共同研究報告書

整理番号第268号

非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋かぶり・径の計測に関する共同研究報告書

2001年3月

国土交通省土木研究所
材料施工部コンクリート研究室

(社)日本非破壊検査協会

Copyright © (2001) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第268号2001年3月

非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋かぶり・径の計測に関する共同研究報告書

国土交通省土木研究所　コンクリート研究室　室　　長　河野　広隆
主任研究員　森濱　和正

社団法人　日本非破壊検査協会
鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験特別研究委員会
幹　　事　富士　　岳
〃　　小林　幸一
〃　　山口　哲夫
〃　　西山　直洋

要　旨

完成したコンクリート構造物では，実際の配筋状態やコンクリートの品質・寸法などが耐荷性や耐久性に大きな影響を与える。このため重要な検査対象項目であるにもかかわらず，それらを完成した構造物で直接検査する有効な手法がなかった。

ここでは超音波，電磁波レーダ，衝撃弾性波を用いた非破壊検査によって，これらを精度よく測定する手法を検討した。特に，コンクリート内でのそれらの波の速度分布に注目し，精度を向上させることを試みた。その結果を基に，3種類の測定方法について，部材厚さ，鉄筋のかぶりと径の求め方，コンクリートの品質評価方法を提案した。

キーワード：鉄筋コンクリート構造物，非破壊試験，検査方法，超音波法，電磁波レーダ法，衝撃弾性波法，速度分布，コンクリート強度，品質評価，部材厚さ，鉄筋径，かぶり厚さ

目　　次

委員会名簿

まえがき

第Ⅰ部　概　　説

1章　研究の背景…… 1
1．1　研究の背景…… 1
1.1.1　技術的な背景…… 1
1.1.2　構造物自体を直接検査する方法の重要性…… 1
1.1.3　社会的な背景…… 3
1．2　非破壊試験技術の現状…… 4
1.2.1　超音波法…… 4
1.2.2　レーダ法…… 7
1.2.3　弾性波法…… 9
2章　研究目的 …… 11
2．1　検査システムの構築…… 11
2．2　速度分布の測定方法…… 12
2．3　部材厚さ，鉄筋のかぶり厚さ・径の測定…… 12
2．4　コンクリート品質 …… 13
2．5　厚さの目標精度 …… 13
3章　研究内容…… 14

第Ⅱ部　実　　験

1章　実験概要…… 15
2章　測定装置の種類と測定原理…… 16
2．1　超音波法…… 16
2.1.1　超音波Ａ（エルソニック）…… 16
2.1.2　超音波Ｂ（ウルコン）…… 20
2.1.3　超音波Ｃ（UCM2000）…… 26
2．2　レーダ法…… 37
2.2.1　レーダＤ（ハンディサーチ）…… 37
2.2.2　レーダＥ（地下レーダー）…… 42
2．3　衝撃弾性波法…… 48
2.3.1　弾性波Ｇ（Knocker）…… 48
2.3.2　弾性波Ｈ（インパクトエコー）…… 53
3章　基礎実験 …… 57
3．1　実験目的と供試体の種類…… 57
3.1.1　実験目的…… 57
3.1.2　供試体の種類…… 57
3.1.3　使用材料…… 59
3.1.4　品質管理試験…… 60
3.1.5　コアによる品質確認…… 60
3．2　実験手順と方法…… 61
3.2.1　供試体Ａ，Ｂ，Ｃの測定…… 61
3.2.2　コンクリートの品質管理試験…… 61

3.2.3 コア試験…… 61
3．3 コンクリートの品質・実測結果…… 66
3.3.1 品質管理試験…… 66
3.3.2 コア試験結果…… 71
3.3.3 部材厚さ，かぶり厚さの実測値…… 76
3．4 超音波法の測定結果…… 77
3.4.1 超音波 A…… 77
3.4.2 超音波 B…… 83
3.4.3 超音波 C…… 92
3.4.4 表面走査法における探触子の影響…… 97
3.4.5 表面走査法による見かけの音速に及ぼす鉄筋の影響…… 105
3.4.6 音速分布の形状に関する検討…… 108
3.4.7 部材厚さの解析結果と実測値の比較…… 124
3.4.8 鉄筋のかぶり厚さ，径の測定結果（超音波A，B）…… 125
3.4.9 鉄筋のかぶり厚さ，径の測定結果（超音波C）…… 128
3．5 レーダ法の測定結果…… 131
3.5.1 レーダ D…… 131
3.5.2 レーダ E…… 141
3.5.3 含水率と電磁波速度，部材厚さ，かぶり厚さ…… 155
3．6 衝撃弾性波法の測定結果…… 164
3.6.1 弾性波 G…… 164
3.6.2 弾性波 H…… 173
3．7 超音波法による強度推定…… 177
3.7.1 圧縮強度，含水率と音速の関係…… 177
3.7.2 強度推定…… 177

4章 壁供試体の厚さ測定および基礎実験を含めた品質推定…… 179
4．1 壁供試体の種類…… 180
4．2 実験概要…… 180
4.2.1 速度分布，壁厚さ，かぶり厚さの測定…… 180
4.2.2 供試体作製時の圧縮強度試験…… 181
4.2.3 コア試験片の音速，圧縮強度，細孔径分布の測定…… 181
4.2.4 簡易中性化深さ試験…… 183
4.2.5 簡易透気性試験…… 184
4.2.6 簡易吸水性試験…… 184
4.2.7 コア採取後の孔を用いたコンクリート内部の透過音速の直接測定…… 184
4．3 コンクリートの品質，実測結果…… 185
4.3.1 コアの音速…… 185
4.3.2 圧縮強度…… 185
4.3.3 細孔構造と強度の推定…… 187
4.3.4 中性化深さ，透気性，吸水性…… 189
4.3.5 実測結果…… 190
4．4 超音波法の測定結果…… 191
4.4.1 超音波 A…… 191
4.4.2 超音波 B…… 192
4.4.3 音速分布の解析結果と実測値の比較…… 195
4.4.4 音速分布と壁厚さの解析結果と実測値の比較…… 196

４．５　レーダ法の測定結果……197
4.5.1　レーダ D……197
4.5.2　レーダ E……199
４．６　衝撃弾性波法の測定結果……202
4.6.1　弾性波 G……202
4.6.2　弾性波 H……204
４．７　超音波法による品質推定……206
4.7.1　圧裂強度分布と音速，有効細孔量と圧裂強度分布の関係……206
4.7.2　有効細孔量と音速の関係……206

５章　コンクリート舗装版による検証実験……208
５．１　実験目的と舗装版の種類……208
5.1.1　実験目的……208
5.1.2　舗装版の種類……209
５．２　実験手順と方法……214
5.2.1　舗装版の測定……214
5.2.2　管理試験……214
5.2.3　コア試験片の音速，強度試験……218
5.2.4　既設舗装版の鉄筋間隔，かぶり厚さ測定および曲げ強度試験……220
５．３　コンクリート品質，実測結果……222
5.3.1　現場管理試験……222
5.3.2　大型供試体の管理試験結果……222
5.3.3　コア試験結果……231
5.3.4　既設舗装版の曲げ強度試験結果……235
5.3.5　部材厚さ，鉄筋のかぶり厚さ・間隔の実測結果……238
５．４　超音波法の測定結果……240
5.4.1　超音波 A……240
5.4.2　超音波 B……243
5.4.3　超音波 C……246
5.4.4　音速分布の解析結果とコア側面，曲げ供試体側面の透過音速の比較……249
5.4.5　音速分布と版厚の解析結果と実測値の比較……252
５．５　レーダ法の測定結果……253
5.5.1　レーダ D……253
5.5.2　レーダ E……257
５．６　衝撃弾性波法の測定結果……264
5.6.1　弾性波 G……264
5.6.2　弾性波 H……269
５．７　超音波法による強度推定……272
5.7.1　圧縮強度，含水率と音速の関係……272
5.7.2　強度推定……272
５．８　衝撃弾性波法による品質推定実験……274
5.8.1　測定理論および実験目的……274
5.8.2　実験方法……275
5.8.3　測定結果……276
5.8.4　コンクリート品質の推定……279
5.8.5　衝撃弾性波法によるコンクリート品質推定実験考察……280

６章　強度推定実験……281
６．１　実験目的……281
６．２　供 試 体……282
6.2.1　壁供試体およびボス供試体の作製……282
6.2.2　コンクリートの配合……283
6.2.3　打設方法……283
6.2.4　養　　生……283
６．３　実験手順……285
6.3.1　管理供試体およびボス供試体の音速，圧縮強度試験……285
6.3.2　壁供試体の超音波法，弾性波法，テスタハンマによる品質推定……286
6.3.3　コア供試体の音速，圧縮強度の測定……287
6.3.4　小径コアの圧縮強度試験および吸上げ試験……287
6.3.5　細孔径分布の測定……288
６．４　コンクリートの品質……289
６．５　ボス供試体の圧縮強度……294
6.5.1　断面積の算出方法……294
6.5.2　寸法法と質量法による圧縮強度の比較……294
6.5.3　ボス強度とコア強度の比較……294
６．６　小径コアによる品質推定……297
6.6.1　圧縮強度……297
6.6.2　吸上げ率……297
６．７　超音波法による品質推定……299
6.7.1　音速分布および透過音速……299
6.7.2　強度推定……299
6.7.3　表層の細孔構造と音速分布の関係……299
６．８　衝撃弾性波法の強度推定……307
6.8.1　弾性波Ｇ……307
6.8.2　弾性波Ｈ……315
６．９　テストハンマによる強度推定……325

７章　ま と め……327
７．１　実験結果の概要……327
７．２　基礎実験の結果……328
7.2.1　超音波法……328
7.2.2　レーダ法……328
7.2.3　弾性波法……329
７．３　検証実験の結果……329

第Ⅲ部　非破壊試験によるコンクリートの品質、厚さ、鉄筋かぶり・径の推定方法（案）
Ａ．超音波法……331
Ｂ．レーダ法……337
Ｃ．弾性波法……340

あとがき……341

本研究に関連した発表論文……342

非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋かぶり･径の計測に関する研究委員会

委　員　名　簿

	氏　　名	勤　務　先　所　属
委員長	富士　　岳	NDI特研幹事＊[(社)非破壊検査振興協会認証事業センター]
委　員	小林　幸一	NDI特研幹事＊[(社)セメント協会・研究所ｼﾞｵｾﾒﾝﾄ研究ｸﾞﾙｰﾌﾟ]
	山口　哲夫	NDI特研幹事＊[㈱東横エルメス]
	西山　直洋	NDI特研幹事＊[西松建設㈱技術研究所建築技術研究課]
	河野　広隆	国土交通省土木研究所コンクリート研究室長
幹　事	森濱　和正	国土交通省土木研究所コンクリート研究室
(超音波)	坂本　　一	検査開発㈱
	南　　康雄	日本クラウトクレーマー㈱システム営業部
	柏瀬　一彦	東京理学検査㈱
	廣瀬　正行	㈱エッチアンドビーシステム
	奥　　紀仁	㈱八洋コンサルタント技術センター
(レーダ)	松本　　功	日本無線㈱
	吉村　明彦	ｺﾏﾂｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ㈱川崎事業所計測ｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ事業室
	松本　　章	㈱ジャスコ
	前川　　聡	応用地質㈱つくば技術開発センター
(弾性波)	金井昭三郎	伊藤建設㈱技術研究所
	岩野　聡史	伊藤建設㈱技術研究所
	境　　友昭	アプライドリサーチ㈱
	寺本　朝明	松下インターテクノ㈱
	後藤　俊宏	松下インターテクノ㈱

NDI特研幹事：(社)日本非破壊検査協会(NDI)
鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験特別研究委員会の幹事

幹事の構成

池永　博威	(主査) 千葉工業大学工学部建築学科	小林　幸一	(社)セメント協会研究所ｼﾞｵｾﾒﾝﾄ研究ｸﾞﾙｰﾌﾟ
魚本　健人	東京大学国際産学共同研究センター	込山　貴仁	㈱コンステック技術研究所
太田　資郎	日本工営㈱中央研究所開発研究部	竹中　克巳	非破壊検査㈱東京本店営業本部
笠井　哲郎	東海大学工学部土木工学科	谷川　恭雄	名古屋大学工学研究科建築学専攻
笠井　芳夫	日本大学生産工学部	辻　　正哲	東京理科大学理工学部土木工学科
菅野　匡	日本道路公団試験研究所橋梁研究室	西山　直洋	西松建設㈱技術研究所建築技術研究課
蔵方　弘之	㈱クレオ建設テクノ事業本部	野崎　喜嗣	武蔵工業大学工学部建築学科
毛見　虎雄	足利工業大学工学部建築学科	富士　岳	(社)非破壊検査振興協会認証事業センター
小井戸純司	日本大学生産工学部電気工学科	森濱　和正	国土交通省土木研究所
國府　勝郎	東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻	山口　哲夫	㈱東横エルメス
		湯浅　昇	日本大学生産工学部建築工学科

まえがき

本研究は、非破壊試験によってコンクリート部材の出来形である厚さ、強度などコンクリートの品質、鉄筋の間隔、かぶり（厚さ）、径を検査に使えるほど精度良く測定する方法を確立すること、そしてその測定方法を用いた検査方法を確立することを目的に実施した。検査の対象は、主に新設構造物であり、詳細な検査（以下、詳細検査と呼ぶ）の前に電磁波レーダなどを用いて内部の配筋状態、部材の厚さなどを把握しておく（以下、概観検査と呼ぶ）ことを前提にしている。

本共同研究の実施に当たり、委員会を構成する一部のメンバーと事前に２回の検討を行なっており、本共同研究は３期目に相当する。共同研究までの経緯は以下のとおりである。

第１期は、1995 年である。

当初の目的は、コンクリート舗装版の厚さの検査を非破壊で行うことができないかということであった。その背景は、「セメントコンクリート舗装要綱」（1984 年版、(財)日本道路協会）では、舗装版の厚さの検査は、コアを抜き取り、その長さを測定するという直接的な方法が採用されている。ところが、コアを採取するにはコンクリート版を削孔することになり、ひび割れを誘発する恐れが高くなるという問題がある。また、その後補修が必要になるなどの問題もある。そのため、型枠の高さからの下がりをもって検査に代えたり、主に管理の場合であるが、路盤と舗装版の高さをレベルで測定し、その差から厚さを求めるなど間接的な方法も用いられている。ところが、これら間接的な方法は、事前に測定位置を決めておかなければならず、「サンプルをランダムに採取する」という『検査の原則』から逸脱しているという基本的な問題がある。

そのため、超音波法を用いて舗装版などの厚さの測定を試みた。その結果、厚さを求めるには反射時間とコンクリート内を伝搬する速度（音速）が必要であるが、後者の音速の求め方が不明確であり何を用いてよいのかわかっていない。

この実験では、音速を表面の２点間の距離を変えて伝搬時間を測定することによって求めようとした。しかしながら、距離が長くなるほど、距離を伝搬時間で割った“見かけの音速”は速くなった。この結果より、コンクリートの音速を求めるには、超音波がコンクリート内を伝搬する経路を考慮する必要があること、このことは、コンクリートの品質が表層と内部では異なっていることが知られていることから、音速を分布として求める必要があることが想定された[1)]。

そこで 1996 年から（第二期）は日本大学生産工学部建築学科の協力を得て、超音波がコンクリート内部を伝搬する経路を考慮した音速分布の求め方について検討した。また、電磁波レーダ法（以下、単にレーダ法と呼ぶ）も取り入れた。

この結果、超音波法では、音速分布を求めるため、表面の２点間の距離を変えて伝搬時間を測定する。一方、音速分布を仮定して変分法によって最速伝搬経路とそのときの伝搬時間を計算し、伝搬時間の計算値が測定値の最適値となるときを繰返し計算することによって求めることができること、その音速分布を用いることにより高精度で厚さを求めることができることが明らかになった[2), 3), 4)]。

新たにレーダ法を加えた理由は、容易に・迅速に・連続的な測定ができること、測定結果が画像として記録することができるので、客観性が極めて高いという利点があるためである。

一方、レーダ法でも厚さを求める場合、反射時間とともに電磁波速度を知る必要があるが、その求め方は明確になっていない。電磁波速度は含水率の影響を強く受けるので、両者の関係を求めることを目的に実験を行ったものである。

さらには、超音波法などで厚さを測定するにしても、速度を求めるとき鉄筋の影響を受けるので、その位置を探査しておく必要がある。また、厚さを測定する位置を決めるに当たっても、内部の状態を探査しておき、空洞などを避けなければならない。これらの確認は、施工の管理・検査を行っていることにほかならず、レーダ法は厚さ測定のみでなく、構造体コンクリートの管理・検査にとってほとんど必然のアイテムと考えたことによる。

レーダ法による実験の結果、電磁波の伝搬速度は、含水率の影響が極めて大きく、内部の含水率分布の影

響を受けて速度分布が変わることが明らかになった[5, 6]。

そして 1999 年にはこれらの成果を発展させるため勉強会を開き、以下のような目的に対して実験計画を検討し、2000 年より本共同研究を実施することになった（第三期）。

共同研究の課題名は「非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋かぶり・径の計測に関する研究」となっているとおり、これまでの非破壊によるコンクリート版の厚さの測定のみではなく、コンクリート内部の速度を分布として精度良く求めることによって、この速度分布から精度良く鉄筋のかぶり厚さを求めることや、コンクリートの品質も推定することをめざした[7]。

対象とする部材は、舗装版に限らず、床版や、壁部材など、コンクリート構造物一般とした。

また、測定機種も、超音波法、レーダ法に加え鋼球打撃による衝撃弾性波法（以下、単に弾性波法と呼ぶ）も対象とした[7]。弾性波法を加えた理由は、次のとおりである。

弾性波法については、最近、新しく鋼球打撃による方法が開発されている[8, 9]。弾性波法は、超音波法に比べると、打撃を与える鋼球、受信センサが小さく、超音波のように発信、受信探触子の大きさの影響をほとんど考慮する必要がないと考えられること、構造体コンクリート表面には凹凸があるが、鋼球、センサが小さいのでその影響についてもほとんど考慮する必要がなく、打撃位置、センサ取付け位置を研磨する面積が極めて小さいこと、超音波ではグリスなど接触媒質が必要であるが、弾性波はそれを必要としないので表面を汚すことがないこと、などの特長があることから採用したものである。

弾性波法は、反射時間をフーリエ解析（ＦＦＴ）による共振周波数から求めたり[8]、自己相関関数[9]によって理論的に求めようとしている。しかしながら、弾性波速度については、これらの方法による求め方は不明確である。これまで提案されている方法[8]についても、コンクリートの品質や層構成などが考慮されたものとなっているとは考えにくいものであり、検討の余地があるものと考えた。

このように研究目的、対象とするコンクリート構造物、対象とする非破壊試験方法が広がったことから、非破壊試験全般について調査・研究を行なっている(社)日本非破壊検査協会を中心に、非破壊に関する測定装置の開発・生産メーカーや検査・試験業者と共同研究を実施したものである。

【参考文献】

1)山口哲夫、森濱和正、富士　岳、笠井芳夫：コンクリート部材厚さの超音波法とレーダ法による非破壊試験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.1227-1232, 1996.7

2)森濱和正、笠井芳夫、山口哲夫：非破壊試験によるコンクリート版厚の測定、日本非破壊検査協会平成 10 年度春季講演会概要集, pp.89-92, 1998.5

3)森濱和正：超音波による正確なコンクリート版厚の測定方法、土木技術資料、Vol.41, No.2, pp.38-43, 1999.2

4)森濱和正、笠井芳夫、山口哲夫：超音波によるコンクリート版内の最速経路の予測と版厚測定に関する研究、非破壊検査、Vol.48, No.5, pp.294-302, 1999.5

5)森濱和正、笠井芳夫、湯浅　昇：コンクリート内部の含水状態と比誘電率の関係、日本非破壊検査協会平成 11 年春季大会講演概要集、pp.91-94, 1999.5

6)森濱和正：コンクリート内部の電磁波の速度分布－厚さ測定への含水率の影響－、土木技術資料、Vol.41, No.11, pp.12-13, 1999.9

7)富士　岳,森濱和正,宮本雅章：非破壊試験によるｺﾝｸﾘｰﾄ品質、厚さ、鉄筋の計測に関する研究 その.1 実験計画、日本非破壊検査協会平成 12 年度春季講演会概要集, pp.65-66, 2000.5

8)Jiunn-Ming Lin and Mary Sansalone : Impact-Echo Response of Hollow Cylindrical Concrete Structures Surrounded by Soil and Rock : Part Ⅱ－Experimental Studies, Geotechnical Testing Journal, Vol.17, No.2, pp.220-226, 1994.6

9)極壇邦夫、野瀬元興、岩野聡史、境　友昭：周波数応答解析によるコンクリートの健全性試験、土木学会構造工学技術シリーズ No.5、構造物の診断に関するシンポジウム論文集、 pp.121-128, 1998.7

第Ⅰ部　概　　説

1章　研究の背景
2章　研究目的
3章　研究内容

1章　研究の背景

1．1　研究の背景

本研究を実施するに至った直接の背景は、まえがきで述べたとおり、当初、コンクリート舗装版の厚さを非破壊試験によって測定することであった。さらに、検査項目を厚さだけでなくコンクリートの品質や鉄筋のかぶり厚さなどにまで広げたり，対象構造物を一般構造物にまで広め、適用とする測定機種を増やしたのは、次のような背景による。

1.1.1 技術的な背景

一点目は、これまでの検討の結果、超音波法によって構造物の表面から内部の音速分布の推定が可能になったことである。このことによって、コンクリート部材の厚さだけでなく、コンクリート内部の品質評価なども直接行える可能性が出てきたことである。そのため、コンクリートの強度はもちろん、耐久性を含めた品質の評価が行えるのではないかと考えた。特に、表層のコンクリートは鉄筋を保護する性能が期待されているが、その性能を適切に評価する方法は今のところ皆無といっていい状況であり、こういったことにも適応できるものと考えた。

レーダ法や弾性波法もしだいに詳細な測定が行えるようになってきた。

詳しくは，**1．2節**で述べることにする。

1.1.2 構造物自体を直接検査する方法の重要性

二点目は、鉄筋コンクリート構造物のコンクリートが直接検査されていないため、打設し養生されたコンクリートの強度、耐久性が適切であったかどうかがわからないことである。そのために、コンクリートを直接検査できる方法の確認が必要であったことである。

現在行われているコンクリート構造物の主な検査の時期と項目は、**表－1.1** のとおり①鉄筋の組立後に配筋状態、②コンクリートの強度は荷卸し時に供試体を作製し、所定材齢で強度試験、③竣工時に形状・寸法の計測、が実施されており、①②は竣工時のプロセス検査となっている。

主な問題点としては、配筋状態の検査では、コンクリートの打設前に実施されるため、打設時の鉄筋の移動が測定されないことになる。土木学会「コンクリート標準示方書[施工編]」（以下、RC 示方書という）および日本建築学会「建築工事標準仕様書 5 鉄筋コンクリート工事」（以下、JASS5 という）では、表面状態を目視で検査して「かぶり不足の兆候が認められ」たとき非破壊試験を取り入れることになっているが、どのように測定すればいいのか明確な規定はない。

コンクリート品質（圧縮強度）は、RC 示方書、JASS5 とも基本的には JIS A 5308 で実施することになっており、供試体は現場で試料を採取して作製したものであり構造物自体のコンクリートが評価されているわけではない。JASS5 では養生温度を工事現場と合わせるようにしているが、そのほかの施工実態、環境条件などが反映されているわけではない。RC 示方書では「必要のある場合には、非破壊試験による」としてい

表－1.1 検査方法の現状と問題点

検査項目	検査方法	検査時期	問題点
配筋状態	目視、計測	組立後	コンクリート打設時の移動が測定されない
	非破壊試験(かぶり厚さ)	竣工時(表面状態から、かぶり厚さ不足の兆候時)	非破壊試験による測定方法は確立されていない
コンクリート品質(圧縮強度)	圧縮強度	荷卸し時に試料採取、供試体作製所定材齢で強度試験	・構造物自体のコンクリートが評価されていない ・表層コンクリートが評価できない
	非破壊試験	竣工時	・測定方法確立されてない ・テストハンマーなど信頼性低い
	コア試験		構造物をきずつける
形状・寸法	計測	竣工時	壁、版の厚さが直接測定できない
	非破壊試験		速度の測定方法が不明

るものの、どのようなときに実施するのかは不明確であり、その方法についても解説では「構造物中のコンクリートの品質の試験技術は確立されていない」とことわりつつ、「JSCE-G504（土木学会規準）によるテストハンマー強度の試験等の非破壊試験」によって行なうが「±50%以上も異なることがあることを考慮して適用する」と記述されているように、極めて信頼性の低いものである。

強度に問題があると考えられる場合、コアを採取しその強度試験を行なうことになるが、多くの労力を使い、構造物を傷つけるという問題がある。

さらには、コンクリートの表層と内部では含水率の状態により養生条件が異なることなどから品質も異なっており、特に鉄筋を保護している表層コンクリートの品質を適切に評価することが重要と考えられるが、そのような方法はない。

形状・寸法の内、壁、版部材のように直接厚さを測定できない場合、レベルなどによって間接的に測定するか、コア採取による破壊試験により直接測定されているが、ランダムに測定位置を決められない、構造物を傷つけるなど問題が多い。

非破壊試験によって厚さを求める場合、一般には反射時間と伝搬速度を測定し、式(1.1)で計算して求める。しかし、伝搬速度を求める方法は確立されていない。これでは非破壊試験による厚さ測定は不可能である。

$$h = v \cdot t / 2 \qquad (1.1)$$

ここに、h：厚さ、v：伝搬速度、t：反射時間である。

これらの問題点を克服し、しかも、対象とする構造物を一般構造物にまで広げ、測定方法も超音波法のみでは非効率であることから、検査項目に適するようにレーダ法や弾性波法を取り込み、それらを組み合わせた非破壊試験によって構造物自体を直接検査する方法の確立をめざした。

また、最近鉄筋コンクリート構造物の設計は、性能規定化へと大きく変わって来つつある。これまで、主な検査項目である配筋状態、コンクリートの強度、構造物の形状・寸法の内の版、壁の厚さは、ほとんど間

接的か、直接測定する場合はコアを採取し、局部的な破壊をともなう検査が行われている。ところが性能規定化になれば、構造物自体が所要の性能を有しているのかどうかを確認することが一層重要になることからも、非破壊試験により構造物自体を直接検査する方法の確立が求められるようになってきた。

1.1.3 社会的な背景

三点目は、1995年の兵庫県南部地震では，大きな被害の直接の原因ではなかったが，コンクリート構造物の施工不良が明らかになったり，1999年6月に発生したトンネルの覆工コンクリートの崩落事故に端を発しコンクリート構造物の耐久性が社会問題となったことである。信頼性の高いコンクリート構造物を建設、維持・管理してゆくには、新設時に所要の性能が確保されていることを確認する手段を早期に確立する必要があることはもちろん、維持・管理のための点検手法の確立も望まれている。本報告書の直接の目的は新設時の検査方法の確立であるが、検討しようとしている方法は点検にも十分適用可能なものと考えられる。新設時の検査結果は、点検の初期値に位置づけられ、その後も測定を継続することにより維持・管理に役立つものと考えられる。

１．２ 非破壊試験技術の現状

対象とした超音波法、レーダ法、弾性波法の技術の現状、問題点などについて、対象とする検査項目に限ってとりまとめると次のようになっている。

1.2.1 超音波法

(1) 音速分布の求め方

超音波法による音速分布の求め方を検討したものは、文献 1.1)以前は皆無であった。文献 1.1)では、超音波の最速経路を予測することにより音速分布を求める方法が提案されており、その概要はつぎのとおりである。

①コンクリート表面を、表面走査法により探触子間距離を数点変化させ伝搬時間を測定する。

②コンクリート内部の音速分布を仮定し、変分法により最速経路を求め、伝搬時間を計算する。

③伝搬時間の計算値が測定値の最適値となるように繰り返し計算を行い、音速分布を求める。

具体的には，②の音速分布を式(1.2)と仮定（**図－1.1** の(a)）すると，

$$V(x)=K\cdot X^{\frac{1}{2m}}=K\left(h_0+h_i\right)^{\frac{1}{2m}} \qquad (1.2)$$

ここに，$V(x)$：音速分布，ho：音速分布の原点から表面までの距離，hi：表面からの距離，m：正の整数である。

伝搬経路は式（1.3）となる。

$$y=\frac{(2m-1)!!}{(2m-2)!!}a^{2m}\left(\frac{\pi}{2}-\sin^{-1}\frac{x^{\frac{1}{2m}}}{a}\right)+\left[x^{\frac{2m-1}{2m}}+\sum_{r=1}^{m-1}\frac{(2m-2r+1)!!}{(2m-2r)!!}a^{2r}x^{\frac{2m-2r-1}{2m}}\right]\sqrt{a^2-x^{\frac{1}{m}}} \qquad (1.3)$$

ただし、

$$\frac{(2m-1)!!}{(2m-2)!!}=\frac{(2m-1)(2m-3)\cdots 5.3}{(2m-2)(2m-4)\cdots 4.2}$$

$$\sum_{r=1}^{m-1}\frac{(2m-2r+1)!!}{(2m-2r)!!}=\underbrace{\frac{2m-1}{2m-2}}_{r=1}+\underbrace{\frac{(2m-1)(2m-3)}{(2m-2)(2m-4)}}_{r=2}+\cdots+\underbrace{\frac{(2m-1)(2m-3)\cdots 5.3}{(2m-2)(2m-4)\cdots 4.2}}_{r=m-1}$$

伝搬時間は式（1.4）を積分することによって求められる。

$$dts=\frac{ds}{V(x)}=\sqrt{\frac{1+y'^2}{V^2(x)}}dx \qquad (1.4)$$

ここで，ts：表面伝搬時間，ds：微少な伝搬距離である（**図－1.1** の(b)）、y'：式(1.3)の微分である。

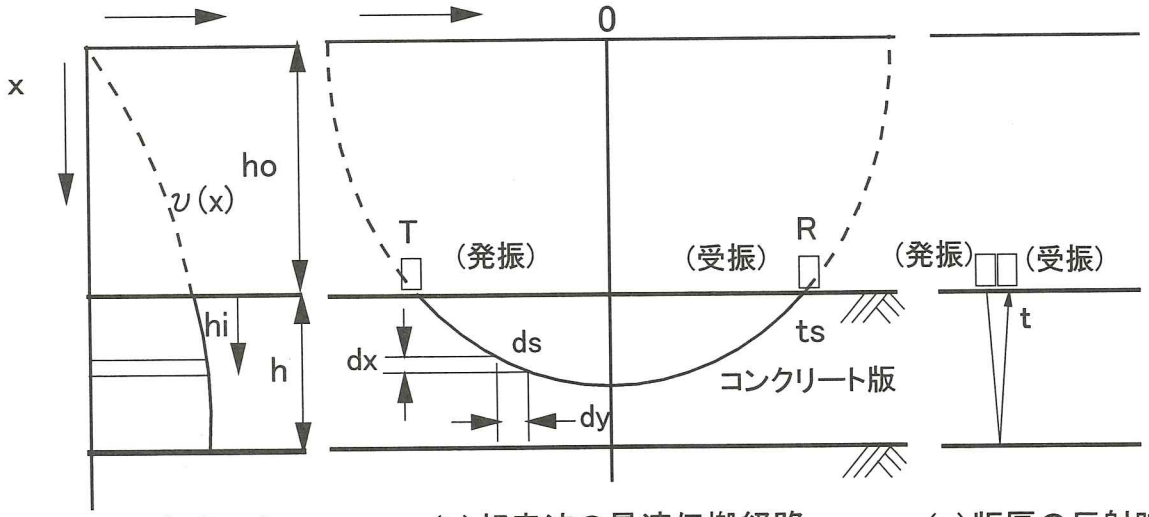


図-1.1　音速分布と超音波の最速伝搬経路

(2)　部材厚さの求め方

この方法によって求めた音速分布から厚さを求める方法は文献 1.2）で提案されている（図－1.2)。

これまで，部材厚さは音速を一定と仮定して式(1.1）で求めている。音速分布から厚さを求める場合は，式(1.5)を解くことにより，式(1.6)で厚さ h が求められる。式(1.5)は、微少な距離 dx を音速 $V(x)$ で伝搬する時間を積分することによって反射時間が求められることを示している。

$$\frac{t}{2}=\int_{h_0}^{h_0+h}\frac{dx}{V(x)} \qquad (1.5)$$

ここに、 t ：反射時間である。

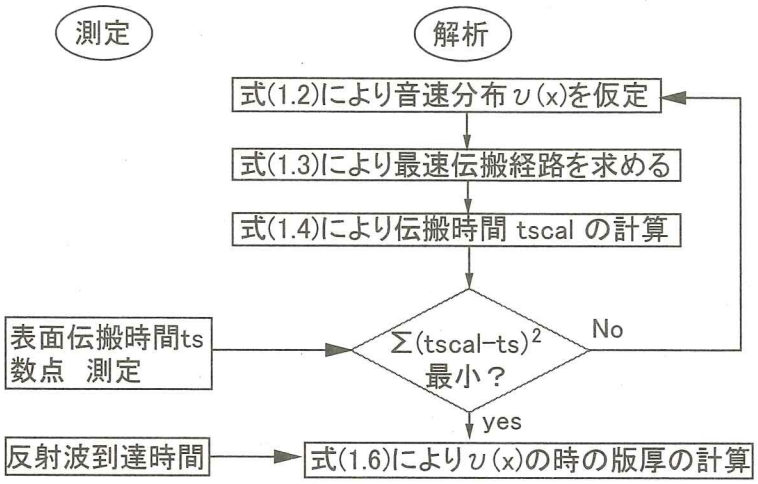
$$h=\left(\frac{2m-1}{2m}\frac{K\cdot t}{2}+h_0^{\frac{2m-1}{2m}}\right)^{\frac{2m}{2m-1}}-h_0 \qquad (1.6)$$

(3)　鉄筋のかぶり厚さおよび径の求め方

鉄筋のかぶり厚さおよび径の求め方は、文献 1.3)および文献 1.4)で提案されている。

文献 1.3）のかぶり厚さは，鉄筋表面からの反射波の到達時間から，鉄筋径は鉄筋内部を回折した波の到達時間と鉄筋表面からの反射波到達時間の差から求める。

文献 1.4）では反射波を FFT 解析し，鉄筋かぶり厚さは鉄筋表面からの反射波の周波数から，鉄筋径は鉄筋内部を反射した波の周波数と鉄筋表面からの反射波の周波数から求める。



図－1.2 版厚解析フロー

(4) コンクリートの品質評価

コンクリート強度の代表的な非破壊試験にテストハンマによる反発度法，超音波法と，両方法を組み合わせた複合法がある。しかし，これらの方法には多くの根本的な問題がある。反発度法については **1.2.3** 項で記述することとし，以下に超音波法の問題点を例記する。

① 音速は使用材料，配合，含水状態などによって異なる。

② (1)で述べたようにコンクリート内部は品質や含水状態によって音速分布を有することが考慮されていない。

③ 構造物自体の評価にあたって，測定方法が確立されていない。透過法で提案されているものもあるが，伝搬距離が既知でなければならないなど，測定位置が限定されること，土木構造物のように大断面の場合適用しにくいこと，②のように音速分布があるにもかかわらず平均的な評価しかできない。

④ 複合法にしても，反発度法も **1.2.3** 項 **(3)** で指摘するとおり根本的な問題があり，このような方法を組み合わせたところで何の問題解決にもならない。複合法によって相関係数が高くなるのは，単に説明変数が増えることによるからである。

以上のような問題に対する解決方法として，②③については(1)で示した音速分布を求めればよい。①に対しては， a .影響要因が考慮できる方法， b .何らかの方法で影響要因をとりこむ， 2 方法が考えられる。

a については文献 1.5)で検討されているが，その方法は複雑であり，また，構造物へどのように適用するかという重要な問題も残っている。

ここでは， *b* の方法について検討する。圧縮強度用の品質管理供試体を用いて，含水率を変化させるなどして音速と圧縮強度の関係を求める。この方法は，使用するコンクリートごとに音速と圧縮強度の関係を求めなければならないという問題があるが，使用材料，配合などの要因を取り除くことができる。

構造物内部の音速分布と，品質管理用供試体からの音速と圧縮強度の関係から，構造物自体の強度推定はもちろん，そのほかの品質を評価できる可能性を有している。

1.2.2 レーダ法

(1) 電磁波速度（分布）の求め方

レーダ法による速度分布の求め方には次の４方法が考えられる。**図－1.3** に測定方法の概要を示す。

① ワイドアングル法（WA法）

② 鉄筋の反射双曲線から求める方法（双曲線法）

③ 鉄筋のかぶりから求める方法（深度法）

④ 部材厚さから求める方法（厚さ法）

これらの方法を整理したのが**表－1.2** である。

①のWA法は，発信，受信アンテナを離しながら反射時間を測定することによって速度を求める特殊な方法であり[1.6]，鉄筋など必要とすることなく速度分布を求めることができる。横軸に送受信アンテナ間の距離，縦軸を反射時間とする走時図が得られ，その傾きから速度が求められる。この方法は，鉄筋が入っている場合は速度が速く測定される傾向があり，無筋コンクリート構造物に適した方法である。

②の双曲線法は，かぶり厚さがわからないときに適用できる方法である。鉄筋からの反射図形は見かけ上双曲線になることから，その曲率から鉄筋までの距離（かぶり厚さ）を求めることができ，その距離と反射時間から速度を求める方法である。曲率を正確に求めるに十分な分解能を有する装置を使用する必要がある。

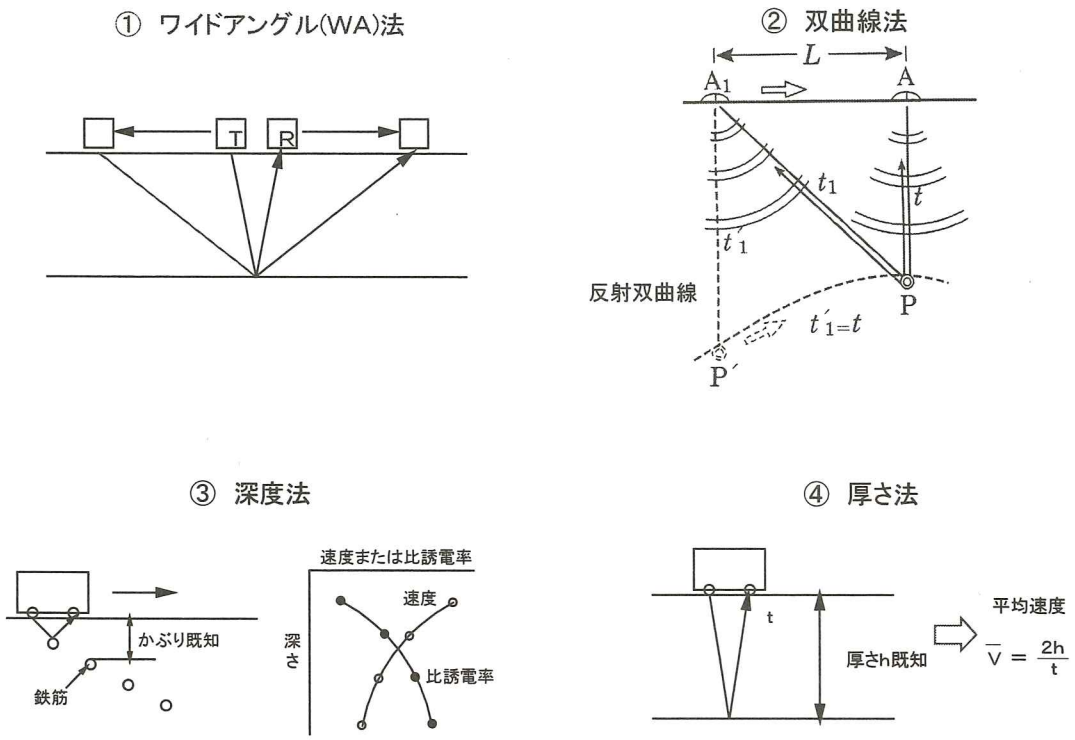
③の深度法は，鉄筋のかぶり厚さが既知の部分を作っておき，かぶり厚さと反射時間から速度を求める方法であり，かぶり厚さの実測値を与えるならばこの方法が最も精度良く速度を求めることができる。

双曲線法，深度法ともかぶり厚さまでの平均速度しか求められないが，鉄筋を何段か配置することにより速度分布を求めることができる。

④の厚さ法は，厚さが既知の場合，反射時間から平均速度を求める方法である。速度分布は求めることができない。

表－1.2　速度分布測定方法と測定できる項目

測定方法	与条件	求められる速度	測定項目
WA法	―	速度分布	厚さ かぶり
双曲線法	鉄筋	かぶりまでの平均速度	厚さ かぶり
深度法	鉄筋 かぶり	かぶりまでの平均速度	厚さ かぶり
厚さ法	厚さ	平均速度	かぶり



図－1.3　レーダ法による速度測定方法

(2)　部材厚さの求め方

電磁波速度分布を考慮する場合，厚さは式（1.5）で求めることができる。

厚さ法のように平均速度しか得られない場合，従来どおり式（1.1）で求める。

式（1.5）によって求める場合，速度分布 $V(x)$の形状が重要な課題となる。電磁波速度は式（1.7）で表される。

$$V(X)=\frac{C}{\sqrt{\varepsilon\ (x)}} \qquad (1.7)$$

ここに，C：真空中の電磁波速度，$\varepsilon\ (x)$：比誘電率である。

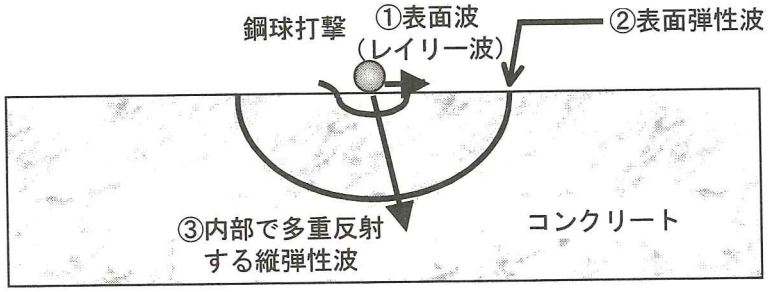
比誘電率は，真空の場合 1，水は 81，コンクリートは 8～12 程度といわれている。

コンクリート中の含水率が高い場合，比誘電率が大きくなり電磁波速度は遅くなり，含水率が小さい場合は速くなる。そのためコンクリート内の電磁波速度は，音速とは逆に，表面は速く，内部は遅くなるものと考えられ，速度分布の形状をどの様に仮定するかを明らかにする必要がある。

1.2.3 弾性波法

（1）弾性波法の概要

コンクリート表面に打撃を加えると図－1.4 に示す波動が主に発生する。①表面波（レイリー波）は鋼球とコンクリート表面との接触による変形によって発生する振動で、コンクリート表面を平面的に伝搬し、表面波の振動数は鋼球とコンクリート表面との接触時間によって決定される。その他の波動にはコンクリート内部を球面状に伝搬する縦弾性波があり、縦弾性波で表面を伝搬する成分を②表面弾性波という。また、内部に伝搬する縦弾性波はコンクリート底面や内部欠陥など異なる物質に接する面で反射し、③コンクリート表面と反射面で多重反射する弾性波が発生する。現状では、弾性波法はこれらの波動を利用して、次の検査を行なっている。



図－1.4 鋼球打撃で発生する波動の模式図

(2) 部材厚さの求め方

厚さ方向に多重反射する弾性波の振動数 f_0 と弾性波速度 V_Pからコンクリートの厚さ Dは

$$D = \frac{V_P}{2f_0} \tag{1.2.3.1}$$

により計算できる。

本研究では次の 2 方法について検討した。一つは、インパクトエコー法と呼ばれているもので、厚さ方向に多重反射する弾性波の振動数 fを検知センサーで得た減衰振動の時間波形をＦＦＴすることにより測定し、弾性波速度 V_Pを 300mm の一定間隔に置いた 2 本の検知センサーに対する弾性波の到達時間差により測定しているものである。

もう一つの方法は、鋼球打撃により発生する波動では表面波の振幅が最も大きく、この影響を考慮する必要があると考え、打撃する鋼球の質量を変化させ、受信波形の自己相関関数での振動数解析結果を比較して、厚さ方向に多重反射する弾性波の振動数 f_0 を求めている。また、この方法では弾性波速度 V_Pを測定する方法は確立されていない。

(3) 強度推定

超音波も弾性波の一種であり，音速による強度推定が可能であれば，弾性波法による弾性波速度を用いて強度推定も可能と考えられる。また，鋼球打撃時の接触時間から表面の強度推定が可能と考えられる。

打撃による強度推定では，テストハンマによる反発度法がよく知られている。しかし，この方法は，押し当てた跡がへこんでいることから部分的に破壊され，純粋な反発度とはなっていない。このことが強度推定精度が極めて低い主要な原因の一つと考えられる。反発度で評価するのであれば，ａ．破壊しないように微小な打撃により弾性反発を利用すべきである。破壊で評価するのであれば，ｂ．非破壊的には微小硬度計のように圧子を押しつけその微小な破壊面積で評価すべきである。

鋼球打撃による弾性波法の強度推定はａ．の微小な打撃によって評価しようとするものであり，テストハンマより信頼性の高い方法と考えられる。

【参考文献】

1.1) 森濱和正、笠井芳夫、山口哲夫：超音波によるコンクリート版内の最速経路の予測と版厚測定に関する研究、非破壊検査、Vol.48, No.5, pp.294-302, 1999.5

1.2) 森濱和正：超音波による正確なコンクリート版厚の測定方法，土木技術資料，Vol.41，NO.2，pp.38-43，1999.2

1.3) 廣瀬正行，宇田川義夫：超音波によるコンクリート内部の探知①，検査技術，Vol.4，No.5，pp.48-55，1999.5

1.4) 山口達夫、山口哲夫：超音波法による鉄筋径の測定、日本非破壊検査協会平成 11 年度春季大会講演概要集、pp.107-110, 1999.5

1.5) 吉荒俊克、向井一弘、松井重樹、今中拓一：超音波によるコンクリート圧縮強度推定、土木学会構造物の診断に関するシンポジウム論文集、pp.175-182, 1998.8

1.6) Annan,A.P. and J.L.Davis : Impulse Radar Sounding In Permafrost, Radio Science, Vol.11, pp.383-394, 1976

2章　研究目的

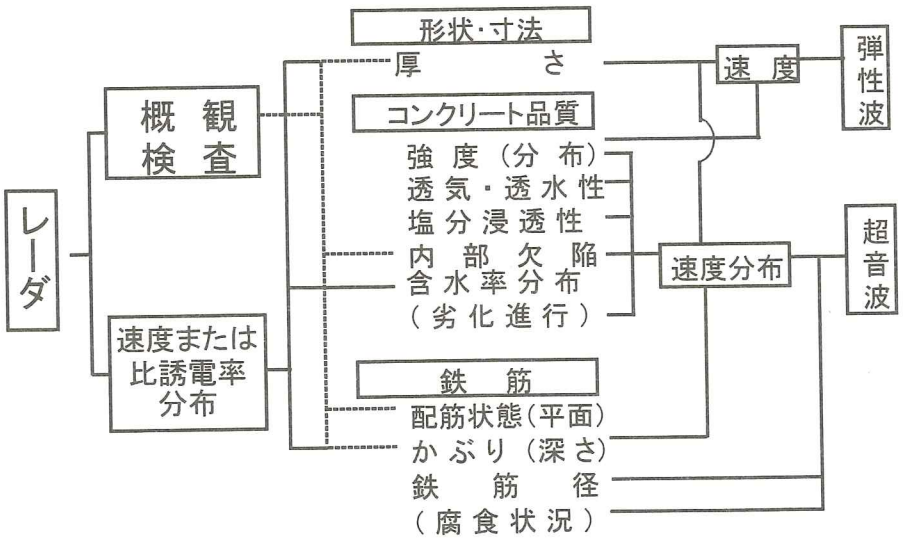
2．1　検査システムの構築

本研究の最終目的は，構造物自体を竣工時に直接検査する方法を確立することである。

現状の検査方法とその問題点は表－1.1で指摘した。それに対し，表－2.1および図－2.1のような検査方法を提案しようとするものである。

表－2.1　非破壊試験による構造物自体の検査方法

検査項目			非破壊			検査時期
			レーダ	超音波	弾性波	
概観検査	配筋状態・内部状態		○			竣工時
詳細調査	速度（分布）		○	○	○	
	かぶり厚さ・(径)		○	○	△	
	コンクリート品質	圧縮強度		○	○	
		表層の緻密性		○		
	部材厚さ		○	○	○	



図－2.1　ＲＣ構造物の非破壊試験による検査システムの提案

最初にレーダ法により配筋状態の測定や内部の空洞の有無などの概観を探査し，その後詳細検査を行うに当たって，伝搬速度や厚さを測定する位置を決めるために鉄筋の影響や空洞などを避けるための参考にしようとするものであり，配筋状態，内部状態の探査精度を確認する必要がある。

次に構造物自体のコンクリートの速度（分布）を求める。精度良くかぶり厚さや部材厚さ，コンクリート品質を求める場合，内部の正確な速度分布が必要となることから，速度分布の求め方を提案することが最も

かぶり厚さおよび部材厚さを求めるには，正確な反射時間の求め方が重要である。

構造物自体のコンクリートの強度は，超音波法または弾性波法により，速度分布と，品質管理用供試体の速度と圧縮強度の関係から求めようとしている。超音波法は速度分布から表層コンクリートの品質をも評価しようとしている，これらの方法を確立する。

以下に，各項目ごとに，具体的な目標を列記する。

2．2　速度分布の測定方法

何よりも，コンクリートの品質評価の指標として，また，部材厚さ，鉄筋のかぶり厚さを精度良く求めるために，構造物内部の速度分布を正確に求める方法を確立することが重要である。

測定機種ごとに，速度に及ぼす要因を整理すると**表－2.2** のようになる。

表－2.2　速度に及ぼす要因

測定機種	強度(材齢)	含水率	鉄筋	その他
超音波法	◎	○	○	探触子の影響
レーダ法	△	◎	◎	
弾性波法	◎	△	○	

◎:影響が非常に大きい
○:影響が大きい
△:影響が小さい

超音波法，弾性波法は強度の影響が非常に大きい。レーダ法は，水の比誘電率が大きいこと，鉄筋は電磁波を通さないので電磁波速度に及ぼす影響が非常に大きい。そのため，これらの影響について検討した。

また，版，壁など部材ごとに測定面が異なる。版は，通常，上面が打設面となりブリーディングなどの影響が考えられる。下面は粗骨材が沈降しやすいことなどの影響が考えられる。壁は，側面を測定することになる。これらの影響についても検討した。

超音波法によって音速分布を求める場合，部材厚さが厚くなり音速分布を全厚さにわたって延長すると、内部の音速は見かけ上非常に速くなる。実際にはある音速で収束することが考えられることから，その音速をどのように推定するかが重要な課題である。そのために，表面走査法による測定距離，点数，音速分布形状（式(1.2)のm値）などを検討する必要がある。これは**図－1.2** の版厚解析フローが適用できるのかどうかを検討することである。

超音波法では，表面走査法による伝搬時間を測定する場合，探触子が大きいので伝搬距離をどう算定するかも重要な検討項目である。

2．3　部材厚さ，鉄筋のかぶり厚さ・径の測定

厚さを求めるには反射波の到達時間を測定する必要がある。反射面がコンクリートの音響インピーダンスと大きく異なる物質に接していれば反射波の確認は比較的簡単であるが，近ければ難しくなる。

鉄筋のかぶり厚さを求める場合は，コンクリートと鉄筋上面の付着面，径を求める場合は筋下面のコンクリートの付着面の反射波を確認することになる。

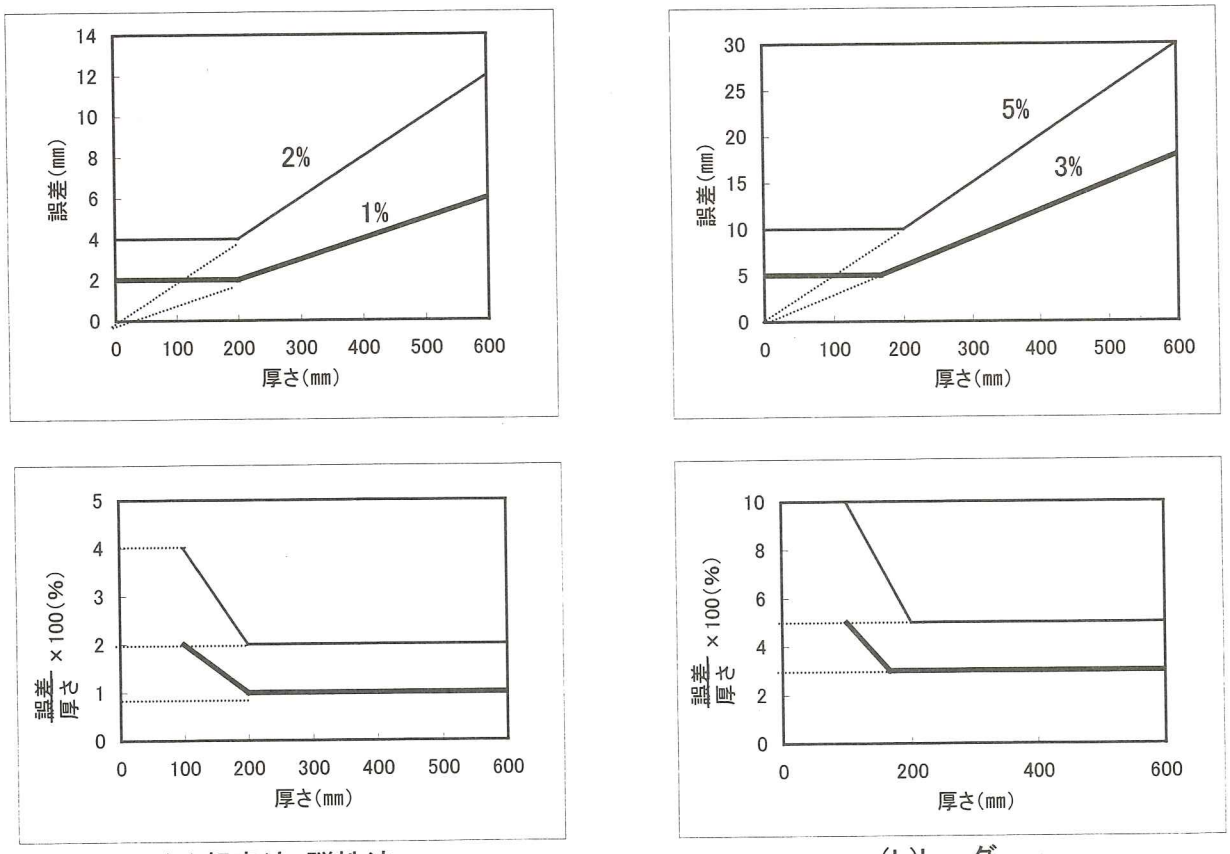
コンクリート構造物は，反射面が空気に接している条件の良い場合もあるが，路盤などコンクリートの音響インピーダンスに近いものに接している場合も多く，厚さを求めるには，そのような場合にも反射波が確認できるかどうかが重要である。

2．4　コンクリート品質

コンクリート品質は，強度と耐久性を検討対象とする。耐久性にもさまざまな項目があるので，ここでは，凍結融解，中性化，塩害などと深い関係があると考えられている細孔径分布との関係について検討することとした。

2．5　厚さの目標精度

厚さの目標精度は図－2.2 のように設定した。部材が薄い場合は絶対値で、しだいに厚くなると比率で設定した。細線は最低目標であり，できるだけ太線より高精度をめざした。



図－2.2　目標精度

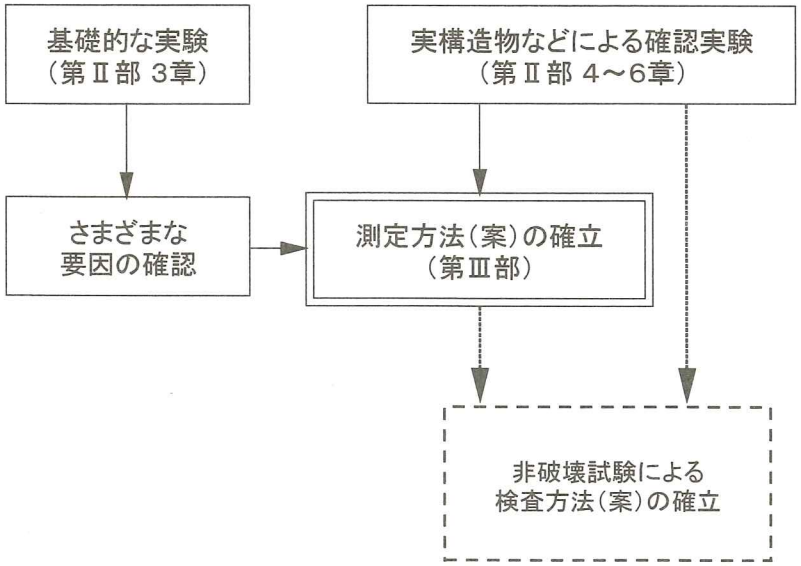
3章　研究内容

まえがきでは、共同研究に至った経緯をとりまとめた。

第Ⅰ部では、検査に非破壊試験を適用するにあたっての現在の技術レベルと問題点を明らかにし，本研究の目指す方向（目的）を明確にした。

第Ⅱ部では、実験による測定方法の確立を目指した。

1章では、第Ⅰ部の目的からどんな実験が必要かを整理し，2章では、使用した測定装置の測定原理、仕様、測定方法をとりまとめた。3章以降は各種実験である。実験と最終成果である第Ⅲ部の関係は**図－3.1**のとおりである。



図－3.1　実験と最終成果の関係

3章は、これまでの事前の検討結果を補足するもので，版、壁供試体によって、速度分布などの測定などに関する基礎的な実験を行い、測定方法の確立を目指した。

4～6章は、3章で確立した測定方法が適用可能かどうかを確認するとともに、検査方法を確立するために実構造物などの測定実験を行なった。4章では16年経過した実大の壁供試体の測定、5章では新設および既設のコンクリート舗装版の測定、6章は強度推定のための実験を行なった。

7章は、第Ⅱ部をとりまとめた。

第Ⅲ部は、第Ⅱ部の実験結果に基づいて非破壊試験によりコンクリート構造物を直接検査するための測定方法を提案した。

第Ⅱ部　実　　験

１章　実験結果
２章　測定装置の種類と測定原理
３章　基礎実験
４章　壁供試体の厚さ測定および基礎実験を含めた品質推定
５章　コンクリート舗装版による検証実験
６章　強度推定実験
７章　まとめ

1章 実験概要

第Ⅰ部2章の研究目的に基づき次のような実験を実施した。

3章基礎実験では、

①速度分布の測定に及ぼす影響について検討し、速度分布の求め方の確立をめざした。

②その速度分布から部材厚さの求め方について検討した。

③鉄筋のかぶり厚さ、径の求め方について検討した。

④強度の推定方法、細孔径分布との関係について検討した。

①では、部材ごとに測定面の違い、厚さの影響、材齢の違いによる強度、含水率の影響、鉄筋の径、かぶり厚さの影響について検討した。

②では、厚さが異なる部材について、①で求めた速度分布を用いた厚さ求め方を検討した。また、二層構造についても検討した。

③では、①の鉄筋の影響を検討するため多くの鉄筋の種類を使い、かぶり厚さを極端に変化させ、それを測定した。

④の強度推定では、含水状態の影響を考慮するため、品質管理用供試体の養生方法を変えて含水状態を変化させたときの音速を求め、各供試体の音速分布を比較した。

4章では、16年経過した実大の壁供試体で、セメントの種類が普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の2種類のもので、脱型時期が異なる場合について、速度分布、部材厚さ、かぶり厚さを測定した。

5章では、25年間使用されている既設の舗装版と、新設の舗装版の測定を行った。既設舗装版は速度分布と厚さ、レーダ法による鉄筋間隔とかぶり厚さを測定した。新設舗装版は、竣工時の概観検査、厚さ、強度の詳細検査を想定して実施した。概観検査は、レーダ法により鉄筋の間隔、かぶり厚さ、内部の欠陥の有無などを測定した。詳細検査では、速度分布と厚さの測定、品質管理用供試体の速度と強度の関係から強度推定を行った。強度推定は、超音波法に加え弾性波法も実施した。

6章では、強度推定のための実験を行った。非破壊試験では超音波法、弾性波法に加え、テストハンマーによる反発度法も実施した。また、局部的な破壊を伴うが、ボス供試体、小径コアによる強度試験も行なった。さらに強度分布と細孔径分布の関係も調査した。

ボス供試体とは、Broken Off Specimens by Splitting (BOSS) Method のことである。ボス供試体は、あらかじめ構造物のコンクリート用型枠にボス供試体用の凸部を有する型枠を取り付けておき、構造物のコンクリートと同時にコンクリートを打込み、養生を行い、所要の試験材齢になったらボス供試体を採取して圧縮強度試験を行うというものである。

2章　測定装置の種類と測定原理

２．１　超音波法

２．１．１　超音波Ａ（エルソニック　ＥＳＩ／Ｐ—１０Ｓ）

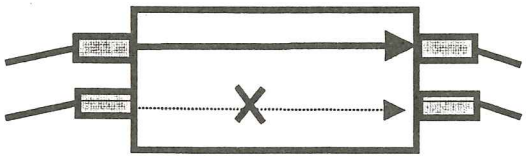
（１）装置の概要

超音波Ａは、１台でコンクリートのひび割れ深さ、厚さ、内部欠陥、音速測定の４役のコンクリート用超音波測定器として、従来の超音波法の原理に拘らない新しい原理を採用して開発され、現場の構造物などの非破壊試験に使用されている。測定法の概要を以下の図に示す。

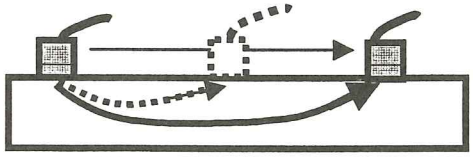
（２）測定法

1)透過法による音速の測定

超音波の伝搬時間を、デジタル値で測定表示する。音速の大小や欠陥の検出、表面走査法により内部音速を推定することにも使用される。狭帯域の 5kHz、28kHz、200kHz の探触子を使い分けて測定する。



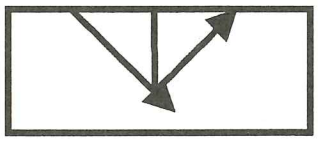
図－2.1.1.1　透過法



図－2.1.1.2　表面走査法

2)ひび割れ深さの測定

深さ 5mm から 1500mm まで各種のひび割れ深さを音速なし、計算なしに現地ですぐに測定できる。鉄筋介在のひび割れ深さも測定できる。精度と測定能率が良い。

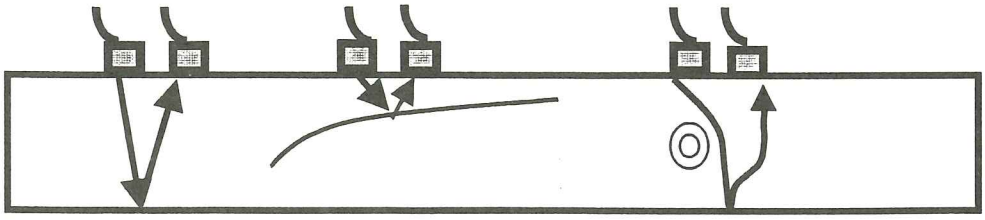


図－2.1.1.3　ひび割れ深さの測定

直角回折波法の原理により、受信波の波形により測定しており、音速を使用しない。受信第一波の波形のプラス、マイナスを赤青のランプとブザーで表示し、耳で音を聞きながらひび割れ深さを測定する。使用探触子は、音速法と同じである。

3)反射法による厚さの測定、内部欠陥の検出

この装置はＦＦＴアナライザ使用のフーリエ解析によるスペクトルの周波数で厚さを測定する。反射波の厚さ測定では、近い位置にある送受探触子間の直接波の受信が非常に大きく、反射波は小さい。小さな反射波を求めるために受信波をフーリエ解析し、不要な波を除去し反射波を求める。フーリエ解析は多重反射波

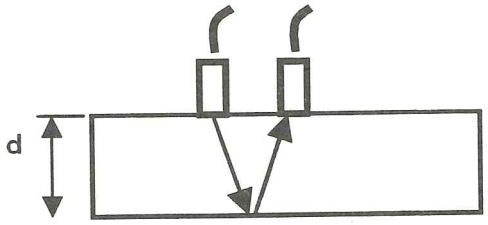


厚さの測定　　斜めひび割れ内部欠陥の測定　　ジャンカ、空洞の検出

図－2.2.2.4　反射法による厚さの測定、欠陥の検出

に対して検出能力が高いが、この測定法では多重反射しない１回の反射波でも、厚さを測定する。解析したスペクトルは例えば後で述べる第二の手法では１本のラインスペクトルとなり、厚さ 500mm でも１mm の分解能で測定できる。この装置は周波数でなく音速が 4000m／s を仮定したコンクリートの厚さ mm で表示する。厚さは次式によって求める。

$$2d／c＝1／f＝t \qquad (2.1.1.1)$$



図－2.1.1.5　厚さの測定

dは厚さ、 cは音速、 fは反射の周波数、 tは反射時間である。厚さ測定では第一の手法、第二の手法、第三の手法などがある。説明図を**図－2.1.1.6** に示す。使用する探触子は、広帯域探触子、場合により送波に 28kHz 探触子、吸着センサなども使用する。

厚さ測定法を用途別に説明する。

a．反射法による内部欠陥の測定

この装置の反射法の厚さ測定法により構造物の内部欠陥を検出する。内部欠陥のうち、面状でない空洞などの欠陥は、ジャンカや充填不良の空洞などであり、この場合、欠陥からの反射波は位相の揃った波として受信できず、測定表面から空洞までの距離は測定できない。しかし普通の欠陥部分は、**図－2.1.1.4** のように厚く測定され、欠陥の存在や欠陥の大小が分かる。柱ならば打ち継ぎ部と、上下 300mm 離れた健全部の２点の位置において音速 4000m／s 仮定の見かけの厚さを測定し、厚さ測定値の比から欠陥を検出する。絶対値は必要ないが、厚さを１％の精度で測定する。浮き桟橋ならば 500mm 方形の位置の各点で、厚さの変化の有無を調べ、疑問のときにはさらにその付近を調べる。厚く測定された部分があると掘削して内部を調べ、欠陥の不良程度の閾値を決めて検査を実施する。面状でない欠陥の例は、浮き桟橋や高価な重要構造物の柱や床版の鉄筋まわりの充填不良などである。

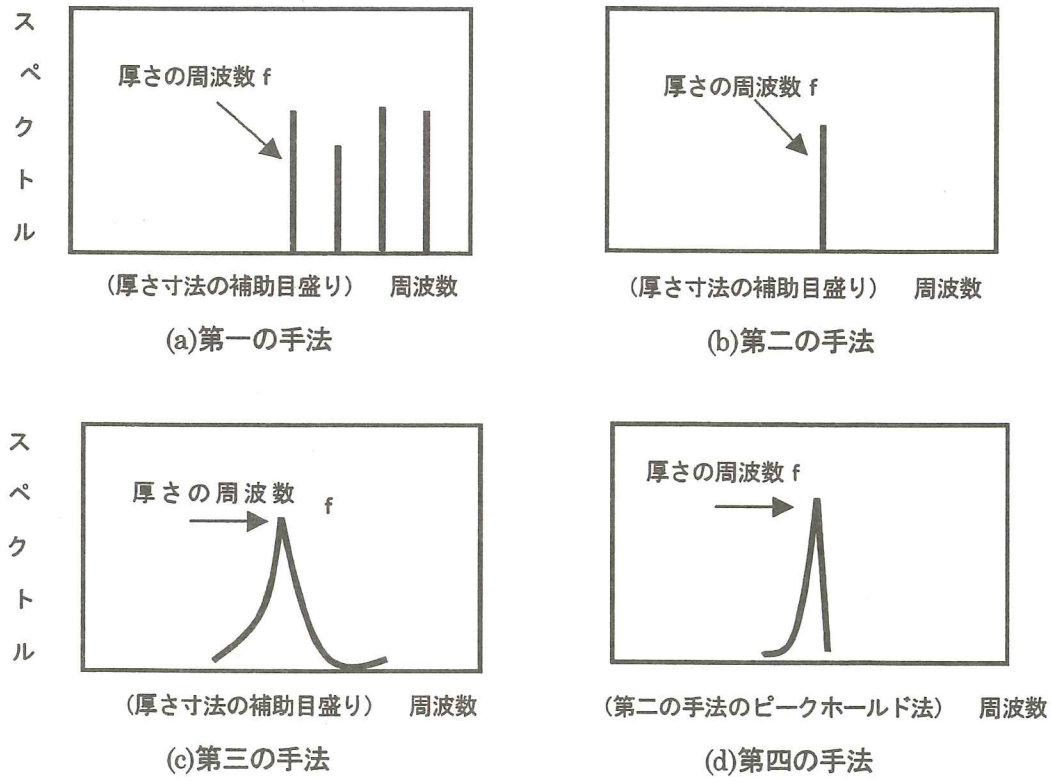
内部欠陥のうち、欠陥が面状であれば、欠陥からの反射波により、表面から欠陥までの距離が分かる。面状欠陥は、鉄筋の緊張内部割れや各種の内部の剥離、欠陥部分を修理した場合の充填材の接着不良箇所などである。内部の剥離では位置の高い測定精度よりも、まず欠陥を鉄筋の反射波や他の部材などと区別する測定技術が要求される。

b．反射法による厚さの測定

またこの装置は、各種のトンネル、ボックスカルバート、地下構造物、橋梁、重要構造物、建築物の床や壁などの厚さ寸法を測定する。一般に厚さ 500mm の水平に打設されたコンクリート床版の場合、側面の水平方向の透過音速は厚さ測定に使用できるが、水平な上表面の表面音速を厚さ測定の音速として使用することができなく、３％なり増加が必要であった。都合の良いことに、大部分の現場の測定は、水平に打設された構造物では下面から上へ向けて探触子を設置して測定するトンネルの天端（天井）などであり、一部が垂直な側面の壁である。過去のトンネルの模型実験や現場の確認測定では、天端の底面で上向きに測定した、探触子間隔１ｍの音速は、厚さ測定の音速として利用可能なデータを得た。ただし、鉄筋を配した簡易シールドトンネルでは、（丸いトンネル内表面での斜め表面音速法は面倒だが）鉄筋の影響を避け

るために、鉄筋と斜めに探触子を配置する必要があった。側面などの厚さ測定では、音速 4000m／ｓの厚さを正確に測定し、厚さを求めるための平均音速としては測定依頼者の過去の似た例や今後、採取するコアの音速による校正待ちとする。しかし参考として、端部などの実測できる似た打設条件の１m表面音速から、５%増しなどのデータを得て、推定した厚さを示す例がある。カタログ値の厚さの推定精度は測定値の±５%である。

今回の実験においても、表面走査法による音速のデータが多数示されている。また試験体やコア、現場の厚さや音速が示されている。これらのデータより、現場の測定者が簡易に利用できる経験値を知ることができる。厚さ測定の原理は以下のとおりである。



図－2.1.1.6　厚さ測定の手法

探触子としては普通、広帯域探触子を使用する。

第一の手法は、探触子を手持ちで、瞬時におおよその厚さを測定する方法である。波が多重反射でなくても直接波を主とした受信波の繰返し現象をフーリエ解析し、繰返し周波数を基本周波数としたフーリエスペクトルの高次項として厚さの周波数を求める。直接波と受信波の時間差の逆数の周波数を、スペクトルとして捕らえる。FFT により直接波の繰返し周波数を基本周波数としたフーリエスペクトルの高次項として厚さの周波数を求めている。パルス繰返し周波数の整数倍のスペクトルであるため、厚いコンクリートの場合、第一の手法の厚さ測定の分解能は劣る。内部の剥離や裏面の凹凸の大なトンネルの厚さなどでは、第一の手法で良いこともある。

第二の手法は、探触子固定で厚さを 1mm の精度で求める方法である。反射波の到達時間にパルスの繰り

返し周波数の周期を一致させ、送波の周期を１ｍｍピッチで変化させ、得られるスペクトルのピーク位置から厚さを得る。第二の手法は精度が高い。

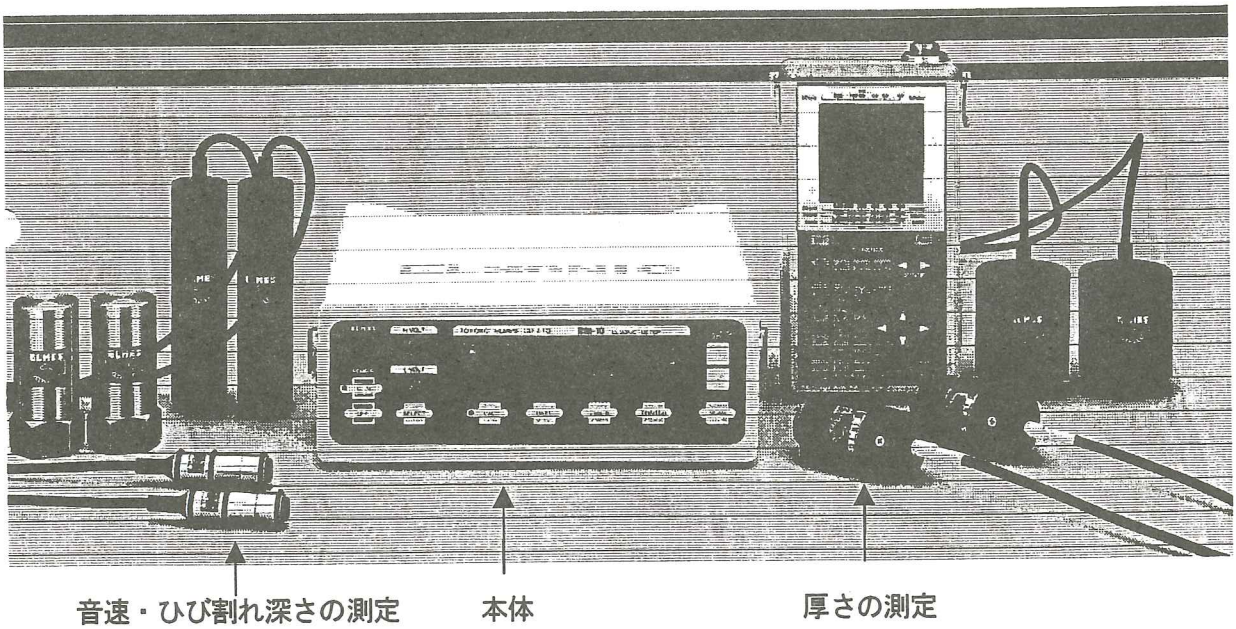
第一の手法の周波数を変化させ、そのスペクトルを加算平均したものが第三の手法である。

第二の手法の周波数を変化させ、ＦＦＴのスペクトルピークの軌跡を表示させたものを第四の手法と呼び、目的に応じて使い分ける。

図－2.1.1.7 に装置の外観を、**表－2.1.1.1** に仕様を示す。

表－2.1.1.1　超音波Ａの仕様

項目	ひび割れ深さの測定	伝搬時間の測定	厚さの測定
測定範囲	30～500mm 5～30mm 400～1500mm	0.1～2000μs	40～1000mm 40～2000mm （桁長さなど）
測定精度	±10%(深さ 30mm 以上の平坦面で) ±5mm(深さ 5～30mm で)	±0.3μs(長さ 250mm のコンクリートの同一面の反復測定静止値) 0.1μs(長さ 5mm のカーボン片の反復静止値)	音速均質なコンクリートは±1%、 普通のコンクリートは±5%、誤差原因はコンクリートの音速分布
探触子	5、28、200kHz 狭帯域探触子	左に同じ	広帯域探触子、(狭帯域も一部で併用)
FFT アナライザ	使用せず	使用せず	使用
オシロスコープ	不要だが、併用可能	不要だが、併用可能	使用
プリンタ	デジタル値の使用可能	デジタル値の使用可能	ＦＦＴのプリンタ使用
電源	AC100V、または DC12V		
重量	本体重量　3kg		
プリンタ	外付け		
インターフェイス	RC-232C 外部出力		



図－2.1.1.7　超音波測定器Ａの外観と探触子の構成

２．１．２　超音波Ｂ（ウルコン）

(1) 測定原理

従来、鋼に対して適用してきた超音波探傷試験をコンクリートに対して適用する場合、コンクリートの成分（骨材を含む）等からコンクリート内における超音波の散乱減衰が大きいため波長の長い（低い周波数）超音波を適用しなければならないこと、また、高い送信出力を必要とするため送信波の振動数が多くなり不感帯が長くなり、検出するべき波形を分離することができない等の問題点があり目的を満足させる検査結果が得られにくいのが現状であった。しかし、それらの問題点をできる限り少なくさせる方法を考案するために、各種コンクリート材に対して様々な基礎実験を実施した結果、現状の超音波の特性を最大限に活用するため下記の項目について改善させ適用することによって、コンクリートに対してより精度の高い検査結果を得ることが可能となった。

① 波形直接観察可能方式

測定時にコンクリート構造物に関する各種現象を熟知している超音波探傷技術者が、図-2.1.2.2 に示すような表示器（ＣＲＴ）から直接超音波の波形の変化を観察しながら、目的のエコーにのみ着目して測定を実施する事ができるため、探傷器から得られるデータに対してより高度な判断を行うことが可能となった。

② 試験周波数の決定

各種コンクリート試験体で基礎実験を実施した結果、周波数 500kHz を中心とする超音波を適用するのがコンクリートに対して最も超音波の伝搬特性が良好な傾向にあった。しかし、コンクリートの状況によっては 500kHz より高い周波数成分の超音波が、また、反対に 500kHz より低い周波数成分の超音波の伝搬特性が良好な場合も認められた。そこでコンクリート用として中心周波数 500kHz の広帯域探触子を開発し適用した。

③ 送信周波数の可変型方式

コンクリートによって超音波の伝搬しやすい周波数が異なるため、探傷器の送信周波数を可変型にして、探触子から送信される 500kHz を中心とした 20kHz～１MHz の広い帯域の周波数の中から送信周波数を任意に変更させながら、探傷図形の超音波のエコーの変化を確認することにより、対象とするコンクリートに対する最適の送信周波数を選定することができ、その結果としてＳＮ比が高く、精度の良い測定を実施することが可能となった。

④ 振動子寸法の選択

コンクリートの成分による超音波の伝搬特性の変化、コンクリートの厚さの変化及び作業性等に対応するために３種類の直径の異なる振動子を組み込んだ探触子を個別に製作した。振動子寸法が大きい探触子を用いることによって、指向性の鋭い、強い超音波を試験体に伝搬させることができ、また、振動子寸法の小さい探触子を用いることによって、近距離音場限界距離を低減させ、探触子の大きさの影響を少なくする等、様々な状況に応じた最適の探触子を選択して実施することが可能となった。参考として今回使用した各探触子の振動子寸法及び送信周波数が各々50kHz、100kHz、200kHz、500kHz における超音波

特性として、図-2.1.2.1 に示す指向角と近距離音場限界距離の計算結果（コンクリートの縦波音速 4000m/s と仮定して）を表-2.1.2.1 に示す。

指向角（度）　　$\theta_0 \fallingdotseq 70 \times \lambda / D$

近距離音場限界距離（mm）　　$X_0 = D^2 / 4\lambda$

D：振動子直径　　λ：波長＝C（音速）／f（周波数）

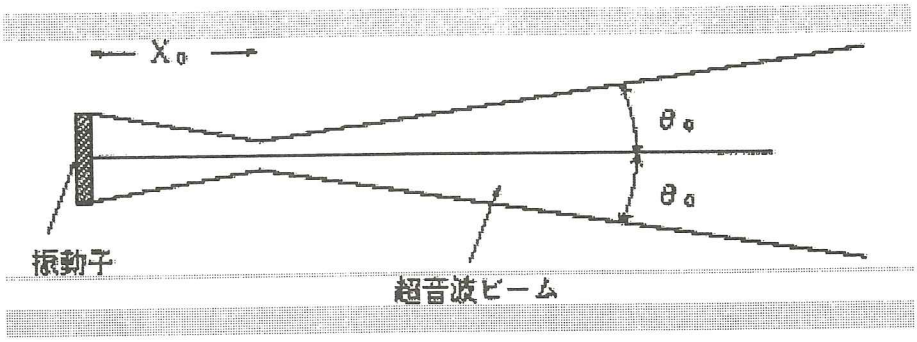


図-2.1.2.1　指向角と近距離音場限界距離

表-2.1.2.1　各探触子の超音波特性

探触子直径(mm) ＼ 周波数(kHz)		50	100	200	500
20	指向角(度)	280.0	140.0	70.0	28.0
	近距離音場限界距離(mm)	1.3	2.5	5.0	12.5
56	指向角(度)	100.0	50.0	25.0	10.0
	近距離音場限界距離(mm)	156.8	78.4	39.2	98.0
76	指向角(度)	73.6	36.8	18.4	7.4
	近距離音場限界距離(mm)	18.1	36.1	72.2	180.5

⑤　探触子の高ダンピング化

探触子の構造を高ダンピング型に改造させることによって、超音波の波数を少なくさせた結果、近距離分解能（表面直下反射源の検出性）の向上に伴い不感帯を低減させ、遠距離分解能（遠距離における近接した反射源の分離）を向上させ、散乱減衰に伴う林状エコーを低減させ、検出性及びＳＮ比の高い測定が実施できるようになった。

⑥　適受信周波数選択機能による受信周波数の選定

ハイパスフィルター（60kHz～240kHz）及びローパスフィルター(20kHz～80kHz)を使用することによって、技術者が探傷図形から低周波数成分のノイズ、高周波数成分のノイズを除去する事ができ、ＳＮ比の高い目的に合った探傷図形を得ることが可能となった。

本装置の本装置概略構成図を図 - 2.1.2.2 に示す。

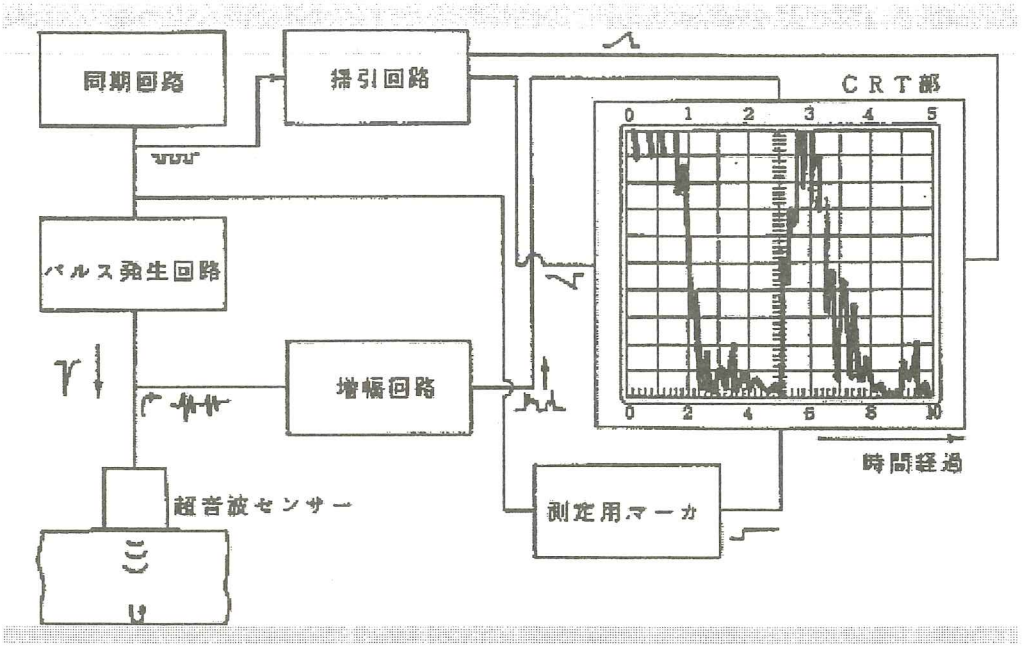


図-2.1.2.2　本装置概略構成図

以上の様々な改善を施したコンクリート用の超音波探傷装置を用いて、コンクリート中に中心周波数 500kHz の広帯域超音波を伝搬させ、以下に示す項目について各種機能を充分に活用させ、得られた結果から様々な評価を行うことが可能となった。

① 反射法による厚さ測定

音速の確認されている試験体に対して、図-2.1.2.3 に示すように試験体表面に探触子を配置し、その探触子で試験体中に超音波を伝搬させ、裏面で反射してきた超音波を同一の探触子で検出し、既知の音速を用いて試験体の版厚を測定する方法である。その際、既知音速値を探傷器に設定すると、表示器上のゲートを目的のエコーに合わせるだけで、測定物の版厚がデジタルで表示される。以下全ての項目について同様にデジタル表示させることが可能である。

② 空洞（反射法）の検出

図-2.1.2.4 に示すように空洞がある場合、空洞表面で反射してきた超音波を検出することにより、空洞までの距離を測定することができる。また、そのエコー高さからある程度空洞の大きさを推定することも可能である。

③ 透過法による音速測定

図-2.1.2.5 に示すように、試験体の同じ場所の表裏面上にそれぞれ探触子を配置し、１つは送信用、もう１つは受信用とし、試験体中を透過してきた超音波の伝搬時間を測定し、試験体の厚さから音速を計算する方法である。この方法は超音波の伝搬距離が片道であるので、反射法（往復）に比べて厚物や減衰の大きい対象物に適用が可能である。

④ 鉄筋検出及びかぶり厚さ測定

図-2.1.2.6 に示すように、探触子を試験体の表面上を走査させ、試験体内部の鉄筋を検出し、その配筋状態状態を調査し、既知の音速から鉄筋のかぶり厚さを測定する方法である。

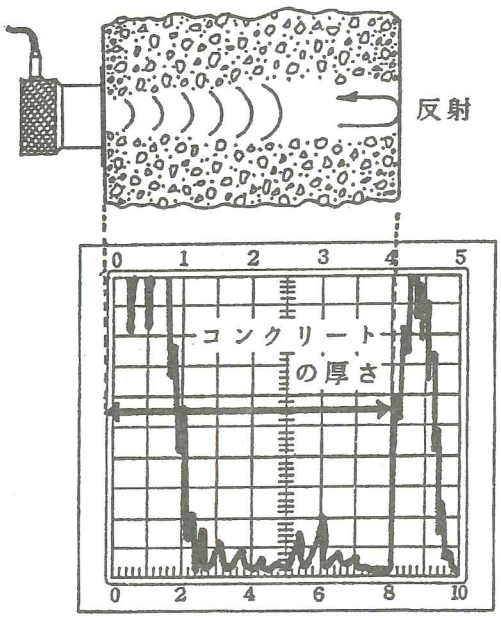


図 - 2.1.2.3　厚さの測定

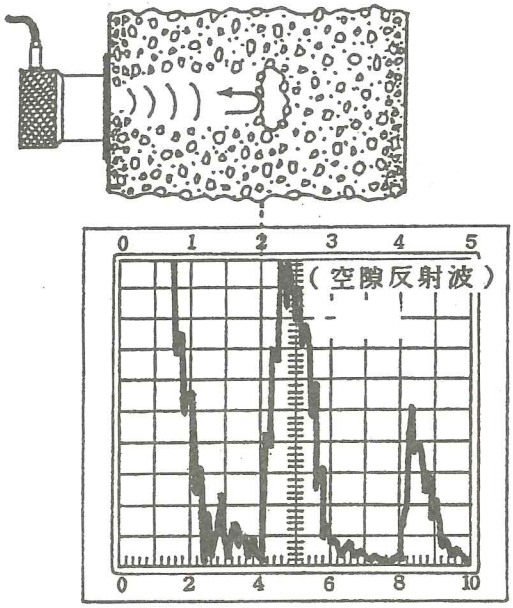


図-2.1.2.4　空洞までの距離

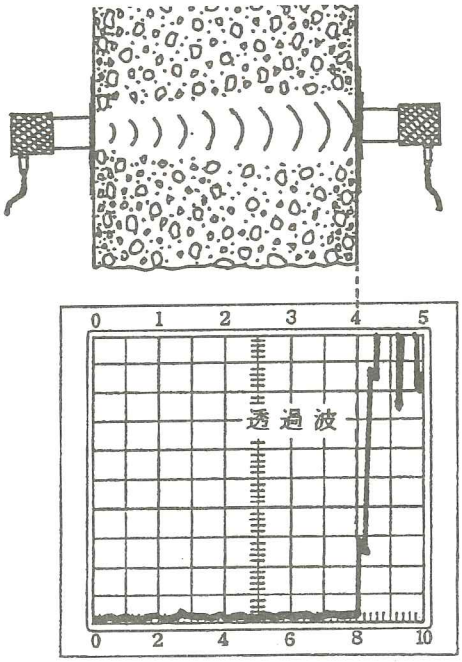


図-2.1.2.5　透過法

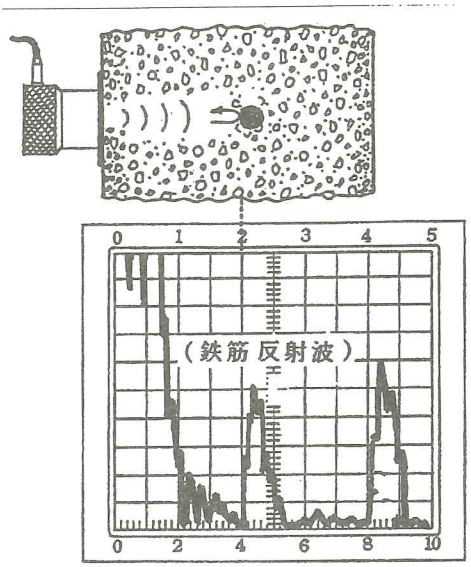


図-2.1.2.6　かぶり厚さの測定

(2) 装置の仕様

本装置及び探触子の外観を図-2.1.2.7 に、仕様を表-2.1.2.2 に示す。

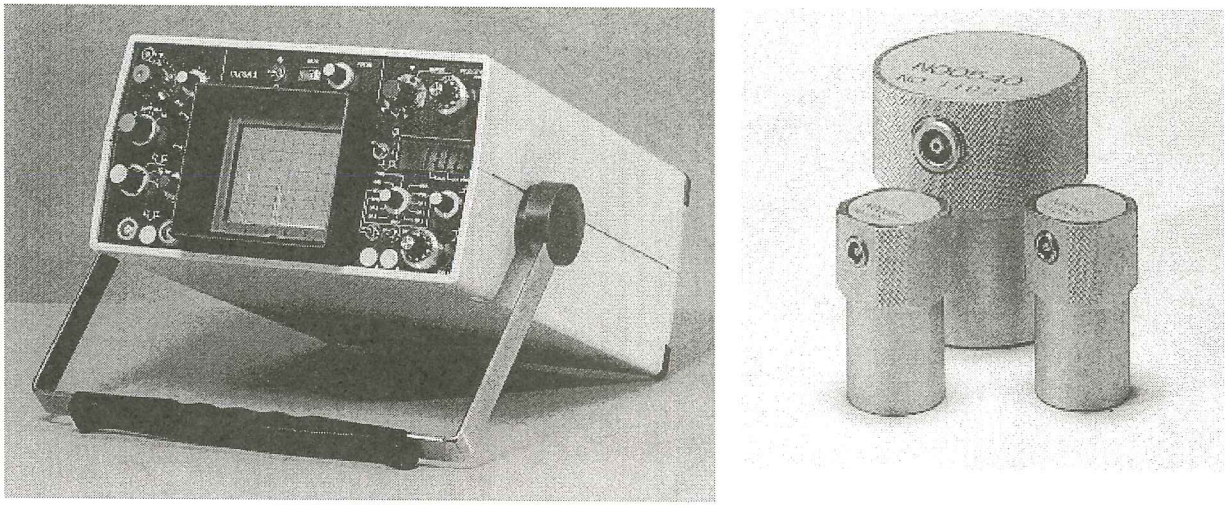


図-2.1.2.7　本装置及び探触子外観図

(3) 表面走査法による内部音速の測定方法

反射法、透過法による音速測定のほか、表面走査法によって表面伝搬時間を測定し、内部音速を推定した。

図-2.1.2.8 に示すように２つの探触子を同一面上に任意の距離を離して、その距離を順次大きくして（例 100mm、200mm、300mm 等）配置し、一方を送信用とし、もう一方を受信用として、表面近傍を伝搬してきた超音波の伝搬時間を測定し、その伝搬時間から第Ⅰ部の 1.2.1 項の解析方法により内部の音速を推定した。この際、距離の増加に伴い超音波の減衰が著しくなるため、探触子間距離が近い場合は小さい径の探触子を、遠い場合には大きい径の探触子を用いて測定した。

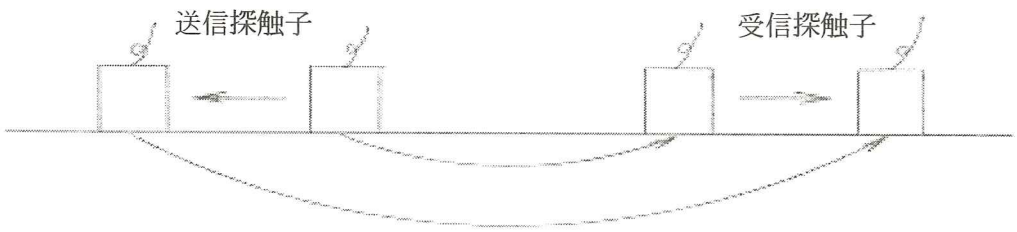


図-2.1.2.8　表面走査法

表-2.1.2.2　装置の仕様

項　目	仕　様　詳　細
使用可能測定周波数	増幅帯域切り替えスイッチ位置　使用周波数範囲 高周波帯域　60～240ｋHz 低周波帯域　20～80ｋHz 広帯域　10～1000ｋHz
総　合　感　度	約110ｄB 粗調整　0／20／40／60　（20ｄBステップ） 微調整　0～40ｄB　（２ｄBステップ） 0～４ｄB以上　（無段階）
増　幅　直　線　性	±４％以内
リジェクション範囲	表示器画面上０～100％以上
入　力　保　護	増幅器入力のダイオード・リミッタによる（約±0.6V）
測　定　範　囲	０～1000mm　（音速4000m／ｓ：一回反射法） 100mm／250mm／500mm／1000mmの４レンジ
パルス位置移動範囲	０～250mm（音速4000m／ｓ：一回反射法）
時間軸　直線性	±１％以内
パルス繰り返し周波数 （ＰＲＦ）	約60～500Hz　（測定範囲つまみと連動） 測定範囲　100mm　250mm　500mm　1000mm ＰＲＦ　約500Hz　約250Hz　約125Hz　約60Hz
音速　設定　範囲	1000～6000m／ｓ
送信電圧	約±70Ｖ
送信パルス幅	約0.8～10μｓ （周波数調整つまみ及び増幅帯域切り替えスイッチに連動）
送信パルス波数	正パルス１波、正負パルス各１波、正パルス２波＋負パルス１波の ３段階
ダンピング	探傷法切り替え、送信出力切り替えつまみに連動 一探触子法Ｈ：約800Ω 一探触子法Ｌ：約200Ω 二探触子法　：送信側約１ｋΩ、受信側約1.3ｋΩ
測定ゲート	表示器上にステップ状表示（測定点以降の輝線をステップアップ）
ゲート設定範囲	表示器横軸上０～100％以上
測定モード	一探触子パルス反射法版厚測定 二探触子パルス反射法版厚測定 二探触子パルス透過法割れ深さ測定
ＬＣＤ表示	３・1/2桁大型ＬＣＤ、±表示、小数点表示付き
ＬＣＤ表示内容	音速、零調整値、伝搬時間、版厚、割れ深さ、探触子間距離、異常
伝搬時間測定精度	±（表示値の0.1％）±0.2μｓ
版厚測定精度	50～600mm厚さに対して±５mm以下
割れ深さ測定精度	10～100mm深さに対して±５mm以下
ＲＦ出力	約±1.25V／100％CRT
ビデオ出力	約0～2.5V／100％CRT
電　源	専用NiCdバッテリー・パック （UL341、ULCON　3/Aタイプに付属） 専用ＡＣ電源・パック （UL34J1、ULCON　3/Bタイプに付属）
バッテリー充電	専用充電器（UL346）を使用、充電時間は使用時間の1.5倍
バッテリー動作時間	完全充電時約８時間
外観寸法	約250×130×300mm（ハンドル含まず）
重　量	約８kg（バッテリーUL341含む）

2.1.3　超音波C(UCM2000)

(1)　装置概要

本研究で用いた超音波探知装置 UCM2000 は新たに構築した巨視的探知理論に基づいて開発されたものであり、装置概要は図 2.1.3.1 に示す如くである。

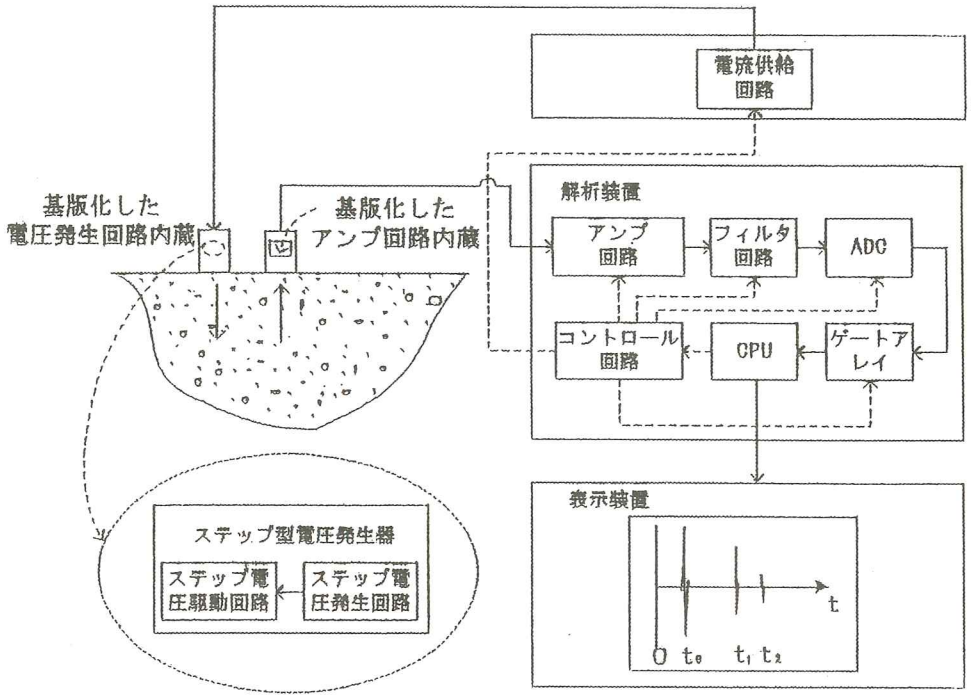


図 2.1.3.1　UCM2000 装置概要

超音波を用いコンクリートの内部探知を行おうとしても、従来幾つかの問題点の存在により妨害波が生じ、探知を困難、若しくは不可能にした。超広帯域超音波を被探知体表面より入力し得られる受信波より、巨視的探知理論に基づき特定される周波数帯で成分波を取り出せば、従来探知が困難、もしくは不可能であった鉄筋&鉄骨コンクリートの内部探知を広範な領域で高精度に行い得る。そして、多くの現場計測でその探知能力が実証されつつある。探知対象を開発中のものも含めて列挙すれば以下の如くなる。

① 音速計測（透過法、斜透過法、表面配置法、反射波法）

② 異形/丸鋼、鉄筋、エンビ管、ガス管等の位置/かぶり厚/径

③ 鉄筋の腐食状況（爆裂含む）の判断情報の取得

④ 版厚、柱&梁の背（斜め、変動巻厚可能）

⑤ 空洞、接着状態及び剥離

⑥ ジャンカ・内部割れ（斜め可能）

⑦ 密な配筋下におけるひび割れ深さ及び斜割れ深さ、及びその形状

⑧ 鉄筋/鉄骨の溶接破断

⑨ 鉄皮下モルタル充填度（特許出願済）

(2) コンクリート内部探知における問題点

コンクリートの内部探知を超音波を用いて行うことが難しい要因は、被探知体が鋼であれ、木材、セラミック等々であれ、測定を邪魔する程度の差はあるが共通に存在する。その要因を顕著に示すことが出来るコンクリート材を用いて説明する。整理して示せば、

① コンクリート内にある多量の骨材及び気泡の存在により超音波が散乱現象を起こす
② 経年による被探知体の劣化
③ 走査面に存在する無数の大小さまざまなひび割れ
④ 被探知体の形状
⑤ 電気的雑音及び外乱の受信波への混入

上記の要因の幾つかについて概説する。

コンクリートはセメントと細骨材、粗骨材の混合されたものであり、かつ無数の空隙が存在する。超音波はこれら界面で散乱し、直進性、その高い指向性が低減される。この散乱現象の概念図を図 2.1.3.2 に示す。これより、超音波がコンクリート内部に扇状に広がる。この扇状超音波の強度が周波数でどのように変化するかを模式的に表したものが図 2.1.3.3、図 2.1.3.4 である。これより、超音波入力方向以外からの反射波が多数受信され、低周波ほどその勢力が大きくなる。さらに、散乱現象は図 2.1.3.5 のような直接波を発生させる。浅い経路や深い経路の直接波(102)が探知目標波(101)よりもたいがいの場合、その勢力が大きくなる。減衰率αを伝達距離 d と周波数 f の関数α（d、f）としたときの関係を図 2.1.3.6 に示す。超音波は、散乱現象により伝達距離が長いほど、高周波数成分になればなるほど加速的に減衰し、コンクリートの内部探知を困難にする。

また、被探知体の前記要因により、大きな勢力の散乱波、直接波、表面波が発生し、探知目標とする反射波が図 2.1.3.7 のようにこれら妨害波の中に埋没することも探知を困難にする大きな要因である。

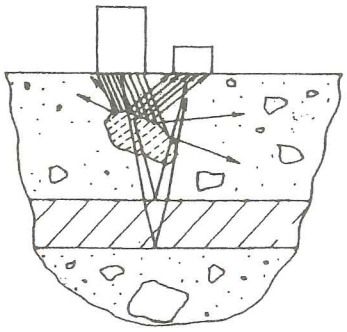


図 2.1.3.2　散乱現象

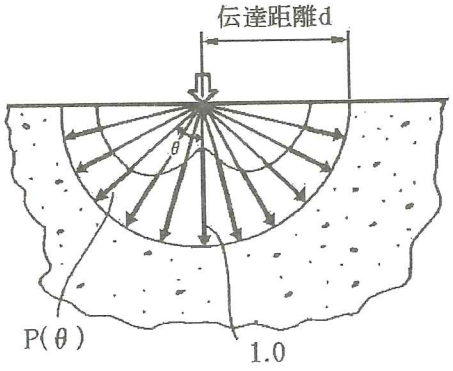


図 2.1.3.3　扇状超音波（低周波）

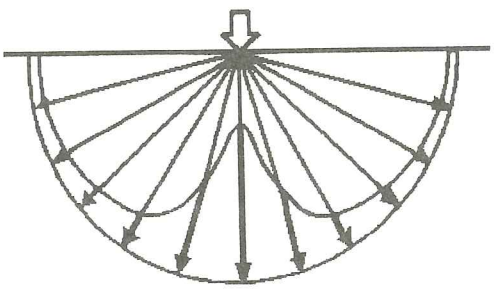


図 2.1.3.4　扇状超音波（高周波）

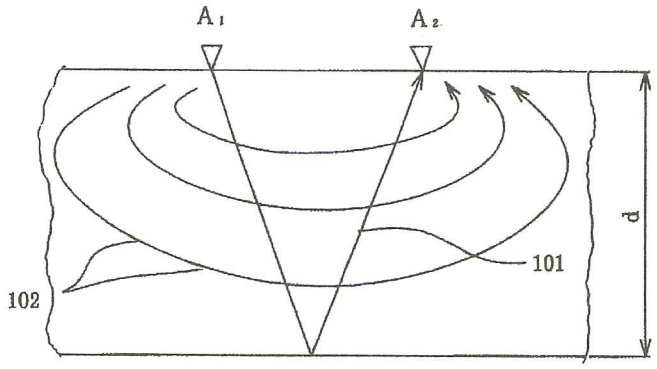


図 2.1.3.5　直接波の存在

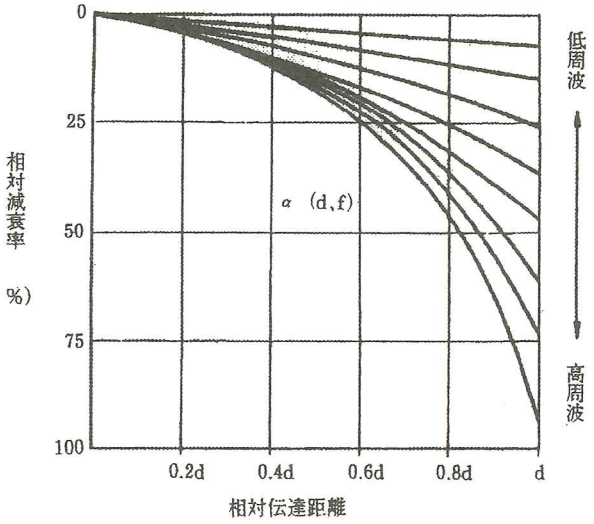


図 2.1.3.6　超音波の相対伝達減衰

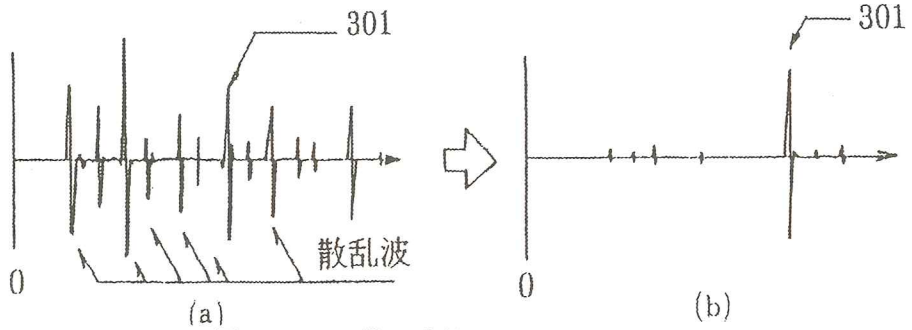


図 2.1.3.7　散乱波等の林立と探知目標

(3)　巨視的探知理論要約

前述要因で生ずる妨害波を除去しなければ、コンクリートの内部探知は不可能であると筆者は論じできた。そして、この問題に対処すべく、巨視的探知理論を構築した。この理論を要約すると、

① 広帯域超音波を被探知体に入力し、その近傍で超広帯域超音波を得る探知装置において、超音波発信を任意の周期で連続して行い、これ等発信波毎に得る受信波を超高速に加算平均する。

② 上記加算平均波では、探触子の走査法、被探知体の音速、使用探触子、1 又は 2 探触子計測の違い、探知距離の組み合せに応じ、妨害波の強度が最も小さく、かつ探知目標波が最も大きく励起する周波数帯がある。

③ 記周波数帯の中心周波数（以降最適周波数と呼ぶ）を理論的に特定できる。この周波数を中心にして、探知目的に応じて、狭帯域あるいは広帯域成分波を抽出する。この成分波を用いれば探知目標からの反射波あるいは回折迂回波を特定することが出来る。

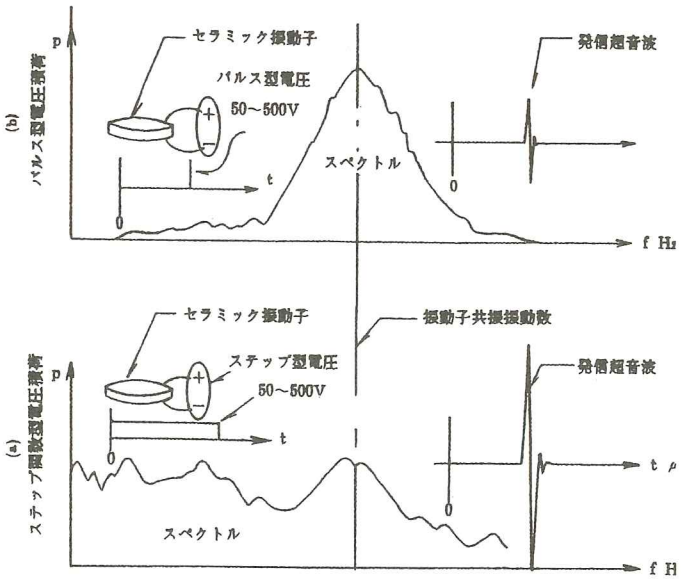


図2.1.3.8　狭帯域及び広帯域発信超音波

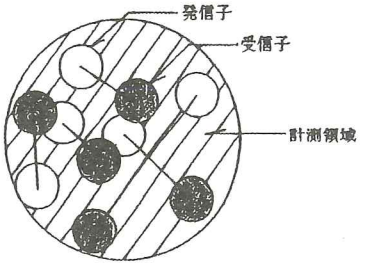
(4)　広帯域入力超音波

受信超音波の帯域は広ければ広いほどよい。一般的セラミック振動子を強制励起させることで発信超音波の帯域を超広帯域とすることができる。振動子にパルス電圧、ステップ電圧を積荷した時の発信超音波のスペクトルを模式的に図 2.1.3.8 に示す。ステップ電圧積荷で以下の利点が生ずる。

① 比較的低電圧でも発信波が高強度となる。

② 低電圧印加しているので受信波の SN 比が向上する。

③ 受信波に広い帯域の成分波を含めることができる。



(5)　超高速加算平均と探触子移動計測

計測波及び解析結果のリアルタイム表示は必要不可欠である。このため広帯域受信波の加算平均をゲートアレイなどを用いて超高速に行うべきである。そして、この平均化処理と図 2.1.3.9 に示す。探触子移動計測を組み合せることが重要である。上記処理は 2 つの目的を持っている。その第 1 は電気的非定常雑音及び計測環境における外乱の除去である。特に交通事情の厳しい立地での構造物の内部探知では、探知目標とする反射波の数百倍の振幅を持った外乱も存在する。この様な場合にも対処するために加算平均化回数を任意に変更できるようにすべきである。その第 2 は勢力の大きい散乱波、直接波、表面波などの妨害波、場合によっては探知目標以外からの反射波などを除去／低減することである。図 2.1.3.7 は鉄筋の探知例において、a)は鉄筋からの反射波(301)が前述妨害波の中に埋没する様子を　b)はこの妨害波を除去し、鉄筋からの反射波を増幅させる様子を模式的に示したものである。散乱波の起生状況は測定位置に対して非定常である。これより前述加算平均波に含まれる散乱波は加算回数が多ければ多いほど消滅していく。同時に、探触子移動計測で得られる個々の受信波において位相の変動する波も、この加算平均の過程の中でその振幅が減少していく。探触子の移動法が適正であり、かつ加算平均が探知目標からの反射波などを浮き上がらせるに充分な回数であれば、誤ることなく探知目標からの反射波などを特定できる。探触子の移動法において、探知目標からの反射波の位相の変化、言い換えると探触子→探知目標→探触子の伝達長の変化が微小となる様に、かつ前記妨害波の位相が相対的に大きく変動するようにすれば、この移動法を適正と判断する。

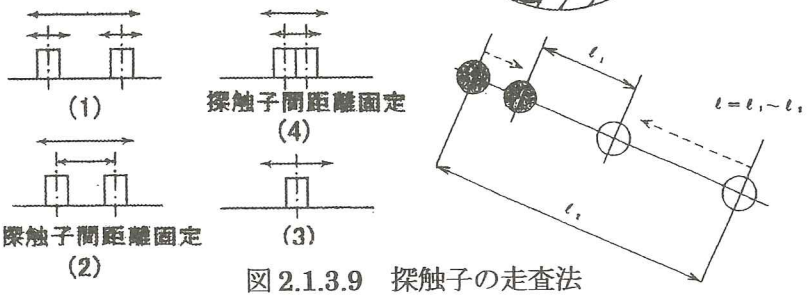


図 2.1.3.9　探触子の走査法

(6)　最適周波数

説明を簡単にするために、妨害波及び探知目標波のスペクトル値 F を 1.0 に基準化して考える。もとより F は周波数の関数である。以降、本論ではこの基準化された個々の波を単に妨害波、探知目標波と呼ぶ。図 2.1.3.10 のコンクリート厚の測定において、図 2.1.3.9 に示す走査法(1)を用い、1 対の発信及び受信探触子の間隔を図示の如く変動させる計測を行って見る。図 2.1.3.11 に探触子対の発信及び受信探触子の間隔を図示の如く変動させる計測を行って見る。図2.1.3.11 に探触子移動に伴う距離 ℓ の変化を K+1 に離散化して示す。

ℓ と $\ell+\Delta\ell$ の場合の加算平均波をさらに加算平均し、(2.1.3.1)式の様に表現する。

$$\tilde{y}(t)=(y_1(t)+y_{\ell+\Delta\ell}(t))/2 \quad -(2.1.3.1)$$

この波に含まれる妨害波(表面波、直接波)は、その音速を $\tilde{V}$ として算定される(2.1.3.2)式を用いて、図 2.1.3.12 の如く正余弦関数で表されるスペクトルとなる。

$$f=\tilde{v}/\Delta\ell \quad \text{——————} (2.1.3.2)$$

(2.1.3.1)式の加算平均を図 2.1.3.11 の 1 と 2、3 と 4、…、K と K+1 で行い、得られた加算平均波毎に同様のさらなる加算平均を繰り返していけば、最終的に 1 つの加算平均波が得られる。図 2.1.3.13 の太線(a_5)が K+1=32 として求めた前記妨害波スペクトルである。

なお、図中 $f_0=1/(K+1)f$ は

$$f_0=\tilde{v}/(\ell_2-\ell_1) \quad \text{——————} (2.1.3.3)$$

となる。a_1、a_2、a_3、a_4 は前述の繰り返し処理の過程でのスペクトルである。図 2.1.3.14 に、図 2.1.3.13 の太線スペクトル(a_5)を周波数軸を拡大して示している。同図 Ba_5 のスペクトルはコンクリート底部からの反射波(201)のスペクトルである。コンクリート厚を d とすれば、ℓ 及び $\ell+\Delta\ell$ の測定において、図 2.1.3.10 の 201 経路の伝達長の差 $\Delta\ell_B$ が(2.1.3.4)式となる。

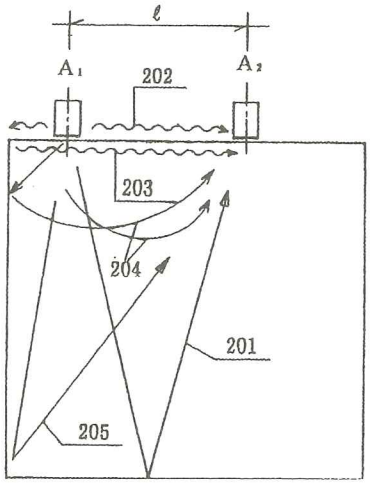


図 2.1.3.10　コンクリート厚の測定

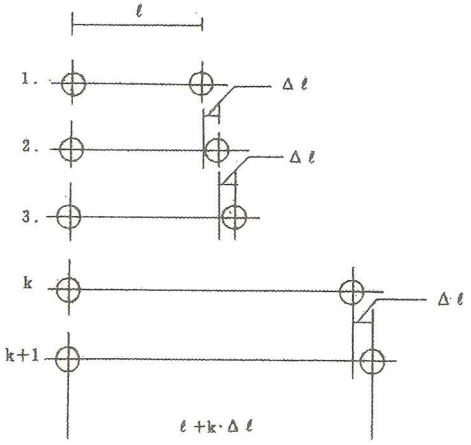


図 2.1.3.11　離散化した探触子移動

$$\Delta\ell_B=2\times\left\{\sqrt{\left(\frac{\ell+\Delta\ell}{2}\right)^2+d^2}-\sqrt{\left(\frac{\ell}{2}\right)^2+d^2}\right\} \quad \text{———} \quad (2.1.3.4)$$

これより $\Delta t_B=\Delta\ell_B/V_P$ (ここ V_P ではたて波音速)より

$$f_B=1/\Delta t_B \quad -(2.1.3.5)$$

となる。ℓ と d の関係において、概略 d>2ℓ とすれば、f_B 値は(2.1.3.2)式の f 値より極端に大きくなる。この f_B 値を用いて得たものである。なお、最適周波数は(2.1.3.3)式を基本に一般式として(2.1.3.6)式の如く整理している。

$$f_0=\frac{1}{2}\alpha\frac{{}_cV_P}{1/2\{(\ell_2-\ell_1)+\phi\}} \quad \text{———} \quad (2.1.3.6)$$

ここで、α は計測実験で得られた補正係数、ϕ は探触子径、${}_cV_P$ はコンクリートたて波音速、1 探触子計測の場合 $\ell_2-\ell_1=0$ (2.1.3.6)式は走査法によって若干異なったものとなる。なお、補正係数 α は ℓ_2=70mm、ℓ_1=60mm、ϕ=40mm の場合で、図 2.1.3.16 の如く求められている。

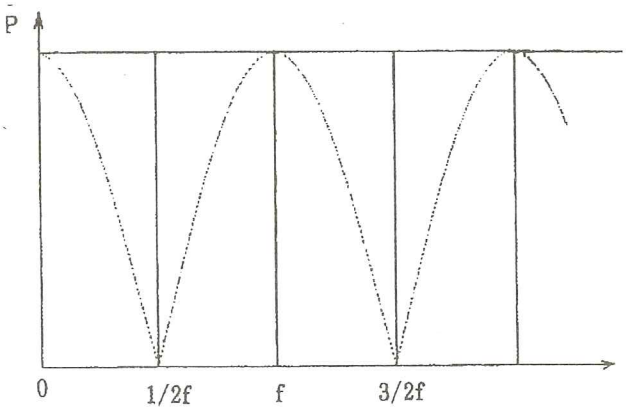


図 2.1.3.12　妨害波のスペクトル

(7) 狭帯域及び広帯域成分波の抽出

図 2.1.3.14 より ←→ で示した周波数帯で狭帯域あるいは広帯域成分波を取り出す方法として以下の掃引法が効果的である。周波数軸における増加関数を I(f)、減少関数 D(f) とし(2.1.3.7)、(2.1.3.8)式の如く定義する。

$$I^k(f/\frac{f_{HL}}{2})\times D^n(f/f_{HL}) \qquad (2.1.3.7)$$

$$I^k(f/\frac{f_{HL}}{2})\times I^n(f/f_{HL}) \qquad (2.1.3.8)$$

上記いずれかの関数を図 2.1.3.14 の Ba_5 に乗ずれば、この掃引を行うことができる。(2.1.3.7)、(2.1.3.8)式の k の値を変化させることで抽出成分波の帯域幅をコントロールする。(2.1.3.7)式の n の値を大きくすれば、高周波から低周波へ、(2.1.3.8)式の n の値を大きくすれば低周波から高周波へというように成分波の抽出帯域を掃引させることができる。図 2.1.3.15 は増加及び減少関数に正余弦関数を用いた時の事例である。なお、f_{HL} は成分波抽出周波数の上限を示す値である。

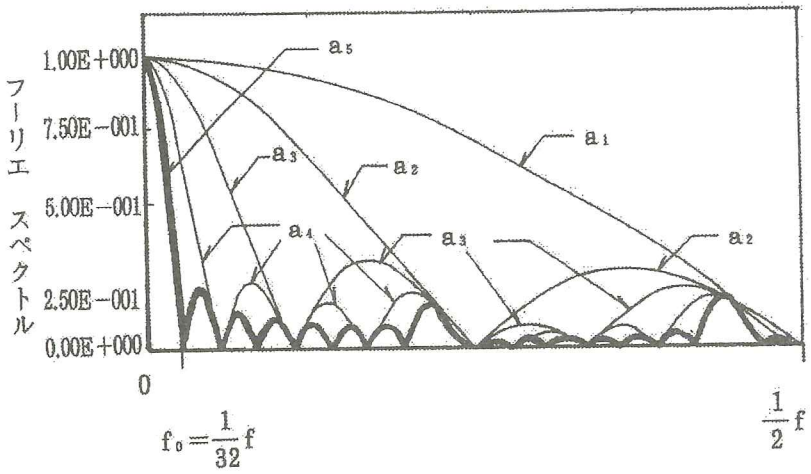
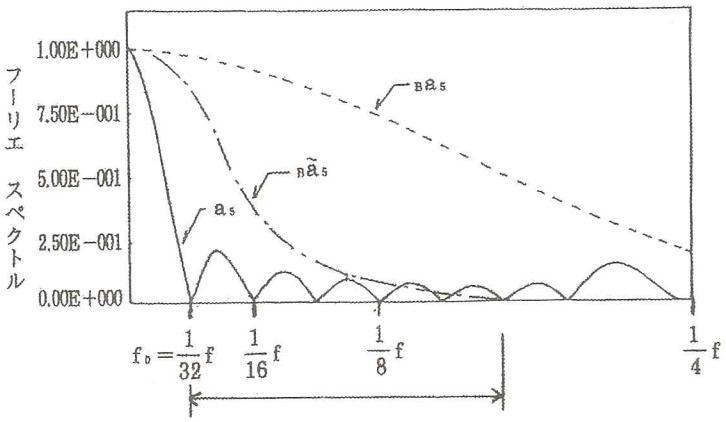


図 2.1.3.13 加算平均化処理による妨害波のスペクトル



2.1.3.14 拡大した加算平均化処理による妨害波及び探知目標波スペクトル

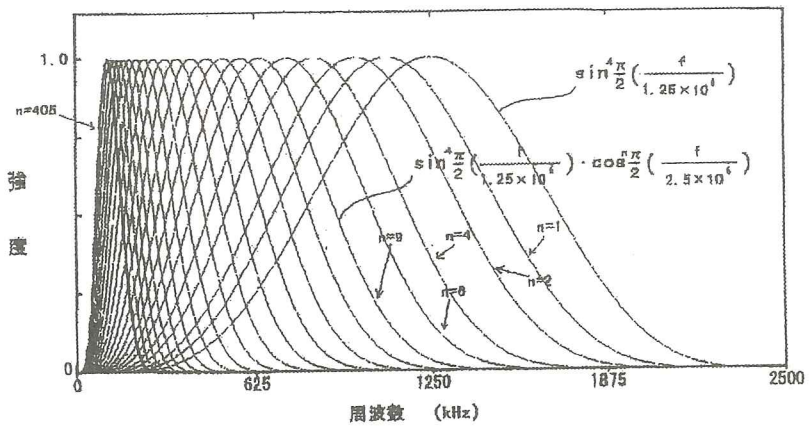


図 2.1.3.15 掃引処理

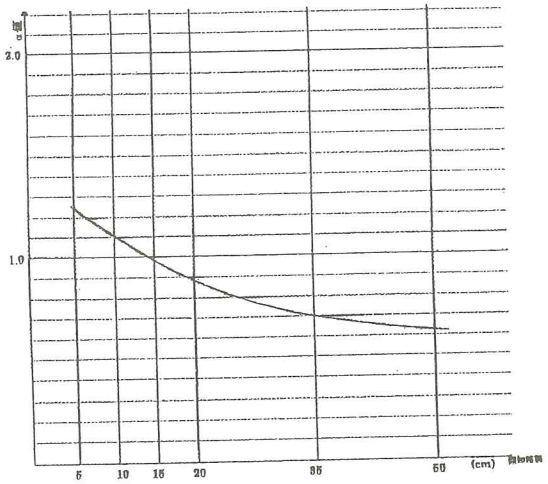


図 2.1.3.16 補正係数 α と探知路程

(8) 音速の測定

音速測定は、コンクリートに1対の発信及び受信探触子を配置し、図2.1.3.17に示す如く、コンクリート表面に起生する極く極く微細なたて波を取り出す方法によった。なお、使用探触子は振動子径40mm、共振振動数500kHzであった。但し、ステップ電圧積荷による0Hz近傍から500kHzの広帯域超音波を用いた。

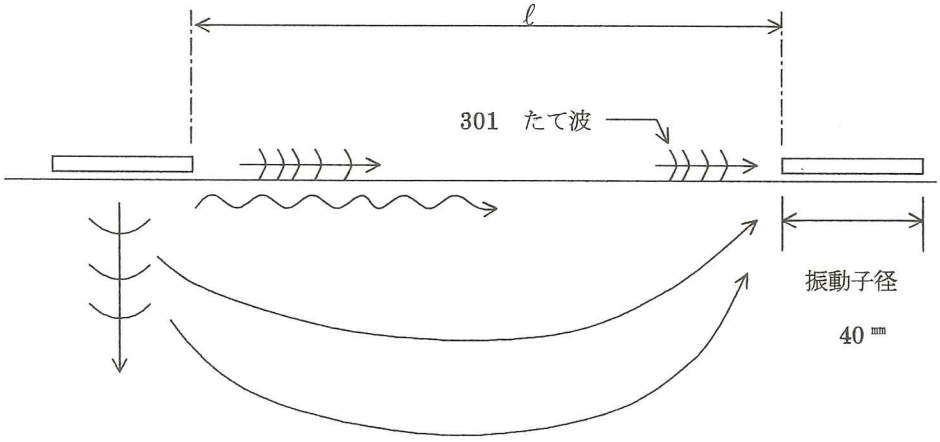


図2.1.3.17 表面配置計測

図2.1.3.17の計測では、発信探触子により超音波をコンクリート面に対し直角方向に入力している。これがため、コンクリート表面を伝達する301のたて波の強度は微細である。当然、探触子間距離ℓが長くなければ、このたて波強度は加速的に減衰していく。この様な条件下での前記301のたて波の取得を前提とした計測法を用いた。

図2.1.3.18はℓの値を250mm（探触子中心間距離252mm）として求めた3000回の加算平均波である。振動子へステップ関数型電圧を500Vで載荷している。カーソル位置で示す微弱なたて波の起生時刻で音速を計測すると、

$$V_p = (252 - 40) / 48.2 = 4398 \text{ m/秒}$$

となっている。しかしながら、上記値は正確な音速値ではない。

図2.1.3.19は、図2.1.3.18の波の振幅を13倍に増幅して表示したものである。294kHzを中心周波数とする狭帯域波で示している。カーソル位置に、図2.1.3.18では視認できなかったこの微細なたて波の起生位置をカーソル位置に確認できる。

$$V_p = (252 - 40) / 46.5 = 4559 \text{ m/秒}$$

が、この場合の、正確なるたて波の音速である。

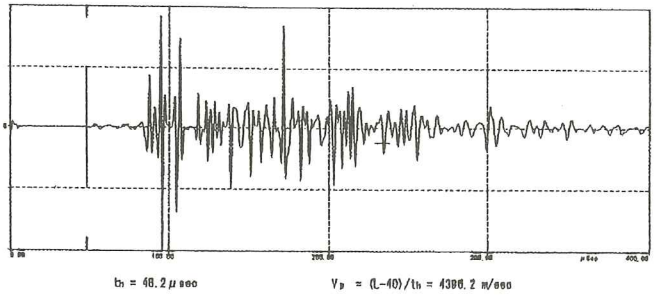


図2.1.3.18 ℓ=250 mm 音速測定

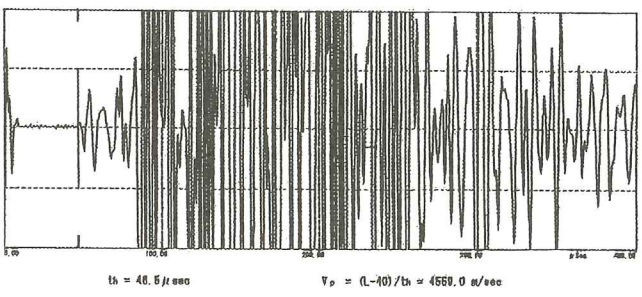


図2.1.3.19 ℓ=250mm 音速測定－振幅13倍

（9）　版厚の測定

図 2.1.3.10 のコンクリートモデルは 500mm×500mm×300mm のサイズである。201 経路の版厚反射波を取り出す測定を考える。まず、従来のパルス波入力にのる超音波測定装置と 300kHz の共振振動数の振動子よりなる 1 対の発信及び受信探触子を用い、図 2.1.3.8 の(b)のスペクトル成分を持つ超音波を図 2.1.3.10 の A1 点より入力し、A2 点で受信する波を考察して見よう。図 2.1.3.20 は、前記計測で探触子間距離 ℓ を 150mm とした時の受信であり図 2.1.3.21 は、対応するスペクトルである。

コンクリート音速が 4300m／秒より、201 経路の反射波はカーソルで示す位置より起生するはずであるが、その根跡も見当たらない。前述した妨害波（表面波、直接波、散乱波）の中に微弱な 201 経路の反射波が埋もれてしまったからである。一方、前記発信探触子内振動子にステップ関数型電圧を加えると、入力超音波として図 2.1.3.8 の(a)に示した広帯域振動数成分よりなるパルス波が評価できることを示した。この場合の受信波を図 2.1.3.22 に示す。図 2.1.3.9 の走査法 2 を用いて、直径 200mm の円領域で 1 対の発信及び受信探触子の距離 150mm に固定しながら走査し、1000 回の受信波を収録し、これ等を加算平均したものである。

図 2.1.3.23 に対応するスペクトルを示す。図 2.1.3.22 のカーソル位置は、201 経路の反射波の起生する理論的時刻である。この位置より比較的低周波の波が生じているのを確認願いたい。

この測定の場合、妨害波の振幅が小さく、そして探知目標(201)の振幅が大きくなる周波数帯は(2.1.3.6)式に ϕ=40mm、 α=0.6、コンクリート音速 4300m／秒を適用し、

$$f_0 = \frac{1}{2} \times 0.6 \frac{4300}{1/2 \times 40} = 64.5\text{kHz}$$

である。この f_0 値を中心周波数として、図 2.1.3.24 の比較的狭帯域スペクトルよりなる成分波を取り出すと図 2.1.3.25 が得られる。201 経路の反射波のみが大きく励起した波となっている。カーソル位置(232.5 μ 秒)を用いて、版厚を計測すると 497mm(実値 500mm)となっている。

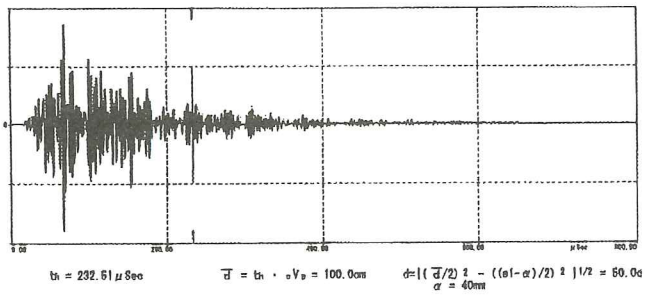


図 2.1.3.20　ℓ=150mm 版厚測定

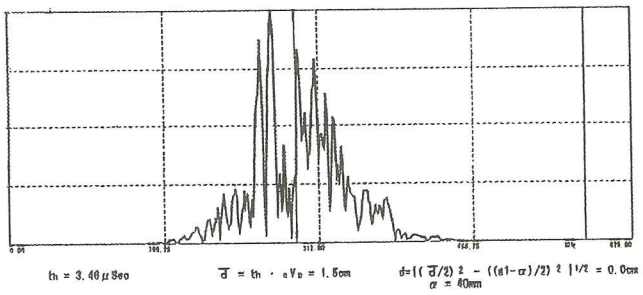


図 2.1.3.21　ℓ=150mm 版厚測定の対応スペクトル

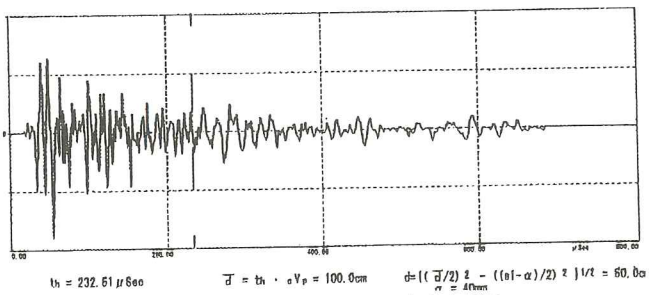


図2.1.3.22　ステップ関数型電圧を加えた場合の ℓ=150mm 版厚測定

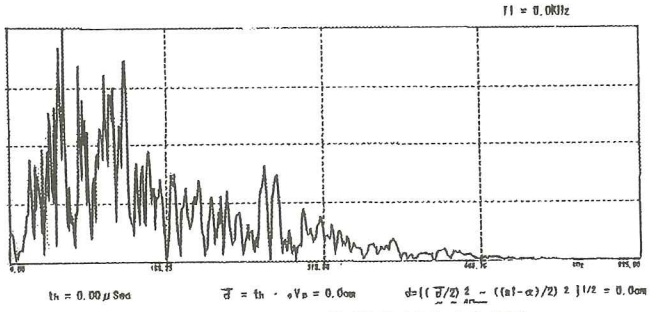


図2.1.3.23　ステップ関数型電圧を加えた場合の対応スペクトル

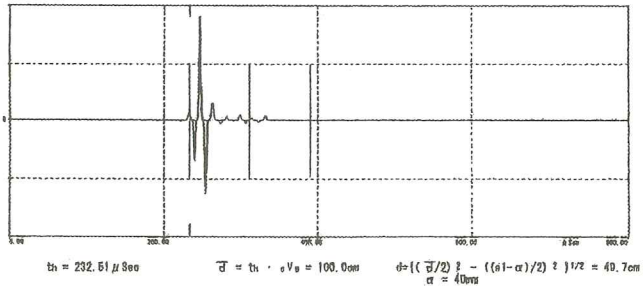


図 2.1.3.24　50mm 版厚測定

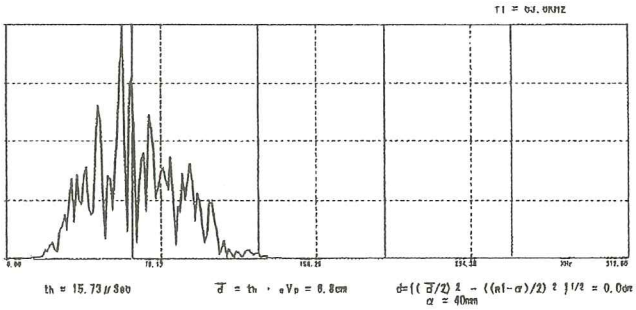


図 2.1.3.25　50mm 版厚測定の対応スペクトル

また、特殊な測定例として、版厚 300mm、幅 1200mm の版幅測定結果を図 2.1.3.26 に示す。50kHz 前後の狭帯域波である。極めて困難な計測であるが、遠方からの版幅反射波を明確に確認できる。但し、時刻の早い時点で生ずる 300mm の版厚が起因する散乱波、直接波、表面波の多重反射波を見かけ上、除去するために図示するタイムゲインコントロールを行っている。

なお、前記計測は、探触子距離 ℓ を 160mm～260mm の範囲で変動させる走査法を用いた。ℓ_2 と ℓ_1 の変動量が大きい場合の(2.1.3.6)式における補正係数 α については現在検討中である。前記 50kHz の設定は、中心周波数を徐々に低周波方向へ変動して行く毎に、波形の変化を視認し、波形後方に生ずる波の振幅が相対的に最も大きくなったと判断した時の周波数である。

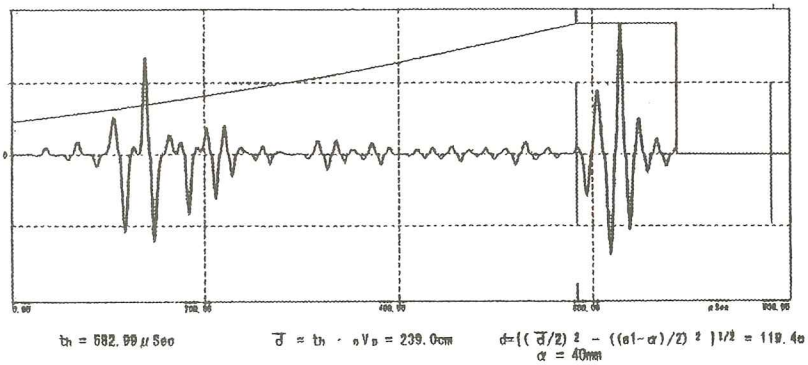


図 2.1.3.26　供試体 A の版幅測定結果

(10) 鉄筋かぶり厚、径の測定(巨視的探知理論を用いた方法)

図 2.1.3.27 は 300mm×300mm×300mm のコンクリートに図示する如く 4 本の 19mm 異形鉄筋をかぶり厚 50mm で配したものである。径 40 mm、共振振動数 500kHz の振動子よるなる 1 対の発信及び受信探触子を用いて、図 2.1.3.9 に示す走査法 (1) により 1～7 の測点で 2000 回の加算平均波を求めた。上記走査では、探触子間距離を ℓ =60～70 mm の間で変動させながら両探触子を配筋方向へ約 200mm の幅で行った。鉄筋からの反射波を取得するための、探知目標波が最も大きくなる最適周波数 f_0 は (2.1.3.6) 式より

$$f_0 = \frac{1}{2}\alpha \frac{{}_cV_p}{\frac{1}{2}\{(\ell_2 - \ell_1) + \phi\}} \qquad (2.1.3.6)$$

であったから、本コンクリートモデルの音速 cVP=4300m/秒、$\ell_2 - \ell_1$ =10 mm、ϕ =40 mm、α =1.24 を適用し 110kHz 前後とした。

前記加算平均波の収録において発信子に印加する電圧は 150V のステップ電圧であった。振動子が強制励

起されることより、0Hz 近傍から 1.5MHz までの成分を持つ加算平均波となっている。図 2.1.3.24 は前記 110kHz を中心周波数とする狭帯域成分波 $\tilde{G}(t)$ を示したものである。

反射成分波を視覚的に明確にするために $\tilde{G}^3(t)$ で表示している。なお、コンクリート音速は透過法で別途 4300m/秒と測定されている。測点 2、6 の上側鉄筋からの反射波の起生時刻に音速を適用し、かぶり厚が 490 mm（実測 500mm）となるのを確認願いたい。また、測点 3、4、5 でコンクリート底部からの反射波が、そして測点 3、5 で下側の鉄筋からの斜方向反射波が起生している。

上端鉄筋、下端鉄筋そしてコンクリート厚を同時に測定したことになる。

重要なことは、図 2.1.3.28 で 201 に示す時系列フィルタを全成分波に乗じている。コンクリートの様な散乱現象の大きい被探知材の場合、探知路程が長いと、及び高周波になればなるほど、超音波が大きく減衰する。このような問題に対処する 1 つの方法である。

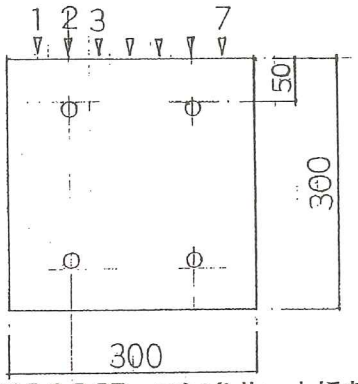


図 2.1.3.27　コンクリートにおける異形鉄筋の配置図

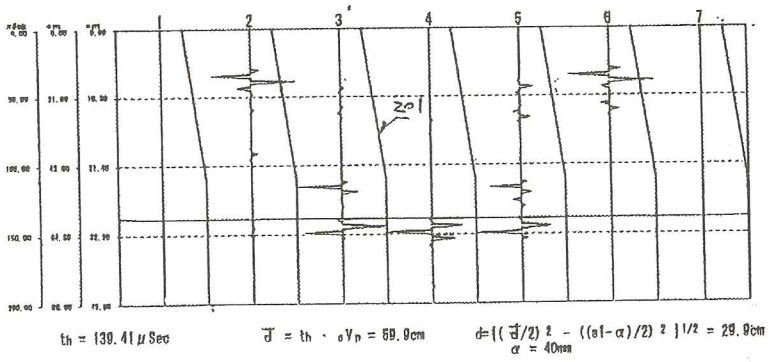
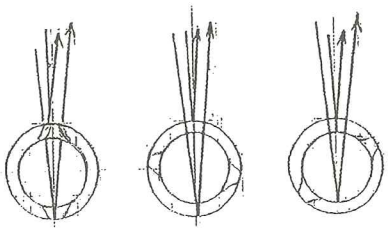


図 2.1.3.28　測定 1～7 における成分波

鉄筋径の測定は、高周波領域成分波を広帯域加算平均波より取り出すことで行う。

まず、鉄筋の存在に起因する波にどの様なものがあるかを説明する。図 2.1.3.29 は、これ等波の起生の概念を示すものである。



鉄筋上端／下端反射波



コンクリート内　　鉄筋内

鉄筋迂回波

図 2.1.3.29　鉄筋の存在に起因する波の発生

図2.1.3.29の鉄筋円周上を迂回/回折する波には、鉄筋内及びコンクリート内を伝達する2っがある。また、

上記迂回時モード変換でたて波がよこ波に、又はよこ波がたて波に変化する物理現象もある。この様な状況下、これ等起生波の内、その強度が大きい波を整理して示したものが表 2.1.3.1 である。

表 2.1.3.1　鉄筋を経路する波

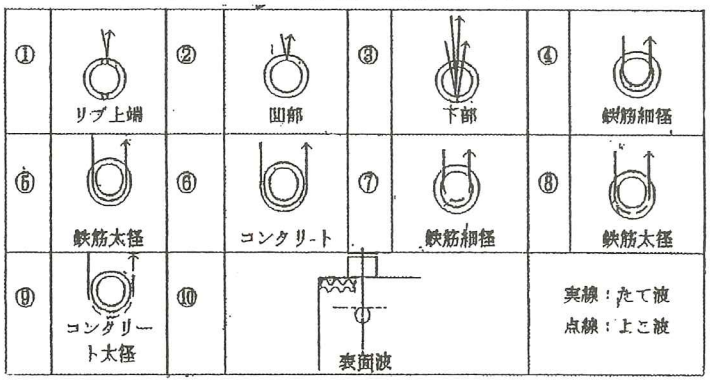


表 2.1.3.2　鉄筋径の算定

	起生時	算定式	径(mm) ①②はかぶり厚	備考
①	28	かぶり厚＝$\sqrt{(28\times4.3/2)^2-(65/2)^2}$	≒50.0	(たて波)
②	29	かぶり厚＝$\sqrt{(29\times4.3/2)^2-(65/2)^2}$	≒52.0	(たて波)
③	34	(③－①)×5.9／2	18.0	細径 (たて波)
④	37.6	(④－①)×5.9／π	18.2	細径 (たて波)
⑤	39.8	(⑤－①)×5.9／π	22.1	太径 (たて波)
⑥	44.2	(⑥－①)×4.3／π	22.0	太径 (たて波)
⑦	46	(⑦－①)×5.9×0.55／π	18.6	細径 (よこ波)
⑧	49	(⑧－①)×5.9×0.55／π	21.7	太径 (よこ波)
⑨	53.9	(⑨－①)×4.3×0.62／π	22.0	太径 (よこ波)
⑩	59.2	ℓ＝4.3×0.62×59.2／2	79.0	表面波・実測 80 mm

図 2.1.3.28 の測点 2 の加算平均波より、1300kHz を中心周波数とする広帯域成分波(600kHz～1800kHz)を取り出したものが図 2.1.3.30 である。同図上段左で第 1 カーソルが 19mm 異形鉄筋の太径(リブ先端)、上段右の第 1 カーソルが凹部からの反射波である。下段は、上段左の波の振幅を増幅表示したものである。起生波の多くは鉄筋の円周に沿って、鉄筋内を、あるいはコンクリート内を迂回して生じる波である。起生時刻を用いた鉄筋径の算定結果を表 2.1.3.2 に整理する。細径で 18mm 前後、太径で 22mm 前後と判断できる。19mm 異形鉄筋細径、太径の実値と高精度に一致している。なお、鉄筋が腐食しておれば、③④⑤⑥⑦⑧の波は理論的に生じないこととなる。

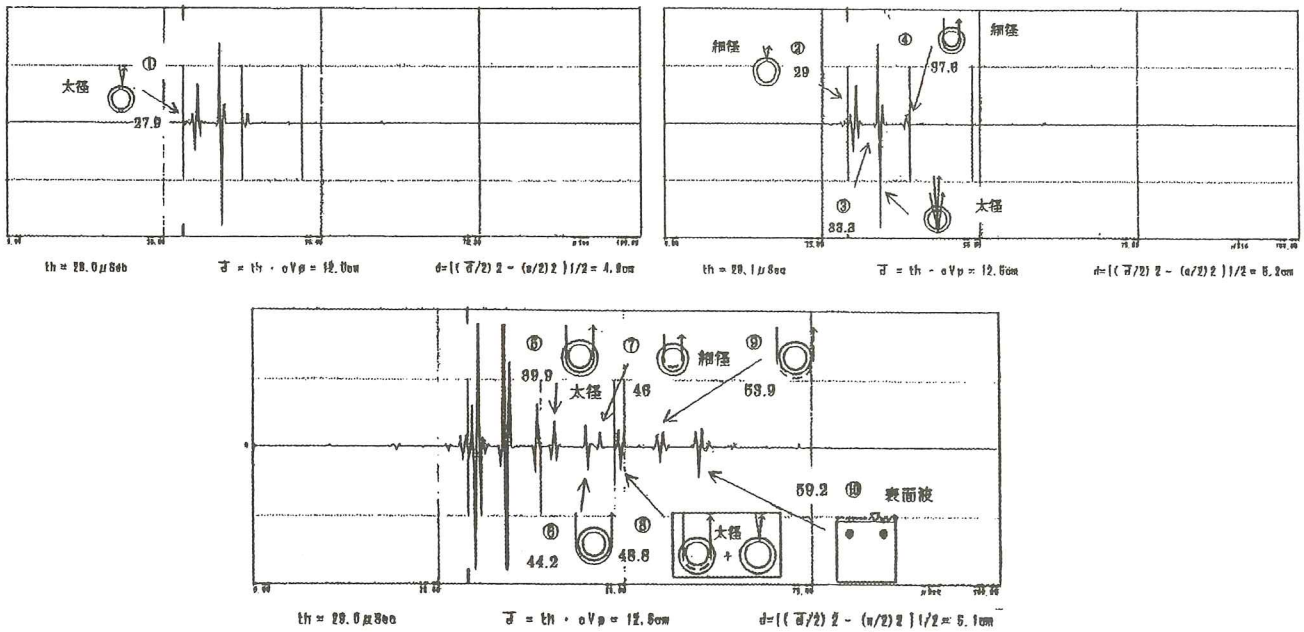


図 2.1.3.30　鉄筋かぶり厚及び径の測定

２．２　レーダ法

２．２．１　レーダＤ（NJJ-85A　ハンデイサーチ）

（１）測定原理[2.2.1.1)]

図-2.2.1.1 に示すように、電磁波をアンテナからコンクリート表面に向けて放射すると、その電磁波がコンクリートと電気的性質が異なる物質、例えば、鉄筋・空洞等との境界面で反射され、再びコンクリート表面に出て受信アンテナで受信される。この送信から受信に至るまでの時間から、反射物体までの深さを知ることができる。平面的な位置は、距離計を内蔵した装置を移動させることにより、位置情報を得ることができる。

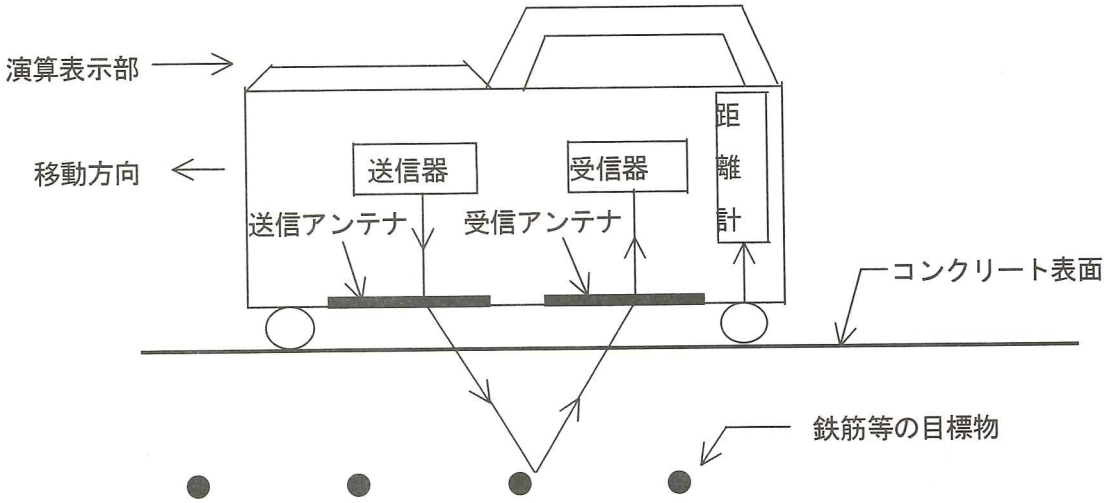


図-2.2.1.1　原　理　図

レーダ法はこのような原理から、広範囲のエリアを連続的に迅速に測定でき、且つ、空洞等の非金属も測定できる特徴を有する。また、コンクリートの浅い部分を高い分解能で探査する必要があるため、アンテナから放射される送信波には、幅のきわめて短いパルス状の電磁波が用いられる。**図-2.2.1.2** に鉄筋等からの反射波形の様子を示す。

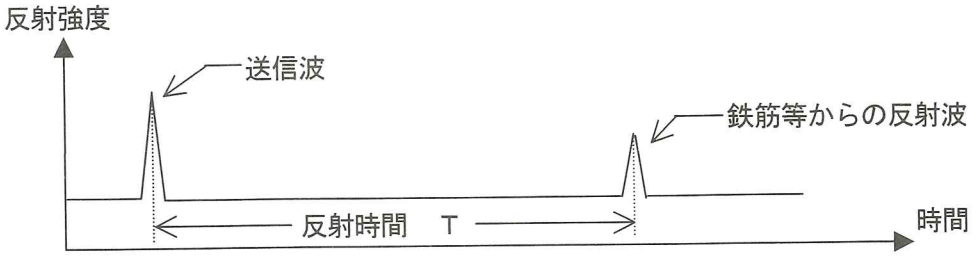


図-2.2.1.2　反射波形

コンクリート中の電磁波の速度 Vは、**式**（2.2.1.1）で表されるので、反射物体までの距離 Dは、送信時刻から反射波の受信時刻までの時間差 Tから**式**（2.2.1.2）で求めることができる。

$$V = C / \sqrt{\varepsilon_r} \qquad (2.2.1.1)$$

C：真空中（空気中）での電磁波の速度（3×10^8m/s）

ε_r：コンクリートの比誘電率（6～10程度）

V：コンクリート中の電磁波の速度

$$D=VT/2 \qquad (2.2.1.2)$$

D：コンクリート表面から反射物体までの距離

T：反射時間

式（2.2.1.1）、（2.2.1.2）から判るように、距離Dの精度は測定現場のコンクリートの比誘電率の精度に依存する。

（2）装置仕様

ハンデイサーチの仕様を、**表-2.2.1.1**に示す。

表-2.2.1.1　ハンデイサーチ仕様

項　　目	性　　能
測定対象物	鉄筋、塩ビ管、空洞等（位置や大きさで左右される場合あり）
かぶり厚さ	5～200mm（鉄筋径6mm以上で上端筋の場合）
表面方向分解能	80mm以上の間隔、但し、直径6mmの鉄筋が深さ60mmにある場合
測定距離	10m（1画面50cmで20画面分）
表示モード	垂直断面図（Bモード）、直接反射波形（Aモード）を同時表示
画像処理（測定時）	リアルタイム自動表面波処理、リアルタイムマニュアル表面波処理
画像処理（非測定時）	ﾏﾆｭｱﾙ表面波処理、ﾋﾟｰｸ処理、原画再生処理、固定表面波処理、減算処理
ディスプレイ	液晶表示、モノクロ8階調、バックライト機能あり
深度較正	コンクリートの比誘電率を6.2～10.7の範囲で7ステップの設定
内部記憶	10m分のデータを一時記憶
アンテナ走査速度	約40cm／s以下、速度アラーム機能あり
周波数	400～950MHz
出力機能	プリンタ用出力、RS-232C出力
温度範囲	0℃～ +40℃
電源	バッテリ動作、AC電源動作（オプション）
連続使用時間	約2時間（バッテリーパック　BP-3007-A1使用時）
構造	簡易防滴構造
寸法・重量	寸法：約160(W)× 150(H)× 210(D)mm、　重量：約1kg

（3）装置の構成

装置本体の外観は**写真-2.2.1.1**の通りであり、**図-2.2.1.1**に示すように、送・受信アンテナ、距離計、演算表示部が一体化され、コンパクト・軽量となっている。



写真-2.2.1.1　NJJ-85A　ハンデイサーチ外観図

（4）測定方法[2.2.1.2) 2.2.1.3)]

レーダ法は迅速且つ連続的に測定が行えるために、広い領域を短時間に調査できる特長を持っている。

以下に測定の詳細について述べる。

①装置走行方法

a．図-2.2.1.3 に示すとおり、測定開始点に装置の中心（▽印）を固定し、表面に沿って装置を走行させる。走行速度は約 40cm/秒が限度で、速度オーバーのときは警報音がなる。

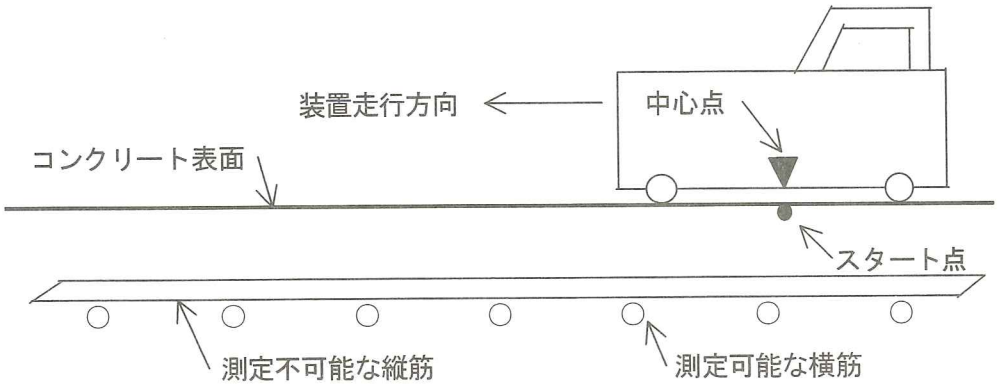


図-2.2.1.3　装置走行方法

b．装置の走行方向に対して直交している鉄筋が一番検出しやすく、逆に走行方向に対して並行している鉄筋は、検出できなくなる。この様子を図-2.2.1.3 に示す。

c．装置走行中に車輪を測定表面から浮かしたり、後戻りさせたり、蛇行させたりすると、測定距離誤差が発生し、目標物の正確な位置が測定できなくなる。

②かぶり測定方法

コンクリート内部の鉄筋等のかぶり厚さを高精度に測定するには、測定現場のコンクリートの比誘電率を知り、その値を装置に入力する必要がある。図-2.2.1.4 に示すように、縦軸の深さスケールの上部にある＋０が比誘電率の設定値を表示するもので、深度校正値と言う。

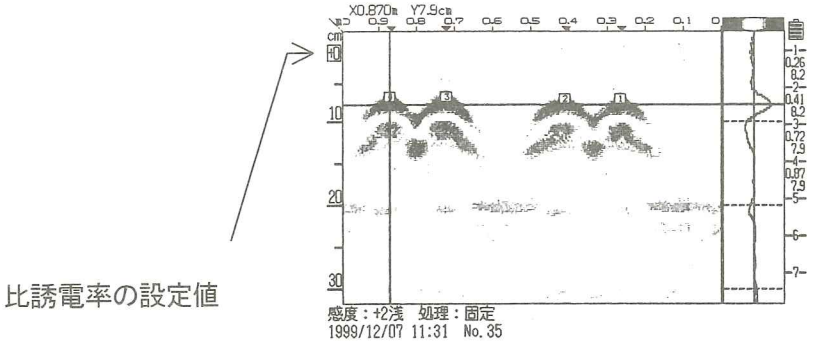


図-2.2.1.4　測定データ例

この深度校正値と比誘電率との関係を表-2.2.1.2 に示す。測定者は、この表に従って深度校正値を－３，－２，…，＋２，＋３のどれかに設定することにより、比誘電率を設定する必要がある。

表-2.2.1.2　深度校正値と比誘電率

深度較正値	−3	−2	−1	0	+1	+2	+3
比誘電率	6.2	6.8	7.4	8.0	8.9	9.8	10.7

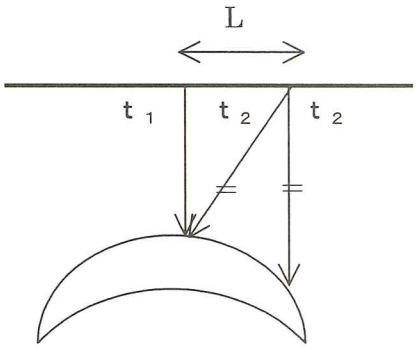
しかし、実際には、コンクリートの比誘電率は正確にはわからない場合が多いので、その時には、次の２つの方法で測定現場の比誘電率を推定する。

ａ．深度法及び厚さ法

ボーリング等で測定現場の一箇所の深さを実測するか、あるいは壁等の厚さのわかっている箇所を測定して、測定値が実測値に近い値になるように、深度校正値を調整する。

ｂ．双曲線法

図-2.2.1.5 に示すように、同じ鉄筋に対して、測定位置をＬだけずらして、得られた到達時間 t_1，t_2 から比誘電率 ε を式（2.2.1.3）から求める。



ε＝比誘電率

Ｃ＝空気中の電波の速度

$$\varepsilon = C^2(t_2^2 - t_1^2) / 4L^2 \qquad (2.2.1.3)$$

図-2.2.1.5　双曲線法の原理

③ピッチ測定方法

ａ．測定終了後、測定結果をプリンタに**図-2.2.1.6** の例のように記録する。

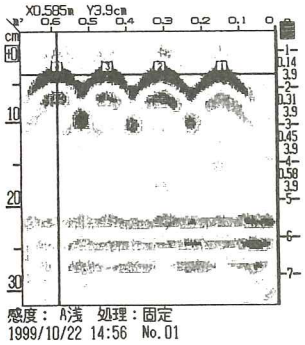
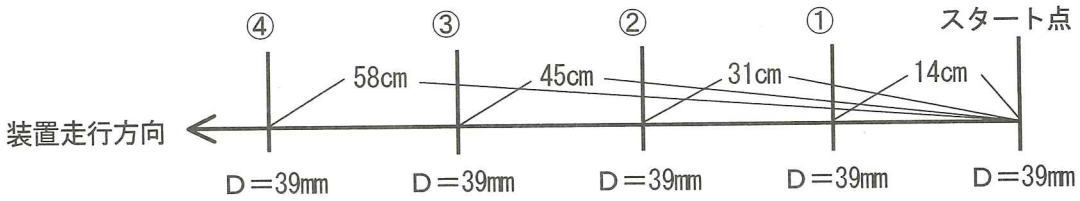


図-2.2.1.6　測定結果の記録例

ｂ．記録データから目標物の位置と深さを読取る。

ｃ．読取った数値を**図-2.2.1.7** のように測定表面にマークする。



＊Dは①～④の各々の地点のかぶりを示す

床等の平面図

図-2.2.1.7　現場での目標物位置のマーキング方法

④測定画像の読取り方法

鉄筋位置等に縦・横カーソルを移動し、マーカ・キーを押すことにより、カーソル交点にカーソルマークを表示し、液晶デスプレイ右側にカーソルマーク点の距離と深さを表示することができる。測定結果例の画像を図-2.2.1.8に示す。

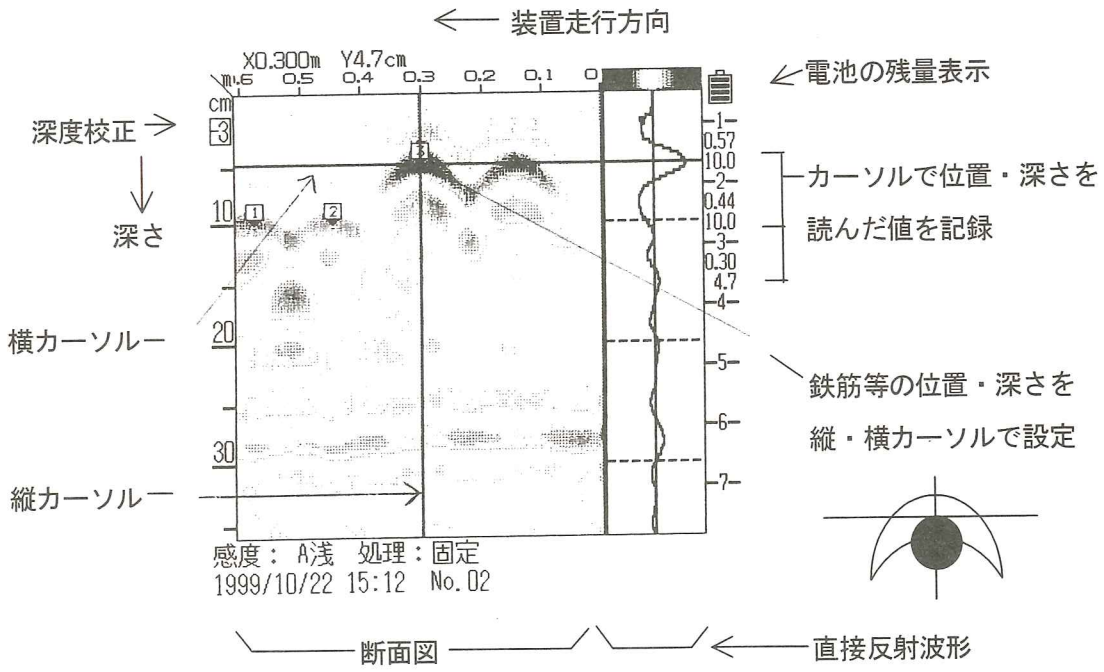


図-2.2.1.8　測定結果例の画像

参考文献

2.2.1.1)　レーダ法によるコンクリート内部の非破壊検査法：第三回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集、日本非破壊検査協会編、pp.98～170、11.1990

2.2.1.2)　日本非破壊検査協会編：コンクリート構造物の非破壊試験法、養賢堂出版、pp.98～110、12.1994

2.2.1.3)　コンクリート構造物の非破壊検査・診断技術、（株）技術情報協会出版、pp.290～303、1.2000

2.2.2　レーダＥ(地下レーダー)

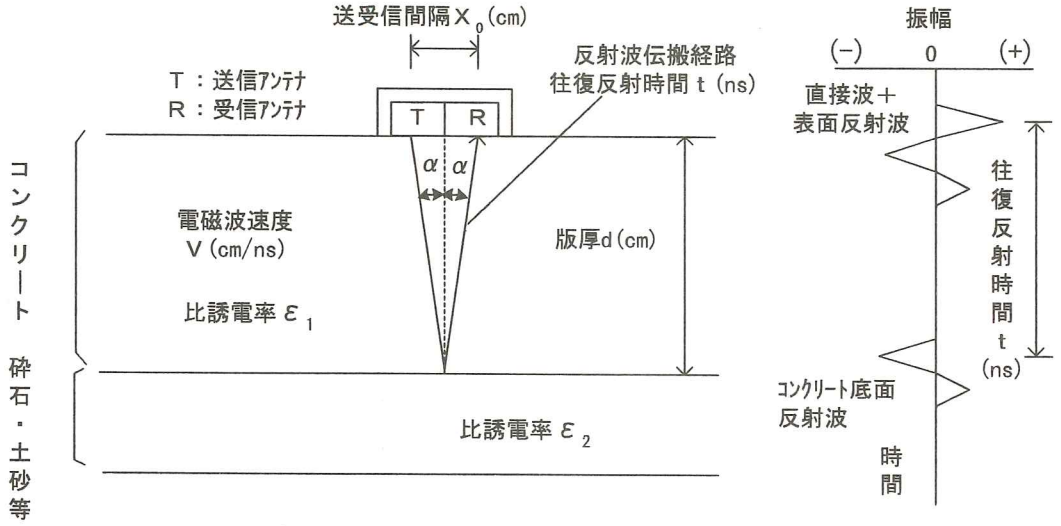
（1）　測定原理

電磁波は異なる比誘電率の媒質の境界で反射する性質があり、コンクリート底面の反射波を捉えて版厚を求めることができる。コンクリート版における測定と波形の摸式を**図－2.2.2.1**に示す。

すなわち、送信アンテナＴから放射された電磁波は減衰・拡散しながらコンクリート中を伝搬するが、コンクリート底面に達した時、反射波を生じ、それが受信アンテナＲに捉えられる。この時、入射波に対する反射波の振幅比は近似的に式**(2.2.2.1)**に示すような反射係数Ｒで表される。

$$R=(\varepsilon_1^{0.5}-\varepsilon_2^{0.5})/(\varepsilon_1^{0.5}+\varepsilon_2^{0.5}) \qquad (2.2.2.1)$$

ここで、ε_1、ε_2は各々コンクリート、砕石あるいは土砂の比誘電率であり、コンクリートでは材質と含水状態により**5～14**、砕石や土砂では種別と含水状態によって**7～25**になることが多い。



図－2.2.2.1　コンクリート版の測定と波形摸式

波形摸式上では、まず空中及びコンクリート表面を送信から受信アンテナへ伝わる直接波や表面反射波が現れ、コンクリート中での往復反射時間の経過後にコンクリート底面からの反射波が現れる。往復反射時間をｔ**(ns)**、電磁波速度を**V(cm/ns)**、送信アンテナと受信アンテナの間隔**X0(cm)**とおくと、版厚をｄ**(cm)**は式**(2.2.2.2)**によって求められる。

$$d=\{(V\cdot t)^2-X_0^2\}^{0.5}/2 \fallingdotseq V\cdot t/2 \qquad (2.2.2.2)$$

式(2.2.2.2)の内、ｔは測定値であるから電磁波速度Ｖが分かれば版厚を求めることができる。

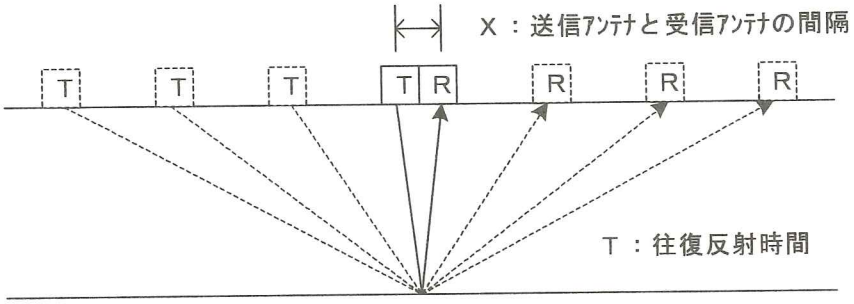
コアリング結果を利用しない電磁波速度の求め方には次のような３通りの方法がある。この内、ワイドアングル法が最も一般的である。

＜ワイドアングル法＞

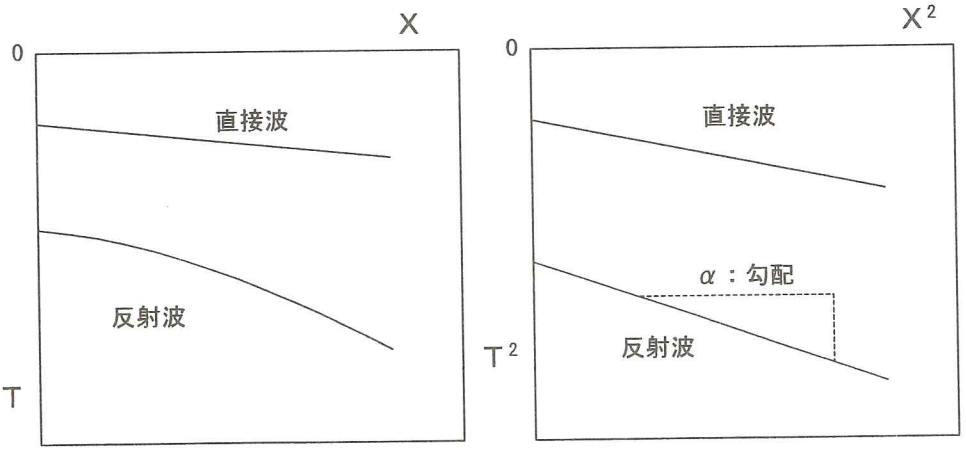
ワイドアングル法の測定方法を**図－2.2.2.2** に示す。ワイドアングル法では送信アンテナＴと受信アンテナＲの２台を使用し、測定点を中心に等距離づつ両者の間隔Ｘ(cm)を拡大しながら、往復反射時間Ｔ(ns)を測定する。

その時、Ｘ～Ｔ関係上では**図－2.2.2.3** の左図に示すように、直接波は直線状、コンクリート底面からの反射波は双曲線状になる。次に、右図に示すようにそれらのX^2～T^2関係図を作成すると反射波も直線状になり、勾配αから式(2.2.2.3)により電磁波速度Ｖ(cm/ns)が求まる。

$$V = 1 / \alpha^{0.5} \qquad (2.2.2.3)$$



図－2.2.2.2　ワイドアングル法の測定方法



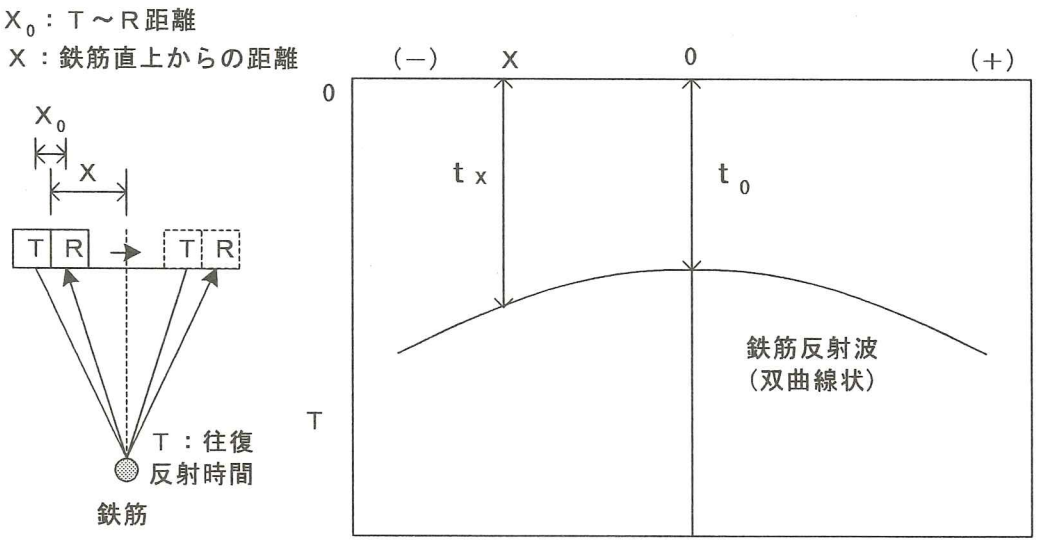
図－2.2.2.3　ワイドアングル法のＸ～Ｔ関係、X^2～T^2関係

＜双曲線法＞

双曲線法の測定方法と鉄筋反射波のＸ～Ｔ関係図を**図－2.2.2.4** に示す。

コンクリート中に鉄筋がある個所で、送受信アンテナを連続的に移動しながら反射波を測定すると、電磁波がコンクリート中で広がる関係で、右図のような双曲線状の反射波が求まる。ここで、双曲線頂点(鉄筋の直上における反射波に相当)における往復反射時間をt_0(ns)、そこから距離Ｘ(cm)における往復反射時間をt_x(ns)とし、送信アンテナと受信アンテナの間隔をX_0(cm)とおくと、電磁波速度Ｖ(cm/ns)は式(2.2.2.4)から求めることができる。

$$V t_x = \{(X - X_0/2)^2 + (V^2 t_0^2 - X_0^2)/4\}^{1/2} + \{(X + X_0/2)^2 + (V^2 t_0^2 - X_0^2)/4\}^{1/2} \quad (2.2.2.4)$$

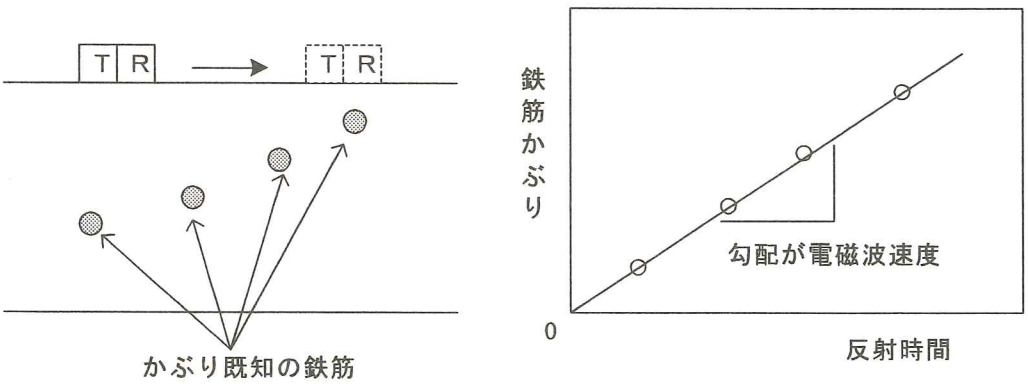


図－2.2.2.4　双曲線法の測定方法と鉄筋反射波のX～T関係

＜深度法＞

深度法の測定方法とかぶり～時間関係を図－2.2.2.5に示す。

深度法は異なる深度に複数の鉄筋が埋設され、それらのかぶりが既知である場合に適用する方法で、右図のように測定値である反射時間とかぶりの関係から、その勾配を電磁波速度として求める。



図－2.2.2.5　深度法の測定方法とかぶり～反射時間関係

（2）装置仕様

使用した測定装置の仕様を表－2.2.2.1に示す。

表－2.2.2.1　使用機器一覧

機器名	仕　様	台数	製作所
地下ﾚｰﾀﾞｰ測定器 SIR-2	ｱﾝﾃﾅ接続ﾁｬﾝﾈﾙ：1 時間ﾚﾝｼﾞ：5～20,000ns 送信周波数：最大64kHz ｽｷｬﾝﾚｰﾄ：8～64 ｽｷｬﾝ/sec A/D ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞﾚｰﾄ：256、512、1024、2048/ｽｷｬﾝ ﾃﾞｰﾀ長：8または16ﾋﾞｯﾄ 増幅率：最大100dB 記録表示：ﾗｲﾝｽｷｬﾝ、ｳｲｸﾞﾙ、ｵｼﾛｽｺｰﾌﾟ I/O：ﾊﾟﾗﾚﾙ、ｼﾘｱﾙ ﾊｰﾄﾞﾃﾞｨｽｸ：450MB 電源：12VDC、36W 寸法・重量：29×27×14cm、6kg	1台	米国GSSI社
1500MHz ｱﾝﾃﾅ	ｱﾝﾃﾅ型式：ﾀﾞｲﾎﾟｰﾙ 中心周波数：1500MHz 寸法・重量：3.8×10×16.5cm、1.8kg	1台	同上
1000MHz ｱﾝﾃﾅ	ｱﾝﾃﾅ型式：ﾀﾞｲﾎﾟｰﾙ 中心周波数：1000MHz 寸法・重量：3.8×10×16.5cm、1.8kg	1台	同上
900MHz ｱﾝﾃﾅ	ｱﾝﾃﾅ型式：ﾀﾞｲﾎﾟｰﾙ 中心周波数：900MHz 寸法・重量：8×18×33cm、2.3kg	2台	同上
400MHz ｱﾝﾃﾅ	ｱﾝﾃﾅ型式：ﾀﾞｲﾎﾟｰﾙ 中心周波数：400MHz 寸法・重量：30×30×17cm、5kg	1台	同上
その他	接続ｹｰﾌﾞﾙ(L=30m)、ﾊﾝﾄﾞﾏｰｶｰ	1式	

（3）装置特徴

装置の特徴は次のとおりである。

①ＳＩＲ－２

○フルデジタル方式

パラメータ設定、測定、記録、再生をフルデジタルコントロール方式で行う。

○豊富なパラメータ設定が可能

時間レンジ、フィルタ、増幅率、サンプリグレート、スキャンレートのような測定パラメータを目的、現場条件に応じて広範囲に設定できる。

○測定記録をハードディスクに保存

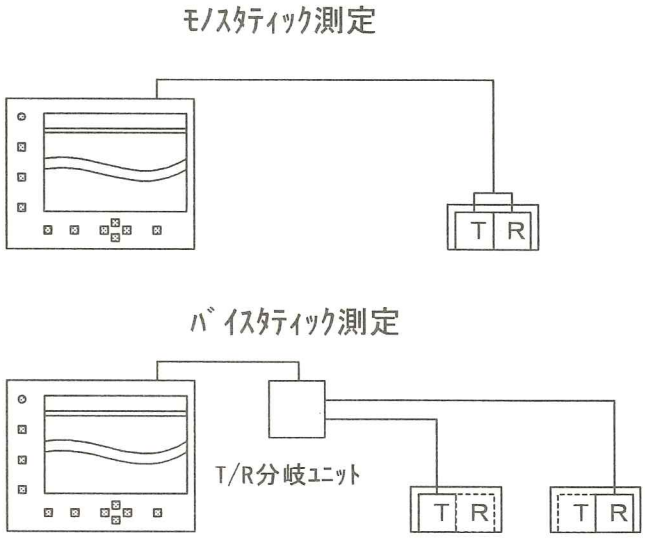
記録は測定パラメータを表すヘッダファイルがあり、次に８ビットまたは１６ビットのバイナリー形式の波形記録が続く。ハードディスク内の記録はパラレル転送によりパソコンに取り込み、解析に供する。

○多種類のアンテナを接続可能

表—2.2.2.1 中のアンテナ含めて、10 種類以上のアンテナを接続できる。

○モノスタティック及びバイスタティック測定が可能

図—2.2.2.6 に示すように、モノスタティック及びバイスタティック測定が可能であり、通常測定はモノスタティックで、前出のワイドアングル測定はバイスタティック測定により行う。



図—2.2.2.6　モノスタティック測定とバイスタティック測定

②アンテナ

○送受信一体型

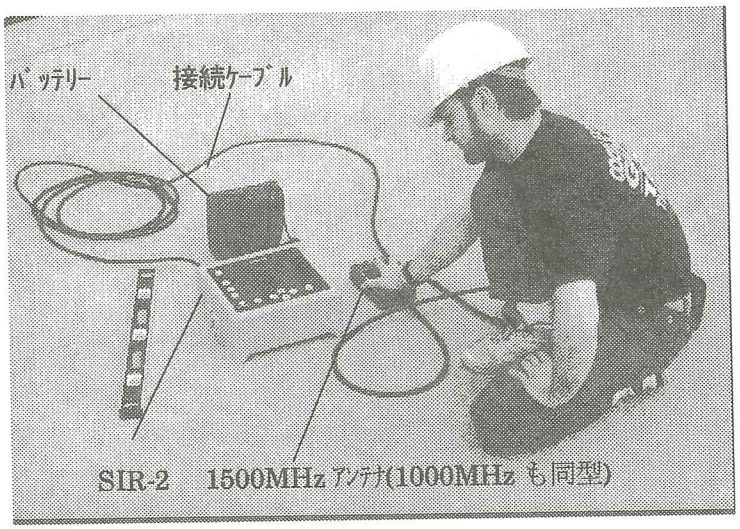
一台の函体の中に送信ユニットと受信ユニットがあり、それだけでモノスタティツク測定を行うことができ、２台使用することによりバイスタティック測定も可能である。

○周波数の異なるアンテナが多種類

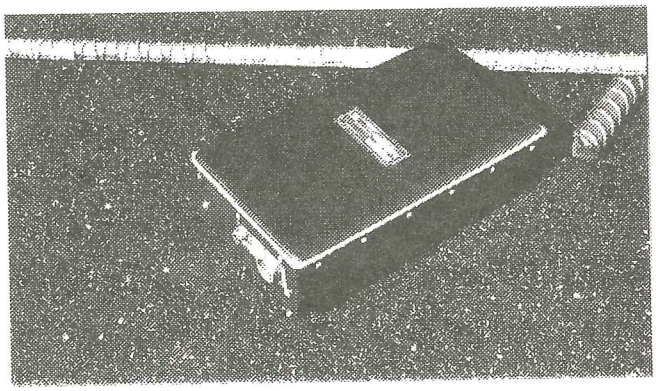
電磁波の性質として、周波数が高いほど分解能は高いが測定可能な版厚が薄く、逆に周波数が低いほど分解能は低いが測定可能な版厚が大きくなる。従って、版厚の大きさ毎に測定可能なアンテナの中でできる限り高周波なものが望ましく、多種類の中から選択できる点が有利である。

（4）装置外観

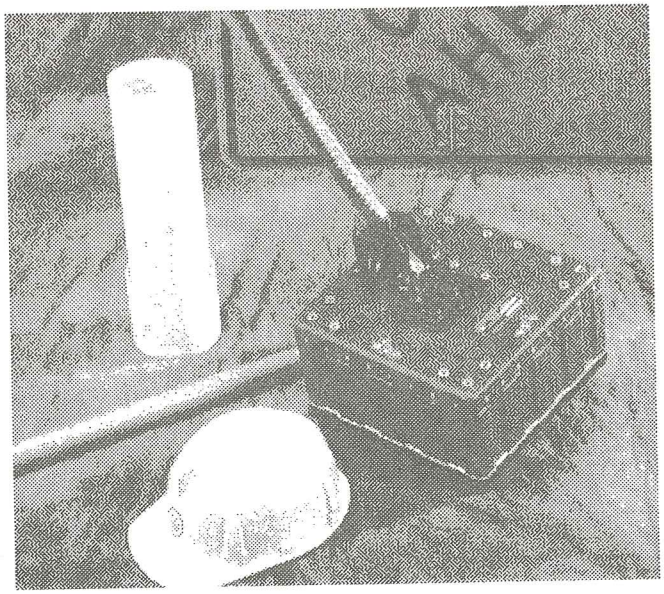
使用した測定器の外観を図—2.2.2.7～図—2.2.2.9 に示す。装置は測定器本体(SIR-2)、アンテナ(1500MHz、1000MHz、900MHz、400MHz)、接続ケーブル及び電源(バッテリー)から構成されている。



図－2.2.2.7　SIR-2、1500MHz アンテナの外観



図－2.2.2.8　900MHz アンテナの外観



図－2.2.2.9　400MHz アンテナの外観

2．3　衝撃弾性波法

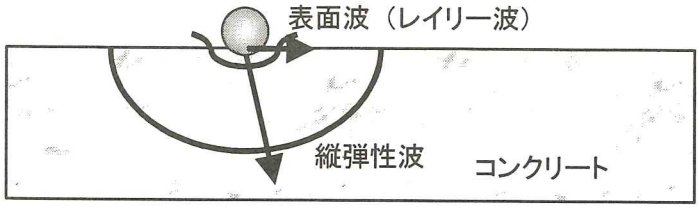
2.3.1 弾性波 G（Knocker）

2.3.1.1 測定原理

（1）発生する弾性波の種類について

衝撃弾性波法は、コンクリート表面を鋼球またはハンマーで打撃する単純な振動入力方法であり、コンクリート表面の劣化の影響を受けにくく、簡易にかつ再現性のある振動を入力できる。また、発生する振動は数 kHz と波長が長いで、コンクリート内部の鉄筋や粗骨材の影響を受けずに、コンクリートの底面で反射する波動が観測できるといった長所がある。

打撃によりコンクリートに発生する波動の模式図を図－2.3.1.1 に示す。主にコンクリート表面を平面的に伝搬する表面波（レイリー波）と、内部を球面状に伝搬する縦弾性波が発生し、表面では両者の振動が複合された振動が測定される。



図－2.3.1.1　コンクリートに発生する弾性波

コンクリートには打撃鋼球とコンクリート表面との接触により振動が発生するので、発生する振動の周期は鋼球とコンクリートの接触時間に対応したものとなる。例えば、鋼球の質量が大きくなると鋼球接触時間が長くなるので、入力振動の周期は長く、振動数は低くなる。この振動が表面を伝搬する表面波では、振動数は打撃する鋼球の質量により変化する性質となる。

一方、縦弾性波でも入力振動が内部を球面状に伝搬するが、縦弾性波にはコンクリート底面・表面で反射し、厚さ方向に多重反射する成分（反射波と言う）があり、反射波は厚さ方向の往復時間を周期とする振動成分を持つ。つまり、この多重反射に起因する反射波の振動数はコンクリートの厚さによって変化する。

以上より、測定振動から反射波の振動数 f_0 と弾性波速度 V_P が求まればコンクリートの厚さ D は

$$D = \frac{V_P}{2f_0} \qquad \cdots \qquad \text{(式 2.3.1.1)}$$

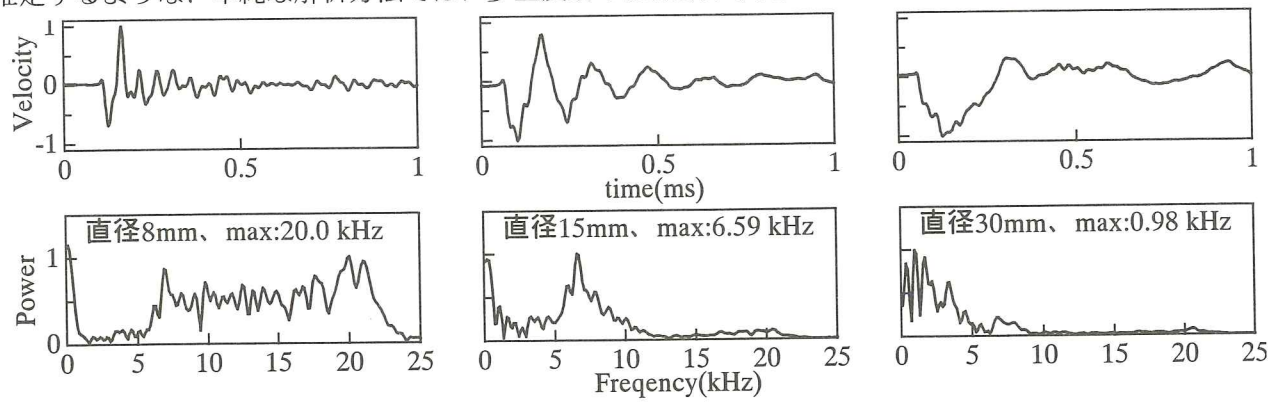
により計算できる。

（2）反射波振動数の測定方法

1）表面波の影響について

図－2.3.1.2 に厚さ 300mm のコンクリートを直径 8,15,30mm の鋼球で打撃した時の測定波形と、振動数解析として測定波形を FFT 解析した結果を示す。測定波形は表面波と縦弾性波が複合された振動となるが、図－2.3.1.2 から打撃する鋼球質量によりスペクトル分布が大きく変化していることが分かる。すなわち、鋼球質量によって振動数が変化する表面波および縦弾性波の振幅が、往復時間を周期とする多重反射成分の振幅より大きいと考えられる。これから、測定波形を FFT 解析し、最大となる振動数から多重反射の振動数を

推定するような、単純な解析方法では、多重反射の振動数が決定できないことが示される。



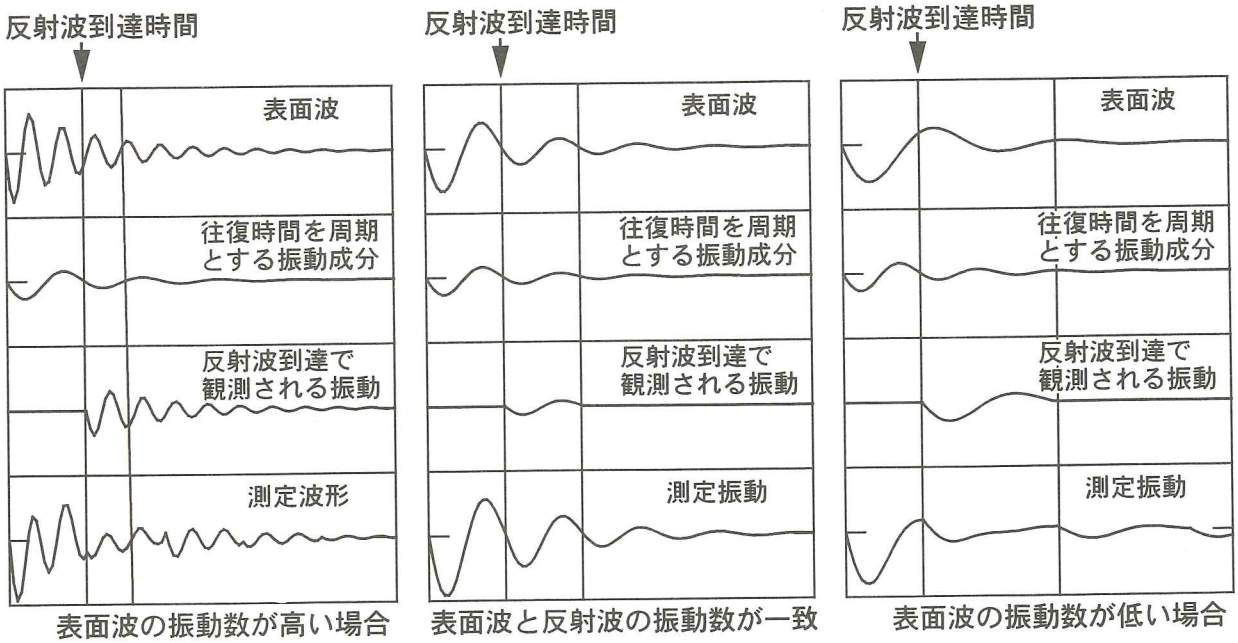
図－2.3.1.2 各鋼球直径での測定振動（上図）とパワースペクトル（下図）

2）多重反射波の性質

縦弾性波は表面波と同じ振動数成分を持つ波動がコンクリート内部に伝搬したものである。弾性波はその伝搬過程で減衰するものの、波形の類似性は保持される。これから、縦弾性波がコンクリート底面で反射し、表面に到達すると、表面では振動入力時の表面波と同じ波形を持つ振動が再度観測されることになる。

打撃する鋼球の直径により表面波の振動数は変化するが、縦弾性波の到達時間周期は変化しない。各打撃鋼球直径での反射波到達時の測定波形の模式図を図－2.3.1.3 に示す。

縦弾性波の往復時間に起因する振動数と表面波の振動数がほぼ一致する場合、表面波の振幅がほぼ0になった時に反射波が表面に到達し、表面波と類似した波形を持つ振動が再度観測されることになる。
一方、両者の振動数が一致しない場合、反射波が到達した時の表面波の振幅は0ではない。表面波は、反射波到達で観測される振動と位相が一致せず、更に、往復時間に起因する振動と入力の振動数は一致しない。
従って、反射波が到達した時に測定した振動波形は、入力振動の波形とは異なったものとなる。



図－2.3.1.3 反射波到達時の複合振動模式図

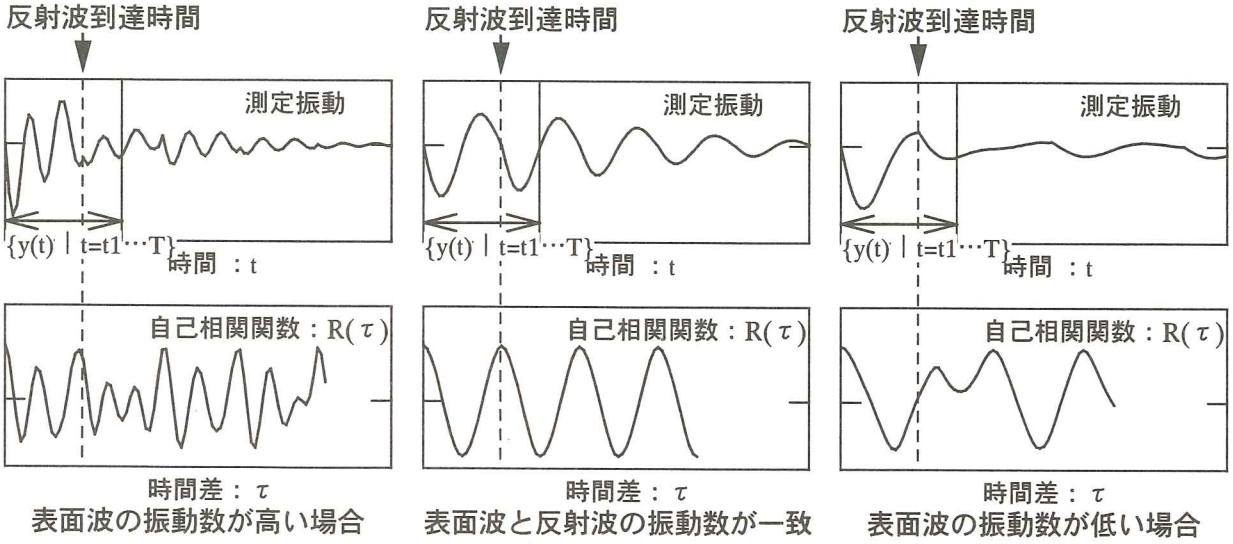
3）自己相関関数を用いた解析方法

振動波形を$y(t)$とし、$y(t)$とある時間τ後の振動波形$y(t+\tau)$との相関係数$R(\tau)$を

$$R(\tau)=\frac{\sum_{t=t1}^{t1+T}\left\{y(t)-\overline{y(t)}\right\}\left\{y(t+\tau)-\overline{y(t+\tau)}\right\}}{\sqrt{\sum_{t=t1}^{t1+T}\left\{y(t)-\overline{y(t)}\right\}^2\sum_{t=t1}^{t1+T}\left\{y(t+\tau)-\overline{y(t+\tau)}\right\}^2}} \qquad \text{(式 2.3.1.2)}$$

とする。（$t1$は測定振動での振動開始時間、Tは$y(t)$の初期振動の周期より長い時間。）

図－2.3.1.4に各打撃鋼球で、各時間τ毎に相関係数$R(\tau)$を求めた模式図を示す。



図－2.3.1.4 各打撃鋼球直径での自己相関関数模式図

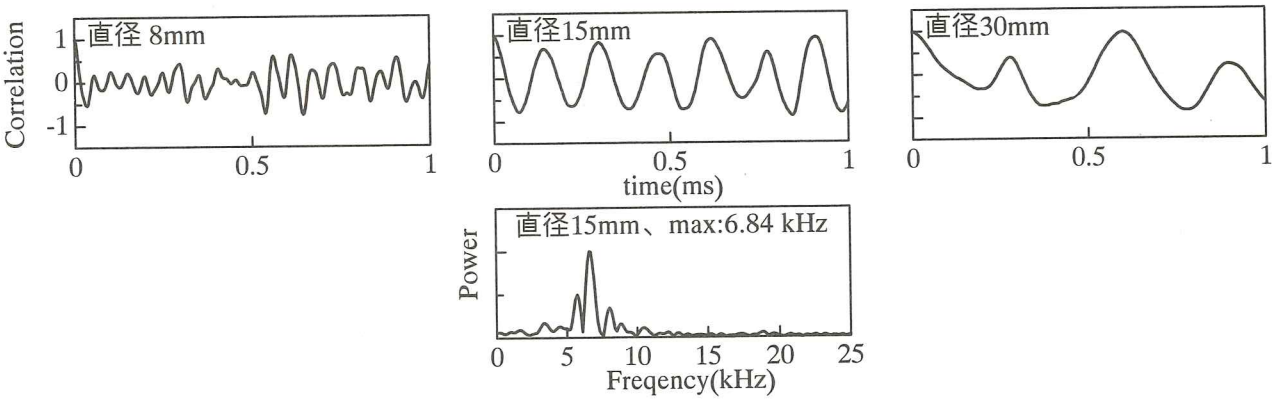
縦弾性波が1往復する時間を$\tau 1$とすると、縦弾性波の往復時間に起因する振動数と表面波の振動数が一致している場合では、$y(t)$と$y(t+\tau 1)$は前述の通り類似し、$R(\tau 1)$は極大となる。

さらに、縦弾性波はコンクリート内部で2, 3回と一定時間間隔で往復し多重反射するので、この一定時間間隔$\tau 2, \tau 3$,…毎に$R(\tau)$は極大値をとる。

従って、$R(\tau)$（自己相関関数）を求めると、縦弾性波の往復時間に起因する振動数と表面波の振動数が一致している場合の自己相関関数は、一定時間間隔で極大値をとる正弦波に近い形状となり、その周期は反射波の往復時間を示す。

一方、両者の振動数が一致しない場合では、前述の通り、振動波形$y(t)$と$y(t+\tau 1)$は類似しない。また、τが表面波の周期の倍数となる時間においても極大となり得るので、自己相関関数は正弦波状とはならない。

以上より、測定波形の初期部分を用いて自己相関関数を求め、自己相関関数が正弦波に類似する打撃条件、すなわち鋼球質量を選定し、この時の自己相関関数をFFT解析すれば多重反射の振動数を抽出できることが示される。



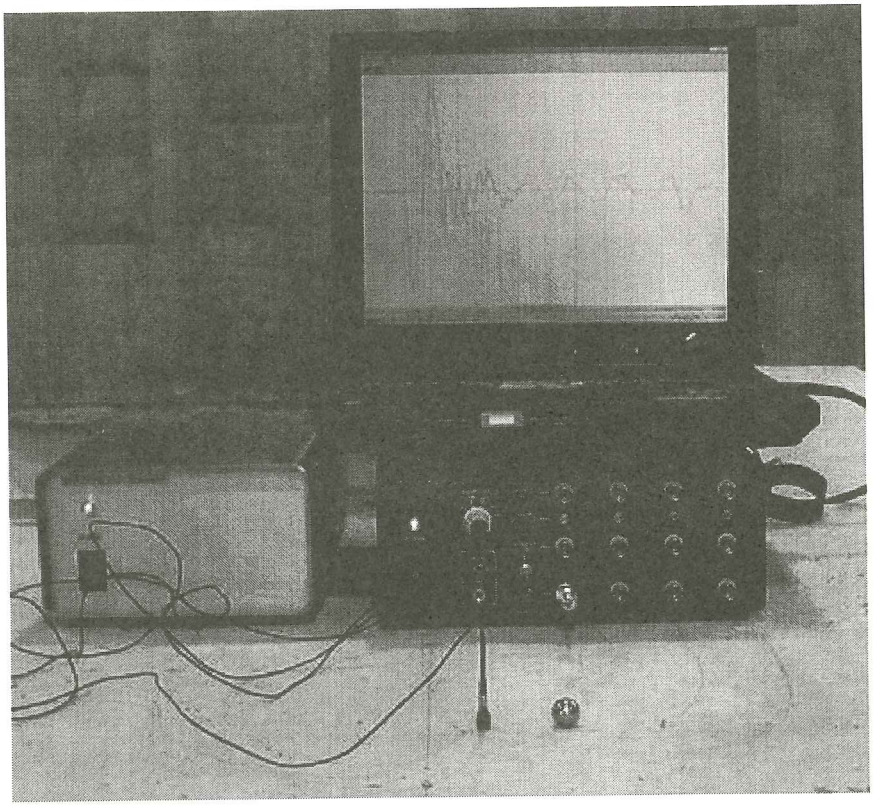
図－2.3.1.5 自己相関関数（上図）とパワースペクトル（下図）

図－2.3.1.5 上図に、図－2.3.1.2 での測定振動の自己相関関数を求めた結果を示す。直径 8mm では、相関係数は 0.3 程度と大きくならない。直径 30mm では、鋼球とコンクリートが接触している間に反射波が戻ってくるため、自己相関関数波形の中途に極大となる時間が見られる。直径 15mm では、周期一定で相関係数も大きいので反射波の振動数と表面波の振動数が一致していると判断できる。この自己相関関数を FFT 処理し、反射波の振動数を求めると 6.84kHz となる（図－2.3.1.5 下図）。

2.3.1.2 測定方法

（1）測定手順

測定器材の構成を図－2.3.1.6 に示す。本法では前項に示した測定原理に基づき、次の手順で反射波の振動数を求め、コンクリートの厚さを測定する。



図－2.3.1.6 測定器材の構成

①コンクリート表面に圧電型加速度計（センサー）（測定振動数 30ｋHz）を設置する。

②センサーの近傍を重さの異なる数種類の鋼球（直径 10mm～63mm）で打撃する。

③測定器 Knocker により、コンクリート表面に発生する振動をデジタル化し、取り込む。

④測定振動の初期部分を用いて、自己相関関数を求め、FFT 処理により反射波の振動数 f_0 を決定する。

⑤弾性波速度 V_P※を用いて、コンクリートの厚さ D を（式 2.3.1.1）により計算する。

※弾性波速度の測定方法は、3.6.1.4 に示す本研究委員会での実験成果により確立された。この実験の実施前では、弾性波速度 V_P は仮定値を用いて厚さを測定した。

（2）装置の仕様

本装置は、次によって構成される。

1) 入力アンプ部	a)PCB 加速度計用 ICP 入力 b)アナログ入力(入力抵抗 10kΩ) 入力チャンネル数：4ch 平衡入力 周波数範囲：0.1Hz ～30kHz -18dB/Oct. 増幅率：入力±1V に対して A/D 変換電圧の 1/2 アンプ増幅率は、時間可変倍率 1, 20 倍 ダイナミックレンジ：72dB 以上
2) アナログ出力部	出力信号：力信号をモニター出力 信号レベル：±1V 出力抵抗 100Ω以下
3) A/D 変換部	速度：1, 2, 4, 10 μs ch 数：4ch 精度：12bit 入力：±5V P－P サンプルホールド：全 ch 同時サンプルホールド サンプル数：8192/ ch トリガー：プレトリガー 長さ 50% トリガーレベル：±50%以下 トリガーソース：入力 1ch
4) データ記憶部	
5) コントロールシステム	Windows98 のアプリケーションとして制御システムを作動させる。
6) 機能	測定波形の表示 自己相関関数 FFT によるパワースペクトル解析

2.3.2 弾性波 H （インパクトエコー）

2.3.2.1 装置の構成および仕様

本装置の主要部は、弾性波を感知する円筒型の受信センサ（ハンドヘルド・トランスデューサ・ユニット)、A/D変換部（アナログデジタル・アクイジションシステム)、ノートブックコンピュータ、装置の操作制御やモニターを行い数値やグラフでデータを表示するソフトウェアから構成されている。写真-2.3.2.1は、2本の受信センサを300mmのスペースサーバで固定し、表面弾性波速度を測定するための構成である。内部を伝搬する往復弾性波の速度測定は、この受信センサを1本もちいて行う。

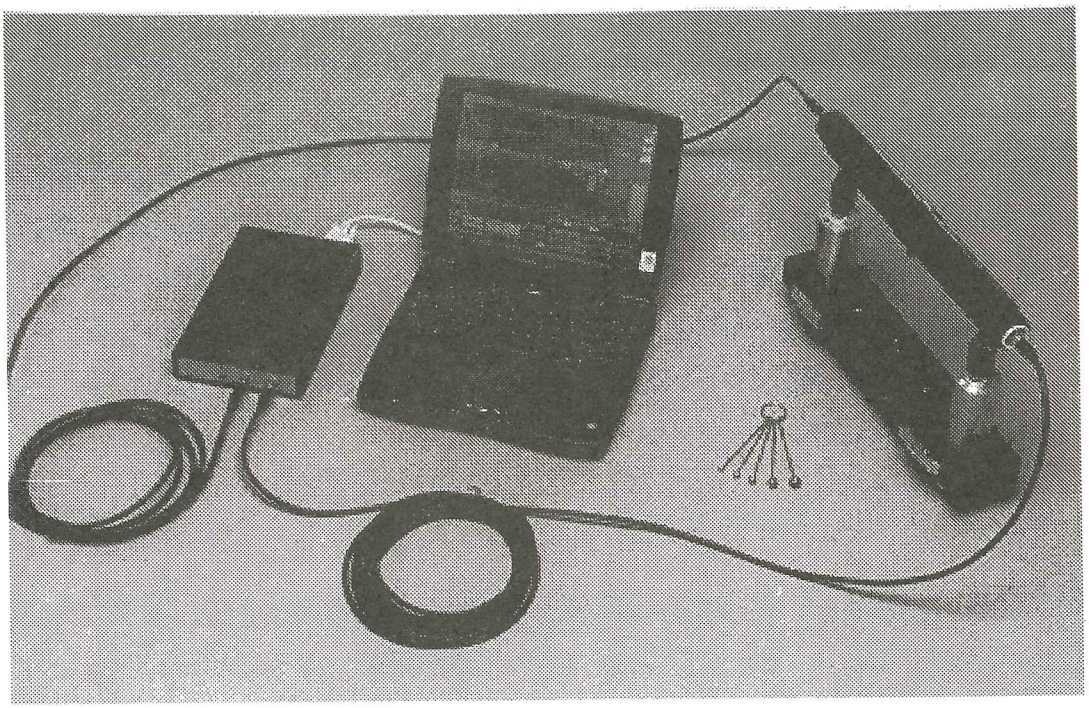


写真-2.3.2.1　インパクトエコー装置

受信センサ部は、直径50mm×長さ170mmの円筒内に圧電型クリスタルやオンボードプリアンプなどを一体で内蔵し、重量約１kgと野外測定を考慮してコンパクトにまとめてある。A/D変換部は、2チャンネルとも受信センサのアナログ信号を最大10,000/秒でサンプリングして12ビットのデジタル変換をおこない、コンピュータのメモリに転送する。

2.3.2.2 測定原理

本法では、コンクリート供試体の表面を鋼球で打撃（Impact）し、供試体に機械力学的衝撃力をあたえる。この衝撃力によって供試体内部に過渡的な弾性波が発生する。この弾性波は、図-2.3.2.1のように、半球状に縦波（Ｐ波）および横波（Ｓ波）として3次元的に供試体内部を伝わり、またレイリー波のように表面波として2次元的に表面を伝わる。したがって、供試体表面では、Ｐ波、Ｓ波および表面波の振動

が観測される。供試体内部を半球状に伝搬したＰ波とＳ波は、内部欠陥（例えば、ひびわれや空隙）や供試体の外縁で反射し、図-2.3.2.2のようにこの反射が繰り返される。

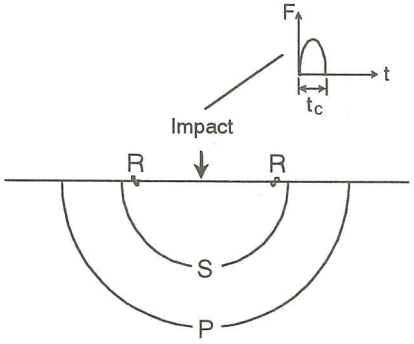


図-2.3.2.1 発生した弾性波の伝搬

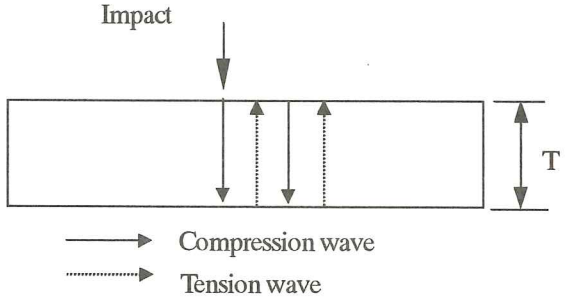


図-2.3.2.2 供試体両端からの多重反射

本法では、供試体内部を伝搬し両端で多重反射する往復弾性波を、打撃点の付近に置いた受信センサで測定する。Ｐ波のほうがＳ波より到達時間がずっと早いので、本法では主としてＰ波を扱う。受信センサで測定した往復弾性波のＰ波の振動は、ＦＦＴによって時間領域から周波数領域に変換し解析される。振動を支配する周波数は、周波数スペクトルのなかで大きな振幅のピークをもつものとして現れる。図-2.3.2.2に示す供試体内部を伝搬し上端と下端間で多重反射する往復弾性波のＰ波の速度をC_pとし、周波数をf_pとすると、供試体の厚さＴは次式であらわされる。

$$T = \frac{C_P}{2f_p} \qquad (2.3.2.1)$$

この往復弾性波は、振動の厚さモードと呼ばれる共振状態を励起し供試体を変位させる。供試体の変位の振動は、共振厚さモードによって生成される周期的なパターンに支配される。このモードは、図-2.3.2.3に示すように、コンクリート版の厚さ方向の膨張と収縮の繰り返しからなりたっている。このいわゆる厚さ周波数fとよばれる単一の大きな振幅ピークを持つスペクトルは、次式であらわされる。

$$f = 0.96\left(\frac{C_p}{2T}\right) = \frac{0.96C_p}{2T} = \frac{C_{p,plate}}{2T} \qquad (2.3.2.2)$$

ここで、Ｔはコンクリート版厚、$C_{p,plate}$は、”実質の” コンクリート内部を伝搬する往復弾性波のＰ波の速度である。Sansalone 等 [2.3.2.1)] によると、このコンクリート版の変位を決定する実質上の往復弾性波のＰ波速度は、ポアソン比が約0.2のコンクリートでは、無限媒質中におけるＰ波速度C_pの96%である。

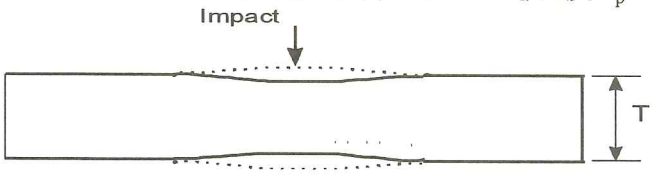


図-2.3.2.3 振動の厚さモードのモードシェープ

2.3.2.3 表面弾性波速度の測定

供試体の表面を伝搬する表面弾性波のＰ波の速度は、計測によって直接求められる。図-2.3.2.4 にＰ波速度測定のためのセットアップ図と受信センサＲ１およびＲ２で記録された波形をあらわす。受信センサを一定の距離Ｌ（本法では、典型的に300mm）を保ってスペースサーバにて固定し、伝搬するＰ波先端部が、２つの受信センサへ到達する時間を正確に測定する。到達時間をそれぞれt_1とt_2すると、Ｐ波の速度C_pは、次式で与えられる。

$$C_p = \frac{L}{t_2 - t_1} \qquad (2.3.2.3)$$

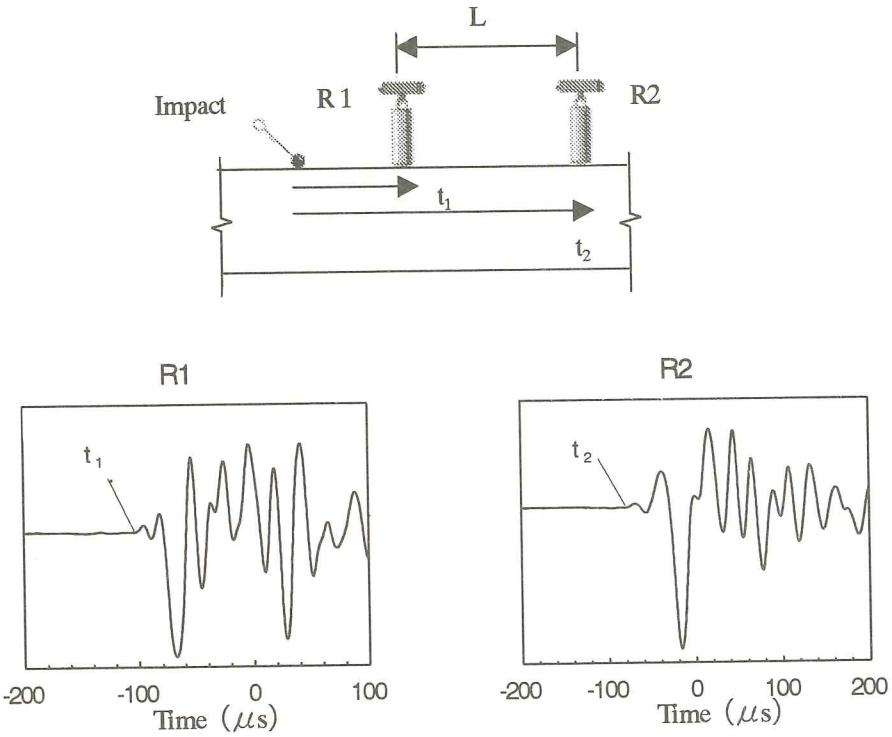


図-2.3.2.4 表面弾性波速度の直接測定

Ｐ波の先端部における変位は、波の伝搬方向に対して平行であり、打撃した供試体表面の変位は表面に対して平行となる。しかしながら、ポアソン効果によって、表面あるいは表面直下のところの変位は、表面に対して垂直（鉛直）に微小な変位をおこし、それらの変位は、受信センサによって検知することができる。速度の測定は、到達時間t_1とt_2の時間差と距離Ｌによって決定されるので、距離Ｌが大きいほど精度は高くなるが、波面先端部の減衰のために、実際上変位を検知できる距離限界が存在する。Sansalone等の研究[2.3.2.1)]によると本法の場合の最適な距離は、300mmであるので、本実験では、基本的に2本の受信センサの設置間隔にこの300mmをもちいる。

2.3.2.4 コンクリート版の厚さ測定 －ASTM C1383-98 規格[2.3.2.2)]

前述の 2.3.2.3 の方法により表面弾性波速度を測定し、次に図-2.3.2.5 のように、打撃点付近に設置した受信センサで厚さ周波数 f を測定し、版厚 T を式（2.3.2.2）すなわち T=0.96Cp/2f から求める。本法は、

コンクリート版厚の測定手法として、ASTM C1383-98 にすでに規格化されている。

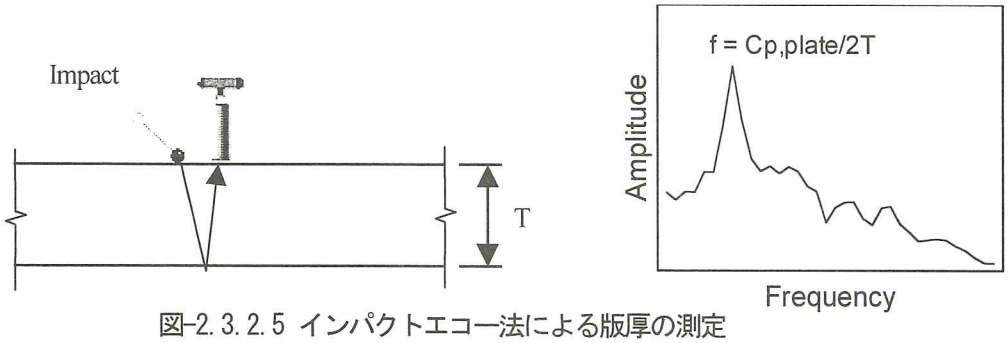


図-2. 3. 2. 5 インパクトエコー法による版厚の測定

2.3.2.5 往復弾性波速度法

逆に、供試体の厚さが既知の場合、供試体内部を伝搬し多重反射する往復弾性波のP波の厚さ周波数 f を測定することによって、式（2.3.2.1）、すなわち C=2fT からP波の速度を求めることも可能である。ただし、供試体が版の形状の場合、2.3.2.3 の方法で測定した表面弾性波のP波速度 $C_{p,\,surface}$ との関係は、版内部の往復弾性波のP波速度を $C_{p,\,plate}$ とすると、コンクリート版の場合、2.3.2.2 の式(2.3.2.2)の部分でのべたように、

$$C_{p,\,plate} = 0.96\, C_{p,\,surface} \qquad (2.3.2.4)$$

となる。

参考文献

2.3.2.1） Sansalone, M. and Streett, W.B., (1997), "Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry," Bullbrier Press, Jersey Shore, PA., USA

2.3.2.2） ASTM C 1383 (1998), "Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02., USA

3章　基礎実験

3．1 実験目的と供試体の種類

3．1．1　実験目的

本章の実験目的は、速度分布、部材厚さ、鉄筋のかぶり厚さ、径などの測定方法を確立するために、それらの測定に及ぼす様々な影響を検討することである。特に速度分布の測定には、鉄筋や含水率など多くの要因について検討した。

3．1．2　供試体の種類

実験で使った供試体は、以下の3種類である(**図－3.1.1～3.1.3**)。コンクリート内部の品質および含水率の分布は、**図－3.1.4** のようになっているものと想定して供試体を作製した。

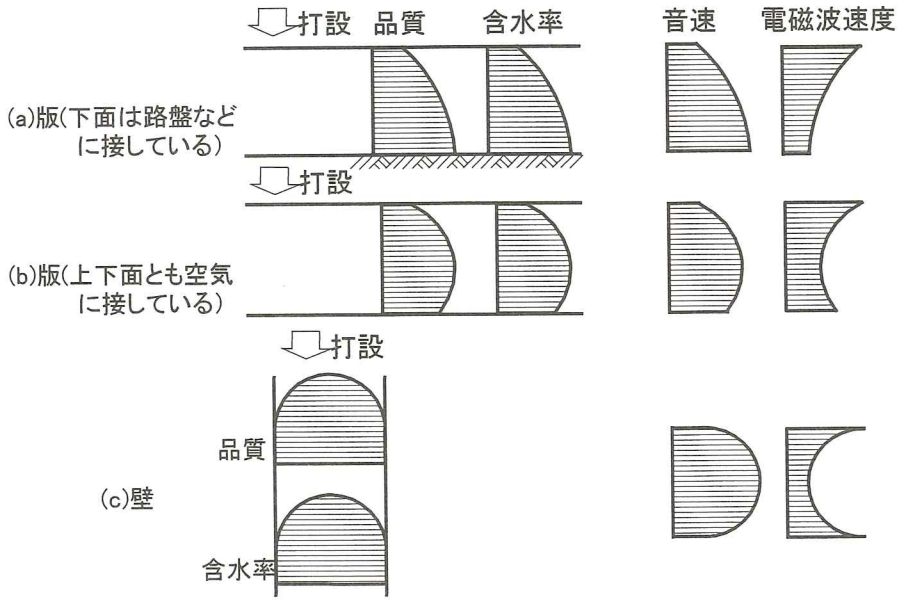
供試体Ａ：舗装版を想定した供試体（**図－3.1.1**）

・側面と底面を塗装し，打設面のみから乾燥する。含水率は打設面が小さく，深くなるほど大きくなる分布となる（**図－3.1.4(a)**）。それにともない音速、弾性波速度は深くなるほど速くなり、電磁波速度は逆になることを想定している。

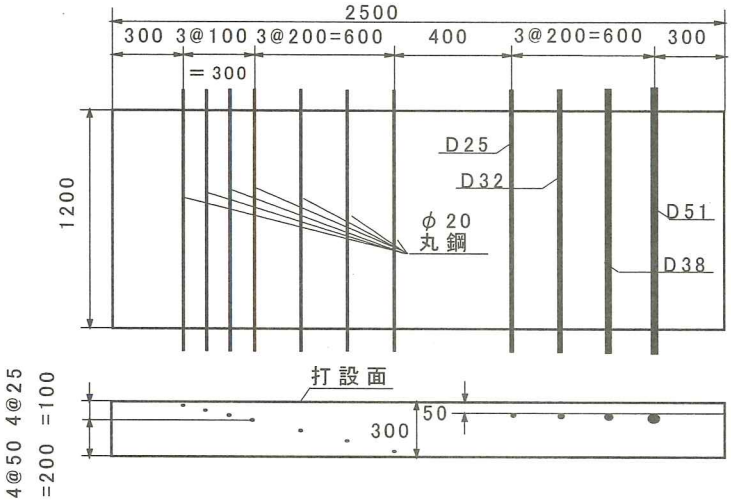
・丸鋼を，かぶり厚さを変えて埋め込んでおき，電磁波速度の分布が求められるようにした。

・径の異なる異形棒鋼を埋め込んでおき，レーダに及ぼす影響範囲，超音波の音速に及ぼす影響，鉄筋のかぶり，径の測定が行えるようにした。

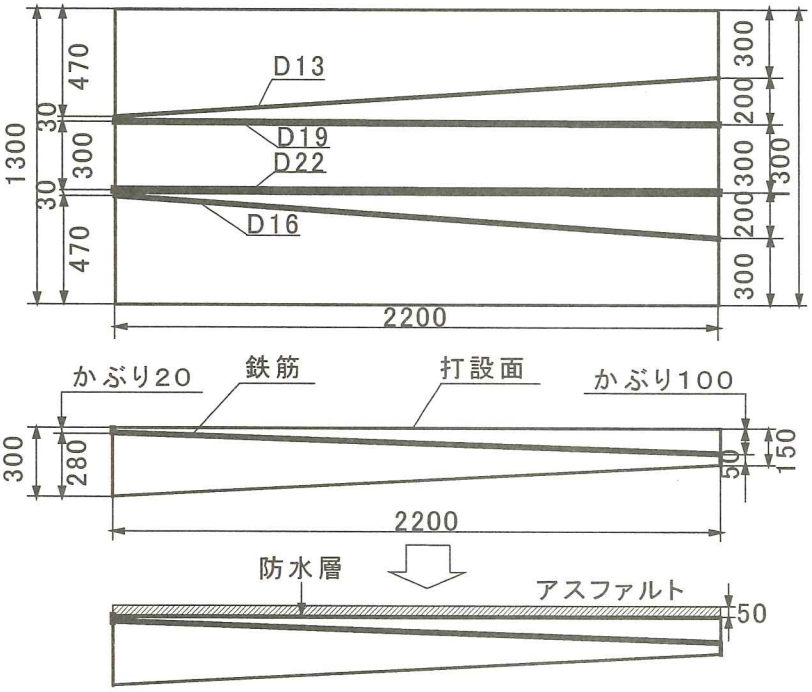
供試体Ｂ：床版を想定した断面が変化している版供試体(**図－3.1.2**)



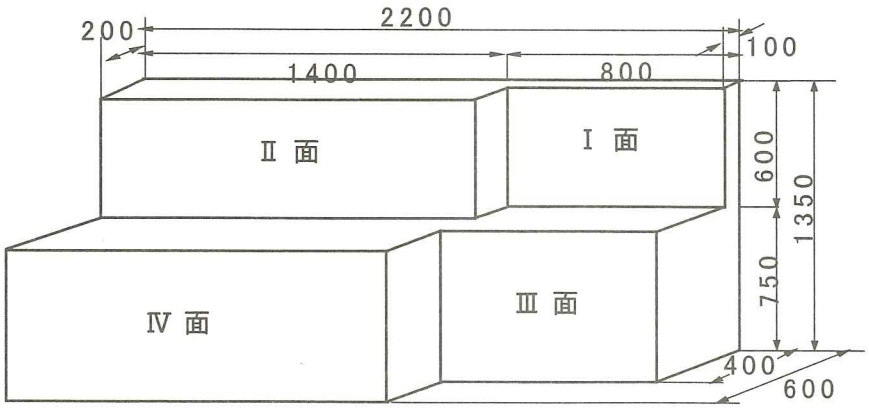
図－3.1.4　部材の種類と速度分布



図－3.1.1　供試体A



図－3.1.2　供試体B



図－3.1.3　供試体C

・側面を塗装し，打設面と底面から乾燥する。それに伴い，含水率，音速、弾性波速度は打設面，底面が小さくなり内部が大きくなる。打設面と底面では，材料分離などから音速と弾性波速度は底面の方が速くなるものと考えられる(**図－3.1.4(b)**)。含水率，速度分布が異なる両面から測定する。

・鉄筋を斜めに扇状に広げて入れることにより，鉄筋の間隔とかぶり，厚さがレーダに及ぼす影響，超音波によるかぶりと鉄筋径の測定が行えるようにした。

・あとで打設面にアスファルトを舗設した二層構造とし、アスファルト上面，コンクリート底面から二層構造の速度、厚さ測定を行う。

供試体Ｃ：厚さの異なる壁供試体(**図－3.1.3**)

・**図－3.1.3** の見えていない面を表（おもて）面とする。表面は一面である。4 面（Ⅰ～Ⅵ）に分かれている面を裏面とする。

・表面・裏面以外の側面，上面，底面を塗装することにより，表面，裏面の両側から乾燥する。含水率，音速分布は表面，裏面が小さく，中央部が大きくなる対象の分布となる(**図－3.1.4(c)**)。

・ボックスカルバートなどのように表面からは裏面の状態がわからないことを想定している。

３．１．３　使用材料

供試体作製に使用したコンクリートは，早強ポルトランドセメントを用い，呼び強度 24，空気量 4.5%，スランプ 8cm のものを使用した。配合は**表－3.1.1**，使用材料は**表－3.1.2** のとおりである。

表－3.1.1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m^3)						
					水 W	セメント C	細骨材 ①S1	細骨材 ②S2	粗骨材 ①G1	粗骨材 ②G2	混和剤 A
20	8	62.4	4.5	44.1	156	250	493	328	538	537	0.781

表－3.1.2 使用材料の品質

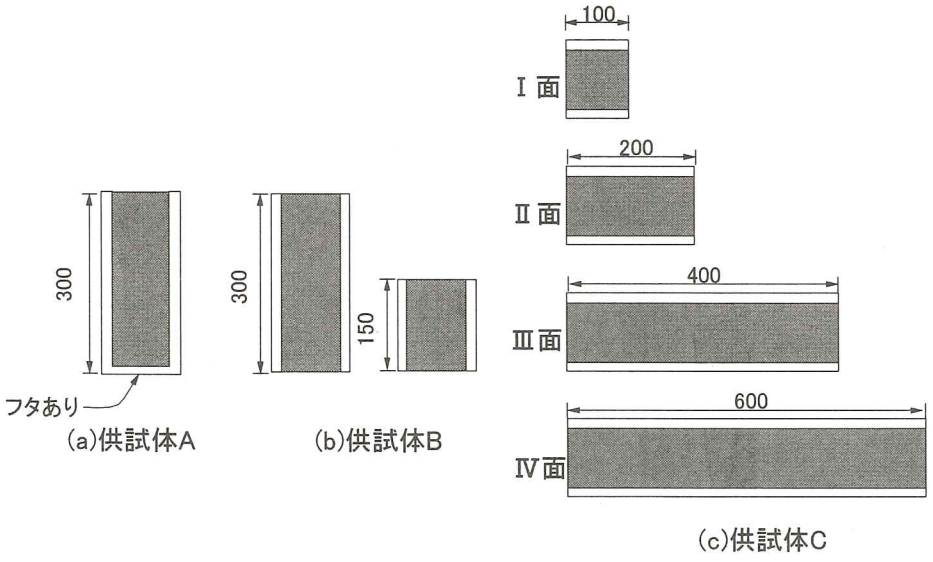
材料の種類		絶乾密度 g/cm^3	比表面積 cm^2/g	吸水率 %	実績率 %	粒形判定 実積率%	粗粒率	備考
セメント	早強ポルトランドセメント	3.14	4510	－	－	－	－	
細骨材①	山砂(君津産)	2.53	－	2.09	－	－	2.33	①:②=6:4 粗粒度2.60
細骨材②	砕砂(田沼産)	2.56	－	1.74	－	59.4	3.01	
粗骨材①	砕石(田沼産)	2.62	－	1.10	59.9	58.8	6.60	①:②=5:5 粗粒率6.61 実積率60.5%
粗骨材②	砕石(鳥形山産)	2.68	－	0.59	60.8	60.1	6.63	
混和剤	AE減水剤ポゾリスNo.70	1.065	－	－	－	－	－	

３．１．４　品質管理試験

品質管理用供試体は，**表－3.1.3** のように供試体作製時に通常の圧縮強度試験用試験体φ100×200mm と，供試体内部の含水率分布，強度分布を推定するために各供試体の厚さ，打設方法に合わせて内径 100mm の塩ビ管にコンクリートを打設した含水率・圧裂強度用試験体も作製した（**図－3.1.5**）。養生方法，試験時期，試験項目は**表－3.1.3** のとおりである。

表－3.1.3　品質管理試験

試験体 (mm)	養生		試験材齢 (週)	本数 (1回当り)	試験項目
	1週まで	1週以後			
φ100 ×200	湿布	水中 封かん 気中	1，4，13 コア試験時	3本	含水率 音速 圧縮強度 ヤング係数
φ100×100 ～600	湿布	気中	1，4，13	2本	50mmピッチで 圧裂，含水率



図－3.1.5　含水率・圧裂強度用試験体

３．１．５　コアによる品質確認

測定終了後φ100 に加えφ44，32，24mm の小径コアを抜き取り，厚さの直接確認，音速，強度分布などを測定した。

コアの一部は細孔径分布を測定した。詳細は，４章の**4.2.3項**に測定方法，**4.3.3項**に測定結果，**4.7節**に有効細孔量と音速分布，圧裂強度分布の関係を示している。

コア抜あとの孔を利用して内部の透過音速を直接測定した。

3．2 実験手順と方法

3．2．1 供試体A、B、Cの測定

測定手順は**図－3.2.1** のフローのとおりである。測定は，コンクリート打設後，1週，4週，13週とした。供試体Bのアスファルト施工は13週の測定以後とし、同様に測定を行った。

測定位置を**図－3.2.2～3.2.4** に示す。測定機種ごとの測定項目と測定経過は**表－3.2.1.**のとおりである。

超音波法は，基準棒を用意しておき，測定日に20℃の恒温室と供試体設置位置で音速を測定した。基準棒はアルミ，花崗岩，アクリルの3種類で，径50mm，長さ300mmである。

3．2．2 コンクリートの品質管理試験

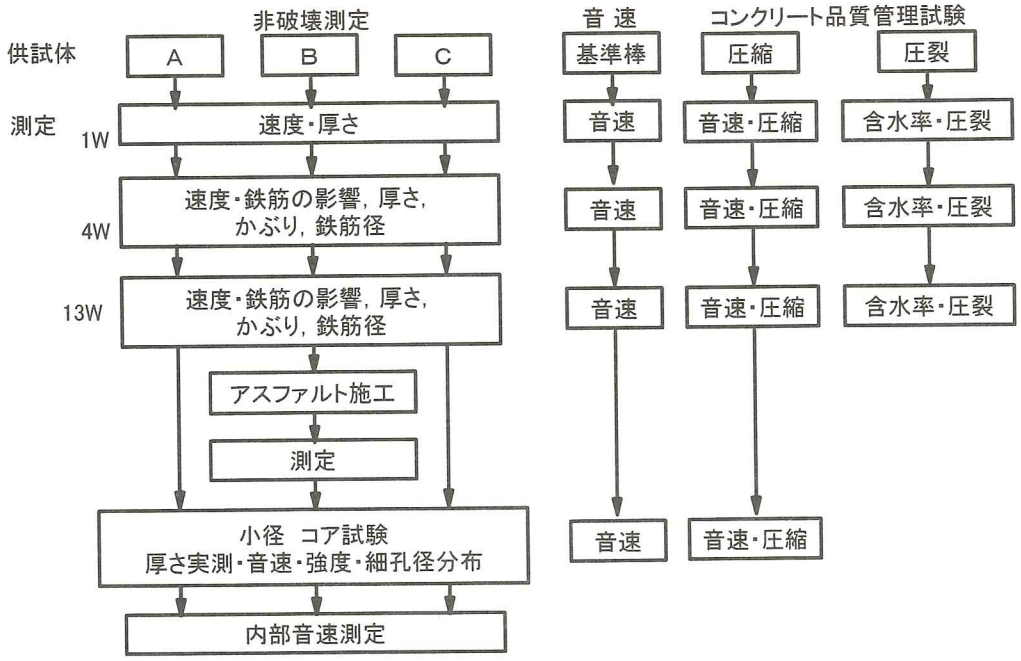
品質管理用試験は**表－3.1.3** のとおり，測定日に合わせ，圧縮強度用の音速，圧縮強度試験，圧裂用の含水率，圧裂強度試験などを行った。

3．2．3 コア試験

その後，**表－3.2.2**，**図－3.2.5～3.2.7** のようにコアを採取し，音速を測定したあと圧縮強度試験などを行った。

一部のコアは、**図－3.2.8** のように切断しながら随時音速を測定した。また、コアからさらに小径コアを採取して、音速の測定、圧縮強度試験を行った。

供試体Bのコア1本(**表－3.2.2**)と供試体CのⅣ面のコアの一部(**図－3.2.8**)の細孔径分布(ポロシティー)を測定した。細孔径分布を測定した位置は，表面から0～10mm，20～30mm，45～55mm，90～100mm、140～150mm、190～200mmである。細孔径分布の詳細については、**4．7節**に記述してある。

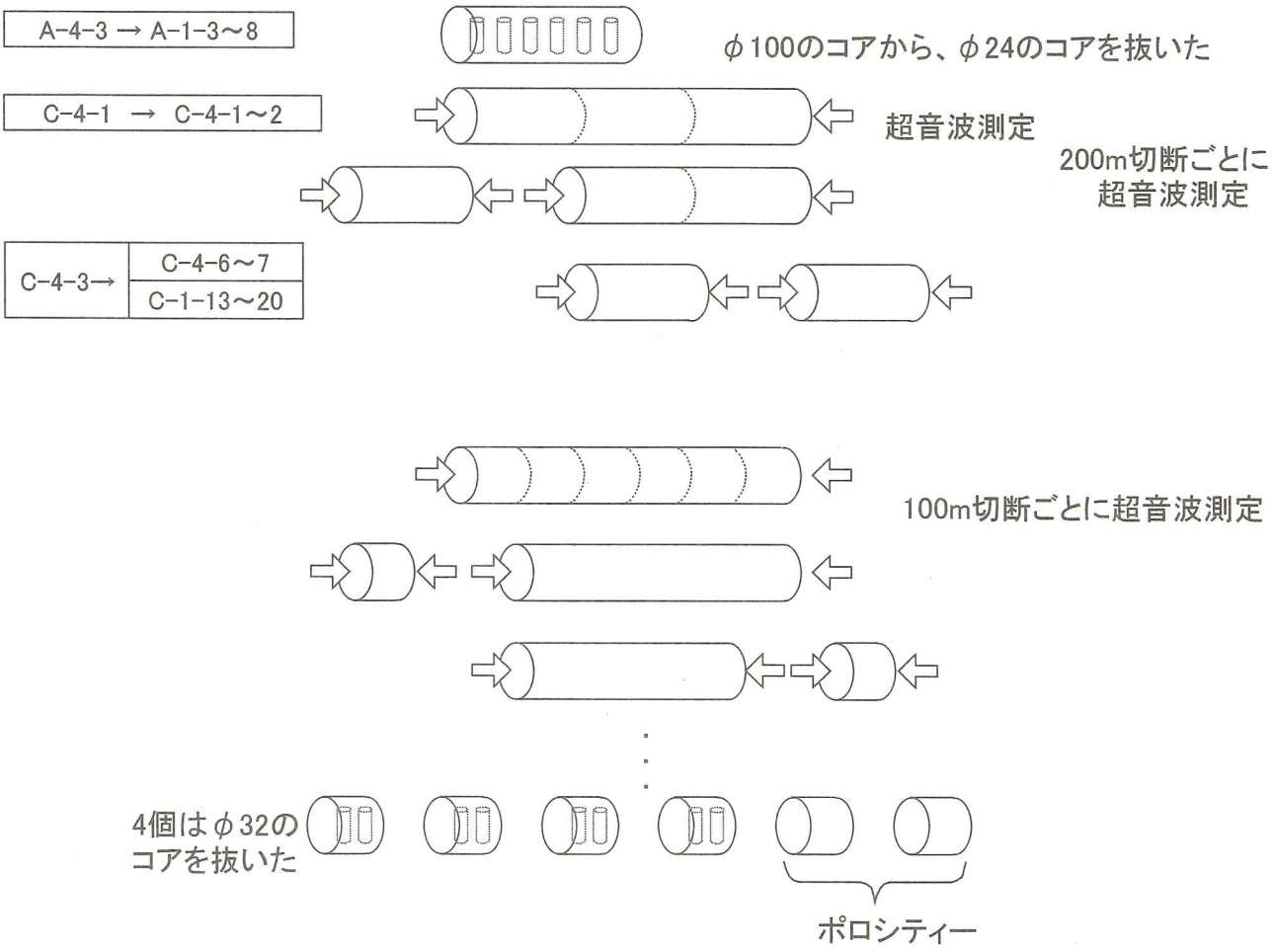


図－3.2.1 実験フロー

表－3.2.1 測定位置

供試体	測定機種	測定項目	測定位置　注）
A	超音波	速度	①,②,③,④,⑤,hの100-800までは100ピッチ，1000，1200，1600，2000，2400mm
		速度（鉄筋の影響）	鉄筋上　a,b,c,d,h,i,j,k,l の700と1000mm 鉄筋間　I-j，j-k，k-lの700と1000mm
		鉄筋かぶり，径	③の鉄筋上
	レーダ	速度，鉄筋かぶり	①,②,③,④,⑤,h
	弾性波	速度	hの①,②,③,④,⑤
	共通	厚さ	hの①,②,③,④,⑤
B	超音波	速度	③,a,b,c,d,eの100-800まで100ピッチ，1000,1200,1600,2000mm
		鉄筋かぶり，径	a,b,c,d,eの鉄筋上
	レーダ	速度，鉄筋かぶり	③,a,b,c,d,e
	弾性波	速度	④,a,b,c,d,e
	共通	厚さ	④,a,b,c,d,e
Cの表面 裏面は Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ 面ごとに	超音波	速度	①,②,④,⑤,⑥,⑧,b,fの100-800まで100ピッチ，1000,1200,1600,2000mm
	レーダ	速度	①,②,④,⑤,⑥,⑧,b,f
	弾性波	速度	③,⑦のa,g
	超音波	厚さ	①,②,④,⑤,⑥,⑧のc，e
	弾性波・レーダ	厚さ	①,③,④,⑤,⑦,⑧のa，g

注）測定位置については、図－3.2.2～3.2.4参照



図―3.2.8 供試体C－Ⅳ面コアの切断と音速の測定手順

表－3.2.2　コア数量および圧縮試験数

供試体		コア供試体 番号	径	長さ	本数	圧縮試験 番号	径	長さ	コア1本当本数	試験本数	備考	打設方向関係
A		A-1-1～2	24	300	2	A-1-1～12	24	48	6	12		平行
		A-3-1～2	44	300	1	A-3-1～6	44	88	3	6		
		A-4-1～2	100	300	1	A-4-1～2	100	200	1	2		
		A-4-3	100	300	1	A-1-3～8	24	48	6	6	φ100からφ24抜取	直角
B		B-2-1	32	225	1	B-2-1～3	32	64	3	3		平行
		B-2-2	32	170	1	B-2-4～5	32	64	2	2		
		B-2-3～17	32	100	15	B-2-6～35	32	64	2	30		直角
	アスファルト	B-A2-1～2	32	50	2	B-A2-1～2	32	64	1	2	圧縮時ひずみ測定	平行
		B-A2-3～5	32	100	3	B-A2-3～8	32	64	2	6		直角
		B-3-1	44	280	1	B-3-1～3	44	88	3	3		平行
		B-3-2	44	252	1	B-3-4～6	44	88	3	3		
	アスファルト	B-A3-1～2	44	50	2	B-A3-1～2	44	50	1	2	音速のみ	平行
		B-4-1	100	252	1	B-4-1	100	200	1	1		平行
		B-4-2	100	197	1	B-4-2	100	197	1	1		
		B-4-3	100	183	1	B-4-3	100	183	1	1	ポロシティー	
	アスファルト	B-A4-1～3	100	50	3	B-A4-1～3	100	50	1	3	音速のみ	平行
C	Ⅰ面	C-3-1～6	44	100	6	C-3-1～6	44	88	1	6		直角
	Ⅱ面	C-3-7～12	44	200	6	C-3-7～12	44	88	2	12		
	Ⅲ面	C-3-13～14	44	400	2	C-3-13～26	44	88	4	8		
		C-4-1	100	400	1	C-4-1～2	100	200	2	2		
	Ⅳ面	C-2-1	32	600	1	C-2-1～8	32	64	8	8		
		C-3-15～16	44	600	2	C-3-27～38	44	88	6	12		
		C-4-2	100	600	1	C-4-3～5	100	200	3	3		
		C-4-3	100	600	1	C-4-6～7	100	100	2	2	ポロシティー	
						C-2-13～20	32	64	8	8	φ100からφ32抜取	平行
合計					57					144		
内訳				φ24	2				φ24	12		
				φ32	18				φ32	57		
				アスファルト	5				アスファルト	8		
				φ44	19				φ44	50		
				アスファルト	2				アスファルト	2		
				φ100	8				φ100	12		
				アスファルト	3				アスファルト	3		
				計	57				計	144		

番号の説明

A-1-1
- 通し番号
- コアの径
  - 1：φ24mm
  - 2：φ32mm
  - 3：φ44mm
  - 4：φ100mm
- 供試体

コア番号は、図－3.2.5～3.2.8 参照

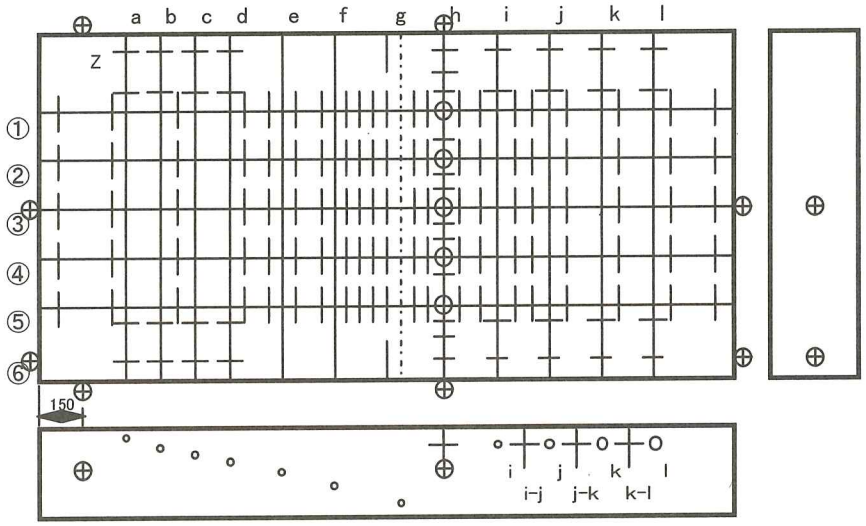
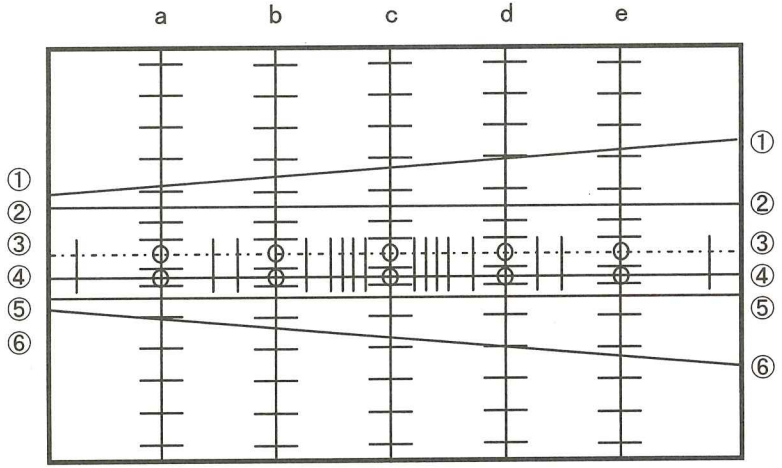
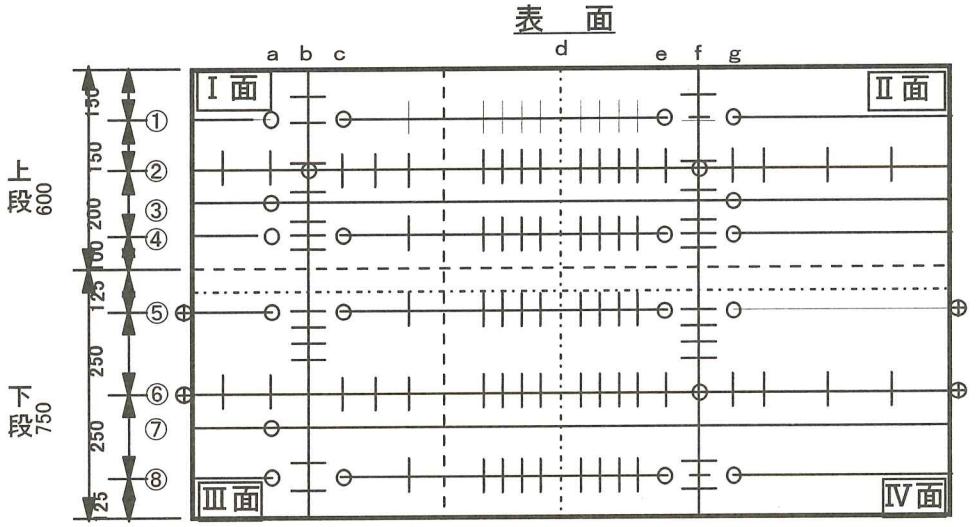


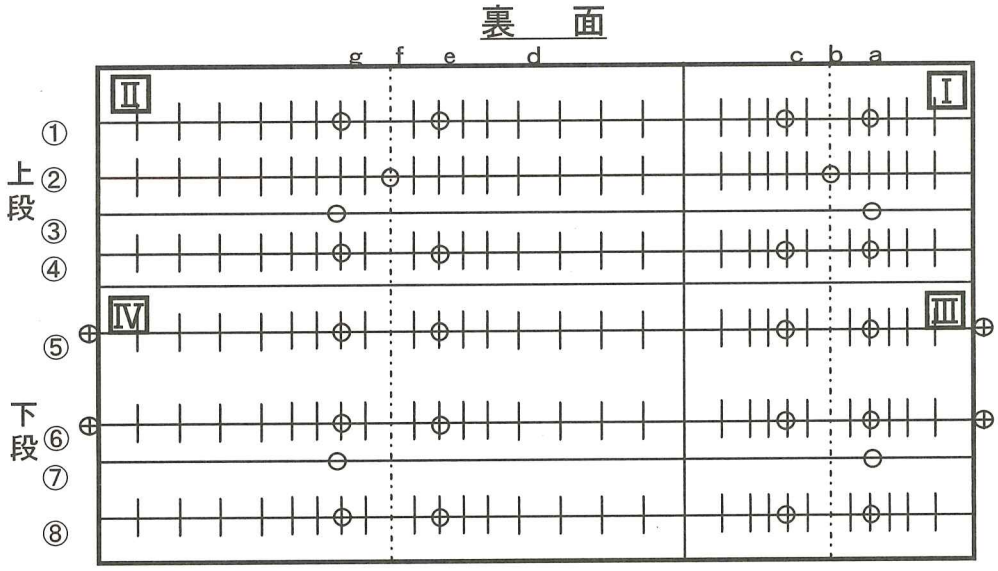
図-3.2.2 供試体Aの測定位置



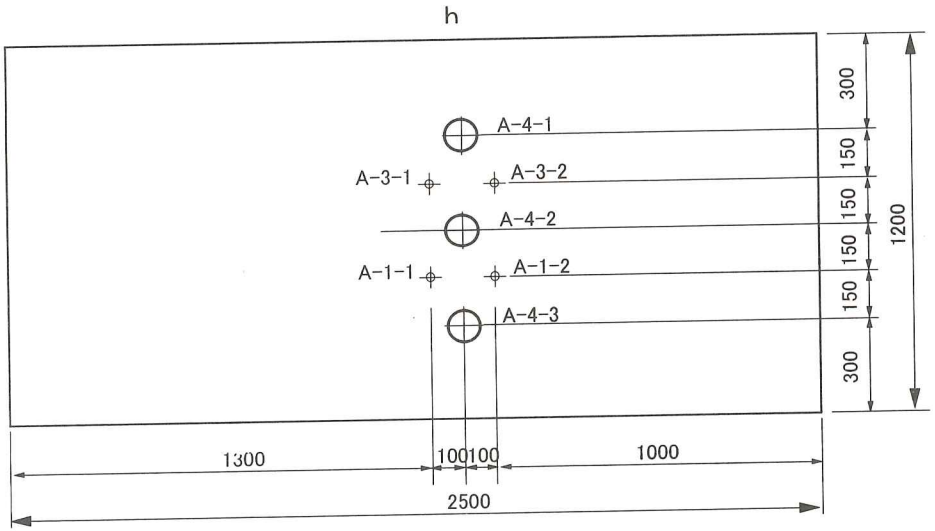
上面、底面とも同様に測定

図-3.2.3 供試体Bの測定位置

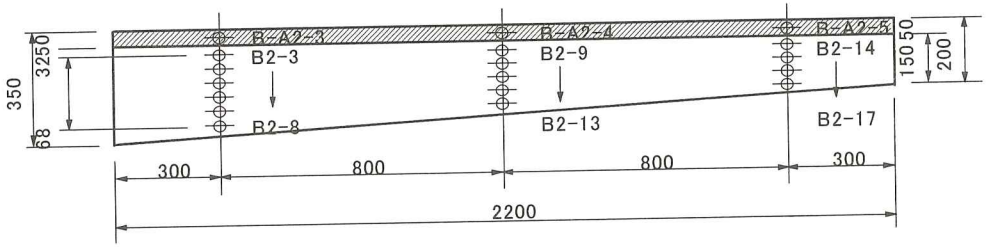




図－3.2.4 供試体Cの測定位置



図－3.2.5 供試体Aコア採取位置図



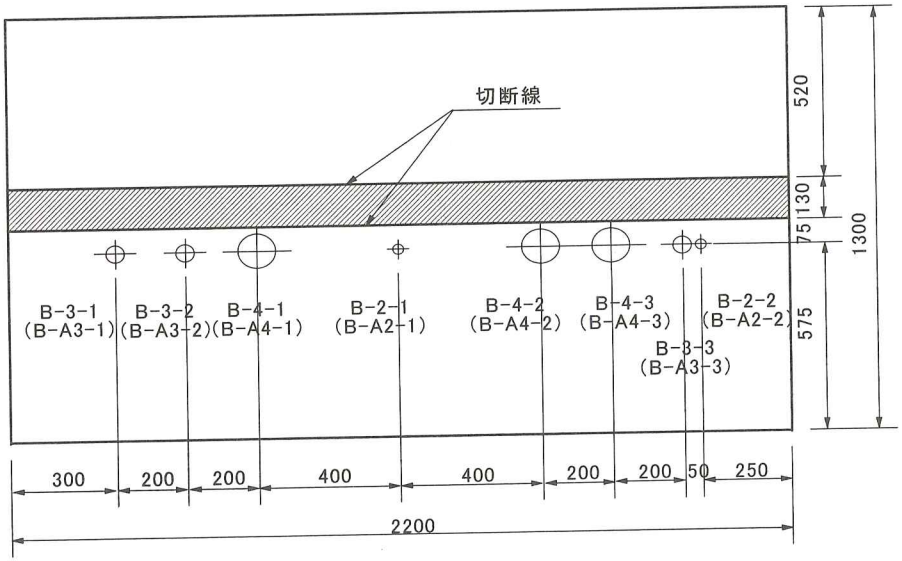
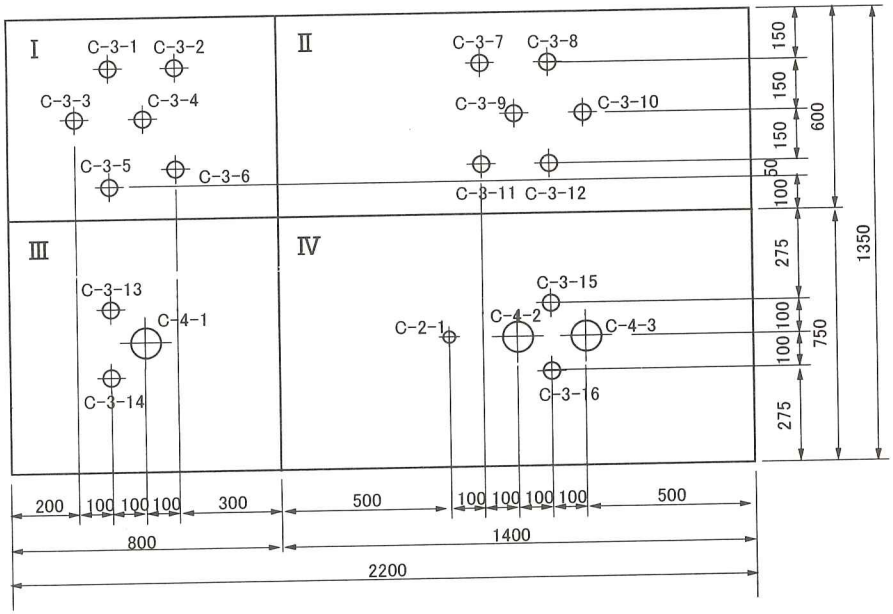


図-3.2.6 供試体Bコア採取位置図



図－3.2.7 供試体Cコア採取位置図

３．３　コンクリートの品質・実測結果

３．３．１　品質管理試験

(1)圧縮強度試験

圧縮強度試験用の含水率（封かん養生に対する質量の増減），圧縮強度，音速結果などは**表－3.3.1.1** のとおりである。音速の測定に用いた装置は超音波Ａである。

材齢と圧縮強度の関係を**図－3.3.1.1** に，含水率の増減と材齢の関係を**図－3.3.1.2** に，圧縮強度とヤング係数、圧縮強度と音速，ヤング係数と音速の関係を養生方法ごとに表わしたものが**図－3.3.1.3, 3.3.1.4** および 3.3.1.5 である。

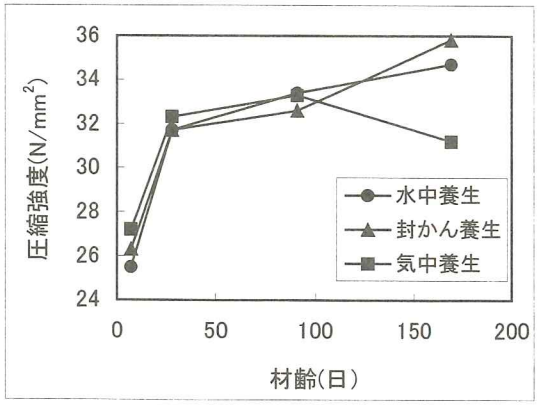
圧縮強度は、水中および封かん養生は 169 日まで増加している。気中養生は、91 日までは同じように増加しているが、169 日には減少している。ヤング係数、音速も強度の増加とともに増加しているが、気中養生はヤング係数が 91 日で急激に、音速も 169 日に急激に低下している。

音速は，本来，ヤング係数の関数である。両者の関係は，**図－3.3.1.5** のようであった。圧縮強度の範囲がせまいので明確ではないが，相関関係がある。

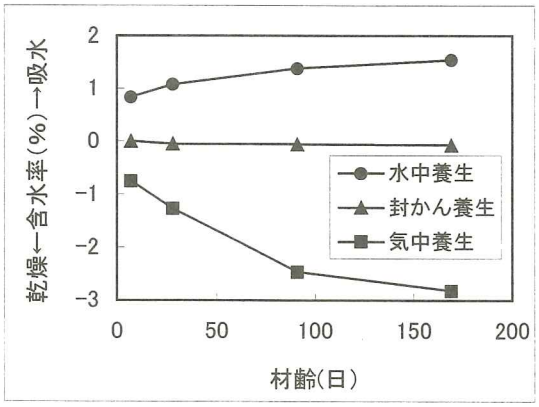
表－3.3.1.1　コンクリートの圧縮強度

材　齢	養生方法	圧縮強度試験					超音波試験			
		質量増減 g	含水率増減 %	圧縮強度 N/mm²	ﾎﾟｱｿﾝ比 μ	ﾔﾝｸﾞ係数 kN/mm²	伝搬時間 μs	透過音速 m/sec	ﾔﾝｸﾞ係数 μ＝1/6 kN/mm²	動ﾔﾝｸﾞ係数 μD＝1/4 kN/mm²
7日	水中養生	30.4	0.84	25.5	0.164	27.6	46.4	4304	39.7	35.5
	封緘養生	0	0.00	26.3	0.164	28.3	46.4	4305	39.8	35.5
	気中養生	−28.6	−0.75	27.2	0.181	26.1	46.9	4252	38.8	34.7
28日	水中養生	38.7	1.08	31.7	0.181	29.0	44.8	4462	42.7	38.2
	封緘養生	−2.0	−0.05	31.7	0.182	31.7	45.4	4404	41.6	37.2
	気中養生	−45.7	−1.27	32.3	0.168	32.3	46.2	4327	40.2	35.9
91日	水中養生	50.0	1.38	33.4	0.174	31.8	44.4	4499	43.4	38.8
	封緘養生	−2.0	−0.06	32.6	0.179	30.2	45.5	4392	41.4	37.0
	気中養生	−89.5	−2.47	33.3	0.158	23.3	45.9	4357	40.7	36.4
169日 コア試験時	水中養生	55.7	1.54	34.7	0.164	30.4	43.6	4587	45.2	40.3
	封緘養生	−2.7	−0.07	35.8	0.179	30.0	44.6	4484	43.1	38.5
	気中養生	−102.1	−2.82	31.2	0.188	22.0	49.4	4049	35.2	31.4

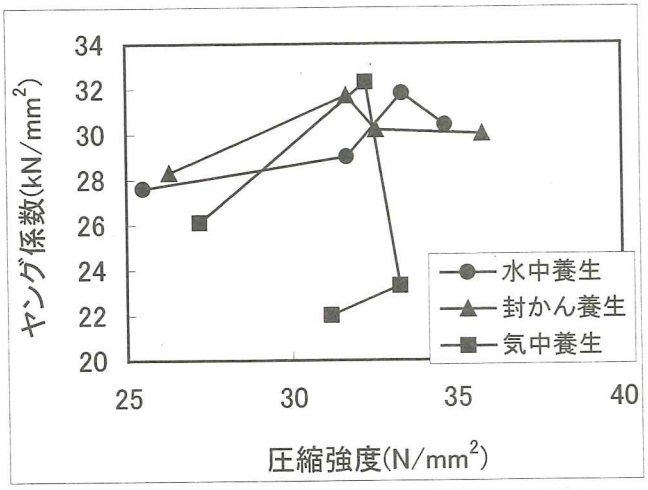
※　μ：ポアソン比
　　μD：動ポアソン比



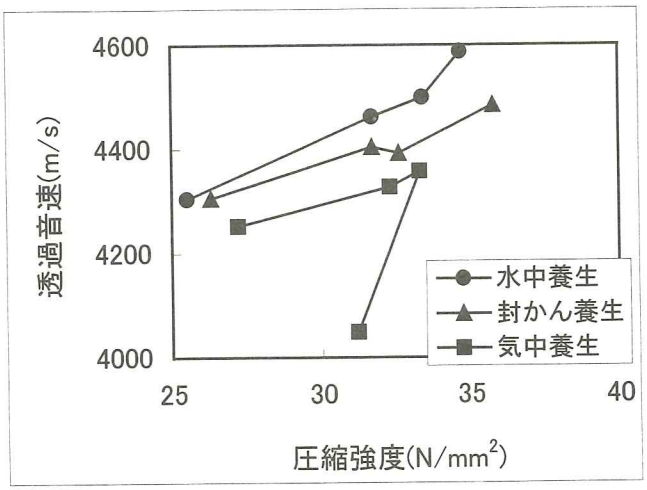
図－3.3.1.1　圧縮強度



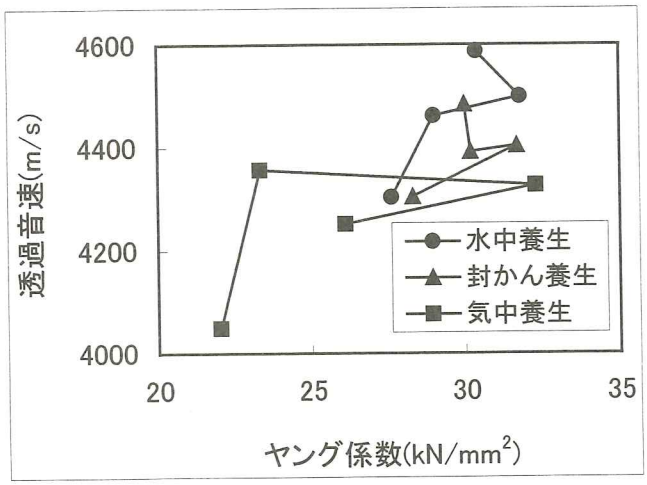
図－3.3.1.2　圧縮供試体の含水状態



図－3.3.1.3 圧縮強度とヤング係数の関係



図－3.3.1.4 圧縮強度と音速の関係



図－3.3.1.5 ヤング係数と透過音速の関係

圧縮強度と材齢の関係を式(3.3.1.1)で回帰した(図-3.3.1.6 参照)。回帰に用いた強度は、水中養生および封かん養生したものである。

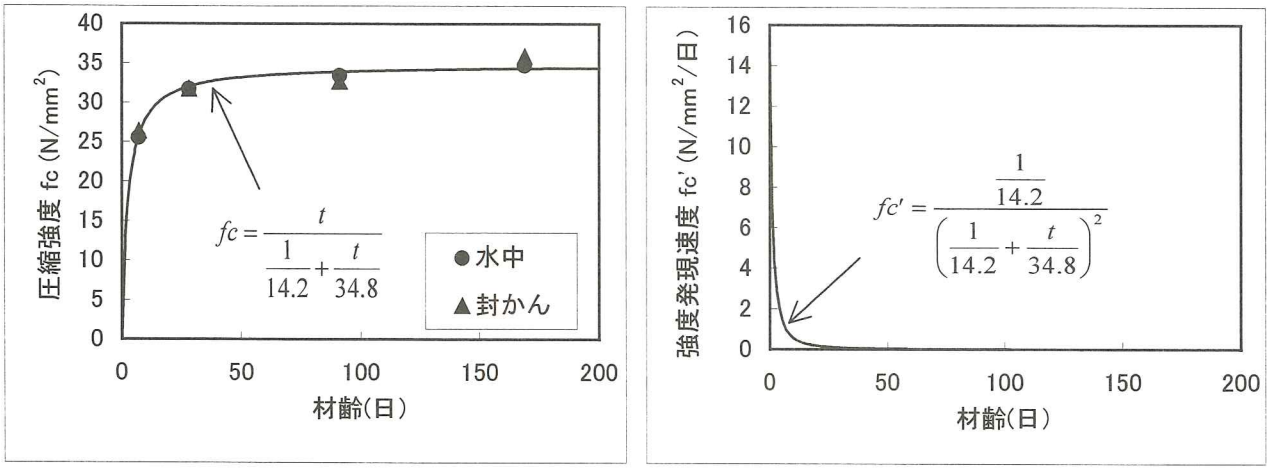
$$fc = \frac{t}{1/a + t/b} \qquad (3.3.1.1)$$

ここに、fc：圧縮強度、t：材齢、a,b：回帰係数であり、aは原点の接線、bは$t=\infty$のときの強度である。回帰の結果、a＝14.2、b＝34.8（相関係数 r ＝0.975）であった。

式(3.3.1.1)を微分することにより、強度発現速度$f'c$が得られる。

$$f'c = \frac{1/a}{(1/a + t/b)^2} \qquad (3.3.1.2)$$

圧縮強度の回帰結果および強度発現速度は図－3.3.1.6 のようになった。



(a)圧縮強度　　(b)強度発現速度

図-3.3.1.6 圧縮強度の回帰結果および強度発現速度

(2) 含水率、圧裂強度試験

含水率，圧裂強度試験の結果は**表－3.3.1.2** のとおりであった。打設面あるいは側面の表面からの距離と圧裂強度，含水率の関係は**図－3.3.1.7**，**図－3.3.1.8** のとおりであった。

圧裂強度分布は**図－3.3.1.7** のように、わずかではあるが内部ほど大きくなっている。特に供試体Aは底面にフタをして乾燥を防いでいたので、その傾向は顕著である。強度分布を次式で回帰した結果が**表－3.3.1.3** である。式(3.3.1.3)は、速度分布を第 I 部の式(1.2)と仮定しているので、同じ式としたものである。つまり $C = 2m$ となる。

$$ft \text{ or } w = A(B+x)^{\frac{1}{C}} \qquad (3.3.1.3)$$

ここに、ft：圧裂強度、w：含水率、x：表面からの距離、A,B,C：回帰係数である。回帰結果は**表－3.3.1.3** に示すとおり、C≒2～10 であり、m≒1～5 となっている。

図－3.3.1.8 の含水率分布は 3 段になっている。上段は、圧裂試験直後の個々の切片を乾燥して求めた含水率 *wi*、中段は、それを水中に浸漬して表乾状態で測定した吸水率 *wsi*、下段は *wi/wsi* である。含水率は、表面から乾燥するので、表面ほど小さく、材齢が進むほど小さくなっている。しかしながら、供試体 A,B の下部も小さくなっている。また吸水率は表面が大きく内部ほど小さくなる傾向がある。これは、表面近く（表層）は空隙が多く、下部ほど緻密になっていることを示している。そのため、*wi/wsi* をとると、供試体 *A,B* の下部は 1 に近づいており、表面ほど小さくなっている。供試体 C－VI面は中央までなので、*wi* および *wi/wsi* は表面が小さく、内部ほど大きくなっている。

含水率も式(3.3.1.3)で回帰した結果を**表－3.3.1.4** に示す。C≒4～10 であり、m≒2～5 となっている。

表－3.3.1.2　含水率、圧裂強度試験結果

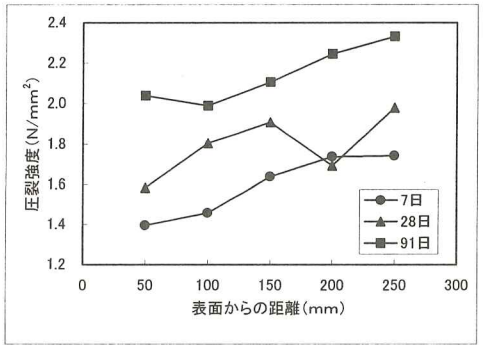
供試体	長さ	圧裂強度 (N/mm2) 表面からの距離	材齢（日）			含水率 (%) 表面からの距離	材齢（日） 7			28			91		
	(mm)	(mm)	7	28	91	(mm)	含水率 wi	吸水率 wsi	wi/wsi	含水率 wi	吸水率 wsi	wi/wsi	含水率 wi	吸水率 wsi	wi/wsi
A	300	50	1.40	1.58	2.04	25	4.97	7.03	0.707	4.42	6.80	0.650	3.81	6.78	0.562
		100	1.46	1.80	1.99	75	5.71	6.38	0.895	5.34	6.33	0.843	5.31	6.61	0.803
		150	1.64	1.91	2.11	125	6.22	6.55	0.949	5.90	6.75	0.874	5.67	6.40	0.887
		200	1.74	1.69	2.25	175	6.42	6.63	0.968	5.94	6.49	0.915	5.69	6.04	0.941
		250	1.74	1.98	2.33	225	6.29	6.39	0.983	5.83	6.09	0.957	5.83	6.30	0.926
		—	—	—	—	275	5.89	5.94	0.992	5.45	5.63	0.969	5.29	5.48	0.966
B	150	50	1.54	1.64	1.90	25	4.86	6.86	0.709	4.72	7.28	0.649	3.61	7.04	0.513
		100	1.63	1.90	2.17	75	5.83	6.52	0.894	5.14	6.40	0.804	4.64	6.34	0.733
		—	—	—	—	125	5.43	5.77	0.940	4.96	5.74	0.863	4.13	5.50	0.751
	300	50	1.47	1.59	2.00	25	4.58	6.53	0.701	4.48	6.98	0.642	3.89	6.73	0.578
		100	1.57	1.80	2.12	75	5.87	6.47	0.907	5.37	6.45	0.833	4.97	6.07	0.819
		150	1.61	1.62	2.05	125	6.17	6.39	0.966	5.69	6.59	0.864	5.46	6.23	0.877
		200	1.75	2.01	1.89	175	5.97	6.08	0.981	5.84	6.62	0.882	5.62	6.18	0.908
		250	1.74	1.91	2.09	225	6.16	6.25	0.986	5.80	6.37	0.911	5.45	6.02	0.906
		—	—	—	—	275	5.59	5.63	0.994	5.17	5.85	0.884	4.07	5.36	0.759
C	100	50	1.61	1.85	1.98	25	5.89	6.84	0.862	5.43	6.74	0.806	3.56	6.23	0.571
		—	—	—	—	75	5.66	6.02	0.941	5.06	5.78	0.875	3.27	5.09	0.642
	200	50	1.45	1.92	1.78	25	6.19	7.33	0.844	5.60	6.87	0.815	4.24	6.75	0.629
		100	1.90	2.06	2.06	75	6.06	6.10	0.994	5.77	6.45	0.895	5.06	5.98	0.846
		150	1.80	1.89	2.16	125	5.70	5.62	1.015	5.74	6.55	0.877	5.46	6.25	0.873
		—	—	—	—	175	4.85	5.06	0.960	4.69	5.70	0.822	4.06	5.37	0.757
	400	50	1.35	1.64	1.94	25	5.97	7.03	0.849	5.64	6.96	0.811	4.32	6.34	0.681
		100	1.71	1.67	1.94	75	6.31	6.51	0.969	5.67	6.29	0.901	5.48	6.19	0.885
		150	1.48	1.66	2.02	125	6.38	6.48	0.985	5.90	6.39	0.923	5.89	6.45	0.914
		200	1.34	1.85	1.93	175	6.60	6.75	0.978	5.81	6.39	0.909	5.94	6.43	0.924
		250	1.65	1.82	1.94	225	6.52	6.68	0.976	6.10	6.74	0.905	5.82	6.23	0.935
		300	1.54	1.85	1.94	275	6.54	6.62	0.989	5.93	6.50	0.912	5.89	6.31	0.934
		350	1.72	1.96	2.35	325	6.60	6.66	0.991	5.89	6.32	0.932	5.49	5.85	0.939
		—	—	—	—	375	5.51	5.86	0.940	4.73	5.28	0.897	4.01	4.96	0.808
	600	50	1.53	1.90	1.88	25	5.64	6.55	0.862	5.19	6.41	0.809	4.18	6.45	0.648
		100	1.57	2.06	2.02	75	6.01	6.18	0.973	5.64	6.03	0.935	5.42	6.13	0.884
		150	1.44	1.86	1.90	125	6.20	6.32	0.981	5.83	6.18	0.945	6.02	6.45	0.933
		200	1.62	1.89	2.03	175	6.15	6.31	0.975	5.88	6.27	0.937	5.63	6.73	0.837
		250	1.44	1.68	1.90	225	6.38	6.49	0.982	5.93	6.37	0.931	5.56	5.84	0.953
		300	1.62	1.78	1.98	275	6.18	6.30	0.981	6.17	6.56	0.941	6.03	6.38	0.944
		350	1.49	1.85	1.82	325	6.28	6.43	0.977	5.86	6.29	0.932	5.72	5.97	0.957
		400	1.62	1.94	1.97	375	6.14	6.26	0.981	5.79	6.11	0.948	5.45	5.81	0.938
		450	1.66	1.81	1.85	425	6.23	6.24	0.997	5.83	6.17	0.945	5.26	5.56	0.946
		500	1.67	1.82	1.66	475	6.16	6.21	0.991	5.86	6.25	0.937	5.45	5.36	1.016
		550	1.96	1.81	1.91	525	6.09	6.20	0.982	5.60	6.01	0.932	5.25	5.79	0.906
		—	—	—	—	575	5.02	5.33	0.943	4.76	5.33	0.894	3.84	4.89	0.784

表－3.3.1.3　圧裂強度回帰結果

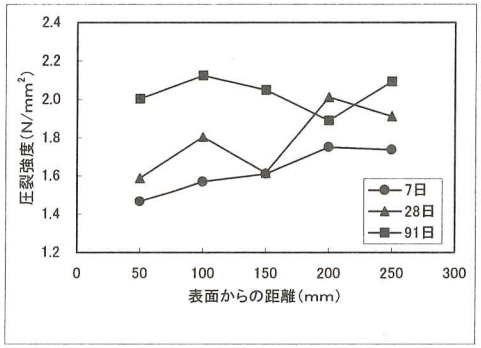
回帰係数	材齢 7日 A-300	B-300	C-400	C-600	材齢 28日 A-300	B-300	C-400	C-600	材齢 91日 A-300	B-300	C-400	C-600
A＝	0.11	0.10	0.26	0.76	0.10	0.10	0.34	0.92	0.10	1.00	0.96	0.96
B＝	171	237	968	1035	284	289	457	1000	314	1000	1000	1034
C＝	2.13	2.1	4.0	10.1	2.1	2.1	4.0	10.0	2.0	10.0	10.0	10.0
r＝	0.944	0.88	0.223	0.161	0.605	0.728	0.855		0.842			0.224

表－3.3.1.4　含水率回帰結果

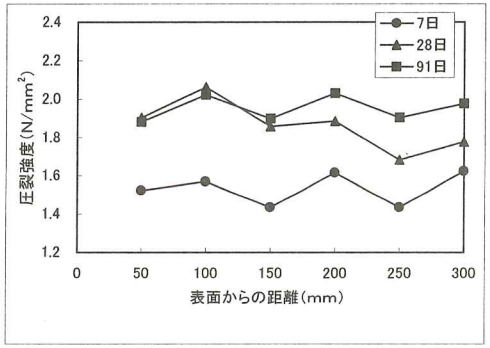
回帰係数	材齢 7日 A-300	B-300	C-400	C-600	材齢 28日 A-300	B-300	C-400	C-600	材齢 91日 A-300	B-300	C-400	C-600
A＝	2.51	2.31	3.29	3.51	1.30	2.21	2.80	2.71	1.41	2.11	2.31	2.21
B＝	70.9	29.2	171.6	120.5	149.3	33.1	283.8	101.4	71.9	6.7	27.5	26.7
C＝	6.2	5.4	8.7	10.1	3.9	5.5	8.2	7.2	4.1	5.4	5.8	5.6
表面含水率	4.98	4.31	5.96	5.65	4.63	4.17	5.56	5.13	4.04	3.00	4.10	3.98
r＝	0.759	0.865	0.904	0.862	0.684	0.941	0.829	0.963	0.737	0.939	0.870	0.827



(a)供試体 A

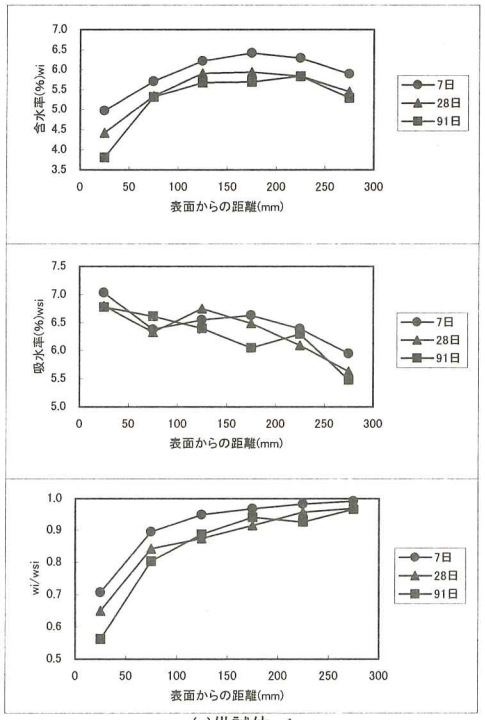


(b)供試体 B

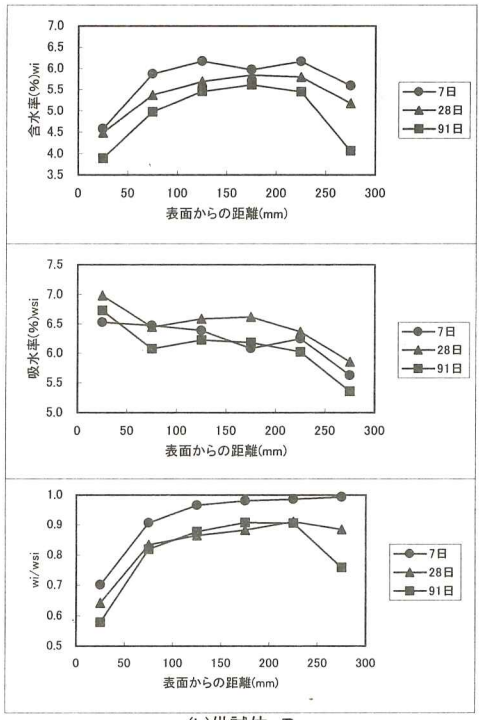


(c)供試体 C-Ⅳ面

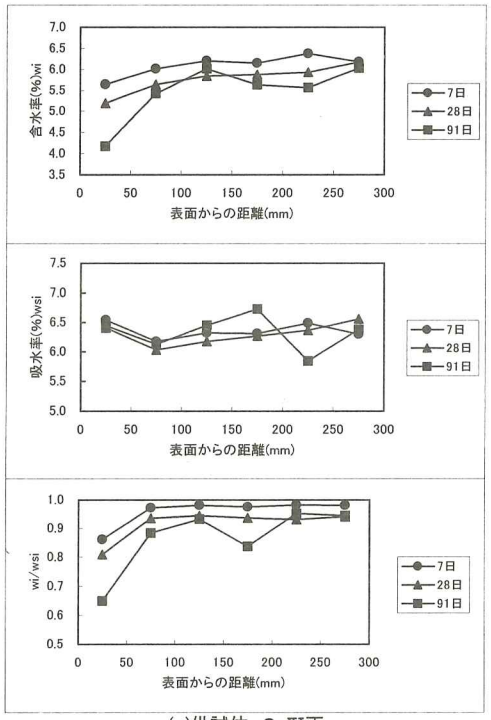
図-3.3.1.7 圧裂強度分布



(a)供試体 A



(b)供試体 B



(c)供試体 C-Ⅳ面

図-3.3.1.8 含水率分布

３．３．２　コア試験結果

コア採取直後の長いままの長さと，音速結果を**表－3.3.2.1** に，コアを分割して圧縮用に整形したあとの音速，圧縮強度結果を**表－3.3.2.2** に示す。小径コアの音速測定は，出力の強さによる衝撃の影響も確認するため，出力を通常の電圧１kV に対し，小型センサを用いて 500V の場合にも測定した。コア径ごとに圧縮強度と音速の平均，標準偏差、変動係数を計算した結果を**表－3.3.2.3** に示す。コア径と圧縮強度の平均，変動係数，音速の平均と変動係数を**図－3.3.2.1** および 3.3.2.2 に示す。圧縮強度は径が小さいほど強度が小さく，変動係数は大きくなっている。今回，コアの側面を観察するとガタガタであり，端面を研磨したとき直角度はよくなかったためと考えられる。

図－3.3.2.3 と 3.3.2.4 に表面からの距離と圧縮強度，音速の関係を示す。**図－3.3.2.5** には圧縮強度と音速の関係，**図－3.3.2.6** には音速測定時の出力電圧，１kV と 500V を比較した。

図－3.3.2.3 の圧縮強度分布，**図－3.3.2.5** の圧縮強度と音速の関係は，**図－3.3.2.1** のように小径コアの圧縮強度結果に問題があったことから，明確な関係は得られなかった。

超音波の出力とコア径の関係は，**図－3.3.2.6** のように今回用いた装置Ａでは，φ44 のとき出力電圧１kV でも 500V とほぼ一致しているが，φ24，φ32 は音速が遅い（強度が小さい）場合，出力が大きいとき音速が速くなる傾向がある。

表-3.3.2.1　　コア全長の音速

コアの番号	長さ L(mm)	乾燥(1kV) 伝搬時間 (μs)	乾燥(1kV) 透過音速 (m/sec)	乾燥(500V) 伝搬時間 (μs)	乾燥(500V) 透過音速 (m/sec)
A- 1- 1	–	–	–	–	–
A- 1- 2	–	–	–	–	–
A- 3- 1	–	–	–	–	–
A- 3- 2	302.6	89.6	3966	76.9	3961
A- 4- 1	301.3	85.7	4162	–	–
A- 4- 2	302.6	85.6	4186	–	–
A- 4- 3	302.9	85.1	4219	–	–
C- 3- 1	106.1	39.6	4033	27.0	4002
C- 3- 2	108.8	40.8	3958	28.1	3943
C- 3- 3	105.3	39.2	4067	26.2	4099
C- 3- 4	109.7	38.6	4338	26.0	4304
C- 3- 5	–	–	–	–	–
C- 3- 6	113.4	40.5	4170	27.9	4140
C- 3- 7	209.6	64.4	4101	52.5	4030
C- 3- 8	208.1	64.9	4033	52.4	4010
C- 3- 9	211.7	65.5	4055	53.4	4002
C- 3- 10	210.4	65.2	4055	53.2	3993
C- 3- 11	216.3	66.4	4074	53.7	4066
C- 3- 12	213.7	65.6	4087	53.2	4056
C- 3- 13	–	–	–	–	–
C- 3- 14	407.0	114.8	4010	102.7	3982
C- 4- 1	409.8	110.5	4216	–	–
C- 2- 1	–	–	–	–	–
C- 3- 15	–	–	–	–	–
C- 3- 16	613.2	173.9	3818	162.7	3781
C- 4- 2	613.4	161.3	4145	–	–
C- 4- 3	6 2.3	161.6	4129	–	–

コアの番号	長さ L(mm)	乾燥(1kV) 伝搬時間 (μs)	乾燥(1kV) 透過音速 (m/sec)	乾燥(500V) 伝搬時間 (μs)	乾燥(500V) 透過音速 (m/sec)
B- 2- 1	–	–	–	–	–
B- 2- 2	–	–	–	–	–
B- 2- 3	129.2	45.3	4037	32.2	4075
B- 2- 4	129.5	46.3	3925	34.7	3787
B- 2- 5	130.0	46.8	3880	32.9	4011
B- 2- 6	–	–	–	–	–
B- 2- 7	130.8	45.2	4099	32.9	4036
B- 2- 8	131.5	45.5	4084	33.0	4046
B- 2- 9	–	–	–	–	–
B- 2- 10	–	–	–	–	–
B- 2- 11	–	–	–	–	–
B- 2- 12	134.6	46.9	4005	33.9	4029
B- 2- 13	134.7	46.5	4058	33.4	4095
B- 2- 14	129.2	46.2	3926	32.9	3987
B- 2- 15	–	–	–	–	–
B- 2- 16	–	–	–	–	–
B- 2- 17	–	–	–	–	–
B- A2- 1	49.0	–	–	–	–
B- A2- 2	50.7	–	–	–	–
B- A2- 3	128.8	48.50	3658	35.4	3690
B- A2- 4	132.6	48.70	3746	36.0	3735
B- A2- 5	–	–	–	–	–
B- 3- 1	–	–	–	–	–
B- 3- 2	–	–	–	–	–
B- 3- 3	175.9	54.8	4238	42.1	4228
B- A3- 1	50.6	29.4	3144	16.5	3164
B- A3- 2	52.4	29.7	3193	16.3	3315
B- A3- 3	50.9	29.3	3182	15.9	3306
B- 4- 1	252.2	73.8	4169	–	–
B- 4- 2	199.4	62.1	4086	–	–
B- 4- 3	186.3	58.2	4150	–	–
B- A4- 1	54.8	29.2	3446	–	–
B- A4- 2	47.2	28.2	3169	–	–
B- A4- 3	52.1	28.5	3428	–	–

－：折損により長さ計測不能　＊：鉄筋を含む

表-3.3.2.2 コアの音速，圧縮強度

試料番号		超音波音速測定 1kV	超音波音速測定 500V	圧縮強度
元のコア	TP No.	(m/sec)	(m/sec)	(N/mm^2)
A-1-1	A-1-1	4437	4132	20.2
	A-1-2	4703	4655	15.2
	A-1-3	—	—	—
	A-1-4	4520	4357	25.1
	A-1-5	—	—	—
	A-1-6	4912	4672	18.4
A-1-2	A-1-7	4553	4728	12.4
	A-1-8	4745	4497	12.7
	A-1-9	4882	4719	16.4
	A-1-10	4843	4964	13.3
	A-1-11	4602	4480	22.3
	A-1-12	—	—	—
A-3-1	A-3-1	4214	4214	22.4
	A-3-2	4468	4468	24.5
	A-3-3	4407	4476	27.5
A-3-2	A-3-4	4532	4556	25.3
	A-3-5	4381	4494	25.5
	A-3-6	4464	4510	29.1
A-4-1	A-4-1	4257	*	31.6
A-4-2	A-4-2	4775	*	30.6
A-4-3	A-1-13	4895	4847	30.1
	A-1-14	4644	4644	19.7
	A-1-15	4622	4417	29.8
	A-1-16	4668	4583	24.6
	A-1-17	4737	4565	29.5
	A-1-18	4539	4458	24.8

*:100φ供試体の音速は1kVレンジのみでの計測

試料番号		超音波音速測定 1kV	超音波音速測定 500V	圧縮強度
元のコア	TP No.	(m/sec)	(m/sec)	(N/mm^2)
B-2-1	B-2-1	4675	4641	24.4
	B-2-2	4306	4220	22.3
	B-2-3	—	—	—
B-2-2	B-2-4	4388	4271	25.1
	B-2-5	4901	4979	29.1
B-2-3	B-2-6	4683	4649	17.2
	B-2-7	4495	4563	18.7
B-2-4	B-2-8	4499	4468	21.0
	B-2-9	4302	4302	14.3
B-2-5	B-2-10	4530	4665	23.1
	B-2-11	4373	4435	14.3
B-2-6	B-2-12	4552	4425	20.9
	B-2-13	—	—	—
B-2-7	B-2-14	4460	4397	24.5
	B-2-15	4553	4585	23.4
B-2-8	B-2-16	4474	4538	24.4
	B-2-17	4421	4517	26.9
B-2-9	B-2-18	4403	4497	15.8
	B-2-19	—	—	—
B-2-10	B-2-20	4518	4394	24.6
	B-2-21	—	—	—
B-2-11	B-2-22	4646	4579	16.9
	B-2-23	—	—	—
B-2-12	B-2-24	4545	4513	20.0
	B-2-25	4477	4509	17.9
B-2-13	B-2-26	4743	4708	20.0
	B-2-27	4840	4803	16.4
B-2-14	B-2-28	4304	4164	17.2
	B-2-29	4341	4246	15.8
B-2-15	B-2-30	4689	4554	16.0
	B-2-31	—	—	—
B-2-16	B-2-32	4525	4493	16.6
	B-2-33	—	—	—
B-2-17	B-2-34	4615	4649	16.7
	B-2-35	—	—	—
B-3-1	B-3-1	4370	4370	19.0
	B-3-2	4331	4309	25.1
	B-3-3	4376	4376	29.8
B-3-2	B-3-4	—	—	—
	B-3-5	—	—	—
	B-3-6	4508	4485	28.2
B-3-3	B-3-7	4572	4422	21.4
	B-3-8	4550	4599	28.5
B-4-1	B-4-1	4323	*	29.9
B-4-2	B-4-2	4284	*	26.9
B-4-3	B-4-3	—	—	—

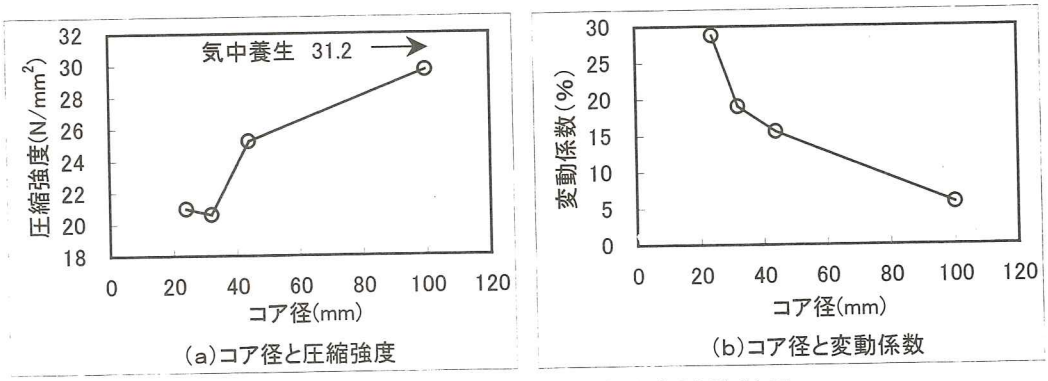
[アスファルト]

B-A2-1	B-A2-1	3339	3316	—
B-A2-2	B-A2-2	3875	3845	2.49
B-A2-3	B-A2-3	3831	3831	—
	B-A2-4	3969	3995	2.42
B-A2-4	B-A2-5	3900	3900	2.29
	B-A2-6	4033	3982	—
B-A2-5	B-A2-7	3765	3743	—
	B-A2-8	—	—	—
B-A3-1	B-A3-1	3307	3373	—
B-A3-2	B-A3-2	3493	3541	—
B-A3-3	B-A3-3	3371	3416	—
B-A4-1	B-A4-1	3629	*	—
B-A4-2	B-A4-2	3233	*	—
B-A4-3	B-A4-3	3497	*	—

試料番号		超音波音速測定 1kV	超音波音速測定 500V	圧縮強度
元のコア	TP No.	(m/sec)	(m/sec)	(N/mm^2)
C-3-1	C-3-1	4311	4421	17.1
C-3-2	C-3-2	4254	4338	20.1
C-3-3	C-3-3	4364	4431	17.6
C-3-4	C-3-4	4483	4529	28.2
C-3-5	C-3-5	—	—	—
C-3-6	C-3-6	4524	4595	27.8
C-3-7	C-3-7	4421	4443	30.4
	C-3-8	4397	4397	19.6
C-3-8	C-3-9	4407	4497	27.1
	C-3-10	4524	4596	26.5
C-3-9	C-3-11	4408	4453	27.6
	C-3-12	4518	4518	29.8
C-3-10	C-3-13	4430	4499	24.3
	C-3-14	4524	4548	29.1
C-3-11	C-3-15	4459	4414	26.4
	C-3-16	4568	4568	19.1
C-3-12	C-3-17	4453	4453	27.0
	C-3-18	4536	4490	23.3
C-3-13	C-3-19	4358	4358	23.9
	C-3-20	4282	4303	17.3
	C-3-21	4550	4526	23.1
	C-3-22	4419	4419	26.4
C-3-14	C-3-23	4513	4422	28.6
	C-3-24	4459	4392	28.1
	C-3-25	4408	4386	30.0
	C-3-26	4620	4620	32.8
C-4-1	C-4-1	4242	*	29.0
	C-4-2	4316	*	32.6
C-2-1	C-2-1	4451	4352	25.9
	C-2-2	4521	4422	24.5
	C-2-3	4539	4435	17.3
	C-2-4	4664	4664	19.2
	C-2-5	4792	4649	16.8
	C-2-6	5054	5012	22.2
	C-2-7	4713	4571	15.8
	C-2-8	4456	4424	18.4
	C-2-9	—	—	—
C-3-15	C-3-27	4342	4386	27.8
	C-3-28	4443	4398	25.7
	C-3-29	4687	4739	26.6
	C-3-30	4597	4549	28.3
	C-3-31	—	—	—
	C-3-32	4460	4531	28.8
C-3-16	C-3-33	4177	4197	25.6
	C-3-34	4254	4274	21.6
	C-3-35	4234	4254	27.4
	C-3-36	4537	4537	17.8
	C-3-37	4471	4540	23.7
	C-3-38	4419	4397	20.5
C-4-2	C-4-3	4333	*	30.0
	C-4-4	4313	*	28.3
	C-4-5	4199	*	28.0
C-4-3	C-4-6	—	—	—
	C-4-7	—	—	—
	C-2-10	4541	4442	25.3
	C-2-11	4724	4618	22.0
	C-2-12	4548	4450	22.0
	C-2-13	4522	4454	22.6
	C-2-14	4774	4699	26.2
	C-2-15	4599	4458	25.4
	C-2-16	4597	4529	22.2
	C-2-17	4710	4638	16.2

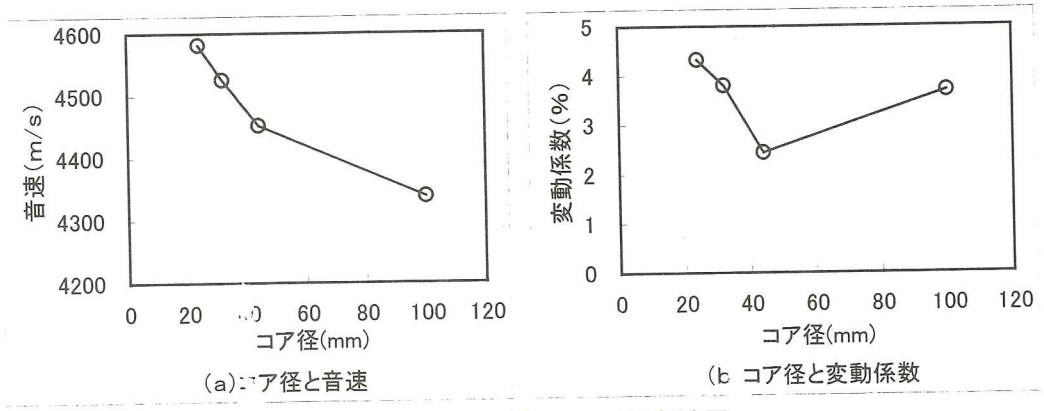
表-3.3.2.3 測定方向，コア径ごとの結果

測定方向（打設方向に対して）	コア径（mm）		供試体A		供試体B			供試体C		供試体ABC		平行・直角	
			圧縮強度（N/mm²）	音速（m/s）	圧縮強度（N/mm²）	音速（m/s）	アスファルト音速	圧縮強度（N/mm²）	音速（m/s）	圧縮強度（N/mm²）	音速（m/s）	圧縮強度（N/mm²）	音速（m/s）
平行	24	個数（個）	9	9						9	9	15	15
		平均	17.3	4578						17.3	4578	21.0	4581
		標準偏差	4.26	229						4.26	229	6.03	198
		変動係数（%）	24.5	5.0						24.5	5.0	28.8	4.3
	32	個数（個）			4	4	2	8	8	12	12	43	43
		平均			25.2	4528	3580	22.7	4536	23.5	4533	20.6	4525
		標準偏差			2.47	307	265	22.35	96	3.04	194	3.91	172
		変動係数（%）			9.8	6.8	7.4	20.3	2.1	12.9	4.3	19.0	3.8
	44	個数（個）	6	6	6	6	3			12	12	48	48
		平均	25.7	4453	25.3	4427	3443			25.5	4440	25.2	4452
		標準偏差	2.14	111	3.95	94	71			3.18	103	3.92	108
		変動係数（%）	8.3	2.5	15.6	2.1	2.1			12.5	2.3	15.5	2.4
	100	個数（個）	2	2	2	2	3			4	4	9	9
		平均	31.1	4516	28.4	4304	3453			29.8	4410	29.7	4338
		標準偏差	0.52	259	1.5	20	165			1.78	212	1.71	160
		変動係数（%）	1.7	5.7	5.4	0.5	4.8			6.0	4.8	5.8	3.7
直角	24	個数（個）	6	6						6	6		
		平均	26.4	4585						26.4	4585		
		標準偏差	3.79	140						3.79	140		
		変動係数（%）	14.4	3.0						14.4	3.0		
	32	個数（個）			23	23	5	8	8	31	31		
		平均			19.3	4507	3890	20.0	4566	19.4	4522		
		標準偏差			3.62	144	95	3.50	200	3.60	162		
		変動係数（%）			18.8	3.2	2.4	17.5	4.4	18.5	3.6		
	44	個数（個）						36	36	36	36		
		平均						25.1	4456	25.1	4456		
		標準偏差						4.13	110	4.13	110		
		変動係数（%）						16.4	2.5	16.4	2.5		
	100	個数（個）						5	5	5	5		
		平均						29.6	4281	29.6	4281		
		標準偏差						1.65	51	1.65	51		
		変動係数（%）						5.6	1.2	5.6	1.2		



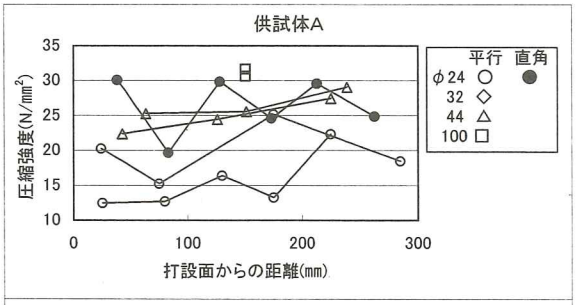
(a)コア径と圧縮強度　(b)コア径と変動係数

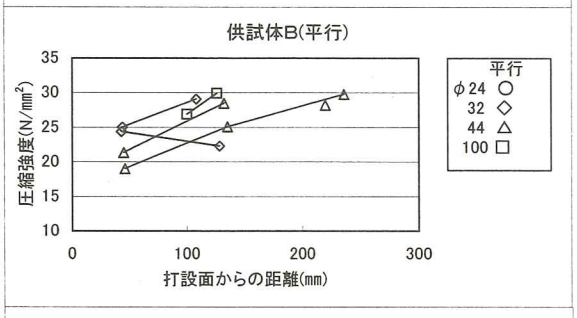
図－3.3.2.1 小径コアの圧縮強度試験結果

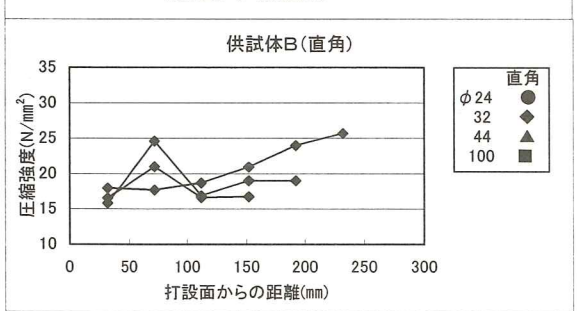


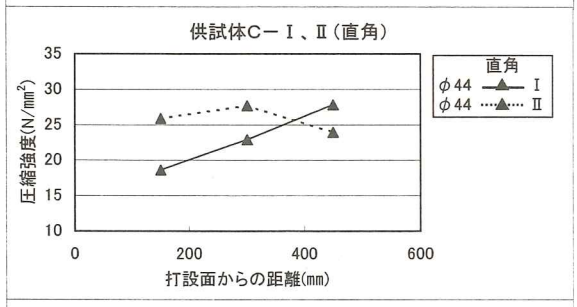
(a)コア径と音速　(b コア径と変動係数

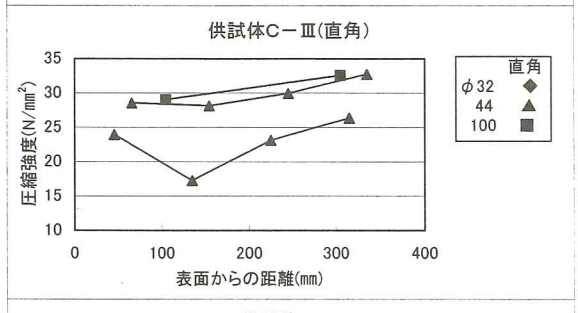
図－3.3.2.2 小径コアの音速結果

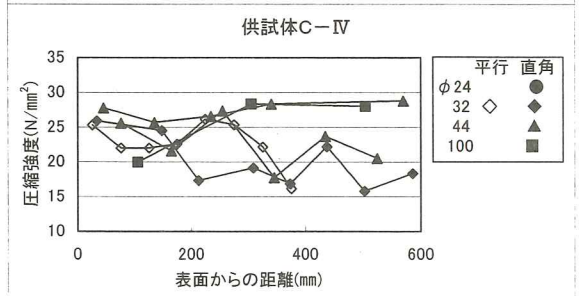




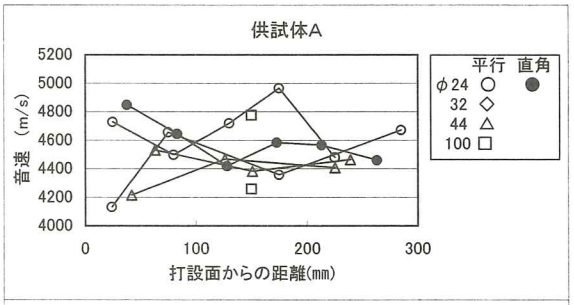


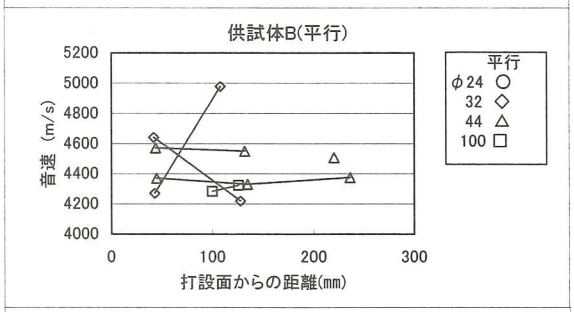


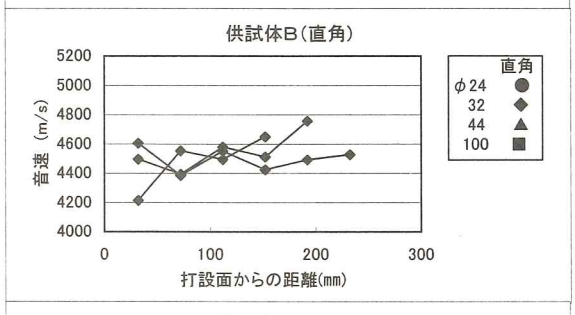


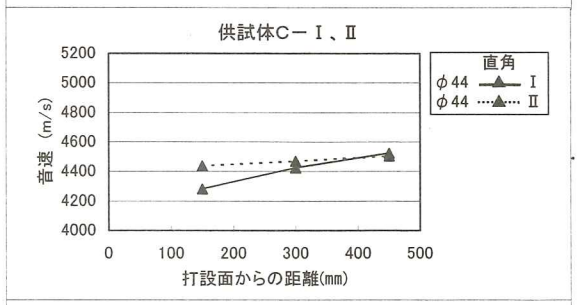


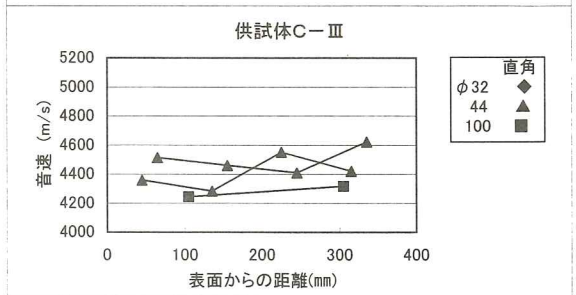
図－3.3.2.3 圧縮強度分布

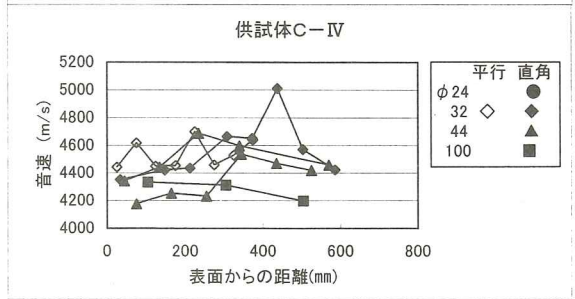




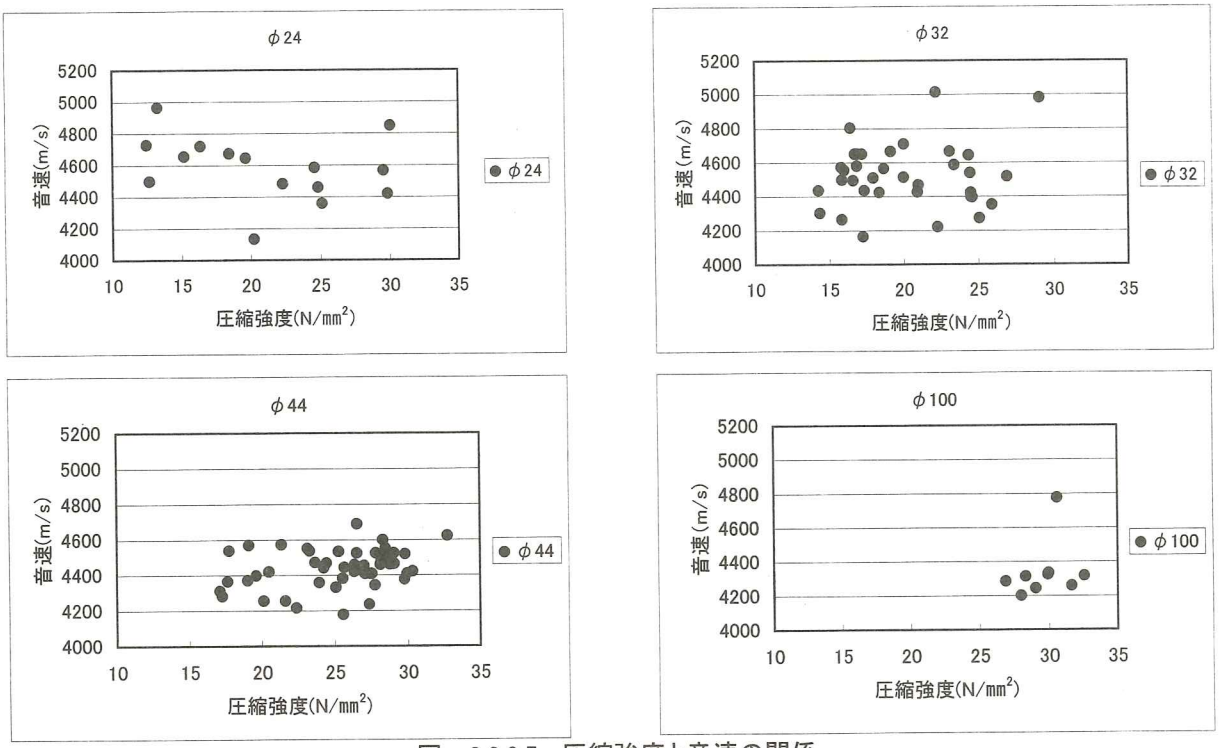




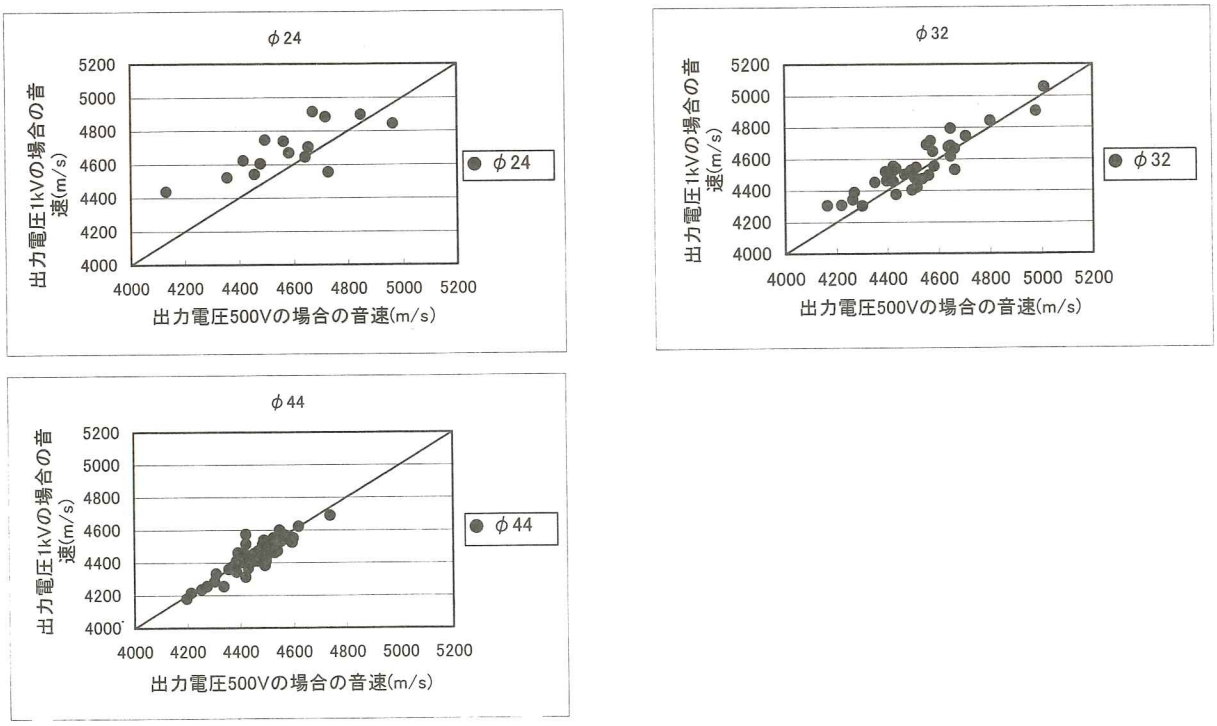




図－3.3.2.4 音速分布



図－3.3.2.5　圧縮強度と音速の関係



図－3.3.2.6　探触子の大きさ、出力電圧の影響

3．3．3　部材厚さ，かぶり厚さの実測値

表－3.3.3.1～3.3.3.3 に部材厚さとかぶり厚さ測定位置の実測結果を示す。

表-3.3.3.1 供試体A

(a)部材厚さ

	h
①	301.3
②	302.0
③	302.6
④	302.7
⑤	302.9

(b)かぶり厚さ

		a	b	c	d	e	f	g	i	j	k	l
打設面	①	17.5	42.0	67.6	90.5	140.2	191.0	240.2	52.8	53.2	53.9	51.6
	②	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	③	16.7	41.8	68.6	92.1	141.9	191.9	242.4	53.0	52.6	53.1	50.9
	④	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	⑤	16.6	40.9	67.2	92.0	142.8	193.6	243.9	53.2	52.8	53.6	51.6

表-3.3.3.2 供試体B

(a)部材厚さ

		a	b	c	d	e
①	As	53.7	54.7	50.3	50.5	51.9
	Co	281.8	252.7	227.2	197.0	173.1
②	As	50.6	52.3	48.0	45.0	47.6
	Co	281.9	252.4	226.9	198.6	172.8
③	As	50.0	54.1	47.9	45.9	50.1
	Co	282.5	253.4	227.4	200.2	175.1
④	As	50.6	54.8	49.0	47.2	50.9
	Co	282.6	252.2	225.0	199.4	175.9
⑤	As	50.3	52.4	50.6	53.6	55.4
	Co	281.8	254.3	226.2	199.6	173.9
⑥	As	51.1	51.7	50.1	50.5	52.4
	Co	281.0	254.3	224.7	198.3	173.6

(b)かぶり厚さ

		a	b	c	d	e
打設面	①	34.6	46.7	62.5	73.6	90.9
	②	34.3	46.5	62.8	76.2	92.1
	③	—	—	—	—	—
	④	—	—	—	—	—
	⑤	33.6	48.1	62.1	77.6	93.9
	⑥	34.2	49.2	61.4	76.7	93.7
底　面	①	234.2	192.9	151.7	110.4	69.1
	②	225.7	184.4	143.1	101.8	60.5
	③	—	—	—	—	—
	④	—	—	—	—	—
	⑤	224.1	182.2	140.3	98.3	56.4
	⑥	230.1	188.4	146.8	105.2	63.5

表-3.3.3.3 供試体C

(a)部材厚さ

		a	b	c	e	f	g
上段	①	106.1	—	108.8	209.6	—	208.1
	②	108.2	109.7	112.3	215.1	211.7	212.1
	③	108.3	—	—	—	—	213.4
	④	109.3	—	114.8	217.7	—	215.4
下段	⑤	407.8	—	412.8	613.8	—	613.7
	⑥	407.6	409.8	410.7	614.2	613.4	613.7
	⑦	407.0	—	—	—	—	613.2
	⑧	404.2	—	406.8	610.3	—	609.7

	上面からの距離(mm)	d
Ⅳ面	25	619.4
	50	619.6
	75	619.5
	100	619.1
	150	619.1
	200	619.1
	250	617.8
	350	617.5
	450	616.6
	550	614.6
	650	610.7
	725	606.1

３．４　超音波法の測定結果

３．４．１　超音波 A(ｴﾙｿﾆｯｸ)

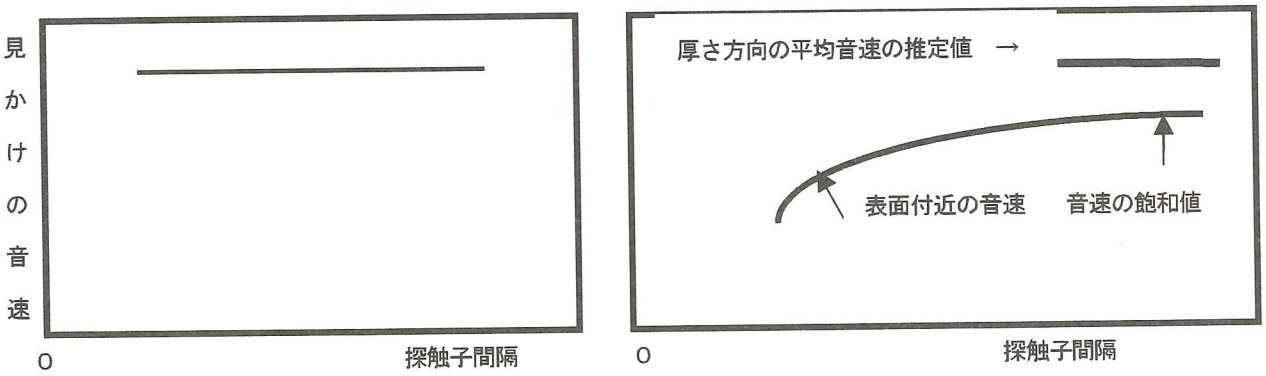
１）目的

厚さ方向の平均音速を、コンクリートの表面で測定する音速から簡易に推定する方法を検討した。

２）方法

例えば厚さ 300mm の版の上面において、探触子間隔１m 付近で測定した表面音速の「何パーセント増し」にすれば必要な平均音速となっているか検討する。この方法を施工現場の条件と削孔内部の実測との対比などにより、データを積み重ね、経験的に、推定精度を上げていく。

コンクリートの内部の音速分布が一様な場合には、**図－3.4.1.1(A)**に示すように、表面を進む縦波音速は探触子間隔を広くしても一定である。波は送信探触子から球面波として同じ速度で半空間に伝搬する。送波に指向性があり、振幅が方向で異なっても音速が大体同じ球面波である。球面波と測定表面の接点ではポアソン比効果により、進行する圧縮波の第一波は表面を押し上げ、受信探触子はプラスの電圧パルスを受信する。こうして縦波は表面を伝搬する。この縦波は虫が表面を這うように伝搬するので creeping wave ともいわれ、横波やレーリ波より速く第一波として確実に受信される。コンクリートの creeping wave は鋼材よりもインピーダンスの関係で受信しやすい。



(A)内部の音速が一定の場合　　(B)表面部の音速が低い場合

図－3.4.1.1　探触子間距離と音速の関係で平均音速を求める説明図

しかしコンクリート版の上部の音速は内部より遅いことが普通である。表面付近のブリーディングなど、また乾燥により水和が不十分となっていることが影響している。表面付近の音速が内部より遅いと、音速と探触子間距離の関係は**図－3.4.1.1**（B）のように飽和曲線となる。ホイヘンスの原理で内部を伝搬する波は球面波から外れ、探触子の距離を離すと波は内部の音速の速い部分を、懸垂線に近い曲線で回り込み、遅い表面部分を直進する波よりも先に受信される。従って飽和曲線を描いた音速分布の場合、１m 離した探触子間の音速よりも内部の音速は速くなる。厳密には回り込む経路の音速と、厚さ方向の平均音速が一致するものではないが、こうして距離を離した安定な飽和部分の表面音速よりも厚さ方向の平均音速が何パーセント増しか速い。この値を経験的に求めようとした。波が回り込む経路は厚さ 300mm の外へは出ない。推定

値は、試験体や現場データからの実績値とした。伝搬経路以外に、材料の若干の異方性も考えられるが、今回は表面の見かけの音速と厚さの反射時間から、平均音速を推定した。

厚さ測定や構造物の音速測定のために、探触子を離して表面音速を測定することは、超音波装置Aを使用し以前より試験してきたが、従来は、縦波音速ではなく受信しやすい２倍以上遅い音速の表面波（レイリー波）しか受信できないなどの指摘もあった。しかし最近は、衝撃弾性波法が普及し、誤解は解消されつつある。

３）測定結果

基礎実験として製作された、探触子間距離と音速の関係の測定結果を以下の各表と図に示す。音速が探触子間隔 1200mm までは 28kHz 探触子を、これ以上の距離では送信に 5kHz 探触子を使用した。伝搬時間 μｓは、AL なしシステムをとってあり、実測の伝搬時間から CAL13.3μｓを引いている。版の打設面と底面、壁(側面)などで表面音速の探触子間距離依存性は異なっている。

表－3.4.1.1　供試体Ａ　第１回測定結果　（伝搬時間：μｓ，音速：m/s，以下同じ）

測定面	測線	距離	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1600	2000	2400
打設面	①	伝搬時間	27.6	53.4	81.5	107.6	161.2	210.6	263.6	316.2	438.3	537.1	616.7
		音速	3623	3745	3681	3717	3722	3799	3794	3795	3650	3724	3892
	③	伝搬時間	30.2	57.3	82.1	108.9	161.3	212.4	264.0	314.9	437.5	535.6	630.5
		音速	3311	3490	3654	3673	3720	3766	3788	3811	3657	3734	3807
	⑤	伝搬時間	28.8	56.5	84.4	109.3	162.2	215.8	263.5	313.6	437.3	569.0	626.0
		音速	3472	3540	3555	3660	3699	3707	3795	3827	3659	3515	3834
	h	伝搬時間	26.9	55.2	82.3	108.2	157.0	208.1	261.2				
		音速	3717	3623	3645	3697	3822	3844	3828				

表－3.4.1.2　供試体Ｂ　第１回測定結果

測定面	測線	距離	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1600	2000
打設面	③	伝搬時間	24.9	51.3	79.1	105.8	155.8	208.4	262.2	314.2	413.9	512.7
		音速	4016	3899	3793	3781	3851	3839	3814	3819	3866	3901
	a	伝搬時間	25.6	51.8	78.0	104.0	157.6	207.1	256.4	307.4		
		音速	3906	3861	3846	3846	3807	3863	3900	3904		
	b	伝搬時間	26.8	53.6	80.0	106.0	159.5	208.6	260.6	310.4		
		音速	3731	3731	3750	3774	3762	3835	3837	3866		
	c	伝搬時間	26.9	53.2	77.7	105.0	156.8	207.9	259.6	310.3		
		音速	3717	3759	3861	3810	3827	3848	3852	3867		
	d	伝搬時間	26.3	53.1	78.2	106.3	156.5	207.9	260.5	310.6		
		音速	3802	3766	3836	3763	3834	3848	3839	3863		
	e	伝搬時間	26.5	52.3	78.7	104.5	153.7	204.0	254.4	307.8		
		音速	3774	3824	3812	3828	3904	3922	3931	3899		
底　面	③	伝搬時間	23.0	48.1	71.9	97.8	146.9	200.3	249.3	297.6	412.7	537.4
		音速	4348	4158	4172	4090	4084	3994	4011	4032	3877	3722
	a	伝搬時間	24.3	48.2	73.0	98.1	146.2	196.1	246.0	295.1		
		音速	4115	4149	4110	4077	4104	4080	4065	4066		
	b	伝搬時間	25.0	50.1	73.8	97.6	146.9	197.0	246.4	294.6		
		音速	4000	3992	4065	4098	4084	4061	4058	4073		
	c	伝搬時間	24.2	49.3	73.6	97.7	147.5	196.5	247.3	299.1		
		音速	4132	4057	4076	4094	4068	4071	4044	4012		
	d	伝搬時間	24.9	50.4	73.0	98.0	148.9	197.5	253.8	300.3		
		音速	4016	3968	4110	4082	4030	4051	3940	3996		
	e	伝搬時間	26.5	48.6	74.5	100.5	150.5	199.3	251.3	301.1		
		音速	3774	4115	4027	3980	3987	4014	3979	3985		

表－3.4.1.3　供試体Ｃ　第１回測定結果

測定面	測線	距離	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1600	2000
表　面	②	伝搬時間	27.5	51.6	81.2	100	149.3	200.9	249.2	296.6	396.7	514.7
		音速	3636	3876	3695	4000	4019	3982	4013	4046	4033	3886
	⑥	伝搬時間	26.5	49.8	75.4	99.9	150.1	199.8	249.6	298.1	398	498.3
		音速	3774	4016	3979	4004	3997	4004	4006	4025	4020	4014
	d	伝搬時間	25.9	51.8	77.3	101.7	152.4	203.1	251.1	301.8		
		音速	3861	3861	3881	3933	3937	3939	3982	3976		
	⑤	伝搬時間	25.7	56.4	77.3	102.7	154	203.2	252.8	303.2		
		音速	3891	3546	3881	3895	3896	3937	3956	3958		
裏　面	Ⅰ面②	伝搬時間	25.6	51.2	74.7	100.1	150.5					
		音速	3906	3906	4016	3996	3987					
	Ⅱ面②	伝搬時間	27.0	50.9	75.8	99.8	149.7	201.4	249.4	303.3		
		音速	3704	3929	3958	4008	4008	3972	4010	3956		
	Ⅲ面⑥	伝搬時間	24.8	51.0	75.6	101.9	151.0					
		音速	4032	3922	3968	3925	3974					
	Ⅳ面⑥	伝搬時間	26.1	50.9	76.2	101.5	152.1	201.8	251	304.2		
		音速	3831	3929	3937	3941	3945	3964	3984	3945		

表－3.4.1.4　供試体Ａ　第２回測定

測定面	測線	距離	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1600	2000
打設面	①	伝搬時間	29.5	54.0	80.6	106.1	131.5	157.6	181.7	207.5	257.8	307.3	413.5	517.5
		音速	3390	3704	3722	3770	3802	3807	3853	3855	3879	3905	3869	3865
	③	伝搬時間	28.3	57.8	81.1	107.8	132.8	158.4	182.7	208.2	256.7	306.4	410.4	511.5
		音速	3534	3460	3699	3711	3765	3788	3831	3842	3896	3916	3899	3910
	⑤	伝搬時間	29.7	56.1	82.7	107.6	131.9	157.4	181.3	208.0	255.5	307.6	410.1	515.1
		音速	3367	3565	3628	3717	3791	3812	3861	3846	3914	3901	3901	3883
	h	伝搬時間	28.6	56.6	80.2	107.6	132.3	153.2	179.6	205.0	254.4			
		音速	3497	3534	3741	3717	3779	3916	3898	3902	3931			

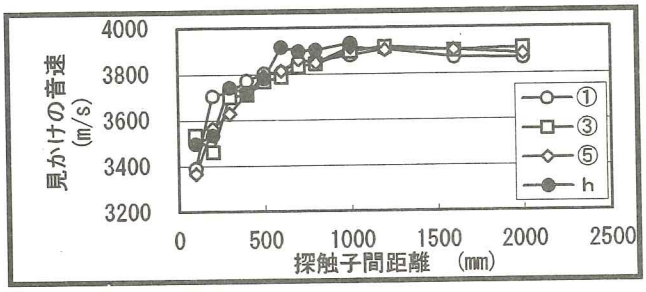
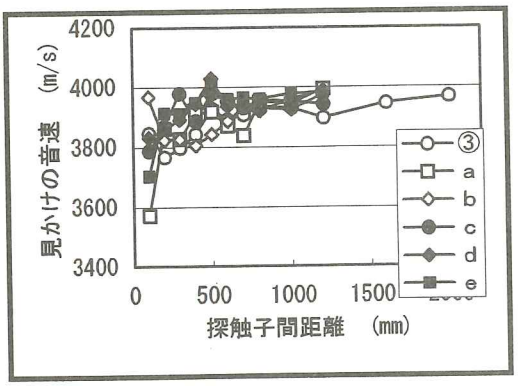


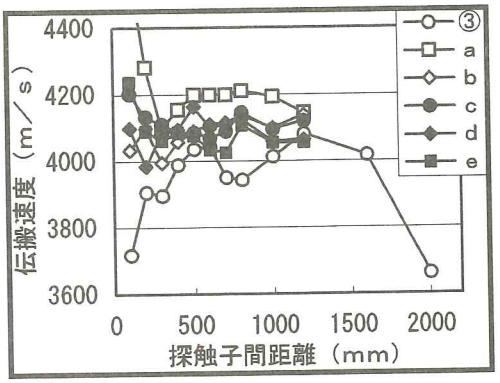
図-3.4.1.1　供試体A　第２回測定　見かけの音速

表－3.4.1.5　供試体Ｂ　第２回測定

測定面	測線	距離	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1600	2000
打設面	③	伝搬速度	26.0	53.1	79.0	104.1	127.3	154.2	179.1	203.3	254.5	308.0	405.5	504.2
		音速	3846	3766	3797	3842	3928	3891	3908	3935	3929	3896	3946	3967
	a	伝搬速度	28.0	51.8	78.4	102.3	127.6	155.0	182.4	202.5	253.5	300.5		
		音速	3571	3861	3827	3910	3918	3871	3838	3951	3945	3993		
	b	伝搬速度	25.2	52.3	78.4	105.1	130.1	154.4	178.0	204.1	252.5	300.9		
		音速	3968	3824	3827	3806	3843	3886	3933	3920	3960	3988		
	c	伝搬速度	26.4	51.7	75.4	102.9	125.7	151.8	178.1	202.2	253.0	304.4		
		音速	3788	3868	3979	3887	3978	3953	3930	3956	3953	3942		
	d	伝搬速度	26.1	51.8	77.1	101.4	124.1	152.4	178.0	203.6	254.8	301.9		
		音速	3831	3861	3891	3945	4029	3937	3933	3929	3925	3975		
	e	伝搬速度	27.0	51.1	76.7	101.3	124.9	151.5	176.6	202.0	251.4	301.4		
		音速	3704	3914	3911	3949	4003	3960	3964	3960	3978	3981		
底　面	③	伝搬速度	26.9	51.2	77.0	100.3	123.9	148.4	177.2	202.9	249.2	294.1	398.4	546.2
		音速	3717	3906	3896	3988	4036	4043	3950	3943	4013	4080	4016	3662
	a	伝搬速度	21.6	46.7	73.2	96.3	119.1	142.9	166.7	190.0	238.5	289.5		
		音速	4630	4283	4098	4154	4198	4199	4199	4211	4193	4145		
	b	伝搬速度	24.8	48.8	75.1	98.6	122.3	146.0	170.1	193.4	244.0	290.0		
		音速	4032	4098	3995	4057	4088	4110	4115	4137	4098	4138		
	c	伝搬速度	23.8	48.4	73.0	97.9	122.4	147.5	171.2	193.0	244.2	291.3		
		音速	4202	4132	4110	4086	4085	4068	4089	4145	4095	4119		
	d	伝搬速度	24.4	50.2	73.5	97.7	120.1	146.4	170.2	193.9	246.4	295.3		
		音速	4098	3984	4082	4094	4163	4098	4113	4126	4058	4064		
	e	伝搬速度	23.6	48.9	73.9	97.9	122.7	148.8	173.9	194.8	246.6	295.9		
		音速	4237	4090	4060	4086	4075	4032	4025	4107	4055	4055		



(a)打設面

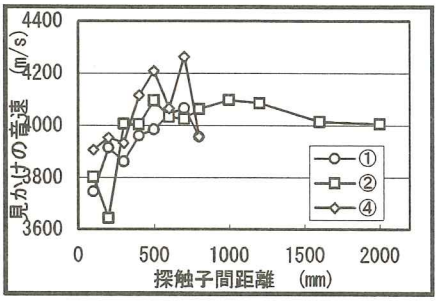


(b)底　面

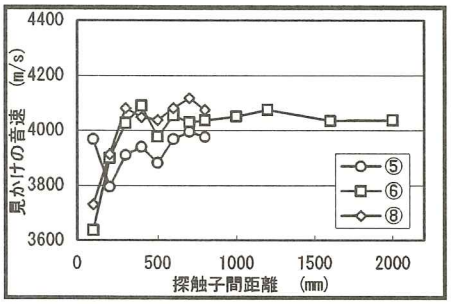
図-3.4.1.2　供試体Ｂ　第２回測定　見かけの音速

表－3.4.1.6　供試体Ｃ・表面　第２回測定

測定面		測線	距離	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1600	2000
表面	上段	①	伝搬時間	26.7	51.1	77.7	101.0	125.5	148.4	172.2	202.2				
			音速	3745	3914	3861	3960	3984	4043	4065	3956				
		②	伝搬時間	26.3	54.9	74.9	99.9	122.1	148.8	173.9	196.9	244.1	293.8	398.6	499.3
			音速	3802	3643	4005	4004	4095	4032	4025	4063	4097	4084	4014	4006
		④	伝搬時間	25.6	50.6	76.3	97.2	118.8	147.6	164.2	202.2				
			音速	3906	3953	3932	4115	4209	4065	4263	3956				
	下段	⑤	伝搬時間	25.2	52.7	76.7	101.5	128.8	151.2	175.2	201.2				
			音速	3968	3795	3911	3941	3882	3968	3995	3976				
		⑥	伝搬時間	27.5	51.3	74.5	97.8	125.7	148.0	173.7	198.2	246.9	294.5	396.5	495.3
			音速	3636	3899	4027	4090	3978	4054	4030	4036	4050	4075	4035	4038
		⑧	伝搬時間	26.8	51.1	73.5	98.8	123.8	147.0	170.0	196.3				
			音速	3731	3914	4082	4049	4039	4082	4118	4075				



(a)表面・上段（測線①～④）



(b)表面・下段（測線⑤～⑧）

図－3.4.1.3　供試体Ｃ・表面　第２回測定　見かけの音速

表－3.4.1.7　供試体Ｃ・裏面　第２回測定

裏面・Ⅰ面

測線	距離	100	200	300	400	500	600	700
①	伝搬時間	27.2	52.3	79.0	104.8	125.5	153.7	178.9
	音速	3676	3824	3797	3817	3984	3904	3913
②	伝搬時間	25.2	53.0	80.5	102.2	123.5	149.2	176.3
	音速	3968	3774	3727	3914	4049	4021	3971
④	伝搬時間	26.1	47.1	68.0	89.7	110.0		
	音速	3831	4246	4412	4459	4545		

裏面・Ⅱ面

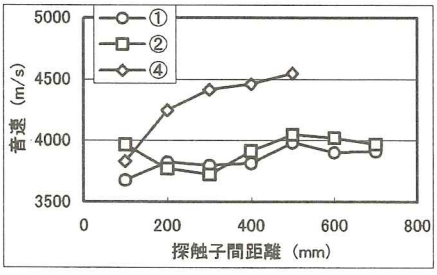
測線	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200
①	27.3	56.3	76.9	101.6	125.2	150.5	175.5	199.5	246.3	294.9
	3663	3552	3901	3937	3994	3987	3989	4010	4060	4069
②	25.5	50.9	75.8	99.7	122.6	147.7	172.2	200.1	243.6	295.5
	3922	3929	3958	4012	4078	4062	4065	3998	4105	4061
④	26.2	51.2	77.9	99.3	125.5	151.1	172.1	201.5	240.5	291.2
	3817	3906	3851	4028	3984	3971	4067	3970	4158	4121

裏面・Ⅲ面

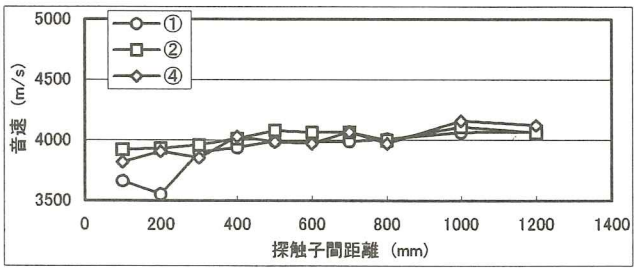
		100	200	300	400	500	600	700
⑤	伝搬時間	26.3	53.7	78.3	103.9	131.6	156.8	181.6
	音速	3802	3724	3831	3850	3799	3827	3855
⑥	伝搬時間	27.0	51.4	83.1	101.1	127.0	150.5	175.1
	音速	3704	3891	3610	3956	3937	3987	3998
⑧	伝搬時間	26.2	50.7	76.7	97.2	122.4	145.0	170.0
	音速	3817	3945	3911	4115	4085	4138	4118

裏面・Ⅳ面

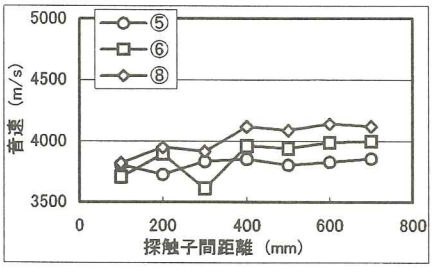
		100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200
⑤	伝搬時間	27.4	54.7	79.9	106.1	129.5	153.2	179.2	206.0	251.8	304.7
	音速	3650	3656	3755	3770	3861	3916	3906	3883	3971	3938
⑥	伝搬時間	25.7	51.3	75.9	102.4	125.9	150.2	178.5	198.6	247.5	300.1
	音速	3891	3899	3953	3906	3971	3995	3922	4028	4040	3999
⑧	伝搬時間	26.6	52.1	77.9	101.6	123	145.7	171	199.1	239.4	288
	音速	3759	3839	3851	3937	4065	4118	4094	4018	4177	4167



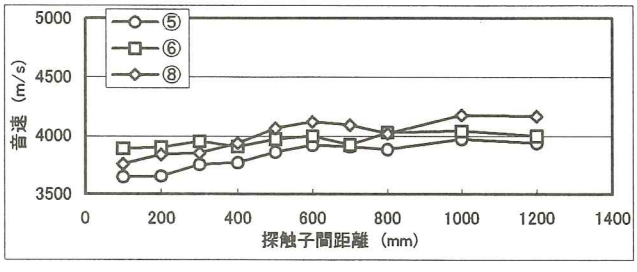
(a)裏面・Ⅰ面



(b)裏面・Ⅱ面



(C)裏面・Ⅲ面



(d)裏面・Ⅳ面

図－3.4.1.4　供試体Ｃ・裏面　第２回測定　見かけの音速

表－3.4.1.8　供試体Ａ　第３回測定

測定面	距離		100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1600	2000	2400
打設面	伝搬時間	①	28.9	52.8	80.6	106.1	131.7	157.4	181.8	206.2	254.6	304.9	404.3	501.6	595.7
	音速		3460	3788	3722	3770	3797	3812	3850	3880	3928	3936	3957	3987	4029
	伝搬時間	③	30.6	58.1	82.9	107.3	133.0	157.4	182.3	205.9	256.2	304.7	403.8	501.3	593.5
	音速		3268	3442	3619	3728	3759	3812	3840	3885	3903	3938	3962	3990	4044
	伝搬時間	⑤	30.3	57.5	83.2	107.7	132.5	157.5	180.9	206.0	255.6	304.5	401.8	498.2	590.9
	音速		3300	3478	3606	3714	3774	3810	3870	3883	3912	3941	3982	4014	4062
	伝搬時間	h	27.7	55.0	79.7	105.3	129.9	152.4	177.9	203.0	252.1				
	音速		3610	3636	3764	3799	3849	3937	3935	3941	3967				

表－3.4.1.9　供試体Ｂ　第３回測定

測定面	距離		100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1600	2000
打設面	伝搬時間	③	27.0	54.6	79.7	105.8	130.1	154.5	180.6	207.0	258.1	307.4	404.6	504.1
	音速		3704	3663	3764	3781	3843	3883	3876	3865	3874	3904	3955	3967
	伝搬時間	a	26.1	52.1	77.3	104.3	129.4	156.0	177.1	208.2	251.2	302.5		
	音速		3831	3839	3881	3835	3864	3846	3953	3842	3981	3967		
	伝搬時間	b	25.9	52.2	80.0	105.8	129.4	156.6	185.8	207.7	250.7	300.1		
	音速		3861	3831	3750	3781	3864	3831	3767	3852	3989	3999		
	伝搬時間	c	27.6	53.0	78.0	102.3	126.2	154.5	177.8	207.8	253.0	300.7		
	音速		3623	3774	3846	3910	3962	3883	3937	3850	3953	3991		
	伝搬時間	d	25.4	54.4	77.3	100.9	128.4	153.9	182.5	202.3	255.7	303.4		
	音速		3937	3676	3881	3964	3894	3899	3836	3955	3911	3955		
	伝搬時間	e	27.5	53.7	78.9	101.8	126.4	152.2	173.4	200.0	248.3	300.6		
	音速		3636	3724	3802	3929	3956	3942	4037	4000	4027	3992		
底　面	伝搬時間	③	29.3	51.8	77.1	100.8	126.3	149.4	177.0	200.5	249.7	296.6	393.3	494.7
	音速		3413	3861	3891	3968	3959	4016	3955	3990	4005	4046	4068	4043
	伝搬時間	a	24.2	48.4	75.2	97.6	122.3	147.2	175.7	193.8	244.3	292.2		
	音速		4132	4132	3989	4098	4088	4076	3984	4128	4093	4107		
	伝搬時間	b	25.0	51.6	76.8	101.1	124.3	146.4	172.9	196.5	244.9	290.8		
	音速		4000	3876	3906	3956	4023	4098	4049	4071	4083	4127		
	伝搬時間	c	24.5	46.8	75.7	98.1	124.0	147.8	171.6	194.2	244.7	292.2		
	音速		4082	4274	3963	4077	4032	4060	4079	4119	4087	4107		
	伝搬時間	d	25.2	52.5	74.4	98.8	125.0	147.7	171.6	196.1	247.3	294.7		
	音速		3968	3810	4032	4049	4000	4062	4079	4080	4044	4072		
	伝搬時間	e	25.4	52.6	76.4	98.2	124.2	147.9	172.5	197.5	248.0	296.1		
	音速		3937	3802	3927	4073	4026	4057	4058	4051	4032	4053		

表－3.4.1.10　供試体Ｃ・表面　第３回測定

測定面		距離		100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1600	2000
表面	上段	伝搬時間	①	26.7	53.2	79.1	103.1	129.8	151.9	177.0	204.6				
		音速		3745	3759	3793	3880	3852	3950	3955	3910				
		伝搬時間	②	26.0	53.3	77.7	102.5	125.7	152.0	175.7	201.5	248.7	297.4	398.5	504.6
		音速		3846	3752	3861	3902	3978	3947	3984	3970	4021	4035	4015	3964
		伝搬時間	④	25.6	52.1	76.7	98.6	118.7	141.2	164.4	202.0				
		音速		3906	3839	3911	4057	4212	4249	4258	3960				
	下段	伝搬時間	⑤	26.1	53	77.8	102.2	126.8	151.9	175.2	203.8				
		音速		3831	3774	3856	3914	3943	3950	3995	3925				
		伝搬時間	⑥	28.2	52.2	75.1	99.7	123.8	148.6	174.9	196.8	248.2	293.9	387.7	482.8
		音速		3546	3831	3995	4012	4039	4038	4002	4065	4029	4083	4127	4143
		伝搬時間	⑧	28.2	51.6	75.5	100.2	124.6	147.6	171.9	195.5				
		音速		3546	3876	3974	3992	4013	4065	4072	4092				
		伝搬時間	d	26.1	55.6	80.7	104.3	130.2	156.1	179.1	203.9	257.5	307.6		
		音速		3831	3597	3717	3835	3840	3844	3908	3923	3883	3901		
		伝搬時間	⑤	28.2	54.2	77.4	103.5	129.9	153.2	177.7	203	251.3	299.9		
		音速		3546	3690	3876	3865	3849	3916	3939	3941	3979	4001		

表－3.4.1.11　供試体Ｃ・裏面　第３回測定

測定面		距離		100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200
裏面	Ⅰ面	伝搬時間	①	31.5	57.5	84.4	109.2	135.2	161.1	191.0			
		音速		3175	3478	3555	3663	3698	3724	3665			
		伝搬時間	②	26.9	55.1	80.3	105.4	129.6	156.4	181.1			
		音速		3717	3630	3736	3795	3858	3836	3865			
		伝搬時間	④	28.5	49.9	69.8	90.5	112.2	147.7				
		音速		3509	4008	4298	4420	4456	4062				
	Ⅱ面	伝搬時間	①	28.5	54.7	79.8	104.6	127.3	155.2	178.1	200.2	248.0	298.0
		音速		3509	3656	3759	3824	3928	3866	3930	3996	4032	4027
		伝搬時間	②	28.5	53.1	78.0	100.8	125.3	149.6	176.3	199.1	247.3	296.9
		音速		3509	3766	3846	3968	3990	4011	3971	4018	4044	4042
		伝搬時間	④	27.7	53.0	78.1	101.3	128.8	149.0	176.2	197.4	241.0	293.7
		音速		3610	3774	3841	3949	3882	4027	3973	4053	4149	4086
	Ⅲ面	伝搬時間	⑤	28.4	56.6	81.0	107.1	133.7	159.0	182.4			
		音速		3521	3534	3704	3735	3740	3774	3838			
		伝搬時間	⑥	27.1	52.2	78.0	102.4	126.9	150.7	174.4			
		音速		3690	3831	3846	3906	3940	3981	4014			
		伝搬時間	⑧	26.1	51.6	75.1	100.6	123.9	146.5	173.4			
		音速		3831	3876	3995	3976	4036	4096	4037			
	Ⅳ面	伝搬時間	⑤	28.3	54.1	81.8	108.1	131.9	155.1	181.4	206.4	254.2	303.1
		音速		3534	3697	3667	3700	3791	3868	3859	3876	3934	3959
		伝搬時間	⑥	28.1	52.3	77.1	101.9	125.2	151.5	175.8	200.9	248	295.9
		音速		3559	3824	3891	3925	3994	3960	3982	3982	4032	4055
		伝搬時間	⑧	25.8	51.3	75.2	99.0	125.4	148.9	169.3	193.8	240.2	287.5
		音速		3876	3899	3989	4040	3987	4030	4135	4128	4163	4174

表-3.4.1.12 厚さ(反射時間)測定結果

供試体	測定面		測定位置	厚さ実測値	反射時間（μs）		
				(mm)	第１回測定	第２回測定	第３回測定
A		打設面	①—h	301.3	142.5	149.0	149.5
			③—h	302.6	141.5	153.5	152.0
			⑤—h	302.9	150.5	147.0	145.0
			h	301.3	141.5	153.5	152.0
		側 面	h	—	—	—	609.5
			z	—	—	—	607.5
			③	—	—	—	1252.0
			⑥	—	—	—	1252.5
B		打設面	a	282.5	146.5	142.0	142.5
			b	253.4	130.0	124.0	124.5
			c	227.4	122.0	116.5	114.0
			d	200.2	104.0	101.5	102.0
			e	175.1	84.5	89.0	89.5
			③	227.4	122.0	116.5	114.0
		底 面	a	282.5	139.0	142.5	142.5
			b	253.4	128.5	131.0	125.5
			c	227.4	122.0	117.0	114.0
			d	200.2	104.5	98.0	102.0
			e	175.1	84.5	89.5	88.0
			③	227.4	122.0	117.0	114.0
C	表 面	Ⅰ	①	108.8		55.0	48.0
			②	109.7	52.5	54.0	53.0
			④	114.8		58.5	57.0
		Ⅱ	①	209.6		93.0	102.5
			②	211.7	106.5	106.5	107.0
			④	211.7		106.0	106.0
		Ⅲ	⑤	412.8		200.5	201.0
			⑥	409.8	199.0	199.5	204.5
			⑧	406.8		199.5	199.5
		Ⅳ	⑤	613.8		331.0	312.5
			⑥	613.4	298.5	327.5	298.5
			⑧	610.3		328.5	298.5
		a—Ⅰ	①	108.8		55.0	48.0
			②	109.7	52.5	54.0	53.0
			④	114.8		58.5	57.0
		b—Ⅱ	①	209.6		93.0	102.5
			②	211.7	106.5	106.5	107.0
			④	211.7		106.0	106.0
		a—Ⅲ	⑤	412.8		200.5	201.0
			⑥	409.8	199.0	199.5	204.5
			⑧	406.8		199.5	199.5
		b—Ⅳ	⑤	613.8		331.0	312.5
			⑥	613.4	298.5	327.5	298.5
			⑧	610.3		328.5	298.5
	裏 面	Ⅰ	①	108.8		51.5	53.0
			②	109.7	53.0	48.5	52.5
			④	114.8		54.0	52.5
		Ⅱ	①	209.6		96.0	106.5
			②	211.7	104.9	111.0	104.0
			④	211.7		102.0	106.5
		Ⅲ	⑤	412.8		193.0	208.5
			⑥	409.8	204.0	199.5	208.0
			⑧	406.8		199.5	201.0
		Ⅳ	⑤	613.8		321.5	307.0
			⑥	613.4	299.0	327.5	316.0
			⑧	610.3		331.5	307.5

3.4.2　超音波B(ウルコン)

(1) 校正用試験体測定結果

表－3.4.2.1　測定器Ｎｏ．１，Ｎｏ．２

材質	長さ（ｍｍ）	測定器Ｎｏ．１ 音速(m/s) 室外 1回目	2回目	3回目	4回目	室内 3回目	4回目	測定器Ｎｏ．２ 音速(m/s) 室外 1回目	2回目	3回目	室内 3回目
アルミニウム	300.0	6356	6233	6307	6272	6211	6285	6415	6303	6246	6276
アクリル	300.0	2744	2756	2743	2758	2723	2717	2742	2751	2741	2733
花崗岩	305.8	4072	4228	4289	4362	4269	4338	4195	4210	4231	4329

(2) 透過法による音速測定結果

表－3.4.2.2　供試体Ａ

測定位置	実測厚さ（ｍｍ）	音速（ｍ／ｓ） 1回目	2回目	3回目
③	2500	－	4232	4279
⑥	2500	－	4274	4286
z	1200	－	－	4275
h	1200	－	4258	4317

表－3.4.2.3　供試体Ｂ

位置		(mm) Co	音速(m/s) 1回目	2回目	3回目	(mm) As	Co	音速(m/s) 4回目
打設面	③a	282.5	4130	4179	4142	50.0	282.5	4006
	③b	253.4	－	4120	4134	54.1	253.4	3983
	③c	227.4	4090	4039	3996	47.9	227.4	4556
	③d	200.2	－	4154	4188	45.9	200.2	3906
	③e	175.1	4101	4101	4130	50.1	175.1	3760
底面	③a	282.5	－	4130	4167	50.0	282.5	4030
	③b	253.4	－	4147	4100	54.1	253.4	4004
	③c	227.4	－	4053	4011	47.9	227.4	4556
	③d	200.2	－	4215	4154	45.9	200.2	3876
	③e	175.1	－	4110	4082	50.1	175.1	3728

表－3.4.2.4　供試体Ｃ

測定位置		実測厚さ(mm)	測定結果 音速(m/s) 1回目	2回目	3回目	測定位置		実測厚さ(mm)	測定結果 音速(m/s) 1回目	2回目	3回目
表	①c	108.8	－	3872	3845	裏	①c	108.8	－	3928	3818
	②c	112.3	－	4206	4144		②c	112.3	－	4206	4069
	④c	114.8	－	4057	4071		④c	114.8	－	4000	4115
	⑤c	412.8	－	4051	4116		⑤c	412.8	－	4075	4116
	⑥c	410.7	－	4136	4195		⑥c	410.7	－	4140	4195
	⑧c	406.8	－	4216	4287		⑧c	406.8	－	4242	4269
	①e	209.6	－	4142	4070		①e	209.6	－	4102	4094
	②e	215.1	－	4218	4177		②e	215.1	－	4218	4193
	④e	217.7	－	4211	4211		④e	217.7	－	4219	4203
	⑤e	613.8	－	4128	4173		⑤e	613.8	－	4136	4156
	⑥e	614.2	－	4125	4153		⑥e	614.2	－	4125	4164
	⑧e	610.3	－	4289	4322		⑧e	610.3	－	4283	4307
側面	76φ左全⑤	2200	－	4122	4151						
	76φ左全⑥	2200	－	4237	4291						
	76φ左短⑤	1400	－	4194	4230						
	76φ左短⑥	1400	－	4245	4272						
	76φ右全⑤	2200	－	4082	4159						
	76φ右全⑥	2200	－	4233	4297						
	76φ右短⑤	1400	－	4195	4242						
	76φ右短⑥	1400	－	4230	4272						

(3) 伝搬速度測定結果

表－3.4.2.5　供試体Ａ・Ｂ

距離	表面音速(m/s)															
	供試体A				供試体B											
(mm)	No.	第1回	第2回	第3回	No.	第1回	第2回	第3回	No.	第1回	第2回	第3回	No.	第1回	第2回	第3回
100		3906	3704	3584		—	4167	4115		—	—	4132		—	—	3953
200		—	3883	3861		—	3976	3824		—	—	3976		—	—	4032
300		—	—	—	打設	—	—	3759	打設	—	—	3741	打設	—	—	3827
300	①	4138	4167	4451	③	3922	4219	4121	b	—	—	4329	d	—	—	4458
400		4069	3937	3876		4061	4197	4057		—	—	4053		—	—	4255
500		4085	4036	4000		3888	3990	4078		—	—	3990		—	—	4115
600		3997	3883	3755		3849	4065	4155		—	—	3955		—	—	3904
700		4000	4065	3959		3798	4137	4075		—	—	3993		—	—	3982
平均		4058	4018	4008		3903	4122	4097		—	—	4064		—	—	4143
100		3891	3650	3676		4405	4329	4032		—	—	4386		—	—	4367
200		—	3643	3442		—	4228	3984		—	—	4158		—	—	4049
300		—	—	3663	底面	—	—	3827	底面	—	—	3963	底面	—	—	3851
300	③	4054	3947	4093	③	4710	4839	4511	b	—	—	4594	d	—	—	4471
400		3810	4004	3949		4301	4115	4269		—	—	3839		—	—	4246
500		4036	4023	3981		4042	4274	4255		—	—	3782		—	—	3873
600		3989	3934	4003		4149	4222	4213		—	—	4093		—	—	4065
700		3977	3995	4002		4063	4230	4167		—	—	4144		—	—	3955
平均		3973	3981	4005		4253	4336	4283		—	—	4090		—	—	4122
100		3861	3690	3257		—	4049	4219		—	3953	4016		—	4000	4016
200		—	3766	3552		—	4132	4016		—	3960	3960		—	4090	4024
300		—	—	3667	打設	—	—	3881	打設	—	—	3841	打設	—	—	3836
300	⑤	4065	4016	4155	a	4121	4386	4622	c	3979	4451	4354	e	3974	4208	4342
400		3941	4049	4171		4008	3964	4032		3817	3902	4206		3968	4111	4202
500		4019	4078	4026		3975	3805	3894		3855	4112	4223		3897	3994	4125
600		3989	4082	4013		3929	3783	4051		3819	3934	4000		3894	3940	4112
700		4113	4044	4051		3774	3993	4000		3861	4037	4063		3928	4108	4039
平均		4025	4054	4083		3961	3986	4120		3866	4087	4169		3932	4072	4164
100		4000	3876	3861		4878	4525	4587		4566	4329	4566		4425	4237	4505
200		—	3810	3697		—	4415	4415		—	4283	4141		—	4292	4211
300		—	—	3856	底面	—	—	4000	底面	—	—	3916	底面	—	—	3974
300	h	4138	4219	4076	a	4451	4886	4354	c	4777	4587	4580	e	4702	4167	3995
400		3883	4260	4119		4128	4301	4237		4115	4124	4233		4499	4044	4167
500		4143	4136	4013		4065	4170	4003		4177	4205	4102		4198	4075	3994
600		3966	4187	4161		4132	4267	3947		4190	4304	4076		4104	4190	3987
700		4023	4096	4063		4079	4144	4021		4056	4222	4189		4079	4212	4011
平均		4031	4180	4086		4171	4354	4113		4263	4288	4236		4317	4138	4031

注)①100mm～300 mm の使用探触子は，送信φ20，受信φ20
②300～700mm は，送信φ76，受信φ56
③平均値は，300～700mm を使用

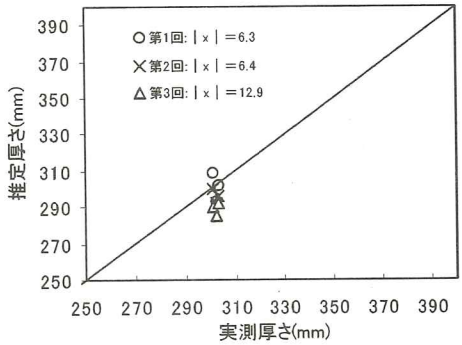
表－3.4.2.6　供試体Ｃ

距離	表面音速(m/s)																			
(mm)	No.	第1回	第2回	第3回	No.	第1回	第2回	第3回	No.	第1回	第2回	第3回	No.	第1回	第2回	第3回	No.	第1回	第2回	第3回
100		—	4405	4098		4348	4310	4274		—	4065	3571		4255	4348	4032		—	4566	4219
200		—	4141	3861		—	4202	3992		—	3929	3623		—	4202	3976		—	4264	4073
300	表	—	—	3891	表	—	—	—	裏	—	—	—	裏	—	—	3974	裏	—	—	4071
300	上段	—	4348	4202	下段	4464	4666	4342	Ⅰ面	—	4335	4196	Ⅱ面	4552	4651	3958	Ⅲ面	—	4027	4386
400	①	—	4320	4246	⑥	4415	4343	4180	①	—	4197	4004	②	4400	4274	4098	⑧	—	4119	4376
500		—	4082	4156		4329	4170	4119		—	4082	3774		4340	4119	4198		—	4352	4363
600		—	4246	4132		4234	4286	4208		—	3863	3599		4240	4261	4040		—	4211	4367
700		—	3922	4025		4207	4065	4130		—	3676	3132		4242	4172	3989		—	4016	4271
平均		—	4183	4152		4330	4306	4195		—	4031	3741		4355	4295	4057		—	4145	4353
100		4444	4505	4115		—	4444	4065		4329	4184	4082		—	4184	4065		—	4149	3984
200		—	4274	3960		—	4310	4202		—	4124	3817		—	4132	3922		—	4024	3781
300	表	—	—	—	表	—	—	4071	裏	—	—	3717	裏	—	—	3922	裏	—	—	3764
300	上段	4644	4219	4298	下段	—	4190	4231	Ⅰ面	4532	4518	4243	Ⅱ面	—	4525	4038	Ⅳ面	—	4367	3866
400	②	4381	4040	4193	⑧	—	4292	4158	②	4430	4103	4175	④	—	3799	4082	⑤	—	4171	3984
500		4303	4202	4160		—	4112	4055		4367	4072	3956		—	4227	4136		—	4102	3965
600		4431	4418	4178		—	4298	4164		4258	4112	3896		—	4283	4098		—	4178	3987
700		4279	4263	4167		—	4271	4135		4274	3980	3749		—	4260	4096		—	4065	3980
平均		4408	4229	4199		—	4233	4149		4372	4157	4004		—	4219	4090		—	4177	3956
100		—	4425	4184		4310	4098	4065		—	4292	4049		—	4082	4049		4202	4425	4202
200		—	4274	3992		—	3899	3817		—	4494	4283		—	3891	3717		—	4184	4024
300	表	—	—	4060		—	—	—	裏	—	—	4237	裏	—	—	3797	裏	—	—	4032
300	上段	—	4594	4367	表d	4348	4405	4478	Ⅰ面	—	4478	4934	Ⅲ面	—	4280	4138	Ⅳ面	4666	4323	3958
400	④	—	4459	4449		4260	4154	4278	④	—	4283	4372	⑤	—	4278	4024	⑥	4353	4128	4065
500		—	4492	4405		4219	3994	3987		—	3802	4587		—	4170	3940		4292	4209	4016
600		—	4370	4392		4196	4011	3868		—	3836	3711		—	3911	3919		4219	4152	4054
700		—	4051	3913		4162	4032	3763		—	3876	—		—	3962	3712		4230	4140	3980
平均		—	4393	4305		4237	4119	4075		—	4055	4401		—	4120	3947		4352	4190	4014
100		—	4425	3984		4255	4184	4082		—	4184	3802		4310	4348	4237		—	4651	4329
200		—	4124	3906		—	4049	3945		—	4175	3810		—	4141	4107		—	4338	4193
300	表	—	—	—		—	—	3927	裏	—	—	3896	裏	—	—	—	裏	—	—	4082
300	上段	—	4021	4444	表f	4615	4418	4286	Ⅱ面	—	4552	4267	Ⅲ面	4511	4249	3927	Ⅳ面	—	4280	4049
400	⑤	—	3683	4188		4376	4197	4224	①	—	4057	4206	⑥	4338	4061	4115	⑧	—	4464	4175
500		—	4042	4068		4296	3978	4153		—	4108	4095		4255	4019	4029		—	4119	4174
600		—	3947	4090		4084	4021	4112		—	4170	4060		4181	4112	4228		—	4280	4205
700		—	4065	4101		4130	4063	4067		—	4232	3995		4242	4005	4049		—	4324	4204
平均		—	3952	4178		4300	4135	4168		—	4224	4125		4306	4089	4070		—	4293	4161

(4) 厚さ測定結果

表－3.4.2.7 供試体A

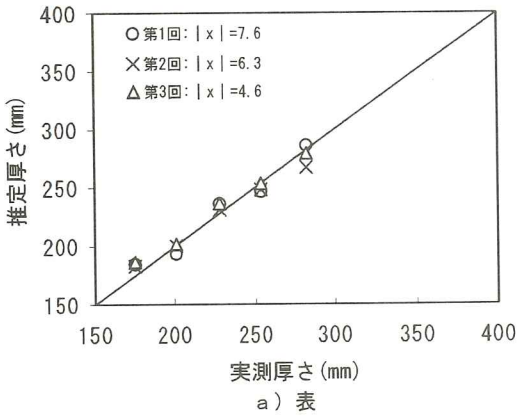
測定位置	実測厚さ	第1回 伝搬時間	第1回 表面音速	第1回 推定厚さ	第1回 誤差	第2回 伝搬時間	第2回 表面音速	第2回 推定厚さ	第2回 誤差	第3回 伝搬時間	第3回 表面音速	第3回 推定厚さ	第3回 誤差
	mm	μs	m/s	mm	mm	μs	m/s	mm	mm	μs	m/s	mm	mm
①h	301.2	76.2	4058	309.2	8.0	74.6	4018	299.7	−1.5	72.4	4008	290.2	−11.0
③h	302.6	73.7	3973	292.9	−9.7	73.3	3981	291.8	−10.8	71.3	4005	285.6	−17.0
⑤h	302.9	75.0	4025	301.7	−1.2	73.0	4054	295.9	−7.0	71.6	4083	292.3	−10.6
絶対値平均					6.3				6.4				12.9



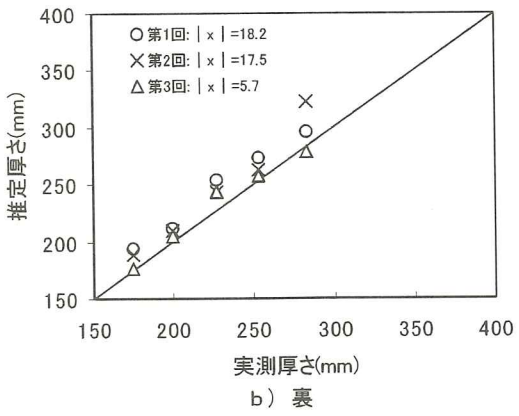
図－3.4.2.1 実測厚さと推定厚さの関係

表－3.4.2.8 供試体B

測定面	測定位置	実測厚さ	第1回 伝搬時間	第1回 表面音速	第1回 推定厚さ	第1回 誤差	第2回 伝搬時間	第2回 表面音速	第2回 推定厚さ	第2回 誤差	第3回 伝搬時間	第3回 表面音速	第3回 推定厚さ	第3回 誤差
		mm	μs	m/s	mm	mm	μs	m/s	mm	mm	μs	m/s	mm	mm
表	③a	282.5	72.5	3961	287.0	4.5	67.1	3986	267.5	−15.0	67.9	4120	279.7	−2.8
	③b	253.4	63.0	3903	246.0	−7.4	60.3	4122	248.6	−4.8	62.4	4064	253.6	0.2
	③c	227.4	61.1	3866	236.2	8.8	56.4	4087	230.5	3.1	56.7	4167	236.3	8.9
	③d	200.2	49.3	3903	192.3	−7.9	48.4	4122	199.5	−0.7	48.5	4143	200.9	0.7
	③e	175.1	46.9	3932	184.4	9.3	44.9	4072	182.8	7.7	44.6	4164	185.7	10.6
絶対値平均						7.6				6.3				4.6
裏	③a	282.5	71.1	4171	296.7	14.2	74.0	4354	322.2	39.7	67.9	4113	279.3	−3.2
	③b	253.4	64.1	4253	272.5	19.1	60.6	4336	262.8	9.4	62.9	4090	257.3	3.9
	③c	227.4	59.5	4263	253.6	26.2	56.8	4288	243.6	16.2	57.3	4236	242.7	15.3
	③d	200.2	49.9	4253	212.1	11.9	48.4	4336	209.9	9.7	49.6	4122	204.5	4.3
	③e	175.1	45.1	4317	194.8	19.7	45.4	4138	187.9	12.8	43.9	4031	177.0	1.9
絶対値平均						18.2				17.5				5.7



a）表

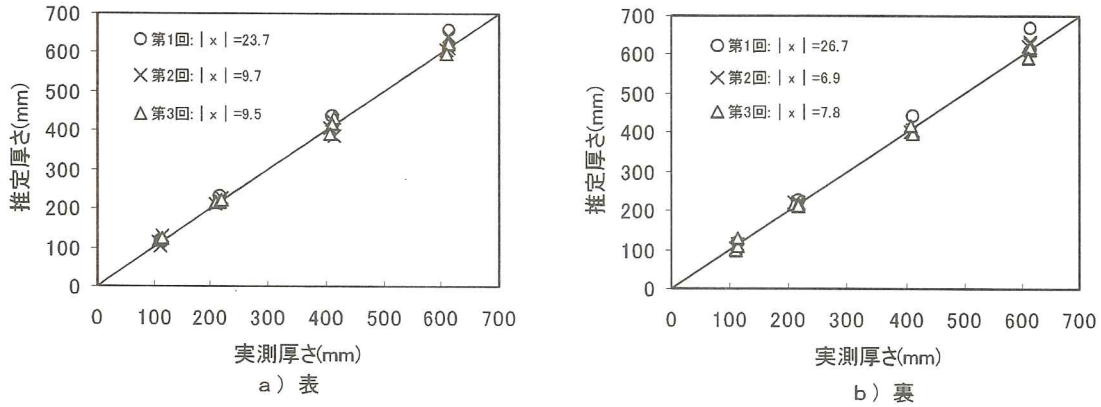


b）裏

図－3.4.2.2 実測厚さと推定厚さの関係

表－3.4.2.9　供試体C

測定回数	測定位置		実測厚さ mm	表 伝搬時間 μs	表 表面音速 m/s	表 推定厚さ mm	表 誤差 mm	裏 伝搬時間 μs	裏 表面音速 m/s	裏 推定厚さ mm	裏 誤差 mm
1回目	Ⅰ	①c	108.8	–	–	–	–	–	–	–	–
		②c	112.3	26.6	4408	117.4	5.1	27.2	4372	119.1	6.8
		④c	114.8	–	–	–	–	–	–	–	–
	Ⅱ	①f	209.6	–	–	–	–	–	–	–	–
		②f	215.1	52.4	4408	230.8	15.7	52.2	4355	227.5	12.4
		④f	217.7	–	–	–	–	–	–	–	–
	Ⅲ	⑤c	412.8	–	–	–	–	–	–	–	–
		⑥c	410.7	101.3	4330	438.6	27.9	103.1	4306	443.9	33.2
		⑧c	406.8	–	–	–	–	–	–	–	–
	Ⅳ	⑤f	613.8	–	–	–	–	–	–	–	–
		⑥f	614.2	152.5	4330	660.3	46.1	153.7	4352	668.8	54.6
		⑧f	610.3	–	–	–	–	–	–	–	–
	絶対値平均						23.7				26.7
2回目	Ⅰ	①c	108.8	26.8	4183	112.1	3.3	25.1	4031	101.2	−7.6
		②c	112.3	24.5	4229	103.6	−8.7	26.6	4157	110.6	−1.7
		④c	114.8	29.3	4393	128.7	13.9	28.3	4055	114.8	0.0
	Ⅱ	①f	209.6	50.7	4183	212.1	2.5	51.8	4224	218.8	9.2
		②f	215.1	51.2	4229	216.5	1.4	50.8	4295	218.2	3.1
		④f	217.7	51.6	4393	226.7	9.0	52.1	4219	219.8	2.1
	Ⅲ	⑤c	412.8	98.2	3952	388.1	−24.7	98.4	4120	405.4	−7.4
		⑥c	410.7	98.8	4306	425.4	14.7	99.5	4089	406.9	−3.8
		⑧c	406.8	96.6	4233	408.9	2.1	97.1	4145	402.5	−4.3
	Ⅳ	⑤f	613.8	154.2	3982	614.0	0.2	150.7	4177	629.5	15.7
		⑥f	614.2	149.9	4306	645.5	31.3	150.7	4190	631.4	17.2
		⑧f	610.3	143.0	4233	605.3	−5.0	144.6	4293	620.8	10.5
	絶対値平均						9.7				6.9
3回目	Ⅰ	①c	108.8	28.8	4152	119.6	10.8	26.7	3741	99.9	−8.9
		②c	112.3	28.8	4199	120.9	8.6	27.3	4004	109.3	−3.0
		④c	114.8	28.3	4305	121.8	7.0	28.9	4401	127.2	12.4
	Ⅱ	①f	209.6	51.7	4152	214.7	5.1	52.7	4125	217.4	7.8
		②f	215.1	51.6	4199	216.7	1.6	52.9	4057	214.6	−0.5
		④f	217.7	51.3	4305	220.8	3.1	51.5	4090	210.6	−7.1
	Ⅲ	⑤c	412.8	103.2	4178	431.2	18.4	101.6	3947	401.0	−11.8
		⑥c	410.7	99.2	4195	416.1	5.4	97.7	4070	397.6	−13.1
		⑧c	406.8	94.8	4149	393.3	−13.5	95.8	4353	417.0	10.2
	Ⅳ	⑤f	613.8	150.7	4178	629.6	15.8	154.9	3956	612.8	−1.0
		⑥f	614.2	148.9	4195	624.6	10.4	153.4	4014	615.7	1.5
		⑧f	610.3	143.7	4149	596.2	−14.1	142.6	4161	593.4	−16.9
	絶対値平均						9.5				7.8

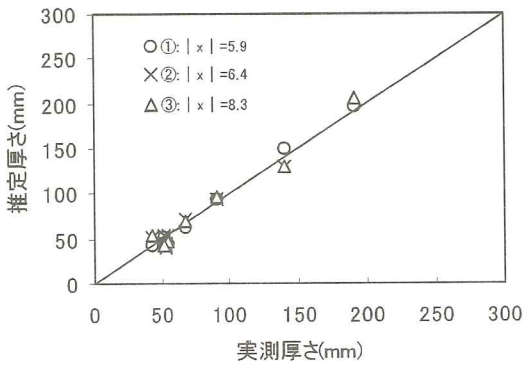


図－3.4.2.3　実測厚さと推定厚さの関係

(5) 鉄筋のかぶり厚さ測定結果

表－3.4.2.10　供試体Ａ

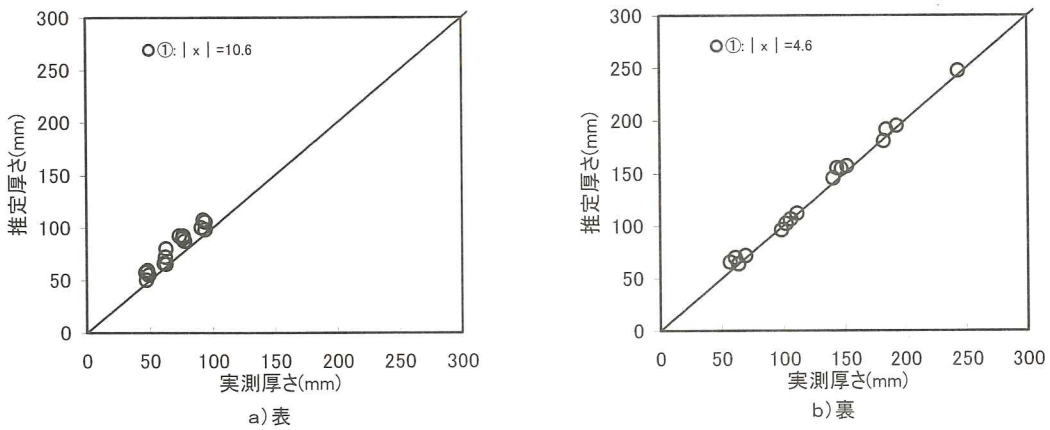
ラインNo.	測定位置	実測厚さ mm	第1回 伝搬時間 μs	第1回 表面音速 m/s	第1回 かぶり厚さ mm	第1回 誤差 mm	第2回 伝搬時間 μs	第2回 表面音速 m/s	第2回 かぶり厚さ mm	第2回 誤差 mm
①	a	17.5	－	－	－	－	－	－	－	－
	b	42.0	11.8	4058	47.9	5.9	10.8	4018	43.2	1.2
	c	67.6	16.7	4058	66.8	−0.8	15.5	4018	62.0	−5.6
	d	90.5	27.1	4058	108.4	17.9	23.4	4018	93.6	3.1
	e	140.2	37.0	4058	148.0	7.8	37.3	4018	149.2	9.0
	f	191.0	－	－	－	－	49.4	4018	197.6	6.6
	g	240.2	－	－	－	－	－	－	－	－
	h	－	－	－	－	－	－	－	－	－
	i	52.8	11.5	4058	46.0	−6.8	10.5	4018	42.0	−10.8
	j	53.2	13.1	4058	52.4	−0.8	11.3	4018	45.2	−8.0
	k	53.9	12.0	4058	48.0	−5.9	11.4	4018	45.6	−8.3
	l	51.6	11.4	4058	45.6	−6.0	12.8	4018	51.2	−0.4
	絶対値平均					6.5				5.9
③	a	17.5	－	－	－	－	－	－	－	－
	b	42.0	－	－	－	－	13.1	3981	52.4	10.4
	c	67.6	－	－	－	－	17.7	3981	70.8	3.2
	d	90.5	－	－	－	－	23.6	3981	94.4	3.9
	e	140.2	－	－	－	－	32.6	3981	130.4	−9.8
	f	191.0	－	－	－	－	－	－	－	－
	g	240.2	－	－	－	－	－	－	－	－
	h	－	－	－	－	－	－	－	－	－
	i	52.8	－	－	－	－	10.2	3981	40.8	−12.0
	j	53.2	－	－	－	－	11.0	3981	44.0	−9.2
	k	53.9	－	－	－	－	13.6	3981	54.4	0.5
	l	51.6	－	－	－	－	13.4	3981	53.6	2.0
	絶対値平均					－				6.4
⑤	a	17.5	－	－	－	－	－	－	－	－
	b	42.0	－	－	－	－	13.3	4054	53.2	11.2
	c	67.6	－	－	－	－	17.1	4054	68.4	0.8
	d	90.5	－	－	－	－	23.8	4054	95.2	4.7
	e	140.2	－	－	－	－	32.4	4054	129.6	−10.6
	f	191.0	－	－	－	－	51.3	4054	205.2	14.2
	g	240.2	－	－	－	－	－	－	－	－
	h	－	－	－	－	－	－	－	－	－
	i	52.8	－	－	－	－	11.2	4054	44.8	−8.0
	j	53.2	－	－	－	－	10.5	4054	42.0	−11.2
	k	53.9	－	－	－	－	11.9	4054	47.6	−6.3
	l	51.6	－	－	－	－	10.9	4054	43.6	−8.0
	絶対値平均					－				8.3



図－3.4.2.4　実測厚さと推定厚さの関係（第２回）

表－3.4.2.11　供試体B

ラインNo.	測定位置	実測厚さ mm	第3回 伝搬時間 μs	表面音速 m/s	かぶり厚さ mm	誤差 mm	ラインNo.	測定位置	実測厚さ mm	第3回 伝搬時間 μs	表面音速 m/s	かぶり厚さ mm	誤差 mm
表①	a	34.6	–	–	–	–	裏①	a	243.4	60.2	4113	247.6	4.2
	b	46.7	12.5	4064	50.8	4.1		b	192.9	47.8	4090	195.5	2.6
	c	62.5	19.3	4169	80.5	18.0		c	151.7	37.1	4236	157.2	5.5
	d	73.6	22.3	4143	92.4	18.8		d	110.4	27.2	4122	112.1	1.7
	e	90.9	24.1	4164	100.4	9.5		e	69.1	17.8	4031	71.8	2.7
表②	a	34.3	–	–	–	–	裏②	a	225.7	–	–	–	–
	b	46.5	14.2	4064	57.7	11.2		b	184.4	46.9	4090	191.8	7.4
	c	62.8	15.8	4169	65.9	3.1		c	143.1	36.6	4236	155.0	11.9
	d	76.2	21.7	4143	89.9	13.7		d	101.8	24.8	4122	102.2	0.4
	e	92.1	25.8	4164	107.4	15.3		e	60.5	17.3	4031	69.7	9.2
表⑤	a	33.6	–	–	–	–	裏⑤	a	224.1	–	–	–	–
	b	48.1	14.6	4064	59.3	11.2		b	182.2	44.2	4090	180.8	−1.4
	c	62.1	17.3	4169	72.1	10.0		c	140.3	34.3	4236	145.3	5.0
	d	77.6	21.1	4143	87.4	9.8		d	98.3	23.3	4122	96.0	−2.3
	e	93.9	25.5	4164	106.2	12.3		e	56.4	16.3	4031	65.7	9.3
表⑥	a	34.2	–	–	–	–	裏⑥	a	230.1	–	–	–	–
	b	49.2	13.7	4064	55.7	6.5		b	188.4	–	–	–	–
	c	61.4	15.9	4169	66.3	4.9		c	146.8	36.5	4236	154.6	7.8
	d	76.7	22.3	4143	92.4	15.7		d	105.2	25.9	4122	106.8	1.6
	e	93.7	23.7	4164	98.7	5.0		e	63.5	15.9	4031	64.1	0.6
絶対値平均						10.6	絶対値平均						4.6

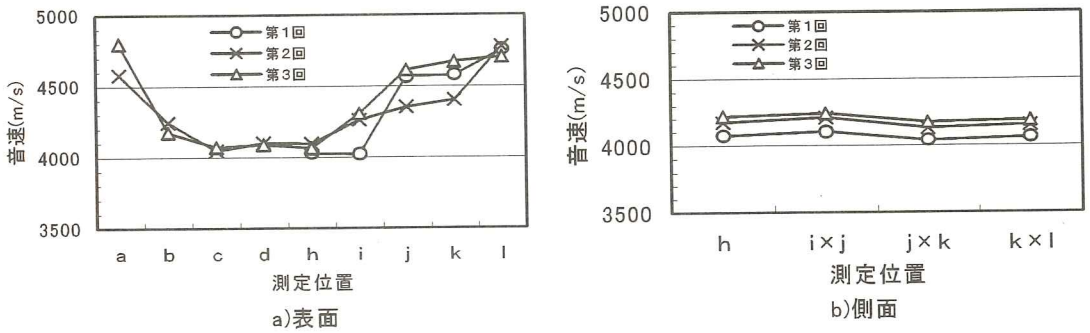


図－3.4.2.5　実測厚さと推定厚さの関係

(6)　鉄筋の影響測定結果　表面・側面（鉄筋・鉄筋の間）

表－3.4.2.12　供試体Ａ

測定位置		探触子間距離 (mm)	第1回 音速 m/s	第2回 音速 m/s	第3回 音速 m/s
表面	a700	700	—	4578	4798
	b700	700	—	4245	4172
	c700	700	—	4044	4070
	d700	700	—	4098	4089
	h700	700	4023	4096	4063
	i700	700	4021	4260	4305
	j700	700	4566	4351	4611
	k700	700	4575	4400	4670
	l700	700	4752	4775	4701
側面	h-1	1200	4051	4174	4218
	h-2	1200	4078	—	—
	h-3	1200	4089	—	—
	h平均	1200	4072	4174	4218
	i鉄	—	—	—	—
	i×j	1200	4106	4211	4240
	j鉄	—	—	—	—
	j×k	1200	4040	4131	4177
	k鉄	—	—	-	—
	k×l	1200	4061	4152	4188
	j鉄	—	—	—	—



図－3.4.2.6　鉄筋の影響

(7)　炭素供試体伝搬速度測定結果

表－3.4.2.13　炭素供試体伝搬速度結果

供験体 No.	使用帯域	探触子	探触子間距離 (mm)	第３回 伝搬時間 μs	音速 m/s	感度 dB	周波数読み値	周波数 KHz
炭素	高周波	送信:20φ 受信:20φ	100	30.8	3247	100	5.0	147
			150	53.0	2830	100	5.0	147
			200	72.4	2762	100	5.0	147
			250	93.4	2677	100	5.0	49
			300	115.5	2597	100	5.0	49
			350	–	–	–	–	–
		送信:76φ 受信:56φ	100	–	–	–	–	–
			150	–	–	–	–	–
			200	57.5	3478	100	5.0	147
			250	76.1	3285	100	5.0	49
			300	88.3	3398	100	5.0	49
			350	–	–	–	–	–

(8)結果概要

①校正用試験体測定結果について

アルミニウムの最大音速差は 169m/s で音速の約３％であり、アクリルの最大音速差は 18 m/s で音速の約１％であり、花崗岩の最大音速差は 290m/s で音速の約７％であった。アルミニウム及びアクリルの測定結果より、装置及びセンサーが正常であることが確認できた。なお、自然石である花崗岩は、音の入る位置により音速差が生じたため、約７％の音速差があったと考える。

②透過法による音速測定について

表-3.4.2.14 より、供試体による音速差は若干あるが差率は低い。なお、供試体Ｃの表面、裏面の大きな音速差については、ブロック状の供試体で上下約１ｍ差があり、上側の音速が遅く下側の音速が速くなった結果、大きな音速差が生じたと考える。

また、供試体Ｂの四回目データはコンクリート面にアスファルトを打ち増した面の測定結果であるが、アスファルトの音速を事前に求めていないためコンクリートとして処理したので、参考扱いとし上表に含めなかった。

表－3.4.2.14

供試体	測定面	最小音速 m/s	最大音速 m/s	音速差 m/s	差率 %
供試体A	打設面	4232	4317	85	2
供試体B	打設面	3996	4188	192	5
	底　面	4011	4215	204	5
供試体C	表　面	3845	4322	477	12
	裏　面	3818	4307	489	13
	側　面	4082	4297	215	5

③伝搬速度測定結果について

表－3.4.2.15 より、供試体による音速差は若干あるが差率は低く、②透過法による音速測定結果と同じである。なお、供試体Ｃの表面、裏面の大きな音速差についても、同じである。

なお、平均伝搬速度は実際の測定センサーと同じセンサーサイズを用いて測定した、測定間距離 300～700mm の値の平均値である。

表－3.4.2.15

供試体	測定面	平均伝搬速度		音速差	差率
		小 m/s	大 m/s	m/s	%
供試体A	打設面	3973	4180	207	5
供試体B	打設面	3866	4169	303	8
	底　面	4090	4354	264	7
供試体C	表　面	3952	4408	456	12
	裏　面	3741	4401	660	18

④厚さ測定結果について

表－3.4.2.16 より、供試体Ａ及び供試体Ｂの打設面の誤差率は約±6%以内であり、供試体Ｃの表面、裏

面の誤差率は約±12%以内である。供試体Bの底面の誤差率は−1.1〜14.1%であり、＋側に偏っている。これは、後に解析を行うが、表面音速と内部音速の音速差が大きいことによる影響と考えられる。

なお、表面音速は測定位置近傍の平均伝搬速度(測定間距離 300〜700mm)を用いた。また、**図**-3.4.2.1〜**図**-3.4.2.3 に実測厚さ×推定厚さ関係を示す。

表－3.4.2.16

供試体	測定面	誤差:推定値−実測値 mm	誤差率 %	絶対値 平均
供試体A	打設面	−17.0〜 8.0	−5.6〜 2.7	6.3〜12.9
供試体B	打設面	−15.0〜10.6	−5.3〜 6.1	4.6〜 7.6
	底　面	−3.2〜39.7	−1.1〜14.1	5.7〜18.2
供試体C	表　面	−24.7〜46.1	−7.7〜12.1	9.5〜23.7
	裏　面	−16.9〜54.6	−7.0〜10.8	6.9〜26.7

⑤鉄筋のかぶり厚さ測定結果について

表－3.4.2.17 より、供試体Aの誤差率は約±27%以内であり、供試体Bの打設面の誤差率は 2.3〜28.8%であり、＋側に偏っている。供試体Bの底面の誤差率は−2.3〜16.5%であり、＋側に偏っている。

また、**図**-3.4.2.4 及び**図**-3.4.2.5 に実測かぶり厚さ×推定かぶり厚さ関係を示す。

表－3.4.2.17

供試体	測定面	誤差:推定値−実測値 mm	誤差率 %	絶対値 平均
供試体A	打設面	−11.2〜14.2	−21.1〜26.7	5.9〜 8.3
供試体B	打設面	4.1〜18.8	2.3〜28.8	10.6
	底　面	−2.3〜11.9	−2.3〜16.5	4.6

⑥鉄筋の影響測定結果について

測定位置hには鉄筋が配置されていないので、ここを影響ゼロとし、**図**－3.4.2.6a)表面を見れば、鉄筋の深さ影響を測定するための測定位置a〜g間では、測定位置a(鉄筋深さ:17.5mm)とb(鉄筋深さ:42.0mm)は鉄筋の影響を受け、音速が早くなっている。測定位置c(鉄筋深さ:67.6mm)以降は測定位置hと同じ音速であるので、影響は受けていないものと考える。また、鉄筋の径影響を測定するための測定位置i〜l間では、鉄筋の径の影響を受け径が大きくなるに伴い、音速が早くなっている。なお、測定位置a〜gは丸鋼(径：20mm)が，順に深くなるようにセットされ、測定位置i〜lは異形鉄筋が、順に太く(D25→D51)なるようにセットされている。

また、a)表面はコンクリート表面より音を入れて鉄筋の影響を調べたが、b)側面はコンクリート側面より音を入れて隣合う鉄筋(離れ：100mm)の影響を調べたが影響はなかった。

⑦炭素供試体伝搬速度測定結果について

表-3.4.2.13 に測定結果を示す。

3.4.3 超音波C

(1)　供試体Aの鉄筋位置、かぶり厚及び版厚の同時計測

供試体Aにおいて、i、j、k、lの鉄筋位置かぶり厚さ及び版厚の測定結果を図3.4.3.1に示す。測定2.4.6.8がそれぞれl、k、j、i位置に対応する。各測点で、1対の探触子の間隔を70mmから80mmの間で変動させた測定である。他の測定条件は前述2.1.3(10)鉄筋かぶり厚、径の測定の場合と同じである。同図は3000回の加算平均波より100kHz前後の中心周波数で狭帯域成分波$\tilde{G}(t)$を取り出し$\tilde{G}^2(t)$表示したものである。前記100kHzは（2.1.3.6）式に示す最適周波数算定式により求めている。但し、鉄筋のかぶり厚（50mm）を精度よく求めるために、補正値αを1.25としている。鉄筋が埋め込まれた測点2、4、6、8に振幅の大きな鉄筋からの反射波及び迂回／回折波の重畳波の起生が確認できる。

一方、図3.4.3.2は版厚300mmを精度よく取り出すために、補正値αを0.8とし、63kHzを中心周波数として取り出した成分波である。3乗表示している。いずれにしても、鉄筋及び版厚からの反射波が明確に確認できる。かつ鉄筋が測定直下にある測点2、4、6、8では、入力超音波がこれ等鉄筋で遮断され版厚反射が生じていない。本計測時(1999.11.16)の表面走査による3Spp100音速値(3850m／秒)を適用した測定結果を表3.4.3.1に整理する。

鉄筋かぶり厚さは、510mm(実値50mm)となっているが、版厚は274mm～288mmと変動しており、かつ実値300mmと大きく相違している。本供試体がスラブモデルであり、打設側と打設背面で大きく音速値が変化している事より生じた測定誤差である。測定版厚平均値281mmとし、版厚実値約300mmを用い等価音速を試

$$3850\times\frac{30}{28.1}=4110\text{m／秒}$$

算すると、となっている。

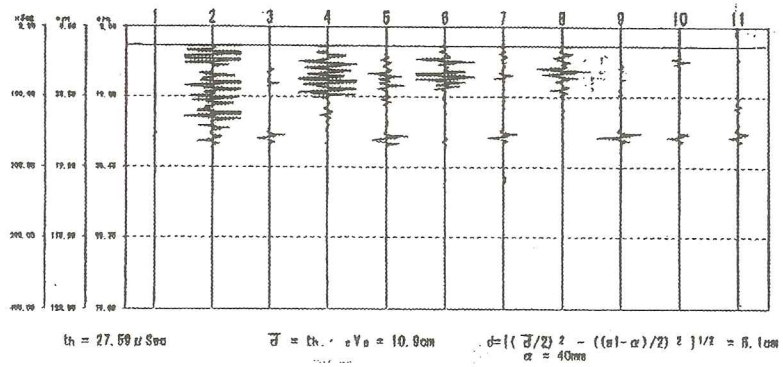


図3.4.3.1　供試体Aにおける鉄筋配置かぶり厚さ及び版厚測定

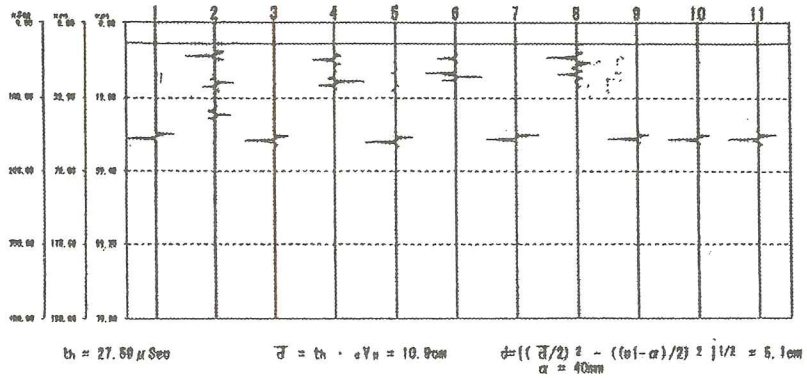


図3.4.3.2　63kHzを中心周波数とする結果成分波

表 3.4.3.1　供試体 A　鉄筋かぶり厚及び版厚

位置	実測値 (mm)	測定内容	反射波(t_h) 起生時刻(μ秒)	音速 ${}_CV_P$ (m／秒)	路程長 $\tilde{d}$ (mm)	版厚／鉄筋かぶり厚(mm)	実測値との比較
i 厚 30cm		版厚	141.87	3850m／秒	546	273	
i 厚 20cm		版厚	143.84		553	277	
i 厚 10cm		版厚	143.84		553	277	
i	53.0	鉄筋	27.59		106	50.7	0.96
i ～ j 中間		版厚	143.84		553	277	
j	52.6	鉄筋	27.59		106	50.7	0.96
j ～k 中間		版厚	145.81		561	281	
k	53.1	鉄筋	27.59		106	50.7	0.95
k～ l 中間		版厚	138.92		535	267	
l	50.9	鉄筋	27.59		106	50.7	1.00
l 厚 10cm		版厚	138.92		535	267	

注)　$d = \sqrt{(\tilde{d}/2)^2 - ((a_1 - \phi)/2)^2}$

$\tilde{d} = t_h \times {}_CV_P$　　ここで a_1 は探触子間最短距離（70mm）

(2) 供試体 B による斜め版厚測定

コンクリート音速値を 4500m／秒とした時の③通り a、b、c、d、e 点における版厚測定結果を並べて図 3.4.3.3 に示す。測定結果を整理して、表 3.4.3.2 に示す。

なお、探触子走査法は各測点部のコンクリート表面で直径 250mm の円領域を設定し、40 φ の 1 対の発信と受信探触子の中心距離を 100mm から 130mm の間で変動させながら、前記円領域内を自在に移動させ、その間 3000 回の加算平均を行っている。

ところで、図 3.4.3.3 の各成分波で波形の後方に微弱な信号を確認できる。コンクリート表面と裏面を重複反射する波である。本分析法の分析能力を示すために、この重複反射波を取り出したものが図 3.4.3.4 である。図示するタイムゲインコントロールで、この抽出を行っている。探知路程が長くなる故 70kHz 付近の成分波で示している。

表 3.4.3.2　供試体 B 斜版厚測定値

位置	実測値 (mm)	起生時刻 t_h (μ秒)	音速 ${}_CV_P$	路程長 $\tilde{d}$ (mm)	版厚 d (mm)	実測値との比較
a	282.5	136	4250m／秒	578	287	1.02
b	253.4	128.1		544	271	1.07
c	227.4	115.3		490	243	1.07
d	200.2	100.5		427	211	1.05
e	175.1	80.8		343	169	0.97

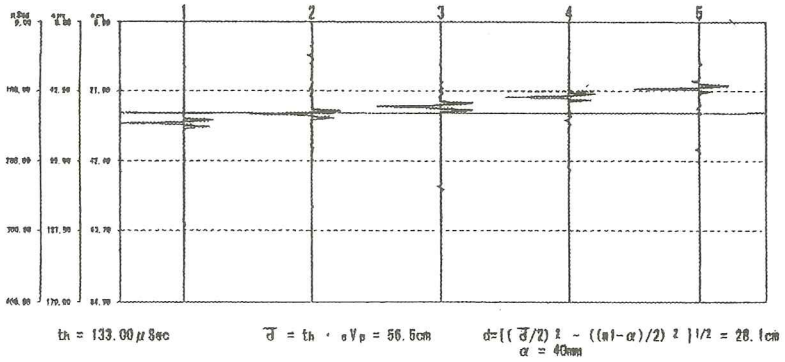


図 3.4.3.3　b、c、d、e における版厚測定結果

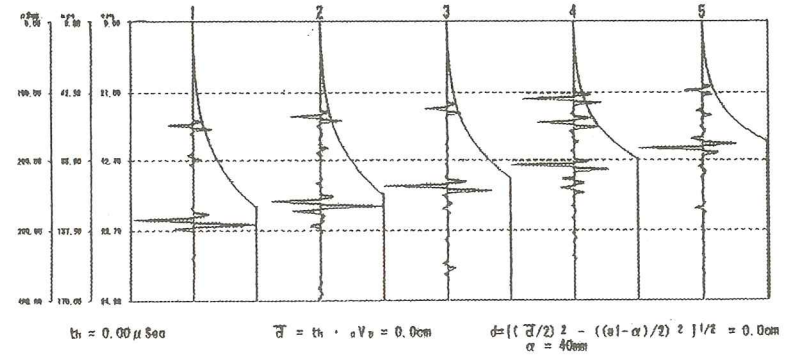


図 3.4.3.4　供試体 B 斜め版厚測定の重複反射波

(3)　供試体 C の版厚測定

図 3.4.3.5 に版厚の測定位置を示す。

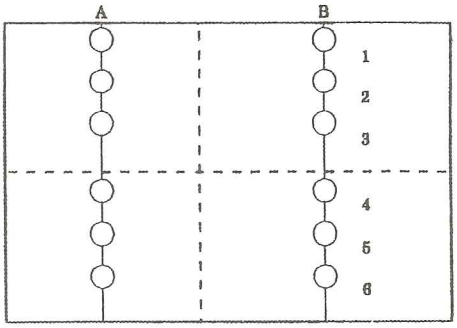


図 3.4.3.5　版厚測定位置

各測点のコンクリート表面に直径 200mm の円領域を設定し、1 対の 40φ の発信及び受信探触子をその距離 120mm から 160mm の範囲で変動させながら、前記円領域内で走査し、この間 3000 回の受信波を加算して得た波より 70kHz を中心周波数とする狭帯域波を取り出した結果が図 3.4.3.6 である。本コンクリートの音速値を図 3.4.3.5 の②位置での透過法による 3970m／秒としてカーソル位置としてカーソル位置の路程を計算すると 199mm(実値 200mm) となっている。

各測点での波形後方に微弱な波の存在が確認できる。コンクリートの様な散乱現象の激しい被探知体の場合、探知路程の 2～3 乗のオーダーで超音波が減衰することも稀ではない。これより、図 3.4.3.7 に示す如く、図示するタイムゲインコントロールで振幅調整すると、深い位置からの反射波等が浮び上る。測点 1、2、3 で 2 番目及び 3 番目に生じているのは版厚の間で重複反射する波である。測点 4、5、6 で厚さ 600mm の版厚が測定されている。

表 3.4.3.3 によれば、測定 4、5、6 で順次音速値が速くなっているのを確認願いたい。なお、音速結果を透過法による音速値を用いて表 3.4.3.3 に整理して示す。

表 3.4.3.3　供試体 C 版厚測定値

位置	実測値 (mm)	起生時刻 t_h (μ秒)	音速 ${}_C V_P$	路程長 $\tilde{d}$ (mm)	版厚 d (mm)	実測値との比較
1	209.6	102.46	3970	406.8	199.4	0.95
2	215.1	102.46	3970	409.8	200.9	0.93
3	217.7	102.46	3970	413.9	203.0	0.93
4	613.8	302.50	3970	1179.8	589.0	0.96
5	614.2	297.54	4010	1193.1	595.2	0.97
6	610.3	289.66	4150	1202.1	599.7	0.98

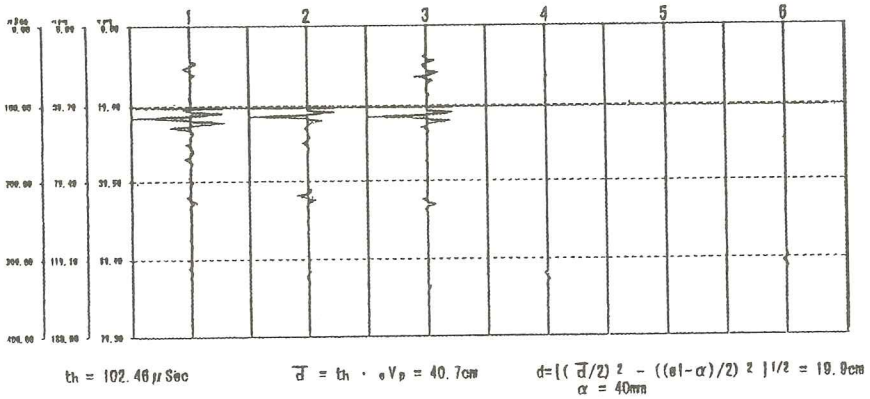


図 3.4.3.6　供試体 C の版厚測定

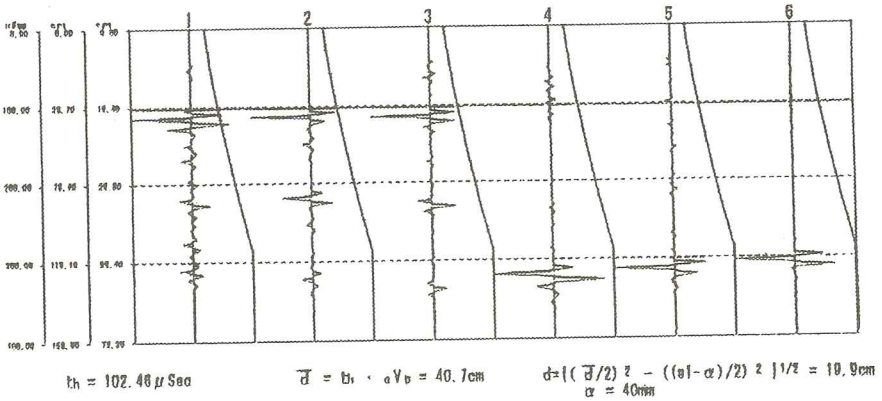


図 3.4.3.7　タイムゲインコントロール後の供試体 C の版厚測定

(4) 音速測定結果

供試体A、B、Cの音速測定結果を測定日時毎に整理して示す。

○ 1999年11月16日 測定

供試体A

音速測定：表面配置法

伝播速度

	端子間距離(mm)				
	100	200	300	400	500
3Sp	—	3547.2	3552.3	3833.8	3736.2
3Spp	3850.0	3810.8	—	—	—

供試体B

音速測定：表面配置法

伝播速度

	端子間距離(mm)				
	100	200	300	400	500
3Sp	3880.7	3810.8	3695.6	3486.3	3779.7
E	3760.0	4323.1	—	—	—

供試体C

音速測定：透過法（B通り上端から）

伝播速度

	端子間距離(mm)					
	200	200	200	600	600	600
BSp	3970.0	3970.0	3970.0	3892.0	4010.0	4150.0

○ 1999年12月14日 測定

供試体B

音速測定：表面配置法

伝播速度 表面

	端子間距離(mm)			
	100	200	300	400
③	3495.9	3710.5	3639.9	3393.0
A	4360.8	3772.6	4037.4	3699.7
B	3776.8	3735.1	3941.9	3646.6
C	3419.6	3558.4	3445.5	3605.1
D	3710.5	3876.3	3787.2	3615.4
E	3304.7	3772.6	3580.1	3810.8

伝播速度 裏面

	端子間距離(mm)			
	100	200	300	400
③	4272.7	3823.7	4147.1	4120.1
A	3953.3	4087.0	4165.9	3990.6
B	4028.6	3698.4	4109.9	3916.7
C	4230.0	4147.1	3933.5	4054.3
D	3615.4	3650.5	3900.0	3799.4
E	4406.3	3957.9	3883.5	3904.6

音速測定：透過法

伝播速度

	測定位置				
	A	B	C	D	E
③	4223.0	4162.0	4133.0	4218.0	4158.0

○ 2000年1月18日 測定

供試体A

音速測定：表面配置法

伝播速度

	端子間距離(mm)				
	100	200	300	400	500
①	3573.1	3772.6	3670.8	3627.3	3788.5
③	3440.7	3424.9	3637.7	3683.3	3573.1
⑤	3337.7	3556.0	3521.2	3800.5	3653.4
H	3844.1	3840.8	3748.1	3635.2	3880.6

	測定位置					
	⑥	H	I−J	J−K	K−L	Z
A	—	—	4281.0	4203.0	4261.0	4300.0

供試体C

音速測定：表面配置法

伝播速度 表面

		端子間距離(mm)			
		100	200	300	400
上段	○	4028.6	3985.9	3916.7	3880.7
	①	4272.7	4256.6	4073.3	3916.7
	③	4188.1	4162.4	4147.1	4160.7
下段	②	4067.3	3971.8	3925.1	3916.7
	⑤	3584.7	3581.0	3802.9	3678.3
A		3916.7	3514.0	3419.8	3625.7
B		4147.1	4116.8	4119.1	3776.8

伝播速度 裏面

		端子間距離(mm)			
		100	200	300	400
I面	○	4067.3	3772.6	3680.7	3495.9
	①	3845.5	3836.7	3638.7	3833.8
	③	3678.3	3810.8	4333.3	4258.4
II面	○	3304.7	3581.0	3802.9	3868.9
	①	3467.2	3957.9	3984.8	4067.3
	③	3596.1	4028.2	3693.3	3897.9
III面	②	3634.1	3734.7	3573.1	4170.1
	③	3505.7	3652.1	3921.1	3809.1
	⑤	3240.7	3616.5	3594.3	3926.4
IV面	②	4159.7	3401.4	3682.0	3791.8
	③	3240.7	3725.3	3797.8	3853.0
	⑤	3619.5	3772.6	3785.9	4000.5

		測定位置					
		A	A1	A2	B	B1	B2
上段	○	—	4222.7	4165.9	—	4101.5	4361.5
	①	4300.9	—	—	4092.5	—	—
	③	—	4056.8	4165.9	—	4065.6	4039.1
下段	②	—	4065.6	4039.1	—	4110.6	4004.3
	③	4165.9	—	—	4128.9	—	—
	⑥	—	4361.5	4232.3	—	4320.9	4307.6

○ 2000年2月16日 測定

供試体A

音速測定：表面配置法

伝播速度

	端子間距離(mm)				
	100	200	300	400	500
①	3439.0	3525.0	3238.5	3799.4	3668.6
③	3330.7	3317.6	3344.9	3689.0	3710.5
⑤	3411.3	3337.3	3511.5	3605.1	3540.4
H	3776.8	3722.8	3710.5	3699.7	3603.3

音速測定：表面配置法

伝播速度

	測定位置					
	A	B	C	D	I	J
700	4465.5	3970.1	3764.6	3728.4	3716.5	4356.7
	測定位置					
	K	L				
700	3764.6	4230.0				

音速測定：反射法

伝播速度

	端子間距離(mm)	
	1200	1400
H	4360.8	—
I	—	5077.2
I〜J	4388.0	—
J	—	5364.1
J〜K	4298.8	—
K	—	5903.1
K〜L	4334.0	—
L	—	5931.5
Z	4316.3	—

供試体B

音速測定：表面配置法

伝播速度 上面

	端子間距離(mm)				
	100	200	300	400	500
③	3439.0	3407.9	3381.9	3322.0	3652.0
A	3554.6	3547.2	3680.7	3636.1	3619.4
B	3845.5	3798.0	3622.5	3534.8	3502.2
C	3087.6	3592.4	3850.8	3833.9	3806.3
D	3990.6	3863.0	3850.8	3845.5	3770.9
E	3330.7	3536.1	3594.1	3754.4	3762.2

伝播速度 裏面

	端子間距離(mm)				
	100	200	300	400	500
③	3776.8	3686.3	3680.7	3270.6	3450.0
A	4147.1	4043.0	4002.2	3978.1	3954.9
B	3916.7	3823.7	3850.8	4015.8	4115.5
C	3229.0	3280.1	3199.0	3204.5	3230.1
D	3916.7	3889.7	3834.7	3822.3	3946.3
E	4452.6	4224.7	3867.1	3833.8	3954.9

○ 2000年3月6日 測定

供試体B

音速測定：表面配置法

伝播速度

	端子間距離(mm)		
	100	200	300
B7壁1	3279.1	3082.0	2909.5
B7壁4	3990.6	3260.1	3182.3

	測定位置				
	B7壁1	B7壁2	B7壁3	B7壁4	B7壁5
200	4378.9	4351.9	4311.9	4351.9	4338.5
	測定位置				
	B7壁6	B7壁7			
200	4234.2	4378.9	—	—	—

音速測定：透過法

伝播速度

		端子間距離(mm)				
		223	248	275	302	328
上段	3A	—	—	—	—	4290.2
	3B	—	—	—	4199.4	—
	3C	—	—	4178.3	—	—
	3D	—	4274.8	—	—	—
	3E	4466.3	—	—	—	—
下段	3A	—	—	—	—	4282.2
	3B	—	—	—	4199.4	—
	3C	—	—	4251.6	—	—
	3D	—	4295.8	—	—	—
	3E	4391.5	—	—	—	—

供試体C

		端子間距離(mm)			
		100	200	300	400
I面	○	3304.7	3460.1	3432.6	3515.2
	③	3615.4	4028.6	4147.1	4391.0
II面	○	3646.6	3503.1	3695.6	3776.8
	①	3495.9	4057.6	3666.0	3965.6
	③	3554.6	3666.0	3651.4	3594.4
III面	②	3304.7	3204.5	3445.5	3615.4
	③	3710.5	3889.7	3818.8	3605.1
	⑤	4470.1	3650.9	3802.9	4080.4
IV面	②	2858.1	3627.0	3511.5	3636.1
	③	4188.1	4101.8	4055.3	3721.4
	⑤	4188.1	4360.8	3834.7	3953.3

	端子間距離(mm)			
	100	200	300	400
A	2532.9	3916.7	3171.3	2884.1
B	3110.3	3460.1	3407.1	3164.6

3．4．4　表面走査法における探触子の影響

超音波によって表面の音速を測定する場合，探触子間の距離は中心間の距離を用いる場合と探触子間の内側の最短距離を用いる場合が見受けられる。厚さを精度よく求めたり，コンクリートの品質を推定するために，表面走査法による伝搬時間から内部の音速分布を予測する方法について検討しており，その際，探触子間距離によって大きな影響を受ける。そのため，探触子間の距離をどのように算定すればよいかを実験的に検討した。

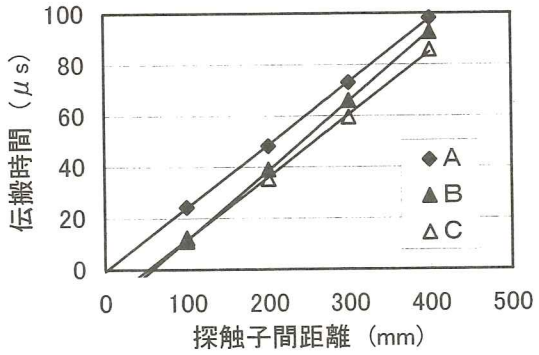
（1）コンクリート表面の２探触子間距離と伝搬時間の関係

表－3.4.4.1 の３機種の超音波測定装置を用いて探触子間距離を変化させたときの伝搬時間を測定すると図－3.4.4.1 のようになった。この結果は，供試体Ｂの底面の材齢初期のものである。距離は中心間で示している。

測定結果を一次式 y=ax+b で回帰し，ｘ軸と交わる点(x=-b/a)を探触子の影響と考え，その距離を求めると表－3.4.4.1 のとおりであった。装置Ａの影響はわずかであるが，Ｂ，Ｃは探触子の大きさ程度の影響がある。

表－3.4.4.1　超音波測定装置と探触子の影響

装置	探触子		探触子の影響(mm)
	径(mm)	周波数(kHz)	
A	20	28	3
B	送信76 受信56	50	58
C	40	広帯域	52



図－3.4.4.1　探触子間距離と伝搬時間の関係
（コンクリート）

探触子間隔と最速伝搬経路の間には，図－3.4.4.2 のような関係になっているものと考えられる。間隔が短い場合，減衰が小さいので発信探触子に近い部分の受信探触子で受信するので，最短の探触子間距離に近いものと考えられる。しだいに距離が長くなると減衰が大きくなるので全面で受信するようになり，中心間距離になっていくものと考えられる。

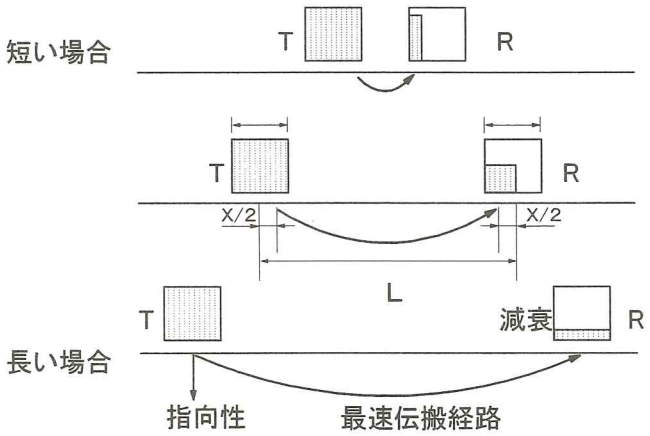
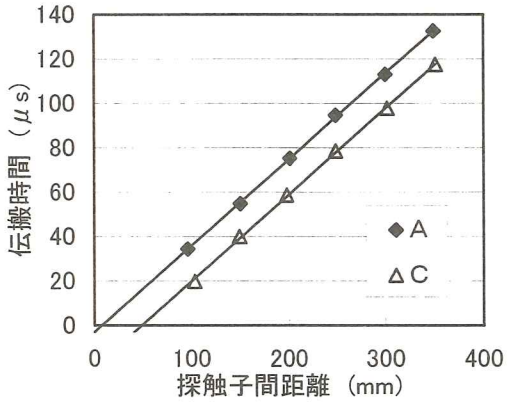


図-3.4.4.2 探触子間隔と最速伝搬経路の概念

（2）炭素ブロックによる検討

コンクリートは，強度発現や含水率などによって音速が変化するので，100×100×400 ㎜の炭素ブロックを用いて同様の検討を行なった。図－3.4.4.3 は探触子間距離と伝搬時間の関係であり，図－3.4.4.1 と同様の傾向にある。



図－3.4.4.3 探触子間距離と伝搬時間の関係
（炭素ブロック）

図－3.4.4.4 は探触子間の距離と見かけの音速の関係であり，音速を求めるときの距離を次の３種類について検討した（図－3.4.4.5）。

①中心間距離Ｌ

②中心間距離から探触子径φを引いた距離(L-φ)，つまり探触子の最短距離

③探触子間距離が短いときの影響を xo とし，離れるにしたがいしだいに影響が小さくなることを考慮し，その比率をαとしたときの距離(L-xo)(1+α)

図中の矢印は炭素ブロックの透過音速である。

図－3.4.4.4 より，①の中心間距離Ｌでは，距離が短いときは音速が速く，遠くなるとしだいに一定値に漸近していき，装置Ａは 250 ㎜以上でほぼ一定であり，透過音速とほぼ一致している。装置Ｃは 350 ㎜でもまだ低下傾向にある。

②の(L-φ)の場合，A，Cで短いときの傾向は異なるものの，この場合も遠くなるほど一定値に漸近している。しかしながら，透過音速よりは小さくなっている。

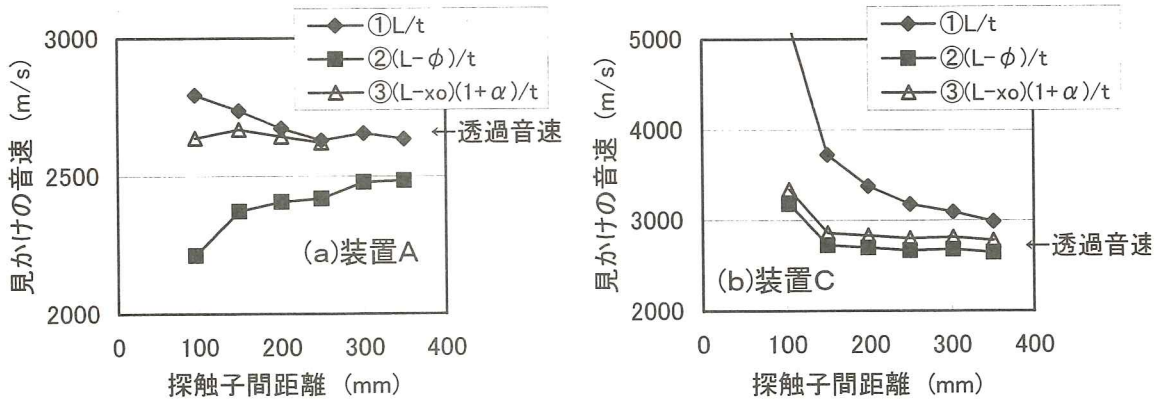
実際には①と②の間にあるものと考えられる。探触子が近づいたときの影響は，Aはわずか数㎜であるが，Cは探触子の径に相当する影響を受けている。探触子が遠ざかると，その影響はしだいに小さくなり，中心間距離に近づいていく。音速が一定で透過音速に一致するように増加率αを求めると，表－3.4.4.2 のようにAは 0.03，Cは 0.05 であった。これらの結果により，音速の計算に用いる距離L′は次式によって表される。

$$L' = (L-xo)(1+\alpha) \leqq L \qquad (3.4.4.1)$$

ただし，Lがしだいに大きくなり$(L-xo)(1+\alpha)>L$となった場合，$L' = L$とする。

表－3.4.4.2 探触子の影響

装置	探触子径(㎜)	(L－xo)(1＋α)	
		xo	α
A	20	8	0.03
B	66	66	0.05
C	40	40	0.05



図－3.4.4.4 探触子間距離と見かけの音速の関係

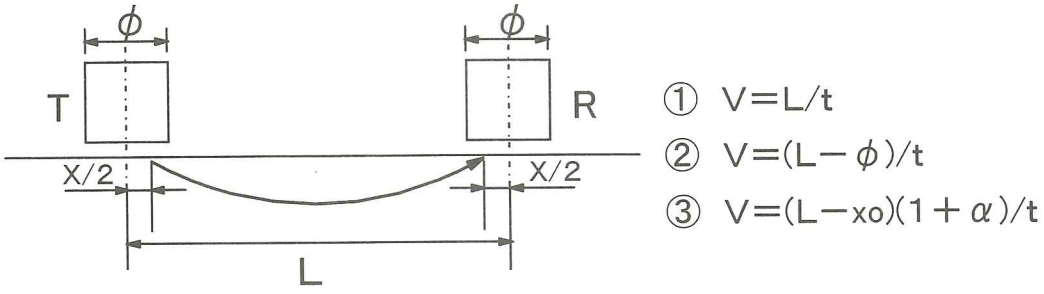


図-3.4.4.5 表面伝搬距離の算定

（3）コンクリートの曲げ供試体による検討

5章で作製した曲げ供試体を用い，超音波Aの装置によって供試体の各面を表面走査法，透過法で測定した結果を、表－3.4.4.3 および図－3.4.4.6～3.4.4.8 に示す。

図－3.4.4.6 および 3.4.4.7 は曲げ供試体の表面走査法による見かけの音速である。図－3.4.4.6 は探触子の中心間距離で表した場合，図－3.4.4.7 は式(3.4.4.1)によって距離を補正した結果である。補正値は表－3.3.4.2 の結果を用いた。

図－3.4.4.8 は側面間の透過音速の結果である。

図－3.4.4.6 の距離を補正しない場合は，材齢，養生方法にかかわらず，中心間距離が近い場合は速く，150mm 以上になるとほぼ一定になっている。図－3.4.4.7 の補正した場合は，材齢，養生方法によってわずかではあるが異なった傾向がある。材齢 1～7 日は，底面と側面はほぼ一定であり，打設面は距離が短い場合は遅く 200～300mm 以上でほぼ一定になっている。3 日が異なっているのは，湿布養生により表面に水分が供給されたためではないかと考えられる。28 日では，気中養生は距離が短い場合は遅くなっているが，水中養生はほぼ一定になっている。56 日の気中養生の短かい場合,底面および側面はさらに低下している。水中養生も低下傾向にある。

この傾向を検討するために側面からの透過音速を見てみると，図－3.4.4.8 のように湿布養生の 1～7 日は打設面が遅く，底面が速く，音速が傾きを持っていることがわかる。28 日の水中養生と気中養生を比較すると，中央部分はほぼ同じであるが，打設面と底面は水中養生が速く，気中養生は遅くなっているという速度分布を有していることがわかる。56 日の場合、水中養生は 28 日とほぼ同じであるが，気中養生の表面はさらに遅く，内部にまで進行している。

図－3.4.4.8 の結果から，図－3.4.4.6 および 3.4.4.7 の表面走査法による見かけの音速を検討してみると，次のようになる。

打設面で表面走査法を行うと，音速は底面に向かって速くなっているので，伝搬経路は内部をとることになり，見かけの音速は距離が短いと遅く，長くなるにしたがい速くなっていく。それに対し，底面の表面走査法は，表面の音速が最も速いので表面を伝搬することになり，音速はほぼ一定になる。また，28 日および 56 日の水中養生を行った場合は，打設面，底面とも音速は速くなっているのでほぼ一定になるはずである。逆に，気中養生した場合は打設面，底面とも音速は遅く，内部が速くなっているので，内部を通る伝搬経路をとることになり，距離が短い場合は遅く，長くなるにしたがい速くなる。距離を補正した図－3.4.4.7 の結果は，これらの結果をほぼ満足しており，補正方法および補正値はほぼ妥当と考えられる。56 日の水中養生の距離が短かい場合遅くなっているのは，材齢、養生方法によって補正係数を変える必要があるのかもしれない。しかしながら、この傾向が得られたのはこの一例のみであったこと，通常の測定では乾燥を受けていることが多いことから，以下の解析における補正係数は表－3.4.4.2 のままとする。

ちなみに，表－3.4.4.3 の透過時間を図－3.4.4.1，図－3.4.4.3 のように回帰すると表－3.4.4.4 のようになった。(b)のように材齢ごとに平均すると，1～7 日はしだいに大きくなっているが，28，56 日はほぼ 8 mm であり表－3.4.4.2 の結果と一致した。この方法により探触子の影響を検討することができる。

表－3.4.4.3 曲げ供試体の見かけの音速

（透過時間；μs，音速；m/s）

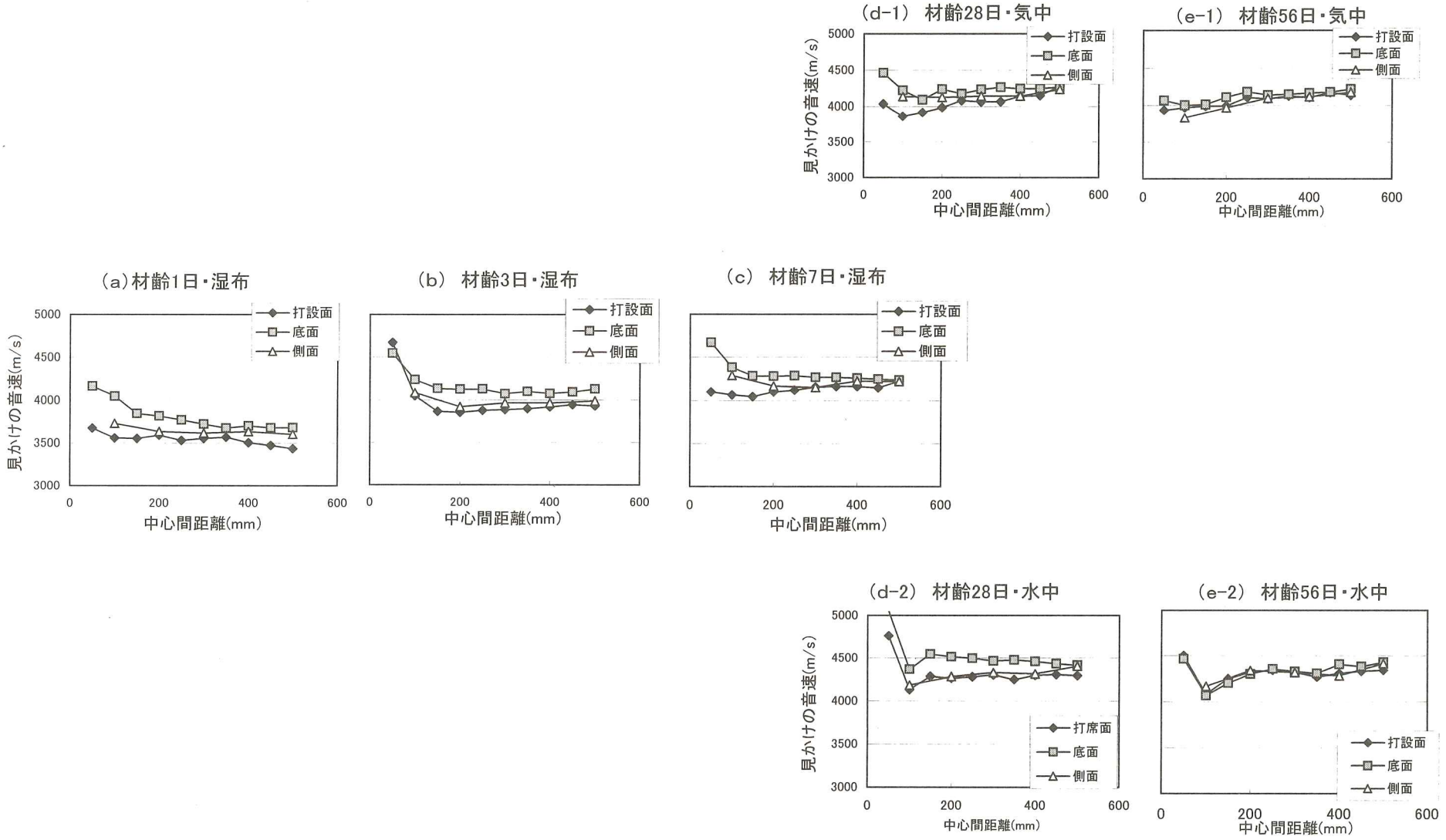
（a）距離補正なし

測定距離		湿布養生						気中養生				水中養生			
		1日		3日		7日		28日		56日		28日		56日	
面	距離 (mm)	透過時間	音速	透過時間	音速	透過時間	音速	透過時間	音速	透過時間	音速	透過時間	音速	透過時間	音速
打設面	50	13.6	3676	10.7	4673	12.2	4098	12.4	4032	12.7	3937	10.5	4762	11.1	4505
	100	28.1	3559	24.7	4049	24.6	4065	25.9	3861	25.2	3968	24.2	4132	24.5	4082
	150	42.2	3555	38.8	3866	37.1	4043	38.3	3916	37.6	3989	35.0	4286	35.3	4249
	200	55.7	3591	51.9	3854	48.8	4098	50.2	3984	50.1	3992	46.9	4264	46.3	4320
	250	70.8	3531	64.5	3876	60.7	4119	61.3	4078	60.9	4105	58.4	4281	57.6	4340
	300	84.4	3555	77.2	3886	72.2	4155	73.9	4060	73.4	4087	69.7	4304	69.5	4317
	350	98.1	3568	89.8	3898	84.1	4162	86.1	4065	84.9	4122	82.4	4248	82.0	4268
	400	114.1	3506	102.1	3918	96.1	4162	96.7	4137	97.5	4103	93.1	4296	92.9	4306
	450	129.6	3472	114.1	3944	108.5	4147	108.5	4147	107.9	4171	104.5	4306	103.9	4331
	500	145.5	3436	127.3	3928	118.4	4223	116.8	4281	121.0	4132	116.4	4296	115.2	4340
底面	50	12.0	4167	11.0	4545	10.7	4673	11.2	4464	12.3	4065	9.9	5051	11.2	4464
	100	24.7	4049	23.6	4237	22.8	4386	23.7	4219	25.0	4000	22.9	4367	24.6	4065
	150	39.0	3846	36.3	4132	35.0	4286	36.7	4087	37.4	4011	33.0	4545	35.7	4202
	200	52.4	3817	48.5	4124	46.7	4283	47.2	4237	48.7	4107	44.3	4515	46.5	4301
	250	66.3	3771	60.6	4125	58.3	4288	59.9	4174	59.8	4181	55.6	4496	57.4	4355
	300	80.6	3722	73.7	4071	70.3	4267	70.9	4231	72.5	4138	67.2	4464	69.3	4329
	350	95.2	3676	85.4	4098	82.0	4268	82.1	4263	84.4	4147	78.2	4476	81.3	4305
	400	108.1	3700	98.2	4073	93.9	4260	94.3	4242	96.1	4162	89.7	4459	90.8	4405
	450	122.3	3679	110.0	4091	105.9	4249	106.0	4245	107.7	4178	101.5	4433	102.7	4382
	500	135.8	3682	121.2	4125	118.0	4237	117.3	4263	118.6	4216	113.2	4417	112.9	4429
側面	100	26.8	3731	24.5	4082	23.3	4292	24.2	4132	26.1	3831	23.9	4184	24.0	4167
	200	55.0	3636	51.0	3922	48.0	4167	48.5	4124	50.4	3968	46.7	4283	46.1	4338
	300	82.9	3619	75.7	3963	72.3	4149	72.5	4138	73.3	4093	69.3	4329	69.5	4317
	400	110.0	3636	100.9	3964	94.7	4224	96.6	4141	97.2	4115	92.7	4315	93.4	4283
	500	138.8	3602	125.4	3987	118.5	4219	118.1	4234	119.8	4174	113.5	4405	113.3	4413
＊側面透過	15	4.1	3676	3.7	4021	3.5	4286	3.5	4335	3.5	4237	3.4	4464	3.4	4412
	30	8.1	3686	7.3	4121	6.9	4323	6.9	4373	7.0	4261	6.7	4464	6.7	4451
	45	12.2	3676	10.9	4132	10.5	4274	10.3	4360	10.3	4373	10.3	4360	10.2	4425
	60	16.0	3741	14.6	4121	14.0	4298	13.4	4478	13.8	4348	13.6	4425	13.6	4425
	75	19.6	3836	18.2	4132	17.4	4323	16.9	4451	17.5	4298	16.9	4438	16.9	4451
	90	23.6	3807	21.8	4132	21.1	4261	20.7	4348	21.2	4249	20.5	4399	20.2	4451
	105	26.9	3906	25.3	4155	24.1	4360	24.3	4323	24.2	4348	23.5	4478	23.7	4438
	120	31.0	3876	28.4	4225	27.3	4399	27.7	4335	28.2	4249	26.4	4545	26.5	4532
	135	34.5	3916	30.7	4399	30.5	4425	31.3	4310	31.7	4261	29.3	4615	29.3	4601
長手透過		160.6	3737	145.1	4169	463.0	4370	456.9	4442	136.6	4450	135.7	4497	135.6	4505

＊側面透過の距離は、打設面から底面に向かっての距離

（b）距離補正あり　（透過時間；μs，音速；m/s）

測定距離			湿布養生			気中養生		水中養生	
面	距離 (mm)	補正 (mm)	1日	3日	7日	28日	56日	28日	56日
打設面	50	43.3	3181	4043	3546	3489	3406	4120	3897
	100	94.8	3372	3836	3852	3659	3760	3916	3868
	150	146.3	3466	3770	3942	3819	3890	4179	4143
	200	197.8	3550	3810	4052	3939	3947	4217	4271
	250	249.3	3521	3864	4106	4066	4093	4268	4327
	300	300	3555	3886	4155	4060	4087	4304	4317
	350	350	3568	3898	4162	4065	4122	4248	4268
	400	400	3506	3918	4162	4137	4103	4296	4306
	450	450	3472	3944	4147	4147	4171	4306	4331
	500	500	3436	3928	4223	4281	4132	4296	4340
底面	50	43.3	3605	3933	4043	3863	3517	4370	3863
	100	94.8	3836	4015	4156	3998	3790	4138	3852
	150	146.3	3750	4029	4179	3985	3911	4432	4097
	200	197.8	3774	4078	4235	4190	4061	4464	4253
	250	249.3	3760	4113	4275	4161	4168	4483	4343
	300	300	3722	4071	4267	4231	4138	4464	4329
	350	350	3676	4098	4268	4263	4147	4476	4305
	400	400	3700	4073	4260	4242	4162	4459	4405
	450	450	3679	4091	4249	4245	4178	4433	4382
	500	500	3682	4125	4237	4263	4216	4417	4429
側面	100	94.8	3536	3868	4067	3916	3631	3965	3948
	200	197.8	3596	3878	4120	4078	3924	4235	4290
	300	300	3619	3963	4149	4138	4093	4329	4317
	400	400	3636	3964	4224	4141	4115	4315	4283
	500	500	3602	3987	4219	4234	4174	4405	4413



図－3.4.4.6 表面走査法による見かけの音速(補正なし)

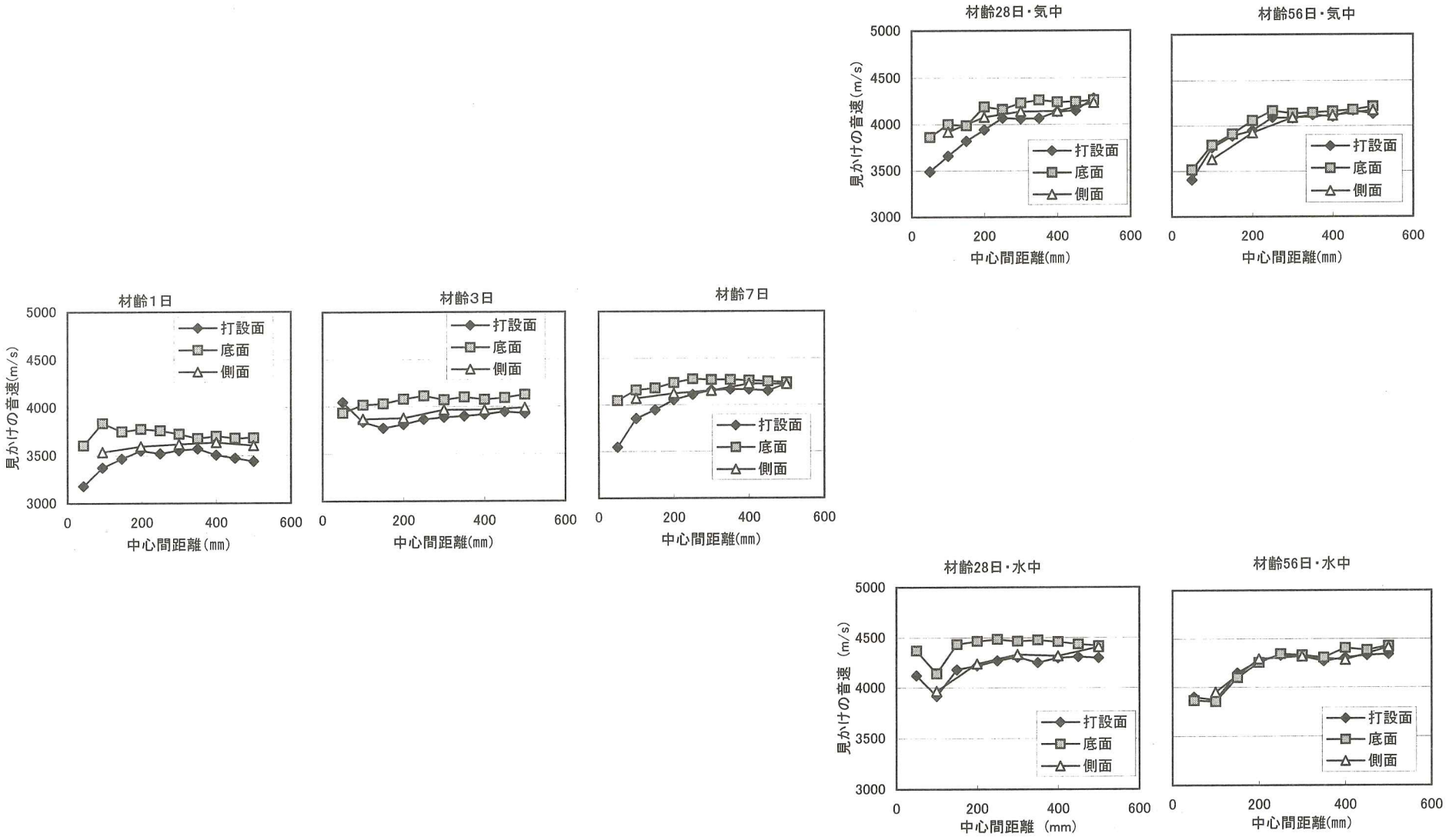
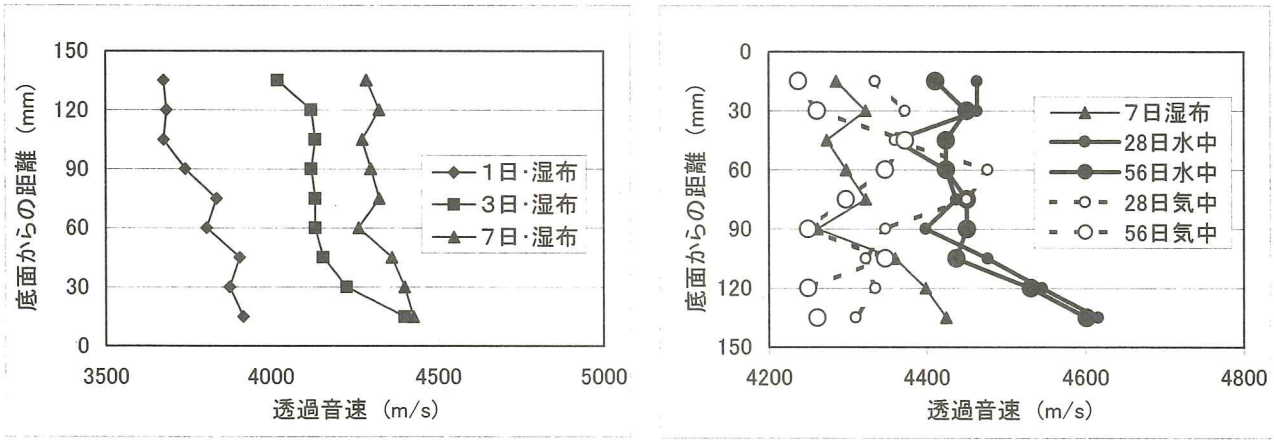


図-3.4.4.7 表面走査法による見かけの音速(補正)



(a) 材齢1～7日　　(b) 材齢7～28日

図-3.4.4.8 側面からの透過音速

表－3.4.4.4 曲げ供試体による探触子の影響の回帰結果

(a)回帰結果

測定面	養生試験測定位置	材齢（日）	回帰係数		相関係数	表面速度	探触子の影響
			a	b	r	Vo	xo
打設面	湿布養生	1	0.287	0.849	0.9995	3.480	3.0
		3	0.261	1.516	0.9997	3.838	5.8
		7	0.249	1.906	0.9999	4.021	7.7
	気中養生	28	0.258	2.354	0.9998	3.871	9.1
		56	0.252	1.928	0.9999	3.970	7.7
	水中養生	28	0.237	1.394	0.9999	4.217	5.9
		56	0.237	1.629	0.9999	4.215	6.9
底面	湿布養生	1	0.270	0.761	0.9995	3.703	2.8
		3	0.244	0.588	0.9998	4.094	2.4
		7	0.234	0.639	0.9997	4.278	2.7
	気中養生	28	0.242	1.683	0.9999	4.134	7.0
		56	0.249	1.925	0.9999	4.021	7.7
	水中養生	28	0.222	0.342	0.9993	4.500	1.5
		56	0.239	2.042	0.9998	4.188	8.6
側面	湿布養生	1	0.276	0.766	0.9997	3.628	2.8
		3	0.257	1.420	0.9999	3.898	5.5
		7	0.243	1.593	0.9999	4.110	6.5
	気中養生	28	0.249	1.973	0.9999	4.016	7.9
		56	0.256	2.163	0.9999	3.907	8.5
	水中養生	28	0.239	1.996	0.9999	4.176	8.3
		56	0.240	1.993	0.9997	4.172	8.3

(b)材齢ごとの平均

	材齢	xoの平均
湿布養生	1	2.9
	3	4.6
	7	5.6
気中	28	8.0
水中		5.3
気中	56	7.9
水中		7.9

3.4.5 表面走査法による見かけの音速に及ぼす鉄筋の影響

（1）実験目的

表面走査法によって伝搬時間を測定するとき，鉄筋上のコンクリート表面あるいはその近くを測定すると，鉄筋の影響を受け時間が短く（速度が速く）測定される可能性がある。その対策として，鉄筋からどの程度離れた位置で測定すればよいのか，鉄筋が密に縦横に配筋されている場合どうすればいいかを検討した。

（2）測定方法

供試体Aを用いかぶりが異なる場合，かぶり一定で鉄筋呼び名（径）が異なる場合について，鉄筋上を探触子間隔 700mm で伝搬時間を測定した。また，側面から鉄筋の中間部の透過時間を測定した。

さらには，鉄筋に対して斜めに配置した時の伝搬時間を測定した。

（3）測定結果

測定結果を見かけの音速で**表－3.4.5.1** および**図－3.4.5.1** と 3.4.5.2 の上段に示す。

図より，かぶりが厚くなると見かけの音速はしだいに遅くなっている。鉄筋径が太くなると速くなっていることがわかる。**図－3.4.5.2** の（a-1）より，鉄筋に対して斜めに測定すれば，鉄筋の影響をほとんど受けないことがわかる。また，表－3.4.5.1（b）のBの下段のように鉄筋の間で測定した結果も，鉄筋がない場合とほぼ同じ音速であり，ほとんど鉄筋の影響を受けていないことがわかる。鉄筋間隔は 200mm なので，D38－D51 のあきは 111mm ということになる。その中間で両側の鉄筋から 56mm で測定してもほとんど影響を受けていない。

鉄筋がどの程度音速に影響しているかを調べるため，**表－3.4.5.1** には，**図－3.4.5.3** のように 45° で鉄筋に入射し，45° で受信探触子に入射する経路を仮定したときの鉄筋を伝搬する音速 V' の計算結果と，V' がコンクリートの影響を受け鉄筋の音速よりどの程度遅くなっているのかを調べるため，式（3.4.5.1）によっての値を求めた。

$$\alpha = \frac{V'-Vc}{Vs-Vc} \qquad (3.4.5.1)$$

ここに，V' ：コンクリート中の鉄筋を伝搬する音速，Vs：鉄筋を伝搬する音速（5900m/s），Vc：コンクリートの音速である。

α 値の計算結果を**表－3.4.5.1** および**図－3.4.5.2** の下段に示す。

図－3.4.5.1 のかぶりの影響では，かぶり 65mm 以上ではコンクリート音速にほぼ一致し，鉄筋の影響を受けていない。伝搬経路の解析結果も 65mm 付近を伝搬しており，鉄筋を伝搬していないものと考えられるので，検討からはずした。鉄筋 ϕ20 でかぶり 15mm の場合 α＝0.4 程度，40mm の場合 α＝0.2 程度になっている。

かぶりが 50mm で鉄筋径が異なる場合（**図－3.4.5.2**），D25 では α＝0.2～0.3，D32 は α＝0.4～0.5，D38 とD51 は α＝0.6～0.7 程度になっており，鉄筋径が太くなるほど音速に及ぼす影響は大きいものの，しだいに収束する傾向がある。

表－3.4.5.1　コンクリート表面の見かけの音速と鉄筋を伝搬する音速

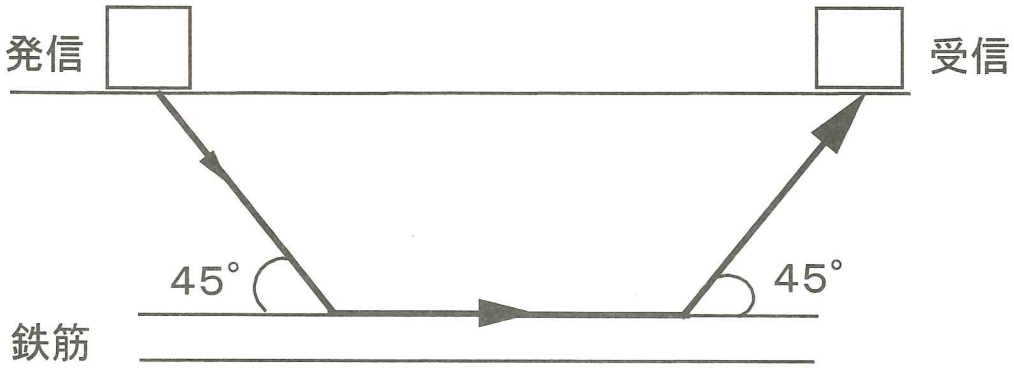
(a)かぶりの影響

測定装置	鉄筋呼び名	鉄筋径 (mm)	かぶり (mm)	見かけの音速(L＝700)(m/s)			V′（鉄筋を伝搬する音速）			α値		
				1週	4週	13週	1週	4週	13週	1週	4週	13週
A	φ20	20	15		4673			4816			0.439	
		20	40		4030			4269			0.156	
		20	65		3963							
		20	90		3980							
	なし				3935							
B	φ20	20	15		4578	4798		4697	4943		0.332	0.479
		20	40		4245	4172		4507	4422		0.227	0.195
		20	65		4044	4070						
		20	90		4098	4089						
	なし			4023	4096	4063						

(b)鉄筋径の影響

測定装置	鉄筋呼び名	鉄筋径 (mm)	かぶり (mm)	見かけの音速(L＝700)(m/s)			V′（鉄筋を伝搬する音速）			α値		
				1週	4週	13週	1週	4週	13週	1週	4週	13週
A	D25	25	50		3989			4289			0.166	
	D32	32	50		4352			4790			0.426	
	D38	38	50	3889	4567			5098		0.097	0.585	
	D51	51	50		4632	3940		5193			0.634	0.132
B	D25	25	50	4021	4260	4305	4288	4745	4682	0.105	0.284	0.337
	D32	32	50	4566	4351	4611	5048	4824	5113	0.527	0.359	0.571
	D38	38	50	4575	4400	4670	5073	5381	5198	0.541	0.403	0.618
	D51	51	50	4752	4775	4701	5347		5243	0.693	0.712	0.642
	なし　透過音速			4072	4174	4218						
	D25-D32間　透過音速			4106	4211	4240						
	D32-D38間　透過音速			4040	4131	4177						
	D38-D51間　透過音速			4040	4152	4188						

注)Aの見かけの音速，α値の1週，13週に記入してある値は，鉄筋に対して斜めに測定した結果。D38は14度，D51は40度で測定。
Bの下段の透過速度は，供試体側面から測定(L＝1200mm)



図－3.4.5.3　超音波伝搬経路の仮定

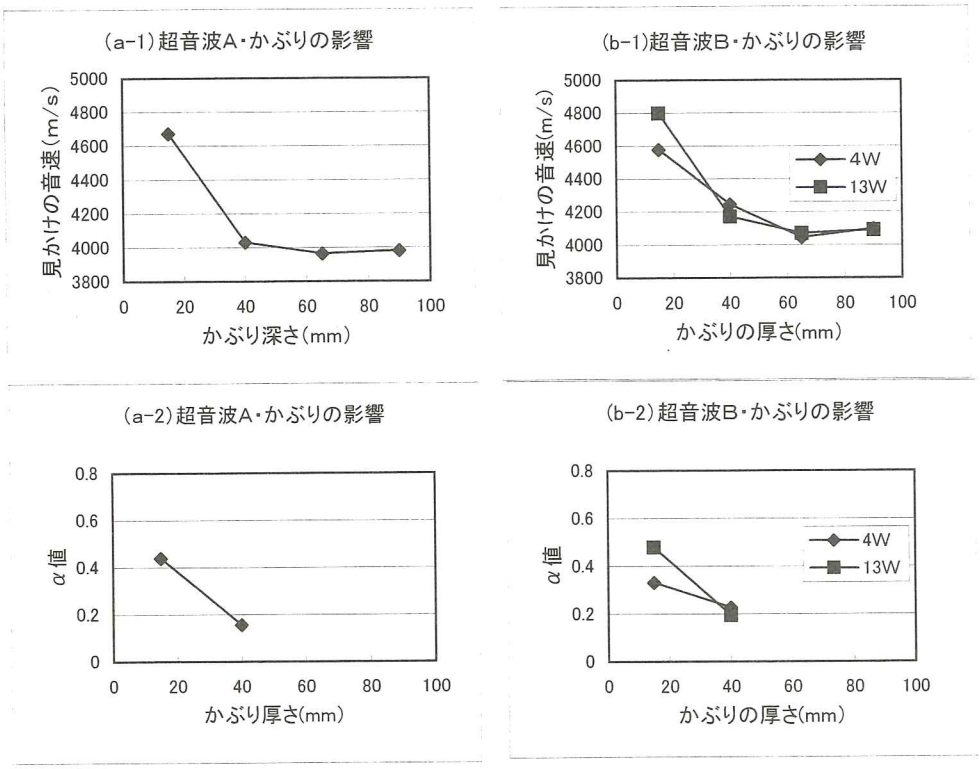


図-3.4.5.1　見かけの音速及びα値(かぶりの影響)

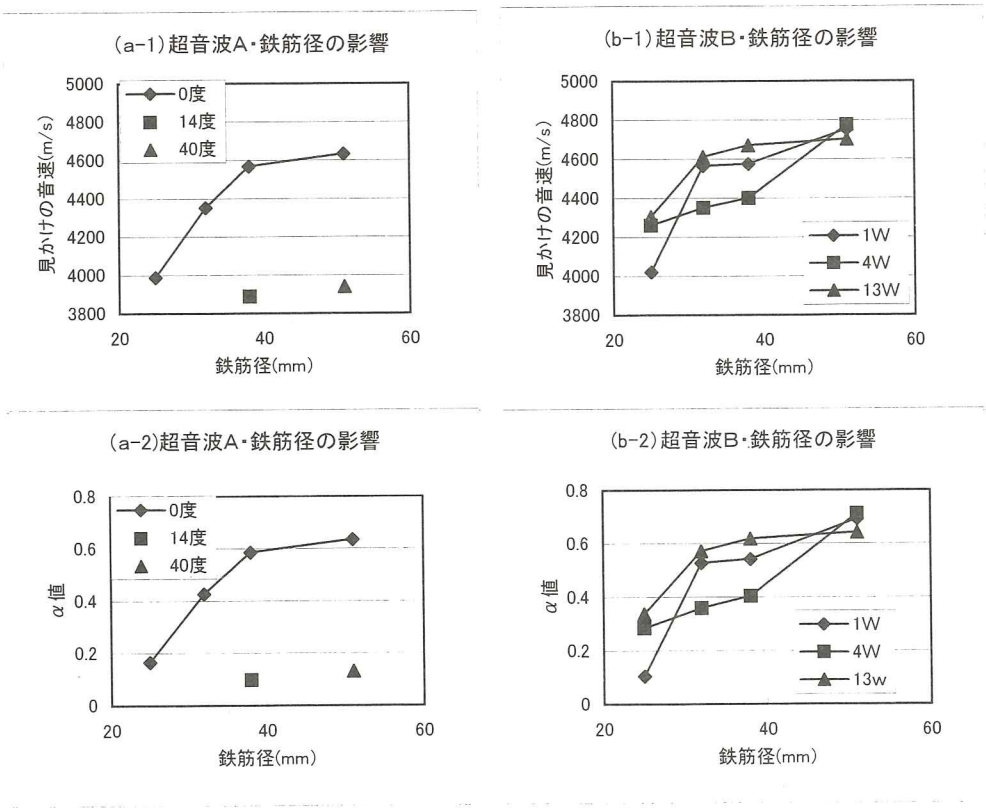


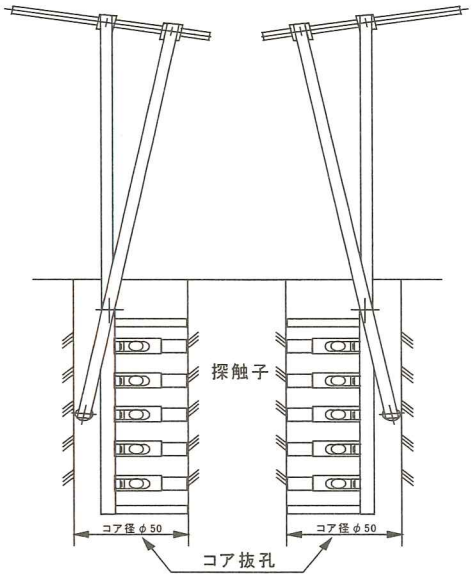
図-3.4.5.2　見かけの音速とα値(鉄筋径の影響)

3.4.6　音速分布形状に関する検討

(1) 音速分布の解析結果と実測値の比較

表面走査法による伝搬時間からｍ＝5 の場合の内部の音速分布を求めると，**図－3.4.6.1** の実線のようになる。音速分布が実際に予測できているかを確認するため，次のように内部の音速を測定した。

３種類の供試体について表面走査法により測定した後，コアを抜き，**図－3.4.6.2** のように内部の透過音速を直接測定した。測定結果を**表－3.4.6.1** および**図－3.4.6.1** に示す。

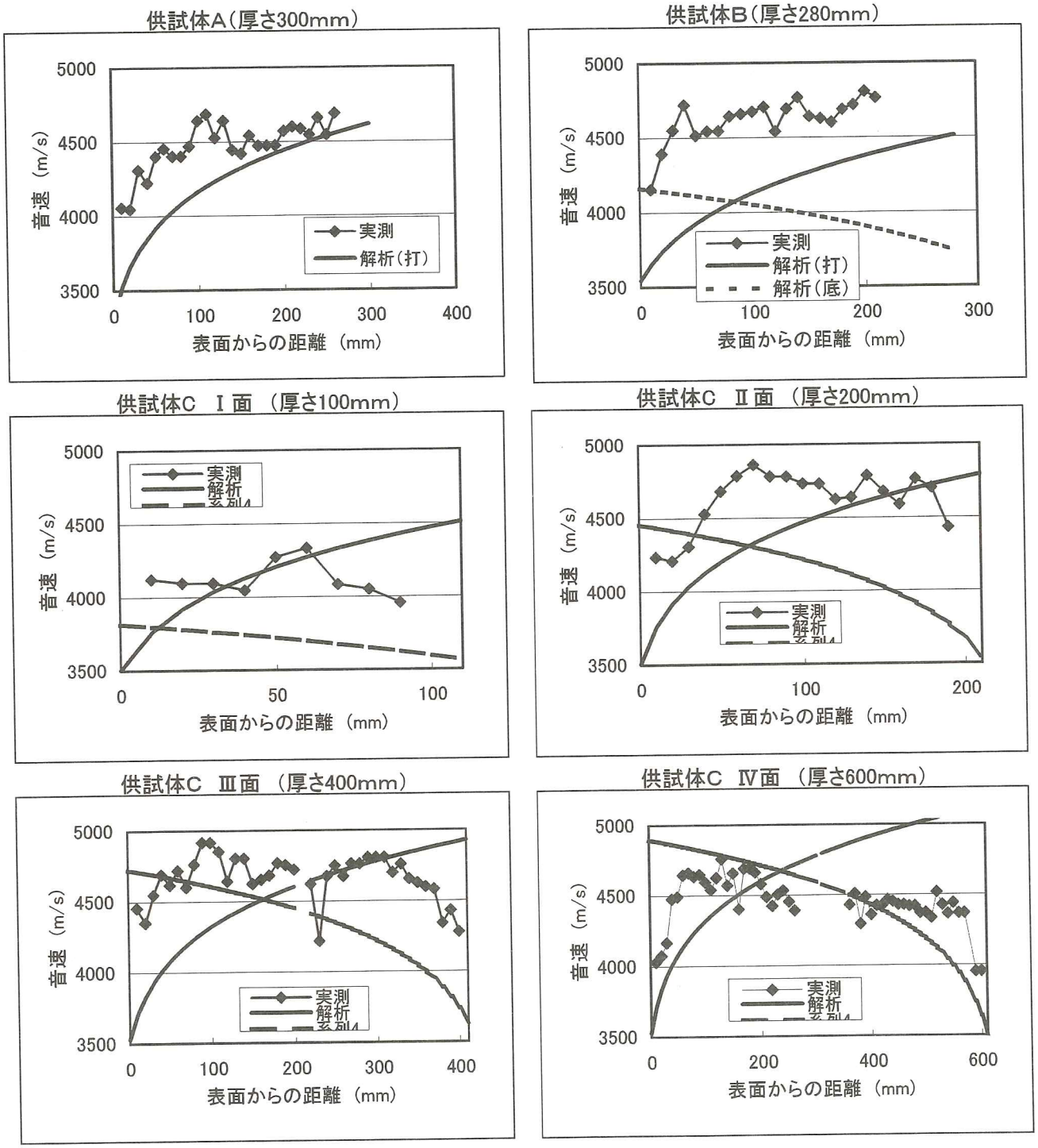


図－3.4.6.2　内部音速の直接測定

表－3.4.6.1 コンクリート内部の透過時間　　(μs)

測定面からの距離 (mm)	供試体A	供試体B	供試体C－Ⅰ面					供試体C－Ⅱ面					供試体C－Ⅲ面		供試体C－Ⅳ面	
			①	②	③	④	⑤	①	②	③	④	⑤				
	打設面	打設面	表面					表面					表面	裏面	表面	裏面
10	36.0	38.8	35.6	35.2	36.7	31.1	29.0	36.6	35.1	35.7	32.0	31.1	33.7	34.9	37.3	38.7
20	36.1	40.2	35.4	35.4	36.2	32.2	29.1	32.8	35.3	35.2	31.4	30.7	34.5	33.7	36.9	38.7
30	33.9	41.5	35.5	35.4	38.5	31.8	29.4	31.6	34.5	34.1	30.5	30.7	33.0	34.4	36.1	37.5
40	34.6	40.6	34.0	35.8	38.1	30.8	27.9	31.4	32.8	32.8	30.1	30.4	32.0	32.6	33.6	35.0
50	33.2	41.3	35.0	33.9	36.2	32.1	28.3	31.2	31.7	33.0	30.9	31.0	32.5	32.5	33.5	35.0
60	32.8	36.9	35.7	33.4	35.2	31.4	30.5	31.3	31.0	32.7	31.6	29.6	31.8	32.3	32.4	34.4
70	33.2	34.9	35.1	35.4	36.3	30.6	31.2	31.3	30.5	32.6	31.4	29.9	32.6	32.1	32.3	35.0
80	33.2	33.7	36.0	35.7	33.2	30.7	32.1	32.3	31.0	31.9	31.8	31.2	31.5	31.4	32.5	34.5
90	32.7	32.5	37.5	36.5	37.7	32.2	34.6	32.3	31.0	31.9	31.0	30.7	30.5	31.8	32.4	33.8
100	31.5	34.0						32.6	31.3	31.2	29.4	30.4	30.5	31.1	32.8	35.2
110	31.2	33.8						32.6	31.3	31.5	30.8	28.9	30.9	31.1	33.2	34.9
120	32.3	33.8						32.3	32.0	31.8	31.2	31.2	32.3	31.1	32.6	34.9
130	31.5	33.1						32.1	31.9	32.2	30.7	30.2	31.2	31.4	31.7	34.5
140	32.9	33.0						33.1	30.9	32.1	30.9	30.4	31.2	31.4	33.0	34.5
150	33.1	32.9						32.7	31.6	31.6	31.0	30.1	32.4	32.0	32.4	34.4
160	32.2	32.7						32.2	32.2	32.2	31.6	29.8	32.2	31.5	34.3	34.4
170	32.7	33.9						32.7	31.0	31.4	32.5	29.8	32.0	32.0	32.2	34.2
180	32.7	32.8						32.4	31.4	33.1	31.2	28.0	31.4	35.5	32.2	34.1
190	32.7	32.3						35.0	33.3	36.3	32.9	30.9	31.5	32.4	32.4	34.4
200	32.0	33.2											31.7		33.0	34.4
210	31.8	33.3													33.7	34.9
220	31.9	33.5													34.2	33.9
230	32.2	32.9													33.6	35.4
240	31.4	32.7													33.4	33.7
250	32.2	32.1													34.0	34.3
260	31.2	32.4													34.5	
測定間隔 測定面	146.1	152.9	147.1	145.2	231.3	152.0	130.1	148.7	148.8	146.7	129.4	126.5	150.2		150.3	
測定間隔 裏面	146.4	154.6	147.3	144.3	249.5	153.0	131.2	148.2	147.4	148.6	131.4	124.9	149.3		153.2	

＊供試体Bの10～50mmはアスファルト部分

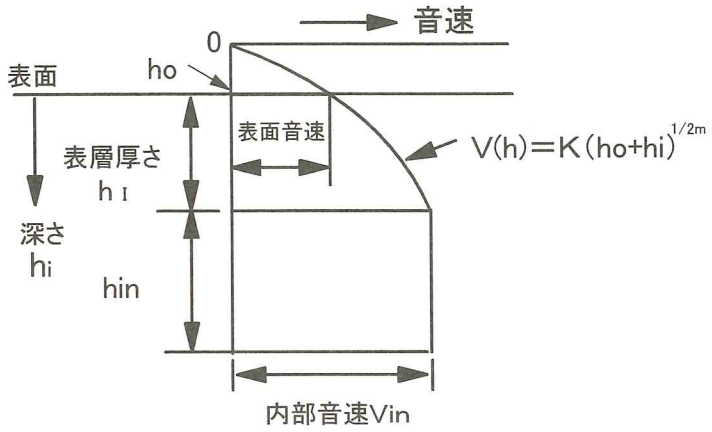


図－3.4.6.1 コンクリート内部の透過音速の実測値と解析値の比較

図－3.4.6.1 の解析結果と測定結果を比較すると，測定結果は表面から次第に速くなっているが，100mm程度より内部ではほぼ一定の音速になっている。それに対し，解析結果の表面の音速はやや遅く，表面から遠ざかるにしたがい速くなっている。

解析結果は，表面付近の音速分布を外挿しているだけであり，内部深くを推定しているわけではない。

内部の音速を予測するには，図－3.4.6.3 のように表面付近の音速が変化する部分の形状と，その深さ，それより内部のほぼ一定の音速を求める必要がある。図－3.4.6.1



図－3.4.6.3　音速分布の仮定

表 面 音 速：表面の音速

表層（厚さ）：表面付近の音速が変化している音速分布域。その厚さを表そう厚さと呼ぶ。

内部音速　　：表層より内部のほぼ一定の音速。

(2) 表層の音速分布形状

測定結果の表面から 100mmまでを式（3.4.6.1）で回帰した結果は，表－3.4.6.2 のとおりであった。

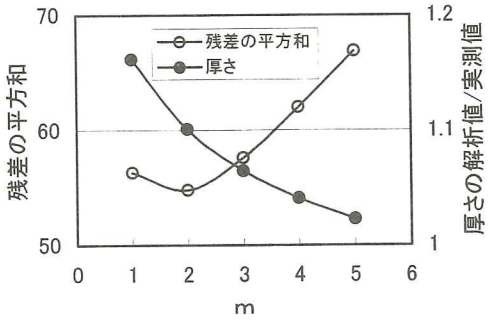
mの値は，部材厚さの薄い供試体CのⅠ面，Ⅱ面はやや小さいものの，厚さ 300mm 以上では約 5 であった。

表－3.4.6.2 実測値の回帰結果と解析結果

供試体		測定面	実測回帰結果			解析結果		
			K	h0	m	K	h0	m
A		打設面	2806	28.2	5.00	2600	11.0	5
B		打設面	2921	42.5	5.22	2597	25.3	5
		底 面	－	－	－	2655	22.0	5
C	Ⅰ面	表 面	2214	167.7	4.25	2794	9.6	5
		裏 面	2171	31.8	3.30	2468	34.1	5
	Ⅱ面	表 面	2341	25.4	3.15	2794	9.6	5
		裏 面	2806	156.1	5.29	2585	22.9	5
	Ⅲ面	表 面	3040	35.0	5.21	2689	15.1	5
		裏 面	2953	33.9	5.06	2661	12.5	5
	Ⅳ面	表 面	3076	6.6	5.43	2689	15.1	5
		裏 面	2925	16.5	5.49	2570	22.2	5

(3) 部材厚さによる音速分布形状の検討

音速分布形状を検討するため，表面走査法によって測定した伝搬時間から，表面音速および音速分布を**表－3.4.6.3** のように求めた。**表－3.4.6.3** は，各測定機種ごとに，音速分布形状を表すmの値を 1～5 に変えたときの結果を求めたものの一例を示した。**表－3.4.6.3** には，次の項で説明するように，音速分布形状ごとに厚さの結果も示している。音速分布を求めるにあたって，探触子間ごとに伝搬時間 *ti* と，解析による伝搬時間 *tical* から残差平方和 $(tical\text{-}ti)^2$ が求められている。m値ごとに残差の平方和と厚さの解析結果を示したのが**図－3.4.6.4** である。



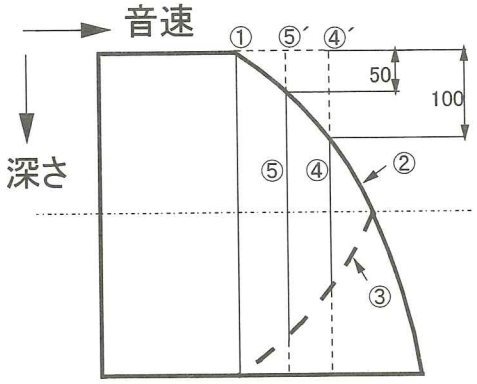
図－3.4.6.4 m値と残差の平方和，厚さの関係
（供試体A）

当初，残差の平方和が最小になるとき音速分布の最適値と考え，厚さも最適な値が得られると考えていたが，必ずしもそうとはなっていない。解析の結果，残差の平方和が最小になるのは m＝1～5 に存在しており，主に 3～5 が多かった。厚さは，m が小さいときはかなり大きく，m が大きくなると実測値に近くなっている。

(4) 表層厚さの検討

前項のように，残差平方和が最小値になる m 値と厚さが実測値に近くなるm値が一致しないのは，表層の音速分布を部材下部にまで外挿しているためと考えられる。コンクリートの内部では品質がほぼ一定であり，音速もほぼ一定になっていることが考えられることから，表層厚さについて検討した。

検討にあたっては，音速分布を**図－3.4.6.5** のように仮定して厚さを求めた。音速分布の仮定は次のとおりである。



図－3.4.6.5 音速分布の仮定

①表面音速

②提案法による音速分布

③壁の場合両面から乾燥するため，②の対称分布

④⑤表面から 100 ㎜，50 ㎜より内部は一定音速

④′ ⑤′ 簡易に求めるため表面から 100 ㎜，50 ㎜の音速一定

①～⑤'の音速分布の仮定に対し、厚さの計算は**図－3.4.6.4** のとおりである。

①④'⑤'は一定音速なので通常の求め方である。

②は、第Ⅰ部の式(1.6)である。③は対象断面を考えているので、反射時間の 1/2 で厚さの半分を求め、それを 2 倍して求める。

④は、音速分布を有するⅠ区間と音速一定のⅡ区間に分割する。Ⅰ区間までの深さ h は次のように求める。

表面走査法により伝搬時間を数点測定し、距離 L を時間 t で割った見かけの音速 V' と距離 L の関係から，見かけの音速がほぼ一定となるときの距離 L_I を求める。

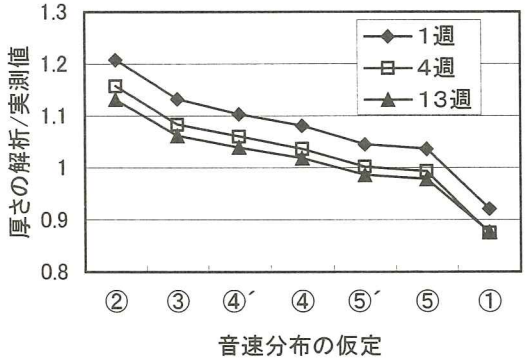
距離 L_I のときの伝搬経路を第Ⅰ部の式(1.3)で計算し，最深部の深さ h_I を求める。

h_I が求められれば，そこまでの往復伝搬時間 t_I は第Ⅰ部の式(1.5)によって求められる。

反射時間 t からⅠ区間の往復伝搬時間 t_I を引くと，Ⅱ区間の往復伝搬時間 t_{II} となり，式(1.1)によって h_{II} を求めることができる。

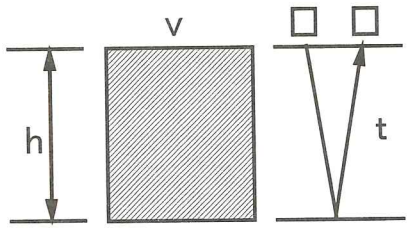
⑤は③と同様，$t = t/2$ とし，④と同様に厚さの半分を求め，それを 2 倍する。

このようにして求めた各音速分布の厚さは**図－3.4.6.7** のとおりであった。②→⑤になるにしたがい実測値に近くなっている。また，測定材齢が 1 週と 13 週を比べると 1 週は⑤，13 週は④が最も実測値に近い。これは材齢の進行により乾燥が内部まで進行したためと，それにともない表面近傍の強度発現が小さくなったためである。音速が一定値となる距離は，長期材齢の場合 100㎜ より内部ではほとんど含水率は変化しないといわれており，この距離でほぼ妥当と考えられる。材齢が若い場合は，この距離の検討が必要である。



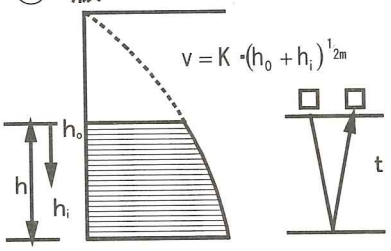
図－3.4.6.7 音速分布の仮定と厚さの関係
（供試体C―Ⅳ面）

① ④' ⑤'



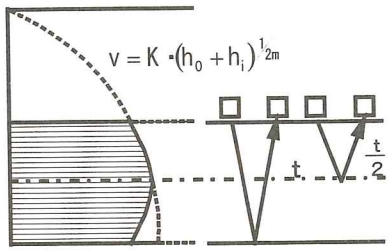
$$h = \frac{v\ t}{2} \qquad (1)$$

② 版



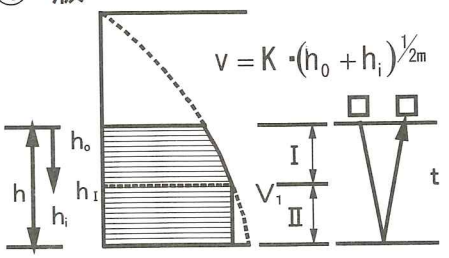
$$h = \left(\frac{2m-1}{2m} \frac{K \cdot t}{2} + h_0^{\frac{2m-1}{2m}} \right)^{\frac{2m}{2m-1}} - h_0 \qquad (2)$$

③ 壁



$$h = \left[\left(\frac{2m-1}{2m} \frac{K \cdot \frac{t}{2}}{2} + h_0^{\frac{2m-1}{2m}} \right)^{\frac{2m}{2m-1}} - h_0 \right] \times 2 \qquad (3)$$

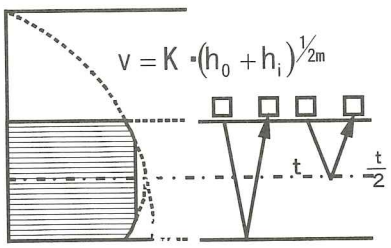
④ 版



$$h = h_I + h_{II}$$

$$= \left[\left(\frac{2m-1}{2m} \frac{K \cdot t_I}{2} + h_0^{\frac{2m-1}{2m}} \right)^{\frac{2m}{2m-1}} - h_0 \right]_I + \left[\frac{v_I \cdot t_{II}}{2} \right]_{II} \qquad (4)$$

⑤ 壁



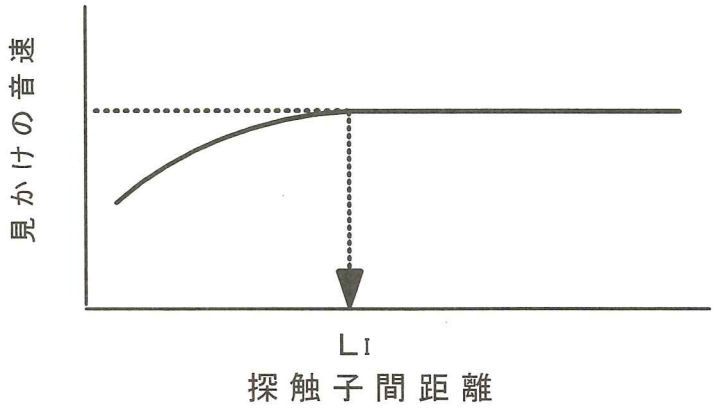
$$h = \left[h_I \left(\frac{t_I}{2} \right) + h_{II} \left(\frac{t_{II}}{2} \right) \right] \times 2 \qquad (5)$$

図－3.4.6.6 厚さの求め方

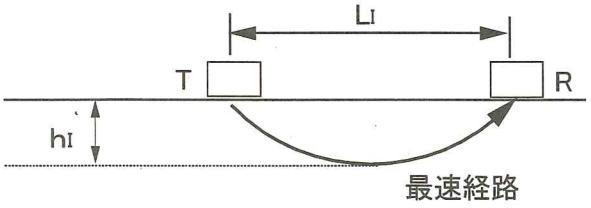
(5) 表層厚さの求め方

表層の音速分布は，(2) のコンクリート内部の音速を直接透過法によって測定した結果，および (4) の部材厚さと音速分布の関係から，**式 (3.4.6.1)** のmの値をほぼ 5 とすればよいことがわかった。次に**図－3.4.6.3** の音速分布を決定するには表層厚さを求める必要がある。

表面走査法による見かけの音速は，**図－3.4.6.8** のようにある距離以上になるとほぼ一定値となる。これは，音速分布が**図－3.4.6.3** の形状となっていることから，探触子間距離がある距離以上になると超音波が表層より内部のほぼ一定の音速域を伝搬するためと考えることができる。このことから，表層厚さを求めるには，見かけの音速がほぼ一定になるときの距離L_Iを求め，そのとき超音波の最速経路の最深部が表層厚さになるものと考えられる（**図－3.4.6.9**）。



図－3.4.6.8　探触子間距離と見かけの音速の関係



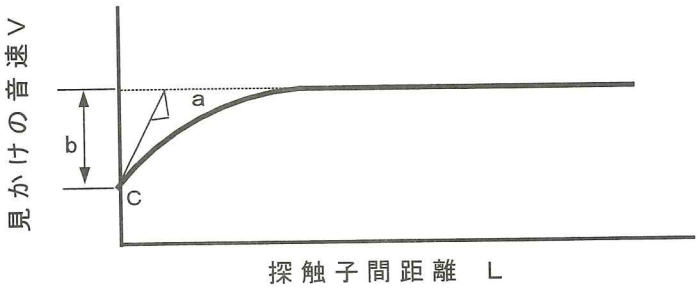
図－3.4.6.9　L_Iと表層厚さの関係

実際にL_Iを求めるにあたっては，次のような方法が考えられる。

探触子間距離と見かけの音速の関係を式 (3.4.6.2) で回帰する。

$$V = \frac{L}{\frac{1}{a} + \frac{L}{b}} + c \qquad (3.4.6.2)$$

式 (3.4.6.2) の *a, b, c* は回帰係数であり，**図－3.4.6.10** のように，a は$L=0$のときの傾き，*b+c* は$L=\infty$のときの音速（表面音速）である。



図－3.4.6.10　式（3.4.6.2）の模式図

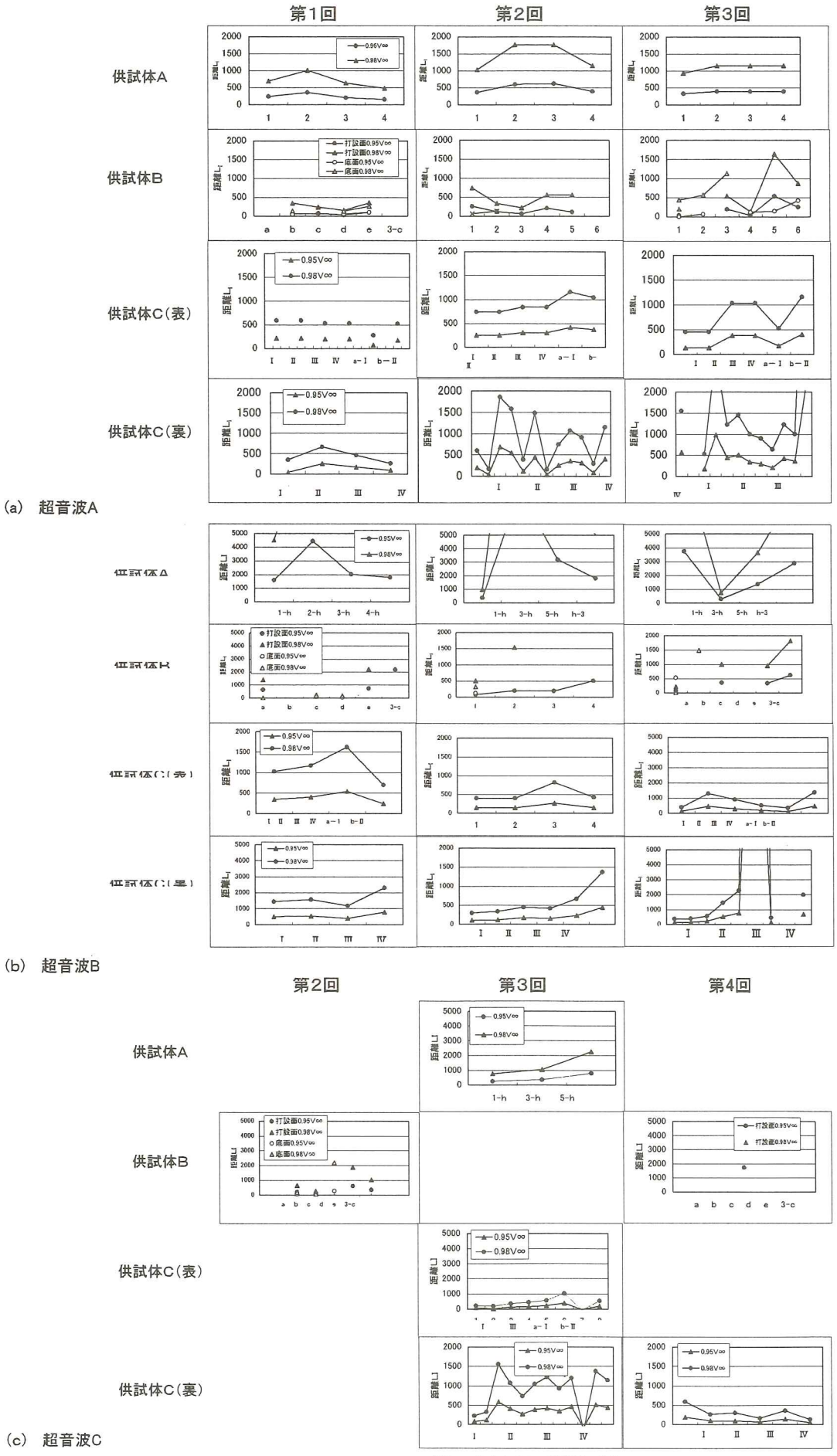
回帰結果を**表－3.4.6.4**に示す。$b+c=V\infty$とし，$V\infty$の95%，98%の時の音速を示すと，**図－3.4.6.11**のように大きくばらついた。**図－3.4.6.8**のように回帰結果がほぼ一定になっている位置を決めようとしており，わずかな音速の違いで距離は大きく変化することになる。そのため，現段階では何回か測定してほぼ変化がなくなる位置を見つけ出す方が安定した値を求めることができる。

このようにして音速分布を，求めた結果（解析）が**図－3.4.6.12**である。解析結果は実測結果より500m/sほど小さいものの，分布形状はほぼ同じである。解析結果と実測値が異なる理由の一つは，測定装置の違いを考えられるが，なぜ500m/sも違うかなどは不明である。

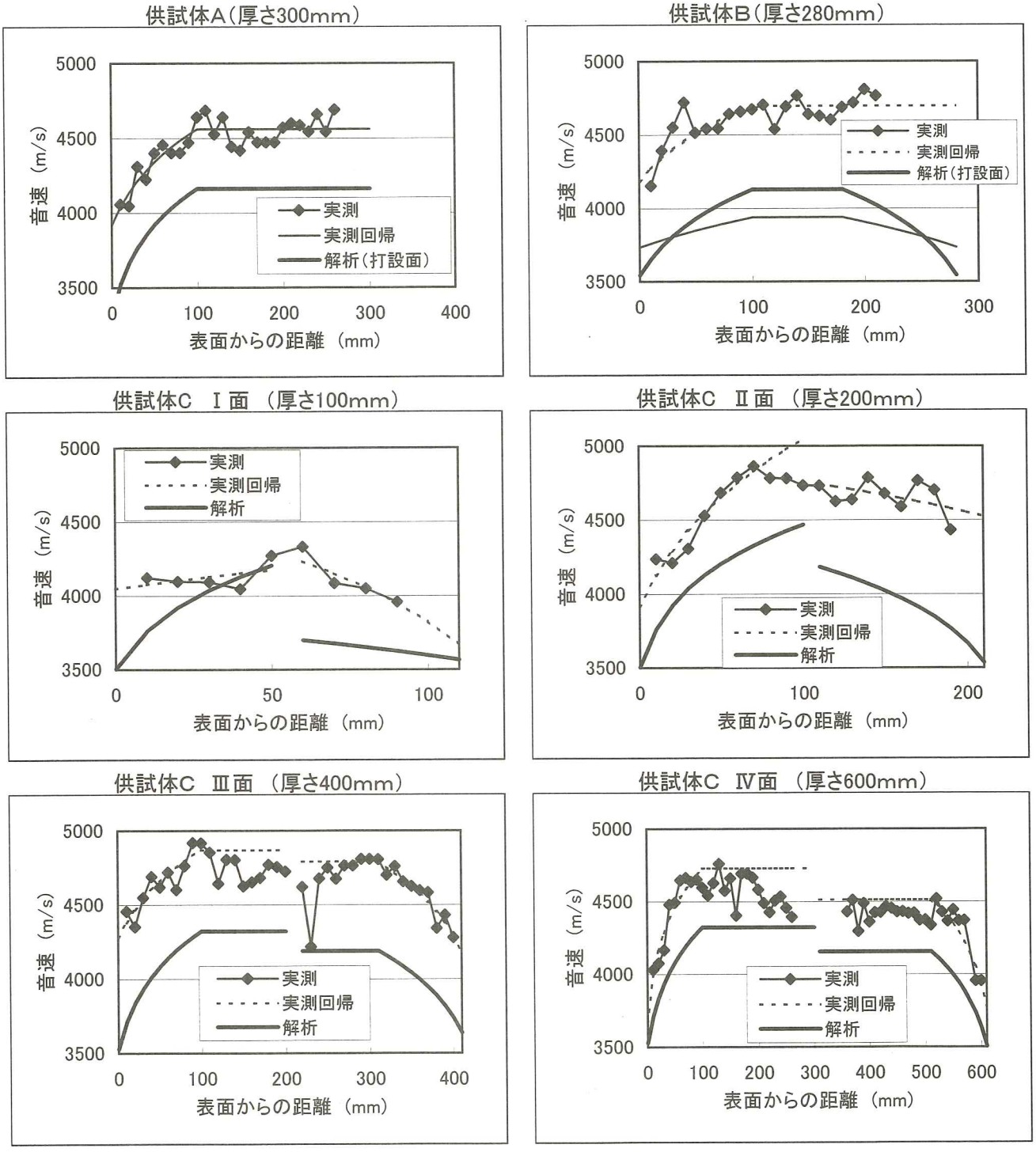
(6) 内部音速の簡易測定

部材厚さの概略値や、あとで述べる強度推定を行うためには，内部音速を求めればよい。そのため内部音速を簡易に求める方法を検討した。

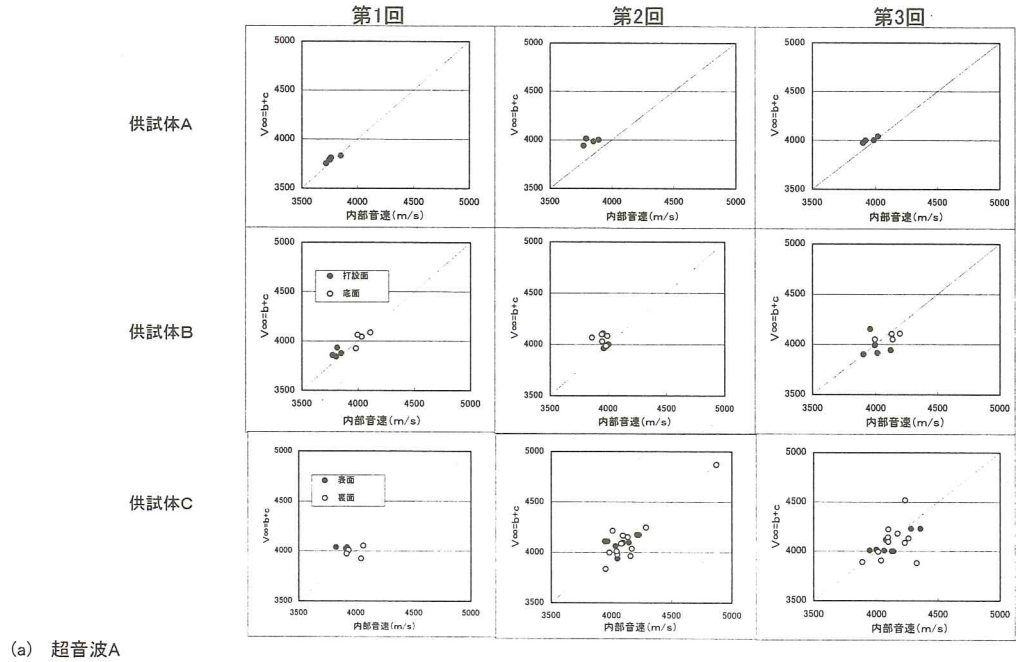
図－3.4.6.13に内部音速（**表－3.4.6.5**）と$V\infty$（$=b+c$）（**表－3.4.6.4**）の関係を示す。ばらつきは大きいものもあるが，概ね両者はほぼ同じ値であり，内部音速は$V\infty$で概略値を得ることができる。


第1回
第2回
第3回
供試体A
供試体B
供試体C(表)
供試体C(裏)
(a) 超音波A
(b) 超音波B
第2回
第3回
第4回
供試体A
供試体B
供試体C(表)
供試体C(裏)
(c) 超音波C

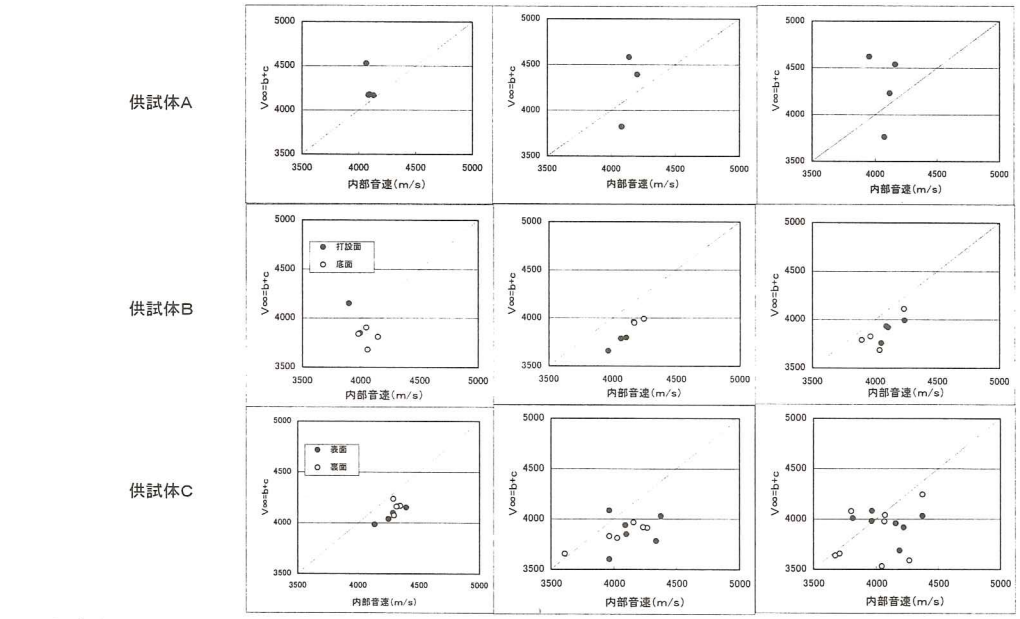
図－3.4.6.11 距離 LI



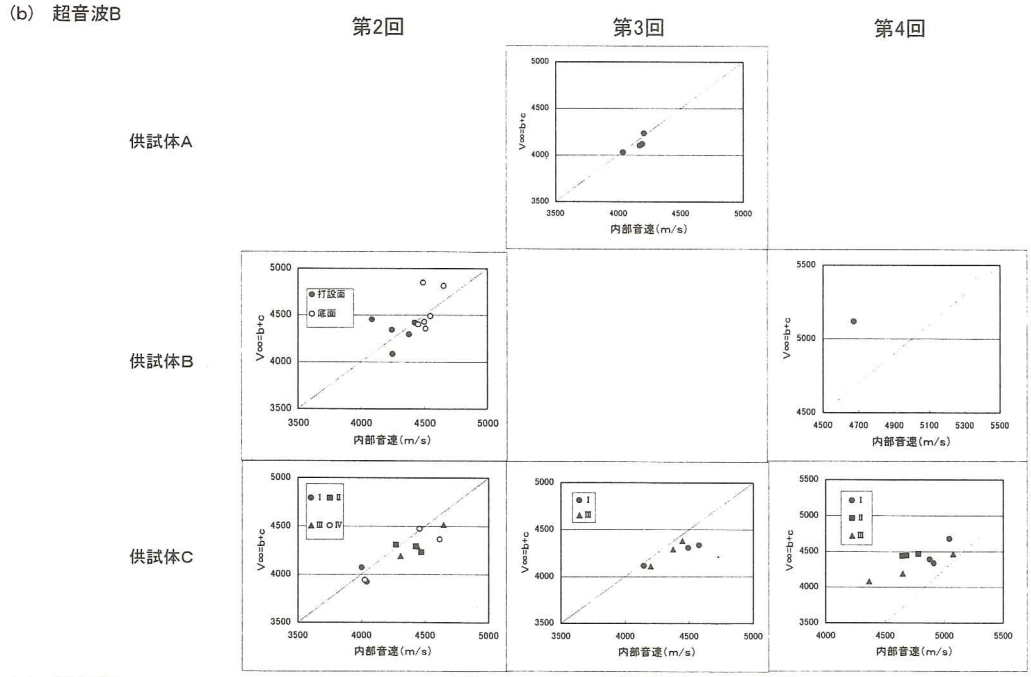
図－3.4.6.12　実測値と解析値の比較



(a) 超音波A



(b) 超音波B



(c) 超音波C

図－3.4.6.13　内部音速とV∞の関係

表-3.4.6.3 音速分布の解析結果と厚さ(超音波B, m＝5)

供試体	測定面	測定位置		厚さ実測値 mm	第1回測定																	
					表面音速	m5分布		反射時間	厚さ(mm)													
									①表面音速		②m5分布		③t/2*2		④(100)t/2		④'V(100)t/2		⑤(50)t/2		⑤'V(50)t/2	
					m/s	K	ho	μs	解析値	解／実	解析値	解／実	解析値	解／実	解析値	解／実	解析値	解／実	解析値	解／実	解析値	解／実
A	打設面		1-h	301.3	3394	2604.9	14.1	76.2	258.6	0.858	325.2	1.079	306.0	1.015	322.0	1.069	318.8	1.058	303.2	1.006	300.9	0.999
			3-h	302.6	3257	2597.7	9.6	73.7	240.0	0.793	310.8	1.027	291.6	0.963	308.9	1.021	306.2	1.012	290.0	0.959	288.1	0.952
			5-h	302.9	3252	2641.4	8.0	75.0	243.9	0.805	322.0	1.063	301.5	0.995	318.8	1.052	316.4	1.045	299.1	0.987	297.3	0.982
			h-3	301.3	3329	2614.5	11.2	73.7	245.3	0.814	313.7	1.041	294.6	0.978	311.5	1.034	308.7	1.024	292.8	0.972	290.8	0.965
B	打設面		a	282.5	3429	2438.7	30.3	72.5	248.6	0.880	291.5	1.032	277.1	0.981	392.5	1.389	287.7	1.019	327.2	1.158	274.1	0.970
			b	253.4	3189	2504.6	11.2	63.0	200.9	0.793	252.1	0.995	237.2	0.936	355.6	1.403	252.7	0.997	290.2	1.145	238.1	0.940
			c	227.4	3189	2504.6	11.2	61.1	194.8	0.857	243.8	1.072	229.5	1.009	348.0	1.530	245.1	1.078	283.0	1.244	230.9	1.015
			d	200.2	3189	2504.6	11.2	49.3	157.2	0.785	192.9	0.964	182.1	0.909	300.7	1.502	197.8	0.988	238.4	1.191	186.3	0.931
			e	175.1	3250	2550.2	11.3	46.9	152.4	0.871	186.4	1.064	176.0	1.005	294.5	1.682	191.6	1.094	232.6	1.328	180.5	1.031
			3-c	227.4	3323	2466.5	19.7	61.1	203.0	0.893	242.5	1.067	229.8	1.011	347.1	1.526	243.2	1.069	283.0	1.245	230.4	1.013
	底面		a	282.5	3654	2553.5	36.0	71.1	259.8	0.920	301.5	1.067	287.1	1.016	401.8	1.422	296.7	1.050	336.7	1.192	283.4	1.003
			b	253.4	3511	2678.1	15.0	64.1	225.1	0.888	277.8	1.096	262.0	1.034	379.3	1.497	275.9	1.089	313.0	1.235	260.6	1.028
			c	227.4	3511	2678.1	15.0	59.5	208.9	0.919	256.2	1.127	241.8	1.063	359.5	1.581	256.1	1.126	294.3	1.294	241.9	1.064
			d	200.2	3511	2678.1	15.0	49.9	175.2	0.875	211.5	1.057	200.1	0.999	318.2	1.589	214.8	1.073	255.2	1.275	202.9	1.013
			e	175.1	3815	2424.1	93.2	45.1	172.1	0.983	183.4	1.047	178.6	1.020	292.1	1.668	185.1	1.057	233.7	1.335	179.6	1.026
			3-c	227.4	3644	2589.1	30.5	59.5	216.8	0.953	251.3	1.105	239.4	1.053	355.5	1.563	250.7	1.103	292.0	1.284	238.9	1.051
C	表面	Ⅰ	1	109.7	3708	2798.1	16.7	26.6	98.6	0.899	112.7	1.028	107.7	0.982	223.4	2.036	119.8	1.092	165.8	1.511	113.3	1.033
		Ⅱ	1	211.7	3708	2798.1	16.7	52.4	194.3	0.918	234.5	1.108	221.8	1.048	339.6	1.604	236.0	1.115	275.6	1.302	223.2	1.054
		Ⅲ	3	409.8	3684	2723.6	20.5	101.3	373.2	0.911	468.9	1.144	441.2	1.077	549.5	1.341	445.5	1.087	474.9	1.159	422.3	1.030
		Ⅳ	3	613.4	3684	2723.6	20.5	152.5	561.8	0.916	734.0	1.197	687.9	1.121	774.6	1.263	670.7	1.093	688.4	1.122	635.7	1.036
		a-Ⅰ	1	109.7	3557	2707.8	15.3	26.6	94.6	0.862	108.5	0.989	103.6	0.944	219.2	1.998	115.8	1.056	161.8	1.475	109.4	0.997
		b-Ⅱ	1	211.7	3712	2612.0	33.6	52.4	194.5	0.919	222.0	1.049	212.2	1.002	328.3	1.551	223.3	1.055	266.3	1.258	213.1	1.006
		a-Ⅲ	3	409.8	3557	2707.8	15.3	101.3	360.3	0.879	463.9	1.132	435.4	1.062	544.4	1.328	441.0	1.076	469.0	1.144	416.6	1.017
		b-Ⅳ	3	613.4	3712	2612.0	33.6	152.5	566.1	0.923	706.2	1.151	665.0	1.084	754.8	1.231	649.9	1.059	673.3	1.098	620.1	1.011
	裏面	Ⅰ	1	109.7	3695	2764.4	18.2	27.2	100.5	0.916	114.3	1.042	109.3	0.997	224.9	2.050	121.2	1.105	167.3	1.525	114.7	1.046
		Ⅱ	1	211.7	3686	2744.4	19.1	52.2	192.4	0.909	229.4	1.084	217.4	1.027	334.9	1.582	231.1	1.091	271.4	1.282	218.8	1.034
		Ⅲ	3	409.8	3606	2734.6	15.9	103.1	371.8	0.907	478.3	1.167	448.9	1.095	557.0	1.359	453.5	1.107	481.0	1.174	428.6	1.046
		Ⅳ	3	613.4	3676	2727.2	19.8	153.7	565.0	0.921	741.1	1.208	694.3	1.132	780.3	1.272	676.4	1.103	693.5	1.131	640.9	1.045

表－3.4.6.4 距離LI その1(超音波A)

供試体	測定位置			第1回測定							第2回測定							第3回測定						
				回帰係数			相関係数	V∞	LI		回帰係数			相関係数	V∞	LI		回帰係数			相関係数	V∞	LI	
				a	b	c	r	b+c	0.95V∞	0.98V∞	a	b	c	r	b+c	0.95V∞	0.98V∞	a	b	c	r	b+c	0.95V∞	0.98V∞
A	打設面		1-h	20.23	1072.7	2713.8	0.695	3786.5	247.4	698.1	17.09	1221.1	2719.7	0.970	3940.8	371.3	1035.5	16.56	1148.9	2823.6	0.944	3972.5	331.9	933.9
			3-h	17.62	1205.9	2605.5	0.933	3811.4	364.6	1014.2	5.53	923.1	3060.2	0.928	3983.3	606.8	1767.3	10.00	1000.0	3000.0	0.872	4000.0	400.0	1150.0
			5-h	9.68	719.4	3032.6	0.679	3752	210.7	638.2	7.74	1089.0	2923.9	0.987	4012.9	622.9	1768.4	10.00	1000.0	3000.0	0.892	4000.0	400.0	1150.0
			h-3	10.86	676.7	3154.6	0.435	3831.3	157.8	488.0	10.00	1000.0	3000.0	0.912	4000.0	400.0	1150.0	8.68	942.4	3094.8	0.935	4037.2	398.3	1158.6
	側面		h																					
			z																					
			3																					
			6																					
B	打設面	上	a			4349.1					(521.65)	(1791.6)	5688.6		3897.0			6.13	351.1	3551.4	0.291	3902.5	45.8	200.4
			b	2.79	312.4	3545.0	0.814	3857.4	69.4	341.4	20.36	1139.5	2829.2	0.793	3968.7	265.4	747.5		(44.2)	3912.3				
			c	13.10	534.1	3341.5	0.904	3875.6	71.6	240.2	47.47	1165.0	2803.6	0.619	3968.6	119.5	335.7	53.15	1565.8	2424.9	0.931	3990.7	201.7	548.5
			d	5.81	302.4	3539.5		3841.9	29.9	152.8	15.71	571.1	3404.1	0.753	3975.2	68.1	224.8	18.60	483.0	3431.7	0.078	3914.7	38.1	134.2
			e	6.89	475.4	3456.0	0.860	3931.4	97.9	348.2	67.58	1778.2	2223.2	0.626	4001.4	207.6	558.3	4.19	797.6	3353.4	0.967	4151.0	541.2	1638.5
			3-c			4027.3	0.587				1.77	321.3	3641.0	0.743	3962.3	112.9	554.5	3.14	505.8	3438.5	0.909	3944.3	252.0	871.7
	底面	底	a		4504.2						(5.08)	(686.6)	4751.3	0.79	4064.7	−591.8	−1276.7	2583.90	(21.8)	4088.2			0.0	
			b	21.86	544.9	3539.2	0.703	4084.1	41.6	141.4	10.52	496.8	3609.2		4106	67.1	238.5	60.98	(849.6)	4899.8	0.427	4050.2	72.4	
			c		355.9	3686.4		4042.3				44.3	4038.2		4082.5				5778.3					
			d	1468.60	4063.2			4063.2	52.6	135.6		−25.1	4121.6		4096.5			4.59	447.4	3659.8	0.643	4107.2	114.9	433.4
			e	1108.70	5832.5			5832.5	100.0	257.8		64	3965.1		4029.1			3.71	457.5	3647.9	0.701	4105.4	151.5	563.8
			3-c		554.8	3371.0		3925.8			48.34	1229.1	2756.7	0.434	3985.8	131.4	366.6	32.02	1755.8	2294.0	0.831	4049.8	420.6	1133.8
C	側面（表面）	Ⅰ	0								6.98	678.9	3415.8	0.89	4094.7	225.3	709.1	2.39	475.7	3527.0	0.844	4002.7	274.1	
			1	50.55	1595.6	2440.2	0.798	4035.8	218.0	592.4	11.91	895.4	3213.8	0.748	4109.2	252.5	743.9	6.85	541.2	3465.7	0.719	4006.9	134.4	454.6
			3								10.71	751.2	3419.9	0.592	4171.1	182.5	561.5	13.52	1022.8	3207.1	0.628	4229.9		
		Ⅱ	0								6.98	678.9	3415.8	0.89	4094.7	225.3	709.1	2.39	475.7	3527.0	0.844	4002.7		
			1	50.55	1595.6	2440.2	0.798	4035.8	218.0	592.4	11.91	895.4	3213.8	0.748	4109.2	252.5	743.9	6.85	541.2	3465.7	0.719	4006.9	134.4	454.6
			3								10.71	751.2	3419.9	0.592	4171.1	182.5	561.5	13.52	1022.8	3207.1	0.628	4229.9		
		Ⅲ	2								57.24	−617.8	4554.9		3937.1	44.7	95.5	2.05	392.6	3626.1	0.774	4018.7		
			3	95.13	2058.2	1963.9		4022.1	199.8	531.9	29.82	1466.8	2593.4	0.533	4060.2	306.2	839.3	26.15	1534.4	2580.5	0.905	4114.9	378.9	1035.3
			5								49.54	1776.9	2379.3	0.894	4156.2	270.8	730.9	21.82	1514.6	2681.1	0.975	4195.7		
		Ⅳ	2								57.24	617.8	4554.9		5172.7	15.0	53.7	2.05	392.6	3626.1	0.774	4018.7		
			3	95.13	2058.2	1963.9		4022.1	199.8	531.9	29.82	1466.8	2593.4	0.533	4060.2	306.2	839.3	26.15	1534.4	2580.5	0.905	4114.9	378.9	1035.3
			5								49.54	1776.9	2379.3	0.894	4156.2	270.8	730.9	21.82	1514.6	2681.1	0.975	4195.7		
		a-Ⅰ	0																					
			1	6.79	430.7	3545.6	0.812	3976.3	74.0	280.1	16.97	1308.5	2782	0.981	4090.5	416.2	1156.2	12.24	751.3	3158.2	0.343	3909.5	174.5	528.4
			3																					
		b-Ⅱ	0																					
			1	12.01	748.2	3213	0.312	3961.2	173.0	526.1	18.47	1296.1	2779.1	0.956	4075.2	376.2	1045.7	9.92	1010.4	3056.0	0.977	4066.4	404.3	1163.6
			3																					
		a-Ⅲ	2																					
			3	6.79	430.7	3545.6	0.812	3976.3	74.0	280.1	16.97	1308.5	2782	0.981	4090.5	416.2	1156.2	12.24	751.3	3158.2	0.343	3909.5	174.5	528.4
			5																					
		b-Ⅳ	2																					
			3	12.01	748.2	3213	0.312	3961.2	173.0	526.1	18.47	1296.1	2779.1	0.956	4075.2	376.2	1045.7	9.92	1010.4	3056.0	0.977	4066.4	404.3	1163.6
			5																					
	側面（裏面）	Ⅰ	0								11.04	766.3	3210.9	0.852	3977.2	198.1	599.3	14.86	1381.6	2508.8	0.982	3890.4	567.4	1557.9
			1	1.50	252.5	3801.4	0.771	4053.9	41.4	355.9	6.18	329.9	3632	0.207	3961.9	35.5	168.9	20733.00	44603.0		0.885	44603		
			3								22.14	2051.8	2817.7	0.996	4869.5	688.3	1859.8	12.48	757.6	3122.3	0.581	3879.9	176.4	532.0
		Ⅱ	0								7.74	1051.2	3115.4	0.887	4166.6	549.5	1577.4	3.42	956.6	3264.7	0.987	4221.3	988.0	2889.6
			1	110.84	2484.9	1523.4		4008.3	255.5	672.5	9.59	594.8	3490.8	0.761	4085.6	118.6	389.5	16.66	1345.8	2795.6	0.987	4141.4	444.2	1231.7
			3								2.2	564.5	3585.6	0.735	4150.1	441.4	1488.5	8.90	1083.2	3096.1	0.954	4179.3	509.2	1455.5
		Ⅲ	2								6.67	322.6	3510.8		3833.4	33.0	155.1	8.65	863.4	3041.8	0.925	3905.2	341.5	1003.6
			3		15.4	3908.8		3924.2			12.47	908.5	3126.7	0.622	4035.2	255.2	747.3	7.46	783.2	3303.8	0.977	4087	297.4	901.0
			5								6.3	802.1	3443.8	0.916	4245.9	353.7	1075.3	8.37	709.3	3422.2	0.927	4131.5	206.2	642.7
		Ⅳ	2								10.2	905.6	3090	0.907	3995.6	313.7	917.4	8.06	931.3	3062.1	0.933	3993.4	423.4	1231.8
			3	42.22	973.1	2998.5	0.580	3971.6	89.9	259.3	8.29	486.7	3521.6	0.61	4008.3	83.9	297.7	17.8	1253.3	2843.6	0.977	4096.9	360.4	1006.6
			5								10.46	1050.5	3162.4	0.902	4212.9	400.4	1151.7	0.67	708.5	3811.1	0.958	4519.6	2257.9	7231.0

表-3.4.6.5 内部音速(その1，超音波A)

(a)第1回測定 (材齢 1週)

供試体	測定面	測定位置	表面音速 (m/s)	解析結果				
				k	h0	探触子距離	表層厚さ (mm)	内部音速 (m/s)
供試体A	打設面	①	3610	2412	56.3	400	26.0	3750
		③	3469	2483	28.3	400	35.6	3763
		⑤	3451	2450	30.7	400	34.6	3722
		h	3508	2551	24.2	400	37.4	3852
供試体B	打設面	③	3726	2322	113.2	400	15.9	3775
		a	3783	2405	92.9	400	18.6	3853
		b	3663	2447	56.5	400	26.0	3804
		c	3714	2424	71.3	400	22.4	3817
		d	3683	2442	61.0	400	24.8	3811
		e	3687	2517	45.5	400	29.2	3874
供試体B	底面	③	4111	2208	500.0	300	2.2	4113
		a	4018	2414	163.2	300	6.7	4034
		b	3950	2524	88.1	300	11.6	3999
		c	3998	2339	212.7	300	5.2	4008
		d	3982	2139	500.0	300	2.2	3984
		e	3931	2379	151.5	300	7.2	3949
供試体C (表面)	Ⅰ-Ⅱ	②	3676	2466	54.1	400	26.6	3826
	Ⅲ-Ⅳ	⑥	3882	2392	126.9	400	14.4	3924
	Ⅰ-Ⅲ	b	3783	2526	56.7	400	25.9	3928
	Ⅱ-Ⅳ	f	3684	2561	37.9	400	31.8	3915
供試体C (裏面)	Ⅰ	②	3881	2636	47.8	400	28.5	4067
	Ⅱ	②	3835	2498	72.7	400	22.2	3938
	Ⅲ	⑥	3843	2632	44.0	400	29.7	4046
	Ⅳ	⑥	3832	2470	80.8	400	20.6	3920

(b)第2回測定 (材齢 4週)

供試体	測定面	測定位置	表面音速 (m/s)	解析結果				
				k	h0	探触子距離	表層厚さ (mm)	内部音速 (m/s)
供試体A	打設面	①	3598	2392	59.2	500	35.7	3772
			3598	2392	59.2	700	58.3	3853
		③	3520	2443	38.6	500	43.2	3794
			3520	2443	38.6	700	67.3	3894
		⑤	3508	2449	36.3	500	44.1	3798
			3508	2449	36.3	700	68.4	3900
		h	3535	2628	19.4	500	52.2	4028
			3535	2628	19.4	700	77.5	4152
供試体B	打設面	③	3872	2080	500.0	500	6.2	3877
		a	4103	2525	128.6	500	21.5	4167
		b	3933	2634	55.1	500	37.1	4141
		c	4042	2483	130.9	500	21.2	4103
		d	3993	2498	108.9	500	24.4	4074
		e	4064	2183	500.0	500	6.2	4069
供試体B	底面	③	3722	2427	71.9	500	32.1	3862
		a	3800	2497	66.7	500	33.5	3958
		b	3688	2576	36.2	500	44.2	3994
		c	3841	2449	90.0	500	27.9	3946
		d	3851	2444	94.4	500	27.0	3949
		e	3837	2503	71.7	500	32.2	3982
供試体C (表面)	Ⅰ-Ⅱ	①	3768	2686	29.5	500	47.2	4146
		②	3845	2448	91.5	500	27.6	3948
		④	3860	2740	30.8	500	46.6	4232
	Ⅲ-Ⅳ	⑤	3759	2646	33.5	500	45.3	4095
		⑥	3893	2427	112.9	500	23.7	3968
		⑧	3875	2723	34.0	500	45.1	4216
	Ⅰ-Ⅲ	b	3672	2628	28.4	500	47.7	4052
	Ⅱ-Ⅳ	f	3767	2591	42.2	500	41.7	4035
供試体C (裏面)	Ⅰ	①	3731	2615	35.0	500	44.7	4051
		②	3755	2700	27.1	500	48.3	4160
		④	4113	3192	12.6	500	56.1	4873
	Ⅱ	①	3732	2652	30.5	500	46.7	4095
		②	3877	2598	54.7	500	37.2	4083
		④	3790	2674	32.7	500	45.7	4136
	Ⅲ	⑤	3706	2532	45.1	500	40.6	3952
		⑥	3680	2718	20.7	500	51.5	4170
		⑧	3881	2783	27.8	500	48.0	4290
	Ⅳ	⑤	3619	2583	29.1	500	47.3	3986
			3619	2583	29.1	600	59.7	4046
		⑥	3860	2525	69.8	500	32.7	4011
			3860	2525	69.8	600	43.3	4051
		⑧	3764	2729	24.9	500	49.4	4199
			3764	2729	24.9	600	61.8	4264

(c)第3回測定 (材齢 13週)

供試体	測定面	測定位置	表面音速 (m/s)	解析結果				
				k	h0	探触子距離	表層厚さ (mm)	内部音速 (m/s)
供試体A	打設面	①	3619	2466	46.4	600	51.8	3901
			3619	2466	46.4	800	75.8	3987
		③	3479	2508	26.4	600	61.0	3922
			3479	2508	26.4	800	86.2	4022
		⑤	3470	2523	24.2	600	62.2	3941
			3470	2523	24.2	800	87.4	4043
		h	3612	2640	23.0	600	62.8	4120
			3612	2640	23.0	800	88.1	4228
供試体B	打設面	③	3637	2463	49.2	600	50.6	3904
		a	3711	2548	42.9	600	53.2	4023
		b	3751	2513	54.8	600	48.5	3996
		c	3754	2532	51.4	600	49.7	4017
		d	3825	2434	91.9	600	37.1	3957
		e	3687	2632	29.1	600	59.7	4122
供試体B	底面	③	3798	2495	66.8	600	44.3	3996
		a	4075	2317	283.7	600	15.2	4096
		b	3817	2669	35.8	600	56.4	4196
		c	3977	2552	84.5	600	39.0	4131
		d	3860	2611	49.8	600	50.4	4139
		e	3850	2597	51.2	600	49.8	4121
供試体C (表面)	Ⅰ-Ⅱ	①	3679	2635	28.1	600	60.2	4125
		②	3749	2466	65.9	600	44.5	3948
		④	3830	2791	23.7	600	62.5	4358
	Ⅲ-Ⅳ	⑤	3737	2638	32.6	600	57.9	4139
		⑥	3863	2539	66.4	600	44.4	4066
		⑧	3811	2736	27.5	600	60.5	4281
	Ⅰ-Ⅲ	b	3616	2549	33.0	600	57.7	4001
	Ⅱ-Ⅳ	f	3681	2598	32.6	600	57.9	4077
供試体C (裏面)	Ⅰ	①	3487	2482	30.0	600	59.2	3888
		②	3635	2600	28.5	600	60.0	4071
		④	4177	2669	88.3	600	38.0	4329
	Ⅱ	①	3722	2607	35.2	600	56.7	4097
		②	3838	2577	53.7	600	48.9	4095
		④	3799	2653	36.3	600	56.2	4171
	Ⅲ	⑤	3532	2588	22.4	600	63.2	4039
		⑥	3726	2708	24.3	600	62.1	4230
		⑧	3860	2713	34.0	600	57.3	4261
	Ⅳ	⑤	3639	2556	34.2	600	57.2	4015
		⑥	3813	2588	48.2	600	51.0	4098
		⑧	3896	2684	41.5	600	53.8	4234

表-3.4..6.5 内部音速(その2, 超音波B)

(a)第1回測定 (材齢 1週)

供試体	測定面	測定位置	表面音速 (m/s)	解析結果			
				K	h0	表層厚さ (mm)	内部音速 (m/s)
供試体A	打設面	①	3394	2604.9	14.1	76.3	4087
		③	3257	2597.7	9.6	79.2	4068
		⑤	3252	2641.4	8.0	80.3	4134
		h	3329	2614.5	11.2	78.2	4097
供試体B	打設面	③	3323	2466.5	19.7	73.0	3880
		a	3430	2438.7	30.3	67.2	3874
		c	3189	2504.6	11.2	78.2	3997
		e	3250	2550.2	11.3	78.1	3900
供試体B	底面	③	3644	2589.1	30.5	67.1	4059
		a	3654	2553.5	36.0	64.4	4147
		c	3511	2678.1	15.0	75.8	4049
		e	3815	2424.1	93.2	43.4	3981
供試体C (表面)	Ⅰ-Ⅱ	②	3708	2798.1	16.7	74.8	4395
	Ⅲ-Ⅳ	⑥	3684	2723.6	20.5	72.5	4286
	Ⅰ-Ⅲ	b	3557	2707.8	15.3	75.6	4251
	Ⅱ-Ⅳ	f	3712	2612.0	33.6	65.5	4136
供試体C (裏面)	Ⅰ	②	3695	2764.4	18.2	73.9	4345
	Ⅱ	②	3686	2744.4	19.1	73.3	4316
	Ⅲ	⑥	3606	2734.6	15.9	75.2	4294
	Ⅳ	⑥	3676	2727.2	19.8	72.9	4290

(b)第2回測定 (材齢 4週)

供試体	測定面	測定位置	表面音速 (m/s)	解析結果			
				K	h0	表層厚さ (mm)	内部音速 (m/s)
供試体A	打設面	①	3321	2603.6	11.4	78.0	4081
		③	3266	2591.7	10.1	78.9	4060
		⑤	3360	2641.2	11.1	78.2	4139
		h	3502	2678.4	14.6	76.0	4203
供試体B	打設面	③	3432	2657.6	12.9	77.1	3967
		a	3354	2516.3	17.7	74.2	4067
		c	3432	2591.4	16.6	74.8	4106
		e	3405	2622.8	13.6	76.6	4166
供試体B	底面	③	3663	2718.9	19.7	73.0	4171
		a	3812	2577.8	50.0	58.0	4214
		c	3610	2741.1	15.7	75.4	4248
		e	3431	2722.6	10.1	78.9	4303
供試体C (表面)	Ⅰ-Ⅱ	①	3702	2474.8	56.1	55.6	3966
		②	3503	2793.9	9.6	79.2	4376
		④	3955	2124.5	500.0	10.9	3964
	Ⅲ-Ⅳ	⑤	3262	2612.8	9.2	79.5	4092
		⑥	3764	2575.2	44.5	60.4	4101
		⑧	3534	2768.2	11.5	78.0	4339
	Ⅰ-Ⅲ	b	3481	2591.8	19.1	73.3	4076
	Ⅱ-Ⅳ	f	3509	2598.1	20.2	72.7	4087
供試体C (裏面)	Ⅰ	①	3548	2140.3	156.7	30.6	3612
		②	3598	2546.6	31.7	66.5	4029
		④	3630	2006.6	375.3	14.3	3644
	Ⅱ	①	3502	2722.5	12.4	77.4	4269
		②	3654	2689.8	21.4	72.0	4234
		④	3439	2763.7	8.9	79.7	4327
	Ⅲ	⑤	3581	2500.4	36.3	64.2	3965
		⑥	3492	2598.6	19.2	73.3	4086
		⑧	3605	2632.4	23.2	71.0	4147
	Ⅳ	⑤	3548	2644.5	18.9	73.5	4158
		⑥	3558	2678.6	17.1	74.5	4208
		⑧	3601	2782.1	13.2	76.9	4363

(c)第3回測定 (材齢 13週)

供試体	測定面	測定位置	表面音速 (m/s)	解析結果			
				K	h0	表層厚さ (mm)	内部音速 (m/s)
供試体A	打設面	①	3361	2515	18.2	73.9	3952
		③	3305	2600	11.0	78.3	4075
		⑤	3371	2627	12.1	77.6	4119
		h	3432	2654	13.1	77.0	4162
供試体B	打設面	③	3437	2657	13.1	77.0	4048
		a	3544	2542	27.7	68.6	4089
		c	3587	2597	25.3	69.8	4104
		e	3582	2606	24.1	70.5	4235
供試体B	底面	③	3621	2703	18.6	73.6	3893
		a	3735	2273	143.3	32.7	3962
		c	3617	2655	22.0	71.7	4035
		e	3535	2552	26.0	69.5	4230
供試体C (表面)	Ⅰ-Ⅱ	①	3702	2475	56.1	55.6	3966
		②	3503	2794	9.6	79.2	4376
		④	3955	2124	500.0	10.9	3964
	Ⅲ-Ⅳ	⑤	3508	2647	16.7	74.8	4158
		⑥	3528	2689	15.1	75.7	4221
		⑧	3575	2665	18.9	73.5	4190
	Ⅰ-Ⅲ	b	3491	2398	42.8	61.2	3815
	Ⅱ-Ⅳ	f	3589	2624	22.9	71.2	4134
供試体C (裏面)	Ⅰ	①	3226	1733	500.0	10.9	3233
		②	3565	2224	111.8	38.8	3673
		④	3795	2039	500.0	9.6	3802
	Ⅱ	①	3552	2580	24.5	70.3	4067
		②	3535	2585	22.9	71.2	4071
		④	3479	2655	14.9	75.8	4168
	Ⅲ	⑤	3544	2296	70.5	50.3	3708
		⑥	3426	2661	12.5	77.3	4173
		⑧	3710	2785	17.6	74.2	4376
	Ⅳ	⑤	3347	2582	13.4	76.8	4050
		⑥	3504	2570	22.2	71.6	4047
		⑧	3563	2720	14.9	75.8	4269

表－3.4.6.5 内部音速（その3、超音波C）

（a） 第1回測定 （材齢 1週）

供試体	測定面	測定位置	表面音速 (m/s)	解析結果				
				k	h0	距離	表層厚さ (mm)	内部音速
供試体B	打設面	③	4040	2918	25.9	400	34.02	4393
		a	4245	2176	800.0	400	2.23	4246
		b	4070	2898	29.9	400	32.33	4380
		c	4250	2178	800.0	400	2.23	4251
		d	4083	2252	384.0	400	4.61	4088
		e	3949	2961	17.8	400	37.85	4426
供試体B	底面	③	4260	2896	47.4	400	26.22	4452
		a	4649	2628	300.0	400	4.39	4656
		b	4311	2981	40.0	400	28.57	4550
		c	4404	2828	83.9	400	18.16	4491
		d	4376	2880	65.6	400	21.59	4502
		e	4493	2645	200.0	400	8.63	4512

（b）第2回測定 （材齢 4週）

供試体	測定面	測定位置	表面音速 (m/s)	解析結果				
				k	h0	距離	表層厚さ (mm)	内部音速
供試体A	打設面	①	3802	2661	35.5	600	55.08	4175
		③	3675	2694	22.3	600	61.72	4196
		⑤	3574	3710	15.9	600	65.34	4207
		h	4021	2273	300.0	600	13.89	4039
供試体C（表面）	Ⅰ	①	4071	2544	110.2	600	23.17	4149
		②	4071	2880	39.5	600	46.09	4493
		④	4159	2947	31.0	600	51.26	4580
	Ⅱ	①	4159	2544	110.2	600	23.17	4149
		②	4154	2880	39.5	600	46.09	4493
		④	4154	2947	31.0	600	51.26	4580
	Ⅲ	⑤	3970	2673	52.2	600	39.70	4201
		⑥	3970	2799	42.9	600	44.24	4375
		⑧	4076	2868	25.4	600	55.11	4448
	Ⅳ	⑤	4076	2673	52.2	600	39.70	4201
		⑥	3963	2799	42.9	600	44.24	4375
		⑧	3963	2868	25.4	600	55.11	4448
供試体C（裏面）	Ⅰ	①	3810	2567	55.5	600	38.27	4043
		②	3810	2257	300.0	600	9.22	4004
		④	3963	3264	15.7	600	62.63	5049
	Ⅱ	①	3963	2859	19.2	600	59.80	4426
		②	3836	2887	18.2	600	60.59	4468
		④	3836	2741	35.8	600	48.25	4269
	Ⅲ	⑤	3992	2765	22.0	600	61.88	4306
		⑥	3992	2846	24.8	600	60.38	4438
		⑧	4299	2985	20.9	600	62.49	4645
	Ⅳ	⑤	4299	2515	68.8	600	42.30	4028
		⑥	3842	2856	25.5	600	60.01	4457
		⑧	3842	2974	15.1	600	65.82	4614

（c） 第3回測定 （材齢 13週）

供試体	測定面	測定位置	表面音速 (m/s)	解析結果				
				k	h0	距離	表層厚さ (mm)	内部音速
供試体B	打設面	③	4156	2447	200.0	600	16.01	4188
		a	4129	3019	22.9	600	58.96	4690
		B	4039	3057	16.2	600	63.57	4737
		c	4090	3009	21.5	600	59.89	4672
		d	4109	3066	18.7	600	61.80	4755
		e	4095	2315	300.0	600	10.95	4110
供試体C（裏面）	Ⅰ	①	4060	3175	11.7	600	66.87	4912
		②	4144	3149	15.6	600	64.00	4878
		④	4243	3259	14.0	600	65.16	5046
	Ⅱ	①	4398	2934	57.2	600	41.22	4643
		②	4326	2896	40.7	600	48.62	4680
		④	4232	3075	24.4	600	57.98	4780
	Ⅲ	⑤	3905	3001	13.9	600	65.24	4647
		⑥	4330	2549	200.0	600	16.01	4363
		⑧	4058	3284	8.3	600	69.46	5076
	Ⅳ	⑤	3730	2805	17.3	600	62.78	4348
		⑥	4035	2375	200.0	600	16.01	4066
		⑧	3837	2787	24.5	600	57.92	4332

3.4.7　部材厚さの解析結果と実測値の比較

表－3.4.6.5 の音速分布の解析結果と反射時間の測定結果から厚さを求めた結果を，コアによる実測値の比（厚さ比＝厚さの解析結果／コア実測値）を示したのが**図－3.4.7.1** である。

多くの結果は実測値に対して±3%以内に入ったが，一部には 10%以上も違っている場合がある。この主な原因として次の 2 点が考えられる。

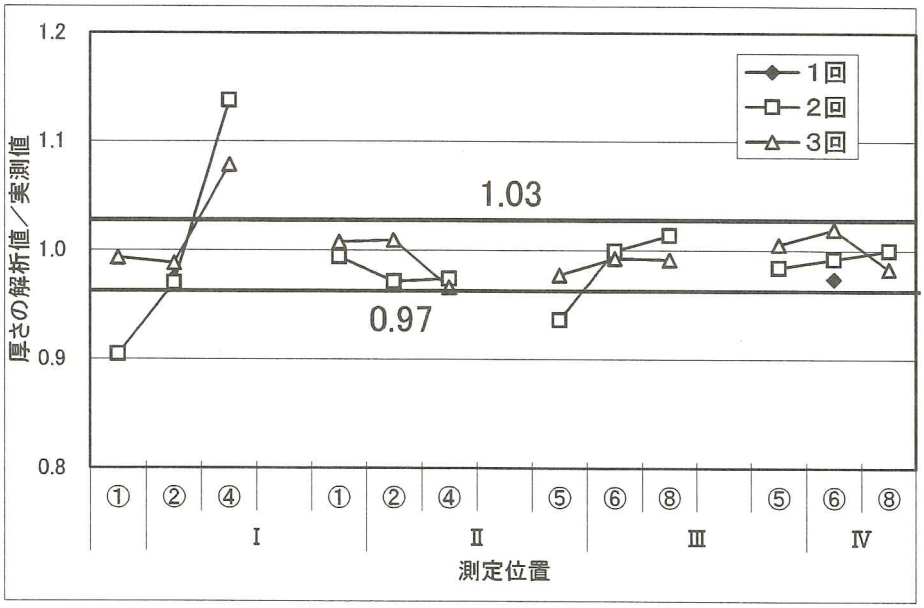
① 音速分布，とくに表層厚さの求め方による内部音速の影響

厚さの求め方は，音速分布を表わす関数の積分になることから，音速分布の推定がわずかに違っていただけでも厚さに大きく影響する。とくに表層厚さが異なると内部音速も違い，大きな影響を受けることになる。

この基礎実験では，供試体，測定する面ごとに表面走査法による測定を 3～5 測線行ない，見かけの音速と探触子間距離の関係から，見かけの音速がほぼ一定になるときの平均的な距離（音速収束距離と呼ぶ）を求め，この距離を代表値として表層厚さを求めている。部材の種類などに応じ，音速収束距離の求め方をよく検討してみる必要がある。例えば，壁の場合，高さによる違いなどを検討する必要があろう。

② 反射時間の精度

厚さを求める位置では，反射時間を測定する。その測定結果はどの程度の精度かを別途検討する必要がある。材齢が異なるときの反射時間は，材齢が進むと強度発現により短くなるものと考えられる。乾燥の影響により長くなる要因もあるが，それは表面付近のみであり，短くなる要因のほうが強いと考えられる。
しかし，反射時間を見ると，多くは材齢が長くなるほど短くなる傾向にあるが，一部には逆の傾向のものもあり，反射時間測定精度の向上，安定性が求められる。



図－3.4.7.1　厚さ解析結果（供試体Ｃ）
（超音波Ａ）

3.4.8　鉄筋のかぶり厚さ，径の測定結果　（超音波Ａ、Ｂ）

ここでは，超音波ＡおよびＢの装置を用いた鉄筋のかぶり厚さ，径の測定結果について記述し，超音波Ｃは3.4.9でふれる。

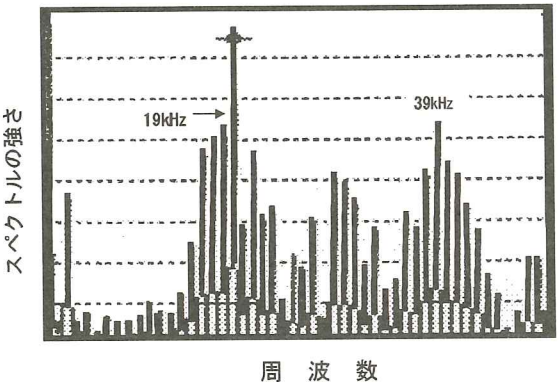
（1）超音波Ａの結果

鉄筋かぶり厚さｃは、鉄筋上面からの反射時間から求める。鉄筋径は、鉄筋内を反射して戻ってくる時間と鉄筋上面からの反射時間の差と、鉄筋の音速から鉄筋径を求めることができる。

かぶり厚さｃは、鉄筋が表層内にある場合、**図－3.4.6.6**の式(2)のt_1に鉄筋上面からの反射時間ｔ、h_1にかぶりｃとすることにより求められる。

供試体Ａのかぶりが約50mmのD25、D32、D38、D51の鉄筋の、かぶりと径の推定を行なった。**図－3.4.8.1**は、反射波の周波数スペクトルである。ピークが２つあり、39kHzが鉄筋上面を、19kHzが鉄筋内を反射して戻ってきた波と考えられる。周波数の逆数が反射時間となる。この結果からかぶりと鉄筋径を求めた結果が**表－3.4.8.1**および**図－3.4.8.2**である。

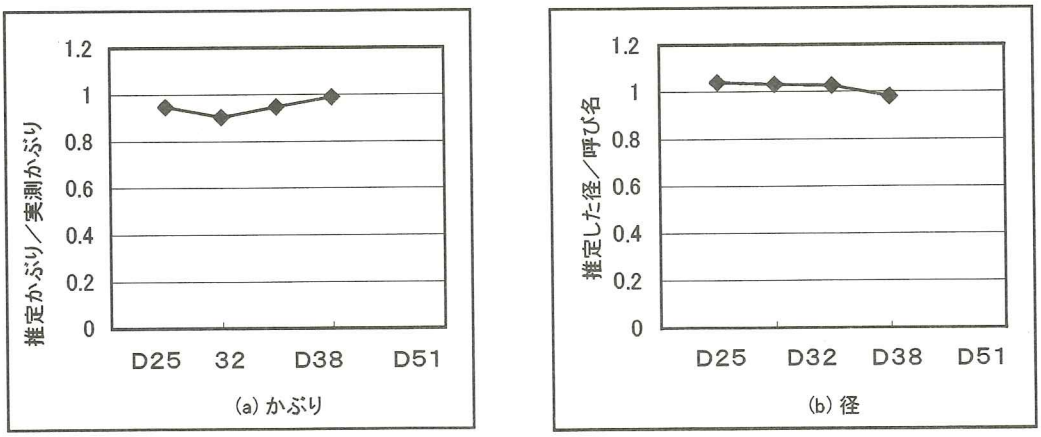
鉄筋径は、呼び名の±１mmで推定できている。鉄筋の種類は３mmピッチであり、実用上問題ない範囲で推定できている。かぶりも５mm以内と精度よく推定できている。



図－3.4.8.1　　反射波のスペクトル

表－3.4.8.1　　鉄筋かぶり・径の推定

鉄　筋 呼び名	実測かぶり (mm)	推定した径 (mm)	推定かぶり (mm)
D25	52.8	26	50
D32	53.2	33	48
D38	53.9	39	51
D51	51.6	50	51



図－3.4.8.2　かぶり・径の推定結果

（2）超音波Bの結果

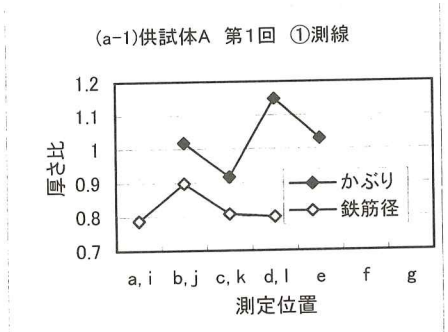
超音波Bはかぶり厚さのみの結果である。**図－3.4.8.3～3.4.8.5** に実測かぶり厚さに対する推定かぶり厚さの比を示す。**図－3.4.8.3** は第1回（材齢1週）の結果，**図－3.4.8.4** と **3.4.8.5** は第2回（材齢4週）の結果であり，前者は供試体Aの鉄筋φ20 でかぶり厚さが変化している場合と，かぶり厚さは一定で鉄筋径が異なる場合の結果である。後者は供試体Bの結果であり，打設面および底面から測定した結果である。

図－3.4.8.3 と 3.4.8.4 の供試体Aの測定結果の，測定位置ａ～ｇはかぶり厚さが変化している場合であり，約 15～240mm である。ａの 15mm とｇの 240mm は測定不可能であった。ｂ（40mm）～ｆ（190mm）の測定結果は，１点で実測値より 20%以上の推定が違っていたが，そのほかは±15%以内で推定されている。

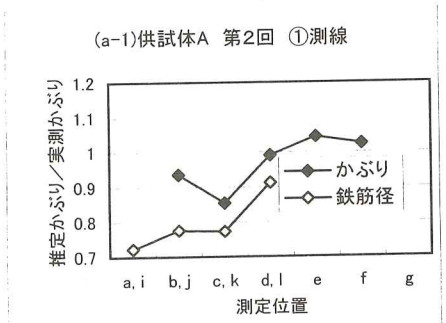
測定位置ｉ～ｌはかぶり厚さが約 50mm で，鉄筋径がD25，D32，D38，D51 の場合であるが，実測値に比べ 20%程度小さくなっている。この理由には，表面走査法によって伝搬時間を測定するときの距離の補正に問題があったのかもしれない。このことは，**表－3.4.6.5** の超音波Ａ（その１）と超音波Ｂ（その２）の表面音速を比べると，内部音速は超音波Ｂのほうが速くなっているにもかかわらず，超音波Ｂのほうが 10%程度遅くなっていることから予想できる。しかしながら，ｉ～ｌよりかぶりの小さいｂではむしろ大きく測定されていること，このあと説明するとおり供試体Ｂも逆の傾向があり，原因はよくわからない。

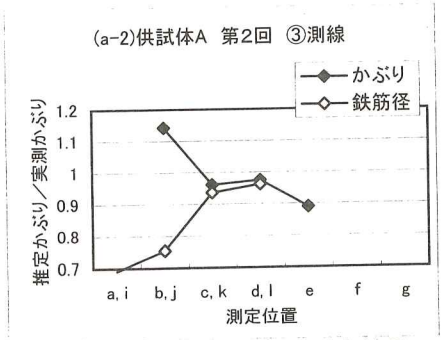
図－3.4.8.5 の打設面からの測定位置のａ～ｅはかぶり厚さが約 35～90mm である。この場合もａの 35mm 程度の位置が測定不可能であった。打設面からの測定結果は，実測値とほぼ一致(1.0)～20%増（1.2）に分布している。

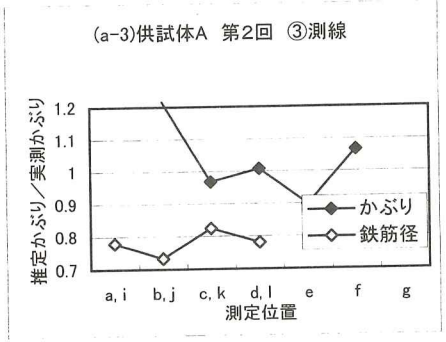
底面からの測定のａ～ｅのかぶりは，約 230～60mm である。ｅの位置で 15%ほど大きくなっている場合があるが，そのほかはほぼ良好な測定結果であった。



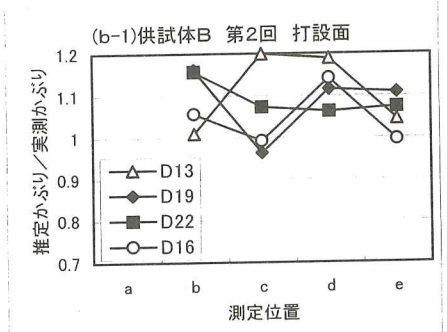
図－3.4.8.3　供試体A、第1回測定結果

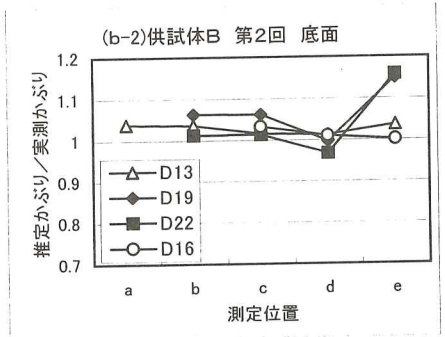






図－3.4.8.4　供試体A、第2回測定結果





図－3.4.8.5　供試体B、第2回測定結果

3.4.9　鉄筋のかぶり厚さ，径の測定(超音波C)

e位置での測定を用いて、まず分析手順を説明する。径40mmで共振振動数500kHzの1対の発信探触子と受信探触子をその中心間距離をa_1=60mm～a_2=80mmに変動させながら鉄筋直上を鉄筋にそって幅200mmの範囲で走査し、その間3000回の受信波を加算平均した。この平均波より最適周波数理論にのっとり(2.1.3.7)式より

$$f_0 = \frac{1}{2}\alpha \cdot cV_p \Big/ \left\{\frac{1}{2}(\phi + (80-60))\right\} \qquad \text{(2.1.3.7)}$$

に、コンクリート音速約3900μ秒前後、ϕ=40mm、α=1.30を適用し、f_0=85kHzを中心周波数とする狭帯域成分波G(t)を取り出したものが図3.4.9.1である。ピーク強調のため$G^2(t)$で表示している。最初に起生している大きな振幅の波がかぶり厚140mmで径20mmの鉄筋からの反射波、迂回波などの重畳波である。2番目の起生波が版厚300mmに関する反射波である。カーソルで示す波の起生時刻t_h=72.1μ秒を用いて(3.4.9.1)式より、かぶり厚dが140.4mmと測定されている。

$$d = \left\{(\tilde{d}/2)^2 - ((a_1-\phi)/2)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \quad , \quad \tilde{d} = cV_p \times t_h \qquad \text{(3.4.9.1)}$$

図3.4.9.2は、上記加算平均波より1250kHzを中心周波数とする広帯域成分波取りだし、図示する時系列フィルターを乗じたものである。図3.4.9.1に比し、時間軸を2倍に広げ表示している。この時系列波上でカーソルを計5本表示している。最左のカーソルを①とし、順次②、③…としている。これ等カーソルの意味するところを表3.4.9.1に示す。なお、$\tilde{t}_h$は図3.4.9.1で得られたt_h =72.1μ秒付近で大きく励起する波の起生時刻とすればよい。各カーソルの発生位置は、鉄筋径ϕを種々仮定し、表3.4.9.1の算定式を適用した。径を9ϕ、13ϕ、16ϕ…51ϕの如く指定し、各々の場合でカーソルが全ての起生波と合致した時、この指定径を探知径と断ずるようにした。図3.4.9.3はa～fの解析結果である。解析法は前述図3.4.9.2を求めた方法と同様にしている。それぞれ中心周波数を1100～1500kHzの範囲で決めている

表3.4.9.1　反射波及び迂回波の起生時刻算定式

	起生波種類	起生時刻算定式
①	鉄筋上端反射波(たて波)	$\tilde{t}_h$
②	鉄筋下端反射波(たて波)	$\tilde{t}_h + 2\phi / sV_p$
③	鉄筋円周上鉄内迂回波(たて波)	$\tilde{t}_h + \pi\phi / sV_p$
④	鉄筋円周上ｺﾝｸﾘｰﾄ内迂回波(たて波)	$\tilde{t}_h + \pi\phi / cV_p$
⑤	鉄筋円周上鉄筋内迂回波(よこ波)	$\tilde{t}_h + 1/4\,(3\pi\phi / sV_s + 2\phi / cV_p)$

sV_P：鉄筋たて波音速 。cV_P：コンクリートたて波音速。cV_S：コンクリートよこ波音速

fの解析以外は図3.4.9.2に示すような時系列フィルターを用いた。波形表示は$G^2(t)$ or $G^3(t)$とした。表3.4.9.1に示す径20mmとして発生させた①～③のカーソルがa～fの全ての成分波で、起生波と合致している。

④、⑤のカーソルも、かぶり厚が深くなると、対応する起生波と合致してくる様を確認願いたい。図 3.4.9.4 は前述と同様にして取り出した i～k の成分波である。①～③のカーソルが大きな振幅の波の起生時刻と合致している。異形鉄筋故、それぞれ細径に対応させカーソルを発生させた。径の指定として i を 25mm、j を 32mm、k を 38mm として表 3.4.9.1 の算定式を用いた。j の測定では、鉄筋上端からの反射波としてリブ部、凹部の相方からの起生が確認できる。

以上、測定結果を整理すると、表 3.4.9.2 の如くなる。

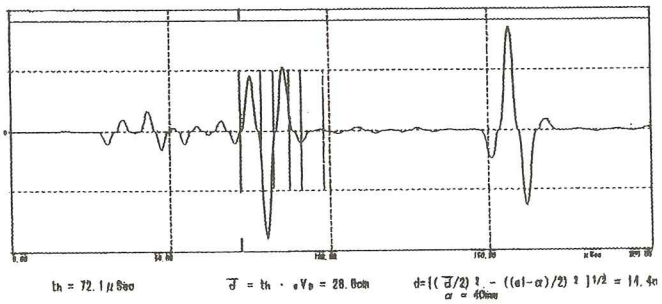


図 3.4.9.1　140mm かぶり厚測定例

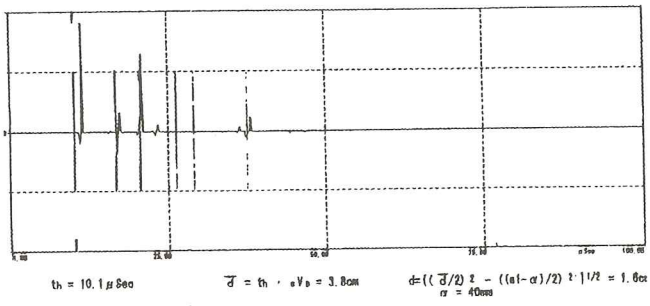


図 3.4.9.3－(a)150mm かぶり厚と鉄筋径路波

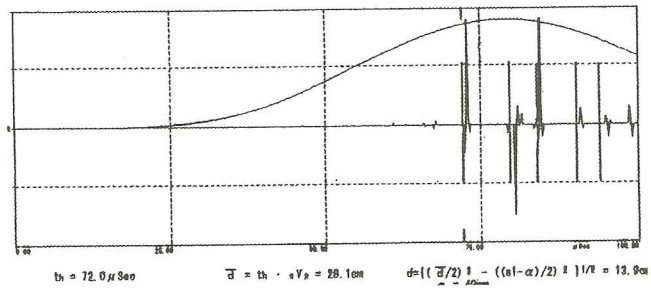


図 3.4.9.2　140mm かぶり厚と鉄筋径路波

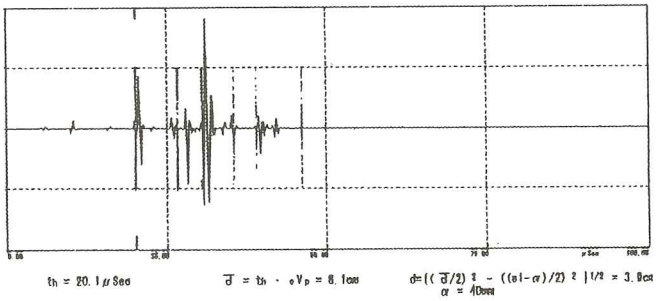


図 3.9.3－(b)400mm かぶり厚と鉄筋径路波

表 3.4.9.2　鉄筋かぶり厚さ及び径の測定値

	かぶり厚(mm)		鉄筋径	
	測　定	実　値	測　定	実　値
a	16	15.5	20	φ20
b	39	40	20	φ20
c	66	65	20	φ20
d	92	90	20	φ20
e	139	140	20	φ20
f	186	190	20	φ20
g	—	240	—	φ20
i	50	50	D25 の細径	D25
j	47	50	D32 の細径	D32
k	47	50	D38 の細径	D38
l	—	50	—	D51

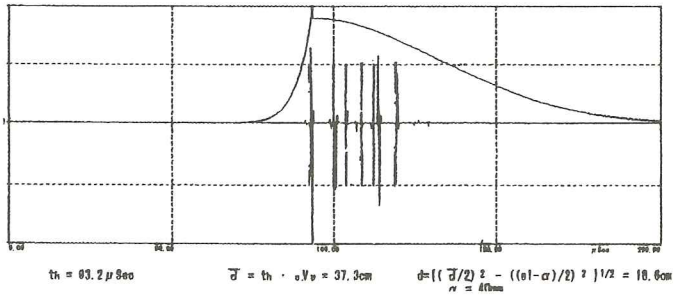


図 3.4.9.3－(c)65mm かぶり厚と鉄筋径路波

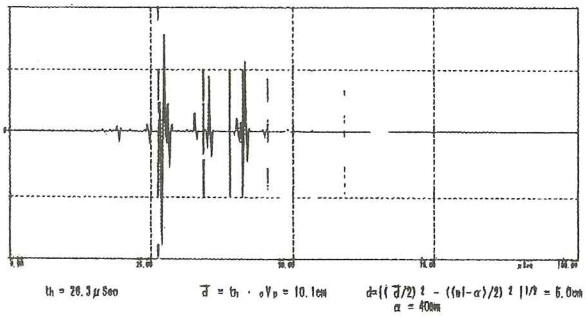


図 3.4.9.4－(i)50mm かぶり厚と鉄筋径路波

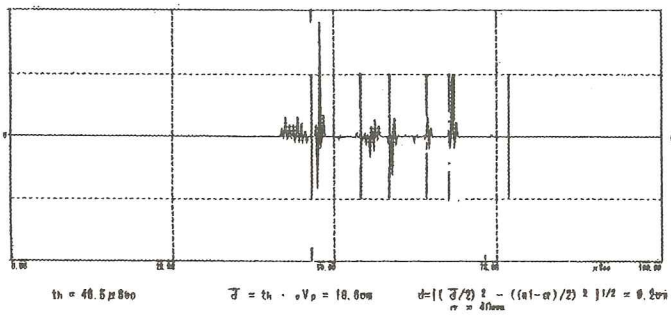


図 3.4.9.3－(d) 90mm かぶり厚と鉄筋径路波

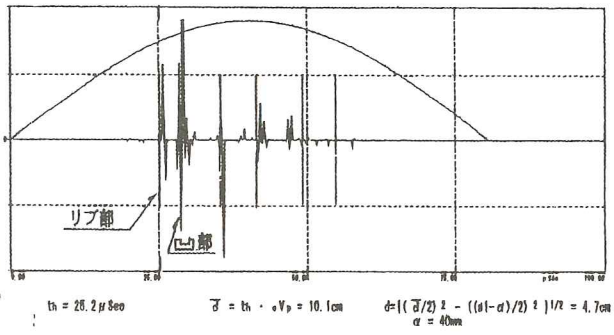


図 3.4.9.4－(j) 50mm かぶり厚と D32 鉄筋径路波

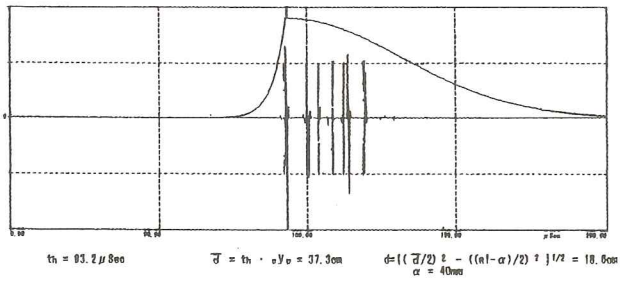


図 3.4.9.3－(f) 190mm かぶり厚と D32 鉄筋径路波

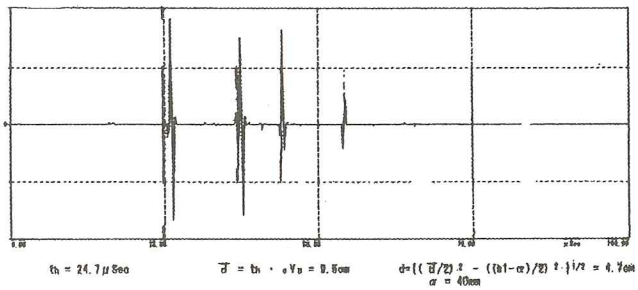


図 3.4.9.4－(k)) 50mm かぶり厚と D38 鉄筋径路波

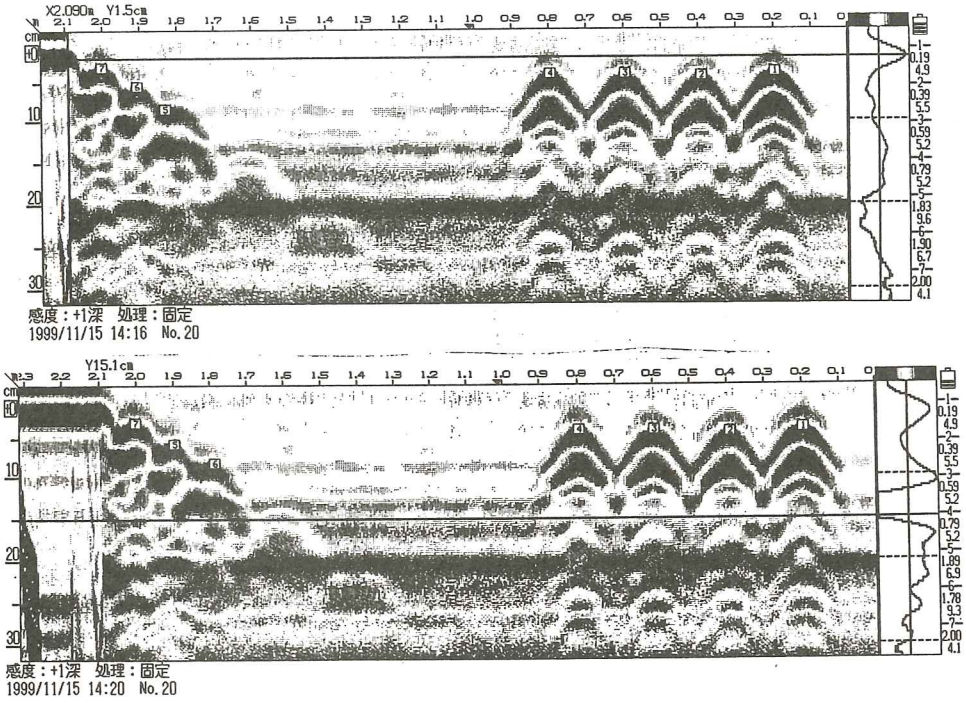
３．５　レーダ法の測定結果

３．５．１　レーダＤ（NJJ-85A　ハンデイサーチ）

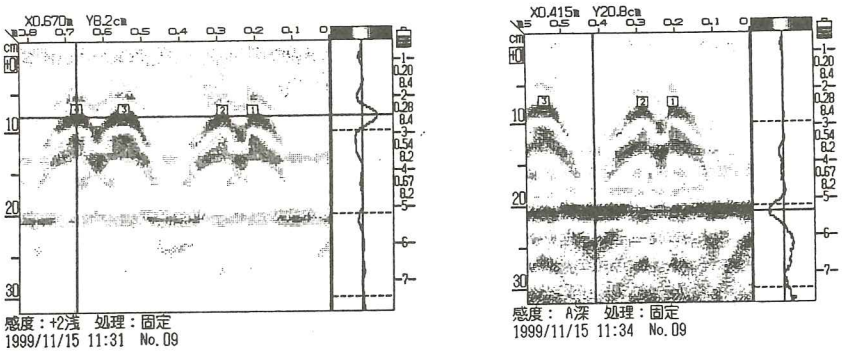
（１）測定結果

図－3.5.1.1 および図－3.5.1.2 は測定結果の出力例である。

測定結果の詳細を表-3.5.1.1～表-3.5.1.10 に示す。



図－3.5.1.1　　供試体Ａ　　①ライン測定データ



図－3.5.1.2　　供試体Ｂ　表ｄライン測定データ

表－3.5.1.1　材齢１週間の供試体Ａの比誘電率の推定

シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）

	鉄筋位置																							
	a		b		c		d		e		f		g		(h)		i		j		k		l	
	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測			測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測
①ライン	15.0	17.5	41.0	42.0	67.0	67.6	93.0	90.5	151.0	140.2	215.0	191.0	250*	240.2	不能	299.3	52.0	52.8	52.0	53.2	55.0	53.9	49.0	51.6
比誘電率	5.88		7.62		7.86		8.45		9.28		10.14		8.67				7.76		7.64		8.33		7.21	
③ライン	15.0	16.7	41.0	41.8	72.0	68.6	100.0	92.1	149.5	141.9	210*	191.9	250*	242.4	不能	301.2	55.0	53.0	52.0	52.6	52.0	53.1	47.0	50.9
比誘電率	6.45		7.70		8.81		9.43		8.88		9.58		8.51				8.62		7.82		7.67		6.82	
⑤ライン	15.0	16.6	41.0	40.9	67.0	67.2	98.0	92.0	150.0	142.8	220*	193.6	250*	243.9	不能	301.4	55.0	53.2	52.0	52.8	52.0	53.6	49.0	51.6
比誘電率	6.53		8.04		7.95		9.08		8.83		10.33		8.41				8.55		7.76		7.53		7.21	
ライン平均	15.0	16.9	41.0	41.6	68.7	67.8	97.2	91.5	150*	141.2	215.2	192.0	250.6	242.0	不能	300.0	54.0	53.0	52.0	52.9	53.0	53.5	48.3	51.4
比誘電率	6.30		7.77		8.21		8.99		9.00		10.01		8.52				8.30		7.73		7.85		7.06	
√比誘電率	2.51		2.79		2.87		3.00		3.00		3.16		2.92				2.88		2.78		2.80		2.66	

・ライン平均は①、③、⑤箇所の平均　　ε_r=8×（測定値／実測値）^{2}

・＊印は不確定値

表－3.5.1.2　材齢４週間の供試体Ａの比誘電率の推定

供試体A　　：　材齢　4週間（28日）

シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）

	鉄筋位置																							
	a		b		c		d		e		f		g		(h)		i		j		k		l	
	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測			測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測
①ライン	15.0	17.5	41.0	42.0	67.0	67.6	91.0	90.5	147.0	140.2	220.0	191.0	270*	240.2	不能300	299.3	49.0	52.8	52.0	53.2	55.0	53.9	47.0	51.6
比誘電率	5.88		7.62		7.86		8.09		8.79		10.61		10.11				6.89		7.64		7.45		6.64	
③ライン	15.0	16.7	41.0	41.8	67.0	68.6	93.0	92.1	151.0	141.9	215*	191.9	270*	242.4	不能300	301.2	52.0	53.0	47.0	52.6	49.0	53.1	47.0	50.9
比誘電率	6.45		7.70		7.63		8.16		9.06		10.04		9.93				7.70		6.39		6.81		6.82	
⑤ライン	15.0	16.6	39.0	40.9	67.0	67.2	93.0	92.0	151.0	142.8	215*	193.6	265.0	243.9	不能300	301.4	52.0	53.2	52.0	52.8	52.0	53.6	49.0	51.6
比誘電率	6.53		8.04		7.95		9.08		8.83		10.33		8.41				8.55		7.76		7.53		7.21	
ライン平均	15.0	16.9	40.3	41.6	67.0	67.8	92.3	91.5	149.6	141.6	216.7	192.2	268.3	242.2	不能300	300.6	51.0	53.0	50.3	52.9	51.0	53.5	47.7	51.4
比誘電率	6.30		7.51		7.81		8.14		8.93		10.17		9.82				7.41		7.23		7.27		6.89	
√比誘電率	2.51		2.74		2.79		2.85		2.99		3.19		3.13				2.72		2.69		2.70		2.62	

・ライン平均は①、③、⑤箇所の平均

・＊印は不確定値

表－3.5.1.3　材齢13週間の供試体Ａの比誘電率の推定

供試体A　　：　材齢13週間（90日）

シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）

	鉄筋位置																							
	a		b		c		d		e		f		g		(h)		i		j		k		l	
	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測			測定	実測	測定	実測	測定	実測	測定	実測
①ライン	15.0	17.5	39.0	42.0	62.0	67.6	89.0	90.5	140.0	140.2	187.0	191.0	255.0	240.2	不能	299.3	47.0	52.8	47.0	53.2	49.0	53.2	47.0	51.6
比誘電率	5.88		6.90		6.73		7.74		7.98		7.67		9.02				6.34		6.24		6.61		6.64	
③ライン	15.0	16.7	39.0	41.8	65.0	68.6	89.0	92.1	142.0	141.9	190.0	191.9	255.0	242.4	不能	301.2	49.0	53.0	47.0	52.6	47.0	53.1	44.0	50.9
比誘電率	6.45		6.96		7.18		7.47		8.01		7.84		8.85				6.84		6.39		6.27		5.98	
⑤ライン	15.0	16.6	39.0	40.9	62.0	67.2	91.0	92.0	144.0	142.8	190.0	193.6	255.0	243.9	不能	301.4	49.0	53.2	47.0	52.8	49.0	53.6	47.0	51.6
比誘電率	6.53		7.27		6.81		7.83		8.14		7.71		8.74				6.79		6.34		6.69		6.64	
ライン平均	15.0	16.9	39.0	41.6	63.0	67.8	89.7	91.5	142.0	141.6	189.0	192.2	255.0	242.2	不能	300.6	48.3	53.0	47.0	52.9	48.3	53.5	46.0	51.4
比誘電率	6.30		7.03		6.91		7.69		8.05		7.74		8.87				6.64		6.32		6.52		6.41	
√比誘電率	2.51		2.65		2.63		2.77		2.84		2.78		2.98				2.58		2.51		2.55		2.53	

・ライン平均は①、③、⑤箇所の平均

・＊印は不確定値

表－3.5.1.4　材齢１週間の供試体Ｂの比誘電率の推定

（ａ）供試体B上面（打設面）：　材齢　1週間（7日）
シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）

	鉄筋位置											
	①		②		(③)		⑤		⑥		ライン平均	
	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値
aライン	36.0	34.6	36.0	34.6	不能	279.0	36.0	33.6	36.0	34.2	36.0	34.2
比誘電率	8.66		8.81				9.18		8.86		8.86	(2.98)
bライン	52.0	46.7	49.0	46.5	265.0	251.5*	49.0	48.1	49.0	49.2	49.8	47.6
比誘電率	9.92		8.88		8.91		8.30		7.94		8.76	(2.96)
cライン	72.0	62.5	65.0	62.8	241.0	226.0	67.0	62.1	65.0	61.4	67.3	62.2
比誘電率	10.62		8.57		9.10		9.31		8.97		9.37	(3.06)
dライン	84.0	73.6	84.0	76.2	208.0	196.5	82.0	77.6	82.0	76.7	83.0	76.0
比誘電率	10.42		9.72		8.96		8.93		9.14		9.54	(3.09)
eライン	93.0	90.9	96.0	92.1	183.0	169.0	96.0	93.9	98.0	93.7	95.8	92.7
比誘電率	8.37		8.69		9.38		8.36		8.75		8.54	(2.92)
√比誘電率	2.89		2.95				2.89		2.96			

・ライン平均は①、②、⑤、⑥箇所の平均
・＊印は不確定値

（ｂ）供試体B下面（底面）：　材齢　1週間（7日）
シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）

	鉄筋位置											
	①		②		(③)		⑤		⑥		ライン平均	
	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値
aライン	255.0*	234.2	255.0	225.7	不能	279.0	255.0*	224.1	255.0*	230.1	255.0*	228.5
比誘電率	9.48		10.21				10.36		9.83		9.96	(3.16)
bライン	190.0*	192.9	190.0*	184.4	282.0*	251.5	190.0*	182.2	200.0*	188.4	192.5	187.0
比誘電率	7.76		8.49		10.05		8.70		9.02		8.48	(2.91)
cライン	160.0	151.7	147.0	143.1	239.0	226.0	147.0	140.3	160.0	146.8	153.5	145.5
比誘電率	8.90		8.70		8.95		8.78		9.50		8.90	(2.98)
dライン	114.0	110.4	107.0	101.8	210.0	196.5	100.0	98.3	110.0	105.2	107.8	103.9
比誘電率	8.53		8.84		9.14		8.28		8.75		8.61	(2.93)
eライン	67.0	69.1	65.0	60.5	183.0	169.0	57.0	56.4	65.0	63.5	63.5	62.4
比誘電率	7.52		9.23		9.38		8.17		8.38		8.28	(2.88)

・ライン平均は①、②、⑤、⑥箇所の平均
・＊印は不確定値

表－3.5.1.5　材齢１週間の供試体Ｃの比誘電率の推定

供試体C上面（表面）：　材齢　1週間（7日）
シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）

	厚さ測定箇所				参考鉄筋位置
	a		f		
	測定値	実測値	測定値	実測値	
②ライン	114.0	100.0	211.0	201.0	
比誘電率	10.40	(3.22)	9.67	(3.11)	
⑥ライン	不能	599.0	不能	399.5	
比誘電率	—		—		

供試体C下面（裏面）：　材齢　1週間（7日）
シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）

	厚さ測定箇所				参考鉄筋位置
	a		f		
	測定値	実測値	測定値	実測値	
②ライン	110.0	100.0	217.0	201.0	
比誘電率	9.68	(3.11)	9.32	(3.05)	
⑥ライン	不能	599.0	不能	399.5	
比誘電率	—		—		

表－3.5.1.6　材齢４週間の供試体Ｂの比誘電率の推定

（ａ）供試体B上面（打設面）：　材齢　4週間（28日）
シンドコウセイ　：　0（ε_γ=8.0）

	鉄筋位置											
	①		②		(③)		⑤		⑥		ライン平均	
	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値
aライン	36.0	34.6	36.0	34.3	不能	279.0	36.0	33.6	36.0	34.2	36.0	34.2
比誘電率	8.66		8.81				9.18		8.86		8.86	(2.98)
bライン	52.0	46.7	52.0	46.5	250.8*	251.5	49.0	48.1	49.0	49.2	50.2	47.6
比誘電率	9.92		10.00		7.96		8.30		7.94		9.00	(3.00)
cライン	67.0	62.5	65.0	62.8	230.0	226.0	65.0	62.1	62.0	61.4	64.0	62.2
比誘電率	10.62		8.57		9.10		9.31		8.97		9.37	(3.06)
dライン	82.0	73.6	82.0	76.2	205.0	196.5	79.0	77.6	79.0	76.7	80.5	76.0
比誘電率	9.93		9.26		8.71		8.29		8.49		8.98	(3.00)
eライン	91.0	90.9	93.0	92.1	174.0	169.0	93.0	93.9	96.0	93.7	93.3	92.7
比誘電率	8.02		8.16		8.48		7.85		8.40		8.10	(2.85)

・ライン平均は①、②、⑤、⑥箇所の平均
・＊印は不確定値

（ｂ）供試体B下面（底面）：　材齢　4週間（28日）
シンドコウセイ　：　0（ε_γ=8.0）　　平成12年1月25日作成

	鉄筋位置											
	①		②		(③)		⑤		⑥		ライン平均	
	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値
aライン	246.0	234.2	246.0*	225.7	不能	279.0	239.0*	224.1	239.0	230.1	242.5	228.5
比誘電率	8.83		9.50				9.10		8.63		9.01	(3.00)
bライン	205.0*	192.9	190.0*	184.4	259.0	251.5	190.0*	182.2	205.0	188.4	197.5	187.0
比誘電率	9.04		8.49		8.48		8.70		9.47		8.92	(2.99)
cライン	150.0	151.7	149.0	143.1	232.0	226.0	147.0	140.3	150.0	146.8	149.0	145.5
比誘電率	7.82		8.67		8.43		8.78		8.35		8.39	(2.90)
dライン	110.0	110.4	100.0	101.8	206.0	196.5	96.0	98.3	103.0	105.2	102.3	103.9
比誘電率	7.94		7.72		8.79		7.63		7.67		7.76	(2.78)
eライン	67.0	62.0	65.0	60.5	176.0	169.0	55.0	56.4	62.0	63.5	61.5	62.4
比誘電率	7.52		8.40		8.68		7.61		7.63		7.77	(2.79)

・ライン平均は①、②、⑤、⑥箇所の平均
・＊印は不確定値

表－3.5.1.7　材齢４週間の供試体Ｃの比誘電率の推定

供試体C上面（表面）：　材齢　4週間（28日）
シンドコウセイ　：　0（ε_γ=8.0）

	厚さ測定箇所 a		厚さ測定箇所 f		参考鉄筋位置
	測定値	実測値	測定値	実測値	
②ライン	110.0	100.0	214.0	201.0	
比誘電率	9.68 (3.11)		9.07 (3.01)		
⑥ライン	不能 600	599.0	不能 600	399.5	
比誘電率	9.71 (3.12)		11.07 (3.33)		

供試体C下面（裏面）：　材齢　4週間（28日）
シンドコウセイ　：　0（ε_γ=8.0）

	厚さ測定箇所 a		厚さ測定箇所 f		参考鉄筋位置
	測定値	実測値	測定値	実測値	
②ライン	107.0	100.0	214.0	201.0	
比誘電率	9.16 (3.03)		9.07 (3.01)		
⑥ライン	不能 600	599.0	不能 600	399.5	
比誘電率	9.71 (3.12)		11.07 (3.33)		

表－3.5.1.8　材齢 13 週間の供試体 B の比誘電率の推定

（ａ）供試体B上面（打設面）：　材齢13週間（90日）
シンドコウセイ　　：　0（ε_r=8.0）

	鉄筋位置											
	①		②		(③)		⑤		⑥		ライン平均	
	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値
aライン	39.0	34.6	39.0	34.3	277.0	279.0	36.0	33.6	36.0	34.2	37.5	34.2
比誘電率	10.16		10.34		7.89		9.18		8.86		9.62	(3.10)
bライン	47.0	46.7	47.0	239.0	239.0	251.5	47.0	48.1	47.0	49.2	47.0	47.6
比誘電率	8.10		8.17		7.22		7.64		7.30		7.80	(2.79)
cライン	67.0	62.5	60.0	62.8	217.0	226.0	62.0	62.1	60.0	61.4	62.2	62.2
比誘電率	9.19		7.30		7.38		7.97		7.64		8.00	(2.83)
dライン	77.0	73.6	77.0	76.2	194.0	196.5	77.0	77.6	77.0	76.7	77.0	76.0
比誘電率	8.76		8.17		7.80		7.88		8.06		8.21	(2.87)
eライン	89.0	90.9	91.0	92.1	165.0	169.0	89.0	93.9	91.0	93.7	90.0	92.7
比誘電率	7.67		7.81		7.63		7.19		7.55		7.54	(2.75)

・ライン平均は①、②、⑤、⑥箇所の平均
・＊印は不確定値

（ｂ）供試体B下面（底面）：　材齢13週間（90日）
シンドコウセイ　　：　0（ε_r=8.0）

	鉄筋位置											
	①		②		(③)		⑤		⑥		ライン平均	
	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値
aライン	230.0	234.2	230.0	225.7	277.0	279.0	226.0	224.1	226.0	230.1	228.0	228.5
比誘電率	7.72		8.31		7.89		8.14		7.72		7.79	(2.82)
bライン	185.0	192.9	183.0	184.4	241.0	251.5	181.0	182.2	185.0	188.4	183.5	187.0
比誘電率	7.36		7.88		7.35		7.89		7.71		7.70	(2.76)
cライン	144.0	151.7	142.0	143.1	219.0	226.0	135.0	140.3	147.0	146.8	142.0	145.5
比誘電率	7.21		7.88		7.51		7.41		8.02		7.62	(2.76)
dライン	105.0	110.4	96.0	101.8	194.0	196.5	91.0	98.3	98.0	105.2	97.5	103.9
比誘電率	7.24		7.11		7.80		6.86		6.94		7.04	(2.65)
eライン	62.0	69.1	55.0	60.5	165.0	169.0	52.0	56.4	57.0	63.5	56.5	62.4
比誘電率	6.44		6.61		7.63		6.80		6.45		6.56	(2.56)

・ライン平均は①、②、⑤、⑥箇所の平均
・＊印は不確定値

表－3.5.1.9　材齢 13 週間の供試体 C の比誘電率の推定

供試体C上面（表面）：　材齢13週間（90日）
シンドコウセイ　　：　0（ε_r=8.0）

	厚さ測定箇所				参考鉄筋位置
	a		f		
	測定値	実測値	測定値	実測値	
②ライン	101.5	100.0	204.0	201.0	
比誘電率	8.24		8.24		
⑥ライン	不能	599.0	不能	399.5	
比誘電率	—		—		

供試体C下面（裏面）：　材齢13週間（90日）
シンドコウセイ　　：　0（ε_r=8.0）

	厚さ測定箇所				参考鉄筋位置
	a		f		
	測定値	実測値	測定値	実測値	
②ライン	101.5	100.0	203.0	201.0	
比誘電率	8.24		8.16		
⑥ライン	不能	599.0	不能	399.5	
比誘電率	—		—		

表－3.5.1.10　材齢 18 週間の供試体 B の比誘電率の推定

（ａ）供試体B上面（打設面）：　材齢18週間（125日）、ｱｽﾌｧﾙﾄを上面に50㎜舗設
シンドコウセイ　　：　0（ε_r=8.0）

	鉄筋位置											
	①		②		(③)		⑤		⑥		ライン平均	
	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値
aライン	39.0 77.0	53.7 34.6	39.0 77.0	50.6 34.3	39.0 —	50.0 282.5	39.0 77.0	50.3 33.6	39.0 79.0	51.1 34.2	39.0 77.5	51.1 34.2
比誘電率	4.22	6.08	4.75	6.58	4.87	—	4.81	6.74	4.66	6.86	4.66	6.60
bライン	41.0 91.0	54.7 46.7	41.0 89.0	52.3 46.5	41.0 —	54.1 253.4	41.0 91.0	52.4 48.1	41.0 91.0	51.7 49.2	41.0 90.5	53.0 47.6
比誘電率	4.49	6.44	4.92	6.49	4.59	—	49.0	6.56	5.03	6.51	4.79	6.47
cライン	39.0 105.0	50.3 62.5	39.0 100.0	48.0 62.8	39.0 —	47.9 227.4	39.0 100.0	50.6 62.1	39.0 98.0	50.1 61.4	39.0 100.8	49.4 62.2
比誘電率	4.81	6.93	5.28	6.52	5.30	—	4.75	6.30	4.85	6.18	4.99	6.53
dライン	41.0 114.0	50.5 73.6	41.0 114.0	45.0 76.2	41.0 232.0	45.9 200.2	41.0 114.0	53.6 77.6	41.0 114.0	50.5 76.7	41.0 114.0	49.1 76.0
比誘電率	5.27	6.75	6.64	7.08	6.38	7.11	4.68	6.04	5.27	6.43	5.57	6.64
eライン	41.0 131.0	51.9 90.9	41.0 131.0	47.6 92.1	41.0 205.0	50.1 175.1	41.0 131.0	55.4 93.9	41.0 133.0	52.4 93.7	41.0 131.5	51.5 92.7
比誘電率	4.99	6.73	5.94	7.03	5.35	6.63	4.38	6.16	4.90	6.63	5.07	6.65

・鉄筋かぶり、ｺﾝｸﾘｰﾄ厚みのライン平均は①、②、⑤、⑥箇所の平均、舗装厚は①、②、③、⑤、⑥箇所の平均を示す。
・測定値／実測値欄の上段は舗装厚値、測定値欄の下段は舗装厚部とｺﾝｸﾘｰﾄ部とを含んだ値を示し、実測値欄の下段はｺﾝｸﾘｰﾄ厚値を示す。
・比誘電率欄は左側が舗装厚部の比誘電率、右側が舗装厚部とｺﾝｸﾘｰﾄ部とを含んだ複合の比誘電率を示す。

（ｂ）供試体B下面（底面）：　材齢18週間（125日）、ｱｽﾌｧﾙﾄを上面に50㎜舗設
シンドコウセイ　　：　0（ε_r=8.0）

	鉄筋位置											
	①		②		(③)		⑤		⑥		ライン平均	
	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値
aライン					— —	282.5 50.0						
比誘電率					—	—						
bライン					242.0 282.0	253.4 54.1						
比誘電率					4.37	6.73						
cライン					215.0 255.0	227.4 47.9						
比誘電率					5.58	6.86						
dライン					188.0 228.0	200.2 45.9						
比誘電率					6.08	6.87						
eライン					165.0 205.0	175.1 50.1						
比誘電率					5.10	6.63						

・測定値／実測値欄の上段はｺﾝｸﾘｰﾄ厚値、下段は舗装厚値、測定値欄の上段はｺﾝｸﾘｰﾄ厚値、下段はｺﾝｸﾘｰﾄ厚と舗装厚とを含んだ総合の値を示す。
・比誘電率欄は左側が舗装厚部の比誘電率、右側ｺﾝｸﾘｰﾄ厚部と舗装厚部とを含んだ複合の比誘電率を示す。

（2）深さ－比誘電率特性

供試体A、供試体Bについて、各材齢毎の鉄筋の測定かぶり厚さと実測かぶり厚さから、比誘電率を推定し、その結果を図-3.5.1.3及び図-3.5.1.4にまとめた。

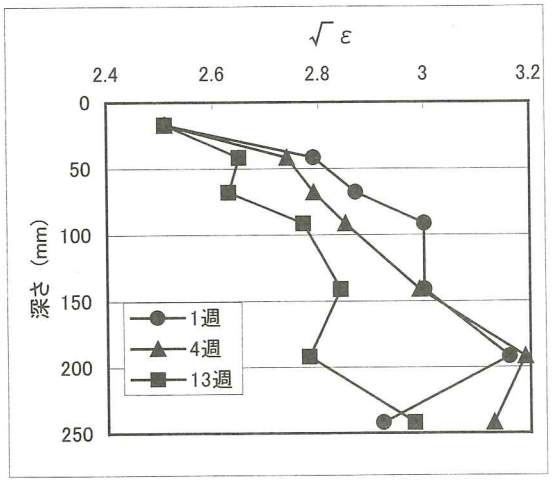


図-3.5.1.3　供試体A深さ－比誘電率特性

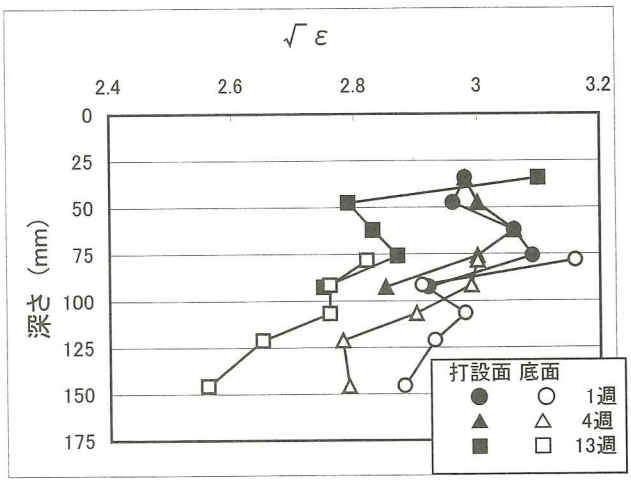


図-3.5.1.4　供試体B深さ－比誘電率特性

図-3.5.1.3の供試体A深さ-比誘電率特性から、裏面を密封した状態では、表面から深くなるに従って、また、材齢日数が少ない程、比誘電率が大きくなることがわかる。また、図-3.5.1.4の供試体B深さ-比誘電率特性については、間隔が10mm程度と小さすぎたため、バラツキが大きい。また底面からの結果は、最も小さいかぶりでも50mm程度あり、底面近くのデータが採れない。

（3）補正双曲線法

①双曲線法の補正

コンクリート材の比誘電率は個々の測定現場毎に異なり、正確に特定することが困難である。比誘電率に頼らない双曲線法を用いた深さ測定を行い、測定精度に関して実用性の検証を行い、併せて改良すべき問題点を考察した。

コンクリート材質が均一である場合には、以下のように比誘電率を知ることなしに鉄筋等の深さを推定することができる。

$$D_0 = L / \sqrt{(T_1 / T_0)^2 - 1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5.1.1)$$

式(3.5.1.1)に示すように、T_0、T_1を測定することにより、かぶりD_0を求めることができる。しかし、実際には装置の送受信アンテナエレメントの間隔２Ｅが無視出来ない大きさであるので、それを考慮すると、中心A及びBに対して、焦点を±Ｅとして持つ楕円を考えることになる。この様子を図-3.5.1.7に示す。

図-3.5.1.8 に示すように、鉄筋等の深さをD_0、コンクリート内部を電波が走る速度をV、点線部分の長さを$R1$とすると、

$$V = R1/To \qquad (3.5.1.2)$$

但し

$$R1 = 2\times\sqrt{E^2 + Do^2}$$

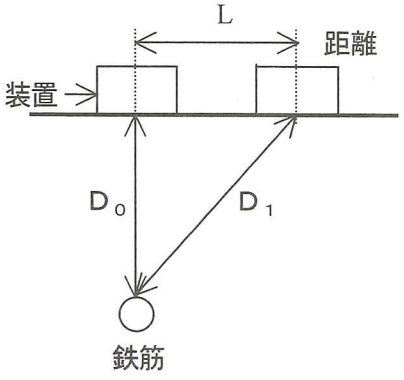


図-3.5.1.5　装置移動図

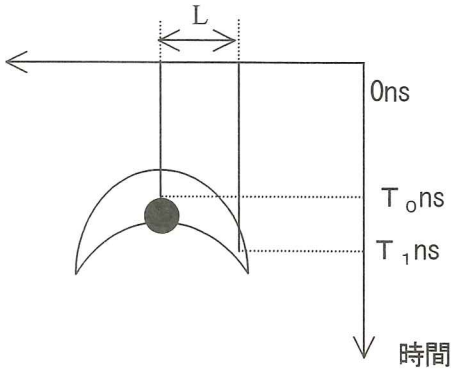


図-3.5.1.6　双曲線法の原理図

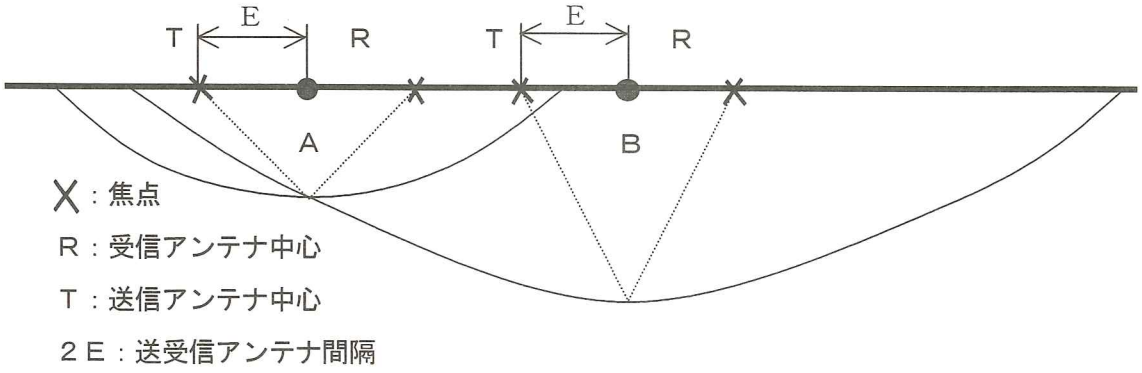


図-3.5.1.7　アンテナエレメントの大きさを考慮した楕円軌道

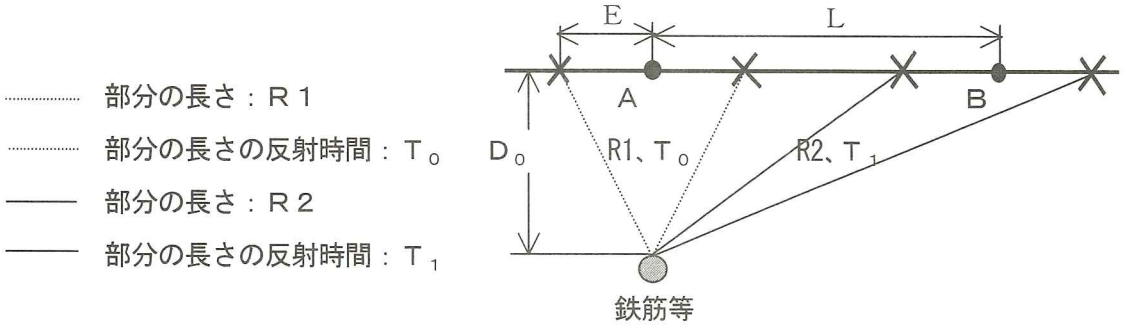


図-3.5.1.8　鉄筋等の深さの求め方

また、実線部分の長さを$R2$とすると

$$V = R2 / T1$$

但 し $$R2 = \sqrt{(L-E)^2 + Do^2} + \sqrt{(L+E)^2 + Do^2} \quad (3.5.1.3)$$

式(3.5.1.2)，(3.5.1.3)から式(3.5.1.4)となる。

$$T_1 / T_o = \sqrt{(L-E)^2 + Do^2} + \sqrt{(L+E)^2 + Do^2} / 2 \times \sqrt{E^2 + Do^2} \quad (3.5.1.4)$$

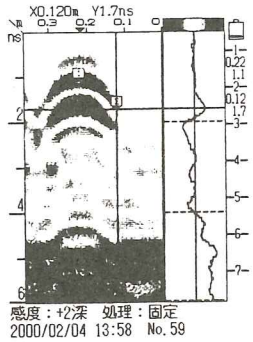
②検証方法

供試体を装置で測定し、反射時間を求め、双曲線法の原理に従って、鉄筋深さを算出し、実測した深さとの誤差を求め、その実用性について検証した。

③測定結果

測定結果を**図-3.5.1.9、図-3.5.1.10** に示し、まとめを**表-3.5.1.11** に示す。

A供試体　⑤ラインデータ



実測値：51.6mm:

標準双曲線法：　$Do = 10 / \sqrt{(1.7/1.1)^2 - 1} = 84.9mm$

読取り及び丸め誤差を考慮した双曲線法：

$Do = 9 / \sqrt{(1.74/1.06)^2 - 1} = 69.1mm$

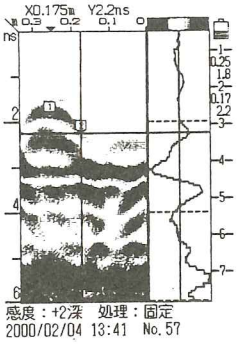
アンテナエレメント位置を考慮した双曲線法：D_o＝74.1mm

$$t_1 / t_o = \sqrt{(L-E)^2 + Do} + \sqrt{(L+E)^2 + Do^2} / 2 \times \sqrt{E^2 + Do^2}$$

更に読取り及び丸め誤差を考慮した双曲線法：D_o＝55.1mm

図-3.5.1.9　データNo.1　双曲線法による鉄筋かぶり測定

B供試体　表　Eラインデータ



実測値：90.9mm

標準双曲線法：　$Do = 8 / \sqrt{(2.2/1.8)^2 - 1} = 113.8mm$

読取り及び丸め誤差を考慮した双曲線法：

$Do = 7 / \sqrt{(2.24/1.76)^2 - 1} = 88.9mm$

アンテナエレメント位置を考慮した双曲線法：D_o＝104.2mm

$$t_1 / t_o = \sqrt{(L-E)^2 + Do} + \sqrt{(L+E)^2 + Do} / 2 \times \sqrt{E^2 + Do^2}$$

更に読取り及び丸め誤差を考慮した双曲線法：D_o＝76.0mm

図-3.5.1.10　データNo.2　双曲線法による鉄筋かぶり測定

表-3.5.1.11　双曲線法の結果

ﾃﾞｰﾀNo	実測深さ	双曲線法による測定結果	補正を加えた双曲線法による測定結果	読取誤差と丸め誤差を考慮した測定結果	補正双曲線法・読取誤差・丸め誤差を考慮した測定結果
No.1	51.6mm	84.9mm	74.1mm	69.1mm	55.1mm
誤差	—	+33.3mm	+22.5mm	+17.5mm	+3.5mm
No.2	90.9mm	113.8mm	104.2mm	88.9mm	76.0mm
誤差	—	+22.9mm	+13.3mm	−2mm	−14.9mm

④測定結果の考察

ａ．双曲線法による測定結果

表-3.5.1.11 に示すように、単純に双曲線法を用いて測定した結果は、実際の深さより、大幅に深くなっている。この原因は、アンテナ部に内臓されている送・受アンテナエレメントの物理的間隔の影響で、反射時間が実際の長さよりも、長く測定されていることと、反射時間の読取り誤差（読取りの細かさ 0.042ns/1 ドット）及び水平測定距離の丸め誤差（1cm／1 ライン）に因ると考えられる。

ｂ．補正を加えた双曲線法による測定結果

送･受アンテナエレメントの物理的間隔を考慮して補正を加えると、単純な双曲線法での測定値に比べて、約 1cm 程度誤差が軽減される。浅い鉄筋を測定する場合程、この補正の効果は、顕著になる。

ｃ．読取り誤差と丸め誤差を考慮した測定結果

測定に使用した装置の反射時間（深さ方向）の読取りの細かさは、6ns/144 点＝0.0417/点である為、例えば測定された反射時間が 1.7ns と 1.1ns の場合 1.658～1.742ns、1.058～1.142ns の範囲にあると考えられる。

また、水平方向の距離は、1cm 単位に丸められている為、例えば水平位置が 22cm、12cm の場合、21.5～22.4cm、11.5～12.4cm の範囲にあると考えられる。

誤差を軽減するような値、即ち 21.5cm，12.4cm，1.742ns，1.058ns を用いると、約 2cm の誤差が軽減される。

ｄ．補正双曲線法・読取り誤差・丸め誤差を考慮した測定結果

ｂ．ｃ．項の補正を同時に行った場合は、データ№1 の深さ 5cm の場合は、丁度よい補正であるが、データ№2 の深さ 9cm の場合は、誤差が負の値となり、補正がかかり過ぎる結果となっている。

これはｃ項の数値の範囲の中で、補正が最大にかかるような数値を用いた為である。

ｅ．改良すべき問題点

双曲線法を用いて鉄筋等のかぶり深さを測定する場合、高精度で測定できる為には、反射時間の読取りの細かさ、測定距離の細かさが実験で用いた装置より、一桁細かく読取れる装置が必要である。

3.5.2　レーダＥ(地下レーダ)

今回の測定のために作成された供試体Ａ~Ｃの測定に関して、時間分解能をできる限り高める観点から次の要領で測定を実施した。

○供試体Ａ、Ｂ、ＣのⅠ、Ⅱ面(厚さ 10cm、20cm)には分解能の最も高い中心周波数 1500MHz を使用した。

○供試体ＣのⅢ、Ⅳ面(厚さ 40cm,60cm)は、1500MHz では減衰により測定困難であったので、900MHz、400MHz を併用した。

○ワイドアングル測定には 900MHz を 2 台使用した。測定場所は鉄筋の影響を避けることを考慮して次のとおりとした。

供試体Ａ：ｈ測線の中央を測定点とした。

供試体Ｂ：③測線の中央を測定点とした。

供試体Ｃ：②測線とｆ測線の交点及び⑥測線とｆ測線の交点を測定点とした。

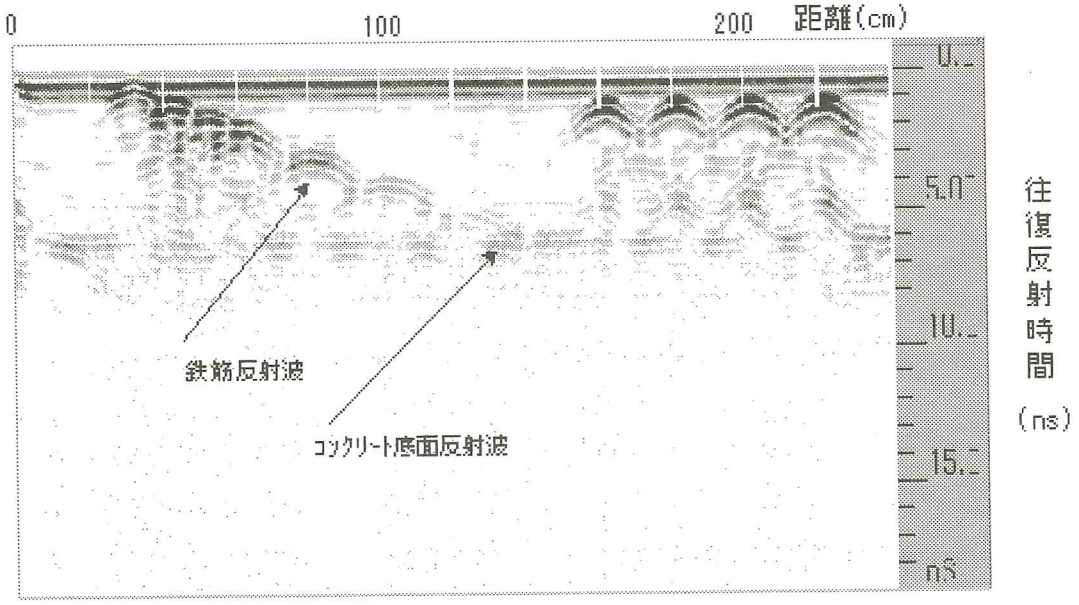
○測定器のサンプリングレートは最大である 2048 点／波形、データ長は 16 ビットにした。

○時間レンジは供試体Ａ、Ｂでは 20ns、Ｃでは 30ns にした。

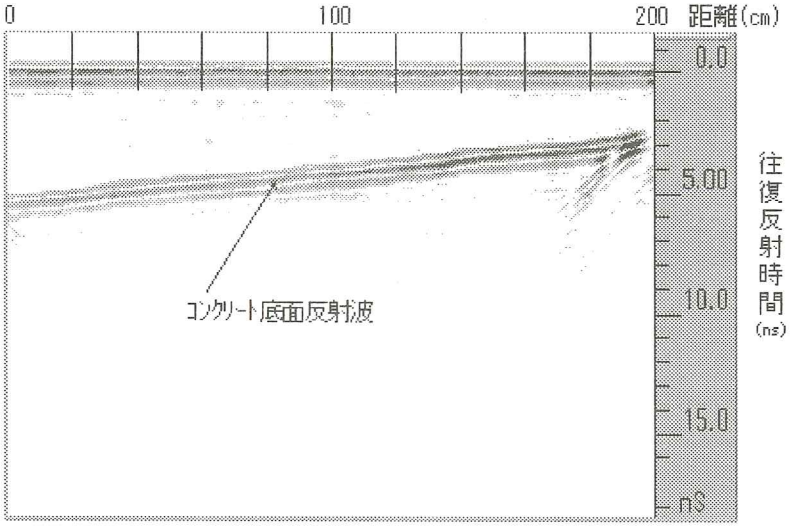
なお、測定は打設後の経時変化を見るために材齢 7 日、28 日、99 日の３回行った。

（1）測定記録

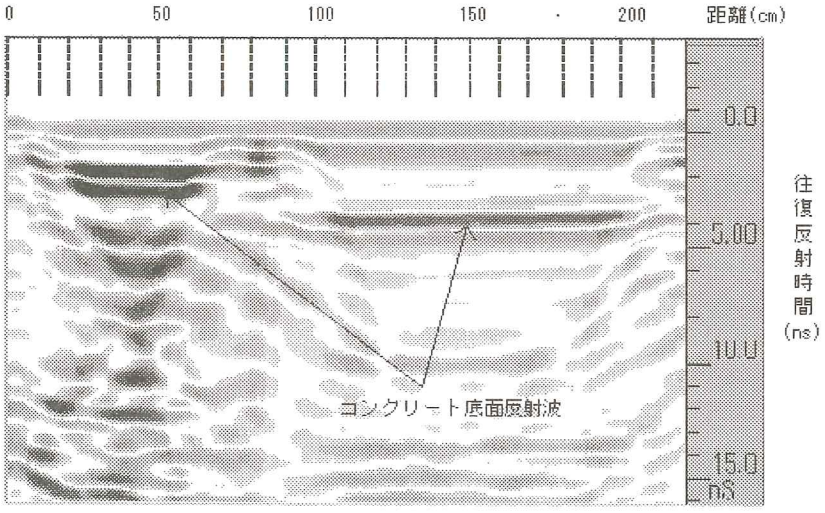
代表例として３回目測定時(材齢 99 日)におけるＡ供試体の③測線、Ｂ供試体の③測線、Ｃ供試体の②測線、⑦測線の測定記録を図－3.5.2.1～図－3.5.2.4 に示す。



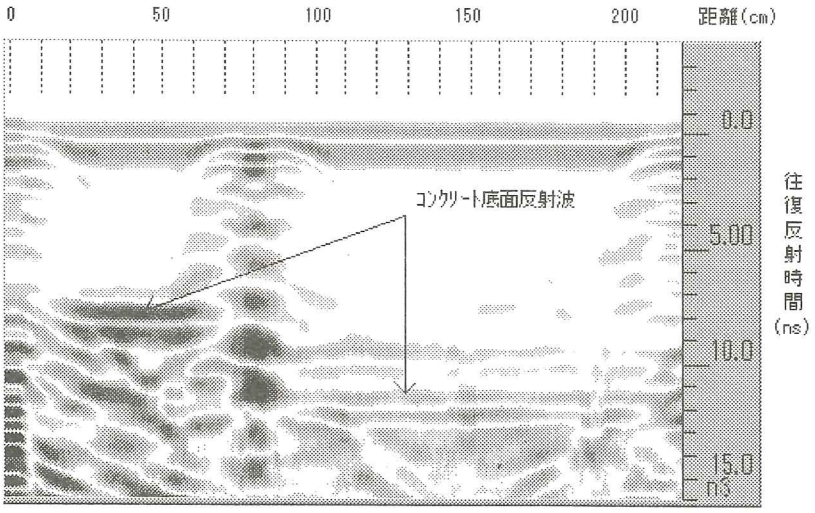
図－3.5.2.1　３回目測定時(材齢 99 日)のＡ供試体③測線の測定記録(1500MHz ｱﾝﾃﾅ使用)



図－3.5.2.2　３回目測定時（材齢 99 日）のＢ供試体③測線の測定記録（1500MHz ｱﾝﾃﾅ使用）



図―3.5.2.3　３回目測定時（材齢 99 日）のＣ供試体②測線の測定記録（900MHz ｱﾝﾃﾅ使用）



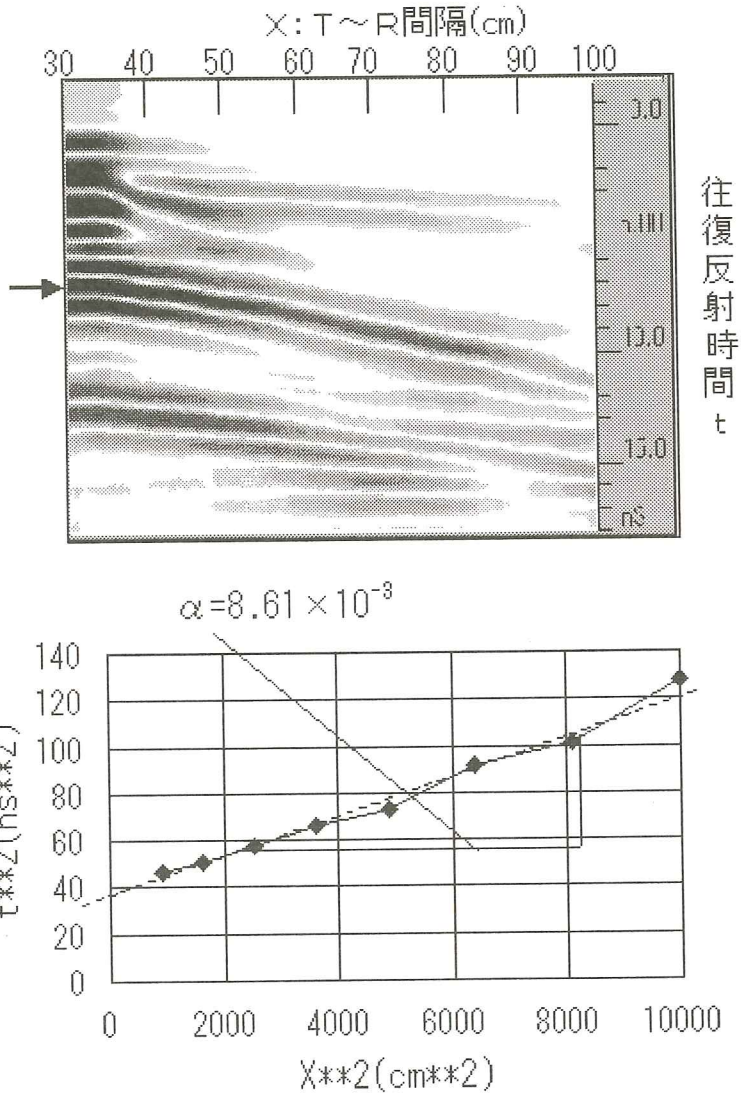
図－3.5.2.4　３回目測定時（材齢 99 日）のＣ供試体⑥測線の測定記録（900MHz ｱﾝﾃﾅ使用）

（2）電磁波速度測定結果

ワイドアングル法の T/R 間隔～往復反射時間関係、電磁波速度算出結果を**表－3.5.2.1** に、双曲線法の双曲線頂点からの距離～往復反射時間関係、電磁波速度算出結果を**表－3.5.2.2** に、深度法の往復反射時間～(鉄筋)かぶり関係、電磁波速度算出結果を**表－3.5.2.3** に示す。そして、３回目測定時(材齢 99 日)におけるＡ供試体の例を以下に示す。

１）ワイドアングル法

ワイドアングル法の測定記録を**図－3.5.2.5** の上段に示す。→の反射波に関する X^2～t^2 関係を表すのが同図の下段であり、電磁波速度は勾配αから式(2.2.2.3)により **10.8cm/nsec** になった。

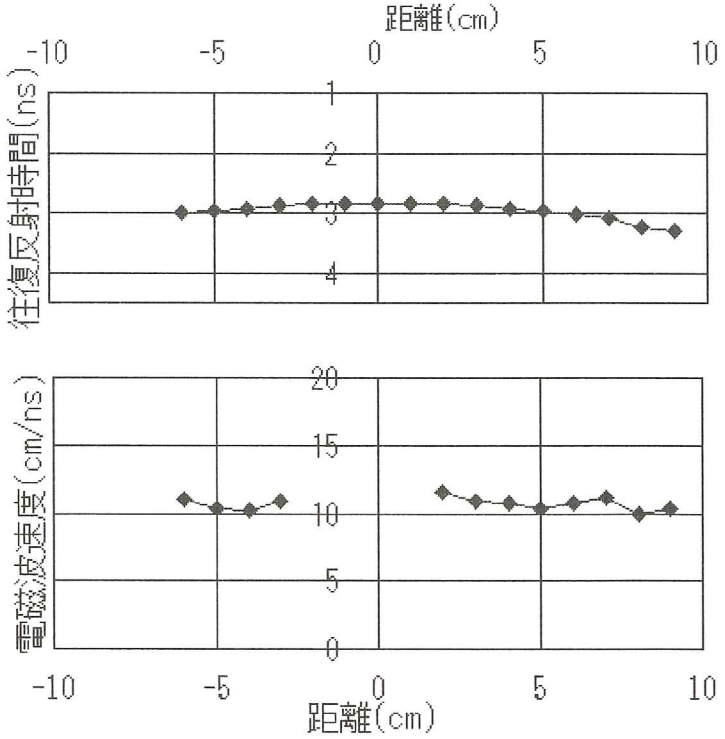


図－3.5.2.5　Ａ供試体のワイドアングル法の測定記録と解析結果(材齢 99 日)

２）双曲線法

双曲線法の解析結果を**図－3.5.2.6** に示す。同図は**図－3.5.2.1** に示した測定記録の内、設計深度 **15cm** の鉄筋反射波(距離 **80cm**、往復反射時間 **2.7nsec** 付近にピークを持つ反射波)に関して、上段が双曲線頂点位置を距離原点として読み取った波形記録を、下段が**式(2.2.2.4)** から算出した電磁波速度を表す。

このように、双曲線法では読み取り点毎に複数の値が求まるため、最終的にはそれらの平均値を用いることにしたが、この例では10.7cm/nsecになった。なお、X_0には1500MHzアンテナの送受信間隔である8.25cmを用いた。

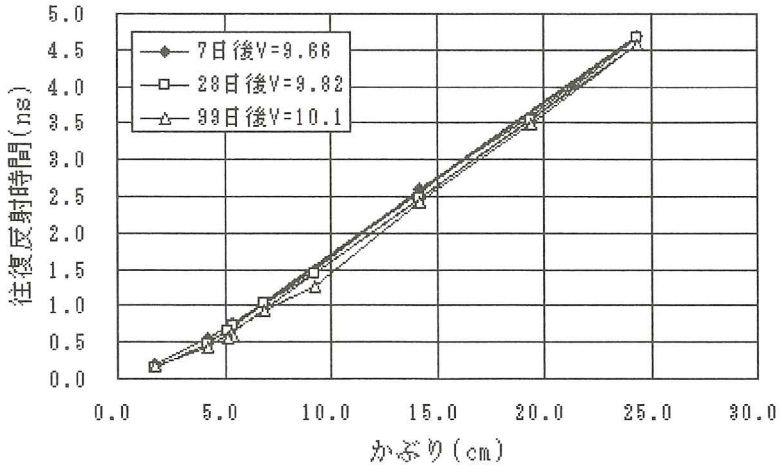


図－3.5.2.6　A供試体に関する双曲線法解析結果(材齢99日)

3）深度法

深度法による③測線の電磁波速度の解析結果を図－3.5.2.7に示す。

回帰直線の勾配から電磁波速度を求めた結果、材齢が7日、28日、99日では各々9.66cm/nsec、9.82cm/nsec、10.1cm/nsecになった。



図－3.5.2.7　A供試体③測線の深度法解析結果(材齢7、28、99日)

表－3.5.2.1　ワイドアングル法結果一覧

材齢(日)	A供試体			B供試体			C供試体					
	測定位置	T/R 間隔(cm)	往復反射時間(nsec)	測定位置	T/R 間隔(cm)	往復反射時間(nsec)	測定位置	T/R 間隔(cm)	往復反射時間(nsec)	測定位置	T/R 間隔(cm)	往復反射時間(nsec)
7	hの中央	30.0	6.91	——	——	——	②とfの交点	30.0	5.95	⑥とfの交点	30.0	9.03
		40.0	7.25					40.0	6.40		40.0	9.42
		50.0	7.96					50.0	6.89		50.0	9.76
		60.0	8.48					60.0	7.51		60.0	10.30
		70.0	8.96					70.0	8.69		70.0	11.33
		80.0	9.46					80.0	9.38			
	速度 11.4cm/ns						速度 10.1cm/ns			速度 9.41cm/ns		
28	hの中央	30.0	6.87	——	——	——	②とfの交点	30.0	5.82	⑥とfの交点	30.0	8.92
		40.0	7.20					40.0	6.27		40.0	9.37
		50.0	7.65					50.0	6.81		50.0	9.70
		60.0	8.29					60.0	7.47		60.0	10.21
		70.0	9.11					70.0	8.28		70.0	11.13
		80.0	9.71					80.0	9.22			
	速度 10.6cm/ns						速度 10.4cm/ns			速度 9.70cm/ns		
99	hの中央	30.0	6.84	③の中央	30.0	5.27	②とfの交点	30.0	5.75	⑥とfの交点	30.0	8.87
		40.0	7.14		40.0	5.52		40.0	6.17		40.0	9.25
		50.0	7.59		50.0	5.99		50.0	6.72		50.0	9.58
		60.0	8.13		60.0	6.62		60.0	7.24		60.0	9.99
		70.0	8.57		70.0	7.44		70.0	7.88		70.0	10.78
		80.0	9.57		80.0	8.07		80.0	8.65			
	速度 10.8cm/ns			速度 11.5cm/ns			速度 11.5cm/ns			速度 10.5cm/ns		

ただし、B供試体の材齢7、28日は双曲線状の反射波が現れなかったため、ワイドアングル法により電磁波速度を求めることができなかった。

表－3.5.2.2　双曲線法結果一覧

材齢(日)	A供試体				B供試体			
	測定位置	双曲線頂点からの距離(cm)	往復反射時間(nsec)	電磁波速度(cm/ns)	測定位置	双曲線頂点からの距離(cm)	往復反射時間(nsec)	電磁波速度(cm/ns)
7	③とｅの交点	-6	3.11	10.3	②とｅの交点	-6	2.24	11.3
		-5	3.05	10.3		-5	2.19	10.5
		-4	3.02	9.1		-4	2.14	9.7
		-3	2.96	9.7		-3	2.07	10.4
		3	2.96	9.7		3	2.08	9.6
		4	3.02	9.1		4	2.15	9.3
		5	3.04	10.6		5	2.24	9.1
		6	3.10	10.6		6	2.32	9.5
		7	3.19	10.2		7	2.39	10.1
		8	3.27	10.3		8	2.47	10.5
		9	3.32	10.9		9	2.61	10.2
		10	3.40	11.0		——	——	——
		11	3.50	11.0		——	——	——
		平均速度 10.2cm/ns				平均速度 10.0cm/ns		
28	③とｅの交点	-6	3.08	11.3	②とｅの交点	-6.5	2.24	10.4
		-5	3.02	11.6		-5.5	2.16	10.2
		-4	2.98	11.3		-4.5	2.08	10.1
		-3	2.94	12.1		-3.5	2.02	9.7
		-2	2.92	11.4		-2.5	2.01	10.5
		2	2.92	11.4		-1.5	1.93	9.8
		3	2.94	12.1		2.5	1.96	10.5
		4	2.98	11.3		3.5	2.01	10.3
		5	3.01	12.1		4.5	2.06	10.9
		6	3.06	12.0		5.5	2.14	10.7
		7	3.14	11.3		6.5	2.21	11.0
		8	3.18	12.0		7.5	2.33	10.6
		9	3.28	11.5		——	——	——
		10	3.40	11.0		——	——	——
		平均速度 11.6cm/ns				平均速度 10.4cm/ns		
99	③とｅの交点	-6	3.01	11.4	②とｅの交点	-6.5	2.17	10.8
		-5	2.98	10.3		-5.5	2.08	10.8
		-4	2.93	10.2		-4.5	2.00	11.0
		-3	2.88	10.9		-3.5	1.95	10.4
		2	2.85	11.5		-2.5	1.90	10.6
		3	2.88	10.9		-1.5	1.87	9.9
		4	2.92	10.8		1.5	1.87	9.9
		5	2.98	10.3		2.5	1.90	10.4
		6	3.03	10.8		3.5	1.95	10.4
		7	3.08	11.2		4.5	2.00	11.0
		8	3.23	10.0		5,5	2.10	10.3
		9	3.30	10.3		6.5	2.17	10.8
		平均速度 10.7cm/ns				平均速度 10.5cm/ns		

表－3.5.2.3　深度法結果一覧

材齢	A供試体									B供試体					
	測定位置	往復反射時間(ns)	かぶり(mm)	測定位置	往復反射時間(ns)	かぶり(mm)	測定位置	往復反射時間(ns)	かぶり(mm)	測定位置	往復反射時間(ns)	かぶり(mm)	測定位置	往復反射時間(ns)	かぶり(mm)
7日	①a	0.61	17.5	③a	0.55	16.7	⑤a	0.56	16.6	②a表	0.82	34.6	③a表	0.82	33.6
	①b	0.91	42.0	③b	0.91	41.8	⑤b	0.85	40.9	②b表	1.06	46.5	③b表	1.06	48.1
	①c	1.44	67.6	③c	1.39	68.6	⑤c	1.38	67.2	②c表	1.32	62.8	③c表	1.47	62.1
	①d	1.85	90.5	③d	1.85	92.1	⑤d	1.91	92.0	②d表	1.74	76.2	③d表	1.68	77.6
	①e	2.85	140.2	③e	2.94	141.9	⑤e	2.94	142.8	②e表	2.00	92.1	③e表	1.97	93.9
	①f	4.00	191.0	③f	3.94	193.6	⑤f	3.94	193.6	②a裏	4.68	225.7	③a裏	4.71	224.1
	①g	5.06	240.2	③g	5.04	243.9	⑤g	5.06	243.9	②b裏	3.80	184.4	③b裏	3.78	182.2
	①I	1.14	52.8	③I	1.09	53.2	⑤I	1.14	53.2	②c裏	2.94	143.1	③c裏	2.89	140.3
	①j	1.17	53.2	③j	1.11	52.8	⑤j	1.11	52.8	②d裏	2.06	101.8	③d裏	2.03	98.3
	①k	1.20	53.9	③k	1.11	53.6	⑤k	1.14	53.6	②e裏	1.33	60.5	③e裏	1.21	56.4
	①l	1.11	51.6	③l	1.00	51.6	⑤l	1.08	51.6	——	——	——	——	——	——
	速度9.52cm/ns			速度9.66cm/ns			速度9.67cm/ns			速度9.46cm/ns			速度9.84cm/ns		
28	①a	0.53	17.5	③a	0.50	16.7	⑤a	0.47	16.6	②a表	0.82	34.6	③a表	0.82	33.6
	①b	0.79	42.0	③b	0.82	41.8	⑤b	0.79	40.9	②b表	1.06	46.5	③b表	1.09	48.1
	①c	1.35	67.6	③c	1.38	68.6	⑤c	1.30	67.2	②c表	1.29	62.8	③c表	1.47	62.1
	①d	1.74	90.5	③d	1.80	92.1	⑤d	1.85	92.0	②d表	1.71	76.2	③d表	1.68	77.6
	①e	2.77	140.2	③e	2.83	141.9	⑤e	2.80	142.8	②e表	1.91	92.1	③e表	1.91	93.9
	①f	3.95	191.0	③f	3.89	193.6	⑤f	3.86	193.6	②a裏	4.57	225.7	③a裏	4.51	224.1
	①g	4.98	240.2	③g	5.01	243.9	⑤g	5.01	243.9	②b裏	3.71	184.4	③b裏	3.62	182.2
	①I	1.06	52.8	③I	1.09	53.2	⑤I	1.06	53.2	②c裏	2.92	143.1	③c裏	2.86	140.3
	①j	1.06	53.2	③j	1.06	52.8	⑤j	1.06	52.8	②d裏	2.03	101.8	③d裏	1.97	98.3
	①k	1.15	53.9	③k	1.09	53.6	⑤k	1.12	53.6	②e裏	1.33	60.5	③e裏	1.21	56.4
	①l	1.06	51.6	③l	1.00	51.6	⑤l	1.09	51.6	——	——	——	——	——	——
	速度9.77cm/ns			速度9.82cm/ns			速度9.91cm/ns			速度10.2cm/ns			速度10.4cm/ns		
99	①a	0.53	17.5	③a	0.53	16.7	⑤a	0.50	16.6	②a表	0.82	34.6	③a表	0.79	33.6
	①b	0.79	42.0	③b	0.79	41.8	⑤b	0.82	40.9	②b表	1.00	46.5	③b表	1.00	48.1
	①c	1.23	67.6	③c	1.29	68.6	⑤c	1.23	67.2	②c表	1.26	62.8	③c表	1.32	62.1
	①d	1.68	90.5	③d	1.62	92.1	⑤d	1.68	92.0	②d表	1.56	76.2	③d表	1.48	77.6
	①e	2.71	140.2	③e	2.77	141.9	⑤e	2.74	142.8	②e表	1.85	92.1	③e表	1.85	93.9
	①f	3.83	191.0	③f	3.83	193.6	⑤f	3.80	193.6	②a裏	4.41	225.7	③a裏	4.41	224.1
	①g	4.95	240.2	③g	4.92	243.9	⑤g	4.95	243.9	②b裏	3.59	184.4	③b裏	3.53	182.2
	①I	0.97	52.8	③I	0.97	53.2	⑤I	0.97	53.2	②c裏	2.77	143.1	③c裏	2.71	140.3
	①j	0.97	53.2	③j	0.97	52.8	⑤j	0.94	52.8	②d裏	1.91	101.8	③d裏	1.82	98.3
	①k	1.00	53.9	③k	0.94	53.6	⑤k	0.97	53.6	②e裏	1.18	60.5	③e裏	1.06	56.4
	①l	0.94	51.6	③l	0.91	51.6	⑤l	0.97	51.6	——	——	——	——	——	——
	速度10.0cm/ns			速度10.1cm/ns			速度10.2cm/ns			速度10.5cm/ns			速度10.4cm/,ns		

（3） 版厚算出結果

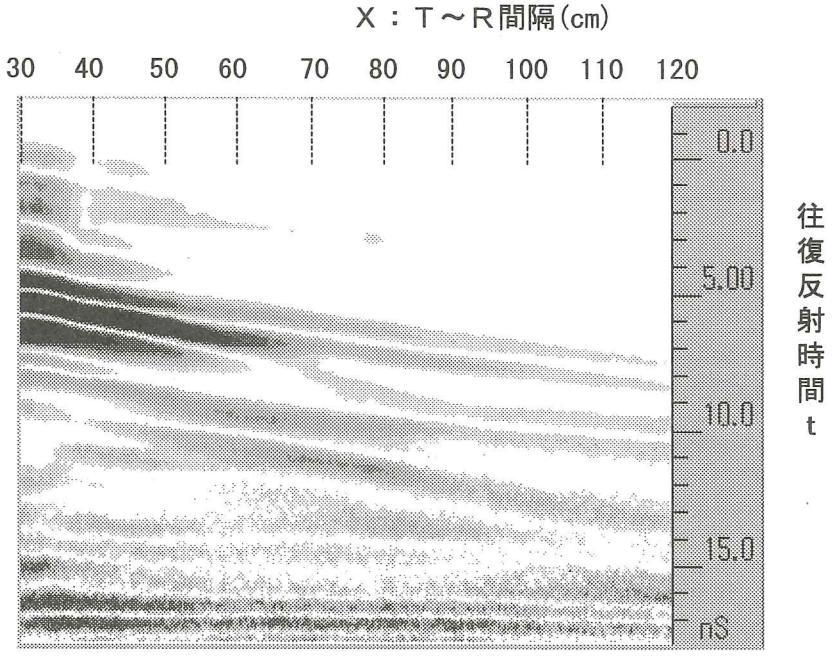
1）材齢１週の測定結果

表－3.5.2.4 に材齢１週間(7 日)経過後の版厚算出結果一覧を示す。

表－3.5.2.4　材齢１週の版厚算出結果一覧表

供試体名	測定地点	往復反射時間 (ns)	ﾜｲﾄﾞｱﾝｸﾞﾙ法		双曲線法		深度法		ｺｱﾘﾝｸﾞによる実測値 (mm)
			電磁波速度 (cm/ns)	版厚 (mm)	電磁波速度 (cm/ns)	版厚 (mm)	電磁波速度 (cm/ns)	版厚 (mm)	
A	①h	6.29	11.4	359	10.2	321	9.52	299	301.3
	③h	6.29		359		321	9.66	304	302.6
	⑤h	6.36		363		324	9.67	308	302.9
B	③a	5.62	算出不可	算出不可	10.0	281	9.65	271	282.5
	③b	4.98				249		240	253.4
	③c	4.52				226		218	227.4
	③d	3.85				193		186	200.2
	③e	3.34				167		161	175.1
C	②b	2.09	10.1	106	――	――	――	――	109.7
	②f	4.15		210					211.7
	⑥b	8.57	9.41	403					409.8
	⑥f	12.98		611					613.4

ここで、B 供試体のワイドアングル法について算出不可としたのは、**図－3.5.2.8** に示すように、コンクリート底面からの反射波に相当する双曲線状の反射波が表れなかったことによる。また、C 供試体では鉄筋が補強用に埋設されているだけであり、双曲線法あるいは深度法で利用できるようにはなっていないことから電磁波速度を求めていない。



図－3.5.2.8　B供試体のワイドアングル法測定記録(材齢７日)

2）材齢４週の測定結果

表－3. 5. 2. 5 に材齢 4 週間(28 日)経過後の版厚算出結果一覧を示す。ただし、B 供試体のワイドアングル測定では、材齢１週間と同様に双曲線状の反射波が表れなかったことから電磁波速度を算出することができなかった。

表－3. 5. 2. 5　材齢４週の版厚算出結果一覧表

供試体名	測定地点	往復反射時間 (ns)	ﾜｲﾄﾞｱﾝｸﾞﾙ法		双曲線法		深度法		ｺｱﾘﾝｸﾞによる実測値 (mm)
			電磁波速度 (cm/ns)	版厚 (mm)	電磁波速度 (cm/ns)	版厚 (mm)	電磁波速度 (cm/ns)	版厚 (mm)	
A	①h	6.26	10.6	332	11.6	363	9.77	306	301.3
	③h	6.25		331		363	9.82	307	302.6
	⑤h	6.26		332		363	9.91	310	302.9
B	③a	5.48	算出不可	算出不可	10.4	285	10.3	282	282.5
	③b	4.96				258		255	253.4
	③c	4.36				227		225	227.4
	③d	3.73				194		192	200.2
	③e	3.30				172		170	175.1
C	②b	2.03	10.4	106	——	——	——	——	109.7
	②f	4.07		212					211.7
	⑥b	8.37	9.70	406					409.8
	⑥f	12.76		619					613.4

3）材齢 13 週の測定結果

表－3. 5. 2. 6 に材齢 13 週間(99 日経過後)の版厚算出結果一覧を示す。

表－3. 5. 2. 6　材齢１３週の版厚算出結果一覧表

供試体名	測定地点	往復反射時間 (ns)	ﾜｲﾄﾞｱﾝｸﾞﾙ法		双曲線法		深度法		ｺｱﾘﾝｸﾞによる実測値 (mm)
			電磁波速度 (cm/ns)	版厚 (mm)	電磁波速度 (cm/ns)	版厚 (mm)	電磁波速度 (cm/ns)	版厚 (mm)	
A	①h	5.84	10.8	315	10.7	312	10.0	292	301.3
	③h	5.96		322		319	10.1	301	302.6
	⑤h	5.88		318		315	10.2	300	302.9
B	③a	5.15	11.5	296	10.5	270	10.5	270	282.5
	③b	4.62		266		243		243	253.4
	③c	4.19		241		220		220	227.4
	③d	3.63		209		191		191	200.2
	③e	3.10		178		163		163	175.1
C	②b	1.75	11.5	101	——	——	——	——	109.7
	②f	3.76		216					211.7
	⑥b	7.90	10.5	415					409.8
	⑥f	11.48		603					613.4

4）版厚測定結果のまとめ

表－3.5.2.7 に速度算出方法別に比較した版厚の測定結果一覧表を示す。

表－3.5.2.7　版厚に関する測定結果一覧

材齢	供試体名	測定地点	ｺｱﾘﾝｸﾞによる実測値 ① (mm)	ﾜｲﾄﾞｱﾝｸﾞﾙ法 版厚② (mm)	②／①	双曲線法 版厚③ (mm)	③／①	深度法 版厚④ (mm)	④／①
7日	A	①h	301.3	359	1.192	321	1.065	299	0.992
		③h	302.6	359	1.186	321	1.061	304	1.005
		⑤h	302.9	363	1.198	324	1.070	308	1.017
		平均	302.3	360	1.192	322	1.065	304	1.005
	B	③a	282.5	———	———	281	0.995	271	0.959
		③b	253.4			249	0.983	240	0.947
		③c	227.4			226	0.994	218	0.959
		③d	200.2			193	0.964	186	0.929
		③e	175.1			167	0.954	161	0.919
		平均	227.7			223	0.978	215	0.943
	C	②b	109.7	106	0.966	———	———	———	———
		②f	211.7	210	0.992				
		⑥b	409.8	403	0.983				
		⑥f	613.4	611	0.996				
		平均	336.2	333	0.984				
28日	A	①h	301.3	332	1.099	363	1.205	306	1.016
		③h	302.6	331	1.094	363	1.200	307	1.015
		⑤h	302.9	332	1.096	363	1.198	310	1.023
		平均	302.3	332	1.096	363	1.201	308	1.018
	B	③a	282.5	———	———	285	1.009	282	0.998
		③b	253.4			258	1.018	255	1.006
		③c	227.4			227	0.998	225	0.989
		③d	200.2			194	0.969	192	0.959
		③e	175.1			172	0.982	170	0.971
		平均	227.7			227	0.995	225	0.983
	C	②b	109.7	106	0.966	———	———	———	———
		②f	211.7	212	1.001				
		⑥b	409.8	406	0.991				
		⑥f	613.4	619	1.009				
		平均	336.2	336	0.992				
99日	A	①h	301.3	315	1.045	312	1.036	292	0.969
		③h	302.6	322	1.064	319	1.054	301	0.995
		⑤h	302.9	318	1.050	315	1.040	300	0.990
		平均	302.3	318	1.053	315	1.043	298	0.985
	B	③a	282.5	296	1.048	270	0.956	270	0.956
		③b	253.4	266	1.050	243	0.959	243	0.959
		③c	227.4	241	1.060	220	0.967	220	0.967
		③d	200.2	209	1.044	191	0.954	191	0.954
		③e	175.1	178	1.017	163	0.931	163	0.931
		平均	227.7	238	1.044	217	0.953	217	0.953
	C	②b	109.7	101	0.921	———	———	———	———
		②f	211.7	216	1.020				
		⑥b	409.8	415	1.013				
		⑥f	613.4	603	0.983				
		平均	336.2	334	0.984				

（4）鉄筋配置算出結果

3回目の記録について、双曲線法による電磁波速度を使用したA供試体の③測線沿い、B供試体の②測線沿いの鉄筋とa～e測線との交点における間隔、かぶりを**表－3.5.2.8**に示す。

表－3.5.2.8　鉄筋配置算出結果一覧

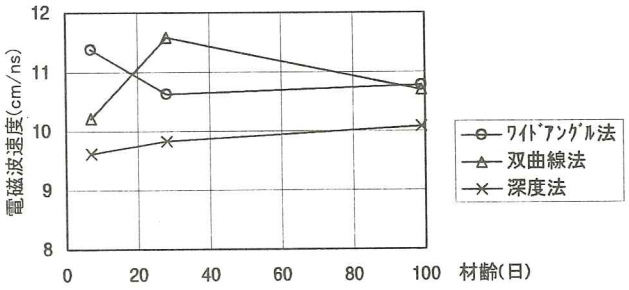
供試体 No.	鉄筋位置	地下レーダー測定結果			かぶりの実測結果 (mm) ②	①／②
		距離(cm)または位置	間隔 (cm)	かぶり (mm) ①		
A	a	32		28.6	17.5	1.63
	b	43	10	42.6	41.8	1.02
	c	53	10	66.3	68.6	0.966
	d	63	10	90.6	92.1	0.984
	e	81	18	146.1	141.9	1.03
	f	101	20	206.4	193.6	1.07
	g	122	21	266.8	243.9	1.09
	i	162	20	52.3	53.2	0.983
	j	181	19	52.3	52.8	0.991
	k	201	20	53.9	53.6	1.01
	l	221	20	50.7	51.6	0.983
B表	②	aとの交点		44.2	34.3	1.29
	②	bとの交点		53.9	46.5	1.16
	②	cとの交点		67.9	62.8	1.08
	②	dとの交点		84.1	76.2	1.10
	②	eとの交点		99.7	92.1	1.08
B裏	②	aとの交点		237.7	225.7	1.05
	②	bとの交点		193.5	184.4	1.05
	②	cとの交点		149.3	143.1	1.04
	②	dとの交点		102.9	101.8	1.01
	②	eとの交点		63.6	60.5	1.05

（5）測定結果のまとめ

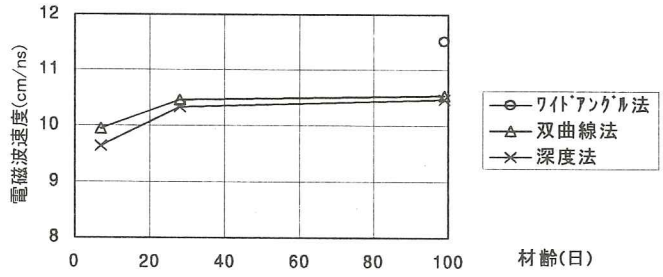
1）材齢に伴う電磁波速度、往復反射時間の変化

●電磁波速度の変化

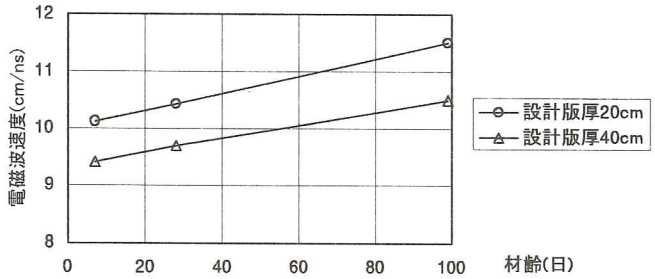
材齢変化に伴うA供試体、B供試体、C供試体の電磁波速度の変化を**図－3.5.2.9～図－3.5.2.11**に示す。ただし、C供試体はワイドアングル法のみであり、測定した版厚20cm、40cmで電磁波速度が異なっていたため分けて表示した。



図－3.5.2.9　A供試体の電磁波速度の変化



図－3.5.2.10　B供試体の電磁波速度の変化



図－3.5.2.11　C供試体のワイドアングル法による電磁波速度の変化

図示のように、A供試体の深度法、B供試体の双曲線法、深度法、C供試体のワイドアングル法では材齢とともに電磁波速度が増加している。これは、A供試体では上面から、B供試体では上面と底面から、C供試体では表面、裏面からの自然乾燥により含水量が減少したためである。すなわち、電磁波速度Vは近似的に式(3.5.2.1)のように比誘電率ε_rの関数であるが、コンクリートが5～14であるのに対して水は81であり、含水量が少なくなる程、コンクリート全体の比誘電率が小さくなり、電磁波速度が増加する。

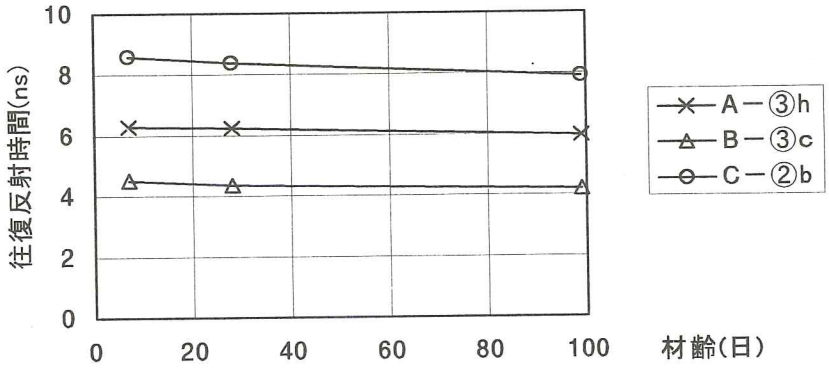
$$V = C / \varepsilon_r^{0.5} \qquad (3.5.2.1)$$

ただしCは光速(30cm/ns)である。

従って、その傾向から外れるA供試体のワイドアングル法の材齢7日目、双曲線法の材齢28日目は異常値であり、表－3.5.2.7で判るように、他の誤差が数%であるのに対して10%を超えている。

●往復反射時間の変化

代表例としてA供試体の③h地点、B供試体の③c地点、C供試体のb地点の材齢に伴う往復反射時間の変化を図－3.5.2.12に示す。このように往復反射時間は材齢とともに減少しており、乾燥に伴う電磁波速度の増加と整合している。



図—3.5.2.12　往復反射時間の経時変化

2）版厚測定結果

表—3.5.2.7をもとに、各速度算出方法の版厚誤差、特徴、注意点等について述べる。

① ワイドアングル法

A供試体では材齢7日の異常値(反射波が直線に近く、電磁波速度が極端に大きい)を含めると、材齢7日、28日、99日の平均誤差が各々19.2%、9.6%、5.3%と、材齢とともに減少していく傾向にある。B供試体では99日経過後の平均誤差が4.4%であった。C供試体では同じく7日、28日、99日経過後の平均誤差が各々1.6%、0.8%、1.6%であった。

これから、A供試体のような鉄筋を内在するコンクリートで高精度測定を行うには、材齢の経過を待つことが重要であり、4週経過以前では10%近い誤差になることがある。しかし、C供試体のように鉄筋を内在しないコンクリートでは材齢が1週間程度から誤差数%以内の測定が可能である。

鉄筋を内在するコンクリートで材齢とともに誤差が変化する要因としては、表面付近の含水率変化に伴い、電磁波の減衰量が変化することに加えて、指向角が変化し、電磁波の広がる範囲が変わることにより、コンクリート底面反射波に対する鉄筋反射波の重なりが変化するためであると考えられる。

② 双曲線法

A供試体では材齢7日、(28日、)99日の平均誤差が6.5%、(20.1%)、4.3%、B供試体では2.2%、0.5%、4.7%であった。これから全体としては、ワイドアングル法よりも高精度になっているが、A供試体の材齢28日のように異常値になることがある。

すなわち、ワイドアングル法は比較的広い範囲で表面から底面までの平均的な電磁波速度を求めるのに対して、双曲線法は浅部で、しかも局所的な反射波から電磁波速度を求めることから、その場所でのアンテナの接触状況、表面の凹凸、含水量のような局所パラメータの影響を受け易いことが原因であると考えられる。

従って、双曲線法ではできる限り複数の鉄筋反射波から電磁波速度を求めることが重要である。

③ 深度法

A供試体の材齢7日、28日、99日の平均誤差が0.5%、1.8%、1.5%、B供試体では5.7%、1.7%、

4.7%と、鉄筋の実測かぶりを使用しているため当然ではあるが、他の２法に比較して誤差が小さい。

3） 鉄筋のかぶり

かぶりが 6cm 未満の浅い鉄筋を除いて、A供試体の平均誤差は 3.1%、B 供試体の平均誤差は 5.9%で、実長では概ね 1cm 未満であった。

かぶりが浅い鉄筋の誤差が大きくなるのは、用いた双曲線法による電磁波速度が送信アンテナと受信アンテナの間隔を考慮した真の速度であるのに対して、往復反射時間が送信～受信への斜距離であることと、表面付近では乾燥により含水率が低く、その分電磁波速度が大きいことが原因していると考えられる。

3.5.3　含水率と電磁波速度，部材厚さ，かぶり厚さ

(1)電磁波速度分布

深度法による電磁波速度の分布を次のように求める。

図-3.5.3.1 のように各かぶり厚さを c_i、反射時間を t_iとする。各鉄筋間の電磁波速度 V_iは式(3.5.3.1)で求められる。

$$V\,i = 2 \times \left(C\,i - Ci1\right) / \left(ti - ti1\right) \quad (3.5.3.1)$$

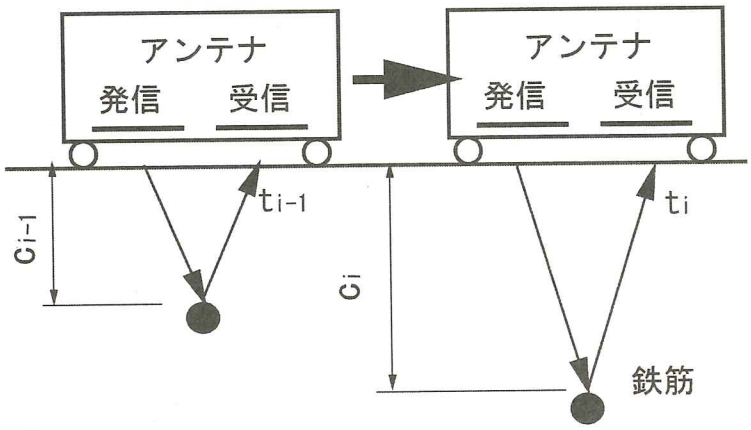


図-3.5.3.1　鉄筋のかぶり厚さと反射時間

電磁波速度 V は式(3.5.3.2)で表される。

$$V = C / \sqrt{\varepsilon} \quad (3.5.3.2)$$

ここに、C：電磁波の真空中での速度(10^{11}mm/s)、ε ：比誘電率である。

各鉄筋間の比誘電率の平方根$\sqrt{\ }\varepsilon_i$は、次式となる。

$$\sqrt{\varepsilon\,i} = C\,/\,Vi \quad (3.5.3.3)$$

比誘電率$\sqrt{\ }\varepsilon_i$および電磁波速度 V_iを求めると**図-3.5.3.2**～**3.5.3.5** のとおりである。供試体Aの結果は、表面は速く、内部深くに入るに従いしだいに遅くなり、ある距離からはほぼ一定になっている。$\sqrt{\ }\varepsilon_i$の表面近くの分布を式(3.5.3.4)で回帰した結果は**表-3.5.3.1** および **3.5.3.2** のとおりであった。

$$\sqrt{\varepsilon\,i} = K(ho + hi)^{1/2} + 1 \quad (3.5.3.4)$$

回帰曲線を**図-3.5.3.2** および **3.5.3.4** に示した。

供試体Bの結果は、間隔が10mm程度と小さすぎたため、バラツキが大きい。また、底面からの結果は、最も小さいかぶりでも50mm程度あり、表面近くの速度分布を求めることができない。

これらの結果より、電磁波速度の分布を求めるには、鉄筋間隔が20～30mm程度が適切と考えられる。

電磁波速度は含水率の影響を強く受けるので、次項では、供試体Aについて含水率と比誘電率の関係を求める。

表-3.5.3.1 $\sqrt{\varepsilon}$の回帰結果(レーダD)

	7日	28日	90日
K	0.202	0.149	0.124
ho	42.6	96.1	141.7
r	0.953	0.890	0.733
$\sqrt{\varepsilon}$s	3.31	3.33	3.18
$\sqrt{\varepsilon}$sまでの距離	88.6	147.2	168.5

表-3.5.3.2 $\sqrt{\varepsilon}$の回帰結果(レーダE)

測線	係数	材齢		
		7日	28日	99日
①	K	0.157	0.179	0.184
	ho	101.5	46.2	35.1
	r	0.567	0.686	0.956
	$\sqrt{\varepsilon}$s	3.20	3.13	3.22
	$\sqrt{\varepsilon}$sまでの距離	94.4	95.2	110.1
③	K	0.180	0.182	0.174
	ho	60.3	45.1	39.9
	r	0.974	0.778	0.700
	$\sqrt{\varepsilon}$s	3.19	3.16	3.21
	$\sqrt{\varepsilon}$sまでの距離	87.3	95.9	121.1
⑤	K	0.234	0.266	0.171
	ho	26.7	7.0	44.5
	r	0.945	0.997	0.977
	$\sqrt{\varepsilon}$s	3.32	3.30	3.27
	$\sqrt{\varepsilon}$sまでの距離	71.4	67.7	131.9

(2)含水率と電磁波速度分布

含水率は**表-3.3.1.2**および**図-3.3.1.8**のとおりであり、ここでは、*wi/wsi*（相対含水率と呼ぶ）を用いることとした。

相対含水率と$\sqrt{\varepsilon}$の関係は**図-3.5.3.6**および**図-3.5.3.7**のとおりである。両者は文献3.5.3.1)で仮定したとおり、ほぼ線形関係になっている。回帰すると次式が得られた。

レーダD　$\sqrt{\varepsilon}=1.72wi/wsi+1.54$　(3.5.3.5)

レーダE　$\sqrt{\varepsilon}=2.34wi/wsi+1.03$　(3.5.3.6)

切片は相対含水率が0の時の$\sqrt{\varepsilon}_0$を表しており、レーダDは1.54だが、レーダEはほぼ1であり、これはほぼ真空中の速度と同じになることを示している。両者の違いについては、次の部材厚さとかぶり厚さで検討する。相対含水率がほぼ飽和のときは、両者ともほぼ$\sqrt{\varepsilon}$s≒3.2であった。

文献3.5.3.1)では、$\sqrt{\varepsilon}_0$=1.85、$\sqrt{\varepsilon}$s=3.45であった。コンクリートの品質の違いなども考えられるが、今回はかぶり厚さを正確に求め、装置の分解能なども検討の上で求めたものであり、信頼性の高い結果が得

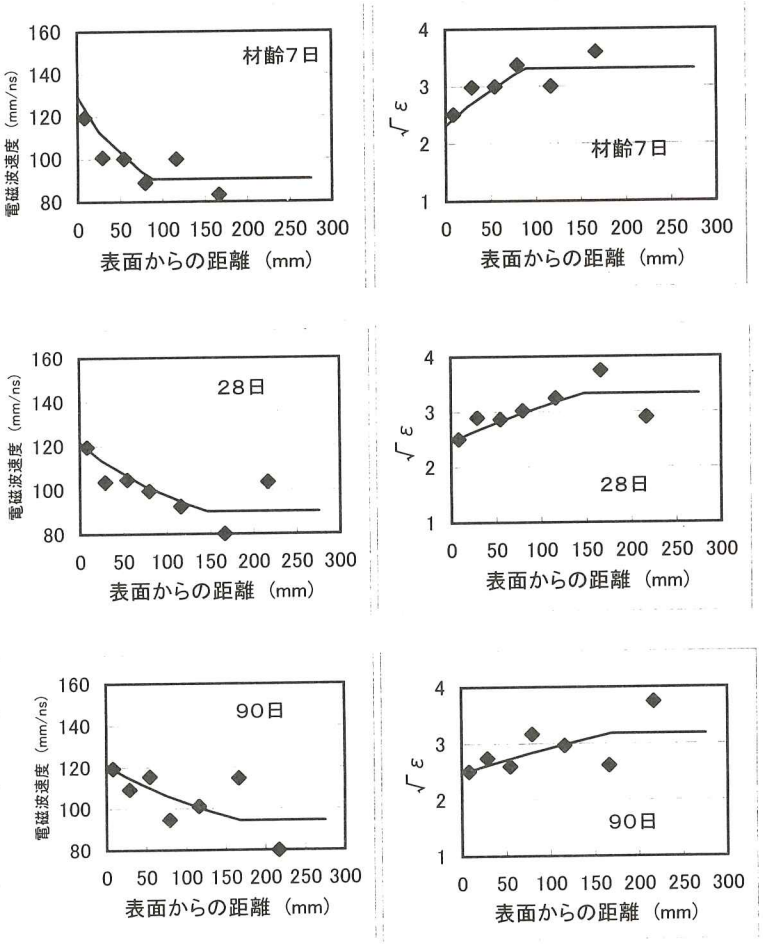


図-3.5.3.2 表面からの距離と電磁波速度,比誘電率の関係(供試体A)
レーダD

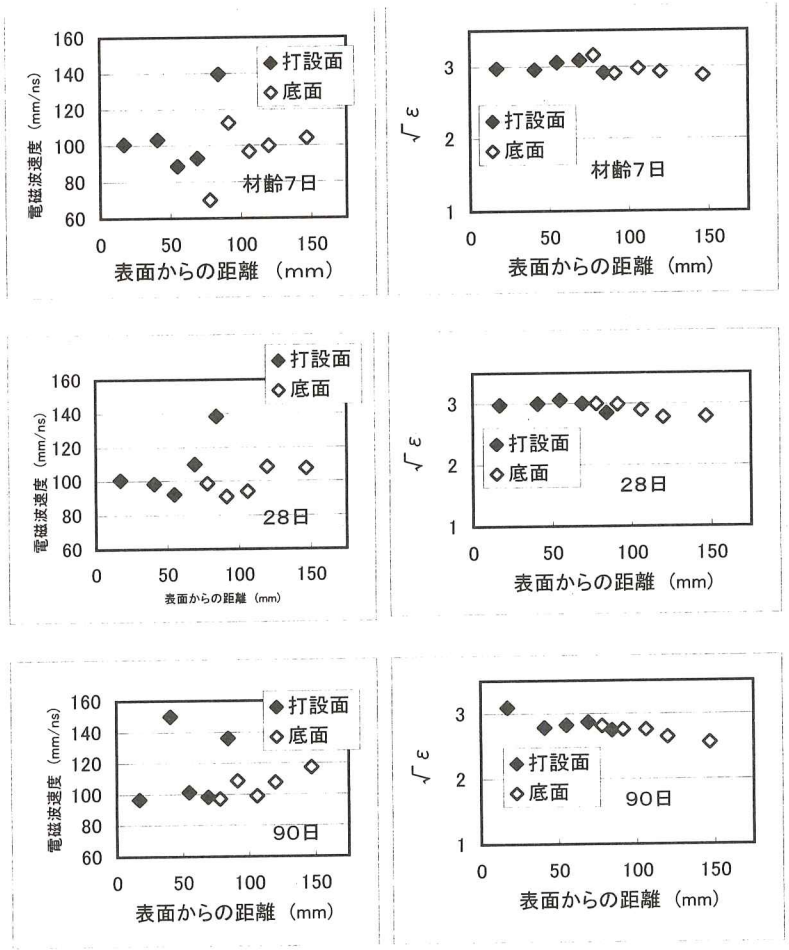
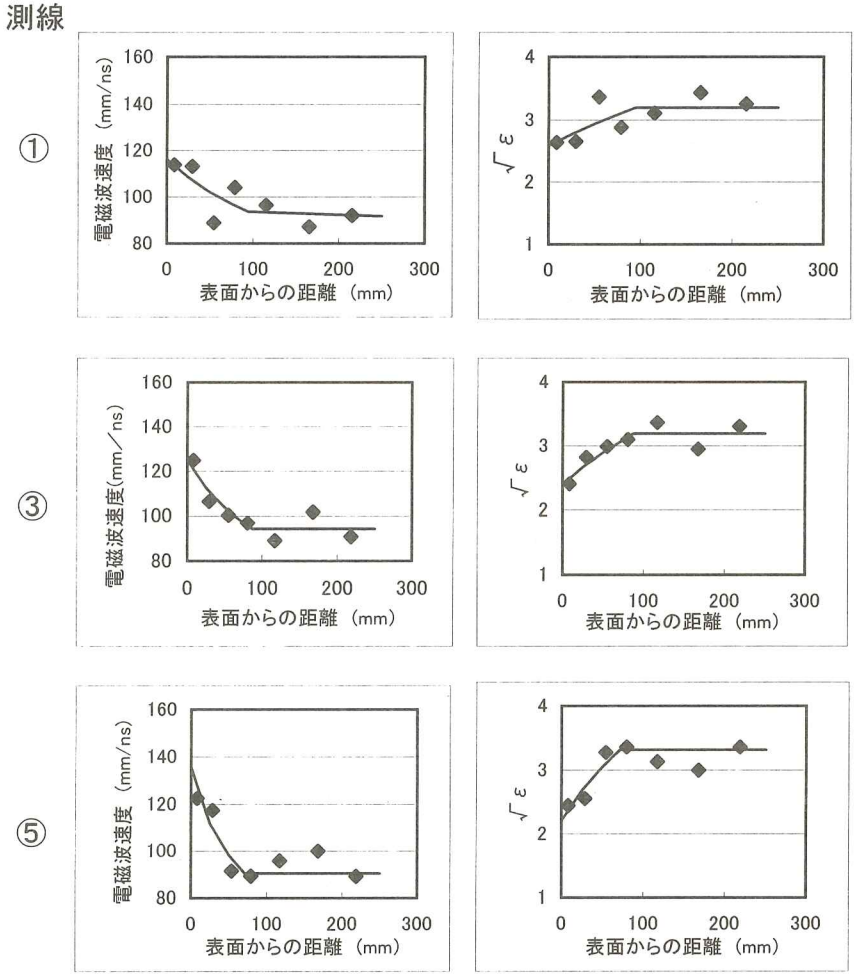
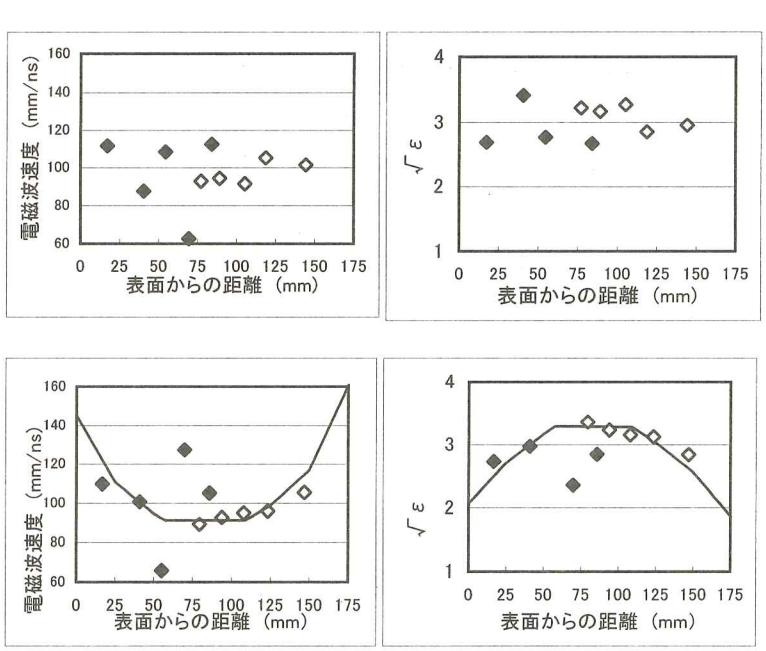


図-3.5.3.3 表面からの距離と電磁波速度,比誘電率の関係(供試体B)
レーダD



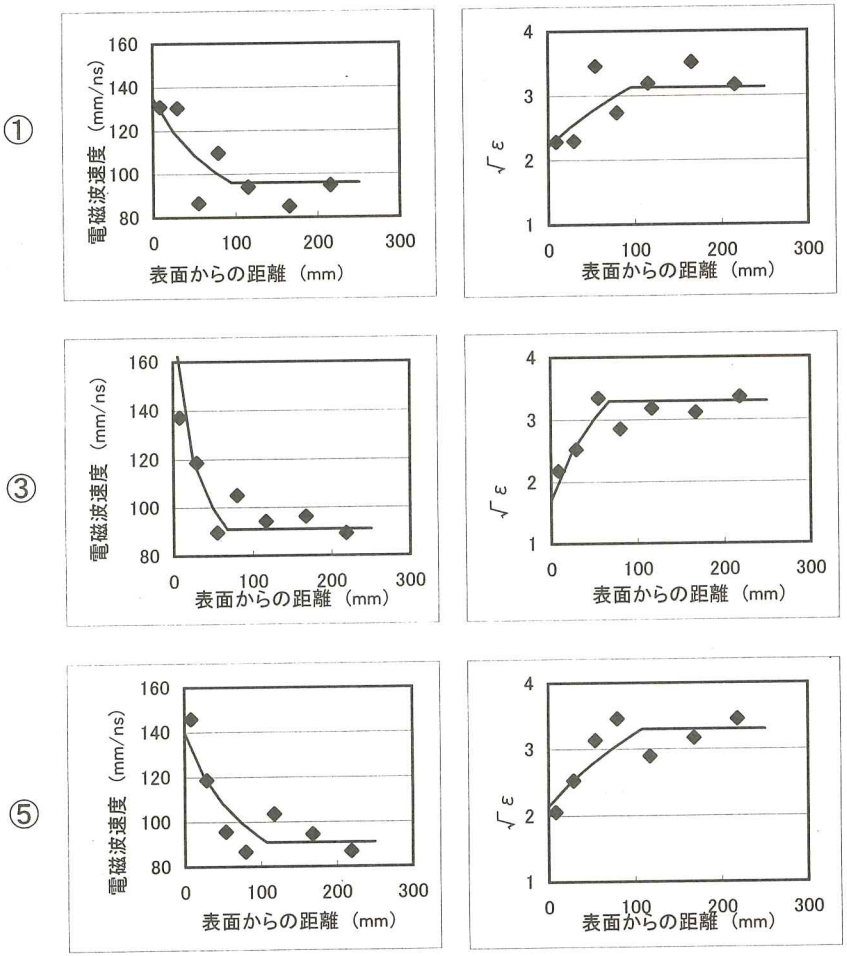
材齢7日

図-3.5.3.4 （その1） 表面からの距離と電磁波速度,比誘電率の関係(供試体A)
(レーダーE)



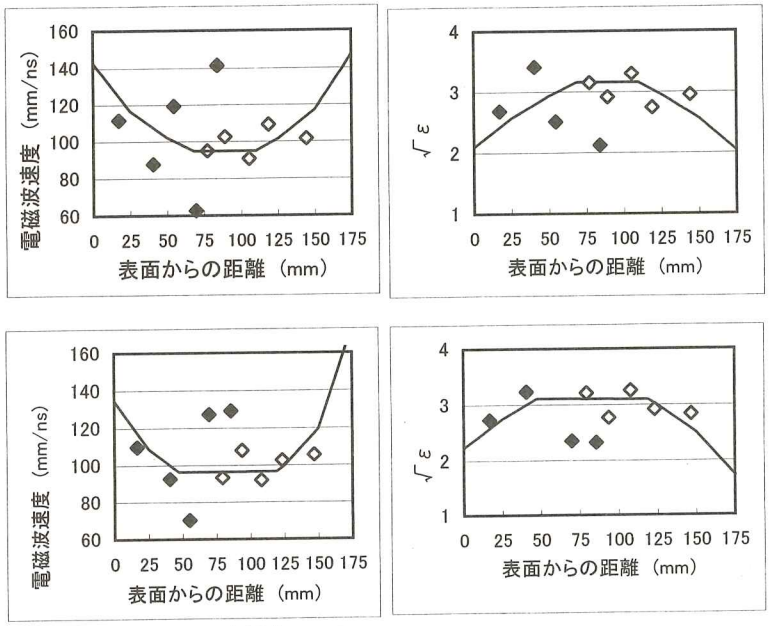
材齢7日

図-3.5.3.5 （その1） 表面からの距離と電磁波速度,比誘電率の関係(供試体B)
(レーダーE)



材齢28日

図-3.5.3.4 （その2） 表面からの距離と電磁波速度,比誘電率の関係(供試体A)
（レーダーE）



材齢28日

図-3.5.3.5 （その2） 表面からの距離と電磁波速度,比誘電率の関係(供試体B)
（レーダーE）

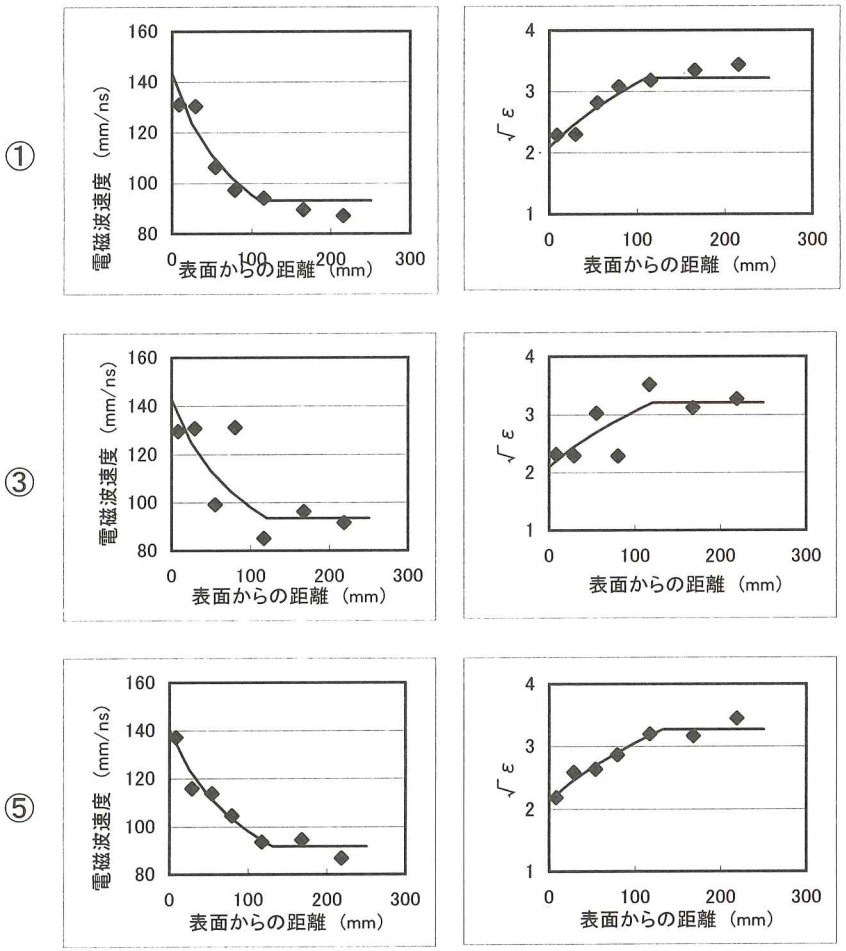


図-3.5.3.4 （その3） 表面からの距離と電磁波速度,比誘電率の関係(供試体A)
(レーダE)

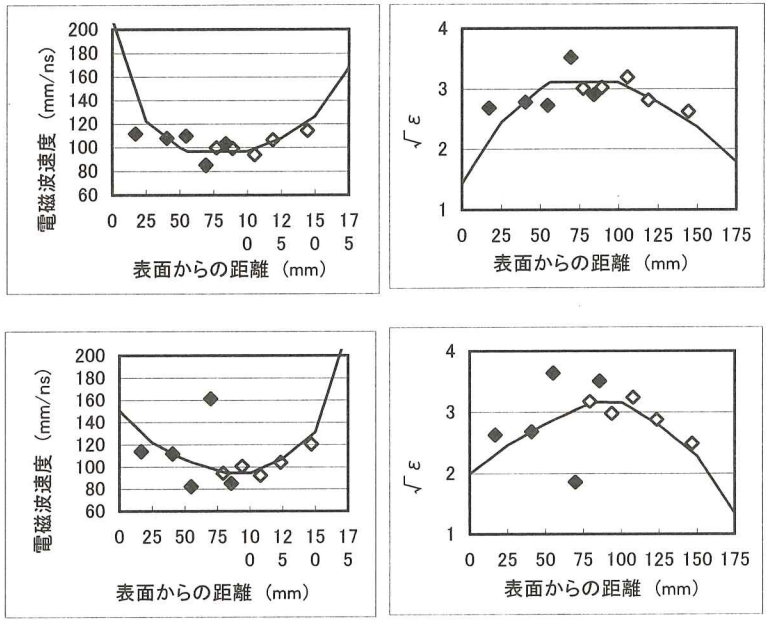
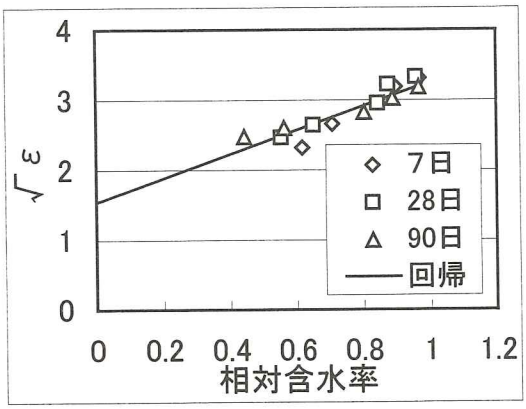


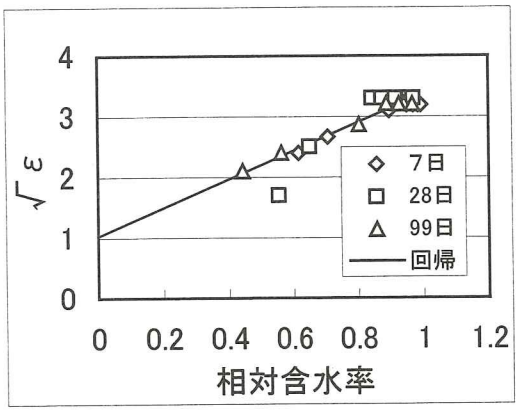
図-3.5.3.5 （その3） 表面からの距離と電磁波速度,比誘電率の関係(供試体B)
(レーダE)

られたものと考えられる。

この結果より、かぶり厚さと反射時間を正確に求めれば、コンクリート内部の含水率分布も求めることができるものと考えられる。



図－3.5.3.6　含水率と√εの関係（レーダD）



図－3.5.3.7　含水率と√εの関係（レーダE）

(3)部材厚さ

レーダEの電磁波速度分布と反射時間の関係から、供試体Aの厚さを求めた結果が表-3.5.3.3である。厚さは次の手順で求めた。

部材厚さhおよびかぶり厚さcを求める式は、超音波と同じく式(3.5.3.7)が基本式となる。

$$\frac{t}{2}=\int_o^h \frac{dh}{V(h)} \qquad (3.5.3.7)$$

①速度分布を有する範囲（区間1）内の厚さhは、式(3.5.3.9)によって求められる。このとき、式(3.5.3.7)の$V(h)$は式(3.5.3.2)から

$$V(h)=C/\sqrt{\varepsilon(h)}$$

$\sqrt{\varepsilon(h)}$は式(3.5.3.4)から

$$\sqrt{\varepsilon(h)}=K(ho+h)^{1/2}+1$$

なので、式（3.5.3.7）は、

$$\frac{t}{2}+\frac{1}{C}\int_o^h\left[K(ho+h)^{1/2}+1\right]dh \qquad (3.5.3.8)$$

となり、厚さ h と反射時間 t の関係は式（3.5.3.9）となる。

$$t=\frac{2}{C}\left\{\frac{2}{3}K\left[\left(ho+h\right)^{3/2}-ho^{3/2}\right]+h\right\}\cdots\cdots \qquad (3.5.3.9)$$

②速度一定区間（区間2）内の厚さ h は、まず区間1を往復する時間 t_1 を、式(3.5.3.9)から $h\rightarrow h_1$ とおいて求める。区間2内の往復時間 t_2 は式(3.5.3.10)によって求められる。

$$t_2=t-t_1 \qquad (3.5.3.10)$$

区間2内の厚さ h_2 は

$$h_2=V_2\cdot t_2/2 \qquad (3.5.3.11)$$

ただし、 $V_2=C/\sqrt{\varepsilon\ s}$
なので、厚さは

$$h=h_1+h_2 \qquad (3.5.3.12)$$

表－3.5.3.3　供試体Ａの厚さ解析結果（レーダＥ）

材齢	測定位置	実測h ③	反射時間t	係数 K	係数 ho	係数 h_I	係数 $\sqrt{\varepsilon}_{II}$	t_I	t_{II} $t-t_I$	h_{II}	解析h ①分布	①/③	解析h ②$\sqrt{\varepsilon}_{II}$	②/③
7日	①	301.3	6.29	0.157	101.5	94.4	3.20	1.83	4.46	209.0	303.4	1.007	294.8	0.979
	③	302.6	6.29	0.180	60.3	87.3	3.19	1.64	4.65	218.5	305.8	1.011	295.8	0.977
	⑤	302.9	6.36	0.234	26.7	71.4	3.32	1.34	5.02	226.6	298.0	0.984	287.3	0.949
28日	①	301.3	6.26	0.179	46.2	95.2	3.13	1.72	4.54	217.4	312.6	1.038	300.0	0.996
	③	302.6	6.25	0.182	45.1	95.9	3.16	1.75	4.50	213.7	309.6	1.023	296.7	0.980
	⑤	302.9	6.26	0.266	7.0	67.7	3.30	1.19	5.07	230.4	298.0	0.984	284.5	0.939
99日	①	301.3	5.84	0.184	35.1	110.1	3.22	2.00	3.84	179.0	289.2	0.960	272.0	0.903
	③	302.6	5.96	0.174	39.9	121.1	3.21	2.19	3.77	176.0	297.1	0.982	278.5	0.920
	⑤	302.9	5.88	0.171	44.5	131.9	3.27	2.43	3.45	158.1	290.0	0.957	269.7	0.890
平均												0.994		0.948

表-3.5.3.3 の解析結果より、速度分布を考慮した①の結果は、実測値に対して平均で 0.99、±4%の範囲にはいっており、精度よく推定できている。比誘電率が一定の場合で求めてみると、②のように実測値よりも平均で 0.95、−0〜−11%の範囲となっており、小さく推定されている。これは、表面付近の速度分布が適切に考慮されていないためである。

なお、発信と受信の距離は、次のように補正してある。アンテナを水に浮かべ、水深を変化させたときの反射時間を測定した。アンテナの中心間隔は 82.5mm であるが、試験の結果 58.8mm となり、60mm で計算している。

(4)かぶり厚さ

かぶり厚さ c は、式(3.5.3.10)の $h_I \rightarrow c$、t_I に鉄筋からの反射時間 t とすることにより求めることができる。レーダDおよびレーダEの推定結果は**表－3.5.3.4～3.5.3.6**のようになった。**表－3.5.3.4**（レーダD）および**表－3.5.3.5**（レーダE）は速度分布を考慮した場合である。**表－3.5.3.6**はレーダEについて、**表－3.5.2.3**の速度一定値を用いた場合である。

表－3.5.3.4 および 3.5.3.5 の結果は実測値に対してほぼ±５%以内に入っているが、**表－3.5.3.6** の結果は実測値よりも 10～20%も小さくなっており、部材厚さ（**表－3.5.3.3**）の場合よりもさらに小さくなっている。これは、表面付近の速度分布の影響が大きく現れたためであり、かぶり厚さのように表面近傍の厚さを精度良く求めるには速度分布を求める必要がある。

表－3.5.3.4　かぶり厚さ（レーダD）

測線	かぶり	7日		28日		99日	
	実測値	解析値	解／実	解析値	解／実	解析値	解／実
③	53.0	58	1.09	55	1.04	53	1.00
	52.6	55	1.05	51	0.97	51	0.97
	53.1	55	1.04	52	0.98	51	0.96
	50.9	50	0.98	51	1.00	48	0.94

表－3.5.4.5　かぶり厚さ（レーダE，速度分布を考慮した場合）

測線	かぶり	7日		28日		99日	
	実測値	解析値	解／実	解析値	解／実	解析値	解／実
①	52.8	54	1.02	55	1.04	52	0.98
	53.2	55	1.03	55	1.03	52	0.98
	53.9	56	1.04	59	1.09	54	1.00
	51.6	52	1.01	55	1.07	50	0.97
③	53.0	53	1.00	56	1.06	52	0.98
	52.6	54	1.03	54	1.03	52	0.99
	53.1	54	1.02	56	1.05	51	0.96
	50.9	49	0.96	51	1.00	49	0.96
⑤	53.2	55	1.03	55	1.03	52	0.98
	52.8	54	1.02	55	1.04	51	0.97
	53.6	55	1.03	58	1.08	53	0.99
	51.6	52	1.01	56	1.09	52	1.01
平均			1.02		1.05		0.98

表－3.5.4.6　かぶり厚さ（レーダE，速度一定とした場合）

測線	かぶり	7日		28日		99日	
	実測値	解析値	解／実	解析値	解／実	解析値	解／実
①	52.8	47	0.89	45	0.85	42	0.80
	53.2	49	0.91	45	0.85	42	0.79
	53.9	50	0.93	49	0.91	44	0.81
	51.6	46	0.89	45	0.87	41	0.79
③	53.0	46	0.86	47	0.88	43	0.80
	52.6	47	0.89	45	0.86	43	0.81
	53.1	47	0.88	47	0.88	41	0.78
	50.9	42	0.82	42	0.83	40	0.78
⑤	53.2	48	0.90	46	0.86	43	0.81
	52.8	47	0.88	46	0.86	42	0.79
	53.6	48	0.90	48	0.90	43	0.81
	51.6	45	0.87	47	0.90	43	0.83
平均			0.89		0.87		0.80

【参考文献】

3.5.3.1)森濱和正、笠井芳夫、湯浅昇：コンクリート内部の含水状態と比誘電率の関係，日本非破壊検査協会平成11年春季大会講演概要集，pp.91-94,1999.5

３．６　衝撃弾性波法の測定結果

3.6.1 弾性波 G（Knocker）

3.6.1.1 厚さ測定実験結果

弾性波法 G（Knocker）により３．１に示す供試体について、反射波の振動数 f_0 を求め、厚さ D を

$$D = \frac{V_P}{2f_0} \qquad \text{（式 3.6.1.1）}$$

（V_P：弾性波速度）により測定した。

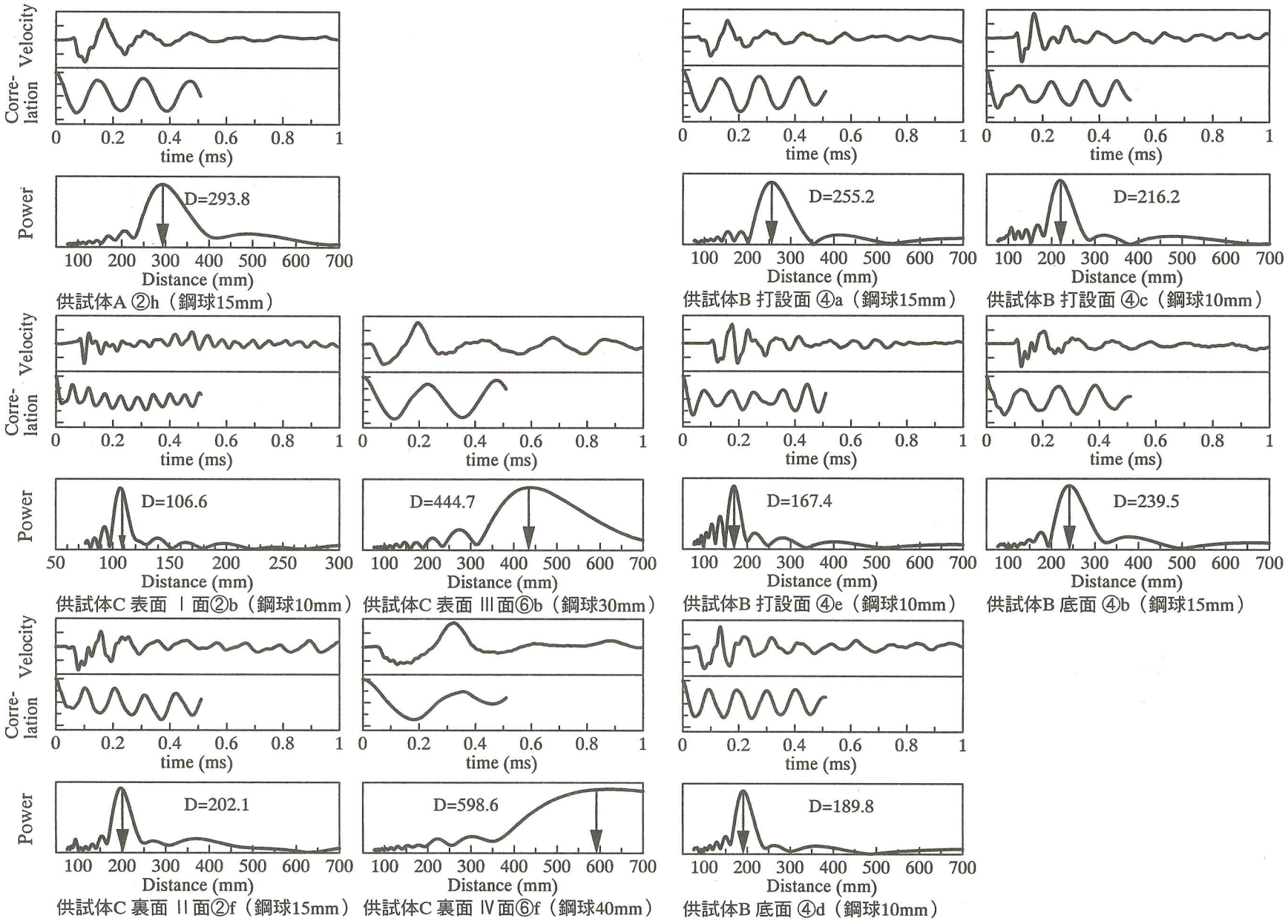
測定日は材齢 7 日、材齢 28 日、材齢 90 日の計 3 回で、V_P については材齢 7 日では 3800m/s、材齢 28 日および 90 日では 4000m/s と仮定値を用いた。

測定結果一覧表を表－3.6.1.1 に、詳細解析図を図－3.6.1.1～図－3.6.1.3 に示す。

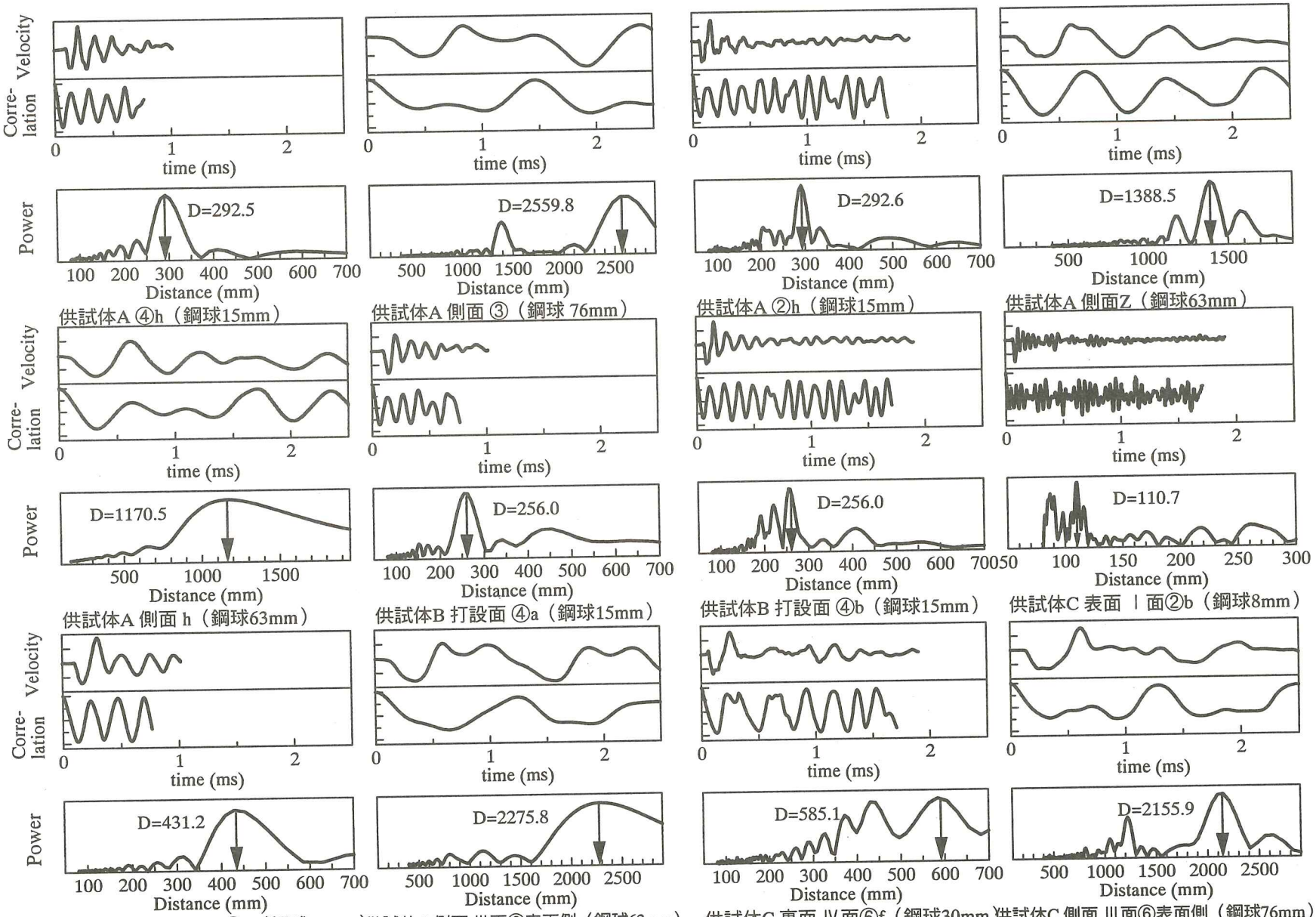
表－3.6.1.1 厚さ測定結果一覧

供試体	測定位置		①実寸 (mm)	材齢7日測定結果			材齢28日 測定結果			材齢90日 測定結果		
				f_0(Hz)	② D (mm)	②/①	f_0(Hz)	② D (mm)	②/①	f_0(Hz)	② D (mm)	②/①
A		②h	302.0	※ 6467	293.8	0.973	7079	282.5	0.936	※ 6836	292.6	0.969
		③h	302.6	6837	277.9	0.918	—	—	—	—	—	—
		④h	302.7	—	—	—	※ 6837	292.5	0.966	6958	287.4	0.950
	側面	③	2500.0	—	—	—	※ 781	2559.8	1.024	781	2559.8	1.024
		⑥	2500.0	—	—	—	757	2642.0	1.057	757	2642.7	1.057
		Z	1200.0	—	—	—	—	—	—	※ 1440	1388.5	1.157
		h	1200.0	—	—	—	※ 1709	1170.5	0.975	1782	1122.2	0.935
B	打設面	④a	282.6	※ 7445	255.2	0.903	※ 7813	256.0	0.906	7202	277.7	0.983
		④b	252.2	7933	239.5	0.950	8058	248.2	0.984	※ 7813	256.0	1.015
		④c	225.0	※ 8788	216.2	0.961	9035	221.4	0.984	8911	224.4	0.998
		④d	199.4	9886	192.2	0.964	10254	195.1	0.978	10010	199.8	1.002
		④e	175.9	※ 11350	167.4	0.952	11965	167.2	0.950	11963	167.2	0.950
	底面	④a	282.6	7202	263.8	0.933	7079	282.5	1.000	7202	277.7	0.983
		④b	252.2	※ 7933	239.5	0.950	7813	256.0	1.015	7813	256.0	1.015
		④c	225.0	8543	222.4	0.988	9035	221.4	0.984	9033	221.4	0.984
		④d	199.4	※ 10011	189.8	0.952	10254	195.1	0.978	10010	199.8	1.002
		④e	175.9	11229	169.2	0.962	11965	167.2	0.950	11597	172.5	0.980
C	表面	Ⅰ面①a	106.1	—	—	—	20019	99.9	0.942	—	—	—
		Ⅰ面②b	109.7	※ 17824	106.6	0.972	—	—	—	※ 18066	110.7	1.009
		Ⅰ面③a	108.3	—	—	—	18061	110.7	1.023	—	—	—
		Ⅰ面④a	109.3	—	—	—	19287	103.7	0.949	—	—	—
		Ⅱ面①g	208.1	—	—	—	8543	234.1	1.125	—	—	—
		Ⅱ面②f	211.7	9401	202.1	0.955	—	—	—	9766	204.8	0.967
		Ⅱ面③g	213.4	—	—	—	9764	204.8	0.960	—	—	—
		Ⅱ面④g	215.5	—	—	—	10011	199.8	0.927	—	—	—
		Ⅲ面⑤a	407.8	—	—	—	4394	455.2	1.116	—	—	—
		Ⅲ面⑥b	409.8	※ 4273	444.7	1.085	—	—	—	5127	390.1	0.952
		Ⅲ面⑦a	407.0	—	—	—	※ 4639	431.2	1.059	—	—	—
		Ⅲ面⑧a	404.2	—	—	—	4639	431.2	1.067	—	—	—
		Ⅳ面⑤g	613.7	—	—	—	3662	546.1	0.890	—	—	—
		Ⅳ面⑥f	613.4	3174	598.6	0.976	—	—	—	3784	528.5	0.862
		Ⅳ面⑦g	613.2	—	—	—	3662	546.1	0.891	—	—	—
		Ⅳ面⑧g	609.7	—	—	—	3418	585.2	0.960	—	—	—
	裏面	Ⅰ面②b	109.7	17707	107.3	0.978	—	—	—	17944	111.5	1.016
		Ⅱ面②f	211.7	※ 9401	202.1	0.955	—	—	—	9766	204.8	0.967
		Ⅲ面⑥b	409.8	4273	444.7	1.085	—	—	—	5859	341.3	0.833
		Ⅳ面⑥f	613.4	※ 3174	598.6	0.976	—	—	—	※ 3418	585.1	0.954
	側面	Ⅲ面⑤	2200.0	—	—	—	806	2482.0	1.128	—	—	—
		Ⅲ面⑥表面側	2200.0	—	—	—	※ 879	2275.8	1.034	※ 928	2155.9	0.980
		Ⅲ面⑥裏面側	1200.0	—	—	—	—	—	—	1660	1204.7	1.004

※については、詳細解析図を以下に示す。



図－3.6.1.1　厚さ測定実験詳細解析図（材齢７日）



図－3.6.1.2　厚さ測定実験詳細解析図（材齢 28 日）

図－3.6.1.3　厚さ測定実験詳細解析図（材齢 28 日）

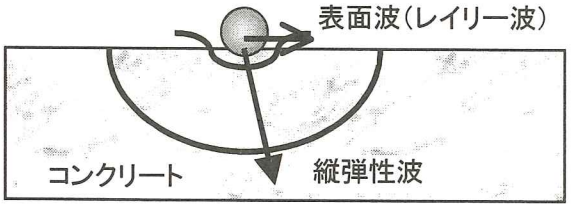
3.6.1.2 弾性波速度の測定実験

（1）実験目的

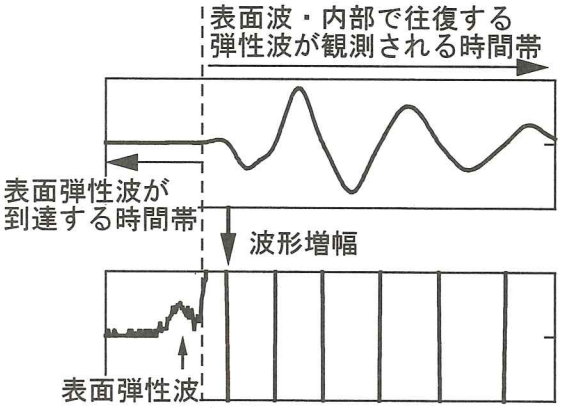
本測定方法では、厚さ測定に必要な弾性波速度をコンクリート表面から測定することができずに、前項では仮定値を用いて厚さを測定していた。

より正確に厚さを測定するには、コンクリート品質によって変化する弾性波速度を正確に測定する必要がある。そこで、弾性波速度測定方法を確立するために以下の実験を行なった。

（2）理論的背景



図－3.6.1.4　コンクリートに発生する振動



図－3.6.1.5　測定波形の増幅による
表面弾性波の観測

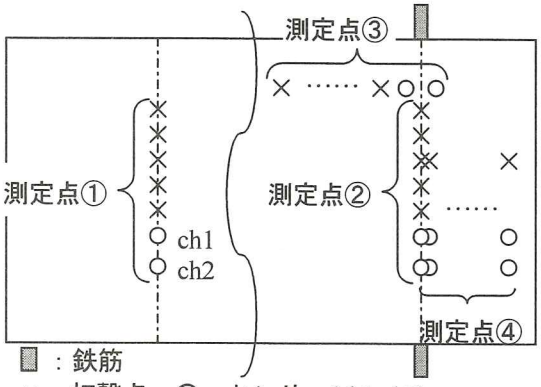
鋼球打撃により、コンクリートに発生する波動を図－3.6.1.4 に示す。一般的に縦弾性波の伝搬速度は表面波の約2倍である。このため、コンクリート内部に存在する鉄筋の影響を受けないとすれば、コンクリート表面に設置したセンサーが最初に検知する振動はコンクリート表面を伝搬した縦弾性波の成分（表面弾性波）そのものである。そこで、2 点のセンサーをコンクリート表面に設置して表面弾性波の到達時間差を求めれば、センサー間距離から表面弾性波速度が決定される。なお、表面弾性波の振幅は表面波より微弱であるため、この測定では測定波形を増幅する必要がある（図－3.6.1.5）。

しかし、鉄筋コンクリートは鉄とコンクリートとの複合構造と考えられ、鉄筋と測定点の位置関係によっては、センサーに最初に到達する波動は表面弾性波ではなく、鉄筋を伝搬した弾性波となる可能性がある。この場合、コンクリートの弾性波速度は正確に決定できないことになる。

（3）内部鉄筋の影響調査実験

1）実験方法

材齢９０日以上経過した供試体Aを用いて内部鉄筋が弾性波速度に与える影響について試験を行った。この実験での測定点を図－3.6.1.6 に示す。測定点①～③では2点のセンサー（ch1、ch2）を 200mm 間隔で設置し、打撃点を ch1 から 100～500mm の範囲で移動させた。測定点①は鉄筋の無い位置、②はφ51mm の鉄筋上で、かぶり



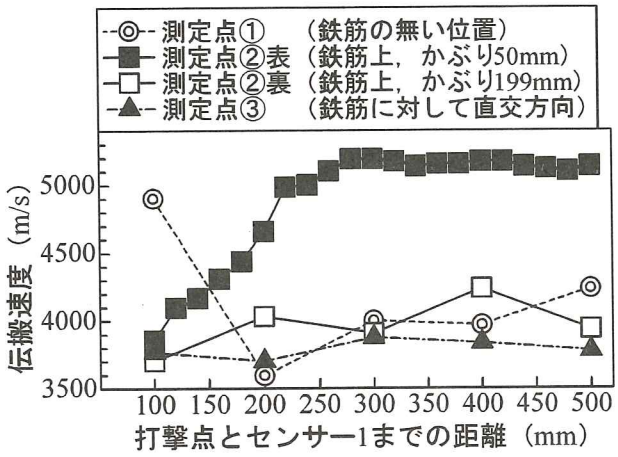
図－3.6.1.6 内部鉄筋の影響調査実験状況

かぶり 50mm となる表面および、かぶり 199mm となる裏面、③は鉄筋に対して直交方向の位置とし、鉄筋の中心位置から左右 100mm に ch1、ch2 を設置している。

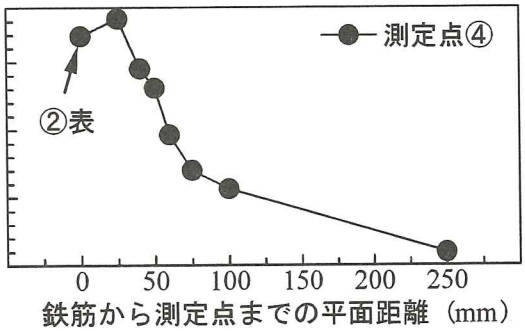
また、測定点④では、センサー間隔を 200mm、打撃点を ch1 より 300mm と固定し、この測定点を鉄筋上から 25～250mm まで平行移動させた。

全測定とも打撃体は直径 10mm の鋼球で、加速度波形のサンプリング速度は 0.4 μ 秒である。

2）内部鉄筋の影響調査実験結果



図－3.6.1.7 伝搬速度と打撃点位置の関係

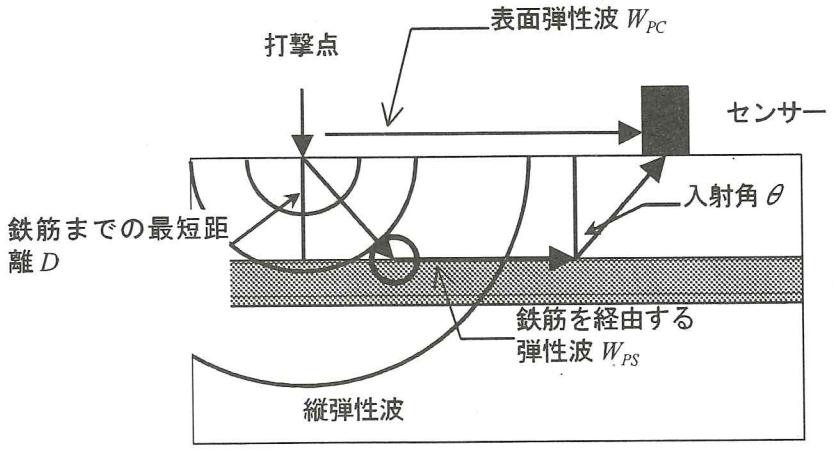


図－3.6.1.8 伝搬速度と鉄筋までの平面距離の関係

図－3.6.1.7 に測定点①、②表裏、③で測定した伝搬速度と打撃点位置の関係を、図－3.6.1.8 に測定点④で測定した伝搬速度と鉄筋までの平面距離の関係を示す（②表打撃点 300mm を距離 0 とする。）。

図－3.6.1.7 より、測定点①では、距離 100mm で弾性波速度は、4902m/s となったが、他では約 4000m/s で一定となった。測定点②表は、距離 100mm～280mm では距離と比例して伝搬速度が速くなるが、300mm 以降では約 5100m/s 一定となった。測定点②裏と③では、誤差はあるが全打撃点において測定点①とほぼ等しい結果となった。

図－3.6.1.8 より、測定点④では平面距離 0、25mm では約 5100m/s であるが、距離が 40～60mm と離れると 4950～4464m/s と徐々に遅くなり、距離 75mm 以降では約 4000m/s となった。



図－3.6.1.9 弾性波の伝搬モデル

弾性波の伝搬速度は、一般的なコンクリートでは約 4000m/s、鉄筋では約 5200m/s であり、伝搬速度が 5000m/s 以上となった条件は、1)測定点②表と裏の結果比較より、鉄筋かぶりが浅い場合、2)測定点④の結果より、測定点と鉄筋距離の平面距離が近い場合、3)測定点②の結果より、打撃点が遠方である場合、以上の 1)～3)の条件を同時に満たす場合である。

ここで弾性波の伝搬経路を考えると（**図－3.6.1.9**）、球面状に伝搬する縦弾性波は表面を伝搬する経路（表面弾性波）W_{PC} とコンクリート内部に伝搬する経路を持ち、後者には内部に鉄筋が存在する場合、鉄筋を経由しセンサーに到達する弾性波 W_{PS} の経路がある。打撃点からセンサーまでの距離を L_{ch}、W_{PC} の伝搬速度を V_{PC}、W_{PS} の鉄筋内部での伝搬速度を V_{PS}、打撃点から鉄筋までの最短距離を D とすると、W_{PC} の最短伝搬時間 T_{PC} は

$$T_{PC} = \frac{L_{ch}}{V_{PC}} \qquad \text{（式 3.6.1.2）}$$

W_{PS} では、コンクリートと鉄筋を伝搬するので、

$$T_{PS} = \frac{2D}{V_{PC}\cos\theta} + \frac{L_{ch} - 2D\tan\theta}{V_{PS}} \qquad \text{（式 3.6.1.3）}$$

となる（ここで、$\theta = \sin^{-1}(V_{PC}/V_{PS})$）。

（式 3.6.1.2）、（式 3.6.1.3）より $T_{PS} < T_{PC}$、すなわち W_{PS} が先にセンサーに到達する条件は、

$$L_{ch} > \frac{2D\sqrt{V_{PS}^{\,2} - V_{PC}^{\,2}}}{V_{PS} - V_{PC}} \qquad \text{（式 3.6.1.4）}$$

である。

センサー1、センサー2 とも（式 3.6.1.4）を満たす場合、両センサーへは鉄筋を経由した W_{PS} が観測される。到達時間は（式 3.6.1.3）となるので、到達時間差 ΔT_P は

$$\Delta T_P = \frac{L_{ch2} - L_{ch1}}{V_{PS}} = \frac{\Delta L_{ch}}{V_{PS}} \qquad \text{（式 3.6.1.5）}$$

（L_{ch1}：打撃点とセンサー1 までの距離、L_{ch2}：打撃点とセンサー2 までの距離、$\Delta L_{ch} = L_{ch1} - L_{ch2}$）

となり、鉄筋内部での伝搬速度 V_{PS} が測定される。測定結果と比較すると、前述の通り、条件 1)鉄筋かぶりが浅い場合、2)測定点と鉄筋距離の平面距離が近い場合、3)打撃点が遠方である場合、を同時に満たすと伝搬速度が 5000m/s 以上となった。条件 1)、2)では（式 3.6.1.4）の D が小さくなるので（式 3.6.1.4）の（右辺）が小さくなり、条件 3)では（式 3.6.1.4）の（左辺）が大きくなるので、センサー1、センサー2 とも（式 3.6.1.4）を満たし、両センサーへは鉄筋を経由した W_{PS} が観測され鉄筋内部での伝搬速度 V_{PS} が測定された。

また、鉄筋に対して直交方向となる測定点③では 4000m/s 以下で一定であったことからも、鉄筋によりコンクリートの強度が増加したのではなく、鉄筋を経由した W_{PS} が観測されたことが示される。

両センサーとも（式 3.6.1.4）を満たさない場合は、両センサーへは表面弾性波 W_{PC} が観測される。到達時間は（式 3.6.1.2）となるので、到達時間差 ΔT_P は

$$\Delta T_P = \frac{L_{ch2} - L_{ch1}}{V_{PC}} = \frac{\Delta L_{ch}}{V_{PC}} \qquad (式\ 3.6.1.6)$$

となり、表面弾性波速度 V_{PC} が測定される。測定点①、②裏、③、④での平面距離の遠方では、両センサーとも（式 3.6.1.4）を満たさないので、表面弾性波速度 V_{PC} が測定された。

センサー1 より遠方にあるセンサー2 のみが（式 3.6.1.4）を満たし、センサー1 には表面弾性波 W_{PC}、センサー2 には鉄筋を経由した W_{PS} が観測される場合も考えられる。この時、センサー1 への到達時間 T_{P1} は（式 3.6.1.2）、センサー2 への到達時間 T_{P2} は（式 3.6.1.3）となるので、両センサーでの到達時間差 ΔT_P は $\theta = sin^{-1}\left(\frac{V_{PC}}{V_{PS}}\right)$ を用いて整理すると、

$$\Delta T_P = \frac{2D\sqrt{{V_{PS}}^2 - {V_{PC}}^2} + V_{PC} \cdot \Delta L_{ch}}{V_{PC} \cdot V_{PS}} - \frac{V_{PS} - V_{PC}}{V_{PC} \cdot V_{PS}} \cdot L_{ch1} \qquad (式\ 3.6.1.7)$$

となる。即ち、センサー2 だけが（式 3.6.1.4）を満たす場合においては、両センサーでの到達時間差は打撃点とセンサー1 までの距離によって変化し、距離が遠くなると比例して時間差は短く、速度は速くなる。測定点②表の距離 100mm～280mm での測定結果はこれと一致した。

また、センサー2 だけが（式 3.6.1.4）を満たす場合において、測定点④のように測定点から鉄筋までの距離（式 3.6.1.7 での D）が変化する場合を考えると、（式 3.6.1.7）より、両センサーでの到達時間差は測定点から鉄筋までの距離によって変化し、距離が遠くなると比例して時間差は長く、速度は遅くなる。測定点④での平面距離が 40～60mm での測定結果はこれと一致した。

（2）正確な弾性波速度の測定方法

（1）の結果から弾性波速度は、鉄筋上かぶり 50mm となる位置で測定したとしても、（式 3.6.1.4）から計算すると、L_{ch} が 300mm では表面弾性波が先に到達し、鉄筋の影響を受けないことが分かる。そこで、センサー間隔 200mm で、センサー1 から 100mm の位置を打撃して弾性波速度を求めることとした。なお、供試体 C では、打設面側である厚さ 100、200mm と底面側である 400、600mm では打設面からの深さが 600mm と異なり、品質の違いによる速度変化が考えられるので、2 箇所で測定した。

（3）弾性波速度の測定結果

弾性波速度 V_P を測定した結果を表－3.6.1.4 に示す。供試体 A、B、および C の底面側である Ⅰ・Ⅱ面側では、4000m/s 弱となり、供試体 C の打設面側であるⅢ・Ⅳ面側では、これより遅い 3894m/s となった。

表－3.6.1.2 弾性波速度測定結果

供試体	測定位置	V_P (m/s)
A	f、③上平均値	3943
B	④上	3971
C	②上	3894
	⑥上	3940

3.6.1.5 基礎実験測定結果考察

（1）反射波の振動数の測定結果について

基礎実験では供試体 A、B、C を用いて、厚さ 100mm～2500mm の位置を測定点とし、2.3.1 で示した測定方法により反射波の振動数を求め、弾性波速度を材齢 7 日では 3800m/s、28 日以降では 4000m/s と仮定値を用いてコンクリートの厚さを測定した。その結果、測定厚さを実際の厚さで割った比率から調べた平均誤差は、材齢 7 日では 4.8%、材齢 28 日では 5.3%、材齢 90 日では 4.1%と良く一致し、本測定方法により厚さ 100mm～2500mm のコンクリートでの反射波の振動数が正確に測定できることが示された。

しかし、供試体 CIII面では、材齢 7、28 日では約 444mm、90 日では約 341mm と実寸（約 407mm）と比較すると、誤差 10%以上でばらつく結果となった。

（2）弾性波速度の測定結果について

材齢 90 日以上経過した供試体 A、B、C について、弾性波のコンクリート表面を伝搬する成分（表面弾性波）から弾性波の伝搬速度を測定した結果、鉄筋と速度測定点の位置関係によっては鉄筋の影響を受け、コンクリートを伝搬する弾性波速度を正確に測定できないことが分かった。

しかし、最も鉄筋の影響を受ける、かぶり 50mm の鉄筋上での測定であっても、センサー間隔を 200mm、打撃点を近い方のセンサーから 100mm とすれば影響を受けない。

この状況で測定した結果、弾性波速度は 3894～3971 m/s となった。（1）の通り、材齢 90 日では弾性波速度を 4000m/s と仮定し、コンクリート厚さを測定して良好な結果となった。実測した弾性波速度はこの仮定値と近い結果となり、また、供試体 C では打設面側の速度が底面側の速度より遅くなったことから、弾性波速度は正確に測定できたと考えられる。

3.6.2 弾性波 H （インパクトエコー）

3.6.2.1 供試体Aの厚さ測定

供試体Aにおいて、2.3.2.3 で述べた方法で表面弾性波のＰ波速度を測定したところ、h①からh⑤の各測定点で安定していたので、Ｐ波速度は供試体中央部で測定した値を代表して用いた。受信センサＲ１およびＲ２へのＰ波の到達時間差は、74.5μs であったので、式（2.3.2.3）により、Ｐ波速度は 4027m/s と計算される。次に、h①からh⑤の各測定点で厚さ周波数ｆを測定し、各点での厚さを求めた。h①での厚さ周波数の測定例を 図-3.6.2.1 に示し、結果を表-3.6.2.1 に記す。

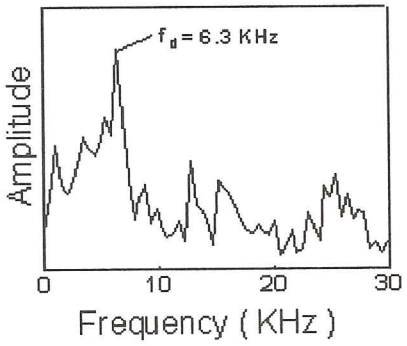


図-3.6.2.1　供試体Aのh①の厚さ周波数

3.6.2.2 供試体Bの厚さ測定

供試体Bは厚さ約50mmのアスファルト層で舗装されており、コンクリートとの２層となっている。Sansalone[2.3.2.1)] およびY. Lin[3.6.2.1)] 等によると、この２層の版厚全体の厚さ周波数fは、次式（3.6.2.1）によって得られる。

$$f = \frac{1}{\frac{2T_a}{0.96 \times C_a} + \frac{2T_c}{0.96 \times C_c}} \qquad (3.6.2.1)$$

ここで、　Ta=アスファルトの厚さ
　　Ca=アスファルトのＰ波速度
　　Tc=コンクリートの厚さ
　　Cc=コンクリートのＰ波速度

上式は、コンクリートの厚さを求める次式のように書ける。

$$T_c = \left(\frac{0.96 \times C_c}{2f}\right) \times \left(1 - \frac{2T_a}{0.96 \times C_a} \times f\right) \qquad (3.6.2.2)$$

Ca を知るために、先ず、受信センサを供試体の横端面のコンクリート部に設置してコンクリートの表面

弾性波のP波速度をもとめた。受信センサR1およびR2へのP波到達時間の差(t_2-t_1)は、77.5 μs であったので、コンクリートのP波速度 C_cは、3871 m/s となる。Ta は既知のものとして、アスファルト層の厚さ 50mm を値として使用する。アスファルトの表面弾性波のP波速度 Ca と全体の厚さ周波数 f は、受信センサをアスファルト表面に設置して実際に測定することができるので、式（3.6.2.2）からコンクリートの厚さ Tc が計算できる。測定結果を供試体Aと同じく表-3.6.2.1 に記す。

3.6.2.3 供試体Cの厚さ測定

3.6.2.1 と同様に、供試体Cの測定を行った。ただし、測定は、100mm と 200mm の厚さのコンクリート部分でのみでおこなった。厚さが400mm をこえる部分では、供試体の凹凸形状が複雑で、横端の境界からの反射波が波形に大きな影響をおよぼすからである。このような場合、Cp,plate=0.96Cp という関係はもはやなりたたない。供試体の幾何学的形状によって、数値解析よりあらたに係数を決定する必要がある。したがって、測定は、a①、a③、a④、g①、g③、g④のみでおこなった。測定結果を供試体AおよびBと同じく表-3.6.2.1 に記す。なお、a④では、測定スペクトルは、17.3kHz のノイズによって完全に分裂し、厚さ周波数のピークが特定できず、厚さ周波数を特定できなかったので表には記載しなかった。

表-3.6.2.1　供試体 A、B、C の厚さ測定結果

	測定点	t_1 (μs)	t_2 (μs)	P波速度Cp (m/s)	適用速度 0.96Cp (m/s)	厚さ周波数f (kHz)	測定厚さ (mm)	コア実測値 (mm)	測／実	誤差 (%)
供試体A	h①	103.0	177.5	4027	3866	6.35	304.4	301.3	1.010	1.0
	h②					6.35	304.4	302.0	1.008	0.8
	h③					6.59	293.3	302.6	0.969	-3.1
	h④					6.59	293.3	302.7	0.969	-3.1
	h⑤					6.59	293.3	302.9	0.968	-3.2
	測定点	Asのt_1 (μs)	Asのt_2 (μs)	AsのP波速度Ca (m/s)		厚さ周波数f (kHz)	測定厚さ (mm)	コア実測値 (mm)	測／実	誤差 (%)
供試体B	a④	97.0	187.5	3315		5.37	287.6	282.6	1.018	1.8
	b④	95.0	188.5	3209		5.62	270.3	252.2	1.072	7.2
	c④	79.0	173.5	3175		6.10	243.6	225.0	1.083	8.3
	d④	75.0	172.5	3077		7.08	199.5	199.4	0.998	0.1
	e④	85.0	182.5	3077		7.57	182.6	175.9	1.038	3.8
	測定点	t_1 (μs)	t_2 (μs)	P波速度Cp (m/s)	適用速度 0.96Cp (m/s)	厚さ周波数f (kHz)	測定厚さ (mm)	コア実測値 (mm)	測／実	誤差 (%)
供試体C	a①	95.0	173.5	3822	3669	18.07	101.5	106.1	0.957	-4.3
	a③	93.0	170.5	3871	3716	18.55	100.2	108.3	0.925	-7.5
	g①	95.0	170.5	3974	3815	9.28	205.5	208.1	0.988	-1.2
	g③	94.0	168.5	4027	3866	9.28	208.3	213.4	0.976	-2.4
	g④	98.0	171.5	4082	3919	9.52	205.8	215.4	0.956	-4.4

3.6.2.4　表面弾性波速度に対する鉄筋の影響

供試体Aにおいて、表面弾性波速度に対する鉄筋の影響を調べた。2.3.2.3 で述べたように、本法では

300mm離して設置した2本の受信センサをもちい、表面弾性波のP波のそれぞれの受信センサへの到達時間差からP波速度を測定するが、P波の伝搬する経路の媒質の違い、すなわち鉄筋が近傍にある場合は、その影響をうけるのではないかと思われる。

図-3.1.1のように、供試体Aには、a ～ gにかぶり厚を変えて7本の径一定の丸鋼が、i ～ lに約50mmのかぶり厚で4本の径の異なる異形棒鋼が、それぞれが埋め込まれている。鉄筋のP波速度への影響を測定するためにこれら11本のそれぞれの鉄筋方向に300mmの固定間隔で2本の受信センサを設置し、鋼球による打撃位置を図-3.6.2.2のように受信センサからの距離をZ=－100、1= ＋50、2=＋100、3=＋200、4=＋300mmと変えて、P波速度を計測した。測定結果を表-3.6.2.2に記し、図-3.6.2.3にグラフ化する。

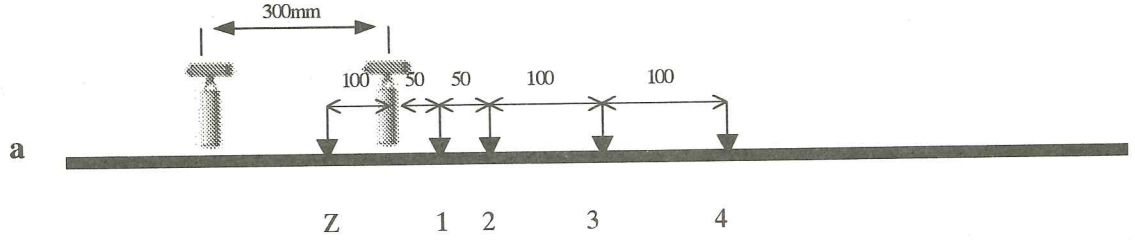


図-3.6.2.2　鉄筋上の鋼球打撃位置

表-3.6.2.2 鉄筋上のコンクリートの表面弾性波速度

鉄筋	かぶり厚 (mm)	径 (mm)	P波速度 (m/s)				
			Z	1	2	3	4
a	17	20	5714	5405	5505	5405	5405
b	42	20	4255	4651	4651	5128	4959
c	68	20	4878	4082	4255	4580	4959
d	92	20	4082	3974	4082	4317	4511
e	142	20	3779	3774	3922	3974	4082
f	192	20	4255	3922	3922	3922	4138
g	242	20	4444	3681	3681	3822	4082
i	53	D25	4651	4255	4380	4878	5128
j	53	D32	3922	4380	4580	4957	5128
k	54	D38	3922	4380	4580	4878	5217
l	52	D51	4255	4380	4800	5405	5505

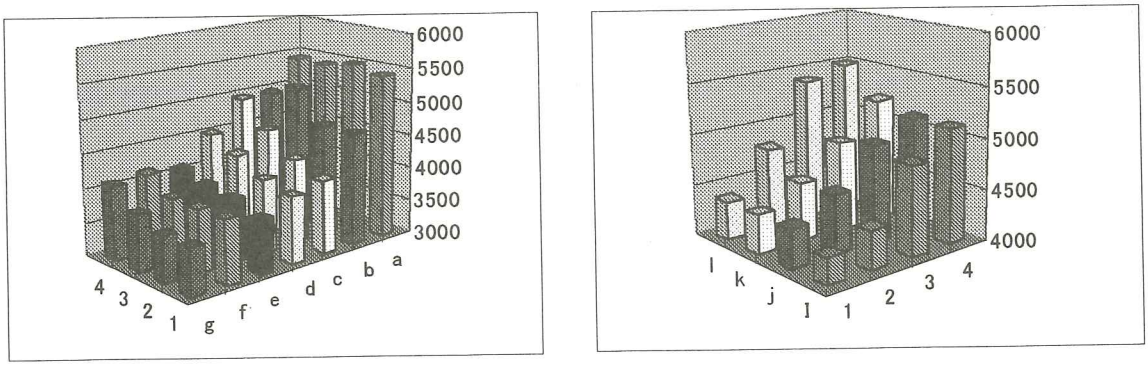


図-3.6.2.3　鉄筋上のコンクリートの表面弾性波速度

Z点は、本来両受信センサの外側であるべき打撃点を、あえて内側で打撃したものであり、測定結果のばらつきが大きく、考察の対象から省く。a～g、i～lに対する1～4の打撃点でのP波速度をみると多少の測定のばらつきはあるものの、**表-3.6.2.2** および**図-3.6.2.3**の結果から、

① 鉄筋のかぶりが浅いほど、表面弾性波速度はより速くなる。

② 鉄筋径が大きいほど、表面弾性波速度はより速くなる。

③ 打撃点が遠いほど、表面弾性波速度はより速くなる。

という傾向が見られる。これら3条件の状態では、コンクリートより弾性波速度の速い鉄筋を伝搬するP波の成分が多いためと思われる。

従って、フィールド測定などの場合に、2本の受信センサの設置方向や打撃点の距離によっては、表面弾性波速度に鉄筋からの影響を受ける可能性があり、受信センサの設置位置や鋼球打撃点など鉄筋上を避けるように注意するべきである。

3.6.2.5 基礎実験のまとめ

表-3.6.2.1のように、基礎実験において、供試体Aのコンクリート版厚の測定誤差は、−3.2～1.0%の範囲であった。表面弾性波速度が本供試体上で一様であると考えて各測定点にその速度を適用したが、各点で表面弾性波速度をそれぞれ測定しなおした方が精度は高まったと思われる。供試体Bでは、アスファルトの厚さが一定既知であるとみなしてコンクリートの厚さを求めたことが、測定誤差0.1～8.3%のばらつきの主因であると思われる。実際の道路などの野外測定では、アスファルト自身の厚さは不明であり、またコンクリート自身の表面弾性波速度もそのままでは簡単に測定ができないので、式（3.6.2.1）を利用する本測定法には一考を要する。供試体Cでは、測定誤差が−7.5～−1.2%と、供試体Aの測定誤差より大きく、またa④点は計測不能であった。これは凹凸のある供試体Cの形状による側面からの反射波の影響とおもわれ、形状の複雑な供試体に対しては、さらに測定のノウハウを蓄積する必要があると思われる。

表面弾性波速度の測定では、2本の受信センサの設置位置や打撃点の受信センサからの距離によっては、鉄筋の影響を受ける可能性があり、留意が必要である。

参考文献

3.6.2.1） Lin, Y., (2000), “Measuring the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method,” Department of Civil Engineering, National Chung-Hsing Univ., Taiwan R.O.C.

３．７　超音波法による強度推定

３．７．１　圧縮強度，含水率と音速の関係

表-3.3.1.1 より，圧縮強度，含水率と音速の関係を回帰すると次式が得られる。**図-3.7.1.1** に実測値および回帰曲線を示す。

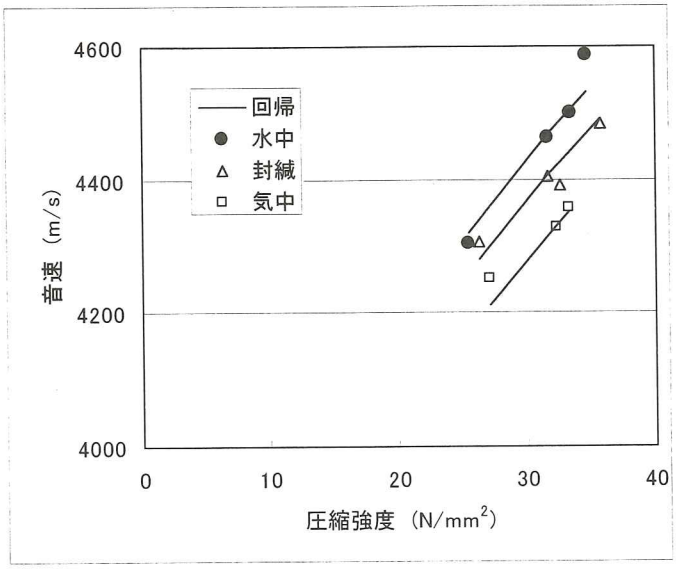
$$V = 2330.0\,fc^{\frac{1}{6}} + 49.9w + 263.3 \qquad (3.7.1.1)$$

ここに，V：音速，fc：圧縮強度，W：封かん状態を０とした時の含水率の増減である。

３．７．２　強度推定

表-3.4.7.1 の内部音速を式（3.7.1.1）に代入し，圧縮強度を推定した結果が**表-3.7.2.1** である。**表-3.7.2.1** には，供試体の透過音速から同様に圧縮強度を推定した結果も示した。圧縮強度の推定値／コアの圧縮強度（以下，単に強度比と呼ぶ）を**図-3.7.2.1** に示す。

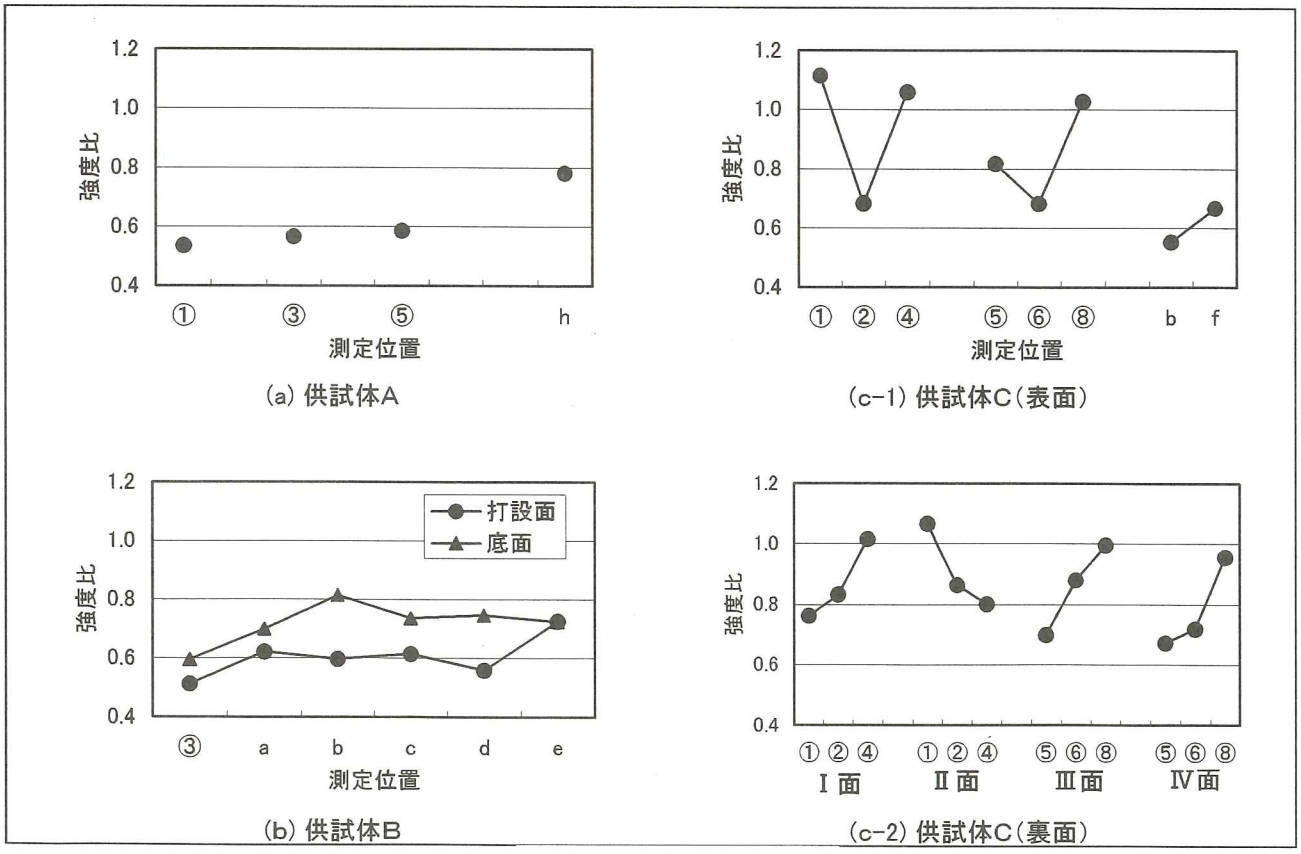
図-3.7.2.1 より，供試体ＡおよびＢの強度比は 0.5～0.8 程度でありかなり小さい。供試体Ｃの（-2）図を見ると，Ⅱ面を除き，Ⅰ面は①→④，Ⅲ面，Ⅳ面は⑤→⑧と下にいくほど強度比は大きくなっており，とくに④と⑧はほぼ 1 であり，非常によく推定されている。上記の①と⑤は 0.7～0.8 程度とやや小さい。供試体Ａ，Ｂと合わせて見ると，打設面とその近くはかなり小さく推定されている。打設面付近はブリーディングなどにより品質が低く，そのために乾燥しやすいことなどから，かなり音速が遅くなっているために推定精度が低いものと考えられる。一方，供試体 C の下部はよく締め固まっており，キャリブレーションに用いた円柱供試体とほぼ同じような状態になっていることが推定されることから，下部の強度は精度の高い推定が可能と考えられる。



図－3.7.1.1　圧縮強度と音速の関係

表−3.7.2.1　圧縮強度の推定結果

測定位置			コア		内部音速による強度推定			透過音速による強度推定						
供試体	測定面	測定位置	音速 m/s	圧縮強度 N/mm²	内部音速 m/s	推定強度 N/mm²	強度比	透過音速		強度推定		強度比		
														平均
供試体A	打設面	①	4516	31.1	3987	16.7	0.536							
		②	4516	31.1	4022	17.6	0.566							
		③	4516	31.1	4043	18.2	0.586							
		h	4516	31.1	4228	24.3	0.781							
供試体B	打設面	③	4304	28.4	3904	14.5	0.512							
		a	4304	28.4	4023	17.6	0.621							
		b	4304	28.4	3996	16.9	0.595							
		c	4304	28.4	4017	17.5	0.615							
		d	4304	28.4	3957	15.9	0.559							
		e	4304	28.4	4122	20.6	0.726							
供試体B	底面	③	4304	28.4	3996	16.9	0.595							
		a	4304	28.4	4096	19.8	0.698							
		b	4304	28.4	4196	23.1	0.814							
		c	4304	28.4	4131	20.9	0.736							
		d	4304	28.4	4139	21.2	0.746							
		e	4304	28.4	4121	20.6	0.725							
供試体C（表面）	上段	①	4283	18.6	4125	20.7	1.114	2667	3348	1.2	5.4	0.065	0.290	0.177
		②	4424	22.9	3948	15.6	0.683	2902	3425	2.1	6.2	0.092	0.273	0.182
		④	4524	27.8	4358	29.4	1.059	2863	3402	1.9	6.0	0.069	0.215	0.142
	下段	⑤	4437	25.9	4139	21.2	0.818	3663	3851	9.6	13.3	0.372	0.514	0.443
		⑥	4470	27.7	4066	18.9	0.682	3727	3851	10.8	13.3	0.389	0.481	0.435
		⑧	4504	25.6	4281	26.3	1.027	3767	3981	11.6	16.5	0.451	0.645	0.548
	AB	b	4279	30.8	4001	17.0	0.553							
		f	4282	28.8	4077	19.2	0.667							
供試体C（裏面）	Ⅰ	①	4283	18.6	3888	14.2	0.763	2673		1.2		0.066		0.066
		②	4424	22.9	4071	19.0	0.832	2894		2.1		0.091		0.091
		④	4524	27.8	4329	28.2	1.016	2870		2.0		0.071		0.071
	Ⅱ	①	4283	18.6	4097	19.8	1.066		3354		5.4		0.293	0.293
		②	4424	22.9	4095	19.8	0.863		3409		6.1		0.264	0.264
		④	4524	27.8	4171	22.3	0.801		3402		6.0		0.215	0.215
	Ⅲ	⑤	4437	25.9	4039	18.1	0.699	3679		9.9		0.383		0.383
		⑥	4470	27.7	4230	24.3	0.879	3740		11.0		0.399		0.399
		⑧	4504	25.6	4261	25.5	0.996	3788		12.0		0.468		0.468
	Ⅳ	⑤	4437	25.9	4015	17.4	0.672		3853		13.4		0.516	0.516
		⑥	4470	27.7	4098	19.9	0.718		3851		13.3		0.481	0.481
		⑧	4504	25.6	4234	24.5	0.957		3971		16.2		0.634	0.634



図−3.7.2.1　強度比

4章　壁供試体の厚さ測定および基礎実験を含めた品質推定

コンクリートの品質は、表層と内部では異なっている。通常、表層の品質は、内部に比べ劣っている[4.1)]。表層は、乾燥を受けやすいので長期の水和反応による強度発現があまり期待できないこと、気象作用を直接受け劣化しやすいこと、などによる。このため、特に鉄筋までの品質を適切に評価することは、コンクリート構造物の耐久性の向上、寿命予測などにとって重要である。

コンクリートの品質を評価する方法に細孔径分布の測定がある。コンクリートは大小さまざまな空隙（細孔）を有しており、強度や耐久性に大きな影響を及ぼしている。細孔量と強度の間には高い相関関係がある。また、コンクリートを中性化させる二酸化炭素や、鉄筋を腐食させる酸素、腐食を促進させる塩素イオンなどの拡散・浸透も、細孔径分布や細孔量と密接な関係がある。コンクリート強度と細孔量の間には高い相関関係があり、強度と音速の間にも高い相関関係があることから、細孔量と音速の間にも一義的な関係があるものと考えられる。そこで、超音波法により構造体コンクリート内部の音速分布を推定することにより、強度のみならず耐久性も含めた品質評価手法が確立できるものと考えている。

既に、コンクリート内部の音速分布を推定することにより、強度分布も推定できる可能性があることについては前章で報告した。ここでは主に、音速分布と細孔径分布を比較した結果を報告する。試験した供試体は，壁供試体に加え，前章の基礎実験に用いた供試体である。

４．１　壁供試体の種類

測定した壁供試体は 3 体である。形状、寸法は**図-4.1.1** のとおりである。使用したコンクリートの配合は**表－4.1.1** のとおりである。**表-4.1.1** には３章の基礎実験の配合も示してあるのは、あとで細孔径分布を測定しているため、比較するために示してある。

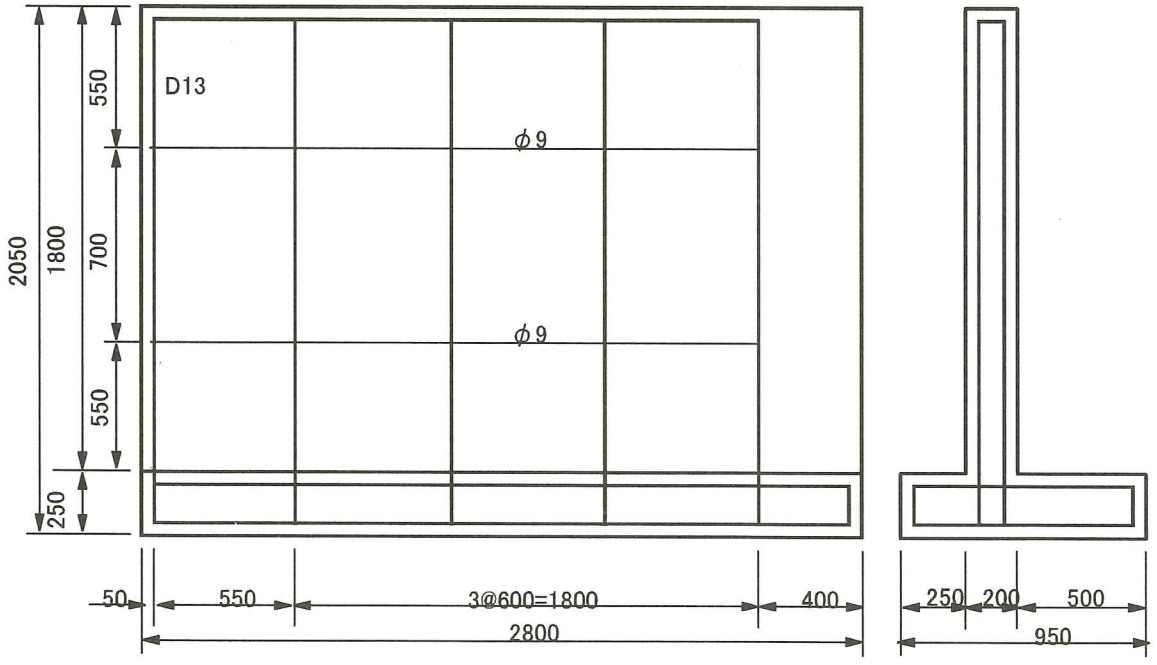
表-4.1.1 コンクリートの材料，配合

供試体	セメントの種類	呼び強度	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
								水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
A,B,C	早強セメント	24	20	8	62.4	4.5	44.1	156	250	821	1075	0.781
N2,N7	普通セメント	18	25	20	65	4	46	185	285	814	975	0.091
BB7	高炉B種							183	282			0.090

注）混和剤は，供試体A～CにはAE減水剤（ポゾリスNo.70），供試体N2，N7，BB7にはAE剤（ヴィンソル）を使用した。

供試体Ｎ２、Ｎ７、ＢＢ７は、セメントの種類と脱型材齢が異なっている。供試体名のアルファベットはセメントの種類を表しており、Ｎは普通ポルトランドセメント、ＢＢは高炉セメントＢ種である（**表－4.1.1**）。数字は脱型材齢（日）を表している。供試体は 16 年間風雨にさらされたものである。

供試体の壁面は、東（東面）と西（西面）に向いて設置されており、非破壊による測定は東面で行なった。



図－4.1.1 壁供試体

４．２　実験概要

測定項目およびその方法を測定順に示す。

４．２．１　速度分布、壁厚さ、かぶり厚さの測定

(1) 速度分布の測定

超音波法、レーダ法、弾性波法により各供試体の速度分布を測定した。超音波法による供試体内部の音速分布を予測するため、表面走査法により図-4.2.1.1 の②③測線上の伝搬時間を、探触子中心間隔 100～800 mm まで 100 mmピッチ，それ以上は 1000，1200，1600，2000 mmで測定した。

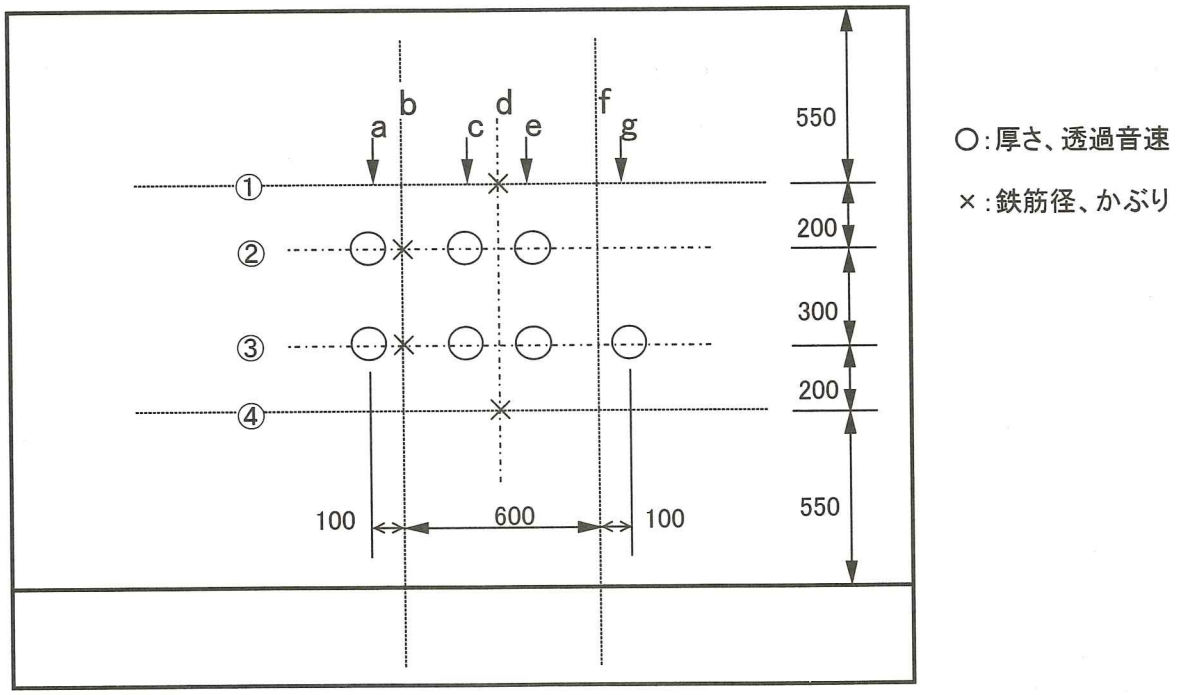
(2) 厚さの測定

図-4.2.1.1 の○印の位置で壁の厚さ（反射時間）を測定した。

超音波法は透過時間も測定した。

(3) かぶり厚さおよび鉄筋径の測定

図-4.2.1.1 の×印の位置で、超音波法はかぶり厚さおよび鉄筋径を、レーダ法はかぶり厚さを測定した。



図－4.2.1.1 測定位置

4．2．2 供試体作製時の圧縮強度試験

供試体作製当時（16 年前），水中養生した材齢 7，28 日の圧縮強度試験が行なわれている。また、28 日にはコアの圧縮強度試験も実施されている。

4．2．3 コア試験片の音速、圧縮強度、細孔径分布の測定

今回，非破壊試験後にコアを採取し，以下のような試験を行なった．

(1) コアの採取位置

コア試験片を採取し、超音波透過時間、中性化深さ、かぶり厚さ、圧縮強度、細孔径分布を測定した。コア採取位置は、図-4.2.1.1 の○印および×印の位置であり、○印はφ100 mmを 3 本とφ44 mmを 4 本、×印は鉄

筋位置でありφ44 ㎜である。また、**図-4.2.1.1** の②の ab 間、③の ab 間、fg 間、f の右でφ32 ㎜のコアを採取した（**表-4.3.1.1**）。また、簡易試験による中性化深さ、透気性、透水性も測定した。

(2) 中性化深さの測定

コアの両面（東面、西面）の周を 5 等分した位置および最大の中性化深さをそれぞれ 6 点測定した。

(3) 音速および圧縮強度試験

① コアを採取直後の長いまま（約 200 ㎜）、気乾状態で、径、長さ、質量、音速を測定した。

② 48 時間水浸した後、質量と音速を測定した。

③ 圧縮強度試験用に所定の長さに切断した。

④ 圧縮強度試験を行なった。

⑤ 破壊時の状態を写真撮影した。

(4) 径・かぶりの測定

図-4.2.1.1 の×印のコアから径・かぶりを測定後、表面から鉄筋までを切断し，中央部（長さ 88 ㎜）を (3) の②～⑤と同様に音速、圧縮強度試験を行なった。

(5) 細孔径分布の測定

細孔径分布を測定するための試料は、コア試験片の表面から 0～10、20～30、45～55、90～100mm の位置で薄片を採取した。供試体 C は、さらに 145～155、190～200mm の位置でも採取した（**図-3.2.8** 参照）。試験手順としては、コア試験片の所定の位置をコンクリートカッタで切断し、モルタル部分をはつり取り、その試料を D-乾燥して水和を停止させた。その後、水銀圧入ポロシメータで水銀を圧入し、細孔量を求めた。さらに、骨材の空隙を無視した硬化セメントペースト部分の細孔量である有効細孔量を求めた[4.1)、4.2.3.1)]。

ⅰ 試料の採取

所定の位置のコンクリート薄片を破砕して 2.5～5 ㎜粒度試料を採取した。採取した試料は，アセトンで洗浄したのち D-dry 処理を行い，その後，試料分取器により分割し，個々の実験用の試料とした。

ⅱ 空隙構造の測定

空隙構造の測定は，マイクロメリテックス社製の水銀圧入ポロシメータ 903 型（最大圧力 2100kg/㎝）で行い，加圧過程，減圧過程における各々の空隙構造を求めた。

ⅲ 結合水率・溶解率の測定

D-dry 処理後の試料を 105℃で 2 日間乾燥させたのち，電気炉で 3 時間加熱して強熱減量を求めた。加熱温度は，セメント協会報告 F－18[4.2.3.2)] の推奨値である 600℃とした。

結合水率測定後の試料を約 1000ml の 10%塩酸溶液に入れ，スターラーで 2 時間撹拌し，試料のペースト部分を溶解させた。不溶残分を含む溶解液をろ紙（5 種 B）でろ過し，残留物をろ紙とともにるつぼに入れ，950℃の電気炉中で 30 分間乾燥させた後，不溶残分質量を測定した。硬化セメントペーストを溶解させる塩酸溶液の濃度について，セメント協会報告 F－18 では 1%を推奨しているが，本研究では用いる試料の量が多く，1%濃度では多量の溶液と長い時間を要するため，ASTM[4.2.3.3)]に規定されている濃度のうち，希薄な 10%濃度を採用した。

ⅳ 結果の指標化

圧縮強度との相関性を検討するため，各々の測定で得られた結果を以下の指標にまとめた。

①溶解率（m）：骨材が塩酸に溶解せず，硬化セメントペーストの割合。

$$m=\frac{w_0-w_1}{w_0} \qquad (4.2.3.1)$$

ここに，w_0：105℃乾燥後の試料質量，w_1：不溶残分質量

②結合水率（W_c）：強熱減量をすべて結合水量とし，硬化セメントペースト質量に対する値として算出する。

$$w_c=\frac{w_0-w_2}{w_0\times m}=\frac{w_0-w_2}{w_0-w_1} \qquad (4.2.3.2)$$

ここに，w_2：600℃乾燥後の試料質量

③総細孔量（TPV）：水銀圧入試験の加圧過程で測定される全細孔量。本研究の場合，半径 3.2nm から 56 μm 間の細孔量($\times 10^{-2}$ cc/g)。

④有効細孔量（$ETPV$）：骨材の空隙を無視した場合のコンクリートの硬化セメントペースト部分の細孔量。

$$ETPV=\frac{TPV}{m} \qquad (\times 10^{-2}\,\mathrm{cc/g}) \qquad (4.2.3.3)$$

⑤もどり比（R_e）：減圧過程と加圧過程で測定された細孔量の比の値。空隙の独立性に関係する。

$$R_e=\frac{P_r}{P_p} \qquad (4.2.3.4)$$

ここに，P_p：加圧過程で測定された細孔量（総細孔量），P_r：減圧過程で測定された細孔量。

⑥中央値（M_e）：加圧過程での細孔径分布において，全体の細孔量の 1/2 に対応する細孔半径。Jamber[4.2.3.4)]の平均細孔半径に対応する指標で，細孔径分布の細かさを表す（nm）。

これらの指標のほか，結合水率のあばれが大きいことから，これらにかわる指標として材齢（Age；週）を加えた。

(6) 圧縮強度の推定

鎌田・吉野らの提案した推定式[4.2.3.8)]、式（4.2.3.5）によって、圧縮強度（湿試験強度）を推定する。

$$fc=144.2\times exp\{-0.0267\times ETPV-0.485\times log(Me)-0.96\times Re+3.56\times WRH\} \qquad (4.2.3.5)$$

ここに、：f_c 推定圧縮強度（N/㎟）、$ETPV$：総有効細孔量（$\times 10^{-2}$cc/g）、Me：中央値（Å）、Re：戻り比、WRh：結合水率（g/g）

4. 2. 4 簡易中性化深さ試験

簡易中性化深さ試験は，各種コンクリート壁の東面（鋼製型枠面）の高さ 105 ㎝の位置について，NDIS 3419「ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法」[4.2.3.5)]に基づいて行なった。

4. 2. 5　簡易透気性試験

簡易透気性試験は，次のように行った[4.2.3.6)]。中性化試験実施後，

① 振動ドリルを用いて，壁に直径 10 ㎜，深さ 50 ㎜の孔をあける。

② 削孔をシリコン栓とエポキシ樹脂を用いて密封する。

③ シリコン栓に注射針を差し込む。

④ 注射針，マノメーター，真空ポンプを接続する。

⑤ 真空ポンプを用いて孔の内部を（X_1（160 ㎜ Hg）－10）　㎜ Hg まで減圧する。

⑥ 孔の周壁からの空気の流入により X_1（160 ㎜ Hg）から X_2（190 ㎜ Hg）まで低下する時間 T（sec）を測定する（Tが 10 秒以下となるとき，X_1 を 100 ㎜ Hg，X_2 を 250 ㎜ Hg として測定する）。

⑦ ⑤と⑥の作業を 4 回繰り返す。

⑧ 次式により，1 回目の結果を除いた 2 回目以降の簡易透気速度を求め，平均する。

$$K=(X_2-X_1)/T \qquad (4.2.3.6)$$

ここに，K：簡易透気速度（㎜ Hg/sec），X_1：時間測定開始時の真空度（㎜ Hg），X_2：時間測定終了時の真空度（㎜ Hg），T：真空度の低下時間（sec）

4. 2. 6　簡易吸水性試験

簡易吸水性試験は，次のように行った[4.2.3.7)]。簡易透気性試験終了後，

① シリコン栓に 2 本目の注射針を斜めに差込む。

② これをメスピペットとつなぐ。

③ 注射器により，簡易透気性試験で使用した針を通して削孔内に水を注入する。

④ メスピペットの先より水がオーバーフローした時コックを閉じる。

⑤ メスピペット上で 0.01ml 吸収される時間を計る。もし，この時間が 10 秒以下ならば，吸収量を 0.03ml として測定する。

⑥ 次式により，簡易吸水速度 Q（ml/sec）を算出する。

$$Q=W/T \qquad (4.2.3.7)$$

ここに，W：吸水量（ml），T：所要時間（sec）

4. 2. 7　コア採取後の孔を用いたコンクリート内部の透過音速の直接測定

コア採取後、２本の孔の間（**図-4.2.1.1** の②，③の c－e 間）を超音波によって透過時間を直接測定し、内部の透過音速を求めた（図－3.4.6.1 参照）。孔の間隔は約 150mm で、東面から内部方向に 5 mm、10 mm，それより内部は 10 mm ッチで測定した。

4．3　コンクリートの品質，実測結果

4. 3. 1　コアの音速

壁供試体の採取直後の長いままのコアの音速は**表-4.3.1.1** のとおりであった。

4. 3. 2　圧縮強度

管理試験片およびコア試験片の圧縮強度試験結果は**表-4.3.2.1** および**図－4.3.2.1** のとおりであった。供試体A～C用の養生条件が異なる場合の強度は、13週まではほぼ同じであるが、24週になると水中および封緘養生はさらに強度が増加しているが、気中養生したものはわずかに低下した。音速、静ヤング係数も同様の傾向であった（**図-3.3.1.3～3.3.1.5**, **図-3.3.2.3～3.3.2.4** 参照）。水中および封緘養生は構造体内部を、気中養生は表層を模擬したものであり、表層は品質が低いことが予想される。コア試験片の結果は、気中養生のものとほぼ同じであった。

壁供試体用の水中養生，コア供試体の結果も**図－4. 3. 2. 1** に示す。

表-4.3.2.2 に壁供試体のコア径ごとの圧縮強度、音速の平均、標準偏差、変動係数を示す。**3章**の**表-3.3.2.3** と同様、コアの採取状況が悪かったので、圧縮強度の平均は径が小さいほど小さく、変動係数は大きくなった。

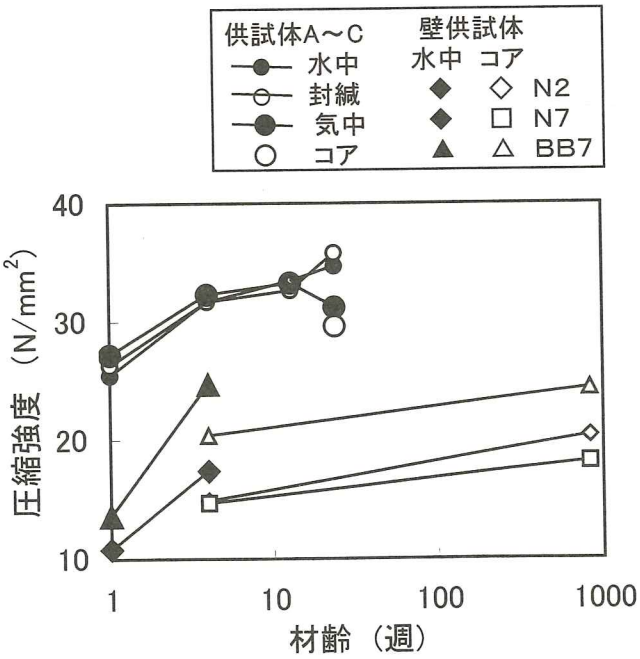


図-4.3.2.1　圧縮強度

表-4.3.1.1 コンクリートの超音波音速測定結果

供試体	コア径 (mm)	採取位置	1 kV			500V		
			長さ (mm)	伝搬時間 (μs)	伝搬速度 (m/sec)	長さ (mm)	伝搬時間 (μs)	伝搬速度 (m/sec)
N2	100	②－a	200.3	66.4	3773	－	－	－
		③－a	200.4	65.7	3824	－	－	－
		③－g	202.6	65.5	3882	－	－	－
	44	②－c	199.3	66.4	3754	199.3	53.4	3768
		②－e	200.5	67.6	3693	200.5	54.8	3693
		③－c	200.1	67.2	3713	200.1	54.2	3727
		③－e	201.2	66.1	3810	201.2	53.7	3782
		②－b	－	－	－	－	－	－
		③－b	－	－	－	－	－	－
		①－d	－	－	－	－	－	－
		④－d	－	－	－	－	－	－
	32	②－ab間	－	－	－	－	－	－
		③－ab間	200.8	72.2	3409	200.8	62.0	3265
		③－fg間	－	－	－	－	－	－
		③－g右	－	－	－	－	－	－
N7	100	②－a	200.3	65.9	3807	－	－	－
		③－a	202.0	66.2	3818	－	－	－
		③－g	199.8	66.3	3769	－	－	－
	44	②－c	197.5	66.1	3741	197.5	52.9	3769
		②－e	197.9	66.2	3741	197.9	52.7	3791
		③－c	197.6	68.6	3574	197.6	57.6	3461
		③－e	198.9	65.8	3789	198.9	57.4	3496
		②－b	－	－	－	－	－	－
		③－b	－	－	－	－	－	－
		①－d	－	－	－	－	－	－
		④－d	－	－	－	－	－	－
	32	②－ab間	－	－	－	－	－	－
		③－ab間	－	－	－	－	－	－
		③－fg間	202.9	67.8	3724	202.9	54.3	3772
		③－g右	－	－	－	－	－	－
BB7	100	②－a	197.6	64.5	3860	－	－	－
		③－a	198.3	64.6	3865	－	－	－
		③－g	199.8	64.3	3917	－	－	－
	44	②－c	－	－	－	－	－	－
		②－e	198.8	64.6	3876	198.8	51.5	3899
		③－c	197.8	65.5	3790	197.8	52.5	3804
		③－e	198.8	66.6	3730	198.8	53.4	3758
		②－b	－	－	－	－	－	－
		③－b	199.1	64.1	3919	199.1	51.6	3896
		①－d	196.7	66.3	3711	196.7	54.2	3662
		④－d	197.6	66.7	3701	197.6	54.2	3680
	32	②－ab間	－	－	－	－	－	－
		③－ab間	－	－	－	－	－	－
		③－fg間	－	－	－	－	－	－
		③－g右	－	－	－	－	－	－

－ ： 折損により計測不能

表－4.3.2.1 コアの圧縮強度試験結果

(N/mm²)

コア径 (mm)	採取位置	供試体 N2	供試体 N7	供試体 BB7
24	②－ab間	21.2	－	－
		8.5	－	－
	③－ab間	12.4	11.4	17.8
		－	－	－
	③－fg間	20.1	11.1	－
		－	－	12.8
	③－f右	7.5	－	13.6
		11.2	－	－
32	②－ab間	18.7	19.5	20.1
		14.3	－	－
	③－ab間	－	18.1	14.8
		17.8	17.6	－
	③－fg間	11.2	19.0	18.2
		17.2	18.8	－
	③－f右	15.3	18.1	24.5
		－	－	－
44	②－c	18.0	17.3	25.8
	③－c	17.2	14.7	22.5
	③－e	19.2	19.8	26.8
100	③－a	20.7	17.4	24.0
	③－g	20.2	19.1	24.9

表-4.3.2.2 コア径ごとの圧縮強度，音速

コア径 (mm)		供試体N2		供試体N7		供試体BB7	
		圧縮強度 (N/mm²)	音速 (m/s)	圧縮強度 (N/mm²)	音速 (m/s)	圧縮強度 (N/mm²)	音速 (m/s)
24	個数(個)	6		2		3	
	平均	13.5		11.2		14.7	
	標準偏差	5.32		0.10		2.19	
	変動係数(%)	39.4		0.9		14.9	
32	個数(個)	6	1	6	1	4	
	平均	15.7	3265	18.5	3772	19.4	
	標準偏差	2.53		0.67		3.53	
	変動係数(%)	16.1		3.6		18.2	
44	個数(個)	3	4	3	4	3	6
	平均	18.1	3742	17.3	3630	25.0	3783
	標準偏差	0.81	35	2.07	152	1.83	93
	変動係数(%)	4.5	0.9	12.0	4.2	7.3	2.5
100	個数(個)	2	4	2	3	2	3
	平均	20.5	3815	18.2	3798	24.5	3881
	標準偏差	0.25	43	0.83	21	0.44	26
	変動係数(%)	1.2	1.1	4.5	0.6	1.8	0.7

4. 3. 3　細孔構造と強度の推定

細孔径分布の測定結果は**表-4.3.3.1** および**表-4.3.3.2**，分布図は**図-4.3.3.1** のとおりである。有効細孔量を**図－4.3.3.2** に示す。**図－4.3.3.1** より，表面は内部より 10～180nm の細孔量が多く，1.8～10nm が少ない傾向がある。25 ㎜より内部はほぼ同じであり，表面よりも小さい方にシフトしている。

図－4.3.3.2 より有効細孔量は，供試体 BB7 を除き，表面が大きく内部が小さく，音速分布とは逆の傾向を示している（**図-3.4.6.2** および 4.4.4.1 参照）。BB7 の片側は小さくなっており，音速の結果（**図－4.4.4.1**）とは逆の傾向を示している。BB7 は高炉セメントであり，雨により表面近傍が潜在水硬性などにより緻密になっている可能性がある。このことは，中性化深さ，吸水性などからも裏付けられている（**表-4.3.4.1** および 4.3.4.2 参照）。

表-4.3.3.1　供試体B，Cの細孔構造の指標と推定圧縮強度

試料名	表面からの距離（㎜）	総有効細孔量（cc/g）	中央値（半径）（nm）	戻り比	結合水率（%）	推定圧縮強度（N/㎟）
B-4-3	0～10	0.376	49.6	0.398	11.6	14.7
	20～30	0.360	64.3	0.383	11.5	14.7
	45～55	0.341	55.6	0.392	8.2	14.1
	95～105	0.285	45.2	0.395	8.2	17.1
	145～155	0.395	44.7	0.392	12.0	14.6
	177～187	0.389	52.1	0.389	7.3	12.2
C-4-6	0～10	0.290	28.6	0.397	6.6	17.5
	45～55	0.309	27.7	0.370	5.6	16.6
	90～100	0.360	35.4	0.400	9.6	15.4
C-4-7	0～10（100～110）	0.368	38.1	0.351	16.4	19.8
	20～30（120～130）	0.361	38.3	0.400	13.7	17.5
	45～55（145～155）	0.354	36.2	0.400	11.3	16.5
	90～100（190～200）	0.429	39.1	0.416	15.8	15.4

表-4.3.3.2　壁供試体の細孔構造の指標と推定圧縮強度

供試体	薄片位置（㎜）東面からの距離	総有効細孔量（cc/g）	中央値（半径）（nm）	戻り比	結合水率（%）	推定圧縮強度（N/㎟）
N2	0～10	0.366	40.8	0.560	15.3	15.4
	20～30	0.317	79.3	0.411	24.7	24.6
	45～55	0.322	56.3	0.445	23.3	24.0
	95～105	0.347	28.3	0.450	23.1	25.7
	145～155	0.365	51.1	0.406	21.8	21.6
	170～180	0.342	70.7	0.495	16.8	16.4
	190～200	0.385	49.7	0.545	18.0	15.7
N7	0～10	0.325	41.4	0.562	12.7	15.6
	20～30	0.281	56.3	0.404	22.8	27.4
	45～55	0.244	47.1	0.415	21.2	29.4
	95～105	0.301	44.2	0.450	23.4	26.7
	145～155	0.327	39.3	0.433	23.0	25.6
	170～180	0.323	74.9	0.443	25.7	24.7
	190～200	0.367	44.2	0.555	14.4	14.7
BB7	0～10	0.224	38.5	0.378	24.4	37.6
	20～30	0.294	62.3	0.323	24.5	29.8
	45～55	0.315	34.6	0.344	23.5	30.1
	95～105	0.284	29.5	0.383	23.5	32.6
	145～155	0.306	30.6	0.361	23.6	31.2
	170～180	0.300	40.7	0.298	24.1	32.4
	190～200	0.370	32.8	0.521	18.2	18.3

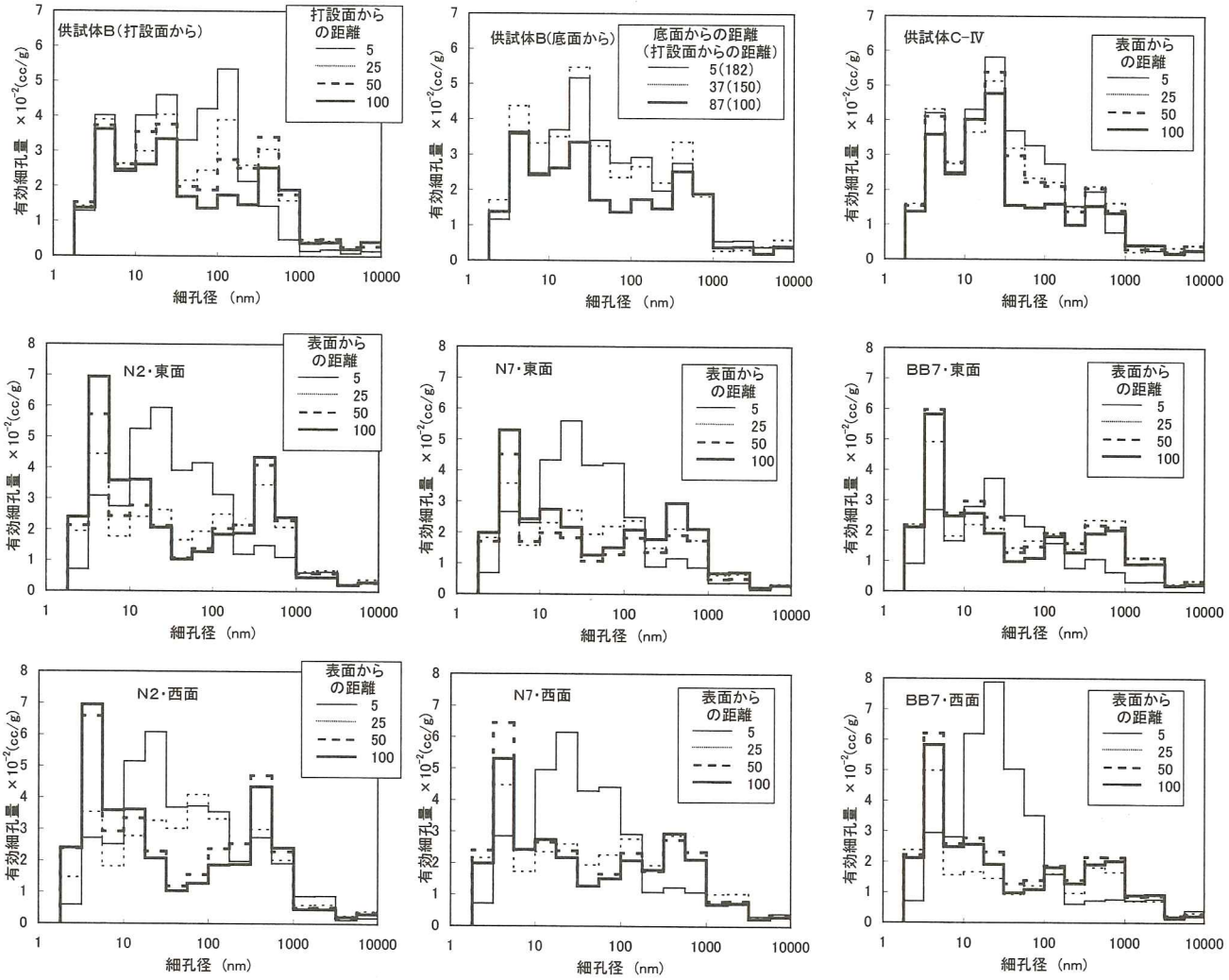


図-4.3.3.1 細孔径分布

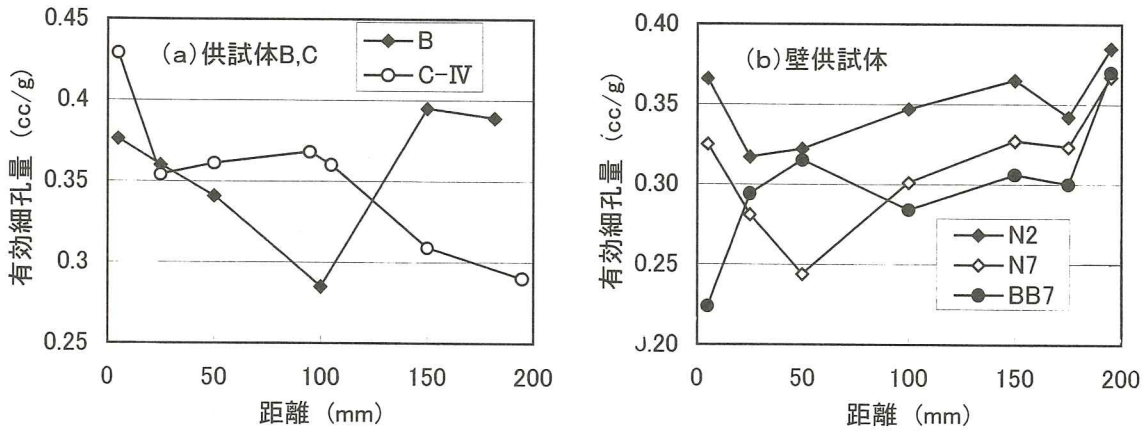


図-4.3.3.2 有効細孔量

4. 3. 4　中性化深さ，透気性，吸水性

表－4. 3. 4. 1は，簡易試験による中性化深さ，透気速度，吸水速度結果である。表-4.3.4.2はコアから測定した中性化深さを示す。

まず第一に，普通セメントを使用した場合に比し，高炉セメントB種を用いたコンクリートの中性化の進行が極めて遅いことがわかる。高炉セメントB種を用いたコンクリートの東面表層10 ㎜程度の組織は緻密であり，簡易透気速度が大きいのは説明できないが，中性化深さ及び簡易吸水速度の結果を説明できる。音速分布も図-4. 4. 4. 1のようにBB7の表層は速くなっている。

中性化深さ試験の簡易法とコアから測定した結果はよく一致している。コアのBB7が小さいのは，0.0 ㎜がほぼ半数あったためであり、0.0 ㎜を除いた平均値は約8 ㎜であり、簡易法はほぼ一致している。

表－4.3.4.1　簡易試験による中性化深さ，簡易透気速度，簡易吸水速度，測定結果

供試体	中性化深さ (㎜)	簡易透気速度 (㎜Hg/sec)	簡易吸水速度 (ml/sec)
N2	20.3	7.5	2.13×10
N7	20.9	12.8	1.52×10
BB7	9	22.1	0.76×10

表-4.3.4.2　コアから測定した中性化深さ

供試体		簡易試験	コア	
		東面	東面	西面
N2	コア本数	-	19	19
	測定数	1	114	114
	最大	-	30.1	38.6
	最小	-	0.0	0.0
	平均	20.3	20.7	18.5
	標準偏差	-	4.9	7.2
N7	コア本数	-	19	19
	測定数	3	95	95
	最大	24.1	37.9	38
	最小	18.2	0.0	0.0
	平均	20.9	20.2	17.6
	標準偏差	2.4	5.6	6
BB7	コア本数	-	19	19
	測定数	1	95	95
	最大	-	19.8	27.6
	最小	-	0.0	0.0
	平均	9.0	3.3	11.4
	標準偏差	-	4.6	4.7

4. 3. 5　実測結果

壁厚さ、鉄筋径、かぶり厚さの実測結果は表-4.3.5.1 のとおりであった。

表-4.3.5.1　実測結果

(a)壁厚さ

供試体	測定位置	厚さ (mm)
N2	②－a	200.3
	②－c	199.3
	②－e	200.5
	③－a	200.4
	③－c	200.1
	③－e	201.2
	③－g	202.6
N7	②－a	200.3
	②－c	197.5
	②－e	197.9
	③－a	202.0
	③－c	197.6
	③－e	198.9
	③－g	199.8
BB7	②－a	197.6
	②－c	198.2
	②－e	198.8
	③－a	198.3
	③－c	197.8
	③－e	198.8
	③－g	199.8

(b)鉄筋径，かぶり厚さ

供試体	測定位置	鉄筋径	かぶり厚さ(mm) 東面	かぶり厚さ(mm) 西面
N2	②-b	D13	41.0	39.6
	③-b		43.5	37.0
	①-d	φ9	48.1	50.2
	④-d		54.9	47.2
N7	②-b	D13	37.9	37.8
	③-b		41.0	35.7
	①-d	φ9	42.9	47.1
	④-d		56.2	39.6
BB7	②-b	D13	40.7	36.3
	③-b		41.0	33.7
	①-d	φ9	49.7	48.2
	④-d		48.3	40.2

4．4　超音波法の測定結果

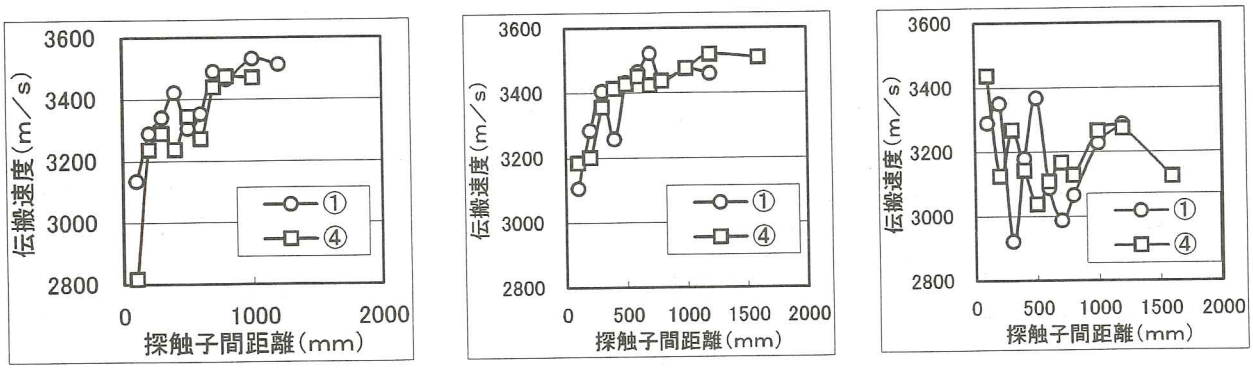
4.4.1　超音波 A(ｴﾙｿﾆｯｸ)

表面走査法による測定結果を**表-4.4.1.1** および**図-4.4.1.1** に示す。

反射時間は**表-4.4.1.2** のとおりである。

表－4.4.1.1　壁供試体の測定結果

供試体	距離		100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1600
N２	伝搬時間	①	31.9	60.8	89.8	116.9	151.3	179.0	200.6	230.9	283.2	341.7	
	音速		3135	3289	3341	3422	3305	3352	3490	3465	3531	3512	
	伝搬時間	④	35.5	61.8	91.2	123.6	149.5	183.4	203.6	230.3	288.2		
	音速		281/	3236	3289	3236	3344	32/2	3438	34/4	34/0		
N７	伝搬時間	①	32.2	60.9	88.1	122.8	145.7	173.2	198.8	232.8	287.9	346.9	
	音速		3106	3284	3405	3257	3432	3464	3521	3436	3473	3459	
	伝搬時間	④	31.4	62.5	89.4	117.2	145.9	173.9	204.5	232.8	287.8	341.1	456.0
	音速		3185	3200	3356	3413	342/	3450	3423	3436	34/5	3518	3509
ＢＢ７	伝搬時間	①	30.4	59.7	102.7	125.8	148.5	194.4	234.4	261.0	309.9	365.2	
	音速		3289	3350	2921	3180	3367	3086	2986	3065	3227	3286	
	伝搬時間	④	29.1	64.0	91.8	127.3	164.6	193.1	221.1	255.8	306.3	366.7	512.2
	音速		3436	3125	3268	3142	3038	310/	3166	312/	3265	32/2	3124



(a) 供試体 N2　　(b) 供試体 N7　　(c) 供試体 BB7

図－4.4.1.1　壁供試体の見かけの音速

表－4.4.1.2　反射時間　(μs)

測線	位置	N2	N7	BB7
①	a	111.0	110.5	113.0
	c	109.5	109.5	115.0
	e	110.5	109.5	113.5
	g	109.5	111.0	111.0
④	a	110.5	110.5	113.0
	c	110.0	111.0	111.5
	e	110.5	111.0	115.0

４．４．２　超音波Ｂ（ｳﾙｺﾝ）

（1）透過法による音速測定結果

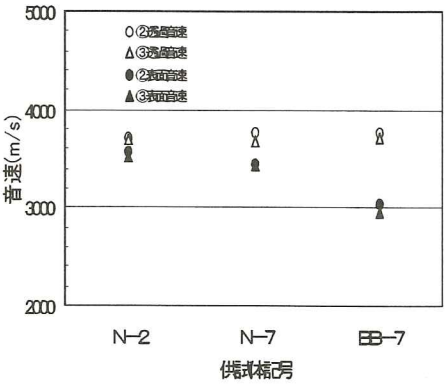
表－4.4.2.1　透過法による音速測定結果

測定位置	実測厚さ (mm)	音速 m/s N－2	N－7	BB－7
②a	200.3	3696	3696	3800
②c	199.3	3718	3776	3733
②e	200.5	3706	3820	3787
平均値		3707	3764	3773
③a	200.4	3732	3673	3813
③c	200.1	3726	3750	3697
③e	201.2	3705	3630	3668
③g	202.6	3611	3653	3686
平均値		3694	3676	3716
全体平均値		3699	3714	3741

（2）伝搬速度測定結果

表－4.4.2.2　伝搬速度測定結果（表面音速）

ﾗｲﾝ No	使用帯域	探触子	探触子間距離 (mm)	音速 m/s N－2	N－7	BB－7
②	高周波	送受信 20φ	100	3745	3571	3636
			200	3130	3086	3521
			300	2933	2865	2523
	低周波	送信 76φ 受信 56φ	300	3778	3831	3275
			400	3707	3373	2924
			500	3521	3408	2950
			600	3452	3468	3015
			700	3426	3182	3007
			800	—	—	—
			平均	3577	3452	3034
③	高周波	送受信 20φ	100	2976	3195	3571
			200	3120	3226	2692
			300	3033	2924	2667
	低周波	送信 76φ 受信 56φ	300	3654	3456	3046
			400	3683	3626	2952
			500	3441	3394	2852
			600	3429	3513	3027
			700	3406	3189	2923
			800	—	—	—
			平均	3523	3436	2960
全体平均値				3550	3444	2997



図－4.4.2.1　各供試体

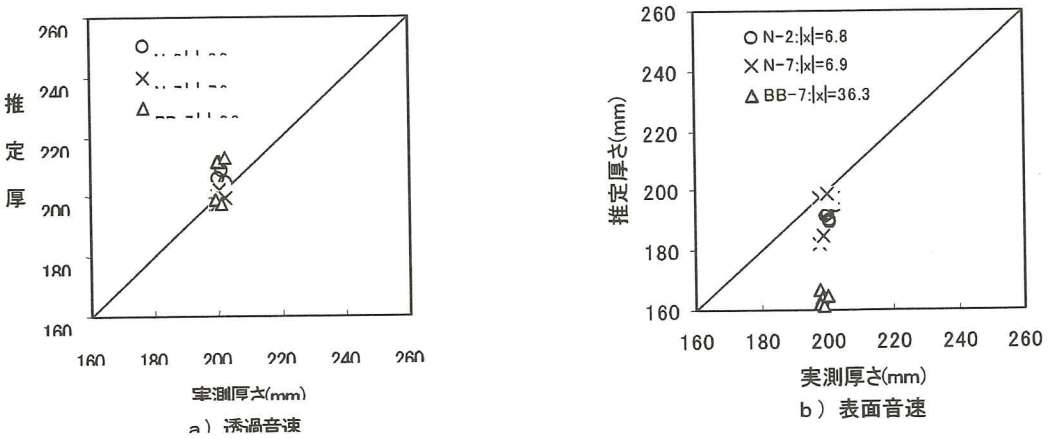
（3）厚さ測定結果

表－4.4.2.3　厚さ測定結果（透過音速を適用）

ﾗｲﾝ No.	N－2 伝搬時間 μs	透過音速 m/s	推定厚さ mm	実測厚さ mm	誤差 mm	N－7 伝搬時間 μs	透過音速 m/s	推定厚さ mm	実測厚さ mm	誤差 mm	BB－7 伝搬時間 μs	透過音速 m/s	推定厚さ mm	実測厚さ mm	誤差 mm
②a	55.6	3707	206.1	200.3	5.8	–	3764	–	200.3	–	54.9	3773	207.1	197.6	9.5
②c	53.6	3707	198.7	199.3	−0.6	52.8	3764	198.7	197.5	1.2	54.0	3773	203.7	198.2	5.5
②e	52.9	3707	196.1	200.5	−4.4	–	3764	–	197.9	–	52.3	3773	197.3	198.8	−1.5
③a	54.0	3694	199.5	200.4	−0.9	57.6	3676	211.7	202	9.7	53.3	3716	198.1	198.3	−0.2
③c	54.6	3694	201.7	200.1	1.6	57.6	3676	211.7	197.6	14.1	54.8	3716	203.6	197.8	5.8
③e	56.5	3694	208.7	201.2	7.5	53.8	3676	197.8	198.9	−1.1	54.6	3716	202.9	198.8	4.1
③g	55.4	3694	204.6	202.6	2.0	57.9	3676	212.8	199.8	13.0	55.6	3716	206.6	199.8	6.8
絶対値平均					3.3					7.9					2.9

表－4.4.2.4　厚さ測定結果（表面音速を適用）

ラインNo.	N－2 伝搬時間 μs	表面音速 m/s	推定厚さ mm	実測厚さ mm	誤差 mm	N－7 伝搬時間 μs	表面音速 m/s	推定厚さ mm	実測厚さ mm	誤差 mm	BB－7 伝搬時間 μs	表面音速 m/s	推定厚さ mm	実測厚さ mm	誤差 mm
②a	55.6	3577	198.9	200.3	−1.4	−	3452	−	200.3	−	54.9	3034	166.6	197.6	−31.0
②c	53.6	3577	191.7	199.3	−7.6	52.8	3452	182.3	197.5	−15.2	54.0	3034	163.8	198.2	−34.4
②e	52.9	3577	189.2	200.5	−11.3	−	3452	−	197.9	−	52.3	3034	158.7	198.8	−40.1
③a	54.0	3523	190.2	200.4	−10.2	57.6	3436	197.9	202	−4.1	53.3	2960	157.8	198.3	−40.5
③c	54.6	3523	192.4	200.1	−7.7	57.6	3436	197.9	197.6	0.3	54.8	2960	162.2	197.8	−35.6
③e	56.5	3523	199.0	201.2	−2.2	53.8	3436	184.9	198.9	−14.0	54.6	2960	161.6	198.8	−37.2
③g	55.4	3523	195.2	202.6	−7.4	57.9	3436	198.9	199.8	−0.9	55.6	2960	164.6	199.8	−35.2
絶対値平均					6.8					6.9					36.3

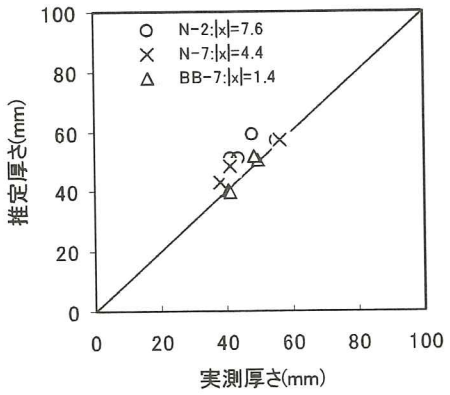


図－4.4.2.2　各供試体の推定厚さと実測厚さの関係

（4）鉄筋かぶり厚さ測定結果

表－4.4.2.5　鉄筋かぶり厚さ測定結果

測定位置	N－2 伝播時間 μs	透過音速 m/s	推定かぶり厚さ mm	実測かぶり厚さ mm	誤差 mm	N－7 伝播時間 μs	透過音速 m/s	推定かぶり厚さ mm	実測かぶり厚さ mm	誤差 mm	BB－7 伝播時間 μs	透過音速 m/s	推定かぶり厚さ mm	実測かぶり厚さ mm	誤差 mm
②b	13.8	3699	51.0	41.0	10.0	11.6	3714	43	37.9	5.2	10.8	3741	40	40.7	−0.3
③b	13.7	3699	50.7	43.5	7.2	13.0	3714	48	41.0	7.3	10.6	3741	40	41	−1.3
①b	16.0	3699	59.2	48.1	11.1	−	−	−	42.9	−	13.4	3741	50	49.7	0.4
④d	15.4	3699	57.0	54.9	2.1	15.3	3714	57	56.2	0.6	13.9	3741	52	48.3	3.7
絶対値平均					7.6					4.4					1.4



図－4.4.2.3　各供試体の推定かぶり厚さと実測かぶり厚さの関係

(5)結果概要

①透過法による音速測定結果について

供試体 N2 の全体平均音速値 3699m/s、供試体 N7 の全体平均音速値 3714m/s、供試体 BB7 の全体平均音速値 3741m/s であった。全体で音速差は約 1%で、供試体間の差はない。

②伝搬速度測定結果について

供試体 N2 の全体平均音速値 3550m/s、供試体 N7 の全体平均音速値 3444m/s、供試体 BB7 の全体平均音速値 2997m/s であった。全体で音速差は約 18%で、供試体間の差は大きかった。これは、コンクリート表面の状態の影響と考えられる。特に、供試体 BB7 の測定表面は、表面風化状態にあり、ザラザラであった。

なお、全体平均音速値は実際の測定センサーと同じセンサーサイズを用いて測定した、測定間距離 300～700mm の値の平均値である。また、**図**-4.4.2.1 に各供試体の平均音速値(透過法による音速測定値及び伝搬速度測定値)を示す。

③厚さ測定結果について

実測厚さ約 200mm に対し、誤差範囲(表面音速を用いた供試体 BB7 を除く)は-15.2～14.1mm であり、誤差率約 8%以内であった。なお、供試体 BB7 においては、適用音速の違いにより大きな差がある。これは、②項で述べたようにコンクリート表面の状態(表面風化によりザラザラであった)の影響と考えられる。今後、表面音速を用い厚さ測定を行う時は、表面風化等によりコンクリート表面の状態が悪い場合は、表面の処理を必要とする。

なお、表面音速は測定位置近傍の平均伝搬速度(測定間距離 300～700mm)を用いた。また、**図**-4.4.2.2 に各供試体の推定厚さと実測厚さの関係を示す。

表-4.4.2.6

適用音速	供試体	誤差 (mm) 推定値-実測値	誤差率 (%)	絶対値 平均
透過音速	N2	-4.4～ 7.5	-2.2～ 3.7	3.3
	N7	-1.1～ 14.1	-0.6～ 7.1	7.9
	BB7	-1.5～ 9.5	-0.8～ 4.8	2.9
表面音速	N2	-11.3～ -1.4	-5.6～ 0.7	6.8
	N7	-15.2～ 0.3	-7.7～ 0.2	6.9
	BB7	-40.5～-31.0	-20.4～-15.7	36.3

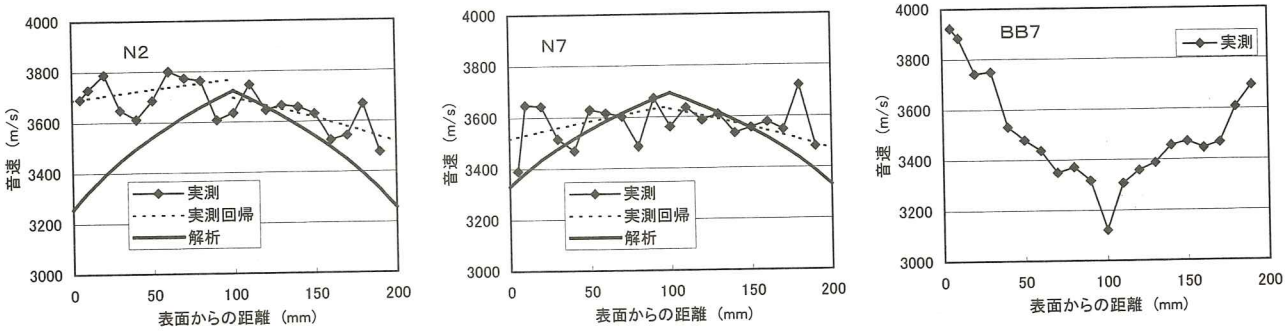
④鉄筋のかぶり厚さ測定結果について

表-4.4.2.5 に測定結果を示す。また、**図**-4.4.2.3 に各供試体の推定かぶり厚さと実測かぶり厚さの関係を示す。誤差範囲は-1.3～11.1mm であり、推定かぶり厚さと実測かぶり厚さの関係では、大きなバラツキ及び偏りは見られない。

なお、適用音速は透過音速のみとした。

4. 4. 3　音速分布の解析結果と実測値の比較

壁供試体の内部の音速分布の測定結果は表-4. 4. 3. 1 および図-4. 4. 3. 1 のとおりである。供試体 BB7 では表層が速くなっている。これは、高炉セメントが、雨により表面近傍が潜在水硬性などにより緻密になったものと考えられる。そのほかの供試体は、表層が遅く内部が速くなる一般的な傾向を示している。



図－4.4.3.1　音速分布の解析結果と直接測定結果の比較

表－4.4.3.1　　コンクリート内部の透過時間　　（μs）

表面からの距離 (mm)		N2		N7		BB7	
		2-3	5-6	2-3	5-6	2-3	5-6
		東面					
5		42.9	40.9	39.6	42.9	37.2	37.7
10		39.9	39.7	39.2	43.5	37.6	39.9
20		40.0	39.9	38.6	43.0	39.1	42.8
30		41.5	40.3	40.1	41.7	39.1	43.1
40		42.1	40.6	40.5	41.7	41.6	43.1
50		40.3	40.7	39.7	42.6	42.3	41.1
60		40.5	41.1	38.5	42.2	42.9	40.8
70		40.7	41.6	38.8	42.7	44.1	41.3
80		42.1	40.2	38.9	42.2	43.9	41.6
90		40.0	41.6	40.6	42.3	44.7	40.9
100		41.3	42.5	40.3	42.5	47.6	42.0
110		40.5	41.8	39.1	42.6	45.0	42.3
120		41.1	41.8	40.2	42.5	44.4	41.6
130		40.9	41.9	40.0	42.6	44.1	41.8
140		41.8	40.4	40.1	43.8	43.3	42.3
150		41.6	41.0	40.4	42.5	43.2	41.7
160		41.4	42.5	41.6	43.1	43.6	41.4
170		41.8	41.4	41.4	42.8	43.4	41.3
180		39.9	42.7	40.0	43.4	41.8	38.4
190		42.7	46.1	42.2	44.8	40.9	39.0
測定間隔	東面	146.2	150.0	145.4	147.5	145.8	146.2
	西面	146.8	148.7	148.8	149.8	151.3	143.5

４．４．４　音速分布と壁厚さの解析結果と実測値の比較

３章で検討した音速分布，厚さの求め方によって求めた結果を表－4.4.4.1 に示す。

(1)音速分布

音速分布の解析結果より，表面音速 Vo は 2000m/s 台となっている。脱型材齢の異なる N2 と N7 を比較すると，N7 のほうが速く，品質のいいことがわかる。このことは，4.7 節の内部の音速分布の測定結果，細孔径分布とも傾向は一致している。一方，内部音速 V_1 は，同一のコンクリートであることから両者ほぼ一致しており，表面の劣化の程度に違いのあることがわかる。　表層厚さ h_1 も比較すると，N2 の方が深くなっている。

(2)壁厚さ

厚さは，次のように求めた。

① 壁部材なので音速分布は対称と考え，音速分布と反射時間から 1/2 の厚さ h/2 を求めた。

② h/2 と表層厚さ h_1 を比較し，$h/2<h_1$ 場合は，音速分布内に壁の中心があることになり，壁厚さは h/2 を２倍することによって求めた。

③ $h/2>h_1$ の場合，内部音速(内部の音速一定)域を有することになり，表層厚さ h_1 の往復時間 t_1 を求めた。

④ 内部音速域の往復時間 t_2 は，$t_2=t/2-t_1$ によって求める。

⑤ 内部音速域の厚さ $h_2/2$ は，$h_2/2=V_1 \cdot t_2/2$ によって求める。V_1 は内部音速である。

⑥ $h/2<h_1$ の場合の壁厚さは，$h=(h_1+h_2/2)\times 2$ によって求めた。

解析の結果，N2 は 3.0～5.6%とやや小さい結果となったが，N7 は-1.9～0.2%の範囲に入っており,非常に良好な結果であった。

表－4.4.4.1　音速分布，厚さの解析結果と実測値の比較

供試体	測線	位置	音速分布の解析結果					反射時間 t	1/2の厚さ h/2	音速分布域の往復時間 t_1	内部音速域の厚さ $h_2/2$	厚さ h (mm)		
			Vo	K	ho	h_1	V_1	μs	mm	μs	mm	解析h	実測	解／実
N2	①	a	2629	2430	2.2	101.7	3866.1	111.0	97.1			194.3	200.3	0.970
		b	2629	2430	2.2	101.7	3866.1	109.5	95.7			191.4	199.3	0.960
		c	2629	2430	2.2	101.7	3866.1	110.5	96.7			193.3	200.5	0.964
		d	2629	2430	2.2	101.7	3866.1	109.5	95.7			191.4	200.4	0.955
	④	a	2481	2417	1.3	102.4	3844.6	110.5	95.6			191.3	200.1	0.956
		c	2481	2417	1.3	102.4	3844.6	110.0	95.2			190.3	201.2	0.946
		e	2481	2417	1.3	102.4	3844.6	110.5	95.6			191.3	202.6	0.944
N7	①	a	2864	2459	4.6	74.1	3805	110.5	98.9	42.4	24.5	197.1	200.3	0.984
		b	2864	2459	4.6	74.1	3805	109.5	97.9	42.4	23.5	195.2	197.5	0.988
		c	2864	2459	4.6	74.1	3805	109.5	97.9	42.4	23.5	195.2	197.9	0.986
		d	2864	2459	4.6	74.1	3805	111.0	99.4	42.4	24.9	198.1	202.0	0.981
	④	a	2910	2463	5.3	73.7	3812.7	110.5	99.3	42.0	25.3	197.9	197.6	1.002
		b	2910	2463	5.3	73.7	3812.7	111.0	99.8	42.0	25.7	198.9	198.9	1.000
		c	2910	2463	5.3	73.7	3812.7	111.0	99.8	42.0	25.7	198.9	199.8	0.995

４．５　レーダ法の測定結果

４．５．１　レーダＤ（NJJ-85A　ハンディサーチ）

（１）壁供試体 N7、N2、BB7 の測定結果

壁供試体の測定結果の詳細を表－4.5.1.1～表－4.5.1.3 に示す。

表-4.5.1.1　壁供試体Ｎ7 の比誘電率の推定

供試体　N7

シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）

	鉄筋位置及び厚さ測定位置													
	厚さ測定位置		鉄筋位置		厚さ測定位置		厚さ測定位置		鉄筋位置		厚さ測定位置		鉄筋位置	
	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値
②ライン	—		—		厚さ測定位置③		厚さ測定位置②		鉄筋位置ａ		厚さ測定位置①		—	
	—	—	(39.0) 40.8	—	242.0 282.0	253.4 54.1	190.0	197.9	(33.0) 34.5	37.9	192.0	200.3	(36.0) 37.7	—
比誘電率	—		—				7.37		—		7.35		—	
③ライン	厚さ測定位置⑦		—		厚さ測定位置⑥		厚さ測定位置⑤		鉄筋位置ｂ		厚さ測定位置④		—	
	192.0	199.8	(44.0) 46.0	—	192.0	198.9	187.0	197.6	(36.0) 37.7	41.0	194.0	202.0	(39.0) 40.8	—
比誘電率	7.39		—		7.45		7.16		—		7.38			
dライン	—		鉄筋位置ｄ		—		—		鉄筋位置ｃ		—		—	
	—	—	(49.0) 51.3	56.2	242.0 282.0	253.4 54.1	—	—	—	—	—	—	—	—
比誘電率	—		—		—		—		—		—		—	

＊比誘電率の平均値 ε_{rv} は、$\varepsilon_{rv}=8\times(190.3/199.1)^2$ ＝ **7.31**

＊厚さ測定からの比誘電率の推定値　$\varepsilon_{rv}=8\times$（測定値／実測値）^{2}

→ 比誘電率の平均値　$\varepsilon_{rv}=8\times$（測定値平均／実測値平均）^{2}

＊鉄筋のカブリ測定値は、深度較正：0（ε_{rv}=8）で測定した値｛（　）内の値｝に

$\sqrt{8.0}$／（厚さ測定から求めた比誘電率推定値の平均値）の係数を掛けて求める。→ **1.046**

表-4.5.1.2　壁供試体Ｎ2 の比誘電率の推定

供試体　N2

シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）

	鉄筋位置及び厚さ測定位置													
	厚さ測定位置		鉄筋位置		厚さ測定位置		厚さ測定位置		鉄筋位置		厚さ測定位置		鉄筋位置	
	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値
②ライン	—		—		厚さ測定位置③		厚さ測定位置②		鉄筋位置ａ		厚さ測定位置①		—	
	—	—	(36.0) 37.1	—	194.0	200.5	194.0	199.3	(39.0) 40.2	37.9	196.0	200.3	(33.0) 34.0	—
比誘電率	—		—		7.49		7.58		—		7.66		—	
③ライン	厚さ測定位置⑦		—		厚さ測定位置⑥		厚さ測定位置⑤		鉄筋位置ｂ		厚さ測定位置④		—	
	194.0	202.6	(39.0) 40.2	—	196.0	201.2	194.0	200.1	(39.0) 40.2	43.5	194.0	200.4	(36.0) 37.1	—
比誘電率	7.34		—		7.59		7.52		—		7.50			
dライン	—		鉄筋位置ｄ		—		—		鉄筋位置ｃ		—		—	
	—	—	(47.0) 48.5	54.9	—	—	—	—	(44.0) 45.4	48.1	—	—	—	—
比誘電率	—		—		—		—		—		—		—	

＊比誘電率の平均値 ε_{rv} は、$\varepsilon_{rv}=8\times(194.6/200.6)^2$ ＝ **7.53**

＊厚さ測定からの比誘電率の推定値　$\varepsilon_{rv}=8\times$（測定値／実測値）^{2}

→ 比誘電率の平均値　$\varepsilon_{rv}=8\times$（測定値平均／実測値平均）^{2}

＊鉄筋のカブリ測定値は、深度較正：0（ε_{rv}=8）で測定した値｛（　）内の値｝に

$\sqrt{8.0}$／（厚さ測定から求めた比誘電率推定値の平均値）の係数を掛けて求める。→ **1.031**

表-4.5.1.3　壁供試体 BB7 の比誘電率の推定

供試体　BB7																	
シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）																	
	鉄筋位置及び厚さ測定位置																
	厚さ測定位置		鉄筋位置		厚さ測定位置		厚さ測定位置		鉄筋位置		厚さ測定位置		鉄筋位置			
	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値	測定値	実測値		
②ライン	—		—		厚さ測定位置③		厚さ測定位置②		鉄筋位置 a		厚さ測定位置①		—			
	—	—	(39.0) 40.2	—	190.0	198.8	190.0	198.2	(39.0) 40.2	40.7	192.0	197.5	(36.0) 37.1	—		
比誘電率	—		—		7.31		7.35		—		7.55		—			
③ライン	厚さ測定位置⑦		—		厚さ測定位置⑥		厚さ測定位置⑤		鉄筋位置 b		厚さ測定位置④		—			
	194.0	199.8	(39.0) 40.2	—	192.0	198.8	196.0	197.8	(39.0) 40.2	30.7	194.0	198.3	(36.0) 37.1	—		
比誘電率	7.54		—		7.46		7.85		—		7.66					
dライン	—		鉄筋位置 d		—		—		鉄筋位置 c		—		—			
	—	—	(44.0) 45.4	48.3	—	—	—	—	(47.0) 48.5	49.7	—	—	—	—		
比誘電率	—		—		—		—		—		—		—			

＊比誘電率の平均値 ε_{rv} は、$\varepsilon_{rv}=8\times(192.6/198.5)^2=$ 7.53

＊厚さ測定からの比誘電率の推定値　$\varepsilon_{rv}=8\times$（測定値／実測値）^{2}

→　比誘電率の平均値　$\varepsilon_{rv}=8\times$（測定値平均／実測値平均）^{2}

＊鉄筋のカブリ測定値は、深度較正：0（$\varepsilon_{rv}=8$）で測定した値［（　）内の値］に

$\sqrt{8.0}$／（厚さ測定から求めた比誘電率推定値の平均値）の係数を掛けて求める。　→　係数 1.031

（2）　壁厚実測値から壁の比誘電率を推定

壁供試体 N7、N2、BB7 について、壁厚の測定値と実測値から、各壁供試体の比誘電率を推定し、その結果を**表-4.5.1.4** に示す。

表-4.5.1.4　壁供試体の比誘電率推定一覧

	壁供試体　N7	壁供試体　N2	壁供試体　BB7
各比誘電率推定表	表-4.5.1.1	表-4.5.1.2	表-4.5.1.3
推定比誘電率値	7.31	7.53	7.53

上の表から壁供試体 N7、N2、BB7 の各々の推定比誘電率値は 7.3～7.5 の範囲にあることがわかる。

（3）　測定鉄筋かぶり厚さの補正と実測かぶりとの比較

推定した各壁供試体の比誘電率から鉄筋の測定かぶり厚さを補正し、実測鉄筋かぶり厚さとの誤差を**表-4.5.1.5** に示す。

表-4.5.1.5　壁供試体の測定鉄筋かぶり誤差一覧

測定箇所	壁供試体　N7			壁供試体　N2			壁供試体　BB7		
	測定値	実測値	誤差	測定値	実測値	誤差	測定値	実測値	誤差
a	34.5	37.9	-3.4	40.2	41.0	-0.8	40.2	40.7	-0.5
b	37.7	41	-3.3	40.2	43.5	-3.3	40.2	41	-0.8
c	40.8	42.9	-2.1	45.4	48.1	-2.7	48.5	49.7	-1.2
d	51.3	56.2	-4.9	48.5	54.9	-6.4	45.4	48.3	-2.9

表-4.5.1.5 から解かるように壁供試体 N7、N2 の d の箇所の誤差は 5～6mm あり、他の a ～ c の箇所（3mm 以下）に比べて大きくなっているが、装置の読取りの細かさ(ns/144 点≒300mm/144 点≒2.1mm/1 点)、材質(比誘電率)のバラツキを考えると、妥当な結果と言える。

4.5.2　レーダE(地下レーダー)

壁供試体では同型のBB-7、N-2、N-7の3供試体を測定した。測定に際してはできる限り時間分解能が高くなるように次の要領とした。

○アンテナには分解能の最も高い中心周波数1500MHzを使用した。

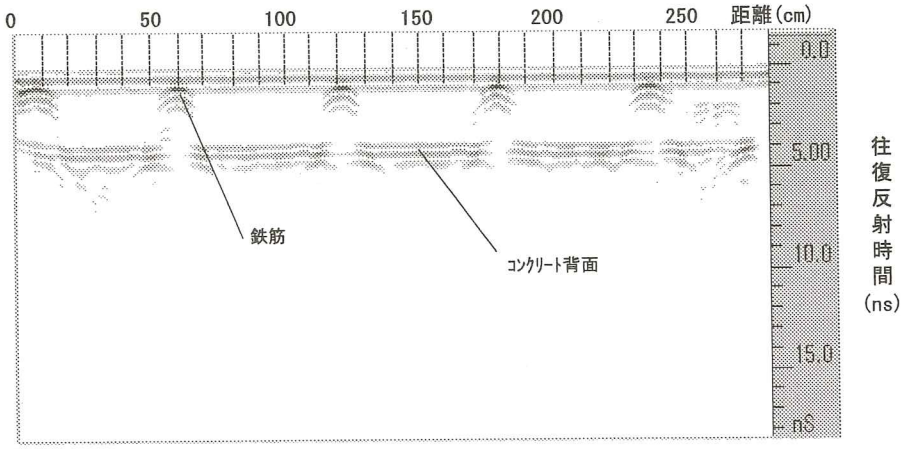
○ワイドアングル測定は900MHzを2台使用した。測定場所は②あるいは③測線とした。

○測定器のサンプリングレートは最大である2048点／波形、データ長は16ビットにした。

○時間レンジは20nsにした。

（1）測定記録

例として、BB-7供試体の②測線の測定記録を図－4.2.2.1に示す。



図－4.2.2.1　BB-7供試体②測線の測定記録(1500MHzアンテナ使用)

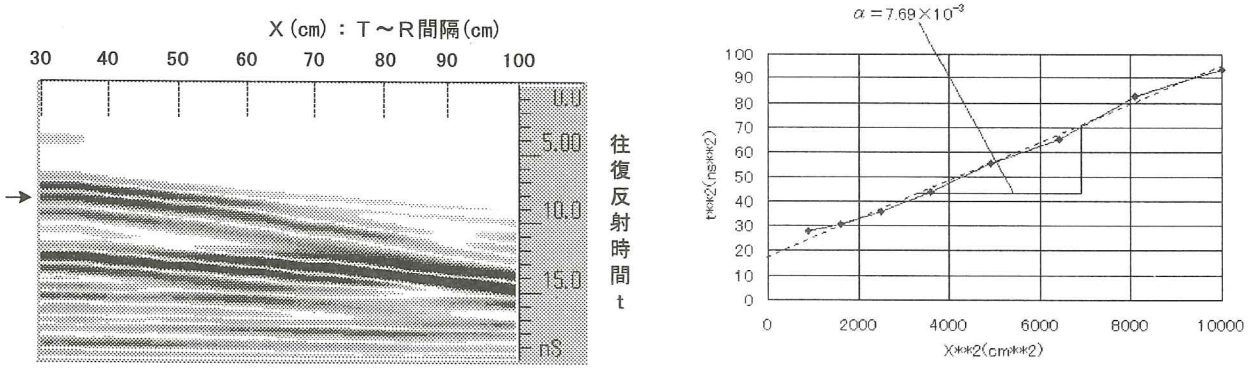
（2）電磁波速度測定結果

T/R間隔～往復反射時間関係を表－4.2.2.1に、N-2供試体で行ったワイドアングルの測定記録、解析結果を図－4.2.2.2に示す。

表－4.2.2.1　ワイドアングル法測定結果

BB-7			N-2			N-7		
測定位置	T/R間隔(cm)	往復反射時間(ns)	測定位置	T/R間隔(cm)	往復反射時間(ns)	測定位置	T/R間隔(cm)	往復反射時間(ns)
③	30	5.19	②	30.0	5.27	②	30.0	5.23
③	40	5.46	②	40.0	5.52	②	40.0	5.49
③	50	5.88	②	50.0	5.99	②	50.0	5.91
③	60	6.51	②	60.0	6.62	②	60.0	6.60
③	70	7.36	②	70.0	7.44	②	70.0	7.42
③	80	7.99	②	80.0	8.07	②	80.0	8.05
③	90	9.01	②	90.0	9.09	②	90.0	9.06
③	100	9.58	②	100.0	9.66	②	100.0	9.59

ワイドアングル記録を解析した結果、BB-7、N-2、N-7供試体の電磁波速度は各々11.6cm/ns、11.4cm/ns、11.6cm/nsになった。



図—4.2.2.2　N-2 供試体ワイドアングル法の測定記録と解析結果

（3）版厚算出結果

版厚算出結果を**表—4.2.2.2** に示す。

表—4.2.2.2　版厚算出結果一覧表

供試体名	測定地点	ｺｱﾘﾝｸﾞによる実測値① (mm)	往復反射時間 (ns)	ﾜｲﾄﾞｱﾝｸﾞﾙ法		②／①
				速度 (cm/ns)	版厚② (mm)	
BB-7	②a	197.6	3.41	11.6	198	1.002
	②c	198.2	3.55		206	1.039
	②e	198.8	3.48		202	1.016
	③a	198.3	3.48		202	1.019
	③c	197.8	3.55		206	1.041
	③e	198.8	3.55		206	1.036
	③g	199.8	3.55		206	1.031
	平均	198.5	3.51	———	204	1.026
N-2	②a	200.3	3.48	11.4	198	0.989
	②c	199.3	3.62		206	1.034
	②e	200.5	3.55		202	1.007
	③a	200.4	3.48		198	0.988
	③c	200.1	3.58		204	1.019
	③e	201.2	3.62		206	1.024
	③g	202.6	3.55		202	0.997
	平均	200.6	3.55	———	202	1.008
N-7	②a	200.3	3.48	11.6	202	1.008
	②c	197.5	3.48		202	1.023
	②e	197.9	3.48		202	1.021
	③a	202.0	3.48		202	1.000
	③c	197.6	3.48		202	1.022
	③e	198.9	3.45		200	1.006
	③g	199.8	3.59		208	1.041
	平均	199.1	3.49	———	203	1.017

（4）鉄筋配置算出結果

鉄筋配置算出結果を**表―4. 2. 2. 3** に示す。

表－4. 2. 2. 3　鉄筋配置算出結果一覧

供試体 No.	地下レーダー測定結果				かぶりの実測値 (mm) ①	②／①
	位置	距離 (cm)	間隔 (cm)	かぶり② (mm)		
BB-7		5		50.5		
	③b	60	55	52.8	41.0	1.288
	③f	121	61	51.0		
		179	58	59.7		
		235	56	59.7		
N-2		3		52.4		
	③b	63	60	49.0	43.5	1.126
	③f	120	63	52.4		
		184	64	54.2		
		237	53	58.7		
N-7		1		56.8		
	③b	60	59	47.6	41.0	1.161
	③f	122	62	47.6		
		182	60	54.5		
		235	52	47.6		

（5）測定結果のまとめ

壁供試体では速度測定はワイドアングル法しか行っていないが、コアリングによる実測値と比較した誤差は、**表－4. 2. 2. 2** のように、BB-7、N-2、N-7 各々で平均 2.6%、0.8%、1.7%と小さなものになった。

これは、電磁波速度が 11.4cm/ns～11.6cm/ns と高いように、打設後 16 年経過し、材質が安定していることと、**図－4. 2. 2. 1** あるいは**表－4. 2. 2. 3** に示したように、鉄筋間隔が 60cm 前後と広く、コンクリート版の背面反射波に鉄筋反射波の混入する割合が小さかったためであると考えられる。

一方、鉄筋のかぶりは誤差が 10%以上と版厚に比較して大きくなっているが、これは地下レーダーでは送信アンテナから受信アンテナに至る斜距離をかぶりとしているためである。

４．６　衝撃弾性波法の測定結果

4.6.1 弾性波 G（Knocker）

4.6.1.1 測定結果

弾性波法 G（Knocker）により、材齢 16 年の壁供試体での反射波の振動数 f_0 を求め、厚さ D を

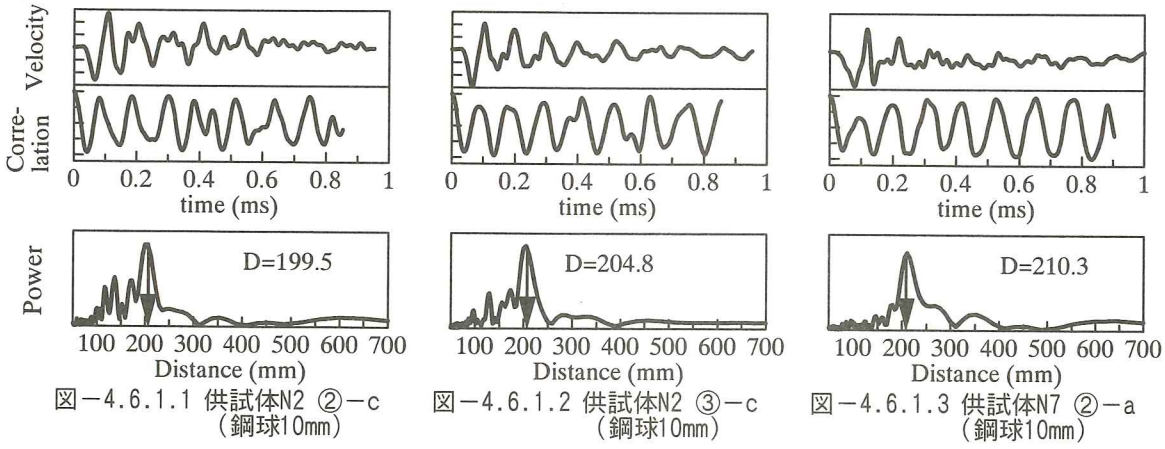
$$D = \frac{V_P}{2f_0} \qquad \text{（式 4.6.1.1）}$$

（V_P：反射波速度）により測定した。測定結果を表－4.6.1 に、詳細解析図を図－4.6.1.1～図－4.6.1.6 に示す。なお、V_Pについては 3800m/s と仮定値を用いた。

表－4.6.1.1 壁供試体厚さ測定結果一覧

供試体	測定位置	①実寸 (mm)	f_0(Hz)	②D (mm)	②/①
N2	②－a	200.3	9277	204.8	1.022
	②－c	199.3	※ 9521	199.5	1.001
	②－e	200.5	9033	210.3	1.049
	③－a	200.4	9766	194.6	0.971
	③－c	200.1	※ 9277	204.8	1.023
	③－e	201.2	9277	204.8	1.018
	③－g	202.6	8789	216.2	1.067
N7	②－a	200.3	※ 9033	210.3	1.050
	②－c	197.5	9766	194.6	0.985
	②－e	197.9	※ 9521	199.5	1.008
	③－a	202.0	9277	204.8	1.014
	③－c	197.6	9277	204.8	1.036
	③－e	198.9	9521	199.5	1.003
	③－g	199.8	9033	210.3	1.053
BB7	②－a	197.6	9277	204.8	1.036
	②－c	198.2	9033	210.3	1.061
	②－e	198.8	9277	204.8	1.030
	③－e	197.8	※ 9277	204.8	1.035
	③－g	199.8	※ 9277	204.8	1.025

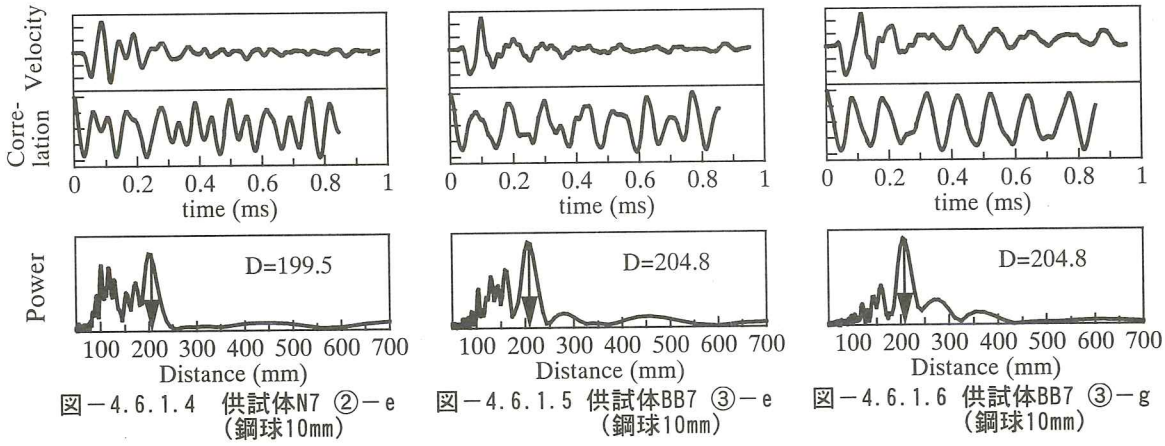
※については、詳細解析図を以下に示す。



図－4.6.1.1 供試体N2 ②－c（鋼球10mm）

図－4.6.1.2 供試体N2 ③－c（鋼球10mm）

図－4.6.1.3 供試体N7 ②－a（鋼球10mm）



図－4.6.1.4　供試体N7 ②－e（鋼球10mm）

図－4.6.1.5 供試体BB7 ③－e（鋼球10mm）

図－4.6.1.6 供試体BB7 ③－g（鋼球10mm）

4.6.1.2 壁供試体測定結果考察

材齢 16 年の壁供試体を用いて、2.3.1 で示した測定方法により反射波の振動数を求め、弾性波速度を 3800m/s と仮定値を用いてコンクリートの厚さを測定した。その結果、測定厚さを実際の厚さで割った比率から調べた平均誤差は 3.0％と良く一致し、本測定方法により長年経過したコンクリートにおいても反射波の振動数が正確に測定できることが示された。

また、供試体 N2 ②－c（**図－4.6.1.1**）では、厚さ以外の内部に相当する 120、130mm 付近でパワースペクトルがピークとなった。この原因が打撃鋼球の直径による影響（表面波による影響）であれば、本測定は全測定点とも直径 10mm の鋼球で打撃して測定したので、全測定点ともこの位置にピークが存在することになる。しかし、**図－4.6.1.1～図－4.6.1.6** より測定点によってピークの存在が変化する。これから、ピークが存在するのは表面波の影響ではなく、コンクリート壁内に反射点が存在すると推測される。

供試体 N2 ②－c 以外に、厚さ以外の内部に相当する位置でパワースペクトルがピークとなった測定点は、供試体 N2 ②－a、供試体 N2 ③－c（**図－4.6.1.2**）、供試体 N7 ②－e（**図－4.6.1.4**）、供試体 N7 ③－a、供試体 N7 ③－c、供試体 BB7 ③－e（**図－4.6.1.5**）である。

4.6.2 弾性波 H　(インパクトエコー)

4.6.2.1 壁供試体 N-2、N-7、BB-7

本法により、壁供試体 N-2、N-7、および BB-7 の厚さを測定した。表面弾性波のＰ波速度は、各供試体とも、2.3.2.3 の方法にて②のラインと③のライン上の b をまたぐ個所で一箇所それぞれ測定し、各ライン上の測定点のＰ波速度として厚さ測定にもちいた。各供試体の測定結果を表-4.6.2.1 に記す。

なお、鉄筋の厚さ周波数 f に対する影響を調べるため、供試体 N-2 において③-b 上で厚さ周波数を測定した。

表-4.6.2.1　壁供試体 N-2、N-7、BB-7 の厚さ測定結果

供試体	測定点	t_1 (μs)	t_2 (μs)	P波速度Cp (m/s)	適用速度 0.96Cp	厚さ周波数f (kHz)	測定厚さ (mm)	ｺｱ実測値 (mm)	測／実	誤差 (%)
N-2	②-a	95.0	176.5	3681	3534	8.79	201.0	200.3	1.004	0.4
	②-c					8.79	201.0	199.3	1.009	0.9
	②-e					8.79	201.0	200.5	1.003	0.3
	③-a	90.0	172.5	3636	3491	9.52	183.4	200.4	0.915	-8.5
	③-c					8.79	198.6	200.1	0.992	-0.8
	③-e					8.79	198.6	201.2	0.984	-1.3
	③-g					8.54	204.4	202.6	1.009	0.9
	③-b					8.54	204.4	—	—	—
N-7	②-a	95.0	176.5	3681	3534	8.79	201.0	200.3	1.004	0.4
	②-c					9.28	190.4	197.5	0.964	-3.6
	②-e					9.28	190.4	197.9	0.962	-3.8
	③-a	94.0	176.5	3636	3491	8.79	198.6	202.0	0.983	-1.7
	③-c					8.79	198.6	197.6	1.005	0.5
	③-e					9.03	193.3	198.9	0.972	-2.8
	③-g					8.79	198.6	199.8	0.994	-0.6
BB-7	②-a	95.0	178.5	3593	3449	8.79	196.2	197.6	0.993	-0.7
	②-c					8.79	196.2	198.2	0.990	-1.0
	②-e					8.79	196.2	198.8	0.987	-1.3
	③-a	96.0	178.5	3636	3491	9.03	193.3	198.3	0.975	-2.5
	③-c					8.79	198.6	197.8	1.004	0.4
	③-e					8.79	198.6	198.8	0.999	-0.1
	③-g					8.79	198.6	199.8	0.994	-0.6

4.6.2.2 鉄筋の厚さ周波数 f に対する影響

図-4.6.2.1 に壁供試体 N-2 の測定点③-b に於ける測定スペクトルを示した。そのスペクトラムによると、厚さ周波数は 8.54kHz であり、Ｐ波のコンクリート版の適用速度 0.96×Cp が 3496m/s であったので、厚さは 204.4mm となる。3.6.2.3 で述べたように、受信センサの設置の仕方によっては、表面弾性波速度が鉄筋の影響をうけるが、ここでは、鉄筋をまたがって表面弾性波のＰ波速度を測定したので速度への影響は殆どなかった。一方、測定した厚さ周波数はその他の測定点の測定値と殆ど変わらず、鉄筋は厚さ周

波数に対しては大きな影響を与えない事が判る。

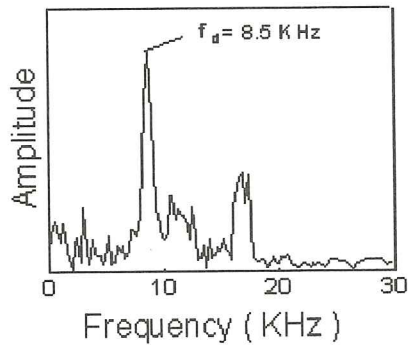


図-4.6.2.1　供試体 N-2 の鉄筋上の③-b における厚さ周波数

これは、コンクリートに対する鉄筋の体積比は非常に小さく、厚さモードの振動周波数は鉄筋の存在によって大きく影響されないからであると考えられる。したがって鉄筋方向を避けるなどして受信センサを設置し、3.6.2.4 でのべた条件に注意し鉄筋の影響を受けないで表面弾性波速度を測定できれば、鉄筋上で厚さ周波数を測定してコンクリートの厚さをもとめても支障はないものと思われる。

4.6.2.4 壁供試体測定実験のまとめ

壁供試体の測定実験において、測定誤差は供試体 N-2 や N-7 の一部で−8.5%や−3.8、−3.6%などがみられたが、それ以外ではほぼ±2%の範囲におさまり、これらの供試体のように凹凸や複雑な形状ではない一様な版状の測定対象の場合、本法は概ね厚さ測定に適用可能であると思われる。

また、鉄筋上であっても厚さ周波数自身は鉄筋の影響をうけないので、表面弾性波速度の測定に注意すれば、充分厚さの測定が可能と思われる。

４．７　超音波法による品質推定

４．７．１　圧裂強度分布と音速、有効細孔量と圧裂強度分布の関係

供試体A～Cは、図－3.3.1.7のように内部の圧裂強度分布結果がある。また、図-3.4.6.2のように音速分布を求めている。両者の図より、表面から同じ距離の圧裂強度と音速の関係を示すと図－4.7.1.1のようであった。同様に図－3.3.1.7と4.3.3.2より有効細孔量と圧裂強度の関係を求めると図－4.7.1.2のようになった。圧裂強度の変化はわずかであり，あまり明確ではないが図－4.7.1.1は右上がり，つまり圧裂強度が大きくなると音速が速くなる傾向，図－4.7.1.2は有効細孔量が大きくなると圧裂強度は低下する傾向がある。

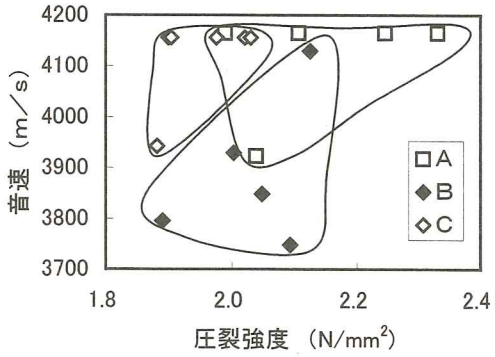


図-4.7.1.1　圧裂強度と音速の関係

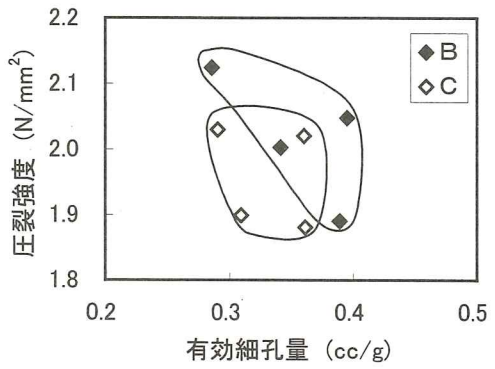


図-4.7.1.2　有効細孔量と圧裂強度の関係

４．７．２　有効細孔量と音速の関係

同様に図－4.4.4.1と4.3.3.2から有効細孔量と音速の関係は図－4.7.2.1のようになった。有効細孔量が大きくなると音速が小さくなる傾向があることがわかる。また，同じコンクリートを使用したBとCはほぼ同じ分布であること，脱型の早いN2は養生が不十分なため，脱型の違いによりN7より有効細孔量が大きいこと，呼び強度の高いB，Cは，低いN2，N7より音速は大きいが，水セメント比はほぼ同じなので有効細孔量の範囲はほぼ同じであることなど，通常考えられているコンクリートの品質を評価できていることがわかる。

このことより，音速分布は，耐久性に大きな影響を及ぼす細孔径分布も間接的に評価できるものと考えられる。

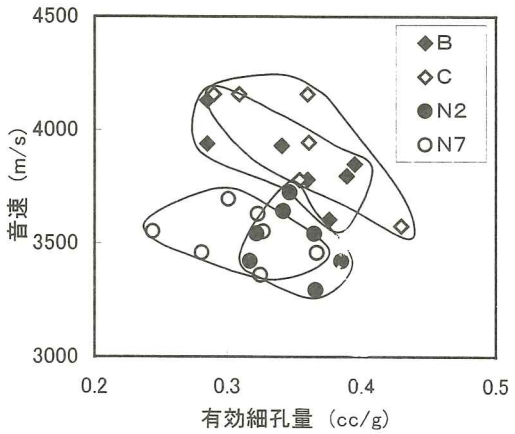


図-4.7.2.1　有効細孔量と音速の間径

【参考文献】

4.1) 湯浅　昇,笠井芳夫,松井　勇：乾燥を受けたｺﾝｸﾘｰﾄの表層から内部にわたる含水率、細孔構造の不均質性、日本建築学会構造系論文集、第 509 号、pp.9-16, 1998.7

4.2.3.1) 吉野利幸,鎌田英治,田畑雅幸,柳　敏幸：空隙構造依存性に基づくｺﾝｸﾘｰﾄ強度推定法に関する研究－第 1 報 圧縮強度と空隙構造の関係－、日本建築学会論文報告集、第 312 号、pp.9-17, 1982.2

4.2.3.2) （社）セメント協会：硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告書，コンクリート専門委員会報告 F-18,1967.9

4.2.3.3) ASTM C85-66 Standard Test Method for Cement Content of Hardened Portland Cement Concrete

4.2.3.4) J. Jomber： Influence of Phase Composition of Hardened Binder Paste on Its Pore Structure and Strength, RILEM/IUPAC Symposium on Pore Structure and Properties of Materials, Part V , 1973

4.2.3.5) 日本非破壊検査協会規格　NDIS 3919 : 1999

4.2.3.6) 笠井芳夫，松井勇，湯浅昇，野中英：ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法、その 1，その 2，日本建築学会大会学術講演会梗概集 A-1，pp.699-702.　1999.9

4.2.3.7) 笠井芳夫，松井勇，湯浅昇：簡易な試験による構造体コンクリートの品質評価の試み、セメント協会、セメント・コンクリート、No.559、pp.20-28、1993.9

4.2.3.8) 吉野利幸：空隙指標による強度式表示とその応用、北海道大学博士学位論文、1996 年

5章　コンクリート舗装版による検証実験

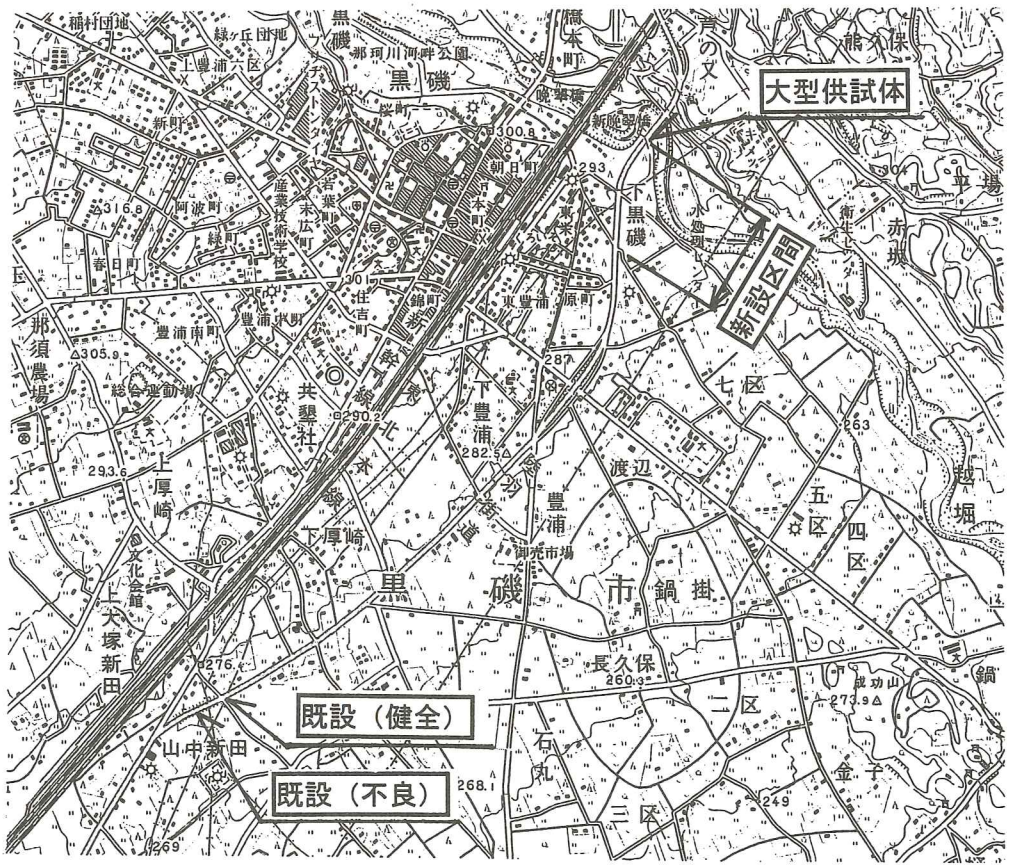
5．1　実験目的と舗装版の種類

5.1.1　実験目的

新設構造物の検査方法の検討のため、新設のコンクリート舗装版（以下、単に新設舗装版と呼ぶ）の版厚、コンクリート品質、強度および鉄筋のかぶり、間隔の推定を行った。

また、25 年経過した既設のコンクリート舗装版（以下、単に既設舗装版と呼ぶ）についても版厚、コンクリート品質、および鉄筋のかぶり厚さ、間隔の推定を行った。

測定現場は，**図－5.1.1.1** のとおり関東地方整備局宇都宮国道工事事務所管内の黒磯バイパスである。新設舗装区間は黒磯市街東側の 560mである。近くの同じ路盤上に，同じコンクリートを用いた供試体（大型供試体）も作製した。既設舗装版は，バイパス南側の 2 箇所である。1 箇所は目地の健全な部分（健全），もう 1 箇所は目地に多少段差のある部分（不良）である。不良部分は非破壊試験は行わず，切り出したコンクリート版の音速測定，圧縮，圧裂，曲げ強度試験を行った。



（国土地理院発行の 5 万分の 1 地形図の「大田原」の一部を使用）

図－5.1.1.1　測定現場

５．１．２　舗装版の種類

（１）新設舗装版

新設舗装版の断面は**図－5.1.2.1** のとおり、幅 7.5m、延長 560mである。施工日ごとにロットをⅠ～Ⅵに分割した。舗装構造は**図－5.1.2.2** のようにコンクリート版厚 300mm で表面から 1/3 のところに D6 で 150×150 の格子状の鉄網が入っている。路肩側 3 本分についてはさらに D13 で補強されている。路盤は、アスファルト中間層が 40mm、その下は粒調砕石路盤が 150mm となっている。コンクリートは機械施工である。

（２）大型供試体

主にレーダ法による速度分布を求めるため、**図－5.1.2.3** のように新設舗装版と同じ構造とし、かぶり厚さを変化させて鉄筋を設置した大型供試体も作製した。アスファルト中間層の速度も求めた。

新設舗装版および大型供試体に用いたコンクリートの配合は**表－5.1.2.1**、使用材料は**表－5.1.2.2** のとおりである。コンクリートは人力打設である。

（３）既設舗装版

調査した既設舗装版は**図－5.1.2.4** の(a)のとおり収縮目地から 2.5～3.5mの位置で、１車線の 1/2 の路肩側である。舗装構造は、**図－5.1.2.5** のように新設の場合とほぼ同様、コンクリート版厚 300mm、鉄網は D6 で 125×260mm の格子状のものが表面から版厚の中央に入っている。路肩側 3 本分についてはさらに D13 で補強されている。

既設舗装版に用いたコンクリートの配合は**表－5.1.2.3** のとおりである。コンクリートは機械施工である。

表－5.1.2.1　新設舗装版に用いたコンクリートの配合

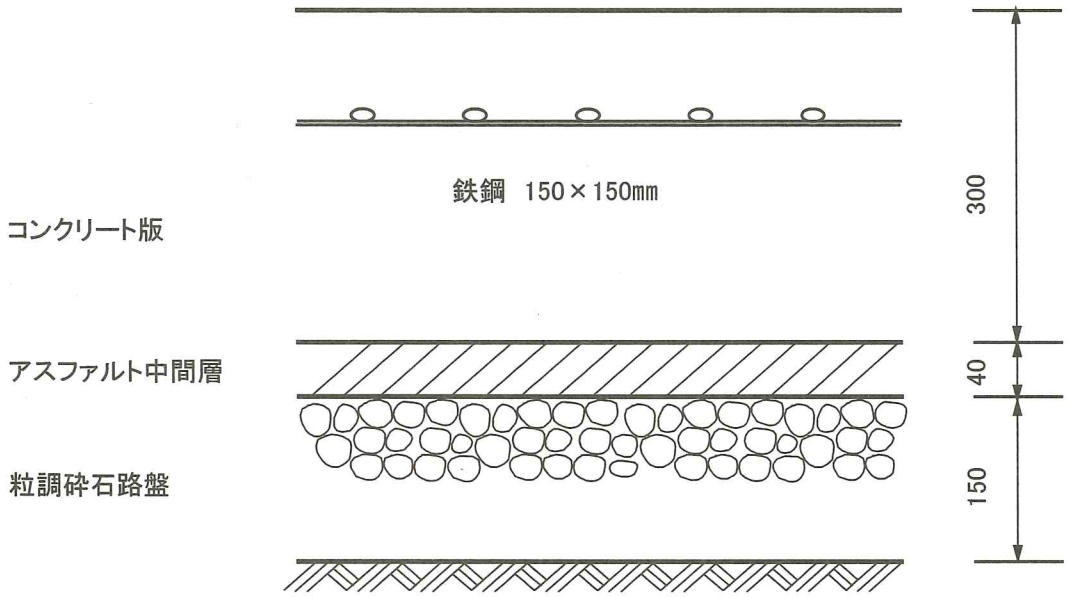
粗骨材の最大寸法 (mm)	呼び強度	目標スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
40	曲げ4.5	2.5	40	34.1	139	348	619	1223	3.48

表－5.1.2.2　使用材料

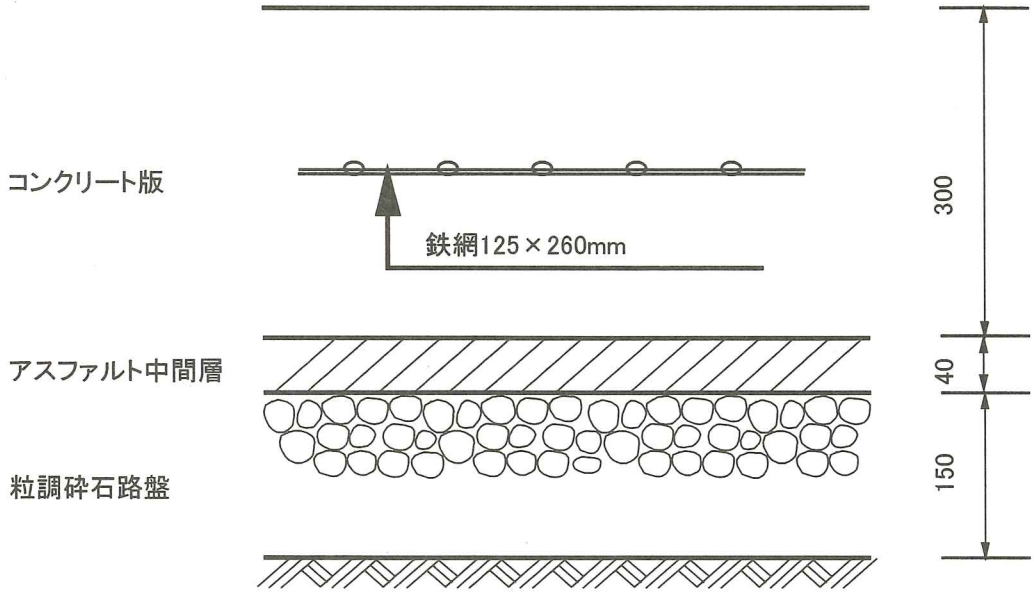
セメント	普通ポルトランドセメント(太平洋セメント)密度3.16g/cm^3
細骨材	箒川水系の河砂　表乾密度2.57g/cm^3、吸水率2.18%、FM2.70
粗骨材	砕石:福島県産硬質砂岩　砕石2505A　表乾密度2.65g/cm^3、吸水率1.56%、実績率60.8%
	川砂利:箒川水系　表乾密度2.57g/cm^3、吸水率1.71%
混和剤	AE減水剤　標準型Ⅰ種(ポゾリス785)

表－5.1.2.3　既設舗装版に用いたコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	呼び強度	目標スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位粗骨材容積 (m^3/m^3)	単位量(kg/m^3)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
40	曲げ4.5	2.5	40		0.76	132	330	598	1277	1.65

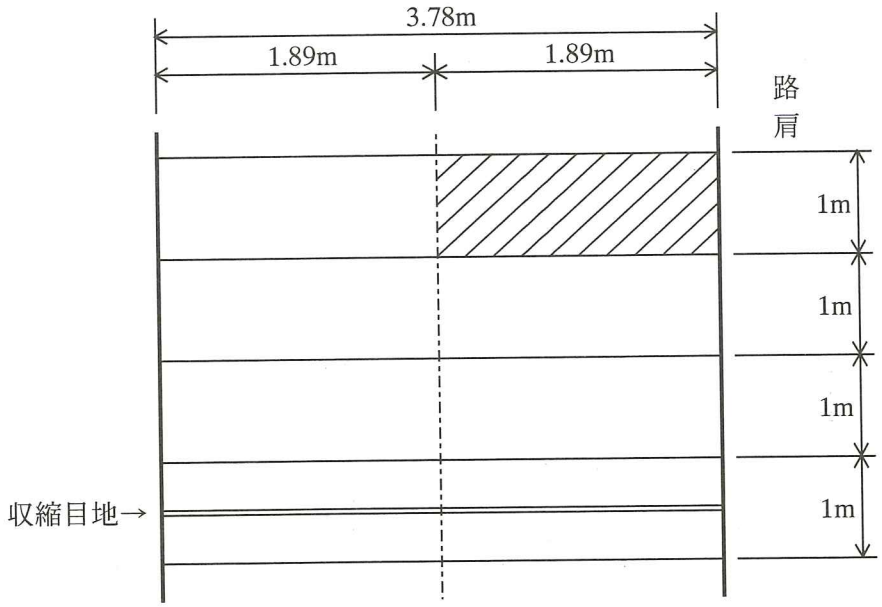


図－5.1.2.2　新設舗装版の構造

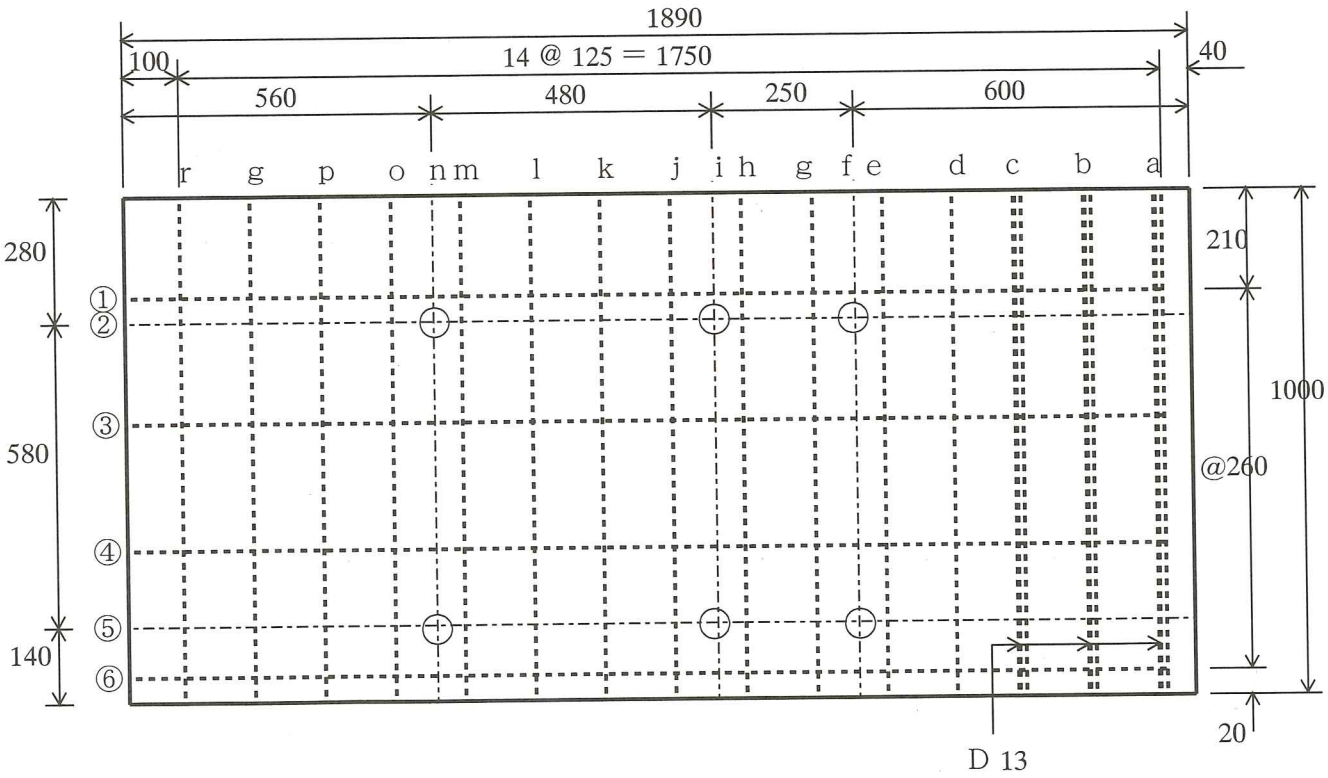


図－5.1.2.5　既設舗装版の構造

既設舗装版

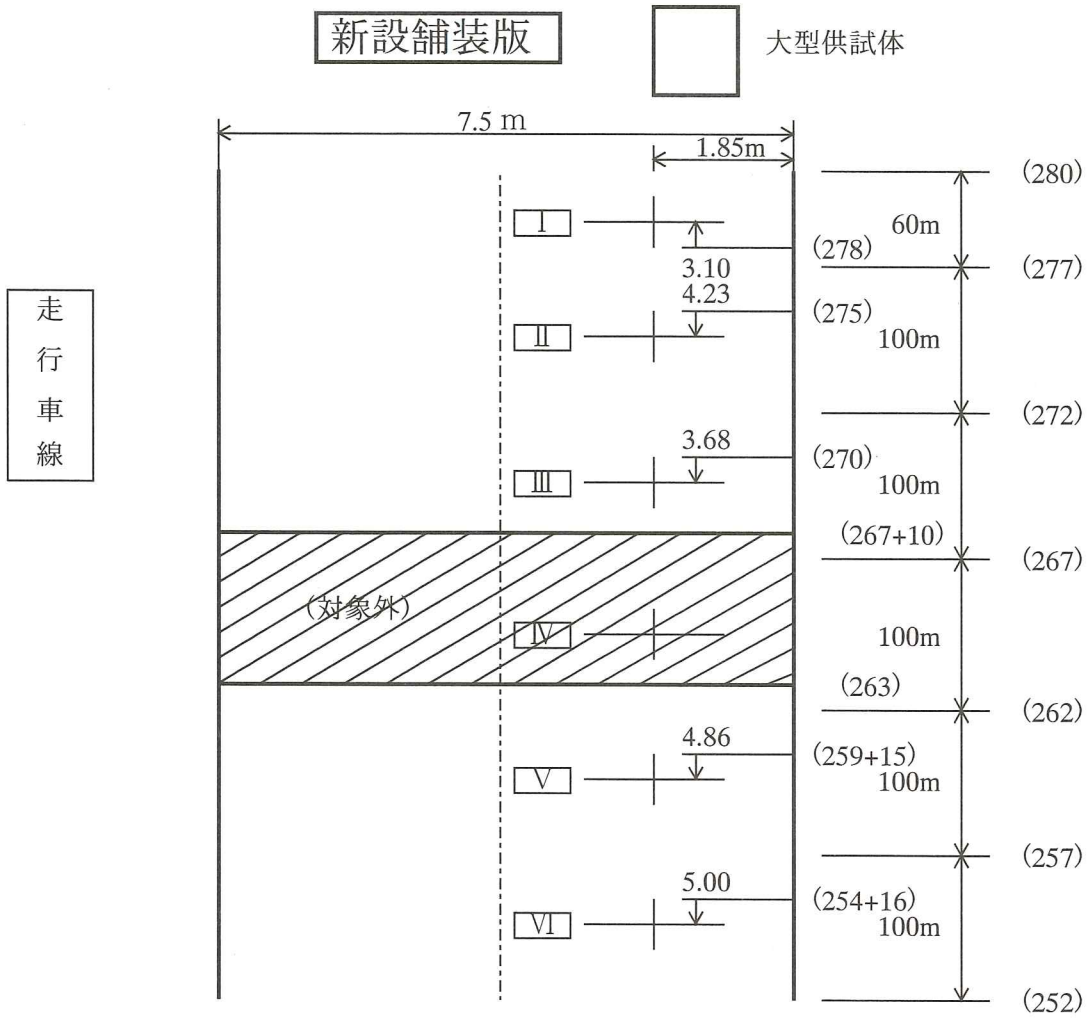


(a)　既設舗装版の調査位置



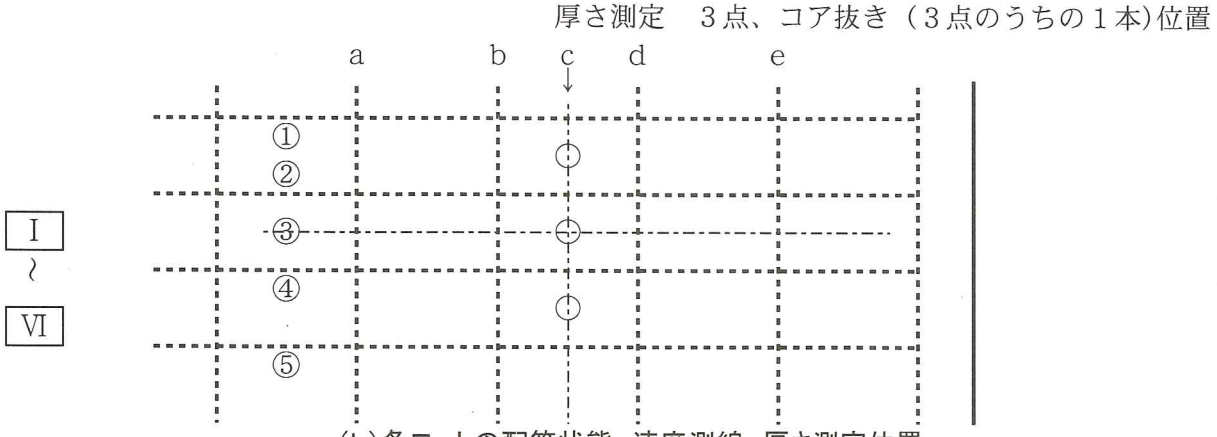
(b)　既設舗装版の配筋状態、速度、測線、厚さ測定位置

図－5.1.2.4　既設舗装版の測定位置



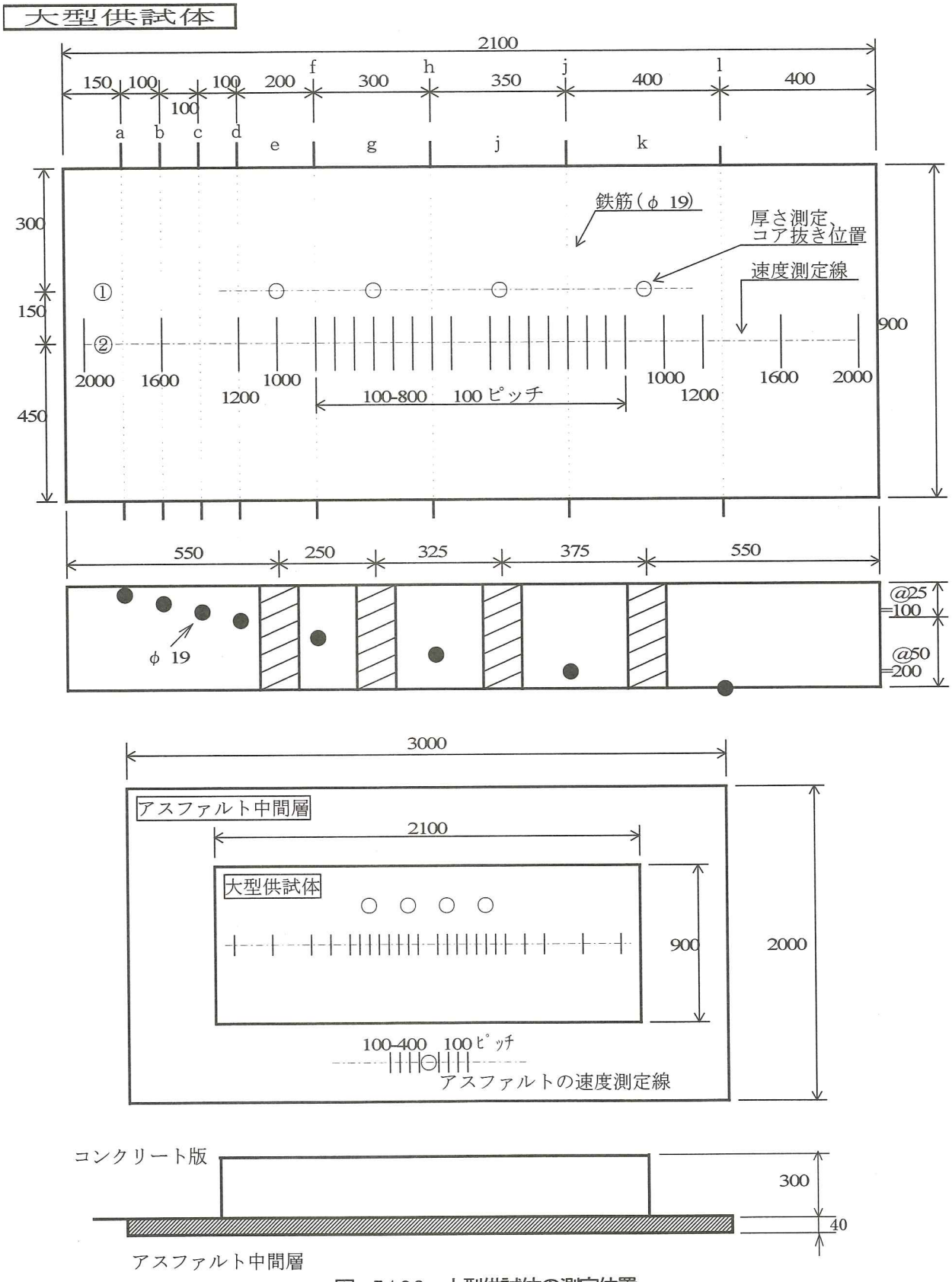
(000) 内の数字は、施工上の位置番号で、20m 間隔である。
その後ろに＋ 00 とあるのは、000 番からの距離（m）の目地位置を表している。

(a)測定位置(ロット分割)



(b)各ロットの配筋状態，速度測線，厚さ測定位置

図－5.1.2.1　新設舗装版の測定位置



図—5.1.2.3　大型供試体の測定位置

５．２　実験手順と方法

５．２．１　舗装版の測定

測定機種ごとの測定項目は表－5.2.1.1 のとおりである。各測定は3章と同様である。コンクリートの強度測定も行うため，測定日も併記した。

新設舗装版のロットごとのコンクリート打設日と，測定したときの材齢を表－5.2.1.2 に示す。

表－5.2.1.1　測定機種ごとの測定項目，測定日

測定機種		大型供試体				新設舗装版				既設舗装版（健全）				測定日
		速度	厚さ	鉄筋間隔	かぶり厚さ	速度	厚さ	鉄筋間隔	かぶり厚さ	速度	厚さ	鉄筋間隔	かぶり厚さ	
超音波	A	○	○	—	○	○	○	—	—	○	○	—	—	11/21
	B	○	○	—	○	○	○	—	—	○	○	—	—	11/21
	C	○	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	—	11/23
レーダ	D	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	11/20
	E	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—	11/20
	F	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
弾性波	G	○	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	—	11/20
	H	○	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	—	11/23

表－5.2.1.2　新設舗装版・大型供試体のコンクリート打設日と測定材齢

新設舗装版ロット	コンクリート打設日	測定材齢（日）		
		11/20	11/21	11/23
Ⅰ	10/26	25	26	27
Ⅱ・大型	10/27	24	25	26
Ⅲ	10/28	23	24	25
（Ⅳ）	（11/21）	–	–	–
Ⅴ	10/30	21	22	23
Ⅵ	10/31	20	21	22
		↑ 弾性波G レーダD,E	↑ 超音波A,B	↑ 超音波C 弾性波H

５．２．２　管理試験

（１）試験片の数量

各試験片の試験条件と数量は，表－5.2.2.1 のとおりである。

表－5.2.2.1　試験条件と数量

強度試験	養生	試験材齢（日）			試験材齢（週）			
・曲げ ・圧縮 ・割裂引張	水中				4	8		各21本（1回3本）
	マット	1	3	7				
	気中（室内）				4	8		
＊ 圧裂・含水率	マット			7				3本
	気中（室内）				4	8	15	9本（1回3本）
							水中 13→15	1本
	気中（外）				4	8	15	3本（1回1本）

↑マット養生終了時脱型

＊　圧裂・含水率測定用の供試体は脱型せずに気中養生（打設面からの乾燥・湿潤）

（2）試験項目

表－5.2.2.2 のような管理用試験片を用いて速度，強度，含水率，密度を測定した。

舗装版の強度管理用に，含水率・強度－速度の関係を求めた。速度を測定したのは，超音波A，弾性波 H である。

（3）試験手順（**図－5.2.2.1** のフロー参照）

① 脱型直後に重量，寸法を測定する（基準とする）。

以下，すべての供試体は，養生終了後，試験までは常によく絞った湿布で供試体を覆っておき，乾燥させないようにする。

② 試験材齢 7 日までの供試体は，直ちに速度を測定し，強度試験を行う。

弾性波による速度測定は，事前に測定方法を確立しておく。

圧裂供試体は，脱型後直ちに重量，速度を測定し，圧裂強度試験を行う。

③ 超音波による音速測定は以下のとおり（**表－5.2.2.2**）。

〈 曲げ供試体 〉

ⅰ． 3 本の内 2 本は，長手方向，側面，打設面―底面間の透過音速

ⅱ． 1 本については，ⅰに加え，

側面の透過音速を 15mm ピッチで測定

打設面，底面では，50mm～500mm まで 50mm ピッチ

側面は，100mm～500mm まで 100mm ピッチ

〈 割裂引張および圧縮供試体 〉

長手方向と側面の透過音速

〈 圧裂供試体 〉

ⅰ． 3 本の内 2 本は，長手方向，側面の透過音速

ⅱ． 1 本は，長手方向と，側面は 25mm ピッチで透過音速

ⅲ． 測定後，すぐにグリスなどを削り取る。

④ 圧裂供試体の強度試験後の切片は，⑥のとおり含水率，密度を求める。

⑤ 水中・気中養生供試体が試験材齢に達すると、水中養生供試体は表面の水を拭き取った後、気中養生 供試体はそのままで質量、速度を測定し、強度試験を行なう。

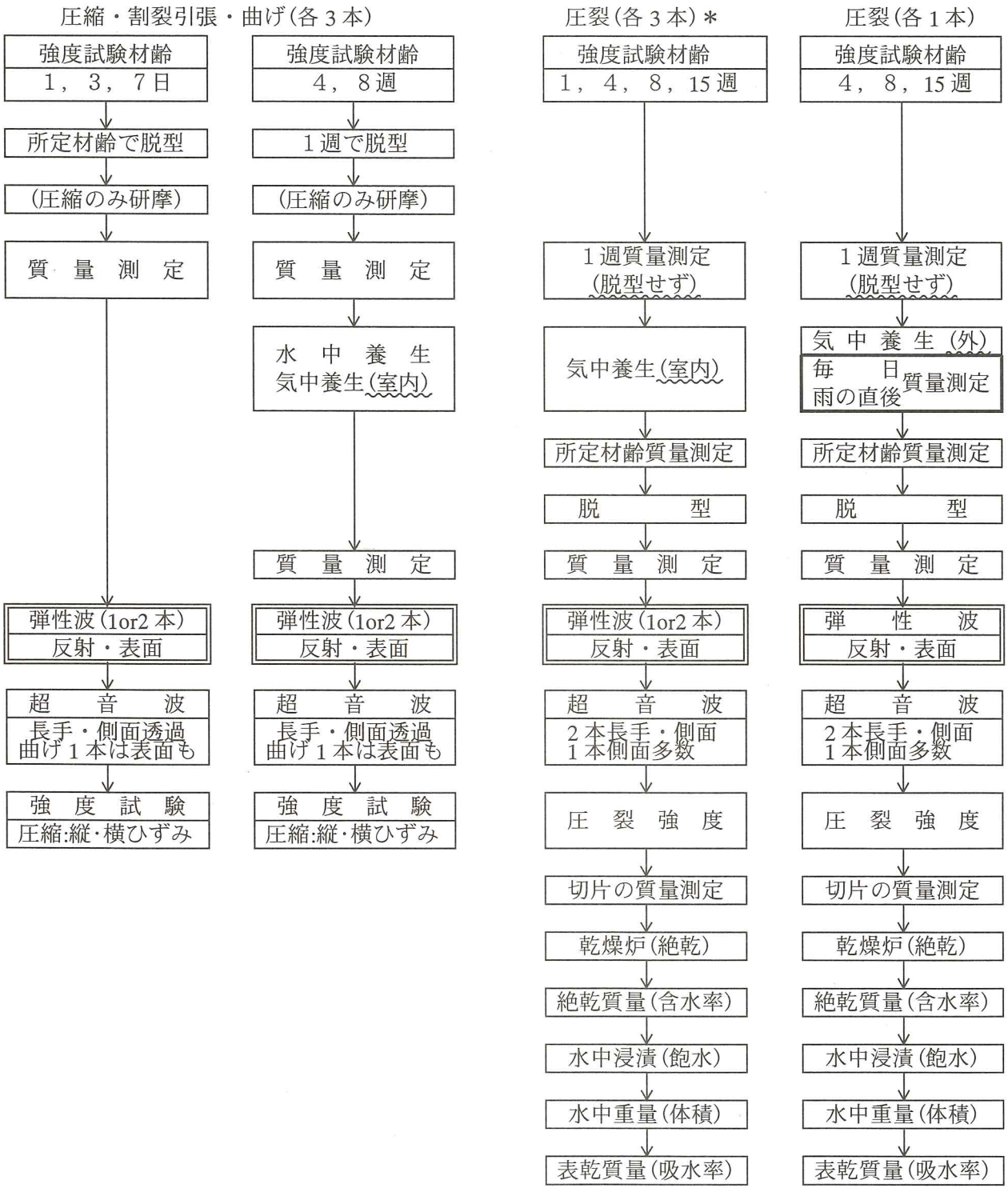
圧裂後の切片は⑥のとおり。

⑥ 圧裂強度試験後の各切片は、次のよう含水率・密度を測定する。

ⅰ． 各切片の質量を直ちに測定する。

ⅱ． 乾燥炉に 48 時間程度入れ、絶乾にして質量を測定する（含水率を求める）。

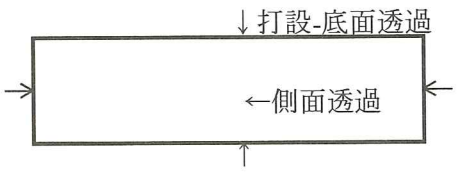
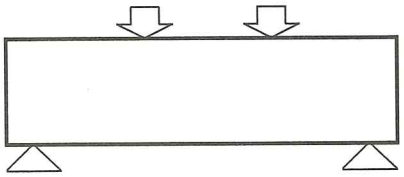
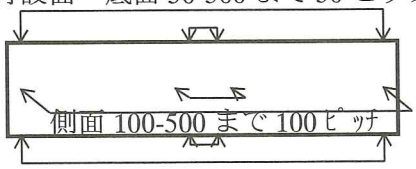
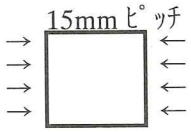
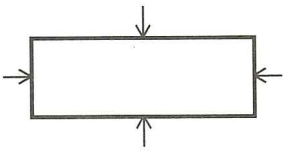
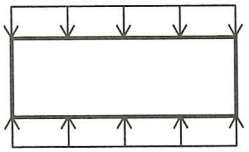
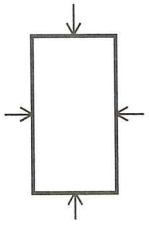
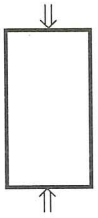
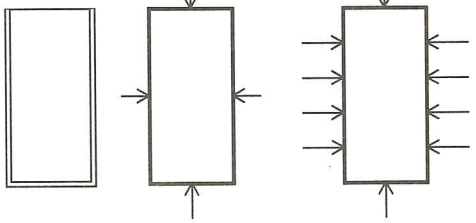
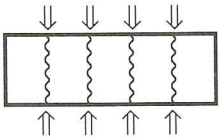
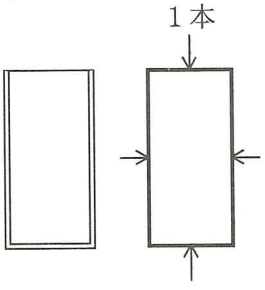
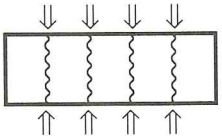
ⅲ． 水中に 7 日程度浸漬した後、見かけの水中質量、表乾質量を測定する（表乾密度、表乾時の含水率を求める）。



＊圧裂の 15 週は２本であり，１本はフローのとおり実施。もう１本は圧裂強度試験の２週前に水中に浸漬し，毎日質量変化を測定した。

図－5.2.2.1　音速・強度試験の手順

表－5.2.2.2　管理用試験片による速度、強度の測定

供試体 （mm）		速度（超音波、弾性波）	強度試験
曲げ 150 × 150 × 530			
		各材齢・養生ごとに１本のみ ○打設面・底面・側面の表面音速測定 打設面・底面 50-500 まで 50 ピッチ 	○側面透過 
割裂引張 φ 125 × 250			
圧縮 φ 125 × 250			
* 圧裂 含水率 密度	** 室内		 割裂後の切片で 含水率・密度測定
φ 125 × 250	外		 割裂後の切片で 含水率・密度測定

* 圧裂用は、脱型せずに室内および外に放置した。外のものは、毎日質量変化を測定した。
**室内のものの１体は，長期設置した後，圧裂試験の２週間前に型枠とコンクリートの間から水が入らないようにシールして水中に浸透し，毎日質量変化を測定した。

5．2．3　コア試験片の音速、強度試験

舗装版の非破壊試験の測定後，厚さ測定位置でコアを採取し，以下の試験を行った。

(1)コアの数量と試験

厚さ測定位置でコア採取

数量は以下のとおり

大型供試体　　4本（大型1～4）　→　2本圧縮
　　2本圧裂

新設舗装版　　5本（新設Ⅰ～Ⅲ，Ⅴ，Ⅵ）　→　全部圧裂

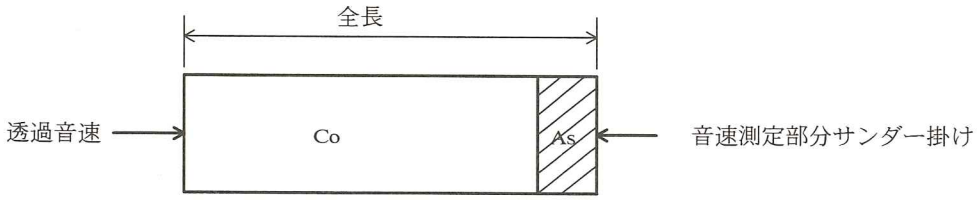
既設舗装版（曲げ試験片から抜取る）

4本（大型１～４）　→　２本圧縮
　　２本圧裂

(2)試験の手順

１）コア全長（コンクリート Co＋アスファルト As）

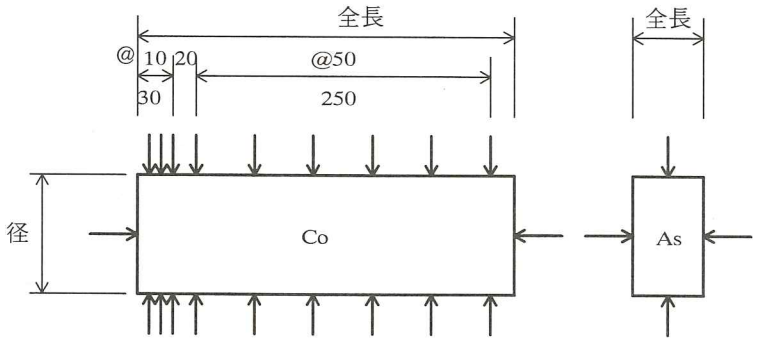
写真撮影、質量、寸法、音速測定



図－5.2.3.1 コア全長の音速測定

２）コンクリート、アスファルト部分

質量、寸法、長手および側面の音速測定



図－5.2.3.2 コア側面の音速測定

3）圧裂強度、含水率、吸水率（表乾）、密度

① 50mm ピッチで圧裂強度試験

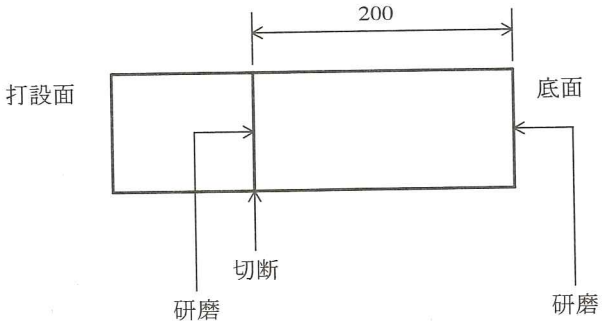
② 切片の質量測定、乾燥炉で 48 時間以上乾燥後、再度質量測定－－－含水率の測定

③ 水中7日浸漬、水中における見かけの質量、表乾質量測定－－－吸水率、表乾密度の測定

4）圧縮強度、音速、密度

① 切断、研磨

底面から 200mm とする。



図－5.2.3.3 圧縮強度用の採取

② 質量、寸法、音速の測定

音速は、長手と側面中央で測定する。

③ 水中に 48 時間浸漬、水中における見かけの質量、表乾質量測定－－－吸水率、表乾密度の測定

④ 再度、 長手と側面中央の音速測定

⑤ 圧縮強度試験を行う。

縦・横ひずみを測定し、ヤング係数、ポアソン比を求める。

５．２．４　既設舗装版の鉄筋間隔，かぶり厚さ測定および曲げ強度試験

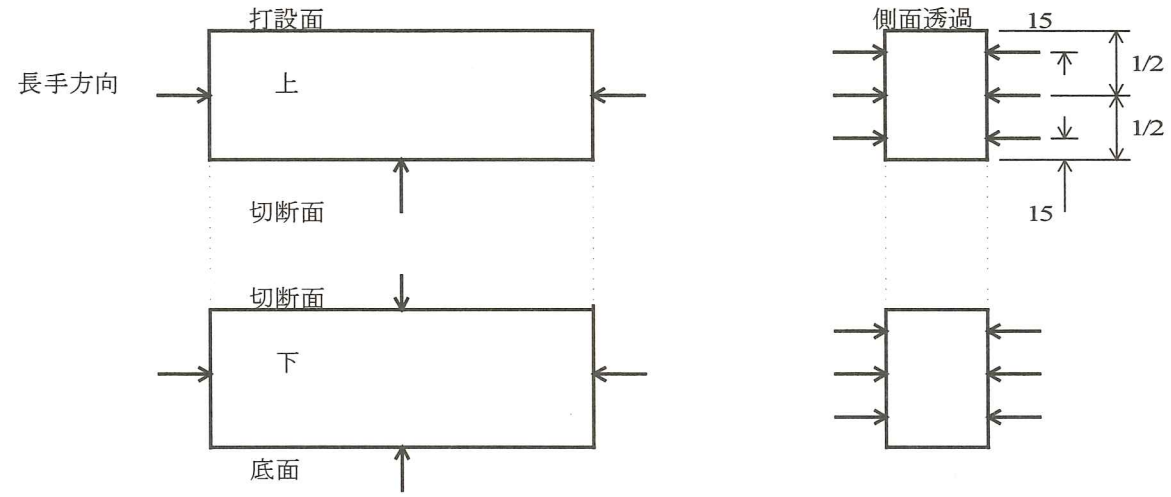
図－5.1.2.4(b)の既設舗装版を切り出し，側面から鉄筋間隔，かぶり厚さを測定した。その後，**図－5.2.4.1**のように切断し，**表－5.2.4.1**のように曲げ試験を行った。供試体の大文字のA,Bは全厚さのもので大試験片，小文字のものは，厚さの中央部で２つに分割・切断したもので小試験片である。A,Bおよびa,bは曲げ試験により走行方向に破断するもので，Aおよびbはほぼ車輪走行位置が破断するもの，Bおよびaは路肩側の破断である。cおよびdは走行方向に直角に破断するもので，cは車線中央，dは路肩である。

試験の手順は以下のとおりである。

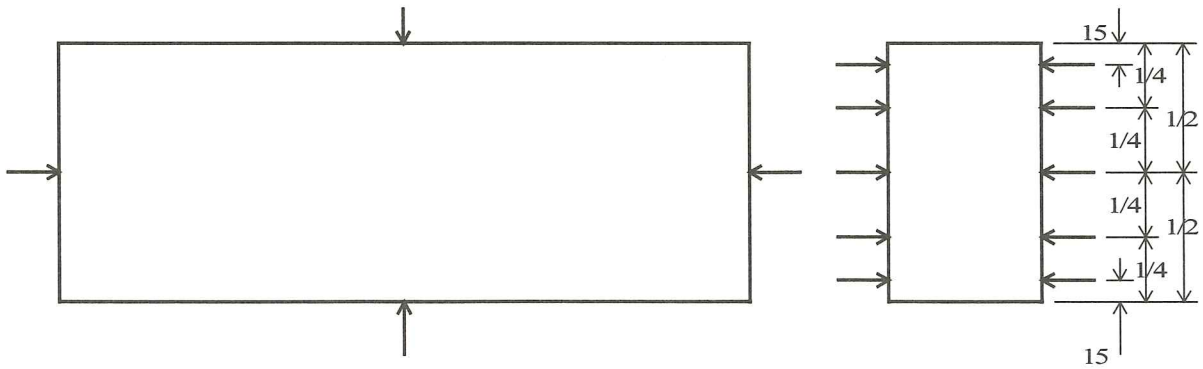
（１）試験片の形状･寸法、写真撮影

供試体の長さ，断面の幅を測定した。

(2)　音速の測定

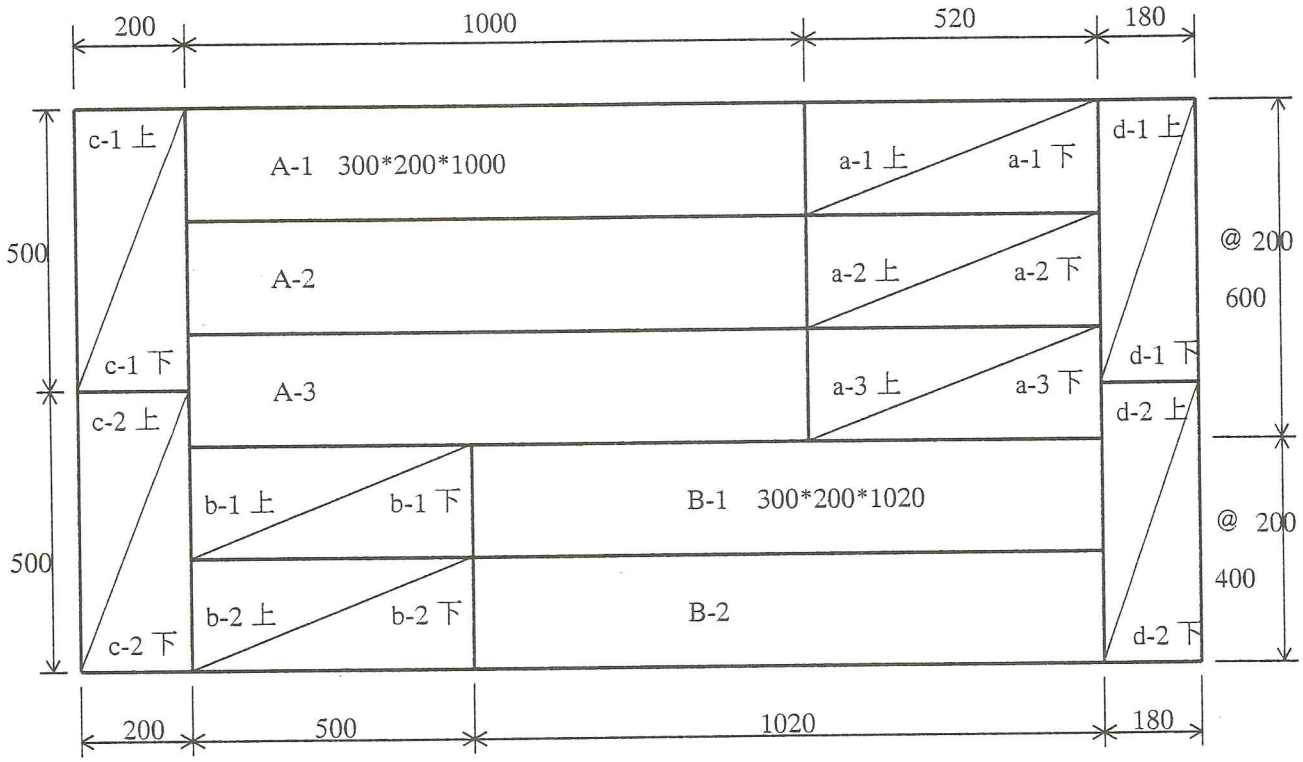


(a)小試験片



(b)大試験片

図―5.2.4.2　音速測定



斜線の供試体は、厚さ 300mm を上下に 2 分割する。

図－5.2.4.1　曲げ供試体用切断位置

表－5.2.4.1　曲げ強度試験

供試体			曲げ破壊位置			供試体の大きさ	本数
供試体名		大きさ	破壊面	方向	位置	高さ＊幅＊長さ(mm)	
A-1～3		大	底面	走行方向	車輪位置	300＊200＊1000	3
B-1～2			底面	走行方向	路肩	300＊200＊1020	2
小計							5
a-1～3	上 下	小	上面 底面	走行方向	路肩	150＊200＊520	3 3
b-1～2	上 下		上面 底面	走行方向	車輪位置	150＊200＊500	2 2
c-1～2	上 下		上面 底面	直角方向	車線中央	150＊200＊500	2 2
d-1～2	上 下		上面 底面	直角方向	路肩	150＊180＊500	2 2
小計							18
合計							23

５．３　コンクリート品質，実測結果

５．３．１　現場管理試験

コンクリートの現場での管理試験結果を**表－5.3.1.1** に示す。

大型供試体の強度試験場所は異なるが（土研で実施），参考に示した。

設計基準曲げ強度 4.5N/mm^2，配合強度 5.3N/mm^2 で設計されているが，材齢 7 日では平均 5.14N/mm^2、28 日で 5.93N/mm^2 となっている。変動係数もそれぞれ 2.1%，3.9%と，非常に良い結果となっている。

表－5.3.1.1　新設舗装版の現場管理試験結果

ロット	スランプ (cm)	空気量 (%)	ｺﾝｸﾘｰﾄ温度 (℃)	曲げ強度(N/mm^2)	
				7日	28日
Ⅰ	2.5	4.5	20.0	5.08	6.04
Ⅱ	3.0	4.2	17.5	5.11	6.04
	3.0	4.0	17.5	5.16	5.99
大型供試体	1.2	2.7	18.0	(4.85)	(5.74)
Ⅲ	3.0	3.9	17.5	4.92	5.47
	3.0	4.2	19.0	5.05	5.92
Ⅴ	3.0	3.8	17.5	5.21	5.89
	2.0	3.7	17.0	5.26	6.06
Ⅵ	3.0	3.9	15.5	5.28	6.31
	2.5	4.2	17.0	5.20	5.63
平均				5.14	5.93
標準偏差				0.107	0.234
変動係数(%)				2.1	3.9

注）2段書きの，上段は午前，下段は午後の結果

５．３．２　大型供試体の管理試験結果

(1) 各種強度結果

表－5.3.2.1～3.5.2.4 に圧縮，割裂引張，曲げ，圧裂強度試験用供試体の音速，含水率などと強度試験結果を示す。

各強度と材齢，音速の関係は**図－5.3.2.1** のとおりである。

各強度間の相互関係は**図－5.3.2.2** のとおりである。

圧縮、割裂引張、曲げ強度と材齢の関係を式(3.3.1.1)および式(5.3.2.1)で回帰した結果は、**表－5.3.2.5** のとおりである。回帰曲線を**図－5.3.2.1** の(a-1)、(b-1)、(c-1)に示す。

$$fc, fb, ft = \frac{t - to}{\frac{1}{a} + \frac{t-to}{b}} \qquad (5.3.2.1)$$

ここに、fc，fb，ft：圧縮、曲げ，割裂引張強度，to：強度発現開始時期を表わす回帰係数である。

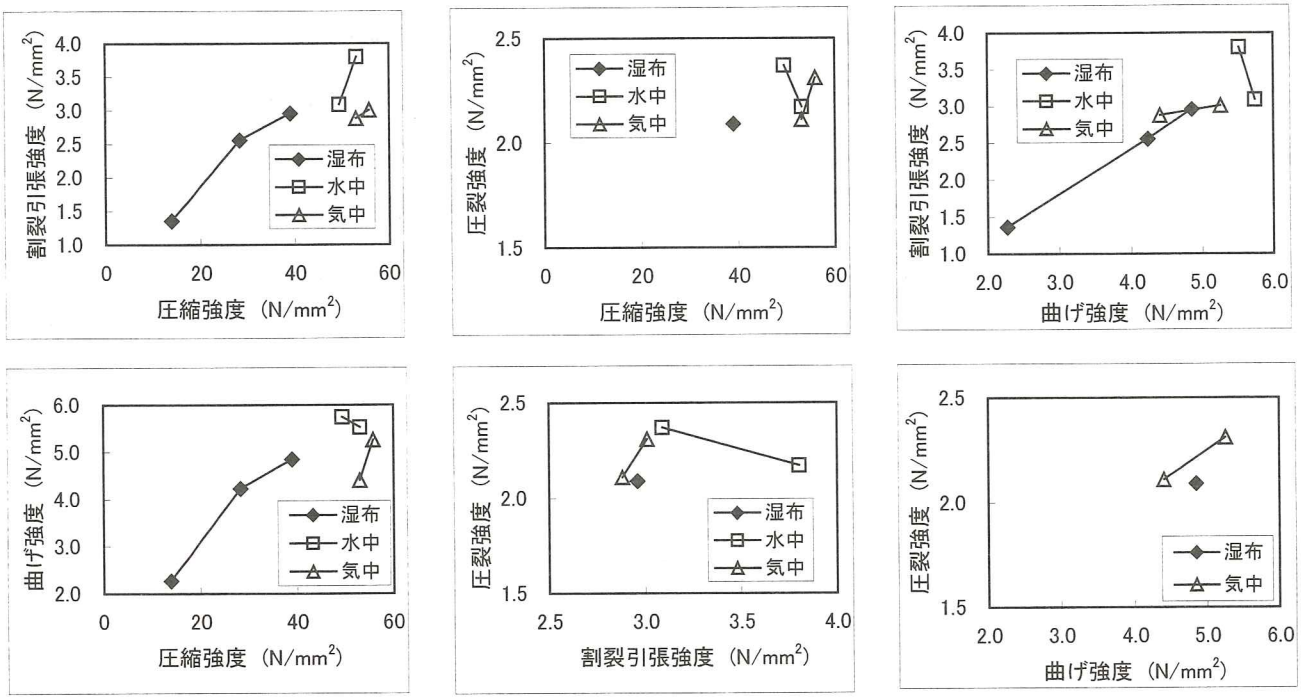


図-5.3.2.2　各強度の相互関係

(2)圧裂強度、含水率分布

圧裂強度，その後の切片の含水率結果を表－5.3.2.6 および図－5.3.2.3 と 5.3.2.4 に示す。圧裂強度分布は明確な関係は見出せないものの，含水率分布は材齢進行とともに表面付近の含水率は低下していることが分かる。

表－5.3.2.7 には外にばくろして乾湿を受けたものと，13 週まで気中養生してその後水中養生したときの質量変化である。乾湿を受けたものは，11 月は雨が多く，1 月には雪が数回降るなど、乾燥量はわずかであった。

圧裂強度試験前に測定した側面からの透過音速結果は，表－5.3.2.8 および図－5.3.2.7 のとおりであった。28 日以後は，打設面付近は 4300～4400m/s，底面はそれよりわずかに速くなっている。

表-5.3.2.1 圧縮強度

試験材齢（日）	養生方法	含水率の増減 %	圧縮強度 N/mm²	ヤング係数 kN/mm²	ポアソン比	音速 (m/s) 長手方向	音速 (m/s) 直角方向
1	湿布養生	0.00	13.9	18.5	0.134	3769	3685
3		0.00	28.3	23.8	0.175	4076	4030
7		0.00	39.0	27.7	0.152	4231	4136
28	水中養生	0.80	49.4	29.8	0.189	4431	4407
56		0.92	53.1	28.8	0.160	4500	4525
28	気中養生	−1.67	53.0	26.6	0.147	4380	4203
56		−2.14	55.8	26.4	0.170	4363	4183

表-5.3.2.2 割裂引張強度

試験材齢（日）	養生方法	含水率の増減 %	割裂強度 N/mm²	音速 (m/s) 長手方向	音速 (m/s) 直角方向
1	湿布養生	0.00	1.36	3806	3700
3		0.00	2.56	4097	4033
7		0.00	2.96	4272	4138
28	水中養生	0.83	3.09	4444	4465
56		0.73	3.80	4486	4508
28	気中養生	−1.65	2.88	4375	4244
56		−2.15	3.01	4328	4272

表-5.3.2.3 曲げ強度

試験材齢（日）	養生方法	含水率の増減 %	曲げ強度 N/mm²	音速 (m/s) 長手方向	音速 (m/s) 側面	音速 (m/s) 打ー底面
1	湿布養生	0.00	2.27	3737	3794	3659
3		0.00	4.23	4169	4178	4083
7		0.00	4.85	4370	4372	4256
28	水中養生	0.40	5.74	4497	4384	4468
56		0.56	5.52	4505	4392	4468
28	気中養生	−1.17	4.40	4442	4417	4364
56		−1.92	5.26	4450	4398	4380

表-5.3.2.4 圧裂強度（全体の平均）

試験材齢（日）	養生方法	含水率の減少 %	含水率 %	吸水率 %	圧裂強度 N/mm²	音速 (m/s) 長手方向	音速 (m/s) 直角方向
7	湿布養生	0.00	6.03	6.06	2.09	4243	4184
28	気中養生	−0.20	5.39	5.38	2.11	4395	4378
56		−0.31	3.80	4.71	2.31	4373	4407
103		−0.46	2.34	3.53	2.55	4479	4402
103	89日気中	−0.42	—	—	—	—	—
	その後水中	0.20	2.68	3.39	2.19	4352	4356
28	乾湿	−0.08	5.65	5.90	2.37	4404	4356
56		−0.11	4.37	4.87	2.17	4476	4314
103		−0.03	2.77	3.70	2.69	4403	4359

表-5.3.2.5 材齢-強度の回帰結果

強度	回帰係数 a	回帰係数 b	回帰係数 to	相関係数 r
圧縮強度	18.18	57.22	—	0.996
	17.75	57.35	−0.05	0.996
割裂強度	2.77	3.34	—	0.916
	4.46	3.27	0.48	0.924
曲げ強度	4.75	5.45	—	0.926
	8.06	5.33	0.51	0.938

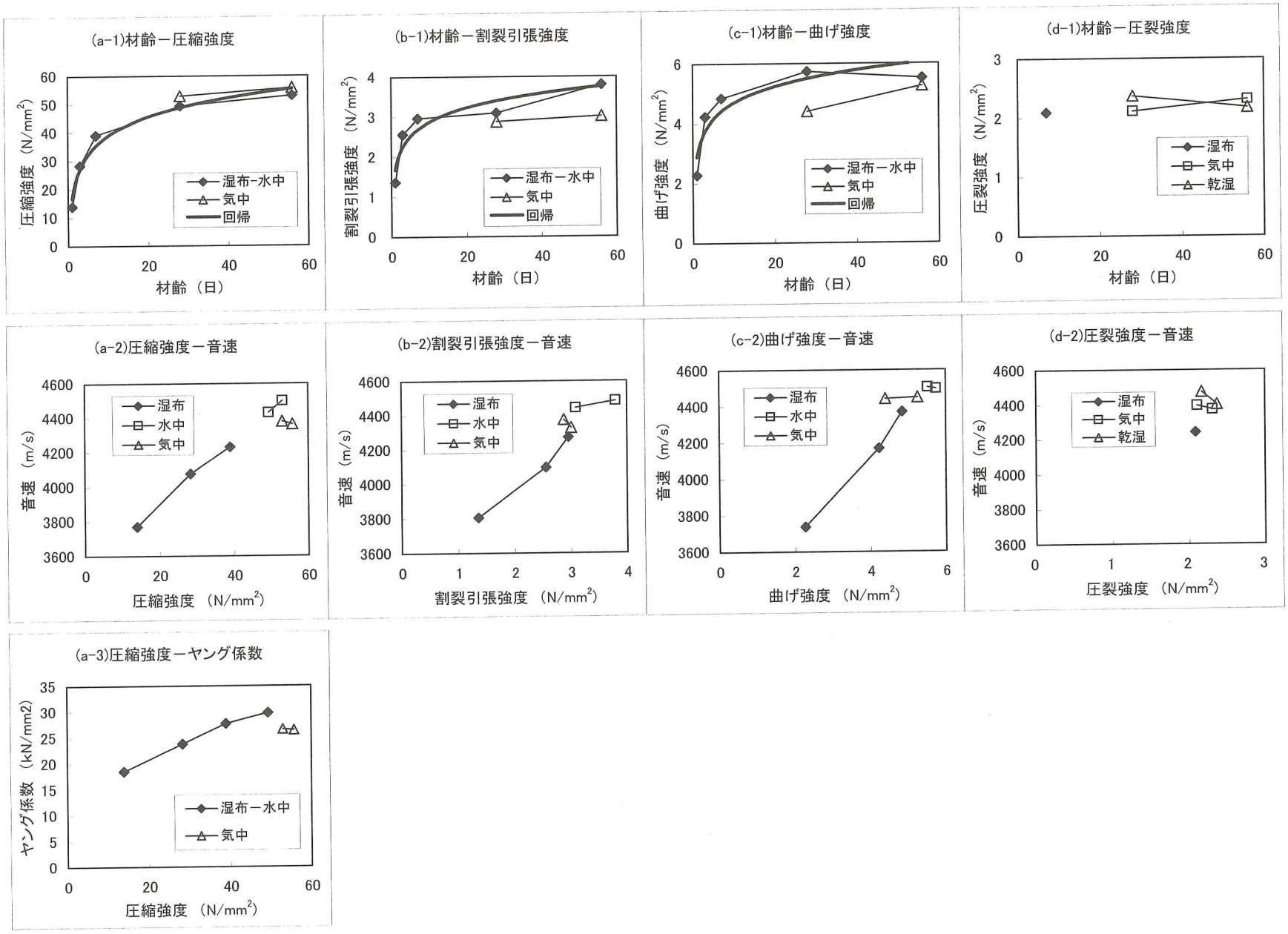
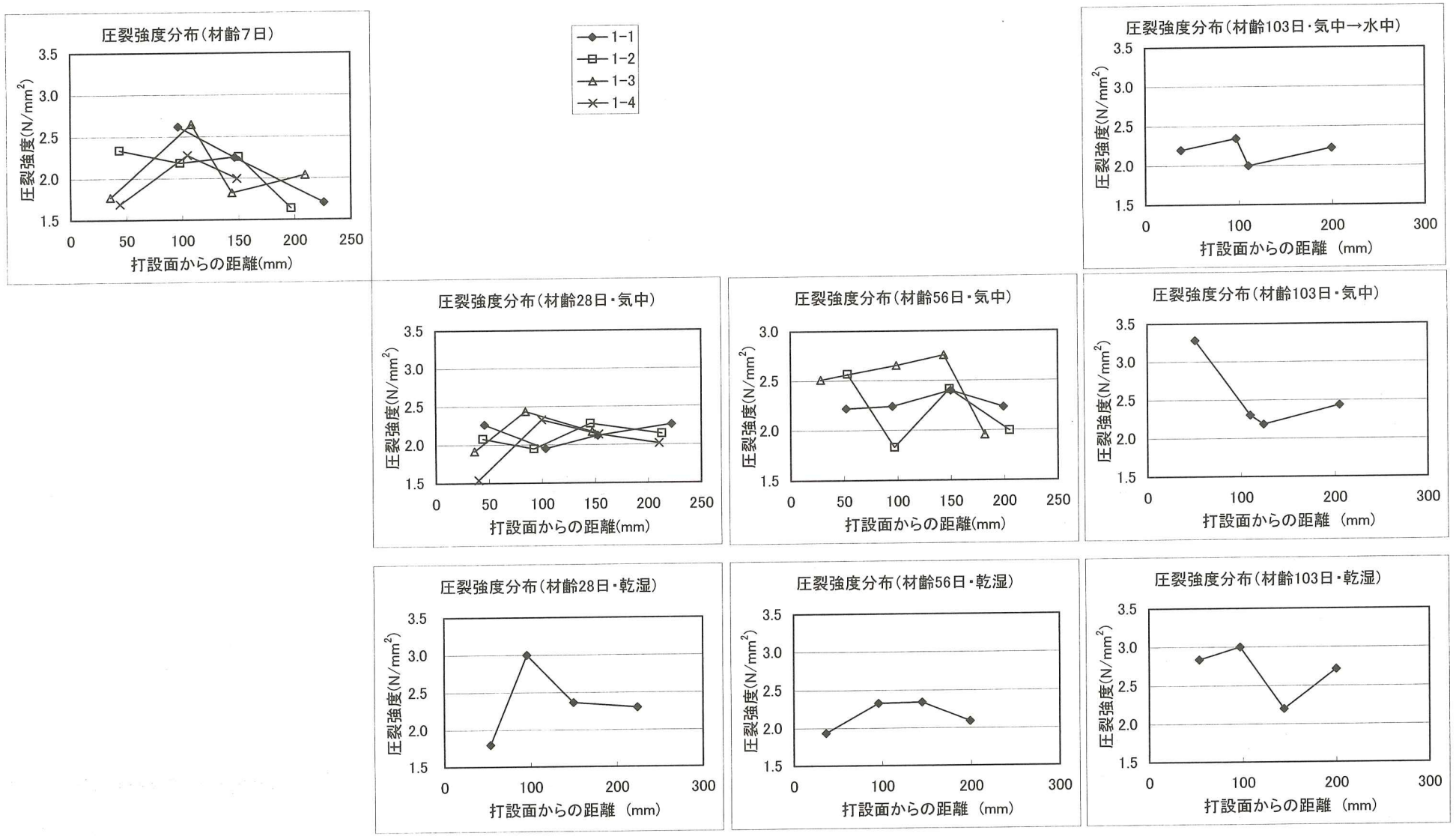


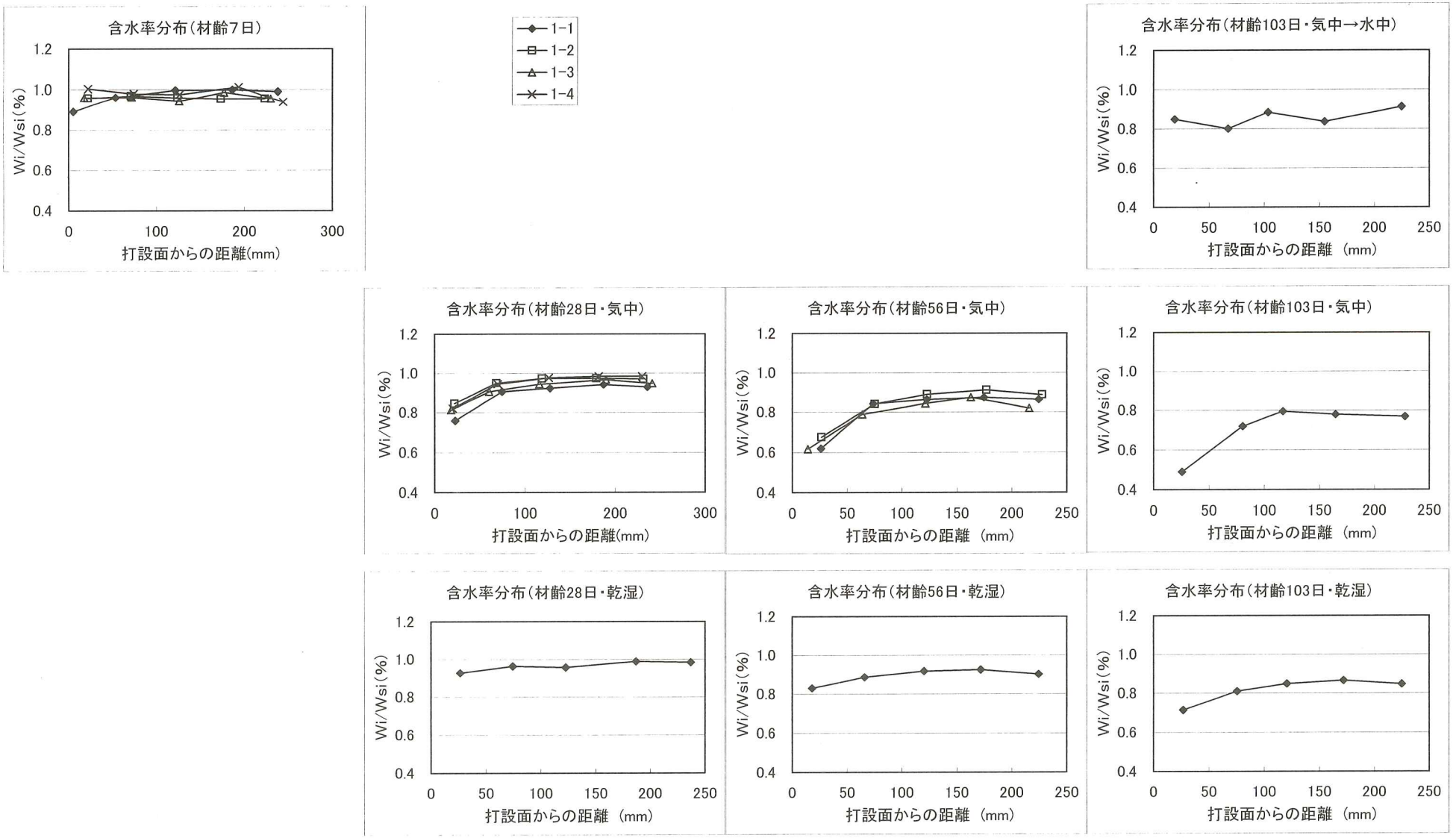
図-5.3.2.1 各強度と材齢、音速の関係

表—5.3.2.6　圧裂強度、含水率分布

養生方法	供試体名	試験材令（日）	切片平均厚さ (mm)	打設面から圧裂位置 (mm)	圧裂強度 (N/mm^2)	打設面から切片中心 (mm)	含水率 wi (%)	吸水率 wsi (%)	wi/ws
マット（室内）	AI-1-1	*	10.6	10.6	1.89	5.3	5.72	6.41	0.892
	AI-1-2		85.7	96.3	2.62	53.4	5.53	5.75	0.962
	AI-1-3		50.4	146.7	2.25	121.5	6.34	6.36	0.997
	AI-1-4		79.3	226.0	1.70	186.3	5.82	5.83	0.998
	AI-1-5		24.0		–	238.0	6.07	6.13	0.990
	AI-2-1		43.9	43.9	2.34	21.9	6.03	6.29	0.959
	AI-2-2		54.1	98.0	2.18	70.9	6.12	6.31	0.969
	AI-2-3	7	52.0	149.9	2.26	123.9	6.16	6.42	0.960
	AI-2-4		46.7	196.6	1.64	173.3	6.08	6.37	0.954
	AI-2-5		53.4		–	223.3	5.59	5.84	0.956
	AI-3-1		35.7	35.7	1.77	17.8	6.07	6.32	0.961
	AI-3-2		72.4	108.1	2.64	71.9	6.01	6.24	0.963
	AI-3-3		36.0	144.1	1.82	126.1	6.27	6.65	0.943
	AI-3-4		65.3	209.4	2.04	176.7	6.20	6.28	0.987
	AI-3-5		40.6		–	229.7	6.09	6.37	0.956
	AI-11-1		44.2	44.2	1.69	22.1	6.17	6.15	1.003
	AI-11-2		60.4	104.7	2.28	74.4	6.11	6.24	0.979
	AI-11-3	7	43.9	148.5	2.00	126.6	6.47	6.63	0.976
	AI-11-4	*	89.7	238.2	1.83	193.4	6.00	5.94	1.011
	AI-11-5		11.8		–	244.1	6.35	6.76	0.940
気中（室内）	AI-4-1		45.7	45.7	2.26	22.9	4.48	5.90	0.759
	AI-4-2		57.7	103.4	1.95	74.6	5.27	5.80	0.907
	AI-4-3		49.1	152.6	2.12	128.0	5.67	6.13	0.924
	AI-4-4		69.4	222.0	2.26	187.3	5.53	5.87	0.943
	AI-4-5		28.0		–	236.0	5.85	6.29	0.930
	AI-5-1		44.1	44.1	2.08	22.1	4.95	5.85	0.846
	AI-5-2		48.2	92.3	1.95	68.2	5.68	5.98	0.951
	AI-5-3	28	53.4	145.6	2.27	119.0	5.84	6.00	0.974
	AI-5-4		67.1	212.7	2.14	179.2	5.42	5.56	0.975
	AI-5-5		37.3		–	231.4	5.70	5.87	0.972
	AI-6-1		36.4	36.4	1.92	18.2	4.83	5.94	0.814
	AI-6-2		48.0	84.4	2.43	60.4	5.39	5.95	0.907
	AI-6-3		63.0	147.4	2.17	115.9	5.70	6.03	0.945
	AI-6-4	*	85.1	232.4	2.17	189.9	5.37	5.55	0.967
	AI-6-5		17.6		–	241.2	5.70	6.01	0.948
	AI-12 -1		40.2	40.2	1.54	20.1	4.51	5.50	0.821
	AI-12 -2		59.6	99.8	2.32	70.0	5.29	5.60	0.945
	AI-12 -3		53.7	153.5	2.14	126.7	5.64	5.77	0.978
	AI-12 -4		56.7	210.2	2.01	181.9	5.44	5.52	0.985
	AI-12 -5		39.8		–	230.1	5.36	5.44	0.985
気中（室内）	AI-7-1		52.2	52.2	2.22	26.1	2.75	4.44	0.619
	AI-7-2		43.2	95.3	2.24	73.7	4.02	4.77	0.843
	AI-7-3		54.7	150.0	2.40	122.6	4.11	4.76	0.865
	AI-7-4		49.3	199.2	2.23	174.6	4.16	4.75	0.876
	AI-7-5		50.8		–	224.6	3.95	4.58	0.864
	AI-8-1		53.3	53.3	2.57	26.7	3.09	4.57	0.676
	AI-8-2		43.8	97.1	1.83	75.2	4.32	5.13	0.842
	AI-8-3	56	51.5	148.7	2.41	122.9	4.27	4.80	0.891
	AI-8-4		56.3	205.0	2.00	176.8	3.86	4.23	0.913
	AI-8-5		45.0		–	227.5	3.79	4.26	0.888
	AI-9-1		28.2	28.2	2.51	14.1	3.36	5.45	0.616
	AI-9-2		71.0	99.2	2.65	63.7	3.58	4.54	0.789
	AI-9-3		44.3	143.5	2.76	121.4	4.45	5.27	0.843
	AI-9-4		38.2	181.7	1.96	162.6	4.64	5.31	0.875
	AI-9-5		68.3		–	215.8	3.17	3.86	0.820
	AI-14-1		51.2	51.2	3.28	25.6	1.80	3.67	0.490
	AI-14-2		58.6	109.8	2.30	80.5	2.35	3.26	0.719
	AI-14-3	103	14.2	123.9	2.18	116.8	3.53	4.45	0.794
	AI-14-4		81.4	205.4	2.43	164.6	2.40	3.08	0.779
	AI-14-5		44.6		–	227.7	2.46	3.20	0.768
気中→水中	AI-13-1		38.1	38.1	2.20	19.1	2.80	3.29	0.849
	AI-13-2	89	58.9	97.0	2.35	67.6	2.79	3.48	0.801
	AI-13-3	89→103	13.2	110.2	2.00	103.6	3.98	4.49	0.886
	AI-13-4		89.4	199.5	2.23	154.8	2.47	2.94	0.837
	AI-13-5		50.5		–	224.8	2.53	2.77	0.913
乾湿	AO-1-1		53.3	53.3	1.80	26.6	5.20	5.60	0.928
	AO-1-2		42.4	95.7	3.00	74.5	5.88	6.10	0.963
	AO-1-3	28	54.1	149.8	2.36	122.7	5.83	6.10	0.957
	AO-1-4		74.1	223.9	2.30	186.8	5.60	5.66	0.989
	AO-1-5		26.1		–	236.9	5.96	6.05	0.984
	AO-2-1		36.3	36.3	1.94	18.1	4.08	4.90	0.832
	AO-2-2		59.3	95.5	2.33	65.9	4.31	4.86	0.887
	AO-2-3	56	49.4	144.9	2.34	120.2	4.73	5.14	0.919
	AO-2-4		54.0	198.9	2.09	171.9	4.64	5.02	0.925
	AO-2-5		51.1		–	224.5	4.03	4.46	0.903
	AO-3-1		53.8	53.8	2.84	26.9	2.16	3.02	0.715
	AO-3-2		43.5	97.3	3.00	75.5	3.12	3.85	0.810
	AO-3-3	103	46.7	144.0	2.20	120.6	3.13	3.68	0.850
	AO-3-4		56.1	200.0	2.71	172.0	3.02	3.49	0.866
	AO-3-5		50.0		–	225.0	2.50	2.95	0.849



図－5.3.2.3　圧裂強度分布



図－5.3.2.4　含水率Wi/Wsi分布

表—5.3.2.7 乾湿，気中→水中養生の質量変化

測定月日		乾燥日数	天気	外(乾湿)							気中→水中	
				質量(g)			質量差(g)			質量差	質量	質量差
月	日	(日)		1	2	3	1	2	3	平均	(g)	(g)
11	3	0	くもり	7980.7	7971.8	8000.4	—	—	—	0.0	7943.0	0.0
	4	1	晴れ	7978.3	7969.7	7996.8	2.4	2.1	3.6	2.7		
	5	2	晴れ	7977.0	7968.7	7995.8	3.7	3.1	4.6	3.8		
	6	3	晴れ	7976.9	7968.3	7995.6	3.8	3.5	4.8	4.0		
	7	4	雨上がり	7979.7	7970.8	7998.6	1.0	1.0	1.8	1.3		
	8	5	晴れ	7978.1	7969.7	7997.0	2.6	2.1	3.4	2.7		
	9	6	くもり	7976.8	7968.7	7995.3	3.9	3.1	5.1	4.0		
	10	7	くもり	7976.4	7968.1	7995.1	4.3	3.7	5.3	4.4		
	11	8	晴れ	7976.0	7967.8	7994.6	4.7	4.0	5.8	4.8		
	12	9	くもり	7975.3	7967.4	7994.1	5.4	4.4	6.3	5.4		
	13	10	くもり／晴れ	7974.5	7966.8	7993.6	6.2	5.0	6.8	6.0		
	14	11	くもり	7973.9	7966.4	7993.1	6.8	5.4	7.3	6.5		
	15	12	雨／くもり	7977.7	7968.5	7996.1	3.0	3.3	4.3	3.5		
	16	13	雨／くもり	7977.2	7968.7	7997.0	3.5	3.1	3.4	3.3		
	17	14	雨	7980.2	7971.5	8000.9	0.5	0.3	−0.5	0.1		
	18	15	晴れ	7975.7	7967.5	7996.4	5.0	4.3	4.0	4.4		
	19	16	晴れ	7974.8	7967.0	7995.5	5.9	4.8	4.9	5.2		
	20	17	雨	7977.1	7968.5	7997.8	3.6	3.3	2.6	3.2		
	21	18	雨上がり	7979.8	7971.4	8000.9	0.9	0.4	−0.5	0.3		
	22	19	くもり	7975.8	7967.8	7996.6	4.9	4.0	3.8	4.2		
	23	20	晴れ	7976.1	7968.1	7996.7	4.6	3.7	3.7	4.0		
	24	21	晴れ	7974.4	7966.3	7994.8	6.3	5.5	5.6	5.8		
	25	22		—	—	—	—	—	—			
	26	23	晴れ	—	7967.5	7995.9	—	4.3	4.5	4.4		
	27	24	晴れ	—	7967.0	7995.6	—	4.8	4.8	4.8		
	28	25	晴れ	—	7966.6	7995.1	—	5.2	5.3	5.2		
	29	26	晴れ	—	7965.6	7994.0	—	6.2	6.4	6.3		
	30	27	晴れ	—	7965.7	7994.2	—	6.1	6.2	6.2		
12	1	28	晴れ	—	7965.3	7994.0	—	6.5	6.4	6.4		
	2	29	晴れ	—	7965.3	7993.7	—	6.5	6.7	6.6		
	3	30	晴れ/くもり	—	7965.6	7994.1	—	6.2	6.3	6.2		
	4	31	晴れ	—	7964.5	7992.8	—	7.3	7.6	7.4		
	5	32	晴れ	—	7964.6	7992.9	—	7.2	7.5	7.3		
	6	33	晴れ	—	7963.6	7992.1	—	8.2	8.3	8.2		
	7	34	晴れ	—	7963.0	7991.6	—	8.8	8.8	8.8		
	8	35	晴れ	—	7962.8	7991.3	—	9.0	9.1	9.0		
	9	36	晴れ	—	7962.8	7991.3	—	9.0	9.1	9.0		
	10	37	晴れ	—	7962.7	7992.3	—	9.1	8.1	8.6		
	11	38	晴れ	—	7962.9	7992.1	—	8.9	8.3	8.6		
	12	39	晴れ	—	7962.6	7990.7	—	9.2	9.7	9.4		
	13	40	晴れ	—	7962.0	7991.1	—	9.8	9.3	9.5		
	14	41	くもり	—	7961.9	7990.6	—	9.9	9.8	9.8		
	15	42	晴れ	—	7962.2	7990.8	—	9.6	9.6	9.6		
	16	43	晴れ	—			—					
	17	44	晴れ/くもり	—	7961.8	7990.4	—	10.0	10.0	10.0		
	18	45	夜雨/くもり	—	7964.6	7993.4	—	7.2	7.0	7.1		
	19	46	夜雨/くもり	—	7964.7	7993.7	—	7.1	6.7	6.9		
	20	47	くもり	—	7963.2	7992.2	—	8.6	8.2	8.4		
	21	48	夜雨/晴れ	—	7963.9	7992.8	—	7.9	7.6	7.8		
	22	49	晴れ	—	7962.9	7991.8	—	8.9	8.6	8.8		
	23	50	晴れ	—	—		—	—				
	24	51	晴れ	—	—		—	—				
	25	52	晴れ	—	—	7991.5	—	—	8.9	8.9		
	26	53	晴れ	—	—	7991.4	—	—	9.0	9.0		
	27	54	晴れ	—	—	7990.5	—	—	9.9	9.9		
	28	55	晴れ	—	—	7990.4	—	—	10.0	10.0		
	29	56	晴れ	—	—		—	—				
	30	57	くもり	—	—		—	—				
	31	58	くもり	—	—	7990.8	—	—	9.6	9.6		
1	1	59	夜雨/晴れ	—	—		—	—				
	2	60	晴れ	—	—		—	—				
	3	61	晴れ	—	—		—	—				
	4	62	晴れ	—	—	7988.7	—	—	11.7	11.7		
	5	63	晴れ	—	—	7988.6	—	—	11.8	11.8		
	6	64	晴れ	—	—		—	—				
	7	65	くもり	—	—	7988.4	—	—	12.0	12.0		
	8	66	雪	—	—		—	—				
	9	67	くもり	—	—	7992.8	—	—	7.6	7.6		
	10	68	晴れ(前夜雨)	—	—	7995.4	—	—	5.0	5.0		
	11	69	晴れ	—	—	7993.0	—	—	7.4	7.4		
	12	70	晴れ	—	—	7992.5	—	—	7.9	7.9		
	13	71	くもり	—	—	7991.8	—	—	8.6	8.6		
	14	72										
	15	73	晴れ	—	—	7991.0			9.4	9.4		
	16	74	晴れ	—	—	7990.7			9.7	9.7		
	17	75	晴れ	—	—	7990.4			10.0	10.0		
	18	76	晴れ	—	—	7990.8			9.6	9.6		
	19	77	晴れ	—	—	7989.8			10.6	10.6		
	21	79										
	20	78	くもり	—	—	7989.4			11.0	11.0		
	22	80	晴れ	—	—	7991.6			8.8	8.8		
	23	81	晴れ	—	—	7991.3			9.1	9.1		
	24	82	晴れ	—	—	7990.6			9.8	9.8	7909.6	33.4
	25	83	くもり	—	—	7990.3			10.1	10.1	7922.3	20.7
	26	84	くもり	—	—	7996.8			3.6	3.6	7926.3	16.7
	27	85	雪	—	—	8000.9			−0.5	−0.5	7930.9	12.1
	28	86										
	29	87	晴れ	—	—	7994.3			6.1	6.1	7935.1	7.9
	30	88	晴れ	—	—	7993.4			7.0	7.0	7939.3	3.7
	31	89	晴れ	—	—	7992.7			7.7	7.7	7942.2	0.8
2	1	90	雨	—	—	7996.6			3.8	3.8	7945.2	−2.2
	2	91	くもり	—	—	7994.2			6.2	6.2	7947.2	−4.2
	3	92	晴れ	—	—	7993.2			7.2	7.2	7949.7	−6.7
	4	93	くもり	—	—	7992.5			7.9	7.9	7951.7	−8.7
	5	94	くもり	—	—	7992.2			8.2	8.2	7954.3	−11.3
	6	95	晴れ	—	—	7992.5			7.9	7.9	7956.6	−13.6
	7	96	雨	—	—	7997.8			2.6	2.6	7958.8	−15.8
						7984.3				0.03		−0.20

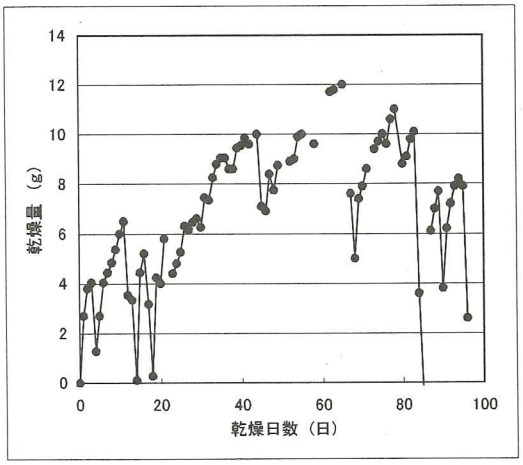


図-5.3.2.5 乾湿の推移

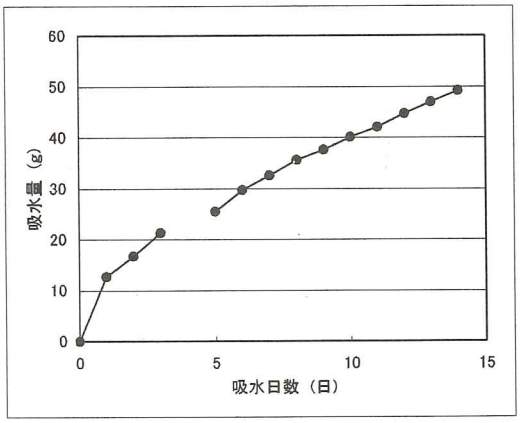
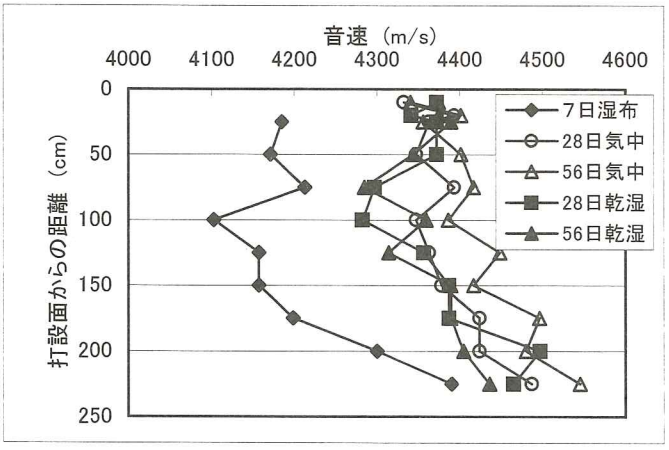


図-5.3.2.6 気中→水中養生の吸水状況

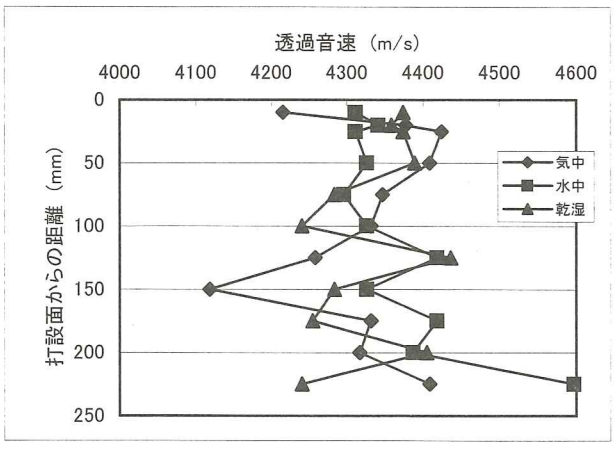
表－5.3.2.8　圧裂供試体の側面透過音速

供試体番号	AI-2(湿布　7日)			AI-5(気中　28日)			AI-8(気中　56日)			AI-8(気中　103日)		
測定位置		超音波測定			超音波測定			超音波測定			超音波測定	
(打設面からの距離)	直径 (mm)	時間 (μs)	速度 (m/sec)	直径 (mm)	時間 (μs)	速度 (m/sec)	直径 (mm)	時間 (μs)	速度 (m/sec)	直径 (mm)	時間 (μs)	速度 (m/sec)
10	-	-	-	125.2	42.2	4332	125.0	42.1	4340	125.2	43.0	4215
20	-	-	-	125.2	41.8	4393	125.0	41.7	4401	125.2	41.9	4377
25	125.1	43.2	4185	125.2	42.0	4362	125.0	42.0	4355	125.2	41.6	4424
50	125.1	43.3	4171	125.2	42.1	4347	125.0	41.7	4401	125.2	41.7	4408
75	125.1	43.0	4213	125.2	41.8	4393	125.0	41.6	4417	125.2	42.1	4347
100	125.1	43.8	4102	125.2	42.1	4347	125.0	41.8	4386	125.2	42.2	4332
125	125.1	43.4	4157	125.2	42.0	4362	125.0	41.4	4448	125.2	42.7	4258
150	125.1	43.4	4157	125.2	41.9	4378	125.0	41.6	4417	125.2	43.7	4118
175	125.1	43.1	4199	125.2	41.6	4424	125.0	41.1	4496	125.2	42.2	4332
200	125.1	42.4	4300	125.2	41.6	4424	125.0	41.2	4480	125.2	42.3	4317
225	125.1	41.8	4390	125.2	41.2	4487	125.0	40.8	4545	125.2	41.7	4408

供試体番号	AO-1(乾湿　28日)			AO-2(乾湿　56日)			AO-3(乾湿　103日)			AI-13(気中→水中103日)		
測定位置		超音波測定			超音波測定			超音波測定			超音波測定	
(打設面からの距離)	直径 (mm)	時間 (μs)	速度 (m/sec)	直径 (mm)	時間 (μs)	速度 (m/sec)	直径 (mm)	時間 (μs)	速度 (m/sec)	直径 (mm)	時間 (μs)	速度 (m/sec)
10	125.0	41.9	4372	125.1	41.9	4374	125.1	41.9	4374	125.0	42.3	4311
20	125.0	42.1	4341	125.1	41.9	4374	125.1	42.0	4359	125.0	42.1	4341
25	125.0	41.9	4372	125.1	41.8	4389	125.1	41.9	4374	125.0	42.3	4311
50	125.0	41.9	4372	125.1	42.1	4344	125.1	41.8	4389	125.0	42.2	4326
75	125.0	42.4	4297	125.1	42.5	4284	125.1	42.5	4284	125.0	42.4	4297
100	125.0	42.5	4282	125.1	42.0	4359	125.1	42.8	4240	125.0	42.2	4326
125	125.0	42.0	4356	125.1	42.3	4314	125.1	41.5	4436	125.0	41.6	4418
150	125.0	41.8	4387	125.1	41.8	4389	125.1	42.5	4284	125.0	42.2	4326
175	125.0	41.8	4387	125.1	41.8	4389	125.1	42.7	4255	125.0	41.6	4418
200	125.0	41.1	4497	125.1	41.7	4405	125.1	41.7	4405	125.0	41.8	4387
225	125.0	41.3	4465	125.1	41.5	4436	125.1	42.8	4240	125.0	40.5	4597



(a)7～56日



(b)103日

図—5.3.2.7　側面透過音速

５．３．３　コア試験結果

コアの試験結果を**表－5.3.3.1～4** に示す。

表－5.3.3.1 は圧縮強度試験結果により，圧縮前の音速測定を，搬入時の状態である長さ約 300mm の状態，圧縮用に 200mm で切断した状態，それを水中に浸漬して 1 日目と 4 日目に測定した。

表－5.3.3.2 は圧裂強度試験結果であり，含水率は気乾状態で圧裂強度試験した後の切片を，48 時間乾燥機に入れ絶乾にしたときの損失水量であり，吸水率はその後 7 日間水中に浸漬したあとの結果である。

既設舗装版の圧縮強度および圧裂強度は、新設舗装版より大きく良好である。

表－5.3.3.3 はアスファルト中間層の音速，密度の結果である。新設舗装版のアスファルトはローラによる締固めに対し，大型供試体はビブロプレートによる締固めだったため新設舗装のものより音速，密度ともかなり小さい。大型供試体の As は，大型供試体外のアスファルト部分であり，端部であったためさらに小さい測定結果であった。

表－5.3.3.4 は，コアをアスファルトと一体で採取できたので，音速を一体のとき，アスファルトとコンクリートを分離してそれぞれ測定した結果を示した。

表－5.3.3.5 は既設舗装版（健全部分）の開削調査時のコンクリートとアスファルト接着部分の音速と，それを分離したときの結果である。Ａｓ不良というのは，アスファルトの厚さの中間付近で分離気味になっており，その部分に細かい泥が入っていたものである。

表－5.3.3.6 および**図－5.3.3.1** にはコアの打設面から内部方向の音速分布，圧裂強度，含水率分布を示す。左側が大型供試体および新設舗装版から採取したコアの結果，右側が既設舗装版（健全および不良）から採取したものの結果である。左側の音速は平均 4400m/ｓ程度でほぼ一定であるが，右側は表面付近が 4000m／ｓ程度と小さいが，100 ㎜より内部は 4400～4600m/ｓ程度になっている。

圧裂強度は、左側は 2～2.5N/mm^2 程度でほぼ一定であるが，右側は音速とは異なり表面付近も高い強度を示している。

含水率分布 wi/wsi を見ると，左側は 100％近くでほぼ一定であるが，右側は表面付近は 60％前後に対し，100 ㎜より内部では 80％前後でほぼ一定している。

既設舗装版の音速の表面付近の低下は主に含水率の影響と考えられ，全厚さにわたってほぼ良好な圧裂強度分布を有している。

表-5.3.3.1　コアの圧縮強度

測定位置	番号	試験材齢	密度 g/cm3	圧縮強度 N/mm²	ヤング係数 kN/mm²	ポアソン比	音速 (m/s) 搬入時 長手	切断時 長手	切断時 直角	水中1日 長手	水中1日 直角	水中4日 長手	水中4日 直角
大型供試体	3	35日	2.344	43.9	28.6	0.127	4315	4332	4352	4398	4352	4437	4430
	4		2.349	45.2	29.0	0.171	4314	4442	4429	4452	4468	4472	4529
既設（健全）	②－i	25年	2.374	50.5	38.6	0.152	4487	4640	4607	—	—	4608	4628
	④－f		2.372	52.1	38.3	0.169	4401	4677	4666	—	—	4624	4622
既設（不良）	②－i	25年	2.361	62.2	38.1	0.209	4401	4642	4524	—	—	4653	4607
	④－f		2.406	55.0	32.8	0.256	4462	4717	4386	—	—	4588	4386

表-5.3.3.2 コアの圧裂強度（全体の平均）

測定位置	番号	試験材齢	含水率 %	吸水率 %	表乾密度 g/cm³	圧裂強度 N/mm²	音速 (m/s) 長手	音速 (m/s) 直角
大型供試体	1	33日	5.16	5.60	2.352	2.23	4347	4278
	2		5.26	5.48	2.351	1.97	4329	4352
新設舗装版	1	34日	4.72	4.94	2.378	2.23	4332	4405
	2	33日	3.98	4.08	2.395	2.16	4350	4366
	3	32日	4.12	4.28	2.380	2.03	4300	4216
	5	30日	3.94	4.15	2.391	2.19	4446	4506
	6	29日	4.04	4.13	2.403	2.32	4483	4547
既設（健全）	②－n	25年	2.21	3.04	2.360	2.30	4430	4440
	④－i		1.77	2.51	2.382	2.78	4437	4606
既設（不良）	②－n	25年	2.12	2.68	2.357	2.84	4423	4460
	④－i		2.08	2.70	2.370	2.71	4371	4783

表-5.3.3.3 アスファルト 音速

測定位置	番号	音速 (m/s) 長手	音速 (m/s) 平均	音速 (m/s) 直角	音速 (m/s) 平均	密度 (g/cm³)
大型供試体	1	3072	3113	2815	2882	2.11
	2	3205		2797		
	3	3168		2981		
	4	3008		2935		
	As	2916	2916	2717	2717	2.07
新設舗装版	1	3887	3809	3792	3758	2.34
	2	3684		3693		
	3	3774		3701		
	5	3873		3772		
	6	3825		3831		

表－5.3.3.5　既設舗装版（健全）のコンクリート，アスファルトの音速

	全長 距離 mm	全長 時間 μs	全長 音速 m/s	コンクリート 距離 mm	コンクリート 時間 μs	コンクリート 音速 m/s	アスファルト 距離 mm	アスファルト 出力 1kV 時間 μs	アスファルト 出力 1kV 音速 m/s	アスファルト 出力 500V 時間 μs	アスファルト 出力 500V 音速 m/s
As健全	119.9	29.3	4090	63.2	14.8	4268	41.1	11.6	3540	12.1	3393
As不良	181.1	47.3	3829	125.1	32	3909	39.6	13.2	3002	11.6	3416
As(健全)のみ		—	—	—	—	—	41.7	12.6	3315	12.1	3452

表-5.3.3.4 コンクリートとアスファルト一体の場合と、分離したときの音速の比較

測定位置	番号	Co+As一体 全長	Co+As一体 時間	Co+As一体 音速	Co+As一体 平均	Co,As個々 Co 全長	Co 時間	Co 音速	Co 平均	As 全長	As 時間	As 音速	As 平均	Co+As 全長	Co+As 差	Co+As 時間	Co+As 差	Co+As 音速	Co+As 平均*
大型供試体	1	346.0	85.0	4071	4064	302.5	69.6	4347	4326	43.6	14.2	3072	3113	346.1	0.1	83.8	−1.2	4131	4137 (+73)
	2	344.5	85.6	4025		302.1	69.8	4329		42.3	13.2	3205		344.5	−0.1	83.0	−2.6	4150	
	3	337.6	82.4	4097		299.9	69.5	4315		38.0	12.0	3168		337.9	0.3	81.5	−0.9	4146	
	4	-	—	—		300.3	69.6	4314		36.1	12.0	3008		336.4		81.6		4122	
新設舗装版	1	365.4	87.9	4157	4266	324.9	75.0	4332	4411	41.2	10.6	3887	3808	366.1	0.7	85.6	−2.3	4277	4330 (+64)
	2	355.5	82.7	4299		315.4	70.2	4493		40.2	10.9	3684		355.5	0.0	81.1	−1.6	4384	
	3	366.7	86.4	4245		325.1	75.6	4300		41.5	11.0	3774		366.6	−0.2	86.6	0.2	4233	
	5	359.2	83.4	4306		313.0	70.4	4446		46.1	11.9	3873		359.1	−0.1	82.3	−1.1	4363	
	6	349.9	80.9	4325		308.0	68.7	4483		42.1	11.0	3825		350.1	0.1	79.7	−1.2	4392	

＊（ ）内は、一体との比較

表—5.3.3.6 コアの音速·圧裂強度·含水率·密度分布

(a)音速分布

距離	大型1	大型2	新設1	新設2	新設3	新設5	新設6
10	4259	4240	4588	4546	4345	4368	4526
20	4223	4240	4567	4674	4383	4349	4631
30	4188	4240	4464	4652	4345	4311	4506
50	4371	4352	4310	4444	4252	4387	4329
100	4223	4409	4347	4464	4461	4426	4426
150	4278	4352	4405	4366	4216	4506	4547
200	4333	4352	4291	4328	4442	4506	4506
250	4278	4295	4310	4366	4216	4466	4653
300	4636	4635	4385	4444	4383	4527	4426

距離	健全1	健全2	不良1	不良2
10	4111	4462	4128	4097
20	4061	4289	4044	3936
30	3887	4403	4269	3758
50	3887	4462	4420	4183
100	4420	4648	4440	4544
150	4440	4606	4460	4783
200	4500	4462	4561	4607
250	4520	4563	4561	4607
280	4480	4502	4362	4423

(b)圧裂強度分布

距離	大型1	大型2	新設1	新設2	新設3	新設5	新設6
50	2.19	2.08	1.98	2.51	2.13	2.22	2.11
100	2.08	1.98	2.12	2.06	2.00	2.09	2.05
150	2.32	2.00	2.33	1.86	2.10	2.09	2.53
200	2.29	1.97	2.33	2.41	1.87	2.10	2.38
250	2.27	1.81	2.36	1.98	2.07	2.44	2.55

距離	健全1	健全2	不良1	不良2
50	2.19	3.17	3.12	2.64
100	1.98	3.41	2.23	2.59
150	2.46	2.19	3.19	2.81
200	2.48	2.30	2.68	2.88
250	2.41	2.81	2.97	2.62

(c)含水率分布

大型1				大型2			
距離	wi	wsi	wi/wsi	距離	wi	wsi	wi/wsi
27.8	4.60	5.63	0.817	24.9	4.93	5.50	0.897
69.9	5.45	6.04	0.902	73.4	5.59	5.81	0.962
114.5	5.41	5.70	0.949	123.9	5.41	5.54	0.977
168.7	5.33	5.62	0.948	177.1	5.71	5.87	0.972
217.0	5.47	5.78	0.946	212.3	5.97	6.30	0.947
272.0	4.93	5.09	0.968	261.6	4.72	4.81	0.981

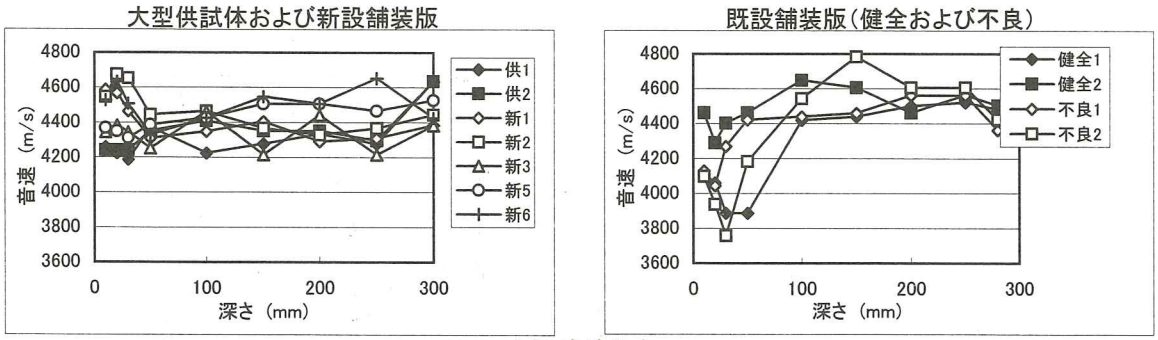
新設1				新設2			
距離	wi	wsi	wi/wsi	距離	wi	wsi	wi/wsi
21.6	4.55	4.97	0.915	27.8	3.88	4.13	0.939
72.1	5.07	5.28	0.961	77.5	4.67	4.63	1.008
124.0	5.06	5.26	0.962	121.2	3.94	4.01	0.981
154.9	4.66	4.80	0.970	168.8	3.98	4.00	0.995
209.4	4.50	4.71	0.956	213.7	4.25	4.37	0.973
290.5	4.63	4.77	0.969	274.0	3.56	3.70	0.962

新設3				新設5			
距離	wi	wsi	wi/wsi	距離	wi	wsi	wi/wsi
25.3	3.87	4.20	0.923	23.8	3.74	4.27	0.876
73.9	4.55	4.64	0.982	74.0	4.27	4.51	0.946
122.3	4.25	4.25	1.000	126.0	3.87	4.04	0.959
170.2	4.41	4.67	0.944	174.0	4.32	4.39	0.986
221.0	4.15	4.29	0.967	219.8	4.06	4.13	0.983
287.1	3.76	3.91	0.960	278.1	3.56	3.74	0.951

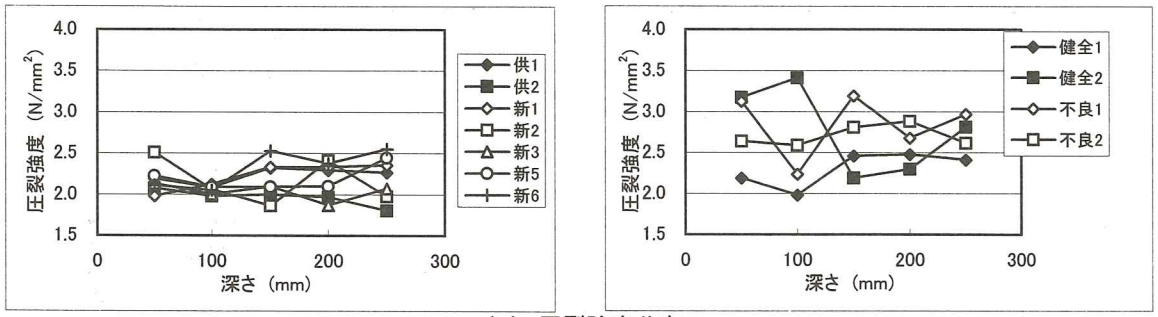
新設6			
距離	wi	wsi	wi/wsi
26.3	4.04	4.19	0.964
74.3	4.88	4.86	1.003
121.2	4.28	4.32	0.990
168.3	4.24	4.33	0.980
216.8	3.70	3.76	0.986
275.6	3.46	3.64	0.950

健全1				健全2			
距離	wi	wsi	wi/wsi	距離	wi	wsi	wi/wsi
29.9	1.85	3.14	0.588	24.5	1.40	2.66	0.528
81.4	2.38	3.52	0.675	74.0	1.91	2.87	0.664
125.2	2.72	3.60	0.756	124.4	1.83	2.52	0.726
173.3	2.31	2.94	0.787	171.0	2.14	2.88	0.744
227.8	2.06	2.48	0.830	219.4	1.92	2.47	0.776
275.3	2.08	2.71	0.770	274.4	1.50	1.81	0.830

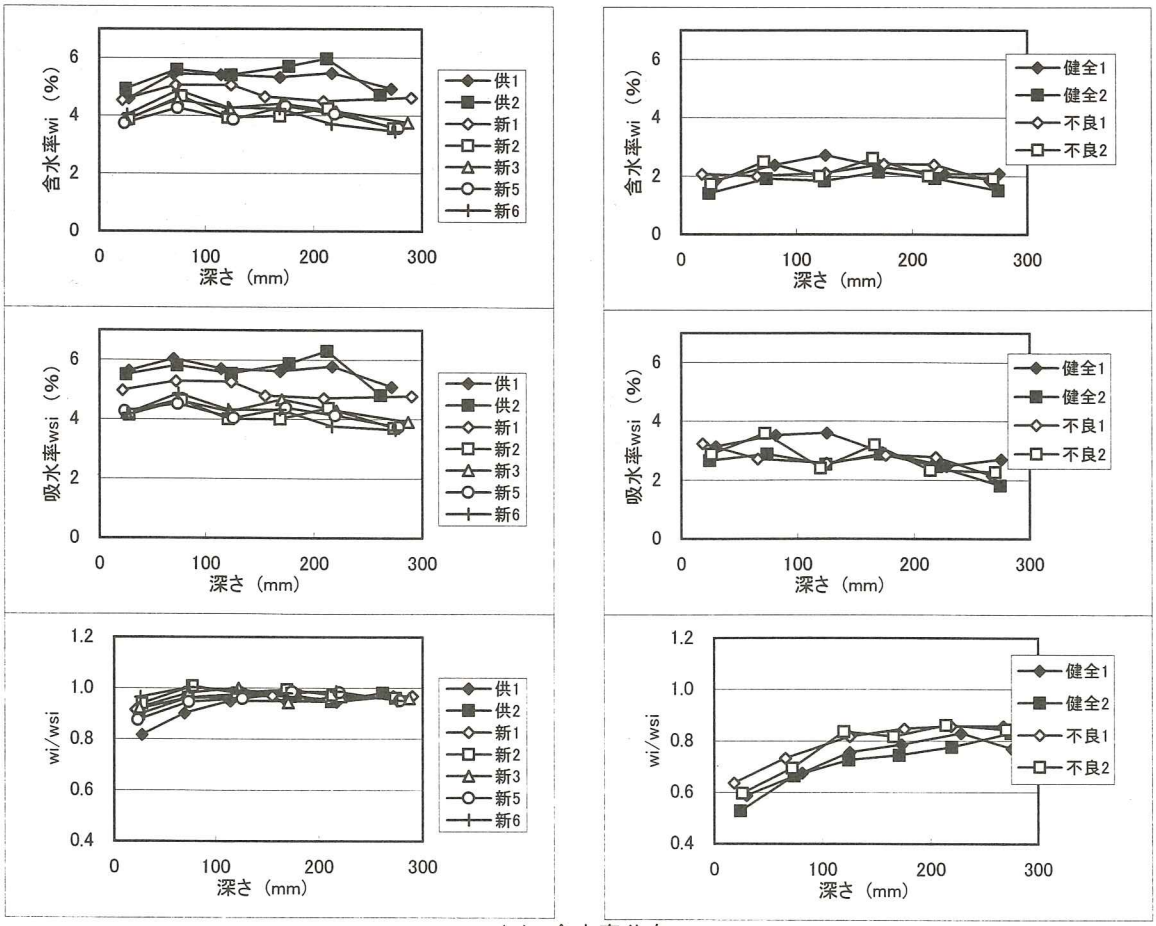
不良1				不良2			
距離	wi	wsi	wi/wsi	距離	wi	wsi	wi/wsi
18.4	2.06	3.24	0.637	26.0	1.72	2.88	0.597
66.0	1.99	2.71	0.734	72.0	2.49	3.58	0.694
125.1	2.11	2.58	0.818	119.8	2.00	2.39	0.836
175.8	2.42	2.85	0.848	166.0	2.61	3.19	0.818
218.7	2.39	2.78	0.858	213.9	2.01	2.33	0.861
267.2	1.84	2.15	0.857	270.0	1.91	2.27	0.843



（a） 音速分布



（b） 圧裂強度分布



（c） 含水率分布

図—5.3.3.1 コアの音速，圧裂，含水率分布

５．３．４　既設舗装版の曲げ強度試験結果

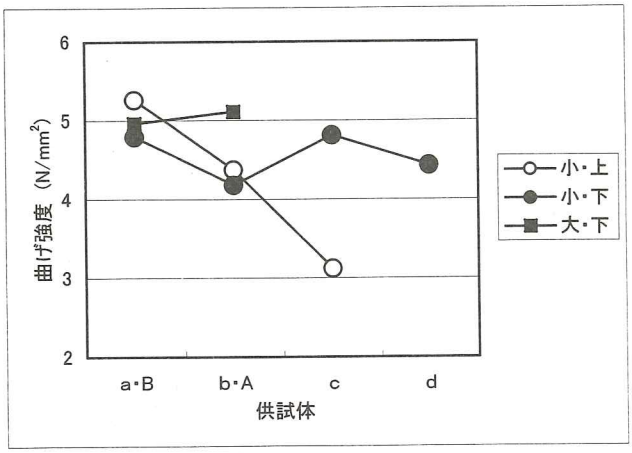
表－5.3.4.1 に既設舗装版を切り出した試験片の音速と曲げ強度結果を示す。

図－5.3.4.1 は曲げ強度試験結果であり，c，d の上面破壊したものの強度が 2.5～3N/mm^2 程度であり，他の 4～5N/mm^2 程度より明らかに小さくなっている。c，d は走行方向に対して直角方向，つまり表面に温度変化によるそり応力や乾燥による収縮ひび割れの入る方向であり，表面には微細なひび割れが入っている可能性があるものと考えられる。

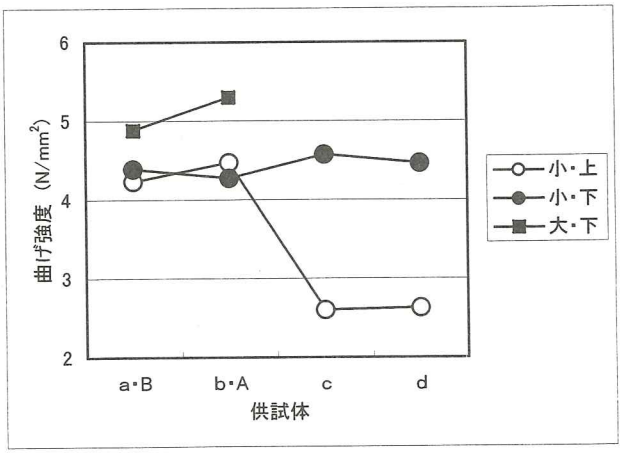
大試験片は 5N/mm^2 程度有しており，小試験片より大きい傾向があり非常に良好な結果であった。通常であれば，寸法効果により小試験体のほうが 20%程度大きくなることが予想されたが，逆に 10%程度小さくなっている。

曲げ供試体の側面から深さ方向に透過音速を測定した結果が図－5.3.4.2 である。図－5.3.3.1 の(a)の右のコアの結果と同様の傾向を示しているが，音速は 200m/ s 程度速くなっている。これはポアソン比の影響によるものと考えられる。コアの側面は球面であり、探触子の接触は線状となりポアソン比の影響は非常に大きい。それに対し，曲げ供試体の断面はほぼ 150×200mm で接触面はほぼ平面であったためと考えられる。

図－5.3.4.3 は曲げ供試体の長手方向，図－5.3.4.4 は厚さ方向の音速である。上が遅く，下が速い傾向がある。



(a)健全



(b)不良

図—5.3.4.1　曲げ強度

表－5.3.4.1　既設舗装版の曲げ強度・音速結果

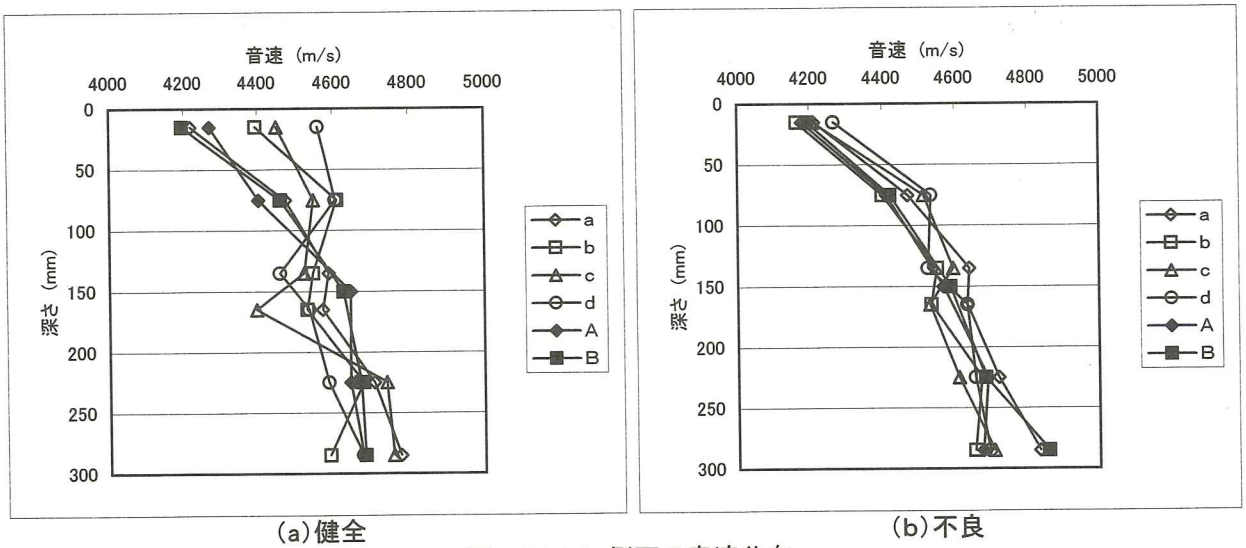
（a）健全

試験片			d			a				B			A				b			c		
位置・破壊方向			路肩・直角			路肩・走行				路肩・走行			走行・走行				走行・走行			中央・直角		
路肩からの距離（mm）			90			450				700			1200				1450			1800		
供試体番号			1	2	平均	1	2	3	平均	1	2	平均	1	2	3	平均	1	2	平均	1	2	平均
音速（m/s）	側面深さ（mm）	15	4502	4618	4560	4044	4402	4210	4218	4141	4250	4195	4353	4159	4301	4271	4490	4300	4395	4370	4532	4451
		75	4576	4638	4607	4495	4504	4422	4474	4362	4560	4461	4503	4374	4330	4402	4669	4552	4610	4458	4637	4547
		135	4447	4471	4459	4591	4621	4552	4588								4562	4530	4546	4468	4578	4523
		150								4512	4743	4627	4658	4677	4603	4646						
		165	4520	4552	4536	4570	4602	4543	4572								4507	4555	4531	4323	4469	4396
		225	4632	4543	4587	4637	4714	4770	4707	4606	4740	4673	4670	4718	4549	4646	4743	4614	4679	4819	4662	4741
		285	4774	4580	4677	4819	4750	4766	4778	4592	4773	4683	4776	4681	4573	4677	4600	4580	4590	4790	4729	4759
		平均	4575	4567	4571	4526	4599	4544	4556	4442	4613	4528	4592	4522	4471	4528	4595	4522	4558	4538	4601	4570
	長手	上	4635	4721	4678	4530	4571	4468	4523								4469	4396	4433	4327	4420	4374
		中or平均	4627	4688	4657	4611	4606	4584	4600	4602	4590	4596	4568	4589	4578	4578	4516	4454	4485	4442	4496	4469
		下	4618	4655	4637	4693	4641	4701	4678								4563	4513	4538	4557	4572	4564
	厚さ	上	4502	4565	4533	4440	4519	4522	4493								4398	4272	4335	4334	4267	4301
		全厚or平均	4512	4521	4517	4446	4486	4537	4490	4365	4385	4375	4467	4467	4334	4423	4424	4323	4374	4442	4398	4420
		下	4522	4477	4500	4453	4454	4552	4486								4451	4374	4412	4550	4528	4539
曲げ N/mm2	上面破壊 ＊		(7.10)	(8.99)		5.08	5.64	5.07	5.26								4.42	4.33	4.38	3.43	2.81	3.12
	下面破壊		4.52	4.33	4.43	5.32	4.89	4.16	4.79	4.82	5.10	4.96	5.54	4.81	4.98	5.11	4.34	4.01	4.18	4.83	4.79	4.81

＊（ ）内は，鉄筋の影響

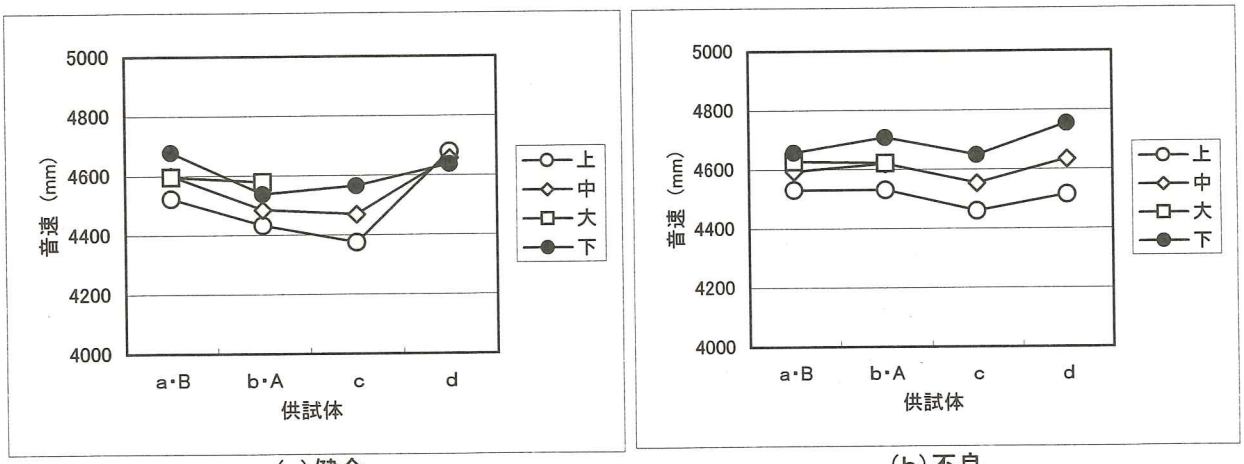
（b）不良

試験片			d			a				B			A				b			c		
位置・破壊方向			路肩・直角			路肩・走行				路肩・走行			走行・走行				走行・走行			中央・直角		
路肩からの距離（mm）			90			450				700			1200				1450			1800		
供試体番号			1	2	平均	1	2	3	平均	1	2	平均	1	2	3	平均	1	2	平均	1	2	平均
音速（m/s）	側面深さ（mm）	15	4161	4373	4267	4260	4096	4285	4214	4131	4259	4195	4284	4090	4167	4180	4209	4120	4164	4288	4131	4210
		75	4505	4563	4534	4512	4370	4530	4470	4407	4436	4422	4463	4319	4453	4412	4430	4371	4400	4564	4463	4514
		135	4563	4489	4526	4639	4638	4639	4639								4654	4445	4550	4628	4562	4595
		150								4653	4521	4587	4480	4604	4618	4567						
		165	4685	4583	4634	4754	4494	4650	4633								4608	4461	4534	4568	4494	4531
		225	4742	4568	4655	4736	4753	4668	4719	4684	4681	4683	4570	4762	4735	4689	4735	4608	4672	4640	4578	4609
		285	4682	4706	4694	4840	4793	4866	4833	4811	4906	4859	4709	4566	4750	4675	4627	4678	4653	4671	4741	4706
		平均	4556	4547	4552	4624	4524	4606	4585	4537	4560	4549	4501	4468	4545	4505	4544	4447	4495	4560	4495	4527
	長手	上	4502	4528	4515	4517	4567	4507	4530								4578	4482	4530	4490	4428	4459
		中or平均	4626	4644	4635	4527	4627	4627	4594	4644	4610	4627	4608	4622	4635	4622	4646	4592	4619	4576	4532	4554
		下	4749	4760	4755	4538	4687	4747	4657								4714	4703	4708	4662	4635	4649
	厚さ	上	4494	4479	4486	4703	4433	4349	4495								4361	4441	4401	4533	4269	4401
		全厚or平均	4436	4527	4482	4627	4437	4422	4495	4398	4389	4393	4405	4429	4308	4381	4442	4505	4474	4449	4263	4356
		下	4377	4576	4477	4550	4440	4496	4496								4524	4569	4546	4366	4258	4312
曲げ N/mm2	上面破壊		2.72	2.54	2.63	4.14	3.68	4.87	4.23								4.35	4.58	4.47	2.33	2.87	2.60
	下面破壊		4.58	4.33	4.455	3.81	4.48	4.89	4.39	4.82	4.94	4.88	5.18	5.32	5.39	5.30	4.26	4.27	4.27	4.30	4.83	4.57



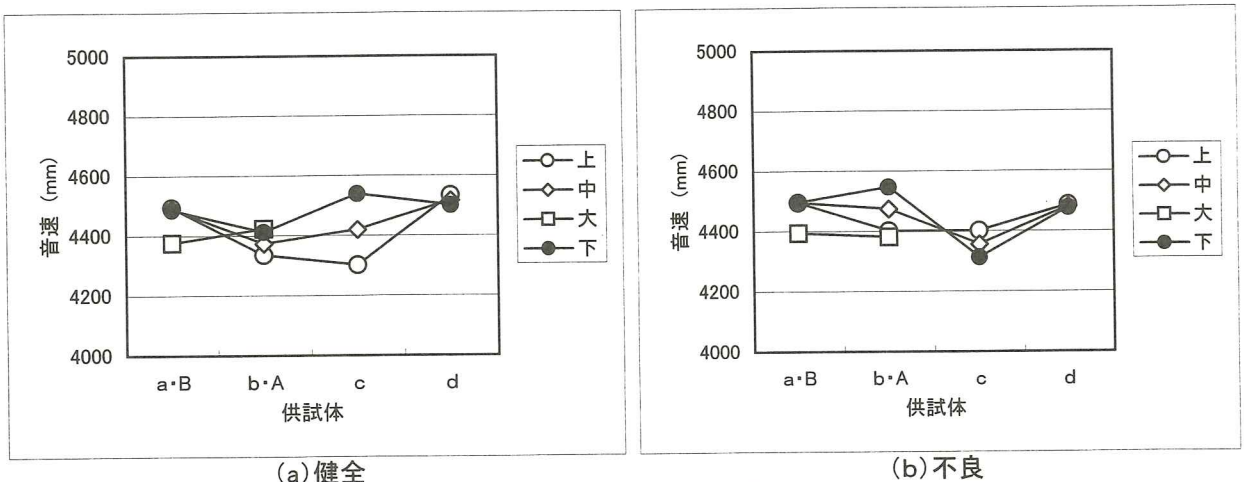
(a)健全　　(b)不良

図—5.3.4.2 側面の音速分布



(a)健全　　(b)不良

図—5.3.4.3 長手方向の音速



(a)健全　　(b)不良

図—5.3.4.4. 厚さ方向の音速

５．３．５　部材厚さ，鉄筋のかぶり厚さ・間隔の実測結果

表－5.3.5.1～3 に大型供試体，新設舗装版，既設舗装版の部材厚さ，かぶり厚さ，鉄筋間隔，路面の凹凸の測定結果を示す。

図－5.3.5.1 に既設舗装版の横断方向，縦断方向の凹凸状態を示す。横断方向の路肩から 1000～1500mm は車輪走行位置にあたり，10mm 近くすりへっている。縦断方向の凹凸はわずかである。

図－5.3.5.2 の(a)は切断面で測定したかぶり厚さと，(b)は鉄筋交点位置を比例で求めたかぶり厚さである。鉄筋番号 l ～ g あたりのかぶり厚さが小さくなっているのは，すりへりが原因である。

表-5.3.5.1　大型供試体の実測結果

(a)厚さ

	e	g	i	k	As
Co	302.5	302.1	299.9	300.3	—
As	43.6	42.3	38.0	36.1	44.3

(b)鉄筋間隔

a-b	b-c	c-d	d-f	f-h	h-j	j-l
402	348	301	199	100	102	99

(c)かぶり

a	b	c	d	f	h	j	l
294.0	236.7	188.5	137.4	86.9	61.6	37.3	10.3

表-5.3.5.2　新設舗装版の厚さ

	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅴ	Ⅵ
Co	324.9	315.4	325.1	313.0	308.0
As	41.2	40.2	41.5	46.1	42.1

表-5.3.5.3 既設舗装版(健全)の実測結果

(a)厚さ

	m	j	e
②	294.2	299.7	—
⑤	—	302.3	304.1

(b) 路面の凹凸

	路肩	r	q	p	o	n	厚さ m	l	k	厚さ j	i	h	g	f	厚さ e	d	c	b	a	中央
距離	0	40	165	290	415	540	600	665	790	850	915	1040	1165	1290	1350	1415	1540	1665	1790	1890
②	0.0	-0.4	-2.8	-4.3	-7.1	-7.0	-7.3	-8.6	-6.7	-3.2	-3.4	-2.2	-0.3	-0.4	-0.4	-1.1	-0.3	2.0	0.2	0.0
⑤	0.0	-0.6	-2.7	-3.8	-6.5	-7.3	-7.1	-7.1	-6.8	-3.9	-3.1	-2.0	0.3	0.2	0.5	0.3	0.0	1.4	0.8	0.0

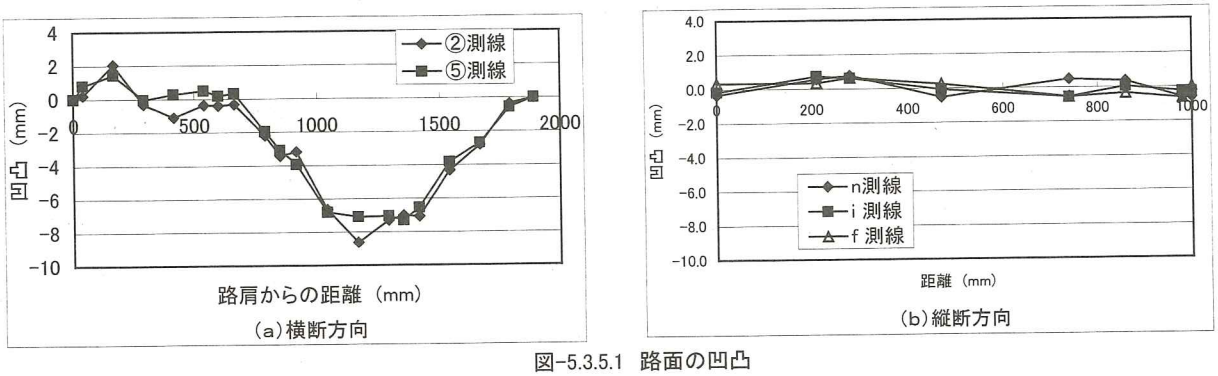


図-5.3.5.1 路面の凹凸

(c) 鉄筋間隔

間隔	D13 q-r	D13 p-q	D6 q-r	p-q	o-p	n-o	l-n	k-l	i-k	h-i	g-h	f-g	d-f	c-d	b-c	a-b
①	116	130	125	125	125	124	125	125	125	125	125	124	125	125	125	124
③	115	132	125	125	125	125	125	125	125	125	125	124	125	125	125	124
④	115	134	125	124	124	125	124	125	124	126	124	125	125	125	125	124
⑥	114	136	125	124	124	126	124	125	124	126	124	125	125	125	125	124

①-③	260
②-③	261
③-④	260

(d)かぶり

かぶり	D13 r	D13 q	D13 p	D6 r	q	p	o	n	l	k	i	h	g	f	d	c	b	a
①	70	69	69	81	85	83	84	84	82	79	75	72	72	72	73	75	77	78
③	70	68	70	85	87	85	86	86	85	82	78	76	76	76	77	80	81	82
④	71	68	71	88	89	87	88	87	87	86	82	81	81	81	82	84	86	87
⑥	71	67	72	91	92	90	90	89	90	90	86	85	85	85	87	89	91	91

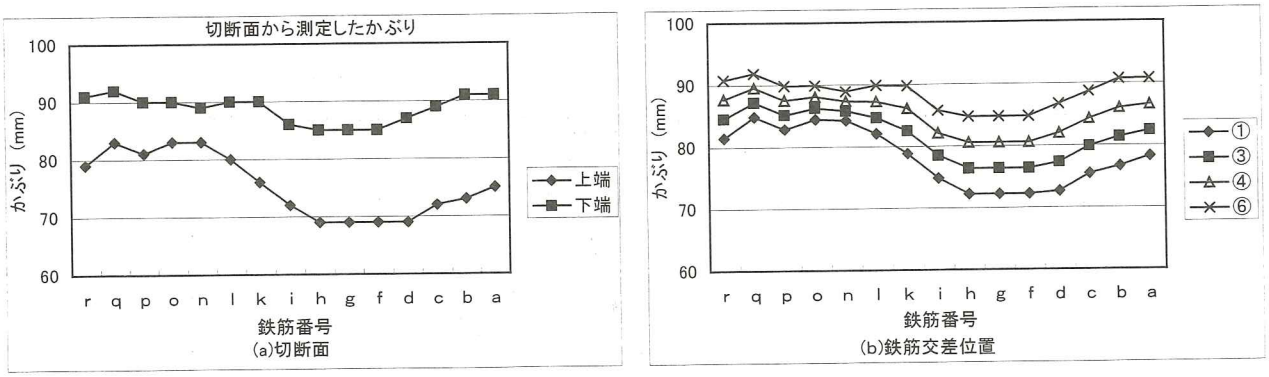


図-5.3.5.2 かぶり

５．４　超音波法の測定結果

５．４．１　超音波Ａ

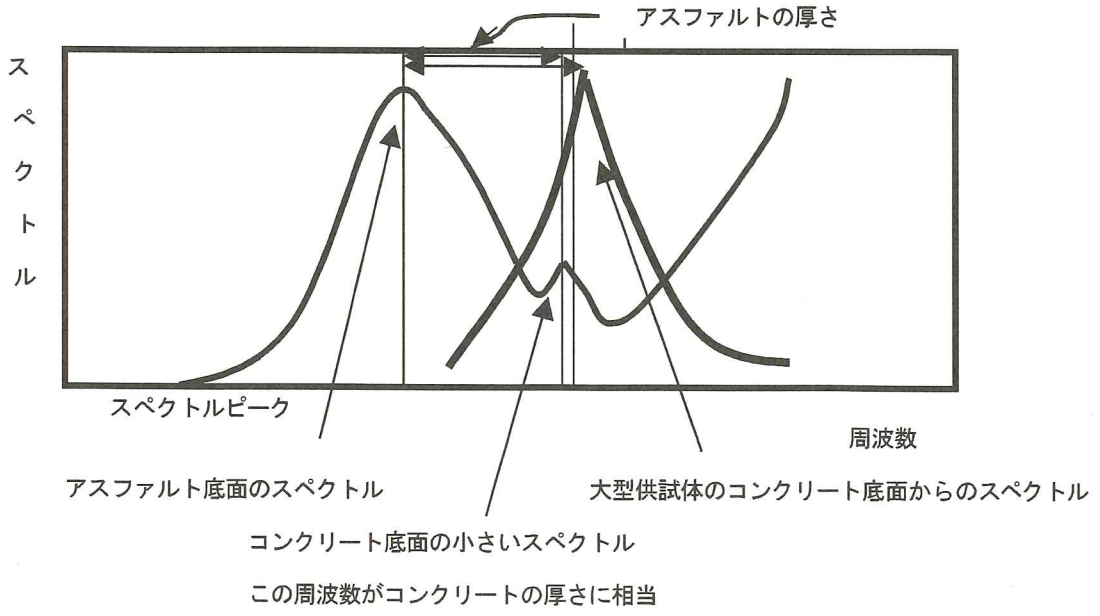
１）目的

厚さ約 300mm のコンクリート舗装版の厚さを測定した。この場合にも表面の音速が低く、内部の音速は速いと考えられるので、コンクリート版の厚さ方向の平均音速を簡易に推定する方法を検討した。コンクリート版の下にアスファルト中間層があり、反射波が分離できるかどうかの問題もある。

２）方法

この場合にも音速の表面走査法により厚さ方向の平均音速を推定した。基礎実験の供試体Ａや他の経験から、約 800～1000mm の探触子間隔の表面音速の×1.04～1.06 を平均音速の推定に試案として利用した。ここでは後でコアが採取できたので、表面音速の何倍に推定すれば厚さが精度よく測定できるか、検証して今後の利用に役立てることにした。このことは、トンネル覆工や、構造物の壁，床版などの厚さを求める上で経験値として大切な結果である。

また舗装版にはコンクリート版の下に約 40mm のアスファルト中間層が施工してある。コンクリート表面からはアスファルトの存在はわからない。厚さや音速も不明であり、ここではまず、コンクリート版のみをアスファルトと分離して求める方法を検討した。アスファルト底面のスペクトルピークは求めやすい。コンクリート底面からのピークは、アスファルト底面より高い周波数に表れることになる。このピークを見つけ出すことによって直接コンクリートのみの厚さを得ることができる。この分離のためのピークの検出には、感度の高い第二の手法または第四の手法を本来は採用するが、今回は電源トラブルのため探触子を道具で固定できず、感度が 1／10 の第三の手法を採用した。



図－5.4.1.1　コンクリートとアスファルトの厚さ測定(第三の手法のスペクトル説明図)

また大型供試体では、自立させた探触子をゴムブロックで軽く挟んで測定面に静止する方法すなわち、探触子をごく軽く測定面に接触させる方法により、コンクリートの厚さだけの高い電圧の反射波のスペクトルピークを測定できた。この方法により第三の手法および第二の手法で測定した。

しかし、探触子を押しつけるとアスファルト底面からの反射波のスペクトルに瞬時に変化した。探触子を押しつけ送波の出力を増加すると、コンクリートだけの反射波ではなく、アスファルト底面からの反射波の両方の多重反射波が測定された。この現象には再現性があった。大型供試体の場合、コンクリートとアスファルトの音速がそれぞれ約 4200m／s と約 3000 m／s であり、音速に差があったことから分離測定を可能にしていたものと考えられる。

各種の反射波のスペクトルおよび分離測定の説明を図-5.4.1.1 に示す。

左の山が合計の厚さに相当し、右の山が分離法によるコンクリートだけの厚さに相当する。

表-5.4.1.1 大型供試体 測定結果

距離	120	220	310	420	520	620	720	820	1020	1220	1620	2020
伝搬時間	31.5	54.5	75.6	101.5	125.8	149.8	173.8	197.0	247.5	295.0	402.7	499.3
音速	3810	4037	4101	4138	4134	4139	4143	4162	4121	4136	4023	4046

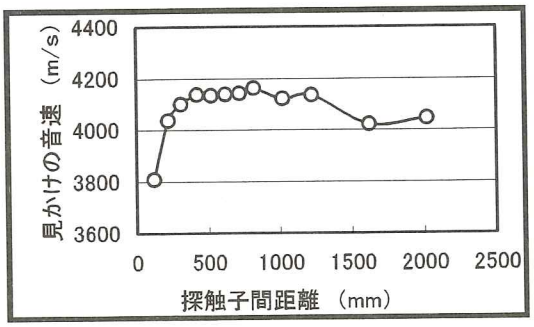


図-5.4.1.2 大型供試体 見かけの音速

表-5.4.1.2 新設舗装版 測定結果

ロット	距離	120	220	320	420	520	620	720	820	1020	1220	1620	2020
I	伝搬時間	29.6	53.0	77.1	100.7	124.7	148.7	172.7	196.7	243.7	290.7	385.7	484.7
	音速	4054	4151	4150	4171	4170	4169	4169	4169	4185	4197	4200	4168
II	伝搬時間	30.4	54.9	80.2	102.7	123.7	149.7	171.7	193.7	243.7	290.7	386.7	480.7
	音速	3947	4007	3990	4090	4204	4142	4193	4233	4185	4197	4189	4202
III	伝搬時間	30.5	56.1	77.5	103.7	126.7	148.7	172.7	199.7	248.7	295.7	389.7	480.7
	音速	3934	3922	4129	4050	4104	4169	4169	4106	4101	4126	4157	4202
V	伝搬時間	29.7	54.6	76.9	100.7	126.7	147.7	171.7	194.7	243.7	285.7	381.7	486.7
	音速	4040	4029	4161	4171	4104	4198	4193	4212	4185	4270	4244	4150
VI	伝搬時間	32.4	55.4	77.4	101.7	127.7	151.7	173.7	197.7	246.7	292.7	387.7	480.7
	音速	3704	3971	4134	4130	4072	4087	4145	4148	4135	4168	4178	4202
VI (45°)	伝搬時間	30.0	54.2	78.3	102.7	126.7	149.7	171.7	196.7	244.7	288.7	386.7	479.7
	音速	4000	4059	4087	4090	4104	4142	4193	4169	4168	4226	4189	4211

表-5.4.1.3 既設舗装版 測定結果

	距離	120	220	310	420	520	620	720	827	1027	1227	1627
②	伝搬時間	27.7	65.5	84	106.9	128.3	154.9	187.8	201.5	250.6	296.4	383.2
	音速	4332	3359	3690	3929	4053	4003	3834	4104	4098	4140	4246
⑤	伝搬時間	33.3	81.4	96.7	101.3	136.9	152.5	192.7	200.2	260	295.8	388.3
	音速	3604	2703	3206	4146	3798	4066	3736	4131	3950	4148	4190

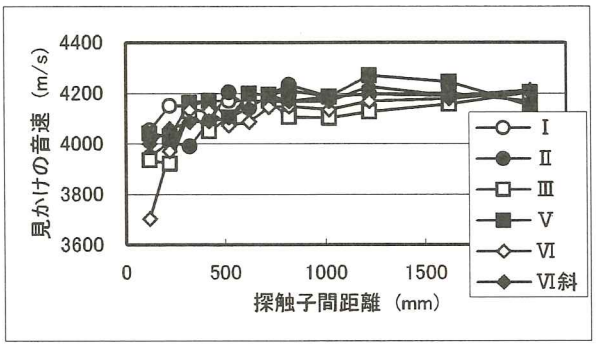


図-5.4.1.3 新設舗装版 見かけの音速

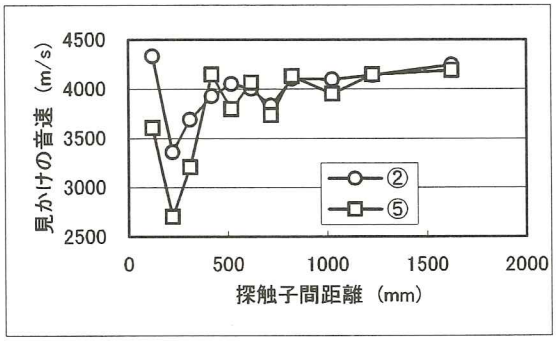


図-5.4.1.4 既設舗装版 見かけの音速

表-5.4.1.4 反射時間測定結果

大型供試体		新設舗装版				既設舗装版			
測定位置		ロット	1回目	2回目	3回目	測線	f	i	n
1	142.9	I	178.6	185.2	181.8	②	175.4	175.4	172.4
2	140.8	II	175.4	172.4	178.6	⑤	172.4	172.4	172.4
3	138.9	III	181.8	163.9	181.8				
4	138.9	V	181.8	181.8	181.8				
		VI	175.4	175.4	172.4				

5．4．2　超音波B(ウルコン)

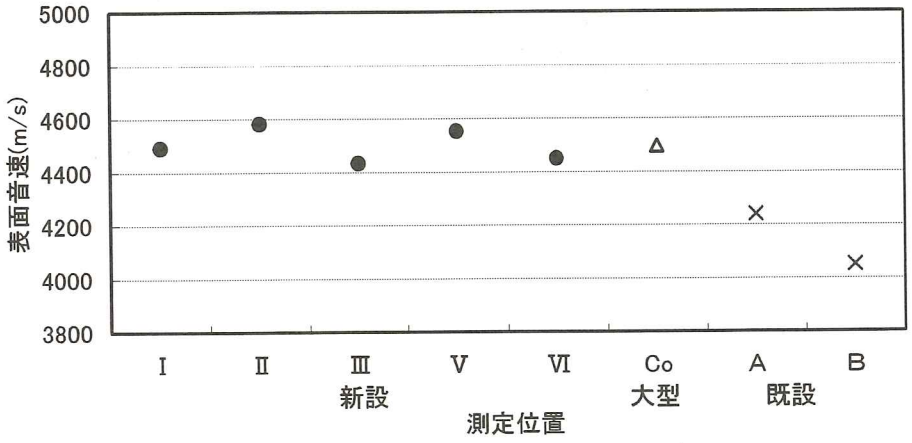
(1) 伝搬速度測定結果

表－5.4.2.1　新設舗装版

使用帯域	探触子	探触子間距離 (mm)	表面音速 m/s				
			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅴ	Ⅵ
高周波	送受信 20φ	100	4651	4587	4525	4587	4630
		200	4535	4435	4545	4211	4415
		300	4172	4286	4196	4110	4098
低周波	送信 76φ	300	4243	4854	4418	4854	4532
		400	4706	4556	4469	4678	4646
		500	4545	4541	4413	4421	4468
	受信 56φ	600	4655	4515	4532	4535	4415
		700	4316	4450	4342	4281	4202
		平均	4493	4583	4435	4554	4452

表－5.4.2.2　大型供試体及び既設舗装版

使用帯域	探触子	探触子間距離 (mm)	表面音速m/s			
			大型供試体		既設舗装版	
			As	Co	A	B
高周波	送受信 20φ	100	2364	4587	4505	4762
		200	－	4386	4167	4338
		300	－	4525	3927	4310
低周波	送信 76φ	300	－	4673	4412	4267
		400	－	4587	4090	4107
		500	－	4421	4263	4013
	受信 56φ	600	－	4448	4196	3822
		700	－	4353	－	－
		平均	－	4496	4240	4052

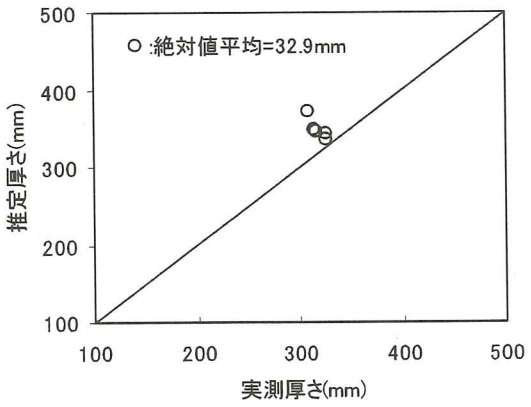


図－5.4.2.1　測定位置と表面音速の関係

(2) 厚さ測定結果

表－5.4.2.3　新設舗装版

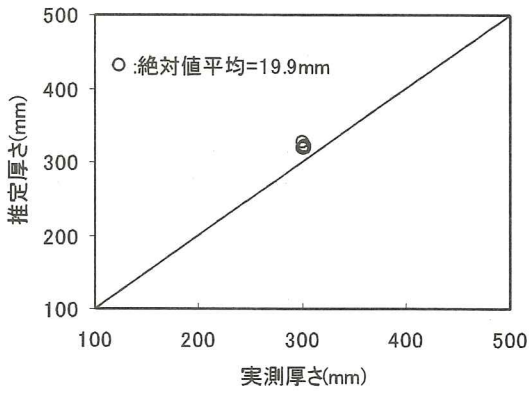
測定位置	伝搬時間 μs	表面音速 m/s	推定厚さ mm	実測厚さ mm	誤差 mm
Ⅰ	76.7	4493	344.5	324.9	19.6
Ⅱ	75.9	4583	347.8	315.4	32.4
Ⅲ	76.0	4435	336.9	325.1	11.8
Ⅴ	76.7	4554	349.3	313.0	36.3
Ⅵ	83.6	4452	372.2	308.0	64.2
絶対値平均					32.9



図－5.4.2.2　実測厚さと推定厚さの関係

表－5.4.2.4　大供供試体

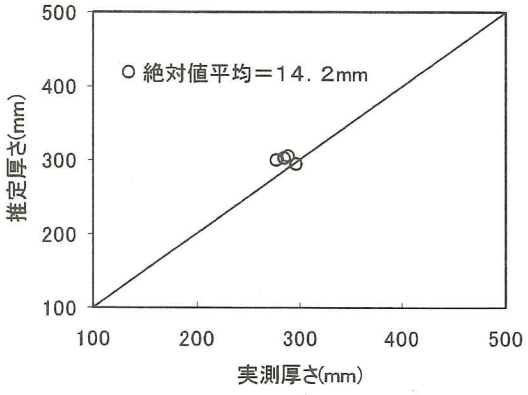
測定位置	伝搬時間 μs	表面音速 m/s	推定厚さ mm	実測厚さ mm	誤差 mm
①k	70.7	4496	317.9	300.3	17.6
①i	72.5	4496	326.1	299.9	26.2
①g	70.9	4496	318.6	302.1	16.5
①e	71.5	4496	321.6	302.5	19.1
絶対値平均					19.9



図－5.4.2.3　実測厚さと推定厚さの関係

表－5.4.2.5　既設舗装版

測定位置	伝搬時間 μs	表面音速 m/s	推定厚さ mm	実測厚さ mm	誤差 mm
②e	67.3	4146	279.0	–	–
②j	67.2	4146	278.6	299.7	−21.1
②m	71.7	4146	297.3	294.2	3.1
⑤e	69.7	4146	289.0	304.1	−15.1
⑤j	68.7	4146	284.8	302.3	−17.5
⑤m	71.5	4146	296.2	–	–
絶対値平均					14.2

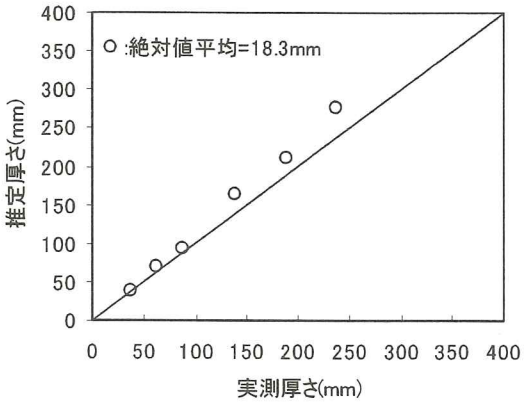


図－5.4.2.4　実測厚さと推定厚さの関係

(3) 鉄筋のかぶり厚さ測定結果

表－5.4.2.6　大型供試体

ラインNo.	測定位置	伝搬時間 μs	表面音速 m/s	推定かぶり厚さ mm	実測かぶり厚さ mm	誤差 mm
②	h	–	–	–	10.3	–
	g	8.9	4496	40.0	37.3	2.7
	f	15.9	4496	71.5	61.6	9.9
	e	20.9	4496	94.0	86.9	7.1
	d	36.4	4496	163.7	137.4	26.3
	c	47.2	4496	212.2	188.5	23.7
	b	61.6	4496	277.0	236.7	40.3
	a	–	–	–	294.0	–
絶対値平均						18.3



図—5.4.2.5　実測かぶり厚さと推定かぶり厚さの関係

(4)結果概要

①伝搬速度測定結果について

新設舗装版の平均音速値 4435～4583m/s、大型供試体の平均音速値 4496m/s、既設舗装版の平均音速値はAが 4240m/s でBが 4452m/s であった。材齢の関係で新設の音速は既設に比較して約 200～400m/s 速かった。なお、**図-5.4.2.1** に測定位置と表面音速の関係を示す。

②厚さ測定について

新設舗装版と大型供試体においては、①項に示したように材齢の関係で音速が 5～10%速いため、実測厚約 300mm に対し 15～30mm 程度厚く推定されたと考える。

なお、**図-5.4.2.2**～**図-5.4.2.4** に各供試体の実測厚さと推定厚さの関係を示す。

表－5.4.2.7

供試体	誤差 (mm) 推定値-実測値	誤差率 (%)	絶対値 平均
新設舗装版	11.8～64.2	3.6～20.8	32.9
大型供試体	16.5～26.2	5.5～ 8.7	19.9
既設舗装版	-21.1～ 3.1	-7.0～ 1.1	14.2

③鉄筋のかぶり厚さ測定結果について

表-5.4.2.6 に測定結果を示す。また、**図-5.4.2.5** に実測かぶり厚さと推定かぶり厚さの関係を示す。誤差範囲は 2.7～40.3mm であり、実測かぶり厚さと推定かぶり厚さの関係では、大きなバラツキは見られないが、かぶり厚さが厚くなるに従い誤差は大きくなっている。

5.4.3　超音波 C

(1) 新設舗装版

コンクリート舗装版（新設）の版厚測定結果の 1 例を図 5.4.3.1 に示す。測点 1 の直径 200mm の円領域で 1 対の 40 φ探触子の距離を 60 mm～80 mmの範囲で変動させながら 3000 回の受信波を収録し、これ等の加算平均波より 50kHz 前後の狭帯域成分波に図示するタイムゲインコントロールを行ったものである。最初に起生している波がコンクリート版底部からの反射波、2 番目の波がその下のアスファルト層底部からの反射波である。

t_h =135.6 μ 秒に音速値 4500 m/秒を適用すると 308mm とコンクリート厚が測定されている。

Δt_h =(188.2-155.4)=32.8 μ 秒にアスファルト音速値 2790m/秒を適用するとアスファルト厚が

32.8×2.79/2=46 mm

と測定される。同様の測定を測点Ⅲ、Ⅴ、Ⅵで行った。測定コンクリート厚及びアスファルト厚を表 5.4.3.1 に示す。一方、図 5.4.3.2 は測点 6 での多点計測で道路軸方向に 100mm 間隔で計測した事例である。前記図 5.4.3.1 との測定条件の違いは探触子間距離の変動を 60～70 mmの範囲とした事、加算回数を 1000 回とした事である。

50kHz の狭帯域成分波に図示するタイムゲインコントロールを行っている。本例では、コンクリート底面からの反射波は殆ど起生しておらず、アスファルト底部からの反射波が大きく生じている。アスファルト打設後、その表面が凸凹になったままコンクリートを打設したものと判断する。

但し、周波数を若干高周波方向へ掃引していくと、微弱ではあるが、コンクリート底部からの反射波も確認できた。図 5.4.3.3.がこの場合の画像である。57kHz の狭帯域成分波より作成したものである。

表 5.4.3.1　新設舗装版コンクリート及びアスファルト厚測定値

測点	コンクリート実測値(mm)	アスファルト実測値(mm)	コンクリート厚 反射波 t_h (μ秒)	＊＊ Δt (μ秒)	コンクリート音速 (m／秒)	コンクリート厚 d_C (mm)	アスファルト厚 ＊ d_A (mm)	コンクリート実測値との比較	アスファルト実測値との比較
測点Ⅰ	324.9	41.2	135.6	32.80	4500	304	46	0.94	1.12
測点Ⅲ	325.1	41.5	125.3	44.78	4500	280	62	0.86	1.49
測点Ⅴ	313.0	46.1	127.88	44.30	4500	286	62	0.91	1.34
測点Ⅵ	308.0	42.1	133.91	39.18	4500	300	54	0.97	1.28

＊　アスファルト音速は 2790m／秒とした

＊＊　版厚反射波とアスファルト反射波の起生時刻差(図 5.4.3.1 参照)

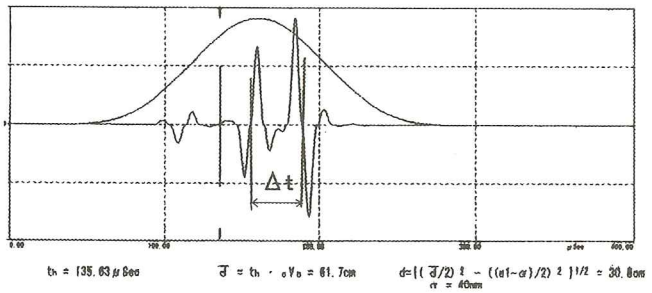


図 5.4.3.1　コンクリート舗装版厚測定結果

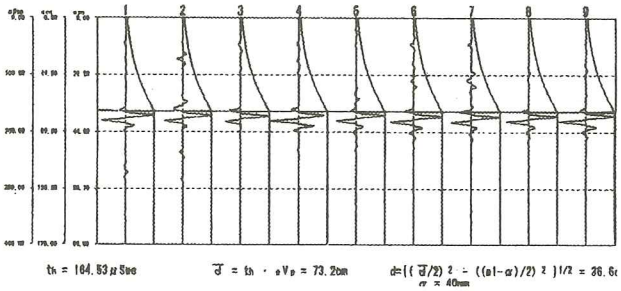


図 5.4.3.2　加算回数 1000 回とした多点版厚測定結果

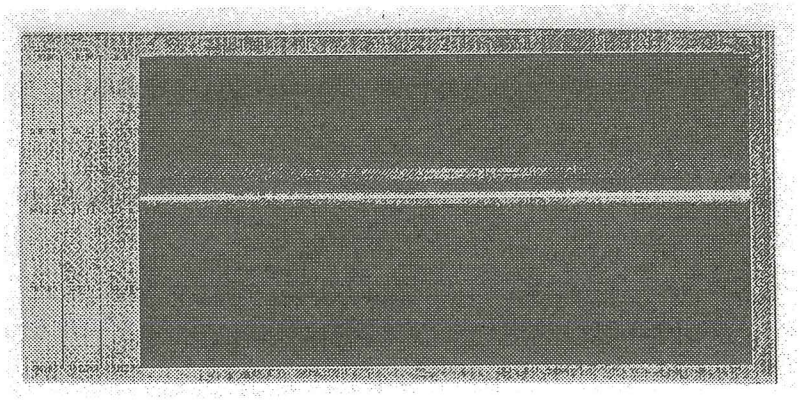


図 5.4.3.3　狭帯域成分波画像

(2) 大型供試体

コンクリート下側アスファルト厚は 45mm である。反射波法を用い、音速を測定する。探触子間距離を 60mm に固定した時の測定波を図 5.4.3.4 に示す。t_h=32.7 μ 秒より音速 V_A は

V_A=2×45/32.7=2750m/秒

となり、別途表面走査法で求めた音速 2790m/秒前後とよく一致している。

図 5.4.3.5 は測点Ⅲで図 5.4.3.1 を得たと同一の計測条件で求めた加算平均波より、154kHz の狭帯域成分波に図示するタイムゲインコントロール処理を行ったものである。コンクリートモデルの音速を 4400m/秒として、コンクリート厚が 300mm（実値 300mm）と明確に測定されている。図 5.4.3.1、図 5.4.3.2 ではアスファルト底部からの反射波の強さが大きいが、本供試体ではコンクリート底部からの反射波の強度の方が大きい。本モデルではアスファルト層が突き固められた後、コンクリートが打設されている。これが影響して生じた現象と判断する。

上記記述を実証するために、図 5.4.3.6 に示すタイムゲインを図 5.4.3.5 の成分波に乗ずる。埋もれていたアスファルト底部からの反射波が明敏に確認できる。

アスファルト厚 d_A は

d_A=(170.1-136.5)×2750/2=46mm（実値 45mm）

と測定されているのを確認願いたい。

(2.1.3.6) 式で f_0 値が 100kHz となることより、これを中心周波数とした狭帯域成分波を用いた測定結果を表 5.4.3.2 に示す。

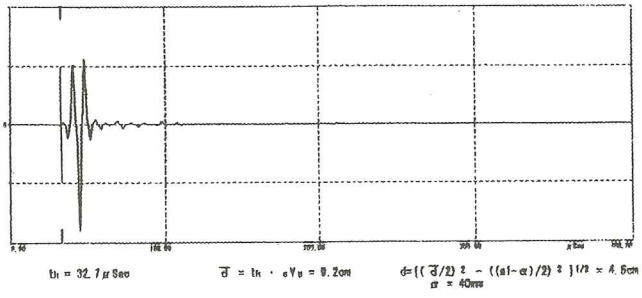


図 5.4.3.4　探触子間距離 60mm 音速測定結果

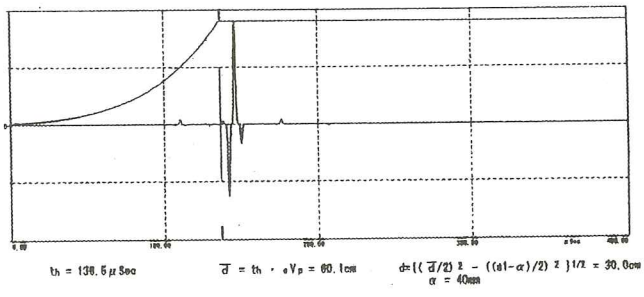


図 5.4.3.5　測点Ⅲにおける狭帯域成分波のタイムゲインコントロール処理

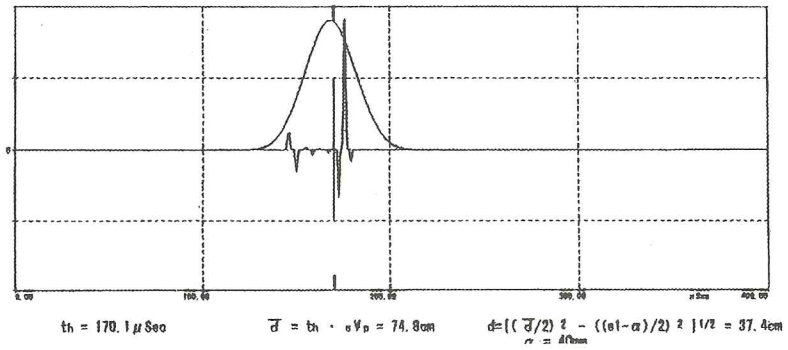


図 5.4.3.6　タイムゲイン成分波

(3) 音速測定結果

表 5.4.3.3 に音速測定結果一覧を示す。

表 5.4.3.2　大型供試体コンクリート厚及びアスファルト厚測定

測点	コンクリート実測値	アスファルト実測値(mm)	コンクリート反射波 t_h(μ秒)	** Δt(μ秒)	コンクリート音速(m／秒)	コンクリート厚 d_A(mm)	アスファルト厚 * d_A(mm)	コンクリート実測値との比較	アスファルト実測値との比較
測点 e	302.5	43.6	136.72	33.6	4400	299	47	0.99	1.08
測点 g	302.1	42.3	136.1	32.3	4400	298	45	0.99	1.06
測点 i	299.9	38.0	136.5	33.6	4400	299	47	1.00	1.24
測点 k	300.3	36.1	122.0 *** (130.5)	—	4400	267 *** (286)	—	0.95	

＊　アスファルト音速 2790m／秒とした。

＊＊　版厚反射波とアスファルト反射波の起生時刻差(図 5.4.3.1 参照)

＊＊＊　(　　) 内は 150kHz 成分波による測定値である。

成分波取り出しを低周波へ移行していくとコンクリート底面からの反射波起生時刻が早くなっている。この即点付近でコンクリート厚に段差があるのだろうか？　この様な場合、この付近で多点計測を行い、各測点での波形の変化を視認できる B モード計測を行うことで対処しなければいけない。

表 5.4.3.3　音速測定結果一覧

現場実験　　測定日　2000 年　11 月　23　日

超音波　　音速

供試体	測線		測定間隔 (mm)											
			100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1600	2000
大型供試体	中心	Co	4409	4436	4446	4330	4420	4400	4295	—	—	—	—	—
	As		2797	2792			—	—	—	—	—	—	—	—
新設舗装版	1	Co	4484	4559	4557	4578	4324	4268	4262	4248	4227	4265	4178	分析不能
	3	Co	4485	4476	4446	4389	4340	4333	4251	4276	4227	4384	測定不能	測定不能
	5	Co	4335	4377	4572	4503	4430	4414	4445	4490	4289	測定不能	4293	
	6	Co	4409	4436	4473	4535	4539	4387	4445	4355	4361	4271	4303	4367

５．４．４　音速分布の解析結果とコア側面，曲げ供試体側面の透過音速の比較

表-5.4.4.1 に大型舗装版，新設舗装版，既設舗装版の音速分布の解析結果を示す。また，**表－5.4.4.2** に曲げ強度試験用供試体の音速分布の解析結果を示す。**図－5.4.4.1～5.4.4.4** にコアおよび曲げ供試体の側面から測定した透過音速と音速分布の解析結果を比較した。**図－5.4.4.1** の大型供試体のコアの透過音速と解析結果はよく一致している。**図－5.4.4.2** の新設舗装版のコアの透過音速と解析結果は，表面付近の傾向が異なるものの，内部音速はほぼ一致している。**図－5.4.4.3** の既設舗装版のコアおよび**図－5.4.4.4** の曲げ供試体の透過音速と解析結果は，全体的に解析結果が遅いものの，傾向はほぼ一致している。

曲げ強度試験用供試体の各面からの解析結果と透過音速の関係も、**図－5.4.4.5** のようにほぼ両者は一致している。

表-5.4.4.1　音速分布の解析結果

材齢	供試体	位置	解析結果		表面音速	表層厚さ	内部音速
			K	ho	m/s	mm	m/s
	大型供試体	大型	2751	43.6	4013	55.0	4376
	新設舗装版	Ⅰ	2786	41.1	4040	56.0	4421
		Ⅱ	2853	22.7	3900	66.0	4436
		Ⅲ	2829	24.3	3892	65.0	4407
		Ⅴ	2828	30.7	3983	64.0	4439
		Ⅵ	2720	42.1	3954	56.0	4320
		Ⅵ(45度)	2788	32.6	3950	60.0	4385
25年	既設舗装版(健全)	②	2781	13.9	3618	71.0	4356
		⑤	2767	3.9	3170	77.0	4282

表-5.4.4.2　曲げ強度試験用供試体の音速分布の解析結果

材齢(日)	養生方法	測定面	表面音速(m/s)	解析結果			
				k	ho	表層厚さ(mm)	内部音速
1	湿布	打設面	3480	2049	＊ 200.0	5.5	3489
3			3838	2608	47.6	18.1	3964
7			4021	2862	30.0	23.3	4259
28	気中		3871	2945	15.4	29.4	4307
56			3970	2835	29.0	23.6	4214
28	水中		4217	2828	54.4	16.6	4331
56			4215	2899	42.2	19.5	4378
1	湿布	底面	3703	2180	＊ 200.0	5.5	3713
3			4094	2410	＊ 200.0	5.5	4105
7			4278	2518	＊ 200.0	5.5	4290
28	気中		4134	2864	39.3	20.3	4310
56			4021	2869	29.2	23.6	4266
28	水中		4500	2649	＊ 200.0	5.5	4512
56			4188	3037	24.9	25.2	4491
1	湿布	側面	3628	1949	＊ 500.0	2.2	3630
3			3898	2627	51.7	17.2	4012
7			4110	2813	44.4	18.9	4258
28	気中		4016	2882	27.6	24.2	4277
56			3907	2888	20.5	27.0	4249
28	水中		4176	3008	26.6	24.5	4458
56			4172	3003	26.8	24.5	4452

＊　測定に問題あり

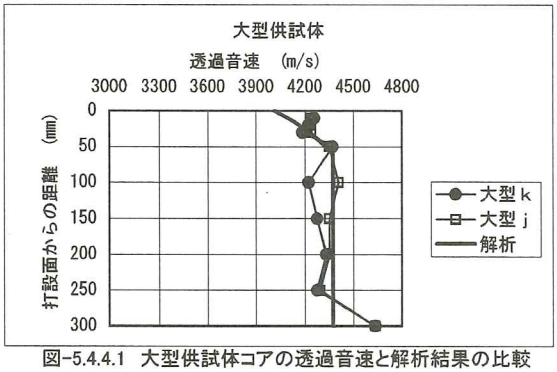
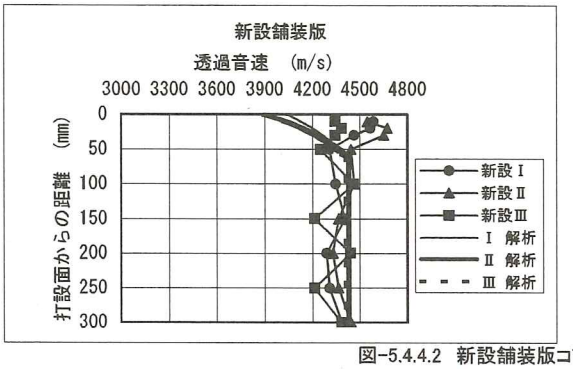


図-5.4.4.1 大型供試体コアの透過音速と解析結果の比較



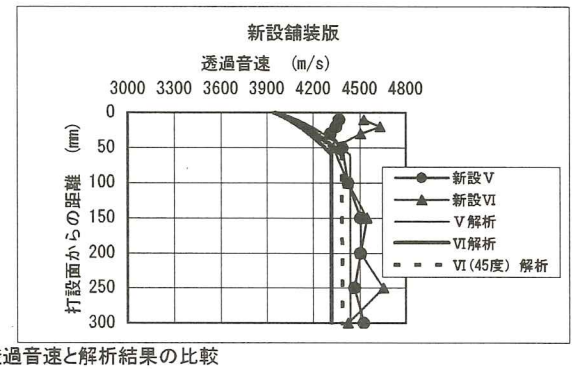


図-5.4.4.2 新設舗装版コアの透過音速と解析結果の比較

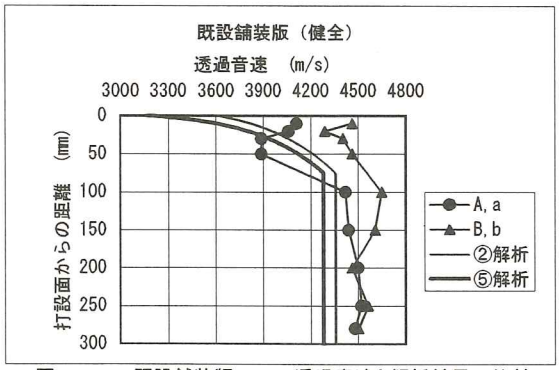


図-5.4.4.3 既設舗装版 コアの透過音速と解析結果の比較

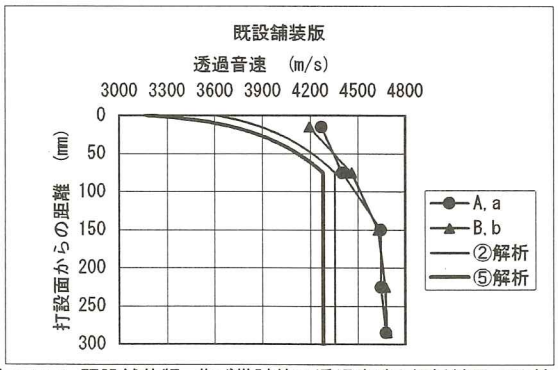


図-5.4.4.4 既設舗装版 曲げ供試体の透過音速と解析結果の比較

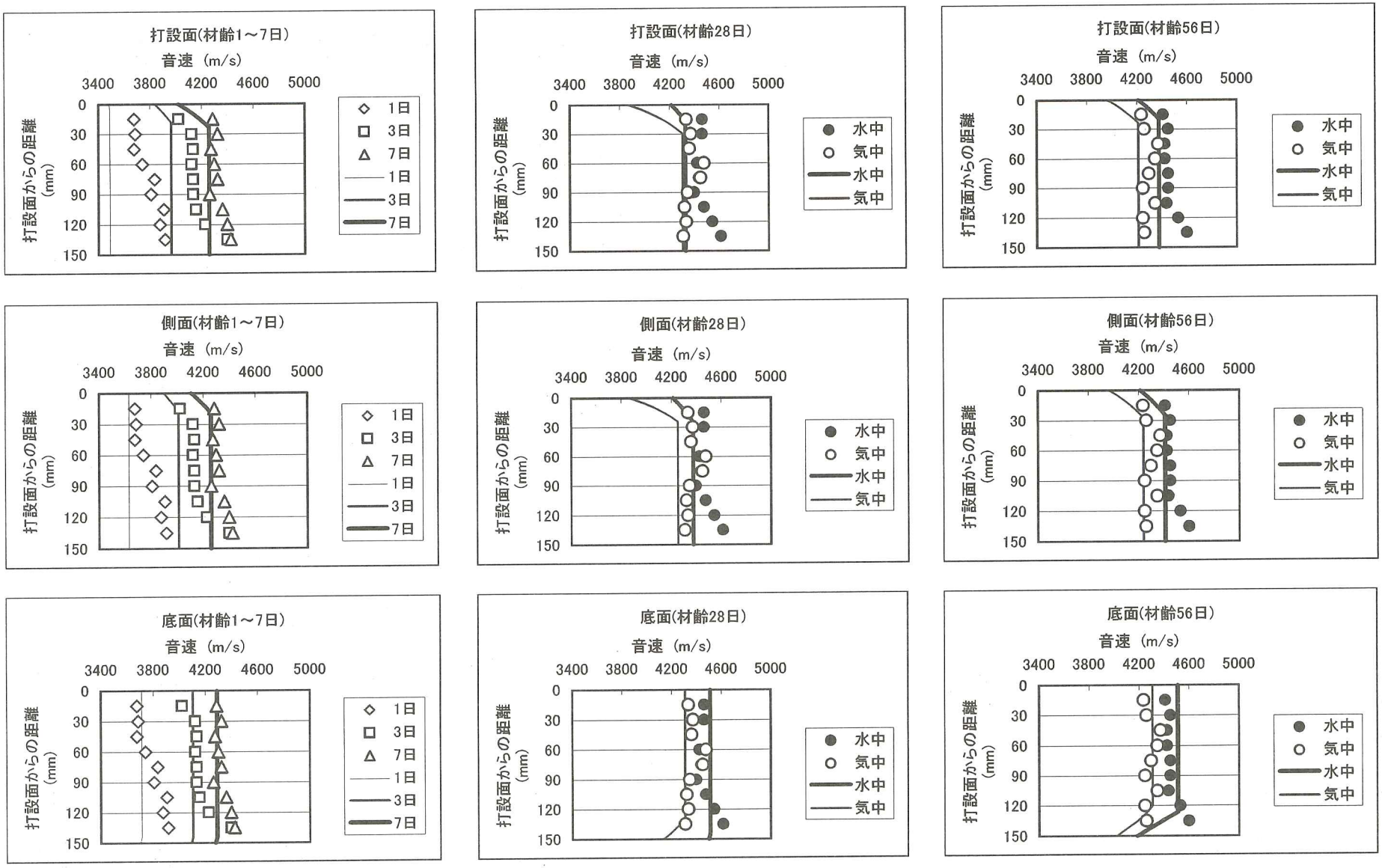


図-5.4.4.5 曲げ強度試験用供試体の透過音速と解析結果の比較

５．４．５　音速分布と版厚の解析結果と実測値の比較

音速分布の解析結果，版厚の結果を表－5.4.5.1 に示す。

(1)音速分布

音速分布の解析結果より，大型供試体および新設舗装版の表面音速 Vo は約 3900～4000m/s であるが，既設舗装版は約 3200m/s と 3600m/s であり新設より遅くなっているが，内部音速は３供試体とも約 4300～4400m/s でほぼ同じである。大型・新設および既設のコンクリートの配合は同じであり，強度試験結果もほぼ同じであったことから，既設は乾燥と表面の劣化により表面音速が遅くなっているものと考えられる。

(2)版　　厚

厚さの結果を見ると，大型供試体は非常に良好な結果であるが，新設および既設舗装版はかなり大きくなっている。この理由は，大型供試体の反射時間はコンクリート底面で測定できたが，舗装版はアスファルト中間層と分離できず，中間層の底面の反射時間が測定されたためと考えられる。大型供試体は，アスファルト中間層，コンクリートとも人力打設である。そのため，特にアスファルトの音速は舗装版のものに比べかなり遅かった。また，コンクリートとアスファルトの付着も，コア採取中に大型供試体のものは４本の内１本ははくりしたが，舗装版のもののはくりはなかった。このようなことから，大型供試体はコンクリート底面からの反射時間が得られやすかった，逆に舗装版は得られにくかったものと考えられる。

アスファルト中間層をいかに分離するのかという問題は残るものの，コンクリート底面からの反射時間が測定できれば精度よく厚さを推定することができる。

表－5.4.5.1　音速分布，厚さの解析結果と実測値の比較

供試体	測線	位置	音速分布の解析結果					反射時間 t	音速分布域の往復時間 t_1	内部音速域の厚さ $h_2/2$	厚さ h　(mm)		
			Vo	K	ho	h_1	V_1	μs	μs	mm	解析h	実測	解／実
大型供試体		1	4013	2751	43.6	55	4354	142.9	26.2	254.1	309.1	302.5	1.022
		2	4013	2751	43.6	55	4354	140.8	26.2	249.5	304.5	302.1	1.008
		3	4013	2751	43.6	55	4354	138.9	26.2	245.4	300.4	299.9	1.002
		4	4013	2751	43.6	55	4354	138.9	26.2	245.4	300.4	300.3	1.000
新設舗装版	Ⅰ	1	4040	2786	41.1	56	4403	178.6	26.4	335.0	391.0	324.9	1.204
		2	4040	2786	41.1	56	4403	185.2	26.4	349.6	405.6	324.9	1.248
		3	4040	2786	41.1	56	4403	181.8	26.4	342.1	398.1	324.9	1.225
	Ⅱ	1	3900	2853	22.7	66	4468	175.4	31.2	322.2	388.2	315.4	1.231
		2	3900	2853	22.7	66	4468	172.4	31.2	315.5	381.5	315.4	1.209
		3	3900	2853	22.7	66	4468	178.6	31.2	329.3	395.3	315.4	1.253
	Ⅲ	1	3892	2829	24.3	65	4433	181.8	30.9	334.5	399.5	325.1	1.229
		2	3892	2829	24.3	65	4433	163.9	30.9	294.8	359.8	325.1	1.107
		3	3892	2829	24.3	65	4433	181.8	30.9	334.5	399.5	325.1	1.229
	Ⅴ	1	3983	2828	30.7	61	4443	181.8	28.7	340.1	401.1	313.0	1.281
		2	3983	2828	30.7	61	4443	181.8	28.7	340.1	401.1	313.0	1.281
		3	3983	2828	30.7	61	4443	181.8	28.7	340.1	401.1	313.0	1.281
	Ⅵ	1	3954	2720	42.1	56	4303	175.4	27.0	319.2	375.2	308.0	1.218
		2	3954	2720	42.1	56	4303	175.4	27.0	319.2	375.2	308.0	1.218
		3	3954	2720	42.1	56	4303	172.4	27.0	312.8	368.8	308.0	1.197
	Ⅵ (45度)	1	3950	2788	32.6	60	4385	175.4	28.6	321.9	381.9	308.0	1.240
		2	3950	2788	32.6	60	4385	175.4	28.6	321.9	381.9	308.0	1.240
		3	3950	2788	32.6	60	4385	172.4	28.6	315.3	375.3	308.0	1.218
既設舗装版	a	f	3618	2781	13.9	71	4336	175.4	35.0	304.4	375.4		
		i	3618	2781	13.9	71	4336	175.4	35.0	304.4	375.4	299.7	1.253
		n	3618	2781	13.9	71	4336	172.4	35.0	297.9	368.9	294.2	1.254
	b	f	3170	2767	3.9	77	4293	172.4	39.1	286.1	363.1	304.1	1.194
		i	3170	2767	3.9	77	4293	172.4	39.1	286.1	363.1	302.3	1.201
		n	3170	2767	3.9	77	4293	172.4	39.1	286.1	363.1		

５．５　レーダ法の測定結果

５．５．１　レーダＤ（NJJ-85A　ハンデイサーチ、NJJ-64　レーダミニ）

（１）新設、既設、大型供試体の測定結果

新設、既設のコンクリート舗装版および供試体の測定結果の詳細を表-5.5.1.1～表-5.5.1.2 に示す。

表－5.5.1.1　新設、既設舗装版測定結果一覧

シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）

測定ブロック	測定ライン	鉄筋位置（cm）とかぶり（mm）								
		e-ニ	e-ハ	e-ロ	e-イ	e	d	b	a	a-イ	a-ロ
		①-ニ	①-ハ	①-ロ	①-イ	①	②	④	⑤	⑤-イ	⑤-ロ
Ⅰ	③ライン	103	120	134	148	163	179	194	208	223	238
	s点:路肩より1m	74　72	79　77	82　80	82　80	82　80	86　84	86　84	91　89	93　91	96　94
	cライン				273	288	303	318	333	347	363
	目的地より南へ2.5m				93　91	93　91	93　91	96　94	89　87	86　84	84　82
Ⅱ	③ライン	102	117	132	147	162	177	193	207	223	239
	s点:路肩より1m	72　70	72　70	77　75	77　75	77　75	79　77	77　75	84　82	84　82	86　84
	cライン		355	370	384	399	414	428	443	458	473
	目的地より南へ3m		84　82	89　87	86　84	62　60	69　67	77　75	79　77	82　80	84　82
Ⅲ	③ライン		112	127	142	157	171	189	203	217	233
	s点:路肩より1m		77　75	69　67	69　67	72　70	72　70	77　75	77　75	79　77	86　84
	cライン			314	329	344	358	373	394	408	423
	目的地より南へ2.7m			74　72	77　75	74　72	77　75	79　77	79　77	72　70	77　75
Ⅴ	③ライン	101	117	131	146	161	176	192	206	220	235
	s点:路肩より1m	69　67	69　67	65　63	67　65	74　72	79　77	82　80	84　82	84　82	84　82
	cライン	403	417	432	446	463	477	492	506	521	537
	目的地より南へ3.5m	89　87	89　87	84　82	84　82	84　82	84　82	82　80	82　80	82　80	82　80
Ⅵ	③ライン	102	117	131	146	161	176	192	209	224	239
	s点:路肩より1m	79　77	79　77	77　75	77　75	79　77	82　80	79　77	84　82	84　82	86　84
	cライン			447	462	477	492	507	523	537	551
	目的地より南へ3.5m			84　82	84　82	84　82	84　82	84　82	84　82	86　84	89　87

＊各測定ラインの上段は鉄筋の位置、下段はかぶりを示す。
＊かぶり欄の左側の数値は、シンドコウセイ：0（ε_r=8.0）で測定した値、右側の数値は供試体で推定した値（ε_r=8.43：ﾊﾝﾃﾞｨｰｻｰﾁによる鉄筋測定かぶりと実測かぶりより推定した比誘電率のc，d，f，部分の平均比誘電率値）で補正したガブリを示す。補正係数は$\sqrt{8.0/8.43}=0.974$　となる。
＊各測定ラインの上段は鉄筋位置で　　の箇所はその間にコア抜き箇所がある事を示す。

表－5.5.1.2　既設舗装版・供試体の測定結果一覧

シンドコウセイ　：　0（ε_r=8.0）

測定場所	測定ライン	鉄筋位置（cm）とかぶり（mm）														
		r	q	p	o	n	l	k	i	h	g	f	d	c	b	a
		①	③	④	⑥											
既設舗装版	②ライン	4	16	29	41	53	66	79	91	103	115	128	139	153	165	178
	s点:路肩より横断	6.7　7.0	6.2　6.9	6.0　6.9	7.7　8.4	7.7　8.4	7.2　8.2	6.9　7.9	6.5　7.5	6.2　7.2	6.0　7.2	6.0　7.2	6.2　7.3	6.5　7.5	6.5　7.7	6.5　7.8
	⑤ライン	6	18	31	43	54	68	79	93	105	117	129	142	154	166	179
	s点:路肩より横断	6.5　71	6.0　67	6.2　72	7.4　90	7.4　89	7.2　90	7.2　90	6.7　86	6.5　85	6.5　85	6.5　85	6.5　87	6.7　89	7.2　91	7.2　91
	eライン	21	46	73	99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	s点より北へ走行	6.7	6.7	6.7	6.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	jライン	20	46	73	99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	s点より北へ走行	7.7	7.2	7.4	7.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	mライン	21	47	74	98	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	s点より北へ走行	8.2	7.9	7.9	7.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

測定場所	測定ライン	鉄筋位置（cm）とカブリ（mm）											
		l	j	h	f	d	c	b	a	e	g	i	k
大型供試体	②ライン	—	—	—	144　137	89　87	62　62	33　37	15　10	—	—	—	—
	比誘電率				8.79	8.39	8.10	6.26	16.97				
	①ライン	390　294	320　237	270　189	190　138	130　87	—	—	—	370　303	370　302	370　300	370　300
	比誘電率	12.6	13.1	14.7	13.7	16.0				10.7	10.7	10.7	10.7

＊既設舗装版の各測定ラインの上段は鉄筋位置、下段の左側はシンドコウセイ：0（ε_r=8.0）で測定した値、右側は実測値を示す。
＊供試体厚さ測定ラインの左側の値はレーダ・ミニで比誘電率の設定をドシツ（ε_r=7.16）で測定した値、右側は実測値を示し、速度測定ラインの左側の値はﾊﾝﾃﾞｨｰｻｰﾁでシンドコウセイ：0（ε_r=8.0）で測定した値、右側は実測値を示す。比誘電率値はﾊﾝﾃﾞｨｰｻｰﾁはε_r=8.0×（測定値／実測値）^{2}で、レーダ・ミニは、ε_r=7.16×（測定値／実測値）^{2}で求める。

（２）既設舗装版の測定結果の考察

①鉄筋かぶり誤差について

表-5.5.1.3 に示すように、②ラインについては約 10㎜、⑤ラインについては約 20mm 測定値が浅く測定されている。

表-5.5.1.3　既設舗装版の鉄筋かぶり誤差　　$\varepsilon_r=8.0$

	r	q	p	o	n	l	k	i	h	g	f	d	c	b	a
②ライン	67 70	62 69	60 69	77 84	77 84	72 82	69 79	65 75	62 72	60 72	60 72	62 73	65 75	65 77	65 78
誤差	-3	-7	-9	-7	-7	-10	-10	-10	-10	-12	-12	-11	-10	-12	-13
⑤ライン	65 71	60 67	62 67	74 90	74 89	72 90	67 86	67 86	65 85	65 85	65 85	65 87	67 89	72 91	72 91
誤差	-6	-7	-10	-16	-15	-18	-18	-19	-20	-20	-20	-22	-22	-19	-19

＊かぶりの左側は測定値、右側は実測値

測定現場の比誘電率を推定する為に厚み測定を試みたが、鉄筋のピッチが狭く厚み測定が困難であった。

測定現場の一箇所、例えばｉ鉄筋の位置をボーリングして、かぶりを実測したとすると

②ライン　　$\varepsilon_r=8.0\times(\text{測定値}/\text{実測値})^2=8\times(69/79)^2=6.1$

⑤ライン　　$\varepsilon_r=8.0\times(\text{測定値}/\text{実測値})^2=8\times(67/86)^2=4.85$

二つの平均の比誘電率 $\varepsilon_{rv}=5.475$ で測定値を補正（　　）すると、表-5.5.1.4 のようになり、誤差が軽減される。　　$\sqrt{8.0/5.475}=1.209$

表-5.5.1.4　既設舗装版の補正鉄筋かぶり誤差

	r	q	p	o	n	l	k	i	h	g	f	d	c	b	a
②ライン	81 70	75 69	73 69	93 84	93 84	87 82	83 79	79 75	75 72	73 72	73 72	75 73	79 75	79 77	79 78
誤差	+11	+6	+4	+9	+9	+5	+4	+4	+3	+1	+1	+2	+4	+2	+1
⑤ライン	79 71	73 67	75 72	89 90	89 89	87 90	87 90	81 86	79 85	79 85	79 85	79 86	81 89	87 91	87 91
誤差	+8	+6	+3	-1	0	-3	-3	-5	-6	-6	-6	-8	-8	-4	-4

＊かぶりの左側は測定値、右側は実測値

②鉄筋位置（ピッチ）誤差について

表-5.5.1.5 に鉄筋位置（ピッチ）誤差の一覧を示す。

表-5.5.1.5　既設舗装版の鉄筋ピッチ誤差

	r-q	q-p	p-o	o-n	n-l	l-k	k-i	i-h	h-g	g-f	f-d	d-c	c-b	b-a
②ライン	120 125	130 125	120 125	120 124	130 125	130 125	120 125	120 125	120 125	130 124	110 125	130 125	120 125	130 124
誤差	-5	+5	-5	-4	+5	+5	-5	-5	-5	+6	-15	+15	-5	+6
⑤ライン	120 125	130 124	120 124	110 126	140 124	110 125	140 124	120 126	120 124	120 125	130 125	120 125	120 125	130 124
誤差	-5	+6	-4	-6	+16	-15	+16	-6	-4	-5	+5	-5	-5	+6

＊左側の数値は測定値、右側の数値は実測値を示す。

誤差が±15mm と大きい箇所が認められるが、これについては、以下の要因が考えられる。

ａ．装置の距離分解能

距離の測定の細かさは5mm単位で測定できるようになって居り、例えば実際の距離がスタートから52.25cmのときは、52.0cmあるいは52.5cmのいずれかに測定される。また、プリント記録は0.53m（52.5cmを四捨五入）のようにcm単位に丸められる。

b．測定者の操作不注意

走行距離の測定は装置の前輪が回転することにより行われる。そして回転方向（前進、後退）に拘わらず前進したように測定され、途中僅かでも後退させると、それだけ距離誤差が加算される。

c．測定表面の問題

図-5.5.1.1 に示すように測定表面が平坦でない場合、装置は表面に沿った距離を測定するので、直線距離に比べて長く測定される。

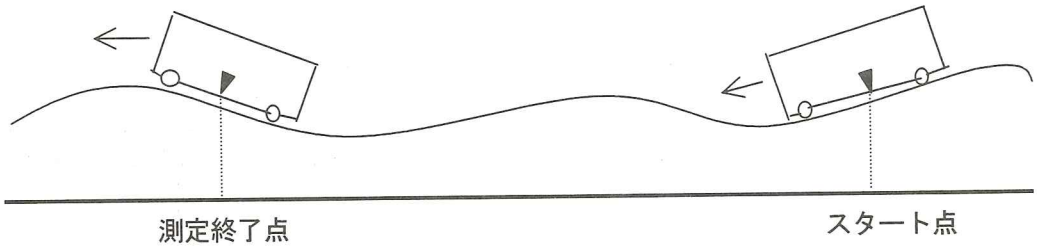


図-5.5.1.1　測定表面が平坦でない場合

（3）大型供試体の測定結果の考察

大型供試体を、新設舗装工事施工時に同一材料で作製し、これを測定することにより、新設舗装版の材料（比誘電率）の現場校正が可能である。

①ハンデイサーチでの比誘電率の推定

カブリ測定値と実測値から式（5.5.1.1）のように比誘電率が推定出来る。

$$\varepsilon_r = 8.0 \times (\text{測定値} / \text{実測値})^2 \quad \cdots\cdots (5.5.1.1)$$

ここで、8.0はハンデイサーチで測定時の比誘電率の設定値

表-5.5.1.3 に示すように、鉄筋ａ、ｂの浅いかぶりの測定値からの比誘電率の推定値は誤差が大きく、非現実的な値となるので、鉄筋ｃ、ｄ、ｆのかぶり測定値から推定した比誘電率 8.10、8.39、8.79 の平均の比誘電率 $\varepsilon_{rv}=8.43$ を大型供試体の比誘電率として用いた。

②レーダ・ミニでの比誘電率の推定

かぶり測定値と実測値から式（5.5.1.1）で比誘電率を推定すると**表-5.5.1.6** のようにハンデイサーチに比べ大きな値となる。

表-5.5.1.6　ミニ探査レーダによる比誘電率の推定

	鉄筋かぶり					部材厚さ			
	l	j	h	f	d	e	g	i	k
比誘電率	12.6	13.1	14.7	13.7	16.0	10.7	10.7	10.7	10.7

どちらが適正な値かは新設舗装版の実測値との誤差を測定しないと結論がでないが、レーダ・ミニがハンデイサーチに比べ、分解能の点で劣ることを考慮し、レーダ・ミニの比誘電率推定値は不要とした。

（４）新設舗装版の測定結果の考察

①鉄筋カブリについて

大型供試体より推定した比誘電率値 8.43 で補正した値を右側に、シンドコウセイ０（ε_r=8.0）で測定した値を左側に示した。新設の為、鉄筋カブリの実測が出来ないので、誤差の確認は不可能であった。

また、レーダ・ミニを用いて厚み測定を行い、厚み実測値との誤差を検証しようと試みたが、鉄筋ピッチが密で厚み測定ができなかった。

②鉄筋ピッチについて

鉄筋ピッチについては、**表-5.5.1.1** のＶブロックについて整理すると**表-5.5.1.7** のようになる。

表-5.5.1.7　新設舗装版の測定鉄筋ピッチ

	e-ニ-ハ	e-ハ-ロ	e-ロ-イ	e-イ-e	e-d	d-b	b-a	a-a-イ	a-イ-ロ
	①-ニ-ハ	①-ハ-ロ	①-ロ-イ	①-イ-①	①-②	②-④	④-⑤	⑤-⑤-イ	⑤-イ-ロ
②ライン	16	14	15	15	15	16	14	14	15
cライン	14	15	14	17	14	15	14	15	16

鉄筋ピッチについても実測が不可能なので、測定ピッチとの誤差の検証はできなかった。

5.5.2　レーダ E(地下レーダー)

現地では新設コンクリート舗装版、大型供試体の測定を行ったが、その際にはできる限り時間分解能が高くなるように次の要領とした。

○比較的分解能の高い中心周波数 1000MHz を使用した。

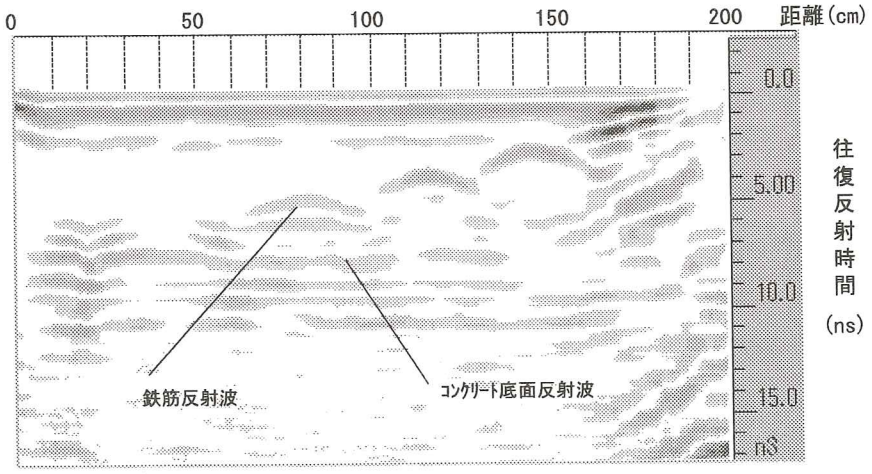
○ワイドアングル測定は 900MHz を 2 台使用した。大型供試体では鉄筋の影響を避けるためにｋ測線の中央を測定点とした。

○測定器のサンプリングレートは最大である 2048 点／波形、データ長は 16 ビットにした。

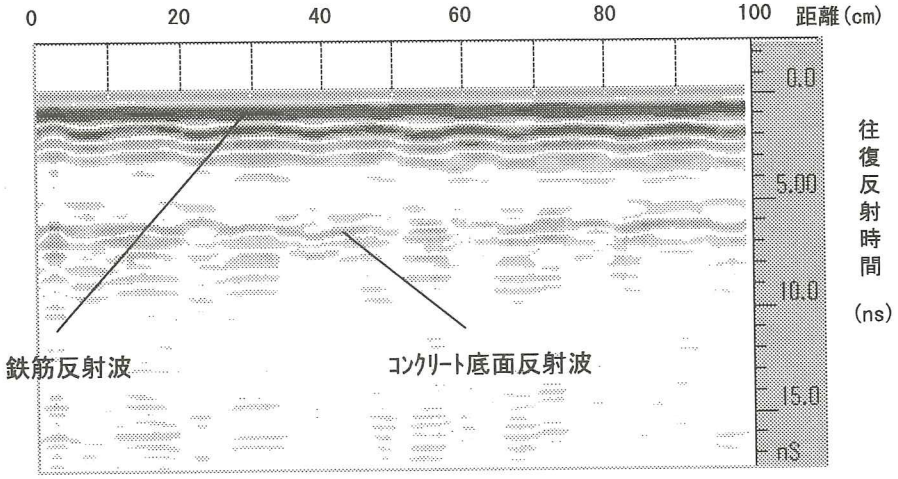
○時間レンジは供試体 20ns にした。

（1）測定記録

記録例として、大型供試体の①測線の記録を図－5. 3. 2. 1 に、新設舗装版Ⅴの記録を図－5. 3. 2. 2 に示す。測定当日の天候は雨で、その時の材齢は大型供試体が 26 日、新設舗装版の Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ、Ⅵが各々25 日、26 日、27 日、29 日、30 日であった。



図－5. 3. 2. 1　大型供試体①測線の測定記録(1000MHz アンテナ使用)



図－5. 3. 2. 2　新設舗装板Ⅴの測定記録(1000MHz アンテナ使用)

（2）電磁波速度測定結果

ワイドアングル法の T/R 間隔～往復反射時間関係、双曲線法の双曲線頂点からの距離～往復反射時間関係、深度法の鉄筋かぶり～往復反射時間関係を**表－5.3.2.1** に示す。

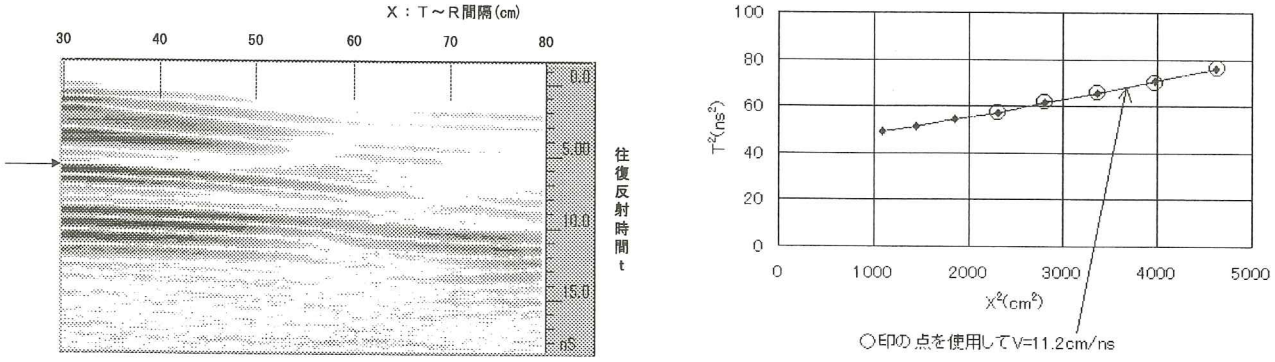
表－5.3.2.1　電磁波速度測定記録一覧

大型供試体ﾜｲﾄﾞｱﾝｸﾞﾙ法			新設IVﾜｲﾄﾞｱﾝｸﾞﾙ法			大型供試体双曲線法			大型供試体深度法		
測定位置	T/R 間隔(cm)	往復反射時間(ns)	測定位置	T/R 間隔(cm)	往復反射時間(ns)	測定位置	双曲線頂点からの距離(cm)	往復反射時間(ns)	測定位置	鉄筋かぶり(mm)	往復反射時間(ns)
kの中央部	33	7.47	中央部	33	9.32	①とbの交点	-12	5.29	②l	10.3	0.40
	38	7.63		53	9.85		-10	5.18	②j	37.3	0.93
	43	7.84		73	10.50		-8	5.10	②h	61.6	1.48
	48	8.02		93	11.82		-6	5.06	②f	86.9	1.98
	53	8.32		113	13.50		-4	4.98	②d	137.4	2.80
	58	8.57		——	——		-2	4.88	②c	188.5	3.92
	63	8.88		——	——		2	4.88	②b	236.7	4.88
	68	9.18		——	——		4	4.98	②a	294.0	6.08
	——	——		——	——		6	5.04	——	——	——
	——	——		——	——		8	5.08	——	——	——
	——	——		——	——		10	5.19	——	——	——
	——	——		——	——		12	5.31	——	——	——

次に、大型供試体のワイドアングル法、双曲線法、深度法、新設舗装版Vのワイドアングル法による電磁波速度の算出結果を述べる。

1）大型供試体ワイドアングル法

測定記録を**図－5.3.2.3** の左に、→で示した反射波の X^2～T^2 関係を同図の右に示す。雨天の影響のためか X^2～T^2 関係の直線性が多少悪く、○印のついた点から電磁波速度を求めることにしたが、回帰直線の勾配から **11.2cm/ns** になった。



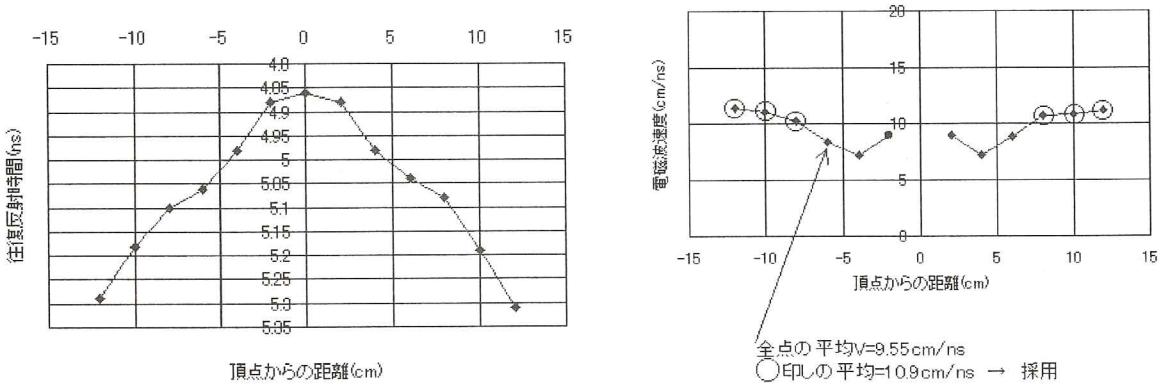
図－5.3.2.3　　大型供試体のワイドアングル解析結果

2）大型供試体双曲線法

図－5.3.2.1 の距離 **80cm**、往復反射時間 **5ns** 付近に表れている鉄筋反射波に関して、双曲線頂点から

の距離と各距離で読み取った往復反射時間の関係を**図－5.3.2.4** の左に、それから求めた電磁波速度を同図の右に示す。

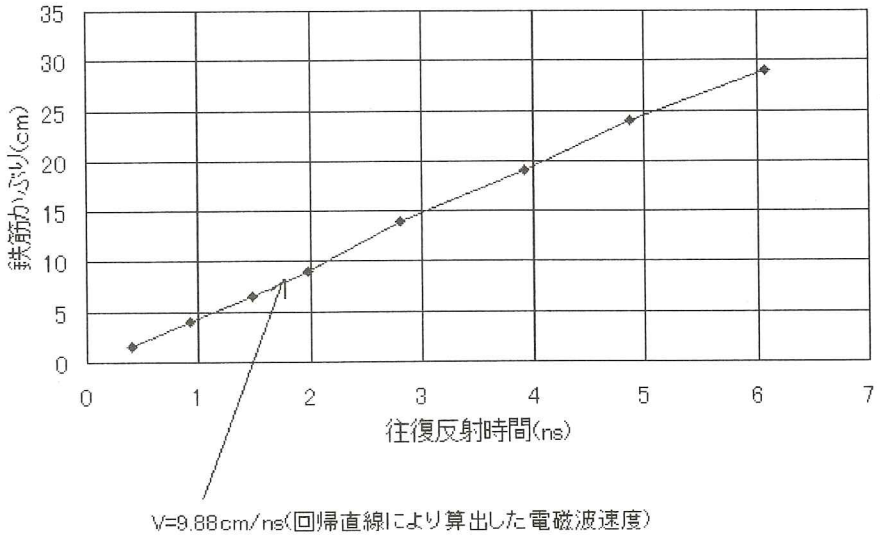
図示のように、やはり雨天の影響によるのためか２種類の双曲線が現れているようであり、頂点付近では双曲線の傾きが急で低い電磁波速度であったことから、それらを除く○印の平均値 **10.9cm/ns** を使用することにした。



図－5.3.2.4　大型供試体の双曲線法解析結果

３）大型供試体深度法

深度法の解析結果を**図－5.3.2.5** に示す。回帰直線の勾配から求めた結果、電磁波速度は **9.88cm/ns** になった。

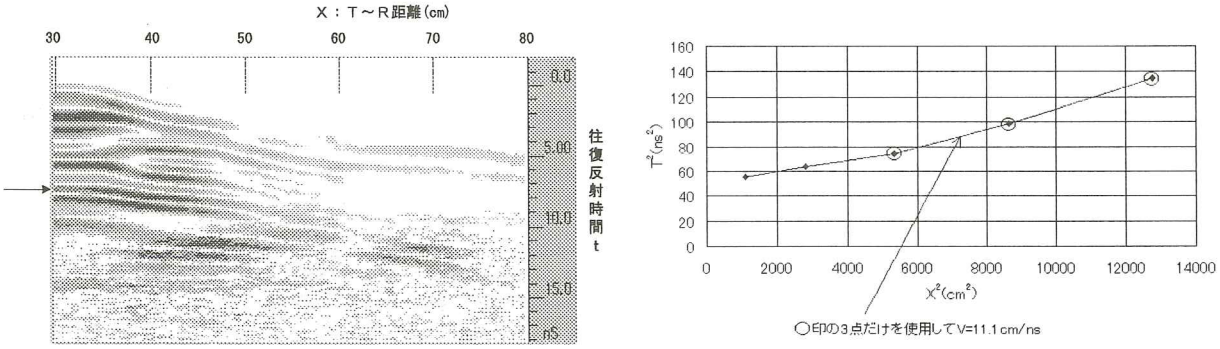


図－5.3.2.5　大型供試体の深度法解析結果

４）新設舗装版ワイドアングル測定

新設舗装版Ｖで行ったワイドアングル測定記録を**図－5.3.2.6** の左に、→の反射波に関する $X^2 \sim T^2$ 関係を同図の右に示す。大型供試体と同様に、雨天の影響により $X^2 \sim T^2$ 関係の直線性が悪かったため、○

印の点から電磁波速度を求めることにしたが、回帰直線の勾配から **11.1cm/ns** になった。



図－5.3.2.6　新設舗装版Ⅴのワイドアングル解析結果

（3）版厚算出結果

版厚の算出結果一覧を**表－5.3.2.2** に示す。ここで、ワイドアングル法、双曲線法の往復反射時間には後述の**表－5.3.2.4** の補正結果(t')を使用した。一方、深度法では新設舗装版を含めて、往復反射時間の測定値(t)と大型供試体の速度値 **9.88cm/ns** を使用した。ただし、大型供試体のt'の上段はワイドアングル法に適用し、下段は双曲線法に適用した値である。

表－5.3.2.2　版厚算出結果一覧

測定箇所	ｺｱﾘﾝｸﾞ結果		地下ﾚｰﾀﾞｰ結果											
			往復反射時間(ns)		ﾜｲﾄﾞｱﾝｸﾞﾙ法			双曲線法			深度法			
	地点	版厚実測値(mm)①	t'	t	電磁波速度(cm/ns)	版厚(mm)②	②／①	電磁波速度(cm/ns)	版厚(mm)③	③／①	電磁波速度(cm/ns)	版厚(mm)④	④／①
新設Ⅰ	③c	324.9	6.05	6.10	11.1	336	1.034	——	——	——	9.88	301	0.926
新設Ⅱ	③c	315.4	5.87	5.92		326	1.034					292	0.926
新設Ⅲ	③c	325.1	5.96	6.01		331	1.018					297	0.914
新設Ⅴ	③c	313.0	6.06	6.11		336	1.073					302	0.965
新設Ⅵ	③c	308.0	6.10	6.15		339	1.101					304	0.987
平均		317.3	6.01	6.06	——	334	1.052	——	——	——	——	299	0.944
大型供試体	①e	302.5	6.03 6.02	6.07	11.2	338	1.117	10.9	328	1.084	9.88	300	0.992
	①g	302.1	5.98 5.97	6.02		335	1.109		325	1.076		297	0.983
	①j	299.9	6.01 6.00	6.05		337	1.124		327	1.090		299	0.996
	①k	300.3	5.88 5.88	5.93		329	1.096		320	1.066		293	0.976
平均		301.2	5.98 5.97	6.02	——	335	1.112	——	325	1.079	——	297	0.987

（4）鉄筋配置算出結果

大型供試体の鉄筋配置算出結果を**表－5.3.2.3** に示す。ここで、かぶりの算出では電磁波速度に大型供試体の双曲線法の値 **9.88cm/ns** を使用し、往復反射時間には式**(5.3.2.1)** の補正を施した。

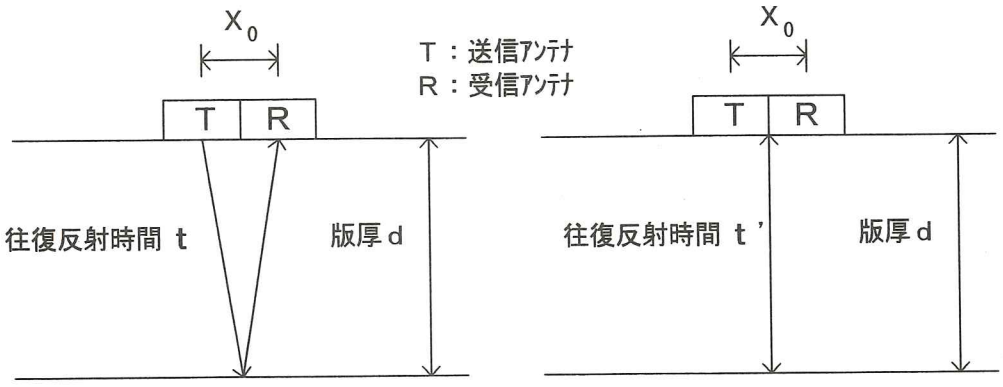
表－5.3.2.3　大型供試体の鉄筋配置算出結果一覧

地下レーダー測定結果			間隔の実測値 (cm) ③	①／③	かぶりの実測値 (mm) ④	②／④
距離 (cm)	間隔(cm) ①	かぶり (mm)②				
39		332.4			294.0	1.131
82	43	262.8	40.2	1.07	236.7	1.110
116	36	199.6	34.8	1.03	188.5	1.059
146	30	139.8	30.1	1.00	137.4	1.018
168	22	85.4	19.9	1.11	86.9	0.983
178	10	61.5	10.0	1.00	61.6	0.998
不可	不可	不可			37.3	
不可	不可	不可			10.3	

（5）測定結果のまとめ

1）往復反射時間の補正

測定記録から読み取った往復反射時間 t は**図－5.3.2.7** の左図に示すように、送信アンテナから受信アンテナに至る斜距離の往復反射時間である。一方、ワイドアングル法及び双曲線法で算出した電磁波速度は送受信間隔 X_0 を考慮した真の電磁波速度である。これから t をそのまま使用したのでは実際の版厚よりも大きくなる。従って、ワイドアングル法及び双曲線法の電磁波速度から、より正確な版厚を求めるには右図のようなX_0=0cm、すなわちゼロオフセットの経路になった時の往復反射時間 t'を求める必要がある。



図－5.3.2.7　ワイドアングル法、双曲線法における往復反射時間の補正

t から t'を求めるための補正量Δ t は**式(5.3.2.1)** で与えられる。ただし、Vは電磁波速度、d は版厚、X_0 は送受信間隔である。

$$\Delta t = 2d\left[\{1+(X_0/d)^2/4\}^{0.5}-1\right]/V \fallingdotseq X_0^2/(4Vd) \qquad (5.3.2.1)$$

dは求める版厚であるが、Vに無補正のtを掛けたものが近似値であるとし、X_0を1000MHzアンテナの値である8.25cmとおくと、補正後の往復反射時間は**表－5.3.2.4**のようになる。

表－5.3.2.4　往復反射時間の補正結果

測定個所	測定地点	t (ns)	ﾜｲﾄﾞｱﾝｸﾞﾙ法		双曲線法	
			電磁波速度 (cm/ns)	t ‘ (ns)	電磁波速度 (cm/ns)	t ‘ (ns)
新設Ⅰ	③c	6.10	不可	6.05	———	———
新設Ⅱ	③c	5.92	不可	5.87		
新設Ⅲ	③c	6.01	不可	5.96		
新設Ⅴ	③c	6.11	11.05	6.06		
新設Ⅵ	③c	6.15	不可	6.10		
大型供試体	①e	6.07	11.24	6.03	10.88	6.02
	①g	6.02		5.98		5.97
	①j	6.05		6.01		6.00
	①k	5.93		5.88		5.88

2）ワイドアングル法

版厚の誤差は、大型供試体では平均で11.2%、新設舗装板では平均で5.2%になった。大型供試体で大きな誤差になったのは電磁波速度が大きくなり過ぎたことが原因である。大型供試体では測定時の材齢が26日であったが、**3.5.2項**で述べたように、材齢が4週間程度以前ではやはり電磁波速度が大きくなり過ぎ、10%以上の誤差であった。しかし、材齢が13週になると誤差が5%前後になったことから、さらに材齢を重ねることにより改善される可能性がある。

3）双曲線法

大型供試体の版厚の誤差は平均で7.9%とやや大きな値になった。この原因も電磁波速度が大きくなり過ぎたことが原因であるが、**図－5.3.2.4**のように、雨天の影響のためか双曲線が変形しており、求めた速度値のバラツキが大きく、高めの平均速度を使用したことを反映している。従って、精度を高めるには変形の少ない双曲線を測定することが重要であり、しかも**3.5.2項**に述べたように、局所的な影響により異常速度になることがあることから、複数の双曲線から電磁波速度を求めることが必要である。

4）深度法

版厚の誤差は、大型供試体では平均で1.3%であったが、新設舗装版では平均で5.6%とやや大きくなった。この原因は次のようであると考えられる。

すなわち、本来は同じ材質、同じ含水率であるという前提の基に新設舗装版にも大型供試体の電磁波速度を使用したが、実際には**5.3.3項**の**図－5.3.3.1**に示されるように、大型供試体の含水率が5%前後、新設舗装版では4%前後と、1%程度異なっていた。**3.5.2.項**で述べたように、電磁波速度は含水率によ

って変化し、大きければ低速になり、小さければ高速になる。従って、新設舗装版では大型供試体よりも電磁波速度が大きく、この違いが誤差に反映されていると考えられる。

5）鉄筋のかぶり

かぶりが 20cm 未満の鉄筋では誤差が小さく、それ以上では 10%を超える誤差になった。これから、電磁波速度は深度方向に変化しているものと推定される。すなわち、双曲線法ではかぶり 23.67cm の鉄筋反射波を解析したが、その深度までの平均速度は 9.88cm/ns で概ね妥当であるが、それ以深では含水率が高く、深度 30cm 付近までの平均では 9.88cm/ns よりも小さくなっている可能性がある。

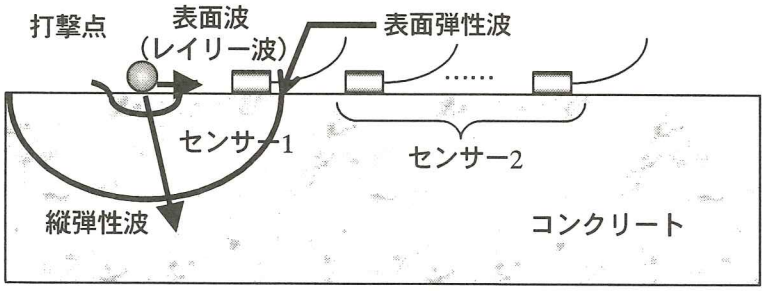
５．６　衝撃弾性波法の測定結果

5.6.1 弾性波 G（Knocker）

5.6.1 1 弾性波速度の測定

（1）測定方法

3.6.1.4 に示した実験成果に基づき、コンクリートの厚さ測定に必要な弾性波の速度を、縦弾性波の表面を伝搬する成分（表面弾性波）から測定した。今回の測定対象は鉄筋コンクリートであるので、この測定方法では、1)鉄筋かぶりが浅い、2)測定点と鉄筋までの平面距離が近い、3)打撃点とセンサー間の距離が離れている、これらの条件が重なると鉄筋の影響を受け、正確なコンクリートでの弾性波速度を測定できない可能性がある。そこで、電磁波法により鉄筋の位置を確認し、条件 2)に抵触しないよう測定点を鉄筋から充分離れた位置とし、次の通り弾性波速度を測定した。



図－5.6.1.1 弾性波速度測定状況

測定状況を図－5.6.1.1 に示す。コンクリート表面にセンサー1、２を設置する。内部で多重反射する弾性波の振動数を観測する場合では、表面に対して垂直方向に設置し、センサーの感度軸を底面方向に向けるが、今回の実験では、弾性波速度測定に必要なコンクリート表面を伝搬する表面弾性波を測定波形の増幅をせずに観測するため、センサーの感度軸を打撃点方向に向けて設置した。

センサー1 を打撃点から 100mm の位置に設置し、センサー2 をセンサー1 から、100～600mm の範囲で 100mm 間隔ずつ移動させ、各２点センサー間隔について直径 10mm の鋼球で打撃して表面弾性波を観測した。サンプリングクロックは 1μ秒である。各センサー間隔（表面弾性波伝搬距離）での表面弾性波の到達時間差を測定し、測定結果からセンサー間隔と到達時間差の関係を最小二乗法により調べ、この関係から弾性波速度を測定した。

測定位置は、大型供試体のコンクリート②線上、大型供試体アスファルト、新設舗装版Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅴ，Ⅵのｃ線上である。

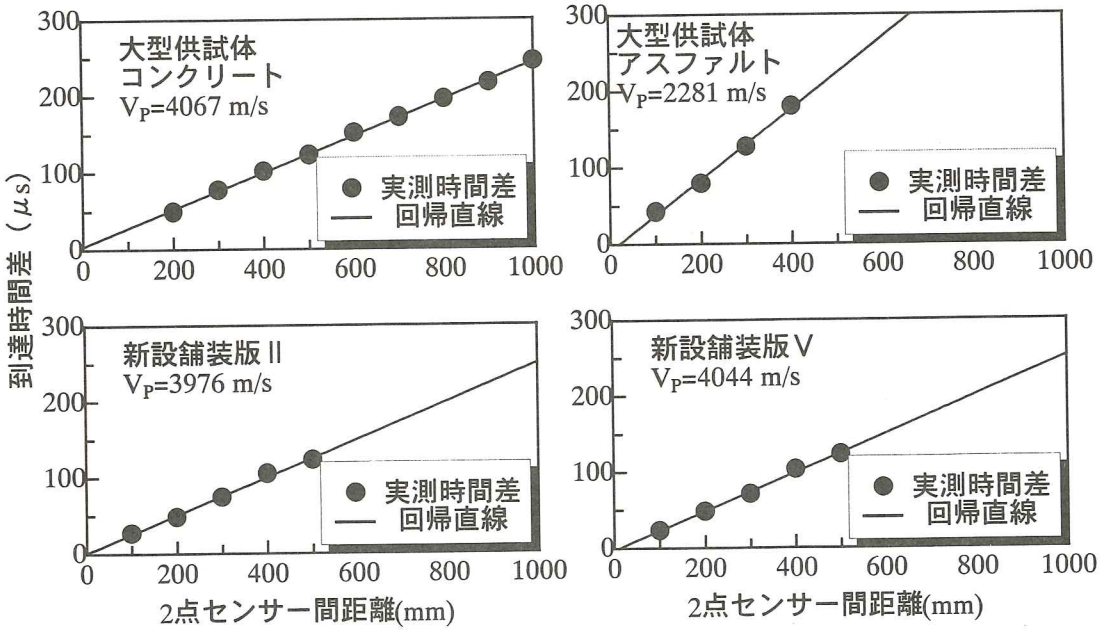
（2）弾性波速度の測定結果

各センサー間距離で測定した表面弾性波到達時間差の一覧を表－5.6.1.1 に、一部の測定点について、到達時間差とセンサー間距離の関係を示した図を図－5.6.1.2 に示す。

表－5.6.1.1 各センサー間距離での表面弾性波到達時間差

センサー間距離 (mm)	表面弾性波到達時間差（μs）						
	大型供試体		新設舗装版				
	※コンクリート	※アスファルト	Ⅰ	※Ⅱ	Ⅲ	※Ⅴ	Ⅵ
100	－	42.3	25.0	27.0	26.0	23.3	26.3
200	49.0	79.3	49.0	48.3	48.3	48.3	52.7
300	77.7	127.5	76.0	74.3	72.7	71.0	81.3
400	102.0	180.3	98.3	105.0	96.3	103.0	97.3
500	123.0	－	130.0	123.3	123.7	123.0	124.0
600	151.7	－	－	－	－	－	－
700	172.3	－	－	－	－	－	－
800	196.0	－	－	－	－	－	－
900	217.0	－	－	－	－	－	－
1000	245.0	－	－	－	－	－	－

※はセンサー間距離と到達時間差の関係を図－5.6.1.2に示す。



図－5.6.1.2 弾性波速度測定結果

表面弾性波の到達時間差はセンサー間隔に比例して長くなり、両者は高い相関関係で直線関係を示した。これから、鉄筋の影響を受けていないことが確認できる。また、大型供試体のコンクリートではセンサー間隔 1000mm まで測定し、超音波法で見られる品質変化による速度分布の変化によって、到達時間差の直線関係が乱れるか確認したが、直線関係に変化は見られなかった。

最小二乗法により回帰直線を求め、その傾きから弾性波速度 V_P を求めた結果、大型供試体のコンクリートでは 4067.m/s、大型供試体のアスファルトでは 2281m/s、新設舗装版Ⅱでは 3976m/s、同Ⅴでは 4044m/s となった。（その他の測定点での弾性波速度測定結果については、表－5.6.1.2 に示す。）

5.6.1.2 反射波の振動数及び厚さ測定結果

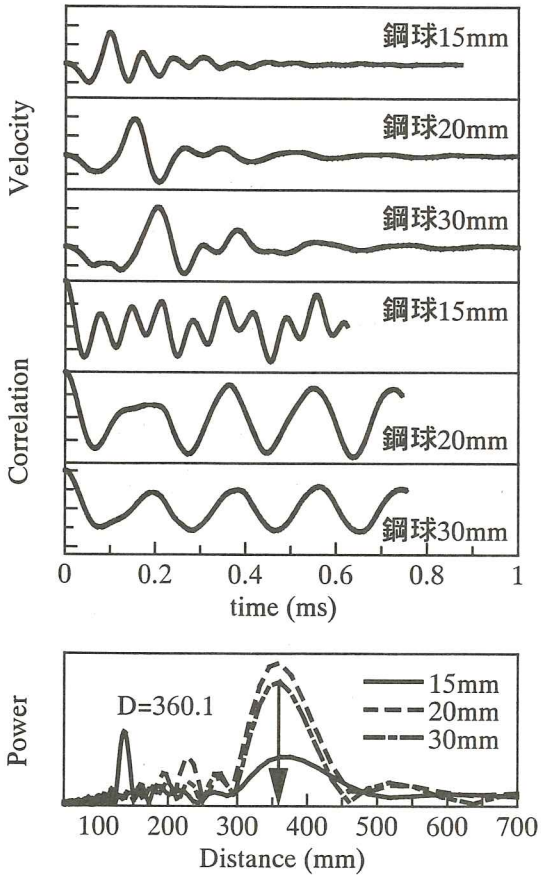
今回の測定では厚さが分からない場合を想定し、直径の異なる複数の鋼球（直径 15、20、30mm）を用いて測定し、各鋼球での自己相関関数を比較して内部を多重反射する縦弾性波（反射波）の振動数 f_0 を決定した。この f_0 と前項で求めた弾性波速度 V_P から、コンクリートの厚さ D を

$$D = \frac{V_P}{2f_0} \qquad \text{（式 5.6.1.1）}$$

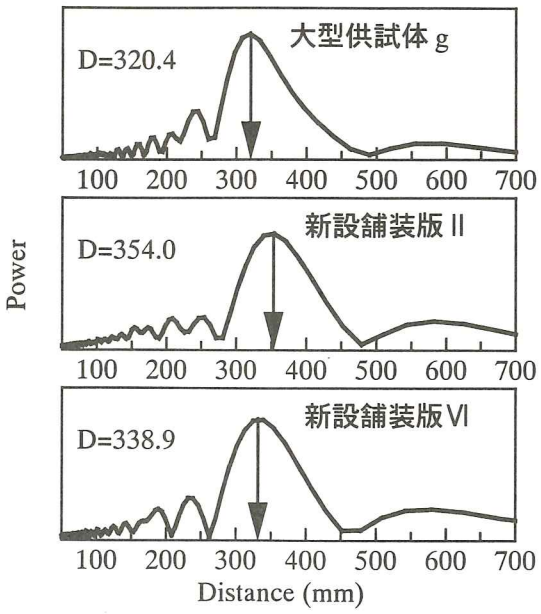
により測定した。

測定位置は、大型供試体コンクリート e，g，j，k の①上と新設舗装版Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅴ，Ⅵの c③線上のコア抜き位置である。

新設舗装版Ⅴについて、鋼球 15，20，30mm での測定波形、自己相関関数、FFT 解析結果を図－5.6.1.3 に示す。測定波形は、打撃する鋼球の直径により振動数が変化する表面波の振幅が最も大きいので、鋼球直径によって異なったものとなる。自己相関関数は、表面波の振動数とコンクリート内部を多重反射する縦弾性波（反射波）の振動数が一致すると正弦波のような波形となるが、図に示した自己相関関数を鋼球直径毎に比較すると、直径 30mm の時に最も正弦波に近いと判断できる。前項で求めた弾性波速度 V_P を用いて、FFT 解析により厚さを求めると、鋼球直径 30mm では 360.1mm となった。



図－5.6.1.3 各打撃鋼球直径での測定結果
（測定点：新設舗装版Ⅴ）



図－5.6.1.4 各測定点での測定結果

また、反射波の振動数成分はコンクリートの厚さによって決まるので、打撃鋼球直径に関係なく全鋼球での波動に存在するが、FFT 解析結果では 360mm 付近に全鋼球で共通してピークとなっている。

以上の①自己相関関数が正弦波に近い鋼球直径 30mm での測定結果。②全鋼球直径で共通してピークとなる。①、②から厚さは 360.1mm と決定できる。

同様にして測定した大型供試体 g、新設舗装版測定点Ⅱ、Ⅵでの FFT 解析結果を**図－5.6.1.4** に、全測定結果を**表－5.6.1.2** に示めす。

表－5.6.1.2 測定結果一覧

測定物		実寸(mm)			弾性波速度 (m/s)	③測定厚 (mm)	③ /(①+②)
		①コンクリート	②アスファルト中間層	①+②			
大型供試体	e	302.5	43.6	346.1	4067	347.1	1.003
	g	302.1	42.3	344.4		320.4	0.930
	j	299.9	38.0	337.9		347.1	1.027
	k	300.3	36.1	336.4		333.2	0.990
	アスファルト	—	44.3	—	2281	未測定	未測定
新設舗装版	Ⅰ	324.9	41.2	366.1	3945	367.2	1.003
	Ⅱ	315.4	40.2	355.6	3976	354.0	0.996
	Ⅲ	325.1	41.5	366.6	4091	364.3	0.994
	Ⅴ	313.0	46.1	359.1	4044	360.1	1.003
	Ⅵ	308.0	42.1	350.1	3971	338.9	0.968

5.6.1.3 舗装版での厚さ測定結果考察

今回の測定結果をまとめると、弾性波速度の測定については、測定点を鉄筋から充分離れた位置としたので、鉄筋の影響を考慮する必要が無く、2 点センサー間の距離を変化させて距離差と表面弾性波の到達時間差の関係を調べた。その結果、両者は高い相関関係で比例関係を示し、回帰直線の傾きから大型供試体でのアスファルトを含め、弾性波速度を求めることができた。

反射波の振動数については、厚さが分からない場合を想定し、直径の異なる 3 種類の鋼球で打撃して測定した。その結果、各鋼球で比較して自己相関関数が最も正弦波に近くなる鋼球で打撃した時の振動数スペクトルと、複数の鋼球で共通してスペクトルがピークとなる振動数から反射波の振動数を決定することができた。

この両者から厚さを測定したが、**表－5.6.1.2** に示す通り、実際のコンクリートのみの厚さと比較すると、大型供試体では 320～347mm、新設舗装版では 339～367mm と厚めに測定される結果となった。これはコンクリート裏側にあるアスファルトの影響と考えられるが、解析結果ではコンクリート底面での反射波、アスファルトまで伝搬した弾性波の底面での反射波のように、反射波の反射位置を分離することはできなかった。

また、厚めに測定された原因として、縦弾性波がコンクリート内部を透過して反射面がアスファルト底面

となった、あるいは、アスファルトの密着によりコンクリートの共振点が変化した、などが考えられる。アスファルトの底面で縦弾性波が反射したとすれば、アスファルト内での弾性波速度（大型供試体で 2281m/s）はコンクリート内での速度より遅いことから、コンクリートの弾性波速度を用いて計算した測定厚さはコンクリートとアスファルトの実寸の和より大きくなる。しかし、測定厚さとコンクリートとアスファルトの実寸の和の比率は 0.930 など 1.000 未満が 8 測定点中 5 点で、1.000 以上でも 1.003 程度となり、アスファルトとコンクリートの弾性波速度には余り差が見られない結果となった。

弾性率が近似した複合構造体である今回の実験では、弾性波の伝搬方法について把握することはできず、今後検討する必要があるものと思われる。

5.6.2 弾性波 H　（インパクトエコー）

5.6.2.1 新設コンクリート舗装道路の測定

実構造物の測定実験として、黒磯（地名）付近の新設コンクリート舗装版の測定をおこなった。2.3.2.3 および 2.3.2.4 でのべたように、道路の表面弾性波のＰ波速度を測定するために 300mm の間隔で固定した 2 本の受信センサをコンクリート舗装道路の表面に設置し、受信センサの横のコンクリート面を鋼球で打撃し、それぞれの受信センサへの到達時間をもとめ、次に測定点に 1 本の受信センサを設置し、鋼球で打撃し厚さ周波数をもとめた。

表面弾性波のＰ波到達時間差の測定では、各点ともノイズが多く、複数回測定をおこない平均してＰ波の適用速度をもとめた。表-5.6.2.1 に測定結果を記す。

表-5.6.2.1　黒磯新設コンクリート舗装道路の厚さ測定結果

測定点	t_1 (μs)	t_2 (μs)	P波速度Cp (m/s)	適用速度 0.96Cp	適用速度 平均(m/s)	コア実測速度 Co+As (m/s)	厚さ周波数f (kHz)	測定厚さ (mm)	コア実測値 Co+AS (mm)	測／実	誤差 (%)
Ⅰ②	105.0	170.5	4580	4397	4364	4157	5.37	406.3	365.4	1.112	11.2
	94.0	160.5	4511	4331							
Ⅱ②	107.0	172.5	4580	4397	4364	4299	5.37	406.3	355.5	1.143	14.3
	107.0	173.5	4511	4331							
Ⅲ②	107.0	173.5	4511	4331	4331	4245	5.37	403.3	366.7	1.100	10.0
	107.0	173.5	4511	4331							
Ⅴ②	104.0	172.5	4380	4204	4204	4306	5.37	391.4	359.2	1.090	9.0
	106.0	174.5	4380	4204							
Ⅵ②	92.0	159.5	4444	4267	4267	4325	5.37	397.3	349.9	1.135	13.5

ここで Co はコンクリート、As はアスファルトをさす。本測定では、Co と As の分離ができなかった。

5.6.2.2 大型供試体の測定

5.6.2.1 と同様に、表面弾性波のＰ波速度と厚さ周波数を測定した。本測定もノイズが多く、複数回測定をおこない平均してＰ波の適用速度および厚さをもとめた。表-5.6.2.2 に測定結果を記す。

表-5.6.2.2　黒磯大型供試体の厚さ測定結果

測定点	t_1 (μs)	t_2 (μs)	P波速度Cp (m/s)	適用速度 0.96Cp	適用速度 平均(m/s)	コア実測速度 Co+As (m/s)	厚さ周波数f (kHz)	測定厚さ (mm)	測定厚さ 平均(mm)	コア実測値 Co+AS (mm)	測／実	誤差 (%)
①-e	107.0	175.5	4380	4204	4204	4071	6.84	307.3	333.0	346.0	0.962	-3.8
	106.0	174.5	4380	4204			5.86	358.7				
①-g	107.0	175.5	4380	4204	4236	4025	6.35	333.5	347.5	344.5	1.009	0.9
	101.0	168.5	4444	4267			5.86	361.4				
①-j	106.0	173.5	4444	4267	4267	4097	6.35	336.0	336.0	337.6	0.995	-0.5
	106.0	173.5	4444	4267			6.35	336.0				
①-k	102.0	171.5	4317	4144	4247	—	6.35	334.4	334.4	336.4	0.994	-0.6
	102.0	169.5	4444	4267								
	105.0	171.5	4511	4331								

本測定でも、Co と As の分離ができなかった。

5.6.2.3 実構造物ー黒磯実験のまとめ

(1) 新設コンクリート舗装道路の測定結果について

次の表-5.6.2.3で、表面弾性波のP波の速度測定結果とコアによる実測速度を比較した。

表-5.6.2.3 新設コンクリート道路のP波速度測定結果とコア実測速度の比較

測定点	P波速度Cp (m/s)	適用速度 0.96Cp	適用速度 平均(m/s)	コア実測速度 Co+As(m/s)	測/実	Co実測速度 (m/s)	As実測速度 (m/s)
Ⅰ②	4580	4397	4364	4157	1.050	4332	3887
	4511	4331					
Ⅱ②	4580	4397	4364	4299	1.015	4493	3684
	4511	4331					
Ⅲ②	4511	4331	4331	4245	1.020	4300	3774
	4511	4331					
Ⅴ②	4380	4204	4204	4306	0.976	4446	3873
	4380	4204					
Ⅵ②	4444	4267	4267	4325	0.987	4483	3825

As の速度が非常に速くかつノイズの多い測定であったので、厚さ周波数の測定では、FFT 波形からは Co と As を明確に分離できなかった。また、速いといっても As の速度は若干 Co の速度を下回っており、コンクリート舗装の表面表面弾性波速度を全体のP波速度とみなして厚さをもとめたので、表-5.6.2.1 ように、Co と As 一体の実測厚さに対して、9.0～14.3%と測定誤差が大きなものとなった。

(2) 大型供試体の測定結果について

次の図-5.6.2.3は、本法による As 部分の厚さ周波数測定の生波形および FFT 波形である。

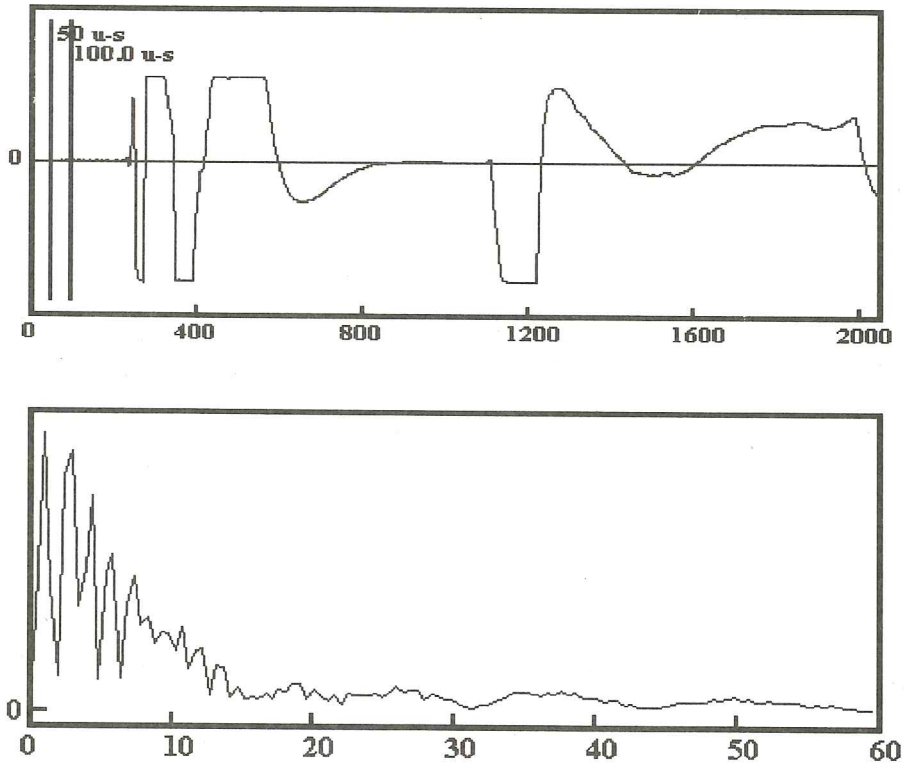


図-5.6.2.3 As 部分の厚さ周波数測定の測定生波形と FFT 波形

本法で計測される生波形は、衝撃の過渡応答であるので、通常下記の図-5.6.2.4 のようでなければならないが、図-5.6.2.3 の生波形のように、今回の測定では有意の信号が測定できなかった。したがって、有効と思われる厚さ周波数が特定できなかったので、測定において Co と As を分離することを断念した。これは、As 部分の表面状態が悪く受信センサが充分密着できなかったためと思われる。したがって大型供試体の Co 部分での表面弾性波速度のみをもちい、Co と As と一体で厚さをもとめたので、誤差は−3.8～0.9%と比較的小さいが、この測定結果に対しては注意が必要と思われる。

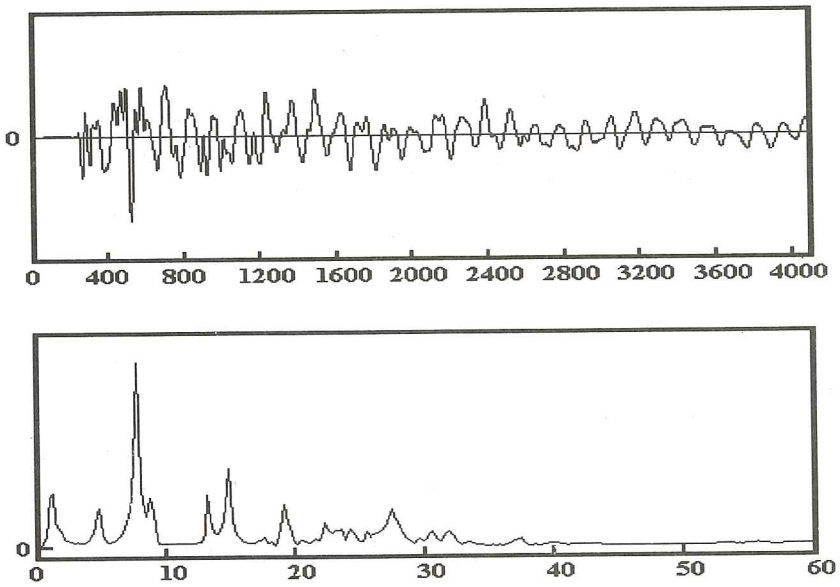


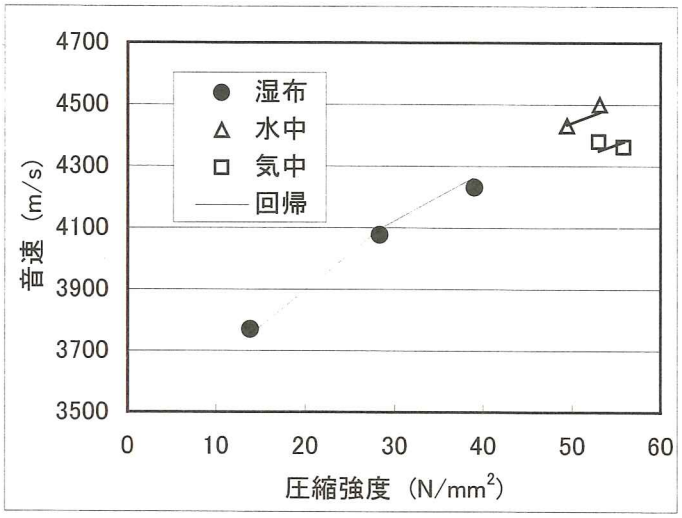
図-5.6.2.4 通常の測定波形

5．7　超音波法による強度推定

5．7．1圧縮強度，含水率と音速の関係

表－5.3.2.1 の結果により，圧縮強度，含水率と音速の関係を回帰すると次式が得られた。図－5.7.1.1 に実測値および回帰曲線を示す。

$$V = 1766.1 fc^{\frac{1}{6}} + 44.9w + 1012.5 \qquad (5.7.1.1)$$



図－5.7.1.1 圧縮強度、含水率と音速の関係

5．7．2　強度推定

3．7節と同様に，表－5.4.4.1 の内部音速から大型供試体，新設舗装版，既設舗装版の圧縮強度を推定した結果が表-5.7.2.1 である。新設舗装版のコア強度は，圧裂強度用のコア音速から推定したものである。また，表-5.4.4.2 の内部音速を用い曲げ強度試験用供試体から圧縮強度を推定した結果が表-5.7.2.2 である。大型供試体，新設舗装版，既設舗装版の強度は±21％以内で推定できている。曲げ強度試験用による推定結果は，材齢 1，3 日はやや小さく推定されているものの，7 日以降は，±15％以内で推定されているものが多い。

表-5.7.2.1 大型供試体，新設舗装版，既設舗装版の強度推定結果

供試体		コア強度	内部音速	強度推定	強度比	透過音速	強度推定	強度比
大型		44.6	4376	47.7	1.070	4315	42.8	0.959
新設	Ⅰ	44.1	4421	51.7	1.172	4332	44.1	1.000
	Ⅱ	45.5	4436	53.1	1.165	4350	45.5	1.000
	Ⅲ	41.6	4407	50.4	1.212	4300	41.6	1.000
	Ⅴ	54.0	4439	53.3	0.988	4446	54.0	1.000
	Ⅵ	57.6	4320	43.1	0.749	4483	57.6	1.000
	Ⅵ(45度)	57.6	4385	48.5	0.842	4483	57.6	1.000
既設（健全）		51.3	4356	46.0	0.897	4381	48.1	0.938
		51.3	4282	40.3	0.785	4393	49.2	0.959

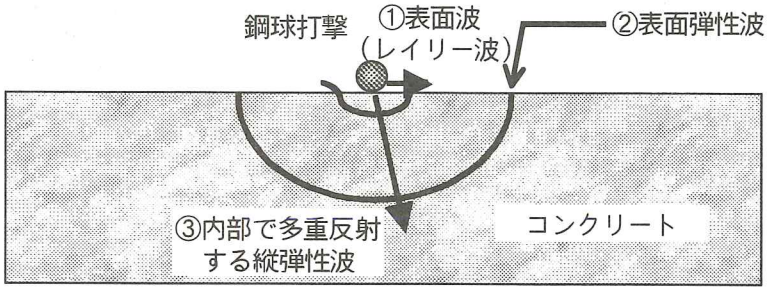
表-5.7.2.2 曲げ供試体の強度推定結果

養生	材齢	強度	内部音速による推定				透過音速による推定			
			位置	内部音速	強度推定	強度比	位置	透過音速	強度推定	強度比
湿布	1	13.9	打設面	＊ 3489	7.6	0.547	長手方向	3737	13.5	0.970
	3	28.3		3964	21.8	0.770		4169	32.6	1.152
	7	39.0		4259	38.6	0.989		4370	47.2	1.210
水中	28	49.4		4307	42.1	0.853		4497	59.0	1.194
	56	53.1		4214	35.5	0.668		4505	59.8	1.126
気中	28	53.0		4331	44.0	0.830		4442	53.6	1.012
	56	55.8		4378	47.9	0.858		4450	54.4	0.974
湿布	1	13.9	底面	＊ 3713	12.8	0.919	側面	3794	15.3	1.098
	3	28.3		＊ 4105	28.8	1.019		4178	33.2	1.172
	7	39.0		＊ 4290	40.8	1.047		4372	47.4	1.215
水中	28	49.4		4310	42.4	0.858		4384	48.4	0.980
	56	53.1		4266	39.1	0.736		4392	49.1	0.925
気中	28	53.0		＊ 4512	60.5	1.142		4417	51.3	0.968
	56	55.8		4491	58.4	1.046		4398	49.6	0.889
湿布	1	13.9	側面	＊ 3630	10.6	0.762	打―底面	3659	11.3	0.815
	3	28.3		4012	24.0	0.848		4083	27.6	0.976
	7	39.0		4258	38.5	0.987		4256	38.4	0.984
水中	28	49.4		4277	39.9	0.807		4468	56.1	1.136
	56	53.1		4249	37.9	0.713		4468	56.1	1.056
気中	28	53.0		4458	55.1	1.040		4364	46.7	0.881
	56	55.8		4452	54.6	0.978		4380	48.1	0.861

＊ 測定に問題あり

５．８　衝撃弾性波法によるコンクリート品質推定実験

5.8.1 測定理論および実験目的



図－5.8.1 鋼球打撃で発生する波動の模式図

鋼球打撃で発生する波動の模式図を図－5.8.1 に示す。表面を平面的に伝搬する①表面波（レイリー波）と、内部を球面状に伝搬する縦弾性波が発生し、縦弾性波には表面を伝搬する②表面弾性波と、③内部で多重反射する縦弾性波がある。コンクリート表面にセンサーを２点設置し①、②の伝搬速度を測定すると、これらの伝搬速度は２点のセンサーに挟まれた範囲内でのコンクリート表面の弾性率によって変化すると考えられる。また、③について、内部で多重反射する縦弾性波の振動数 f_0 と実際の厚さ D から伝搬速度を測定すると、これは打撃点からセンサーに挟まれた範囲内でのコンクリート表面から底面までの弾性率の平均値によって変化すると考えられる。

コンクリートの弾性率は品質によって変化するので、衝撃弾性波法により③多重反射する縦弾性波の速度（往復弾性波速度）を測定すれば、コンクリート表面から底面まで全体の平均的な品質が推定できると期待できる。また、①表面波速度、②表面弾性波速度を測定すればコンクリート表面の品質が推定でき、コンクリートが均質等方であれば、同時にコンクリート全体の品質が推定できると期待できる。特に①、②による推定が可能であれば、厚さが分からないトンネル覆工コンクリート、コンクリート舗装版などの構造物について品質管理が可能となるので、用途が広くなる。

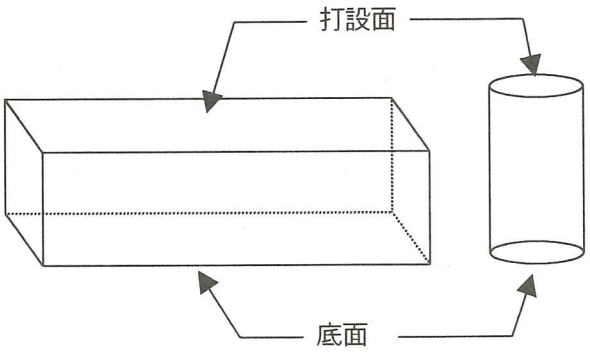
そこで、5.2.2 に示す試験片について、材齢、養生方法を変えて①表面波速度、②表面弾性波速度、③往復弾性波速度を測定し、これらの測定結果と強度試験結果とを比較して、衝撃弾性波法によりコンクリートの品質管理が可能であるか実験した。

5.8.2 実験方法

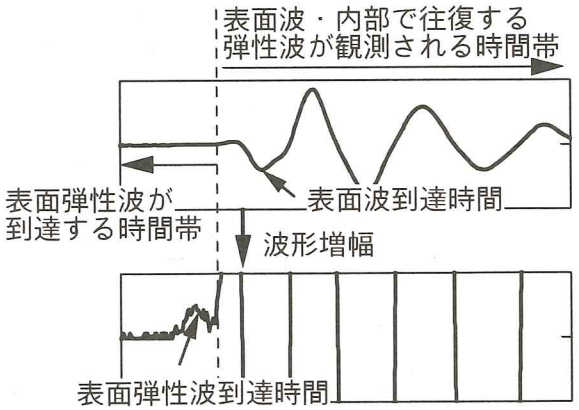
表－5.8.1　品質推定実験状況

試験片名称	試験片状況			衝撃弾性波法での実験方法		
	材齢（日）	養生方法	設計寸法（mm）	①表面波速度測定方法	②表面弾性波速度測定方法	③往復弾性波速度測定方法
曲げ	1,3,7	湿布	150×150×550	測定面：打設面,底面 センサ間隔：150mm 打撃鋼球:4,6mm	測定面：打設面,底面 センサ間隔：150mm 打撃鋼球:10mm	測定面：打設面 打撃鋼球:10mm
	28,56	水中、気中				
圧縮	1,3,7	湿布	φ125×250	測定面：打設面,底面 センサ間隔：50mm 打撃鋼球:4,6mm	－	測定面：打設面 打撃鋼球:10mm
	28,56	水中、気中				
割裂引張	1,3,7	湿布	φ125×250	測定面：打設面,底面 センサ間隔：50mm 打撃鋼球:4,6mm	－	測定面：打設面 打撃鋼球:10mm
	28,56	水中、気中				

※試験片形状および測定面は図－5.8.2参照。



図－5.8.2 試験片形状
（曲げ：左図、圧縮，割裂引張：右図）



図－5.8.3　測定波形と各振動の測定方法

実験に用いた試験片および実験方法を表－5.8.1、図－5.8.2 に、各振動の測定方法を図－5.8.3 に示す。鋼球打撃により発生する各振動は、伝搬速度と打撃点・測定点の位置関係から表面弾性波、表面波（レイリー波）、内部で多重反射する縦弾性波の順に測定点で観測されるが、表面弾性波の振幅は表面波および内部で多重反射する縦弾性波と比べて微弱なので、通常の測定波形で最初に到達する振動が表面波となる。

表面波速度は測定面にセンサーを 2 点設置し、通常の測定波形で最初に到達する振動が極小となる時間を表面波到達時間として、2 点センサー間での到達時間差を求め、センサー間隔から求めた。なお、表面波の到達後に内部を往復する縦弾性波が到達するが、表面波が極小となる前に縦弾性波が到達しないよう、直径 4mm、6mm と表面波の周期が短くなる鋼球を用いて測定し、その平均値を求めた。測定面は打設面（表）と底面（裏）からの 2 面である。

表面弾性波速度は 2 点のセンサーについて測定波形を増幅し、最初に到達する振動が極大となる時間差とセンサー間隔から求めた。なお、表面弾性波の到達後に表面波が到達するが、表面弾性波が極大となる前に表面波が到達しないよう、打撃点と打撃点に近い方のセンサーを 100mm 以上離間して測定した。従って、曲げ試験片のみでの測定となった。測定面は打設面（表）と底面（裏）からの 2 面である。

往復弾性波速度 V_Pは、厚さ 150mm、250mm で内部で多重反射する縦弾性波の振動数 f_0 と表面波の振動数

がほぼ一致する鋼球 10mm で打撃し、測定波形の自己相関関数を FFT 解析して f_0 を求め、厚さ D を用いて

$$V_P=2D \cdot f_0 \qquad (式\ 5.8.1)$$

により求めた。測定面は打設面（表）からの 1 面である。

以上のように①表面波速度、②表面弾性波速度、③往復弾性波速度を圧縮・割裂引張試験片では 3 片、曲げ試験片では 2 片について測定し、①～③の測定後同日内にそれぞれの強度試験を行なった。なお、養生方法が湿布・水中である試験片での実験では、衝撃弾性波法による測定と強度試験との測定時間間隔において放置により品質が変化しないよう、よく絞った湿布で試験片を覆い乾燥させないようにした。

5.8.3 測定結果

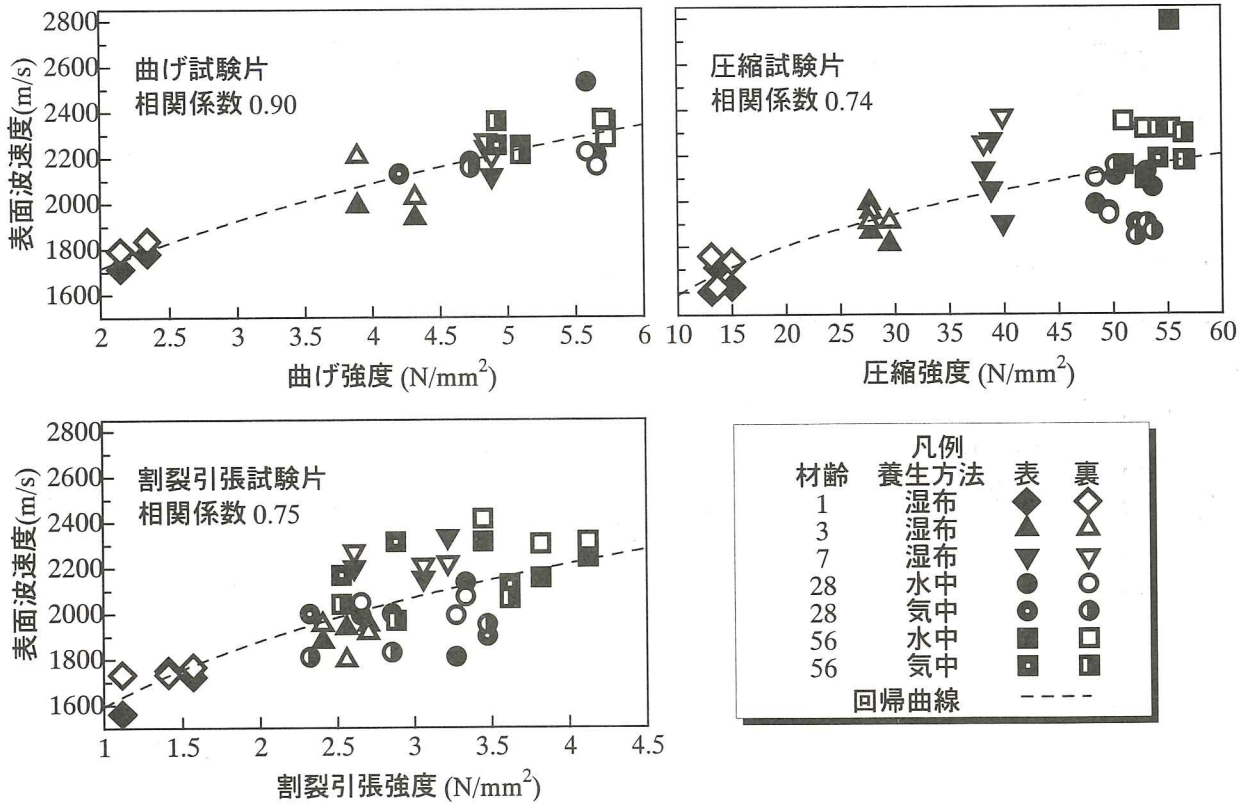
表－5.8.2　各試験片での測定結果一覧

試験片名称	材齢（日）	養生方法	強度試験結果 (N/mm²)	表面波速度(m/s)		表面弾性波速度(m/s)		往復弾性波速度(m/s)
				打設面	底面	打設面	底面	
曲げ	1	湿布	2.34	1783	1838	3488	3488	2943
			2.14	1716	1794	3492	3558	2932
	3		4.32	1938	2027	3472	3803	3450
			3.89	1992	2209	4006	3866	3394
	7		4.88	2122	2209	3972	4252	3604
			4.84	2246	2276	3923	4443	3624
	28	水中	5.66	2216	2165	4157	4157	3682
			5.59	2533	2226	4176	4281	3745
		気中	4.72	2187	2158	4067	4213	3532
			4.20	2131	－	3898	4076	3451
	56	水中	5.70	2370	2368	4422	4271	3736
			5.73	2362	2289	4486	4464	3726
		気中	4.92	2256	2362	4204	4167	3987
			5.10	2255	2216	4050	4067	3763
圧縮	1	湿布	13.64	1711	1625	－	－	3397
			15.00	1623	1737	－	－	3397
			13.09	1603	1761	－	－	3280
	3		27.79	1867	1953	－	－	3766
			29.50	1812	1909	－	－	3751
			27.65	1992	1909	－	－	3750
	7		38.84	2049	2266	－	－	3971
			39.90	1901	2370	－	－	3918
			38.17	2137	2252	－	－	3972
	28	水中	49.59	1955	1939	－	－	4116
			48.41	1984	2101	－	－	4130
			50.23	2110	2155	－	－	4089
		気中	53.09	2128	1901	－	－	4003
			53.64	2058	1866	－	－	3883
			52.11	1901	1846	－	－	3891
	56	水中	52.95	2094	2315	－	－	4150
			51.00	2155	2347	－	－	4127
			55.28	2786	2315	－	－	4132
		気中	56.48	2177	2294	－	－	3854
			54.16	2183	2315	－	－	3889
			56.64	2176	2174	－	－	3888
割裂引張	1	湿布	1.12	1564	1736	－	－	3368
			1.41	1755	1736	－	－	3309
			1.57	1725	1768	－	－	3397
	3		2.56	1939	1799	－	－	3762
			2.41	1880	1953	－	－	3774
			2.70	1953	1916	－	－	3770
	7		2.61	2203	2273	－	－	3910
			3.22	2337	2223	－	－	4005
			3.06	2155	2212	－	－	3898
	28	水中	3.27	1812	1993	－	－	4141
			3.33	2137	2076	－	－	4116
			2.66	1994	2049	－	－	4136
		気中	2.32	2000	1812	－	－	3884
			3.47	1901	1953	－	－	3993
			2.86	2001	1832	－	－	3896
	56	水中	3.82	2156	2305	－	－	4203
			3.45	2315	2416	－	－	4231
			4.12	2244	2315	－	－	4227
		気中	2.53	2169	2041	－	－	3881
			3.62	2128	2066	－	－	3895
			2.88	2313	1970	－	－	3887

各試験片で測定した強度試験結果、表面波速度、表面弾性波速度、往復弾性波速度を表－5.8.2 に示す。この測定結果から、次の（1）～（4）の通り、各速度測定結果と強度試験結果、養生方法による各速度の変化を比較した。

（1）表面波速度測定結果と強度試験結果の比較

衝撃弾性波法により測定した表面波速度と各強度試験により得られた強度との関係を図－5.8.4 に示す。



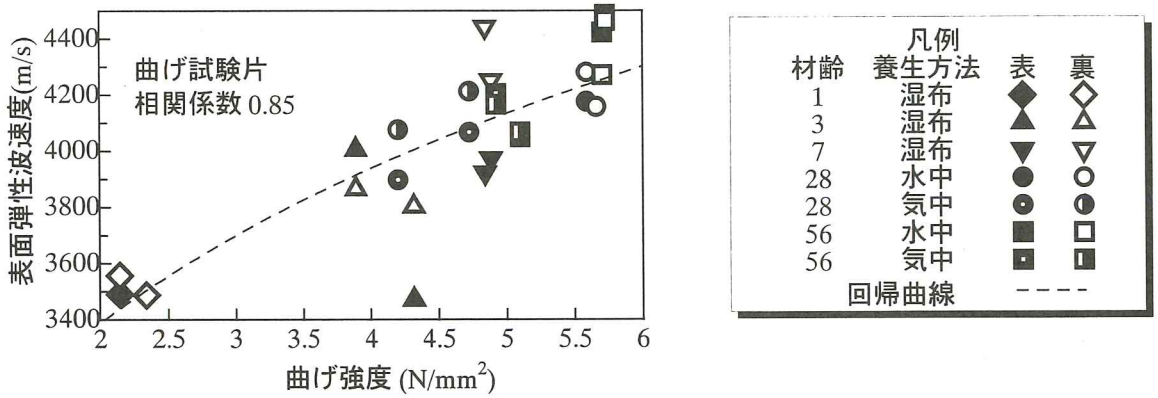
図－5.8.4 表面波速度と各強度試験結果の関係

試験片が均質等方であれば、内部強度の増加により表面の弾性率が増加し、表面波速度は速くなると考えられる。図より表面波速度と内部強度の関係を見ると、センサー間隔 150mm の曲げ試験片では、相関係数 0.90 と一応の関係は見られるが、その他の結果では相関係数 0.74、0.75 と両者は相関関係にあるとは言い難い結果となった。センサー間隔が狭くなると、表面波速度の測定精度が低下することや、表面波速度はセンサーに挟まれた局部的な範囲での弾性率によって変化するので、試験片全体の強度である内部強度との関係が低くなるものと考えられる。

（2）表面波弾性波速度測定結果と曲げ強度試験結果の比較

衝撃弾性波法により測定した表面弾性波速度と曲げ強度試験により得られた曲げ強度との関係を図－5.8.5 に示す。

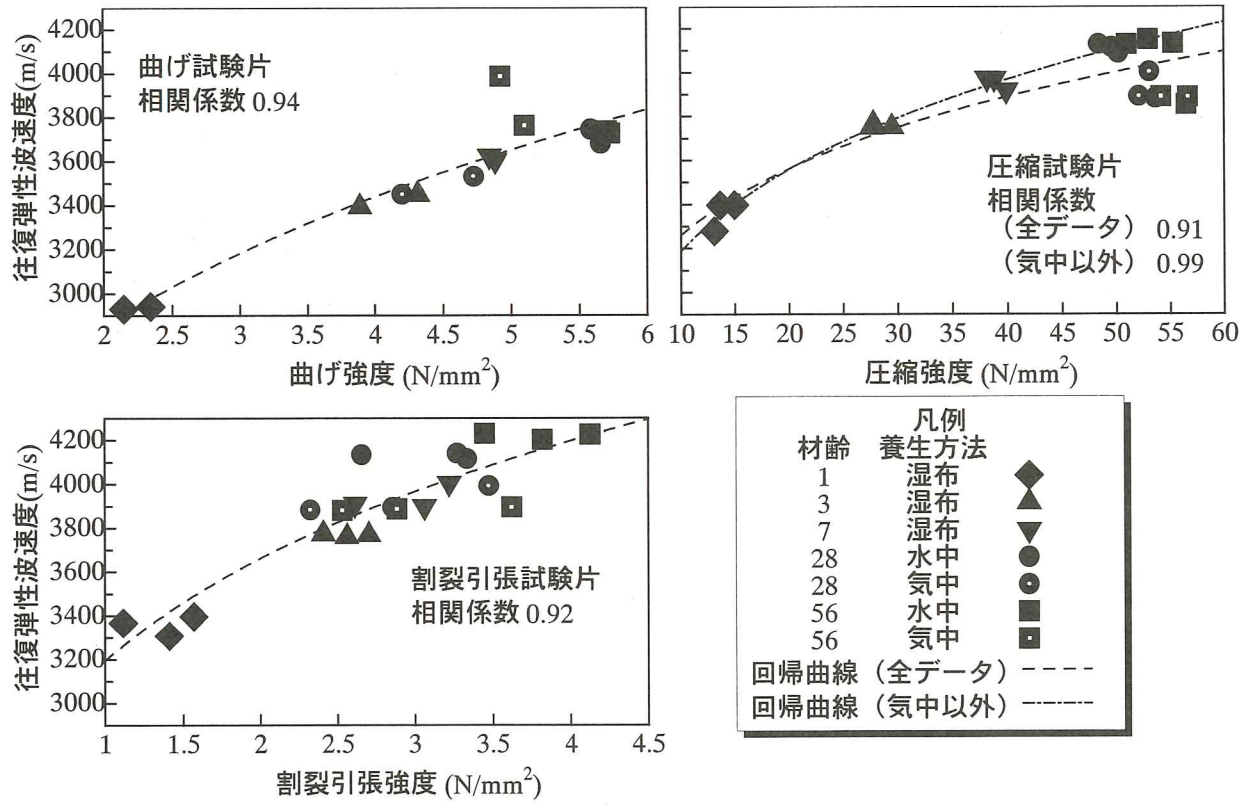
表面弾性波速度も表面波速度と同様に、試験片が均質等方であれば内部強度の増加により速くなる。図では、大きくばらつく測定結果もあるが、相関係数 0.85 と表面波速度と曲げ強度との関係程度に一応の関係は見られる。



図－5.8.5 表面弾性波速度と各強度試験結果の関係

（3）往復弾性波速度測定結果と強度試験結果の比較

衝撃弾性波法により測定した往復弾性波速度と各強度試験により得られた強度との関係を図－5.8.6 に示す。



図－5.8.6 往復弾性波速度と各強度試験結果の関係

往復弾性波速度は打撃点からセンサーに挟まれた範囲での、コンクリート表面から底面までの弾性率によって変化するので、内部強度が増加すれば往復弾性波速度は速くなると考えられる。

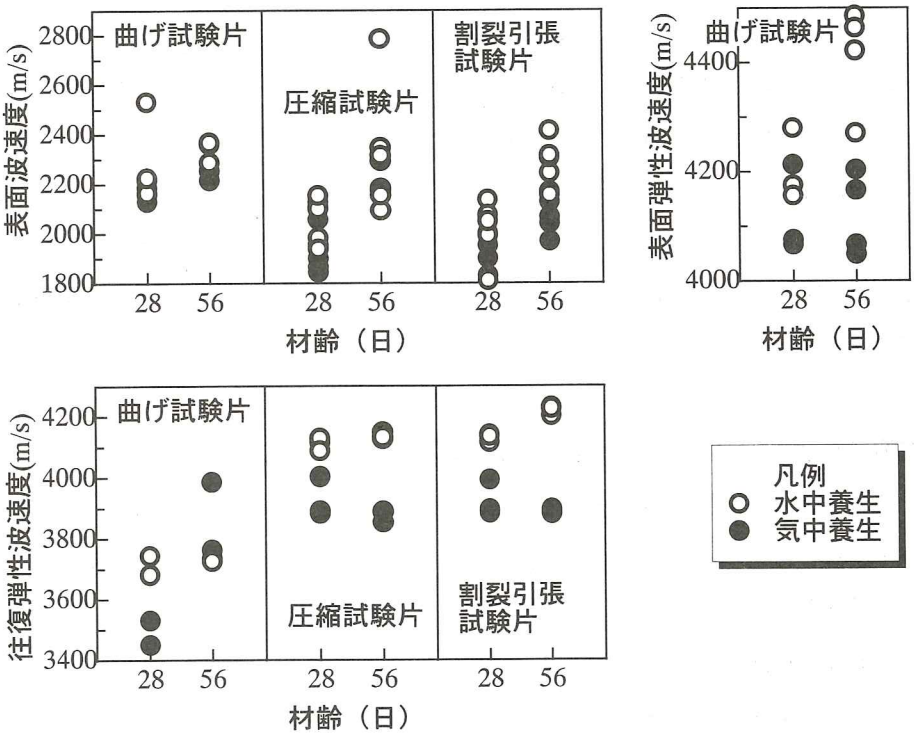
曲げ試験片では往復弾性波速度と曲げ強度の関係は、材齢 56 日での気中養生で他での関係と異なるが、相関係数は 0.94 と高くなった。しかし、原因は明らかでないが、曲げ試験片で測定された往復弾性波速度は、同じ試験片で測定した表面弾性波速度や他の試験片で測定した往復弾性波速度と比較すると 10％程度遅くなる結果となっている。

圧縮試験片では往復弾性波速度と圧縮強度との相関係数は0.91となるが、材齢28日、56日とも気中養生試験片での両者の関係は、湿布養生・水中養生試験片での関係とは異なる結果となった。気中養生での結果を除いた両者の相関係数は0.99と非常に高くなり、養生方法を考慮すれば往復弾性波速度から圧縮強度を推定できると期待できる。

割裂引張試験片では養生方法、材齢による往復弾性波速度と割裂引張強度との関係の違いは見られず、両者の相関係数は0.92となった。

（4）養生方法の違いによる各速度の変化

材齢28、56日での、各試験片の各速度測定結果について、養生方法（水中養生、気中養生）による違いを比較した結果を図－5.8.7に示す。



図－5.8.7 往復弾性波速度と各強度試験結果の関係

一般に水中養生では気中養生よりコンクリートの品質が良くなるので、内部強度は強く、弾性率は大きくなり、速度が速くなることが予想される。測定結果では、各試験片、各速度とも全体的に水中養生での速度が速くなった。この傾向は圧縮試験片、割裂引張試験片での往復弾性波速度で顕著となり、コンクリート表面のみの弾性率によって変化する表面波速度、表面弾性波速度よりも、コンクリート表面から底面までの弾性率で変化する往復弾性波速度がコンクリートの品質に反映されるといえる。曲げ試験片での往復弾性波速度は、前述の通り、他の往復弾性波速度測定結果と異なり、養生方法の違いも確認できなかった。

5.8.4 コンクリート品質の推定

5.8.3より、衝撃弾性波法によるコンクリートの品質管理として、コンクリートの養生方法を考慮したうえでの、往復弾性波速度による圧縮強度の推定が最も期待できる。気中養生での結果を除いた場合の圧縮強

度f_Cと往復弾性波速度V_Pの関係式を最小二乗法により求めると、

$$f_C = e^{-48.4} \cdot V_P^{6.29} \qquad \text{(式 5.8.2)}$$

となった。

往復弾性波速度を測定し、（式 5.8.2）によりコンクリートの圧縮強度を推定するには、対象が橋脚など厚さが分かるコンクリート構造物であることが条件となる。この場合は、両者の相関係数が0.99であったことから高精度で推定できると期待できる。

一方、今回の舗装版やトンネル覆工コンクリートなど厚さが分からない場合においては、表面波速度と表面弾性波速度が測定できるが、表面波速度と各強度試験結果、表面弾性波速度と曲げ試験結果、では強い相関関係が得られなかった。従って、コンクリート表面から内部強度を推定する手段としては、表面弾性波速度を正確に、往復弾性波速度と等しくなるよう測定し、（式 5.8.2）により圧縮強度を推定する方法が望ましい。そこで、**5.6.1** で測定した表面弾性波速度を用いて（式 5.8.2）により現地大型供試体、新設舗装版での圧縮強度を推定した。その結果を**表－5.8.3** に示す。大型供試体でコア採取により、実際に圧縮強度を測定した結果は 44.6N/mm^2 となり、表面弾性波速度を用いた推定結果との比率は 1.079 となった。

表－5.8.3 圧縮強度推定結果

測定物		弾性波速度 (m/s)	推定圧縮強度 (N/mm^2)
大型供試体		4067	48.14
新設舗装版	I	3945	39.72
	II	3976	41.74
	III	4091	49.97
	V	4044	46.46
	VI	3971	41.43

5.8.5 衝撃弾性波法によるコンクリート品質推定実験考察

衝撃弾性波法により測定した①表面波速度、②表面弾性波速度、③往復弾性波速度と強度試験結果を比較してコンクリートの品質管理が可能であるか実験した。その結果、表面波速度と表面弾性波速度は内部強度とは強い相関関係が見られず、①、②から直接内部強度を推定することは困難であると思われる。これは①、②はセンサーに挟まれた範囲でのコンクリート表面と、局部的な範囲での弾性率によって変化するので、①、②によってコンクリート全体の品質を管理するには、測定物が均質等方であることが条件となり、センサー間隔 150mm、材齢 56 日以下の試験片ではこの条件を満足しなかったものと考えられる。

厚さが分かっているコンクリートで測定できる往復弾性波速度は、内部強度と強い相関関係にあることが分かった。往復弾性波速度は打撃点からセンサーに挟まれた範囲内でのコンクリート表面から底面までの弾性率の平均値によって変化するので、コンクリート全体の品質管理に利用できると考えられる。特に往復弾性波速度と圧縮強度は、気中養生試験片での結果を除いた場合に相関係数 0.99 と強い相関関係となった。

以上より衝撃弾性波法では、橋脚など厚さが分かるコンクリート構造物においては、養生方法を考慮すれば往復弾性波速度の測定によりコンクリートの品質が推定できるといえる。また、模範となる養生方法で製作した試験片と実際の構造物で測定した往復弾性波速度を比較すれば、養生方法の確認を含めた実際の構造物の品質管理ができると期待できる。一方、コンクリート舗装版、トンネル覆工コンクリートなど厚さが分からない構造物で品質を推定するには、表面弾性波速度を往復弾性波速度と同等に扱うことが望ましい。これには表面弾性波速度をより正確に、往復弾性波速度と等しくなるよう測定することが重要となる。

6章　強度推定実験

6．1　実験目的

強度推定および表層の品質を推定することを目的に、次のような各種非破壊試験および局部破壊を伴う試験を行なった。

① 非破壊試験

超音波法による強度推定および表層の品質推定

弾性波法による強度推定

テストハンマ（シュミットハンマ）を用いた反発度法による強度推定

② ボス供試体の適用性

ボス供試体とは、Broken Off Specimens by Splitting (BOSS) Method のことである。ボス供試体は、あらかじめ構造物のコンクリート用型枠にボス供試体用の凸部を有する型枠（ボス型枠）を取り付けておき、構造物のコンクリートと同時にコンクリートを打込み、養生を行ない、所要の試験材齢になったらボス供試体を採取して圧縮強度試験を行なうというものである。これまで建築で検討されてきたものであり、これを土木用コンクリートにも適用可能かを確認するために、次の３点について検討した。

i.　スランプおよび粗骨材最大寸法（Gmax）の違いによるボス型枠への充填性

スランプ　8 cm

Gmax　　25 と 40mm

ii.　ボス供試体の大きさの検討

100×100×200mm に対し、

Gmax 25 の場合　75×75×150mm

40 の場合　125×125×250mm

iii.　ボス供試体による強度推定

③ 小径コアによる品質および強度推定

吸上げ試験による品質推定を行なった後、圧縮強度試験を行ない強度を推定

④ 表層の品質推定のための細孔径分布の測定

６．２　供試体

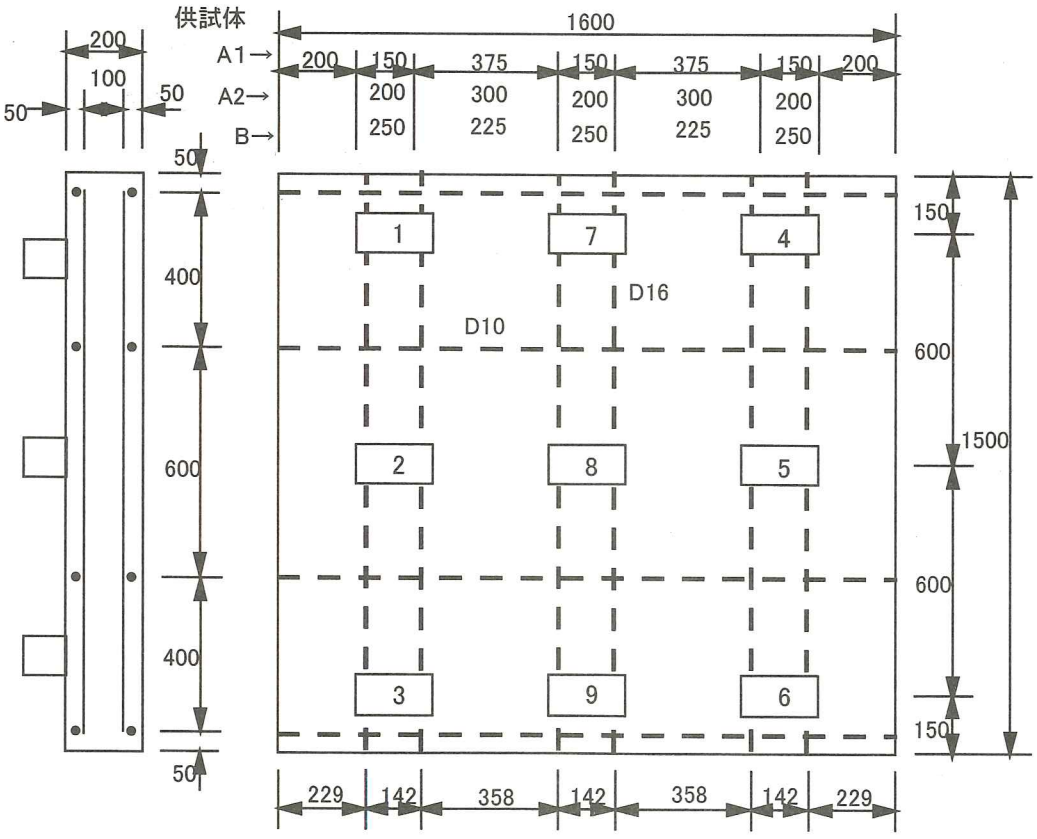
６．２．１　壁供試体およびボス供試体の作製

図－6.2.1.1 のように高さ 1500×幅 1600mm、厚さ 200mm の壁供試体に、ボス型枠を高さ 150、750、1350mm の位置に取り付けた。ボス型枠位置にはコンクリートの充填を阻害するために鉄筋 D16 を２本配置した。

供試体Aは、Gmax 25mm 用であり、供試体Ａ１はボス供試体が 75×75×150mm（□75）、供試体Ａ２は 100×100×200mm（□100）である。

供試体Ｂは、Gmax 40mm 用であり、ボス供試体は 125×125×250mm（□125）である。

養生は、７日間湿布養生し、その後は気中養生とした。



図－6.2.1.1　壁供試体とボス供試体取付位置

圧縮強度の管理用供試体は，以下の数量を作製した。

供試体Ａ　　φ100×200mm　　７組

供試体Ｂ　　φ125×250mm　　７組と、φ100×200mm　　２組

養生は，壁供試体と合わせ，すべて７日までは湿布養生とし、その後は気中と水中養生に分けた。コンクリートの打設は冬だったので，打設から３日間は電気毛布をかけておき上，中，下部の温度を測定した。

6．2．2　コンクリートの配合

使用したコンクリートの配合を**表－6.2.1.1** に，使用材料を**表－6.2.1.2** に示す。打設前の試験結果は**表－6.2.1.3** のとおりであった。

表－6.2.1.1　コンクリートの配合

供試体	粗骨材の最大寸法（mm）	呼び強度	配合強度	目標スランプ（cm）	水セメント比（%）	細骨材率（%）	単位量（kg/m^3）					
							水	セメント	細骨材	粗骨材①	粗骨材②	混和剤
A	25	24	30.2	8	50.0	43.0	160	320	763	1023	—	3.42
B	40			8	49.5	41.5	153	309	748	746	321	3.31

表－6.2.1.2　使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント（宇部三菱セメント），密度3.14g/cm^3
細骨材	桜川産川砂，表乾密度2.56g/cm^3，吸水率1.67%，粗粒率2.80
粗骨材①	桜川産砂利，25mm～5mm，表乾密度2.59g/cm^3，吸水率1.08%，実積率61.0%
粗骨材②	桜川産砂利，40mm～20mm，表乾密度2.59g/cm^3，吸水率1.07%，実積率60.0%
混和剤	AE減水剤標準形Ⅰ種（ポゾリスNo.70）

表－6.2.1.3　コンクリートの試験結果

	スランプ（cm）	空気量（%）	温度（℃）
供試体A	6.5	4.6	10
	15.0		
供試体B	5.9	4.9	10

注）　供試体Ａのスランプの上段は打設前、
下段は打設後の結果である。

6．2．3　打設方法

コンクリートの打設はバケットを使用し，３層に分けて打込み，バイブレータで締め固めた。一層当たりの所要時間は約５分であった。

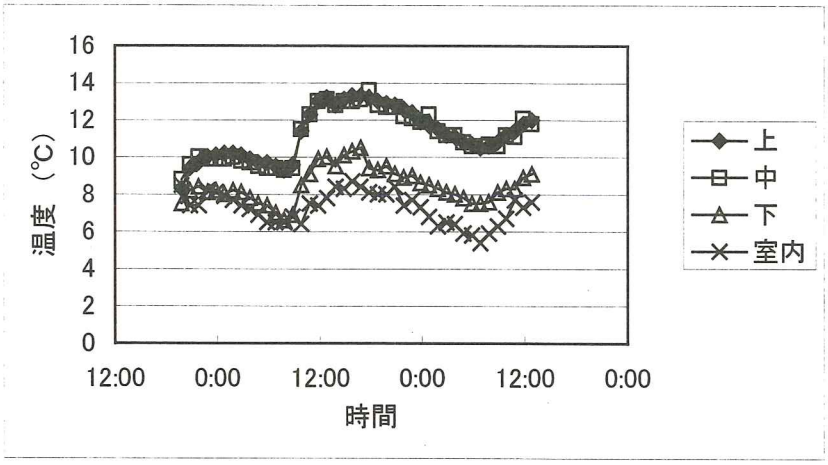
供試体Aは，A2 を先に打ち込み，次にA1 を打ち込んだ。コンクリートはしだいに軟らかくなってきたので，打設終了時にもスランプ試験を行うと 15.0cm であった（**表－6.2.1.3**）。

供試体Ｂの打設途中にトラブルがあり，一時中断した。打込み再開後，ボス型枠の空気抜から未充填部分の充填を確認することができた。ボス型枠は，充填の確認にも役立つことがわかった。

6．2．4　養生

供試体の打設は実験室内で行ったが，冬場で気温が低く，事前の温度測定では夜間５℃以下であった。そのため電気毛布によって３日間養生した。またその間，供試体の上，中，下段の位置で温度を測定した。管理用供試体は下に置いていた。温度は**図－6.2.4.1** のように室内温度に対し，上，中は５℃程度，下は２℃程度高くなっている。

その後は，打設から１週間湿布養生を行った。



図－6.2.4.1　養生時の温度

６．３　実験手順

６．３．１　管理供試体およびボス供試体の音速，圧縮強度試験

ボス供試体　　材齢３，７，28 日に１列３個ずつ圧縮強度試験を行なった。

管理供試体　　供試体Ａ　φ100×200mm　1，3，7 日と、14、28 日に気中、水中養生分

供試体Ｂ　φ125×250mm　1，3，7 日と、14、28 日に気中、水中養生分

φ100×200mm　７日と、28 日に水中養生分

試験前には、質量、形状・寸法、音速を測定した。

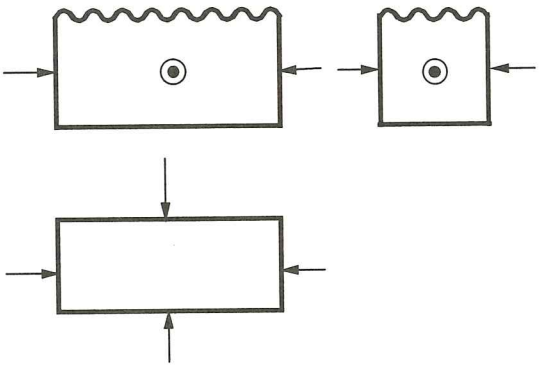
管理供試体の圧縮試験時には、縦・横ひずみを測定し、ヤング係数、ポアソン比を求めた。

音速の測定は、次のように行なった。

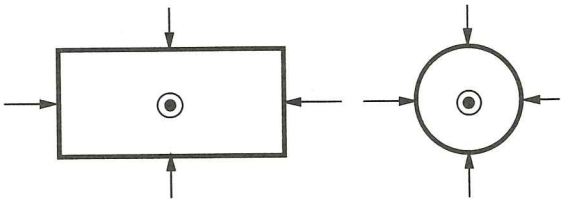
①ボス供試体は、**図－6.3.1.1** のように長手方向と、それに直角な１方向とした。（１個２回）。

②管理供試体の材齢７日までのものは、**図－6.3.1.2** のとおりとした。（１個３回）。

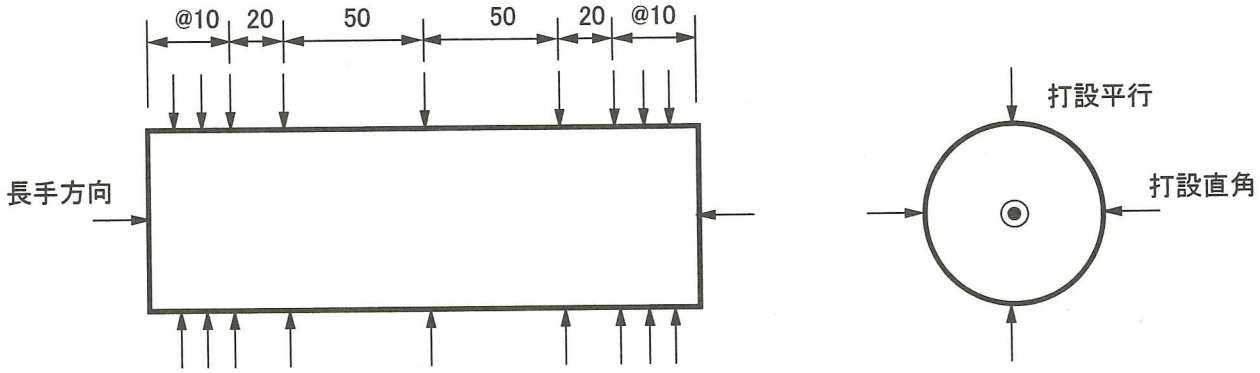
③管理供試体の材齢 14、28 日のものは、脱型時および圧縮試験直前に**図－6.3.1.3** のように測定した(1 個 11 回)。



図－6.3.1.1　ボス供試体の音速測定



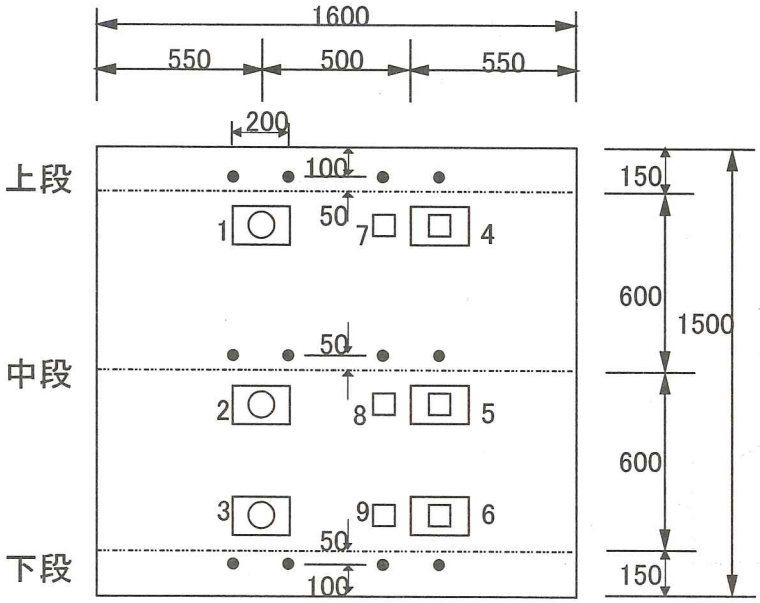
図－6.3.1.2　管理供試体の音速測定



図－6.3.1.3　管理供試体脱型時および(材齢14,28日)およびコアの音速測定

６．３．２　壁供試体の超音波法，弾性波法およびテストハンマによる品質推定

図－6.3.2.1 のようにコア採取位置の超音波法による表面走査法および透過法による伝搬時間，弾性波法（弾性波GおよびH）による表面弾性波および往復弾性波速度およびテストハンマによる反発度を測定した。ボス供試体を取付けてない面の表面伝搬時間を測定し，内部の音速分布を推定した。



コアφ25　● 小径コア採取

コアφ100　○：材齢7日コア採取，1，3，7日透過時間測定位置

□：材齢28日コア採取，1，3，7，14，28日透過時間測定位置

：超音波法による表面走査法測定線

：弾性波法およびテストハンマ測定位置，測定材齢はコア採取直前

図－6.3.2.1　超音波法，弾性波法，テストハンマ測定位置およびコア採取位置

（1）超音波法

超音波Aの装置を用い，表面走査法による表面伝搬時間，コア採取位置の透過時間を測定した。

①　表面伝搬時間

測定距離は、800mm までは 100mm ピッチ、1400mm まで 200mm ピッチとした。

測線は、打設面から 150、750、1350mm の３本、測定材齢は、3、7、14、28 日の４材齢とした。

②　透過時間

コア採取位置は、図－6.3.2.1 の○（材齢７日でコア採取）、□（同 28 日）である。

○の位置：材齢 3、7 日の２材齢で測定

□の位置：材齢 3、7、14、28 日の４材齢で測定

③　φ100 コアの側面から透過速度を測定した。

（2）弾性波法

弾性波G、弾性波Hの装置を用い、コア採取位置で往復弾性波速度、表面弾性波速度を測定した。また、強度管理用供試体の往復弾性波速度を測定した。

（3）テストハンマ

図－6.3.2.1 の□内でテストハンマによる反発度を測定した。打撃位置は，コア採取位置を中心に縦，横 50mm 間隔で 4 点ずつ，1 箇所で 16 点とした。

測定材齢は、コア採取材齢に合わせ、枠内の○印の位置は材齢 7 日、□印の位置は材齢 28 日である。

6．3．3　コア供試体の音速，圧縮強度の測定

（1）φ100 コアの音速，圧縮強度

図－6. 3. 2. 1 のように材齢 7 日，28 日に，φ25mm（小径コア）およびφ100mm のコアを採取し，小径コアは吸上げ試験と圧縮強度，φ100 は音速と圧縮強度試験を行った。

（2）7 日採取コア

① 両端面を研摩した。

② 質量、形状・寸法を測定した。

③ 透過音速を図－6.3.1.3 のように長手方向と、それに直角で、打設方向に平行と直角方向に両表面から 10,20,30,50,100mm の位置で測定した。

④ 圧縮強度試験を行なう。縦・横ひずみを測定した。

（3）28 日採取コア

① 両端面を研摩した。

② 質量、形状・寸法を測定した。

③ 透過音速を図－6.3.1.3 のように長手方向と、それに直角で、打設方向に平行と直角方向に両表面から 10,20,30,50,100mm の位置で測定した。

④ 水中に 48 時間浸漬した後、水中における見かけの質量、表乾状態の質量を測定した。

⑤ 音速を③と同様に測定した。

⑥ 圧縮強度試験を行なう。縦・横ひずみを測定した。

6．3．4　小径コアの圧縮強度試験および吸上げ試験

小径コア(直径 25mm)の圧縮試験および吸上げ試験は、各非破壊試験後に行なった。A1 と B からは、3 種類の高さで 2 本ずつ、A2 からは 3 種類の高さで 1 本ずつ採取した。小径コア採取位置は、直径 100mm のコア採取位置と対応している。小径コアは、成形するまで水中養生した。A1 と B から採取した 2 本の小径コアを、吸上げ試験用 100mm と圧縮試験用 50mm3 本の計 4 供試体に成形し、A2 から採取した 1 本の小径コアは圧縮試験用 50mm3 本に成形した。

圧縮試験用供試体は、成形後、硫黄キャッピングを施し、圧縮試験に供した。圧縮試験は片押しにならないように注意して行った。圧縮強度は、単純に最大荷重を断面積で割って求めた。

吸上げ試験は、供試体成形後も水中養生しておき、表乾質量を計測した。その後、24 時間 100℃で乾燥させ、絶乾質量を計測した。水深 1cm の水槽に壁供試体の表面が下になるように吸上げ試験用供試体を立てて静置し、2,5,18 時間後に質量を計測した。吸上げ量は、次のように求めた。

$$\text{吸上げ量}\left(g/cm^2\right)=\frac{\text{吸上げ開始18時間後の質量}(g)-\text{絶乾質量}(g)}{\text{断面積}\left(cm^2\right)} \qquad (6.3.4.1)$$

ボス、管理、コア供試体の養生と圧縮強度試験材齢の関係は**表－6.3.4.1** のようになる。

表－6.3.4.1 ボス，管理，コア供試体の養生と圧縮強度試験材齢の関係

養生方法	湿布養生			気中放置		備考
材齢（日）	1	3	7	14	28	
ボス供試体	－	○	○	－	○	
管理供試体	○	○	○	○	○	7日以降，水中，気中に分ける
				●	● 水中	
コア供試体	－	－	○	－	○ → ● 水中2日	
小径コア	－	－	○	－	○	吸上げおよび圧縮

6.3.5 細孔径分布の測定

細孔径分布の測定と、それによる圧縮強度の推定は、**4.2.3 項**と同様に行なった。測定位置は、壁供試体の表面から 0～10、20～30、45～50、95～105mm である。

６．４　コンクリートの品質

管理供試体の音速，圧縮強度試験結果は**表—6.4.1.1** のとおりである。材齢と強度の関係は**図－6.4.1.1** のとおりであり、式（3.3.1.1）および式（5.3.2.1）で回帰した強度発現曲線も示した。回帰結果は**表－6.4.1.2** のとおりであった。

コア強度結果を**表－6.4.1.3** に，ボス供試体の結果を**表－6.4.1.4** に，材齢との関係を**図－6.4.1.2** に示す。

圧縮強度と音速の関係は，**６．７節**でふれることとし，ここではそれ以外の長手の音速と側面音速の関係を**図－6.4.1.3** に，ヤング係数と長手の音速の関係を**図－6.4.1.4** に示す。

管理供試体の側面透過音速分布結果は**表－6.4.1.5** および**図－6.4.1.5** のとおりである。

コアの側面透過音速分布結果を**表－4.6.1.6** および**図－4. 6. 1. 6** に示す。縦軸の表面からの距離は、ボス供試体の反対側の表面からの距離である。**図－6.4.1.6** には，**６．７節**で求めた壁供試体の音速分布の解析結果も示しているとおり、両者はほぼ一致している。

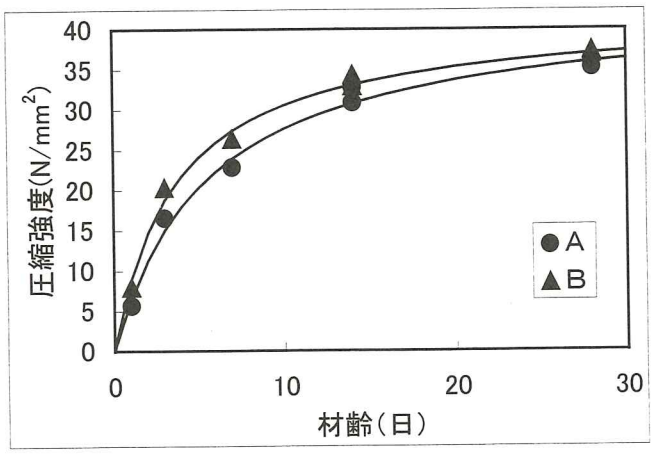


図-6.4.1.1　圧縮強度と材齢の関係

表-6.4.1.2　回帰結果

供試体	式	回帰係数			相関係数
		a	b	to	r
A	3.3.1.1	7.66	43.1	—	0.996
	5.3.2.1	8.07	42.5	0.114	0.996
B	3.3.1.1	11.30	41.8	—	0.996
	5.3.2.1	12.42	41.0	0.163	0.996

表－6.4.1.1 管理試験結果

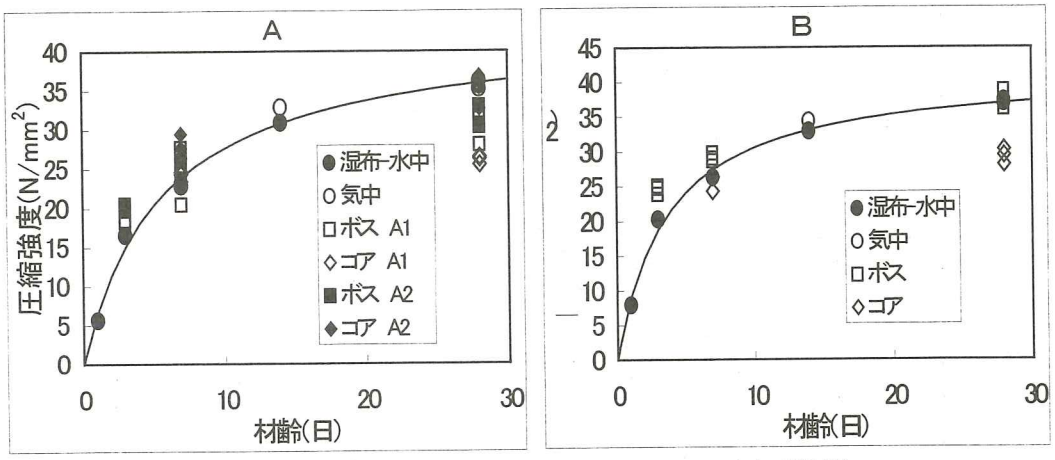
養生方法	試験材齢(日)	供試体A(A-1,A-2):Gmax 25mm 供試体番号	含水率増減(%)	音速(m/s) 長手	平均	側面	平均	圧縮強度(N/mm2) 個々	平均	ヤング係数(kN/mm2) 個々	平均	供試体B:Gmax 40mm 供試体番号	含水率増減(%)	音速(m/s) 長手	平均	側面	平均	圧縮強度(N/mm2) 個々	平均	ヤング係数(kN/mm2) 個々	平均
湿布養生	1(30時間)	KA-1	0.00	3388		3263		5.07		12.7		KB-1	0.00	3592		3575		7.71		13.8	
		KA-2	0.00	3468	3472	3405	3373	5.72	5.61	15.2	13.1	KB-2	0.00	3715	3686	3546	3574	8.03	7.91	14.4	16.6
		KA-3	0.00	3559		3451		6.04		11.5		KB-3	0.00	3752		3601		8.00		21.6	
	3	KA-4	0.00	3958		3851		16.26		19.4		KB-4	0.00	3995		3891		20.43		22.4	
		KA-5	0.00	3923	3948	3773	3849	16.87	16.51	19.0	20.0	KB-5	0.00	4022	3963	3871	3925	19.96	20.29	22.5	22.2
		KA-6	0.00	3963		3923		16.41		21.5		KB-6	0.00	3871		4012		20.49		21.7	
	7	KA-7	0.00	4117		4032		22.75		23.7		KB-7	0.00	4168		4119		27.71		25.3	
		KA-8	0.00	4163	4107	3940	3981	23.29	22.80	23.5	23.3	KB-8	0.00	4271	4211	4245	4153	26.22	26.34	25.0	25.6
		KA-9	0.00	4041		3969		22.35		22.8		KB-9	0.00	4194		4095		25.09		26.3	
												KB2-1	0.00	4238		4183		27.93		24.7	
											φ100→	KB2-2	0.00	4172	4201	4158	4107	27.77	28.39	25.3	24.8
												KB2-3	0.00	4192		3980		29.47		24.5	
水中養生	14	KAW-1	0.43	4316		4160		31.23		26.0		KBW-1	0.39	4327		4254		33.64		26.7	
		KAW-2	0.45	4304	4291	4099	4131	27.63	30.83	25.5	26.3	KBW-2	0.37	4331	4313	4220	4266	33.27	32.88	26.1	25.7
		KAW-3	0.45	4252		4135		30.43		26.7		KBW-3	0.30	4280		4325		31.72		24.4	
	28	KAW-4	0.57	4237		4127		34.82		26.5		KBW-4	0.50	4266		4300		37.04		28.7	
		KAW-5	0.48	4329	4281	4248	4194	37.37	36.10	27.0	26.8	KBW-5	0.49	4338	4318	4307	4296	37.33	37.29	31.2	30.6
		KAW-6	0.54	4276		4208		28.66		25.2		KBW-6	0.47	4351		4281		37.50		31.9	
												KB2-4	0.60	4262		4370		40.22		29.1	
											φ100→	KB2-5	0.54	4252	4345	4152	4257	33.18	39.04	27.2	30.4
												KB2-6	0.54	4520		4248		37.86		31.6	
気中養生	14	KAA-1	-1.16	4282		3998		32.25		24.4		KBA-1	-1.11	4298		4244		29.64		28.4	
		KAA-2	-1.28	4156	4212	4155	4064	32.51	32.80	26.1	24.8	KBA-2	-1.14	4280	4255	4166	4212	34.00	34.32	30.0	28.7
		KAA-3	-1.42	4197		4040		33.65		23.8		KBA-3	-1.09	4187		4225		34.65		27.4	
	28	KAA-4	-1.68	4035		4132		33.45		26.8		KBA-4	-1.56	4372		4111		37.62		28.1	
		KAA-5	-1.85	4203	4147	4050	4091	37.06	35.14	25.1	26.0	KBA-5	-1.52	4261	4319	4184	4166	33.80	36.85	25.2	26.9
		KAA-6	-1.78	4201		4092		34.93		26.3		KBA-6	-1.62	4324		4202		36.07		25.8	

表－6.4.1.3 コア供試体

養生方法	試験材齢(日)	供試体A-1 供試体番号	高さ(mm)	音速(m/s) 長手	側面	圧縮強度(N/mm2)	ヤング係数(kN/mm2)	供試体A-2 供試体番号	高さ(mm)	音速(m/s) 長手	側面	圧縮強度(N/mm2)	ヤング係数(kN/mm2)	供試体B 供試体番号	高さ(mm)	音速(m/s) 長手	側面	圧縮強度(N/mm2)	ヤング係数(kN/mm2)
湿布養生	7	CA1-1	196.7	4015	3830	24.61	23.4	CA2-1	198.2	3965	3874	26.36	22.6	CB-1	199.2	4025	4029	29.18	24.3
		CA1-2	198.6	3918	3914	27.12	24.3	CA2-2	199.3	4092	4001	27.63	24.5	CB-2	200.7	4208	4107	33.57	26.3
		CA1-3	200.0	4016	3934	28.65	24.6	CA2-3	200.4	4131	4121	29.44	24.7	CB-3	201.5	4171	4198	33.83	26.4
気中養生	28	CA1-4	196.7	4044	4065	29.77	25.5	CA2-4	197.6	3972	4075	32.63	24.9	CB-4	198.7	4263	4287	35.66	30.3
		CA1-5	200.1	4041	3976	34.54	26.2	CA2-5	198.9	4102	4043	35.31	27.3	CB-5	199.9	4299	4205	40.64	29.4
		CA1-6	203.3	4100	4131	35.05	26.4	CA2-6	200.8	4331	4106	36.72	27.7	CB-6	201.1	4224	4168	38.29	28.1

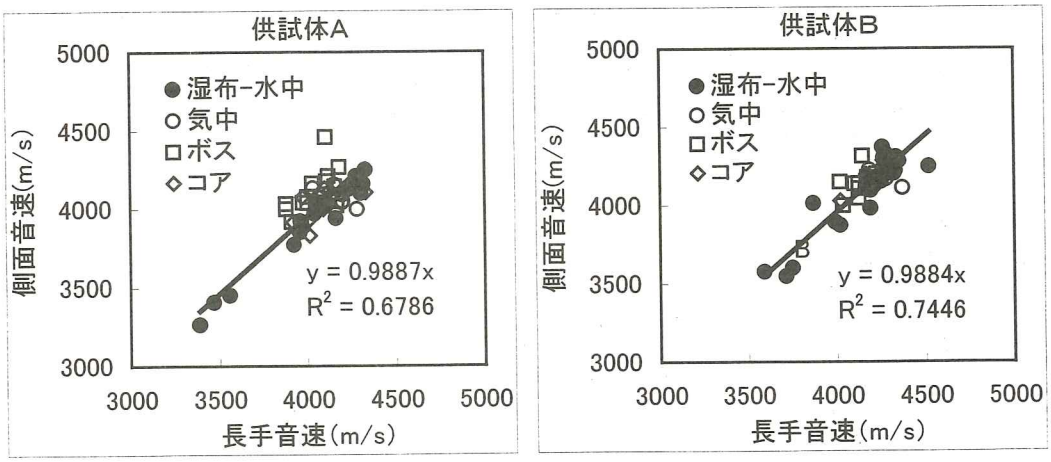
表－6.4.1.4 ボス供試体

養生方法	試験材齢(日)	供試体A-1 供試体番号	形状寸法(mm)	音速(m/s) 長手	側面	圧縮強度(N/mm2) 寸法法	重量法	供試体A-2 供試体番号	形状寸法(mm)	音速(m/s) 長手	側面	圧縮強度(N/mm2) 寸法法	重量法	供試体B 供試体番号	形状寸法(mm)	音速(m/s) 長手	側面	圧縮強度(N/mm2) 寸法法	重量法
湿布養生	3	A1-1	□75×150	3881	4033	18.17	18.25	A2-1	□100×200	3881	4001	20.47	20.45	B-1	□125×250	4129	4105	25.20	25.10
		A1-2		4003	4039	17.78	18.43	A2-2		3968	3903	20.17	20.04	B-2		4039	3997	24.86	24.76
		A1-3		4088	4034	19.99	19.75	A2-3		4001	4076	20.97	20.26	B-3		4023	4150	24.05	23.87
	7	A1-4	□75×150	3912	3918	20.72	20.42	A2-4	□100×200	3977	4041	23.68	23.48	B-4	□125×250	4104	4138	29.35	28.69
		A1-5		4063	4043	27.15	27.67	A2-5		4091	4021	23.91	23.78	B-5		4149	4314	29.84	29.78
		A1-6		4168	4022	24.91	25.25	A2-6		4107	4457	26.30	26.04	B-6		4128	4045	29.50	29.04
気中養生	28	A1-7	□75×150	4122	4209	29.27	27.97	A2-7	□100×200	4158	4145	30.73	30.29	B-7	□125×250	4127	4139	38.16	36.98
		A1-8		4111	4177	32.10	30.59	A2-8		4171	4050	33.96	32.95	B-8		4228	4200	39.07	38.71
		A1-9		4182	4266	33.46	31.81	A2-9		4031	4163	35.89	35.48	B-9		4176	4177	36.49	36.10

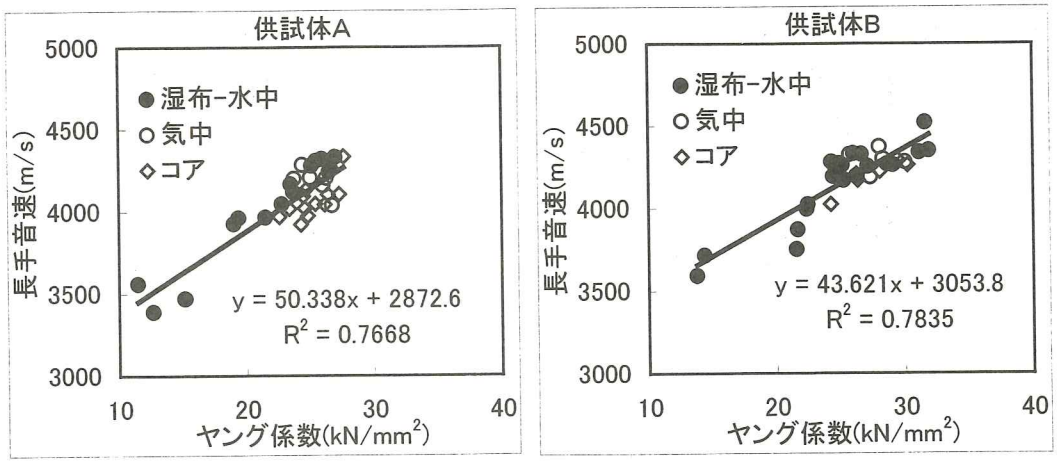


(a) 供試体A　　(b) 供試体B

図－6.4.1.2　コア、ボス供試体の
圧縮強度と材齢の関係



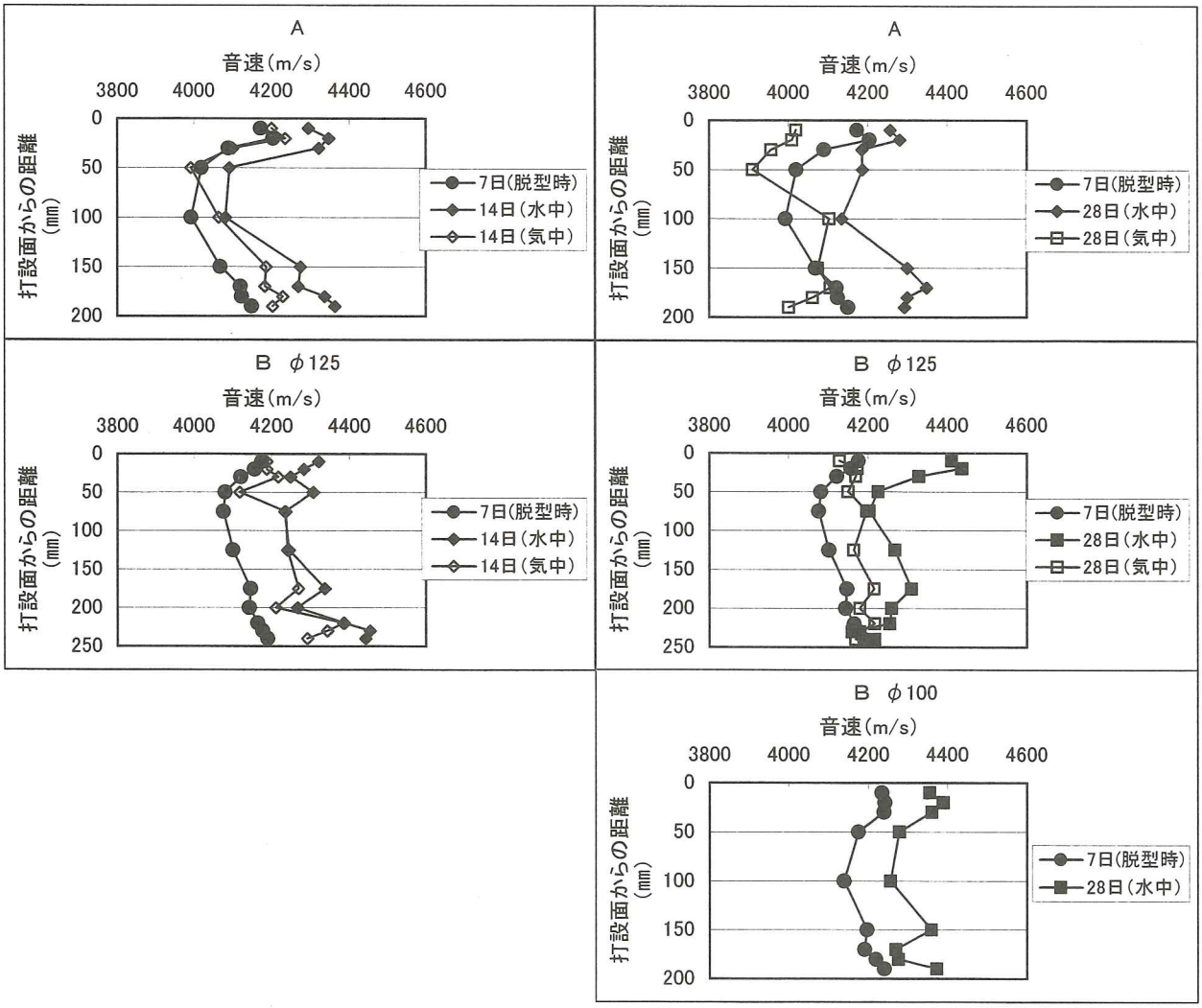
図－6.4.1.3 長手方向と側面の音速比較



図－6.4.1.4 ヤング係数と音速の比較

表－6.4.1.5 管理供試体側面の透過音速 (m/s)

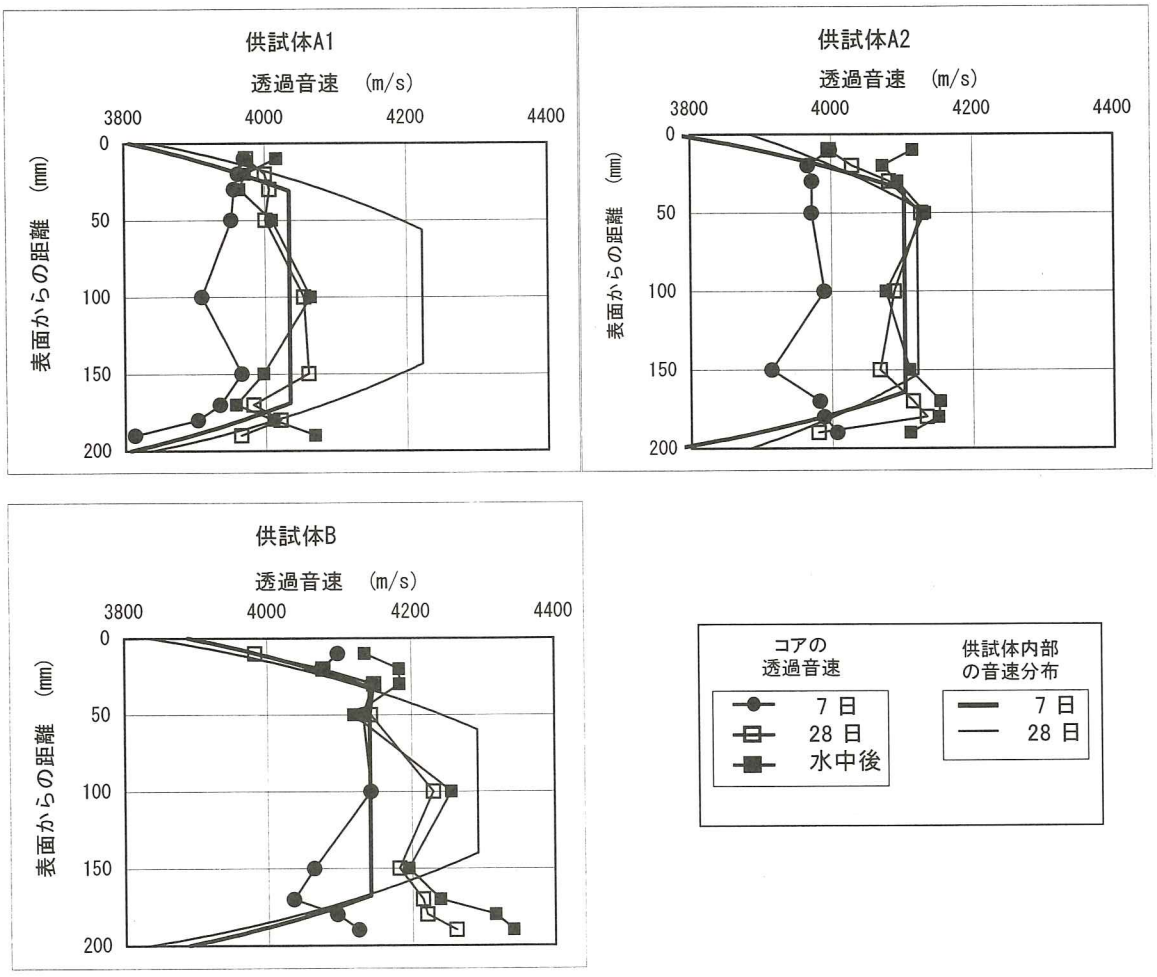
供試体	管理用	打設面距離	7日	14日		28日	
			脱型時	水中	気中	水中	気中
A	φ100×200	10	4173	4295	4201	4257	4019
		20	4205	4347	4236	4282	4009
		30	4091	4321	4103	4185	3956
		50	4020	4093	3992	4188	3910
		100	3993	4083	4065	4134	4103
		150	4069	4274	4187	4300	4074
		170	4121	4269	4184	4349	4106
		180	4125	4336	4230	4300	4061
		190	4150	4363	4204	4293	4001
B	φ125×250	10	4176	4321	4188	4412	4128
		20	4158	4283	4189	4437	4173
		30	4122	4249	4218	4329	4170
		50	4082	4307	4120	4226	4150
		75	4077	4235	4237	4203	4197
		125	4102	4245	4242	4269	4164
		175	4147	4336	4269	4310	4216
		200	4144	4266	4211	4260	4179
		220	4165	4387	4384	4255	4217
		230	4178	4453	4343	4160	4180
		240	4191	4442	4292	4217	4169
	φ100×200	10	4236			4356	
		20	4243			4390	
		30	4241			4361	
		50	4176			4280	
		100	4139			4257	
		150	4198			4360	
		170	4191			4270	
		180	4219			4276	
		190	4241			4373	



図－6.1.4.5 管理供試体の側面音速分布

表－6.4.1.6 コア供試体側面からの透過音速（3本の平均） （m／s）

打設面からの距離(mm)	A1			A2			B		
	7日	28日	水中後	7日	28日	水中後	7日	28日	水中後
10	3971	3974	4016	3999	3996	4115	4098	3983	4135
20	3962	4000	3972	3967	4029	4072	4076	4077	4183
30	3956	4007	3964	3973	4081	4093	4146	4148	4184
50	3952	4001	4010	3972	4127	4133	4133	4143	4119
100	3910	4054	4064	3989	4088	4076	4143	4230	4255
150	3966	4060	3997	3915	4067	4109	4063	4182	4195
170	3935	3983	3958	3982	4114	4153	4035	4215	4239
180	3904	4020	4010	3989	4133	4150	4095	4221	4316
190	3814	3965	4069	4007	3980	4110	4125	4261	4341



図－6.4.1.6 コア側面の透過音速と供試体内部の音速分布の比較

６．５　ボス供試体の圧縮強度

６．５．１　断面積の算出方法

表—6.4.1.4 のボス供試体の圧縮強度は，次の２方法で測定した体積から断面積を算出して求めた。

① **図-6.5.1.1** のように寸法を測定し（寸法法），式（6.5.1.1）によって断面積を算出した。

$$A = (a_1 + a_2) / 2 \times (b_1 + b_2) / 2 \qquad (6.5.1.1)$$

ここに、A：ボス供試体の加圧面積(mm²)、a_1、a_2、b_1、b_2：図－6.5.1.1による加圧面の寸法(mm)である。

ボス供試体の空中質量WAと水中における見かけの質量Wwを測定し（質量法），式(6.5.1.2)によって断面積を算出した。

$$A = \frac{WA - Ww}{L} \qquad (6.5.1.2)$$

ここに，L＝供試体の高さ(mm)である。

６．５．２　寸法法と質量法による圧縮強度の比較

寸法法と質量法によって求めた断面積から圧縮強度を求めた結果を比較すると，**図-6.5.2.1** のように質量法は寸法法より1.6%小さくなった。

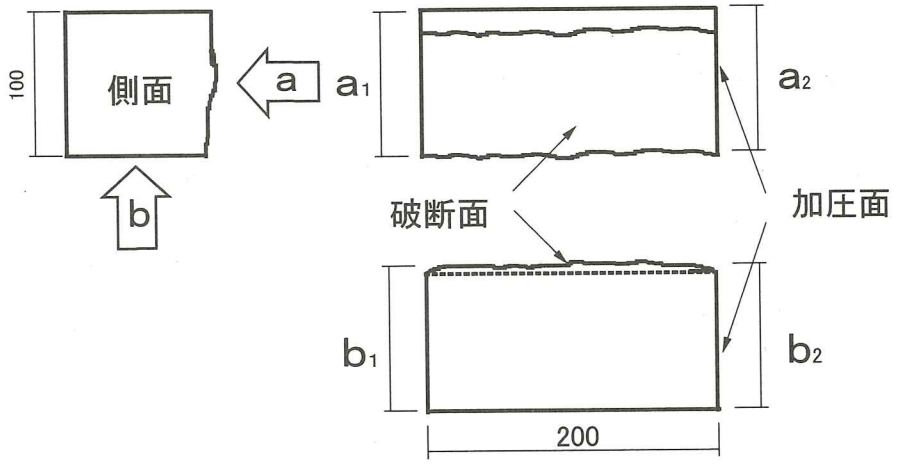
寸法法と質量法の結果を採取位置ごとに比較したのが，**図-6.5.2.2** および**表-6.5.2.1** である。コア強度は**図-6.5.2.2** のように採取位置が高いほど小さくなっていた。ボス供試体の場合も，**図-6.5.2.2** のようにほぼ高いほど小さくなる傾向はあるが，寸法法の場合一部逆の傾向も見受けられる。**表-6.5.2.1** には寸法法と質量法の強度比を示している。右欄は，強度比が１%以下の場合は記号なし，２%以下は＊，２%以上は＊＊である。この結果,材齢３日は強度比の違いが大きいこと,供試体Ｂは材齢にかかわらず違いが大きいことがわかる。また，寸法法は質量法より強度が高い傾向がある。

この結果は，破断面の状況を現している。つまり，若材齢時は強度が小さいため，また供試体Ｂは Gmax が 40 mmであり，しかもボス供試体が大きいだけコンクリートが入る部分も大きくしてあるため、破断面凸凹が大きかったことによる。

以下の検討では質量法の結果を用いた。

６．５．３　ボス強度とコア強度の比較

コア強度を採取位置ごとに示したのが**図-6.5.2.3** である。ボス強度とコア強度を比較したのが**図－6.5.2.4** である。両者はよい相互関係があり、ボス強度はコア強度のほぼ93%になっている。



図－6.5.1.1　ボス供試体の加圧断面積の測定

表-6.5.2.1 ボス供試体の寸法法，質量法による断面積から求めた圧縮強度の比較

材齢（日）	供試体	寸法法 N/mm²	質量法 N/mm²	寸／質	注）
3	A1	18.17	18.25	0.995	
		17.78	18.43	0.965	＊＊
		19.99	19.75	1.012	＊
	A2	20.72	20.42	1.015	＊
		27.15	27.67	0.981	＊
		24.91	25.25	0.987	＊
	B	29.27	27.97	1.046	＊＊
		32.10	30.59	1.049	＊＊
		33.46	31.81	1.052	＊＊
7	A1	20.47	20.45	1.001	
		20.17	20.04	1.007	
		20.97	20.26	1.035	＊
	A2	23.68	23.48	1.009	
		23.91	23.78	1.005	
		26.30	26.04	1.010	
	B	30.73	30.29	1.014	＊
		33.96	32.95	1.031	＊＊
		35.89	35.48	1.012	＊
28	A1	25.20	25.10	1.004	
		24.86	24.76	1.004	
		24.05	23.87	1.007	
	A2	29.35	28.69	1.023	＊＊
		29.84	29.78	1.002	
		29.50	29.04	1.016	＊
	B	38.16	36.98	1.032	＊＊
		39.07	38.71	1.009	＊
		36.49	36.10	1.011	＊

注）なし　1%以下
＊　2%以下
＊＊　2%以上

Bはすべて1%以上，とくに3日は3体ともかなり違う。
3日はAも5/6　1%以上

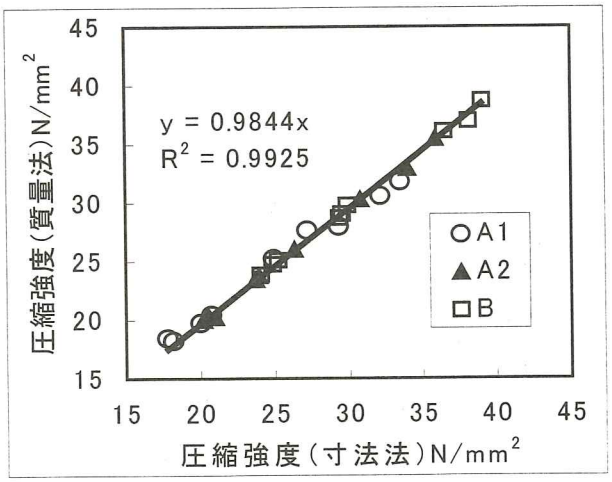
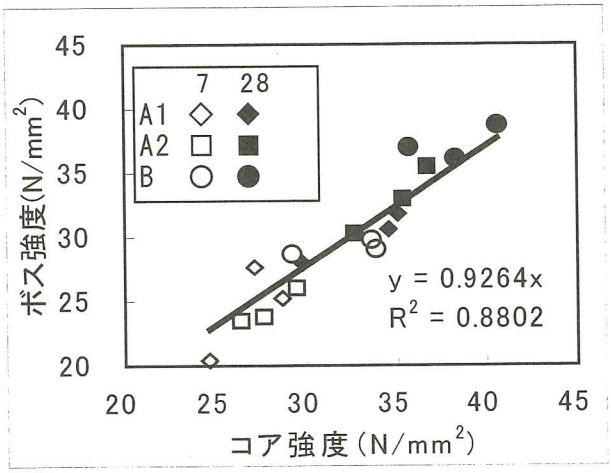
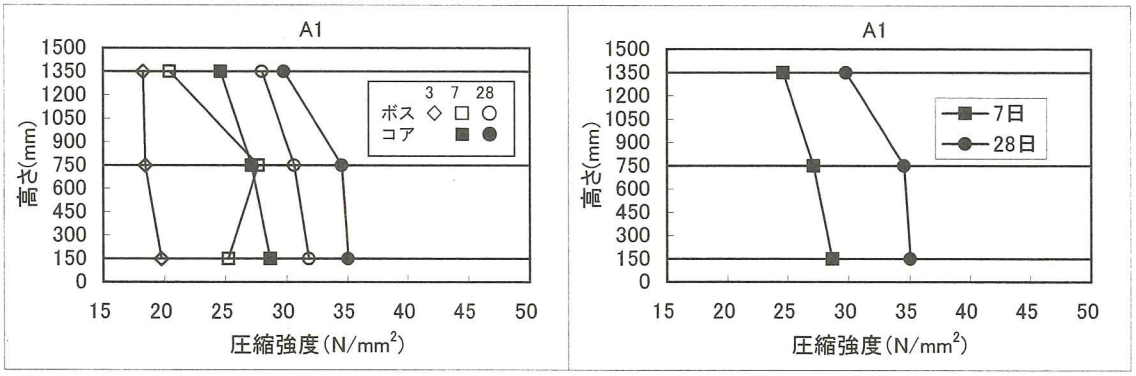
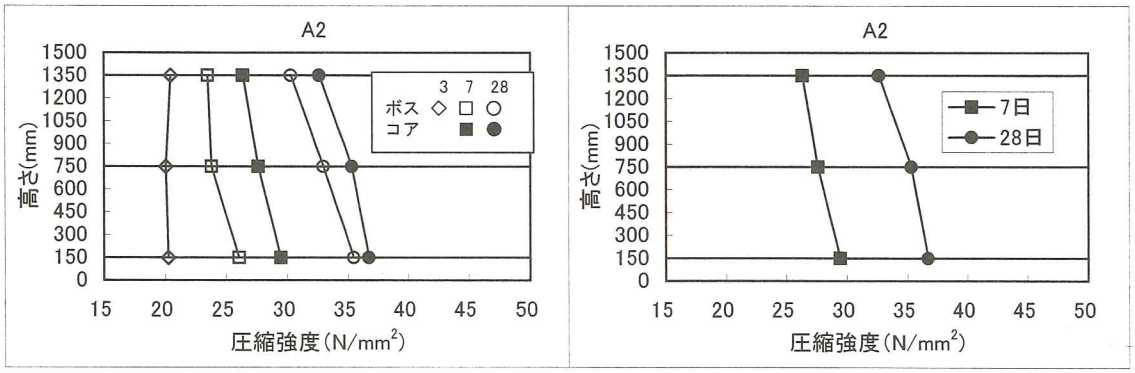


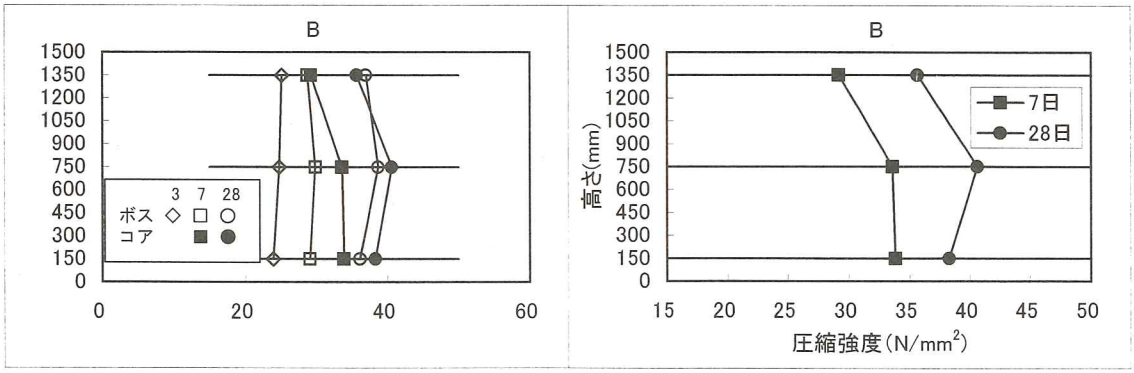
図-6.5.2.1　寸法法，質量法による圧縮強度の比較



図－6.5.2.4　コア強度とボス強度の比較







図－6.5.2.2 ボス供試体の採取位置と質量法、寸法法の比較

図-6.5.2.3 採取位置とコア強度

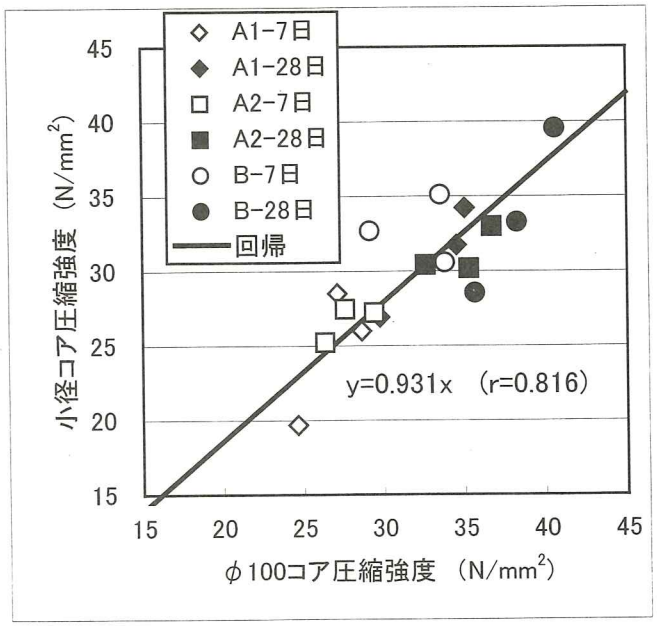
６．６　小径コアによる品質推定

小径コアによる圧縮強度，吸上げ試験結果は**表－6.6.1.1** のとおりであった。

６．６．１　圧縮強度

φ100mm コアの圧縮強度と小径コア強度の関係は**図－6.6.1.1** のとおりであった。小径コア強度は，φ100 の 93%，標準偏差は 2.5N/mm^2 であった。

小径コア強度は，寸法効果を考慮すれば，φ100 コア強度より大きくなることが予想される[6.6.1.1)]。しかし，様々な原因により低下することも報告されており[6.6.1.2)]，φ25mm では 82%となっている。今回の結果は，これらの中間の結果であり，コア採取にともなう側面のきずの影響，両端面の凹凸，直角度などが厳しくなることを考慮するならば，ほぼ妥当な結果と考えられる。



図－6.6.1.1 φ100と小径コア強度の比較

６．６．２　吸上げ率

φ100 コア強度と吸上げ率の関係は，**図－6.6.2.1** のように強度が大きいほど吸上げ率は小さくなっており，緻密になっていることを表している。この関係を次式で回帰すると，

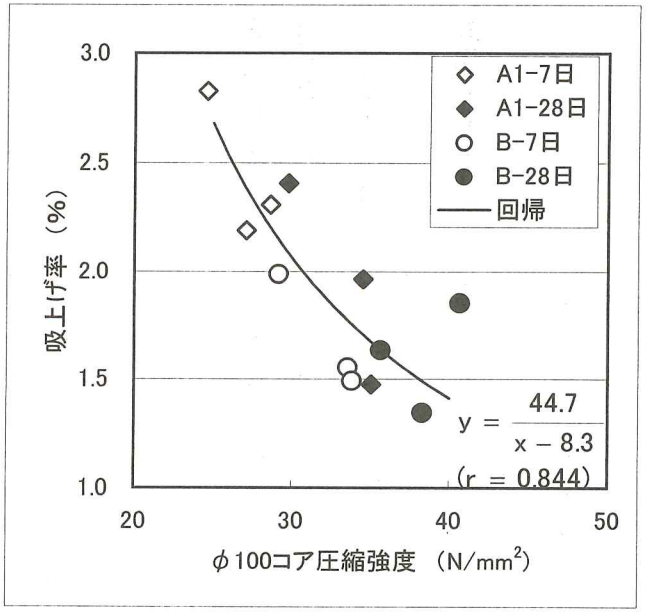
$$y = \frac{b}{x - a} \qquad (6.6.2.1)$$

ここに、a，b は回帰係数であり、a は吸上げ率が無限大になるときの強度であり a ＝8.31、b ＝44.74、相関係数 r ＝0.844 であった。

表－6.6.1.1　小径コアの試験結果

(a) 圧縮強度

供試体	材齢（日）	コア番号	圧縮強度 (N/mm²) 1	2	3	平均
A1	7	CA1-1	19.1	20.5	19.4	19.7
		CA1-2	26.0	17.8	31.0	28.5
		CA1-3	26.2	23.0	28.9	26.0
	28	CA1-4	28.1	25.0	27.6	26.9
		CA1-5	32.1	31.4	30.9	31.7
		CA1-6	37.6	31.0	34.0	34.2
A2	7	CA2-1	23.3	25.4	26.9	25.2
		CA2-2	27.2	–	27.7	27.4
		CA2-3	28.8	25.6	27.2	27.2
	28	CA2-4	28.2	30.7	32.3	30.4
		CA2-5	28.3	25.8	32.1	30.2
		CA2-6	33.3	32.4	33.2	33.0
B	7	CB-1	36.9	33.5	27.6	32.7
		CB-2	36.6	35.6	33.1	35.1
		CB-3	27.5	34.3	29.9	30.6
	28	CB-4	28.3	35.0	22.2	28.5
		CB-5	41.8	–	37.2	39.5
		CA1-7	35.8	31.9	32.0	33.3



図－6.6.2.1 コア強度と吸上げ率の関係

(b) 吸上げ試験

供試体	材齢（日）	コア番号	吸上げ量(g/cm²) 2h	5h	18h	66h	吸上げ率(%) 2h	5h	18h	66h	含水率（%）
A1	7	CA1-1	0.40	0.49	0.62	0.69	1.82	2.22	2.83	3.13	7.07
		CA1-2	0.29	0.38	0.49	0.53	1.29	1.69	2.19	2.39	6.07
		CA1-3	0.31	0.42	0.51	0.58	1.40	1.91	2.31	2.61	6.62
	28	CA1-4	0.35	0.44	0.53		1.60	2.00	2.40		6.51
		CA1-5	0.27	0.33	0.44		1.18	1.47	1.96		6.19
		CA1-6	0.20	0.20	0.33		0.88	0.88	1.47		5.41
B	7	CB-1	0.24	0.33	0.44	0.51	1.09	1.49	1.99	2.29	5.96
		CB-2	0.22	0.29	0.35	0.42	0.97	1.26	1.55	1.84	5.24
		CB-3	0.24	0.29	0.35	0.42	1.03	1.21	1.49	1.77	4.57
	28	CB-4	0.24	0.29	0.38		1.06	1.25	1.63		5.67
		CB-5	0.24	0.31	0.42		1.07	1.36	1.85		5.75
		CB-6	0.18	0.22	0.31		0.77	0.96	1.34		5.00

６．７ 超音波法による品質推定

6.7.1 音速分布および透過音速

表－6.7.1.1 は表面走査法による伝搬時間の測定結果である。距離と見かけの音速の関係は**図－6.7.1.1** のとおりである。この結果から表面音速を求めたのが**表－6.7.1.2**、音速分布の解析結果が**表－6.7.1.3** である。壁供試体の透過音速を**表－6.7.1.4** に示す。

表面音速、内部音速、透過音速を比較したのが**図－6.7.1.2** である。表面音速は遅く、内部音速、透過音速はほぼ同じ速さになっている。ただし、透過音速はほぼ安定して材齢の進行とともに音速も速くなっているが、内部音速は安定していない。表面音速、内部音速の黒印は、測定結果に問題があると考えられるものであり、その場合、表面音速は速く、内部音速は遅くなる傾向がある。

6.7.2 強度推定

表－6.4.1.1 より、圧縮強度、含水率と音速の関係を回帰すると**図－6.7.2.1** のようになった。回帰式は次のとおりである。

供試体Ａ　$V=1734\,fc^{1/6}+75.8w+1173$　(6.7.2.1)

供試体Ｂ　$V=1610\,fc^{1/6}+5.0w+1392$　(6.7.2.2)

内部音速、透過音速から推定した圧縮強度は**表－6.7.2.1** のとおりである。

両方とも、７日材齢と測定位置が上段の場合、コア強度よりもかなり小さく推定されている。28 日の中段と下段は、内部音速の場合、測定に問題があったと考えられる１点を除くと、0.86～1.13 であった。透過音速の場合は、0.90～1.01 であった。

6.7.3 表層の細孔構造と音速分布の関係

壁供試体の上段、中段、下段の、表面から 5、25、50、100㎜ の細孔径分布の測定結果は、**表－6.7.3.1** のとおりである。

表面からの距離と細孔径分布の関係は**図－6.7.3.1** のとおりである。表面(5㎜)では 100nm 付近にピークがあるが、内部ほど小さい方に移動していることがわかる。

上段、中段、下段の表面と内部(100㎜)を比較したのが**図－6.7.3.2** である。また、測定位置ごとに総細孔量を示したのが**図－6.7.3.3** である。違いはわずかであるが、内部ほど、また下部ほど総細孔量は小さくなっており、緻密になっていることがわかる。

音速分布は**図－6.4.1.6** のとおり、材齢 28 日では表面から 50～60㎜ まで音速が変化しており（表層）、総細孔量の分布と近似している。

表-6.7.1.1 表面伝搬時間

材齢3日 (μs)

距離 (mm)	A1			A2			B		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下
94.8	27.0	24.9	24.1	25.3	25.4	26.6	26.4	23.3	24.8
197.8	50.6	51.9	50.9	51.4	52.0	51.1	50.1	49.5	50.1
300	79.3	78.1	79.4	79.0	77.4	77.7	75.8	73.4	76.2
400	108.5	105.3	105.4	107.0	105.8	103.4	101.9	97.3	102.6
500	137.3	134.2	130.9	135.8	130.9	129.6	130.4	126.1	128.5
600	162.6	158.9	156.9	162.0	158.3	157.4	156.0	149.3	151.0
700	189.7	187.0	185.2	188.2	183.6	181.7	179.6	176.5	178.4
800	214.4	213.2	209.2	213.8	210.5	205.9	204.7	202.6	205.0
1000	270.0	266.1	261.5	268.0	263.1	257.0	257.1	258.5	252.5
1200	326.0	322.5	316.1	325.9	319.2	308.4	305.9	308.1	305.8
1400	379.9	374.2	373.4	379.0	370.6	361.2	361.8	357.9	359.2

7日

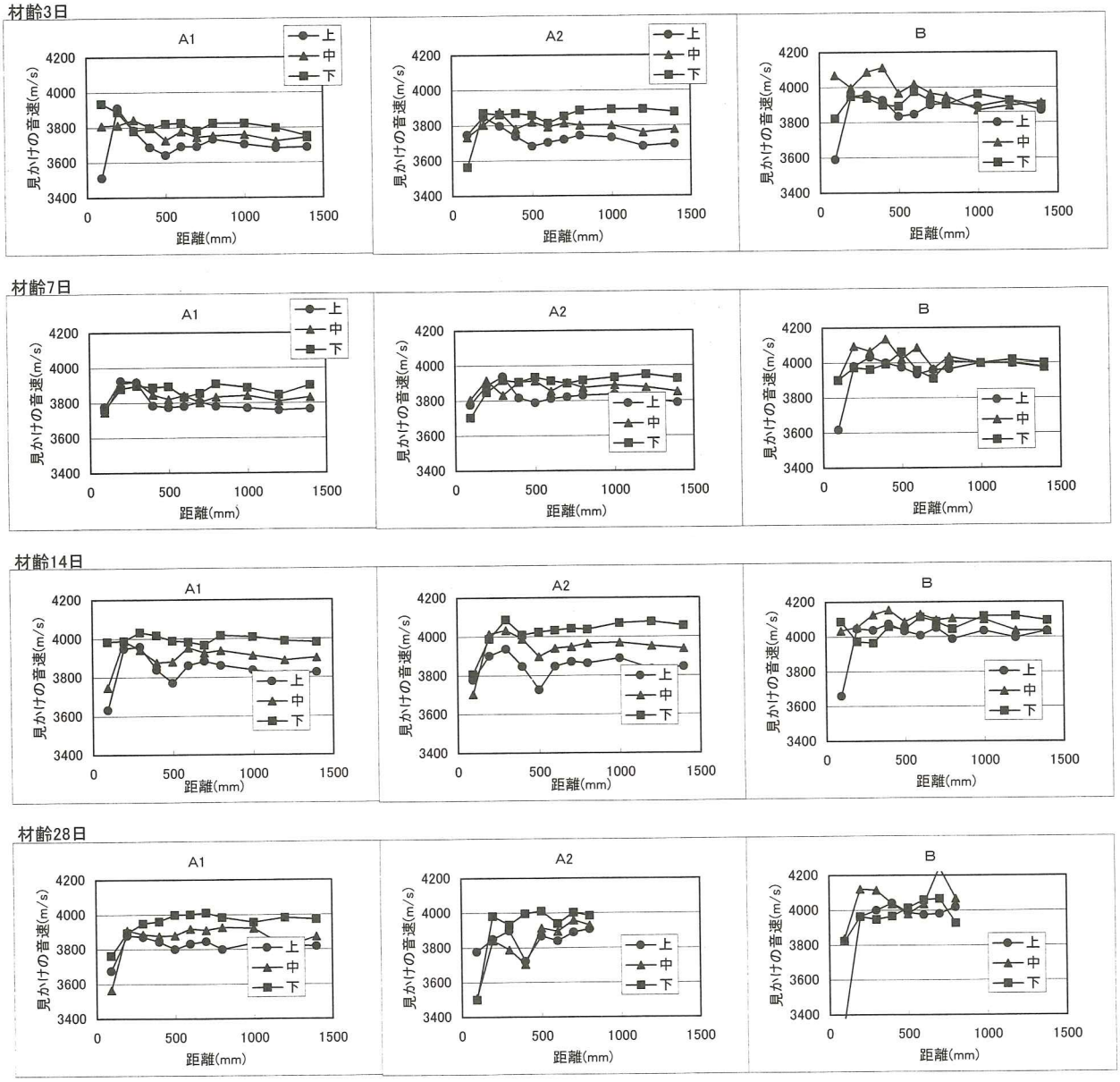
距離 (mm)	A1			A2			B		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下
94.8	25.1	25.3	25.2	25.1	24.9	25.6	26.2	24.3	24.3
197.8	50.4	50.6	51.0	50.9	50.5	51.4	49.7	48.3	49.8
300	76.6	76.5	77.0	76.2	78.3	76.6	74.4	73.8	75.7
400	105.7	104.0	102.9	104.8	102.4	102.4	100.0	96.7	100.2
500	132.5	130.9	128.4	132.0	127.8	127.1	125.8	124.4	123.1
600	158.7	156.2	156.6	157.4	155.7	153.3	152.5	146.8	151.7
700	184.0	184.1	181.6	183.2	179.3	179.6	176.8	176.5	179.0
800	211.6	208.7	204.7	208.9	206.5	204.3	201.8	198.3	199.6
1000	265.2	260.3	257.3	260.7	257.2	254.3	250.1	250.1	250.1
1200	319.4	315.1	312.0	315.3	309.7	303.9	300.3	300.0	298.7
1400	372.0	365.5	358.9	369.5	363.5	356.6	352.5	352.3	350.2

14日

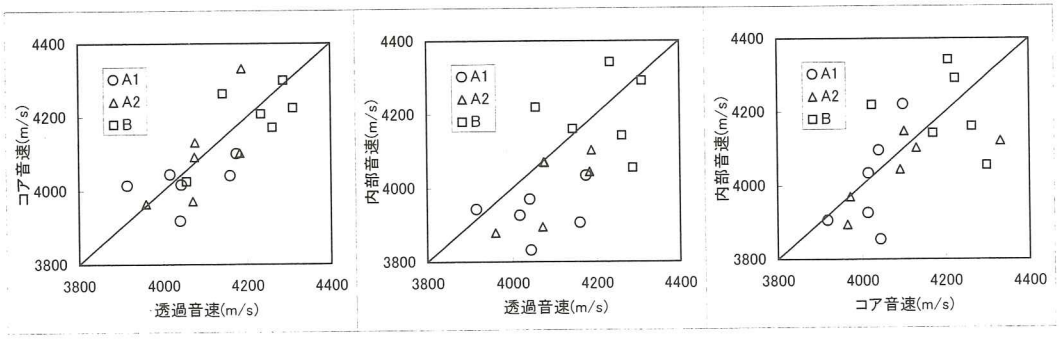
距離 (mm)	A1			A2			B		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下
94.8	26.1	25.3	23.8	25.1	25.6	24.9	25.9	23.5	23.2
197.8	50.1	49.6	49.6	50.7	49.3	49.6	48.9	48.8	49.8
300	75.8	76.1	74.4	76.2	74.4	73.4	74.3	72.7	75.7
400	104.2	103.2	99.6	104.0	100.3	99.8	98.2	96.3	98.6
500	132.6	128.9	125.4	134.2	128.3	124.3	124.0	122.4	123.7
600	155.4	151.8	150.7	156.0	152.3	148.8	149.7	145.3	145.9
700	180.3	178.3	176.5	180.9	177.4	173.2	172.8	170.9	171.3
800	207.2	203.2	199.2	207.1	201.8	198.2	200.7	194.8	197.8
1000	260.6	255.6	249.5	257.2	252.0	245.8	247.9	243.9	242.8
1200	314.9	308.7	300.9	313.2	303.7	294.4	300.4	297.3	291.3
1400	366.0	358.9	351.8	364.1	355.5	345.2	347.1	347.0	342.0

28日

距離 (mm)	A1			A2			B		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下
94.8	25.8	26.6	25.2	25.1	27.0	27.1	28.1	24.7	24.8
197.8	51.0	50.6	50.8	51.4	51.5	49.7	49.9	48.0	49.9
300	77.5	77.2	76.0	77.0	79.2	76.3	75.0	72.9	76.0
400	104.1	103.2	101.0	107.5	108.0	100.1	99.0	99.1	100.9
500	131.6	128.9	125.1	129.3	127.8	124.7	125.4	125.7	124.6
600	156.6	153.2	150.0	156.3	154.1	152.4	151.0	148.7	147.8
700	182.1	179.1	174.6	180.0	176.9	174.9	175.9	164.9	172.2
800	210.6	203.8	200.9	204.8	203.7	200.8	199.1	196.7	203.8
1000	260.8	255.1	252.9	261.2	–	247.6	250.1	–	243.0
1200	313.9	314.9	301.4	–	–	295.8	–	–	293.4
1400	366.9	361.5	352.6	–	–	–	–	–	348.3



図－6.7.1.1　見かけの音速



図－6.7.1.3　コアの音速，透過音速，内部音速の比較

表－6.7.1.2 表面音速

材齢	供試体	位置	回帰係数		相関係数	表面音速
			a	b	r	km/s
3	A1	上	0.269	1.727	0.998	3.724
		中	0.266	1.715	1.000	3.756
		下	0.261	0.542	0.999	3.830
	A2	上	0.265	1.022	1.000	3.770
		中	0.270	2.351	1.000	3.705
		下	0.270	2.327	0.999	3.706
	B	上	0.266	2.516	0.999	3.760
		中	0.254	2.106	1.000	3.944
		下	0.260	1.758	1.000	3.852
7	A1	上	0.265	1.090	0.999	3.777
		中	0.260	0.639	1.000	3.850
		下	0.263	1.572	0.999	3.808
	A2	上	0.257	0.299	0.999	3.892
		中	0.264	1.674	1.000	3.795
		下	0.265	1.916	1.000	3.778
	B	上	0.259	1.966	0.999	3.866
		中	0.253	2.044	1.000	3.957
		下	0.257	1.664	1.000	3.890
14	A1	上	0.259	0.185	0.999	3.867
		中	0.261	1.463	1.000	3.836
		下	0.251	0.099	1.000	3.989
	A2	上	0.260	0.814	0.999	3.845
		中	0.251	0.046	0.999	3.976
		下	0.253	1.365	1.000	3.955
	B	上	0.251	1.131	1.000	3.979
		中	0.247	1.355	1.000	4.045
		下	0.257	1.923	1.000	3.887
28	A1	上	0.262	0.555	1.000	3.814
		中	0.265	1.670	1.000	3.781
		下	0.261	1.804	1.000	3.839
	A2	上	0.266	1.368	0.999	3.763
		中	0.275	2.071	0.999	3.637
		下	0.257	1.440	0.999	3.885
	B	上	0.257	1.522	0.999	3.894
		中	0.247	0.371	0.999	4.048
		下	0.261	1.943	1.000	3.834

表－6.7.1.3 音速分布

材齢	供試体	位置	解析結果		表面音速	表層厚さ	内部音速
			K	ho	m/s	mm	m/s
3	A1	上	2649	30.2	3724	23.2	3942
		中	2664	31.0	3756	22.9	3970
		下	2057	500.0	3830	2.2	3832
	A2	上	2539	52.0	3770	17.1	3879
		中	2775	18.0	3705	28.2	4071
		下	2774	18.1	3706	28.1	4070
	B	上	2868	15.0	3760	29.6	4193
		中	2885	22.8	3944	26.0	4256
		下	2745	29.6	3852	23.4	4083
7	A1	上	2528	55.5	3777	26.2	3926
		中	2414	106.5	3850	16.7	3906
		下	2634	39.9	3808	31.1	4034
	A2	上	2091	500.0	3892	4.0	3895
		中	2649	36.4	3795	32.4	4044
		下	2708	27.9	3778	35.8	4103
	B	上	2790	26.1	3866	36.6	4220
		中	2875	24.4	3957	37.4	4342
		下	2712	36.8	3890	32.2	4142
14	A1	上	2077	500.0	3867	8.9	3874
		中	2561	56.8	3836	47.7	4077
		下	2143	500.0	3989	8.9	3996
	A2	上	2065	500.0	3892	8.9	3852
		中	2136	500.0	3795	8.9	3983
		下	2610	63.9	3778	45.2	4172
	B	上	2544	87.7	3979	38.2	4125
		中	2666	64.6	4045	45.0	4264
		下	2770	29.6	3887	59.4	4339
28	A1	上	2254	192.5	3814	21.5	3854
		中	2594	43.3	3781	53.1	4096
		下	2686	35.6	3839	56.5	4222
	A2	上	2483	63.9	3763	45.2	3970
		中	2658	23.0	3637	62.8	4149
		下	2586	58.5	3885	47.1	4121
	B	上	2621	52.4	3894	49.4	4161
		中	2174	500.0	4048	8.9	4055
		下	2741	28.7	3834	59.9	4291

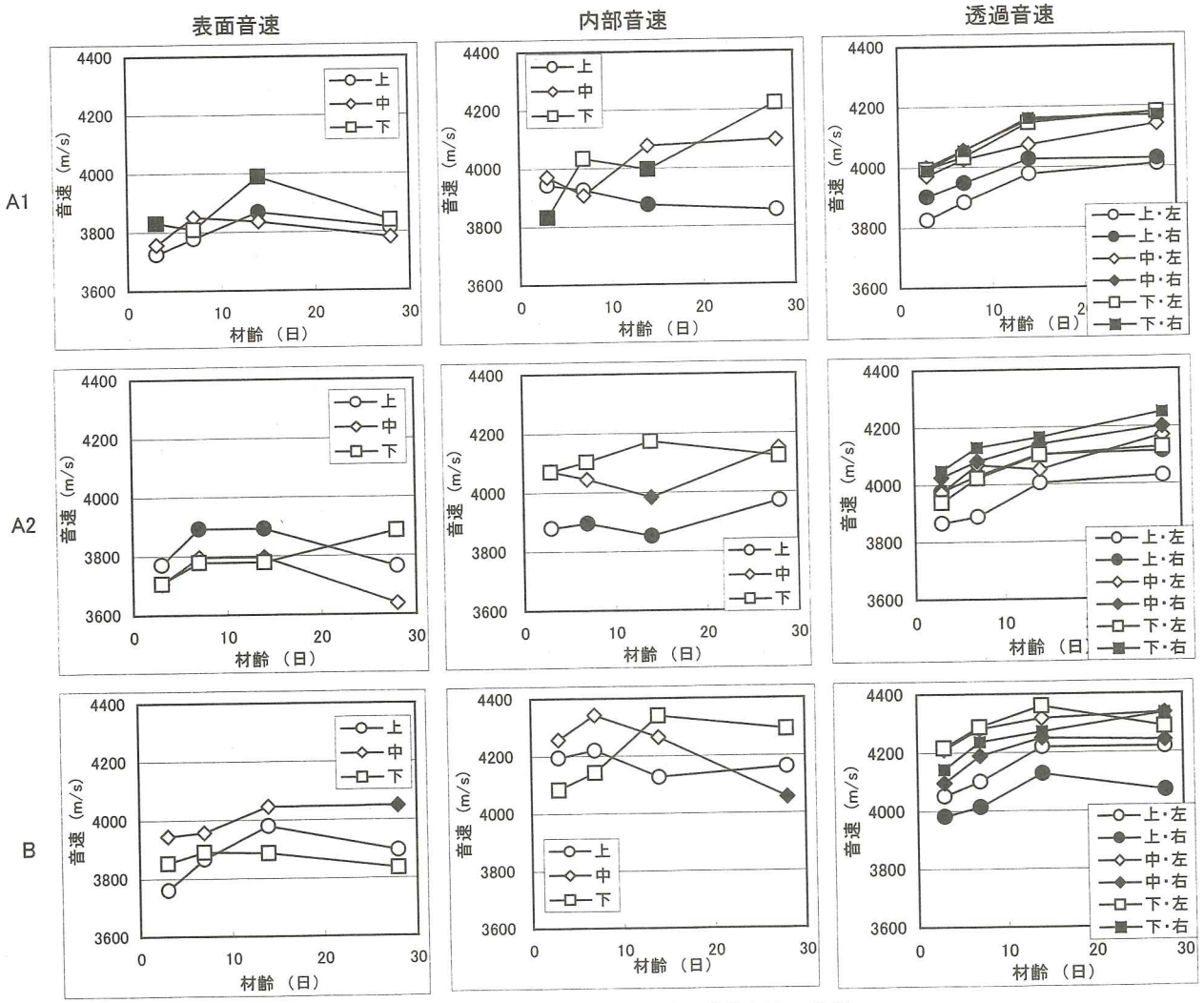
表-6.7.1.4 透過時間・透過音速

（透過時間：υs，透過音速：m/s）

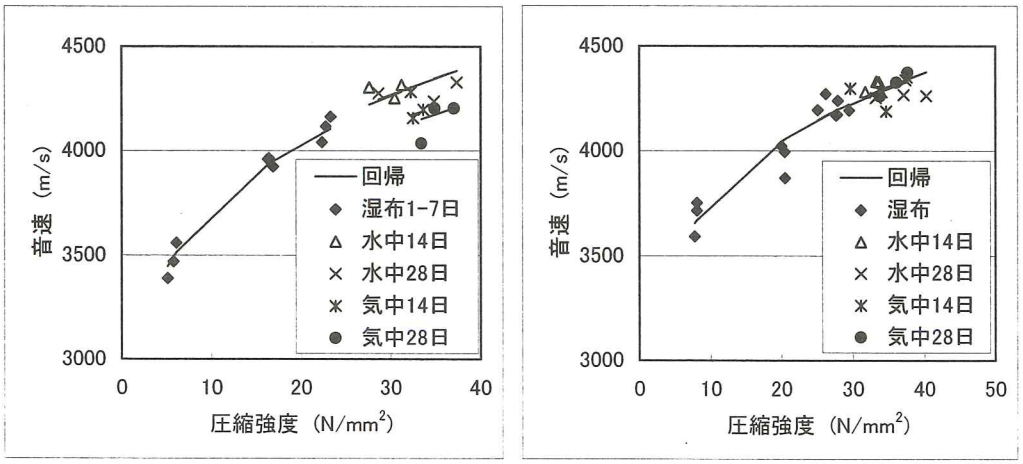
供試体		A1											
測定位置	上下	上				中				下			
	左右	左		右		左		右		左		右	
距離(mm)		距離 201.2		距離 201.7		距離 203.28		距離 204		距離 204.87		距離 203.5	
材齢（日）	3	52.6	3825	51.7	3901	51.2	3970	51.0	4000	51.3	3994	51.0	3990
	7	51.8	3884	51.1	3947	50.5	4025	50.3	4056	50.8	4033	50.2	4054
	14	50.6	3976	50.1	4026	49.9	4074	49.1	4155	49.4	4147	48.9	4162
	28	50.2	4008	50.1	4026	49.1	4140	48.8	4180	49.0	4181	48.8	4170

供試体		A2											
測定位置	上下	上				中				下			
	左右	左		右		左		右		左		右	
距離(mm)		距離 201.4		距離 202.75		距離 202.98		距離 204.06		距離 205.56		距離 205.23	
材齢（日）	3	52.1	3866	51.0	3975	51.1	3972	50.7	4025	52.2	3938	50.7	4048
	7	51.8	3888	50.3	4031	49.9	4068	50.0	4081	51.1	4023	49.7	4129
	14	50.3	4004	49.4	4104	50.1	4051	49.3	4139	50.1	4103	49.3	4163
	28	50.0	4028	49.3	4113	48.7	4168	48.6	4199	49.8	4128	48.3	4249

供試体		B											
測定位置	上下	上				中				下			
	左右	左		右		左		右		左		右	
距離(mm)		距離 202.93		距離 202.21		距離 203.3		距離 203.98		距離 205.34		距離 205.02	
材齢（日）	3	50.1	4050	50.8	3981	48.3	4209	49.8	4096	48.7	4216	49.5	4142
	7	49.5	4100	50.4	4012	47.5	4280	48.7	4189	47.9	4287	48.4	4236
	14	48.1	4219	49.0	4127	47.1	4316	48.0	4250	47.1	4360	48.0	4271
	28	48.1	4219	49.7	4069	46.9	4335	48.1	4241	47.9	4287	47.3	4334



図－6.7.1.2 表面音速，内部音速，透過音速の比較



（a） 供試体A　　（b） 供試体B

図－6.7.2.1 圧縮強度，含水率と音速の関係

図－6.7.2.1 強度推定

供試体	材齢	位置	コア強度	内部音速による推定			透過音速による推定						
				内部音速	強度推定	強度比	透過音速		強度推定		強度比		
							左	右	左	右	左	右	左右平均
A1	3	上		3942	16.6		3825	3901	12.8	15.2			
		中		3970	17.6		3970	4000	17.6	18.8			
		下		＊3832	13.0		3994	3990	18.5	18.4			
	7	上	24.61	3926	16.0	0.650	3884	3947	14.6	16.8	0.593	0.681	0.637
		中	27.12	3906	15.3	0.566	4025	4056	19.8	21.1	0.730	0.778	0.754
		下	28.65	4034	20.2	0.704	4033	4054	20.1	21.0	0.702	0.734	0.718
	14	上		＊3874	17.7		3976	4026	21.9	24.3			
		中		4077	26.9		4074	4155	26.7	31.4			
		下		＊3996	22.8		4147	4162	30.9	31.8			
	28	上	29.77	3854	18.3	0.616	4008	4026	25.2	26.1	0.846	0.878	0.862
		中	34.54	4096	30.0	0.869	4140	4180	32.7	35.4	0.948	1.024	0.986
		下	35.05	4222	38.2	1.091	4181	4170	35.4	34.7	1.010	0.989	0.999
A2	3	上		3879	14.4		3866	3975	14.0	17.8			
		中		4071	21.8		3972	4025	17.7	19.8			
		下		4070	21.7		3938	4048	16.4	20.8			
	7	上	26.36	＊3895	15.0	(0.568)	3888	4031	14.7	20.0	0.559	0.760	0.659
		中	27.63	4044	20.6	0.746	4068	4081	21.6	22.3	0.783	0.805	0.794
		下	29.44	4103	23.3	0.790	4023	4129	19.7	24.6	0.669	0.834	0.752
	14	上		＊3852	16.8		4004	4104	23.2	28.4			
		中		＊3983	22.2		4051	4139	25.6	30.4			
		下		4172	32.5		4103	4163	28.3	31.9			
	28	上	32.63	3970	23.3	0.715	4028	4113	26.2	31.0	0.804	0.951	0.877
		中	35.31	4149	33.3	0.943	4168	4199	34.5	36.6	0.978	1.037	1.008
		下	36.72	4121	31.5	0.859	4128	4249	31.9	40.3	0.870	1.096	0.983
B	3	上		4193	27.7		4050	3981	20.3	17.3			
		中		4256	31.7		4209	4096	28.7	22.4			
		下		4083	21.8		4216	4142	29.1	24.8			
	7	上	29.18	4220	29.3	1.006	4100	4012	22.6	18.6	0.775	0.636	0.705
		中	33.57	4342	37.8	1.126	4280	4189	33.3	27.4	0.992	0.817	0.904
		下	33.83	4142	24.8	0.734	4287	4236	33.8	30.4	0.998	0.897	0.948
	14	上		4125	24.2		4219	4127	28.9	23.7			
		中		4264	32.6		4316	4250	35.5	30.9			
		下		4339	38.0		4360	4271	38.8	32.3			
	28	上	35.66	4161	26.3	0.738	4219	4069	28.8	20.7	0.808	0.581	0.694
		中	40.64	＊4055	20.8	(0.512)	4335	4241	36.7	30.2	0.902	0.742	0.822
		下	38.29	4291	34.6	0.904	4287	4334	33.2	36.6	0.868	0.957	0.912

＊ 音速測定結果問題あり

表－6.7.3.1 細孔径分布測定結果

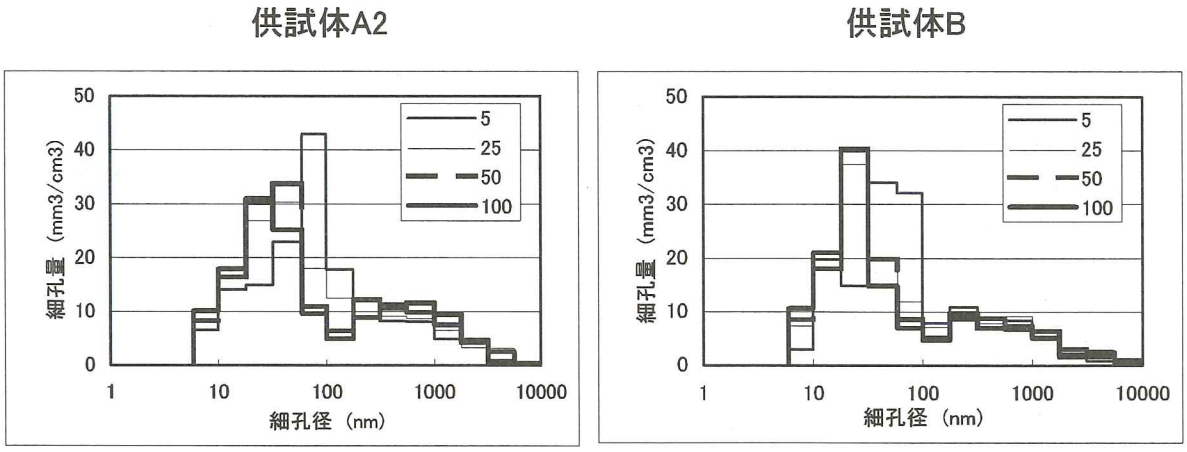
(mm^3/cm^3)

供試体A2　　上，中，下段は供試体の測定位置。その下の数字は表面からの距離(mm)。

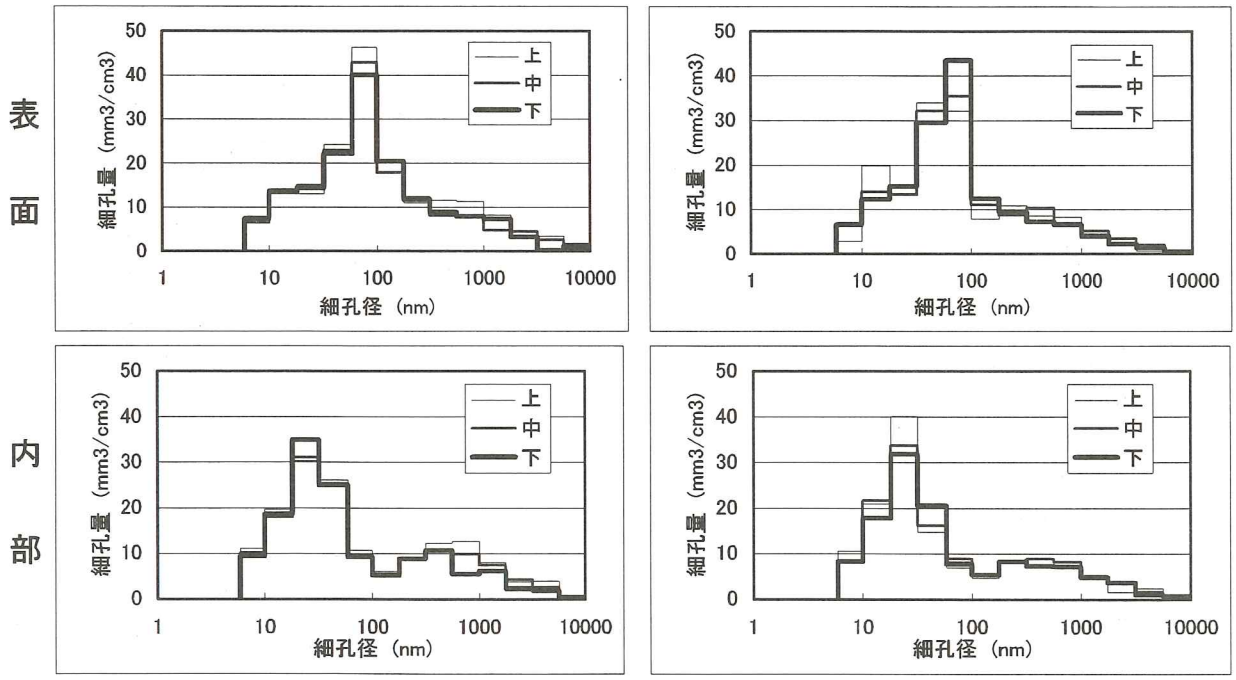
細孔径	上段		中段				下段	
(nm)	5	100	5	25	50	100	5	100
7499～10000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5623～7499	1.12	0.08	0.53	0.27	0.02	0.19	1.31	0.35
4217～5623	1.70	1.73	1.16	1.26	0.00	1.12	0.01	0.53
3162～4217	1.77	2.21	1.42	1.87	0.64	1.38	0.17	1.39
2371～3162	1.61	1.54	1.78	1.45	1.80	2.02	1.20	0.96
1778～2371	1.89	2.31	2.76	1.79	2.81	2.19	2.05	1.33
1334～1778	3.56	2.96	1.57	2.58	3.29	3.07	3.71	3.61
1000～1334	4.67	5.01	3.26	3.88	6.11	4.40	3.61	2.59
750～1000	5.95	6.62	4.10	4.62	5.96	4.86	3.21	3.31
562～750	5.42	6.10	3.94	4.03	5.60	4.94	4.74	2.19
422～562	5.67	6.56	3.67	4.19	5.87	5.30	4.62	3.43
316～422	5.92	5.72	4.49	4.88	5.38	5.31	4.26	7.21
237～316	5.60	4.66	4.29	6.29	5.72	4.67	5.52	4.05
178～237	5.42	3.75	7.82	5.94	6.41	4.17	6.22	4.77
134～178	5.62	2.46	5.10	4.61	1.60	2.79	7.23	1.27
100～134	12.09	3.58	12.71	7.89	4.72	2.12	13.19	3.97
75～100	21.80	4.68	20.94	8.06	4.23	3.45	20.55	3.34
59～75	24.49	6.08	21.95	9.98	6.67	6.15	19.47	5.94
42～59	14.23	11.21	13.33	11.39	10.70	8.10	13.51	9.31
32～42	9.95	14.92	9.61	18.96	22.99	17.07	8.63	15.73
24～32	6.86	18.10	7.68	15.88	18.23	19.24	7.06	20.88
18～24	6.17	12.16	7.21	10.95	11.94	11.75	7.33	14.06
14～18	6.37	10.45	6.84	9.09	8.80	10.31	6.98	9.99
10～14	6.84	9.25	7.15	7.11	7.62	7.61	6.52	8.56
7.5～10	7.20	11.17	6.45	8.13	8.24	10.12	7.44	9.49
TPV	171.92	153.31	159.76	155.11	155.36	142.33	158.53	138.26

供試体B

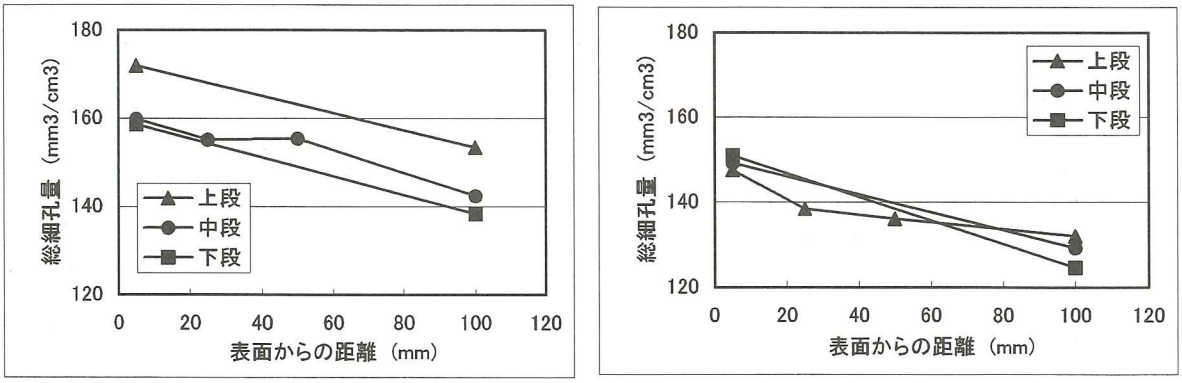
細孔径	上段				中段		下段	
(nm)	5	25	50	100	5	100	5	100
7499～10000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5623～7499	0.03	0.20	0.95	0.44	0.57	0.52	0.48	0.68
4217～5623	0.71	0.05	0.16	1.02	1.00	0.75	0.18	0.26
3162～4217	0.00	0.88	1.38	1.42	1.01	0.76	1.17	0.75
2371～3162	0.00	1.35	1.05	0.89	1.39	1.20	1.06	1.06
1778～2371	2.23	1.76	1.96	0.68	1.96	2.25	1.20	2.62
1334～1778	2.88	1.95	3.04	2.33	2.46	1.54	2.46	2.35
1000～1334	2.41	3.42	3.31	2.74	2.73	3.48	1.59	2.48
750～1000	4.03	4.74	3.06	3.85	3.60	4.15	3.38	3.63
562～750	4.23	4.44	4.21	2.93	3.20	4.06	3.12	3.53
422～562	4.16	3.44	3.06	3.98	5.00	4.29	3.01	3.29
316～422	4.48	4.41	3.93	4.77	5.31	4.53	4.21	3.99
237～316	4.71	4.70	4.73	4.69	4.71	4.54	4.42	4.35
178～237	6.18	3.94	4.91	4.00	3.97	3.79	5.02	3.90
134～178	1.68	2.44	1.94	2.13	4.33	1.25	4.58	2.55
100～134	6.14	4.68	3.22	2.54	6.71	3.77	7.85	2.75
75～100	11.23	4.67	3.21	3.22	12.87	3.50	17.40	2.68
59～75	20.91	7.21	5.40	3.74	22.60	5.35	26.15	5.08
42～59	21.56	7.01	6.94	5.45	21.42	5.76	19.64	7.81
32～42	12.49	12.73	12.84	9.37	10.71	10.41	9.88	12.74
24～32	7.61	22.27	23.83	21.06	7.13	16.88	7.53	17.10
18～24	7.20	15.24	16.44	19.12	6.22	16.85	7.64	14.77
14～18	9.96	11.00	10.95	12.39	6.66	11.91	6.76	9.42
10～14	9.78	8.56	7.03	8.60	7.30	9.69	5.53	8.42
7.5～10	2.85	7.30	8.51	10.60	6.30	7.98	6.60	8.29
TPV	147.48	138.40	136.06	131.96	149.18	129.20	150.88	124.51



図－6.7.3.1 細孔径分布（表面からの距離の違い）



図－6.7.3.2 細孔径分布（測定位置高さの違い）



図－6.7.3.3 表面からの距離と総細孔量の関係

6．8　衝撃弾性波法の測定結果

6.8.1 弾性波 G（Knocker）

6.8.1.1 実験目的

5．8に示した通り、コンクリートの厚さが分かっている場合において、内部で多重反射する弾性波の振動数 f_0 を測定し、実際の厚さ D から往復弾性波速度 V_P を（式 6.8.1.1）により求めると、V_P はコンクリートの内部強度と強い相関関係があり、この関係を利用したコンクリートの品質推定が期待できる。

$$V_P=2D\cdot f_0 \qquad (式\ 6.8.1.1)$$

厚さが分からない場合はコンクリート表面で表面弾性波速度を正確に、往復弾性波速度と等しくなるよう測定し、往復弾性波速度と内部強度との相関関係を利用した品質推定が期待できる。

今回は 6.2 に示す粗骨材の最大寸法の異なる供試体 A・B を用いて、①～③の実験をした。①管理供試体を用いて往復弾性波速度を測定し圧縮強度との関係を調べ、この関係を利用して実構造物と想定した供試体 A・B のボス供試体、壁供試体で圧縮強度を推定した。②供試体は粗骨材最大寸法、養生方法、打設面からの深さが異なり、コンクリート品質が異なる。条件の変化により、往復弾性波速度どの様な変化をするのか比較した。③表面弾性波速度と往復弾性波速度測定結果を比較して、表面弾性波速度で厚さ測定、品質推定を行なえる条件を検討した。

6.8.1.2 実験内容

表－6.8.1.1　品質推定実験に用いた供試体および測定内容

供試体		粗骨材最大寸法 (mm)	試験片名称	養生状況		圧縮強度測定	衝撃弾性波法による測定			
							①往復弾性波速度測定		②表面弾性波速度測定	
				材齢（日）	方法	材齢（日）	材齢（日）	測定方法	材齢（日）	測定方法
A	A1	25	管理供試体	1～7	湿布	1,3,7,14,28	1,3,7,14,28	測定面：打設面	－	
				8～	水中、気中					
			ボス供試体	1～7	湿布	3,7,28	3,7,28	測定面：打設面	－	
				8～	気中					
			壁供試体	1～7	湿布	7,28	3,7,14,28	測定位置：コア採取位置全9点	3,7,14,28	位置：コア採取位置 上，中，下段3点 センサ間隔：200mm
				8～	気中					
	A2		ボス供試体	1～7	湿布	3,7,28	3,7,28	測定面：打設面	－	
				8～	気中					
			壁供試体	1～7	湿布	7,28	3,7,14,28	測定位置：コア採取位置全9点	3,7,14,28	位置：コア採取位置 上，中，下段3点 センサ間隔：200mm
				8～	気中					
B		40	管理供試体	1～7	湿布	1,3,7,14,28	1,3,7,14,28	測定面：打設面	－	
				8～	水中、気中					
			ボス供試体	1～7	湿布	3,7,28	3,7,28	測定面：打設面	3,7,28	測定面：打設面 センサ間隔：100mm
				8～	気中					
			壁供試体	1～7	湿布	7,28	3,7,14,28	測定位置：コア採取位置全9点	3,7,14,28	位置：コア採取位置 上，中，下段3点 センサ間隔：200mm
				8～	気中					

実験に用いた供試体および実験内容を**表－6.8.1.1** に示す。粗骨材の最大寸法は供試体 A で 25mm、B で 40mm と異なる。実験した材齢は 1～28 日までの 5 日間で、養生方法は 7 日までは湿布養生とし、その後は気中養生と水中養生に分かれる。測定位置は管理供試体、ボス供試体では打設面の中心付近とした。壁供試体では往復弾性波速度については、側面の打設面からの深さが異なる 3 点（打設面、中央、底面）の左側、中央、右側にあるコア採取位置 9 ヶ所、表面弾性波速度については、側面にあるコア採取位置で打設面からの深さが異なる 3 点（上、中、下）の中心付近とした。

その他の表面弾性波速度、往復弾性波速度の測定方法は、5.8.2 に示した測定方法と同様である。

6.8.1.3 測定結果

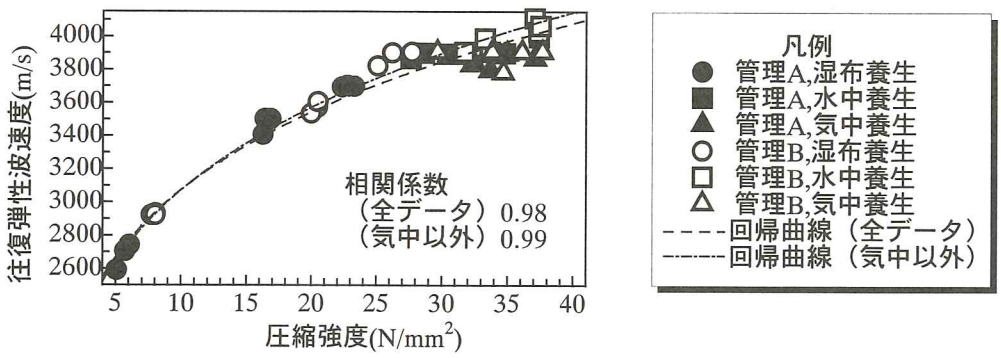
（1）強度推定結果

1）往復弾性波速度と圧縮強度の関係

管理供試体で測定した圧縮強度、往復弾性波速度を**表－6.8.1.2** に、両者の関係を**図－6.8.1.1** に示す。

表－6.8.1.2 管理供試体での測定結果

試験片名称	供試体	湿布養生			水中養生			気中養生		
		材齢（日）	圧縮強度 (N/mm^2)	往復弾性波速度(m/s)	材齢（日）	圧縮強度 (N/mm^2)	往復弾性波速度(m/s)	材齢（日）	圧縮強度 (N/mm^2)	往復弾性波速度(m/s)
管理供試体	A	1	5.07	2592	14	31.23	3895	14	32.25	3832
			5.72	2707		27.63	3868		32.51	3832
			6.04	2744		30.43	3895		33.65	3797
		3	16.26	3409	28	34.82	3898	28	33.45	3900
			16.87	3503		37.37	3996		37.06	3868
			16.41	3503		28.66	3900		34.93	3898
		7	22.75	3705						
			23.29	3700						
			22.35	3696						
	B	1	7.71	2925	14	33.64	3908	14	29.64	3908
			8.03	2934		33.27	3986		34.00	3906
			8.00	2924		31.72	3906		34.65	3784
		3	20.43	3571	28	37.04	4110	28	37.62	3908
			19.96	3537		37.33	4027		33.80	3908
			20.49	3605		37.50	4064		36.07	3906
		7	27.71	3908		40.22	4026			
			26.22	3903		33.18	4089			
			25.09	3823		37.86	4087			
			27.93	3793						
			27.77	3774						
			29.47	3702						



図－6.8.1.1 管理供試体による往復弾性波速度と圧縮強度の関係

供試体 A、B では粗骨材の最大寸法が異なるが、図より、供試体 A、B による往復弾性波速度と圧縮強度

の関係に違いは見られず、両者は強い相関関係にある。また、気中養生では湿布、水中養生での関係と異なる結果となった。５．８の黒磯での実験結果と同様に、気中養生での結果を除いた場合の圧縮強度f_Cと往復弾性波速度V_Pの関係式を最小二乗法により求め、次の関係式を相関係数0.99で得た。

$$f_C = e^{-34.4} \cdot V_P^{4.57} \qquad \text{(式 6.8.1.2)}$$

２）ボス供試体と壁供試体での圧縮強度推定結果

ボス供試体、壁供試体で往復弾性波速度、表面弾性波速度を測定し、（式 6.8.1.2）で圧縮強度を推定した。ボス供試体での推定結果および実際に測定した圧縮強度と比較した結果を**表－6.8.1.3** に示す。

表－6.8.1.3 ボス供試体での強度推定結果

供試体	材齢（日）	養生方法	圧縮強度 (N/mm²)	往復弾性波			表面弾性波		
				速度 (m/s)	推定強度 (N/mm²)	比率	速度 (m/s)	推定強度 (N/mm²)	比率
A1	3	湿布	18.17	3511	18.32	1.008	—		
			17.78	3630	21.34	1.200			
	7		20.72	3603	20.62	0.995			
			27.15	3679	22.69	0.836			
			24.91	3748	24.68	0.991			
	28	気中	29.27	3847	27.82	0.950			
			32.10	3892	29.34	0.914			
			33.46	3958	31.67	0.946			
A2	3	湿布	20.47	3611	20.84	1.018	—		
			20.17	3613	20.89	1.036			
			20.97	3711	23.59	1.125			
	7		23.68	3736	24.33	1.028			
			23.91	3776	25.55	1.068			
			26.30	3824	27.06	1.029			
	28	気中	30.73	3914	30.10	0.980			
			33.96	3902	29.69	0.874			
			35.89	3971	32.17	0.896			
B	3	湿布	25.20	3781	25.70	1.020	3918	30.26	1.201
			24.86	3784	25.80	1.038	3687	22.92	0.922
			24.05	3746	24.65	1.025	4019	33.98	1.413
	7		29.35	3898	29.56	1.007	4045	35.00	1.192
			29.84	3828	27.19	0.911	4085	36.59	1.226
			29.50	3873	28.69	0.973	4019	33.98	1.152
	28	気中	38.16	4145	39.13	1.026	4139	38.86	1.018
			39.07	4149	39.28	1.005	4223	42.59	1.090
			36.49	4152	39.42	1.080	4223	42.59	1.167

表より、実際の圧縮強度と推定強度を比較すると、往復弾性波速度による湿布養生の供試体での推定で最も推定精度が良くなり、平均誤差は5.27％となった。気中養生では、平均誤差は6.11％と推定精度が若干悪くなった。表面弾性波速度を用いた推定では、養生方法に関係なく全体的に精度が悪くなり、平均誤差は17.09％となった。養生方法が異なると、圧縮強度と往復弾性波速度の関係が変化することと、表面弾性波速度は往復弾性波速度と完全には一致せず、これらは圧縮強度推定結果に影響することが示された。

壁供試体での推定結果および実際に測定した圧縮強度と比較した結果を**表－6.8.1.4** に示す。表より、実際の圧縮強度と推定強度を比較すると、壁供試体では養生方法や往復弾性波速度・表面弾性波速度によって推定精度に差は見られなかった。往復弾性波速度での平均誤差は 14.79％、表面弾性波速度での平均誤差は

9.19%とボス供試体と比較すると全体的に推定精度は悪くなった。壁供試体では材齢 3 日まで気温が低下したので電気毛布を掛け、養生中の温度が打設面から底面の位置によって異なった。養生方法が異なる場合、圧縮強度と往復弾性波速度の関係が変化することは先に述べたが、この様な養生状況の変化によってもその関係は変化し、圧縮強度の推定結果に影響すると考えられる。

表－6.8.1.4 壁供試体での強度推定結果

供試体	材齢（日）	養生方法	測定深さ	圧縮強度 (N/mm^2)	往復弾性波			表面弾性波		
					速度 (m/s)	推定強度 (N/mm^2)	比率	速度 (m/s)	推定強度 (N/mm^2)	比率
A1	7	湿布	上	24.61	3839	27.55	1.120	3852	27.98	1.137
			中	27.12	3875	28.76	1.060	3956	31.59	1.165
			下	28.65	3984	32.65	1.140	3987	32.76	1.143
	28	気中	上	29.77	4062	35.66	1.198	3918	30.26	1.016
			中	34.54	4092	36.88	1.068	3888	29.20	0.845
			下	35.05	4212	42.10	1.201	4013	33.73	0.962
A2	7	湿布	上	26.36	3862	28.31	1.074	3894	29.40	1.116
			中	27.63	3943	31.15	1.127	3805	26.46	0.958
			下	29.44	4098	37.13	1.261	3858	28.18	0.957
	28	気中	上	32.63	4130	38.48	1.179	3912	30.04	0.921
			中	35.31	4095	37.01	1.048	3870	28.58	0.809
			下	36.72	4275	45.04	1.226	4032	34.48	0.939
B	7	湿布	上	29.18	4066	35.82	1.228	3900	29.62	1.015
			中	33.57	4031	34.45	1.026	4019	33.98	1.012
			下	33.83	4102	37.30	1.102	3981	32.52	0.961
	28	気中	上	35.70	4241	43.44	1.217	3962	31.82	0.891
			中	40.60	4146	39.17	0.965	4058	35.52	0.875
			下	38.30	4406	51.73	1.351	3962	31.82	0.831

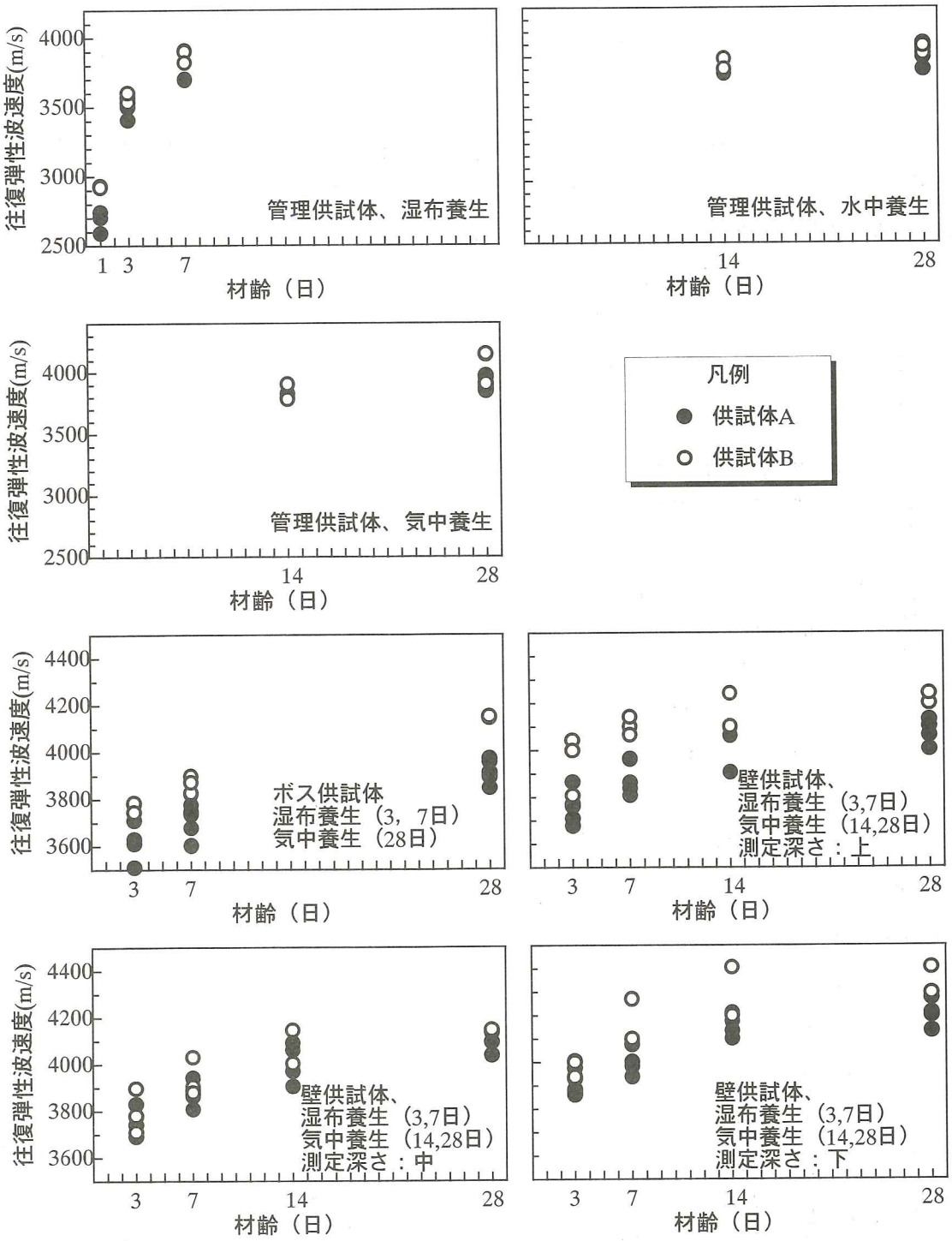
（2）コンクリートの品質の違いによる往復弾性波速度の変化について

表－6.8.1.5 に壁供試体で圧縮強度を測定したとき以外に測定した、往復弾性波速度と表面弾性波速度の全測定結果を示す。**表－6.8.1.2～表－6.8.1.5** の全速度測定結果より、次の１）～３）について比較した。

表－6.8.1.5 壁供試体での全速度測定結果

材齢（日）	測定深さ	供試体	往復弾性波速度(m/s)	表面弾性波速度(m/s)	供試体	往復弾性波速度(m/s)	表面弾性波速度(m/s)	供試体	往復弾性波速度(m/s)	表面弾性波速度(m/s)
3	上	A1	3773	3737	A2	3763	3900	B	4000	4006
			3765			3866			4044	
			3711			3678			3809	
	中		3743	3823		3778	3823		3898	3811
			3693			3831			3781	
			3711			3711			3711	
	下		3885	3799		3931	4000		4002	4019
			3878			3977			4006	
			3862			3874			3939	
7	上		3963	3852		3965	3894		4143	3900
			3809			3809			4102	
	中		3892	3956		3864	3805		3881	4019
			3809			3809			3906	
	下		4079	3987		4076	3858		4270	3981
			3939			4004			4102	
14	上		4062	3918		4097	3900		4241	4006
			3906			3906			4102	
	中		4092	3943		4062	3906		4146	4072
			3971			3906			4004	
	下		4212	4026		4175	4006		4406	4026
			4102			4134			4199	
28	上		4004	3918		4102	3912		4199	3962
	中		4036	3888		4036	3870		4134	4058
	下		4134	4013		4199	4032		4297	3962

1）供試体A・B（粗骨材の最大寸法の違い）による比較



図－6.8.1.2 供試体A·Bでの往復弾性波速度測定結果比較

供試体A・Bでの往復弾性波速度測定結果について、供試体、養生方法および測定深さ毎に比較した結果を**図－6.8.1.2** に示す。先ず、供試体、養生方法、打設面からの深さに関係なく、材齢が経過すると往復弾性波速度は速くなることが図より確認できる。

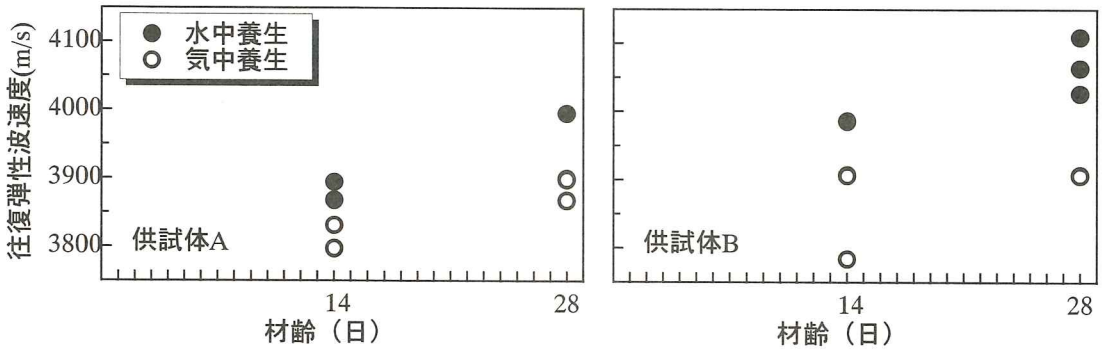
供試体AとBでは**表－6.2.1.1** の通り、粗骨材の量に違いはないが、供試体Aでは最大寸法が25mmであるのに対し、供試体Bでは最大寸法40mmの粗骨材②が使用されている。また、単位水・セメント量は供試

体 A で 160・320kg/m^3、B で 153・309kg/m^3 である。一般に最大寸法の大きい粗骨材を用いれば、この寸法範囲内では、所要の強度を得るための単位水・セメント量を減らせることになる[6.8.1.1)]。しかし、供試体 A・B では単位水・セメント量に余り差が無く、粗骨材の最大寸法が大きい供試体 B の圧縮強度が強くなることが考えられる。

図－6.8.1.2 を見ると、管理供試体での気中養生を除いて供試体 B での往復弾性波速度が供試体 A より速くなる傾向が見られた。これは、前記の性質により供試体 B の圧縮強度が供試体 A より強くなっていることを示している。また管理供試体での気中養生では、**表－6.8.1.2** より供試体 A と B の圧縮強度自体に差が無く、養生方法によっては前記の性質が成立しないと考えられる。

以上から、コンクリートの配合および養生方法の違いによるコンクリートの品質の変化を、往復弾性波速度測定結果から確認できることが分かった。

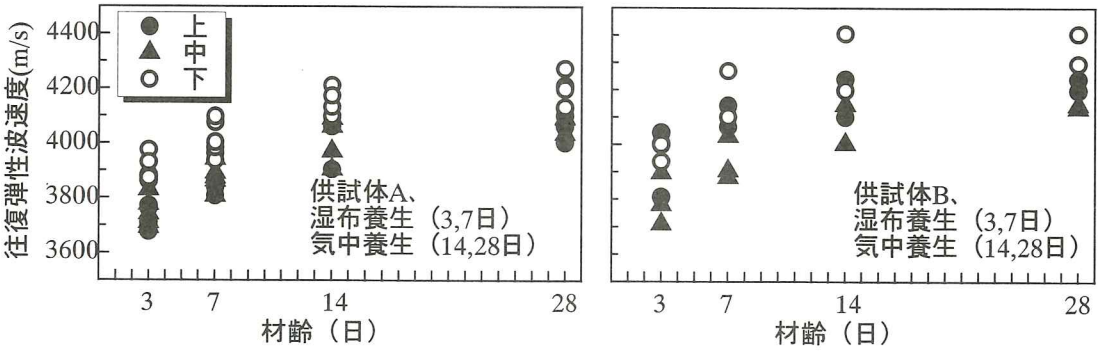
2）養生方法による比較



図－6.8.1.3 水中養生・気中養生での往復弾性波速度測定結果比較

同日に測定した、養生方法が気中・水中と異なる管理供試体での往復弾性波速度測定結果の比較を**図－6.8.1.3** に示す。図より水中養生では往復弾性波速度が速くなることが示された。しかし、**表－6.8.1.2** より両者の圧縮強度には差はない。５．８に示した、圧縮強度では確認できない養生方法の違いを往復弾性波速度により確認できること、また、往復弾性波速度から圧縮強度を推定するには養生方法を考慮する必要があること、これらがここでも示された。

3）測定深さ位置による比較



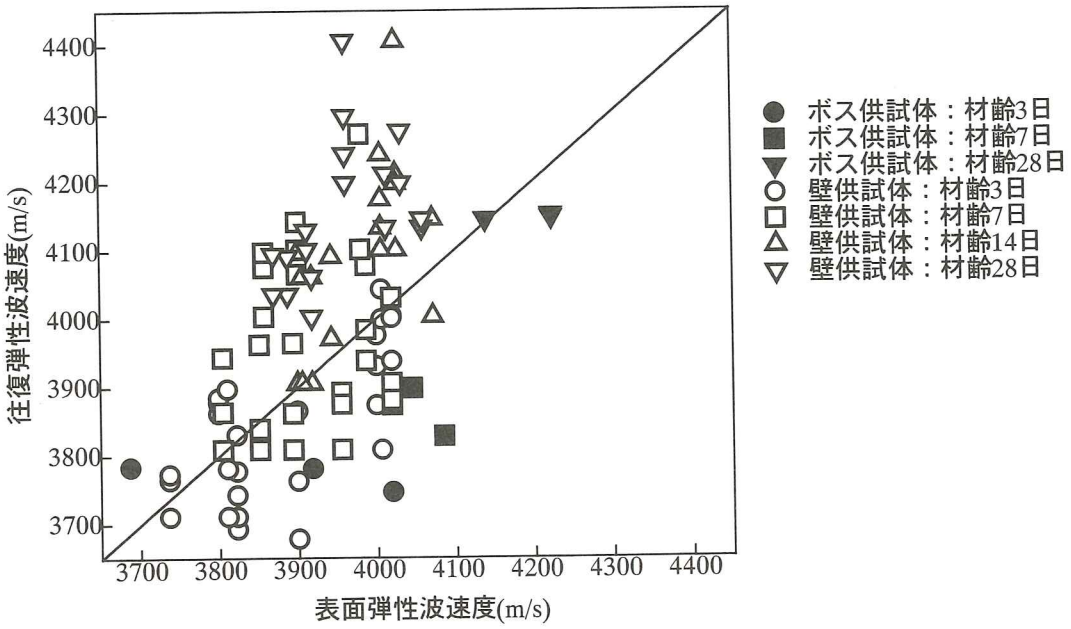
図－6.8.1.4 壁供試体 A･B での測定深さ位置の変化による往復弾性波速度測定結果比較

壁供試体では測定位置を側面にあるコア採取位置で、打設面側の上、中、底面側の下と深さを変えて往復弾性波速度を測定したが、この結果を比較したものを**図－6.8.1.4** に示す。打設面から深くなると品質の違

いにより内部強度が強くなるといわれており、表－6.8.1.4 より圧縮強度の測定結果もこの結果となった。しかし、往復弾性波速度は下では他と比べ速度は速くなったが、上と中では大きな差は見られなかった。

前述の通り、壁供試体では養生中の温度が位置によって異なったが、養生条件の変化によってコンクリート品質と往復弾性波速度の関係が変化することがここでも示された。

（3）表面弾性波速度と往復弾性波速度の測定結果比較



図－6.8.1.5 水中養生・気中養生での往復弾性波速度測定結果比較

表面弾性波速度は、厚さが分からないコンクリート構造物において、往復弾性波速度と一致することが条件で、厚さ測定、コンクリートの品質推定に利用できる。図－6.8.1.5 にボス供試体、壁供試体で測定した表面弾性波速度と往復弾性波速度の関係を示す。材齢 7 日以内では表面弾性波速度は往復弾性波速度より速く、さらに、往復弾性波速度が 4100m/s 以上では表面弾性波は往復弾性波速度より遅くなっている。つまり、厚さ測定・品質推定に表面弾性波速度が利用できる条件は、①材齢が 8 日以上、で②弾性波速度が 4100m/s 未満と非常に限定される結果となった。

①の原因については、この材齢のコンクリートでは表面のみが乾燥していると考えられ、対処は困難であるが、②については、今回の実験ではセンサー間距離をボス供試体で 100mm、壁供試体で 200mm と固定して、表面弾性波の到達時間差から速度を測定したため、速度が速い場合での測定精度が悪くなったものと考えられる。

黒磯実験での大型供試体、新設舗装版では、センサー間隔を 100～600mm と変えて、センサー間隔と表面弾性波の到達時間差との関係から速度を測定する方法を用いた。今後は鉄筋の影響を考慮しながら、このように平均的に表面弾性波速度をより正確に測定し、表面弾性波が往復弾性波速度として利用できるかを確認する必要がある。

6.8.1.4 衝撃弾性波法によるコンクリート品質推定実験結果考察

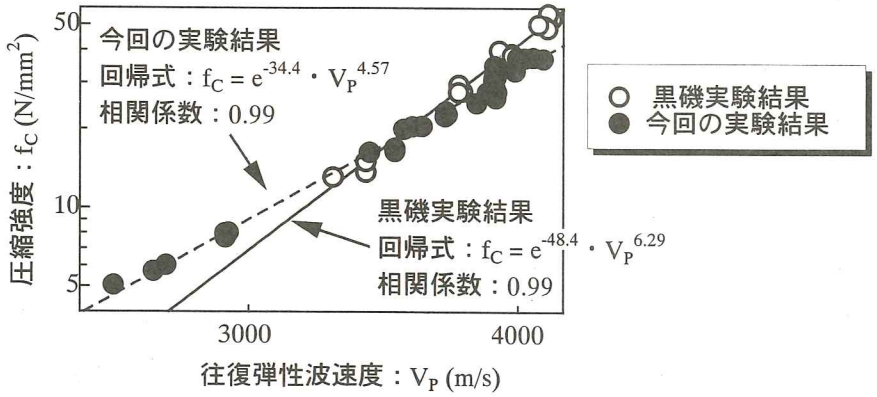
衝撃弾性波法によりコンクリート構造物の品質推定が可能であるか実験した結果を以下に示す。

1）管理供試体を用いて往復弾性波速度と圧縮強度の関係を調べたが、両者には相関係数 0.99 で（式 6.8.1.2）の関係が得られた。供試体 A と B では粗骨材の最大寸法が異なるが、この影響も見られなかった。この関係式を利用して、ボス供試体、壁供試体で圧縮強度を推定した。気中養生の場合、養生中の温度が異なる場合は両者の関係が異なり、また、表面弾性波速度と用いた場合は往復弾性波速度と完全に一致しないので、推定精度が悪くなったが、これら以外では平均誤差 5.27％で圧縮強度を推定できた。

さらに今回の実験で得られた関係式は、黒磯で得られた関係式、

$$f_C = e^{-48.4} \cdot V_P^{6.29} \qquad \text{（式 6.8.1.3）}$$

と異なる結果となった（**図－6.8.1.6**）。（式 6.8.1.2）と（式 6.8.1.3）は、同じ養生方法で得られた関係式であるが、コンクリートの水セメント比、細骨材率等の配合が異なる。以上から、圧縮強度と往復弾性波速度の関係式は粗骨材の最大寸法の違いには影響されないが、これ以外のコンクリートの配合（水セメント比、細骨材率等）が異なると変化することも分かった。



図－6.8.1.6 水中養生・気中養生での往復弾性波速度測定結果比較（両対数表示）

2）コンクリートの粗骨材最大寸法、養生方法、打設面からの深さによって、コンクリートの品質は変化する。測定した往復弾性波速度は、養生中の温度の違い場合は影響を受けたが、コンクリートの品質の変化に対応して変化し、往復弾性波速度からコンクリートの品質が確認できると期待できる。

3）往復弾性波速度は、①材齢が 7 日以内、②弾性波速度が 4100m/s ではセンサー間隔 100、200mm で測定した表面弾性波速度とは異なる結果となった。今後、センサー間隔を変えて表面弾性波を測定し、センサー間隔と表面弾性波の到達時間差との関係から表面弾性波速度をより正確に測定して、厚さ測定、品質推定に利用できるかを確認する必要がある。

〔参考文献〕

6.8.1.1） 村田二郎、岩崎訓明：土木建設技術全書 コンクリート施工法、山海堂、1978.12

6.8.2 弾性波 H （インパクトエコー）

6.8.2.1 実験目的

衝撃弾性波法では直接コンクリートの強度を測定することはできないが、コンクリート表面を鋼球で打撃することによって発生した、コンクリート内部を伝搬する往復弾性波速度を測定することができる。この弾性波の伝搬速度は、コンクリートの強度と相関関係がある。したがって、往復弾性波速度を測定することによって、コンクリートの強度の推定を試みた。

6.8.2.2 実験方法

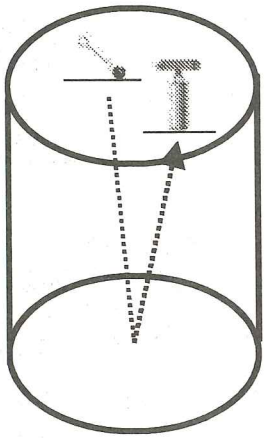


図-6.8.2.1 円柱の測定例

インパクトエコーによる往復弾性波のＰ波速度の測定は、2.3.2.5 で述べたように、円柱やボスないしはコンクリート版の各供試体を打撃し厚さ周波数fを測定した。各供試体の厚さＴが既知であるので、式 2.3.2.1 から導いた Cp ＝2fT からＰ波速度 Cp を求めた。円柱 (管理供試体) による測定例を図-6.8.2.1 に示す。

なお、各供試体とも、材齢 1 日 (30 時間)、3 日、7 日、14 日、28 日で測定をおこない、Ｐ波速度の変化と強度との関係を調べた。併せてコンクリート版供試体については、材齢 7 日、14 日、28 日目に、300mm に固定した 2 本の受信センサをもちい 2.3.2.3 および 2.3.2.5 で述べた方法で表面弾性波速度を測定し、内部を伝搬する往復弾性波速度と比較した。

6.8.2.3 測定結果

下記の測定供試体の、往復弾性波のＰ波速度の測定結果と強度実測値を次の各表に記す。

- 円柱 (管理供試体)：最大粗骨材寸法 25mm のＡ系、最大粗骨材寸法 40mm のＢ系の 2 系統
- ボス供試体：Ａ系の版 A1/A2、およびＢ系の版Ｂとともに打設
- コンクリート版供試体：材質Ａ系の A1/A2、Ｂ系のＢ の 2 系統計 3 種

(コア抜きにより強度試験を実施)

表-6.8.2.1 円柱（管理供試体）供試体Ａの往復弾性波速度の測定結果と圧縮強度実測値

供試体	養生方法	試験材齢 (日)	供試体番号	厚さ周波数 (kHz)	高さ (mm)	測定速度 (m/s) 個々	測定速度 (m/s) 平均	圧縮強度 (N/mm2) 個々	圧縮強度 (N/mm2) 平均
管理試験（円柱）供試体A	湿布養生	1 (30時間)	KA-1	6.35	199.6	2535	2663	5.07	5.61
			KA-2	6.84	199.4	2728		5.72	
			KA-3	6.84	199.3	2726		6.04	
		3	KA-4	8.30	199.5	3312	3341	16.26	16.51
			KA-5	8.30	199.3	3308		16.87	

（続き）			KA-6	8.54	199.3	3404		16.41	
	湿布養生	7	KA-7	9.03	199.7	3607		22.75	
			KA-8	9.03	199.4	3601	3570	23.29	22.80
管理試験			KA-9	8.79	199.2	3502		22.35	
（円柱）	気中養生	14	KAA-1	9.28	199.5	3703		32.25	
			KAA-2	9.28	199.5	3703	3702	32.51	32.80
供試体A			KAA-3	9.28	199.4	3701		33.65	
	水中養生	14	KAW-1	9.52	199.4	3797		31.23	
			KAW-2	9.52	199.7	3802	3798	27.63	29.76
			KAW-3	9.52	199.4	3797		30.43	
	気中養生	28	KAA-4	9.52	199.7	3802		33.45	
			KAA-5	9.28	199.7	3706	3770	37.06	35.15
			KAA-6	9.52	199.6	3800		34.93	
	水中養生	28	KAW-4	9.52	199.6	3800		34.82	
			KAW-5	9.77	199.6	3900	3834	37.37	33.62
			KAW-6	9.52	199.7	3802		28.66	

表-6.8.2.2 円柱（管理供試体）供試体Bの往復弾性波速度の測定結果と圧縮強度実測値

供試体	養生方法	試験材齢（日）	供試体番号	厚さ周波数 (kHz)	高さ (mm)	測定速度 (m/s) 個々	測定速度 (m/s) 平均	圧縮強度 (N/mm2) 個々	圧縮強度 (N/mm2) 平均
	湿布養生	1（30時間）	KB-1	5.86	249.6	2925		7.71	
			KB-2	5.86	250.4	2935	2928	8.03	7.91
			KB-3	5.86	249.5	2924		8.00	
		3	KB-4	6.84	249.3	3410		20.43	
			KB-5	7.08	249.8	3537	3491	19.96	20.29
			KB-6	7.08	248.9	3524		20.49	
		7	KB-7	7.32	250.1	3661		27.71	
			KB-8	7.32	249.8	3657	3659	26.22	26.34
管理試験			KB-9	7.32	249.9	3659		25.09	
（円柱）		7	KB2-1	9.28	199.2	3697		27.93	
			KB2-2	9.28	198.2	3679	3660	27.77	28.39
供試体B			KB2-3	9.03	199.5	3603		29.47	
	気中養生	14	KBA-1	7.57	250.1	3787		33.64	
			KBA-2	7.57	250.0	3785	3786	33.27	32.88
			KBA-2	7.57	250.0	3785		31.72	
	水中養生	14	KBW-1	7.57	250.1	3787		29.64	
			KBW-2	7.81	249.9	3903	3865	34.00	32.76
			KBW-3	7.81	250.0	3905		34.65	
	気中養生	28	KBA-4	7.57	250.1	3787		37.62	
			KBA-5	7.57	250.1	3787	3786	33.80	35.83
			KBA-6	7.57	250.0	3785		36.07	
	水中養生	28	KB2-4	9.77	199.5	3897		40.22	
			KB2-5	9.77	199.4	3897	3928	33.18	37.09
			KB2-6	10.01	199.3	3991		37.86	

表-6.8.2.3 ボス供試体A-1の往復弾性波速度の測定結果と圧縮強度実測値

供試体	試験材齢 (日)	供試体番号	厚さ周波数 (kHz)	高さ (mm)	測定速度 (m/s) 個々	測定速度 (m/s) 平均	圧縮強度 (N/mm2)	圧縮強度 (寸法) 平均
ボス供試体 A-1	3	A1-1	11.47	149.8	3436	3484	18.17	18.65
		A1-2	11.72	149.7	3510		17.78	
		A1-3	11.72	149.6	3507		19.99	
	7	A1-4	11.72	150.6	3530	3603	20.72	24.26
		A1-5	11.96	150.7	3605		27.15	
		A1-6	12.21	150.5	3674		24.91	
	28	A1-7	12.70	149.6	3801	3836	29.27	31.61
		A1-8	12.70	150.5	3821		32.10	
		A1-9	12.94	150.1	3886		33.46	

表-6.8.2.4 ボス供試体A-2の往復弾性波速度の測定結果と圧縮強度実測値

供試体	試験材齢 (日)	供試体番号	厚さ周波数 (kHz)	高さ (mm)	測定速度 (m/s) 個々	測定速度 (m/s) 平均	圧縮強度 (N/mm2)	圧縮強度 (寸法) 平均
ボス供試体 A-2	3	A2-1	8.79	199.9	3514	3547	20.47	20.54
		A2-2	8.79	200.0	3516		20.17	
		A2-3	9.03	200.0	3613		20.97	
	7	A2-4	9.03	199.6	3605	3648	23.68	24.63
		A2-5	9.03	200.0	3613		23.91	
		A2-6	9.28	200.8	3727		26.30	
	28	A2-7	9.52	200.4	3816	3809	30.73	33.53
		A2-8	9.52	199.8	3804		33.96	
		A2-9	9.52	200.0	3807		35.89	

表-6.8.2.5 ボス供試体Bの往復弾性波速度の測定結果と圧縮強度実測値

供試体	試験材齢 (日)	供試体番号	厚さ周波数 (kHz)	高さ (mm)	測定速度 (m/s) 個々	測定速度 (m/s) 平均	圧縮強度 (N/mm2)	圧縮強度 (寸法) 平均
ボス供試体 B	3	B-1	7.32	249.8	3657	3620	25.20	24.70
		B-2	7.32	250.0	3660		24.86	
		B-3	7.08	250.2	3543		24.05	
	7	B-4	7.32	249.5	3653	3661	29.35	29.56
		B-5	7.32	250.2	3662		29.84	
		B-6	7.32	250.5	3668		29.50	
	28	B-7	7.81	249.7	3900	3903	38.16	37.91
		B-8	7.81	249.9	3903		39.07	
		B-9	7.81	250.1	3907		36.49	

表-6.8.2.6 コア(壁)供試体A-1の往復弾性波速度および表面弾性波速度の測定結果と圧縮強度実測値

供試体	試験材齢 (日)	供試体番号	測定位置	厚さ周波数 (kHz)	高さ (mm)	測定速度 (m/s) 個々	測定速度 (m/s) 平均	圧縮強度 (N/mm2) 個々	圧縮強度 (N/mm2) 平均	表面弾性波速度 (m/s) 表面Cp	表面弾性波速度 (m/s) 適用Cp	表面弾性波速度 (m/s) 適用Cp平均
		CA1-1	上	9.28	201.6	3742		24.61		3922	3765	

(続き)		CA1-2	中	9.03	203.5	3675		27.12	26.79	3922	3765	
	7	CA1-3	下	9.28	204.0	3786	3762.5	28.65		3871	3716	3758.3
コア		CA1-4	上	9.28	202.9	3766		—		3974	3815	
(壁)		CA1-5	中	9.28	204.4	3794		—	—	3774	3623	
供試体		CA1-6	下	9.28	205.4	3812		—		4027	3866	
A-1		CA1-4	上	9.52	202.9	3863		—		4082	3918	
	14	CA1-5	中	9.52	204.4	3892	3888.6	—	—	4027	3866	3883.3
		CA1-6	下	9.52	205.4	3911		—		4027	3866	
		CA1-4	上	9.77	202.9	3965		29.77		4182	4015	
	28	CA1-5	中	9.52	204.4	3892	3956.7	34.54	33.12	4138	3972	4019.0
		CA1-6	下	9.77	205.4	4014		35.50		4240	4070	

表-6.8.2.7 コア(壁)供試体A-2の往復弾性波速度および表面弾性波速度の測定結果と圧縮強度実測値

供試体	試験材齢	供試体	測定位置	厚さ周波数	高さ	測定速度 (m/s)		圧縮強度 (N/mm2)		表面弾性波速度 (m/s)		
	(日)	番号		(kHz)	(mm)	個々	平均	個々	平均	表面 Cp(m/s)	適用 Cp(m/s)	適用Cp 平均
		CA2-1	上	9.28	202.8	3764		26.36		3922	3765	
		CA2-2	中	9.28	203.6	3779		27.63	27.81	4027	3866	
	7	CA2-3	下	9.52	204.7	3897	3808.4	29.44		4027	3866	3815.5
コア		CA2-4	上	9.28	203.0	3768		—		3922	3765	
(壁)		CA2-5	中	9.28	202.9	3766		—	—	3922	3765	
供試体		CA2-6	下	9.52	203.6	3877		—		4027	3866	
A-2		CA2-4	上	9.77	203.0	3967		—		3974	3815	
	14	CA2-5	中	9.52	202.9	3863	3936.1	—	—	4027	3866	3866.3
		CA2-6	下	9.77	203.6	3978		—		4082	3918	
		CA2-4	上	9.77	203.0	3967		32.63		4138	3972	
	28	CA2-5	中	9.77	202.9	3965	4035.0	35.31	34.88	4138	3972	4033.0
		CA2-6	下	10.25	203.6	4174		36.72		4328	4155	

表-6.8.2.8 コア(壁)供試体Bの往復弾性波速度および表面弾性波速度の測定結果と圧縮強度実測値

供試体	試験材齢	供試体	測定位置	厚さ周波数	高さ	測定速度 (m/s)		圧縮強度 (N/mm2)		表面弾性波速度 (m/s)		
	(日)	番号		(kHz)	(mm)	個々	平均	個々	平均	表面 Cp(m/s)	適用 Cp(m/s)	適用Cp 平均
		CB-1	上	9.52	203.1	3867		29.18		4027	3866	
		CB-2	中	9.52	204.7	3897		33.57	32.20	4138	3972	
	7	CB-3	下	9.52	204.9	3901	3882.9	33.83		4138	3972	3919.2
コア		CB-4	上	9.52	202.0	3846		—		3974	3815	
(壁)		CB-5	中	9.52	203.8	3880		—	—	4138	3972	
供試体		CB-6	下	9.52	205.1	3905		—		4082	3918	
B		CB-4	上	9.77	202.0	3947		—		4138	3972	
	14	CB-5	中	9.77	203.8	3982	4011.8	—	—	4255	4085	4047.3
		CB-6	下	10.01	205.1	4106		—		4255	4085	
		CB-4	上	10.01	202.0	4044		35.66		4296	4124	
	28	CB-5	中	9.77	203.8	3982	4076.9	40.64	38.20	4255	4085	4146.3
		CB-6	下	10.25	205.1	4205		38.29		4406	4230	

なお、往復弾性波と表面弾性波の比較のために、表-6.8.2.6、表-6.8.2.7 および 表-6.8.2.6 では、2.3.2.5 の式(2.3.2.4)より、測定した表面 Cp 速度に 0.96 を乗じて適用 Cp 速度を求めた。

6.8.2.4 弾性波速度について

(1) 材質A系、B系（粗骨材の最大寸法の違い）による比較

A系、B系の材質の違いによる弾性波速度を比較するために、次の図-6.8.2.2 および図-6.8.2.3 に各供試体毎にそれぞれ総ての往復弾性波速度をプロットし、その傾向をしらべた。

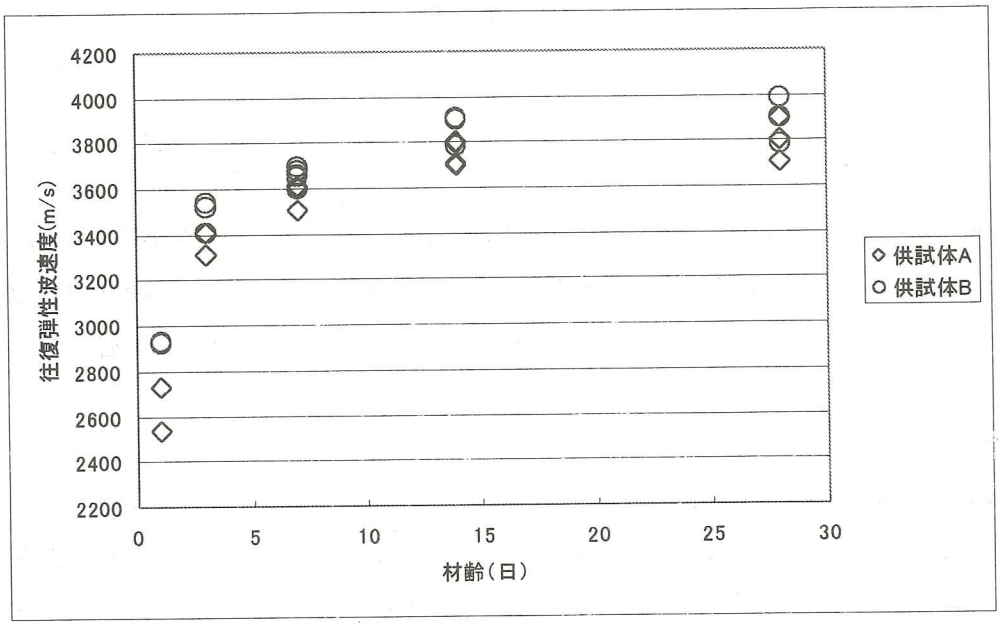


図-6.8.2.2 円柱管理供試体A、Bの往復弾性波測定結果の比較

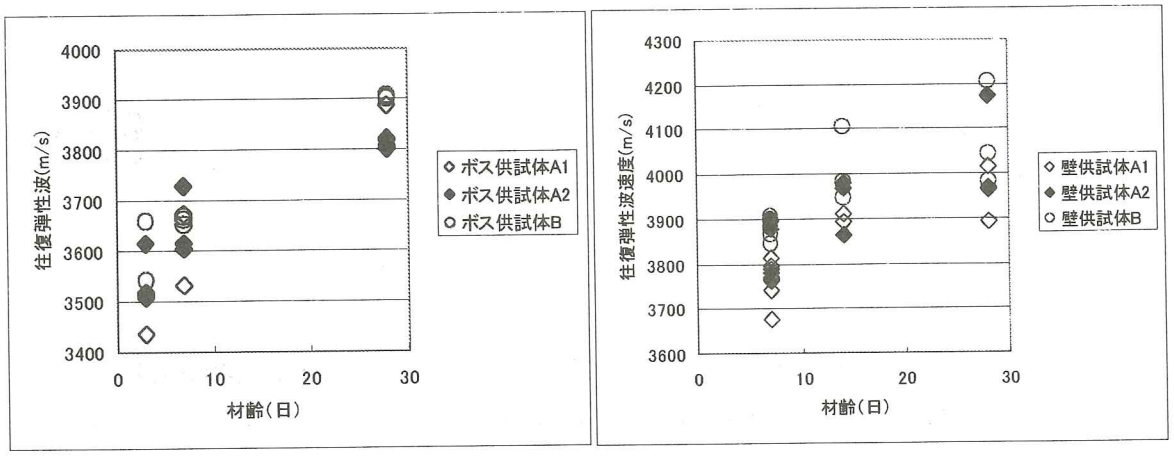


図-6.8.2.3 ボス供試体およびコア(壁)供試体のA系、B系での往復弾性波測定結果の比較

単位水、セメント量にあまり違いが無い場合、上図のように、粗骨材の寸法の大きいB系のほうがA系よりも往復弾性波速度が速くなる傾向がみられた。特に湿布、気中、水中の各養生ともよくコントロールされた円柱管理供試体では、材齢の進行とともにA系B系ともに往復弾性波速度が速くなっていく中で、B系のほうがA系より往復弾性波速度がより速くなるという傾向が顕著にみられた。

(2) 養生方法による比較

養生方法の違いによる弾性波速度を比較するために、次の図-6.8.2.4 にＡ系、Ｂ系の円柱管理供試体毎に養生方法-往復弾性波速度をプロットし、その傾向をしらべた。

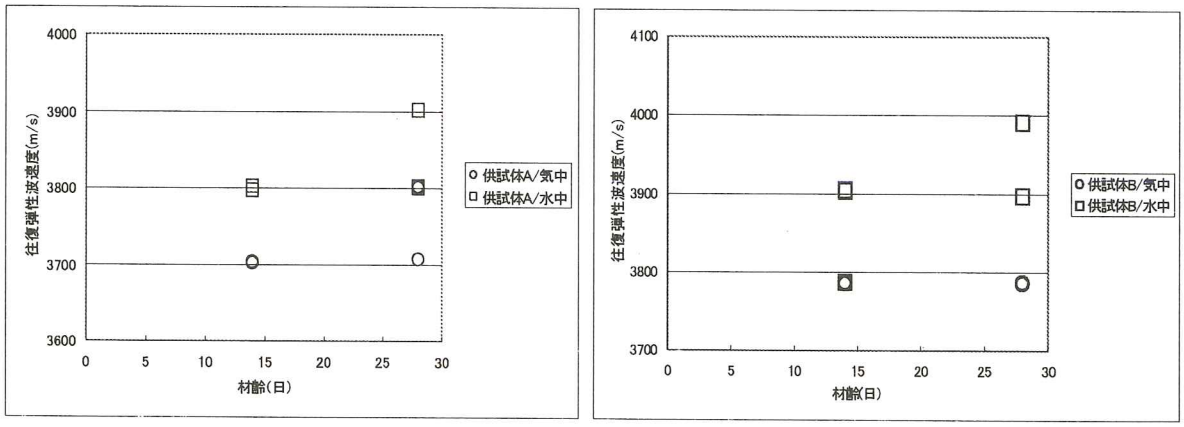


図-6.8.2.4 Ａ系、Ｂ系の管理供試体の水中/気中養生方法に対する往復弾性波速度の比較

上図から、Ａ系、Ｂ系とも各材齢で、あきらかに水中養生のほうが気中養生よりも往復弾性波の速度が速いことがわかる。乾燥したコンクリートよりも湿ったコンクリートのほうが弾性波速度は速くなるということが言える。

(3) 壁供試体の測定点の高さによる比較

壁供試体では、コア採取位置で、打設面側から、上・中・下と高さを変えて往復弾性波速度を測定した。A1/A2 のＡ系およびＢ系毎に、次の図-6.8.2.5 に高さ-往復弾性波速度をプロットし、高さと弾性波速度の関係をしらべた。

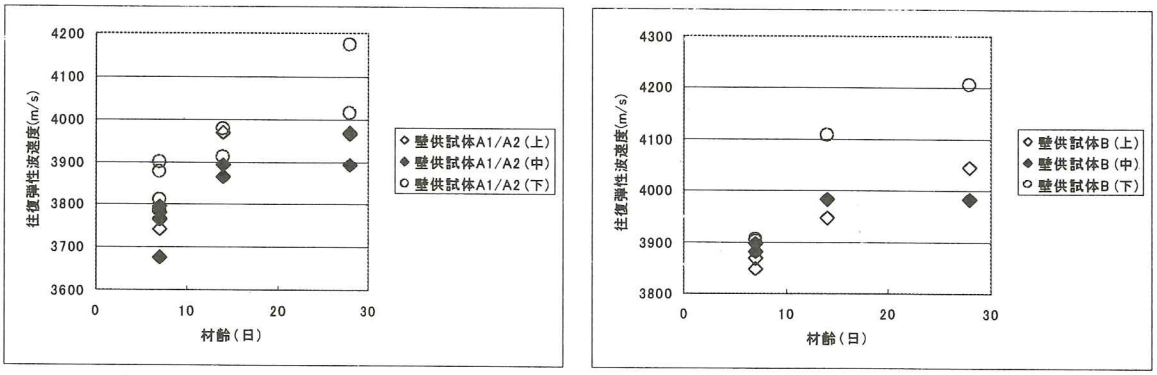


図-6.8.2.5 Ａ系、Ｂ系のコア(壁)供試体の測定点高さに対する往復弾性波速度の比較

上図から、壁供試体の底面に近い「下」の測定点では、あきらかに弾性波速度が速いことがわかる。ただし、「上」と「中」の測定点では明確な速度差はみられなかった。

(4) 壁供試体における往復弾性波速度と表面弾性波速度の比較

壁供試体では、コア採取位置の各測定点で(3)で述べた往復弾性波速度を測定するとともに、2.3.2.3 の方法により表面弾性波も測定した。次の図-6.8.2.6 にてこの往復弾性波速度と表面弾性波速度の測定結果の比較をおこなった。なお、6.8.2.3 で述べたように、2.3.2.5 の式(2.3.2.4)より測定した表面弾性波速度(表

面 Cp)に 0.96 を乗じた表面弾性波適用速度(適用 Cp)を用いて、往復弾性波速度と比較した。

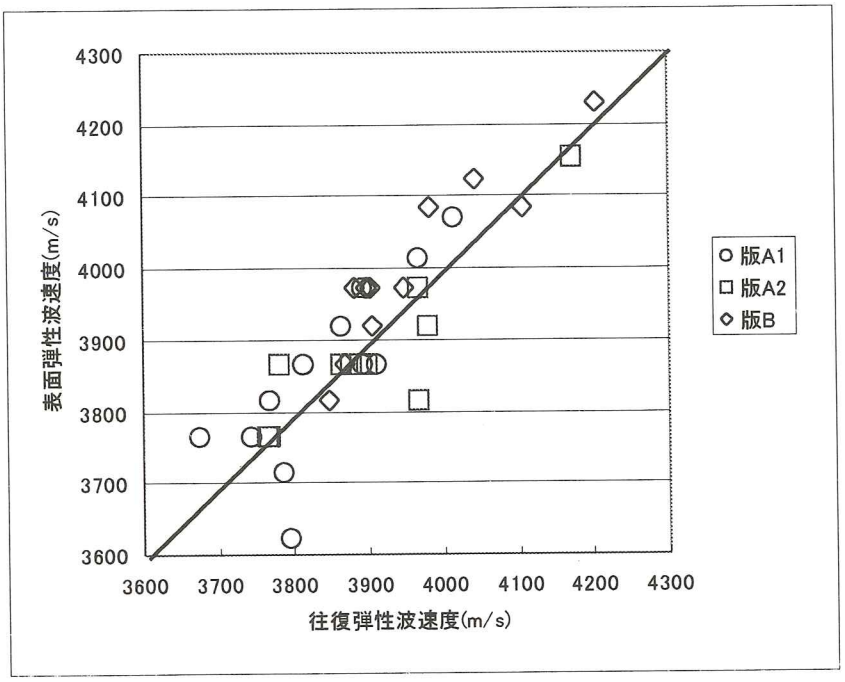


図-6.8.2.6
コア(壁)供試体における往復弾性波速度と表面弾性波速度の比較

上図-6.8.2.6 より、全般的にわずかながら、往復弾性波速度にくらべて表面弾性波速度のほうが速い測定結果となった。6.8.2.4.(2)でのべたように、コンクリートは湿った部分のほうが乾燥部分のよりも弾性波速度は速いと考えられる。本壁供試体の場合、上面と底面の両端面部分は中心部にくらべて、気中養生中に乾燥が進んでいると思われる。弾性波の伝搬経路を考えた場合、下図-6.8.2.7 のようになると思われ、表面弾性波の方が往復弾性波よりも乾燥部分を伝搬する回数および経路が短いことが、表面弾性波のほうが往復弾性波よりも速い測定結果となった一因ではないかと思われる。

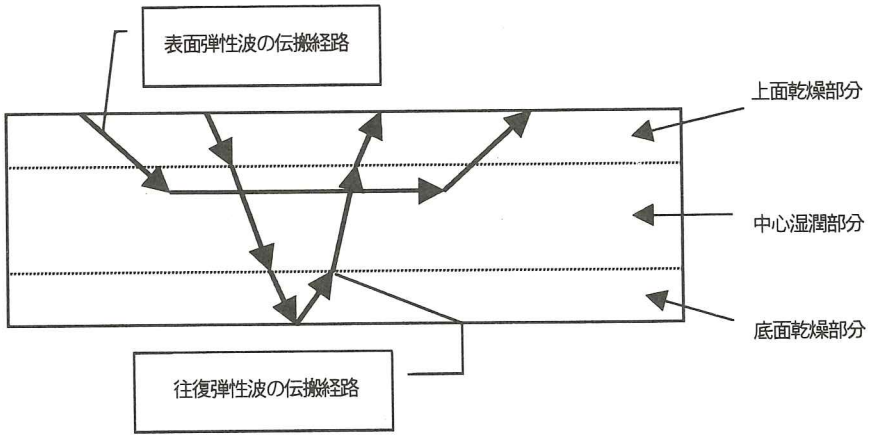


図-6.8.2.7 弾性波の供試体内部の伝搬経路

ただし、図-6.8.2.6 より、表面弾性波速度のほうがわずかに速いながらも往復弾性波速度に対して、ほぼ両者の線形関係は保たれているといえる。したがって、供試体の厚さがわからず共振厚さ周波数による往復弾性波速度が測定できない場合であっても、表面弾性波速度を測定することで、ある程度弾性波速度を予測することが可能であると思われる。ということは、後述の弾性波速度から強度推定をおこなう際に、往復弾性波速度のみならず、表面弾性波速度からも強度推定が可能であろうと考えられる。

6.8.2.5 強度推定について

(1) 円柱管理供試体の材質A系、B系（粗骨材の最大寸法の違い）による比較

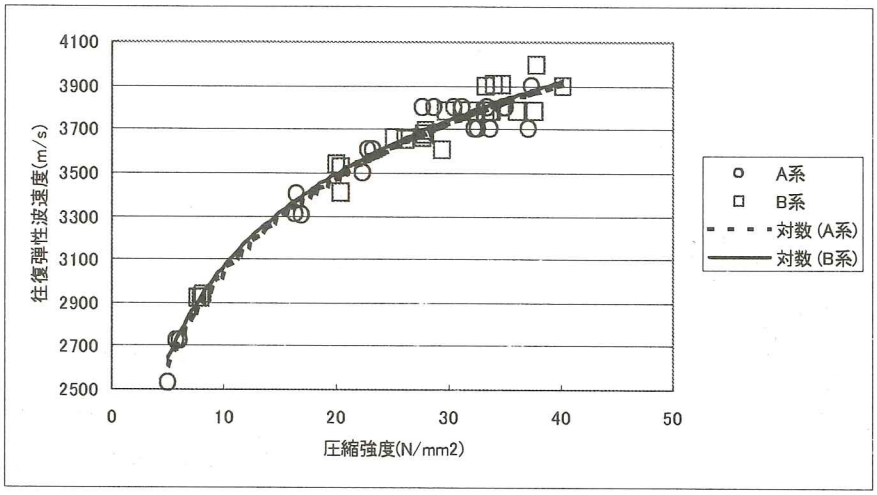


図-6.8.2.8 円柱管理供試体A系、B系の圧縮強度と往復弾性波速度の関係

上図-6.8.2.8 は、円柱管理供試体A系およびB系の圧縮強度と往復弾性波速度の関係をしらべたものである。往復弾性波速度をy、圧縮強度をxおくと、

A系：$y = 624.69\mathrm{Ln}(x) + 1597.7$ (ただし、$R^2 = 0.97$)　(6.8.2.1)

B系：$y = 613.7\mathrm{Ln}(x) + 1653.9$ (ただし、$R^2 = 0.96$)　(6.8.2.2)

であり、本実験では、粗骨材の大きさの違うA系とB系による違いはほとんどみられなかった。したがって、A系B系の供試体ともに、同じ圧縮強度ー往復弾性波速度近似曲線をもちいて、測定した往復弾性波速度から圧縮強度の推定がおこなえるのではないかと考えられる。

(2) 円柱管理供試体の養生方法（湿布ー気中、湿布ー水中）の違いによる比較

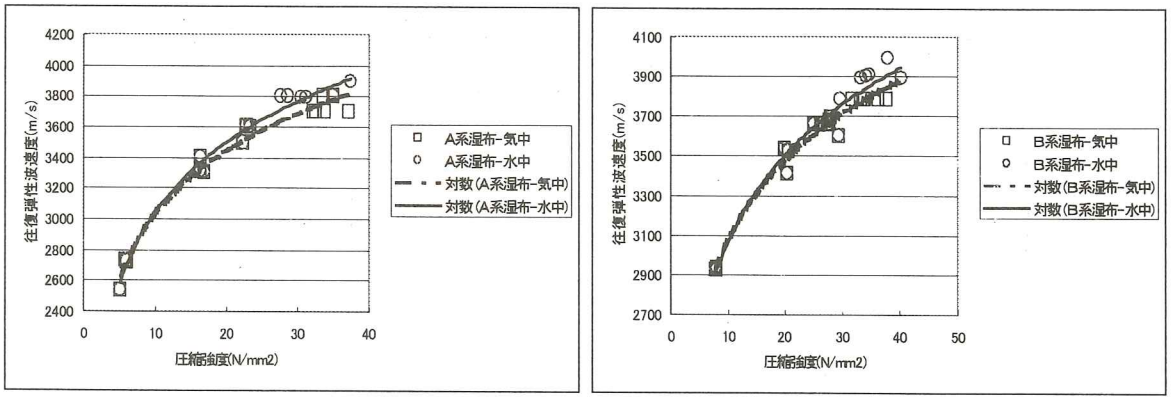


図-6.8.2.9 円柱管理供試体A系、B系の養生方法の違いにおける圧縮強度と往復弾性波速度の関係

上図-6.8.2.9 は、円柱管理供試体のA系およびB系それぞれの湿布養生から気中養生、湿布養生から水中養生にいたる養生方法の違いで圧縮強度ー往復弾性波速度の関係を比較したものである。厳密にいえば、往復弾性波速度が高速になるにしたがって、A系B系ともに水中養生のほうが気中養生に比べて、やや圧縮強度の高さの程度に対して弾性波速度速度が速くなる傾向がみられるが、圧縮強度ー往復弾性波速

度の傾向はほぼ一致している。したがって、養生方法が違っていても、往復弾性波速度を測定することによって、圧縮強度が推定可能であると考えられる。

(3) 往復弾性波速度によるボス供試体、コア（壁）供試体の強度推定

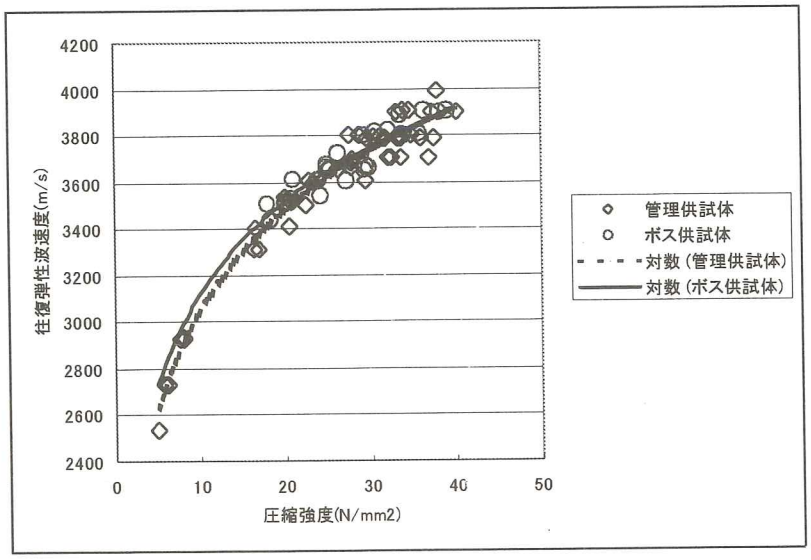


図-6.8.2.10 ボス供試体の圧縮強度－往復弾性波速度と管理供試体との比較

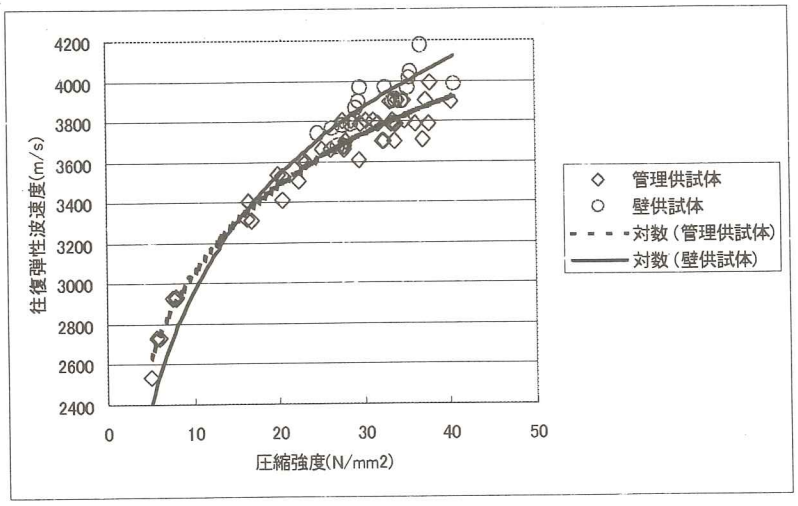


図-6.8.2.11 コア(壁)供試体の圧縮強度－往復弾性波速度と管理供試体との比較

6.8.2.5 (1)でのべたように、管理供試体における圧縮強度－往復弾性波速度の関係はＡ系とＢ系はほぼ一致するので、図-6.8.2.10 では、Ａ系Ｂ系両方を含むボス供試体の圧縮強度－往復弾性波速度の関係と管理供試体の圧縮強度－往復弾性波速度の関係を比較し、図-6.8.2.11 では、Ａ系Ｂ系両方を含むコア(壁)供試体の圧縮強度－往復弾性波速度の関係と管理供試体の圧縮強度－往復弾性波速度の関係を比較した。図-6.8.2.10 よりボス供試体の場合、圧縮強度－弾性波速度の関係は管理供試体のものと概ね一致し、図-6.8.2.11 よりコア(壁)供試体の場合、弾性波速度が 3400m/s を超える範囲では圧縮強度－弾性波速度の関係は管理供試体のものより差異が大きくなるものの、傾向は合致している。したがって、あらかじめ管理供試体から圧縮強度－往復弾性波速度の関係を得ることができていれば、実際の供試体の往復弾性波速度を測定することによって、ある程度その供試体の圧縮強度を推定することは可能であると思われる。

(4) 表面弾性波速度によるコア（壁）供試体の強度推定

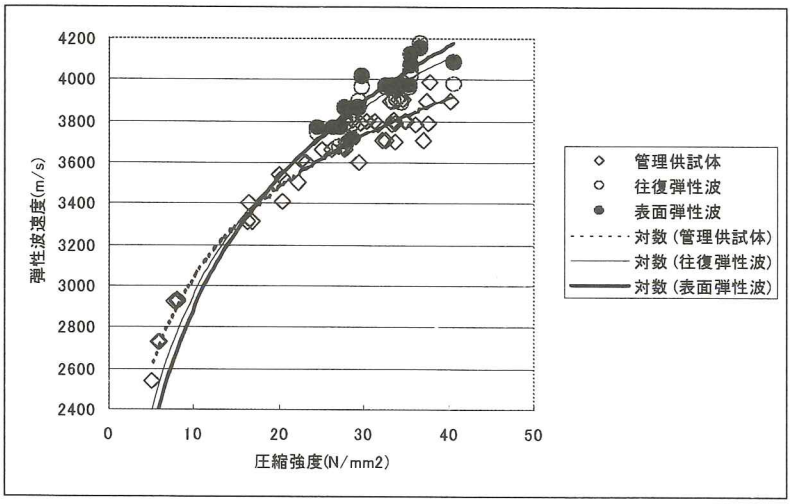


図-6.8.2.12 コア(壁)供試体の圧縮強度－表面弾性波速度、往復弾性波速度と管理供試体との比較

上図-6.8.2.12 は、コア(壁)供試体の、圧縮強度－表面弾性波速度、圧縮強度－往復弾性波速度の関係と管理供試体のものと比較したものである。6.8.2.4 (4)で思量したように、表面弾性波速度と往復弾性波速度の関係は概ね線形的に一致していたので、それぞれの弾性波速度と圧縮強度の関係はよく合致する。したがって実際の供試体において、往復弾性波速度のみならず表面弾性波速度を測定することによっても、ある程度その供試体の圧縮強度を推定することは可能であると思われる。

6.8.2.6 強度推定実験のまとめ

コンクリートの配合や養生方法が同様の場合は勿論であるが、配合や養生方法が違っていたとしても、厚さが分っている供試体の場合、往復弾性波速度を測定することによって圧縮強度を推定することが可能であると思われる。また、厚さが分らず、往復弾性波速度がそのままでは測定できない供試体であっても、表面弾性波を測定することによって、ある程度圧縮強度を推定することは可能であると思われる。

6．9　テストハンマによる強度推定

表－6.9.1 にテストハンマによる強度推定結果を示す。推定式は、①日本材料学会、式（6.9.1）②東京都建築材料試験所、式（6.9.2）③日本建築学会、式（6.9.3）のものを用いた。

① $fc=13Ro-184$　　(6.9.1)

② $fc=10Ro-110$　　(6.9.2)

③ $fc=7.3Ro+100$　　(6.9.3)

Ro：基準反発度であり、$Ro=R+\triangle R$、R：反発度の読み値、$\triangle R$：テストハンマの打撃面に対する角度の補正値である。

式 (6.9.1) ～ (6.9.3) で見かけの圧縮強度 fc を求め、次式により材齢補正した最終推定強度 Fc を求めた。

$Fc=\alpha n \cdot fc$　　(6.9.4)

αn：材齢の補正値である。

ϕ100 コア強度との比で表したのが**表－6.9.2** および**図－6.9.1** である。

推定式①，②はほぼ同じであり，③より小さい。材齢 7 日の強度比は，①②が約 1.2 に対し，③は約 2 にもなっている。この場合，材齢の影響を考慮した係数 αn＝1.8 を乗じている。③について，αn を考慮しないとほぼ強度比は 1.0 であった。

材齢 28 日の場合，①②の強度比は 0.7 程度に対し，③はほぼ 1.0 であった。

今回の試験結果で，推定式③を用い，材齢の影響を考慮した係数を用いないと，強度推定は良好であった。

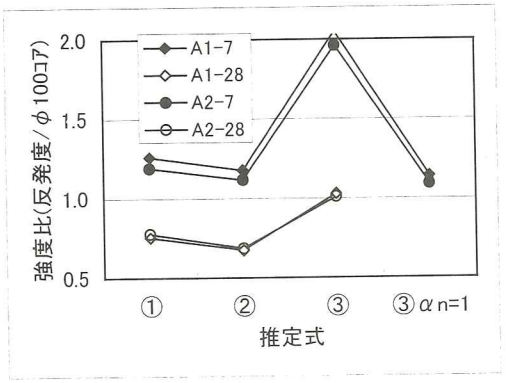
表－6.9.2　強度比の比較

(a)材齢7日

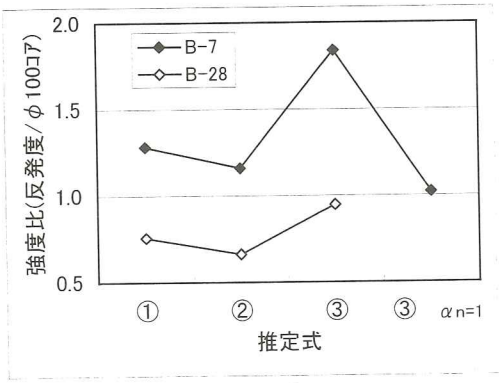
供試体	位置	コア強度	①	②	③	③ α n=1
A1	上	24.6	1.353	1.267	2.217	1.232
	中	27.1	1.122	1.068	1.953	1.085
	下	28.7	1.299	1.194	1.982	1.101
	平均		1.258	1.176	2.050	1.139
A2	上	26.4	1.187	1.124	2.027	1.126
	中	27.6	1.195	1.120	1.969	1.094
	下	29.4	1.187	1.102	1.885	1.047
	平均		1.190	1.115	1.960	1.089
B	上	29.2	1.413	1.278	2.023	1.124
	中	33.6	1.203	1.091	1.744	0.969
	下	33.8	1.225	1.107	1.748	0.971
	平均		1.280	1.159	1.838	1.021
平均			1.239	1.149	1.960	1.089
標準偏差			0.075	0.062	0.122	0.068
変動係数		(%)	6.1	5.4	6.2	6.2

(b)材齢28日

供試体	位置	コア強度	①	②	③
A1	上	29.8	0.835	0.746	1.138
	中	34.5	0.669	0.604	0.952
	下	35.1	0.759	0.672	0.995
	平均		0.754	0.674	1.028
A2	上	32.6	0.798	0.709	1.059
	中	35.3	0.786	0.692	1.006
	下	36.7	0.745	0.657	0.961
	平均		0.776	0.686	1.009
B	上	35.7	0.769	0.678	0.991
	中	40.6	0.768	0.667	0.922
	下	38.3	0.731	0.643	0.931
	平均		0.756	0.663	0.948
平均			0.763	0.675	0.999
標準偏差			0.037	0.032	0.056
変動係数		(%)	4.8	4.7	5.6



(a) 供試体A



(b) 供試体B

図－6.9.1　強度比

表－6.9.1 テストハンマ測定結果

推定式 ①:日本材料学会推定式
②:東京都建築材料試験所推定式
③:日本建築学会推定式

材齢 7日

供試体番号	測定値				平均値 R	補正値 ΔR	基準強度 Ro	推定式	圧縮強度 F(N/mm²)	材齢係数 αn	補正圧縮強度 F'(N/mm²)	コア圧縮強度 fc(N/mm²)	強度比 F'／fc
A1-1	27	26	27	26	25.4	3.3	28.7	①	18.5	1.80	33.3	24.6	1.353
	22	26	24	26				②	17.3		31.2		1.267
	24	26	27	24				③	30.3		54.6		2.217
	23	26	29	23									1.232
A1-2	24	28	26	22	24.1	3.3	27.4	①	16.9	1.80	30.4	27.1	1.122
	23	20	23	24				②	16.1		29.0		1.068
	23	25	24	24				③	29.4		53.0		1.953
	22	27	24	27									1.085
A1-3	27	23	30	26	27.2	3.2	30.4	①	20.7	1.80	37.2	28.7	1.299
	28	28	30	25				②	19.0		34.2		1.194
	27	32	27	31				③	31.5		56.8		1.982
	26	25	25	25									1.101
A2-1	25	24	25	22	24.5	3.3	27.8	①	17.4	1.80	31.3	26.4	1.187
	22	25	23	23				②	16.5		29.6		1.124
	28	26	24	26				③	29.7		53.4		2.027
	25	25	25	24									1.126
A2-2	26	27	23	25	25.3	3.3	28.6	①	18.3	1.80	33.0	27.6	1.195
	28	28	23	26				②	17.2		31.0		1.120
	28	29	22	24				③	30.2		54.4		1.969
	26	25	21	23									1.094
A2-3	29	28	24	23	26.2	3.2	29.4	①	19.4	1.80	34.9	29.4	1.187
	26	28	25	27				②	18.0		32.4		1.102
	25	29	26	29				③	30.8		55.5		1.885
	26	25	26	23									1.047
B-1	26	28	30	29	28.9	3.2	32.1	①	22.9	1.80	41.2	29.2	1.413
	31	30	28	28				②	20.7		37.3		1.278
	28	27	30	32				③	32.8		59.0		2.023
	25	33	30	28									1.124
B-2	28	30	28	29	28.6	3.2	31.8	①	22.4	1.80	40.4	33.6	1.203
	28	29	30	30				②	20.3		36.6		1.091
	29	29	29	26				③	32.5		58.5		1.744
	29	33	24	26									0.969
B-3	29	32	31	32	29.1	3.1	32.2	①	23.0	1.80	41.4	33.8	1.225
	30	27	28	26				②	20.8		37.4		1.107
	31	30	30	30				③	32.9		59.1		1.748
	25	28	29	28									0.971

強度比の4段目は、③のσn=1(材齢の影響考慮せず)の場合

材齢 28日

供試体番号	測定値				平均値 R	補正値 ΔR	基準強度 Ro	推定式	圧縮強度 F(N/mm²)	材齢係数 αn	補正圧縮強度 F'(N/mm²)	コア圧縮強度 fc(N/mm²)	強度比 F'／fc
A1-4	32	29	29	35	30.6	3.1	33.7	①	24.9	1.00	24.9	29.8	0.835
	30	29	30	37				②	22.2		22.2		0.746
	28	30	30	30				③	33.9		33.9		1.138
	29	32	30	29									
A1-5	30	26	26	31	29.2	3.1	32.3	①	23.1	1.00	23.1	34.5	0.669
	29	27	29	29				②	20.9		20.9		0.604
	30	29	29	35				③	32.9		32.9		0.952
	27	28	33	29									
A1-6	31	31	32	32	31.9	3.1	35.0	①	26.6	1.00	26.6	35.1	0.759
	29	36	30	31				②	23.6		23.6		0.672
	35	32	30	31				③	34.9		34.9		0.995
	35	31	37	28									
A2-4	28	31	28	29	31.5	3.1	34.6	①	26.0	1.00	26.0	32.6	0.798
	30	35	32	29				②	23.1		23.1		0.709
	34	31	36	34				③	34.6		34.6		1.059
	34	31	31	31									
A2-5	37	37	29	34	32.9	3.0	35.9	①	27.8	1.00	27.8	35.3	0.786
	35	29	35	32				②	24.4		24.4		0.692
	33	30	32	31				③	35.5		35.5		1.006
	33	33	37	30									
A2-6	37	33	33	36	32.6	3.0	35.6	①	27.4	1.00	27.4	36.7	0.745
	27	32	31	30				②	24.1		24.1		0.657
	32	31	34	30				③	35.3		35.3		0.961
	30	37	35	34									
B-4	31	32	35	32	32.7	3.0	35.7	①	27.4	1.00	27.4	35.7	0.769
	32	32	33	37				②	24.2		24.2		0.678
	31	32	31	32				③	35.3		35.3		0.991
	35	32	32	34									
B-5	38	37	34	33	35.8	2.9	38.7	①	31.2	1.00	31.2	40.6	0.768
	36	31	31	35				②	27.1		27.1		0.667
	41	36	33	43				③	37.5		37.5		0.922
	43	35	32	34									
B-6	32	32	32	28	33.1	3.0	36.1	①	28.0	1.00	28.0	38.3	0.731
	38	38	34	33				②	24.6		24.6		0.643
	30	32	33	32				③	35.6		35.6		0.931
	36	30	38	32									

7章　まとめ

7．1　実験結果の概要

3～6章で，**表－1**のように6種類，12体の供試体，実舗装版の実験を実施し，**表－2**のような結果を得た。

表－1　供試体の種類

実験	供試体の種類		実験目的	供試体形状・寸法(mm)			測定面	備考
	部材	供試体名	供試体の特徴	厚さ	高さ or長さ	幅		
基礎実験(3章)	(舗装)版	A	・速度分布推定方法の確立 ・速度に及ぼす鉄筋、強度、含水率などの影響 ・コンクリート品質、厚さ、かぶり・径の推定方法の確立	300	2500	1200	打設面	φ100・小径コアの音速，圧縮 細孔径分布 (有効細孔量) 含水率
	床版	B		150～300	2200	1300	打設面 底面	
	壁	C Ⅰ面		100	600	800	側面	
		C Ⅱ面		200	600	1400		
		C Ⅲ面		400	750	800		
		C Ⅳ面		600	750	1400		
検証実験(4～6章)	壁	N2	16年暴露 N:普通セメント、BB:高炉B種 脱型　2or7日	200	2050	2800	側面	小径コア 細孔径分布 透気・透水・中性化
		N7						
		BB7						
	舗装版	既設	25年間供用中	300	1000	1900	打設面	φ100コアの音速，圧縮，圧裂 含水率
		新設	6ロット分	300	560m	7.5m		
		大型	新設と同じ構造、速度分布推定	300	2100	900		
	壁	A1，A2	強度推定 Gmax　A:25mm、B:40mm	200	1500	1600	側面	ﾃｽﾄﾊﾝﾏ、ﾎﾞｽ供試体 小径ｺｱ、細孔径分布
		B						
合計	6種類	12本						

表－2　実験結果のまとめ

測定項目	超音波法	電磁波レーダ法	衝撃弾性波法
速度分布	・表層の品質、含水率の違いによる音速分布を求めることができる。 ・探触子の大きさの影響を把握し，その補正方法を提案した。 ・鉄筋の影響と，その回避方法を提案した。	・深度法は精度良く分布を求めることができ、含水率の分布も推定できる可能性がある。 ・WA法は無筋ｺﾝｸﾘｰﾄには有効である。	・部材厚さの平均的な速度を求めることができる。
部材厚さ	概ね±3%以内で推定できる。	概ね±3%以内で推定できる。	概ね±3%以内で推定できる。
鉄筋かぶり・径	・かぶりは±15%程度で推定できる。	・かぶりは±5%程度で推定できる。	―
圧縮強度	部材の下部で±15%以内で推定できる。	―	速度と圧縮強度に高い相関関係があり、圧縮強度を推定できるめどがついた。
表層の品質(細孔量)	音速分布は細孔量との相関関係がある。	―	―

3章では各検査項目の推定方法と，推定に影響を及ぼす要因に関する基本的な検討結果を得た。4～6章では，3章で得た推定方法を適用し，その妥当性の確認を行なった。以下にそれらの概要，問題点などを示す。

7．2　基礎実験の結果

7.2.1 超音波法

超音波法については，提案した方法に対して何点かの修正が必要であることがわかった。

(1)音速分布の求め方

①表面走査法によって表面伝搬時間を測定するにあたって，探触子の大きさを考慮した距離の設定が必要であり，式(3.4.4.1)を提案した。

②音速分布を求めるにあたって，表面走査法によって表面伝搬時間の測定は，見かけの音速がほぼ一定となることが確認できるまで必要である。その距離は，材齢，乾燥状態，測定面(打設面，側面，底面)などによって異なるが，600～800mm であった。

③音速分布の計算は，見かけの音速が一定となる距離までの表面伝搬時間を使い，式(1.3)によればよい。ただし，音速分布の形状を表わす式(1.2)のmの値は，通常のコンクリートから舗装用コンクリートのようにある程度強度が高い範囲では，m＝５としてよいようである。そして，音速分布は，見かけの音速が一定となる距離のときの伝搬経路のいちばん深い部分まで求め，それより，内部の音速は一定としてよい。今後，見掛けの音速分布が一定になる位置の推定方法を検討する必要がある。

④部材によって音速分布形状を考慮する必要がある。舗装版のように表面が打設面で底面が路盤に接しているような部材は，表面近傍の音速分布を求め，内部は底面まで音速一定と仮定すればよい。壁のように両側面が対称な場合は，音速分布も対称とする。

(2)部材厚さ，かぶり厚さの求め方

⑤上記③，④のような音速分布に対して，厚さは図-3.4.6.6 の式(1)～(5)で求める。

⑥鉄筋のかぶり厚さ，径は測定原理に応じて測定可能な範囲を明確にする必要がある。

(3)表層の品質，強度推定

⑦コンクリート表層の音速分布は細孔量の分布と相関があり，耐久性を評価する指標になり得るものと考えられる。

⑧圧縮強度は，構造物内部のほぼ一定の音速(内部音速)と，品質管理用供試体の音速と強度の関係から推定することができる。今回の検討結果では，部材の下部の推定精度は±15%以内で良好であった。今後，部材の上部，中部，打設面からの推定精度の向上が必要である。

7.2.2　レーダ法

(1)速度分布

レーダ法では、速度分布の４方法についてまとめると以下のとおりである。

①ワイドアングル(WA)法は，鉄筋が入っている場合は速度を速く測定する傾向があり，無筋コンクリート構造物に適した方法である。

②双曲線法は，双曲線の曲率からかぶり深さを求め，このかぶり厚さと反射時間から速度を求める方法であり，この方法によって速度を求めるには，曲率を精度良く求めることができる分解能を有する測定機を使

用する必要がある。

③深度法は，最も簡単に精度よく速度を求めることができる方法である。ただし，かぶり厚さは，設計値ではなく実測値を与える必要がある。

④厚さ法は，厚さがわかっている場合にかぶり厚さを求める簡単な方法である。しかし速度分布を求めることができず，表層の速度変化が大きい部分を精度よく求めることはできない。

(2)含水率と電磁波速度の関係

⑤含水率と比誘電率の平方根$\sqrt{\varepsilon}$には強い相関関係があり，速度分布を正確に求めることによりコンクリート内部の含水率の分布を求めることができる。

(3)部材厚さ，かぶり厚さの推定

⑥部材厚さ，かぶり厚さは，速度分布を考慮することにより精度よく推定することができる。

⑦特にかぶり厚さを精度よく測定するには，含水率の変化により速度も大きく変化しており，速度分布を求めることは不可欠である。

7.2.3　弾性波法

(1)弾性波速度および部材厚さ

①弾性波速度は，低周波なので速度はほぼ一定値となり，超音波法のように速度分布を求めることはできなかったが，逆に，簡易に速度や部材厚さが測定できる方法である。

(2)強度推定

②管理用供試体の往復弾性波速度と，圧縮強度の間には強い相関関係がある。

③コンクリート部材の表面弾性波速度，往復弾性波速度と，管理用供試体の往復弾性波速度の間にも強い相関関係があり，弾性波法により強度推定できる可能性があることを示した。

7．3　検証実験の結果

4～6章では，3章で確立した測定方法が適用可能かどうか，また，検査方法を確立するための検討を行ない，次のような検討結果を得た。

超音波法では，3章で確立した方法によって音速分布，部材厚さ，コンクリートの品質，鉄筋のかぶり厚さ，径の測定が可能であった。ただし，部材厚さを求めるにあたって反射時間を求めるには，測定位置近傍を数点測定し，ほぼ一致する値を用いるとよい。

レーダ法は，簡易に配筋状態や内部の層構成などが測定できる。ただし，鉄筋間隔が密な場合，鉄筋位置より内部の探査を行うことができなくなり，部材厚さの測定は別の方法によって行う必要がある。

弾性波法でも強度推定方法の検討を行い，その方法を確立した。

以上の結果より，第Ⅲ部で超音波法，レーダ法，弾性波法を用いた速度(分布)の測定方法，コンクリート表層の品質，圧縮強度，鉄筋のかぶり厚さ，部材の厚さの推定方法を提案する。

第　Ⅲ　部

非破壊試験によるコンクリートの品質、厚さ、鉄筋かぶり･径の推定方法(案)

Ａ．超音波法
Ｂ．レーダ法
Ｃ．弾性波法

A．超音波法

1．音速分布の求め方

(1) 表面伝搬時間の測定

① 表面伝搬時間を、少なくとも**図−1.1** の見かけの音速または単位距離当たりの伝搬時間がほぼ一定になることが確認できるまで（距離 1,000mm 程度)、100mm ピッチで測定する。

これは、表面近傍の音速分布の変化が大きい部分(表面から 100mm 程度)までは超音波を直接伝搬させ、音速分布を求めるためである。

その際、鉄筋が表面近傍にあり、その影響が避けられない場合、鉄筋に対して 45° 程度交差させて測線を設けて測定する。

② 測定結果の確認（できれば測定時にリアルタイムで)

ｉ．測定距離がしだいに遠くなり、見かけの音速がほぼ一定になることを確認し、その距離 L_1 を求める（**図−1.1**)。

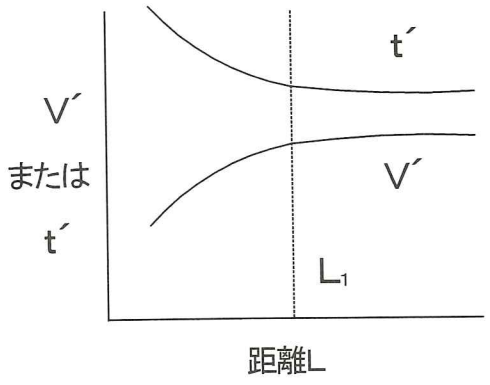
その際，式（1.1）によって伝搬距離を補正する（**図−1.2**)。

$$L' = (L - x) \cdot (1 + \alpha) \leqq L \qquad (1.1)$$

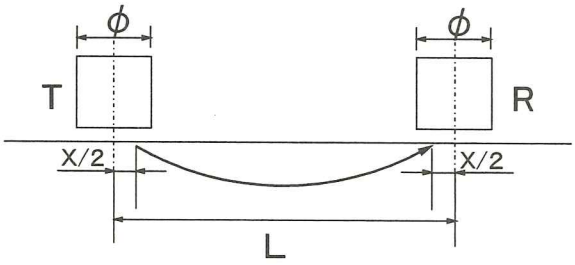
ここに，L'：補正距離，x：最大影響距離，α：補正係数であり，$(L - x) \cdot (1 + \alpha) > L$となった場合$L' = L$とする。

測定距離Ｌを伝搬時間ｔで割った見かけの音速　$v' = L / t$

または単位距離当たりの伝搬時間　　$t' = t / L$



図−1.1 距離と見かけの音速，単位距離当りの伝搬時間の関係

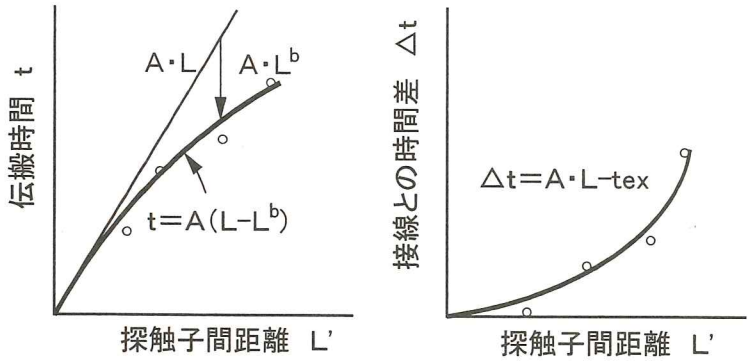


図—1.2 表面伝搬距離の算定

ii．L_1までの距離と時間の関係から、内部が速くなっていることを確認する。また、その結果を回帰して接線を求めることにより表面音速V_0を求める（**図—1.3**）。V_0は式（1.2）によって求められる。

$$V_0 = 1 / A \qquad (1.2)$$

ここに，A：**図—1.3**（a）の原点での接線傾きである。



（a）t-Lの関係　　（b）接線と実測値の差

図—1.3 探触子間距離と伝搬時間の関係

（2）音速分布の計算

① 音速分布を式（1.3）で仮定し，通常，m＝5とした場合の音速分布を計算する。

$$V(x) = K \cdot X^{\frac{1}{2m}} = K(h_0 + hi)^{\frac{1}{2m}} \qquad (1.3)$$

ここに，$V(x)$：音速分布，ho：音速分布の原点から表面までの距離，hi：表面からの距離，m：正の整数である。

音速分布は次のように求める（**図—1.4**参照）。

i．伝搬経路を式（1.4）で計算する。

$$y=\frac{(2m-1)!!}{(2m-2)!!}a^{2m}\left(\frac{\pi}{2}-sin^{-1}\frac{x^{\frac{1}{2m}}}{a}\right)+\left[x^{\frac{2m-1}{2m}}+\sum_{r=1}^{m-1}\frac{(2m-2r+1)!!}{(2m-2r)!!}a^{2r}x^{\frac{2m-2r-1}{2m}}\right]\sqrt{a^2-x^{\frac{1}{m}}} \qquad (1.4)$$

ただし,

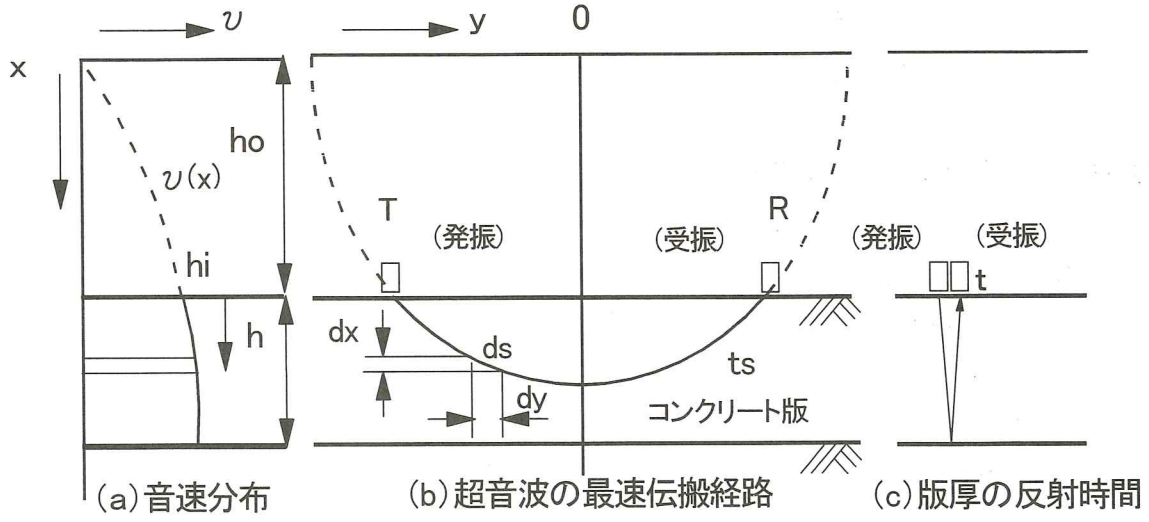
$$\frac{(2m-1)!!}{(2m-2)!!}=\frac{(2m-1)(2m-3)\cdots 5.3}{(2m-2)(2m-4)\cdots 4.2}$$

$$\sum_{r=1}^{m-1}\frac{(2m-2r+1)!!}{(2m-2r)!!}=\underbrace{\frac{2m-1}{2m-2}}_{r=1}+\underbrace{\frac{(2m-1)(2m-3)}{(2m-2)(2m-4)}}_{r=2}+\cdots+\underbrace{\frac{(2m-1)(2m-3)\cdots 5.3}{(2m-2)(2m-4)\cdots 4.2}}_{r=m-1}$$

ii．伝搬時間は式（1.5）を積分することによって求められる。

$$dts=\frac{ds}{V(x)}=\sqrt{\frac{1+y'^2}{V^2(x)}}dx \qquad (1.5)$$

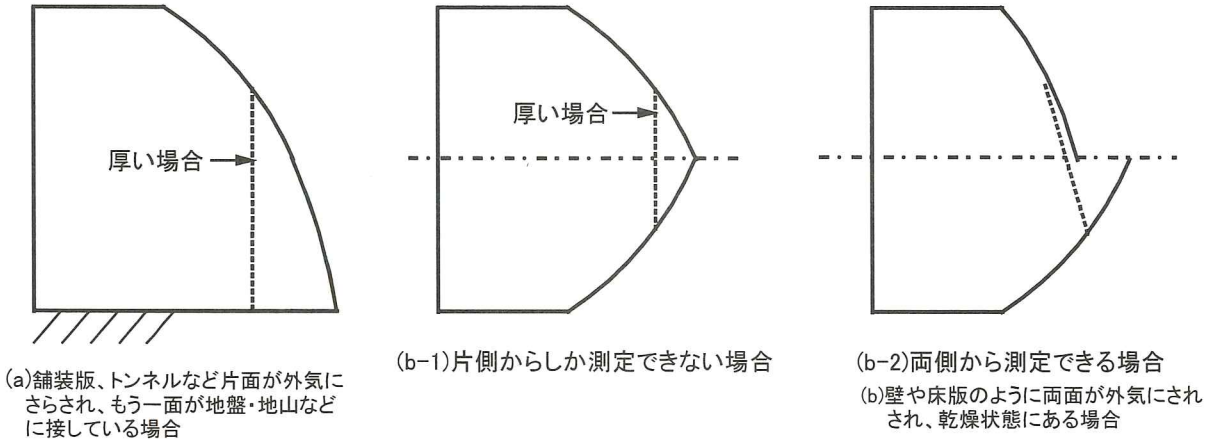
ここで，ts：表面伝搬時間，ds：微少な伝搬距離である（図−1.4の(b)）、y'：式(1.4)の微分である。



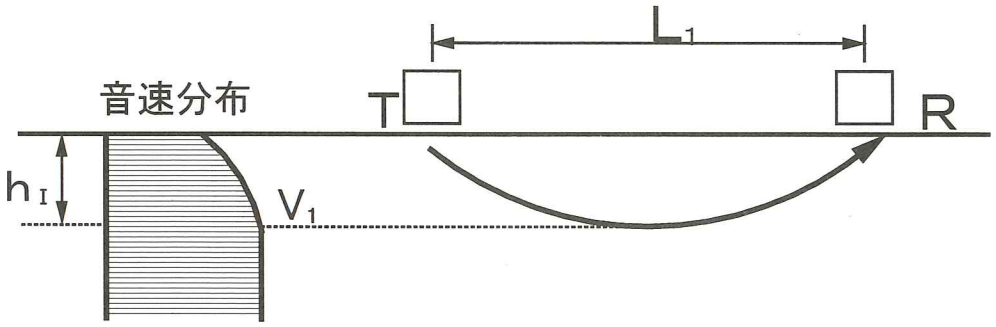
図−1.4 音速分布と超音波の最速伝搬経路

iii．伝搬時間の計算値が測定値の最尤値となるように繰り返し計算を行い、音速分布を求める。

② 構造物の種類（図−1.5）、概略の厚さ、状態などにより音速が一定となる深さh_1を，探触子間距離L_1のときの伝搬経路を式（1.3）で求め，その最深部をh_1とし（図−1.6），それ以下を音速一定とする。



図—1.5 音速分布の仮定



図—1.6 音速一定となる深さ h_1 の求め方

2．部材厚さおよびかぶり厚さの求め方

図—1.5のような音速分布を有する場合，コンクリート部材の反射時間あるいは鉄筋上面までの反射時間を測定し，次の手順でかぶり厚さ，部材厚さを求めることができる。

ⅰ．反射時間 t と厚さ h の関係の基本式は式(2.1)となる。

$$\frac{t}{2}=\int_{ho}^{ho+h}\frac{dh}{V(h)} \qquad (2.1)$$

ⅱ．かぶり厚さ c，部材厚さ h が表層内の場合

式(2.1)の $V(h)$ に式(1.3)を代入することにより，式(2.2)で求めることができる。

$$c \text{ or } h=\left[\frac{2m-1}{2m}\frac{K\cdot t}{2}+ho^{\frac{2m-1}{2m}}\right]^{\frac{2m}{2m-1}}-ho \qquad (2.2)$$

ⅲ．かぶり厚さ、部材厚さが表層より深い場合

①表層部分(表層厚さ h_I は図—1.6により既知)の往復伝搬時間 t_I を式(2.3)によって求める。式(2.3)は，式(2.1)の $V(h)$ に式(1.3)を，$h=h_I$，$t=t_I$ を代入することにより得られる。

$$tI = \frac{2}{K}\frac{2m}{2m-1}\left[(ho+hI)^{\frac{2m-1}{2m}} - ho^{\frac{2m-1}{2m}}\right] \qquad (2.3)$$

②反射時間tから表層部分の往復伝搬時間t_Iを引いた差tinを求める。

$$tin = t - tI \qquad (2.4)$$

③tinと内部音速Vinから式(2.5)によって内部の厚さhinを求める。

$$hin = Vin \cdot tin / 2 \qquad (2.5)$$

④かぶり厚さc，部材厚さhは式(2.6)によって求められる。

$$c \ or \ h = hI + hin \qquad (2.6)$$

壁部材のように音速分布が対称と仮定できる場合には，次のように求める。

ii．の表層内の場合

式(2.2)’のように，式(2.2)のtを$t/2$とし，それを２倍する。

$$c \ or \ h = \left\{\left[\frac{2m-1}{2m}\frac{K\cdot(t/2)}{2} + ho^{\frac{2m-1}{2m}}\right]^{\frac{2m}{2m-1}} - ho\right\}\times 2 \qquad (2.2)'$$

iii．の表層より深い場合も、

式(2.4)’のように式(2.4)のtを$t/2$とし，式(2.5)，(2.6)によって1/2の厚さを求め，それを２倍することにより式(2.6)’で厚さが求められる。

$$tin = (t/2) - tI \qquad (2.4)'$$

$$c \ or \ h = (hI + hin)\times 2 \qquad (2.6)'$$

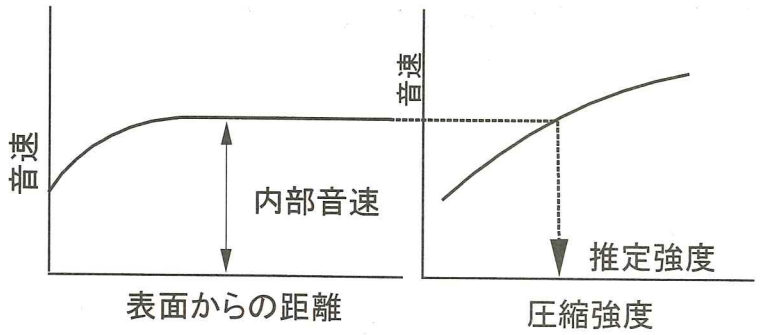
３．鉄筋径の求め方

鉄筋径は，鉄筋内部を伝搬して戻ってきた時間と，鉄筋上面からの反射時間の差と，鉄筋の音速の積から求める。

4．コンクリート品質

(1) 品質管理用供試体によるキャリブレーションカーブの作成

封かん養生した管理用供試体の音速と圧縮強度を，材齢を変化させて測定し，**図−4.1(b)**のようにキャリブレーションカーブを作成する。



(a) 内部音速　　(b) 封緘養生した管理供試体の圧縮強度と音速の関係

図−4.1　内部音速と封緘養生した管理供試体の圧縮強度と音速の関係と圧縮強度の推定

(2) 構造物の強度の推定

コンクリート表層の音速分布は、含水率の影響や強度発現の違いによって変化する。そのため，強度推定には安定した音速が得られる内部音速を用いる(**図−4.1(a)**)。コンクリートの音速は強度のみではなく，使用材料や配合などさまざまな要因によって変化するため，強度を推定するための基準とした音速と強度の関係は，内部の状態に近い封緘養生した管理用供試体の透過音速と圧縮強度の関係を用い(**図−4.1(b)**)，内部音速に対応する圧縮強度を推定強度とする。

B．レーダ法

1．概観検査

レーダ法はもちろん超音波法，弾性波法によって構造物の検査を行なう場合，鉄筋や内部の状態（空洞の有無など）の影響を受ける。そのため，配筋状態などを事前に把握しておく必要がある。これをレーダで行なうことにより鉄筋間隔や，かぶり厚さの概略値を得ることができる。

レーダによる詳細検査や，超音波，弾性波によって伝搬速度や厚さを測定する位置を，鉄筋の影響などを受けないように設定する。

2．電磁波速度分布の測定

2.1　速度分布測定方法

レーダ法による電磁波速度の分布を求める方法には，次の４方法がある。

① ワイドアングル法（WA法）

② 鉄筋の反射双曲線から求める方法（双曲線法）

③ 鉄筋のかぶり厚さから求める方法(深度法)

④ 部材厚さから求める方法(厚さ法)

これらの方法の特徴などを整理すると表−2.1のようになる。

表−2.1　電磁波速度分布の測定方法の特徴

測定方法	与条件	求められる速度	測定項目	特徴
WA法	−	速度分布	部材厚さ かぶり厚さ	無筋ｺﾝｸﾘｰﾄ部材に適している
双曲線法	鉄筋	鉄筋間の 平均速度	部材厚さ かぶり厚さ	分解能の高い装置が必要
深度法	鉄筋 かぶり厚さ	鉄筋間の 平均速度	部材厚さ かぶり厚さ	簡単に精度よく求められる
厚さ法	部材厚さ	平均速度	かぶり厚さ	

以下，深度法による速度分布の測定方法について説明する。

2.2　速度分布の求め方

深度法による電磁波速度の分布を次のように求める。

図-2.1のように各かぶり厚さを c_i、反射時間を t_i とする。各鉄筋間の電磁波速度 V_i は式(2.1)で求められる。

$$V\,i = 2 \times \left(C\,i - Ci1\right) / \left(ti - ti1\right) \qquad (2.1)$$

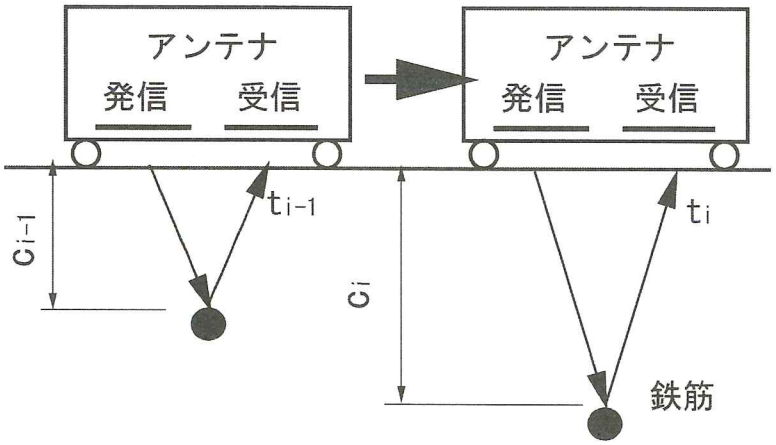


図-2.1 鉄筋のかぶり厚さと反射時間

電磁波速度 Vは式(2.2)で表される。

$$V = C / \sqrt{\varepsilon} \qquad (2.2)$$

ここに、C: 電磁波の真空中での速度(3×10^{11}mm/s)、 ε : 比誘電率である。
各鉄筋間の比誘電率の平方根$\sqrt{\varepsilon i}$ は、次式となる。

$$\sqrt{\varepsilon\, i} = C / \ Vi \qquad (2.3)$$

コンクリート内部の比誘電率$\sqrt{\varepsilon i}$ の分布は式(2.4)と仮定し, 回帰して求める。

$$\sqrt{\varepsilon\, i} \ = K(ho + hi)^{1/2} + 1 \qquad (2.4)$$

3. 部材厚さ, かぶり厚さの推定方法

(1) 厚さを求める基本式

部材厚さ hおよびかぶり厚さ cを求める式は, 超音波と同じく式(3.1)が基本式となる。

$$\frac{t}{2} = \int_0^h \frac{dh}{V(h)} \qquad (3.1)$$

(2) 速度分布を有する範囲内の厚さ

速度分布を有する範囲 (区間 1) 内の厚さ hは, 式(3.3)によって求める。このとき, 式(3.1) の $V(h)$は,

$$V(h) = C/\sqrt{\varepsilon(h)}$$

$\sqrt{\varepsilon(h)}$ は式(2.4)から

$$\sqrt{\varepsilon(h)} = K(ho + h)^{1/2} + 1$$

なので、式 (3.1) は、

$$\frac{t}{2} = \frac{1}{C}\int_o^h \left[k(ho+h)^{1/2} + 1\right] dh \qquad (3.2)$$

となり、厚さhと反射時間tの関係は式 (3.3) となる。

$$t = \frac{2}{C}\left\{\frac{2}{3}K\left[(h_o+h)^{3/2} - ho^{3/2}\right] + h\right\} \qquad (3.3)$$

(3)速度一定区間内の厚さ

速度一定区間（区間2）内の厚さ hは、まず区間1を往復する時間 t_1を、式(3.3)から $h \rightarrow h_1$ とおいて求める。区間2内の往復時間 t_2は式(3.4)によって求められる。

$$t_2 = t - t_1 \qquad (3.4)$$

区間2内の厚さ h_2は

$$h_2 = V_2 \cdot t_2 / 2 \qquad (3.5)$$

ただし、$V_2 = C/\sqrt{\varepsilon\ s}$

なので、厚さは

$$h = h_1 + h_2 \qquad (3.6)$$

によって求める。

C．衝撃弾性波法

1．弾性波速度の求め方

弾性波速度 V_P は，弾性波の表面を伝搬する成分（表面弾性波）の伝搬速度から測定する。

鉄筋の影響を受けない位置を速度測定位置とし、センサー間隔を変化させる，もしくは，十分な距離のセンサー間隔を確保し，センサ間距離と表面弾性波の到達時間差の関係から平均的に表面弾性波速度を測定する。

2．部材厚さの推定方法

厚さを推定するには，反射時間の代わりに，厚さ方向に多重反射する弾性波の振動数 f_0 を正確に測定する。

振動数 f_0 の測定には，

①多重反射する弾性波をＦＦＴ解析して周波数スペクトルのピークを求める方法

②多重反射する波形の自己相関関数を用いる方法

がある。

部材厚さ D の測定は，上記の方法で求めた厚さ方向に多重反射する弾性波の振動数 f_0 と弾性波速度 V_P から式(2.1)によって推定できる。

$$D = \frac{V_P}{2f_0} \qquad (2.1)$$

3．圧縮強度の推定

(1)管理用供試体によるキャリブレーションカーブの作成

コンクリート打設時に構造物と同時に強度管理用の供試体を作製し，同じ養生を行ない，圧縮強度と弾性波速度 V_P の関係式を求める。

(2)部材厚さがわからない場合

厚さが正確に分からない構造物については，表面弾性波から弾性波速度を測定し，弾性波速度と圧縮強度の関係式より構造物の圧縮強度を推定する。

(3)部材厚さが正確にわかる場合

厚さが正確に分かる構造物については，構造物の厚さ方向に多重反射する弾性波の振動数 f_0 を上記により測定し，弾性波速度 V_P を式(3.1)によって求める。

$$V_P = 2D \cdot f_0 \qquad (3.1)$$

弾性波速度と圧縮強度の関係式より構造物の圧縮強度を推定する。

あとがき

鉄筋コンクリート構造物自体を直接検査することをめざし，レーダ法，超音波法，弾性波法によって鉄筋間隔，かぶり厚さなどの配筋状態，内部の空洞の有無などの状態，コンクリートの品質，とくに圧縮強度の推定と鉄筋を保護している表層コンクリートの品質評価，部材の厚さの求め方について検討し，測定方法を提案した。これらの測定にあたっては，コンクリート内部の正確な速度分布を把握することが重要であることから，速度分布の求め方を重視して検討した。その結果，上記の各測定項目について，精度の高い測定方法を提案することができた。

今後，これらの測定方法を用いて，鉄筋コンクリート構造物の竣工時に非破壊試験によって構造物を直接検査する体系の確立を目指して検討する予定である。

提案した測定方法によって検査することにより，維持管理の基準となる値（初期値）を得ることができ，その後も継続して測定することにより維持管理に役立つものと考えられる。また，既設の構造物であっても，健全性の評価に役立つものと考えられるなど，応用範囲も広いものと考えられる。

なお、最後に、本研究を進めるに当り第Ⅱ部の実験では下表のとおり多くの機関、関係者の方々に協力いただいたことを付記しておく。

特に、セメント協会・研究所と日本大学生産工学部建築学科には多くの協力をいただいた。

セメント協会・研究所には、３章の基礎実験では供試体を設置させていただき、各社の測定や、コンクリートの各種強度試験に便宜を図っていただいた。４章の壁供試体の測定においては、16 年経過した貴重な供試体を提供いただいた。さらに６章では、細孔径分布を測定していただいた。

日本大学生産工学部建築学科の湯浅専任講師と学生の方々には、３章、４章の細孔径分布、小径コアの圧縮強度試験、簡易試験による中性化深さ、透気、吸水性を測定していただいた。

５章の現場の実験では、関東地方整備局宇都宮国道工事事務所の協力により、新設および 25 年経過した既設の舗装版と大型供試体を提供していただいた。測定に当っては日本道路㈱の関係者の方々にも協力いただいた。

６章の小径コアの圧縮強度、吸上げ試験は当研究室の片平、石原が担当した。

表　協力いただいた機関

対応する章		協力いただいた内容	協力いただいた機関
第Ⅱ部	3章	供試体設置、強度試験	セメント協会・研究所
		細孔径分布	日本大学生産工学部建築学科
	4章	供試体の提供	セメント協会・研究所
		細孔径分布、小径コアの圧縮強度 簡易中性化深さ・透気・吸水性	日本大学生産工学部建築学科
	5章	現場の提供	関東地方整備局宇都宮国道工事事務所
	6章	細孔径分布	セメント協会・研究所
		小径コアの圧縮強度、吸上げ試験	当研究室（片平・石原）

本研究に関連した発表論文

１．日本非破壊検査協会春季・秋季大会

メインタイトル「非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋の計測に関する研究」と題して連番で発表

＜2000 春季＞　2000.5

1) 富士　岳、森濱　和正、宮本　雅章：
　その１　実験計画

2) 森濱　和正、山口　哲夫、南　康雄、廣瀬　正行、柏瀬　一彦、坂本　一、奥　紀仁：
　その２　超音波による音速分布の測定

3) 森濱　和正、松本　功、吉村　明彦、前川　聡、松本　章、奥　紀仁：
　その３　含水率と電磁波速度の関係

4) 岩野　聡史、境　友昭：
　その４　弾性波法による測定方法について

5) 山口　達夫、山口　哲夫、森濱　和正：
　その５　超音波法による鉄筋径とかぶりの計測

6) 廣瀬　正行、森濱　和正、周　利、吉村　明彦：
　その６　広帯域超音波による鉄筋径、かぶり厚の探知

7) 山口　達夫、山口　哲夫、奥　紀仁、坂本　一、森濱　和正：
　その７　コンクリートの表面の音速測定に及ぼす鉄筋の影響

＜2000 秋季＞ 2000.11

8) 森濱　和正、山口　哲夫、南　康雄、廣瀬　正行、柏瀬　一彦、坂本　一、奥　紀仁：
　その８　超音波による表面伝播時間の測定における探触子の影響

9) 森濱　和正、南　康雄、柏瀬　一彦：
　その９　超音波による音速分布と厚さの測定

10) 森濱　和正、山口　哲夫、南　康雄、廣瀬　正行、柏瀬　一彦、坂本　一、奥　紀仁：
　その 10　超音波による内部音速の解析結果と測定値の比較

11) 廣瀬　正行、佐藤　康之、森濱　和正：
　その 11　かぶり厚の異なる鉄筋の広帯域超音波による径の探知

12) 前川　聡、松本　功、吉村　明彦、森濱　和正：
　その 12　電磁波を使用したコンクリート供試体の速度分布と厚さの測定について

13) 岩野　聡史、境　友昭：
　その 13　表面波に及ぼす鉄筋の影響

14) 湯浅　昇、小林　幸一、森濱　和正：
　16 年を経過した模擬コンクリート壁の細孔構造、透気性、中性化

15) 小林　幸一、湯浅　昇、森濱　和正、西山　直洋：
　新･旧コンクリート部材内部の音速分布予測と空隙構造の検討

16) 山口　達夫、山口　哲夫、森濱　和正：
　繰返し加振による厚さ測定装置の開発

＜2001 春季＞　2001.5

17) 森濱　和正、山口　哲夫、南　康雄、廣瀬　正行、柏瀬　一彦、坂本　一、奥　紀仁：
　その 14　超音波法によるコンクリート内部の音速分布推定方法の提案

18) 森濱　和正、山口　哲夫、南　康雄、廣瀬　正行、柏瀬　一彦、坂本　一、奥　紀仁：
　その 15　超音波法によるコンクリート品質の推定方法

19) 廣瀬　正行、森濱　和正：
　その 16　コンクリート表面を伝達するたて波超音波を用いた音速評価法

20) 前川　聡、松本　功、森濱　和正：
　その 17　電磁波を使用したコンクリート舗装版、供試体の版厚、鉄筋かぶりの測定

21) 岩野　聡史、極檀　邦夫、境 友昭、森濱 和正：
　その 18　弾性波法によるコンクリート舗装版での弾性波速度と厚さの測定

22) 岩野　聡史、極檀　邦夫、境 友昭、森濱 和正：
　その 19　弾性波法による鉄筋かぶりの測定方法について

＜2001 秋季＞　2001.10

23) 森濱　和正：
　その 20　コンクリート内部を伝搬する超音波の経路に関する検討

24) 森濱　和正、片平　博、石原　雅規：
　その 21　各種非破壊試験によるコンクリート強度の推定

25) 前川　聡、松本　功、森濱　和正：
　その 22　コンクリート内部の電磁波速度の分布

26) 岩野　聡史、境　友昭、極檀　邦夫、森濱　和正：
　その 23　弾性波法によるコンクリート強度の推定

２．土木学会年次学術講演会

＜2000＞　2000.9

27) 森濱　和正、山口　哲夫：
　コンクリート版内の音速分布と強度の関係

＜2001＞　2001.10

28) 石原　雅規、河野　広隆、森濱　和正、片平　博：
　ボス供試体圧縮試験と小径コア圧縮試験による硬化コンクリート品質推定の検討

29) 岩野　聡史、境　友昭、極檀　邦夫、森濱　和正：
　衝撃弾性波法によるコンクリート品質の推定について

３．建築学会全国大会

＜2000＞　2000.9

30) 森濱　和正、林　宜清、後藤　俊宏：
　衝撃弾性波エコー法によるコンクリートの厚み測定

＜2001＞　2001.9

31) 森濱　和正、後藤　俊宏：
　弾性波によるコンクリート強度推定のための検討

４．コンクリート工学協会・工学講演会

＜2001＞2001.7

32) 岩野　聡史、極檀　邦夫、境 友昭、森濱 和正：
　衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定

33) 森濱　和正、富士　岳、小林　幸一、西山　直洋：
　非破壊試験によるコンクリート品質、部材厚さ、かぶり厚さの検査方法に関する研究

４．その他

34) 森濱　和正：
　鉄筋腐食とかぶり厚さにかかわる非破壊試験
　超音波 TECHNO, Vol.12, No.10, pp.25-28, 2000.10

35) 森濱　和正、小林　幸一、湯浅　昇、西山　直洋：
　超音波速度分布の予測によるコンクリートの品質評価に関する研究
　日本非破壊検査協会、鉄筋コンクリート構造物の計測と表面探傷シンポジウム、pp.21-26, 2001.1

36) 森濱　和正：
　産業界における非破壊検査Ｉ－21 世紀を迎えて－コンクリート構造物
　非破壊検査、Vol.50, No.3, pp.133-136, 2001.3

37) 森濱　和正：
　版厚 WG の活動報告
　日本非破壊検査協会、鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験特別研究委員会、2001 年第１回研究委員会資料(No.009-181)、pp.1-8, 2001.6

38) 森濱　和正、吉荒　俊克、太田　資郎：
　コンクリートに関する新しい NDT 技術－非破壊試験による圧縮強度の推定
　非破壊検査、Vol.50, No.7, pp.440-445, 2001.7