

非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の 品質検査に関する共同研究報告書(1)

- I 共同研究の概要
- II 本研究で対象とした試験方法の概要
- III L型供試体および中型供試体を用いた実験

2004年3月

独立行政法人土木研究所
技術推進本部構造物マネジメント技術チーム

(社)日本非破壊検査協会
伊藤建設(株)・応用地質(株)・佐藤工業(株)

(株)銭高組・前田建設工業(株)・日本国土開発(株)

千葉工業大学・日本工営(株)

戸田建設(株)

Copyright © (2004) 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 Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事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、独立行政法人土木研究所理事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。

非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の 品質検査に関する共同研究報告書(1)

I 共同研究の概要

II 本研究で対象とした試験方法の概要

III L型供試体および中型供試体を用いた実験

(独)土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム

主任研究員
主任研究員
交流研究員

森濱
片平
野田

和正
博
一弘

(社)日本非破壊検査協会

千葉工業大学
(株)東横エルメス
日本無線(株)
日本工営(株)
(株)アミック
日本ヒルティ(株)
大成基礎設計(株)

池永
山口
飯田
青木
長岡
佐藤
中野
岩野
前川
伴
野永
渡部
佐原
古屋
青木
篠崎
土田
袴谷

博威
達夫
洋志
伸之
康之
次男
剛
聡史
聡享
健二
正也
晴陽
一之
徹
克美
秀幸

伊藤建設(株)
応用地質(株)
佐藤工業(株)
(株)銭高組
前田建設工業(株)
日本国土開発(株)
千葉工業大学
日本工営(株)
戸田建設(株)

要 旨

鉄筋コンクリート構造物を非破壊試験によって直接検査できる方法の確立をめざし、共同研究を行なっている。

本報告書は、共同研究の概要、使用した試験方法の概要、および大型のL型供試体を用いて、主に精度の確認を目的に行なった実験結果をとりまとめたものである。

キーワード：鉄筋コンクリート構造物，竣工検査，維持管理，非破壊試験，局部破壊試験，コンクリート強度，緻密性，内部欠陥，かぶり厚さ，部材厚さ

非破壊・局部破壊共同研究 名簿

試験方法	氏 名	所 属	参加期間		
非破壊	日本 非破壊 検査 協会	富士 岳	RC特研幹事[(社)日本非破壊検査工業会]	02.4～	
		池永 博威	RC特研主査[千葉工業大学建築学科]	02.4～	
		太田 資郎	RC特研幹事[日本工営(株)社会環境エンジニアリング事業部]	02.4～03.5	
		小林 幸一	RC特研幹事[(社)セメント協会・研究所ジオセメント研究グループ]	02.4～	
		辻 正哲	RC特研幹事[東京理科大学理工学部土木工学科]	02.4～	
		西山 直洋	RC特研幹事[西松建設(株)技術研究所建築技術課]	02.4～	
		山口 哲夫	RC特研幹事[(株)東横エルメス]	02.4～	
	弾 性 波	超音 波	山口 哲夫	前出(非破壊検査協会)	02.4～
			山口 達夫	(株)東横エルメス	02.4～
			奥 紀仁	(株)八洋コンサルタント技術センター	02.4～
		衝撃 弾性 波	金井昭三郎	伊藤建設(株)技術研究所	02.4～03.3
			田中 茂	伊藤建設(株)技術研究所	03.4～
			境 友昭	アプライドリサーチ(株)	02.4～
			岩野 聡史	伊藤建設(株)技術研究所	02.4～
		打音 法	歌川 紀之	佐藤工業(株)中央技術研究所土木研究グループ材料チーム	02.4～
			篠川 俊夫	佐藤工業(株)土木本部技術部門リニューアルグループ [*]	02.4～03.3
			伴 享	佐藤工業(株)土木本部技術部門リニューアル・新技術グループ [*]	02.4～
			北川 真也	佐藤工業(株)土木本部設計部門	02.4～
	電磁 性波	電磁 パルス	長岡 康之	(株)アミック	02.4～
		松本 章	(株)ジャスコ	02.4～	
	電 磁 波	電磁 波 レー ダ	前川 聡	応用地質(株)つくば技術開発センター	02.4～
			利岡 徹馬	応用地質(株)つくば技術開発センター	02.4～
			佐藤 信一	応用地質(株)つくば技術開発センター	02.4～
			斎藤 秀樹	応用地質(株)つくば技術開発センター	02.4～
			石井 武	日本無線(株)通信機器事業部通信技術二部測定器グループ	02.4～03.3
			飯田 洋志	日本無線(株)通信機器事業部通信技術二部測定器グループ	03.4～
			太田 資郎	前出(非破壊検査協会)	02.4～03.5
			青木 伸之	日本工営(株)社会環境エンジニアリング事業部LCマネジメント部	02.4～
		電磁 誘導	佐藤 次男	日本ヒルティ(株)技術部	02.4～
			小井戸純司	日本大学生産工学部電気工学科	02.4～
		赤外 線	船引 増雄	大成基礎設計(株)リニューアル事業部	02.4～03.8
			中野 剛	大成基礎設計(株)リニューアル事業部	03.9～

試験方法	氏 名	所 属	参加期間
局部 破壊	小径 コ ア	野永 健二 (株)銭高組土木事業本部土木本部技術部	02.4～
		渡部 正 前田建設工業(株)技術研究所技術開発土木グループ	02.4～
		佐原 晴也 日本国土開発(株)技術研究所コンクリート研究室	02.4～
		佐藤 文則 前田建設工業(株)技術研究所技術開発土木グループ	02.4～
		若林信太郎 (株)銭高組技術本部技術研究所	02.4～
	超 小径 コ ア	池永 博威 前出(非破壊検査協会)	02.4～
		古屋 陽一 千葉工業大学建築学専攻学科	02.4～
		太田 資郎 前出(非破壊検査協会)	02.4～03.5
		青木 伸之 日本工営(株)社会環境エンジニアリング事業部LCマネジメント部	02.4～
		岸見 淳平 日本工営(株)社会環境エンジニアリング事業部LCマネジメント部	02.4～
	ボス 供 試 体	多田 幸司 戸田建設(株)土木工事技術部	02.4～
		篠崎 徹 戸田建設(株)技術研究所	02.4～
		田中 徹 戸田建設(株)土木工事技術部技術課	02.4～03.3
		沖田 佳隆 戸田建設(株)土木工事技術部技術課	02.4～
		土田 克美 戸田建設(株)土木工事技術部技術課	02.4～
		袴谷 秀幸 戸田建設(株)技術研究所	02.4～
	土 木 研 究 所	河野 広隆 (独)土木研究所構造物マネジメント技術	02.4～
		森濱 和正 (独)土木研究所構造物マネジメント技術	02.4～
		片平 博 (独)土木研究所構造物マネジメント技術	02.4～
		久田 真 (独)土木研究所構造物マネジメント技術	02.4～
		古賀 裕久 (独)土木研究所構造物マネジメント技術	02.4～
		野田 一弘 (独)土木研究所構造物マネジメント技術(八千代エンジニアリング(株))	02.4～03.3
		田中 秀治 (独)土木研究所構造物マネジメント技術(株)ウエスコ	02.4～
		山口順一郎 (独)土木研究所構造物マネジメント技術(株)構造技術センター	03.4～
		北山 良 (独)土木研究所構造物マネジメント技術(株)日本ピーエス	03.4～

ま え が き

コンクリート構造物の耐久性が問題になっており、コンクリート構造物の長寿命化が重要な課題になっている。長寿命化が図られているかどうかを確認するためには、その構造物が所要の性能・品質を有しているかどうかを新設時に確認しておくことが必要である。

ところが、現在の竣工時の検査では、通常、出来形および表面状態を除いて、構造物の性能・品質が直接検査されてはおらず、新設時の構造物の性能・品質はほとんど確認されていないのが現状である。

そのため、本研究は、新設鉄筋コンクリート構造物の性能を非破壊試験および局部破壊試験によって竣工時に検査できる方法の確立をめざす。また、新設構造物を直接検査することにより、竣工時の品質の初期値が得られることから、その後継続的に測定することにより維持点検にも役立つ検査方法をめざす。

本研究で対象とする検査項目は、

- ① コンクリートの圧縮強度
 - ② 耐久性確保に重要なコンクリート表層の緻密性、内部欠陥
 - ③ 出来形検査のうち直接測定することができない壁、スラブを対象にした部材厚さ
 - ④ 鉄筋のかぶり厚さ、配筋状態
- などである。

対象とした検査方法は、次の 10 方法である。

- (1) 非破壊試験
 - 1) 弾性波
 - ① 超音波法
 - ② 衝撃弾性波法
 - ③ 打音法
 - 2) 電磁波と弾性波
 - ④ パルス電磁力音響法
 - 3) 電磁波
 - ⑤ 電磁波レーダ法 (3 機種)
 - ⑥ 電磁誘導法
 - ⑦ 赤外線サーモグラフィ法
- (2) 局部破壊試験
 - ⑧ 小径コア法
 - ⑨ 超小径コア法
 - ⑩ ボス供試体

研究を進めるに当たって、土木研究所と(社)日本非破壊検査協会ははじめ 19 機関と共同研究を 2002 年度から 3 年計画で実施することとした。

本研究は、大型の供試体や実際の構造物に対して、各種非破壊・局部破壊試験方法を使った実験を行なうことによって、非破壊・局部破壊試験法を検査に適用するために必要な、試験結果に及ぼす各種要因の把握や、測定精度の向上を図り、品質判定基準を確立し、竣工検査方法を確立しようとするものである。

これらの検討結果を、順次報告書にとりまとめ、研究内容を紹介する。

なお、本報告書では実験結果などの概要を記述し、詳細な内容、実験データは巻末の CD・R に収録した。

非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究報告書(1)

I 共同研究の概要

II 本研究で対象とした試験方法の概要

III L型供試体および中型供試体を用いた実験

目 次

まえがき

第I部 共同研究の概要

1章 研究目的	I.1-1
2章 本研究で対象とする検査項目と非破壊・局部破壊試験方法	I.1-2
3章 検討課題と研究の進め方	I.1-3

第II部 本研究で対象とした試験方法の概要

1. 本研究で使用した試験装置	II-1
2. 超音波法	II-2
3. 衝撃弾性波法	II-2
4. 打音法	II-3
5. パルス電磁力音響法	II-3
6. 電磁波レーダA法	II-4
7. 電磁波レーダB法	II-4
8. 電磁波レーダC法	II-4
9. 電磁誘導法	II-5
10. 赤外線サーモグラフィ法	II-5
11. 小径コア法	II-6
12. 超小径コア法	II-6
13. ボス供試体	II-6

第III部 L型供試体および中型供試体を用いた実験

1章 実験概要	III.1-1
1.1 実験目的	III.1-1
1.2 供試体の種類	III.1-2
1.3 測定項目	III.1-5
1.4 円柱供試体、標準コア供試体の試験結果	III.1-5
1.4.1 円柱供試体の音速および圧縮強度の結果	III.1-5
1.4.2 標準コア供試体の音速、強度試験結果	III.1-6
1.4.3 封かん養生とコアの強度の比較	III.1-6
1.4.4 吸水率および細孔径分布	III.1-6
1.5 かぶり厚さ、部材厚さの実測結果	III.1-6

2 章 超音波法	III.2-1
2. 1 実験目的	III.2-1
2. 2 円柱供試体の強度発現と音速の関係	III.2-1
2. 3 コンクリート内部の音速分布の推定結果とコアの透過音速の比較	III.2-2
2. 4 強度推定結果	III.2-3
2. 5 部材厚さ測定結果	III.2-4
2. 6 内部欠陥の検出	III.2-5
3 章 衝撃弾性波法	III.3-1
3. 1 実験目的	III.3-1
3. 2 L 型供試体での圧縮強度の測定実験	III.3-1
3.2.1 実験概要	III.3-1
3.2.2 円柱供試体での換算式の検証実験	III.3-1
3.2.3 L 型供試体での弾性波速度測定、圧縮強度の測定	III.3-2
3.2.4 ま と め	III.3-2
3. 3 L 型供試体および中型供試体での厚さ測定実験	III.3-3
3.3.1 L 型供試体での測定結果	III.3-3
3.3.2 中型供試体での測定結果	III.3-3
3.3.3 ま と め	III.3-4
3. 4 L 型供試体での表層部欠陥の平面範囲の探査	III.3-4
3.4.1 測定原理および実験内容	III.3-4
3.4.2 測定結果およびまとめ	III.3-4
4 章 打 音 法	III.4-1
4. 1 厚さ測定における精度	III.4-1
4. 2 内部欠陥の検知性能	III.4-2
4. 3 材齢、支持条件など検査条件の影響	III.4-2
5 章 パルス電磁力音響法	III.5-1
5. 1 実験目的	III.5-1
5. 2 測定概要	III.5-1
5.2.1 かぶり厚さ測定	III.5-1
5.2.2 鉄筋の腐食状態の把握	III.5-2
5. 3 測定結果	III.5-2
5. 4 ま と め	III.5-2
6 章 電磁波レーダ A 法	III.6-1
6. 1 往復伝播時間および電磁波速度の材齢変化	III.6-1
6. 2 速度測定法の比較	III.6-1
6. 3 双曲線法による鉄筋かぶりと電磁波速度の算出	III.6-1
6. 4 鉄筋の施工位置	III.6-2
6. 5 鉄筋のかぶり	III.6-2
6. 6 版 厚	III.6-2

6. 7	内部欠陥	Ⅲ.6-3
6. 8	400MHz アンテナの適用	Ⅲ.6-3
7 章	電磁波レーダ B 法	Ⅲ.7-1
7. 1	実験目的	Ⅲ.7-1
7. 2	測定方法	Ⅲ.7-1
7. 3	かぶり厚さの測定結果	Ⅲ.7-1
7. 4	内部欠陥の検出	Ⅲ.7-2
7. 5	ま と め	Ⅲ.7-4
8 章	電磁波レーダ C 法	Ⅲ.8-1
8. 1	実験目的	Ⅲ.8-1
8. 2	実験結果	Ⅲ.8-1
8. 3	実験結果に関する考察	Ⅲ.8-3
8. 4	今後の課題	Ⅲ.8-3
9 章	電磁誘導法	Ⅲ.9-1
9. 1	実験目的	Ⅲ.9-1
9. 2	探査結果	Ⅲ.9-1
9.2.1	探査の適用範囲	Ⅲ.9-1
9.2.2	鉄筋位置の解析結果	Ⅲ.9-2
9.2.3	かぶり厚さの解析結果	Ⅲ.9-2
9.2.4	鉄筋径の解析結果	Ⅲ.9-3
9.2.5	探査結果、精度についての考察	Ⅲ.9-3
10 章	赤外線サーモグラフィ法	Ⅲ.10-1
10. 1	実験目的	Ⅲ.10-1
10. 2	実験概要	Ⅲ.10-1
10. 3	実験結果	Ⅲ.10-1
11 章	小径コア法	Ⅲ.11-1
11. 1	L 型試験体を用いた実験	Ⅲ.11-1
11.1.1	実験概要	Ⅲ.11-1
11.1.2	実験結果	Ⅲ.11-1
11.1.3	ま と め	Ⅲ.11-4
11. 2	中型試験体を用いた小径コア圧縮強度試験	Ⅲ.11-5
11.2.1	試験概要	Ⅲ.11-5
11.2.2	試験結果	Ⅲ.11-5
11.2.3	ま と め	Ⅲ.11-5
12 章	超小径コア法	Ⅲ.12-1
12. 1	実験目的	Ⅲ.12-1
12. 2	試験概要	Ⅲ.12-1
12.2.1	超小径コアの採取	Ⅲ.12-1
12.2.2	圧縮強度試験	Ⅲ.12-1

12.2.3	採取箇所	III.12-1
12.3	実験結果（L型試験体）	III.12-2
12.3.1	超小径コア（ $\phi 10\text{mm}$ ）と $\phi 100\text{mm}$ の標準コアとの比較	III.12-2
12.3.2	供試体の採取位置による $\phi 100\text{mm}$ コア強度と超小径コア強度との関係	III.12-2
12.3.3	採取深さと超小径コア強度との関係	III.12-3
12.3.4	材齢と強度の関係	III.12-4
12.4	実験結果（中型試験体）	III.12-4
12.4.1	採取方向と超小径コア強度の関係	III.12-4
12.4.2	採取箇所による平均値評価	III.12-5
12.5	まとめ	III.12-6
13章	ボス供試体	III.13-1
13.1	はじめに	III.13-1
13.2	実験概要	III.13-1
13.2.1	実験方法	III.13-1
13.2.2	実験項目	III.13-2
13.3	実験結果	III.13-3
13.3.1	寸法法と体積法の比較	III.13-3
13.3.2	供試体採取位置による密度・圧縮強度への影響	III.13-3
13.3.3	供試体の寸法による圧縮強度への影響	III.13-4
13.3.4	ボス供試体強度とコア供試体強度の比較	III.13-4
13.3.5	早期材齢採取による圧縮強度への影響	III.13-5
13.4	まとめ	III.13-6

第 I 部

共同研究の概要

1 章 研究目的

本研究の目的は、鉄筋コンクリート構造物の品質を非破壊試験や局部破壊試験によって直接検査する方法を確立することである。また、竣工時の構造物を直接検査することで品質の初期値が得られることから、その後も測定を継続的に行うことにより維持管理にも役立つ試験方法を目指している。

鉄筋コンクリート構造物の竣工検査の現状は、出来形（スラブや壁の厚さを除く）、コンクリート表面の充填状況、ひび割れ状態などを除き、構造物を直接的に検査することにはなっていない。コンクリートの圧縮強度はテストピースによって試験されるが、養生条件等が実構造物とは異なるために構造物の真の強度とは異なる。また、構造物に明らかな欠陥等が認められるような場合にはコアを採取する場合もあるが、このような特別な場合を除き、構造物の耐荷力や耐久性に重要な項目であるコンクリートの強度や鉄筋のかぶり厚さなどは測定されていない。

最近、構造物の寿命予測や維持管理計画の必要性が指摘されているが、実構造物の品質を直接かつ適切に評価できる方法が確立していないのが現状である。そのために、非破壊試験あるいは局部破壊試験を用いて構造物の性能・品質を直接評価できる方法が必要である。

本研究では、以下のことを検討することによって目的を達成しようとするものである。

①適切な原理に基づいた試験方法の確立

②試験結果に及ぼす主要な要因の把握と対応策の検討

試験方法の確立、精度の向上のためには、測定に影響を及ぼす各種要因を把握し、それらに対する対応策、あるいは回避策などを検討する。

③試験精度の把握

①②の成果から、実際の測定精度を把握し、検査基準に反映させる必要がある。

④実構造物への適用性の検討

実際に構造物への適用が可能かを確認する。また、検査方法を確立するためには、試験するロットの大きさ、ロットごとのサンプリングの位置や数量、合格判定基準などが必要であり、適用性と合わせて実構造物で検討する。

⑤検査方法（案）の作成

上記の結果を踏まえて、最終的に検査方法マニュアル案を作成する。

本研究では、非破壊試験に加え局部破壊試験も対象とした。その理由は、非破壊試験結果の信頼を得るためには時間がかかるものと考えられることから、非破壊試験ほどではないが構造物に与えるダメージが小さく、しかも信頼性の高い方法として局部破壊試験も加えた。また、現場条件によっては、非破壊試験と局部破壊試験を組み合わせることによって合理的な検査方法確立の可能性もあるものと考えられる。

2 章 本研究で対象とする検査項目と非破壊・局部破壊試験方法

本研究で対象とする検査項目は、鉄筋コンクリート構造物の耐荷力、耐久性にとって重要なコンクリートの圧縮強度、緻密性、内部欠陥、鉄筋のかぶり厚さ、出来形検査のうち直接検査できないスラブ、壁などの厚さ測定である。

これらの検査項目に対して、共同研究の参加機関と試験方法は表-I.2.1のとおりである。

検査項目と試験方法の関係は表-I.2.2とおりである。竣工検査は2段階とし、概観検査を行なった後、詳細に検査することを考えている。ここで概観検査とは、目視による表面状態の観察のことではなく（もちろん、目視検査は別途行われている重要な検査である）、目視ではわからない内部欠陥の有無や鉄筋位置を把握することである。これらの項目も重要な検査であることはもちろん、詳細検査に当たり、検査する位置を選定するときの必須のデータでもあるからである。

詳細検査は、鉄筋に関しては、かぶり厚さである。コンクリート品質については、コンクリートの圧縮強度、耐久性を評価する上で重要な表層部分の品質（緻密性）、内部欠陥である。出来形については、現在の検査方法では、スラブや壁の厚さは施工段階ごとに計測していく間接的な方法や、コアを採取して直接測定されているが破壊を伴う方法が行われているので、非破壊による部材厚さの測定も行なった。なお、表-I.2.2中の「速度（分布）」は検査項目ではないが、他の検査項目を求めるうえで、極めて重要な測定項目となるので、あえて掲載した。

各検査項目に対する試験方法は表-I.2.2に示すとおり、超音波、衝撃弾性波、打音法、パルス電磁力、電磁波レーダ、電磁誘導、赤外線サーモグラフィの各種非破壊試験と、小径コア、超小径コア、ボス供試体による局部破壊試験である。各試験方法の具体的な測定方法、特長などは第Ⅱ部に記述する。

表-I.2.2には、維持管理で継続的に測定することにより健全性あるいは劣化状況が把握できることが期待される項目についても示している。

表-I.2.1 対象とする試験方法と参加機関

試験方法			参加機関		
非破壊	弾性波	超音波	◇東横エルメス	◇八洋コンサルタント	
		衝撃弾性波	伊藤建設		
		打音法	佐藤工業		
	電磁波・弾性波	パルス電磁力	◇アミック	◇ジャスコ	
	電磁波	電磁波レーダ	応用地質		
			◇日本無線		
			◇日本工営		
		電磁誘導	◇日本ヒルティ		
			◇日本大学		
		赤外線サーモグラフィ	◇大成基礎設計		
局部破壊	コア（構造物内部）	小径コア	銭高組	前田建設工業	日本国土開発
		超小径コア	千葉工業大学	日本工営	
	（構造物外部）	ボス供試体	戸田建設		

◇：日本非破壊検査協会加盟機関

表- I .2.2 検査項目と適用可能と考えられる試験方法

検査時期	検査項目		非破壊試験						局部破壊試験				
			弾性波			電・弾	電磁波			小径 コア	超小径 コア	ボス 供試体	
			超音波	衝 撃 弾性波	打音法	パルス 電磁力	電磁波 レーダ	電磁 誘導	赤 外 線 サーモグラフィ				
新設時	概観 検査	配筋状態					○	○					
		内部状態					○		○				
	詳細 調査	(速度分布)	○	○		△	○						
		鉄筋のかぶり厚さ		△	△		○	○	○		○		
		コンク リート 品質	強度	○	○	△	△	△			○	○	○
			表層の品質 (緻密性)	○	△			△			○	△	
			内部欠陥	○	○	○		○		○			
		部材の厚さ		○	○	○		○					
維持管理		経時変化 ひび割れ はくり	経時変化 ひび割れ はくり	はくり	さび	はくり 含水率		はくり	中性化・塩分		中性化 ・塩分の モニタリング		

3 章 検討課題と研究の進め方

本研究は、1 章の研究目的を達成するため、表- I .3.1 に示す項目を検討する予定である。試験方法によっては比較的新しい方法で、基本的なことから研究する必要があるもの、あるいは既に試験法が確立されており、現場での適用性の検討がまたれている方法など、到達状況はさまざまであることを考慮し、本研究ではゴシックの部分を主な検討課題とした。なお、表中の標準コアの測定値は、各種試験法の妥当性を検証するための基準となるものである。

研究の手順としては、まず、大型の供試体を用いた実験や、実構造物を用いた現場実験を行い、この結果をもとに、最終目標である検査方法(案)の確立を行う予定である。

(1)大型の供試体による実験

- 大型の供試体を用いた実験では、各試験方法ごとに、
- ①適切な原理に基づいた試験方法の確立
 - ②非破壊試験に及ぼす主要な要因の把握と対応策の検討
 - ③非破壊試験の精度の把握
- を行う。

(2)実構造物による現場実験

- (1)の基本的な実験により得られた成果が実際に適用できるのかを、実構造物によって確認する。
- また、実構造物では、供試体実験では実質的に困難な検査方法の確立のための検討を行う。具体的には、試験するロットの大きさ、ロットごとのサンプリングの位置や数量、合格判定基準などを検討する。

(3)検査方法(案)の作成

これらの結果をとりまとめ、最終的に検査方法のマニュアル案を作成する予定である。

表- I .3.1 試験方法の現状と共同研究での主な検討内容

試験方法の種類			測定項目	現状	問題点	検討内容	成果の目標
非破壊	弾性波	超音波法	表層の緻密性	元になる音速分布の求め方、それぞれの評価項目の測定方法確立	耐久性との関係	耐久性あるいは類似の評価指標との比較	表層の耐久性評価
			強度(簡易法)		測定位置の影響	精度向上(変動要因の把握)	強度推定方法
			部材厚さ		現場への適用性	現場での実績	
			(内部欠陥・品質変化)			相対的な品質の比較	
		衝撃弾性波法	強度	確立(特許)	コンクリートの品質と弾性波速度	弾性波速度の求め方	強度推定方法
			部材厚さ	確立(特許)		精度向上	部材厚さ測定方法
			内部欠陥	確立(特許)	現場への適用性	現場での実績	
		打音法	部材厚さ	確立(特許)	精度、測定範囲	精度向上	部材厚さ測定方法
			内部欠陥	確立(特許)	現場への適用性	現場での実績	
		電・弾	パルス電磁力音響法	かぶり厚さ	確立(特許)	各種影響	精度向上
	鉄筋腐食			未実施	各種影響	検出方法	完全非破壊の鉄筋腐食検出方法
	電磁波	電磁波レーダ法	鉄筋位置(平面)	一般的な測定方法	(測定限界)	かぶりと間隔の関係	適用範囲
			かぶり厚さ・部材厚さ	一般的な測定方法	誘電率、リブの影響	精度向上(誘電率の求め方、リブの補正方法)	かぶり厚さ測定方法
			内部欠陥	一般的な測定方法	見分け方	波形の見分け方	内部欠陥検出方法
		電磁誘導法	かぶり厚さ	一般的な測定方法	鉄筋径・間隔の影響	精度向上	かぶり厚さ測定方法
		赤外線サーモグラフィ法	内部欠陥	一般的な測定方法	欠陥の種類・大きさ・深さ	欠陥の見分け方	欠陥検出方法
局部破壊	コア	小径コア	強度・弾性係数	確立(特許、建築)	土木用への適用性	現場での実績	
			耐久性	未実施(管理のための中性化、塩分量は実施中)	評価方法がない	評価方法(吸水率)	簡易な耐久性評価方法
			かぶり厚さ	標準コアまたははつり	鉄筋位置の確認(電磁波レーダ、電磁誘導との組合せ)		かぶり厚さ確認方法
		超小径コア	強度	検討中	精度向上	試験方法	強度試験方法
			耐久性	未実施	評価方法がない	(孔を使った検討?)	簡易な耐久性評価方法
	ボス供試体	強度	確立(特許、建築)	土木用への適用性	現場での実績		
		耐久性	モニタリング(中性化、特許)	塩分浸透	塩分浸透・鉄筋腐食	塩分浸透のモニタリング	
	標準コア(供試体、構造物の非破壊・局部破壊試験結果との比較)			強度			圧縮強度試験
			耐久性(緻密性)			吸水率、細孔径分布測定	
			部材厚さ			コア(および計測)による部材厚さ測定	
円柱供試体			強度・弾性波速度			養生条件と圧縮強度試験、弾性波速度の測定	
			含水率・弾性波速度			含水率測定、含水率と弾性波速度の測定	

第 II 部

本研究で対象とした試験方法の概要

1. 本研究で使用した試験装置

本研究で使用した主な試験装置は、表-Ⅱ.1.1 のとおりである。各装置の仕様およびそれらの装置を用いた各検査項目の試験方法の概要を以下の各章で概説する。

表-Ⅱ.1.1 本研究で使用した主な試験装置

試験方法	実施機関・グループ	試験装置
超音波	東横エルメス 八洋コンサル	東横エルメス社製エルソニックSP、繰返し加振器
	土研	東横エルメス社製エルソニックSP
衝撃弾性波	伊藤建設	アプライドリサーチ社製 iTECS-2, iTECS-3
打音法	佐藤工業	佐藤工業社製コンクリートヒッター
パルス電磁力	アミック ジャスコ	パルス電磁力音響装置 電位
電磁波レーダ	応用地質	地下レーダー測定器SIR-2
	日本無線	ハンディサーチNJJ-85A・PDA(HSComm)、NJJ-95A
	土研	ハンディサーチNJJ-85A・PDA(HSComm)
	日本工営	多目的レーダ計測システム
電磁誘導	日本ヒルティ	ヒルティ社製 フェロスキャンFS10
赤外線サーモグラフィ	大成基礎設計	NEC三栄社製TH5102
小径コア 標準コア	銭高組 前田建設工業 日本国土開発	コア採取機 切断機 キャッピング装置 圧縮試験機 促進中性化試験装置
超小径コア	千葉工業大学 日本工営 東邦アーステック	コア採取機(ダイヤモンドコアドリルDD-EC1) 切断機 圧縮試験機(INSTRON 4466)
ボス供試体	戸田建設	ボス型枠: □75×150、□100×200、□125×250 圧縮試験機: 東京衡機製RU-TK10(100tf)、RU-FA(200tf) 促進中性化試験装置
円柱供試体	土研	圧縮試験機 φ100: 島津製作所製CONCRETO 2000(2000kN) φ50: 島津製作所製(300kN)
標準コア		コア採取機 切断機 キャッピング装置 圧縮試験機 φ100: 島津製作所製CONCRETO 2000(2000kN) φ50: 島津製作所製UH-300kN
小径・超小径コア		コア採取機 切断機 キャッピング装置 圧縮試験機 マルイ社製(50kN)
その他		シュミットハンマ 自然電位・分極抵抗: 四国総合研究所製SRI-CM-II

2. 超音波法

超音波法で使用した試験装置は東横エルメス社製であり、コンクリートの圧縮強度、表層の緻密性、内部欠陥、部材の厚さを測定する。

これらの項目を測定するには、コンクリート内部の音速分布を求めることが必要である。音速分布は、通常、表層の音速が変化する部分と、ある深さより内部の一定の音速部分（内部音速）に分けられ、表層の音速分布と内部音速、内部音速に達する位置を求める必要がある。表層の音速分布は、表面走査法により探触子間隔を変化させたときの伝搬時間を測定し、変分法によって最速の伝搬経路を推定することによって求める。内部音速と、内部音速に達する位置は、表面走査法によって測定した伝搬時間の変化率（見かけの音速）が一定になる探触子間隔のときの最速経路の最深部となる。

表層の音速分布が緻密性を示しているものと考えており、吸水率、細孔量の比較を行うことによって評価できるかを検討する。圧縮強度は、封かん養生した円柱供試体の音速と圧縮強度の関係を求めておき、内部音速に一致する強度を求めることによって推定する。

部材厚さ、内部欠陥までの距離は、求めたい位置までの反射波の往復時間と音速分布から求めることができる。欠陥は、健全部分の音速との比較によって検出する。

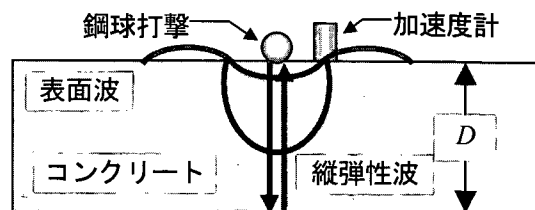
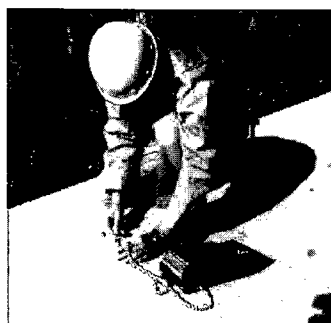
3. 衝撃弾性波法

測定状況を写真－Ⅱ.3.1に示す。コンクリート表面に加速度計を手で押し付け、その近傍を鋼球で打撃する。この時、発生する弾性波の模式図を図－Ⅱ.3.1に示す。本測定ではiTEC-2、iTECS-3により、加速度計が検知した振動を記録し、内部を球面状に伝搬する縦弾性波が打撃面と反射面で多重反射することにより生成される振動数 f と、縦弾性波の伝搬時間を表面で計測することにより、弾性波速度 V_P を測定する。これらの測定結果から、①式(Ⅱ.3.1)からコンクリートの厚さ D の測定。

$$D = V_P / (2f) \dots\dots\dots (Ⅱ.3.1)$$

②弾性波速度と相関関係にあるコンクリートの圧縮強度の測定。

③欠陥直上で測定される振動数は、諸要因により健全部で測定される振動数とは異なることに着目し、複数点での振動数測定結果の比較による欠陥の平面範囲・断面積の測定。以上①～③の測定を主に行う。



写真－Ⅱ.3.1 測定状況（振動数測定：左，速度測定：右）

図－Ⅱ.3.1 鋼球打撃で発生する弾性波

4. 打音法

コンクリート構造物の剥離検知では、叩き検査が用いられている。叩き検査では、検査者の聴覚を用いた評価となるため、検査者が異なったり、騒音などの環境条件により、欠陥部を見過ごしたり、欠陥部の広さが異なる結果が得られる可能性がある。打音法は、このような叩き検査における主観的な評価方法を改善した手法である。

打音法は、ハンマーによりコンクリートに生じた振動を音で捉え、その音から健全性を評価する手法である。剥離箇所では、コンクリート自体の厚さが薄くなっているため、打撃により大きな振動、それに伴い大きな音が発生する。一方、健全部では、相対的にコンクリート自体の厚さが厚くなっているため、打撃により相対的に小さな振動、それに伴う小さな音が発生する。すなわち、板の振動の原理を用い、計測データから数値的に欠陥部の検知をする手法である。

打音法では、衝撃力を測定できるインパルスハンマーと遮音性があるフード付マイクロフォンを用いる。得られたデータから、衝撃力の最大値と発生した音の最大振幅の比である振幅値比を求める。次に試験体で得られた振幅値比と部材厚さの関係式から部材厚さを換算する。さらに部材厚さの分布から、欠陥の有無や規模を推定する手法である。

5. パルス電磁力音響法

本測定法は、鉄筋コンクリート表面から内部の鉄筋を直接振動させ、その健全性を評価する手法である。

装置は、電磁パルスを発生させるコンデンサーバンク装置(電源部)と鉄筋より発生した音響を受信するセンサー部とで構成されている。電源部はコンデンサーに蓄えた電荷を大電流として放出するような構造になっている。音響受信センサー部は音響を電気信号に変え増幅器、フィルターをへてアナログ波形表示、またAD変換装置を用いてデジタル信号として波形情報を取得する。

原理は、コイルにパルス大電流を流し強力なパルス磁場が発生し、導体に渦電流が誘起され、渦電流と電磁パルスによる磁界との相互作用で鉄筋が力を受け振動し音響が発生する。発生した音響は、コンクリート中を通り表面に伝わり、音響センサーで受信し、その信号を解析することでコンクリートと鉄筋の状態が診断できる¹⁾。

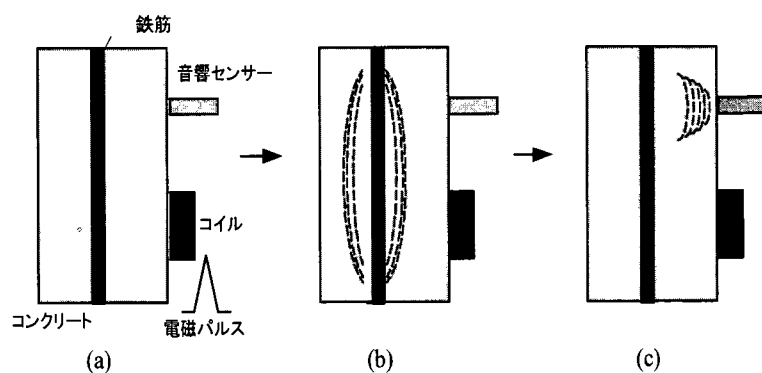


図-Ⅱ.5.1 パルス電磁力法の原理

このパルス電磁力音響法は、電気的に加振しているため再現性にすぐれ、コンクリートと鉄筋との付着力の評価や鉄筋位置の測定への適用が期待できる手法といえる。

【参考文献】

- 1) 高鍋雅則、橋本光男：鉄筋コンクリート診断のためのパルス電磁力音響法の提案，非破壊検査，Vol.52, No.11, pp.628-632, 2003.1

6. 電磁波レーダA法

電磁波レーダはコンクリート表面においた送信アンテナから電磁波パルスを放射し、内部や背面からの反射波を受信アンテナで捉えて、鉄筋の位置とかぶり、版厚、内部欠陥の位置と深度を求めるものである。

測定には、主に中心周波数 1500MHz のアンテナを使用し、かぶりが深い場合には中心周波数 400MHz のアンテナも使用し、距離計同期で 1m 当たり 200 波形の波形サンプリングを行なった。

電磁波速度の測定には、ワイドアングル法、透過法、深度法および双曲線法の 4 方法による解析も行った。ここで双曲線法は、鉄筋反射波ごとに電磁波速度を求める方法であるが、これまでの方法を改良し、鉄筋反射波の頂点からの距離と往復伝播時間を複数点読み取り、それら全体を用いて、最小二乗法により電磁波速度とかぶりを同時に求めた。また、特に浅い場合の鉄筋かぶりの測定精度を向上するために、水槽を利用して水位～往復伝播時間関係を求めて、それから送信アンテナと受信アンテナの間隔(送受信間距離)の実効的な値を求めた。

7. 電磁波レーダB法

電磁波レーダB法で用いた装置は、周波数 900MHz、深さ 200mm まで測定可能である。

電磁波レーダは、誘電率の異なる物質から反射することを利用して、主に配筋状態やかぶり厚さの測定に使われている。

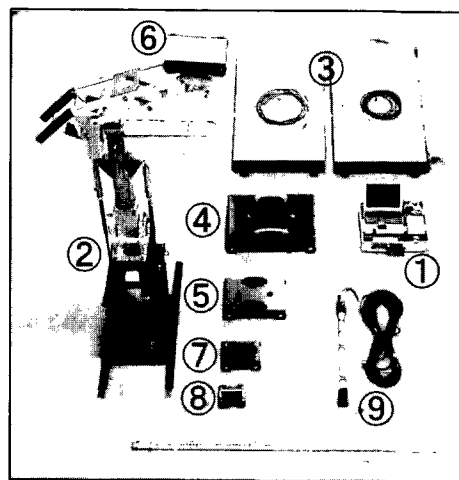
電磁波レーダでかぶり厚さや部材厚さを測定する場合、反射波の往復時間と、コンクリート内を伝搬する電磁波速度が必要になる。電磁波速度は、コンクリートの状態による誘電率が変化することによって変化するため、誘電率(実際には比誘電率)を適切に設定する必要がある。そのため、この装置は、比誘電率を設定できるようになっている(深度校正)。しかし、実際には、比誘電率の設定の仕方は決まっていないため、本研究の重要な課題である。

電磁波レーダは、誘電率が変化する物質で反射することを利用して、配筋状態の把握、鉄筋のかぶり厚さの測定、部材厚さの測定、内部欠陥の検出を行う。

8. 電磁波レーダC法

研究に用いた“多目的レーダ計測システム(日本工営株式会社製)”は、100MHz～1500MHz 周波数帯の多彩なアンテナバリエーションを有する。本研究では部材中の配筋などを探査するため、高周波の 1000MHz と 1500MHz のアンテナを使用した。

調査対象表面をアンテナ走査し、インパルス状の電磁波をコンクリート内へ放射すると、その電磁波がコンクリートと電気的性質(比誘電率・導電率)の異なる物体(鉄筋・埋設管・空洞等)との境界面で反射および透過する。この反射した電磁波をアンテナで受信し、往復の伝搬時間(送受信の時間差)から反射物体までの距離を計算することで物体の位置を求めることができる。



多目的レーダ計測システム

9. 電磁誘導法

コンクリート構造物に埋設された鉄筋を非破壊で探査する方法の内、電磁誘導原理を用いた鉄筋探査方法について述べる。

探査システムは、スキャナーとモニターを含む本体制御部より構成される。スキャナー部にはインパルス誘導原理で作動するフィールドコイルが内臓されていて、探査対象であるコンクリート構造物に磁界を励起する。この一次磁界の中に鉄筋が存在すると誘導電流が発生し、その結果二次誘導磁界が形成される。

スキャナーがコンクリート上を移動して一次磁界が減衰すると、それにつれて二次磁界も減衰する。この磁界の変化がセンサーコイルの電圧を変化させ、信号として取り込まれる。

このプロセスにより得られたパラメータは本体に内臓されている実測されたデータベースと照合され、合致するデータを引き当てる。

スキャナーホイールによって距離（位置）を計測し、測定より得られたパラメータとデータベースを照合して合致したデータの値に基づいてかぶり厚さや鉄筋径を求めるシステムである。

10. 赤外線サーモグラフィ法

本測定法は、コンクリート表面温度を測定し、その温度分布からコンクリート表面の健全性を評価する手法である。

全ての物体は表面の温度に応じた強度の赤外線を放射している。赤外線サーモグラフィは、この物体表面から放射される赤外線の放射強度を、赤外線センサを用いて計測し、これを温度分布に換算・画像化する装置である。

赤外線画像によるコンクリートの内部劣化の検出は、コンクリート表面温度の時間変化が劣化部と健全部で異なることに注目している。劣化部と健全部に温度変化が生じる理由は、劣化部の背後に存在する空気層が断熱層となりコンクリート内部への熱伝導を妨げるため、日照や大気により与えられた熱がコンクリート表層に蓄えられることによる。この温度差に注目することにより、劣化部の検出が可能となる。

なお、コンクリート内部の熱伝導モデルを図-Ⅱ. 10. 1 に示す。

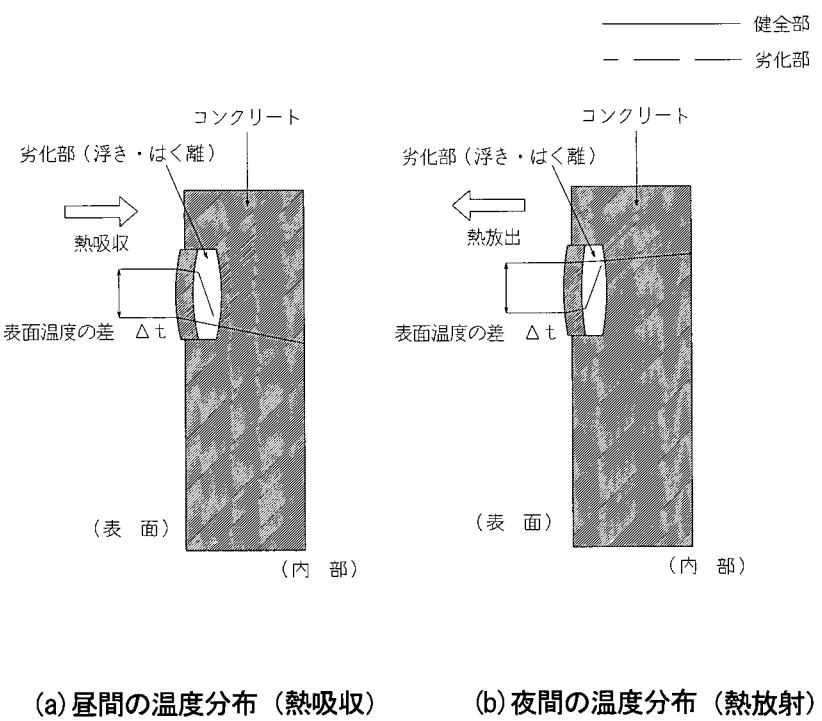


図-Ⅱ. 10. 1 コンクリート内部の熱伝導モデル

1 1. 小径コア法

小径コア法は直径が $\phi 15\text{mm}$ から $\phi 30\text{mm}$ の範囲のコアを用いた試験法（ソフトコアリング）であるが、今回実施した試験技術は、構造物から採取直径 $\phi 25\text{mm}$ の小径コアを採取（湿式採取）してコンクリート構造物の圧縮強度、塩化物イオン含有量、中性化深さなどを測定する調査技術（ソフトコアリング C⁺）である。試験方法の適用範囲は粗骨材最大寸法 40mm 以下であり、推定可能な圧縮強度の範囲は、 $10\sim 70\text{N/mm}^2$ である。ここでは本報告で主に使用した圧縮強度の測定方法について説明する。

圧縮強度試験の供試体は、高さがコア径の2倍となる 50mm に切断してイオウキャッピング加工する。端面成形の平面度は JIS A 1132 に準拠する。供試体は空隙、粗骨材の剥離、損傷等の観察を行い検査する。そして圧縮強度試験は応力制御にて実施する。一般に強度の推定値は、既往に行った多数の試験結果より定めた強度の補正及び異常値の棄却検定を行って算出するが、本研究では、新設構造物のいろいろな条件での特性を考察する必要があるので、補正する前の強度試験の値を使用する。同時に異常値の棄却検定の参考にするために、破壊形状も4パターンに分類し記録する。強度の補正を検討するにあたっては、標準コア（ $\phi 100\text{mm}$ ）の強度試験を同時に実施してその結果と比較して強度の傾向を調べる。

1 2. 超小径コア法

コアは、ダイヤモンドコアドリル DD-EC1（コアビット内径約 9.7mm ）を用いて採取する。

採取したコアを、直径：高さ $=1:2$ （ h/d が約2.0）となるように、小型のコンクリートカッターを用いて切断する。切断したコアについて、研磨やキャッピングなどは施さない。また、採取する試験体の強度にも関係してくるが、一箇所の採取から約3～5本の超小径コアが成形でき、両端面が平滑となっている試験体を強度試験用として用いる。

圧縮強度試験は、最大荷重 10kN のインストロン 4466 万能型試験機を用いておこなう。載荷方法は JIS A 1108 に準拠し、 0.35mm/s （約 $0.20\sim 0.30\text{N/mm}^2/\text{s}$ ）の変位制御でおこない、荷重値を容量 30kN のロードセルで測定する。

1 3. ボス供試体

ボス供試体とは、図-Ⅱ. 13. 1 に示すように構造物コンクリートに成型してできた凸部状の供試体を割取ったものを称し、ボス (BOSS) は Broken Off Specimens by Splitting を意味する。ボス供試体は、コンクリート打設前に構造物コンクリートの型枠にあらかじめボス供試体型枠を取り付けておき、構造物コンクリートが打設されると同時にボス供試体型枠にもコンクリートが充てんされ、凸部状の供試体が成型される。このためボス供試体は、構造物コンクリートの性能に損傷を与えることなく供試体の成型と採取ができ、さらに試験方法の容易性や採取後の補修などの問題を解消したものである。

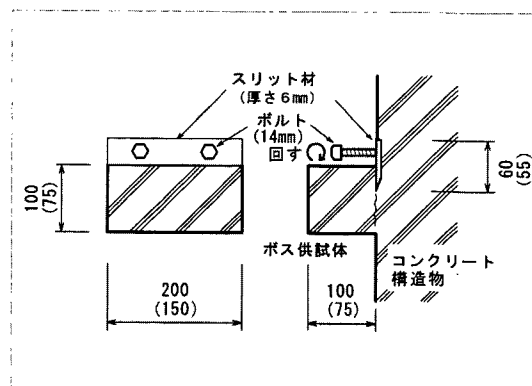


図-Ⅱ. 13. 1 ボス供試体の概要

第 III 部

L 型供試体および中型供試体を用いた実験

1 章 実験概要

1. 1 実験目的

L 型供試体、中型供試体、小型供試体による実験は、主に精度の確認を目的に実施した。試験方法ごとの試験項目、実験要因は表-Ⅲ. 1. 1. 1 のとおりである。詳細な実験目的は、試験方法ごと(各章)に記述する。

なお、小型供試体は、塩水を散布し、塩分浸透深さ、鉄筋の腐食に関する実験であり、実験を継続中である。本報告書では実験概要を示すにとどめ、結果については共同研究報告書(3)で報告する予定である。

表-Ⅲ. 1. 1. 1 試験方法ごとの試験項目と実験要因

試験方法	供試体	試験項目	実験要因
超音波法	L型・中型	強度	コンクリートの種類、材齢
		緻密性	コンクリートの種類、材齢、表層(型枠の違い)
		部材厚さ	厚さ、測定面、支持条件
		内部欠陥	欠陥の種類、大きさ、位置
衝撃弾性波法	L型・中型	強度	コンクリートの種類、材齢
		部材厚さ	厚さ、測定面、支持条件、形状の影響
		内部欠陥	欠陥の種類、大きさ、位置
打音法	L型・中型	部材厚さ	厚さ、測定面、支持条件
		内部欠陥	欠陥の種類、大きさ、位置
パルス電磁力 音響法	L型	かぶり厚さ	鉄筋径、かぶり厚さ、鉄筋間隔
	小型	さびの検出	塩水散水材齢
電磁波レーダ法	L型	かぶり厚さ	鉄筋径、かぶり厚さ、鉄筋間隔、リブの角度
		比誘電率	含水率
		内部欠陥	欠陥の種類、大きさ、位置
電磁誘導法	L型	かぶり厚さ	かぶり厚さ、鉄筋位置(間隔)、(鉄筋径)
赤外線 サーモグラフィ法	L型	内部欠陥	欠陥の種類、大きさ、位置
小径コア法	L型・中型	強度	コンクリートの種類、材齢
	小型	塩化物イオン濃度	塩水散水材齢
超小径コア法	L型・中型	強度	コンクリートの種類、材齢
ボス供試体	L型・中型	強度	コンクリートの種類、材齢、ボス型枠の大きさ
	小型	塩分浸透深さ 塩化物イオン濃度	塩水散水材齢

1. 2 供試体の種類

実験に使用した L 型供試体の形状・寸法は図-Ⅲ. 1. 2. 1 のとおりであり、3 体作製した。中型供試体は、図-Ⅲ. 1. 2. 2 のような直方体の供試体 1 体 (N18) である。L 型供試体と中型供試体の製作条件を表-Ⅲ. 1. 2. 1 に、コンクリートの配合を表-Ⅲ. 1. 2. 2 に示す。小型供試体は、

図-Ⅲ. 1. 2. 3 のようにベースコンクリートにボス供試体が一体となった供試体であり、表-Ⅲ. 1. 2. 2 に示す 5 種類のコンクリートにつき 3 体ずつ作製した。

なお、強度試験用と含水率測定用としてコンクリート配合ごとに円柱供試体を作製した。

表-Ⅲ. 1. 2. 1 供試体の種類

供試体			コンクリートの種類			粗骨材 最大寸法 (mm)	底版 支持条件
名称		部位	記号	セメント の種類	呼び 強度		
L型供試体	A	壁	N18	普通	18	25	—
		底版	BB18	高炉B	18	40	合板型枠
	B	壁	N27	普通	27	25	—
		底版	BB18	高炉B	18	40	碎石+砂
	C	壁	N40	普通	40	25	—
		底版	BB27	高炉B	27	40	合板型枠
中型供試体			N27	普通	27	25	合板型枠

表-Ⅲ. 1. 2. 2 コンクリートの配合

供試体			コンクリート の 種類	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
名称		部位							水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤*
L 型 供 試 体	A	壁	N18	25	8	4.5	63.0	44.9	158	251	1026	824	2.69
		底版	BB18	40			59.0	43.0	148	251	1070	799	2.69
	B	壁	N27	25			49.5	43.2	158	320	1023	771	3.42
		底版	BB18	40			59.0	43.0	148	251	1070	799	2.69
	C	壁	N40	25			38.0	41.0	159	419	1015	696	4.48
		底版	BB27	40			45.5	41.3	148	326	1064	740	3.49
中型供試体			N27	25	8	4.5	49.5	43.2	158	320	1023	771	3.42

* AE減水剤(ホゾリスNo.70)

配筋状態は図-Ⅲ. 1. 2. 4 のとおりである。L 型供試体のかぶり厚さは、壁の背面、前面ともに 20mm～200mm に変化させ、底版も 20mm～170mm に変化させた。壁の背面には呼び名 D13、D19、D25、D35、D51 の 5 種類の鉄筋を、壁の前面には D25 を用いて、鉄筋の中心間隔を 25mm～150mm まで 25mm ピッチで変化させた。また、コンクリート内の含水率の変化に伴う電磁波速度または比誘電率の変化を測定するために、φ20 の丸鋼を配筋した。

底版には内部欠陥を模擬してポーラスコンクリートと発泡スチロールを入れた。欠陥の大きさは幅 100×長さ 200mm で、厚さがポーラスコンクリートは 50mm、発泡スチロールが 20mm である。設置位置は図-Ⅲ. 1. 2. 5 のとおり、鉄筋のかぶり(コンクリート表面)側と内部である。

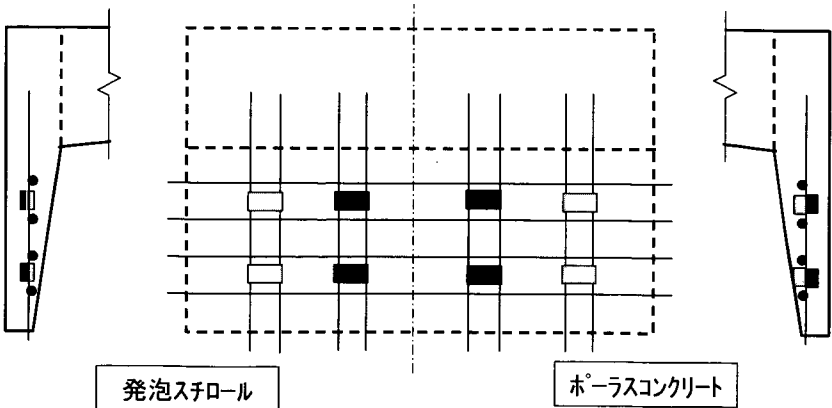


図-Ⅲ. 1. 2. 5 内部欠陥の配置状況

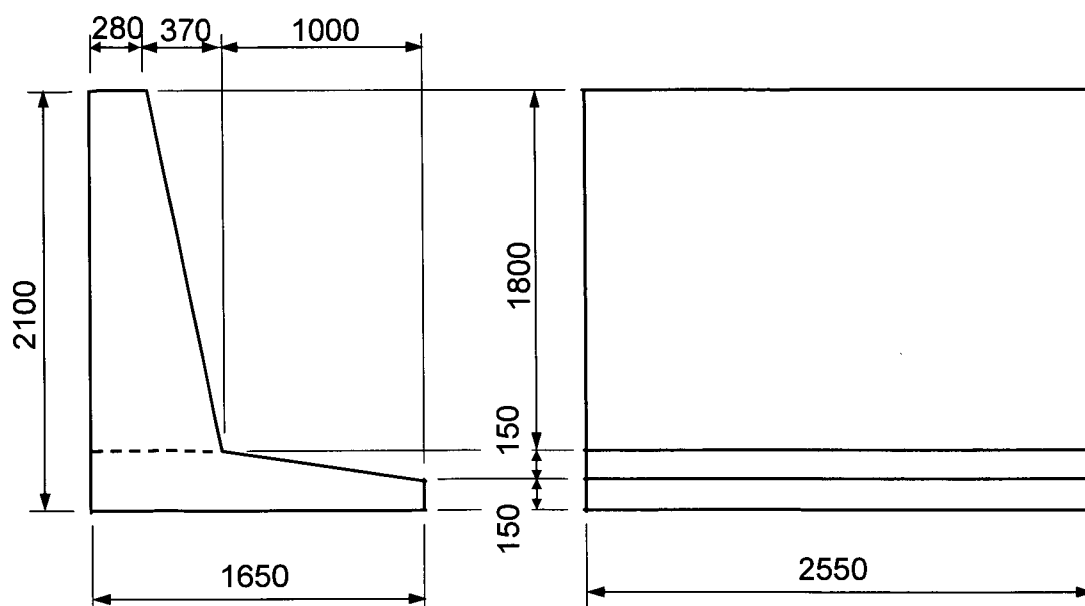


図-Ⅲ.1.2.1 L型供試体の形状・寸法

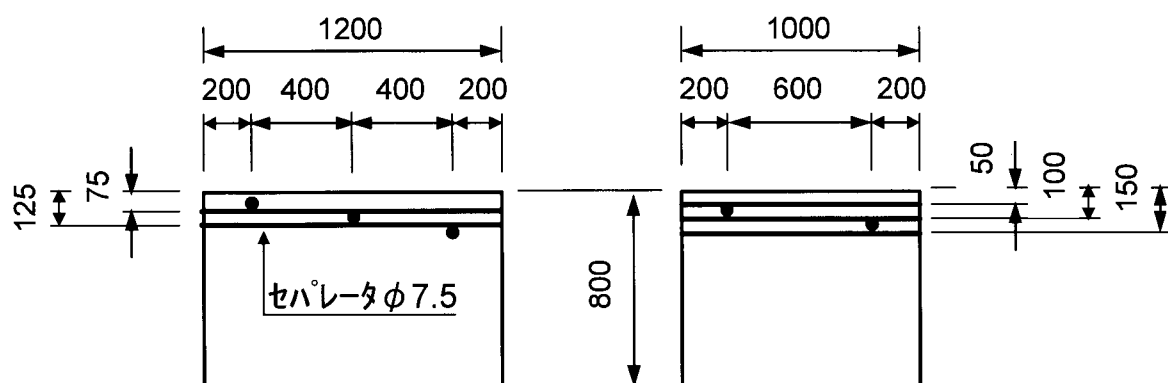


図-Ⅲ.1.2.2 中型供試体の形状・寸法

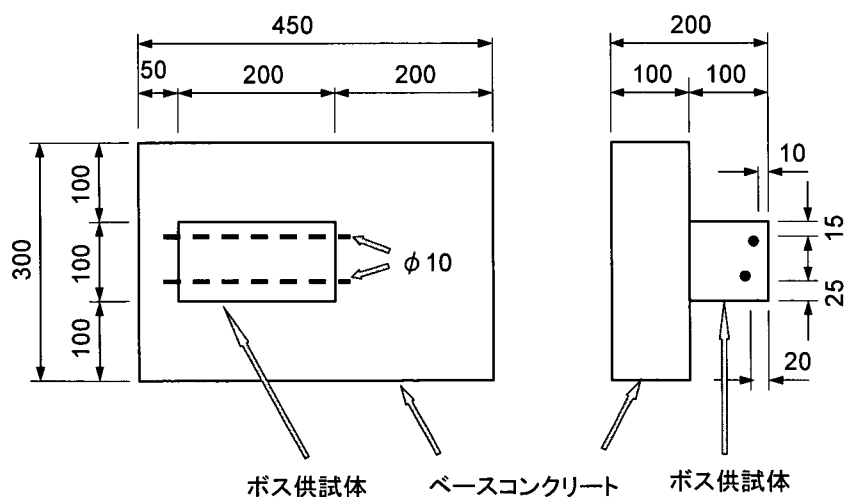
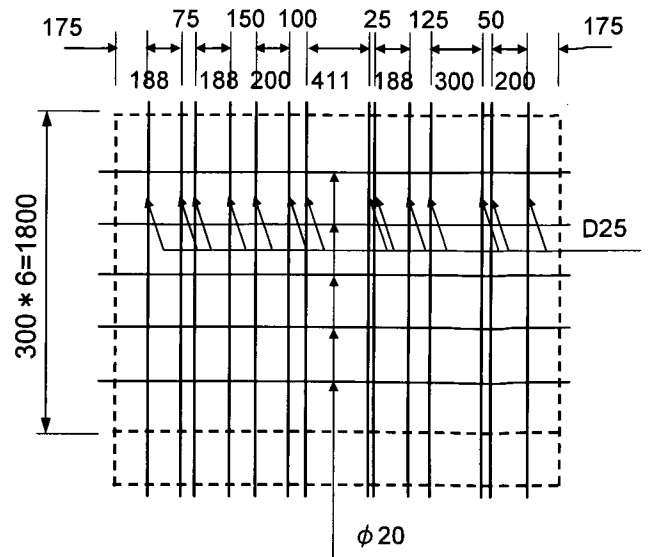
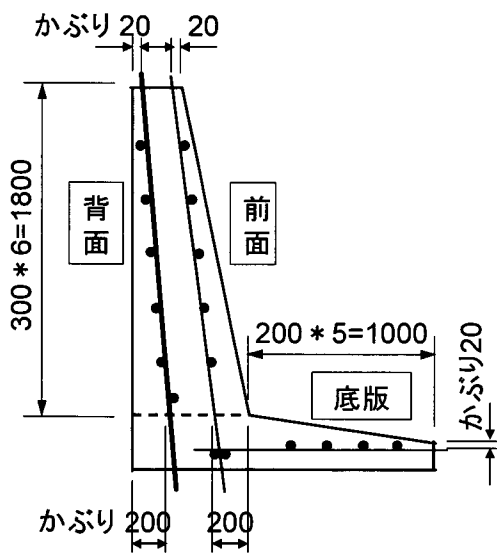


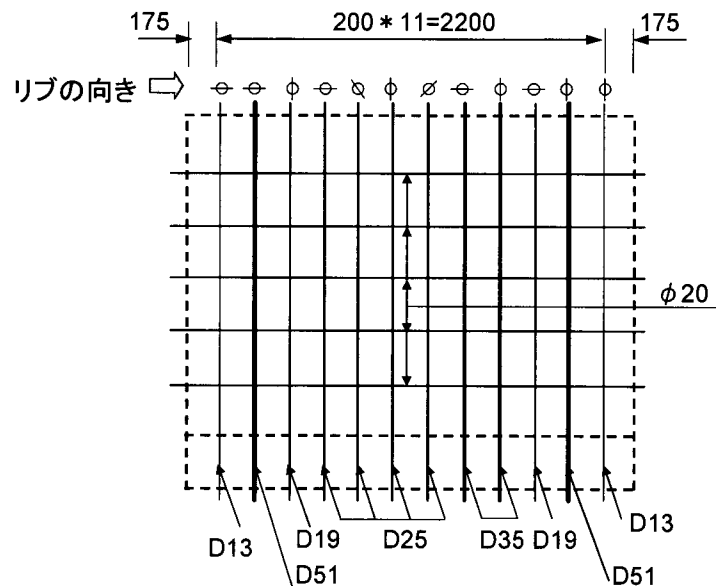
図-Ⅲ.1.2.3 小型(塩水散布)供試体の形状・寸法



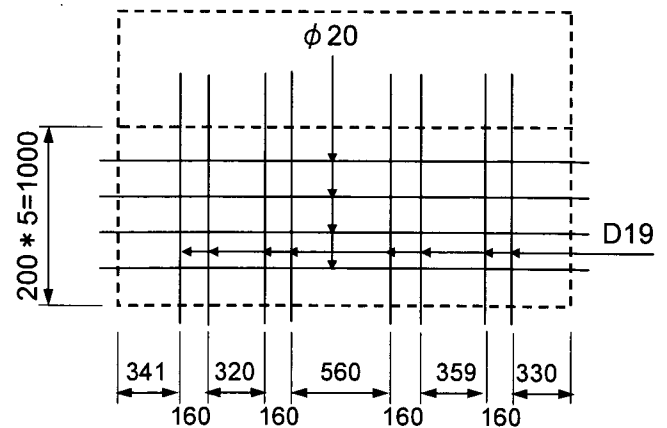
(b) 前面の配筋図



(a) 断面図



(c) 背面の配筋図



(d) 底版の配筋図

図-Ⅲ. 1. 2. 4 配筋図

底版の支持条件は、図-Ⅲ.1.2.6のように供試体AとCは型枠の上に直接打設した。供試体Bは、外周を1辺100mmの角材で囲い、その中に20～5mmの碎石と砂を質量比1：1で混合したものを締固め、その上に直接コンクリートを打設した。

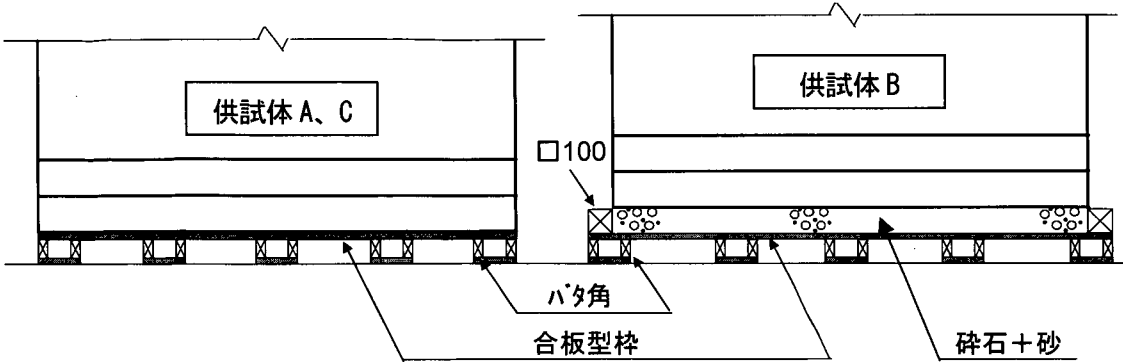


図-Ⅲ.1.2.6 底版の支持条件

型枠は、通常用いられている塗装合板とした。ただし、側面の片側は透水型枠を用いた。透水型枠用の透水シートは、ポリエチレン系フィルム（コンクリート側）、ポリプロピレン系不織布（型枠側）を貼り合わせたものである。

コンクリート打設後、7日間散水養生を行ない、そのあと脱型し、L型供試体と中型供試体は自然状態にさらした。

1. 3 測定項目

実験時期は、試験方法によって多少異なるが、基本的に打設以後、1週、2週、4週、8週、13週、6月、1年で各種非破壊試験および局部破壊試験を行なった。

基礎データとなる円柱供試体を用いた試験は、強度試験用は音速、弾性波速度および圧縮強度、含水率試験用は音速、弾性波速度および含水率を測定した。標準コア供試体では、音速、圧縮強度試験、吸水率試験、細孔径分布測定を行なった。また、部材厚さおよびかぶり厚さも実測した。

1. 4 円柱供試体、標準コア供試体の試験結果

1.4.1 円柱供試体の音速および圧縮強度の結果

円柱供試体の圧縮強度と材齢の関係、圧縮強度と音速の関係を図-Ⅲ.1.4.1に示す。材

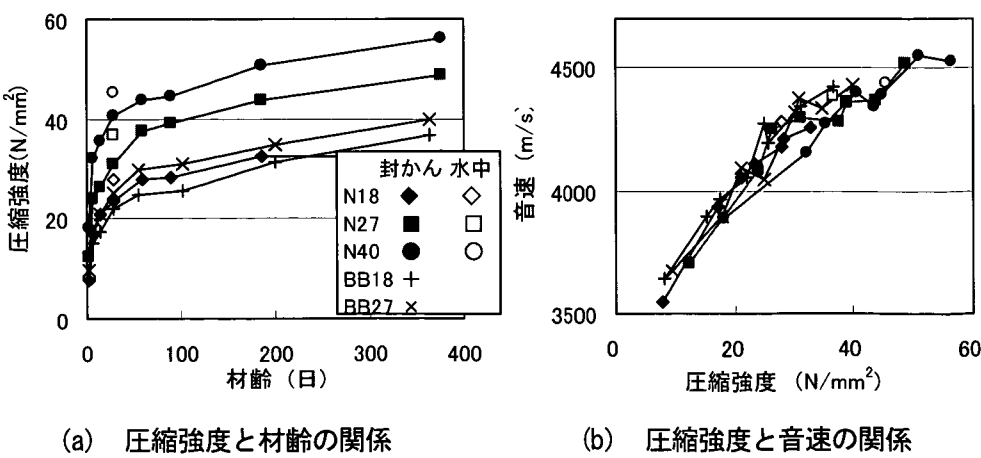


図-Ⅲ.1.4.1 コンクリートの音速と圧縮強度の結果

齢 28 日は水中養生の結果も示しているが、そのほかはすべて封かん養生の結果である。圧縮強度と音速の関係は、同じ強度で比較すると、わずかではあるが呼び強度の高い方が音速は小さい傾向がある。呼び強度が高くなるとペースト量が増えるためと考えられる。

1. 4. 2 標準コア供試体の音速、強度試験結果

L 型供試体から採取したコアの半径方向の透過音速の測定結果の例を図-Ⅲ. 1. 4. 2 に示す。透過音速は、表面は遅く、内部深くなるほど速くなるが、しだいに傾きは小さくなり、ある程度より深くなるとほぼ一定になる傾向がある。特に打設方向となる底版はその傾向が強い。

L 型供試体の壁および底版から採取したコアの圧縮強度試験結果と材齢の関係を示したのが図-Ⅲ. 1. 4. 3 である。通常の強度発現と同様に材齢の進行と共に強度も増加している。

1. 4. 3 封かん養生とコアの強度の比較

水中養生と封かん養生した円柱供試体の強度を比較すると（材齢 28 日）、図-Ⅲ. 1. 4. 4 のように封かん養生のものは水中養生のものより小さくなった。水中養生したものとコアの強度を比較した場合も（材齢 28 日）、コアの方が水中養生のものよりも小さくなった。水中養生に対して封かん養生、コアの強度がどの程度小さくなっているかを比較するため、原点を通る一次式で回帰すると、傾きは封かん養生が 0.88、コアが 0.91 であり、両者はほぼ同じであった。封かん養生した円柱供試体、コアとも、水中養生のものより 10% 程度低下しており、コアの強度は封かん養生した円柱供試体と同程度である。

1. 4. 4 吸水率および細孔径分布

コアを表面から約 10mm ずつスライスし、吸水率または細孔径分布を測定した結果は、いずれも表層の品質が低く、内部ほど品質は良くなり、ある程度内部になるとほぼ一定になる傾向を示した。

1. 5 かぶり厚さ、部材厚さの実測結果

結果は CD-R 版をご覧ください。

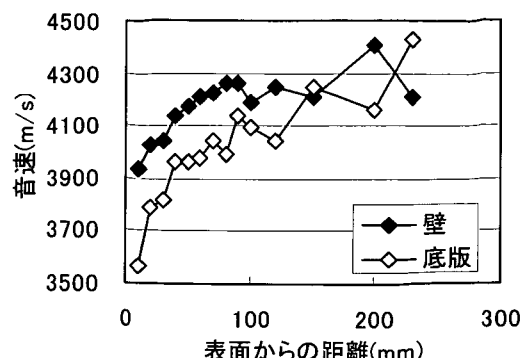


図-Ⅲ. 1. 4. 2 コアの音速

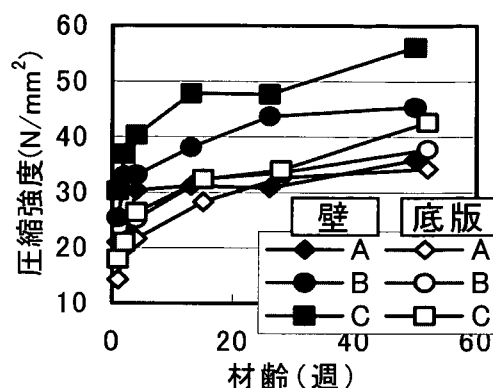


図-Ⅲ. 1. 4. 3 コアの材齢と強度の関係

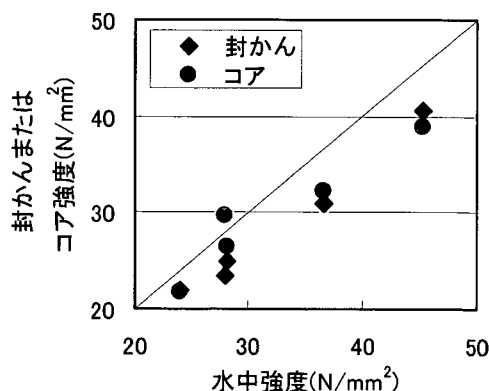


図-Ⅲ. 1. 4. 4 水中養生強度と封かん、コア強度の比較

2章 超音波法

2. 1 実験目的

コンクリートの強度、緻密性、部材厚さを精度良く推定するためには、音速を精度良く求める必要がある。

そのため、まず、強度推定の基準となる圧縮強度と音速の関係を円柱供試体を用いて求めた。また、音速は含水率の影響を受けるため、含水率と音速の関係について検討した。

次に、L型供試体と中型供試体を用いて、表面走査法による伝搬時間を測定し、コンクリート内部の音速分布を推定し、その結果（推定方法はCD-R版の第Ⅱ部2.2節）の精度について検討した。推定した音速分布を用いて強度、表層の緻密性、部材厚さの推定結果（厚さの推定方法は第Ⅱ部2.3節および2.4節）の精度、内部欠陥の検出方法について検討した。

さらには、型枠の違いによる表面付近（表層）の品質の違いが表面走査法による音速分布に及ぼす影響についても検討した。

2. 2 円柱供試体の強度発現と音速の関係

供試体内部の音速分布を推定し、強度を推定するためには封かん養生したときの強度と音速の関係が必要である。また、推定した強度を検査に用いるには、検査の基準日（一般には28日）の強度に補正する必要がある。図-Ⅲ.1.4.1の音速と強度、材齢と強度の関係を、式(Ⅲ.2.2.1)、式(Ⅲ.2.2.2)によって回帰すると、表-Ⅲ.2.2.1、表-Ⅲ.2.2.2の回帰係数が得られ、式(Ⅲ.2.2.3)によって28日強度が得られる。

$$fc = a \cdot \exp(b \cdot V) \quad (\text{Ⅲ.2.2.1})$$

ここに、 fc ：圧縮強度(N/mm²)、 V ：長手方向の透過音速(m/s)、 a 、 b ：回帰係数である。

$$fct = t / (1/a + t/b) \quad (\text{Ⅲ.2.2.2})$$

$$fc_{28} = fct(\alpha + \beta \cdot t) / t \quad (\text{Ⅲ.2.2.3})$$

ここに、 fct ：材齢 t 日の圧縮強度、 a ： $t=0$ の時の接線勾配、 b ：最終($t=\infty$)到達強度を表わす係数。

材齢 t 日の強度を28日強度 fc_{28} に補正するために、式(Ⅲ.2.2.2)の右辺の分子、分母に fc_{28} を掛けることによって式(Ⅲ.2.2.3)を得る。ただし、 $\alpha = fc_{28}/a$ 、 $\beta = fc_{28}/b$ 。

表-Ⅲ.2.2.1 音速と強度の回帰結果

コンクリートの種類	式(Ⅲ.2.2.1)の回帰結果		
	a	b	r
BB18	0.0120	0.00182	0.980
BB27	0.0248	0.00166	0.965
N18	0.00683	0.00198	0.999
N27	0.0186	0.00175	0.974
N40	0.0397	0.00159	0.979

表-Ⅲ.2.2.2 式(Ⅲ.2.2.3)の係数 α 、 β

コンクリート	α	β
N18	5.83	0.725
N27	6.15	0.684
N40	4.32	0.795
BB18	7.83	0.671
BB27	6.70	0.681

2. 3 コンクリート内部の音速分布の推定結果とコアの透過音速の比較

表面走査法による探触子間隔ごとの伝搬時間の測定結果から、コンクリート内部の音速分布を解析した結果は図-Ⅲ. 2. 3. 1 のとおりである。図は、音速分布の解析結果とコアの半径方向の透過音速の比較を示しており、底版はよく一致しており音速分布の推定方法は妥当と考えられる。壁(背面)の内部音速は解析値が大きい傾向がある。

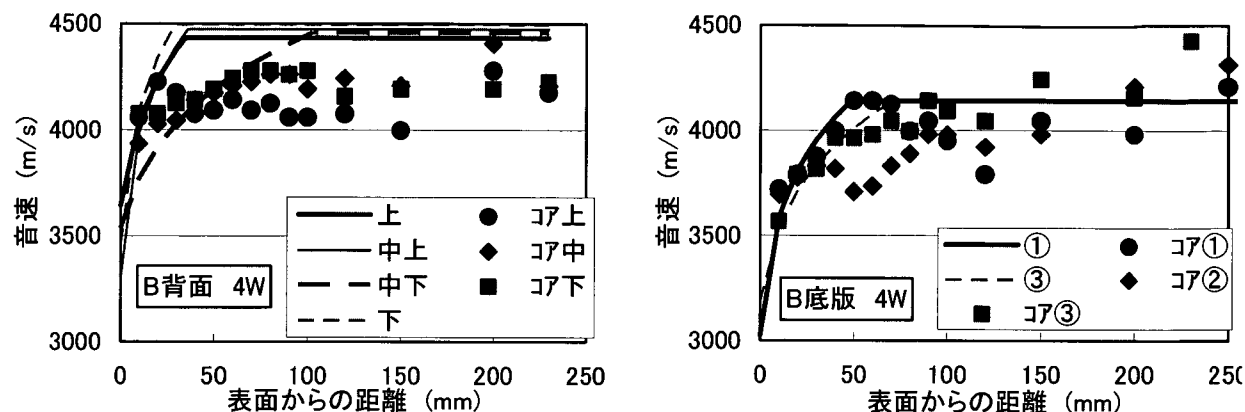


図-Ⅲ. 2. 3. 1 供試体 B の 4 週の音速分布

内部音速と材齢の関係を図-Ⅲ. 2. 3. 2 に示す。材齢の進行と共に内部音速が速くなっている。強度発現と同様の傾向を示しており、内部音速は強度の増進を表しているものと考えられる。

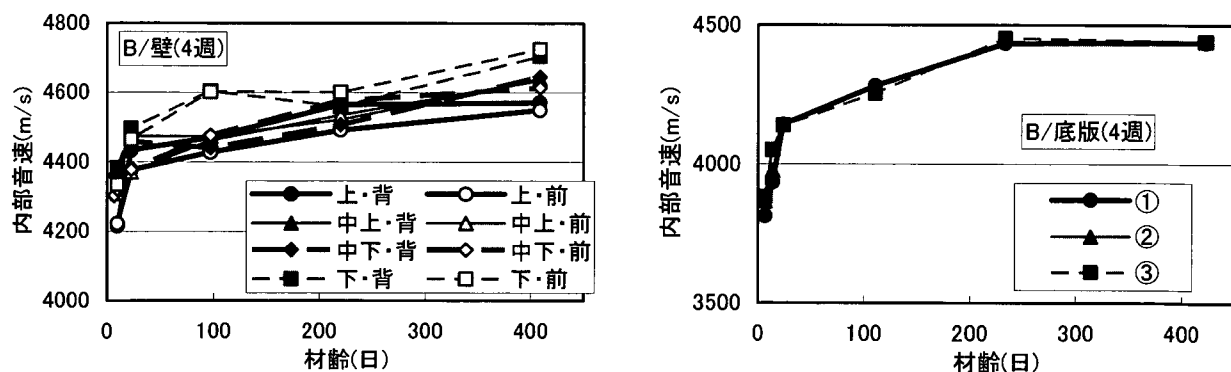


図-Ⅲ. 2. 3. 2 内部音速と材齢の関係

そこで、内部音速とコア強度の関係を図-Ⅲ. 2. 3. 3 に示す。両者の間には線形関係があることから、内部音速はコンクリート強度を推定できることを示している。

図-Ⅲ. 2. 3. 3 の壁の結果をよく見ると、上段の結果に対し中・下段の内部音速は大きくなっている。これは、壁状あるいは柱状のようにコンクリートを高さ方向に打設した場合、下部ほどよく充填され、しかも打設面付近の上部ではブリーディングにより、強度は下部ほど高くなる傾向があることが知られており、内部音速もそのような特性を表しているものと考えられる。

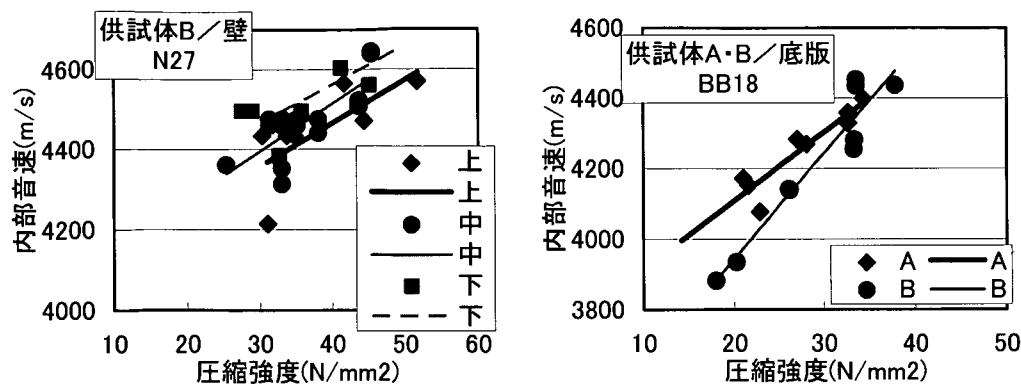


図-Ⅲ. 2. 3. 3 内部音速と圧縮強度の関係

2. 4 強度推定結果

強度推定結果とコア強度の関係を図-Ⅲ. 2. 4. 1 に示す。壁の推定結果はコア強度より大きい強度を推定しているが、底版は両者がほぼ一致しており、推定結果はほぼ妥当と考えられる。

壁の結果について、測定した高さごとに、両者の関係を原点を通る直線で回帰して傾きを求めた結果を示すと、図-Ⅲ. 2. 4. 2 のように上段はコア強度とほぼ同じ強度を推定しているが、下がるほど傾きは大きくなり推定強度はコア強度より大きい強度を推定している。この原因は、十分な締固めにより粗骨材が沈降して下段ほど音速が速くなり、強度の推定結果も大きくなっているものと考えられる。壁のように側面を測定して強度を推定する場合、測定する位置を打設面からどの程度下がったところにするのかを決める必要があるものと考えられる。測定位置は、図-Ⅲ. 2. 4. 2 より、打設面から200～300mm 程度の位置が適切と考えられる。

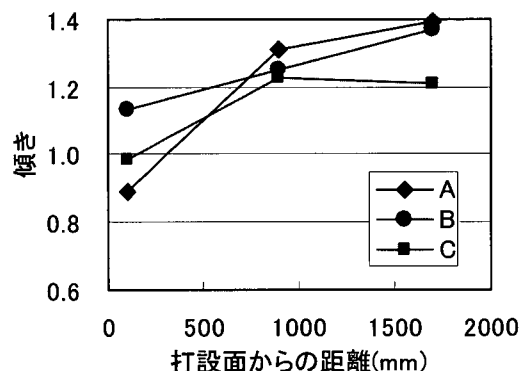


図-Ⅲ. 2. 4. 2 測定位置と強度推定結果

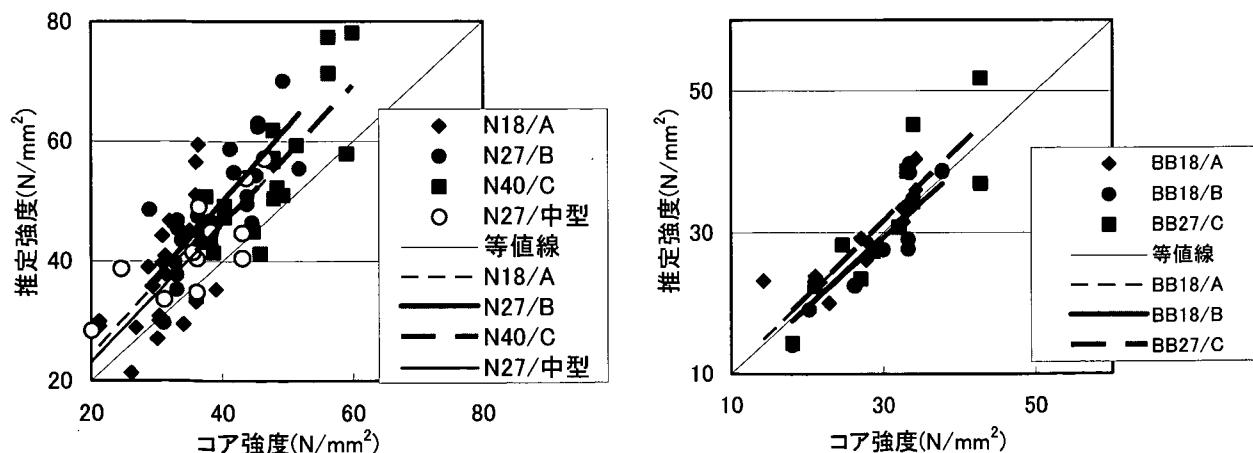


図-Ⅲ. 2. 4. 1 推定強度とコア強度の関係

推定強度を 28 日強度に補正し、28 日コア強度に対する推定 28 日強度の比を求め、材齢との関係を示したのが図-Ⅲ. 2. 4. 3 である。壁、底版の結果とも下に凸の関係を示しており、初期および長期の強度推定には問題があるものの、4 週、13 週も強度比はほぼ 1 であり、この時期の測定であれば超音波法による強度推定は可能と考えられる。ただし、検査できる材齢は施工条件の制約を受け、4 週とは限らない。今後も材齢補正の検討が必要である。

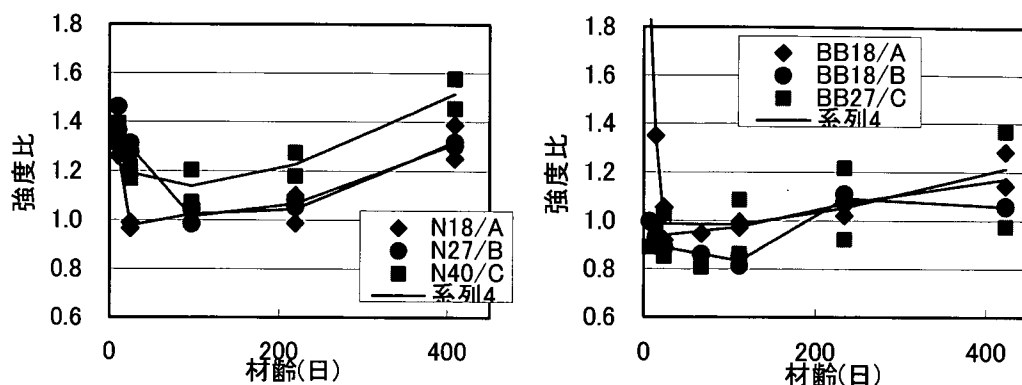


図-Ⅲ. 2. 4. 3 強度比および補正強度比 (コア強度との比較)

2. 5 部材厚さ測定結果

壁の厚さ測定結果を図-Ⅲ. 2. 5. 1 に示す。図の計算値は、音速分布を考慮して厚さを求めた結果である。計算値は、実測値よりすべて大きくなっていること、下の方が大きくなっていることがわかる。

下の方が大きくなったことについては、強度推定でも明らかとなっており、下ほど材料分離により音速が速くなっているためと考えられる。

簡易法によって求めた音速を用いて厚さを計算した結果が図-Ⅲ. 2. 5. 2 である。多くの結果は±5%以内に入っている。簡易法による音速は、コアの音速などに比べて小さく測定されるが、結果的に繰返し加振器による低周波の反射波共振周波数との相性がいいのかもしれない。

底版の厚さ測定結果を図-Ⅲ. 2. 5. 3 に示す。計算値は、音速分布を考慮して厚さを求めた結果である。供試体 B は、A、C と傾向が異なっている。供試体 A、C は、厚い部分は±5%以内に入っているが、薄い部分は+10~20%程度も大きくなっている。この原因は、薄い部分の計算に用いた音速分布が底版先端の結果を用いたことから何らかの影響を受けている

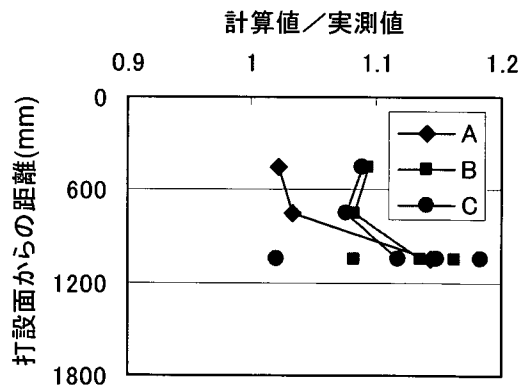


図-Ⅲ. 2. 5. 1 部材厚さ (壁)

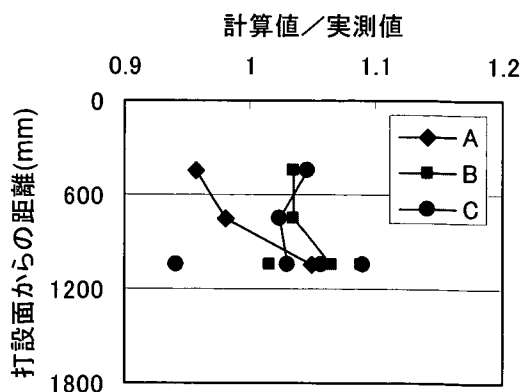


図-Ⅲ. 2. 5. 2 簡易法による部材厚さ (壁)

ものと考えられる。

供試体 B は、底面が碎石+砂に直接コンクリートを打設したため、その影響を受けているものと考えられる。コアを採取したとき、設計上の厚さに対して骨材 2 個分ほど厚くなっていた。1 個分についてはゆるんでいたのので人力で容易にとれ、実測値の厚さは供試体 A、C より碎石の大きさ分の 20mm ほど厚くなっていた。

厚い部分の計算結果は、実測値に骨材もう 1 個分加える（コア採取時の厚さ）と、実測値と計算値はほぼ一致する。

このことから、厚い部分は超音波の減衰により、設計厚さ+骨材 2 個分の面で反射したときの周波数が卓越したものと考えられる。

それに対し、薄い部分は減衰が小さいため、骨材下面で反射波が卓越したことから、厚さの計算値はかなり大きくなったものと考えられる。

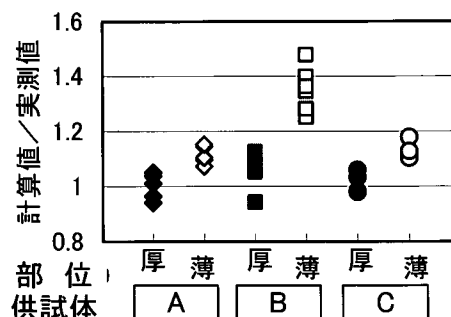


図-Ⅲ. 2. 5. 3 部材厚さ（底版）

2. 6 内部欠陥の検出

欠陥があるラインの欠陥部分と健全部分の反射波の共振周波数を求め、音速を計算した結果が図-Ⅲ. 2. 6. 1 と図-Ⅲ. 2. 6. 2 である。供試体 B は前節のとおり反射面が不明確であるため除いた。

健全部分の音速は 4000m/s 程度である。それに対し、発泡スチロールがある場合は、鉄筋の上にある場合、下にある場合とも音速が遅くなっており、欠陥の有無を検出している。ところが、ポーラスコンクリートの場合は、健全部分の音速と同じであり、欠陥として検出できていない。この原因は、コンクリート打設時に空隙にモルタル・ペーストが充填され、普通のコンクリートと同じようになったことが考えられる。または、もともとポーラスコンクリートの音速、あるいは超音波の伝搬特性が普通の健全なコンクリートとほぼ同じであったことも考えられる。

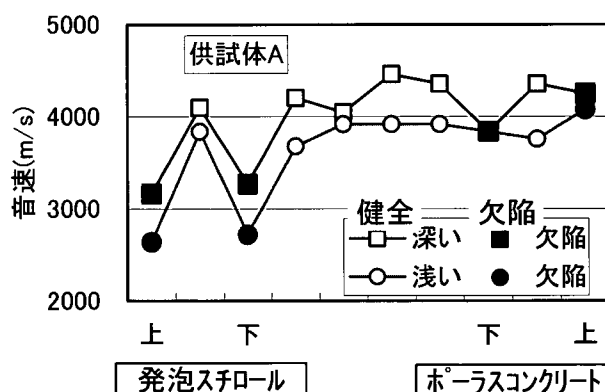


図-Ⅲ. 2. 6. 1 欠陥部分の音速（供試体 A）

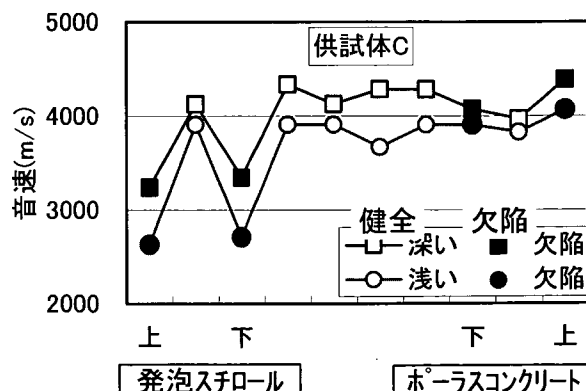


図-Ⅲ. 2. 6. 2 欠陥部分の音速（供試体 C）

3章 衝撃弾性波法

3. 1 実験目的

衝撃弾性波法は測定が簡便であること、内部の鉄筋の影響を受けない測定が可能であることなど、他手法とは異なる特長を有する非破壊検査方法であると考えられる。この中で過去の供試体を用いた実験においては¹⁾、厚さ 100mm～2500mm までの厚さ測定、弾性波速度測定による圧縮強度の測定が可能であることが示された。今回は、過去の実験成果を実構造物に適用するため、各条件が測定に及ぼす影響を把握し、適用条件を明確にすることを目的として実験を行った。

3. 2 L 型供試体での圧縮強度の測定実験

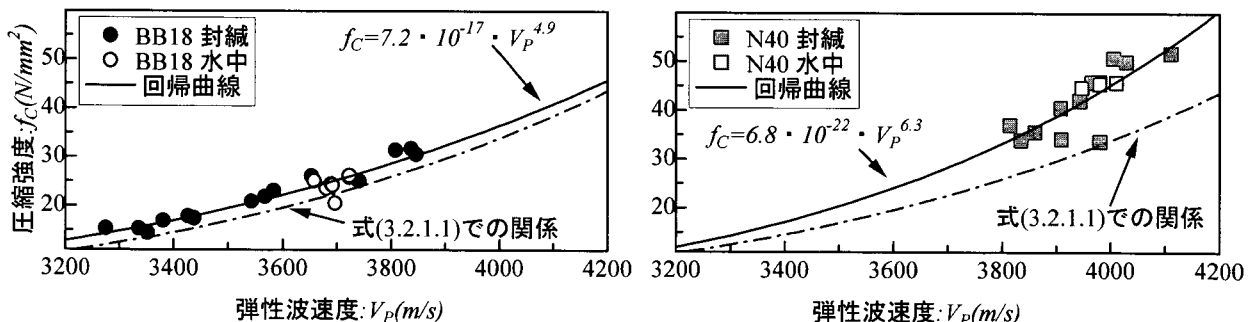
3.2.1 実験概要

本法では弾性波速度 V_p を測定し、過去の実験²⁾ で得た換算式(Ⅲ.3.2.1)から、圧縮強度 f_c を測定する。

$$f_c = 6.3 \cdot 10^{-18} \cdot V_p^{5.2} \cdots \cdots (Ⅲ.3.2.1)$$

しかし、両者の関係はコンクリートの材料などによって異なる。そこで、L 型供試体の各配合で打設時に製作した円柱供試体で両者の関係を再度調査し、換算式として式(Ⅲ.3.2.1)を採用することに問題がないかを検証して、検証結果から換算式を決定し、圧縮強度を測定する実験を行った。

3.2.2 円柱供試体での換算式の検証実験



図一Ⅲ.3.2.1 弾性波速度と圧縮強度の関係調査結果

各配合で弾性波速度と圧縮強度を測定し、最小二乗法により両者の関係式を求めると、各配合とも式(Ⅲ.3.2.1)とは完全には一致しない関係式が得られた。BB18 と N40 での測定例を図一Ⅲ.3.2.1 に示す。そこで、各配合において弾性波速度 3200～4200m/s の範囲で換算式として式(Ⅲ.3.2.1)を採用することに問題がないかを検証するため、弾性波速度 3200,3225,⋯,4200m/s (25m/s 間隔、41 個)での式(Ⅲ.3.2.1)を換算式とした場合の圧縮強度の測定値を f_c 、各配合で今回の実験で得られた関係式を換算式とした場合の測定値を f'_c とし、寄与率 λ を下式(Ⅲ.3.2.2)で求めた。

表一Ⅲ.3.2.1 寄与率計算結果

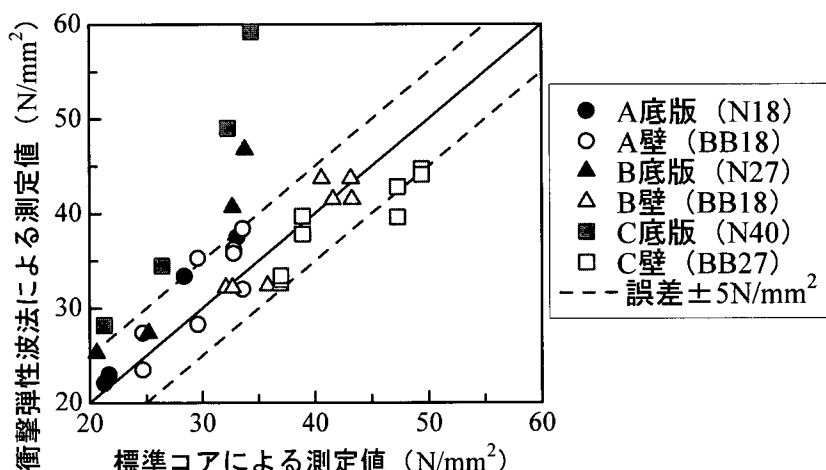
コンクリート		寄与率 λ
セメント	呼び強度	
BB	18	0.91
	27	0.80
N	18	0.89
	27	0.65
	40	0.49

$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{41} (f_{Ci} - f_{C'i})^2}{\sum_{i=1}^{41} (f_{Ci} - \overline{f_{C'i}})^2} \cdots \cdots \cdots (\text{III.3.2.2})$$

寄与率を求めた結果を表Ⅲ.3.2.1に示す。表より、BB18、BB27、N18での寄与率は0.8以上となり、換算式として式(Ⅲ.3.2.1)を採用しても問題がないと判断できた。これに対し、N27、N40での寄与率は0.5程度となったことから今回の実験で得られた関係式を採用した。

3.2.3 L型供試体での弾性波速度測定、圧縮強度の測定

L型供試体で縦弾性波の伝搬時間を表面で計測することにより弾性波速度を測定し、3.2.1項で決定した換算式から圧縮強度を測定した。実際にφ100mmのコアを採取して圧縮試験を行ない、比較した結果を図Ⅲ.3.2.2に示す。比較結果より、換算式として過去の実験で得られた式を採用したBB18、BB27、N18では、本法により測定した圧縮強度とφ100mmのコアによる圧縮試験結果との誤差は概ね±5.0N/mm²の範囲内となり、平均誤差は2.9N/mm²となった。これに対し、換算式として今回の実験で得られた弾性波速度と圧縮強度の関係式を採用したN27、N40では、特に圧縮強度が30.0N/mm²以上の場合に、誤差が大きくなり、平均誤差は10.6N/mm²となった。



図Ⅲ.3.2.2 衝撃弾性波法による圧縮強度測定結果と標準コア測定結果の比較

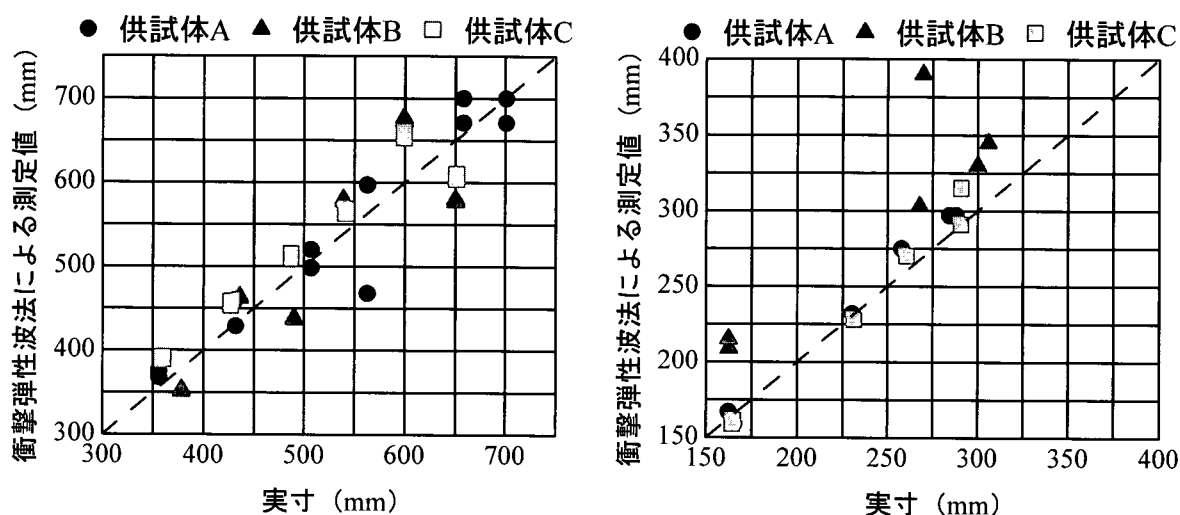
3.2.4 まとめ

衝撃弾性波法による圧縮強度を測定する実験結果について以下にまとめる。①弾性波速度と圧縮強度の関係式はコンクリートの配合によって異なることが確認された。これから換算式として過去の実験で得た両者の関係式を安易に採用することはできないといえる。②今回の実験では検証実験の結果から換算式を決定し、圧縮強度を測定した。その結果、φ100mmのコアによる圧縮試験結果と比較すると、換算式として過去の実験で得られた関係式を採用したコンクリートの配合では、平均誤差は2.9N/mm²と小さくなった。③換算式の検証実験の結果、今回の実験で得られた関係式を採用したコンクリートの配合では、特に強度が強い場合に誤差が大きくなった。④以上の結果から、換算式として過去の実験で得られた関係式が採用できる場合では、衝撃弾性波法によりφ100mmのコアによる圧縮試験と同等の測定が可能であると考えられる。一方、換算式として過去の実験で得られた関係式が採用できない場合では、換算式の決定方法に問題があると考えられる。また、今後の課題として、既設構造物などで換算式の検証実験ができない場合での誤差について、検討する必要がある。

3. 3 L 型供試体および中型供試体での厚さ測定実験

3.3.1 L 型供試体での測定結果

L 型供試体の底版部、壁部でコンクリートの厚さを測定した。材齢 4 週での測定結果と実寸との比較を図一Ⅲ.3.3.1 に示す。実寸との測定誤差は壁部では供試体 A : 4.6%, B : 9.1%, C : 6.8%, 床版部では供試体 A : 3.4%, B : 23.5%, C : 3.1%であった。背面が砂・砂利に密着している供試体 B の床版部では、全測定点とも測定される振動数が低くなり、背面の材質が厚さ測定に影響を及ぼすことが確認された。この原因は、縦弾性波は音響インピーダンスの異なる境界面で反射するが、背面材質の音響インピーダンスがある程度の値の時では反射波の位相は入力波とズレが生じることとなる。これから、供試体 B の底版での反射波は位相にズレが生じ、振動数解析での解析上の往復時間は長く、振動数が低くなったものと考えられる。

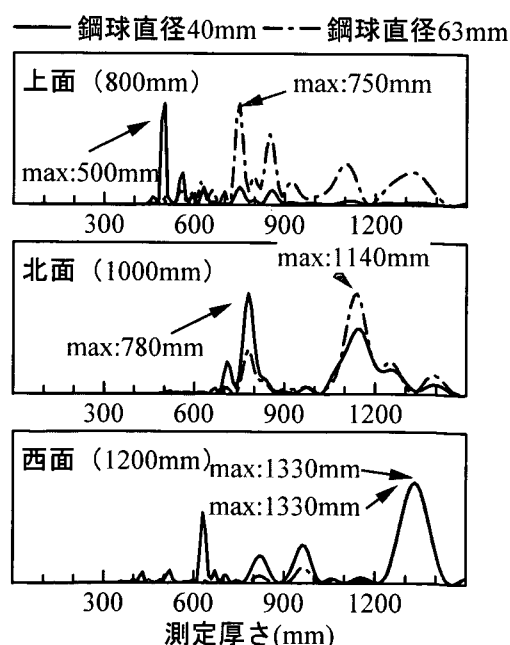


図一Ⅲ.3.3.1 衝撃弾性波法による厚さ測定結果と実寸との比較 (左：壁部，右：床版部)

3.3.2 中型供試体での測定結果

設計寸法が $1000 \times 1200 \times 800\text{mm}$ である中型供試体では、厚さの異なる 3 面から測定した。測定結果を図一Ⅲ.3.3.2 に示す。どの測定面においても振幅が卓越した振動数が複数測定される結果となった。これは、この供試体は測定面から見た厚さに対して、縦・横の寸法が十分に長くないことから、厚さ方向で多重反射する縦弾性波のみでなく、縦・横方向等で多重反射する縦弾性波が観測されたものと考えられる。

また、測定は打撃する鋼球の直径を 40mm, 63mm とし、入力波長を変化させたが、入力波長によっては振幅が最大となる振動数は厚さ方向で多重反射する縦弾性波ではなく、縦・横方向等での多重反射と考えられる縦弾性波となり、厚さ測定に影響が確認される結果となった。



図一Ⅲ.3.3.2 中型供試体での厚さ測定結果

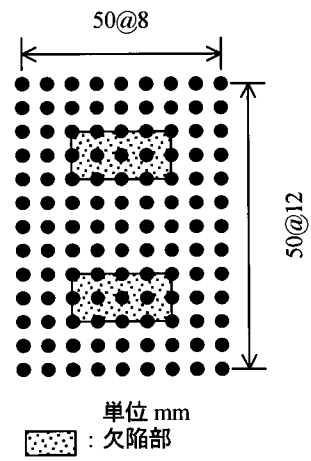
3.3.3 まとめ

L 型供試体および中型供試体での厚さ測定結果について以下にまとめる。①背面が砂・砂利に密着している L 型供試体 B の床版部では、全測定点とも測定される振動数が低くなった。これから、測定部材の支持条件、特に背面の材質が厚さ測定に影響を及ぼすことが確認された。②今回測定した供試体は、L 型供試体は厚さがくさび状に変化し、中型供試体は測定面から見た厚さに対して、縦・横の寸法が十分に長くない形状であり、振幅が卓越した振動数が複数測定される結果となった。測定部材の形状が厚さ測定に影響を及ぼすことが確認された。

3. 4 L 型供試体での表層部欠陥の平面範囲の探查

3.4.1 測定原理および実験内容

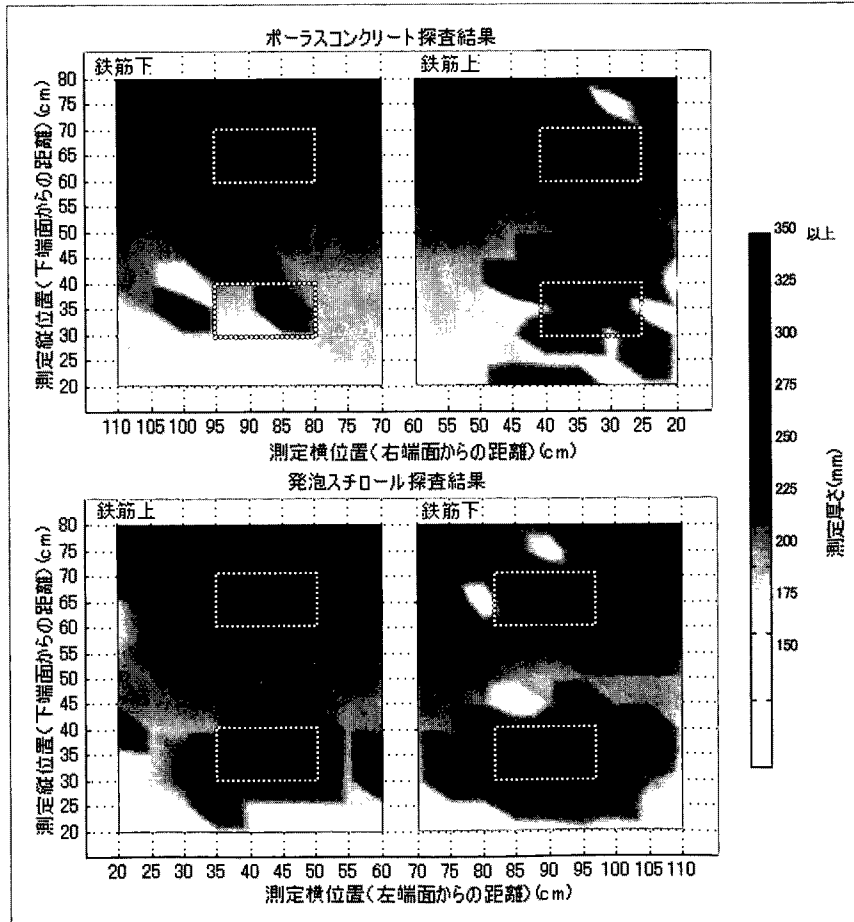
コンクリートの内部に欠陥が存在すると、①欠陥表面で反射する縦弾性波が発生する。②縦弾性波の経路が欠陥を迂回して長くなる。③コンクリートの弾性率が低下により、弾性波速度が遅くなり、縦弾性波の往復時間が長くなる。④打撃面と欠陥表面のコンクリートが撓むことにより、曲げ振動が発生する。以上①～④の現象が見られ、欠陥直上で衝撃弾性波法により測定される厚さは、実際の厚さや健全部での測定厚さとは異なることとなる³⁾。これから、欠陥周囲の複数点で厚さを測定し（図－Ⅲ.3.4.1）、測定厚さを比較して、欠陥の平面範囲を測定する実験を行った。



図－Ⅲ.3.4.1 測定点

3.4.2 測定結果およびまとめ

各欠陥部での測定結果を図－Ⅲ.3.4.2に示す。欠陥部付近での測定厚さは健全部での測定厚さより厚くなり、欠陥が存在していると概ね判断できる結果となった。実際の欠陥位置と比較すると、欠陥が発泡スチロールの場合では、欠陥直上では精度良く欠陥の位置を探查できた。しかし、鉄筋下では若干広く判断され、指向性に問題があるといえる。一方、完全な空洞でないポラスコンクリートでは、欠陥直上であっても測定点によっては余り変化が無く、特に鉄筋下での探查精度が低下する結果となった。



図－Ⅲ.3.4.2 各測定点での測定厚さ（白枠：実際の欠陥部）

【参考文献】

- 1)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 共同研究報告書 第 268 号, pp.168-172, 2001.3
- 2)岩野聡史, 境友昭, 極檀邦夫, 森濱和正: 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 2 3 弾性波法によるコンクリート強度の推定, 日本非破壊検査協会平成 13 年度秋季大会講演
概要集, pp.111-114, 2001.10
- 3)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内部欠陥探査, コンクリート
工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1521-1526, 2002.6

4章 打音法

打音法の鉄筋コンクリート構造物の検査・点検への適用を目的に、手法の精度や課題を整理するため、供試体を対象に打音法測定を実施した。得られた結果を以下に示す

4. 1 厚さ測定における精度

厚さ測定では、厚さ 30cm 以下の供試体に対しては振幅値比を用いた評価法、厚さ 30cm 以上の供試体に対しては周波数を用いた評価法を用いた。

(1) 振幅値を用いた評価

厚さが 15cm から 30cm に変化する L 型供試体の底版厚さの測定結果を図-Ⅲ. 4. 1. 1 に示す。設計厚さと測定厚さは良好に一致しており、打音法により最大 10% 程度の誤差で、RC 構造物の厚さが測定できることが分った。

(2) 周波数を用いた評価

厚さが 80cm から 120cm に変化する中型供試体の打音測定結果 (B 供試体 2, 5 測線) を周波数分析し、平均的な配合のコンクリートの縦波共振周波数 (弾性波速度を 4km/sec と考え、80cm では 2500Hz、100cm では 2000Hz、120cm では 1600Hz) 近傍に見られるピーク周波数を抽出した結果を表-Ⅲ. 4. 1. 1 に示す。それぞれの厚さに対応する縦波共振周波数の付近にピークが見られ、材齢によりピーク周波数が大きくなっ

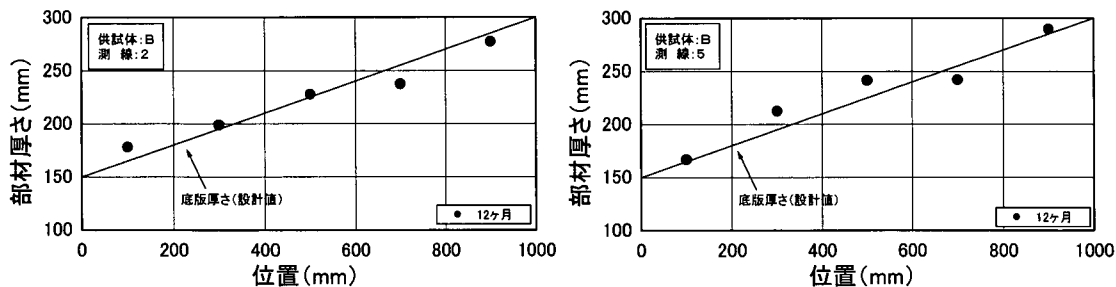


図-Ⅲ. 4. 1. 1 厚さ測定結果 (L 型供試体 B)

表-Ⅲ. 4. 1. 1 各測定材齢における測定位置で観測される縦波共振 1 次周波数 (中型供試験体)

測定点	部材厚さ (mm)	縦波共振周波数 (Hz)				
		2 週	4 週	13 週	6 ヶ月	12 ヶ月
①	800	2344	2417	2466	2490	2539
②	800	2344	2417	2466	2490	2490
③	800	2319	2417	2466	2490	2417
④	800	2319	2417	2466	2490	2490
測定面での平均		2332	2417	2466	2490	2484
⑤	1000	2026	2099	2148	2173	2246
⑥	1000	2075	2124	2148	2197	2246
測定面での平均		2051	2112	2148	2185	2246
⑦	1200	1440	1489	1528	1563	1563
⑧	1200	1440	1513	1562	1563	1563
測定面での平均		1440	1501	1545	1563	1563

ていることから、打音法により、縦波共振周波数を求め、厚さを換算することも可能と思われる。ただし、事前に概略の厚さが分かっていない場合、測点⑦⑧以外の測点では板の振動など他のピークも目立つため、縦波共振のピークを特定することは難しいものと思われる。

4. 2 内部欠陥の検知性能

(1) 空洞

内部欠陥を平面的に厚さ測定した結果を図-Ⅲ. 4. 2. 1 に示す。周辺の健全部に比較し、かぶりが 23mm の空洞位置（欠陥 No.1）では厚さが薄く測定されており、欠陥位置が識別できる。ただし、かぶりが大きくなる No.2・4 では、周辺との厚さの差異がなく、空洞の検知は難しいものと思われる。かぶりが大きい空洞で欠陥が検知できない理由は、平面規模 10cm×20cm 程度の空洞では、かぶり部分が周辺の拘束を受け、打撃による振動が小さくなるためと思われる。

(2) ジャンカ

ジャンカについては図-Ⅲ. 4. 2. 1 に示すように、周辺との厚さの差異が認められないので、本手法では検知が難しいものと思われる。これは、ジャンカを模擬した模型では健全部とはく離などがなく、健全部と一緒に振動しているためと考えられる。

4. 3 材齢、支持条件など検査条件の影響

(1) 材齢の影響

振幅値比（逆数）の材齢による変化（91日で基準化）を図-Ⅲ. 4. 3. 1 に示す。図-Ⅲ. 4. 3. 1 に示すように、材齢により、振幅値比の逆数が大きくなっていく。すなわち、振動が小さくなっていくことが分る。また、本結果は、コア試験で得られた単位体積質量と弾性係数から理論的に得られた振幅値比の逆数の変化（ $\rho \cdot V$ ）と傾向が一致しており、理論的に若材齢の影響を考慮することが可能である。ただし、若材齢の影響を受ける時期は材齢 14 日程度までと予想される。

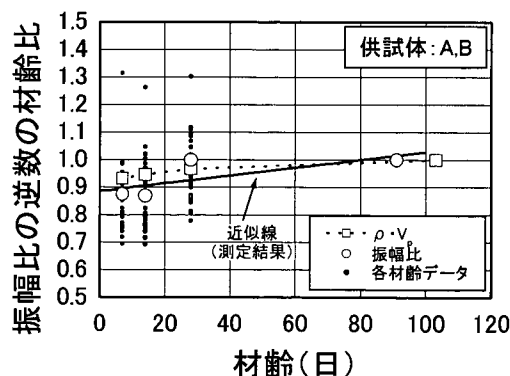


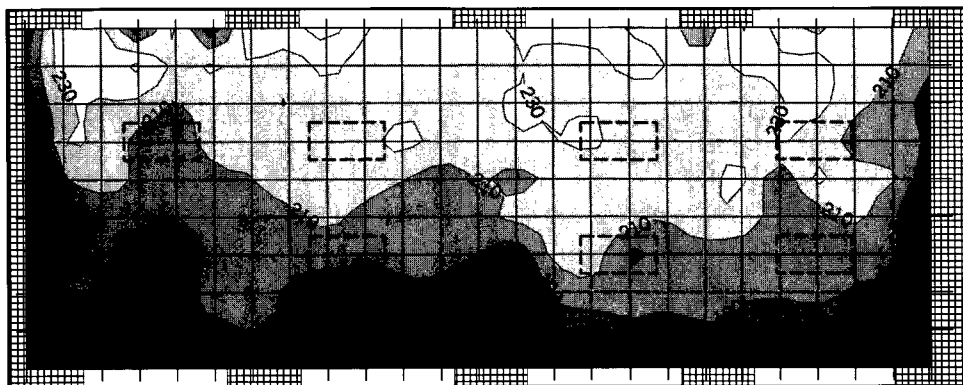
図-Ⅲ. 4. 3. 1 振幅値比の逆数の材齢による変化（L字供試体 AB）

(2) 支持条件の影響

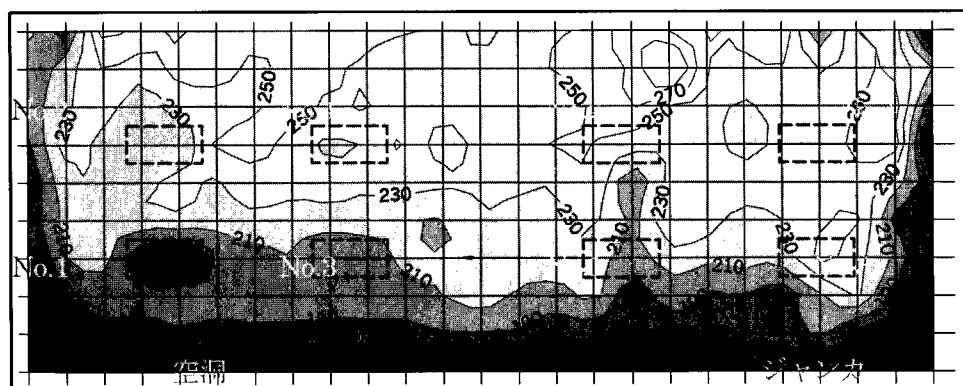
3 体の L 型供試体の平面的な厚さ測定結果を図-Ⅲ. 4. 2. 1 に比較する。A, C 試験体の方が B 試験体に比較

し、端部や支持点以外では厚さが薄い結果となっており、振動が大きくなっていることを示している。これは、試験体 A, C では単純支持のため、底版全体の振動の影響が出ているものと予想される。一方試験体 B は碎石支持のため、均一に支持されており、底版全体の振動が発生しづらいためと考えられる。ただし、ここで振幅値比を用いた評価法では、第 1 波の最大値に着目しているため、全体の振動の影響は小さいものと考えられる。

A：単純支持



B：碎石支持



C：単純支持

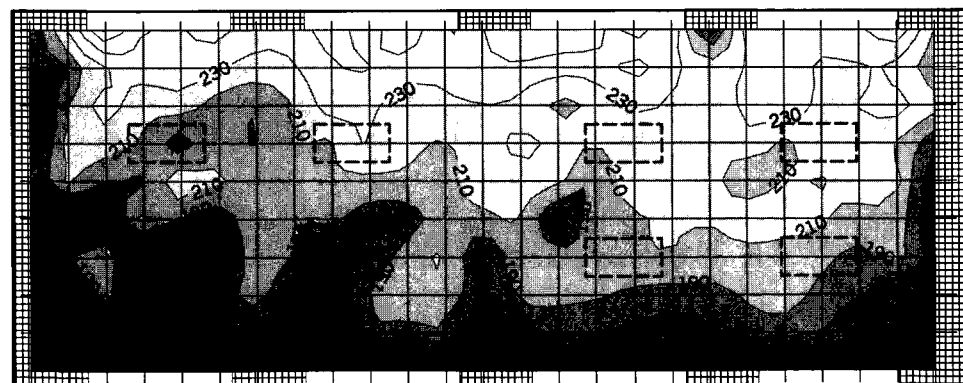


図-Ⅲ. 4. 2. 1 部材厚さの平面的計測 (L 型供試体底版)

5章 パルス電磁力音響法

5. 1 実験目的

かぶり厚さ測定および鉄筋の腐食状態の把握にパルス電磁力音響法適用の可能性を探る。

5. 2 測定概要

5.2.1 かぶり厚さ測定

L型の供試体Cの底版のかぶり厚さを測定した(図-Ⅲ.5.2.1)。

図-Ⅲ.5.2.2のように鉄筋直上に電磁コイルを配置し、それから100mmずつ離れた位置A、Bに受信センサーを配置し、各々のセンサーが受信する時間差(パルス発生時より最初にセンサーに到達するまでの時間)を測定し、式(Ⅲ.5.2.1)によりかぶり厚さを算出する。

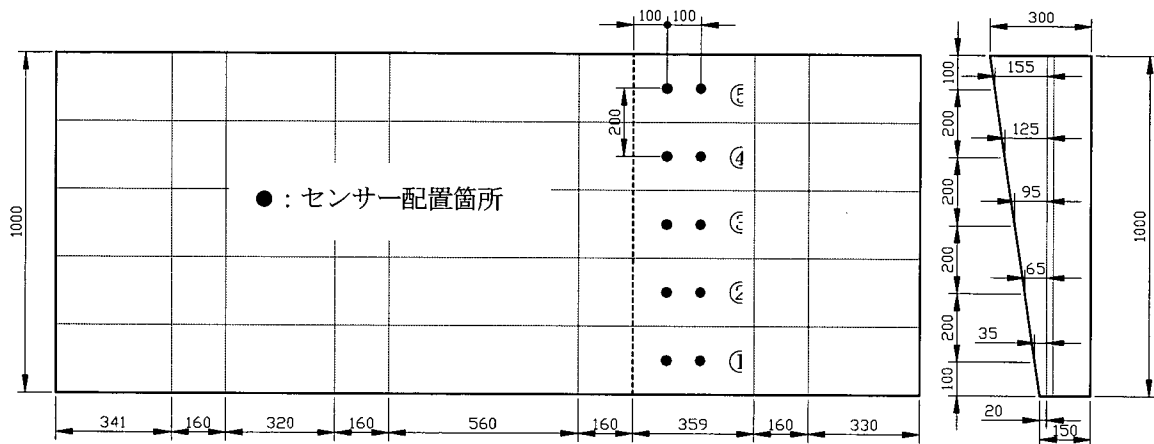


図-Ⅲ.5.2.1 かぶり厚さ測定位置

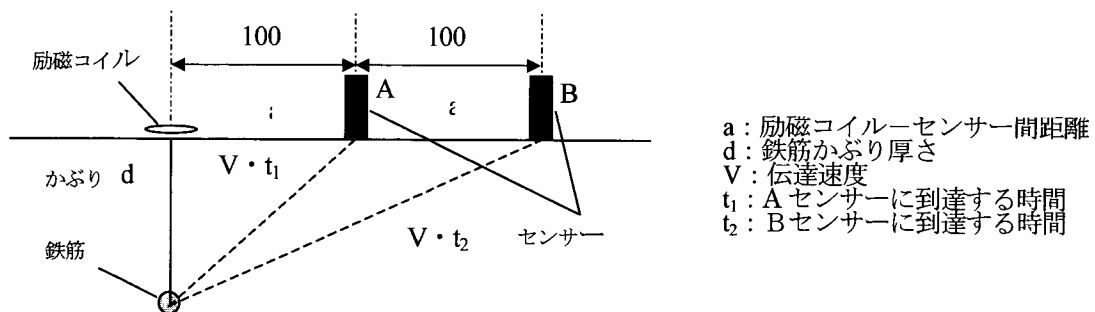


図-Ⅲ.5.2.2 かぶり厚さ測定箇所および励磁コイルとセンサーの位置関係

$$d = \sqrt{\frac{3a^2 \cdot t_1^2}{t_2^2 - t_1^2} - a^2} \quad \dots (Ⅲ.5.2.1)$$

5.2.2 鉄筋の腐食状態の把握

塩水を散布している小型供試体を用いて継続して測定中であり、結果は共同研究報告書(3)で報告予定である。

5.3 測定結果

かぶり厚さの測定結果を表Ⅲ.5.3.1に示す。

表Ⅲ.5.3.1 t_1 と t_2 の測定値およびかぶり厚さ算定結果

cf	CH1(t_1)(μ s)			CH2(t_2)(μ s)			a(mm)
	1 回目	2 回目	平均	1 回目	2 回目	平均	
①	-	-	-	-	-	-	100
②	-	-	-	-	-	-	
③	30.9	31.0	31.0	52.0	51.9	51.9	
④	29.1	29.1	29.1	52.0	52.2	52.1	
⑤	27.2	27.4	27.3	51.8	51.9	51.8	

	$t_1(\mu$ s)	$t_2(\mu$ s)	d(計算値)(mm)	実測値(mm)
①	-	-	-	157.0
②	-	-	-	127.1
③	31.0	51.9	81.2	94.7
④	29.1	52.1	60.0	62.2
⑤	27.3	51.8	39.5	31.0

5.4 まとめ

- ・ かぶり厚さ 100mm を超える部位については、励磁装置の出力不足でデータが取れなかった。
- ・ そのほかの測定に関しても幾何学的に求まる値と 2.2mm～13.5mm の誤差が生じた。この原因は、センサー間の間隔が長すぎたためで、チャンネル 2 で受信するエネルギーが著しく減少し初期到達時間の測定で読み取り誤差が生じたものと推察される。
- ・ 今後パルス電磁力音響法を用いたかぶり厚さ測定の精度を向上させるためには、励磁装置の出力を上げることと、励磁コイル-センサー間の適切な位置関係を確認することが必要である。

【参考文献】

1) 高鍋雅則、橋本光男：鉄筋コンクリート診断のためのパルス電磁力音響法の提案，非破壊検査，Vol.52,No.11,pp.628-632,2003.11

6章 電磁波レーダA法

中心周波数1500MHzアンテナおよび壁の一部で中心周波数400MHzアンテナを使用した電磁波レーダ測定を行い次のような結果を得た。

6.1 往復伝播時間および電磁波速度の材齢変化

材齢の増加とともに鉄筋までの往復伝播時間が減少することや電磁波速度が増加することを確認した。これは往復伝播時間の減少量は表面に近いほど大きい傾向があることから、乾燥による含水率の低下に対応すると考えられる。

6.2 速度測定法の比較

鉄筋コンクリートの電磁波速度測定としてワイドアングル法、透過法を行い、さらに本測定記録から双曲線法、深度法により電磁波速度を求めた。これらを比較したところ、双曲線法あるいは深度法の精度が比較的高く、鉄筋コンクリートには適しているようである。この内、深度法は予めかぶりが既知な鉄筋を複数深度に埋設しておく必要があるが、双曲線法はそのような必要がなく最も現実的な方法であると考えられる。ワイドアングル法は鉄筋コンクリートの場合、鉄筋反射波がコンクリート背面反射波に混入するため、誤差が大きくなったり算出が困難になることがある。透過法は、精度が低いことに加えて、コンクリートを挟んで送信アンテナと受信アンテナを対向させる必要があり、測定可能な構造物が限定される。

6.3 双曲線法による鉄筋かぶりと電磁波速度の算出

これまで行なってきた双曲線法を改良し、図-Ⅲ.6.3.1、図-Ⅲ.6.3.2に示すように、鉄筋毎に双曲線状反射波の頂点からの距離と往復伝播時間を複数点読み取り、往復伝播時間に関する最小二乗法を適用してかぶりと電磁波速度を同時に求めた。その結果、他の反射波が混入しないような条件であれば、高精度でかぶりを求められることが判った。また電磁波速度について、表面で大きく内部に行くに従い減少し、深度12cm程度からほぼ一定になる傾向が求まり、往復伝播時間の深度方向変化と調和した。

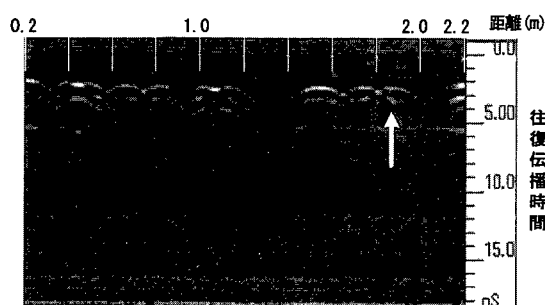


図-Ⅲ.6.3.1 BW 供試体測線の測定記録

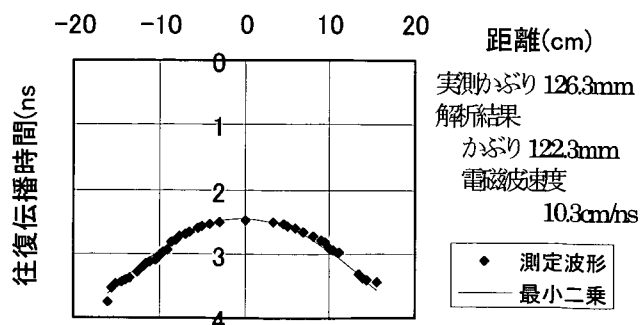


図-Ⅲ.6.3.2 BW 供試体測線記録の図中の↑の反射波から求めたかぶり、電磁波速度

6. 4 鉄筋の施工位置

鉄筋の施工位置の検出精度について、図-Ⅲ. 6. 4. 1、図-Ⅲ. 6. 4. 2 に示すように測定した距離 2.5m 程度の範囲内であれば、始点からの距離による誤差の違いは少なく、むしろかぶりの違いによる誤差の変化が大きく、深くなるほど誤差が大きくなることになった。これは、鉄筋の双曲線状反射波はかぶりが浅ければ鋭角的であるのに対して、かぶりが深くなると鈍角的になり、そのために頂点の距離の読み取り誤差が増加するものと考えられる。

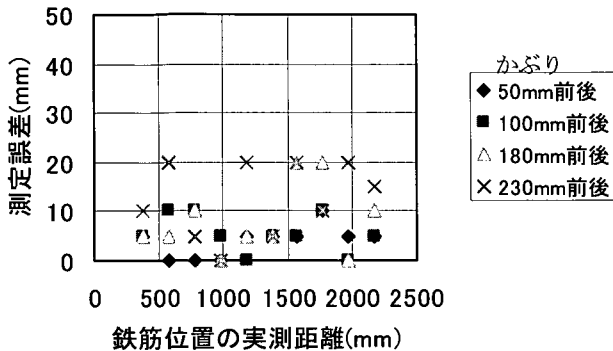


図-Ⅲ. 6. 4. 1 AW 供試体Ⅰ～Ⅲ測線の鉄筋の実測距離と測定誤差との関係

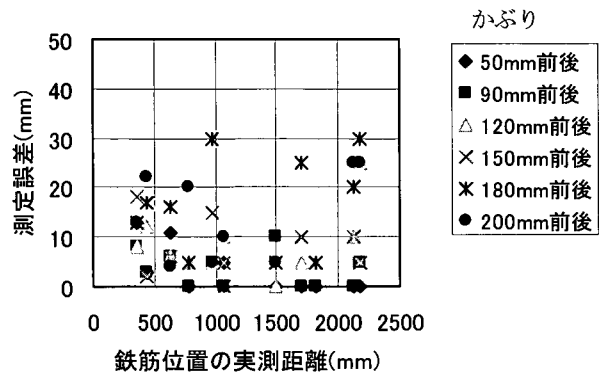


図-Ⅲ. 6. 4. 2 AW 供試体Ⅳ～Ⅵ測線の鉄筋の実測距離と測定誤差との関係

6. 5 鉄筋のかぶり

壁版供試体で 1500MHz アンテナを使用した測定記録から求めた鉄筋かぶりの測定誤差と実測値との比較を図-Ⅲ. 6. 5. 1 に示す。この中で電磁波速度には 3 種類の方法の結果を用いたが、透過法に比較して双曲線法と深度法は誤差が同程度で比較的小さく、かぶりが 200mm 程度の範囲内であれば、±10%程度以内の誤差で求められることになった。ただし、双曲線法は最も現実的な方法であるが、図-Ⅲ. 6. 5. 2 に示すように、隣り合う鉄筋との間隔が 100 mm 以下では、他の鉄筋反射波の混入する影響により誤差が大きくなることもある。

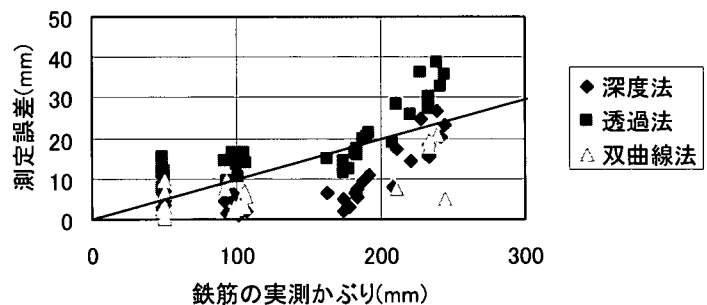


図-Ⅲ. 6. 5. 1 AW 供試体Ⅰ～Ⅲ測線の鉄筋の実測かぶりと測定誤差との関係(鉄筋間隔 200mm 一定)

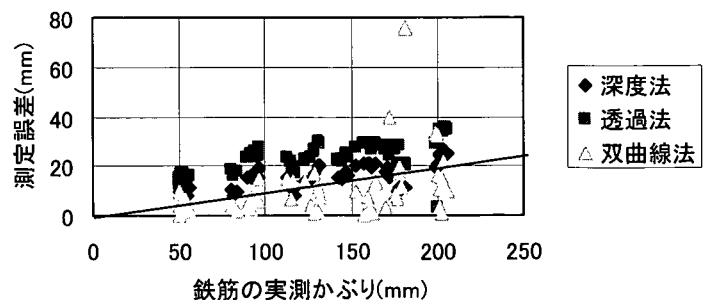


図-Ⅲ. 6. 5. 2 AW 供試体Ⅳ～Ⅵ測線の鉄筋の実測かぶりと測定誤差との関係(鉄筋間隔 25mm～412mm で変化)

6. 6 版 厚

底版で 1500MHz アンテナを使用した測定記録から求めた版厚の実測値と測定誤差との関係を図-Ⅲ. 6. 6. 1 に示す。ただし、

底版は鉄筋が一重に配筋されているだけであり、版厚も最大 300mm 程度であったことから 1500MHz アンテナで測定可能であった。

電磁波速度には深度法と双曲線法の結果を用いたが、双曲線法の方が誤差が少なく、最大誤差は 13.4% であるが、平均誤差は $\pm 6.1\%$ と小さな結果になった。なお、双曲線法の電磁波速度にはコンクリート内部で一定になった値を使用している。

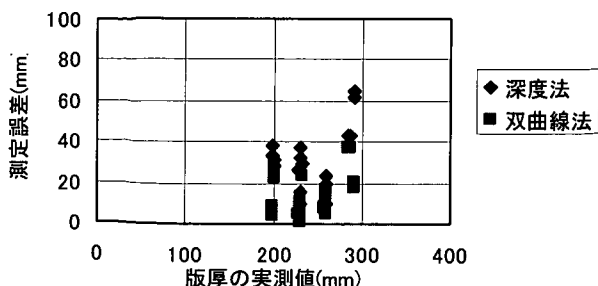


図-Ⅲ. 6. 6. 1 底版供試体に関する版厚の実測値と測定誤差の関係

6. 7 内部欠陥

1500MHz アンテナを使用して、底版に設けた内部欠陥上を通る測線で測定した記録にデータ処理(マイグレーション処理)を行なった結果を図-Ⅲ. 6. 7. 1 に示す。内部欠陥としては空洞模型とポーラスコンクリートがあり、いずれも鉄筋の上部と下部に設置されている。これから空洞は反射率が大きく、いずれも検出できていることが判る。さらに、鉄筋上部にある場合には鉄筋反射波が不明瞭になることから空洞と鉄筋との位置関係が判別できる。しかし、ポーラスコンクリートはコンクリート打設時にセメントミルクあるいは細粒分が空隙に進入した模様で反射波が明瞭ではない。このようにポーラスコンクリートは空隙の量によって検出できたりできなかったりする。

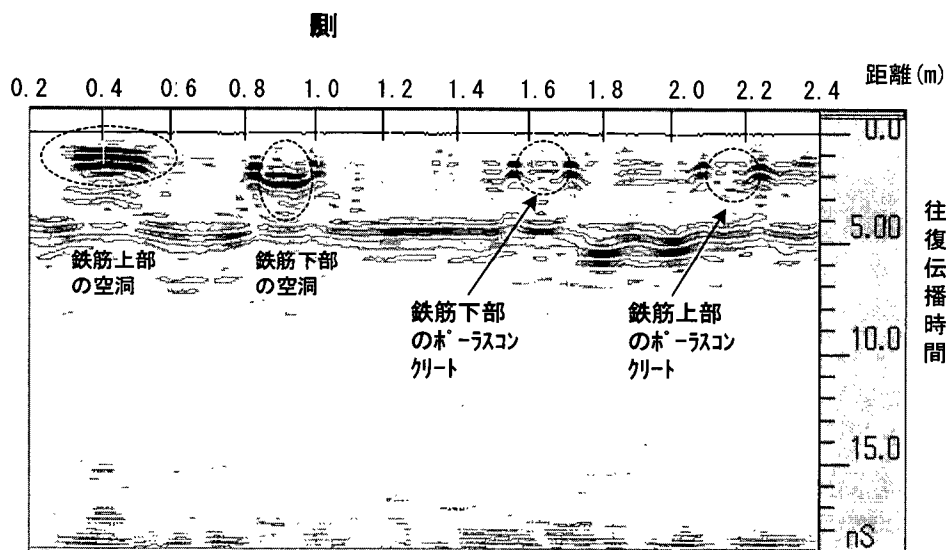


図-Ⅲ. 6. 7. 1 内部欠陥の測定記録にデータ処理を行なった結果

6. 8 400MHz アンテナの適用

400MHz アンテナを使用して測定した記録にデータ処理(マイグレーション処理)を行なった結果を図-Ⅲ. 6. 8. 1 に示す。図上に記した反対側の鉄筋反射波、コンクリート背面反射波の往復伝播時間を読み取り、双曲線法による電磁波速度を乗じて深度に換算したところ、いずれも実測値に近い結果になった。1500MHz アンテナでは深い深度の測定は困難であるが、400MHz アンテナではこのような測定が可能である。

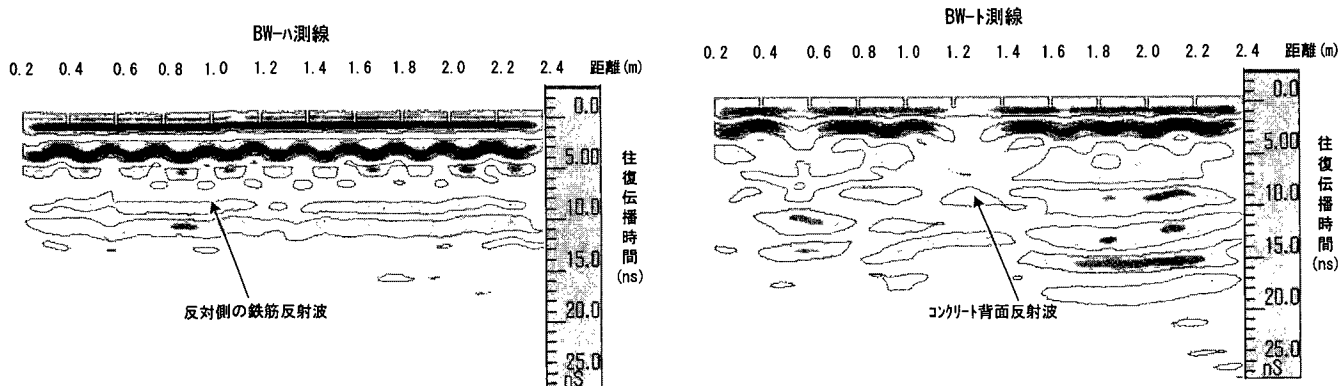


図-Ⅲ. 6. 8. 1 400MHz アンテナを使用して壁版を測定した記録にデータ処理を行った結果

【参考文献】

- 1) 国土交通省土木研究所他：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、共同研究報告書第 268 号、pp42-47、pp141-154、pp199-201、pp257-263、2001. 3
- 2) 前川聡、松本功、吉村明彦、森濱和正：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 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測定について、非破壊検査協会平成 12 年秋季大会講演概要集、pp267-268、2000. 11
- 3) 前川聡、斉藤秀樹、向井一弘、森濱和正：非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究 電磁波レーダ法その 1 コンクリート中の鉄筋かぶりの高精度測定、非破壊検査協会平成 15 年秋季大会講演概要集、pp131-134、2003. 11

7 章 電磁波レーダ B 法

7. 1 実験目的

目的の第 1 は、コンクリート内部の比誘電率の分布を求めることである。

第 2 は、求めた比誘電率を用いることにより、かぶり厚さ、部材厚さの測定精度を把握する。

第 3 に、内部欠陥の検出方法の検討を行う。

7. 2 測定方法

深度校正（比誘電率）を $\varepsilon = 8.0$ 一定にしておき、設定した測線を走査し、かぶり厚さの異なる鉄筋上でかぶり厚さを測定し、かぶりコンクリートの平均比誘電率を求めた。その測定結果から、かぶり厚さの異なる相隣る鉄筋のかぶり厚さの測定値と実測値から各深さの比誘電率分布を求めた。その比誘電率分布からかぶり厚さと、部材厚さを求めた。

発泡スチロールやポーラスコンクリートと健全部分の電磁波の波形の違いから、内部欠陥の検出を試みた。

7. 3 かぶり厚さの測定結果

図-Ⅲ. 7. 3. 1 は、測定したかぶり厚さと実測したかぶり厚さから、かぶりコンクリートの平均比誘電率を求める方法である。かぶり厚さを d 、鉄筋から反射して戻ってきたときの往復時間を t とすると、平均速度 V は式(Ⅲ.7.3.1)で求められ、式(Ⅲ.7.3.2)によって平均比誘電率 ε が求められる。

$$V = \frac{2d}{t} \quad (\text{Ⅲ.7.3.1})$$

$$\sqrt{\varepsilon} = \frac{C}{V} \quad (\text{Ⅲ.7.3.2})$$

式(Ⅲ.7.3.2)によって平均比誘電率 ε を求めた結果は図-Ⅲ. 7. 3. 3 のとおりである。

次に、かぶり厚さの異なる相隣る鉄筋間の比誘電率の求め方は次のとおりである。図-Ⅲ. 7. 3. 2 のように、かぶり厚さの異なる隣り合う鉄筋のかぶり厚さを d_{i-1} 、 d_i 、反射波往復時間を t_{i-1} 、 t_i とすると、鉄筋間の電磁波速度は式(Ⅲ.7.3.3)、比誘電率 ε_i は式(Ⅲ.7.3.4)により求められる。

$$V_i = \frac{2(d_i - d_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad (\text{Ⅲ.7.3.3})$$

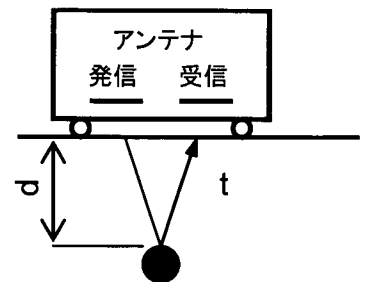


図-Ⅲ. 7. 3. 1 かぶりコンクリートの平均比誘電率の求め方

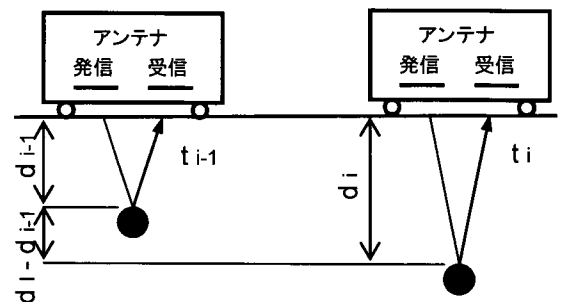


図-Ⅲ. 7. 3. 2 鉄筋間の比誘電率の求め方

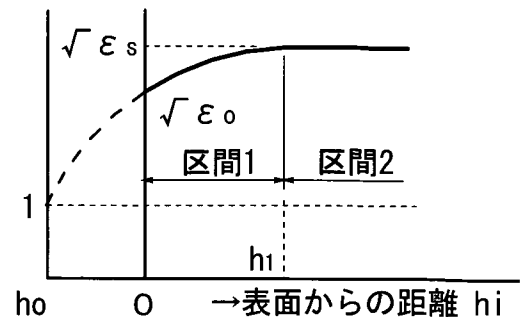


図-Ⅲ. 7. 3. 5 コンクリート内部の比誘電率分布の仮定

$$\sqrt{\epsilon_i} = \frac{C}{V_i} \quad (\text{III.7.3.4})$$

式(III.7.3.4)によって求めた鉄筋間の比誘電率分布は図-III.7.3.4のとおりである。

図-III.7.3.3 および図-III.7.3.4 の中に、コンクリート内部の比誘電率は図-III.7.3.5 のように分布するものと仮定し^{1, 2)}、かぶり厚さの測定値と実測値から回帰して求めた結果を太い実線で示してある。

回帰結果、供試体 A と C は、図-III.7.3.3 の平均比誘電率にほぼ一致している。図-III.7.3.4 の鉄筋間の比誘電率の測定値はばらつきが大きいものの、表面近くは小さく、内部ほど大きくなり、ある程度の深さになるとほぼ一定になる傾向を示し、回帰結果とはほぼ一致しており、図-III.7.3.5 の仮定した分布はほぼ妥当と考えられる。ところが、供試体 B の回帰結果は、両図とも測定値より小さくなっている。これは、表層の比誘電率が図-III.7.3.5 の比誘電率 1 の位置がプラス側になっていたため、表面からの距離が 0mm を通るよう回帰したことによる。

比誘電率分布を回帰結果で見ると (図-III.7.3.4 の太い実線)、一定値になる深さは 50~100mm 程度であった。表面の比誘電率 ϵ_0 と、内部の一定値になる比誘電率 ϵ_s は、材齢とともに小さくなる傾向があり、乾燥の影響を表しているものと考えられる (図-III.7.3.6)。

比誘電率分布からかぶり厚さを求め (計算値)、計算値と実測値の比を求めた結果が図-III.7.3.7 である。凡例の数字はかぶりの実測値である。供試体 A のかぶり厚さの測定結果は、一部を除き $\pm 5\%$ 以内で求められている。詳細に見ると、材齢の進行に伴いわずかに小さくなり、また、かぶり厚さが小さいほど小さくなる傾向があった。供試体 C も同様の傾向であった。供試体 B も、かぶり厚さが一番小さい場合を除き $\pm 7\%$ 以内であり、供試体 A、C と同様の傾向である。一番小さいかぶり厚さが 10~20% も小さくなっているのは、上記のとおり比誘電率を表面からの距離 0mm を通るよう回帰して求めているため、表面近くの比誘電率が大きくなり、電磁波速度が小さくなったためである。

7. 4 内部欠陥の検出

欠陥位置と健全部分のレーダによる測定結果を図-III.7.4.1 に示す。

発泡スチロールの場合は明確にはわからない。厚さが 20mm しかないので、発泡スチロールの上面からの反射波と底面からの反射波が分離しにくいと考えられる。

ポーラスコンクリートは、健全部分と比較すると、鉄筋の上に設置した場合は明確に異常があることがわかる。鉄筋の下に設置した場合は、鉄筋の上ほど明確ではないが、電磁波速度が速くなっており、異物の存在の可能性があることがわかる。

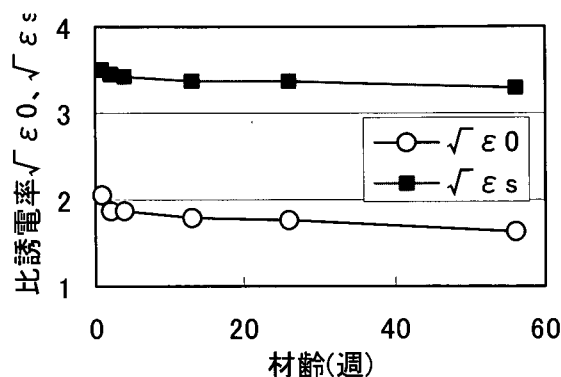


図-III.7.3.6 比誘電率と材齢の関係

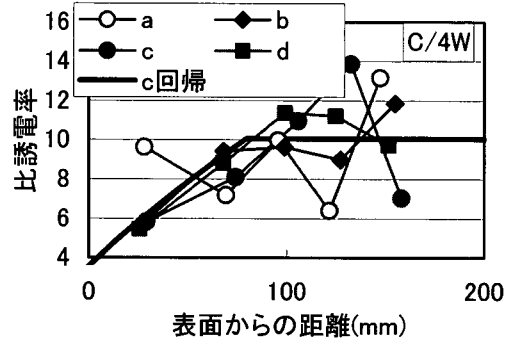
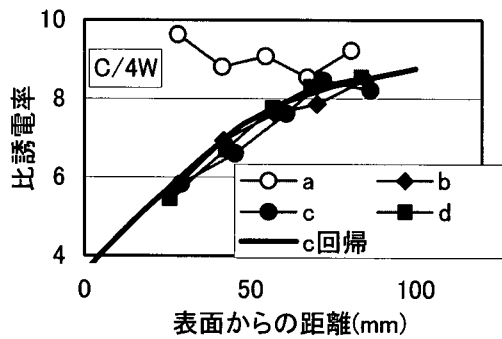
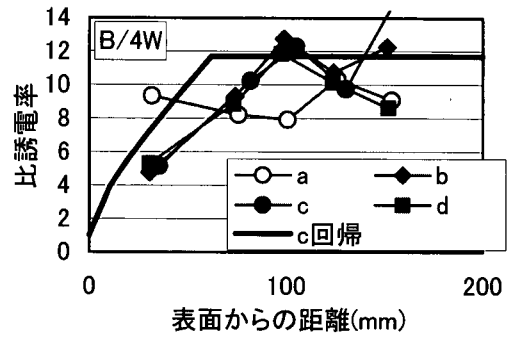
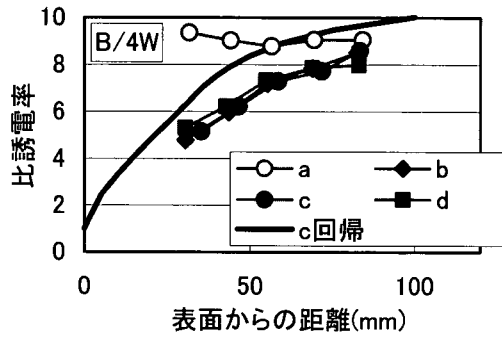
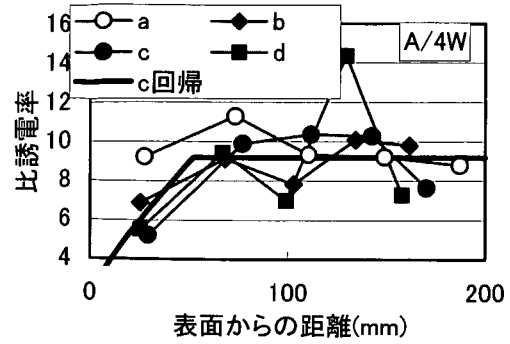
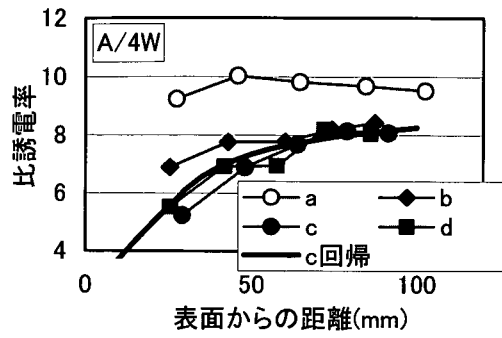


図-Ⅲ. 7. 3. 3 平均比誘電率分布

図-Ⅲ. 7. 3. 4 鉄筋間の比誘電率

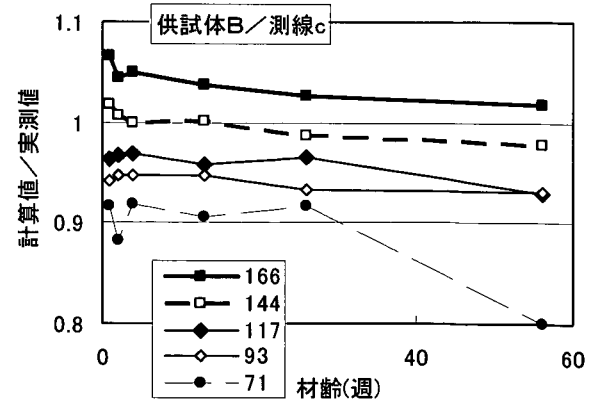
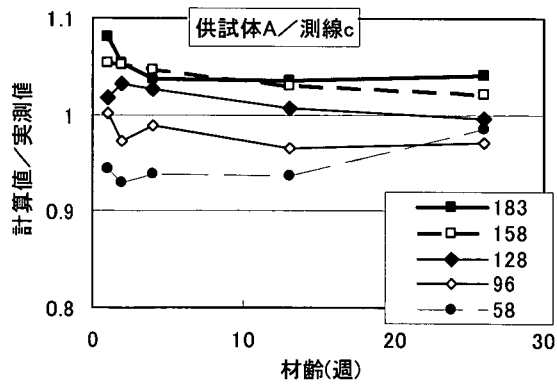


図-Ⅲ. 7. 3. 7 かぶり厚さの計算値と実測値の比較

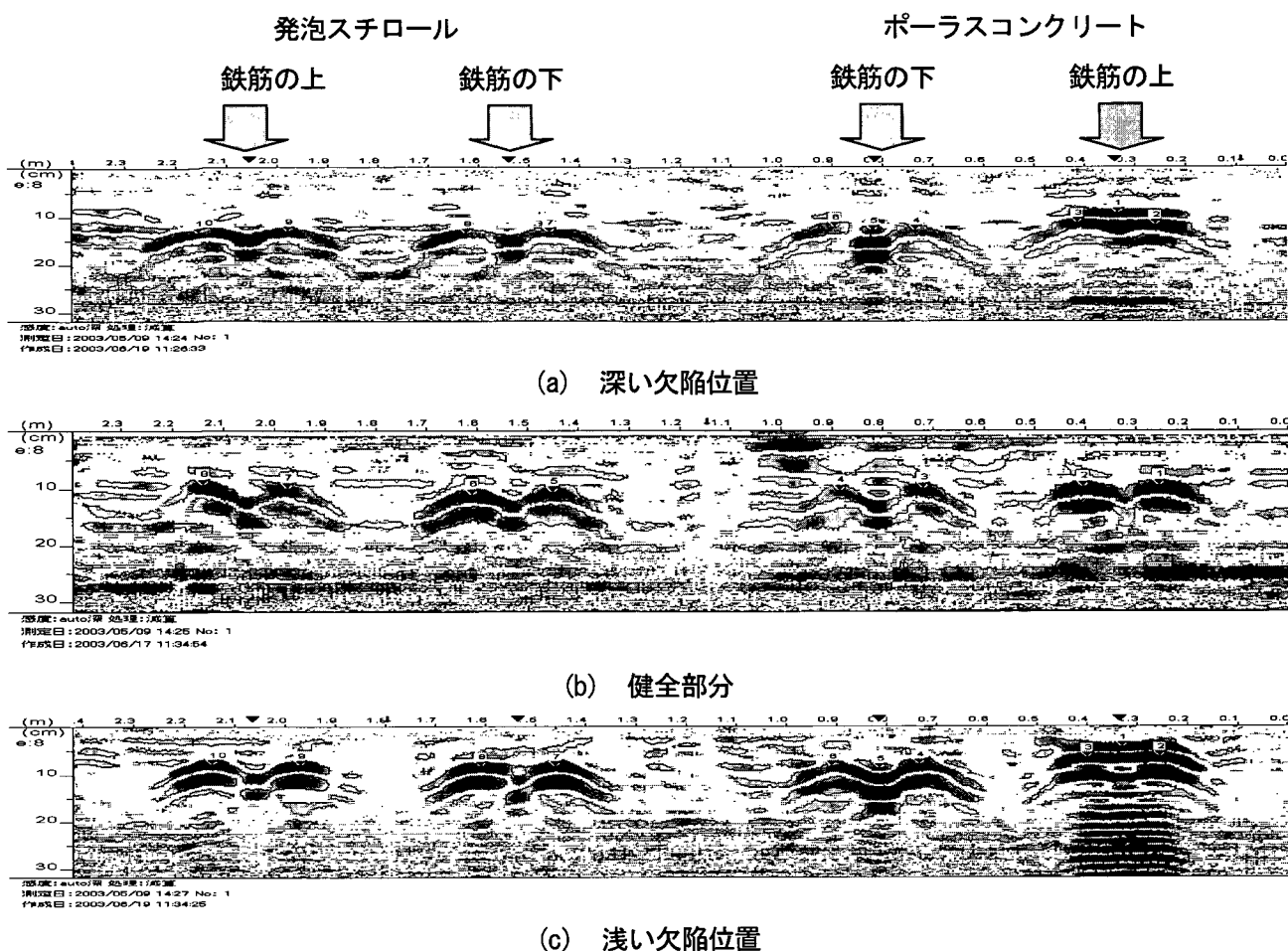


図-Ⅲ. 7. 4. 1 電磁波レーダの内部欠陥部分の測定記録（供試体Bの底版、測定 28 週）

7. 5 まとめ

コンクリート内部の比誘電率の分布を求め、これまで^{1), 2)}とほぼ同じ結果を得た。

求めた比誘電率分布を使っにかぶり厚さを求めることにより、かぶりの浅いところを除き、精度良く推定できることがわかった。

内部欠陥の検出は、はくりを模擬した薄い発泡スチロールの検出は難しい。ジャンカを模擬したポーラスコンクリートは、健全な部分と比較することにより、表層のかぶり部分の検出の可能性は高い。鉄筋の下に存在する場合も、異常が存在する可能性を判断することはできる。

今後、かぶり厚さを精度良く求めるためには、比誘電率を非破壊で求める方法の検討が必要である。また、欠陥を検出のためには、波形など詳細な検討が必要と考えられる。

【参考文献】

- 1) 国土交通省土木研究所、(社)日本非破壊検査協会：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、第 268 号、2001.3
- 2) 富士岳、森濱和正ほか：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 第 2 報 レーダ法および衝撃弾性波法、非破壊検査、Vol.52, No.12, pp. 691-696, 2003.12

8章 電磁波レーダC法

8. 1 実験目的

本実験は、以下の3点を明らかにすることを目的として実施した。

(1) コンクリート材齢毎の比誘電率の推移 施工検査などに電磁波レーダ法を適用するためには、材齢毎の適切な比誘電率を用いて反射物体の深度を推定する必要がある。

(2) コンクリート内部欠陥の検出限界 コンクリート構造物への電磁波レーダ法の適用性は、欠陥の規模・形態や鉄筋の配筋状態などによって影響を受ける。

(3) コンクリート内部鉄筋を透過するためのアンテナ走査方法 電磁波レーダ法によりコンクリート構造物の部材厚や部材背面の状況を探査するためには、部材内の鉄筋層を電磁波が確実に透過する必要がある。

8. 2 実験結果

本実験では以下の結果が得られた。

(1) コンクリート材齢毎の比誘電率の推移

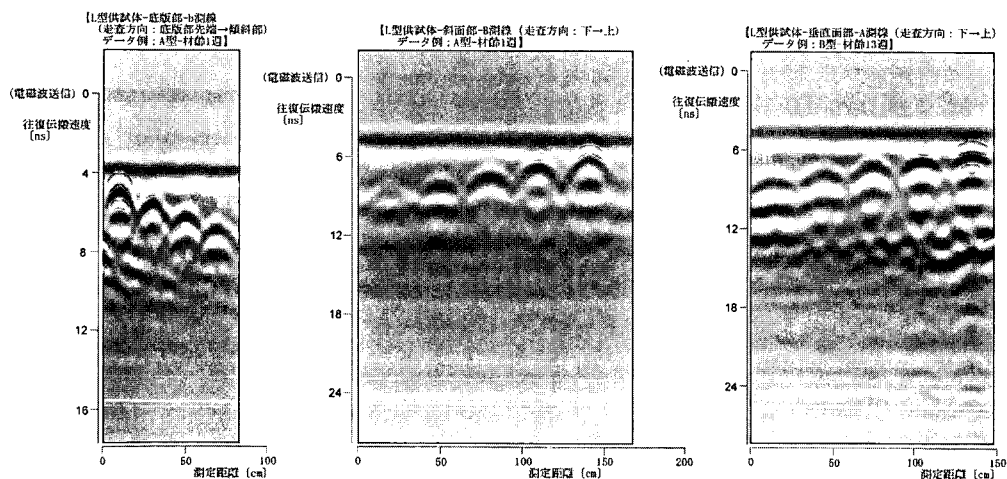


図-Ⅲ. 8. 2. 1 配筋状態レーダ取得データ例

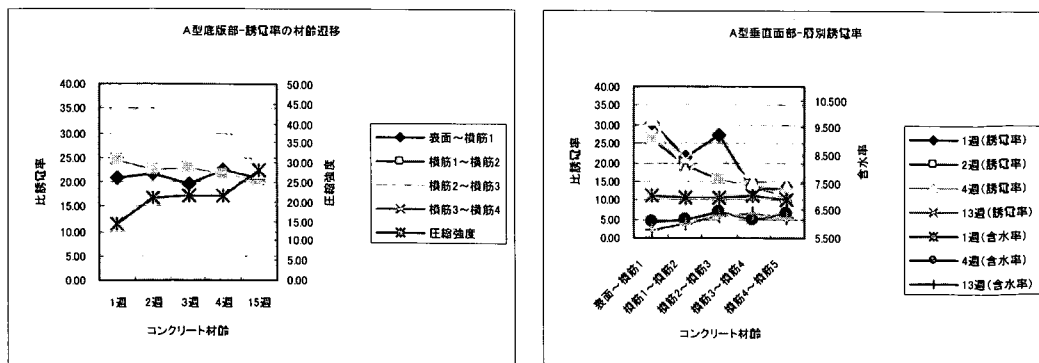


図-Ⅲ. 8. 2. 2 誘電率推移分析例

(2) コンクリート内部欠陥の検出限界

鉄筋よりも浅部にある発泡スチロール（空洞を模擬）からは明瞭な反射が得られたが、その背面の鉄筋は判別が難しい。鉄筋背面の発泡スチロールは鉄筋間に限って明瞭な反射を抽出することができた。

一方、ポーラスコンクリートは抽出が困難であった。

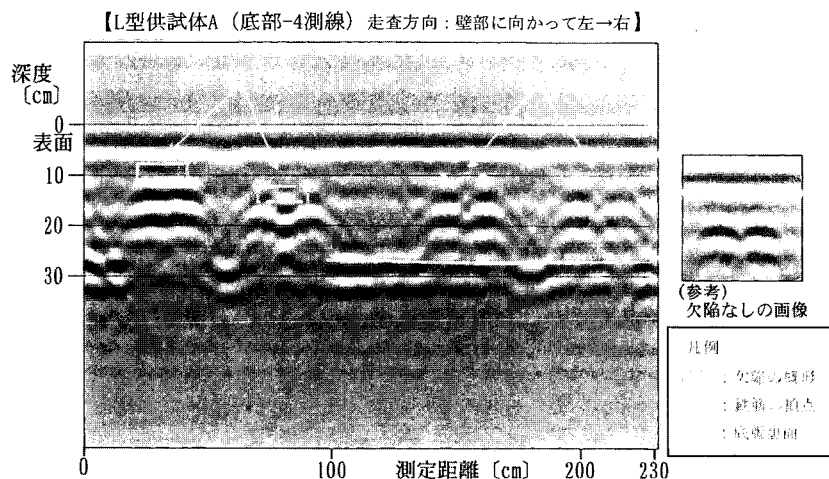


図-Ⅲ. 8. 2. 3 内部欠陥レーダ取得データ

(3) コンクリート内部鉄筋を透過するためのアンテナ走査方法

アンテナ走査方法は、通常用いられる縦方向への走査および横方向への走査の2通りとした。

縦方向走査では、鉄筋位置は明瞭に特定できるものの部材裏面は抽出できなかった。一方、横方向走査では、鉄筋が若干不明瞭になるものの部材裏面を抽出することができた。

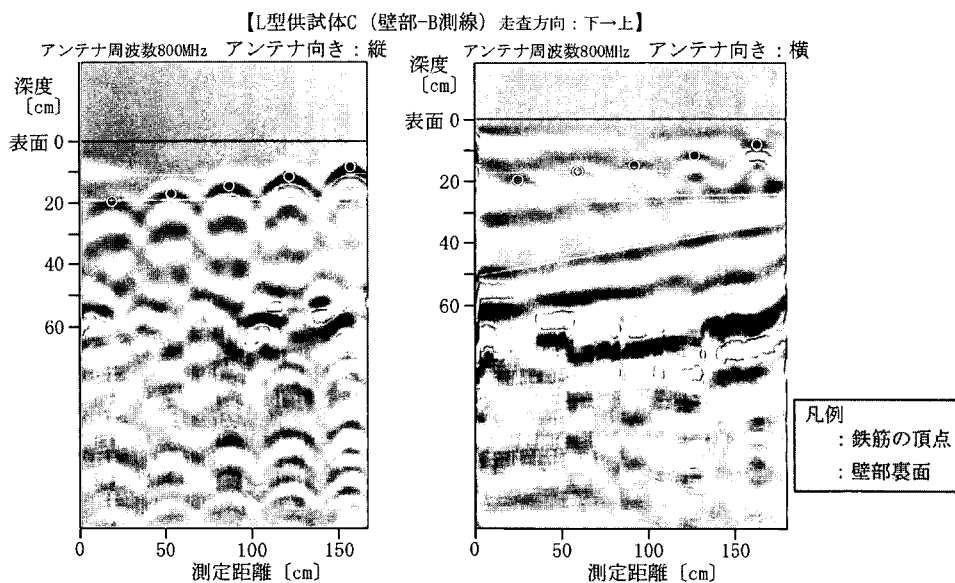


図-Ⅲ. 8. 2. 4 アンテナ方向毎のレーダ取得データ

8. 3 実験結果に関する考察

(1) コンクリート材齢による比誘電率の推移

コンクリートの比誘電率は、深部ほど低い傾向がある。一方、含水率は、浅部と深部で若干低くなっている。また、材齢が進むと、比誘電率が低下するとともに、圧縮強度は増加し、含水率は低下するといった相関が確認された。

このことから、浅部では水分が蒸発し、深部では水和反応がすすみ、結果、深部で強度増進（ただし深度毎の圧縮強度は未確認である）および比誘電率の低下が発生したものと考えられる。

(2) コンクリート内部欠陥等の検出限界

鉄筋と空洞（発泡スチロール）が奥行き方向に重なっている場合は、表面側の鉄筋もしくは空洞は抽出できるが、背面側の空洞もしくは鉄筋は抽出が困難であるものと推測される。

空洞背面の鉄筋が判別できないのは、空洞表面で発生する強反射と直近の反射（鉄筋表面で発生する強反射）との合成によるものであり、鉄筋背面の空洞が判別できないのは、電磁波は鉄筋で全反射するため鉄筋背面の空洞には電磁波が到達しないためである。

(3) コンクリート内部鉄筋層を透過するためのアンテナ（電磁波送受信部）走査方法

縦方向走査では、鉄筋位置は明瞭に特定できるものの部材裏面は抽出できなかった。一方、横方向走査では、鉄筋が若干不明瞭になるものの部材裏面を抽出することができた。

横方向走査時に鉄筋が若干不明瞭になるのは電磁波送受信部が鉄筋を跨いでいないためであり、結果、鉄筋層での電磁波反射成分が少なく、より深層部への電磁波透過が可能であることを表している。

8. 4 今後の課題

以下にあげる課題は、今後、より多くの実験データによって明らかにしていく必要がある。

(1) コンクリート材齢による比誘電率の推移

新設構造物の竣工検査などに電磁波レーダ法を適用する場合において、ドリル削孔等の破壊調査法によるキャリブレーションを実施せずに高精度な評価を行うためには、より多くの実験データによってコンクリート材齢毎の比誘電率を定めておくことが望ましい。今回の実験結果からは、材齢毎の比誘電率と圧縮強度、そして含水率にはおよそ相関性があるものと確認されたことから、本件についても継続検証するべきと考える。また、供試体あるいは実構造物に、かぶり厚が既知で深度方向に分布した複数の鉄筋を配筋することで、比誘電率の推定精度（深度方向の構造評価精度）は向上するものと考えられる。

(2) コンクリート内部欠陥等の検出限界

鉄筋背面空洞の検出限界を明らかにするためには、鉄筋間隔を様々に設定して検証する必要がある。

また、部材内の空隙調査への適用性を判断するためには空隙分布状況（空隙率）を様々に設定して検証する必要がある。

(3) コンクリート内部鉄筋層を透過するためのアンテナ（電磁波送受信部）走査方法

アンテナ横方向走査の適用条件としては、アンテナ進行方向と平行な鉄筋の間隔が電磁波送受信部の間隔以上であることが考えられる。また、アンテナ進行方向と直行する鉄筋の間隔は、極端に狭い場合も深部まで電磁波が透過するものと推測されるが、これを実験的に検証する必要がある。

9章 電磁誘導法

9. 1 実験目的

鉄筋位置、かぶり厚さ、鉄筋径の測定精度の把握と、適用可能な範囲を把握することを目的に実験を行った。

9. 2 探査結果

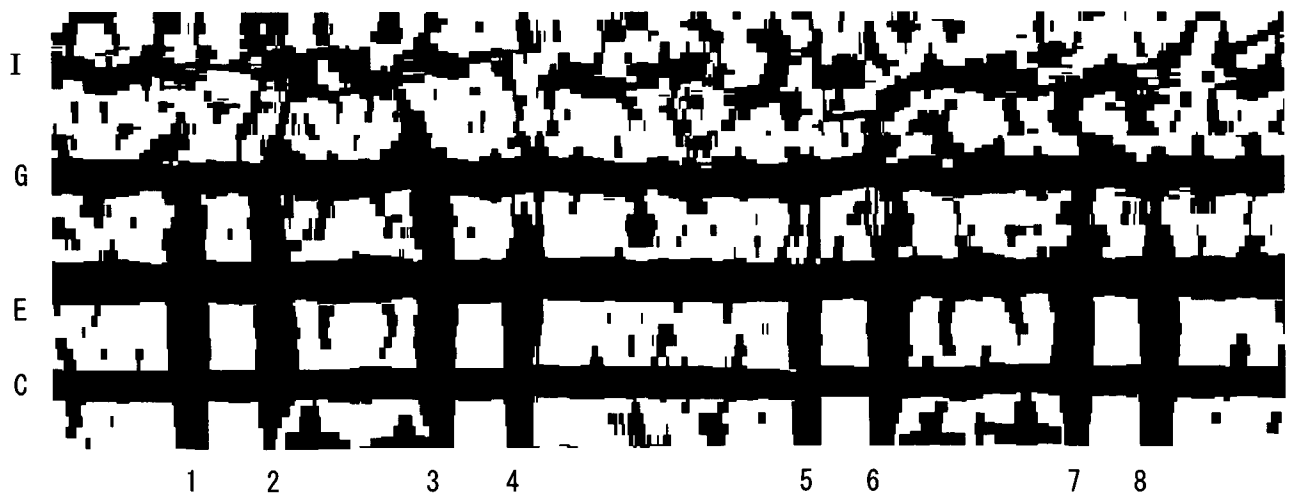
壁前面の上部と底版の、装置を操作して得られたイメージ画像を図－Ⅲ. 9. 2. 1 および図－Ⅲ. 9. 2. 2 に示す。図の上および下の数字と左側のアルファベットは鉄筋番号である。図－Ⅲ. 9. 2. 1 の2,3 と6,7 は画像上では1本として見えるが、鉄筋が近接または密着していることを示している。

9. 2. 1 探査の適用範囲

図－Ⅲ. 9. 2. 1 ではCからE方向に向かって、図－Ⅲ. 9. 2. 2 ではCからI方向に向かってかぶり厚さが厚くなっており、画像には徐々に乱れが生じることが確認できる。図－Ⅲ. 9. 2. 2 で僅かながら確認できる横筋Iは120mmのかぶり厚さがあり、鉄筋の太さにもよるがこの付近が適用できる範囲と考えられる。



図－Ⅲ. 9. 2. 1 供試体 A ・ 壁上部の探査結果イメージ画像



図－Ⅲ. 9. 2. 2 供試体 A ・ 底版の探査結果イメージ画像

9.2.2 鉄筋位置の解析結果

鉄筋位置を実測値と比べた結果が表－Ⅲ.9.2.1 および表－Ⅲ.9.2.2 である。測定結果は、ほぼ±10mm 以内で測定できている。

表－Ⅲ.9.2.1 壁上部・垂直筋の位置 (単位：mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
供試体 A	探查値	164	363	418	721	848	1049	←	1476	1567	1778	1917	2109	2182	2366
	実測値	175	375	425	725	850	1038	1063	1475	1575	1775	1924	2112	2187	2375
	差	-11	-12	-7	-4	-2	11	-14	1	-8	3	-7	-3	-5	-9

表－Ⅲ.9.2.2 底版のたて筋の位置 (単位：mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8
供試体 A	探查値	337	501	824	987	1543	1701	2061	2218
	実測値	341	501	821	981	1541	1701	2060	2220
	差	-4	0	3	6	2	0	1	-2

9.2.3 かぶり厚さの解析結果

かぶり厚さを実測値と比べた結果が表－Ⅲ.9.2.3 および表－Ⅲ.9.2.4 である。

壁上部の測定結果は、実測値よりも浅く推定する傾向があり、実測値との差は-11～0mm の範囲であった。また底版については測点位置が異なるものの、No.8 の 1 本を除いて同様の傾向が見られる。

表－Ⅲ.9.2.3 壁上部・垂直筋のかぶり厚さ (単位：mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
供試体 A	端面からの距離	150	149	147	147	149	149	←	125	118	125	128	126	124	128
	探查値	39	39	44	54	53	53	←	49	46	51	41	42	38	38
	実測値*	46	50	51	54	54	55	55	54	53	53	52	50	49	48
	差	-7	-11	-7	0	-1	-2	-	-5	-7	-2	-11	-8	-11	-10

表－Ⅲ.9.2.4 底版のたて筋のかぶり厚さ (単位：mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8
供試体 A	端面からの距離	157	149	148	151	138	138	159	158
	探查値	46	44	45	43	36	29	39	48
	実測値*	36	38	37	36	32	31	30	32
	150mm位置換算	44	46	45	44	40	39	38	40
	差	2	-2	0	-1	-4	-10	1	8

*表－Ⅲ.9.2.3 および 9.2.4 表中の実測値は打設端面から 100mm 位置の値

9.2.4 鉄筋径の解析結果

鉄筋径を実測値と比べた結果が表－Ⅲ.9.2.5 および表－Ⅲ.9.2.6 である。

壁上部の D25 に対して-9～11mm の範囲で推定している。底版の D19 はほとんど-3mm であるが、1 本のみ-5mm がある。鉄筋の径は 3mm ピッチで規格化されており、±2 ランクの範囲、つまり 5 種類の鉄筋を判定する可能性を示している。より正確な判定を行なうためには±1mm の精度が求められるが、少なくとも 2 種類のうちのどちらか（1 ランク上または下）を判定する程度の精度を持たせるためには、+3mm または-3mm 以内で測定できるだけの精度が必要と考えられる。

表－Ⅲ.9.2.5 壁上部・垂直筋の鉄筋径 (単位：mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
供試体 A	探査値	28	20	28	36	32	36	←	25	16	36	20	25	20	28
	実測値	25													
	差	3	-5	3	11	7	11	-	0	-9	11	-5	0	-5	3

表－Ⅲ.9.2.6 底版のたて筋の鉄筋径 (単位：mm)

		1	2	3	4	5	6	7	8
供試体 A	探査値	16	16	16	16	14	-	16	20
	実測値	19							
	差	-3	-3	-3	-3	-5	-	-3	1

9.2.5 探査結果、精度についての考察

鉄筋の有無・位置・距離寸法について、図－Ⅲ.9.2.1 および図－Ⅲ.9.2.2 「探査結果イメージ画像」に示す通り、探査可能かぶり厚さの範囲内では明確にその状態を確認でき、実際とほぼ合致しての探査が可能である。

かぶり厚さおよび鉄筋径の探査精度については、解析結果のばらつきとその範囲が大きい場合があり、この精度を向上させることが今後の課題として挙げられる。当該装置は探査結果と内蔵されているデータを照合するシステムとしているため、内蔵されているデータベースの数をより多くすることにより改善できる可能性があるものと考えられる。

10章 赤外線サーモグラフィ法

10.1 実験目的

赤外線サーモグラフィを用いて構造物の表面温度を測定し、内部欠陥の有無および位置を推定すること、撮影条件（撮影時間帯等）、および赤外線サーモグラフィによる欠陥検出の適用限界などを検証することを目的とする。

10.2 実験概要

撮影はパッシブ法で行い、次の点に注意して実施した。

- ①晴天日、日射が得られる時間を選んで測定を行った。
- ②調査対象部分の日射受熱量が最大となる時間帯に撮影を行った。
- ③対象供試体はL型供試体の底版部であり、検出目標の欠陥は、人工的に欠陥を再現するため、コンクリート内に埋め込んだ発泡スチロールまたはポーラスコンクリートである。

10.3 実験結果

赤外線サーモグラフィにより、表-Ⅲ.10.3.1の条件で撮影を行い図-Ⅲ10.3.1の熱画像を得た。

欠陥は、結果的には検出できなかった。その理由は、次のようなことが考えられる。

- ① コンクリート表面から欠陥までの深さが深く、とくに発泡スチロールの最も浅い位置でも設計上38mmであり、パッシブ法では温度差が現れにくかったこと。
- ② ポーラスコンクリートは、空隙が24%と少ない上、最も浅い位置は7mmであるが、空隙にペーストが充填された可能性があり、実際にはもっと深くなっている可能性があること。
- ③ 底版表面は、補修を行なっていたために色むらがあり、それが温度差となって現れていたことから、欠陥によるわずかな温度差を確認することができなかったこと。



表-Ⅲ.10.3.1 撮影条件

供 試 体	供試体B
対象とする欠陥	発泡スチロール
撮影時間・天気	11:46、晴れ
撮影時気温	16℃
結 果	欠陥の確認できず
備 考	表面補修あり

図-Ⅲ.10.3.1 供試体Bの熱画像（発泡スチロール埋め込み）

11章 小径コア法

11.1 L型試験体を用いた実験

11.1.1 実験概要

L型擁壁を模擬した実大試験体よりφ25mmの小径コア（以下、小径コア）およびφ100mmのコア（以下、φ100mm コア）を採取して圧縮強度試験を行った。実験結果に基づき、小径コアの圧縮強度とφ100mm コアの圧縮強度の関係について検討した。

表-Ⅲ. 11.1.1 に、実験の要因を試験体種類ごとに示す。

本実験の要因は、コア供試体の直径、水セメント比 W/C、粗骨材最大寸法、セメント種類、試験材齢であり、小径コアについては、試験体上端からの採取高さとも表面からの深さも実験要因として採りあげた。

表-Ⅲ. 11.1.1 実験の要因

試験体	部位	実験要因						
		小径コアならびにφ100mm コア						小径コア
		コアの直径 (mm)	水セメント比 W/C (%)	Gmax (mm)	セメント	試験材齢 (日)	上端からの採取高さ* (mm)	表面からの深さ (mm)
A	壁	25, 100	63.0	25	N	7, 14, 28, 63, 91, 154, 350	上、中、下	表面から約50mm 間隔で2~4段階
	底版	25, 100	59.0	40	BB	7, 14, 28, 77, 105, 168, 364	-	
B	壁	25, 100	49.5	25	N	7, 14, 28, 63, 91, 154, 350	上、中、下	
	底版	25, 100	59.0	40	BB	7, 14, 28, 77, 105, 168, 364	-	
C	壁	25, 100	38.0	25	N	7, 14, 28, 63, 91, 154, 350	上、中、下	
	底版	25, 100	45.5	40	BB	7, 14, 28, 77, 105, 168, 364	-	

* 上：壁の頂部より150~450mm、中：壁の頂部より750~1050mm、下：1350~1650

11.1.2 実験結果

(1) 圧縮強度試験結果の一覧

表-Ⅲ. 11.1.2 に、圧縮強度試験結果を示す。

表-Ⅲ. 11.1.2 圧縮強度試験結果

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)											
	A 試験体-壁		B 試験体-壁		C 試験体-壁		A 試験体-底版		B 試験体-底版		C 試験体-底版	
	φ100mm	小径	φ100mm	小径	φ100mm	小径	φ100mm	小径	φ100mm	小径	φ100mm	小径
	コア	コア	コア	コア	コア	コア	コア	コア	コア	コア	コア	コア
7	20.8	23.1	26.2	31.0	31.0	37.1	14.5	16.1	18.2	18.7	18.3	20.5
14	24.7	28.5	32.2	38.8	37.0	43.4	21.3	19.1	20.6	21.3	21.3	26.8
28	29.6	32.4	32.4	38.2	38.9	43.8	21.7	24.5	25.2	27.4	26.4	31.0
63	31.7	35.5	38.3	42.7	45.8	46.6	-	-	-	-	-	-
77	-	-	-	-	-	-	26.3	33.3	29.7	34.2	31.2	33.9
91	33.6	34.8	41.5	43.4	47.3	55.9	-	-	-	-	-	-
105	-	-	-	-	-	-	28.4	31.7	32.6	34.6	32.3	37.9
154	32.8	38.6	43.7	47.3	49.4	56.5	-	-	-	-	-	-
168	-	-	-	-	-	-	33.1	43.4	33.8	41.7	34.4	45.8
350	38.2	40.4	44.5	52.3	58.3	55.4	-	-	-	-	-	-
364	-	-	-	-	-	-	34.4	37.9	37.8	40.2	42.8	46.7

(2)小径コアとφ100mm コアの圧縮強度の関係

図-Ⅲ. 11. 1. 1 および図-Ⅲ. 11. 1. 2 に、小径コア強度とφ100mm コア強度の関係を示す。

図中に線形回帰式と寄与率 R^2 を示す。なお、この図は、φ100mm コア強度に対して、対応する小径コア強度を平均値として評価したものである。

図からわかるように、粗骨材最大寸法にかかわらず、両者の相関は高い。また回帰式の勾配もほぼ1に近く、小径コアとφ100mm コアの強度差は、ほぼ一定になる傾向がある。

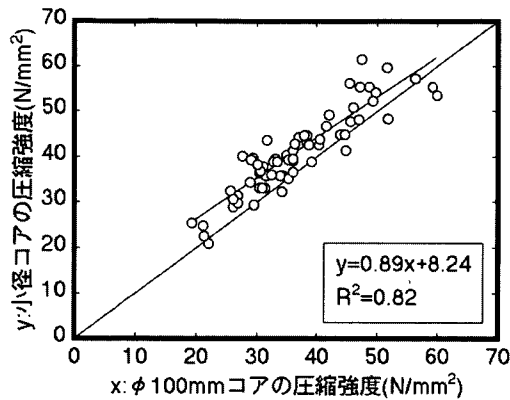


図-Ⅲ. 11. 1. 1 小径コアとφ100mm コアの圧縮強度の関係 (Gmax=25mm、平均値評価)

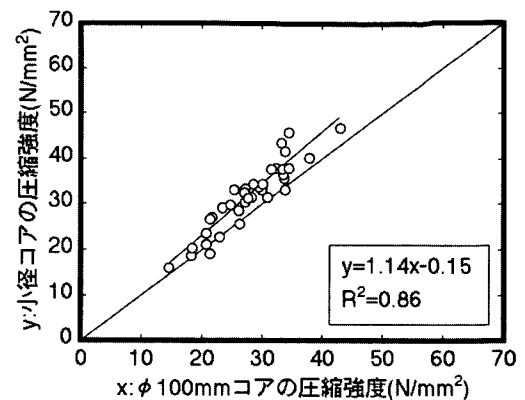


図-Ⅲ. 11. 1. 2 小径コアとφ100mm コアの圧縮強度の関係 (Gmax=40mm、平均値評価)

(3)圧縮強度と供試体採取位置の関係

図-Ⅲ. 11. 1. 3 および図-Ⅲ. 11. 1. 4 に、壁試験体から採取したコア供試体の圧縮強度と採取高さの関係を示す。

供試体の直径にかかわらず、採取位置が低くなることによって、圧縮強度が高くなる傾向がみられた。

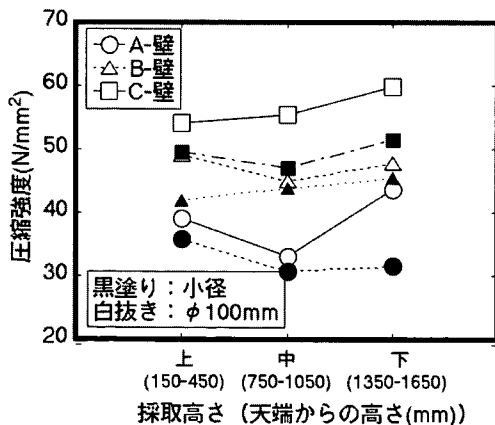


図-Ⅲ. 11. 1. 3 コア供試体の圧縮強度と採取高さの関係 (材齢 28 日)

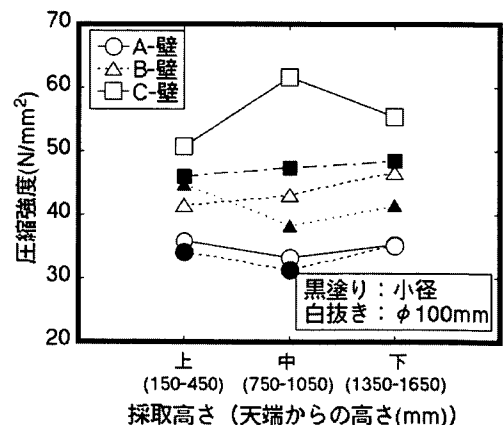


図-Ⅲ. 11. 1. 4 コア供試体の圧縮強度と採取高さの関係 (材齢 91 日)

図-Ⅲ. 11. 1. 5 および図-Ⅲ. 11. 1. 6 に、小径コアの圧縮強度の深さ方向の分布を材齢ごとに示す。

これは、各試験材齢における小径コアの圧縮強度平均値と各試験材齢における採取深さごとの小径コアの圧縮強度平均値の差と材齢の関係に示したものである。

小径コアの圧縮強度とコアの採取深さの間には、コンクリートの配合および材齢にかかわらず明確な相関は認められなかった。

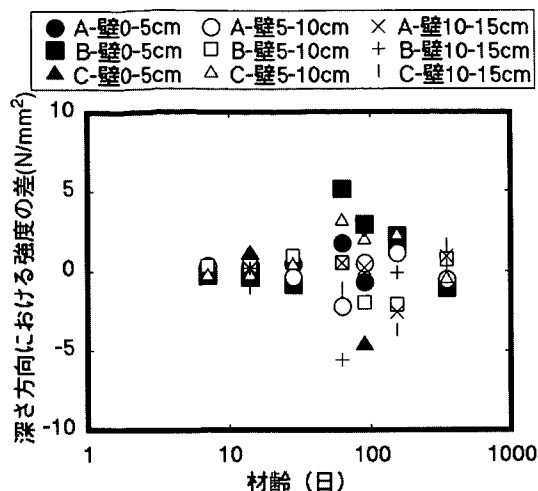


図-Ⅲ. 11. 1. 5 小径コアの圧縮強度の深さ方向の分布（採取部位：壁）

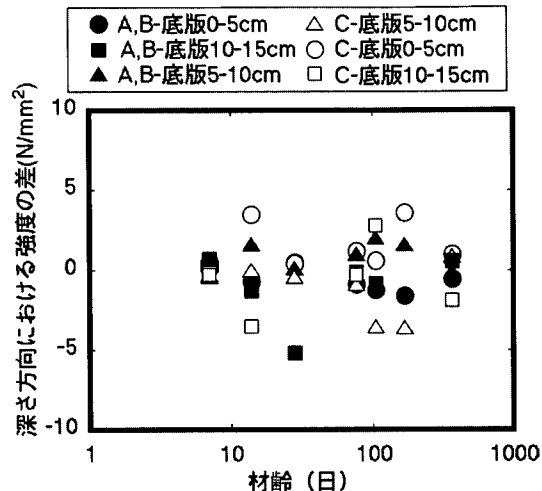


図-Ⅲ. 11. 1. 6 小径コアの圧縮強度の深さ方向の分布（採取部位：底版）

(4) 圧縮強度の分布

図-Ⅲ. 11. 1. 7 および図-Ⅲ. 11. 1. 8 に小径コアと $\phi 100\text{mm}$ コアの強度差の度数分布を示す。なお、強度差は、小径コア強度より $\phi 100\text{mm}$ コア強度を減じたものである。

これより、粗骨材の最大寸法によらず、強度差の分布は、正規分布とみなしてよいと判断でき、統計的な処理が可能であるといえる。また、粗骨材の最大寸法に関わらず、強度差の平均値は約 4N/mm^2 であり、標準偏差も 5N/mm^2 程度とほぼ同じ値を示している。これより、強度差のばらつきは、粗骨材の最大寸法が 40mm 以下であれば、ほぼ同じであると考えられる。

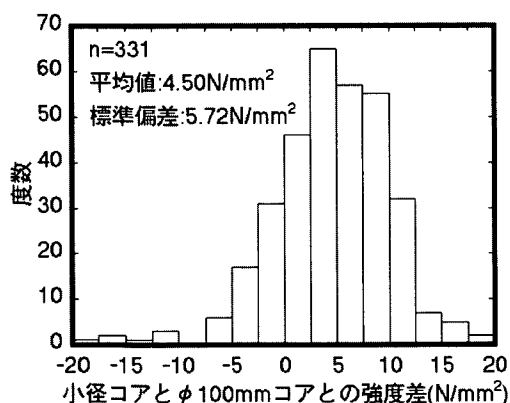


図-Ⅲ. 11. 1. 7 小径コアと $\phi 100\text{mm}$ コアの強度差の度数分布 ($G_{\text{max}}=25\text{mm}$)

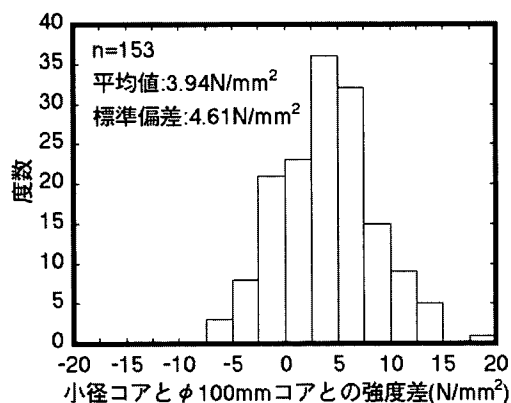


図-Ⅲ. 11. 1. 8 小径コアと $\phi 100\text{mm}$ コアの強度差の度数分布 ($G_{\text{max}}=40\text{mm}$)

(5) 強度発現率

図-Ⅲ. 11. 1. 9～図-Ⅲ. 11. 1. 13 に、材齢と強度発現率の関係（呼び強度 40N/mm^2 ）を、コンクリートの配合ごとに示す。これは、材齢 7 日の小径コアおよび標準コアと各材齢での圧縮強度の比を示したもので、コンクリート標準示方書[施工編]で示された強度発現式¹⁾による算定値を併記した。

強度発現率は、 $\phi 100\text{mm}$ コアと小径コアともほぼ等しい。また、強度算定値と $\phi 100\text{mm}$ および小径コアによる強度発現率は、概ね良い対応を示したものの、材齢 28 日でコア強度がやや低い。これは、材齢 28 日試験を 11 月下旬から 12 月上旬の外気温が低い時期に行ったことも影響していると思われる。

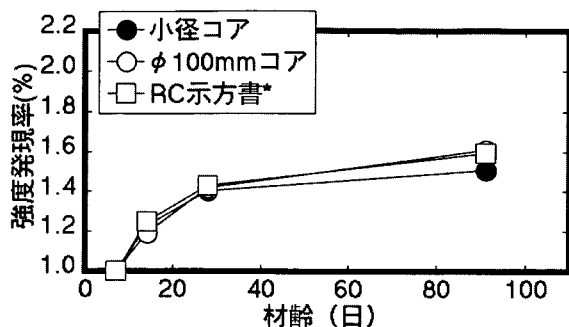


図-Ⅲ. 11. 1. 9 強度発現率と材齢の関係
(A 試験体壁: 18N)

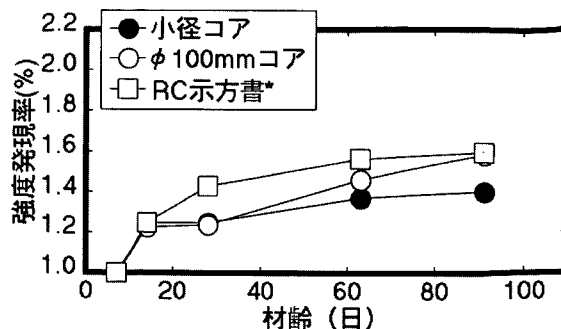


図-Ⅲ. 11. 1. 10 強度発現率と材齢の関係
(B 試験体壁: 27N)

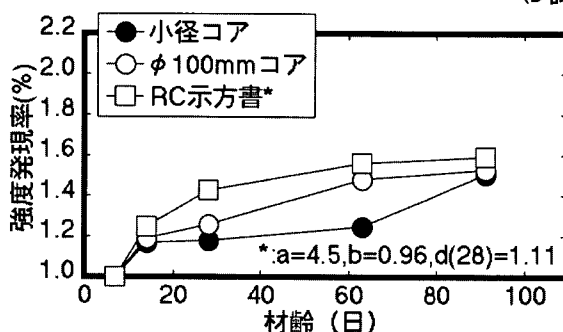


図-Ⅲ. 11. 1. 11 強度発現率と材齢の関係 (C 試験体壁: 40N)

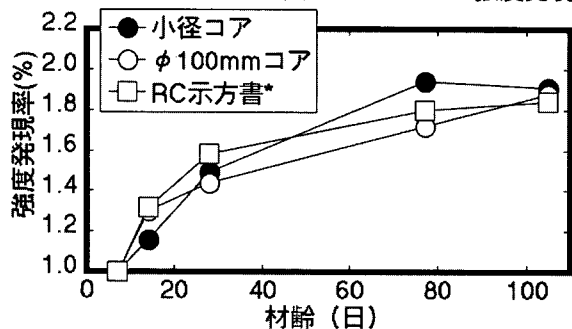


図-Ⅲ. 11. 1. 12 強度発現率と材齢の関係
(A, B 試験体底版: 18BB)

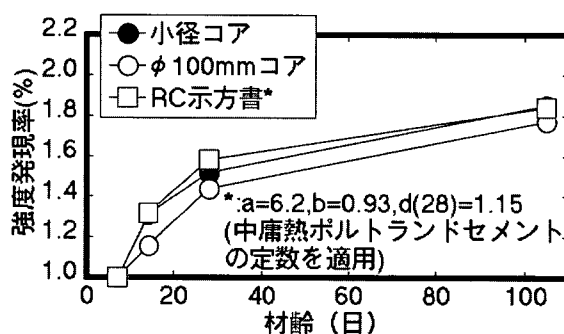


図-Ⅲ. 11. 1. 13 強度発現率と材齢の関係
(C 試験体底版: 27BB)

11. 1. 3 まとめ

本実験で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 小径コアの圧縮強度は、 $\phi 100\text{mm}$ コアの圧縮強度よりも高い。また、回帰直線の勾配はほぼ 1 に近く、小径コアと $\phi 100\text{mm}$ コアの強度差はほぼ一定になる傾向にある。
- 2) 小径コアの圧縮強度とコアの採取深さの間には、明確な相関は認められなかった。
- 3) 粗骨材の最大寸法によらず、強度差の分布は、正規分布とみなして良いと判断でき、統計的な処理が可能であるといえる。また、粗骨材の最大寸法に関わらず、強度差の平均値は約 4N/mm^2 であり、標準偏差も 5N/mm^2 程度とほぼ同じ値を示している。
- 4) 強度発現率は、 $\phi 100\text{mm}$ コアと小径コアともほぼ等しい。また、コンクリート標準示方書の強度推定式から求めた強度算定値と $\phi 100\text{mm}$ および小径コアによる強度発現率は、概ね良い対応を示した。

11.2 中型試験体を用いた小径コア圧縮強度試験

11.2.1 試験概要

中型試験体（縦1m、横1.2m、高さ0.8m）から $\phi 25\text{mm}$ の小径コアと $\phi 100\text{mm}$ コアを採取し、1)コア採取方向がコンクリート強度に及ぼす影響、2)材齢と強度発現性の関係、等について検討した。

11.2.2 試験結果

(1) コア採取方向と強度の関係

図-Ⅲ. 11.2.1 に $\phi 100\text{mm}$ コアの材齢と強度の関係を、図-Ⅲ. 11.2.2 に小径コアの材齢と強度の関係を示す。 $\phi 100\text{mm}$ コア、小径コアともにコアの採取方向によって強度値は異なり、水平方向コア強度の方が鉛直方向コア強度よりも $5\sim 10\text{N/mm}^2$ 大きい傾向がみられる。鉛直方向コアは試験体上面から採取したものであり、ブリーディングや粗骨材沈降などの影響で強度が低下したことが考えられる。

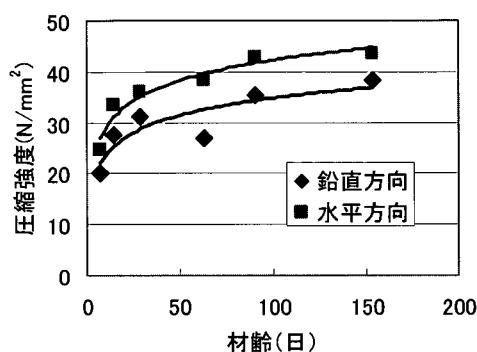


図-Ⅲ. 11.2.1 材齢と $\phi 100\text{mm}$ コア強度の関係

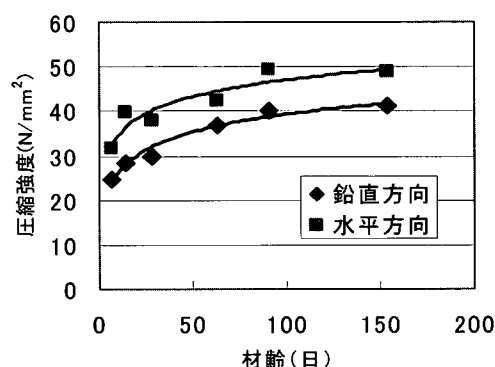


図-Ⅲ. 11.2.2 材齢と小径コア強度の関係

(2) 強度発現性

図-Ⅲ. 11.2.3 に材齢91日強度を基準(1.0)とした場合の材齢と強度発現率の関係の一例を示す。大型試験体の結果と同様に、 $\phi 100\text{mm}$ コアと小径コアの強度発現率は同程度であるが、RC示方書による推定式に対しては、材齢1~2ヶ月の発現率が小さい傾向がみられる。実験時の外気温の低さ等の影響と考えられる。

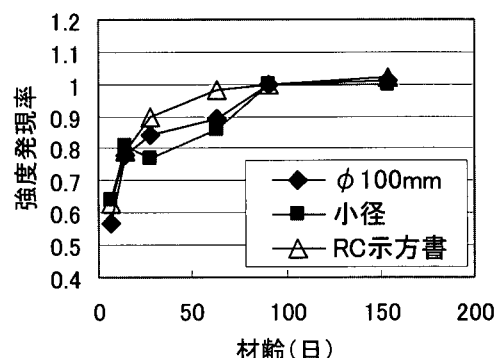


図-Ⅲ. 11.2.3 材齢と強度発現率の関係の一例
(91日強度を1とした場合)

11.2.3 まとめ

- 1) $\phi 100\text{mm}$ コア、小径コアともにコアの採取方向によって強度値は異なり、水平方向コア強度の方が鉛直方向コア強度よりも $5\sim 10\text{N/mm}^2$ 大きい傾向がみられた。
- 2) $\phi 100\text{mm}$ コアと小径コアの強度発現率は同程度であった。

【引用文献】

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕2002年制定、pp.52-53.

12章 超小径コア法

12.1 実験目的

超小径コアを用いた局部破壊における新設・既設の構造体コンクリートの試験では、通常 JIS A 1107 で規定されている $\Phi 100$ mm 標準コアを用いた強度試験に比べて、直径と高さがそれぞれ 1/10 となるため、構造体コンクリートに含まれる粗骨材が超小径コアの圧縮強度値に及ぼす影響を検証することが必要である。そこで、実構造物を想定した L 型試験体および中型試験体より超小径コアを採取し、 $\Phi 100$ mm のコア強度との関係を示し、データ値のばらつきなどから、その要因や相関性、試験方法の適宜を考察するとともに、局所における超小径コアを用いたコンクリート強度の評価方法について検討をおこなう。また、竣工時（初期材齢）におけるコンクリートの品質検査として、現場で簡易かつ迅速に行う事ができる試験法の適否を検討するために、材齢ごとの強度についても考察をおこなう。

12.2 試験概要

12.2.1 超小径コアの採取

使用したドリルは、今後現場などで場所による作業の難易や、アンカーボルトによる構造物の微破壊、採取時に生じるコンクリートのノロによる吸着パッドの型汚れなどの影響をなるべく軽減し、円滑かつ迅速に作業できる事を考慮し、ダイヤモンドコアドリル DD-EC1 手持ちで湿式のものを使用する。コアの全長採取長さとして、約 16cm 目標に採取をおこなう。コアビットは、外径約 14mm、内径約 9.7mm のダイヤモンドコアビットを用いて採取する。

12.2.2 圧縮強度試験

試験装置を写真-Ⅲ. 12. 2. 1 に示す。圧縮強度試験は、最大荷重 10 kN のインストロン 4466 万能型試験機を用いておこなう。載荷方法は JIS A 1108 に準拠し、0.35mm/s（約 0.20~0.30N/mm²/s）の変位制御でおこない、荷重値を容量 30kN のロードセルで測定する。

12.2.3 採取箇所

基本は、 $\Phi 100$ mm コア 1 本の採取につき、その近傍で超小径コアを採取する。また、L 型試験体の底版部については、粗骨材の最大寸法が 40mm なので、初期材齢においては数箇所、壁部は基本的に 3 箇所を採取する。中型試験体についても壁部と同様に採取をおこなう。その際、粗骨材および $\Phi 100$ mm コア採取後の補修モルタルなどの影響も考慮し、 $\Phi 100$ mm コア近傍より約 25~50mm の間隔をあけて、採取をおこなうこととする。

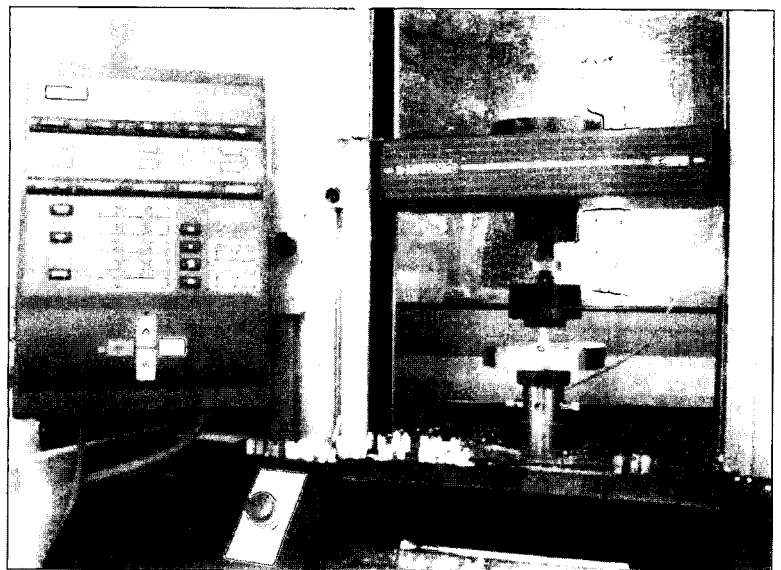


写真-Ⅲ. 12. 2. 1 インストロン 4466 万能型試験機

12.3 実験結果（L型試験体）

12.3.1 超小径コア（Φ10 mm）とΦ100 mmの標準コアとの比較

1箇所の採取において作製できる超小径コアの数はおよそ3～5本であり、本実験ではΦ100mm コア1本につきその周部3箇所を基本に超小径コアを採取し、個々のΦ100mm コア強度に対し、対応する3箇所の超小径コア強度を平均値評価したものについて、 $G_{max}=40\text{mm}$ を図-Ⅲ.12.3.1、 $G_{max}=25\text{mm}$ を図-Ⅲ.12.3.2 に示す。

$G_{max}=40\text{mm}$ 、 25mm とともに回帰式の寄与率は低い値を示した。ただし、異常値などの棄却をおこなわず、全数値による平均値評価であるため、Φ100mm コア強度に対する評価ではばらつきが出る結果となった。相関性においては、 $G_{max}=40\text{mm}$ の相関係数が0.67、 $G_{max}=25\text{mm}$ で0.54 と回帰式の寄与率に比べ、1に近い値を示し、やや強い相関を示した。また、骨材寸法の違いによる比較においては、 $G_{max}=40\text{mm}$ の試験結果が高い相関を示し、超小径コアを使って試験する際、粗骨材の最大寸法が強度値に及ぼす影響は高いだろうと推測していたが、平均値で評価することによって、個々のデータのばらつきに比べその値は小さく、相関性は強くなった。 $G_{max}=25\text{mm}$ においても同様のことが言える。さらに、個々のデータの標準偏差および破壊形状などから、異常値の棄却をおこなうことによって、相関性は強くなると考えられる。

尚、本実験においては、2種の棄却検定および破壊形状による判定から、異常値とみなせるデータを総合的な視点から考察し、該当するものを削除して検討をおこなった。

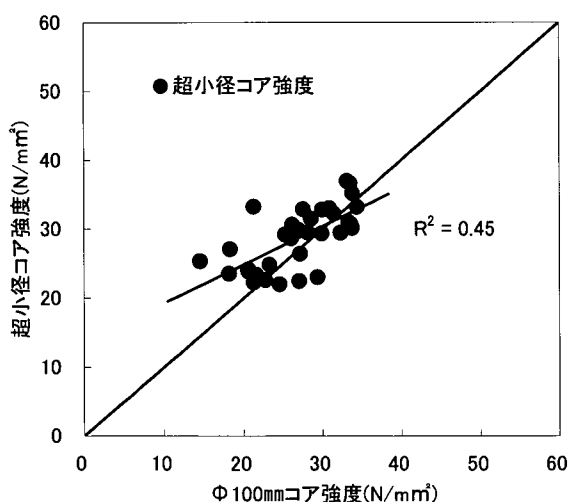


図-Ⅲ.12.3.1（骨材寸法 40 mm 平均値評価）

超小径コアとΦ100 mmコアの圧縮強度の関係

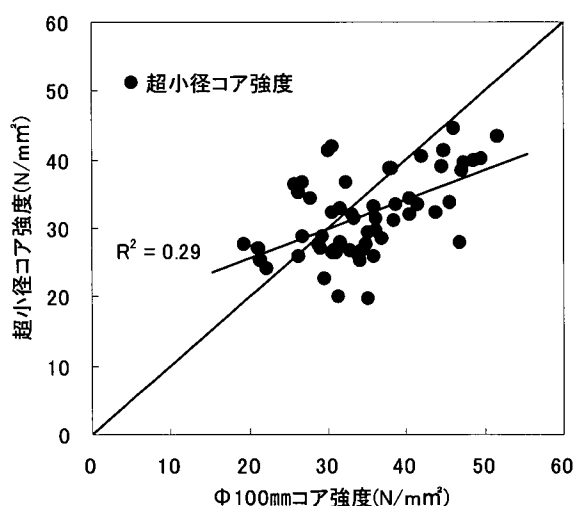


図-Ⅲ.12.3.2（骨材寸法 25 mm 平均値評価）

超小径コアとΦ100 mmコアの圧縮強度の関係

12.3.2 供試体の採取位置によるΦ100 mmコア強度と超小径コア強度との関係

図-Ⅲ.12.3.3、図-Ⅲ.12.3.4 に、壁部から採取した超小径コアの圧縮強度と採取高さの関係およびΦ100 mmコア強度との関係を示す。超小径コアの強度は、それぞれの材齢の平均値である。

超小径コアでは、採取位置が低くなると、圧縮強度が高くなる傾向がみられた。一方、Φ100 mmコア強度と比較してみると、採取高さが中程度までは似たような強度の上昇傾向がみられるが、低くなるにつれ超小

径コア強度の上昇が、顕著に現れる傾向がみられた。また、採取高さが上、中付近ではどちらの材齢も $\Phi 100$ mm コア強度にくらべ、超小径コア強度が低い値を示す結果となった。

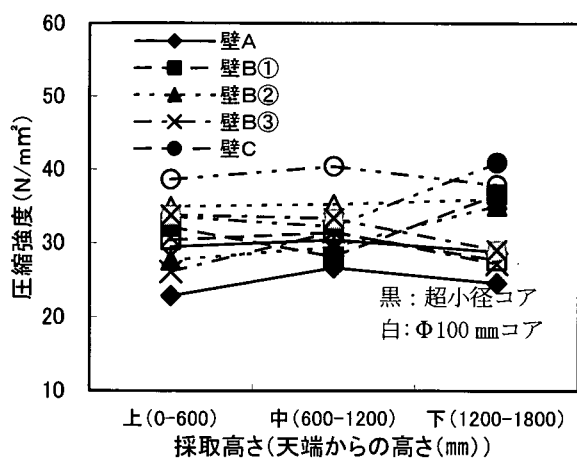


図-Ⅲ. 12. 3. 3 採取高さと圧縮強度の関係
(材齢 28 日)

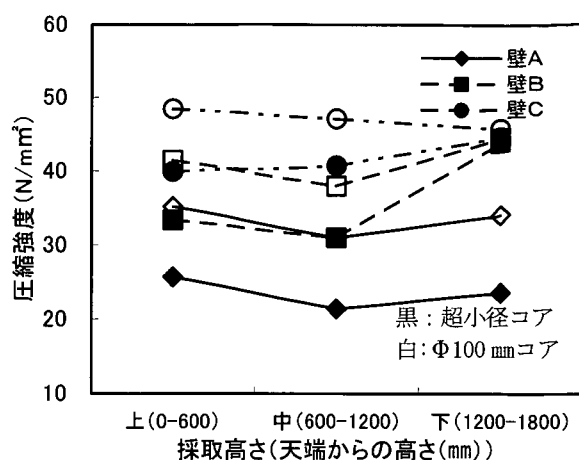


図-Ⅲ. 12. 3. 4 採取高さと圧縮強度の関係
(材齢 91 日)

12. 3. 3 採取深さと超小径コア強度との関係

底版部(鉛直方向)および壁部(水平方向)の採取深さと超小径コア強度との関係を、底版を材齢 28、105 日について図-Ⅲ. 12. 3. 5 に、壁部は材齢 28、154 日について図-Ⅲ. 12. 3. 6 に示した。横軸に採取深さ、縦軸に

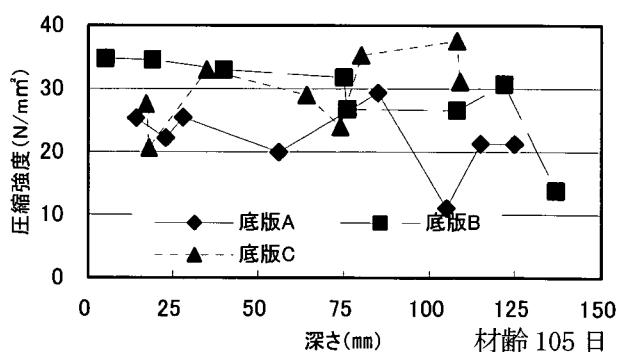
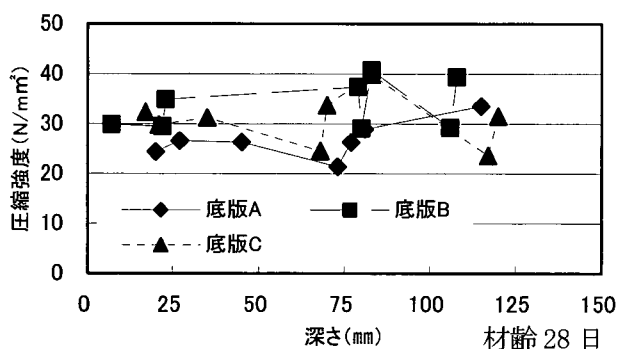


図-Ⅲ. 12. 3. 5 採取深さと超小径コア強度の関係 (鉛直方向)

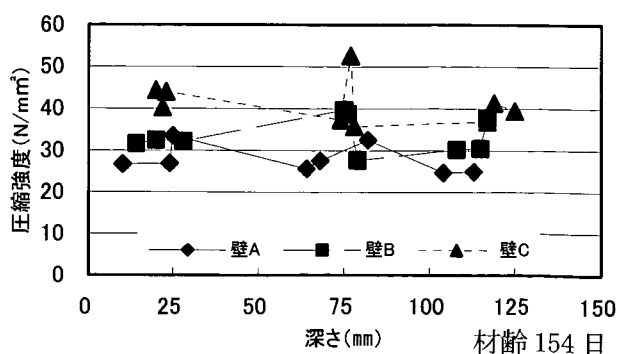
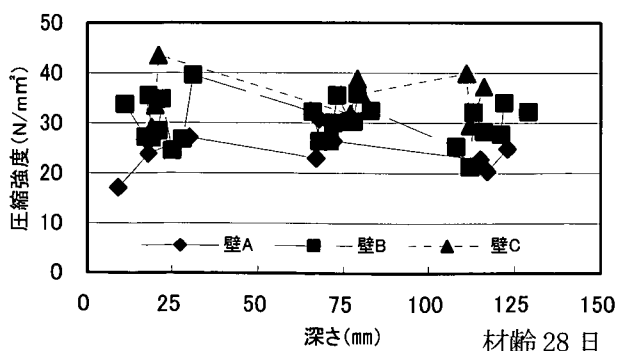


図-Ⅲ. 12. 3. 6 採取深さと超小径コア強度の関係 (水平方向)

強度をプロットし、試験体A, B, Cについて、3つの深さ範囲(0-50, 50-100, 100-150)の平均値を求め評価をおこなった。

鉛直、水平方向ともに深さ方向に強度が上昇するなどの顕著な結果は認められなかった。

12.3.4 材齢と強度の関係

試験体別に、各材齢と超小径コア強度との関係を図-Ⅲ.12.3.7(底版部)、図-Ⅲ.12.3.8(壁部)に示す。データ値は材齢時の平均値をプロットしたものである。

底版部においてはほぼ順調な強度増進を示した。一方で壁部においては、材齢28日以降において強度の増進傾向が小さくでる結果となった。この原因の一つとして、試験体の強度増進にともない、モルタル部の強度が増加することで、微小な端面の凸などがコア全体に大きな破壊機構を発生させていると考えられるため、成形においては細心の注意が必要である事が確認された。

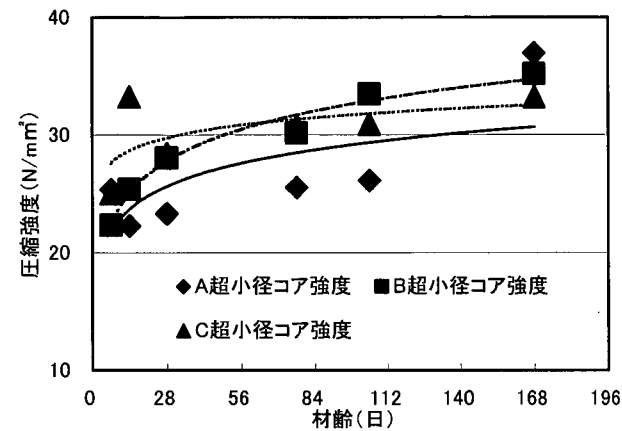


図-Ⅲ.12.3.7 試験体別材齢と圧縮強度の関係
(Gmax=40 mm)

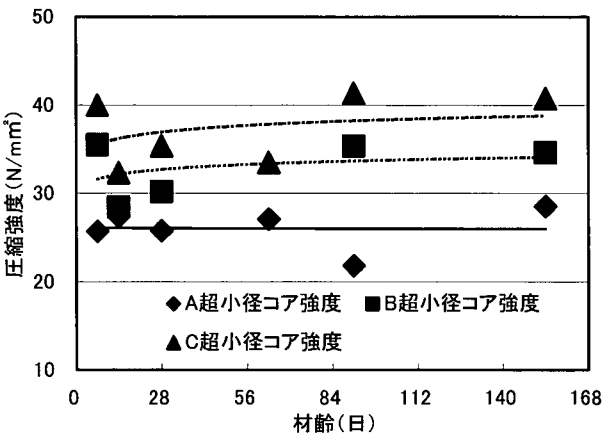


図-Ⅲ.12.3.8 試験体別材齢と圧縮強度の関係
(Gmax=25 mm)

12.4 実験結果 (中型試験体)

12.4.1 採取方向と超小径コア強度の関係

2方向別の材齢と強度との関係を図-Ⅲ.12.4.1に示す。またΦ100 mmコア強度との関係を図-Ⅲ.12.4.2に示す。強度の増進はやや緩いが上昇傾向であった。また採取方向の違いでは、鉛直方向に比べ、水平方向で採取した強度が各材齢ともにやや高い値を示す結果となった。Φ100 mm強度との強度増進の比較では、材齢の経過とともに超小径コア強度が低い値を示した。採取方向では、両者ともに上記と同様な傾向が認められた。

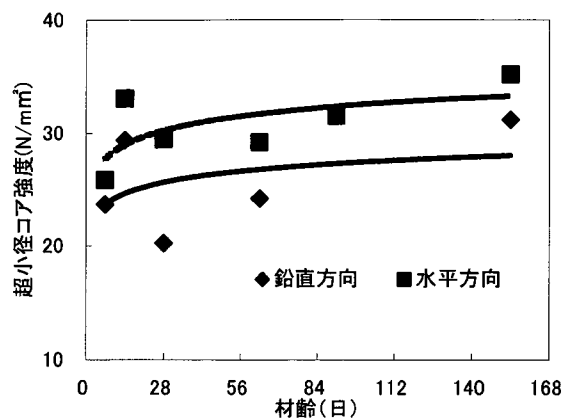


図-Ⅲ. 12. 4. 1 採取方向による材齢と強度の関係

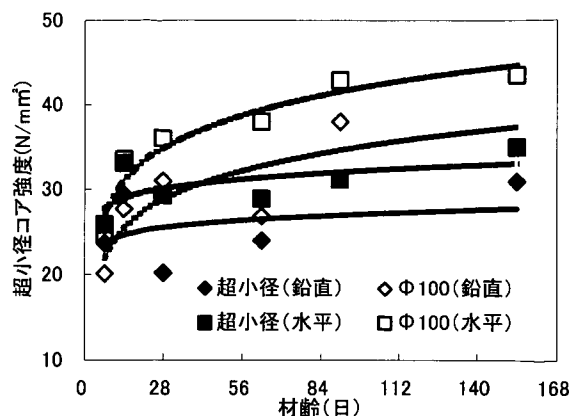


図-Ⅲ. 12. 4. 2

採取方向によるΦ100 mmコア強度との関係

12. 4. 2 採取個所による平均値評価

個々のΦ100 mmコア強度について、対応する超小径コア強度を平均値評価したものを、図-Ⅲ. 12. 4. 3 に示す。また、異常値とみなされるデータを棄却した場合の関係を図-Ⅲ. 12. 4. 4 に示す。

どちらもL型試験体と同様に、平均値で評価することによって個々のデータのばらつきに比べその値は小さく相関性は強くなった。また、Φ100 mmコア強度が高くなるにしたがい、超小径コア強度は減少する傾向がみられた。尚、個々データの標準偏差および破壊形状などから、異常値の棄却をおこなうことによって、直線回帰の寄与率および相関性が強くなることが認められた。

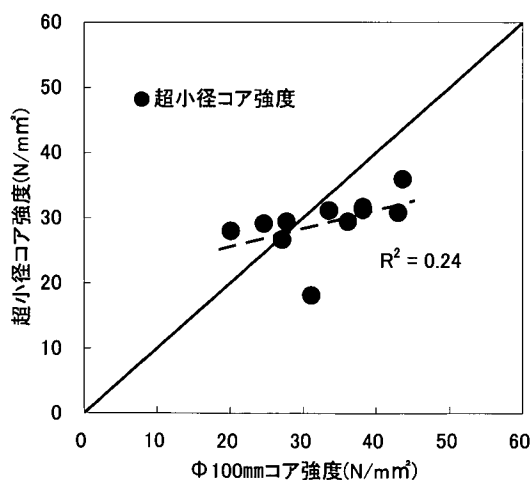


図-Ⅲ. 12. 4. 3 (棄却前)

超小径コアとΦ100 mmコアの圧縮強度の関係

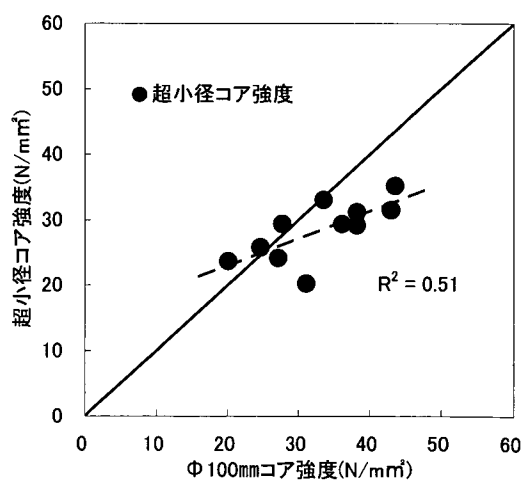


図-Ⅲ. 12. 4. 4 (棄却後)

超小径コアとΦ100 mmコアの圧縮強度の関係

12.5 まとめ

本実験で得られた知見は以下のとおりである。

- a. 試験片1本による超小径コア強度の評価では、ばらつきが大きくなる。しかし、採取した材齢ごとに平均値評価する事によって、 $\Phi 100$ mmコア強度との相関性は高くなっている。
- b. 超小径コアの採取位置との関係において、高さの上下により若干ではあるが強度の上昇傾向が認められた。また深さ方向では、深浅による強度への明確な関係は認められなかった。
- c. 粗骨材の最大寸法による検討結果への影響はほとんどなく、標準偏差の平均も約7～8 N/mm²と同程度であり、強度のばらつきへ直接的に影響を及ぼしているとは考えがたい。
- d. 強度が大きくなる(材齢が経過する)に従い、 $\Phi 100$ mmコア強度よりも超小径コア強度が低い値を示す結果となった。原因の一つとして、モルタル部の強度が増加することで、微小な端面の凸などがコア全体に大きな破壊機構を発生させるため、成形時における端面処理に細心の注意が必要である。
- e. 異常値の棄却をおこなうことによって、直線回帰の寄与率および相関性は向上すると考えられる。
- f. 採取方向の違いによる強度値への影響では、鉛直方向に比べ、水平方向で採取した強度が各材齢ともにやや高い値を示す結果となった。

13章 ボス供試体

13.1 はじめに

ボス供試体とは、図-Ⅲ.13.1.1に示すように構造体コンクリートに成型してできた凸部状の供試体を割取ったものを称し、ボス (BOSS) は Broken Off Specimens by Splitting を意味する。ボス供試体は、コンクリート打設前に構造体コンクリートの型枠にあらかじめボス供試体型枠を取り付けておき、構造体コンクリートが打設されると同時にボス供試体型枠にもコンクリートが充てんされ、凸部状の供試体が成型される。このためボス供試体は、構造体コンクリートの性能に損傷を与えることなく供試体の成型と採取ができ、さらに試験方法の容易性や採取後の補修などの問題を解消したものである。

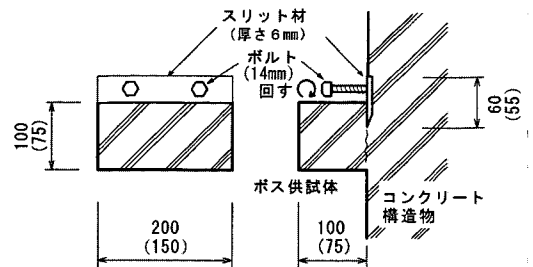


図-Ⅲ.13.1.1 ボス供試体の概要

13.2 実験概要

13.2.1 実験方法

(1) ボス供試体型枠の取付けと採取

構造体の型枠にあらかじめ開口部を開けておき、構造体の型枠を建て込み終了後、この開口部にボス供試体型枠を外側から取付けた。

ボス供試体の採取は、所定の試験材齢に、構造体コンクリートとボス供試体型枠との間にセットしてある採取用スリット材のナット部にボルトを差し込み、そのボルトを回したときの反力で構造体コンクリートからボス供試体型枠と一緒に割取った。その後、ボス供試体型枠を脱型してボス供試体を採取した。

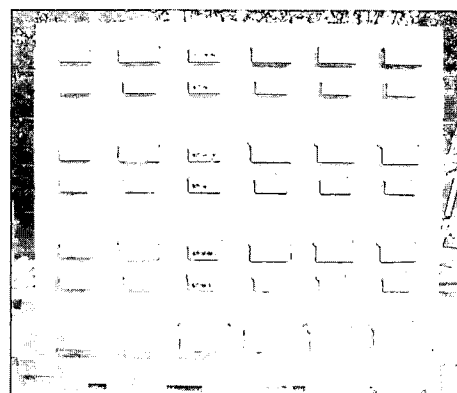
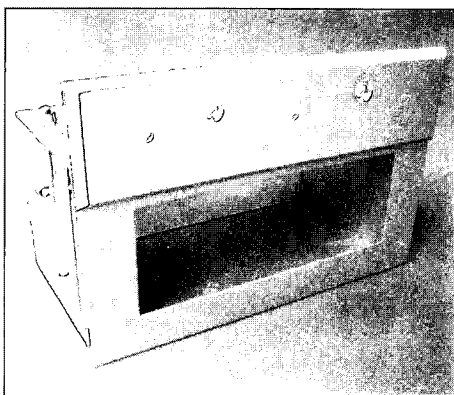


写真-Ⅲ.13.2.1 ボス供試体（ボス供試体型枠と取付け状）

(2) 圧縮強度試験

ボス供試体の圧縮強度試験は、加圧面を研磨しないことと供試体を水中浸漬しないこと以外は、JIS A 1107（コンクリートからのコア及びはりの切取り方法並びに強度試験方法）に準じて行い、ボス供試体の最大荷重を加圧断面積で除して圧縮強度を求めた。

13.2.2 実験項目

(1) 供試体精度の確認

ボス供試体は構造体コンクリートから割取って採取するため、供試体両端と中間部では加圧断面積の形状が異なる場合がある。そこで本実験では加圧断面積算定の測定方法として、ボス供試体を直接ノギスで測定して算出した方法（寸法法）と、気中質量および水中質量から算定した方法（体積法）を比較検討することで、ボス供試体の凹凸が圧縮強度に及ぼす影響を確認した。

(2) 供試体採取位置による圧縮強度への影響

構造体コンクリートは部位や位置により圧縮強度にばらつきが生じることが考えられ、ボス供試体においても採取位置の影響を受けると推測される。そこで、異なる採取位置（上下方向あるいは水平方向）から採取したボス供試体の圧縮強度を比較検討し、採取位置が圧縮強度に及ぼす影響を確認した。

(3) 供試体の寸法による圧縮強度への影響

ボス供試体を圧縮強度試験に用いる場合、構造体コンクリートと同様にコンクリートの充てん性や材料の均質性が重要となる。そこで、コンクリートのワーカビリティや最大骨材寸法に対応した寸法のボス供試体を作成し、供試体の寸法が充てん性や圧縮強度に及ぼす影響を確認した。本実験に用いたボス供試体は、75mm×75mm×150mm（以下、□75）、100mm×100mm×200mm（以下、□100）、125mm×125mm×250mm（以下、□125）の3種類とした。

(4) ボス供試体強度とコア供試体強度の比較

ボス供試体強度とコア供試体強度を比較し、両供試体強度の相関性（回帰）を求めることで、採取したボス供試体からコア供試体強度（≒構造体コンクリートの強度）を推定することが可能であるかどうかを検討した。コア供試体はφ100mm×200mmとし、ボス供試体の採取位置近傍で採取したものを比較対象とした。

(5) 早期採取による圧縮強度への影響

構造体の基礎部分など型枠の脱型後速やかに埋戻しされる箇所については、構造体コンクリートから直接コア供試体を採取したり、非破壊検査によって材齢28日（もしくは所定の材齢）の強度を検査することは困難である。そこで、早期（所定の材齢以前）に採取したボス供試体と、所定の材齢に採取したボス供試体の圧縮強度の比較を行うことで、早期採取による圧縮強度への影響を確認した。

13.3 実験結果

13.3.1 寸法法と体積法の比較

図-Ⅲ.13.3.1 に寸法法と体積法による圧縮強度の関係を示す。両者の回帰直線の傾きは0.973であり、寄与率も0.9962と高いことから、寸法法と体積法はほぼ1対1にある。したがって、断面積の算出方法には簡便な寸法法を用いた。

13.3.2 供試体採取位置による密度・圧縮強度への影響

図-Ⅲ.13.3.2 に供試体の密度と採取位置の関係を、図-Ⅲ.13.3.3 に圧縮強度と採取位置の関係をそれぞれ示す。なお、ここではL型供試体Bの壁から採取した供試体の試験結果を示した。

図-Ⅲ.13.3.2 から、各供試体とも試験体の下段で採取した供試体の密度の方が、上段で採取した供試体の密度よりも大きい傾向となった。また、同一採取高さにおける密度のばらつきを比較すると、コア供試体に比べボス供試体の方がばらつきは小さくなった。

図-Ⅲ.13.3.3 から、ボス供試体強度は採取高さが下段になると大きくなる傾向となったが、コア供試体強度は採取高さが下段になると小さくなった。また、同一採取高さにおける圧縮強度のばらつきを比較すると、□100 < □75 < コアとばらつきは大きくなり、□100 ではほとんどばらつきが認められなかった。

供試体の圧縮強度、密度ともボス供試体はコア供試体に比べるとばらつきは小さいことから、ボス供試体はコア供試体に比べると打設または供試体採取の影響は小さいと考える。また、ボス供試体強度はコア供試体強度よりも採取高さによる影響を受けやすいため、実際の構造物の強度管理にボス供試体を用いる場合は、採取高さを考慮したボス供試体の設置計画が必要である。

以下の結果は上・中・下3体の平均値を用いた。

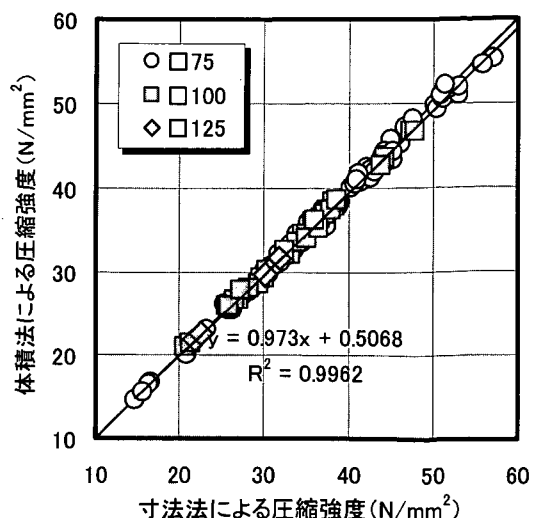


図-Ⅲ.13.3.1 寸法法と体積法の圧縮強度

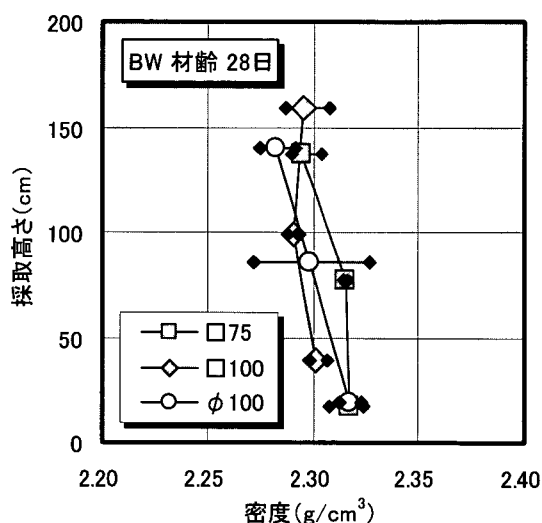


図-Ⅲ.13.3.2 密度と採取位置の関

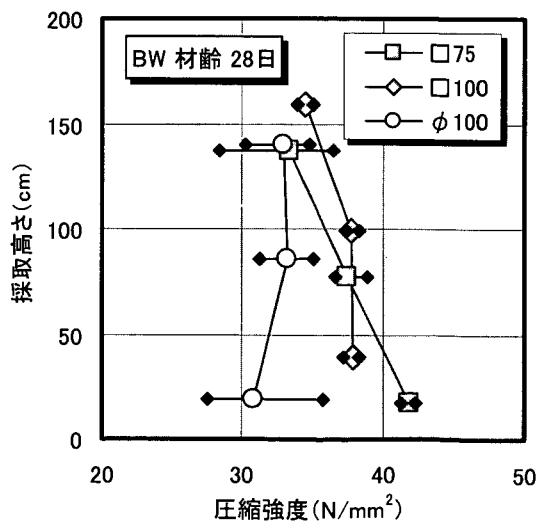


図-Ⅲ.13.3.3 圧縮強度と採取位置

13.3.3 供試体の寸法による圧縮強度への影響

図-Ⅲ.13.3.4 に□75 と□100 の圧縮強度の関係を示す。AW、BW、CW のいずれの試験体においても、□100 に比べて□75 の圧縮強度は2～6N/mm²程度大きな結果であった。

その要因の一つとしては、打設時の気泡（あばた）を取り除くために、ボス供試体型枠上部に貼付けた透気性シートの影響が考えられる。透気性シートは気泡を型枠外に排出すると同時に、ブリーディング水もわずかに排出するため、シートに接するコンクリート表層のコンクリートの水セメント比が減少し、組織が緻密になったと考えられる。水セメント比が減少した部分のコンクリートが加圧断面積に占める割合は、□75 の方が□100 よりも大きいいため、□75 のボス供試体強度が大きくなったと推測される。また、一般的に言われているように、寸法の大小が圧縮強度にも影響を与えていると考えられる。

13.3.4 ボス供試体強度とコア供試体強度の比較

(1) 各供試体の材齢強度

図-Ⅲ.13.3.5 および図-Ⅲ.13.3.6 に各供試体の試験材齢と圧縮強度の関係（それぞれ AW、CW）を示す。また、BW についても同様の傾向であったので、ここでは省略した。

AW・CW どちらの試験体においても、各供試体の圧縮強度は試験材齢の平方根に比例し、寄与率は0.9以上と相関も高い。

また各供試体を比較すると、ボス>コア>封かんの順で圧縮強度が大きい傾向であったが、ボス供試体強度とコア供試体強度の差は、AW では大きく、CW では小さくなる結果となった。しかし、各試験材齢におけるボス供試体強度とコア供試体強度は同様な傾向であるため、ボス供試体強度からコア供試体の所定材齢の強度（≒構造体コンクリートの所定材齢の強度）を推定することは可能であると考えられる。

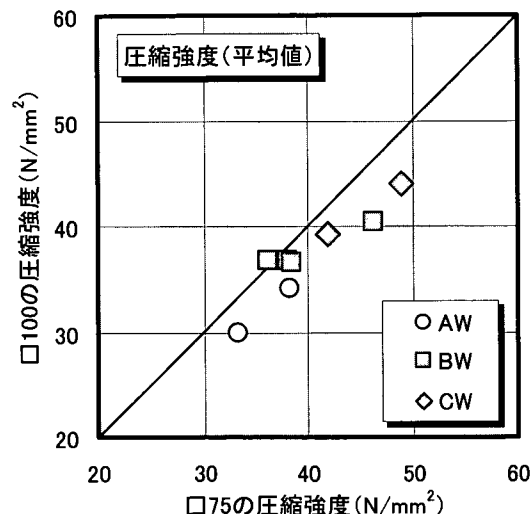


図-Ⅲ.13.3.4 □75 と□100 の圧縮

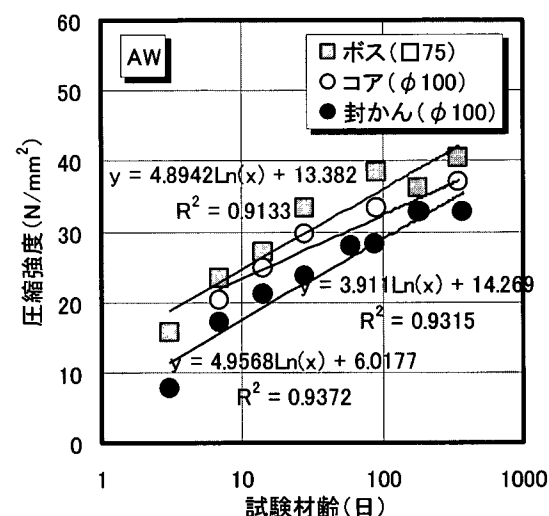


図-Ⅲ.13.3.5 試験材齢と圧縮強度

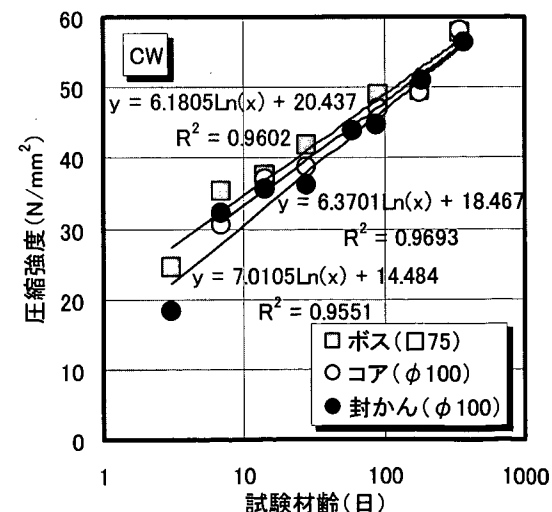


図-Ⅲ.13.3.6 試験材齢と圧縮強度

(2) ボス供試体とコア供試体強度

図-Ⅲ. 13. 3. 7 および図-Ⅲ. 13. 3. 8 に、□75 および□100 のボス供試体強度とコア供試体強度の関係を示す。

図-Ⅲ. 13. 3. 7 から、□75 のボス供試体強度とコア供試体強度の関係は寄与率で 0.93～0.98 と相関が高かったが、コア供試体強度に比べるとボス供試体強度が若干大きい結果であった。また、ボス供試体強度とコア供試体強度の差は、20～45N/mm² の範囲では 2～5N/mm² 程度であったが、45～60N/mm² の範囲ではほとんど差が認められず、両供試体強度が増加すると小さくなる傾向であった。

図-Ⅲ. 13. 3. 8 から、□100 のボス供試体強度とコア供試体強度とはほぼ同程度であり、両供試体強度の相関は高い。

これらの結果から、□75 および□100 のいずれのボス供試体寸法においても、コア供試体強度（≒構造体コンクリートの強度）の推定は可能であると考えられる。

13. 3. 5 早期材齢採取による圧縮強度への影響

図-Ⅲ. 13. 3. 9 にボス供試体の採取材齢と圧縮強度の関係を示す。ボス供試体を各試験体から材齢 3 日、5 日、12 日、26 日に採取した後、現場封かん養生して、材齢 28 日の圧縮強度試験を行った。

AW の 26 日採取の圧縮強度および BW の 12 日採取の圧縮強度は、他の採取材齢に比べると若干大きい値を示したが、それ以外はほぼ同程度の圧縮強度を示した。この結果からボス供試体の採取時期が圧縮強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

したがって、工事の進捗状況によりボス供試体を設置した場所を埋め戻すような場合でも、埋め戻しの前にボス供試体を採取し封かん養生しておくことで、その部分のコア供試体強度（≒構造体コンクリートの強度）を推定することが可能であると考えられる。

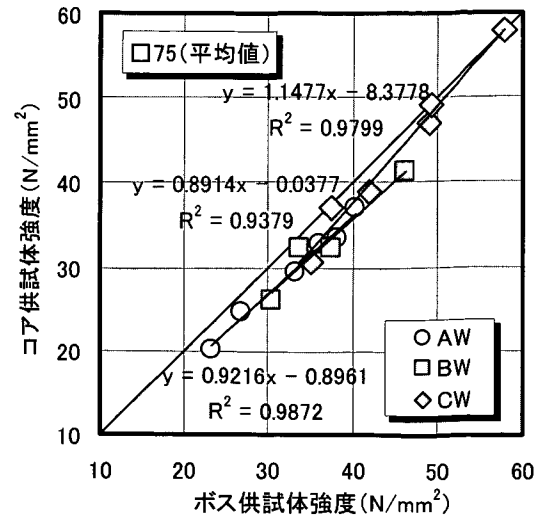


図-Ⅲ. 13. 3. 7 ボス試験体強度とコア供試体強度 (□75)

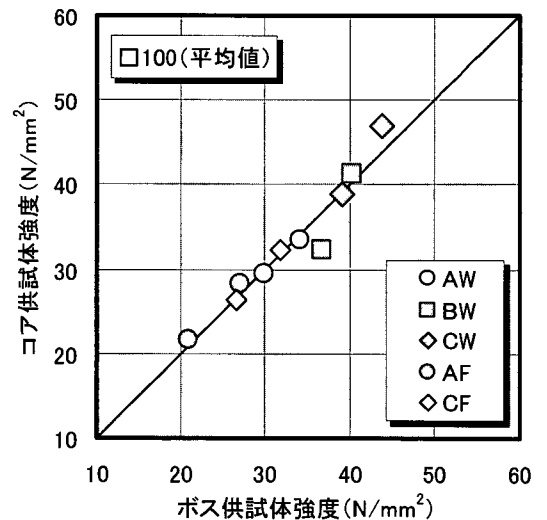


図-Ⅲ. 13. 3. 8 ボス試験体強度とコア供試体強度 (□100)

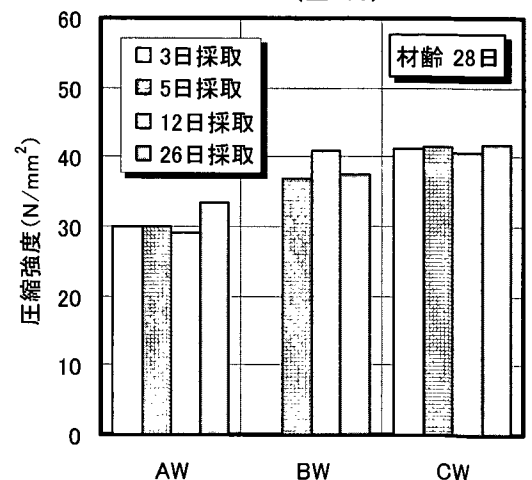


図-Ⅲ. 13. 3. 9 採取材齢と圧縮強度の関係

13. 4 まとめ

本実験では、以下の結果が得られた。

- (1) ボス供試体強度を寸法法と体積法で算出した断面積で求めた結果、両者には大差がないことが確認できたため、本実験では寸法法を用いた。
- (2) ボス供試体およびコア供試体とも、供試体の採取高さが低くなると供試体の密度は大きくなる傾向であったが、密度のばらつきはボス供試体の方が小さかった。
- (3) ボス供試体では供試体の採取位置が低くなると供試体強度は大きくなる傾向であったが、コア供試体では採取位置による影響はほとんど認められなかった。
- (4) □75 のボス供試体強度は□100 のボス供試体強度に比べると若干大きな値を示した。
- (5) ボス供試体およびコア供試体の圧縮強度は材齢の平方根に比例し、その相関も高い結果であった。ここで、ボス供試体強度とコア供試体強度では強度に若干の差が見られたが、ボス供試体によるコア供試体強度（≡構造体コンクリートの強度）の推定は可能であると考えられる。
- (6) ボス供試体を早期に採取し、現場封かん養生を行った供試体と圧縮強度試験前に採取した供試体の強度はほぼ同等であることから、早期採取が圧縮強度に及ぼす影響は小さかった。このため、工事の進捗状況によりボス供試体を設置した場所を所定材齢よりも早い段階で埋戻すような場合でも、埋戻し前にボス供試体を採取しておくことで、コア供試体強度（≡構造体コンクリートの強度）を推定することは可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 土田克美他：ボス供試体によるコンクリート構造物の圧縮強度推定，社団法人土木学会 第 58 回年次学術講演会講演概要集，pp189-190，2003. 09
- 2) 篠崎徹他：非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品詞検査に関する共同研究 ボス供試体 その 1 コンクリート構造物の強度管理に関する研究，社団法人日本非破壊検査協会 平成 15 年度秋季大会講演概要集，pp151-152，2003. 11
- 3) 篠崎徹他：ボス供試体によるコンクリート構造物の品質検査に関する研究 その 1 ボス供試体による構造体コンクリートの強度推定の検討，社団法人日本建築学会 学術講演梗概集 A-1（東海），pp817-818，2003. 08