

マイクロフィルム用資料

橋梁基礎構造の調査方法の開発に関する

共同研究報告書（その2）

平成11年6月

建設省土木研究所
(財)土木研究センター
阪神高速道路公団
(株)フグロ・ジオサイエンス
(株)大林組
飛島建設(株)
清水建設(株)
(株)間組
(株)フジエンジニアリング
(株)東京ソイルリサーチ
基礎地盤コンサルタンツ(株)
(株)竹中土木
中央復権コンサルタンツ(株)
日本工営(株)
梶谷エンジニア(株)

Copyright © (1999) 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。

橋梁基礎構造の調査方法の開発に関する 共同研究報告書（その 2）

建設省土木研究所 材料施工部施工研究室室長
 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室室長
 阪神高速道路公団 工務部設計課課長
 （財）土木研究センター理事
 (株)大林組 土木技術本部統括部長
 梶谷エンジニア(株) 調査部部長
 基礎地盤コンサルタンツ(株) 地盤工学センター所長
 清水建設(株) 土木本部技術第一部グループ長
 (株)竹中土木 技術本部技術開発部課長
 中央復建コンサルタンツ(株) 防災診断室室長
 (株)東京ソイルリサーチ 技術本部技術開発室次長
 飛島建設(株) 技術研究所地盤耐震研究室室長
 日本工営(株) 中央研究所開発研究部部長
 (株)間組 技術研究所技術研究部主席研究員
 (株)フグロ・ジオサイエンス マネージャー
 (株)フジエンジニアリング 調査第一部部長

大 下 武 志
 福 井 次 郎
 古 池 正 宏
 小 林 茂 敏
 菊 池 禎 二
 佐々木 勉
 土 谷 尚
 野 口 恒 久
 小 嶋 平 三
 金 谷 忠 良
 小 野 日出男
 三 輪 滋
 太 田 資 郎
 三反畑 勇
 坂 本 真 也
 今 田 和 夫

要旨：

古い橋梁では図面がなく基礎形式や形状が不明の場合が多い。このような橋梁に近接して施工する場合や上部工の架替において基礎の再利用をする場合に、基礎形式や形状を調査する必要が生じる。また、地震後の基礎の損傷状況を調査する場合がある。これらの調査では、掘削による目視や各種の非破壊調査が用いられているが、掘削による目視は費用を要し、各種の非破壊調査は判定手法が必ずしも確立されていない。

こうした現状を踏まえ、大規模な掘削を必要としない橋梁基礎構造の調査手法を確立するため、建設省土木研究所と阪神高速道路公団、（財）土木研究センター、民間 12 社により平成 8 年度から 3 カ年の予定で共同研究「橋梁基礎構造の調査方法の開発」を実施している。本報告書は、平成 10 年度の成果を中心に、これまでの検討結果をとりまとめたものである。

キーワード：橋梁基礎，非破壊調査，損傷調査，形状調査，フーチング，杭，クラック

目 次

1. まえがき	1
2. 研究概要	2
2.1 研究目的	2
2.2 研究体制	3
3. 岸和田現場実験の概要	6
3.1 岸和田現場実験の目的	6
3.2 実験に用いた試験体	6
3.3 観測孔の設置	7
4. 各調査手法の検討結果	8
4.1 インテグリティ試験	8
4.1.1 研究概要	8
4.1.2 検討結果	9
4.1.3 適用条件	23
4.1.4 まとめ	24
4.2 レーダ法	26
4.2.1 研究概要	26
4.2.2 検討結果	29
4.2.3 適用条件	52
4.2.4 まとめと今後の課題	53
4.3 アコースティック・エミッション	54
4.3.1 研究概要	54
4.3.2 検討結果	59
4.3.3 まとめ	65
4.3.4 試験土槽におけるAEセンサを用いた杭-孔間弾性波速度試験	67
4.4 ボアホールカメラ	71
4.4.1 研究概要	71
4.4.2 検討結果	74
4.4.3 適用条件	101
4.4.4 まとめ	102
4.5 磁気探査	103
4.5.1 研究概要	103
4.5.2 実橋梁実験探査結果	104
4.5.3 適用条件	144

4.5.4	まとめ	145
4.6	衝撃振動試験	146
4.6.1	研究概要	146
4.6.2	検討結果	149
4.6.3	適用条件	151
4.6.4	まとめ	151
5.	調査手法の適用性	154
5.1	形状調査	154
5.1.1	調査目的	154
5.1.2	各調査法の適用性	155
5.1.3	調査計画事例	165
5.2	損傷調査	186
5.2.1	調査目的	186
5.2.2	各調査方法の適用性および調査要領	187
5.2.3	調査計画事例	194
6.	まとめ	205
	文献調査一覧	209
	対外発表論文一覧	214
	実績調査文献一覧	216

1. まえがき

我が国には、橋長2 m以上の橋が65万橋、橋長15 m以上の橋に限っても13万橋ある。これらの多くは、昭和30～40年代に作られており、維持管理の問題が重要になっている。

国土の基盤を形成する社会資本のひとつである橋梁を長期間にわたって有効に活用していくためには、その間に生じた損傷・変状を適切に点検・補修・補強していく必要がある。また、新しい知見に基づき、既存の橋梁を補強する必要がある。

平成8年度から道路防災総点検により全国の橋梁の耐震性調査が行われているが、古い橋梁では図面がなく、基礎の形式や形状が不明の場合が多い。また、既設橋梁に近接して施工する場合や、上部工の架替えにおいて基礎の再利用を判定する場合に、基礎形式や基礎形状を調査する必要がある。

一方、平成7年の兵庫県南部地震後、被災地域の多くの橋梁において基礎の損傷状況の調査が行われた。調査に当たっては、掘削による目視や各種の非破壊検査が用いられた。しかし、掘削による目視は費用を要し、また、非破壊検査は判定手法が現状では確立されていない。

そこで、建設省土木研究所と阪神高速道路公団、(財)土木研究センター、民間12社の共同研究により、平成8年度から3ヶ年にわたり「橋梁基礎構造の調査方法の開発」を実施した。

平成8年度は、適用可能な調査方法を選定し、各検討グループにより調査方法の開発を行った。

平成9年度は、模型地盤に杭を設置し、各調査手法の基本的な特性を把握した。

平成10年度は、実橋梁での適用性評価試験を実施し、調査マニュアルを作成した。

平成9年度までの成果は、「橋梁基礎構造の調査方法の開発に関する共同研究報告書(その1)」に取りまとめている。また、本報告書は、平成10年度の成果を中心に、これまでの検討結果をとりまとめたものである。

建設省土木研究所

構造橋梁部 基礎研究室長 福井 次郎

材料施工部 施工研究室長 大下 武志

2. 研究概要

2.1 研究目的

本共同研究は、地震後等の基礎の損傷を調査する手法を開発すること、および、図面等がなく基礎形状が不明な基礎の形状を調査することを目的として実施した。

平成7年の兵庫県南部地震以降、被災地域に存在する多くの橋梁の基礎について、被災状況の調査が行われた。一部の橋梁では、掘削による杭の目視および載荷試験が実施されたが、フーチング下までの掘削には多大な費用を要する。また、ボアホールカメラ、インテグリティ試験（IT）、アコースティックエミッション（AE）等による調査も実施されたが、これらの手法による損傷の判定規準については必ずしも確立されていない。そこで、基礎の損傷調査手法及び健全度判定手法確立を目的として研究を実施した。

一方、古い橋梁では図面等が残っていないため、基礎形式や基礎深さ、杭種、杭配置等が不明な場合がある。平成8年度から道路防災総点検が実施され、この中で橋梁の耐震性の調査が行われているが、基礎構造が不明な場合には、基礎の耐震性が判定できない。また、既設橋梁の周辺や直下に近接して施工する場合には、既設基礎構造の調査が不可欠である。しかしながら、このような基礎形状の調査手法は確立されたものがない。そこで、基礎の形状調査に関する調査手法を開発し、これらの適用性を明確にすることを目的として研究を実施した。

平成10年度は、前年度までの結果を整理し、各調査手法の適用性を把握するために阪神高速湾岸線をはじめとする実橋梁等の現場試験を行った。本報告書では、これらの検討結果をとりまとめた。

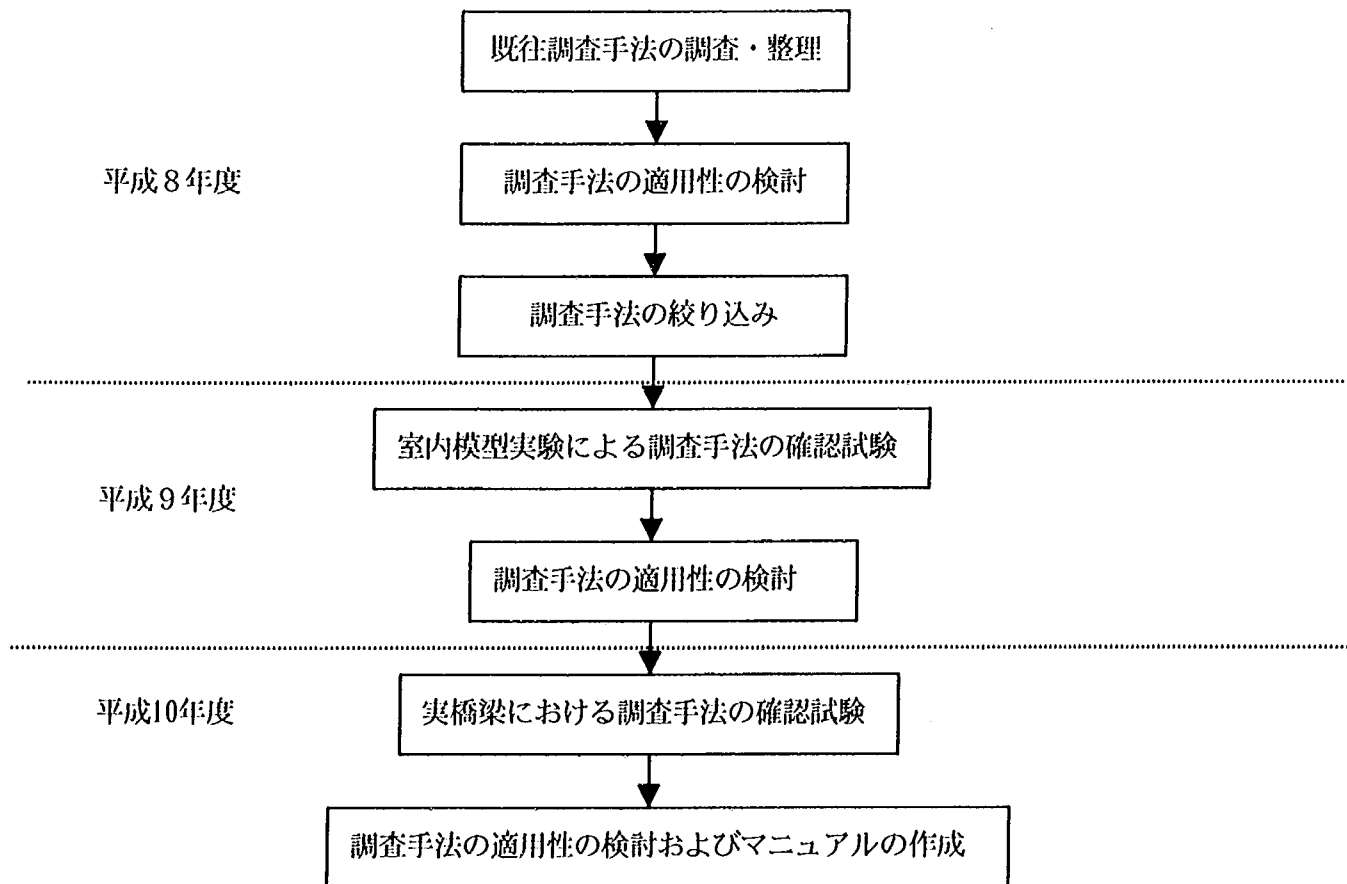


図-2.1 研究フロー

2.2 研究体制

本研究の実施にあたって、基礎の調査に適用可能と考えられる手法を整理し、損傷調査手法として①インティグリティ試験（IT）、②アコースティックエミッション（AE）、③ボアホールカメラ、④衝撃振動試験の4手法を、形状調査手法として①インティグリティ試験（IT）、②ボアホールレーダ、③磁気探査の3手法を選定した。検討は調査手法別に検討グループを設置して実施した。各検討グループの担当機関を表-2.1に示す。

表-2.1 検討グループ一覧

目的	調査法	担当期間
損傷調査	インティグリティ試験	土木研究所施工研究室、阪神高速道路公団 大林組 梶谷エンジニア 基礎地盤コンサルタンツ 竹中土木 東京ソイルリサーチ 間組 フグロ・ジオサイエンス フジエンジニアリング
	アコースティックエミッション（AE）	土木研究所施工研究室、阪神高速道路公団 飛島建設 日本工営
	ボアホールカメラ	土木研究所基礎研究室、阪神高速道路公団 梶谷エンジニア 基礎地盤コンサルタンツ 東京ソイルリサーチ
	衝撃振動試験	土木研究所基礎研究室、阪神高速道路公団 中央復建コンサルタンツ
形状調査	インティグリティ試験	土木研究所施工研究室、阪神高速道路公団 大林組 東京ソイルリサーチ
	ボアホールレーダ	土木研究所基礎研究室、阪神高速道路公団 基礎地盤コンサルタンツ 清水建設 日本工営
	磁気探査	土木研究所基礎研究室、阪神高速道路公団 梶谷エンジニア

※ 土木研究センターは、既存の技術の収集整理と全体の調整を行った。

表-2.2 平成 11 年度共同研究担当者名簿

氏 名				所 属			
大下武志	市村靖光	森芳徳	福井次郎	建設省土木研究所	材料施工部	施工研究室	室長
石田雅博	秋田直樹	寿上隆司		"	"	"	研究員
				"	"	"	研究員
				"	構造橋梁部	基礎研究室	室長
				"	"	"	研究員
				"	"	"	
				"	"	"	
古池正宏	幸左賢二	田坂広	藤井康男	阪神高速道路公団	工務部	設計課	課長
崎谷				"	"	"	調査役
				"	"	"	課長補佐
				"	"	"	係長
				"	"	"	
菊池禎二	崎本純生	佐藤峰雄	田坂幹雄	(株)大林組	土木技術本部	統括部長	
				"	技術研究所	土木第二研究室	主任研究員
				"	土木技術本部	設計第一部	課長
				"	"	"	課長代理
金谷忠良	田底成智	水野温夫		中央復建コンサルタンツ(株)	防災診断室	室長	
				"	"	課長	
				"	情報システム室	次長	
太田資郎	石橋晃睦	藤原鉄朗	松山公年	日本工営(株)	中央研究所	開発研究部	部長
金本康宏				"	"	情報システム開発室	課長
				"	"	開発研究部	
				"	"	"	
				"	"	"	
上出定幸	佐々木勉	日下部啓一	亀和田修一	梶谷エンジニア(株)	地質計測部	部長	
田口雅章				"	調査部	部長	
				"	"	次長	
				"	地質計測部	主任	
				"	調査部	主任	
本正信	今田和夫	仲田慶正		(株)フジエンジニアリング	常務取締役		
				"	調査第一部	部長	
				"	調査第一課	主任	
藤井義文	小嶋平三	井本雅祥	加倉井正昭	(株)竹中土木	技術本部	技術開発部	部長
				"	"	"	課長
				"	大阪本店	技術部	課長
				"	竹中技術研究所	部長	
長谷川昌弘	三輪滋基	塩谷智基		飛島建設(株)	技術研究所	所長	
				"	"	地盤耐震研究室	室長
				"	"	"	主任
野口恒久	小松義典	前田敏也	了戒公利	清水建設(株)	土木本部	技術第一部	グループ長
				"	技術研究所		
				"	土木本部	技術第一部	
				"	技術研究所	主席研究員	

氏 名	所 属
小 野 日出男	(株)東京ソイルリサーチ 技術本部 技術開発室 次長
阿 部 秋 男	" つくば総合試験所 特殊試験室 課長
田 中 伸 治	" " " 係長
土 谷 尚	基礎地盤コンサルタンツ(株) 地盤工学センター 所長
森 田 悠紀雄	" 技術部 部長
酒 井 幸 雄	" 地盤工学センター 機器開発室 室長
田 中 勉	" 技術部 課長
山 田 眞 一	" 地盤工学センター 地盤物性室 室長
続 誠	(株)フグロ・ジオサイエンス 代表取締役会長
西 村 真 二	" 部長
坂 本 真 也	" マネージャー
本 間 利 明	" シニア・エンジニア
吉 村 和 彦	(株)間組 技術研究所 技術研究部 主席研究員
村 上 祐 治	" " " 主任研究員
三反畑 勇	" " " 主任研究員
松 本 江 基	" " " 主任研究員
平 澤 賢 治	" " 構造物・橋梁統括部
小 林 茂 敏	(財) 土木研究センター 理事
鷹 取 勲	" 企画部 部長
大 関 敏 広	" " 次長
三 木 正 久	" " 次長

3. 岸和田現場実験の概要

平成10年11月11日(水)に、基礎の諸元と損傷の調査手法に関する公開実験が、阪神高速湾岸線(大阪府岸和田市)において開催され、関係省庁、公団および民間企業から約160名の参加があった。本公開実験は、建設省土木研究所(施工研究室、基礎研究室)と阪神高速道路公団、(財)土木研究センター、民間12社により、平成8年度から3カ年の予定で実施している共同研究「橋梁基礎構造物の調査手法の開発」の一環として開催したものである。

3.1 岸和田現場実験の目的

これまでの試験では、実験土槽に設置した共通供試体および実橋梁に対して実施してきた。しかし、共通供試体における試験では、地盤条件が一様であり、杭長も短かったため実地盤での適用性の確認ができず、また、実橋梁での試験においても一部の調査手法のみで実施しているため、各調査手法間の比較・検討をすることができなかった。

そこで、今回の実験は、同一の実杭に対して各調査手法の適用性試験を行い、各調査手法間の比較・検討を行うために実施した。

3.2 実験に用いた試験体

実験で使用した杭基礎は、阪神高速道路公団が過去に水平載荷試験(最大変位40mm、杭頭クラック確認)を実施した仮設ペント用杭基礎(場所打ち杭($\phi 1.2\text{m} \times 28.9\text{m}$)9本およびフーチング($9\text{m} \times 9\text{m}$, 厚さ2.3m))である(図-3.1参照)。実験では、杭体および周辺地盤に観測孔を設置した。

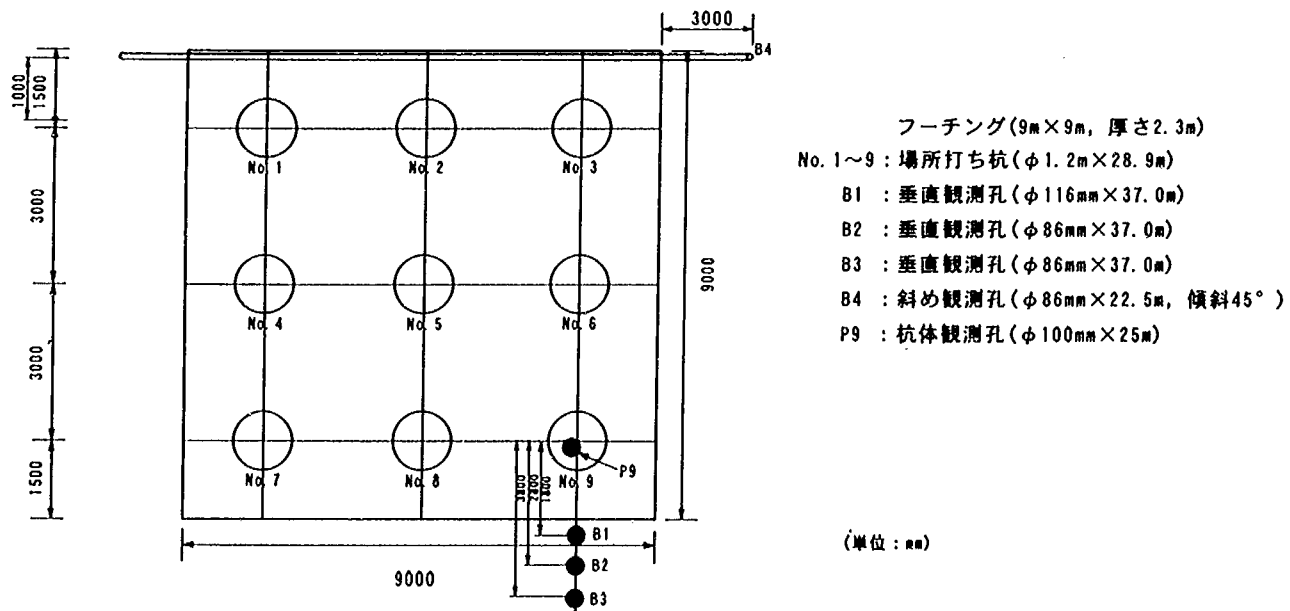


図-3.1 仮設ペント用杭基礎概要

3.3 観測孔の設置

観測孔は、杭に平行に掘削した鉛直観測孔と杭の配置を確認する目的のために設置した傾斜観測孔および杭体内を垂直に掘削した杭中観測孔の3種類を設置した（図-3.1 参照）。各観測孔の仕様を以下に示す。

(1) 鉛直観測孔（観測孔番号；B1, B2, B3）

- ・観測孔と杭の離れはそれぞれ、1.8m, 2.8m, 3.8m とした。
- ・観測孔長は、37.0m（杭端+5.0m）とした。
- ・削孔は機械ボーリングで行った。
- ・B1 の保護管は VU100 とした（ボーリング孔径は ϕ 116mm 以上）。
- ・B2, B3 の保護管は VP65 とした（ボーリング孔径は ϕ 86mm 以上）。

(2) 傾斜観測孔（観測孔番号；B4）

- ・観測孔と杭の離れは、1.0m とした
- ・観測孔の角度は 45 度とした。
- ・観測孔長は 20.0m（杭+5.0m）とした。
- ・削孔は機械ボーリングで行った。
- ・観測孔とフーチングの離れは 3.0m とした（観測孔がフーチングにかからない位置）
- ・保護管は VP65 とした。

(3) 杭中観測孔（観測孔番号；P9）

- ・観測孔長は 30.0m とした。
- ・削孔は機械ボーリングで行った。
- ・ボーリング孔径は ϕ 100mm とした。

4. 各調査手法の検討結果

4.1 インティグリティ試験

4.1.1 研究概要

(1) インティグリティ試験の概要

インティグリティ試験は、低ひずみ（Low Strain）を用いて杭の健全性を調査するもので、図-4.1.1 に示すように杭頭をハンドハンマで軽打することにより低レベルのひずみを発生させ、そのときの杭の応答を加速度計等で計測する試験法である。

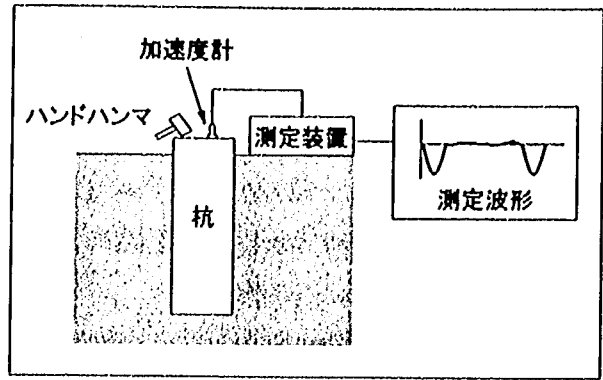


図-4.1.1 インティグリティ試験の方法

打撃により発生した入力波は、瞬時に杭径全体に広がり平面波として杭先端に向かって伝播する。この入力波は、杭の材質が均一で断面積に変化がない場合には、一定の速度で振幅を弱めながら進んでいくが、杭の断面変化や損傷がある場合には反射波が生じる。

(2) 本年度共同研究の概要

インティグリティ試験に関する研究では、杭基礎の形状調査および損傷調査への適用性研究を目的とした。しかし、昨年度の土槽実験等から、形状調査に関してはインティグリティ試験単独では正確な判断が困難な場合が多いことが判明した。そこで、本年度は、杭基礎の損傷調査に重点を置いて、以下のような研究を実施した。

なお、これらの成果を踏まえ、「インティグリティ試験を用いた杭の損傷調査法マニュアル」を作成した。

1) 杭体を伝わる波速の検討

昨年の土槽杭のインティグリティ試験結果を詳細に検討すると、杭の設置条件によって波速に差が生じている傾向がみられた。そこで、昨年度の土槽実験の RC 杭を用いて、気中の杭、土中の杭（フーチングあり・なし）の、3つの条件の異なる杭に対してインティグリティ試験を追加実施し、それらの条件の違いによって、杭体内を伝わる波速に差がでるかどうかを検討した。

2) 岸和田現場実験による適用性検討

杭体にクラックの入っている実大の仮設ベノト杭基礎を用いて、フーチングの上、および、フーチングの下でインティグリティ試験を実施した。試験結果を、ボアホールカメラ等の調査結果とも比較し、フーチングを有する杭に対するインティグリティ試験の適用性を検討した。

3) インティグリティ試験の解析的検討

FEM解析を利用して、インティグリティ試験のシミュレーション解析を行い、打撃・計測位置の影響、フーチングの影響などについて検討した。

4. 1. 2 検討結果

(1) 土槽杭の伝播速度測定結果

1) 試験内容

平成9年度に実施した土槽実験のPHC杭を用いて、フーチングなしの土中杭(A杭)、フーチングありの土中杭(B杭)及び気中に横置きした杭(C杭)の3種類の杭に対してインティグリティ試験を追加実施し、それらの条件の違いによって、杭体内を伝わる伝播速度に差があるかどうかを検討した。

測定は、打撃点と加速度計の位置関係が図-4.1.2に示すような3ケースについて、プラスチックハンマとスチールハンマを用い実施した。

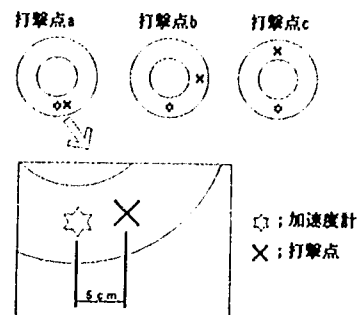


図-4.1.2 打撃点と加速度計の位置関係

2) 試験結果

測定結果を図-4.1.3および表-4.1.1に示し、以下に考察を示す。

・プラスチックハンマとスチールハンマによる伝播速度の差はない。図中には示していないが、試験装置による差もない。

・打撃点により伝播速度が変わり、 $a < b < c$ の順に大きくなっている。これは、試験杭が中空のPHC杭であるので、伝播経路が異なるためである。

・土中杭(A杭)と気中杭(C杭)を比較すると、打撃点によらず、土中杭(A杭)の方が伝播速度が速くなっている。

・フーチングありの土中杭(B杭)は、フーチングなしの土中杭(A杭)と比較して、フーチングの影響により伝播速度が遅くなっている。これは、フーチングの厚さと杭径の関係によるところが大きいと考えられるが、実杭で検証することが必要である。

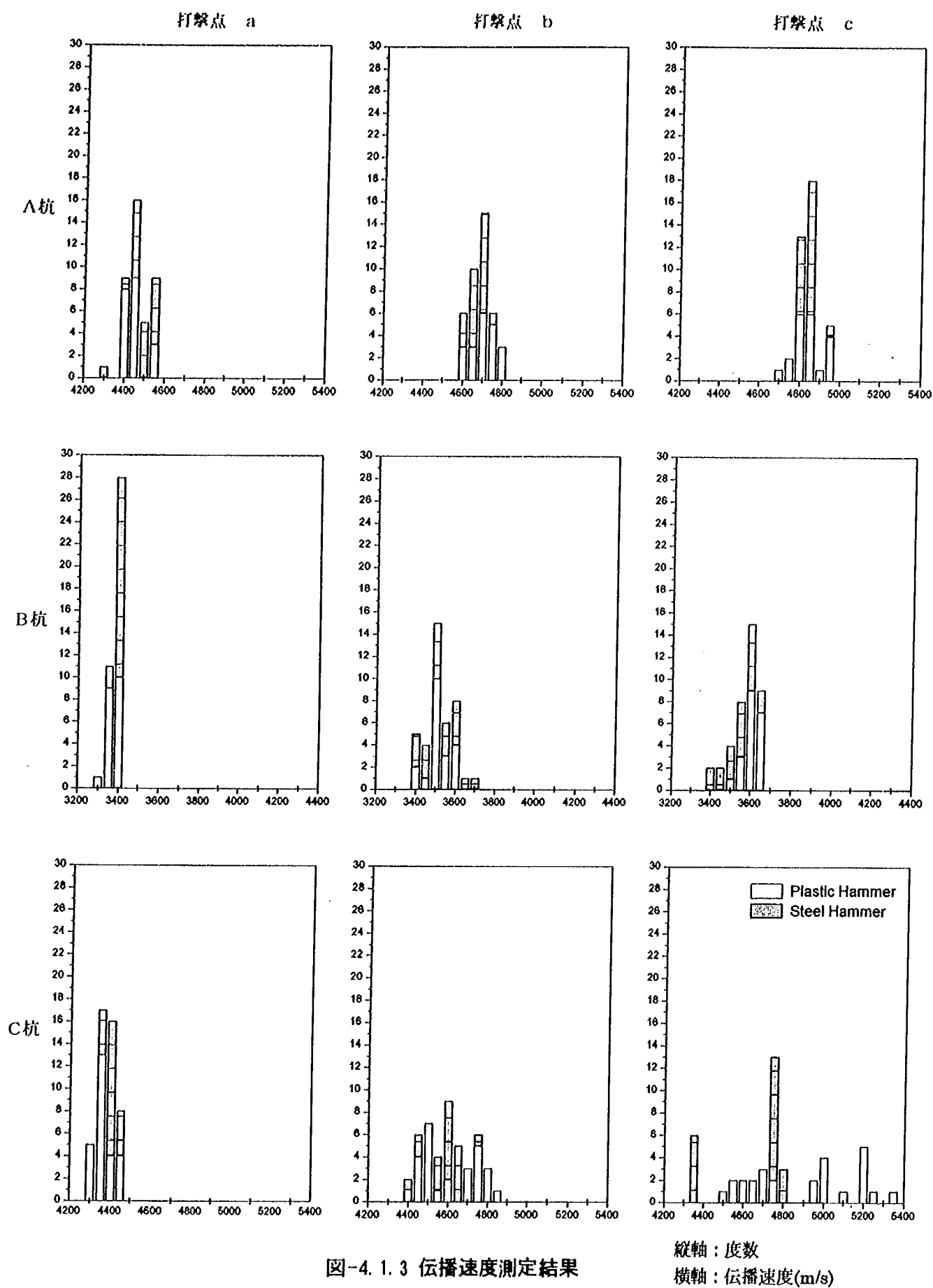
・気中杭(C杭)は他の杭と比較して、特に打撃点b及びcのバラツキが大きい。一方、A杭及びB杭は、打撃点に依らずバラツキは小さい。この気中杭(C杭)のバラツキが大きい原因は、試験杭が短かったことによりノイズの影響を受けやすく、また、杭を横置きにしているため、試験条件が悪く、かつ、床との接触の影響が現れていると考えられる。

表-4.1.1 伝播速度測定結果

		打撃点		
		a	b	c
杭	A	4445	4655	4818
		55.0	48.4	58.4
	B	3354	3499	3549
		21.1	62.7	61.4
	C	4363	4584	4758
		47.5	110.3	265.3

上段：平均値(m/s)

下段：標準偏差(m/s)



(2) 岸和田現場実験結果

1) 試験内容

試験は、現在広く用いられている表-4.1.2 に示した 3 種類の測定装置より行った。これらの装置は、基本的な測定原理に違いは無い。

表-4.1.2 測定装置の概要

測定装置	仕 様
SIT	装置構成:コンピュータ+コンディショナ 14bitA/D HDD にデータ保存 加速度計:水晶圧電型(特殊粘土で設置)
IT-System	装置構成:専用機 最大ゲイン 100db 12bitA/D 512Kbyte メモリ 加速度計:ジルコチタン酸鉛セラミック圧電素子型
PIT	装置構成:専用機 16bitA/D 350 回測定可能 加速度計:水晶圧電型(グリスで設置)

測定は、図-4.1.4 に示すように、①杭直上部フーチング上面に加速度計を設置し、フーチング上面を軽打する(測定方法 1)、②フーチング周囲を掘削し、杭側面に加速度計を設置して、アンカーボルトで固定したブロックを鉛直方向に軽打する(測定方法 2)の 2 方法で実施した。

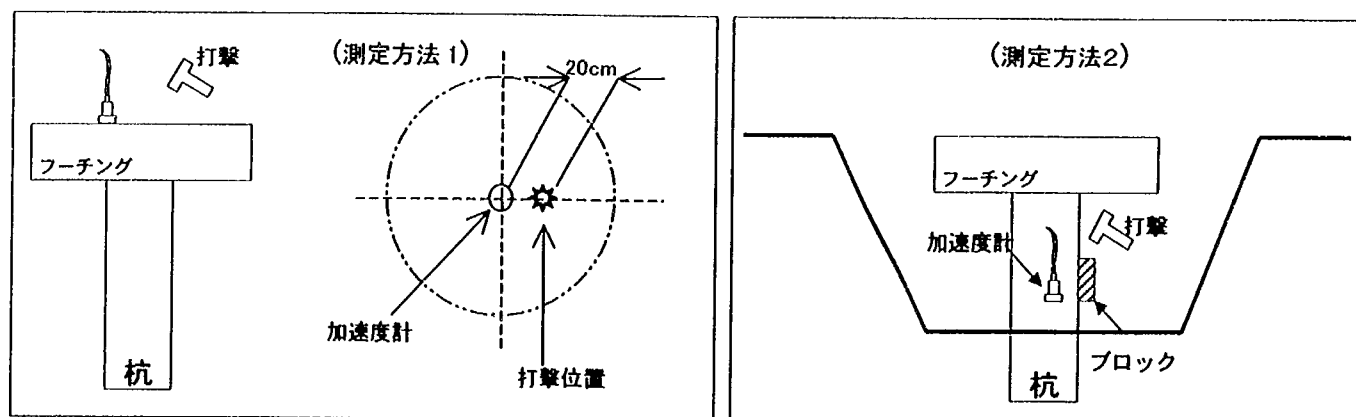


図-4.1.4 測定概念図

2) 検討結果

a) 試験杭の選定

測定波形は、ボアホールカメラ結果と比較し、フーチングを有する杭に対する本試験の適用性を検証するために、コアボーリングによって削孔し、ボアホールカメラを実施したNo.9 杭を用いた。

なお、測定方法 2 については、G. L-3.8m まで掘削し、直接No.9 杭を露出させて実施した。

b) 試験杭の伝播速度

伝播速度は、杭材の密度と弾性係数で決まり、コンクリート杭では 3,500~4,000m/sec 程度である。今回は、コンクリート杭の一般的な範囲の中間である 3,800m/sec を用いて検討を行った。

c) 試験の条件

試験条件は、3種類の測定装置から得られた波形とも、入力 の 最大値および発生場所を揃えた。また、増幅やフィルター処理といった波形処理は施していない。

d) 試験結果

① 測定方法1での結果

図-4.1.5 は、測定方法1によって得られた各測定装置の波形である。

各波形ともフーチング上面から 4m 付近までは同様な波形を示しており、反射波の大きさも極端な差は認められない。しかしながら、7m 以深においては、波形に統一性が無い。ボアホールカメラ結果によれば、7~11.5m 間には複数のクラックが存在している。したがって、7m 以深においては、このクラック群が測定器毎に複雑な反射波を与え、統一性が無くなったと考えられる。

② 測定方法2での結果

図-4.1.6 は、測定方法2によって得られた各測定装置の波形である。測定方法2の打撃位置および加速度計設置位置は、フーチング上面より 3.2m 下であり、図-4.1.6 では、この位置を 0 としている。

波形は、各測定器ともにサインカーブを示している。反射波形は、おおむね一致している。

e) ボアホールカメラによるクラック位置との比較

図-4.1.7 は、ボアホールカメラから得られたクラック位置と測定方法1及び測定方法2の代表実測波形との関係を示したものである。フーチング上面を G.L±0.0m とす

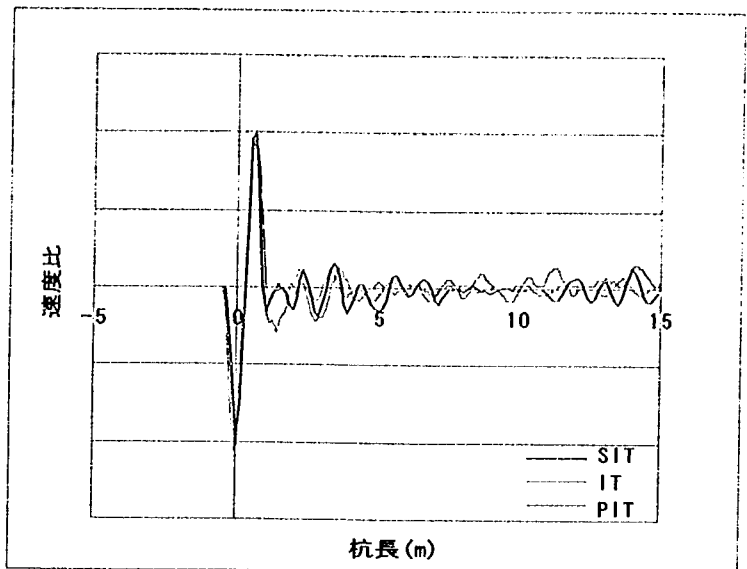


図-4.1.5 測定方法1による各測定器の波形

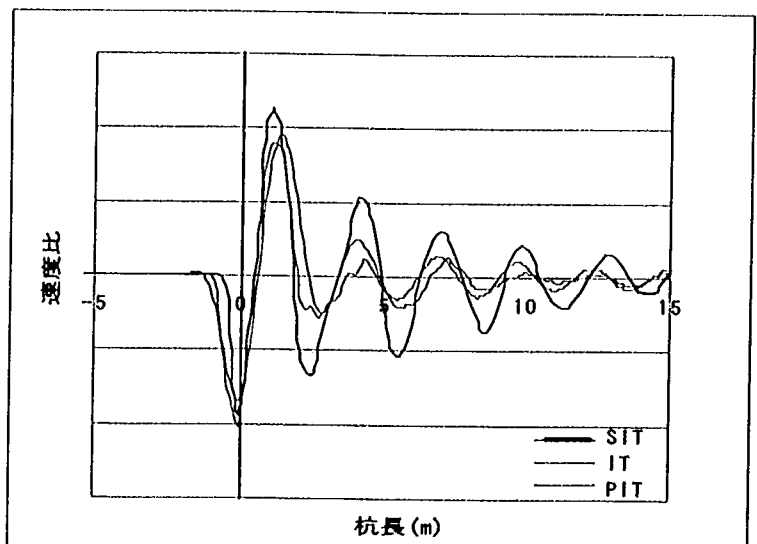


図-4.1.6 測定方法2による各測定器の波形

れば、G.L-2.3～-2.9m までのクラック幅は 0.25～1mm、G.L-4.9m 付近のものは 0.25mm 以下、G.L-7.0～-11.5m のクラック幅は 0.25mm 以下～2mm である。なお、測定方法 2 の加速度計設置深度は、G.L-3.2m である。

測定方法 1 の波形は、G.L-2.4m 付近でクラックの影響と考えられる反射波が出ている。また、G.L-4.9m および G.L-7.0～-11.5m より発生しているクラック群の内、最浅部 (G.L-7.0m 部) のクラック部においてもクラックの影響とも考えられる反射した波が測定された。しかしながら、G.L-7.0m～-11.5m 間にある他のクラックについては、明瞭な反射波を確認することはできなかった。この要因として、クラック群が密集することによる反射波の乱れ等が考えられるが、推測の域をでない。なお、フーチング内および G.L-4.0m 付近でも反射波を測定している。

これらの位置には、ボアホールカメラでは捕らえきれない微小クラックが存在している可能性も考えられる。

測定方法 2 の波形は、G.L-4.9m 付近のクラック位置で反射波を確認しており、以降ではサイン波となっている。測定方法 1 の波形では、G.L-4.9m 以降にクラックの影響とも考えられる反射した波を測定しているが、測定方法 2 では明瞭な反射波は確認していない。この要因として、フーチング上面からの繰返し波と G.L-4.9m 部のクラックによる反射波がミックスした可能性や掘削後の杭状況が良くなかったことも、影響しているとも考えられるが、今回の実験では明らかにできない。今後、同種のデータの蓄積、検討する必要がある。

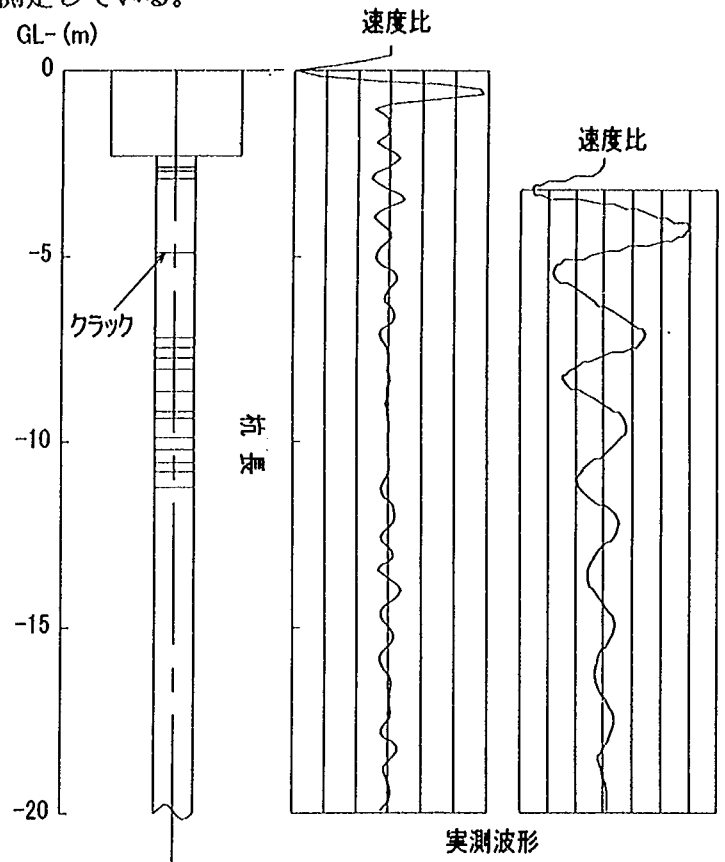


図-4.1.7 インテグリティ試験結果とクラック位置との関係

(3) 検討結果のまとめ

今回は、フーチングを有する破損した場所打ちコンクリート杭に対してインテグリティ試験を行った。一般に杭基礎が損傷を最も受けやすい箇所は、フーチングと杭基礎との境界付近と言われており、今回の試験杭でも同様な位置でクラックがある。

試験結果は、測定方法 1 の方法を用いた場合でも、ボアホールカメラ結果に対応する位置に反射波と考えられる波形を確認している。しかしながら、その他の位置にも同程度の波形があるので、今後、同種のデータを蓄積し、適用性を判断していきたい。一方、測定方法 2 の方法は、境界付近を直接目視確認することが可能であり、今回の実験で、G.L-4.9m のクラックの影響と考えられる反射波を確認したが、以深ではサイン波となっている。何らかの要因があると考えられるが、今回の実験で明らかにできなかったため、測定方法 1 と同様に同種のデータを蓄積し、検討する必要がある。

(3) 解析的検討

既往の3次元衝撃応答解析プログラムDYNA3Dをインティグリティ試験に適用し、

①プラスチックハンマでの測定可能範囲に関する検討

②杭の健全性試験結果に与える打撃・計測位置の影響検討

の2項目について解析的に検討した結果を以下に示す。

1) プラスティックハンマでの測定可能範囲に関する検討

a) 検討の目的

インティグリティ試験では入力波を与える道具として、一般的にプラスチックハンマが用いられているが、このプラスチックハンマでは杭頭近傍の損傷を確認することは難しいと言われている。

本検討においてはこのことを確認すると同時に、プラスチックハンマを用いた場合の損傷の有無および位置の特定可能な範囲を解析的に検証することを目的とする。

b) 検討概要

例えば、GL-1mに損傷があったとき、杭体内の縦波伝播速度を3,800m/sとすれば、反射波が杭表面に返ってくるのに要する時間は0.526msである。それに対して、プラスチックハンマによる入力波の入力時間は概ね1msといわれており、入力波のピークが入力されるとほぼ同時に反射波が返り、入力波と反射波が重なることになる。このような場合にどのような速度波形が得られるのか、そのとき損傷の有無を特定できるのか等について解析的に検証する。

3次元衝撃解析ソフトを用い、杭体内に損傷部分を設けその位置（深さ）を変動させて、得られる波形を損傷のない杭体でのそれとそれぞれ比較することにより、プラスチックハンマによるインティグリティ試験の測定可能な範囲について検討するものである。

c) 解析方法

c-1) 検討モデル

検討モデルは、 $\phi 1.0\text{m}$ 、 $L=10.0\text{m}$ の中実コンクリート杭を想定した。今回は、周辺地盤の影響を消去するために気中の杭をイメージして解析している。

解析モデル概観を図-4.1.8に、メッシュ割付図を図-4.1.9に示す。8節点6面体要素を用い、全体の1/2をモデル化した。全節点数は9,135、全要素数は7,956であり、杭断面は54要素から構成されている。また、深さ方向のメッシュ間隔は上部2mを0.25m、それ以深を0.5m、平面方向には概ね0.1mとしている。要素全体の下方および半径方向の境界には、伝播波の反射を避けるために無反射境界を設けている。

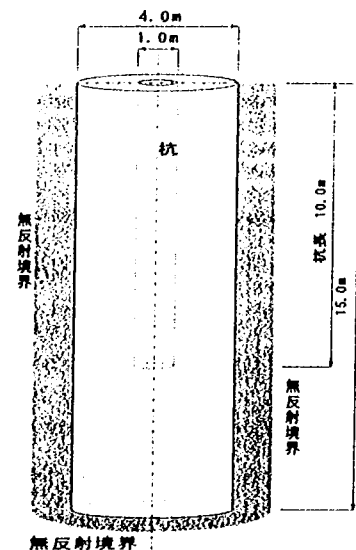


図-4.1.8 解析モデル図

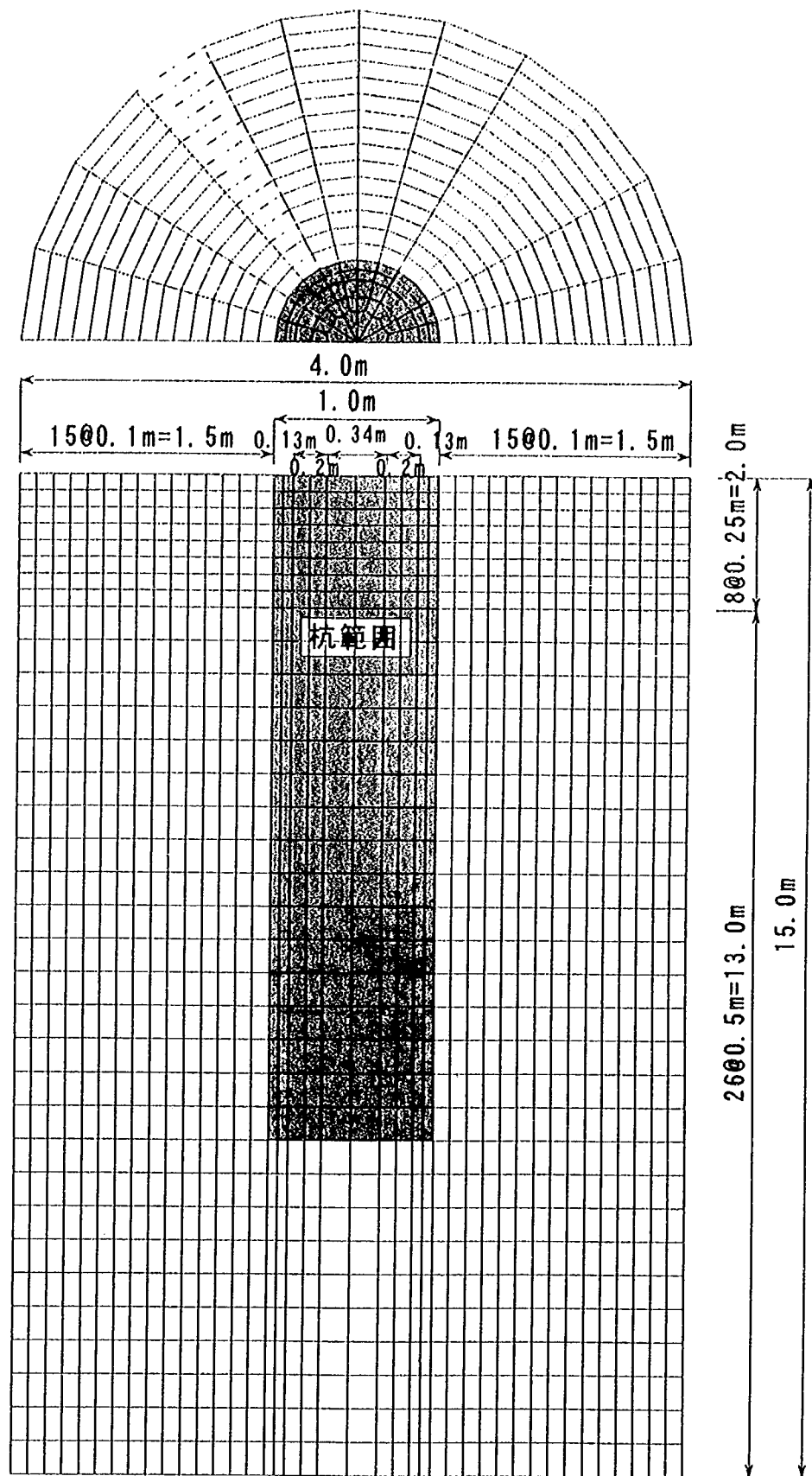


図-4.1.9 メッシュ割付図

c-2) 入力定数

c-2-1) 杭の入力定数

杭体コンクリートのヤング率は、杭体内の弾性波速度 $V_p = \sqrt{E/\rho}$ が 3,800(m/s)になるように設定した。その他は以下のような値を入力した。

ヤング率	3.54×10^6	(tf/m ²)
ポアソン比	0.167	
密度	2.4	(tf/m ³)

c-2-2) 地盤の入力定数

前述したように、周辺地盤の影響を消去するために、気中にある杭をイメージして地盤のヤング率を 1×10^{-4} (tf/m²)とした。

c-2-3) 打撃荷重

プラスチックハンマによる打撃波の波長は概ね 1ms と言われており、図-4.1.10 のような波形を入力波とした。

c-3) 打撃点及び測定点

打撃点は杭中心、測定点は杭中心と縁部の概ね中央に位置する node15 (中心から 27cm)とした。

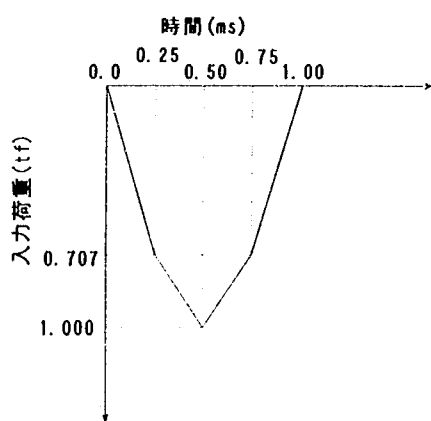


図-4.1.10 打撃荷重の時刻歴 (入力値)

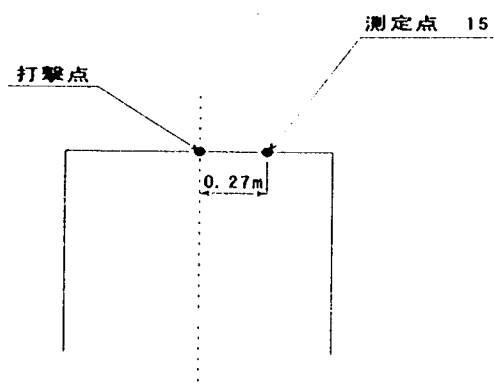


図-4.1.11 打撃点および測定点

c-4) 損傷の規模および位置 (深さ)

損傷の平面的な大きさは、偏荷重による曲げ破壊を想定して半円形の50%とした。また損傷厚は1cmとした(図-4.1.12参照)。損傷深さについては、反射波が入力波の範囲内にあるGL-1.0m、入力波の終了直後に反射波が返ってくるGL-2.0mの上部2ケースに、入力波の影響のない杭中間のGL-5.0mを加えた3ケースを検討した。



図-4.1.12 損傷範囲

d) 解析結果

損傷が無い場合、および損傷位置がGL-1m、-2m、-5mの場合の、杭頭における速度波形をそれぞれ図-4.1.13~16に示す。

いずれにおいても先端からの反射波が明確に得られており、計算上の先端位置と概ね合致している。ここで反射波の振幅を比較すれば、損傷がない場合に比較して損傷がある場合の方がすべて小さくなっていることがわかる。波動エネルギーは損傷部透過時には減少すると言われており、これはそのことに起因するものと考えられる。

図-4.1.17~20は、それぞれの場合における深度方向に1m毎の速度波形を表したものであり、直線はそれぞれのピークの位置を繋いでいる。それぞれ先端からの反射波としているピークが先端からの直線の延長線上にあり、このことから先端からの反射波であることは検証できる。ここでは、杭頭からの繰り返し波も確認でき、概ね入力時と同じ速度で伝播していることがわかる。

次に損傷部からの反射波を見ると、GL-2m、および-5mでは明らかに反射波であると思われるピークが存在するのに対して、GL-1mでは見受けられない(図-4.1.14~16参照)。損傷位置GL-5mにおいては、図-4.1.20を見ても先端からの反射波と同様に、ピークの連続性より損傷部からの反射波を確認できる。損傷位置GL-2mでは、図-4.1.19に示すようにGL-1mにおいて入力波と反射波が重なっており、反射波の連続性からは確認できないが、計算上の位置と概ね合致しており損傷部からの反射波であると判断できる。それに対して損傷位置GL-1mにおいては、入力波の範囲内に小さな突起(図-4.1.14内の①で示した部分)があり、他と異なる形状を示している。この突起は損傷位置ともほぼ合致するが、これを持ってGL-1m付近に損傷があると判断することは困難である。その他、2ms付近にピークがあり(図-4.1.14内の②で示した部分)、あたかも損傷があるかのように見受けられる。これはGL-1mの損傷からの繰り返し波の影響であると考えられるが、GL-3m付近に損傷があると誤って解釈しやすく注意を要する。

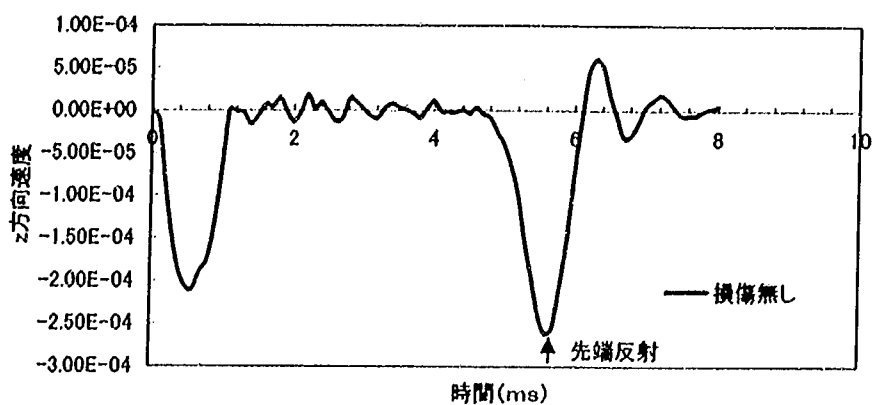


図-4.1.13 損傷無しの場合の波形

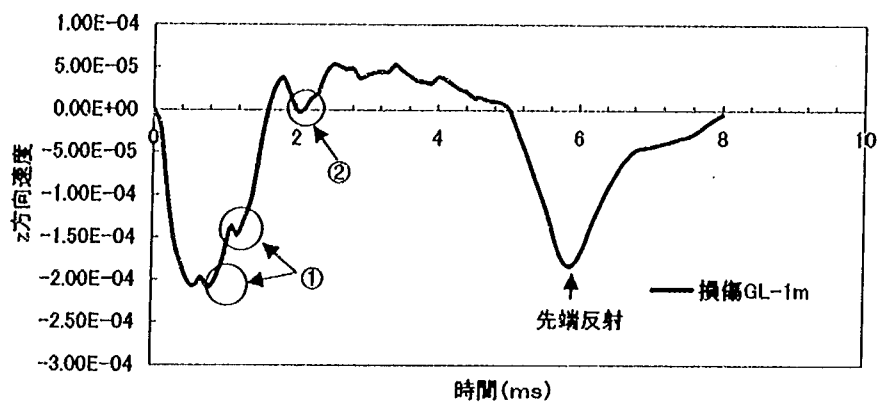


図-4.1.14 損傷位置GL-1mの場合の波形

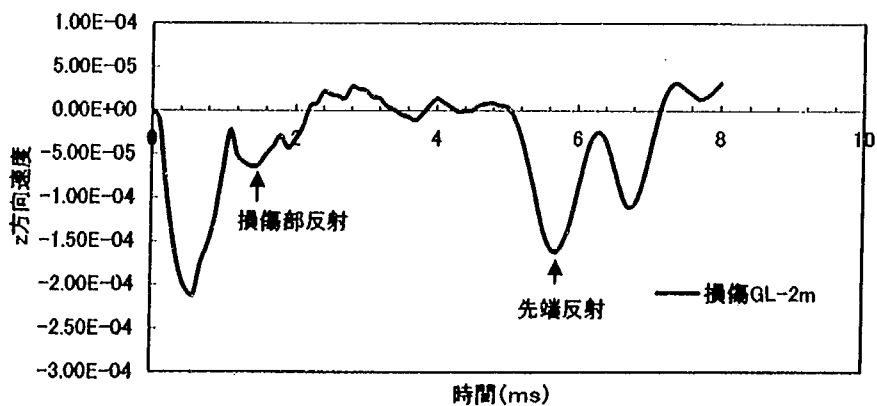


図-4.1.15 損傷位置GL-2mの場合の波形

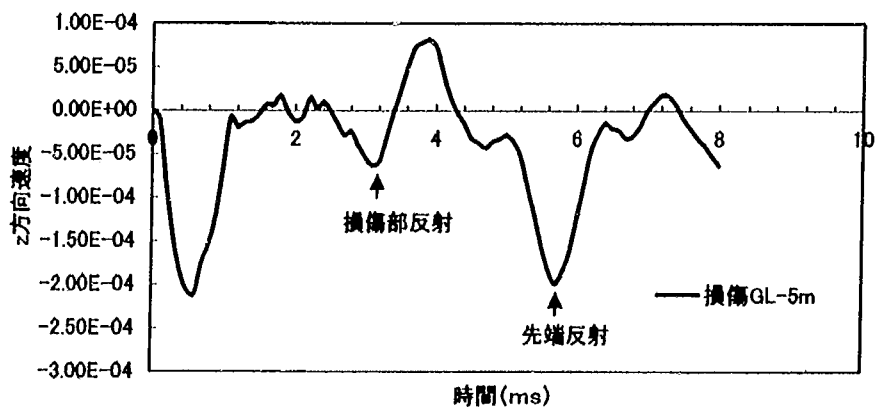


図-4.1.16 損傷位置GL-5mの場合の波形

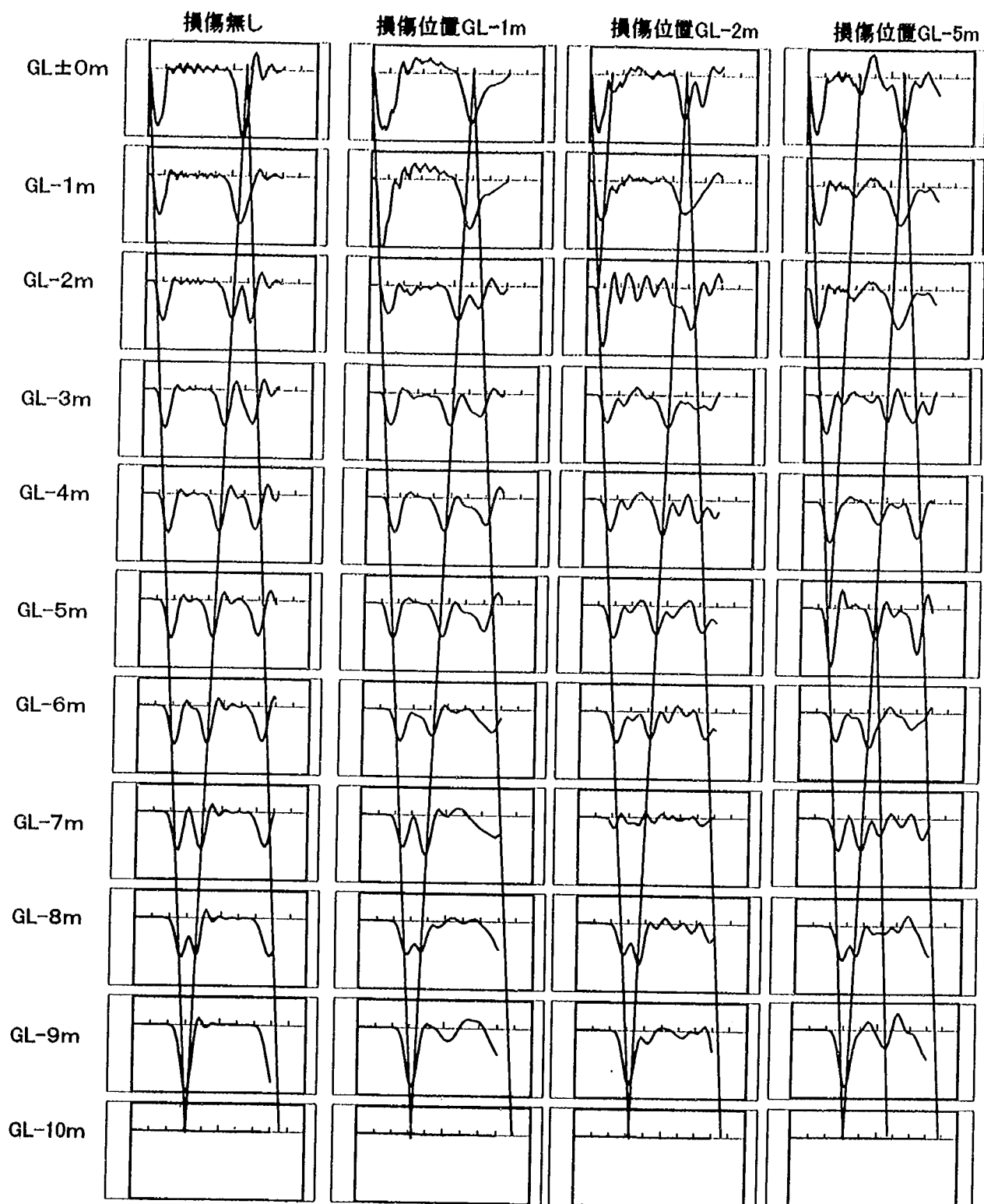


図-4.1.17
損傷無しの
各深度での速度波形

図-4.1.18
損傷位置 GL-1m の
各深度での速度波形

図-4.1.19
損傷位置 GL-2m の
各深度での速度波形

図-4.1.20
損傷位置 GL-5m の
各深度での速度波形

e) まとめ

解析により得られた知見をまとめると、以下のものである。

- ① プラスティックハンマを用いてインティグリティ試験を行う場合には、GL-2m 以浅にある損傷を予測するのは困難である。
- ② GL-2～3m 付近からの反射波が得られても、それ以浅に存在する損傷からの繰り返し波であることも考えられ、即座に反射波の位置に損傷があると判断することは難しい。
- ③ GL-2～3m 付近からの反射波が得られた場合には、それより浅い部分に損傷が生じているようであると大まかに判定し、より詳細に調査したい場合には入力時間の短い金属製のハンマを用いる等別途方法を検討する必要がある。

3) 杭の健全性試験結果に与える打撃・計測位置の影響検討

a) 検討の目的

インティグリティ試験を適用する上で課題があるとされるフーチングのある杭基礎を対象とし、実際に用いられている各種打撃・計測方法についてFEMによるシミュレーション解析を実施し、各方法の適用性を検討した。

b) 解析概要

図-4.1.21 に解析モデルを、表-4.1.3 に解析定数を示す。杭は $\phi 600$ 、 $L=9.0\text{m}$ の中実コンクリート杭で、厚さ1.0mのフーチングがついている。地盤は杭下端を境界とした2層でモデル化しており、解析領域の側面および下面は無反射境界としている。打撃力は図-4.1.22 に示すように正弦波を模擬した波形とした。解析は以下の3ケースについて三次元衝撃FEM解析プログラム(LS-DYNA3D)によって行った。

CASE 1：フーチング上を直接打撃し、加速度計をフーチング上に設置。

CASE 2：フーチング下の地盤を掘削して露出した杭側面を直接打撃し、加速度計を杭側面に設置。

CASE 3：フーチングに穴をあけて杭頭を打撃し、加速度計を杭頭に設置。

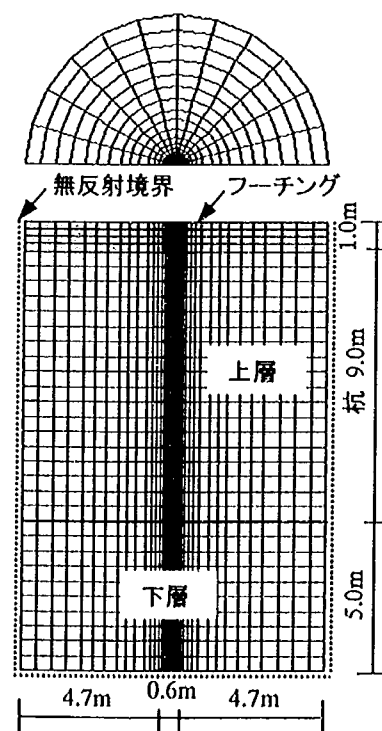


図-4.1.21 解析モデル

表-4.1.3 解析定数

材料	E(N/m ²)	ν	ρ (g/cm ³)
フーチング、杭	3.43E+10	0.167	2.5
上層地盤	9.80E+06	0.333	1.8
下層地盤	9.80E+07	0.333	1.8

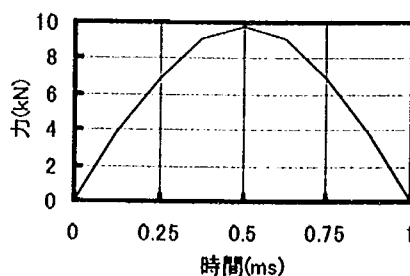


図-4.1.22 打撃波形

c) 解析結果

図-4.1.23～25に各ケースの模式図と解析結果を示す。ここでは、波の伝播状況を見るために各深度における波形を示している。CASE 1 では、フーチング上を打撃して生じた圧縮波はフーチングから杭へと伝播し、杭先端で反射した後、杭頭に向かって伝播していく様子が明確にわかる。しかし、反射波はフーチングに入ると乱れ、加速度計を設置しているフーチング上端部ではほとんど判別できなくなっている。CASE 2 の方法では、杭を直接打撃しているため、CASE 1 より大きな圧縮波が杭下方に伝播し、反射波も杭頭部に設置した加速度計位置まで明瞭に伝わっていることがわかる。このケースでは、フーチング上端部においても反射波を確認することができる。また、CASE 3 の方法でもCASE 2 と同様に明確な反射波が得られている。

d) まとめ

フーチングのある杭基礎を対象に、打撃位置と加速度計の設置位置を変えたインテグリティ試験とそのシミュレーション解析を実施した。その結果、フーチング上を直接打撃して加速度計をフーチング上に置く方法では杭先端からの反射波が明瞭には現れにくいことがわかった。一方、フーチング下地盤を掘削して露出した杭を直接打撃し、加速度計も杭に設置する方法や、フーチングに穴をあけて杭頭を直接打撃し、加速度計も杭頭に設置する方法では、杭先端からの反射波が明瞭に現れている。したがって、フーチングのある杭基礎の健全性を調査する場合、フーチングによる影響を避けるため、フーチング上で試験をするのではなく、杭を直接打撃し、加速度計も杭に直接設置する方法が望ましいと判断される。

実際の適用においては、解析のような理想的な条件で実施されることはなく、地盤条件などの影響も考えられる。したがって反射波の確認も難しくなるが、今回の解析結果は、実施方法の妥当性を判断する際に参考になると思われる。今後、実測データとの照合を検討したい。

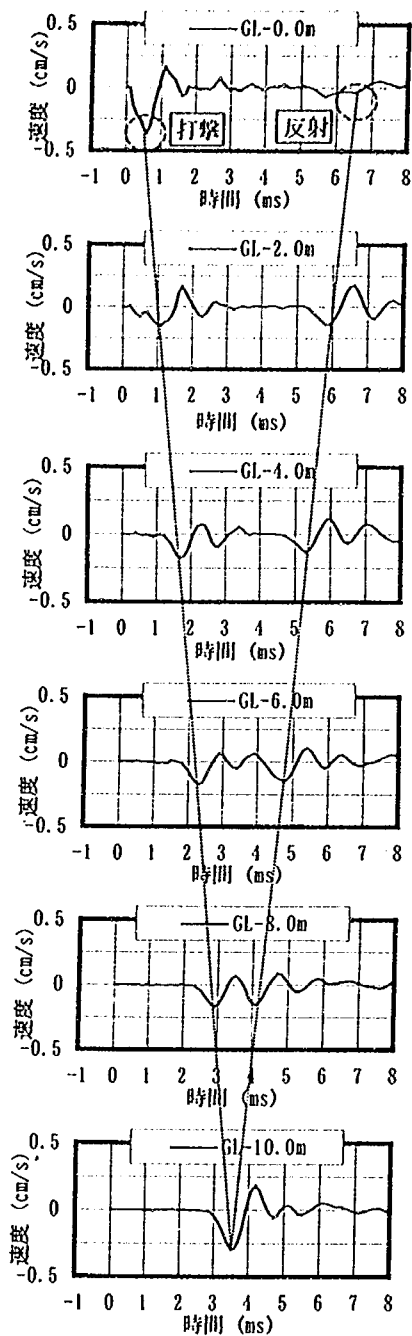
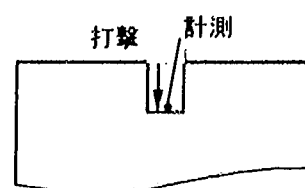
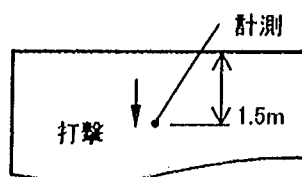
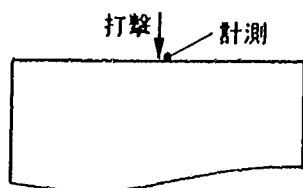


図-4.1.23 CASE 1

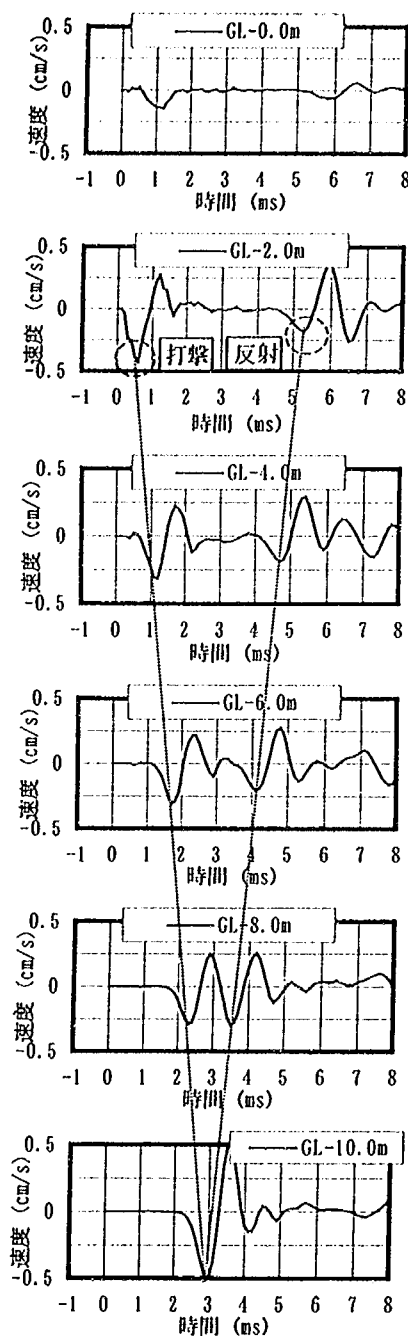


図-4.1.24 CASE 2

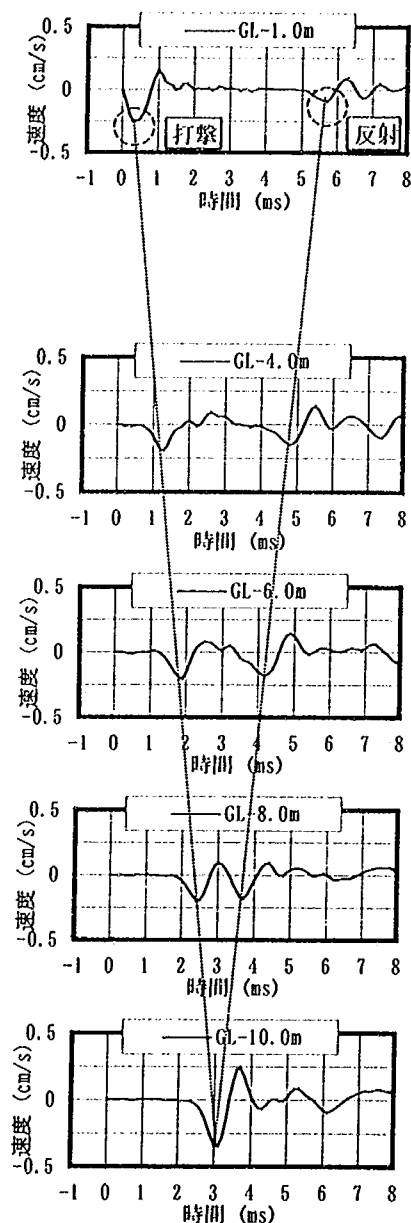


図-4.1.25 CASE 3

4.1.3 適用条件

インテグリティ試験を杭の損傷調査等に用いる場合の適用条件を以下に示す。

(1) 杭の条件

インテグリティ試験は、既製コンクリート杭、場所打ちコンクリート杭、鋼杭などのすべての杭基礎に適用可能である。測定実績からみた杭種別の適用性を表-4.1.4に示す。

表-4.1.4 インテグリティ試験の杭種別の適用性

適用性			測定実績 (最大長さ)	杭先端 位置	健全性		断面 形状	根固め 形状
杭種					クラック	断面 欠損		
杭頭露出	既製 コンクリート杭	打込み杭	40～45m	○	○	△	—	—
		埋込み杭	25～30m	○	○	△	—	○
	場所打ちコンクリート杭		50～60m	○	○	△	—	—
	鋼管杭		50～60m	○	△	—	—	—
	H型钢		15～20m	△	—	—	—	—
フーチング下	既製 コンクリート杭	打込み杭	25～30m	○	△	△	—	—
		埋込み杭	25～30m	△	△	△	—	△
	場所打ちコンクリート杭		30～40m	○	△	—	—	—
	鋼管杭		30～35m	△	—	△	—	—
	H型钢		10m	△	—	—	—	—
その他	深礎		20m	○	—	—	—	—
	地中連続壁		30～40m	△	—	—	—	—
	オープンケーソン		20～30m	△	—	△	△	—

(解説)

○：事例が多い △：事例がある —：事例がない

フーチング下：フーチング下の杭側面にセンサーを設置またはフーチングコア抜き後杭頭にセンサーを設置(図-2.2.6, 図-2.2.7 参照)

既製杭：継手箇所が多い場合は不適

杭先端：岩盤などに支持させている場合は、先端位置を捉えにくい

中間層：中間支持層がある場合は、波形が不明瞭となる場合がある

(2) 地盤条件

一般に、周辺地盤が硬くなる程、杭先端からの波の反射が明確に得られにくくなる。

また、中間に非常に硬い層があるときには、図-4.1.26に示すように、中間層の開始深さからは入力波と逆方向の、終了深さからは入力波と同じ方向の反射波が得られる場合がある。極端な場合には波が先端まで届かず、先端からの反射波が得られないこともある。

その他、杭先端の支持地盤が非常に硬い場合には、波動が地盤に透過し杭先端からの明確な反射が得られない場合がある。

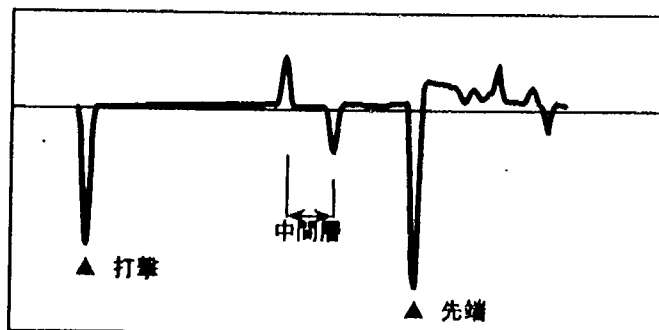


図-4.1.26 中間層がある場合の測定波形例

4.1.4 まとめ

橋梁基礎杭の損傷調査に対するインティグリティ試験の適用性を確認するために、杭体を伝わる波速の検討、現場実験による適用性検討、FEMを用いた解析的検討を実施した。

杭体を伝わる波速の検討より、以下のようなことが明らかとなった。

- ①杭長が短い既製コンクリート杭（中空構造）に対するインティグリティ試験では、打撃位置と測定位置の関係によって、波動の伝播距離に差がでるため、見かけ上、波速が変化する。
- ②既製コンクリート杭では、気中に横置きした場合よりも、土中に埋め込んだ場合の方が、波速が速かった。
- ③フーチングを有する土中の既製コンクリート杭に対するインティグリティ試験では、フーチングなしと比較すると波速が遅くなった。しかし、これは、フーチングの厚さと杭径の関係にも影響されると考えられるので、実杭での検証が必要である。

また、フーチングを有する場所打ちコンクリート杭に対する現場実験からは、以下のようなことが判明した。

- ④フーチング上で実施したインティグリティ試験では、杭頭付近（GL-2.4m）のクラックの影響と考えられる反射波が測定されているものの、その他の波形の乱れも多い。これは、フーチングの影響や、クラックが密集していることによる影響ではないかと考えられる。
- ⑤一方、フーチング下まで掘削して杭頭を露出させて試験する方法では、GL-4.9m付近のクラック位置からの繰り返し反射波が確認できるが、上方向に伝播した波のフーチング上面からの反射波の影響が出ている可能性もあり、今回のデータだけでは明確に判定できない。フーチングを有する杭に関しては、今後、同種のデータを蓄積し、検討する必要がある。

なお、FEMを用いた解析的研究からは、次のような知見が得られた。

- ⑥プラスチックハンマを用いてインティグリティ試験を行う場合には、GL-2m以浅にある損傷は、損傷部からの反射波が打撃による入力波形と重なるため、損傷位置を判定するのは困難である。
- ⑦GL-2～3m付近からの反射波が得られても、それ以浅に存在する損傷からの繰り返し波であることも考えられ、即座に反射波の位置に損傷があると判断することは難しい。より詳細に調査したい場合には入力時間の短い金属製のハンマを用いるなど、別途測定方法などを検討する必要がある。

今後の課題は、以下の通りである。

（１）マニュアルの普及

マニュアルの普及活動を積極的に行い、損傷調査に対するインティグリティ試験の有効性を浸透させる必要がある。これにより、調査実績の増加につながると考えられる。

（２）実現場でのデータの蓄積

実現場では、これまで行ってきた実験よりも測定条件が厳しく、測定上の工夫が必要になると考えられる。したがって、様々な構造諸元、地盤条件、損傷程度のもとでの試験データを蓄積し、より有効な測定法を提示することが必要である。また、ボーリング孔を利用したインテグリティ試験（フーチングをボーリングして貫通し、ボーリング孔内の杭頭部に加速度計を設置し、ボーリング孔内で杭頭部を直接打撃する方法）の適用性を確認したい。

（３）他の調査法の結果も併せた損傷度評価法の確立

インテグリティ試験では、全数調査が可能で損傷の疑いがある杭を抽出することが可能である。しかしながら、この試験のみで基礎の詳細な損傷度判定を行うことは困難な場合が多い。したがって、他の調査法（ボアホールカメラなど）との結果も併せた損傷度の評価法を確立することが望ましい。また、損傷度から補修・補強の必要性を判断し、適切な補強法を選定できるシステムが必要である。

4.2 レーダ法

4.2.1 研究概要

レーダ法の橋梁基礎構造調査への適用性については、以下の試験体を対象に検討を実施した。

- ① 建設省土木研究所内橋梁（鋼管杭）
- ② 建設省土木研究所内 PHC 杭
- ③ 岸和田現場実験（場所打ちコンクリート杭）

また、検討に用いた装置について以下に列挙する。

① パルス波反射式ポアホールレーダ（1）

パルス波反射式ポアホールレーダ装置の主な仕様を表-4.2.1 に示す。

表-4.2.1 パルス波反射式ポアホールレーダ装置（1）の仕様

装置本体	波形：単パルス法 パルス発振周波数：1MHz パルス出力：20Vp-p 計測レンジ：15, 30, 60, 90nsec 計測間隔：1cm 間隔 パルス平均回数：32 回（SN 比改善）
ポアホールレーダ アンテナ	レーダ送受信周波数：600MHz アンテナ指向性：±45° レーダアンテナ径：φ55mm レーダアンテナ長：722mm アンテナケーブル長：最長 20m 防水機能：有

また、装置本体の特長として以下のことが挙げられる。

- ・対象物の深度と必要とする精度からアンテナを 400～1500MHz に任意に選定することが可能である。
- ・PRF（パルス発振周波数）を 1MHz としていることにより、精度の高い調査が可能となる。
- ・下図に示すような回路を持たせることにより、対象物中の伝播速度を推定することが可能である。

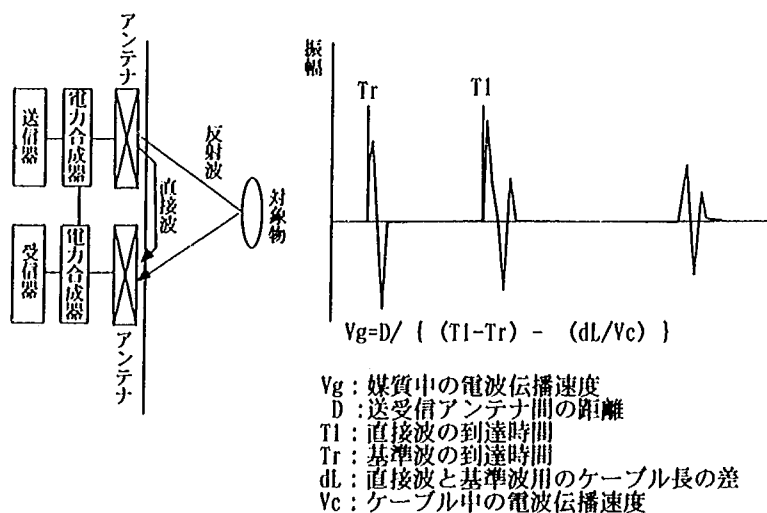


図-4.2.1 伝播速度推定のための基本回路

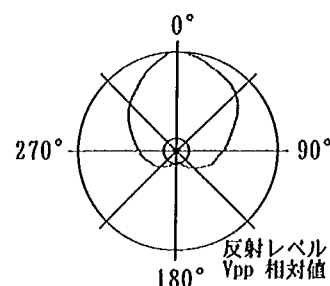


図-4.2.2 レーダアンテナの指向性

② パルス波反射式ポアホールレーダ (2)

ポアホールレーダ装置の仕様を表-4.2.2 に、また機器構成を図-4.2.3 に示す。

表-4.2.2 パルス波反射式ポアホールレーダ (2) の仕様

電氣的緒元	電磁波型式 : 単パルス法 送信周波数 : 中心周波数 2 3 0 MHz 受信周波数 : 1 0 ~ 5 0 0 MHz アンテナ型式 : ダイポール 送受信回路 : 単独使用 指 向 性 : 無指向 波形処理 : スタッキング (1 ~ 2 5 6 回)
孔内部	外 径 : 約 5 0 mm 長 さ : 約 3 . 2 m アンテナ : 中心距離 (L=約 6 0 0 mm) 重 量 : 約 8 k g f (プローブのみ) ケーブル長 : 3 0 m

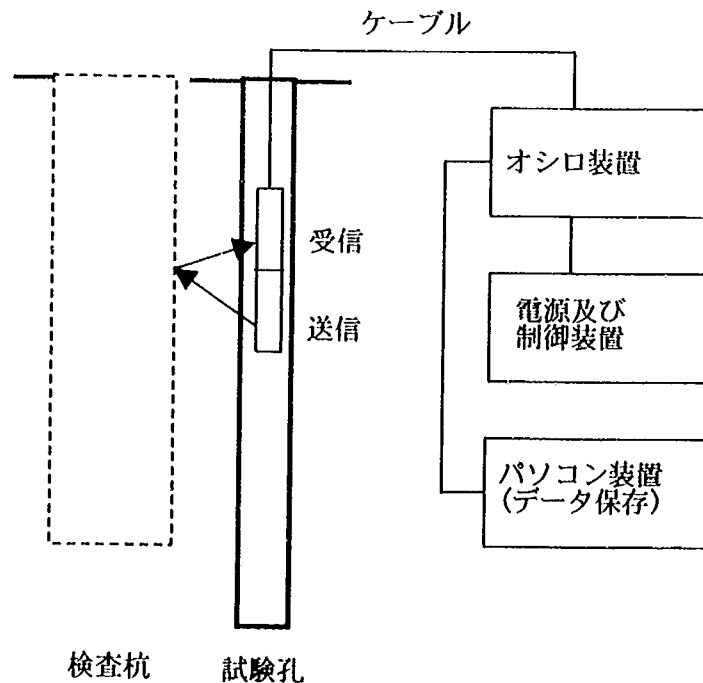


図-4.2.3 測定装置の構成

③ ステップ周波数掃引ポアホールレーダ

ステップ周波数掃引ポアホールレーダ装置の主な仕様を表-4.2.3 に、ブロック図を図-4.2.4 に示す。試作したアンテナは、外形 96mm の円筒形状で、中央で連結・分離することで、送受アンテナを一体・分離どちらの状態でも使用可能なものとした。一体時の円筒部の長さは 892mm で、分離時の円筒部の長さは 452mm である(キスター等突起部は除く)。

高周波回路部は電磁波の送受信及び受信信号の検波を行う。レーダコントローラは発振器発振周波数制御信号の生成、データ取込みのタイミングコントロール等を行う。

表- 4.2.3 レーダ装置主要諸元

レーダ方式	ステップ周波数レーダ (FM-CWレーダ)
掃引周波数帯域	20MHz~2GHz
送信出力	反射計測時：約-10dBm (0.1mW)、可変機能有り 透過計測時：約 15dBm (32mW)、可変機能有り
アンテナタイプ	ポウタイアンテナ
アンテナエレメント	エレメント長：350mm 中心周波数：425MHz
A/D 変換分解能	12ビット

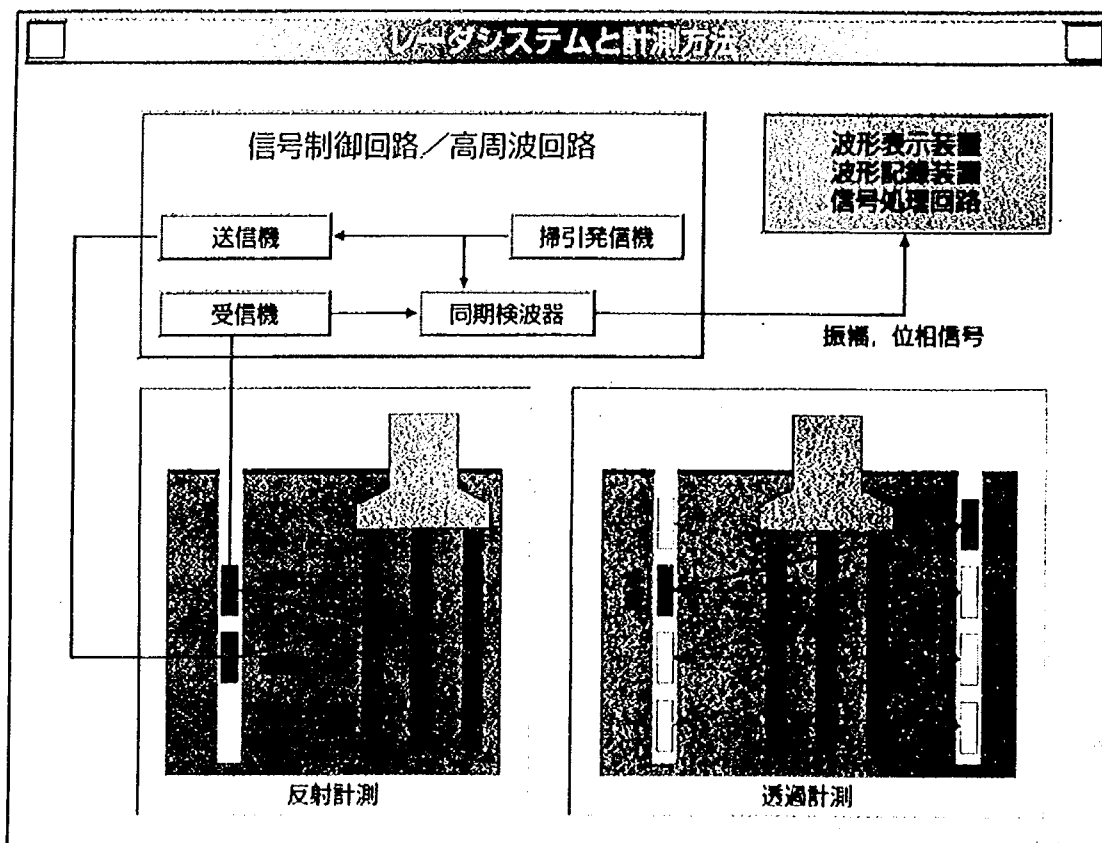


図-4.2.4 ステップ周波数掃引ポアホールレーダ機器構成

4.2.2 検討結果

(1) 土木研究所内橋梁鋼管杭調査

レーダグループでは、岸和田の現場実験にさきがけて土木研究所内の実橋梁の杭基礎について適用性試験を実施した。実施した橋梁基礎は鋼管杭基礎であり、図-4.2.5 のような構造を有している。今回の試験では、杭間隔を調査することを想定し、斜めボーリング孔 (BI) を用いた試験を行った。

表-4.2.4 調査対象杭の諸元

杭種	: 鋼管杭
杭径	: 60cm
杭長	: 16m
杭間隔	: 1.5m
地盤	: 関東ローム・砂層互層
ボーリング角度	: 35°
ボーリング長	: 20m
ボーリング孔・杭間隔	: 1.00m
アンテナ走査長	: 14m
ボーリング孔保護	: 塩ビ管
塩ビ管内径	: 100mm

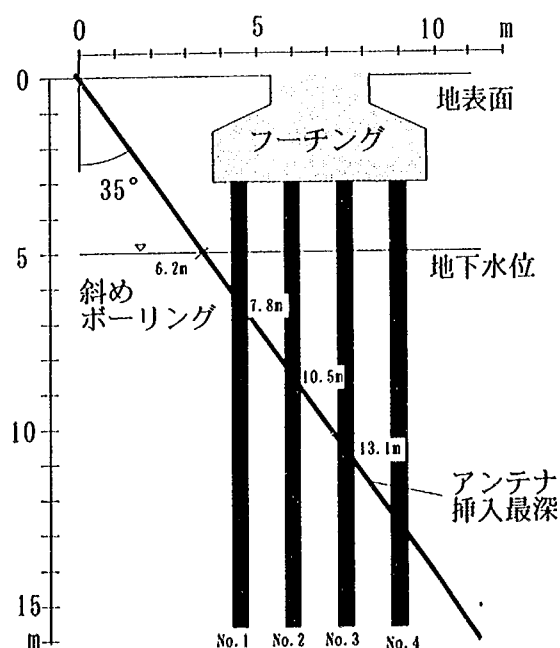
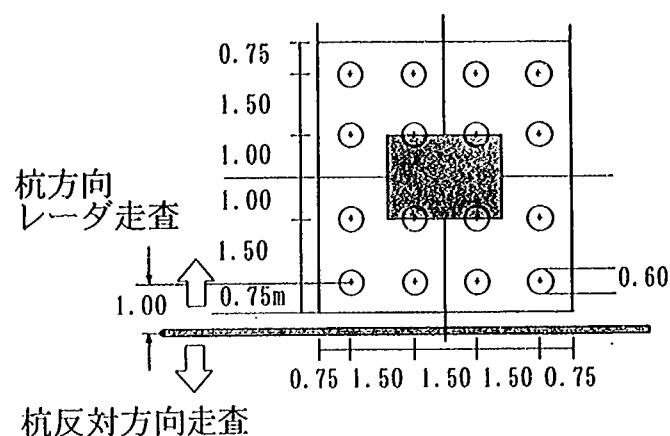


図-4.2.5 調査対象の鋼管杭基礎 (土木研究所内橋梁)

1) パルス波反射式ポアホールレーダ (1) による鋼管杭調査結果

図-4.2.6 に試験によって得られた画像を示す。図-4.2.6 に認められるとおり、杭方向の画像には、明瞭に鋼管杭からの反射が存在する。これに対して杭反対方向の画像には深部からの反射がない。また、杭の間隔も図面から確認される間隔に正確に一致する。以上の結果から、ポアホールレーダと斜めボーリングを組み合わせてることにより、橋梁基礎（杭間隔）の調査が実施可能である判断される。

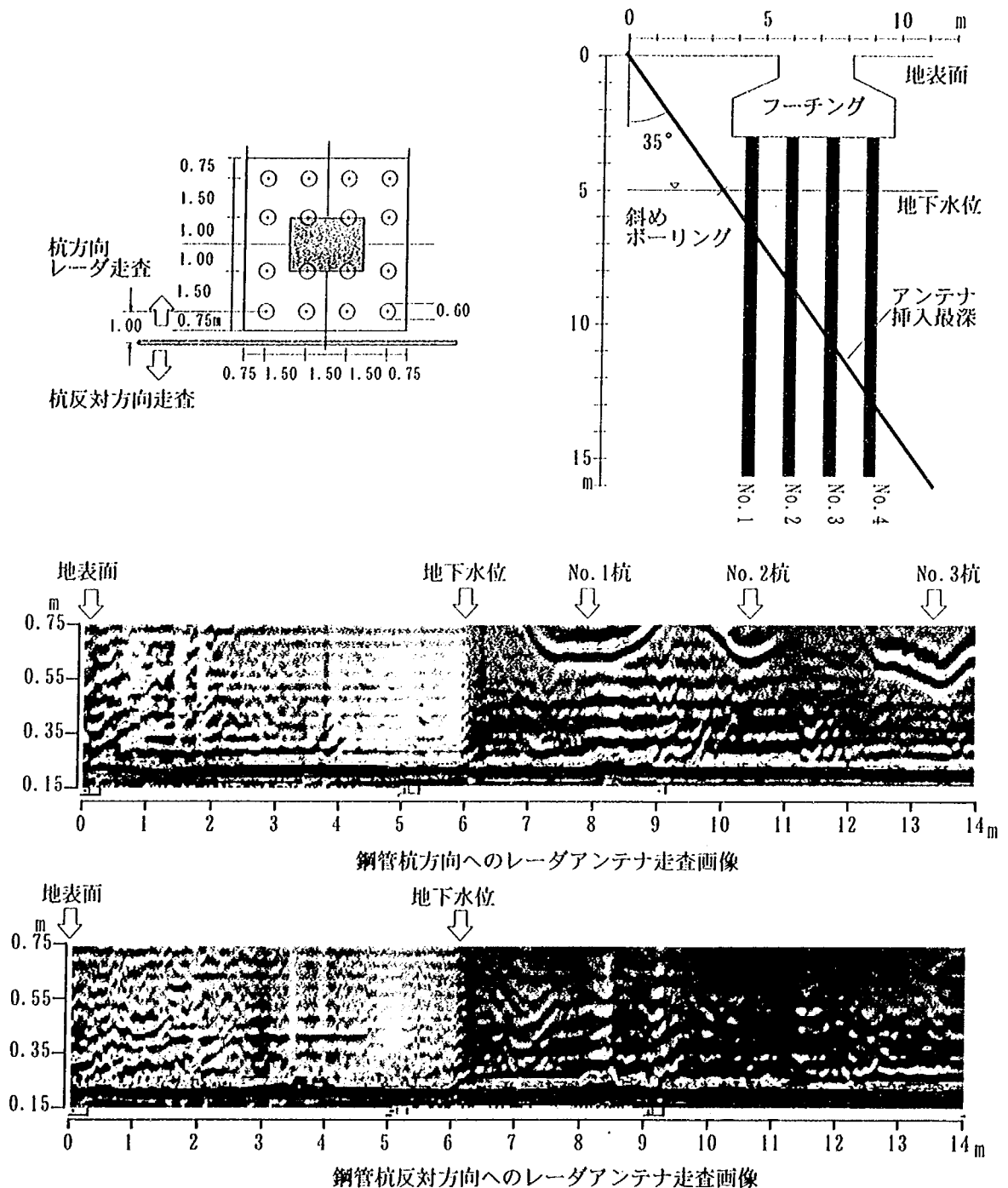


図-4.2.6 鋼管杭基礎のレーダ画像

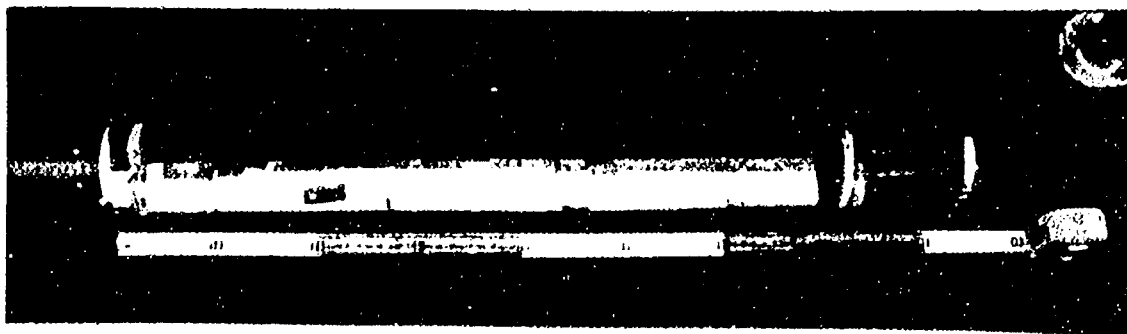


写真-4.2.1 使用したポアホールレーダアンテナ



写真-4.2.2 ポアホールレーダ調査状況

2) パルス波反射式ポアホールレーダ（2）による鋼管杭調査結果

橋梁鋼管杭調査において探査孔B 1 孔とB 7 孔においてポアホールレーダ試験を実施した。

表-4.2.5 橋梁鋼管杭調査の実施内容

橋梁名称	杭緒元	観測孔	形態	杭間距離	孔深度	調査深度	測定間隔
土木研究所 構内橋梁	φ 600mm 鋼管製 L=13.0m	B 1	傾斜孔 35 度	1.0m	L=22.0m	3.0~20.5m	0.25m
		B 7	直孔	1.25m	L=22.0m	2.5~17.1m	0.50m

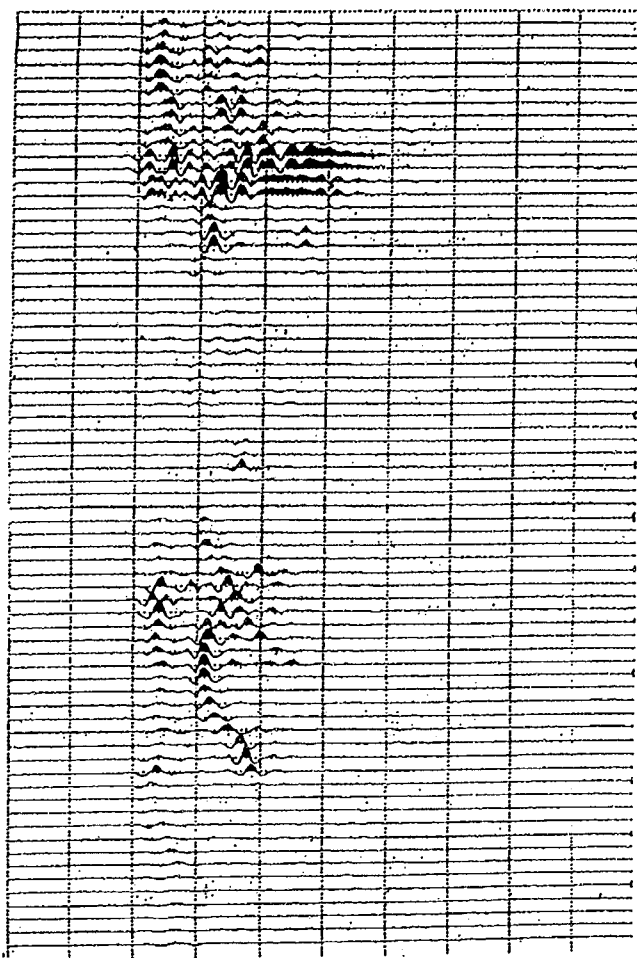
その結果を図-4.2.7, 4.2.8 に示す。

図-4.2.7 の（a）図は斜孔（B 1）は探査傾斜距離 3.0~20.5m、測定間隔 25cmで行った波形を示している。図中の探査傾斜深度 10~17m付近と表層で減衰が多く、同じ感度で示しているので小さく判読不明の記録部分が見られる。（b）図は前図を概ね同じ記録振幅に描く様にそれぞれの記録波形の振幅感度を修正したものである。

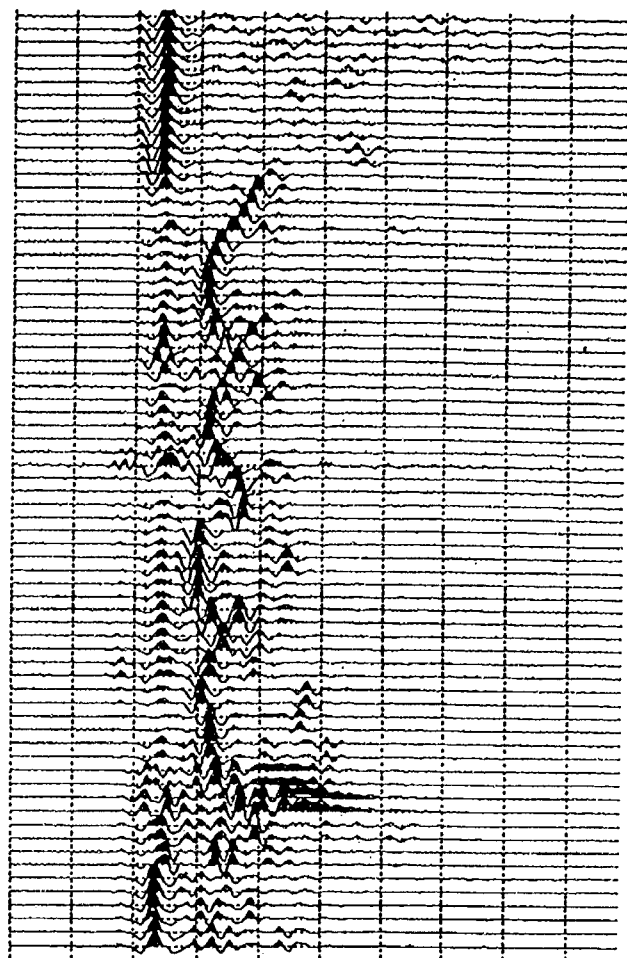
図-4.2.8 は直孔（B 7）で探査深度 2.5~17.1m、測定間隔 50cmで行った波形を示している。図中の探査深度 10~15m付近で減衰が多く、同じ感度で示しているので小さく判読不明の記録部分が見られる。

2例実施された傾斜孔（B 7）と直孔（B 1）の探査結果から杭の存在を確認が出来た。また、深度 10~15m では波形振幅が縮小しており、電磁波が大きく減衰する様な地層が介在しているであろうことが伺える。 図-4.2.9 に実橋梁の成果図をまとめた。

実橋梁杭：B 1 孔（傾斜孔、 $L=2.2\text{m}$ ）（時間軸 20ns/div 、（a）電圧軸固定（b）電圧軸任意）



（a）原波形記録



（b）感度修正後

図-4.2.7 実橋梁B 1 孔記録波形図

实桥梁杭：B 7 孔（直孔、 $L=22\text{m}$ ）——（时间轴 20ns/div 、电压轴任意）

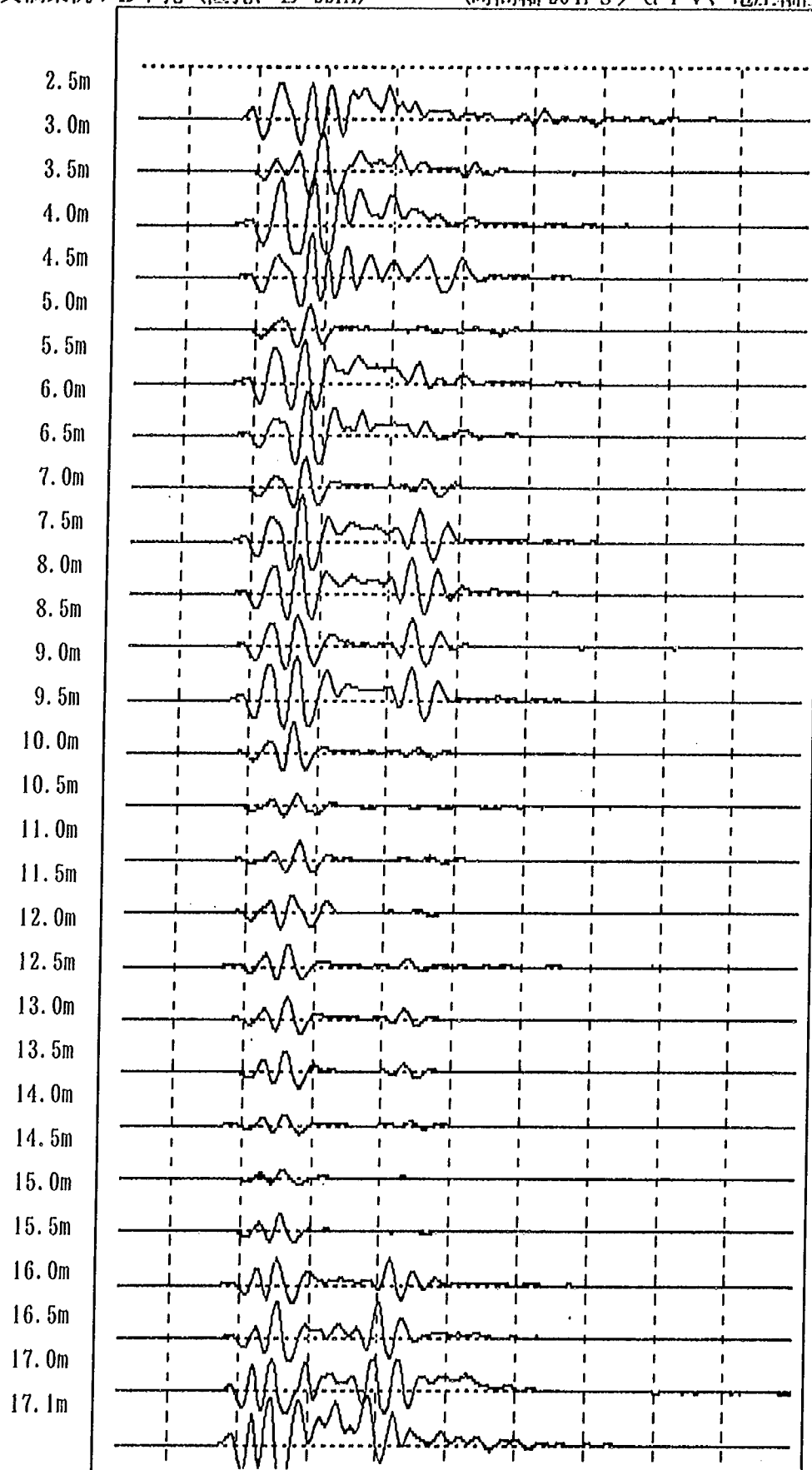
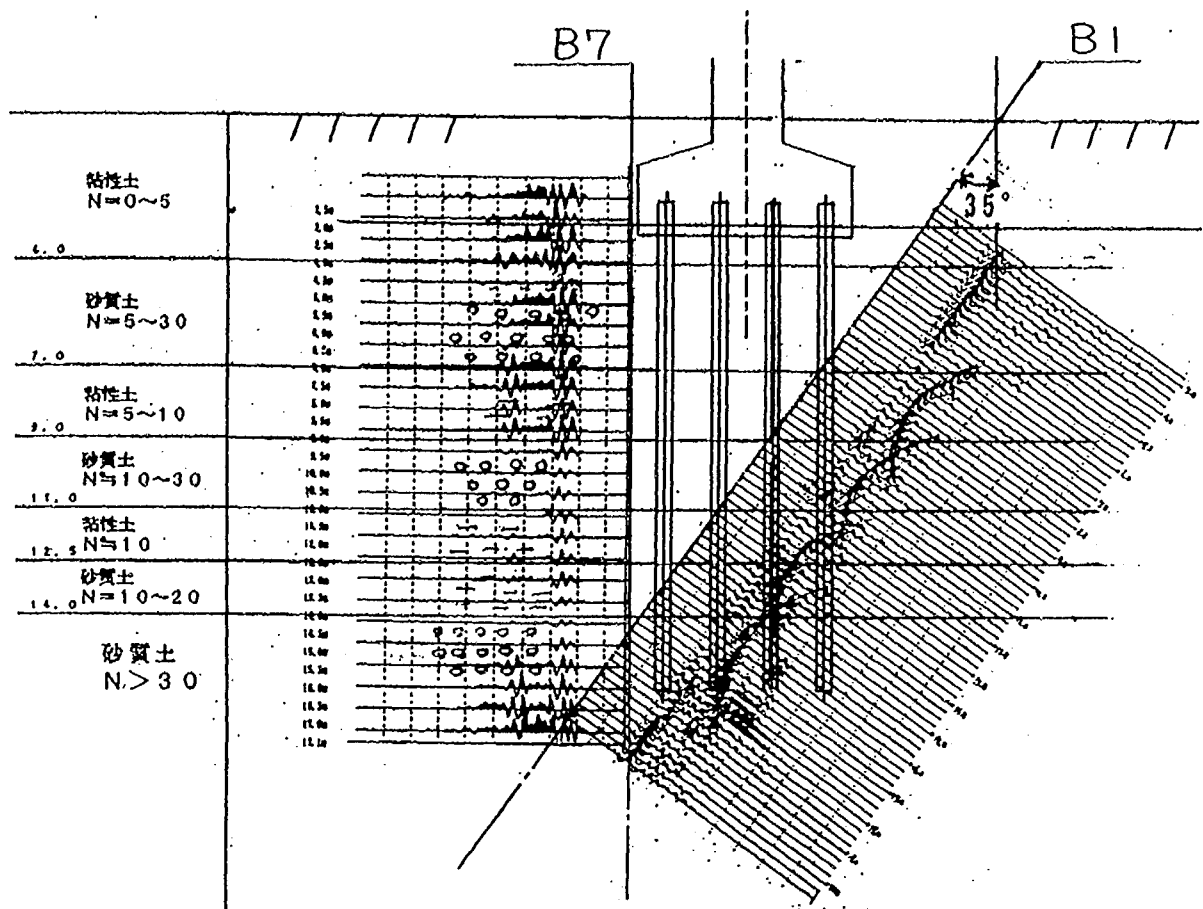


图-4.2.8 实桥梁（B 7 孔）波形图



3) 調査事例(3)

ステップ周波数掃引型ボアホールレーダを用いて、ボーリング孔先端より 10m までの調査を実施した。計測の概要は以下の通りである。

- ・計測日時：平成 10 年 6 月 11 日 13 : 30
- ・走査方法：ボーリング孔上端部より斜距離で 10m 下降した位置を起点とし、引き上げ走査で反射計測を行った
- ・データ取得ピッチ：2 cm

ボアホールレーダの外観を写真 4.2.* に、計測の状況を写真 4.2.* に示す。

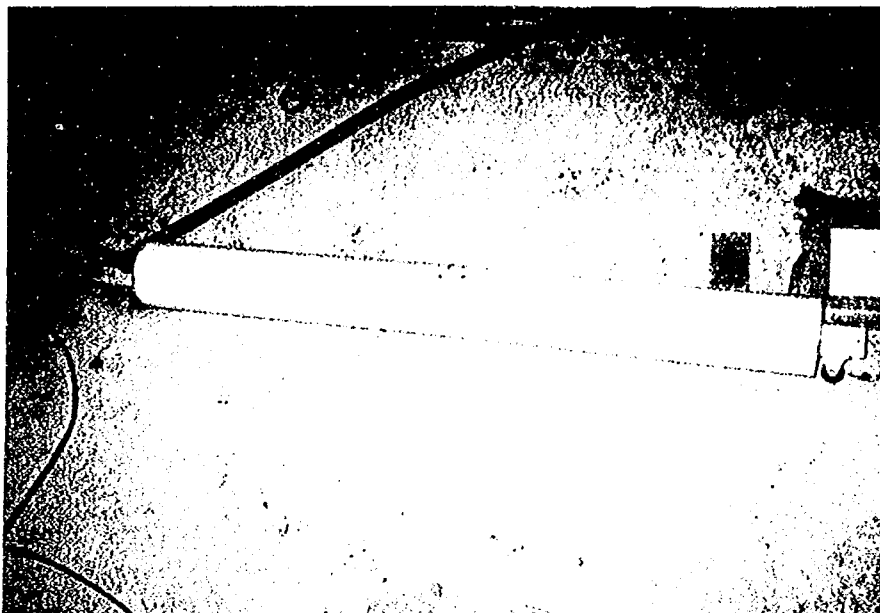
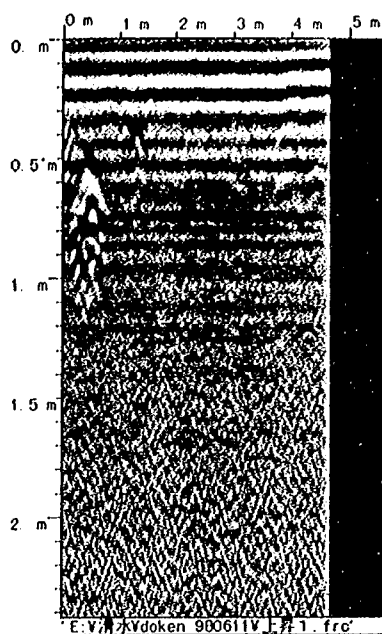


写真 4.2.4 使用したボアホールレーダ

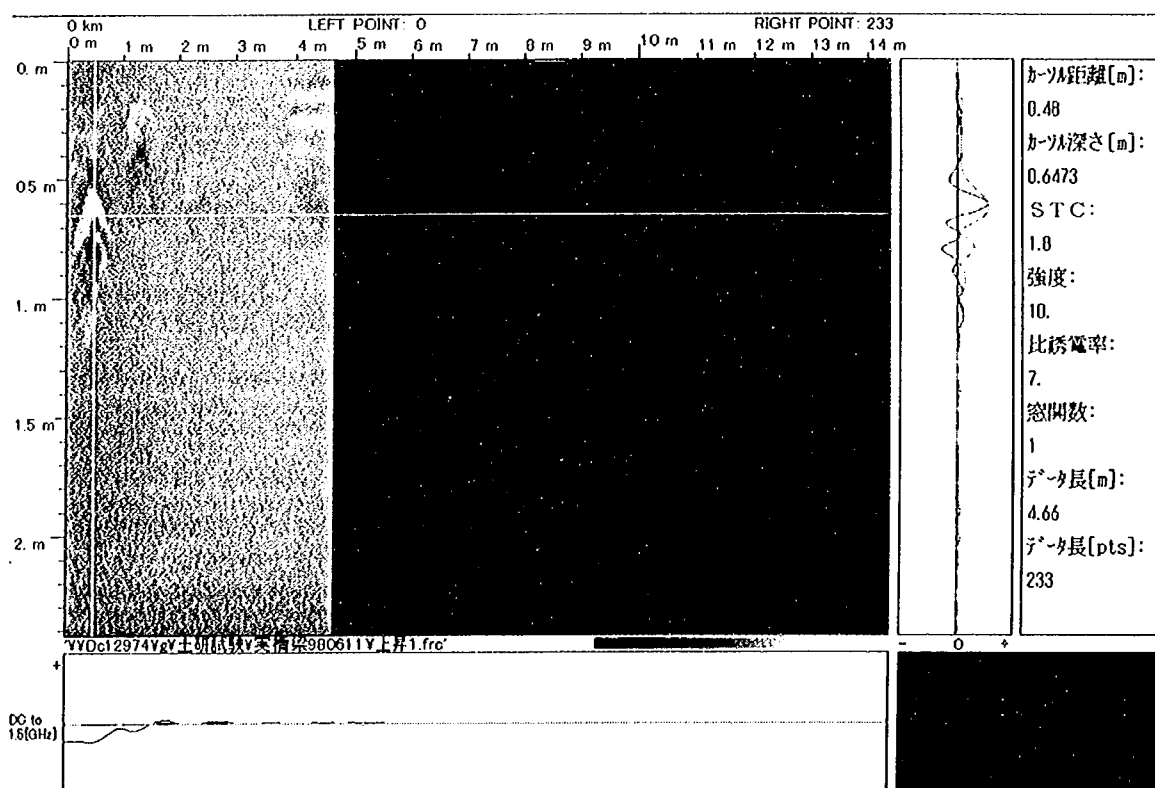


写真 4.2.5 現場調査の状況

調査結果のレーダ画像を図-4.2.10に示す。走査距離 0.5m（ボーリング孔先端から 9.5m）の地点で、ボーリング孔表面から 0.65m離れた位置にある鋼管杭からの反射を鮮明に捉えている。



a) 原画像



b) 差分処理画像

（2 m位置のデータで差分処理、杭からの反射信号の波形も表示）

図-4.2.10 レーダ画像

(2) 土木研究所内 PHC 杭調査

土中における電磁波の反射は金属に比較してコンクリートの方が弱いことが想定されることから、鋼管杭に比べて PHC 杭のレーダ調査はより難しいと考えられた。そこで、本調査では鋼管杭のほかに、土木研究所内の実地盤に埋設された PHC 杭を対象に斜めボーリング孔と垂直ボーリング孔を用いた試験を行った。

なお、本試験は、外径 500mm の既成コンクリート杭 (PHC) を地中にたてこみ、図-4.2.11 に示すような位置に観測孔を設置して実施した。

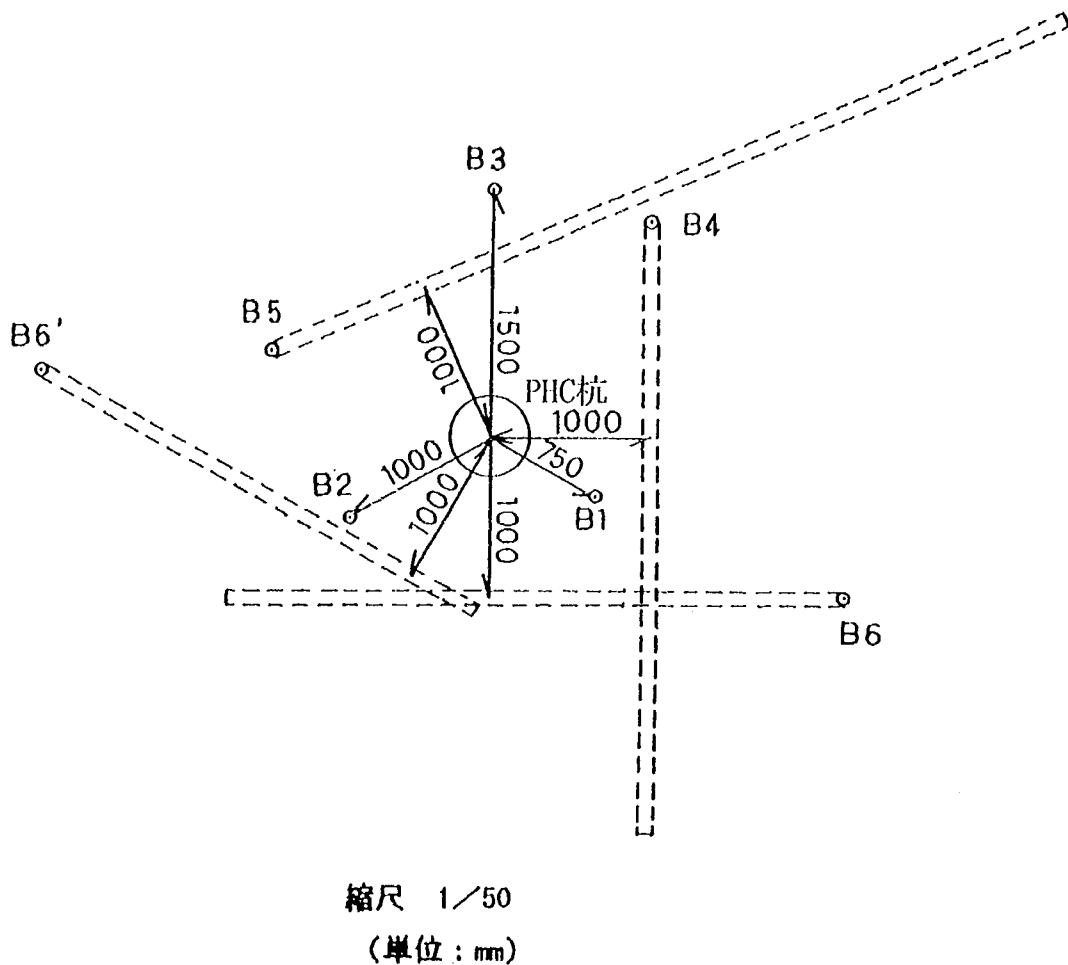


図-4.2.11 PHC 杭と観測孔の位置関係

1) パルス波反射式ボアホールレーダ (1) による PHC 杭調査結果

試験結果の一部を図-4.2.12 に示す。

図-4.2.12 に示すとおり、垂直ボーリングにおける調査結果では、根入れ位置まで明瞭な反射が認められる。また、斜めボーリングにおける調査結果では、杭に対応する位置での反射が認められる。これらのことから、PHC 杭についてもボアホールレーダ法により、杭位置および杭の根入長の調査が可能であることが確認できた。

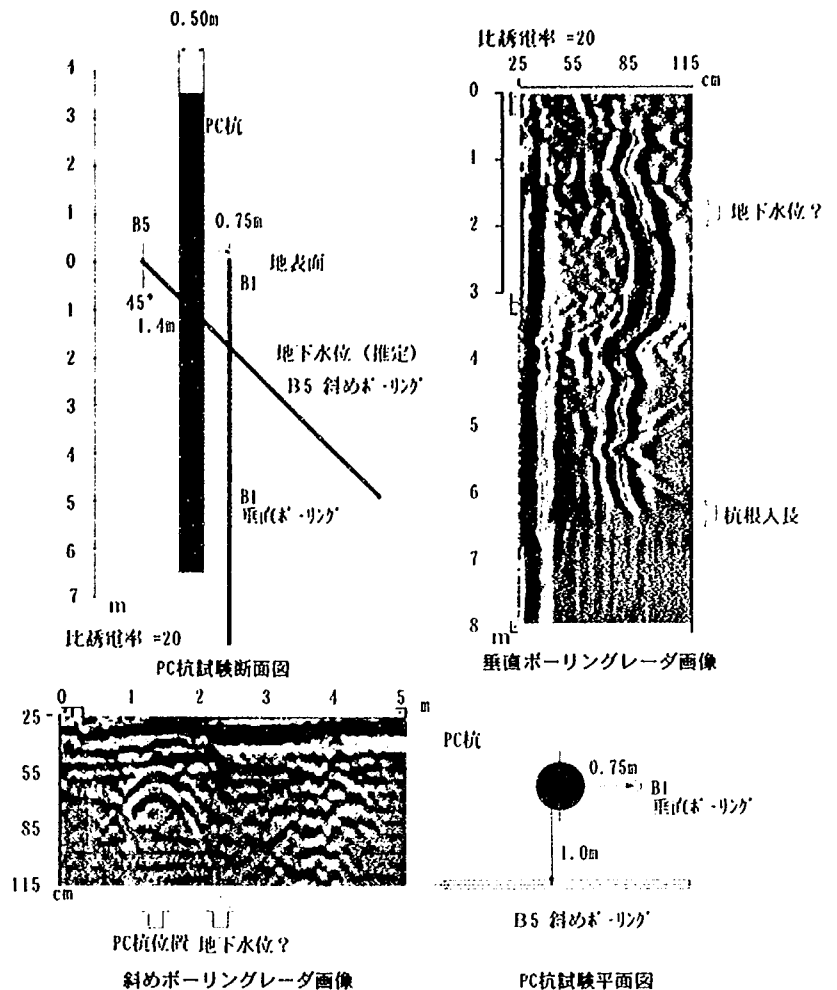


図-4.2.12 レーダ法による PHC 杭調査結果

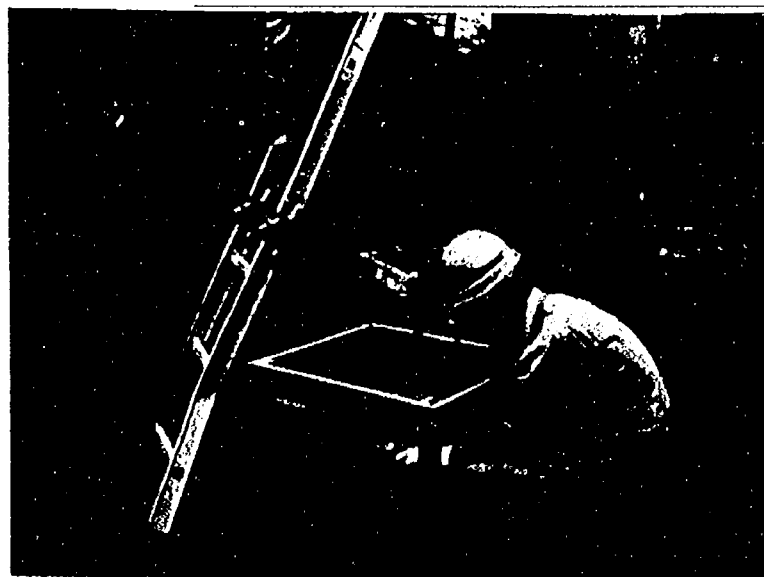


写真-4.2.5 レーダ法による PHC 杭調査状況

2) パルス波反射式ポアホールレーダ (2) による PHC 杭調査結果

パルス波反射式ポアホールレーダ (2) では、表-4.2.6 に示す探査孔について調査を行なった。

表-4.2.6 橋梁鋼管杭調査の実施内容

橋梁名称	杭緒元	観測孔	形態	杭間距離	孔深度	調査深度	測定間隔
PHC 杭	φ500mm コンクリート製 L=4.5m	B 5	傾斜孔 45 度	1.0m	L=7.5m	2.0~6.1m	0.25m
		B 2	直孔	1.0m	L=9.0m	2.0~7.0m	1.00m
		B 3	直孔	1.5m	L=9.0m	2.0~7.0m	1.00m

図-4.2.13 に傾斜 B 5 孔における傾斜深度距離 2.0~6.1m までの探査記録を示す。測定距離 2.5~4.75m までの探査区間は波形記録の振幅が小さかった。図-4.2.14 と図-4.2.15 は直孔探査記録でいずれも PHC 杭からの最短距離は 1.0 と 1.5m である。図-4.2.16 は PHC 杭の成果図である。

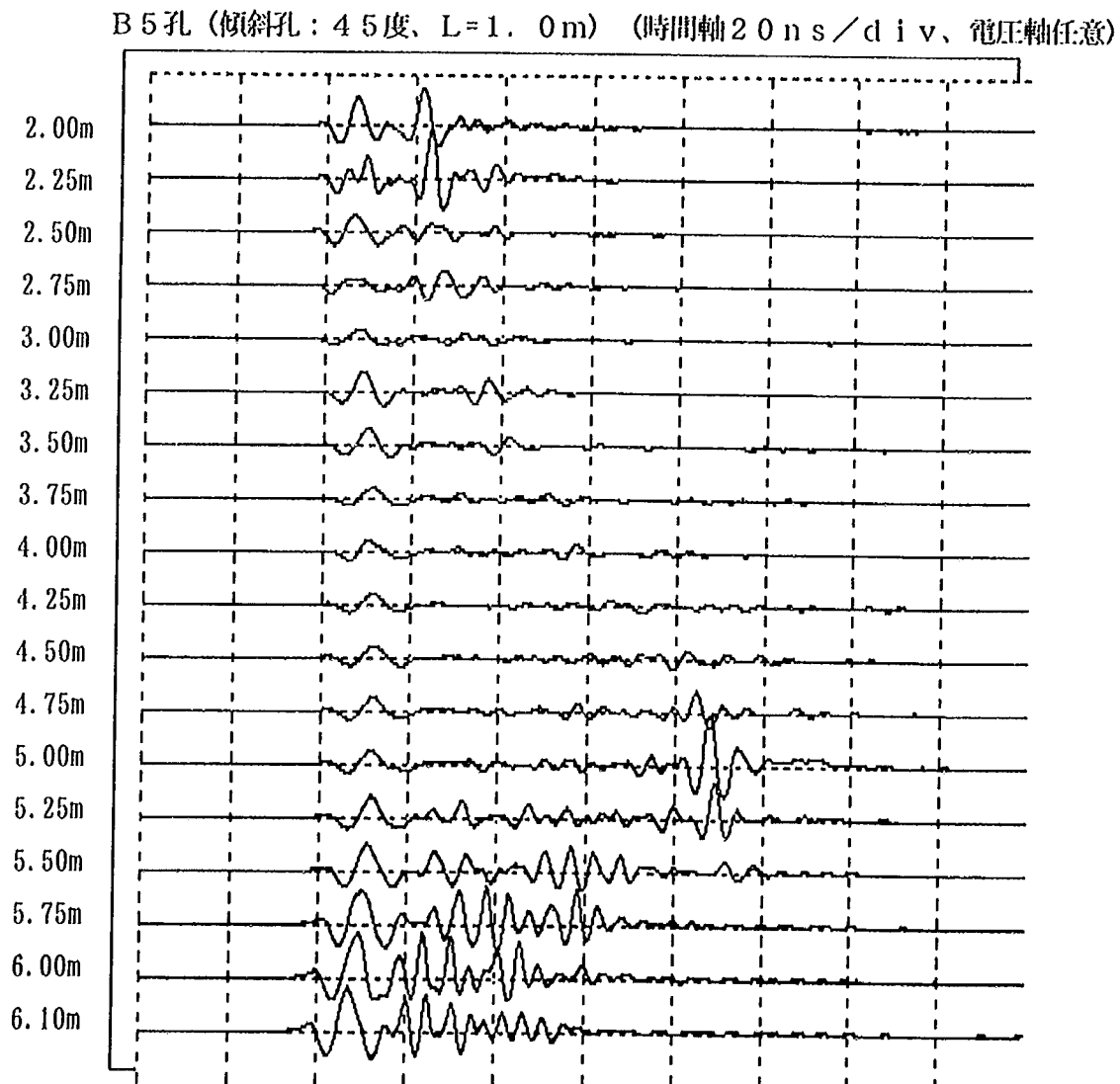


図-4.2.13 PHC-B5 記録波形図

PHC杭 B2孔 (直孔、L=1.0m)

(時間軸20ns/div、電圧軸任意)

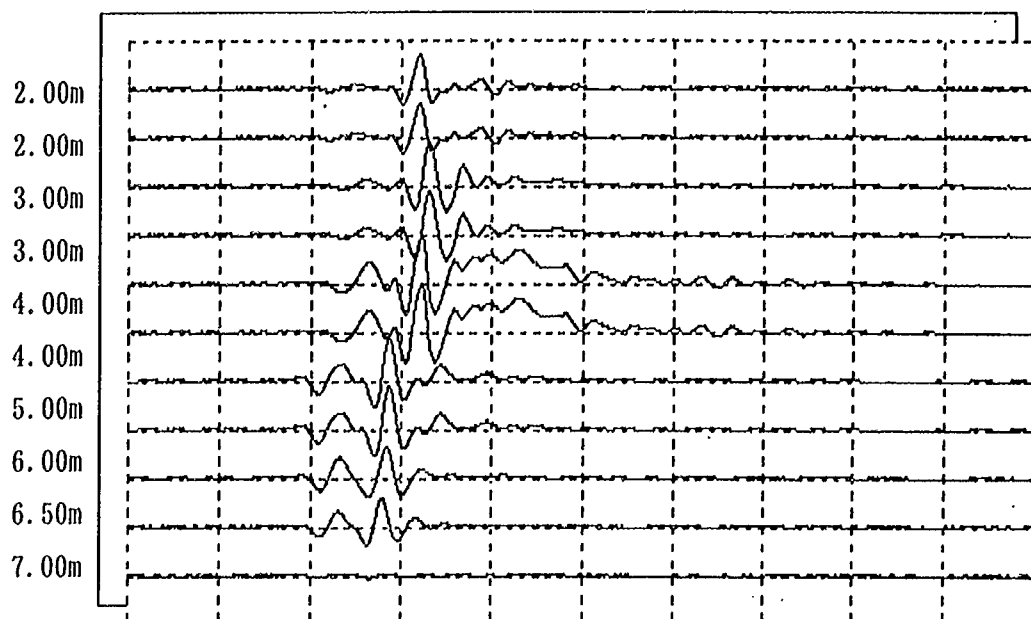


図-4.2.14 PHC-B2 記録波形図

B3 (直孔、L=1.5m)

(時間軸20ns/div、電圧軸任意)



図-4.2.15 PHC-B3 孔記録波形図

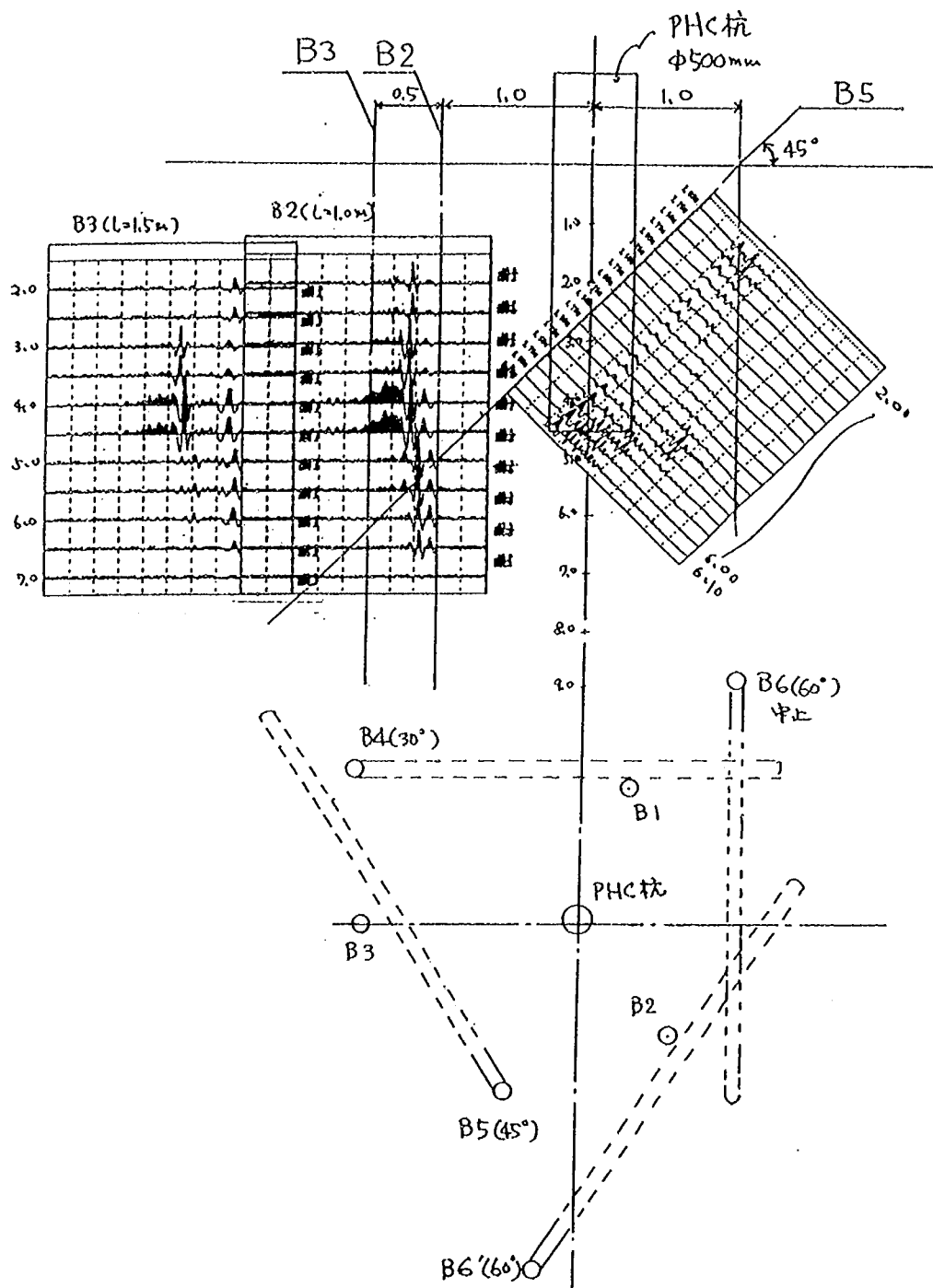


図-4.2.16 PHC 杭における成果図

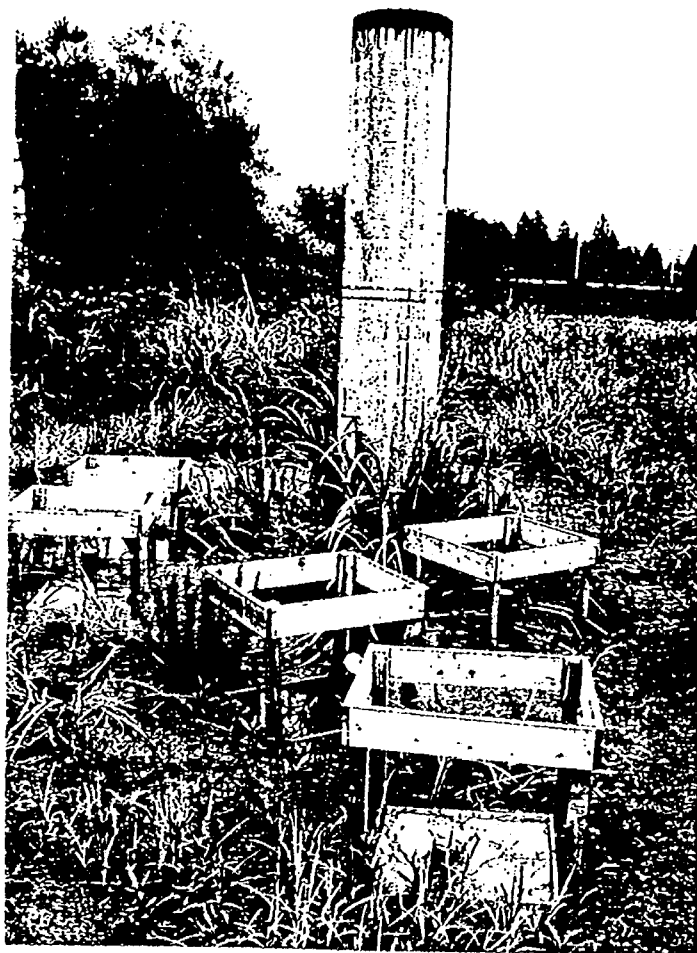
写真-4.2.6 : 土研構内実橋梁



写真-4.2.7 : 観測孔

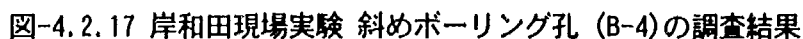


写真-4.2.8 : PHC 杭



1) パルス波反射式ポアホールレーダ(1)による場所打ちコンクリート杭調査結果

しかしながら、全般として、これまでに実施した砂質土・ロームにおけるレーダ計測結果に比べると杭位置の反射は明らかに不明瞭であり、本条件はレーダ計測の条件としては不良であるものと判断される。



杭内ボーリング孔への実験は、9-1 および 9-2 の2孔の表面から約 5m について実施した。ここには、とくに強い反射が認められた 9-2 の調査結果を図-4.2.18 に示す。S 方向垂直走査結果には、フーチング下付近（-2.8m）から検査孔に対して、しだいに近づく形で傾斜した金属特有の強い反射が認められる。また、回転方向では、強い反射の位置がしだいに南にずれることが確認できる。これらの現象は、検査孔と杭内金属埋設物が「ねじれ」の位置関係にあることを意味していると考えられる。

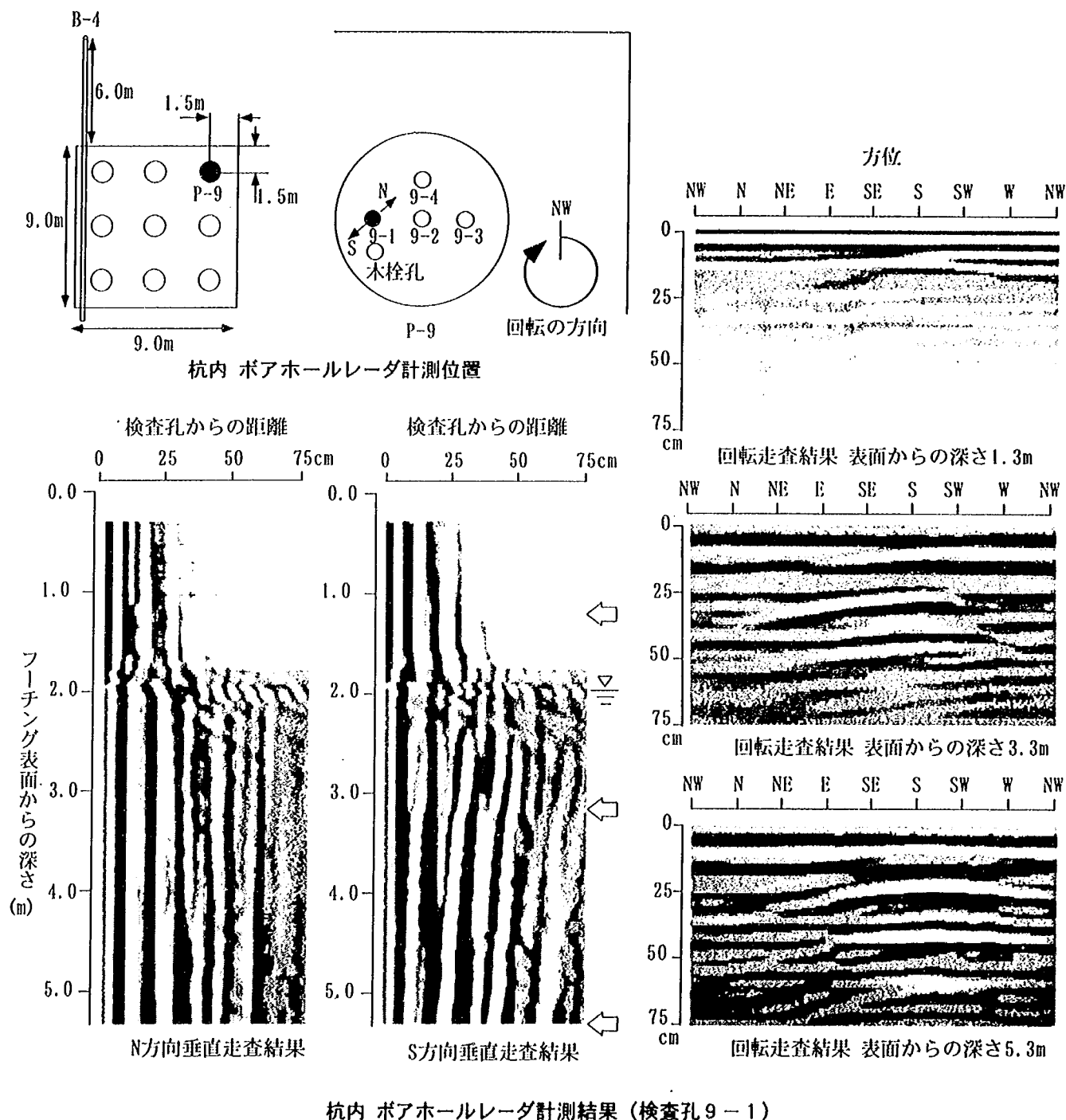


図-4.2.18 岸和田現場実験 杭内ボーリング孔 (P-9-2)の調査結果

2) パルス波反射式ボアホールレーダ (2) による場所打ちコンクリート杭調査結果

橋梁調査は以下の内容で実施した。

表-4.2.7 橋梁調査の実施内容

橋梁名称	杭緒元	観測孔	形態	杭間距離	孔深度	調査深度	測定間隔
阪高湾岸線 橋梁敷地内	場所打ち コンクリート杭 L=28.9m	B 1	直孔	1.80m	L=37.0m	3.0-10.0m	1.00m
		B 2	直孔	2.80m	L=37.0m	最大感度で無信号、中止	
		B 3	直孔	3.80m	L=37.0m	最大感度で無信号、中止	
		B 4	傾斜孔 45 度	1.0m	L=22.5m	8.0-12.0m	0.50m
		P 9-1	直孔	1.0m	L=25.0m	3.0-15.0m	0.50m

探査用ボーリング孔 (φ86mm) の中に塩ビ製パイプ (VP100 or VP65) を入れ孔壁を保護した状態でその孔内にレーダ装置を挿入して実施した。この基礎構造物は場所打ちコンクリートで杭径φ1.2m、杭長 28.9 m の 3 行×3 列の 9 本群杭で構成され、この基礎構造物に対してボアホールレーダを用いて探査を行ったもので、この試験場所は海岸線よりおよそ約 50m ほど陸地よりの海岸人工埋立地盤中となり、ここの表層部分は海水を含んでいる可能性があり、その塩分が多いと電磁波レーダの探査能力に低下現象 (減衰が多い) が起こり、一般的に探査しにくい地盤となっている。

地表付近深度では外来ノイズ成分が非常に多く見られたため、8 回×256 回数のスタッキング処理によりデータを収録した。外来ノイズの原因として上げられるのは近傍の船舶関係や高速道路上の自動車などの無線機器などからの飛来するノイズ (電磁波) によるものと思われ、孔内の深度 4～5 m に降下したあたりではかなり減少していた。

① B 4 傾斜孔試験による成果

試験は地表面より 50 cm 間隔で斜めに挿入した距離で 21 m まで行った。結果を図-4.2.19 に示す。図中から表層 GL～-16.5 m までは無信号 (全減衰か全吸収) 状態で反射信号が得られず、また 17～21 m までは少しの反射信号が得られた。成果図はいずれも横軸は時間軸で全て同じ縮尺である。しかしスタートの原点調整は今現在の検討内容には余り重要でないのでここでは無修正で利用している。また図中には参考として柱状図を併記した。それによると約 GL-13 m までが盛土材でそれより深部が旧海底面地盤である。正確を記すには標高等を合わす必要がある。

斜めボーリング探査の結果、杭の番号としては P 1 (一番奥) の存在が確認出来たが P 2, P 3 杭の存在は確認できなかった。また杭位置については孔底 (GL-23.2 m) に到着してしまい、杭状や円柱物などに得る放物線形状の波形が得られなかった。

② B 1 直孔試験による成果

杭番号 P 9 に対して B 1, B 2, B 3 と水平距離を離れた直ボーリング孔に深度 1 m 毎に孔内レーダ装置

を挿入して試験を行った。成果を図-4.2.20 に示す。ただし、B 1（距離 1.8m）以遠のB 2, B 3 地点のデータは得られなかったので添付していない。

得られた GL-4mまでの波形と GL-12m以深の波形はその間（GL-5～11m）の波形より小さく、その間の地盤物性が異なるか、または杭自体の均一性が異なるなどが考えられる。また 4 m程度まで得られた波形は基礎フーチング厚さ 2.5mの影響があると考えられる。

③No. 9 杭ボーリング孔試験による成果（参考試験）

杭No. 9に対してボーリング削孔した孔内（P 9-1、保護パイプ無し）に深度 1 m毎に孔内レーダ装置を挿入して参考的に試験を行った。ここでは杭の損傷箇所や程度などが反映された成果を期待して参考に行った。成果を図-4.2.21 に示す。得られた GL-4.5mまでの波形と GL-8.5m以深の波形はその間（5～8m）の波形より小さく、その間の地盤物性を反映して異なるのか、または杭自体の等均一が異なるなどが考えられる。また GL-4 m程度まで得られた波形は基礎フーチング厚さ 2.5mの影響があると考えられる。

ただし、得られたレーダ波形パワーは近傍の杭体内部の鉄筋や杭外径（ $\phi 1.2\text{m}$ ）からの反射度合いで大きな反射信号が得られていて入力オーバー気味であった。測定系の感度調整が自由に加減出来ずアンプが飽和状態になっていたが、全測定深度に対して相対的に比較する場合に不都合はない。

以下に本調査で確認された事項を整理する。

- ①B 4 傾斜孔探査の結果、杭の番号としてはP 1（一番奥）の存在が確認出来たがP 2, P 3 杭の存在は確認できなかった。浅い深度におけるデータが無信号で欠落して見えるのは塩分成分の影響と考えられ、地盤伝搬時の減衰などにより受信出来なかったもので、他との検証が必要である。
- ②直孔探査の結果、探査孔より杭までの水平距離が 1.8m（B 1）までは探査可能で、2.8m以遠（B 2, B 3）は不能であった GL-4mまでの波形と GL-12m以深の波形はその間（5～11m）の波形より小さい事から、その間の地盤物性が異なるか、または杭自体の均一性が異なる等の確認ができた。
- ③参考に行ったP 9-1 杭体内試験の結果、杭内に挿入した状態で GL-4.5mまでの波形と GL-8.5m以深の波形はその間（5～8m）の波形より小さい事から、その間の地盤物性が異なるか、または杭自体の均一性が異なる等の確認ができた。
- ④No. 9 杭は GL-5～8m、または 11mまでの間に何らかの異常が見られる。ただし、これらの現象は例えば杭体に設置したボーリング孔と探査対象の場所打ちコンクリート杭とが平行である保証は無いことや、その杭が予め損傷を受けていて経年変化等によるその部分に何らかの異物（例えば海水等）が介在している可能性や想定もできるので、今後は他の調査との検証等からと総合判断する必要がある。

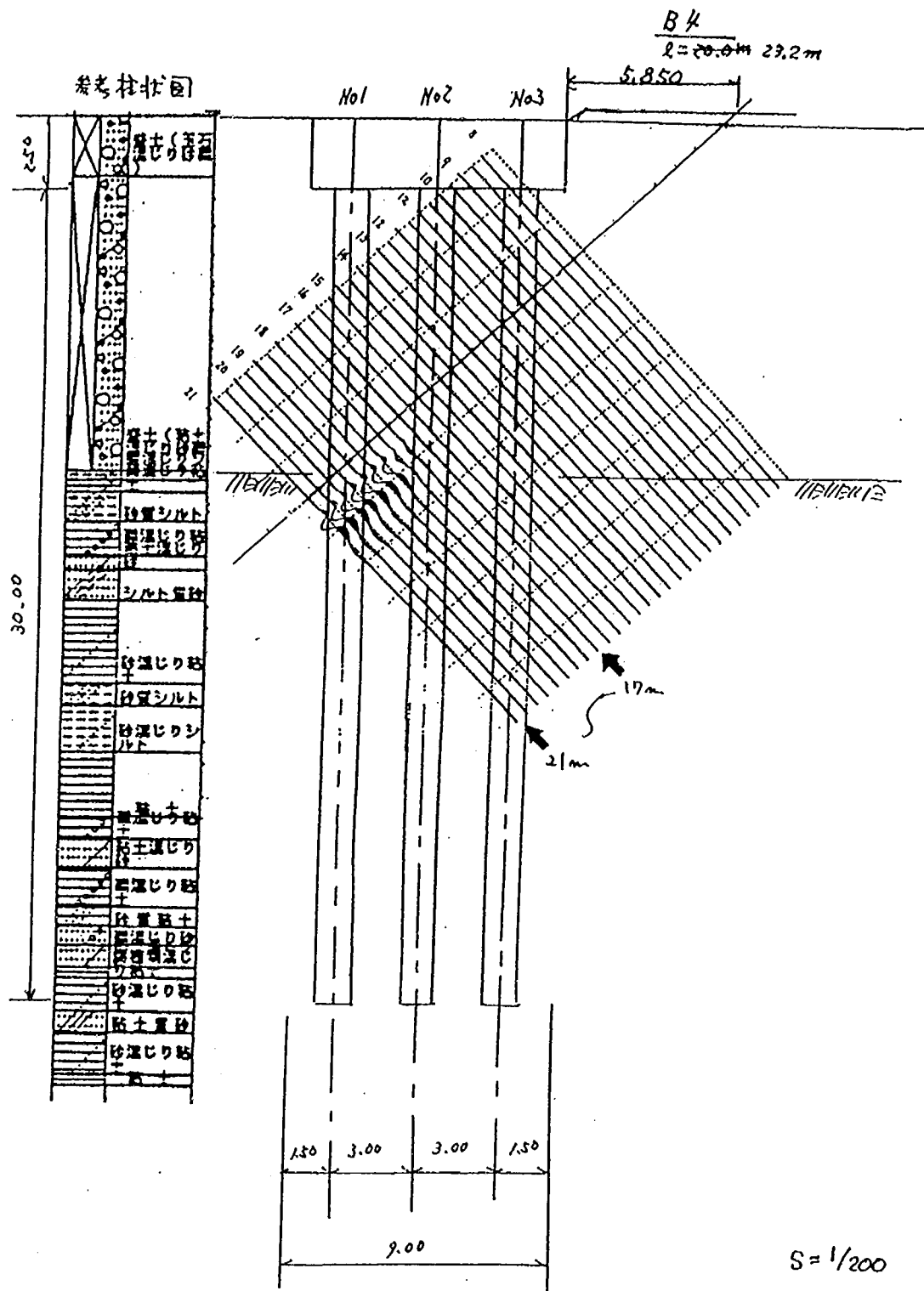
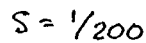


図-4.2.19

B4斜孔試験における成果図



— 50 —

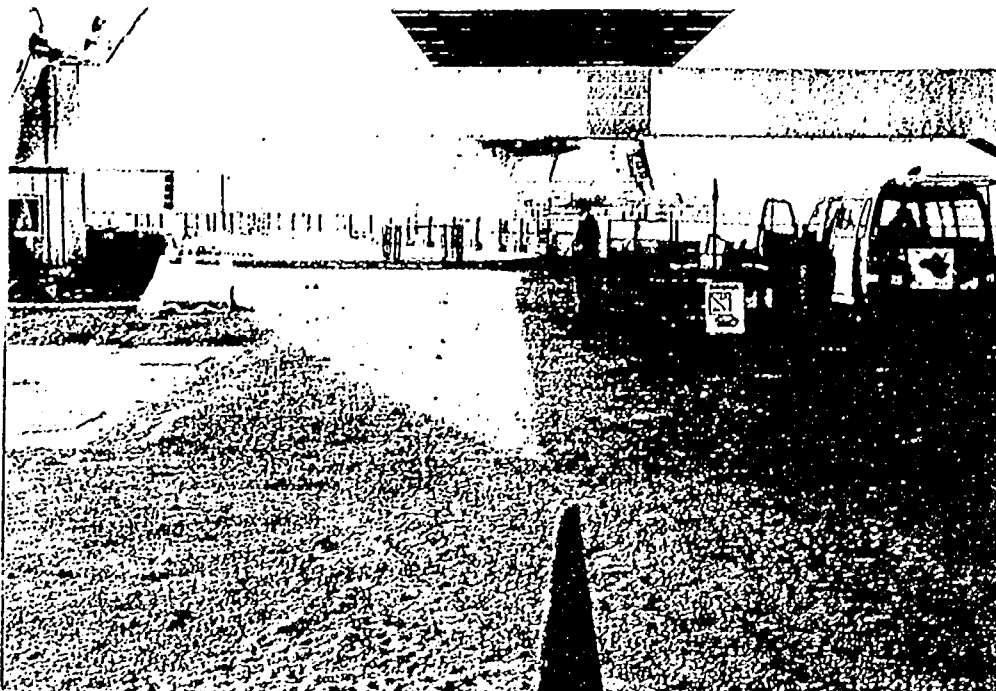


写真-4.2.9 :
現場状況

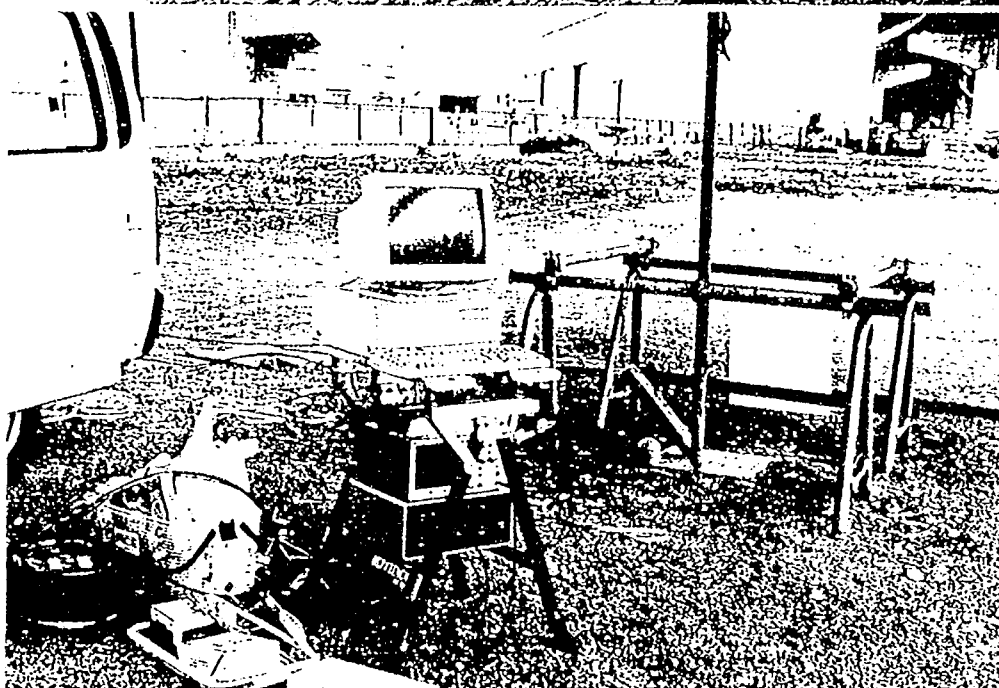


写真-4.2.10
レーダ 測定中

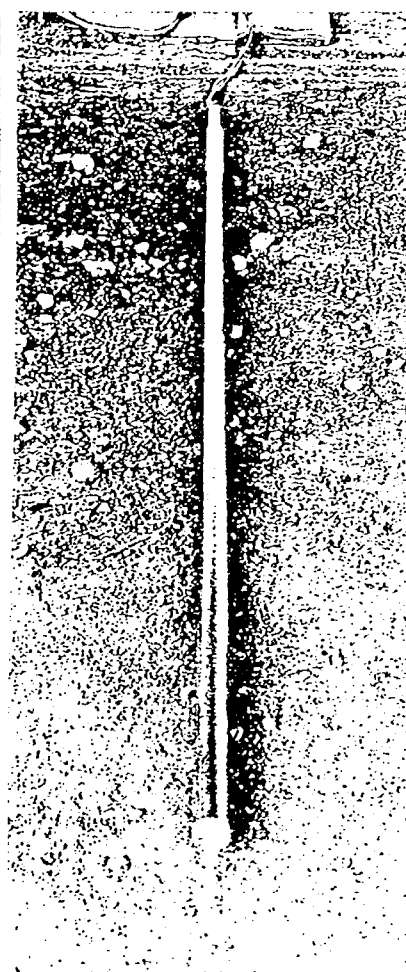
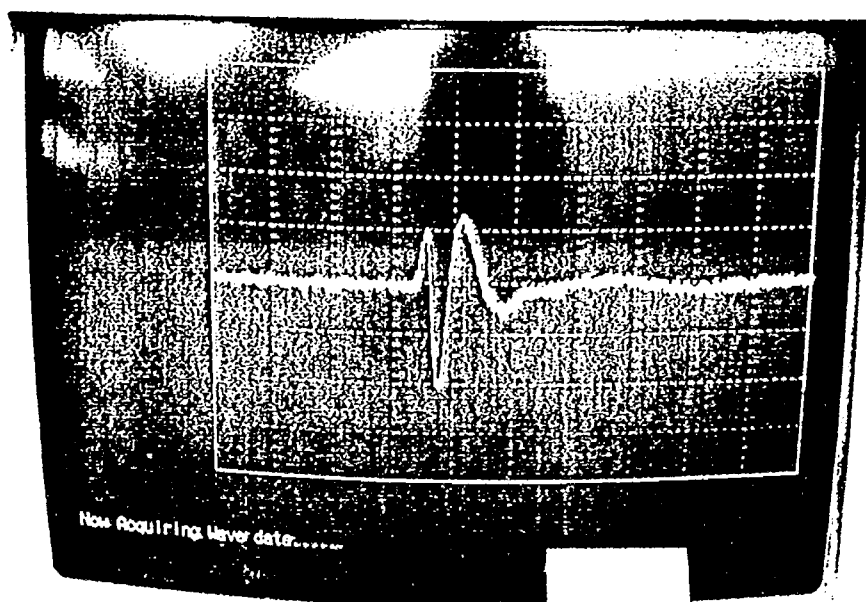


写真-4.2.11 : 細型ゾンデ
写真-4.2.12 : 波形測定例



Ultra line

4.2.3 適用条件

① 適用条件

レーダ法は調査結果を地中の擬似断面として表示することが可能である。このことから、レーダ法は杭長のみならず杭の形式および杭の配置等を総合的に調査することができるという点で他の調査法にはない特長を有している。しかし、一方で、レーダ法は、調査可能深度が地盤条件に依存するという欠点もある。

平成 9 年度の共通供試体試験により、土質条件が砂質土であれば、レーダ法によりフーチング下の杭配置調査が可能であることが確認できている。また、平成 10 年度の実橋における実験結果では、杭から 1m 程度の離れ位置にボーリング孔を設置できれば、地盤条件が関東ロームなどの粘性土でも調査が可能であることが確認された。

しかしながら、一般的には、塩分を含んだ沖積地盤などでは適用が難しいと考えられる。以下にとくにレーダ調査が難しいと考えられる土質の条件及び地中の状態を列記する。

- ・土質が粘性土の場合

経験的に、真砂土のような砂質土では電波の減衰が小さいが、粘性土の場合では電波の減衰が大きく探査が難しくなる。

- ・土の含水率が大きい場合

土の含水率が大きいと電気伝導性が高まるため電波の減衰が大きくなり、深い深度の探査が難しくなる。

- ・塩分等電気伝導性の高くなる成分が地中の水分に含まれる場合

上記と同様の理由で、深い深度の探査が難しくなる。

- ・地中の不均一性が高い場合

大きな石等地中に電波の反射物体が多く存在する場合、杭からの反射と混同し杭特定が難しくなる。

② 計測作業に要する労力

- ・作業員人数

3 人程度必要。

- ・探査判断者

レーダ法による探査経験が必要。

4.2.4 まとめと今後の課題

(1) まとめ

本共同研究において、橋梁基礎構造の調査方法としてレーダ法の適用可能性を検討するため以下の実験を実施した。

①土木研究所共通供試体（砂質土・鋼管杭）レーダ計測

②土木研究所内橋梁基礎（関東ローム・鋼管杭）レーダ計測

③岸和田現場実験供試体（塩分を含む粘土混じり砂質土・場所打ちコンクリート杭）レーダ計測

これらの実験の結果、以下のことが明らかになった。

- ① 地盤条件が砂質土や関東ロームであれば、斜めボーリング孔を設置することにより、杭の位置（杭の配置）については明瞭に把握することができる。また、同条件であれば、杭の根入れ深さについても調査可能と判断される。
- ② 地盤条件が砂質土や関東ロームであっても、現在の計測レーダシステムでは杭径までを明らかにすることはできない。
- ③ 現場が海岸線に近く、地盤が塩分を含んだ条件では杭のレーダ反射が不明瞭になり、調査が困難になる。しかしながら、ボーリング孔が杭に近接して設置できるなど、条件が良ければ調査はある程度可能である。

4.3 アコースティック・エミッション

4.3.1 研究概要

(1) はじめに

フーチングに接合された場所打ちコンクリート杭の損傷調査に AE（アコースティック・エミッション）を適用した。計測対象杭は既に水平載荷試験が実施され、杭頭部を中心に損傷が認められていた。AE 計測は、杭自身に削孔を施し、AE センサを設置する「杭内 AE 計測」と、対象杭近傍の地盤を削孔、塩化ビニル管を埋設し AE センサを設置する「杭外 AE 計測」により行った。杭損傷部からの AE 放射を励起させる目的で、杭上部のフーチングへ油圧ショベルにより小規模の静的荷重や動的荷重を与えた。

(2) 試験対象杭および AE 計測孔

フーチング（9.0×9.0×2.3m）に接合された 9 本の場所打ちコンクリート杭（ ϕ : 1,200 mm、 l : 28,900mm）のうち、図-4.3.1 に示すようその隅角に位置する No.9 杭について試験を行った。ここで、杭外の塩化ビニル管中心から試験杭中心までの距離は 1.9m（側壁間 1.25m）である。杭内 AE 計測および、杭外 AE 計測孔一覧を表-4.3.1 に示す。杭内 AE 計測は特別に設計した取付け治具により、AE センサを杭中の削孔壁に圧着して計測し、杭外 AE 計測は塩化ビニル管に専用の治具によりセンサを所定の位置に固定、空隙を水充填することにより行った。

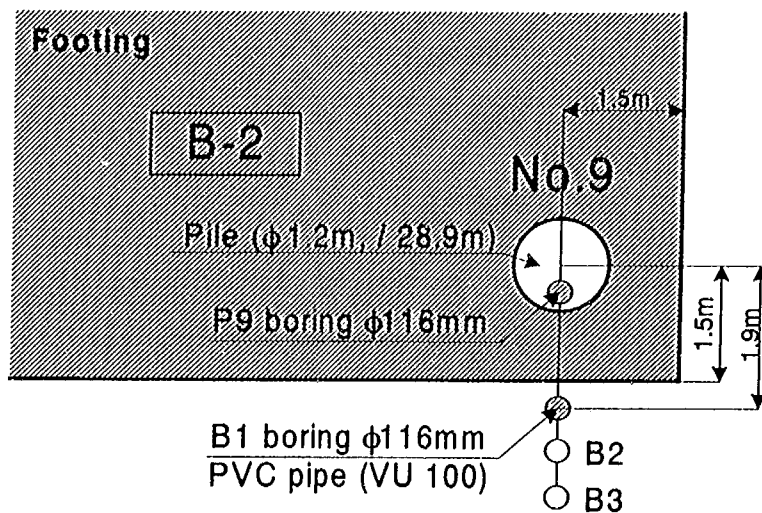


図-4.3.1 試験対象杭と AE 計測孔の平面図

表-4.3.1 試験対象杭と AE 計測孔一覧

試験対象杭	杭内 AE 計測	杭外 AE 計測(塩ビ管利用)
No.9 杭(フーチング有り)	No.9 に削孔 (ϕ 116mm)	B1 を利用 (VU100)

(3) 試験深度と AE センサ設置方法

計測計画当初、杭設置地盤の埋立て層と自然堆積層との地層境界がフーチング表面から約 12m であったことなどから、対象杭の AE 試験深度を境界を完全に含むように 16.5m までとされていた。しかし、杭削孔が、予期せぬ鉄筋の出現から、その境界以深不可能であったことから、削孔完了深度 12.3m までを AE 計測深度とした。ただし、スライム等の沈殿物から実務上はそれまでの深度は計測できず、「11.5m」とした。

杭内の AE 計測は、図-4.3.2 右図に示すように 1 つの計測範囲が 2m となるよう 5 個の AE センサを 50cm 間隔で取付けたセンサ群を同左図に示すように 2m を 1 つの計測ゾーンとして、50cm の重複を設けながら第 7 ゾーン最深の 11m 深さまで段階的に設置、計測を行い、最終の第 8 ゾーンのみ第 7 ゾーンとの重複を 150cm として 11.5m 深さまでの計測が可能なものとした。所定深度へのセンサ群の移動は、各 AE センサ近傍にラバーボールを設置し、空気圧力の封入によりボールを膨張させバネによるセンサ圧着を低減させることで可能とした。ここで、各 AE センサの孔壁への圧着は、バネの一定圧力により行っている。(写真-4.3.1 参照)

杭外の AE 計測は、図-4.3.2 右図に示すように杭内 AE 計測と同様の配置によりグラスファイバー棒に取り付けた AE センサ群を所定の深度に吊下げるように設置、間隙を水により充填し行った。この方法は、一般に行われる導波棒による AE 計測の約 2 倍の AE 検出感度を有し、杭損傷部より放射され、AE 計測孔まで到達した AE 波を塩化ビニル管により水に効率的に透過させ、水を最終の伝播媒体として AE センサにより検出する方法である。(写真-4.3.2 参照)

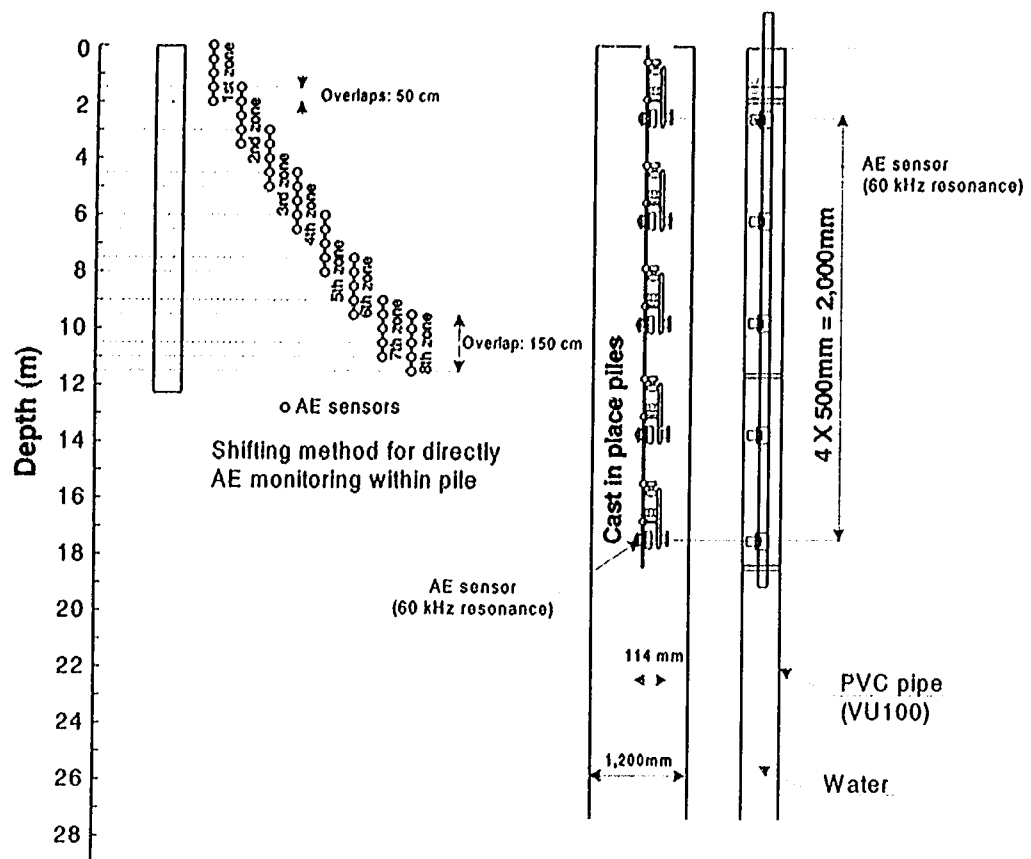


図-4.3.2 AE 計測範囲と AE センサ配置図

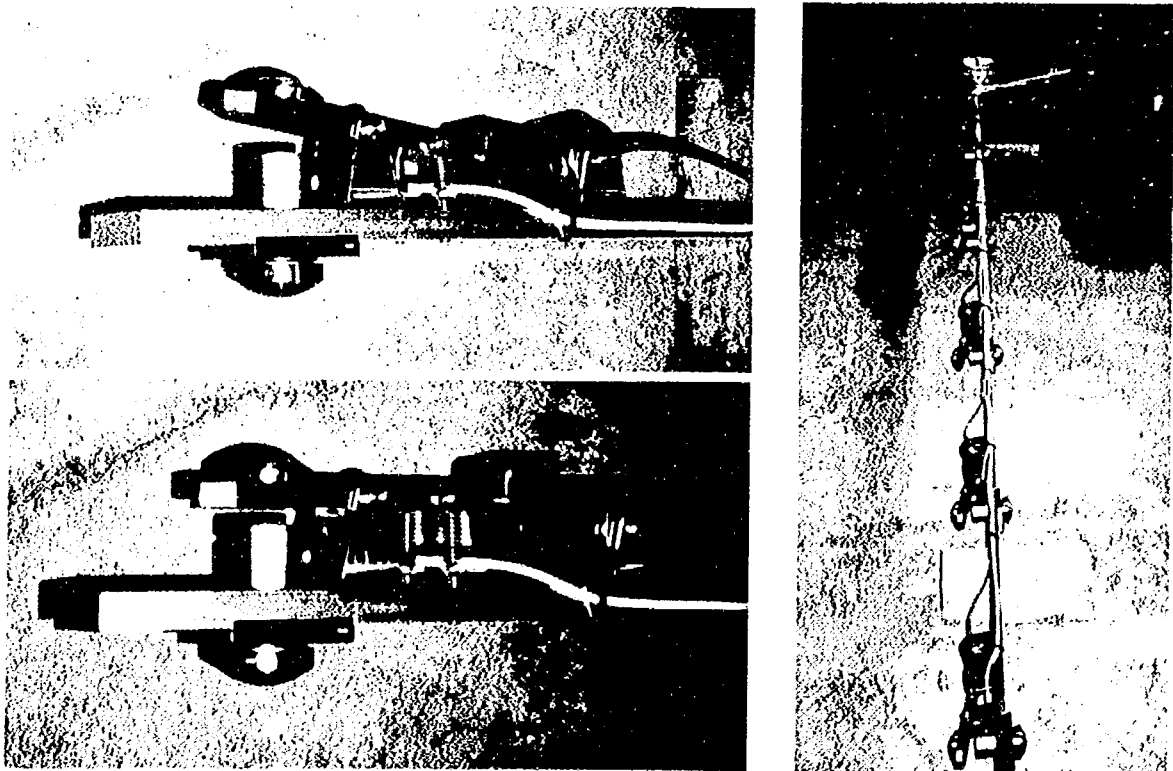


写真-4.3.1 杭内 AE センサ取付け治具および装置（左上ラバーエア解放、左下ラバーエア封入）



写真-4.3.2 杭外 AE センサ設置状況

(4) AE センサーおよび AE 計測装置

AE センサは杭内、杭外ともに、40 dB の利得を有するプリアンプを内蔵した防水型 AE センサ（PAC 社製）を用いた。AE センサにより検出された 45dB 以上の AE 信号は、AEDSP カード（Mistras、PAC 社製）を介し、その AE パラメータおよび AE 波形を記録した。なお、AE 波形は、4kwords のデータ長、休止時間を 10ms として収録した。

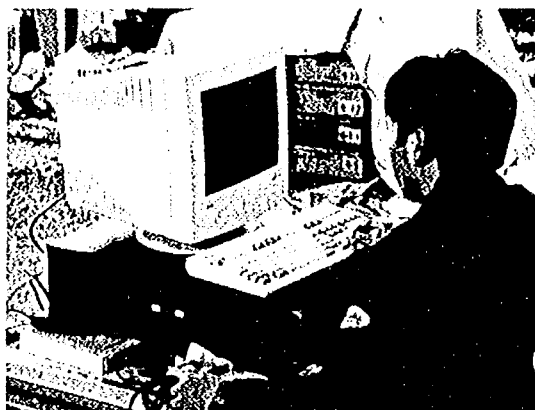


写真-4.3.3 AE 計測概要（左：順に発電機・ノイズフィルタ・安定化電源、右：AE 計測装置）

(5) 油圧ショベルによる荷重変動

杭損傷部からの AE 放射を励起させる目的で、杭と接合された上部のフーチングへ油圧ショベル（バケット容量 0.59m³、重量 11.8t）により小規模の静的荷重や動的荷重を与えた。静的な荷重は、例えば写真-4.3.3 上側のようにフーチング側面にショベルをあて重機の重量の一部が作用するように载荷した。動的な荷重は、写真-4.3.3 下側のように重機をフーチング上に載せ、アームの伸縮、上げ下げなどにより与えた。一連の荷重変動は、基本的に図-4.3.3 にしたがった。

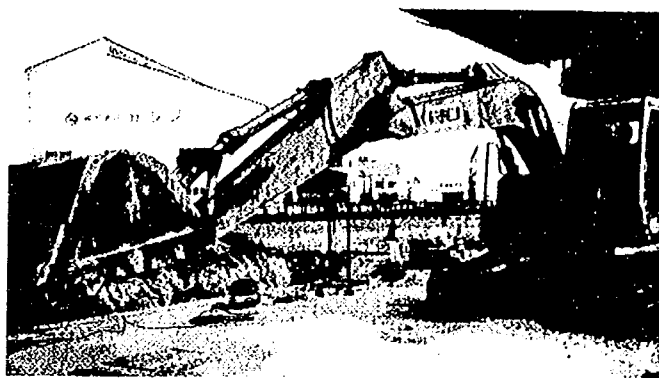
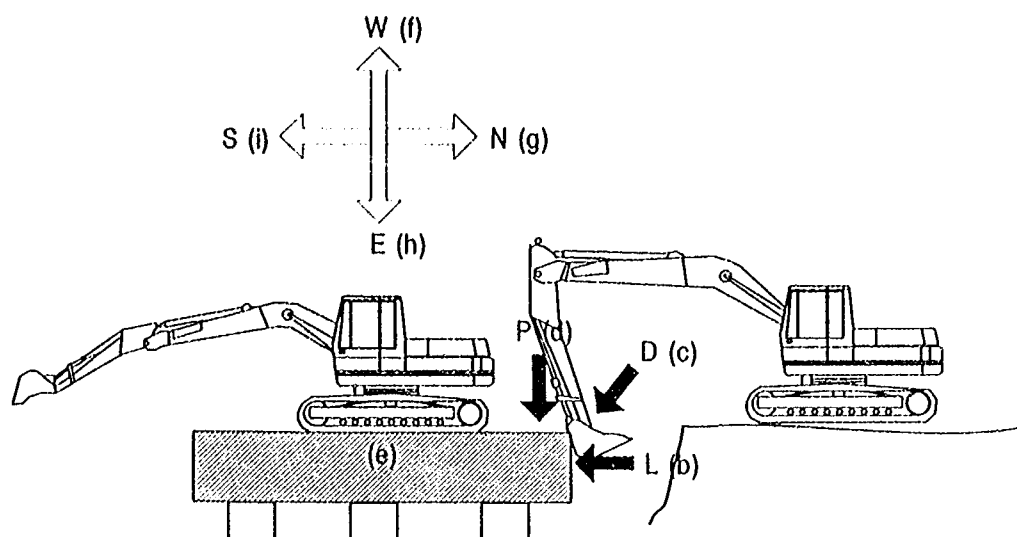


写真-4.3.3 油圧ショベルによる杭への荷重変動



- (a) BGN monitoring
- (b) Lateral load
- (c) Diagonal load
- (d) Perpendicular load
- (e) Placing machinery above footing
- (f) Expanding / up-and-down movements of an arm to the west
- (g) Expanding / up-and-down movements of an arm to the north
- (h) Expanding / up-and-down movements of an arm to the east
- (i) Expanding / up-and-down movements of an arm to the south
- (j) Leaving from the footing

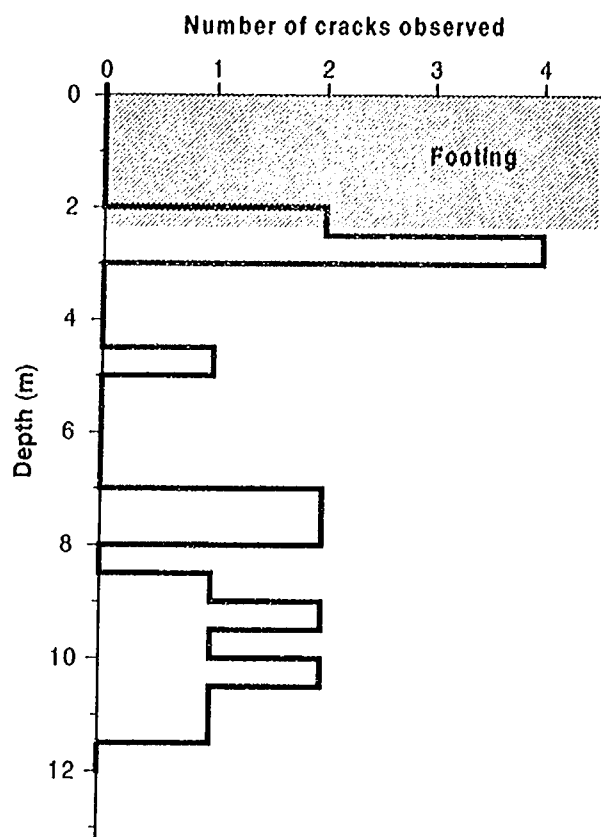
図-4.3.3 油圧ショベルによる外力変動の流れ

4.3.2 検討結果

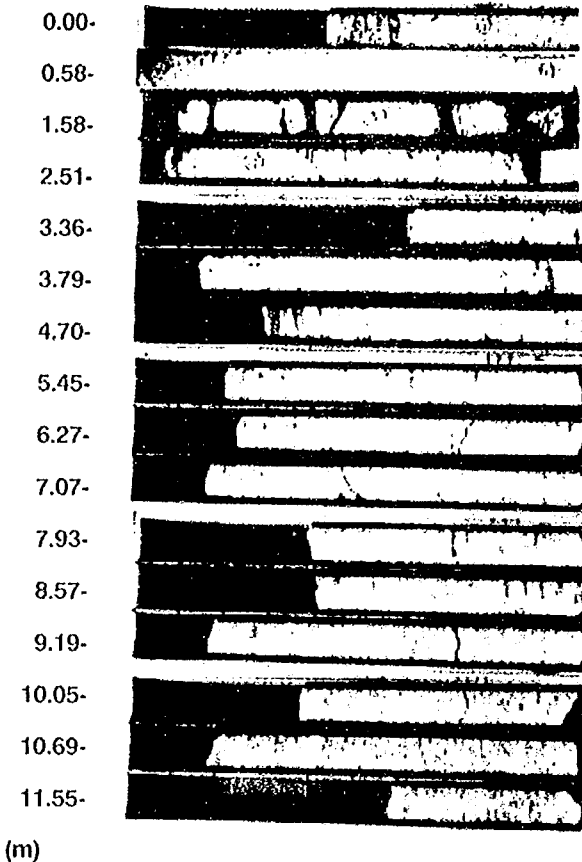
(1) ボアホールカメラおよび採取コア観察結果

まず、AE 計測結果と直接的に比較できる杭の損傷観察結果を整理する。図-4.3.4 は、杭の損傷結果を示しており、同(a)は、ボアホールカメラにより観察されたクラックの本数を 50cm 深度ごとに累積した図を表し、(b)は、ボーリングの採取コアの観察結果を示している。(a)の深度毎のクラック観察数結果より、杭頭の損傷が大規模であったことがわかる。その他、4.5-5.0m、7.0-8.0m、8.5-11.5m にクラックの集中領域が認められる。(b)の採取コア観察結果より、ほぼ(a)の観察結果と同位置にクラックが認められる。(a)の結果と異なるのはフーチング内部の結果であり、1.58-2.51m で多くの採取コアの破断が観察され、この破断は削孔時に生じたもので、それ以深のコアに潜在的クラック以外に同様な採取コアの乱れがないことを考慮すると、削孔にともなう「ねじりにより容易に破壊するほどの材料強度しか有していなかった」あるいは、「目視観察できない微視的クラックが杭内部に既に存在し、若干のねじり力で、そのクラックが進展・破断した」ことが推察される。ボアホールカメラの画像処理後の最小値読みとりは 0.2mm 前後であり、カメラにより

観察・判断可能なクラックは、この幅 0.2mm 以上であるとされる。ところで、RC コンクリート材料の健全性を判断する指標の一つに表面クラック幅があり、既往の文献から、損傷を L、M、H に分類するとき対応するクラック幅の最小値は L、M が 0.12-0.20mm、H が 0.5mm と報告されている。ここで、カメラより判断可能な 0.2mm のクラック幅について考えると、損傷が M (中) ~H (高) に対応していることがわかる。つまり、それ以下のクラックは見逃されることとなり、前述した推察される事項の后者「目視観察できない微視的クラックが杭内部に既に存在し、若干のねじり力で、そのクラックが進展・破断した」は、十分に考え得る内容といえる。



(b) ボアホールカメラ観察による 50cm 深度ごとのクラック累積数



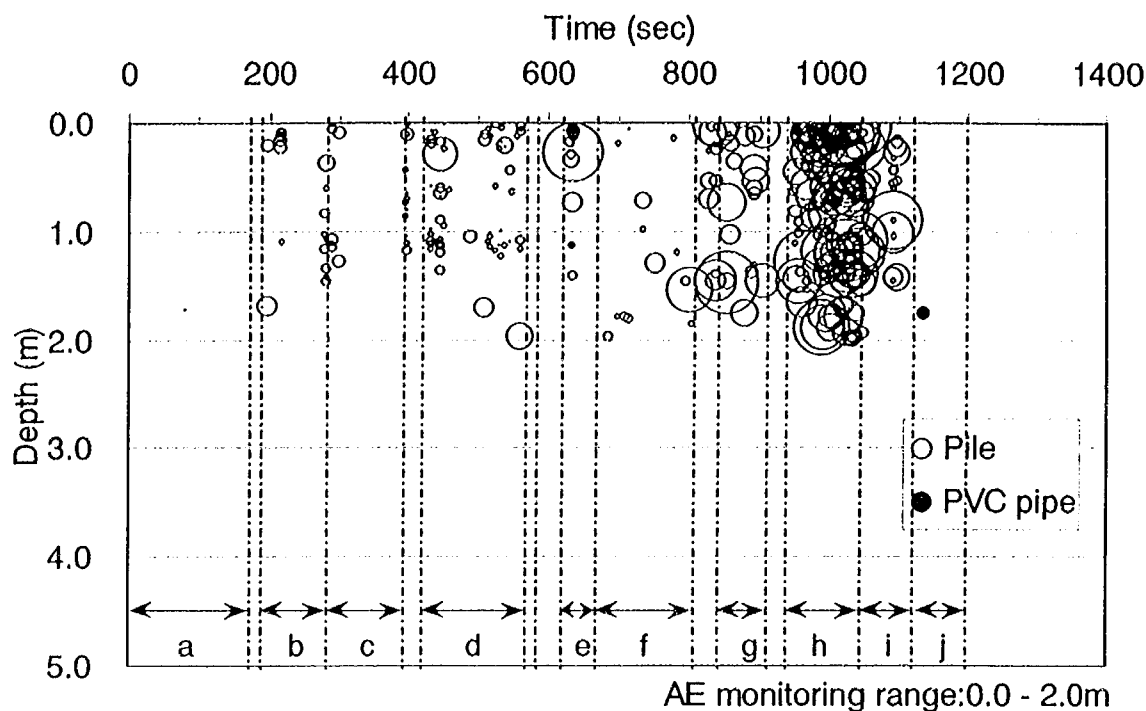
(a) 採取コア観察結果

図-4.3.4 杭の損傷観察結果

(2) AE 計測結果

図-4.3.5 に代表例として第一領域（フーチング上面から 2m まで）を計測した時に得られた AE 位置標定結果の経時変化を示す。白抜き円は、杭内位置標定結果を、塗りつぶし円は、杭外の塩化ビニル管での位置標定結果を示している。なお、第一領域の計測は最初の載荷にあたり、カイザー効果（繰返し荷重等により荷重に材料がなじみ、先行最大荷重を超過する載荷を行わないと、それまでの荷重レベルでは、AE アクテ

イビティが急激に低下する現象)の影響が認められない AE を最も放射しやすい段階である。同図下方に示した(a)~(e)がバックグラウンドノイズ (BGN) 測定を含む重機の状態である。杭内 AE 計測結果において、



(a) BGN, (b) フーチング側面載荷, (c) フーチング斜め載荷, (d) フーチング上面載荷, (e) 重機フーチング上載, (f) 西側でアーム振動, (g) 北側でアーム振動, (h) 東側でアーム振動, (i) 移動撤去, (j) BGN

図-4.3.5 AE 位置標定結果 (0-2.0m を計測、円の半径はリングダウンカウントの大きさを反映)

(a)の BGN 測定区間において有意な AE 源は観察されなかったが、(b)~(e)までのフーチング側面より載荷した区間でフーチング内部に多くの AE 源が得られた。重機をフーチングに上載した直後の(e)で再度 AE 源はフーチング内部で得られ、アームの伸張や上げ下げによる(g)~(h)の区間において大規模な AE 源が数多くフーチングの全領域にわたり観察された。AE 源は、重機をフーチングから移動した区間 (i)、いわゆる除荷時にも認められた。一方、杭外 AE 計測結果からは有意な AE 源は認められなかった。

以上から、フーチング表面で観察された AE 源は、ある程度重機自身の振動による直接的な弾性波を AE として検出した可能性があるものの、様々なフーチングへの載荷により、フーチング内部に AE 源が多数認

められたことから、対象とした杭が接合されたフーチングには、数多くの潜在クラックが存在していた可能性が高いといえ、この推測はコア観察結果から概ね妥当と判断できる。

図-4.3.6 に杭の直接 AE 計測より得られた AE 位置標定の深度に対する累積 AE イベント、リングダウンカウント、継続時間、エネルギーの累積ヒストグラムを示し、図-4.3.7 にそれぞれの AE パラメータ累積値を AE イベントで除したヒストグラム、つまり、各深度における平均パラメータ値のヒストグラムを示す。なお、図-4.3.8 は間接 AE 計測より得られた図-4.3.6 と同種の結果である。図-4.3.6 より、フーチング内に多数の AE イベントがあり、リングダウンカウント、継続時間、エネルギーでの結果から 1.0-1.5m、2.0m、値は小さいが 3.0-3.5m、5.0m 付近に AE の集中が認められる。図-4.3.7 の AE イベントの平均パラメータ値より、4.2-5.0m、6.3-7.0m の AE 集中が明瞭になる。図-4.3.8 より間接 AE 計測において 1.8m、3.2m、4.8m に AE 集中が認められる。これらは、直接計測結果と比較し、杭の損傷箇所から放射された AE と同期していないが、ほぼ直接計測で得られた AE 集中深度に一致していた。

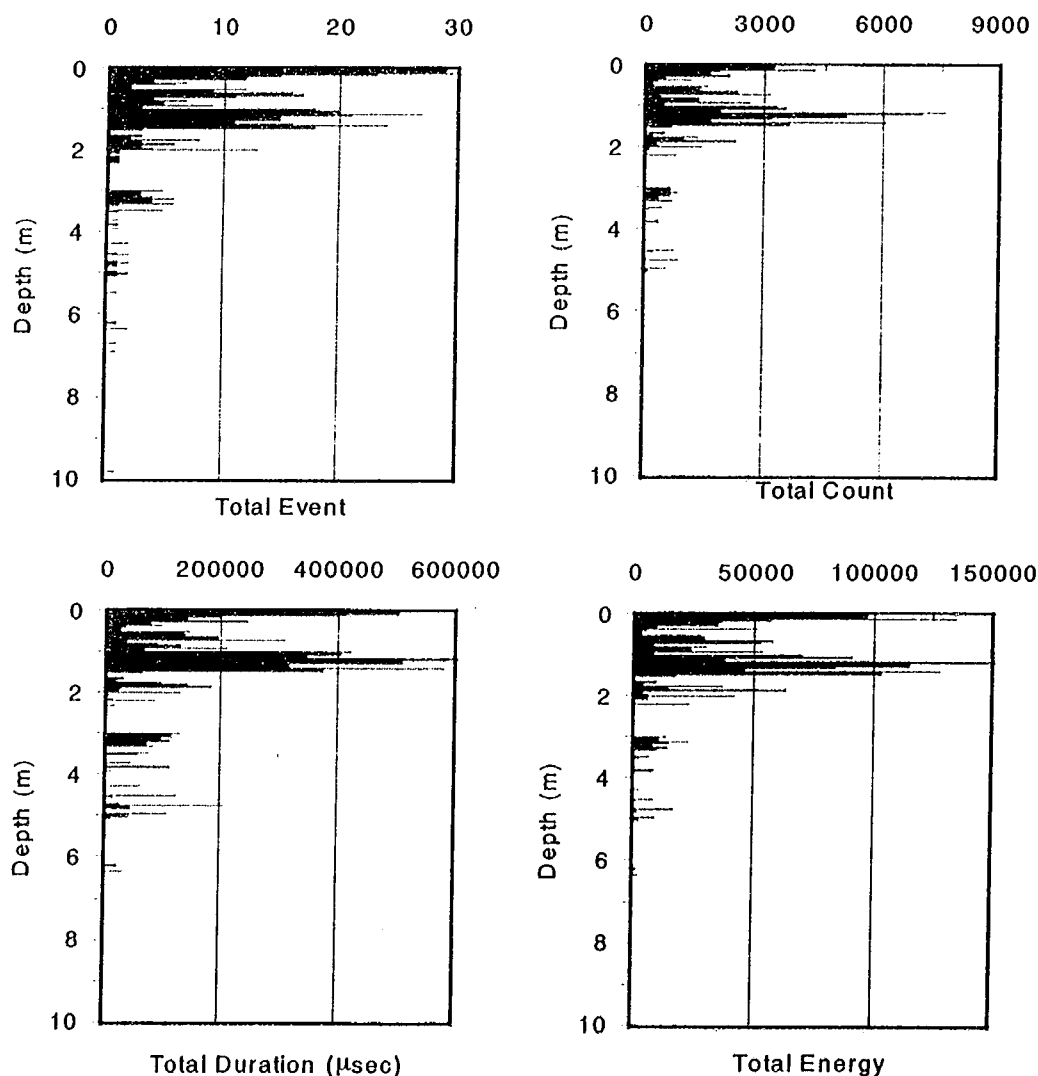


図-4.3.6 AE 位置標定の深度に対する累積ヒストグラム（リングダウンカウント、継続時間、エネルギー）

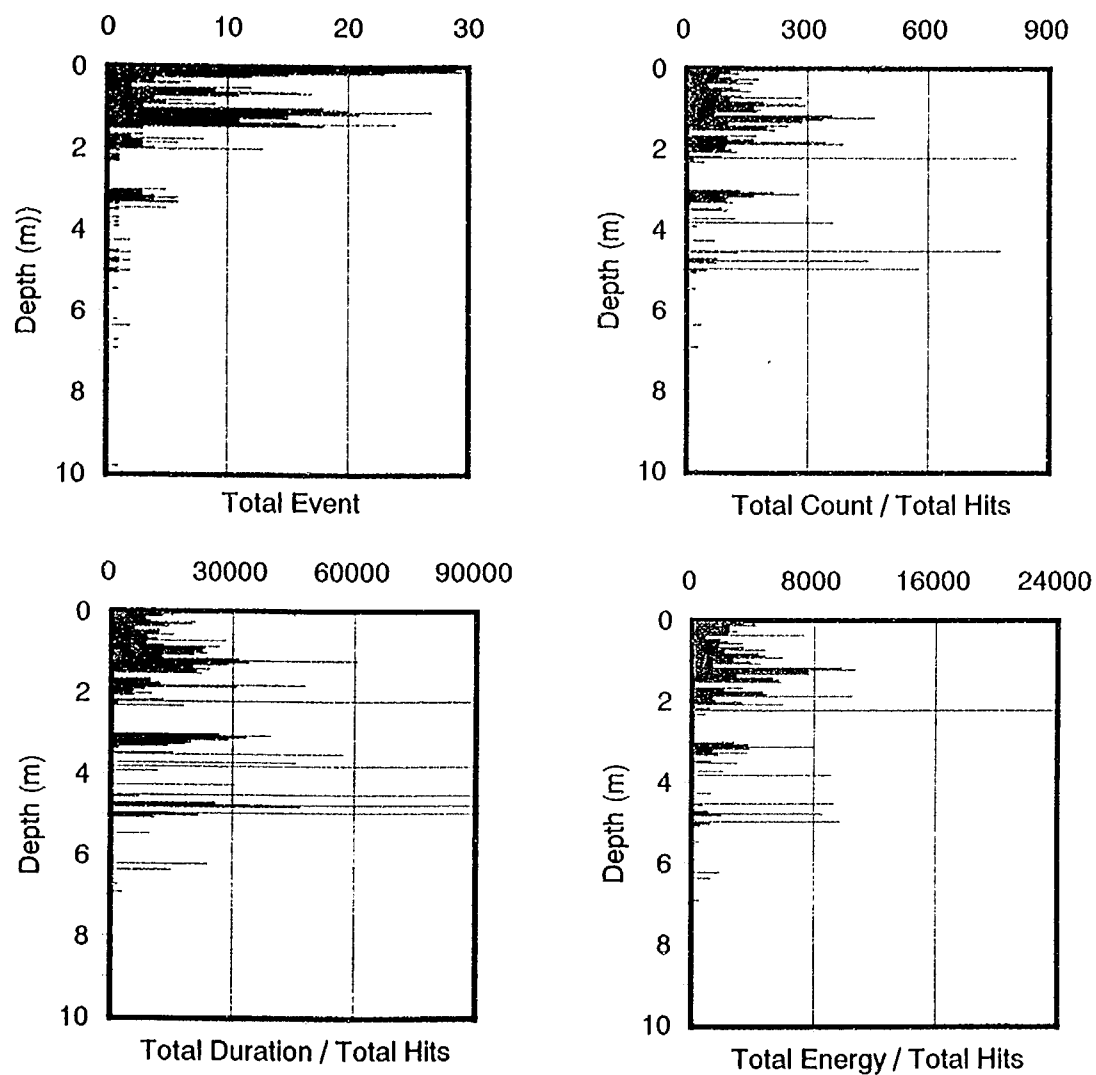


図-4.3.7 AE 位置標定の深度に対する平均ヒストグラム（リングダウンカウント、継続時間、エネルギー）

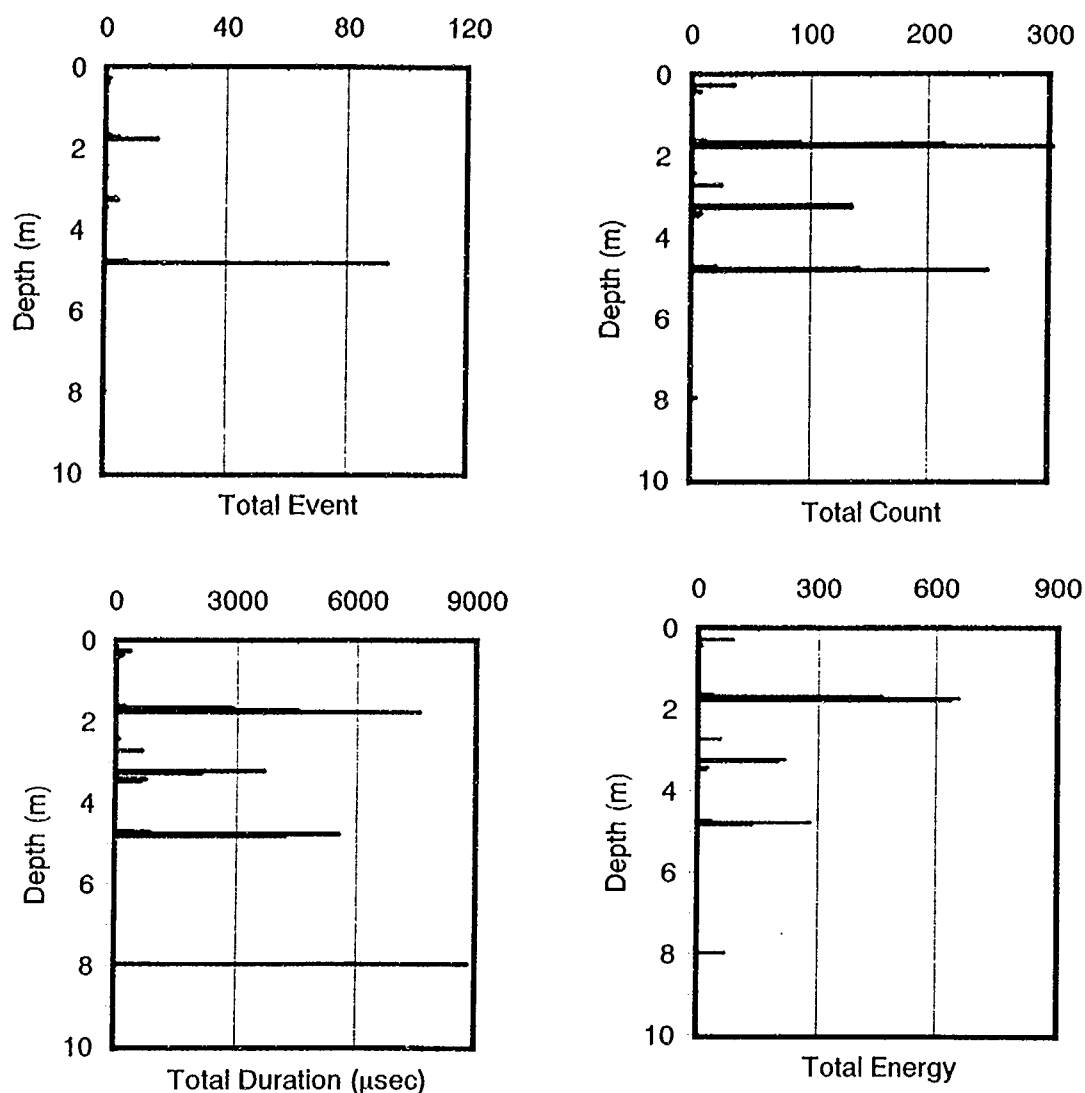


図-4.3.8 AE 位置標定の深度に対する累積ヒストグラム
(リングダウンカウント、継続時間、エネルギー)

(3) 杭体の弾性波伝播速度

AE 計測とは無関係であるが、各 AE 計測領域で計測終了後、杭頭より金属ハンマーにより弾性波を励起させ、直接 AE 計測に用いた AE センサでその「弾性波」を記録した。一例として、センサごとに得られた弾性波の到達時刻より求めた弾性波速度を図-4.3.9 に示す。ここで、各部プロットは、伝播速度算出に用いたセンサ間中心、つまり、1.0m-1.5m 間の伝播速度は、1.25m の伝播速度として示している。一般に、ある程度の高さを有するコンクリート構造物では上部のコンクリートに比べ、下部のコンクリートの密度や強度

が高いことが知られている。したがって、図-4.3.9 を検討する場合、深度に対してある勾配を有する弾性波伝播速度直線（曲線）で議論するのが正しいが、ここでは極端に速度が低い深度に着目する。その場合、1.5-2.0m、3.0-4.0m、4.5-5.5m、6.0-6.5m に低い速度領域が認められ、これらの深度は直接 AE 計測より推定された損傷位置、ならびに間接 AE 計測より推定された損傷位置に合致していた。

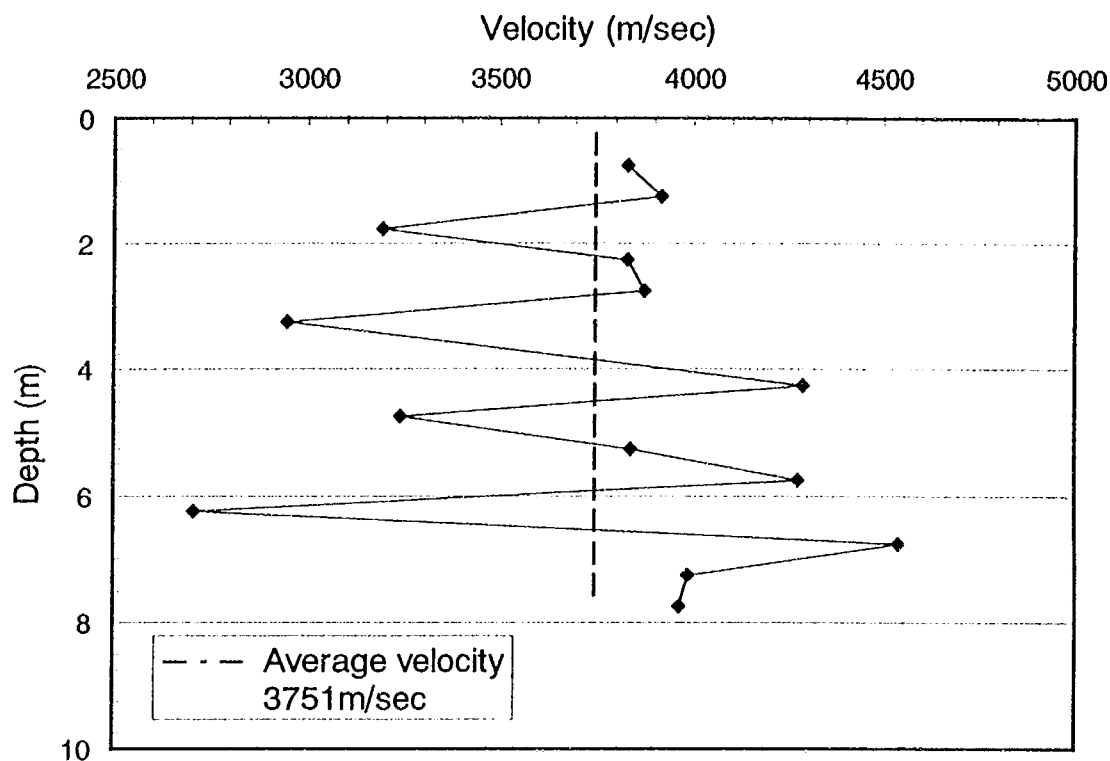


図-4.3.9 AE センサより得られた杭体中の弾性波伝播速度

4.3.3 まとめ

AE 直接計測、AE 間接計測、ボアホールカメラおよび採取コア観察結果、ならびに、弾性波伝播速度より得られた杭の推定損傷位置を図-4.3.10 に示す。以下の事項が認められた。

- 1)ボアホールカメラ観察結果から、杭頭および、その下部の損傷が観察された。AE 直接/間接計測および弾性波速度より、杭頭上部のフーチングの損傷が予測され、採取コアより観察できない潜在き裂多数生じていた可能性が高いことが明らかとなった。
- 2)AE 直接/間接計測より、深度 3.0m 付近に損傷が推定され、この位置は弾性波速度結果と合致した。ただし、ボアホールカメラ観察結果からは損傷は認められなかった。
- 3)全ての結果から、深度 5.0m 付近の損傷が推定された。

4) AE 直接計測から深度 6.5-7.0m 付近の損傷が推定され、合致していないもののボアホール、弾性波よりこの前後に損傷が推定された。

以上の結果から、次の事項が結論づけられる。

油圧ショベルにより外力変動を与えることができる上部構造がないフーチングに連結されたコンクリート杭の損傷を AE 計測により検討することは可能であった。特に、杭内に AE センサが設置できる場合、AE 法は有効であり、一般的な孔内観察では得ることが困難な潜在微小クラックの有無や、程度を判断できる可能性が確認できた。フーチング内で得られた多くの AE は、上記を反映していると考えられ、今後の追加検討により詳細に検証するつもりである。また、杭体の弾性波速度計測より、AE 計測により推定された損傷位置に速度が低い部位が存在することが認められた。したがって、目視観察可能なクラックの存在以外に観察できない潜在クラックの存在をいかに評価できるかが、杭体の健全性、ひいては構造物全体の健全性を検討する上で重要となる可能性が高く、この場合、AE 計測や弾性波速度による調査は特に有効と考えられる。

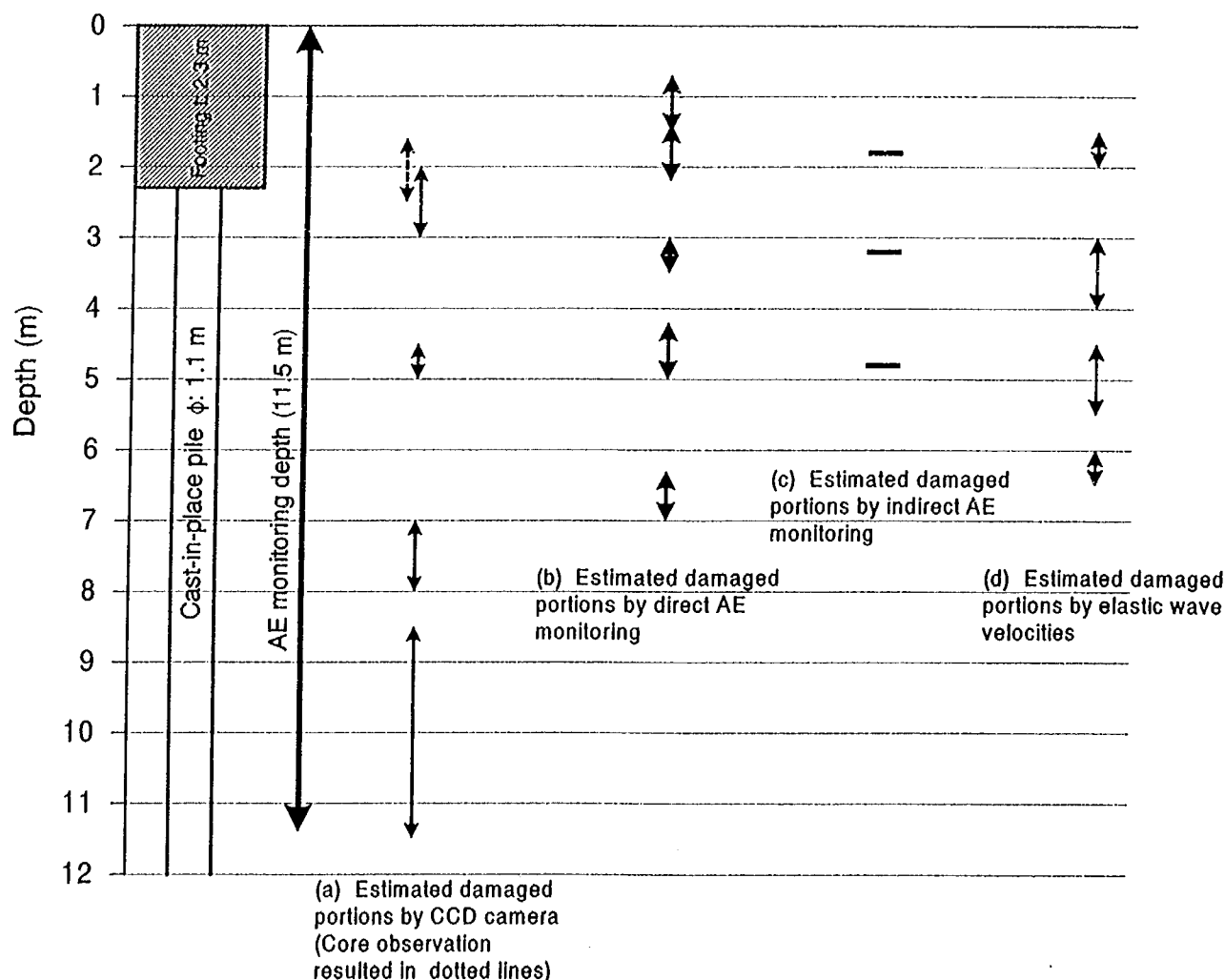


図-4.3.10 損傷位置推定結果まとめ

4. 3. 4 試験土槽における AE センサを用いた杭-孔間弾性波速度試験

(1) 試験概要

岸和田共同実験において杭内に削孔したボーリング孔内に AE センサを設置し、杭頭を打撃することにより伝播する弾性波を計測することによって、杭内の損傷位置を把握できることを確認した。しかし、供用中の橋梁の杭に削孔を行なうことは困難であり、この場合には、杭体を削孔することなく計測できる方法を検討する必要がある。

そこで、受振センサ (AE センサ) を基礎杭に近接して設置したボーリング孔内に挿入し、杭頭付近へのハンマー起振によって発生し杭中を伝播する弾性波を深さ方向に連続的に検出することで、杭の破断面で生じる弾性波の減衰や伝搬の遅延を捉える手法について検討を行った (図-4. 3. 11)。

(2) 試験方法

本試験は、土木研究所内土槽における共通供試体について実施した (土槽試験詳細は本共同研究報告書その 1 に記載)。実験をはじめるにあたり、センサの設置方法が問題となった。今回の実験では、内径 10cm の塩ビ管をボーリング孔の代替として使用するが、実際のボーリング孔の内径はさらに小さいため、双方に対応するセンサ設置方法を検討する必要がある。そこで、センサの脱着が容易なバネ反力を用いた簡易な治具を作製した。

実験には、(株) フジタ製の AE 計測器およびグラフテック社製のサーマルアレイレコーダを組み合わせ、センサは 8 チャンネルの 15kHz 共振の加速度型 AE センサを用いた (図-4. 3. 12)。

試験は、フーチング上から杭頭位置の上部をハンマーで打撃し、杭近傍の試験用塩ビパイプ内に設置したセンサにより伝達する弾性波を連続的に取得する方法で行った。

センサの設置位置は、センサを挿入棒に取り付けた治具に 25cm 間隔で装着し、深さ方向に挿入棒をスライドさせながらさらに細かいポイントで計測を実施した。

(3) 試験結果

本実験で得られた代表的な以下の波形データを図-4. 3. 12 に示す。

- ① 健全杭 (杭長 4.0m、損傷なし)
- ② 拡底杭 (〃、損傷なし、下部 1.0m に拡底部)
- ③ 損傷杭 (杭長 4.0m、杭頭から 1.4m に損傷)

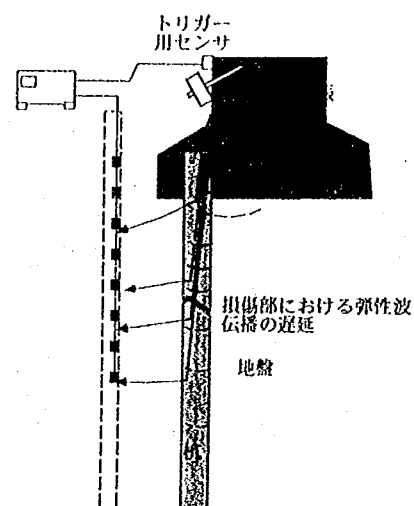


図-4. 3. 11 杭-孔間弾性波計測概念図

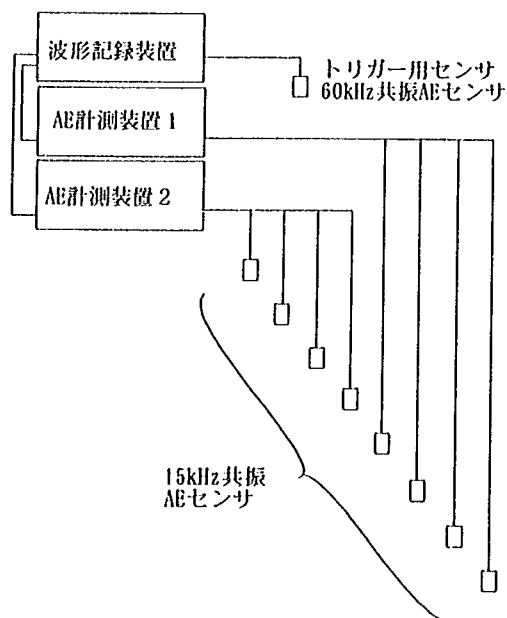


図-4. 3. 12 杭-孔間弾性波計測システム

打撃からの時間差

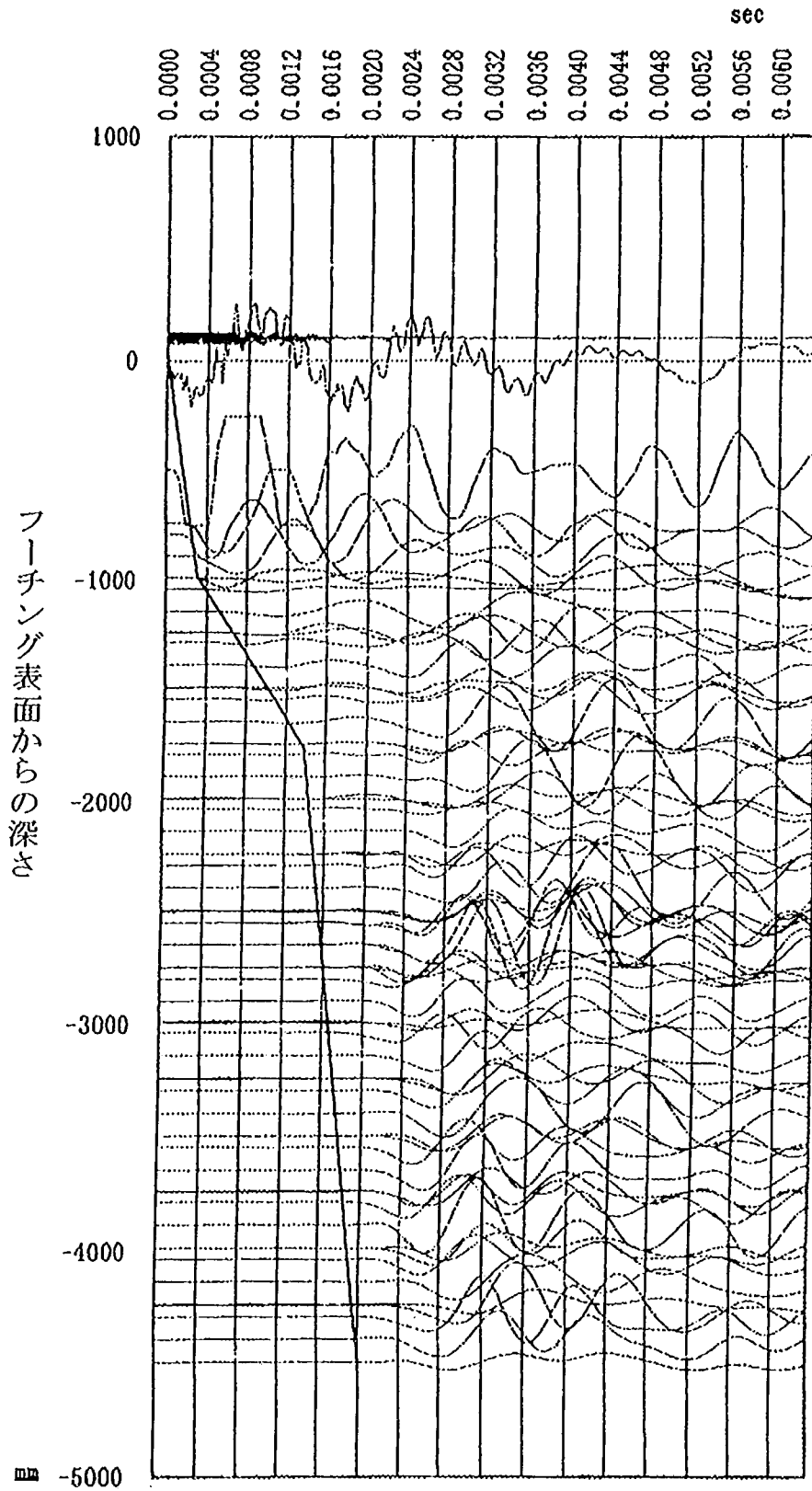


図-4.3.13(1) フーチング有りの健全杭での計測結果

打撃からの時間差

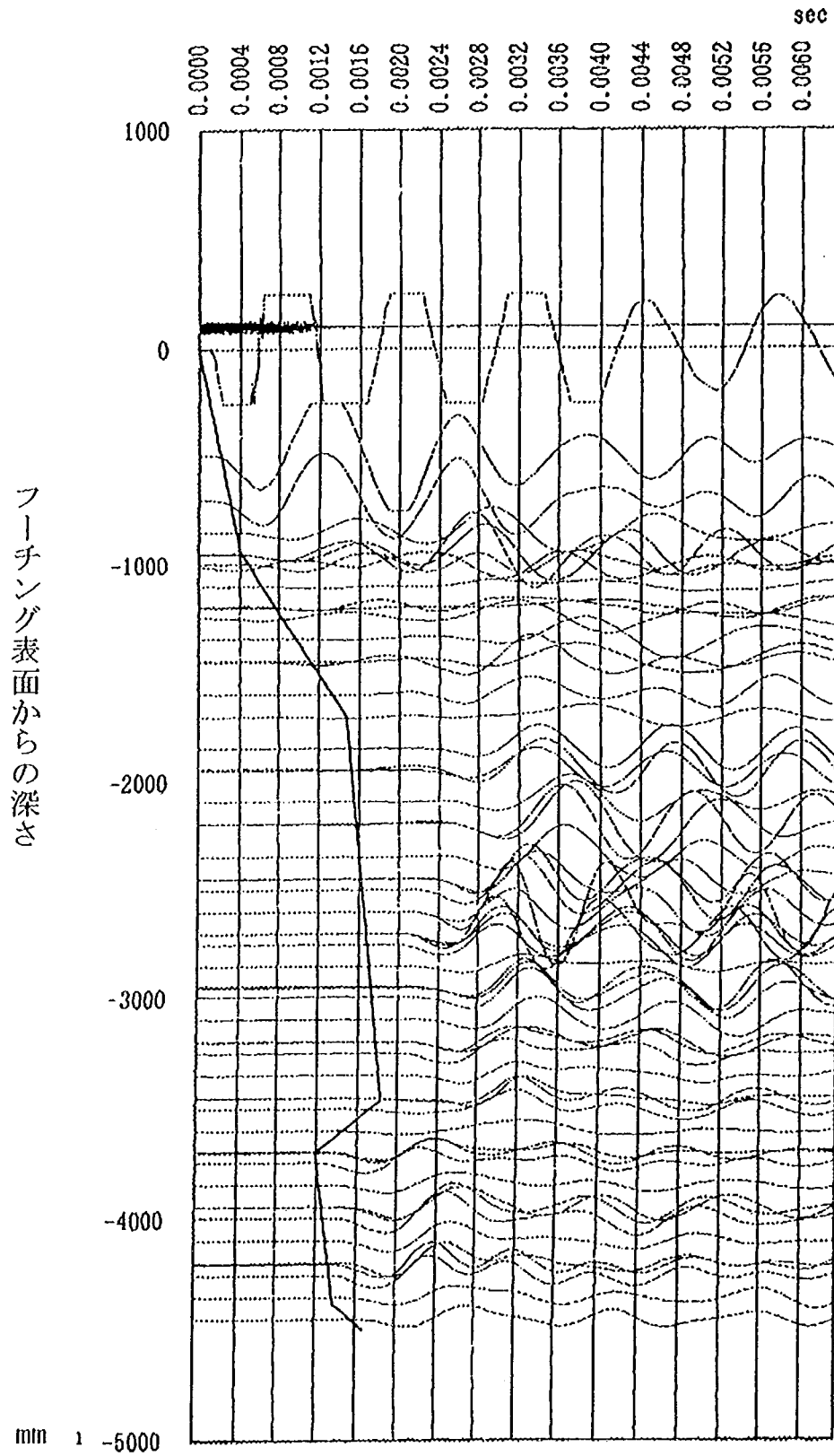


図-4.3.13(2) フーチング有りの拡底杭での計測結果

打撃からの時間差

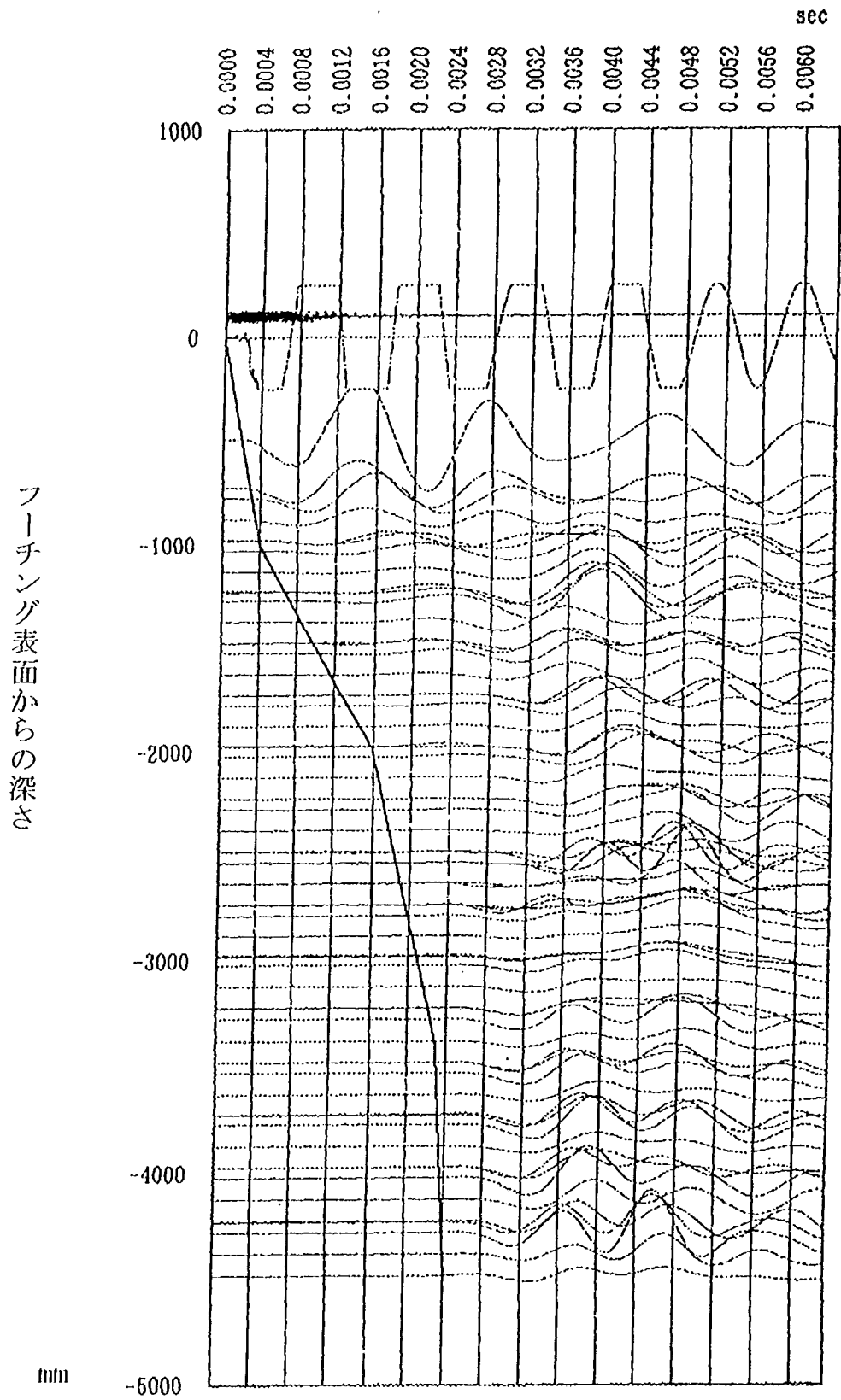


図-4.3.13(3) フーチング有りの損傷杭での計測結果

4.4 ボアホールカメラ

4.4.1 研究概要

ボアホールカメラは、調査対象物に直接ボーリングを行い、CCDカメラ等をボーリング孔内に挿入し、測定器のモニターで観察して孔壁の損傷状態を確認する手法である。

測定結果は、調査現場において直接測定器のモニターで確認できるため、調査時にある程度の損傷度の判定が可能である。測定した画像の記録にはビデオテープを用いたアナログのものと展開図などの出力も可能なデジタル式のものがある。また、ボーリング時に採取したコアとボアホールカメラで観察した結果とを比較してひび割れの状況を評価することも可能である。

損傷状況を直接画面で確認できるため、損傷調査方法として信頼度の高い手法であると考えられるが、カメラの種類によって測定精度が異なる。さらに、ボーリング削孔時に損傷部を拡大してしまい、実際のひび割れ幅よりも大きく評価してしまう可能性がある。そのため、ボーリングの削孔時にひび割れを拡大しないためのビットの種類や回転速度、掘削速度を検討する必要がある。

(1) 使用した孔壁観察機器の種類

現在、この種の調査に利用されているボアホールカメラは、数種類ある。それらは、概ね3つのタイプすなわち、Bip System、MBS方式、Inspection Camera方式のいずれかに属している。

ところで、今回の試験杭の撮影に用いた装置は、上記のうち Bip System(BIPS)及び Inspection Camera方式(P・I・C)の2タイプである。写真-4.4.1にはBIPSのカメラ部分を、写真-4.4.2にはP・I・Cのカメラ部分を示す。

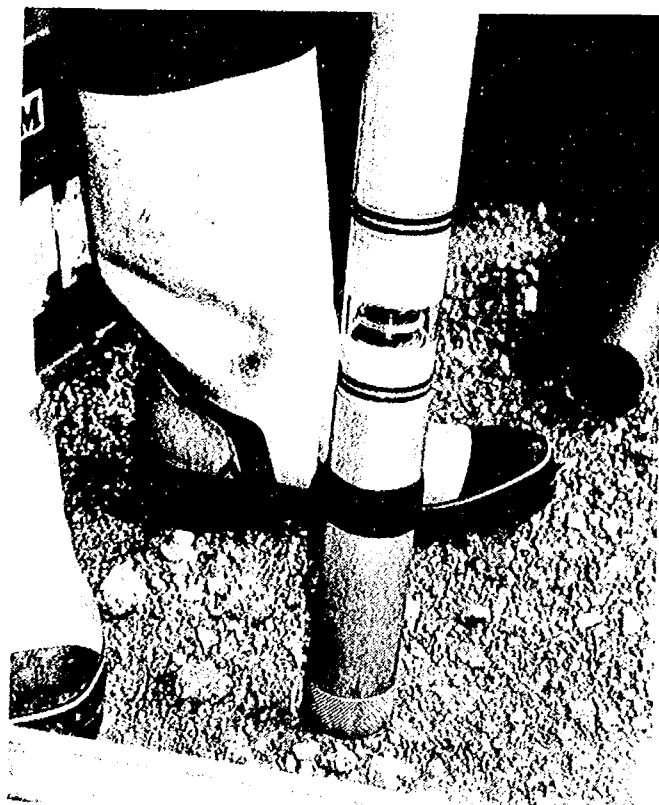
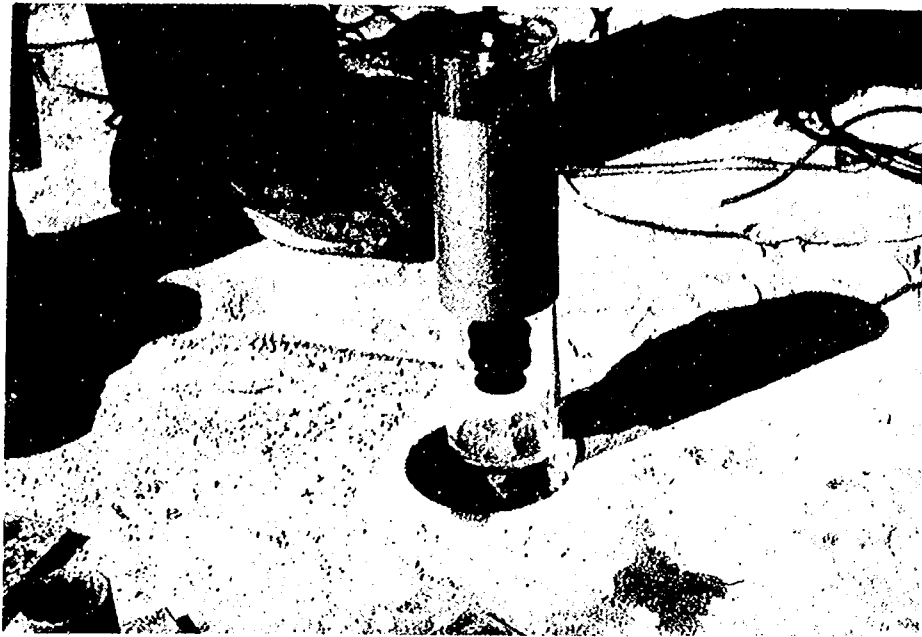


写真-4.4.1 BIPSのカメラ(レンズ)部分



写真－4.4.2 P・I・C のカメラ(レンズ)部分

(2) 試験内容

試験は、下記に示した項目を目的として行った。

- ① 「岸和田現場実験の杭」を使用し、2種類のボアホールカメラを用いて、クラックの測定精度を検討した。
 - ・ BIPS と P・I・C との比較
 - ・ クラック検出精度の比較検討
- ② 観測孔掘削方法が潜在クラックに与える影響を検討した。
 - ・ コア抜きに使用する機械の違い(掘削速度の問題)
 - ・ クラック角度・掘削機械と観測孔の出来上り精度の問題

4.4.2 検討結果

(1) 岸和田現場実験杭

1) 「実杭」供試体

ボアホールカメラによるクラックの検出精度を目的とした試験杭の概要は、「3.2 実験に用いた試験杭」に示すとおりである。なお、今回はNo.9杭を用いてコアボーリング後に実施したが、フーチング上面より11.8m付近で縦鉄筋に当たり削孔不能となった。このことから、ボアホールカメラによる観察深度は11.5mとした。

2) 観測孔の削孔

観測孔の削孔は、今回使用したボアホールカメラのBIPSが $\phi 66\text{mm}$ 以上、P・I・Cが $\phi 100\text{mm}$ 以上であったので、 $\phi 100\text{mm}$ の孔径とした。

削孔は、図-4.4.1に示した、「高周波モータ(400Hz)」を使用した「コアカッタ」用のボーリングマシンで、「ダイヤモンドビット付のコアチューブ」を使って行なった。観測孔の削孔状況は、写真-4.4.3～写真-4.4.4に示したとおりである。

観測孔の長さは、フーチング上面より11.8mである。なお、観測孔を削孔すると同時にコアを採取したが、その結果は写真-4.4.5の通りである。

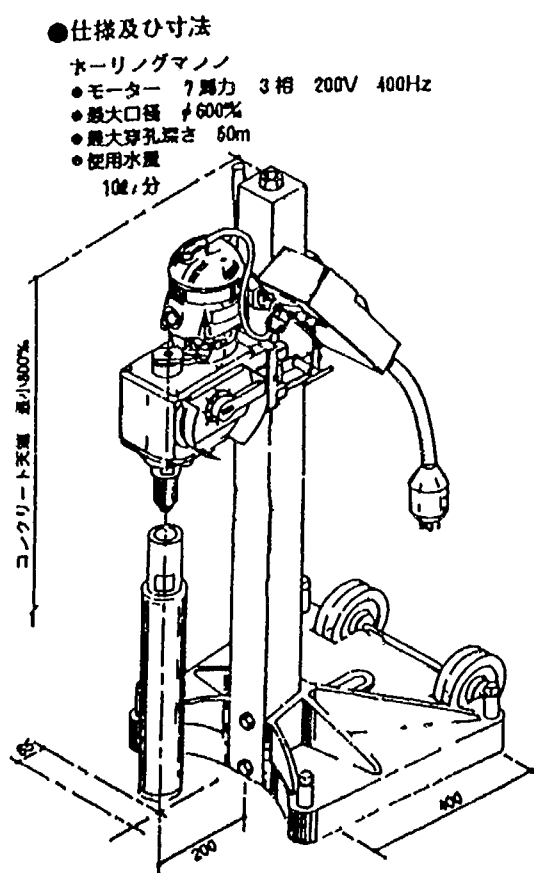


図-4.4.1 観測孔削孔ボーリングマシン



写真-4.4.3 観測孔の削孔状況

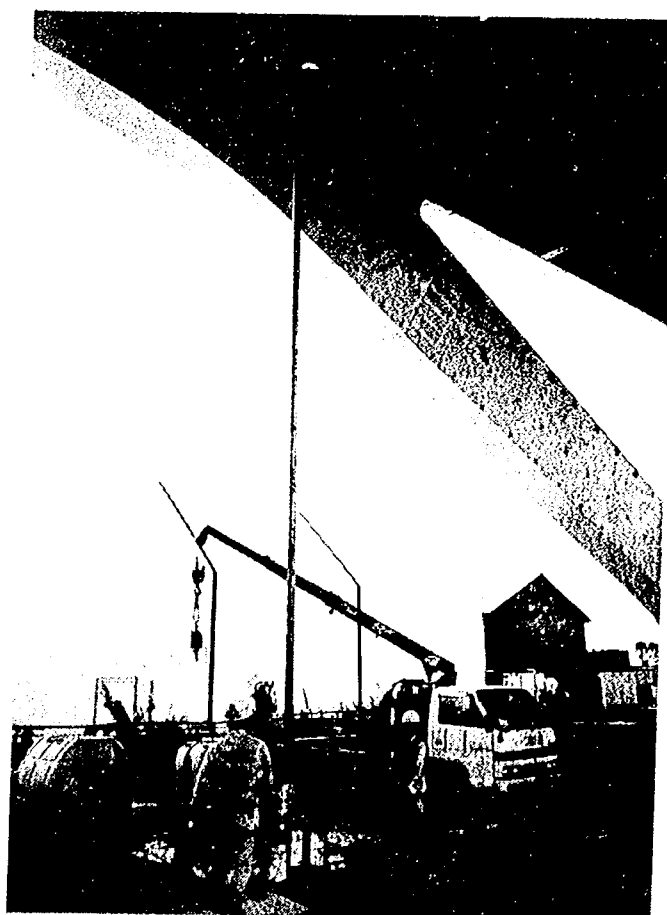


写真-4.4.4 コンクリートコア抜き状況

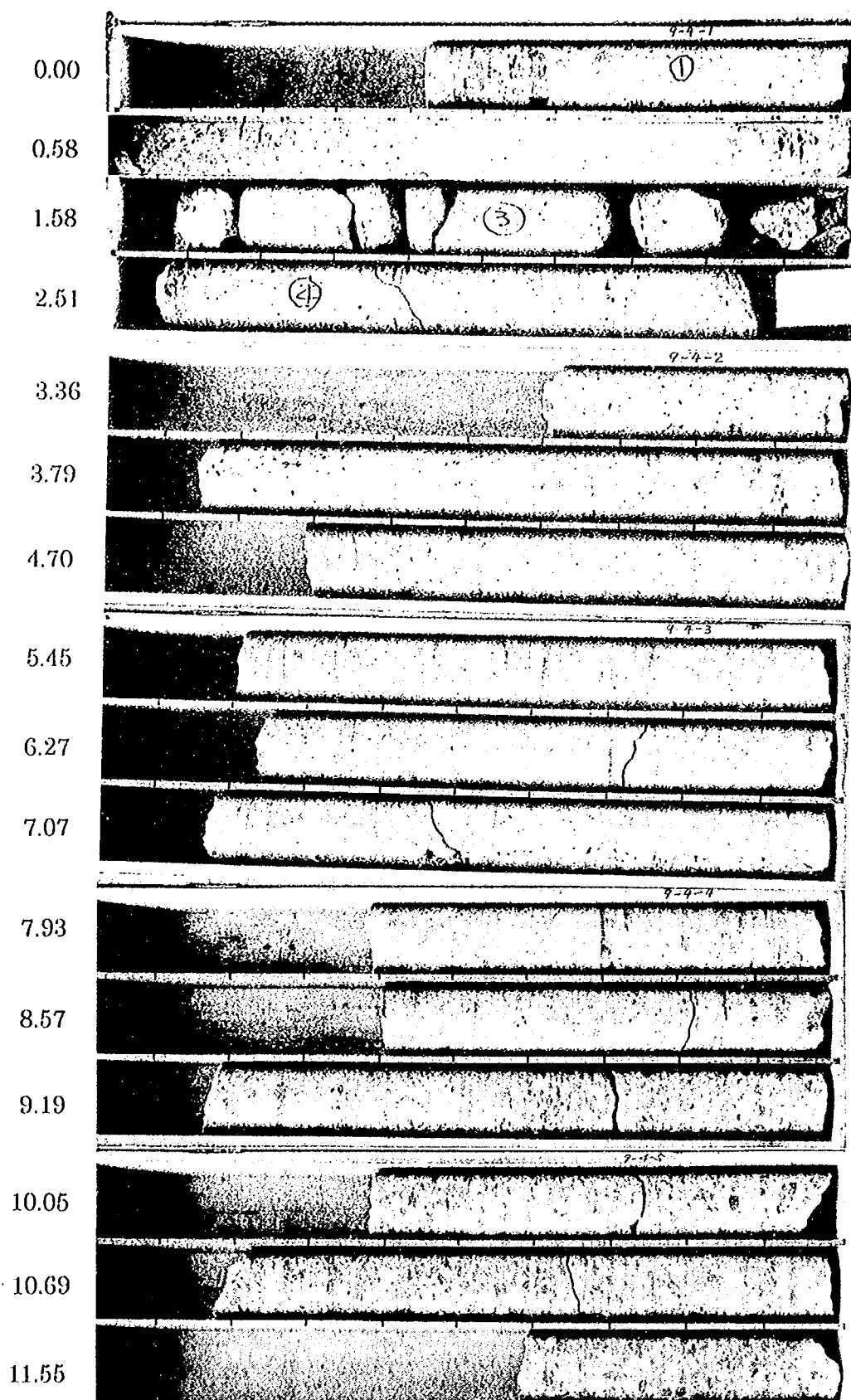


写真-4.4.5 コア状況

3) 観察結果

観察結果は、写真－4.4.6 及び写真－4.4.7 に示したとおりである。

写真－4.4.6 は、BIPS で観察したものである。写真－4.4.6 によれば、フーチング内にはクラックは認められない。さらに、2.20～2.80m までは、不規則に 6 箇所でクラックが認められ、クラック幅は 0.25～1.00mm である。4.84m、7.16m、7.68m 及び 7.98m には概ね水平方向のヘアークラックが認められたが、クラック幅の特定には至っていない。7.30～7.90m では縦方向にクラックが認められ、クラック幅も 2.00mm を有している。8.20～11.80m では 9 箇所でクラックが認められた。クラック幅は 0.50～1.50mm である。これらのクラック位置および形状をまとめたものが、表－4.4.1 である。

表－4.4.1 BIPS による観察結果一覧表

番 号	深 度 (m)	クラック幅(mm)	形 状	備 考
1	2.225	0.25	不規則	
2	2.283	1.00	平 滑	
3	2.504	0.50	不規則	
4	2.605	測定不能(微少クラック)	平 滑	
5	2.723	0.50	不規則	
6	2.770	測定不能(微少クラック)	不連続	
7	4.848	測定不能(微少クラック)	平 滑	
8	7.156	測定不能(微少クラック)	平 滑	
9	7.678	測定不能(微少クラック)	不連続	
10	7.486	測定不能(微少クラック)	不連続	
11	7.980	2.00	不規則	
12	8.596	0.75	平 滑	
13	9.003	0.75	不規則	
14	9.194	0.50	不規則	
15	9.740	0.75	不規則	
16	10.021	0.75	不規則	
17	10.376	0.75	不規則	
18	10.609	1.50	不規則	
19	11.100	測定不能(微少クラック)	平 滑	

写真－4.4.7 は、P・I・C で観察したものである。写真－4.4.7 によれば、フーチング内にはクラックは認められない。さらに、2.20～2.80m までは、不規則に 3 箇所でクラックが認められ、クラック幅は同写真に写っているスケールから読み取ると最薄部で 0.50mm、最大幅 7.00mm である。4.81m、7.12m 及び 7.98m には概ね水平方向のヘアークラックが認められた。7.33～7.93m では縦方向にクラックが認められた。さらに、8.56、9.70 及び 9.98m クラックが認められたが、画像からは密着しているように見られた。これらのクラック位置および形状をまとめたものが、表－4.4.2 である。

表-4.4.2 P・I・Cによる観察結果一覧表

番 号	深 度 (m)	クラック幅(mm)	形 状	備 考
1	2.22~2.26	0.40 程度	不規則	
2	2.46~2.49	1.00 程度	平 滑	
3	2.65~2.71	0.50 程度	不規則	
4	4.81	測定不能	平 滑	
5	7.12	測定不能	不規則	
6	7.33~7.93	測定不能	縦不規則	
7	7.98	測定不能	平 滑	
8	8.56	測定不能(微少クラック)	平 滑	
9	9.70	1.00 程度	不連続	
10	9.98	測定不能(微少クラック)	不連続	

一方、写真-4.4.5 のコア試料によれば、1.58~2.30m のフーチング内においても多数のクラックがあるが、潜在クラックなのかコア採取時に発生したクラックかは不明である。その他にボアホールカメラとクラック位置が一致した箇所は 2.8m 付近、4.8m 付近、7.9m 付近、8.6m 付近、9.0m 付近、9.2m 付近、10.0m 付近、10.6m 付近および 11.1m 付近のクラックである。

深度範囲: 0.000 ~ 2.000 m

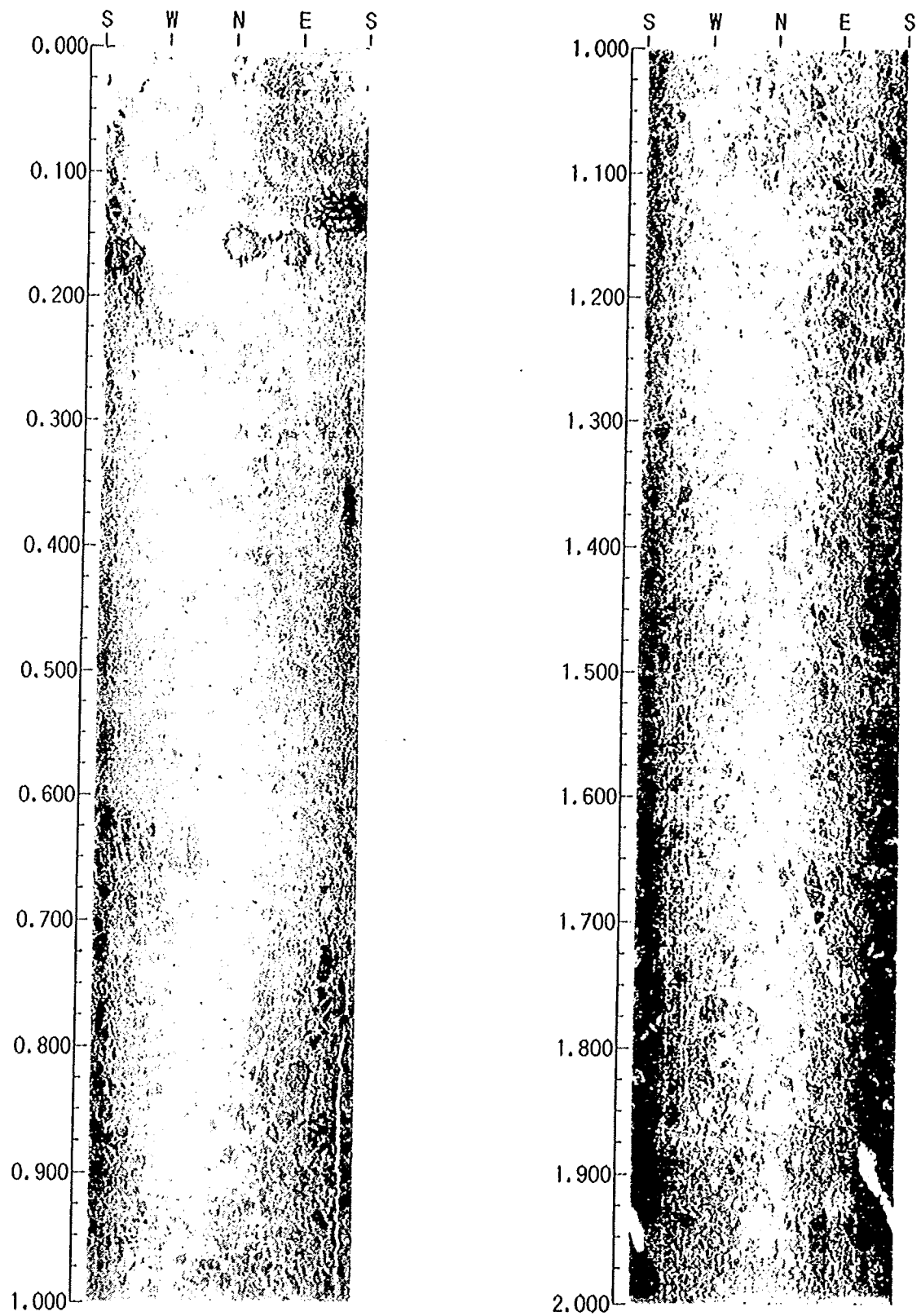


写真-4.4.6(a)

深度範囲: 2.000 ~ 4.000 m

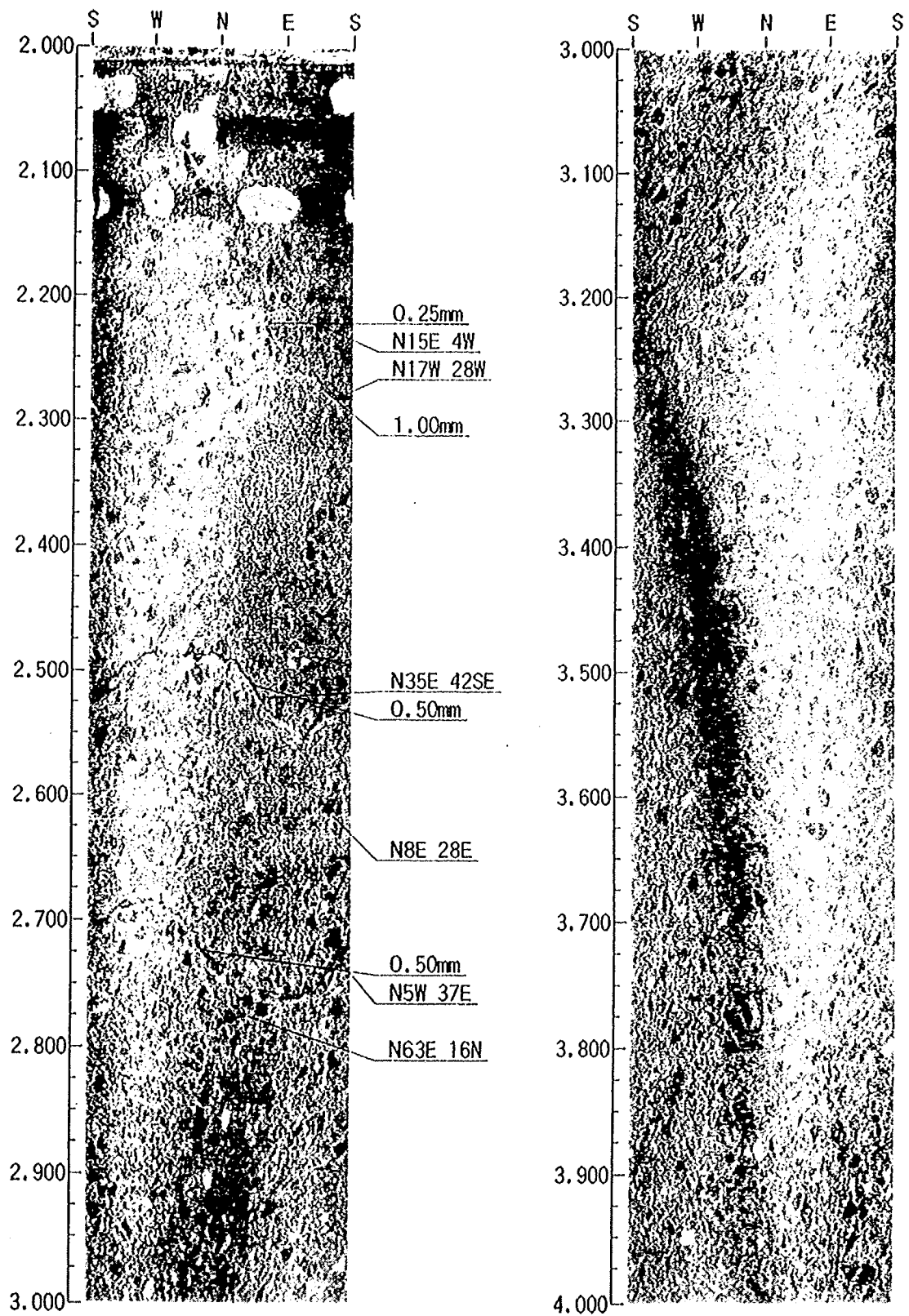


写真-4.4.6(b)

深度範囲: 4.000 ~ 6.000 m

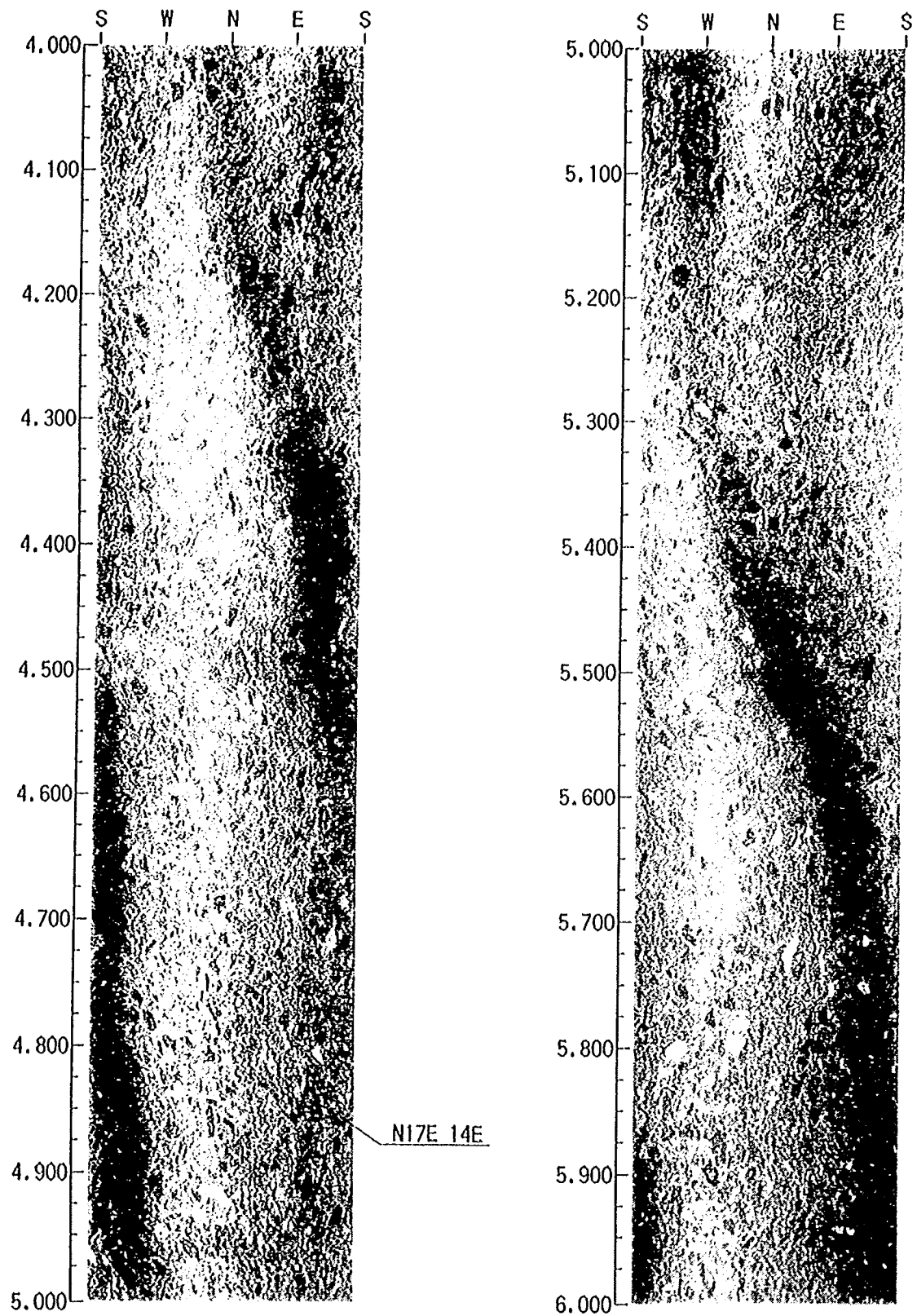


写真-4.4.6(c)

深度範囲: 6.000 ~ 8.000 m

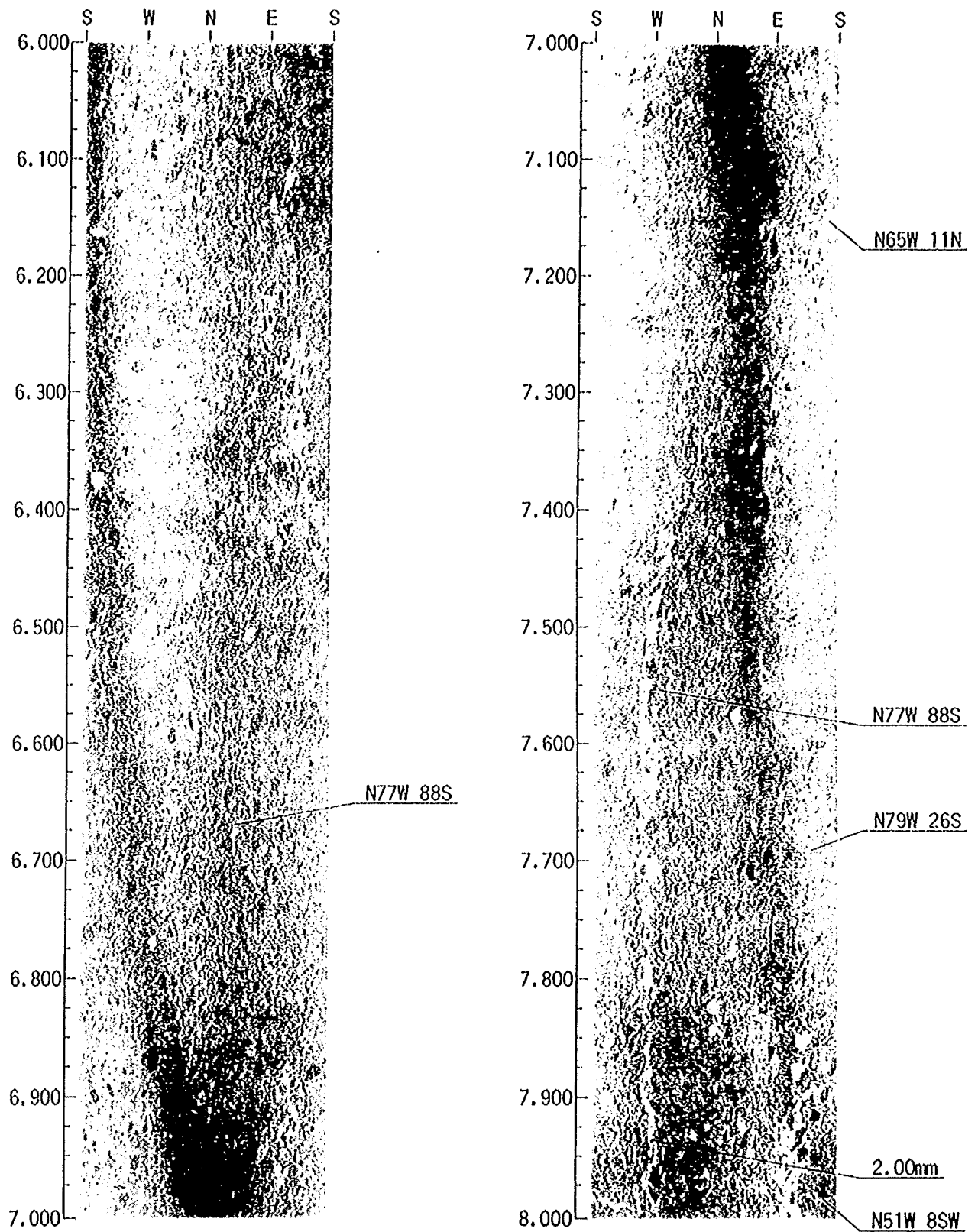


写真-4.4.6(d)

深度範囲: 8.000 ~ 10.000 m

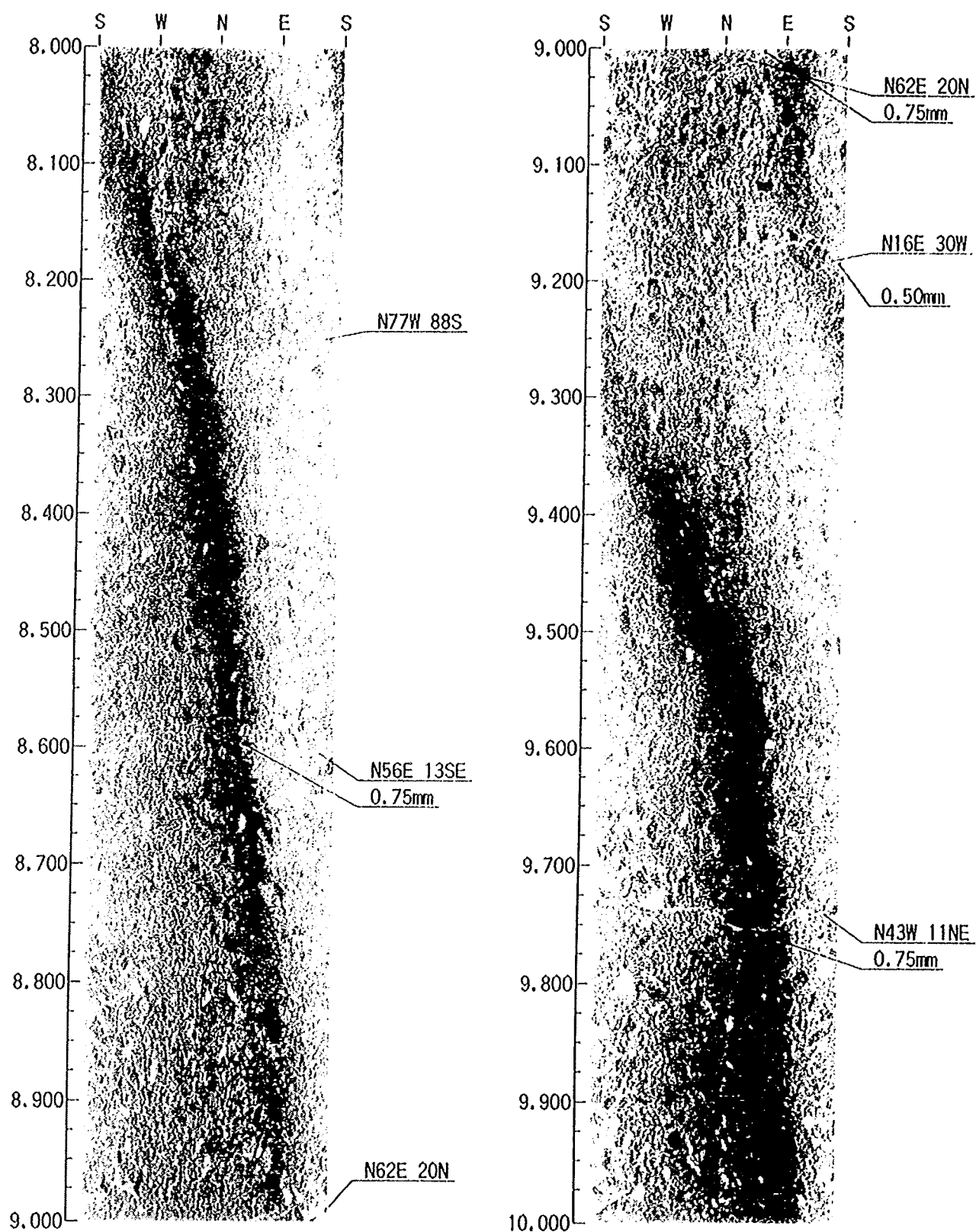


写真-4.4.6(e)

深度範囲: 10.000 ~ 11.588 m

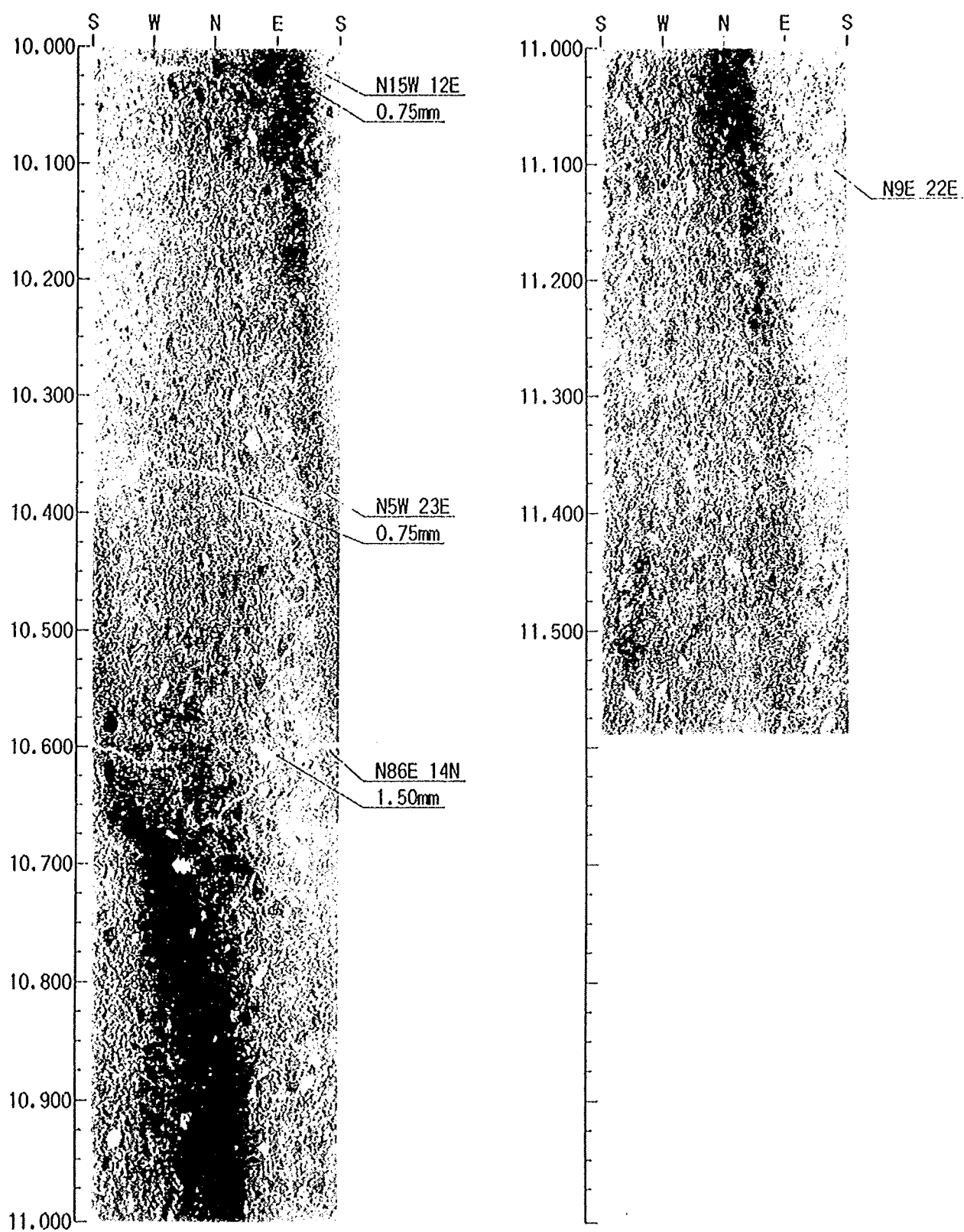
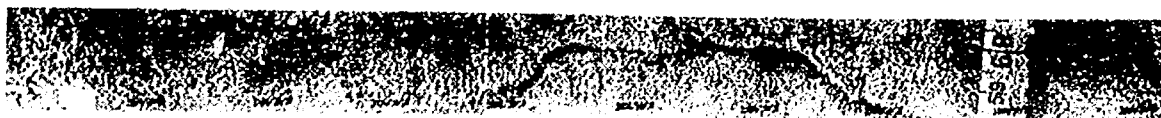
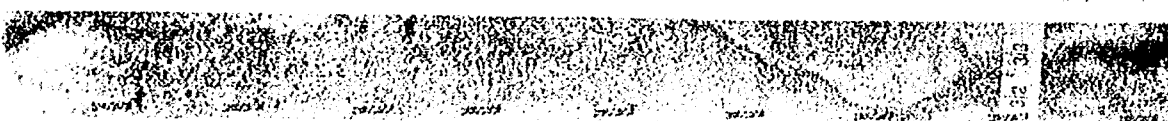
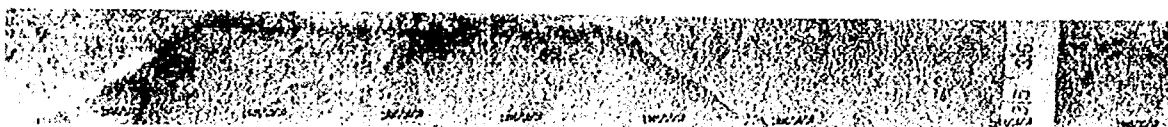


写真-4.4.6(f)

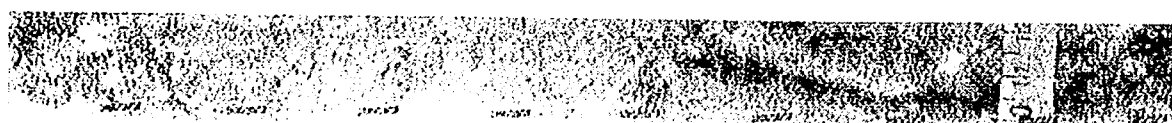
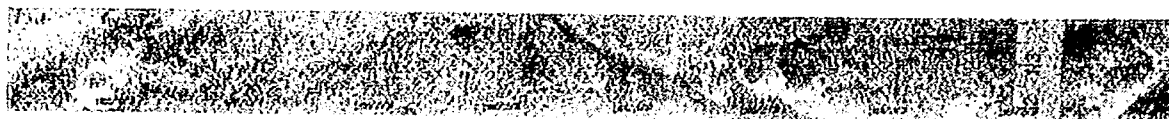
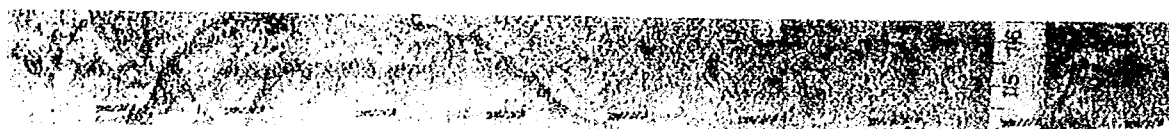
2.22m ~ 2.26m



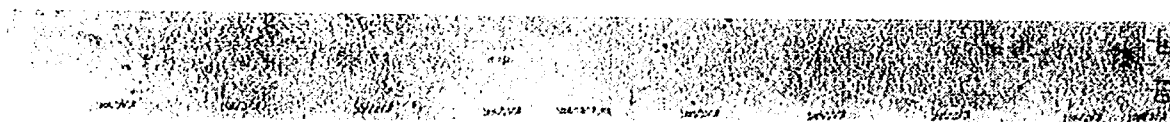
2.46m ~ 2.49m



2.65m ~ 2.71m



4.81m



7.12m

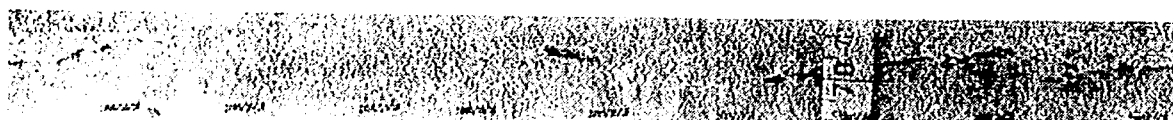
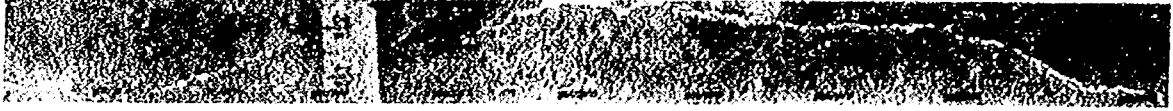


写真-4.4.7(a)

8.56m



9.70m



9.98m

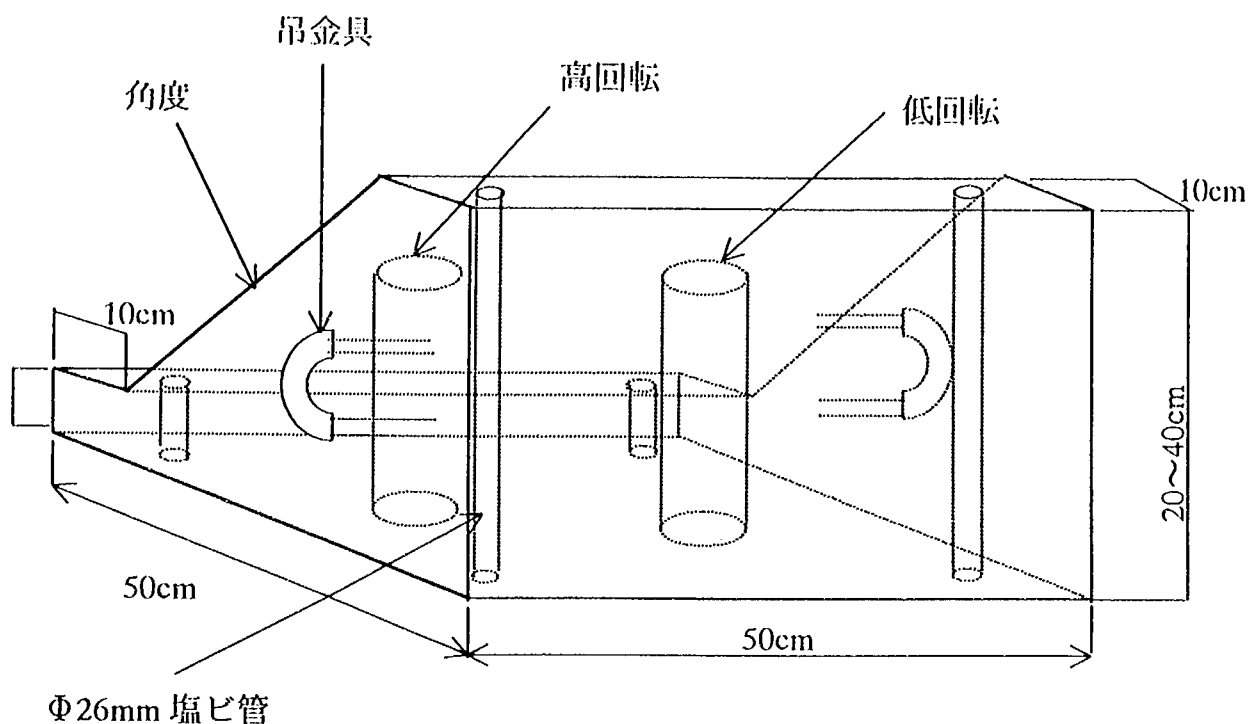


写真-4.4.7(c)

(2) 掘削方法の実験

1) 「掘削方法の検証」のための供試体

「掘削方法の検証」のための供試体は、図－4.4.2 の供試体概要図に示したような供試体を6体(傾斜角毎に2体)作成し重ね合わせ、各角度の観測孔を削孔し、ボアホールカメラによる観察を行った。なお、クラック幅は0.8mmとし、その調整はアクリル板を用いた。写真－4.4.8 は、アクリル板を供試体に、コンクリート・プラスチック用接着剤を用いて設置した状況を示したものである。



図－4.4.2 供試体概要



写真－4.4.8 アクリル板設置状況

2) 掘削方法

掘削方法は、「岸和田現場実験」時に使用した図-4.4.1の「高周波モータ」を使用した「コアカッタ」用のボーリングマシンで、「ダイヤモンドビット付のコアチューブ」を使って行なった。さらに、掘進速度による影響を把握するために、下記に示した回転数により削孔した。

- ① 毎分 250 回転(低速回転)
- ② 毎分 500 回転(高速回転)

写真-4.4.9 及び写真-4.4.10 は、「高周波モータ」のモータ部分と削孔風景を示したものである。

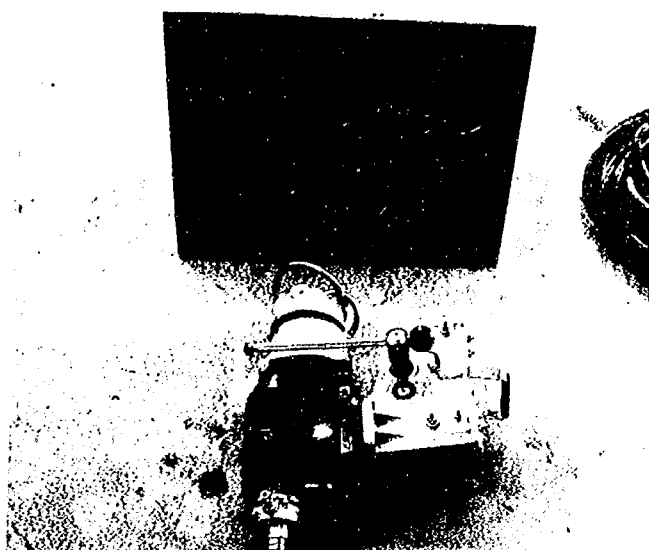


写真-4.4.9 「高周波モータ」のモータ部分

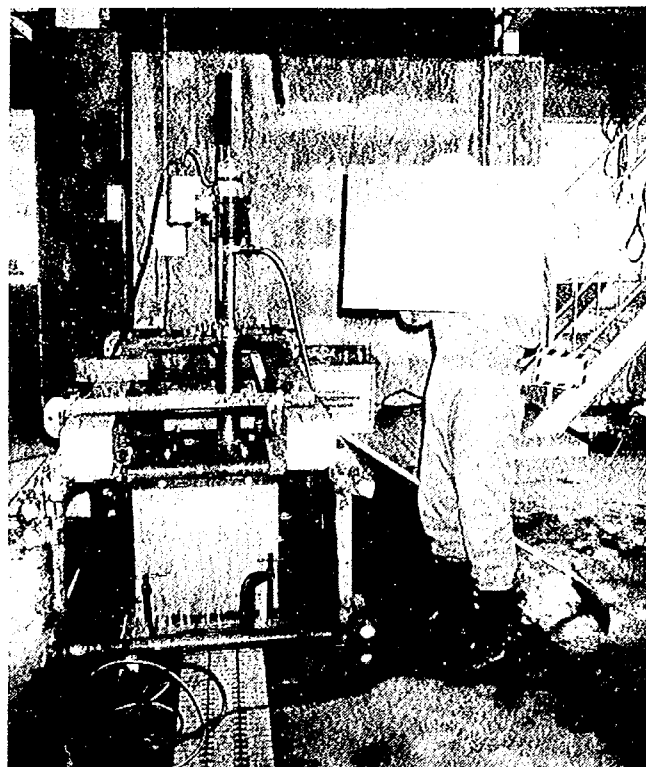
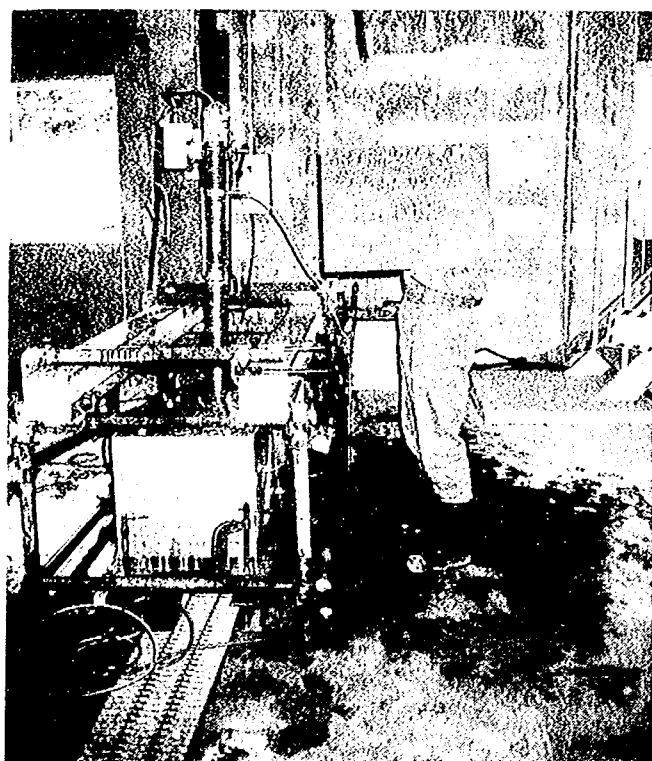


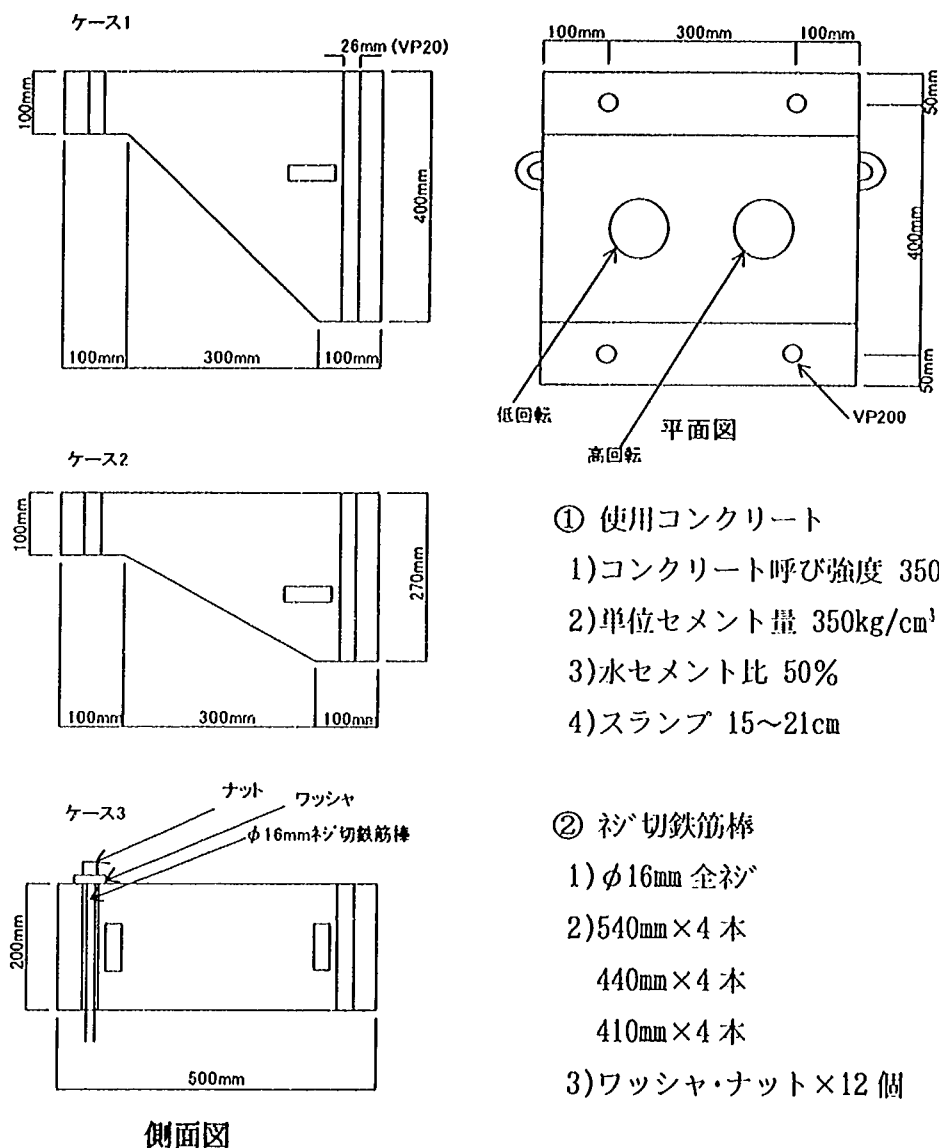
写真-4.4.10 「高周波モータ」による削孔風景

3) 供試体の諸元

クラック角度が削孔時にクラック幅に影響を与えるか否かを実験するために、下記に示した角度で供試体を作成した。なお、供試体の詳細は、図-4.4.3 の供試体諸元に示すとともに、写真-4.4.11 に供試体全体景を示す。

クラック角度

- ① クラック 45 度
- ② クラック 30 度
- ③ クラック 0 度(水平)



① 使用コンクリート

- 1)コンクリート呼び強度 350kgf/cm²
- 2)単位セメント量 350kg/cm³
- 3)水セメント比 50%
- 4)スランプ 15~21cm

② ネジ切鉄筋棒

- 1)φ16mm 全ネジ
- 2)540mm×4 本
- 440mm×4 本
- 410mm×4 本
- 3)ワッシャ・ナット×12 個

③ 型枠は各ケースとも 2 個

④ クラック幅 0.8mm(アクリル版使用)

図-4.4.3 供試体諸元



写真-4.4.11 供試体全体景

4) ボアホールカメラ

使用したボアホールカメラは、BIPS 方式である。BIPS 方式は、デジタルで画像処理を行うため、展開画像が可能である。さらに、今回は、クラック幅を 0.1mm まで測定できるように新開発したカメラも実験的に採用した。写真-4.4.12 は、BIPS による実験状況を示したものである。

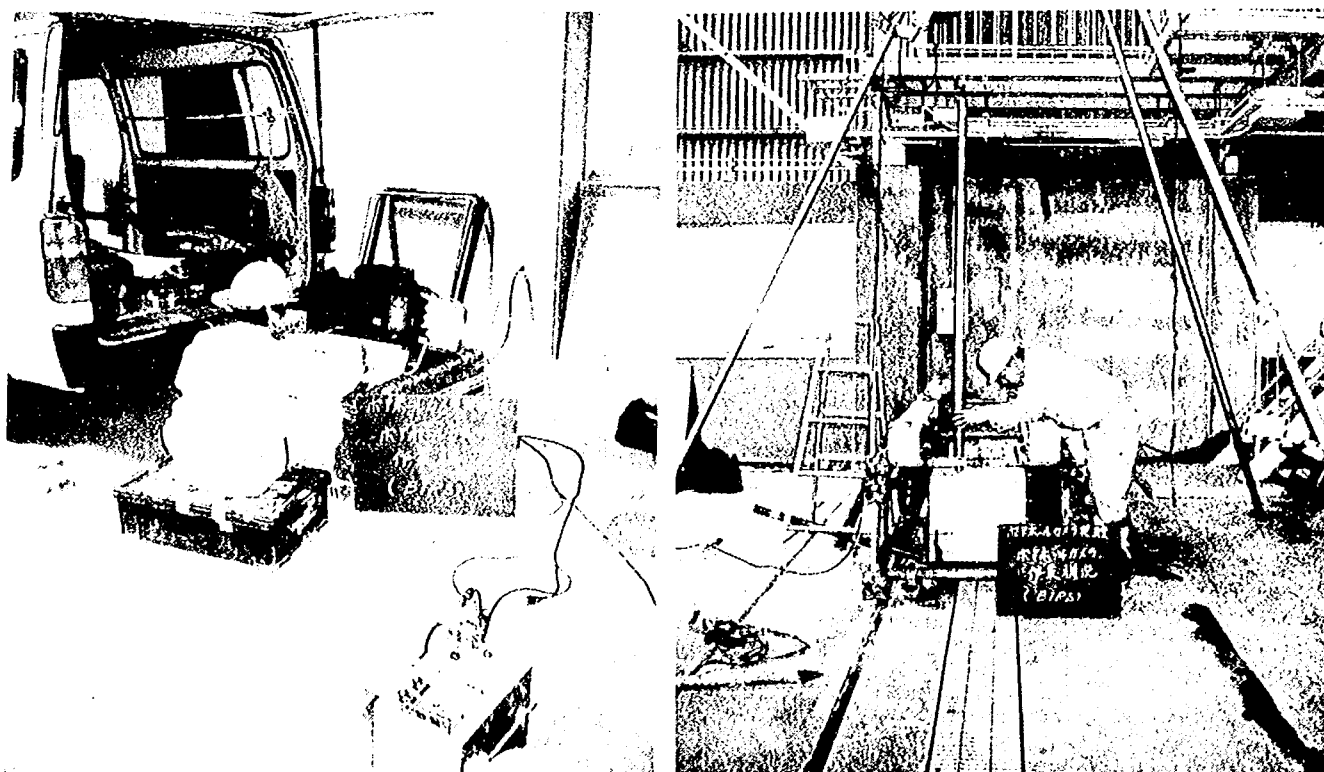


写真-4.4.12 BIPS を用いた実験状況

5) 観察結果

クラック幅の測定は、展開画像を基に計測した。さらに、測定位置は、クラック角度をつけている供試体については、図-4.4.4に示したような、サインカーブの変化点とした。

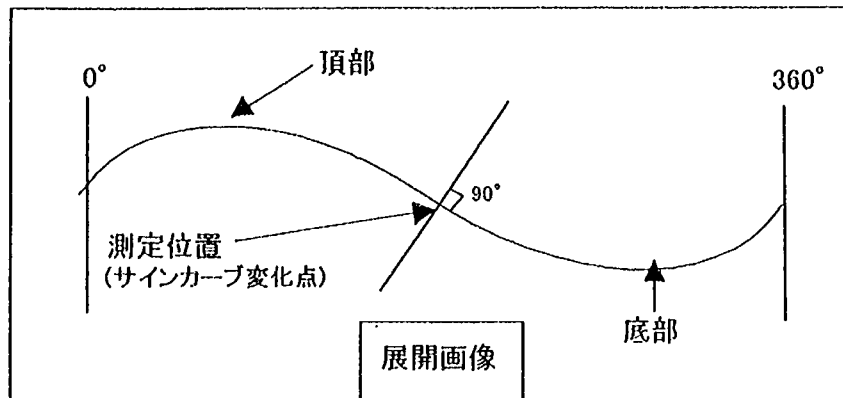


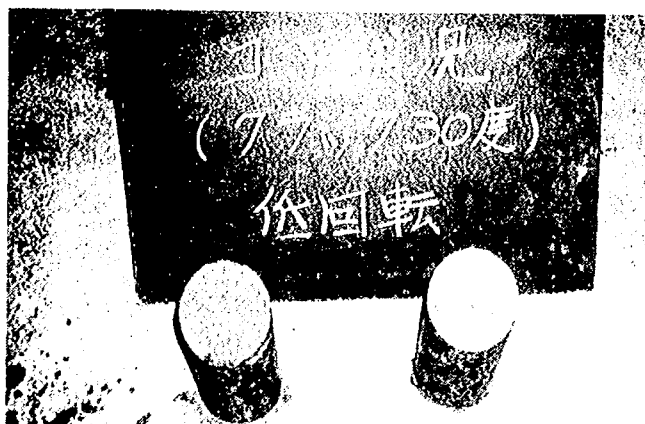
図-4.4.4 測定位置

① クラック角度 30°

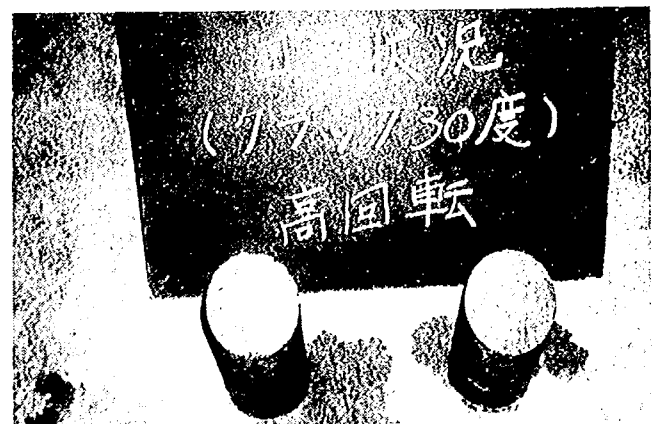
写真-4.4.13 は、低回転掘削と高回転掘削で採取したコアを上面から撮影したものである。なお、写真内のコアに白墨で記入されている上面ならびに下面は、クラック上面と下面の意味である。

写真-4.4.13 によれば、低回転で採取したコアは、クラック上下面ともに、ほとんど欠けていない。一方、高回転で掘削したコアは、クラック上面に複数の欠けた部分が認められるが、下面はほとんど欠けていない。

写真-4.4.14 は、低回転掘削と高回転掘削の展開画像である。写真-4.4.14 によれば、高回転掘削のコア観察で確認したクラック面の欠けた部分は認められず、きれいなサインカーブを描いている。さらに、写真-4.4.15 は、サインカーブの変化点を拡大し、クラック幅を測定したものである。低回転掘削と高回転掘削のいずれも、クラック内に崩れ落ちたコンクリート片は極少量であり、解析に支障をきたすものではない。また、クラック幅は、低回転掘削が 0.6mm、高回転掘削が 0.7mm となっており、アクリル板の厚さ 0.8mm より薄く測定された。この原因は、供試体を重ね合わせる時に、若干のズレを生じ、予定のクラック幅より薄くなったと考えられるが、今回の実験目的には支障は生じない。



低回転掘削コア



高回転掘削コア

写真-4.4.13 コア写真



低回転掘削

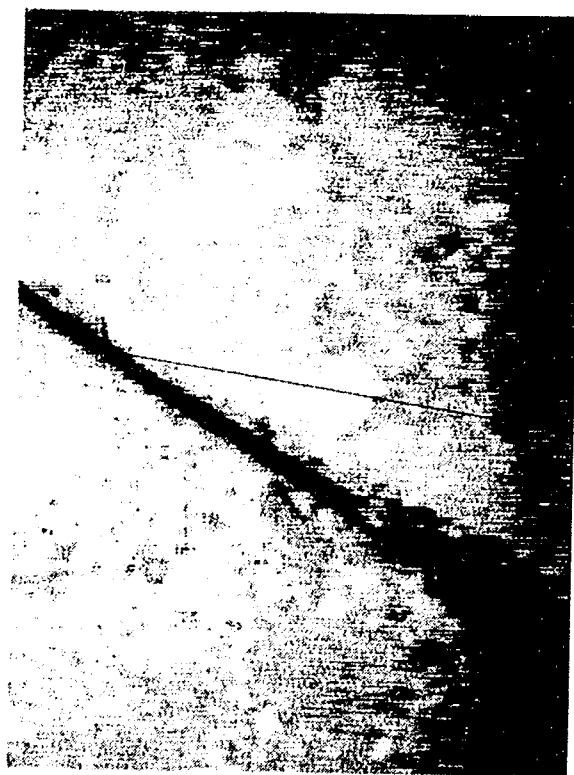


高回転掘削

写真-4.4.14 展開画像



低回転掘削



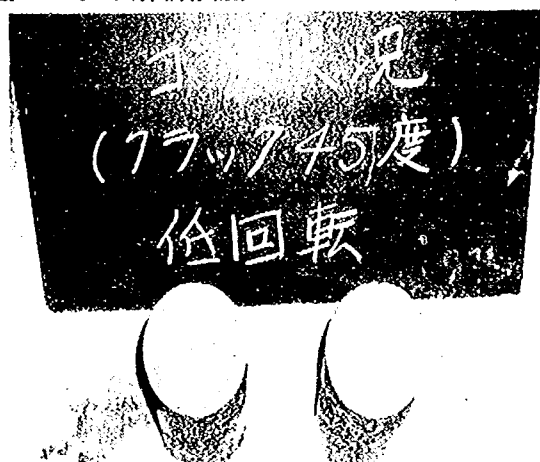
高回転掘削

写真-4.4.15 クラック幅測定画像

② クラック角度 45°

写真-4.4.16 は、低回転掘削と高回転掘削で採取したコアを上面から撮影したものである。写真-4.4.16 によれば、低回転で採取したコアは、クラック上下面ともに、ほとんど欠けていない。一方、高回転で掘削したコアは、クラック下面に 1箇所大きく欠けた部分が認められるが、上面はほとんど欠けていない。

写真-4.4.17 は、低回転掘削と高回転掘削の展開画像である。写真-4.4.17 によれば、低回転掘削および高回転掘削は、きれいなサインカーブを描いており、高回転掘削のコア観察で確認したクラック面の欠けた部分は認められない。したがって、コア観察で確認した欠損部は、コア採取時に発生したものと考えられる。写真-4.4.18 は、サインカーブの変化点を拡大し、クラック幅を測定したものである。低回転掘削と高回転掘削のいずれも、クラック内に崩れ落ちたコンクリート片はほとんど認められない。クラック幅は、低回転掘削・高回転掘削ともに 0.8mm と測定され、クラック角度ならびに回転の違いによる解析誤差は生じなかった。

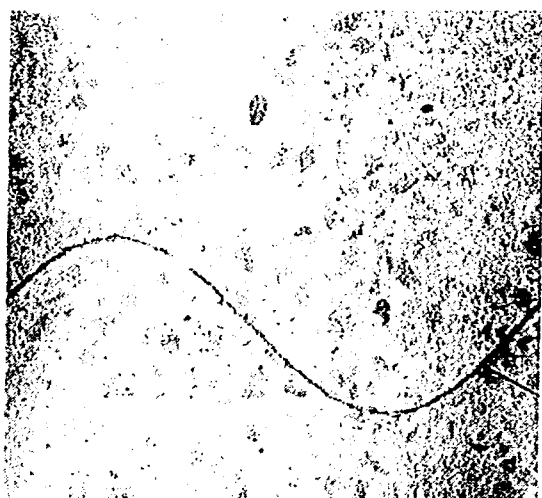


低回転掘削コア

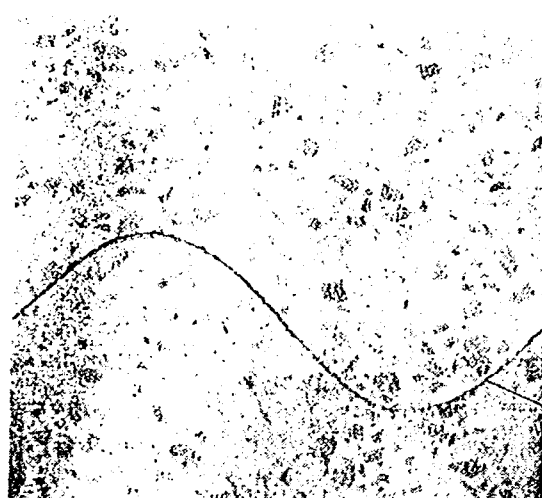


高回転掘削コア

写真-4.4.16 コア写真



低回転掘削



高回転掘削

写真-4.4.17 展開画像

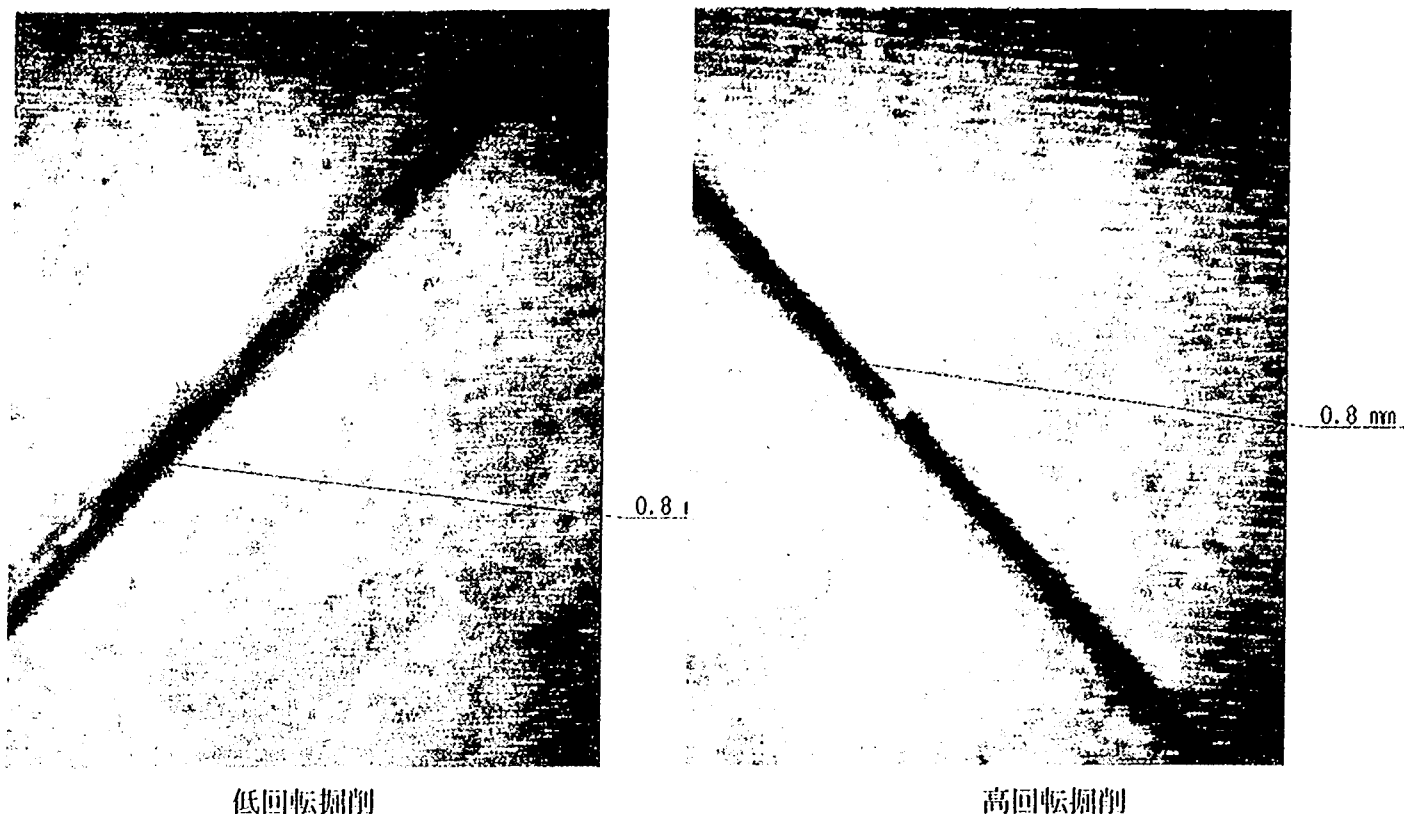


写真-4.4.18 クラック幅測定画像

③ 角度のあるクラックの頂部と底部での測定

写真-4.4.19 及び写真-4.4.20 は、クラック角度 30° およびクラック角度 45° の頂部の映像である。写真-4.4.19 及び写真-4.4.20 によると、頂部でクラック幅を測定した場合は、クラック角度 30° が、低回転掘削でクラック幅が 2.7mm 、高回転掘削で 3.6mm である。クラック角度 45° の場合は、低回転掘削が 3.5mm 、高回転掘削で 4.9mm となる。ただし、映像では、クラック下面部が薄く削り取られているようにも見られる。今回は、この薄く削り取られたように見られた範囲までクラック幅として測定している。いずれにしても、頂部での測定はクラック幅を過大に評価する可能性が高いと考えられる。

写真-4.4.21 及び写真-4.4.22 は、クラック角度 30° およびクラック角度 45° の底部の映像である。写真-4.4.21 及び写真-4.4.22 によると、底部でクラック幅を測定した場合は、クラック角度 30° が低回転掘削でクラック幅が 0.4mm 、高回転掘削で 0.3mm である。クラック角度 45° の場合は、低回転掘削・高回転掘削ともに 0.3mm となり、クラック幅を過小に評価している。しかしながら、底部のクラック面は、いずれも潰れたもしくは、崩れた状態となっており、クラック幅を測定するには、測定条件が悪く、かつ解析者の技量に左右される可能性が高いことから、何れも測定誤差を招きやすいことは確実である。

以上の結果より、供試体作成時にクラック幅の誤差が生じたとしても、展開画像からクラック幅を測定する場合には、頂低部を測定するとクラック幅を過大もしくは過小評価する可能性があると考えられる。

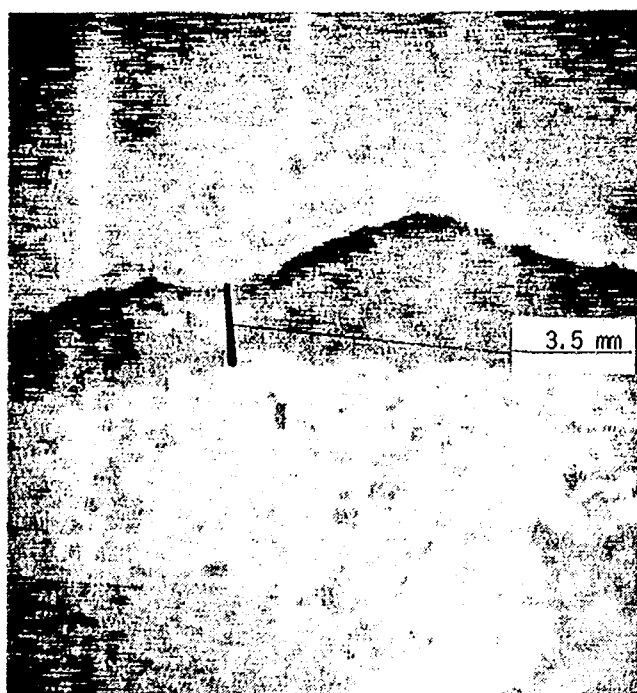


低回転掘削

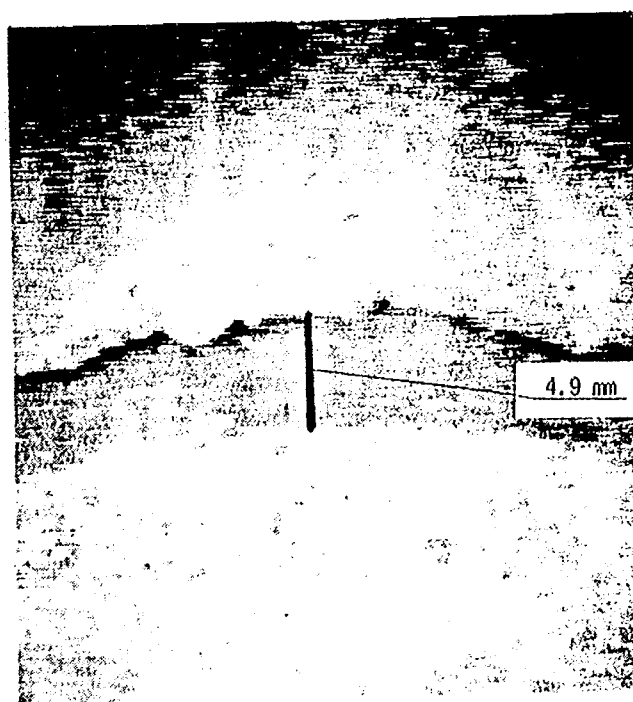


高回転掘削

写真-4.4.19 クラック幅測定画像(クラック角度 30°・頂部)

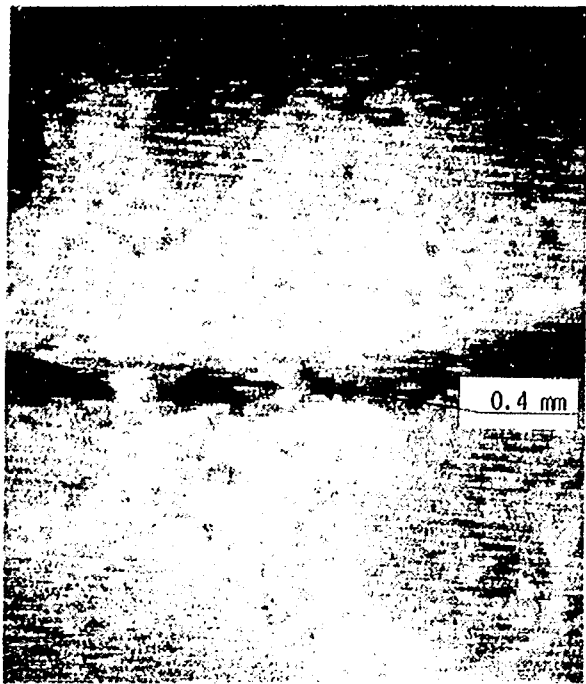


低回転掘削

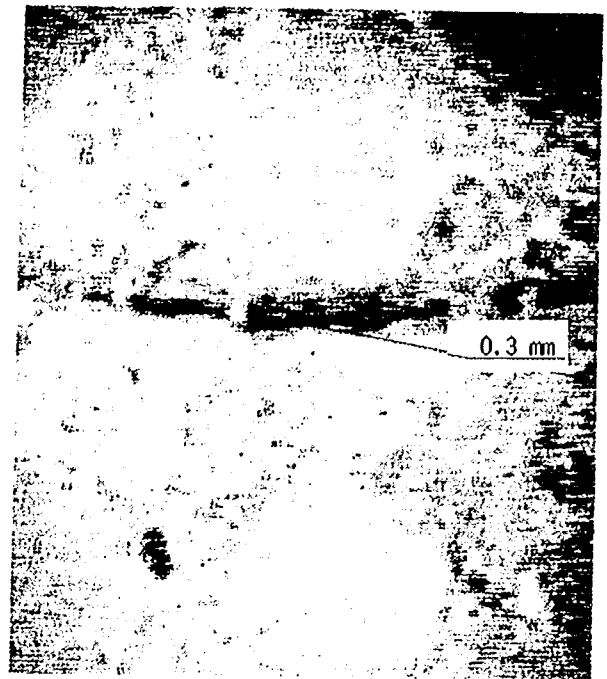


高回転掘削

写真-4.4.20 クラック幅測定画像(クラック角度 45°・頂部)

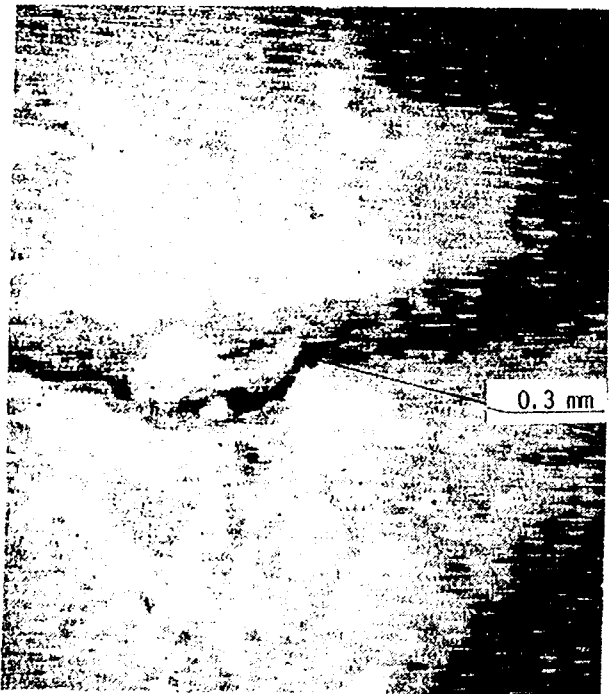


低回転掘削

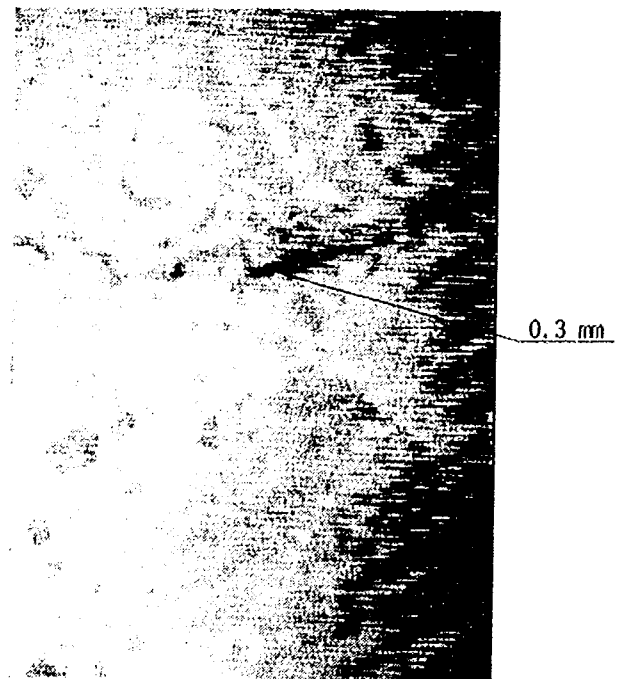


高回転掘削

写真-4.4.21 クラック幅測定画像(クラック角度 30°・底部)



低回転掘削



高回転掘削

写真-4.4.22 クラック幅測定画像(クラック角度 45°・底部)

④ クラック角度 0° (水平)

写真-4.4.23 は、低回転掘削と高回転掘削で採取したコアを上面から撮影したものである。写真-4.4.23 によれば、低回転で採取したコアは、クラック上面がほぼ全域に欠けている。一方、下面については、ほとんどかけていない。高回転で削孔したコアは、クラック上面に、複数の欠けた部分が認められたが、下面は2箇所程度である。

写真-4.4.24 は、拡大した低回転掘削と高回転掘削の展開画像である。写真-4.4.24 によれば、低回転掘削および高回転掘削のいずれも、クラック内にコンクリート片が混入している。さらに、クラック部分を詳細に観察すると、コアチューブがクラック位置に達した時に、クラック上面部全体が剥離もしくは全体に欠けたように見受けられる。この崩れ具合を箇所数で表すと、下記のようなになる。

高回転掘削：21 ブロック(コンクリート片の数)

低回転掘削：14 ブロック(//)

ブロック数では、高回転掘削の方が多くなるが、次のようなことが言える。

高回転掘削：亀裂面が細かく崩れて、崩れ落ちたコンクリート片も細かい。崩れた高さも比較的低い。

低回転掘削：亀裂面は大きく崩れて、崩れ落ちたコンクリート片も大きな物が多い。崩れた高さは比較的高い。

この現象を図化すると、図-4.4.5 に示したようになる。

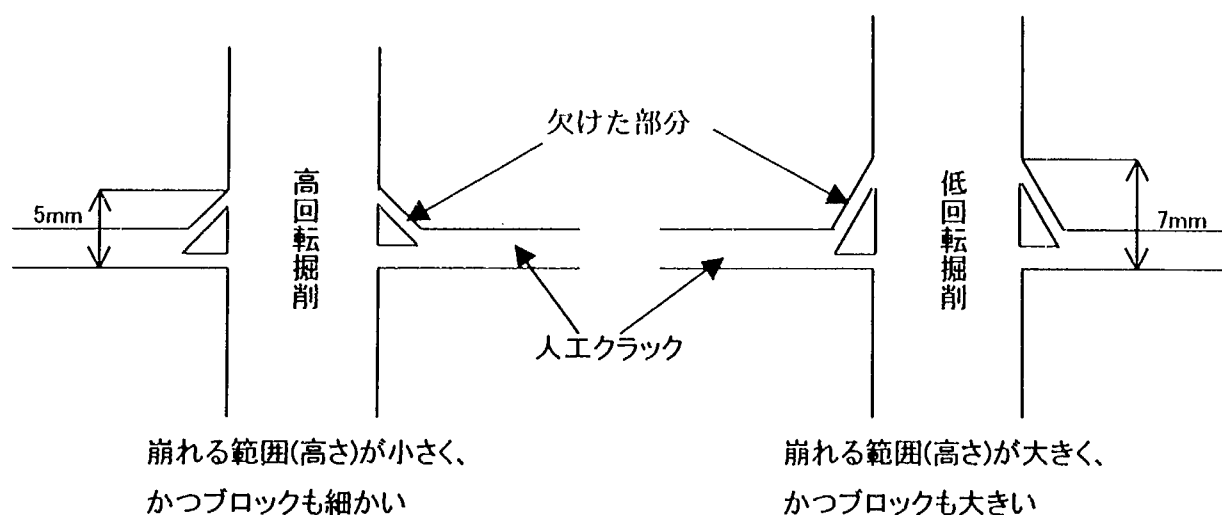


図-4.4.5 クラック面の欠損部の模式図

測定するクラック幅は、対象構造物(ダム・杭等)によって異なるが、一般には最小幅を測定するが多い。しかしながら、写真-4.4.24(a)、(b)ともに、全断面にわたり水平に2段のクラックが存在しているため、1つの大きなクラックとも読み取れる。

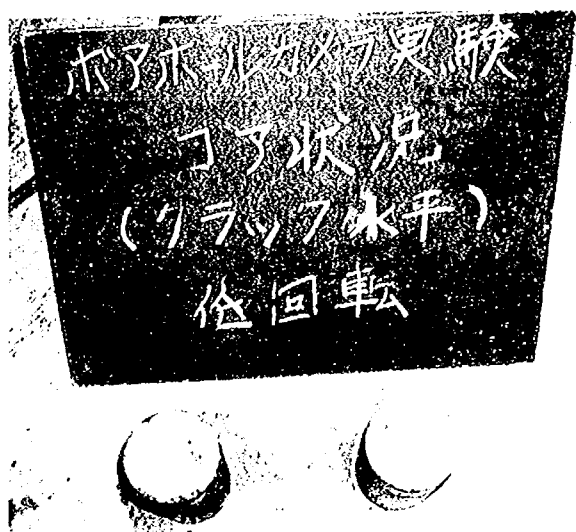
写真-4.4.25 は、クラック部を拡大し、クラック幅を測定したものである。クラック幅は、低回転掘削・高回転掘削ともに、崩れ落ちたコンクリート片の影響により、一般的な最小幅によるクラック幅を特定すると、クラック幅は0.3mmとなる。ここで、クラック幅が0.8mmと測定できる位置を比率で

表すと、下記に示したようになる。

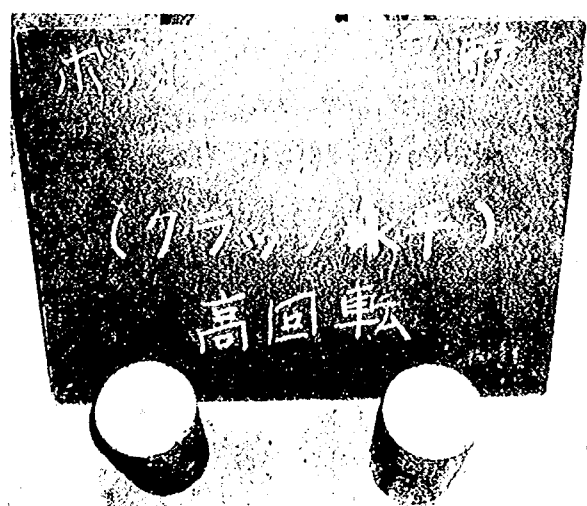
高回転掘削： 23.8% 85.7° /360° (クラック幅 0.3～7.0mm)

低回転掘削： 7.1% 25.7° /360° (クラック幅 0.3～

以上より、水平クラックの場合は、コアボーリング時にクラックを破損させ、解析に支障をきたす可能性が高く、さらに、コンクリート片がクラック部分に詰まることにより、クラック幅を過小もしくは過大に評価する恐れがある。

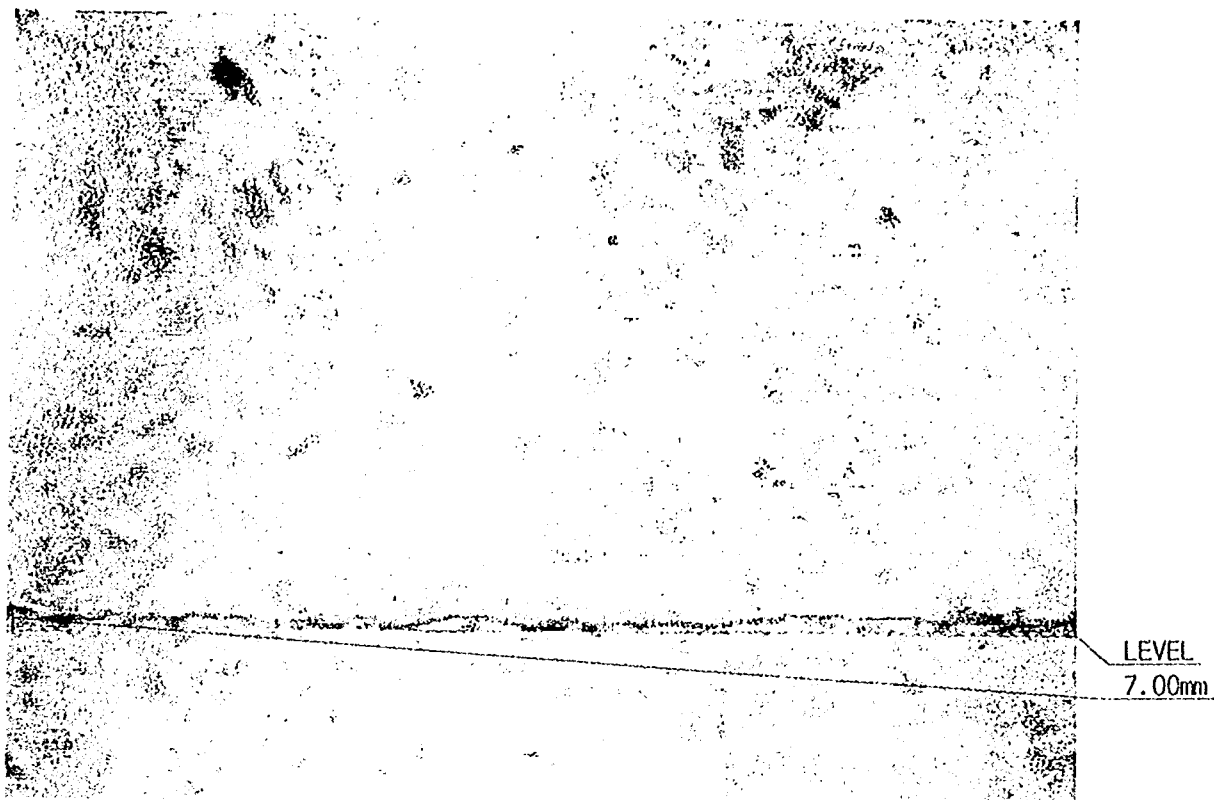


低回転掘削コア

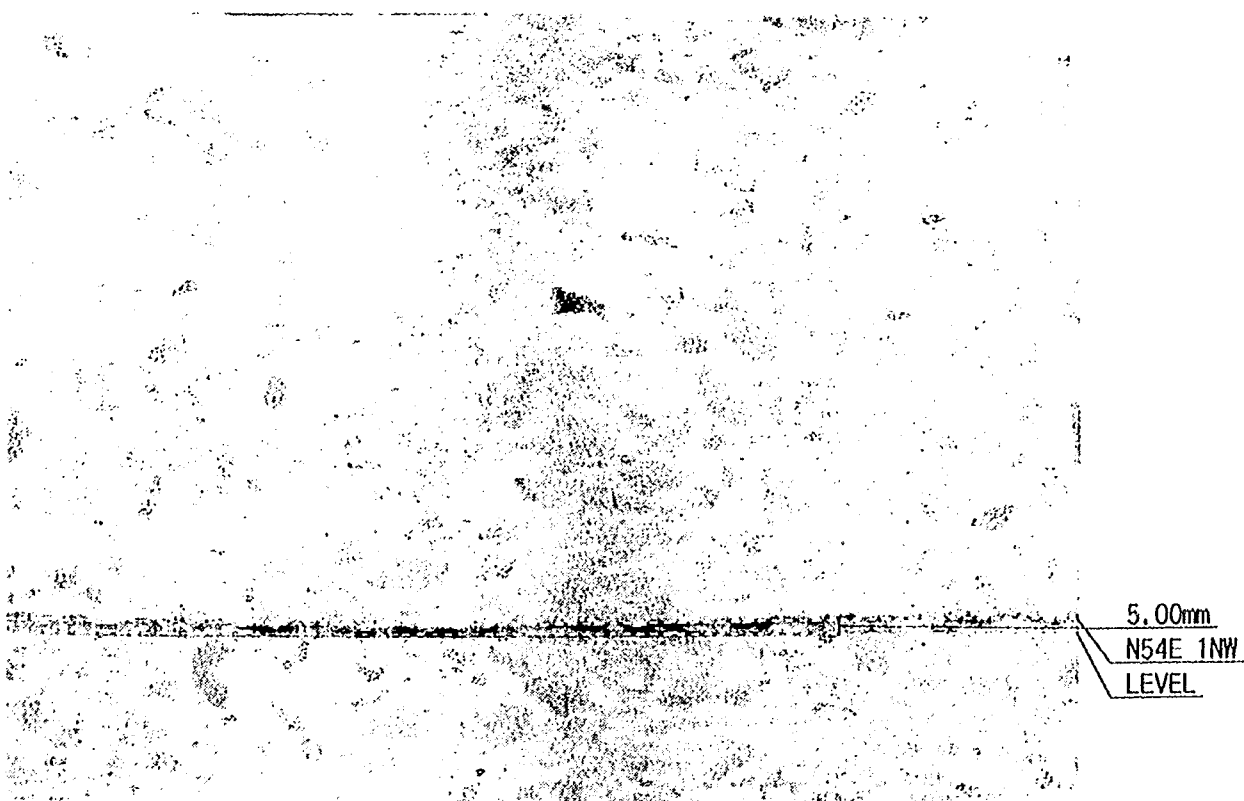


高回転掘削コア

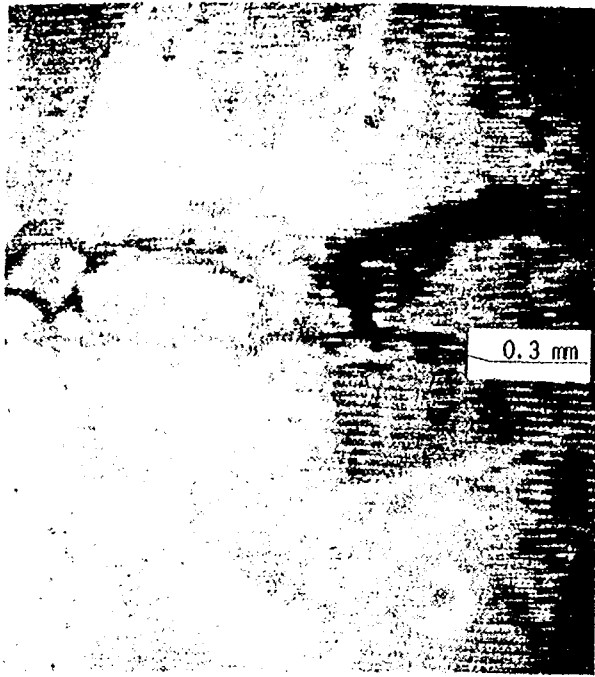
写真-4.4.23 コア写真



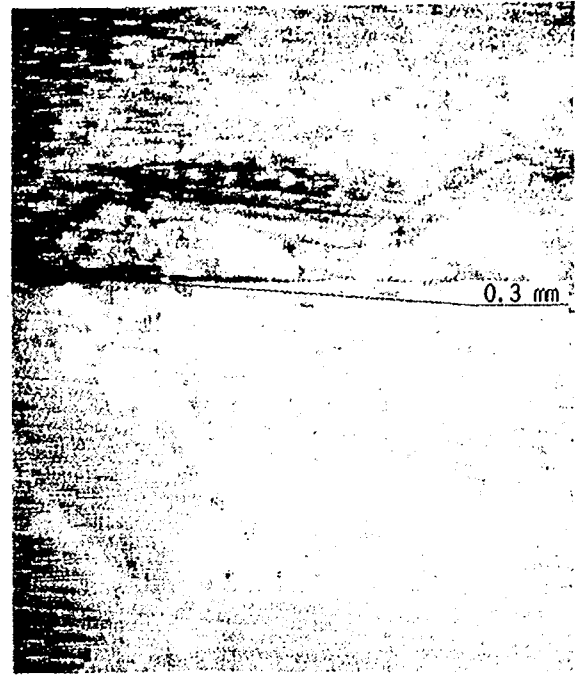
写真—4.4.24(a) 低回転掘削展開画像



写真—4.4.24(b) 高回転掘削展開画像



低回転掘削コア



高回転掘削コア

写真-4.4.25 クラック幅測定画像

4.4.3 適用条件

ボアホールカメラを利用するに当たっての適用条件についてまとめる。

- a. 観測孔の孔径は、ボアホールカメラの大きさによって、 $\phi 66\text{mm} \sim 100\text{mm}$ であるが、最大径は孔内水の濁りが無ければ 200mm でも可能である。ただし、クラックの解析精度は、撮影面積が増えても得られる画像素子の情報量が一緒なので落ちる。
- b. 観測孔を掘削する時に水を使用するが、水が濁っている場合は、画像の鮮明度は落ちるので、可能な限り清水にする。
- c. BIPS は、コンパスで方向を制御しているため強磁性体が近くにあると画像が歪む。
- d. 測定深度は、P・I・C が 50m 、BIPS は $500\text{m} \sim 1,600\text{m}$ で、橋梁基礎構造の観察を考えた場合、十分な深度である。
- e. 観測システムは、AC100V の電源が必要である。
- f. 観測孔が垂直ではない場合も可能であるが、特殊な装置あるいは工夫が必要となる。
- g. 観測孔の掘削により、特に水平クラックの部分は角部が欠け、解析に支障をきたす可能性があるため、掘進方法には注意が必要である。
- h. 水平クラックの場合は、観測孔の掘削により、欠けたコンクリート片がクラックに詰まり、クラック幅を過小もしくは過大に評価する可能性が高く、細心の注意が必要である。
- i. ボアホールカメラは、いろいろな種類があり、その目的によって使い分ける必要がある。
- j. ボアホールカメラで解析可能なクラックは、 1mm 以上のものは確実に判定できる。BIPS の場合には詳細画像の設定を行うことにより 0.1mm 程度までは判定可能である。一方、P・I・C ではズームでクラック面を測定することにより、 0.1mm 程度までは可能であるが、解析者の技量による所が大きい。
- k. 解析手法は、成果品がビデオタイプのものは、目標物を撮影しキャリブレーションを行なう必要があり、解析精度が落ちる。
- l. 角度のあるクラックは、展開画像からクラック幅を測定する場合に、サインカーブの頂部もしくは底部で測定すると、クラック幅を過大もしくは過小評価する可能性がある。

4.4.4 まとめ

(1)ボアホールカメラの精度

今回の観察結果をまとめると以下ようになる。

- a.カメラの種類によって、光源の明るさが異なるため、画像の鮮明度が違う。
- b.成果品は、BIPS では連続写真を簡単に作成できるが、P・I・C はビデオの方が鮮明である。
- c.BIPS では、クラック幅の精度が詳細画像で観察していないと、0.25mm が限度である。
- d.カメラの種類によって、撮影可能範囲(深度)が違う。この場合は、P・I・C の方が、5cm 深く撮影できている。これは、カメラの取り付け位置の違いである。
- e.クラックの大きさは、1mm 以上のものは明確に判別できる。
- f.P・I・C は、クラックの大きさは、目標物を同時に撮影し、キャリブレーションを行なって決定する必要がある。

(2) 観測孔削孔方法による影響

今回の実験結果をまとめると以下ようになる。

- a.掘削方向に対して、30° 以上の角度がついているクラックは、観測孔の掘削による影響が少ない。
- b.掘削方向に対して、30° 以上の角度がついているクラックは、削孔に使用するコアボーリングマシンの回転数の違いによる影響は少ない。
- c.水平クラックの場合は、観測孔の掘削により、クラックの角部が欠け、コンクリート片がクラック部分に詰まり、解析に支障をきたす可能性が高い。
- h.水平クラックの場合は、削孔に使用するコアボーリングマシンの回転数の違いにより、欠ける状態が異なる。低回転掘削は、亀裂面は大きく崩れて、崩れ落ちたコンクリート片も大きな物が多く、崩れた高さは比較的高い。一方、高回転掘削の場合は、亀裂面が細かく崩れて、崩れ落ちたコンクリート片も細かく、崩れた高さも比較的低い。
- h.水平クラックの場合は、観測孔の掘削により、c. で述べた現象により、クラック幅を過小もしくは過大に評価する可能性が高く、細心の注意が必要である。
- i.角度のあるクラックは、展開画像からクラック幅を測定する場合に、サインカーブの頂・低部での測定を避け、極力、サインカーブの変化点で測定することが望ましい。

4.5 磁気探査

4.5.1 研究概要

(1) 研究目的

磁気探査は磁気傾度計を使用して、強磁性体の位置を特定することにより、杭の形状を推定する方法である。磁気探査の解析には理論式より求めた磁気波形を使用している。したがって、理論式により算出したモデル波形と実測波形の相違を明確にし、探査方法（観測孔の仕様など）および解析手法を確立することを目的とした。

また、供試体実験によれば開口亀裂部で磁気異常が認められており、実橋梁においての適用性を確認することを目的とした。

研究目的をまとめると下記のとおりである。

- ① 探査方法の確立……………探査方法のフローの作成
観測孔の仕様の決定
- ② 解析手法の確立……………杭長解析手法の確認
杭配置（杭ピッチ）解析手法の確立
- ③ 健全度調査（破断位置の特定）への適用性の確認

(2) 研究項目

前述した研究目的を達成するため、下記の研究項目を実施した。

①杭と探査孔の距離による探査精度の把握

解析の基本となる磁気波形は杭と探査孔により相違するので、実橋梁実験等により探査精度を把握するとともに、探査精度を基に観測孔の仕様を決定する。

②杭ピッチ解析法の確立

磁場を斜めに切断する場合の起電圧の算出方法を確立する。

③杭の健全度調査（破断位置の特定）への適用性の確認

供試体実験によれば開口亀裂部で磁気異常が認められており、実橋梁においての適用性を確認する必要がある。

また、供試体実験で磁気異常が認められた杭の目視確認（特に、帯磁体の鉄筋の状況の確認）および地上部での亀裂杭の磁気反応を確認する。

具体的な方法としては、①、②については実橋梁実験においてデータを収集すること、③については其通供試体の目視による亀裂（帯磁体である鉄筋の状況確認）および同供試体の陸上部による模擬探査により求める。

4.5.2 実橋梁実験探索結果

①杭と探索孔の距離による探索精度の把握、②杭種による磁気反応の相違、③観測孔設置仕様の決定を目的として、下記の実橋梁等に対して実験を行った。

- (1) 土木研究所内橋梁：鋼管杭（ $\phi 600\text{mm}$ 、 $l=13.0\text{m}$ ）
- (2) 土木研究所内P H C杭：P H C杭（ $\phi 500\text{mm}$ 、 $l=6.0\text{m}$ ）
- (3) 岸和田現場実験：場所打ち杭（ $\phi 1300\text{mm}$ 、 $l=28.9\text{m}$ ）

(1) 鋼管杭（土木研究所内橋梁）探索結果

1) 杭の形状および観測孔の配置

杭は外径 $\phi 600\text{mm}$ 、杭長 13.0m の鋼管杭で、探索対象基礎には16（ 4×4 ）本の杭が配置されている。観測孔は鉛直観測孔4孔、傾斜観測孔3孔を設置した。観測孔の仕様は表-4.5.1に、杭配置および観測孔の配置状況を図-4.5.1にまとめた。

表-4.5.1 観測孔仕様（土研内橋梁）

孔番	杭との離れ (m)	観測孔角度	保護材	観測孔長 (m)
B 1	1.00	傾斜 35°	VP100	22.0
B 2	1.00	垂直	VP65	20.0
B 3	2.00	垂直	VP65	20.0
B 4	4.00	垂直	VP65	20.0
B 5	2.00	傾斜 35°	VP65	22.0
B 6	4.00	傾斜 35°	VP65	22.0
B 7	1.00	垂直	VP65	20.0

2) 杭長探索結果

i) 磁気異常点

鉛直探索の測定結果（実測波形）を図-4.5.2、図-4.5.3にまとめた。

実測波形によれば次の磁気異常点が認められた。

① GL-2.0m付近（杭頭と考えられる）

② GL-15.0m付近（杭先端反応と考えられる）

① GL-2.0m付近（杭頭と考えられる）

杭頭部と考えられる磁気反応がGL-2.0m付近に認められた。

なお、杭に近接する観測孔（B2、B7）に対しては2つの磁極が読取れる。これは、観測孔が近い場合、探索対象杭の杭頭の磁極のほかに、他の杭の杭頭磁極に反応したか、もしくはフーチング基礎鉄筋の磁極に影響されたものと考えられる。

② GL-15.0m付近（杭先端反応と考えられる）

B2～B4、B7すべてにおいて、杭先端と思われる磁気波形が読取れる。離れ4mの計測（B4）においても、最大起電力は1.0Vであり、測定離れが2.0m以内の測定結果に比べ地盤ノイズは多いが、明確な杭先端に対する磁気反応が読取れる。

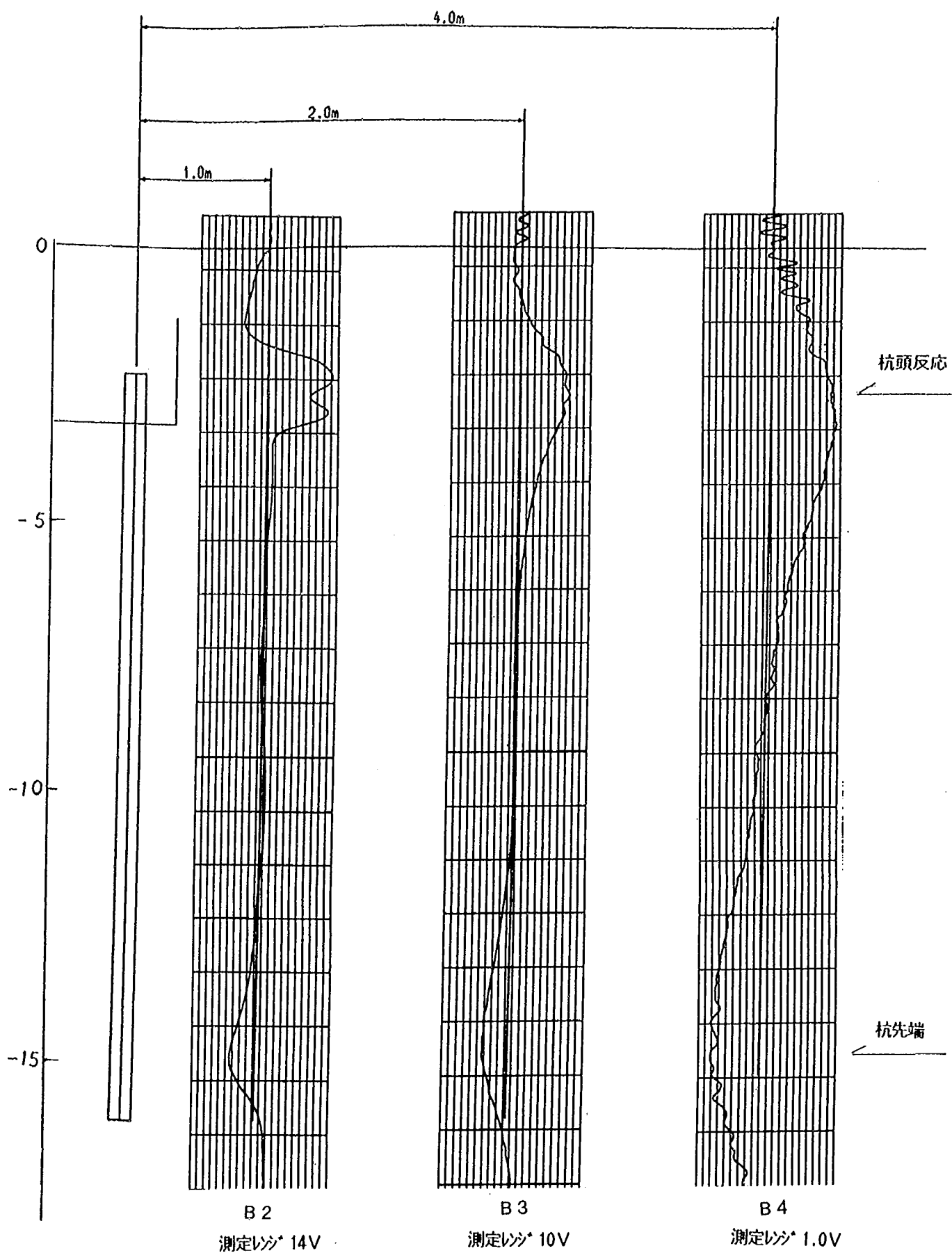
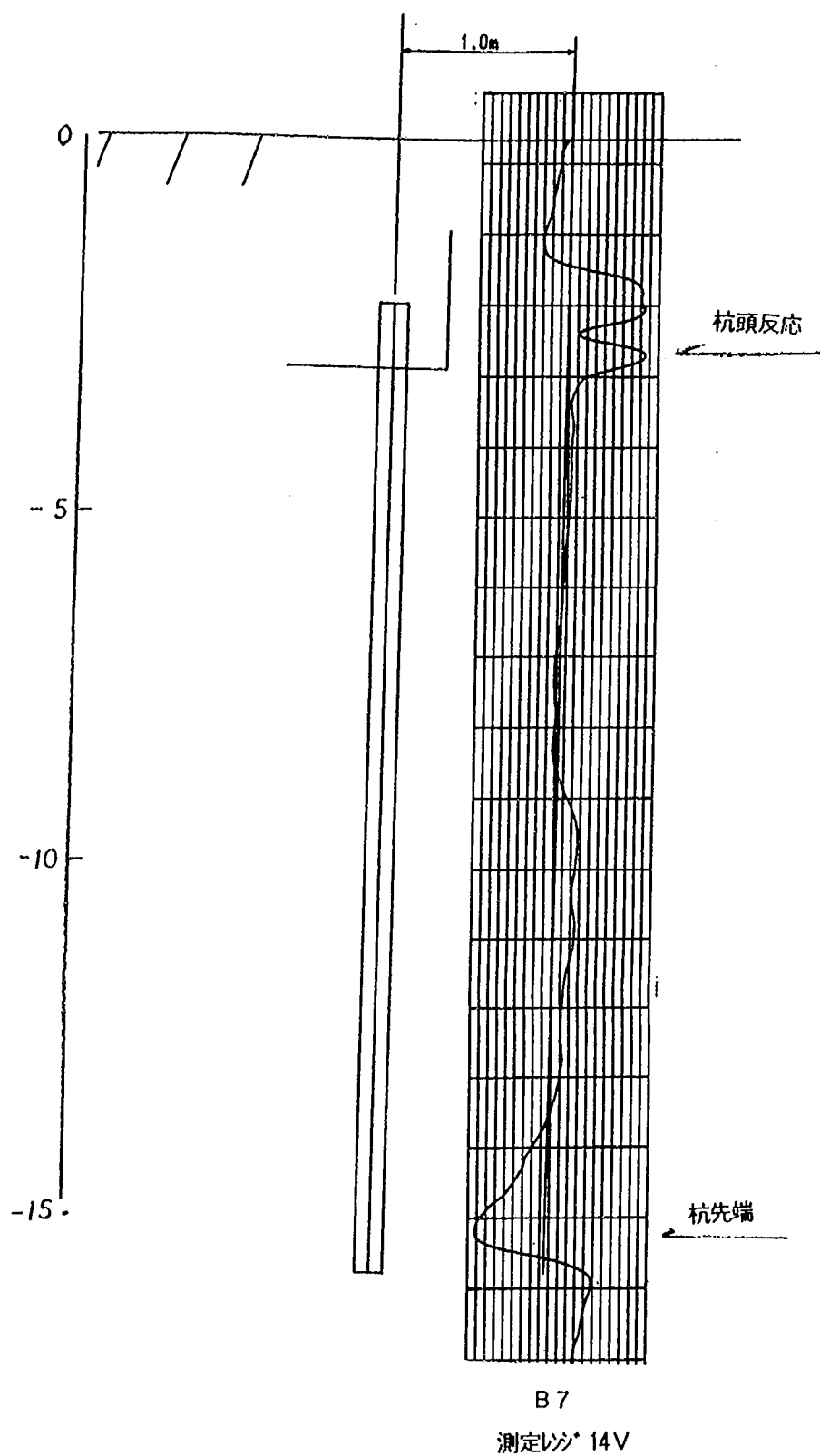


図-4. 5. 2 杭長探查結果 (実測波形)

縮尺: 1/100



図一4. 5. 3 杭長探查結果（実測波形）

縮尺：1/100

ii) 杭先端位置の解析

実測波形とあうモデル波形により杭先端位置をもとめると下表のとおりである（図-4.5.4、図-4.5.5参照）。杭先端磁気異常点位置から求めた杭先端位置と図面位置を表-4.5.2にまとめた。

表-4.5.2 杭先端磁気異常点位置の図面位置と探査結果の比較

ボーリング No.	観測孔の離れ (m)	深度 GL- (m)		杭長 (m)	
		図面位置	探査結果	杭長 (m)	差 (m)
B-2	1.0	16.0	14.6	12.8 12.1	0.2 0.9
B-3	2.0		14.5	12.7 12.0	0.3 1.0
B-4	4.0		14.1	12.3 11.6	0.7 1.4
B-7	1.0		15.3	13.5 12.8	0.5 0.2

図面位置深度はフーチング底面を GL-3.0m と仮定した場合

杭長は B-7 杭の杭頭反応より杭頭位置 (GL-1.8m: 上段、2.5m: 下段) として杭長を求めた

基礎深度（標高）は図面では明示されていないため、図面深度から読取ったものであり、図面深度の相違を比較しても意味がない。

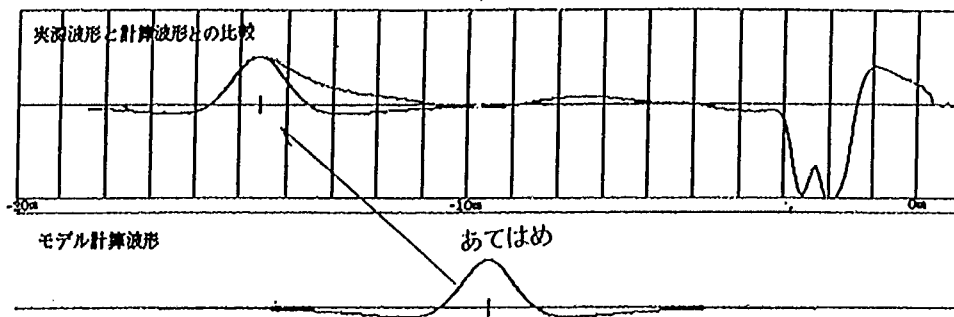
ただし、同じ杭の杭長を探査した B 2～B 4 の解析結果によれば、探査孔の距離が大きくなると杭長深度は短くなる結果となっている。特に、離れ 1.0m の B 2 と離れ 2.0m の B 3 での杭長深度の差は 10cm であるが、離れ 1.0m の B 2 と離れ 4.0m の B 4 での杭長深度の差は 50cm と大きくなっている。

図-4.5.4～図-4.5.5 に示すように、離れ 1.0m、2.0m のモデル波形と実波形のあてはめは余り一致していない（実測波形は非対称であるため）が、離れ 4.0m についてモデル波形と実波形のあてはめは比較的一致する。これは、鋼管 1 本 1 本の磁気反応がかなり大きいため、前者は他の杭の影響を受けるものも、対象杭杭先端の磁極が求められたのに対し、後者は複数の杭により形成された磁場の磁極が求められたものと考えられる。

前述のように実際の杭長深度が明確でないため探査誤差は不明であるが、観測孔が探査杭から離れば、探査杭以外の杭の影響を受けることは明確である。

なお、同じ 1.0m 離れの B 2 と B 7 の探査結果を比較すると、明らかに違う杭長深度（70cm の差）が得られた。この要因としては、①対象杭が違うため杭長が実際に相違したため、②杭の位置が図面と相違したため杭との離れが相違し探査精度に違いが生じた（解析モデルからの離れでは図面位置より B 7 方向に 50～100cm にずれた位置に杭が配置されていると考えられる）。

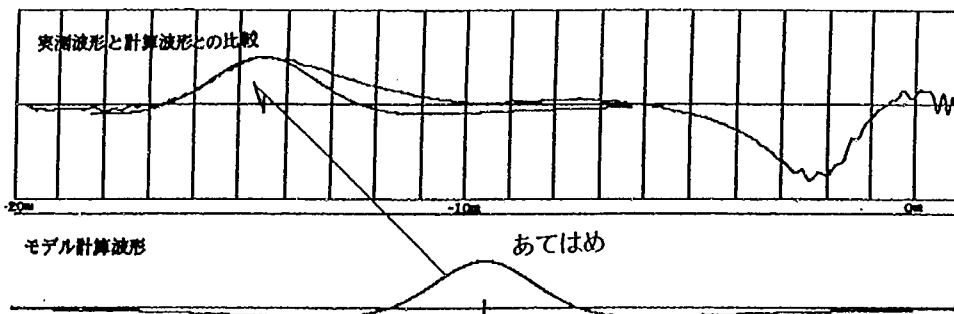
鉛直探査データ処理 KRB2-10U表示範囲 深度 1.0m～20.0m 深度 -14.60m



距離 $z = 1.50\text{m}$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(90^\circ)$

(1) B 2 での結果

鉛直探査データ処理 KRB3-5U 表示範囲 深度 1.0m～20.0m 深度 -14.50m

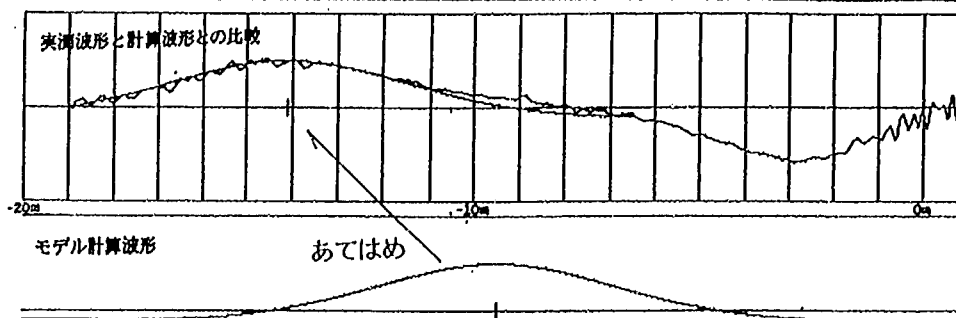


距離 $z = 3.00\text{m}$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(90^\circ)$

(2) B 3 での結果

図-4. 5. 4 実測波形とモデル波形のあてはめ

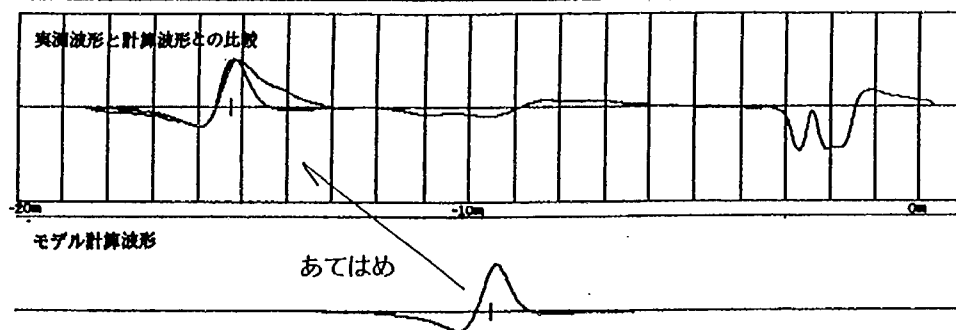
鉛直探査データ処理 KRB4-1U 表示範囲 深度 1.0m～20.0m 深度 -14.10m



距離 $z = 7.00m$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(90^\circ)$

(1) B 4 での結果

鉛直探査データ処理 KRB7-10U 表示範囲 深度 1.0m～20.0m 深度 -15.30m



距離 $z = 0.75m$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(110^\circ)$

(2) B 7 での結果

図-4. 5. 5 実測波形とモデル波形のあてはめ

3) 杭配置探索結果

i) 磁気異常点

探索の測定結果（実測波形）を図－4.5.7 (1) ～図－4.5.7 (3) にまとめた。

実測波形によれば、両側の杭位置に対応すると考えられる磁気反応は明瞭に認められているが、中間部にある杭に対する磁気反応は明瞭には表れていない。

B1（離れ1 m）、B 5（離れ2 m）に対しては不明確であるが中間部の杭と考えられる磁気反応が読取れるが、4 m離れたB 6では中間部の杭と考えられる磁気反応が読取れない。

磁気反応だけで評価すると連続的な磁場（例えば、鋼矢板）を横断した時のような磁気反応を示している。これは、隣接する杭の磁場が影響し合い一つの磁場として計測されたためと考えられる。

ii) 杭位置の解析

B 1 で認められた4箇所の磁気反応について、それぞれ斜めの杭のモデルとあてはめた結果を図－4.5.8、図－4.5.9に示した。実測波形とあうモデル波形により杭位置をもとめると下表のとおりである。

表－4.5.3 磁気異常点位置の図面位置と探索結果の比較

杭 No	図面位置	B 1		B 5	
		探索結果	差 (m)	探索結果	差 (m)
1	8.3	6.9	1.4	5.5	2.7
2	10.9	8.8	2.1	9.2	1.7
3	13.5	11.6	1.9	11.4	2.1
4	16.1	16.2	0.1	15.9	0.2

磁気異常点で記したように、中間部の杭（No 2、3）は、不明確な磁気波形に対して当てはめたものである。モデル計算結果と図面位置の杭位置（観測孔の地盤位置からの距離）を比較すると 2.0m程度の相違が認められる。

両側の杭の位置を比較すると、No. 4 杭はモデル計算結果はほぼ図面位置であるが、No 1 杭は1.5～3.0mの相違が認められ、観測孔の距離が離れたほうが相違が大きくなっている。これは No 1 杭が杭頭に近接するため、杭先端部の影響を受けたものと考えられる。

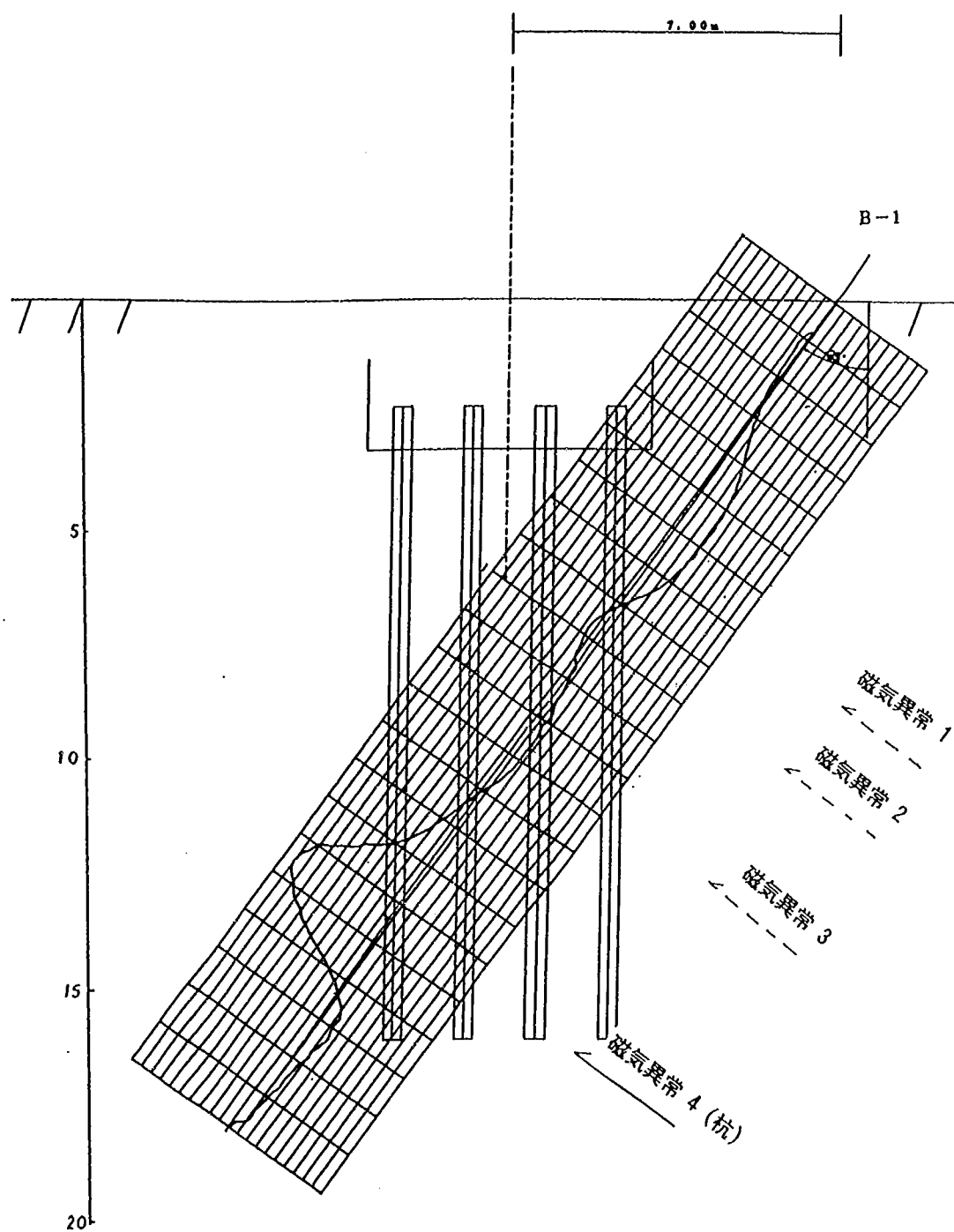


図-4. 5. 7 (1) 杭配置探查結果 (B 1 での実測波形)

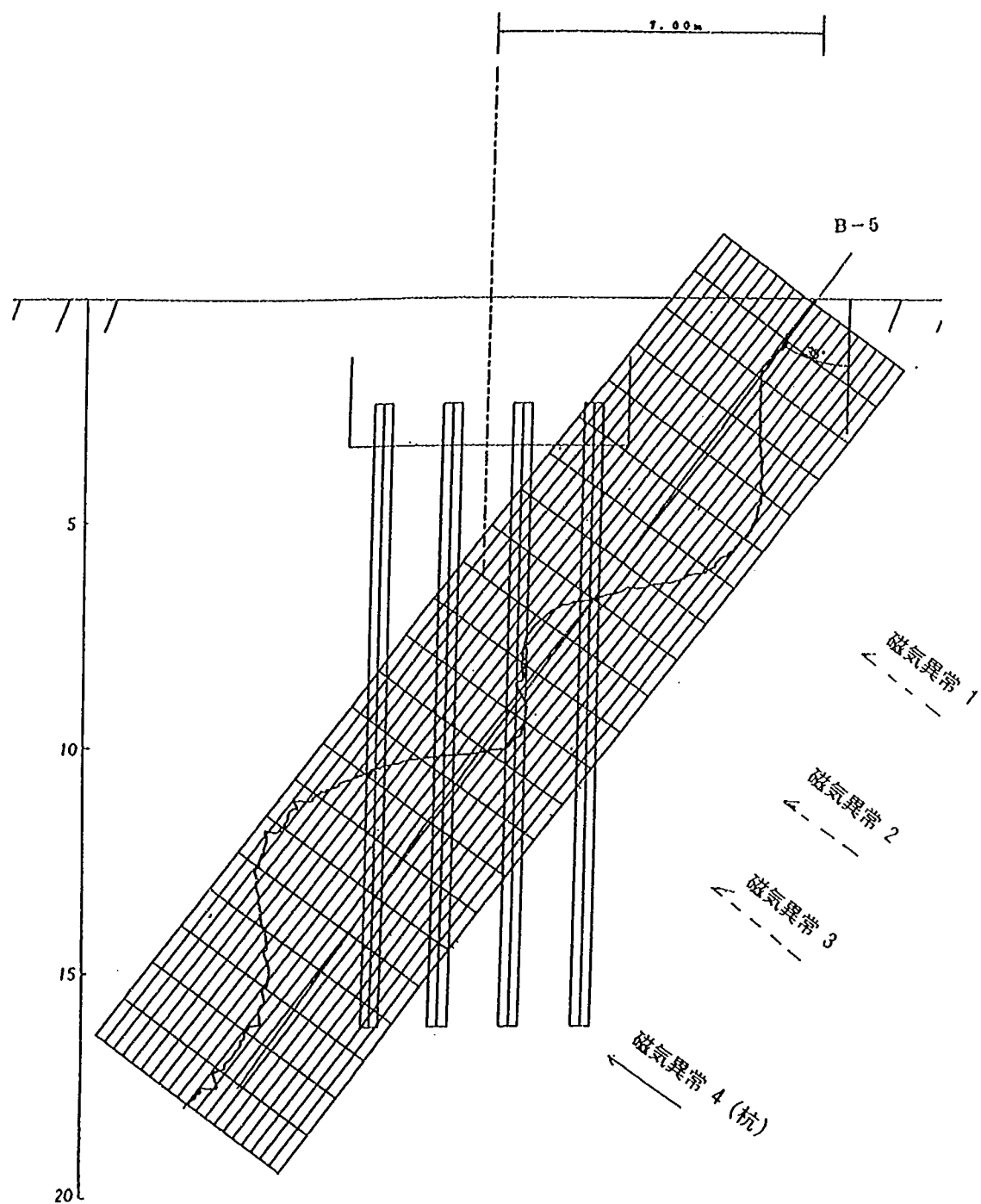


図-4. 5. 7 (2) 杭配置探查結果 (B 5 での実測波形)

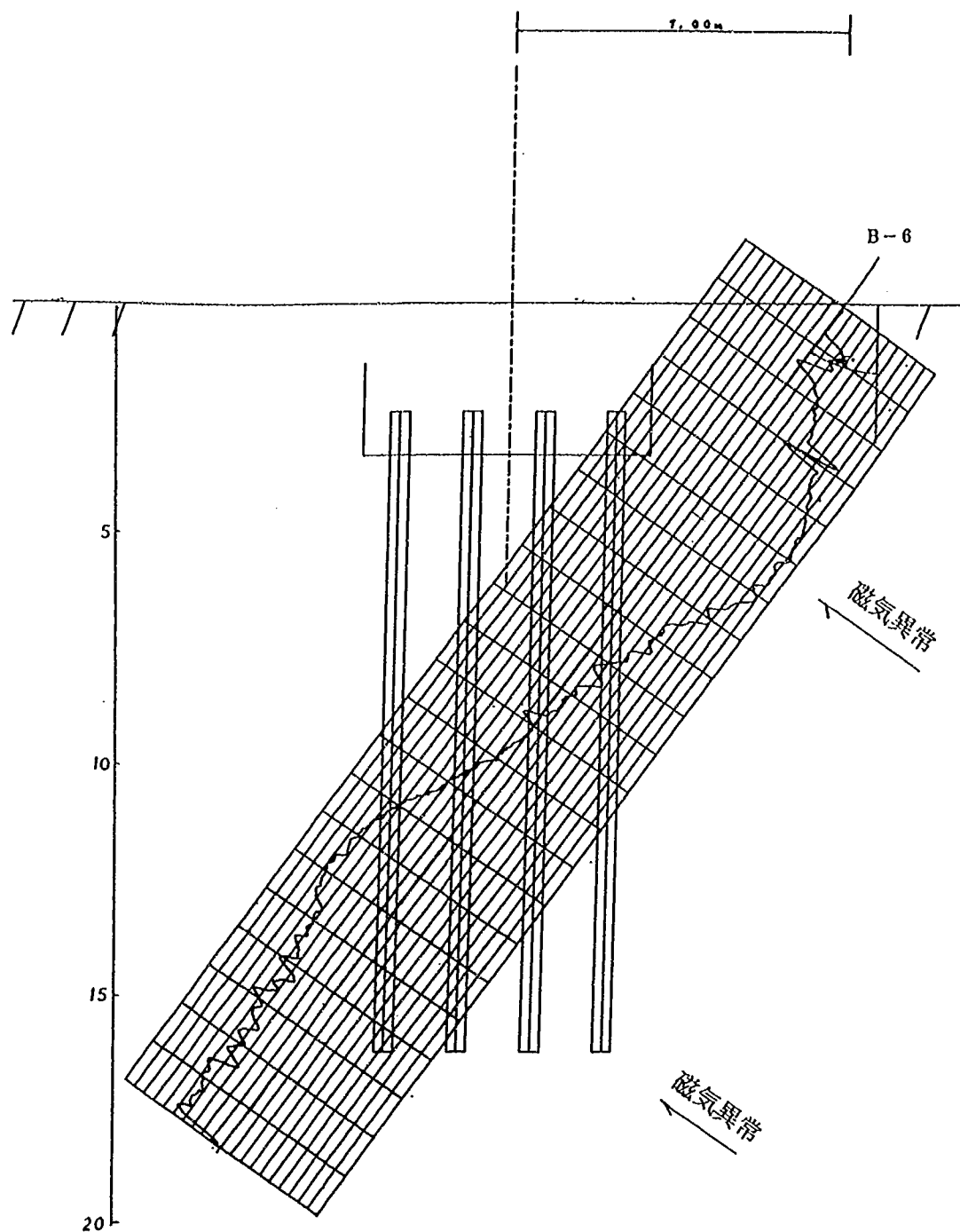
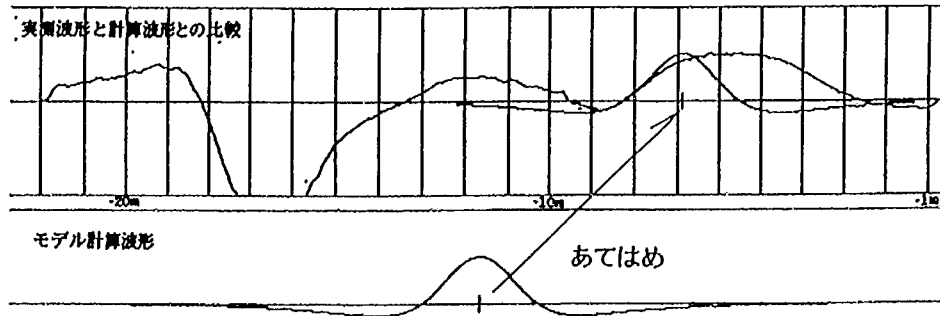


図-4. 5. 7 (3) 杭配置探査結果 (B 6 での実測波形)

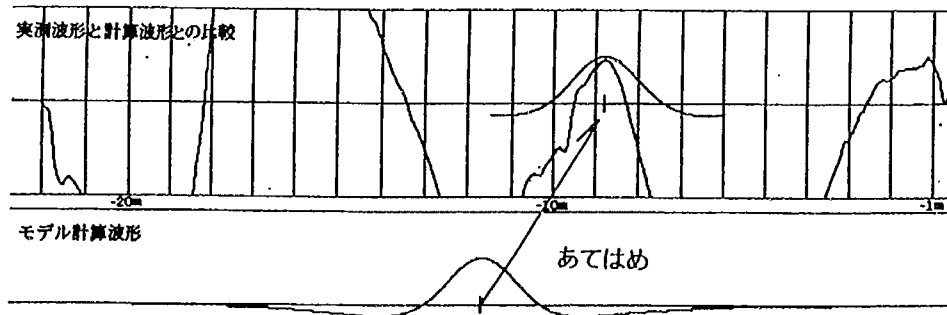
鉛直探査データ処理 KRB1-5U. 深度 -6.90 m



斜め角度 $\theta = 65^\circ$ 距離 = 1m 方向余弦 $\alpha = \cos(90^\circ)$ $\beta = \cos(50^\circ)$

(1) 磁気異常 1 のあてはめ

鉛直探査データ処理 KRB1-5U 深度 -8.80 m



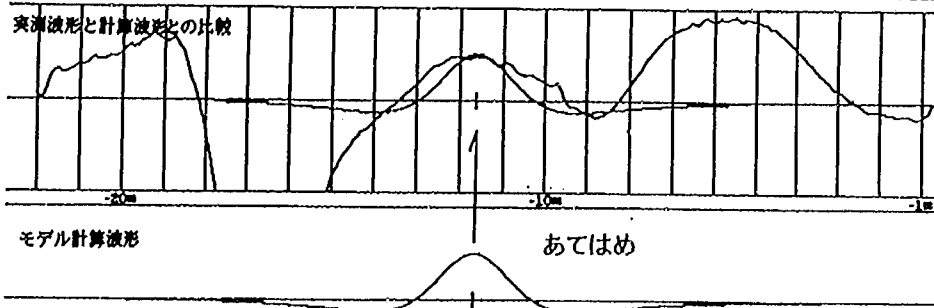
斜め角度 $\theta = 65^\circ$ 距離 = 1m 方向余弦 $\alpha = \cos(90^\circ)$ $\beta = \cos(50^\circ)$

(2) 磁気異常 2 のあてはめ

図-4. 5. 8 実測波形とモデル波形のあてはめ (B 1)

鉛直探査データ処理 KRB1-5U

深度 -11.60m

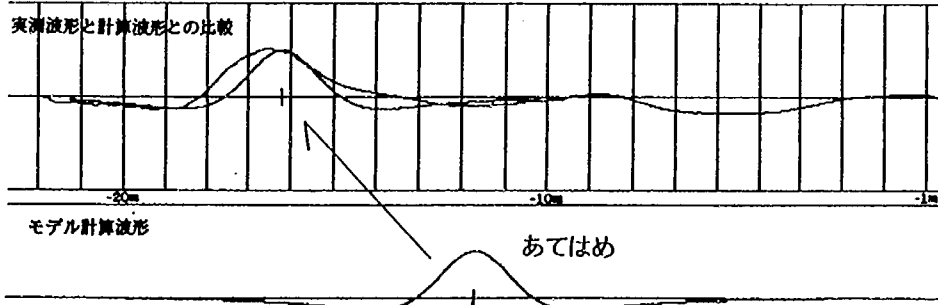


斜め角度 $\theta = 65^\circ$ 距離 = 1m 方向余弦 $\alpha = \cos(90^\circ)$ $\beta = \cos(50^\circ)$

(1) 磁気異常3のあてはめ

鉛直探査データ処理 KRB1-5U

深度 -16.20m



斜め角度 $\theta = 65^\circ$ 距離 = 1m 方向余弦 $\alpha = \cos(90^\circ)$ $\beta = \cos(50^\circ)$

(2) 磁気異常4 (杭) のあてはめ

図-4. 5. 9 実測波形とモデル波形のあてはめ (B1)

(2)PHC杭（土木研究所内1本杭）探查結果

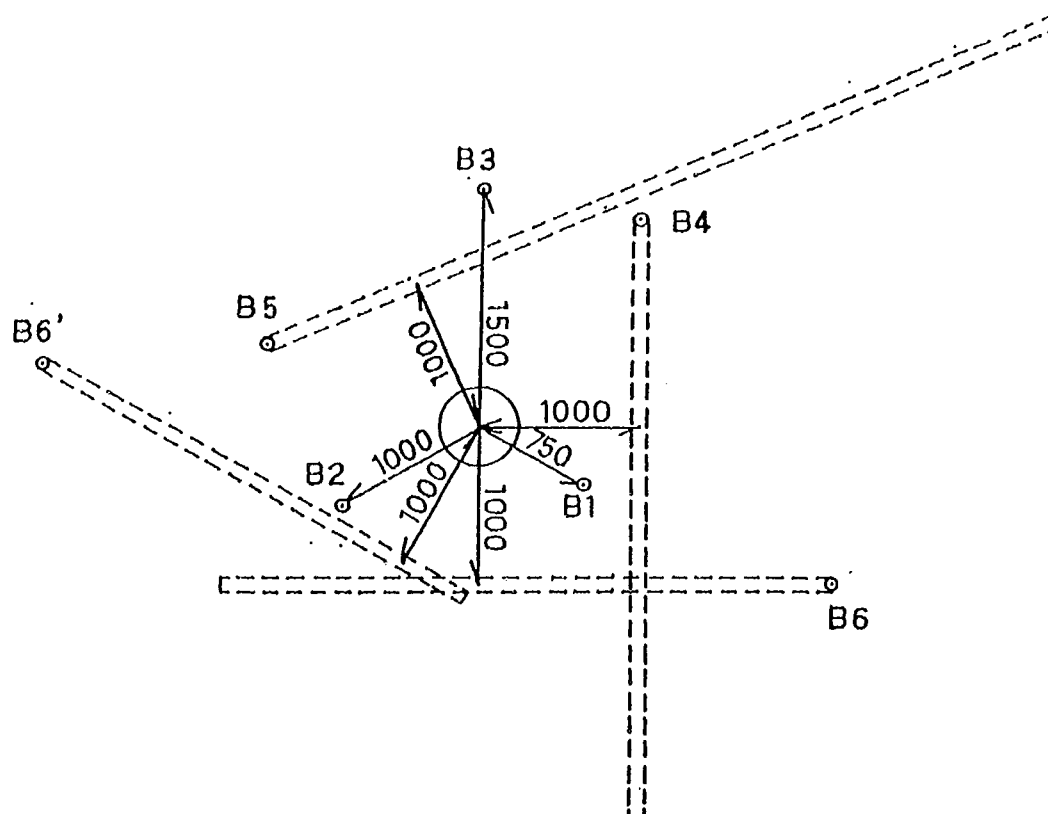
1）杭の形状および観測孔の配置

杭は外径φ500mm、杭長6.0mのPHC杭である。

観測孔は鉛直観測孔3孔、傾斜観測孔3孔を設置した。観測孔の仕様は表－4.5.4 に、観測孔の配置状況を図－4.5.10 にまとめた。

表－4. 5. 4 観測孔仕様（土研内PHC杭）

孔番	杭との離れ (m)	観測孔角度	保護材	観測孔長 (m)
B 1	0.75	垂直	VP65	9.0
B 2	1.00	垂直	VP65	9.0
B 3	1.50	垂直	VP65	9.0
B 4	1.00	傾斜 30°	VP65	7.5
B 5	1.00	傾斜 45°	VP65	7.5
B 6	1.00	傾斜 60°	VP65	4.0
B 6'	1.00	傾斜 60°	VP65	4.5



図－4. 5. 10 観測孔配置平面図（縮尺：1／50）

2) 杭長探査結果

i) 磁気異常点

鉛直探査の測定結果(実測波形)を図-4.5.11 にまとめた。

実測波形によれば次の磁気異常点が認められた。

① GL-0.0m~2.0m付近

② GL-6.0m付近(杭先端反応と考えられる)

① GL-0.0m~2.0m付近の磁気異常点

GL-0.0m~2.0m間には、複数の磁気異常が認められる。磁気異常深度および磁気異常点の数は観測孔により相違しており、杭とは関係しない磁気反応と思われる。磁気異常点が認められた区間は盛土と考えられるので帯磁物があっても不思議ではない。

なお、GL-1.0m付近で各孔において磁気異常点が認められており、この磁気異常点は同一磁場のものと考えられ、杭に関連した磁場(損傷?)の可能性もある。

② GL-6.0m付近(杭先端反応と考えられる)

B1~B3すべてにおいて、杭先端と思われる磁気波形が読取れる。

ただし、杭との離れが0.75m、1.0m離れのB1、B2の最大起電力は1.0V程度であるが、離れが1.5mのB3の最大起電力は0.5Vであり、B1、B2の最大起電力の半分程度である。

ii) 杭先端位置の解析

実測波形とあうモデル波形により杭先端位置をもとめると下表のとおりである(図-4.5.12 参照)。本計測結果によれば、実測波形とモデル波形が良くあてはまる。

本計測は単一杭の計測であり、実際の計測では、他の杭の影響を受ける可能性がある。

表-4.5.5 杭先端磁気異常点位置の図面位置と探査結果の比較

ボーリング No.	観測孔の離れ (m)	深度 GL-(m)	
		実深度	探査結果
B-1	0.75	6.0	6.0
B-2	1.00		6.0
B-3	1.50		6.0

探査結果は杭との離れが相違しても結果は同じであり、実際の深度に一致する結果が得られた。ただし、B3(離れ1.5m)については、磁気異常深度を若干変えても、実測波形とモデル波形をあてはめることが可能である。

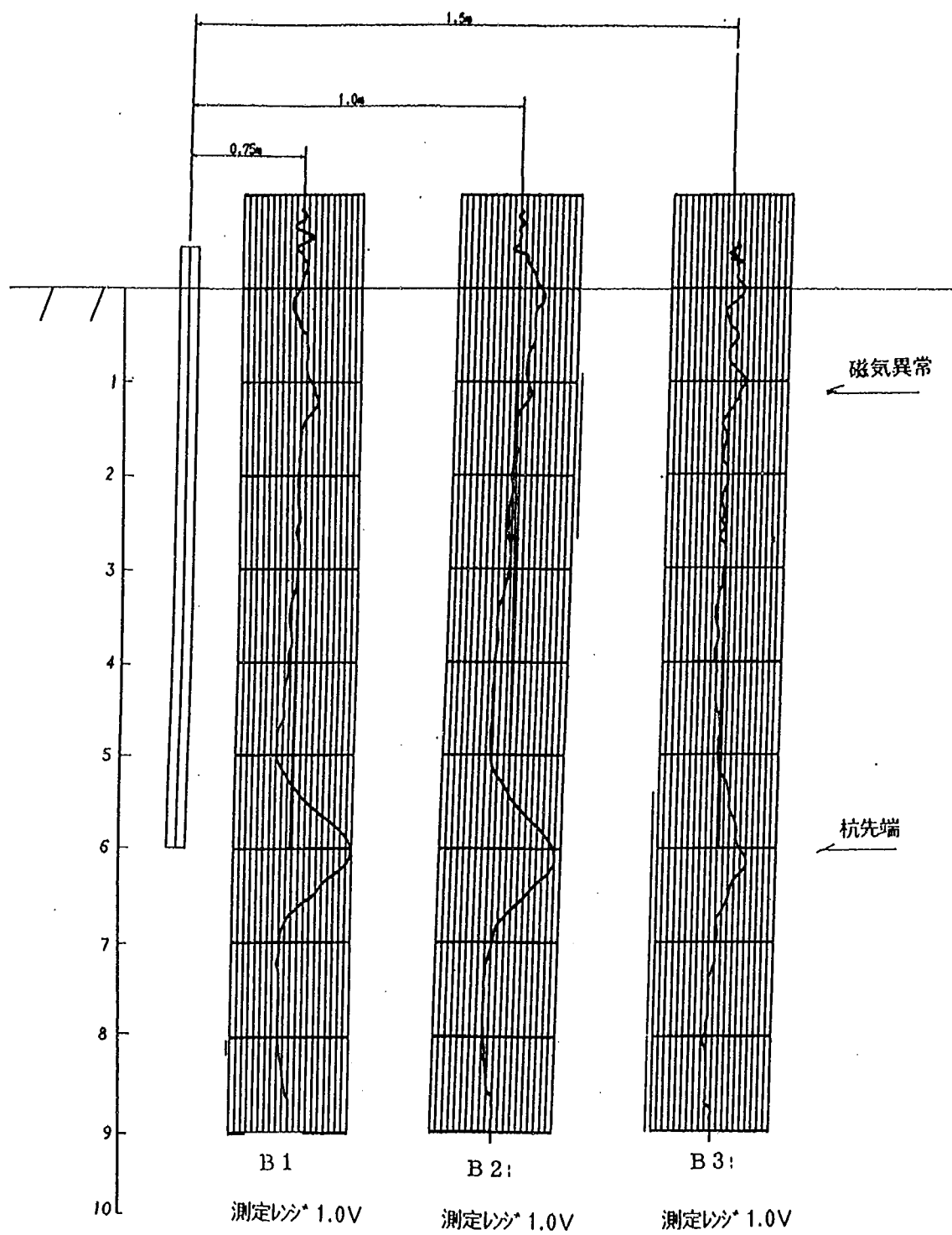
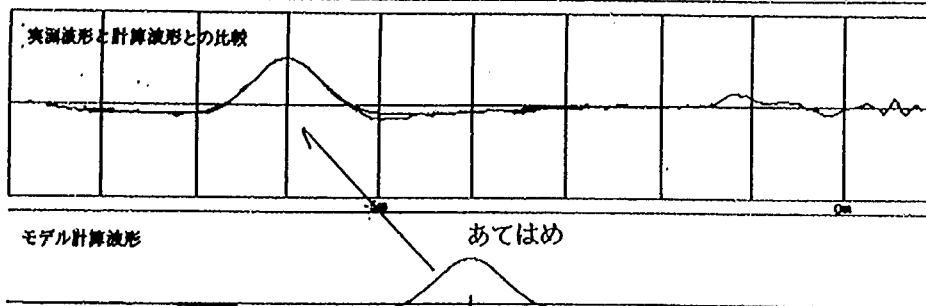


図-4. 5. 11 杭長探査結果（実測波形）

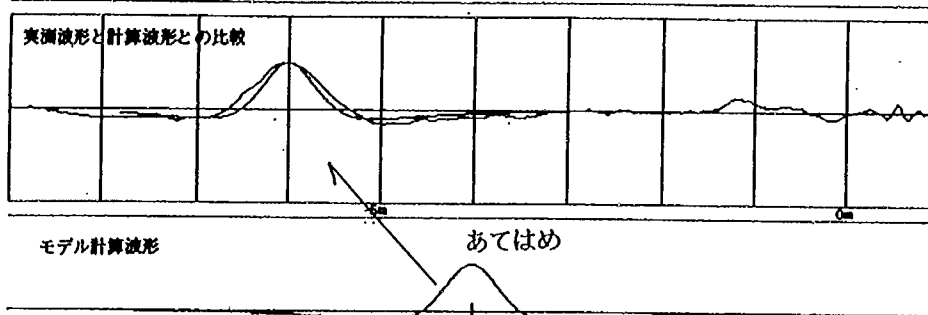
鉛直探査データ処理 PHCB1-1U表示範囲 深度 1.0m～-9.0m 深度 -6.00m



距離 $z = 1.00\text{m}$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(90^\circ)$

(1) B 1での結果

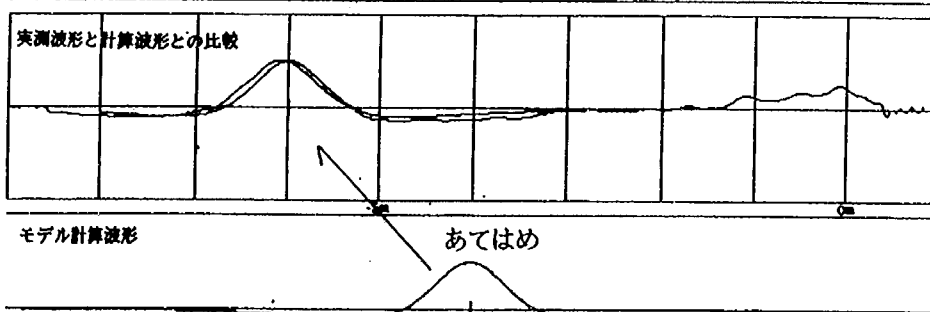
鉛直探査データ処理 PHCB1-1U表示範囲 深度 1.0m～-9.0m 深度 -6.00m



距離 $z = 0.75\text{m}$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(90^\circ)$

(2) B 2での結果

鉛直探査データ処理 PHCB2-1U表示範囲 深度 1.0m～-9.0m 深度 -6.00m



距離 $z = 1.00\text{m}$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(90^\circ)$

(3) B 3での結果

図-4. 5. 12 実測波形とモデル波形のあてはめ

3) 傾斜孔探索

傾斜孔探索の測定結果(実測波形)を図-4.5.13 にまとめた。実測波形によれば明確な磁気異常点が認められない。

これは、PHC杭の磁気量が小さいために、観測孔との離れ1mでは、計測不能となったと想定される。杭長探索では、測定離れ1.0mにおいても杭先端反応が読取れており、杭中央部の磁気量が杭先端部に比べ小さいことを示している。

従って、PHC杭等の磁気量の小さい杭における傾斜探索は、観測離れを接近させて探索することが必要である。

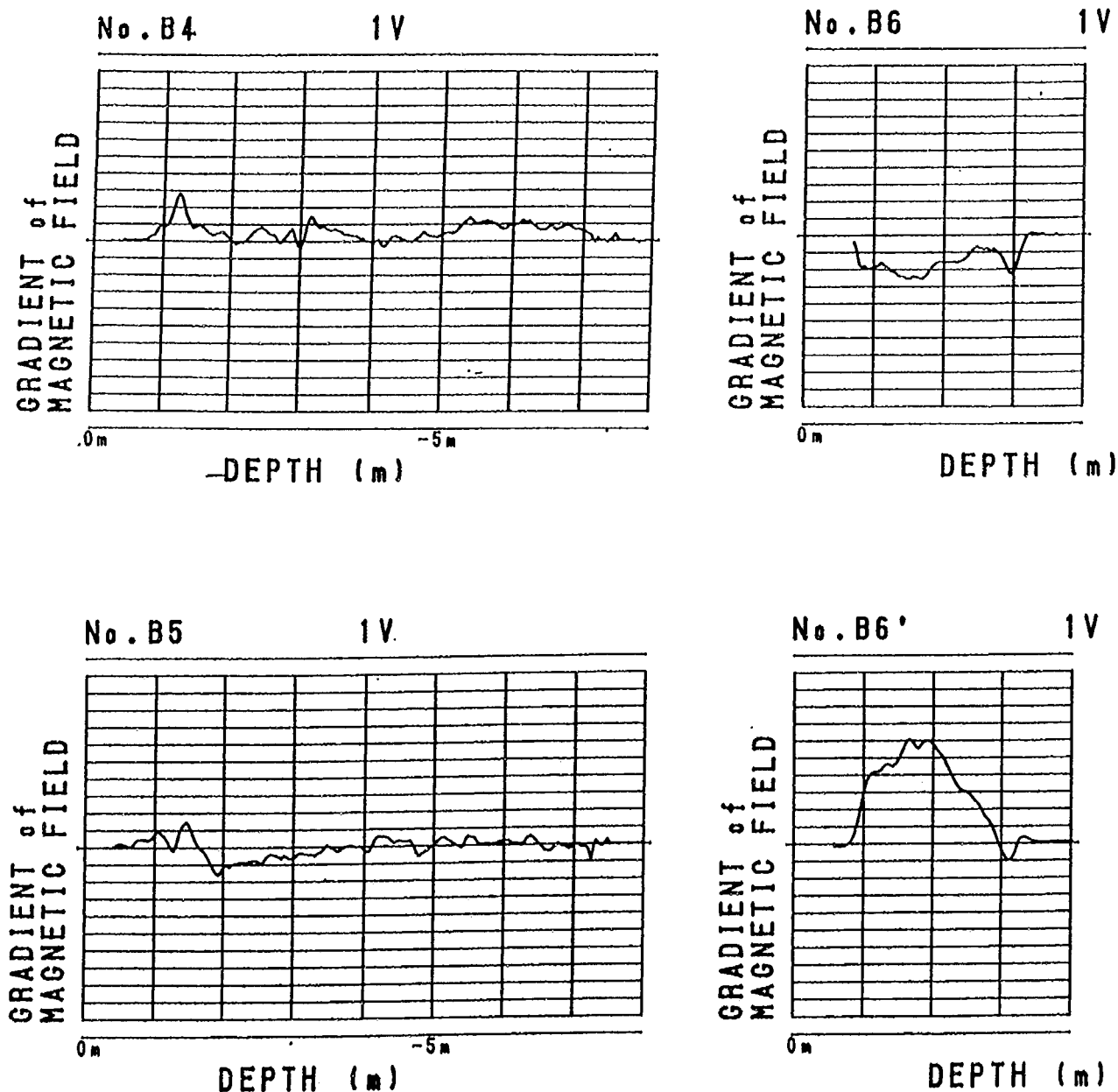


図-4. 5. 13 杭配置探索結果(実測波形)

(3) 場所打ち杭 (岸和田現場実験結果)

1) 観測孔の配置等

観測孔の配置 (杭形状) は、3 章の岸和田現場実験の概要に示したとおりである。

2) 鉛直探査結果

i) 磁気異常点

鉛直探査の測定結果 (実測波形) を図-4.5、14 にまとめた。

実測波形によれば次の磁気異常点が認められる。

- ① GL-0~3.0m 間 (基礎鉄筋と思われる反応)
- ② GL-5.0~20.0m 間
- ③ GL-13.0m 付近の磁気異常点 (B1 と B2 間に磁極が存在)
- ④ GL-30.0m 付近 (杭先端反応と考えられる反応)

① GL-0~3.0m 間 (基礎鉄筋と思われる反応)

杭頭部には磁極が形成されているが、基礎鉄筋は杭に比べ探査孔に近い (基礎鉄筋による磁気傾度が強い) 杭頭に対する磁気反応は読取れない。

② GL-5.0~20.0m 間

GL-5.0~20.0m 間の磁気としては下記の 2 点が考えられ、現時点では磁極の特定はできない。

i. 試験杭の配筋状況は杭頭から 13.95m で配筋状況が相違しており、配筋の相違により磁極が形成された。

ii. 杭の裂断により磁極が形成された。

磁極位置は GL-12m 付近であり、配筋相違位置とは約 2 m の相違がある。一方、杭の裂断位置は特定できないが、杭のコアボーリングでは、GL-12m で掘削不能 (杭の縦筋に遭遇) となっており、同深度付近で杭が裂断されている可能性がある。

③ GL-13.0m 付近の磁気異常点

GL-13.0m 付近の磁気反応は B1 孔と B2 孔では、逆向きの反応を示している。

B1 孔と B2 孔では磁場方向が異なることを示しており、この反応は B1 孔と B2 孔の間に磁気を帯びた異物に対する反応である。

④ 杭先端反応と考えられる磁気反応

B1~B3 すべてにおいて、杭先端と思われる磁気波形が読取れる。

B1 (杭の離れ 1.8m) においても杭先端による起電圧は 0.3V と小さい。土研内橋梁では最大起電圧約 10V (鋼管杭; 離れ 1.0m)、モデル実験では最大起電圧約 2V (RC 杭; 離れ 1.0m) である。

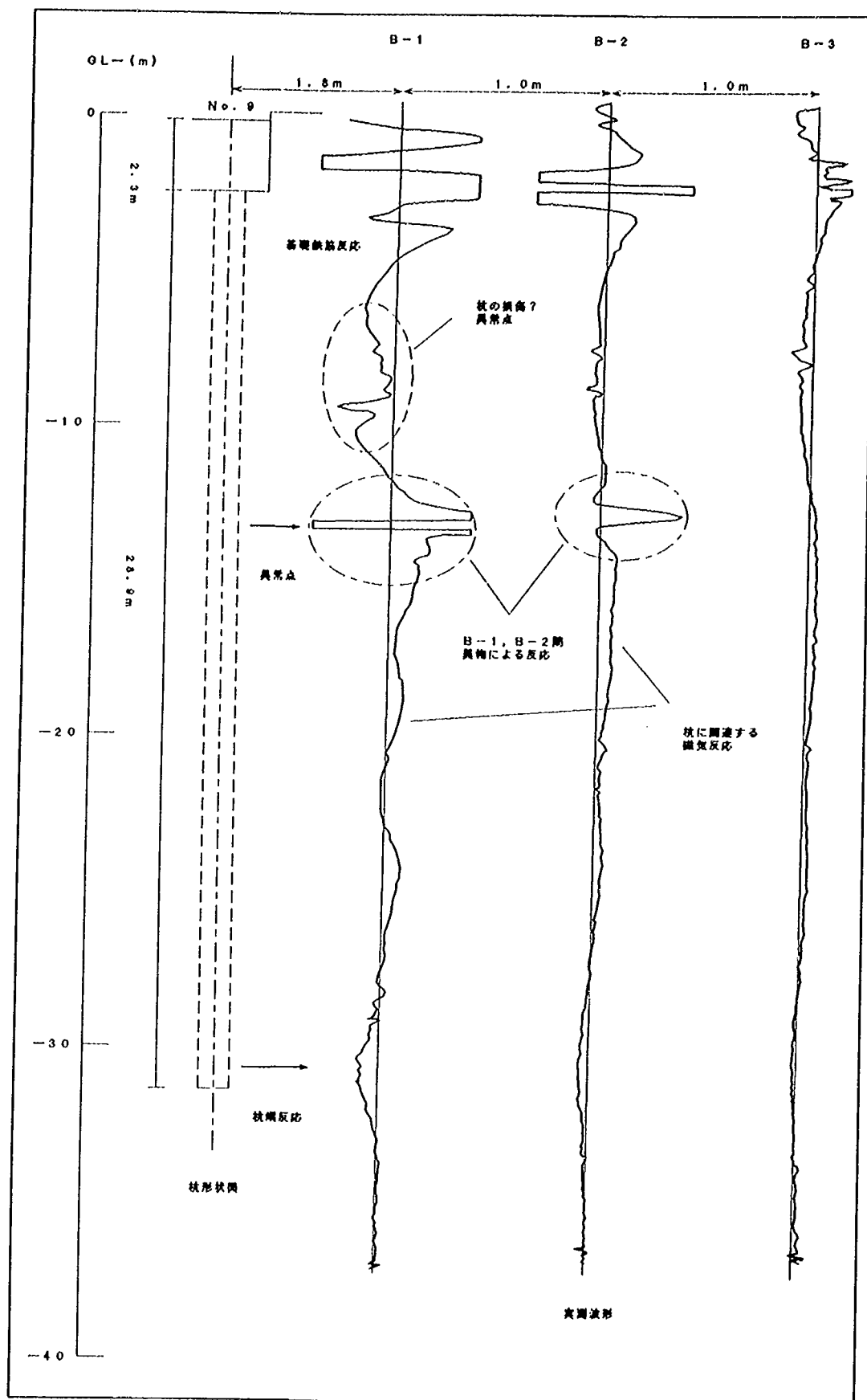


図-4. 5. 14 杭長探査結果 (実測波形)

ii) 杭先端位置の解析

実測波形と合うモデル波形により杭先端位置をもとめると下表のとおりである（図－4.5.15、図－4.5.16 参照）。

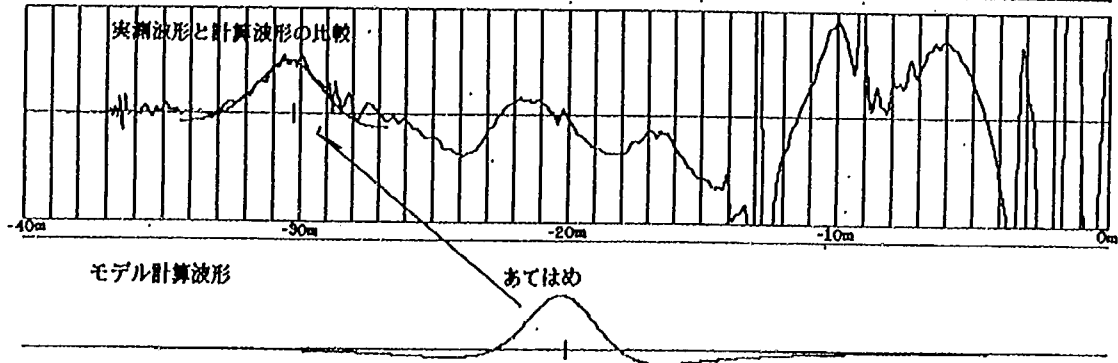
表－4.5.6 杭先端磁気異常点位置の図面位置と探査結果の比較

ボーリング No.	深度 GL－ (m)		差 (m)
	図面位置	探査結果	
B 1	31.2	30.3	0.9
B 2	31.2	30.3	0.9
B 3	31.2	30.3	0.9

杭長探査結果によれば、各探査孔とも深度－30.3mが得られた。図面深度－31.2mはであり、図面深度とは0.9mの相違がみとめられた。

探査孔の距離が相違しても杭長深度は相違しておらず、図面深度と探査結果が相違した要因としては、①実杭が図面より短い、②配筋が杭底までないことが考えられる。

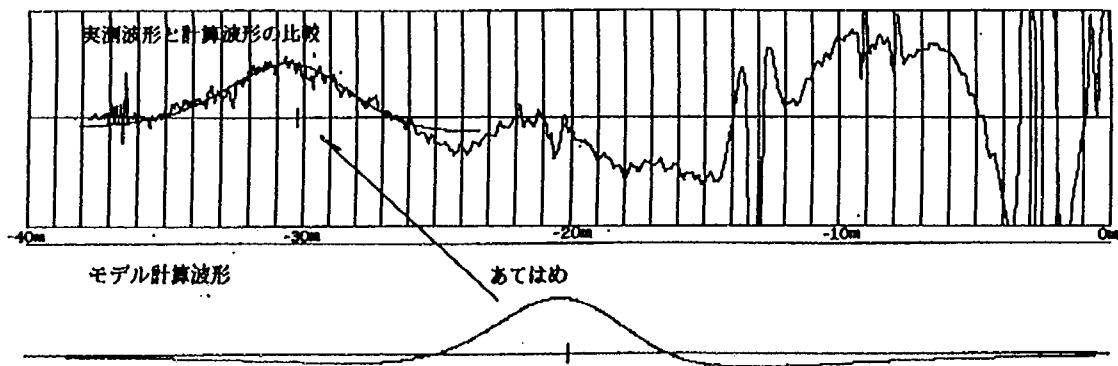
鉛直探査データ処理 No.B-1 表示範囲 深度 0.0m~~40.0m 深度 -30.30m



距離 $z = 3.20\text{m}$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(85^\circ)$

(1) B 1での結果

鉛直探査データ処理 No.B-2 表示範囲 深度 0.0m~~40.0m 深度 -30.30m

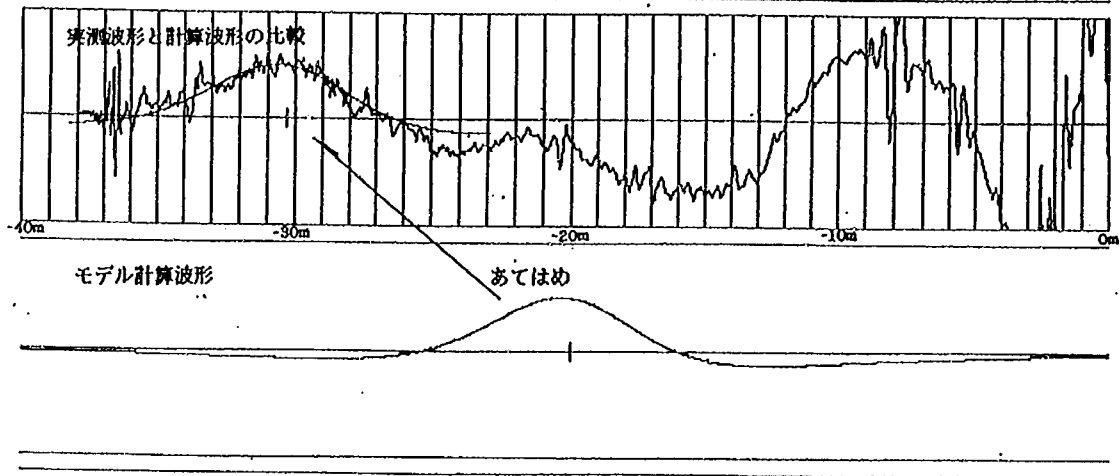


距離 $z = 6.00\text{m}$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(85^\circ)$

(2) B 2での結果

図-4. 5. 15 実測波形とモデル波形のあてはめ

鉛直探査データ処理 No.B-3 表示範囲 深度 0.0m~-40.0m 深度 -30.30m



距離 $z = 6.50\text{m}$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(85^\circ)$

図-4. 5. 16 実測波形とモデル波形のあてはめ (B 3)

② 杭配置探查結果

i) 磁気異常点

探查の測定結果（実測波形）を図-4.5.18にまとめた。

実測波形によれば、杭位置に対応する磁気異常点が認められている。

ただし、杭により磁気波形の相違が認められる。No. 2、3 杭に対しては明瞭な磁気波形が得られたのに対し、No. 1 杭に対しては明瞭な磁気反応が得られていない。

この原因としては、下記のもものが想定される。

① 杭により形成されている磁場が杭の先端部に集中するため

② No. 1 杭の探查深度は GL-13m 付近であり、鉛直探查で認められた GL-12m 付近の磁場が影響したため

実測波形によれば、No. 1 杭の磁気波形は2つの磁気波形が複合しているものであり、鉛直探查で認められた GL-12m 付近の磁場が影響したものと考えられる。



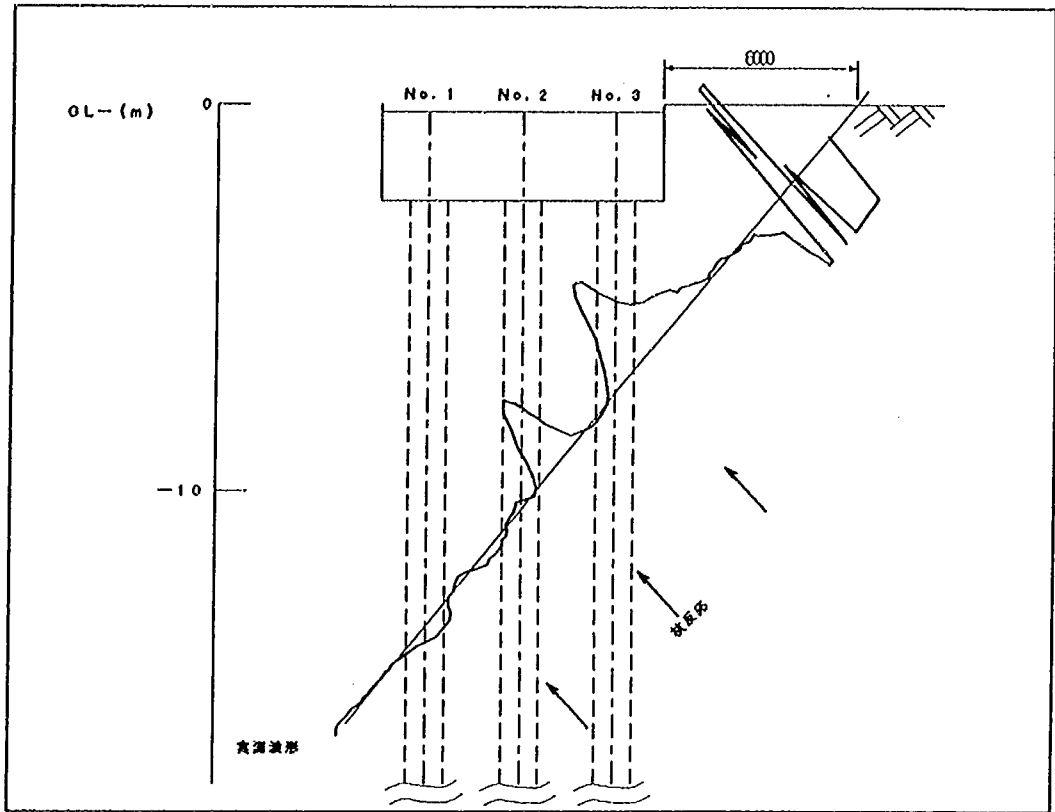
図-4.5.17 No. 1 杭付近の磁気状況

ii) 杭位置の解析

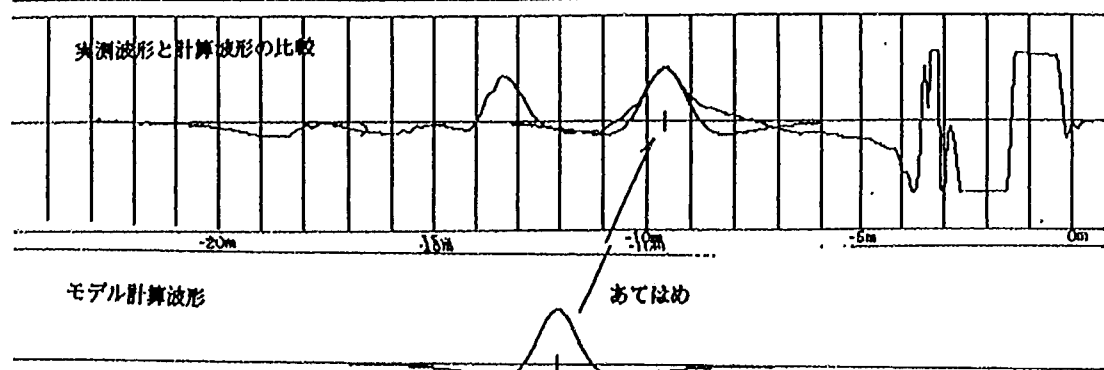
B 4 で認められた 3 箇所の磁気反応について、それぞれ斜めの杭のモデルとあてはめた結果を図-4.5.19に示した。実測波形と合うモデル波形により杭位置をもとめると下表のとおりである。

表-4.5.7 磁気異常点位置の図面位置と探查結果の比較

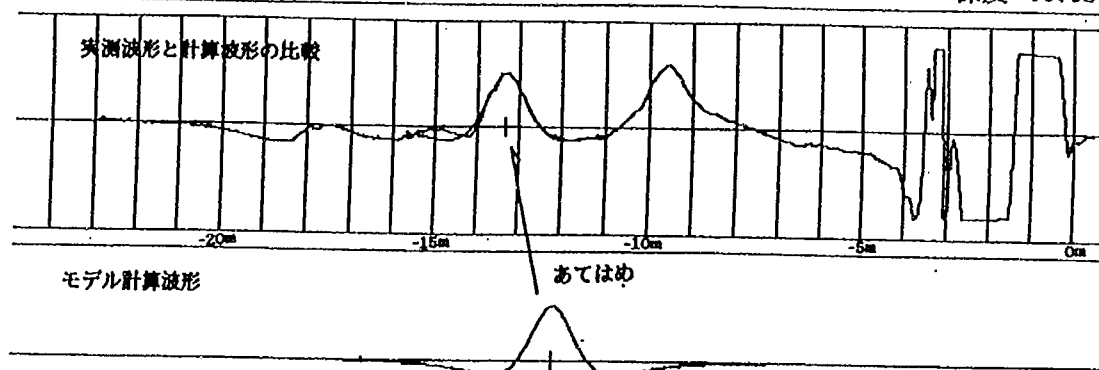
杭 No	位置		
	図面位置	探查結果	差 (m)
1	19.1	17.1	2.0
2	14.8	13.3	1.5
3	10.6	9.55	1.05



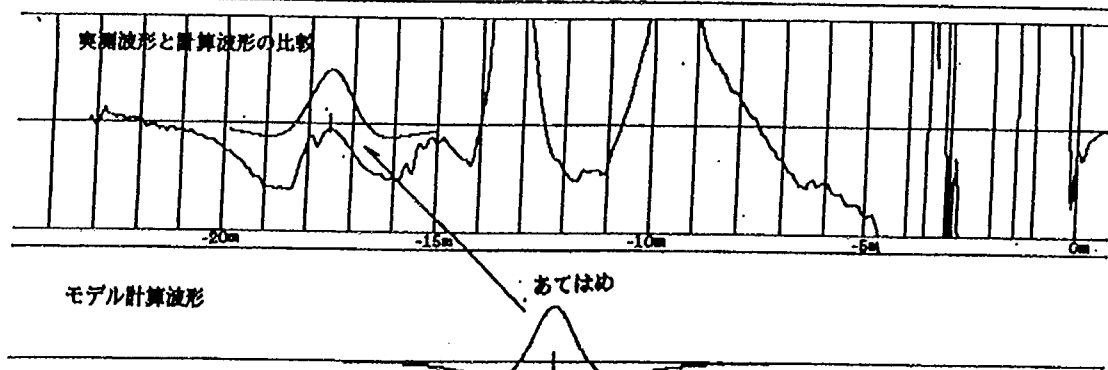
図一4. 5. 18 杭配置探查結果（実測波形）



斜め角度 $\theta = 45^\circ$ 距離 = 1m 方向余弦 $\alpha = \cos(90^\circ)$, $\beta = \cos(50^\circ)$



斜め角度 $\theta = 45^\circ$ 距離 = 1m 方向余弦 $\alpha = \cos(90^\circ)$, $\beta = \cos(50^\circ)$



斜め角度 $\theta = 45^\circ$ 距離 = 1m 方向余弦 $\alpha = \cos(90^\circ)$, $\beta = \cos(50^\circ)$

図-4. 5. 19 実測波形とモデル波形のあてはめ

モデル計算結果によれば、杭位置（観測孔の地面位置から距離）は、計算結果のほうがすべて短くなっており、図面上の距離と探査で求めた距離の差は、観測孔天端より離れるほど大きくなっている。

この原因としては、①鉛直探査で記したように、場所打ち杭の磁場が一定でないことに起因した相違、また、杭（磁場）が連続的に遭遇するため解析モデルが一致しない（他杭の磁場の影響を受けたため）、②観測孔の角度が掘削当初角度（45度）と相違したことに起因したものが考えられる。

①については、解析モデルの見直しも考えているが、不確定要素（変数）が多いためモデル化が難しい。

②については、斜めボーリングは掘り進むとともに孔が上向きになる可能性がある。特に、当観測孔は埋土部（礫混じり土）に設置したものであり、地盤の固さが一定しないため、硬質部（捨石等）に遭遇した箇所では掘削角度が変化したことが考えられる。

仮に観測孔の角度を 40° 程度にすると探査結果とほぼ一致する結果となるが、孔曲がり測定を実施していないので断定はできない。

(4) 亀裂有り供試体（R C杭）の模擬観測結果

1) 実験項目

供試体模擬観測：気中において亀裂を有する供試体の観測を実施。
帯磁体と考えられる鉄筋の状況を確認。

2) 実験内容

供試体模擬観測：共通供試体と同じ条件（亀裂状況）の杭に対して、地上部で磁気探査を実施し、磁気波形を計測する。

磁気異常が認められた場合は、鉄筋だけの状態での計測を実施し、鉄筋状況による磁気反応の相違を確認する。

3) 実験結果

実験に用いた供試体の亀裂状況を図-4.19 に示す。

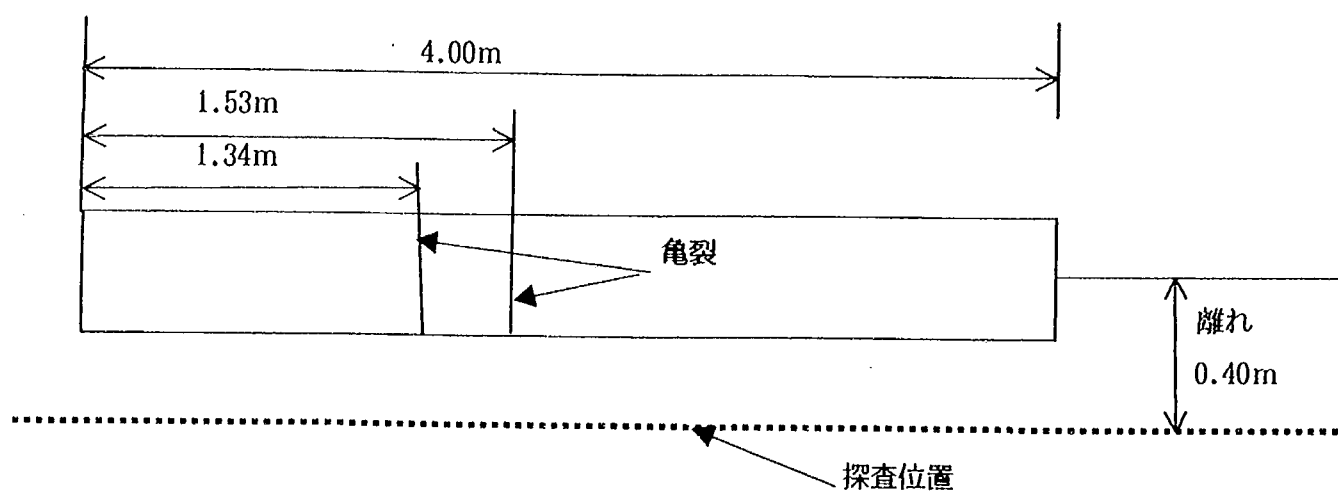


図-4.19 供試体状況

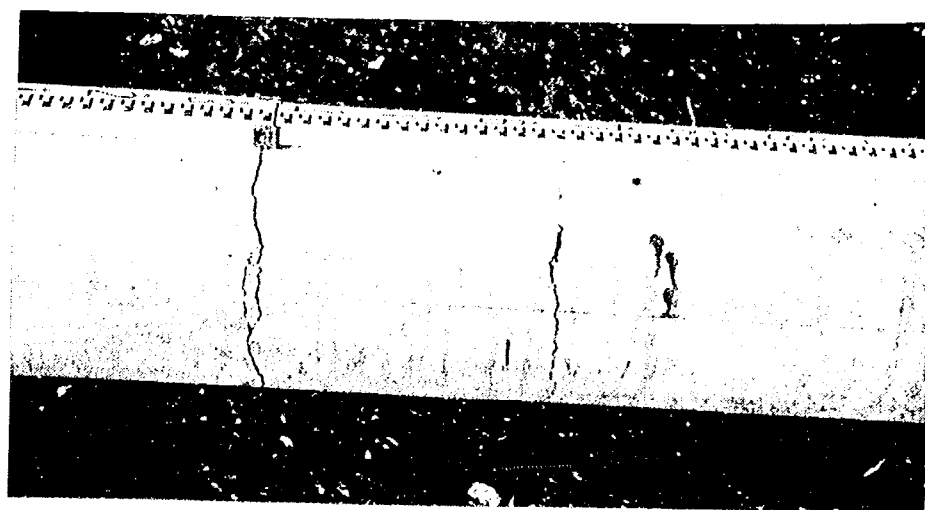


写真 4.5.1 供試体亀裂状況

① 磁気探査結果

気中の磁気探査結果によれば、杭先端反応以外に① 1.6mに磁気異常点が認められている。①以外にも 1.3 m付近に①反応と逆向きの反応が認められている。ただし、この反応は、①磁極と別の磁極に起因するものか、杭先端および①の磁極に関連したものかは不明である。いずれにしても杭の損傷部付近に新たな磁極が形成されていることはまちがいない（図-4.5.21）。

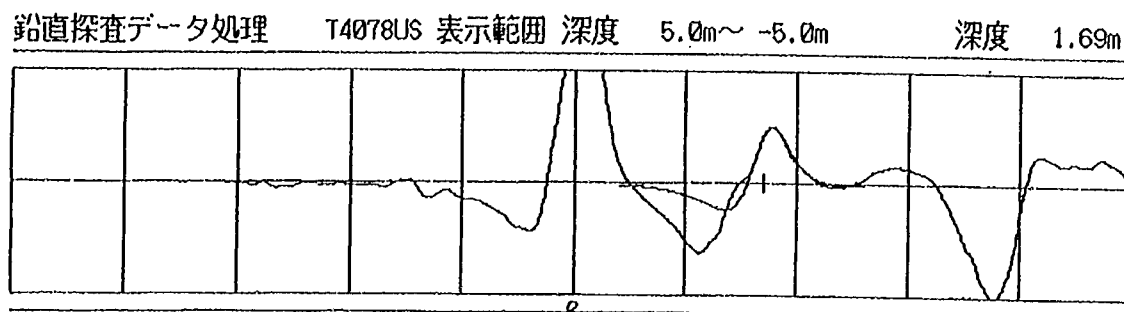


図-4.5.21 磁気探査結果（モデル波形とのあてはめ図）

② 亀裂部の鉄筋状況（目視判定結果）

亀裂部の鉄筋状況は下記のとおりであり、その状況を写真-4.5.2に示す。

- ① 鉄筋の破断は認められない。
- ② 鉄筋の配筋状態にも明確な変状は認められない。

→強いて挙げれば、亀裂部付近の鉄筋がやや中央部に変位している。

亀裂部の鉄筋状況では、明確な磁極の形成原因は認められない。強いて挙げれば鉄筋状態の変形であるが、強制的に鉄筋を変形させた場合の磁気反応は図-4.5.22 のとおり磁気変化の違いは認められず、変形により磁極が生じるとは考えられない。従って、コンクリート中の鉄筋が変形するほどの大きな応力（またはその時に発生する熱作用）により磁極が発生したものと考えられるが、現時点では確認できないので、今後要素実験において磁極発生要因を特定しなければならない。

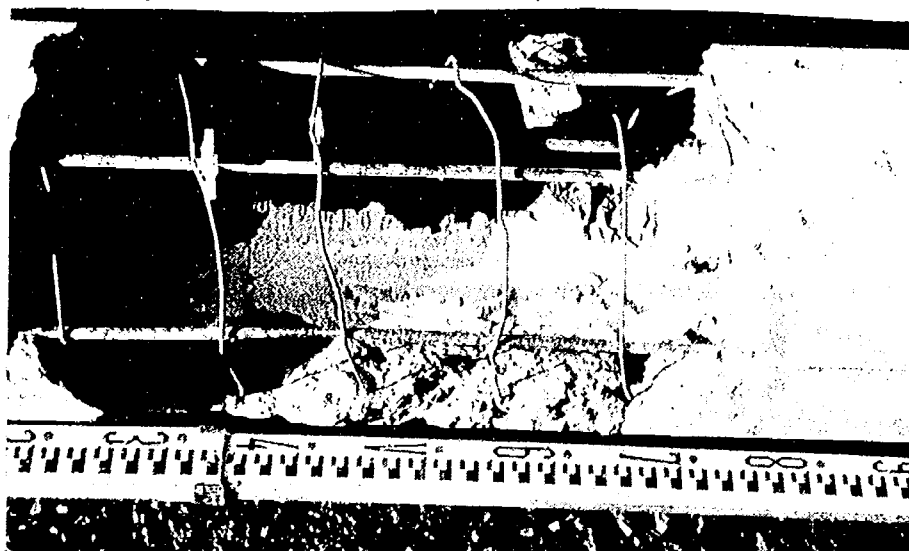


写真-4.5.2 亀裂部の鉄筋状況

鉛直探査データ処理 T6012US 表示範囲 深度 5.0m ~ -5.0m 深度 1.69m

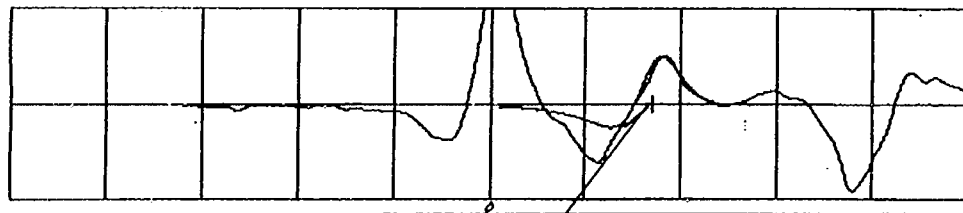


あてはめ

距離 $z = 0.40\text{m}$ 方向余弦 $\alpha = \cos(150^\circ)$, $\gamma = \cos(50^\circ)$

(1) 鉄筋1本を内側に変形させた場合

鉛直探査データ処理 T701U2 表示範囲 深度 5.0m ~ -5.0m 深度 1.69m



あてはめ

(2) 鉄筋をすべて内側に変形させた場合

図-4. 5. 22 実測波形とモデル波形のあてはめ

(5) 考察

1) 杭長探査精度(鉛直探査)

杭長調査においての探査精度とは、実際の杭長と探査でもとめた杭長の誤差になる。この誤差を生じる原因としては以下のものが挙げられる。

- i) 機械誤差…エンコーダ等の誤差
- ii) 解析モデルと実際の帯磁状態の差
- iii) 測定距離による誤差
 - a) 測定距離による磁気反応の相違による読み取り誤差
 - b) 解析波形を設定する際の誤差

上記のうち i) 機械誤差…エンコーダ等の誤差は、機械的なものであり、測定前にキャリブレーションを実施することにより誤差を減少させることは可能である。従って、ここでは、ii) 解析モデルと実際の帯磁状態の差、iii) 測定距離による誤差に対して、今回の実験結果より考察する。

① モデル波形の適応性

軸に沿って双極子が線上に分布すると仮定した場合のモデル波形と実測波形とのあてはめ結果は、下記のようにまとめられる。

鋼管杭…測定距離が近い場合(観測孔離れ 1.0、2.0m)では非対称の実測波形であり、モデル波形と相違する。

→近接する杭の磁場が影響。

測定距離が離れた場合(観測孔離れ 4.0m)の実測波形は、実際の距離をパラメータにしたモデル波形では相違が認められる。実測波形に適応するモデル波形の距離パラメータは 7.0m であり、観測孔と基礎中心の距離とほぼ一致する。

→対象杭の磁場を計測したのではなく、杭全体の磁場(合成磁場)を計測。

PHC 杭…単一杭を対象とした実験では、モデル波形と実測波形は良くあてはまる。

→近接杭の影響は不明。

R C 杭…モデル波形と実測波形は良くあてはまると想定される(室内実験のため、十分な実測波形が得られていない)

場所打ち杭…実測波形は図面上の距離をパラメータにしたモデル波形では相違が認められた。

→場所打ち杭の配筋は一定していないことにより、磁場が複雑である。

均一な単一磁場を対象としたモデル波形と、複数の磁場(複数の杭)を測定した実測波形では相違が認められた。特に、杭や磁気量が大きい杭(鋼管杭)や磁場形成が複雑な杭(場所打ち杭)では、適応性が悪い結果が得られた。

従って、今回の研究結果を含めデータを収集し、モデル波形は近接杭の影響を考慮したものに修正をすることが必要である。ただし、近接する杭の影響は杭の配置状況により相違するものであり、各ケースに対するモデルを設定することは困難である。また、実際の調査においては、杭の位置関係が不明な場合がほと

んどであるので、他杭の影響を少なくし（観測孔の離れを近くする）、現在のモデルを使用し解析することが現実的であろう。

また、場所打ち杭の配筋状況が特定できなければ、場所打ち杭に対する新たな解析モデルを設定することも不可能なので、現在のモデルを使用することが現実的である。

② 観測孔の離れによる探査精度

a) 波形の解析上の誤差

各実験結果でも明確なように、磁気反応は距離が離れば明瞭な反応ではなくなり（距離が大きくなれば周期が大きくなる）、磁極位置の判定が困難になる。

図－4.5.23 は単磁極に対する測定距離 1～4mのモデル波形である。同図に示すように測定距離が離れるほど周期が大きくなる。図－4.5.24、図－4.5.25 はこのモデル波形の距離を少しづらして表示したものである。同図から観測距離による波形解析誤差（解析可能な波形のずれ）をもとめると下表のとおりである。

表－4.5.8 波形の解析上誤差

測定距離 (m)	誤差 (cm)
1.0	10
1.5	10
2.0	20
3.0	20
4.0	30

b) 杭種・測定距離による磁気反応の相違

上記した解析上の誤差は磁気波形が正確に測定された場合のものである。しかしながら、実測に際しては、地盤ノイズの影響等を受けるものである。振幅（起電圧）は杭自体の残留磁気量および測定距離により変化する。今回の実験結果（実測波形）よれば、振幅（起電圧）は、観測距離が1 mの場合の最大起電圧は下記のとおりである。

鋼 管 杭：10 V以上

R C 杭：1～2 V

P H C 杭：1 V

場所打ち杭：1～2 V（観測孔1.8mより推定）

当然、杭の残留磁気は、磁性体からなる鋼管杭は他の杭より強い。R C杭、P H C杭、場所打ち杭に関して、同程度の最大起電力が得られている。ここで、地盤ノイズとの区別が容易な磁気反応（起電圧）は、地盤ノイズが特定できないが、過去の事例から考えると1 V以上の起電圧を示す磁気反応に対しては、地盤ノイズとの区別が比較的容易である。今回の実験より起電圧1 V以上の磁気反応がえられる観測離れは下記のとおりである。

鋼 管 杭：4 mでも可能

R C 杭：1 m

P H C 杭：1 m

場所打ち杭：1 m

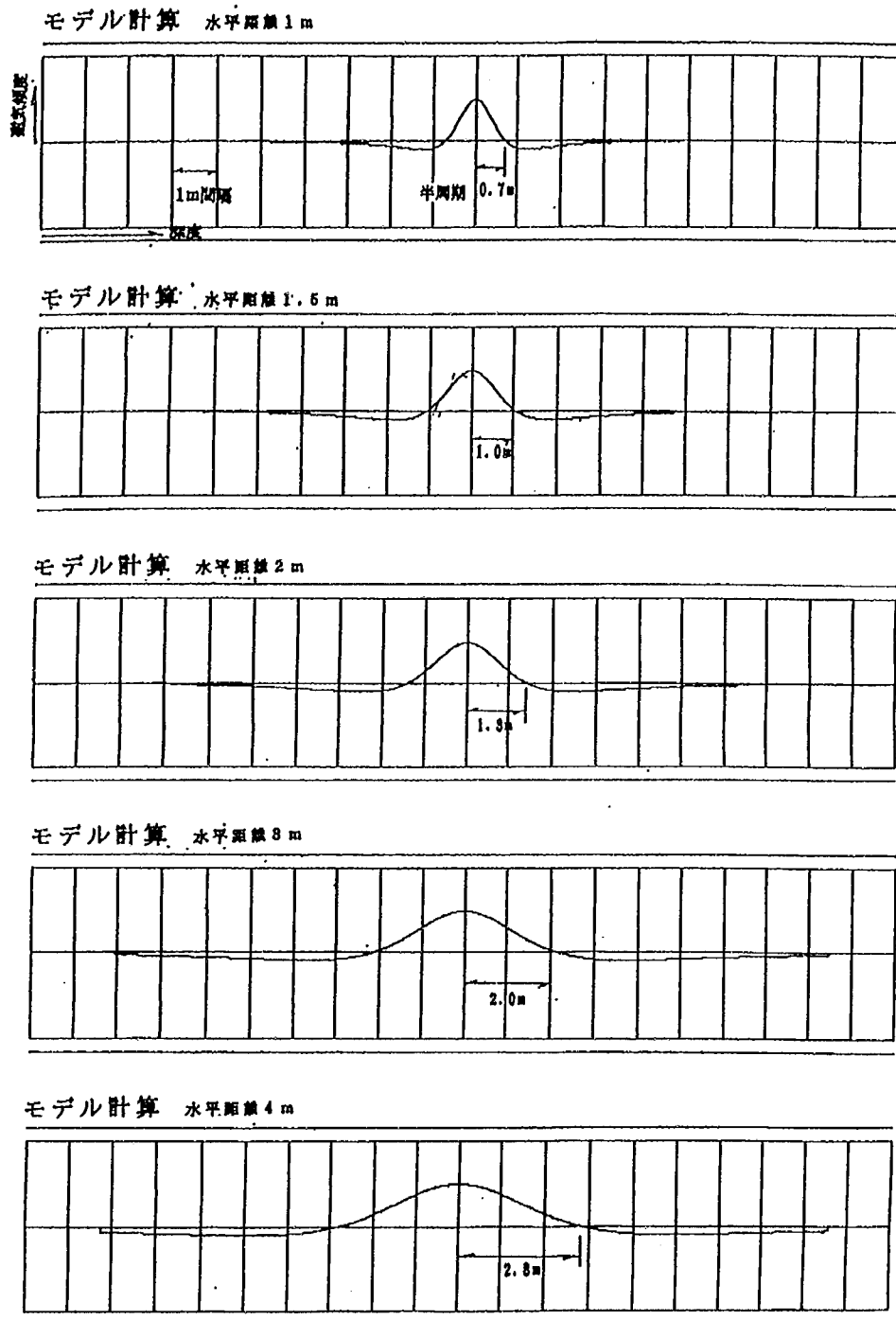
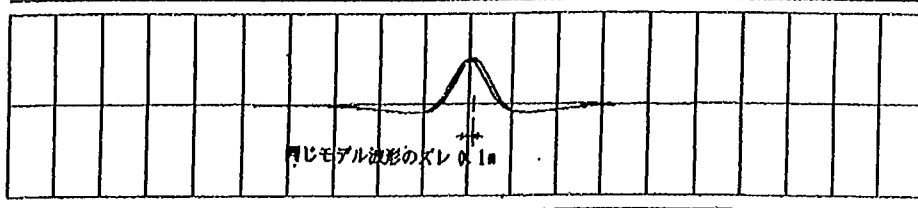
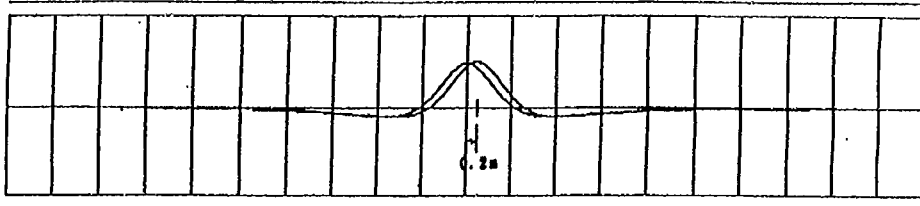
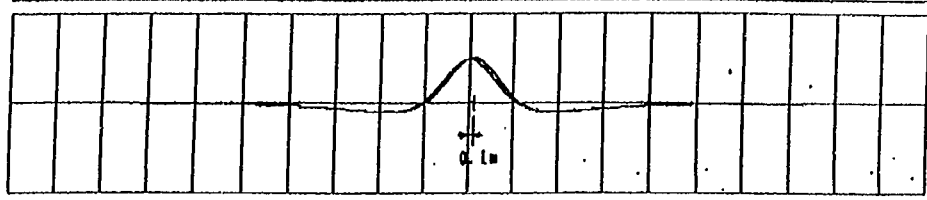


図-4.5.23 単極磁場の波形

モデル波形比較 水平距離 1 m.



モデル波形比較 水平距離 1.5 m



モデル波形比較 水平距離 2 m

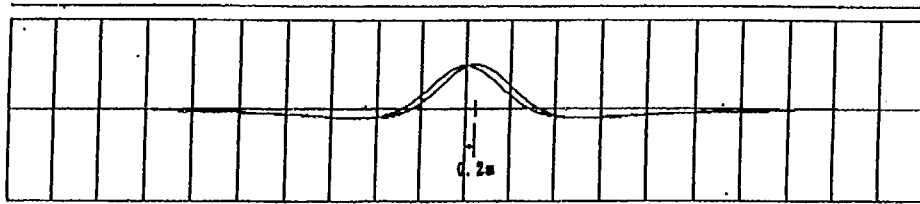
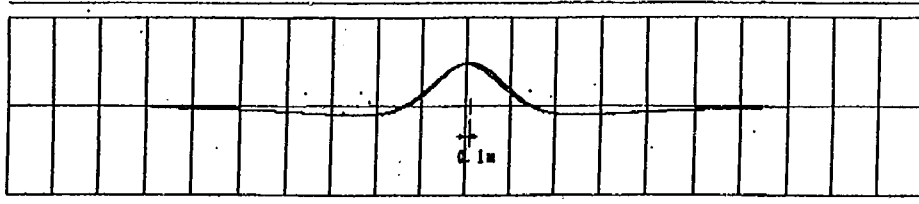
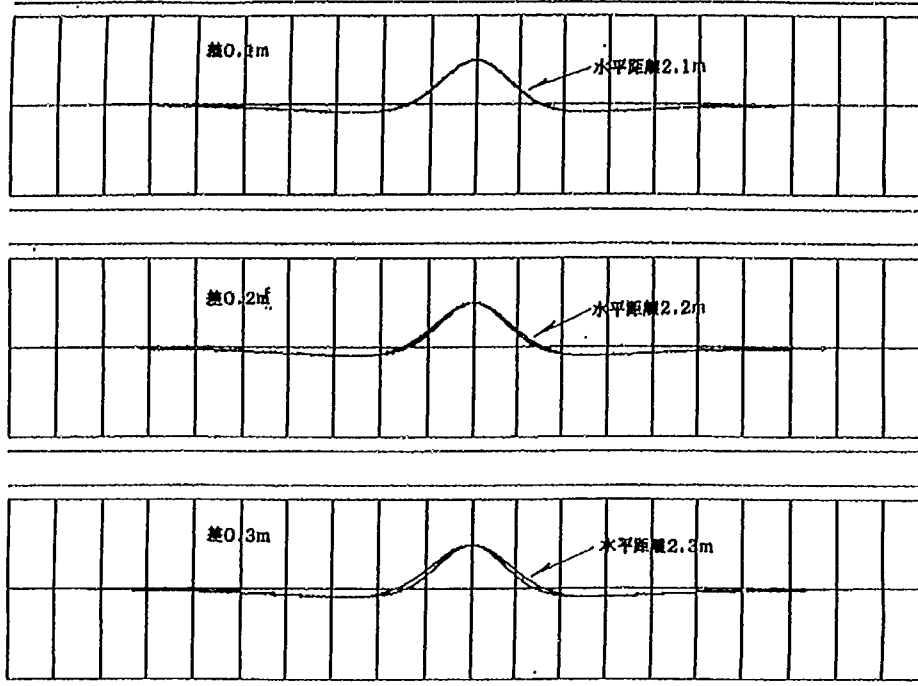


図-4.5.24 モデル波形の比較

モデル波形比較 水平距離 2 m



モデル波形比較 水平距離 3 m

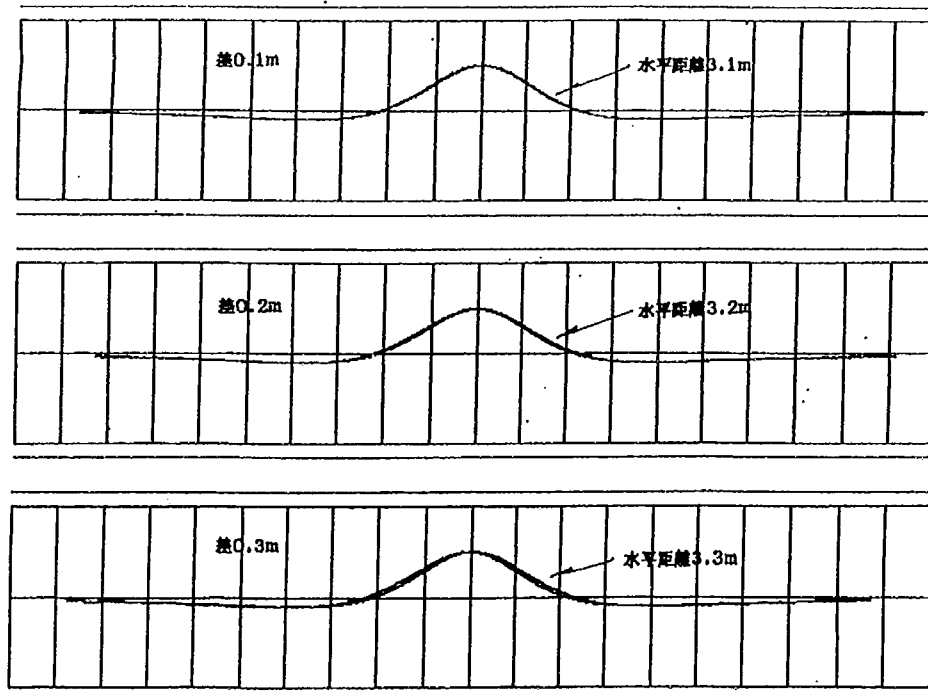


図-4.5.25 モデル波形の比較

c) 近接杭の磁場の影響

実計測は単杭のものではなく、複数の杭からなる基礎の杭長を探索するものである。従って、磁気探索では、探索対象杭の磁場と他の杭の磁場を合わせて計測している。

他の杭の影響は当然ながら、杭自体の持つ磁気量によって決定されるものであり、今回の実験結果においても、場所打ち杭、RC杭では、明確な他の杭の影響は認められないが、磁気量の大きい鋼管杭では、観測距離 1、2m でも他の杭の影響が認められ、特に、観測距離 4m では、探索対象杭の磁場ではなく、杭全体として形成された磁場の磁気反応を計測している。

今回の実験結果によれば、杭自体の残留磁気量が小さい場所打ち杭、RC杭、PHC杭に関しては、近接杭の影響は少ない。これに対し、杭自体の残留磁気量が高い鋼管杭は、他の杭の影響を避けることは困難である。特に、観測距離が離れば、杭全体により形成された磁場を計測することになるので、探索杭の磁気反応を得るためには、観測距離を 2.0m 以内にすることが必要である。

③ 観測孔の仕様の設定

a) 観測孔の離れ

今回の実験結果をもとに各諸元に対する観測孔の位置をまとめて表-4.5.9に示す。

表-4.5.9 各諸元を満たすための観測孔の離れ

杭種	波形解析	磁気反応	近接杭の影響
鋼管杭	誤差 10cm : 1.5m	4.0mでも可能	2.0m以内は少ない
R C杭		1.0m	少ない
P H C杭	誤差 20cm 3.0m	1.0m	少ない
場所打ち杭		1.0m	少ない

表-4.5.9から各杭に対する観測孔の離れを求めると下記のとおりである。

R C、P H C、場所打ち杭の観測孔の離れは1.0m以内にすることが必要である。

磁気量が多い鋼管杭は、1.5m程度までは解析可能であるが、近接杭の影響を抑えるためには観測孔の離れを近くすることが必要である。

P C杭に対する実験は未実施であるが、R C、P H C杭と同様に1.0m以内と想定される。

b) 観測孔の長さ

観測に必要となる観測孔の長さは、杭先端の磁気反応を計測できることである。磁気反応の周期は図-4.5.23のモデル波形に示すように観測孔の離れによって変化する。観測孔の離れを1.0~1.5mに設置すれば、磁気反応は杭先端より1.0m程度である。従って、杭先端磁気反応がない部分を2.0m確認するとすれば、必要となる観測孔の長さは杭先端以深3.0mとなる。しかしながら、実測に際しては、杭先端位置や杭位置が明確ではないので、観測孔の長さは推定杭先端長以深5.0m程度とすべきである。

2) 杭配置探査(傾斜孔探査)

今回の実験によれば、鋼管杭、場所打ち杭、RC杭に対しては杭反応と考えられる磁気反応が認められており、磁気探査により杭配置を特定することは可能と考えられる。

ただし、実際に杭配置を特定するには下記の事項を解決しなければならない。

① 杭磁場の問題

杭の磁場は、杭先端を磁極として形成されているので、磁気傾度は杭中央部は杭先端にくらべて小さい。従って、杭を横断する位置により求められる磁気反応が相違する。特に、現解析モデルによる解析結果によれば、杭先端付近を横断する箇所は、杭先端磁場の影響により実際の位置と違う結果が得られている。

② 隣接杭の影響

残留磁気量が大きい鋼管杭の結果によれば、近接する杭の磁場影響により、単杭に対する明確な磁気反応がえられていない。特に、観測孔が離れる場合(観測距離 4.0m)、杭全体として形成された磁場の磁気反応を計測している。

上記問題を解決するには、杭磁場、近接する杭の磁場を考慮した解析手法に修正することが必要となる。しかしながら、解析手法を特定するには、不確定要素(杭種、残留磁気、観測位置、杭間等)が多く、現時点では困難であり、今回の実験データを含め、データの集積により、解析手法の見直しを実施するものとする。

現段階で、現解析手法に対応するため① 杭磁場の問題、② 隣接杭の影響を少なすることが必要である。具体的な対応方法は下記のとおりである。

① 杭磁場の問題

杭横断位置を杭中央部に限定する。

② 隣接杭の影響

観測距離をなるべく近くする。杭中央部の磁気傾度は杭先端の磁気傾度にくらべ小さいので、杭長調査の離れ(1.0m)より近くすることが必要であり。観測距離は0.5m程度とする。

3) 健全度調査の可能性

破損RC杭の探査結果によれば、供試体実験・模擬観測とも亀裂部に対応する磁気異常点が認められおり、亀裂部付近に磁極が形成されたことは間違いない。従って、磁気探査により杭の亀裂の有無を判別できる可能性は大きい。

実橋梁実験においても、損傷場所打ち杭で認められた杭端以外の磁気反応は、亀裂に関連した反応の可能性がある。

しかしながら、模擬観測では、亀裂部の鉄筋状況では、鉄筋の破断や明確な変形等の磁極の形成要因は認められない。従って、磁極形成要因を特定することが課題となる。

現時点で考えられる磁極形成要因としては、亀裂を発生させた応力、その時に発生する熱作用が挙げられるが、いずれにしても、要素実験等により磁極発生要因を特定することが必要である。

4.5.3 適用条件

(1) 現場条件

① 杭に近接する観測孔が必要である。

観測孔条件：観測孔は非磁性体であること（塩ビ管、ステンレス管）

観測孔内径は $\phi 50\text{mm}$ 以上（磁気傾度計を使用）が必要

観測孔は磁気反応が無い位置まで必要（杭先端+5mが目安）

観測孔の位置は下表のとおり

表-4.5.10 観測孔設置位置

探査項目	杭種	観測孔離れ
杭長探査	鋼管杭	1.5m以内
	R C杭、P C杭	1.0m以内
	P H C杭	
	場所打ち杭	
杭配置調査	杭種とわず	0.5m以内

② 強磁性体が無いこと。

杭以外の強磁性体の磁力の影響により解析不能となる場合がある。

例：高圧送電線直下

杭に近接して管等が埋設されている場合

(2) 杭種条件

鋼材を含む杭に対しては適用可能である。

(3) 探査できる基礎諸元

- ・杭長
- ・杭配置

(4) 人員・工程

人員・工程は磁気探査に要するものとし、観測孔設置および計器運搬などに関するものは含めない。

① 人員（50mまで）

- ・計画・準備：1人
- ・現地計測：2人
- ・解析：2人

② 工程（50mまで）

- ・計画・準備：0.5日
- ・現地計測：1日
- ・解析：1日

4.5.4 まとめ

今回の実験結果をまとめると下記のとおりである。

(1) 杭長調査

- ・単杭の磁場をもとにした現在の解析手法では、複数の杭の磁場からなる実際の杭長を正確に求めることはできない。解析手法を複数の磁場に対応するものに修正する必要がある。
- ・現解析手法を適用するためには、近接する杭の影響を少なくすることが必要である。
- ・解析の基になる磁気傾度は、杭種および観測離れにより相違し、観測距離が離れば、地盤ノイズの影響を受け明確な磁気反応は読取れなくなる。
- ・近接する杭の影響がなく、明確な杭先端の磁気反応を読取るためには下記の離れで計測することが必要である。

鋼管杭：2.0m以内

R C、P C、P H C杭、場所打ち杭：1.0m以内

- ・ただし、現解析モデルの解析誤差を 10cm 以内にするためには、観測距離は 1.5m以内にする必要がある。解析誤差を 10cm にするためには、鋼管杭は 1.5m以内で観測することが必要である。

(2) 杭配置調査

- ・杭横断調査では杭位置で磁気反応が認められており、磁気探査により杭配置を特定することは可能と考えられる。ただし、現解析手法は、近接杭の影響等を考慮していないので、解析手法を修正する必要がある。
- ・現解析手法で杭配置を探査するには、杭先端の影響、近接杭の影響を最小限にすることが必要である。
- ・具体的な対策としては、観測距離を 0.5m以内とし、観測位置を杭端の影響が少ない杭中央部に限定する。

(3) 健全度調査への適用

- ・破損R C杭の探査結果によれば、供試体実験・模擬観測とも亀裂部に対応する磁気異常点が認められおり、亀裂部付近に磁極が形成されたことは間違いない。従って、磁気探査により杭の亀裂の有無を判別できる可能性は大きい。
- ・破損杭の鉄筋状況では、鉄筋の破断や明確な変形等の磁極の形成要因は認められないので、磁極形成要因を特定することが課題となる。

4.6 衝撃振動試験

4.6.1 研究概要

(1) はじめに

平成10年度は、阪神高速道路湾岸線の岸和田地区の橋脚で衝撃振動試験の適用性を検証した。その基礎は、長さ56mの場所打ち杭で、橋脚天端までの地上高さが12.8mのRC単柱式橋脚である。上部工構造形式は大阪側が単純桁、和歌山側がニールセン橋である。この路線は、大阪湾岸地域の主要幹線道路として建設され、終日にわたって交通量が多い。車両が通行している状態で、図に示す位置の橋脚頭部を打撃して、その振動応答を計測した。

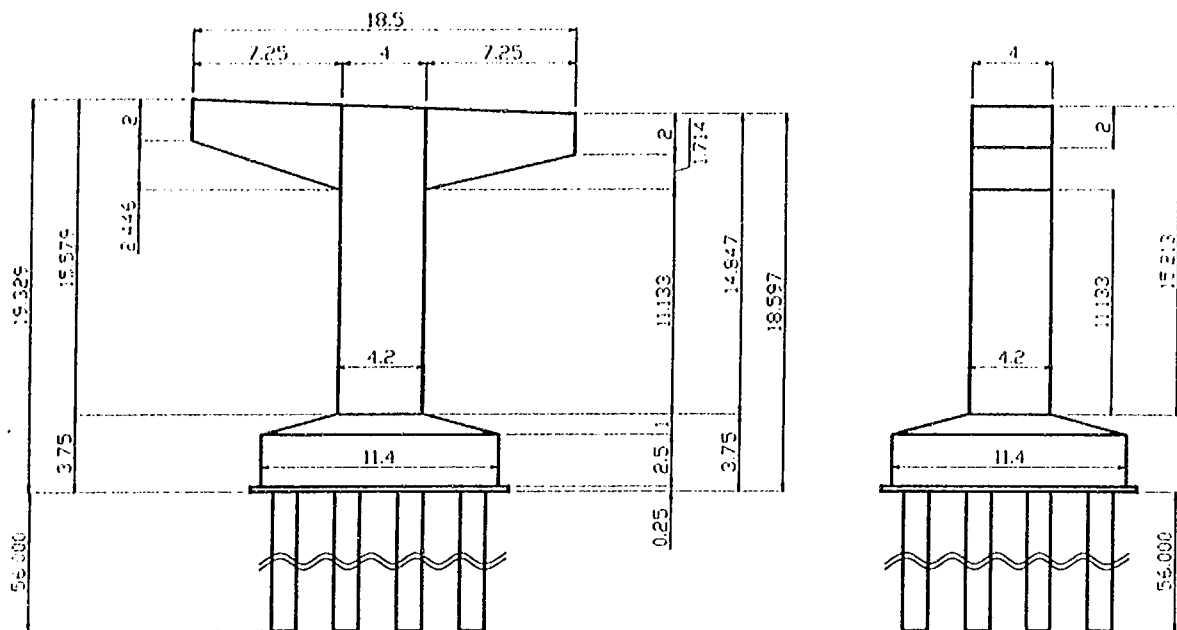


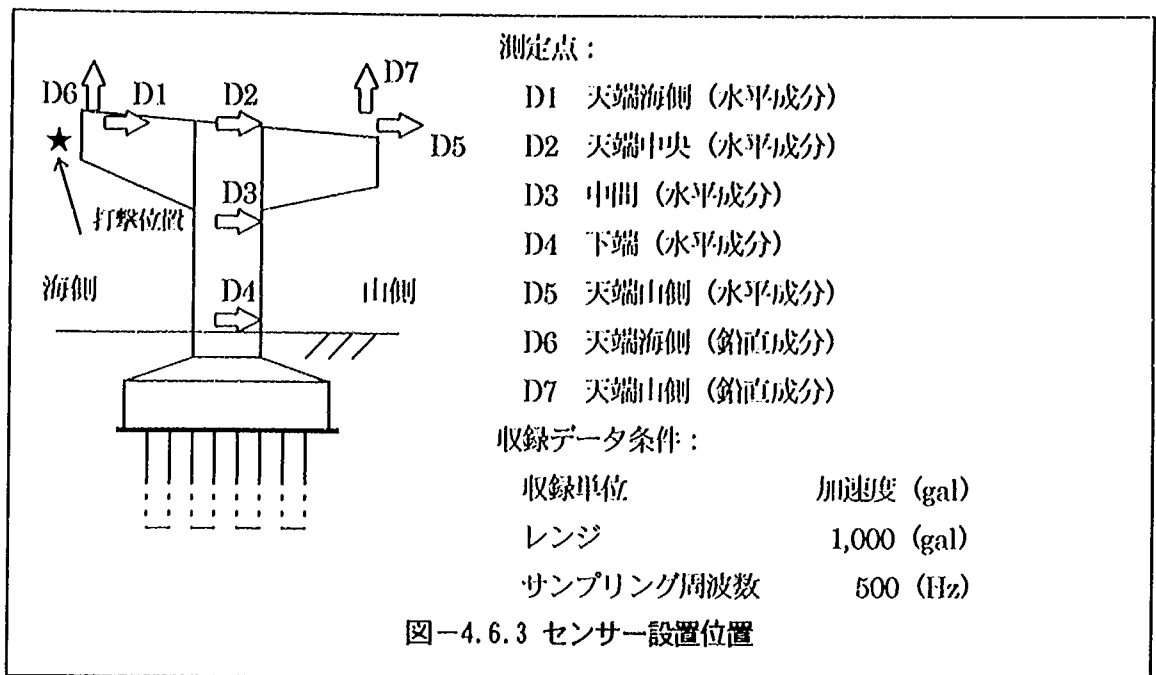
図-4.6.1 橋脚の概略図

(2) センサーの設置位置

橋脚の固有振動数は、応答波形のフーリエスペクトル上の卓越および位相スペクトルの値（加速度・変位応答の場合、固有振動数における位相差は 90° あるいは 270° であり、速度応答では 0° あるいは 180° となる）から決定する。しかし、車両が通行している状態では、フーリエスペクトル上に橋脚の固有振動数におけるスペクトルの卓越の他に、桁の固有振動数でもスペクトルの卓越が現れ、卓越が数箇所認められる。これにより橋脚の固有振動数の決定が惑わされる場合がある。したがって、今回は、大阪方および和歌山方の桁についても橋軸直角方向水平振動成分および鉛直振動成分検出用のセンサーを設置して、打撃しない状態で桁の自由振動波形の収録を行い、解析に用いた。（図-4.6.3）

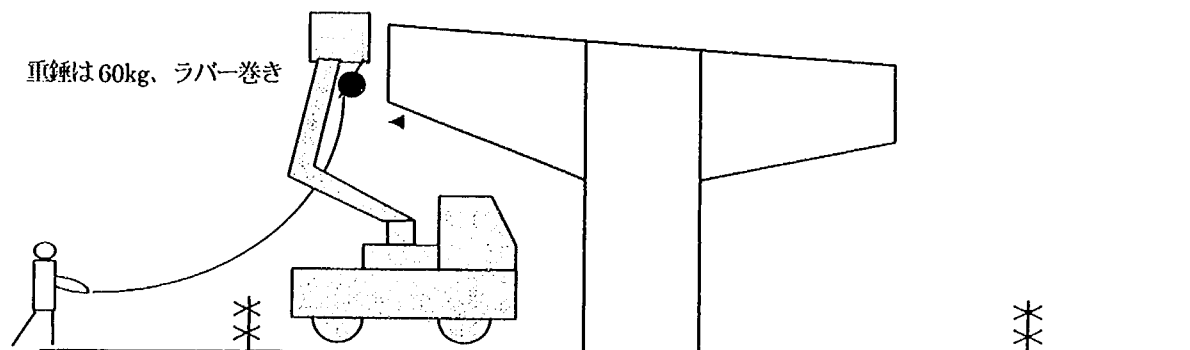


図-4.6.2 センサーおよび波形収録機器



(3) 打撃用重錘

今回実施した橋脚は幅が18.5mあり、非常に大きかった。そのため、直角方向の衝撃応答レベルが低くなり、振動が明瞭に観測できないことが懸念された。そこで、重量100kgまでの重錘を用意したが、60kgで実施できた。



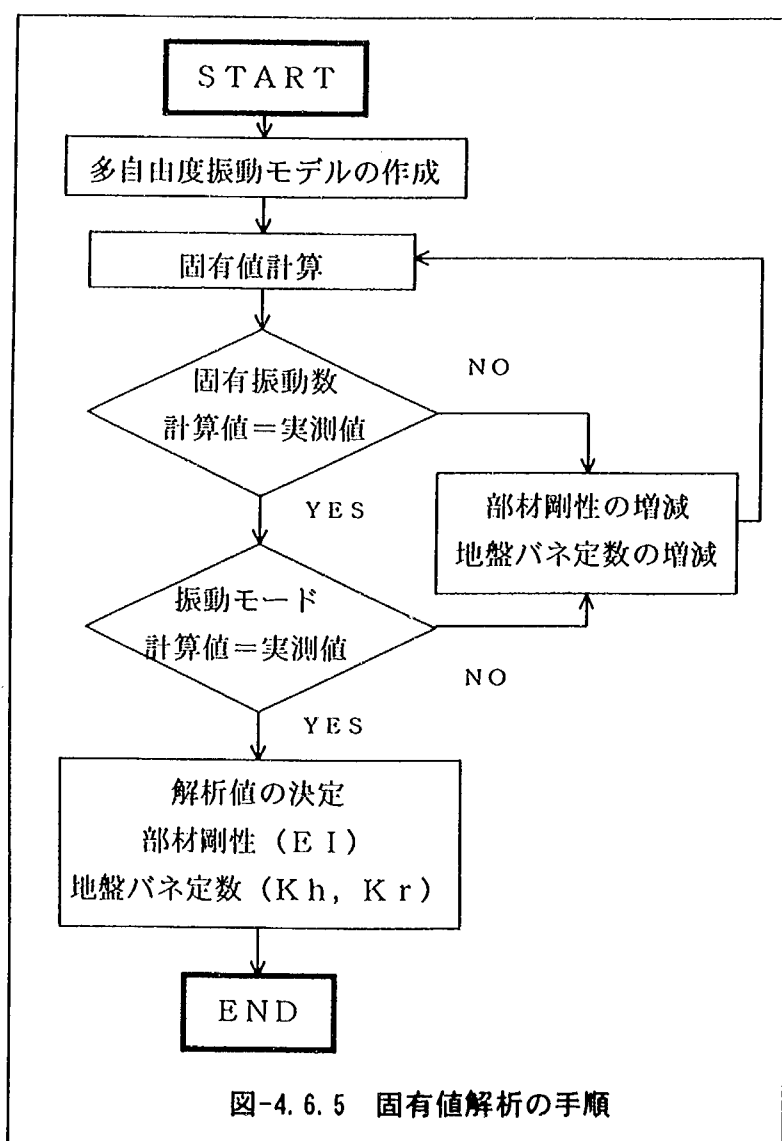
(4) 試験手順

以下の手順で実施した。

- ① センサーを橋脚天端、中間部、下端部、桁に取り付ける。
- ② 高所作業車のバケットから重錘をつり下げ、鐘をたたく要領で、橋脚を直角方向に打撃する。（この時の速度計の測定成分は、重錘打撃方向とする。）
- ③ 重錘はラバー巻きし、橋脚を傷つけない処置を施す。
- ④ 各測点における応答振動波形を求める。
- ⑤ フーリエ解析を行い、フーリエスペクトル振幅の卓越から橋脚の固有振動数を求める。

- ⑥ その時に、桁の固有振動数と混同しないように、桁に設置したセンサーから得られる固有振動数と、橋脚から得られるものを比較する。
- ⑦ 橋脚鉛直方向のスペクトル分布から、振動モード（振幅比率）を求める。
- ⑧ 多自由度振動モデルを作成し、実測固有振動数と振動モードに一致するように部材剛性、地盤バネ定数を増減させる。（図-4.6.5）
- ⑨ 設計基準から求められる部材剛性、地盤バネ定数と比較して、健全度評価を行う。

試験実施時は、見学者に対するデモンストレーションを目的として、振動波形、フーリエ解析のリアルタイム表示を行った。



4. 6. 2 検討結果

(1) 橋脚のフーリエスペクトル

重錘打撃による波形を橋脚天端、中間部、下端部に設置したセンサーにより収録した。この波形に対しフーリエスペクトル解析を実施した結果を図-4. 6. 6に示す。なお、打撃試験は10回行った。そこで波形の前処理として各計測点毎に各々10回の波形の重ね合わせを行い、この重ね合わせ波形の打撃時（トリガー設定時点）から1秒間分を実減衰波形として収録、その後にゼロデータを約7秒分繋ぎ合わせた。これにより4096個のサンプリングデータを作成し（サンプリング周波数500Hz）、分解能 0. 125Hz の条件でフーリエ解析を行った。

得られたフーリエスペクトルを見ると、1. 7Hz、

2. 9Hz、4. 3Hzに明瞭な卓越が確認できるが、位相スペクトルの理論値（加速度収録を行っていることから位相差は 90° もしくは 270° となる）を考慮すると4. 3Hz が対象橋脚の固有振動数であると判断できる。

(2) 大阪方の単純桁の固有振動数

大阪方の単純桁に設置したセンサーにより、打撃によらない状態で、さらに車両通過時の振動応答の乱れを避けた部分の波形に対しフーリエ解析を行った結果を図-4. 6. 7に示す。この図から桁の鉛直方向の固有振

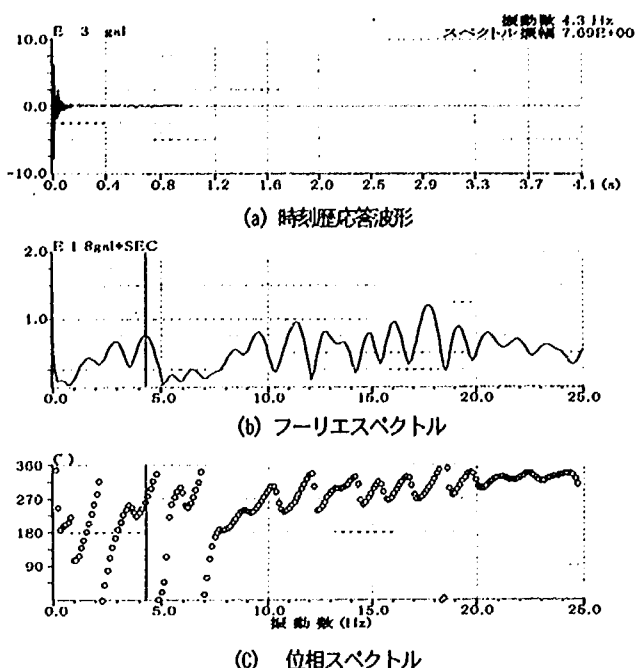
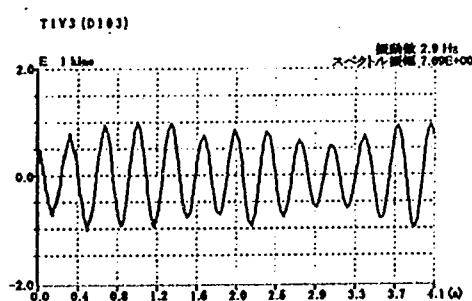
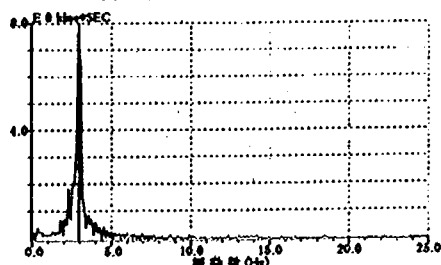


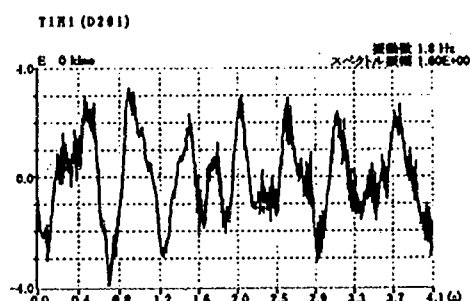
図-4. 6. 6 橋脚の衝撃振動試験結果（橋脚天端）



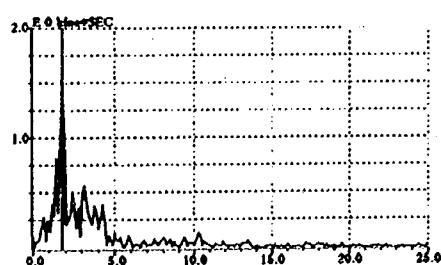
(a) 鉛直方向の時刻歴応答波形



(b) 鉛直方向のフーリエスペクトル



(a) 水平方向の時刻歴応答波形



(b) 水平方向のフーリエスペクトル

動数が2. 9Hz、水平方向の固有振動数が1. 8Hz であることがわかる。
図-4. 6. 7 大阪方単純桁の振動波形

(3) 和歌山方のニールセン橋のフーリエスペクトル

同様に、和歌山方のニールセン橋張り出し部に設置したセンサーにより得られた同様の波形から、桁の鉛直方向の固有振動数が2.1Hz、水平方向の固有振動数が2.3Hzであることがわかった。

(4) 橋脚の固有振動数の決定

橋脚のフーリエスペクトル図で得られた 4.3Hz以外の卓越振動数である1.7Hz、2.9Hz に関しては上記の桁の解析結果より、前者が単純桁の水平方向の固有振動数、後者が同じく単純桁の鉛直方向の固有振動数であることがわかる。以上のことから、先に述べたように対象橋脚の固有振動数は 4.3Hzに決定することが可能である。

(5) 固有値解析に用いる固有振動数について

前項の結果から、固有振動数を 4.3Hzとして解析を進める。

(6) 桁重量

桁重量に関する情報は与えられておらず、試験対象橋脚にかかる正確な桁反力は不明である。ここでは、一般図から求められる部材寸法から桁反力を400(tf)と設定して解析を進めることとした。

また、桁による橋脚天端の拘束は考慮しないものとした。

(7) く体の形状について

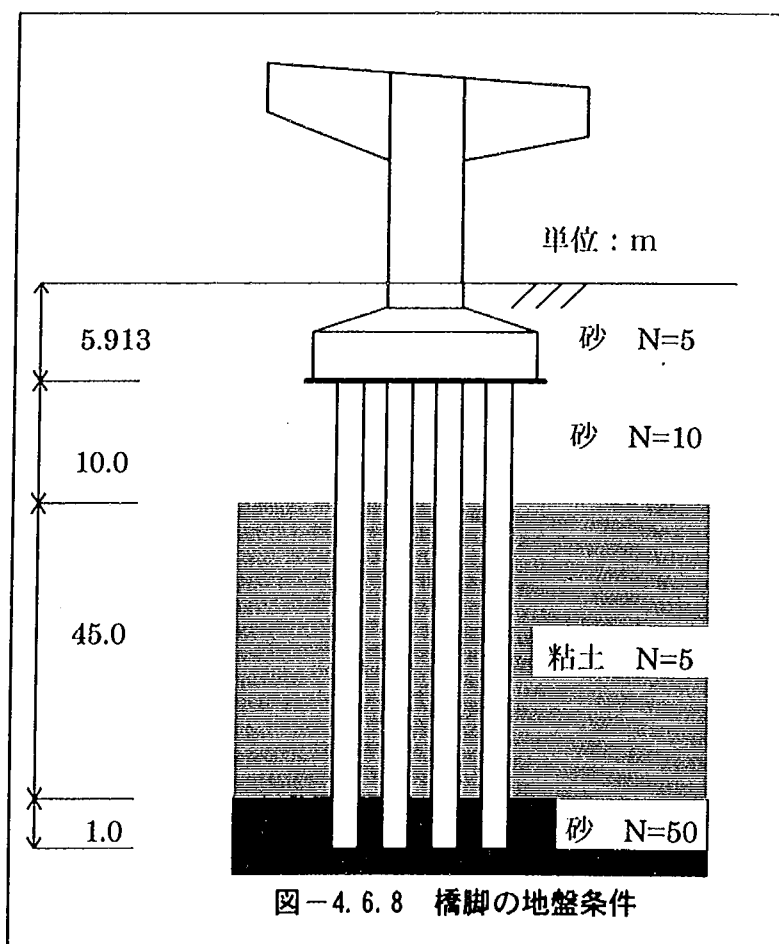
橋脚躯体部の断面は、図面においては1辺が 4.0(m)の正方形となっているが、実際には鋼板巻補強が施されており、1辺が 4.2(m)程度の正方形となっている。ここでは、鋼板厚を1(cm)と仮定し鋼板の剛性も考慮して、躯体の剛性を計算した。モデルデータとしては、もとのRC橋脚の剛性に対する補強後の剛性の倍率をヤング係数に乗じることにより表現した。

また、橋脚の重量も、補強後の形状を考慮して計算した。

(8) 地盤条件について

土質柱状図やN値は、近辺の地盤データを参考として、図-4.6.8に示すように設定した。

(9) 固有値解析モデル



この時、設計時想定よりも部材剛性 1.6 倍、水平ばね 2.5 倍、鉛直・回転ばね 9.0 倍の高い値となった。これは、基礎構造物としての機能が十分果たされていることを示すものである。

4.6.3 適用条件

(1) 構造物の条件

昨年度実橋試験を行った八高線高架橋や竜谷寺高架橋と比べても、今回実施の橋脚は大規模な構造物である。その橋脚について常時車両が通行している状態でも、固有振動数や固有値解析用データを採取することができた。単柱式橋脚に限れば、構造物の大きさに応じた適用上の制限はないものと考えられる。但し、橋脚頂部を打撃することができるという作業上の制限を考えなければならない。作業上の制限として考慮しなければならないのは、以下の点である。

- ① 橋脚周辺に近接構造物がある場合の離隔（重錘を打撃する余裕空間に 2 m 程度は必要）
- ② 橋脚周面に付帯施設がある場合の位置（橋脚上・中・下部にセンサーを設置できるスペースに 10cm × 10cm は必要）
- ③ 橋脚が河川中にあるか陸上にあるか。
- ④ 橋脚に道路が隣接して、地盤を介しての振動が伝播するか。
- ⑤ 作業車が現場に搬入できるか。

(2) 橋梁交通量の条件

これまでの実橋試験の結果から、交通量の多少にかかわらず、固有振動数を求めることができた。但し、交通量が少ないほど、橋重が大きいほど固有振動数を明瞭に特定することができる。逆に交通量が多く、しかも鋼橋がかかっている場合は、車両の衝撃が橋脚に伝わりやすいために、ノイズの相殺や消去の作業が必要となる。また、ノイズの相殺方法として複数回の重錘打撃による重ね合わせを実施した。10 回程度が最良だった。それ以上回数を増やすと、かえってノイズの影響が顕著となった。

(3) 地盤の条件

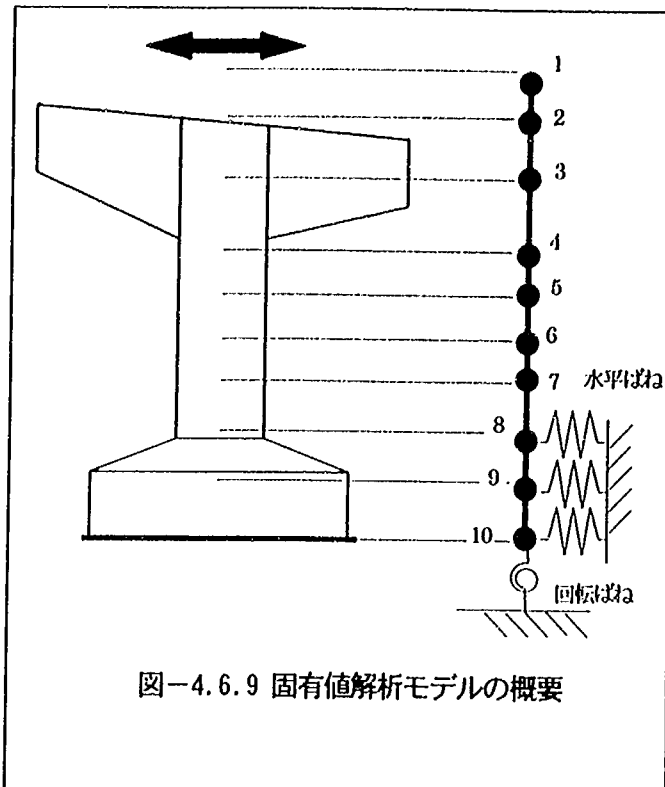
軟弱地盤の場合、周辺のノイズを橋脚に与えるため、固有振動数の測定が困難となる場合がある。この場合に、あらかじめ地盤上にセンサーを設置して、周辺ノイズの状況を把握すればよい。今回の岸和田橋梁の場合、軟弱地盤ではあったが、橋梁下は車両の通行や工事による振動はなく、実験に悪影響は与えられなかった。

4.6.4 まとめ

車両通過に伴う交通振動が途切れることがない道路橋橋脚に対し衝撃振動試験を実施した。計画の段階では打撃に伴う応答と交通振動による攪乱振動による比＝S/N 比 (Signal/Noise) が小さく、そのため橋脚の固有振動数を決定することは困難ではないかと予想された。しかし、今回の試験により、十分に把握可能であること、また、桁の固有振動数を分離可能であることが明確にわかった。

衝撃振動試験は、鉄道橋で非常に多くの実績を積み重ねている。今回、通過車輛による振動が常に加えられている状況で実施したところ、道路橋にも適用できる可能性があることを確かめられた。重錘打撃という

振動の方向



節点	X m	Y m	重量 tf	Kx tf/m	Ky tf/m	Kr tf·m/rad
1	0	0	400	0	0	0
2	0	-2.88	185	0	0	0
3	0	-4.80	340	0	0	0
4	0	-6.88	145	0	0	0
5	0	-10.4	132	0	0	0
6	0	-13.88	126	0	0	0
7	0	-16.0	113	5730	0	0
8	0	-18.0	99.6	9080	0	0
9	0	-19.0	523	21400	0	0
10	0	-21.8	406	3.50E+5	1.12E+5	1.96E+7

部材	節点 (1)	節点 (2)	断面積 m ²	断面2次 m ⁴	ヤング係 数 tf/m ²
1	1	2	8	260	2.7E+6
2	2	3	74	2110	2.7E+6
3	3	4	45	1070	2.7E+6
4	4	5	16	21.3	3.7E+6
5	5	6	16	21.3	3.7E+6
6	6	7	16	21.3	3.7E+6
7	7	8	16	21.3	3.7E+6
8	8	9	59.3	717	2.7E+6
9	9	10	130	1410	2.7E+6

(10) 解析結果

橋脚下端、中間、天端での振動モードと合致するように、部材剛性（水平、鉛直）、地盤ばね（水平、鉛直、回転）を変化させたところ、図-4.6.10 が得られた。

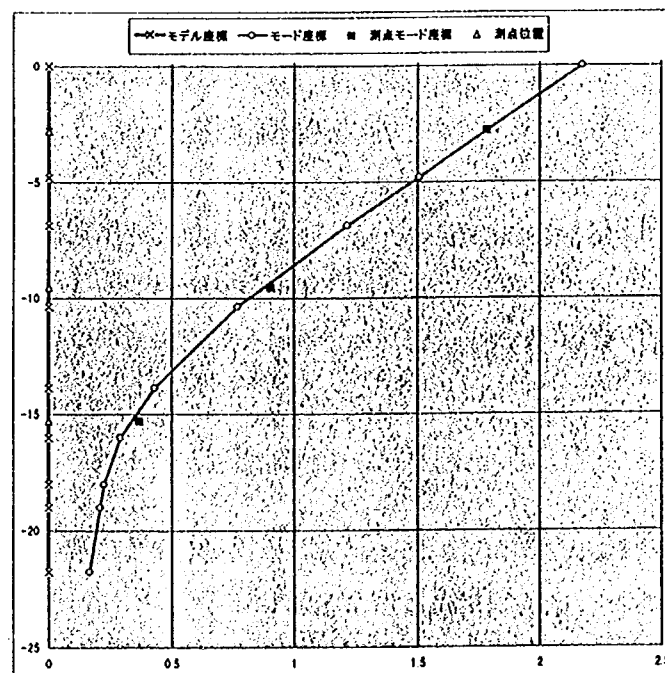
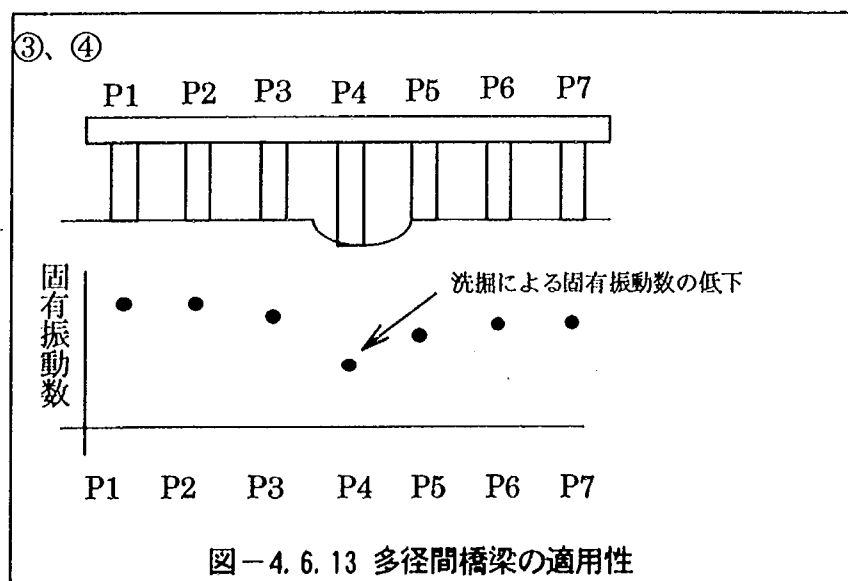
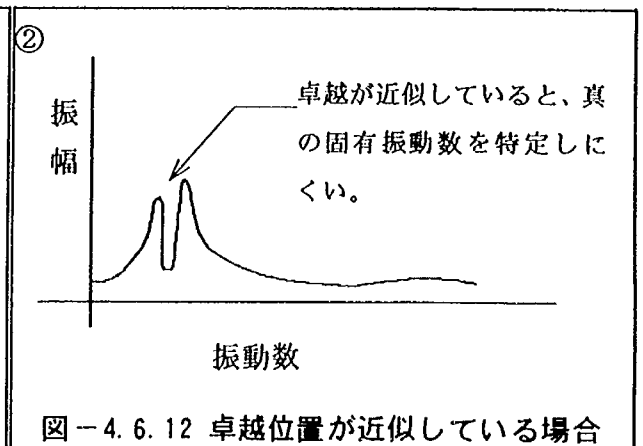
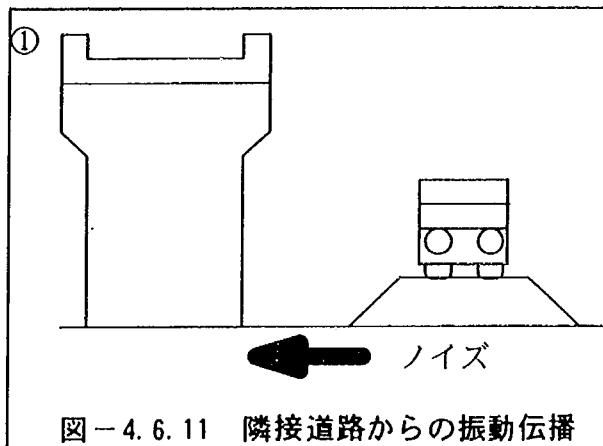


図-4.6.10 解析モード図

加振力で発生する自由減衰波形を収録することで、基礎構造全体の健全性が確認できるこの手法は、特殊な機器を必要とせず、簡便に実施できることから道路橋の基礎構造調査に十分役立つものと考えている。

但し、一連の共同研究としての活動終了後も、道路橋への適用上について以下の課題が残されている。

- ① 軟弱地盤上で、しかも近接構造物があり、地盤を通してノイズが入り込みやすい橋梁での衝撃振動試験の適用性 (図-4.6.11 参照)
- ② 桁と橋脚の固有振動数が近似しており、その区別が困難な橋梁での衝撃振動試験の適用性 (図-4.6.12 参照)
- ③ 河川を横断する多径間橋りょうで、基礎種別が異なっているもの、あるいは洗掘を受けている可能性があるものに対する適用性 (基礎を区別できるのか、洗掘を判別できるのかの判定、図-4.6.13 参照)
- ④ 過去に地震を経験した橋梁に対する適用性 (不可視部分での損傷状況、図-4.6.13 参照)



今後は、これらの検証を目的とした実橋試験を実施する予定である。

5. 調査手法の適用性

5.1 形状調査

5.1.1 調査目的

既設橋梁に近接して新たな構造物を建造する場合や、既設基礎の耐震性の判定、河床洗掘等の地盤変状を受けた橋梁の健全性を検討する場合などに、既設基礎の基礎形式や基礎諸元等を把握する必要がある。また、既設橋梁の架替えに当たって上部構造のみを架替えし、基礎については既存のものをそのまま利用していくことも考えられ、このような場合にも基礎諸元が必要となる。しかし、古い橋梁では図面等が保管されていないことが多いため、基礎の形状調査を実施しなければならない。基礎形状の調査目的と調査項目を整理すると表-5.1.1 のようになる。

表-5.1.1 基礎の形状調査の目的と調査項目

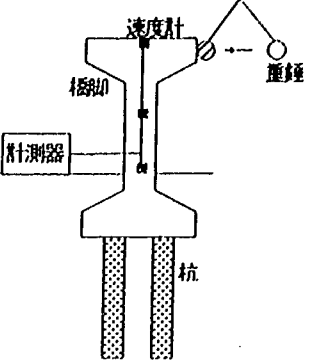
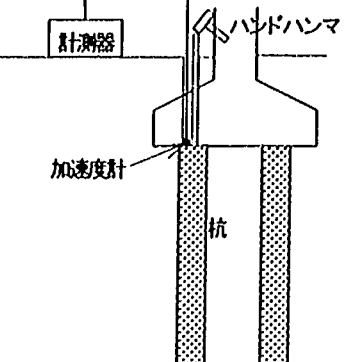
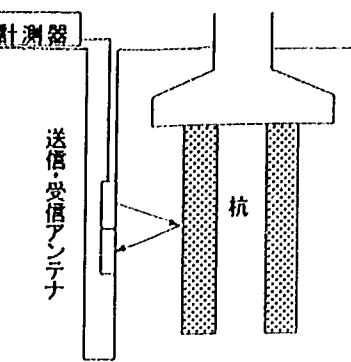
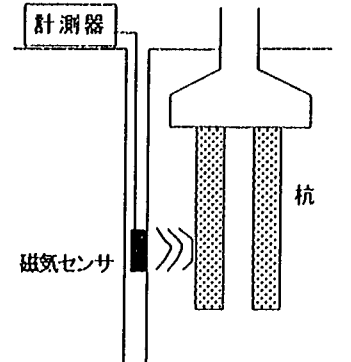
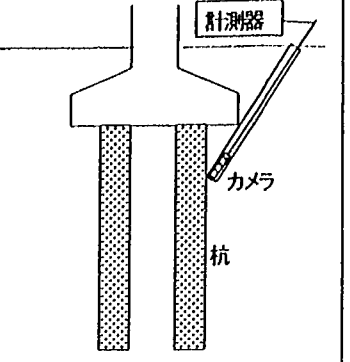
調査対象	調査目的	調査項目
近接施工時	基礎位置の確認	基礎の平面的配置、基礎の根入れ深さ
耐震性判定、洗掘を受けた橋梁、架替え時	健全性の評価	基礎形式、基礎配置、杭種別、杭径、根入れ深さ

ひとつの調査手法で、表-5.1.1 の全ての項目を調査することは困難である。そこで、図-5.1.1 の形状調査フローに示すように、いくつかの調査手法を組み合わせながら必要な項目を調査するとともに、仮設年次等から類推することも必要である。

5.1.2 各調査法の適用性

各種法の適用性をまとめると、表-5.1.2 のようになる。

表-5.1.2 形状調査の適用性・調査項目一覧表

調査法		衝撃振動試験	インティグリティ試験	ボアホールレーダ	磁気探査	ボアホールカメラ	備考
適用条件							今回の研究項目以外で、橋梁基礎形状調査に適用可能なものを列記すると以下のようになる。
調査項目	基礎構造(杭・ケーソン等)	○	△	—	—	—	試掘： 直接確認できるが、地下水位以下の掘削では、排水が必要となる。また、深い掘削では山留めが必要となり大掛かりとなる。
	基礎上面深度	—	—	—	—	—	
	平面形状	—	—	—	—	△	
	フーチング厚さ	—	△	△	△	○	
	杭種	△	—	△	△	○	
	基礎の根入れ(杭長)	△	○	○	○	—	
	杭配列	—	—	○	○	—	
	杭径	—	—	—	—	○	
	最大対象深度	任意	60m	20m	100m	500m	
	非破壊検査が可能	○	○	○	○	—	
	ボーリングの必要性	無	無	有	有	有	斜めボーリング： 調査項目のほとんどの適用できるが、費用が掛かる。
	フーチングの影響	無	有	無	無	無	
	作業工程(1日当り)	2ヶ所	30点(杭頭露出時)	20m、3孔(観測孔設置除く)	20m、3孔(観測孔設置除く)	10m、5孔(観測孔設置除く)	
	試験が容易	○	○	△	△	△	
	試験結果の評価が容易	△	○	△	△	○	
	特記事項	地上部分の一般寸法図や地盤データが必要	フーチングがある場合、試掘やボーリング孔内で杭頭打撃する必要あり。木杭の根入れは△	観測孔は基礎に接近していること、塩分の多いところでは注意が必要	鉄類にのみ反応、観測孔は基礎に近いほど精度が上がる	フーチングの厚さ・杭径は杭本体を削孔	

○：適用可、△：条件によって適用可、—：実績少ない

また、橋梁基礎の「形状調査フロー」は、図-5.1.1 に示したようになる。

橋梁基礎の形状調査は、基本的に現地調査や既存の資料を調べ、不明な点について調査を行う。

まず、基礎形式を推定する必要があるが、上部構造や地盤状態から想定し、場合によっては試験で確認する。

その他の「橋台」「橋脚」の形状は、現地状況や地盤状況などにより、各探査手法の組み合わせにより、最も適したものを選ぶ必要がある。

なお、観測孔を設置する調査・試験法では、同時に「標準貫入試験」を実施すれば、地盤構成と特性値が求まるので有効である。

調査結果の報告では、その調査目的にもよるが、一般に「基礎形状の図面」を作成し、基礎の材質、寸法などを示すとともに「測定精度」を表記する。

以下に、調査の各段階の説明を示す。

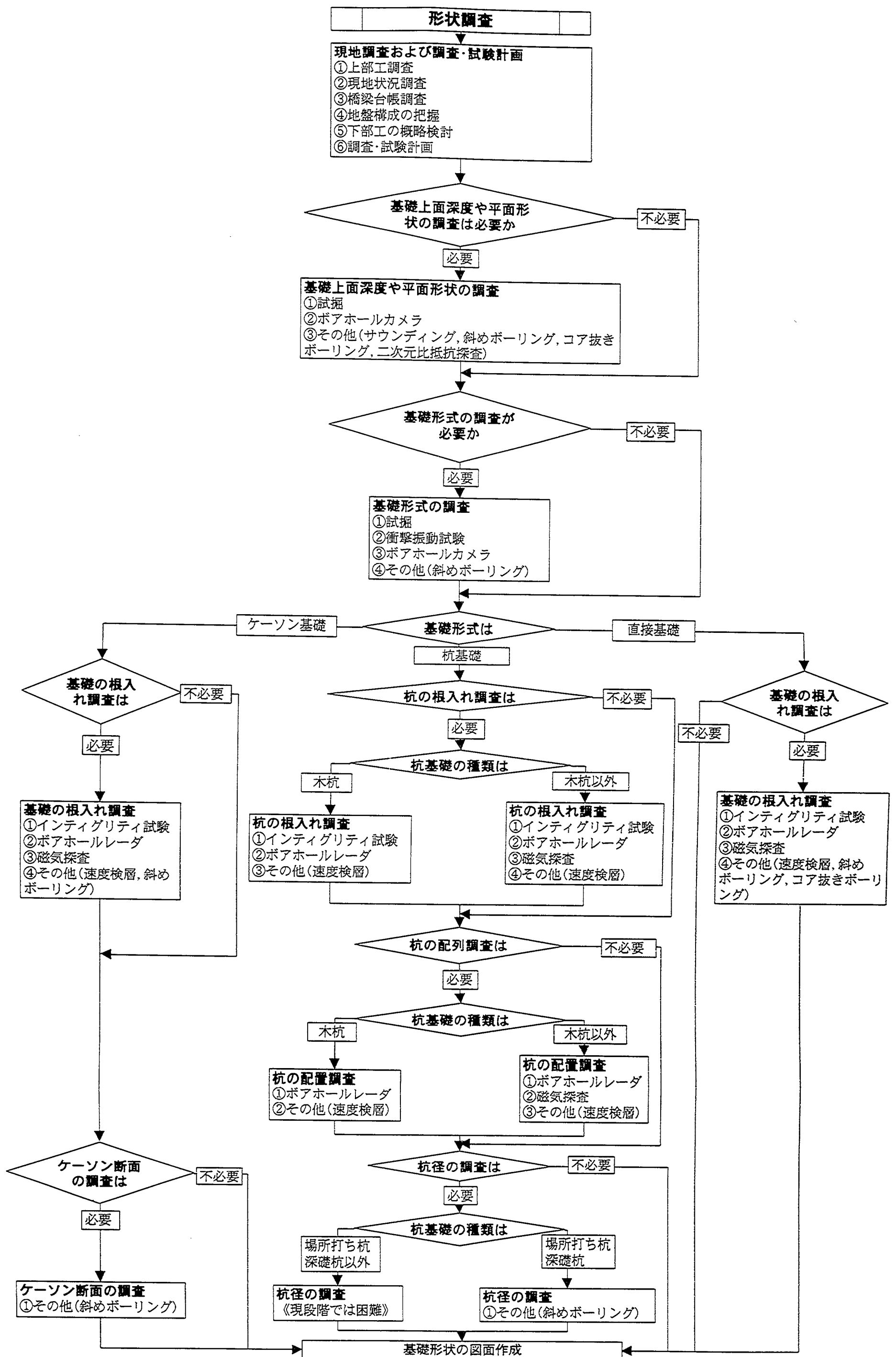


図 - 5.1.1 形状調査フロー

(1) 現地調査および調査・試験計画

現地調査は、「橋梁台帳」が無い場合に、下部工を想定するために、その構造などの調査が必要である。また、その結果や各種資料を基に調査・試験計画を立てる。

1) 上部工調査

上部工調査は、「橋梁台帳」が無い場合や、存在していても詳細が不明なところが多いので、現地で確認する必要がある。

- ・ 構造
- ・ 寸法
- ・ 架設年月日
- ・ その他

2) 現地状況調査

現地状況調査は、現地で各種試験を行う場合の仮設条件を主体に以下の調査が必要である。

- ・ 桁下空間
- ・ 河川水量、水深
- ・ 搬入路
- ・ 土地利用
- ・ 通行量
- ・ その他

3) 橋梁台帳調査

橋梁台帳は、管理する地方自治体が整備しているが、最近の架設橋梁以外は、上部工のみのものが多い。また、記載事項については、設計段階のものが載っている事もあるので、現地調査と合わせて確認する必要がある。

4) 地盤構成の把握

地盤構成は、その対象橋梁の「基礎形式」を想定する上で重要な情報となるので、「柱状図」が必要である。

5) 下部工の概略検討

下部工の検討は、現地調査、橋梁台帳、地盤構成、架設年月日などの情報をもとに、簡単な構造計算を行い、想定される基礎形式を検討する。

この場合、基礎形式を絞り込む必要はないが、何の根拠もなく調査するより、効率的な調査が可能

になる。

6) 調査・試験計画

以上の検討をもとに、明らかにしたい目的別に、「調査・試験計画」を立てる。

この場合、必要な精度、日程、費用などを考慮し、計画する必要がある。

(2) 基礎形式調査

1) 基礎上面深度と平面形状調査

この調査は、「フーチング」の深度、厚さ、平面位置を特定するもので、以下の調査・試験がある。

表-5.1.3 基礎上面深度と平面形状調査

手法	調査項目	適用性
試掘	深度、厚さ、平面形状	地下水が高いと排水処理必要
ボアホールカメラ	材質、厚さ	観測孔が必要
サウンディング	深度、平面形状	簡便であるが砂礫地盤は不可
斜めボーリング	深度、厚さ、平面形状	厚さは、構造物を直接コアリング
コア抜きボーリング	厚さ	土砂部の掘削は不可能

2) 基礎形式の調査

基礎形式の調査は、「試掘」が可能な場合は、この方法が最も確実であるが、地下水が高かったり、フーチングが厚い場合は、不適当である。

試掘以外の方法としては「斜めボーリング」を杭に当て、ボーリング孔の先端を「ボアホールカメラ」で観察する方法もある。しかし、費用的等で「ボアホールカメラ」を利用できない場合は「ボーリング」時の感触で想定するしかない。

衝撃振動試験は、基礎形式の判定が可能である。「杭基礎」と「直接基礎」の区別は、水平方向に衝撃を与え時の基礎の回転中心が高いか低いかで判定するが、高い方が「直接基礎」である。また、「ケーソン基礎」は、剛体的な回転をする結果が得られるので判別できる。

表-5.1.4 基礎形式の調査

手法	適用基礎形式	適用性
試掘	全て	地下水が高いと排水処理必要
衝撃振動試験	直接基礎・杭基礎・ケーソン基礎	上部構造・地盤構成が必要
ボアホールカメラ	全て	観測孔が必要。厚さはコア抜き孔を利用
斜めボーリング	全て	感触で確認

(3) 基礎の根入れ・杭長調査

この調査は、「直接基礎」の場合は、厚さを特定し、その他の基礎の場合は「その根入れ長（杭長）」を特定するもので、以下の調査・試験がある。

表-5.1.5 基礎の根入れ・杭長調査

手法	適用基礎形式	適用性
インティグリティ試験	全て	水中では不可 フーチングがある場合は適用注意
ボアホールレーダ	全て	観測孔が必要
磁気探査	木杭は除く	観測孔が必要、鉄類に反応
速度検層	全て	観測孔が必要
斜めボーリング	直接基礎、ケーソン基礎	構造物をコアリングする
コア抜きボーリング	直接基礎、ケーソン基礎	土砂部の掘削は不可

(4) 杭の配列調査

「杭配列」を特定する場合、以下の調査・試験がある。

表-5.1.6 杭の配列調査

手法	適用基礎形式	適用性
ボアホールレーダ	全て	近傍に観測孔を設置、高塩分の場合は困難
磁気探査	木杭を除く	鉄類に反応する。鋼管杭は近傍に観測孔を設置
速度検層	全て	近傍に観測孔を設置、センサの設置ピッチで精度が決まる

(5) 杭径の調査

「杭径」を特定できる基礎形式は限られているが、以下の調査試験がある。

表-5.1.7 基礎の杭径調査

手法	適用基礎形式	適用性
斜めボーリング	ケーソン基礎 場所打ち杭 深礎杭	杭芯をコア抜きし、採取コアから判定するが、鉄筋による障害に注意

5.1.3 調査計画事例

調査計画事例は、以下のものについて、調査・試験計画を中心に、種類別に示す。また、実橋での計画事例についても示す。

- ・直接基礎
- ・ケーソン基礎
- ・場所打ち杭基礎(深礎杭)
- ・木杭
- ・RC杭・PC杭・PHC杭
- ・鋼管杭

(1) 直接基礎(橋脚部)

直接基礎の橋脚部は、図-5.1.2 に示したような調査計画となる。

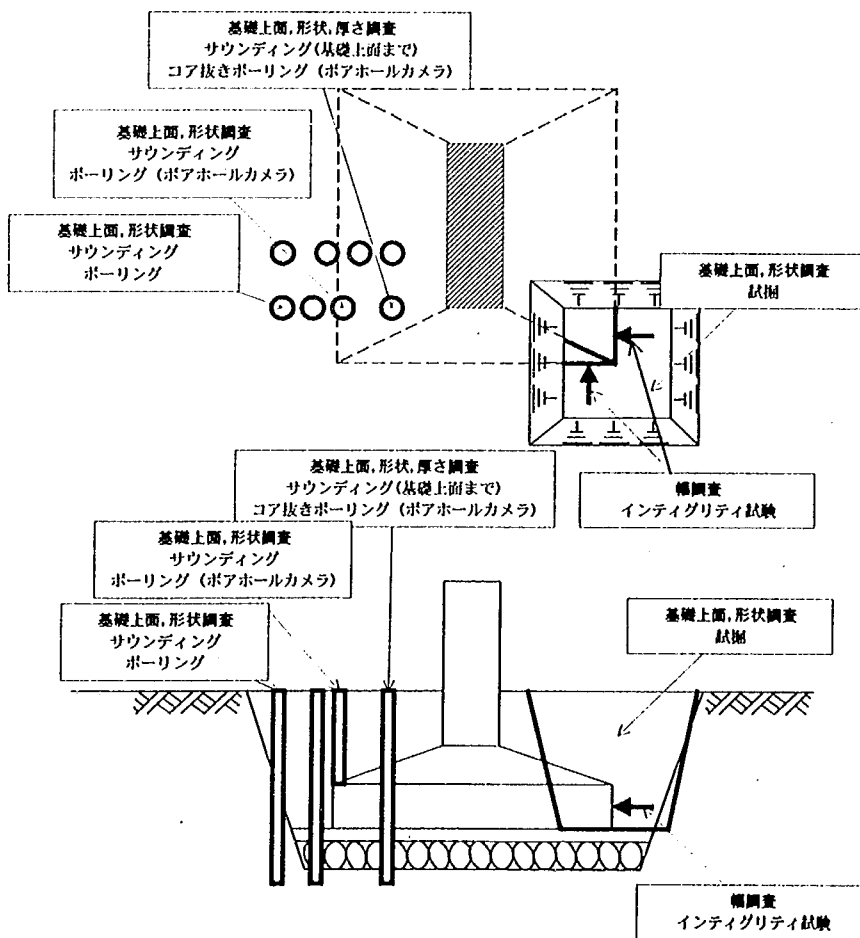


図-5.1.2 直接基礎の形状調査(橋脚部)

(2) 直接基礎(橋台部)

直接基礎の橋台部は、図-5.1.3 に示したような調査計画となる。

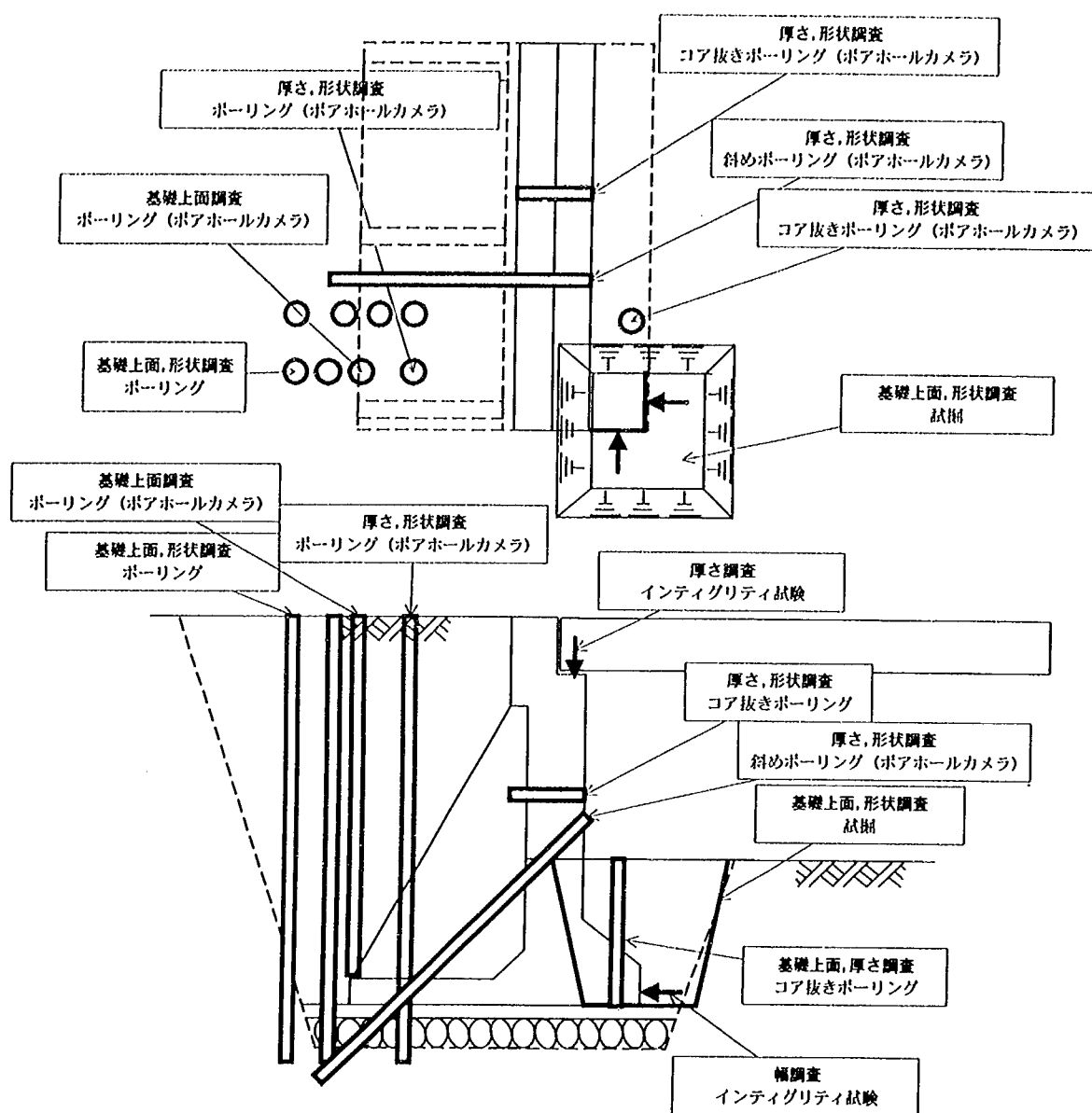


図-5.1.3 直接基礎の形状調査(橋台部)

(3) ケーソン基礎

ケーソン基礎の場合は、図-5.1.4 に示したような調査計画となる。

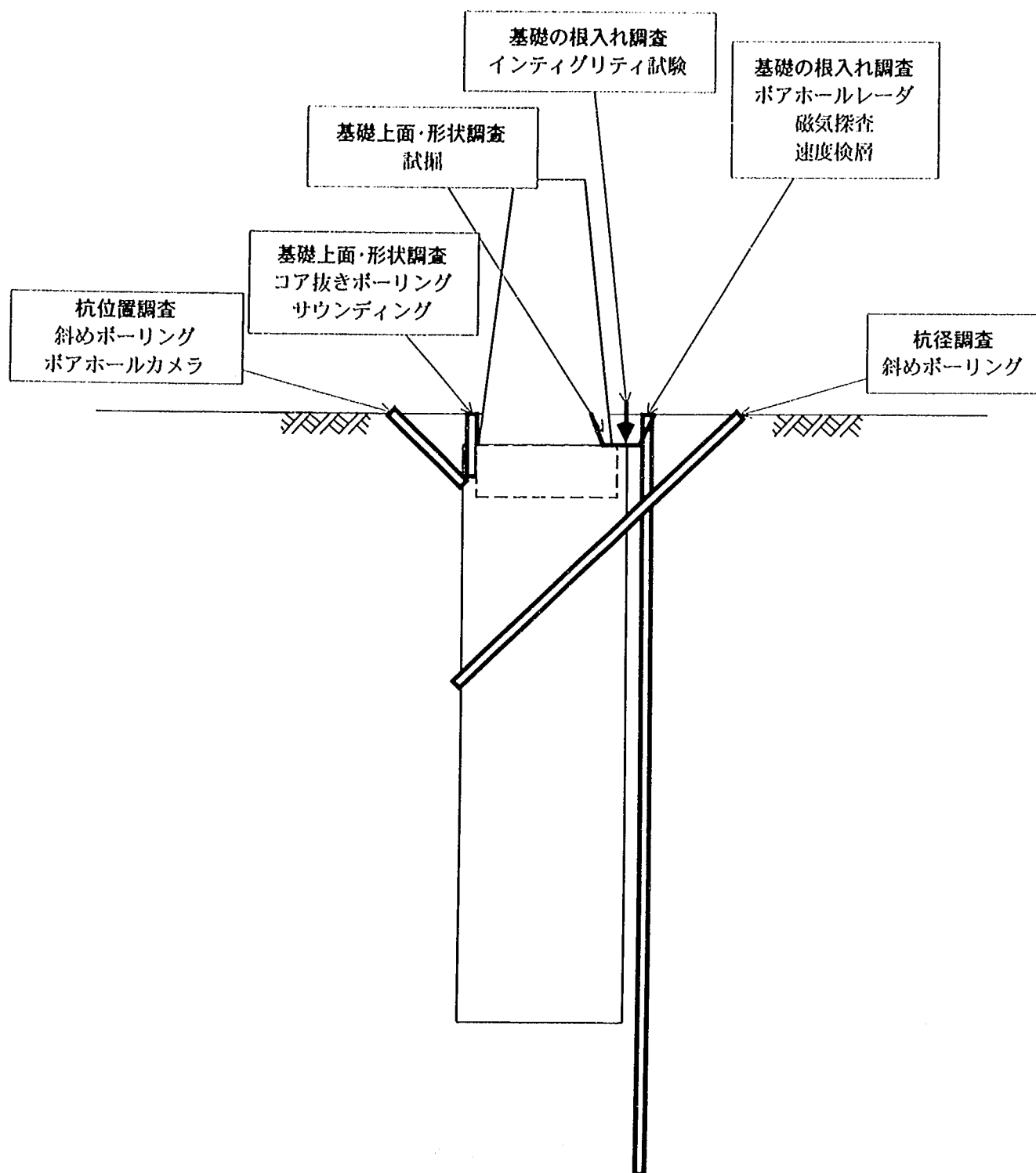


図-5.1.4 ケーソン基礎の形状調査

(4) 場所打ち杭基礎

場所打ち杭基礎の場合は、図-5.1.5 に示したような調査計画となる。

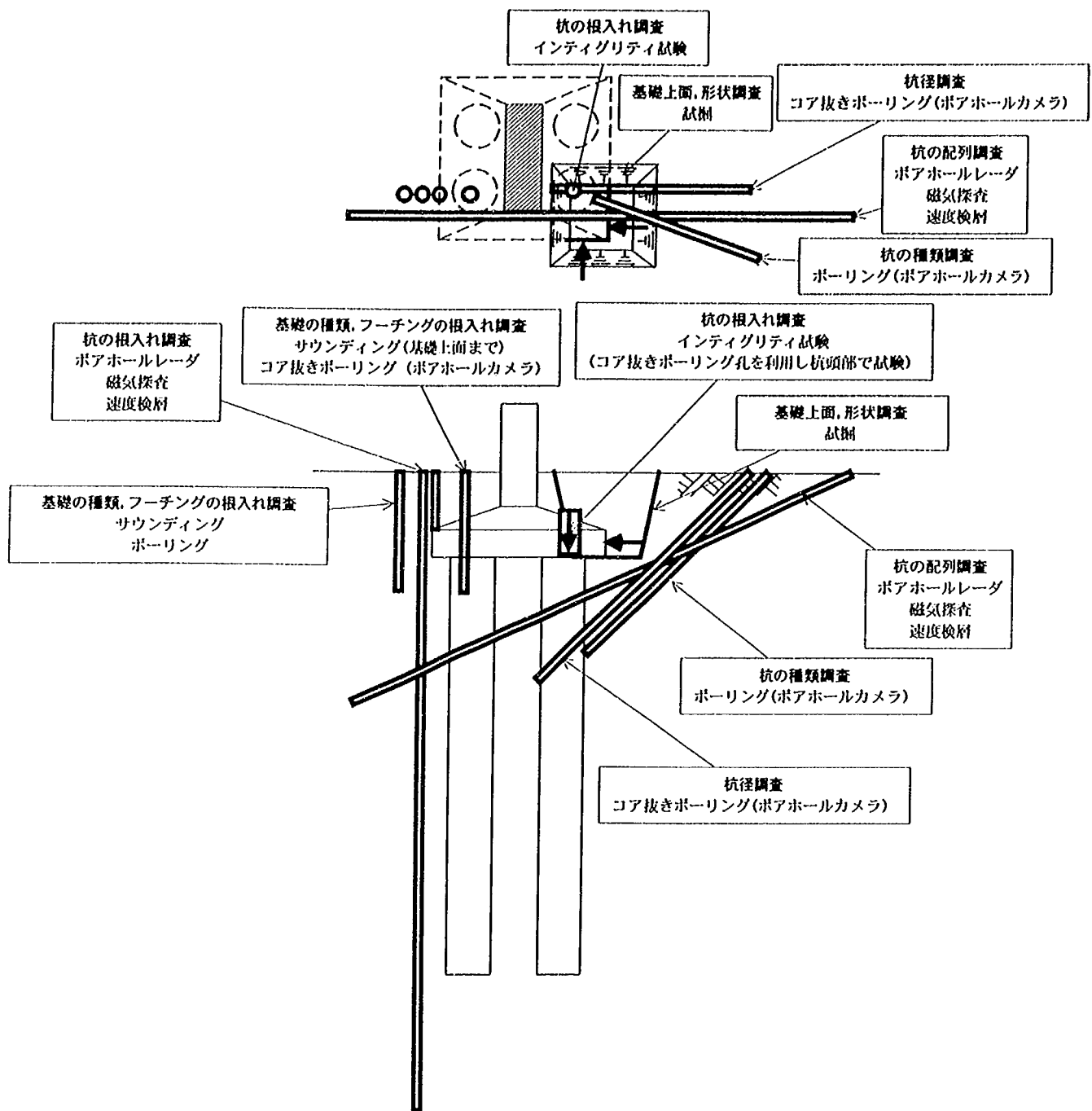


図-5.1.5 場所打ち杭・深礎杭の形状調査

(5) 木杭基礎

木杭基礎の場合は、図-5.1.6 に示したような調査計画となる。

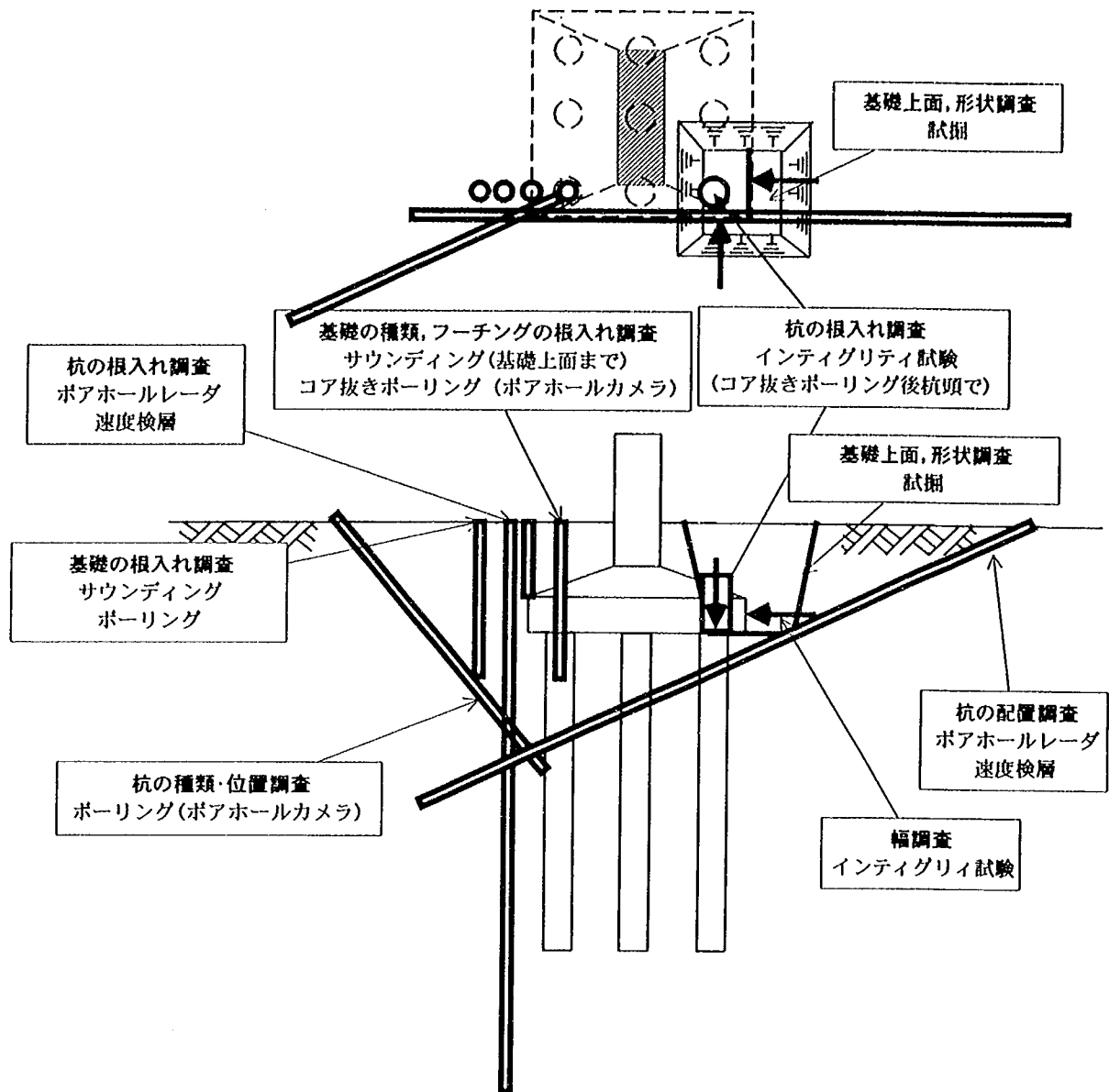


図-5.1.6 木杭の形状調査

(6) RC杭・PC杭・PHC杭・鋼管杭基礎

RC杭・PC杭・PHC杭・鋼管杭基礎の場合は、図-5.1.7 に示したような調査計画となる。

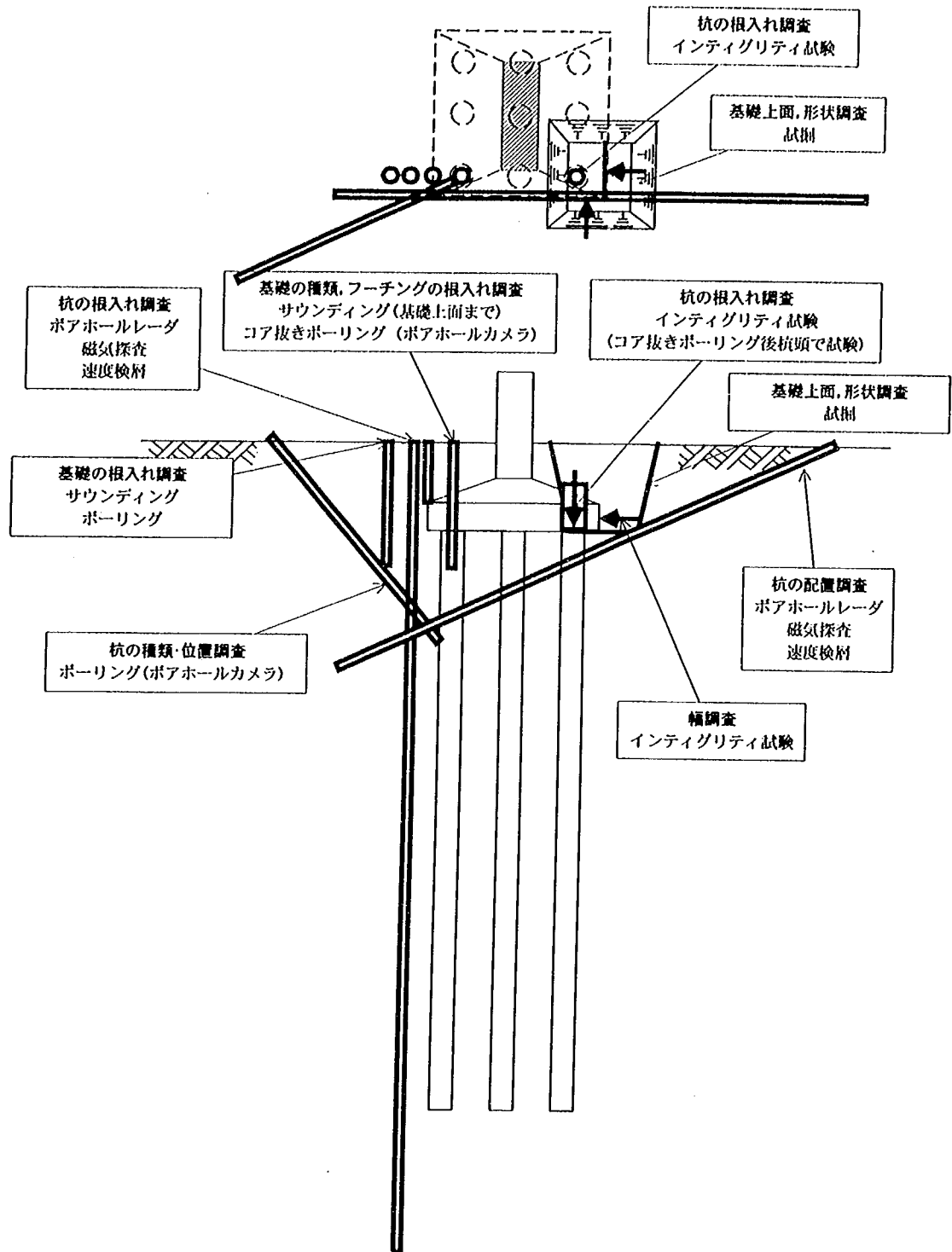


図-5.1.7 RC杭・PC杭・PHC杭・鋼管杭の形状調査

(7) 実橋の調査計画事例

ここでは、実橋での調査計画事例を示す。

目的は、橋梁の「基礎形式」「基礎の諸元」を調べる事である。

図-5.1.8 は、対象橋梁の「橋梁一般図」であり、地上部に露出している下部工と上部工の諸元などは事前に判明しているものとする。また、付近の柱状図もある。

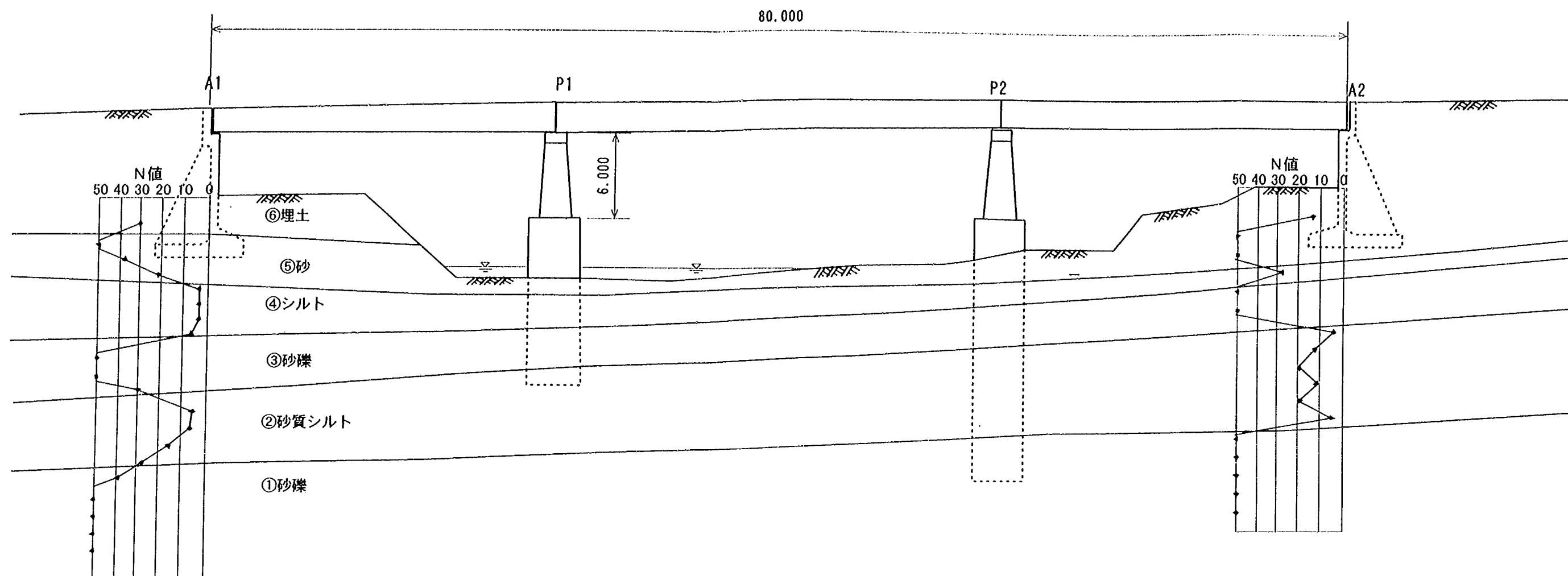


図-5.1.8 実橋梁調査計画（一般図）

1) 計画事前調査

現況調査

- a. 橋台および橋脚上部構造物等の計測…幅員、支間、上部構造の形式
簡易的な7-チン[®]形状調査（探針調査による寸法計測）
- b. 施工時期等の確認…橋歴板等の確認
- c. 現況状況の確認…観測孔設置候補地、交通状況の確認

机上調査

- a. 地盤情報（地盤構成）の収集…周辺地域の既存ボーリング結果、文献
- b. 橋梁関係の竣工図面等の収集（再確認）…橋梁台帳、竣工図面等の収集
- c. 聞き込み調査…施工業者（橋歴板に記載されている場合）等

概略基礎形状の想定（施工記録が未確認の場合）

- a. 地盤情報から支持地盤の想定…概略杭長の想定
- b. 上部構造物の形状、施工時期から基礎形状の想定

2) 概略基礎の推定

事前調査結果（本ケースは図面からの推定）

- a. 地盤条件から支持地盤の選定
 - i 砂礫層③（基準面からの深度：GL-0～5m）
 - ii 砂礫層①（基準面からの深度：GL-17m）
- b. 支持地盤からの基礎形式、形状の推定
 - i 砂礫層③（基準面からの深度：GL-0～5m）
直接基礎
杭基礎…木杭の可能性あり
 - ii 砂礫層①（基準面からの深度：GL-17m）
杭基礎…支持層までの中間に礫層あり、場所打ち杭、中掘り杭基礎、ケーソン基礎が有力（磁性体を含む杭が有力）
- c. 上部構造物からの基礎形式の推定
 - i A1 橋台…直接基礎、杭基礎
 - ii P2 橋脚…ケーソン基礎が有力

3) 橋台部の調査計画

橋台部（A1）の探査

探査項目および探査手法

i フーチングの形状（図-5.1.9）

フーチング上面形状

- ・ボーリング（サウンディング）の抵抗による調査
- ・試掘による直接確認

フーチングの厚さ、幅

- ・コア抜きボーリング
- ・幅はインティグリティ試験
- ・試掘による直接確認

その他

- ・橋台の根入れ……橋台天端でインティグリティ試験
- ・橋台の厚さ……コア抜きボーリング

ii 基礎形式〔杭の有無、杭配置〕（図-5.1.10）

杭の有無と配置（傾斜観測孔を用いた探査）

- ・磁気探査
- ・ボアホールレーダ（木杭にも対応）
- ・速度検層（木杭にも対応）

杭の有無と種類

- ・斜めボーリングで直接確認
- ・基礎に当たったところでボアホールカメラで基礎の種類を目視確認

iii 杭長探査〔基礎形状調査後に実施〕（図-5.1.11）

長い観測孔を用いる場合

- ・磁気探査
- ・ボアホールレーダ
- ・速度検層（木杭にも対応）

短い観測孔を用いる場合

- ・インティグリティ試験（杭頭まで観測孔を設置）

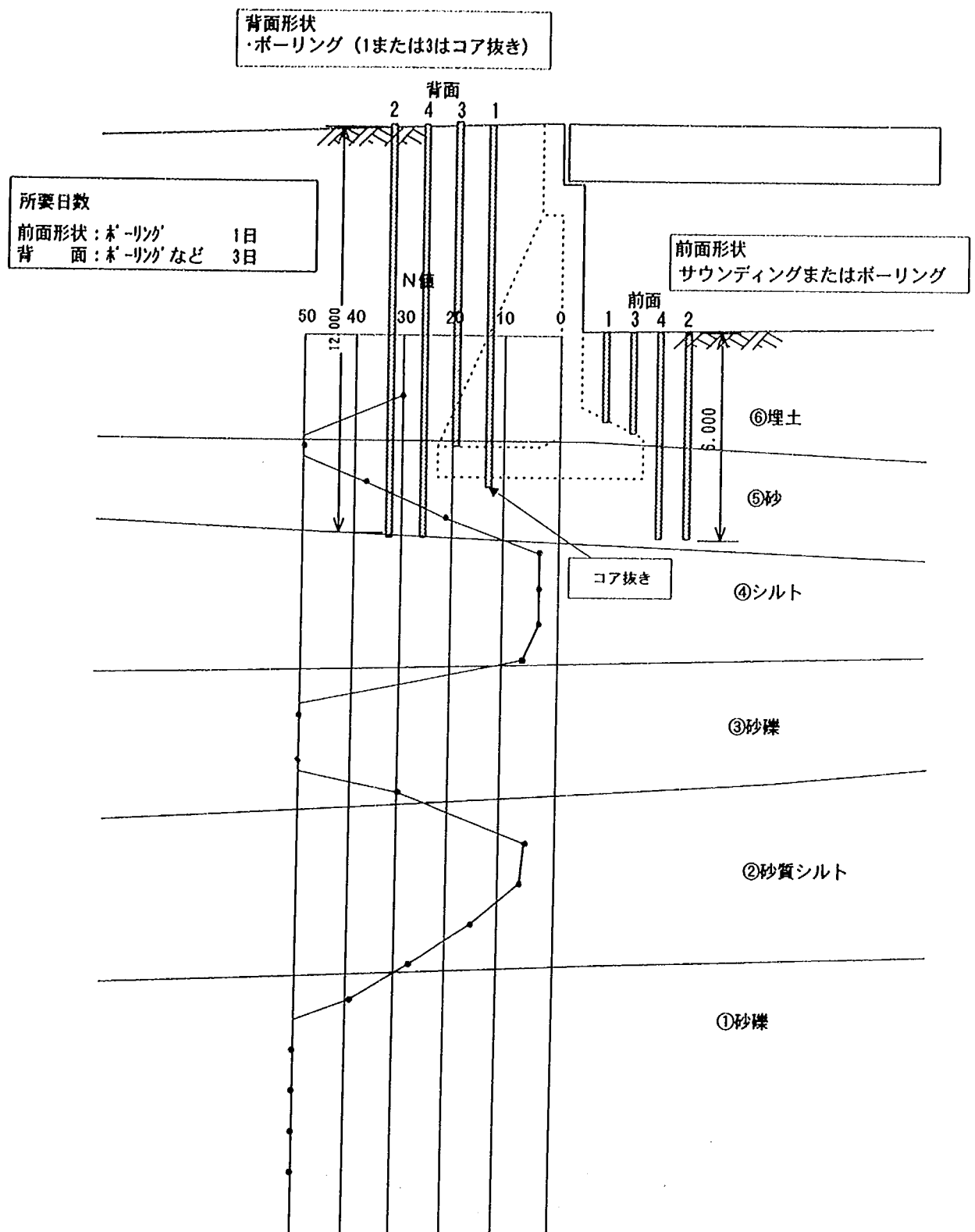


図-5.1.9(1) 実橋梁調査計画 (AI橋台フーチング調査, ボーリングなど)

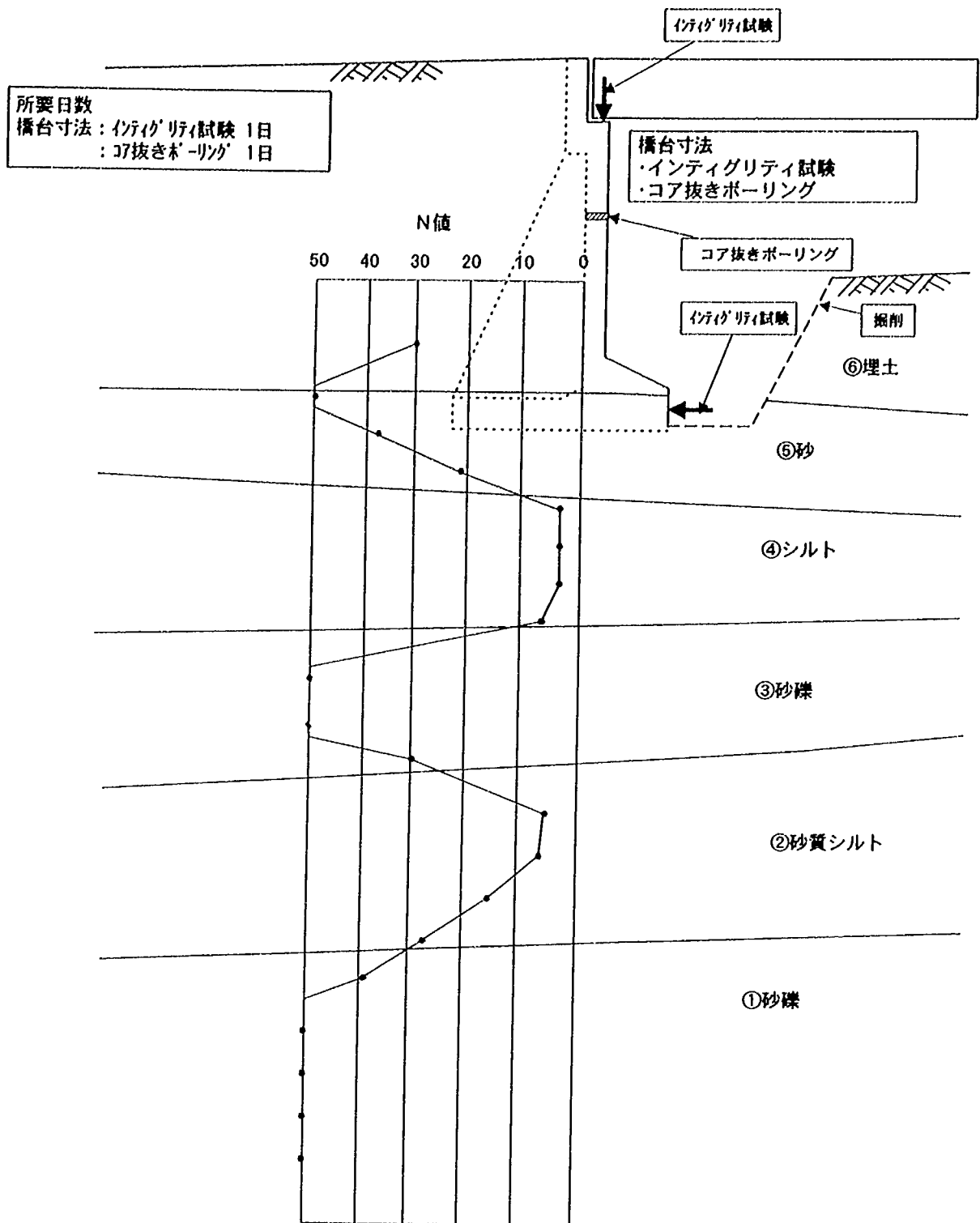


図-5.1.9(2) 実橋梁調査計画
(A1橋台フーチング調査, インテグリティ試験など)

- ①ボーリング $\phi 86\text{mm}$
 ・杭にあたった場合はボアホールカメラで杭種を確認
 ・孔保護のためにVP65塩化ビニール管設置
- ②探査など
 ・磁気探査
 ・ボアホールレーダ
 ・速度検層（磁気探査に反応がなかった場合）
 ・ボアホールカメラ（ボーリングが杭に当たった場合）

所要日数
 ボーリング：1～2日
 探査：各1日
 ボアホールカメラ：1日

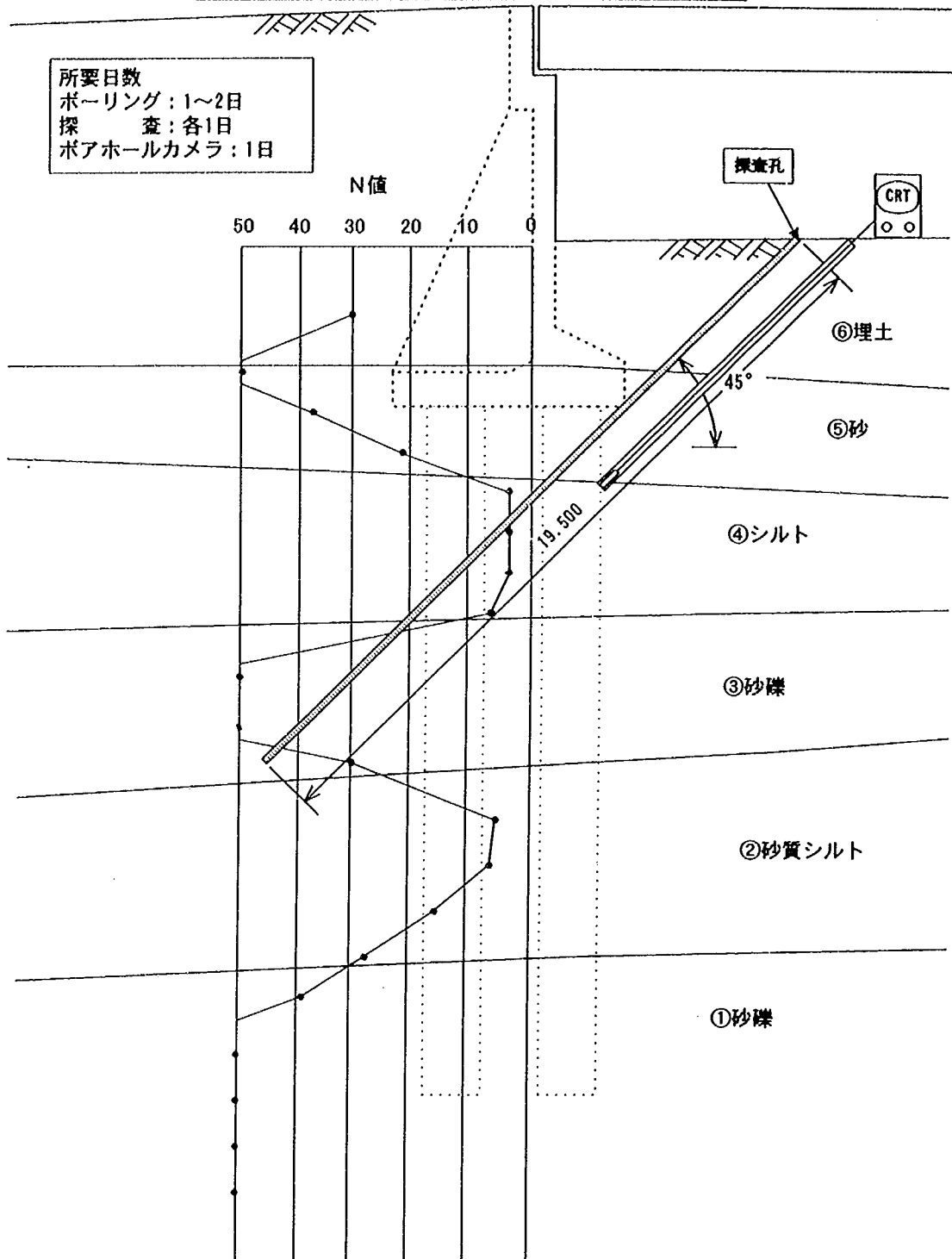


図-5.1.10 実橋梁調査計画（A1 橋台杭の有無と杭配置）

- ①ボーリング φ86mm
 ・木杭の場合15m、以外は25m
 ・標準貫入試験
 ・孔保護のためにVP65塩化ビニール管設置
- ②探査
 ・磁気探査
 ・ポアホールレーダ
 ・速度検層（磁気探査に反応が無かった場合）

所要日数
 ボーリング：2～3日
 探 査：各1日

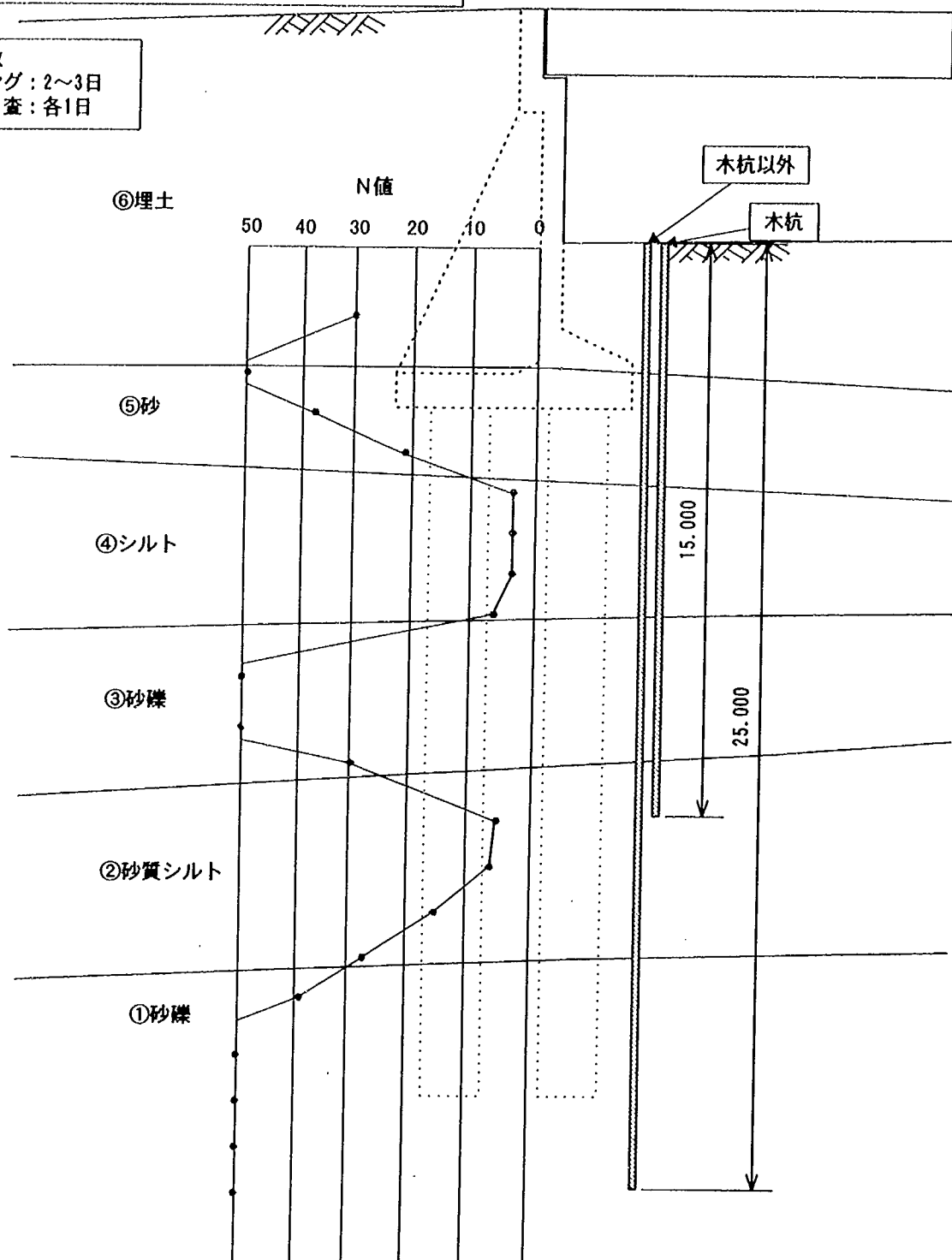


図-5.1.11(1)実橋梁調査計画（A1 橋台杭長、探査など）

- ①ボーリング $\phi 116\text{mm}$
 ・孔保護のためにVP100塩化ビニール管設置
 ②インティグリティ試験 (IT)

所要日数
 ボーリング：1日
 インティグリティ試験：1日

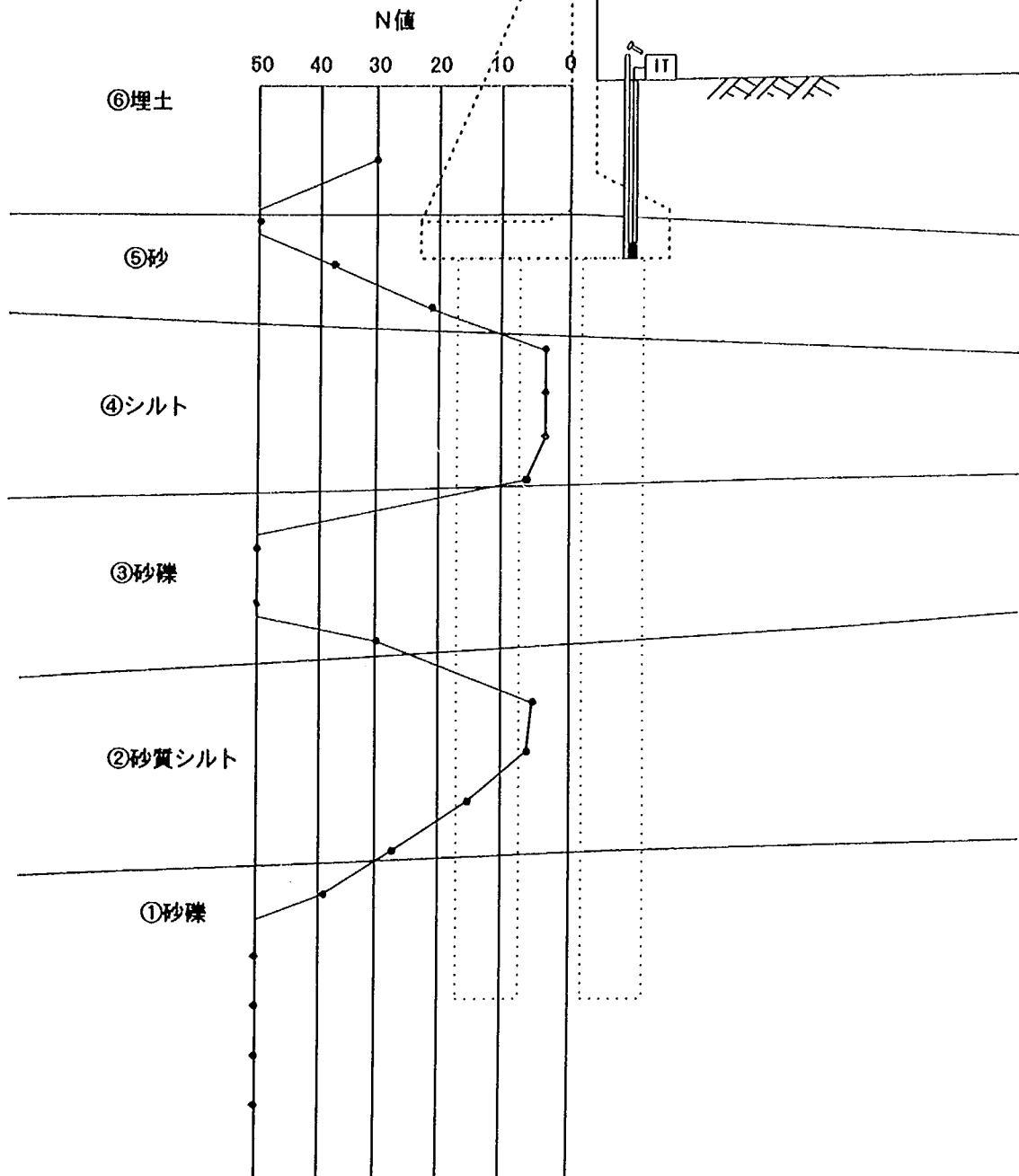


図-5.1.11(2)実橋梁調査計画 (A1 橋台杭長、インティグリティ試験)

4) 橋脚部の調査計画

P 2 橋脚部探査

探査項目および探査手法

i. 杭長探査 (図-5.1.12)

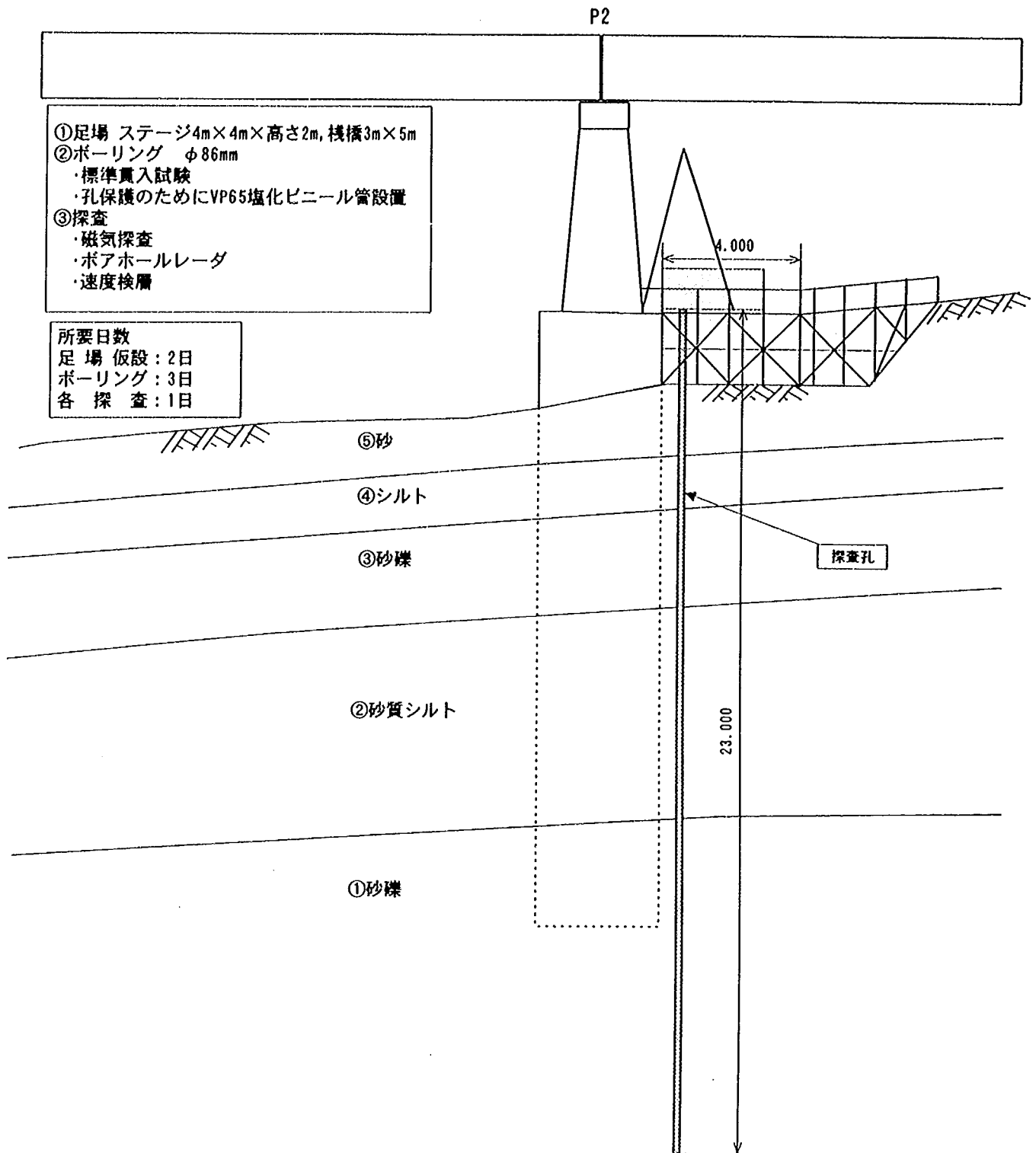
- ・ 傾斜観測孔を用いた探査 … 磁気探査

ボアホールレーダ (木杭にも対応)

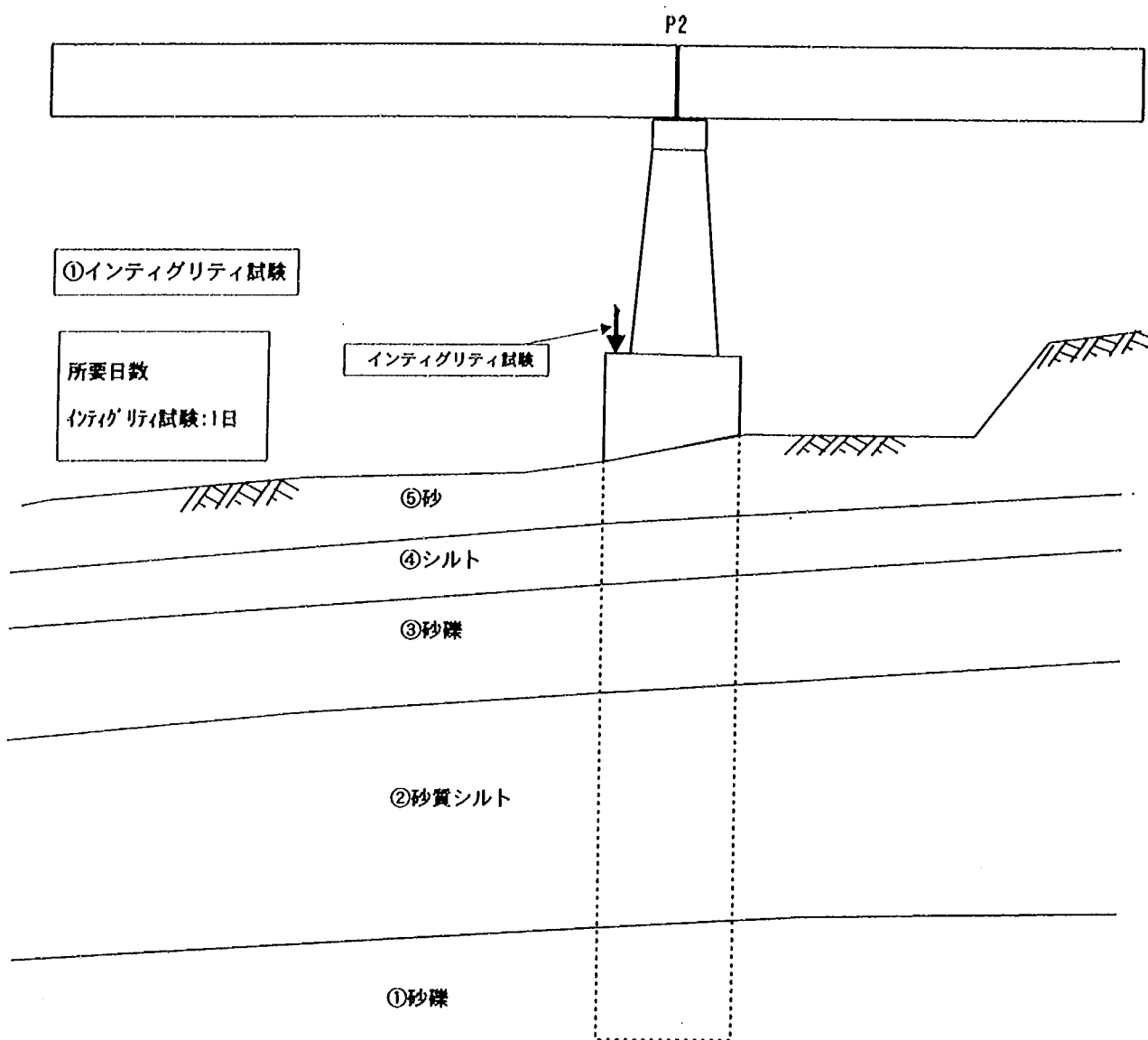
速度検層 (磁気探査で反応がない場合、木杭に対応)

ii. 基礎形式[基礎径] (図-5.1.13)

- ・ 地上部の露出部で確認 (地中部は斜めボーリングによる基礎貫通で確認)



図ー5.1.12(1) 実橋梁調査計画 (P2基礎根入れ調査, 磁気探査など)



図－5.1.12(2) 実橋梁調査計画（P2基礎根入れ調査, インテグリティ試験）

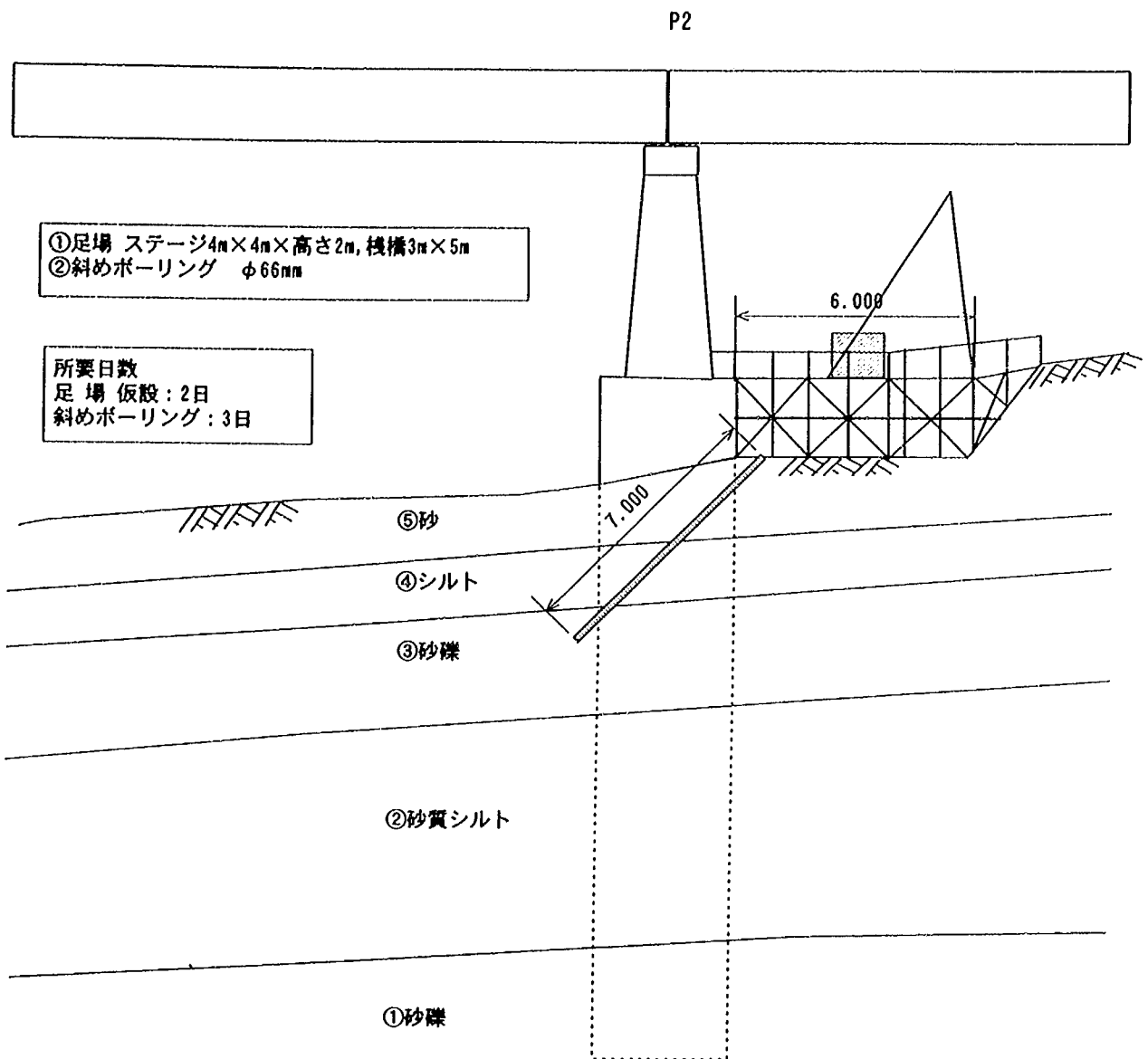


図-5.1.13 実橋梁調査計画 (P2基礎径調査)

5.2 損傷調査

5.2.1 調査目的

地震や洪水等の災害を受けた基礎の健全性の評価にあたっては、基礎の損傷状況の調査が必要である。また、今後、既設橋梁の架替えにあたって、上部構造のみを架替えし、基礎については既存のものをそのまま利用することも考えられる。このような場合にも、既設基礎の健全性の評価が必要となる。

損傷調査では、被災をうけた橋梁基礎等において安価で簡便な調査法を用いて損傷を受けているかどうかを判断し、損傷を受けていると思われる基礎に対して損傷位置、程度等を確認するための詳細な調査を行う。その結果から、補修・補強の必要性を判断することになる。

本共同研究では、損傷調査手法として選定した4つの手法について、調査の簡便性（時間、費用等）、調査可能項目（損傷位置、程度等）を確認し、図-5.2.1 に示す損傷調査フローを作成した。

5.2.2 各調査方法の適用性および調査要領

(1) 各調査方法の適用性

橋梁基礎構造が地震や側方移動あるいは滑り等の影響により、水平変位を生じたり、傾斜を伴う変形が確認された場合、基礎構造に損傷が発生している可能性がある。こうした基礎構造は地中にあるため、基礎を掘り出し、直接目で損傷状態を確認することは、深度的にも限界があり現実的に不可能と言える。そこで、間接的な方法で損傷の発生状況を把握する必要がある。

現在、間接的に基礎構造の損傷状況を把握する調査法としては、前述したようにインテグリティ試験(IT)、アコースティック・エミッション(AE)、ボアホールカメラおよび衝撃振動試験等がある。これらの調査法は兵庫県南部地震を契機として、多数の実績を有している。ただし、衝撃振動試験については、鉄道橋を対象に多くの事例があるが、道路橋への適用事例については検討中である。これらの各調査法の適用条件や調査項目についてまとめたものを表-5.2.2に示す。

表-5.2.2 損傷調査法の適用性・調査項目一覧

調査法		インテグリティ試験 (IT)	アコースティック・ エミッション (AE)	ボアホールカメラ調査	衝撃振動試験
適用条件					
対象構造		杭基礎・深礎 ケーソン基礎	杭基礎・深礎 ケーソン基礎	杭基礎・深礎 ケーソン基礎	基礎を含めた下部工
対象深度		60m程度まで	任意 (荷重伝達可能な深度)	任意	任意
非破壊検査が可能		○	○	×	○
ボーリングの有無		無*1	有	有	無
フーチングの影響		有	無	無	無
調査可能 項目	損傷位置	○	○	○	基礎全体の健全性
	損傷程度	△	△	○	
損傷が複数ある場合		△	○	○	○
簡便性	試験の実施	○	△	△	○
	結果の評価	○	△	○	△
特記事項		*1: フーチング部を削 孔し杭頭部で試験する 場合もある。	載荷が必要	—	固有値解析のデータが 必要

(表中 ○: 適用可能 △: 検討が必要 ×: 適用不可)

表-5.2.2 に示したような各調査方法の適用性を考慮して、実際に上部構造あるいは周辺地盤に変状が生じた場合の損傷調査要領を次に示す。

(2) 損傷調査要領

① 損傷調査フロー

橋梁基礎を対象とした損傷調査のフローチャートを図-5.2.1に示す。

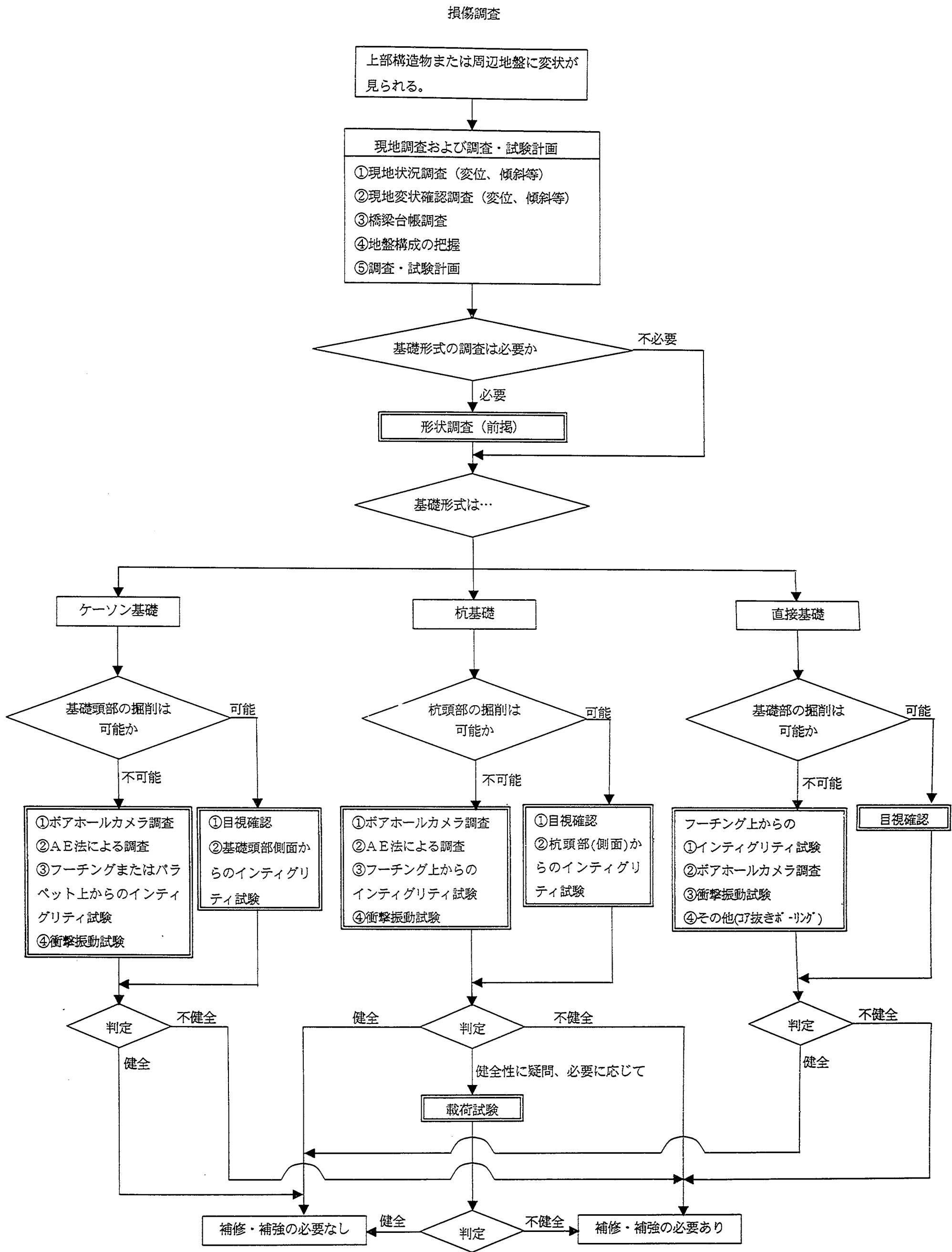


図-5.2.1 損傷調査フローチャート

基礎形式の中で最も代表的な杭基礎を対象として、これらの調査法の簡便性、コスト、精度等を勘案して、損傷調査の手順のフローを示したものが図-5.2.2である。

まず、調査は上部構造物または周辺地盤に変状が見られる橋梁を対象に現地調査を実施し、変位や傾斜など変状の実態を把握する。同時に橋梁台帳や設計図書等の資料により、基礎形式などの構造諸元や地盤条件を調査する。基礎形式が不明な場合は、5.2.1で述べた形状調査により確認する。

現地における損傷調査は、フーチング上面まで掘り出し、橋脚柱部を除く杭全数を対象にインテグリティ試験を実施し、健全性に疑いのあるものだけを選定することから始められる。その後、ボアホールカメラ調査やアコースティック・エミッションによる調査などにより、被災度の大きいと思われる杭を絞り込んでいき、最終的には再利用が可能か否かを確認するために、必要に応じて載荷試験等が実施されることになる。さらに、載荷試験の結果を踏まえて、補修や補強の要否を判定し、判定結果に基づき補修や補強対策工の措置が採られることになる。

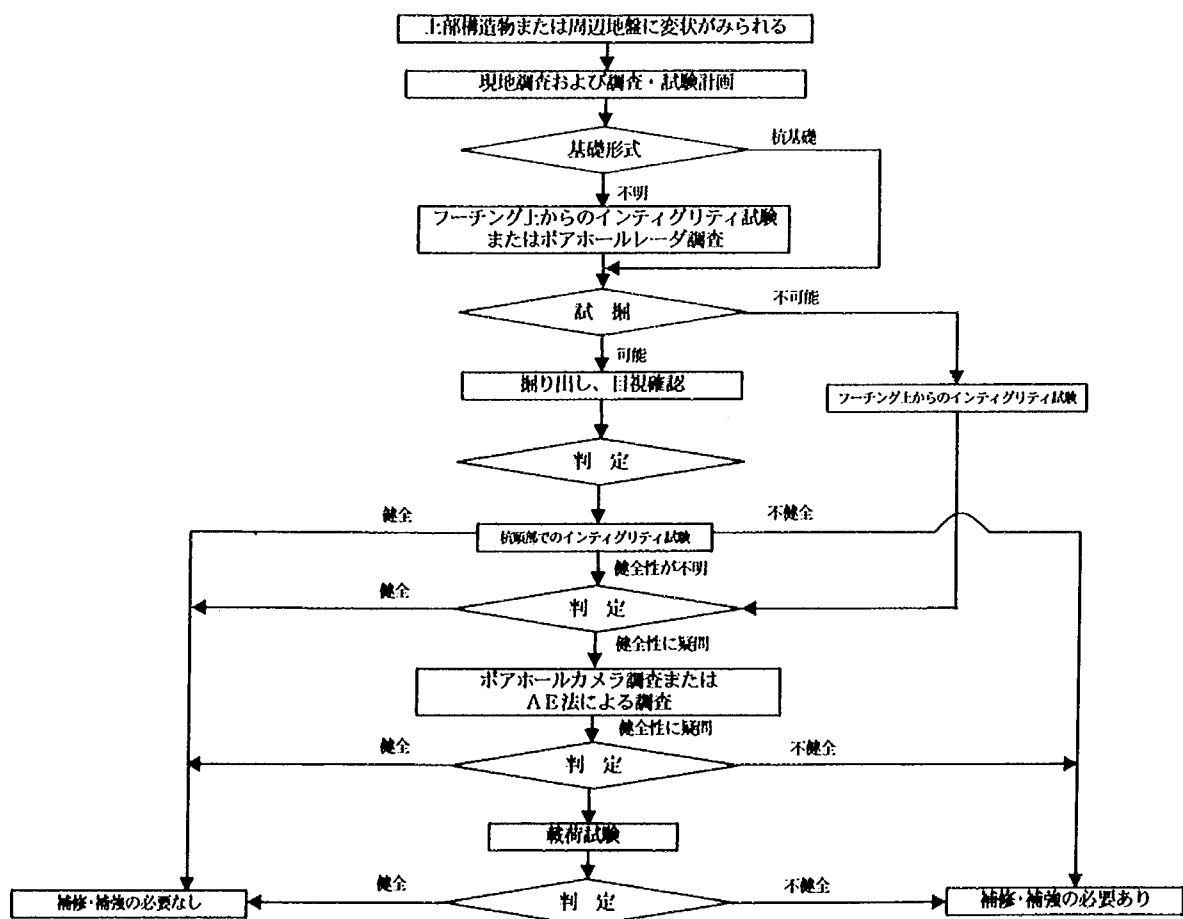


図-5.2.2 杭基礎の損傷調査手順の一例

② 現地調査および調査・試験計画

現地調査には、基礎構造の諸元を把握するための資料調査と、上部工や周辺地盤の変状を確認し、立地条件や現場条件からどういう調査が適用可能かを判断する現地状況調査が必要となる。また、その結果を基に効率的な調査・試験計画を立案する。

＜現地状況調査＞

現地状況調査は、現地で各種試験を行う場合の仮設条件を主体に行う調査で、以下の調査が必要である。

- ・ 桁下空間
- ・ 河川水量、水深
- ・ 搬入路
- ・ 掘削を伴う場合の残土の仮置き場
- ・ 土地利用
- ・ 通行量
- ・ 電力設備、給水設備、排水設備
- ・ その他

＜現地変状確認調査＞

この調査は、予め基礎の損傷状態を推定し、適切な試験・調査を行うために上部工や地盤の変状、および橋脚等の傾斜等を把握するために行う。以下の調査が必要である。

- ・ 上部工の変状（支間長、桁の変形、遊間）
- ・ 支承形式（固定・可動・弾性）
- ・ 下部工の変位、傾斜
- ・ 周辺地盤の変状と移動方向
- ・ 液状化の発生や側方流動の有無（特に護岸際）
- ・ 落橋の危険はないか。
- ・ その他

＜橋梁台帳調査＞

橋梁台帳調査は、基礎形式を主体に橋梁の竣工諸元に関して資料による調査を行うが、記載事項が設計段階のものが載っていることもあり、現地調査と併せて確認する必要がある。

＜地盤構成の把握＞

地盤構成は、各種試験結果の判定を行う場合に必要となる重要なポイントとなるので、土質調査結果、特に柱状図は最低必要である。

＜調査・試験計画＞

以上の調査結果に基づき、目的に応じた精度、コスト、調査所要日数等を考慮して、調査・試験計画を立てる。

③ 損傷位置調査

損傷位置を確認する場合、試掘が可能なら直接目視で行えるが、この方法では調査深度が限定され、しかも地下水位が高い場合やフーチングが厚い場合には適さない。そこで、間接的な手法で確認することになり、各調査手法とその適用性については表-5.2.3の通りである。

表-5.2.3 損傷位置調査手法と適用性

調査手法	適用基礎形式	適用性
試掘（直接目視調査）	全て	調査深度が浅い。地下水が高いと排水処理が必要。
インテグリティ試験	全て	鋼管杭の変形確認には不適。密集したクラックは判定が困難。
アコースティック・エミッション(AE)	全て	載荷が必要。
ボアホールカメラ調査	全て	観測孔が必要。
衝撃振動試験	全て	損傷の有無を確認。位置は特定不可。
コア抜きボーリング	コンクリート杭基礎・ケーソン基礎	逸水状態で推定。木杭は不可。

④ 損傷度調査

損傷度調査は、クラック幅等の損傷程度を確認するものである。損傷位置調査と同様に、直接目視による調査が最も確かであるが、杭頭付近しか確認することができない。そこで、間接的目視調査ともいうべきボアホールカメラ調査が、直接目視調査に次いで精度良く損傷程度を数値として評価できる手法といえる。インテグリティ試験などは、損傷の大きさを定性的には把握することはできるが、定量的に評価することは現状では困難である。各調査手法とその適用性については表-5.2.4の通りである。

表-5.2.4 損傷程度調査手法と適用性

調査手法	適用基礎形式	適用性
試掘（直接目視調査）	全て	調査深度が浅い。地下水が高いと排水処理が必要。
インテグリティ試験	全て	クラックの面積的な評価はできるが、クラックの幅は不可。
アコースティック・エミッション(AE)	全て	載荷が必要。定性的な評価となる。
ボアホールカメラ調査	全て	観測孔が必要。
衝撃振動試験	全て	損傷の有無を確認。損傷程度は特定不可。
コア抜きボーリング	コンクリート杭基礎・ケーソン基礎	逸水状態である程度推定可。木杭は不可。

5.2.3 調査計画事例

損傷調査の場合、調査項目として損傷位置と損傷程度(大きさ)が挙げられるが、特に調査項目で区別して調査するのではなく、調査方法としては同様となる。また、表-5.2.2 に示したように、各調査法により適用範囲の相違があるだけである。ここでは調査計画事例として、下記の種類の基礎を対象に調査、試験計画について示すものとする。

- ・ 直接基礎 (橋脚部)
- ・ 直接基礎 (橋台部)
- ・ ケーソン基礎
- ・ 場所打ちコンクリート杭基礎 (深礎杭)
- ・ 既製杭 (RC杭、PC杭、PHC杭、鋼管杭)

(1) 基礎種別による調査計画

① 直接基礎 (橋脚部)

直接基礎の橋脚部の調査計画を図-5.2.3 に示す。

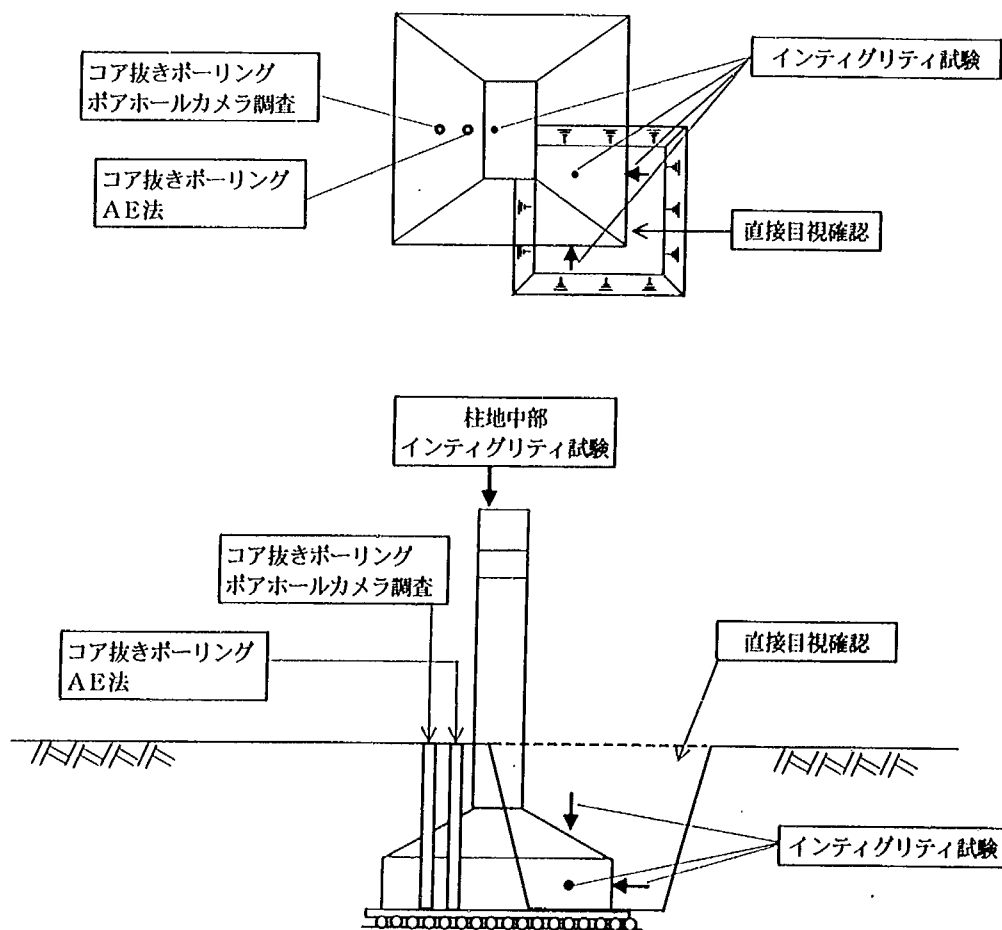


図-5.2.3 直接基礎の調査計画 (橋脚部)

②直接基礎（橋台部）

直接基礎の橋台部の調査計画を図-5.2.4 に示す。

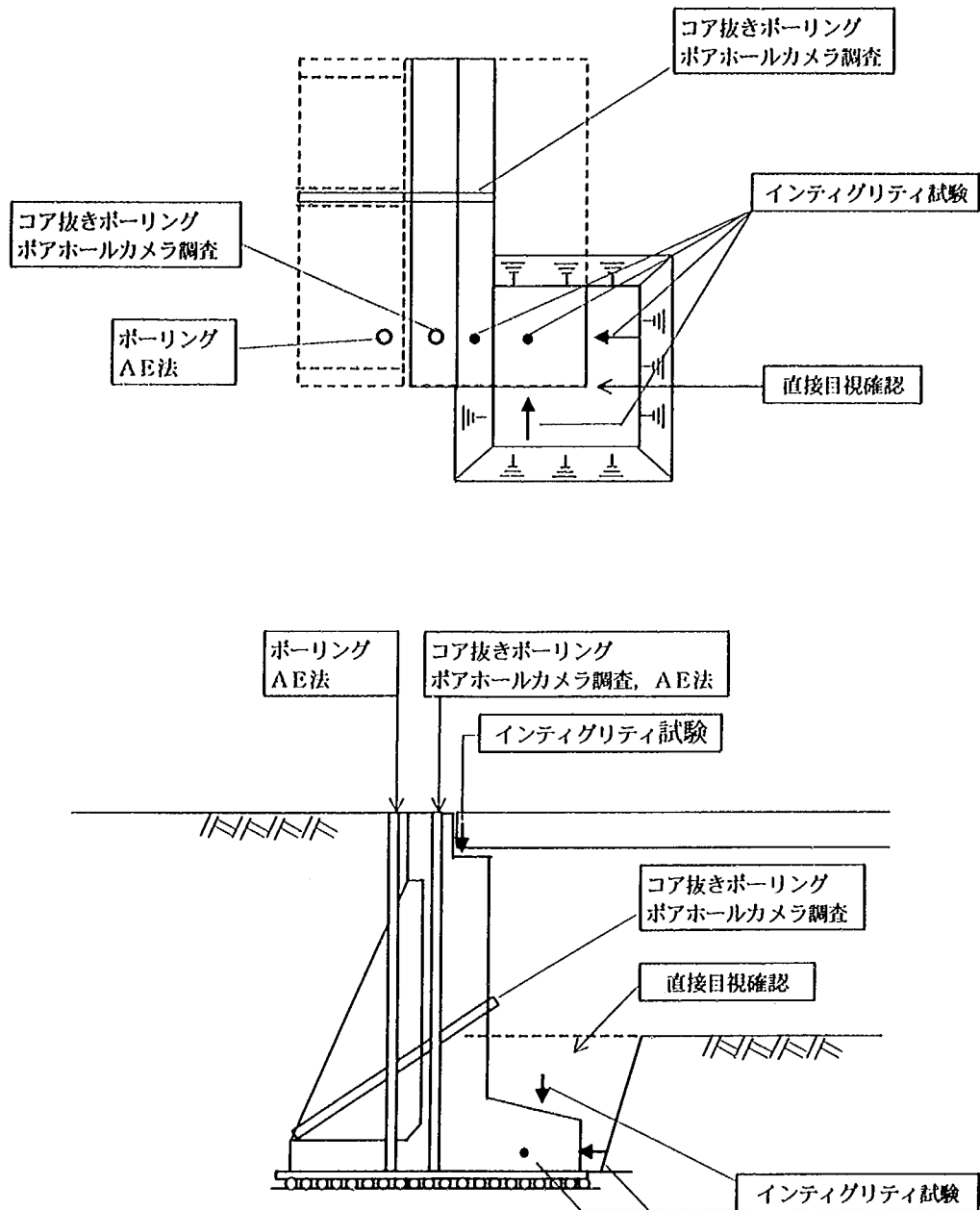


図-5.2.4 直接基礎の調査計画（橋台部）

③ケーソン基礎

ケーソン基礎の調査計画を図-5.2.5 に示す。

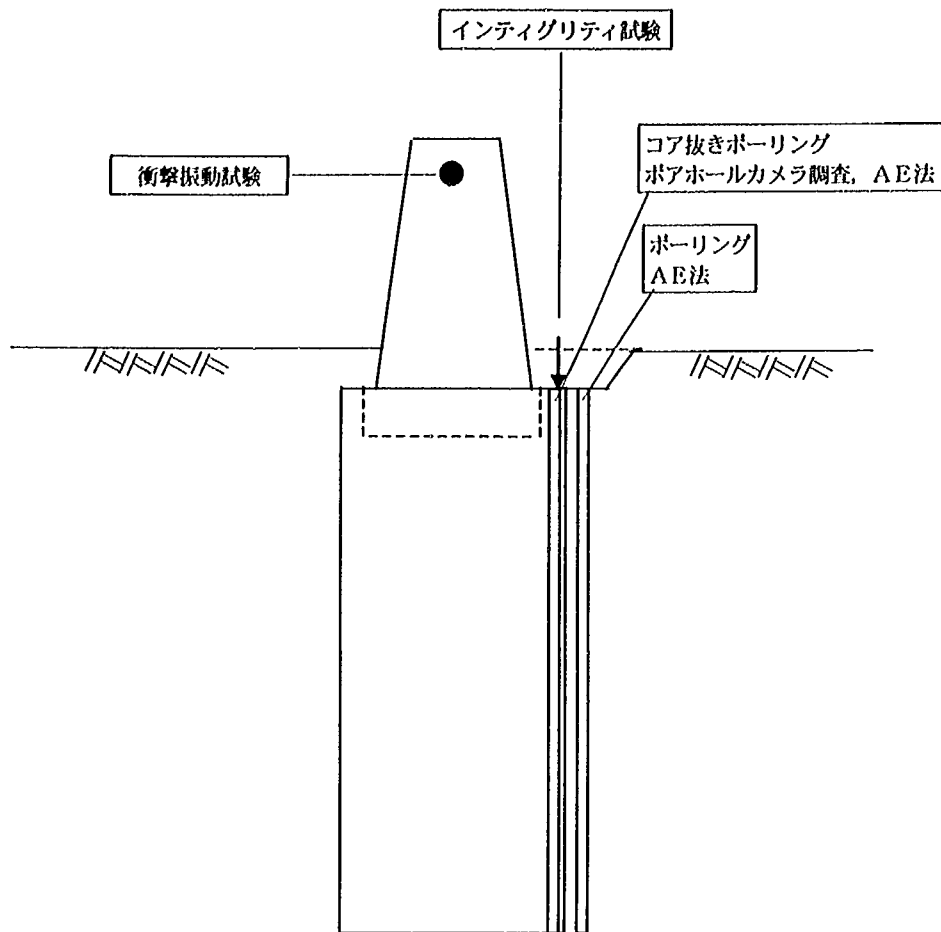


図-5.2.5 ケーソン基礎の調査計画

④場所打ちコンクリート杭

場所打ちコンクリート杭の調査計画を図-5.2.6に示す。

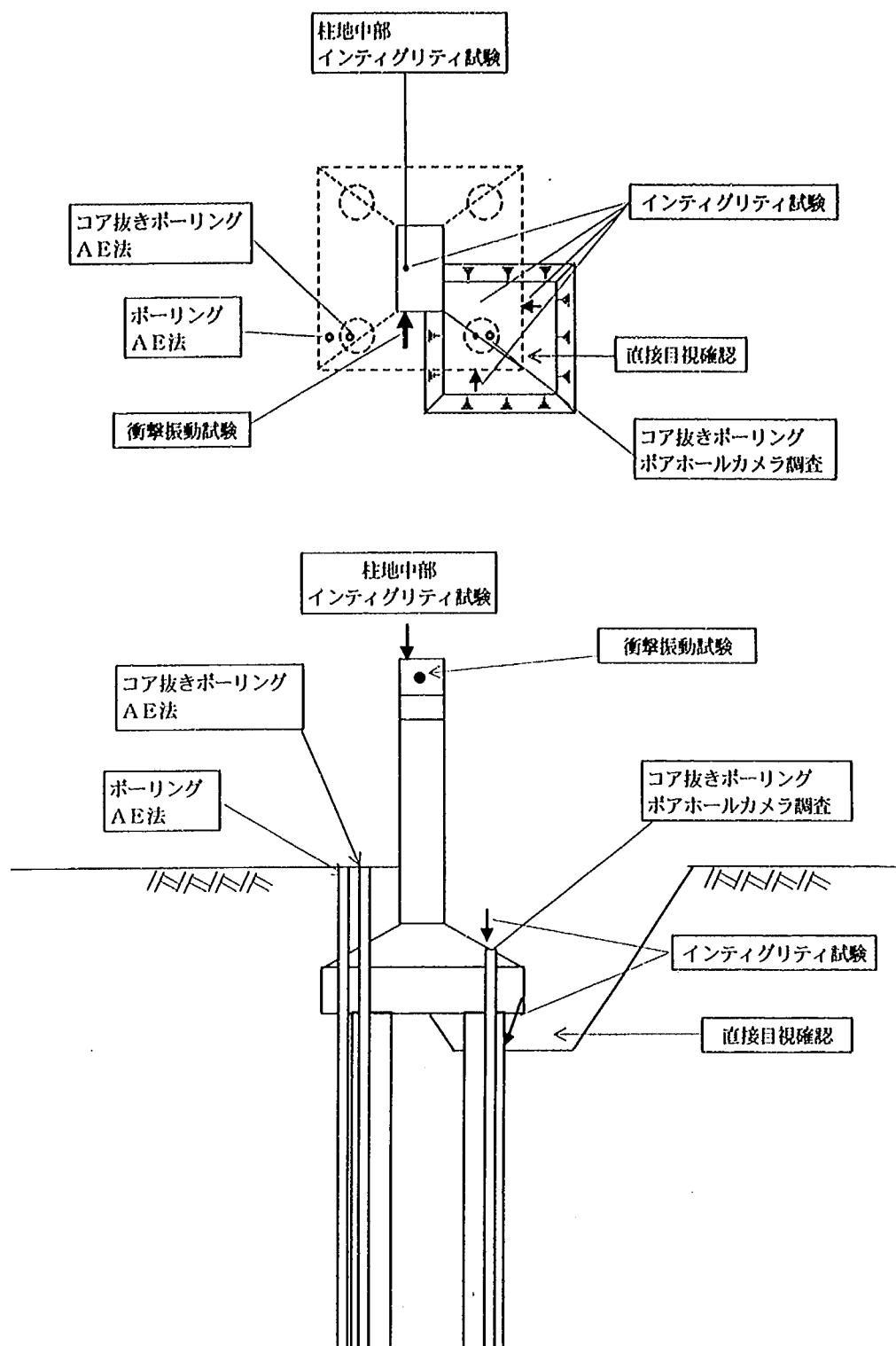


図-5.2.6 場所打ちコンクリート杭の調査計画

⑤既製杭基礎（RC杭、PC杭、PHC杭、鋼管杭）

既製杭（RC杭、PC杭、PHC杭、鋼管杭）の調査計画を図-5.2.7に示す。

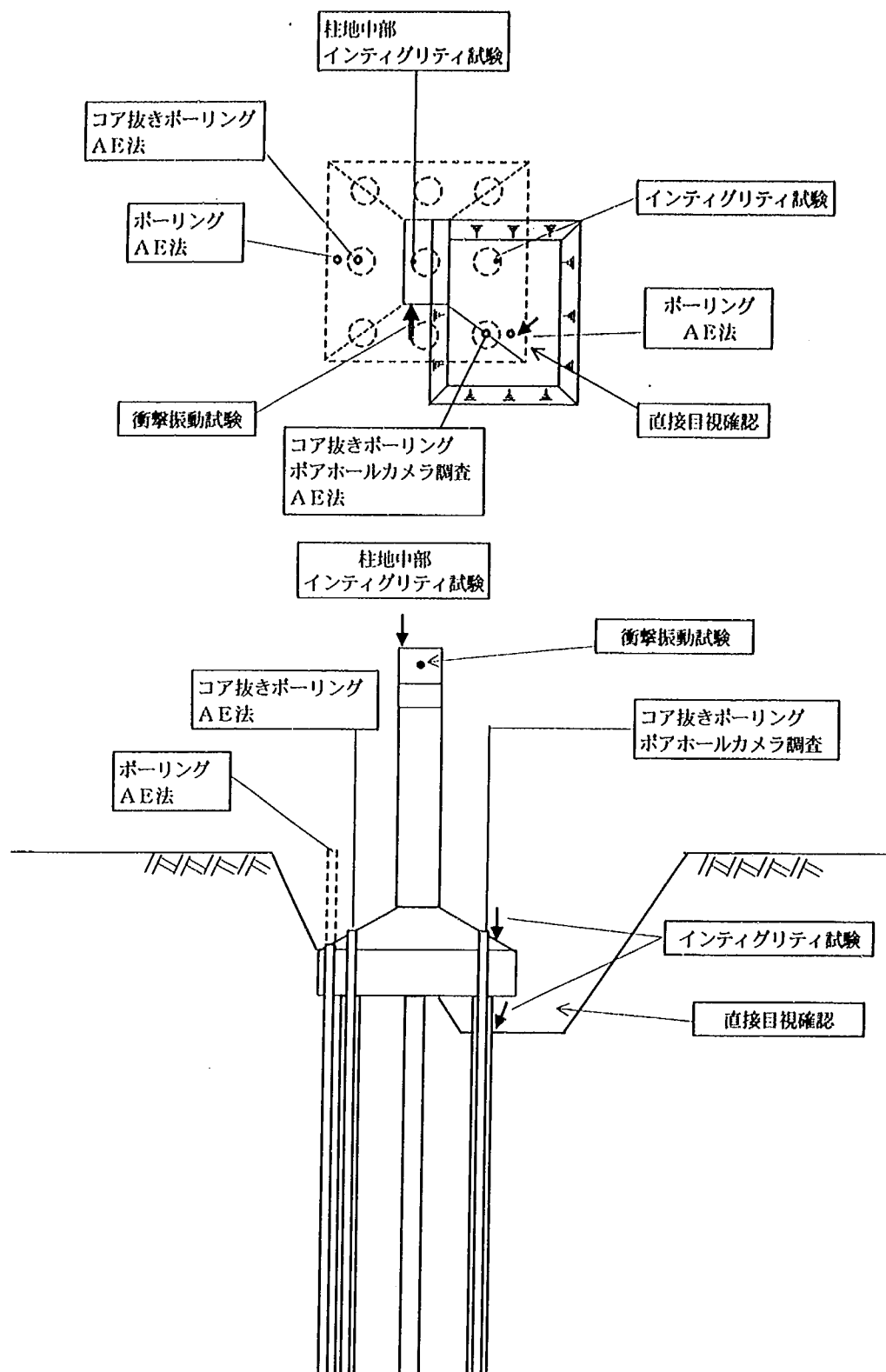


図-5.2.7 既製杭基礎の調査計画

(2) 実橋の調査計画事例

実橋での調査計画事例を以下に示す。

調査対象橋脚は、地震の影響を受けた埋立て地の最も護岸際に位置するRC橋脚である。構造諸元や基礎杭の諸元、ならびに地盤状況も資料により確認することができる。この橋脚を対象に、基礎杭が地震の影響をどのように受けたのか、具体的には損傷発生の有無や発生位置、および損傷の大きさを把握することを目的として調査計画を立てる。計画断面を図-5.2.8に示す。

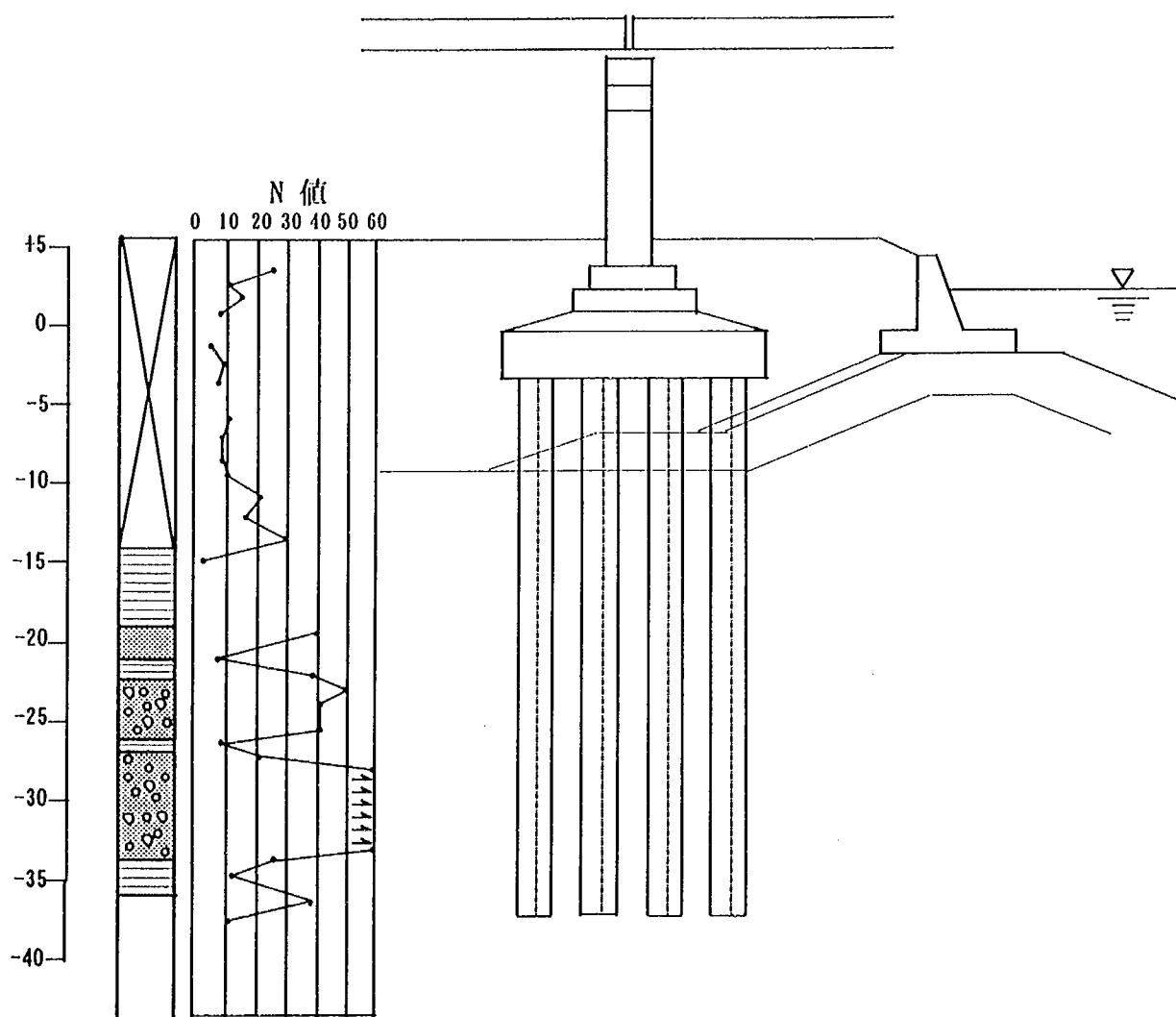


図-5.2.8 調査計画対象橋脚検討断面

①計画事前調査

現地変状確認調査

- a. 橋脚間の支間長、主桁遊間、支承条件および支承損傷状況
- b. 橋脚の残留変位、傾斜、損傷状況
- c. 護岸の変位（水平、鉛直）
- d. 周辺地盤の液状化、側方流動の発生状況の確認
- e. 調査時の安全性
- f. その他

現地状況調査

- a. 現地へのアクセス
- b. 機材等の搬入出路の確認
- c. 路下の土地利用状況
- d. 試掘～掘削残土の仮置き場の確保
- e. 電力設備、給水設備、配水設備の確認
- f. 協議（路下占用許可）
- g. その他

机上調査

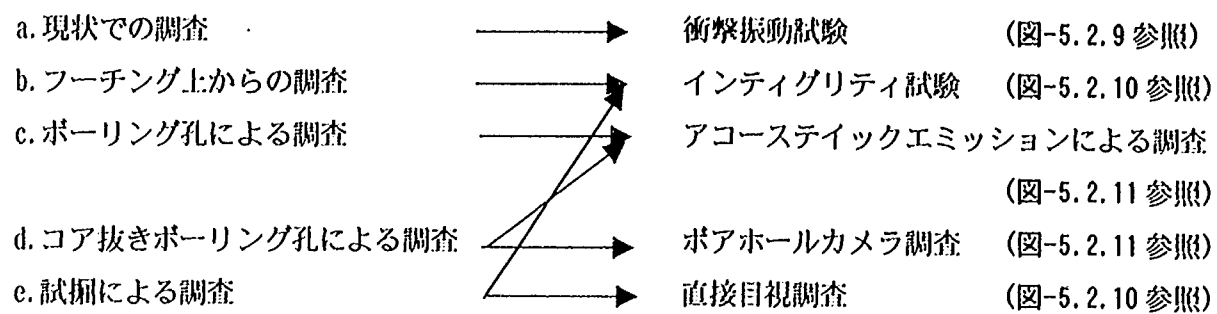
- a. 地盤情報（地盤構成）の収集
- b. 竣工図書等の収集
- c. 施工業者からのヒアリング
- d. その他

②概略損傷状態の推定

事前調査結果

- a. 構造諸元、地盤情報に基づく固有値解析
- b. 橋脚の水平変位量から基礎杭の損傷位置を想定

③調査計画



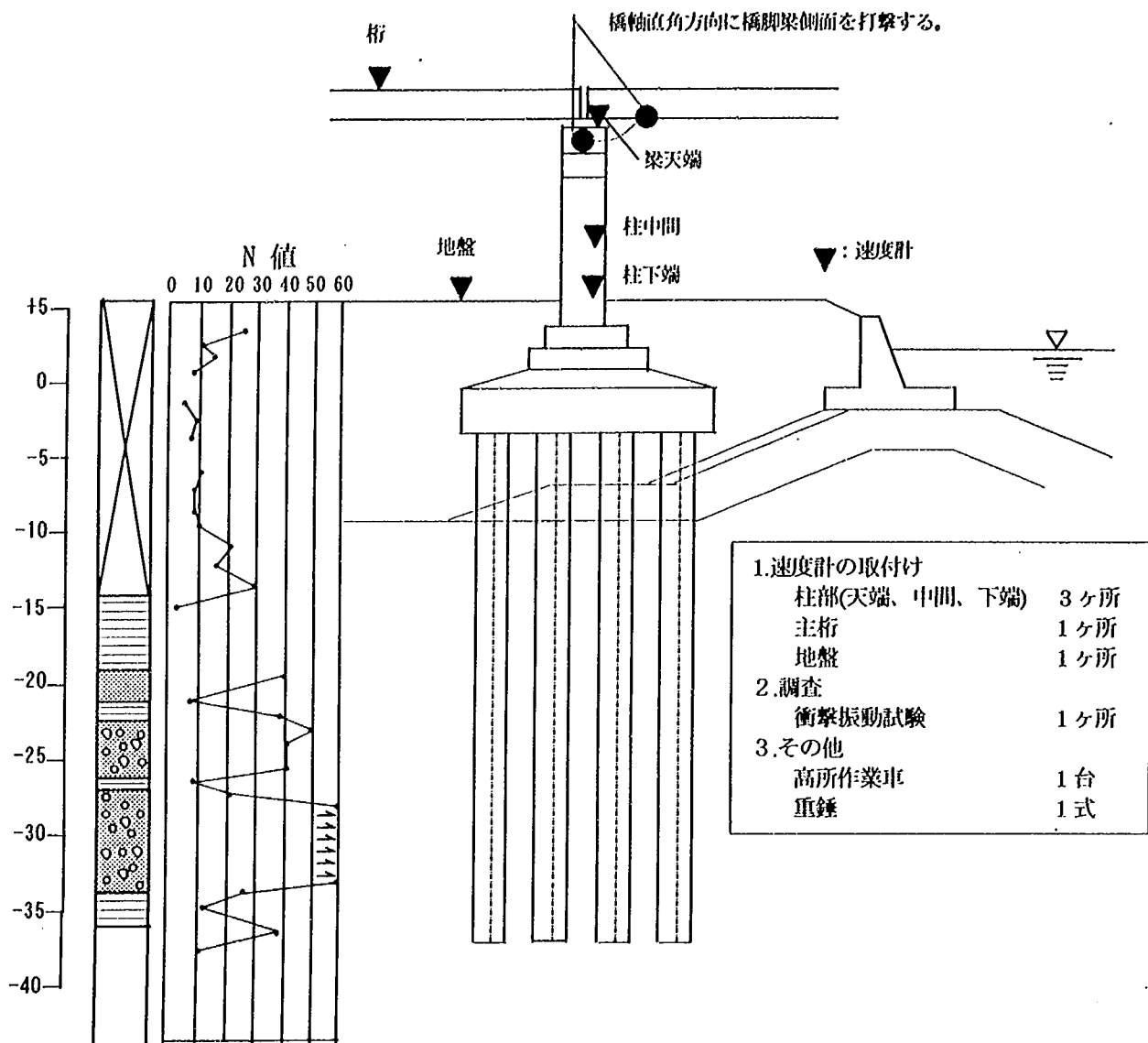


図-5.2.9 衝撃振動試験調査計画

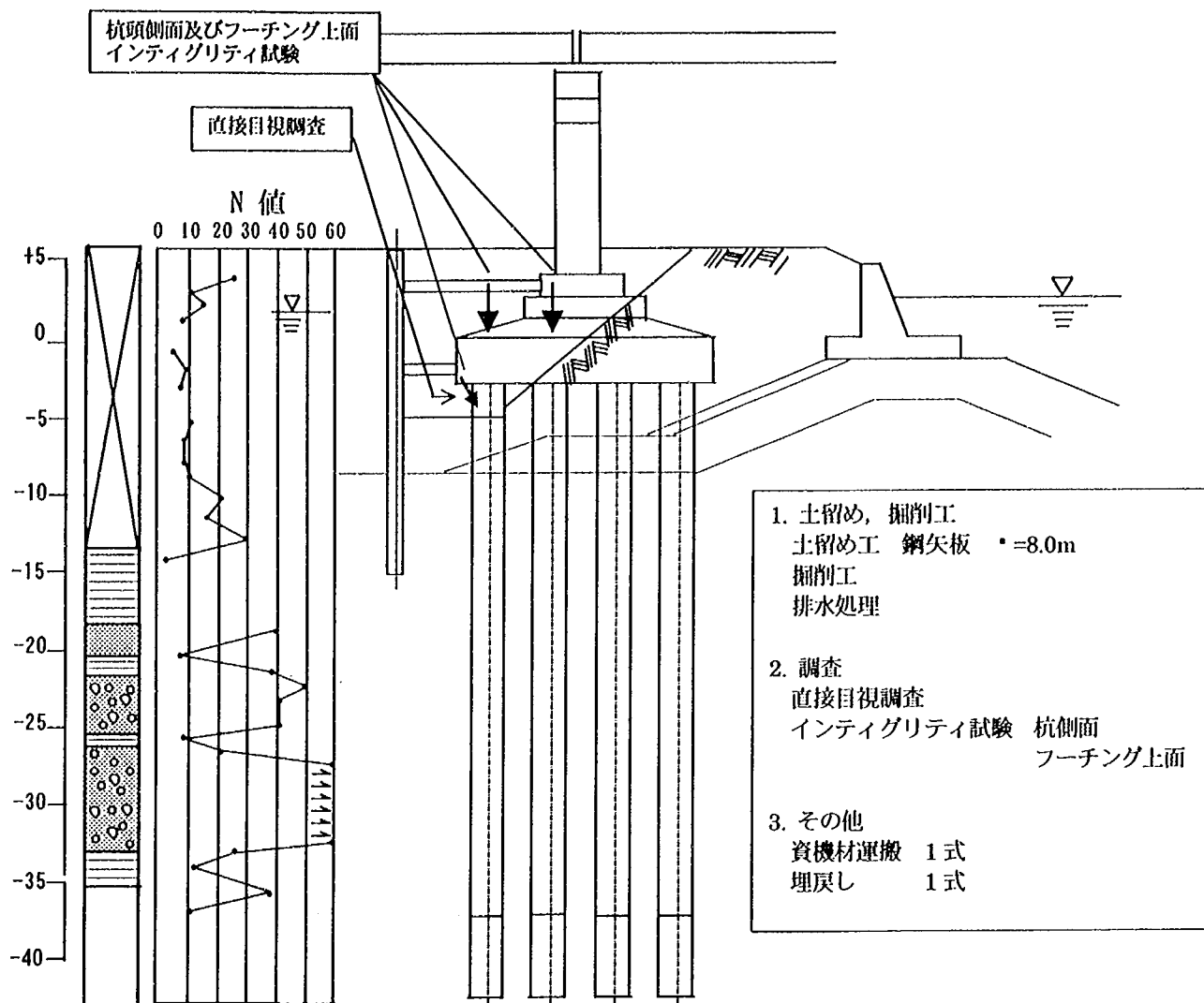


図-5.2.10 掘削による直接目視調査およびインティグリティ試験調査計画

6. まとめ

今回の共同研究では、橋梁基礎構造の形状調査・損傷調査手法の適用性の確認を実施した。

橋梁基礎の形状調査は、基本的に現地調査や既存の資料を調べてから不明な点について調査を実施する。まず、基礎形式を推定する必要があるが、上部構造や地盤状況から基礎形式を想定した後に、各調査手法を用いて確認する。この場合、現地状況や地盤状況および日数、費用などを考慮して各調査手法の選定や組合せを行い、最も適した調査手法を選択する必要がある。なお、観測孔を設置する調査では、同時に標準貫入試験を実施すれば地盤構成と特性値が確認できるため有効である。

橋梁基礎の損傷調査は、まず、上部構造物または周辺地盤に変状が見られる橋梁を対象に現地調査を実施し、変位や傾斜など変状の実態を把握する。同時に橋梁台帳や設計図書等の資料により、基礎形式などの構造諸元や地盤条件を調べる。基礎形式が不明な場合は形状調査を実施して確認する。現地における損傷調査は、フーチング上面まで掘り出し、橋脚柱部を除く杭全数を対象にインテグリティ試験を実施し、健全性に疑いのあるものを選定することから始められる。その後、ボアホールカメラやアコースティックエミッションによる調査などにより、被災度の大きいと思われる杭を絞り込んでいき、最終的には再利用が可能か否かを確認するために、必要に応じて載荷試験等が実施されることになる。さらに、載荷試験の結果を踏まえて、補修や補強の要否を判定し、判定結果に基づき補修や補強対策工の措置が採られることになる。上記は調査の一例であり、現地状況や地盤状況および日数、費用などを考慮して調査を実施することが必要である。

文 献 調 査 結 果 一 覧

対 外 発 表 論 文 一 覧

実 績 調 査 文 献 一 覧

文献調査結果一覧

No.	タ イ ト ル	著 者	出 典	ページ	発行年
01	阪神高速湾岸線における地震後の橋梁基礎移動量調査	大 剛文 南 庄 淳 川上 順子 大前 雄史 平山山紀子	第 31 回地盤工 学研究発表会 発表講演集		1996.7
02	損傷杭の載荷試験	安田 扶律 幸左 賢二	土木学会第 51 回年次学術講 演会講演概要 集		1996.9
03	埋立地盤の液状化による杭の変形調査	社本 康広 佐藤 正義 二木 幹夫 嶋津 伸一	土と基礎		1996.3
04	液状化に伴う側方流動を受けた建物基礎杭の残留変形モード	時松 孝次 大岡 弘 社本 康広	第 31 回地盤工 学研究発表会 発表講演集		1996.7
05	兵庫県南部地震で被災した基礎杭の変形調査 (その 1 : 杭の傾斜測定装置)	桂 豊 社本 康広 谷口 勝利	日本建築学会 大会学術講演 梗概集		1996.9
06	兵庫県南部地震で被災した基礎杭の変形調査 (その 2 : 臨海部の埋立地における液状化被害)	社本 康広 大岡 弘 時松 孝次	日本建築学会 大会学術講演 梗概集		1996.9
07	兵庫県南部地震で被災した基礎杭の変形調査 (その 3 : 杭の曲げモーメント・作用荷重の推定)	堀田 洋之 社本 康広 桂 豊 嶋津 伸一	日本建築学会 大会学術講演 梗概集		1996.9
08	被災した建物基礎杭の非破壊試験と載荷試験	三反田勇 菊池 祐悦 山崎 勉 秋山 竜二	基礎工		1996.5
09	既存杭の健全性を杭体の掘出しにより調査	山下 清 加倉井正昭 吉田 啓喜 鈴木 康之 阿部 秋男	建築技術		1995.9
10	場所打ちコンクリート杭に対する非破壊試験の適用	阿部 秋男 加倉井正昭 A.F.Weele	第 28 回土質工 学研究発表会 発表梗概集		1993.6
11	Retrofit of a large diameter cast-in-place concrete foundation	山下 清 加倉井正昭	竹中技術研究 報告		1996
12	非破壊検査手法を用いた杭基礎の損傷度調査	南 庄 淳 森田悠紀雄 本 正信	土木学会第 23 回地震工学研 究発表会		1995.7
13	埋立地盤における基礎杭の健全性調査手法について	南 庄 淳 本 正信 今田 和夫 仲田 慶正	第 31 回地盤工 学研究発表会 講演集		1996.7
14	孔中内視カメラと弾性波非破壊試験を併用した建物杭基礎の震害調査	大岡 弘 飯場 政紀	土と基礎		1996.3

		阿部 秋男 時松 孝次			
15	基礎の被害調査方法	阿部 秋男 田村 昌仁	建築技術		1995.9
16	杭の健全性の評価	阿部 秋男	基礎工		1996.11
17	非破壊試験法を適用した兵庫県南部地震によるコンクリート基礎杭の被害調査報告(その1)	風早 佳子 林 隆浩 小野 日出男 田中 伸治	第31回地盤工 学研究発表会 講演集		1996.7
18	非破壊試験法を適用した兵庫県南部地震によるコンクリート基礎杭の被害調査報告(その2)	田中 伸治 林 隆浩 小野 日出男 風早 佳子	第31回地盤工 学研究発表会 講演集		1996.7
19	非破壊試験法による杭基礎の被害調査事例	田中 伸治 内田 茂 小野 日出男 阿部 秋男 梶原 雅文	全地連「技術 フォーラム'96」仙台		1996
20	AE を利用したコンクリート杭の破損調査法	森 伸一郎 宇良 成康 塩谷 智基 藤井 清司	第30回土質工 学研究発表会 平成7年度講 演概要集		1995.7
21	コンクリート杭の AE 破損調査法における AE パラメータの検討	森 伸一郎 宇良 成康 塩谷 智基 藤井 清司	土木学会第50 回年次学術講 演会概要集		1995.9
22	地震で被災したコンクリート杭の AE 破損調査法	森 伸一郎 塩谷 智基 宇良 成康 藤井 清司	第23回土木学 会地震工学研 究発表会		1995.7
23	誘発させた AE を利用したコンクリート杭の破損調査法の実建物への適用	森 伸一郎 塩谷 智基 岩城 圭介 境野 典夫	第31回地盤工 学研究発表会 講演概要集		1996.7
24	AE を利用したコンクリート杭の破損調査法の中層建物基礎への適用と検証	森 伸一郎 塩谷 智基 岩城 圭介 境野 典夫	第31回地盤工 学研究発表会 講演概要集		1996.7
25	AE を利用したコンクリート杭破損調査法の軟弱地盤上の構造物基礎への適用	森 伸一郎 塩谷 智基	第31回地盤工 学研究発表会 概要集		1996.7
26	AE を利用したコンクリート杭破損調査法の新しい位置評定法の提案	森 伸一郎 山本 清広 塩谷 智基 藤井 清司	日本建築学会 大会学術講演 梗概集		1996.9
27	AE を利用したコンクリート杭破損調査法の中層建物基礎への適用と検証	森 伸一郎 岩城 圭介 塩谷 智基 境野 典夫 秋山 映雄	日本建築学会 大会学術講演 梗概集		1996.9

28	AE を利用したコンクリート杭破損調査法 の高層建物基礎への適用と検証	森 伸一郎 塩谷 智基 岩城 圭介 境野 典夫 田中 幹雄	日本建築学会 大会学術講演 梗概集		1996.9
29	AE を利用したコンクリート杭破損調査法 の短杭構造物への適用	森 伸一郎 境野 典夫 岩城 圭介 塩谷 智基 小堀 隆治	日本建築学会 大会学術講演 梗概集		1996.9
30	AE を利用したコンクリート杭破損調査法 におけるサスペンション型導波棒の適用	岩城 圭介 森 伸一郎 塩谷 智基 境野 典夫	土木学会第 51 回年次学術講 演会講演概要 集		1996.9
31	コンクリート杭破損部から放射された AE 波形の特徴	塩谷 智基 森 伸一郎 岩城 圭介 境野 典夫	土木学会第 51 回年次学術講 演会講演概要 集		1996.9
32	AE を利用したコンクリート杭の破損調査 法の二次元評定法の適用	山本 清広 森 伸一郎 塩谷 智基 藤井 清司	土木学会第 51 回年次学術講 演会講演概要 集		1996.9
33	被災した場所打ち杭の急速載荷試験による 健全度の判定 (阪神公団 3 号線芦屋入路)	西村 真二 溝淵 修治 児島 郁男	基礎工		1996.9
34	阪神高速道路 5 号湾岸線の橋脚基礎の復旧	石崎 浩 江川 典聡	基礎工		1996.9
35	阪神高速 3 号神戸線基礎構造物の健全度の 判定	林 秀侃 丸居 保 堀田 不二男	基礎工		1996.9
36	名神高速道路・中国自動車道の復旧設計と 橋脚基礎の健全度判定および補強	多久 和勇	基礎工		1996.9
37	震災復旧橋梁における基礎の復旧 —国道 2 号浜手バイパスと国道 43 号岩屋高 架橋—	石川 次郎	基礎工		1996.9
38	橋梁基礎調査のうち基礎杭根入れ深度調査 法の現状	戸井田 克 広野 進 三浦 康代	構造物の診断 と補修に關す る第 7 回技 術・研究発表 会論文集		1995.11
39	Comparison of Cross Hole and Single Hole Sonic Integrity Logging Methods	Tracy Brettmann Michael Frank			
40	Evaluation of Defect Detection During Pile Curing Using Sonic Integrity Logging Methods	Tracy Brettmann Michael Frank Bill Berry Jr.			
41	杭基礎の損傷度調査に対する Pile Integrity Tests の適用性	榎本 雅夫 田中 勉 森田 悠紀雄	第 21 回日本道 路会議論文集		
42	計測技術 96 被災構造物を素早く診断する技 術		日経コンスト ラクション		1996
43	フーチング上面からの基礎杭非破壊調査方 法について	仲田 慶正 南荘 淳 川上 順子	土木学会第 51 回年次学術講 演会		1996.9

		今田 和夫			
44	1995 年兵庫県南部地震によって損傷した杭の調査	堀越 研一 木村 亮 大津 宏康 岡 二三夫	土と基礎		1996.11
45	フーチングが杭の非破壊試験結果に及ぼす影響	宮田 善郁 榎本 雅夫 土谷 尚	第 32 回地盤工 学研究発表会 講演集		1997.5
46	超音波を用いた場所打ちコンクリート杭の品質管理手法	小野 日出男 阿部 秋男 林 隆浩 丸茂 文夫	第 32 回地盤工 学研究発表会 講演集		1997.5
47	ボアホールカメラによる場所打ち杭の損傷度調査	久保田 耕司 丸居 保 幸左 賢二 田島 克洋	土木学会第 52 回年次学術講 演会		1997.8
48	損傷を受けた基礎杭の確認手法とその評価について	南荘 淳 安田 扶律 今田 和夫 仲田 慶正	土木学会第 52 回年次学術講 演会		1997.8
49	杭の健全性試験に関する基礎的検討	喜多 直之 崎本 純治	土木学会第 52 回年次学術講 演会		1997.8
50	衝撃弾性波法による杭の損傷調査手法の実験	石田 雅博 福井 次郎 大越 盛幸 阿部 秋男	土木学会第 52 回年次学術講 演会		1997.8
51	非破壊試験による基礎杭損傷調査における解析手法の開発と適用性に関する研究	松井 保 南荘 淳 安田 扶律 仲田 慶正	土木学会論文 集 No.596/Ⅲ - 43		1998.6
52	A study on the applicability of integrity tests for damaged piles	Yasumitsu Ichimura Shinya Sakamoto Hideo Ono Shinichi Yamada	SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON PILING AND DEEP FOUNDATIONS		1998.6
53	品質検査のためのインティグリティ試験	田中 伸治 二木 幹夫 長尾 俊昌 阿部 秋男	第 33 回地盤工 学研究発表会 講演集		1998.7
54	杭の損傷調査に対するインティグリティ試験の適用性 その1 ＜測定装置の違いによる波形比較＞	坂本 真也 塚田 幸広 市村 靖光 田口 雅章	第 33 回地盤工 学研究発表会 講演集		1998.7
55	杭の損傷調査に対するインティグリティ試験の適用性 その2 ＜フーチングのない杭の測定波形＞	山田 眞一 市村 靖光 仲田 慶正	第 33 回地盤工 学研究発表会 講演集		1998.7
56	杭の損傷調査に対するインティグリティ試験の適用性 その3 ＜フーチングのある杭の測定波形＞	松本 江基 市村 靖光 三反畑 勇 小野 日出男	第 33 回地盤工 学研究発表会 講演集		1998.7
57	杭の健全性調査におけるひび割れ位置推定	真野 英之	第 33 回地盤工		1998.7

	法に関する一提案	西尾 伸也 大槻 明 桐田 賢	学研究発表会 講演集		
58	超音波を用いた場所打ちコンクリート杭の品質評価に関する模型実験	小野 日出男 田村 昌仁 藤井 衛 高田 渉太郎	第 33 回地盤工 学研究発表会 講演集		1998.7
59	超音波を用いた場所打ちコンクリート杭の品質評価に関する模型実験	小野 日出男 田村 昌仁 藤井 衛 高田 渉太郎	日本建築学会 大会学術講演 梗概集 (九州)		1998.9
60	インテグリティ試験による場所打ち杭の品質管理法	塚田 幸広 市村 靖光	土木学会論文 集 No.603/Ⅲ- 44		1998.9
61	非破壊探査システムによる構造物基礎杭(木杭)の杭長探査について	今枝 良仁 手塚 健一 塩月 隆久	土木学会第 53 回年次学術講 演会		1998.10
62	八丁新橋建設に伴う場所打ちコンクリート杭のインテグリティ試験	道 勇治 松本 樹典 浅井 陽一 松田 洋一郎	土木学会第 53 回年次学術講 演会		1998.10
63	鋼管巻き場所打ちコンクリート杭に対するインテグリティ試験適用例	金井 文男 林 正宏 小菅 秀一 松本 樹典	土木学会第 53 回年次学術講 演会		1998.10
64	杭の損傷調査に対するインテグリティ試験の適用性 その4 ＜ハンマの違いによる波形比較＞	本間 利明 市村 靖光 山田 眞一 田口 雅章	土木学会第 53 回年次学術講 演会		1998.10
65	杭の損傷調査に対するインテグリティ試験の適用性 その5 ＜測定位置の違いによる測定波形の差異＞	小野 日出男 市村 靖光 三反畑 勇	土木学会第 53 回年次学術講 演会		1998.10
66	杭の健全性試験結果に与える打撃・計測位置の影響評価	崎本 純治 喜多 直之 市村 靖光 小嶋 平三	第 34 回地盤工 学研究発表会		1999.7
67	兵庫県南部地震で被災した杭基礎の調査結果とその検討 (その1)	飯場 正紀 難波 伸介 中澤 明夫 田中 伸治	第 32 回地盤工 学研究発表会		1997.5
68	兵庫県南部地震で被災した杭基礎の調査結果とその検討 (その2)	難波 伸介 飯場 正紀 中澤 明夫 田中 伸治	第 32 回地盤工 学研究発表会		1997.5

No.	タ イ ト ル	著 者	出 典	ページ	発行年月日
1	橋梁基礎構造の調査に関する研究（その1） ＜形状・損傷調査の実証実験＞	秋田 直樹 石田 雅博 市村 靖光 福井 次郎 藤井 康男	土木学会第 54 回年次学術講 演会		1999.9
2	橋梁基礎構造の調査に関する研究（その2） ＜インテグリティ試験による損傷杭の測定＞	市村 靖光 田口 雅章 坂本 真也 今田 和夫 三反畑 勇	土木学会第 54 回年次学術講 演会		1999.9
3	橋梁基礎構造の調査に関する研究（その3） ＜ボアホールレーダを用いた橋梁基礎構造の調査方法の開発＞	太田 資郎 野口 恒久 酒井 幸雄 石田 雅博 秋田 直樹	土木学会第 54 回年次学術講 演会		1999.9
4	ボアホールレーダを用いた橋梁基礎構造の 調査手法の開発	藤原 鉄朗 石田 雅博 秋田 直樹 野口 恒久 酒井 幸雄	第 34 回地盤工 学研究発表会		1999.7
5	弾性波速度検層の杭の損傷調査への適用性	藤原 鉄朗 市村 靖光 松山 公年 金本 康宏	土木学会第 54 回年次学術講 演会講演概要 集		1999.9
6	損傷した既製 RC 杭より放射する AE 特性	塩谷 智基 境野 典夫 石橋 晃陸 藤原 鉄朗 市村 靖光	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	113～ 120	1998.7
7	Structural Integrity of Damaged Concrete- Piles by Machinery Induced Acoustic Emission	T.Shiotani S.Miwa Y.Ichimura T.Oshita	Proceedings of Structual Faults and Repair99		
8	油圧ショベルにより誘発した AE によるコ ンクリート杭の損傷調査	塩谷 智基 三輪 滋 市村 靖光	第 34 回地盤工 学研究発表会		
9	橋梁基礎構造の調査に関する研究（その6） ＜フーチングに接合された場所打ちコンク リート杭の AE 損傷調査＞	塩谷 智基 三輪 滋 市村 靖光	土木学会第 54 回年次学術講 演会		

10	フーチングを有するコンクリート杭の AE/ 衝撃弾性波による損傷調査	塩谷 智基 三輪 滋 市村 靖光	土木学会耐震 補強・補修技 術及び耐震診 断技術に関す るシンポジウ ム講演論文集		
11	フーチングに接合された場所打ちコンクリ ート杭の AE 法による損傷調査	塩谷 智基 三輪 滋 市村 靖光 長谷川 昌弘	土木学会第 25 回地震工学研究 発表会		
12	橋梁基礎構造の損傷調査 (AE による損傷調 査)	塩谷 智基 三輪 滋 市村 靖光	土木学会第 2 回構造物の診 断に関するシ ンポジウム		

実績調査文献一覧表

No.	タイトル	著者	出典	発行年月日
01	阪神高速湾岸線における地震後の橋梁基礎移動量調査	大 剛文 南 莊 淳 川上 順子 大前 雄史 平山 山紀子	第 31 回地盤工学研究発表会発表講演集	1996. 7
02	損傷杭の載荷試験	安田 扶律 幸左 賢二	土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集	1996. 9
03	埋立地盤の液状化による杭の変形調査	社本 康広 佐藤 正義 二木 幹夫 嶋津 伸一	土と基礎	1996. 3
04	液状化に伴う側方流動を受けた建物基礎杭の残留変形モード	時松 孝次 大岡 弘 社本 康広	第 31 回地盤工学研究発表会発表講演集	1996. 7
05	兵庫県南部地震で被災した基礎杭の変形調査（その 1：杭の傾斜測定装置）	桂 豊 社本 康広 谷口 勝利	日本建築学会大会学術講演梗概集	1996. 9
06	兵庫県南部地震で被災した基礎杭の変形調査（その 2：臨海部の埋立地における液状化被害）	社本 康広 大岡 弘 時松 孝次	日本建築学会大会学術講演梗概集	1996. 9
07	兵庫県南部地震で被災した基礎杭の変形調査（その 3：杭の曲げモーメント・作用荷重の推定）	堀田 洋之 社本 康広 桂 豊 嶋津 伸一	日本建築学会大会学術講演梗概集	1996. 9
08	被災した建物基礎杭の非破壊試験と載荷試験	三反田 勇 菊池 祐悦 山崎 勉 秋山 箴二	基礎工	1996. 5
09	既存杭の健全性を杭体の掘出しにより調査	山下 清 加倉井 正昭 吉田 啓喜 鈴木 康之 阿部 秋男	建築技術	1995. 9
10	場所打ちコンクリート杭に対する非破壊試験の適用	阿部 秋男 加倉井 正昭 A. F. Weele	第 28 回土質工学研究発表会発表梗概集	1993. 6
11	Retrofit of a large diameter cast-in-place concrete foundation	山下 清 加倉井 正昭	竹中技術研究報告	1996
12	非破壊検査手法を用いた杭基礎の損傷度調査	南 莊 淳 森田 悠紀雄 本 正信	土木学会第 23 回地震工学研究発表会	1995. 7
13	埋立地盤における基礎杭の健全性調査手法について	南 莊 淳 本 正信 今田 和夫 仲田 慶正	第 31 回地盤工学研究発表会発表講演集	1996. 7
14	孔中内視カメラと弾性波非破壊試験を併用した建物杭基礎の震害調査	大岡 弘 飯場 政紀 阿部 秋男 時松 孝次	土と基礎	1996. 3
15	基礎の被害調査方法	阿部 秋男 田村 昌仁	建築技術	1995. 9

実績調査文献一覧表

No.	タ イ ト ル	著 者	出 典	発行年月日
16	杭の健全性の評価	阿部 秋男	基礎工	1996.11
17	非破壊試験法を適用した兵庫県南部地震によるコンクリート基礎杭の被害調査報告(その1)	風早 佳子 林 隆浩 小野 日出男 田中 伸治	第31回地盤工学研究発表会発表講演集	1996.7
18	非破壊試験法を適用した兵庫県南部地震によるコンクリート基礎杭の被害調査報告(その2)	田中 伸治 林 隆浩 小野 日出男 風早 佳子	第31回地盤工学研究発表会発表講演集	1996.7
19	非破壊試験法による杭基礎の被害調査事例	田中 伸治 内田 茂 小野 日出男 阿部 秋男 梶原 雅文	全地連「技術フォーラム'96」仙台	1996
20	AE を利用したコンクリート杭の破損調査法	森 伸一郎 宇良 成康 塩谷 智基 藤井 清司	第30回土質工学研究発表会平成7年度講演概要集	1995.7
21	コンクリート杭の AE 破損調査法における AE パラメータの検討	森 伸一郎 宇良 成康 塩谷 智基 藤井 清司	土木学会第50回年次学術講演会講演概要集	1995.9
22	地震で被災したコンクリート杭の AE 破損調査法	森 伸一郎 塩谷 智基 宇良 成康 藤井 清司	第23回土木学会地震工学研究発表会	1995.7
23	誘発させた AE を利用したコンクリート杭の破損調査法の実建物への適用	森 伸一郎 塩谷 智基 岩城 圭介 境野 典夫	第31回地盤工学研究発表会講演概要集	1996.7
24	AE を利用したコンクリート杭の破損調査法の中層建物基礎への適用と検証	森 伸一郎 塩谷 智基 岩城 圭介 境野 典夫	第31回地盤工学研究発表会講演概要集	1996.7
25	AE を利用したコンクリート杭破損調査法の軟弱地盤上の構造物基礎への適用	森 伸一郎 塩谷 智基	第31回地盤工学研究発表会講演概要集	1996.7
26	AE を利用したコンクリート杭破損調査法の新しい位置標定法の提案	森 伸一郎 山本 清広 塩谷 智基 藤井 清司	日本建築学会大会学術講演梗概集	1996.9
27	AE を利用したコンクリート杭破損調査法の中層建物基礎への適用と検証	森 伸一郎 岩城 圭介 塩谷 智基 境野 典夫 秋山 映雄	日本建築学会大会学術講演梗概集	1996.9
28	AE を利用したコンクリート杭破損調査法の高層建物基礎への適用と検証	森 伸一郎 塩谷 智基 岩城 圭介 境野 典夫 田中 幹雄	日本建築学会大会学術講演梗概集	1996.9

実績調査文献一覧表

No	タ イ ト ル	著 者	出 典	発行年月日
29	AE を利用したコンクリート杭破損調査法の短杭構造物への適用	森 伸一郎 境野 典夫 岩城 圭介 塩谷 智基 小堀 隆治	日本建築学会大会学術講演梗概集	1996. 9
30	AE を利用したコンクリート杭破損調査法におけるサスペンション型導波棒の適用	岩城 圭介 森 伸一郎 塩谷 智基 境野 典夫	土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集	1996. 9
31	コンクリート杭破損部から放射された AE 波形の特徴	塩谷 智基 森 伸一郎 岩城 圭介 境野 典夫	土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集	1996. 9
32	AE を利用したコンクリート杭の破損調査法の二次元標定法の適用	山本 清広 森 伸一郎 塩谷 智基 藤井 清司	土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集	1996. 9
33	被災した場所打ち杭の急速載荷試験による健全度の判定 (阪神公団 3 号線芦屋入路)	西村 真二 溝淵 修治 児島 郁男	基礎工	1996. 9
34	阪神高速道路 5 号湾岸線の橋脚基礎の復旧	石崎 浩 江川 典聡	基礎工	1996. 9
35	阪神高速 3 号神戸線基礎構造物の健全度の判定	林 秀侃 丸居 保 堀田 不二男	基礎工	1996. 9
36	名神高速道路・中国自動車道の復旧設計と橋脚基礎の健全度判定および補強	多久 和勇	基礎工	1996. 9
37	震災復旧橋梁における基礎の復旧 — 国道 2 号浜手バイパスと国道 43 号岩屋高架橋 —	石川 次郎	基礎工	1996. 9
38	橋梁基礎調査のうち基礎杭根入れ深度調査法の現状	戸井田 克 広野 進 三浦 康代	構造物の診断と補修に関する第 7 回技術・研究発表会論文集	1995. 11
39	Comparison of Cross Hole and Single Hole Sonic Integrity Logging Methods	Tracy Brettmann Michael Frank		
40	Evaluation of Defect Detection During Pile Curing Using Sonic Integrity Logging Methods	Tracy Brettmann Michael Frank Bill Berry Jr.		
41	杭基礎の損傷度調査に対する Pile Integrity Tests の適用性	榎本 雅夫 田中 勉 森田 悠紀雄	第 21 回日本道路会議論文集	
42	計測技術 96 被災構造物を素早く診断する技術		日経コンストラクション	1996
43	フーチング上面からの基礎杭非破壊調査方法について	仲田 慶正 南庄 淳 川上 順子 今田 和夫	土木学会第 51 回年次学術講演会	1996. 9
44	1995 年兵庫県南部地震によって損傷した杭の調査	堀越 研一 木村 亮 大津 宏康 岡 二三夫	土と基礎	1996. 11

実績調査文献一覧表

No.	タ イ ト ル	著 者	出 典	発行年月日
45	フーチングが杭の非破壊試験結果に及ぼす影響	宮田 善郁 榎本 雅夫 土谷 尚	第32回地盤工学 研究発表会講演集	1997.5
46	超音波を用いた場所打ちコンクリート杭の品質管理手法	小野 日出男 阿部 秋男 林 隆浩 丸茂 文夫	第32回地盤工学 研究発表会講演集	1997.5
47	ボアホールカメラによる場所打ち杭の損傷度調査	久保田 耕司 丸居 保 幸左 賢二 田島 克洋	土木学会第52回 年次学術講演会	1997.8
48	損傷を受けた基礎杭の確認手法とその評価について	南荘 淳 安田 扶律 今田 和夫 仲田 慶正	土木学会第52回 年次学術講演会	1997.8
49	杭の健全性試験に関する基礎的検討	喜多 直之 崎本 純治	土木学会第52回 年次学術講演会	1997.8
50	衝撃弾性波法による杭の損傷調査手法の実験	石田 雅博 福井 次郎 大越 盛幸 阿部 秋男	土木学会第52回 年次学術講演会	1997.8
51	非破壊試験による基礎杭損傷調査における解析手法の開発と適用性に関する研究	松井 保 南荘 淳 安田 扶律 仲田 慶正	土木学会論文集 No.596/III-43	1998.6
52	A study on the applicability of integrity tests for damaged piles	Yasumitsu Ichimura Shinya Sakamoto Hideo Ono Shinichi Yamada	SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON PILING AND DEEP FOUNDATIONS	1998.6
53	品質検査のためのインテグリティ試験	田中 伸治 二木 幹夫 長尾 俊昌 阿部 秋男	第33回地盤工学 研究発表会講演集	1998.7
54	杭の損傷調査に対するインテグリティ試験の適用性 その1 ＜測定装置の違いによる波形比較＞	坂本 真也 塚田 幸広 市村 靖光 田口 雅章	第33回地盤工学 研究発表会講演集	1998.7
55	杭の損傷調査に対するインテグリティ試験の適用性 その2 ＜フーチングのない杭の測定波形＞	山田 真一 市村 靖光 仲田 慶正	第33回地盤工学 研究発表会講演集	1998.7
56	杭の損傷調査に対するインテグリティ試験の適用性 その3 ＜フーチングのある杭の測定波形＞	松本 江基 市村 靖光 三反畑 勇 小野 日出男	第33回地盤工学 研究発表会講演集	1998.7
57	杭の健全性調査におけるひび割れ位置推定法に関する一提案	真野 英之 西尾 伸也 大槻 明 桐田 賢	第33回地盤工学 研究発表会講演集	1998.7

実績調査文献一覧表

No	タ イ ト ル	著 者	出 典	発行年月日
58	超音波を用いた場所打ちコンクリート杭の品質評価に関する模型実験	小野 日出男 田村 昌仁 藤井 衛 高田 渉太郎	第33回地盤工学研究発表会講演集	1998.7
59	超音波を用いた場所打ちコンクリート杭の品質評価に関する模型実験 (その2)	小野 日出男 田村 昌仁 藤井 衛 高田 渉太郎	日本建築学会大会 学術講演梗概集 (九州)	1998.9
60	インテグリティ試験による場所打ち杭の品質管理法	塚田 幸広 市村 靖光	土木学会論文集 No.603/III-44	1998.9
61	非破壊探査システムによる構造物基礎杭(木杭)の杭長探査について	今枝 良仁 手塚 健一 塩月 隆久	土木学会第53回 年次学術講演会	1998.10
62	八丁新橋建設に伴う場所打ちコンクリート杭のインテグリティ試験	道 勇治 松本 樹典 浅井 陽一 松田 洋一郎	土木学会第53回 年次学術講演会	1998.10
63	鋼管巻き場所打ちコンクリート杭に対するインテグリティ試験適用例	金井 文男 林 正宏 小菅 秀一 松本 樹典	土木学会第53回 年次学術講演会	1998.10
64	杭の損傷調査に対するインテグリティ試験の適用性 その4 ＜ハンマの違いによる波形比較＞	本間 利明 市村 靖光 山田 真一 田口 雅章	土木学会第53回 年次学術講演会	1998.10
65	杭の損傷調査に対するインテグリティ試験の適用性 その5 ＜測定位置の違いによる測定波形の差異＞	小野 日出男 市村 靖光 三反畑 勇	土木学会第53回 年次学術講演会	1998.10
66	杭の健全性試験結果に与える打撃・計測位置の影響評価	崎本 純治 喜多 直之 市村 靖光 小嶋 平三	第34回地盤工学研究発表会講演集	1999.7
67	橋梁基礎構造の調査に関する研究 (その2)＜インテグリティ試験による損傷杭の測定＞	市村 靖光 田口 雅章 坂本 真也 今田 和夫	土木学会第53回 年次学術講演会	1999.9