

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）

平成 10 年 9 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
中央復建コンサルタンツ(株)
日本工営(株)
梶谷エンジニア(株)

Copyright © (1998) 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1）

平成 10 年 9 月

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

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

要旨：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）

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ある。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 8～9 年度に行った各手法の適用性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

ま え が き

我が国には、橋長 2 m 以上の橋が 65 万橋、橋長 15m 以上の橋に限って 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場合がある。

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、基礎の形成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、上部工の架替において基礎の再利用を判定する場合に、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 ヶ年の予定で「橋梁基礎構造の調査方法の開発」を実施している。

本報告は、平成 9 年度までに実施した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
同	前基礎研究室長	中野 正則 ^{※1}
材料施工部	施工研究室長	大下 武志
同	前施工研究室長	塚田 幸広 ^{※2}

※1 (現、福岡北九州高速道路公社企画課長)

※2 (現、東北地方建設局酒田工事事務所長)

目 次

1. はじめに	1
2. 研究目的	2
2.1 検討グループ	5
3. 各試験方法の概要	6
3.1 インテグリティ試験の概要	6
3.2 レーダー法の概要	7
3.3 アコースティック・エミッション(AE)試験の概要	8
3.3.1 AEによるコンクリート杭破損調査法の測定原理	8
3.3.2 調査手順	8
3.3.3 計測・評価手順	9
3.3.4 その他の設置方法	9
3.4 ボアホールカメラの概要	10
3.5 磁気探査概要	11
3.6 衝撃振動試験の概要	12
4. 模型供試体の概要	13
4.1 模型供試体 による試験の目的	13
4.2 試験杭	13
4.3 地盤条件	15
4.4 塩ビ管の設置	15
4.5 試験杭の設置工程	16
5. 各調査手法の検討結果	22
5.1 インテグリティ試験	22
5.1.1 研究概要	22
5.1.2 検討結果	22
5.1.3 適用条件	31
5.1.4 まとめと今後の課題	32
5.2 レーダ法	33
5.2.1 研究概要	33

5.2.2	検討結果	39
5.2.3	適用条件	63
5.2.4	まとめと今後の課題	64
5.3	アコースティック・エミッション	65
5.3.1	はじめに	65
5.3.2	AE計測装置	65
5.3.3	AE特性パラメータ	67
5.3.4	AEによるコンクリート杭破損調査法の測定原理	69
5.3.5	共通供試体(RC損傷杭)による室内実験	70
5.3.6	今後の課題	113
5.4	ボアホールカメラ	114
5.4.1	研究概要	114
5.4.2	供試体観察結果	117
5.4.3	適用条件	143
5.4.4	まとめと今後の課題	144
5.5	磁気探査	145
5.5.1	研究概要	145
5.5.2	供試体探査結果	152
5.5.3	適用条件	162
5.5.4	まとめと今後の課題	163
5.6	衝撃振動試験	174
5.6.1	研究概要	174
5.6.2	検討結果	174
5.6.3	適用条件	189
5.6.4	まとめと今後の課題	189
6.	まとめ	192

付 録

1. インテグリティ試験を用いた杭基礎の調査法マニュアル(案)
2. 実績調査文献一覧表

1. はじめに

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、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、各種の非破壊検査は判定手法が必ずしも確立されていない。

一方、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。

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ヶ年の予定で「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9年度までに実施した検討結果をとりまとめたものである。

2. 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基礎形状を調査することを目的として実施している。

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、インテグリティテスト (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および健全度の判定手法を確立することを目的として研究を実施している。

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判定が行われているが、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ている。

平成8年度および9年度は、適用可能と考えられる手法を整理し、これらの適用性を把握するために模型基礎に対する試験および実橋梁での試験を行った。本報告書では、これらの検討結果をとりまとめた。

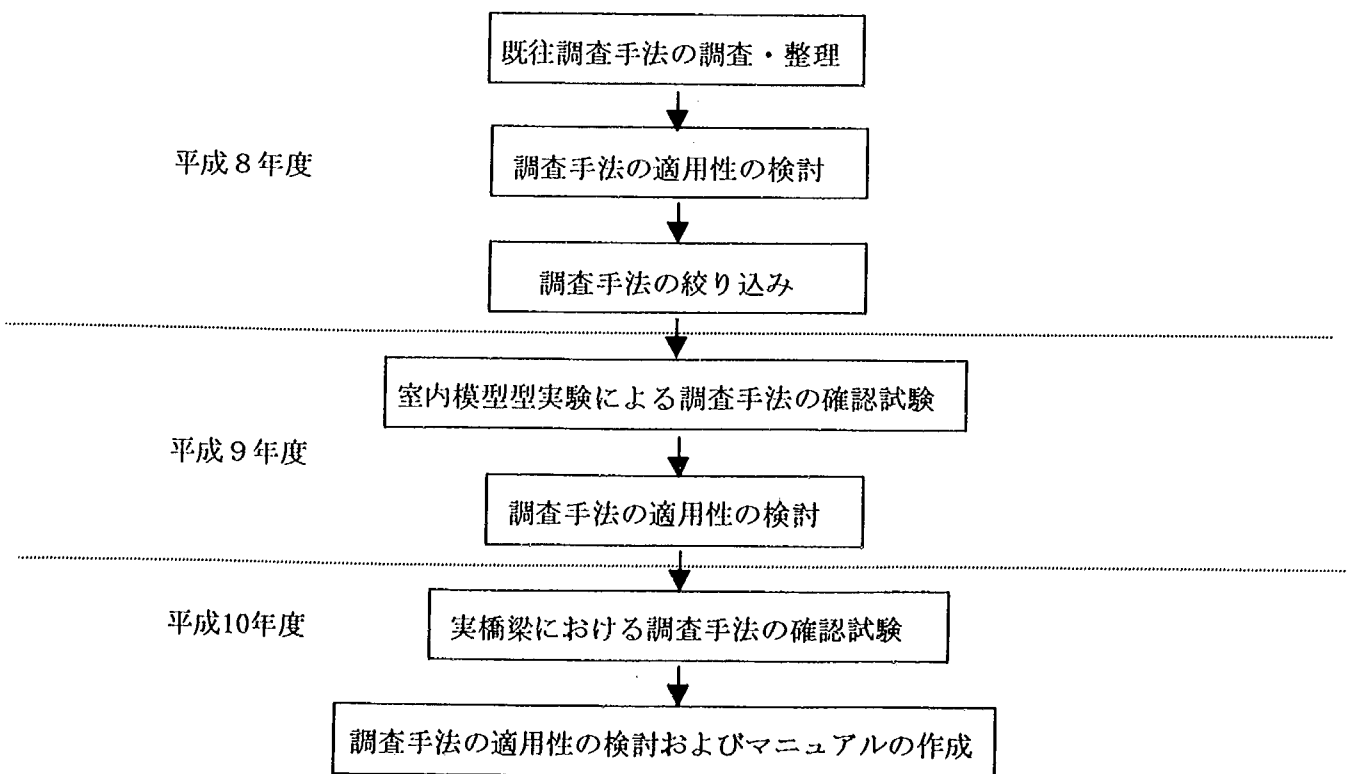


図-2.1 研究フロー

表-2.1 平成10年度共同研究担当者名簿

氏 名	所 属
大下武志 (塚田幸広)	建設省土木研究所 材料施工部 施工研究室 室長
市村靖光	" " " 室長 (平成10年3月まで)
森 芳徳	" " " 研究員
○福井次郎	" " " 研究員
(中野正則)	構造橋梁部 基礎研究室 室長
石田雅博	" " " 室長 (平成8年10月まで)
秋田直樹	" " " 研究員
寿上隆司	" " " "
渡辺明貞	" " " "
○古池正宏	阪神高速道路公団 工務部 設計課 課長
幸左賢二	" " " 調査役
田坂 広	" " " 課長補佐
藤井康男	" " " 係長
崎谷 浄	" " " "
○菊池禎二	(株)大林組 土木技術本部 統括部長
崎本純治	" 技術研究所 土木第二研究室 主任研究員
佐藤峰生	" 土木技術本部 設計第一部 課長
田坂幹雄	" " " 課長代理
○金谷忠良	中央復建コンサルタンツ(株) 防災診断室 室長
田底成智	" " " 課長
水野温夫	" " " 情報システム室 次長
○太田資郎	日本工営(株) 中央研究所 開発研究部 部長
石橋晃睦	" " " 情報システム開発室 課長
藤原鉄朗	" " " 開発研究部
松山公年	" " " "
金本康宏	" " " "
上出定幸	梶谷エンジニア(株) 地質計測部 部長
○佐々木 勉	" 調査部 部長
日下部啓一	" " 次長
亀和田修一	" 地質計測部 主任
田口雅章	" 調査部 主任
杵本正信	(株)フジエンジニアリング 常務取締役
○今田和夫	" 調査第一部 部長
仲田慶正	" 調査第一課 主任
藤井義文	(株)竹中土木 技術本部 技術開発部 部長
○小嶋平三	" " " 課長
井本雅祥	" 大阪本店 技術部 課長
加倉井正昭	" 竹中技術研究所 部長
長谷川昌弘	飛島建設(株) 技術研究所 所長
○三輪 滋	" " " 地盤耐震研究室 室長
塩谷智基	" " " 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
○小野日出男 阿部秋男 田中伸治	(株)東京ソイルリサーチ 技術本部 技術開発室 次長 " つくば総合試験所 特殊試験室 課長 " " " 係長
○土谷尚 森田悠紀雄 酒井幸雄 田中勉 山田眞一	基盤地盤コンサルタンツ(株) 地盤工学センター 所長 " 技術部 部長 " 地盤工学センター 機器開発室 室長 " 技術部 課長 " 地盤工学センター 地盤物性室 室長
続 誠 西村真二 ○坂本真也 本間利明	(株)フグロ・ジオサイエンス 代表取締役会長 " 部長 " マネージャー " シニア・エンジニア
吉村和彦 村上祐治 ○三反畑勇 松本江基 平澤賢治	(株)間組 技術研究所 技術研究部 主席研究員 " " " 主任研究員 " " " 主任研究員 " " " 主任研究員 " " 構造物・橋梁統括部
○小林茂敏 鷹取勲 大関敏広 三木正久	(財)土木研究センター 理事 " 企画部 部長 " " 次長 " " 次長

2.1 検討グループ

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インテグリティテスト (IT)、②アコースティックエミッション (AE)、③ボアホールカメラの3手法を、形状調査手法として①インテグリティテスト (IT)、②ボアホールレーダ、③衝撃振動試験、④磁気探査の4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-2.2に示す。

表-2.2 検討グループ一覧

テーマ	調査法	担当機関		
		土木研究所	幹事会社	
損傷調査	インテグリティテスト (IT)	施工研究室	東京ソイルリサーチ 間組	梶谷エンジニア 大林組 基礎地盤コンサルタンツ 竹中土木 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)	施工研究室	飛島建設	日本工営
	ボアホールカメラ	基礎研究室	梶谷エンジニア	東京ソイルリサーチ 基礎地盤コンサルタンツ
形状調査	インテグリティテスト (IT)	施工研究室	東京ソイルリサーチ	大林組
	ボアホールレーダ	基礎研究室	日本工営	清水建設 基礎地盤コンサルタンツ
	衝撃振動試験	基礎研究室	中央復建コンサルタンツ	
	磁気探査	基礎研究室	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ている。

3. 各試験方法の概要

3.1 インティグリティ試験の概要

欧米では 1960 年代から杭の施工管理や支持力推定への波動理論の適用が実用化され、動的な試験法が普及し始めた。1970 年代後半には、ヨーロッパを中心に場所打ち杭の需要の増加に伴い、施工後の品質に関するトラブルも発生し、杭の品質管理の必要性が高まってきた。打ち込み杭については、一次元波動理論に基づく動的載荷試験 (Dynamic Load Test) により打ち込み管理と支持力推定が可能となったが、場所打ち杭に対してはハンマを別途用意しなければならないことやセンサの取り付け方法、衝撃力による杭頭の破損などの問題があり、その適用が困難であった。このような状況から、動的試験で培ってきた技術を発展させたインティグリティ試験が、オランダ応用科学研究所 (TNO) やフランス建設研究所 (CETBC) により開発・実用化され、現在では世界各国で利用されている。インティグリティ試験は、地中の杭長や杭形状を推定するもので、支持力を直接求めるものではないが、非破壊で迅速かつ低コストであることを特長としており、全数検査が可能な手法である。また、この試験は施工後の杭の品質管理だけではなく、老朽化した構造物の更新に当たっての既存杭の再利用時の杭長確認、及び地震などで被災した杭の健全性の調査にも用いることができる。特に、わが国においては 1995 年に発生した兵庫県南部地震以後、その適用事例が増加している。

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、ソニック・テスト、エコー・テスト、バイブレーション・テストなどがあり、いずれもハンドハンマや加振機により外力を加える方式となっている。このうち、ソニック・テストは、図-3.1.1 に示すように、一般には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などで計測する試験法である。

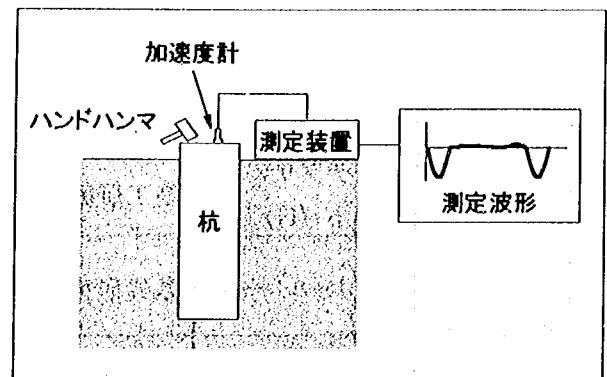


図-3.1.1 インティグリティ試験の方法

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部、地盤変化がある場合には反射波が生じる。反射波は、不連続面いわゆるインピーダンスの変化によって生じるもので、大きなインピーダンスの変化は大きな反射波を発生させる。反射波が発生する条件を整理すると、①杭先端、②断面の拡大、③断面の縮小、④接合部、⑤材質の変化、⑥異素材の混入、⑦杭軸に直角方向のクラック、⑧地層の境界などが挙げられる。インティグリティ試験では、これらの反射波の発生する時間、大きさを測定し、杭体内の波動伝播速度を与えることにより、杭長、損傷の有無、損傷位置などの推定を行う。

3.2 レーダ法の概要

レーダ法は電磁波を応用した技術であり、航空管制や気象観測などに広く用いられている。地中の物理探査技術としても利用されており、遺跡や地下埋設物の調査に適用されてきた。

電磁波は衝撃振動波等、他の波動と比較し、トランスデューサーから出た波動が地中に透過し易い特性を有するため、非接触計測が容易であり、面的に広範囲な探査も比較的短時間で行うことができる。また、土の中を透過する媒体としては波長が短いため、比較的分解能が高く、小さい対象物を探査することができる。

地中レーダで利用する電磁波の周波数は、100～1500MHz程度の範囲である。一般的に、周波数が低いほど、探査距離は大きくなり、広い範囲を調査できるが、分解能は低下する。そこで、比較的浅い範囲で小さい対象物を調査する場合には、高い周波数を使い、深い部分の大きい対象物の調査には、低い周波数の電磁波を用いる。

レーダ装置は電磁波の発振方式により、パルス波法と連続波法に大きく分類することができる。

パルス波法は、パルス状の電磁波を送信アンテナから放射し、対象物から反射あるいは透過してくる電磁波を受信アンテナで連続的に検出し、放射からの時間差と電磁波強度を映像化する手法である。測定原理が簡易で解析が容易という利点がある。一方、探査精度と探査距離の向上には、鋭く強いパルス状の電磁波を放出できる発振器が必要であり、装置制作上の課題となっている。

連続波法は、FM-CW法が代表的な方法である。FM-CWレーダは、発信周波数をステップ状に変化させ、これらの核周波数成分の発信時間を調整することで、擬似的にパルス状の電磁波が発信されたものと想定できる技術である。パルスレーダと比較すると、測定原理が複雑であるが、発信・受信が単一の周波数毎に行われ、位相差が計測されるため、電波伝播速度の変化の影響が小さく、分解能を確保しやすい。また、個々の周波数の発信には大きな電力を必要とせず、発信周波数帯域が任意に調整でき、安定した周波数が発信できる等の利点がある。

探査方式でみると、送・受信アンテナの配置によって反射法と透過法に分けることができる。ポアホールレーダでは、反射法をシングルホール法、透過法をクロスホール法と呼ぶ場合もある。

送信アンテナから地中に発信される電磁波は、電気的特性（比誘電率等）が異なる探査対象物と土質との境界面で、その一部が反射される。この反射波を受信アンテナで捉え、受信時間、受信強度等を解析することにより、探査対象物の位置・材質・大きさ等を認識しようとする方法が反射法である。

透過法は、地中内部の構造によって電磁波の伝播速度と減衰特性が異なることを利用する方法である。送・受信アンテナ間に位置し、電磁伝搬経路上にある物質の平均的な伝播速度、減衰率、振幅等を多点で計測し、回折トモグラフィ処理により2次元の断層映像を再構成するものである。反射法と比較すると、計測データが多く、解析も複雑であるが、より広範囲の断層データ取得が可能になる。

地中レーダ特有の問題としては、大気中に比べて電磁波の減衰が大きいことがある。このため、探査距離や分解能を向上させるために、残された検討課題も少なくない。また、レーダ装置は高周波回路等で構成されるため、現状では制作費用の低廉化にも開発課題がある。しかし、高分解能の断層情報を非接触で高速に取得できる点で、他の非破壊調査に代替できない調査手法となっている。

3.3 アコースティック・エミッション (AE) 試験の概要

アコースティック・エミッション (Acoustic Emission; AE) は、「固体材料内部の微小な破壊あるいは、それと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象」と定義され、その発生機構から欠陥を進行させるような荷重が作用しなければ発生しない。つまり、供用状態に近い荷重条件下で AE を発しないような欠陥は無害ということもできる。「AE によるコンクリート杭破損調査」は、杭基礎の損傷時や損傷後に期待される AE を利用することで、その健全性把握が可能となる調査法である。

3.3.1 AE によるコンクリート杭破損調査法の測定原理

損傷を有するコンクリート杭が荷重下にあるとき、その損傷箇所から AE の発生・放射が期待される。杭損傷部から放射された AE 波は、まず地盤中を伝わり、AE センサーを取付けたウェーブガイドと呼ばれる AE 波の減衰を抑えて AE センサーまで導く棒に入射される。棒に入射された AE 波は、棒中を AE センサーまで伝播し検出される。このとき、図-3.3.1 に示す AE センサー#1、#2 において、AE 源が#1に近い場合、AE 波が到達する順序は AE センサー#1、#2 となり、到達時間差: δt が得られる。このとき、その AE 源の位置、つまり損傷の位置は、 $a = (L - v\delta t) / 2$ により得られる。ここで、 L は AE センサー間距離、 v は AE 波速度である。

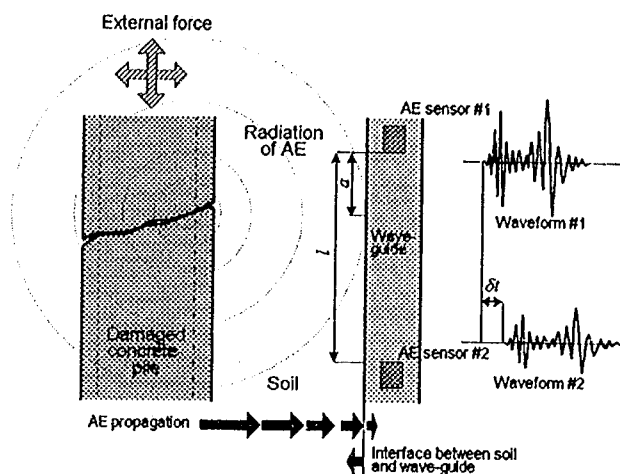


図-3.3.1 測定原理概要図

杭の損傷位置はこのように計測し、検出された AE 位置標定結果よりその集中位置をもって推定する。

3.3.2 調査手順

測定手順の概要を図-3.3.2 に示す。

1) 計測対象杭近傍 (3m 以内) に計測位置を決定し、ボーリングを計測杭の対象深度まで施す。このとき、地盤にもよるが、計測深度が深い場合や、自立性のない地盤性状の場合にはケーシングパイプを削孔時に設置する。

2) 先端を閉塞させた塩化ビニル管 (薄肉型) を孔内に挿入する。地下水位が高い場合は、その浮力を考慮し、管内に水を充填する。3) ケーシング

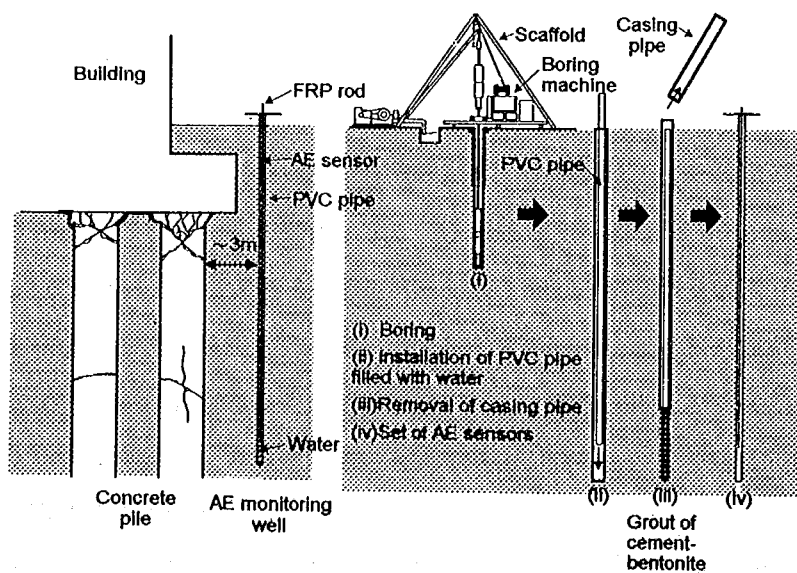


図-3.3.2 測定手順概要図

パイプを引抜く。このとき、孔壁と塩化ビニル管の隙間にセメントベントナイトによるグラウトを施す。グラウト材は地盤性状に近い物性のものを用いる。4) 予め計測対象範囲を網羅するように AE センサー

を複数個取付けた FRP ロッドを塩化ビニル管に挿入する。この場合、管内への水の充填が計測の前提となる。AE センサーは塩化ビニル管に設置するのではなく水の中に吊下げるよう設置する。

3.3.3 計測・評価手順

1) 人為的に外力変動が期待できる場合は、その変動にともなう AE を検出する。それ以外の場合は、杭周辺地盤の長期的圧密などを期待し長期計測を実施する。2) 1)により測定された AE より外部雑音などを除去する。外部雑音には、電源からのノイズ、高出力違法無線、AE センサーケーブルのアンテナ効果によるラジオ等からの電波、など調査地域の計測環境を十分検討し行わなければならない。計測とは無関係な場所（位置）に参照 AE センサーによる計測を行うことも有効である。3) 2)のフィルタリング後の AE を用いて一次元 AE 位置標定を行い、AE 発生位置を推定する。このとき、位置標定の精度向上には、AE データの記録波形をすべて観察し、同一 AE 源から放出された AE であることの確認が有効である。AE 位置標定結果から、深さ方向の AE 源分布を描き、AE 集中位置を検討する。検討が困難な場合は、各 AE イベントが有する AE パラメータを用いて分布を重み付し、検討する方法が良い。リングダウンカウント数、エネルギーなどが有効であると考えられるが、AE 測定器械の分解能が高いパラメータを採用するのが一般的と考える。

3.3.4 その他の設置方法

以上に示した設置手順及び計測・評価手順は、計測対象杭近傍の地盤中に設置した計測孔による方法である。この他、杭体に AE センサが直接設置可能な場合、更に良好な計測環境下での AE の検出、損傷位置の特定が可能と考える。

3.4 ボアホールカメラの概要

ボアホールカメラによる損傷状態の確認は、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孔壁を観察する手法である。

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式のものと、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、ひび割れ等の損傷度の状況を評価することも可能である。原理を図-3.4.1及び図-3.4.2に示す。

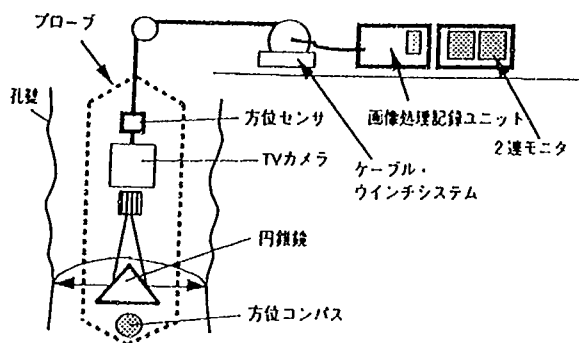


図-3.4.1 デジタル式の例

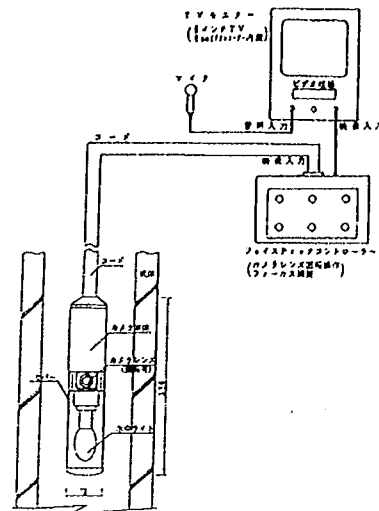


図-3.4.2 アナログ式の例

以下は、適用にあたっての主な留意点である。

- ・観測孔のボーリング孔径は、用いるカメラにもよるがφ66mm～100mmが一般的である。
- ・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同じなので、孔径が大きくなると落ちる。
- ・観測孔を掘削するときに水を使用するが、水が濁っている場合は、画像の鮮明度が落ちるので、可能な限り清水にする必要がある。
- ・撮影方向は、コンパスで制御しているため強磁性体が近くにあると画像が歪む。
- ・観測システムの稼働には、AC100Vの電源が必要である。
- ・観測孔の掘削により、クラックの部分の角部が欠け、拡大する場合があるので、掘進方法や観測結果の解析には注意が必要である。
- ・ボアホールカメラで解析可能なクラックは、1mm以上のものが確実に判定できる。0.1mm程度まで判定可能であるが、解析者の技量による所が大きい。
- ・解析手法として、成果品がビデオタイプのものは、標尺を撮影しキャリブレーションを行わないと、クラックの大きさを確定できない。

3.5 磁気探査概要

鉄などはそれ自身が持つ残留磁気と、その場所の地球磁場による感応磁気によって帯磁している。このため鋼材を含む杭の近くでは、地球磁場が局所的に乱されている。磁気探査はこれを測定することにより強磁性体の位置を特定する方法である。

杭のような細長い鉄類では、その両端付近に磁極が生じ、図-3.5.1の探査概念図に示すような磁場が形成されている。同図に示すように杭体付近は、磁束が集中する（磁気量が多い）ので、観測孔（ボーリング孔）に挿入した磁気センサーで、連続的に磁気量を測定することにより杭端位置を推定することが可能となる。また、観測孔を杭に横断するように配置することにより杭の配置を観測することも可能である。

ただし、磁気センサーは杭以外の磁性体の磁場にも反応するので、対象物の近傍に強磁性体の地下埋設物がある場合は、対象物を判断することが困難となる。

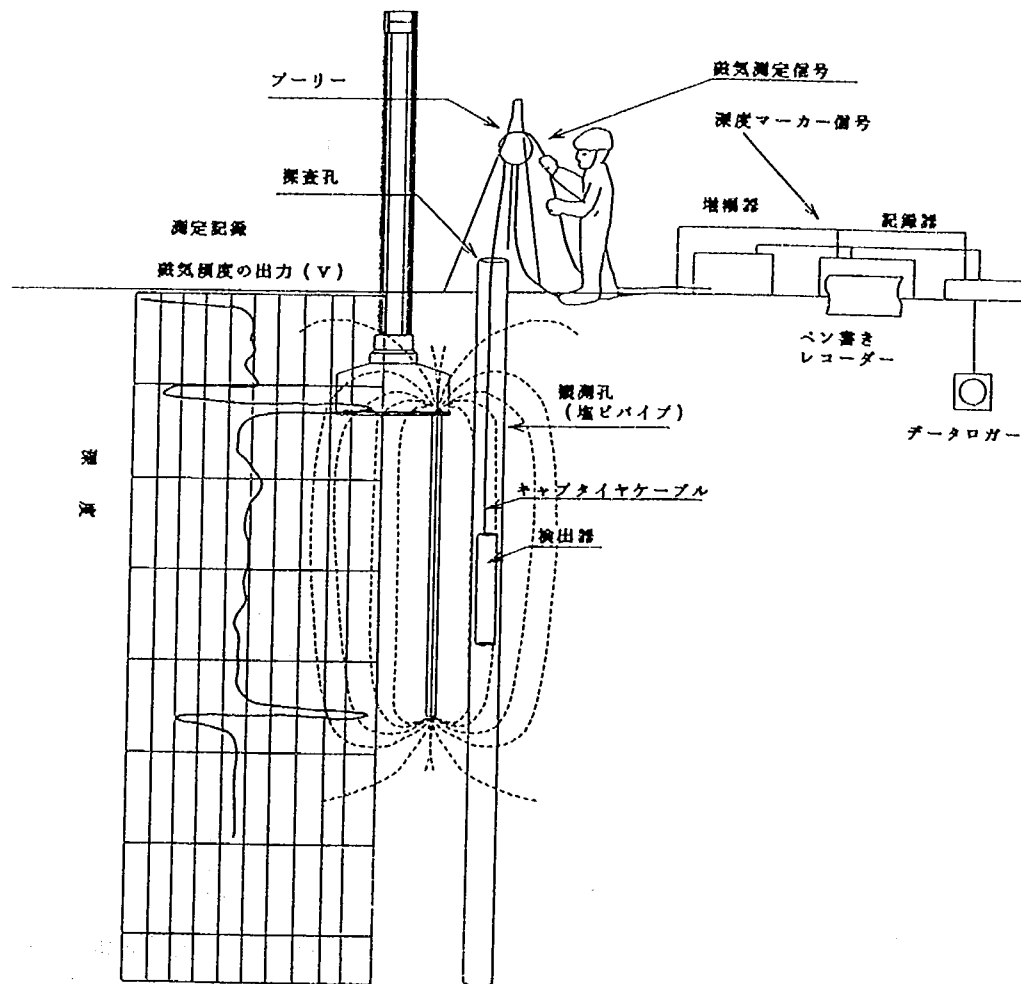


図-3.5.1 磁気探査概念図

3.6 衝撃振動試験の概要

橋脚基礎は、通常、地中にあるため、直接目で確かめて健全度を調べることは困難である。しかし、地震や洗掘による影響を受けて、杭・フーチングの損傷や橋脚周囲の土の緩み等が起こり、基礎構造物の健全性が損なわれる場合がある。

衝撃振動試験とは、橋脚等の構造物が持つ固有振動数を目安として健全度評価を行う現位置試験である。固有振動数は、構造物自身の死荷重、上部工からの上載荷重、構造物の強度、地盤支持力により決定されるものであり、固有振動数が基礎構造物の健全性を評価する目安になりうると考えられる。

試験方法は、以下の手順に分けられる。

- ① 速度計を橋脚天端、中部、下部、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 各測点における応答振動波形を求める。
- ④ 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。
- ⑤ その時に、桁の固有振動数と混同しないように、桁に設置した速度計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。
- ⑥ 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。
- ⑦ 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-3.6.2）
- ⑧ 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。

この試験は、橋脚基礎部の保持状態や、橋脚躯体の剛性を設計条件と比較して評価するものであるから、基礎の損傷位置や、基礎の寸法を求めることはできない。しかし、基礎構造物が設計時に期待された能力を確保しているかを簡便に求める方法として有効である。

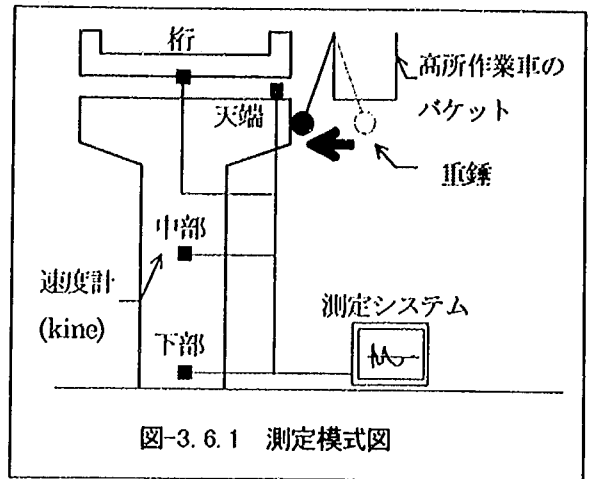


図-3.6.1 測定模式図

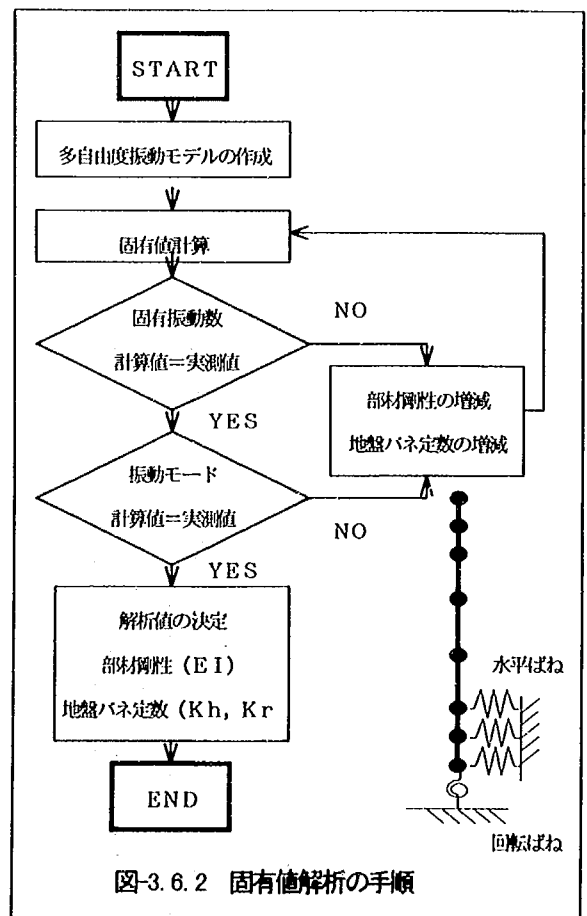


図-3.6.2 固有値解析の手順

4. 模型供試体の概要

4.1 模型供試体による試験の目的

損傷を与えた杭や形状の異なる杭など数種類の試験杭に対して、同一条件の下で様々な非破壊探査法を適用し、各々の測定精度を把握することを目的としている。表-4.1.1 は、使用した探査法と探査目的を示している。

表-4.1.1 試験に用いた探査法

探査法	損傷調査	形状推定
インテグリティ試験	○	○
AE法	○	
ボアホールレーダ		○
磁気探査		○

4.2 試験杭

試験杭は、外径 300mm、杭長 4.0m の RC 杭 12 本である。これらの杭の形状を図-4.2.1 に示す。試験杭のクラックは、曲げ載荷を行うことにより発生させた。また、図-4.2.2 に示すような配置で試験杭を土槽内に設置しており、片方の土槽には無筋コンクリートのフーチングを杭頭に施工している。さらに、A2 および B2 杭には杭先端部に、また A3 杭には杭頭部に無筋コンクリートによる拡大部分を設けている。

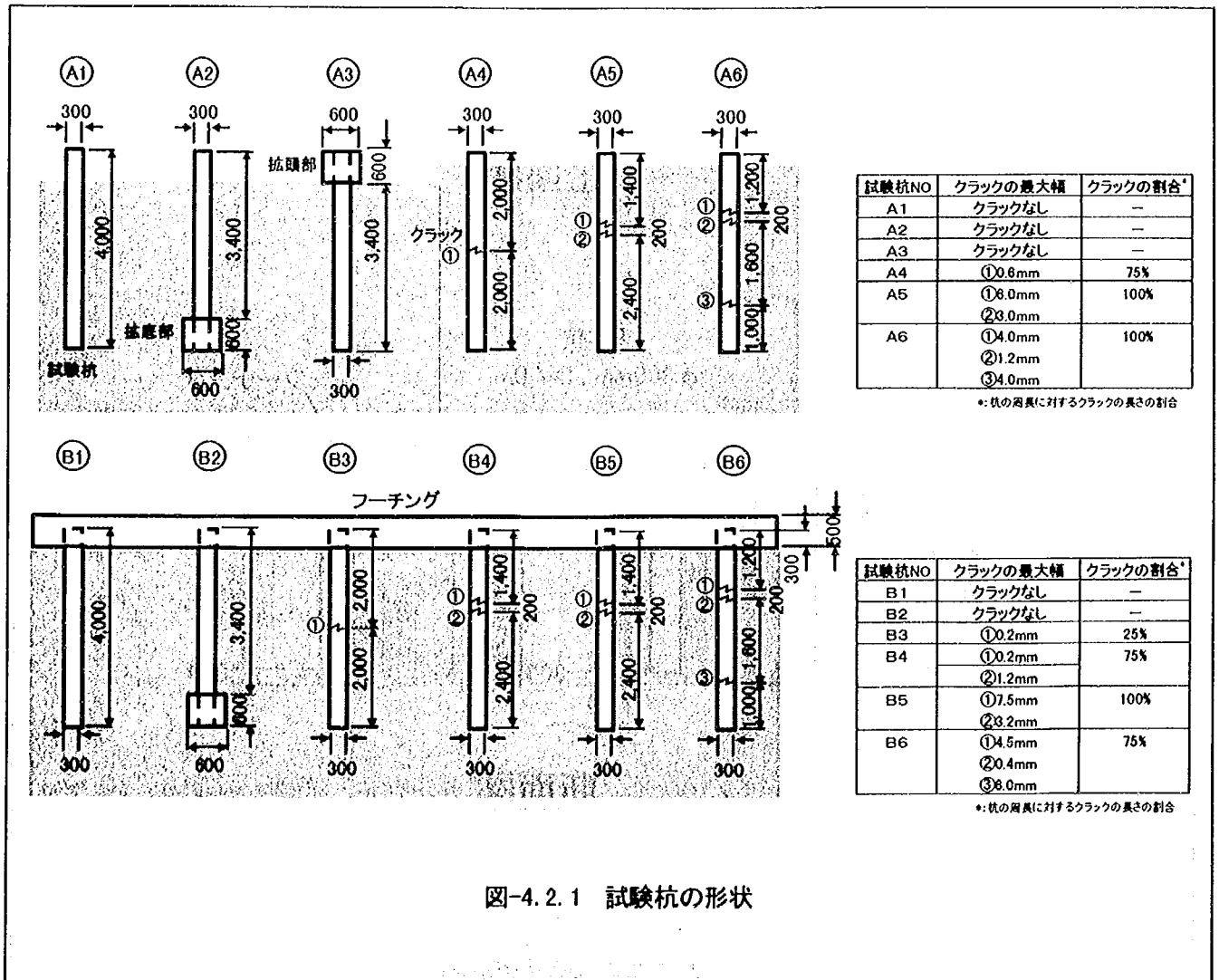


図-4.2.1 試験杭の形状

4.3 地盤条件

試験杭の地中への埋設は、試験土槽に試験杭を建て込み、その周りに川砂を埋め戻すことにより行った。川砂は空中落下法により投入し、締め固めはタンバにより巻きだし厚 30cm で行った。また、各層ごとに密度測定を実施している。その結果を表-4.3.1 に示す。また、川砂の粒度分布は図-4.3.1 に示す通りである。

表-4.3.1 地盤の各層の密度 (単位: g/cm^3)

	土槽A		土槽B	
	湿潤密度	乾燥密度	湿潤密度	乾燥密度
1層目	1.652	1.518	1.651	1.516
2層目	1.611	1.518	1.655	1.540
3層目	1.605	1.536	1.645	1.517
4層目	1.614	1.554	1.644	1.527
5層目	1.595	1.530	1.645	1.511
6層目	1.607	1.547	1.633	1.508
7層目	1.595	1.532	1.635	1.490
8層目	1.620	1.560	1.624	1.495
9層目	1.573	1.513	1.638	1.498
10層目	1.598	1.534	1.618	1.482
11層目	1.620	1.558	1.628	1.516
12層目	—	—	1.640	1.515

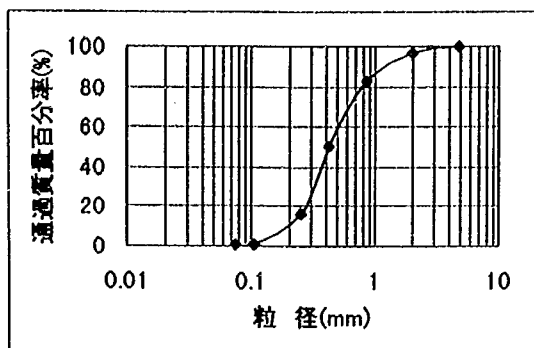


図-4.3.1 川砂の粒度分布

4.4 塩ビ管の設置

杭形状の調査時にレーダなどの探査装置を挿入するための塩ビ管を、試験杭の周辺に予め設置した。配置状況は図-4.4.1 に示す通りである。

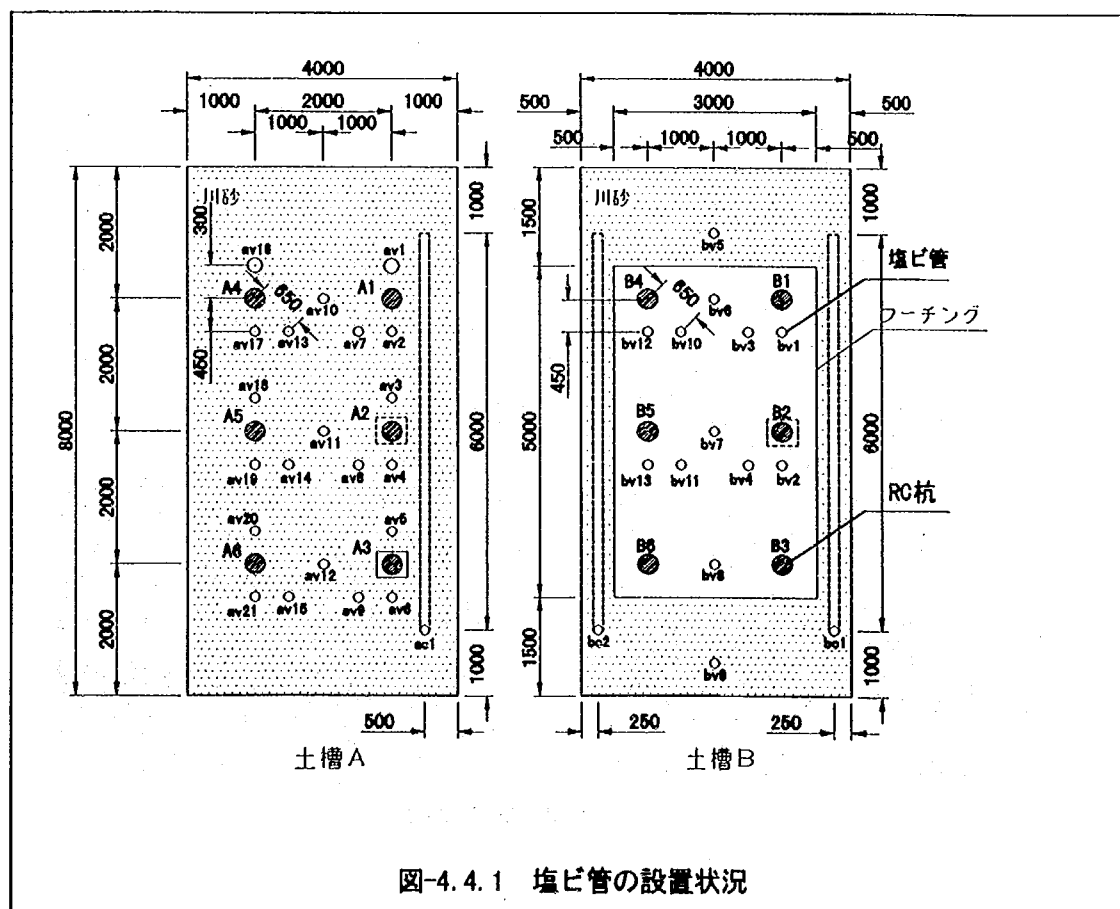


図-4.4.1 塩ビ管の設置状況

4.5 試験杭の設置工程

以下に、試験杭の設置工程を示した写真を列挙する。

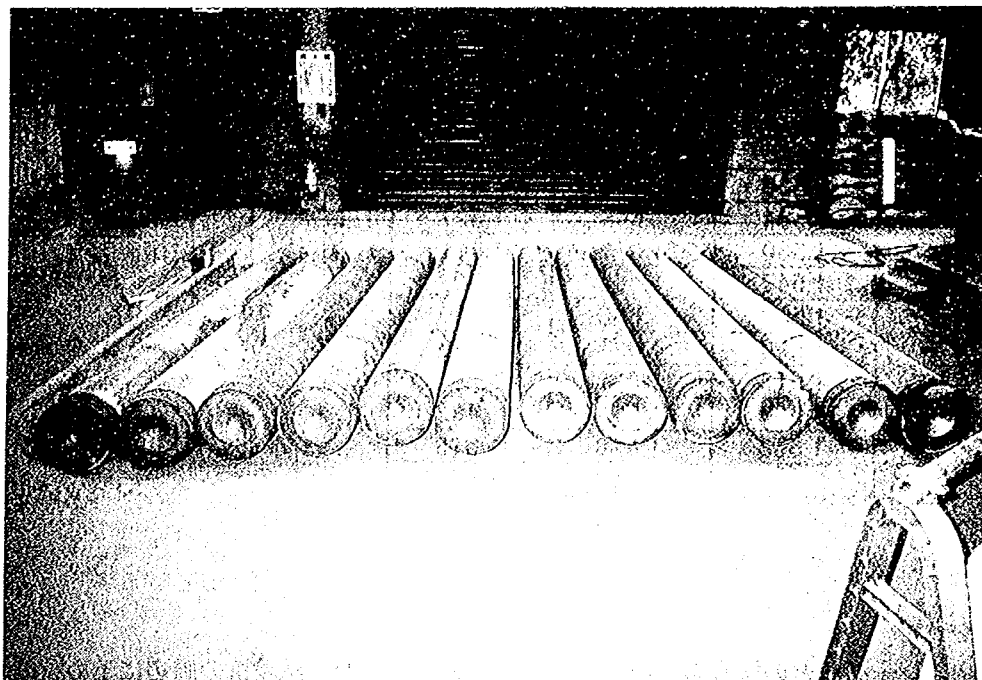


写真-4.5.1 試験杭

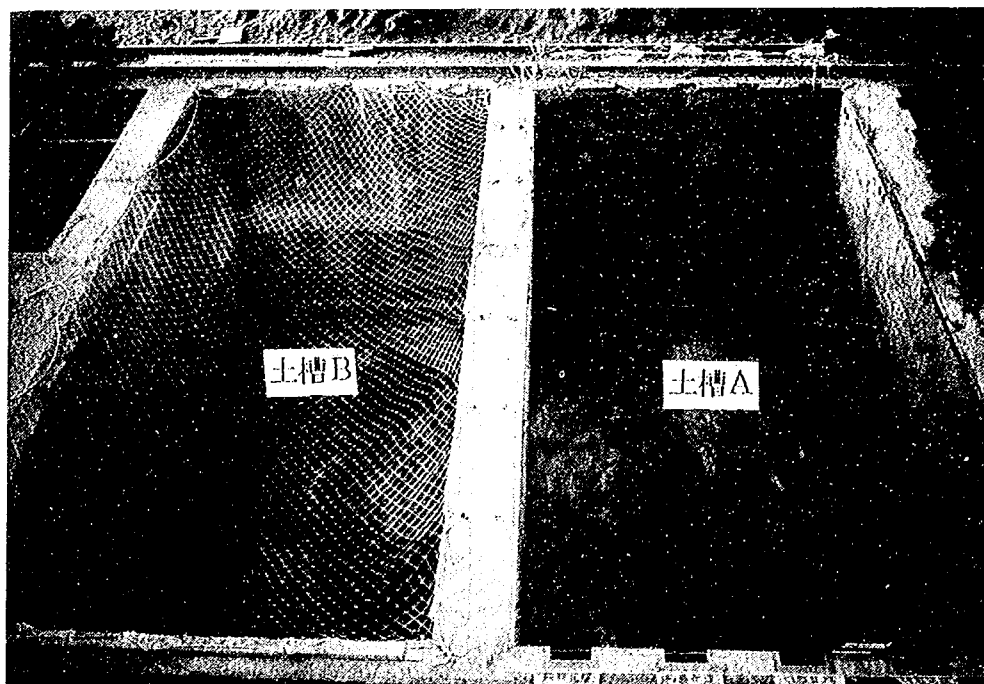


写真-4.5.2 試験土槽

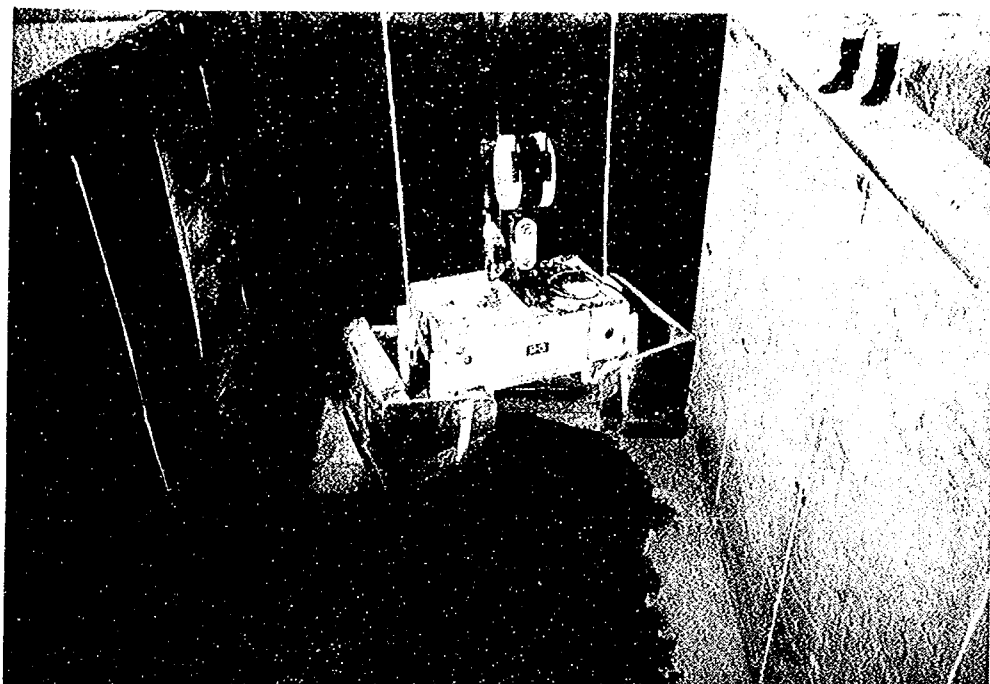


写真-4.5.3 土槽への砂の投入



写真-4.5.4 砂の敷き均し



写真-4.5.5 砂の締め固め

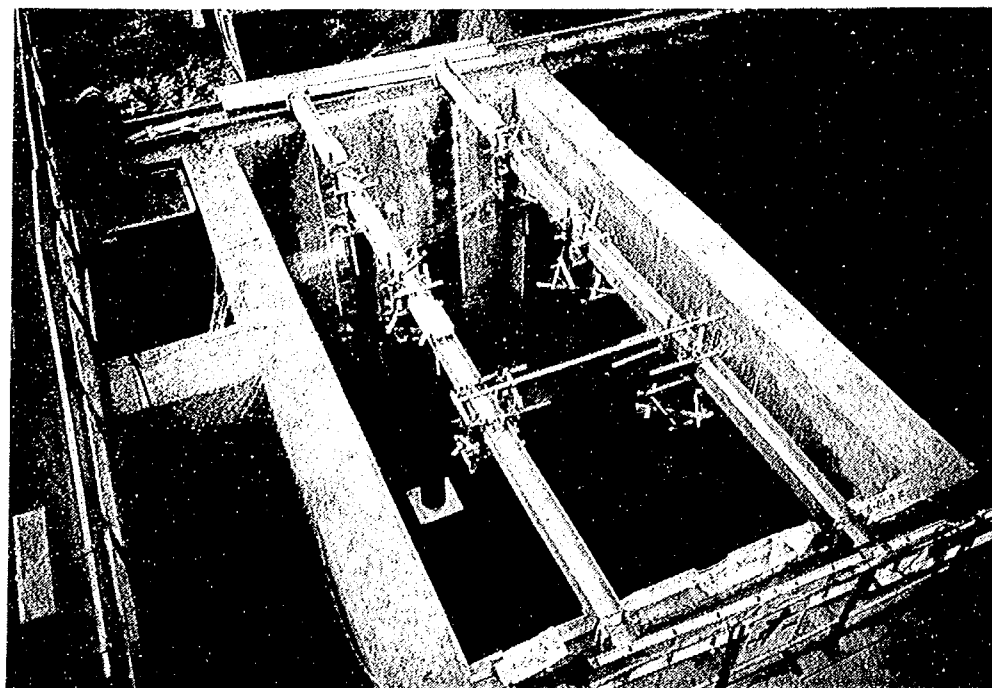


写真-4.5.6 試験杭の建て込み

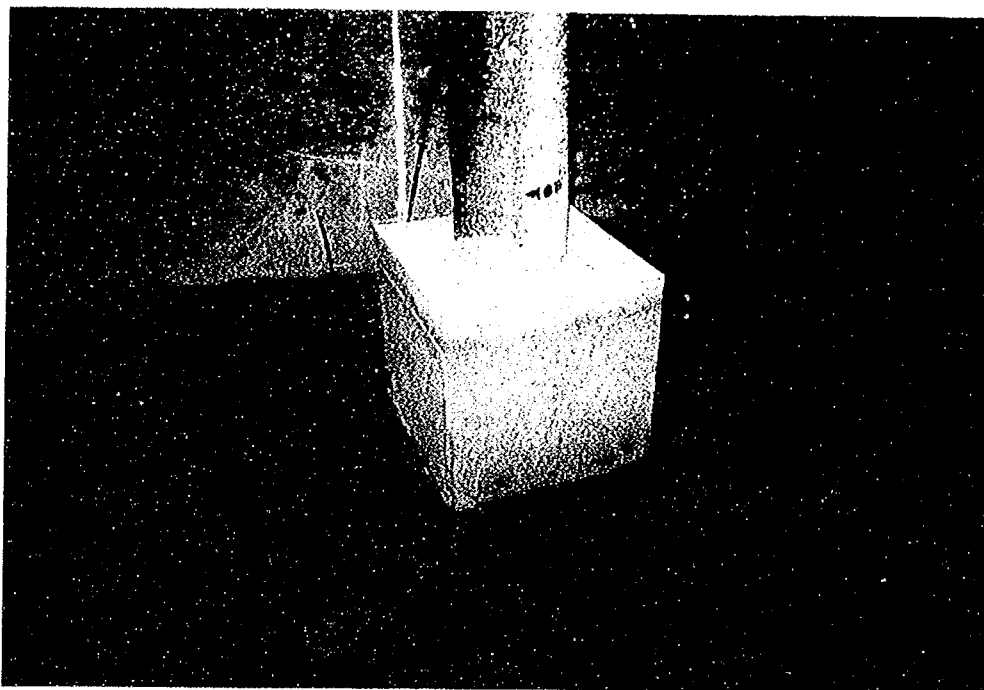


写真-4.5.7 拡底部の状況

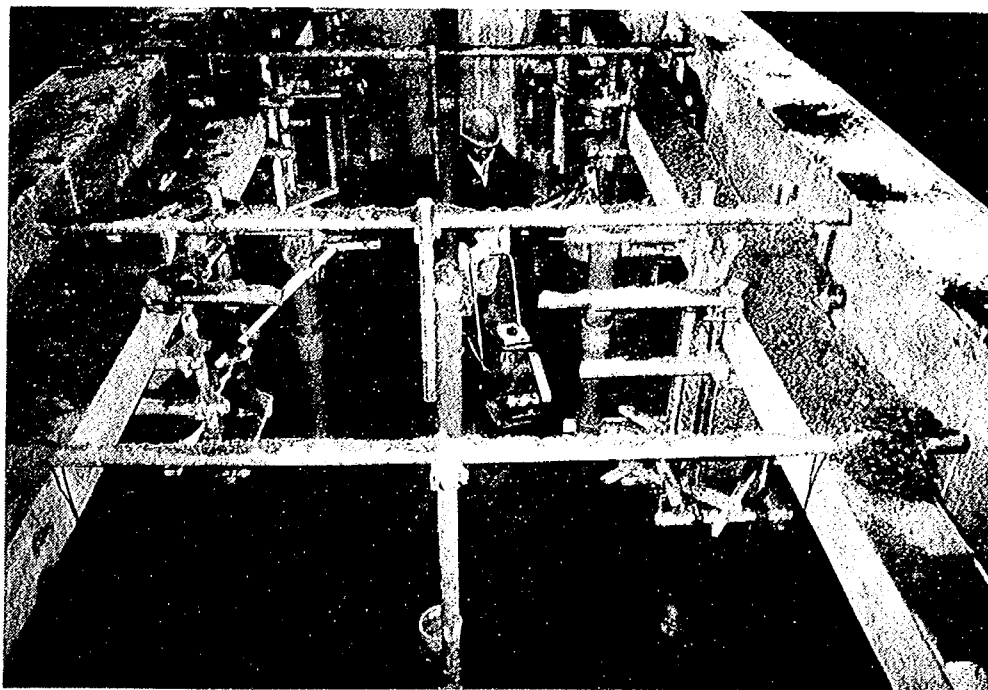


写真-4.5.8 塩ビ管の設置



写真-4. 5. 9 砂の投入

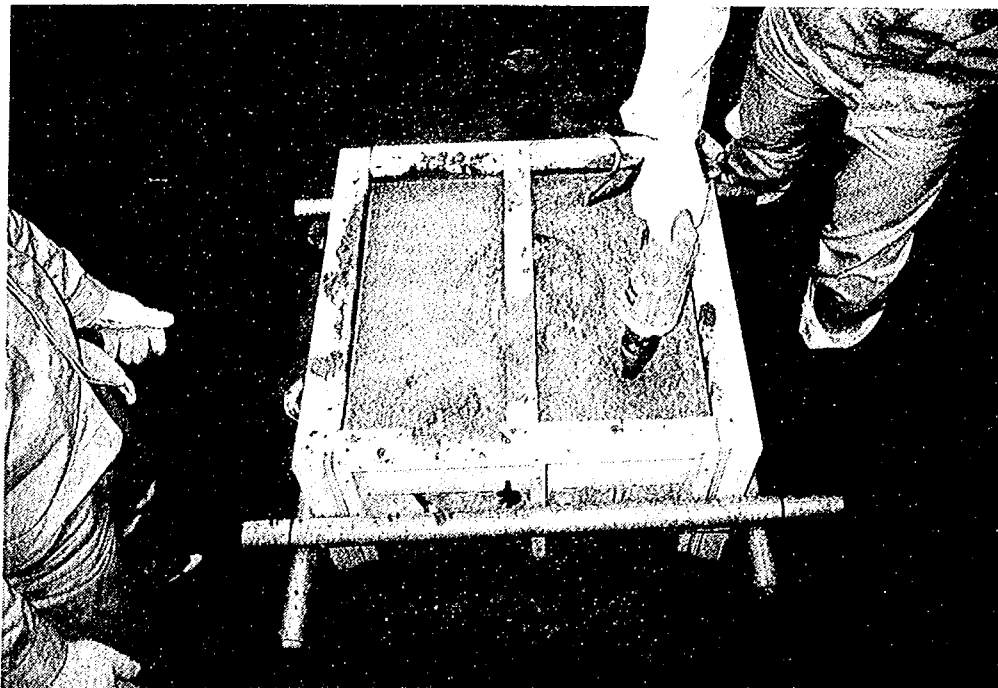


写真-4. 5. 10 拡頭部の造成

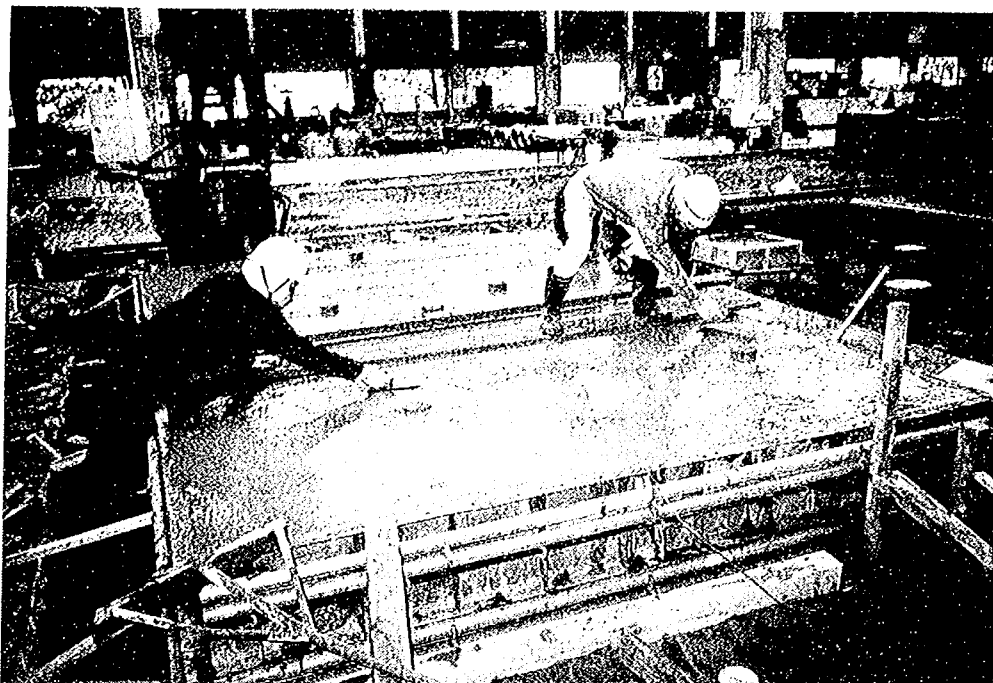


写真-4. 5. 11 フーチングの造成

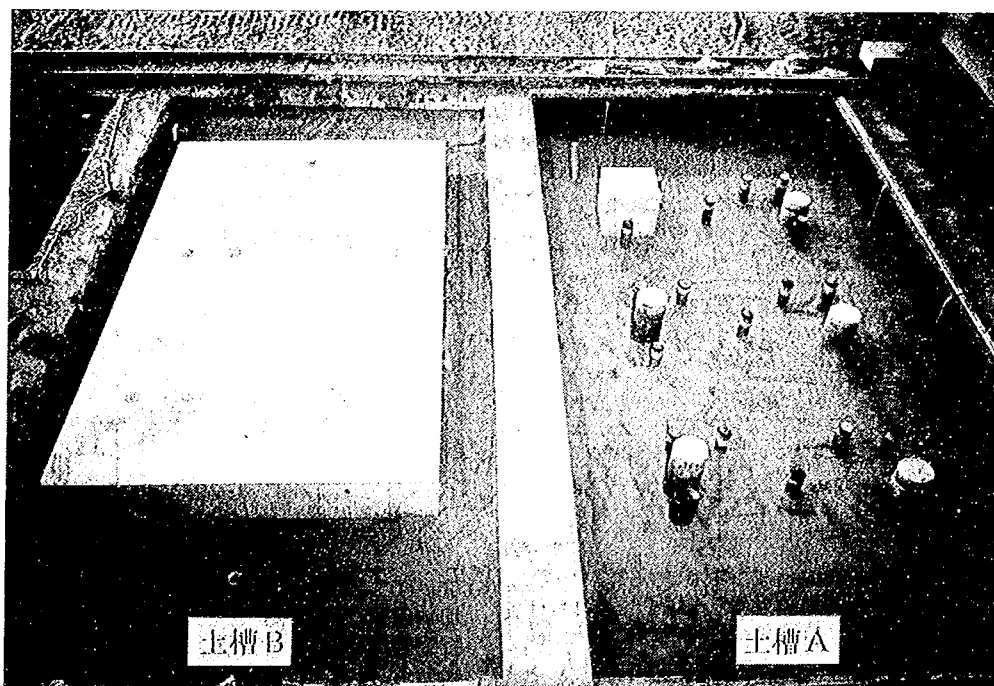


写真-4. 5. 12 試験杭設置完了後の状況

5. 各調査手法の検討結果

5.1 インテグリティ試験

5.1.1 研究概要

非破壊探査の一つであるインテグリティ試験は、簡便で低コストであり、短時間で全数調査が可能な手法である。この手法では、ある程度大きな断面欠損を特定することが可能であると言われているが、定量的に適用範囲が確立されているとは言い難い。このため、インテグリティ試験による杭の損傷調査法の確立を目的に研究を行っている。試験原理や試験方法などについては、付録「インテグリティ試験を用いた杭の損傷調査法マニュアル（案）」を参照されたい。

模型供試体による室内試験は、予め損傷の位置と程度が明らかな試験杭に対して、異なる測定装置、複数の測定者によるブラインドテストを行い、インテグリティ試験の推定精度、測定結果に与えるフーチングの影響、打撃方法の違いによる影響などを把握することを目的としている。

5.1.2 検討結果

(1) 試験内容

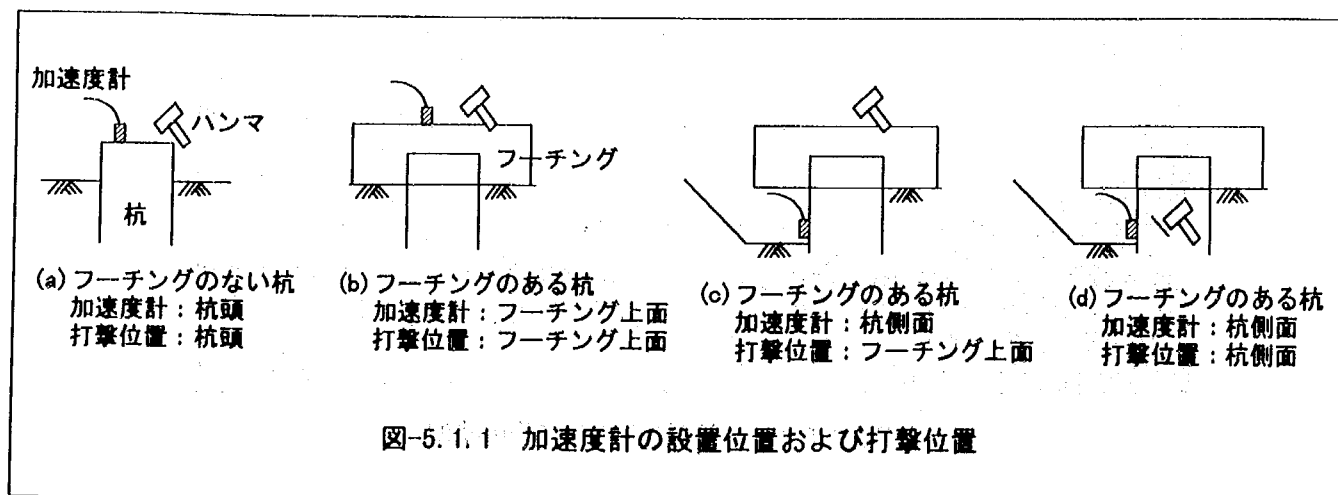
試験杭の種類など供試体の概要は、4. 模型供試体の概要に示す通りである。

試験は、現在広く用いられている3種類の測定装置により行った。これらの装置の概要は、表-5.1.1 に示しているが、基本的な測定原理に違

表-5.1.1 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: シルコチタン酸鉛セラミック圧電素子型 (特殊粘土で設置)
PIT	装置構成: 専用機 16bitA/D、350回計測可能 加速度計: 水晶圧電型(グリスで設置)

いはなく、加速度計の設置方法、サンプリングタイムなどが異なっている。加速度計の設置位置および打撃位置は、図-5.1.1 に示した4種類とした。加速度計と打撃位置の関係は図-5.1.2 に示す通りである。また、打撃用のハンマとしてプラスチック、スチール



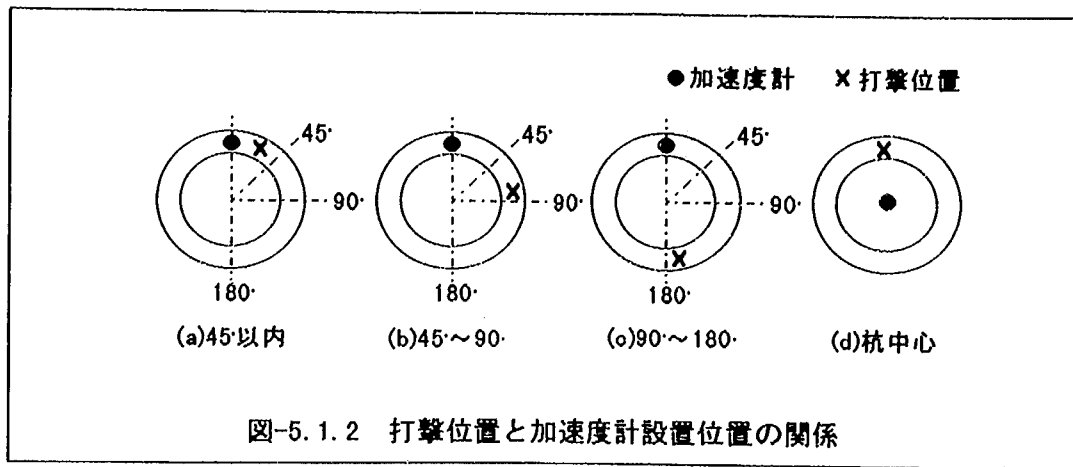


表-5.1.2 試験条件一覧

試験条件 測定装置および測定者		フーチング無し							フーチング有り						
		SIT			IT-System			PIT	SIT			IT-System			PIT
		S-1	S-2	S-3	I-1	I-2	I-3	P-1	S-1	S-2	S-3	I-1	I-2	I-3	P-1
ハンマ	プラスチック			○	○	○	○	○			○	○	○	○	○
	小型スチール	○	○						○		○				
	中型スチール								○	○					
	カケヤ								○						
打撃位置	杭頭	○	○	○	○	○	○	○							
	杭側面													○	
	フーチング上面								○	○	○	○	○	○	○
センサ設置位置	杭頭	○	○	○	○	○	○	○							
	杭側面													○	
	フーチング上面								○	○	○	○	○	○	○
打撃位置とセンサ設置位置の関係	45°以内	○			○		○	○							○
	45°～90°	○	○	○											
	90°～180°					○	○			○			○	○	
	杭中心								○		○				

など材質・重量の異なる数種類のものを用意した。さらに、同じ測定装置でも複数の測定者によって試験を実施した。表-5.1.2 は、上記の試験条件を整理し、試験ケースを示したものである。

また、写真-5.1.1～5.1.3 に試験状況を示す。

(2) 検討結果

a) 波動の伝播速度の算出

試験に当たっては、まずA1杭（フーチングなし、クラックなし）に対する測定を行い、杭長は既知として(5.1)式により伝播速度を算出した。

$$C = 2L / T \quad (5.1)$$

ここで、C：波動の伝播速度、L：杭長(4.0m)、T：インテグリティ試験で測定された波動が杭を1往復する時間である。(5.1)式で求められた伝播速度は、4,400～4,500m/sec 程度であった。また、その他の杭に対してはA1杭で求めた伝播速度を用いて、杭長、クラックの位置を推定した。



写真-5.1.1 フーチングのない杭での試験状況

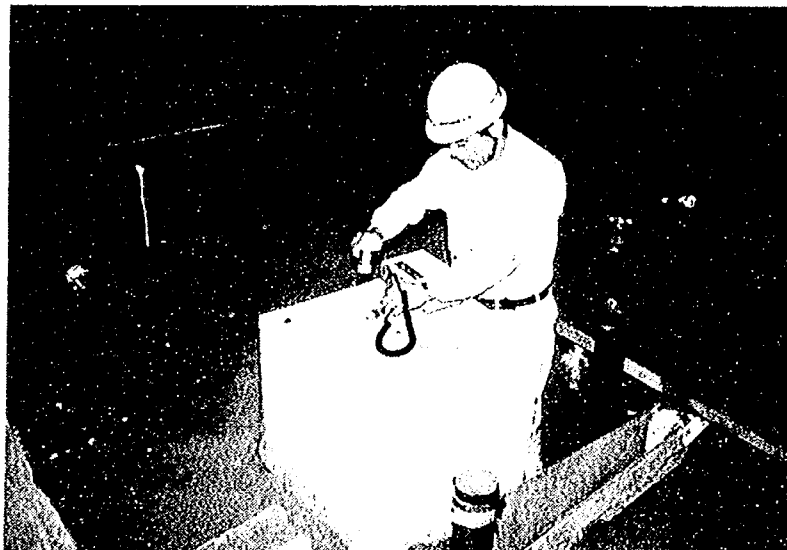


写真-5.1.2 拡頭杭（A2杭）での試験状況



写真-5.1.3 フーチングと結合された杭での試験状況

b) 装置別の波形比較

図-5.1.3 は、A 1 杭（フーチングなし、クラックなし）に対する3種類の異なる装置で得られた測定波形を比較したものである。この図では、3波形とも入力値を-1に、その発生時間を0secに揃えている。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。いずれの装置でも、ほぼ同時刻（0.0017sec 付近）に杭先端からの反射波が観察されており、その大きさも同じであった。また、杭先端からの反射以外の顕著なピークは見当たらない。

さらに、図-5.1.4 はB 1 杭（フーチングあり、クラックなし）に対して図-5.1.1(b)に示した方法で測定した波形を示している。この場合もA 1 杭と同様の結果となっており、3波形とも0.0025sec 付近に反射波を確認でき、その大きさもほぼ等しい。これらのことから、3つの装置の測定性能は同等であると判断できる。

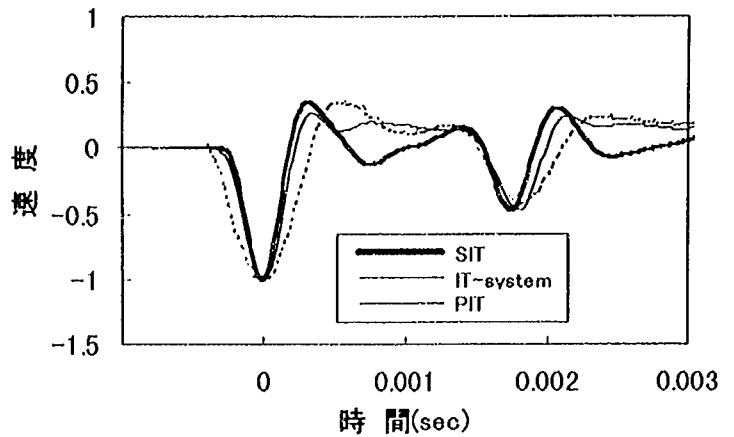


図-5.1.3 測定波形の比較（A 1 杭）

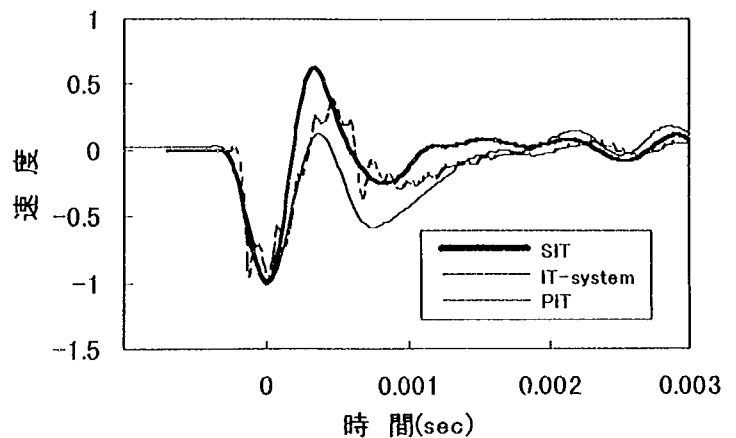


図-5.1.4 測定波形の比較（B 1 杭）

c) フーチングのない杭での測定波形

表-5.1.3 は、フーチングのない杭での試験結果を整理したものである。また、測定波形の例を図-5.1.5～図-5.1.10に示す。以下に各杭の杭長、クラックの推定状況を述べる。

① A 1 杭（通常）

いずれの測定装置においても、杭先端からの反射を確認することができ、測定装置による波形の違いは少なかった。

② A 2 杭（先端拡大）

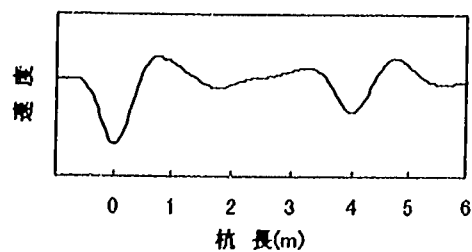
いずれの測定装置においても、拡底位置お

表-5.1.3 フーチングのない杭での測定結果

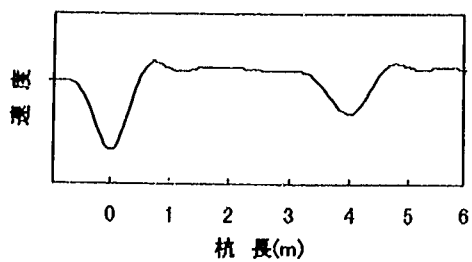
試験杭		測定装置および測定者	SIT (S-1)	IT-System (I-3)	PIT (P-1)
杭長(m)	A1		4.0	4.0	4.0
	A2		4.1	4.7	4.5
	A3		×	×	×
	A4		4.0	4.1	4.2
	A5		×	×	×
	A6		×	×	×
クラック位置(m)	A1		なし	なし	なし
	A2*		3.4	3.4	3.3
	A3*		0.8	1.4	1.7
	A4		1.8	1.8	2.0
	A5		1.2	1.3	1.4
	A6		1.0	×	×

* : A2およびA3杭は断面変化位置

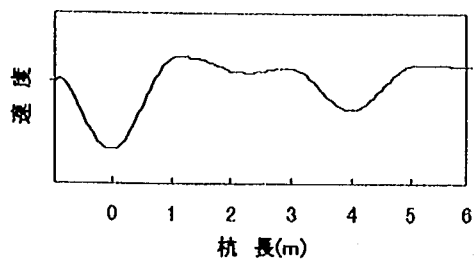
× : 推定不能



SIT

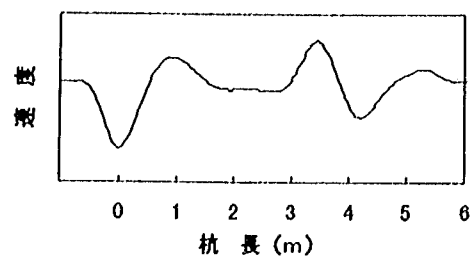


IT-System

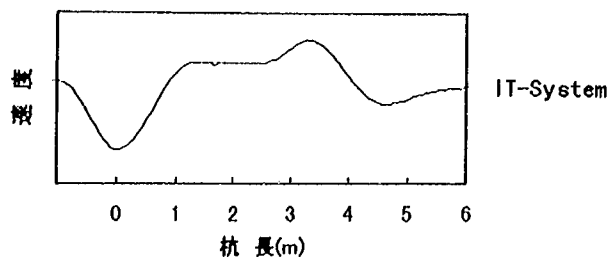


PIT

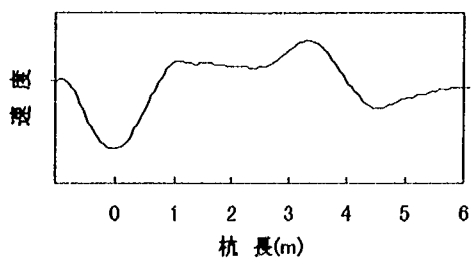
図-5.1.5 A 1 杭に対する測定波形



SIT

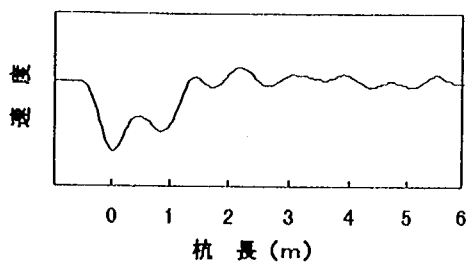


IT-System

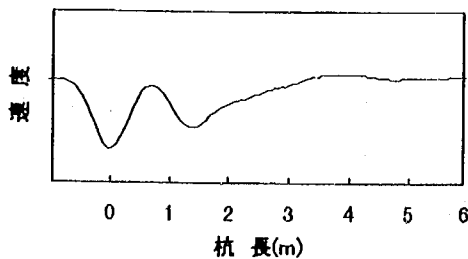


PIT

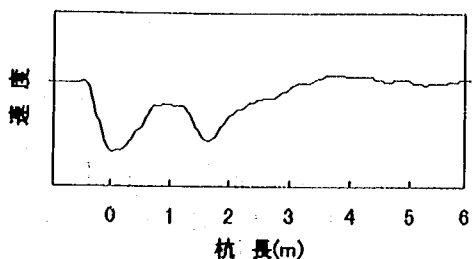
図-5.1.6 A 2 杭に対する測定波形



SIT

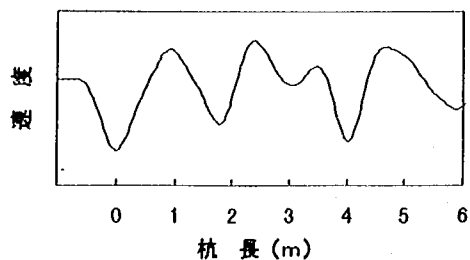


IT-System

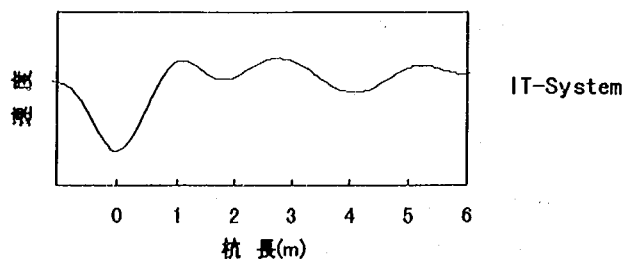


PIT

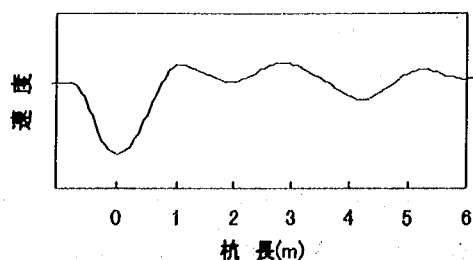
図-5.1.7 A 3 杭に対する測定波形



SIT



IT-System



PIT

図-5.1.8 A 4 杭に対する測定波形

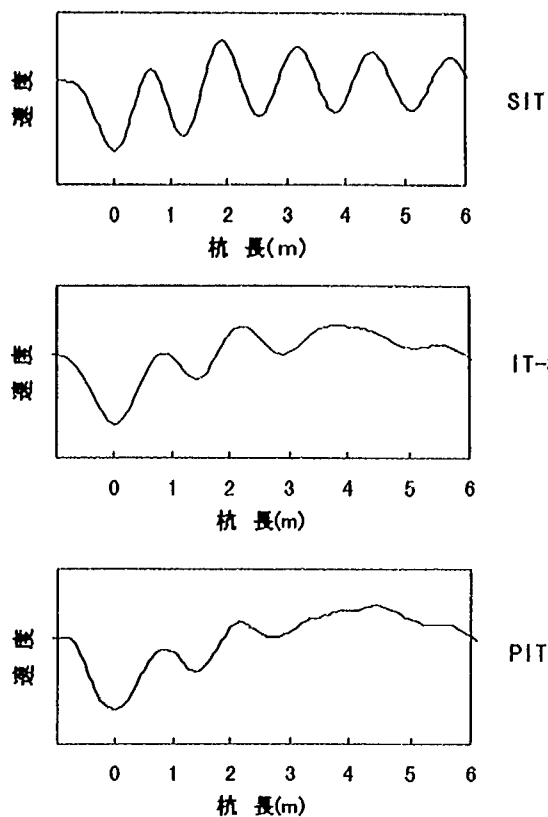


図-5.1.9 A5杭に対する測定波形

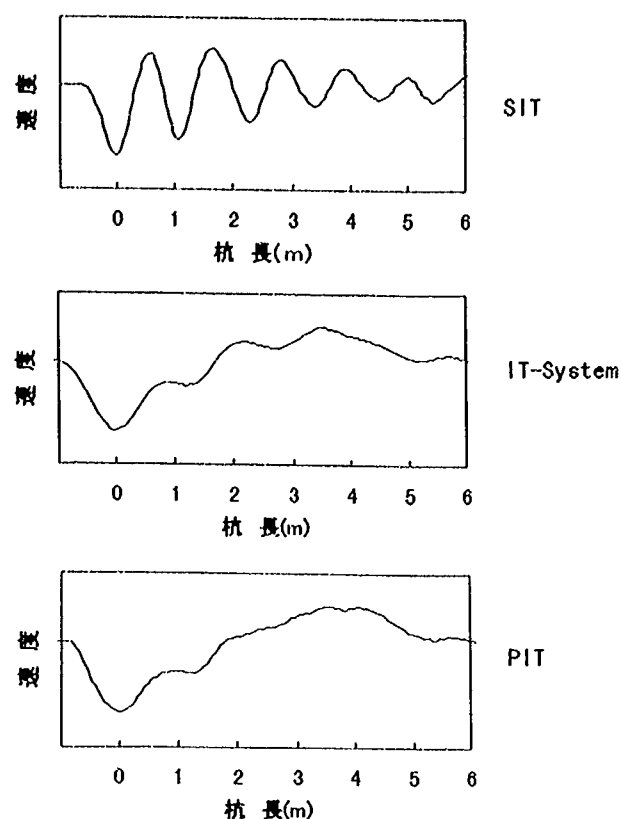


図-5.1.10 A6杭に対する測定波形

よび先端からの反射を確認することができ、杭長の推定精度も高かった。また、A1杭の場合と同様に測定装置による波形の違いは少なかった。

③ A3杭 (杭頭部拡大)

杭頭部の拡大部分の長さは、長めに推定されていた。また、先端反射を特定することが難しくなっていた。これらは、どの測定装置においても同様の傾向であった。

④ A4杭 (クラックあり)

先端反射および杭頭から2m付近のクラックからの反射が捉えられていた。これは、クラックの幅が0.6mmと小さく、しかも全断面には生じていなかったためである。また、杭長の推定精度も高かった。

⑤ A5杭、A6杭 (クラックあり)

A5杭は杭頭から1.4m付近に全周にわたって約6mm幅のクラックが生じているため、波動がこれより先には到達せず、ここまでの繰り返し波形が観察されるだけで、先端反射を特定することができなかった。また、A6杭も杭頭から1.2m付近に全周にわたって約4mm幅のクラックが生じているため、A5杭と同様に先端反射および杭頭から3.0m付近のクラックは判定できなかった。

d) フーチングと結合された杭での測定波形

表-5.1.4 は、フーチングと結合された杭での試験結果を整理したものである。また、SIT の測定波形を図-5.1.11 に示す。

① B 1 杭 (通常)

測定装置によって、波形の形状が異なっていた。SIT および IT-System では先端反射が捉えられていたが、杭長は長めに推定されていた。また、フーチング下面からの反射波が認められたが、その位置は杭長と同様に長めに推定されていた。

② B 2 杭 (先端拡大)

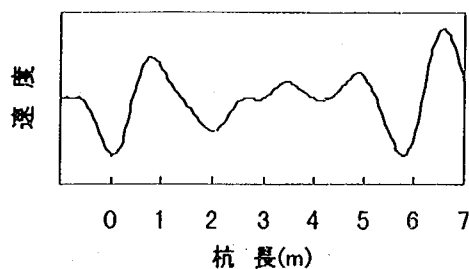
B 1 杭の場合と同様に測定装置により波形が異なっていた。SIT および IT-System では、フーチング下面、拡底位置および先端からの反射を確認することができた。また、各々の位置は長めに推定されていた。

表-5.1.4 フーチングと結合された杭での測定結果

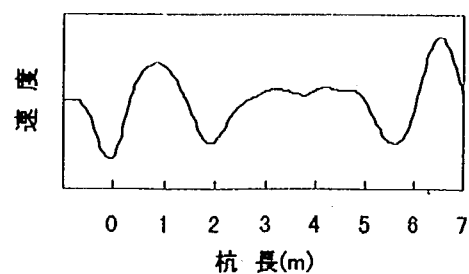
試験杭	測定装置および測定者	SIT (S-1)	IT-System (I-3)
杭長(m)	B1	5.8	5.5
	B2	5.7	5.5
	B3	5.7	5.5
	B4	5.6	5.5
	B5	5.6	5.4
	B6	5.3	×
フーチング厚(m)	B1	2.0	1.8
	B2	1.9	1.7
	B3	1.9	1.8
	B4	1.9	1.8
	B5	1.7	1.7
	B6	1.7	1.6
クラック位置(m)	B1	なし	なし
	B2*	4.9	4.7
	B3	×	×
	B4	×	×
	B5	×	×
	B6	3.0	×

*: B2杭は断面変化位置

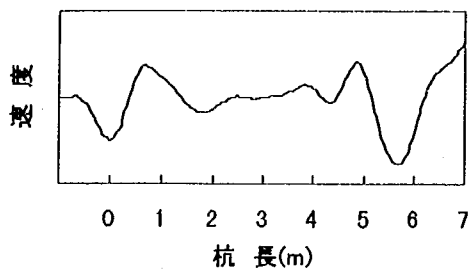
×: 推定不能



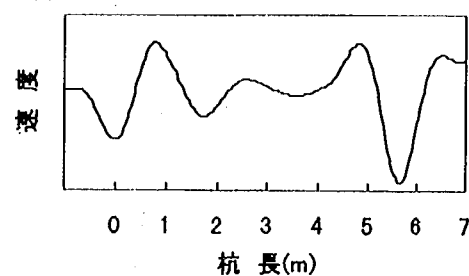
B 1 杭



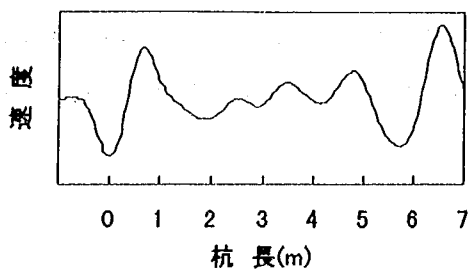
B 4 杭



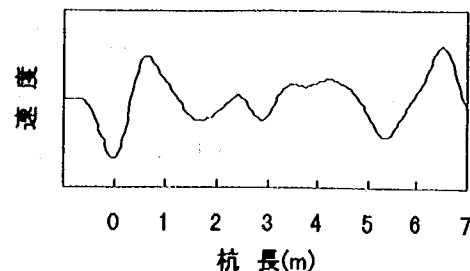
B 2 杭



B 5 杭



B 3 杭



B 6 杭

図-5.1.11 フーチングと結合した杭での測定波形 (SIT)

③ B3杭～B6杭（クラックあり）

先端反射およびフーチング下面からの反射が捉えられていたが、これらの位置は長めに推定されていた。また、フーチングの影響によりクラックを特定することは困難であった。

以上のように、フーチングを有するすべての杭に対して、杭長を長めに推定する結果となった。しかしながら、図-5.1.11 に示す波形を見ると、フーチング下面からの反射の位置（1.9m 前後）と杭先端からの反射の位置（5.6m 前後）を差し引くと 3.7m となり、実際のフーチング下面から杭先端までの距離に一致している。したがって、フーチングの厚さを過大に推定していることがわかる。この理由は、測定波形上で観察されているフーチング下面からの反射波は、1回目の反射波ではなく、フーチング内部を3～4回程度往復した後の反射波であるためだと考えられる。

e) ハンマの違いによる波形比較

表-5.1.5 は、今回の室内試験で使用したハンマの種類を示している。また、この表にはハンマの材質の違いによる入力波の特性として半周期（以後、入力波長 L と称す、図-5.1.12 参照）を併記している。ハンマの材質毎に重量が大きいほど、入力波長 L も大きくなっている。

表-5.1.5 ハンマの種類

No	材質	重量 (g)	L ($\times 10^{-4}$ sec)
1	プラスチック(小)	700	6.79
2	プラスチック(中)	1200	9.5
3	プラスチック(大)	1500	12
4	スチール(小)	70	1.72
5	スチール(大)	450	2.65
6	木(小)	250	3.97
7	木(大)	950	6.88

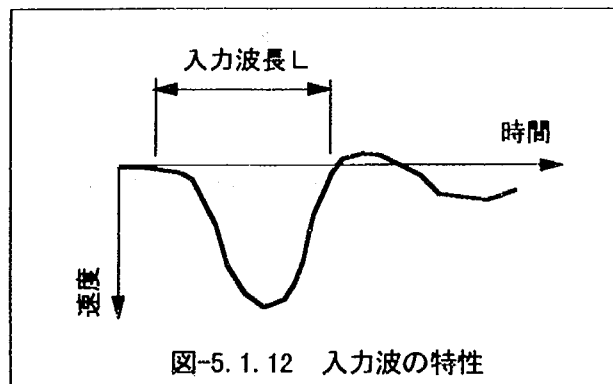


図-5.1.13 は、各ハンマによるA1杭（通常、クラックなし）に対する試験結果を示している。この図から、いずれのハンマによる入力波もノイズや波形の乱れは見られない。但し、入力波長 L の小さいスチールハンマでは、他のハンマと比較してハンマ内での反射が大きくなっている（図-5.1.13 内の矢印部）。また、スチール（小）では入力波以降に大きなノイズが見られる。さらに、すべてのハンマで0.00178～0.00193secの範囲に明瞭な反射波を確認できる。この値から波動の伝播速度を4,500m/secとして杭長を計算すると、プラスチック（中）および（大）が4.3m、それ以外が4.0mとなり、入力波長 L の大きなハンマでは杭長を長めに評価している。また、反射波の大きさは入力波長 L が小さいハンマほど小さくなっている。これは、高周波の波ほど減衰が大きいことに一致している。

一方、図-5.1.14 は杭頭から2.0mの位置に幅0.6mmのクラックを有するA4杭に対する試験結果を示している。波動の伝播速度を4,500m/secとすると、クラックからの反射波が発生する時間 T は 8.9×10^{-4} secとなる。プラスチックハンマでは、入力波長 L が大きいために波形全体が緩やかになり、クラックからの反射波と

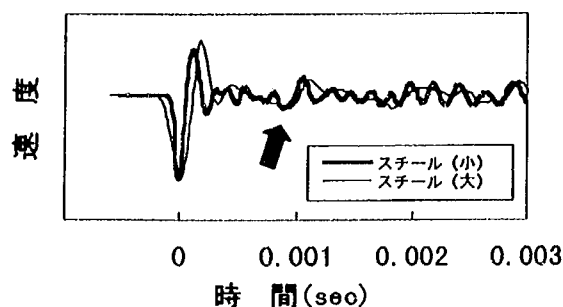
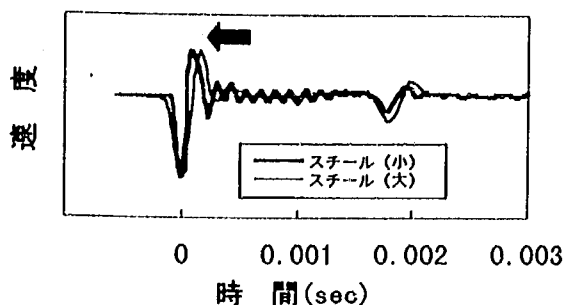
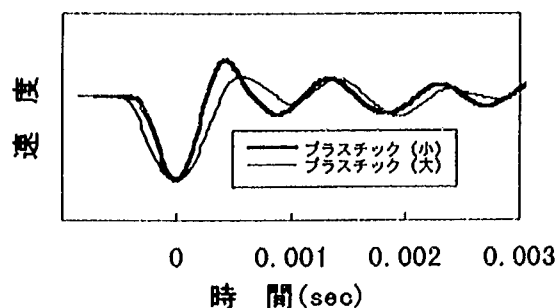
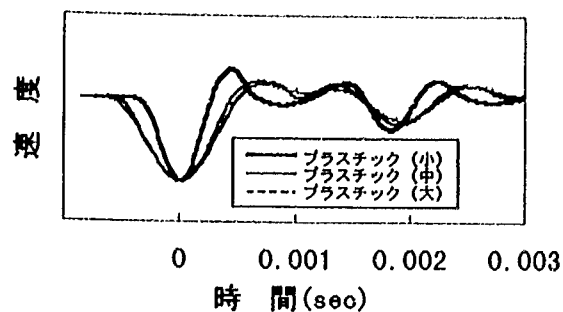


図-5.1.14 A 4 杭に対する測定波形 (SIT)

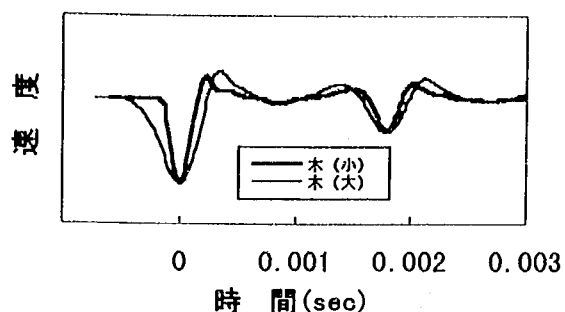


図-5.1.13 A 1 杭に対する測定波形 (SIT)

思われるピークも見られるが、顕著なピークとしては捉えられていない。しかしながら、スチールハンマではクラックからの反射波を明確に判定でき、その位置も正確に示している (図-5.1.14 内の矢印部)。但し、杭先端からの反射波は、クラックのない A 1 杭に比べて小さくなっており、その位置を判定することが困難になっている。

以上の結果から、入力波長 L の小さなハンマ (スチール) では、杭頭付近のクラック検出が可能であるが、減衰が大きいためには杭長測定には不向きであること、また入力波長 L の大きなハンマ (プラスチック) ではこれとは逆に、杭長測定に有効ではあるが細かなクラック検出は難しいことがわかった。したがって、インテグリティ試験に際しては、その目的に応じてハンマを使い分ける必要がある。

5.1.3 適用条件

一般に、インティグリティ試験は以下の長所を有している。

- ① 場所打ち杭や既製コンクリート杭などに適用できる。
- ② 掘削調査、コアボーリング、載荷試験に比較して迅速で廉価である。
- ③ 試験は1名で可能なほど簡便である。
- ④ 1日数十本の試験も可能で、全数検査を行うことができる。
- ⑤ リアルタイムで結果を知ることができる。
- ⑥ 現場で特別に機材等を用意する必要がない。
- ⑦ 他の現場作業を阻害することがない。

このように、インティグリティ試験は経済的で迅速な試験と言える。また、表-5.1.6 は一般的なインティグリティ試験の適用条件を整理したものである。但し、フーチングを有する場合には別途検討が必要となる。

表-5.1.6 インティグリティ試験の適用条件

試験条件	適用条件
気象条件	・ 降雨、降雪時には杭頭が濡れないような処置が必要。また、著しく杭頭が濡れている状態は試験に適さない。
測定装置	・ SIT、IT-System、PITの測定性能に差はない。 ・ センサとして加速度計を使用する。 ・ 通常は小型ハンマで軽打する。
杭条件	・ 杭種…場所打ち杭、既製杭など ・ 杭長…50m 程度まで適用可能。 ・ 杭径…1,500mm 程度まで適用可能。 ・ 材令…場所打ち杭では1週以上とする。 ・ 杭頭…杭頭処理後に試験を行う。また、コンクリートの浮きがないこと。
地盤条件	・ 中間層がある場合、または先端地盤が岩の場合は、杭先端からの反射波が明確でないことがある。

5.1.4 まとめと今後の課題

今回の RC 杭を用いた室内試験の結果などから、以下のことが明らかとなった。

- ① 3 種類のインテグリティ試験装置による測定波形の差はほとんどなかったが、杭長、杭径、材質の異なる実杭についても調査すべきである。
- ② 杭頭部が拡大した杭やフーチングのある杭では、波形が複雑になり杭長やクラックの判定が困難である。
- ③ クラックが杭の全周に渡っている場合には、波形の解釈にばらつきが生じる場合がある。
- ④ ハンマの材質や大きさなどによって入力波形などが変化するので、目的に応じてハンマを使い分ける必要があることが分かった。しかしながら、どのように使い分ければよいかについては、さらに実杭などを用いた検討が必要である。
- ⑤ フーチング有無や地盤条件によって杭体内の波動伝播速度が変化すると考えられるが、その要因などが明らかではない。

以上のような課題を解明していくために、平成 10 年度は以下のような内容について研究・検討を進め、インテグリティ試験による調査法マニュアルを完成させる予定である。

なお、研究の進め方としては、既住の実測データの調査・分析、シミュレーション解析の他に、実大のフーチングを有する杭での実験を予定している。

① IT 基本条件の整理

- ・波動伝播速度の変動要因の把握（杭種、杭径、杭長、地盤条件など）
- ・試験条件による測定波形への影響の把握（打撃方法・位置、センサ位置など）

② フーチングがある場合の適用性の検討

- ・試験目的と使用ハンマの関係（シミュレーション解析と実測の比較など）
- ・調査方法と測定精度の関係（フーチングの上下での測定差、複数センサの有効性など）
- ・実大フーチングを有する杭での適用性

5.2 レーダ法

5.2.1 研究概要

(1) レーダ法の概要

レーダ (RADAR) とは、Radio Detection And Ranging からつくられた造語であり、語源が示すとおり、電波を発射し遠方にある物体を探知する技術である。

レーダ装置は、原理的に送・受信アンテナ、送信機、受信機および指示機から構成され、航空管制や気象観測などに広く用いられている (図-5.2.1)。

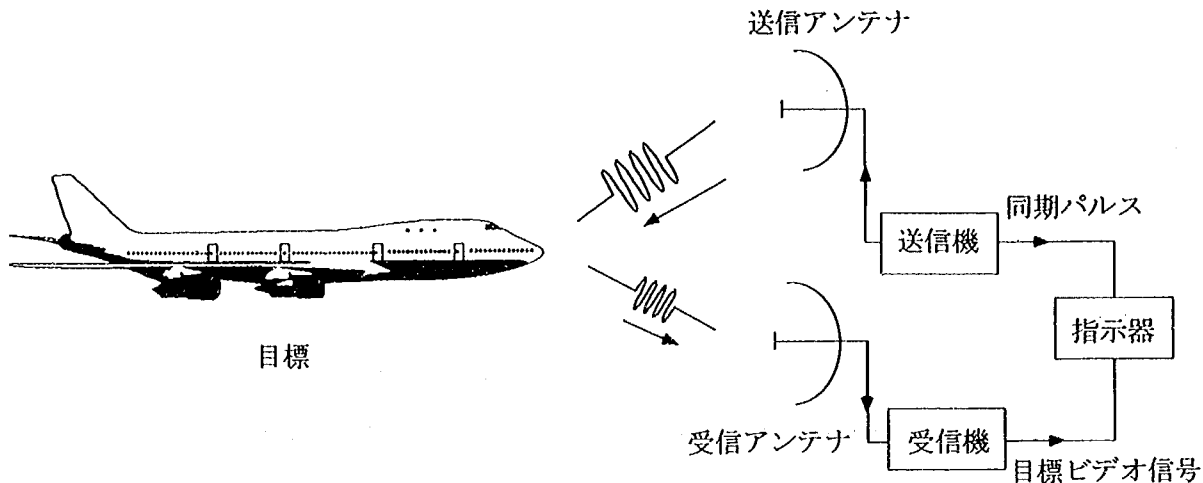


図-5.2.1 一般的なレーダシステム

レーダ法は、地中の物理探査技術としても利用されており、遺跡や地下埋設物の調査に適用されてきた。レーダ技術を地下内部の探査に用いる場合、地質によっては電磁波の減衰が著しいなどの適用上の問題点も少なくなく、今後解決すべき課題は多い。しかし、以下に示すようなレーダ法の利点もある。

- ① センサを対象に密着させることなく、対象物内部の構造や変状を把握できる
- ② レーダ計測結果を擬似断面として表示・判断できる

本共同研究では、上記のレーダ技術の利点を活かした橋梁基礎の構造調査手法を検討している。レーダ法は、他の調査手法と比較して高コストであるが、他の非破壊調査では得られない情報を得られる点で有効であり、また、橋梁基礎構造調査以外への適用範囲も広いものと考えられる。

(2) レーダ法の特徴

① レーダ法の長所

- ・非接触計測が可能

電磁波は衝撃振動波等他の波動と比較し、トランスデューサから出た波動が地中に透過し易い特性を有するため、非接触計測が容易である(但しギャップが広いほど探査性能は劣化する)。このため、面的に広範囲な探査も比較的短時間で行うことができる。

- ・比較的分解能が高い

土の中を透過する媒体としては波長が短く比較的分解能が高いため、地中の杭配置の調査ができる。

とくに、連続波を用いている場合は、パルスレーダ方式に比較して電磁波のエネルギーを大きくできるため、高S/N化し易く、周波数を広帯域に掃引しているため高分解能化し易いという特長を有する。

② レーダ法の短所

- ・地中での減衰が大きい

一般に土の電気伝導性は大きいいため、地中での電磁波の減衰は大きく、深深度の探査に向かない。また、地下水位が高い場合や地下水に塩分が含まれる場合には、さらに探査深度が制限される。

(3) レーダ法の種類

① 周波数特性

レーダ法は、電磁波の送・受信によって対象物の情報を得る技術であるが、用いる電磁波の周波数には、100～1500MHz 程度の幅がある(図-5.2.2)。レーダ技術の適用性は、用いる電磁波の周波数が低いほど、広い範囲が調査可能であるが、調査精度が落ちる関係にある。このため、比較的狭い範囲を調査する場合には高い周波数を使い、広い範囲まで調査する場合には低い周波数の電磁波を用いる。

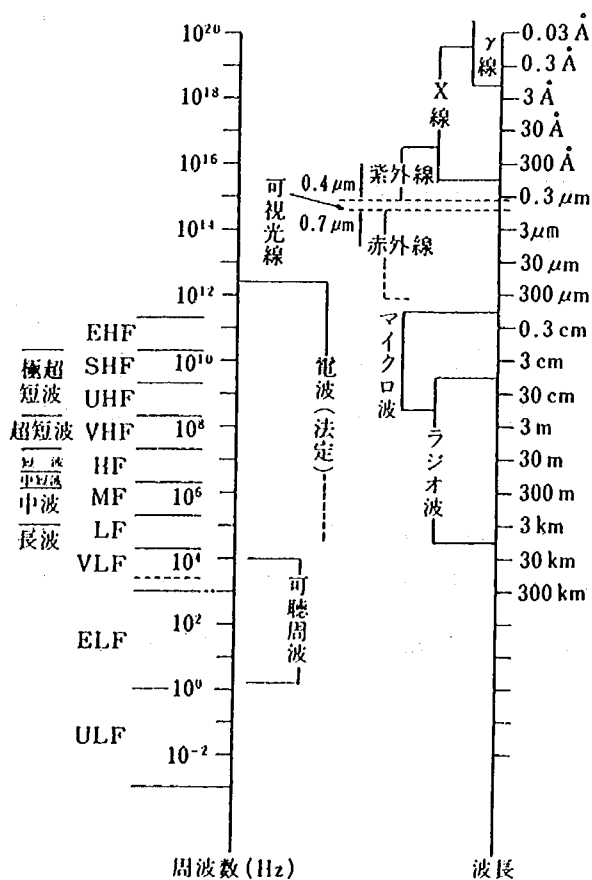


図-5.2.2 電磁波の周波数

② 反射法と透過法

地中の物理探査にレーダ法を用いる場合、送・受信アンテナの配置によって反射法と透過法に分けられる(図-5.2.3)。ボアホールレーダでは、反射法をシングルホール法、透過法をクロスホール法とも称する。

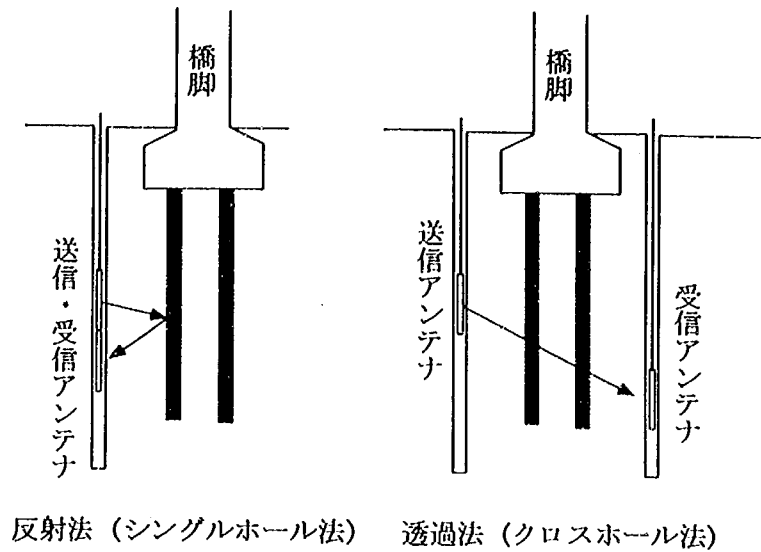


図-5.2.3 反射法と透過法

反射法は、レーダ装置の送信アンテナによって送信された電磁波が電気的特性の異なる物質の境界で反射する性質を利用したものであり、その反射波の影像を解析することによって調査を行う。

一方、透過法は、地中内部の構造によって電磁波の伝播速度と減衰特性が異なることを利用する方法である。透過法は、送・受信アンテナ間に挟まれる物質の平均的な伝播速度と減衰率を多点で計測し、このデータをトモグラフィ技術で解析することにより地下構造を把握するものであり、反射法と比較してより広範囲のデータ取得が可能になる。

③ パルス波法と連続波 (FM-CW) 法

パルス波法は、パルス状の電磁波を送信アンテナから放射し、対象物から反射あるいは透過してくる電磁波を受信アンテナにより連続的に検出し、放射からの時間差と電磁波強度を映像化する手法である。パルス波法は、測定原理が簡易で解析が容易である利点がある。しかし、実際には鋭く強いパルス波状の電磁波を放出することは困難であり、このため、計測精度があがらないという問題点もある。

連続波 (FM-CW) 法は、変調を施した連続波の送信信号を用いる方法である。連続波 (FM-CW) 法では、一瞬々々における送信周波数と受信周波数を比較することによって反射物の位置を把握し、これを映像化する。このため、パルス波法における深さ方向の軸が時間差なのに対し、連続波法では周波数になっている。連続波法は測定原理が複雑であるが、強い電磁波を放出することができるため、より深い位置の構造をより正確に把握することが可能である。

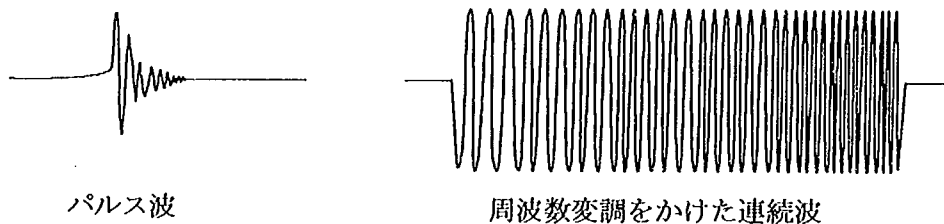
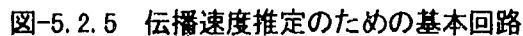


図-5.2.4 パルス波形と変調を施した連続波形

① パルス波反射式ボアホールレーダ

PRF :	1MHz	パルス出力 :	20Vp-p
波形 :	モノサイクルパルス	計測速度 :	約 1m/sec (最大)
パルス平均回数 :	32 回 (SN 比改善)	計測レンジ :	30nsec
CRT モニタ :	9 インチカラー CRT モニタ	表示形式 :	白黒 1 6 階調
地表レーダ送信波 :	400、600、800、1000、1500MHz		
ボアホルレーダ送信波 :	600MHz		
また、装置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。



② 連続波ボアホールレーダ

連続波ポアホールレーダ装置の主な仕様を表-5.2.1 に、ブロック図を図-5.2.6 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-5. 2. 1 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	ボウタイアンテナ
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

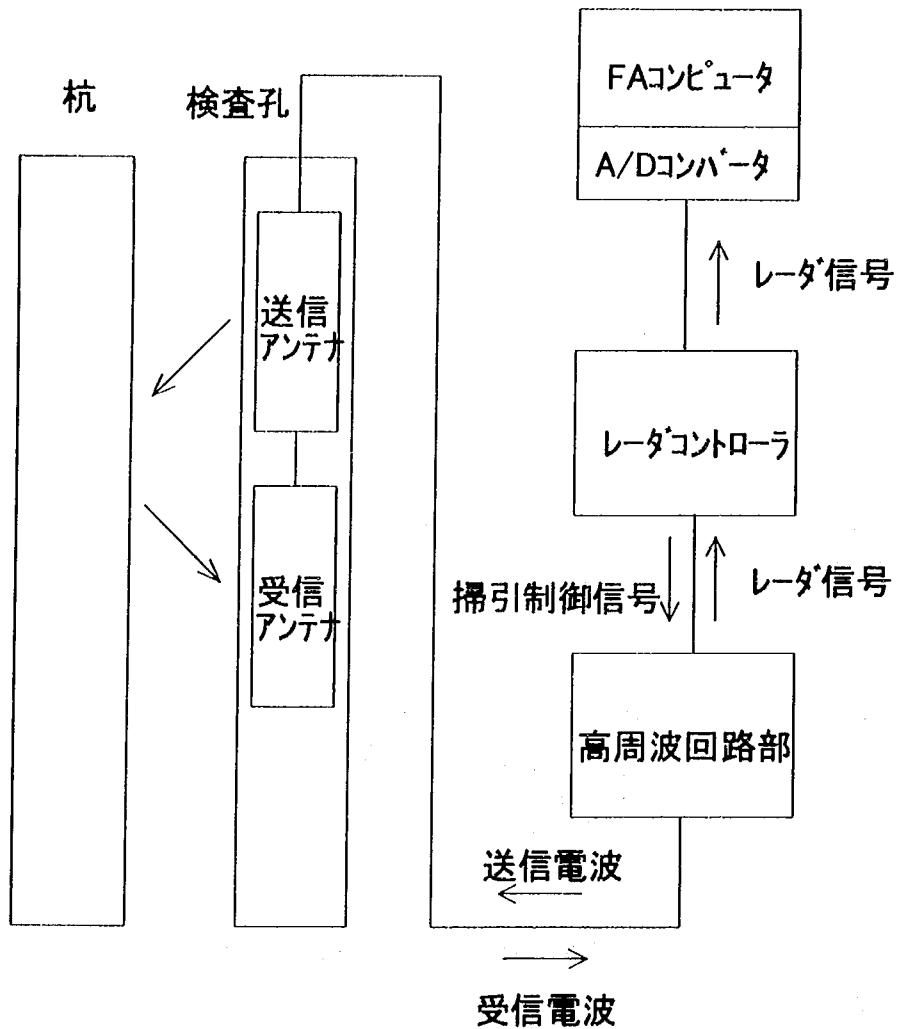


図-5. 2. 6 連続波ポアホールレーダ機器構成

5.2.2 検討結果

(1) 共通供試体における土層伝播速度の計測

共通供試体における土層（砂質土）の電磁波伝播速度を計測するために、クロスホール間でレーダ計測を実施した。乾燥土における距離対遅延時間をプロットした結果を図-5.2.7に示す。この結果、距離に対する遅延時間は約 7nsec/m であり、乾燥土の伝播速度は約 1.4×10^8 m/sec、比誘電率は約 4.6 であることを確認した。また、同様の方法で計測した湿潤状態における伝播速度は約 6.7×10^7 m/sec、比誘電率は約 20 であった。

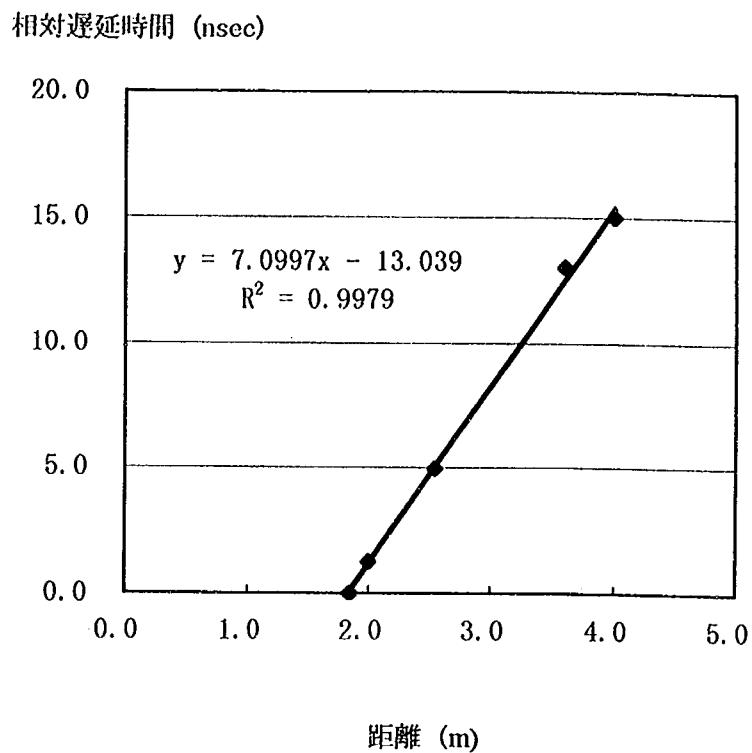


図-5.2.7 乾燥土における距離遅延時間

(2) 地表レーダによるフーチング上からの杭位置計測

① 目的

地表レーダによる橋梁基礎構造（フーチングの厚さ、フーチングの構造、杭の平面的な配置など）の調査の可能性を検討する。

② 試験の対象および方法

モデル供試体は、土木研究所内の土槽 B に作成した RC 杭にフーチングを上載した試験体を使用した。また、レーダアンテナは 100MHz、400MHz、600MHz、800MHz、1000MHz の各周波数のものを使用した。

③ 試験結果

対象コンクリートは無筋構造をしているが、型枠固定のための金具（セパレート）が一定間隔で配置されていることが、レーダ計測から確認された。しかし、実際のフーチングには、無数の鉄筋が配置され、今回よりもフーチングの厚さ、杭の平面的な配置の調査において条件的にはかなり厳しくなることが予想される。

今回の調査では、400MHz のレーダアンテナ（パルスジェネレータ 600MHz）を使用した場合、フーチング上部からの杭位置を確認できた（図-5.2.8）。これより、低い周波数の 100MHz のレーダアンテナでは画像が不鮮明となり、逆に高い周波数では杭位置の電磁波の反射が弱く確認できなかった。

しかし、実際には、杭は複雑に張り巡らされた鉄筋の背後にあり、図面上で予め杭位置が予測できていれば有効な場合もあるが、まったく手がかりがないような場合は杭位置の同定は困難と思われる。

また、フーチングの厚さや杭径については今回の調査によって得られたレーダ画像データから判読することはできなかった。

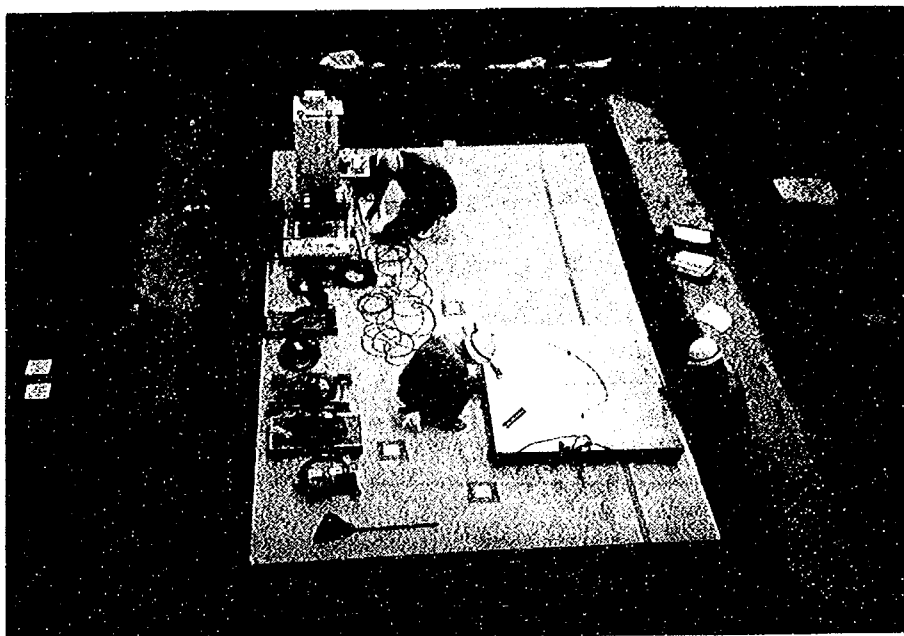


写真-5.2.1 フーチング上の各種地表レーダ

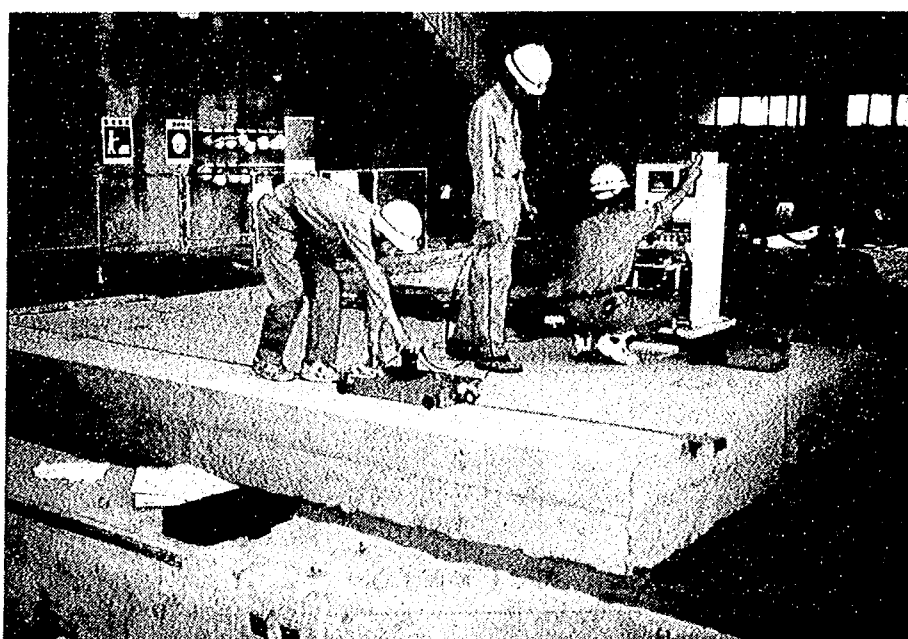
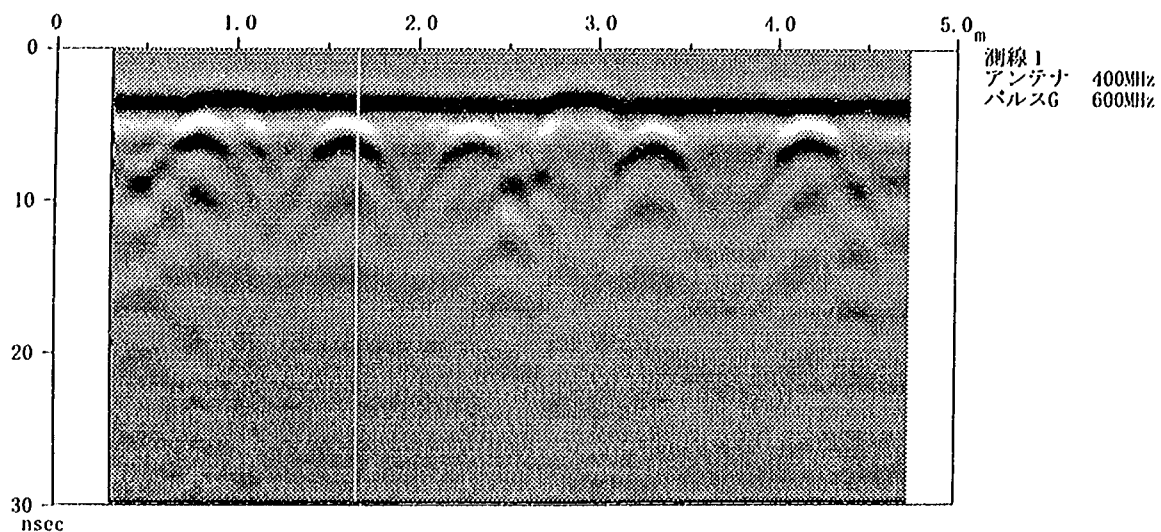
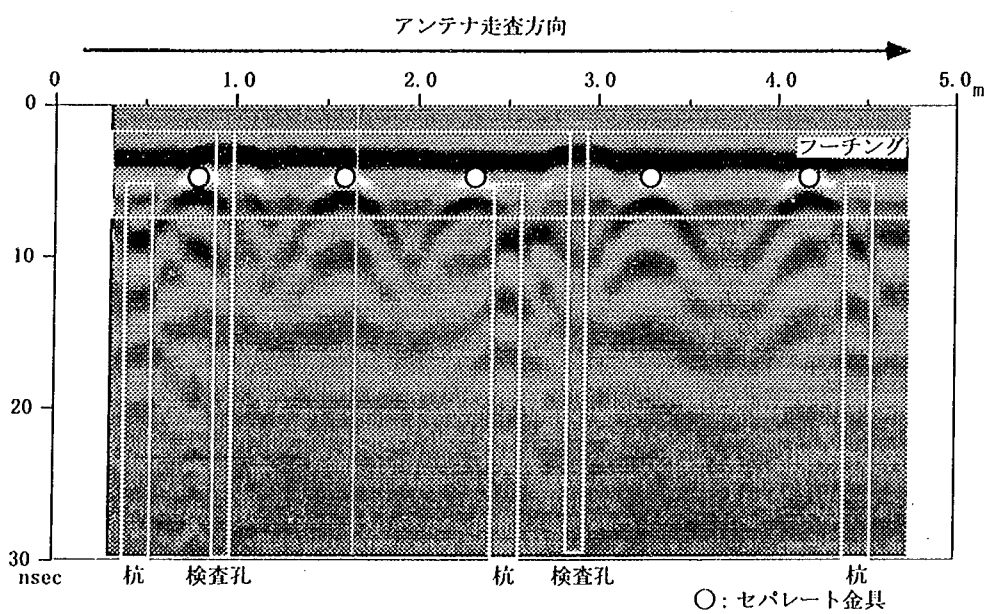


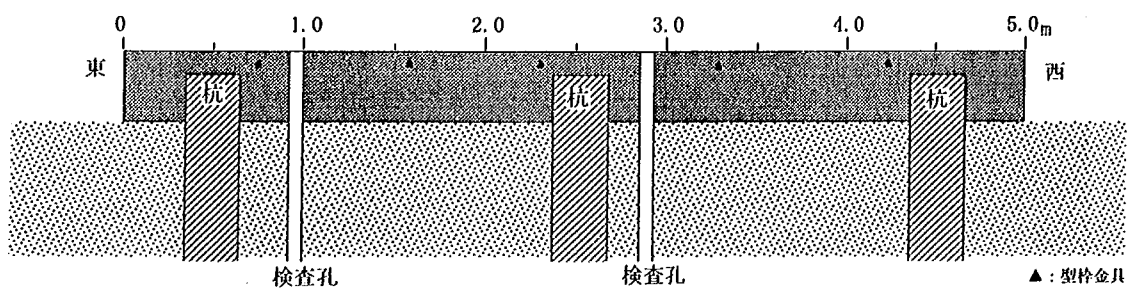
写真-5.2.2 地表レーダのアンテナ走査状況



地上レーダ画像



地上レーダ画像の説明



測線 1 断面予想図

図-5.2.8 地表レーダ調査結果例

(3) パルス波反射式ボアホールレーダによる杭位置計測

実験に使用するアンテナは、600MHz ボアホールレーダアンテナで、形状は径 50mm (ガイド径 98mm)、長さ約 800mm の円筒形をしている。本アンテナは、回転方向と垂直方向の 2 つのスキヤニング機能を有する。

また、実験は、土槽 B (フーチングあり) の杭の形状を変化させたモデル (杭 B1~杭 B3) を対象に実施した。試作したボアホールレーダの性能を検討し、実構造物調査時の問題点や課題を抽出することを目的として、以下のモデル実験を実施する。

1) パルス波回転走査計測

① 目的

回転方向試験は、アンテナを一定深さに停止させ、その場で回転させることによる杭の水平配置調査の可能性を検討することを目的として実施した。

② 計測方法

試験は、杭 B1、杭 B2、杭 B3 の周辺に設置されている検査孔 (塩ビ管) 計 7 本で実施した。

また、深さ方向の試験回数は 8 ポイントとし、アンテナがフーチングから隠れる深さを開始点とし、ここから 50cm ずつ挿入し、検査孔の底面に到達するまでの各ポイントで回転させて反射波形を取得するものとした。

③ 結果

今回の土槽試験 (乾燥条件) においては、杭からの離れが 30~85cm の各調査孔においていずれも明瞭に杭のある方向および距離を確認することが可能であった (図-5.2.9~図-5.2.10)。

2) パルス波垂直走査計測

① 目的

垂直方向試験は、ボアホールレーダを用いて深さ別の反射波形を得ることによる杭形状調査の可能性を検討することを目的として実施した。

② 計測方法

試験は、杭 B1、杭 B2、杭 B3 の周辺に設置されている検査孔 (塩ビ管) 計 7 本で実施した。

まず、ボアホールアンテナを対象とする杭の方向に向けて検査孔に挿入し、垂直に下ろしながら連続的に深さ別の反射波形を取得した。次に、同じ検査孔に対して杭とは反対方向にレーダアンテナを向けて挿入し、同様に反射波形を取得した。これらの 2 つの反射波形データは互いに減算処理を行い、杭に関する情報のみを抽出することを試みた。

③ 結果

回転方向試験と同様に、砂質土 (乾燥条件) において杭からの離れにかかわらず、明瞭に杭の位置を確認することができた (図-5.2.11)。さらに深い調査孔があれば杭の末端についても確認できたものと考えられる。また、拡張杭についてはやや不明瞭ではあったが、拡張底部の範囲を確認することができた (図-5.2.12)。

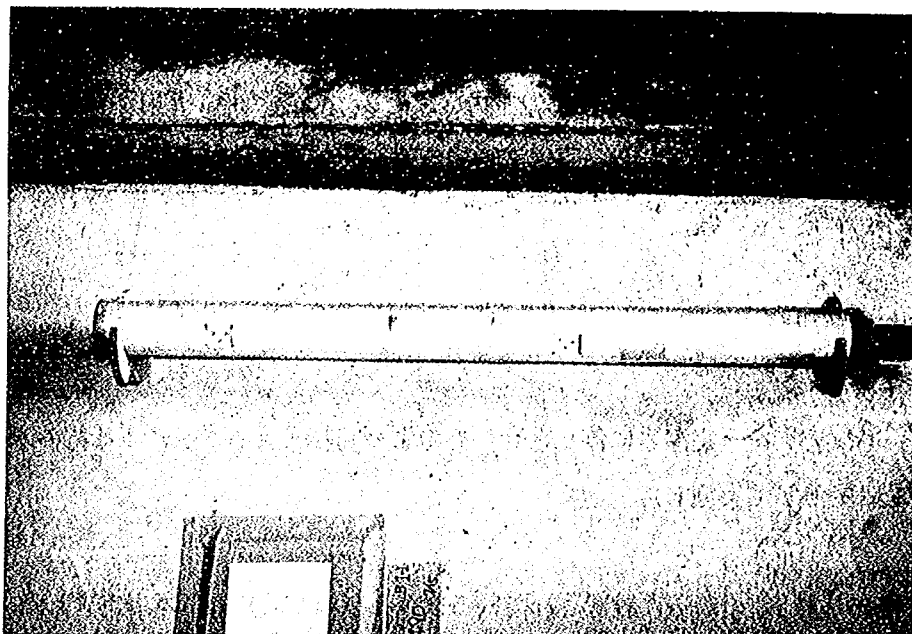


写真-5. 2. 3 使用したボアホールレーダ

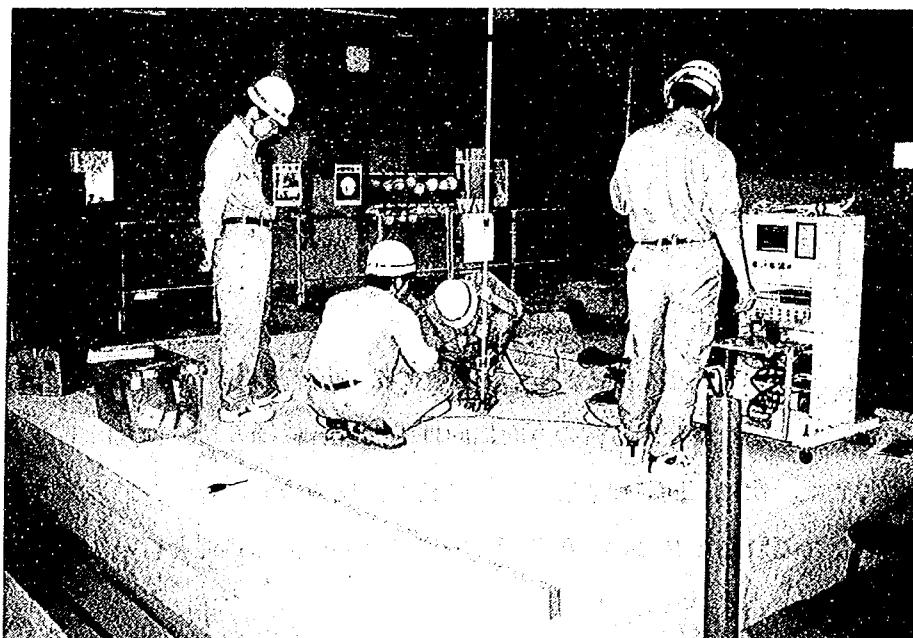
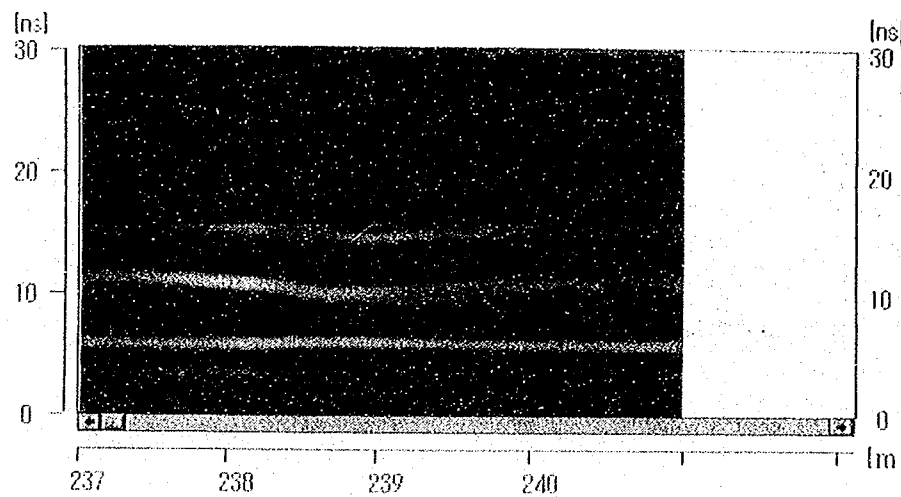
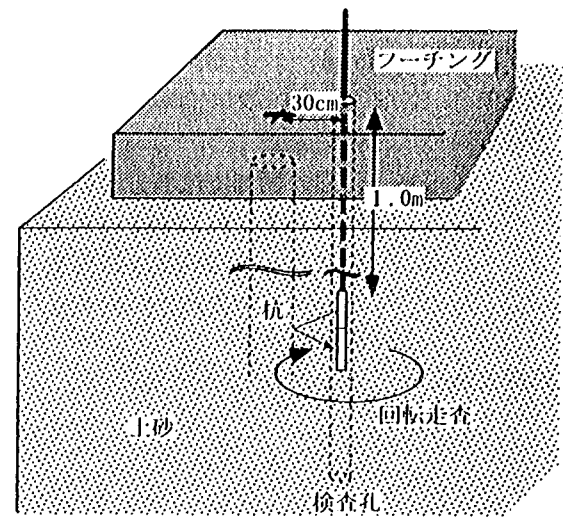


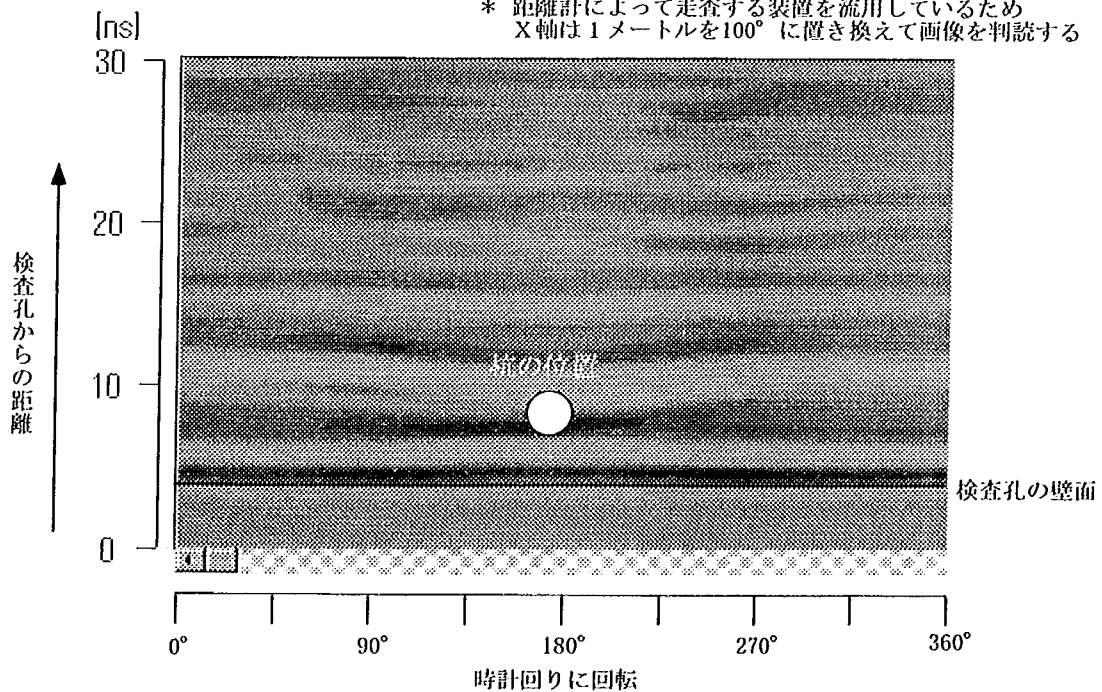
写真-5. 2. 4 ボアホールレーダの使用状況

杭名 : B 1 (健全杭)
 検査孔位置 : bv 1 (杭表面から30cm)
 検査深さ : フーチング表面から1 m深
 走査方向 : 回転走査
 今回の調査ではあらかじめ杭のある方向は確認できていたことから杭とは正反対(180°)の方向から回転を開始した。
 処理方法 : とくになし



レーダ画像

* 距離計によって走査する装置を流用しているため
 X軸は1メートルを100°に置き換えて画像を判読する



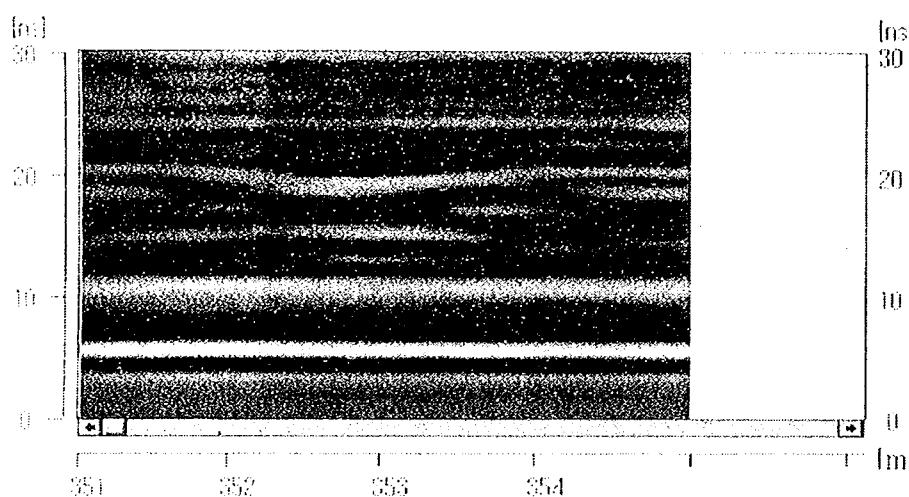
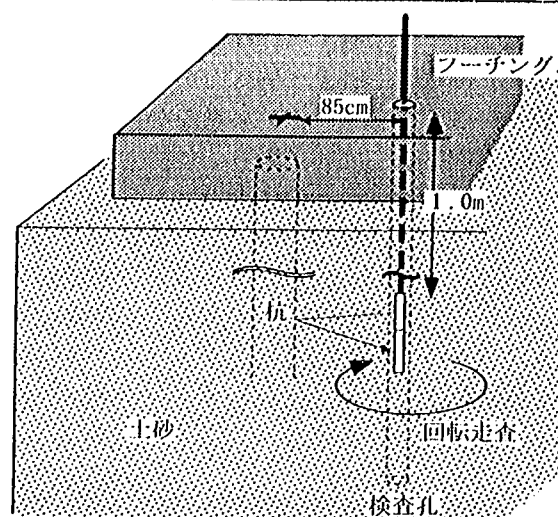
レーダ画像についての説明

図-5.2.9 パルス波レーダ回転走査計測結果例-1

杭名 : B 1 (健全杭)
 検査孔位置 : bv 6 (杭表面から85cm)
 検査深さ : フーチング表面から 1 m 深
 走査方向 : 回転走査

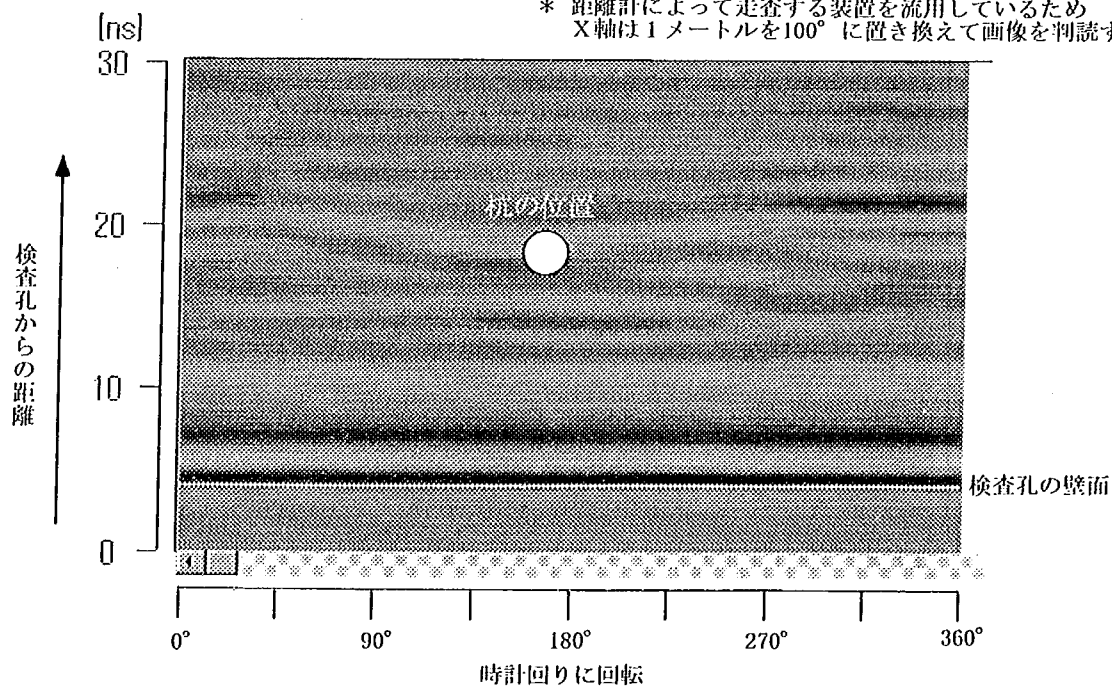
今回の調査ではあらかじめ杭のある方向は確認できていたことから杭とは正反対(180°)の方向から回転を開始した。

処理方法 : とくになし



レーダ画像

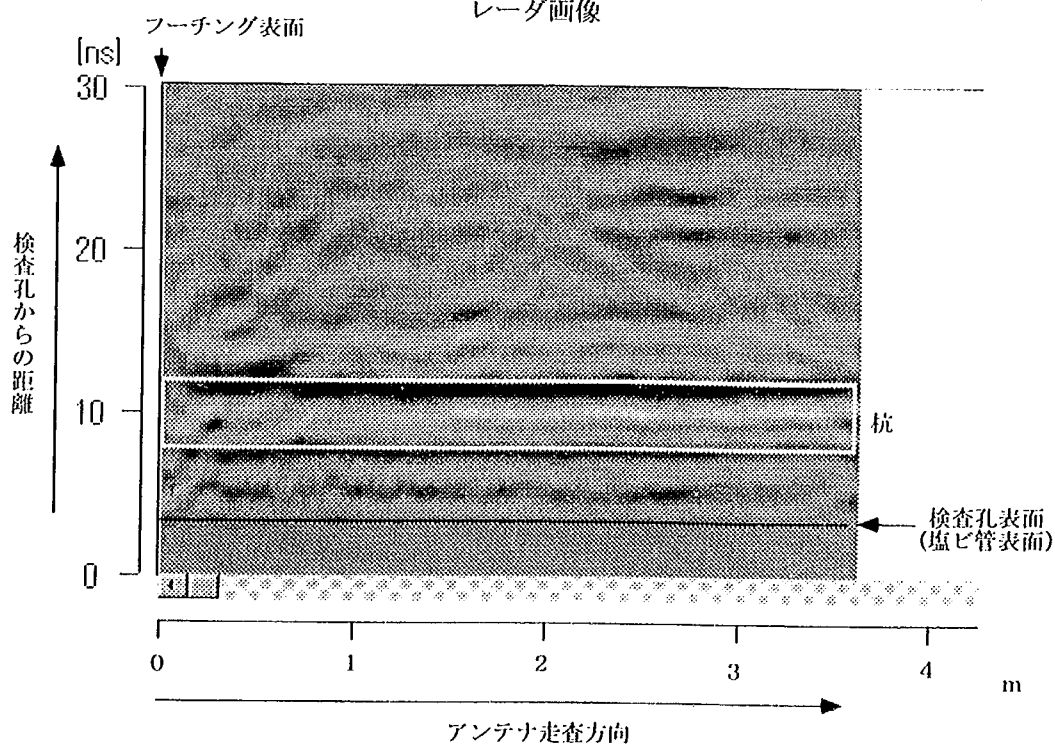
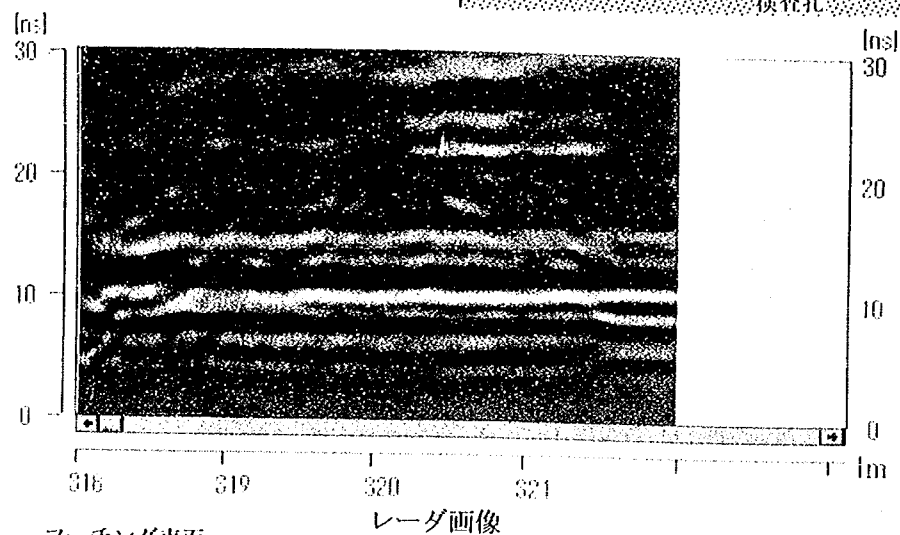
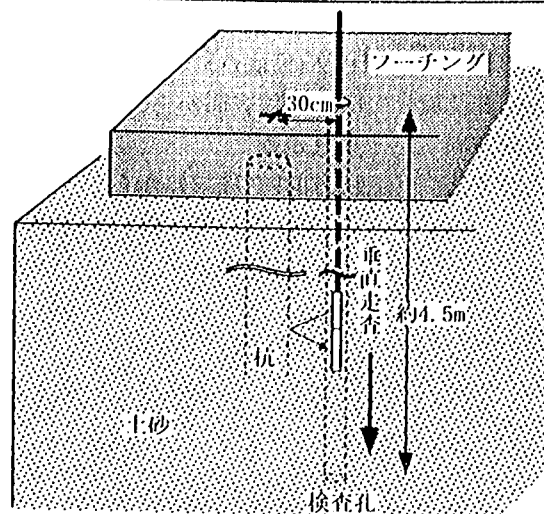
* 距離計によって走査する装置を流用しているため X 軸は 1 メートルを 100° に置き換えて画像を判読する



レーダ画像についての説明

図-5.2.10 パルス波レーダ回転走査計測結果例-2

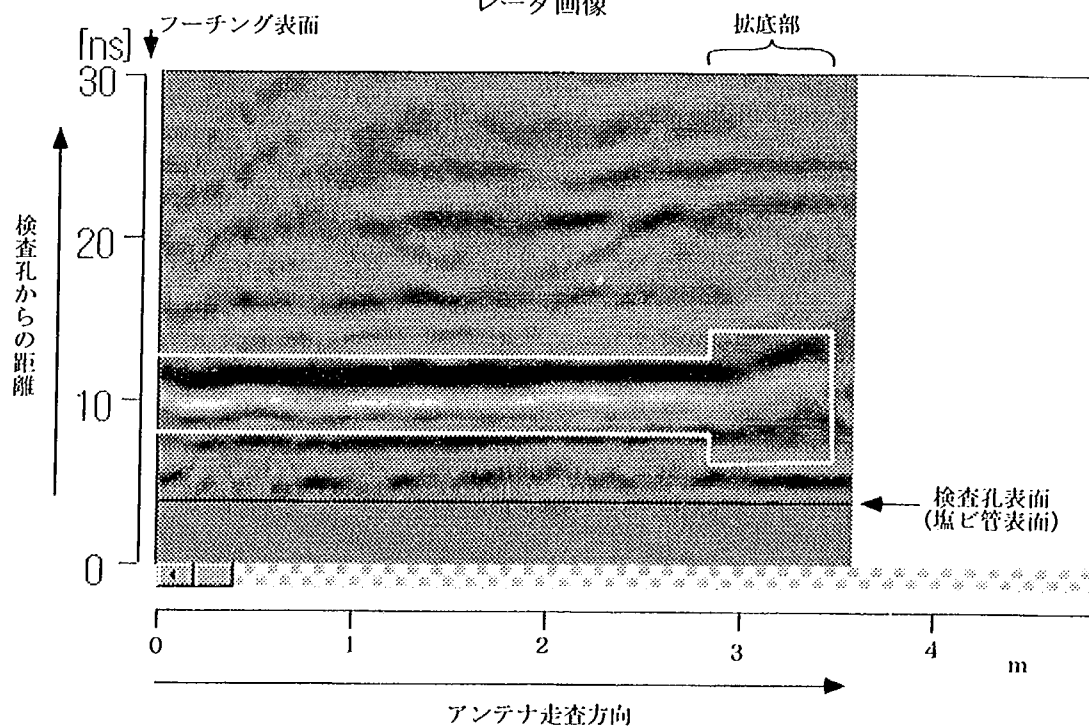
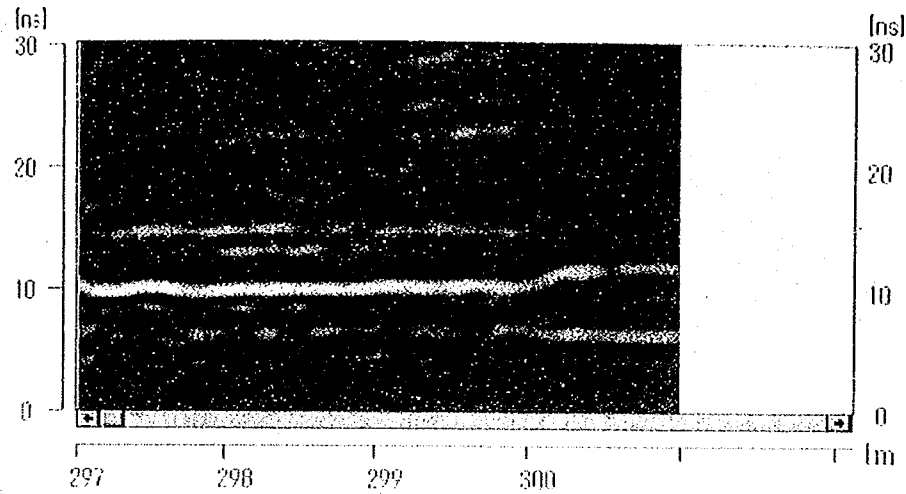
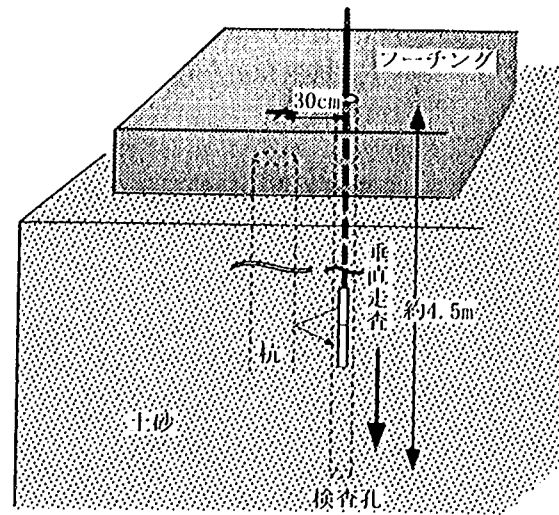
杭名 : B1 (健全杭)
 検査孔位置 : bv 1 (杭表面から30cm)
 走査方向 : 垂直走査
 処理方法 : 杭方向レーダデータから
 杭反対方向レーダデータを減算



レーダ画像についての説明

図-5.2.11 パルス波レーダ垂直走査計測結果例-1

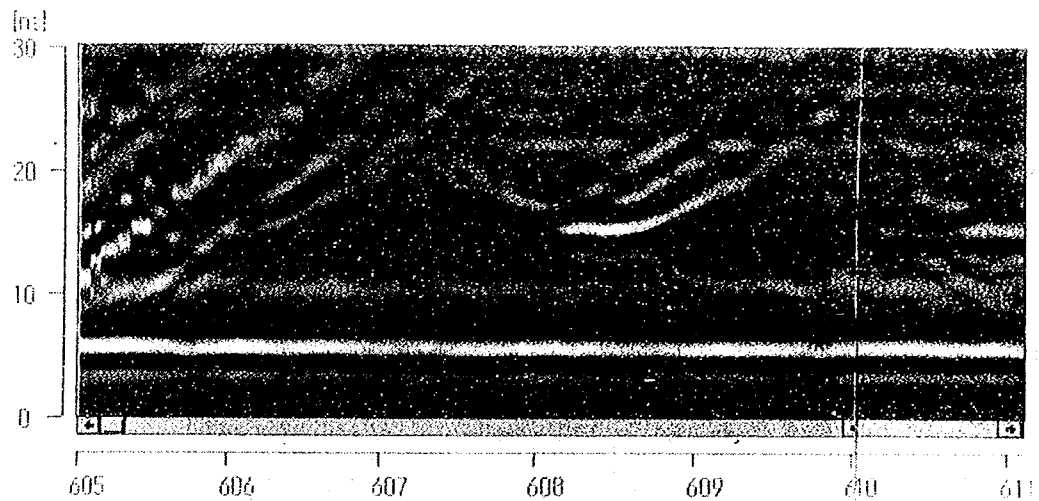
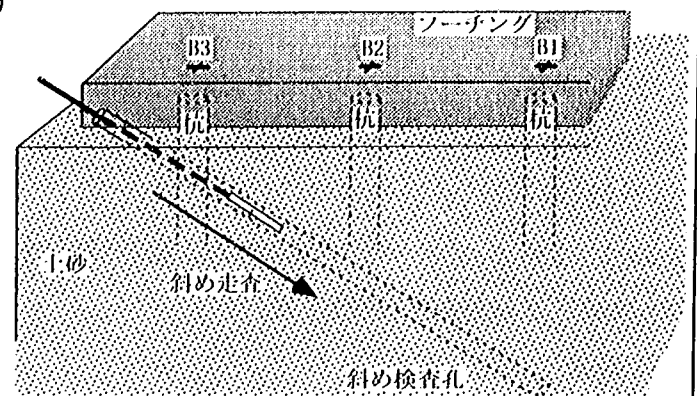
杭名 : B 2 (拡底杭)
 検査孔位置 : bv 2 (杭表面から30cm)
 走査方向 : 垂直走査
 処理方法 : 杭方向レーダデータ から
 杭反対方向レーダデータを減算



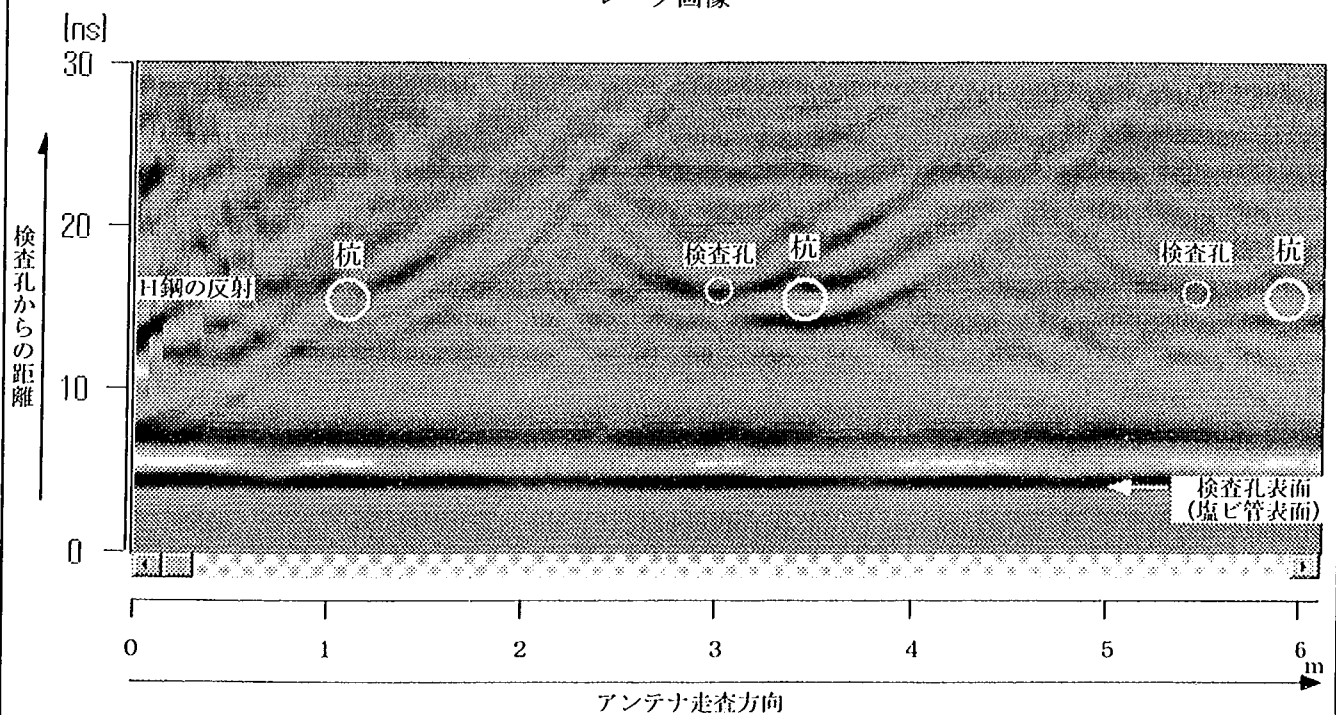
レーダ画像についての説明

図-5.2.12 パルス波レーダ垂直走査計測結果例-2

杭名 : B1~3
 検査孔位置 : bc 1 (フーチング際斜めボーリング)
 走査方向 : 斜め走査
 処理方法 : とくになし



レーダ画像



レーダ画像についての説明

図-5.2.13 パルス波レーダ斜め走査計測結果例

3) パルス波斜め走査計測

① 目的

斜め方向試験は、斜めボーリングを想定し、ボアホールレーダを挿入することによるフーチング下の杭本数および杭配置調査の可能性を検討する目的で実施した。

② 計測方法

試験は、土槽 B のフーチング脇の斜めに設定された検査孔からボアホールアンテナを杭のある方向に向けて斜めに挿入し、反射波形を取得した。

③ 結果

斜め方向にボーリングを行い、レーダアンテナを挿入することにより、砂質土（乾燥状態）においては平面的な杭の配置および本数を確認することができることが明らかになった（図-5.2.13）。

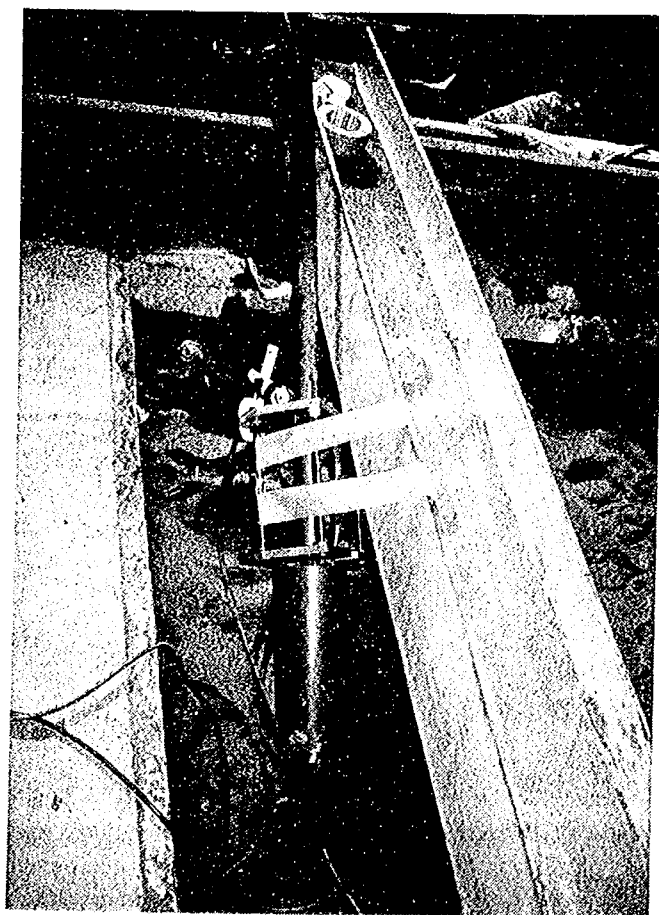


写真-5.2.5 斜め走査によるボアホールレーダ調査

(4) 連続波ポアホールレーダによる杭位置計測

共通供試体試験として、フーチングのある土槽Bにおいて、3種類の走査方法による反射計測と透過計測を実施した。反射式計測は、杭の方向を調査する回転走査計測、杭の形状を調査する垂直走査計測、杭の配置を調査する斜め走査計測である。また、乾燥土における各種計測を終了した後、フーチング上端から-20cmの水位になるまで土槽に水を入れた湿潤状態での計測を行い、乾燥状態での計測結果との比較、および、実橋梁調査への適用課題の検討を行った。

1) 連続波レーダ回転走査反射計測

① 目的

地面に垂直な検査孔内の一定深さでアンテナを回転させながら計測を行うことで、試験杭の方向調査および試験杭までの距離調査の可能性を検討した。

② 計測方法

杭形状を変化させた3本の試験杭(杭 B1~B3)を計測対象とし、検査孔は杭 B1~B3 周辺の7本(bv1~bv4, bv6~bv8)を使用した。アンテナは、アンテナ上端がフーチング上端に隠れる深さを基点とし、ここから2m降ろした位置及び孔底で回転計測を行った。データ収集は試験杭の反対方向から右回りに5.6°(360/64)ピッチで1周(360°)分を行った。計測状況を写真-5.2.6に示す。

③ 結果

計測結果の例として、乾燥土の探査距離85cmの場合と、湿潤土の探査距離50cmの場合を図-5.2.14、図-5.2.15に示す。回転走査による反射計測結果をまとめると以下の通りである。

- ・乾燥土の場合、距離85cmにある杭の方向を探査可能であった。
- ・湿潤土の場合、距離50cmにある杭の方向は探査可能であったが、距離85cmにある杭は探査不能であった。

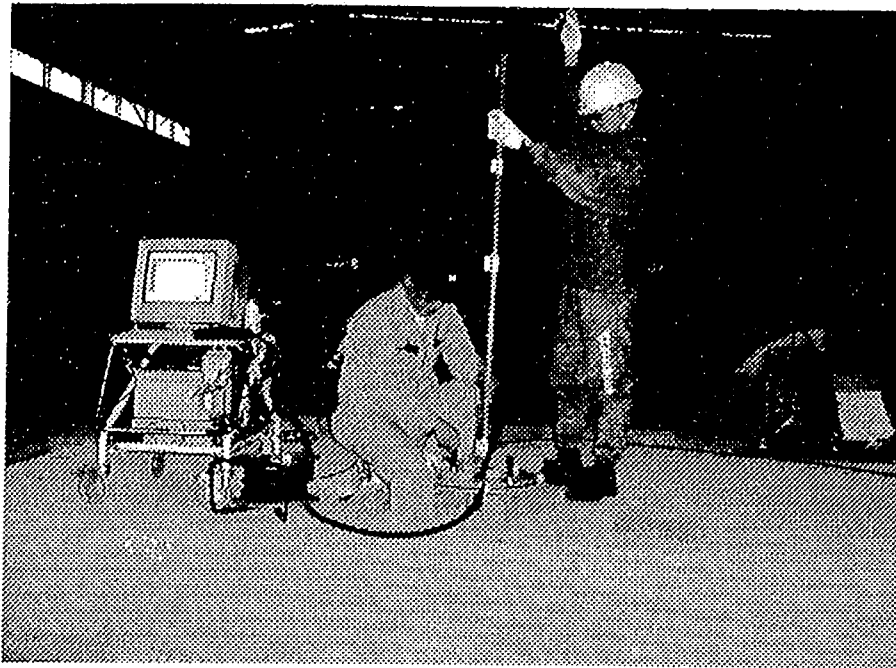
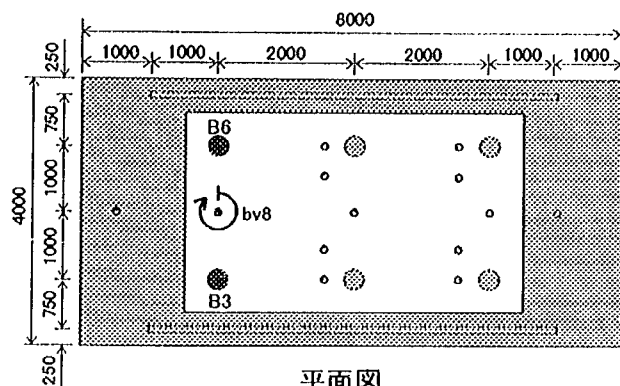


写真-5. 2. 6 回転走査計測状況

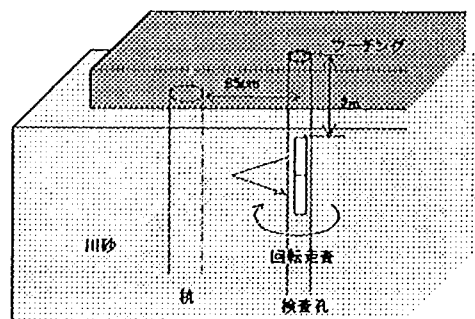
土質：乾燥土、杭：B3、検査孔：bv8、検査深さ：フーチング'上端 -2m

走査方法：杭の反対側から右回りに1周計測（5.6°ピッチで64ポイント計測）

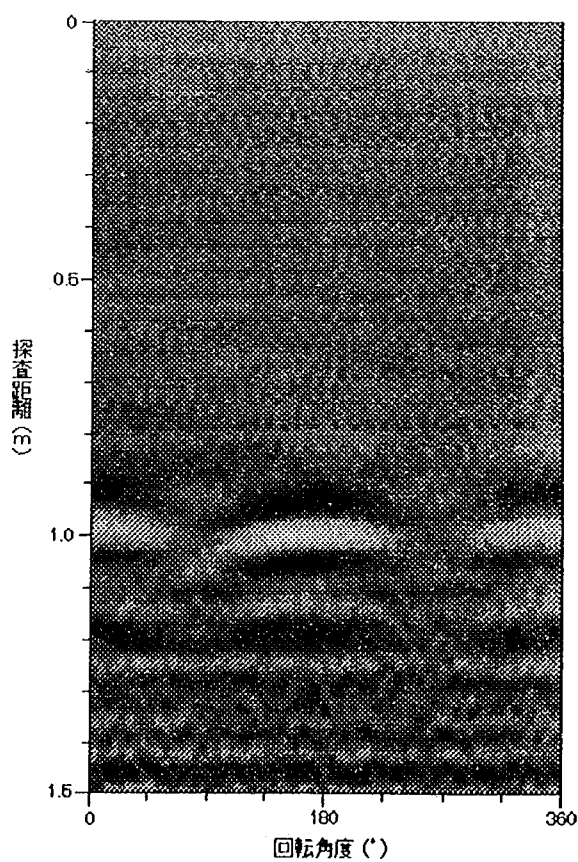
探査画像の説明：180°付近（走査方向中央）に認められる反射波はカサット杭（B3）からのもので、0°、360°付近に認められる反射波は杭B6からのもの。



平面図



計測模式図



レーダ画像

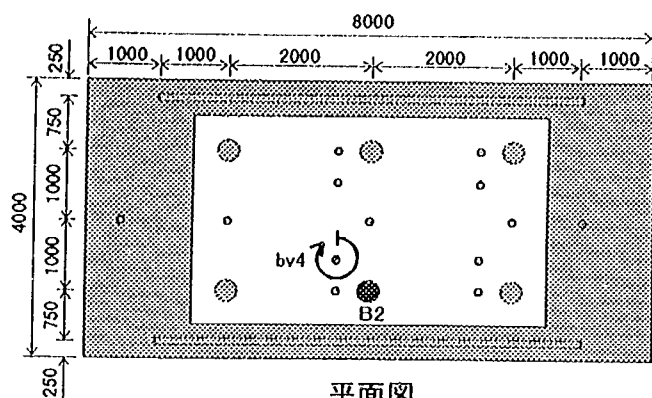
(差処理有り：約1ポイント目を差処理に使用)

図-5.2.14 連続波レーダ回転走査計測例-1

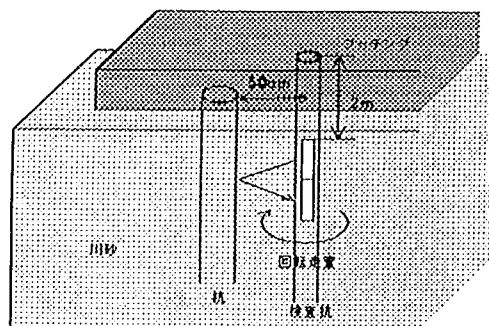
土質：湿潤土、杭：B2、検査杭：bv4、検査深さ：フーチング上端から-2m

走査方法：ターゲット杭の反対側から右回りに360°計測（5.6°ピッチで64ポイント計測）

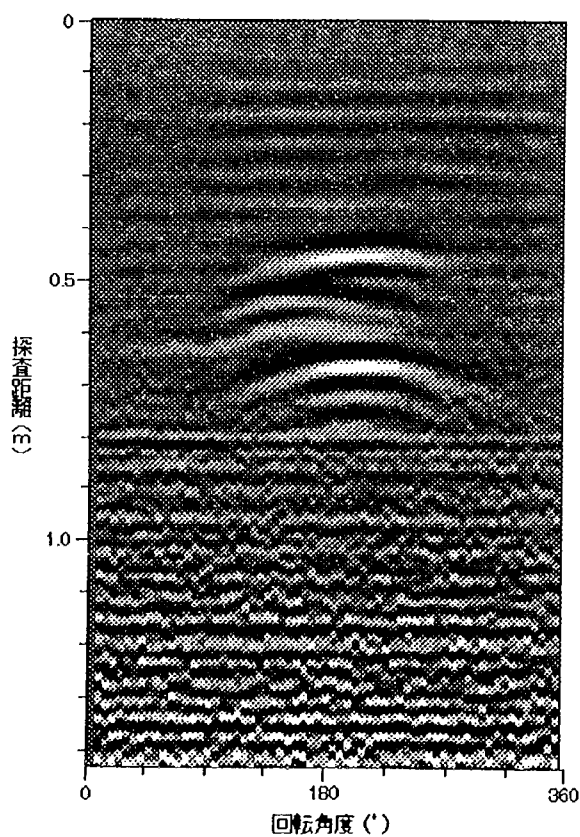
探査映像の説明：180°付近（走査方向中央）に認められる反射波はターゲット杭（B2）からのもの。



平面図



計測模式図



レーダ画像

(差処理有り：約45ポイント目[約250°]を差処理に使用)

図-5.2.15 連続波レーダ回転走査計測例-2

2) 連続波レーダ垂直走査反射計測

① 目的

回転計測で調査した杭の方向にアンテナを向けて、垂直に走査しながら計測を行うことで、試験杭の形状変化の調査可能性を検討する。

② 計測方法

計測対象とする試験杭および検査孔は回転計測と同じである。アンテナ上端がフーチング上端に隠れる位置を走査開始点とし、垂直降下計測を行った。計測状況を写真-5.2.7に示す。

③ 結果

計測結果の例として、乾燥土と湿潤土を比較して、探査距離 80, 50, 30cm の場合を図-5.2.16～図-5.2.18に示す。垂直走査による反射計測結果をまとめると以下の通りである。

- ・ 乾燥土の場合、距離約 85cm, 50cm, 30cm の杭いずれも探査可能であった。
- ・ 湿潤土の場合、距離約 50cm, 30cm の杭を探査可能であった。
- ・ 湿潤土の場合、距離約 85cm の杭は探査可能とは言えないものの、反射波は僅かに認められた。
- ・ 乾燥土、湿潤土いずれの場合も、杭径変化を探知できるほどの分解能は認められなかった。

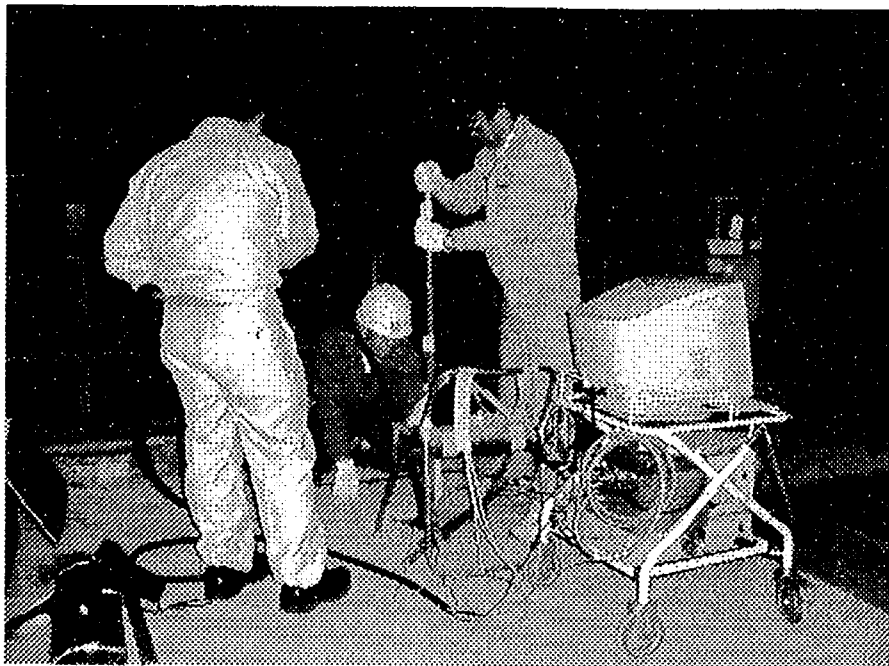
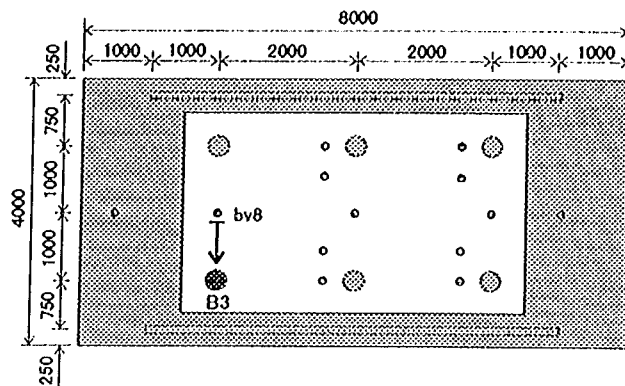


写真-5.2.7 連続波レーダ垂直走査計測状況

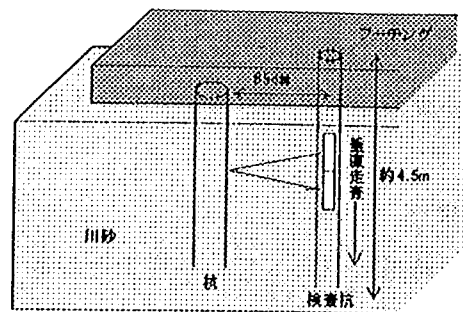
土質：乾燥土、湿潤土、杭：B3、検査杭：bv8

走査方法：アンテナをケーシング杭に向け、アンテナ上端がケーシング杭上端に隠れる位置を基点に降下走査

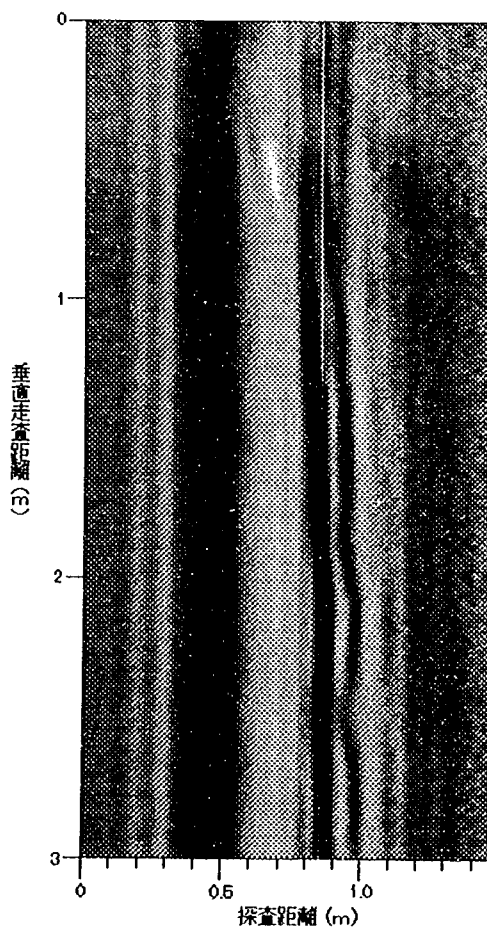
探査画像の説明：白線の深度に杭からの反射波が認められる。(湿潤土では反射波は非常に弱い)



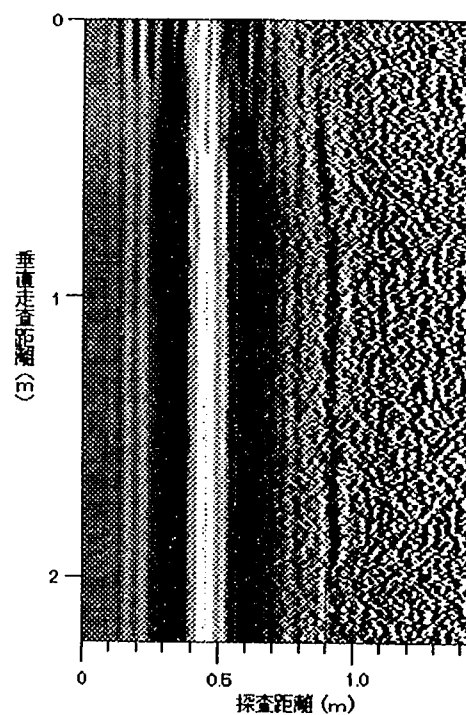
平面図



計測模式図



レーダ画像 (乾燥土)



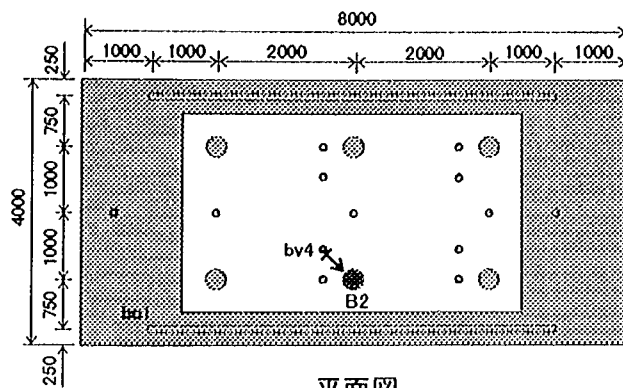
レーダ画像 (湿潤土)

図-5.2.16 連続波レーダ垂直走査計測例-1

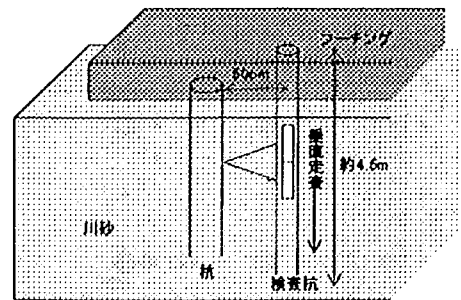
土質：乾燥土、湿潤土， 杭：B2， 検査杭：bv4

走査方法：アンテナをターゲット杭に向け、アンテナ上端がフーチング上端に隠れる位置を基点に降下走査

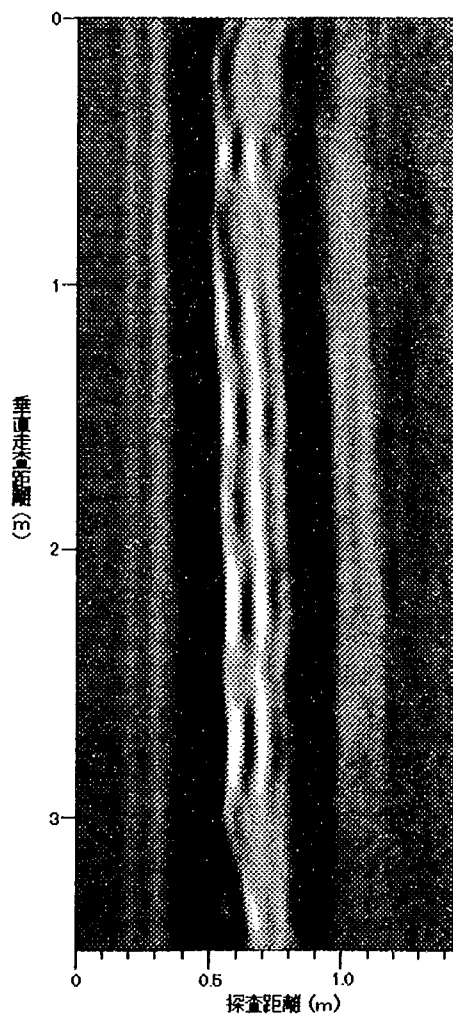
探査画像の説明：白線の深度に杭からの反射波が認められる。



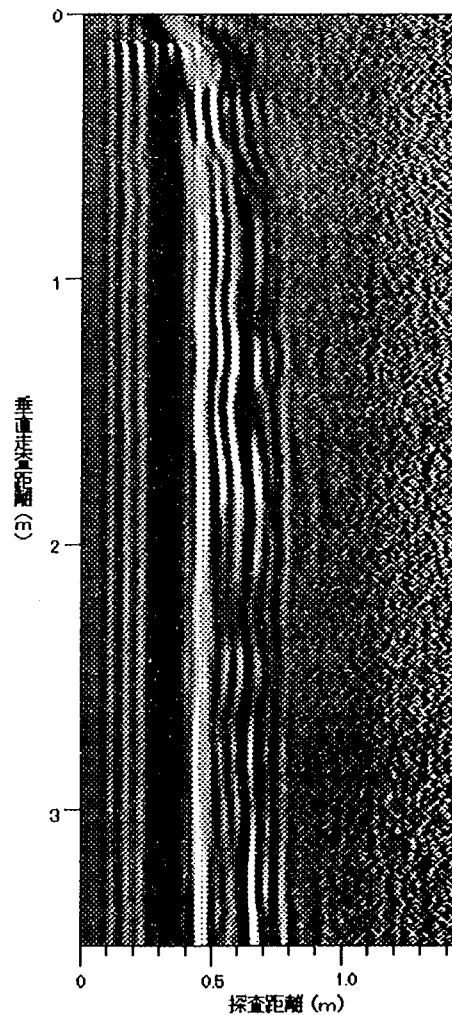
平面図



計測模式図



レーダ画像 (乾燥土)



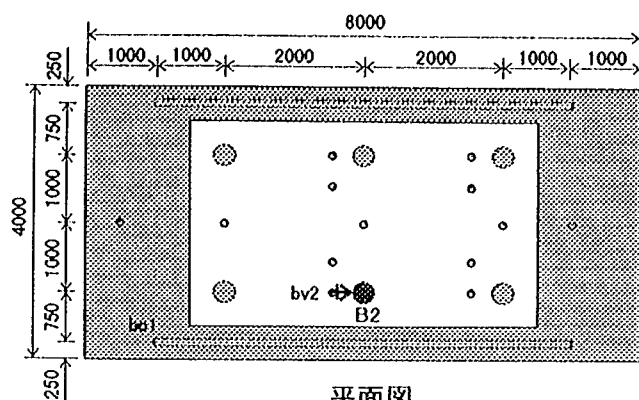
レーダ画像 (湿潤土)

図-5.2.17 連続波レーダ垂直走査計測例-2

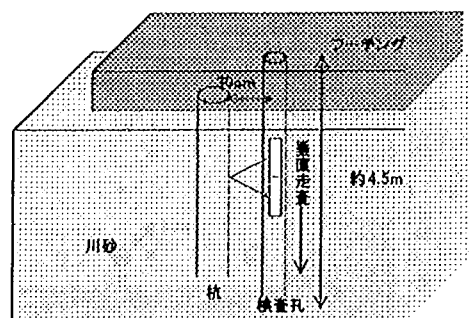
土質：乾燥土、湿潤土、杭：B2、検査杭：bv2

走査方法：アンテナをターゲット杭に向け、アンテナ上端がフーチング上端に隠れる位置を基点に降下走査

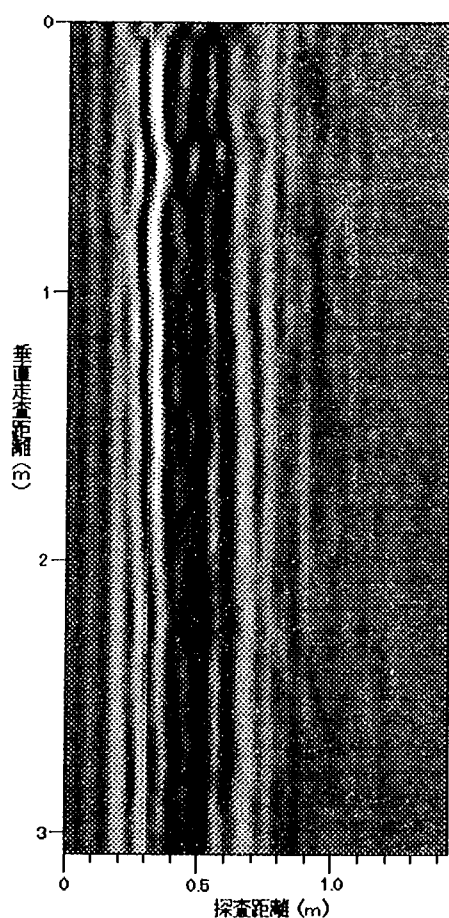
探査画像の説明：白線の深度に杭からの反射波が認められる。



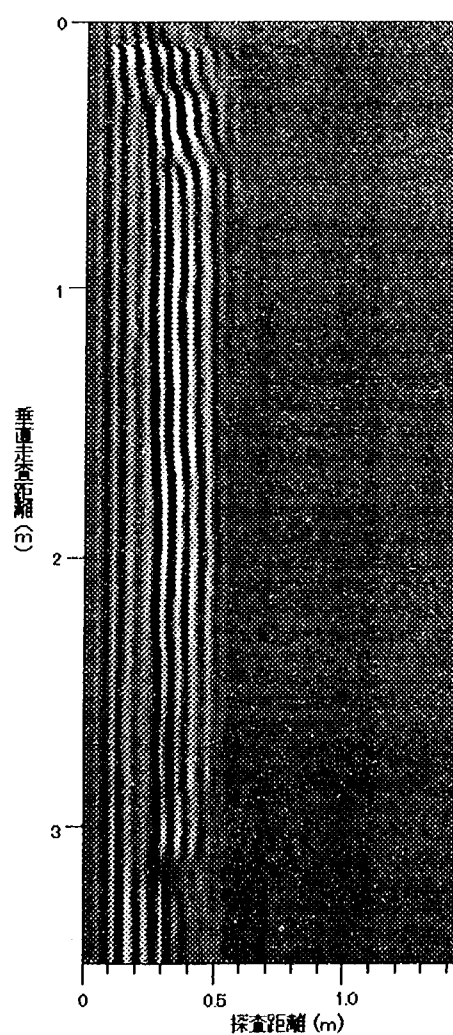
平面図



計測模式図



レーダ画像 (乾燥土)



レーダ画像 (湿潤土)

図-5.2.18 連続波レーダ垂直走査計測例-3

3) 連続波レーダ斜め走査反射計測

① 目的

斜め検査孔内でアンテナを試験杭方向に向けたまま移動計測を行うことで、斜めボーリングを想定した場合の杭本数および杭配置の調査可能性を検討する。

② 計測方法

試験杭 B4～B6 の3本を計測対象とし、検査孔は杭 B4～B6 側の斜め検査孔 (bc2) を使用した。アンテナ上端が検査孔上端に隠れる深さを距離基点とし、斜め降下走査による計測を行った。計測状況を写真-5.2.8に示す。

③ 結果

乾燥土、湿潤土の計測結果を図-5.2.19に示す。斜め走査による反射計測結果をまとめると以下の通りである。

- ・乾燥土、湿潤土の両ケース共、距離約 55cm にある杭を探索可能であった。
- ・距離約 65cm にある検査孔(呼径 100 の塩ビ管)も探索可能であった。

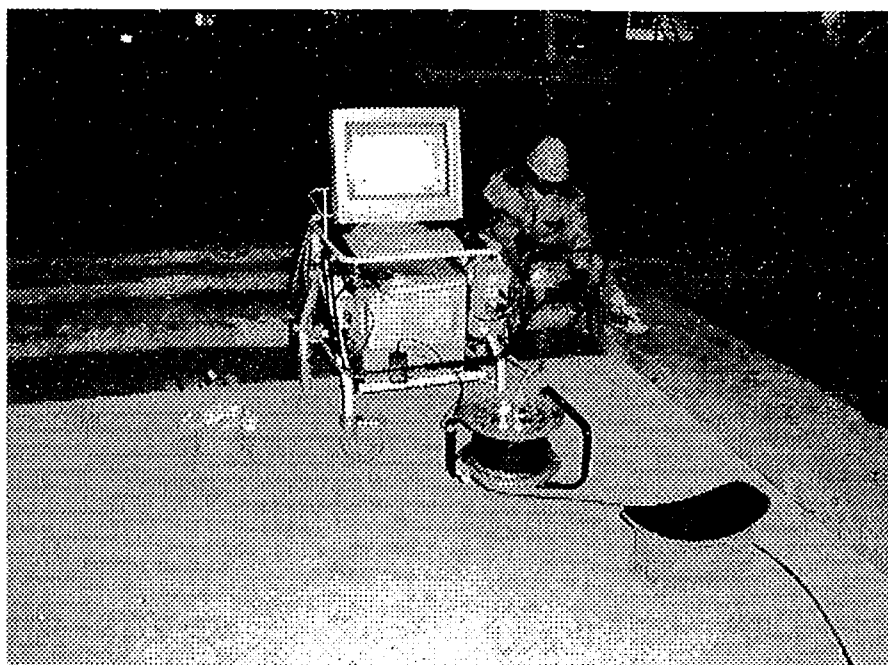


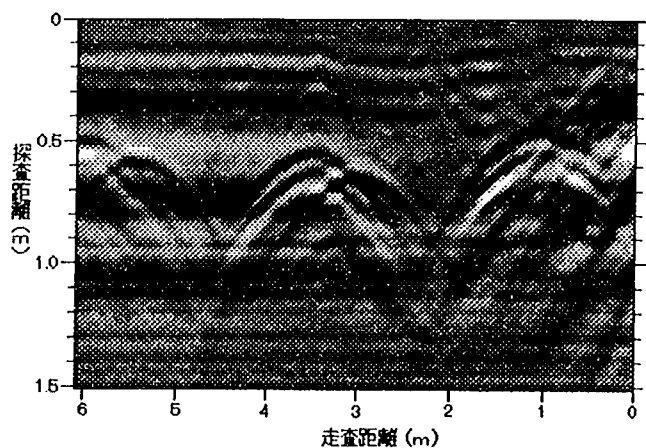
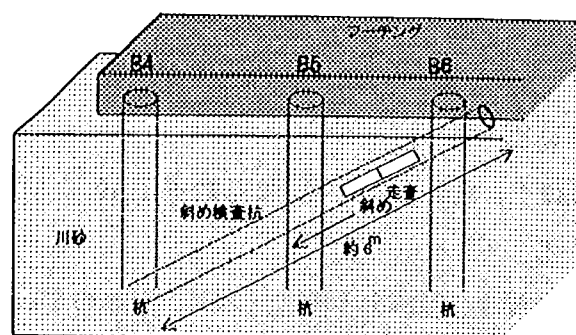
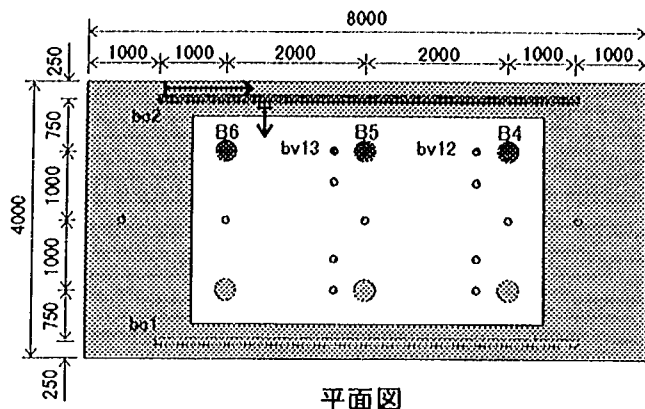
写真-5.2.8 斜め走査反射計測状況

土質：乾燥土、湿潤土、 杭：B4, B5, B6, 検査杭：bc2

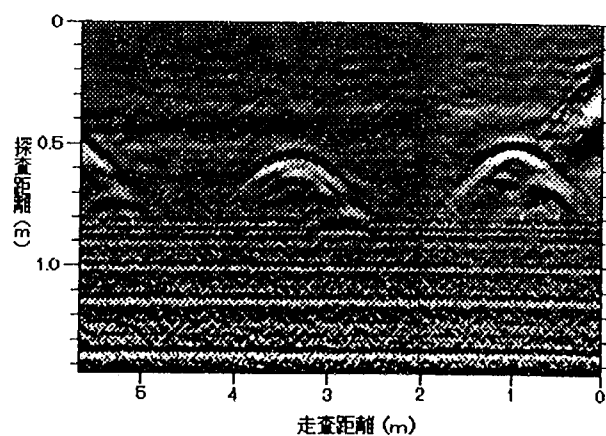
走査方法：アンテナをケーシング杭に向け、アンテナ上端が検査孔上端に隠れる位置を基点に斜め降下走査
 探査画像の説明：

① 3つの強い反射波は、左から杭 B4, B5, B6 からのもの。

② 杭 B5, B6 からの反射波の 50cm 程度前に認められる反射波は検査孔 (VU100) からのもの。



(走査距離約 2m のデータを差処理に使)



(走査距離約 2m のデータを差処理に使)

図-5.2.19 連続波レーダ斜め走査反射計測結果

4) 連続波レーザ斜め走査透過計測

① 目的

橋梁基礎両側の2本の斜めボーリング孔を使用したトモグラフィ方式の調査可能性を検討するため、透過計測により有効な受信信号が得られるか否かを調べる。

② 計測方法

送・受アンテナを互いに向合う状態にし、送信アンテナを bc1、受信アンテナを bc2 に挿入した。計測開始時は送信アンテナを bc1 の下端に設置し、bc2 で受信アンテナを走査させて計測する。送信アンテナを 6cm 単位で引上げながら計測を行い、送信アンテナが斜孔上端に届くまで繰り返す。

③ 結果

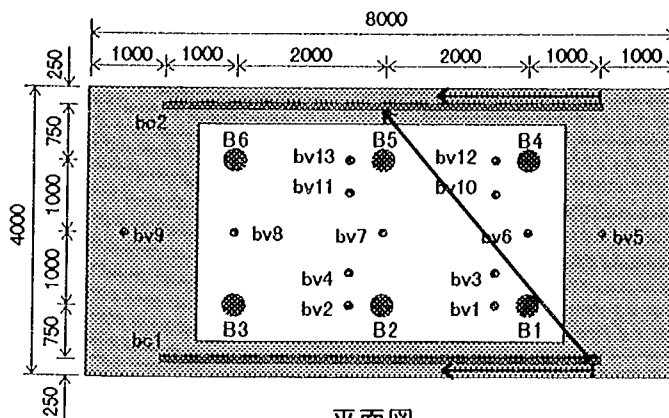
探査結果の例として、送信アンテナが約 2.2m 毎移動したときの計測データを図-5.2.20 に示す。実際の計測では、上げ下げ交代で走査したが、図は下から上へ走査計測を行った状態に統一するようデータの並び替えを行っている。斜め走査による透過計測の結果をまとめると以下の通りである。

- ・乾燥土の場合、斜め検査孔の間隔約 3.5m で、透過信号が明瞭に認められる。
- ・透過信号のパターンから判断すると、透過信号は距離 5m 強まで認められる。
- ・湿潤土の場合、透過信号は認められなかった。

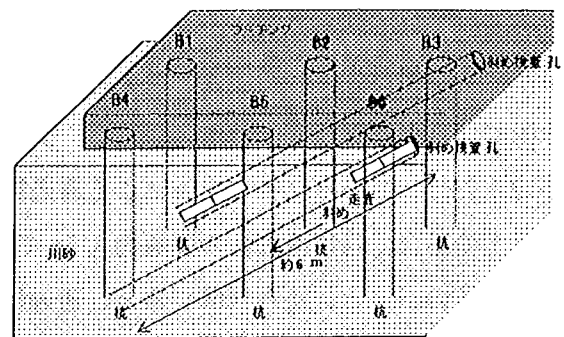
土質：乾燥土、杭：－、検査杭：bc1, bc2

走査方法：送受信アンテナは対向するように設置。送信アンテナは bc1 検査孔の底から、約 2.2m 間隔で引き上げ走査。受信アンテナは上端が bc2 検査孔上端に隠れる位置を基点にし、斜め下降走査。

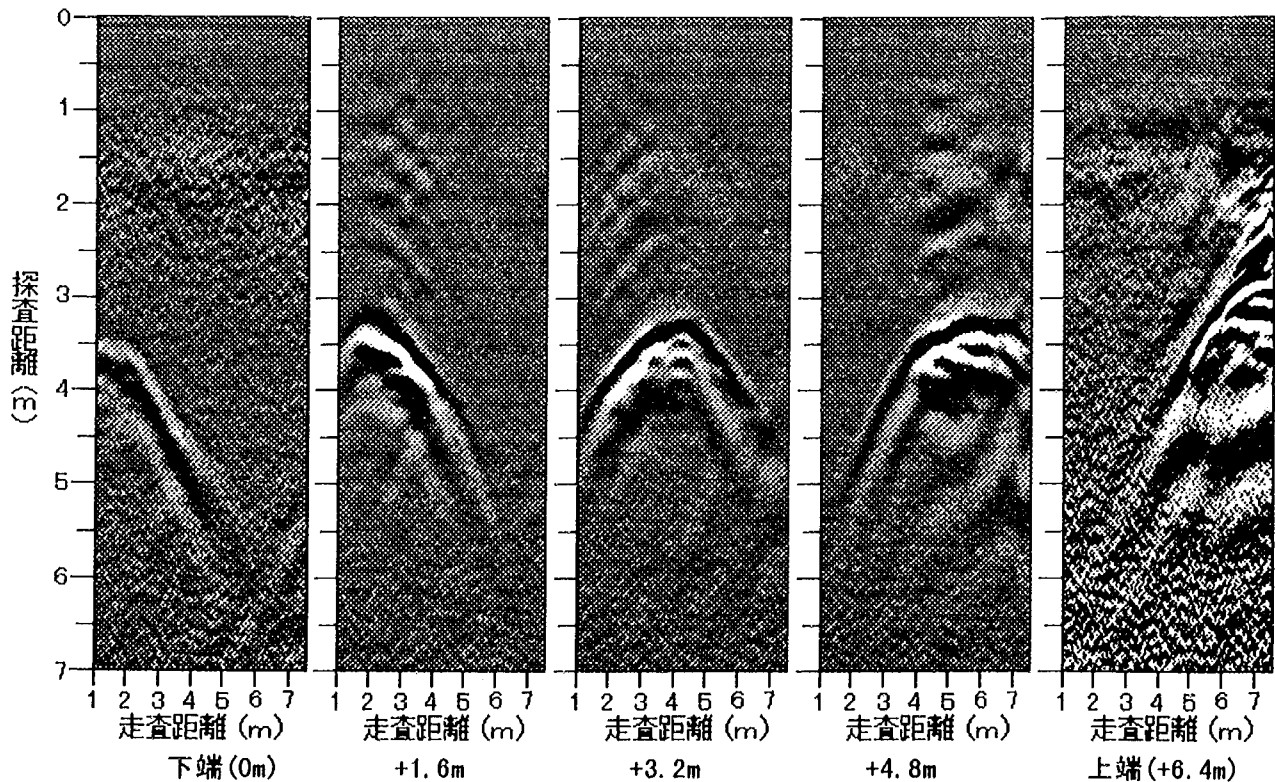
探査画像の説明：送信アンテナが下端にある画像で、探査距離 3.5m 付近から右下方に伸びている信号が透過信号。送受信アンテナが再近接したときの距離である 3.5m が、探査距離の最小値となっている。



平面図



計測模式図



レーダ画像

図-5.2.20 連続波レーダ斜め走査透過計測例

5.2.3 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。一方で、調査可能深度が土質条件と利用波長帯に依存するという制約がある。

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。

しかし、実橋では土質条件がさらに悪く、複雑であることが予想される。そこで、とくに適用が難しいと考えられる土質の条件及び地中の状態を以下に列記する。

これらの条件についての適用限界については、今後、実橋での適用性を検討するなかで明らかにする必要があると考えられる。

- ・土質が粘土質の場合

経験的に、真砂土のような山土では電波の減衰が小さいが、粘土質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。

5.2.4 まとめと今後の課題

(1) まとめ

橋梁基礎構造の調査方法としてレーダ方式の適用可能性を検討するため、土木研究所共通供試体において基本試験を実施した。得られた知見を要約すると以下ようになる。

- ① 共通供試体および小型土層により砂質土の電磁波伝搬特性を確認した。
- ② 地表レーダの共通供試体試験により、フーチング上からの杭配置調査の可能性を検討したが、現システムでは困難であることを確認した。
- ③ パルス波反射式ボアホールレーダの共通供試体試験により、杭配置調査（杭離れ 50cm、乾燥砂質土）が可能であることを明らかにした。
- ④ 連続波反射式ボアホールレーダの共通供試体試験により、土層が湿潤な状態でも杭配置調査（杭離れ 50cm、砂質土）が可能であることを明らかにした。
- ⑤ 連続波透過式ボアホールレーダの共通供試体試験により、乾燥土の場合、検査孔間 3.5m で明瞭な透過信号が認められた。探査画像から、最大約 5m まで透過していることがわかった。湿潤土の場合は、検査孔間 3.5m で透過信号は認められなかった。

(1) 今後の課題

これまでの検討結果から、土質条件が砂質土であれば、反射式ボアホールレーダ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た。しかし、実橋では地盤条件がさらに悪く、複雑であることが考えられる。そこで、土木研究所内の橋梁をはじめとする実橋でのボアホールレーダ計測を行い、調査の実用性について検討を行うとともに、必要に応じてレーダ装置の改造を実施するものとする。

5.3 アコースティック・エミッション

5.3.1 はじめに

近年、1995 年兵庫県南部地震に代表される大規模地震が発生し、土木・建築構造物に甚大な被害をもたらした。そこで、構造物の健全性を早急に診断する手法の確立が強く望まれるようになった。健全性を診断する上で重要となるのは、まず欠陥あるいは、損傷の現状把握である。そして次に重要となるのは、これ以上その欠陥が成長するかどうか、つまり、構造物が継続使用できるかどうかの判断である。アコースティック・エミッション (Acoustic Emission; AE) は、「固体材料内部の微小な破壊あるいは、それと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象」と定義され、その発生機構から欠陥を進行させるような荷重が作用しなければ発生しない。つまり、供用状態に近い荷重条件下で AE を発しないような欠陥は無害ということもできる。「AE によるコンクリート杭破損調査」は、杭基礎の損傷時や損傷後に期待される AE を利用することで、その健全性把握が可能となる調査法である。ここでは、本調査方法に関する測定原理を概観し、共通供試体 (RC 損傷杭) での実験概要及び実験結果を報告する。

5.3.2 AE 計測装置

ドイツにおける Kaiser の研究から遅れること約 10 年、1960 年代前半になると我国の茂木らが岩石の AE に関する研究成果を盛んに発表し、それとほぼ同時期に、超音波領域の弾性波放出 (AE) を検出する装置を米国のダネガンらが考案し、金属に対して盛んに適用し始めた。1960 年代後半には、圧電型センサ、プリアンプ、カウンターからなる初歩的な AE 計測装置が市販されるようになり、多くの材料の AE が活発に計測されるようになった。

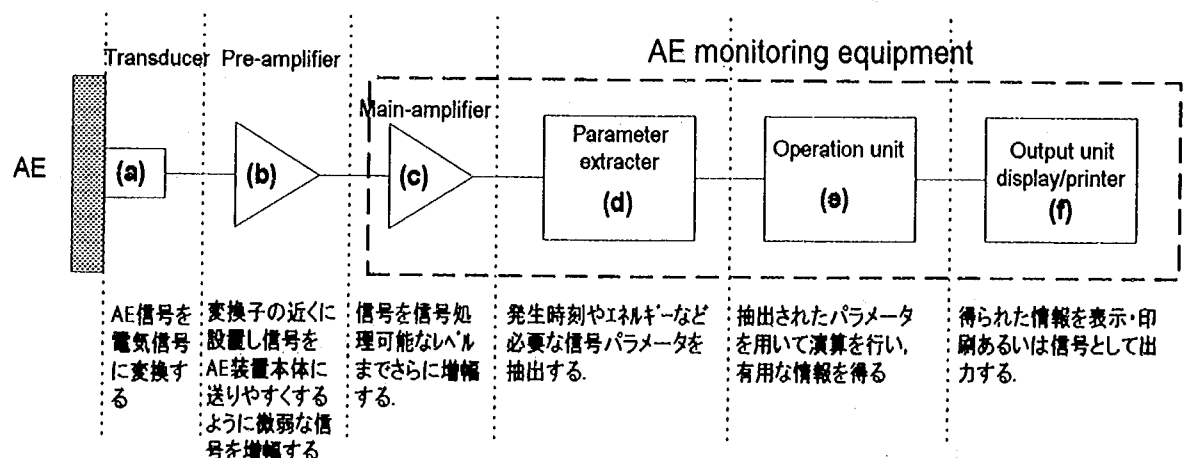


図-5.3.1 AE計測システムブロック

近年 AE 計測装置は、単機能型のものから、コンピュータ制御の万能型まで多種多様な製品が市販されるようになった。しかし、最も基本となる構成はいずれの装置も共通で図-5.3.1 に示すようなものである。すなわち、(a) AE 信号を電気信号に変換する AE 変換子、(b) AE 変換子の近くに設置し、増幅・イン

ピーダンス変換を行うプリアンプ、(c) AE 計測装置本体内にあり、信号を増幅するメインアンプ、(d) 振幅、エネルギー、到達時刻などのパラメータを抽出するパラメータ抽出部、(e) 抽出されたパラメータや外部入力パラメータを用いて演算を行う演算部、(f) 得られた結果を出力する出力・表示部から成立つ。このほか、周波数帯域を制限するためのフィルタ、波形モニタリング装置、波形記録・記憶装置、パラメータ記憶装置などが組込まれる。最近の AE 計測装置はデジタル処理が可能となり、多種多様な機能を容易に実現できるようになっている。

(1) AE センサ (AE sensor、AE transducer)

現在用いられている AE センサは、圧電素子によるものが多く、圧電変換により機械振動を電気信号に変換して出力する。圧電センサは取扱いが容易で、共振特性をもたせることで高感度かつ機械的雑音など低周波ノイズに強い計測が行える。しかしながら、反面十分広い周波数帯域で平坦な周波数特性を得ることが困難であり、また、測定物理量が不明確であるという欠点を有する。しかし、最近の研究成果から、周波数と振動子の方向を限定すれば加速度成分を検出しているものとして良いこと、またデーブス棒を用いた研究成果からもほぼ加速度に等価なものを捉えているということがわかってきている。

圧電素子の形状で感度の最も高い周波数（共振周波数）が決定される。AE センサは加速度計が共振周波数を避けて用いられるのに対し、微弱な波動を増幅させる目的で共振周波数を利用するよう設計されている。一般的な AE センサの共振周波数の選択として、コンクリート材料では 100kHz 以下、地盤材料では 60kHz 以下のものが使用されている。また、AE 波形の周波数スペクトラムを議論する特別の場合には広い周波数域で平坦な特性を持つセンサ（共振周波数を濾過したもの）が必要となるが、共振周波数帯域を避けるために当然センサ感度が低いので一般の AE 計測では使われていない。

(2) 前置増幅装置 (Pre-amplifier)

AE センサで検出された微弱な AE 信号は主増幅器に入力される前に、増幅しなければケーブル、機器回路のひずみなどの影響を受けるので、通常 20~60dB (10 倍~1000 倍) の増幅を行う。また、前置増幅装置には周波数フィルターを内蔵したものもあり、予め有意な AE 周波数が判明しているときには、フィルターで不要な雑音が除去できる。

(3) 主増幅装置 (Main-amplifier)

前置増幅装置により増幅された AE 信号は、さらにメインアンプにより信号処理装置のパラメータ処理が可能な電圧まで増幅される。(0~60dB)

(4) 信号分析装置 (Signal processor)

信号分析装置には、AE 信号を弁別するための包絡線検波器と AE しきい値設定器があり、しきい値以上の信号を AE として出力し、最大振幅、継続時間、エネルギー、立上り時間などの後述するいくつかのパラメータが得られる。

(5) 波形記録装置 (Wave memory)

AE 波形を記録するための装置、AE は高周波数帯に属し、過渡的な現象であるので、高速で記憶でき、かつ、1 データの分解能 (サンプリング) が $1\mu s$ 以下にもおよぶ高級な装置が必要となる。ただし、分解能は計測対象周波数帯の上限と関係しており、 $1\mu s$ で約 300kHz 程度と考えられる。

5.3.3 AE 特性パラメータ

AE 信号のパラメータ解析に通常用いられる信号処理パラメータは、リングダウンカウント、エネルギー、ヒット、イベント、最大振幅値 (波形尖頭値)、立上がり時間、継続時間などである。これらパラメータの発生履歴、頻度、相関、パターンなどを詳細に解析することで、ある程度欠陥の発生条件や進展特性を調べることができ、また、その識別が行える。AE センサ間の信号到達時間差をもとに、地震の震源を求めるのと同様に AE 発生位置が特定できる。パラメータ解析の問題点は、得られる情報が相対的比較に基づいたものであり、AE 発生源の位置標定結果以外は定量的評価ではないということ、計測器械により各パラメータの分解能に差があり、対象 AE の規模、種類 (突発型、継続型) によりいずれのパラメータが破壊現象に密接に関係しているか見極める必要がある。以下に主要な AE パラメータを列記する。

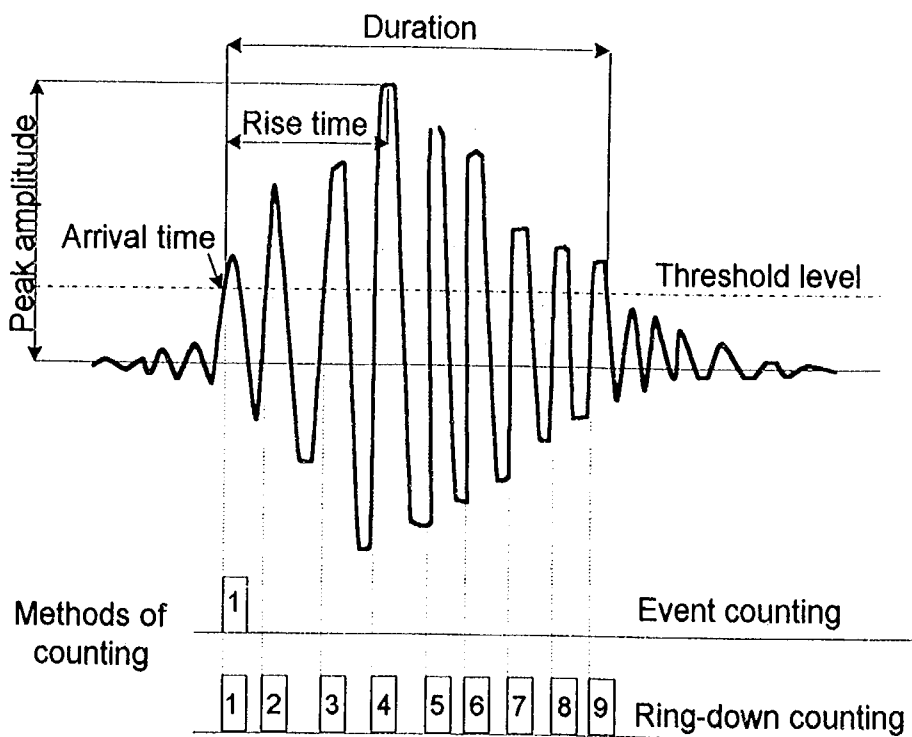


図-5.3.2 AE 特性パラメータと AE 計数方法

(1) リングダウンカウント数

しきい値を越えた AE 波の振動回数を全て数える。事象の振幅の重み付としての意味を持つが、AE 波形は伝播媒体、AE センサの周波数特性に大きく影響を受けるため、そのカウント数もこれらに強く依存する。AE 発生箇所および計測箇所が同じ場合には、カウント数の大小は破壊規模を反映したものと考えられる。

(2) エネルギー

AE 計測器械により定義が異なり、AE の包絡線検波波形の面積、あるいは最大振幅値の 2 乗などとされる。発生した AE 事象のエネルギーを相対的に比較するには最適なパラメータである。一般にはリングダウンカウント数と類似した発生傾向を示すが、器械の分解能により異なる傾向を示す場合がある。突発型 AE 信号に限らずリーク検出など連続型 AE のエネルギー変化を調べるのに使われることもある。

(3) ヒット

AE センサに入力された AE 信号波の一つの波形を 1 ヒットとする。つまり、発生した AE 事象が 1 個 (1 イベント) としても、複数個の AE センサで捉えれば AE センサ個数分だけのヒット数が計数される。クラックや変態など突発型 AE の発生頻度や発生形態を知るのに適したパラメータである。ここでヒットは AE 波の大きさを反映していないので AE のエネルギーの比較には不向きといえる。

(4) イベント

AE センサ間の信号到達時間差をもとに AE 発生源の位置を求めることができる。通常、一次元標定 (直線標定) の場合、2 個以上、2 次元標定 (平面標定) の場合、3 個以上の AE センサ群が必要とされる。位置標定は各群において、全ての AE センサが一つの AE 事象を同時に捉えたときに計算され、AE 源の規模が小さく群中の 1 つの AE センサでもそれを検出できなかった場合は発生位置が決定できない。それを補完する標定方法として、発生した領域を同定するゾーン標定法がある。

(5) 最大振幅値 (尖頭値電圧)

AE を生じた事象が AE センサに与える振動の大きさ、すなわち地震のマグニチュードに相当する。統計的处理を行うことで振幅分布が得られ、発生した AE 事象間の相対的エネルギーレベルの比較が可能である。振幅分布により、異なる AE 発生機構を識別できる可能性がある。また、振幅分布の勾配に着目することで破壊予測が可能となる場合がある。

(6) 立上り時間

AE 信号が入力されたとき、最初のしきい値交差時から最大振幅値に至るまでの時間のことである。各信号の立上りの鋭さに関する情報を与える。AE 発生源と AE センサ位置がほぼ特定できる場合は、立上り時間をもとに目的 AE とノイズなどの識別が可能な場合がある。しかし、最初のしきい値交差が AE 波のどのような初動部に起因するかにより、単に P 波と S 波あるいは表面波などの到達時間差を反映したものとなっている場合が多く、この場合は AE 波の伝播距離、つまり AE センサから AE 源までの距離を示す情報にすぎない。

(7) 継続時間

AE 信号が入力されたとき、最初のしきい値交差時から最後にしきい値を交差するまでに要する時間、つまり 1 ヒットの継続時間を示す。継続時間は 1 ヒット検出記録後に計測休止時間をどの程度見込むかという初期計測条件に大きく依存していることに注意しなければならない。つまり、休止を極端に短く設定すれば 1 ヒットは数秒以上続くと判断、記録される場合もあり、パラメータ計測においてヒット数の増減を議論できない場合がある。

このほか、RMS 電圧（実効値電圧）も AE 活動度の大まかな変化を得るのに用いられる。市販の機器では、時定数が約 100～200ms と大きいために、突発型 AE のように瞬時に生じる現象には対応できないが、金属の変形やリーク検出など連続型 AE が発生する場合には適している。

5.3.4 AE によるコンクリート杭破損調査法の測定原理

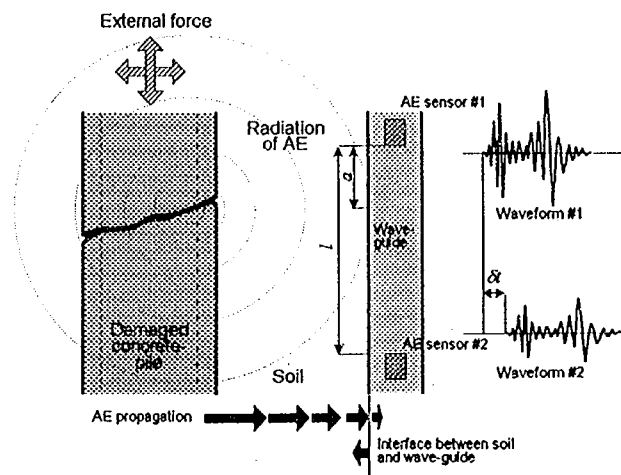


図-5.3.3 測定原理概要図

AE によるコンクリート杭破損調査法の測定原理概要を図-5.3.3 に示す。損傷を有するコンクリート杭が荷重下にあるとき、その損傷箇所から AE の発生・放射が期待される。ここで、P 波のみに限定しその伝播を考える。杭損傷部から放射された AE 波は、まず地盤中を伝わり、AE センサーを取付けたウエーブガイドと呼ばれる AE 波の減衰をできるだけ抑えて AE センサーまで導く棒に入射される。棒に入射された AE 波は、棒中を AE センサーまで伝播し検出される。このとき、同図に示す AE センサー #1、#2 において、AE 源が #1 に近い場合、AE 波が到達する順序は AE センサー #1、#2 となり、到達時間差： δt が得られる。このとき、その AE 源の位置、つまり損傷の位置は、

$$a = \frac{l - v\delta t}{2} \quad (5.3.1)$$

により得られる。ここで、 l は AE センサー間距離、 v は AE 波速度である。

杭の損傷位置はこのように計測し、検出された AE 位置標定結果よりその集中位置をもって推定する。

5.3.5 共通供試体（RC 損傷杭）による室内実験

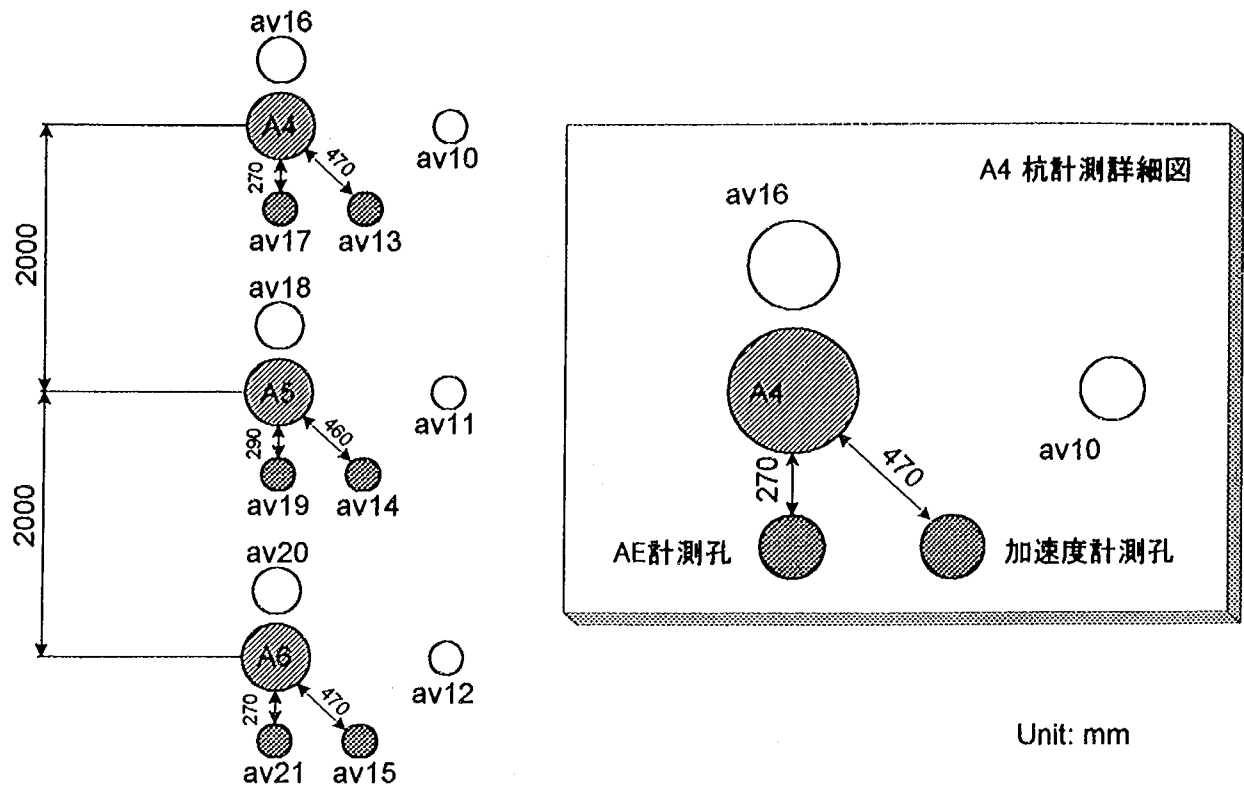


図-5.3.4 AE／加速度計測位置

(1) 試験概要

AE 試験は損傷を有し、実験ピット底面まで設置された A4、A5、A6 杭について行った。AE 計測は、図-5.3.4 に示すように各杭とも直近の塩ビ管 VU100 計測孔で、加速度計測は次に杭に近い計測孔で実施した。計測対象杭と各計測孔を表-5.3.1 に表す。

表-5.3.1 計測対象杭と AE/加速度計測孔番号

計測対象杭	AE 計測孔番号/杭からの距離(mm)	加速度計測孔番号/杭からの距離(mm)
A4	av17 / 270	av13 / 470
A5	av19 / 290	av14 / 460
A6	av21 / 270	av15 / 470

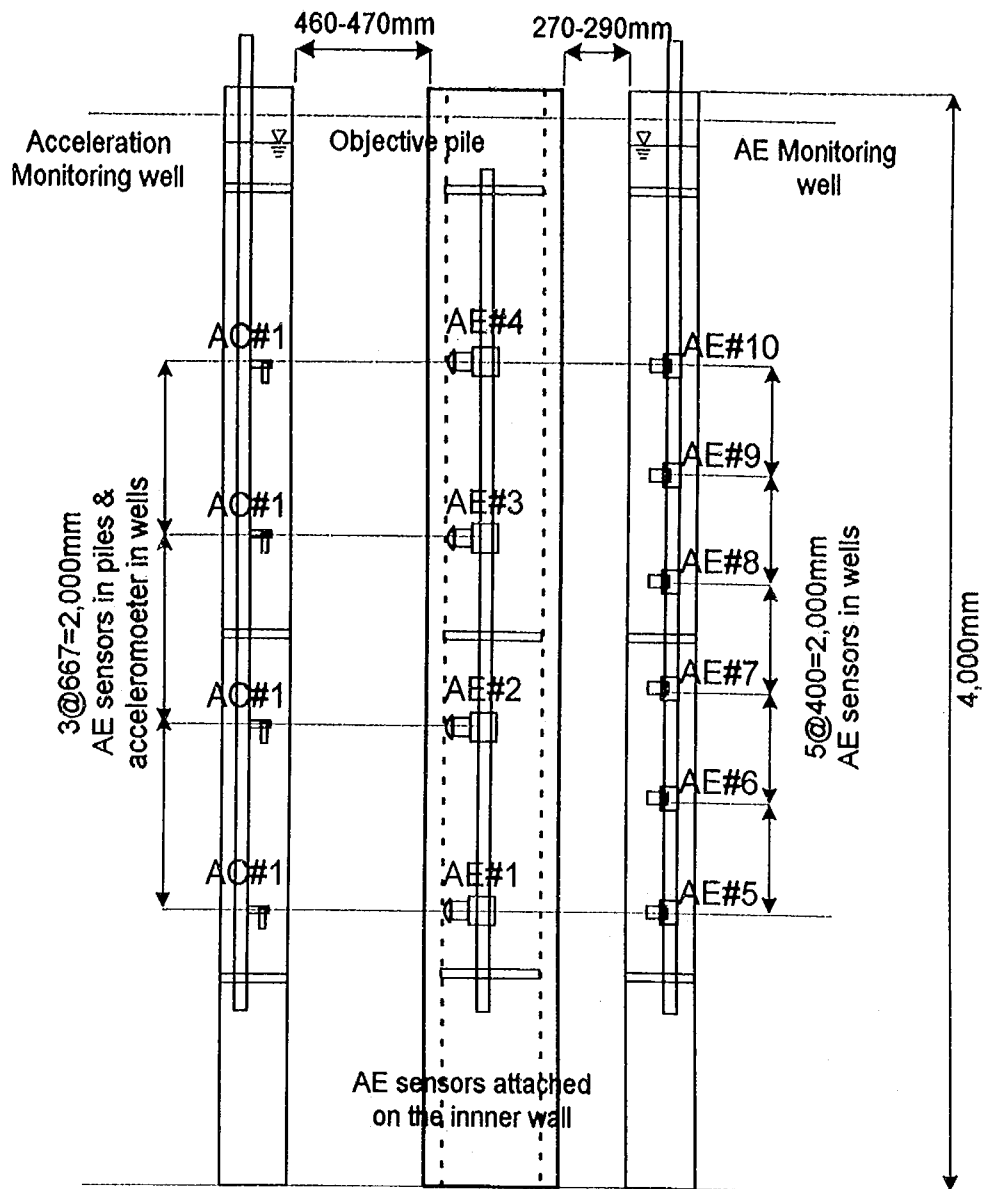


図-5.3.5 AE/加速度センサ配置断面図

ここで、AE センサは杭内にも設置することで杭より発生する AE の直接計測も試みた。AE/加速度センサ配置は図-5.3.5 に示すように、それらの計測範囲を上・下端からそれぞれ 1m 内の範囲 (2m) とした。ただし、A6 杭は上端より 1.1m~3.1m とした。

杭内の AE センサは 2m の範囲を覆うよう #1~#4 まで 4 個、杭外の AE 計測は、杭内と同様 2m の計測範囲を覆うように 40cm 間隔で #5~#10 まで 6 個、加速度計測は同範囲に約 70cm 間隔で #1~#4 まで 4 個設置した。なお、杭外の塩ビ管での AE/加速度計測は、杭体から発生した AE を各センサまで導くために管内を水で満たしている。

AE／加速度計測システムの写真を写真-5.3.1に、ブロック図を図-5.3.6に示す。AE計測は、プリアンプを内蔵した共振周波数60kHzのAEセンサ（R6IUW、PAC社製）を用い、センサで検出されたAEは40dBの増幅後、しきい値35dBを超えた信号のAEパラメータ及びAE波形をAEDSPカード（Mistras、PAC社製）により記録した。加速度計測は25kHz共振型加速度センサ（AE-2000A、富士セラミックス社製）を用い、加速度用アンプにより40dB増幅後、しきい値27dBを超えたAE信号パラメータをAE計測器械（Spartan、PAC社製）により、また波形を高速波形記録装置（TRA-212、PAC社製）により記録した。

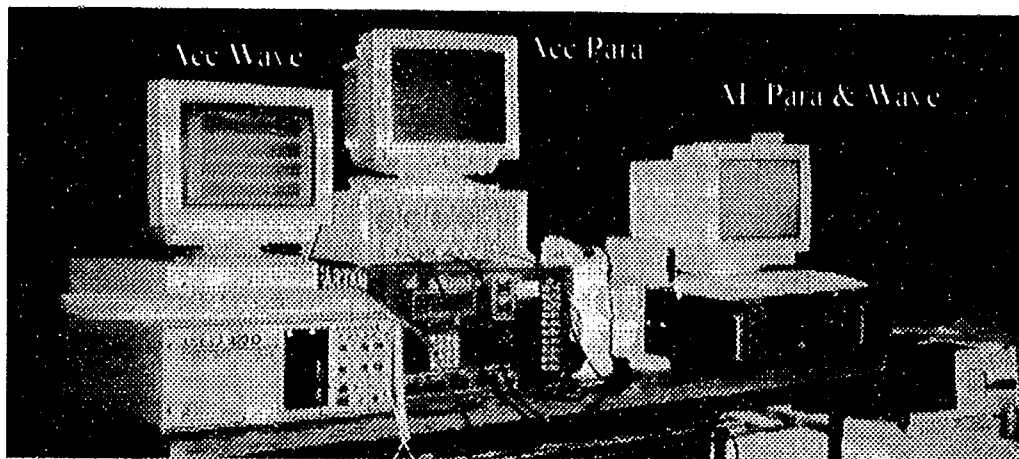


写真-5.3.1 AE／加速度計測システム

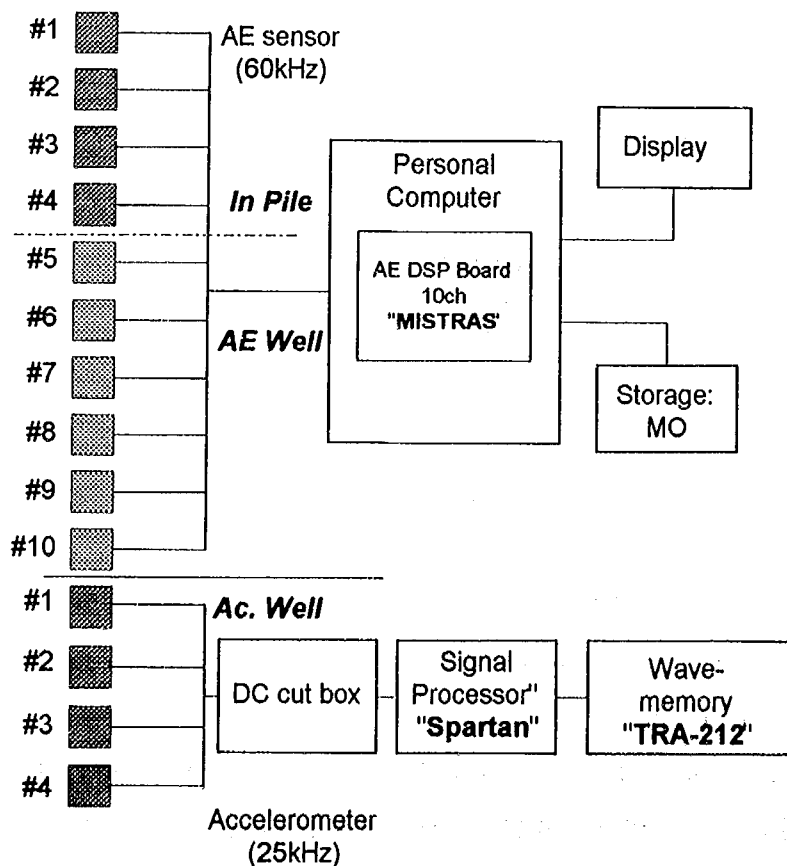


図-5.3.6 AE／加速度計測システムブロック

(2) 試験方法

当実験ピットの最大載荷荷重は、10tf であり、この荷重は対象 RC 杭のコンクリート設計圧縮強度の 6% 程度に留まる。そのため、載荷反力梁上部に約 20tf の鉄板を上載し、設計圧縮強度の 15% まで載荷可能なものとした。載荷は、静的な繰返しと準動的な載荷とし、静的な載荷は、手動ポンプにより 1tf/min で 30tf まで行い、最大荷重を 5 分間保持する。その後、5tf/min で除荷し、これら一連の載荷パターンを合計 3 回繰繰り返した。準動的な載荷は、電動ポンプにより可能な限り短時間で約 20tf の荷重に達するように行った。AE/加速度計測は、載荷開始 3 分～5 分前から始め環境雑音を計測後、荷重増加にともなう AE/加速度を計測した。荷重値は、電動分離式ポンプ及び手動ポンプに 50tf のジャッキを接続し操作した。杭頭変位の測定は、最小読み値 1/100mm、ストローク 100mm のデジタル式変位計を杭頭に 2 箇所、水平二方向の変位を各 1 箇所の合計 4 箇所に設置し、万能デジタル測定器に接続し測定した。

(3) 試験結果

【杭頭水平変位と沈下量】

図-5.3.7、図-5.3.8 に A4 杭の載荷ごとの杭頭水平変位、および杭頭沈下量の経時変化を示す。

図-5.3.9、図-5.3.10 に A5 杭の載荷ごとの杭頭水平変位、および杭頭沈下量の経時変化を示す。

図-5.3.11、図-5.3.12 に A6 杭の載荷ごとの杭頭水平変位、および杭頭沈下量の経時変化を示す。

各杭の杭頭水平変位より特徴的な事項として、A4 杭が各載荷段階で残留変位量が各載荷でのピーク変位量より小さいといういわゆる「弾性的戻り」を示しているのに対し、A6 杭では、除荷段階でも y 方向の変形が進行し、「弾性的戻り」はない。つまり材料の塑性変形が荷重の繰返しとともに明らかに進行していることが推察される。A5 杭は、1 回目の載荷により生じた変形を基にして、2、3 回目の載荷では「弾性的戻り」も少なく、1 回目の変形をトレースしているのみと考えられる。これらの考察より、載荷により塑性変形をとともう破壊現象が生じている可能性が高い杭は、A6 杭のみで、A4 杭については損傷箇所より AE の発生が期待できない、A5 杭は、最初の荷重増加にのみ AE の発生が予期される。

杭頭沈下については、載荷回数の増加により残留変形は残るものの、A4、A5、A6 ともに時間の経過（荷重の増加）とともに安定沈下しているといえる。

【A4 杭について】

図-5.3.13 に A4 杭の荷重、AE 発生源位置の経時変化を示す。

図-5.3.14 に A4 杭の AE 発生源及び各 AE 源の大きさをリングダウンカウンタの大きさに反映させた円で示す。同図において、locgrp1 は杭内に設置した AE センサより得られた結果、つまり杭体で発生した AE 源を示す。locgrp2 は杭外の塩ビ管計測孔で計測した AE 源位置を示す。以下、locgrp1 での AE を杭内 AE、locgrp2 の AE を杭外 AE とする。実際のクラック位置は、図中水平実線で示した 2.07m の 1 箇所である。

これらの図から、杭内 AE 源は実際のクラック位置付近には認められず、1m、1.5m 付近に多く存在する。杭外 AE は、載荷荷重約 2tf から計測範囲全体で発生するが、杭下方の AE アクティビティが上方に比べ高いといえる。

図-5.3.15 に A4 杭の 1 回目載荷により杭内に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント (Event)、立上り時間 (Rise time)、継続時間 (Duration time)、リングダウンカウント (Ringdown-count)、エネルギー (Energy)、振幅値 (Amplitude) で示す。

図-5.3.16 に A4 杭の 1 回目載荷により杭外の計測孔に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

図-5.3.17 に A4 杭の 2 回目載荷により杭内に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

図-5.3.18 に A4 杭の 2 回目載荷により杭外の計測孔に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

A4 杭の 3 回目載荷により杭内に設置した AE センサで得られた AE イベントはなかった。

図-5.3.19 に A4 杭の 3 回目載荷により杭外の計測孔に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

図-5.3.12、図-5.3.17 より、杭損傷位置に AE 源は認められず、それより上方の 1m、1.5m (1 回目載荷)、1.3m (2 回目) に AE 源が存在する。これらの結果から、杭損傷付加時に目視確認されたクラック以外の位置、ここでは上方に杭表面で観察できない微小クラックが発生していた可能性が高い。さらに、杭への損傷は、曲げ破壊により実施され、目視観察されたクラック位置が杭中央部であることから、杭中央部で生じたクラックが杭長手方向に対して直角円周方向となる一方で、それより上方で発生したクラックは、載荷軸方向に向かい傾斜している可能性が高い。したがって、杭への鉛直載荷により上方のクラック断面の一部に応力が集中した可能性があり、それにとまなう更なるクラック進展や新たな微小破壊が生じ AE を発生したものと推測される。

図-5.3.16、図-5.3.18、図-5.3.19 より、杭外の AE は計測範囲全体で発生し、特に下方で顕著である。載荷回数の増加により AE 発生数および AE パラメータの減少が認められる。AE 源が杭全体で観察され、特に下方で顕著であることから、杭と地盤との相互作用により生じた AE の可能性が高い。したがって、杭損傷箇所からの AE との関連性は低いと思われる。杭外の AE は、杭頭の変形とともに後述する。

【A5 杭について】

図-5.3.20 に A5 杭の荷重、AE 発生源位置の経時変化を示す。

図-5.3.21 に A5 杭の AE 発生源及び各 AE 源の大きさをリングダウンカウントの大きさに反映させた円で示す。実際のクラック位置は、図中水平実線で示した 1.32m、1.70~1.80m の 2 箇所である。

これらの図から、杭内 AE は実際の損傷位置付近に認められる。杭外 AE は A4 杭と同様に計測範囲全体で認められる。

図-5.3.22 に A5 杭の 1 回目載荷により杭内に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

図-5.3.23 に A5 杭の 1 回目載荷により杭外の計測孔に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

A5 杭は、2 回目以降の載荷により杭内に設置した AE センサで得られた AE イベントはなかった。

図-5.3.24 に A5 杭の 2 回目載荷により杭外の計測孔に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

A5 杭の 3 回目載荷により杭内に設置した AE センサで得られた AE はなかった。

図-5.3.25 に A5 杭の 3 回目載荷により杭外の計測孔に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

図-5.3.22 および 2、3 回目の載荷により杭内 AE が検出されなかったことより、杭内 AE は 1 回目の載荷によりクラックの閉口にともない損傷位置より発生し、その後の載荷では新たなクラック進展やクラック面に沿うすべりなどは生じなかったものと考えられる。これらの結果は、「1 回目の載荷により生じた変形を基にして、2、3 回目の載荷では”弾性的戻り”も少なく、1 回目の変形をトレースしているのみ」という図-5.3.9 の杭頭水平変位結果により裏付けられている。

図-5.3.23、図-5.3.24、図-5.3.25 より、杭外の AE は損傷位置に集中せず、計測範囲全体に認められる。載荷回数の増加により AE 発生数および AE パラメータの減少が認められる。杭損傷からの AE との関連性は低いと考えられる。

【A6 杭について】

図-5.3.26 に A6 杭の荷重、AE 発生源位置の経時変化を示す。

図-5.3.27 に A6 杭の AE 発生源及び各 AE 源の大きさをリングダウンカウントの大きさに反映させた円で示す。実際のクラック位置は、図中水平実線で示した 1.2m、1.3~1.4m、2.9~3.0m の 3 箇所である。

これらの図から、杭内の AE は初期荷重 2tf 後から損傷位置付近に多く認められる。杭外の AE は計測範囲の上下端側及び、中央に認められる。計測範囲上下端は損傷位置と合致するが、中央付近に AE 発現があることから、杭の損傷とは無関係な異なる発生要因による AE である可能性が高いと思われる。

図-5.3.28 に A6 杭の 1 回目載荷により杭内に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

図-5.3.29 に A6 杭の 1 回目載荷により杭外の計測孔に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

図-5.3.30 に A6 杭の 2 回目載荷により杭内に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

図-5.3.31 に A6 杭の 2 回目載荷により杭外の計測孔に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

図-5.3.32 に A6 杭の 3 回目載荷により杭内に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

図-5.3.33 に A6 杭の 3 回目載荷により杭外の計測孔に設置した AE センサで得られた AE 源の深度分布をイベント、立上り時間、継続時間、リングダウンカウント、エネルギー、振幅値で示す。

図-5.3.28、図-5.3.30、図-5.3.32 より、載荷回数の増加による AE 発生数、AE パラメータの減少は認められるが、損傷位置付近での AE 発現は明らかである。特に、1.2m 位置に比べ、1.3～1.40m、2.9～3.0m の 2 箇所が発生した AE 発生数および AE パラメータが大きい。

図-5.3.34 に A4 杭の杭内累積 AE イベントと載荷荷重、図-5.3.35 に A4 杭の杭外累積 AE イベントと載荷荷重を示す。

図-5.3.36 に A4 杭の杭内累積 AE イベントと杭頭沈下、図-5.3.37 に A4 杭の杭外累積 AE イベントと杭頭沈下を示す。

図-5.3.38 に A4 杭の杭内累積 AE イベントと水平 x 方向変位、図-5.3.39 に A4 杭の杭外累積 AE イベントと水平 x 方向変位を示す。

図-5.3.40 に A4 杭の杭内累積 AE イベントと水平 y 方向変位、図-5.3.41 に A4 杭の杭外累積 AE イベントと水平 y 方向変位を示す。

図-5.3.42 に A5 杭の杭内累積 AE イベントと載荷荷重、図-5.3.43 に A5 杭の杭外累積 AE イベントと載荷荷重を示す。

図-5.3.44 に A5 杭の杭内累積 AE イベントと杭頭沈下、図-5.3.45 に A5 杭の杭外累積 AE イベントと杭頭沈下を示す。

図-5.3.46 に A5 杭の杭内累積 AE イベントと水平 x 方向変位、図-5.3.47 に A5 杭の杭外累積 AE イベントと水平 x 方向変位を示す。

図-5.3.48 に A5 杭の杭内累積 AE イベントと水平 y 方向変位、図-5.3.49 に A5 杭の杭外累積 AE イベントと水平 y 方向変位を示す。

図-5.3.50 に A6 杭の杭内累積 AE イベントと載荷荷重、図-5.3.51 に A6 杭の杭外累積 AE イベントと載荷荷重を示す。

図-5.3.52 に A6 杭の杭内累積 AE イベントと杭頭沈下、図-5.3.53 に A6 杭の杭外累積 AE イベントと杭頭沈下を示す。

図-5.3.54 に A6 杭の杭内累積 AE イベントと水平 x 方向変位、図-5.3.55 に A6 杭の杭外累積 AE イベントと水平 x 方向変位を示す。

図-5.3.56 に A6 杭の杭内累積 AE イベントと水平 y 方向変位、図-5.3.57 に A6 杭の杭外累積 AE イベントと水平 y 方向変位を示す。

図-5.3.34 の A4 杭の杭内累積 AE イベントと繰返し荷重の関係から、1 回目の載荷により載荷初期から発生した AE が 2 回目の載荷では、先行最大荷重（1 回目の最大荷重 22tf）を超過し、25tf に至るまで急増しないことがわかる。最大荷重を十分超過した後での AE 増加は、いわゆる Felicity Ratio^{*1)}が 1 より

大きいという健全な材料状態を示している。図-5.3.50のA6杭での結果から、載荷荷重とAEアクティビティーの関係が明白となる。この図から、1回目の載荷にともなうAEの単調増加が、2回目の載荷では、先行最大荷重30tf近づかないとAEが発現せず、3回目の載荷でも同様な傾向となる。しかし、2回目以降のAE発現は先行最大荷重より若干小さい荷重からとなり、Felicity Ratioが1より小さいという不健全な材料状態を示す。

図-5.3.35、図-5.3.43、図-5.3.51から、杭外のAE発現と載荷荷重は、荷重の繰返しによりAEアクティビティーが低下するものの明らかな関係が認められない。

図-5.3.38～図-5.3.41、図-5.3.46～図-5.3.49、図-5.3.54～図-5.3.57の杭頭水平x、y方向変位より、杭頭水平変位と杭内および杭外AEの発現に明らかな関係は認められない。特に、1回目の載荷でx、y方向変位ともに認められない図-5.3.46～図-5.3.49で、これらとは無関係に杭内・外ともにAEの発現が認められることから「杭頭水平変位の挙動は杭内・杭外のAE発生とは無関係である」といえる。

図-5.3.36、図-5.3.44、図-5.3.52の杭内AEと杭頭沈下の関係から、杭内AEは杭頭沈下とは無関係な挙動を示すことがわかる。一方、図-5.3.37、図-5.3.45、図-5.3.53の杭外AEと杭頭沈下の関係から、杭頭沈下に伴うAE増加、ならびに、先行最大沈下量付近でのAE発生の急増が認められる。これらの事項は、特に図-5.3.53で顕著である。

*1) Felicity Ratio: 繰返し荷重下にある材料で、材料が健全な場合、先行最大荷重までAEは発生しないことが知られている。このことをKaiser効果と呼ぶ。不健全な材料の場合、先行最大荷重に至る前からAEは発現し、このときの荷重値 P_{AE} と先行最大荷重 P_{pr} との比がFelicity ratioと呼ばれ次のように定義される。

$$\text{Felicity ratio} = P_{AE}/P_{pr}$$

材料が健全な場合は1以上、不健全な場合は1以下となる。

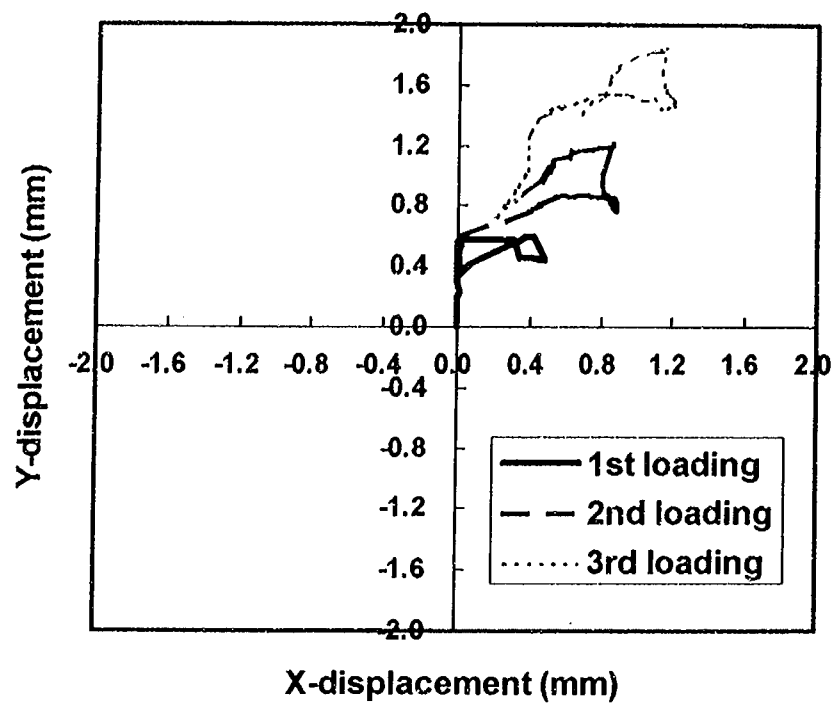


図-5.3.7 A4 杭の載荷ごとの杭頭水平変位

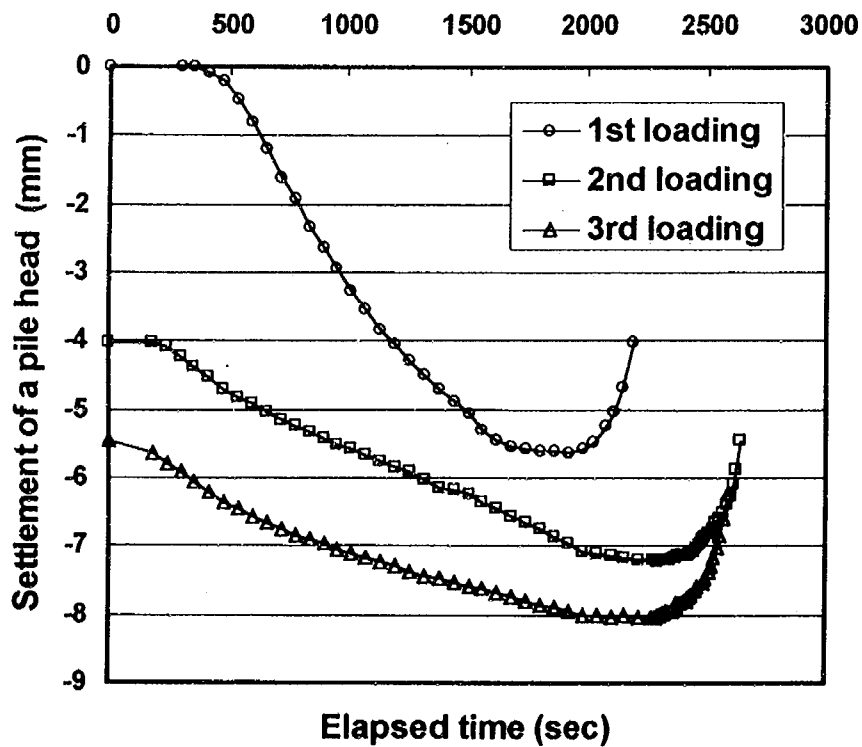


図-5.3.8 A4 杭の杭頭沈下量の経時変化

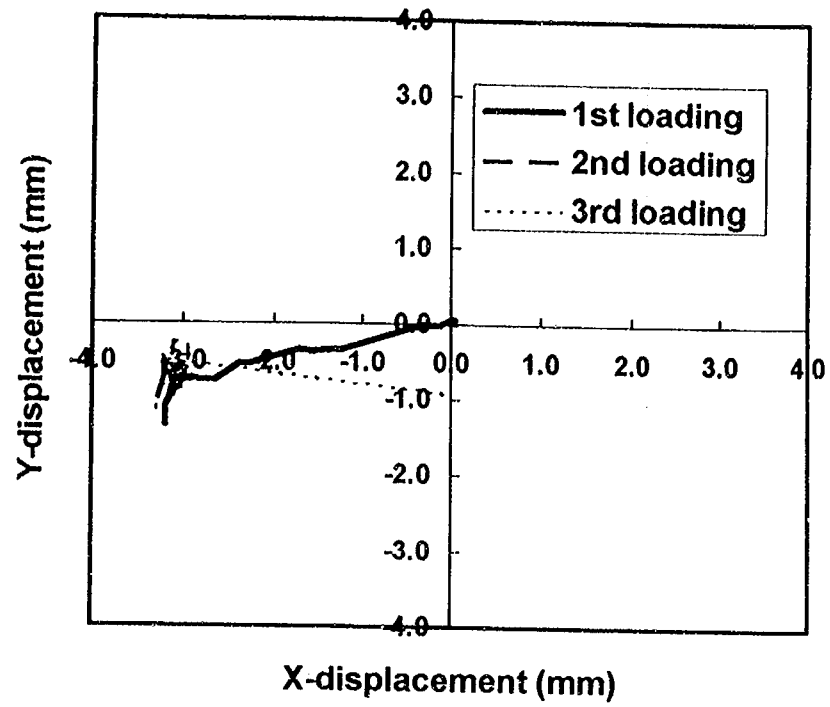


図-5.3.9 A5 杭の載荷ごとの杭頭水平変位

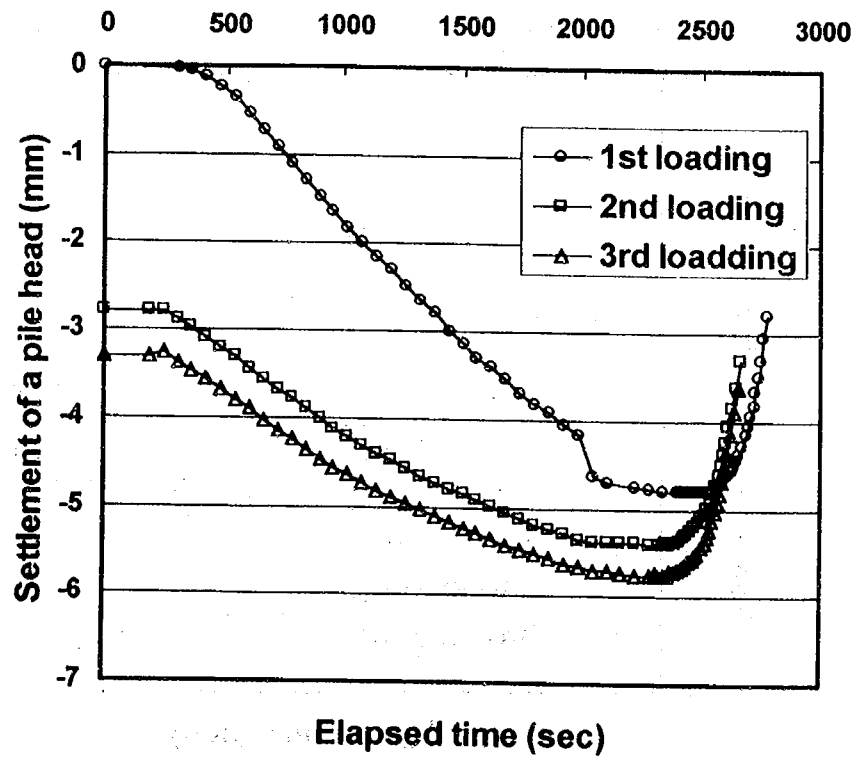


図-5.3.10 A5 杭の杭頭沈下量の経時変化

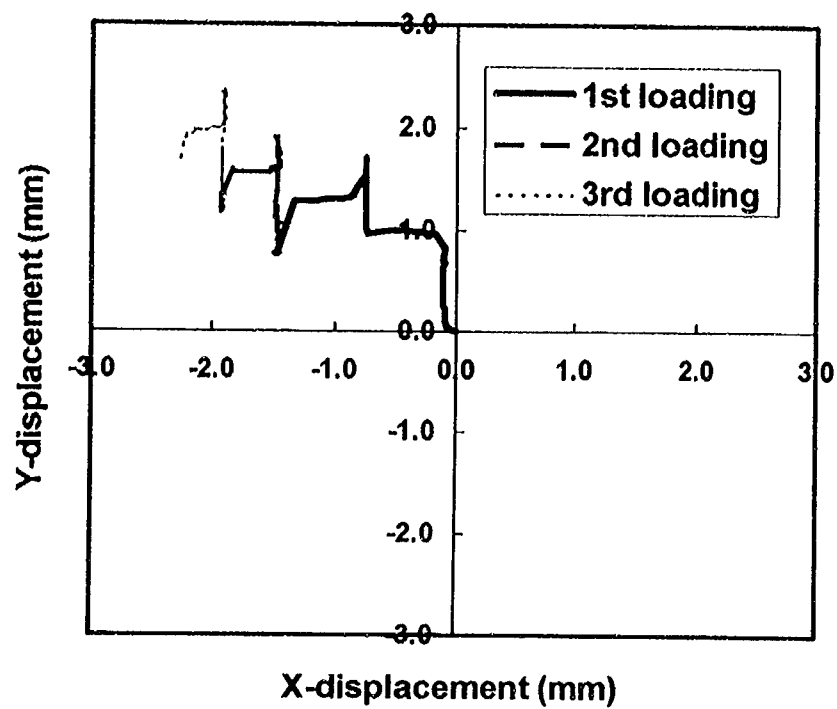


図-5.3.11 A6 杭の載荷ごとの杭頭水平変位量

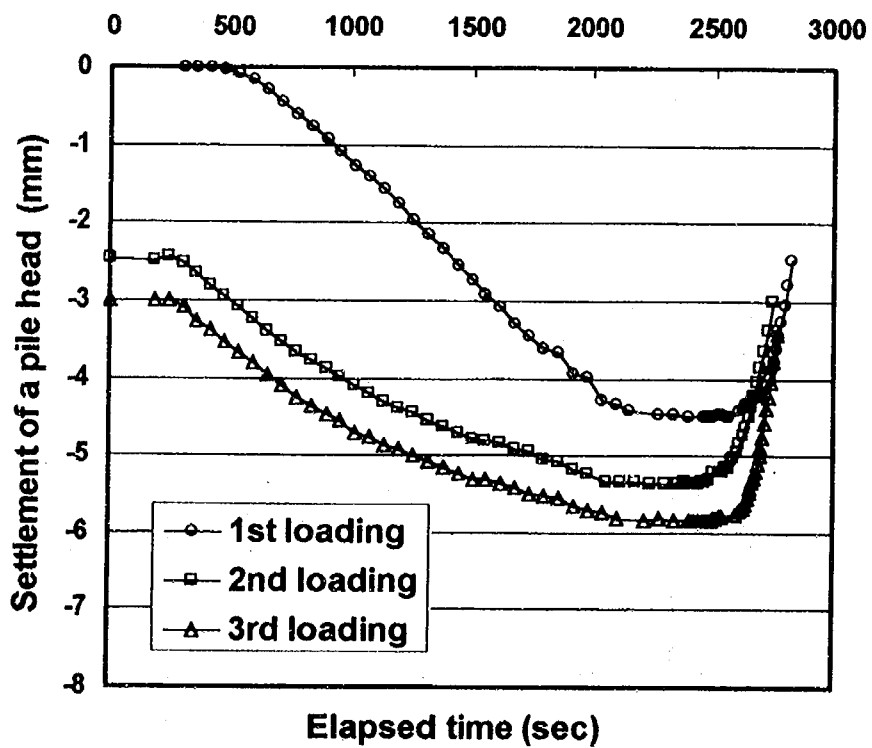


図-5.3.12 A6 杭の杭頭沈下量の経時変化

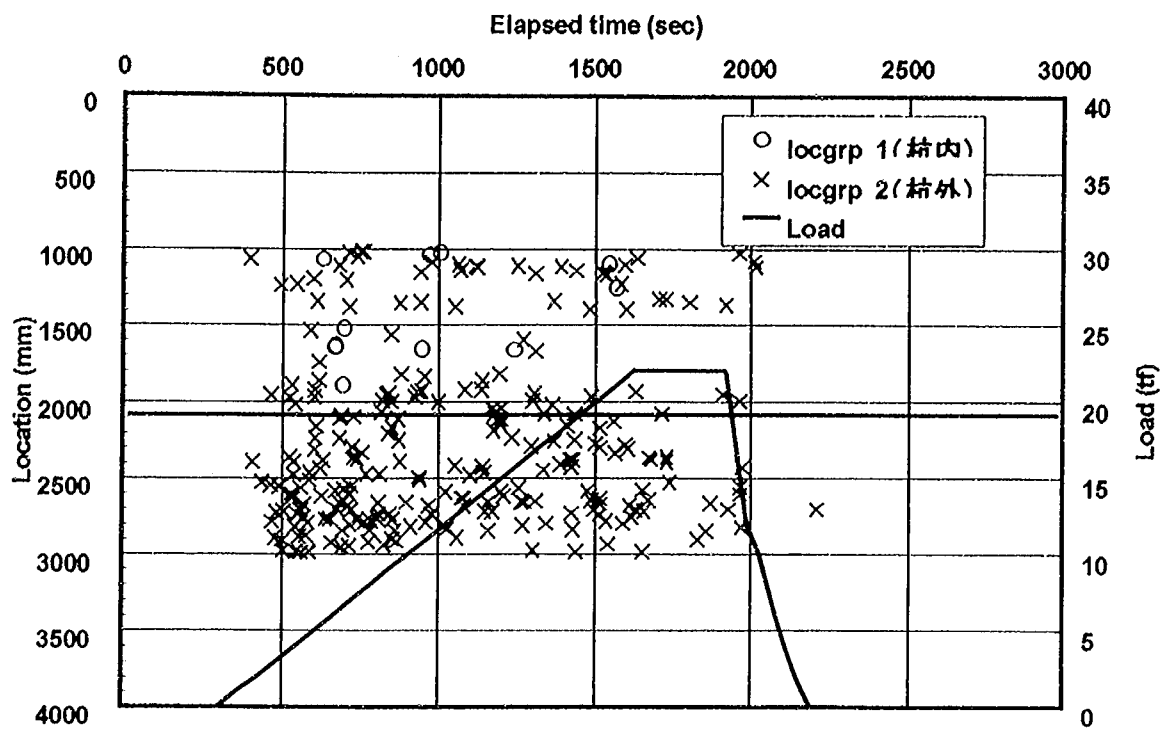


図-5.3.13 A4 杭の載荷及び AE 発生源の経時変化 (第 1 回載荷)

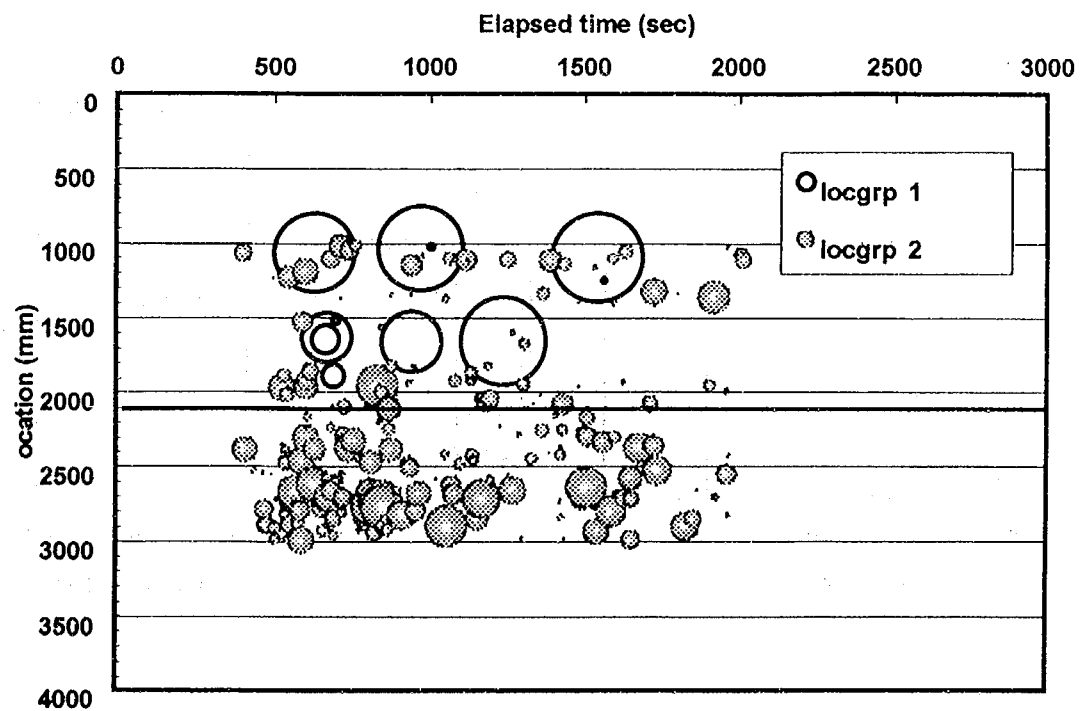


図-5.3.14 A4 杭の荷重及びリングダウンカウントによる AE 発生源の経時変化 (第 1 回載荷)

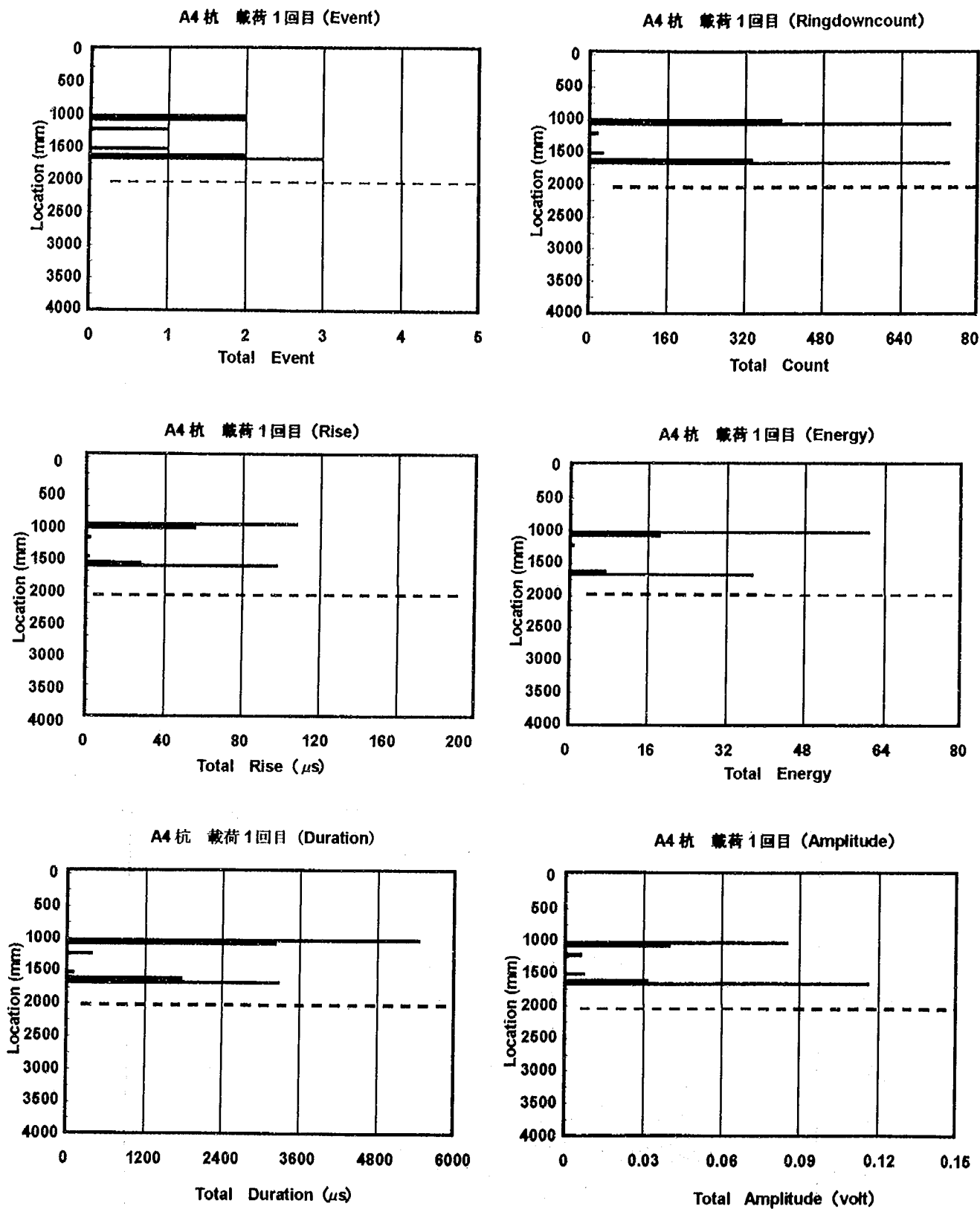


図-5.3.15 A4 杭の 1 回目載荷により杭内 AE センサで得られた AE 源深度分布

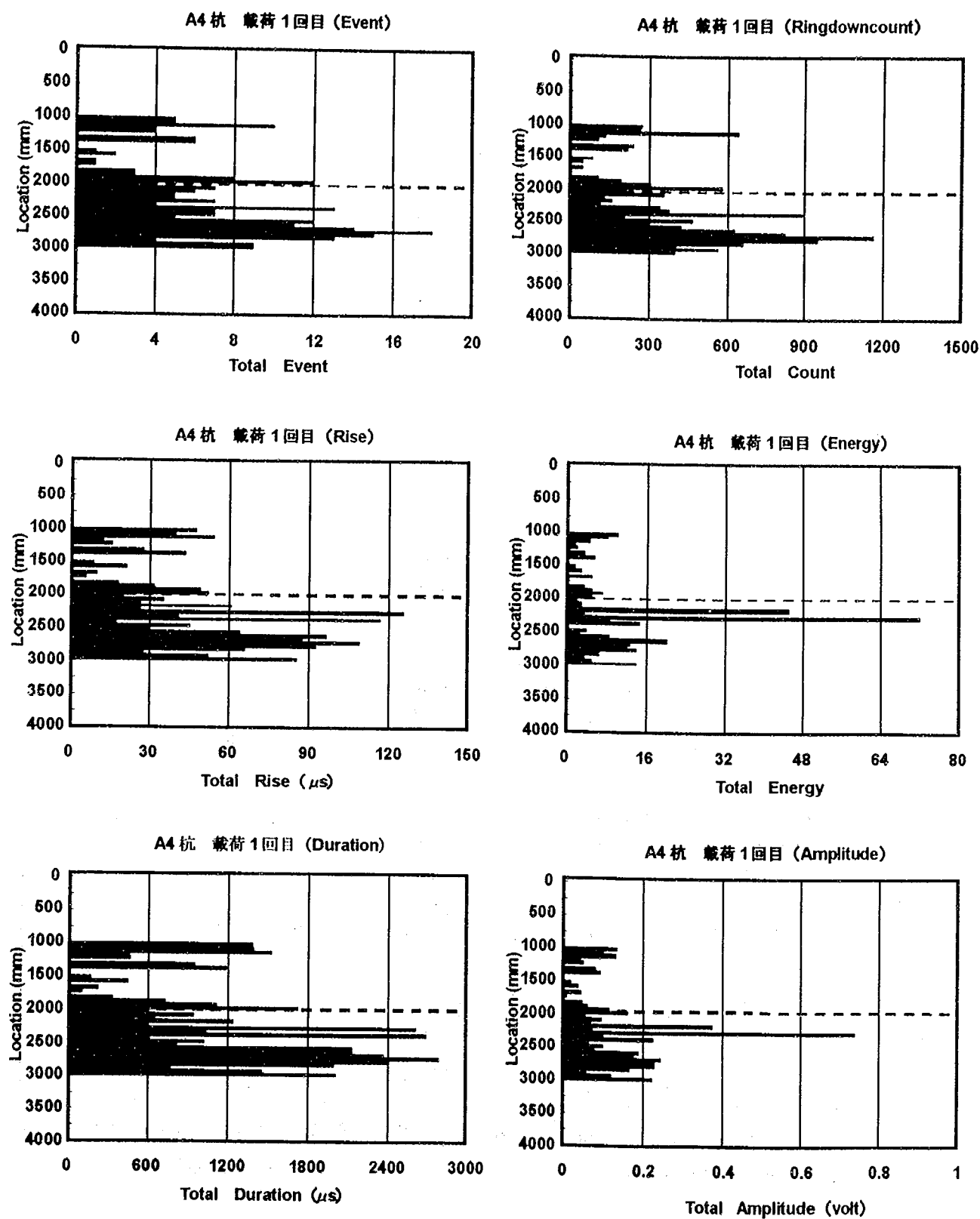


図-5.3.16 A4 杭の 1 回目載荷により杭外 (WG) AE センサで得られた AE 源深度分布

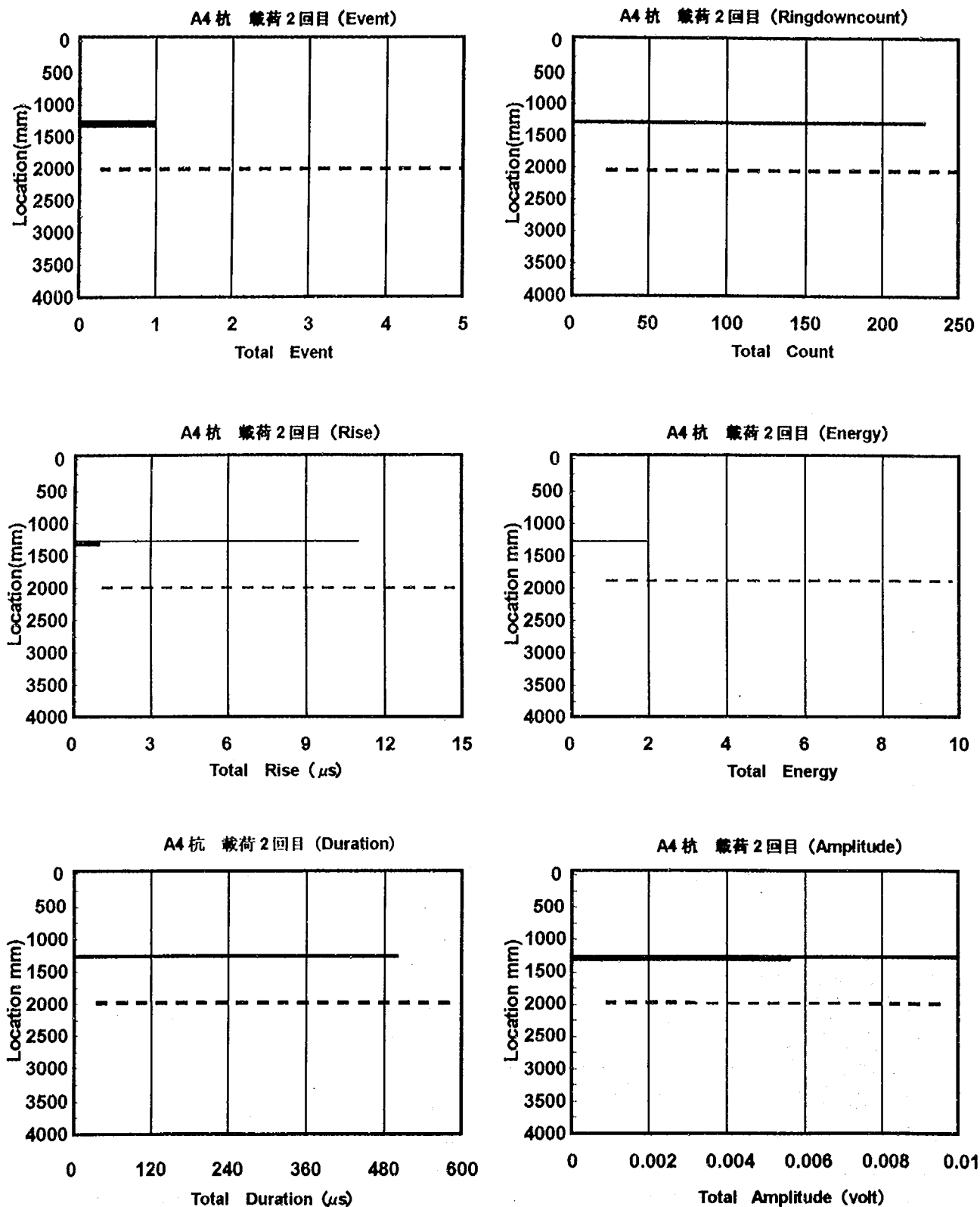


図-5.3.17 A4 杭の 2 回目載荷により杭内 AE センサで得られた AE 源深度分布

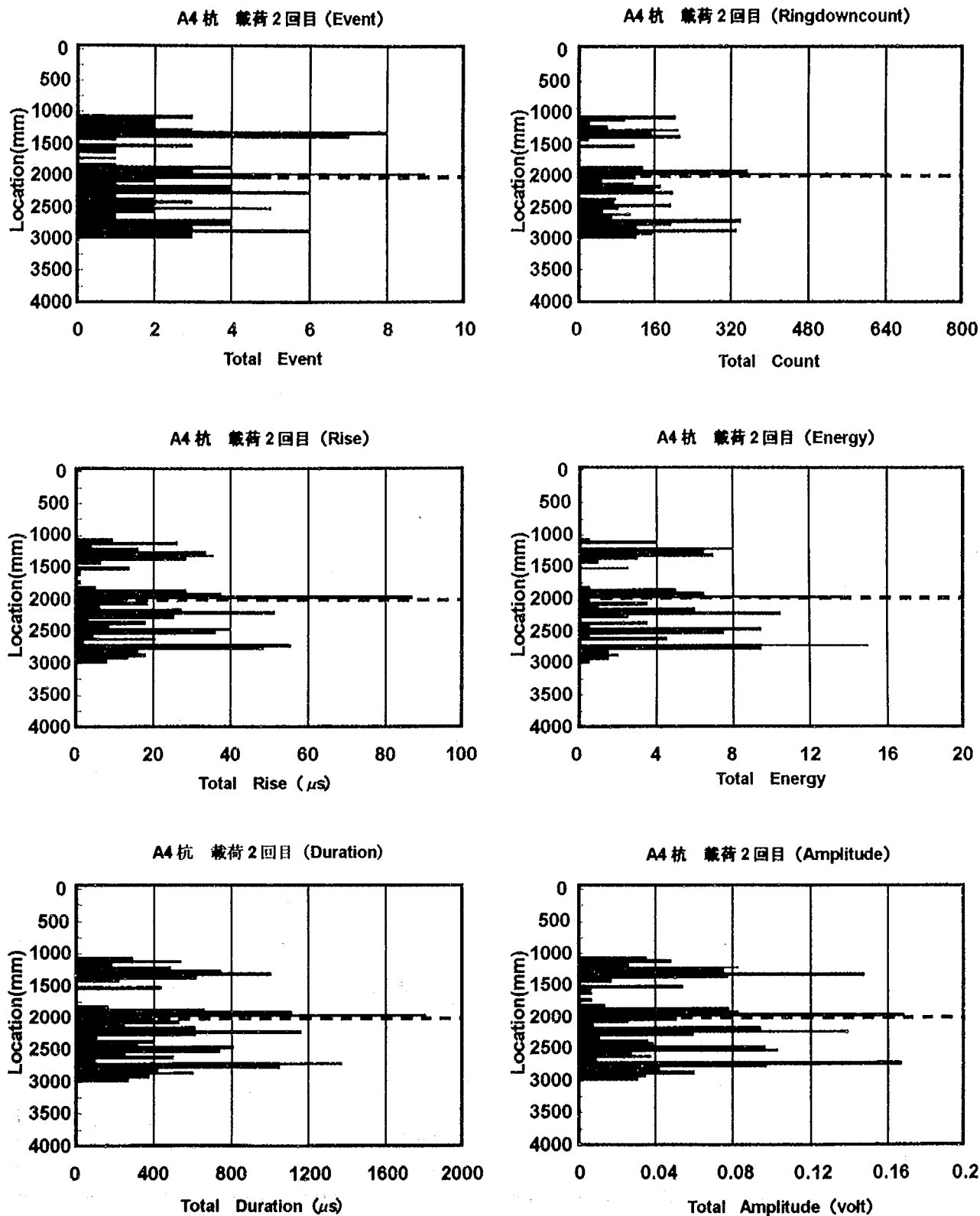


図-5.3.18 A4 杭の 2 回目載荷により杭外 (WG) AE センサで得られた AE 源深度分布

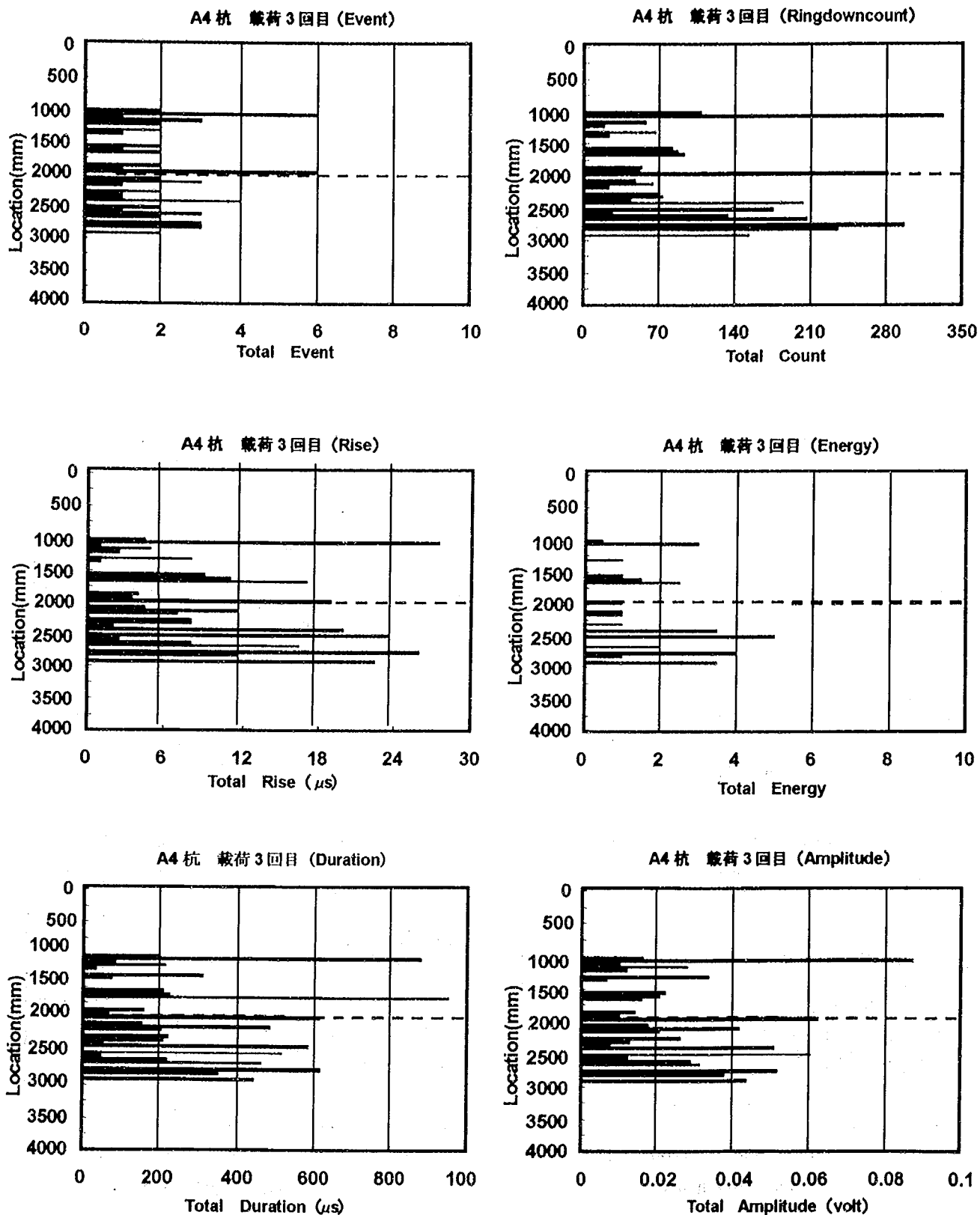


図-5.3.19 A4 杭の 3 回目載荷により杭外 (WG) AE センサで得られた AE 源深度分布

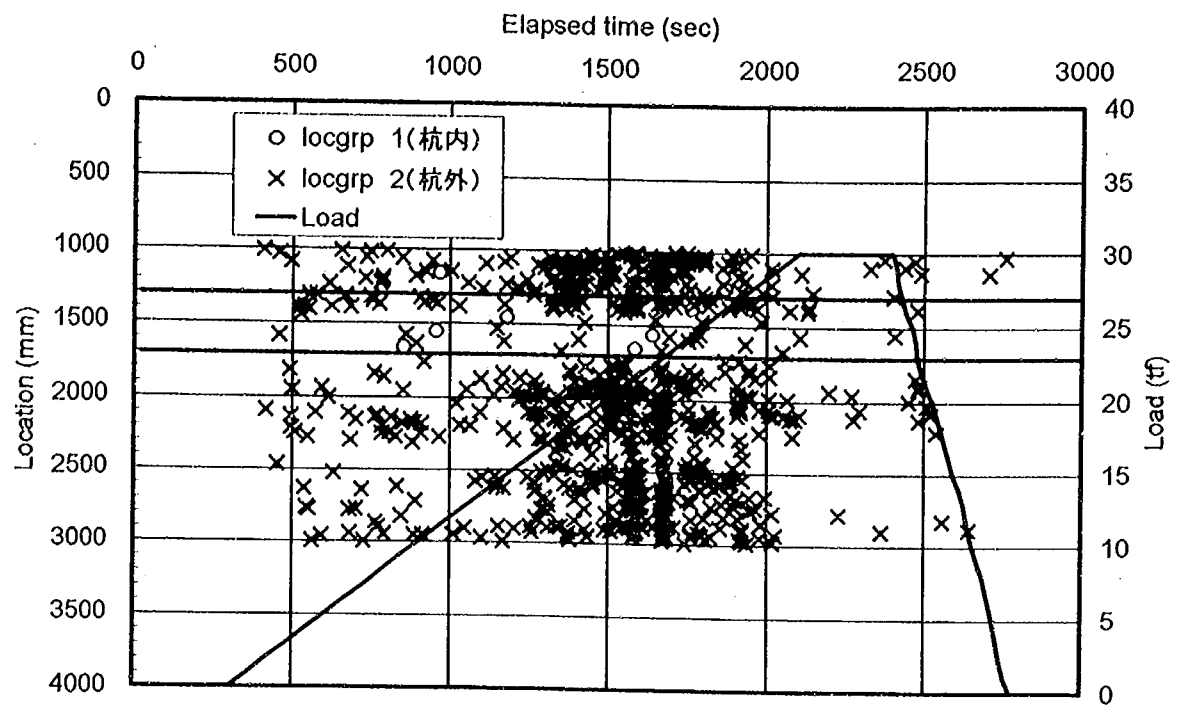


図-5.3.20 A5 杭の載荷及び AE 発生源の経時変化 (第 1 回載荷)

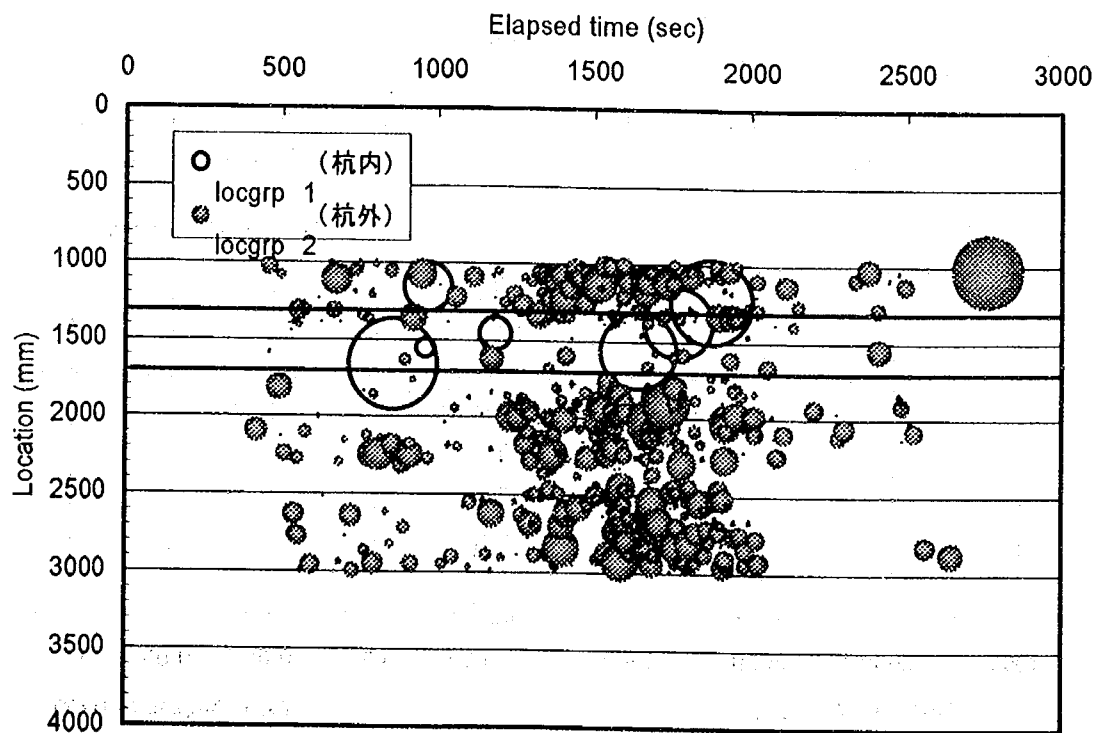


図-5.3.21 A5 杭の載荷及びリングダウンカウントによる AE 発生源の経時変化 (第 1 回載荷)

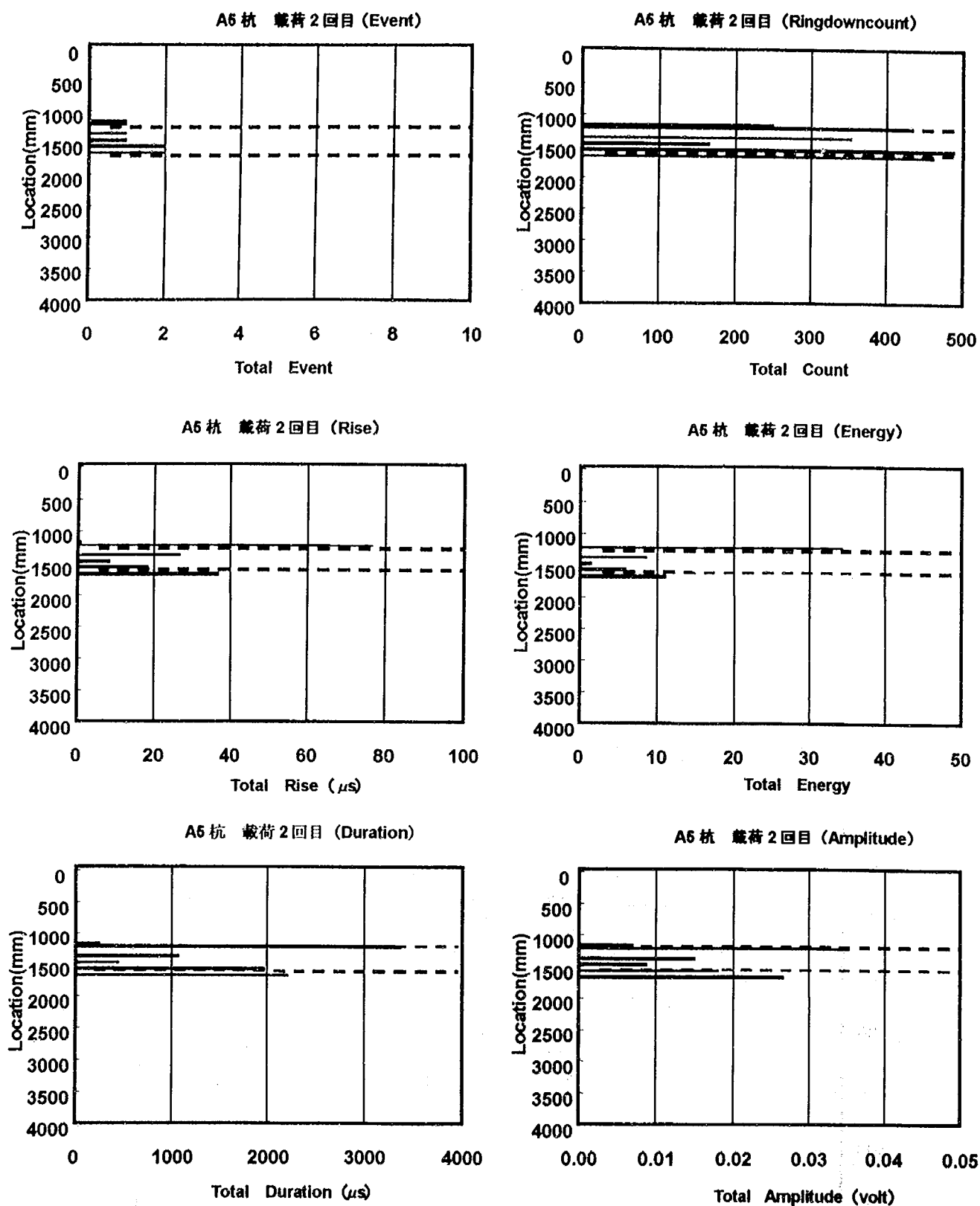


図-5.3.22 A5 杭の 1 回目載荷により杭内 AE センサで得られた AE 源深度分布

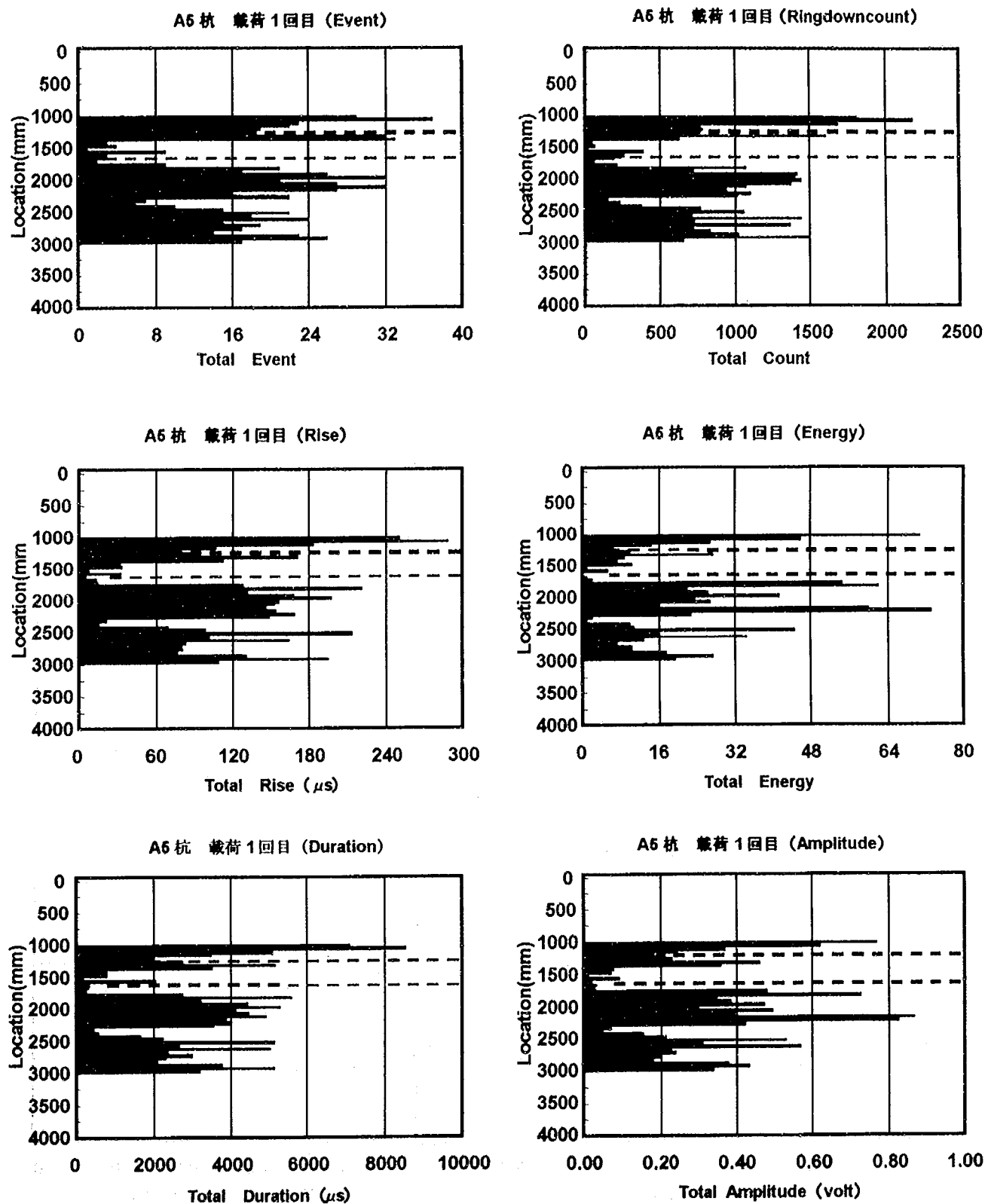


図-5.3.23 A5 杭の 1 回目載荷により杭外 (WG) AE センサで得られた AE 源深度分布

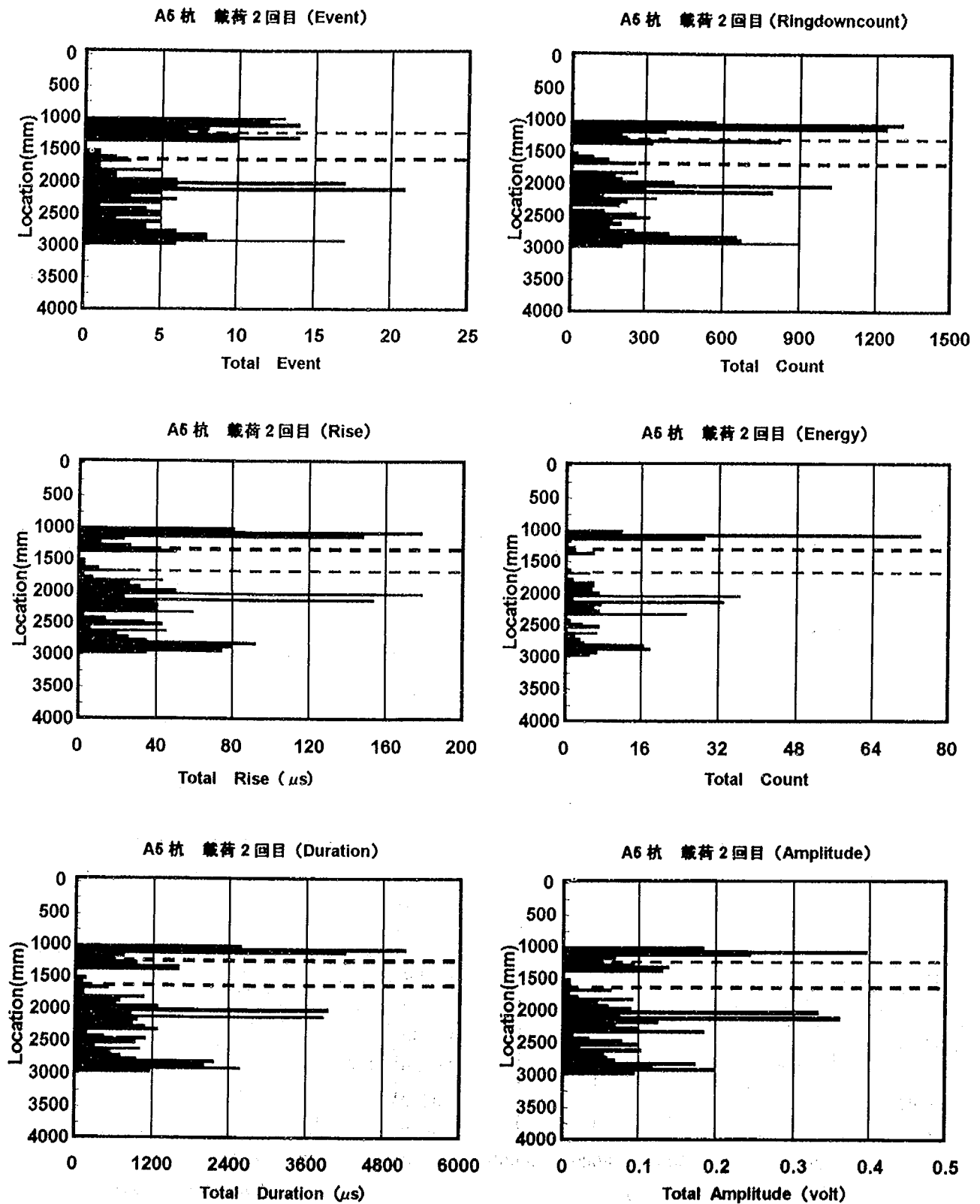


図-5.3.24 A5 杭の 2 回目載荷により杭外 (WG) AE センサで得られた AE 源深度分布

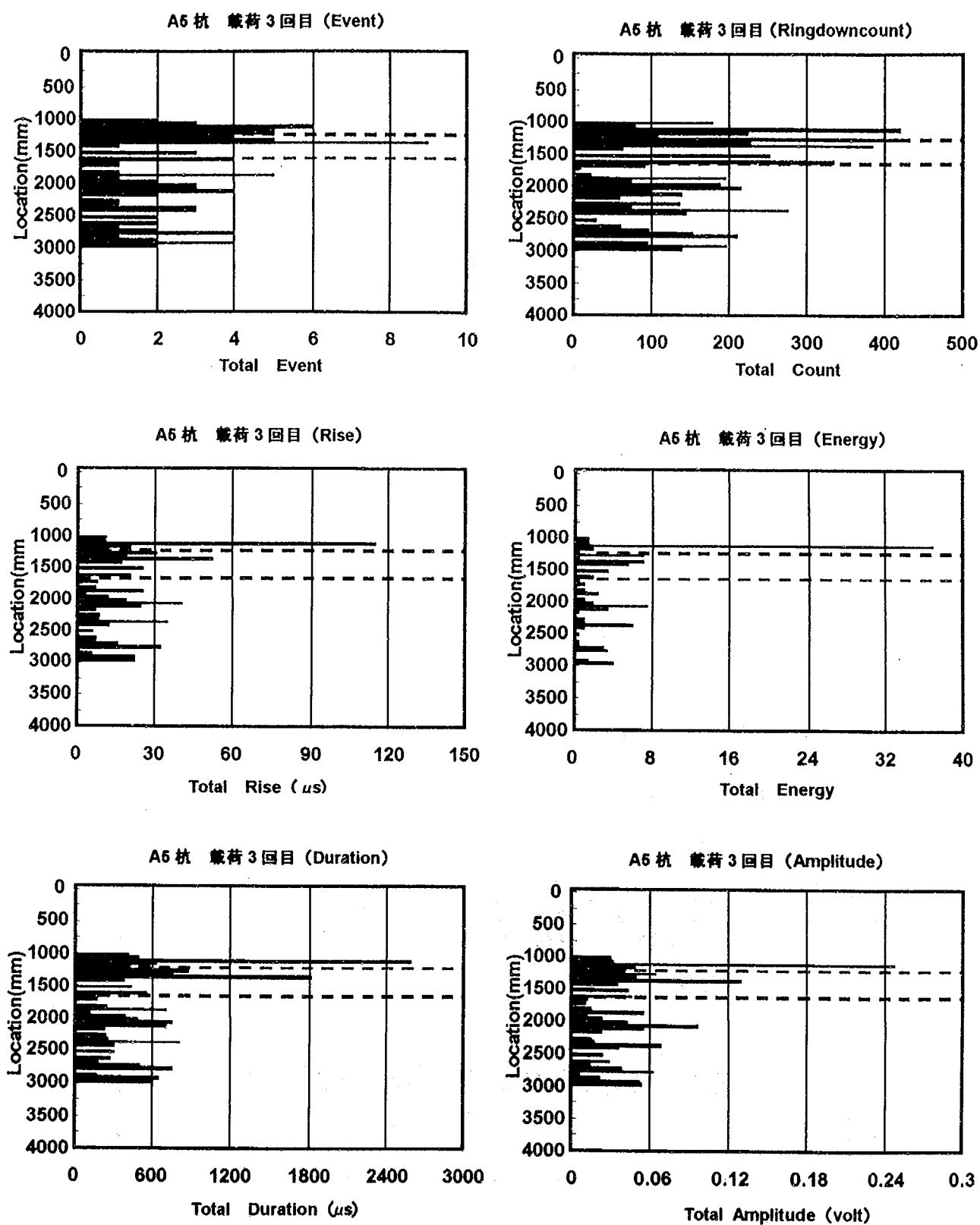


図-5.3.25 A5 杭の 3 回目載荷により杭外 (WG) AE センサで得られた AE 源深度分布

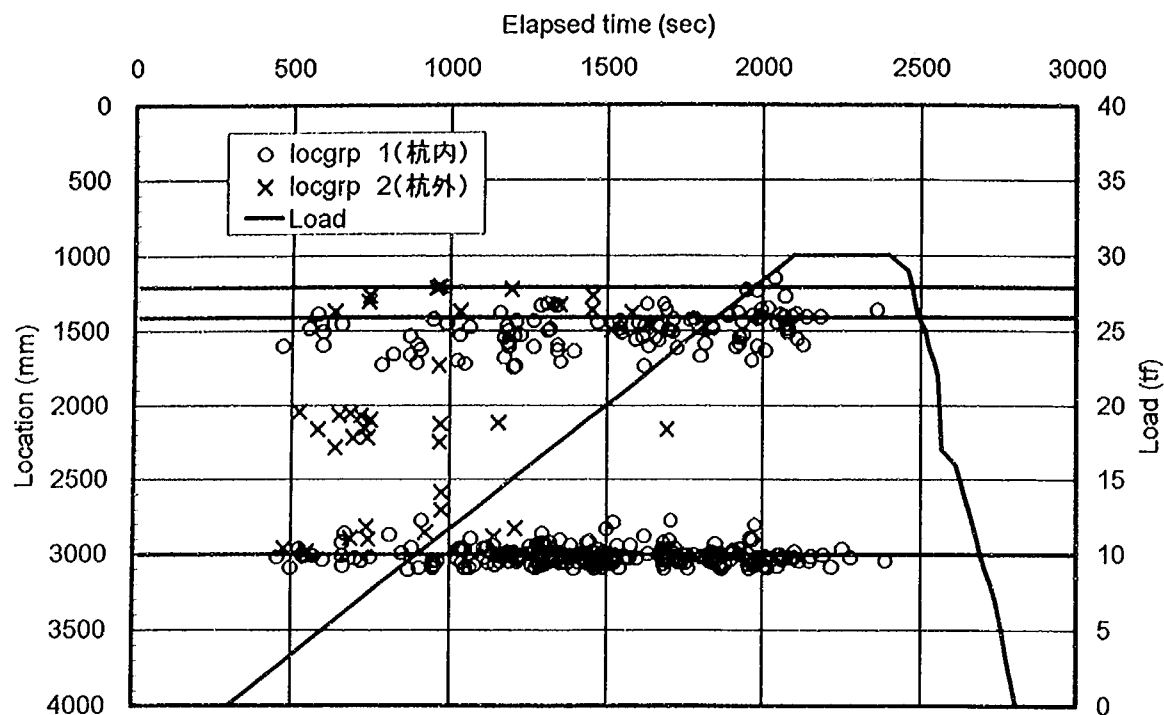


図-5.3.26 A6 杭の載荷及び AE 発生源の経時変化 (第 1 回載荷)

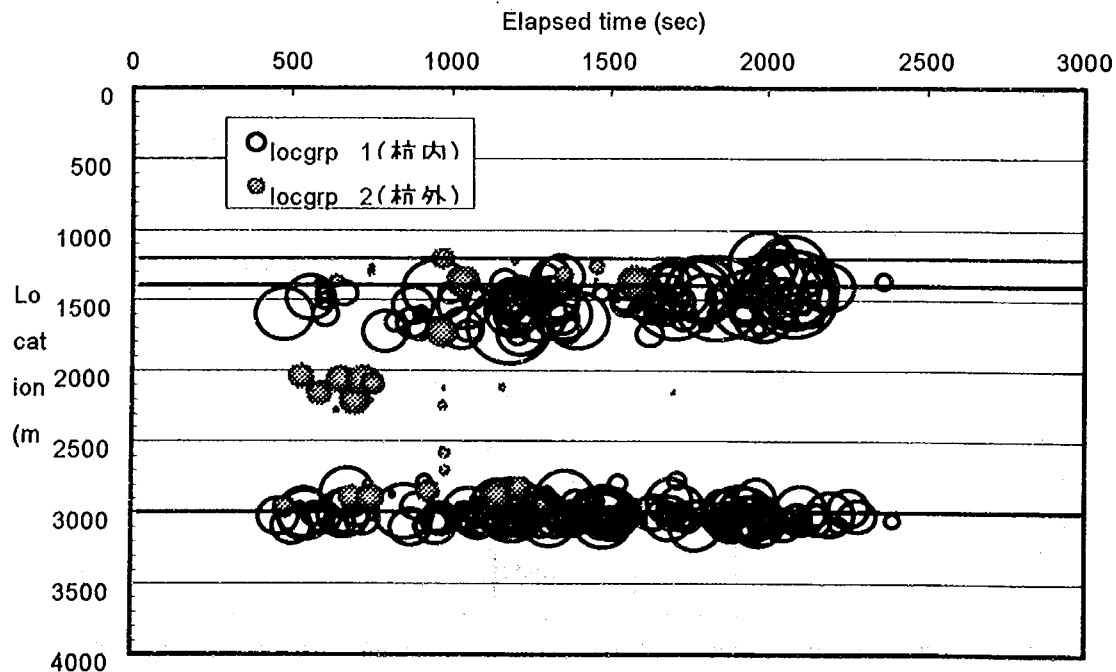


図-5.3.27 A6 杭の荷重及びリングダウンカウントによる AE 発生源の経時変化 (第 1 回載荷)

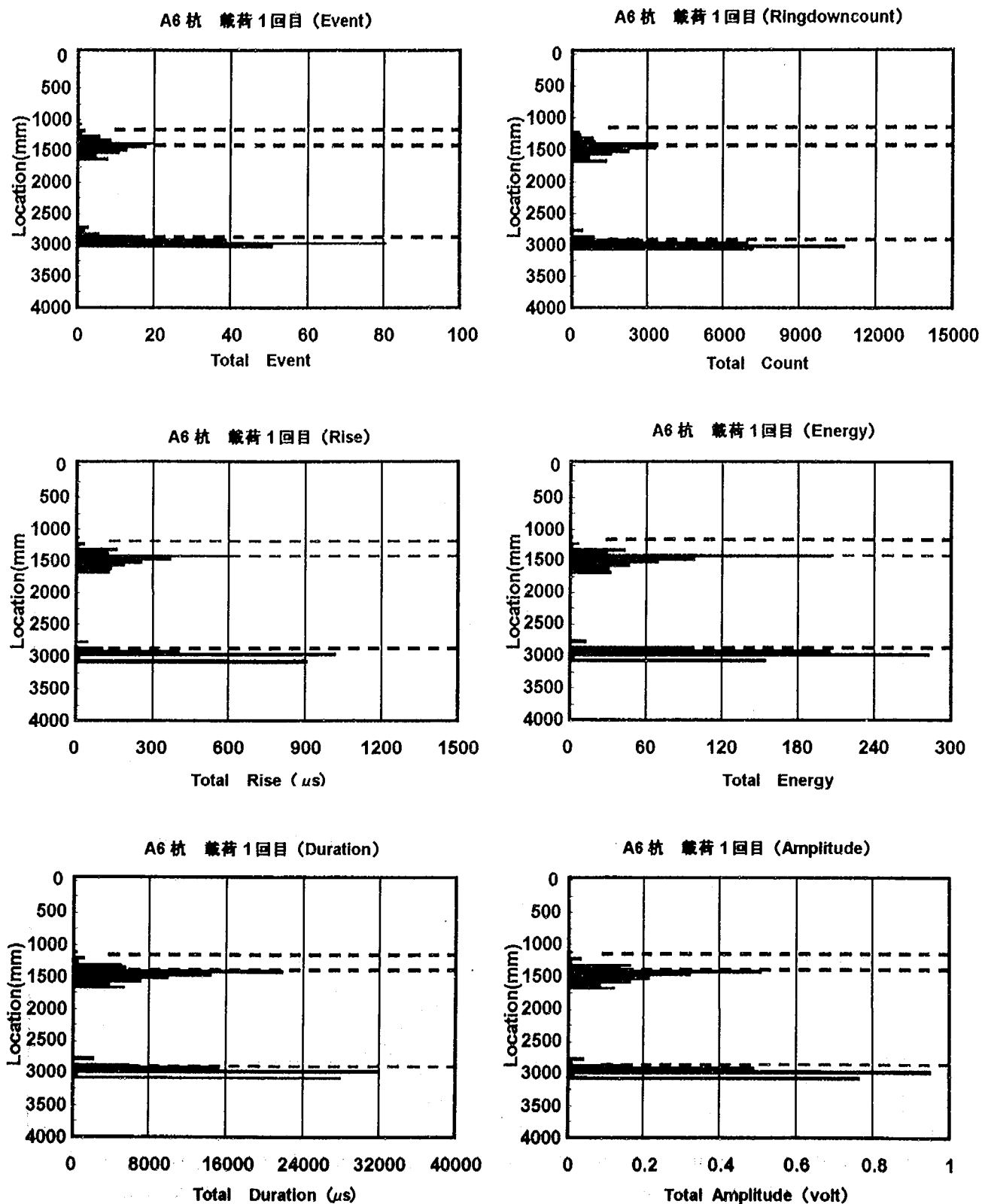


図-5. 3. 28 A6 杭の 1 回目載荷により杭内 AE センサで得られた AE 源深度分布

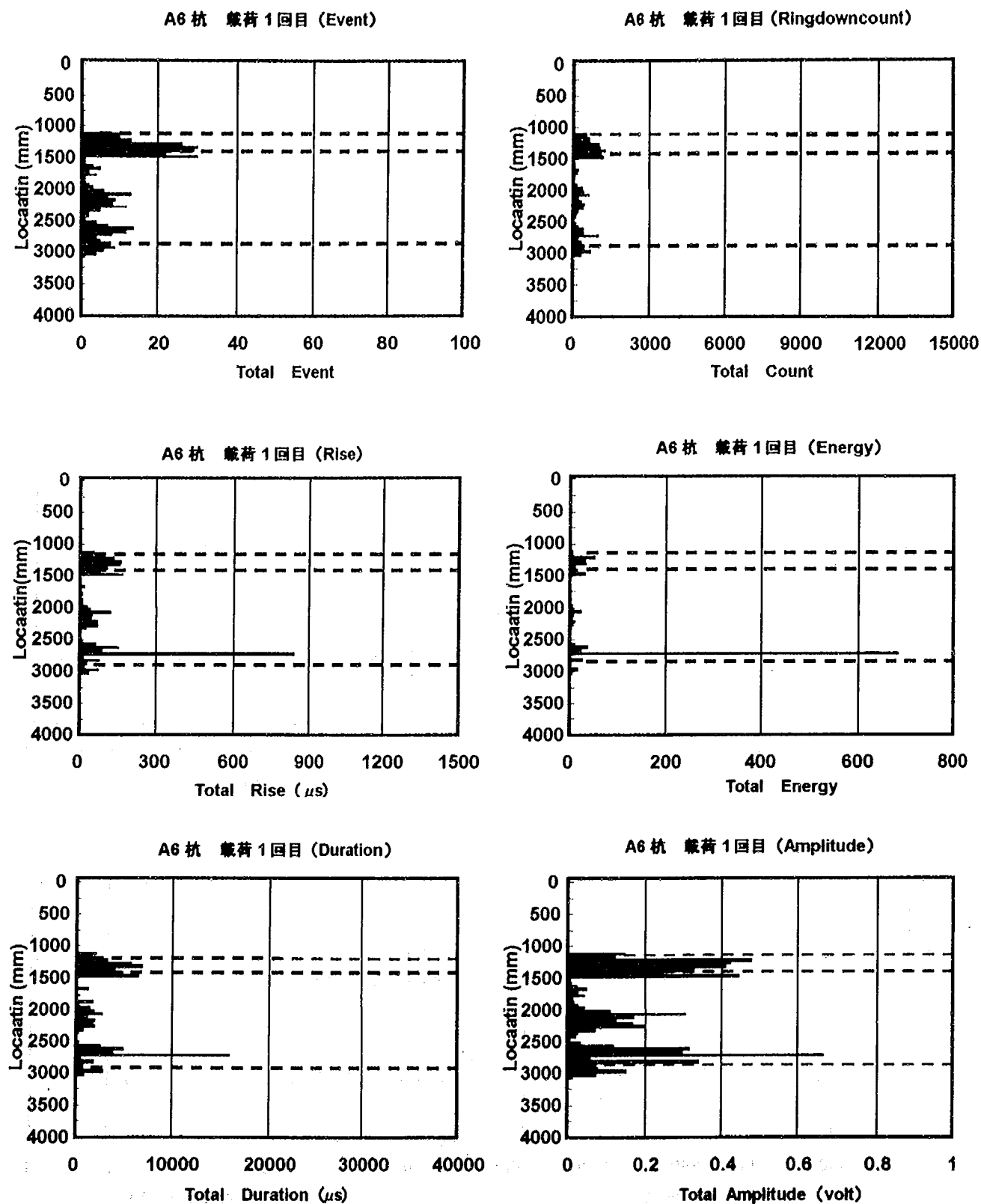


図-5. 3. 29 A6 杭の 1 回目載荷により杭外 (WG) AE センサで得られた AE 源深度分布

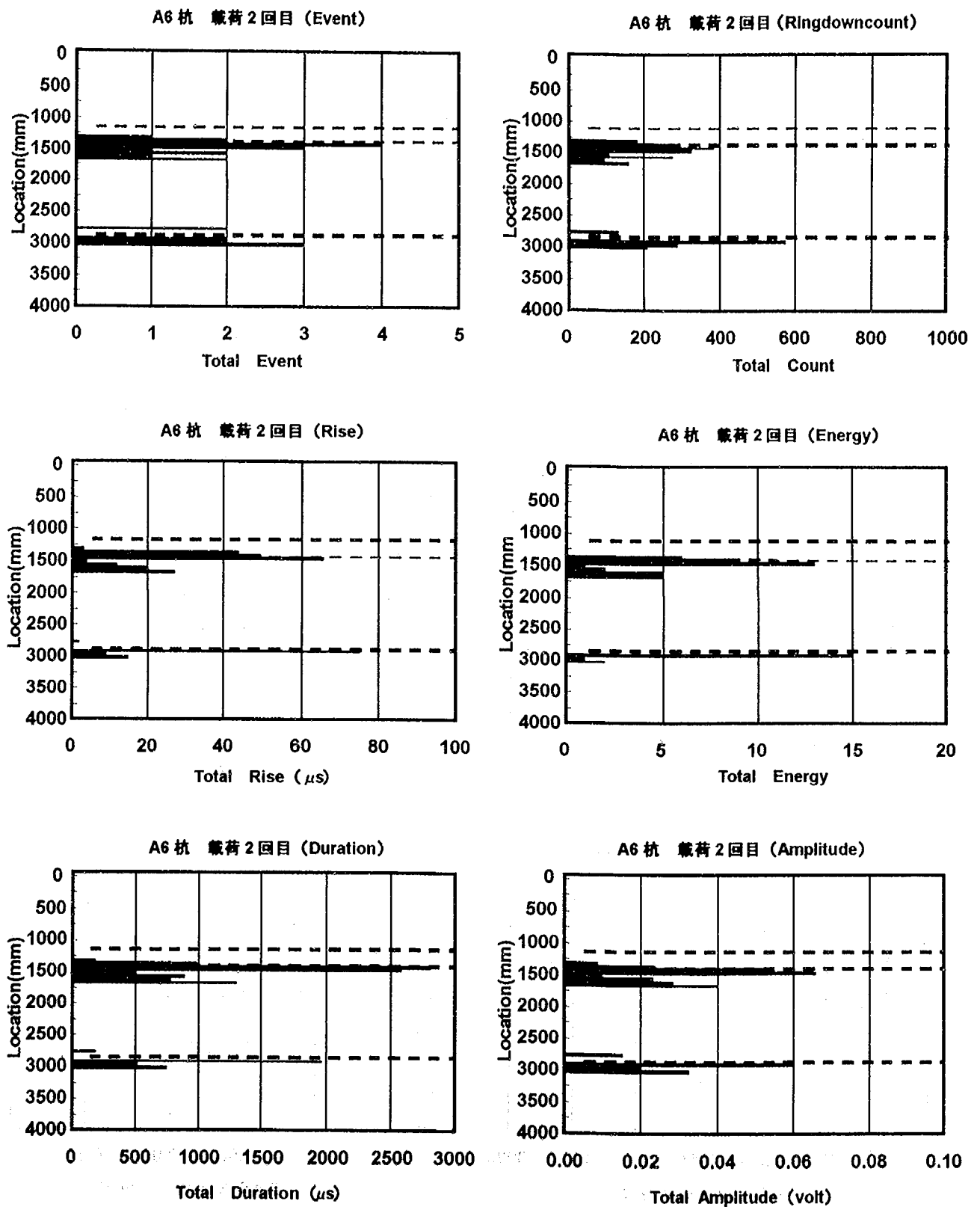


図-5.3.30 A6 杭の 2 回目載荷により杭内 AE センサで得られた AE 源深度分布

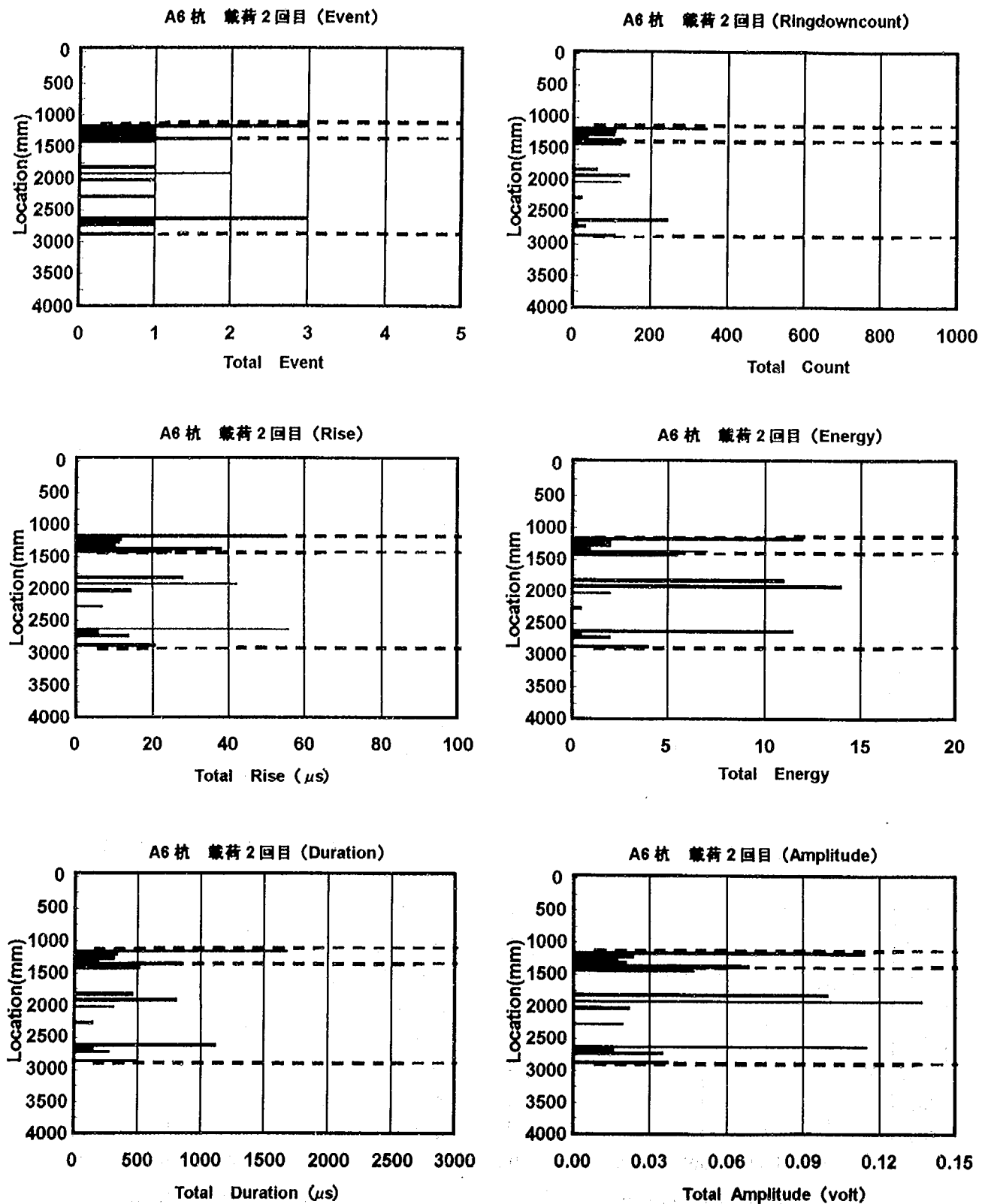


図-5.3.31 A6 杭の 2 回目載荷により杭外 (WG) AE センサで得られた AE 源深度分布

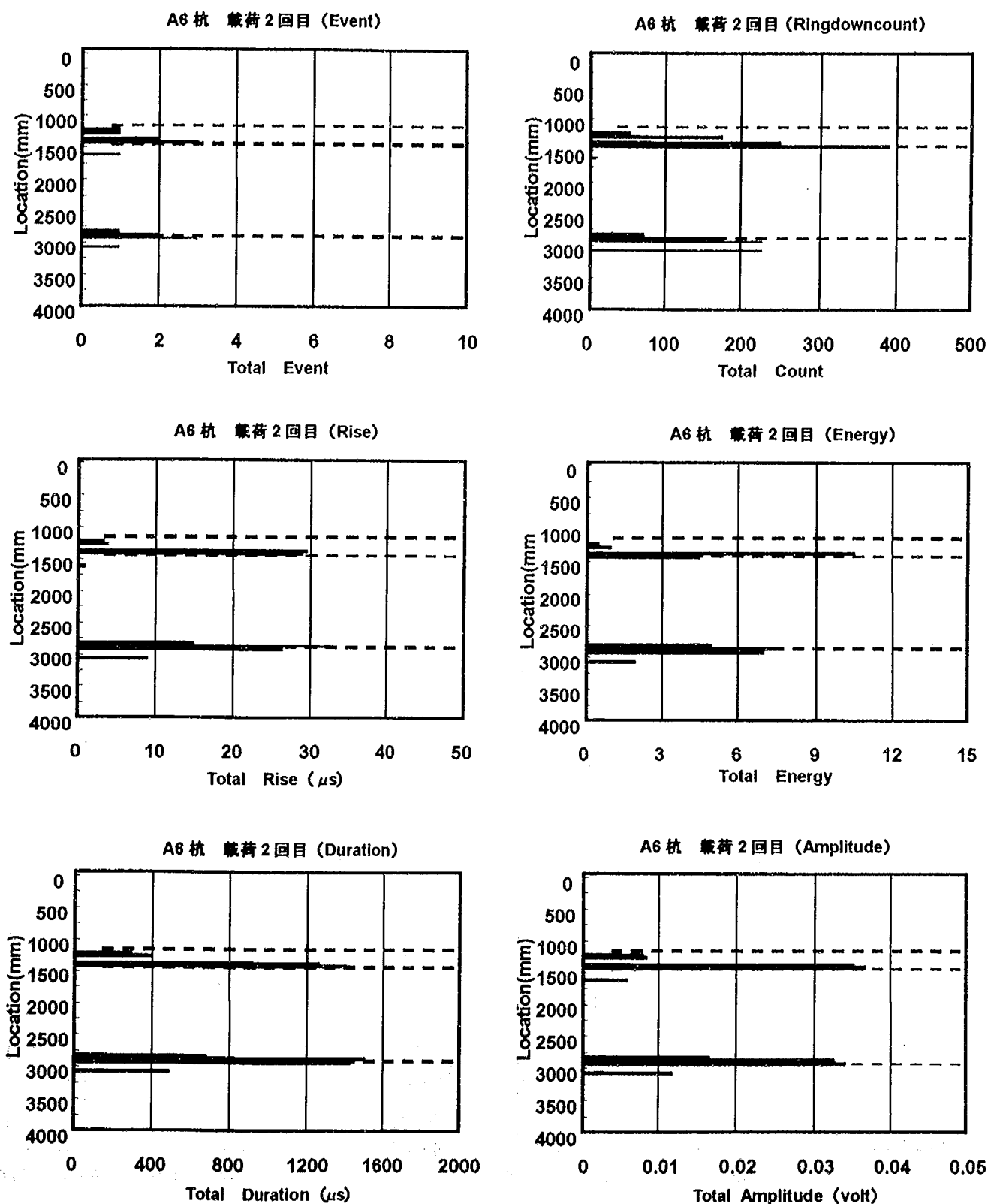


図-5.3.32 A6 杭の 3 回目載荷により杭内 AE センサで得られた AE 源深度分布

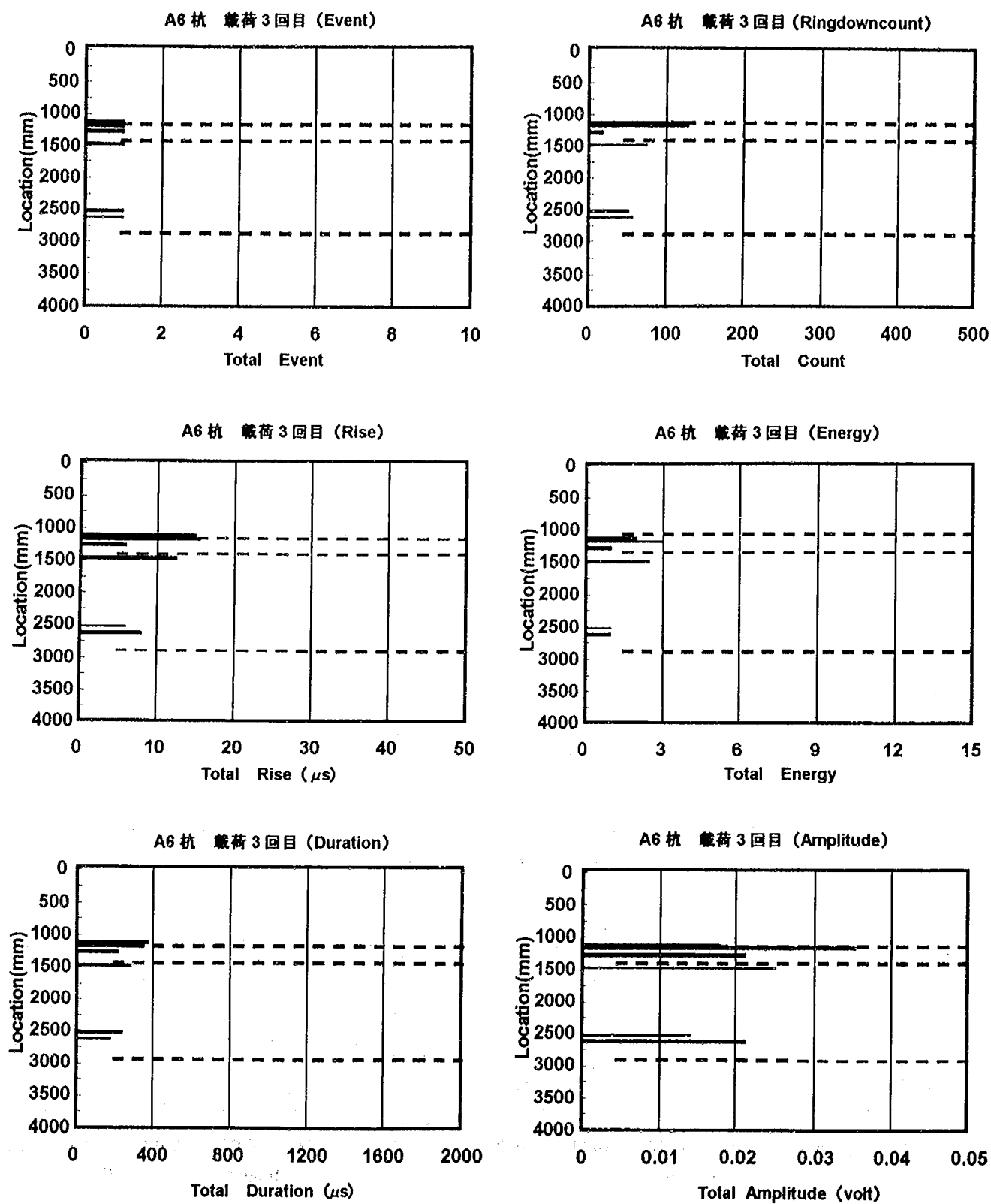


図-5. 3. 33 A6 杭の 3 回目載荷により杭外 (WG) AE センサで得られた AE 源深度分布

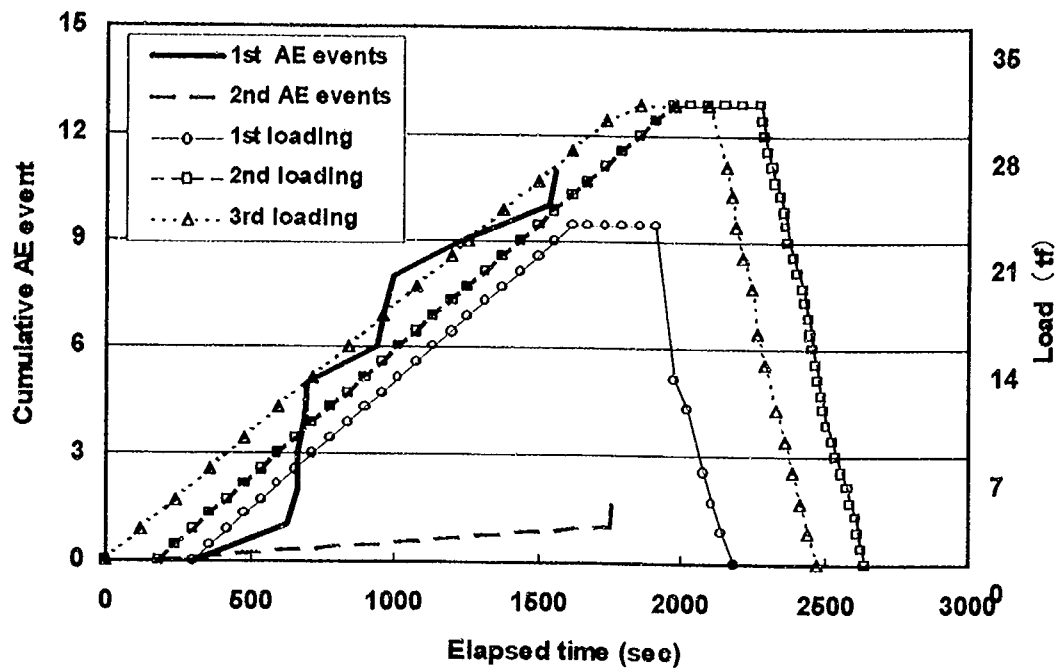


図-5.3.34 A4 杭内累積 AE イベントと荷重

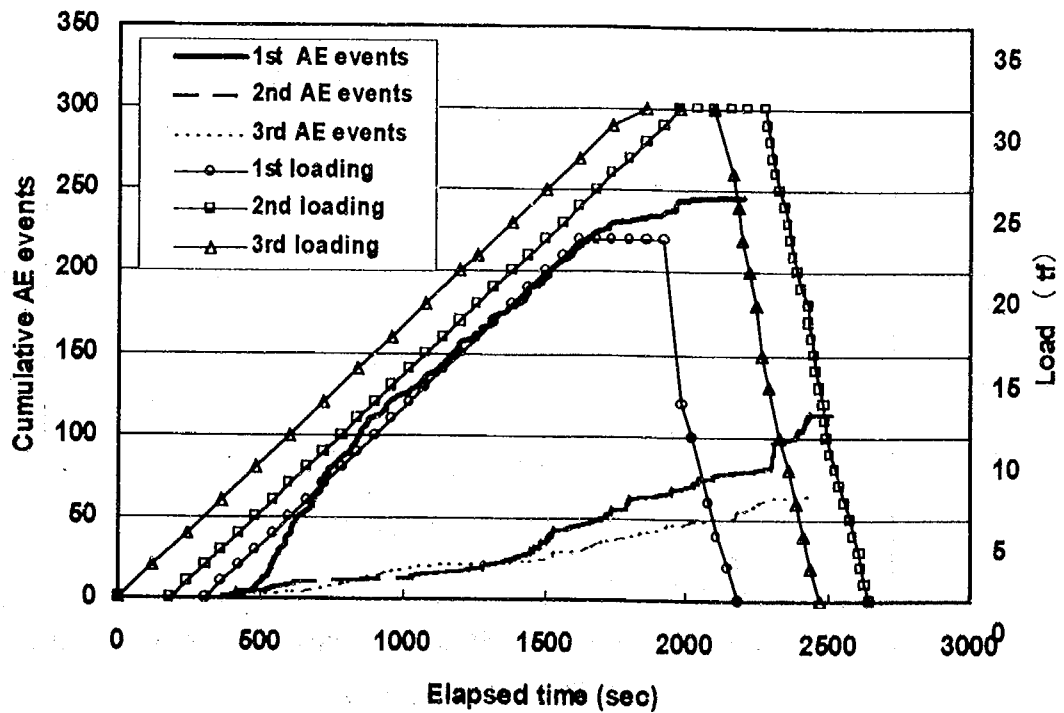


図-5.3.35 A4 杭外(WG)

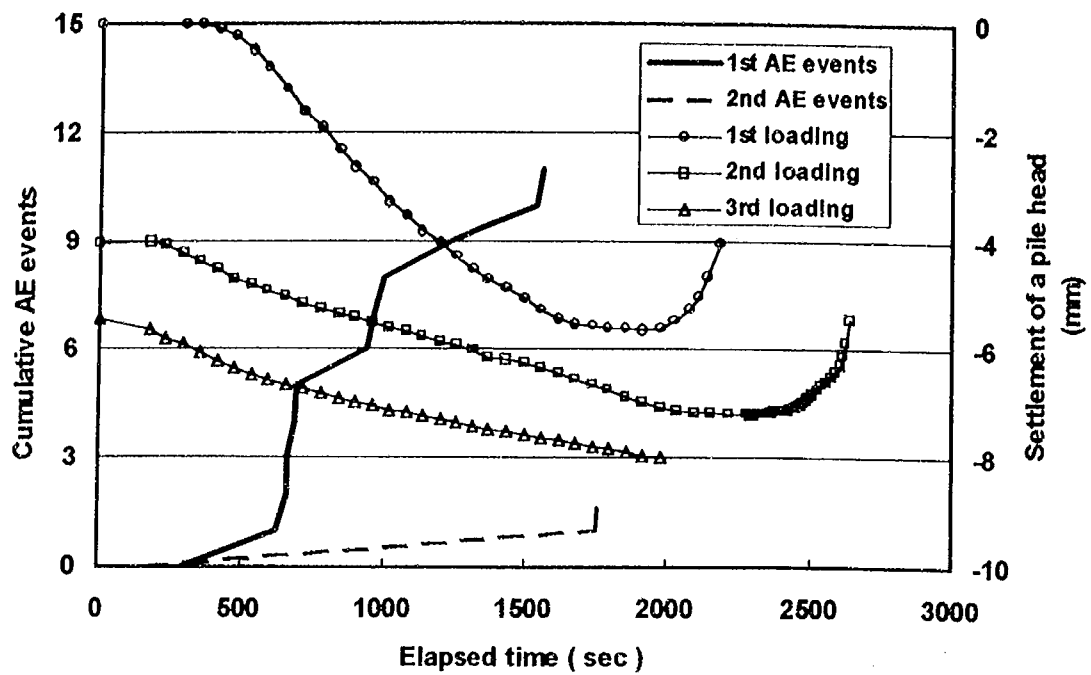


図-5.3.36 A4 杭内累積 AE イベントと杭頭沈下

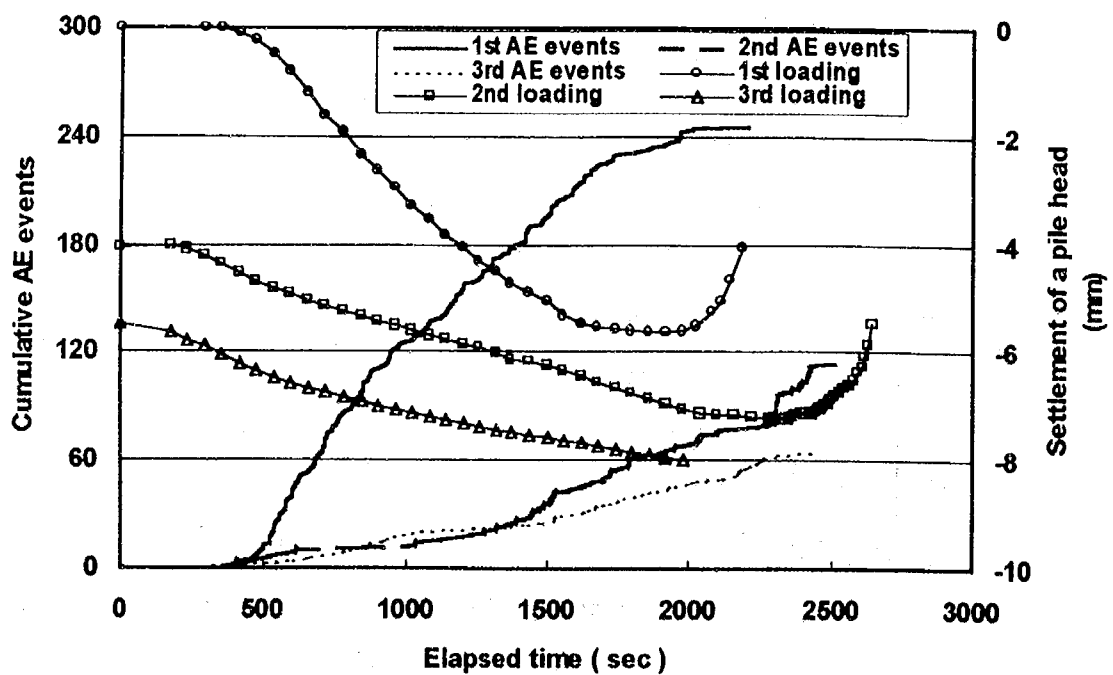


図-5.3.37 A4 杭外(WG)累積 AE イベントと杭頭沈下

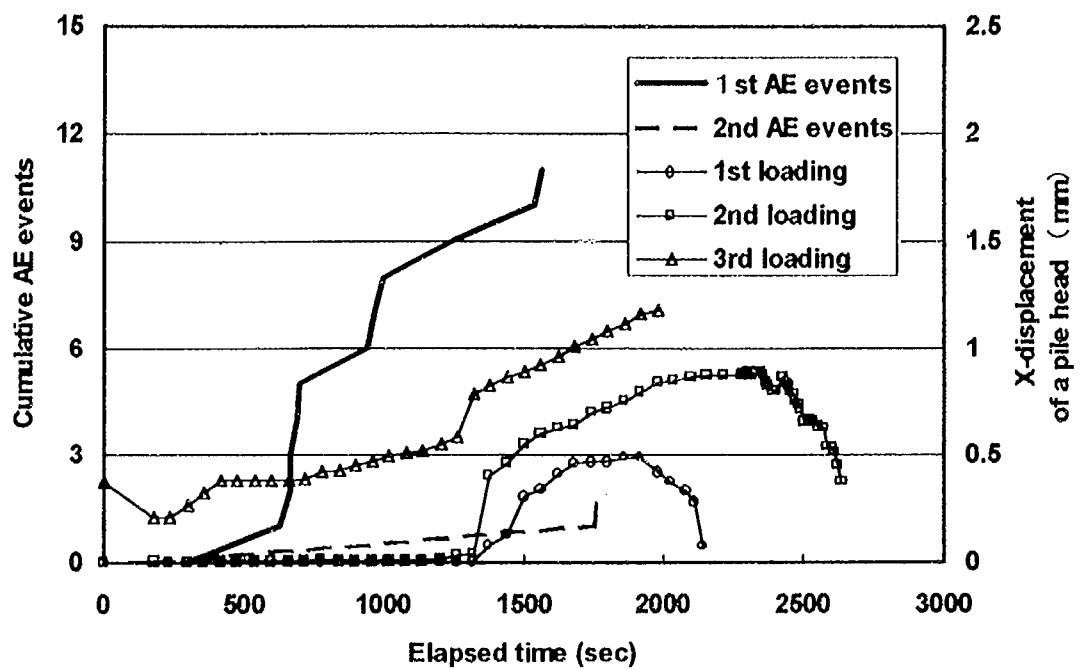


図-5.3.38 A4 杭内累積 AE イベントと水平 X 方向変位

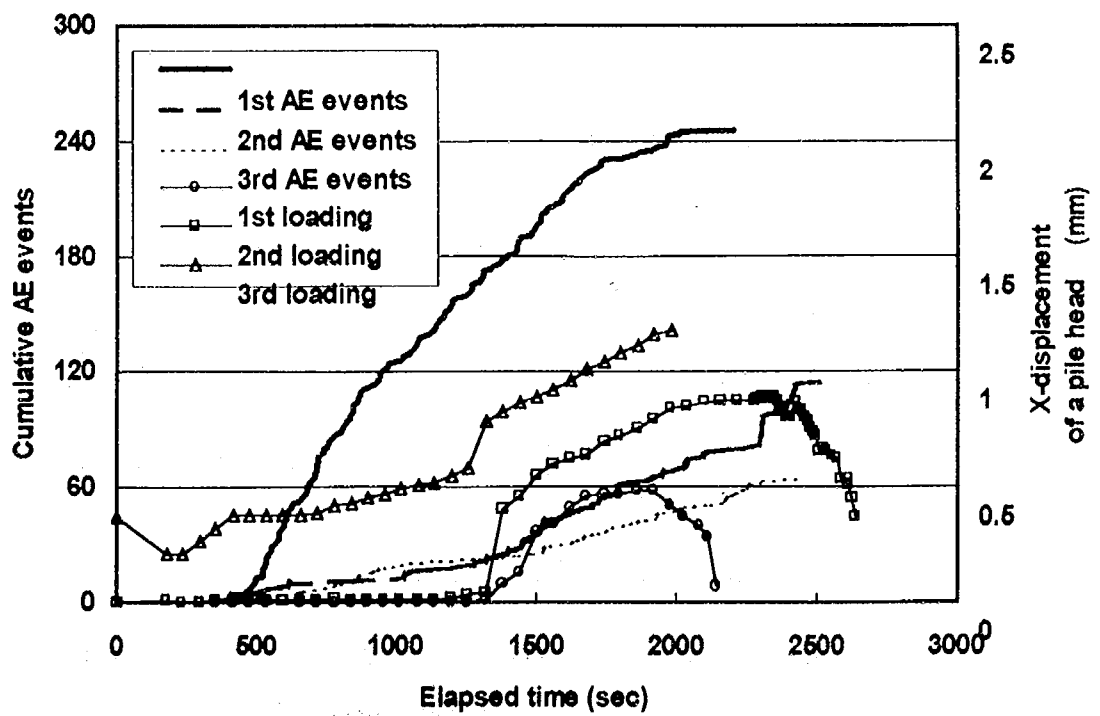


図-5.3.39 A4 杭外(WG)累積 AE イベントと水平 X 方向変位

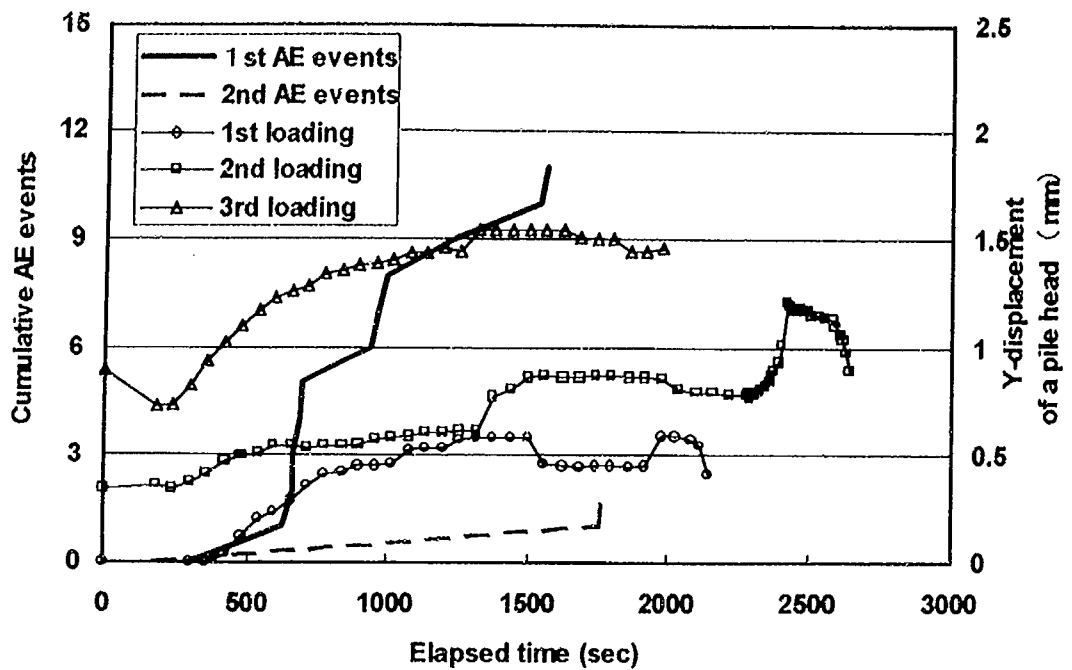


図-5.3.40 A4 杭内累積 AE イベントと水平 Y 方向変位

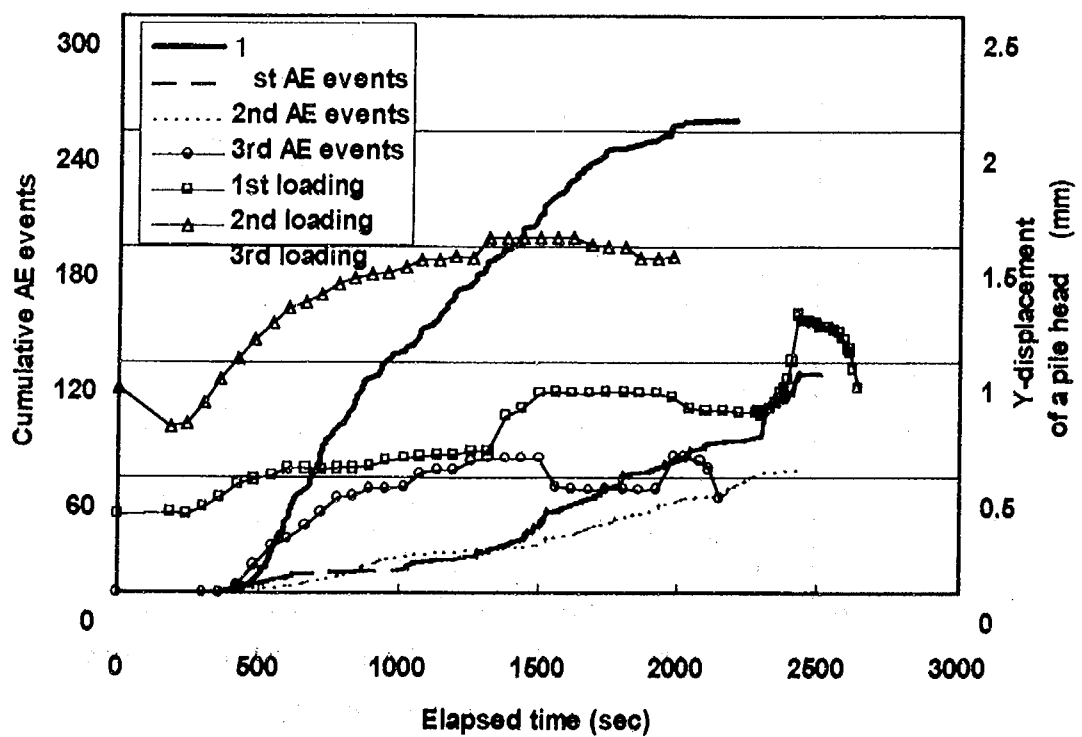


図-5.3.41 A4 杭外 (WG) 累積 AE イベントと水平 Y 方向変位

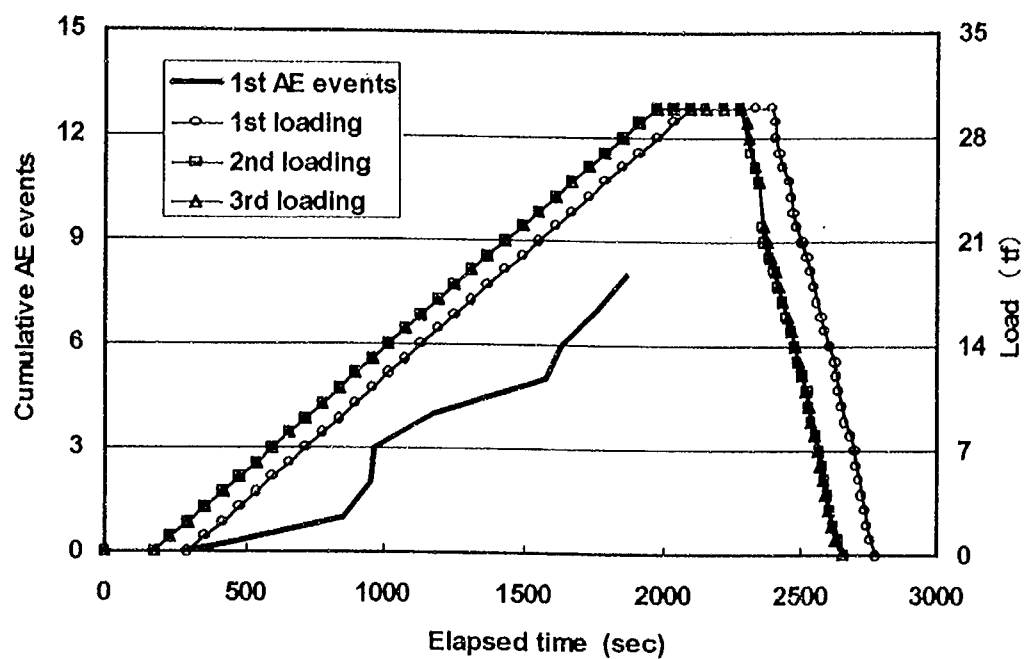


図-5.3.42 A5 杭内累積 AE イベントと荷重

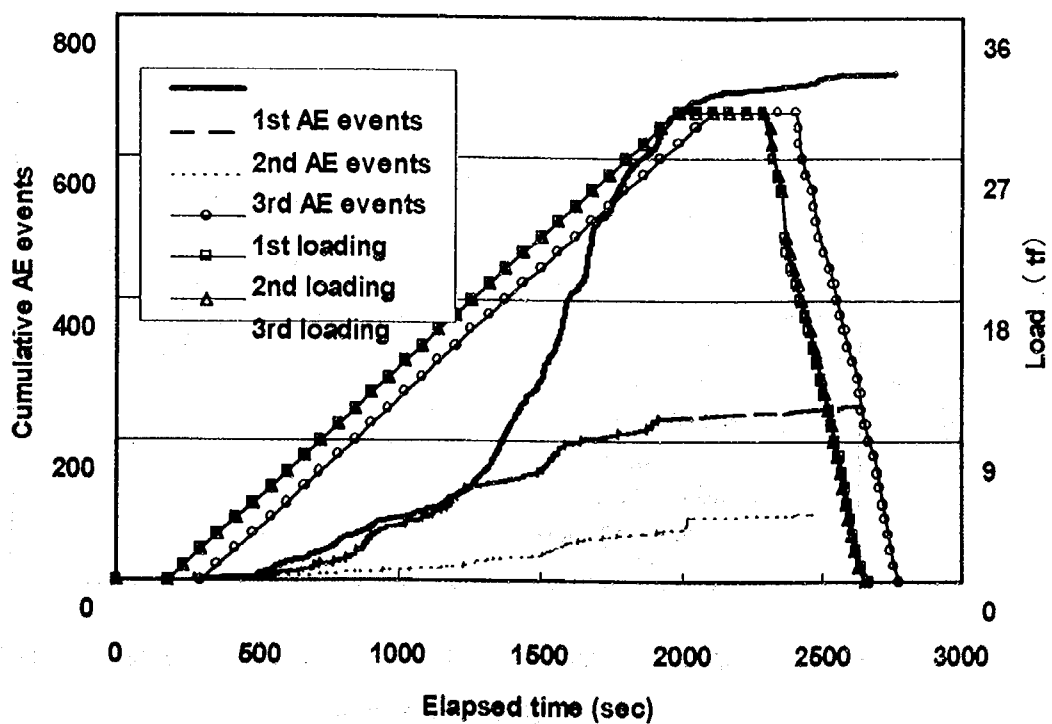


図-5.3.43 A5 杭外(WQ)累積 AE イベントと荷重

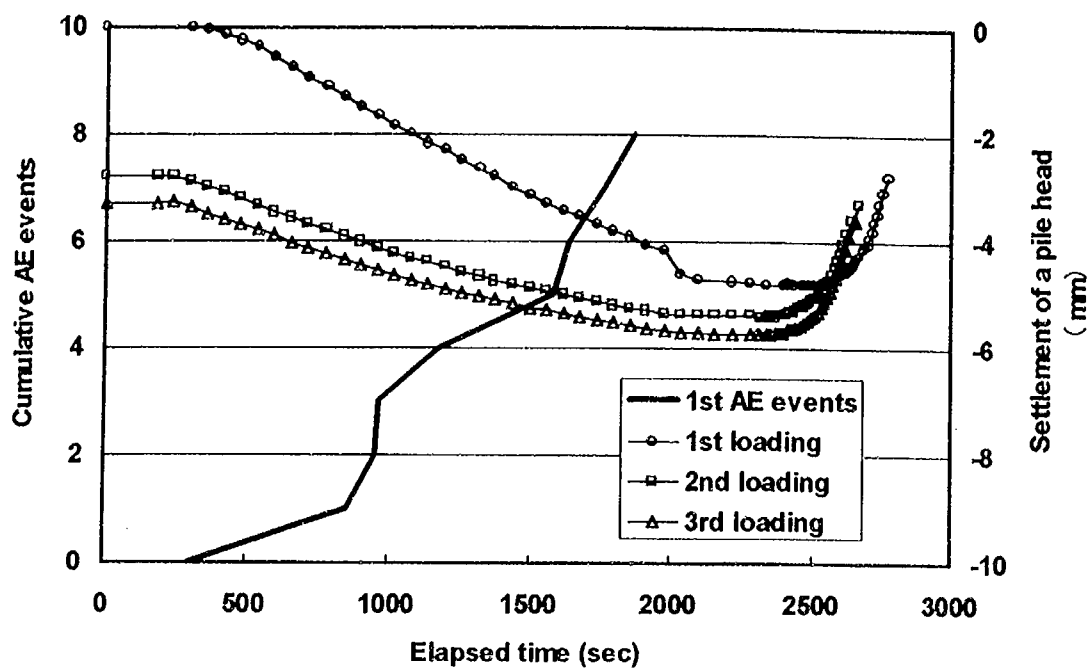


図-5. 3. 44 A5 杭内累積 AE イベントと杭頭沈下

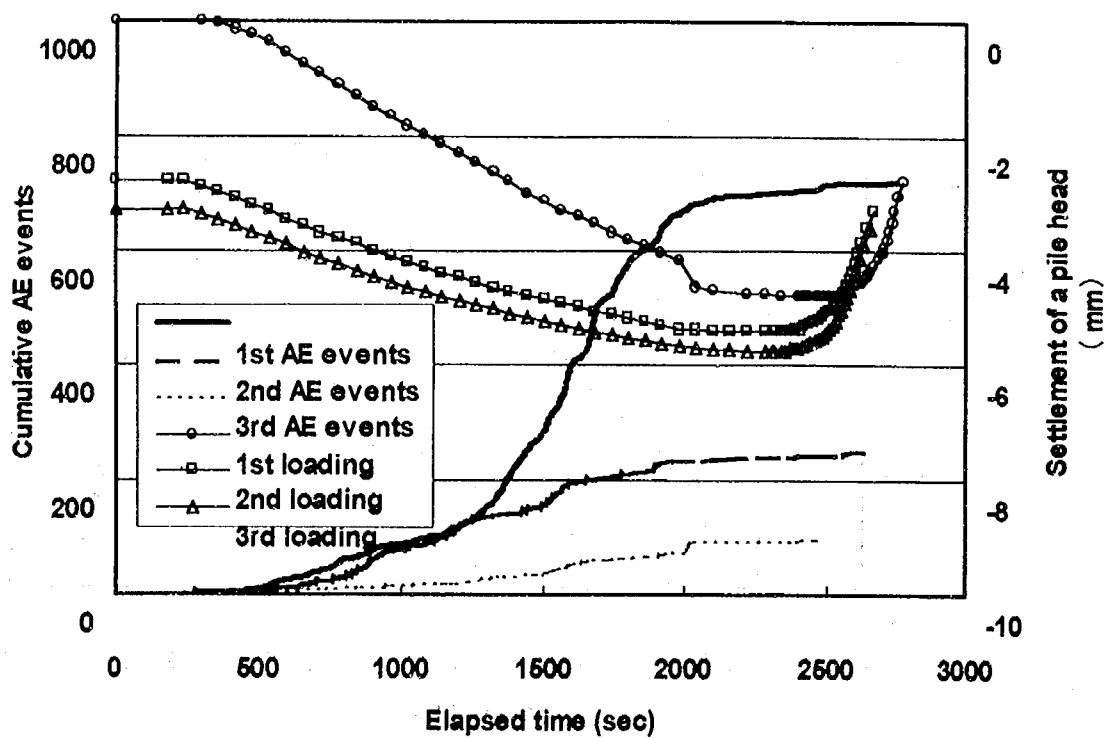


図-5. 3. 45 A5 杭外(WG)累積 AE イベントと杭頭沈下

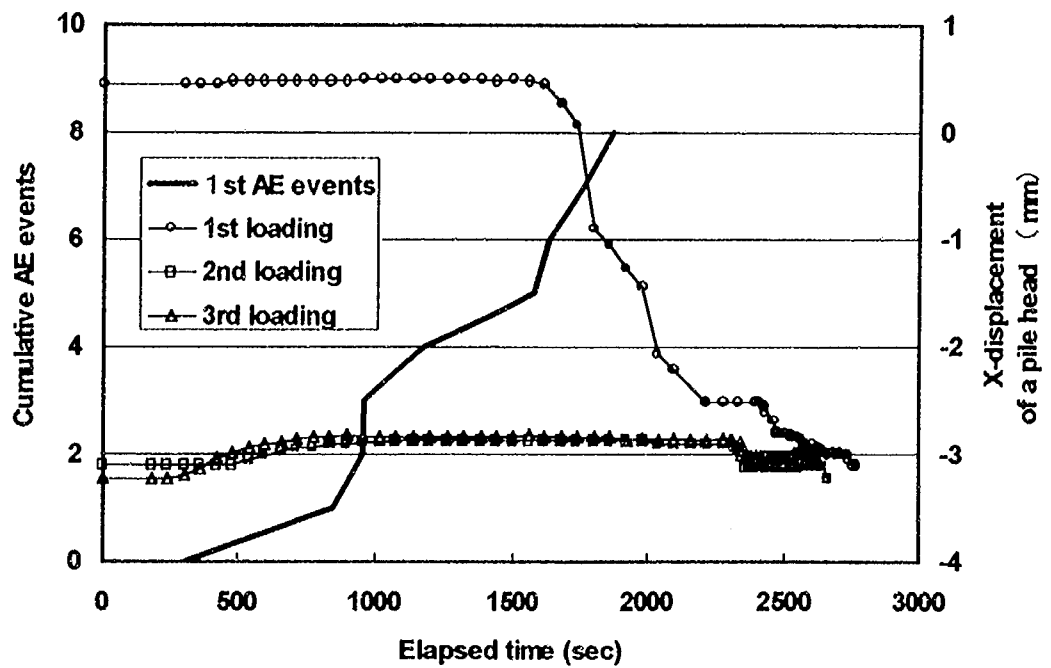


図-5.3.46 A5 杭内累積 AE イベントと水平 X 方向変位

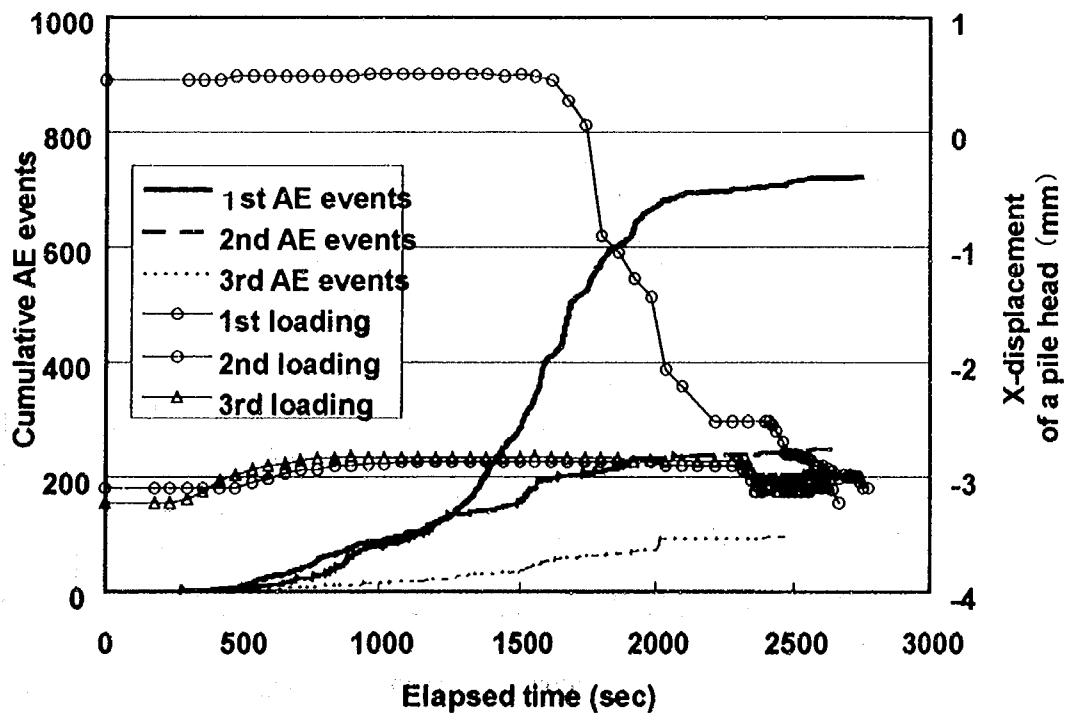


図-5.3.47 A5 杭外(WG)累積 AE イベントと水平 X 方向変位

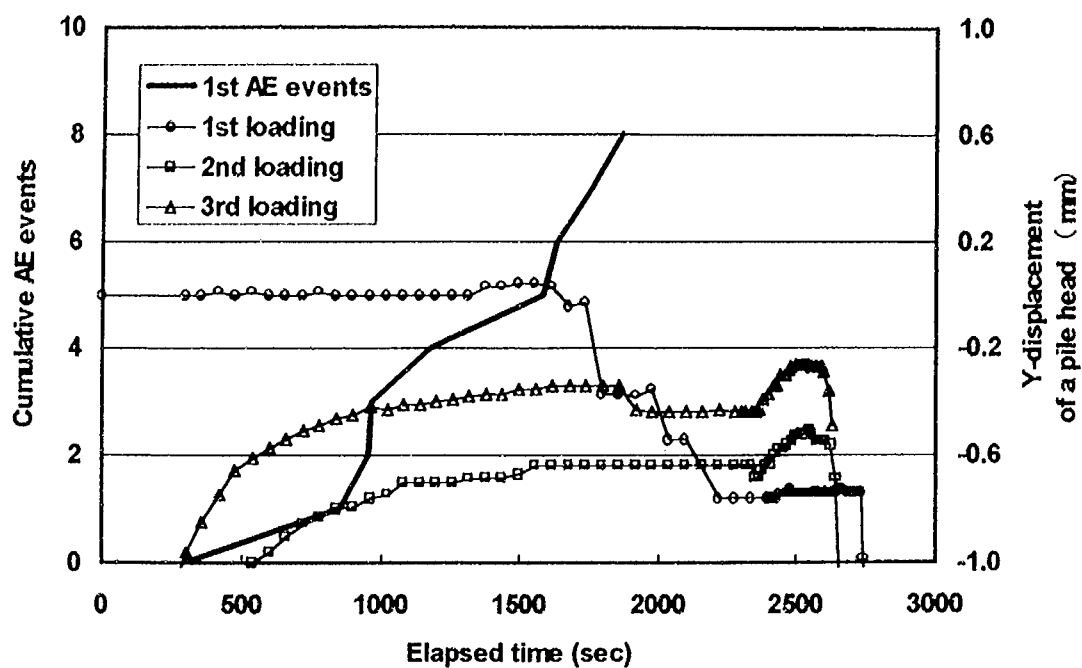


図-5. 3. 48 A5 杭内累積 AE イベントと水平 Y 方向変位

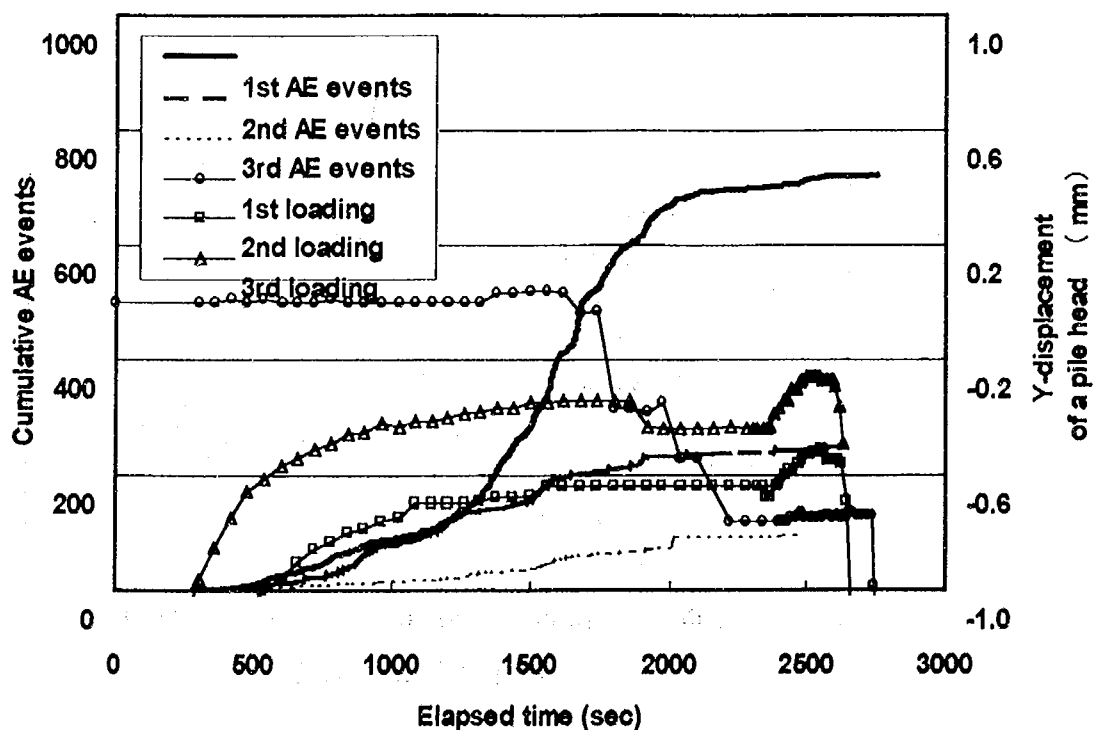


図-5. 3. 49 A5 杭外(WG)累積 AE イベントと水平 Y 方向変位

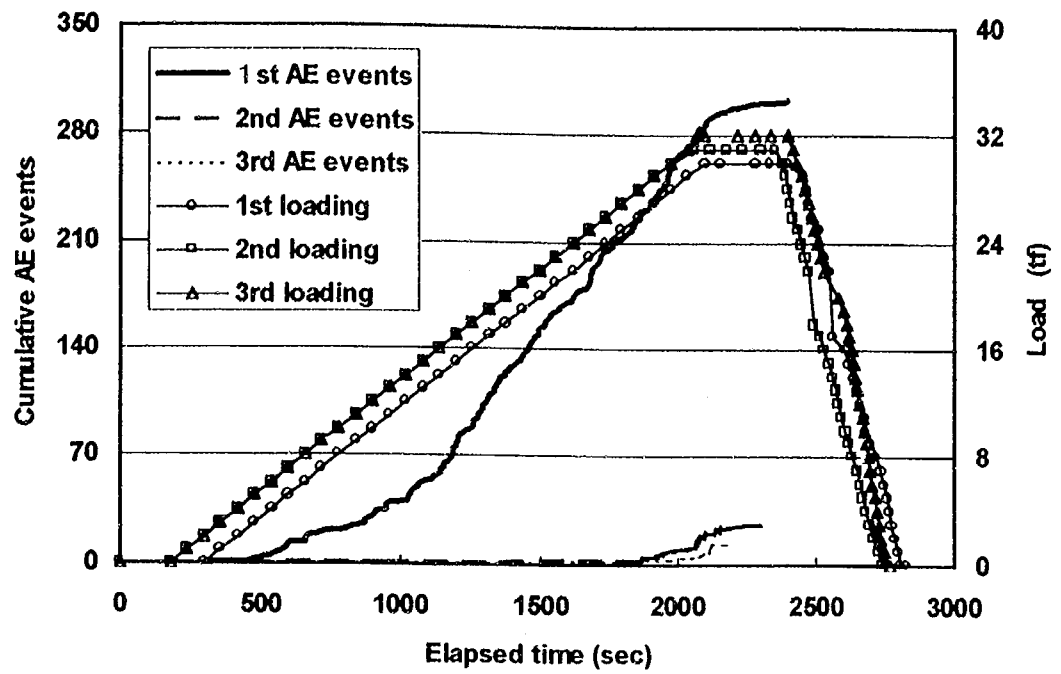


図-5. 3. 50 A6 杭内累積 AE イベントと荷重

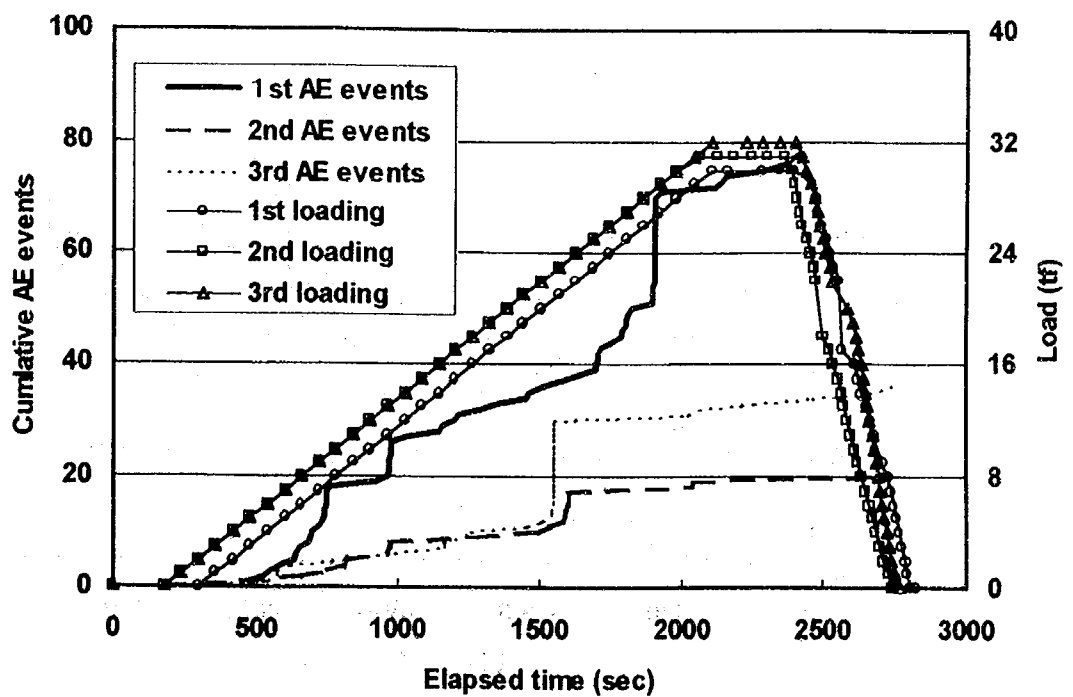


図-5. 3. 51 A6 杭外(WG)累積 AE イベントと荷重

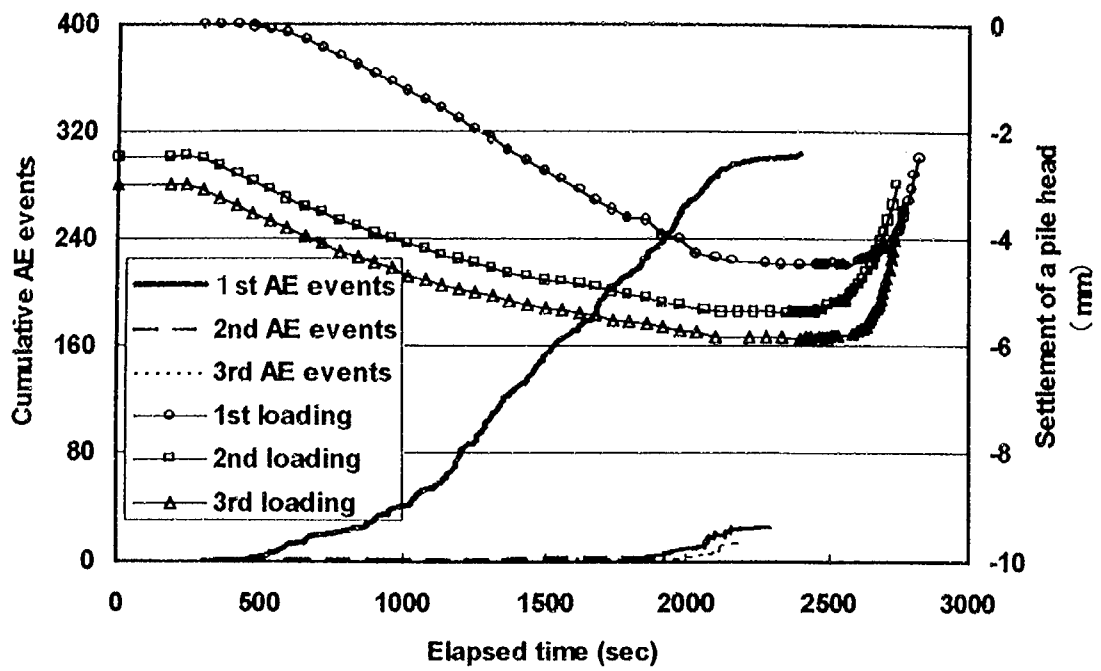


図-5.3.52 A6 杭内累積 AE イベントと杭頭沈下

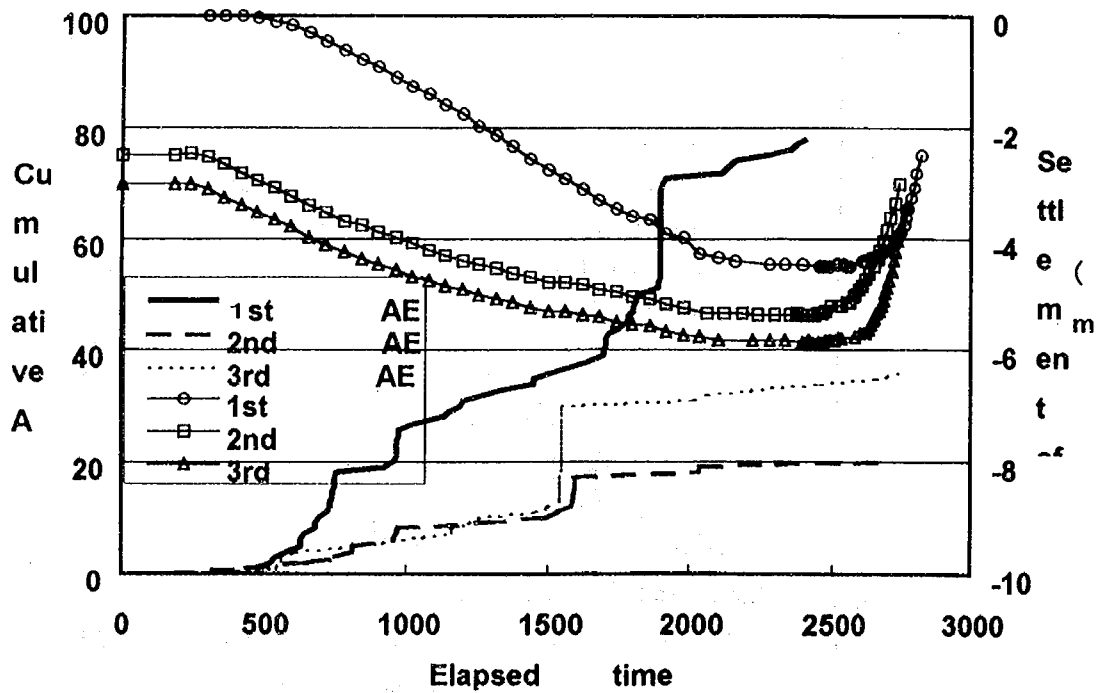


図-5.3.53 A6 杭外(WG) 累積 AE イベントと杭頭沈下

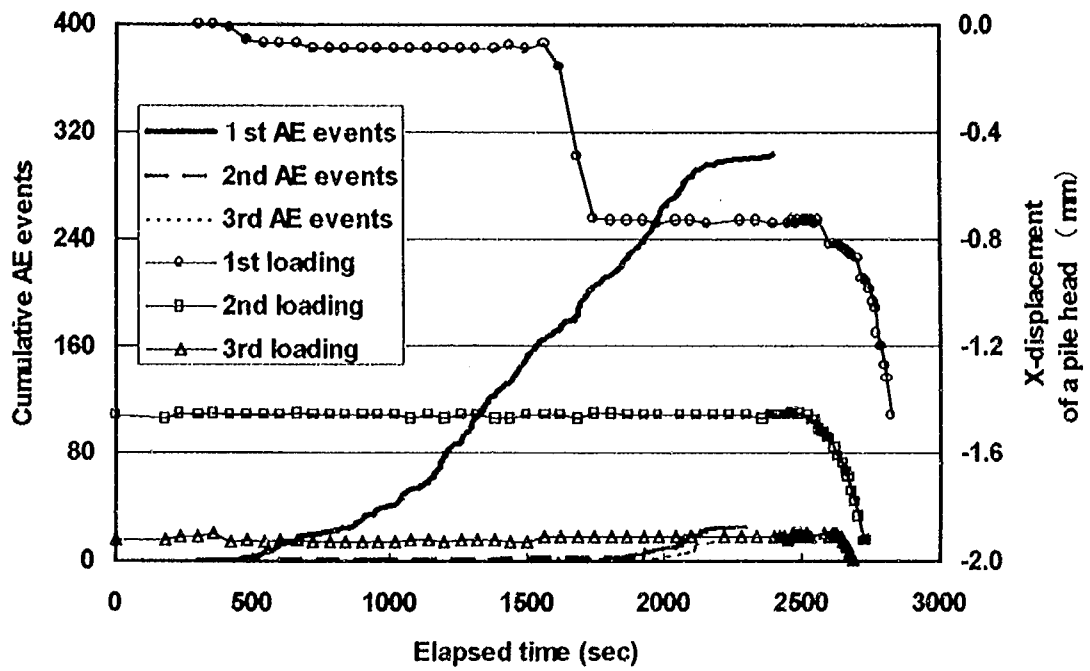


図-5.3.54 A6 杭内累積 AE イベントと水平 X 方向変位

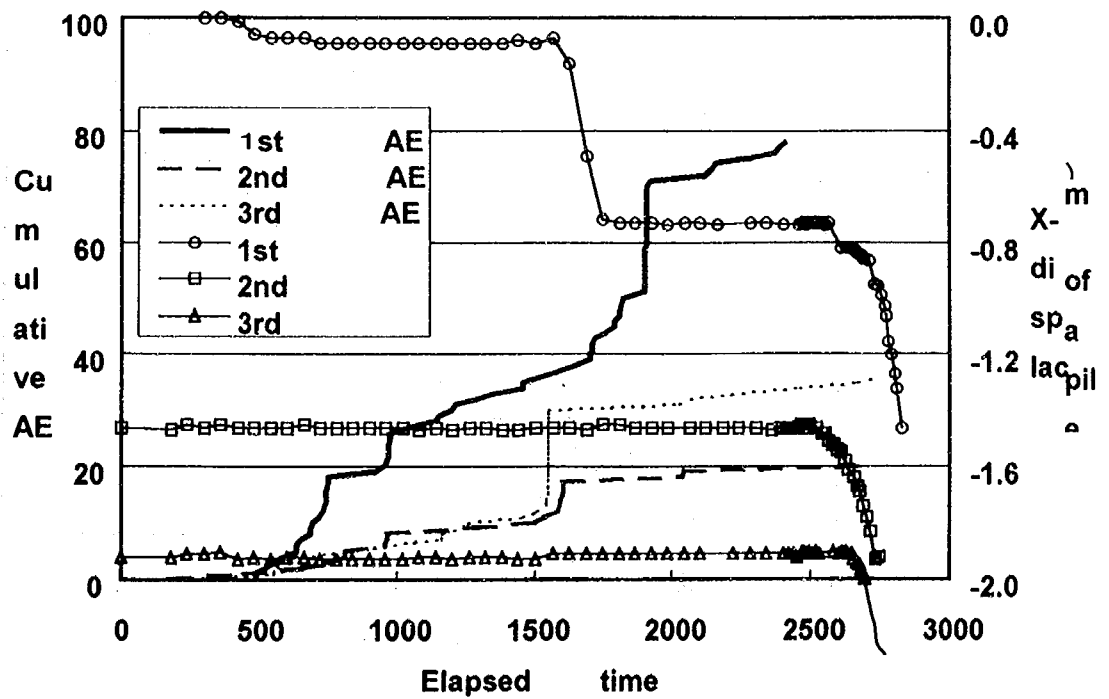


図-5.3.55 A6 杭外(WG)累積 AE イベントと水平 X 方向変位

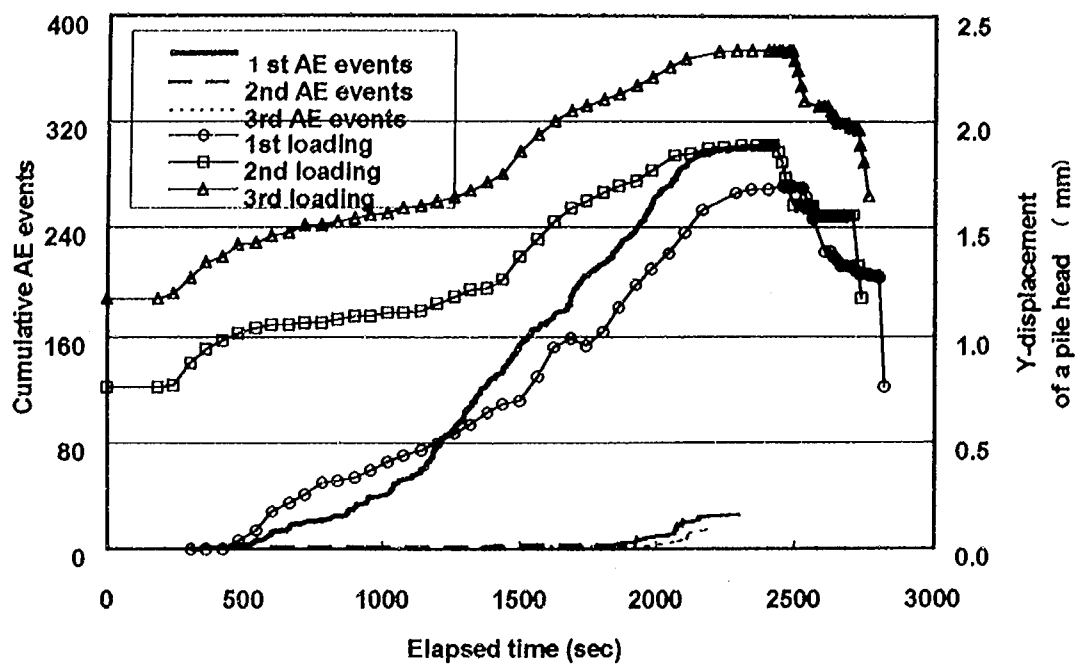


図-5. 3. 56 A6 杭内累積 AE イベントと水平 Y 方向変位

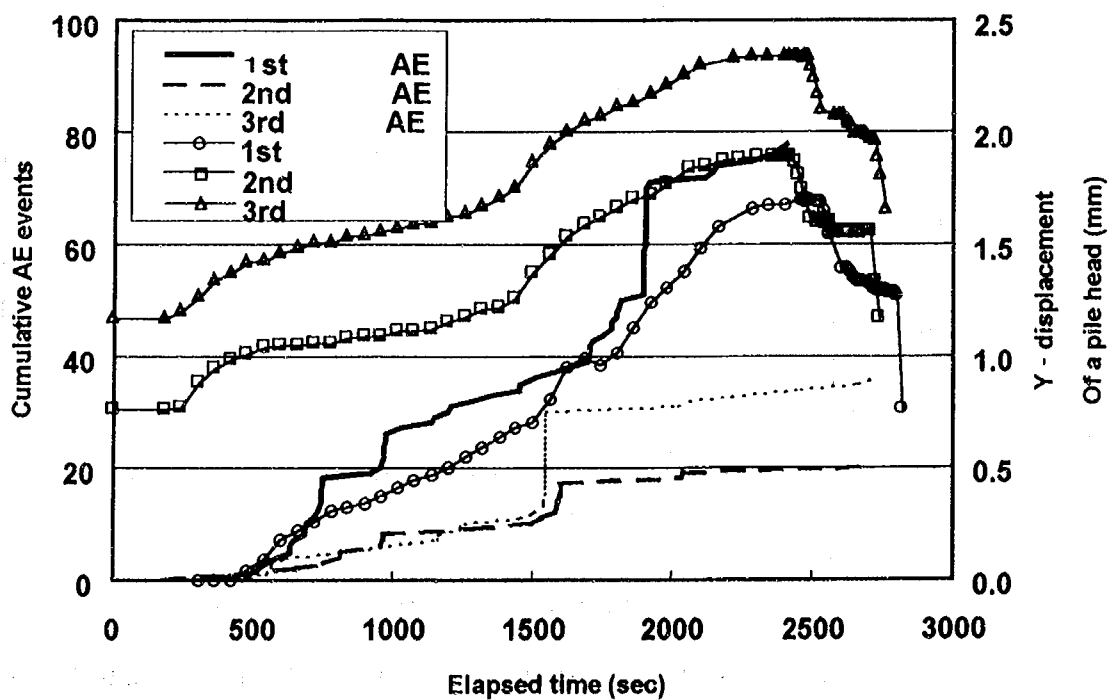


図-5. 3. 57 A6 杭外(WQ)累積 AE イベントと水平 Y 方向変位

ここで、杭の詳細クラック観察結果を加えて更に検討を加える。

図-5.3.58 に各杭のクラック観察結果を示す。A4 杭は、水平クラックで幅 0.6～0mm、A5 杭は上部クラックが 20mm の範囲で幅 6.0～0.4mm、下部クラックが 3.0～1.0mm の幅で 100mm の範囲に広がり、A6 杭は上部クラックが 4.0～0.1mm の幅で約 10mm の範囲、中間クラックが 1.2～0.4mm の幅で 100mm の範囲、下部クラックが 0.2mm の幅で 150mm の範囲に広がっていた。これらの観察結果から、杭上端より鉛直荷重が与えられた場合、A4 杭はクラックが閉口するのみ、A5 杭は上部クラック、下部クラックともに断面の一部で

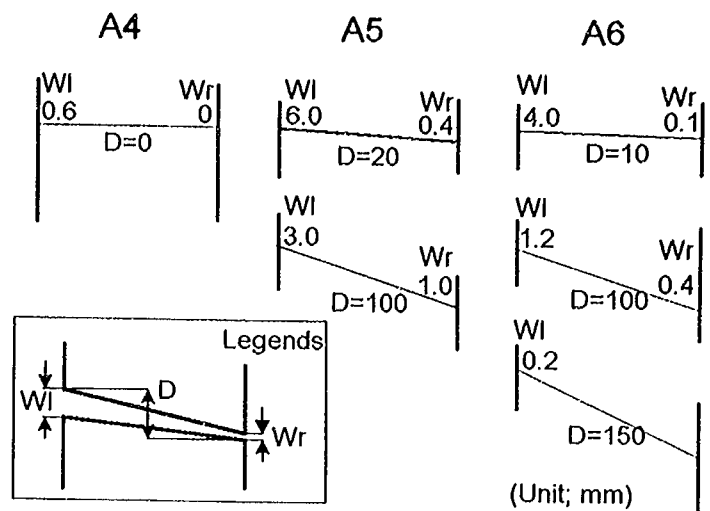


図-5.3.58 各杭のクラック幅とクラック範囲

の応力集中、特に下部クラックでの応力集中が上部に比べて大きいと推測される。A6 杭も A5 杭と同様に中間クラックおよび下部クラックでの応力集中が予測される。

杭内の AE 発生結果から、A4 杭のクラック位置での AE 発生が認められず、A5、A6 杭でクラック幅に無関係に、ほぼ全クラック位置からの AE 発生が認められていた。さらに、A6 杭内で認められた AE はクラックが大きく傾斜している下方の 2 箇所集中していた。これらの事項を考慮すると、杭体損傷箇所からの AE 発生は、クラック幅には無関係で、応力集中を生じやすいクラック範囲の杭長手方向への広がり「すれ」が大きい要因となることが確認された。

(4) まとめ

共通供試体 (RC 損傷杭) による室内実験から次の事項が得られた。

- (1) 各杭の杭頭水平変位より、A4 杭が各載荷段階で残留変位量が各載荷でのピーク変位量より小さいといういわゆる「弾性的戻り」を示しているのに対し、A6 杭では、除荷段階でも y 方向の変形が進行し、「弾性的戻り」はない。つまり材料の塑性変形が荷重の繰返しとともに明らかに進行していることが推察される。A5 杭は、1 回目の載荷により生じた変形を基にして、2、3 回目の載荷では「弾性的戻り」も少なく、1 回目の変形をトレースしているのみと考えられる。これらの事項から、載荷により塑性変形をとまなう破壊現象が生じている可能性が高い杭は、A6 杭のみで、A4 杭については損傷箇所より AE の発生が期待できず、A5 杭は、最初の荷重増加にのみ AE の発生が予測される。
- (2) A4 杭での杭内 AE 結果から、杭損傷位置に AE 源は認められず、それより上方の 1m、1.5m (1 回目載荷)、1.3m (2 回目) に AE 源が存在する。これらの結果から、杭損傷付加時に目視確認されたクラック以外の位置、ここでは上方に潜在クラックが発生していた可能性が高い。さらに、杭への損

傷は、曲げ破壊により実施され、目視観察されたクラック位置が杭中央部であることから、杭中央部で生じたクラックが杭長手方向に対して直角円周方向となる一方で、それより上方で発生したクラックは、載荷軸方向に向かって傾斜している可能性が高い。したがって、杭への鉛直載荷により上方のクラック断面の一部に応力が集中した可能性があり、それにとまう更なるクラック進展や新たな微小破壊が生じ AE を発生したものと推測される。

- (3) A4 杭での杭外 AE 計測結果から、AE は計測範囲全体で発生し、特に下方で顕著である。載荷回数の増加により AE 発生数および AE パラメータの減少が認められる。杭損傷からの AE との関連性は低いと考えられる。A4 杭の AE 結果から、杭内 AE 源は実際のクラック位置付近には認められず、1m、1.5m 付近に多く存在する。杭外 AE は、載荷荷重約 2tf から計測範囲全体で発生するが、杭下方の AE アクティビティーが上方に比べ高い。
- (4) A5 杭での AE 結果から、杭内 AE は実際の損傷位置付近に認められた。杭外 AE は A4 杭と同様計測範囲全体で認められる。
- (5) A5 杭で 2、3 回目の載荷により杭内 AE が検出されなかったことより、杭内 AE は 1 回目の載荷により損傷位置より発生、クラックがほぼ閉口し、その後の載荷では新たなクラック進展は生じなかったものと考えられ、これらの結果は、杭頭水平変位結果と調和的である。
- (6) A5 杭の杭外 AE 計測結果から、杭外の AE は損傷位置に集中せず、計測範囲全体に認められた。載荷回数の増加により AE 発生数および AE パラメータの減少が認められた。杭損傷からの AE との関連性は低いと考えられる。
- (7) A6 杭の杭内 AE 計測結果から、杭内の AE は初期荷重 2tf 後から損傷位置付近に多く認められた。杭外の AE は計測範囲の上下端側、中央に認められた。計測範囲上下端は損傷位置と合致するが、中央付近に AE 発現があることから、杭の損傷とは無関係な異なる発生要因による AE である可能性が高いと考えられる。
- (8) A6 杭の杭内 AE 計測結果から、載荷回数の増加による AE 発生数、AE パラメータの減少は認められるが、損傷位置付近での AE 発現は明らかであった。特に、1.2m 位置に比べ、1.3～1.40m、2.9～3.0m の 2 箇所が発生した AE 発生数および AE パラメータが大きい。
- (9) A4 杭の杭内累積 AE イベントと繰返し荷重の関係から、1 回目の載荷により載荷初期から発生した AE が 2 回目の載荷では、先行最大荷重（1 回目の最大荷重 22tf）を超過し、25tf に至るまで急増しないことがわかった。最大荷重を十分超過した後での AE 増加は、いわゆる Felicity Ratio が 1 より大きいという健全な材料状態を示している。同様な A6 杭での結果から、載荷荷重と AE アクティビティーの関係が明白となり、1 回目の載荷にとまう AE は単調増加を示すが、2 回目の載荷では、先行最大荷重 30tf に近づかないと AE が発現せず、3 回目の載荷でも同様な傾向となった。しかし、2 回目以降の AE 発現は先行最大荷重より若干小さい荷重からとなり、Felicity Ratio が 1 より小さいという不健全な材料状態を示した。
- (10) 杭外の AE 発現と載荷荷重は、荷重の繰返しにより AE アクティビティーが低下するものの明らかな関係が認められない。

- (11) 杭頭水平変位と杭内および杭外 AE の発現に明らかな関係は認められない。特に、1 回目の載荷で x 、 y 方向変位ともに認められない図-5.3.46～図-5.3.49 で、これらとは無関係に杭内・外ともに AE の発現が認められることから「杭頭水平変位の挙動は杭内・杭外の AE 発生とは無関係である」といえる。
- (12) 杭内 AE は杭頭沈下とは無関係な挙動を示す。一方、杭外 AE と杭頭沈下の関係から、杭頭沈下に伴う AE 増加、ならびに、先行最大沈下量付近での AE 発生の急増が認められた。これらの事項は、特に A6 杭で顕著である。
- (13) 杭の損傷クラック観察結果から、杭上端より鉛直荷重が与えられた場合、A4 杭はクラックが閉口するのみ、A5 杭は上部クラック、下部クラックともに断面の一部での応力集中、特に下部クラックでの応力集中が上部に比べて大きいと推測された。A6 杭も A5 杭と同様に中間クラックおよび下部クラックでの応力集中が予測された。これら観察結果から想定される杭の載荷による既存クラック挙動および杭軸応力の断面分布は、A4 杭はクラックが閉口するのみ、A5 杭は上部クラック、下部クラックともに断面の一部での応力集中、特に下部クラックでの応力集中が上部に比べて大きいと推測された。A6 杭も A5 杭と同様に中間クラックおよび下部クラックでの応力集中が予測された。
- (14) 杭内の AE 発生結果から、A4 杭のクラック位置での AE 発生が認められず、A5、A6 杭でクラック幅に無関係に、ほぼ全クラック位置からの AE 発生が認められていた。さらに、A6 杭内で認められた AE はクラックが大きく傾斜している下方の 2 箇所集中していた。これらの事項を考慮すると、杭体損傷箇所からの AE 発生は、クラック幅には無関係で、応力集中を生じやすいクラック範囲の杭長手方向への広がり「ずれ」が大きい要因となることが確認された。

以上の結果から、杭の損傷位置からの AE は既存クラックの幅よりも、むしろクラックの方向性に依存しており、軽微な曲げクラック程度でもクラックに方向性がある場合、小さな鉛直荷重により杭損傷位置から AE は発生する。軽微な損傷杭でも杭に離れた位置に設置した計測孔で、杭の載荷に伴う AE は検出できるが、その杭損傷位置からの AE というよりも、杭の沈下にとまなう地盤の動き、あるいは地盤の破壊に起因した AE であると考えられる。

5.3.6 今後の課題

本報告には、加速度計による計測結果、ならびに準動的な載荷による AE 計測結果は示していない。加速度計による結果は、そのほとんどが杭の変形に伴う弾性波ではなく、いわゆる計測系ノイズに支配されたため割愛した。したがって、本来は各センサの周波数特性と併せてこれまで展開した事項を検討すべきであるが、本報告では AE 計測結果のみに限定した。

準動的な載荷による AE 計測結果は、杭内での AE 発生が認められず、杭外のみとなったことから示していない。杭外の AE は、これまで述べた地盤と杭との挙動に起因した AE と同様と考えられ、特筆すべき事項は確認できなかった。

5.4 ボアホールカメラ

5.4.1 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、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) 孔壁観察機器の種類と原理

1) ボアホールテレビタイプ

ボーリング孔に挿入するプローブ内部に、その軸方向に平行する光軸をもつテレビカメラを設け、この前方に光軸を変更するプリズムまたは平面鏡を設け、孔壁を観察する。孔壁の任意の箇所を観察するため、カメラとミラー部を一体化して回転させたり、ウインチを操作してプローブを上下させる構造となっている。さらに、詳細な画像を観察する目的でズームアップ機能を搭載したものもある。画像記録はビデオ記録（アナログ）によるものがほとんどであるが、最近では、画像記録をデジタルで行い、必要な情報を付加していくことで観察効率を上げたシステムもある。

2) 孔内前方画像観察タイプ

この方式のものには、単純に孔内の前方を確認するだけのものから、前方から側方までの広角画像を撮影するもの等、様々な装置が提案されている。測定画像は、広く孔内状況が確認できるため、孔壁の損傷評価に有効である。広角画像から展開画像を作成することも可能であるが、割れ目の形状が大きく歪んだりすることがあるため注意が必要である。

3) 展開画像観察タイプ

展開画像タイプには、円錐ミラー方式、回転ミラーによるスキャナー方式およびラインカメラ方式のものがある。いずれの方法も、画像データは、光磁気ディスク等の磁気媒体に記憶させ、別途、ひび割れなどの走向傾斜、開口量等の計測が可能である。

① 円錐ミラー方式

孔壁全周を円錐ミラーを使用して撮影し、得られた画像をコンピュータ処理して展開画像を作成する。このとき方位センサなどを使用して、展開画像の方向が一定になるよう制御する。また、プローブ内部に可動部分がないため構造がシンプルであり、水平孔、斜孔にも適用が容易である。

② 回転ミラーによるスキャナー方式

プローブ内部で高速に回転するミラーに光ビームをあて、孔壁に照射し、深度方向にプローブを移動す

ることで孔壁を観察する方法である。ただし、ミラーを一定の速度で高速回転させながら、深度方向にプローブを降下させる必要がある。

③ ラインカメラ方式

ラインプリズムを使用して、任意位置の全周画面を1走査線分カラー画像で検出し、カメラの降下速度に同期した位置に画面変換することで連続した展開画像を合成するシステムである。

(2) 試験に使用した供試体

1) 「梁」供試体

「梁」供試体は、図-5.4.1に示すように2点載荷の単調増加曲げ載荷により、ひび割れを発生させた。最大荷重は240tf、最大変位は梁中央部で100mmまで載荷した。

2) 「試験杭」供試体

「試験杭」供試体は、実構造物の上下を逆にしたものをPCアンカーにより床に固定し、反力壁に取り付けたられた油圧ジャッキにて載荷した。載荷は、事前解析において杭体の最外縁における軸方向結合筋あるいは杭体内鋼材が降伏点に達する水平荷重を作用させたときの荷重載荷位置における水平変位を δy とし、 δy の整数倍で正負交番繰返し載荷を行った。1 δy あたりの繰返し回数は3回である。

また、杭体の降伏後は載荷重が最大荷重の半分になるまでを目標にして載荷を行った。

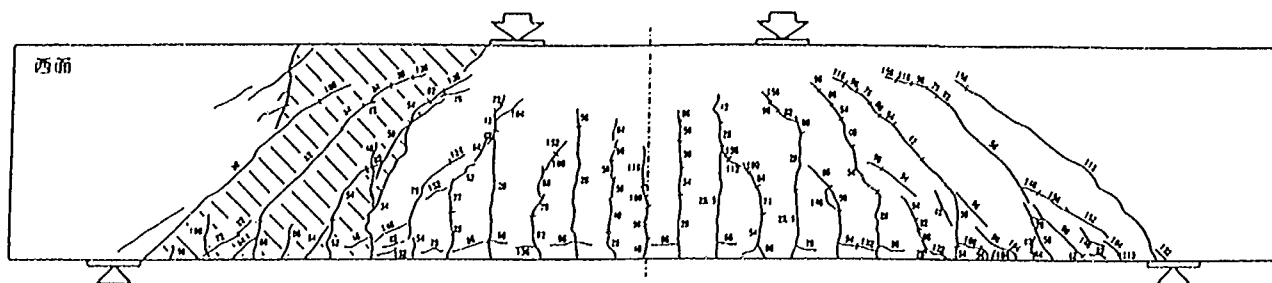


図-5.4.1 「梁」供試体のひび割れ状況

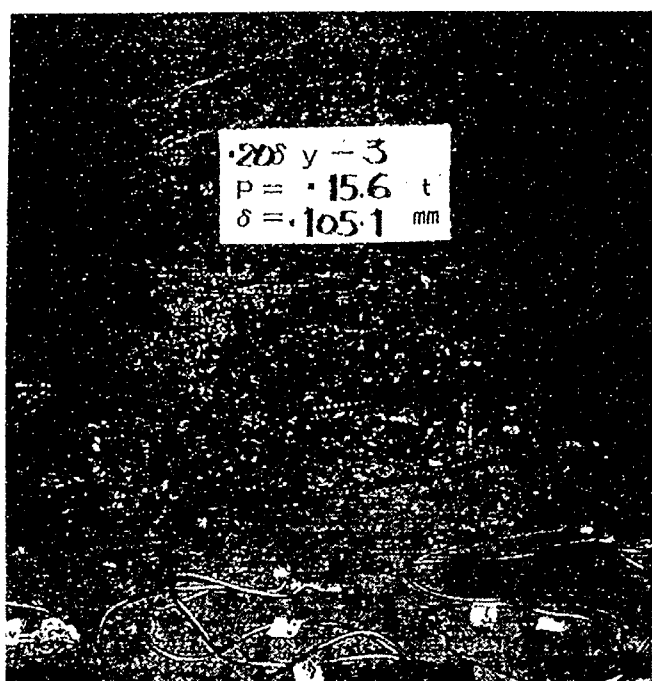


写真-5.4.1 No. 21 杭供試体ひび割れ状況

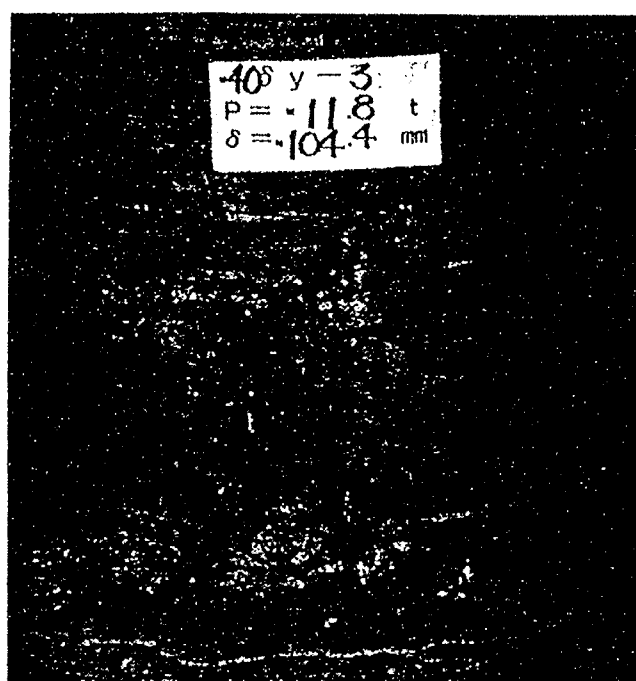


写真-5.4.2 No. 22 杭供試体ひび割れ状況

5.4.2 供試体観察結果

(1) ボアホールカメラの種類と概要

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 及び Inspection Camera 方式の2タイプである。次ページ以降に、前述の Bip System、Inspection Camera 及びその他の装置の特徴、仕様、概観等をまとめて

表-5.4.1 実験に使用したボアホールカメラ一覧表

表-5.4.2 その他のボアホールカメラ一覧表

に示す。

表-5.4.1 実験に使用したボアホールカメラ一覧表

種類	BIPS(Borehole image processing system)	P-I-C(Pile Inspection Camera)
仕様	・孔壁展開処理計測システム 計測可能深度 最大300m 計測可能孔径 66~180mm 観測可能速度 0~1.5cm/s、最大2cm/s ボーリング方向 360° ・孔壁展開処理解析システム MPU IBM-AT互換/チップ X68000 グラフィックス: RGB 各6-8Bit、640×480dot 512×512dot 撮影可能フィルム: 35mmカラーフィルム 解析データファイル: 5インチ2HD、MS-DOS 互換File 特徴 ・現場での観測記録が極めて迅速 ・あらゆる掘削深度、口径、方向の孔に適用 ・孔壁の生画像を360°展開画像を同時観察可能 ・観察記録データをもとに様々な地質解析可能(走行傾斜、亀裂幅計測) ・孔壁の状態の立体的観察可能。	仕様 ・カメラは水陸両用、最大水深50m ・カメラの直径は73mm、長さ370mm ・カメラの撮影範囲は360° 特徴 ・ボアホールカメラに比較して照明が大きく、映像が鮮明である。 ・調査費用が安価
原理	円錐型反射鏡を介して簡便に孔壁の定方位全周画像を取り込み、ゾンデ内のTVカメラから送られてくるアナログ画像信号をコンピュータ処理によりAD変換しリアルタイムに展開画像に変換しMT上に記録し、同時にモニター表示する。展開原理は、メー上の全周画像を任意の円周に沿って一定位置から読み取りこれを展開画像メー上に横一列に取り込み、ゾンデが深度方向に移動すれば、これに同期して一定間隔で深度方向から信号を発信させ、これをトリガーとして上記作業を繰返し、順次行方向に並べることで深度方向に連続した展開画像を得る。	原理 テレビカメラの前に平面反射鏡を置き、それを旋回させ孔壁画像を得る方式。
概観		概観
	BIPS技術研究会	

表-5.4.2 その他のボアホールカメラ一覧表

種類	ボアホールカメラテレビ	MBS Motion Borehole Scanner	Borehole Scanner System	BIP システム
仕様	- 適用ボーリング孔径：φ66～134mm - 観測最大深度：250m - 全周連続画像表示最大速度：36m/H (1cm/秒) - 詳細動画映像幅：全周×上下20mm - 電源：AC100V±10%、50/60Hz - 動作温湿度範囲：+10～+30℃、80%以下（但し、結露なきこと） - 動作環境：粉塵、有毒ガス無きこと	- 動画データ密度：500ドット/全周 - 静止画データ密度：500ドット/全周 - 画像表示機能：前方・展開・スクロール画像 - 色分解能：RGB 各色8ビット - 観測速度：72m/時 - 深度分解能：0.5mm - ウイッチ：超小型電動ウイッチ - 動画出力：NTSCビデオ出力	- 撮影方法：360° 連続回転撮影 - 撮影画像：カラー連続展開画像 - 観測速度：72m/時 - 解析作業効率：10～50m/日 - 記録方法：VTR・デジタル記録 - 解像度：0.1mm - 観測可能深度：200m - 適用孔径：φ66～86mm	- 測定速度：0～1.5cm/s - 測定深度：300m - 適用孔径：φ66～180mm - 記録方法：VTR、デジタル記録
特徴	- 孔壁全周 360° の状況を地上のテレビ画面で全周展開画像として表示。 - 画面に、孔壁映像、カメラ深度、方位、傾斜をデジタル表示	- ボーリング孔内を 360° パノラマ動画画像で観察 - パノラマ画像を展開画像デジタルデータで記録 - 画像データから地層面、節理面、断層面、割れ目の方向や幅など原位置の地質情報を取得 - 高品質の孔内ハードコピーを作成	- 孔壁全周を一度に観察可能、カラーパノラマ画像 - 毎時 72m のリアルタイム観測可能 - 毎分 3000 回転感度スキャナ - 開発 0.1mm の高解像度	- 孔壁全周画像を定方位撮影可能 - 孔壁全周画像を深度信号と同期させ画像処理装置によりデジタル化しMTに記録。 - デジタルデータとして記録されているためコンピュータによる解析処理が容易
原理	Bips 方式	プローブの先に CCD カメラが取り付けられており、ドーナツ状の映像を得る。この映像をデジタル化しメモリ上に長方形に展開し、孔内全周囲を動画画像としてみる。	MBS 方式	Bips 方式
概観				
	サカタデンキ	株式会社 コア	株式会社 建設技術研究所	基礎地盤コンサルタンツ (株)

(2) 供試体諸元

撮影対象の供試体は、載荷試験を行なった「梁」と「試験杭」である。

1) 「梁」

梁は、図-5.4.2 に示したように、800mm×600mm×長さ 4800mm で、中空になっており中空部は、300mm×200mm である。

この梁は、曲げ試験を行なっており、中心部にかなりのクラックがある。

写真-5.4.3 は、今回、対象とした梁で、外観上は梁の中央付近に細かなクラックが見られ、写真の右側が破断している。写真-5.4.4 は、はりの中空部分であるが、中央部分で大きく破損しているのが見える。

今回使用した BIPS のボアホールカメラは、観測孔をボーリングなどで設置した「円形の観測孔」用に作られており、矩形の観測孔で横たわっている事から、一定の焦点距離を得るために、写真-5.4.5、写真-5.4.6 に示したような特殊な装置を試作して実施した。

P・I・C のカメラは、焦点距離には問題はないが、同じように横たわったものを撮影するために、ボアホールカメラをエンビパイプの先に取りつけ観察した。

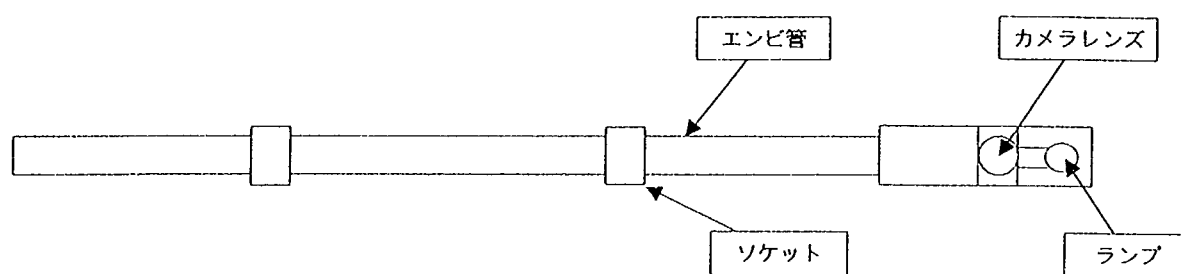


図-5.4.3 梁の中空部を撮影するための装置 P・I・C

2) 「試験杭」

この杭は、図-5.4.4 に示したように、 $\phi 600\text{mm}$ の杭をフーチングに結合させた供試体である。

このような杭を、計 4 本使用して、中詰めコンクリートの部分に「観測孔 $\phi 100\text{mm}$ 」を設置し、2 種類のカメラで観測した。

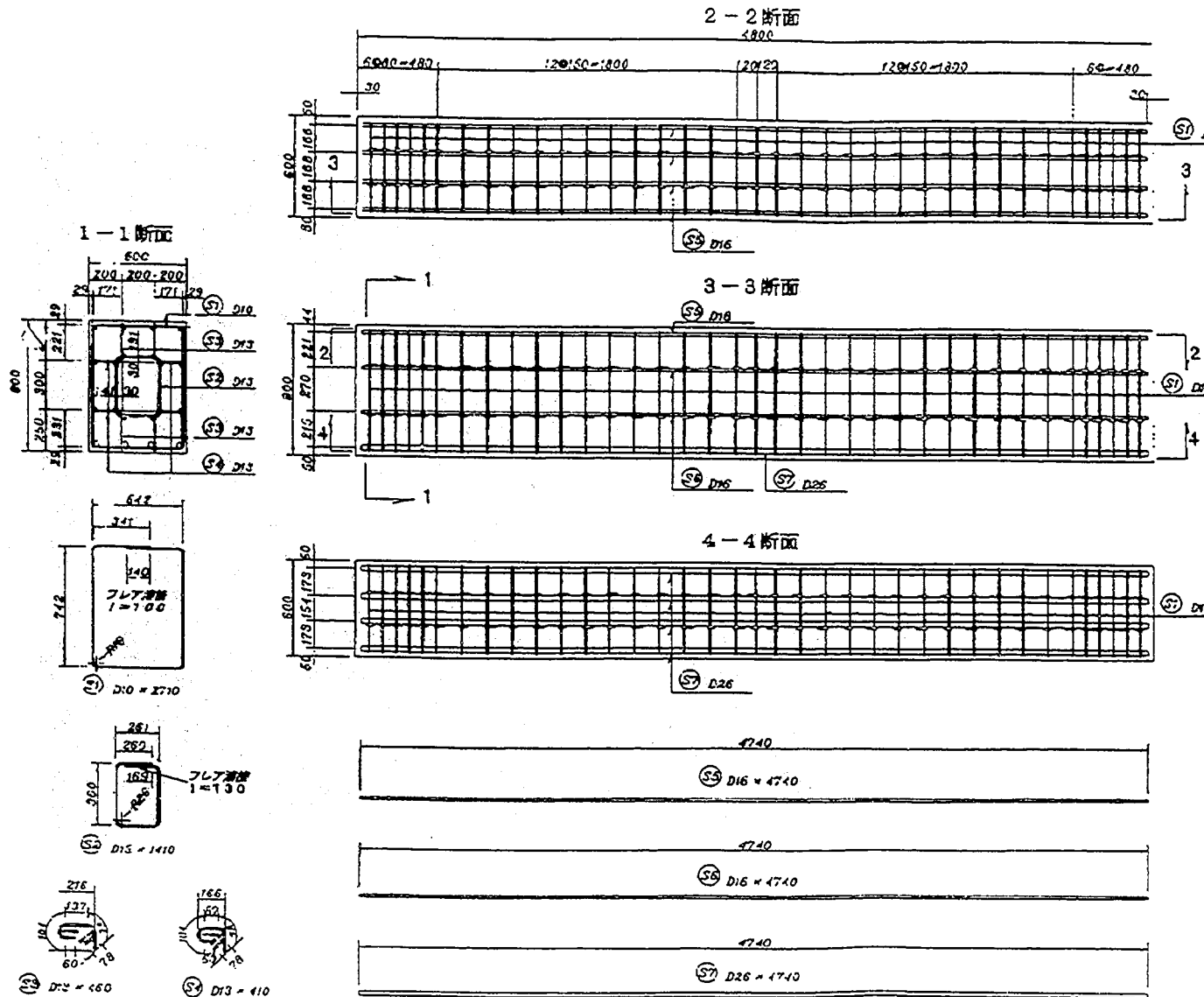
写真-5.4.7 の No. 18 の杭は、外側に鋼板を巻いたものであり、外観上は破壊していない。

写真-5.4.8 の No. 19 の杭も外側に鋼板を巻いたものであり、外観上は破壊していない。

写真-5.4.9 の No. 21 の杭は、外観上は杭とフーチングブロックの境界付近で、破壊し鉄筋がむき出しになっている。

写真-5.4.10 の No. 22 の杭も外観上は杭とフーチングブロックの境界付近で、破壊し鉄筋がむき出しになっている。

梁試験体①配筋図 S=1/25



材 料 表

配筋	長さ (mm)	本数 (本)	重量 (kg)	形状	備考
S1	D10 2710	37	0.560	1.52	56.15
S2	D13 1410	37	0.995	1.40	51.91
S3	D13 460	148	0.995	0.46	67.74
S4	D13 410	148	0.995	0.41	60.36
S5	D13 4740	4	1.56	7.39	29.58
S6	D16 4740	12	1.56	7.39	88.73
S7	D26 4740	4	4.38	22.75	91.01
			D10	66.15	
			D13	180.03	
			D16	88.73	
			合計	324.91 (SD295A)	
			D16	29.58	
			合計	29.58 (7'-7'-7')	
			D26	91.01	
			合計	91.01 (7'-7'-7'-7')	
			コンクリート	V = 2.016 m ³	
			コンクリート	σ _{ck} = 225 (kgf/cm ²)	
			η	G _{max} = 10 (mm)	

図-5.4.2 梁供試体諸元



写真-5.4.3 梁全体

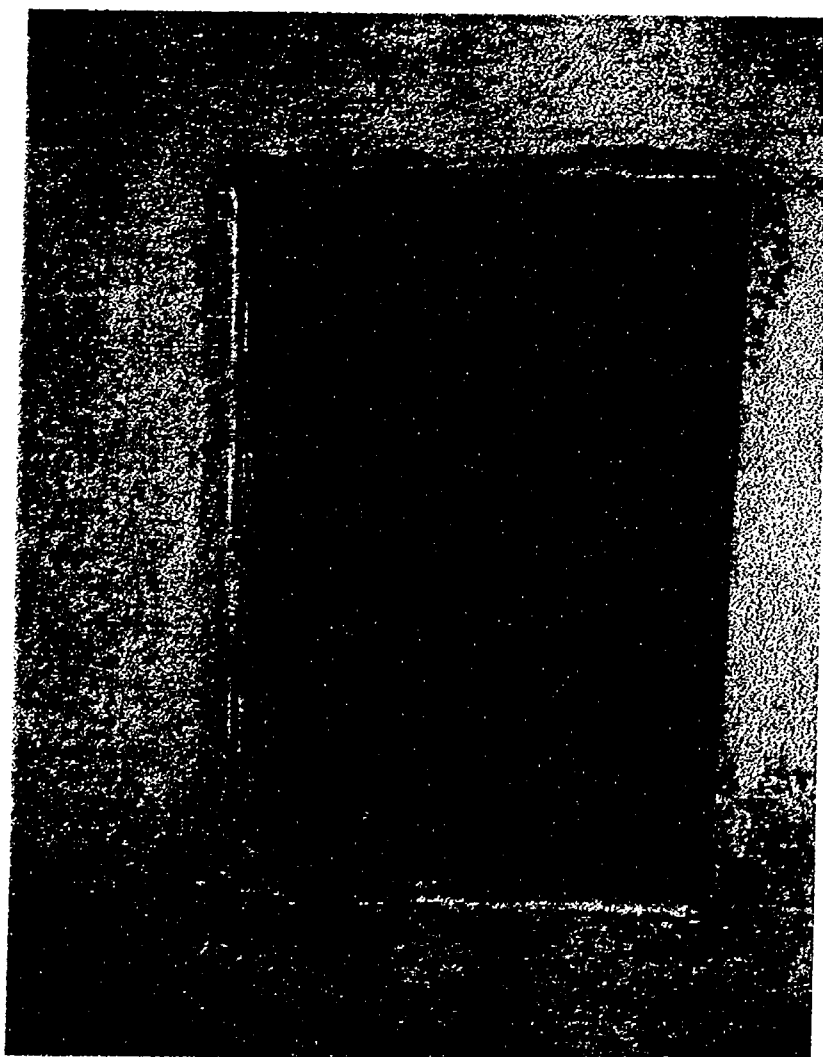


写真-5.4.4 梁中空部

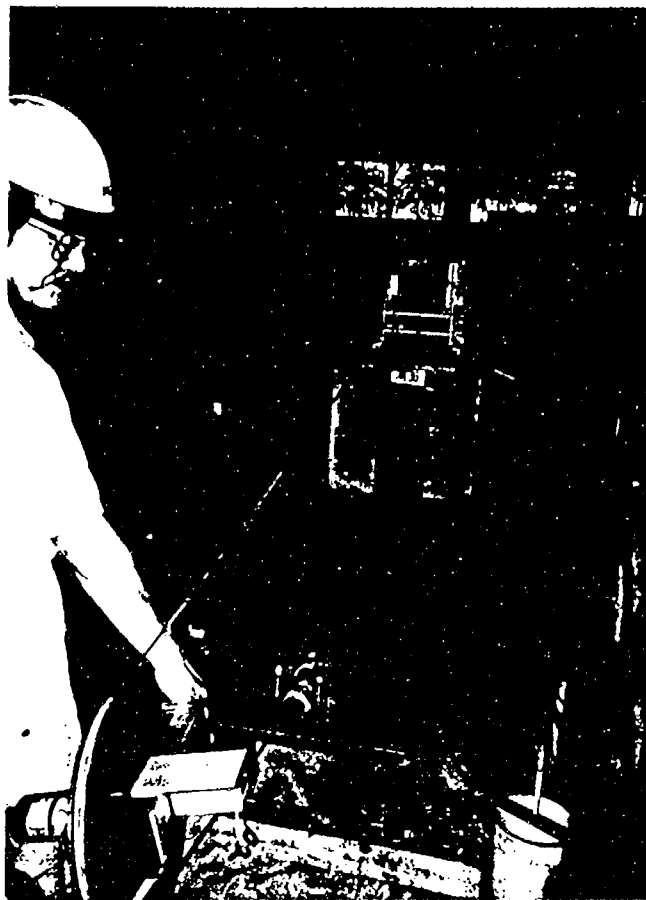


写真-5.4.5 BIPS 矩形横観測装置（試作）

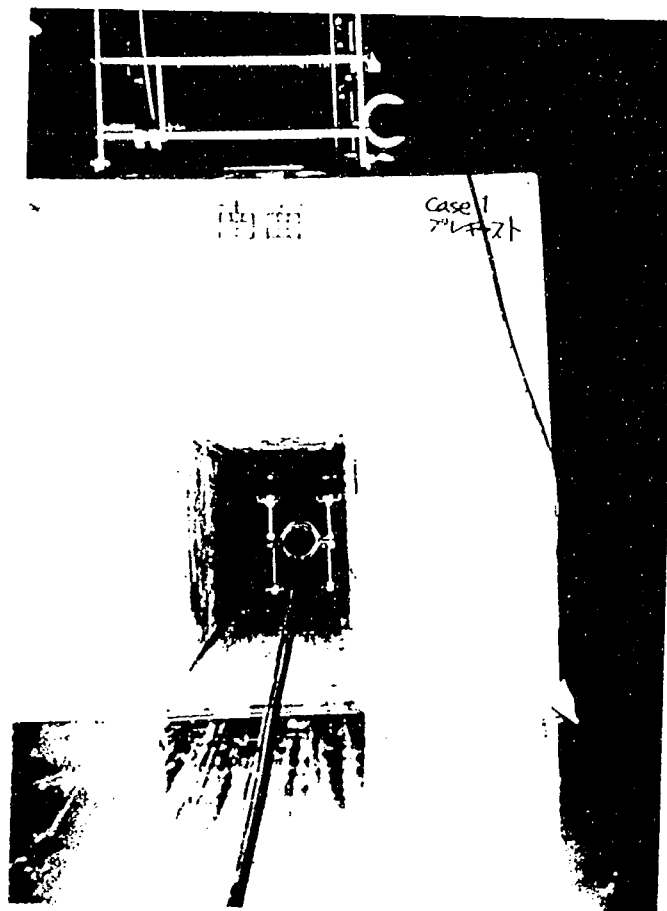
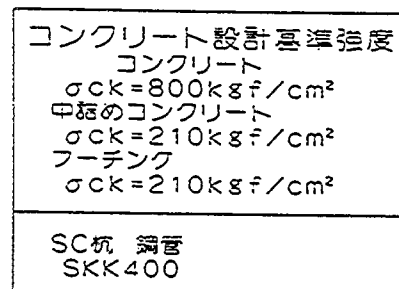


写真-5.4.6 BIPS 矩形横観測装置（測定中）



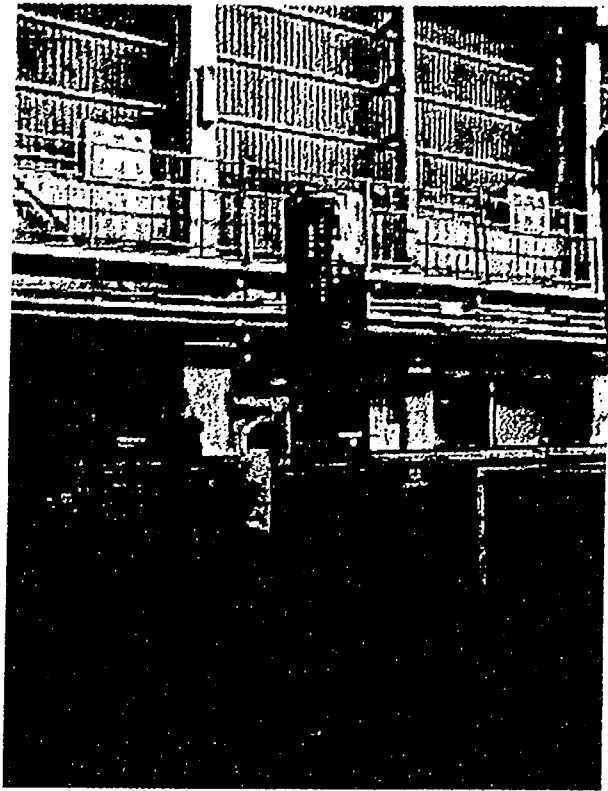


写真-5. 4. 7 試験杭 (No.18)

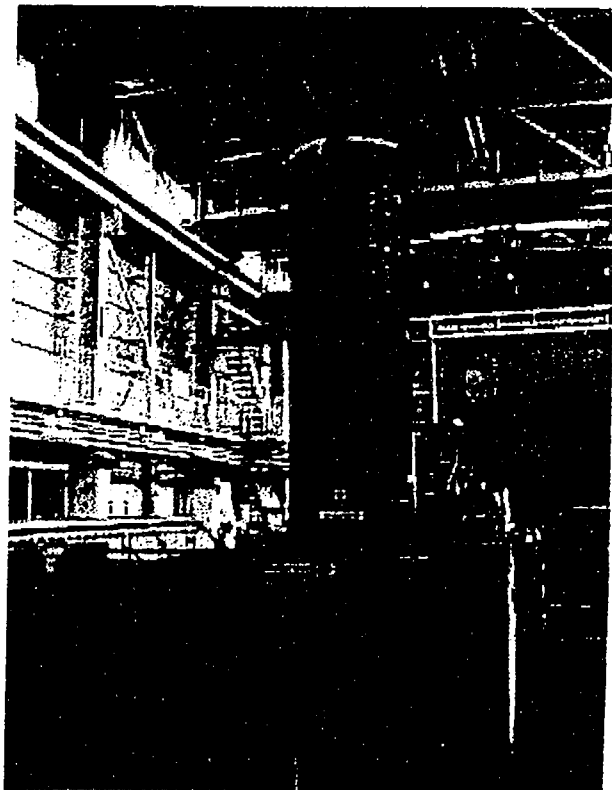


写真-5. 4. 8 試験杭 (No.19)



写真-5. 4. 9 試験杭 (No.21)



写真-5. 4. 10 試験杭 (No.22)

(3) 観測孔の削孔方法

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

削孔は、図-5.4.5 に示した、「高周波モータ(400Hz)」を使用した「コアカット」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」を使って行なったが、試験杭は写真-5.4.11 に示したように、ピットに入れ、周囲に足場仮設を行ない実施した。掘進時間は、1 個所当り約 30 分であった。

観測孔の長さは、杭頭 0.5m は中空であるが、そこから鉄筋が入っていない所を 1.6m~2.1m としたが、各杭のは以下の通りである。

- No. 18 1.6m
- No. 19 1.8m
- No. 21 1.6m
- No. 22 2.1m

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-5.4.12 の通りである。

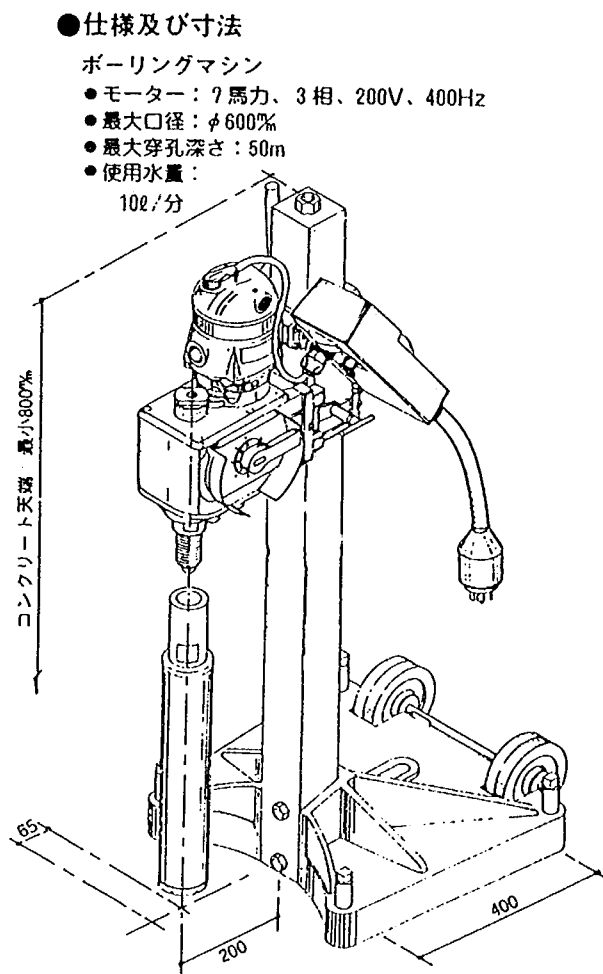


図-5.4.5 観測孔削孔ボーリングマシン

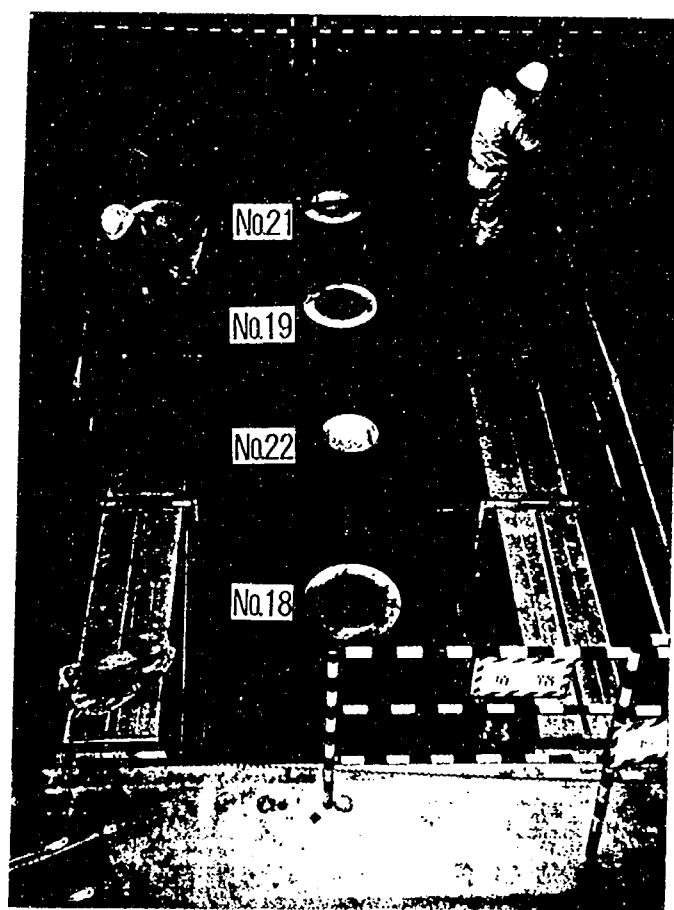


写真-5. 4. 11 観測孔削孔準備

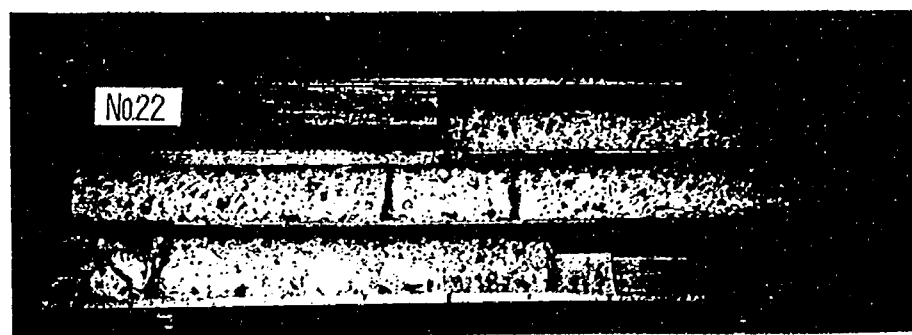
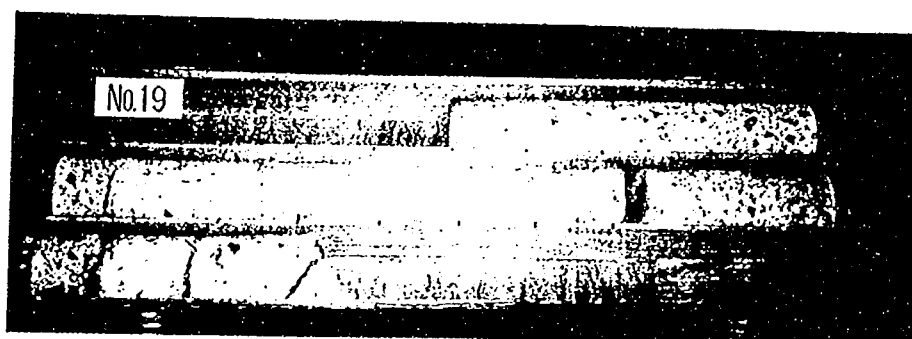


写真-5. 4. 12 観測孔削孔で得られたコア

(4) 観察結果

1) 「梁」

「梁」の観察結果は、写真-5.4.13、写真-5.4.14 に示した通りである。

写真-5.4.13 は、BIPS で観察したものであるが、以下のような事がいえる。

- a. 矩形の隅の部分は、光線が届き難い事もある、暗くなっている。
- b. 始点から 1.0m、1.2m、1.6m、2.2m 付近に「ヘアクラック」が認められる。
- c. 1.0m、1.2m 付近のヘアクラックの方向は、上方(U)が奥で、下方(D)が始点側にあるので、奥の方に荷重されて入った事を示している。
- d. 始点から 3.2m～3.8m は破断しており、3.4m 付近では鉄筋がむき出し状態である。

写真-5.4.14 は、P・I・C で観察したものであるが、ビデオ撮影したものを、一枚の写真にした後、貼り付ける方法で、再現したものである。観察位置は、スケールを同時に映し出す事により特定した。この写真から以下のような事がいえる。

- a. 矩形の隅の部分は、光線が十分届いており、暗い部分が無い。
- b. 破断した部分の、コンクリートの骨材まで鮮明に写っている。
- c. 観測している位置が、ビデオを見ると鮮明であるが、切り貼りしたものは特定し難い。
- d. 全体像を、表現するためには、切り貼りでは作業量が多い。成果は、ビデオの方が良い。

以上のように、同じ「梁」を 2 つの「ボアホールカメラ」で観察したが、以下のような事がいえる。

- a. 両カメラとも、水平な観測孔において計測を行うことは、かなりの工夫が必要である。
- b. 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。
- c. 成果品は、BIPS 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。

件名:
孔番: 1

孔方位: 0

孔傾斜: 0

深度範囲: 0.000 ~ 2.000 m

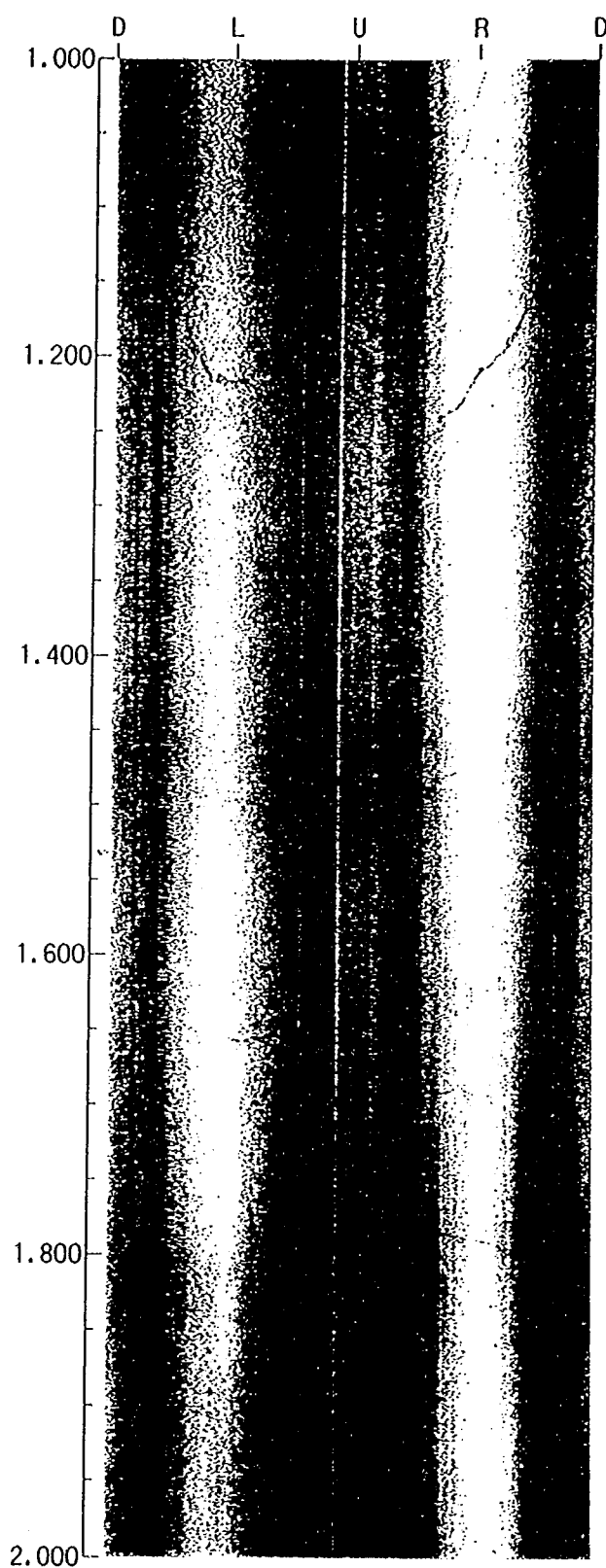
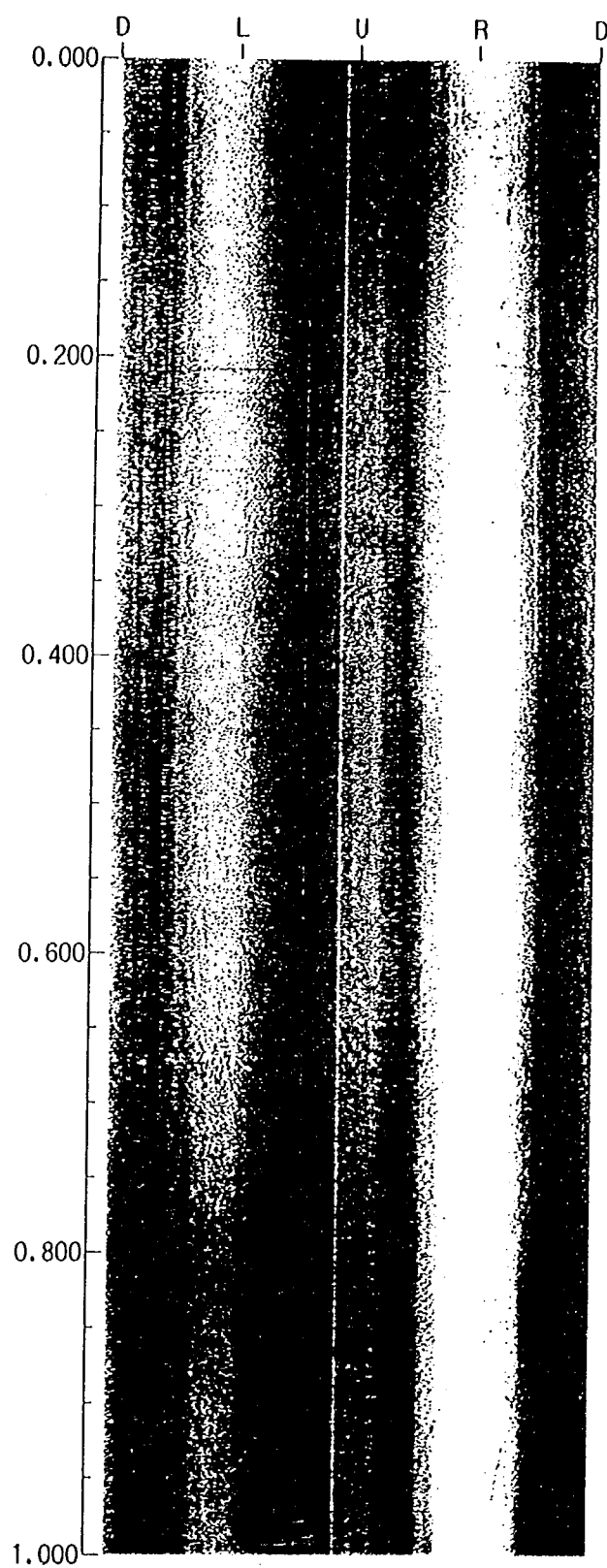


写真-5. 4. 13(1) 梁の観察結果 (BIPS) スケール: 1/5 アスペクト: 100%

件名:
孔番: 1

孔方位: 0

孔傾斜: 0

深度範囲: 2.000 ~ 4.000 m

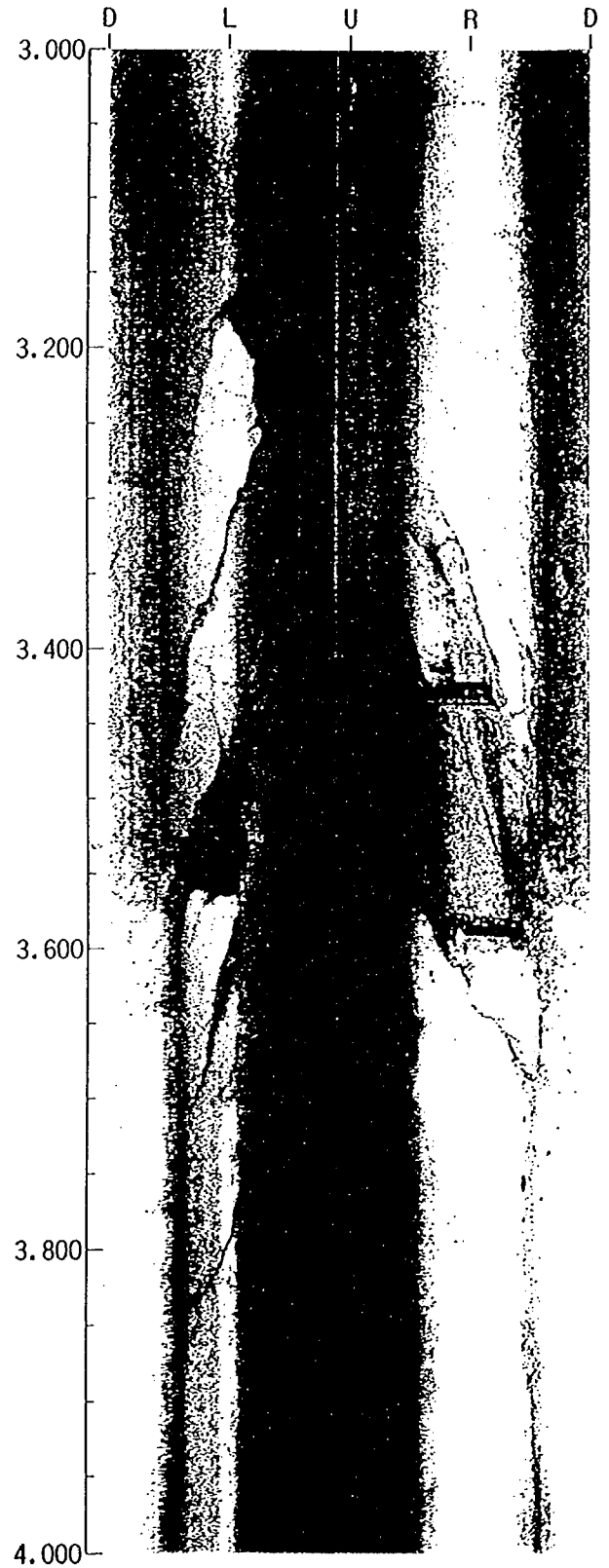
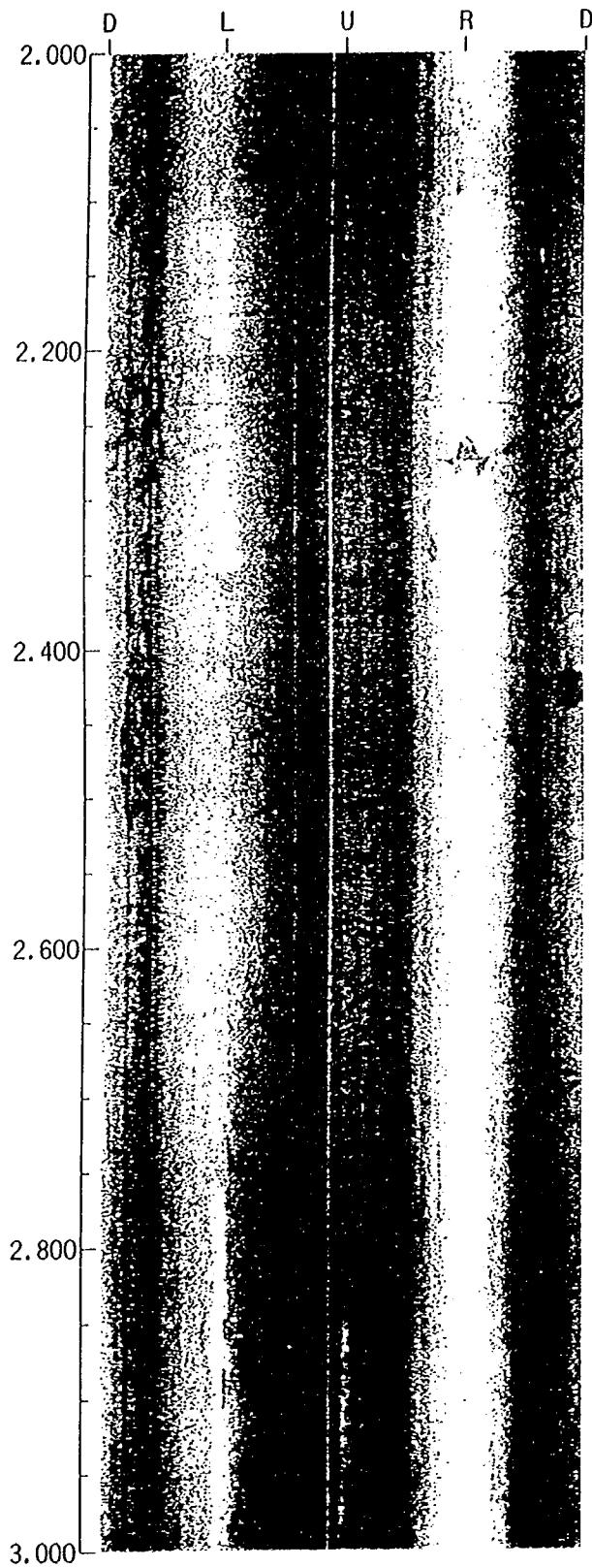


写真-5. 4. 13(2) 梁の観察結果 (BIPS) スケール: 1/5 アスペクト: 100%

CASE 1

南側



北側

写真-5.4.14 梁の観察結果 (P・I・C)

2) 「試験杭」

「試験杭」の観察結果は、以下の通りである。

a. No. 18 の杭

No. 18 の杭は、杭の外周に鋼板を巻き付けたもので、外観上はクラックが認められないが、写真-5.4.15 に示す採取したコアを見ると、杭頭から 1.1m 付近で完全に折れ、1.5m 付近にヘアクラックが見られる。

写真-5.4.16 は、P・I・C の結果であるが、その場所に鮮明に「クラック」が映し出されている。

BIPS の結果は、写真-5.4.17 であるが、1.1m 付近の「クラック」が不鮮明ではあるが認められたが、1.5m 付近は拡大した画像での解析が必要である。

b. No. 19 の杭

No. 19 の杭も杭の外周に鋼板を巻き付けてあり、外観上はクラックが認められないが、写真-5.4.18 に示す採取したコアを見ると、杭頭から 1.1m 付近、1.7m、2.1m、2.2m、2.3m で完全に折れている。コアが折れている現象として、載荷時にクラックが入ったものかコアを採取する時に折れてしまったものか不明である。

写真-5.4.19 は、P・I・C の結果であるが、1.0m、2.0m、2.05m でクラックが認められ、1.0m 付近のものはヘアクラックである。

写真-5.4.20 は、BIPS の結果であるが、1.1m 付近の「ヘアクラック」が不鮮明ではあるが認められ、2.05m 付近は約 2mm のクラックが認められた。

c. No. 21 の杭

No. 21 の杭は、杭の外周に鋼板はなく、外観上はフーチングと杭の境界面で激しく損傷している。写真-5.4.21 は、採取したコアであるが、杭頭から 1.2m、1.8m、2.0m 付近で完全に折れている。コアが折れている現象として、載荷時にクラックが入ったものかコアを採取する時に折れてしまったものか不明である。

写真-5.4.22 は、P・I・C の結果であるが、1.22m が「ヘアクラック」で、1.75m は大きなクラックである。

写真-5.4.23 は、BIPS の結果であるが、1.75m 付近の「クラック」が認められ、その大きさは 1mm 以下である。1.2m 付近のものは、更に解析する必要がある。

d. No. 22 の杭

No. 22 も杭の外周に鋼板はなく、外観上はフーチングと杭の境界面で激しく損傷している。写真-5.4.24 は、採取したコアであるが、杭頭から 1.4m、1.6m、2.0～2.2m 付近で完全に折れている。2.0～2.2m 付近を除いて、コアが折れている現象として、載荷時にクラックが入ったものかコアを採取する時に折れてしまったものか不明である。

写真-5.4.25 は、P・I・C の結果であるが、1.6m が「ヘアクラック」で、1.91m 付近は大きなクラックで鮮明に映し出されている。

写真-5.4.26 は、BIPS の結果であるが、1.95～2.07m 付近に 1mm 程度の大きさの「クラック」が認められるが、これ以外のものは、更に解析する必要がある。

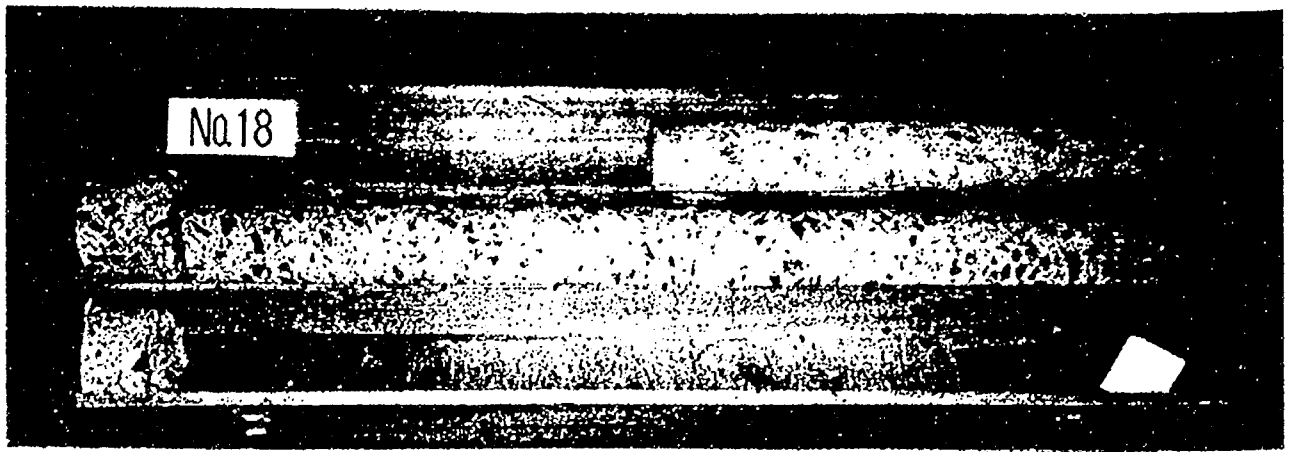


写真-5.4.15 試験杭採取コア (No.18)

NO. 18

1. 1 1 m



1. 5 3 m

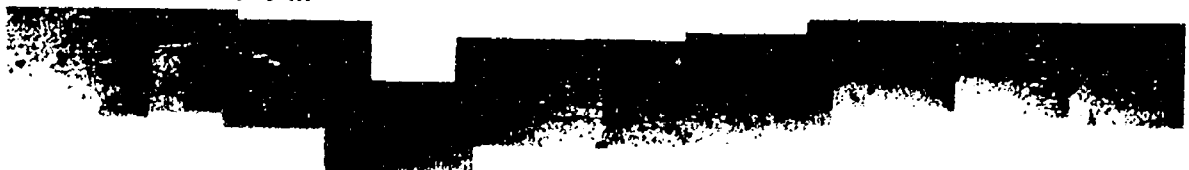


写真-5.4.16 試験杭観察結果 (No.18 P・I・C)

件名:
孔番: 18

孔方位: 0

孔傾斜: -90

深度範囲: 0.500 ~ 1.818 m

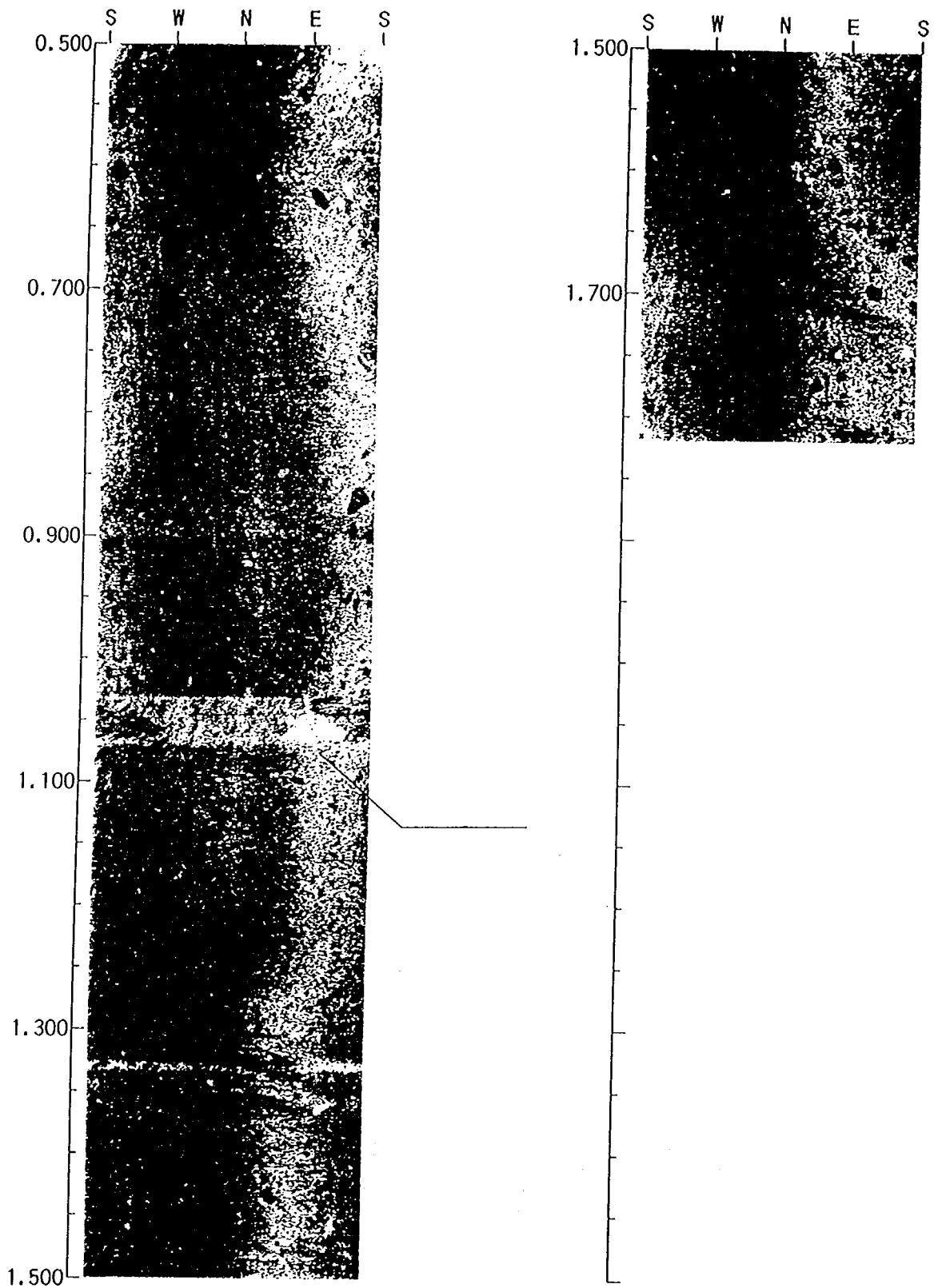


写真-5. 4. 17 試験杭観察結果 (No.18 BIPS) スケール : 1/5 アスペクト : 70%

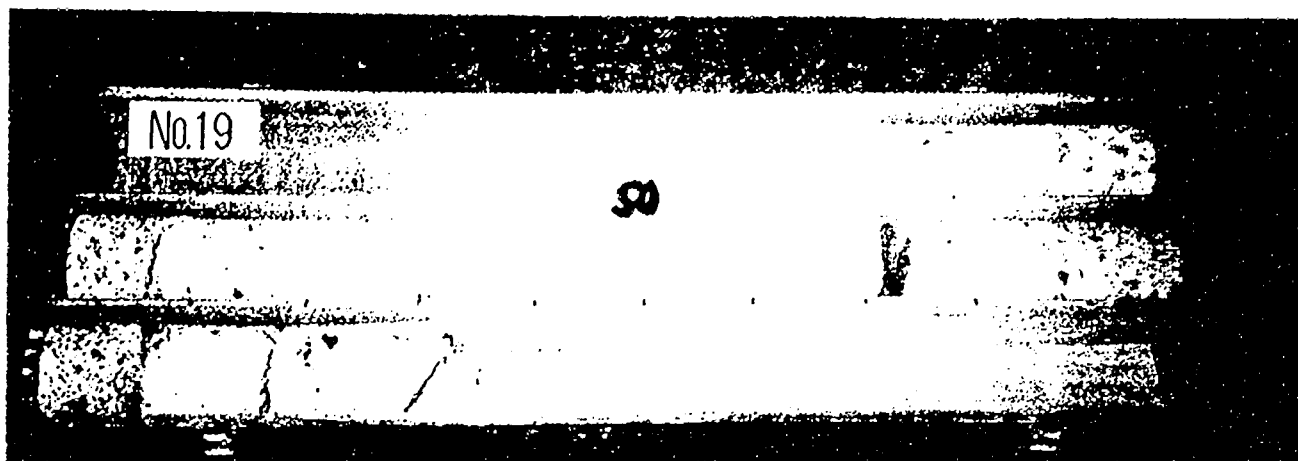
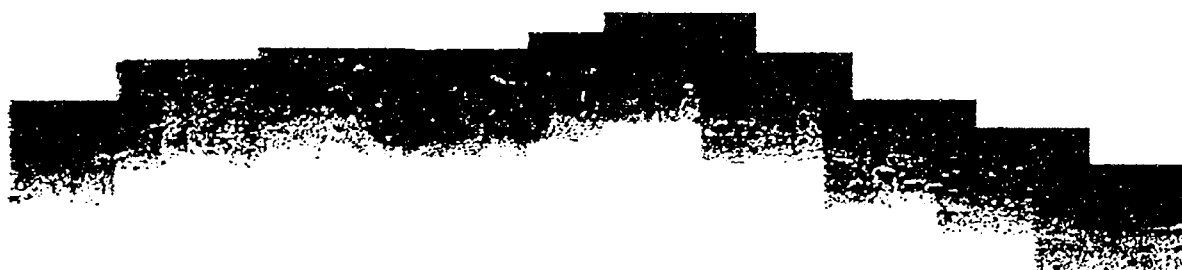


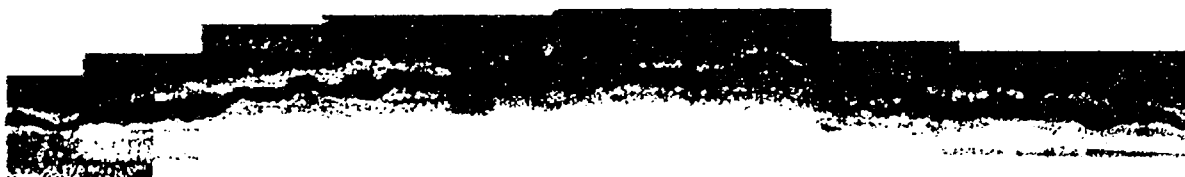
写真-5.4.18 試験杭採取コア (No.19)

NO. 19

1.08 m



2.00 m



2.05 m



写真-5.4.19 試験杭観察結果 (No.19 P・I・C)

件名:
孔番: 19

孔方位: 0

孔傾斜: -90

深度範囲: 0.500 ~ 2.040 m

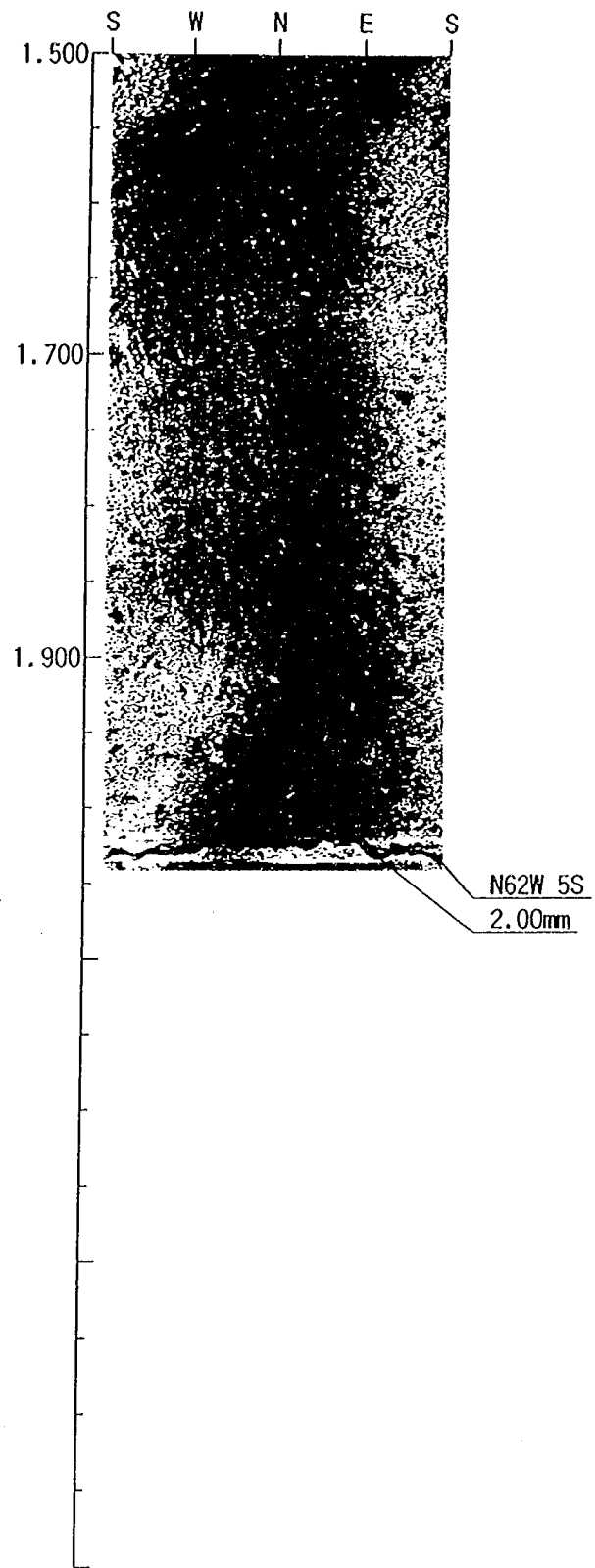
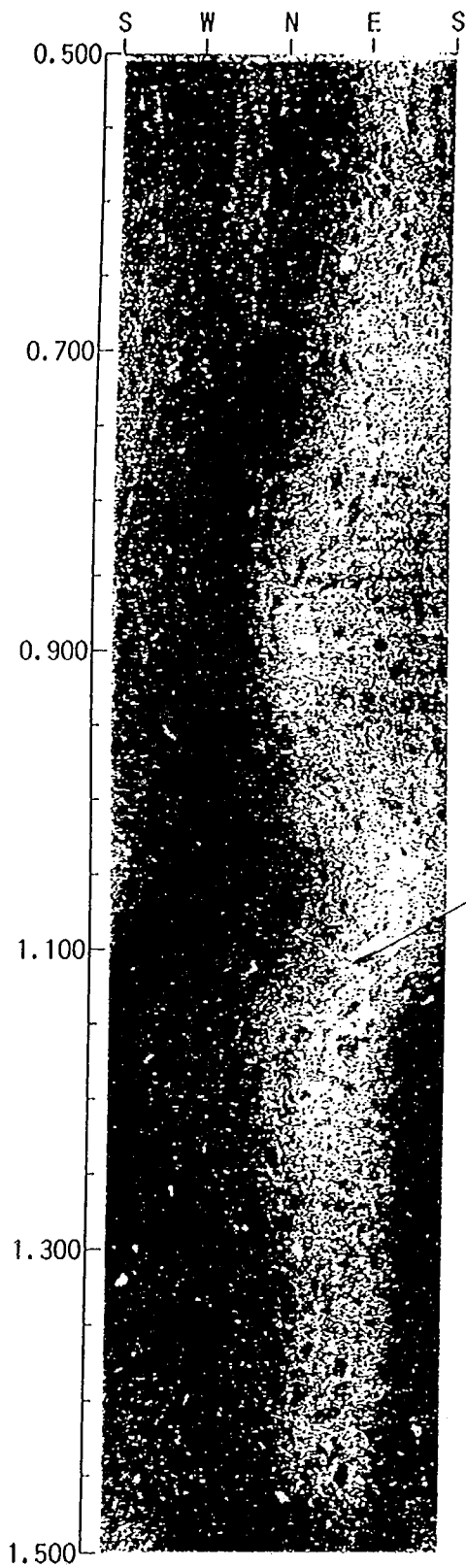


写真-5.4.20 試験杭観察結果 (No.19 BIPS) スケール: 1/5 アスペクト: 70%

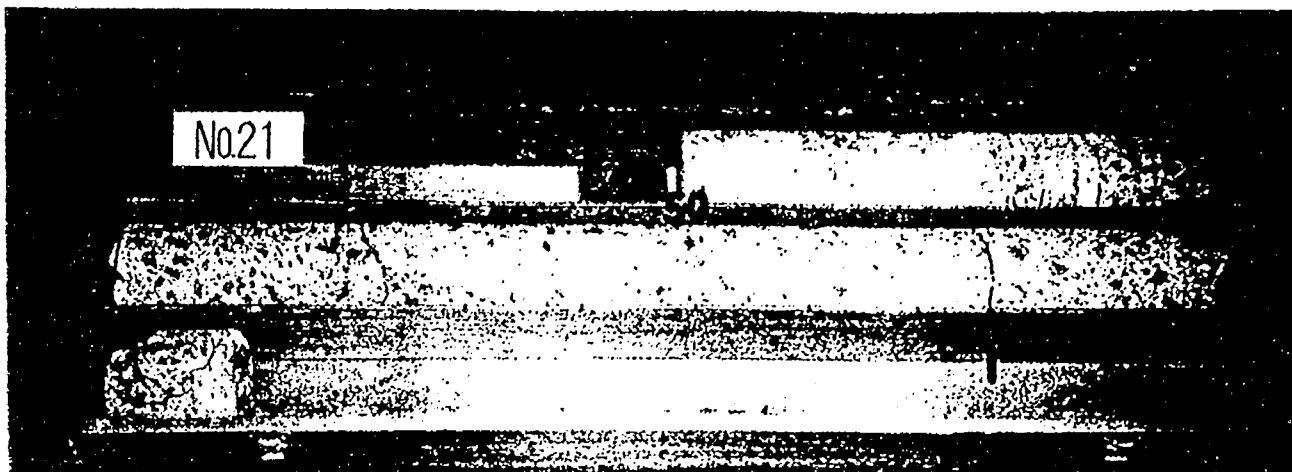


写真-5.4.21 試験杭採取コア (No.21)

NO. 21

1. 32 m



1. 75 m



写真-5.4.22 試験杭観察結果 (No.21 P・1・0)

件名:
孔番: 21

孔方位: 0

孔傾斜: -90

深度範囲: 0.500 ~ 1.856 m

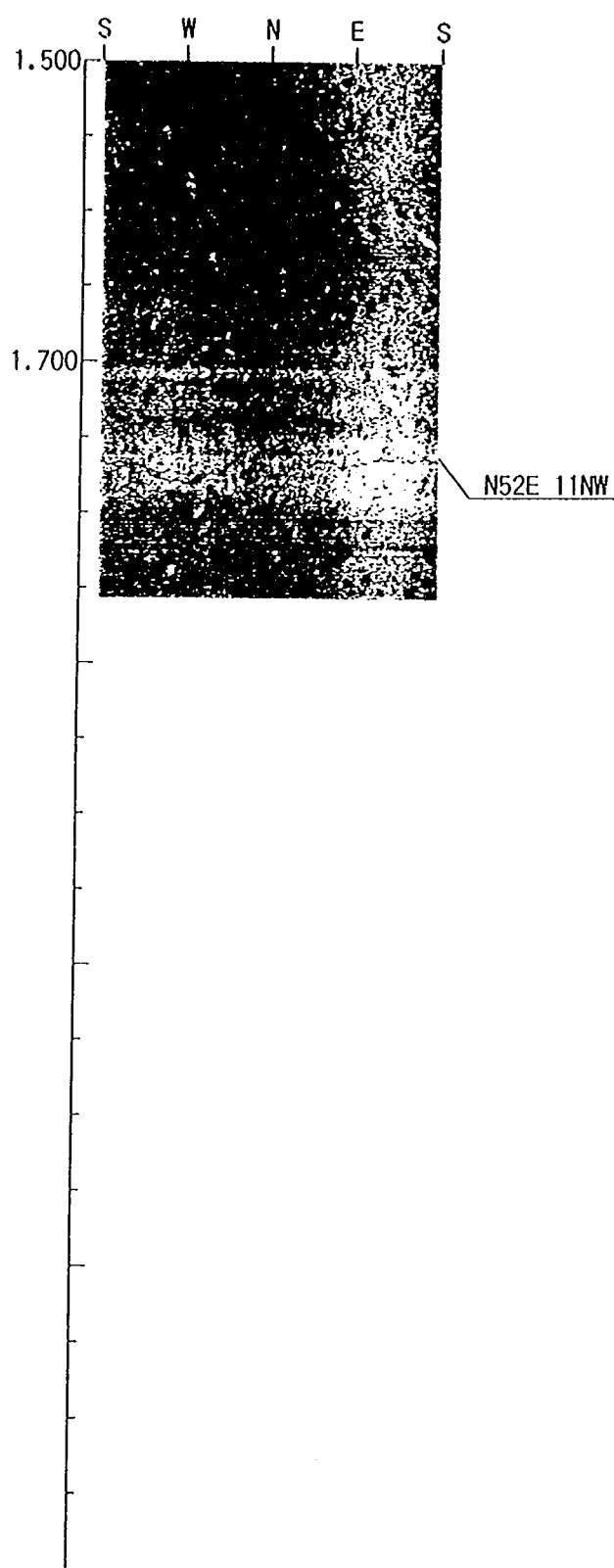
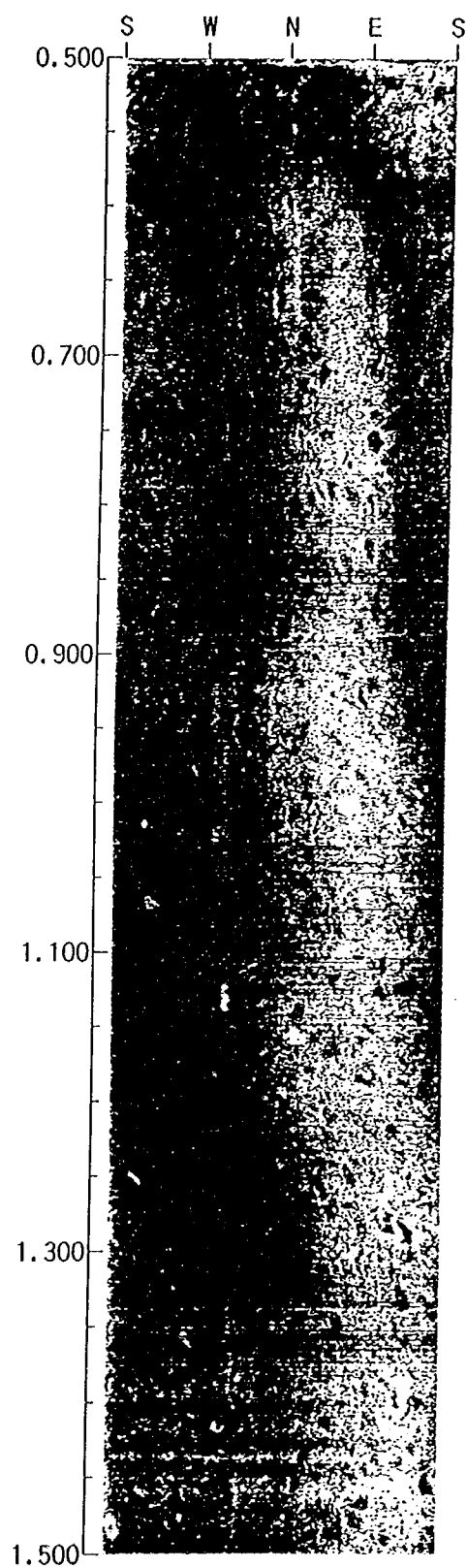


写真-5. 4. 23 試験杭観察結果 (No.21 BIPS) スケール: 1/5 アスペクト: 70%

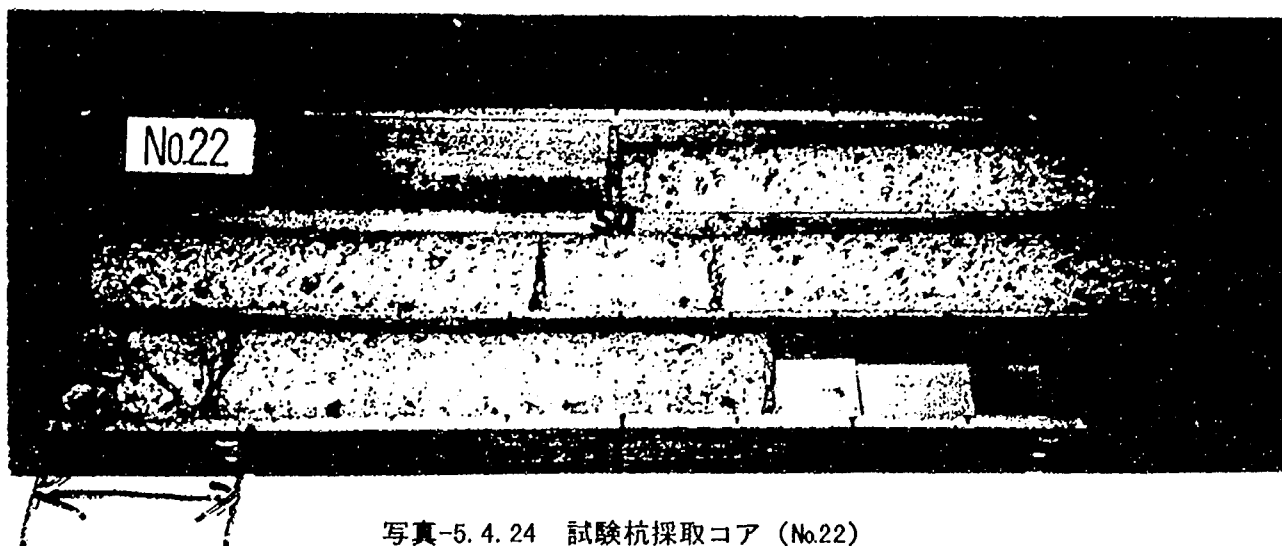


写真-5. 4. 24 試験杭採取コア (No.22)

NO. 22

1. 6 m



1. 91 m

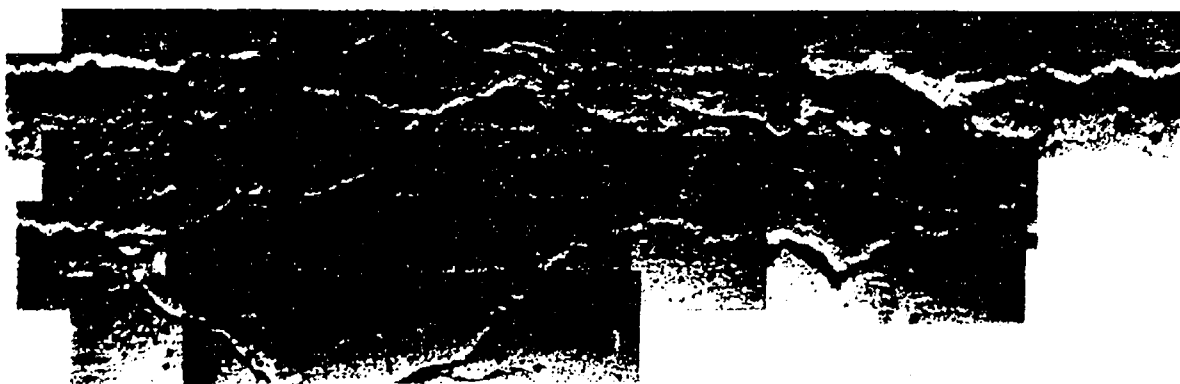


写真-5. 4. 25 試験杭観察結果 (No.22 P・I・C)

件名:
孔番: 22

孔方位: 0

孔傾斜: -90

深度範囲: 0.500 ~ 2.303 m

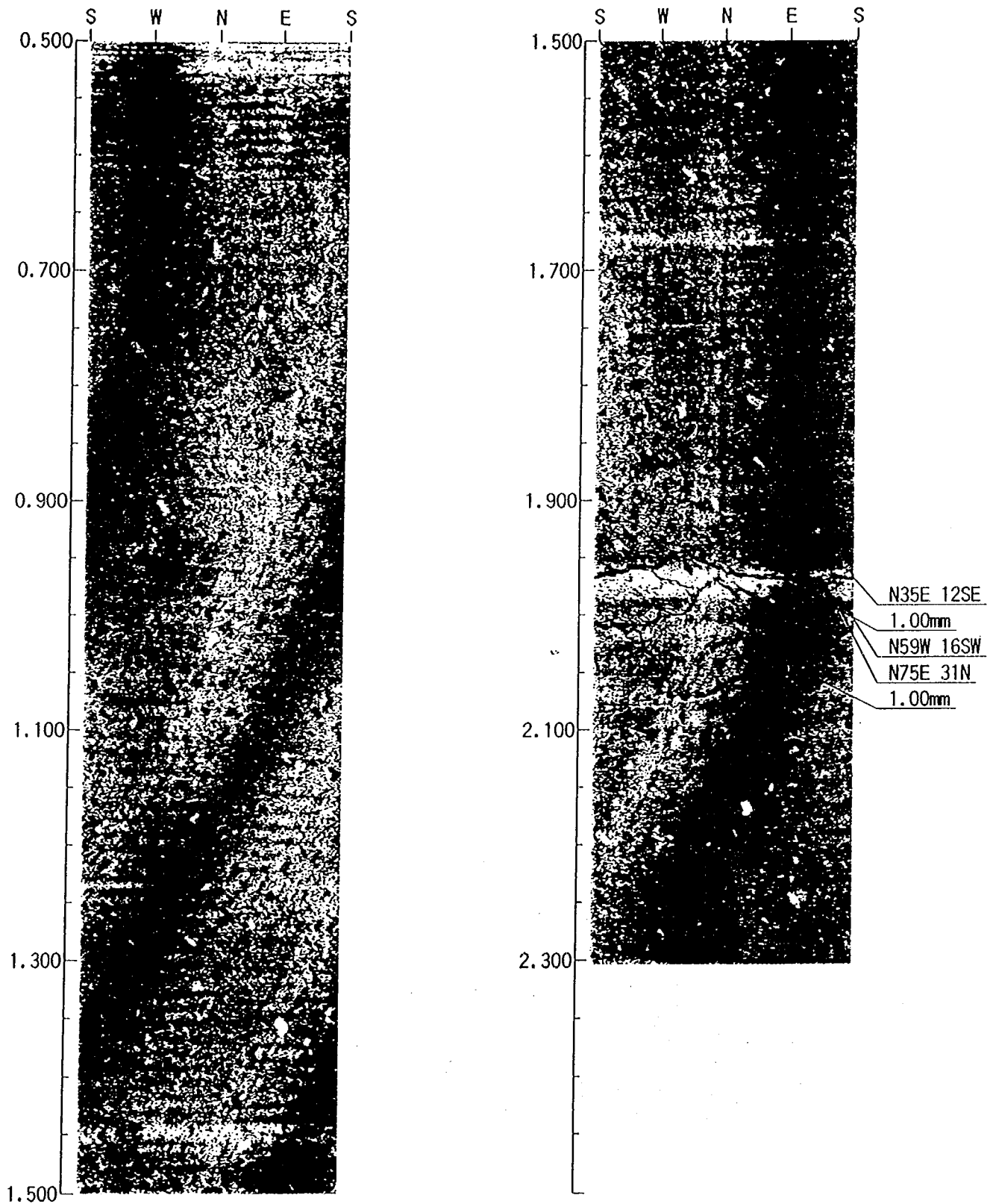


写真-5. 4. 26 試験杭観察結果 (No.22 P・I・C) スケール: 1/5 アスペクト: 70%

5.4.3 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、クラックの部分の角部が欠け、拡大する場合があるので、掘進方法や観測結果の解析には注意が必要である。
- h. 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。
- i. ボアホールカメラの撮影位置の精度は、BIPS が 0.5% 以内であるが、P・I・C は 5cm 以内である。
- 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。 0.1mm 程度までは判定可能であるが、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。

5.4.4 まとめと今後の課題

(1) まとめ

今回の観察結果をまとめると以下ようになる。

- a. 両カメラとも、水平な観測孔で調査を行う場合は、かなりの工夫が必要である。
- b. 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。
- c. 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。
- d. No. 19 の杭で、P・I・C の 2.0m と BIPS の 2.05m のクラックの形状を見るとほぼ同じである事から、距離の精度が 5cm 程度ありそうである。
- e. 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。
- f. クラックの大きさが 1mm 以上のものは明確に判別できる。
- g. P・I・C では、目標物を同時に撮影し、キャリブレーションを行なって、クラックの大きさを決定する必要がある。

(2) 今後の課題

以上のように現状のボアホールカメラの完成度は高いものと考えられるが、観測された結果が正しいかどうかは、観測孔の設置状態に左右されるところが大きいようである。また、クラックを鮮明にする方法も考えられる。

今後は、これらの課題を解明するために、以下の実験を計画する。(案)

- ① クラックの方向によって、観測孔の設置方法により観測結果がどのようなになるかを調べる。

具体的には、人工的な切り欠きを角度を変化させ、掘進速度の違う装置(ボーリングマシンとコアカッタ)で削孔し、観測孔の状態を調べる。

- ② クラックを鮮明にする「染料」と「添加剤」の適用性を調べる。

具体的には、共通供試体の中空部を使って、「蛍光剤」に接着剤を混合し、ブラッシングで蛍光剤を添付し、観察する。

- ③ ヘアクラックがどこまで解析可能か調べる。

平成 9 年度に行なった、試験杭の結果を詳細に再解析する。

5.5 磁気探査

5.5.1 研究概要

(1) 磁気探査概要

磁気探査はボーリング孔に挿入した磁気傾度計により強磁性体の位置を調べ、磁性体の位置により杭の形状を推定する方法である。

鉄等はそれ自身が持つ残留磁気と、その場所の地球磁場による感応磁気によって帯磁している。このため鋼材を含む杭の近くでは、地球磁場が局所的に乱されており、これを測定することにより強磁性体の位置を知ることが可能である。従って、磁気探査により杭長を解析することは、鋼材を含む杭に対しては適応可能であり、残留磁気量が大きい鋼管杭に対しては有効な方法である。

杭長解析の基本となる磁気傾度は、杭種および杭と探査孔の距離により相違するものである。しかしながら、杭種による残留磁気量の相違および杭と探査孔の距離による磁気傾度の相違ならびに杭長解析精度は定量的には求められていない。本研究では杭と探査孔の距離による測定精度の相違を定量的に把握することを目的とした。

また、観測孔を杭に横断方向に設置することにより、杭の配置を推定することも可能であると考えられるので、その適応性および測定精度についても確認するものとした。

(2) 探査に使用した機器の仕様

現在磁気検出方法としては以下のものが使用されている。

a) フラックスメーター方式(磁気傾度計)

磁界中をコイルが移動すると磁力線を切ることにより、コイルに電流が流れる電磁気理論を利用した方法。

b) フラックスゲート方式

高導磁率材料を磁芯とするコイルに高周波正弦磁場を加え、その磁芯の磁気飽和特性を利用し、外部磁界を測定する方法。

c) 光磁気共鳴型磁気計

光磁気共鳴型磁気計は特定なガスの原子の運動が磁気の有無により異なることを利用する方法。

上記磁気検出法の性能・機能等を比較すると表-5.5.1のとおりである。

表-5.5.1 各種磁力計比較表

項目 \ 磁力計	フラックスメーター磁力計	フラックスゲート磁力計	光磁気共鳴磁力計
感 度	10 γ	1~0.1 γ	0.01 γ
検 知 信 号	電圧	電圧	周波数
方 向 性	有 (検出器軸方向)	1 軸有 (検出器軸方向) 3 軸 (全磁場)	無 (全磁場)
測 定 方 法	連続測定	連続測定	連続測定
作 業 性	一定速度で曳航する必要有	速度に関係なし	同左
構 造	最も簡単であるが、2つのコイルの平行度を精度よくすることが必要	1 軸の場合 やや複雑 3 軸の場合 複雑	複雑であってランプの寿命に限度がある
価 格	低	中	高

本調査ではフラックスメーター方式（磁気傾度計）を使用した。使用した機器は下記のとおりであり、測定器の構成を図-5.5.1に示す。また、両コイル型磁気傾度計の仕様は下記のとおりである。

使用機器 両コイル型磁気傾度計

検出器	（D T M - 1 型）	1 台
増幅器	（M A G - 9 1 0 1 3 型）	1 台
記録器	（E P R - 3 5 0 0 型）	1 台
データ収録器	（D R - M 2 型）	1 台
ウィンチ		1 台
発電機		1 台
プーリー		1 台
カウンター		1 台

仕 様	
センサー（D T M - 1 型） 方 式：両コイル型 コア：パーマロイ 4 5 巻 数：60、000 耐水圧：水深 6 0 m 寸 法：φ 35×1、400（mm） 重 量：10kg（ケーブル別）	増幅制御器（M A G - 9 1 0 1 3 型） 方 式：平衡バランス型 利 得：60db 周波数：D C ～ 2 Hz 電 源：D C 1 2 V（単 2 乾電池 8 個） 寸 法：235×255×103（mm） 重 量：2.5kg（電池を含む）

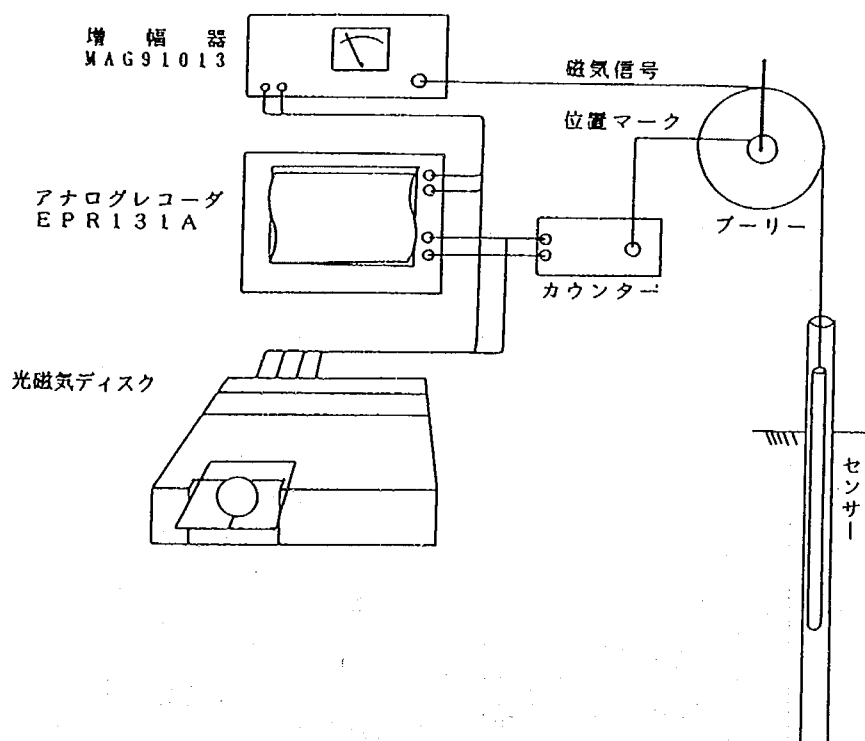


図-5.5.1 測定器の構成

(3) 測定方法

1) 測定原理

今回使用した測定器「両コイル型磁気傾度計」は、磁場の空間的变化（磁気傾計）を測定するものであり、コイルの断面を横切る磁力線の変化に応じてコイルの両端に誘導起電力が生じることを利用している。鉄類の近くの磁場の乱れた場所をコイルが通過したときに生じる起電力を測定し、その異常波形からその鉄類の位置が求められる。

一般に、鉄製品による磁気異常は地球磁場に比べて小さく局所的である。コイルを移動させる場合、わずかな振動により地球磁場を切り大きな起電力が生じ、鉄類等の起電力を上回るため測定できないことがある。このためコイルの移動に細心の注意をはらい、コイルの動揺が最少になるように移動するとともに測定記録を重合させてノイズを減少させる方法を取った。

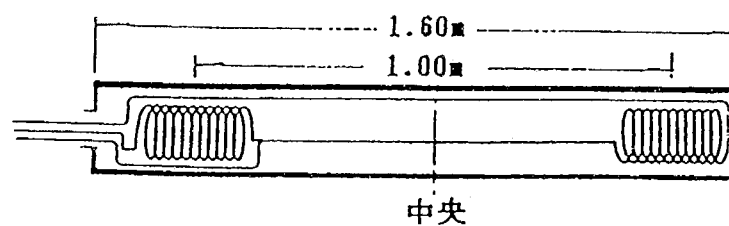


図-5.5.2 両コイル型磁気傾度計概念図

2) 測定方法

測定は両コイル型磁気傾度計の検出器を観測孔内に挿入し、孔口から孔底間を移動し、孔内の磁気傾度を連続的に測定した。センサーからの信号は増幅器を介し、レコーダーに記録すると同時に解析をコンピューターで行うためA/D変換を行なってコンピューターに磁気記録を収録した。

センサーの深度を正確に求めるためケーブルを通したプーリーの回転をエンコーダーで計測し、センサーが1m移動する毎に深度信号を入れ磁気記録と同時に記録した。深度は観測孔口を基準とした。

測定は3回程度繰り返し行ない、記録をスタック処理することにより、ノイズを消した。

3) 解 析

① 鉄類の磁気 (単極波形)

鉄製品とくに長いものの磁気は、N極とS極の2極であると考えられる。探査コイルと磁気異常物の一方の極の距離が近く磁気異常物の磁極が単極と考えられ得る場合、磁極の位置を原点としコイルの位置を (x, y, z) とする。

コイルの移動方向を x 軸に平行とするコイルの位置での磁場の x 成分 H_x は

$$H_x = \frac{m \cdot x}{r^3} \dots\dots\dots (5.5.1 \text{ 式})$$

ここに m : 磁気量 $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ である。

したがって、コイルの両端に生ずる起電力 E は

$$E \propto \frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt}$$

$$= \frac{(y^2 + z^2) - 2x^2}{r^5} V \dots\dots\dots (5.5.2 \text{ 式})$$

ここに $V \equiv \frac{dx}{dt}$ は、コイルの移動速度である。

上式は、下図に示すように $x = 0$ のとき極大となり

$$E_{x=0} = \frac{m \cdot V}{(y^2 + z^2)^{3/2}} \text{ となる。}$$

これより振幅 $E_{x=0} = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{y^2 + z^2}$ であり、

図の T (周期に相当) は、 $0.7 \times \sqrt{y^2 + z^2}$ であり距離に比例する。

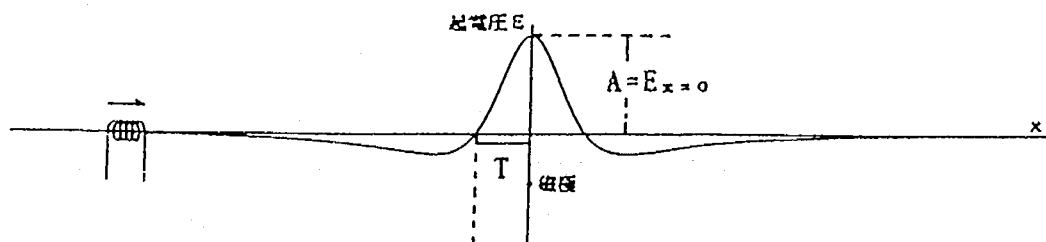


図-5.5.3 磁気異常波形

一般に測定される磁気異常波形は、図-5.5.3 のような対称性のあるものばかりではないが、上式の単極の重ね合わせとして解釈することができる。

② 杭の磁気

杭のように長い物の帯磁分析を考えると、1次近似としては、①に述べたようにその先端部にN極・S極が帯磁しているとしてよいが、実際測定される磁気異常波形は計算と一致しない場合が多い。そこで、杭の軸に沿って双極子が線状に分布するとして考える。

いま、 $y=0$ 、 $z=0$ 、 $x \geq 0$ に双極子が線状に分布するとき観測孔位置 (x 、 $y=0$ 、 $z=一定$) における磁位は、

$$V = \int_0^{\infty} M \frac{\alpha(x-x') + \beta y + \gamma z}{((x-x')^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dx'$$

$$= M \int_0^{\infty} \frac{\alpha \tau + \gamma z}{(\tau^2 + z^2)^{3/2}} d\tau \dots \dots \dots (5.5.3 \text{ 式})$$

ただし、 $\tau = x - x'$ 、 $y=0$ および α 、 β 、 γ は双極子の方向余弦であり M は、双極子モーメントの大きさである。観測孔における x 方向 (調査孔の軸方向) の磁場の強さ H_x は、

$$H_x = - \frac{\partial V}{\partial x} = M \frac{\alpha x + \gamma z}{(x^2 + z^2)^{3/2}} \dots \dots \dots (5.5.4 \text{ 式})$$

であり、この磁場内を磁気傾度計のコイルが通過するとコイルに生じる起電圧 E は、

$$E \propto \frac{dH_x}{dt} = \frac{\partial H_x}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt}$$

$$= M \frac{-2\alpha x^2 + \alpha z^2 - 3\gamma z x}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \cdot V \dots \dots \dots (5.5.5 \text{ 式})$$

となる。ここに、 V はコイルの移動速度である。

③ 磁気測定記録の処理

各測定データは、20msec の等時間間隔でサンプリングされた時系列であるが、1m 間隔に入れた深度マークを基にして深度を等間隔に変換する。

振幅はあらかじめ一定に調整することにより、計算波形を設定し、モデル波形と比較し良く一致するパラメータを見つけることにより磁気異常位置を決めた。

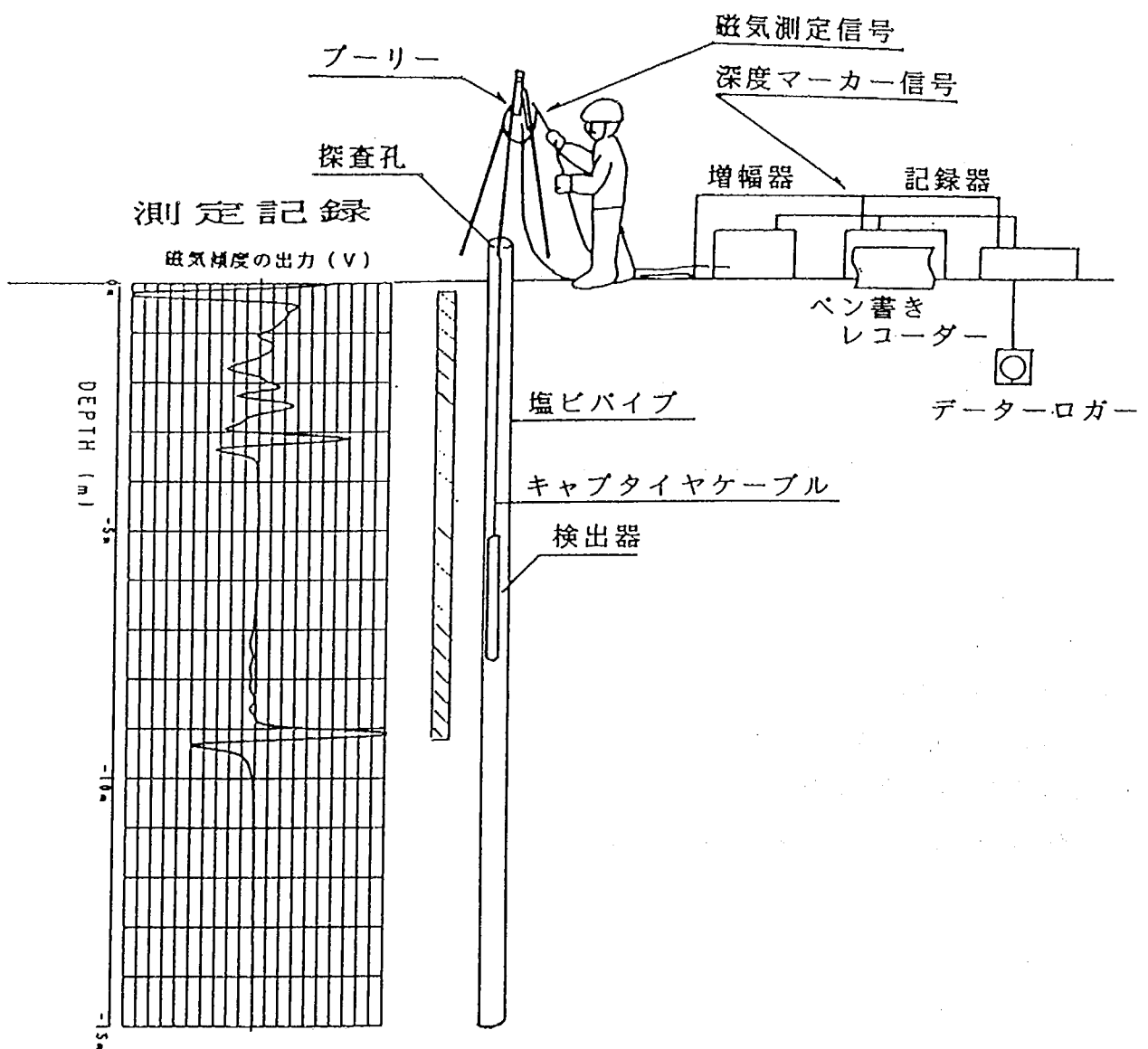
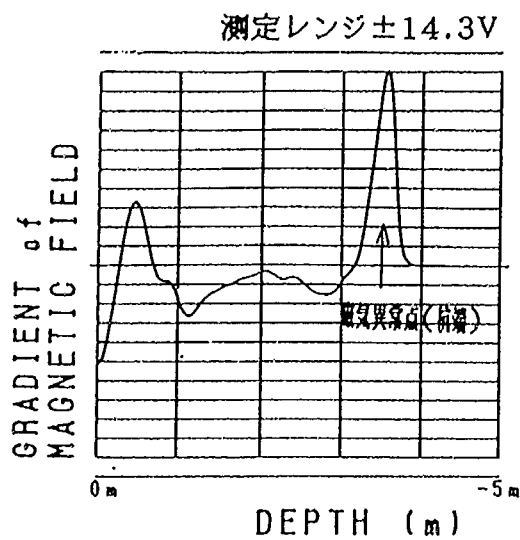
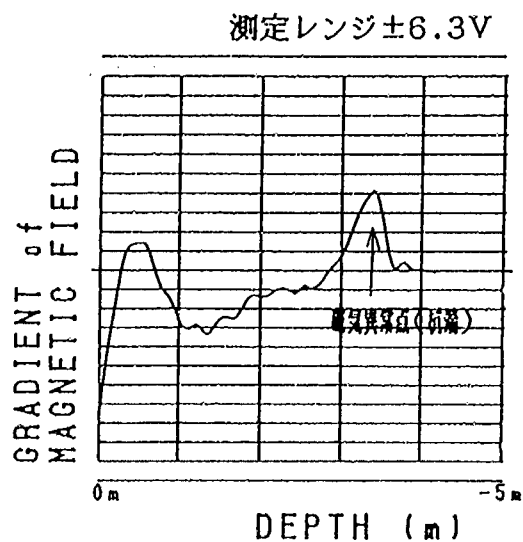


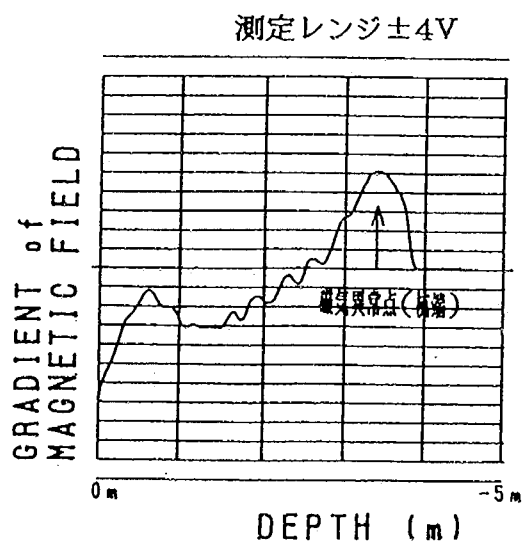
図-5.5.4 磁気探査概念図



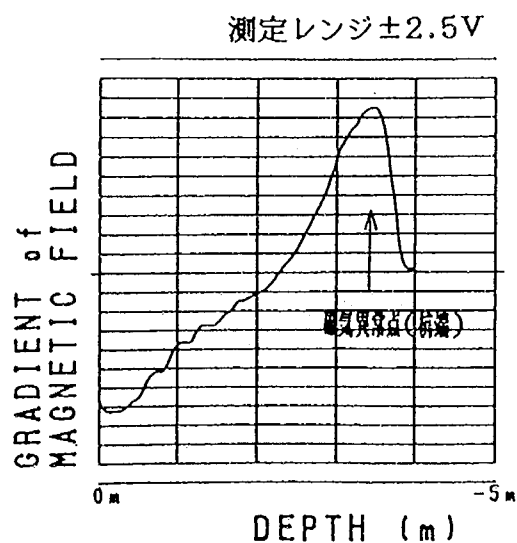
孔 番: a v 1
対 象 杭: A 1
杭との離れ: 30cm



孔 番: a v 2
対 象 杭: A 1
杭との離れ: 45cm



孔 番: a v 7
対 象 杭: A 1
杭との離れ: 65cm



孔 番: a v 10
対 象 杭: A 1
杭との離れ: 100cm
対 象 杭: A 4
杭との離れ: 100cm

図-5.5.5 磁気異常点 (杭端反応)

5.5.2 供試体探査結果

(1) 探査内容

共通供試体に対しては鉛直観測孔を使用した杭長探査と、傾斜探査孔を使用した杭ピッチ探査を実施した。両探査における目的は下記のとおりである。

1) 杭長探査

- ・探査孔の位置と測定精度の把握

共通供試体は杭が殆ど土層の底まで設置しているため、杭長の解析は正確な杭長を把握することはできないことが想定されるため、探査孔の位置による磁気量の相違の確認を目的とする。

2) 杭ピッチ探査

- ・傾斜探査孔による杭ピッチ探査の適応性の確認

探査孔の杭横断位置による磁気量の相違の確認と既存解析手法（磁気を鉛直に横断する場合の解析モデル）の適応性の確認。

(2) 探査結果

測定結果は杭長探査と杭ピッチ探査に分けてまとめる。

1) 杭長探査

- ① 杭長より長い探査孔では、杭端と思われる磁気反応が認められた（例A1杭：図-5.5.5）。
- ② 共通供試体は杭が殆ど土層の底まで設置しているため、図-5.5.6の実測波形と計算波形の比較図に示すように下端の記録が取れていない。従って、杭長の解析は正確な杭長を把握することはできない。

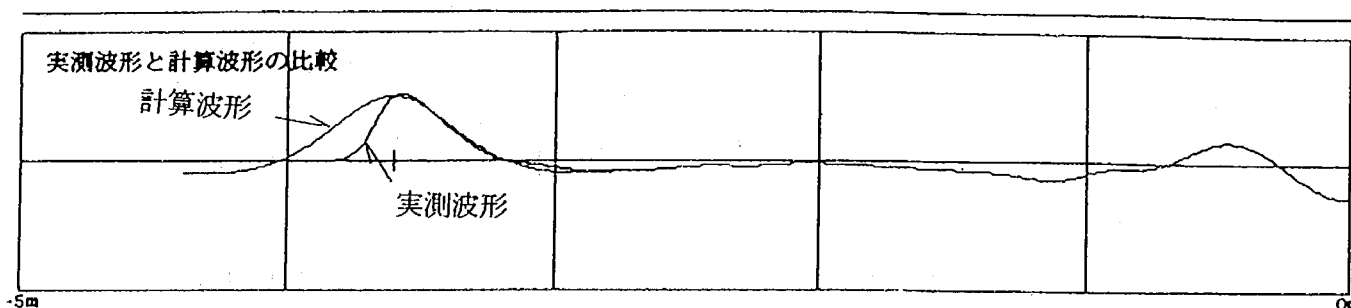
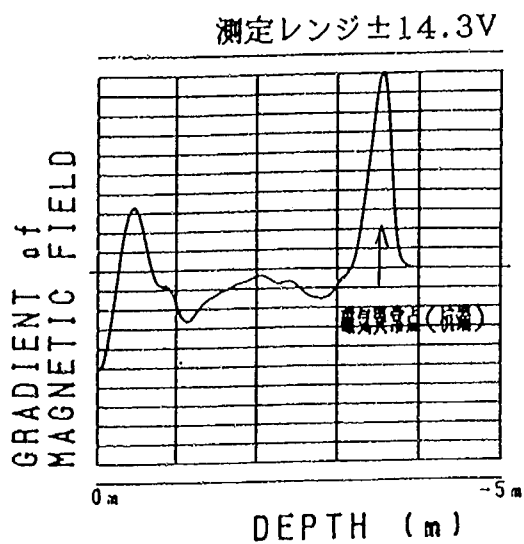
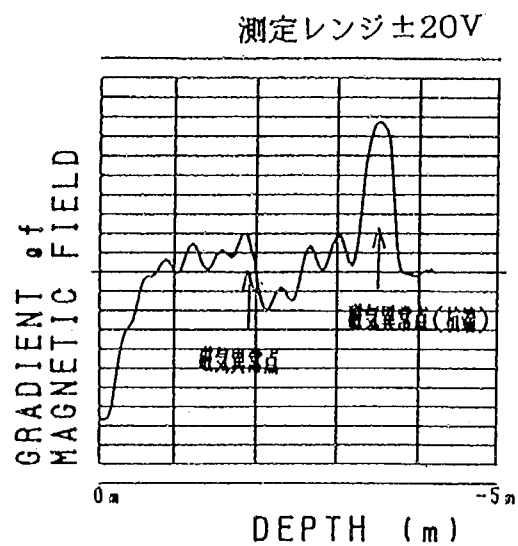


図-5.5.6 実測波形と計算波形の比較図

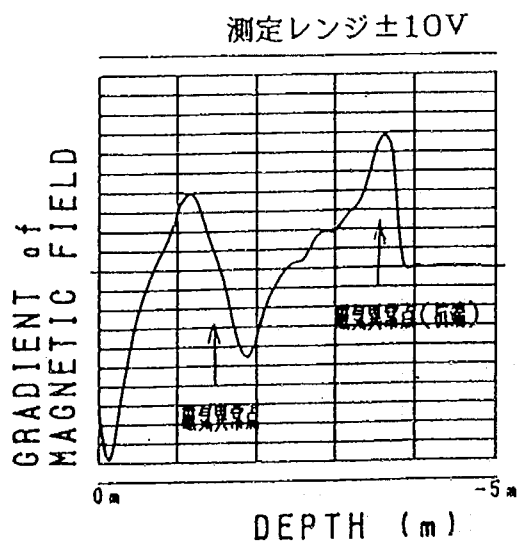
- ③ A5、A6、B4、B5杭については、杭端以外の磁気異常点が認められている（図-5.5.7）。



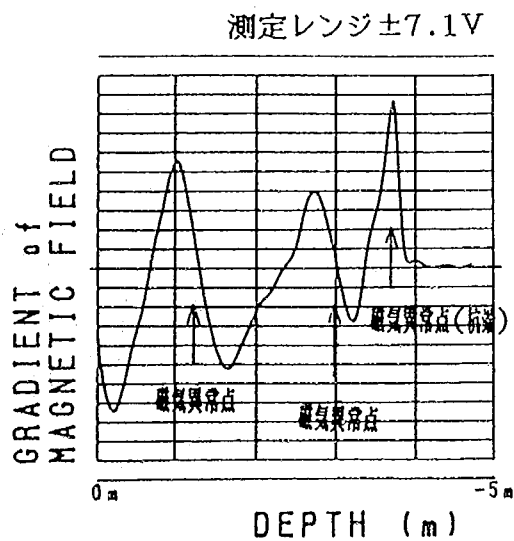
孔 番: av 1
対 象 杭: A 1
杭との離れ: 30cm



孔 番: av 16
対 象 杭: A 4
杭との離れ: 30cm

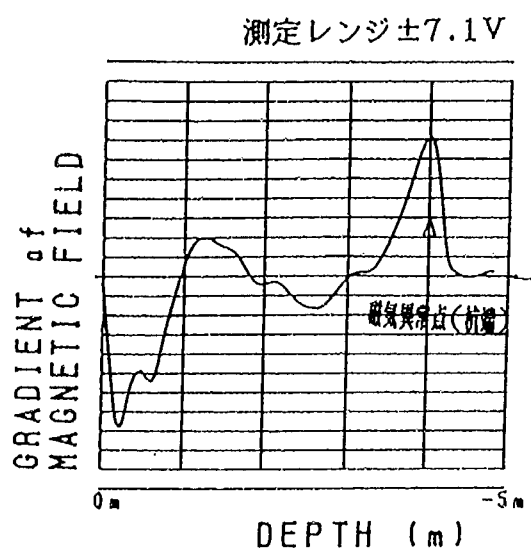


孔 番: av 18
対 象 杭: A 5
杭との離れ: 45cm

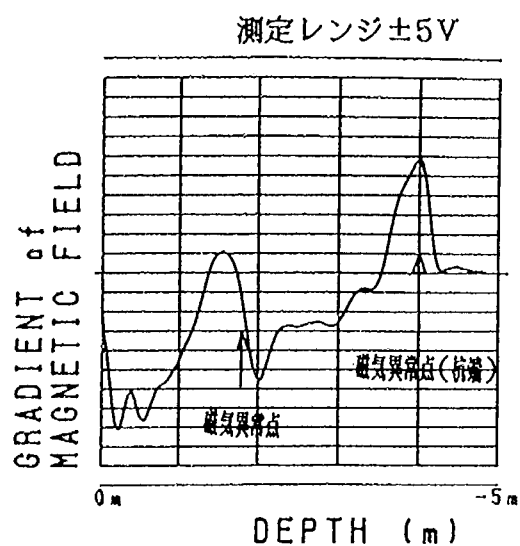


孔 番: av 20
対 象 杭: A 6
杭との離れ: 45cm

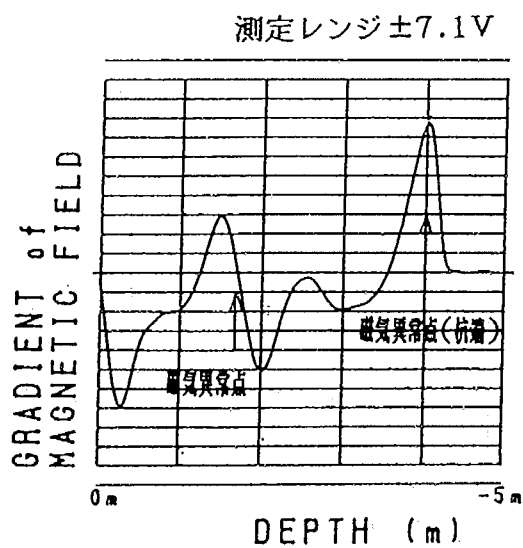
図-5.5.7. a 磁気異常点 (杭端以外)



孔 番: b v 1
対 象 杭: B 1
杭との離れ: 45cm



孔 番: b v 12
対 象 杭: B 4
杭との離れ: 45cm



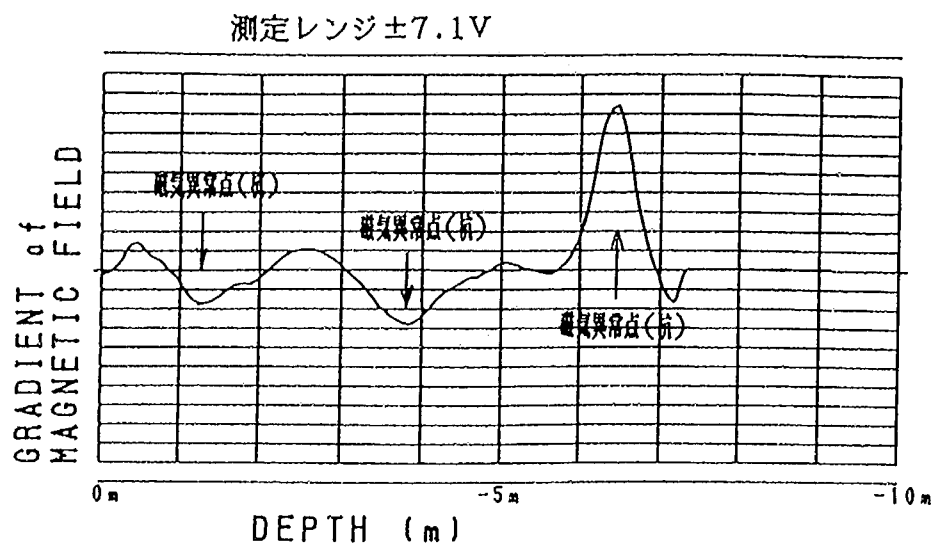
孔 番: b v 13
対 象 杭: B 5
杭との離れ: 45cm

図-5.5.7.b 磁気異常点 (杭端以外)

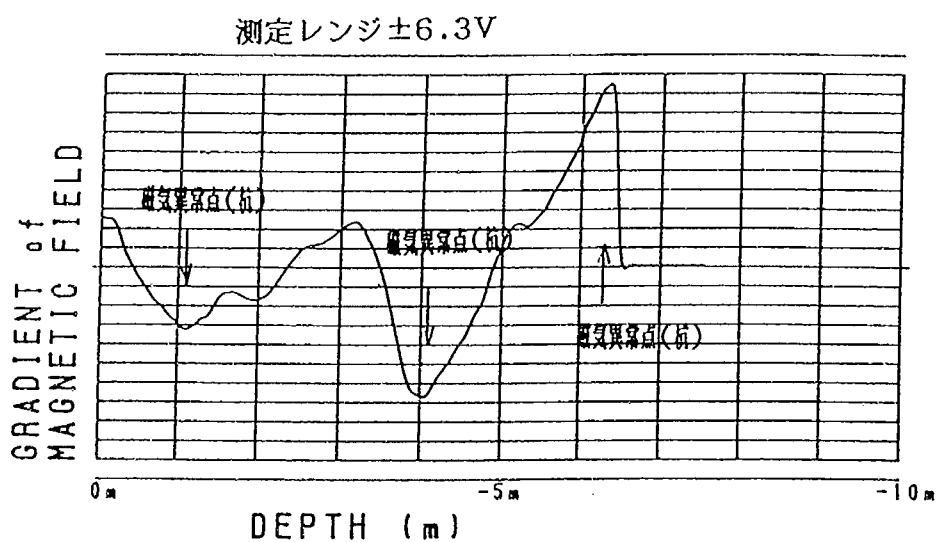
2) 杭ピッチ探査

① 杭を横切る斜め探査孔に対する磁気探査によれば図-5.5.8 に示すように、杭と思われる磁気異常点が認められた。

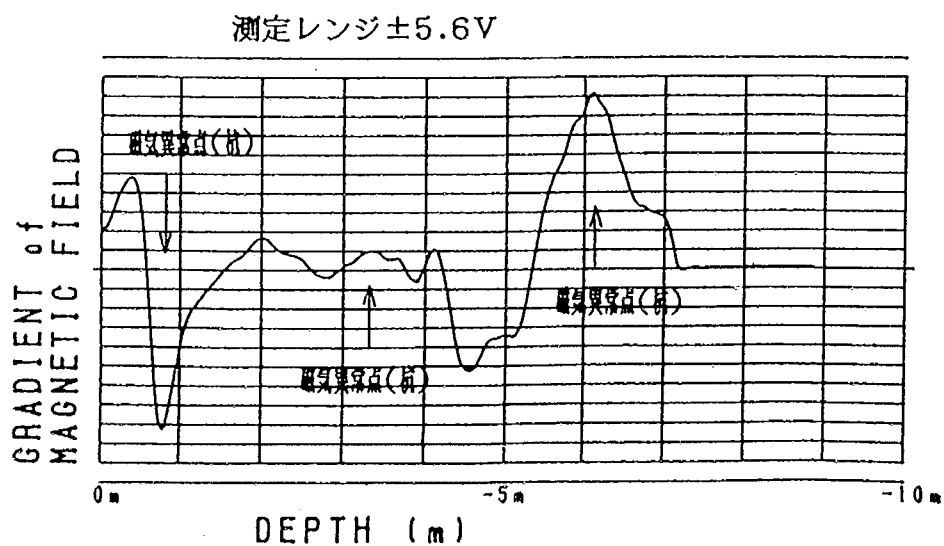
- ac1: 1、4、6m付近に磁気異常点が認められる。
- bc1: 1、4、6m付近に明瞭な磁気異常点が認められる。
- bc2: 1、4、6m付近に明瞭な磁気異常点が認められる。ただし、杭の中央部を通過する 4m 付近の磁気異常は、杭端付近を通過する 1、6m の磁気異常に比べ、磁気量の相違が小さく、明瞭ではない。



孔 番: ac 1
杭との離れ: 50cm



孔 番: bc 1
杭との離れ: 74cm



孔 番: bc 2
杭との離れ: 41cm

図-5.5.8 磁気異常点 (杭横断反応)

(3) 考察

1) 杭長探索

① 探査孔の位置と測定精度

今回の探査は、杭と探査孔の距離は 0.3 から 1.8 m である。今回の探査によれば、測定レンジを変えること（距離が離れるほど振幅が小さくなる）により、磁気反応は読み取ることにはでき、杭長を解析することは可能である（図-5.5.9 モデル波形に当てはめ図参照）。探査結果によれば R C 杭に対しては、杭と探査孔の距離は 1.8 m では杭長解析が可能と考えられる。

ただし、振幅（起電圧）は、杭と探査孔の距離により明確な相違がでている。杭長解析は磁気波形により解析するものであり、振幅（起電圧）自体は問題とはならない。しかしながら、振幅（起電圧）が小さいと地盤ノイズの影響を受け、磁気波形（計算波形）が読取りづらくなる。

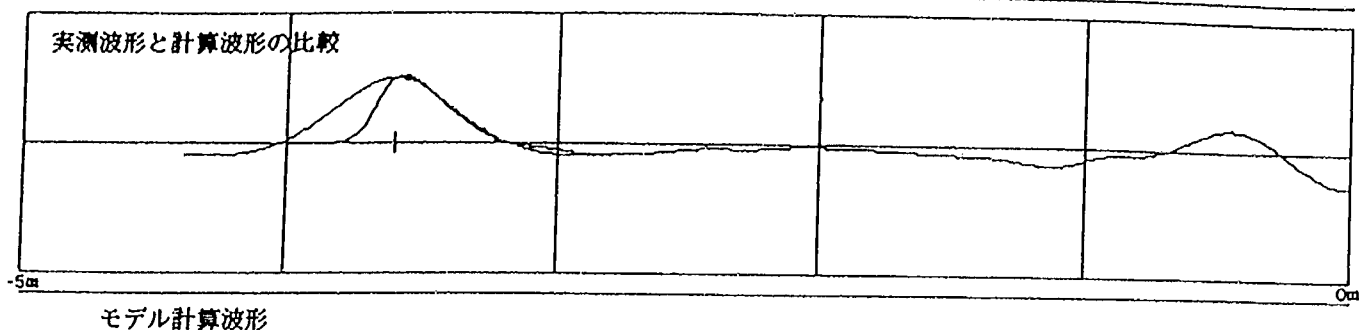
本探査は実験槽であり、地層等のノイズがなく、比較的小さな振幅（起電圧）においても明瞭な磁気波形が得られている。しかし、実橋梁においては地層ノイズを完全に除去することは不可能であり、今回の結果が実橋梁に対して適応できるかは確認しておく必要がある。

② 探査孔の位置による磁気量の減衰

解析式（5.5.1 式）によれば、振幅（起電圧）は距離の 3 乗に比例して減衰する。杭との離れの比から最大起電力を算出した結果は下表のとおりであり、概ね前記の関係を示す結果である。

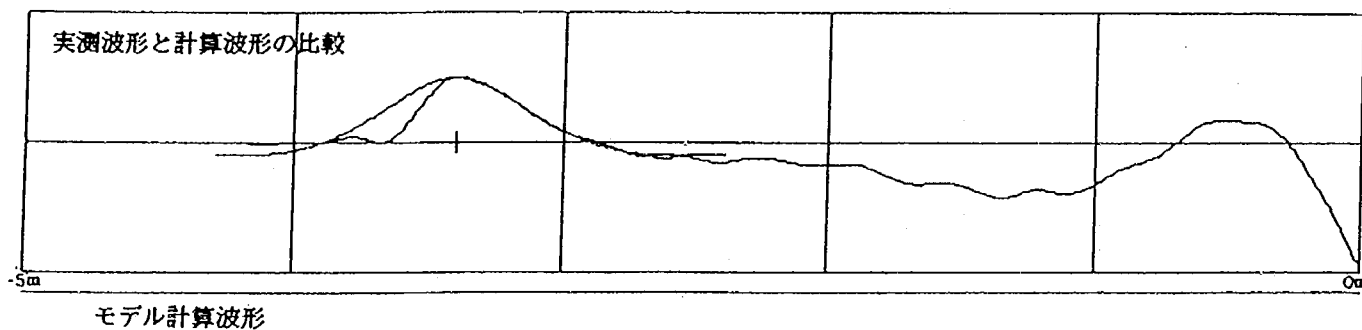
表-5.5.2 杭と探査孔の距離に起電圧の相違

杭	探査孔	杭との離れ (比)	最大起電圧 (距離比からの推定値)
A 1	A 1 1	0.3 m (1.0)	14 V (14 V)
	A 1 2	0.45 m (1.5)	3 V (4.1 V)
	A 1 3	0.65 m (2.2)	2 V (1.4 V)
	A 1 4	1.00 m (3.3)	2 V (0.4 V)



距離 $z = 0.60\text{m}$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(90^\circ)$

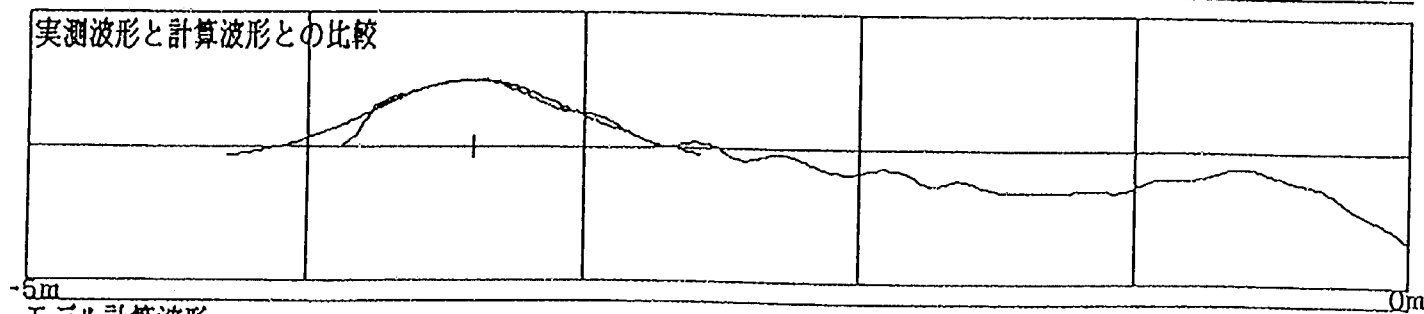
孔 番: a v 1
 対 象 杭: A 1
 杭との離れ: 30cm



距離 $z = 0.70\text{m}$ 方向余弦 $\alpha = \cos(50^\circ)$, $\gamma = \cos(90^\circ)$

孔 番: a v 2
 対 象 杭: A 1
 杭との離れ: 45cm

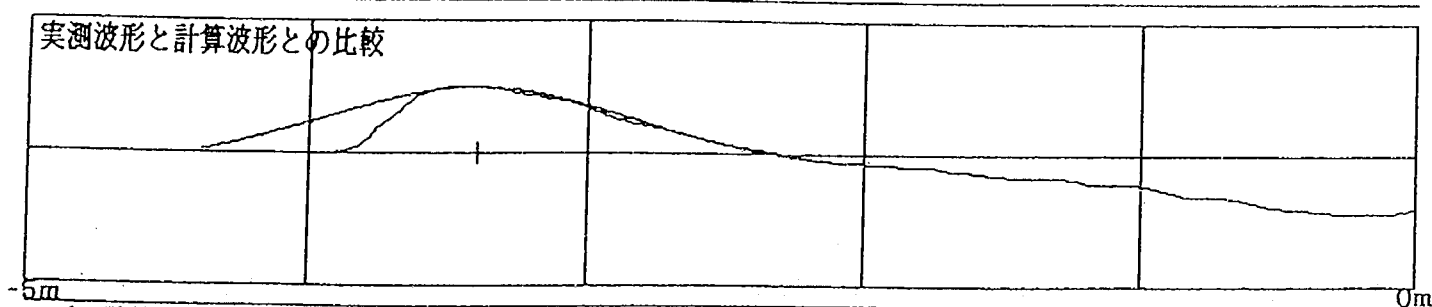
図-5.5.9. a モデル波形に当てはめ図



モデル計算波形

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

孔 番: a v 7
 対 象 杭: A 1
 杭との離れ: 65cm



モデル計算波形

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

孔 番: a v 10
 対 象 杭: A 1
 杭との離れ: 100cm
 対 象 杭: A 4
 杭との離れ: 100cm

図-5.5.9.b モデル波形に当てはめ図

③ 亀裂の把握

杭底以外の磁気異常点が認められた箇所は、亀裂がある杭であり、杭底以外の磁気異常点と亀裂の関係をまとめると表-5.5.3のとおりである。

表-5.5.3 杭の亀裂と磁気異常点

杭番	亀裂 位置 (m) 幅 (mm)		磁気異常点 位置 (m)		杭番	亀裂 位置 (m) 幅 (mm)		磁気異常点 位置 (m)	
A1	無		無		B1	無		無	
A2	無		無		B2	無		無	
A3	無		無		B3	2.0	0.2	無	
A4	2.0	0.6	不明瞭 な反応 あり	2.0	B4	1.4 1.6	0.2 1.2	有り	1.80
A5	1.4	6.0	有り	1.5	B5	1.4	7.5	有り	1.65
	1.5	3.0				1.6	3.2		
A6	1.2	4.0	有り	1.25	B6	1.2	4.5	無 近接探查孔無	
	1.4	1.2		1.4		0.4			
	3.0	4.0		3.0		6.0	2.95		

磁気反応で確認した磁気異常点は、亀裂位置にほぼ対応しており、下記のような結果が得られた。

- ① 亀裂幅が小さいもの（1.0mm以下）に対しては、振幅（起電圧）が小さく磁気異常点は読取りづらい。
- ② 亀裂が近接する場合は、1つの磁気異常として認められる。
- ③ 探查孔が離れている場合は、明瞭な磁気異常は判別できない。

上記の結果は下記に示す磁気特性に起因すると仮定できる。

杭のような長い帯磁物に沿わせた磁気探查で求められる磁気異常点は、磁極が発生した箇所である。磁極は杭のような細長い鉄類では、その両端付近に生じるものであり、亀裂により杭（帯磁物）が2分されれば、亀裂箇所に磁極が生じる。これらの磁極により形成される磁場は、磁極間の影響が無ければ、2個の磁場が形成されるが、磁極が結合する場合は、各々磁場を形成するものでなく、単独の磁場が形成され、亀裂部には磁気的な相違は認められないと考えられ、磁極間が近接する場合に、模式図に示すような複合磁場が形成されるものと考えられる。従って、亀裂部に発生する磁気的な相違は亀裂の間隔に起因することが想定できる。

ただし、この仮定は帯磁物が切断された場合のものである。本探查対象はRC杭の帯磁物は鉄筋であり、鉄筋が切断されたことになる。ただし、供試体の亀裂が鉄筋までおよんでいるとは考えづらい。供試体の亀裂状況は不明であるので、帯磁物の鉄筋の亀裂状況を確認することが必要となる。

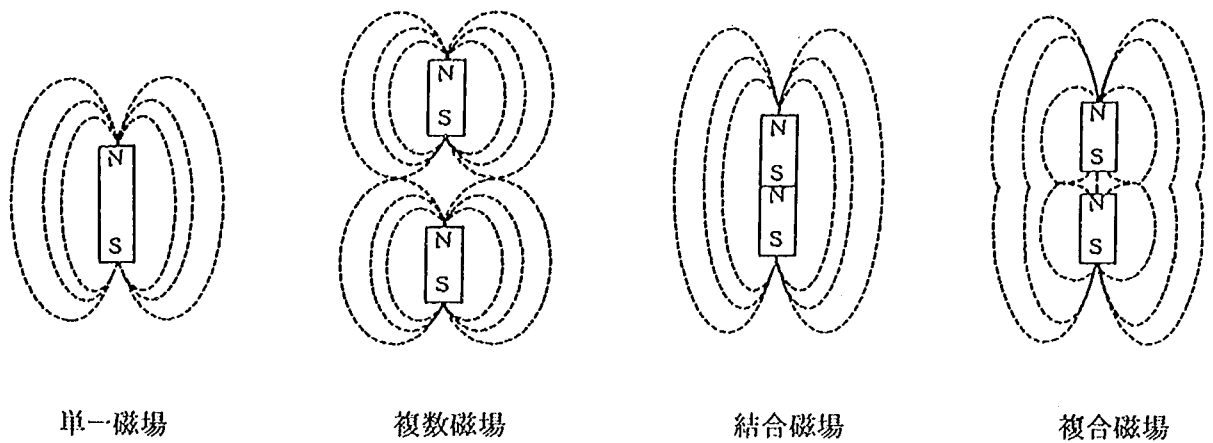


図-5.5.10 模式磁場図

また、亀裂部には磁氣的な相違は認められるものの磁氣的な相違は、杭端部に比べ小さいものである。で、実橋梁においては、地盤ノイズ等による磁気異常との区別は難しいことが想定できる。

2) 杭ピッチ探査

本観測によれば杭横断に対応する磁気異常が認められており、杭ピッチを解析可能と考えられる。ただし、今回の測定では下記の課題が残されているので、実橋梁実験等において解明しておく必要がある。

① 横断位置による磁気反応の相違

今回の測定によれば、杭のほぼ中心部を通過する点（b c 2 孔のB 2）に対しては、明瞭な磁気異常が認められていない。これは、杭の中心部付近には、明瞭な磁氣的な差があまりないことが考えられる。

また、孔口および孔底付近を通過する点は、杭を横断する時の磁界よりも、杭端の磁界が強いためこれに影響されている可能性がある。

② 解析方法の確立

磁気を横断するとした場合の解析モデルを使用して杭の位置（探査孔上面からの深度）を解析すると表-5.5.4 のとおりである（図-5.5.8 参照）。

表-5.5.4 杭配置探査結果一覧表

ボーリング No.	杭	解析深度 (斜め)	実際の深度
a c 1	A 3	-1.25	-1.45
	A 2	-3.70	-3.76
	A 1	-6.40	-6.08
b c 1	B 6	-1.00	-1.45
	B 5	-3.95	-3.74
	B 4	-6.40	-6.06
b c 2	B 3	-0.70	-1.45
	B 2	-3.35	-3.74
	B 1	-6.10	-6.06

今回の杭ピッチ探査の解析結果によれば、磁気異常位置は実際と相違している。これを改善するためには、実際の杭に対するデータを集積し、モデル計算を実際の杭に即したものに改善する必要がある。

5.5.3 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（杭端+5mが目安）

観測孔の位置は杭に近接する方が望ましい（杭との離れ1m以内が目安）

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応可能である。

(3) 探査できる基礎諸元

- ・杭長
- ・杭ピッチ

(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

5.5.4 まとめと今後の課題

(1) まとめ

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。本研究は杭と探査孔の距離による測定精度の相違を定量的に把握することと横断方向探査による杭配置（杭ピッチ）の適応性および測定精度の確認を目的として実施したものであり、供試体実験では下記の事項が明らかになった。

1) 杭長探査

① 杭と探査孔の距離による測定精度

- ・RC杭では杭との離れが1.8mにおいては磁気反応が認められており、同離れまでは杭長解析は可能と考えられる。

- ・解析の基になる振幅（起電圧）は、探査孔との距離に比例し減衰する。その減衰率は概ね理論式（距離の3乗）を示した。

② 亀裂の把握

- ・亀裂位置付近で微小な磁気異常点が認められており、磁気探査により亀裂の位置を特定できる可能性がでてきた。

2) 杭配置

- ・横断方向探査では、概ね杭を横断する位置で磁気異常点が認められており、杭ピッチを確認することは可能と考えられる。ただし、その磁気異常は杭の横断位置により相違している。

(2) 今後の課題

磁気探査の解析には理論式より求めた起電圧を使用しているため、理論式と実測起電圧の相違を明確にし、探査方法（観測孔の仕様など）および解析方法を確立することが必要である。

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応性を確認する必要がある。

具体的な課題としては下記のものが挙げられる。

① 観測孔設置仕様の決定

② 杭と探査孔の距離による探査精度の把握

解析の基本となる起電圧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ことが必要である。

③ 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の確立。

④ 杭の健全度調査（破断位置の特定）へ適応性

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応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の確認。

⑤ 磁気傾度計以外の磁気検出方法の適用性の確認

磁気検出方法としては、磁気傾度計の他にもフラックスゲート方式等があるので、その適応性も確認しておく必要がある。

(3) 実橋梁実験（計画）

1) 実験目的

- ① 観測孔設置仕様の決定
- ② 杭と探査孔の距離による探査精度の把握
- ③ 杭ピッチ解析法の確立

2) 実験項目

杭長探査：杭と探査孔の距離による探査結果の相違の確認

杭種による探査結果の相違の確認

杭ピッチ探査：杭と探査孔の距離による探査結果の相違の確認

探査角度による探査結果の相違の確認

3) 対象橋梁

土木研究所内橋梁－対象杭：鋼管杭（ ϕ 600mm、 $l=13.0$ m）

土木研究所内P H C杭－対象杭：P H C杭（ ϕ 500mm、 $l=6.0$ m）

4) 観測孔の配置

土木研究所内橋梁：観測孔は杭長探査用の鉛直孔と杭ピッチ探査用の傾斜孔を設置する。

傾斜観測孔の角度は35度を原則とする。

杭からの離れを1.0 m～4.0 mに3孔（1.0、2.0、4.0 m）に配置する。

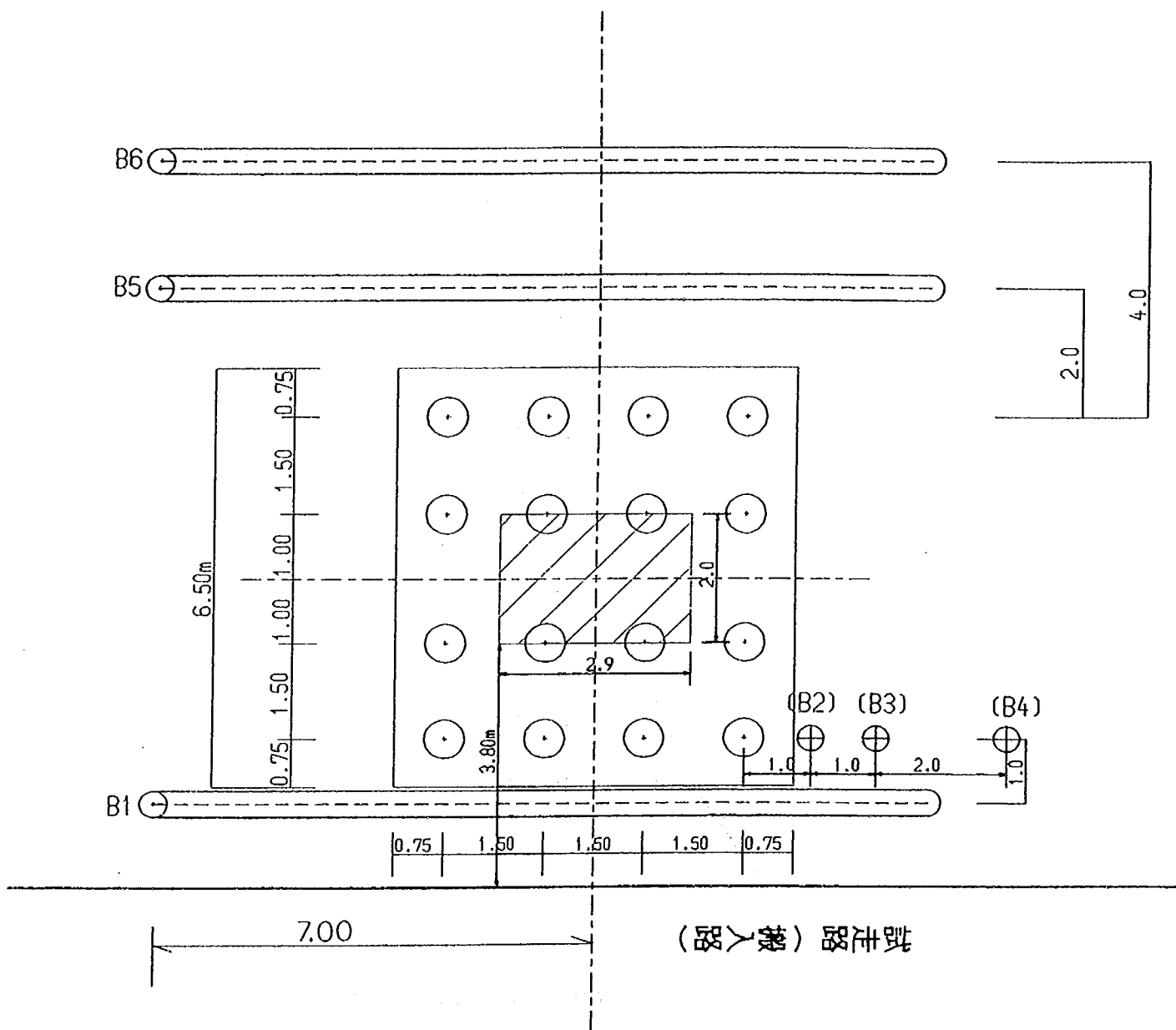
土木研究所内P H C杭：観測孔は距離影響を確認するための鉛直孔と探査角度の影響を確認するための傾斜孔を設置する。

鉛直観測孔の杭からの離れは0.75、1.0、1.5mとする

傾斜観測孔の杭からの離れは1.0 mとし、傾斜角度は30、45、60°とする。

表－5.5.5 観測孔設置計画数量表

土木研究所内橋梁				土木研究所内P H C杭			
孔番	杭との離れ (m)	観測孔角度	観測孔長 (m)	孔番	杭との離れ (m)	観測孔角度	観測孔長 (m)
B 1	1.00	傾斜 35°	22.0	B 1	0.75	垂直	9.0
B 2	1.00	垂直	20.0	B 2	1.00	垂直	9.0
B 3	2.00	垂直	20.0	B 3	1.50	垂直	9.0
B 4	4.00	垂直	20.0	B 4	1.00	傾斜 30°	7.5
B 5	2.00	傾斜 35°	22.0	B 5	1.00	傾斜 45°	7.5
B 6	4.00	傾斜 35°	22.0	B 6	1.00	傾斜 60°	7.5



平面図 (縮尺: 1 / 100)

図-5.5.11a 土木研究所内橋梁観測孔計画図 (平面図)

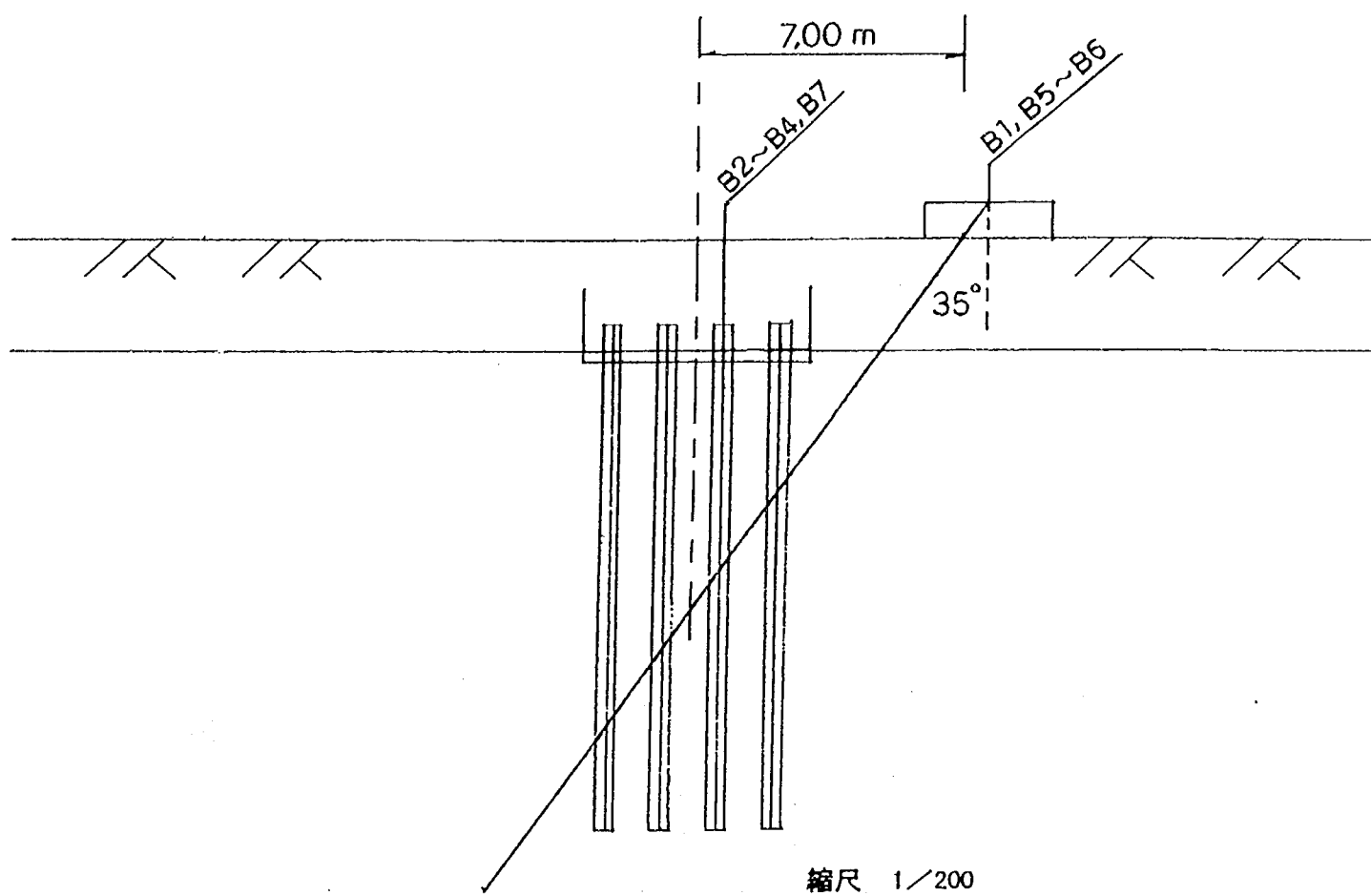


図-5.5.11b 土木研究所内橋梁観測孔計画図（横断図）

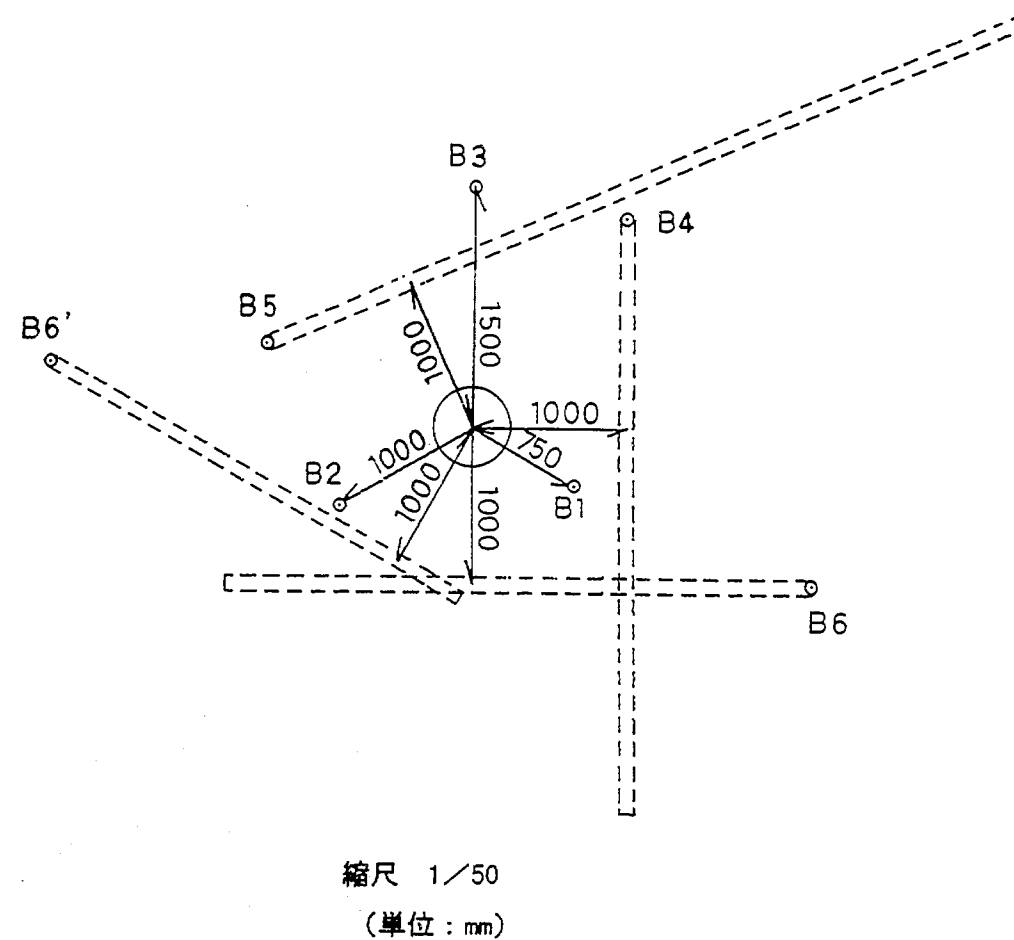
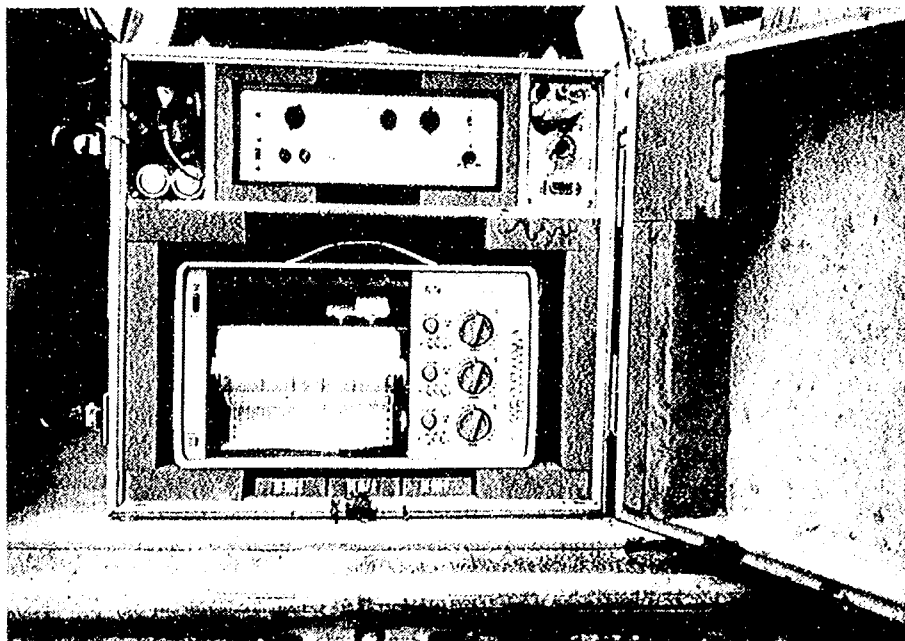


図-5.5.11c 土木研究所内 PHC 杭観測孔計画図 (平面図)



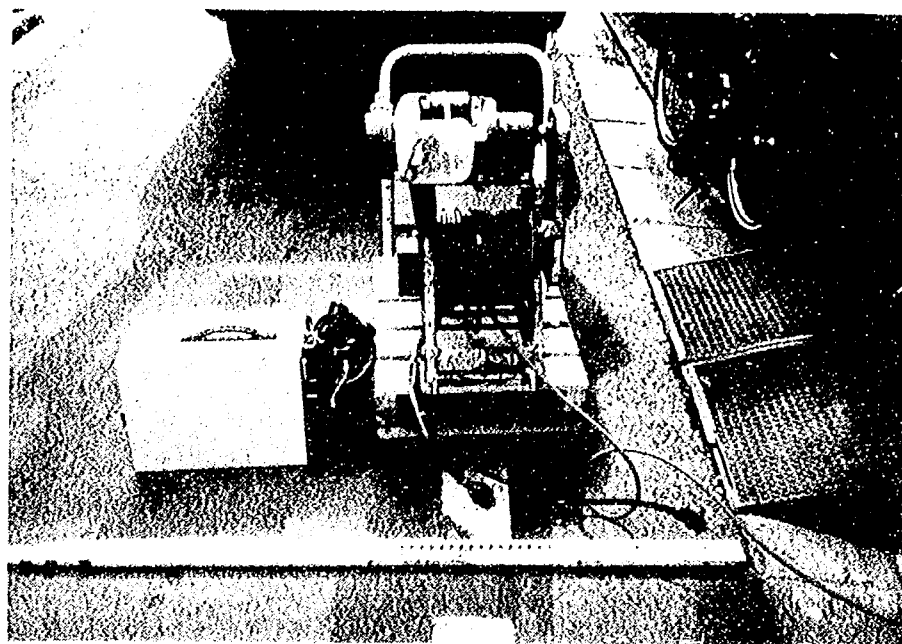
センサー DTM-I 型



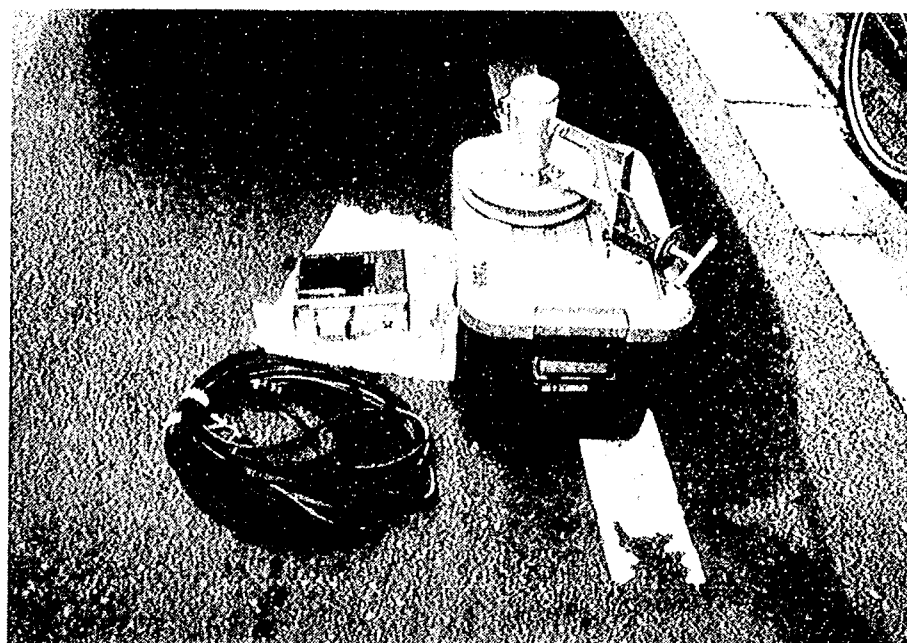
増幅器

記録器（アナログ、デジタル）

写真-5. 5. 1 磁気探査（使用機器）

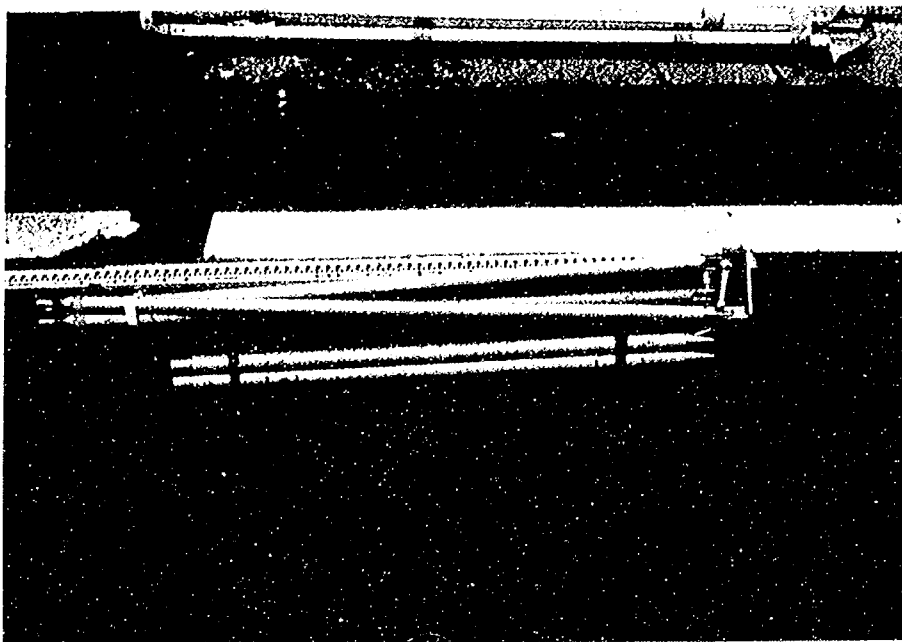


ウィンチ



カウンター
プーリー

写真-5.5.2 磁気探査（使用機器）



三脚

写真-5. 5. 3 磁気探査（使用機器）

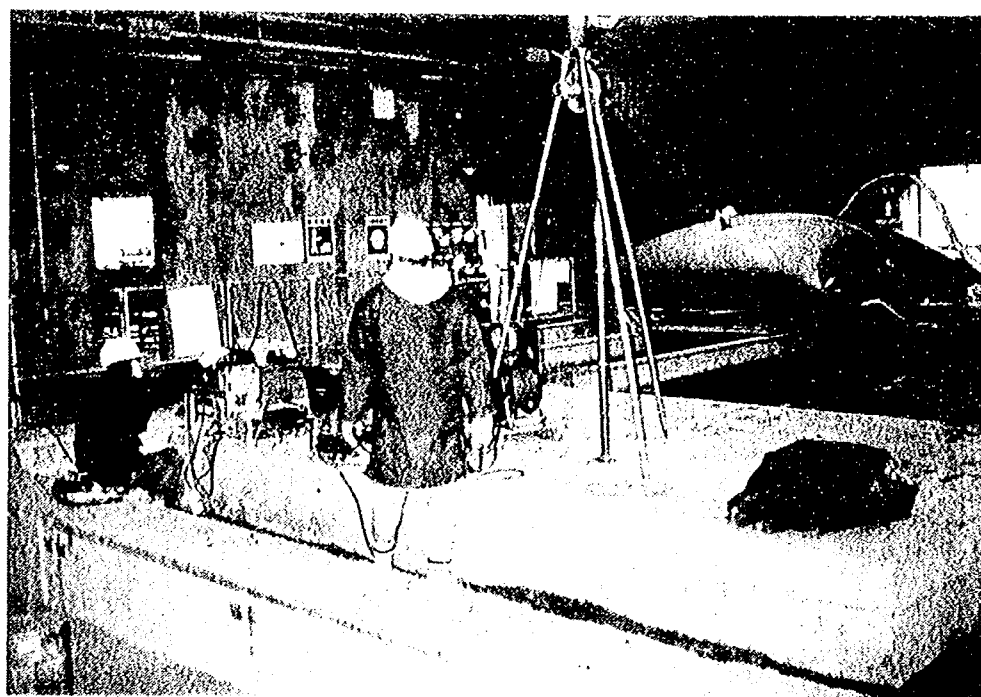
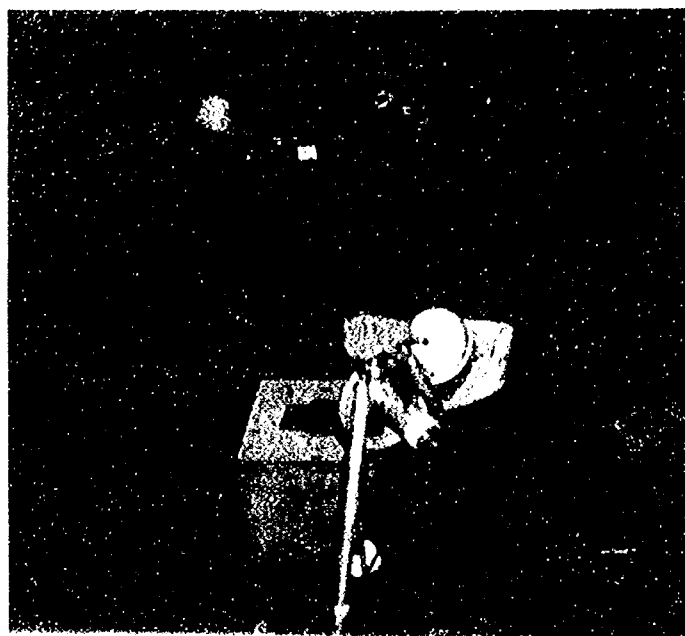


写真-5.3.4 磁気探査状況（鉛直探査）

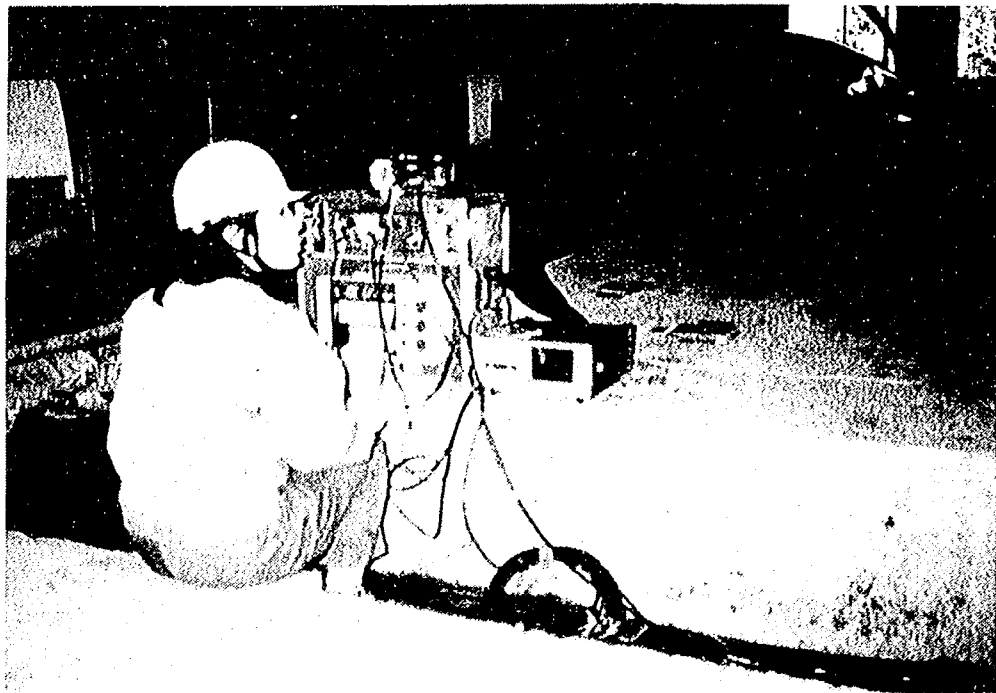
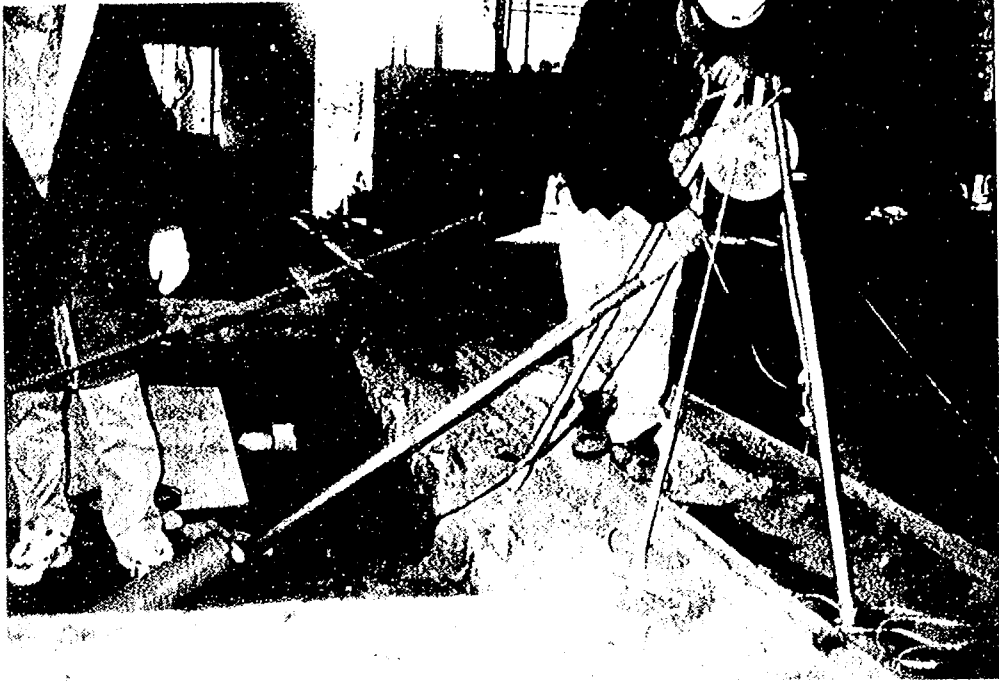


写真-5.3.5 磁気探査状況（斜孔探査）



写真-5.3.6 磁気探査状況（斜孔探査）

5.6 衝撃振動試験

5.6.1 研究概要

3.6 項で述べたように、衝撃振動試験は橋脚に振動を与えた場合の応答波形をデータとして採用するため、基礎構造物の形状（フーチング寸法、杭長）や損傷量（例えば、杭にクラックがどの程度入っているのか）を求めることはできない。しかし、多自由度振動モデルにより構造物の振動状態をシミュレートすることで、基礎構造形式（杭基礎、直接基礎）の区別や基礎構造の保持状態を評価することができる。特に、橋脚の剛性や地盤バネ定数を求められるので、基礎が損傷を受けているのかを判断する場合や損傷が許容できるものかを判断する場合に適している。また、試験方法は簡便なものであるから、例えば地震発生直後といった緊急を要する場合に有効である。

但し、衝撃振動試験は、これまで鉄道橋で列車間合いに衝撃を与えて実施されてきたものであり、道路橋における実績は少ない。道路橋が鉄道橋と異なるのは以下の点である。

- ① 鉄道橋を通過する列車は通過時刻、スピード、荷重があらかじめ決まっているが、道路橋を通過する車両はいずれもランダムである。そのため、通行規制もしない限り、車両振動を除去して試験を実施できる橋梁は限定される。
- ② 列車荷重に比べて、自動車荷重は小さい。そのため、同じ高さ、スパンの橋梁では、道路橋の方がスレンダーな橋脚となり、固有振動数が低くなる。鉄道橋では測定実績に基づいた標準固有振動数が求められているが、道路橋にそのまま適用できるものではない。

そこで、共同研究では、衝撃振動試験を道路橋に適用できるように改良するとともに、道路橋の特性に適合した試験実施マニュアルを作成することを目的とする。研究手法は、実橋試験から発生する課題の克服を目的とした試験を繰り返し行い、道路橋に最適な手法を求めていくこととする。

5.6.2 検討結果

平成9年度までに、下記に示す9橋脚について衝撃振動試験を実施した。

表-5.6.1 衝撃振動試験を実施した橋脚

場所	建設省土木研究所内			国道16号線沿線					
橋梁名	テスト コース 横断橋 梁	土木研究所内横断 橋梁(市道)の橋脚		八高線高架橋				竜谷寺高架橋	
橋脚名	A 橋脚 (仮名)	B 橋脚 (仮名)	C 橋脚 (仮名)	P 8 (上り)	P10 (上り)	P11 (上り)	P 8 (下り)	P 4	P 5
上部工形 式	合成桁 + 合成 桁	合成桁 + 合成 桁	合成桁 + RC 桁	6 径間連続RCホロースラブ桁				合成桁 + 3 径間連 続非合成 桁	3 径間連続 非合成桁
基礎種別	鋼管杭 基礎	不明		直接基礎				鋼管杭基礎	
試験実施 日	平成9年9月8日～9日			平成10年2月25日～26日					

(1) 建設省土木研究所内衝撃振動試験

初回の実橋試験の目的は、これまで鉄道橋で実施されてきた衝撃振動試験が、道路橋で適用できるのかを確認することとした。そこで、車両等が橋梁を通過する際に生ずる振動が、構造物の応答振動へ及ぼす影響を把握し、衝撃振動試験実施上の課題を検討した。

以下の3橋梁について、各々橋脚一基ずつに衝撃振動試験を実施した。

① 土木研究所内試験走路横断橋梁の橋脚（以下A橋脚とする。）

50m程度の合成桁と3方の支点で支えられた合成桁を支える橋脚。基礎は鋼管の杭基礎。

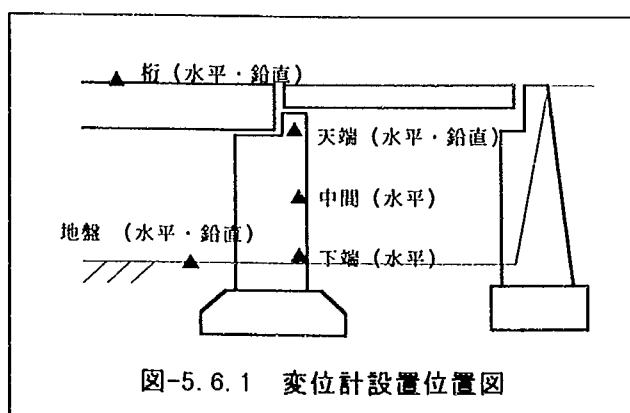
② 土木研究所内横断市道の橋脚（以下B、C橋脚とする。）

50m程度の合成桁と、B橋脚は10m程度の合成桁、C橋脚は10m程度のRC桁を支える橋脚。いずれも図面等の所在が不明のため、A橋脚と同様の基礎形式と仮定した。

変位計設置位置を図-5.6.1に、調査位置図を図-5.6.2に示す。また、以下の3ケースを各々の橋脚に実施した。

表-5.6.2 試験ケース

ケース1	車両が通行していないときに、橋脚を打撃する。（標準的な衝撃振動試験）
ケース2	車両が通行しているときに橋脚を打撃する。（交通振動を含んだ衝撃振動試験）
ケース3	車両通行の振動のみを測定（交通振動の測定）



1) 固有振動数の算出

固有振動数の算出結果を表-5.6.3～表-5.6.5に示す。これらの表から以下の項目が得られる。

- ① 道路橋についても、衝撃振動試験により橋脚の固有振動数を求められる。
- ② 車両が通過していなければ（ケース1）、一回の重錘打撃で固有振動数が得られる。
- ③ 車両が通過している状態（ケース2）では、交通振動によるノイズを相殺するために複数回（この実橋試験では大型トラック通行時に6回）の打撃の重ね合わせが必要である。
- ④ 重錘打撃のない場合（ケース3）では、車両振動が橋脚まで伝播しにくく、固有振動数を求められなかった。

表-5.6.3 固有振動数の算出結果（ケース1：車両が通行していない時に打撃）

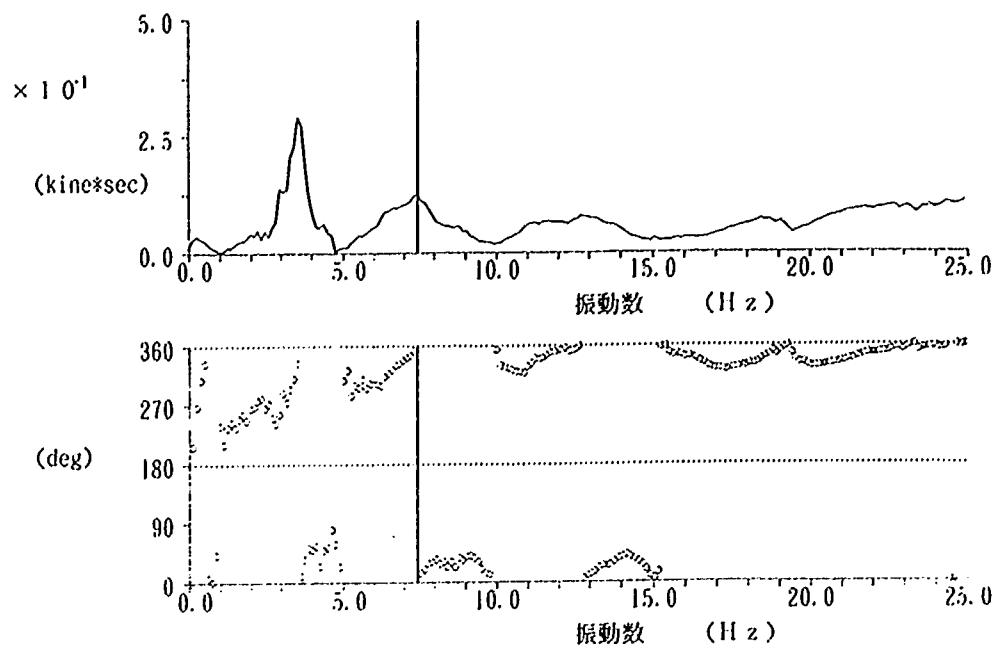
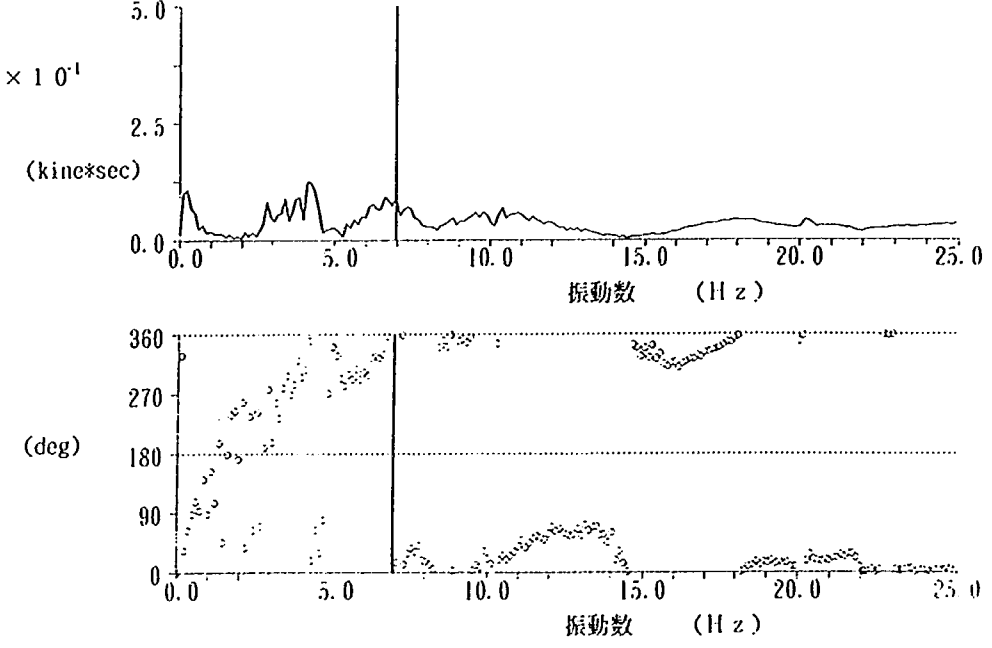
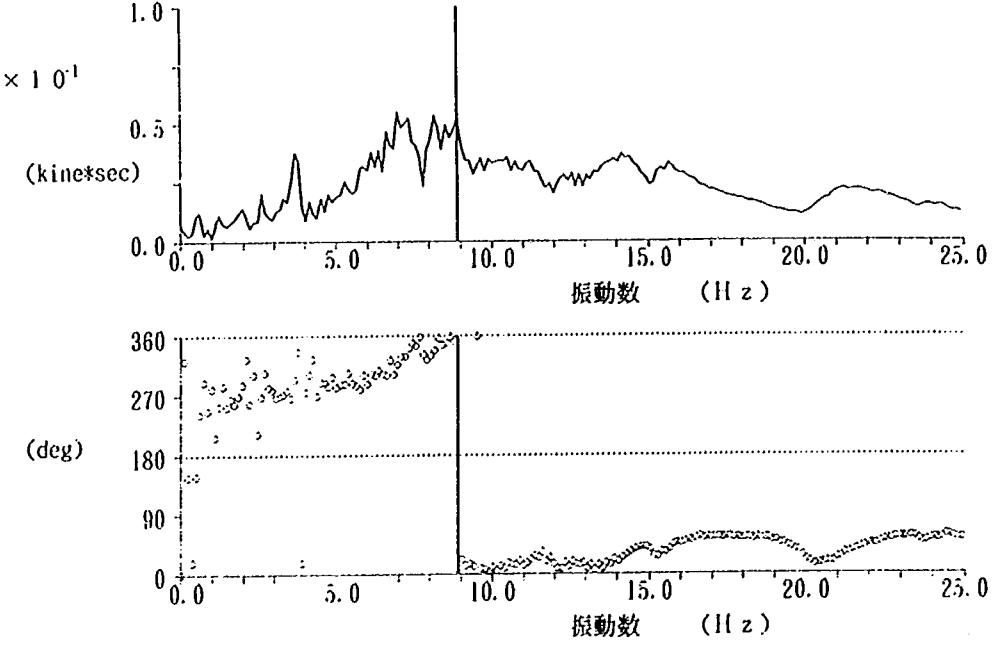
	天端・水平方向の振幅スペクトル、位相差スペクトル図	固有振動 (Hz)	振動モード	解 説	総 括
A 橋脚 (研究所内道路)		7.4	1 次	フーリエ振幅スペクトルの形状は滑らかで、桁や橋脚のピークを特定しやすかった。3.5Hz 付近に最も大きなピークがあるが、位相差スペクトルから、桁の固有振動数と判断できる。2 番目の 7.4Hz にあるピークは位相差が 360° である。しかも、中間、下端とも 7.4Hz で位相差が 360° であった。したがって 7.4Hz が橋脚の 1 次固有振動数であると考えられる。 桁に対する振動試験結果は、1 次モードが 3.7Hz、2 次モードが 11.1Hz であった。	振動スペクトルは、なだらかなピークが認められ、しかも位相差スペクトルが明瞭だった。固有振動数を容易に求めることができた。今回の試験では、桁と橋脚の固有振動数の差異が大きかったために、両者を取り違えることはなかった。仮に両者が近似している場合は、桁に対する衝撃振動試験を実施していれば取り違いを防ぐことができる。
B 橋脚 (市道)		7.0	1 次	フーリエ振動スペクトルの形状は、やや凹凸がある。2.8~4.3Hz 付近に複数のピークがあるが、桁の固有振動数と考えられる。7.0Hz で位相差が 360° である。しかも中間、天端とも 7.0Hz で位相差が 360° であった。したがって、7.0Hz が橋脚の 1 次固有振動数であると考えられる。 桁に対する振動試験では、4.3Hz（水平方向）、2.0Hz、4.0Hz（鉛直方向）にピークが認められた。	
C 橋脚 (市道)		8.9	1 次	フーリエ振動スペクトルの形状は、やや凹凸がある。3.7Hz 付近にピークがあるが、桁の固有振動数と考えられる。7.0~9.0Hz に複数のピークがあるが、そのうち 8.9Hz で位相差が 360° となっている。中間、天端とも 8.9Hz で位相差が 360° であった。したがって、8.9Hz が橋脚の 1 次固有振動数であると考えられる。 桁に対する振動試験では、水平打撃で 3.8Hz（水平方向）、1.9Hz、4.3Hz（鉛直方向）、鉛直打撃で 1.8Hz にピークが認められた。	

表-5.6.4 固有振動数の算出結果（ケース2：車両が通過している時に打撃）

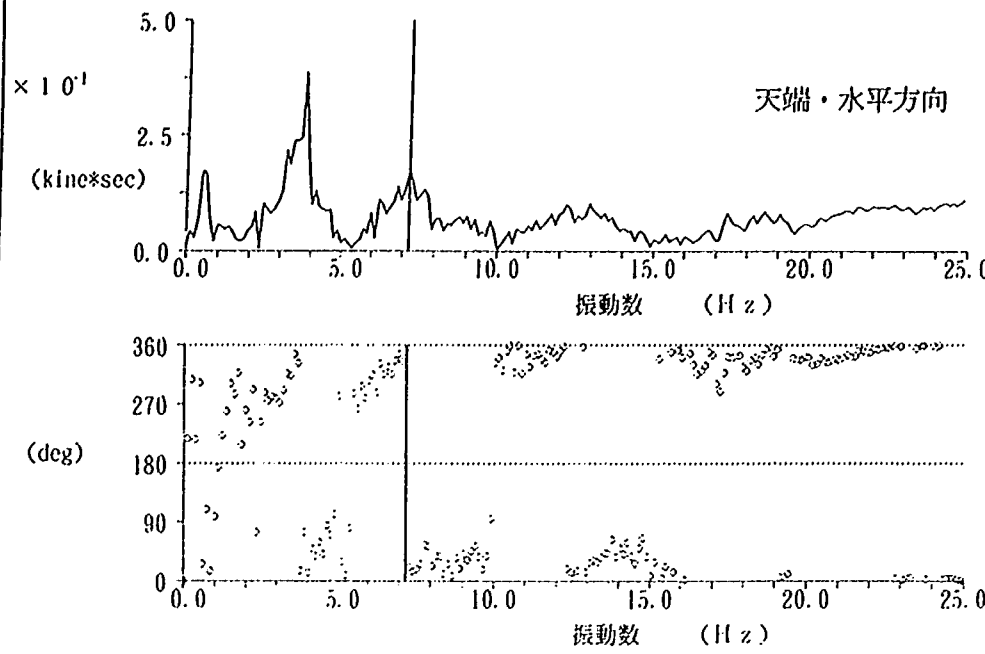
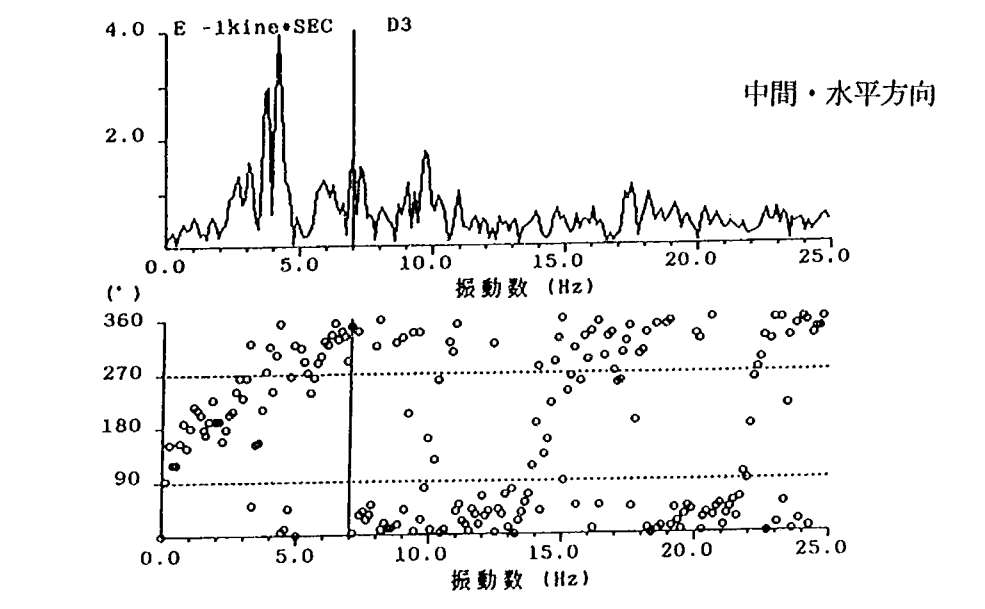
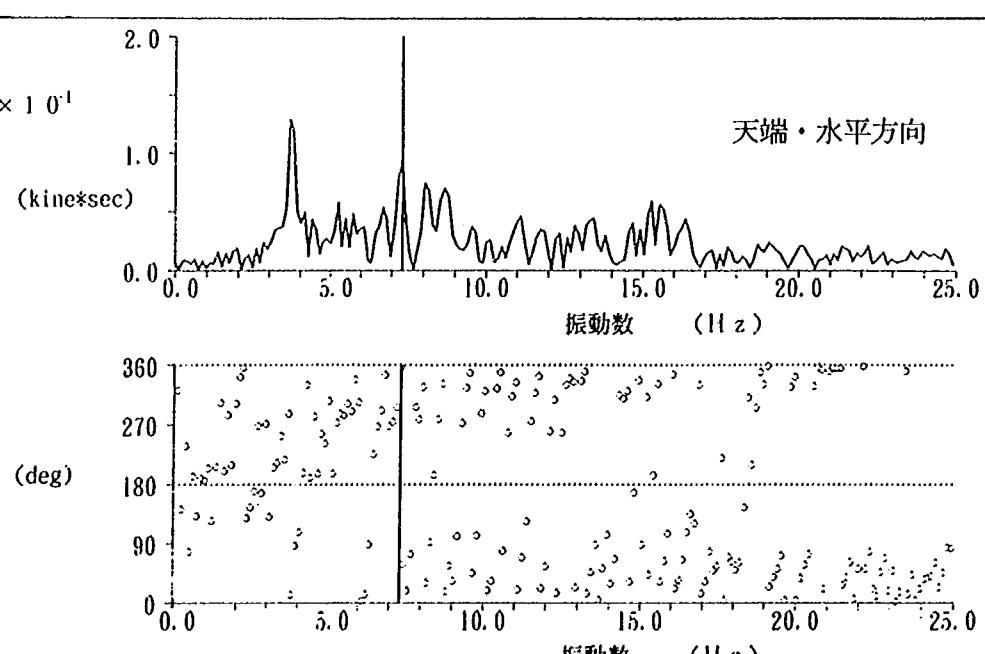
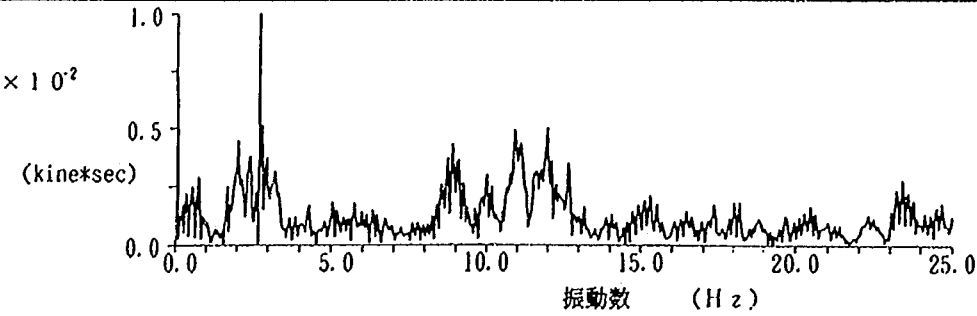
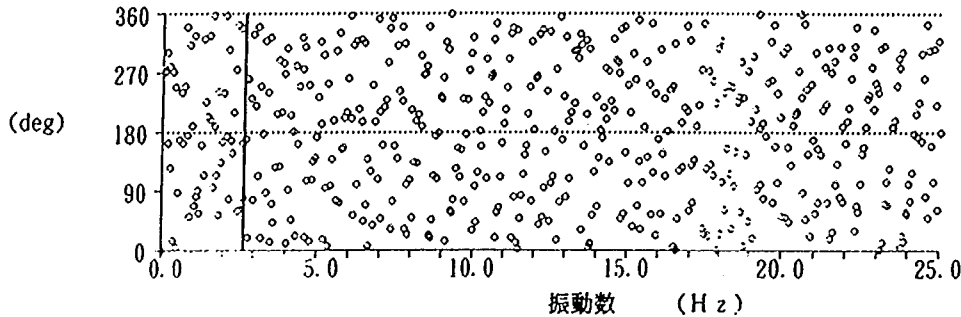
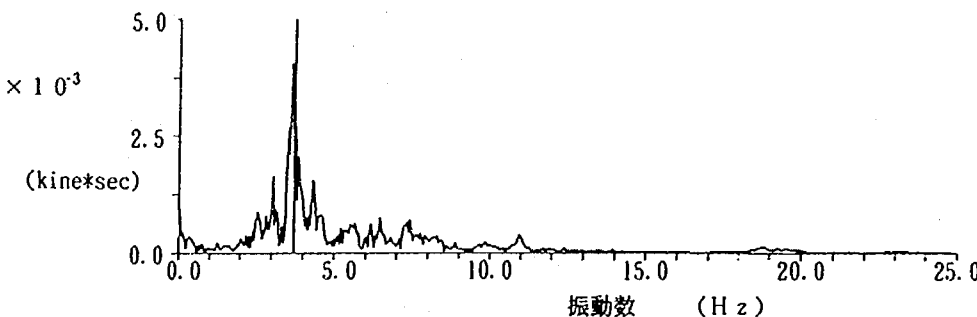
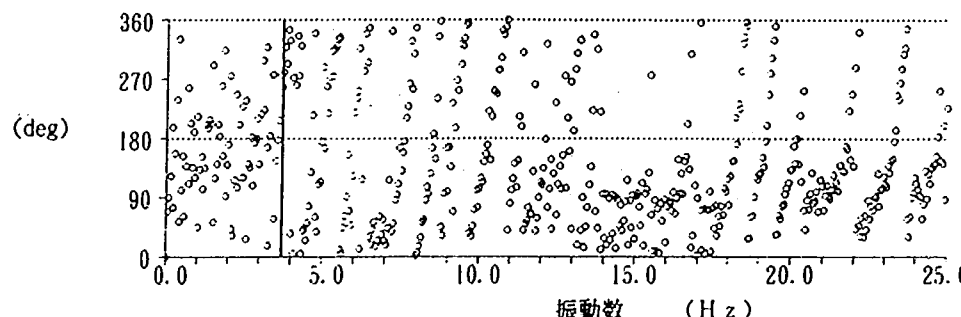
	振幅スペクトル、位相差スペクトル図（重ね合せ）	固有振動 (Hz)	振動モード	解 説	総 括
A 橋脚 （研究所内道路）	 天端・水平方向	7.3	1 次	乗用車2台を通過させた時の測定波形を4回重ね合わせた。固有振動数の傾向は、ケース1（車両未通過時）と同様であるが、スペクトルの形状に乱れが生じている。しかし、乱れの程度が小さいために、固有振動数は容易に特定できた。	通過する車両の大きさや測定波形の重ね合わせ回数により、固有振動数の現れ方に大きな違いがあった。 車両通過時でも衝撃振動試験を適用できるが、その場合に通過車両の大きさや測定波形の重ね合わせ回数の増加といった条件を加える必要がある。
B 橋脚 （市道）	 中間・水平方向	7.0	1 次	複数の大型トラックの橋脚天端通過時とスパン中央通過時の2パターン、3回ずつ計6回の測定波形を重ね合わせた。大型トラック通過時のため、スペクトル形状に乱れが生じているものの、振動数のピークは明瞭に現れている。	
C 橋脚 （市道）	 天端・水平方向	—	—	試験時の交通量が少ないために、複数の大型トラック通過時を2回しか実施することができなかった。2回分の測定波形を重ね合わせた。桁の固有振動数と考えられるピークは認められたが、橋脚の固有振動数は車両のノイズに紛れて特定できなかった。	

表-5.6.5 固有振動数の算出結果（ケース3：車両が通過する振動のみを測定）

振幅スペクトル，位相差スペクトル図	
A 橋 脚	 
	 
C 橋 脚	ケース2の測定に時間がかかりすぎて、実施できなかった。
総 括	振幅スペクトルの形状は凹凸が大きい。桁の固有振動数は明瞭に認めることができるものの、橋脚の固有振動数は凹凸に紛れて特定できなかった。これは車両による振動が車両の重量と速度により与えられて、桁のみが振動するものの、橋脚まで振動が伝わらないためと考えられる。

2) 固有値解析

固有値解析は、衝撃振動試験で得られた固有振動数と振動モード（振幅比率）を、多自由度振動モデルを使ってシミュレートすることにより、現状の構造物の剛性と地盤バネ定数を逆解析する手法である。（図-3.6.2）

① 構造物の解析モデル

A橋脚は一般図があるのに対し、B、C橋脚は一般図がない。そこで、桁、橋脚躯体部は、寸法を測定し、基礎部は3基とも同様な形式と仮定した。バネ値の初期値は、当社の電算プログラムが鉄道設計標準の算式しか採り入れていないので、当面の対応としてこの算式を採用した。道路用の算式についても検討が必要である。

② 固有値解析に用いる解析データ

固有値解析に用いるデータは、交通振動のない場合の衝撃振動試験の結果を採用する。そのデータを表-5.6.6に示す。

表-5.6.6 衝撃式振動試験の測定データ

橋脚	固有振動数 (Hz)		天端	中間	下端
A	7.4	振幅 (kine*sec)	0.125	0.095	0.068
		振幅比率	1.000	0.760	0.544
B	7.0	振幅 (kine*sec)	0.092	0.063	0.040
		振幅比率	1.000	0.685	0.435
C	8.9	振幅 (kine*sec)	0.054	0.039	0.027
		振幅比率	1.000	0.722	0.500

③ 解析結果

解析結果（初期値に対する解析値の比率）を表-5.6.7に示す。

表-5.6.7 固有値解析の結果

橋脚	躯体剛性比 (倍)	水平バネ定数 (tf/m) 比	底面バネ定数 (tf・m/rad) 比
A	1.80	1.00	2.00
B	1.50	3.82	2.62
C	1.50	1.50	2.00

いずれも、試験結果から導き出される解析値が、設計上想定される初期値以上の値となっている。即ち、躯体剛性、地盤バネ定数とも健全と評価できる。

(2) 一般国道16号 八高線高架橋、竜谷寺高架橋衝撃振動試験

前回の調査場所（建設省土木研究所内）は、他の振動ノイズが少ない良好な環境であり、より道路橋の実態に即した環境での調査を実施する必要が生じた。これを受けて、一般国道16号での実橋調査を実施する機会を得られたので、衝撃振動試験の適用性をより実態に即した環境で検討することを目的として、この調査を実施した。

調査対象の八高線高架橋、竜谷寺高架橋は、事前に現地を踏査した。各高架橋の特徴と調査実施橋脚を以下に示す。

表-5.6.8 高架橋の特徴と試験実施橋脚

橋梁名	上部工の形式	下部工の形式	特徴	調査実施橋脚
八高線高架橋	・6径間連続RCホロースラブ桁 ・単純PCプレテンホロー桁	・逆T式橋台 ・壁式橋脚 ・張り出し式橋脚 ・全て直接基礎	・連続桁はジョイント部の車両衝撃が無く、しかもコンクリート製であるから、橋脚への車両衝撃はかなり少ない。固有振動数は得られやすいと考えられる。 ・上り線の八王子方はかなり渋滞であった。一つの橋梁で、渋滞の場合と、通常走行の場合で振動が計測できそうである。	・通常走行の場合として入間方の壁式橋脚3基（P8、P10、P11の上り線側） ・渋滞の場合として八王子方の壁式橋脚1基（P5）を予定していたが、調査当日に渋滞が見られなかったためP8下り線を実施
竜谷寺高架橋	・単純合成桁 ・3径間連続非合成桁	・1層2径間ラーメン橋脚 ・逆T式橋台 ・鋼管杭基礎 ・PC杭基礎（擁壁部）	・鋼製桁は橋脚に車両振動を伝えやすいため、車両振動を相殺するために重ね合わせを何回実施すべきかが目的となる。 ・単純桁と連続桁での車両振動の影響を比較することができる。 ・特に渋滞は見られない。	・単純桁が上部工であるP4 ・連続桁が上部工であるP5

調査位置を図-5.6.3、図-5.6.4に示す。

1) 試験項目

実橋調査は以下の2項目を行う。

① 衝撃振動試験

② 固有値解析（橋脚の剛性、地盤バネ等の評価）

2) 試験方法

橋軸直角方向から水平に、橋脚頭部側面を打撃した。その時に、車両が通行している状態で、ランダムな時間間隔で橋脚を打撃した場合の波形を10回分重ね合わせた。各々の調査状況を図-5.6.5～図-5.6.7に示す。

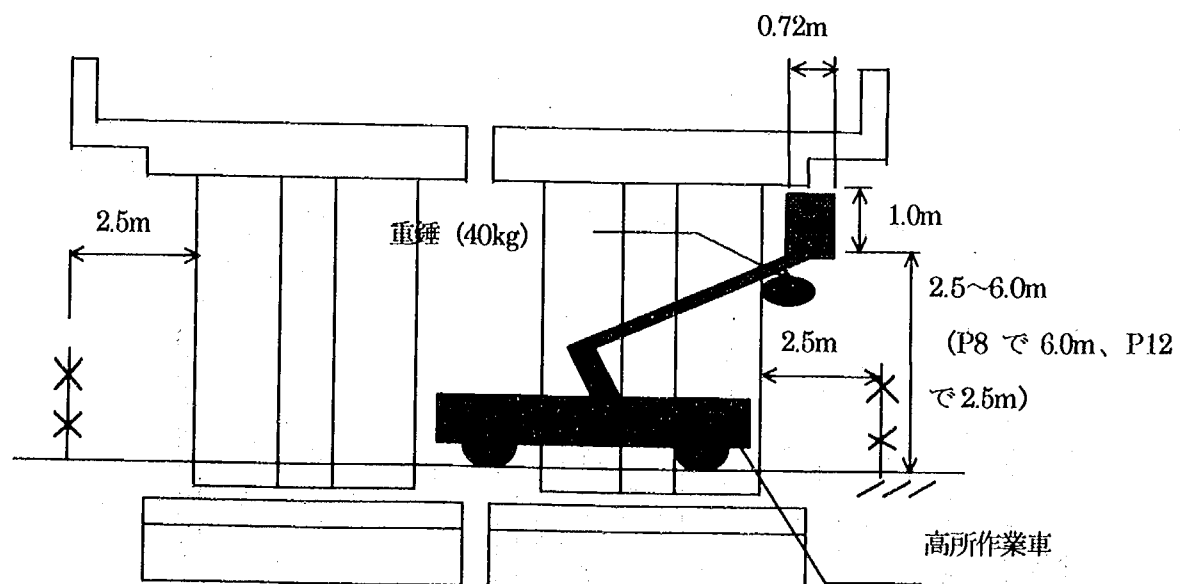


図-5.6.5 調査状況図（八高線）

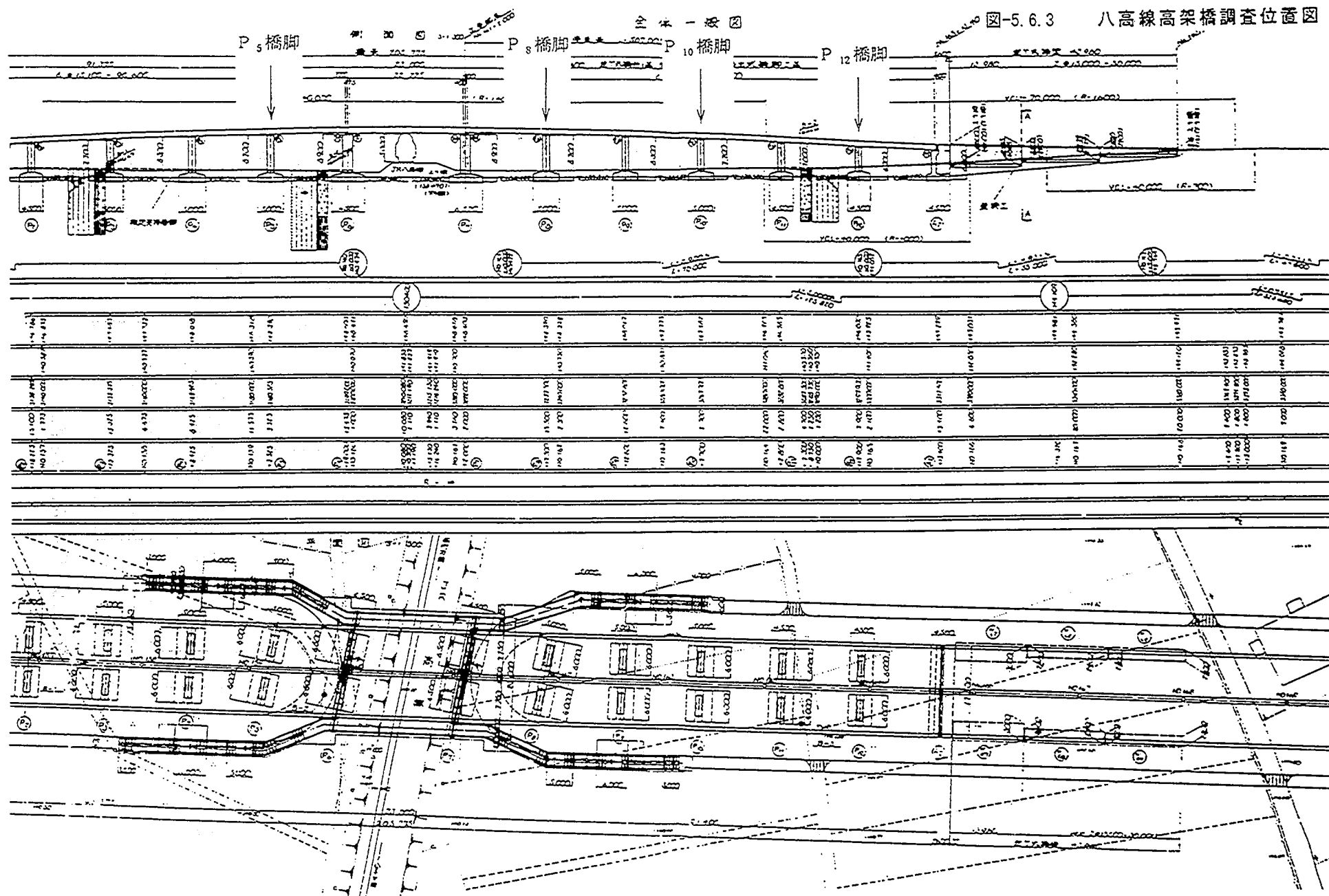


圖-5.6.3 八高線高架橋調查位置圖

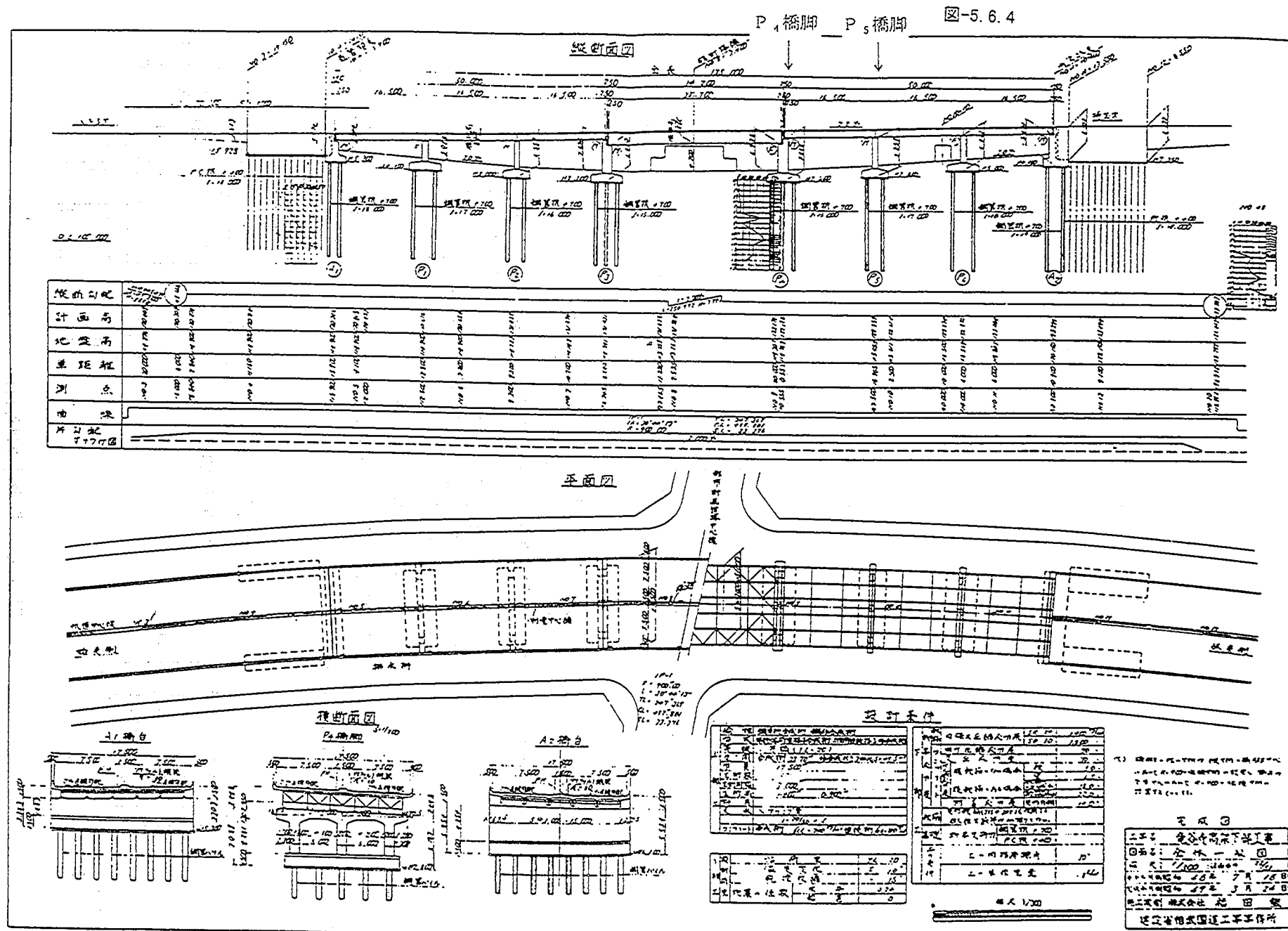


圖-5.6.4 竜谷寺高架橋調査位置圖

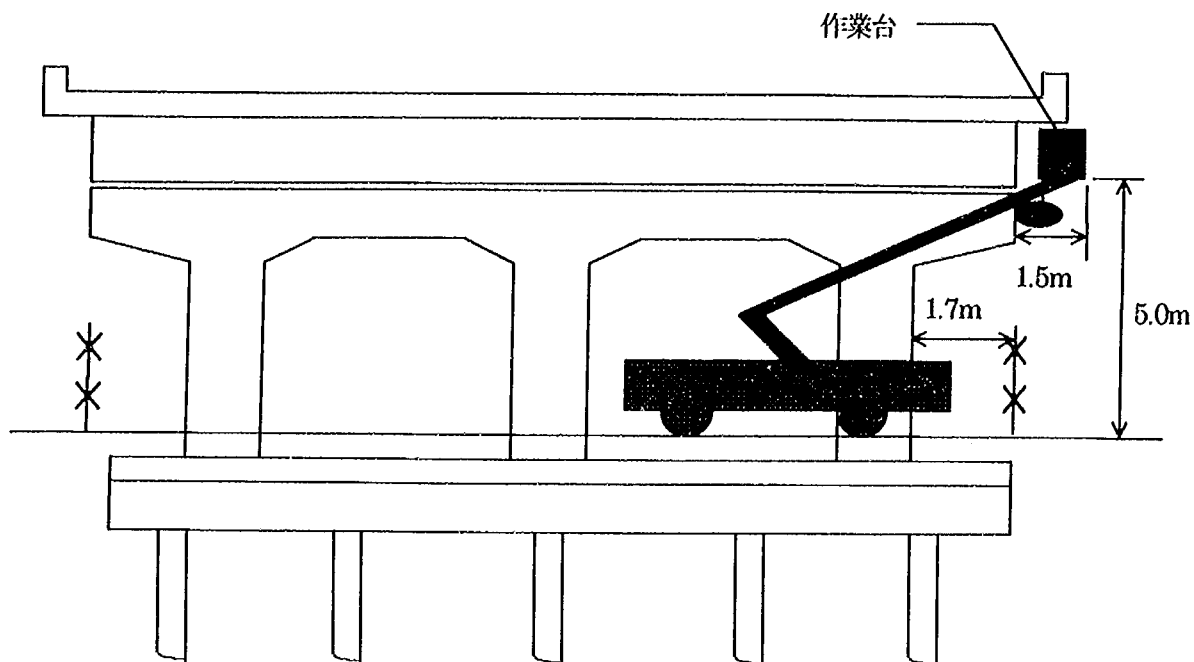


図-5.6.6 調査状況図（竜谷寺）

竜谷寺高架橋での作業中は、境界柵から 1.5m 張り出しして作業することとなる。作業台下は、十分な空間を確保するように努めるとともに、交通整理員を配置して、側道部の通行に支障が発生した場合、交通整理員の誘導で作業台を移動させた。また、竜谷寺高架橋下は、道路維持管理車の駐車場となっている。衝撃振動試験実施中は、橋脚に近接して高所作業車を配置するために、道路維持管理車を移動した。

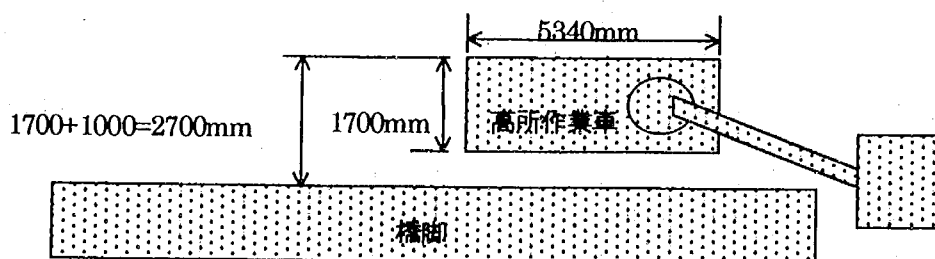


図-5.6.7 調査平面図（竜谷寺）

振動計取付位置は、橋脚の固有振動数及び振動モードが測定できる位置に配置する。橋脚天端、中間、下端の3箇所とする。（図-5.6.8）

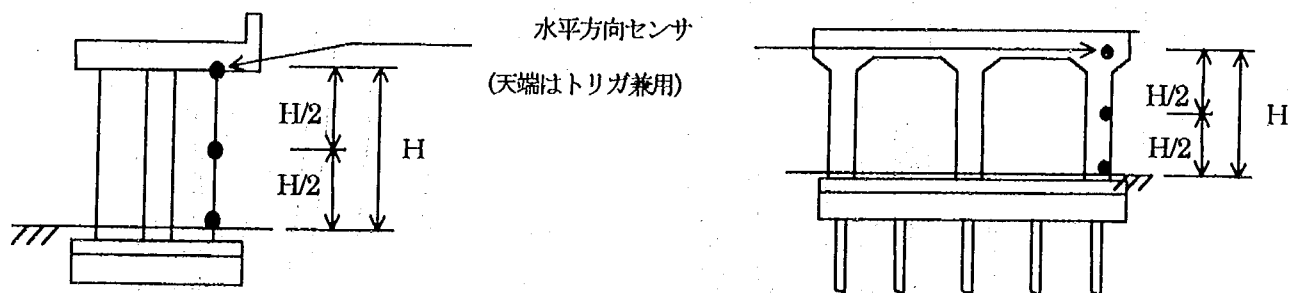


図-5.6.8 振動計取付位置図

振動計で測定された振動波形は、アナログ信号で携帯用計測機に送られる。携帯用計測機において、アナログ信号は即時にデジタル信号に変換され、パソコンのハードディスクに保存される。携帯用計測機の測定範囲を下表に示す。

表-5.6.9 携帯用計測機の仕様

測定周波数範囲	0.1～70Hz
測定範囲	速度 100kine、10kine の2レンジ
分解能周波数範囲	速度 10 μ kine
A/D変換成分数	8チャンネル

3) 試験結果

八高線高架橋、竜谷寺高架橋とも構造物としての剛性が非常に高いため、固有振動数が 20～30Hz 程度という高い値を示した。現在、詳細な波形および固有値の解析を実施中であり、この報告書には盛り込めなかった。

5.6.3 適用条件

(1) 構造物の条件

構造物の大きさに応じた適用上の制限はない。これまでの実績では、スパン 160mの橋梁下部工まで実施している。橋脚頭部を打撃することができれば、固有振動数を求められる。したがって、適用条件として以下のことが挙げられる。

- ① 橋脚周辺に近接構造物があるにしても、重錘を打撃する余裕空間（2 m程度）がある。
- ② 橋脚周面に付帯施設があるにしても、速度計を設置できるスペース（10cm×10cm）がある。

(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。

(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振動速度計を設置して、周辺ノイズの状況を把握すればよい。

5.6.4 まとめと今後の課題

(1) まとめ

これまでの実橋試験で以下の点が明らかとなった。

- ① 道路橋についても衝撃振動試験により、簡便に固有振動数を求めることができる。
- ② 車両が通過していなければ一回の打撃で固有振動数が得られる。
- ③ 車両が通過している状態では、車両振動によるノイズを相殺するために10回程度の打撃の重ね合わせが必要である。

- ④ 上部工が合成桁よりも、コンクリート桁の方が車両振動の影響が少ない。
- ⑤ 測定された固有振動数と、鉄道橋データで多変量解析処理された算定式から得られる標準振動数と比較したが、活荷重の大きさが異なるために固有振動数による健全性判定はできなかった。
- ⑥ 固有値解析を実施した結果、設計時に想定される剛性、バネ値以上の値を保有していることを確かめられた。調査橋脚は、健全なものと考えられる。
- ⑦ 良好な地盤か、地表面が舗装で覆われている場合は、地盤からのノイズ量が少ない。
- ⑧ 実橋梁は、いずれも、桁と橋脚の固有振動数に差があるため、その区別が容易だった。

この結果をもとに、今後の課題として以下の項目が挙げられる。

- 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を確認する。
- 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を検討する
- ③ 河川を横断する多径間橋梁で、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）を調査する。
- ④ 過去に地震を経験した橋梁に対する適用性を検討する。

平成10年度は、これらの課題の解決と試験実施マニュアルの作成に取り組む。

(2) 今後の課題

1) 固有振動数による健全度判定の適用性について

鉄道橋での調査実績から、図-5.6.9 の項目について固有振動数標準値算定式を設定している。この算定式は、これまでの試験データに対して多変量解析を行って作成したものである。算定式に橋脚の諸元（高さ、幅、柱太さ、桁重量等）を代入することで、構造物が健全な場合の固有振動数が得られる。今回得られた固有振動数について標準値との比較を試みたが、標準値を適用できなかった。理由は、活荷重の形式が全く異なるために橋脚の諸元が合わないからである。そこで、道路橋について標準値による健全度判定を実施するには、道路橋独自の算定式を作成する必要がある。

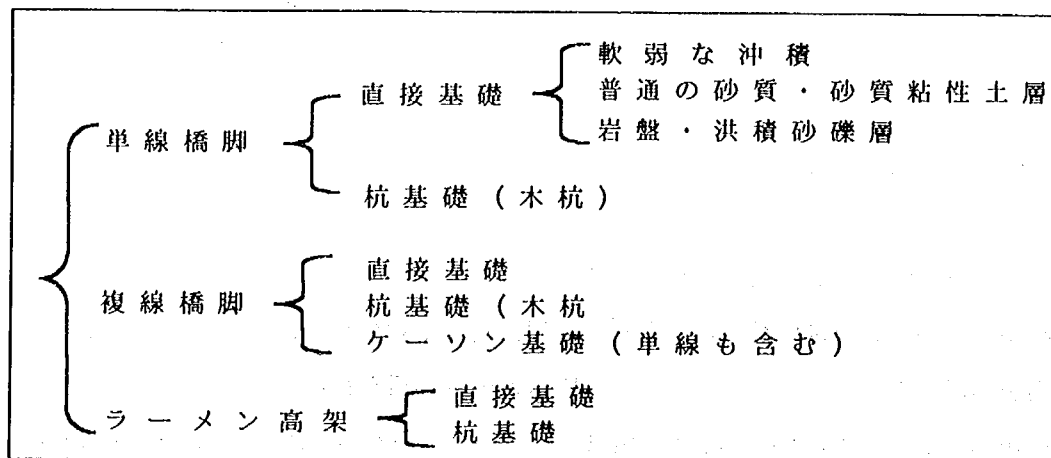


図-5.6.9 標準値算定式の分類

2) 固有振動数測定の実用性

固有振動数測定を道路橋に適用する場合、健全な状態における固有振動数を初期値とした健全性管理が適用ケースとして考えられる。新規に竣工した供用開始前の構造物や、基礎部の健全性が確認されている構造物に衝撃振動試験を実施し、固有振動数を測定する。これを初期値として、定期的に、あるいは地震直後といった緊急時に衝撃振動試験を行うことで、健全性を簡便にチェックできる。

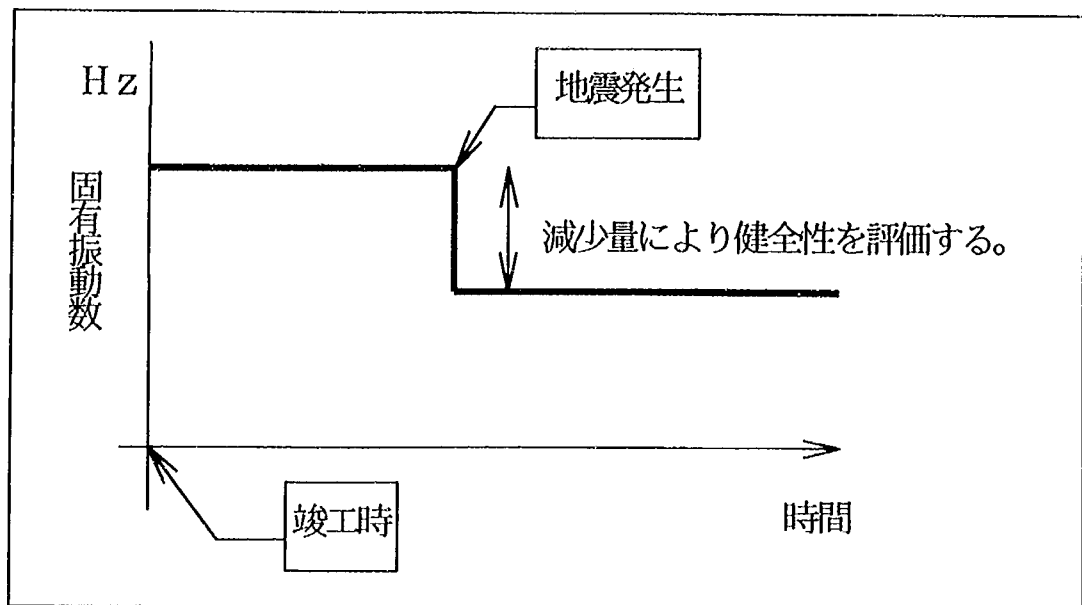


図-5.6.10 固有振動数による管理のイメージ

兵庫県南部地震では、鉄道橋で網羅的に試験を実施したが、最も細かな損傷レベルで、基礎と地盤との間隙 2cm（固有振動数の減少量 0.2Hz）を確認できた。さらに、多径間橋梁で同様な構造形式の橋脚が連続している場合に、固有振動数を比較することで洗掘の可能性のある橋脚を特定することにも活用できる。これまでの実績では、洗掘 1m で、0.3~1.2Hz の固有振動数の低下を認めている。これについては、実橋試験による検証が必要である。

3) 固有値解析の実用性

多経年の橋脚で基礎部に劣化の疑いがある構造物は、固有値解析を行うことで、剛性や地盤バネが設計標準の条件をクリアできているかといった検討を行うことができる。固有値解析は、固有振動数と振動モードを一致させるためにフィードバック解析を実施しなければならず、全数的な調査には適さない。しかし、例えば固有振動数の測定後、劣化の疑いのある構造物について詳細な検討を行うことや、補強する場合に目標とする固有振動数を決定するときに活用できると考えられる。

また、基礎形式の特定に活用できることも考えられる。例えば、ケーソン基礎と設計図面に示されていた橋脚が、固有値解析を行ったところ振動モードが直接基礎のパターンだったため、目視調査を行った結果、やはり直接基礎（地盤条件から構造形式を変更していた）だったことを確認している。ただし、どこまで特定が可能かを今後の調査課題とすべきである。さらに、固有値解析の応用として、基礎部の安定が確保できる限界（洗掘深さや、フーチングの底面の支持面積）を条件とした限界固有振動数を算出することができる。

これらについても、実橋試験による検証が必要である。

6. まとめ

基礎の形状および損傷の調査手法を開発することを目的として、平成8年度から平成9年度までに各手法の適用性を確認するための室内模型試験を実施した。その結果、調査手法によって、調査できる損傷の度合いや地盤の適用性などが異なることを確認した。したがって、実際の調査では、調査の目的や地盤の状況に応じて調査手法を選択したり組み合わせることが必要になる。各手法ごとの適用条件等のまとめは、第5章に記述してある。

平成10年度は、以下の検討を行う予定である。

1. 実橋梁・実地盤における確認試験
2. 調査手法選定方法のとりまとめ
3. 調査に要する費用および期間の算定
4. 調査手法マニュアルの作成

平成10年度にこれらの検討を反映し、最終報告書としてとりまとめた。

付 録

1. インティグリティ試験を用いた杭基礎の調査法マニュアル（案）

（本マニュアルは、現在作成中であり、ここではその一部を紹介する）

2. 実績調査文献一覧表

適用範囲

本マニュアルで対象とするインテグリティ試験は、図-1.0に示す3つの目的で用いることができる。

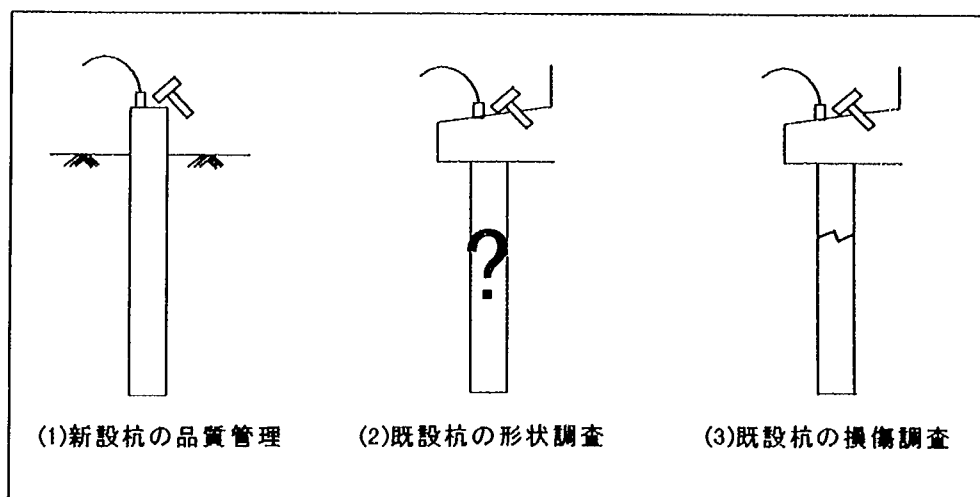


図-1.0 インテグリティ試験の目的

(1) 新設杭の品質管理

もともとインテグリティ試験は、杭施工時の品質管理のために開発されたものであり、これまでもこの目的で最も多く使用されている。新設杭の品質管理では全数検査を基本とし、杭長の確認、不良杭の抽出を目的とする。また、杭頭での計測が基本となるため、標準的な試験手順で実施することができる。

(2) 既設杭の形状調査

老朽化した構造物の更新に当たって、既存杭を再利用することにより建設コストが低減できる。しかしながら、施工年度の古い構造物では図面が保存されておらず、杭長などが不明の場合がある。このようなときに実施するインテグリティ試験では、杭長、杭形状の確認を目的とする。

(3) 地震などで被災した杭の損傷調査

地震などで被災した杭の補修・補強に際しては、その損傷程度を精度良く調査し、適切な補強法を選定する必要がある。インテグリティ試験を損傷調査に用いる場合は、フーチング上からの計測が基本となり、損傷の有無、損傷位置などの特定を目的とする。

但し、インテグリティ試験では杭の支持力、杭の傾斜角などは推定できない。

1. 試験概要

1.1 開発の歴史

近年、都市部では環境問題に配慮し、打込み杭に替わって埋込み杭や場所打ち杭のシェアが増加している。これらの杭では、騒音・振動が少ないなどの特長がある反面、所定の支持力を確保するためには高度な品質管理が不可欠となる。しかしながら、これまでは非破壊的な調査法が確立されておらず、杭打設後の掘削調査やコアボーリングといった手法でしか地中の杭の形状を評価することはできなかった。このため、通常は施工後の品質確認は行われておらず、掘削完了時の掘削孔の深さを検尺テープで、また形状を超音波等で測定していた。したがって、実際の杭形状を必ずしも測定していたわけではなかった。このようなことから、非破壊的に地中の杭の形状を推定しようとするインテグリティ試験 (Integrity Test) の適用が増加している。この試験の開発の経緯は、以下の通りである。

欧米では1960年代から杭の施工管理や支持力推定への波動理論の適用が実用化され、動的な試験法が普及し始めた。1970年代後半には、ヨーロッパを中心に場所打ち杭の需要の増加に伴い、施工後の品質に関するトラブルも発生し、杭の品質管理の必要性が高まってきた。打ち込み杭については、一次元波動理論に基づく動的載荷試験 (Dynamic Load Test) により打ち込み管理と支持力推定が可能となったが、場所打ち杭に対してはハンマを別途用意しなければならないことやセンサの取り付け方法、衝撃力による杭頭の破損などの問題があり、その適用が困難であった。このような状況から、動的試験で培ってきた技術を発展させたインテグリティ試験が、オランダ応用科学研究所 (TNO) やフランス建設研究所 (CETBC) により開発・実用化され、現在では世界各国で利用されている。インテグリティ試験は、地中の杭長や杭形状を推定するもので、支持力を直接求めるものではないが、非破壊で迅速かつ低コストであることを特長としており、全数検査が可能な手法である。

また、この試験は施工後の杭の品質管理だけではなく、老朽化した構造物の更新に当たっての既存杭の再利用時の杭長確認、及び地震などで被災した杭の健全性の調査にも用いることができる。特に、わが国においては1995年に発生した兵庫県南部地震以後、その適用事例が増加している。

1.2 試験原理

インテグリティ試験は、低ひずみ (Low Strain) を用いて杭の健全性を調査するもので、ソニック・テスト、エコー・テスト、パイプレーション・テスト等があり、いずれもハンドハンマや加振機等により外力を加える方式となっている。このうち、ソニック・テストは、図-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。

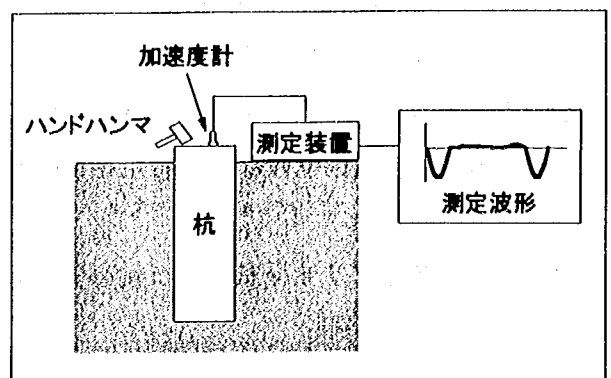


図 -1.1 インテグリティ試験の方法

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、杭の断面変化や地盤変化がある場合には反射波が生じる。反射波は、不連続面いわゆるインピーダンスの変化によって生じるもので、大きなインピーダンスの変化は大きな反射波を発生させる。インピーダンスは式(1.1)に示すように、杭の断面積と波動の伝播速度から求められる。また、伝播速度は杭の材質によって異なり、式(1.2)で求められる。

$$Z = \frac{EA}{C} = A\sqrt{E\rho} \quad (1.1)$$

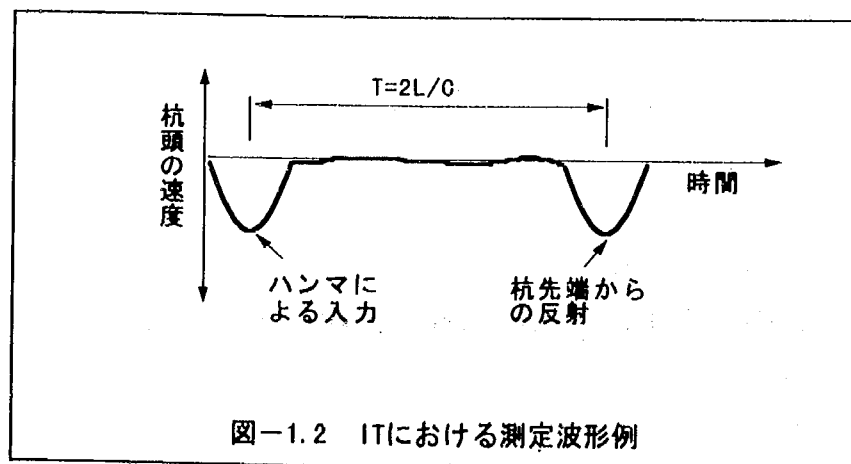
$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.2)$$

ここで、 Z ：インピーダンス、 A ：杭の断面積、 E ：杭のヤング係数、 ρ ：杭材の密度、 C ：波動の伝播速度である。

反射波が発生する条件を整理すると、

- ① 杭先端
- ② 断面の拡大
- ③ 断面の縮小
- ④ 接合部
- ⑤ 材質の変化
- ⑥ 異素材の混入
- ⑦ 杭軸に直角方向のクラック
- ⑧ 地層の境界

などが挙げられる。この中で最も顕著なインピーダンスの変化は杭先端であり、断面変化のない通常の杭では図-1.2に示すような波形が得られる。



杭頭を打撃して反射波が戻ってくるまでの時間は、波動が杭を1往復する時間に等しく、波動の伝播速度がわかれば、式(1.3)により杭長が推定できる。

$$L = \frac{CT}{2} \quad (1.3)$$

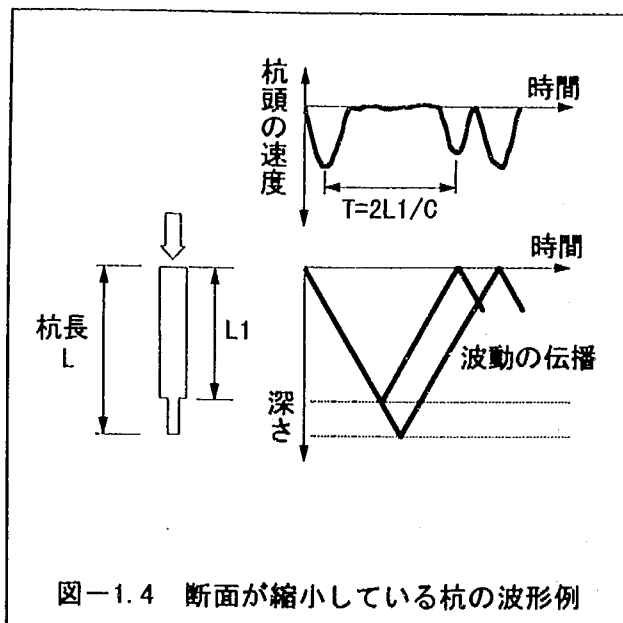
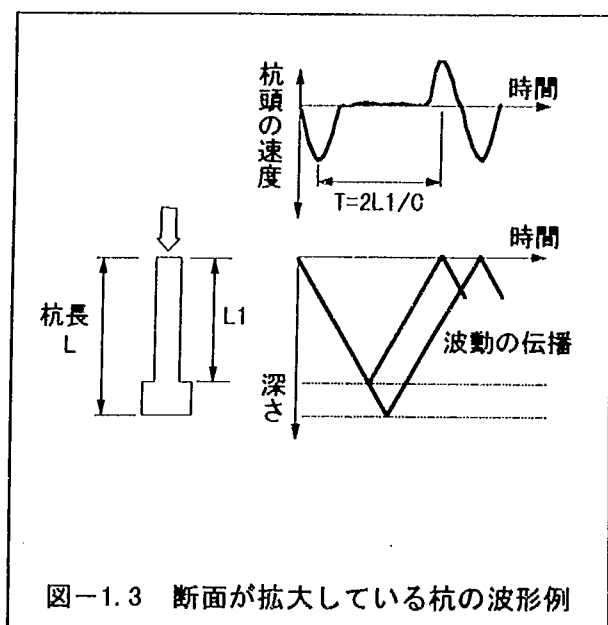
ここで、L：杭長、C：波動の伝播速度、T：波動が杭を1往復する時間（ITで測定）である。

一般に、波動の伝播速度は表-1.1のような値となる。

表-1.1 波動の伝播速度の目安

杭 種	伝播速度 (m/sec)
場所打ちコンクリート杭	3,800~4,000
既製コンクリート杭	4,000~4,300
鋼管杭、H鋼杭	5,120

次に、途中で断面が拡大している杭、途中で断面が縮小している杭の2種類について、反射波の模式図を以下に示す。図-1.3に示すように、断面積が大きくなると入力と逆の成分の速度反射波となる。一方、断面積が小さくなると図-1.4に示すように同成分の速度反射波となる。



断面が拡大している杭と同じ反射波が計測されるものとして、

- ① 地盤抵抗が高くなっている
- ② 弾性係数が高くなっている
- ③ 材料の密度が高くなっている

場合などがある。また、断面が縮小している杭と同様の反射波となるのは、

- ① クラックがある
- ② ジョイントがある
- ③ 地盤抵抗が低くなっている
- ④ 弾性係数が低くなっている

⑤ 材料の密度が低くなっている

場合などが考えられる。さらに、次のような条件では明確な反射波は発生しにくい。

- ① 緩やかな断面拡大
- ② 緩やかな断面縮小
- ③ 曲線形状
- ④ わずかな異素材の混入
- ⑤ 杭先端の破壊
- ⑥ 杭軸に平行なクラック

1.3 試験装置

現在、世界各国で利用されているインテグリティ試験装置には表-1.2に示すものがある。いずれの試験装置も測定原理、機器構成、測定精度、操作性に大きな差はない。測定装置はバッテリーにより作動し、測定波形はリアルタイムでモニターに表示される。

表-1.2 インテグリティ試験装置

システム名	略 称	開発社名
Sonic Integrity Test	SIT	TNO (オランダ)
Integrity Test-System	IT-System	IFCO (オランダ)
Pile Integrity Tester	PIT	PDI (米 国)

表-1.3~1.5に各装置のシステム構成を示す。

表-1.3 SITシステム構成

名 称	仕 様
計測器本体	サイズ : 24×19×5.5cm 重 量 : 1.5kg (バッテリー含む) C P U : 486DX2 (75MHz) R A M : 8MB(option32MB)
センサ	水晶圧電型加速度計
ハンマ	プラスチックハンマ (重量 : 約700g) インスツルメントヘッドハンマ

表-1.4 IT-Systemシステム構成

名 称	仕 様
計測器本体	サイズ : 30×20×7cm 重 量 : 1.015kg 12bit A/D変換 メモリ : 512KB
センサ	水晶圧電型加速度計
ハンマ	ハンドハンマ

表-1.5 PITシステム構成

名 称	仕 様
計測器本体	サイズ : 6.5×15×20cm 重 量 : 1.6kg (バッテリー含む) 16bit A/D変換 350回分のデータを収録可能
センサ	水晶圧電型加速度計
ハンマ	加速度計内蔵 重 量 : 約450, 800, 2, 600g

図-1.5は、杭長52m、杭径1,200mmの場所打ち杭に対する3つの装置による測定波形を比較したものである。図の縦軸が杭頭で測定した速度（最大値で正規化）、横軸が時間を表している。3波形とも杭先端からの反射波が帰ってくる時間は0.014秒前後でほとんど差がない。また、フィルター値の違いで細部では差があるものの全体の波の形状は似通っている。したがって、これら3つの装置の測定精度はほぼ同等と考えられる。

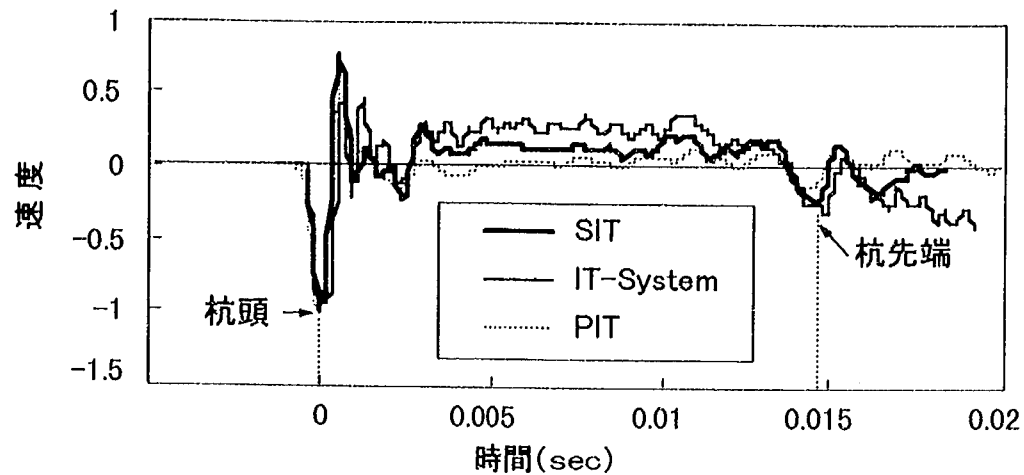


図-1.5 3つの装置による波形比較

2.2 試験手順

(1) 事前調査と試験準備

インテグリティ試験に際しては、表-2.2に示すような項目を事前に調査し、関連資料などを収集することが好ましい。これらの中でも、測定結果を分析する上では波速が重要なパラメータとなるので、杭の材質などのデータは重要である。

なお、現場状況に関しては、周囲で杭打ちの騒音や振動があっても一般的に測定可能である。また、試験時の天候に関しては、大雨でなければ測定可能である。

表-2.2 インテグリティ試験の事前調査項目

項 目	内 容
杭 仕 様	杭種、杭径、杭長など
杭の施工データ	施工法、施工日、施工状況など
杭 頭 部 の 状 況	杭頭処理の状況、フーチングの有無など
地 盤 条 件	土質柱状図、N値、地下水位など
現 場 の 状 況	試験位置の周辺状況、騒音・振動など
そ の 他	工事概要、基礎の設計図書など

試験前の準備としては、杭頭部を清掃してハンマで打撃できるようにしておけばよい。しかし、事前の杭頭処理などが不十分な場合には、思わぬ手間と時間をとられる場合があるので、表-2.3のような事前の試験準備が必要である。これらは現場で比較的簡単にできることであるので、試験を開始する前に終了させておくことが好ましい。なお、フーチングがある場合には別途、検討が必要である。

表-2.3 インテグリティ試験の準備

項 目	内 容
杭の養生	場所打ちコンクリート杭の場合には所定のコンクリート強度が発現するまでの養生期間をおいてから試験を行う。（通常、約1週間以上おくことが必要） 既成杭では通常、施工後の養生期間は必要ないが、埋込み杭の根固効果などを検討する場合には所定の養生期間が必要である。
杭頭処理	通常、試験は杭頭を打撃して行われるので、杭頭が露出している必要がある。 既製杭では試験のために特別な杭頭処理は必要ない。しかし、場所打ち杭の場合は、杭頭付近の余盛コンクリートは品質が悪いのではつり処理を行っておく必要がある。 なお、ブレーカーなどによって発生した杭頭部のクラックは波形に与える影響が大きいのので、クラックなどを生じさせないように注意し、不良部分は充分に取り除いておかなければならない。

(2) 試験手順

図-2.3に試験フローを示し、これに従って手順を説明する。

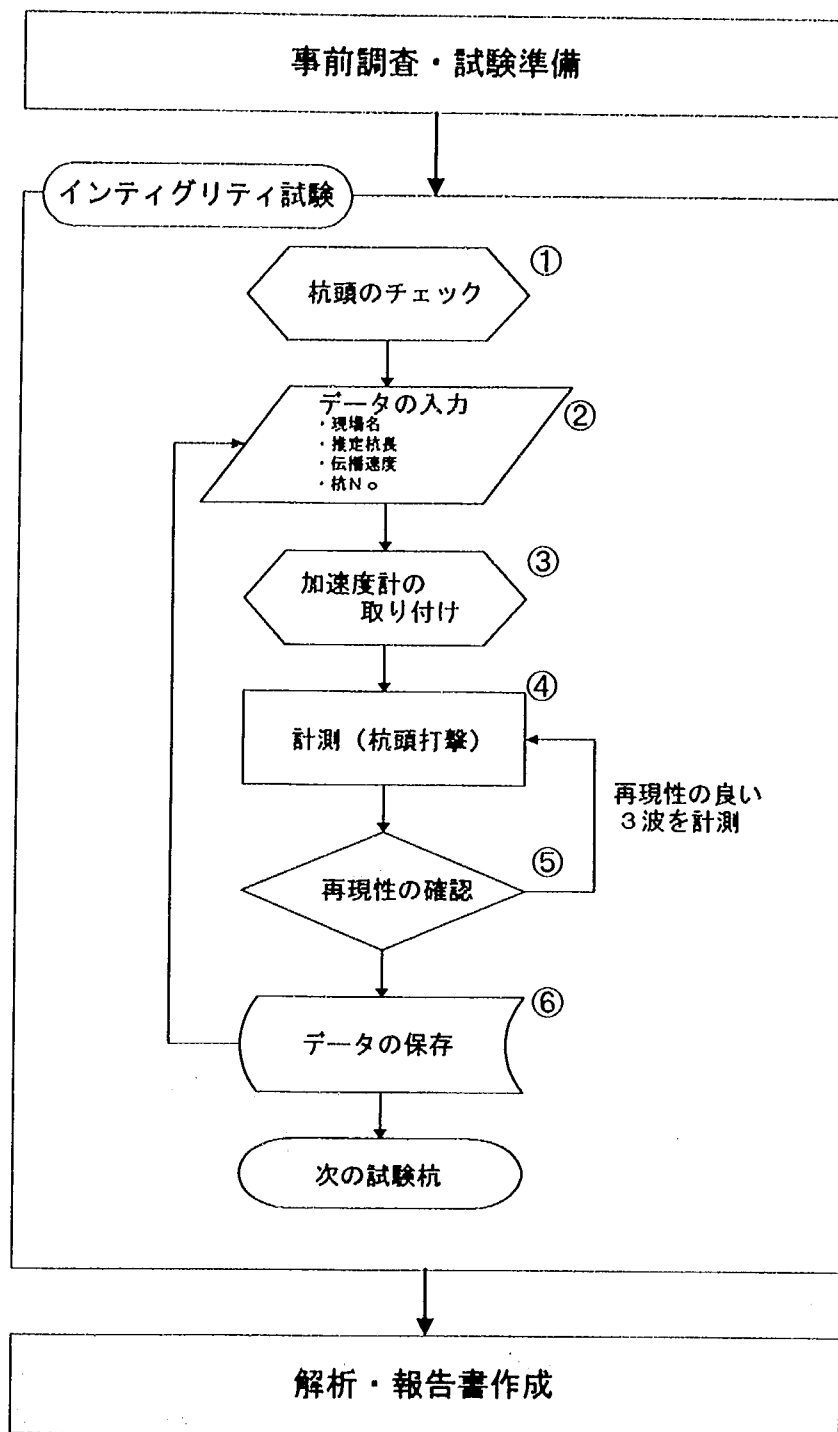


図-2.3 試験フロー

① 杭頭のチェック

試験は通常杭頭にて行うため、事前に杭頭の状態を確認する必要がある。杭頭が濡れていると加速度計と杭との接着が悪くなり、採取波形にノイズが多く発生する。また、杭頭処理などの影響により、杭頭表面のコンクリートに浮きがある部分での加速度計の取り付けや打撃は計測に適さず、異常な波形を採取する場合が多い。

② データの入力

試験直前、計測システムに現場名、推定杭長、伝播速度（波速度）、ハンマタイプ、杭Noなどを入力する。

③ 加速度計の取り付け

杭頭処理による表面の浮きや水分のない場所に、加速度計を粘土またはグリスなどで鉛直に固定する。

④⑤ 計測および再現性の確認

試験は、1本の杭に対し複数回行いその再現性を確認することで品質管理を行う。現場では、最初の試験杭で地盤や杭長に従った伝播速度の設定を行い、その波形からその妥当性を判断し以降の試験を行う。これにより採取された波形から、杭体に著しい損傷や異常の有無および暫定的な杭長を現場にて確認できる。

杭頭の状態が悪い場合などは波形が著しく乱れ、反射波を確認しづらくなるので、再現性を必ず確認しなくてはならない。

⑥ データ保存

データを保存する。データは、内蔵のハードディスクまたはメモリに記録される。

計測結果はその場で確認することができるが、通常採取した波形は、他のコンピュータに転送し解析、印刷などを行う。

(3) ハンマの種類と打撃方法

通常、インティグリティ試験では手で持つ中型のプラスチックハンマ（重量500g程度）を用いて打撃する。打撃より生じる入力波形は、ハンマの材質および重量によって変わる。一般的には堅い材質および大きな重量は高周波の入力波を生む。スチールハンマは、打撃による波動の周波数が高いため、杭頭での損傷を確認するのに適している。しかし、高周波の波であるので減衰が大きくなるため杭の先端まで入力波が届きにくく、杭長確認にはあまり向いていない。大型のプラスチックハンマや掛矢（大型の木製ハンマ）を用いた打撃は低周波で大きな波動を入れることが可能なため、長尺杭の杭長確認には向いているが、杭頭付近の損傷や小さなインピーダンスの変化などの判断は難しい。

打撃は、約20～30cm位の高さから軽く振り下ろす様に行う。採取波形の再現性を得るため、打

撃は同じ強さで行わなければならない。打撃力が強いと周面や鉄筋の影響が大きくなるため、波形が乱れる。また、強い打撃力は地盤および杭のダンピング効果だけが表れ、クラックや杭先端の確認の手助けとはならない。逆に弱いと先端からの反射が不明瞭になり（S/N比〔信号と雑音との強度比〕が小さくなる）判定が困難になる。

(4) 打撃位置および加速度計取付位置

a) フーチングのない場合

インテグリティ試験は、通常杭頭にて計測を行う。加速度計は杭の中心の乾いた部分に鉛直に取り付けることが望ましい。このとき、加速度計を杭端部に取り付け計測を行うと、鉄筋や杭周面の影響により採取波形にノイズが現れることが多くなるので、端部の取付は避けなくてはならない。PHC杭は、杭部の中央に取り付ける。打撃は、加速度計から約10~30cm程度離れた位置で行う。杭頭の状態が悪い場合は、両者とも杭頭の設置条件が良い箇所を選ぶ必要がある。標準的な杭の打撃位置および加速度計の取付位置を図-2.4に示す。

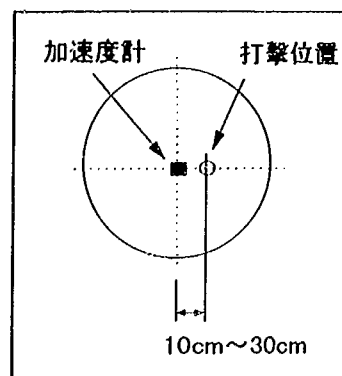


図-2.4 標準的な杭の打撃位置
および加速度計取付位置

b) フーチングがある場合

既存構造物の基礎杭試験において、フーチングや地中梁が一体化した状態で試験を行う場合、以下に示す4種類の計測方法が考えられる。しかし、フーチングなどからの反射波が早期に返ってくるので、いずれも単杭の杭頭で行った試験より精度が落ちるとともに、検討が困難な場合が多い。

① 計測方法1

- ・フーチング上にセンサを取付け、打撃を行う。
- ・この方法は、試験前に準備を行う必要がなく簡易に行えるが、
- ・フーチングの影響を強く受けるため、健全性の検討が難しい場合が多い。
- ・通常の試験装置で行える。
- ・事前に杭配置を知る必要がある。

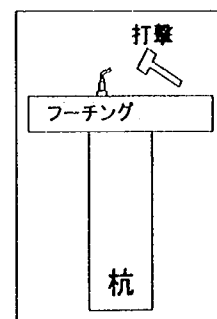


図-2.5 計測方法1

② 計測方法2

- ・フーチングを杭頭までボーリングし、直接杭頭にセンサを取付け、
- ・打撃を行う。
- ・計測方法1と比べ、フーチングの影響を比較的受けにくい。
- ・通常の試験装置で行える。
- ・事前に杭配置を正確に知る必要がある。
- ・ボーリングをする必要がある。
- ・加速度計の取付状況が目視できない。

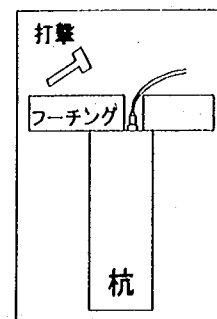


図-2.6 計測方法2

③ 計測方法3

- ・フーチング側面を掘削し、杭側面に加速度計を取付け、打撃を行う。
- ・杭に軸方向の波を発生させる必要がある。
- ・打撃位置は、加速度計取付位置より上でなければならない。
- ・フーチングの影響を比較的受けにくい。
- ・フーチングの下で作業ができるよう掘削などの準備が必要。
- ・通常の試験装置で行える。
- ・フーチングが大きい場合、全数検査ができない。

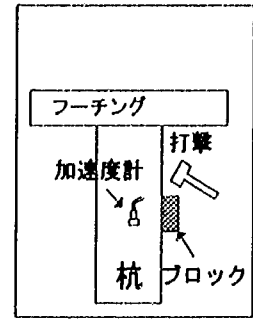


図-2.7 計測方法3

④ 計測方法4

- ・フーチング側面を掘削し、杭側面に加速度計を2個鉛直方向に取付け、フーチング上を打撃する。
- ・フーチングの影響を受けることなく計測できる。
- ・フーチングの下へ加速度計を取り付けるスペースを確保する必要がある。
- ・杭軸方向の波を取り出すため、データの1次処理が必要となる。
- ・フーチングが大きい場合、全数検査ができない。

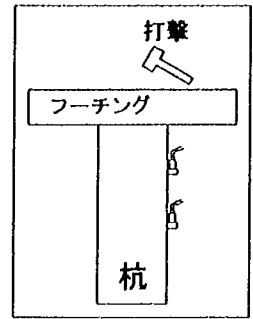


図-2.8 計測方法4

(5) 加速度計の取付方法

杭およびフーチングの表面には小さな凹凸が存在する。図-2.9に示すように凹凸のある状態のままセンサを取り付けると、設置面積が小さいため反射波がセンサに伝わりづらく、良好なデータを採取できない。このためインテグリティ試験では、通常図-2.10に示すように特殊な粘土（ペトロプラスト）やグリスなどを使用し簡易に杭頭との隙間を埋め設置面積を大きくする。これには以下の効果がある。①センサへの反射波の伝達が良くなる、②取付が容易、③フィルター効果。

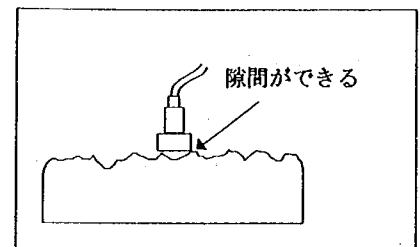


図-2.9 粘土未使用

凹凸が大きい場合には、センサを取り付ける位置をグラインダーなどで削り平らにし、特殊な粘土、グリス、接着剤を用いて、計測することも可能である（図-2.11）。

センサの取付け上の注意事項として、コンクリートの浮きや雨などにより濡れている部分への取り付けは、反射波の伝播が悪くなることからノイズや不明瞭な反射の原因となるため避けなくてはならない。

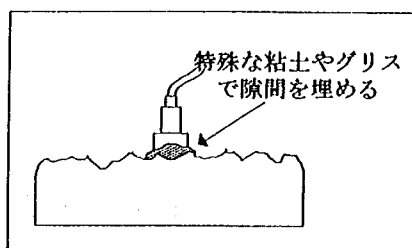


図-2.10 粘土使用

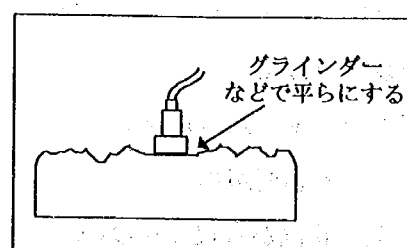


図-2.11 グラインダーで加工

計測に用いる加速度計のレンジは、杭頭を打撃する際に用いるハンマに依存し、一般にインティグリティ試験で用いられるプラスチックハンマの場合50～100G程度、その他大きな力で打撃する必要がある場合に用いる掛矢やスチールハンマの場合200G程度のレンジが必要である。また、取付けに用いる材料にも依存する。フィルター効果の無い接着剤では、レンジの広い加速度計を用いるか、軽打する必要がある。加速度計の応答周波数は1,000Hz以上のものを用いるのがよい。

実績調査文献一覧表 (1/4)

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 淳 川上 順子 大前 雄史 平山由紀子	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 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 淳 本 正信 今田 和夫 仲田	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

実績調査文献一覧表 (2/4)

No	タ イ ト ル	著 者	出 典	発行年月日
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

実績調査文献一覧表(4/3)

No	タ イ ト ル	著 者	出 典	発行年月日
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	5 th Int. Conf. on the Appl. of Stress-Wave Theory to Piles	1996.9
40	Evaluation of Defect Detection During Pile Curing Using Sonic Integrity Logging Methods	Tracy Brettmann Michael Frank Bill Berry Jr.	5 th Int. Conf. on the Appl. of Stress-Wave Theory to Piles	1996.9
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	1995.12

実績調査文献一覧表(4/4)

No.	タ イ ト ル	著 者	出 典	発行年月日
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 正 南莊 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
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	南莊 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

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)

共同研究報告書
第217号平成10年9月

建設省土木研究所基礎研究室

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ヵ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8～9年度に行った各手法の適用性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

郵便はがき

いは50
つ円切
て下手
下さを

305-0804

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
構造橋梁部基礎研究室 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



共同研究報告書第217号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印