

橋梁基礎構造の形状および損傷調査 マニュアル（案）

平成11年12月

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

Copyright © (1999) by P.W.R. I.

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

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

橋梁基礎構造の形状および損傷調査 マニュアル (案)

建設省土木研究所 材料施工部施工研究室室長	大 下 武 志
建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室室長	福 井 次 郎
阪神高速道路公団 工務部設計課課長	古 池 正 宏
(財) 土木研究センター理事	小 林 茂 敏
(株)大林組 土木技術本部統括部長	菊 池 禎 二
梶谷エンジニア(株) 調査部部長	佐々木 勉
基礎地盤コンサルタンツ(株) 地盤工学センター所長	土 谷 尚
清水建設(株) 土木本部技術第一部グループ長	野 口 恒 久
(株)竹中土木 技術本部技術開発部課長	小 嶋 平 三
中央復建コンサルタンツ(株) 防災診断室室長	金 谷 忠 良
(株)東京ソイルリサーチ 技術本部技術開発室次長	小 野 日出男
飛鳥建設(株) 技術研究所地盤開発研究部部長	三 輪 滋
日本工営(株) 中央研究所開発研究部部長	太 田 資 郎
(株)間組 技術研究所技術研究部主任研究員	三反畑 勇
(株)フグロ・ジオサイエンス マネージャー	坂 本 真 也
(株)フジエンジニアリング 調査第一部部長	今 田 和 夫

要旨：

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

こうした現状を踏まえ、大規模な掘削を必要としない橋梁基礎構造の調査手法を確立するため、建設省土木研究所と阪神高速道路公団、(財) 土木研究センター、民間12社により平成8年度から平成10年度まで共同研究「橋梁基礎構造の調査方法の開発」を実施した。本調査マニュアル(案)では、共同研究で検討した6種類の手法について形状調査・損傷調査に対する標準的な試験手順や結果の解釈方法を示したものである。

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

目次

1. はじめに	1
2. 形状調査手法	2
(1) 現地調査および調査・試験計画	5
(2) 基礎形状調査	6
(3) 基礎の根入れ・杭長調査	7
(4) 杭の配列調査	7
(5) 杭径の調査	7
3. 損傷調査手法	8
(1) 現地調査および調査・試験計画	10
(2) 損傷位置調査	10
(3) 損傷度調査	11

各調査法のマニュアル（案）

- ・ボアホールレーダ法を用いた橋梁基礎の形状調査法マニュアル（案）
- ・磁気探査を用いた橋梁基礎の形状調査法マニュアル（案）
- ・インティグリティ試験を用いた橋梁基礎の損傷調査法マニュアル（案）
- ・衝撃振動試験を用いた橋梁基礎の損傷調査法マニュアル（案）
- ・ボアホールカメラを用いた橋梁基礎の損傷調査法マニュアル（案）
- ・アコースティック・エミッション法を用いた橋梁基礎の損傷調査法マニュアル（案）

1. はじめに

わが国の道路構造物は高度経済成長期に整備されたものが多く、これらの老朽化が今後急激に進行することが予想されている。これらを再構築するとなると多額の事業費が必要となるが、わが国の社会は高齢化、少子化が進行しつつあり、今後の社会資本整備のための投資力の低下が懸念されている。このような状況を打破するためには、適時・適切に既設構造物の損傷調査を行い損傷を早期の段階に発見し、補修・補強することにより、できるだけ長期間有効活用することが重要である。しかし、橋梁基礎の場合、基礎本体が地中にあるため、地上構造物とは比べものにならない程、損傷調査、補修・補強が困難である。また、古い橋梁などでは設計図書等が散逸しているため、耐震性能等を評価できない場合がある。そこで、基礎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、建設省土木研究所、阪神高速道路公団、(財)土木研究センターおよび民間12社で共同研究を実施した。

本調査マニュアル(案)では、共同研究で検討した6種類(ボアホールレーダ、磁気探査、インテグリティ試験、衝撃振動試験、ボアホールカメラ、アコースティック・エミッション)の手法について形状調査・損傷調査に対する標準的な試験手順や結果の解釈方法を示したものである。

2. 形状調査手法

橋梁基礎の形状調査では基本的に現地調査や既存の資料を調べ、不明な点について調査を行う。まず、基礎形式を推定する必要があるが、上部構造や地盤状況から想定し、必要であれば試験で確認する。ここで、橋梁台帳は、管理する地方自治体が整備しているが、最近の架設橋梁以外は、上部工のみのものが多い。さらに、記載事項についても設計段階のものが載っていることがあるので、現地調査により下部工を推定することが望ましい。地盤構成は、その対象橋梁の基礎形式を想定する上で重要な情報となるので、柱状図が必要である。そのため、観測孔を設置する調査・試験法では、同時に標準貫入試験等を実施すれば、地盤構成と特性値が求まるので有効である。下部工の検討はこのように、現地調査、橋梁台帳、地盤構成、架設年月日等の情報をもとに、簡単な構造計算を行い、想定される基礎形式を検討する。この場合、基礎形式を絞り込む必要はないが、なんの根拠もなく調査するより効率的な調査が可能となる。以上の検討をもとに、明らかにしたい目的別にインテグリティ試験、ボアホールレーダ、磁気探査等を用いて調査・試験計画をたてる。この場合、調査目的、日程、費用などを考慮し、計画する必要がある。

表-2.1に、形状調査手法の適用性を、図-2.1に形状調査のフローを示す。

表-2.1 形状調査手法の適用性

調査法		ボアホールレーダ	磁気探査	インテグリティ試験	衝撃振動試験	ボアホールカメラ
調査項目	基礎構造(杭・ケーソン等)	—	—	△	○	—
	基礎上面深度	—	—	—	—	—
	平面形状	—	—	—	—	△
	フーチング厚さ	△	△	△	—	○
	杭種	△	△	—	△	○
	基礎の根入れ(杭長)	○	○	○	△	—
	杭配列	○	○	—	—	—
	杭径	—	—	—	—	○
最大対象深度	20m程度	100m程度	60m程度	任意	500m程度	
非破壊検査が可能	○	○	○	○	—	
ボーリングの必要性	有	有	無	無	有	
フーチングの影響	無	無	有	無	無	
作業工程(1日当たり)	20m, 3孔(観測孔設置除く)	20m, 3孔(観測孔設置除く)	30点(杭頭露出時)	2ヶ所	10m, 5孔(観測孔設置除く)	
試験の容易さ	△	△	○	○	△	
評価の容易さ	△	△	○	△	○	
特記事項	観測孔は基礎に接近していること。塩分の多いところでは注意が必要	鉄類にのみ反応。観測孔は基礎に近いほど精度が上がる	フーチングがある場合、試験やボーリングで杭頭打撃する必要あり。木杭の根入れは△	地上部分の一般寸法図や地盤データが必要	フーチングの厚さ・杭径は杭本体を削孔	

○：適用可、△：条件によって適用可、—：実績少ない

また、今回の研究項目以外で、橋梁基礎形状調査に適用可能なものを以下に示す。

① 試掘

直接目視で確認できるが、地下水位下の掘削では、排水が必要となる。また、深い掘削では山留めが必要となり大掛かりとなる。

② サウンディング

浅い部分のフーチングの上面を確認するには、簡易である。ただし、中間層が砂礫の場合やガラの場合は、適用が難しい。

③ 斜めボーリング

調査項目のほとんどに適用できるが、費用が掛かる。

④ コア抜きボーリング

仮設が通常のボーリングより簡易であるが、中間層が崩壊性の強い土砂の場合は、適用不可能である。

⑤ 速度検層

一般に、地盤に比べ杭体を伝わる弾性波の方が速いので、杭の根入れ、杭の配列の調査に適用可能である。「木杭」に対しても適用可能である。

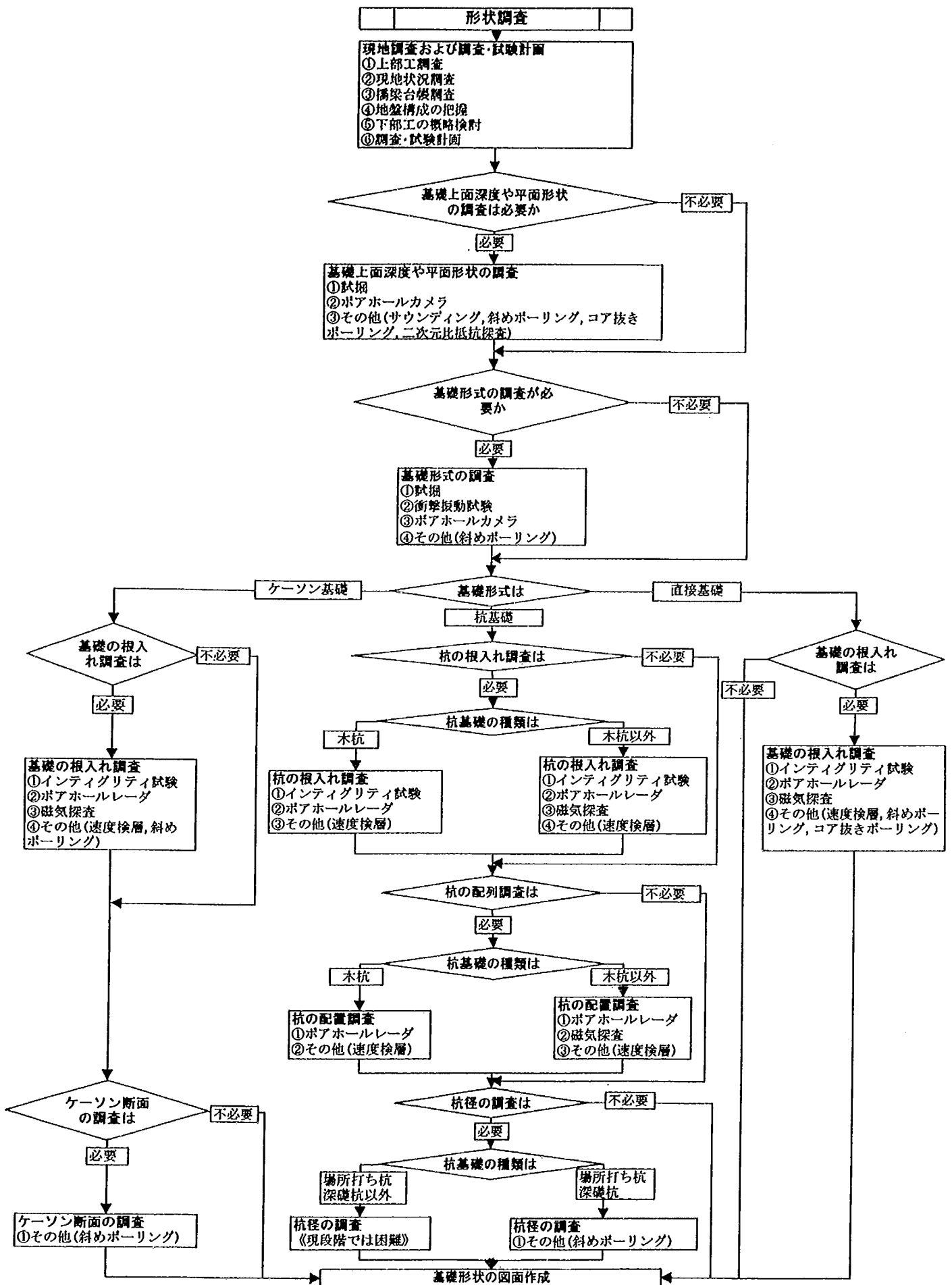


図-2.1 形状調査フローの一例

(1) 現地調査および調査・試験計画

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

1) 上部工調査

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

①構造, ②寸法, ③架設年月日, ④その他

2) 現地状況調査

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

①桁下空間, ②河川水量、水深, ③搬入路, ④土地利用, ⑤通行量, ⑥その他

3) 橋梁台帳調査

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

4) 地盤構成の把握

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

5) 下部工の概略検討

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

この場合は、基礎形式を絞り込む必要は無いが、何の根拠もなく調査するより、効率的な調査が可能になる。

6) 調査・試験計画

以上の検討をもとに、明らかにしたい目的別に「調査・試験計画」を立てる。

この場合、必要な精度、日程、費用などを考慮し、計画する必要がある。

(2) 基礎形状調査

1) 基礎上面深度と平面形状調査

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

表-2.2 基礎上面深度と平面形状調査

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

2) 基礎形式の調査

基礎形式の調査は、「試掘」が可能な場合は、この方法が最も確実であるが、地下水位が高い場合や、フーチングが厚い場合は、不適當である。

この方法以外には、基本的に「斜めボーリング」で杭に当て、先端を「ボアホールテレビ」で観察することになる。しかし、費用的な問題があれば「ボーリング」時の感触で想定するしかない。

衝撃振動試験は、水平方向に衝撃を与えた時に「杭基礎」と「直接基礎」を比較すると、回転中心の高いものが「直接基礎」と判定できる。また、「ケーソン基礎」は、支持層がわかっている場合、基礎が剛体的な回転をするので判別可能である。

表-2.3 基礎形式の調査

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

(3) 基礎の根入れ・杭長調査

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

表-2.4 基礎の根入れ・杭長調査

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

(4) 杭の配列調査

「杭配列」を特定する場合、以下の調査・試験がある。

表-2.5 杭の配列調査

調査手法	適用基礎形式	適用性
ボアホールレーダ	全て	近傍に観測孔を設置。地盤が高塩分の場合は困難。
磁気探査	木杭を除く	鉄類に反応する。鋼管杭は近傍に観測孔を設置する必要がある。
速度検層	全て	近傍に観測孔を設置。センサの設置間隔で精度が決まる。

(5) 杭径の調査

「杭径」を特定できる基礎形式は限られているが、以下の調査試験がある。

表-2.6 基礎の杭径調査

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

3. 損傷調査手法

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

現在、間接的に基礎構造の損傷状況を把握する調査法としては、インテグリティ試験、アコースティック・エミッション（AE法）、ボアホールカメラおよび衝撃振動試験等がある。これらの調査法は兵庫県南部地震を契機として、多数の実績を有している。ただし、衝撃振動試験等については、鉄道橋を対象に多くの事例があるが、道路橋への適用事例は少ない。これらの各調査法の適用条件や調査項目についてまとめたものを表-3.1に示す。

橋梁基礎の損傷調査は、図-3.1に示す損傷調査フローのように、調査法の簡便性、費用、精度などを勘案して実施する。まず、上部構造物または周辺地盤に変状が見られる橋梁を対象に現地調査を実施し、変位や傾斜など変状の実態を把握する。同時に橋梁台帳や設計図書等の資料により、基礎形式などの構造諸元や地盤条件を調査する。基礎形式が不明な場合は形状調査を実施して確認する。現地における損傷調査は、フーチング上面まで掘り出し、橋脚柱部を除く杭全数を対象にインテグリティ試験を実施し、健全性に疑いのあるものだけを選定することから始められる。その後、ボアホールカメラやアコースティックエミッションによる調査などにより、被災度の大きいと思われる杭を絞り込んでいき、最終的には再利用が可能か否かを確認するために、必要に応じて載荷試験等が実施されることになる。さらに、載荷試験の結果を踏まえて、補修や補強の要否を判定し、判定結果に基づき補修や補強対策工の措置が採られることになる。上記は調査の一例であり、現地状況や地盤状況および日数、費用などを考慮して調査手法を選定し、調査を実施することが必要である。

表-3.1 損傷調査手法の適用性

調査法		ボアホールカメラ調査	インテグリティ試験	AE法	衝撃振動試験
適用条件					
調査対象構造物		杭基礎 ケーソン基礎	杭基礎 ケーソン基礎	杭基礎 ケーソン基礎	基礎を含めた下部工
調査深度		任意	60m程度まで	任意 (荷重伝達可能な深度)	任意
調査項目	損傷位置	○	○	○	基礎全体の健全性
	損傷程度	○	△	△	
損傷が複数ある場合		○	△	○	○
非破壊検査が可能		×	○	○	○
ボーリングの有無		有	無*	有	無
フーチングの影響		無	有	無	無
簡便性	試験方法	△	○	△	○
	結果の評価	○	○	△	△
特記事項		削孔時にクラック部に角欠けが生ずる場合がある	*：フーチング部を削孔し、杭頭部で試験する場合もある	載荷が必要	固有値解析のデータが必要

○：適用可，△：条件によって適用可，－：実績が少ない

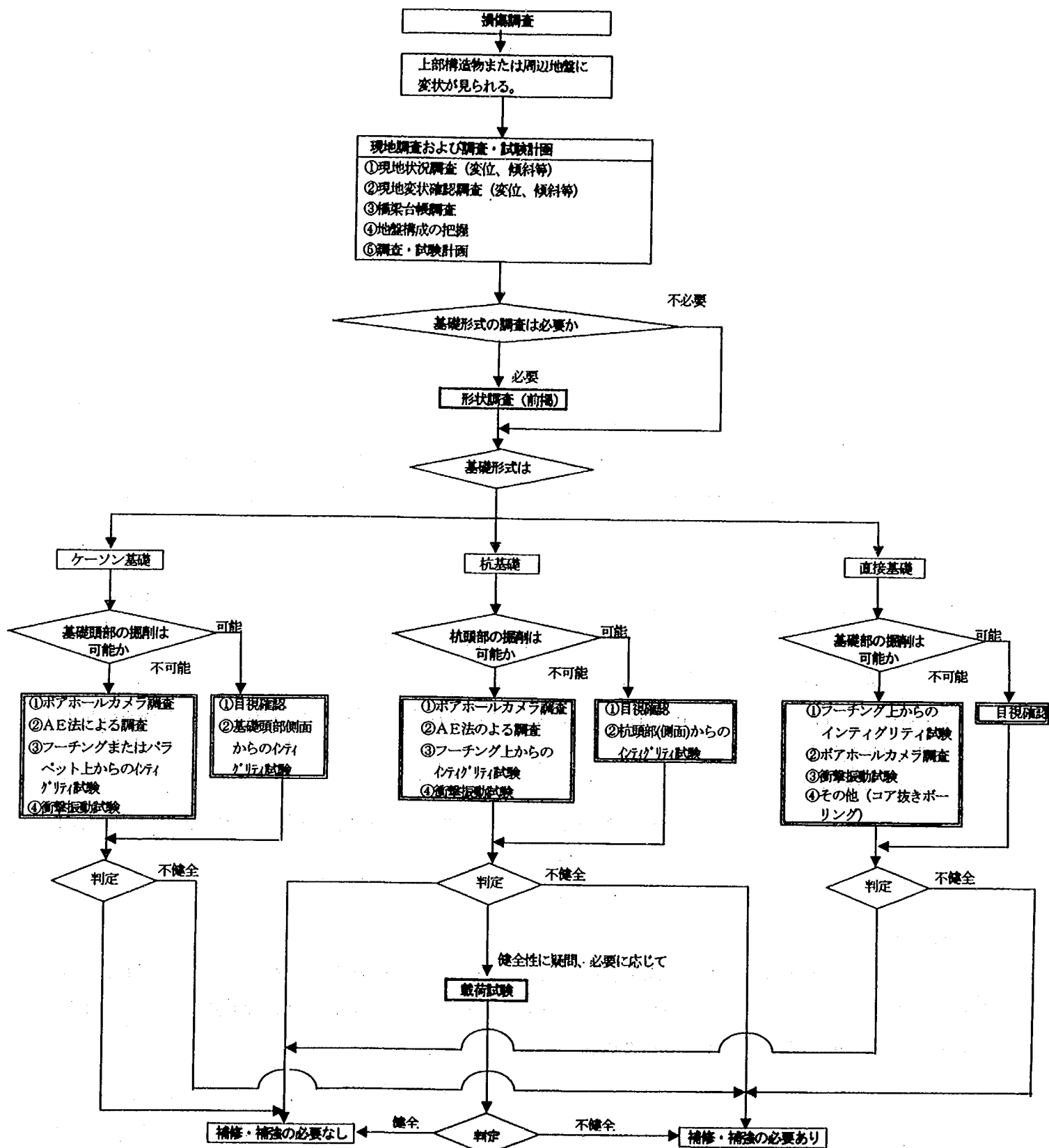


図-3.1 損傷調査フローの一例

(1) 現地調査および調査・試験計画

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

1) 現地状況調査

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

① 桁下空間、② 河川水量、水深、③ 搬入路、④ 掘削を伴う場合の残土の仮置き場、⑤ 土地利用、⑥ 通行量、⑦ 電力設備、給水設備、排水設備、⑧ その他

2) 現地変状確認調査

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

① 上部工の変状（支間長、桁の変形、遊間）、② 支承形式（固定、可動、弾性）、③ 下部工の変位、傾斜、④ 周辺地盤の変状と移動方向、⑤ 液状化の発生や側方流動の有無（特に護岸際）、⑥ 落橋の危険はないか、⑦ その他

3) 橋梁台帳調査

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

4) 地盤構成の把握

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

5) 調査・試験計画

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

(2) 損傷位置調査

損傷位置を確認する場合、試掘が可能なら直接目視で行えるが、この方法では調査深度が限定され、しかも地下水位が高い場合やフーチングが厚い場合には適さない。そこで、間接的な手法で確認することになり、各調査手法とその適用性については表-3.2の通りである。

表-3.2 損傷位置調査手法と適用性

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

(3) 損傷度調査

損傷度調査は、クラック幅等の損傷程度を確認するものである。損傷位置調査と同様に、直接目視による調査が最も確かであるが、杭頭付近しか確認することができない。そこで、間接的目視調査ともいえるべきボアホールカメラ調査が、直接目視調査に次いで精度よく損傷程度を数値として評価できる手法といえる。インテグリティ試験などは、損傷の大きさを定性的には把握することはできるが、定量的に評価することは現状では困難である。各調査手法とその適用性については表-3.3の通りである。

表-3.3 損傷度調査手法と適用性

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

ボアホールレーダ法を用いた
橋梁基礎の形状調査法マニュアル(案)

平成11年3月

建設省土木研究所
清水建設(株)
基礎地盤コンサルタンツ(株)
日本工営(株)

はじめに

平成7年に発生した兵庫県南部地震において数多くの橋梁の基礎が被災した。しかしながら、当時これらの被災した橋梁基礎の効率的な調査技術は十分に確立されておらず、その調査には多大な時間と費用を要した。また、被災後の耐震性検討に際しては、古い橋梁では図面がなく、基礎の形式・形状が不明であることが問題となり、既設橋梁の基礎の形状を効率良く調査する技術が必要であることが明らかになった。

これらのことが契機となり、建設省土木研究所の構造橋梁部基礎研究室および材料施工部施工研究室を主幹として平成8年度から平成10年度の3ヶ年の計画で共同研究「橋梁基礎構造の調査方法の開発」が開始された。

本共同研究は、「橋梁基礎構造の調査に要する時間や費用の低減を目的として、大規模な地盤の掘削を必要としない調査方法を開発する」ことを目標とし、以下の課題について検討を行った。

- ① 基礎の損傷調査手法および健全度判定手法の開発
- ② 基礎形状の調査手法の開発

研究の実施にあたっては、損傷調査手法として①IT（インティグリティ試験）、②AE（アコースティック・エミッション）、ボアホールカメラ、④衝撃振動試験の4手法を、形状調査手法として、①IT、②ボアホールレーダ、③磁気探査の3手法を対象とし、室内模型試験、実大現場試験等により、各種調査手法の適用性を検討した。

本マニュアルは、このうちボアホールレーダ法を用いた基礎の形状調査に関する研究成果をもとに、試験の適用条件、標準的な試験方法、測定結果の解析方法についてとりまとめたものである。

ボアホールレーダ WG メンバー

建設省土木研究所	構造橋梁部	基礎研究室	研究員	石田 雅博
建設省土木研究所	構造橋梁部	基礎研究室	建設技官	秋田 直樹
(株) 清水建設	土木本部	技術第一部	グループ長	野口 恒久
基礎地盤コンサルタンツ (株)	技術本部	機械開発室	室長	酒井 幸雄
(幹事) 日本工営 (株)	中央研究所		研究員	藤原 鉄朗

目 次

	ページ
適用範囲	1
用語の説明	1
1. 試験概要	2
1. 1 試験原理	2
(1) レーダ法	2
(2) レーダ法の特徴	3
(3) レーダ法の分類	3
1. 2 試験装置	5
(1) パルス型	5
(2) ステップ周波数型	5
2. 試験要領	6
2. 1 適用条件	6
2. 2 試験手順	7
(1) 測定準備	7
(2) レーダアンテナ挿入	7
(3) レーダ測定	7
(4) 測定後片づけ	8
2. 3 データの解析と評価	9
(1) データ解析法	9
(2) 評価法	10
2. 4 試験結果の整理および調査事例	11
問合せ先	16

[適用範囲]

ボアホールレーダ法は、橋梁基礎の形状を調査する目的で実施する。

ボアホールレーダ法による調査項目は以下のとおりである。

- ① 杭配置の確認
- ② 杭長の確認
- ③ 杭ピッチ

なお、上記形状調査を行っても判定出来ない事項は以下の事項である。

- ① 杭径
- ② 杭種別
- ③ 杭の損傷

[用語の説明]

- ① 電磁波：電磁場の振動が真空中、または物質のなかを伝播する現象

電磁波は、波長の長い方から電波・赤外線・可視光線（光）・紫外線・X線・γ線などに分けられる。このうち、地中レーダは電波に分類される波長帯域（100MHz～1.5GHz）を利用する。

- ② レーダアンテナ：電磁波を送受信するための装置

ボアホールレーダでは、孔内で電磁波の送受信を行なうため、ボーリング孔内に挿入できるように加工された小型・防水仕様のレーダアンテナを用いる。

- ③ S/N比 [signal-to-noise ratio]：意味のある情報信号電力の雑音電力に対する比
通常 dB を単位とし、信号電力を S 、雑音電力を N としたとき以下の式で与えられる。

$$S/N = 20 \log_{10}(S/N) \text{ [dB]}$$

- ④ 比誘電率：ある物質の誘電率と真空の誘電率との比率

誘電率は、電磁場に対する誘電体の影響力を表す量で、電気分極の機構によって定まる、物質に固有の量である。レーダ探査に重要な電波伝播速度 V は、土質の比誘電率を ϵ_r 、真空中の光速を V_c としたとき、以下の式で与えられる。

$$V = V_c / \sqrt{\epsilon_r}$$

1. 試験概要

1.1 試験原理

(1) レーダ法

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-1)。

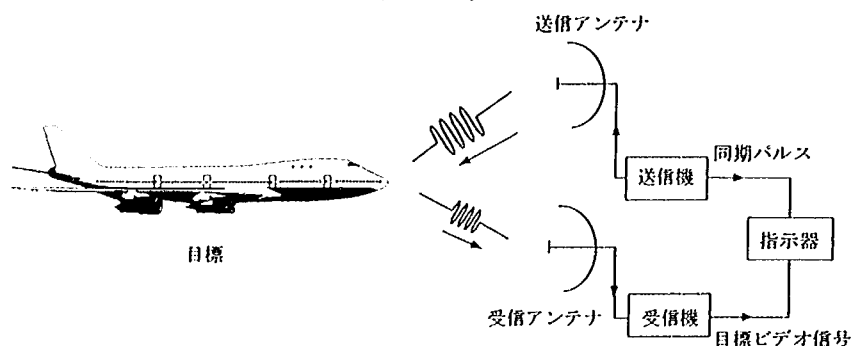


図-1 一般的なレーダシステム

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

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、アンテナから発信され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可能であり、アンテナを調査対象に固定する必要がない。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。

- ・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ため、地中での電磁波の減衰は大きく、深い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) レーダ法の分類

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-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。

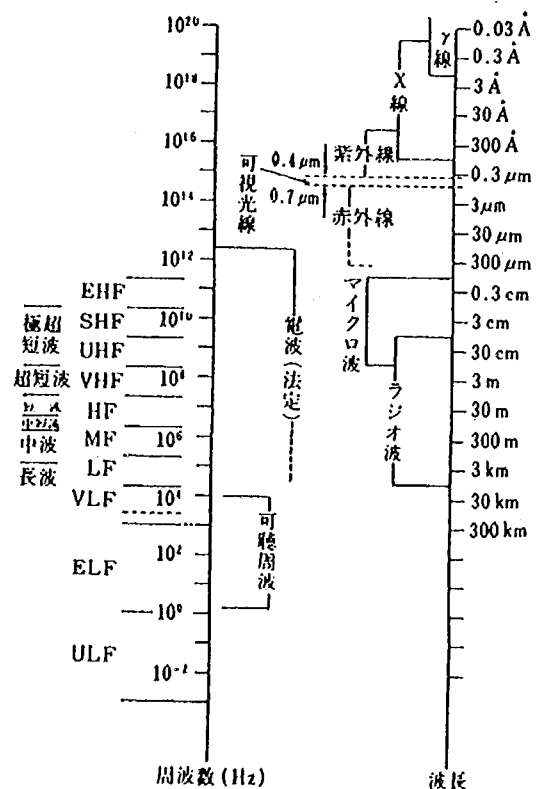


図-2 電磁波の周波数

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-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。

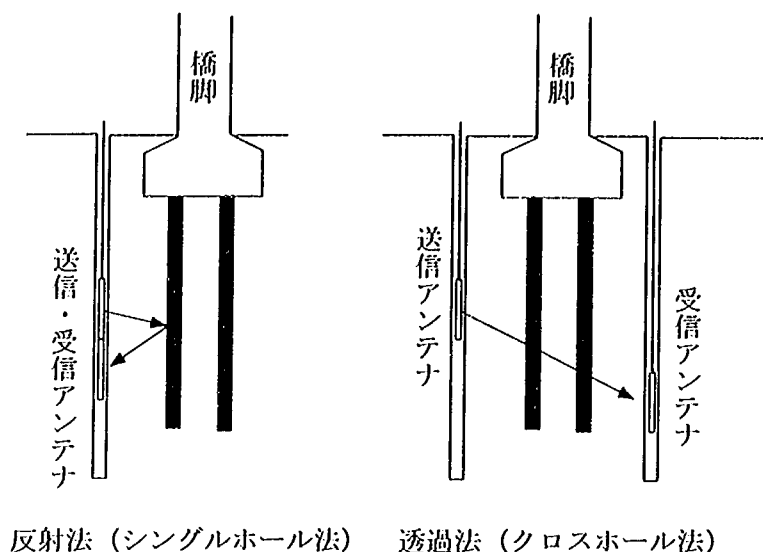


図-3 反射法と透過法

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。

橋梁基礎構造の調査では、ボーリング孔が1つで実施でき、調査が簡便にできる反射法が一般的である。そこで本マニュアルでは反射法に限定して記述する。

③ パルス波法とステップ周波数掃引法

ボアホールレーダ法は、用いるレーダ波形によって、パルス波法とステップ周波数掃引法に分類される。このうち、ステップ周波数掃引法は、探査深度が深いという特長があるが、レーダのアンテナ径が大きくなるという欠点もある。

1.2 試験装置

(1) パルス型

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影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。

パルス波反射式ボアホールレーダ装置の主な仕様を図-4に示す。

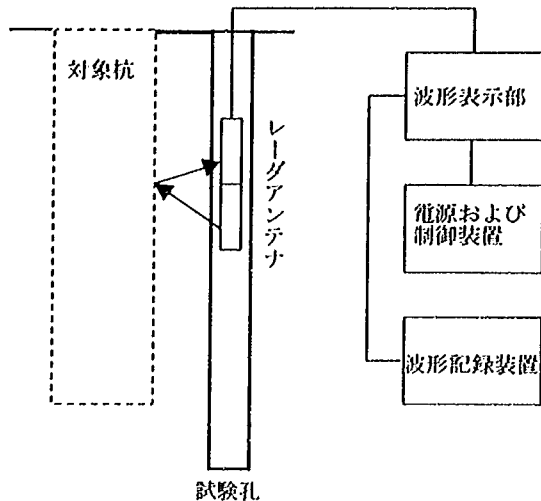


図-4 測定装置の構成

(2) ステップ周波数型

発信周波数を離散的にステップ状に変化させ、各周波数毎の送信波に対する反射波の振幅・位相を計測する。これらの周波数領域で計測した波形をフーリエ変換により時間領域に変換することで、パルス型レーダと等価な反射波形を得ることができる。時間領域で計測す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るため、検波器を狭帯域にでき、受信回路をシンプルに構成できる。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。

一方、パルスレーダに比して計測時間が長く必要である。また、1周波数では定常状態で計測する必要があるため、過渡現象を計測する用途には適していない。

ステップ周波数掃引型レーダのシステム構成と計測方法を図-5に示す。

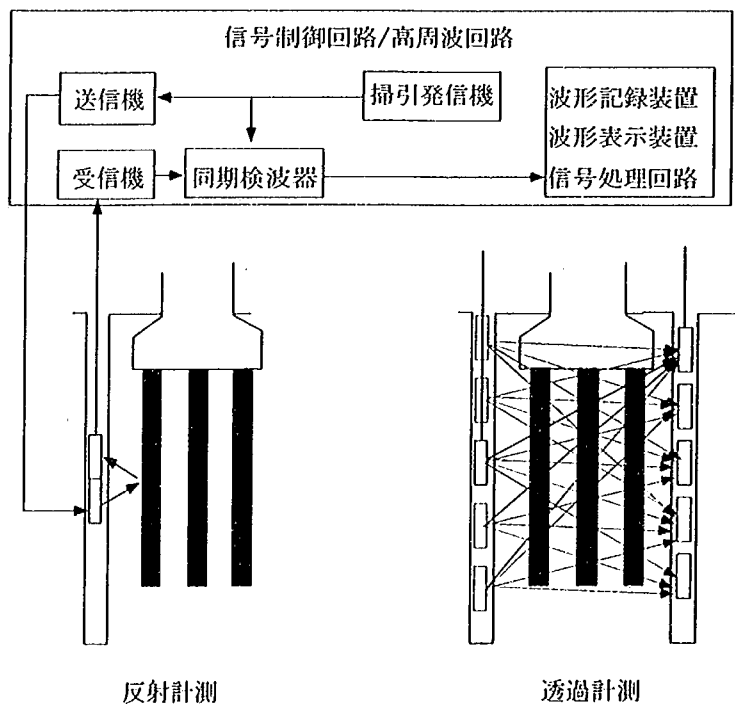


図-5 試験装置の構成と計測方法

2. 試験要領

2.1 適用条件

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

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

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

①土質が粘土質の場合

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

②土の含水率が大きい場合

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

③塩分等電気伝導性の高くなる成分が地中の水分に含まれる場合

上記と同様の理由で、深い深度の探査が難しくなる。

④地中の不均一性が高い場合

地中に大きな石などの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。

2.2 試験手順

ボアホールレーダ試験の測定手順を図-6に示す。

(1) 測定準備

ボアホールレーダ試験では、適当な位置にボーリング孔が設置されていることが実施可能条件の1つになる。

このため、ボーリング位置の決定は、平面位置と標高関係などの測量を十分に行なって決定する。

ボーリングの径は、用いるレーダシステムによっても異なるが、φ86mmあるいはφ116mmである。

削孔したボーリング孔には、孔壁を保護する目的で、電磁波を透過する塩化ビニール管をたてこむ。この際の塩化ビニール管には、VP65あるいはVP100が用いられる。さらに、掘削時に泥水を用いた場合には、電磁波の透過性を高めるために清水で置換する必要がある。

(2) レーダアンテナ挿入

孔内へのレーダアンテナの挿入は、アンテナ部や測定ケーブルに付着したゴミや異物を除去しながら慎重に行なう。また、孔底に着底したら、アンテナケーブルの長さなどからレーダアンテナの挿入深さを確認する。

(3) レーダ測定

レーダ測定にさきがけて、計測感度・時間増幅率・平均化処理数などのレーダ計測条件を設定する。これらの条件は、誘電率などの地盤固有の特性に依存しているため、地盤ごとに設定する必要がある。

レーダ測定方法は、レーダアンテナの走査方法により、ボーリング方向の走査と回転方向の走査に大きく分けられる。ボーリング方向の走査は、垂直ボーリングでは根入れ深さの調査に、斜めボーリングでは杭の本数および配置の調査に用いられる。一方、回転走査は、杭の平面的な配置を探る際に用いられる。

ボーリング方向の走査は、レーダアンテナを引き上げ

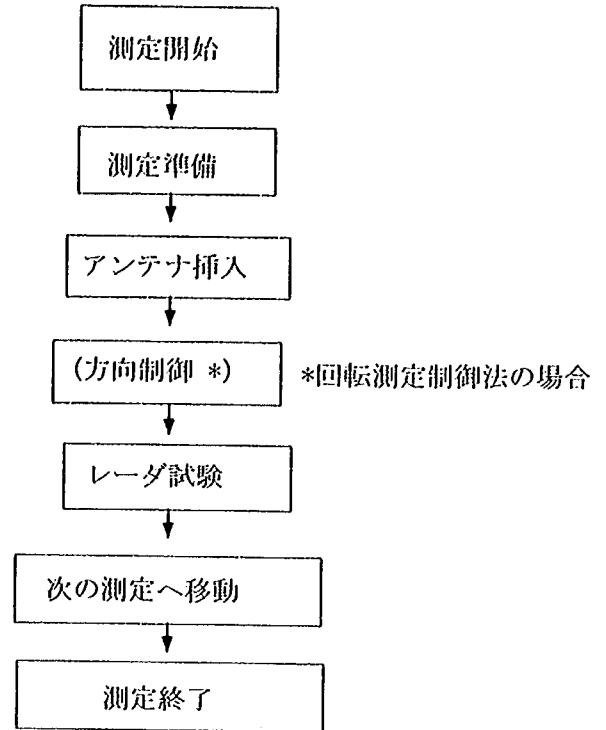


図-6 ボアホールレーダ計測の手順

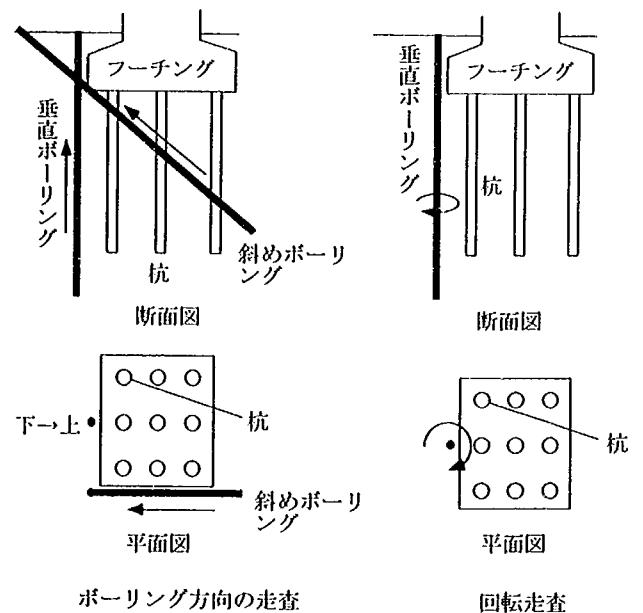


図-7 レーダアンテナの走査方法

ながら計測を行なう。この際、レーダ計測は、ブーリーなどに設置したエンコーダと同期させ、一定の距離間隔で電磁波を送受信し、反射する電磁波を記録する。

レーダアンテナに指向性がある場合には、アンテナの向きで反射波が異なるため、レーダアンテナの向きを固定して調査する必要がある。この性質を積極的に使うことで地盤の不均質性などのノイズ要因を除去し、調査の精度を高めることができる。

一方、回転走査では、指向性を有するレーダアンテナを用い、一定深さにレーダアンテナを固定し、その深さでレーダアンテナの向きを回転させることで、方向別の反射波形を記録する。

このように、指向性を有するレーダアンテナを用いて、ボーリング方向と回転方向の走査を組み合わせることで、橋梁基礎の3次元的な形状を把握することが可能になる。

(4) 測定後片づけ

レーダ装置のアンテナ部が地上に回収出来たら、最終深度と測定回数などを確認して完了する。万一、測定データに取りこぼしや測定項目に不備が見つかったら速やかに対処する。孔口は、ゴミや異物が混入しないように保護キャップを被せておく。最終確認として、測定位置関係や地下水の確認、ボーリング位置と河川や海水面までの水平距離を再度確認する。

2.3 データの解析と評価

(1) データ解析法

1) パルス型

・レーダ測定における影響を与えるパラメータと関連因子などを以下に列記する。

- ① レーダ探査距離の限界と分解能
- ② 境界面の形状と透過や減衰の関係（コンクリート製品や鋼管杭など）
- ③ 地盤（土性）の減衰状況（誘電率の特定）
- ④ アンテナ近傍の状況（漏洩信号）

・データ解析法

基本的な解析手順について図-8 に示す。

- ① 波形の整形（外来ノイズや自己ノイズの除去）
- ② 地下水より以深（飽和度=誘電率）
- ③ 位置や距離（誘電率=伝搬速度）
- ④ 形状や材質の認識（コンクリートや鋼管の反射率相違）

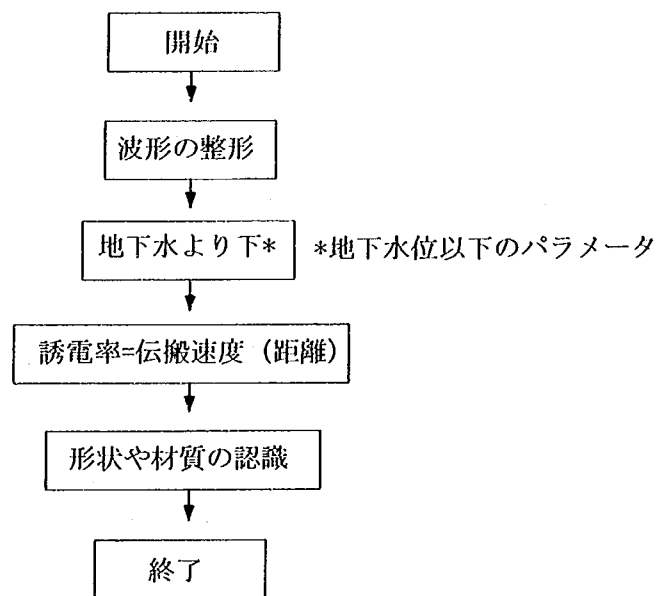


図-8 解析の手順

2) ステップ周波数型

周波数領域で計測されたデータ（反射波の振幅と位相）は、フーリエ変換により時間領域に変換することで、前項のパルス型レーダによる計測データと等価に扱うことができる。

送信波と反射波の模式図を図-9に示す。

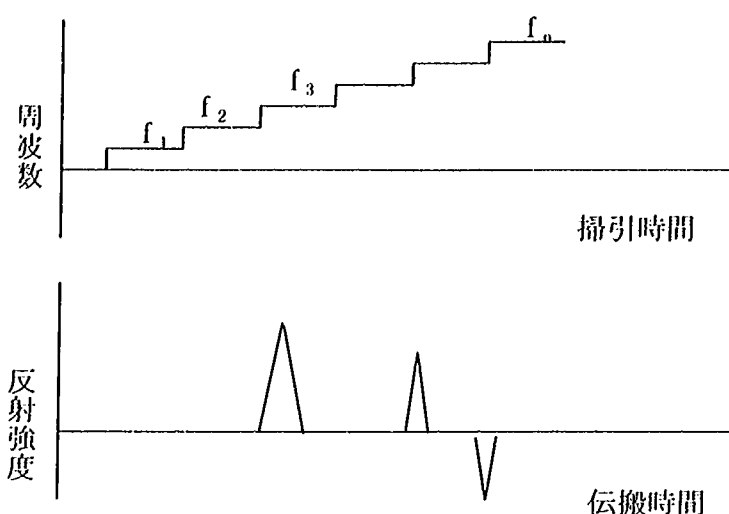


図-9 ステップ周波数型レーダの送信波と反射波の模式図

(2) 評価法

①基礎杭の位置や配列の評価

- ・基礎杭に対して垂直から30～35度程度の傾斜角度の測定孔を設置して探査を行い、平面的な図面を用いて嵩ね合わせる事で杭配列とその位置が分かる。
- ・ただし、基礎杭から1 m程度の近傍に設けた観測孔とする。

②基礎杭長さの評価

- ・基礎杭に対して平行な測定孔を設置して、深度方向に探査を行う事で基礎杭の先端深度の特定は可能である。
- ・ただし、得られる精度はレーダ装置の送受信アンテナ間隔の1/2程度である。
- ・ただし、基礎杭から1 m程度の近傍に設けた観測孔とする。

③基礎杭の杭サイズや材質の評価

- ・一般的な基礎杭の判別や識別を行う場合は、事前に杭などからの反射係数と杭サイズの関係などの判断基準が備わっていないと認識が出来ず、現時点では実施例が皆無である。
- ・ただし、基礎杭から1 m程度の近傍に設けた観測孔とする。

ボアホールレーダ調査における試験条件に関する整理事項を表-1に示す。

2.4 試験結果の整理および調査事例

表-1 ボアホールレーダ調査における試験条件

① 調査日時	② 調査担当者	③ 調査目的
④ 調査地点名	⑤ 調査対象基礎名	⑥ 対象基礎の形式
⑦ 調査ボーリング孔名	⑧ 孔長またはアンテナ走査長	⑨ ボーリング孔径
⑩ レーダ方式	⑪ アンテナの送受信周波数	⑫ 地盤条件
⑬ 地下水位	⑭ 想定地盤誘電率	⑮ 調査状況写真

また、ボアホールレーダ調査における試験結果に関する整理事項を以下に示す。

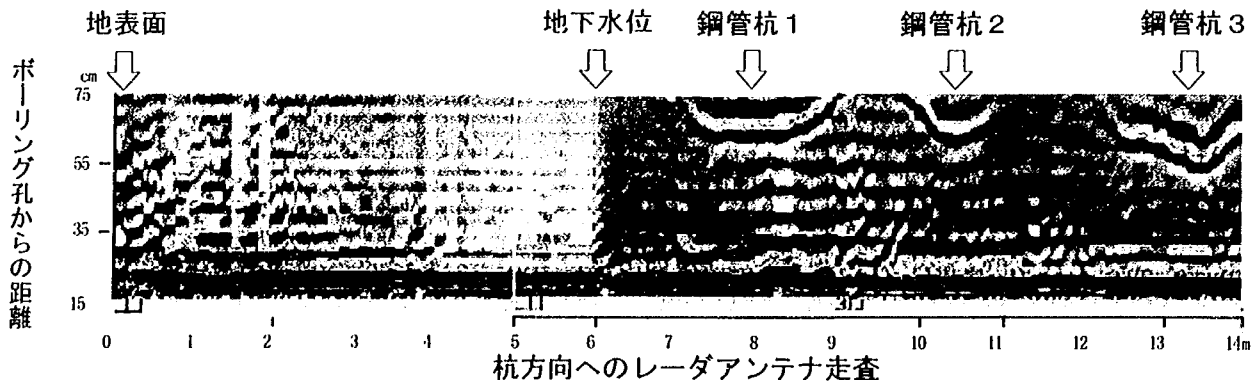
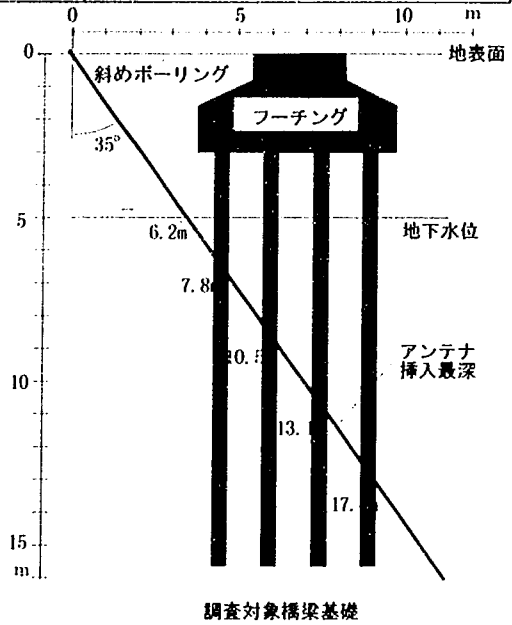
- ① ボアホールレーダ画像（白黒濃淡表示・レインボーカラー表示、走査距離・深度情報付記）
- ② レーダ画像から得られる調査結果概要図
- ③ 調査結果に対するコメント

次ページ以降に試験結果の整理例を示す。

① 鋼管基礎杭の例

ボアホールレーダ調査条件

① 調査日時： 平成9年6月22日	② 調査担当者： —	③ 調査目的： 杭の水平位置の把握
④ 調査地点名： 茨城県つくば市	⑤ 調査対象基礎名： 建設省土木研究所内橋梁基礎	⑥ 対象基礎の形式： 鋼管杭基礎
⑦ 調査ボーリング孔名： 斜めボーリング B-1	⑧ アンテナ走査長： 14.0m	⑨ ボーリング孔径： VP100
⑩ レーダ方式： パルス法	⑪ アンテナの送受信周波数： 600MHz	⑫ 地盤条件： 関東ローム・砂の互層
⑬ 地下水位： GL. -5.0m	⑭ 想定地盤誘電率： 54	



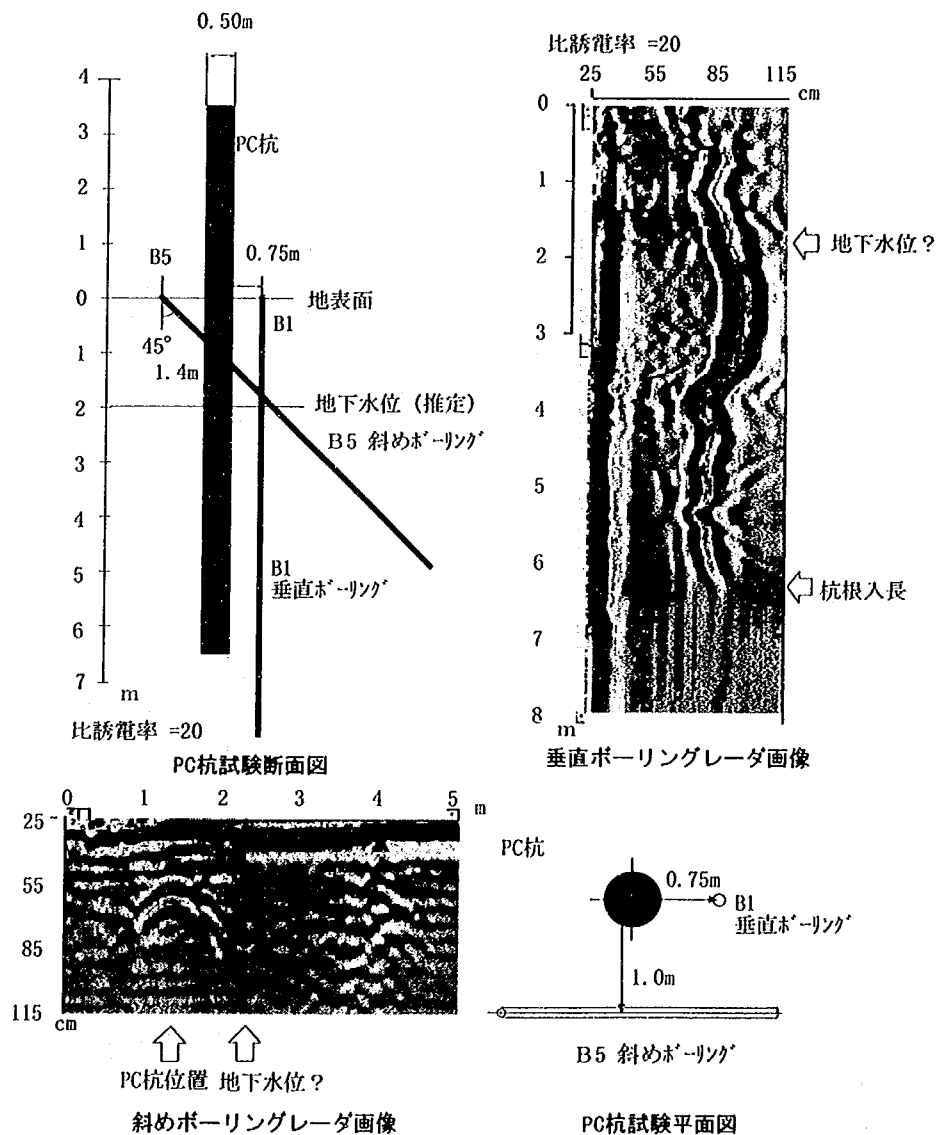
調査結果についてのコメント

ボアホールレーダ画面には、明瞭に鋼管杭からの反射が認められ、杭の間隔も図面から確認される間隔に正確に一致した。

② 既製コンクリート基礎杭の例

ボアホールレーダ調査条件

① 調査日時： 平成9年6月22日	② 調査担当者： --	③ 調査目的： 根入れ深さの把握
④ 調査地点名： 茨城県つくば市	⑤ 調査対象基礎名： 建設省土木研究所内橋梁基礎	⑥ 対象基礎の形式： PC杭基礎
⑦ ボーリング孔名： 垂直 B-1、斜め B-5	⑧ アンテナ走査長： 8.0m、5.0m	⑨ ボーリング孔径： VP65
⑩ レーダ方式： パルス法	⑪ アンテナの送受信周波数： 600MHz	⑫ 地盤条件： 関東ローム・砂の互層
⑬ 地下水位： GL. -2.0m	⑭ 想定地盤誘電率： 20	



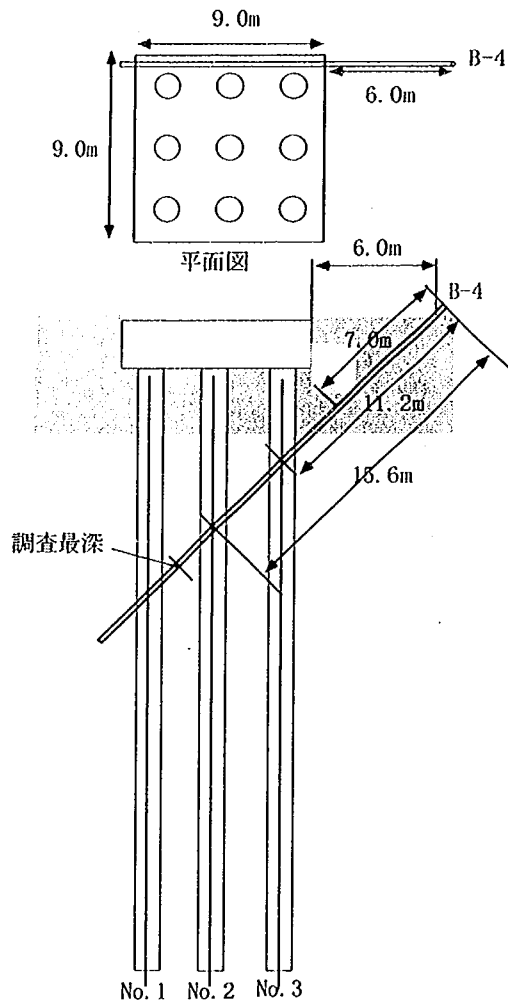
調査結果についてのコメント

垂直ボーリング、斜めボーリングの各レーダ画像において杭からの反射を明瞭に捉えており、PC杭についてもボアホールレーダ法により、杭位置および杭の根入れ長の調査が可能であることが確認できた。

③ 場所打ちコンクリート杭の例

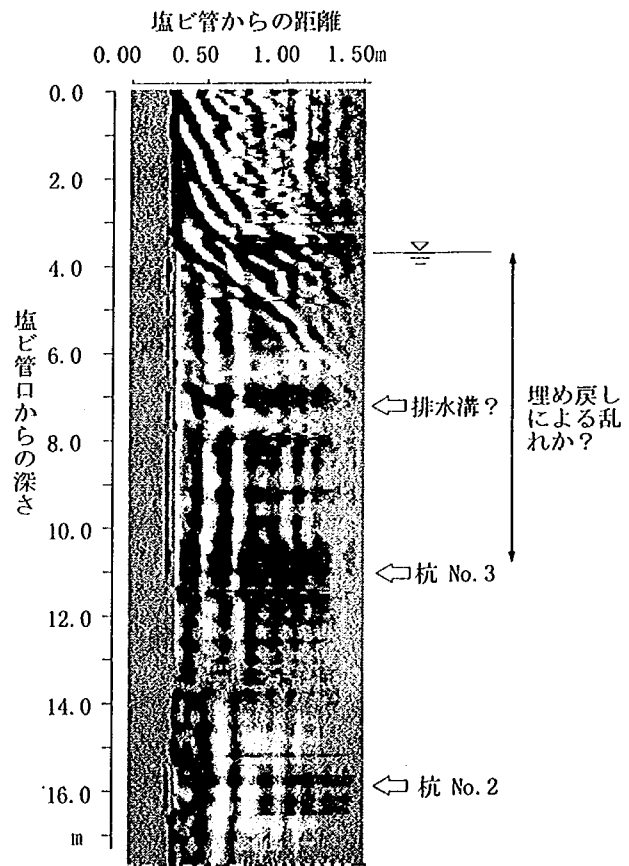
ボアホールレーダ調査条件

① 調査日時： 平成9年10月2日	② 調査担当者： —	③ 調査目的： 杭水平位置の把握
④ 調査地点名： 大阪府岸和田市	⑤ 調査対象基礎名： 阪神高速実験基礎	⑥ 対象基礎の形式： 場所打ちコンクリート杭基礎
⑦ 調査ボーリング孔名： 斜めB-5	⑧ アンテナ走査長： 17.0m	⑨ ボーリング孔径： VP65
⑩ レーダ方式： パルス法	⑪ アンテナの送受信周波数： 600MHz	⑫ 地盤条件： 盛土、砂質シルト層、砂層
⑬ 地下水位： GL. -2.0m	⑭ 想定地盤誘電率： 65	



段面図

斜めボーリング調査位置



斜めボーリング調査結果 (1:150)

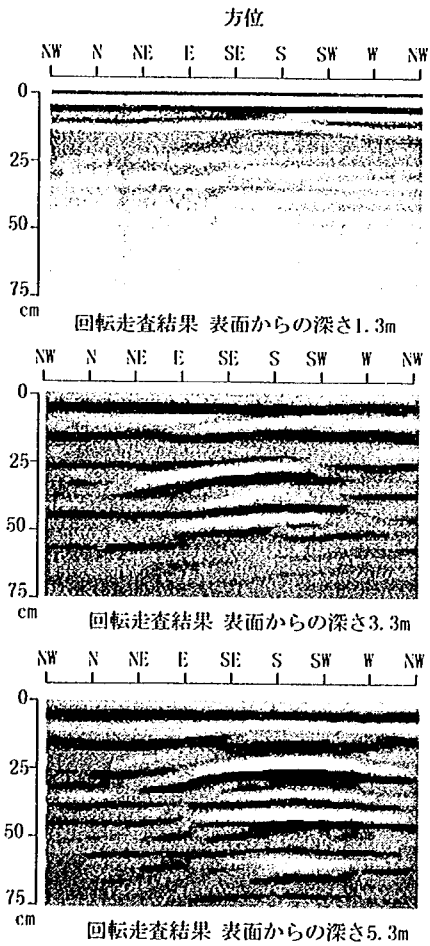
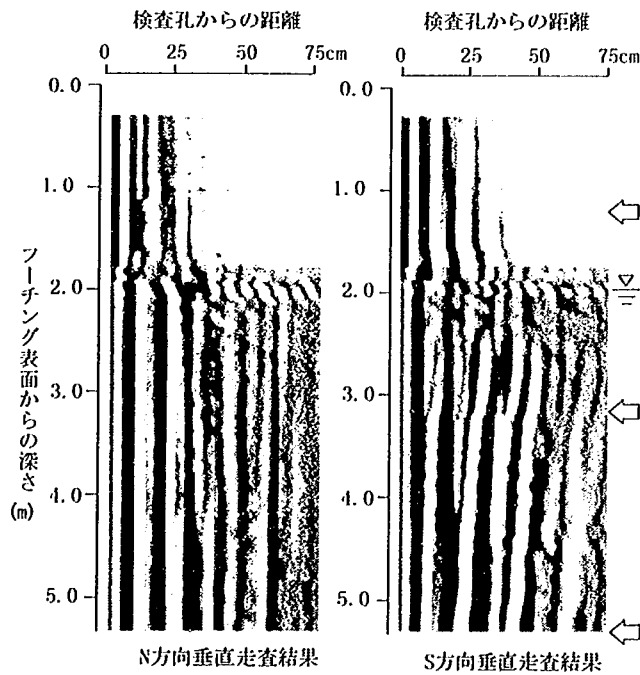
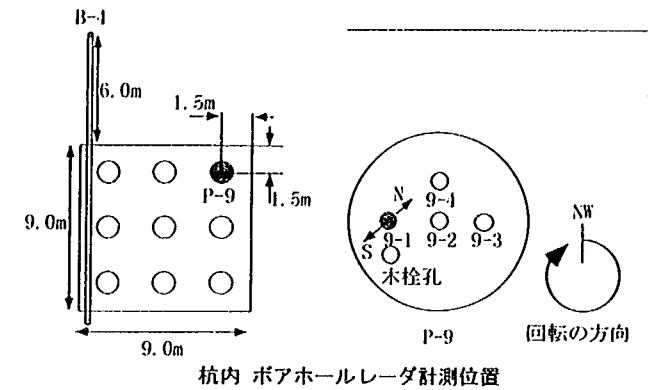
調査結果についてのコメント

レーダ画像に見られるように、地表面付近には強い電磁波の乱れが生じている。一方、地表面から離れると反射波は少なくなり、不明瞭ながら杭位置にあたる箇所誘電率が低くなる形での反射が認められる。

④ 場所打ちコンクリート杭体内の例

ボアホールレーダ調査条件

① 調査日時： 平成9年10月2日	② 調査担当者： --	③ 調査目的： 杭内の変形・損傷
④ 調査地点名： 大阪府岸和田市	⑤ 調査対象基礎名： 阪神高速実験基礎	⑥ 対象基礎の形式： 場所打ちコンクリート杭基礎
⑦ ボーリング孔名： 垂直P-9-1	⑧ アンテナ走査長： 5.5m	⑨ ボーリング孔径： φ100
⑩ レーダ方式： パルス法	⑪ アンテナの送受信周波数 600MHz	⑫ 地盤条件： 場所打ちコンクリート杭内
⑬ 地下水位： GL. -2.0m	⑭ 想定地盤誘電率： 15	



杭内 ボアホールレーダ計測結果 (検査孔9-1)

調査結果についてのコメント

レーダ画像からS方向において深くなるほど近づく反射面が認められる。これは、杭のN方向への傾動あるいは杭内に計測器類が斜めに埋設されていることによると判断される。

問合せ先（ボアホールレーダ法）

日本工営株式会社 中央研究所 開発研究部 藤原 鉄朗

TEL 0298-71-2030, FAX 0298-71-2022, E-mail a3876@n-koci.co.jp

基礎地盤コンサルタンツ(株) 地盤工学センター 機器開発室 室長 酒井 幸雄

TEL 03-3727-6158, FAX 03-3727-6247, E-mail sakai.yukio@kiso.co.jp

清水建設 (株) 土木本部 技術第一部 課長 野口 恒久

TEL03-5441-0624, FAX03-5441-0512, E-mail noguchi@civil.shimz.co.jp

磁気探査を用いた
橋梁基礎の形状調査法マニュアル(案)

平成11年3月

建設省土木研究所
梶谷エンジニア(株)

はじめに

平成7年の兵庫県南部地震以後、災害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。調査手法としては、掘削による目視、各種の非破壊調査が用いられた。しかし、掘削には時間と費用を要し、各種の非破壊調査法については適用性や調査結果の判定基準が確立されているとは言い難い。

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判定が行われているが、古い橋梁では図面がなく、基礎の形式や形状が不明な場合が多い。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判定をする場合に、基礎形式および形状を調査する必要がある。

このような現状に鑑み、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、

① 基礎の損傷調査手法および健全度判定手法の開発

② 基礎形状の調査手法の開発

を目的として、平成8年度から平成10年度まで共同研究を実施した。

研究の実施に当たっては、損傷調査手法として①IT(インティグリティ試験)、②AE(アコースティック・エミッション)、③ボアホールカメラ、衝撃振動試験の4手法を、形状調査手法として①IT、②ボアホールレーダ、③磁気探査の3手法を対象とし、室内模型試験、実大現場試験、数値解析などにより、各調査法の適用性を検討した。

本マニュアルは、このうち磁気探査を用いた形状調査に関する研究成果を基に、試験の適用条件、標準的な探査方法、測定結果の解析方法などについて取りまとめたものである。

磁気探査WGメンバー

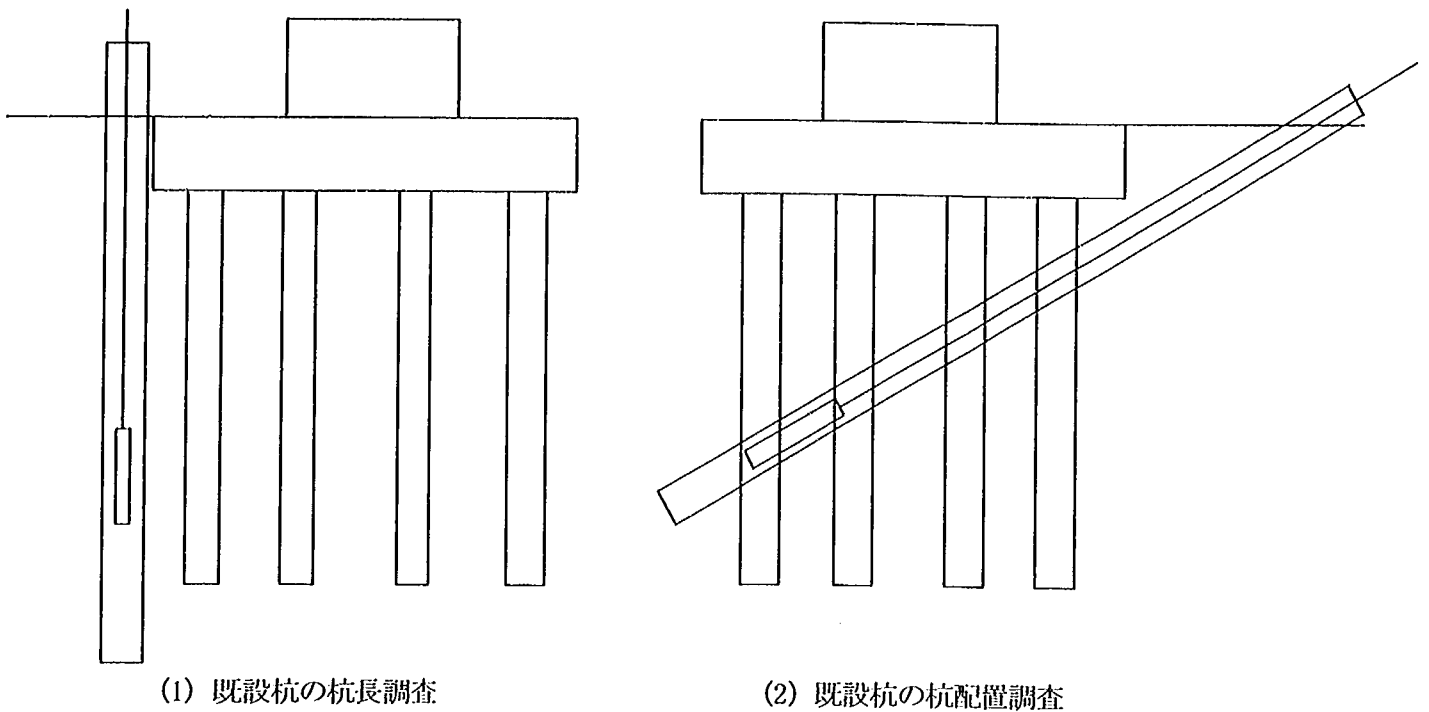
建設省土木研究所	構造部橋梁部	基礎研究室	研究員	石田 雅博
建設省土木研究所	構造部橋梁部	基礎研究室		秋田 直樹
梶谷エンジニア(株)	東京支店	調査部	部長	佐々木 勉
梶谷エンジニア(株)	東京支店	調査部	主任	亀和田 修一

目 次

	ページ
適用範囲	1
用語の説明	2
1. 探査概要	3
1-1 磁気探査の概要	3
1-2 磁気探査の原理	4
1-3 使用機器	5
2. 適用条件	7
(1) 現場条件	7
(2) 杭種条件	7
(3) 探査できる基礎諸元	7
3. 杭長探査	8
3-1 探査手順	8
3-2 事前調査	9
3-3 計画・準備	10
(1) 基礎形状の推定	10
(2) 観測孔位置の選定	11
(3) 関連機関との協議	12
3-4 現場作業	13
(1) 観測孔の設置	13
(2) 計測	14
3-5 杭長解析	15
4. 杭配置調査	17
4-1 探査手順	17
4-2 事前調査	18
4-3 計画・準備	19
(1) 基礎形状の推定	19
(2) 観測孔位置の選定	20
4-4 現場作業	21
(1) 観測孔の設置	21
(2) 計測	22
4-5 杭配置解析	23
5. 探査結果の整理（フォーマット）	25
6. 適用事例	27
7. 参考文献	46
問合せ先	46

適用範囲

磁気探査は磁性物体の位置の特定に用いられており、古くから不発弾等の埋設物の調査に用いられていた。従って、鋼材を含む杭に対しては、磁気探査により下図に示す2つの目的で用いることができる。



シールド工事等で管を既存橋梁を通過させ布設する場合、既存橋梁の基礎杭の下もしくは杭間に布設することになる。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、杭長および杭配置などが不明の場合がある。このようなときに杭長、杭配置を確認することを目的に実施する。

また、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。この場合にも、杭の杭長および杭配列を確認しておくことが必要となる。

本マニュアルは、杭長（杭先端深度）、杭配置（杭間隔）を調査することを目的とした磁気探査を対象に、その標準的な探査方法について記述するものである。

用語の説明

本マニュアル特有な用語の説明を以下に示す。

・磁気異常

磁気異常とは地球磁場の局所的な乱れをさす。

この局所的な磁場の乱れは、鉄類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鉄類が帯磁しているため、これらの近くでは、地球磁場が局所的に乱されることによる。

・地盤ノイズ

鉄類の帯磁物の磁気量は地球磁場に比べ非常に小さい。このような大きな磁気の内から小さい磁場を測定しているため、地盤に含まれる残鉄類の影響による地球磁場の乱れや、磁気検出器の移動により発生する磁気を探査対象物による地球磁場の乱れと区分して地盤ノイズと呼ぶ。

・S/N比（シグナル／ノイズ比）

シグナルとは探査対象物により生じた地球磁場の乱れを、ノイズとは地盤ノイズを指す。

磁気探査により杭形状を調査するに際しては、ノイズを消去することが課題であり、ノイズの影響を少なくすることをS/N比の向上と呼ぶ。

・地球磁場

地球は一種の磁石で、その両端は地理的両極の近くにある。これによる地球上の磁界を地球磁場（地磁気）と呼ぶ。この地球磁場には伏角、偏角、水平分力があり、これは地球磁場の3要素と呼ばれている。

・双極子

1個の磁石には+と-の対をなす磁極を持つており、このような1組の磁極を双極子と呼ぶ。なお、単独の磁極（自由磁荷）は存在しない。

・モデル波形

磁気異常位置（杭端、杭位置）を特定する際に用いる波形（実測波形とのあてはめ）。

杭の軸に沿って双極子が線上に分布するとした場合における計算磁位曲線。

・スタック

同一条件による測定を複数回実施し、この測定データを重合方式により、地盤ノイズを削減する方法。

1. 探査概要

1-1 磁気探査の概要

鉄類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-1.1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端付近は、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。

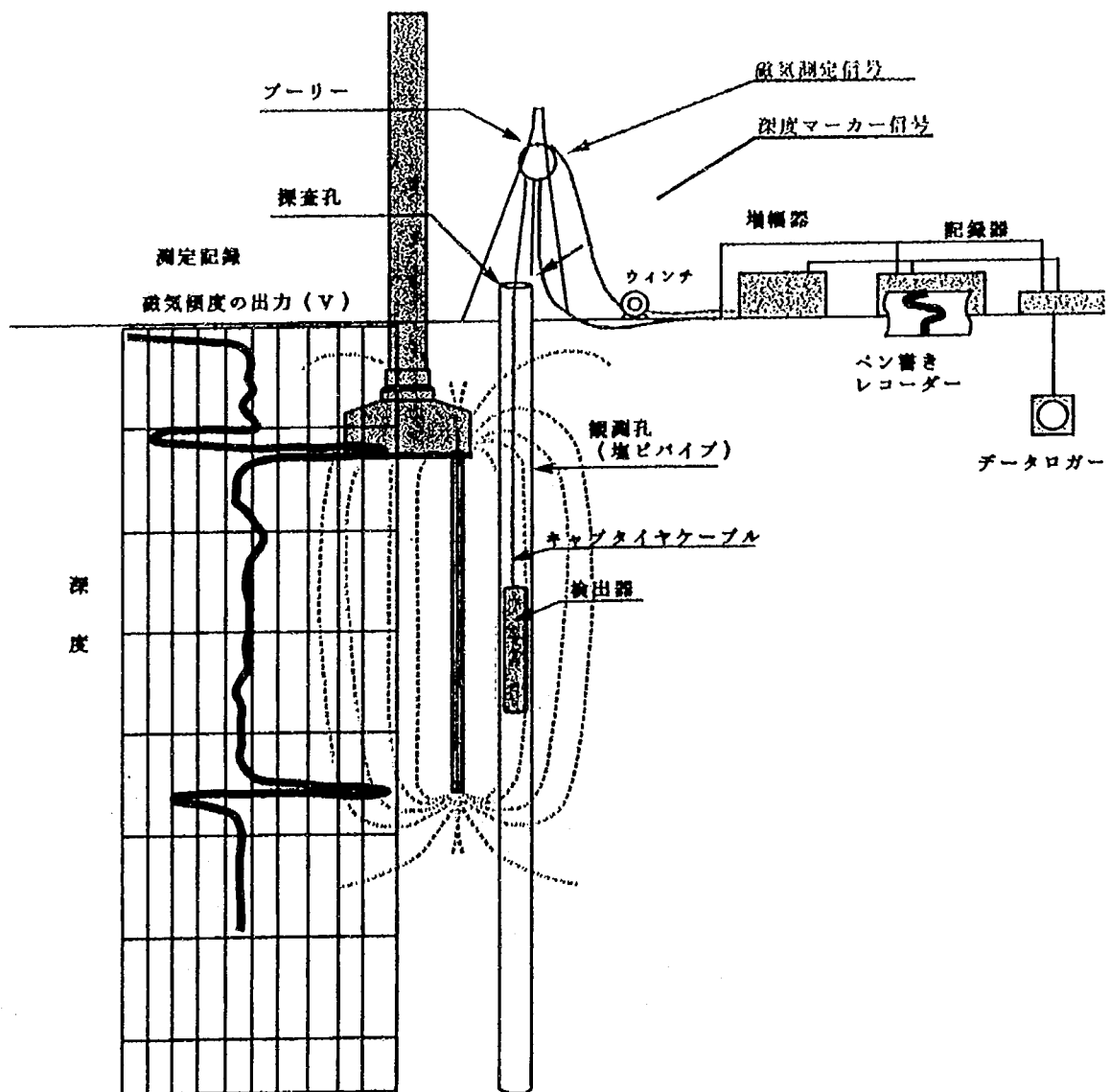


図-1.1 磁気探査概念図

1-2 磁気探査の原理

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。磁気探査は、帯磁物の磁気を測定することにより強磁性体の位置を特定するものである。

ただし、地球は地理的両極付近を磁極とした一種の磁石であるので、地球上いたる所で磁場が存在する。帯磁物の磁気量は、地球磁場と比べ非常に小さい。

このように差の大きな磁気の内から小さな磁気を測定することは、非常に困難である。このために特別な検出器が必要となる。現在、磁気検出には (a) フラックスメータ方式 (磁気傾度計)、(b) フラックスゲート方式、(c) 光磁気共鳴磁力計が用いられている。

このうち、杭の形状調査に対する磁気探査には、磁気量の変化 (磁気傾度) が求められるフラックスメータ方式を用いている。

なお、各方式の概要は下記のとおりである。

a) フラックスメータ方式 (磁気傾度計)

磁界中でコイルを移動させ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。

上記磁気検出器の性能・機能等を比較すると下表のとおりである。

表-1.1 各種磁力計比較表

項目	フラックスメータ磁力計	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

1-3 使用機器

使用する機器は下記のとおりであり、測定器の構成を図-1.2に示す。

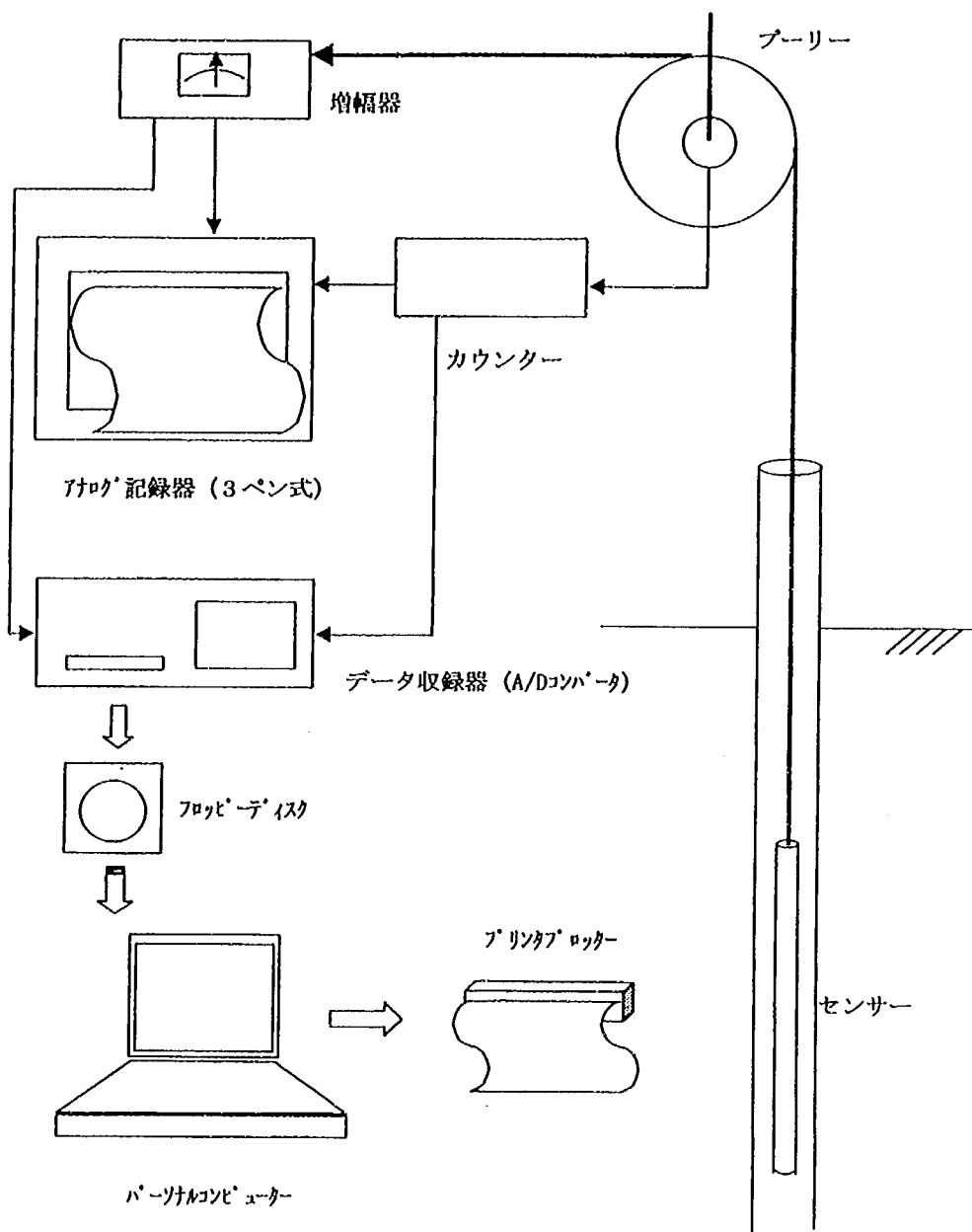
使用機器	両コイル型磁気傾度計
	検出器 1台
	増幅器 1台
	記録器 1台
	データ収録器 1台
	ウインチ 1台
	発電機 1台
	プーリー 1台
	カウンター 1台

「両コイル型磁気傾度計」測定器は、磁場の空間的変化（磁気傾度）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。

参考として代表的な磁気傾度計、増幅器の仕様を表-1.2に示す。

表-1.2 両コイル型磁気傾度計の仕様（例）

仕	様
センサー (DTM-1型)	増幅制御器 (MAG-91013型)
方式: 両コイル型	方式: 平衡バランス型
コア: パーマロイ45	利得: 60db
巻数: 60,000	周波数: DC~2Hz
耐水圧: 水深60m	電源: DC12V (単2乾電池8個)
寸法: $\phi 35 \times 1,400$ (mm)	寸法: $235 \times 255 \times 103$ (mm)
重量: 10kg (ケーブル別)	重量: 2.5kg (電池を含む)



図一.2 測定器の構成

2. 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φ50mm以上（磁気傾度計を使用）が必要

観測孔は磁気反応が無い位置まで必要（杭先端+5mが目安）

観測孔の位置は下表のとおり

表-2.1 観測孔設置位置

探査項目	杭種	観測孔離れ
杭長探査	鋼管杭	1.5m以内
	RC杭、PC杭 PHC杭 場所打ち杭	1.0m以内
	杭配置調査	杭種とわず

- ② 強磁性体が無いこと。

杭以外の強磁性体の磁力の影響により解析不能となる場合がある。

例：高圧送電線直下

杭に近接して管等が埋設されている場合

(2) 杭種条件

鋼材を含む杭に対しては適用可能である。

(3) 探査できる基礎諸元

- ・杭長
- ・杭配置

3. 杭長探査

3-1 探査手順

杭長探査は下記の手順で実施する。

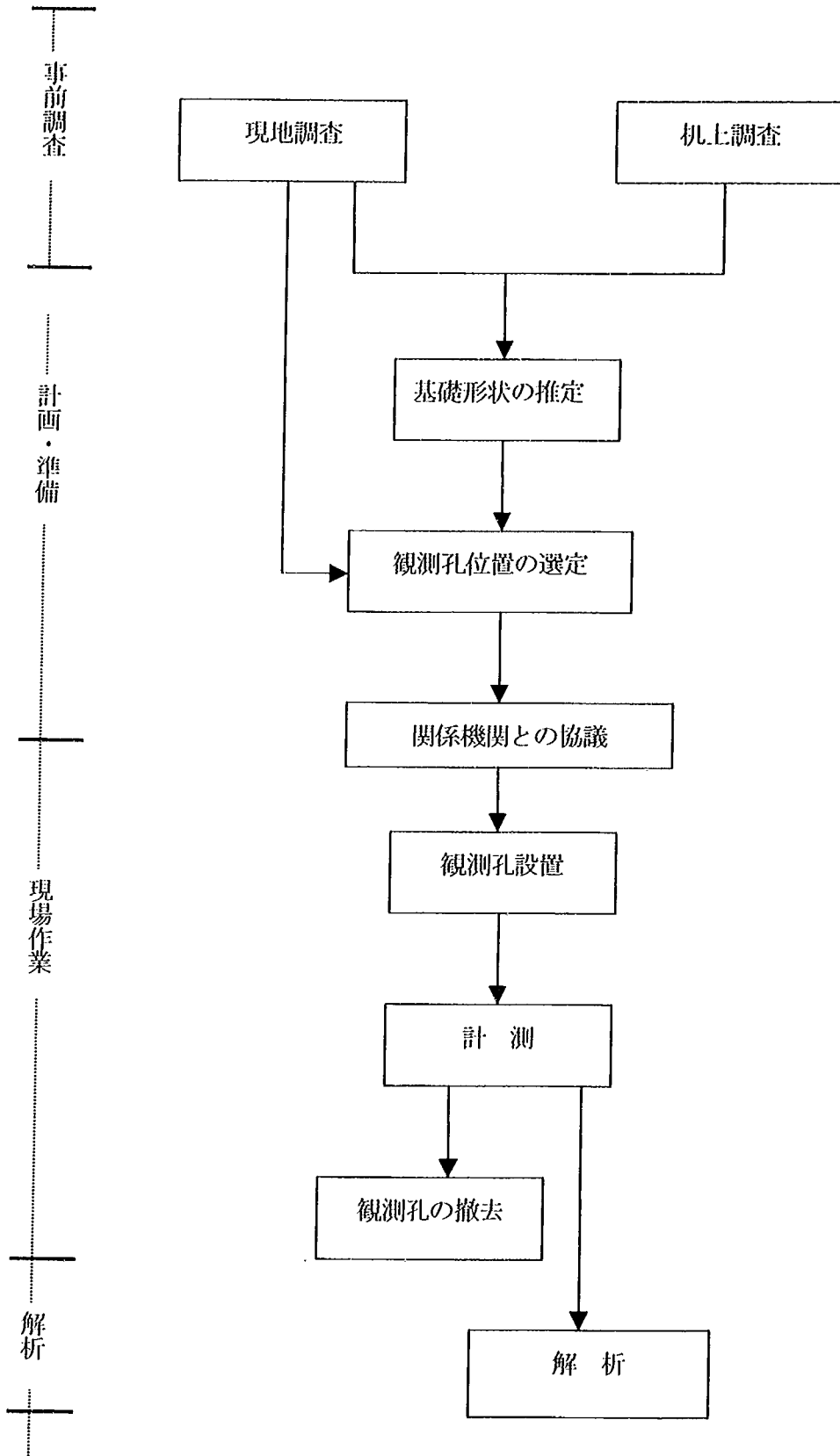


図-3.1 杭長探査の流れ

3-2 事前調査

探査実施に先立ち、現況調査および机上調査を実施しなければならない。

杭長探査は杭先端に発生する磁気異常を計測するものであり、測定される磁気傾度は、杭との離れにより相違するものである。

従って、仮想杭を設定しなければ、観測孔の位置、観測孔の長さを決定することは出来ない。

また、観測孔の設置の特定に際しては、現地状況を確認し、ボーリングが可能な箇所を特定することも必要不可欠である。

現況調査・机上調査で実施する項目は下記のとおりとする。

・ 現地調査

① 橋台および橋脚上部構造物等の計測…幅員、支間、上部構造の形式

簡易的なフーチング形状調査（探針調査による寸法計測）等

② 施工時期等の確認…橋歴板等の確認

③ 現況状況の確認…観測孔設置候補地、交通状況の確認

・ 机上調査

① 地盤情報（地盤構成）の収集…周辺地域の既存ボーリング結果、文献等の収集

② 橋梁関係の竣工図面等の収集…橋梁台帳、竣工図面等の収集

③ 聞き込み調査…施工業者（橋歴板に記載されている場合）等

④ 埋設管位置

3-3 計画・準備

(1) 基礎形状の推定

机上調査・現地調査結果から基礎形状を想定する。

基礎形状（杭長）の推定は、橋梁関係の竣工図面等（橋梁台帳、竣工図面等）により行う。橋梁関係の竣工図面等がない場合は下記により基礎形状を推定する。

・概略基礎形状の想定（施工記録が未確認の場合）

- ① 地盤情報から支持地盤の想定・杭長の想定
- ② 上部構造物の形状、施工時期から基礎形状の想定

(2) 観測孔位置の選定

磁気探査の精度は観測孔位置により決定するものであるため、観測孔位置の選定には十分な検討が必要である。

探査精度を±10cm程度にするには表-3.1に示す観測孔離れ以内に観測孔を設置する必要がある。

表-3.1 観測孔設置位置

探査項目	杭種	観測孔離れ
杭長探査	鋼管杭	1.5m以内
	RC杭、PC杭 PHC杭 場所打ち杭	1.0m以内

なお、観測孔の位置選定に際しては、下記の事項に考慮する必要がある。

① 強磁性体のない箇所

杭以外の強磁性体の磁場の影響により解析不能となる場合があるため、観測孔は杭以外の強磁性体のない位置に設置することが必要である。

杭以外の強磁性体としては、高圧送電線、杭に近接した埋設管等が挙げられる。

② 周辺への影響

橋梁における観測孔は、道路部または河川部に観測孔を設置することになる。従って、観測孔（設置作業）は交通障害等を考慮し設定することが必要である。

③ 埋設管位置

道路部に観測孔を設置する場合には、既設埋設管の位置を調べ、埋設管に影響しない箇所に設定する必要がある。

(3) 関連機関との協議

探査実施に際しては、探査事前に関連機関と協議しなければならない。

探査事前には下記の機関と協議しなければならない。

① 構造物管理者… 調査方法、探査精度、観測孔設置位置の確認

② 観測孔設置箇所の管理者

・ 民地…地権者：観測孔設置の承諾

・ 道路…道路管理者：掘削許可の申請

警察署：道路使用許可の申請

・ 河川等…河川管理者：河川占用の申請

上記に対しては、各機関の申請様式に従うものとする。

③ 埋設管管理者

埋設管近傍に観測孔を設置する場合は、埋設管の確認方法、埋設管の保護方法等を埋設管管理者と協議しなければならない。

3-4 現場作業

(1) 観測孔の設置

観測孔の設置は、機械ボーリングで行うものとし、ボーリング時には、地盤状況を併せて把握するものとする。

橋梁の杭長は地盤構成により決定されるものであるため、対象橋梁の地盤構成を把握しておく必要がある。従って、地盤構成を把握するために、観測孔設置ボーリングでは、標準貫入試験を併せて実施するものとする。

観測孔の設置は下記手順で実施する。

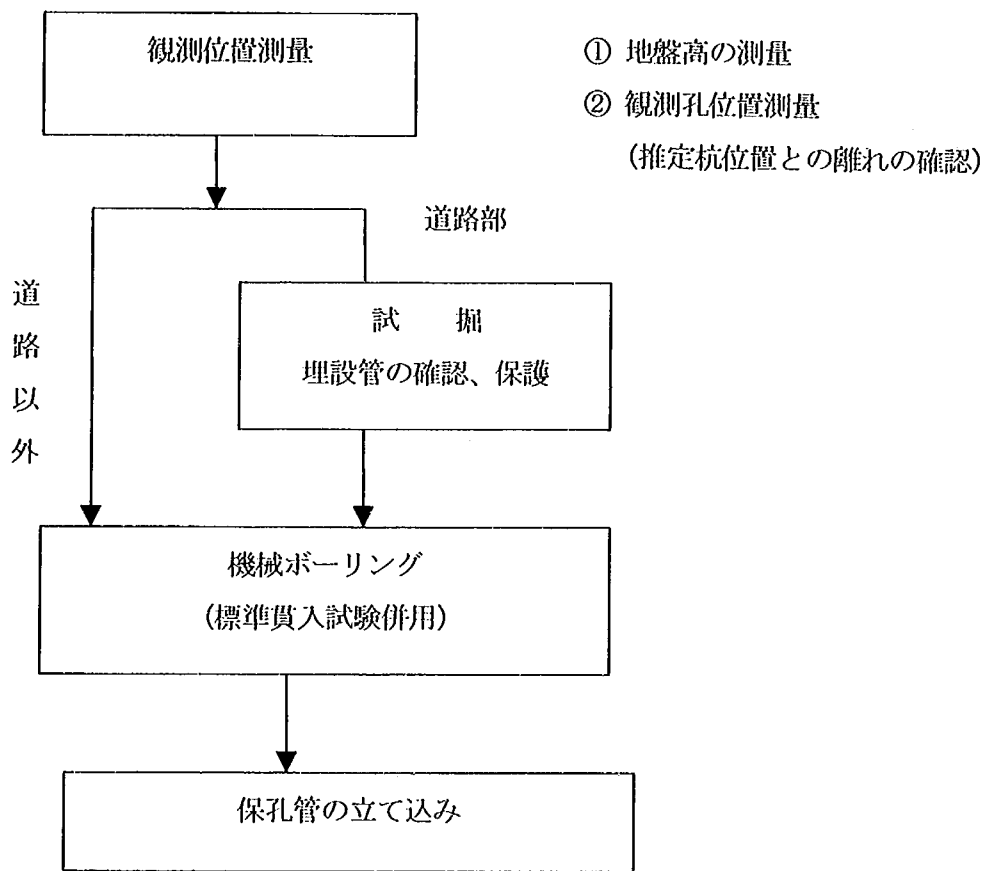


図-3.2 観測設置の手順

観測孔の仕様は下記のとおりとする。

観測孔の仕様：保孔管の材質は非磁性体とする（塩ビ管、ステンレス管等）

内径はφ50mm以上（磁気傾度計を使用）とする

観測孔長は杭端+5mとする

(2) 計測

計測に際しては、杭先端に対する磁気波形を求めるためには、深度誤差、地盤ノイズを消去する方法を用いる。

① 深度誤差

センサー深度の測定誤差は杭長精度に直結するものであるため、測定誤差は事前に防止しなくてはならない。測定誤差としては人為的な読みとり誤差が主体となるため、ウインチにエンコーダ等を取り付けて深度を自動的に計測することにより人的な読み取り誤差を無くすることが必要である。

また、エンコーダ等は測定事前にキャリブレーションを実施することが必要である。

② 測定時の地盤ノイズ

杭による磁場は地球磁場に比べて小さく局所的である。従って、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フラックスメータ方式では、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、杭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払い、コイルの動揺が最少になるように移動することが必要であり、ウインチを用いて一定速度・力で移動させることが望ましい。

また、地盤ノイズを防ぐことは不可能であるため、複数回（3回程度）の測定を実施し、測定記録を重ね合わせ地盤ノイズを減少させることも不可欠である。測定記録はA/D変換を実施し、データをスタック処理するものとする。

3-5 杭長解析

杭長は、双極子が杭に沿って線状に分布するとした場合のモデル波形と実測波形のあてはめにより求める。

実橋梁の杭は複数の杭からなり、複数の杭により形成された磁場を計測しているが、現時点では単杭により形成された磁場として解析する。

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、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、

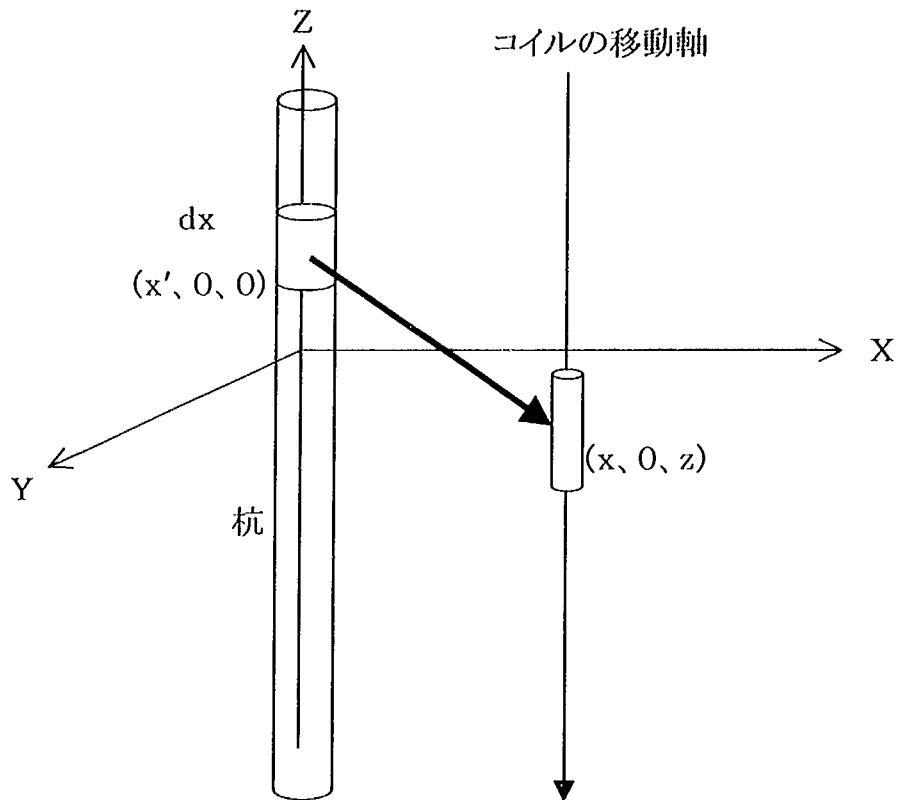


図-3.3 解析モデル図

$$\begin{aligned}
 V &= \int_0^{\infty} M \frac{\alpha(x-x') + \beta y + \gamma z}{((x-x')^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dx' \\
 &= \int_0^{\infty} M \frac{\alpha\tau + \gamma z}{(\tau^2 + z^2)^{3/2}} dx' \quad \text{式(3.1)}
 \end{aligned}$$

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、

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

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、

$$\begin{aligned} E &\propto \frac{dH_x}{dt} = \frac{\partial H_x}{\partial x} \frac{dx}{dt} \\ &= M \frac{-2\alpha x^2 + \alpha z^2 - 3\gamma z x}{(x^2 + z^2)^{5/2}} v \end{aligned} \quad \text{式 (3. 3)}$$

となる。ここに、 v はコイルの移動速度である。

なお 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るものとする。

4. 杭配置探査

4-1 探査手順

杭配置探査は下記の手順で実施する。

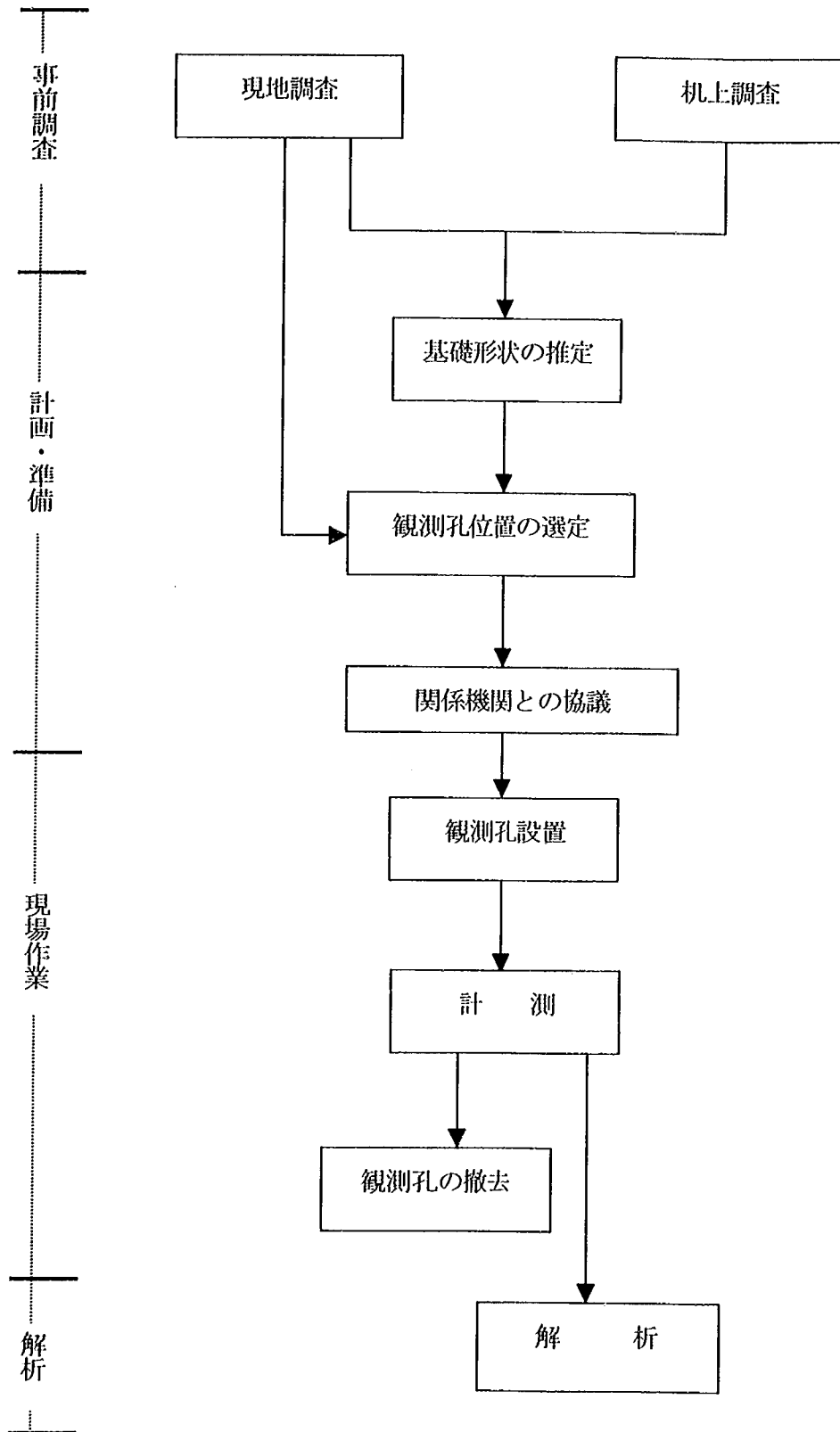


図-4.1 杭配置探査の流れ

4-2 事前調査

探査実施に先立ち、現況調査および机上調査を実施しなければならない。

杭配置探査は杭横断に発生する磁気異常を計測するものであり、測定される磁気傾度は、杭との離れ、横断位置により相違するものである。

従って、仮想杭を設定しなければ、観測孔の位置を決定することは出来ない。

また、観測孔の設置の特定に際しては、現地状況を確認し、ボーリングが可能な箇所を特定することも必要不可欠である。

現況調査・机上調査で実施する項目は杭長調査と同様とする。

・ 現地調査

① 橋台および橋脚上部構造物等の計測・幅員、支間、上部構造の形式

簡易的なフーチング形状調査（探針調査による寸法計測）等

② 施工時期等の確認・橋歴板等の確認

③ 現況状況の確認・観測孔設置候補地、交通状況の確認

・ 机上調査

① 地盤情報（地盤構成）の収集・周辺地域の既存ボーリング結果、文献等の収集

② 橋梁関係の竣工図面等の収集・橋梁台帳、竣工図面等の収集

③ 聞き込み調査・施工業者（橋歴板に記載されている場合）等

④ 埋設管位置

4-3 計画・準備

(1) 基礎形状の推定

机上調査・現地調査結果から基礎形状を想定する。

基礎形状（杭配置）の推定は、橋梁関係の竣工図面等（橋梁台帳、竣工図面等）により行う。橋梁関係の竣工図面等がない場合は下記により基礎形状を推定する。

・概略基礎形状の想定（施工記録が未確認の場合）

- ① 地盤情報から支持地盤の想定→杭長の想定→杭横断位置の選定
- ② 上部構造物の形状、施工時期から杭間隔の推定。

(2) 観測孔位置の選定

磁気探査の精度は観測孔により決定するものであるため、観測孔位置の選定には十分な検討が必要である。

杭横断（杭中央部）の磁気量は、杭先端に比べ小さいので、観測孔離れは 0.5m以内に観測孔を設置する必要がある。

杭の磁気量は杭先端と杭中央部で相違するので、杭配置探査においては、杭横断位置を一定にすることが必要である。→杭横断位置は杭中央部になるような掘削角度を設定する必要がある。

なお、観測孔の位置選定に際しては、杭長調査の観測孔は平面的には点であるのに対し、杭配置観測孔は平面的には線になるので、特に、下記の事項に考慮する必要がある。

① 強磁性体のない箇所

杭以外の強磁性体の磁場の影響により解析不能となる場合があるので、観測孔は杭以外の強磁性体のない位置に設置することが必要である。

杭以外の強磁性体としては、高圧送電線、杭に近接した埋設管等が挙げられる。

② 周辺への影響

橋梁における観測孔は、道路部または河川部に観測孔を設置することになる。従って、観測孔（設置作業）は交通障害等を考慮し設定することが必要である。

③ 埋設管位置

道路部に観測孔を設置する場合には、既設埋設管の位置を調べ、埋設管の影響しない箇所に設定する必要がある。

なお、関連機関との協議は杭長探査と同様とする。

4-4 現場作業

(1) 観測孔の設置

観測孔の設置は、機械ボーリングで行うものとする。

観測孔の設置は下記手順で実施する。

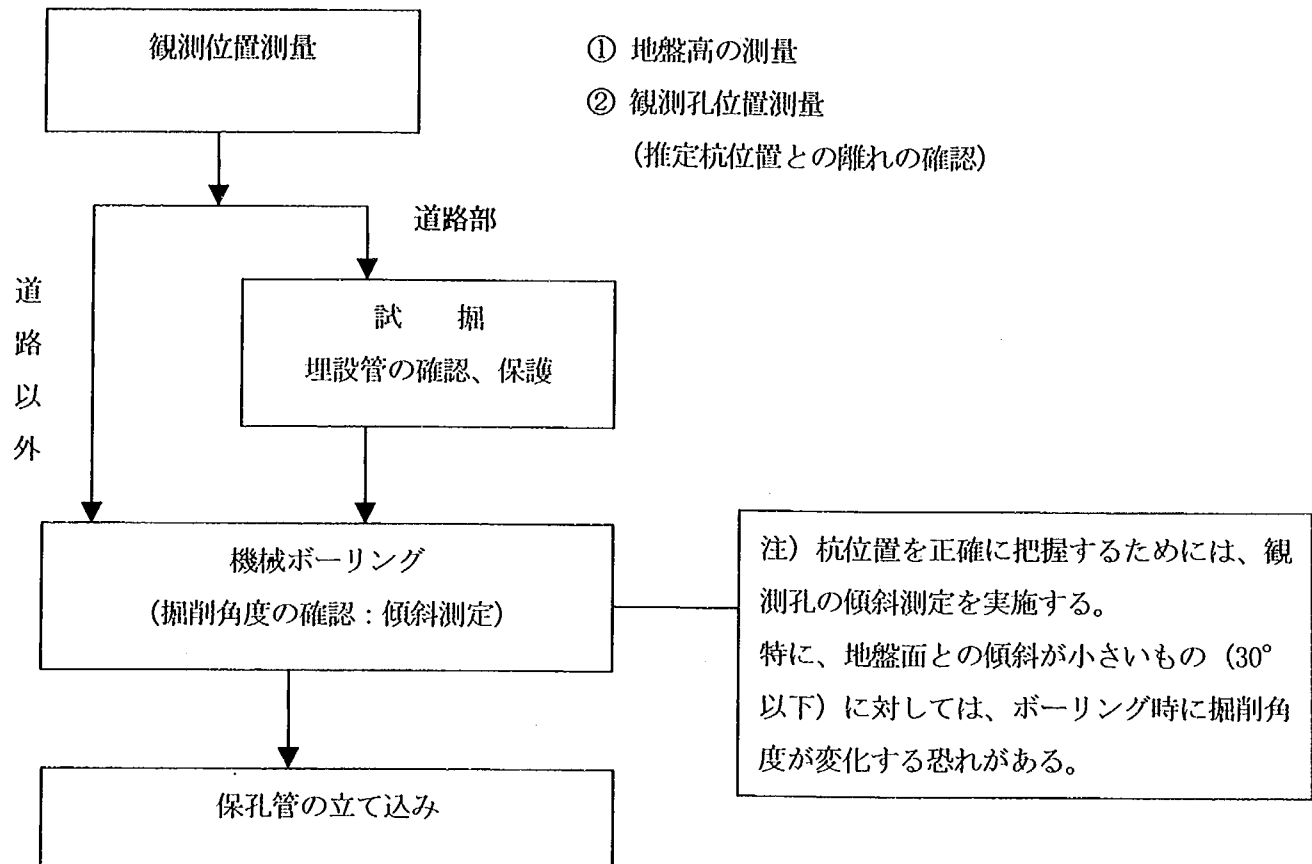


図-4.2 観測設置の手順

観測孔の仕様は下記のとおりとする。

観測孔の仕様：保孔管の材質は非磁性体とする (塩ビ管、ステンレス管等)

内径はφ50mm以上 (磁気傾度計を使用) とする

観測孔の長さは、杭横断位置+5mを原則とする。

(2) 計測

計測に際しては、杭先端に対する磁気波形を求めるためには、深度誤差、地盤ノイズを消去する方法を用いる。

① 深度誤差

センサー深度の測定誤差は杭長精度に直結するものであるため、測定誤差は防止しなくてはならない。測定誤差としては人為的な読みとり誤差が主体となるため、ウインチにエンコーダ等を取り付けて深度を自動的に計測することにより、人為的な読み取り誤差を無くす。

また、エンコーダ等は測定事前にキャリブレーションを実施することが必要である。

② 測定時の地盤ノイズ

杭による磁場は地球磁場に比べて小さく局所的である。従って、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フラックスメータ方式では、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、杭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ことが必要であり、ウインチを用いて一定速度・力で移動させることが望ましい。

特に、観測孔角度が小さいものは、一定速度でセンサーを移動（下降）させることは難しいので、ウインチを用いて一定速度・力で移動（上昇）させることが必要である。

また、地盤ノイズを防ぐことは不可能であるため、複数回（3回程度）の測定を実施し、測定記録を重ね合わせ地盤ノイズを減少させることも不可欠である。測定記録はA/D変換を実施し、データをスタック処理するものとする。

4-5 杭配置解析

杭配置は、双極子が線状に分布するものを横断した場合モデル波形と実測波形のあてはめにより杭の位置を特定する。

杭のように長い物の帯磁分布は、杭の軸に沿って双極子が線状に分布するとして近似する。

いま、 $x=0$ 、 $-\infty < y < \infty$ 、 $z=0$ の線上に双極子（単位ベクトル α 、 β 、 γ とする）が分布するとき、 $x=0$ 、 $y=0$ 、 $z=\text{一定}$ （図では Z_0 ）における磁位 V は、

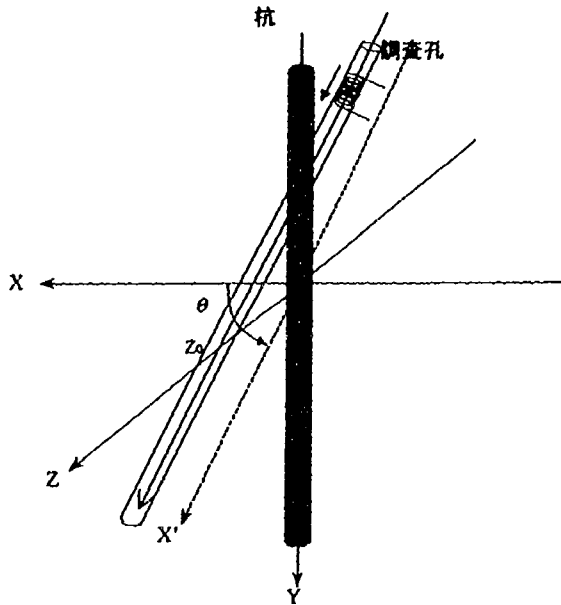


図-4.3 解析モデル図

$$\begin{aligned}
 V &= \int_{-\infty}^{\infty} M \frac{\alpha x + \beta y + \gamma z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \cdot dy \\
 &= 2M \frac{\alpha x + \gamma z}{x^2 + z^2} \qquad \text{式(4.1)}
 \end{aligned}$$

ここで、センサー（コイル）の移動軸が杭に対して直行ではなく、角度 θ で斜めに交わっている場合、 $x = x' \cos \theta$ となるので、 x' 方向の磁場の強さ $H_{x'}$ は、

$$\begin{aligned}
 H_{x'} &= \frac{\partial V}{\partial x'} \\
 &= 2M \frac{\cos \theta (\alpha x'^2 \cos^2 \theta + 2 \gamma x' z \cos \theta - \alpha z^2)}{(x'^2 \cos^2 \theta + z^2)^2} \qquad \text{式(4.2)}
 \end{aligned}$$

である。

よって、この磁場内をコイルが移動するときにコイルに生じる起電圧Eは、

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{d H x'}{d t} \\
 &= \frac{\partial H x'}{\partial x'} \frac{d x'}{d t} \\
 &= -4 M \frac{\cos^3 \theta (\alpha x'^3 \cos^2 \theta + 3 \gamma x'^2 z \cos^2 \theta - 3 \alpha x' z^2 \cos \theta - \gamma z^3)}{(x'^2 \cos^2 \theta + z^2)^3} v
 \end{aligned}$$

式 (4. 3)

ここで、vはコイルの移動速度である。

5. 探査結果の整理（フォーマット）

試験概要	試験目的			
	試験場所			
	試験日時			
杭条件	杭種			
	杭径			
	工法			
	施工時期			
	基礎形状	上部		
		下部		
	杭長			
杭間隔				
地盤条件				
観測孔	材質			
	天端地盤高			
	観測孔の角度			
	観測孔長さ			
	杭との離れ			
	探査杭と観測孔の位置 関係を図示		(平面)	(横断)
測定機器	磁気検出器	検出方式		
		機器名		
	深度データ採取方法			
	増幅器	機器名		
	記録器	方式		

計測	磁気検出器移動方式	
	計測回数	
	地盤ノイズ除去方式	
探査結果	実測波形	(地盤ノイズ除去後の波形)
		(測定結果：磁気異常点)
備考		

6. 適用事例

事例1. 杭長探査(鋼管杭)

(1) 事前調査

① 調査項目 現地調査…橋脚上部構造物の計測
現況確認(視測孔設置位置の選定)

机上調査…竣工図面確認

② 事前調査結果

表-6.1 調査対象杭の諸元

杭種	: 鋼管杭
杭径	: 60 c m
杭長	: 13m (基礎底面 Gl.-2~3m)
杭間隔	: 1.5m
地盤状況	
4.0	粘性土 (N=0~5)
7.0	砂質土 (N=5~30)
9.0	粘性土 (N=5~10)
11.0	砂質土 (N=10~30)
12.5	粘性土 (N=10)
14.0	砂質土 (N=10~20)
	砂質土 (N>30)

(2) 観測孔設置

表-6.2 観測孔仕様

孔番	杭との離れ (m)	観測孔 角度	保護材	観測孔長 (m)
B 2	1.00	垂直	VP65	20.0
B 3	2.00	垂直	VP65	20.0
B 4	4.00	垂直	VP65	20.0

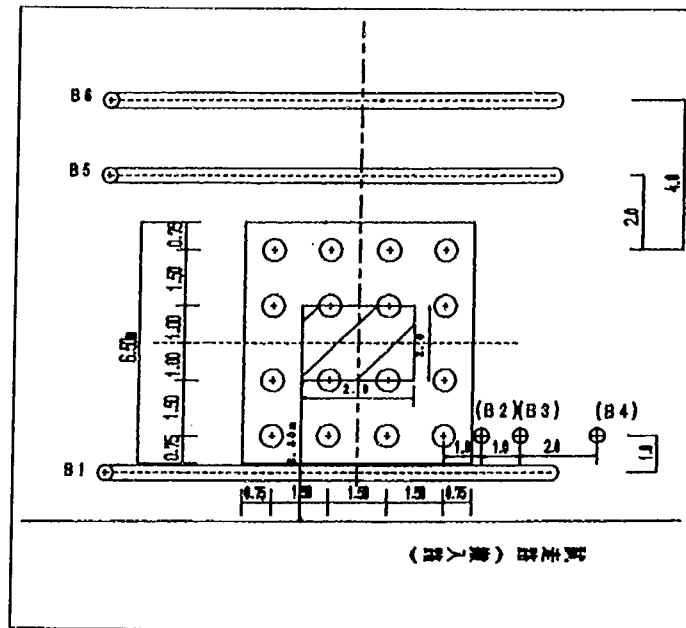


図-6.1 橋梁基礎平面図 (単位 : m)

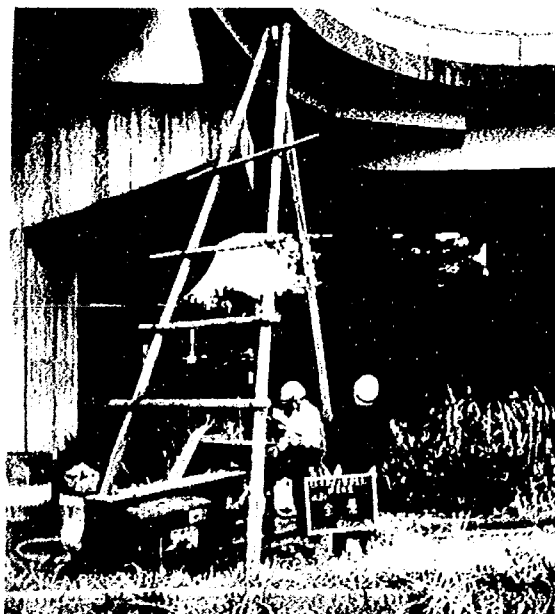


写真-6.1 観測孔設置状況

(3) 計測

① 使用機器… 両コイル型磁気傾度計

検出器 (DTM-1 型)	1 台
増幅器 (MAG-91013 型)	1 台
記録器	1 台
データ収録器	1 台
検出器の移動	
ウィンチ	1 台
発電機	1 台
深度データの採取	
プーリー	1 台
カウンター	1 台

② 地盤ノイズの消去… スタック (計測3回)

③ 計測結果 (実測波形)

① GL-2.0m付近 (杭頭と考えられる反応)

杭頭部と考えられる磁気反応がGL-2.0m付近に認められた。

なお、杭に近接する観測孔 (B2: 離れ 1.0m) に対しては2つの磁極が読取れる。これは、観測孔が近いため探査対象杭の杭頭の磁極のほか、他の杭の杭頭磁極に反応したか、もしくはフーチング基礎鉄筋の磁極に影響されたものと考えられる。

② GL-15.0m付近 (杭先端と考えられる反応)

B2~B4 すべてにおいて、GL-15.0m付近に杭先端と思われる磁気波形が読取れる。離れ4mの計測 (B4) においても、最大起電力は 1.0V であり、測定離れが 2.0m 以内の測定結果に比べ地盤ノイズは多いが、明確な杭先端に対する磁気反応が読取れる。

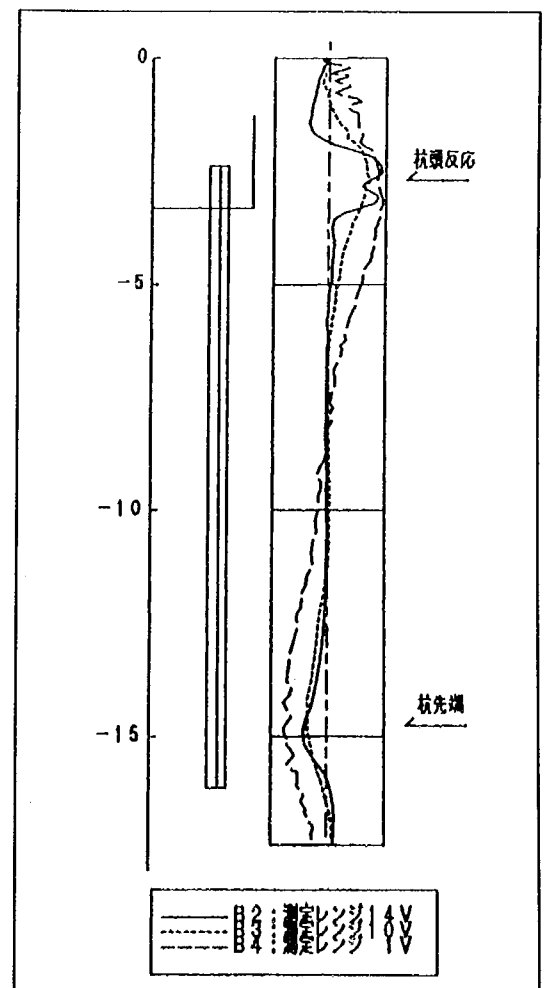


図-6.2 測定結果

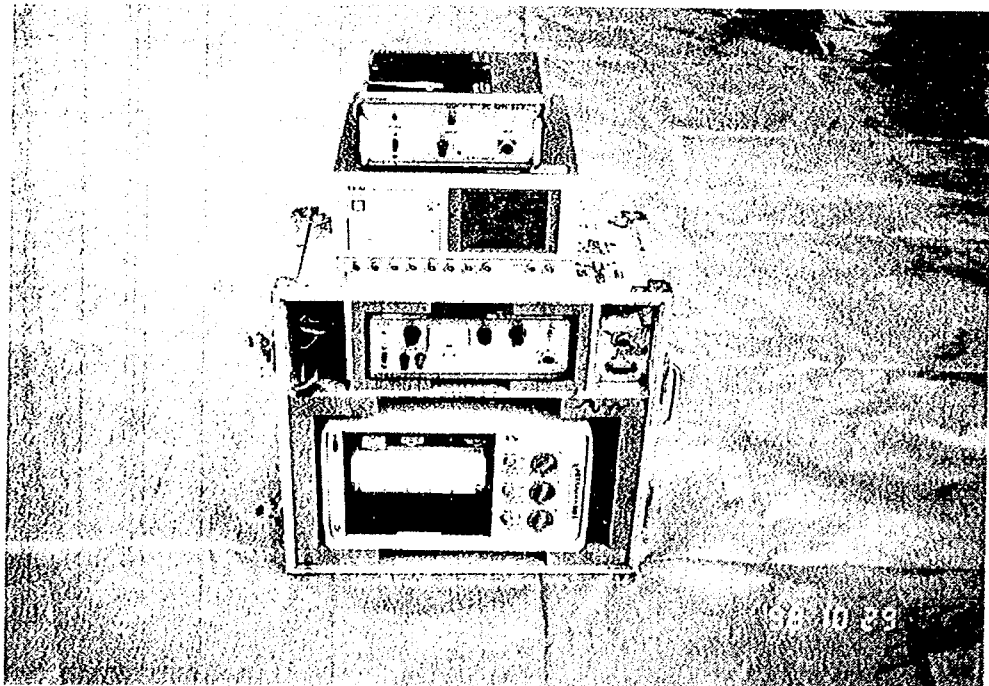
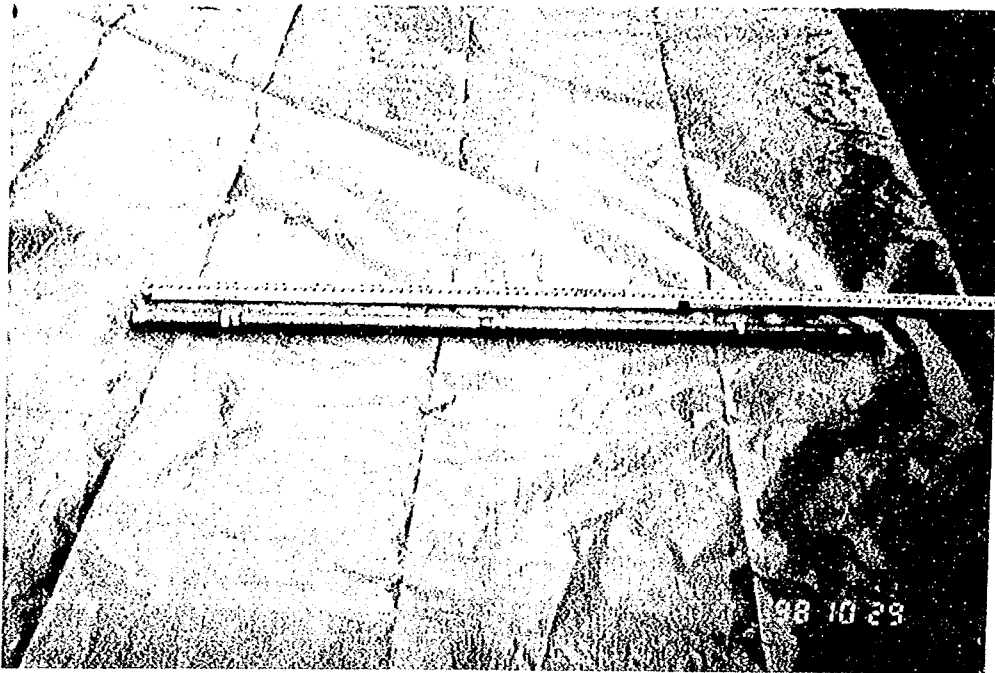


写真-6.2 使用機器

(4) 探査結果の整理

試験概要	試験目的		杭先端深度	
	試験場所		茨城県つくば市〇〇	
	試験日時		平成 10 年〇月〇日	
杭条件	杭種		鋼管杭	
	杭径		60cm	
	工法		不明	
	施工時期		不明	
	基礎形状	上部	—	
		下部	T型張出し梁式	
	杭長		13m	
杭間隔		1.0~1.5m		
地盤条件			GL- 0.0~ 4.0m : 粘性土 (N=0~5) GL- 4.0~ 7.0m : 砂質土 (N=5~30) GL- 7.0~ 9.0m : 粘性土 (N=5~10) GL- 9.0~11.0m : 砂質土 (N=10~30) GL-11.0~12.5m : 粘性土 (N=10) GL-12.5~14.0m : 砂質土 (N=10~20) GL-14.0m~ : 砂質土 (N>30)	
観測孔	材質		エンピ管 (VP65)	
	天端地盤高		GL+50cm	
	観測孔の角度		垂直	
	観測孔長さ		20m	
	杭との離れ		1.0、2.0、3.0	
	探査杭と観測孔の位置 関係を図示		(平面)	
			(横断)	
			観測孔	
			GL-20m 杭長 13m	
	測定機器	磁気検出器	検出方式	両コイル型磁気傾度計
機器名			DTM-1型	
深度データ採取方法		エンコーダ		
増幅器		機器名	MAG-91013型	
		記録器	方式	A/Dコンバータ

計測	磁気検出器移動方式	ウインチ
	計測回数	3回
探査結果	地盤ノイズ消去方式	スタック方式
実測波形		<p>(地盤ノイズ消去後の波形)</p> <p>B-1 B-2 B-3</p>
		<p>(測定結果：磁気異常点)</p> <p>① GL-2.0m付近：杭頭と考えられる反応</p> <p>② GL-15.0m付近：杭先端反応</p>
備考		

事例2. 杭長探査 (RC杭)

(1) 事前調査

- ① 調査項目 現地調査…幅員等の計測
現況確認 (視測孔設置位置の検討)
机上調査…橋台台帳確認

② 事前調査結果

表-6.3 調査対象杭の諸元

杭種	: RC杭
杭径	: ϕ 300mm
杭長	: 10m
杭間隔	: 0.8~1.2m
下部工	: 重力式
(躯体)	(H=6.05m、L=24.38m、B=3.00m)
施工時期	: 昭和35年
地盤状況	
6.0m	埋土、砂質土 (N=5~10)
17.0m以深	粘性土 (N=0~5)
(50m以浅には)	洪積層は出現しない)

(2) 計画・準備

- ① 掘削許可申請…道路管理者 (土木事務所)
→道路復旧方法の確認
- ② 道路使用許可申請…警察署
→作業帯 (安全施設) の設置方法の確認
- ③ 埋設管管理者との協議…埋設管位置の確認
→埋設管確認方法の協議 (試掘方法の確認)

(3) 現場作業

1) 作業手順

調査地点の埋設物確認

- ・ 試掘

観測孔設置ボーリング

- ・ 資機材の搬入
- ・ 作業帯の設置
- ・ 機械ボーリング（異物確認のための磁気探査併用）

探 査

- ・ 磁気探査

復旧および後片付け

- ・ 泥水処理
- ・ 塩ビ管撤去および観測孔閉塞
- ・ 道路復旧

1) 埋設管確認

① 試掘

試掘は掘削巾を1.5m×1.5m、掘削深さを1.0mとした。

なお、試掘時に排出される一般残土およびアスファルトは、産業処理基準に準じ処理した。

② つぼ掘り

ボーリング箇所はG L-2.0mまで、つぼ掘りとオーガーボーリングを実施し埋設管がないことを確認した。

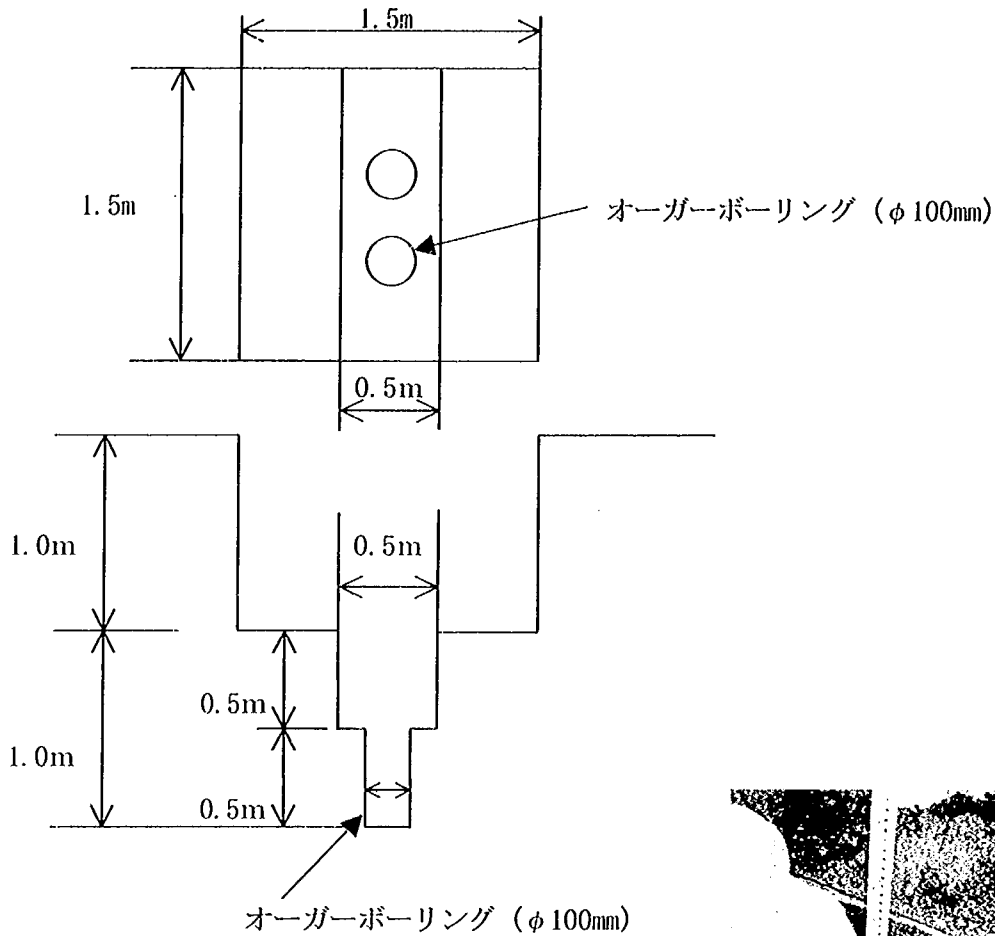


図-6.3 試掘概念図



写真-6.3 試掘状況写真

2) 観測孔設置

①資機材の搬入

資機材の運搬は、トラック（2t）、ワゴン車で輸送した。

資機材の調査地への搬入は、移動式クレーンおよび人力で実施した。

② 作業帯の仮設

調査地点は歩道上に当たるので、作業エリアはガードフェンスで区分し、第三者の進入を防止した。

また、道路路床部のゆるみを防止するために、掘削泥水循環よりの泥水溜めはドラム缶等を使用した。

③観測孔の設置

観測孔の掘孔は機械ボーリングにより作成した。

既設埋設管の布設されている可能性があるGL-5.0mまではノンチップクラウンで掘削した（写真-6.5）。

掘進に際してはベントナイト泥水を循環させて掘り屑（スライム）の排除および孔壁の安定に努め、さらに孔口付近の崩壊にたいしてはケーシングパイプを挿入して保孔した。

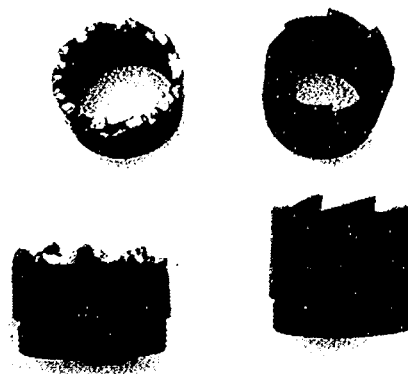
④ 観測孔の仕様

表-6.4 観測孔仕様

杭との離れ (m)	観測孔 角度	保護材	観測孔長 (m)
1.20	垂直	VP65	20.0



写真-6.4 作業状況



(鉄製)

(エンビ製)

写真-6.5 特殊クラウン

3) 計測

① 使用機器… 両コイル型磁気傾度計

検出器 (DTM-1 型)	1 台
増幅器 (MAG-91013 型)	1 台
記録器	1 台
データ収録器	1 台

検出器の移動

ウィンチ	1 台
発電機	1 台

深度データの採取

プーリー	1 台
カウンター	1 台

② 地盤ノイズの消去… スタック (計測 3 回)

③ 計測結果 (実測波形)

GL-16.0m 付近 (杭先端と考えられる反応)

GL-16.0m 付近に杭先端と思われる磁気異常が読取れる。

なお、GL-9.0m 以浅の磁気反応は保護管 (ケーシング)、GL-20m 付近の反応は観測孔直下の帯磁物 (異物) に対する磁気異常が読取れる。

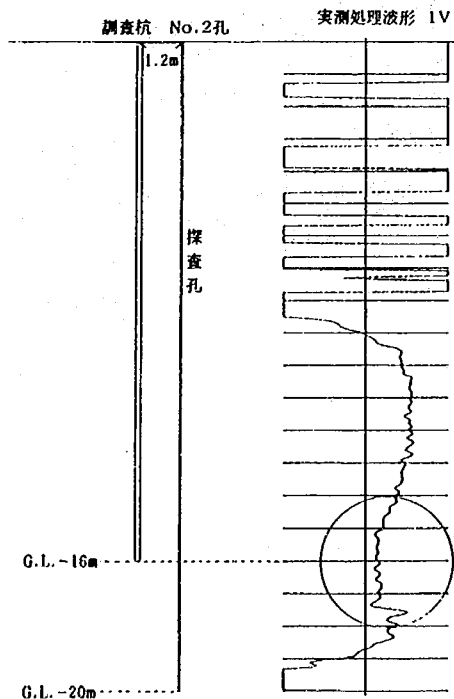


図-6.4 測定結果

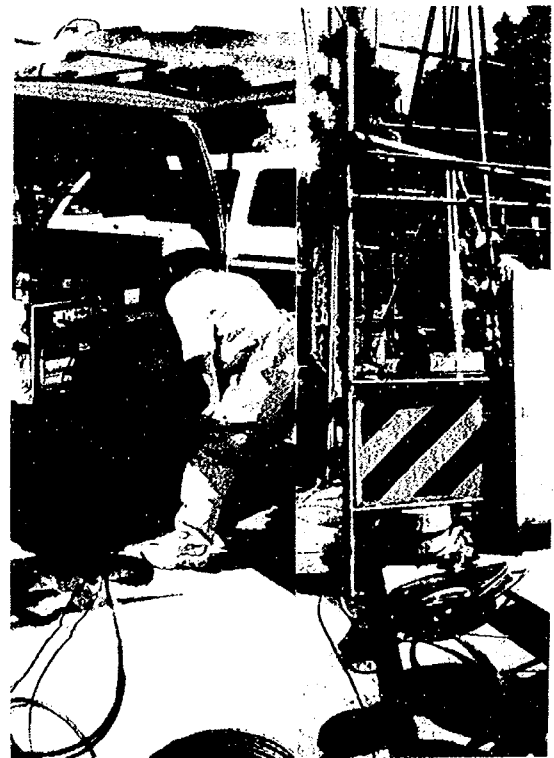


写真-6.6 探査状況

4) 視測孔撤去および道路復旧

① 泥水処理

視測孔設置で発生した泥水等は産業廃棄物にあたるので、産業基準に準じて処理した（写真－5）。

② 視測孔の閉塞

視測孔は塩ビ管を撤去し、セメントミルク（上部山砂）で閉塞した。

③ 道路復旧

歩道試掘部は道路管理者の復旧基準に従い仮復旧および本復旧（仮復旧したのち10日以降）を実施した。



写真－6.7 泥水処理状況



写真－6.8 作業終了後

(3) 探査結果の整理 (フォーマット)

試験概要	試験目的		杭先端深度	
	試験場所		神奈川県〇〇市〇〇	
	試験日時		平成 11 年〇月〇日	
杭条件	杭種		RC杭	
	杭径		300mm	
	工法		不明	
	施工時期		昭和 35 年	
	基礎形状	上部	重力式 (躯体 ; H=6.5m)	
		下部		
	杭長		10m	
杭間隔		0.8~1.2m		
地盤条件			GL- 0.0~ 6.0m : 埋土、砂質土 (N=5~10) GL- 6.0~17.0m : 粘性土 (N=0~5) (50m以浅に洪積層は出現しない)	
観測孔	材質		エンピ管 (VP65)	
	天端地盤高		TP+3.3m	
	観測孔の角度		垂直	
	観測孔長さ		20m	
	杭との離れ		1.2m	
	探査杭と観測孔の位置 関係を図示		(平面)	
			(横断)	
			観測孔 (離れ 1.2m)	
			観測孔長 : GL-20m	
	測定機器	磁気検出器	検出方式	両コイル型磁気傾度計
機器名			DTM-1型	
深度データ採取方法		エンコーダ		
増幅器		機器名	MAG-91013型	
記録器		方式	A/Dコンバータ	

計測	磁気検出器移動方式	ウインチ
	計測回数	3回
探査結果	地盤ノイズ除去方式	スタック方式 (地盤ノイズ除去後の波形)
	実測波形	<p style="text-align: center;">調査杭 No.2孔 実測処理波形 1V</p> <p style="text-align: center;">(測定結果：磁気異常点) ① GL-16.0m付近：杭先端反応 ② 観測孔直下に磁気異常あり</p>
備考	GL-9.0m以浅の磁気反応は保護管によるものである。 観測孔直下の磁気異常物の特定を別途実施。	

事例3. 杭配列探査(場所打ち杭)

(1) 事前調査

- ① 調査項目 現地調査…現況確認(視測孔設置位置の選定)
机上調査…竣工図面等の確認

② 事前調査結果

表-6.5 調査対象杭の諸元

杭種	: 場所打ち杭
杭径	: 120 c m
杭長	: 28.9m
杭間隔	: 3.0m
フーチング	: 巾9.0×9.0m 厚さ2.3m
地盤状況	
13.0	埋土(礫質土)
37.0	粘性土、砂質土互層

(2) 観測孔設置

表-6.6 観測孔仕様

孔番	杭との離れ (m)	観測孔 角度	保護材	観測孔長 (m)
B 4	1.00	45 度	VP65	22.5

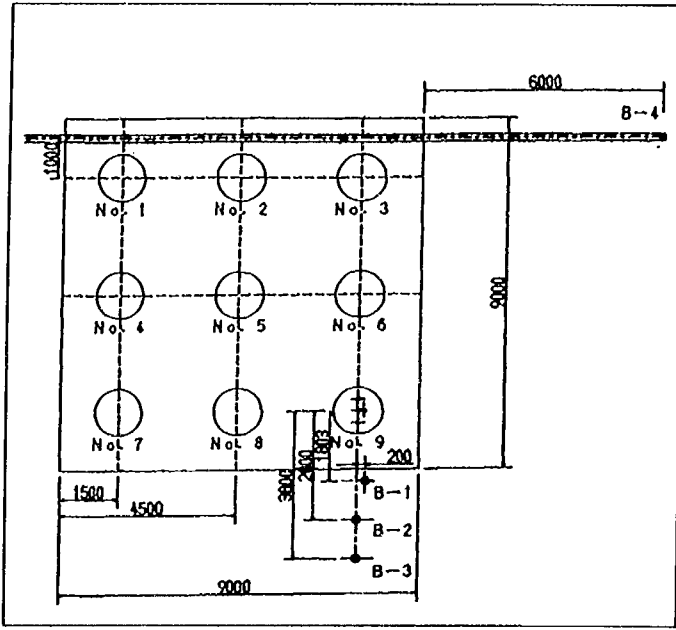


図-6.5 橋梁基礎平面図 (単位 : m)

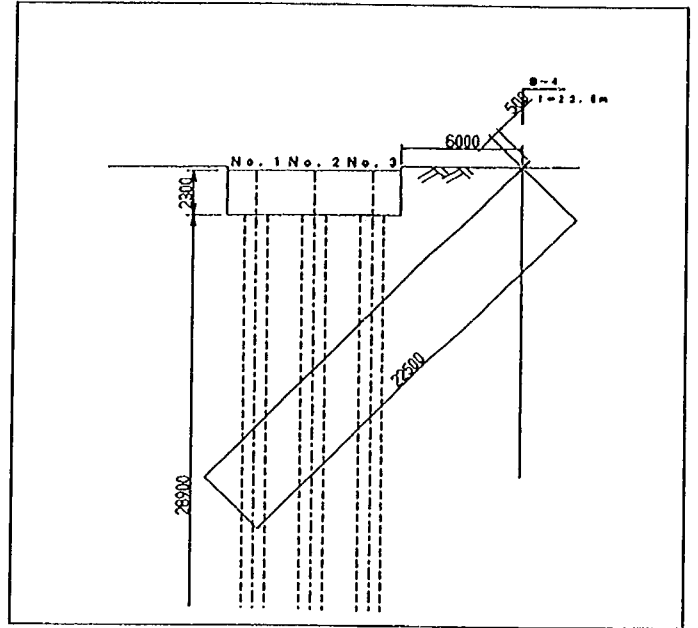


図-6.6 橋梁基礎断面図 (単位 : m)

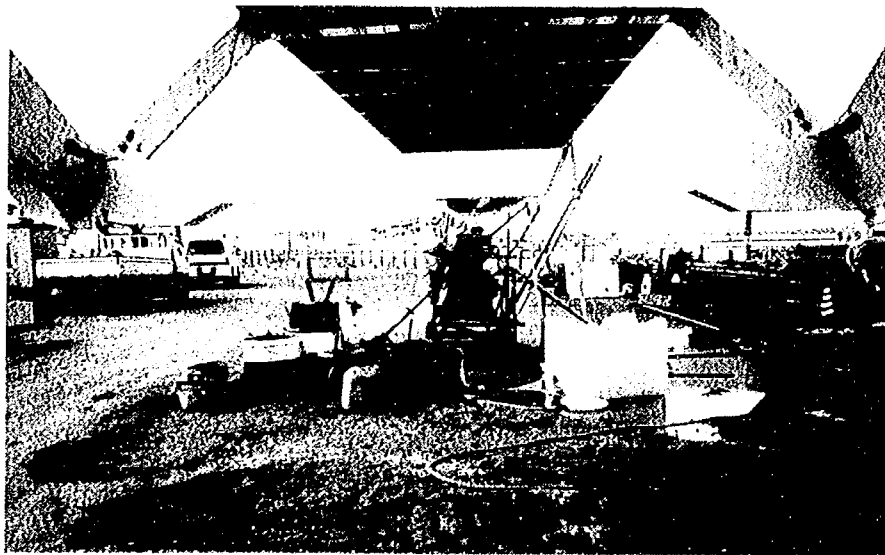


写真-6.9 観測孔設置状況

(3) 計測

① 使用機器… 両コイル型磁気傾度計

検出器 (DTM-1型)	1台
増幅器 (MAG-91013型)	1台
記録器	1台
データ収録器	1台

検出器の移動

ウィンチ	1台
発電機	1台

深度データの採取

プーリー	1台
カウンター	1台

② 地盤ノイズの消去… スタック (計測3回)

③ 計測結果 (実測波形)

図-3は測定結果 (実測波形) をまとめたものである。同図に示すように、実測波形によれば、杭位
置に対応する磁気異常点が認められている。

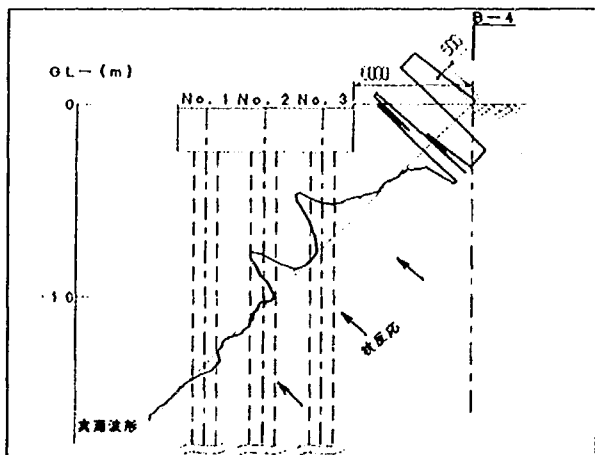


図-6.7 測定結果図

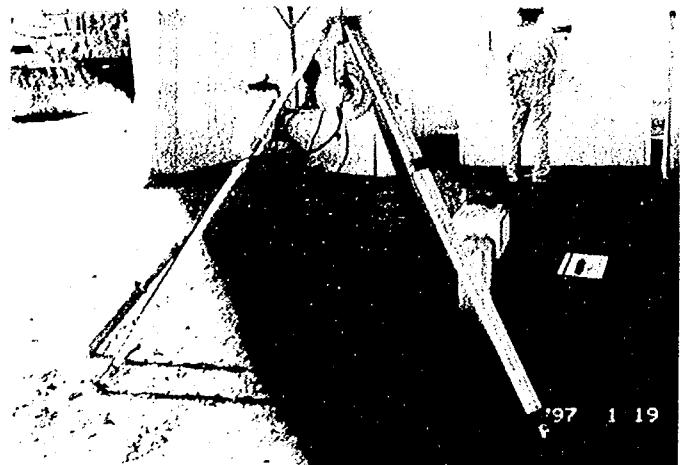
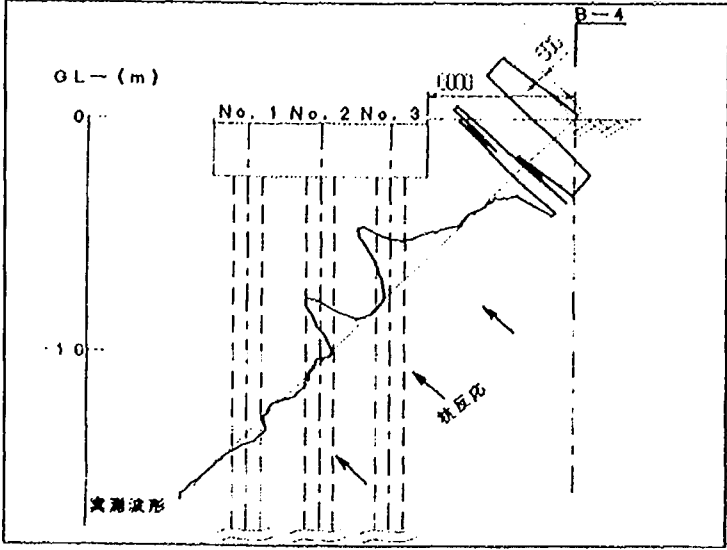


写真-6.10 探査状況

(3) 探査結果の整理 (フォーマット)

試験概要	試験目的	杭配置		
	試験場所	大阪府〇〇市〇〇		
	試験日時	平成10年〇月〇日		
杭条件	杭種	場所打ち杭		
	杭径	1200mm		
	工法	不明		
	施工時期	平成9年		
	基礎形状	上部	-	
		下部	フーチング厚さ; H=2.3m	
杭長	28.9m			
杭間隔	3.0m			
地盤条件	GL- 0.0~13.0m : 埋土、礫質土 GL-13.0~37.0m : 粘性土、砂質土互層			
測孔	材質	エンピ管 (VP65)		
	天端地盤高	TP+3.3m		
	観測孔の角度	45度		
	観測孔長さ	22.5m		
	杭との離れ	1.0m		
	探査杭と観測孔の位置関係を図示	(平面)	(横断)	
測定機器	磁気検出器	検出方式	両コイル型磁気傾度計	
		機器名	DTM-1型	
	深度データ採取方法	エンコーダ		
	増幅器	機器名	MAG-91013型	
	記録器	方式	A/Dコンバータ	

計測	磁気検出器移動方式	ウインチ
	計測回数	3回
探査結果	地盤ノイズ消去方式	スタック方式 (地盤ノイズ消去後の波形)
	実測波形	 <p>(測定結果：磁気異常点)</p> <ul style="list-style-type: none"> ① L=9.5m付近 ② L=13.5m付近 ③ L=17.0m付近
備考	No. 1 杭の磁気反応は No. 2、3 に比べ不明瞭である。 探査結果より杭間を求めると 2.5~2.8m となる。	

7. 参考文献

No.	タイトル	著者	出典	ページ	発行年月日
01	基礎杭，鋼矢板，埋設管等の位置探査に利用される鉛直磁気探査	世森 祐一 神田 和利 安久 俊雄	東京都 1998 技術フォーラム	27～28	1998. 11
02	磁気探査による埋設管探査と誤差	石田 定 齋藤 弘昭	東京都 1998 技術フォーラム	33～34	1998. 11
03	橋梁基礎構造の形状調査 <磁気探査による鋼管杭の杭長及び杭配置調査>	秋田 直樹 亀和田 修一 佐々木 勉	土木学会 第2回構造物 に関するシン ポジウム	133～ 136	1999. 7
04	橋梁基礎構造の調査に関する研究 (その4) <磁気探査による損傷場所 打ち杭の杭長及び杭配列調査>	石田 雅博 亀和田 修一 佐々木 勉 今野 満	土木学会 第54回年次 学術講演会		1999. 9

問合せ先（磁気探査）

梶谷エンジニア（株） 東京支店 調査部

佐々木 勉 亀和田 修一

TEL 03-3478-3185

FAX 03-3478-3188

E-mail : sasaki-tutomu@kajitani.co.jp

kamewada-shuuichi@kajitani.co.jp

インテグリティ試験を用いた
橋梁基礎の損傷調査法マニュアル(案)

平成11年3月

建設省土木研究所
(株) 大林組
梶谷エンジニア(株)
基礎地盤コンサルタンツ(株)
(株) 竹中土木
(株) 東京ソイルリサーチ
(株) 間組
(株) フグロ・ジオサイエンス
(株) フジエンジニアリング

はじめに

平成7年の兵庫県南部地震以後、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。調査手法としては、掘削による目視、各種の非破壊調査法が用いられた。しかし、掘削には時間と費用を要し、各種の非破壊調査法については適用性や調査結果の判定基準が確立されているとは言い難い。

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判定が行われているが、古い橋梁では図面がなく、基礎の形式や形状が不明な場合が多い。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判定をする場合に、基礎形式および形状を調査する必要がある。

このような現状に鑑み、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、

①基礎の損傷調査手法および健全度判定手法の開発

②基礎形状の調査手法の開発

を目的として、平成8年度から平成10年度まで共同研究を実施した。

研究の実施に当たっては、損傷調査手法として①IT(インティグリティ試験)、②AE(アコースティック・エミッション)、③ボアホールカメラ、④衝撃振動試験の4手法を、形状調査手法として①IT、②ボアホールレーダ、③磁気探査の3手法を対象とし、室内模型試験、実大現場試験、数値解析などにより、各調査法の適用性を検討した。

本マニュアルは、このうちインティグリティ試験を用いた基礎の損傷調査に関する研究成果を基に、試験の適用条件、標準的な試験方法、測定結果の解析方法などについて取りまとめたものである。

インティグリティ試験WGメンバー

	建設省土木研究所 材料施工部 施工研究室 研究員	市村 靖光
	(株)大林組 技術研究所 土木第二研究室 主任研究員	崎本 純治
	(株)大林組 土木技術本部 設計第一部 課長	佐藤 峰生
	梶谷エンジニア(株) 東京支店 調査部 部長	佐々木 勉
	梶谷エンジニア(株) 東京支店 調査部 主任	田口 雅章
	基礎地盤コンサルタンツ(株) 地盤物性室 室長	山田 真一
	(株)竹中土木 技術本部 技術開発部 課長	小嶋 平三
(幹事)	(株)東京ソイルリサーチ 技術本部 技術開発室 次長	小野 日出男
	(株)東京ソイルリサーチ つくば総合試験所 係長	田中 伸治
(幹事)	(株)間組 技術研究所 技術研究部 主任研究員	三反畑 勇
	(株)間組 土木本部 構造物・橋梁統括部	平澤 賢治
	(株)フグロ・ジオサイエンス マネージャー	坂本 真也
	(株)フジエンジニアリング 調査第一部 部長	今田 和夫

目 次

	ページ
適用範囲	1
用語の説明	2
1. 試験概要	3
1. 1 開発の歴史	3
1. 2 試験原理	3
1. 3 試験装置	6
2. 試験要領	8
2. 1 適用条件	8
(1) 杭の条件	8
(2) 地盤条件	10
2. 2 試験手順	11
(1) 試験フロー	11
(2) 事前調査と試験準備	12
(3) インテグリティ試験の手順	13
(4) 加速度計の取付方法	14
(5) 打撃位置および加速度計取付位置	15
(6) ハンマの種類と打撃方法	17
2. 3 波形の処理方法	18
(1) 増幅法	18
(2) フィルター処理	19
2. 4 波形の解釈方法	21
(1) 波動伝播速度の決め方	21
(2) 杭先端部, 損傷部の評価	22
(3) 地盤の影響評価	25
2. 5 試験結果の整理	27
(1) 試験結果の整理フォーマット	27
(2) 試験結果の整理例	29
参考資料-1 波形解釈における基本理論	33
参考資料-2 波形の解釈方法～地盤の影響評価	34
参考資料-3 適用事例	36

適用範囲

インテグリティ試験は、下図に示す3つの目的で用いることができる。

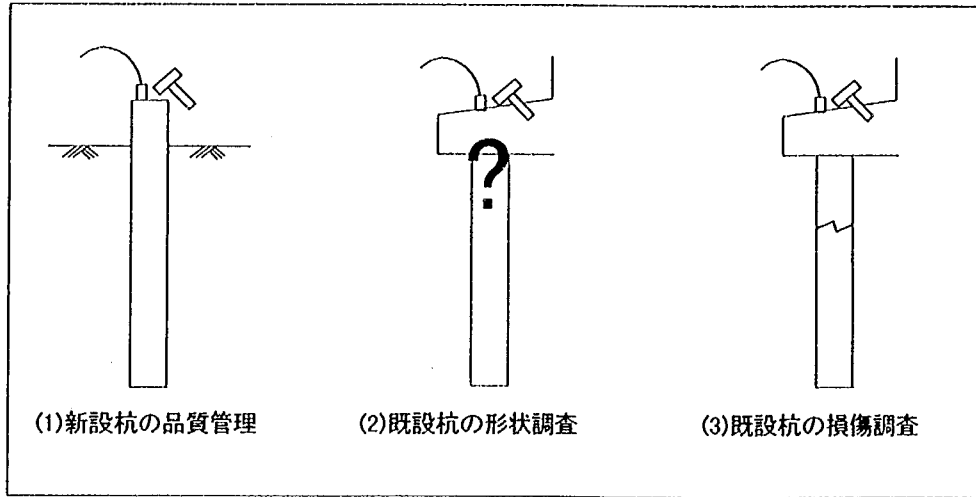


図. インテグリティ試験の目的

(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) 既設杭の損傷調査

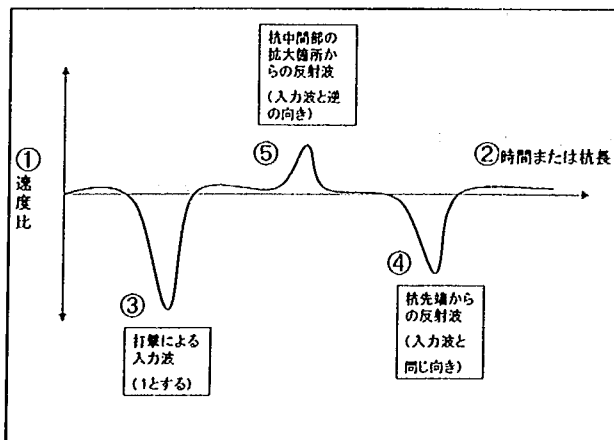
地震などで被災した杭の補修・補強に際しては、その損傷程度を精度良く調査し、適切な補強法を選定する必要がある。インテグリティ試験を損傷調査に用いる場合は、フーチング上からの計測が基本となり、損傷の有無、損傷位置などの特定を目的とする。

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。

本マニュアルは、特に杭の損傷調査を目的としたインテグリティ試験を対象に、その標準的な試験方法について記述したものである。

用語の説明

日本語	English	解説
インストルメンテッドハンマ	Instrumented Hammer	加速度計が内蔵されたハンマ。入力波を計測することにより、杭頭付近のクラックの発見が可能。
インティグリティ試験 (IT、杭の健全性試験)	Integrity Test	杭の健全性を調査するための非破壊試験。
インピーダンス (機械インピーダンス)	Impedance	杭断面積、ヤング係数および伝播速度で表される杭体内の波の伝わり易さを示す指標。 $Z=EA/C$
ハンドハンマ	Hand held Hammer	インティグリティ試験で用いられる数百gのプラスチックまたはスチール製のハンマ。
フィルター処理	Filtering Process	計測波形を見やすくするためのノイズ除去処理。単純移動平均とスタッキングとがある。
一次元波動理論	One dimensional wave theory	杭体内の縦波の伝播を表す理論。
形状調査	Shape Investigation	杭長や断面形状を調査すること。
健全性	Integrity	杭にクラックや断面欠損などの欠陥がないこと。
再現性	Reappearance	杭条件、地盤条件等が同じならば、何回計測しても同等の波形が得られること。
速度比	Normalized Velocity	反射波の速度を入力波の速度で正規化した値で、インティグリティ試験結果を表示する時に用いられる縦軸。
増幅	Amplification	先端反射や異常な反射を明瞭にするために行うデータ処理方法。線形増幅と指数増幅とがある。
損傷調査	Damage Investigation	杭体のクラックや断面欠損等を調査すること。
低ひずみ	Low Strain	ハンドハンマ程度で軽打した場合に生じる小さなひずみ。
伝播速度 (波速)	Propagation Velocity	杭体内を伝わる縦波の速度。
波の減衰	Attenuation	入力波の振幅が、深度とともに小さくなること。
入力波	Input wave	杭頭をハンマで打撃することにより発生する波。
反射波	Reflect wave	杭頭で発生した入力波が、インピーダンスの異なる境界で反射し発生する波。
非破壊試験	Non-Destructive test	対象物に損傷を与えることなく、その特性を調査する試験。



- ① インティグリティ試験では、センサ設置位置の速度波形を計測する。一般には、反射波の速度を入力波の最大速度で正規化した速度比という形で表示される。測定波形は、増幅処理が行われることが多いため、速度比の絶対値は大きな意味を持つわけではない。
- ② 測定された速度波形は、時間の関数であるが、波動の伝播速度を与えることにより、杭長に対応するものに変換できる。
- ③ ハンマ打撃による入力波は、通常下向きに表示される。これは、実際の波動伝播が杭先端に向かうことに対応したもので、方向そのものに意味があるわけではない。計測装置によっては、上向きに表示されるものもある。
- ④ 杭先端からの反射波は、ハンマ打撃による入力波と同じ向き（下向き）となる。
- ⑤ 杭中間部に拡大箇所があると、そこからの反射波はハンマ打撃による入力波と逆の向き（上向き）となる。

1. 試験概要

1.1 開発の歴史

欧米では1960年代から杭の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コンクリート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、場所打ちコンクリート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 (Integrity Test ;IT) 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¹⁾。インティグリティ試験は、地中の杭の品質を調査するもので、支持力は直接求められないが、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。

一方、わが国においても1986年に地盤工学会に波動理論小委員会が設けられ、インティグリティ試験や動的載荷試験に関する国内外の主要な文献抄録を作成し、シンポジウムも開催されている²⁾。さらに、1995年に発生した兵庫県南部地震以後、杭基礎の損傷調査に適用できる非破壊的な探査手法に対するニーズが急増し、インティグリティ試験の適用事例も増加している。

1.2 試験原理

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、パイブレーション・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-1.2.1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などで計測する試験法である。

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(1.2.1)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(1.2.2)で求められる。

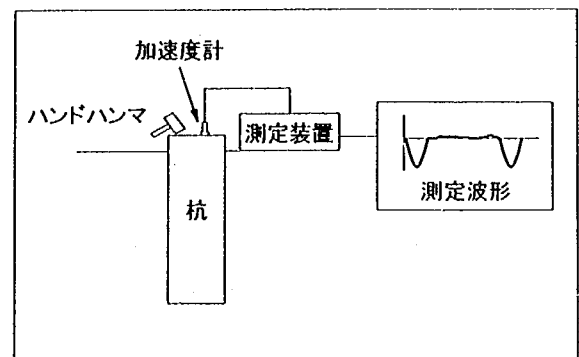


図-1.2.1 インティグリティ試験の方法

$$Z = \frac{EA}{C} = A\sqrt{E\rho} \quad (1.2.1)$$

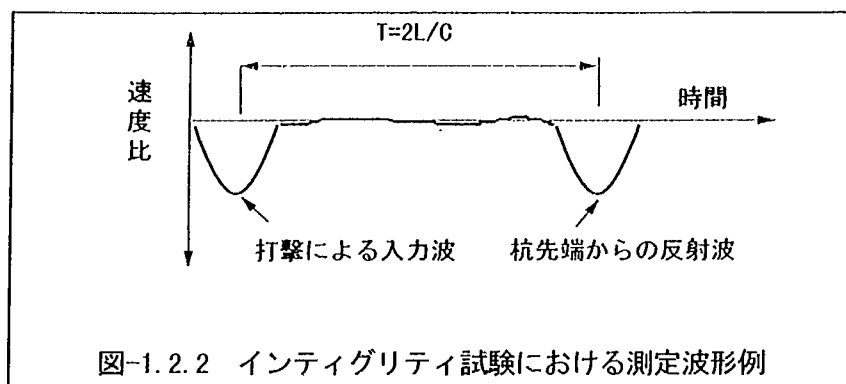
$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.2.2)$$

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-1.2.2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(1.2.3)により杭長が推定できる。

$$L = \frac{CT}{2} \tag{1.2.3}$$

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 (インティグリティ試験で測定) である。

一般に、波動の伝播速度は表-1.2.1のような値となる。

表-1.2.1 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	3,500~4,000
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-1.2.3に示すように、断面積が大きくなると入力と逆向きの速度反射波となる。一方、断面積が小さくなると図-1.2.4に示すように同じ向きに速度反射波となる。

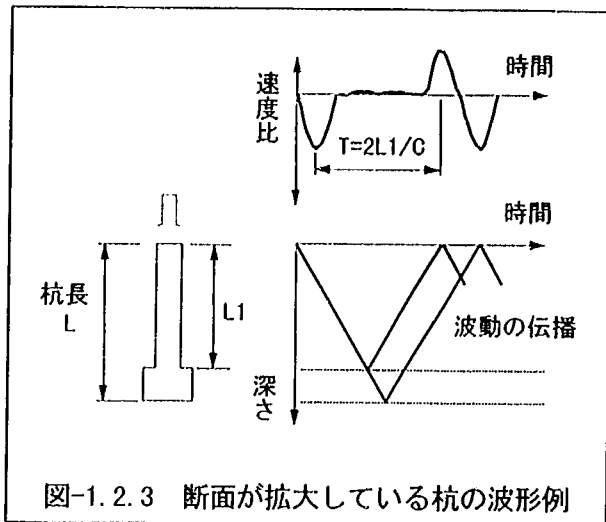


図-1.2.3 断面が拡大している杭の波形例

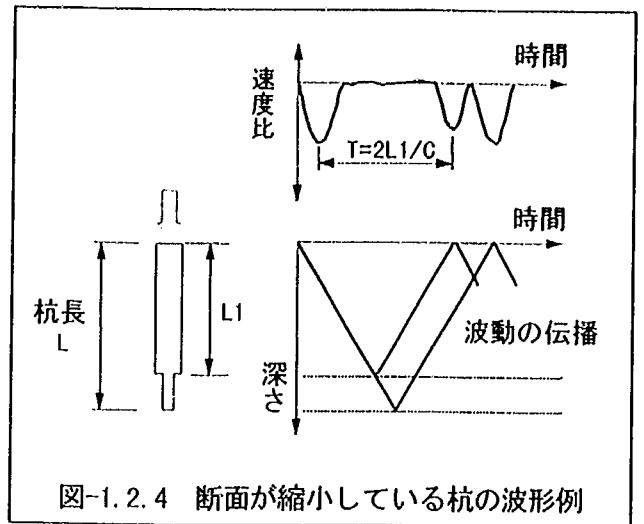


図-1.2.4 断面が縮小している杭の波形例

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
- ⑦杭先端が硬質地盤に根入れされている場合

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-1.3.1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-1.3.1 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-1.3.2~1.3.4に各装置のシステム構成を示す。

表-1.3.2 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) CPU：486DX2 (75MHz) 16bit A/D変換 RAM：8MB (option32MB) サンプルタイム：50~300kHz サンプリング数：4096
センサ	水晶圧電型加速度計 校正値：100mV/g 最大計測加速度：80 g (g：重力加速度)
ハンマ	プラスチックハンマ (重量：約700g) インスツルメントッドハンマ

表-1.3.3 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 サンプルタイム：80kHz サンプリング数：4096
センサ	水晶圧電型加速度計 校正値：100mV/g 最大計測加速度：100 g (g：重力加速度)
ハンマ	ハンドハンマ

表-1.3.4 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 サンプルタイム：31.4kHz サンプリング数：1024
センサ	水晶圧電型加速度計 校正値：100mV/g 最大計測加速度：100g（g：重力加速度）
ハンマ	加速度計内蔵 重量：約450, 800, 2,600g

図-1.3.1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。

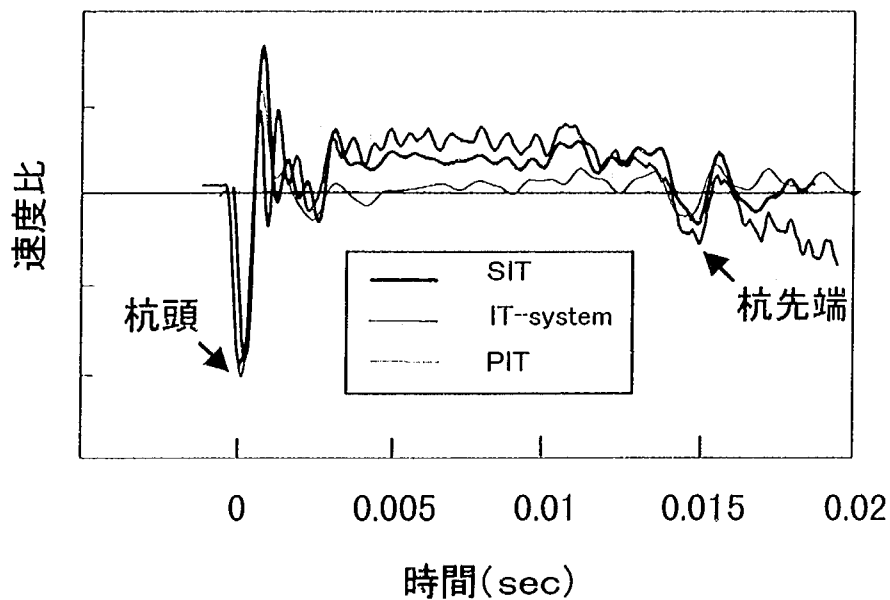


図-1.3.1 3つの装置による波形比較

<参考文献>

- 1) Seitz, J.M.: Pile integrity by low strain impacts-A state-of-the-art, Proc. of the 4th Int. Conf. on the Appl. of Stress-Wave Theory to Piles, pp.627-637, 1992
- 2) 地盤工学会：杭の打込み性および波動理論の杭への応用に関するシンポジウム発表論文集、1989

2. 試験要領

2.1 適用条件

(1) 杭の条件

杭は、その製造方法や施工方法等によって分類される。表-2.1.1に杭種による杭の分類および一般的な施工法を示す。

インテグリティ試験を用いた杭の損傷調査は、表-2.1.1に示した全ての杭に適用可能であるが、その適用性等は杭種や施工法により異なる。例えば、他の杭に比べ断面積の小さい（肉厚の薄い）鋼杭では、入力波の減衰が大きく杭長や地盤条件等によっては明確な反射波が得られにくい場合もある。また、杭先端等を根固めした埋込み杭等では、根固め部分からの反射波が発生し、杭先端を示す反射波形が得られにくい場合もある。

これらの各種条件における本試験の適用限界等については、現状では定量的に把握されているとは言えないが、これまでの適用実績等を整理したものを表-2.1.2に示す。

その他に、精度の良いデータを得るために、さらに必要となる杭等に関する情報については、表-2.2.1および表-2.2.2を参照されたい。

表-2.1.1 杭の分類

杭種による分類			施工法
既製杭	鋼杭	鋼管杭	打込み杭（打撃、振動、プレ-リグ併用）
		H鋼杭	
	既製コンクリート杭	RC杭	埋込み杭（プレ-リグ、中掘り）
		PC杭	
		PHC杭	
木杭	回転圧入杭（圧入、根固め）		
場所打ちコンクリート杭			その他
			アースドリル杭 オールケーシング杭 リバーシブル杭 深礎 その他

表-2.1.2 インテグリティ試験の杭種別の適用性

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

(解説)

○：事例が多い △：事例がある —：事例がない

フーチング下：フーチング下の杭側面にセンサを設置、またはフーチングコア抜き後に杭頭にセンサを設置(図-2.2.6、図-2.2.7参照)

既製杭：継手箇所が多い場合は不適

杭先端：岩盤などに支持させている場合は、先端位置を捉えにくい

中間層：中間支持層がある場合は、波形が不明瞭となる場合がある

(2) 地盤条件

一般に、杭が長くなったり周辺地盤が硬くなるほど、杭先端からの波の反射が明確に得られにくくなることが知られており、杭径が小さくなるに従いこの傾向は強くなると言われている。

これは、杭頭に与えられた打撃エネルギーが杭と周辺地盤との摩擦のために逸散し、杭体内を伝播する波が減衰するためであり、周辺地盤が硬くなるに従い減衰が大きくなる。このような波の減衰への対応方法としては、反射波形を指数関数的に増幅させる方法が一般的に用いられている（「2.3 波形の処理方法」を参照）。ただし、このような増幅を行っても、地盤条件によっては、表-2.1.2の適用性に示した杭種別測定実績より短くても、杭先端からの反射波が確認できない場合もある。

現在、国内では、このような地盤条件に応じた測定限界長を明確に示しているものは見あたらない。しかし、海外では測定可能な杭長を、周辺地盤のせん断抵抗が小さい場合には $60 \cdot D$ 以内（ D ：杭径）、大きい場合には $30 \cdot D$ 以内としているところもある¹⁾。

また、中間に非常に硬い地層があるときには、その中間層の開始深さからは入力波と逆向きの反射波が得られ、終了深さからは入力波と同じ向きの反射波が得られる場合がある。極端な場合には波が先端まで届かず、先端からの反射波が得られないこともある。

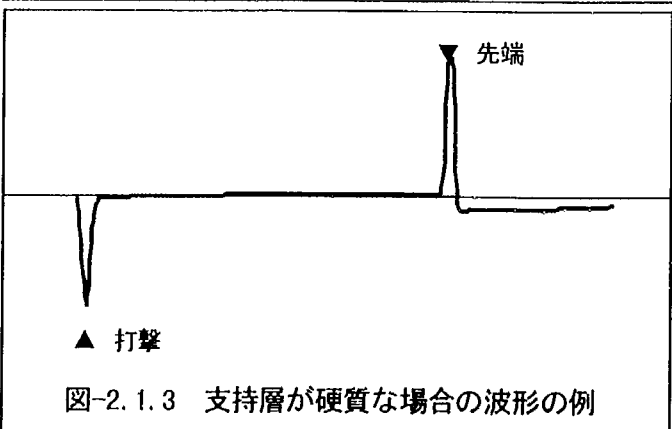
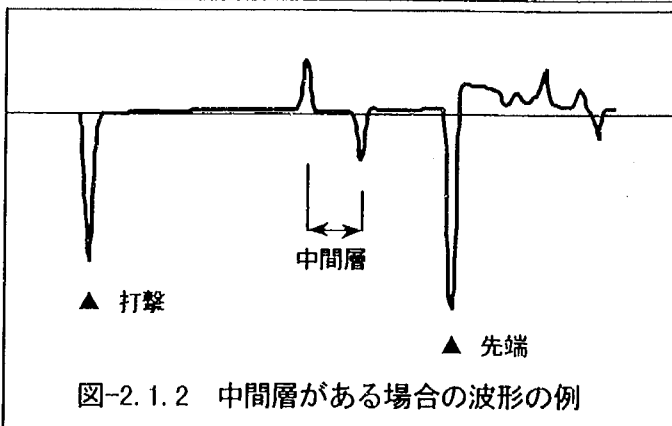
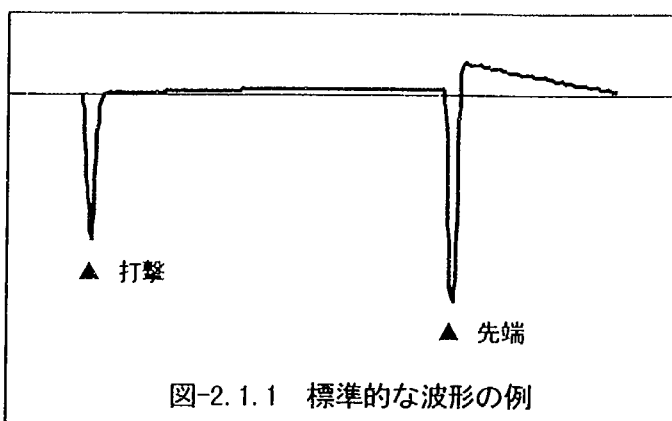
その他、支持層が非常に硬く、そのインピーダンスが杭に近い場合には、波が支持層に透過し先端からの明確な反射が得られない場合がある。支持層がより硬質な岩盤などの場合には、インピーダンスが杭より大きくなり、入力波と逆向きの反射波が返ってくることもある。

図-2.1.1～2.1.3に標準的な波形、中間層がある場合、支持層が硬質な場合におけるそれぞれの波形の例を示す。中間層の場合には杭断面が拡大している場合と同様の波形を示しており、波形の解釈には注意を要する。

これらのことを考慮し、事前に周辺地盤に関する資料を入手しインテグリティ試験へ及ぼす影響を予測しておくことは、波形を解釈する上において非常に重要である。

<参考文献>

- 1) Australian Standard AS2159 Integrity Test (1996)



2.2 試験手順

(1) 試験フロー

図-2.2.1に試験フローを示す。

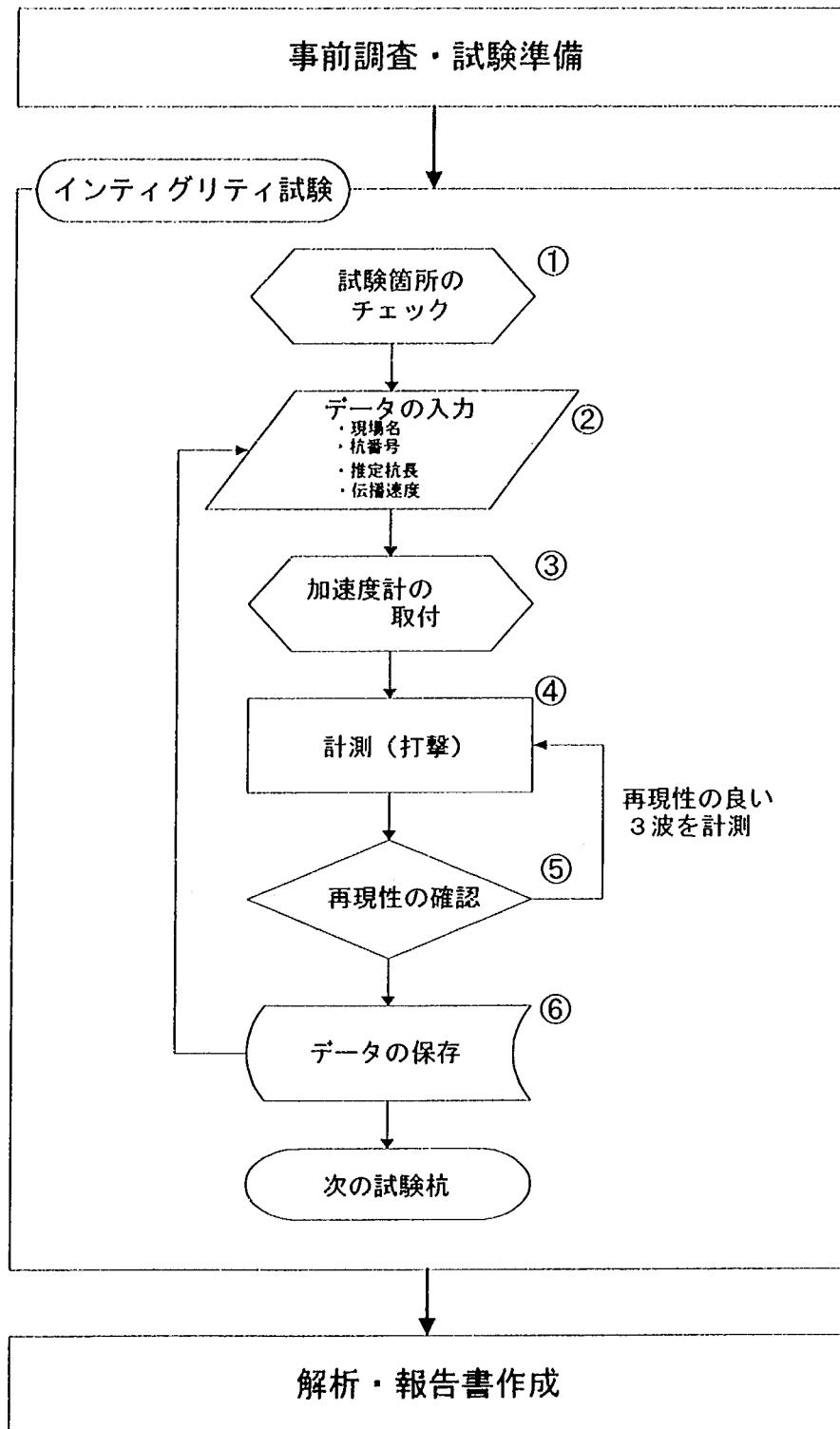


図-2.2.1 試験フロー

(2) 事前調査と試験準備

インテグリティ試験を行う前には、表-2.2.1に示すような項目を事前に調査し資料等を収集することが望ましい。これらの中でも、測定結果を分析する上では波の伝播速度が重要なパラメータとなるので、杭の材質等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は測定可能である。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。

試験前の準備としては、杭頭部またはフーチング上面を清掃して、加速度計の取り付けおよびハンマの打撃が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-2.2.2に示したような点にも注意が必要である。

表-2.2.1 事前調査

項 目	内 容
杭基礎の仕様	杭仕様（杭種、杭径、杭長など）、 フーチング等の有無、 杭頭部やフーチングの状況、 基礎の設計図書など
杭の施工データ	施工法、施工日、施工状況など
地盤条件	土質柱状図、N値、地下水位など
そ の 他	試験位置の周辺状況、 近接工事の影響（騒音・振動）など

表-2.2.2 試験準備

杭頭の状況	計測場所	試験準備の内容	備 考
フーチングなし	杭頭部	杭頭部の露出・清掃	新設の場所打ちコンクリート杭は適切に杭頭処理を行う 杭頭表面のコンクリートの浮き等は事前に取り除く
フーチングあり	フーチング上	フーチングの露出・清掃 杭平面位置のマキング	杭頭にセンサーを取り付ける場合には、フーチングを杭頭までボリングする等の準備が必要（図-2.2.8参照）
	杭頭付近	フーチング側面の掘削 杭頭部の露出・清掃	一般に、杭に軸方向の打撃波を発生させるために杭側面にアンカーロック等を取り付ける（図-2.2.9参照）

(3) インテグリティ試験の手順

図-2.2.1に従って試験手順を以下に説明する。

① 試験箇所のチェック

事前に試験箇所（杭頭、杭側面、フーチング上面）の状態を確認するのが望ましい。試験箇所が濡れていると加速度計と杭との接着が悪くなり、良いデータを計測できない場合が多い。また、コンクリートのはつり等により、コンクリート表面に浮きが生じた部分での加速度計の取付や打撃は計測に適さず、異常な波形を計測する場合が多い。

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、ハンマタイプ、杭番号等を入力する。

③ 加速度計の取付

表面のコンクリートに浮きがなく、乾いている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。

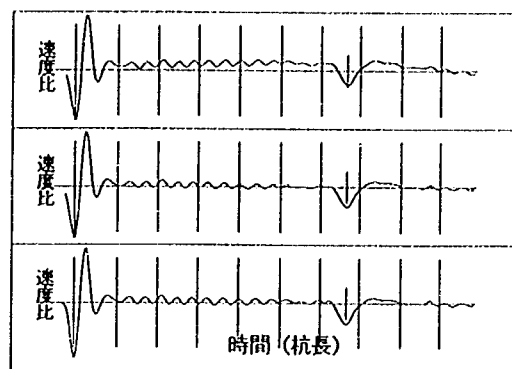


図-2.2.2 計測波形例

④ 計測 及び ⑤ 再現性の確認

試験は1本の杭に対し3波以上の計測を行い、それぞれの波形の再現性を確認することで品質管理を行う。計測波形例を図-2.2.2に示した。現場では、最初の試験杭の計測結果より設計杭長あるいは実杭長に従った伝播速度の設定を行う。以降の試験杭は最初の計測波形と比較することにより、現場にて計測された波形から、杭体に著しい損傷および異常の有無や杭長などの簡易な健全性の判断を行うことが可能となる。

試験箇所の状態が悪い場合は波形が著しく乱れ、反射波を確認しづらくなるので、再現性を確認し、データの信頼性をチェックすることが重要である。再現性を確認できない場合は、加速度の設置位置、打撃位置、増幅値・増幅方法、またはハンマなどを変更して、再計測することが望ましい。杭先端からの反射波の特定が困難な場合は、2往復目の反射波を見つけだすことで確認できる場合もあるので、杭長などの設定を変更して計測するのも1つの方法である。

⑥ データ保存

データを保存する。現場では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、計測した波形は、事務所のコンピュータに転送し、解析・印刷・報告書作成などを行う。

(4) 加速度計の取付方法

インティグリティ試験は、通常杭頭にて計測を行う場合が多い（写真-2.2.1参照）。場所打ちコンクリート杭の場合、センサは杭の中心の乾いた部分に鉛直に取付けることが望ましい。このとき、センサを杭端部付近に取付け計測を行うと、鉄筋や杭周面の影響により計測波形にノイズが現れることが多くなるので、端部の取付は避けた方がよい。PHC杭は、杭肉厚部の中央に取付けることが望ましい。鋼管杭やH鋼杭の場合は、センサを取付ける場所が限られ、厚肉部分や側面に取付けて実施する場合が多い。この場合、取付位置や打撃位置を変え計測を何度か行い、良い位置を探すことが望ましい。

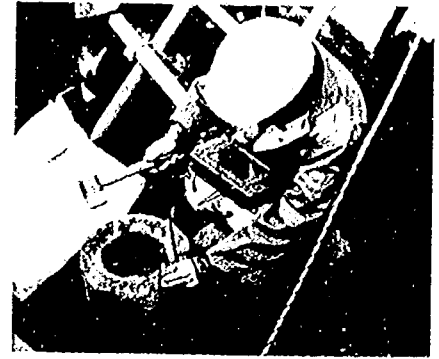


写真-2.2.1 加速度計取付状況

フーチング上面で実施する場合も杭頭と同様な取付方法となる。ただし、杭の直上に加速度計を設置することが重要である。杭側面に取付ける場合は、加速度計が外れやすいので接着剤等で確実に固定する必要がある、打撃位置の下に取付けることが重要である。

杭頭処理後の場所打ちコンクリート杭及びPHC杭の杭頭表面は、小さな凹凸が存在する。図-2.2.3に示すように凹凸のある状態のままセンサを取付けると、設置面積が小さいため反射波がセンサに伝わりづらく、良好なデータを計測できない場合が多い。このためインティグリティ試験では、通常、図-2.2.4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。これによって、以下の効果が得られる。

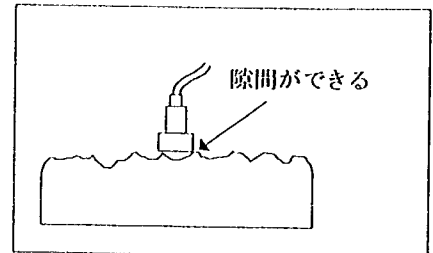


図-2.2.3 粘土未使用

- 1) センサへの反射波の伝達が良くなる。
- 2) 取付・脱着が容易となる。
- 3) フィルター効果がある。

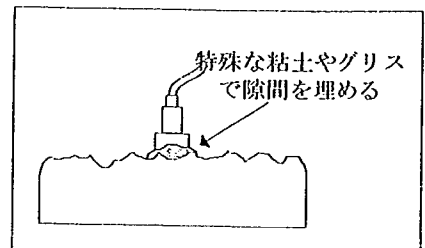


図-2.2.4 粘土使用

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平らに削り、特殊な粘土、グリス及び接着剤を用いて、計測することも可能である（図-2.2.5参照）。

杭側面に取付ける場合は、グラインダーで加工するケースと同様に接着剤等を用いて取付けることが可能である。取付面をきれいにし、加速度計を鉛直に保ち、確実に接着させることが重要である。

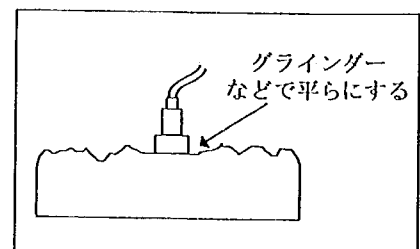


図-2.2.5 グラインダーで加工

センサの取付の注意事項として、表面処理の際に生じたコンクリートの浮きや雨などにより表面が濡れている部分への取付は、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た方がよい。

計測に用いる加速度計のレンジは、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、取付に用いる材料にも依存する。直接杭に接する接着剤では、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良い。

(5) 打撃位置および加速度計取付位置

インティグリティ試験は、フーチングの有無によって打撃位置および加速度計取付位置が異なるので、これらについて説明する。

a) フーチングが無い場合

試験は、センサを杭頭に十分密着するように取付け、ハンドハンマなどで杭頭を軽く打撃して実施する。この時、センサは杭中央に置き、打撃は約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及びセンサの取付位置を図-2.2.6に示す。

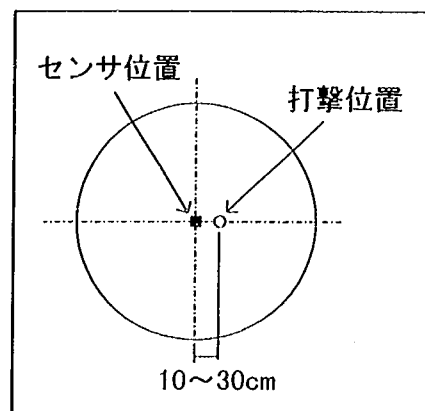


図-2.2.6 標準的な杭の打撃位置及びセンサ取付位置

b) フーチングが有る場合

既存構造物の基礎杭の調査において、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3つの加速度計取付・打撃方法の組み合わせがある。しかし、フーチング等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) 方法1 (図-2.2.7参照)

取付方法：フーチングの上にセンサの取付を行う。

打撃方法：フーチングの上から打撃する。

- ・この方法は、試験前の準備作業を行う必要が無く簡易に行えるが、フーチングの影響を強く受けるため、健全性の検討が困難な場合が多い。
- ・通常の試験装置で行うことができる。
- ・事前に杭配置を知る必要がある。
- ・上部に構造物が有る場合は制限される。

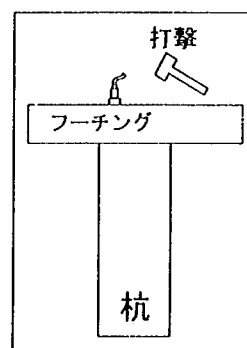


図-2.2.7 試験方法 (方法1)

2) 方法2 (図-2.2.8参照)

取付方法：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る。

打撃方法：ボーリング孔に鋼製のロッドを下ろし、これを介し、杭頭を打撃する。

- ・計測波形へのフーチングの影響は、方法1と比べると小さく杭先端からの反射波を確認できる場合も多い。
- ・通常の試験装置で行うことができる。
- ・事前に杭配置を正確に知る必要がある。
- ・フーチングをボーリングする必要がある。
- ・加速度計の取付状況が目視できない。

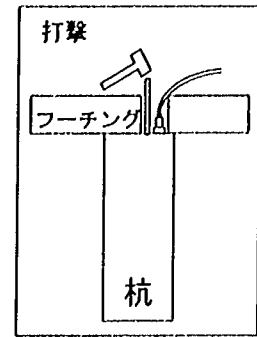


図-2.2.8 試験方法 (方法2)

3) 方法3 (図-2.2.9参照)

取付方法：フーチング側面を掘削し、杭側面に加速度計を取付ける。

打撃方法：杭側面にのみまたは取付ブロック等を介して杭を打撃する。

- ・計測波形へのフーチングの影響は、方法1と比べると小さく杭先端からの反射波を確認できる場合も多い。
- ・通常の試験装置で行うことができる。
- ・フーチングの下で作業ができるよう掘削等の準備が必要である。
- ・杭に軸方向の入力波を発生させる必要がある。
- ・打撃位置は加速度計の取付位置より上でなければならない。
- ・明瞭な波形が計測出来ない場合は、打撃及び加速度計取付の位置（深度）を変え計測を行えば、良い結果が得られる場合もある。

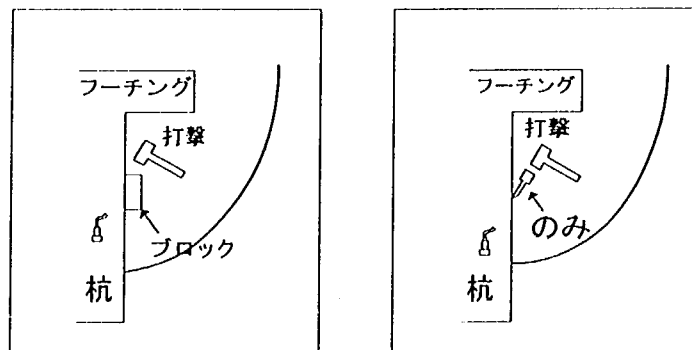


図-2.2.9 試験方法 (方法3)

(6)ハンマの種類と打撃方法

インテグリティ試験では通常手で持つ中型のプラスチックハンマ（重量500g程度、写真-2.2.2の左上）を用いて、約20～30cm位の高さから軽く振り下ろす様に打撃する。計測波形の再現性を得るため、打撃は同じ強さで行うことが重要である。

打撃により生じた入力波形の特性は、ハンマの材質及び重量によって変わる。一般的には堅い材質及び軽い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断面変化などの判断は難しい。各種ハンマを写真-2.2.2に示す。

早期に返ってくる反射波を見極めるための加速度計を内蔵したインストルメンテッド・ハンマもある。このハンマは打撃した入力波を計測できるので、杭頭部に取付けた加速度計で計測した（反射波を含んだ）入力波と比較することにより、打撃位置近傍の損傷を発見できる。

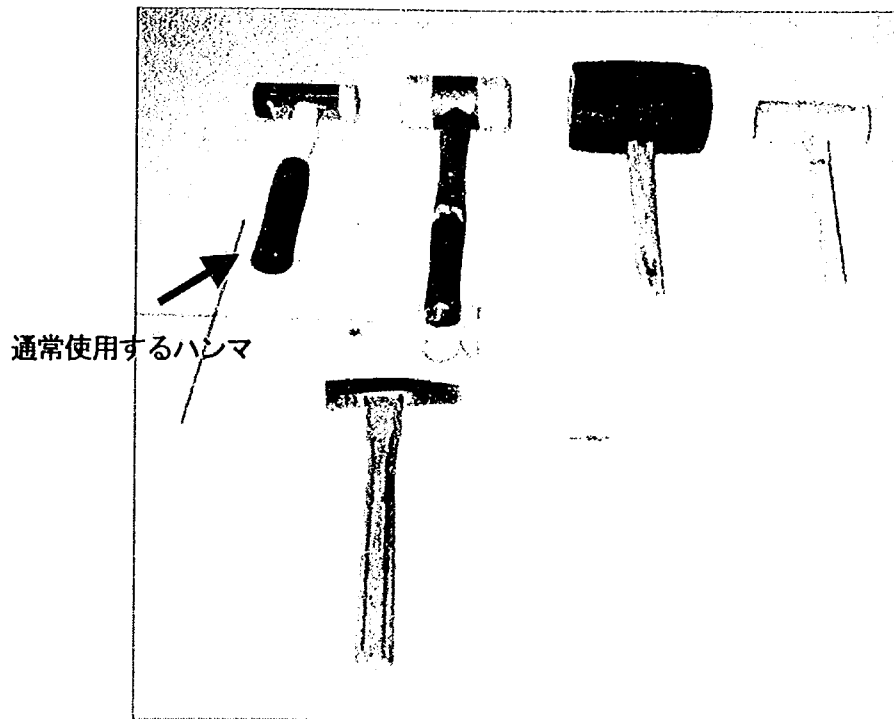


写真-2.2.2 各種ハンマ

2.3 波形の処理方法

測定波形には、鉄筋や周辺地盤の影響によるノイズが含まれる。また、杭が長くなったり杭の周面摩擦が大きくなると、波形が減衰するため、先端反射や、杭の欠損部などからの反射を正確に判断することが難しくなる。このため、測定波形に適切なフィルター処理、増幅処理を施し、先端反射などを明瞭にする必要がある。一般に測定波形は増幅処理を施してから、フィルターがかけられる。これは、フィルター処理を先に行うと、波形の細部での判定ができなくなることが考えられるからである。

(1) 増幅法

増幅法としては、線形増幅、指数増幅の2種類の方法がある。前者は、杭頭付近の波形検討に適しているが、先端部の確認には適していない。一方、後者は杭先端の確認、損傷位置、断面変化位置の確認に適している。図-2.3.1は、測定波形を指数増幅した1例である。上から測定波形、増幅倍率を5、20と変えたものである。増幅倍率の増加に伴い杭先端が明確になっていくことがわかる。一般には、入力波と反射波の大きさが同程度になるように倍率を決めるのがよいとされている。その他、必要に応じて杭先端付近を明確に知りたい場合など、増幅開始位置を変える処理が施されることがある。

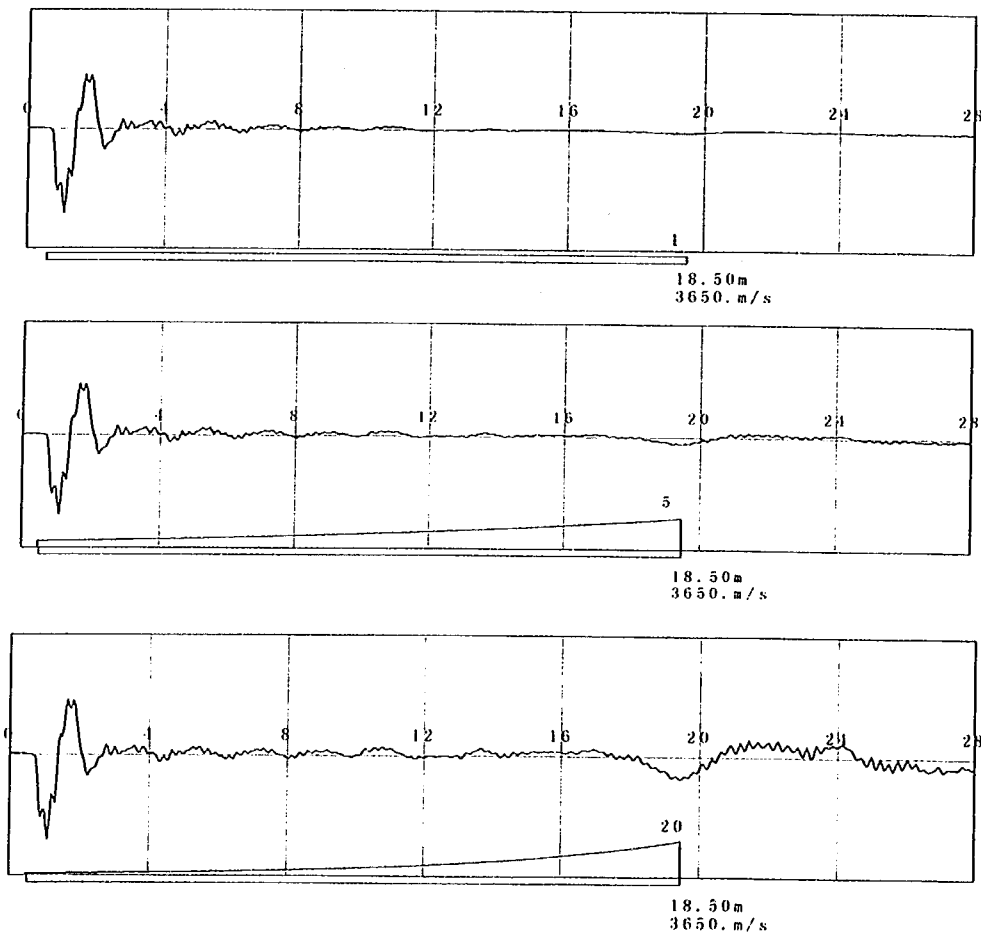


図-2.3.1 波形増幅の例

(2) フィルター処理

一般に、フィルター処理方法として単純移動平均が用いられる。図-2.3.2は、その処理の一例である。図は上から、測定波形、移動平均のデータ数5、10、20とした場合の波形である。移動平均処理によりノイズが除去されていく様子がわかる。しかしながら、ノイズが除去できる反面、あまり移動平均のデータ数を多くすると、原波形が持つ情報がみえなくなる恐れがある。したがって、少ないデータ数から処理を行い徐々に値を増加させ、適切なデータ数を選択する必要がある。

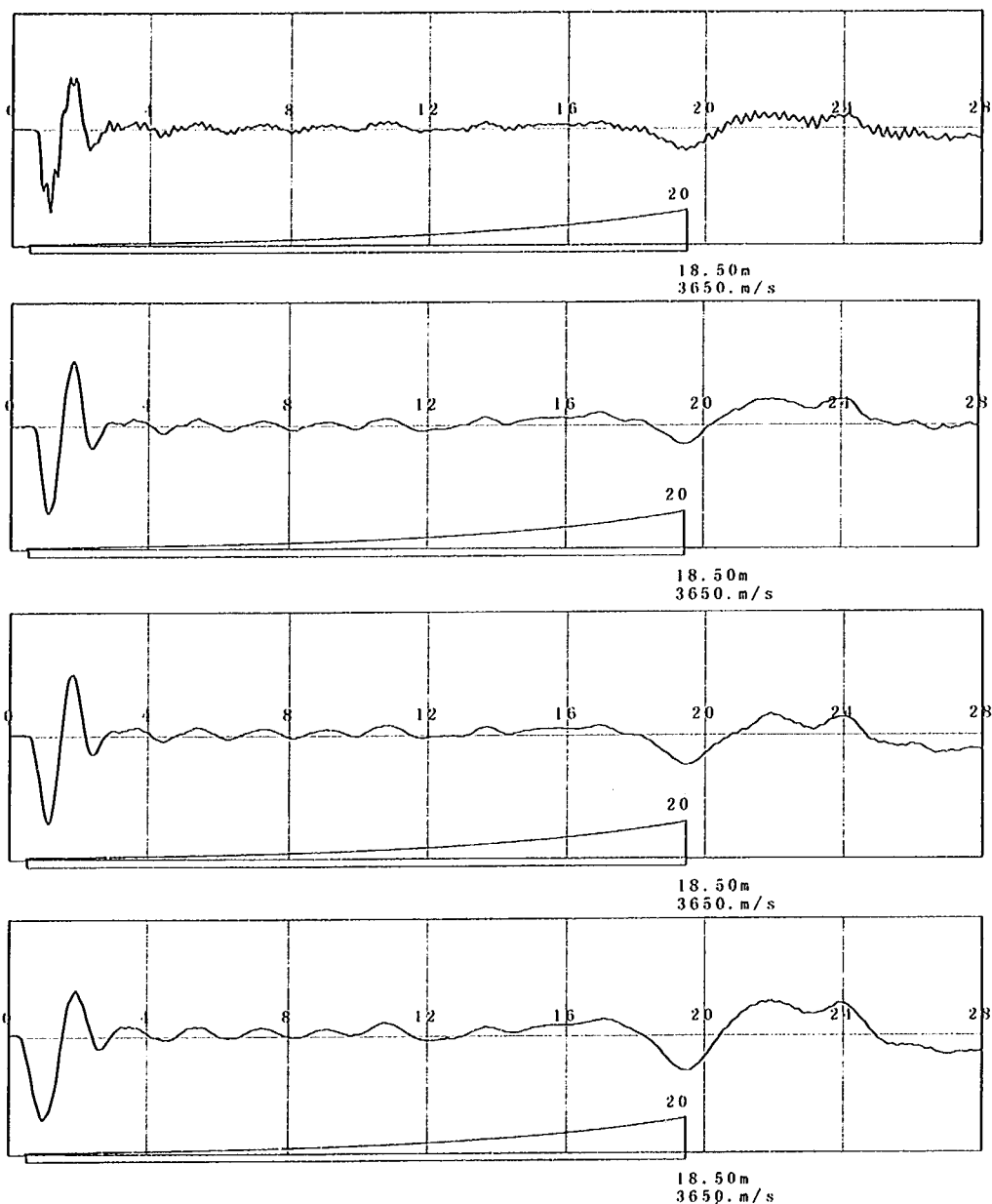
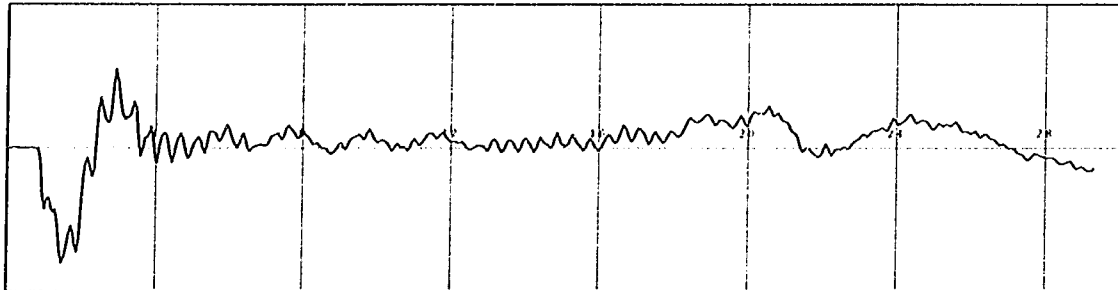
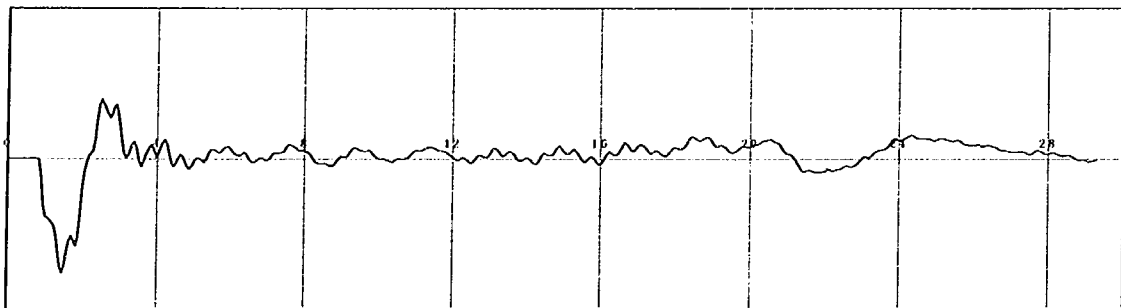


図-2.3.2 フィルター処理の例

その他、測定波形をスタッキング（重合処理）したり、デジタルフィルタなど数学的な処理によりノイズを除去する方法もある。図-2.3.3は、スタッキング処理を行っていない波形と、6個の測定波形をスタッキング処理したものとの比較例である。図からわかるように、複数の測定波形をスタッキング処理することにより不規則なノイズ成分が相殺され、変化しない波形はより強調されている事がわかる。



スタッキングなしの例



6個の測定波形をスタッキングした例

図-2.3.3 スタッキング処理の有無による波形の比較例

2.4 波形の解釈方法

(1) 波動伝播速度の決め方

杭頭を打撃することにより杭体中を伝播する応力波の速度は、波動理論により式(2.4.1)で与えられる。

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (2.4.1)$$

c : 波動伝播速度 (m/s)
 E : 弾性係数 (N/m²)
 ρ : 密度 (kg/m³)

伝播速度は、杭材の密度と弾性係数で決まり、表-2.4.1に示すように通常、コンクリート杭では3,500~4,000m/sec程度で、鋼管杭の場合は約5,120m/secである。

ただし、地中では杭周辺地盤の影響を受けて波動伝播速度が数%変化することが知られている。しかし、実用上は周辺地盤の影響はほとんど無視できる場合が多い。

長さが判明している正常な杭が既に施工されている場合には、その杭に対してインティグリティ試験を実施し、測定波形から速度を逆算するのが望ましい。

なお、コンクリート杭の場合には、表-2.4.2に示すように、コンクリートの養生日数や品質によっても波速が変化するので注意が必要である。

表-2.4.1 杭の種類と波動伝播速度の一例

項目	杭種	既成コンクリート杭		場所打ち コンクリート杭	鋼管杭
		RC杭	PHC杭		
密度 ρ (kg/m ³)		2.5×10^3	2.5×10^3	2.5×10^3	7.85×10^3
ヤング係数 E (N/m ²)		2.9×10^{10}	3.8×10^{10}	3.4×10^{10}	2.06×10^{11}
波動伝播速度 c (m/s)		3400	3900	3680	5120

表-2.4.2 場所打ちコンクリート杭の波動伝播速度の測定例

一斉試験 ¹⁾	コンクリート工学ハンドブック ²⁾		海外文献 ³⁾		海外文献 ⁴⁾	
伝播速度 (m/sec)	コンクリートの品質	縦波速度 (m/s)	General Condition	Velocity (m/s)	Quality of concrete	Velocity (m/s)
3800 を中心に 3500-4050	優	>4570	Excellent	>4120	very good	4000
	良	3660-4570	Good	3300-4120	good	3300-4000
	やや良	3050-3660	Questionable	2750-3300	fair	2800-3300
	不良	2130-3050	Poor	1920-2750	bad	1900-2800
	不可	<2130	Very Poor	<1920	very bad	1900

<参考文献>

- 1) 塚田幸広, 市村靖光: インティグリティ試験による場所打ち杭の品質管理法, 土木学会論文集 No.603/III-44, p.139-146, 1998
- 2) コンクリート工学ハンドブック: 朝倉書店, p.525, 1981
- 3) J.M.Seitz: Low Strain integrity testing of bored piles, 2nd International Conference on Application of Stress-Wave Theory on Piles, 1984
- 4) Bowen Han: Integrity testing of bored piles by seismic reflection method, 3rd International Conference on Application of Stress-Wave Theory on Piles, 1988

(2) 杭先端部、損傷部の評価

杭頭をハンマで打撃すると、杭体内には応力波が発生する。この応力波は、一定の速度で振幅を弱めながら杭先端に向かって伝播し、断面変化部や杭先端部、つまりインピーダンスの変化部に対応して一部が反射する。図-2.4.1は、杭体の材質が均一な杭（直杭）を例にして、(1)断面変化がない場合、(2)断面拡大がある場合、(3)断面縮小がある場合および、(4)全断面にわたる損傷（クラック）がある場合の典型的な反射波形を示したものである。

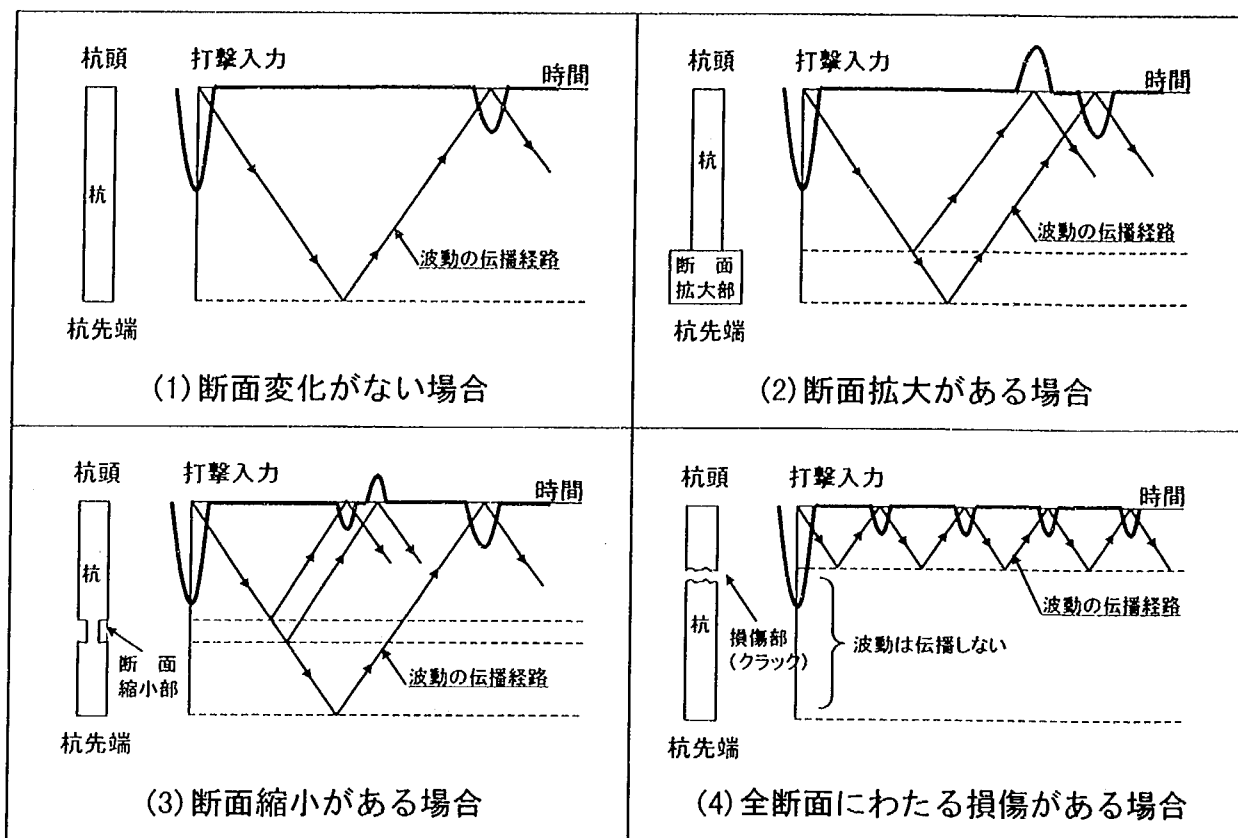


図-2.4.1 典型的な反射波形例

インテグリティ試験では、上記に示した杭各部からの反射波形の特性を考慮して、杭先端部や杭断面の拡大部、縮小部および損傷部（クラック）を評価する。

すなわち、既知あるいは想定する杭長から求められる波動の伝播時間（波動が杭を1往復する時間）より早く、顕著な反射波が観測される場合、杭体には何等かの断面変化や杭に作用する地盤の抵抗の変化があるものとし、その伝播時間から、杭長や断面変化の位置を推定する。そのため、杭長や断面変化の位置の推定では、波動伝播速度が重要な要素となるので、その設定には十分注意する必要がある（2.4(1)波動伝播速度の決め方 参照）。

表-2.4.3 反射波形の特性（杭の材質が一定の場合）

杭の部位	反射波形の特性
杭先端部	杭頭から伝播した圧縮波は、杭先端部で全反射する。全反射した圧縮波は引張波となって反転するため、杭先端部における波形の向きは入力波と同じになる。
杭断面拡大部	杭頭から伝播した圧縮波は、杭断面拡大部で一部が反射し、残りはそのまま透過する。反射波は圧縮波のまま反転するため、杭断面拡大部における波形の向きは入力波と逆の向きになり、その大きさは入力波より小さい。
杭断面縮小部	杭頭から伝播した圧縮波は、杭断面縮小部で一部が反射し、残りはそのまま透過する。反射波は圧縮波から引張波となって反転するため、杭断面縮小部における波形の向きは入力波と同じ向きになり、その大きさは入力波より小さい。
損傷部 (クラック)	杭頭から伝播した圧縮波は、杭の全断面にわたる損傷部（クラック）において全反射し、それ以深の杭体には透過しない。全反射した圧縮波は引張波となって反転するため、損傷部における波形の向きは入力波と同じになり、それ以深は繰返し波形になる。

以下に、計測波形から「健全性が高い」と評価する場合の判定基準を示す。これらの基準を満足しない場合には、その杭を「損傷（クラック）の疑いがある」とみなし、より詳細な調査を計画して、損傷部の有無、位置などの評価を行う。

「健全性が高い」と評価する判定基準（直杭の場合）

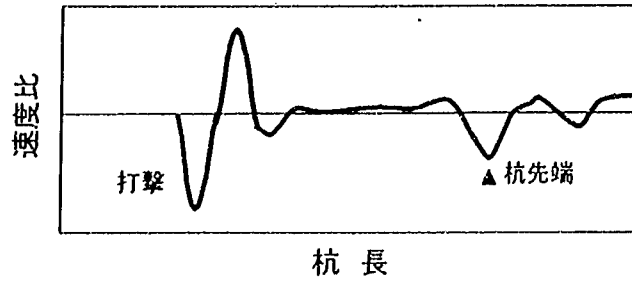
- ①反射波形の再現性が良い。
- ②入力波と同じ向きの大きなピークが、杭の実長（施工長）付近に明瞭に確認され、それ以前には入力波と同じ向きの大きなピークがない。
- ③杭の実長（施工長）付近まで、反射波形が繰返し波形になっていない。

しかし、実際の計測波形は、複雑な反射波形を示すことが多い。その対応として、波形を増幅したり、場合によっては、いくつかの波形を重ね合わせたり、フィルタをかけたりにすることで、反射波形を強調し、杭先端部や損傷部を特定しやすくしている（2.3 波形の処理方法 参照）。

なお、杭に関する事前情報（杭長、杭種、施工法など）が不足しているときには、設定杭長を長めにとって計測を行うのがよい。杭先端からの2往復目の反射波が計測できることもあり、その場合には比較的容易に杭長の判定が行える。

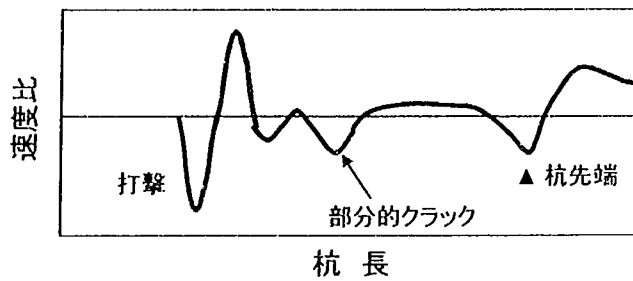
以上のように、杭長や損傷部の評価を適切に行うためには、計測時の設定条件（杭長、波動伝播速度、増幅方法、フィルタ等）や打撃位置を変更しながら、いくつかの波形を計測することが望ましい。そのうえで、関連する設計図書や地盤に関する情報なども参考にして、総合的に計測波形を評価することが重要である。

図-2.4.2に杭体の健全性の判定例を示す。



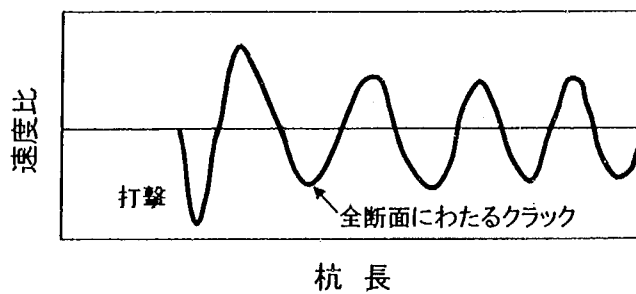
- ①先端反射が明瞭である
- ②先端反射以浅に、下向き大きなピークが見られない

(1) 健全性が高い場合



- ①先端反射が認められる
- ②先端反射以浅に、小さな下向きのピークが見られ、先端反射の位置が杭の実長よりも長い(クラックの影響により、伝播速度が遅くなっている)

(2) 部分的なクラックの生じている疑いがある場合



- ①先端反射は認められない
- ②推定クラック位置以深は、繰り返し反射となっている

(3) 杭の全断面に及ぶクラックが生じている疑いがある場合

図-2.4.2 杭体の健全性の判定例

(3) 地盤の影響評価

地盤中にある杭体を伝播する波動は、地盤抵抗等により以下のような影響を受けるため、これらの変化を考慮して波形の解釈を行う必要がある。

- ① 波動の伝播速度は空中にある場合と比較すると若干速くなる。
- ② 波動の振幅は減衰する。
- ③ 上下2層の地盤に相対的な強度差があると境界部で反射波が発生する。

地盤抵抗の影響を受けたコンクリート杭の場合、波動の伝播速度はポアソン比を 0.20 とすると、理論上約 5% 速くなる。しかし、実際には地盤のバネ定数等の関係で 2~3% 速くなる程度である。杭径 300mm、杭長 4.0m の RC 既製杭を用いた室内土槽実験においても、杭が空中にある場合と地中に設置された場合を比較すると、平均で 2.4% 速くなることが確認できている。(表-2.4.1 参照)

表-2.4.1 地盤拘束の影響を受けた場合の波動の伝播速度

測定器略称	空中	地中	速度比 (c_2 / c_1)	備考
	伝播速度: c_1 (m/s)	伝播速度: c_2 (m/s)		
SIT	4,438	4,567	1.029	
IT-system	4,363	4,483	1.028	
PIT	4,370	4,440	1.016	
全平均値	4,390	4,497	1.024	

したがって、地盤拘束による波動の伝播速度の変化は小さいため、損傷判定に影響を与えることはないと言える。

次に、地盤中における波動の減衰については、指数関数的に減衰と言われている。波動の減衰の様子を模式的に表したのが図-2.4.1 および図-2.4.2 である。

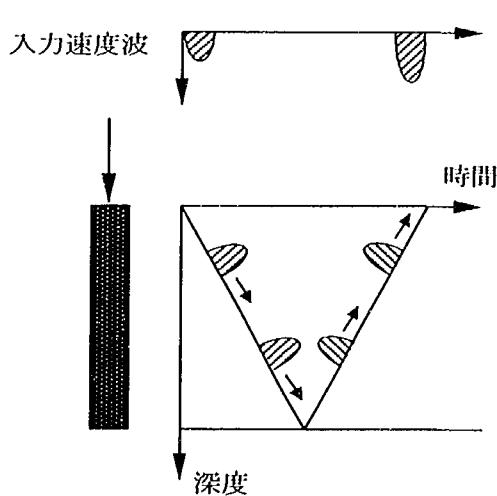


図-2.4.1 地盤抵抗がない場合の波動

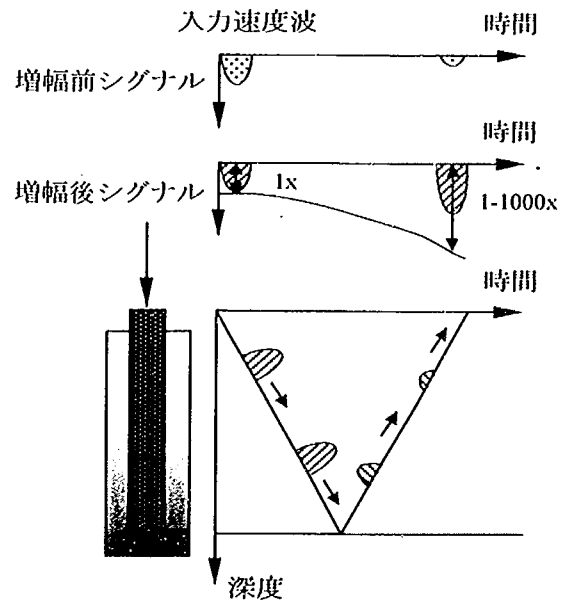


図-2.4.2 地盤抵抗がある場合の波動

地盤抵抗がない場合は入力波に対して、2倍の大きさの反射波が生じるが、地盤抵抗があると反射波は大きく減衰することが判る。2.3(1)増幅法でも述べたように、インテグリティ試験では線形増幅や指数増幅などの波形増幅を行うことにより、減衰した波形を増幅させて判りやすく表示して、波形判断を行っている。

さらに、地盤が測定波形に及ぼす要因として相対的な地盤強度差が挙げられ、これにより速度波形が影響を受ける。わが国の様な複雑な地質構成をもつ地盤では、均一層に杭が設置されていることはなく、多層地盤中に存在している例がほとんどである。そこで、上下2層間において強度に差がある場合を例にとると、その境界層で反射波が発生する。その反射波の発生の仕方は、上下2層が強固な地盤から軟弱な地盤へと変化する場合は、杭体の断面積が減少する場合と同じ変化、つまり入力波と同方向の反射波が発生する。逆に、軟弱な地盤から強固な地盤へと変化する場合は、杭体の断面積が増加する場合と同じ、入力波と逆方向の反射波が発生する。したがって、同じ反射波でも杭体の断面変化の場合と地盤の変化の両者が考えられるため、杭体の周面を構成する地盤条件を把握しておくことは、測定波形を解釈する上で必要不可欠である。

このように地中に設置された杭体を伝播する波動は、地盤から様々な影響を受けるため、杭長確認や損傷調査としてインテグリティ試験を実施する場合、測定波形だけでなく、地盤条件などの情報も考慮して、総合的に波形判定することが重要である。

2.5 試験結果の整理

(1) 試験結果の整理フォーマット

試験概要	試験目的	
	試験場所	
	試験日時	
杭条件	杭No. など	
	杭種	
	工法	
	材齢	
	杭長 杭径	
地盤条件	先端地盤	
	周面地盤	
フーチング	厚さ	
	配筋	
センサ	種類	
	設置方法	
	設置位置	
ハンマ	種類	
	打撃位置	
試験条件の詳細	センサの設置位置と 打撃位置の図示	

データ処理条件	サンプルタイム	
	増幅方法	
	フィルター	
	伝播速度	伝播速度の値： 設定根拠：
試験結果	測定波形	
	波形の解釈	先端反射：
		推定杭長：
		フーチングの影響：
		推定したフーチング厚：
	クラックなどの異常箇所の推定による杭の健全性の評価：	
測定上の工夫		

(2) 試験結果の整理例

フーチング無しの場合のインテグリティ試験結果整理例 (1/2)

試験概要	試験目的	損傷調査
	試験概要	東京都〇〇区地内
	試験日時	199〇年〇月〇日
	杭No.など	No.9
	杭種	場所打ちコンクリート杭
工法	工法	オールケーシング
	材齢	20年
	杭長	不明
	杭径	φ1.2m
地盤条件	先端地盤	洪積砂質土層
	周面地盤	G.L-13mまで粘土混り砂礫を主体とする盛土 G.L-30mまで洪積粘土・砂質土の互層
フーチング	厚さ	
	配筋	
センサ	種類	加速度計
	設置方法	特殊粘土を用いて設置
	設置位置	杭頭中央付近に設置
ハンマ	種類	プラスチックハンマ
	打撃位置	杭頭中央付近から20cm離れに設置
試験条件の詳細	センサの設置位置と打撃位置の図示	<p>The diagram consists of two parts. On the left, a side view of a pile is shown with a hammer striking the top, labeled '打撃' (Impact). On the right, a top-down view of the pile head is shown with a dashed circle representing the sensor's location, labeled '加速度計' (Accelerometer). A starburst symbol indicates the impact point, labeled '打撃位置' (Impact position), which is 20cm away from the center of the pile head, as indicated by the '20cm' label and arrows.</p>

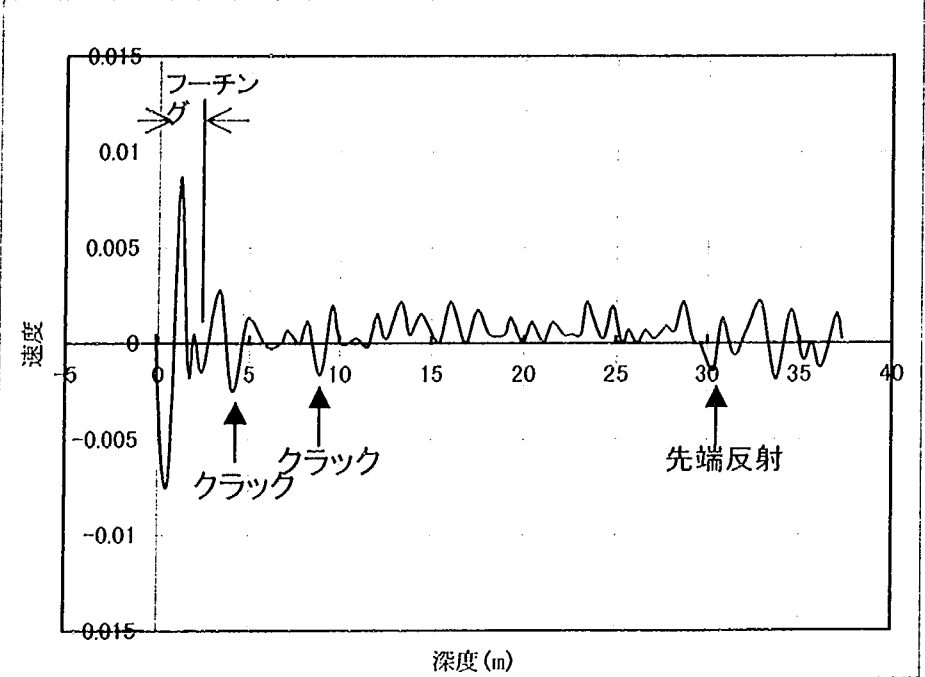
フーチング無しの場合のインテグリティ試験結果整理例 (2/2)

データ処理条件	サンプルタイム	1.19E-04sec
	増幅方法	10倍
	フィルター	無し
	伝播速度	伝播速度の値: 3800m/s 設定根拠: 場所打ちコンクリート杭の一般値
試験結果	測定波形	
	波形の解釈	<p>先端反射: 杭頭より30.5m位置 推定杭長: 30.5m フーチングの影響: 推定したフーチング厚: クラックなどの異常箇所の推定による杭の健全性評価: 杭先端まで, 下向きの大きな反射波が認められないことから, 健全性は高いと考えられる</p>
測定上の工夫		

フーチング有りの場合のインテグリティ試験結果整理例 (1/2)

試験概要	試験目的	損傷調査
	試験概要	東京都〇〇区地内
	試験日時	199〇年〇月〇日
	杭No.など	No.9
	杭種	場所打ちコンクリート杭
工法	工法	オールケーシング
	材齢	20年
	杭長	不明
	杭径	φ1.2m
地盤条件	先端地盤	洪積砂質土層
	周面地盤	G.L-13mまで粘土混り砂礫を主体とする盛土 G.L-30mまで洪積粘土・砂質土の互層
フーチング	厚さ	不明
	配筋	不明
センサ	種類	加速度計
	設置方法	特殊粘土を用いて設置
	設置位置	杭中央付近のフーチング上に設置
ハンマ	種類	プラスチックハンマ
	打撃位置	杭中央付近から20cm離れたフーチング上に設置
試験条件の詳細	センサの設置位置と打撃位置の図示	

フーチング有りの場合のインテグリティ試験結果整理例 (2/2)

サンプルタイム	1.19E-04sec
増幅方法	10倍
フィルター	無し
伝播速度	伝播速度の値:3800m/s
設定根拠:場所打ちコンクリート杭の一般値	
測定波形	
波形の解釈	<p>先端反射:フーチング上面より30.0m位置 推定杭長:30m フーチングの影響:有り 推定したフーチング厚:2.0m クラックなどの異常箇所の推定による杭の健全性評価: フーチング上面より4.0m下付近及び8.0m下付近でクラックによる影響と考えられる反射波が認められることから、杭の健全性は低いと考えられる</p>

参考資料-1 波形解釈における基本理論

インテグリティ試験で得られた反射波形から、杭の先端部や断面変化部の位置を評価する基本的な理論を以下に述べる。

杭頭を小型のハンマで打撃した程度では、杭はほとんど動かない。そのため、杭先端に生じる地盤の反力は非常に小さいので、これを無視し、杭先端を力の作用しない自由端と仮定する。参図-1.1は、杭の中央部で断面が縮小している杭に対する模式的な測定波形を示したものである。杭頭をハンマで打撃すると、発生した波動は参図-1.1に示すような断面変化部（A点とB点）において、断面積の変化に対応して反射する。杭の材質が一定の場合、断面変化部A点における波動の反射率 R は、次式で表わすことができる。

$$R = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \dots\dots\dots \text{参(1.1)}$$

ここで、 A_1 は断面変化部A点における杭頭側の杭の断面積、 A_2 は杭先端側の断面積である。 A_2 が0でない限り、波動は断面変化部を透過する。この時の断面変化部A点における透過率 T は

$$T = 1 - R = \frac{2A_2}{A_1 + A_2} \dots\dots\dots \text{参(1.2)}$$

となる。

断面変化部で反射した波動は、杭頭方向に伝播するので、参図-1.1に示すように、杭頭と断面変化部の距離を波動が往復する時間だけ遅れて杭頭に到達する。

反射率は、

$$A_1 > A_2 \quad (\text{断面縮小}) \dots\dots\dots \text{参(1.3)}$$

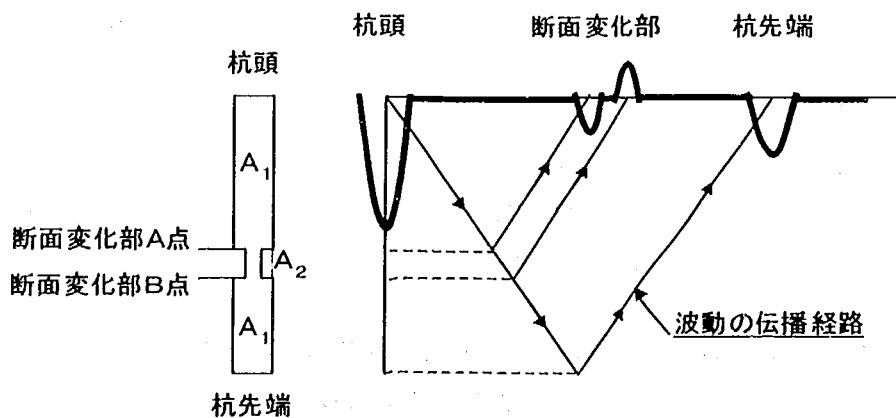
の時、正となり、打撃力と同じ符号の波動として観測される。

また、

$$A_1 < A_2 \quad (\text{断面拡大}) \dots\dots\dots \text{参(1.4)}$$

であれば、反射波の成分は負となり、打撃力と逆符号の波動として観測される（参図-1.1の断面変化部B点）。

なお、杭先端は式参(1.1)において A_2 に相当するものが0となるので、波動は全反射し（ $R = 1$ ）、波動は入力波形と同じ方向となり、大きさも同じになる。



参図-1.1 断面変化に対応する測定波形の模式図

地盤中にある杭体を伝播する波動の伝播速度は、地盤拘束の影響により気中にある場合と比較すると若干速くなる。RC既製杭を用いた室内土槽実験においても、杭が気中にある場合と地中に設置された場合を比較すると、参表-2.1に示すように伝播速度は地中に設置された杭の方が平均で2.4%速くなることが確認されている。このデータは既製杭の頭部において、加速度計から5cm離れた位置を打撃した場合の測定結果を示している。

参表-2.1 地盤拘束の影響を受けた場合の波動の伝播速度

測定器略称		気中での伝播速度		地中での伝播速度		速度比 c_2/c_1	備考
		測定値 (m/sec)	平均値 c_1	測定値 (m/sec)	平均値 c_2		
SIT	SIT-1	4468	4438	4714	4567	1.029	
	SIT-2	4345		4443			
	SIT-3	4300		4540			
IT-system	IT-1	4384	4363	4465	4483	1.028	
	IT-2	4399		4476			
	IT-3	4305		4507			
PIT		4370	4370	4440	4440	1.016	
平均値			4390		4497	1.024	

これはポアソン比が関係しており、杭体の軸方向の圧縮ひずみに対して、軸方向と直角方向のひずみが地盤拘束により影響を受けるためと考えられる。杭の軸方向と直角方向のひずみ $\epsilon_{x=0}$ の場合の伝播速度は次式により求められる。

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{---参(2.1)}$$

- ここに c : 伝播速度
 E : 杭体の弾性係数
 ρ : 杭体の密度
 ν : ポアソン比

ここでコンクリートの弾性係数と密度は一定、ポアソン比を 0.20 として、式参(2.1)に代入して算定した伝播速度と、棒を伝わる波動の伝播速度 ($c = \sqrt{E/\rho}$) との比率: k は 1.054 となり、 $\epsilon_{x=0}$ の場合は最大で約 5% 伝播速度が速くなる。ただし、地盤を弾性体と考えると地盤のバネ定数により厳密には $\epsilon_{x=0}$ とはならないため、伝播速度は式参(2.1)から算定したものより小さくなる。この伝播速度の比率は杭の長さ(根入れ深さ)や地盤の強度等に影響されるが、気中における速度より 2~3%程度速くなるものと想定される。したがって、地盤拘束の影響による伝播速度の変化量は僅かであるため、波形判定に及ぼす影響は非常に小さいものと言える。

また、「2.4 (1) 伝播速度の決め方」でも述べたように、地中にある杭では波動は減衰する。

この地中に埋設された杭中での波動の減衰は、振動速度に比例するものとし、長さ Δx に作用する抵抗を

$\kappa (d\eta/dt) \Delta x$ で表すと、この時の波動方程式は式参(2.2)となる。

$$c^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - k \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad \text{----- 参(2.2)}$$

ここに、 η : 振動変位 ($\eta = u(n, t) e^{u'}$)

c : 杭中での波動の伝播速度

x : 杭頭を原点とする座標系での距離

t : 時間

ρ : 杭体の密度

$$k = \frac{\kappa}{\rho}$$

この波動方程式の一般解は次式で示され、 k が小さい場合の近似解である。

$$\eta = e^{-\frac{1}{2}kt} f(ct - x) + e^{-\frac{1}{2}kt} g(ct + x) \quad \text{----- 参(2.3)}$$

上式から判るように、地盤拘束が作用する場合でも進行波と後退波とがあり、共に同じ速さ c で進む。ところが振幅は時間が経つにつれて指数関数的に減少する。そこで、インティグリティ試験では各装置とも、時間の経過と共に減衰した波形を増幅(線形増幅あるいは指数増幅)することにより、微少な変化を判りやすく表示して、波形の判定を行うことができる。

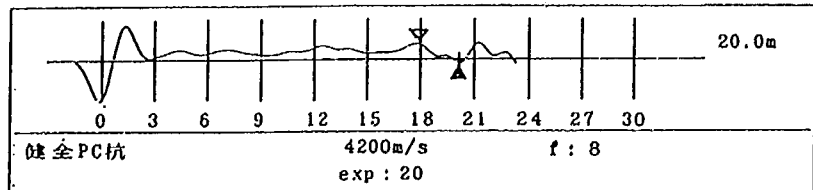
1. 既製杭に対する適用事例

《 健全な既製杭 》

本事例は、新設の建築基礎杭(PC杭)を対象に杭長を測定した事例である。10.0mのPC杭を2本継いでいる測定波形であるが、継ぎ部にも顕著な変化は見られず、設計杭長通り20.0mの深度に先端反射(▲印)が確認できる。また、先端反射の手前の入力波と反対の向きの波形変化(▽印)は支持層に根入れされたことによる地盤の影響が現れていることが分かる。

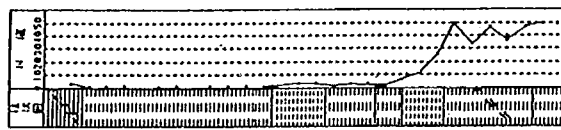
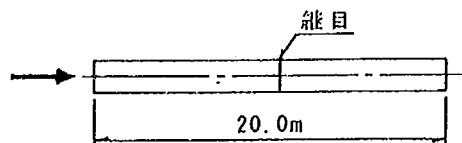
【基礎諸元】

基礎種別：杭基礎
 杭種：PC杭
 設計杭径：φ600mm
 設計杭長：L=20.0m



【測定条件】

測定位置：杭頭
 伝播速度：4200m/s

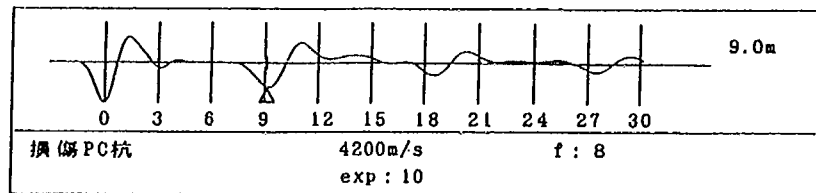


《 損傷のある既製杭 》

本事例は上記事例と同じ現場内で基礎杭打設後、掘削段階で地盤の側方移動により打設されたPC杭が傾いたため杭頭から調査を行ったものである。10.0mの杭を2本継いでいるが、継ぎ手部の上方9.0m(△印)で損傷が確認され、その繰返し波が18mと27mに現れているため、9.0mの位置で破断されているものと判定される。この波形は杭頭と9.0mの位置で重複反射している様子を示している。

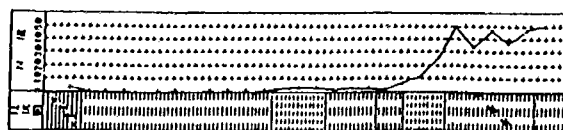
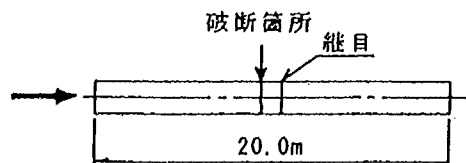
【基礎諸元】

基礎種別：杭基礎
 杭種：PC杭
 設計杭径：φ600mm
 設計杭長：L=20.0m



【測定条件】

測定位置：杭頭
 伝播速度：4200m/s



2. 場所打ち杭に対する適用事例

《 健全な場所打ち杭 》

本事例は、建設段階で側方移動の影響により杭が傾斜したために健全性を調査したものである。試験は約 2.5m 突出した杭頭(杭頭処理は行われていない状態)から実施している。測定波形は損傷を示す波形変化は全く見られず、杭先端からの反射波(▲印)が明瞭に確認できる。したがって、杭には損傷は無く、全体的に傾斜しているものと判断される。また、先端部手前には支持層に根入れされたことによる地盤の影響が現れている(▽印)。

【 基礎諸元 】

基礎種別：杭基礎

杭種：場所打ち杭

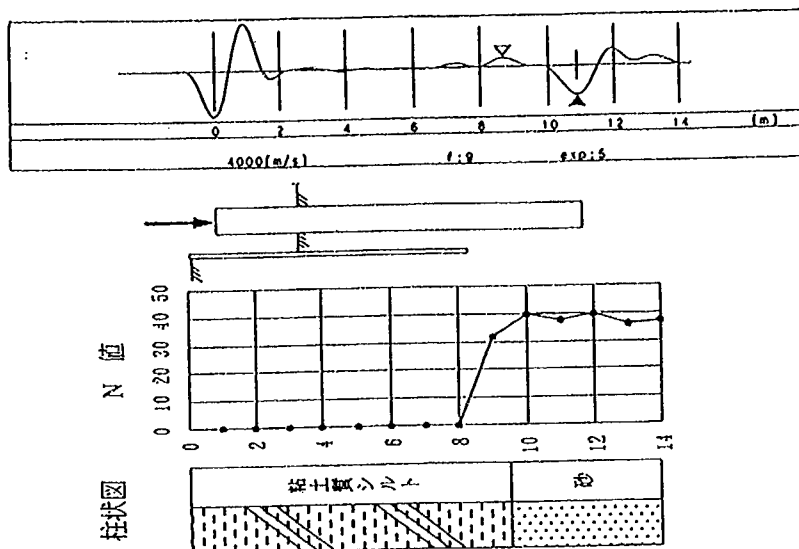
設計杭径：φ1000mm

設計杭長：L=8.5m(全長 11.0m)

【 測定条件 】

測定位置：杭頭

伝播速度：4000m/s



《 損傷のある場所打ち杭 》

本事例は、地震により残留水平変位が生じた橋脚(道路橋)基礎杭の調査事例である。調査は基礎杭直上のフーチング上面から実施している。基礎杭の諸元と調査結果を以下に示す。上に示した健全な波形とは異なり、断面減少を示す入力波と同じ向きの反射波が多く見られる。この断面減少を表す測定波形(△印)が損傷位置と推定できる。したがって、この杭は損傷杭である。

【 基礎諸元 】

基礎種別：杭基礎

杭種：場所打ち杭

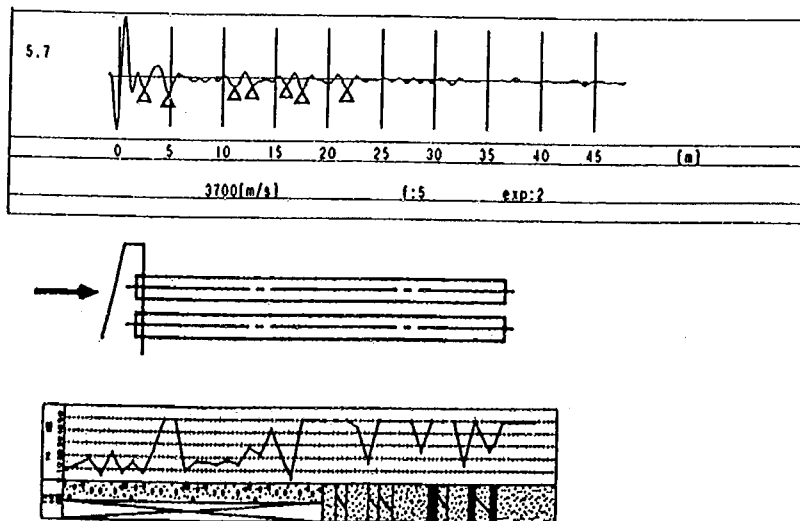
設計杭径：φ1500mm

設計杭長：L=34.0m

【 測定条件 】

測定位置：杭直上のフーチング面

伝播速度：3700m/s



3. オープンケーソンに対する適用事例

《 健全なケーソン 》

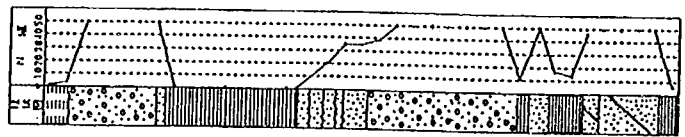
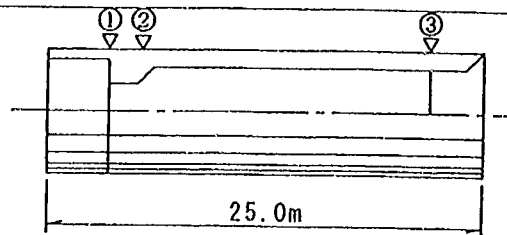
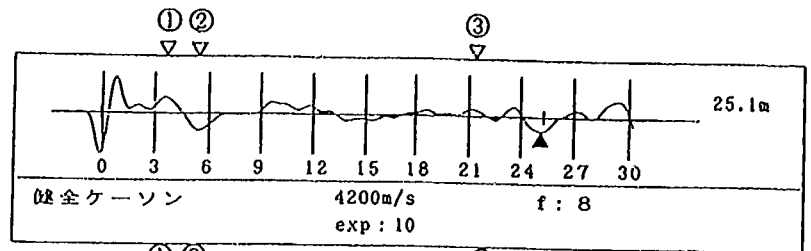
本事例は、地震の影響を受けたケーソンの健全性を確認するために調査した例である。ケーソンは杭基礎と異なり基礎本体が断面変化しているため、断面変化点で反射波が発生する。この事例では波形変化が断面変化と一致しており、健全なケーソンであることが分かる。つまり図において 3.5m 付近で断面増加(▽①)、5.5m 付近で断面減少(▽②)、21m 付近で底盤コンクリートによる断面増加(▽③)を、また 25m 付近でケーソン下端(▲印)を示す波形変化が確認できる。

【基礎諸元】

基礎種別：ケーソン基礎
 杭種：円形オープンケーソン
 設計杭径：φ3000mm
 設計杭長：L=25.0m

【測定条件】

測定位置：パラペット上面
 伝播速度：4200m/s



《 損傷のあるケーソン 》

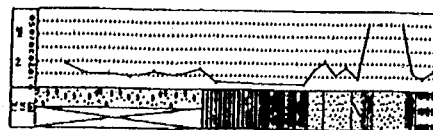
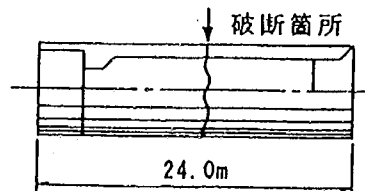
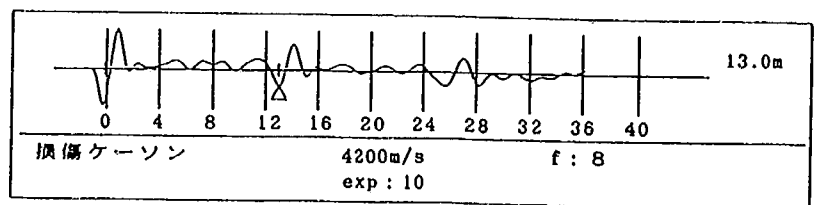
本事例は、地震により水平変位が生じた橋脚ケーソン基礎の調査事例である。試験は頂版端部付近のパラペット天端より行っている。測定波形からケーソンの断面変化がない 13.0m (△印) に反射波が見られ、しかもその倍の 26.0m 付近にも反射波(繰返し波)が確認できることから、頂版から 13.0m の位置で破断しているものと判定される。

【基礎諸元】

基礎種別：ケーソン基礎
 杭種：円形オープンケーソン
 設計杭径：φ3000mm
 設計杭長：L=24.0m

【測定条件】

測定位置：頂版端部付近の
 パラペット上面
 伝播速度：4200m/s



4. その他の適用事例

《 鋼管杭 》

本事例は、鋼管矢板基礎として打設される前、地上において測定した鋼管杭の波形と、打設完了時点の波形を示している。図に示した△印は溶接箇所を表し、▲印は各測定波形における先端反射を表している。このように鋼管杭を対象とした測定では、杭長だけでなく溶接位置も推定することが可能である。

【 基礎諸元 】

基礎種別：鋼管矢板基礎

杭 種：鋼管杭

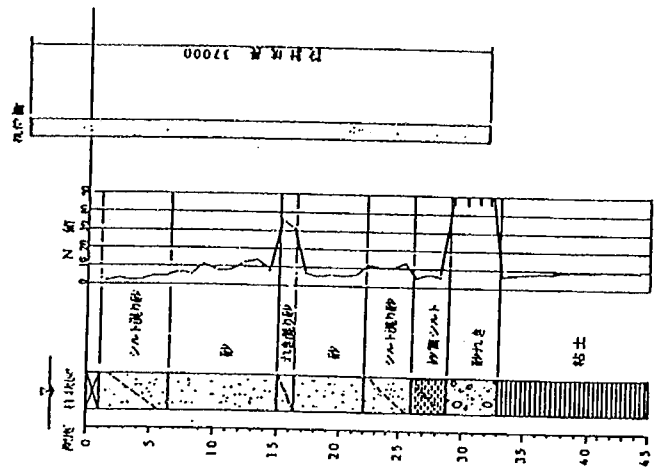
設計杭径：φ800mm

設計杭長：L=37.0m

【 測定条件 】

測定位置：鋼管杭頭部

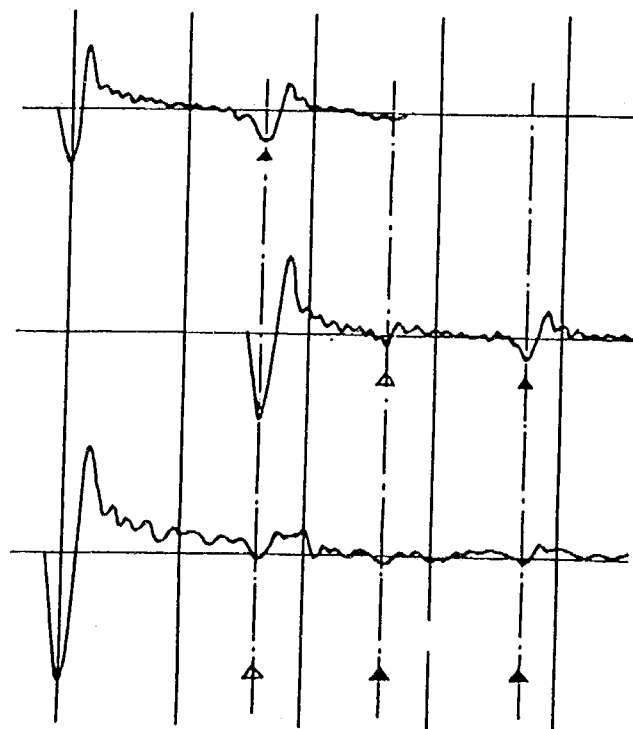
伝播速度：5120m/s



I. 地上に置いた上杭の測定データ
先端反射が明瞭に確認できる。

II. 地上に置いた下杭の測定データ
10m付近の変化は溶接を表わしている。

III. 杭設完了後の測定データ



▲ 杭の先端反射

△ 溶接箇所

《土留め杭 1》

本事例は、かつて土留め杭として使われたH鋼杭の直下をシールドが通過することになり、シールドとの離隔を確認するためにH鋼杭の長さを調査したものである。H鋼杭を掘り出し、杭頭部にセンサを設置して測定を行っている。先端反射波は▲印で示した 13.0mの位置と推定され、杭先端は地盤面から 14.0mの深度に位置することが分かる。

【基礎諸元】

基礎種別：土留め杭

杭種：H鋼杭

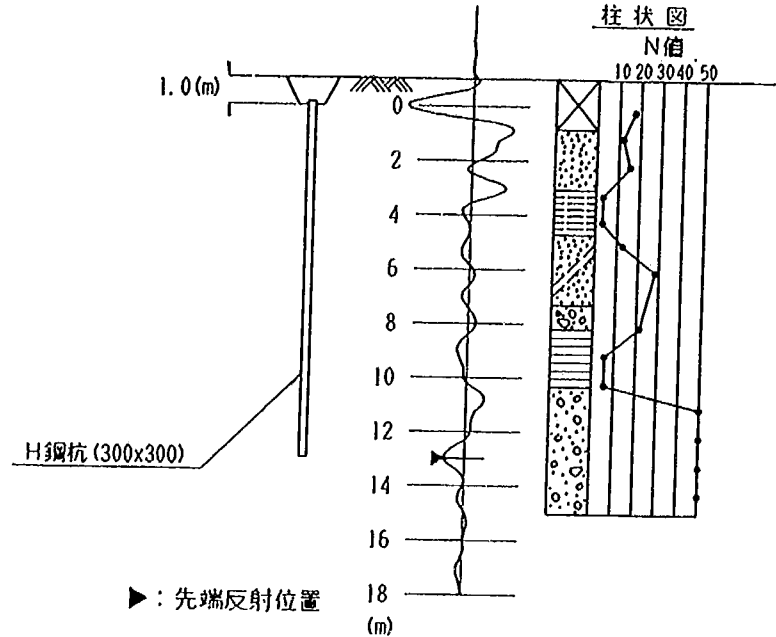
設計杭径：H-300*300mm

設計杭長：L= ? m

【測定条件】

測定位置：H鋼杭頭部

伝播速度：5000m/s



《土留め杭 2》

本事例は、かつて土留めとして使われた鋼矢板の再利用が可能か否かを判断するために、鋼矢板の長さを調査したものである。鋼矢板を掘り出し、杭頭部にセンサを設置して測定を行っている。鋼矢板長さは9.2mと推定され、杭先端は地盤面から 10.2mの深度に位置することが分かる。

【基礎諸元】

基礎種別：土留め

杭種：鋼矢板Ⅲ型

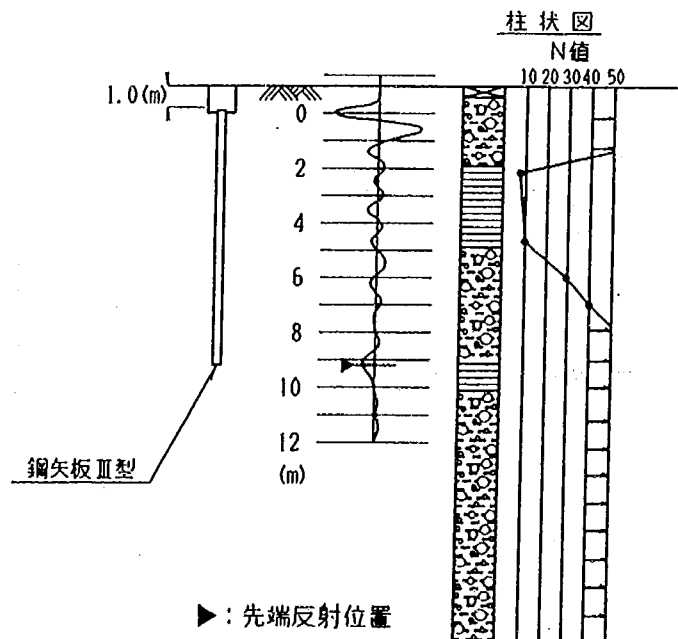
設計杭径：

設計杭長：L= ? m

【測定条件】

測定位置：鋼矢板頭部

伝播速度：5000m/s



問合せ先（インテグリティ試験）

(株)大林組 技術研究所 土木第二研究室 主任研究員 崎本 純治

TEL 0424-95-0932, FAX 0424-95-0903, E-mail sakimoto@tri.obayashi.co.jp

梶谷エンジニア(株) 東京支店 調査部 主任 田口 雅章

TEL 03-3478-3185, FAX 03-3478-3188, E-mail taguchi-masaaki@kajitani.co.jp

基礎地盤コンサルタンツ(株) 地盤物性室 室長 山田 真一

TEL 03-3727-6158, FAX 03-3727-6247, E-mail yamada.shinichi@kiso.co.jp

(株)竹中土木 技術本部 技術開発部 課長 小嶋 平三

TEL 03-3542-6321, FAX 03-3248-6545, E-mail kojima-h@takenaka-doboku.co.jp

(株)東京ソイルリサーチ 技術本部 技術開発室 次長 小野 日出男

TEL 03-3410-1711, FAX 03-3418-1494, E-mail hono@tokyosoil.co.jp

ハザマ 技術研究所 技術研究部 主任研究員 三反畑(サガンバク) 勇

TEL 0298-58-8813, FAX 0298-58-8829, E-mail sandan@hazama.co.jp

(株)フグロ・ジオサイエンス マネージャー 坂本 真也

TEL 03-3288-2936, FAX 03-3288-2984, E-mail sakamoto@fugro.co.jp

(株)フジエンジニアリング 調査第一部 部長 今田 和夫

TEL 06-6350-6130, FAX 06-6350-6140, E-mail k-imada@fujiengi.co.jp

衝撃振動試験を用いた
橋梁基礎の損傷調査法マニュアル(案)

平成11年3月

建設省土木研究所
中央復建コンサルタンツ(株)

はじめに

平成7年に発生した兵庫県南部地震において数多くの橋梁の基礎が被災した。しかしながら、当時これらの被災した橋梁基礎の効率的な調査技術は十分に確立されておらず、その調査には多大な時間と費用を要した。また、被災後の耐震性検討に際しては、古い橋梁では図面がなく、基礎の形式・形状が不明であることが問題となり、既設橋梁の基礎の形状を効率良く調査する技術が必要であることが明らかになった。

これらのことが契機となり、建設省土木研究所の構造橋梁部基礎研究室および材料施工部施工研究室を主幹として平成8年度から平成10年度の3ヶ年の計画で共同研究「橋梁基礎構造の調査方法の開発」が開始された。

本共同研究は、「橋梁基礎構造の調査に要する時間や費用の低減を目的として、大規模な地盤の掘削を必要としない調査方法を開発する」ことを目標とし、以下の課題について検討を行った。

- ① 基礎の損傷調査手法および健全度判定手法の開発
- ② 基礎形状の調査手法の開発

研究の実施にあたっては、①IT（インティグリティ試験）、②AE（アコースティック・エミッション）、③ボアホールカメラ、④ボアホールレーダ、⑤磁気探査、⑥衝撃振動試験の6手法を対象とし、室内模型試験、実大現場試験等により、各種調査手法の適用性を検討した。

本マニュアルは、このうち衝撃振動試験を用いた基礎の損傷調査に関する研究成果をもとに、試験の適用条件、標準的な試験方法、測定結果の解析方法についてとりまとめたものである。

衝撃振動試験グループメンバー

建設省土木研究所	構造橋梁部 基礎研究室 研究員	石田 雅博
	構造橋梁部 基礎研究室	秋田 直樹
中央復建コンサルツ(株)	施設保全室 室長	金谷 忠良
	施設保全室 課長	田底 成智
	情報システム室 次長	水野 温夫

目 次

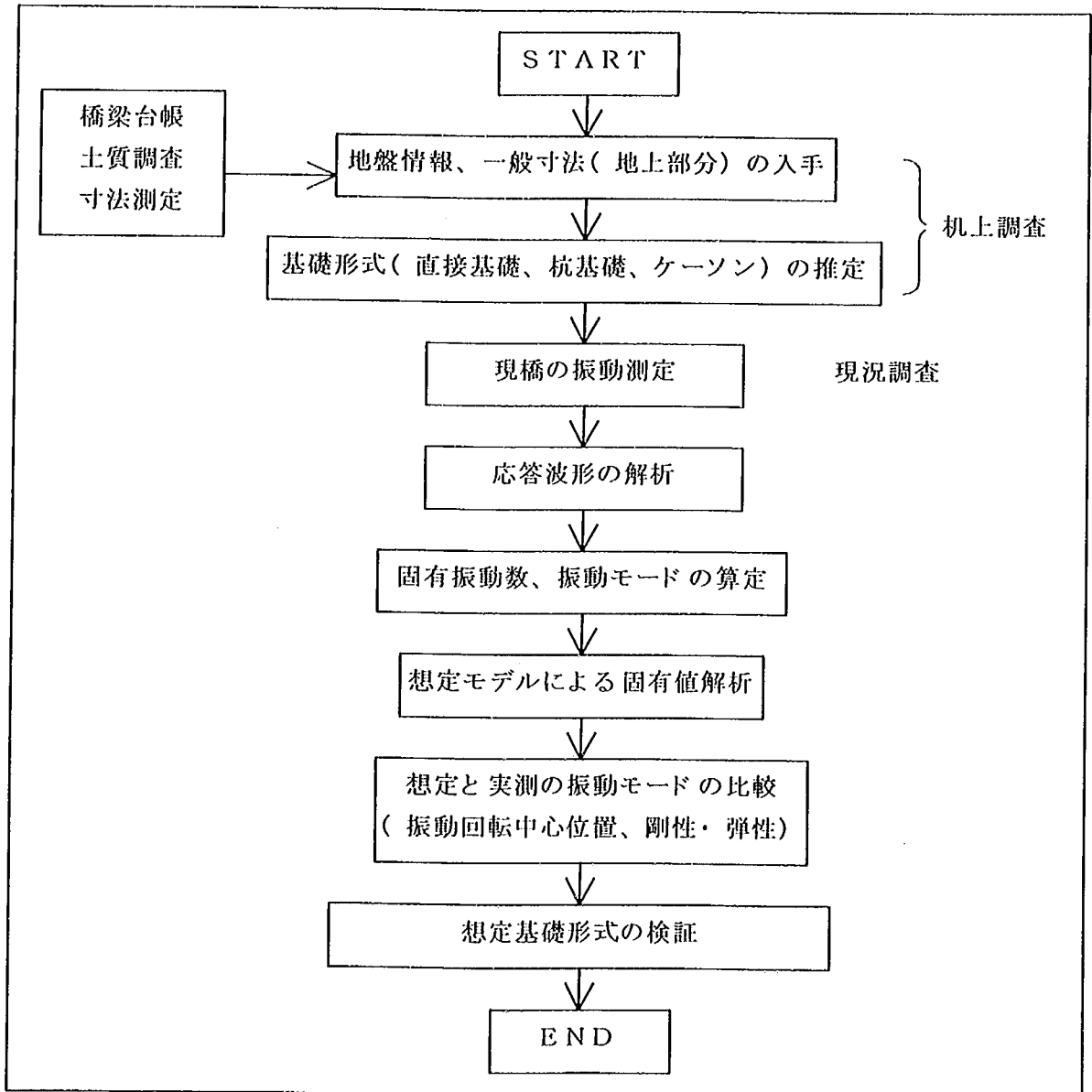
	ページ
適用範囲	1
(1) 基礎形式の特定	1
(2) 基礎全体の健全性	2
用語の説明	4
1. 試験概要	6
1. 1 試験の目的	6
1. 2 試験の方法と手順	7
2. 測定要領	9
2. 1 測定計画	9
2. 2 測定準備	9
2. 3 測定手順	10
2. 4 測定システム	11
2. 5 橋脚の測定	12
2. 6 測定データの保存	16
3. 固有振動数の決定方法	17
3. 1 応答波形の重ね合わせ	17
3. 2 応答波形の解析	19
3. 3 固有振動数の決定	20
4. 固有値解析の方法	21
4. 1 構造物のモデル化	21
4. 2 固有値解析	23
4. 3 解析結果の検証	24
5. 試験の評価	25
5. 1 評価の手順	25
5. 2 基礎の健全度評価	26
5. 3 不健全と判定された場合の対策	26
参考資料	27
問い合わせ先	34

適用範囲

衝撃振動試験は、基礎形式（直接基礎、杭基礎、ケーソン）の特定や基礎全体の健全性を把握することができる。

(1) 基礎形式の特定

衝撃振動試験は、水平方向に衝撃を与えた場合の振動性状が計測されるだけであるから、基礎形状を求めることはできない。但し、基礎形式を土質調査報告書等から推定した場合に、その検証を実施できる。一般的なフローは以下の通りである。

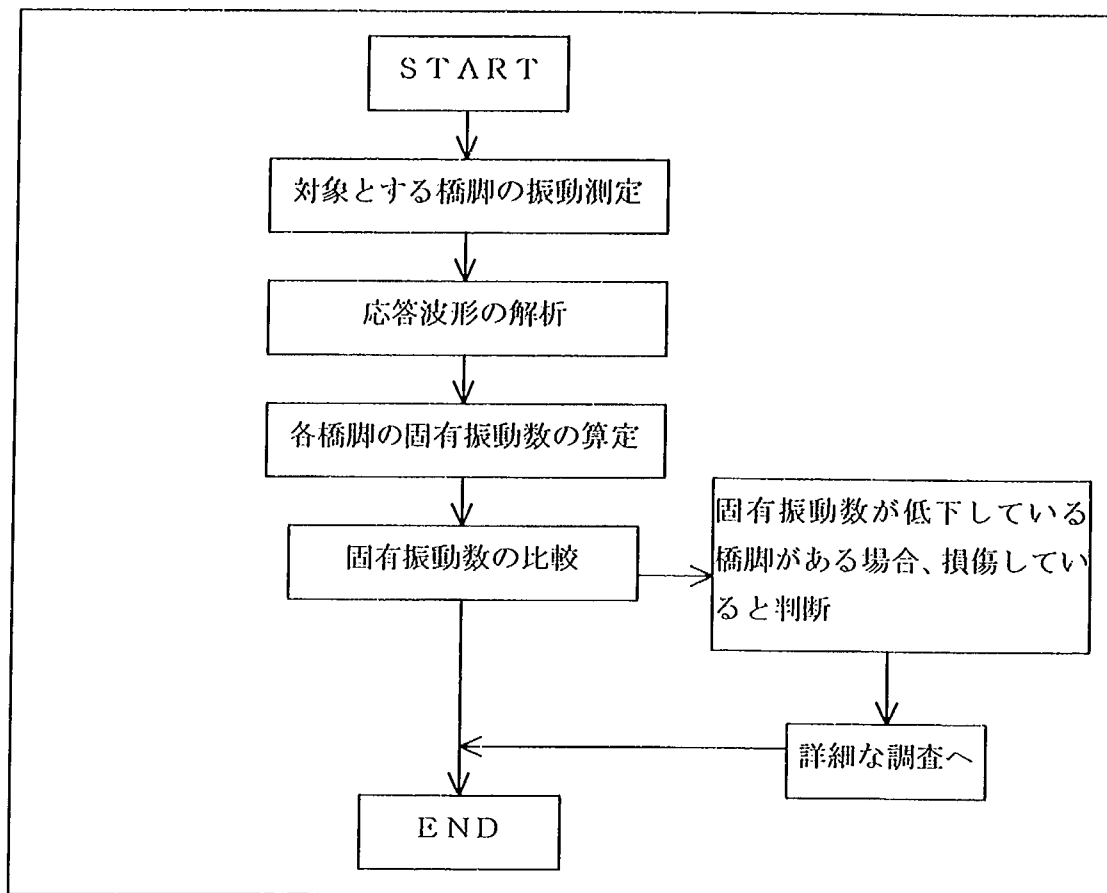


例えば、直接基礎と杭基礎を比較した場合、水平方向に衝撃を与えると杭基礎よりも直接基礎の方が回転中心が高い位置（フーチングの高さ）にある。また、杭基礎とケーソン基礎とを比較した場合、ケーソン基礎の方が支持層の高さを中心とした剛体的な回転を示す。そのことにより、基礎形式の検証を行う。

(2) 基礎全体の健全性

(a) 連続橋梁の場合

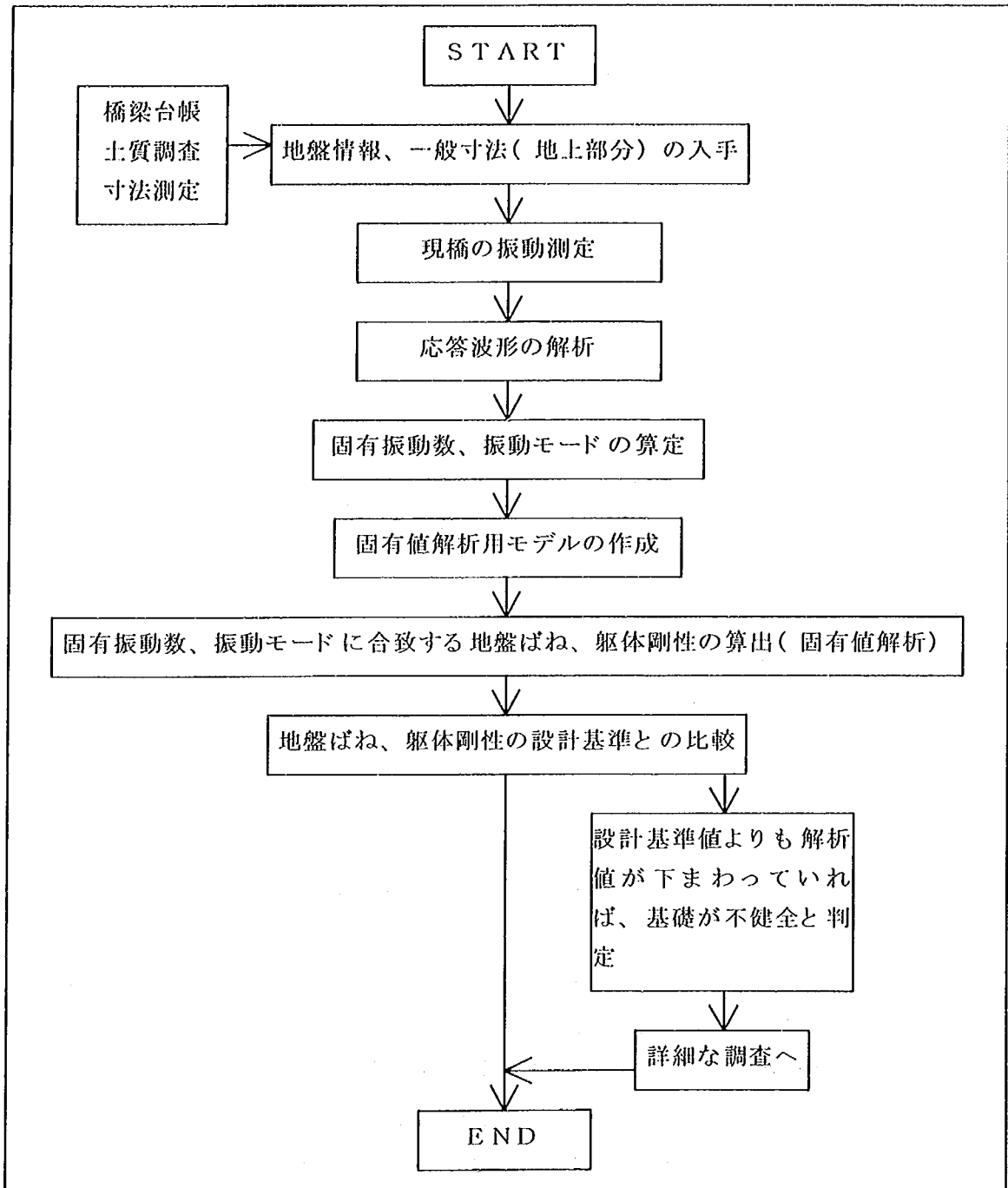
同形式の橋脚が連続している高架橋が、地震被害を受けたとする。その時に、外観上は健全であるが、基礎部分が健全かどうかを確認したうえで通行を再開させたい場合に、衝撃振動試験は有効である。この場合の手順は以下の通りである。



但し、これは橋脚の形状が同形式である場合に有効であり、個々の橋脚の形状高さが異なる場合は、以下の単独橋梁の場合に準ずる。

(b) 単独橋梁の場合

単独橋梁の場合は、固有振動数を求めるだけでは健全性は判定できない。地盤データや一般寸法等の情報をもととした固有値解析が必要である。一般的なフローは以下の通りである。



用語の説明

本マニュアルにおける用語の意味は、次のとおりである。

固有振動数：構造物の持つ固有の値で、構造物の質量と復元力（構造物の剛性および地盤のばね定数）によって決定される。構造物はこの固有振動数と同じ振動数を持つ外力にたいしては非常に揺れやすい。

位相差：入力に対する応答の遅れの値を位相差という。衝撃振動試験で得られる速度スペクトルにおいては、構造物の固有振動数におけるこの値は 180° または 360° に、加速度スペクトル、変位スペクトルでは 90° または 270° となる。

固有値解析：構造物に対し質量、曲げ剛性、そしてそれを支持する地盤のばね定数等明確に定めたモデル化を行い、このモデルの固有振動数や固有振動モードを計算によって求めることをいう。橋梁について上部工、橋脚躯体および基礎部をいくつかの質点と、その質点を結ぶ曲げ剛性をもった部材で構成させるとともに、地盤をバネに置換した解析モデルを作成する。このようなモデル化によってこの橋脚の固有振動数と固有振動モードが計算によって算定される。

固有振動モード：固有振動数で振動するときの振動モード。固有値解析で得られる振動数、振動次数に応じて1次の振動モード、2次の振動モードというようにいう。

振動モード：構造物が振動を続けるときの形状。

地盤バネ定数：地盤の弾性変位量とその時の荷重を関係付ける定数。基礎構造物と地盤の間に考慮する地盤バネには鉛直バネ定数、水平バネ定数、回転バネ定数等がある。固有値解析で用いる各バネ定数の初期値は示方書類に定められている算定式により算定する。

自由振動：一時的な外界からの作用力によって起こった振動が、以後外界からの作用を受けることなく継続する振動をいう。

周波数：単位時間当たりの振動回数。一般には1秒間の振動回数をいい、単位として“Hz”が用いられる。

卓越振動数：地震波のような不規則な波も、様々な振動数の正弦波に分解することが可能である。この場合、それぞれの正弦波の振動振幅は異なるのが一般的であるが、特に大きい振動振幅を持つ正弦波の振動数を卓越振動数という。

トリガー：衝撃振動試験の測定で得られる時刻歴波形の収録に際し、打撃力が作用した瞬間からの必要データを収録することを目的に、設ける目印。

波形の重ね合わせ：衝撃振動試験によって得られる波形にノイズ（例えば、交通振動あるいは常時微動等）が比較的顕著に乗っていると、橋脚の固有振動数決定が困難な場合がある。そこで、複数の応答波形を重ね合わせることで、無秩序なノイズは互いに打消し合い、その影響を些少なものとする為の作業のことである。

フーリエ変換：地震波のような不規則な波形も、様々な振動数の正弦波に分解することが可能である。このような、正弦波の変換をフーリエ変換という。ちなみに分解した正弦波を重ね合わせることで元の不規則波形を作り出すことを逆フーリエ変換という。

フーリエスペクトル振幅：フーリエ変換によって得られたそれぞれの振動数の正弦波が持つ振動振幅の値をいう。応答波形が加速度波形であればフーリエスペクトルの単位は gal、変位であれば mm となるが、一般には得られた値に取込み波形の継続時間の 1/2 を乗じた値で表すため gal・sec、mm・sec となる。

曲げ剛性：構造物の持つ曲げに対する抵抗性を表す。この値は、構造物躯体の断面 2 次モーメント (I) と、躯体材料のヤング係数 (E) を乗じて求められる。

ロッキング振動：壁式橋脚のように橋軸直角方向の曲げ剛性が大きな構造物では躯体はほとんどたわむことなく全体が剛体として、水平および回転振動をする。このような形態をロッキング振動という。

曲げ振動：背の高い円柱橋脚等は躯体が曲げ変形しやすく橋脚はたわむような振動形態となる。このような形態を曲げ振動という。

1. 試験概要

1.1 試験の目的

- (1) 衝撃振動試験は、橋梁下部工の健全度判定を行うことを目的とする。
- (2) 衝撃振動試験は、特別の場合を除きこのマニュアルにより実施するものとする。

【解説】

(1)について

本マニュアルでは、橋脚躯体または高架橋の柱と基礎構造物を総称して橋梁下部工という。橋梁下部工は橋桁など上部工を支える重要な構造物であり、その変状は構造物の使用性に重大な影響を及ぼすため、下部工の健全度判定は、橋梁の維持管理において重要である。

しかし、下部工のうち基礎は一般に地中にあるため、上部工のように直接目視によりその健全度を判定することは困難である。衝撃振動試験は、精度良く下部工の健全度判定を行うために実施するものである。

橋梁下部工の変状の原因には、主に以下のものが考えられる。

①コンクリートの劣化による橋脚躯体の強度の低下

②基礎を支える地盤の支持力の低下

躯体の強度の低下は経年による風化や、ひび割れなどによって生じる。地盤の支持力の低下は河川の増水によって橋脚の周りの土が洗掘されたり、あるいは地盤沈下などによって基礎と地盤の間にすきまができてたりして生じる。

そのほかの変状の原因としては、近接工事による地盤のゆるみなどがある。また、地震などの過大な荷重が作用した場合も変状の原因となる。

橋梁下部工の健全度の評価に当たっては、これらの変状に対する精度のよい評価が重要であり、そのための指標として、変状の程度をよく反映し、しかもバラツキの小さい指標を選ぶ必要がある。

変状の原因である躯体の強度や地盤の支持力が低下すると、それに伴って躯体の曲げ剛性や地盤のばね定数などが低下すると考えられる。なぜなら、躯体の曲げ剛性を決定するヤング係数は強度に応じて求められ、地盤のばね定数は支持力とも関係するN値によって決定されるからである。

これらのことを考慮すると、橋梁下部工の健全度評価に用いる指標としては、固有振動数がよいと考えられる。固有振動数は躯体およびそれが支える橋桁の質量と躯体の曲げ剛性および地盤のばね定数により決定される。そこで橋脚躯体の剛性あるいは地盤のばね定数が低下した場合は固有振動数の低下となって現れると推定できるからである。

また固有振動数が質量と曲げ剛性および地盤のばね定数により決定されるとすると、固有振動数が算定できれば、橋桁および躯体の質量は設計図やまたは諸元を測定することで求めることができるから、橋脚躯体の剛性および地盤の強度を計算で導き出せることになる。

以上から橋梁下部工の健全度評価の指標として、構造物の固有振動数を用いることとした。

(2)について

このマニュアルは初めて衝撃振動試験を適用し、構造物の健全度を調査する場合の試験方法を規定したものである。したがって、2度目以降の試験ではこのマニュアルによらず、ピックアップの設置は天端のみでよい。そして、固有振動数の低下が見られた場合は、このマニュアルに示した試験法で再度実施するのがよい。

また、新設橋梁下部工の場合に、供用開始前に全ての付帯構造物が設置された状態で実施すれば、固有振動数の初期値が得られる。この初期値で、健全度の経年変化を精度良く追跡することができる。

1.2 試験の方法と手順

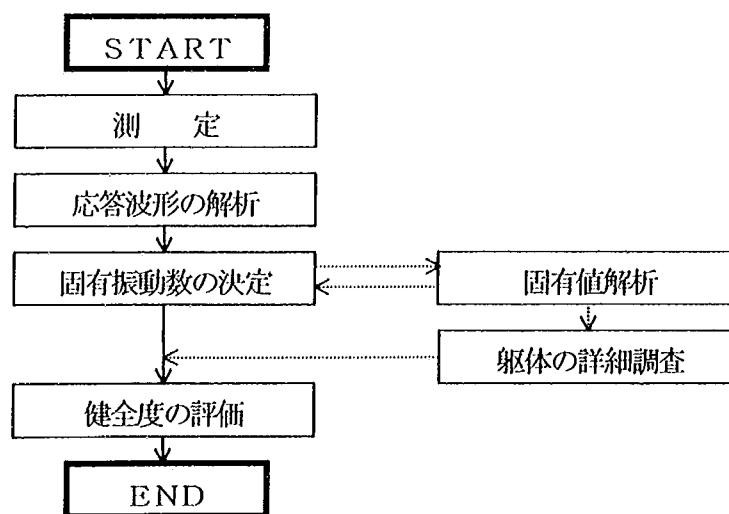
衝撃振動試験は、その目的を十分に把握し、適切な方法および手順により実施するものとする。

【解説】

衝撃振動試験は、打撃による橋脚または高架橋の応答波形をフーリエ解析することにより固有振動数を求め、これから基礎の支持力や躯体の剛性について定量的な評価を行って橋梁下部工の健全度を判定する試験法である。

固有振動数を求める最もよい方法は、任意の振動数で加振できる起振機を橋脚天橋等に設置して強制振動試験を行うことであるが、一般に時間と費用がかかる。調査対象が非常に多い既設の橋梁に適用するには実用的でない。また、簡易な測定方法として常時微動を利用することも考えられるが、背が低く曲げ剛性が大きい橋脚、根入れの深い橋脚などにおいては、明瞭な卓越周期が得られない場合が多く、固有振動数の決定が困難なことが多い。衝撃振動試験は、比較的簡易なほか、打撃による応答波形を用いるため精度が高い試験法として実績を築いてきた試験法である。

衝撃振動試験の一般的な手順を解説図 1.2.1 に示す。



解説図 1.2.1 衝撃振動試験の手順

打撃には一般に重錘が用いられ、打撃位置およびピックアップの設置位置は、構造物の種類や形状および調査の目的によって異なるので、これらを十分に把握して試験を実施する必要がある。打撃による応答波形はピックアップおよび測定計器本体中のアンプ、A/D変換器を介してパソコンに取り込まれる。固有振動数は、パソコンにより、応答波形を重ね合わせてノイズを小さくした波形のフーリエ解析を行って求める。

橋梁下部工の健全度判定は、一般にはこの固有振動数を用いて行うが、フーリエスペクトルの卓越振動数が複数存在し、その判定が困難な場合および躯体の健全性の詳細な調査を行う場合には固有値解析を行う必要がある。

なお、橋梁下部工の健全度については一般には一次の固有振動数で判定できるが、劣化の部位やその程度など躯体の健全度を詳細に判定する場合には、二次以上の高次の固有振動数および振動モードが必要となる。本マニュアルではこれらの方法についても規定した。

2. 測定要領

2.1 測定計画

測定計画を立てるにあたっては、調査対象とする構造物の種類、調査内容、および周辺の環境等に注意して、十分な検討を行わなければならない。

【解説】

衝撃振動試験は、調査対象とする構造物の種類と調査内容により、測定計器の取付位置、打撃の位置と方法が異なるため、注意しなければならない。具体的には、構造物が河川の中か陸上か、道路が隣接している場合に交通振動が大きいか小さいか、作業車が現場に入れるか否か等によって作業内容、および作業性が異なるので、事前調査が必要である。

事前調査にあたっては、前述の他に、重錘の打撃余裕、構造物の天端、および中間位置のピックアップの取付作業方法等について、十分に検討をすること。特に、重錘の打撃余裕については、念入りに調査し、橋脚を打撃できる空間があるかどうかを確認する。

2.2 測定準備

測定にあたっては、計画に基づいて、必要な測定計器・道具等を準備する。

【解説】

測定に必要な測定計器・道具等の一覧（例）を解説表 2.2.1 に示す。

解説表 2.2.1 測定計器・道具等の一覧（例）

測定計器・道具等	注意事項
測定計器本体 パソコン 発電機	バッテリーがあれば、発電機は特に要しない。
ピックアップ 鋼製台座 ケーブル アルミ板 木板 ネジ類	測点数分を用意。 構造物天端にピックアップを設置するためのもの。 測点数分を用意。 // // ピックアップとL形アルミ板の取付用 L型アルミ板と取手付アルミ板の取付用 取手付アルミ板と木板の取付用（木ネジ）
工具一式 接着剤	構造物壁面と木板を接着
重錘 ロープ	30～100kgf 程度 重錘吊り下げ用、重錘引き振り用

2.3 測定手順

測定にあたっては、その手順を十分に把握しておかなければならない。

【解説】

一般的な測定手順を以下に示す。

- (1) 計画に基づき、重錘とピックアップの設置位置を決める。

重錘とピックアップの設置にあたっては、作業の安全性等を考慮して、構造物への設置位置を変更してよい。ただし、設置位置は正確に測ること。

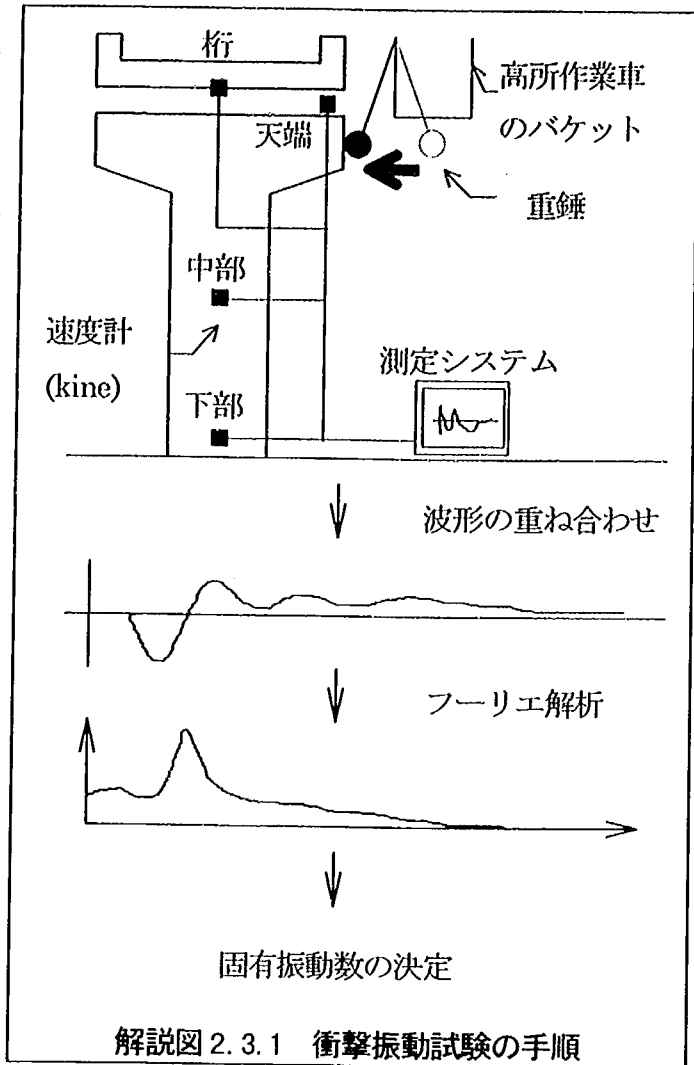
- (2) ピックアップを設置し、ケーブルを接続する。
- (3) 測定計器本体とケーブルを接続し、測定の準備を行う。
- (4) 各ピックアップを軽く叩いて、パソコン画面上で、応答波形および、接続チャンネルの確認を行う。
- (5) 重錘を取付ける。

重錘は落下しないように十分安全に取付け、周辺には、測定計器本体を置かないこと。

- (6) 試し打撃を行い、パソコンの画面上で、打撃による応答波形が確認できるように、打撃力を調整する。ただし、最大レンジを越えないようにする。

- (7) 本打撃を行い、測定を行う。

正常な応答波形が5～10波程度保存できるまで、打撃を行う。



解説図 2.3.1 衝撃振動試験の手順

2.4 測定システム

試験における測定システムを図 2.4.1 に示す。

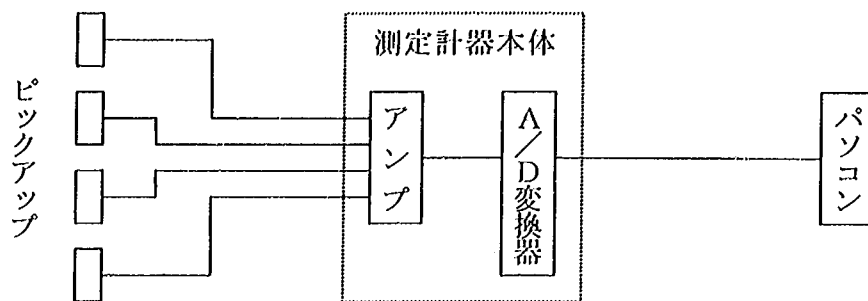


図 2.4.1 測定システム図

【解説】

測定計器の例を解説表 2.4.1 に、その仕様を解説表 2.4.2~3 に示す。

解説表 2.4.1 測定計器一覧表 (例)

測定計器名	型 式
ピックアップ	VSE-15T
測定計器本体	AV-200
パソコン	PC9801NX

解説表 2.4.2 ピックアップ (VSE-15T) の仕様

成 分	1成分
測定周波数範囲	1~70Hz
最大測定範囲	±10kine
感 度	1V/kine、5mV/gal
出力抵抗	10Ω以下
最大出力電圧	±11V
分 解 能	最大30μkine
供給電源	±15V (±3%)
消費電流	30mA以内
使用温度範囲	-10℃~50℃
許容最大加速度	30G (0.1sec以内)

解説表 2.4.3 測定計器本体 (AV-200) の仕様

測定周波数範囲	1～70Hz
最大測定範囲	加速度：2000gal 速度：約100kine 変位：10mm
確 度	加速度：±1%以内 速度：±1%以内 変位：±4%以内
最小分解能	加速度：0.01gal 速度：1mkine以下 変位：約10μm
信号出力	±10V以上／フルスケール
電 源	DC/11～14V AC/100V

(注) ピックアップと測定計器本体の測定周波数範囲は、1～70Hzであるので、パソコン側でのハイパスフィルターの設定は、不要である。ピックアップの使用温度は、-10℃～50℃であるので、夏場、炎天下での試験では、直射日光を避けること。

2.5 橋脚の測定

2.5.1 ピックアップの設置位置と打撃位置

ピックアップの設置位置と打撃位置は次の各項による。

(1) 下部工の調査

下部工の調査にあたっては、1次の固有振動数とその振動モードを把握しなければならない。ピックアップは、原則として橋脚天端、中間、下端に合計3台を、検出方向が橋軸直角方向になるように設置する。

打撃位置は、橋脚天端付近とし、橋軸直角方向に打撃する。

(2) 躯体の詳細調査

躯体の詳細調査にあたっては、2次の固有振動数とその振動モードを把握しなければならない。ピックアップは、橋脚天端、中間、下端に合計4台以上を、検出方向が躯体の曲げ剛性の小さい方向になるように設置する。

打撃位置は、橋脚全高の中間付近とし、躯体の曲げ剛性の小さい方向に打撃する。

【解説】

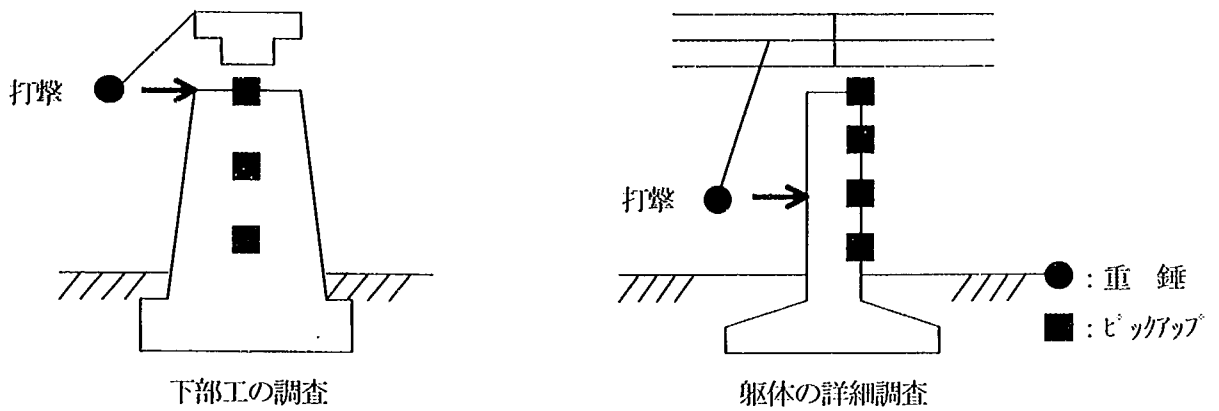
(1) ピックアップの設置位置と打撃位置を、橋脚の種類別に以下に示す。

a) 壁式橋脚

下部工の調査にあたっては、躯体の曲げ剛性が大きく、ロッキング振動を呈する橋軸直角方向の振動を用いる。これは、桁による拘束が小さく、地盤バネ定数を評価するのに適しているためである。

躯体の詳細調査にあたっては、躯体の曲げ剛性が小さく、曲げ振動モードが現れやすい橋軸方向の振動を用いる。これは、躯体の曲げ剛性を精度よく評価するのに適しているためである。

壁式橋脚の場合の打撃位置とピックアップの設置位置を解説図 2.5.1 に示す。

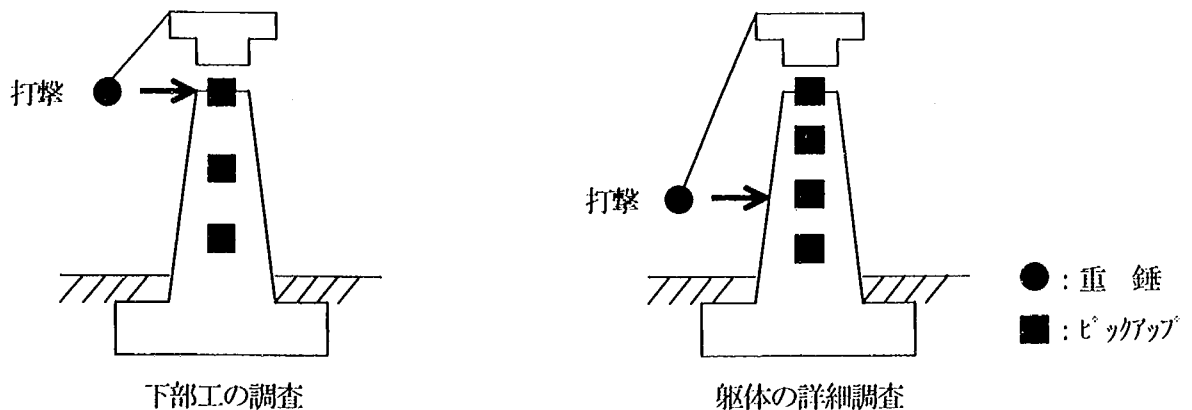


解説図 2.5.1 壁式橋脚の打撃位置とピックアップの設置位置

b) 円柱橋脚

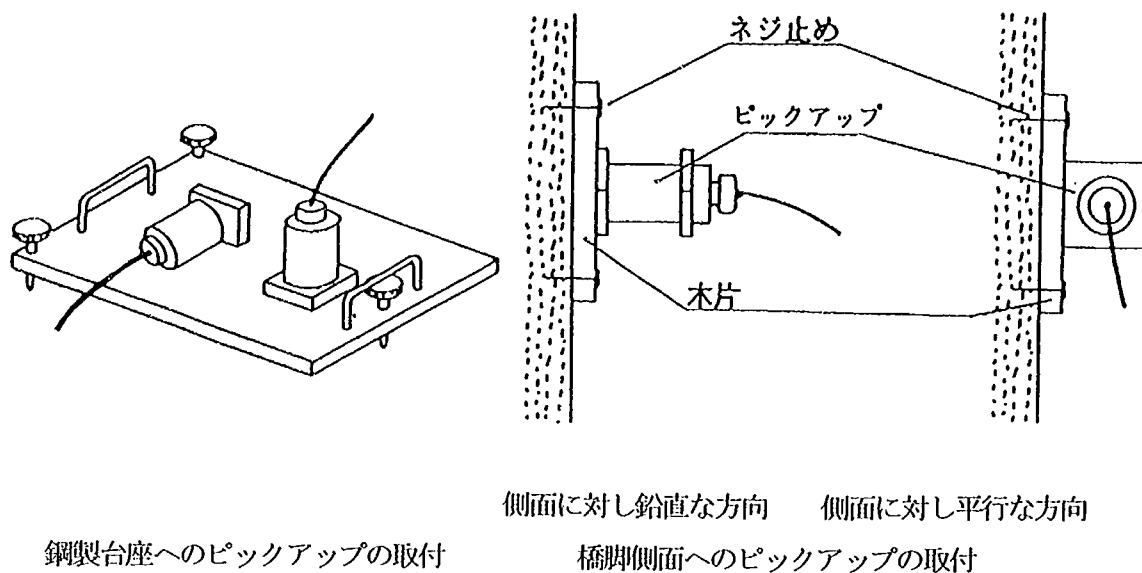
円柱橋脚の場合、橋軸方向と橋軸直角方向の躯体の曲げ剛性が等しいため、下部工の調査、躯体の詳細調査ともに、桁による拘束が小さい橋軸直角方向の振動を用いる。

円柱橋脚の場合の打撃位置とピックアップの設置位置を解説図 2.5.2 に示す。



解説図 2.5.2 円柱橋脚の打撃位置とピックアップの設置位置

(2) ピックアップの設置にあたっては、構造物と一体になるように（ガタつかないように）取り付けなければならない。例えば、橋脚天端のピックアップは、鋼製台座を用いて橋脚天端に設置する。また橋脚中間、下端のピックアップの設置は、木板を介してネジ止めする（橋脚躯体にコンクリートプラグを打ち込み、木ネジで固定する）、石膏等で止める等の方法がある。ピックアップの取付例を解説図 2.5.3 に示す。



解説図 2.5.3 ピックアップの取付例

2.5.2 ピックアップと測定計器本体の接続方法

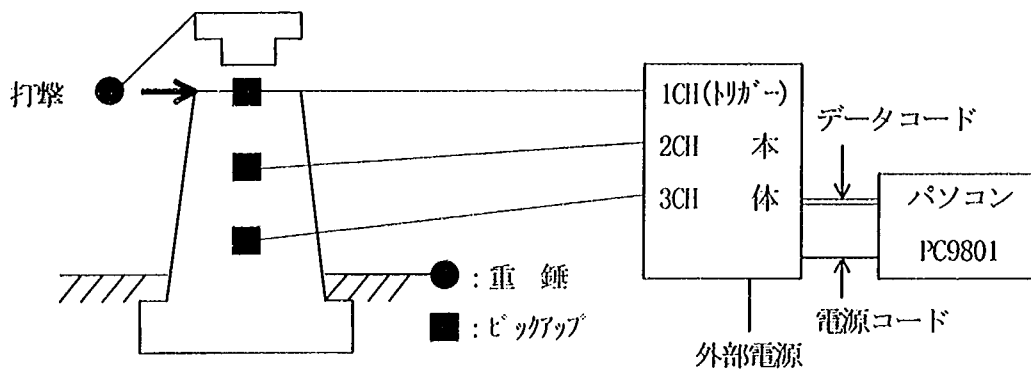
ピックアップと測定計器本体の接続は、測定位置と取込みチャンネルを十分確認の上、行わなければならない。

また、打撃点に最も近いピックアップをトリガー兼用としてよい。

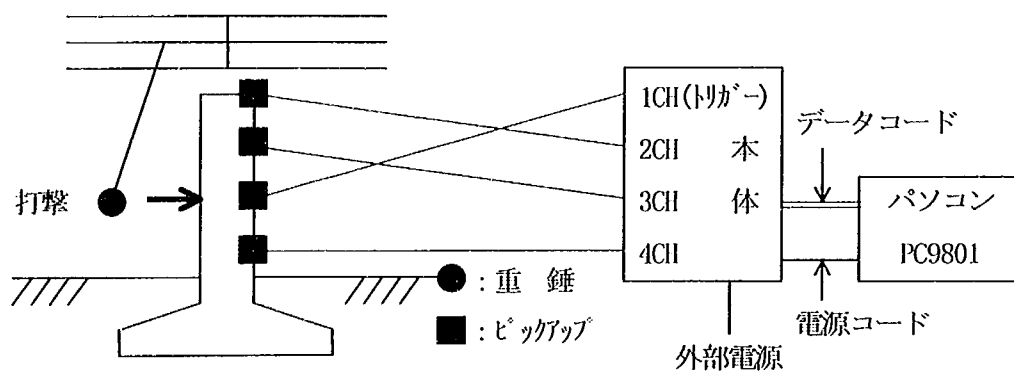
【解説】

ケーブルの接続にあたっては、1CH がトリガーとなるので、打撃点に最も近いピックアップを 1CH に接続すること。

ピックアップと測定計器本体の接続例を解説図 2.5.4～5 に示す。



解説図 2.5.4 下部工の調査におけるピックアップと測定計器本体の接続例



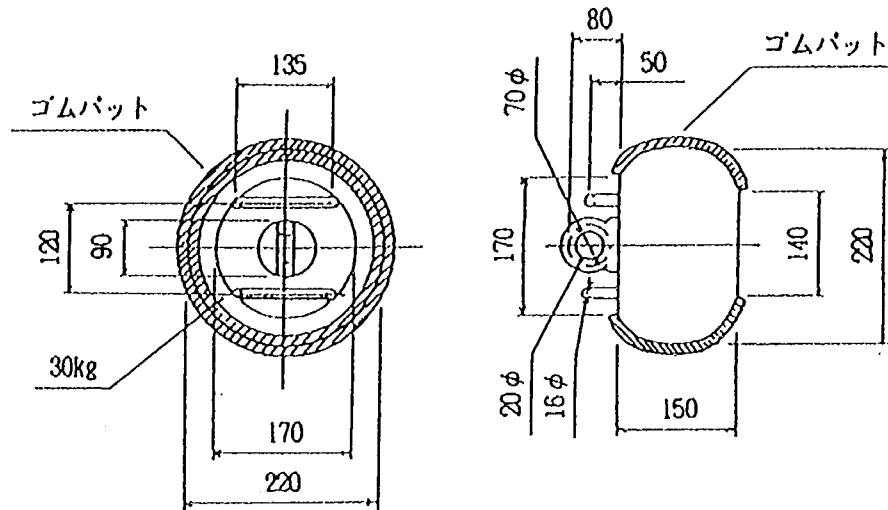
解説図 2.5.5 躯体の詳細調査におけるピックアップと測定計器本体の接続例

2.5.3 打撃方法

打撃は、原則として重錘を用い、正常な応答波形が5波以上得られるまで、行うこと。

【解説】

重錘の重量は、一般には30kg程度で十分であるが、ケーソン基礎のように大きな基礎に支えられている構造物や、道路等に近接し交通振動の大きい場合には、30kg以上の重錘を用いるのがよい。一般的な重錘(30kg)の形状(例)を解説図2.5.6に示す。



解説図 2.5.6 重錘の形状(例)

打撃に当たっては、重錘下端にロープを取付け、地上でロープを引いて重錘を振り上げて、構造物を打撃する。ただし2度打ちしないように注意しなければならない。

また、河川中の橋梁等、地上でロープを引くのが不可能な場合は、治具等を用いて工夫する必要がある。

2.6 測定データの保存

測定データの保存にあたっては、応答波形を十分確認の上、正常な応答波形のみを保存すること。

【解説】

測定にあたっては、応答波形の取り込みを行うタイミングを逸しないために、打撃者と測定者は、お互いの意志疎通をはかること。

正常な応答波形とは、以下の条件を満たす応答波形をいう。

- 1) 振幅が、設定した最大レンジを越えていない。
- 2) 振幅が、ノイズに比較して大きい。
- 3) トリガーが正常にかかっている。

3. 固有振動数の決定方法

3.1 応答波形の重ね合わせ

応答波形の解析にあたっては、応答波形が正常であることを確認して、重ね合わせを行うものとする。

【解説】

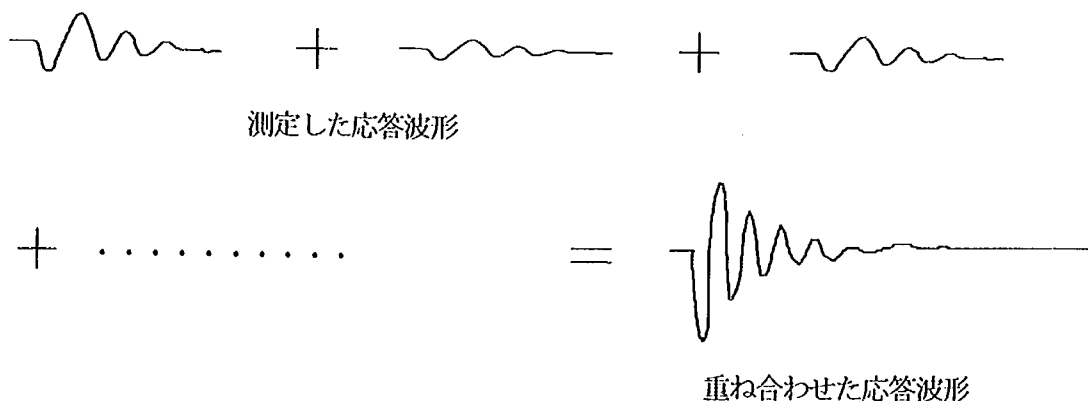
応答波形の重ね合わせは、微小振幅の応答波形を明確にし、他のノイズ成分を除去するために実施するものである。

したがって、応答波形1波で明瞭な場合は、必ずしも重ね合わせを行う必要はないが、3波程度重ね合わせるのがよい。

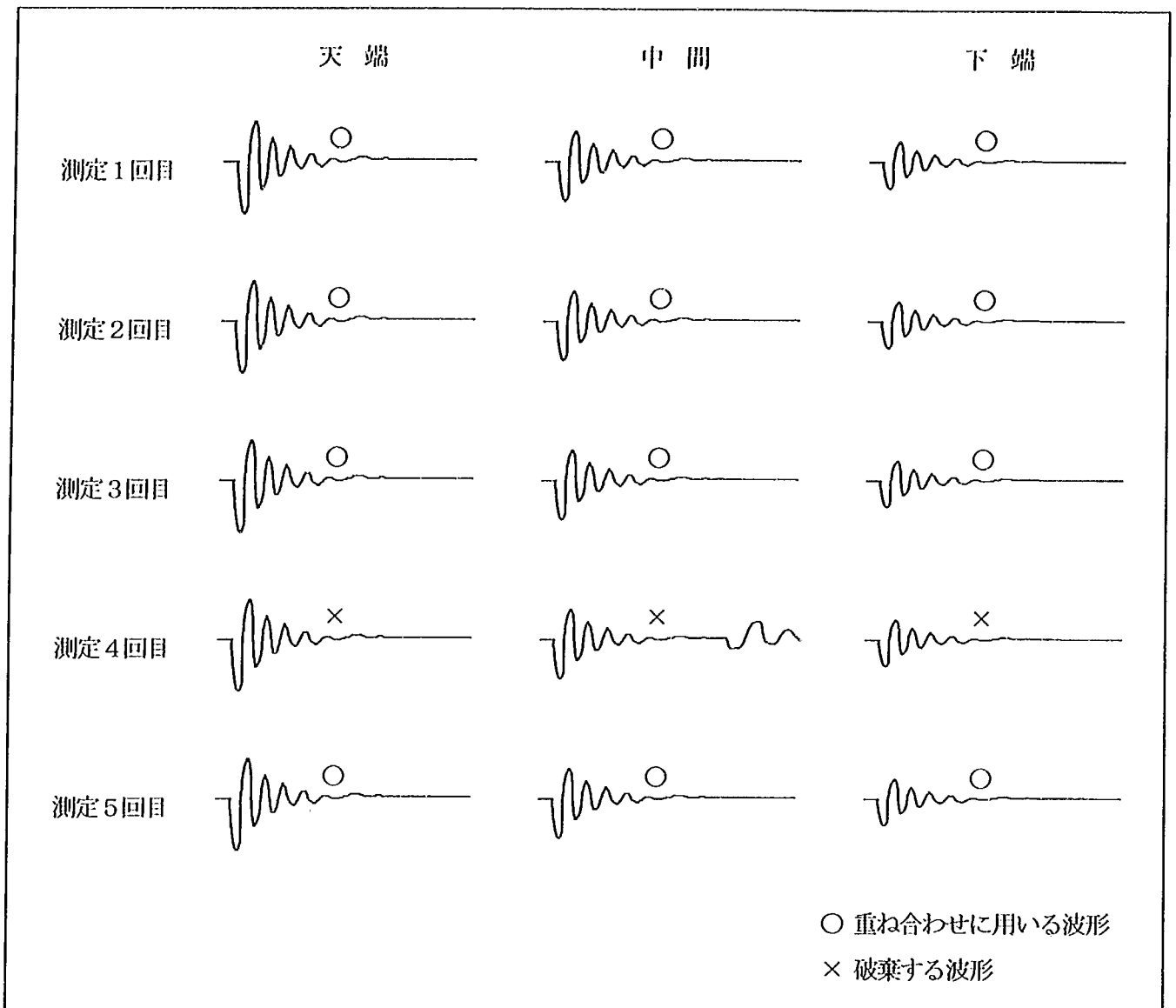
重ね合わせる波形は、「2.6 測定データの保存」で示す正常な波形とする。ただし、保存した応答波形の中に、異常な波形が存在した場合には、同時に測定した他の部位のデータについても破棄した上で、重ね合わせを行う。

これは、重錘による衝撃エネルギーが測定回毎に多少異なるため、各部位の入力エネルギーを等しくしなければ、正確な振動モードが得られないためである。

重ね合わせの概念図を解説図3.1.1に、破棄する波形の例を解説図3.1.2に示す。



解説図3.1.1 重ね合わせの概念図



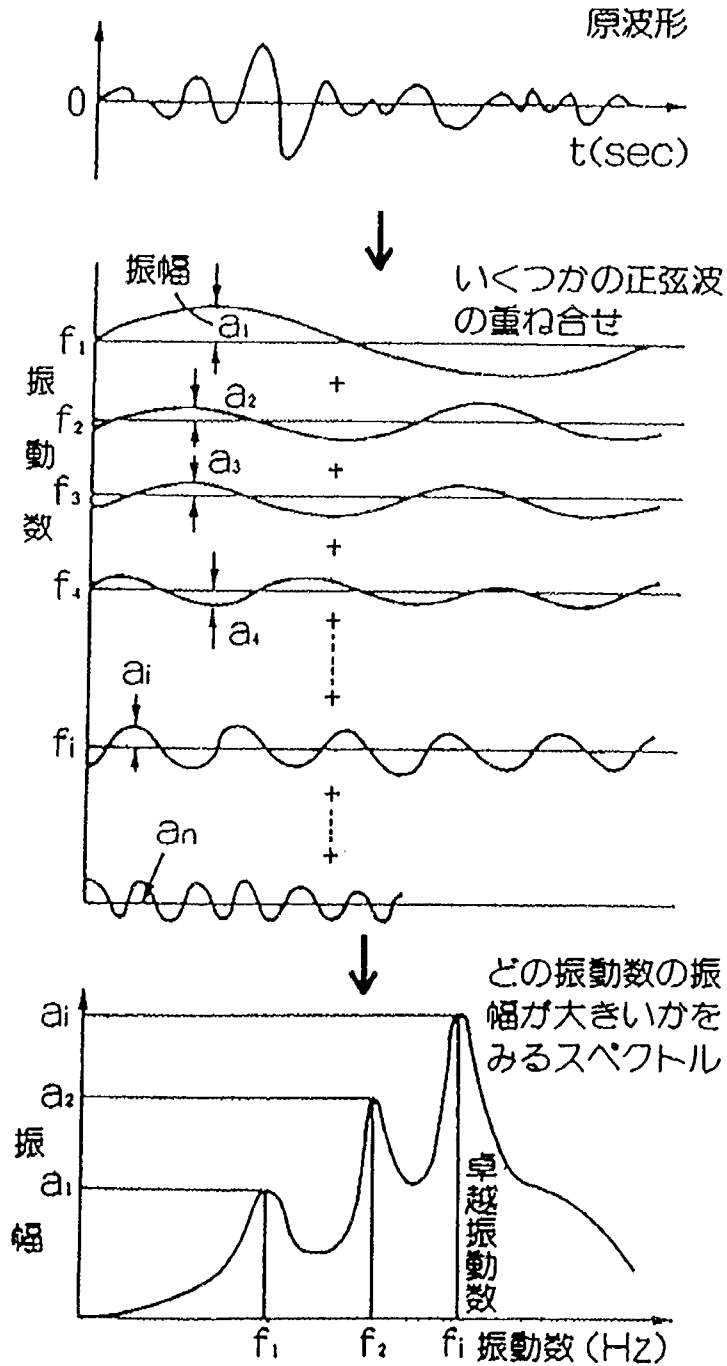
解説図 3.1.2 破棄する波形の例

3.2 応答波形の解析

応答波形の解析においては、「3.1 応答波形の重ね合わせ」により重ね合わせた波形をフーリエ変換し、フーリエスペクトルと位相差スペクトルを求めるものとする。

【解説】

フーリエ変換の概念図を解説図 3.2.1 に示す。



解説図 3.2.1 フーリエ変換の概念図

3.3 固有振動数の決定

固有振動数は、フーリエスペクトルと位相差スペクトルを基に、決定するものとする。

【解説】

- (1) 固有振動数であるための条件は、フーリエスペクトルの卓越振動数であり、位相差（振動応答を速度波形で収録した場合に速度が位相差となる）が 180 度（または 0 度）を示すことである。ただし、フーリエスペクトルには、桁、地盤等の固有振動数が卓越振動数として現れることが多いため、判定が困難となる場合がある。

したがって、構造物の固有振動数を決定するにあたっては、桁等についても打撃を行い、その固有振動数を把握しておくことが望ましい。

- (2) 橋脚躯体の詳細な調査を行って、2次固有振動数を決定するにあたっては、(1)の条件に加えて、位相差が、橋脚天端と下端で 180 度逆転していることが必要である。

4. 固有値解析の方法

4.1 構造物のモデル化

固有値解析にあたっては、構造物の形状、寸法、重量等を把握し、適切にモデル化を行うものとする。

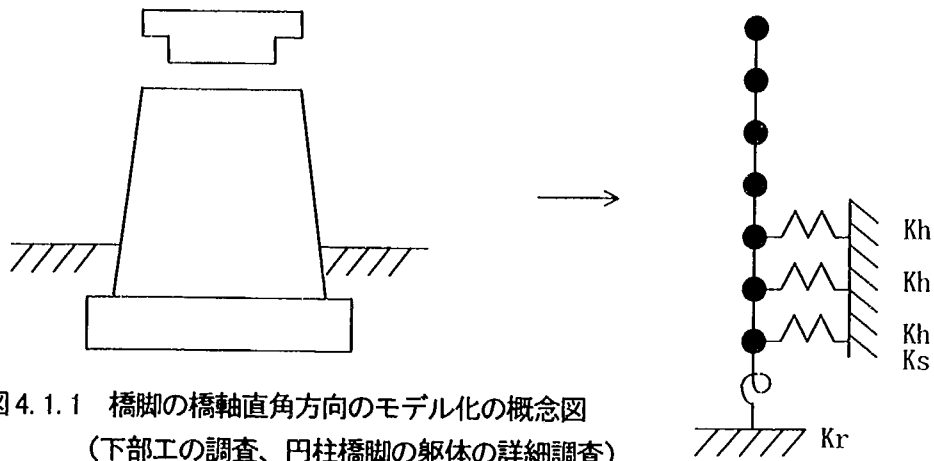
【解説】

(1) 構造物のモデル化は、バネ質点系モデルとして置換するものとする。

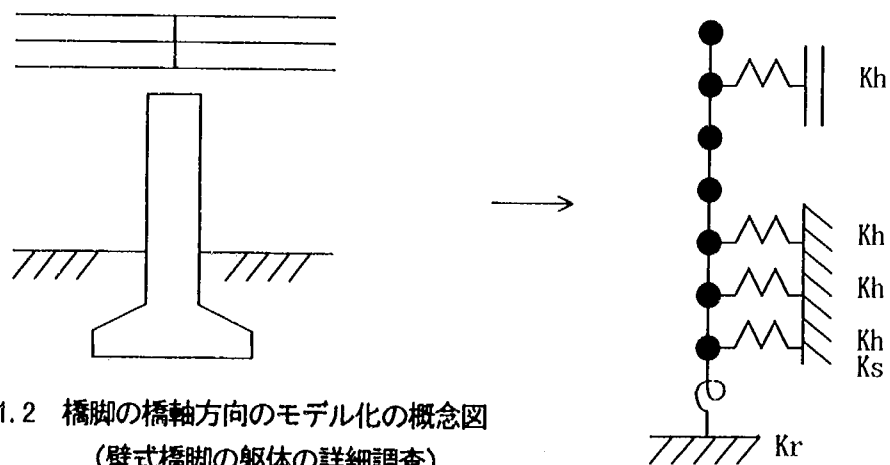
バネ質点系モデルは、長さや剛性を持つ部材と、重量を持つ質点とで構成され、地盤はバネに置換する。

なお、橋脚の橋軸方向モデルの場合には、桁の拘束をバネに置換する。

構造物のモデル化の概念図を解説図 4.1.1～2 に示す。



解説図 4.1.1 橋脚の橋軸直角方向のモデル化の概念図
(下部工の調査、円柱橋脚の躯体の詳細調査)



解説図 4.1.2 橋脚の橋軸方向のモデル化の概念図
(壁式橋脚の躯体の詳細調査)

(2) 下部工の解析モデルにおいて設定する、躯体（柱）の曲げ剛性および地盤バネ定数は、次の値を初期値とする。

① 躯体（柱）の曲げ剛性

断面寸法とコンクリートの設計強度から、示方書等で計算される値。

② 地盤のバネ定数

土質調査の結果得られたN値等から、示方書等で計算される値。

(3) 躯体（柱）の解析モデルに設定する、躯体（柱）の曲げ剛性および地盤バネ定数は、次の値を初期値とする。

① 躯体（柱）の曲げ剛性

断面寸法とコンクリートの設計強度から、示方書等で計算される値

② 地盤のバネ定数

下部工の解析の結果得られた値（橋軸直角方向）、またはその橋軸方向への換算値。ただし、壁式橋脚の解析モデル（橋軸方向）には、橋脚天端の質点に、桁の拘束（水平）バネを設定しなければならない。その初期値は任意（例えば、基礎のせん断バネ定数）とする。

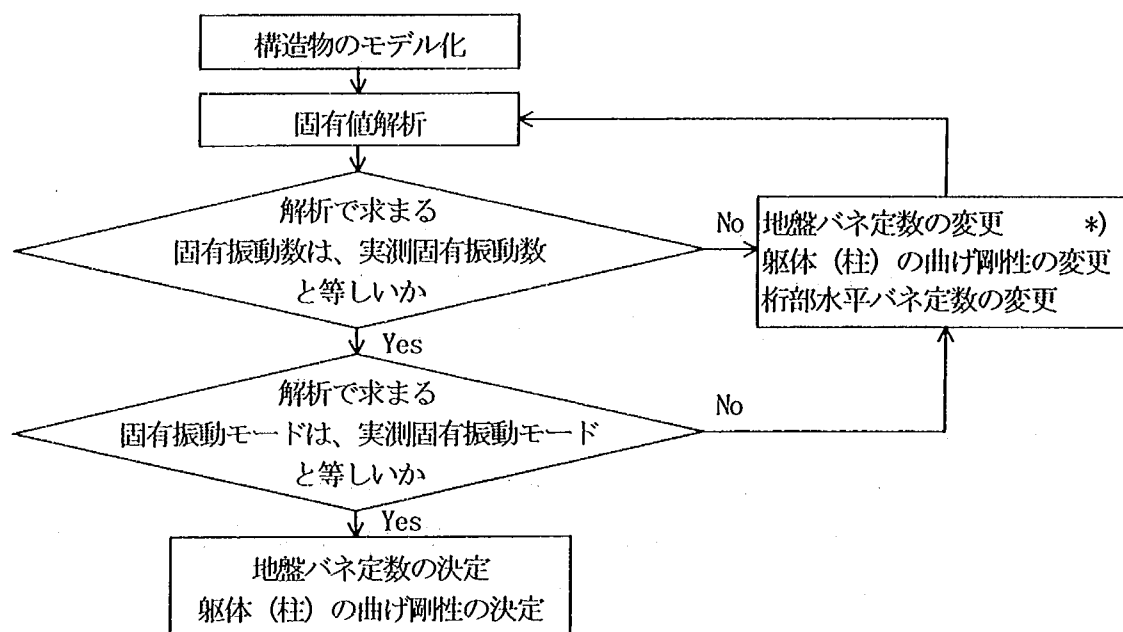
4.2 固有値解析

「4.1 構造物のモデル化」で作成したモデルを用いて、固有値解析を実施し、実測固有振動数とその振動モードを説明できるような地盤バネ定数・躯体の曲げ剛性を求めるものとする。

【解説】

固有値解析では、「4.1 構造物のモデル化」で作成したモデルを用いて、解析で求まる固有振動数とその振動モードが、「3.5 固有振動数の決定」で決定した実測固有振動数とその振動モードに一致するまで、地盤バネ定数・躯体（柱）の曲げ剛性・（桁部水平バネ定数）の値を変更させる。

固有値解析の手順を解説図 4.2.1 に示す。



解説図 4.2.1 固有値解析の手順

(注) について

*) 「4.1 構造物のモデル化」で設定した、地盤バネ定数、躯体（柱）の曲げ剛性、桁部水平バネ定数の初期値の変更は、次の各項による。

① 下部工の解析モデル

地盤バネ定数、躯体（柱）の曲げ剛性を変更させる。

② 躯体（柱）の解析モデル

躯体（柱）の曲げ剛性のみを変更させる。地盤バネ定数は①の解析値であるため変更させない。ただし、壁式橋脚の解析モデル（橋軸方向）においては、桁部水平バネ定数を変更させるものとする。

4.3 解析結果の検証

解析結果の検証は、「4.2 固有値解析」により得られた地盤バネ定数・躯体の曲げ剛性が、適切な値であることを確認することにより、行うものとする。

【解説】

解析値と初期値との比をシミュレート倍率といい

$$\text{地盤バネ定数のシミュレート倍率} = \frac{\text{地盤バネ定数の解析値}}{\text{地盤バネ定数の初期値}}$$

$$\text{躯体の曲げ剛性のシミュレート倍率} = \frac{\text{躯体の曲げ剛性の解析値}}{\text{躯体の曲げ剛性の初期値}}$$

で表される。

このシミュレート倍率は、地盤バネ定数の場合 4.0 倍以下、躯体（柱）剛性の場合 2.0 倍以下に収まることが、一般的であり、この値以下であれば、決定した固有振動数は、適切であると考えられる。この値を越えた場合は、以下の方法により検討する必要がある。

- ① 解析モデルに設定した初期値のチェックを行う。また、土質調査の結果や構造物の寸法、桁や柱等の重量に誤りがないか、精査する必要がある。
- ② 「3.3 固有振動数の決定」で決定した固有振動数に誤りがあることが考えられるので、フーリエスペクトルに卓越振動数が複数現れている場合には、他の卓越振動数を選び、再度固有値解析を実施して、上記の精査を行うのがよい。

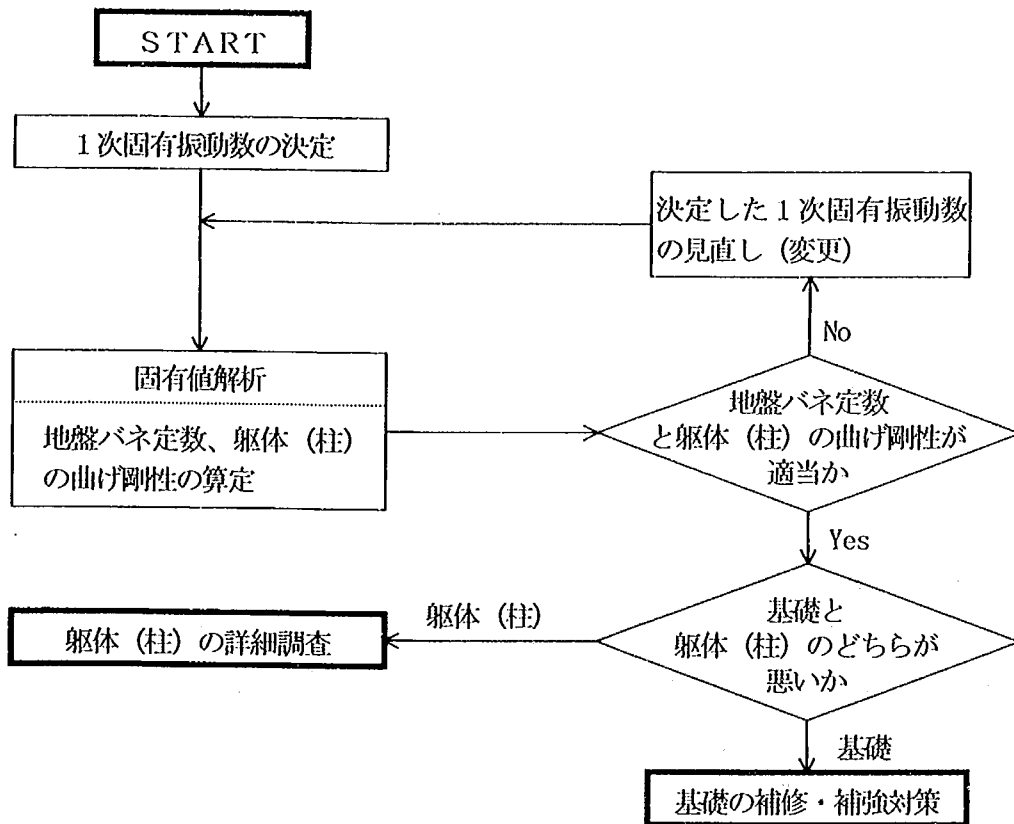
5. 試験の評価

5.1 評価の手順

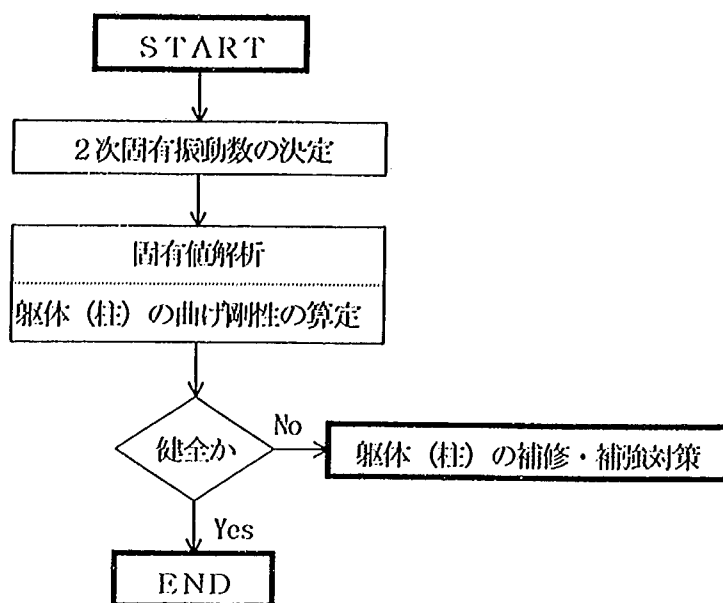
下部工の調査、及び躯体（柱）の詳細調査に対する健全度評価は、適切な手順により行うものとする。

【解説】

下部工の調査に対する健全度評価手順を解説図 5.1.1 に、躯体（柱）の詳細調査に対する健全度評価手順を解説図 5.1.2 に示す。



解説図 5.1.1 下部工の調査に対する健全度評価手順



解説図 5.1.2 躯体（柱）の詳細調査に対する健全度評価手順

5.2 基礎の健全度評価

基礎の健全度評価は、固有値解析で実測固有振動数に近づけた時の地盤バネ定数と躯体の曲げ剛性の大きさにより判断する。

【解説】

(財) 鉄道総合技術研究所では、鉄道橋についてこれまでに基礎種類別に実施した衝撃振動試験により得られた多くの実測データを基に統計解析により作成した固有振動数の標準値算定式によって算定される値（健全な状態における固有振動数）と、衝撃振動試験の結果得られた実測固有振動数を比較することで、基礎の健全度評価を行っている。

道路橋では、固有振動数の標準値算定式はまだ得られていないので、固有値解析で得られる地盤バネ定数と躯体の曲げ剛性により判断することとした。

5.3 不健全と判定された場合の対策

基礎または、躯体（柱）の健全度評価の結果、不健全と評価された場合は、他の調査結果を参照し、効果的な補修・補強対策を立てる必要がある。

【解説】

基礎が不健全と評価された場合は、ジャストポイントのボーリング調査を行った上で、補修・補強対策について検討する必要がある。特に、基礎が変状した場合に沓座周りにその影響が顕著に出ている場合が多いので、沓座周りの目視点検を行うことが有効である。

躯体（柱）が不健全と評価された場合は、適切な処置を講じなければならない。

参考資料

【調査事例】

共同研究「橋梁基礎構造の調査方法の開発」では、通過車両によるノイズの影響を検証するために、次表に示す10橋脚について試験を実施した。

表-1 衝撃振動試験を実施した橋脚

橋梁名	A橋梁	B橋梁	C橋梁	D高架橋				E高架橋		F高架橋
橋脚名	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
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ホーラスラブ桁				合成桁 +3径間連続 非合成桁	3径間 連続非 合成桁	単純桁+ ニールセン橋

(1) A、B、C橋梁

A、B、C橋梁は同じ敷地内にある橋梁である。比較的交通量は少なく、試験条件が良好と考え実施した。各橋梁の特徴は以下の通りである。

- ① A橋梁は、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（P1）を有する。基礎は鋼管杭である。
- ② B、C橋梁は、50m 程度の合成桁と、B橋梁は10m 程度の合成桁、C橋梁は10m 程度のRC桁を有する3径間の橋梁である。それぞれ1橋脚ずつ（P2、P3）実施した。いずれも図面等の所在が不明のため、A橋梁と同様の基礎形式と仮定した。

センサー橋脚天端・中間・下端、桁、地盤に設置した。（P4～P10も同様）設置位置図を図-1に示す。以下の3ケースを各々の橋脚に実施した。

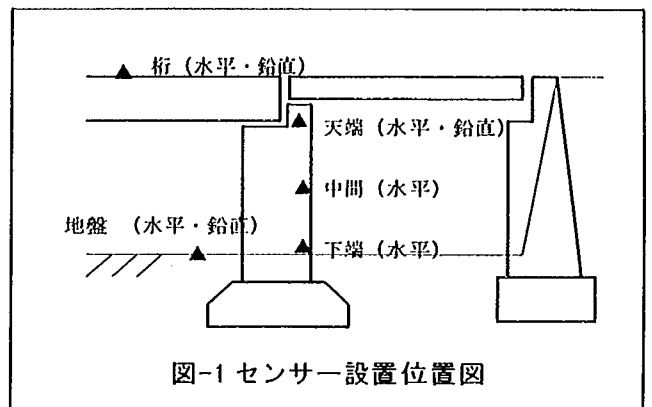


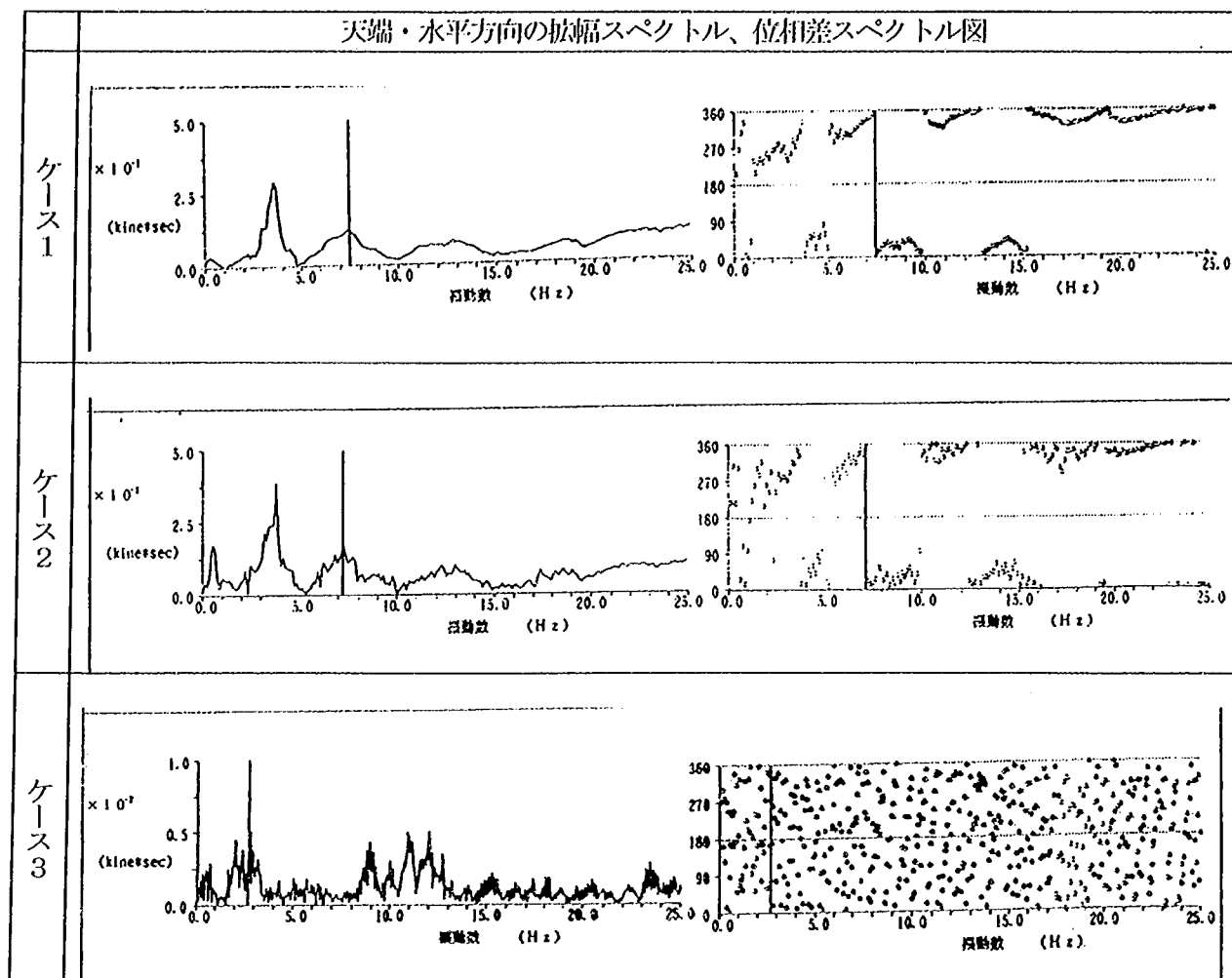
表-2 試験ケース

ケース1	車両が通行していないときに、橋脚を打撃する。
ケース2	車両が通行しているときに橋脚を打撃する。
ケース3	車両通行の振動のみを測定する。

1) 固有振動数の算出

試験結果のうちP1橋脚のフーリエスペクトル、位相スペクトルを示す。この結果から、次のことが分かる。

表-3 P1 橋脚の拡幅スペクトル、位相差スペクトル図



- 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、車輛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。

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-2）

① 構造物の解析モデル

P1橋脚は一般図があるのに対し、P2、P3橋脚は一般図がなかった。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。

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-4に示す。

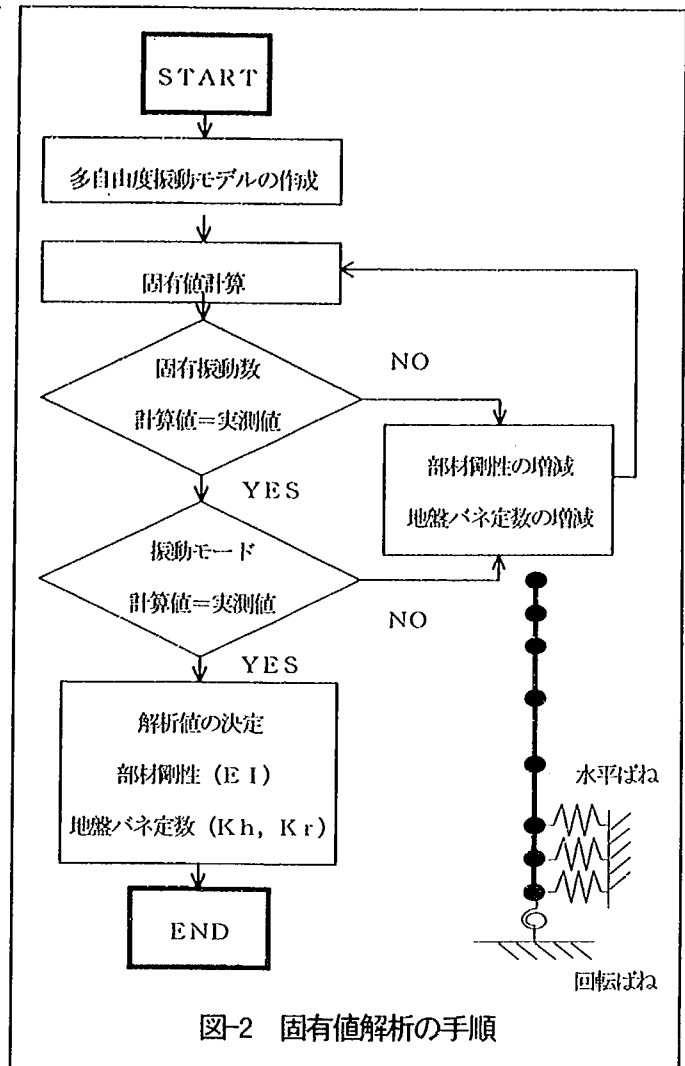


図-2 固有値解析の手順

表-4 衝撃振動試験の測定データ

橋脚	固有振動数(Hz)		天端	中間	下端
P1	7.4	振幅 (kine * sec)	0.125	0.095	0.068
		振幅比率	1.000	0.760	0.544
P2	7.0	振幅 (kine * sec)	0.092	0.063	0.040
		振幅比率	1.000	0.685	0.435
P3	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に示す。

表-5 固有値解析の結果

橋脚	躯体剛性比 (倍)	水平バネ定数比	底面バネ定数比
P1	1.80	1.00	2.00
P2	1.50	3.82	2.62
P3	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) D高架橋、E高架橋

A、B、C橋梁は、他の振動ノイズが少ない良好な環境である。そこで非常に交通量の多い国道沿いの高架橋で、衝撃振動試験の適用性を検証した。それぞれの高架橋の特徴を表-6に示す

表-6 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
D高架橋	・6径間連続RCホロースラブリッジ ・単純PCプレテンホロースラブリッジ	・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。	P4 P5 P6 P7
E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べることができる。	P8 P9

橋軸直角方向から水平に、橋脚頂部側面を打撃した。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-3、4に示す。

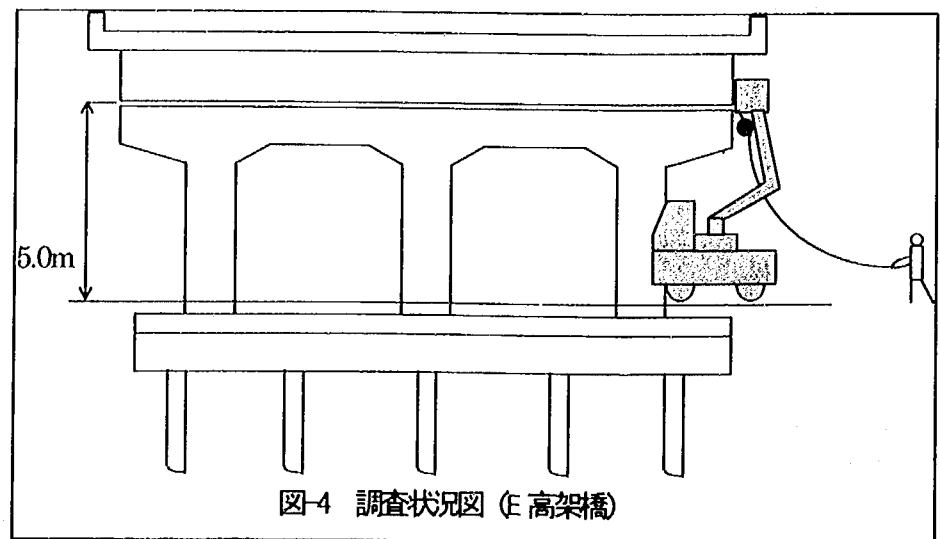
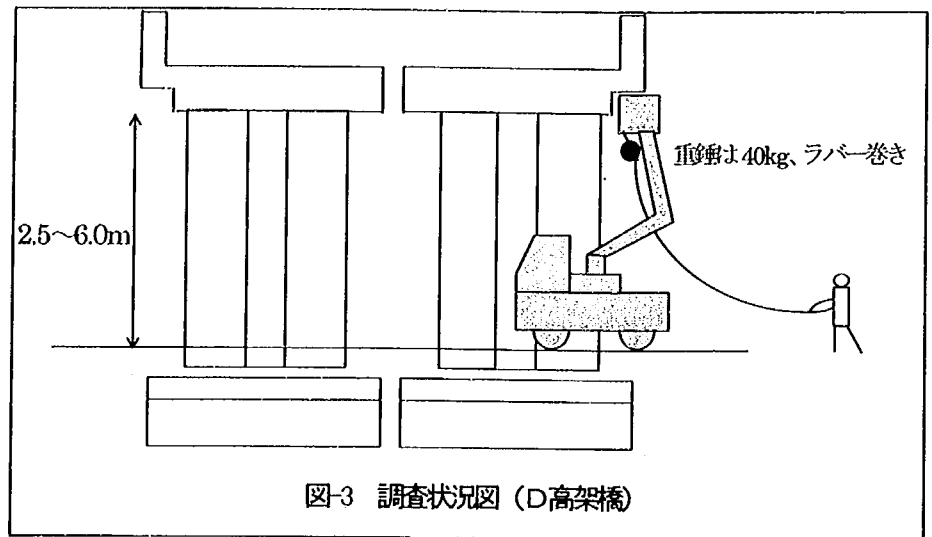
各橋梁について以下の振動試験を実施した。

a) D高架橋

- ① 下り線の渋滞による死荷重が載った状態で固有振動数を求める。(P4)
- ② 上り線も活荷重が載っている状態で固有振動数を求める。(P5、P6、P7)

b) E高架橋

- ① 上り線の活荷重が載っている状態で固有振動数を求める。(P8、P9)



- ② 桁のジョイント部で衝撃を受けた状態での固有振動数を求める。(P8)
 センサーは、橋脚の頭部、中部、下部および桁に設置した。携帯用計測機の測定範囲を下表に示す。

表-7 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
AD変換成分数	8チャンネル

1) 固有振動数の算出

得られた結果を表-8に示す。この特徴を以下に示す。

- ① P4, P5橋脚は幅、高さともほぼ等しいため、固有振動数は近似した値が得られた。
 ② P6, P7橋脚はP4, P5橋脚と幅は等しいが、高さは低い。
 (P7 < P6 < P4, P5)

橋脚高さが低くなると固有振動数が増えるのは一般的な傾向と合致する。

- ③ P8, P9橋脚は、道路直角方向に2径間ラーメン構造であったため、固有振動数はかなり高くなった。高さはほぼ等しいが、道路方向幅がP9橋脚の方が厚いために、固有振動数がP8橋脚より高くなった。これは、剛性を考えると妥当な結果である。

表-8 固有振動数(P4~P9)

橋脚	固有振動数(Hz)
P4	16.5
P5	16.6
P6	17.9
P7	21.5
P8	24.3
P9	30.0

2) 固有値解析

P1~P3橋脚の場合と同様な手順により解析モデルを設定した。P1~P3橋脚との違いは以下の点である。

- ① P4~P7橋脚は連続桁であるために、解析モデルの第1質点に桁の水平方向バネを設けた。
 ② P8, P9橋脚は道路幅が広いとため、桁の拘束効果として桁の水平方向バネを設けた。

表-9にその結果を示す。P8, P9橋脚は、コンクリート舗装等が施されているため、水平バネ定数比がかなり高くなった。

表-9 固有値解析の結果

橋脚	躯体剛性比(倍)	水平バネ定数比	底面バネ定数比
P4	1.30	3.50	4.00
P5	1.00	3.00	3.00
P6	1.95	4.50	5.00
P7	1.70	8.00	9.00
P8	1.75	20.00	5.00
P9	1.70	10.00	5.00

(3) F高架橋

F高架橋は大都市内の高速道路橋である。その基礎は、長さ56mの場所打ち杭で、橋脚天端までの地上高さが12.8mのRC単柱式橋脚である。上部工構造形式は単純桁とニールセン橋である。この路線は、地域の主要幹線道路として建設され、終日にわたって交通量が多い。

車両が通行している状態で、橋脚頭部を打撃して、その振動応答を計測した。試験状況を図-5に示す。また、これは公開実験として実施されたものであり、試験実施時は、見学者に対するデモンストレーションを目的として、振動波形、フーリエ解析のリアルタイム表示を行った。

車両が通行している状態

では、フーリエスペクトル上に橋脚の固有振動数におけるスペクトルの卓越の他に、桁の固有振動数でもスペクトルの卓越が現れ、卓越が数箇所認められる。これにより橋脚の固有振動数の決定が惑わされる場合がある。したがって、桁についても橋軸直角方向水平振動成分および鉛直振動成分検出用のセンサーを設置して、打撃しない状態で桁の自由振動波形の収録を行い、解析に用いた。

センサー設置位置を図-6に示す。

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

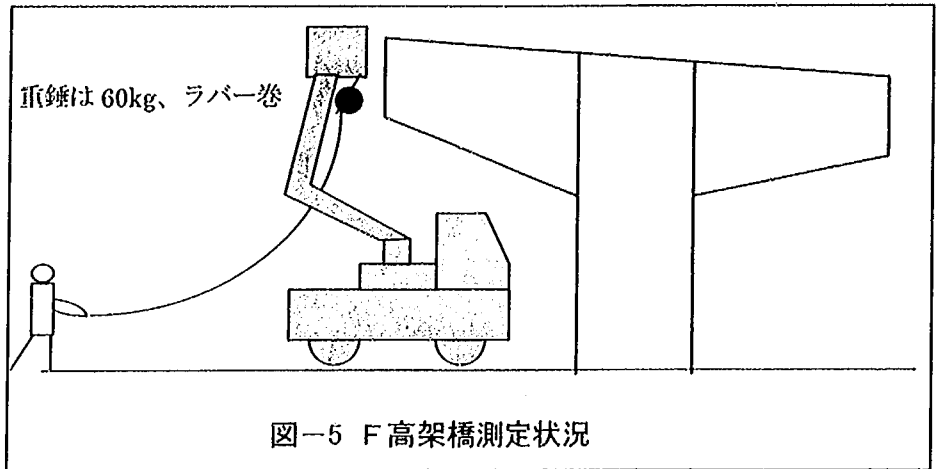


図-5 F高架橋測定状況

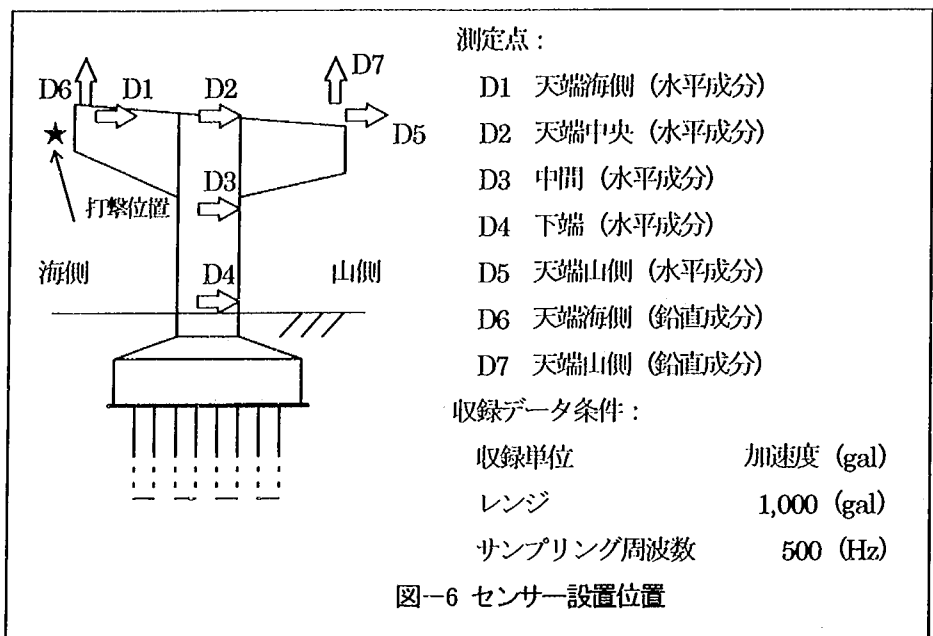


図-6 センサー設置位置

1) 固有振動数の算出

打撃試験は10回実施した。各計測点毎に各々10回の波形の重ね合わせを行った。得られたフーリエスペクトル(図-7)を見ると、1.7Hz、2.9Hz、4.3Hzに明瞭な卓越が確認できるが、位相スペクトルの理論値(加速度収録を行っていることから位相差は90°もしくは270°となる)を考慮すると4.3Hzが対象橋脚の固有振動数であると判断できる。

2) 固有値解析

桁を含めて10節点、9部材を設定した。モデルの概要を図-8に示す。

橋脚下端、中間、天端での振動モードと合致するように、部材剛性(水平、鉛直)、地盤ばね(水平、鉛直、回転)を変化させたところ、図-9が得られた。この時、設計時想定よりも部材剛性1.6

倍、水平ばね2.5倍、鉛直・回転ばね9.0倍の高い値となった。これは、基礎構造物としての機能が十分果

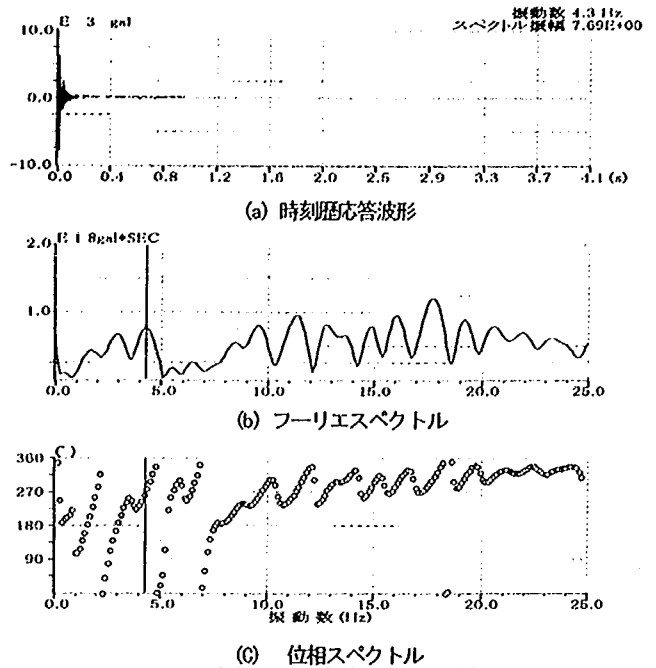


図-7 橋脚の衝撃振動試験結果

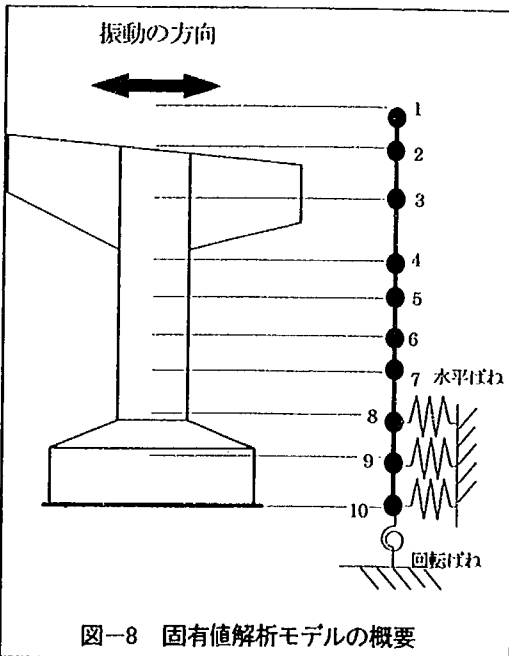


図-8 固有値解析モデルの概要

たされていることを示すものである。

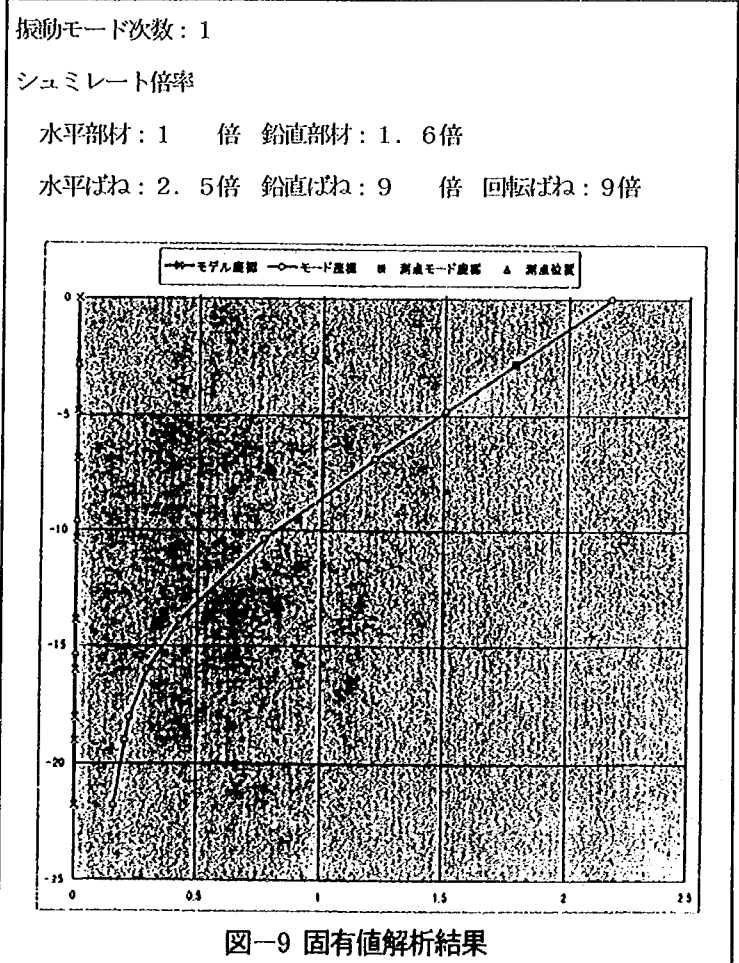


図-9 固有値解析結果

問い合わせ先（衝撃振動試験）

中央復建コンサルタンツ株式会社 施設保全室 たそこなりとも
田底 成智

TEL. 06 - 6393 - 9906, FAX 06 - 6393 - 9912, E-mail tasoko_n@cfk.co.jp

ボアホールカメラを用いた
橋梁基礎の損傷調査法マニュアル(案)

平成11年3月

建設省土木研究所
基礎地盤コンサルタンツ(株)
(株)東京ソイルリサーチ
梶谷エンジニア(株)

はじめに

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方式のものと展開図などの出力も可能なデジタル方式のものがある。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。

ボアホールカメラは、損傷状況を直接画面で確認できるため、損傷調査方法として信頼度の高い手法であると考えられるが、カメラの種類によって測定精度が異なる。さらに、ボーリング削孔時に損傷部を拡大してしまい、実際のひび割れ幅よりも大きく評価してしまう可能性があるため注意を要する。

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。

本マニュアルでは、上記の装置のうち Bip System(BIPS)及び Inspection Camera方式(P・I・C)の2タイプに適用するものである。

ボアホールカメラWGメンバー

	建設省土木研究所 構造橋梁部 基礎研究室 研究員	石田 雅博
	基礎地盤コンサルタンツ(株) 地盤物性室 室長	山田 眞一
	(株)東京ソイルリサーチ 技術本部 技術開発室 次長	小野 日出男
	(株)東京ソイルリサーチ つくば総合試験所 係長	田中 伸治
(幹事)	梶谷エンジニア(株) 東京支店 調査部 部長	佐々木 勉
	梶谷エンジニア(株) 東京支店 調査部 主任	田口 雅章

目 次

	ページ
1. ボアホールカメラの概要	1
1. 1 ボアホールカメラ概要	1
1. 2 用語	1
1. 3 ボアホールカメラ原理	2
1. 4 使用機器	3
2. 測定要領	4
2. 1 適用条件	4
(1) 杭条件	4
(2) 削孔機械	4
(3) 測定器の選定	6
2. 2 事前調査	7
(1) 現地調査	7
(2) 机上調査	7
(3) 概略基礎形状の想定	7
2. 3 観測孔の設置	8
(1) 必要孔径	8
(2) 削孔および削孔位置	8
(3) 削孔時の留意点	8
2. 4 測定	10
2. 5 解析方法	11
(1) B I P S	11
(2) P. I. C	13
3. 事例	14
4. 試験結果の整理例	16
5. 参考文献	19
問合せ先	20

1. ボアホールカメラの概要

1.1 ボアホールカメラ概要

ボアホールカメラによる調査方法は、調査対象物にボーリングを行い、CCD カメラ等をその孔内に挿入し、孔壁の亀裂等をリアルタイムに観察しながら、記録が可能な手法である。記録方式にはビデオテープを用いたアナログ方式、図-1.1.1 のような展開画像などをコンピュータ解析により出力可能なデジタル方式のものがある。この観察記録と、ボーリング時に採取したコアとの比較により亀裂の開口幅の計測、方向、その連続性を確認することができる。

以上述べたように、本手法は損傷状況を直接画面により確認できるため、信頼性の高い損傷調査方法と言える。

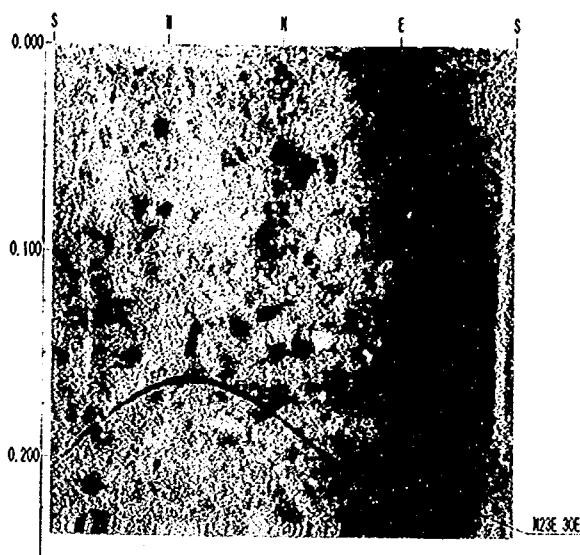


図-1.1.1 360° 展開画像

1.2 用語

用語	解説
ボアホールカメラ	ボーリング孔を利用して、孔壁の構造を詳細に観察し、クラックの分布などを、計測・把握する目的で開発された装置。
P・I・C	防水加工した特殊TVカメラを用いて、その画像から損傷の位置と損傷の程度を直接確認できる装置。
B I P S	総合孔内画像観察記録システム。孔壁を写した画像とそれを処理した展開画像からなるもの。
孔壁展開画像	孔壁の全周(360度)または半周(180度)範囲を連続的に定方位観察できる映像。
孔壁詳細画像	孔壁の特定範囲を詳細に観察できる映像で、電子ズーム機能で拡大する。
コアチューブ	軟弱な粘土地盤、砂地盤のボーリングやコンクリート、岩盤のコアリングに使用する掘削用具。
スピンドル	原動機で発生した回転運動を伝達装置を経て、掘削ツール(ロッド・コアチューブ等)に伝える穿孔装置の一部。
ゾンデ	ボーリング孔内に挿入する測定器部分。プローブとも呼ばれる場合もある。

1.3 ボアホールカメラ原理

Bip System(以下、BIPS と略記)及び Inspection Camera(以下、P・I・C と略記)の測定原理を以下に示す。

(1) BIPS

図-1.3.1 に示すように円錐型反射鏡を用いることにより孔壁の定方位全周画面を取りこみ、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 A/D 変換し、リアルタイムに展開画像を変換、記録し、同時にモニター表示する。

展開原理は、メモリ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、これを展開画像メモリー上に横一列に取りこむ。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カウンタ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り返し、準じ並べることでより深度方向に連続した展開画像を得ることができる。

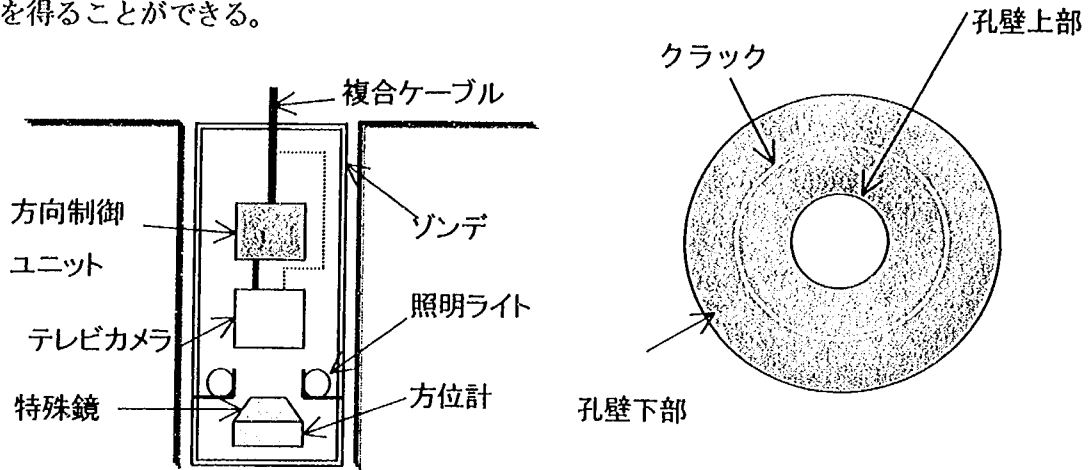


図-1.3.1 BIPS システム

(2) P・I・C

図-1.3.2 に示すようにテレビカメラの前に平面反射鏡を置き、ある深度でテレビカメラを旋回させ、全周撮影した後、ゾンデを降下させ、次の位置で同一動作を繰り返して孔壁画像を得る。

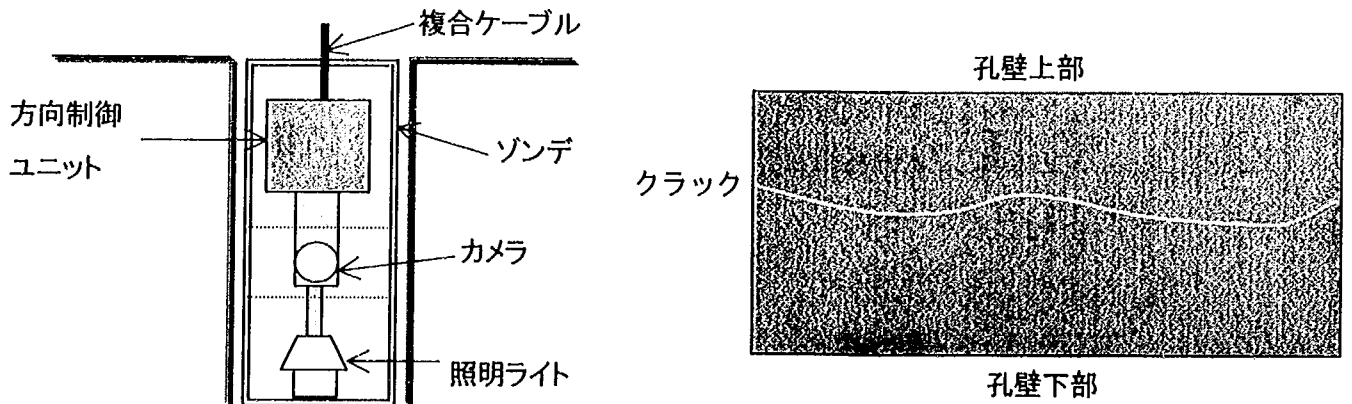


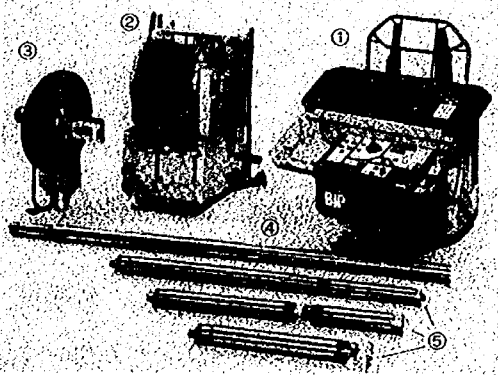
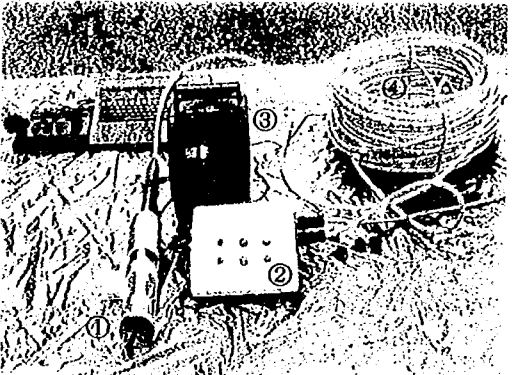
図-1.3.2 P・I・C システム

1.4 使用機器

ボアホールカメラは、ボーリング孔内の状況を視測、撮影するためのテレビカメラ・方位計等を内蔵したゾンデと、映像を記録するためのビデオ、解析するためのコンピュータ等から構成されている。

表-1.4.1に機器の仕様、特徴、装置概観を示す。

表-1.4.1 ボアホールカメラ一覧表

名 称	B I P S	P・I・C
装置仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・孔壁展開処理計測システム 計測可能深度 最大 500m 計測可能孔径 56~180mm 視測可能速度 0~1.5cm/s 最大 2cm/s ボーリング方向 360度 ・孔壁展開処理解析システム MPU IBM-AT互換 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：MS-DOS 互換 File 	<ul style="list-style-type: none"> ・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° ・計測可能孔径 100~350mm
特 徴	<ul style="list-style-type: none"> ・現場での視測記録が極めて迅速 ・孔壁の生画像を 360° 展開画像で同時撮影 ・観察記録データをもとにクラック角度・幅の解析が可能 ・孔壁の状態の立体的観察可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・BIPS に比較して照明が大きく、映像が鮮明である ・測定費用が安価
装置概観	 <ul style="list-style-type: none"> ① 一体型コントロールユニット ② モータドライブケーブル ③ 深度測定プーリ ④ コントロールプローブ ⑤ BCP-552 アタッチメント 	 <ul style="list-style-type: none"> ① 特殊テレビカメラ ② ジョイスティックコントローラ ③ TVモニター ④ ケーブル

2. 測定要領

2.1 適用条件

(1) 杭条件

杭基礎は、杭自体にも種々な方法があるが、それらの主なものを示すと、図-2.1.1 のようになる。

ボアホールカメラを用いた杭の損傷調査は、図-2.1.1 に示した杭のうち、H鋼杭を除く全ての杭に適用可能である。

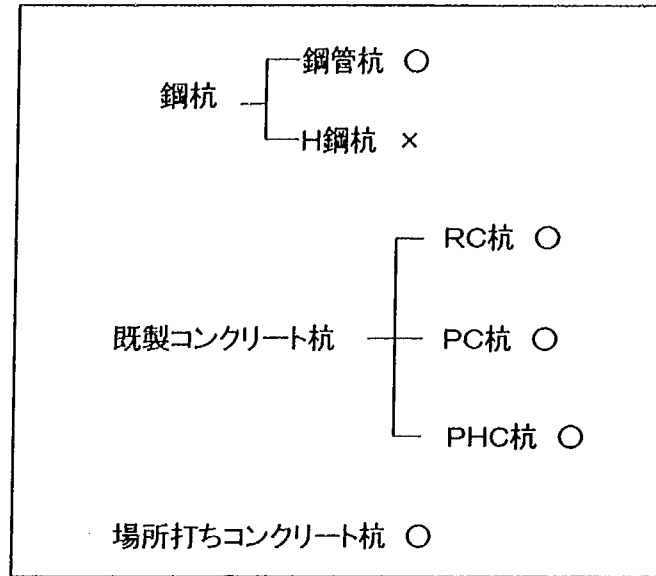


図-2.1.1 杭種による適用範囲の分類

(2) 削孔機械

削孔機械は、①土質調査等に用いるボーリングマシン、②コンクリートコア抜き用ボーリングマシンの2種類に分けることができる。各々の機械の特徴を要約して述べると次のようになる。

① 土質調査等に用いるボーリングマシン

図-2.1.2 は、土質調査等に用いるボーリングマシンを示したものである。特徴は、動力としてディーゼルエンジンを使用するケースが多く、ロッドの先端にコアチューブを取り付けて、それを高トルクで回転させ削孔するものである。回転数は、20～200 回転/分が一般的である。重量は、エンジン部も含めて0.5～3.0 tである。

② コンクリートコア抜き用ボーリングマシン

図-2.1.3 は、コンクリートコア抜き用ボーリングマシンを示したものである。特徴は、動力としてモータを使用するケースが多く、スピンドルに直接コアチューブを取り付けて、高回転させ削孔するものである。回転数は500 回転/分以上が一般的である。重量は50～100kgである。

コアチューブの先端は、いずれの削孔機械とも「ダイヤモンドビット付きコアチューブ」を用いて削孔する必要がある。

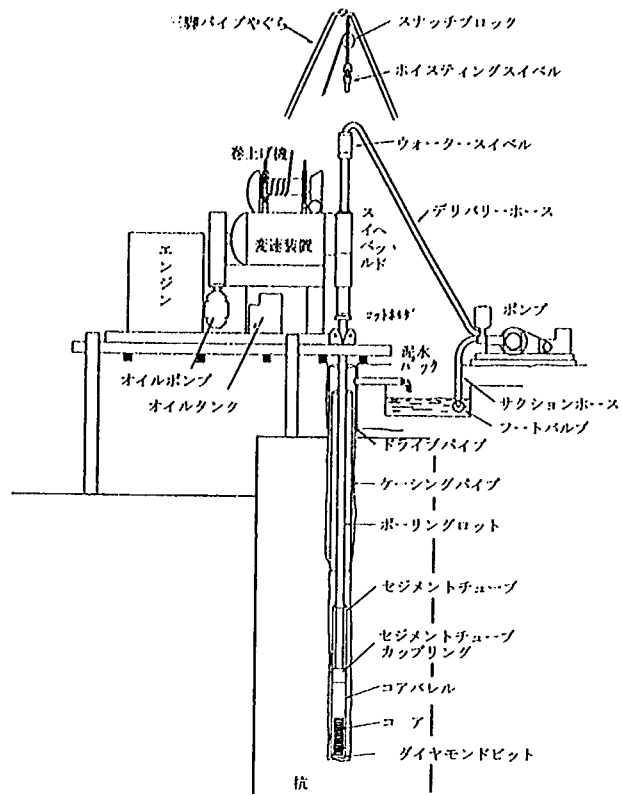


図-2.1.2 土質調査等に用いるボーリングマシン概要図

●仕様及び寸法

ボーリングマシン

- モーター 7馬力 3相 200V 400Hz
- 最大口径 $\phi 800\%$
- 最大穿孔深さ 60m
- 使用水量
10ℓ/分

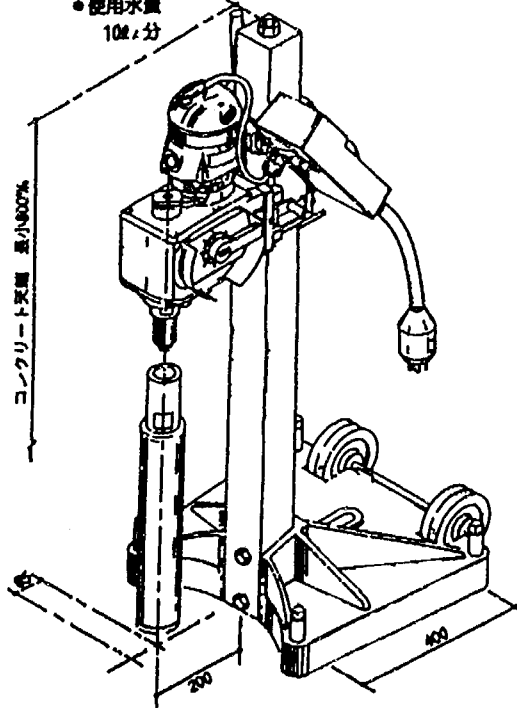


図-2.1.3 コンクリートコア抜き用ボーリングマシン

(3) 測定器の選定

測定器の選定は、以下に示した項目に留意して選定することが望ましい。

- ① BIPS と P・I・C とでは、光源の明るさが異なるため、画像の鮮明度が違う。具体的には P・I・C の方が明るく、孔径が大きい場合には鮮明に写る。
- ② 成果品は、BIPS では連続写真を比較的簡単に作成できるが、P・I・C はビデオ編集となり、煩雑であるが画像は鮮明である。
- ③ BIPS では、クラック幅の精度が通常 0.25mm であるが、詳細画像を使用すると 0.10mm まで可能である。
- ④ P・I・C では、解析者の能力にもよるが、クラック幅の精度は、一般に 0.50mm 程度である。
- ⑤ 先端カメラレンズ位置により、一般的には P・I・C の方が BIPS に比べて、深度が 5cm 深く撮影できる。ただし、BIPS でも魚眼レンズ(特別品)を装着することにより、先端画像の撮影が可能である。
- ⑥ 両ボアホールカメラとも、クラック幅が、1mm 以上のものは明確に判別できる。
- ⑦ P・I・C は、クラックの幅の解析に使用するため、目標物を同時に撮影しキャリブレーションを行って決定する必要がある。
- ⑧ 測定費用は、現場条件および解析条件が同一である場合、一般的に BIPS の方が高価である。

なお、観測システムは、AC100V 電源が必要である。

2.2 事前調査

ボアホールカメラは、杭内部から損傷の程度を目視確認する手法である。したがって、場所打ちコンクリート杭などの場合は、削孔する必要がある。また、鋼管杭などのように中空の場合には、充填物等を取り除く必要がある。

杭の種類や形状および位置は、現況調査結果および机上調査結果をもとに推定するものとし、具体的には下記の項目を実施するものとする。

(1) 現地調査

- ① 橋台および橋脚上部構造物等の計測…幅員，支間，上部構造の形式
簡易的な形状フーチング調査（探針調査による寸法計測）
- ② 施工時期等の確認…橋歴板等の確認
- ③ 現況状況の確認…フーチング厚さを確認することが望ましい
- ④ 机上調査に基づいて、杭位置にマーキング等をつける

(2) 机上調査

- ① 地盤情報（地盤構成）の収集 …周辺地域の既存ボーリング結果，文献
- ② 橋梁関係の竣工図面等の収集（再確認）…橋梁台帳，竣工図面等の収集
- ③ 聞き込み調査 … 施工業者（橋歴板に記載されている場合）等

(3) 概略基礎形状の想定（施工記録が未確認の場合）

- ① 地盤情報から支持地盤の想定…杭長の想定
- ② 上部構造物の形状，施工時期から基礎形状の想定
- ③ フーチングがある場合は、フーチング側面を掘削するなどして杭位置を確認する

2.3 観測孔の設置

観測孔は下記の仕様に準じるものとする。

(1) 必要孔径

孔径は、ボアホールカメラの大きさによって、 $\phi 56\text{mm}$ ～ $\phi 100\text{mm}$ 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。ここで、各ボアホールカメラの最低必要孔径を示すと下記のようになる。

BIPS : 必要孔径 $\phi 56\text{mm}$ 以上

P・I・C : 必要孔径 $\phi 100\text{mm}$ 以上

(2) 削孔および削孔位置

場所打ちコンクリート杭などのように、比較的大孔径の場合は、目的によって削孔位置が異なる。すなわち、杭の中央付近での損傷具合を確認する場合と、杭周面近くを確認したい場合などである。いずれにしても、最も注意を要することは、鉛直精度を高めることである。

その他、留意点を下記に示す。

① 観測孔の洗浄

観測孔を掘削する時に水を使用するが、削孔が終了し、測定を実施するときには孔内の洗浄が必要である。水が濁っている場合は、画像の鮮明度が落ちるとともに解析時に支障となる可能性が高い。

② 強磁性体のない箇所

BIPS を用いて測定する場合は、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。したがって、強磁性体に近い杭での測定はなるべく避けることが望ましい。

③ 周辺への影響

橋梁における観測孔は、橋梁直下に観測孔を設置することになる。従って、立体交差などで橋梁下を使用している場合など、さらに、削孔機械として、コンクリートコア抜きボーリングマシンを採用している場合には、コア抜き時にクレーン車を用いることが一般的であるため、観測孔（設置作業）は交通障害等を考慮し設定することが必要である。

また、削孔によって生じる水(泥水)は、産業廃棄物の対象となることから、適切な処理が必要である。

(3) 削孔時の留意点

- ① 掘削方向に対して、 30° 以上の角度がついているクラックは、観測孔の掘削による影響は少ない。
- ② 掘削方向に対して、 30° 以上の角度がついているクラックは、削孔に使用するコアボーリングマシンの回転数の違いによる影響は少ない。

③ 水平クラックの場合は、下記に示した留意点が挙げられる。

- ・ 観測孔の掘削により、クラックの角部が欠け、コンクリート片がクラック部分に詰まり、解析に支障をきたす可能性が高い(図-2.3.1 参照)。
- ・ 削孔に使用するコアボーリングマシンの回転数の違いにより、欠ける状態が異なる。低回転掘削は、亀裂面が大きく崩れて、崩れ落ちたコンクリート片も大きな物が多く、崩れた高さは比較的高い。一方、高回転掘削の場合は、亀裂面が細かく崩れて、崩れ落ちたコンクリート片も細かく、崩れた高さも比較的小さい。
- ・ コアチューブの押し込み圧(掘進圧力)が強いほど、クラックに与える影響が大きい。

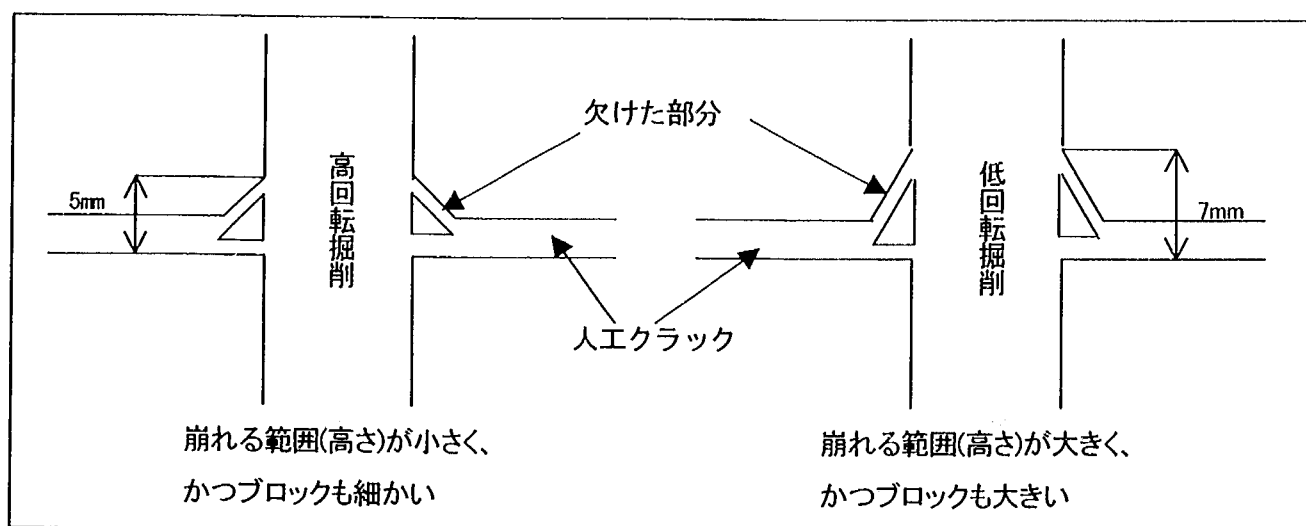


図-2.3.1 クラック面の欠損部の模式図

2.4 測 定

図-2.4.1 に現場作業のフローを示す。

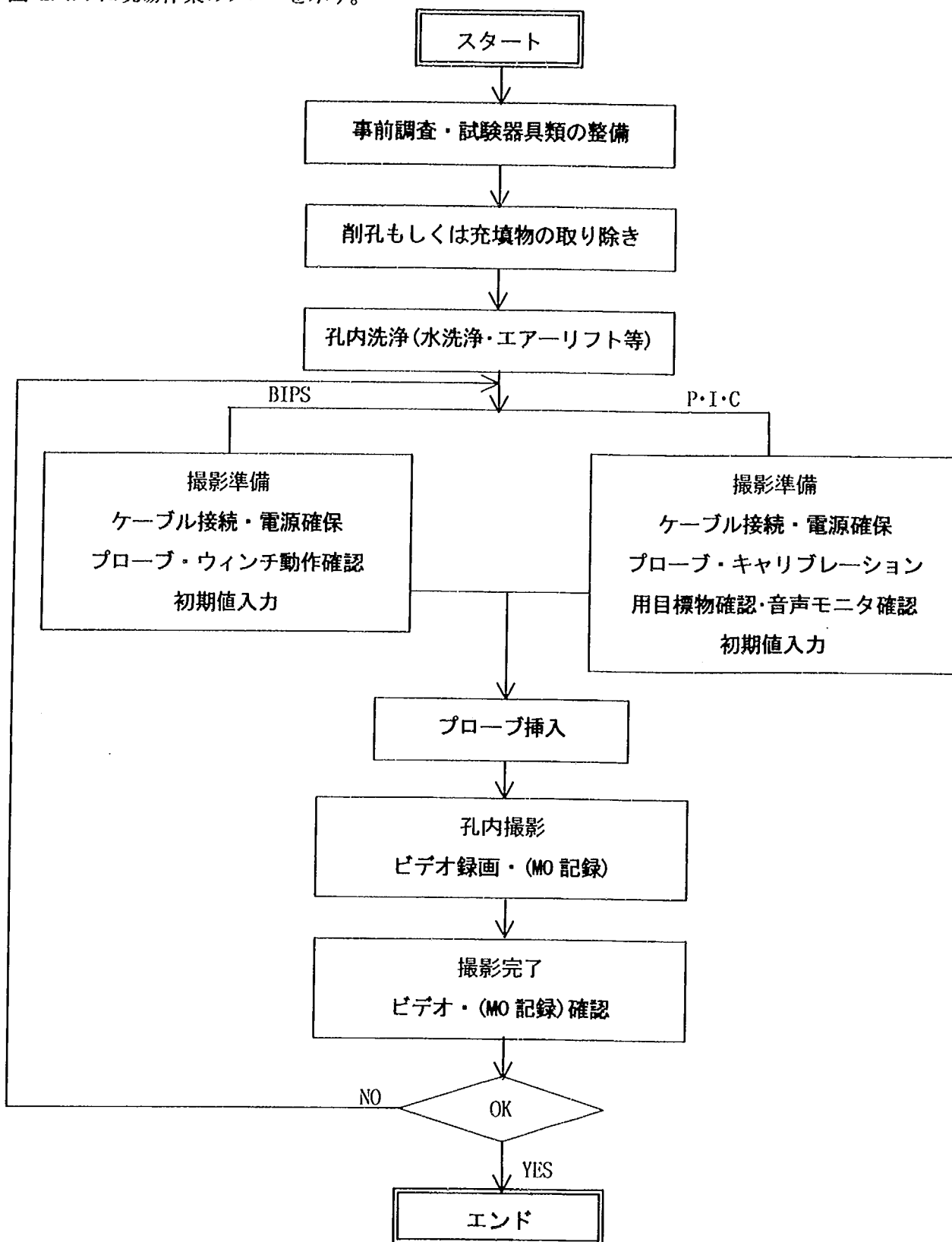


図-2.4.1 現場作業フロー図

2.5 解析方法

ここでは、現場作業で得られた画像データを用いてクラック幅とクラック角度(BIPS のみ)を計測する方法を解説する。

BIPS では、クラック幅やクラック角度の解析作業は、全てコンピュータ上で行う。一方、P・I・Cは、現場作業で得られた画像内に同時撮影したキャリブレーション用の目標物(スケール等)との関係よりクラック幅の測定を行う。

以下に、BIPS と P・I・C に分けて述べる。

(1) BIPS

1) コンピュータ上での機械的作業

損傷杭のクラック幅は、次の要領で行う。なお、一般には①および③の作業(プログラム使用)が大半を占める。プログラムはWindows95 及びWindows98 対応である。

①BPR または BFW プロブから得られた展開画像よりクラック幅・角度の取得。

②BTV プロブから得られたクラックの拡大画像からの詳細なデータも取得。

③ピクセルやカラープリンターを用いた取得データの印刷。

④簡易的に BPR または BFE/BFW の画像を見る。

2) 上記で得られたクラックデータの処理作業

得られたクラックデータはソフトウェアで処理を行うが、ここでは解析者の技術力が入ることから、一定した判断が必要である。

① 上記で得られた各クラックデータは、一覧表形式で取りまとめられ、一括してステレオネット処理などを行う。

② 作成した図表や画像データをもとに測定結果を取りまとめる。

なお、画像データは Windows 形式の画像ファイルとして切り出せるので、Windows のアプリケーションに貼り付けることも可能である。

3) 画像解析の考え方

クラック角度の測定は、現場で観察記録したデータを読み出して室内解析システムのディスプレイ上に表示し、孔壁とのクラック面をマウスカーソルでポインティングすることによって行う(図-2.5.1参照)。

計算された該当面のクラック角度は、ディスプレイおよびフロッピーディスクに表示記録される。以上をフロー図で表したものが、図-2.5.2である。

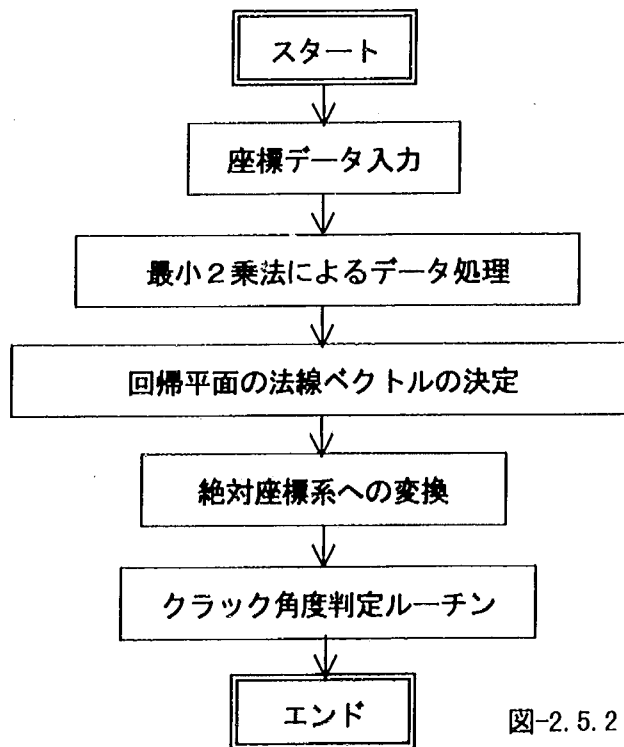
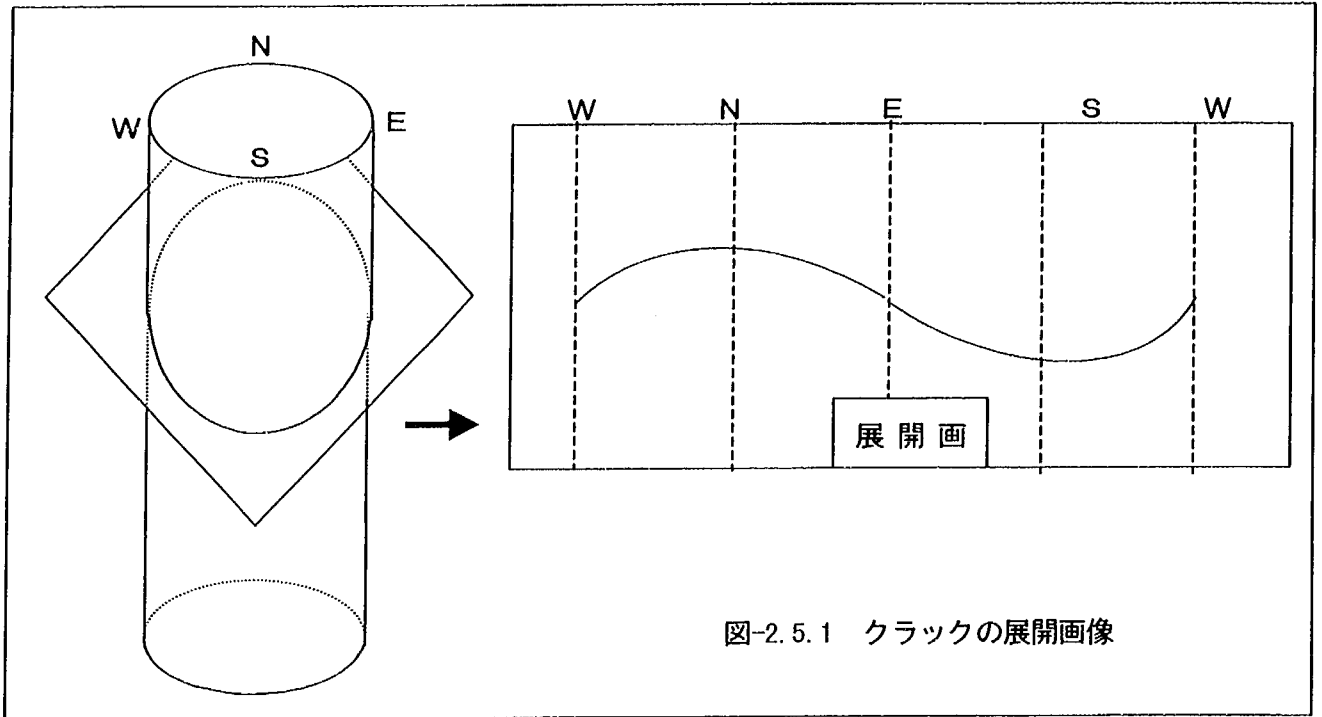


図-2.5.2 クラック角度の判定フロー

クラック幅の測定は、クラック幅の最小幅を測定するのが一般的である。しかしながら、水平クラックなどでは、過小に評価することもあるので注意が必要である。

以下に、クラック幅を測定する上での注意点・留意点を述べる。

- ① クラック角度を有するクラック幅の測定は、解析誤差を少なくするために、図-2.5.3 に示したように、サインカーブの変化点で測定することが肝要である。

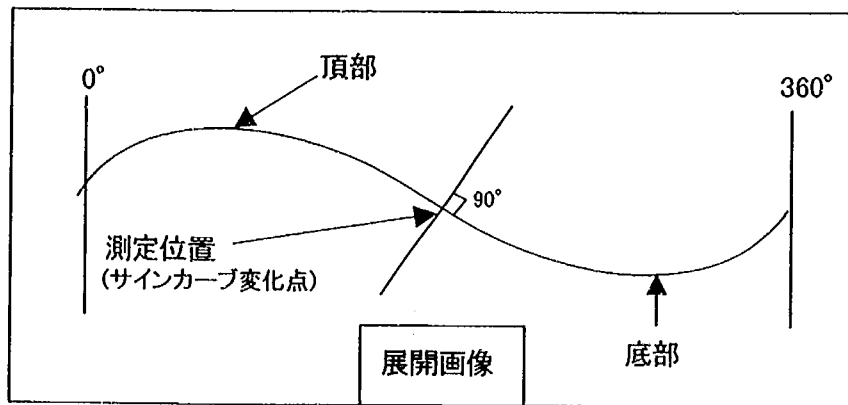


図-2.5.3 クラック角度を有するクラック幅の測定位置

- ② やむを得ず、頂部もしくは底部で測定する場合は、クラック幅を過大もしくは過小に評価する可能性が大きいことから注意を要する。
- ③ 水平クラックの場合は、観測孔の掘削により、欠けたコンクリート片がクラックに詰まり、クラック幅を過小もしくは過大に評価する可能性が高く、細心の注意が必要である。

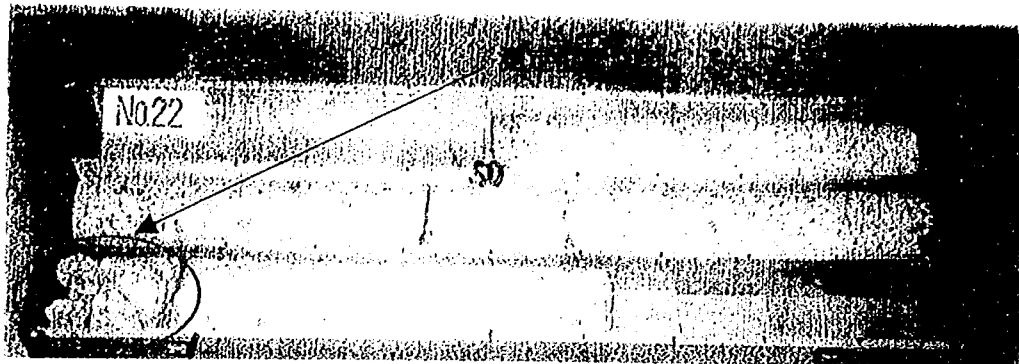
(2) P・I・C

P・I・Cにより観測されたビデオ画像に対して、次に示す順序で解析する。

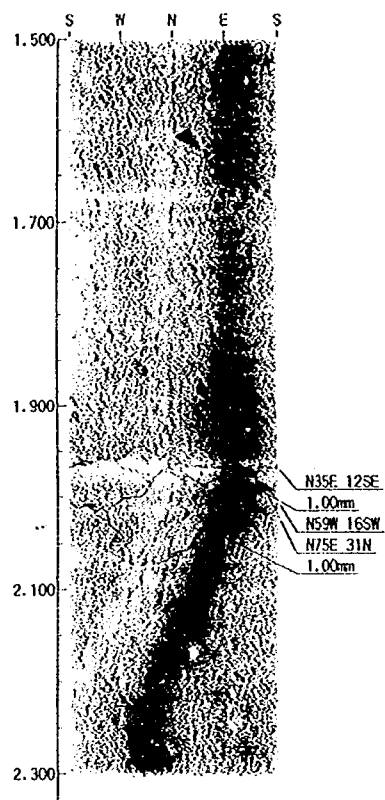
- ① 撮影されたアナログ画像をパソコンにキャプチャーし、パソコンで画像処理を施し、カラープリントアウトする。
- ② カメラは360度エンドレス旋回をせず、340度旋回でストップするが、画像はレンズの広角で360度見ることができる。したがって、必要に応じ、画像処理ソフトでパノラマ展開する。
- ③ クラックがある場合は、プローブの挿入量および音声で録音された深度より、クラック深度を特定するとともに、キャリブレーションした目標物との相関性からクラック幅を測定する。なお、クラック幅の測定については、パノラマ画像を参考として、最も薄いと思われる箇所を選定する。

3. 事 例

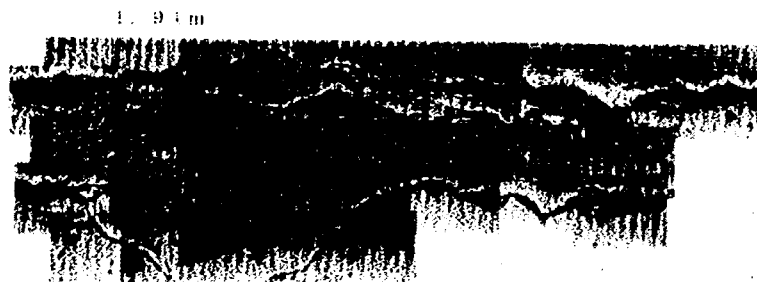
(1) 模型杭(L = 4 m)での測定結果



模型杭採取コア写真



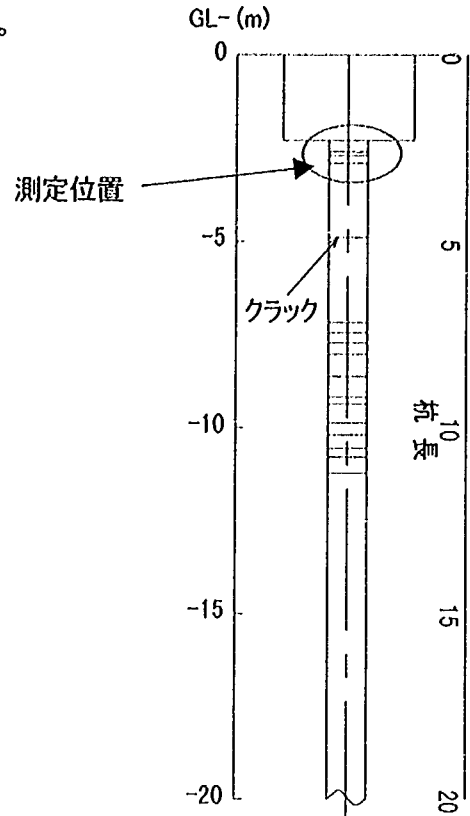
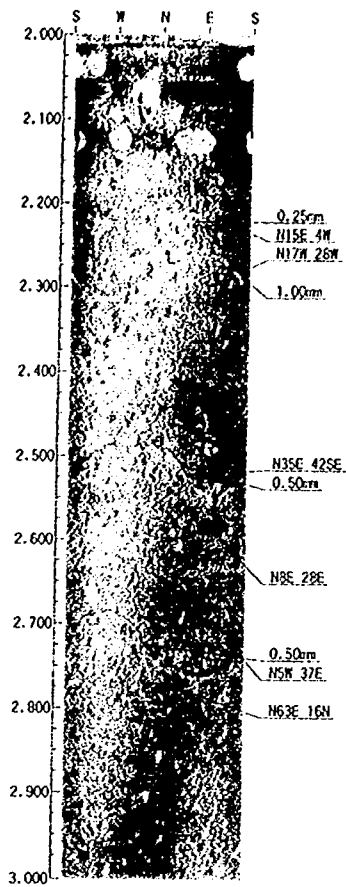
BIPSによる測定結果



P・I・Cによる測定結果

(2) 実杭での測定結果

ここでは、フーチングと杭との境界付近の測定結果を示す。



実杭模式図

BIPS による測定結果



P・I・Cによる測定結果

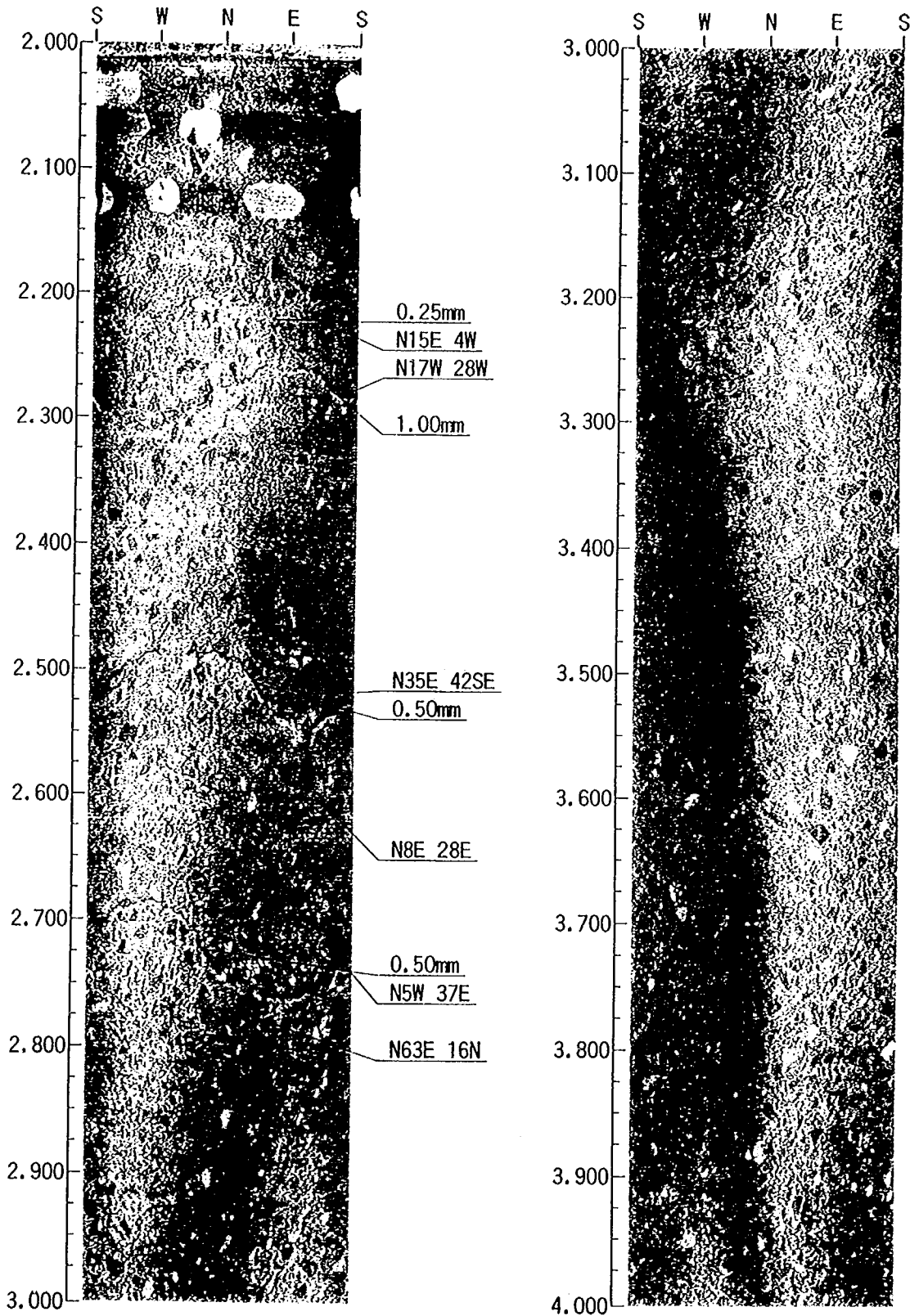
4. 試験結果の整理例

次頁より、BIPS と P・I・C による観察写真の整理例を示す。

件名：阪神高速道路杭試験
孔番：9-4

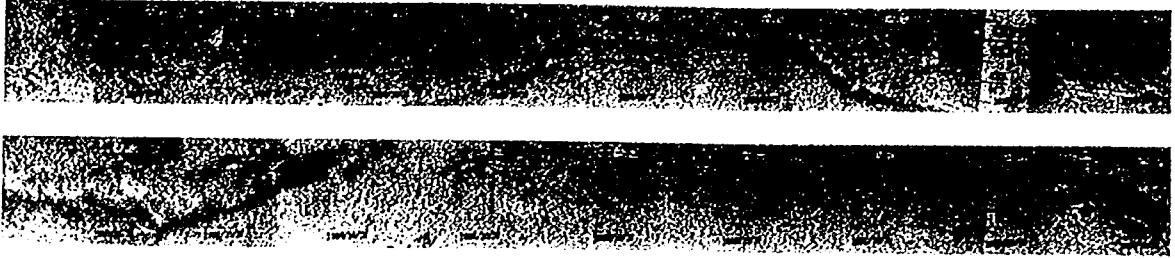
孔方位：0 孔傾斜：-90

深度範囲： 2.000 ~ 4.000 m

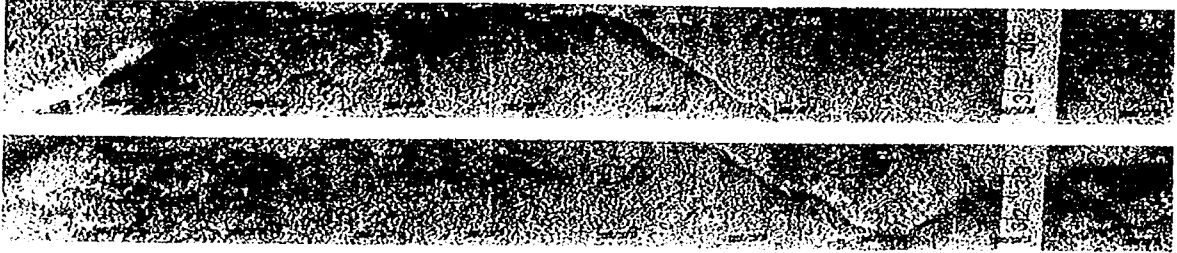


B I P S

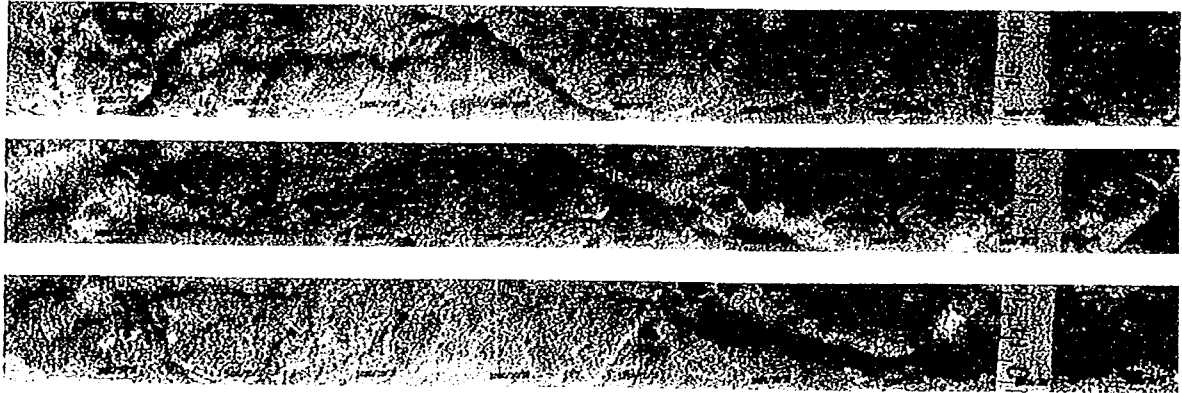
2.22m ~ 2.26m



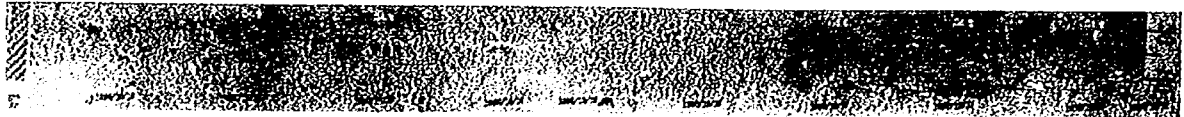
2.46m ~ 2.49m



2.65m ~ 2.71m



4.81m



7.12m



P · I · C

5. 参考文献

No.	タイトル	著者	出典	発行年月日
01	橋梁基礎構造の調査に関する研究<ボーリングがクラックに与える影響>	田口雅章 福井次郎 山田眞一 小野日出男 佐々木勉	土木学会 第 2 回構造物の診断に関するシンポジウム	1999. 8
02	橋梁基礎構造の調査に関する研究(その 5)<ボアホールカメラによる損傷杭の亀裂の測定>	佐々木勉 石田雅博 山田眞一 小野日出男 田口雅章	土木学会第 54 回年次学術講演会	1999. 9

問合せ先

- ・梶谷エンジニア株式会社 田 口 雅 章
東京支店 調査部
TEL 03-3478-3185
FAX 03-3478-3188
E-mail taguchi-masaaki@kajitani.co.jp
- ・基礎地盤コンサルタンツ株式会社 山 田 眞 一
技術本部 技術開発センター 地盤物性室
TEL 03-3727-6158
FAX 03-3727-6247
E-mail yamada.shinichi@kiso.co.jp
- ・株式会社東京ソイルリサーチ 田 中 伸 治
つくば総合試験所 特殊試験室
TEL 0298-51-9501
FAX 0298-51-9559
E-mail tanaka-s@tokyosoil.co.jp

アコースティック・エミッション法を用いた
橋梁基礎の損傷調査法マニュアル(案)

平成11年3月

建設省土木研究所
飛島建設(株)
日本工営(株)

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にある。アコースティック・エミッション (AE) は、既存の欠陥自身のずれや、さらなる欠陥の進行により励起される弾性波であり、損傷位置を震源とする微弱な地震動ともいえる。地震と同種のメカニズムにより発生する AE は、地震と同様に観測点を多数設けることでその震源、つまり損傷位置が探査可能であり、また、課題は残るが、震源のエネルギーから損傷の規模推定の可能性もある。「アコースティック・エミッション法による橋梁基礎の損傷調査」は、構造物の損傷や損傷後に期待される AE を利用することで、その損傷位置や破壊程度を検出された AE により非破壊に推定する調査法である。

本マニュアルは、アコースティック・エミッション法による杭の損傷調査に関する研究成果を基に、試験の適用条件、標準的な試験方法、測定結果の処理・評価方法などについて取りまとめたものである。

アコースティック・エミッションWGメンバー

	建設省土木研究所 材料施工部 施工研究室 研究員	市村 靖光
(幹事)	飛島建設 (株) 技術研究所地盤耐震研究室 室長	三輪 滋
	飛島建設 (株) 技術研究所地盤耐震研究室 主任	塩谷 智基
	日本工営 (株) 中央研究所研究開発部 部長	太田 資郎
	日本工営 (株) 中央研究所情報システム開発室 課長	石橋 晃睦
	日本工営 (株) 中央研究所研究開発部	藤原 鉄朗
	日本工営 (株) 中央研究所研究開発部	松山 公年
	日本工営 (株) 中央研究所研究開発部	金本 康宏

目 次

	ページ
適用範囲	1
用語の説明	1
1. 概要	4
1. 1 背景	4
1. 2 AE計測装置	4
1. 3 AEによるコンクリート杭破損調査法の測定原理	7
2. 調査要領	8
2. 1 計測孔設置手順	8
2. 2 計測・評価手順	10
3. 損傷評価方法	12
4. 解説	14
4. 1 杭内AE計測と杭外AE計測で計測されるAEの意味	14
4. 2 クラックの方向と杭内AEアクティビティ	16
4. 3 AEセンサ設置方法	17
(1) 杭内AE計測	17
(2) 杭外AE計測	17
5. 適用事例	19
5. 1 高層建物基礎への適用	19
(1) 建物・調査概要	19
(2) 調査結果	21
5. 2 中層建物基礎への適用	21
(1) 建物・調査概要	21
(2) 調査結果	21
5. 3 大規模なフーチングに連結された場所打ちコンクリート杭への適用	23
(1) 調査目的	23
(2) 試験対象杭およびAE計測孔	23
(3) 油圧ショベルによる荷重変動	25
(4) AE調査結果	26
(5) 速度検層結果	26
(6) 損傷位置推定結果のまとめ	27
問合せ先	28
参考文献	29

【適用範囲】

本 AE 調査は、コンクリート杭を対象として考案された調査法であり、その対象は RC 杭、PHC 杭、場所打ちコンクリート杭である。また、対象深度は計測器械のチャンネル数の上限まで可能であるが、杭体への荷重伝達範囲まで、例えば重機により負荷を与える場合は 10m 程度までと考えるのが妥当といえる。なお、損傷程度の把握は現在のところは容易ではない。

予め杭体に AE センサが配置できる場合、損傷を受ける時に生じる AE によりその進行状況が場所的・時間的に把握できるが、AE センサが配置されておらず、既に損傷を受けている杭を調査するには、AE の発生を励起させる外力や荷重変動が必要となる。短期的には、杭上部のフーチングや上部構造に起振機などにより荷重変動を与えることで AE の励起は可能であるが、このような荷重変動を与えることができない場合、長期的荷重変動に頼らざるを得なく、適用が困難なことが多い。杭を対象とする AE 計測方法として、杭体内に AE センサを設置する「直接計測」と、杭近傍の地盤内に計測孔を設け AE センサを設置する「間接計測」がある。本マニュアルでは上記「直接計測・間接計測」の 2 つの計測方法による杭の損傷推定方法を解説する。

【用語の説明】

(1) アコースティック・エミッション (acoustic emission: AE)

固体が変形あるいは破壊する際に、それまで蓄えられていたひずみエネルギーが解放され、その一部が弾性波として放射される現象。

(2) AE 源 (AE source)

AE が生じた場所

(3) AE 波 (AE wave)

AE により生じる弾性波

(4) AE センサ (AE sensor, AE transducer)

AE 波を受けて電気信号に変える変換器、AE 変換子ともいう。

(5) AE 信号 (AE signal)

AE 波の受信により AE 変換子により変換された電気信号

(6) AE しきい値 (threshold voltage)

AE 信号を識別するために設けられる電圧レベル。しきい値電圧ともいう。

(7) 到達時間差 (arrival time difference)

複数の AE 変換子に AE 波が到達する相互の時間差

(8) AE 位置標定

AE 源の位置を推定すること。

AE 波は、AE センサ検出後に電気信号として取扱われるので、電気信号の一般的な波形処理方法が適用される。信号処理された AE 波形パラメータは、AE 計測に特異な用語とされ、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、欠陥の発生条件や進展特性を調べることができ、また、その識別が可能な場合もある。以下に主要な AE パラメータを列記する。

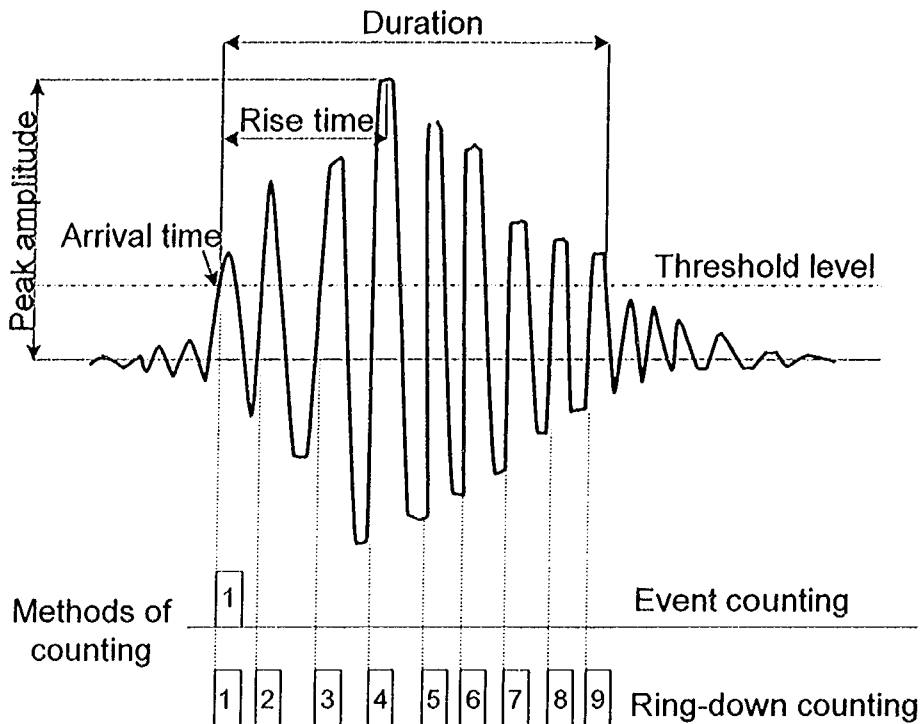


図-1 AE 特性パラメータと AE 計数方法

(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測される。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

位置標定により算出された AE 発生源をイベントといい、1つの AE 発生源が 1 イベントである。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。統計的処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。

1. 概要

1.1 背景

古代から、いろいろな道具を作るのに用いられた錫や亜鉛に力を加えると「錫鳴り」と呼ばれる可聴音が発生することが知られていた。この現象、すなわちある種の金属に応力を加えると双晶変形や、マルテンサイト変態などが誘起され、それとともに可聴音が発生して、材料内部の変化を検出できることについては、20世紀の初頭ヨーロッパで精力的な研究が行われた。これらは、現在 AE (アコースティック・エミッション) と呼ばれる現象に関連して、先駆的研究をなすものである。AE とは、一般には 20 kHz 以上の非可聴域の弾性波を示すが、現在では、AE 法の適用範囲が金属材料から既に土木材料まで及んでいることから、非可聴域に限定されず、有用な弾性波動を全て示すことが多い。

電氣的計測技術を用いた世界最初の科学的な研究は、1930年代始めに我国の東大地震研究所の故岸上教授によって地震現象を模した木材によりなされ、1930年代後半には、ドイツの Förster がマルテンサイト変態で発生する AE の計測を行い、また米国では Mason が、トランジスタの開発で有名なノーベル賞受賞者の Shockley らと 1940年代にベル研究所で金属の双晶変形で発生する AE を計測した。また、鉱山やトンネルなどの岩盤では「山鳴り」や「山はね」が古くから知られ、この分野では、1940年代始めに、アメリカ鉱山局の Obert がジオホーンを用いて最初の AE 計測を行った。1950年代初期に、ドイツの Kaiser が種々材料の引張試験時の AE を計測し、材料が塑性変形を開始すると、AE 発生率が急増するなど今日の AE 技術の基礎を築いた。1960年代に、米国の実験室を中心に様々な金属材料の AE 試験が行われ、原子力用圧力容器やロケットモーターケースの試験にまで適用されるようになった。1967年米国において最初の AEWG (Acoustic Emission Working Group) の会議が開かれ、1970年代に入り AE という用語が統一的に用いられるようになった。それまでの AE は、*elastic shock*、*stress wave emission*、*microseisms* などと呼ばれていた。1970年代は、60年代の成果が一斉に開花した時代とされ日本、アメリカ、ヨーロッパを中心に化学プラント、原子力プラント、タンク、パイプなどの金属製あるいは FRP 製構造物、また航空機、宇宙機器、岩盤などその適用範囲は多岐にわたった。1980年代になると、AE の定量的波形解析に関する理論が確立され、複合材料やファインセラミクスなどの新素材の評価法として広く用いられた。以上に紹介したよう AE 法は金属材料の室内試験を中心に確立され、やがて実プラント、宇宙機器へと発展し、現在ではほとんどの材料試験に適用実績を持つ方法といえる。

1.2 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。

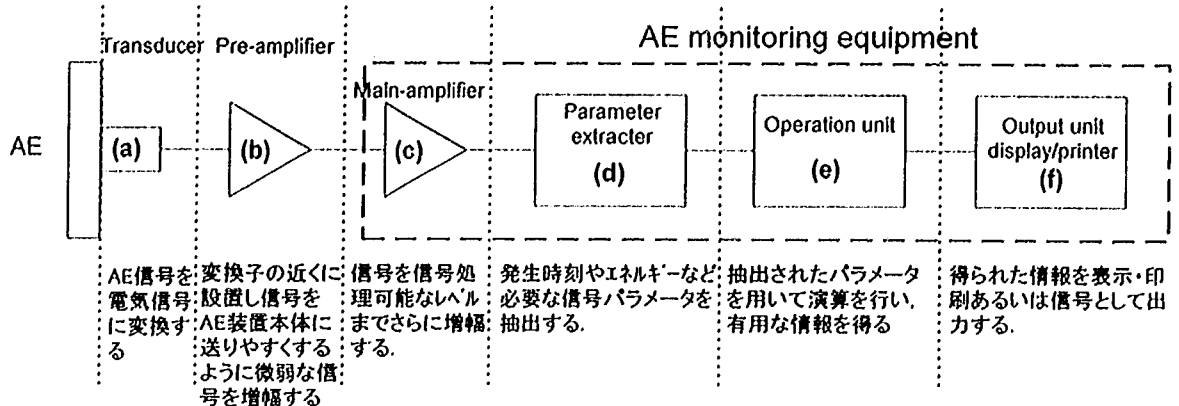


図-2 AE計測システムブロック²⁾

近年の 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-VII-2 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。

(8) 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、最近の研究結果から、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、またデべイス棒を用いた研究結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に設計されている。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 100 kHz 以下、地盤材料では 60 kHz 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。

(9) 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 20~60 dB (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。

(10) 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。(0~60 dB)

(11) 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。

(12) 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 $1 \mu\text{s}$ 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、 $1 \mu\text{s}$ で約 300 kHz 程度と考えられる。

1.3 AEによるコンクリート杭破損調査法の測定原理³⁾

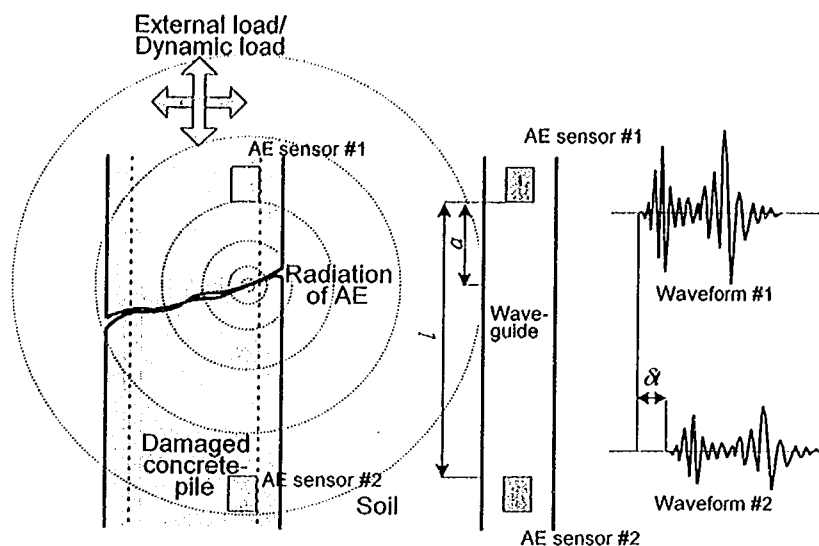


図-3 測定原理概要図

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-3に示す。損傷を有するコンクリート杭に静的あるいは動的荷重が与えられる場合、その損傷箇所の微小なずれや微視的クラックの進展にともなうAEの発生・放射が生じる。AE波は、杭体中を伝播するとともに地盤にも放射される。発生源が図中のAEセンサ#1と#2の間で、かつセンサ#1に近い位置にある場合を考える。このとき、各AEセンサへのAE波の到達は#1、#2の順となり、センサ間に到達時間差 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、

$$a = \frac{l - v\Delta t}{2} \quad (1)$$

により与えられる。ここで、 l はAEセンサー間距離、 v はAE波伝播速度であり、杭体での計測は杭体伝播速度（たとえば、3500 m/s～4500 m/s）を、杭体近傍での地盤内計測孔の場合は、計測孔中のAE伝播速度を用いる。

AE源の発生位置は、このように推定し、発生源の集中位置をもって「損傷位置」と推定する。

2. 調査要領

本調査手法の計測孔設置手順および計測・評価手順は以下の通りである。

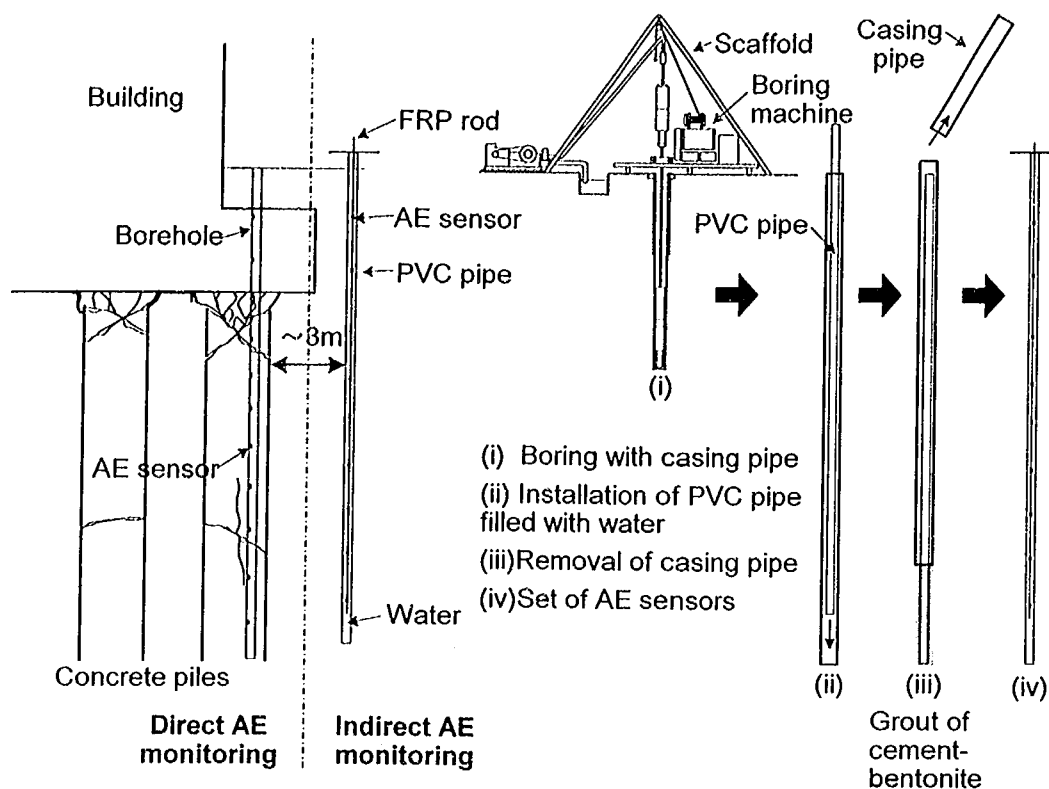


図-4 計測孔設置手順

2.1 計測孔設置手順⁴⁾

図-4 に計測孔設置手順を示す。

- (i) <直接計測>計測対象杭に削孔（ $\phi 116$ mm、ただし AE センサの形状に応じ削孔径を決定する。）を行う。AE センサ（共振周波数 60 kHz）を計測範囲に 2 m を最大間隔として配置する。このとき、孔壁とセンサ受感面が一定圧力で密着することが望ましい。また、AE 計測器械のチャンネル数、センサ個数等の制限により、全計測範囲を一度に計測できない場合、適当なセンサアレーを組み、アレー自身を移動・固定し計測することも可能である。ただし、この場合、複数回数の外力変動が必要となるほか、AE 活動度は荷重履歴に応じて小さくなることを考慮の上、計測データを評価しなければならない。
- (ii) <間接計測>計測対象杭近傍の地盤（可能な限り対象杭に近い位置、3 m 以内）を対象深度までボーリングする。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。
- (iii) 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。

- (iv) ケーシングパイプを引抜く。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などによりグラウトを施す。グラウト材は地盤性状に近い物性のものを用いる。
- (v) 予め計測対象範囲を網羅するように AE センサー（60 kHz 以下の共振周波数）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て設置する。

2.2 計測・評価手順

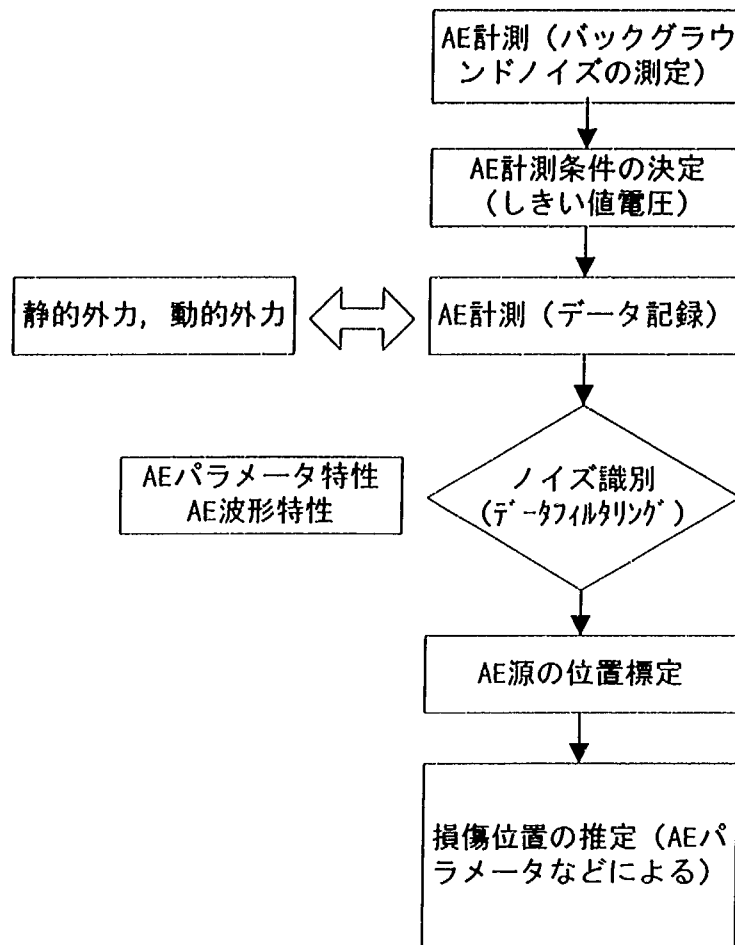


図-5 AE計測・評価フロー

- (i) 環境雑音を測定し、しきい値などのAE計測条件を決定する。
- (ii) 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。
- (iii) (ii)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センサーを設置し、同時計測を行うことも有効である。AEパラメータ特性やAE波形特性を用いてフィルタリングを行う。
- (iv) (iii)のフィルタリング後のAEを用いて次元AE位置標定計算を行い、AE発生位置を推定する。ソフトウェア上での位置標定計算は、各センサへのAE波の到達時間差のみを用いることから、AE波形記録を観察し、同一AE源から放出されたAEであることを確認すれば、標定精度は向上する。
- (v) 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(リングダウンカウント数、エネルギー)

を用いて分布を重み付し、検討する方法が良く、各深度の AE 平均リングダウンカウントや平均エネルギーを用いれば更に明確な結果が得られる場合がある。

3. 損傷評価方法

表-1 AE 計測結果の例

時間(秒)	発生位置 (m)	AEパラメータ				
		立上り時間 (ms)	カウント	エネルギー	継続時間 (ms)	最大振幅値 (dB)
2.3265754	2.572	12	24	40	250	45
3.1253215	2.580	15	30	55	325	58
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
999.9999999	3.022	20	15	150	250	66

測定時間に表-1 に示すような AE 計測結果が得られたとする。ただし、各行は、1 つのイベントデータ、つまり 1 つの AE 源を表し、そのときの AE パラメータはそれぞれの AE センサにより得られたパラメータの平均値として示している。荷重の履歴や AE 以外の他の測定データとの対応を検討したい場合には、図-6 に示すような図示がわかりやすく大まかな損傷位置の把握ができるとともに AE 源の直径や面積をカウント、エネルギーなどの AE パラメータ値を用いて描くことで荷重レベルと AE 発生源位置およびその大きさが判断可能となる。

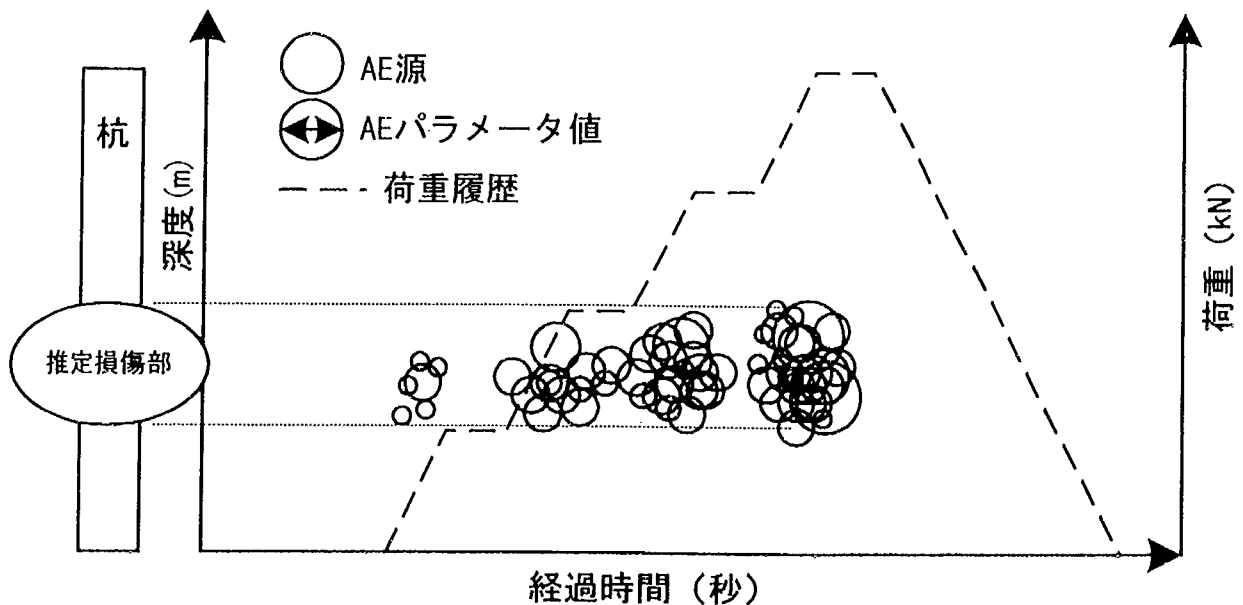


図-6 AE 源分布と荷重履歴の図化例

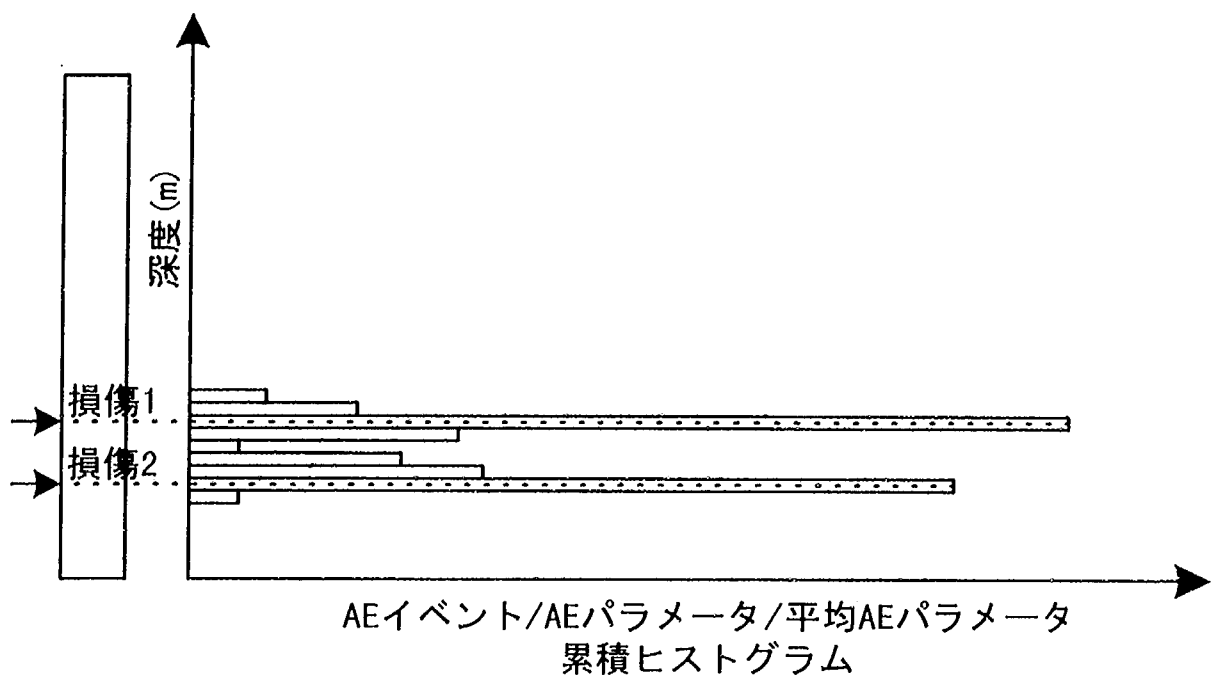


図-7 AE源分布と荷重履歴の図化例

さらに、詳細に損傷位置を検討したい場合、図-6 に示した AE 源を深度に対するヒストグラムとして描き、AE 源の集中深度を「損傷位置」と推定することができる。例えば、図-7 の場合、2 つの AE 源の集中深度が観察でき、それぞれ損傷 1、損傷 2 の位置が推定可能である。また、ヒストグラムの横軸は、AE イベント、AE パラメータ、そして AE パラメータを AE イベントで除した平均 AE パラメータなどにより表すことが可能で、特に平均 AE パラメータは AE 集中深度の観察には有効である。

4. 解説

4.1 杭内AE計測と杭外AE計測で計測されるAEの意味

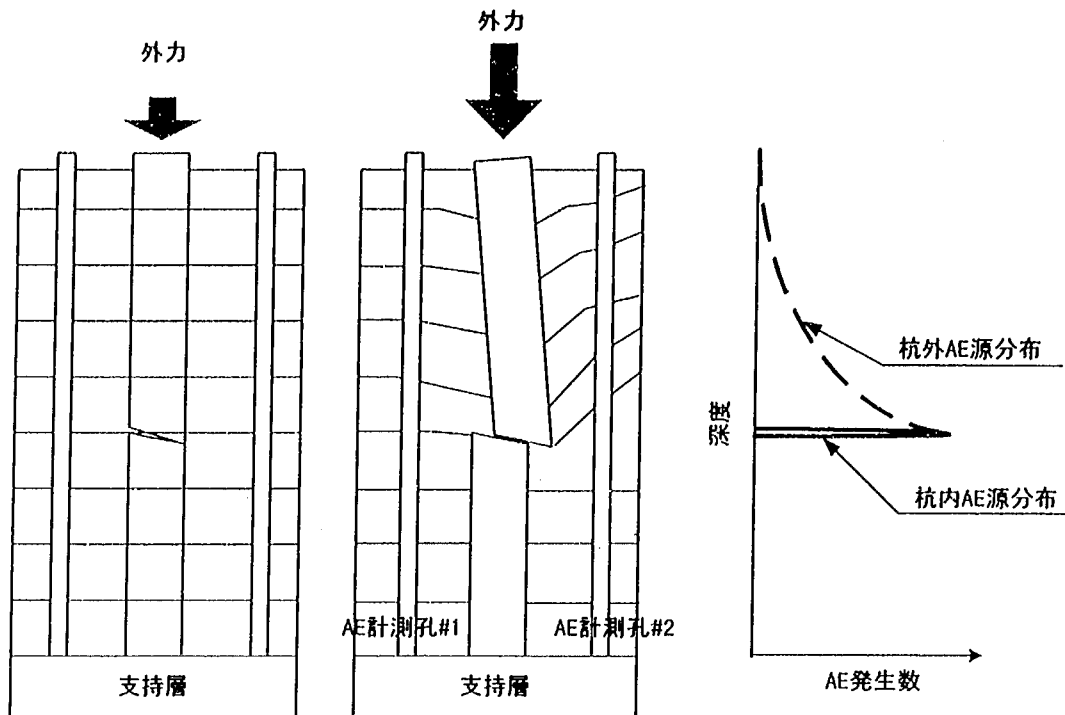


図-8 杭の変形と杭内/杭外で計測されるAE概念図

本調査法は、開発当初に杭外AE計測、つまり杭近傍の地盤にAE計測孔を設け、孔内にAEセンサを設置する方法により行ってきた。しかし、調査結果を直接検証できる比較例がなく、地盤性状や計測対象杭に近接した他の杭でのAE以外の調査結果の比較が中心であった。結論として、得られるAE調査結果は地盤性状から推測される杭の破壊様式や近接杭の損傷結果と良く合致し、杭自身の損傷箇所や損傷箇所周辺の地盤変形にともない放射されるAEを検出しているものと考えていた。杭内と杭外にAEセンサを設置することができたその後の適用事例から、杭内でのAE発現（ここでは、杭内AEセンサでのAE検出時間）と杭外でのAE検出時間が許容される時間に差はなく、杭外で検出されたAEは、損傷箇所周辺の地盤の変形にともなうAEが主であることが確認された。さらに、このことを確認するため、杭外AEセンサを加速度計の範疇にある低周波型としたが、機械雑音の検出が主でこれまでの結果にはほど遠い「有意な弾性波に鈍感かつ雑音に敏感」な結果となった。これらのことから、杭外で計測されるAEは、計測孔と周辺地盤の摩擦によるAE波が主であり、土粒子規模を考えれば、当然高い周波数特性を有するセンサ適用が必要と考えられた。これらの検討から、杭外AE計測に用いるAEセンサは杭内と同様に従来通りの60kHz共振型が良いという結論に至った。杭外で計測されるAEの発生メカニズムは、例えば、斜めき裂を1本有する杭の場合、図-8のように考えられる。杭に杭頭より外力が作用すると、き裂上部の杭体は、き裂面に沿い斜め下方に変形する。このとき、杭外AE計測孔が地盤の変形領域内にある場合、最大ひずみ分布を描くようにAE源分布が得られ、損傷箇所付近が最大となり、損傷位置が概ね推定可能となる。このAEは地盤を構成する材料（粘土、砂、レキ・・・）と計測孔壁との摩擦により放射されるのが中心で、土粒子相互のひずみによるAE

は検出されても少数といえる。また、杭外 AE を効果的な損傷調査とするためには、地盤に設ける AE 計測孔が必ず杭の損傷部の変形に追従した地盤の変形領域内にある必要があり、領域外の計測孔では上述の理由により AE 検出、つまり損傷調査は不可能と考えられる。次に図-9 に示すように重度の水平き裂を液状化層と非液状化層の境界に有する杭について考える。地震動により液状化が生じ、杭は、地層境界深度に損傷を生じたとする。このとき、地盤のひずみは、地層境界を最大とする分布となり、地層境界周辺の地盤は液状化等により乱され、特に破壊した杭の周辺部は、地震後においても上部と比べて「不安定状態」にあると考えられる。このような状態にある杭に軸力を与え、杭外 AE 計測を実施するとき、不安定状態にある損傷箇所周辺の地盤は変形しやすく、杭近傍に設置した AE 計測により AE 発生源分布の集中位置として杭の損傷箇所が推定可能となる。

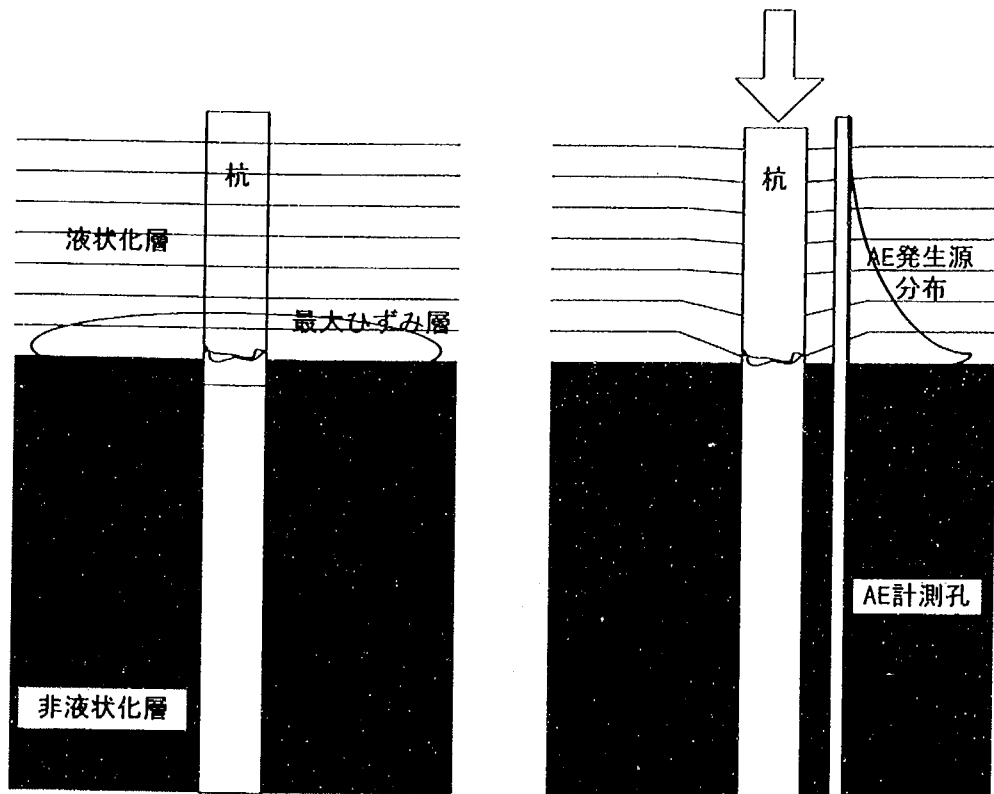


図-9 液状化により地層境界において損傷した杭の AE 発生メカニズム

4.2 クラックの方向と杭内AEアクティビティ⁵⁾

杭頭から外力が与えられ、潜在き裂のずれ（摩擦）やマイクロクラックの連結、あるいは新たなマイクロクラックの生成などによる AE の検出が本調査法の特徴である。ここで、潜在き裂のずれが主要な発生要因となる AE について考える。この場合、AE アクティビティにクラックの方向性が大きく関与する。特徴的な 2 例を図-10 に示す。

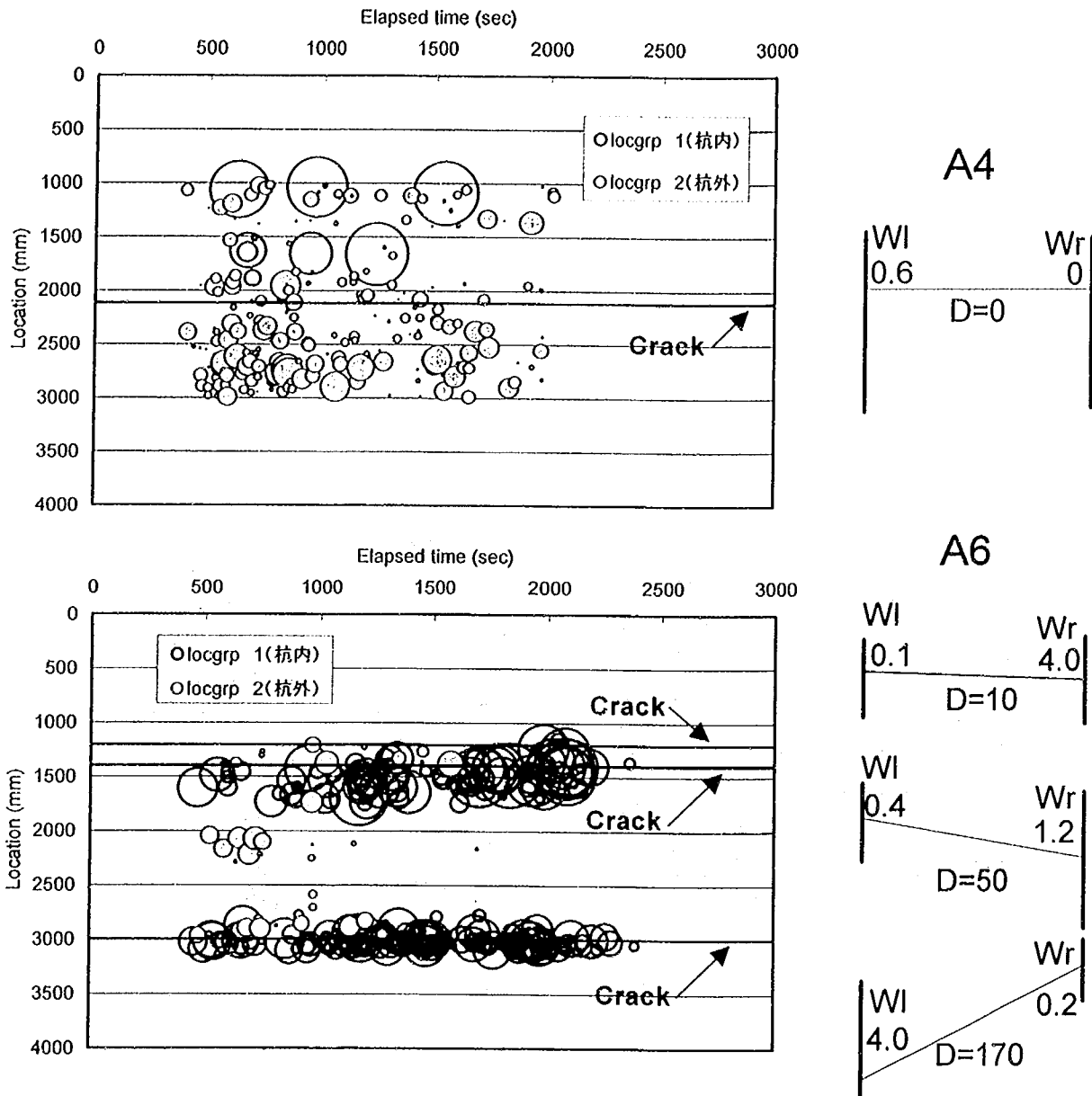


図-10 AE 位置標定結果とクラックの方向性との関係（白抜き円は杭内 AE 計測結果、塗りつぶし円は杭外 AE 計測結果で A4 杭（上図）は 1 本の水平き裂、A6 杭（下図）は 3 本のき裂を有する。右図は、き裂の幅（WI、Wr）mm を示し、D が段差 mm である。）

図-10 は、人工的に損傷を与えた既製 RC 杭の鉛直載荷試験での AE 計測結果である。AE 計測は杭内と杭外で行われ、図中の白抜き円が杭内 AE 計測結果である。A4 杭は、深度 2m 付近

に1本の水平き裂を、A6杭は、1.2、1.4、3.0m付近に3本のき裂を有する。AE計測結果から、A4杭では、き裂位置にAE源はほとんどなく、それよりもむしろ目視観察できない潜在マイクロクラックが生じているであろう上部の位置に確認された。このことは、「杭上部からの荷重により水平き裂が閉口し、そのときのAEは小規模でかつ検出が容易でない」ことを意味している。A6杭は、上部のき裂に比べて中間き裂および、下部き裂の傾斜が大きく、荷重により中間、下部クラック面の一部に応力集中が予測される。AE計測の結果から、A4杭に比べA6杭では、AE発生数および規模が中間部、下部クラックに集中している様子が認められ、傾斜クラックにおける本手法の有効性が確認された。これらの事項から、杭体損傷箇所からのAE発生は、クラック幅よりも応力集中が生じやすいクラックかどうか、つまり、クラック分布範囲の杭長手方向への広がり「ずれ」に左右されると考えられる。

4.3 AEセンサ設置方法

(1) 杭内AE計測

杭内直接AE計測において満足すべきAEセンサおよび、設置方法の条件は以下の通りである。

(i) 鉄筋コンクリートのAE監視に適用するAEセンサを使用すべきである。

(ii) AEセンサは杭体内に確実に設置されなければならない。

(i) については、室内試験で用いられる円柱供試体 ($\phi 5 \times 10 \text{ cm}$ 、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$) などでは、150 kHzあるいはそれ以上の共振周波数を有するAEセンサが使用されるが、実コンクリート構造物では、60 kHz共振型AEセンサが一般に用いられている。60 kHz以下の加速度計の適用も考えられるが、本調査は外力変動下で実施されることが多く、低周波機械ノイズが避けられないため実務上困難といえる。また、1つの60 kHz共振型AEセンサが受持つことができる計測範囲は、2~3 m程度である。

(ii) については、事前に杭体内に確実にAEセンサを設置できる方法を検討する必要がある。それぞれのAEセンサが同一の条件で杭に固定される必要がある。例えば、バネ、エアバック、電磁石などを利用した方法が考えられる。

(2) 杭外AE計測

杭外でのAE計測は、計測孔周辺の地盤と計測孔との摩擦の検出に限定した場合、AE波の伝播特性がよい音響インピーダンスが高い金属材料を用いるのがよい。また、これら摩擦音のみならず、計測孔に離れた位置で発生するAE（杭損傷箇所から生じるAEや周辺地盤のひずみなどによるAE）も測定したい場合、計測孔にAE波が効率よく透過する周辺の地盤に近い音響インピーダンスを有する孔壁材料が必要となり、孔内に入射されたAE波は伝播特性が優れた材料中をAEセンサまで伝わる必要がある⁹⁾。この場合、塩化ビニル管を計測孔とし、孔内にAEセンサを設置する方法が有効である。注意すべきはAEセンサは孔壁に設置されるものではなく、孔壁とAEセンサは接触せず、さらに孔内に水を充填する必要があるということである。この方法⁹⁾により、図-11に示すよう通常のアリミニウムによる方法に比べて約2倍の検出感度が得られる。

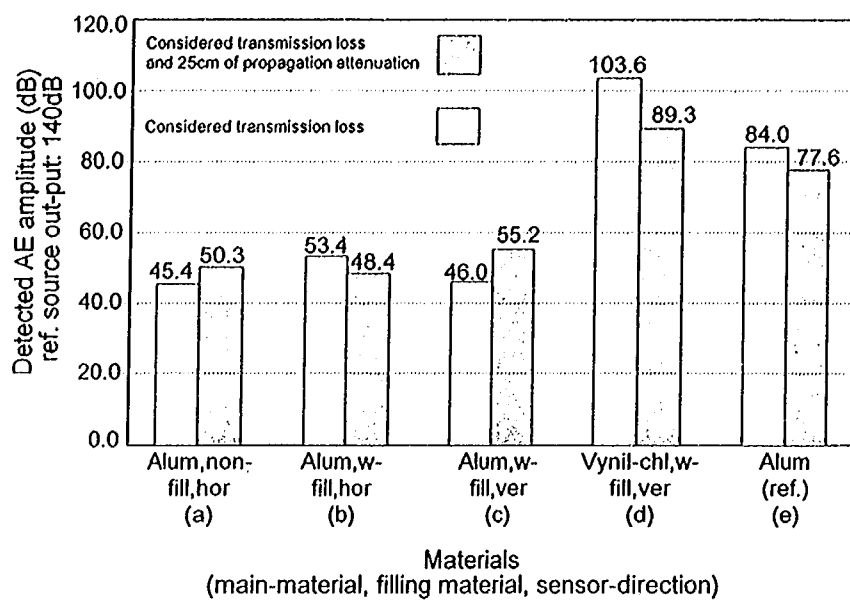


図-11 塩化ビニル管と水との組合わせによる杭外 AE 計測孔の効果比較

5. 適用事例

5.1 高層建物基礎への適用⁸⁾

(1) 建物・調査概要

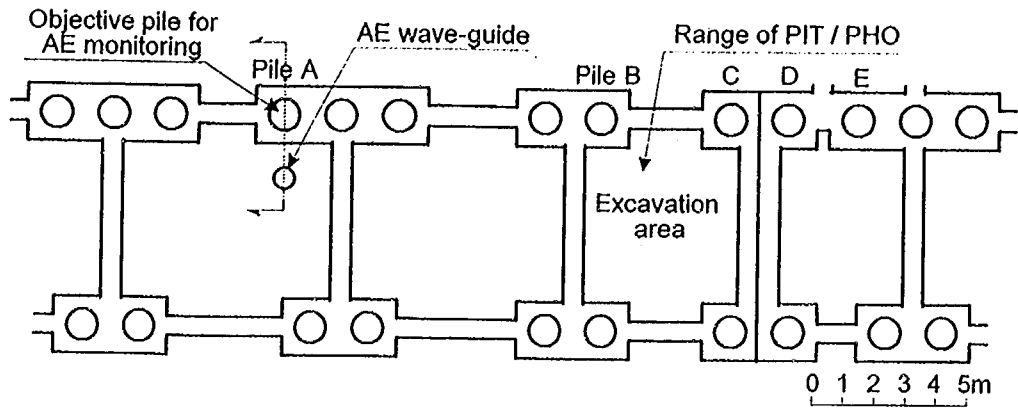


図-12 調査位置平面図

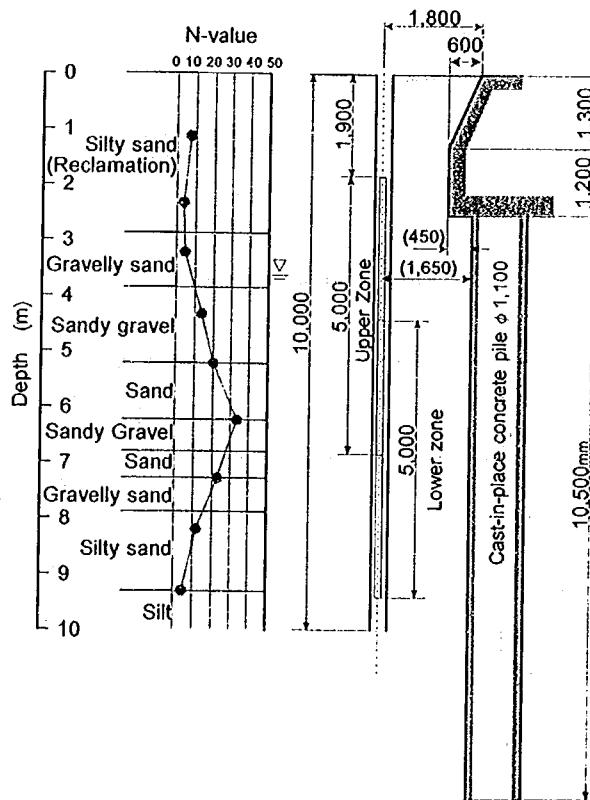


図-13 地盤柱状図と計測位置の断面詳細

高層建築物基礎（場所打杭： $\phi 1,100$ mm、 $l: 10.5$ m）に本手法を適用した。調査時には当該建物の上部は解体・撤去され、フーチング以下の基礎を残すのみであった。そこで、フーチング上部に重機を載せ変動荷重を与えて破損部位からの AE を誘発させた。AE の検出には、ボーリン

グ孔内の任意深度にセンサーが設置可能である“サスペンション型導波棒”を用いた。また、他の調査（PIT 試験、杭頭観察）も併せて実施し、本調査結果と比較検討した。図-12 に AE 計測位置、および PIT 試験・目視観察位置を示す。PIT 試験・目視観察は図に示す B～E の 4 本の杭で行い、PIT は杭頭より下 80 cm 以深を、目視観察は杭頭より 1.1 m までを対象に調査した。

図-13 に調査地盤の性状と AE 計測位置の断面詳細図を示す。地盤は、地表から 3 m までがシルト質砂の埋立土、6 m までが緩い砂、6 m～7 m（杭頭から 3.5 m～4.5 m）に N 値 30 以上の密な砂礫層があり、以深はシルト質の砂層である。AE 計測は、同図に示す計測位置で地表から 10 m の深度まで削孔された 4 インチケーシング内に清水を充填し、サスペンション型導波棒（ $l: 5$ m、両端 60 kHz 共振型 AE センサ内蔵）を吊り下げて計測した。計測位置は同図に示すゾーン上、ゾーン下の 2 ゾーンとし、ゾーン間の重複を半棒長（2.5 m）とした。なお、上部構造撤去後の計測であったため、フーチング上部に重機を載せ、3 方向でのアーム伸縮により杭に外力変動を与え、AE 発生を誘発させた。

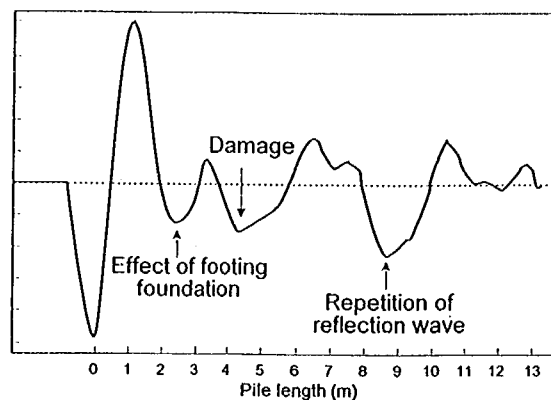


図-14 C 杭の PIT 測定結果

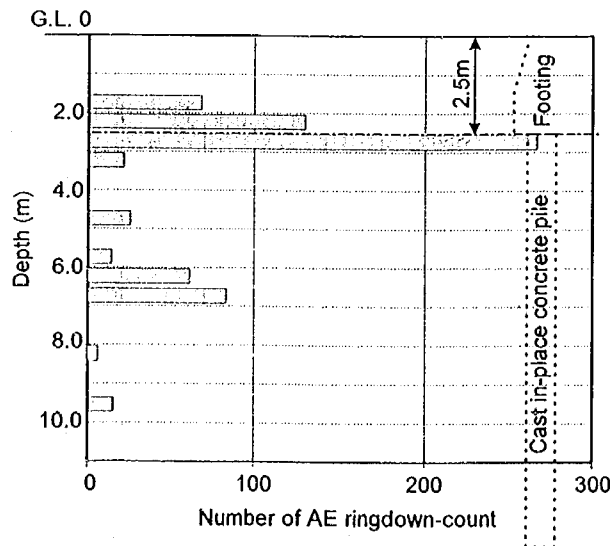


図-15 AE 計測結果

(2) 調査結果

図-14にC杭より得られたPITによる反射波形を示す。図中の4.4mに破損であると推定される反射が認められた。その他の杭については、B杭『健全性が高い』、D杭『不明確』、E杭『杭頭より3.5m付近に破損あり』との結果が得られた。また、目視観察結果よりB～Eのすべての杭で杭頭部に0.2～1mm程度のクラックが認められた。

図-15にAE計測結果を示す。図の縦軸は深度、横軸は各々の深度において検出されたAEをAE源(破壊源)の規模情報を与えるAEリングダウンカウントを用い重み付した結果である。図より、AEが集中している『杭頭付近』および『杭頭より3.5m～4.5m』に杭の破損が推定された。これら2つの推定破損深度は、同一の杭ではないが杭頭観察、PIT試験より推定された破損位置に合致した。

5.2 中層建物基礎への適用⁹⁾

(1) 建物・調査概要

調査対象は、1995年の兵庫県南部地震で被災した共同住宅である。建物と地盤の概要を図-16に示す。なお、計測期間にアンダーピニングによる復旧工事が施工されており、工事にとまなう基礎杭への荷重再配分によるAEの発生が期待された。計測時のアンダーピニング工事進捗状況を図-17に示す。AE計測は、両端にAEセンサー(共振周波数60kHz)を取付けた導波棒を対象杭から1m離れた位置に設置し、杭頭から4.5m深度までを計測した。

(2) 調査結果

本調査は、目視観察およびPIT試験に先がけて実施した。計測されたAEより、暫定的に破損位置を推定した結果、『杭頭部付近』、『杭頭より1.0m付近』、『杭頭より2.2m付近』、『杭頭より3.5m付近』を破損位置として推定した。その後、測定対象杭を目視観察し、杭頭接合部のずれや杭頭から1.0m付近にひび割れが確認された。また、PIT試験結果から、杭頭から3.2m、5.4mに破損が推定された。さらに、AEデータは1)工事期間外データの抽出、2)AEリングダウンカウント数、立上り時間、継続時間を用いたノイズデータ除去等を施し詳細解析した結果、図-18に示す位置が破損と推定された。同図の縦軸は杭頭からの深さ、横軸は各々の深さで検出されたAE1イベント当たりのリングダウンカウント数(各区間の同カウント累計量をAEイベント数で除した値)である。AE詳細解析の結果、『杭頭～0.7m』、『杭頭より0.9m～1.2m』、『杭頭より1.7m～2.4m』、『杭頭より3.4m～3.7m』の4箇所が破損位置と推定された。以上から、本手法により暫定的に推定した破損位置と詳細解析により得られた位置は、ほぼ一致する結果となった。また、これらの破損推定位置は、杭頭から2m付近を除き、目視観察結果およびIT試験結果を反映するものであった。

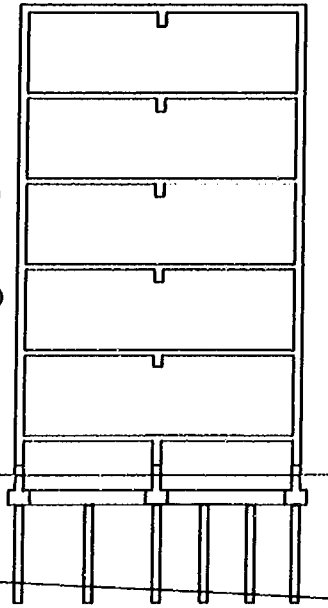
建物概要

平面寸法：46m×6.6m
 階数：地上5階
 構造形式：RC壁式構造
 基礎構造：φ250 RC杭
 被災状況：相対沈下 110mm

地質

1. CL0~-5m 盛土(礫混り砂)
N値 0~10
2. CL-5m~ 風化花崗岩
N値 50以上

深度	地質	N値	50
1	盛土	●	○
2			
3			
4			
5			
6	風化花崗岩	●	○
7			
8			
9			



※地下水位は確認されない

図-16 建物と地盤の概要

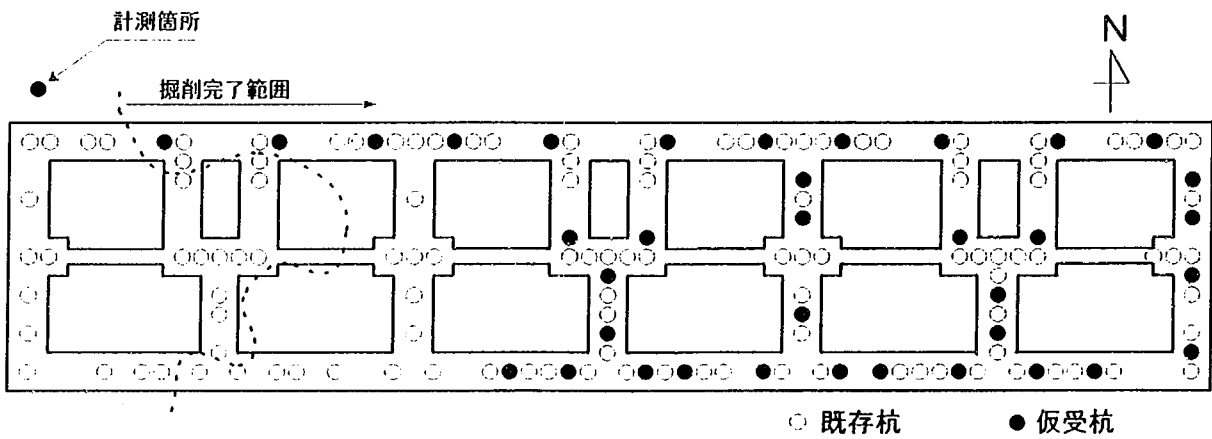


図-17 計測時のアンダーピニング工事状況

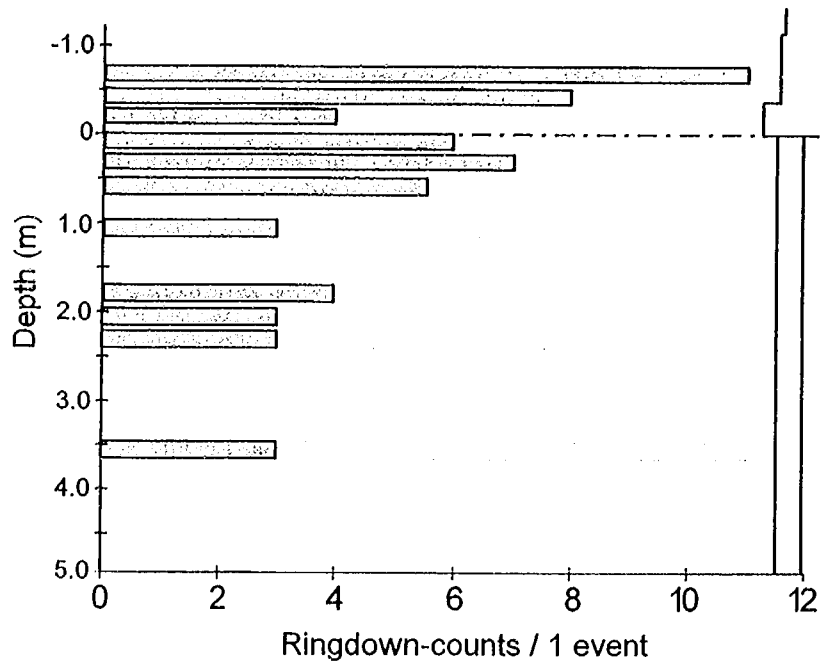


図-18 AE 詳細解析結果

5.3 大規模なフーチングに連結された場所打ちコンクリート杭への適用¹⁰⁾¹¹⁾

(1) 調査目的

既に水平載荷試験が実施され、杭頭部を中心に損傷が認められている場所打ちコンクリート杭を試験対象とし、重機により杭体へ静的荷重や動的荷重を与え、得られた AE 源より、杭の損傷位置を推定し、杭内のボアホールカメラ観察や杭削孔で得られた採取コア観察、および杭体の速度検層結果と比較検討し、AE 調査法の適用性を検討した。

(2) 試験対象杭および AE 計測孔

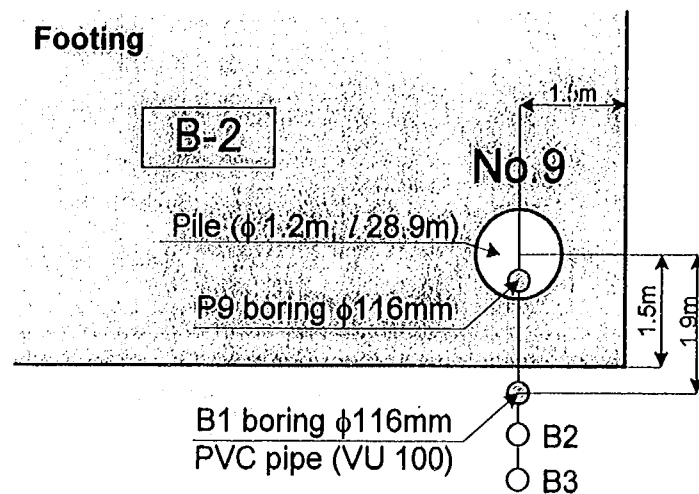


図-19 試験杭と AE 計測孔の平面位置

図-19 に試験対象杭と AE 計測孔の平面位置を示す。試験対象とした場所打コンクリート杭は既に水平載荷試験が実施され、杭頭部を中心に損傷が認められていた。フーチング (9.0×9.0×2.3 m) に接合された 9 本の場所打ちコンクリート杭 (φ: 1.2 m、l: 28.9 m) のうち、その隅角に位置する杭: No. 9 について試験を行った。AE 計測は、杭自身に削孔を施し、AE センサを設置する「杭内 AE 計測」と、対象杭近傍の地盤を削孔、塩化ビニル管を設置し AE センサを設置する「杭外 AE 計測」により行った。杭内 AE 計測は特別に設計した取付け治具により、AE センサを杭中の削孔壁に圧着して計測し、杭外 AE 計測は塩化ビニル管に専用の治具によりセンサを所定の位置に固定、空隙を水充填することにより実施した。

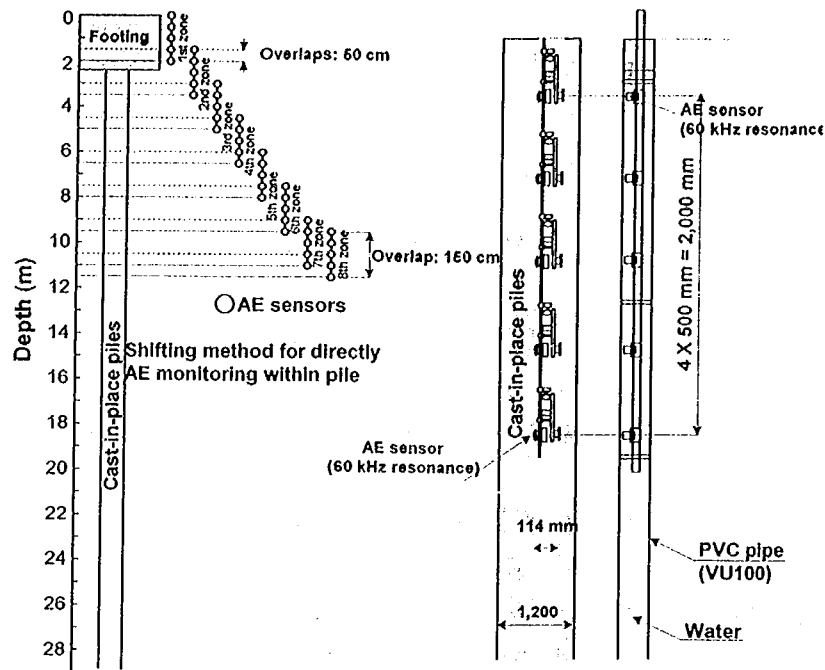


図-20 AE センサ群の配置図

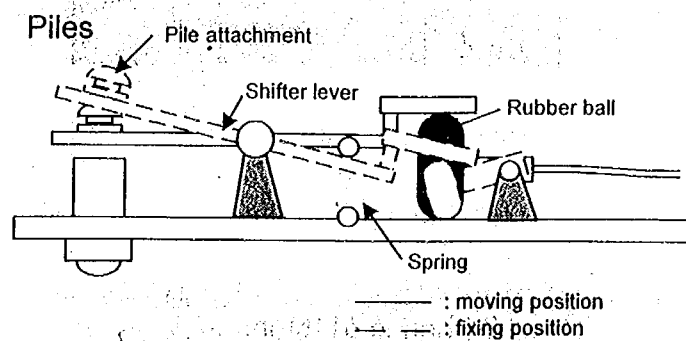


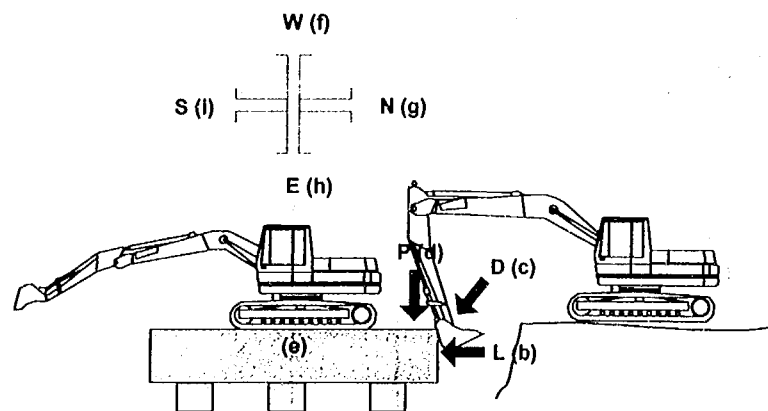
図-21 杭内 AE センサ設置装置

図-20にAEセンサ群の配置図を示す。AE計測対象深度は、フーチング表面より11.5 mで、「杭内AE計測」は、1つの計測範囲が2 mとなるように、5個のAEセンサ（60 kHz共振型）を50 cm間隔で取付けたセンサ群を、基本的に50 cmの重複を設けながら杭頭より挿入・固定して実施した。所定深度へのセンサ群の移動/圧着は、図-21に示すような「てこの原理」による治具を用いた。各センサ近傍に設置したラバーボールが、空気圧により膨張し、同時にバネが伸張し圧着部が下がり、移動可能となる。反対に、ボール収縮時には、バネも収縮し、圧着部が上昇、孔壁に定圧で固定される。このように、製作したAEセンサ設置装置は、ラバーボールの膨張がセンサ群の移動を可能にし、反対にその収縮がAEセンサの杭内壁固定を可能にするという、従来の装置とは相反する原理により設計されているところが特徴といえる。ラバーあるいは管に空気漏れが生じた場合、バネにより杭内壁に圧着されたセンサには影響せず、安定したAE検出が可能となる。杭外のAE計測は、グラスファイバー棒に杭内計測と同種・同間隔のAEセンサを取付けたセンサ群を所定の深度に吊下げのように設置し、間隙を水で充填して行った。

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

(3) 油圧ショベルによる荷重変動

杭損傷部からのAE放射を励起させる目的で、杭と接合された上部のフーチングへ油圧ショベル(バケット容量0.59 m³、重量11.8 tons)により小規模の静的荷重や動的荷重を与えた。基本的な一連の荷重変動を図-22に示す。



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

図-22 油圧ショベルによる外力変動フロー

(4) AE調査結果

図-23 に AE 位置標定結果の深度に対するヒストグラムを示す。図-23(a)は、杭内累積 AE ヒット、(b)は杭内累積 AE カウント（リングダウンカウント）、(c)は各深度における平均カウント数（(b)を(a)で除したもの）、(d)は杭外の AE 位置標定結果の(c)と同種の図を示している。(a)、(b)より、フーチング内に多数の AE イベントがあり、AE 集中深度は 1.0-1.5 m、2.0 m に見られた他、値は小さいが 3.0-3.5 m、5.0 m 付近にも認められた。(c)の AE ヒットの平均カウント数より、4.5-5.0 m の AE 集中が明瞭になる。(d)の杭外 AE 計測において 1.8 m、3.2 m、4.8 m に AE 集中が認められる。これらは、杭内計測より判断された、杭の損傷箇所から放射された AE 波と時間的に同期していないが、AE 集中深度はほぼ一致していた。

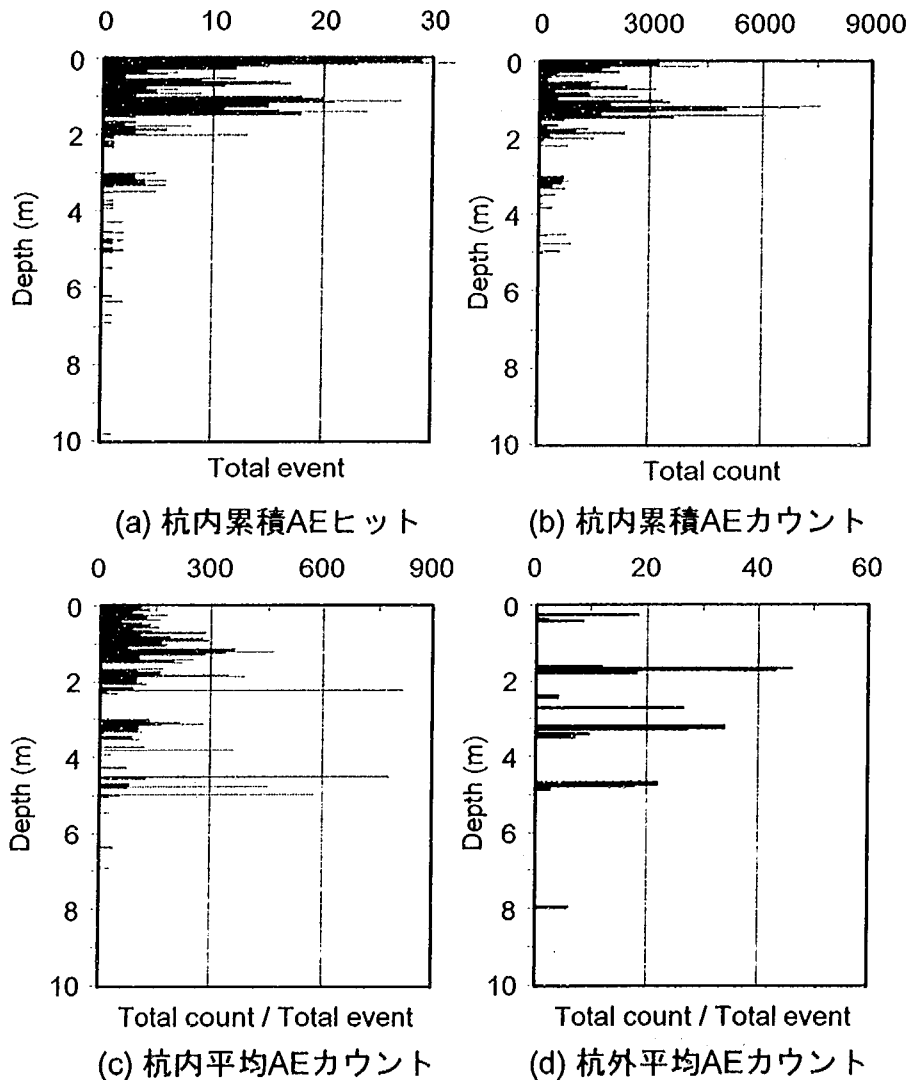


図-23 AE 位置標定の深度に対するヒストグラム

(5) 速度検層結果

図-24 に、各 AE センサで得られた弾性波の到達時刻より求めた杭内の弾性波速度を示す。ここで、各プロットは、伝播速度算出に用いたセンサ間中心、つまり、深さ 1.0 m-1.5 m 間の伝播

速度は、深さ 1.25 m の伝播速度として表している。ここでは極端に速度が低い深度のみに着目する。その場合、1.5-2.0 m、3.0-4.0 m、4.5-5.5 m、6.0-6.5 m に低い速度領域が認められ、これらの深度は杭内 AE 計測より推定された損傷位置、および杭外 AE 計測より推定された損傷位置に合致していた。

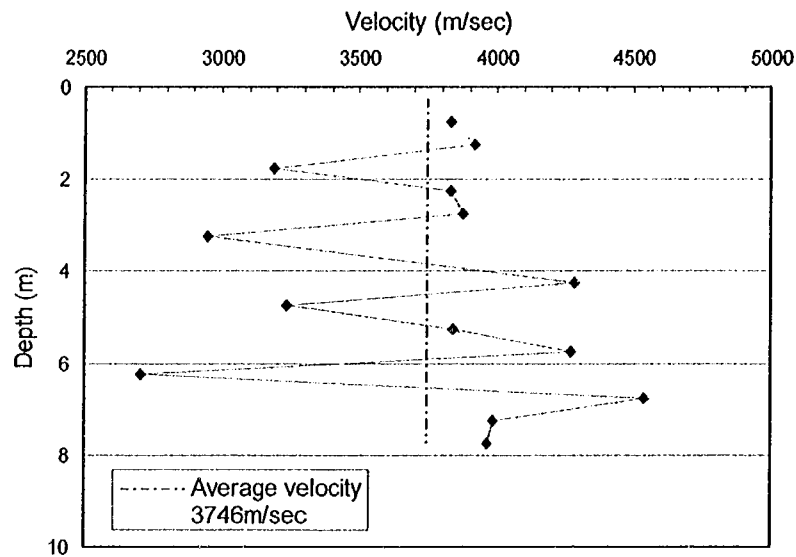


図-24 杭体の弾性波速度

(6) 損傷位置推定結果のまとめ

AE法、ボアホールカメラ・採取コア観察、速度検層より推定された損傷位置を図-25にまとめる。ここで、ボアホールカメラ結果には、クラックは観察できたが、その幅が測定できなかったものも点線で追記している。以下の事項が認められた。

- 1) 杭頭付近の損傷がカメラから観察された。AEおよび速度検層から、フーチング内部での損傷が推定され、この位置はカメラ観察では認められなかったが、採取コアに多くの破断が確認された。
- 2) AEより約3 mの深さに損傷が推定され、この位置は速度検層結果より妥当であると判断された。しかし、カメラ観察からは認められなかった。
- 3) 5 mの深さの損傷が全ての手法で推定された。
- 4) 杭内 AE より、6.5 m～7.0 m の深さに損傷が推定され、この部位はコア観察および速度検層結果と概ね一致していた。また、クラック位置のみが確認できたカメラ結果とも合致していた。

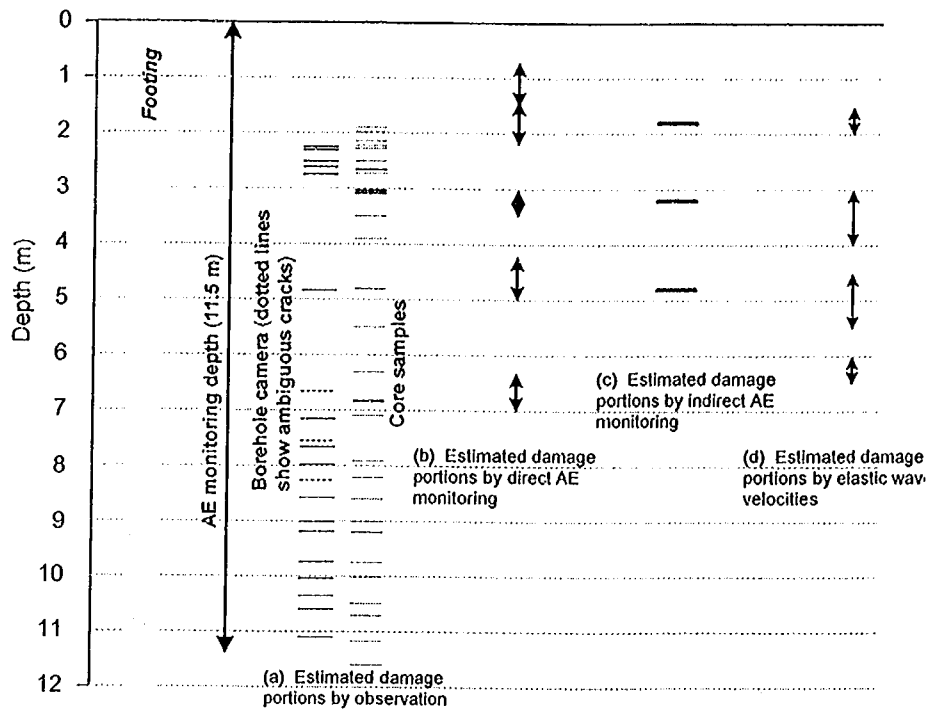


図-25 各手法による損傷位置推定結果のまとめ

問合せ先 (AE調査)

飛島建設 (株) 技術研究所 地盤耐震研究室 主任 塩谷 智基

TEL 0471-98-7551、FAX 0471-98-7586、E-mail tomoki_shiotani@tobishima.co.jp

日本工営 (株) 中央研究所 開発研究部 藤原 鉄朗

TEL 0298-71-2030、FAX 0298-71-2022、E-mail a3876@n-koei.co.jp

参考文献

- 1) 大津政康・新妻弘明・湯山茂徳・吉岡武雄著：アコースティック・エミッション II，日本非破壊検査協会，pp. 1-8.
- 2) 大津政康・新妻弘明・湯山茂徳・吉岡武雄著：アコースティック・エミッション II，日本非破壊検査協会，pp. 101.
- 3) 森伸一郎・宇良成泰・塩谷智基・藤井清司：AE を利用したコンクリート杭の破損調査法，土質工学会，第 30 回土質工学会研究発表会平成 7 年度発表講演集，pp. 1581-1582, 1995. 7.
- 4) 塩谷智基：AE 法による欠陥調査-2（構造物への適用），KABSE・日本コンクリート工学協会九州支部・土木学会西武支部，コンクリート構造物の非破壊調査と診断に関する講習会テキスト，pp. 39-46, 1997. 10.
- 5) 塩谷智基・境野典夫・石橋晃睦・藤原鉄朗・市村靖光：損傷した既製 RC 杭より放射する AE 特性，土木学会構造工学技術シリーズ No.5，構造物の診断に関するシンポジウム論文集，pp. 113-120, 1998. 7.
- 6) 塩谷智基：地盤内破壊評価法へのアコースティック・エミッションの適用に関する研究，熊本大学博士論文，第 4 章ウエーブガイドの開発，pp. 99-165, 1998.
- 7) 塩谷智基・境野典夫・大津政康・重石光弘：AE の地盤伝播特性とウエーブガイドによる検出方法，日本非破壊検査協会，第 11 回 AE 総合コンファレンス論文集，pp. 5-10, 1997. 11.
- 8) 森伸一郎・塩谷智基・岩城圭介・境野典夫・田中幹夫：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，日本建築学会，1996 年度大会学術講演梗概集，pp. 643-644, 1996. 9.
- 9) 森伸一郎・岩城圭介・塩谷智基・境野典夫・秋山映雄：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，日本建築学会，1996 年度大会学術講演梗概集，pp. 639-640, 1996. 9.
- 10) 塩谷智基・三輪滋・市村靖光：フーチングを有するコンクリート杭の AE/衝撃弾性波による損傷調査，土木学会，第 3 回耐震補強・補修技術及び耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集，pp. 127-134, 1999. 7.
- 11) 塩谷智基・三輪滋・市村靖光：橋梁基礎構造の損傷調査＜AE による損傷調査＞，土木学会構造工学技術シリーズ No.11，構造物の診断に関するシンポジウム，pp. 151-156, 1999. 8.