

コンクリート基礎杭の  
品質管理手法に関する基礎的研究

1996年1月

林 隆浩

# コンクリート基礎杭の品質管理手法に関する基礎的研究

## 目 次

### 第1章 序 論

1. 1	本研究の背景と目的	1
1. 2	コンクリート基礎杭の品質管理手法の現状と問題点	2
1.2.1	杭施工管理手法の現状と問題点	2
1.2.2	杭鉛直支持力の確認手法の現状と問題点	4
1. 3	本論文の構成	6
	[第1章 付表、付図]	7

### 第2章 コンクリート基礎杭の品質管理手法に関する既往の研究

2. 1	概 説	12
2. 2	コンクリート基礎杭の品質評価に関する既往の研究	13
2.2.1	コンクリートの強度推定	13
2.2.2	コンクリート基礎杭の形状推定	17
2. 3	コンクリート基礎杭の支持力評価に関する研究	23
2.3.1	静的載荷試験	24
2.3.2	先端載荷試験	25
2.3.3	スタナミック試験	26
2. 4	まとめ	27
	[第2章 付表、付図]	28

### 第3章 衝撃弾性波法を適用したコンクリート基礎杭の形状推定方法に関する研究

3. 1	概 説	41
3. 2	コンクリート基礎杭の形状推定方法	41
3.2.1	波動速度の反射・透過	41
3.2.2	弾性波入力点で検出された反射波の速度比	42

3.2.3	パラメータの算定方法	43
3.3	数値実験による形状推定方法の確認	44
3.3.1	解析手法	44
3.3.2	解析モデル	48
3.3.3	解析結果とその考察	49
3.4	モデル実験による形状推定方法の確認	52
3.4.1	実験方法	52
3.4.2	計測・処理方法	53
3.4.3	実験結果とその考察	54
3.5	実コンクリート基礎杭への適用性の確認	58
3.5.1	実験方法	58
3.5.2	計測・処理方法	59
3.5.3	実験結果とその考察	59
3.6	まとめ	62
	[第3章 付表、付図]	64

#### 第4章 衝撃弾性波法を適用した兵庫県南部地震によるコンクリート基礎杭の被害調査

4.1	概説	107
4.2	調査概要	107
4.3	調査方法（計測手法）	108
4.3.1	非破壊試験方法	108
4.3.2	ボアホール調査方法	109
4.4	調査結果	109
4.4.1	既製コンクリート杭の調査結果	109
4.4.2	場所打ちコンクリート杭の調査結果	110
4.4.3	耐震場所打ち拡径杭の調査結果	111
4.5	まとめ	111
	[第4章 付表、付図]	113

#### 第5章 急速載荷試験方法を適用したコンクリート基礎杭の支持力評価に関する研究

5.1	概説	134
-----	----	-----

5. 2	実験方法	134
5. 2.1	地盤および使用杭の概要	134
5. 2.2	静的載荷試験方法	136
5. 2.3	急速載荷試験方法（スタナミック載荷試験法）	136
5. 3	実験結果とその考察	137
5. 3.1	静的載荷試験結果	137
5. 3.2	急速載荷試験結果	141
5. 3.3	各試験方法の比較検討	143
5. 3.4	既往の試験結果との比較	144
5. 4	まとめ	144
	[第5章 付表、付図]	146

## 第6章 結論および今後の課題

6. 1	結論	184
6. 1.1	衝撃弾性波法を適用したコンクリート基礎杭の形状推定方法	184
6. 1.2	コンクリート基礎杭の地震被害調査に対する衝撃弾性波法の適用性	185
6. 1.3	急速載荷試験によるコンクリート基礎杭の支持力評価方法	186
6. 1.4	コンクリート基礎杭の品質管理手法の提案	186
6. 2	今後の課題	187
	[第6章 付表、付図]	188

引用文献	189
------	-----

既発表論文リスト	197
----------	-----

謝 辞	200
-----	-----

# 第 1 章

## 序 論

# 第1章 序 論

## 1. 1 本研究の背景と目的

基礎構造の品質を一定の水準で確保することは、その確認方法が十分には確立されていないこともあって非常に難しい。特に、基礎構造の中でも地中深くに設置される杭基礎形式においては、既設、新設を問わず、その施工品質および支持力性能を的確にしかも適当なコストで確認することは難しい。しかしながら、時代の流れは、上部構造の大型化および多様化によってより低コストで環境にやさしくてさらに安全性の確認された構造物を要求している。このような中で建築設計分野においては、新しい設計法が取り入れられようとしており、構造規定が「使用規定」から「性能規定」へと移行しつつある。地盤工学（杭基礎を含む）分野においても、1956年にデンマークのBrich Hansenがはじめて限界状態設計の考えを導入してから40年が経った現在、上部構造と基礎構造との調和のとれた安全性の議論に対する認識が高まり、わが国でも基礎構造にも限界状態設計の導入が議論されようとしている。この導入に際して基礎構造における最も重要な課題は、施工品質と支持力の確保、並びにこれを確認・評価する技術の開発にあると考えられる。

コンクリート杭基礎における現状の品質管理は、杭の種類にかかわらずこれらに使用されている材料の品質を管理することに重点が置かれているため、杭基礎に用いられる材料は、高品質の状態管理され、現場に供給されていることはよく知られている。しかし、これを使用して杭基礎を築造する際には施工精度のバラツキが非常に大きいと思われるため、施工品質管理の問題を置き去りにして杭基礎の品質管理を論ずることはできない。一方、杭の支持力評価に関してみると、現在既製コンクリート杭で最も多く利用されている埋込み工法の場合には、過去に多く用いられてきた打込み工法のように杭一本ごとの支持力の確認ができないという欠点があるため、導入され始めた創世期には、その支持力性能の確認を目的として多くの静的載荷試験（Static Loading Test、以後S L T試験と略記する）が実施されてきた。しかし、現在では過去に多くの載荷試験が実施された結果、あたかもこの工法によって施工された杭が、全て同じ支持力性能を有しているかのような間違った判断がなされている。杭の支持力性能は、基本的には杭一本ごとに確認してこれを保証すべきであるが、S L T試験は多額の費用と時間を要するため、現状ではこれを全ての杭に対して実施することは難しい。これらの問題を解決するために、最近波動理論を応

用した施工管理手法や動的載荷試験手法が実際の杭に適用され始めているが、まだ研究段階である。

前述したように、既製コンクリート杭の施工法は殆どが埋込み杭であり、その支持力を保証するための最も確実な確認方法はS L T試験を行うことであるが、その実施が非常に難しいのが実状である。したがって、同じ施工法によって施工された杭が他のS L T試験を行った杭と全く同じ品質が確保できているのが確認できれば、ほぼ同様の支持力性能を有するものと判断せざるを得ない。そのため、施工後の杭が設計仕様書通りに施工されたか否かを調べるために、杭の施工形状を確認することが重要な課題となる。この形状確認を行うために非破壊試験法と呼ばれる試験法がある。一方、杭の支持力を確認する方法として、S L T試験に比べて比較的短時間でしかも経済的に実施できる載荷試験法が開発できれば、一現場で無作為に1～2本程度載荷試験を行うことによって現状よりも確実な支持力性能の確認が可能となる。しかしながら、既製コンクリート杭に対して、生産－在庫－出荷－搬入－打設－試験の全ての過程でこれらの確認手法を系統的に位置付けてシステム化しようとした試みは、今のところ皆無である。

これらの点を踏まえて、本研究では、図－1.1<sup>1)</sup>に示すような既製コンクリート杭（埋込み杭）を対象とした総合品質管理手法の確立を目的として、次に示す二点に着目して一連の基礎的研究を行うことにした。

- (1) 杭の施工品質評価のために、表－1.1に示すような従来の施工管理手法に加えて、施工された杭すべての健全性、施工形状、根固め部の位置等を非破壊試験法によって推定する杭施工品質管理システムの構築する。
- (2) 杭の支持力評価を短時間で比較的経済的に、しかも従来の静的載荷試験と同等な結果が得られると考えられている急速載荷試験法を用いた支持力評価手法を開発する。

## 1. 2 コンクリート基礎杭の品質管理手法の現状と問題点

### 1.2.1 杭施工管理手法の現状と問題点

杭基礎と呼ばれるものには幾つかの種類があるが、施工管理手法と言う観点から分類すれば打込み杭、埋込み杭および現場造成杭（一般的には、場所打ち杭）の3種類となろう。これらの施工法には、その時代のニーズに合ったそれぞれの施工管理手法が用いられている。表－1.2は、杭の施工法と既製コンクリート杭の開発の変遷を示したものである。

時代背景の変化に伴い、既製コンクリート杭の施工法が大きく変貌していることがわかる。特に、昭和40年代初めに埋込み杭工法（セメントミルク工法）が開発され、高度成長期中頃以降に一般化すると、これに伴って施工管理手法も大きく変化せざるを得ない状況となった。すなわち、高度成長期以前に多く用いられていた打込み杭の施工管理手法は、支持力評価手法を兼ね備えた方法で、ハンマにより杭頭を打撃して打撃中の杭の貫入量やリバウンド量を基にした、いわゆる動的支持力式によって杭支持力を評価していた。しかしながら、環境が問題視されるようになって、従来の打撃杭から図-1.2に示すような地盤を予め掘削してその孔に杭を挿入定着し、根固め液の固化により支持力が発現する埋込み杭に移行した。埋込み杭が一般的となった現在では、打撃による動的支持力の評価ができないため、杭施工の完成形状を間接的データから推測する管理手法が用いられている。すなわち、表-1.1に示すように埋込み杭の主な管理手法は、所定の設計長さ、設計掘削径、地盤掘削時のオーガ駆動抵抗電流値、根固め液配合・注入量および注入液の固化後の強度などが規定通りになっていることを確認できれば、杭が設計形状通りに施工されたと判断し、支持力には問題無いものと考えられている。これらは、いわゆる間接的管理手法と呼ばれ、これらの管理項目を遵守し確認することによって、ある程度の杭の品質確保は可能となるが、現実に打設された杭が地盤中に健全に所定位置に設置されているかの確認や杭先端支持力に最も大きく寄与すると考えられる根固め液が設計通りの位置に存在しているかどうかの確認ができないことは明らかである。根固め液が所定位置に存在しているか否かが杭先端支持力の発現に大きな影響を与えることは、横山・日下部<sup>2)</sup>らの研究からも明らかである。

このように、埋込み杭工法に用いられている施工管理の項目<sup>3)</sup>と手法は、杭が施工された後に行われた間接的な調査結果を総合的に評価することで施工品質を保証しようとしている点に問題がある。すなわち、施工後の杭が地盤中にどのような状態で設置されているかを確認していない点で現在の品質評価方法に問題が残っていると見える。換言すれば、直接的管理に一步でも近づくことが問題の解決策となる。このため、施工された杭の全てが地盤中のどこに設置されているかを推定する技術の開発が望まれていたが、最近杭頭を小型のハンマで軽打し、打撃によって発生する微小な弾性波（P波）が杭体を伝播・反射する波をとらえ、波動理論を適用して施工杭の形状推定や健全性を判定する方法が開発され、実用化されようとしている。この試験方法は、インティグリティテスト（Integrity Test）と呼ばれ、簡便で即座に結果が得られるという利点があり、埋込み杭や場所打ち杭の打設後の形状推定技術として期待されている。しかし、この試験法には、振動応答によって得られた反射波形は熟練した技術者でなければ判定ができないといった問題点もあるのが現状である。また、施工された杭を施工後どの時期にこの試験を実施するのが効果的

であるかといったソフト面や試験法の適用限界等については、不明な点が多いのが現状である。本研究では、これらの問題点を解明することを目的としている。

## 1.2.2 杭鉛直支持力の確認手法の現状と問題点

地盤に打設された杭の沈下性状と支持力を評価する方法として、現状ではS L T試験による方法が最も信頼性が高いことは周知のとおりである。しかしながら、この試験法は、時間と多額の費用を要するため、広い敷地に打設された多数の杭の中から僅か一本の杭を選び試験を実施する場合が殆どである。このように、一回のS L T試験の結果から、打設された全ての杭の品質を保障するのは問題が多い。1.1節でも述べたように、杭基礎の設計をより合理的に行うために杭基礎にも限界状態設計法を導入しようとする動きが活発になってきているが、導入の際には、以下に示す幾つかの問題点が挙げられる<sup>4)</sup>。

- (1) 構造物の挙動の解明と限界状態の定義
- (2) 構造物の強度や変形の推定式のもつ精度
- (3) 土質定数の変動性
- (4) 施工に伴う支持力や沈下性状のバラツキの把握
- (5) 上記を考慮した安全性(安全度)レベルの設定

この中で、(4)に示すバラツキの把握には、多くの載荷試験を実施する必要がある。しかし、既に述べたように、S L T試験は時間と多額の費用が必要となるため、この問題点を解決するための手段とはならない。また、打撃杭に対して既に用いられている動的支持力式は、杭1本ごとの支持力評価が可能な点で非常に有効な手段であることは明らかであるが、現在最も多く用いられている埋込み工法には、支持力発現方法の違いからこの方法は利用できない。そのため、近年S L T試験に比べて簡便に実施できる幾つかの新しい載荷試験方法が提案され、その実施例も幾つか報告されている。表-1.3に載荷時間を考慮して分類した各載荷試験法を示す。これらの特徴は、以下の通りである。

### (1) 先端載荷試験法

この方法は、杭先端部に予め載荷用のジャッキを装着し、杭の先端抵抗と杭周面の摩擦抵抗とを互いに反力として利用して載荷を行うもので、載荷時間はS L T試験と同程度で、反力杭を用いないで静的な載荷が可能である。さらに、この方法は杭先端に直接載荷が可能のため、杭先端部の荷重-沈下関係が大荷重まで精度よく求められる利点がある。場所打ち杭および既製コンクリート杭で幾つかの適用例がある。

### (2) 動的載荷試験法

この方法は、杭頭部にひずみ計と加速度計を設置して杭頭をハンマで打撃し、この際に

杭頭に与えられた打撃エネルギーと杭体に発生する応力を測定し、これらから杭の動的貫入抵抗を推定し、この結果から波動理論を適用して静的支持力を推定するものである。従来から使用されている杭打式（動的支持力式）と同様の手法であるが、従来の方法に比べて杭頭に与えられる打撃エネルギーが測定されるため、従来考慮していた打撃効率を考慮する必要がない利点がある。現状では、鋼管杭の打込み工法に利用されている。この方法の荷重時間は5～30ms程度とS L T試験に比べて短く杭体に引張力が生ずるため、コンクリート系の杭に適用する際には注意が必要である。また、動的な測定結果から静的支持力を推定するためには、波動理論による解析が必要であり、解析に用いる地盤モデルや技術者の熟練度などの影響を受けやすく、推定された静的支持力の値がかなり変動することなどが指摘されている。

### （3）急速荷重試験法<sup>5)</sup>

表-1.3は、荷重時間を考慮した各荷重試験法を示したものである。表中では、二つの方法が示されているが、ここでは国外での実施例が比較的多いスタナミック(Statnamic、以下S T Nと略す)法について述べることにする。この試験法は、杭頭で特殊な推進材を燃焼させて反力マス（荷重の5～10%の重量）を打ち上げ、その打ち上げによる反力を杭頭に加える方法であり、荷重時間は50～200ms程度である。この荷重時間は、動的荷重試験の10倍程度で、杭体に引張力が作用しないため、コンクリート系の杭にもこの試験法の適用が可能である。S T N試験は、S L T試験に類似しているが、本質的には動的要素を有する試験であるため、荷重速度に依存する地盤抵抗力が発生するとともに、杭の慣性力の効果も無視できないと考えられる。しかし、簡単な補正を施すことにより、比較的精度よく杭の静的挙動を推定できるとされている。

以上のことを踏まえて、現状における各試験の適用範囲について以下に述べる。極限支持力あるいは基準支持力については、基本的にS L T試験による評価が良いと考えられるが、急速荷重試験および動的荷重試験についても研究およびデータの蓄積が進めば、これらによる支持力の評価も可能となるものと考えられる。また、沈下性状については、山肩<sup>6)</sup>が地盤のクリープ変形特性が表れるのは降伏荷重以降で顕著となると報告しており、これに従えば降伏荷重以下の設計荷重レベルにおいては、荷重時間の影響が比較的小さいと思われるため、沈下性状（剛性）は、急速荷重試験から求めることが可能と考えられる。さらに、地震時の沈下性状（剛性）については、急速あるいは動的な試験から求めることも限界状態設計上有益であると考えられる。この試験は、比較的簡便に実施できるため、同一現場で複数の試験を行うことによって支持力あるいは沈下性状（剛性）のバラツキを把握することも可能となる。限界状態設計法の導入に伴う問題を解決するには、幾つかの

方法論がまだ研究段階あるいは利用の初期段階であるため、基本となる静的試験の評価と同様の評価が急速載荷試験によって可能となるように解析手法を確立するとともに、並びに試験データの蓄積が必要である。

### 1. 3 本論文の構成

第1章は序論であり、本研究の背景と目的、施工管理手法と支持力評価手法の現状と問題点並びに本論文の構成について述べている。

第2章では、コンクリート杭の材料品質、施工品質および支持力の評価技術に関する既往の研究について述べている。

第3章では、衝撃弾性波法を用いたコンクリート杭の健全性評価、並びに根固め位置を含めた施工杭の形状推定の可能性について述べている。すなわち、まず数値実験とモデル実験によって衝撃弾性波法による杭の健全性評価と形状推定の可能性の検討を行い、次に実際の杭を用いて実施工現場への適用性を実験的に検討している。

第4章では、1995年1月17日に発生した阪神大地震によって被害を受けたコンクリート杭（既製杭、場所打ち杭）の調査に、第3章で提案した衝撃弾性波法を適用して杭の健全性評価の実用性を確かめるとともに、実際の測定現場で遭遇する各種の問題点などについて述べている。

第5章では、非常に長い既製コンクリート杭に対して、わが国で初めてS T N試験を適用した研究について述べている。すなわち、埋込み工法で打設した杭に対してS L T試験とS T N試験の両試験を実施し、これらの試験結果の比較検討を行うとともに、S T N試験で得られた結果に対して杭慣性力の補正と除荷点法による補正を行うことによって、S L T試験で得られるのと同様の“静的”荷重-沈下関係を推定し、S T N試験による支持力評価手法の可能性を実験的に検討している。

第6章では、これらの研究の結論と今後の課題について述べている。

# 第1章 付表、付図

表 - 1. 1 埋込み杭の一般的な管理手法の一例

対 象	管 理 項 目	管 理 方 法
既 製 杭	・搬入時の検査	形状・長さ・損傷・種別等
フリクションカッタ	・搬入時の検査	形状・寸法・検測
掘削及び杭沈設	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業地盤</li> <li>・杭打機の鉛直性</li> <li>・リーダーの鉛直性 (1/200以下)</li> <li>・杭芯ずれ (5cm以内)</li> <li>・コンプレッサの吐出圧 (3.0~10.5kg/cm<sup>2</sup>程度)</li> <li>・継手の溶接</li> <li>・杭先端設置深さの上方7mでエアから水に切り換え</li> <li>・杭先端からの先行長 (杭径程度)</li> <li>・掘削所要時間</li> </ul>	地盤の安定性・補強 トランシット・下げ振りにて管理 トランシット・下げ振り・リーダ角度計 逃げ芯  天候・溶接面 杭、ヤットコ等にラインを引いてレベルにて確認 杭の沈設補助装置の油圧シリンダ <sup>*</sup> に標尺をつけて管理 施工サイクルの検討
支持地盤の確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>・等深図と掘削深さの比較</li> <li>・電流計の読み (グラフにて確認) ※(X値 200A/V程度)</li> </ul>	試験杭に於いて比較検討 試験杭にて確認後、本杭も掘削速度、電流値を参考とする。
支持地盤の掘削	<ul style="list-style-type: none"> <li>・支持地盤の掘削長 (杭径の3倍(3D)以上掘削)</li> </ul>	杭の沈設補助装置の油圧シリンダ <sup>*</sup> に標尺をつけて管理
拡大翼の拡翼確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電流値の読み</li> <li>・スパイラルオーガの引き上げ</li> </ul>	電流値の大きな変化を参考 スパイラルオーガを杭先端位置まで引き上げ、フリクションカッタに軽く当てて確認
根 固 め 液	<ul style="list-style-type: none"> <li>・目視検査</li> <li>・計量</li> <li>・強度 (<math>\sigma_{28} \geq 200\text{kg/cm}^2</math>)</li> <li>・使用量</li> <li>・採取位置</li> </ul>	色調・粘性 袋数・計量水管  標準使用量 バッチ数および資材使用量 グラウトプラントの吐出口
拡大掘削と攪拌	<ul style="list-style-type: none"> <li>・拡大掘削時間 (4~8分程度)</li> <li>・拡大掘削速度 (50cm/min以下) (15秒当たり10cm)</li> <li>・拡大掘削回数 (1回)</li> <li>・攪拌混合時間 (6~11分程度)</li> <li>・攪拌混合速度 2往復中の1回目 (50cm/min以下) (15秒当たり10cm)</li> <li>2往復中の2回目 (100cm/min以下) (15秒当たり20cm)</li> <li>・攪拌混合回数 (2回)</li> </ul>	オーガの定速制御装置にて管理 杭の沈設補助装置の油圧シリンダ <sup>*</sup> に標尺をつけて管理  オーガの定速制御装置にて管理 杭の沈設補助装置の油圧シリンダ <sup>*</sup> に標尺をつけて管理 オーガの定速制御装置にて管理 杭の沈設補助装置の油圧シリンダ <sup>*</sup> に標尺をつけて管理
杭 の 圧 入	<ul style="list-style-type: none"> <li>・杭の圧入量 (1D以上)</li> </ul>	杭、ヤットコ等にラインを引いてレベルにて管理
オーガ引き上げ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・表Ⅲ-13に示す位置より養生水を注入</li> </ul>	ヤットコ等にラインを引いてレベルにて管理
所 要 時 間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各工程所要時間</li> </ul>	タイムスタディ

表-1. 2 杭に関する開発の背景と変遷

年度(昭和)	30	40	50	60	平成元年
時代の背景	戦後復興期	高度成長期	低成長期		
既製杭 施工機械 施工方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ダイゼルハンマ 国産化</li> <li>●ダイゼルハンマ初輸入</li> <li>●ダイゼルハンマ 22型</li> <li>●ダイゼルハンマ 40型</li> <li>●杭打ちやくら 3点支持式</li> <li>●オーガ駆動装置国産化</li> <li>●40H 開発</li> <li>●ダイゼルハンマ 22型輸入</li> <li>●セメントミルク工法の施工が始まる</li> <li>●中掘工法開発、普及化</li> <li>●RC(蒸気養生, <math>\sigma_{ck}=350\text{kg/cm}^2</math>) 杭の開発</li> <li>●(蒸気養生, <math>\sigma_{ck}=500\text{kg/cm}^2</math>) ( <math>\sigma_{ce}=40\text{kg/cm}^2</math>, <math>80\text{kg/cm}^2</math>, <math>100\text{kg/cm}^2</math> ) PC 杭の開発</li> <li>●(PC JIS 化) (高性能減水剤、オートクレーブ, <math>\sigma_{ck}=800\text{kg/cm}^2</math>) PHC 杭の開発</li> <li>●鋼筒式</li> <li>●人力掘削(深礎)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ダイゼルハンマ 60, 70型</li> <li>●併用型杭打ちやくら</li> <li>●杭打ちやくら 大型化への移行</li> <li>●60-120H 開発</li> <li>●ダイゼルハンマ</li> <li>●セメントミルク工法の施工が始まる</li> <li>●打撃工法から中掘工法への移行始まる</li> <li>●無聲音振動工法の研究が盛んとなる</li> <li>●RC(蒸気養生, <math>\sigma_{ck}=400\text{kg/cm}^2</math>)</li> <li>●(蒸気養生, <math>\sigma_{ck}=500\text{kg/cm}^2</math>) ( <math>\sigma_{ce}=40\text{kg/cm}^2</math>, <math>80\text{kg/cm}^2</math>, <math>100\text{kg/cm}^2</math> ) PC 杭の開発</li> <li>●(PC JIS 化) (高性能減水剤、オートクレーブ, <math>\sigma_{ck}=800\text{kg/cm}^2</math>) PHC 杭の開発</li> <li>●(膨張性混和剤、蒸気養生) (特殊混和剤、蒸気養生) (<math>\sigma_{ck}=800\sim 900\text{kg/cm}^2</math>, <math>\sigma_{ce}=80, 100, 120, 140, 160\text{kg/cm}^2</math>) PHC 杭の高プレストレス化</li> <li>●鋼筒式</li> <li>●人力掘削(深礎)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ダイゼルハンマ</li> <li>●防音カバーの開発普及化</li> <li>●杭打ちやくら</li> <li>●中掘り拡大根固め工法認定される</li> <li>●プレボ-リング拡大根固め工法認定される</li> <li>●ダイゼルハンマ</li> <li>●ネガティブフリクション用 SL 杭開発</li> <li>●SL 杭認定される</li> <li>●PHC JIS 化 (<math>\sigma_{ce}=40, 80, 100\text{kg/cm}^2</math>) SC (SKK50 を追加)</li> <li>●(特殊混和剤、蒸気養生) (<math>\sigma_{ck}=800\sim 900\text{kg/cm}^2</math>, <math>\sigma_{ce}=80, 100, 120, 140, 160\text{kg/cm}^2</math>) PHC 杭の高プレストレス化</li> <li>●鋼筒式</li> <li>●人力掘削(深礎)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●油圧ハンマ-建設技術評価を受ける</li> <li>●中掘り拡大根固め工法認定される</li> <li>●プレボ-リング拡大根固め工法認定される</li> <li>●ダイゼルハンマ</li> <li>●ネガティブフリクション用 SL 杭開発</li> <li>●SL 杭認定される</li> <li>●PHC JIS 化 (<math>\sigma_{ce}=40, 80, 100\text{kg/cm}^2</math>) SC (SKK50 を追加)</li> <li>●(特殊混和剤、蒸気養生) (<math>\sigma_{ck}=800\sim 900\text{kg/cm}^2</math>, <math>\sigma_{ce}=80, 100, 120, 140, 160\text{kg/cm}^2</math>) PHC 杭の高プレストレス化</li> <li>●鋼筒式</li> <li>●人力掘削(深礎)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●油圧ハンマ-建設技術評価を受ける</li> <li>●中掘り拡大根固め工法認定される</li> <li>●プレボ-リング拡大根固め工法認定される</li> <li>●ダイゼルハンマ</li> <li>●ネガティブフリクション用 SL 杭開発</li> <li>●SL 杭認定される</li> <li>●PHC JIS 化 (<math>\sigma_{ce}=40, 80, 100\text{kg/cm}^2</math>) SC (SKK50 を追加)</li> <li>●(特殊混和剤、蒸気養生) (<math>\sigma_{ck}=800\sim 900\text{kg/cm}^2</math>, <math>\sigma_{ce}=80, 100, 120, 140, 160\text{kg/cm}^2</math>) PHC 杭の高プレストレス化</li> <li>●鋼筒式</li> <li>●人力掘削(深礎)</li> </ul>
既製杭の種類	RC(蒸気養生, $\sigma_{ck}=350\text{kg/cm}^2$ )	RC(蒸気養生, $\sigma_{ck}=400\text{kg/cm}^2$ )	RC(蒸気養生, $\sigma_{ck}=400\text{kg/cm}^2$ )	RC(蒸気養生, $\sigma_{ck}=400\text{kg/cm}^2$ )	RC(蒸気養生, $\sigma_{ck}=400\text{kg/cm}^2$ )
場所打ち杭の種類	<ul style="list-style-type: none"> <li>●鋼筒式</li> <li>●人力掘削(深礎)</li> <li>●オールケーシング(ベント)杭の施工が始まる</li> <li>●アースドリル杭の施工が始まる</li> <li>●リバーササーキューレーション杭の施工が始まる</li> <li>●BII(ボ-リングホ-ル)杭の施工が始まる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●鋼筒式</li> <li>●大林式</li> <li>●北辰式</li> <li>●オールケーシング(ベント)杭の施工が始まる</li> <li>●アースドリル杭の施工が始まる</li> <li>●リバーササーキューレーション杭の施工が始まる</li> <li>●リバーササーキューレーション杭の施工が始まる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●地下連続壁工法評価を受ける</li> <li>●アースドリル杭の施工が始まる</li> <li>●リバーササーキューレーション杭の施工が始まる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●SENTAN/パイル工法 評価を受ける</li> <li>●アースドリル杭の施工が始まる</li> <li>●リバーササーキューレーション杭の施工が始まる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●SENTAN/パイル工法 評価を受ける</li> <li>●アースドリル杭の施工が始まる</li> <li>●リバーササーキューレーション杭の施工が始まる</li> </ul>

表-1. 3 載荷時間を考慮した各載荷試験法

試験法	静的載荷		急速載荷		動的載荷
	従来法 (反力杭方式)	先端載荷法	S T N法	ばね載荷法	
概要					
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 実績が多く、信頼性が高い</li> <li>• 反力杭、載荷杭が必要</li> <li>• 杭先端に荷重が伝わりにくい</li> <li>• 反力杭の影響あり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 反力杭が不要</li> <li>• 杭先端の荷重一沈下が求めやすい</li> <li>• 載荷荷重は先端抵抗と摩擦抵抗の小さい方の極限值で決まる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 載荷装置が比較的簡単</li> <li>• 載荷時間は50～200ms</li> <li>• 波動理論による解析が不要</li> <li>• 杭体に引張力が発生しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 載荷装置が簡単</li> <li>• 載荷時間は5～30ms</li> <li>• 波動理論による解析が必要</li> <li>• 杭体に引張力が発生する</li> </ul>	

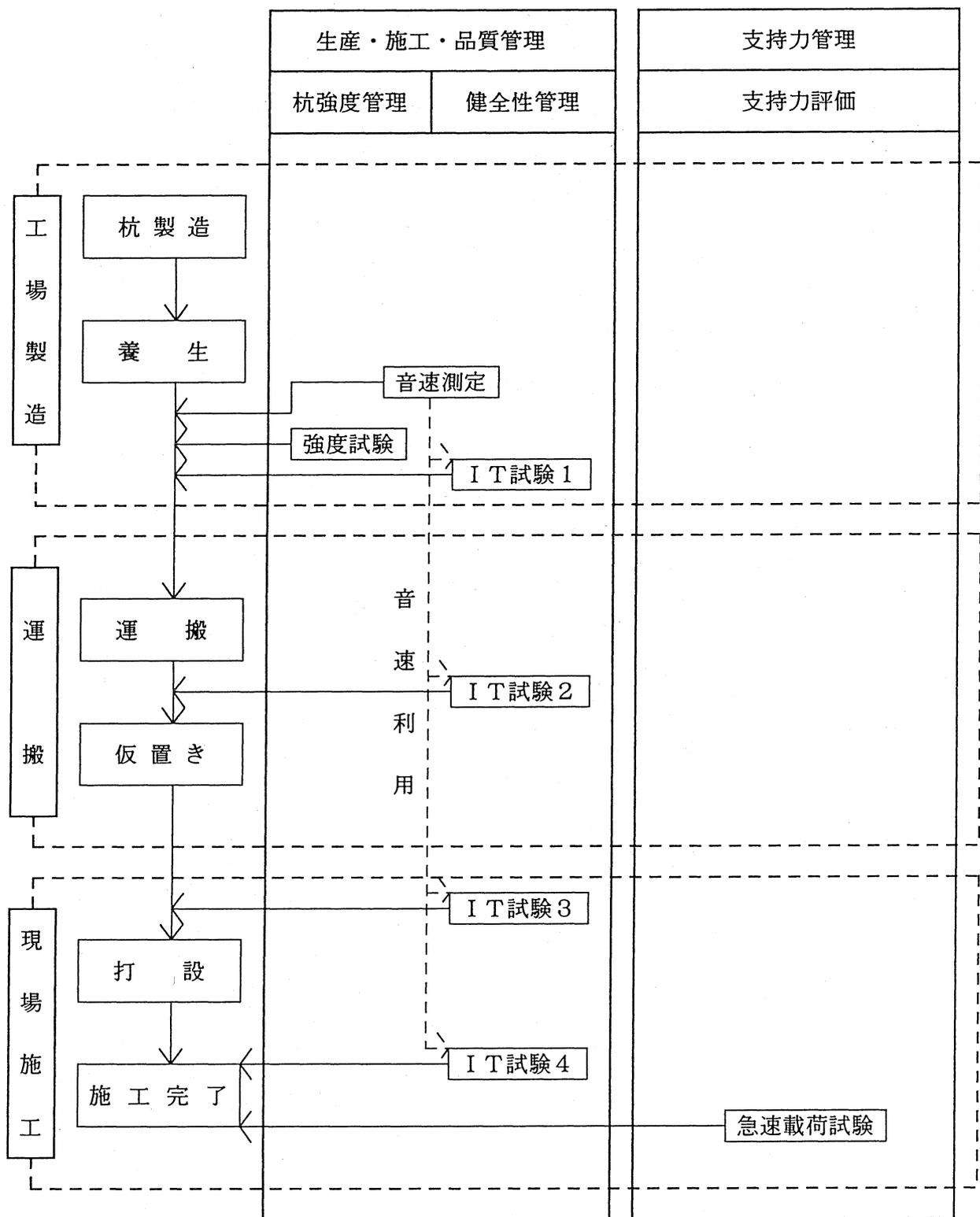


図-1.1 杭の総合品質管理システムの概要図

施工方法

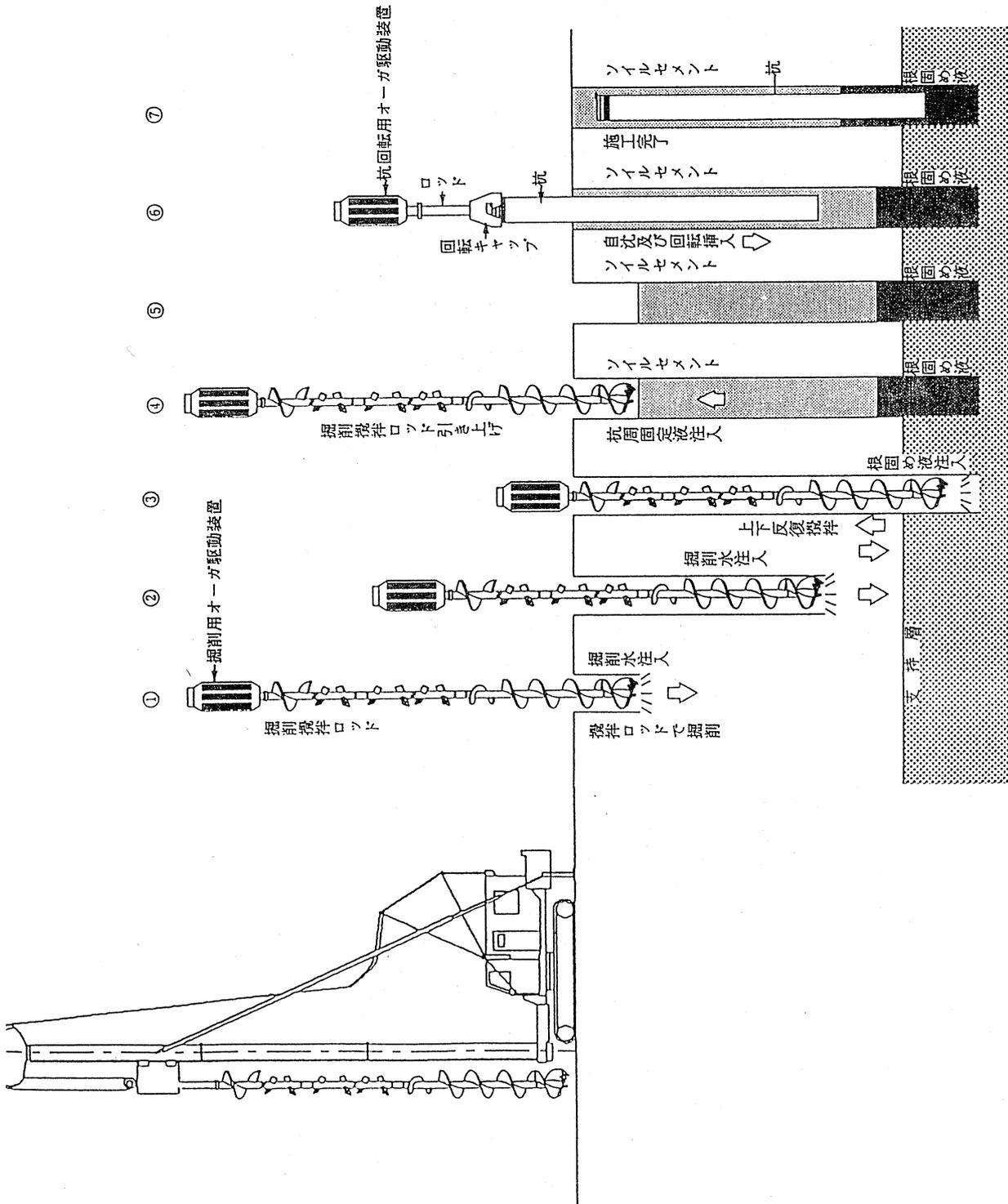


図-1.2 埋込み杭の一般的な施工手順の一例

## 第2章

コンクリート基礎杭の  
品質管理手法に関する  
既往の研究

## 第2章 コンクリート基礎杭の 品質管理手法に関する既往の研究

### 2. 1 概 説

既製コンクリート杭のように、工場で規定の品質管理手法によって管理製造された製品は、全てが規定通りに製造されているものとみなされている。しかし、コンクリートのような複合材料においては、このような判断が適用できない場合も少なくないと思われる。そのために、実際に打設された杭の品質を評価することが必要と考えられる。この問題を解決するための手法として、既にコンクリート構造物に利用されている非破壊試験法がある。非破壊試験法は、大別してコンクリートの強度推定を対象としたものとそれ以外の推定を対象としたものとに分類することができるが、初期の研究は、コンクリートの強度推定を目的としたものがほとんどであった。これは、構造物の調査を行う際に最も重要となるのがその耐力であるといった従来の設計思想が根付いていたためだと考えられる。しかし、現在では設計手法の進歩により、構造物の耐久性診断にはコンクリート強度以外の調査が非常に重要となっている。これらの調査を行うために多くの試験方法が開発されてきたが<sup>7)</sup>、この中に波動理論を利用した非破壊試験法がある。

杭のように細長い弾性体の一端に衝撃波を与えて体内を伝播する変位、応力、伝播速度などの波動現象を表現する波動方程式は、1867年に St. Venant によって最初に導かれた。その後、多くの研究者によって杭の支持力を評価するために適用されてきたが、基本的には、この波動理論の杭への適用は、杭の形状推定（診断）および杭の支持力評価の2つに分類される。

本章では、前章で述べたコンクリート杭の総合品質管理システムを確立するために必要な杭生産時の強度管理、施工後の杭の形状推定および支持力評価などに関する既往の研究成果について述べることにする。さらに最近、限界状態設計への移行が叫ばれているため、これに適用可能な新しい載荷試験法に関する研究成果についても述べる。

ところで、波動理論の杭への応用は、具体的に以下の目的で行われている。

#### (1) 杭体の応力評価（施工時）

(2) 杭（施工・自身）の健全性の評価

(3) 支持力評価

(4) 杭打撃時の打撃効率の評価

これらの各評価を確立するために多くの研究が実施されているが、特に杭施工時に関わる動的問題については1900年代半ばから盛んに議論され、動的測定結果からの静的支持力や荷重-沈下曲線を推定する手法の確立が望まれている。一方、埋込み杭が施工法の主流となった現在では、施工品質のバラツキが杭支持力に大きな影響を与えるものと考えられている。この施工品質を管理・評価することが、全ての杭に対して載荷試験を実施できない現状では、杭支持力の評価手法として最も有効な方法と考えられる。この点を踏まえて、現在わが国においてもヨーロッパで開発された健全性評価技術<sup>8)</sup>の導入とその基礎研究がなされているが、今年発生した阪神大震災による杭の被害調査への利用と相まって、研究成果に期待が寄せられている。また、最初に挙げた杭製造時の品質評価も将来導入される限界状態設計法では重要な課題であると考えられるため、非破壊試験法によるコンクリートの強度推定に関する既往の研究成果についても述べることにする。

## 2. 2 コンクリート基礎杭の品質評価に関する既往の研究

今日までに行われているコンクリート基礎杭の品質評価に関する研究は、大別すると杭をコンクリート構造物の一つとして捉えて、その材料であるコンクリートの強度推定を目的としたものと施工時の施工品質確保のための形状推定を目的としたものの2つに分類できる。一般的にコンクリート杭は、工場製品として品質管理が十分に行われているとの判断から強度のバラツキは非常に小さいと思われているが、基本的には、製造された各杭に非破壊試験を実施し、その杭の強度を含めた総合的な健全性評価を行う必要がある。また、この健全性評価で得られたデータを利用して、打設された杭が設計図書通りに打設されたかを確認するために、杭の形状推定を行うことも必要である。以下では、まず現在までの非破壊試験法による強度推定に関する研究について概説し、次に波動理論を適用した杭の形状推定に関する研究成果について述べる。

### 2.2.1 コンクリートの強度推定<sup>9), 10)</sup>

コンクリート工学の分野に非破壊試験法が利用されはじめた頃の研究目的は、その大半がコンクリートの圧縮強度の推定にあったといえる。強度推定に際しては、実験的で得ら

れた硬さ、弾性、伝播速度、あるいは局所的な強さなどの物理的および力学的特性と強度との関係を回帰式で表して利用しているのが普通である。しかし、多くの非破壊試験値と強度の関係は、一般的にコンクリートの使用材料、調合、打設方法、養生方法および材齢等の条件によってかなり相違するため、回帰式の利用に際しては注意が必要である。ただし、上記の条件が特定できれば、強度推定式に及ぼす各種要因の影響を定量化できる可能性があるため、実験定数や実験式の補正を行うことにより良好な精度で強度推定が行えるものと考えられる。コンクリートの強度推定に利用できる非破壊試験法として、これまでに多くの手法が報告されているが、コンクリート製品の強度推定（管理）を目的としたもので、かつ特別な専門技術や知識を必要とせず比較的簡便に実施できる手法となると、おおよそ以下の手法に限定される。

- (1) 反発度法
- (2) 超音波伝播速度法
- (3) 複合法（組合せ法）
- (4) 引抜き法
- (5) 引抜き法以外の局部破壊試験法

表-2.1は、上記の各試験法の具体的な例とそれぞれの特徴を示したものである。

#### (1) 反発度法

コンクリート表面をハンマーなどで打撃した時のコンクリートが発する音、表面の凹み、ハンマーヘッドのはねかえり量（反発量）などによってコンクリートの性質を評価する方法は、一般的に「打撃法」に分類される。これらは、コンクリートの「硬さ」から内部状態を推定する方法であり、簡便ではあるが推定結果が対象の表面の性質に限定されるという共通した特徴がある。

反発度法のうち、1948年スイスのE. Schmidtが考案したシュミットハンマー法が最も普及している。これは測定器の内部のバネの力でハンマーをコンクリート表面に打ちつけ、その反発度によりコンクリートの圧縮強度を推定する方法である。測定が容易でコンクリート強度の推定も比較的よいため、世界各国で使用されている。しかし、測定器の反発度は、コンクリートの圧縮強度以外に使用する測定器の種類、打撃方向、被測定物の拘束度、コンクリート表面の平滑度などの外的要因や、コンクリートの配（調）合条件、打設条件、養生条件、材齢、含水率などの内的要因によっても影響を受けるといった問題点もある。したがって、コンクリート部材の圧縮強度を精度よく推定するためには測定器の測定値のみならず、必ず検討対象部材から数多くのコアを採取して圧縮強度試験を行い、両者の関係式を求めておくべきである。

#### (2) 超音波伝播速度法<sup>11), 12)</sup>

本方法は、コンクリート中に入力した超音波の既知距離間の伝播に要する時間を測定して速度を算出し、その値を回帰式に代入して強度を推定するものである。コンクリートの強度と超音波伝播速度は直接的には関係ないが、経験的にはその両者がかなり密接な比例的関係にあることが知られており、これを実験的に得た回帰式として利用するものである。超音波法は、発振端子から受振端子までの伝播経路の全体の性質が伝播速度に影響し、対象としたコンクリート部材の内部状態の把握が可能であること、モルタルなどの仕上げ材がある場合でもある程度は測定が可能であるという特徴がある。

超音波は弾性波の一種であり、固体中における弾性波の伝播は、物理学においてもかなり複雑な現象とされている。固体中を伝播する波は、縦波、横波および表面波に大別され、その他として伝播の対向面からの反射や、ひび割れ部分、粗骨材界面などからの回折波や反射波も存在し、これらの各種の波動が混在している。この中でも縦波は、波長が大きいことから微小ひびわれや骨材界面などの不連続面などの影響が小さく、コンクリートの強度推定の目的に有利であるとされている。

この試験法で測定した伝播速度に影響を及ぼす因子として、使用材料、調合、養生、材齢、さらにコンクリート内部の含水率、空隙等が挙げられる。まず、コンクリートをモルタルと粗骨材の2相複合材として考えると、図-2.1および図-2.2に示すように、影響因子は粗骨材の石質、母材モルタル強度および粗骨材率であり、伝播速度を正確に推定するためには、影響度の大きい粗骨材の石質の影響をできるだけ正確に把握する必要のことがわかる。次に、伝播速度、弾性係数および圧縮強度は、一般的にコンクリート材齢とともに増大する傾向を示すが、図-2.3に示すように、伝播速度は早期材齢で著しく増大するのに対して、圧縮強度は長期にわたって増大することがわかる。一方、伝播速度は、気中養生に比べて水中養生の方が大きくなることが知られているが、この養生方法による影響は、含水率の問題とも関連するため、判別するのは非常に難しい。最後に、伝播速度はコンクリート内部の含水率の増加とともに大きくなるが、圧縮強度は逆に小さくなるため、伝播速度を用いて強度の推定精度を向上させるためには、含水率の影響を把握する必要がある。以上のように、把握すべき問題点はあるものの、実用に際しては、対象となるコンクリートが限定され、かつ各種の情報が得られることが多いため、強度の分布範囲はかなり狭くなる。したがって、強度推定は比較的容易となり、強度推定を一次関数で表すことも可能である。とくに、本研究のように工場製品であるコンクリート杭の強度推定を行う場合には、製品が工場で品質管理されているため、影響因子の多くが限定できるという利点があり、これらの推定方法は非常に有効な手段になるものと期待できる(図-2.4参照)。

### (3) 複合法

複合法とは、2種類以上の試験を実施して、複数の説明変数を用いてコンクリートの強度を推定する方法である。複合法によるコンクリートの強度推定に関する検討は、比較的早くから行われ、反発度、くぼみ深さ、超音波伝播速度およびその減衰率、横波速度、引抜き耐力、マチュリティーおよび $\gamma$ 線の減衰定数などが利用されてきた。現在実用化されている方法は、ルーマニア指針や日本建築学会マニュアル中に示されている超音波伝播速度と反発度による複合法である。この複合法は、強度推定精度の点では有効であると思われるが、この検討例はそれほど多くない。1953年に動弾性係数と対数減衰率を複合した方法が初めて報告された<sup>13)</sup>。その後、同様の研究<sup>14)・17)</sup>が行われたが、この時点では測定器の関係から実際の構造物への適用が困難なため、実用化<sup>15)</sup>に至らなかった。しかし、携帯型の超音波測定器の開発<sup>18)</sup>によって構造物を手軽に測定することが可能となり、反発度との複合について報告されるようになった<sup>16)</sup>。なかでも、Facaoaruによる検討は、注目すべきである。わが国でも、同時期に尼崎・明石および谷川・山田・小阪による検討結果が報告されている<sup>19) - 22)</sup>。ただし、これらの研究は実験室段階での成果であり、実構造物への適用に際しては、強度推定結果に及ぼす材齢の影響が問題となる。さらに、複合法自体が各試験方法の組合せであるため、各試験方法の持つ問題点すなわち推定精度に及ぼす使用材料、調合、材齢および内部条件の影響をどう考慮するかが今後の課題であろう。

#### (4) 引抜き法

引抜き法は、コンクリートの中に埋め込んだボルトなどの埋込み具を、コンクリート表面から引き抜くのに要した最大荷重（引抜き耐力）を測定し、この引抜き耐力からコンクリートの強度を推定する方法である。このように、コンクリートを局部的に破壊して直接強度を測定する局部破壊試験法は、補修は要しても構造部材全体に与える損傷の程度が軽微であるため、非破壊試験法に含めることが可能である。局部破壊試験法では、圧縮強度もしくは圧縮強度と強い相関を持つせん断強度、引張強度、曲げ強度、またはこれらの複合した破壊強度が得られるので、直接コンクリート強度の指標として利用することも可能である。また、圧縮強度を推定するという点においても、強度とは直接関係のないコンクリートの物性から推定する純非破壊試験法に比べて、一般的に精度良く推定できるという利点がある。この手法の適用は古く、イギリスやドイツでは1930年代にくぎやボルトを埋め込み具として用いた引抜き法や球状突起引抜き法などの報告が見られる<sup>23)</sup>。その後、Hansen<sup>24)</sup>、Krenchel<sup>25)</sup>、Richards<sup>26)</sup>、Bickiey<sup>27)</sup>らによって引抜き具や独自の引抜き法が開発されるなど多くの研究者によって精力的に研究され、1982年にはASTM規格<sup>28)</sup>を制定するに至っている。わが国においては、引抜き耐力から圧縮強度の推定を行うための研究が森田・小松・近藤<sup>29)</sup>によって行われている。

## (5) 引抜き法以外の局部破壊法

### 1) ブレイクオフ法

ブレイクオフ法は、図-2.5に示すように直径55mmのコア頂部に負荷して、コンクリート表面から70mmの位置のコア底部を曲げ破壊させ、曲げ強度の評価あるいは圧縮強度の推定などを行うものである。破断時の油圧計のゲージ圧を基に、図-2.6に示すような較正曲線<sup>32)</sup>（ゲージ圧と圧縮強度との関係）から圧縮強度を推定できる。この手法は、ノルウェーおよびスウェーデンですでに規準化<sup>30)・31)</sup>され、ASTMで規準案が示されている。Johansen<sup>33)</sup>は、この手法の特徴として低強度から高強度までの幅広いコンクリートに適用可能で、特に若材齢のコンクリートには有効であり、かつ試験法が簡便で実際の構造物に対しても適用可能であるとしている。ただし、較正曲線は、他の試験法と同様に調合や養生条件等の影響を受けることに注意が必要である。

### 2) プローブ貫入試験

この手法は、1960年代の中期前半に開発され、特別に設計された貫入用の銃を用いてコンクリートに鋼製のロッドあるいはプローブを打ち込み、この打ち込み貫入量がコンクリート強度の指標として用いられる。プローブは、通常モルタルと粗骨材を通して進入し、破碎ゾーンのクラックは、モルタルと粗骨材とを縫って進展する。そのため、プローブ貫入量にはモルタルと骨材の両方の強度特性が影響し、粗骨材の種類が大きく影響するものと考えられる。また、実際の構造物に適用する際には、貫入表面にこて仕上げのような堅い層があると貫入量が小さくなり、データのバラツキが大きくなる点を考慮しなければならない。

## 2.2.2 コンクリート基礎杭の形状推定

支持杭の役割は建築物の重さを支えることであるため、杭の品質管理を行うには杭の支持力が設計通りであることを確かめる必要がある。今日までに開発されている杭の支持力を推定する手法としては、杭の静的支持力を測定する載荷実験（loading test）<sup>34)・35)</sup>や杭の動的支持力を測定するCASE法など<sup>36)~38)</sup>がある。前者は杭の上から載荷し、荷重の増加と杭の沈下量の経時変化を測定し、杭の静的支持力（static bearing capacity）を推定する方法で、後者は大きなハンマーで杭を叩き、その応答振動波形から杭の動的支持力（dynamic bearing capacity）を推定する方法である。静的支持力を測定する方法はコストが高く、また時間もかかるため、現場において全部の杭を検査することは事実上不可能である<sup>39)</sup>。動的支持力測定については、日本では試験的に行われてはいるが、現在はまだ研究段階である<sup>39)</sup>。

一方、非破壊検査を適用してより簡便に杭の品質を検査する方法として、杭の形状を推定する方法が考えられる。すなわち、推定された杭の形状が設計通りならば、その杭によって得られる支持力も設計通りであるとする考え方である。しかし、杭の大部分は地中にあるため、杭の形状を直接測定することはできない。そのため、この種の方法で実際に報告されているものほとんどが、小さいテストハンマーで杭頭を叩き、その応答振動波形あるいは後処理された波形を熟練した検査員が観察し、豊富な経験に基づいて杭に形状変化があるかどうかを判断するという方法である<sup>40) - 43)</sup>。その一例として、図-2.7および図-2.8にそれぞれ杭振動の計測結果と処理波形の一例を示す<sup>41)</sup>。この方法は、杭の支持力推定法に比べて格段に安いコストと短い時間で杭の品質検査を行うことができるという利点を有するが、熟練した専門の検査員が必要であること、検査結果が検査員の主観に大きく依存すること、杭の傷や杭の拡張の有無といった定性的な判断はできても、傷の大きさや拡張部の面積を定量的に推定することはできないこと、などの問題点もあり、客観性のある形状推定法の開発が強く望まれている。

#### (1) 歴史的背景<sup>39), 44), 45)</sup>

##### 1) 動的支持力式

杭の動的貫入性状から杭の支持力を求めようとする研究は、19世紀初め頃から開始された。この種の研究の初期の段階では、杭中の波動伝播を考慮せずに杭を剛体と仮定して支持力を評価する方法、いわゆるHiley式に代表される動的支持力式に関する研究がほとんどであった。先駆的研究として、1808年にEytelweinは、杭の極限支持力が打込み時の貫入抵抗に等しいと仮定したうえで、打撃エネルギーのうち重錘の衝突時の損失や落下中の摩擦による損失、その他の損失を除いた有効エネルギーは、杭先端地盤の抵抗力に対して杭が貫入するときになす仕事と、杭・地盤・キャップなどが弾性変形するときになす仕事に費やされるものとして、エネルギーの平衡条件に基づいて動的支持力式を初めて誘導した。以後、数多くの動的支持力式<sup>46), 47)</sup>が提案されている。

動的支持力式は、その誘導過程からわかるように、ハンマーと杭を完全剛体と仮定しているため、貫入抵抗力は杭を通して衝撃時に直ちに発生するものと仮定している。すなわち、動的支持力式は、杭中の応力波伝播を考慮し得ない支持力評価法といえる。

##### 2) 波動理論の適用

一次元弾性棒の波動伝播に関連する基礎的研究の流れを表-2.2に示す。波動理論が実際の杭に応用され始めたのは、1867年のSt. Venantの研究からである。St. Venantは、剛体であるハンマーが弾性体である杭を打撃した場合の杭内部で生じる応力の時間的変化を与える式を導いた。Isaacs(1931)<sup>48)</sup>やFox(1932)<sup>49)</sup>は、St. Venantの方法を杭打ちに適用し、「打込み時の杭の動的挙動は、杭打ち公式において仮定されているような質点の

衝撃によるものではなく、むしろ一次元波動方程式によって支配されている」ことを指摘した。1938年に Granville らは、ハンマーの打撃応力は圧縮波として杭下方に伝播し、その底面が硬い支持層か軟らかい支持層のどちらに接しているかによって、圧縮波あるいは引張波として杭底面より反射してくることを示し、この問題の解法に波動方程式を応用した。Isaacs や Fox の研究以降、杭打ち問題に波動理論を導入した研究が増加した。

一次元波動方程式を解く方法は、2つに大別される。一つは、波動方程式を数値的に解こうとするものであり、代表的なものとして Smith(1955)<sup>50)</sup>の方法がある。Smith法は、図-2.9に示すように、ハンマー、キャップブロック、パイルキャップ、杭を質量のないバネで結んだ多くの質点に離散化し、杭中の応力波伝播を数値的に解く方法である。現在よく用いられている CAPWAP プログラム、TTI プログラムなどは Smith法に基づいた応力波解析プログラムである<sup>51)</sup>。もう一つは、波動方程式を解析的に解く方法である。de Juhasz(1942)<sup>52)</sup>は、波動方程式の図式解法を示している。これは、特性曲線解析法と呼ばれるものである。Fischer(1960, 1962)<sup>53), 54)</sup>は、この方法を最初に杭打ち問題に適用した。また、Nishida ら(1986)<sup>55)</sup>、Randolph(1987)<sup>56)</sup>、松本ら(1988, 1989)<sup>57), 58)</sup>、本間ら(1991)<sup>59)-61)</sup>は、特性曲線解析法に基づいた応力波解析プログラムを開発している。宇都ら<sup>62)-66)</sup>は、杭頭の変位と杭先端の変位とをそれぞれ境界値として採用して一次元波動方程式を解き、変位に関する動的先端抵抗力の算定式を誘導している。宇都らの方法では、杭打ち中の動的摩擦力は無視できるものとし、また杭が最大変位に達する時刻は、ハンマー打撃条件や地盤抵抗特性に関わらず杭の長さだけによって決定されるものと仮定している。このようにして求めた杭先端支持力に標準貫入試験の N 値から推定される周面摩擦支持力を加えたものを全支持力としている。宇都らの方法は、「道路橋示方書」<sup>67)</sup>で杭の打ち止め管理式としてまとめられている。

杭打ち時に測定した杭頭の応力と加速度の動的測定データから直接支持力を求める方法の研究は、Goble らによって 1965~1970 年に行われ、Case法として知られている。Lundberg and Henchoz(1977)<sup>68)</sup>は、棒の 2 箇所測定したひずみ波形から棒の応力、速度、変位を求める方法を提案している。Matsumoto ら(1988)<sup>69)</sup>は、この方法を杭打ちに適用している。

波動理論を杭の健全性評価に応用した方法の一つとして TNO法<sup>70)</sup>がある。TNO法では、加速度計を杭頭に置き、杭頭をハンマーで軽く打撃し、その時測定した加速度波形から杭の長さや断面欠損の位置を推定する。その他の杭の健全性評価方法も、ほぼ同様な手法をとっている。

なお、これまでに波動理論の杭への応用に関する国際会議(Int. Conf. on Application of Stress - Wave Theory on Piles, 1980 and 1984 in Stockholm, 1988 in Ottawa)が 3

回開催されており、波動理論の杭打ちへの応用に対する関心が高まりつつある。

## (2) 理論的背景(波動とは)<sup>39)</sup>

「池に石を投げ入れると波の輪が広がっていく」、「線路に耳を当てると電車がやってくるのがわかる」、「人と話ができる」、これらは全て波動現象である。たとえば、人と話ができるのは相手の声が空気を伝わって自分の耳に届くからである。すなわち、波動とは、「物理量の運動が時間とともに物体中を移動する現象」といえる。

波動は、動的問題の一つである。いわゆる静力学理論と動力学理論の本質的な相違は、慣性力の扱い方にある。動力学では、慣性力を含めて力の釣合いを考えている。ここで、図-2.10のような単純ばりが静的な荷重 $P$ と動的な荷重 $P(t)$ を受けた場合の違いについて簡単に説明する。図-2.10(a)に示したように、単純ばりが静的な荷重 $P$ を受けた場合には、はりに生じるモーメント、せん断力、たわみは、与えられた荷重だけによって定まり、力の釣合いの原則によって計算することができる。一方、図-2.10(b)に示したように、荷重 $P(t)$ が動的に与えられた場合には、生じるはりの変位は、それに抵抗して慣性力を生じる場所の加速度に関連がある。すなわち、図-2.10(b)に示したはりに生じるモーメントおよびせん断力は、単に外部から与えられた力だけではなく、はりの加速度によって生じる慣性力とも釣合うものでなければならない<sup>71)</sup>。空気中を音が伝わったり、線路に振動が伝わる場合には、空気や線路そのものが加速されているわけである。この空気や線路を加速する力、すなわち慣性力を考慮して力の釣合いを考えているのが動力学である。

## (3) 最近の研究の動向<sup>72)</sup>

波動理論の杭打ちへの応用は、現在、次のような目的のために使われている。

- (a) 杭打ち時の杭体の応力の評価<sup>73), 74)</sup>
- (b) 杭の健全性の評価<sup>75) - 81)</sup>
- (c) 打撃装置の効率の評価
- (d) 支持力評価

目的(a)は、過大な打撃応力による鋼管杭の座屈や引張応力によるコンクリート杭の亀裂の発生を防止することである。目的(b)は、杭が所定の長さを有しているか、また根入れ区間に断面欠損(場所打ち杭の断面積縮小や既製コンクリート杭の亀裂)が生じていないかといった杭体自身の健全性(Integrity)のチェックを行うことである。また、施工管理および品質管理の手法としても提案されている<sup>82), 83)</sup>。目的(c)は、ハンマー、キャップ、クッションを含めた打撃装置の効率を評価することである。具体的には、各打撃において、ハンマーから杭に伝達されるエネルギーを評価することである。目的(d)の支持力評価に関しては、打込み時の貫入抵抗の評価と静的支持力(長期支持力)の評価がある。

打込み時の貫入抵抗は、ハンマーから杭に伝達されるエネルギーとともに杭の打込み性に密接に関係する要因である。

杭基礎の役割は、上部構造物の荷重を安全に支え、かつ沈下を許容範囲に収めることであるため、杭打ち時の応力波伝播の測定から杭の静的（長期的）な支持力および荷重－沈下曲線を推定することが、動的測定の主要な問題となろう。打込み時の貫入抵抗と静的支持力は、両者の杭貫入速度の違いや杭打込み後の放置時間における杭周辺地盤の応力状態の変化など種々の要因によって異なることが一般的に知られている。このように、杭打ち問題は、理論的な問題に限れば、杭中の応力波伝播と土質力学の両者を取り扱わなければならないものである。杭打ち時の杭中の応力波伝播から杭の貫入抵抗を求めようとする場合、杭の動的挙動（ひずみ、加速度、変位）を測定することが必要である。杭打ちの現象は非常に高速度であるため、実際の現象をできるだけ正確に測定するためには、高性能な動的測定システムが必要となる。近年のエレクトロニクスの急速な発展は、以上のような多用な目的に波動理論が実際に応用されるようになった一因である。

杭の支持力を確認するには、載荷試験を行うことが最も信頼性が高い。ある限られた地域であっても、一般に地盤条件は複雑に変化している。そのため、さほど離れていない地点の杭であっても、その支持力が非常に異なっていることが多い。そこで、各杭の支持力を確認するためには、各々の杭に対して載荷試験を行うことが必要である。しかし、載荷試験は、多額の費用と時間を必要とするため、各杭に対して載荷試験を行うことは、実際上不可能である。これに対して、現在よく用いられているCase法のような動的測定を多数の杭に対して行うことは比較的容易であり、またその費用も載荷試験と比べてはるかに安い。このように、実用性および経済性の面からも動的測定による支持力評価法の要求が高まってきている。さらには、比較的長尺な杭を必要とし、また載荷試験の実施が難しい海洋構造物の杭基礎の増加も動的測定による支持力評価法の発展をうながしている<sup>84)</sup>。

#### （４）健全性評価試験（Integrity Test）<sup>72)</sup>

ここでは、上記に述べた目的(a)～(d)のうち、本研究で取り扱う目的(b)杭の健全性の評価について詳細に述べる。

##### 1) Integrity Test とは

“Integrity”とは「健全性」のことであり、「杭の Integrity Test」とは地上部に出ている杭の頭部に衝撃や振動エネルギーを加え、杭体の応答を観測することにより、地中部の杭の長さや断面欠損、クラックなどを非破壊的に判定する方法である。この技術は、杭の簡便な品質管理手法としてオランダで15年ほど前に開発され、欧米では20万本以上の検査実績がある。基本原理は一次元波動理論に基づいているが、大きく分けて次の2つの手法がある。

### (a)打撃法 (Sonic Pile Test)

軽量なハンマーで杭頭部を打撃し、杭頭部に設置した加速度計で反射波を計測し、増幅器やA/D変換器を用いて波形データを処理する。杭断面に機械的インピーダンスの変化がある場合、波形にその影響が現れる。図-2.11に杭体の断面積に変化がある場合の杭頭で観測される反射波の状態を模式的に示す。代表的な計測システムは、図-2.12に示す通りである。

この方法では、多数の杭について測定を行い、健全な杭の波形と疑わしい杭の波形とを比較して欠損位置や杭長の推定を行う。測定機器は、現場での活用を考慮してコンパクトに作られており、1日に100本以上の測定が可能であると言われている。計測が比較的簡単であるため、一現場での杭全数の検査が可能である。当初は単純なアナログ式のものであったが、最近ではデジタル化が進み、信号の重ね合わせ、平均化、増幅などが自由にできるようになっている。さらに、プログラムによりシミュレーションを行い、杭の形状を推定することもできると言われている。

### (b)振動法 (Vibration Test)

この方法は、杭頭に加振機を設置し、この加振機により杭～地盤系を共振させ、その応答曲線から杭の剛性、杭長などを判定するものである。また、杭の断面変化（断面欠損）の推定も可能であるとされている。代表的なシステムとその特徴を図-2.13に示す。本システムは、上述の打撃法に比べて加力装置が大きく、重いという欠点がある。

## 2) Integrity Test における課題

Integrity Test は、地盤中において見ることのできない杭の情報を非破壊的手段により入手しようとするユニークな技術であるが、必ずしも万全なものではない。以下に、Integrity Test の課題および問題点をハード面、ソフト面に分けて述べることにする。

### (a)ハード面

- ・試験時に杭に与える打撃または振動エネルギーについて：杭の長さや径により、その大きさを変える必要はないのか。さらには、適用可能な杭長、杭径に限界はないのか。
- ・杭周辺の地盤の影響：測定結果として得られる波形に地盤が与えている影響（主として減衰）の評価。シミュレーションを行うとき、土に関するどのようなデータをどのように用いるのか。また、杭の施工方法の違いによる土質の変化（打込み杭→しまる、埋込み杭→ゆるむ）まで考慮されているか。
- ・得られる情報の精度：発見可能なクラック、断面欠損の大きさと種類、そしてその精度について。さらには、測定で予測された欠損的中率は？（発表されている論文中では、はずれた例は載せていないので不明である。また実際に杭を掘り出して確認したという例もまれである。）

## (b)ソフト面

- ・ Integrity Test の位置付け、期待度： Integrity Test をどのようにとらえ、位置付けるのか、実際の運用面での問題。 Integrity Test は、杭を施工する際の品質管理項目の一つであり、 Total Quality Control の中でその重要度が決まってくる。さらには、各国の杭基礎の施工管理規準、基礎に対する考え方、地盤条件の違いなどにより Integrity Test に対する期待度が異なってくるものと思われる。
- ・ Integrity Test の成果の反映： ネガティブな意味で、もし欠陥が見つかったら誰がどうやって補償するのかという問題。逆にポジティブな意味で Integrity Test を実施するなら安全率を小さくして良いということにはならないのか。これらについては、現在のところまだコンセンサスが得られているとはいえない。

図-2.14に、これらの課題の相関図を示す。

### 3) Integrity Test の今後の展望

Integrity Test は、比較的新しい技術であり、特にわが国においてはまだ実績が少なく、また上記のような課題もある。まずは、健全な杭基礎を製造するうえでの Integrity Test の位置付け、有用性、結果の解釈、運用についてわが国の立場で論議し、社会的コンセンサスを形作っていく必要がある。さらに、将来の展開として次のような Integrity Test の杭以外への応用も考えられる。

- ・ 埋設管および周辺地盤の診断（管周辺地盤の緩みの程度、空洞の位置の検出、管の修理時期の判定）
- ・ 地下連続壁の品質診断
- ・ アースアンカーの定着状況の診断

## 2. 3 コンクリート基礎杭の支持力評価に関する研究

コンクリート基礎杭の支持力評価技術は、杭施工法の進歩と共に多くの手法が開発され適用されてきた。これらを大別すると、杭打撃工法時に使用されていた動的支持力確認式と杭施工後に杭頭に色々な手法によって荷重を加えてこれによって得られるデータから支持力を評価する方法となる。動的支持力から静的支持力を推定する方法は、2. 2 節で述べたように、支持力のバラツキ等の調査に対しても有効な手段となるものと考えられる。一方、埋込み杭の支持力評価については、その工法が開発された当時多くの議論がなされ、1970年に土質工学会から比較的長時間杭に荷重を加える静的載荷試験と呼ばれる試験法が

示された。この載荷試験法については、これまでに多くの研究成果が示されており<sup>85)</sup>、試験結果の蓄積により施工法別の設計用支持力式が提案されている。しかし、現在では、設計用支持力式を用いることが多く、載荷試験の実施は非常に少なくなっている。杭基礎に対して限界状態設計法を導入した場合、杭支持力を正確に評価するために同一現場で全ての杭の支持力を評価できるようにすることが理想であるが、全ての杭に現状の静的載荷試験を適用することは、費用と工期の点で問題が生じる。これらを少しでも解決し、一本でも多くの載荷試験の実施が可能となるような載荷試験法が提案・研究され始めている。これが、第1章で示した先端載荷試験法やスタナミック試験法である。以後、これらの研究成果について順次述べることにする。

### 2.3.1 静的載荷試験<sup>86)</sup>

この試験法については、土質工学会が8年の月を掛けて実験データの収集・整理を行い、昭和45年5月に規準案を制定し、載荷試験法の標準的な手順が初めて示された。ただし、数十年にわたって使用される杭の支持力を短時間の試験によって評価しようとするところに基本的な問題がある。この点からすれば構造物の寿命を仮に50年と仮定すれば、この載荷試験法も後に述べるスタナミック載荷試験方法と同様に急速載荷試験に近いものと判断もできよう。その後、平成5年には改訂版が示されたが、改訂の基本方針は、杭の鉛直載荷試験方法および鉛直支持力判定法に関するその後の研究成果を反映した点、杭の具体的な設計法は建設各分野の裁量に委ねることとした点、各分野に共通した基本的な考え方を確立しようとした点、並びに国際的な整合性を図った点の3点が挙げられる。この規準では試験結果の整理に際して、鉛直支持力に関する特性値として、新たに第1限界荷重、第2限界荷重、杭頭バネ定数などを用いることとしている。また、試験手順についても改良されているが、支持力のバラツキを考慮する点においては、時間と経済性に問題がある。しかし、杭の支持力を知るうえでは、多くの試験データに裏付けされた手法であることも事実である。

この試験において、本論文と関連する点で問題となる事項は、支持力判定に及ぼす荷重保持時間の影響が挙げられる。たとえば、短期載荷による実測データによれば、10分間の保持時間ではデータのバラツキが大きく、第1限界荷重の判定が多少難しいといわれている。しかし、定性的には荷重保持時間の長い方が結果は安定しているものの、定量的な差異は明らかではない。第1限界荷重の判定値は、図-2.15に示すように、30分間と120分間の荷重保持時間の間に大差は無いことがわかる。一方、長期載荷の場合には、短期の場合と異なり土の圧密、杭および土のクリープ変形が杭沈下に大きく影響する。土質工学会

の旧規準の載荷方法Bでは、荷重保持時間は15分間当りの沈下速度が3/100mm以下になるまでとし、それが満足できない場合でも2～5時間の比較的長時間の載荷であった。図-2.16は、載荷時期が1日で荷重保持時間を3時間とした場合の実測結果を示したものであるが、この結果を用いて長期載荷の挙動を推定しようとするところに問題があり、2～5時間程度の荷重保持時間から長期の沈下量を正確に推定することは困難である。したがって、この試験は設計荷重レベル程度の外力に対するでの評価方法と位置付けられる。

### 2.3.2 先端載荷試験<sup>87)</sup>

この試験法は、図-2.17に示すように杭の先端部分に設置した加力装置を用いて、杭先端抵抗を反力として杭体を押し上げるのと同時に、周面抵抗を反力として杭先端を押し下げることによって載荷する方法で、J.O.Osterbergによって開発され、場所打ち杭や鋼管杭に対して米国を中心に40例以上の試験が実施されている。杭頭から載荷する通常の試験方法では、反力杭や大がかりな載荷装置が必要なのに対して、杭先端載荷試験法ではこれらが不要なため試験費用や準備時間が少なく済むという特徴がある。このため数多くの試験が可能となり、有効な杭の品質評価手法の一つとなると考えられている。また、杭長が長い場合は、通常の載荷試験では載荷荷重の大部分が周面摩擦で抵抗されるため、先端地盤に十分な荷重を伝えるのは難しいが、この試験法では、杭先端地盤に直接載荷できるため、確実に先端地盤の性状を把握することができるという特徴もある。吉福・岸田<sup>88)</sup>は、場所打ち杭に対してこの試験を適用し、図-2.18に示すような杭頭載荷試験と先端載荷試験の先端荷重( $P_p$ ) - 先端沈下( $s_p$ ) 関係を比較しているが、両者はほぼ一致していることがわかる。また、図-2.19に示すように、先端載荷試験から得られた $P_p - S_p$ 関係と摩擦抵抗 - 抜上り量関係の測定結果を、岸田・椿原<sup>89)</sup>の解析手法を用いて杭頭部の荷重と沈下量に換算した関係と杭頭で得られた実測結果とを比較している。図によれば、解析値と実測値とはよく近似しており、先端載荷試験から杭頭部の $P - S$ 関係を精度よく推定できるとしている。この方法でも、幾つかの検討すべき問題点がある。たとえば、先端抵抗と摩擦抵抗のどちらか一方の極限值までしか載荷できないこと、杭頭の荷重 - 沈下関係が直接得られないため、これが必要な場合には推定が必要となること、摩擦抵抗が通常の杭頭載荷とは逆方向となること、などが挙げられる。これらを解決するために、建築研究振興協会では「杭の簡易載荷試験法に関する調査委員会」が設けられ、実用性や問題点などの基礎的な検討が行われている。限界状態設計法の導入が議論されている今日、杭の合理的な設計を行うためには簡便な品質評価手法の開発が不可欠である。この先端載荷試験法もその一つの手法ではあるが、実用化に向けてさらに多くのデータを

収集するとともに、先端ジャッキの設置方法等の改良といったハード面や解析手法・マニュアル等の整備といったソフト面の検討が必要である。

### 2.3.3 スタナミック試験

この試験法は、静的載荷試験と動的載荷試験の長所を組み合わせた新しい載荷試験法で、オランダ応用化学研究所建設施工部門とカナダのバーミングハンマー社によって開発<sup>90)</sup>され、わが国においても十数例<sup>90)~93)</sup>の杭に適用されている。載荷方法は動的であるが、杭が地盤に静的に近い状態で押し込まれるように工夫されている。載荷システムの概要を図-2.20に示す。図からわかるように、載荷杭に載荷装置を装着し、推進材を燃焼させ装置内に装着されているピストン内のガス圧を利用して杭に下向きの力を作用させるため、静的載荷試験のように反力杭が必要でなく、比較的短時間でかつ経済的に試験を行うことができる。この試験法を用いた載荷試験は、海外で数多く行われているが、その多くは施工管理を目的としたものである。一方、わが国においては、スタナミック試験を含めた新しい載荷試験法を検討するための組織が、「急速載荷試験研究会」として発足している。この研究会では、手始めにスタナミック試験の基礎研究を実施している。同時に、公的機関や民間組織においても静的載荷試験との比較や実杭の支持力確認を目的とした試験が実施されている。松本ら<sup>94)</sup>は、鋼管杭にこの試験を適用し、スタナミック試験で得られた載荷荷重が静的載荷試験における第1限界支持力（降伏支持力）または第2限界支持力に達するまでは、スタナミック試験で得られる荷重( $F_{stn}$ )—変位( $u$ )関係は、静的載荷試験の結果とほぼ一致すること、および除荷点法によって求まる静的最大荷重から、砂地盤ではほぼ正確に、珪藻泥岩では20%程度の誤差範囲内で静的支持力を推定できると述べている。また、加倉井・山下ら<sup>95)</sup>は、場所打ち杭にこの試験を適用し、杭頭の荷重—沈下関係では静的載荷試験と異なって最大荷重が生じた後に最大変位が生じており、動的効果が現れていることを指摘している。これは、杭体に作用する慣性力および杭周辺地盤への波動伝播に伴う逸散減衰に起因した現象であるとしている。さらに、沈下剛性については、設計荷重レベルでは載荷時間の影響が小さいと思われるため、スタナミック試験によって推定が可能であると述べている。また、この試験は、比較的簡便であるため、複数の試験を行うことができ、沈下剛性のバラツキを把握することも可能となると述べている。

以上のように、この試験法に関する研究は、限界状態設計の導入を契機に活発化しているが、今後、多種多様な地盤や杭を対象とした試験を実施するとともに、静的載荷試験との比較を行い、推定精度の検証を行う必要がある。

これまでに提案されている基礎杭の支持力評価試験方法の特徴を表-2.3に示す。

## 2. 4 まとめ

本章では、既製コンクリート杭の製造から施工、並びに載荷試験までを含めた杭の総合的な管理・評価手法を確立するために必要な各々の研究の成果とその問題点を述べた。

上部構造物で導入されつつある限界状態設計法に関連して、構造部材の強度や剛性のバラツキの評価を目的とした数多くの解析および実験が実施され、データの収集がなされている。限界状態設計法の基礎構造への導入に際しても、同様に解析・実験データの収集が必要であるが、基礎構造の場合には、上部構造の場合と異なり施工後に構造物が目視できない場合が殆どであるため、杭基礎の品質を総合的に評価するには、議論すべき問題は数多くある。技術者の間で最も厄介な問題とされている一つとして、施工管理と支持力のバラツキの問題が挙げられる。これらを解決するための手法として、波動理論を適用した非破壊試験による杭の形状推定および支持力推定（動的）、並びに機動性に優れ、低コストなスタナミック試験による支持力評価が挙げられる。したがって、これからの杭の品質管理手法および支持力評価手法としては、第1章で示した従来からの手法と上述の手法とを組み合わせたより精度の高い、合理的な方法を確立する必要があるといえる。そして、これらの評価方法を用いることによって、現状の杭設計荷重を算定する際の安全係数等の低減が可能となる道も開かれるものと考えられる。

## 第2章 付表、付図

表-2. 1 コンクリート強度推定のための非破壊試験法の種類

種類		測定内容	適用範囲	特徴	欠点	備考
打撃法	表面硬度法 落下式打撃法 ばね式打撃法 回転式打撃法 ピストル鋼球打撃法	左記の各種機器を用いてコンクリート表面をくぼみの深さ、直径、面積等を測定	圧縮強度の推定	<ul style="list-style-type: none"> <li>測定が比較的容易</li> <li>被測定物の形状、寸法等の影響少ない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>測定がコンクリートの表面に限られる</li> <li>同一箇所の再測定出来ない</li> </ul>	最近はあまり利用されない
	反発度法 シュミットハンマー等	左記の機器を用いてコンクリート表面を打撃し、その反発度を測定	圧縮強度の推定	<ul style="list-style-type: none"> <li>測定が簡便</li> <li>被測定物の形状、寸法等の影響少ない</li> </ul>	同上	<ul style="list-style-type: none"> <li>最も多く利用される</li> <li>各種ハンマーあり</li> </ul>
振動法	共振法 縦共振法 たわみ共振法 ねじり共振法	一定の形状、寸法の供試体の共振周波数、対数減衰率等を測定	各種動弾性係数の測定  圧縮強度の推定	<ul style="list-style-type: none"> <li>測定は比較的簡単</li> <li>同一供試体を繰り返し測定できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>被測定物の形状、寸法の制約あり</li> <li>圧縮強度推定の精度に問題</li> </ul>	既に、JIS ASTM 等多くの規格あり
	音速法 超音波法 衝撃波法 位相法	<ul style="list-style-type: none"> <li>超音波パルス（縦波、横波）の伝播速度測定</li> <li>衝撃波（縦、横波）の伝播速度の測定</li> <li>表面波の伝播速度の測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>部材厚の測定</li> <li>内部不連続部の測定</li> <li>強度推定</li> <li>弾性係数推定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>部材の形状、寸法、支持法の影響少ない</li> <li>同一箇所を繰り返し測定できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>測定にやや手間がかかる</li> <li>周波数が高くなると精度は向上するが減衰が著しい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>超音波法は多く用いられる</li> <li>衝撃波法はあまり用いられない</li> </ul>
局部破壊法	貫入法 シンピハンマ スピットピン ウィンザブロー	コンクリートへのピンの貫入量の測定	圧縮強度の推定	測定が比較的容易	測定に危険が伴う	我国ではあまり用いられない
	引抜き法 くぎ、ボルト等の引抜き法	コンクリート中に埋込んだ釘、ボルト等の引抜き耐力	圧縮強度の推定	強度推定精度が良好	コンクリートの打設時に準備する必要がある	諸外国では規格化が進んでいる。
組合せ法	音速-反発度法	超音波伝播速度と反発度の測定	圧縮強度の推定	各々の単独法より推定精度が良い	測定の手間	強度推定の用途に有望 研究段階
	音速-音波減衰定数	超音波伝播速度と減衰定数の測定	圧縮強度の推定	強度推定精度は良い	推定式未確立 減衰率の測定が困難	

表-2. 2 波動理論の研究の歴史

- 1677年 HookeがHookeの法則を発表する。
- 1747年 D'Aembertが、振動する絃の支配方程式(波動方程式)を発表する。
- 1802年 Chladniが棒の縦振動とねじり振動に関する実験結果を発表する。
- 1829年 Poissonが棒の振動に関する近似理論を発表する。
- 1867年 St. Venantが棒の縦衝撃の支配方程式(波動方程式)を発表する。
- 1876年 PochhammerとChreeが棒の応力波の減衰についての研究を行う。
- 1914年 Hopkinsonが棒の衝撃に関する研究結果を発表する。
- 1927年 Loveが横方向の慣性力を考慮した棒の衝撃の近似理論を発表する。
- 1930年 Donnellが棒の中間断面に衝撃力が作用したときの応力波伝播や断面が変化しているところでの応力波の透過、反射の取扱いを示す。
- 1942年 de Juhszが棒と棒の衝撃における応力波の図式解法を発表する。
- 1948年 Daviesがホプキンソン棒試験における応力波伝播の解析理論や測定法の研究を行う。
- 1952年 Bisopが梁の縦応力伝播理論を発表する。
- 1955年 Smithが一次元波動方程式の数値解析法を発表する。
- 1957年 Skalakovが2つの弾性棒の衝突に関する理論解を発表する。
- 1977年 Lundberg と Henchozが棒の2点で測定したひずみ波形から棒格点の応力、速度、変位を求める方法を発表する。

表-2.3 各種支持力評価方法の特徴

適用範囲 試験法	沈下剛性			極限支持力 基準支持力	
	代表値		バラ ツキ	代表値	バラ ツキ
	長期	短期			
従来手法	○	○	×	○	×
先端載荷法	○	○	△	○	△
スタティック載荷法	○	○	○	○	○
動的載荷法	△	△	△	—	—

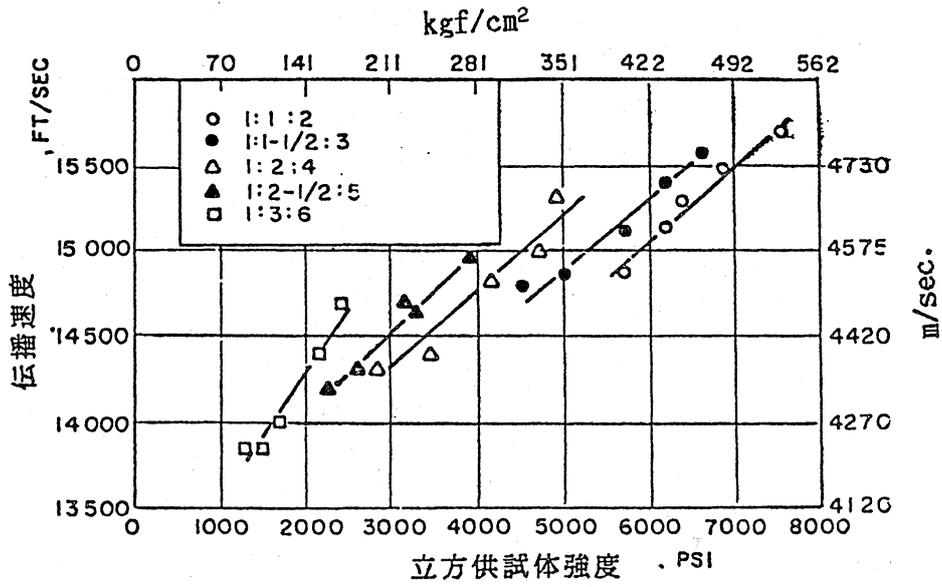


図-2. 1 コンクリートの超音波伝播速度  
に及ぼす配(調)合の影響

(粗骨材は角ばった川砂利、図左上部は  
セメント:細骨材:粗骨材量比を示す)

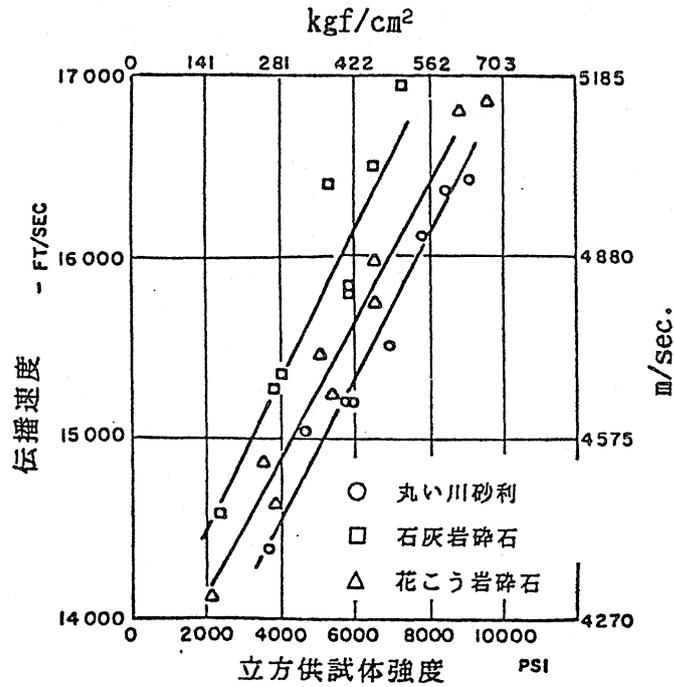


図-2. 2 コンクリートの超音波伝播速度  
に及ぼす粗骨材種類の影響

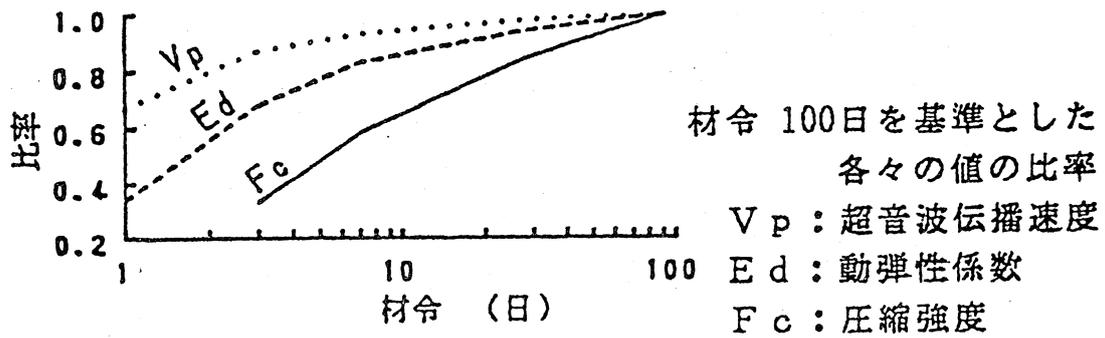


図-2.3 超音波伝播速度および圧縮強度  
と材齢の関係

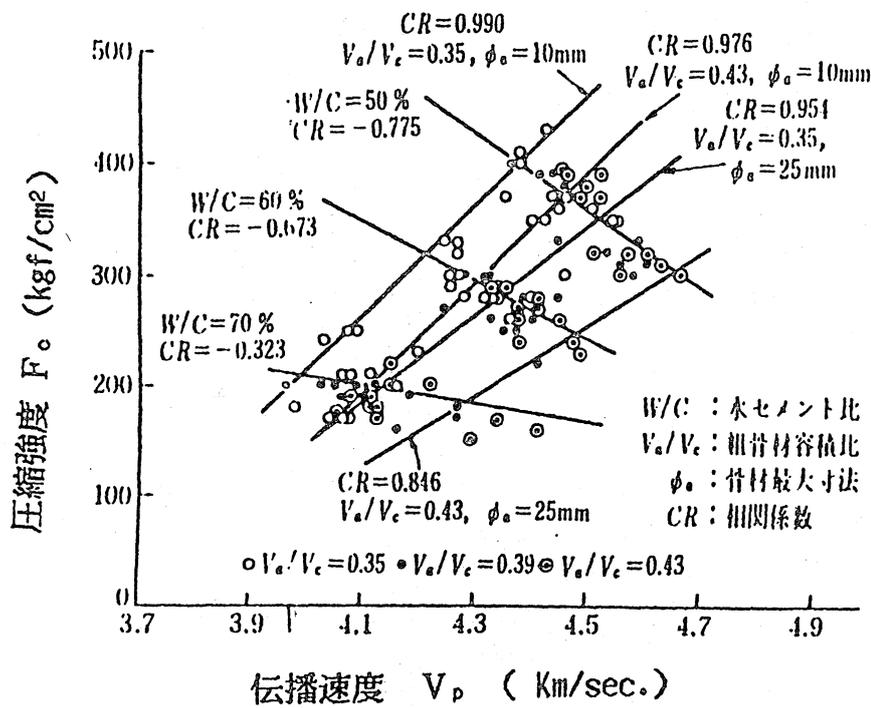


図-2.4 圧縮強度( $F_c$ )と超音波伝播速度  
( $V_p$ )の関係  
(各要因ごとに層別)

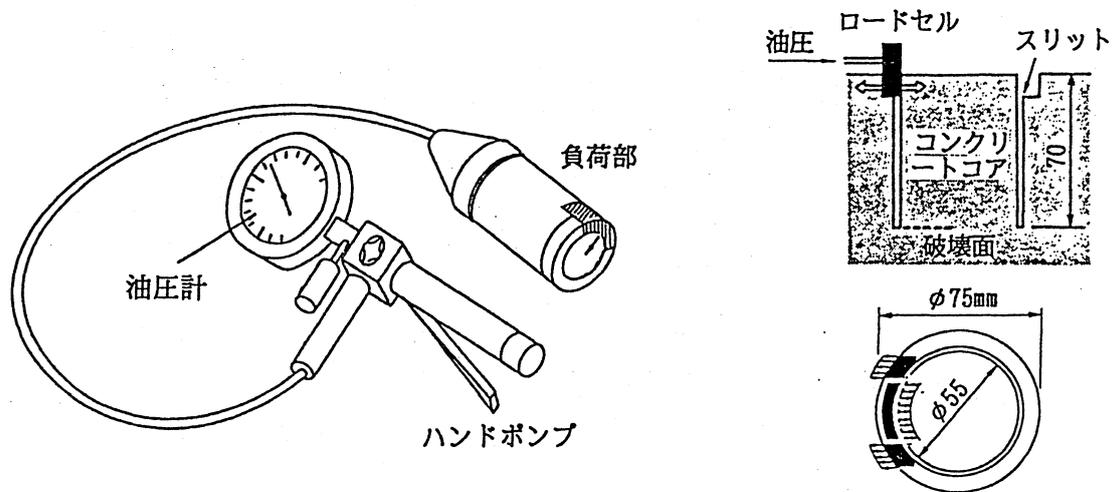


図-2.5 ブレイクオフ法の原理と試験装置

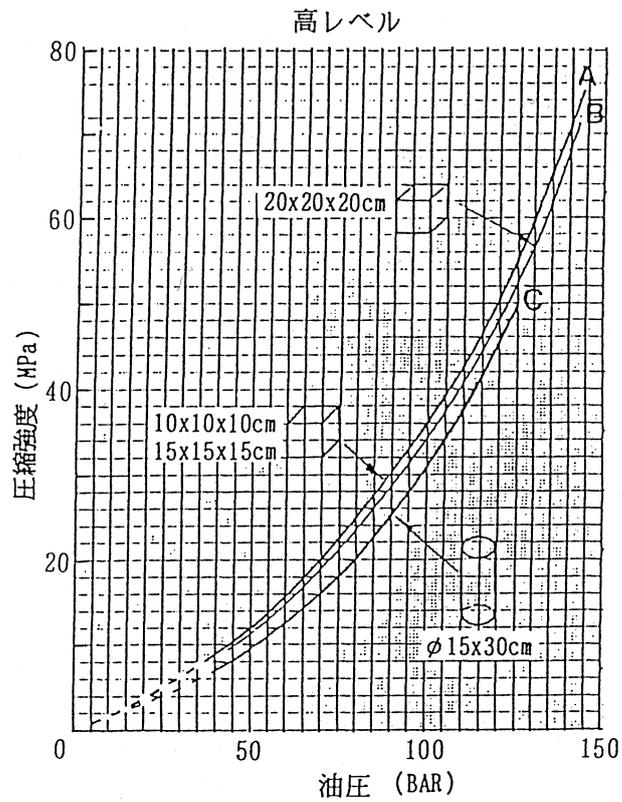


図-2.6 油圧と圧縮強度との関係の例

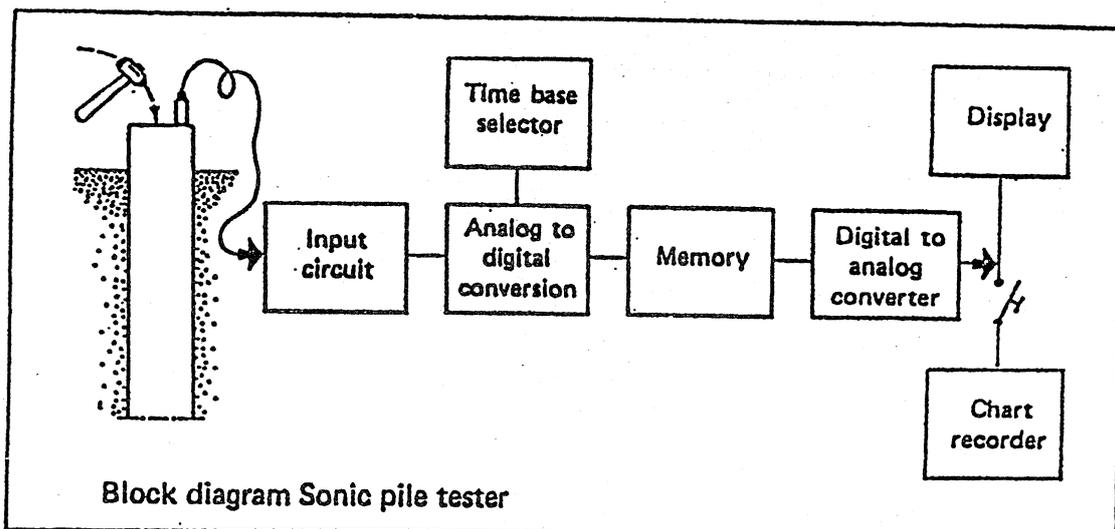


図-2.7 現存の振動解析による杭信頼性検査装置の構成

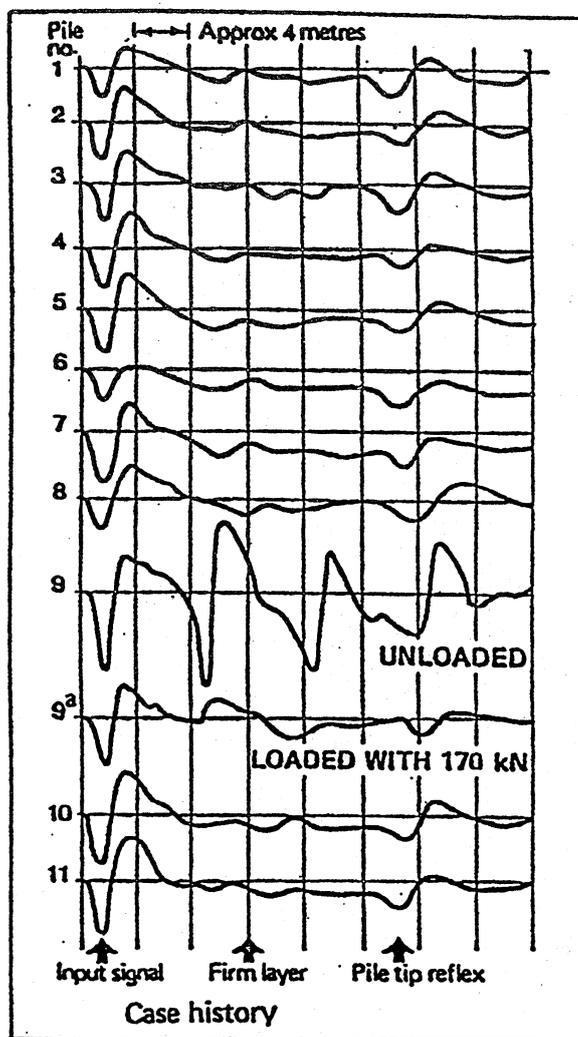


図-2.8 図-2.7に示した信頼性検査装置の出力波形

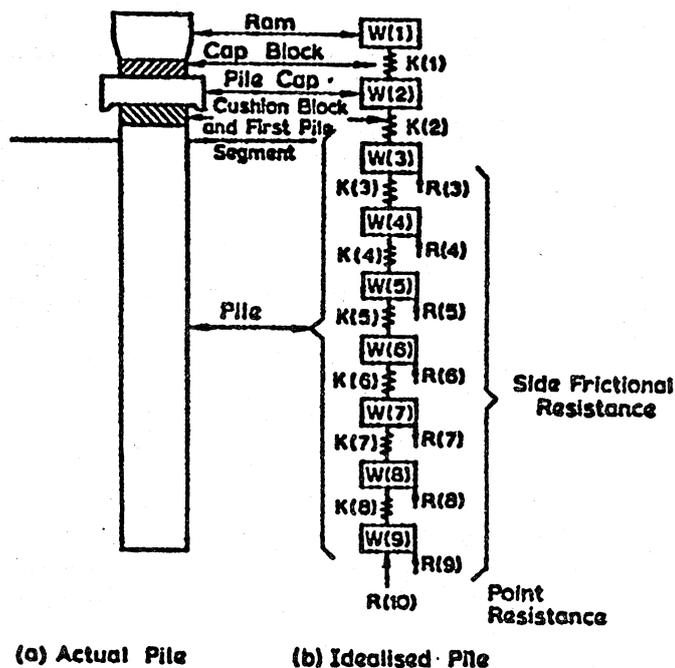


図-2.9 Smith(1955)の数値解析法における杭打ちのモデル化

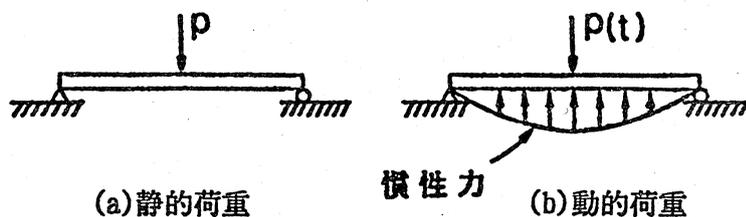


図-2.10 静的および動的荷重の基礎的な相違

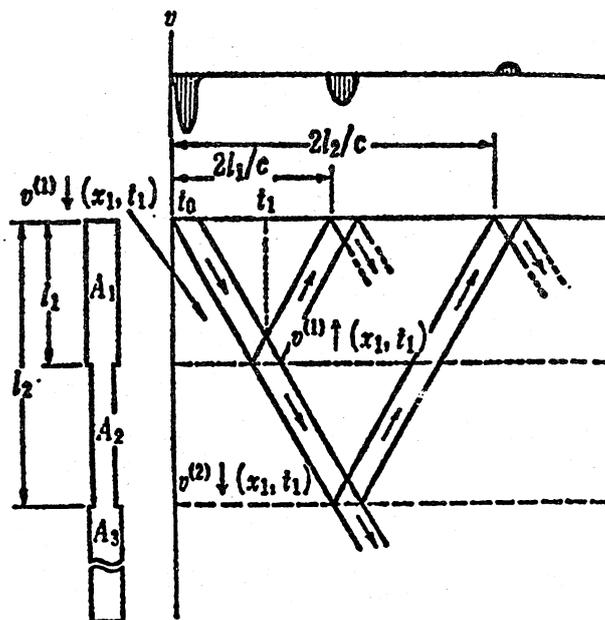


図-2.11 杭体の断面積に変化のある場合の反射波

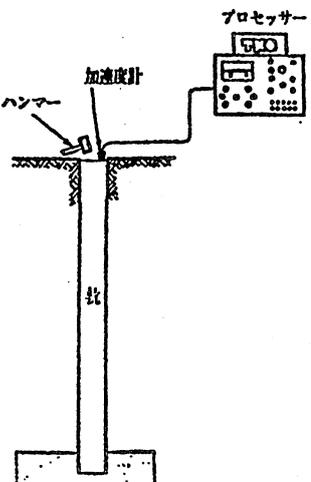
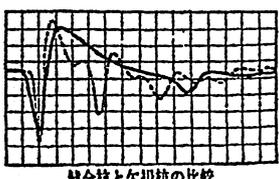
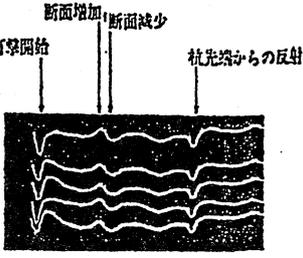
原理	計測・データ処理	利用目的・判定
<p>1. 一次元波動理論 2. 杭頭をハンドハンマーで打撃し波形を加速度計で計測する。</p> 	<p>1. プロセッサは内蔵コンピュータで制御されている。 2. ゲイン、A/D変換のサンプリングタイムが波形・杭長から適切な値が自動的に選択される。</p>	<p>1. 杭の健全性のチェック 杭長の推定 2. 杭欠損部の存在とその位置の推定 3. 杭断面積の増大あるいは減少 4. 疑い杭とほかの杭との情報比較</p>  <p>健全杭と欠損杭の比較</p>  <p>波形例</p>

図-2.12 代表的な計測システム（打撃法）

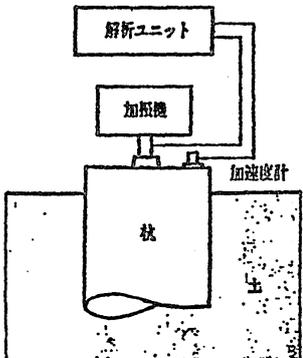
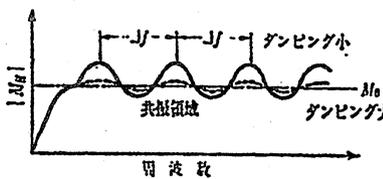
原理	利用目的・判定
<p>杭頭部に加振機をつけ、杭-地盤系を共振させる。</p> 	<p>1. 杭頭部のモビリティ（インピーダンスの逆数）と振動円周波数の関係を示す右図のような曲線から (イ) 初期周波数から杭頭部剛性を推定 (ロ) <math>d</math>より杭長推定 <math>L = \frac{G}{2Af}</math> (ハ) 曲線のうねりからダンピングの大小の推定 (ニ) キャラクタリスティックモビリティ <math>M_0</math>から断面積を推定 <math>M_0 = \frac{1}{\rho CA}</math> 2. 杭体の断面変化の判定法について述べられているが、定性的である。</p>  <p>図 波数</p>

図-2.13 代表的な計測システム（振動法）

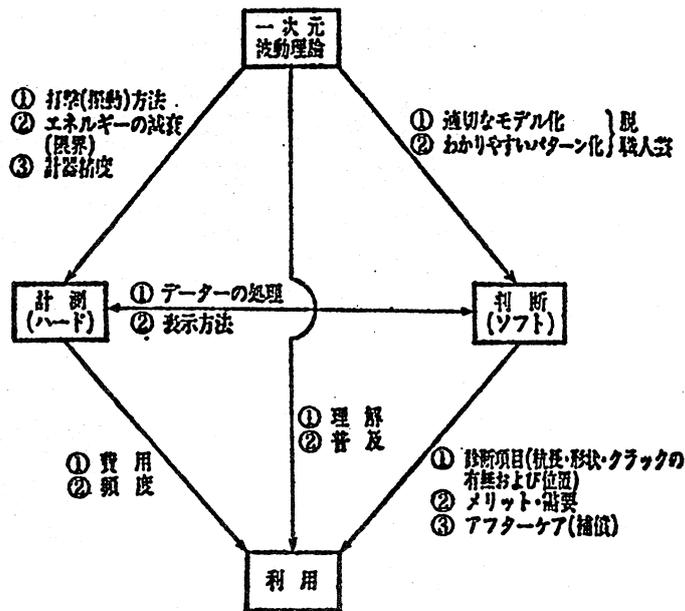


図-2.14 Integrity Test運用上の課題相関図

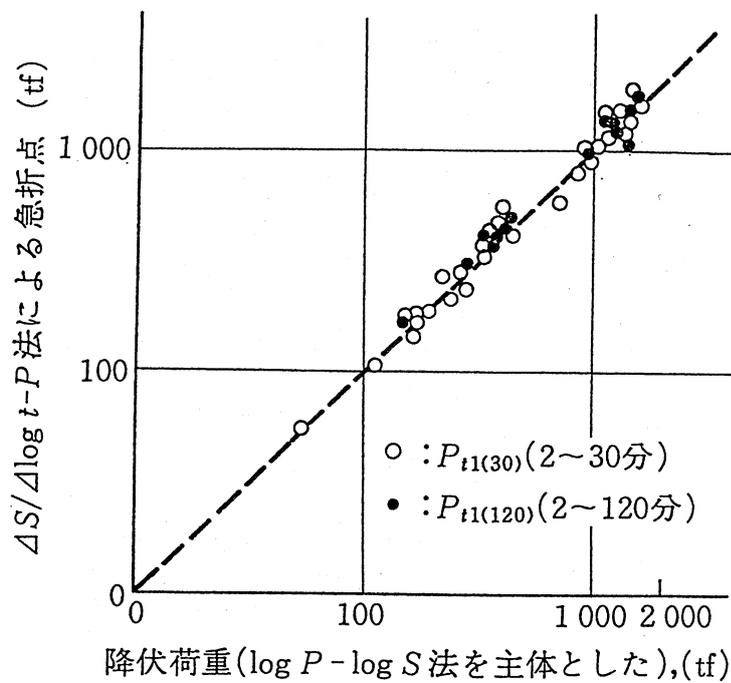


図-2.15 第1限界荷重判定における  $\Delta S / \Delta \log t - P$  法の位置付け

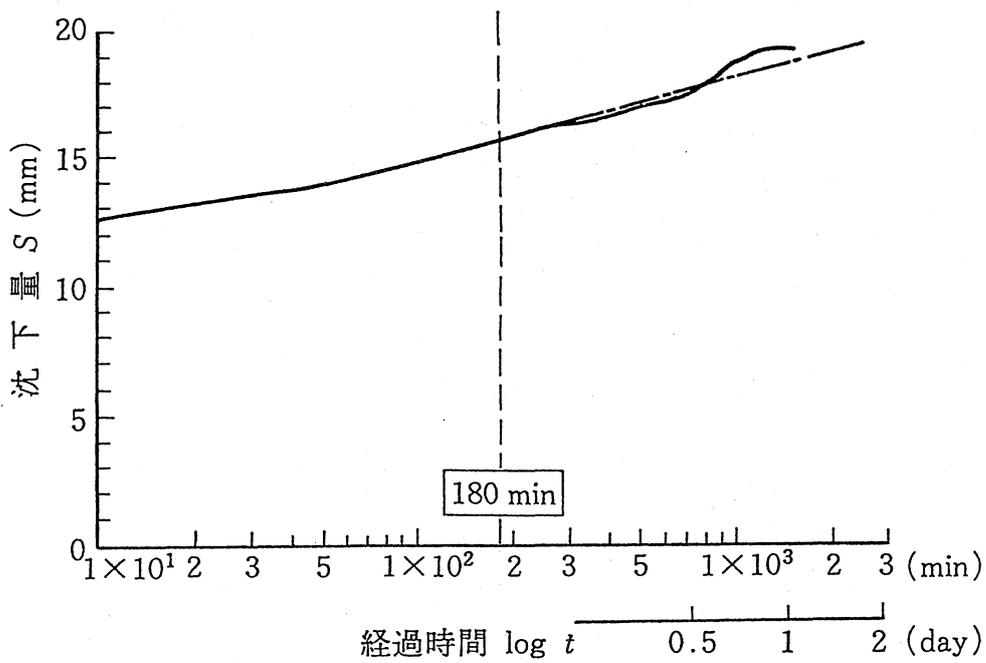


図-2.16 長期載荷試験例

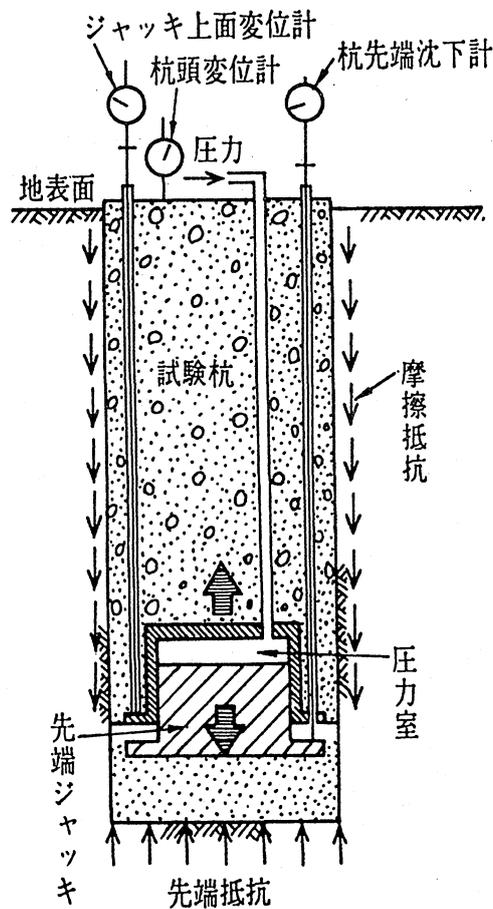


図-2.17 杭先端載荷試験法

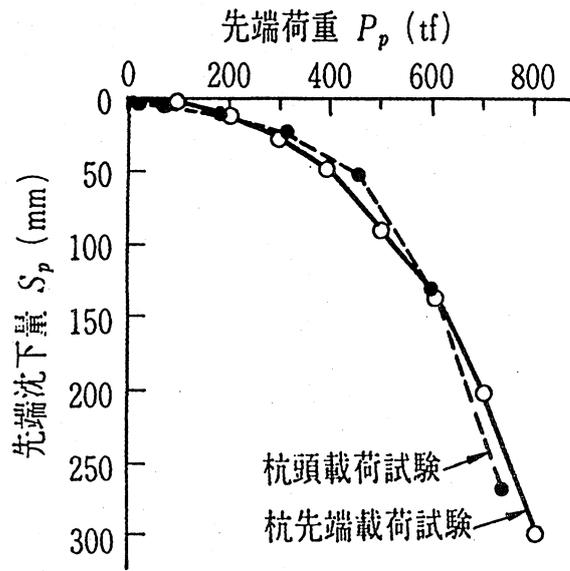


図-2.18  $P_p-S_p$  関係の比較図

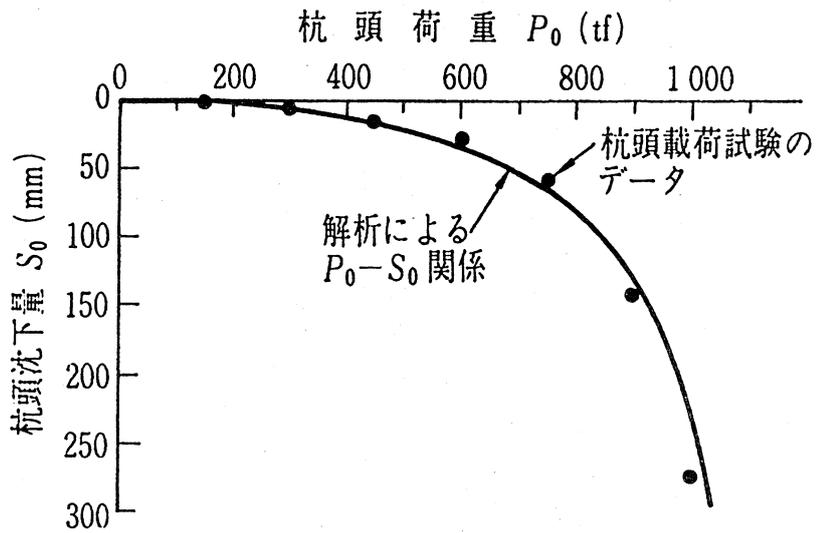
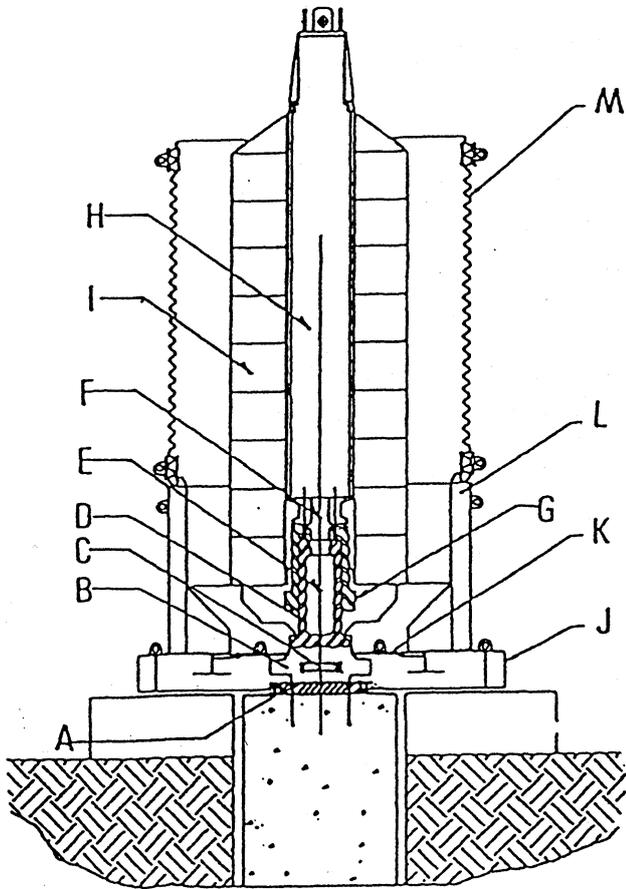


図-2.19  $P_0-S_0$  関係の比較図



システム名称

- A: ベース・プレート
- B: ピストン・ベース
- C: ロードセル/レーザ・センサー
- D: ピストン・シリンダー
- E: 燃焼室
- F: コーン・ベント
- G: プラットフォーム
- H: サイレンサー
- I: 反力マス
- J: 砂利コンテナ・ベース
- K: 砂利落下防止プレート
- L: 下部砂利コンテナ
- M: 上部砂利コンテナ

図-2.20

スタナミック載荷試験装置の組立図

## 第3章

衝撃弾性波法を適用した  
コンクリート基礎杭の  
形状推定方法に関する研究

## 第3章

# 衝撃弾性波法を適用したコンクリート基礎杭の 形状推定方法に関する研究

### 3. 1 概 説

近年、コンクリート基礎杭の支持力を大きくさせることを目的として、拡径コンクリート基礎杭や先端根固め鋼管基礎杭などといった杭の断面を変化させた基礎杭が多く使用されるようになってきた。これらの基礎杭の性能を評価する方法としては、第2章でも述べたように通常載荷実験によって杭の静的支持力を測定する方法やCASE法のような動的支持力を測定する方法などが用いられている。しかし、これらの評価方法は、いずれも大がかりな載荷試験を行わなければならないという欠点があるため、施工後のコンクリート基礎杭の性能を比較的簡便に評価できる方法の開発が強く要望されている。

本研究で取り扱う弾性波法は、コンクリート基礎杭の断面が変化している部分から反射してきた弾性波の速度成分の到達時間と振幅値に着目する方法で、地中に埋設されている杭の場合であっても弾性波を杭に入力でき、かつ反射してきた弾性波を検出できれば試験可能であるため、在来の試験方法と比べて適用範囲は広く、有用な試験方法になり得るものと考えられる。

本章では、検出反射波の到達時間と速度成分に着目した衝撃弾性波法によるコンクリート基礎杭の形状推定の適用性・可能性について一連の解析的・実験的検討を行った。

### 3. 2 コンクリート基礎杭の形状推定方法

#### 3.2.1 波動速度の反射・透過

コンクリート基礎杭中を伝播する波動が部分的に材質や断面積が種類  $i - 1$  から  $i$  へと変化する境界面  $i$  に到達すると、一部は境界面を透過するが、一部は反射する。この時、透過率 ( $T_i$ ) および反射率 ( $R_i$ ) を波動速度で評価すると、 $T_i$  および  $R_i$  は、それぞれ

$$T_i = \frac{2 \eta_{i-1}}{1 + \eta_{i-1}}, \quad R_i = \frac{1 - \eta_{i-1}}{1 + \eta_{i-1}} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

で表されることが知られている。ここに、 $\eta_{i-1} = Z_i / Z_{i-1}$ ：インピーダンス比（ $Z_{i-1}$ および $Z_i$ は、それぞれ入力側および透過側の機械インピーダンス）。なお、杭のような棒材の機械インピーダンス( $Z$ )は、次式で与えられる。

$$Z_i = A_i \cdot E_i / v_i \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに、 $A_i$ ：杭の断面積、 $E_i$ ：ヤング係数、 $v_i$ ：波動の伝播速度。  
したがって、杭のヤング係数( $E$ )および波動の伝播速度( $v$ )がコンクリート杭内部で一定と仮定できる場合には、インピーダンス比 $\eta$ は杭の断面積比となる。

### 3.2.2 弾性波入力点で検出された反射波の速度比

#### (1) コンクリート基礎杭内部の境界面で反射した波動

波動の距離減衰を考慮し、かつ多重反射の影響を無視すると、 $i$ 番目の境界から反射した波動が入力点に到達したときの波動速度の入力速度に対する比率 ( $V_i$ )は、以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \text{「 } i \text{ 境界面からの反射} \\
 V_i &= 2 \{ T_1 \cdot T_2 \cdot \dots \cdot T_{i-1} \} \cdot R_i \cdot \{ T_{i-1}' \cdot \dots \cdot T_1' \} \lambda^{L_i} \\
 & \quad \text{入力方向の透過} \quad \quad \quad \text{反射方向の透過} \\
 & = 2 \prod_{j=1}^{i-1} \left\{ \frac{4 \eta_j}{(1 + \eta_j)^2} \right\} \frac{1 - \eta_i}{1 + \eta_i} \lambda^{L_i} \quad \dots\dots\dots (3.3)
 \end{aligned}$$

ここに、 $\lambda$ ：波動速度の単位長さ当りの減衰率、  
 $L_i$ ：入力点から $i$ 番目の境界までの距離。

#### (2) 終点の境界で反射した波動

終点の境界 $n$ が自由端の場合には、自由端からの反射率 $R_n$ が1となるため、入力点に到達した波動速度の入力値に対する比率 ( $V_n$ )は、次のようになる。

$$V_n = 2 \prod_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{4 \eta_i}{(1 + \eta_i)^2} \right\} \lambda^{L_n} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

また、終点の境界 $n$ が固定端の場合には、固定端からの反射率 $R_n$ が-1となるため、この場合の $V_n$ は、次式で与えられる。

$$V_n = -2 \prod_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{4 \eta_i}{(1 + \eta_i)^2} \right\} \lambda^{L_n} \dots\dots\dots (3.4)'$$

### 3.2.3 パラメータの算定方法

杭がn個の節点(始点が1、終点がn)で分割されている場合を考える。いま、終点(境界n)が自由端で、その境界からの反射波の到達速度(式(3.4))と境界n-1からの反射波の到達速度(式(3.3))との比 $I_{n-1}$ を求めると、以下ようになる。

$$I_{n-1} = \frac{V_n}{V_{n-1}} = \frac{4 \eta_{n-1}}{1 - \eta_{n-1}^2} \lambda^{L_n - (L_{n-1})} \dots\dots\dots (3.5)$$

ただし、終点が固定端の場合には、式(3.4)の代わりに式(3.4)'を用いなければならない。また、境界n-1からの反射波の到達速度と境界n-2からの反射波の到達速度との比( $I_{n-2}$ )は、

$$I_{n-2} = \frac{V_{n-1}}{V_{n-2}} = \frac{4 \eta_{n-2}}{1 - \eta_{n-2}^2} \frac{1 - \eta_{n-1}}{1 + \eta_{n-1}} \lambda^{(L_{n-1}) - (L_{n-2})} \dots\dots\dots (3.5)'$$

となり、同様の手順で順次 $I_{n-3}$ 、 $\dots\dots\dots$ 、 $I_2$ 、 $I_1$ を求めることができる。

断面の形状変化に関連するインピーダンス比 $\eta_{n-1}$ は、減衰率 $\lambda$ が仮定されれば、式(3.5)より次式で与えられる。

$$\eta_{n-1} = \left[ -2 \lambda^{L_n - (L_{n-1})} + \left\{ 4 \lambda^{2(L_n - (L_{n-1}))} + (V_n / V_{n-1})^2 \right\}^{1/2} \right] / (V_n / V_{n-1}) \dots\dots (3.6)$$

同様の手順で、 $\eta_{n-2}$ 、 $\dots\dots$ 、 $\eta_1$ を順次求めることができる。

上式中のパラメータ( $\lambda$ および $\eta_i$ )は、以下の手順で算定する。まず、仮定した $\lambda$ を式(3.6)に代入して $\eta_1 \sim \eta_{n-1}$ を算定する。次に、この値を式(3.3)( $i=1, 2, \dots, n-1$ )および式(3.4)(または式(3.4)')に代入して $V_i$ を計算し、速度の計算結果と測定結果( $V_{i-exp}$ )との残差の二乗和が最小となる $\lambda$ を繰返し計算によって決定する。本研究では、準ニュートン法による非線形最小二乗法を用いて $\lambda$ の値を決定した。

杭の形状変化による断面寸法(D)の変化は、波動の伝播速度(v)と杭のヤング係数(E)を一定と仮定すると、次式を用いて算定できる。

$$R D_{i-1} = D_i / D_{i-1} = \sqrt{(A_i / A_{i-1})} = \sqrt{(Z_i / Z_{i-1})} = \sqrt{\eta_{i-1}} \dots\dots\dots (3.7)$$

なお、杭の形状変化による断面寸法の変化位置 ( $x_i$ ) は、反射波の到達時間 ( $t_i$ ) と波動の伝播速度 ( $v$ ) とを用いて、

$$x_i = 0.5 \cdot t_i / v \dots\dots\dots (3.8)$$

から計算できる。

### 3. 3 数値実験による形状推定方法の確認

#### 3.3.1 解析手法

##### (1) 解析の概要

本研究で取り扱うコンクリート基礎杭は、一般的に棒材とみなすこともできるため、1次元弾性波動伝播解析が適用可能である。しかし、この解析では棒材の曲げ振動の影響は考慮することができない。したがって、これらの影響について検討する場合には、別の解析方法を用いる必要がある。そのため、本研究では、境界条件の取扱いが比較的簡単な2次元有限要素解析も適用することとした。

##### (2) 解析手順

##### 1) 1次元弾性波動伝播解析

速度依存型の減衰項を考慮した1次元弾性波動方程式は、一般に次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{h}{A \cdot E} \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (3.9)$$

ここに、 $u$  : 材軸方向の変位、 $x$  : 材軸方向の位置、  
 $v$  : 速度 ( $=\sqrt{E/\rho}$ )、 $A$  : 杭の断面積、  
 $E$  : ヤング係数、 $\rho$  : 密度、 $t$  : 時間、 $h$  : 減衰係数。

本研究では、上記の波動方程式の解法に差分(中央差分)法を適用し、波動方程式の定式化に際しては、コンクリート基礎杭は  $n$  個の節点から構成されているものと仮定した。

##### (a) コンクリート基礎杭内部における波動方程式の差分表示

いま、位置  $i$  でコンクリート基礎杭の材質、断面積およびコンクリート基礎杭と土との

界面性状が変化する一般的な場合を考えると、位置  $i$  および時刻  $p+1$  での波動方程式の差分表示は、表示式中に表れる仮想変位を力の釣合条件と変位の連続条件を用いて消去すると、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \left( \frac{1}{v_1^2} + \frac{1}{v_2^2} \frac{A_2 \cdot E_2}{A_1 \cdot E_1} \right) \frac{1}{d t^2} + (h_1 + h_2) \frac{1}{A_1 \cdot E_1 \cdot 2 d t} \right\} u_{i, p+1} \\
 &= \frac{2}{d x^2} u_{i-1, p} - \left\{ \left( \frac{2}{d x^2} - \frac{2}{v_1^2 \cdot d t^2} \right) \right. \\
 & \quad \left. - \frac{A_2 \cdot E_2}{A_1 \cdot E_1} \left( \frac{2}{d x^2} - \frac{2}{v_2^2 \cdot d t^2} \right) \right\} u_{i, p} + \frac{2}{d x^2} \frac{A_2 \cdot E_2}{A_1 \cdot E_1} u_{i+1, p} \\
 & \quad - \left\{ \left( \frac{1}{v_1^2} + \frac{1}{v_2^2} \frac{A_2 \cdot E_2}{A_1 \cdot E_1} \right) \frac{1}{d t^2} - (h_1 + h_2) \frac{1}{A_1 \cdot E_1 \cdot 2 d t} \right\} u_{i, p-1} \\
 & \quad \dots\dots\dots (3.10)
 \end{aligned}$$

ここに、添字 1 および 2 は、材質等が位置  $i$  で種類 1 から 2 へ変化することを示す。

(b) 始点における波動方程式の差分表示

始点 1 における波動方程式の差分表示は、一般に次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 & \left( \frac{1}{v^2 \cdot d t^2} + \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 d t} \right) u_{1, p+1} \\
 &= \frac{1}{d x^2} u_{0, p} - \left( \frac{2}{d x^2} - \frac{2}{v^2 \cdot d t^2} \right) u_{1, p} + \frac{1}{d x^2} u_{2, p} \\
 & \quad - \left( \frac{1}{v^2 \cdot d t^2} - \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 d t} \right) u_{1, p-1} \quad \dots\dots\dots (3.11)
 \end{aligned}$$

上式中の仮想変位  $u_{0, p}$  を境界条件に応じて消去すると、時刻  $p+1$  における波動方程式の差分表示は、それぞれ以下のようなになる。

①外力が働いていない ( $F_p = 0$ ) 場合：

$$\begin{aligned}
 & \left( \frac{1}{v^2 \cdot d t^2} + \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 d t} \right) u_{1, p+1} \\
 &= - \left( \frac{2}{d x^2} - \frac{2}{v^2 \cdot d t^2} \right) u_{1, p} + \frac{2}{d x^2} u_{2, p} \\
 & \quad - \left( \frac{1}{v^2 \cdot d t^2} - \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 d t} \right) u_{1, p-1} \quad \dots\dots\dots (3.12)
 \end{aligned}$$

②外力が働いている ( $F_p \neq 0$ ) 場合 :

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{v^2 \cdot dt^2} + \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{1, p+1} \\ &= - \frac{2 F_p}{A \cdot E \cdot dx} - \left( \frac{2}{dx^2} - \frac{2}{v^2 \cdot dt^2} \right) u_{1, p} + \frac{2}{dx^2} u_{2, p} \\ & - \left( \frac{1}{v^2 \cdot dt^2} - \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{1, p-1} \quad \dots\dots\dots (3.13) \end{aligned}$$

(c) 終点における波動方程式の差分表示

終点における波動方程式の差分表示は、始点の場合と同様に取り扱うことができる。

①自由端の場合 : 自由境界 (応力 = 0) の終点位置  $n$  における波動方程式の差分表示は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{v^2 \cdot dt^2} + \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{n, p+1} \\ &= \frac{1}{dx^2} u_{n-1, p} - \left( \frac{2}{dx^2} - \frac{2}{v^2 \cdot dt^2} \right) u_{n, p} \\ & - \left( \frac{1}{v^2 \cdot dt^2} - \frac{h}{A \cdot E \cdot 2 dt} \right) u_{n, p-1} \quad \dots\dots\dots (3.14) \end{aligned}$$

②固定端の場合 : 固定端の場合、終点位置  $n$  における変位は、常に次式で与えられる。

$$u_{n, p} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

(d) 安定条件

式(3.9)の波動方程式を差分法によって解くための安定条件は、一般に

$$v \cdot dt \leq dx \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

ここに、 $v$  : 波動の伝播速度、 $dt$  : 時間増分、 $dx$  : 差分間隔。

与えられるが、波動の伝送が正しく行われるためには、 $v \cdot dt = dx$  となるように、 $dt$  および  $dx$  を設定する必要があることが知られている。

## 2) 2次元有限要素法解析

波動伝播のように、時々刻々と変化していく変位、速度および加速度を逐次求めるためには、微分方程式として表される波動方程式をSTEP-BY-STEPで解いていかなければならな

い。これはコンピューターを用いても非常に時間のかかる作業であるため、なるべく短時間で、しかも精度よく処理することのできる効率のよい数値計算公式を用いる必要がある。本解析で用いた波動方程式は次のようである。

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{f\} \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

ここに、 $\{f\}$  :外力ベクトル、 $[M]$  :質量マトリックス、  
 $[C]$  :減衰マトリックス、 $[K]$  :剛性マトリックス、  
 $\{u\}$  :変位ベクトル、 $\{\dot{u}\}$  :速度ベクトル、 $\{\ddot{u}\}$  :加速度ベクトル。

式(3.17)の数値解法としては、線形加速度法、ニューマークの $\beta$ 法、ウィルソンの $\theta$ 法、フーボルト法、ルンゲ・クッタ法などがよく用いられているが、本研究では、比較的簡単でありながら安定性の高いウィルソンの $\theta$ 法を用いた。以下、ウィルソンの $\theta$ 法について概説することにする。

ウィルソンの $\theta$ 法は、線形加速度法の一の変形で、その性格を端的に言えば「線形加速度法の体質を強化した公式」であるといえる。計算の手続きは、線形加速度法と殆ど同じであるが、線形加速度法では波動方程式を $t + \Delta t$ の時点で使っているのに対し、ウィルソンの $\theta$ 法では、それより先(将来)の時点 $t + \theta \Delta t$ (ただし $\theta > 1$ )に適用している、という違いがある。すなわち、

$$u(t + \theta \Delta t) = u(t) + \theta \Delta t \cdot \dot{u}(t) + \frac{(\theta \Delta t)^2}{3} \ddot{u}(t) + \frac{(\theta \Delta t)^2}{6} \ddot{u}(t + \theta \Delta t) \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

$$\dot{u}(t + \theta \Delta t) = \dot{u}(t) + \theta \Delta t \frac{\ddot{u}(t) + \ddot{u}(t + \theta \Delta t)}{2} \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

$$m \cdot \ddot{u}(t + \theta \Delta t) + c \cdot \dot{u}(t + \theta \Delta t) + k \cdot u(t + \theta \Delta t) = f(t + \theta \Delta t) \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

を連立させて解き、得られた $\ddot{u}(t + \theta \Delta t)$ を

$$\ddot{u}(t + \theta \Delta t) = \frac{(\theta - 1) \ddot{u}(t) + \ddot{u}(t + \theta \Delta t)}{\theta} \dots\dots\dots (3.21)$$

によって補間して $\ddot{u}(t + \Delta t)$ を求め、それを用いて

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \Delta t \cdot \dot{u}(t) + (\Delta t)^2 \cdot \ddot{u}(t) / 3 + (\Delta t)^2 \cdot \ddot{u}(t + \Delta t) / 6 \dots\dots\dots (3.22)$$

$$\dot{u}(t + \Delta t) = \dot{u}(t) + \Delta t \{ \ddot{u}(t) + \ddot{u}(t + \Delta t) \} / 2 \dots\dots\dots (3.23)$$

により、 $u(t + \Delta t)$  および  $\dot{u}(t + \Delta t)$  を算定する。すなわち、式(3.18)、式(3.19)および式(3.20)を連立させて解けばよい。解法としては $\Delta t$ を大きくとる関係上、直接法を用いる。

ウィルソンの $\theta$ 法では、 $\theta$ の値を1.37以上にとれば、 $\Delta t$ の値をどの様にとっても脱線しないということが知られており、 $\Delta t$ を大きくとっても、精度は落ちるが脱線の心配はなく、後は経験と工学的センスを生かして使いこなせばよい。このことから、ウィルソンの $\theta$ 法は、実用価値の高い優れた解法であるといえる。 $\theta$ というパラメータが入っているために式が少し複雑に見えるが、計算の手間は、線形加速度法やニューマークの $\beta$ 法と殆ど変わらない。なお、本研究では、 $\theta = 1.4$ を採用している。

### 3.3.2 解析モデル

本解析は、検出反射波の到達時間と速度成分に着目した衝撃弾性波法によるコンクリート基礎杭の形状推定の適用性・可能性について検討することを目的としている。

解析の概要を表-3.1に示す。解析要因としては、杭の種類（定径杭、拡径杭および欠損杭の3種類）、杭径（定径杭については $d = 300$ および $600\text{mm}$ の2種類、拡径杭については杭頭径が $300$ および $500$ で杭先端径が $350$ および $600\text{mm}$ の2種類、欠損杭については $d = 300\text{mm}$ のみ）、杭長（定径杭については $\ell = 5, 7$ および $9\text{m}$ の3種類、拡径杭については $\ell = 5$ および $9\text{m}$ の2種類、欠損杭については $\ell = 7\text{m}$ のみ）、欠損率（0、25、50および100%の4種類）、並びに解析手法（1次元弾性波動伝播解析および2次元有限要素法解析の2種類）を取り上げた。

1次元弾性波動伝播解析では、波動伝播特性に及ぼす減衰係数（ $h=0.0$ および $1.0$ の2種類）および鉄筋終端の境界条件（自由端および固定端の2種類）についても検討し、弾性波動伝播解析の結果と3.2節で示した方法を用いてコンクリート基礎杭の断面形状推定を行った。なお、弾性波動伝播解析に際しては、波動の伝播速度（ $V$ ）を $4000\text{m/s}$ 、差分間隔（ $dx$ ）を $10\text{cm}$ （ただし、欠損杭のみ $5\text{cm}$ ）、解析時間増分（ $dt$ ）を $dx/v$ に設定して $10000$ ステップ（ $5000\mu\text{s}$ ）まで解析を行った。

一方、2次元有限要素法解析では、速度比例型の減衰マトリックス $[C]$ として、 $\alpha[M] + \beta[K]$ で表される比例減衰（ここに、 $[M]$ ：質量マトリックス、 $[K]$ ：剛性マトリックス）を使用し、 $\alpha$ および $\beta$ の値は、 $1 \times 10^{-6}$ および $1 \times 10^{-3}$ に設定した。また、波動伝播解析に際しては、前述したように波動方程式の解法にウィルソンの $\theta$ 法（ $\theta=1.4$ ）を使用し、入力波をパルス波として、解析時間増分 $1.0\mu\text{s}$ で解析時間 $5000\mu\text{s}$ まで解析を行った。

図-3.1に1次元弾性波動伝播解析の解析モデルを、図-3.2に2次元有限要素法解析で使用したモデル試験体の要素分割、弾性波の入力・検出位置などの例を、表-3.2に解析モデルを構成する材料の各種力学特性をそれぞれ示す。

### 3.3.3 解析結果とその考察

#### (1) 1次元弾性波動伝播解析結果

##### 1) 弾性波動伝播特性

図-3.3～図-3.11は、本解析によって得られたパルス入力点における無次元化した波動速度の履歴応答を減衰係数( $h$ )別に示したもので、図(a)は減衰係数( $h$ )が $0.0$ の場合で、図(b)は $h=1.0$ の場合である。これらの図からわかるように、 $h=1.0$ に設定した場合（各図の(b)）には、パルス入力直後に波形が負の方向に変移するアンダースhoot現象が観察されるが、 $h=0$ に設定した場合（各図の(a)）には、このような現象は観察されない。また、減衰係数が $0.0$ の場合には、入力波に比べて反射波の方が約2倍の振幅値を示しているが、減衰係数が $1.0$ になると約 $1.71\sim 0.58$ 倍になっているのがわかる。したがって、減衰係数が大きくなるにつれて反射波の検出が困難になるといえる。

ところで、図-3.3および図-3.4は、それぞれ解析モデル終端の境界条件を自由端および固定端に設定した場合の解析結果を示したものである。これらの図を比較すると、コンクリート基礎杭先端から反射した波動の到達時刻（ $2667\mu\text{s}$ ）までは、コンクリート基礎杭先端の境界条件の影響を全く受けていないが、コンクリート基礎杭先端から反射してきた波動の速度成分の正負記号は、境界条件によって相違しているのがわかる。また、

図-3.5および図-3.6は、それぞれ $\ell/d=30$ および15の結果を示したもので、これらの図によれば、 $\ell/d$ の違いによる波形の変化は認められない。これは、本解析手法では杭径方向の影響を考慮することができないためである。

一方、杭長が9mで、杭径(d)がそれぞれ300mmの定径杭および杭頭径300mmで杭先端径350mmの拡径杭の弾性波動伝播特性を示した図-3.5および図-3.7によれば、いずれの場合も $4667\mu s$ の近傍で反射波が確認できる。この時間を波動の伝播速度( $V=4000\text{m/s}$ )を用いて距離に換算すると9mとなり、解析モデルの長さとも一致している。また、拡径杭の場合(図-3.7)には、 $4317\mu s$ の近傍でも反射波が認められるが、この時間を距離に換算すると8.3mとなり、断面が拡大している位置に相当している。なお、 $4317\mu s$ の位置で観察される反射波は、他の反射波と比較して正負逆転しているが、これはコンクリート基礎杭の断面が増大しているため、弾性波の反射率(R)がインピーダンス比( $Z_i/Z_{i-1}$ 、ここに $Z_i=A_i \cdot E_i/v_i$ であるが、本解析モデルでは $E_i$ と $v_i$ をコンクリート基礎杭内部で一定と仮定しているため、断面積比( $A_i/A_{i-1}$ )に等しい) = 1を境にして正負逆転するからである。

また、杭径(d)が300mm、杭長( $\ell$ )が7mの定径杭で欠損率50%に設定した欠損杭の場合を示した図-3.10によれば、杭先端からの反射波( $3584\mu s$ )以外にも $2584\mu s$ および $2609\mu s$ の近傍で反射波が観察される。これらの時間を距離に換算すると、それぞれ5mおよび5.05mとなり、解析モデルの欠損の始点および終点の位置に一致している。これと同様のことが、図-3.9に示した欠損率25%の場合にも認められるが、欠損率が100%の場合(図-3.11)には、欠損の始点位置が杭先端位置として検出されている。

## 2) コンクリート基礎杭の形状推定

図-3.12(a)~(d)は、前掲の図-3.3~図-3.11の解析結果と3.2節で示した方法を用いてコンクリート基礎杭の形状推定を行った結果の一例を示したものである。これらの図によれば、減衰係数が同じであれば杭先端の境界条件にかかわらずコンクリート基礎杭の形状推定結果は同じ結果となっていることがわかる。また、波動の減衰を無視した場合(図の(a)および(c))には、解析モデルの形状と推定結果の形状は全く同じであり、全体的な断面推定精度は極めて優れているといえる。これに対して、波動の減衰を考慮した場合(図の(b)および(d))には、コンクリート基礎杭断面の変化位置および減衰を無視した場合に観察された位置以外にも杭の断面変化があると推定された点が認められるが、これは波動の減衰によって生じたアンダースhoot現象によるものと思われる。したがって、断面の推定精度は、減衰が無い場合に比べて幾分悪くなっている。なお、図には示していないが、定径杭、拡径杭および欠損杭のいずれの場合にも同様の結果が得られた。また、欠損杭に対する推定結果を示した図-3.13~図-3.15によれば、欠損率が

大きくなるに従って欠損深さが深くなっているのがわかる。ただし、欠損率が100%の場合には、欠損の始点位置より先の形状は推定できていない。

## (2) 2次元有限要素法解析結果

### 1) 解析結果に及ぼす弾性波入力位置と検出位置の影響

図-3.16は、波動伝播解析結果に及ぼす検出位置の影響を示したもので、図(a)が弾性波入力位置と検出位置の角度を $90^\circ$ 、図(b)が $180^\circ$ とした場合の結果である。これらの図によれば、いずれの場合も杭先端位置からの反射波が明確に認められるが、図(b)においては、検出波の初動方向が負となっており、また入力波と杭先端からの反射波が到達するまでの間に杭先端からの反射波以外の別の成分をもつ波形も検出されている。これは、杭の曲げ振動による成分であるものと考えられる。したがって、弾性波入力位置と検出位置の角度を $90^\circ$ とした場合の方が曲げ振動の影響を受け難く、最も単純な波形が得られることがわかる。

### 2) 反射波の検出および杭長の評価性能

図-3.17(a)~(d)は、本解析によって得られた波動伝播状況の変位ベクトル図を $\ell/d$  (杭長/杭径) 別に示したものである。これらの図より、 $\ell/d=9$ および15のように太くて短い杭の場合には、杭の横方向つまり径方向に広がる波動の方が軸方向に伝播する波動よりも大きくなっており、 $\ell/d=17$ および30のように細長い杭の場合に比べて、波動の径方向の伝播の影響を受けやすいことがわかる。

図-3.18~図-3.28は、速度応答履歴を解析モデル別に示したものである。図-3.18および図-3.19は、杭長が5mの定径杭で、杭径がそれぞれ300mmおよび600mmの場合の結果である。これらの図によれば、いずれの場合も $2540\mu\text{s}$ の位置で反射波が検出されているが、この時間が杭長に相当しているものと仮定すると、伝播速度は約4000m/sとなり、仮定した伝播速度と一致する。また、図-3.20および図-3.21は、どちらも長さが9mの定径杭の結果を示したものであるが、いずれの場合も $4508\mu\text{s}$ で反射波が確認され、この時間を用いて伝播速度を算定すると約4000m/sとなる。ところで、図-3.18~図-3.21を相互に比較してみると、 $\ell/d=9$ および15のように太くて短い杭の場合には、検出波の初動方向が負値を取っており、検出波は波動の径方向の伝播の影響を受けていることがわかる。また、杭先端からの反射波は、太くて短い杭の方が検出し難くなる傾向を示している。なお、これらの傾向は、図-3.26~図-3.29の拡径杭の場合についても同様に認められる。

図-3.22および図-3.23は、長さが5m、杭頭径がそれぞれ300mmおよび500mmで杭先端径が350mmおよび600mmの拡径杭の速度応答履歴を示したものである。これらの図によれば、いずれの場合も杭先端に相当する $2500\mu\text{s}$ の位置で反射波が検出されているのが読み

取れる。また、断面が拡大している部分からと思われる $2115\mu\text{s}$ および $1900\mu\text{s}$ 位置で反射波が認められるが、太い径の杭の場合（図-3.23）には、反射波は認められるものの検出し難くなっている。これらの傾向は、長さが9mの場合の結果を示した図-3.24および図-3.25においても同様に認められる。

図-3.26～図-3.28は、欠損杭で欠損率がそれぞれ25、50および100%の結果を示したものである。ただし、欠損の始点および終点位置は、杭頭から5mおよび5.05mで、杭長は7mである。このことを踏まえて図をみると、欠損率が50%の場合には、欠損の始点および終点位置である $2500\mu\text{s}$ および $2525\mu\text{s}$ の近傍（ $2459\mu\text{s}$ および $2663\mu\text{s}$ ）で欠損部からの反射波が確認できるが、欠損率が25%の場合には、杭先端位置に相当する約 $3510\mu\text{s}$ で反射波が認められるだけで、欠損位置を検出するのが困難となっている。一方、欠損率が100%の杭については、欠損の始点からの反射波は明瞭に検出できているが、杭先端からの反射波を検出することは不可能となっている。

これらのことから、欠損率が小さくなるほど欠損部からの反射波の検出は困難となるが、欠損位置を予測することは可能であること、欠損率が50～100%であれば欠損の確認が容易であることがわかる。

### 3. 4 モデル実験による形状推定方法の確認

前節では、コンクリート基礎杭の形状推定を目的とした衝撃弾性波法の可能性を解析的に検討し、いくつかの有用な知見を得た。本節では、コンクリート基礎杭を鉄筋、地盤をコンクリートに置換したモデル試験体を用いて、衝撃弾性波法の適用性を実験的に検討した。

#### 3.4.1 実験方法

##### (1) 実験の概要

本実験では、目的に応じて以下に示す3シリーズの実験を行った。

##### 1) 実験-I

本実験は、検出波形に及ぼす鉄筋の種類および推定可能な鉄筋長さの限界を調べることを目的としたもので、実験要因として鉄筋の種類（ $\phi 22$ 丸鋼およびD22異形棒鋼の2種類）および鉄筋長さ（50cm、100cm、200cmおよび400cmの4種類）を取り上げた。本実験の概要を表-3.3(a)に示す。

## 2) 実験－Ⅱ

本実験は、鉄筋の断面欠損の推定精度を調べることを目的としたもので、実験要因として試験体の種類（鉄筋のみの場合、鉄筋の周りにコンクリートがある場合およびコンクリートが剥落している場合の3種類）、鉄筋の種類（ $\phi 22$ 丸鋼およびD22異形棒鋼の2種類、ただし長さは100cmのみ）、鉄筋断面の欠損深さ（ $\Delta d = 0, 2$ および8mmの3種類）、欠損長さ（ $l = 10$ および20cmの2種類）および欠損の数（無し、1箇所欠損および2箇所欠損の3種類）を取り上げた。なお、本実験で用いたコンクリートのかぶり厚さは4cmとした。本実験の概要を表－3.3(b)に示す。

## 3) 実験－Ⅲ

本実験は、鉄筋をとりまく媒体の種類やかぶり厚さなどの影響を調べることを目的としたもので、実験要因として鉄筋断面の欠損深さ（ $\Delta d = 0, 2$ および8mmの3種類）、欠損長さ（ $l = 0$ および20cmの2種類）、欠損の数（無しおよび1箇所欠損の2種類）、鉄筋をとりまく媒体の種類（コンクリート、水および砂の3種類）、並びに媒体のかぶり厚さ（ $D = 2, 4$ および10cmの3種類）を取り上げた。なお、媒体がコンクリートの場合には、コンクリート打設前、打設の直後、0.5、1、2、3、4、5、8および24時間、3、7および28日の時点で計測を行い、計測結果に及ぼすコンクリート打設後の経過時間の影響についても調査した。なお、本実験で用いた鉄筋はD22異形棒鋼、長さは100cmとした。本実験の概要を表－3.3(c)に示す。

### (2) 試験体の製作および養生方法

本実験で用いた試験体の例を図－3.29に示す。コンクリートの製作に際しては、実験－ⅠおよびⅡの場合が、普通ポルトランドセメント、猿投山産の山砂（最大寸法＝5mm、表乾比重＝2.56）および猿投山産の山砂利（最大寸法＝10mm、表乾比重＝2.60）、実験－Ⅲの場合が、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂（最大寸法＝5mm、表乾比重＝2.60）および天竜川産の川砂利（最大寸法＝20mm、表乾比重＝2.65）をそれぞれ用いた。コンクリートの調合は、水セメント比（W/C）を0.6、設計スランプを18cmに設定して試し練りによって決定した。実験－ⅠおよびⅡで用いたコンクリートの調合表を表－3.4(a)に、実験－Ⅲで用いたコンクリートの調合表を表－3.4(b)に示す。試験材齢は、実験－ⅠおよびⅡが約2ヶ月、実験－Ⅲは前掲の表－3.3(c)に示す各材齢とした。

## 3.4.2 計測・処理方法

本実験で用いた計測システムのブロックダイアグラムを図－3.30に示す。計測に際しては、まず直径が0.5mmで硬さがHBのシャープペンシルの芯を圧折することによって発生させた衝撃弾性波を鉄筋端面から入力し、伝播弾性波を検出用の超小型圧電型加速度ピッ

クアップ（PV-90B型）で検出した。なお、加速度ピックアップは、ピックアップ接着用ワックス（YJ-0216型）を用いて鉄筋断面中央に直接接着した。検出された弾性波は、チャージアンプ（6D07型）で増幅した後、一旦オートデジタイザー（サンプリング間隔および個数：鉄筋長さに応じて1、2、3または4 $\mu$ sおよび1024個/1データ、分解能：12bit）に記憶させ、その後にGP-IBインターフェースを介して計算機に転送して各種の波形処理を行った。計測は、実験-IおよびIIについては、原則として同一試験体に対して繰返し10回（ただし、一部の試験体については、処理結果に及ぼす測定回数の影響を調べるために、60回の繰返し計測を行った）、実験-IIIについては、原則として同一試験体に対して繰返し15回行った。

### 3.4.3 実験結果とその考察

#### (1) 計測結果の信頼性（実験-II、III）

図-3.31は、計測結果の周波数特性の一例を示したもので、各図の(a)および(b)は、それぞれ10回の計測によって得られたコヒーレンス関数および周波数伝達関数の振幅スペクトルの一例を示したものである。これらの図によれば、コヒーレンス関数値は、約150kHz以下の周波数領域においてほぼ1に近い値を示しているが、それ以上の周波数域になると著しく低下する傾向を示している。したがって、計測結果は、150kHz以上の周波数域では信頼性が低いものと考えられる。

#### (2) 計測結果に及ぼす鉄筋種類の影響（実験-I）

図-3.32(a)および(b)は、それぞれ長さが400cmの丸鋼と異形棒鋼で得られた生の加速度波形データの一例を示したものである。これらの図によれば、鉄筋長が400cmであっても鉄筋終点位置からの反射波が明確に検出されているのがわかる。ただし、丸鋼の場合の検出波形は、弾性波入力後急激に減衰しているが、異形棒鋼の場合は、鉄筋表面の規則的な凹凸のためか、丸鋼の場合ほどの減衰を示していない。しかし、図-3.33に示すように、繰返し行った計測の結果の平均値で検出波形を評価すると、2~3回の計測値の平均化によって異形棒鋼で得られる検出波形も丸鋼の結果とほぼ同じとなり、検出波形に及ぼす鉄筋表面の凹凸の影響を低減できることがわかる。

#### (3) 鉄筋の長さおよび断面欠損位置の推定精度（実験-II）

図-3.34(a)および(b)は、鉄筋断面の欠損部が存在していない試験体によって得られた自己相関関数を示したもので、図(a)が鉄筋のみの結果、図(b)がかぶりコンクリートがある場合の結果である。これらの図によれば、鉄筋のみの場合には約396 $\mu$ sの時間差で、かぶりコンクリートがある場合には約357 $\mu$ sの時間差でかなり有意な正の相関が認められる。なお、本研究では、有意な相関を示す時間差の特定のために絶対値で評価した自己

相関関数の包絡近似曲線を使用し、そのピーク点を有意な時間差とみなした。いま、これらの時間差が鉄筋長さに相当しているものと仮定すると、かぶりコンクリートがある場合の伝播速度は5602m/sとなり、鉄筋のみの場合(5051m/s)に比べて約10%速くなっている。これは、かぶりコンクリートがある場合には、無限媒体とまではいえないが、少なくとも伝播媒体を細長い棒と仮定できなくなるためと思われる。

図-3.35(a)および(b)は、鉄筋断面の欠損深さ( $\Delta d$ )が8mmの試験体によって得られた自己相関関数を示したもので、図(a)が鉄筋のみの結果、図(b)がかぶりコンクリートが有る場合の結果である。これらの図によれば、鉄筋のみの場合には、約118 $\mu$ sの時間差( $\Delta t$ )と約396 $\mu$ sの時間差においてかなり有意な正の相関のあることがわかる。この時間差118 $\mu$ sおよび396 $\mu$ sは、上記の鉄筋中を伝播する弾性波の伝播速度(5051m/s)を用いて距離に換算すると、それぞれ約30cmおよび約100cmとなり、鉄筋断面の欠損部の始点位置および鉄筋長さそれぞれ合致している。また、この試験体の鉄筋断面の欠損終点位置は50cmであり、これを時間に換算すると198 $\mu$ sとなる。図によれば、それほど卓越はしていないものの、この時間差の位置で負の相関が認められる。一方、かぶりコンクリートが有る場合には、約357 $\mu$ sの時間差においてかなり有意な正の相関のあることがわかる。この時間差357 $\mu$ sは、上記の鉄筋中を伝播する弾性波の伝播速度(5602m/s)を用いて距離に換算すると約100cmとなり、鉄筋長さ合致している。また、この試験体の鉄筋断面の欠損始点位置および終点位置は30cmおよび50cmであり、これを時間に換算すると107 $\mu$ sおよび178 $\mu$ sとなる。図によれば、それほど卓越はしていないものの、この時間差の位置で正および負の相関が認められる。

図-3.36は、コンクリートの剥落長さ( $l$ )が20cmの剥落モデル試験体によって得られた自己相関関数を示したものである。この図によれば、約126 $\mu$ sの時間差と約392 $\mu$ sの時間差において有意な正の相関が認められるが、これらの時間差をこの試験体に対して求めた鉄筋中を伝播する弾性波の伝播速度(5102m/s)を用いて距離に換算すると、それぞれ約30cmおよび約100cmとなり、コンクリートの剥落の始点位置および鉄筋長さそれぞれ合致している。また、この試験体のコンクリート剥落終点位置は50cmで、これを時間に換算すると196 $\mu$ sとなるが、図によれば、若干ずれた208 $\mu$ sの位置で負の相関が認められる。

以上のことから、自己相関関数における相関の有意性を調べることによって、埋設鉄筋の長さおよび断面欠損位置を評価することが可能であるといえるが、波動の伝播速度が埋設鉄筋の形状・寸法や埋設条件などによって変動することは、結果の評価に際して注意が必要といえよう。

#### (4) 計測結果に及ぼす断面欠損深さの影響(実験-III)

図-3.37(a)および(b)は、それぞれ鉄筋断面の欠損深さ( $\Delta d$ )が2mmおよび8mmで欠損の数が1箇所の鉄筋を空中につるした試験体で得られた生の加速度波形データの一例を示したものである。これらの図によれば、いずれの場合も鉄筋終端、欠損の始点および終点位置からの反射波は検出できるが、欠損深さが8mmの試験体の方が反射波が明確であり、欠損が深いほど反射波の検出が容易であることがわかる。

#### (5) 計測結果に及ぼす媒体種類の影響 (実験-III)

図-3.38および図-3.39は、それぞれ欠損が無い場合および欠損が1箇所の場合の鉄筋を空中につるした試験体によって得られた結果を示したもので、図(a)が検出加速度波形データの一例、図(b)がその自己相関関数を示したものである。これらの図によれば、欠損の有無にかかわらず検出加速度波形データから打撃波および鉄筋終端からの反射波の検出は可能であるが、自己相関関数を用いると鉄筋断面の欠損の始点および終点位置からの反射波も検出可能であることがわかる。すなわち、欠損の有無にかかわらず約 $396\mu s$ の時間差( $\Delta t$ )でかなり有意な正の相関が認められるが、この時間差 $396\mu s$ は、鉄筋中を伝播する弾性波の伝播速度(約 $5051m/s$ )を用いて距離に換算すると $100cm$ となり、鉄筋長さとは合致する。また、1箇所欠損の場合には、約 $122\mu s$ および約 $195\mu s$ の時間差でそれぞれ有意な正の相関および負の相関が認められるが、これらの時間差を距離に換算すると、それぞれ鉄筋断面の欠損始点位置および終点位置とほぼ合致している。

図-3.40~図-3.42は、鉄筋断面が健全なモデル試験体によって得られた結果を媒体の種類別に示したもので、図(a)が検出加速度波形データの一例、図(b)がその自己相関関数を示したものである。これらの図によれば、媒体が水および砂の場合には、鉄筋終端からの反射波が明確に検出され、鉄筋終端位置に相当する時間差(約 $396\mu s$ )で有意な正の相関が認められる。一方、媒体が硬化コンクリート(打設後7日)の場合には、約 $357\mu s$ の時間差で有意な正の相関が認められるが、この時間差が鉄筋長さとは相当しているものと仮定すると伝播速度は $5602m/s$ となり、媒体が無い場合、水および砂の場合(約 $5051m/s$ )に比べて約10%速くなっている。これは、前述したように、コンクリートが硬化すると、無限媒体とまではいえませんが、少なくとも伝播媒体を細長い棒と仮定できなくなるためと思われる。

#### (6) 計測結果に及ぼすコンクリート打設後の経過時間およびかぶり厚さの影響

##### (実験-III)

図-3.43~図-3.45は、それぞれコンクリートのかぶり厚さが2、4および $10cm$ の断面健全モデル試験体によって得られた検出波形とその自己相関関数の経時変化を示したものである。これらの図を比較すると、いずれの場合もコンクリート打設後1時間の範囲では鉄筋終端からの反射波到達時間は約 $396\mu s$ となっているが、コンクリート打設後の時

間がそれ以上経過すると、鉄筋終端からの反射波の到達時間は、経過時間およびかぶりコンクリートの厚さによってかなり相違することがわかる。すなわち、コンクリートのかぶり厚さが2cmの試験体では、コンクリートの硬化が進展するとともに弾性波の減衰が著しくなるため、鉄筋終端からの反射波到達時間は、見掛け上5時間経過後が420 $\mu$ s、24時間経過後が426 $\mu$ s というように次第に遅くなっているが、かぶり厚さが4および10cmの試験体の場合には、上述のように伝播媒体を細長い棒と仮定できなくなる効果の方が卓越するためか、かぶり厚さが4cmの場合には5時間経過後が370 $\mu$ s、24時間経過後が367 $\mu$ s、かぶり厚さが10cmの場合には5時間経過後が376 $\mu$ s、24時間経過後が361 $\mu$ s、というように逆に速くなっていくのがわかる。なお、これらの反射波の到達時間を用いて弾性波の伝播速度を算定すると、コンクリートのかぶり厚さが2cmの場合、打設後1時間：5060m/s、打設後5時間：4760m/sおよび打設後24時間：4330m/s、かぶり厚さが4cmの場合、打設後1時間：5060m/s、打設後5時間：5410m/sおよび打設後24時間：5470m/s、かぶり厚さが10cmの場合、打設後1時間：5060m/s、打設後5時間：5320m/sおよび打設後24時間：5550m/sとなる。ただし、コンクリートがフレッシュの状態では、打撃波および鉄筋終端からの反射波は明確に検出できるが、コンクリートの硬化が進展するとともに、検出可能ではあるが鉄筋終端からの反射波がとらえ難くなる傾向を示している。また、コンクリート打設後24時間以上の時間が経過すると、検出波形はほぼ一定となっている。

#### (7) 鉄筋の形状推定結果（実験Ⅱ、実験Ⅲ）

図-3.46～図-3.53は、3.2節で示した手法を用いて行った内部鉄筋の断面推定の結果の例を示したものである。なお、内部鉄筋の断面推定に際しては、まず前処理を施した加速度データを数値積分によって速度データに変換した後、さらに得られた速度データを距離換算で5cmに相当する間隔のパルス列データに変換したものを解析用データとして用いた。以下、これらの図を用いて順次考察していくことにする。

図-3.46は、断面健全モデルの結果で、図(a)がモデル図、図(b)が鉄筋のみの場合、図(c)がかぶりコンクリートがある場合である。図によれば、鉄筋のみの場合には、モデル図と同様の結果が得られているが、かぶりコンクリートがある場合の推定結果は、若干の凹凸（モデルとの差は約15%程度）が見られる。

図-3.47は、断面欠損モデルの結果を示したものであるが、鉄筋の欠損位置の推定結果はモデル図と一致していることがわかる。なお、この場合でも、鉄筋のみの場合の方が推定精度はよくなっている。

図-3.48は、コンクリート剥落モデルの場合の結果である。図によれば、コンクリート剥落部の推定結果は、実際の区間（30～50cm）よりも5cm程度ずれた位置となっているが、衝撃弾性法によってコンクリート剥落部の推定も可能であることがわかる。

図-3.49(a)および(b)は、断面欠損モデルに対する推定結果を欠損深さ別に示したものである。これらの図によれば、推定精度は、いずれの場合も優れているが、一般的に欠損が深いほど多重反射の影響を受けているのが読み取れる。

図-3.50は、断面健全モデル試験体の結果を鉄筋をとりまく媒体の種類別に示したものである。これらの図によれば、媒体がコンクリートの場合を除けば、モデルの形状をかなりの精度で推定できていることがわかる。ただし、媒体がコンクリートの場合でもモデル形状との差は約15%程度である。

図-3.51~図-3.53は、形状推定結果に及ぼすコンクリート打設後の経過時間の影響をかぶり厚さ別に示したものである。これらの図によれば、打設後の時間が経過していくとともに、推定精度が悪くなっていくのがわかる。

以上のことから、鉄筋のみの試験体の場合には、多重反射波による影響は認められるものの、鉄筋断面の変化性状をかなりの精度で推定できること、かぶりコンクリートがある場合には、反射波が鉄筋のみの試験体の場合のようには明確にとらえられていないため、鉄筋断面の推定精度がやや悪くなること、鉄筋断面の欠損が深いものほど断面欠損位置が明確に推定できていること、鉄筋をとりまく媒体が砂および水の場合には、鉄筋断面の変化性状をかなりの精度で推定できるが、媒体がコンクリートの場合には、コンクリート打設後の時間が経過するに従って推定精度が悪くなること、などがいえる。

### 3. 5 実コンクリート基礎杭への適用性の確認

前節では、衝撃弾性波法の適用性をモデル試験体を用いて実験的に検討したが、本節では、機械的方法によって発生させた衝撃弾性波の伝播特性を利用したコンクリート基礎杭の形状推定方法の適用性・可能性を実際のコンクリート基礎杭を用いて実験的に検討した。

#### 3.5.1 実験方法

実験の概要を表-3.5に示す。本研究では、実験要因として杭の設置状況(空中横置き杭、盛土杭およびアトラス工法による打設杭の3種類)、杭の種類(定径杭、欠損杭および拡径杭の3種類)、杭長( $l=5, 7$ および $9\text{m}$ の3種類)、杭径( $d=30, 50$ および $60\text{cm}$ の3種類、ただし拡径杭については、杭頭の径( $d_1$ )が $30\text{cm}$ で杭先端の径( $d_2$ )が $35\text{cm}$ の拡径杭および $d_1=50\text{cm}$ で $d_2=60\text{cm}$ の拡径杭の2種類)、欠損率(0、25、50および100%の4種類)、欠損幅(0および $5\text{cm}$ の2種類)、変換子の設置位置と打撃位置との角度( $90$ および $180^\circ$ の2種

類)、並びに計測時刻(杭の盛土または打設の直前、直後、1、3、5、8および24時間経過後の7種類)を取り上げた。試験体の一例を図-3.54に示す。

### 3.5.2 計測・処理方法

本実験で用いた計測システムのブロックダイアグラムを図-3.55に示す。計測・処理の手順は、3.4節で示した実験とほぼ同様であるが、本計測では衝撃弾性波の入力にハンマーを用いた。また、計測は、原則として同一試験体に対して繰返し5回行い、計測波形の集合平均化処理を施して雑音の影響を極力低減させるよう工夫した。

### 3.5.3 実験結果とその考察

#### (1) 計測結果に及ぼす打撃点と変換子の設置位置の影響

図-3.56は、計測された生の加速度波形データに及ぼす変換子の設置位置の影響を示したもので、図(a)が打撃点と変換子位置との角度が $90^\circ$ 、図(b)が $180^\circ$ とした場合の結果である。これらの図によれば、どちらの場合も打撃波と杭先端からの反射波が明瞭に検出されているが、図(b)においては、打撃波と杭先端からの反射波以外に別の成分を持つ波形も検出されている。これは、3.3節で述べたように、杭の曲げ振動による成分であり、この場合には平面波による縦波と曲げ振動による波とが混在するため、後の波形処理が複雑になることが予想される。したがって、設置角度を $90^\circ$ とした場合が曲げ振動の影響を受け難く、最も単純な波形が得られるため、解析に適しているといえる。

#### (2) 反射波の検出性能および検出波形の経時変化

##### 1) 空中横置き杭

図-3.57および図-3.58は、それぞれ杭長が9mで杭径(d)に対する杭長( $\ell$ )の割合を30とした場合および $\ell/d=15$ とした場合の定径杭によって得られた結果を示したもので、図(a)が検出加速度波形データの一例、図(b)がその自己相関関数を示したものである。また、図-3.59および図-3.60は、それぞれ杭長が5mで $\ell/d$ を17および8とした場合の定径杭によって得られた結果を示したものである。これらの図によれば、 $\ell/d$ が30および17の場合には、打撃波および杭先端からの反射波がともに検出可能であり、約 $4217\mu\text{s}$ および約 $2355\mu\text{s}$ の時間差( $\Delta t$ )でかなり有意な正の相関が認められる。これらの時間差 $4217\mu\text{s}$ および $2355\mu\text{s}$ は、コンクリート中を伝播する弾性波の伝播速度( $4246\text{m/s}$ )を用いて距離に換算すると9mおよび5mとなり、それぞれの杭長と合致する。一方、 $\ell/d$ が15および8の場合には、反射波よりも杭頭表面を伝播する表面波の影響の方が卓越するためか、打撃波は確認できるものの杭先端からの反射波は確認するのが困難となっ

ている。以上のことから、杭長に対して杭径が大きい太短い杭よりも細長い杭の方が杭先端からの反射波の検出が容易といえる。図-3.61～図-3.63は、杭径が30cmで杭長が7m、欠損率がそれぞれ25、50および100%の欠損杭によって得られた結果を示したものである。これらの図によれば、欠損率が25%および50%の杭では、杭先端位置に相当する時間差（25%の場合：3157 $\mu$ s、50%の場合：3223 $\mu$ s）で有意な正の相関は認められるが、欠損位置に相当する時間差（25%の場合の欠損の始点：2255 $\mu$ s、欠損の終点：2277 $\mu$ s、50%の場合の欠損の始点：2302 $\mu$ s、欠損の終点：2325 $\mu$ s）では有意な相関は認められず、若干ずれた時間差（25%の場合は2157 $\mu$ sおよび2315 $\mu$ s、50%の場合は2236 $\mu$ sおよび2328 $\mu$ s）の所で有意な正と負の相関を示す箇所のあることがわかる。なお、この正と負の有意な相関を示す時間差の区間内に欠損部分の実際の始点位置と終点位置が存在している。また、欠損率が100%の場合には、欠損の始点位置に相当する時間差（2210 $\mu$ s）で有意な正の相関は認められるが、杭先端位置に相当する時間差（3135 $\mu$ s）では有意な相関は認められない。これは、欠損率が100%であると、欠損始点位置までが杭の長さとしてされるためである。図-3.64および図-3.65は、杭長が9mの拡径杭によって得られた結果である。これらの図によれば、どちらの場合にも約4127 $\mu$ sの時間差で有意な正の相関が認められるが、この時間差を距離に換算すると9.1mとなり、杭長とほぼ合致する。また、図-3.64の場合には、約3935 $\mu$ sの時間差で、図-3.65の場合には、約3498 $\mu$ sの時間差で有意な負の相関が認められるが、これらの時間差は杭断面が増大している箇所から反射してきた波の到達時間（4019 $\mu$ sおよび3777 $\mu$ s）とほぼ一致している。

## 2) 盛土杭

図-3.66および図-3.67は、それぞれ杭長( $l$ )が9mで $l/d$ が30および15の定径杭によって得られた検出波形の経時変化を示したものである。また、図-3.68および図-3.69は、それぞれ杭長が5mで $l/d$ が17および8の定径杭によって得られた検出波形の経時変化を示したものである。これらの図によれば、 $l/d$ が30および17の場合には、盛土後8時間までは打撃波および杭先端からの反射波がともに検出可能であるが、 $l/d$ が15および8の場合には、杭先端からの反射波を確認するのが困難であることがわかる。図-3.70～図-3.72は、杭径が30cmで杭長が7m、欠損率がそれぞれ25、50および100%の欠損杭によって得られた検出波形を示したものである。これらの図によれば、欠損率が25%の場合には、盛土後8時間までの範囲では杭先端からの反射波が検出可能であるが、欠損位置からの反射波は、殆ど検出できないことがわかる。また、欠損率が50%の場合には、盛土後8時間までの範囲では欠損位置および杭先端からの反射波がかなり明確に検出できている。さらに、欠損率が100%の場合には、盛土後24時間が経過しても欠損の始点位置からの反射波は検出可能であるが、杭先端位置からの反射波は全く検出でき

ていない。なお、盛土後24時間経過すると、杭先端からの反射波の出現方向が逆転しているが、これは杭先端の境界条件が自由端とは認められなくなったためと思われる。図-3.73および図-3.74は、杭長が9 mの拡径杭によって得られた結果を杭径別に示したものである。これらの図によれば、杭径の小さい場合（図-3.73）には、盛土後24時間が経過しても杭先端位置および杭断面が増大している位置からの反射波が検出可能であるが、杭径が大きい場合（図-3.74）には、盛土後24時間経過すると杭の断面が増大している位置からの反射波の検出が困難となっていることがわかる。

### 3) 打設杭

図-3.75は、杭径が30cmで杭長が7 mの定径杭によって得られた検出波形の経時変化を示したものである。図によれば、打設後3時間までの範囲では杭先端からの反射波がかなり明確に検出できているが、それ以上時間が経過すると、杭先端からの反射波の検出は難しくなっている。図-3.76～図-3.78は、杭径が30cmで杭長が7 m、欠損率がそれぞれ25、50および100%の欠損杭によって得られた結果を示したものである。これらの図から明らかのように、欠損率が25%の場合には、打設直後までの範囲では、欠損位置および杭先端からの反射波がある程度検出できているが、打設後1時間経過すると杭先端からの反射波のみが検出可能となり、さらにそれ以上時間が経過すると反射波の検出は難しくなっている。また、欠損率が50%の場合には、打設後1時間までの範囲では、欠損位置および杭先端からの反射波がある程度検出できているが、打設後3～5時間の範囲では、欠損位置からの反射波のみが検出可能であり、さらにそれ以上の時間が経過すると、欠損位置および杭先端からの反射波とも検出が困難となっている。さらに、欠損率が100%の場合には、打設後5時間までの範囲では、杭先端位置からの反射波は検出できないものの、欠損始点位置からの反射波は明確に検出できている。ただし、それ以上時間が経過すると、いずれの位置からの反射波も検出できなくなっている。

#### (3) コンクリート基礎杭の形状・寸法の推定結果

図-3.79～図-3.84は、それぞれ3.2節で示した手法を用いて行った空中横置き杭、盛土杭および打設杭の形状推定の結果の一例である。なお、コンクリート基礎杭の形状推定に際しては、3.4節の場合と同様、まず前処理を施した加速度データを数値積分によって速度データに変換した後、定径杭および拡径杭については、さらに得られた速度データを距離換算で杭長に対して20等分した距離に相当する間隔のパルス列データに変換したものを解析用データとして用いた。

これらの図によれば、杭長に比べて杭径が小さい細長い杭および盛土・打設後それほど時間が経過していない場合には、多重反射波による影響は認められるものの、杭断面の変化性状をかなりの精度で推定できているが、杭長に比べて杭径が大きい太短い杭および盛

土・打設後ある程度以上時間が経過した場合には、杭断面の推定精度が悪くなっているのがわかる。これは、弾性波の伝播特性に及ぼす杭周囲の土の影響が著しくなるためであり、今後弾性波の入力方法や検出波形の処理方法を含めて詳細に検討していく必要があるといえる。なお、本実験の範囲では、コンクリート基礎杭の形状推定誤差は約15~70%の範囲にあり、一般的に杭先端に近づくほど推定誤差が大きくなっている。また、欠損率が100%の欠損杭の場合には、欠損の始点位置までが形状推定の可能範囲となっているのがわかる。

### 3.6 まとめ

本章で得られた結果は、およそ次のようにまとめられる。

#### (1) 数値実験によって得られた結果

- 1) 減衰係数 ( $h$ ) が  $h = 1.0$  の場合、 $h = 0.0$  と設定した場合には認められないパルス入力直後に波形が負の方向に変移するアンダーシュート現象が観察され、減衰が大きくなるとともに反射波の波動速度 (波形の高さ) が小さくなり、反射波の検出が困難となる。
- 2) 鉄筋終端の境界条件が自由端か固定端かによって、杭先端から反射してきた弾性波の波動速度の値は正負逆転するが、その時点よりも前の弾性波動伝播特性については、杭先端の境界条件の影響を殆ど受けない。
- 3) 杭の断面欠損箇所から反射した弾性波の到達時間とその速度成分の振幅値とを用いることによって杭の断面推定をある程度正確に行うことができるが、推定精度を向上させるためには、多重反射の影響を考慮する必要がある。
- 4) 弾性波入力位置と検出位置の成す角度が  $90^\circ$  とした場合、また  $l/d = 17$  程度より大きい細長い杭の場合には、曲げ振動の影響を受け難く、最も単純な波形が得られる。
- 5) 細長い杭の方が太短かい杭よりも反射波の検出は容易であり、形状の推定精度も優れている。
- 6) 断面欠損の認識限度は、欠損率 50% 程度である。

#### (2) モデル実験によって得られた結果

- 1) 異形棒鋼の場合、検出波形は鉄筋表面の凹凸の影響をかなり受けるが、集合平均化処理を施すことによって、検出波形に及ぼす鉄筋表面の凹凸の影響を低減させることができる。
- 2) 鉄筋のみの試験体であれば、本手法を用いることによって、400cm以上の長さを有する鉄筋の形状推定が可能である。
- 3) 鉄筋断面の欠損深さが深いほど、欠損位置の推定精度は向上する。
- 4) 鉄筋をとりまく媒体が無い場合、水および砂の場合には、ほぼ同様の波形が検出され、鉄筋終端までの弾性波の伝播時間も同程度であるが、コンクリートの場合には、かぶり厚さが大きいほど、コンクリートの硬化が進展するほど弾性波伝播速度が速くなる。

### (3) 実コンクリート基礎杭の実験によって得られた結果

- 1) 打撃点と変換子位置の成す角度が $90^\circ$  の場合が曲げ振動の影響を受け難く、解析に適した最も単純な波形が得られる。
- 2) 盛土杭では、盛土後24時間経過すると土の影響が著しくなり、杭先端からの反射波がとらえ難くなる。また、打設杭では、打設後約3時間以上経過すると根固め液の影響が著しくなり、杭先端からの反射波がとらえ難くなる。換言すれば、検出波形の形状変化から根固め液の強度発現状況を推定することが可能である。
- 3) 杭長に比べて杭径が大きい太短い杭では、杭頭表面を伝播する波の影響が著しいため、杭の形状推定精度は、細長い杭の場合と比較して若干悪くなる。

以上の結果から、本研究で提案したコンクリート基礎杭の形状推定方法を用いることによって、地盤内部に埋設されている杭の形状推定をかなりの精度で行えることがわかった。ただし、推定精度を向上させるためには、検出波形に含まれている雑音の除去方法や波形処理方法などについて、更に検討を加える必要がある。

## 第3章 付表、付図

表-3.1 解析の概要

杭種類	杭径 d(mm)	杭長 ℓ (m)	欠損率 (%)
定径杭	300, 600	5, 9	/
拡径杭	3035, 5060	5, 9	
欠損杭	300	7	0, 25, 50, 100

表-3.2 力学特性 (2次元有限要素法解析)

媒体	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
杭	400000	0.18	2.40
空気	21	0.18	0.01

表-3.3 実験の概要

(a)実験-I

試験体種類	鉄筋長さ (cm)
鉄筋のみ	50, 100, 200, 400

(b)実験-II

試験体種類	鉄筋長さ (cm)	断面欠損深さ Δd (mm)	断面欠損長さ ℓ (cm)	断面欠損箇所
鉄筋のみ	100	0	0	0
かぶりコンクリートあり		2	20	1
コンクリート剥落		8		

(c)実験-III

断面欠損深さ Δd(cm)	断面欠損長さ ℓ (cm)	断面欠損箇所	媒体の種類	計測時間 (時間)	媒体のかぶり厚さ D(m)
0, 2, 8	0, 20	0, 1	コンクリート	±0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 24, 3日, 7日, 28日	2, 4, 10
			水砂	0	

表-3.4 調合表

(a)実験-I、実験-II

W/C (%)	標準調合 (kg/m <sup>3</sup> )			
	水	セメント	砂	砂利
60	185	308	888	845

(b)実験-III

W/C (%)	標準調合 (kg/m <sup>3</sup> )			
	水	セメント	砂	砂利
60	200	333	740	1060

表-3.5 実験の概要

杭設置方法	杭種類	杭長 ℓ (m)	杭径 d (cm)	欠損率 (%)	欠損幅 (cm)	時間 (h)	変換子と打撃位置の角度
空中横置き 盛土 打設	定径杭	5	30, 60	0, 25, 50, 100	0, 5	00, 0 <sub>3</sub>	90° 180°
	欠損杭	7	(30-35) <sub>1</sub>			1, 3, 5	
	拡底杭	9	(50-60) <sub>2</sub>			8, 24	

1), 2)は拡底杭の杭頭の杭径(d<sub>1</sub>)と杭終端杭径(d<sub>2</sub>)  
3)は空中(00)、盛土後すぐ(0)の時間

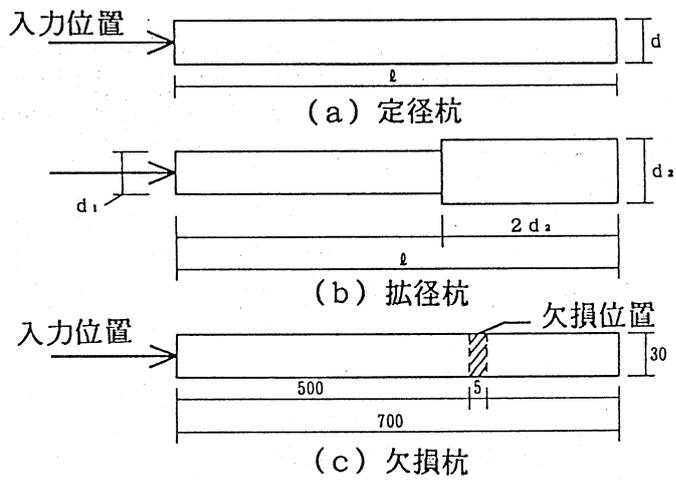


図-3.1 解析モデル (1次元弾性波動伝播解析)

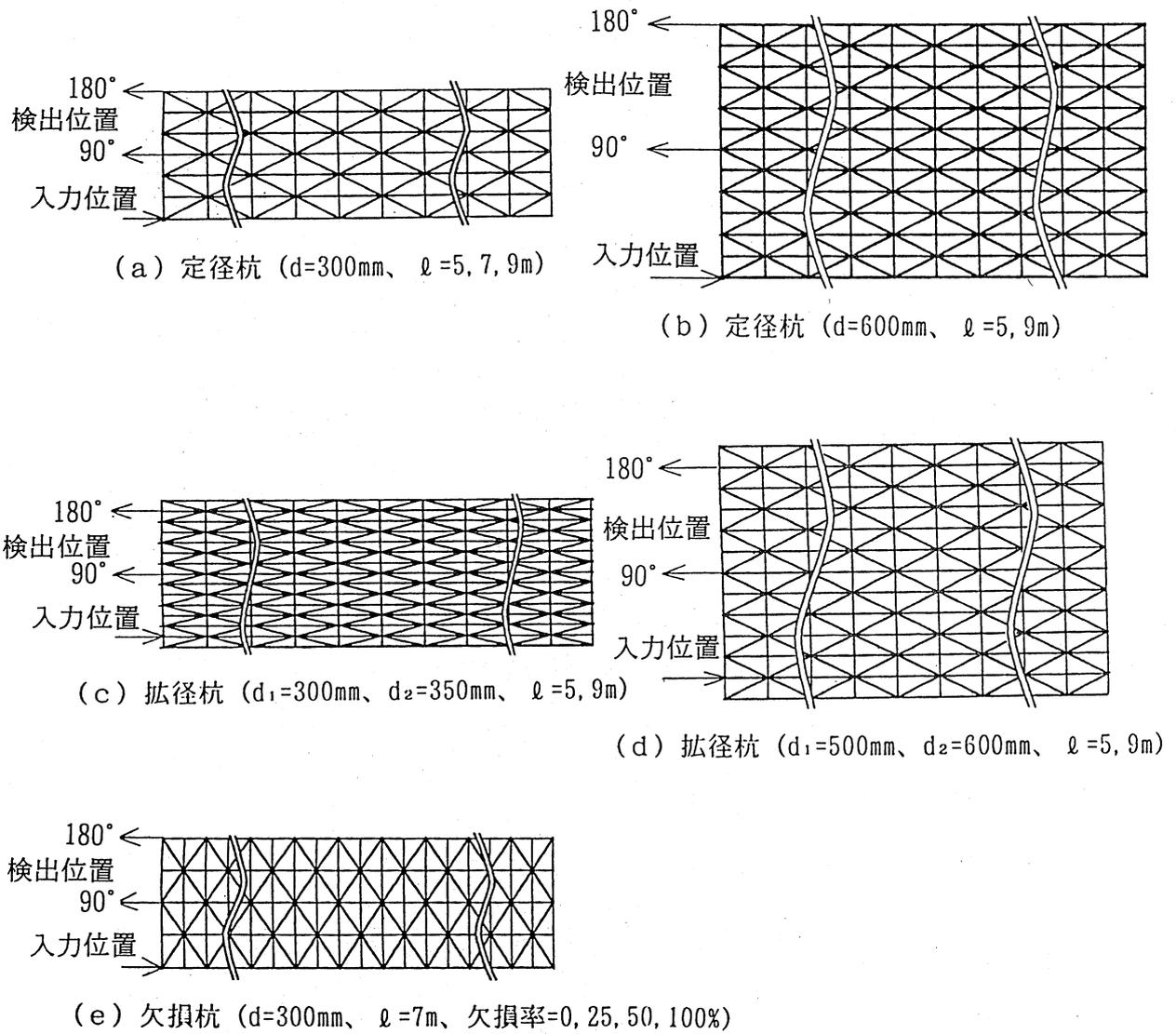
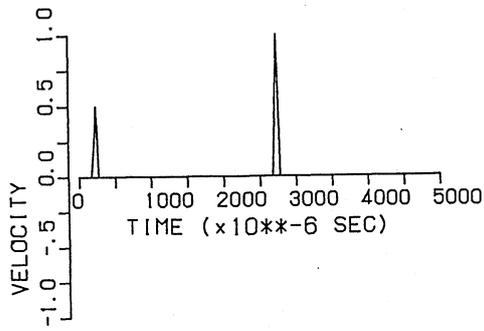
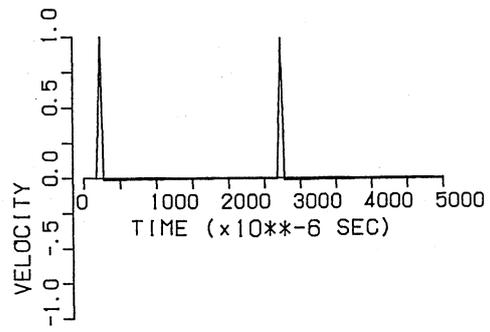


図-3.2 解析モデル (2次元有限要素法解析)

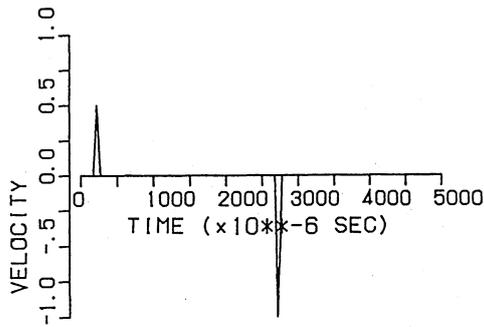


(a)  $h=0.0$ の場合

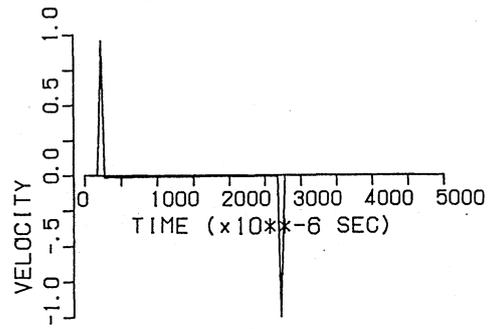


(b)  $h=1.0$ の場合

図-3.3 弾性波動伝播特性 (定径杭、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=5\text{m}$ 、終端：自由端)

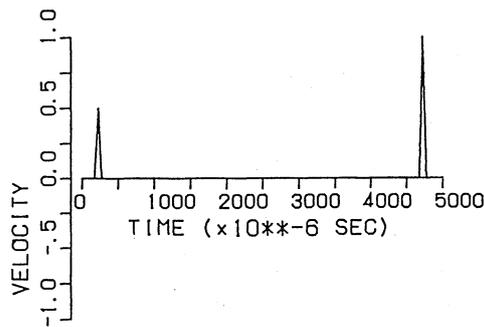


(a)  $h=0.0$ の場合

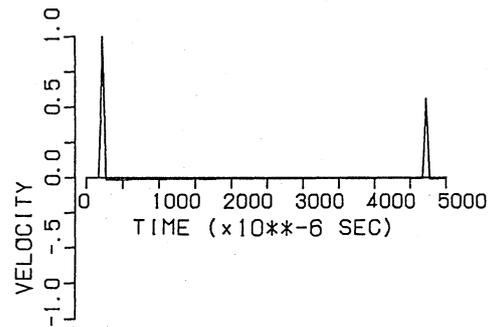


(b)  $h=1.0$ の場合

図-3.4 弾性波動伝播特性 (定径杭、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=5\text{m}$ 、終端：固定端)

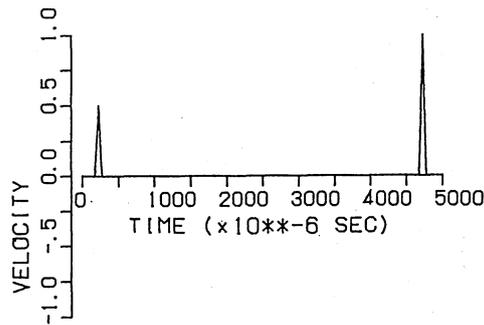


(a)  $h=0.0$ の場合

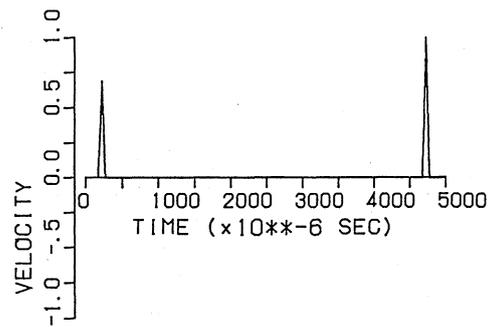


(b)  $h=1.0$ の場合

図-3.5 弾性波動伝播特性 (定径杭、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=9\text{m}$ 、終端：自由端)

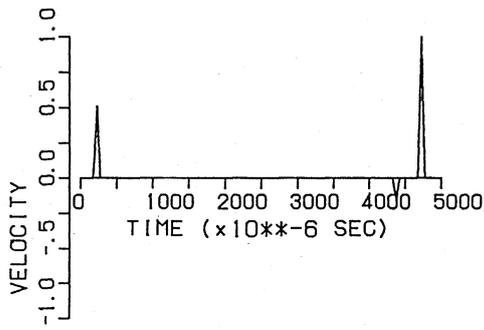


(a)  $h=0.0$ の場合

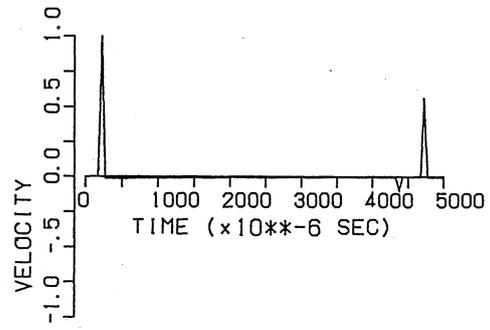


(b)  $h=1.0$ の場合

図-3.6 弾性波動伝播特性 (定径杭、 $d=600\text{mm}$ 、 $l=9\text{m}$ 、終端：自由端)

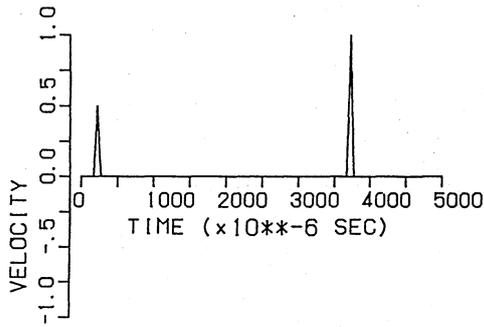


(a)  $h=0.0$ の場合

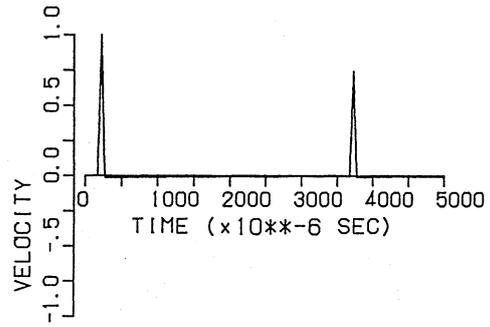


(b)  $h=1.0$ の場合

図-3.7 弾性波動伝播特性 (拡径杭、 $d_1=300\text{mm}$ 、 $d_2=350\text{mm}$ 、 $l=9\text{m}$ 、終端：自由端)

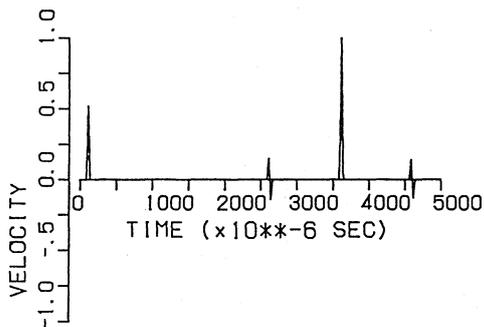


(a)  $h=0.0$ の場合

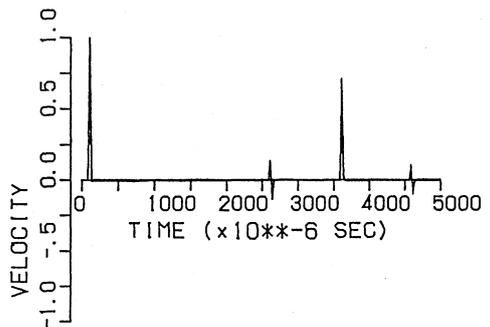


(b)  $h=1.0$ の場合

図-3.8 弾性波動伝播特性 (欠損杭、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=0%、終端：自由端)

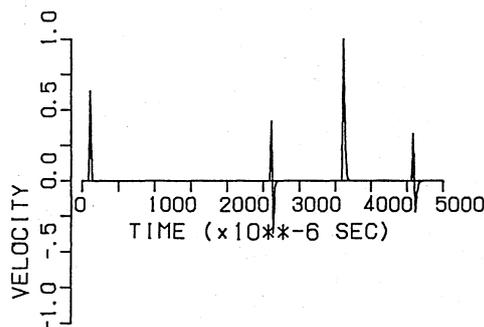


(a)  $h=0.0$ の場合

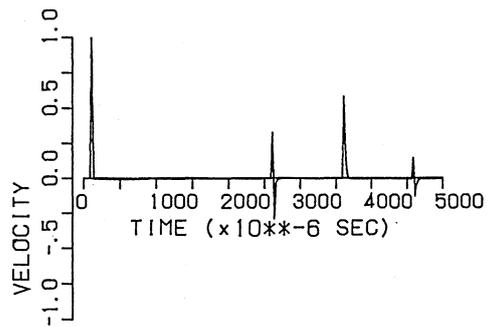


(b)  $h=1.0$ の場合

図-3.9 弾性波動伝播特性 (欠損杭、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=25%、終端：自由端)

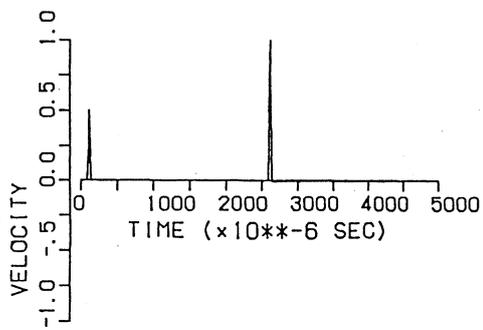


(a)  $h=0.0$ の場合

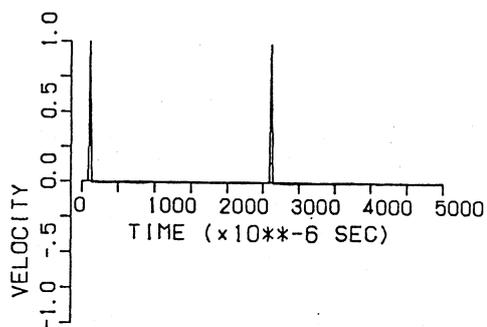


(b)  $h=1.0$ の場合

図-3.10 弾性波動伝播特性 (欠損杭、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=50%、終端：自由端)

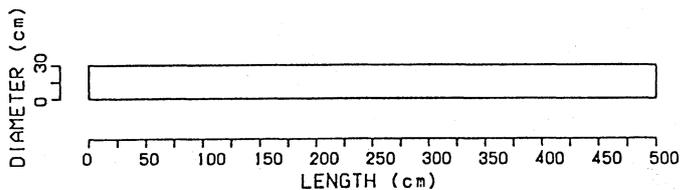


(a)  $h=0.0$ の場合

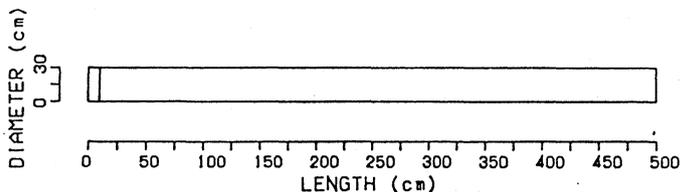


(b)  $h=1.0$ の場合

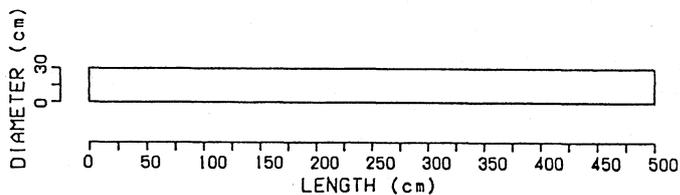
図-3.11 弾性波動伝播特性 (欠損杭、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=100%、終端：自由端)



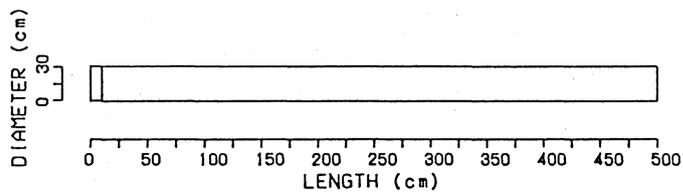
(a)  $h=0.0$ の場合 (終端：自由端)



(b)  $h=1.0$ の場合 (終端：自由端)

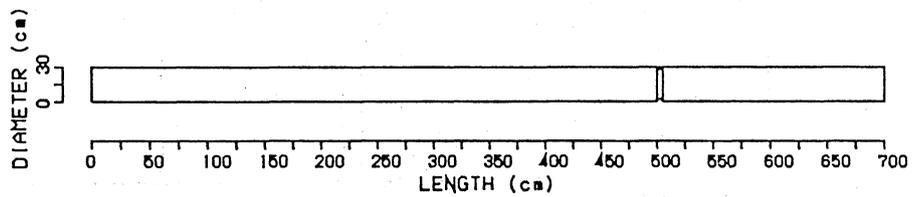


(c)  $h=0.0$ の場合 (終端：固定端)

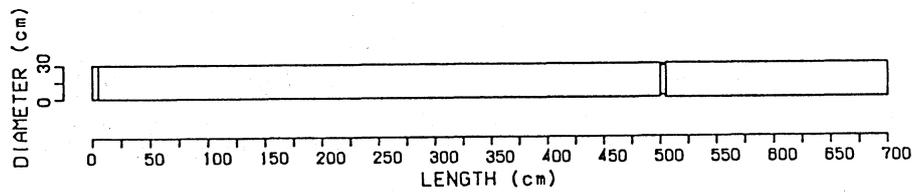


(d)  $h=1.0$ の場合 (終端：固定端)

図-3.12 コンクリート基礎杭の形状推定 (定径杭、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=5\text{m}$ )



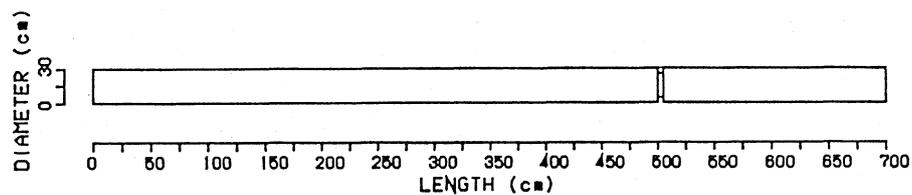
(a)  $h=0.0$ の場合



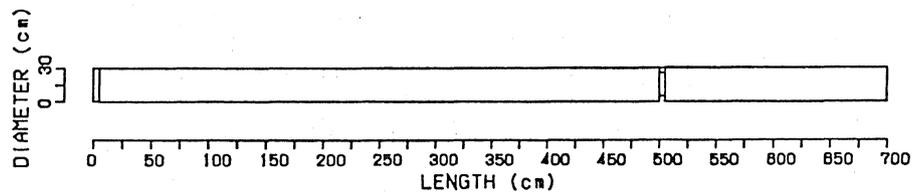
(b)  $h=1.0$ の場合

図-3.13 コンクリート基礎杭の形状推定

(欠損杭、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=25%、終端：自由端)



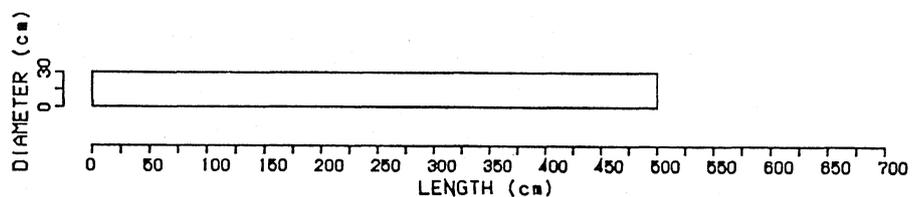
(a)  $h=0.0$ の場合



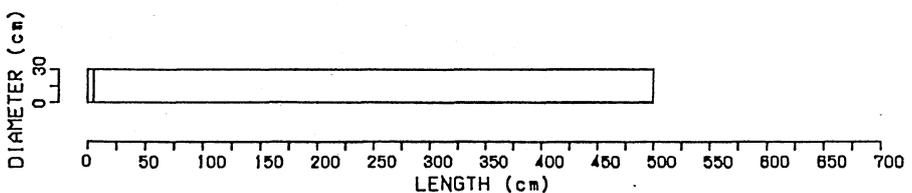
(b)  $h=1.0$ の場合

図-3.14 コンクリート基礎杭の形状推定

(欠損杭、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=50%、終端：自由端)



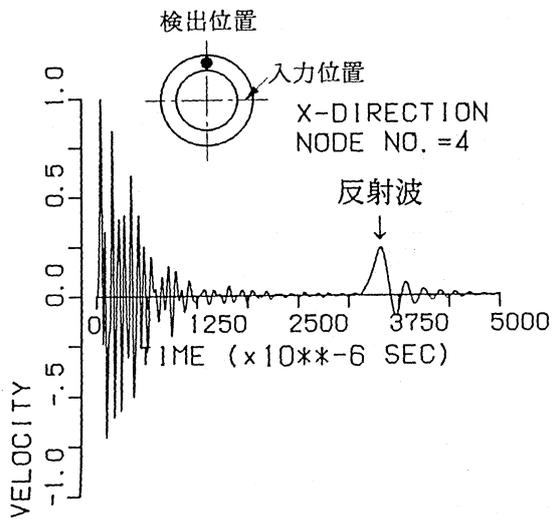
(a)  $h=0.0$ の場合



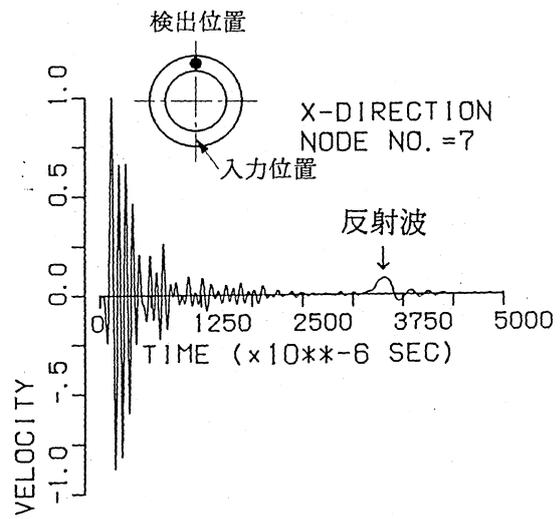
(b)  $h=1.0$ の場合

図-3.15 コンクリート基礎杭の形状推定

(欠損杭、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=100%、終端：自由端)

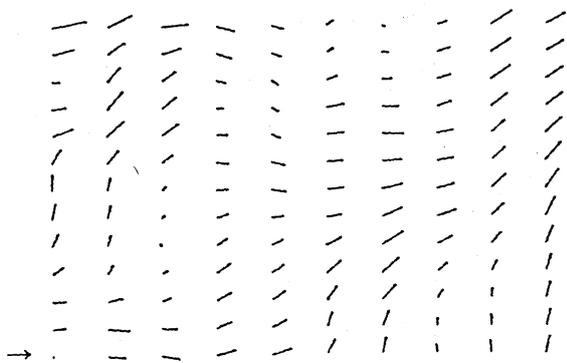


(a) 弾性波入力位置と  
検出位置の成す角 = 90°

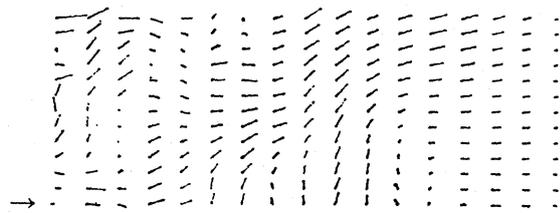


(b) 弾性波入力位置と  
検出位置の成す角 = 180°

図-3.16 速度応答履歴図



(a)  $l/d = 9$  の場合



(b)  $l/d = 15$  の場合



(c)  $l/d = 17$  の場合



(d)  $l/d = 30$  の場合

図-3.17 変位ベクトル図

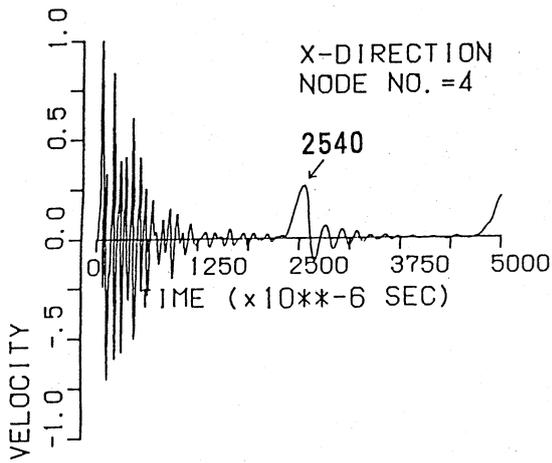


図 - 3.18 速度応答履歴 ( $l/d=17$ 、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=5\text{m}$ の定径杭)

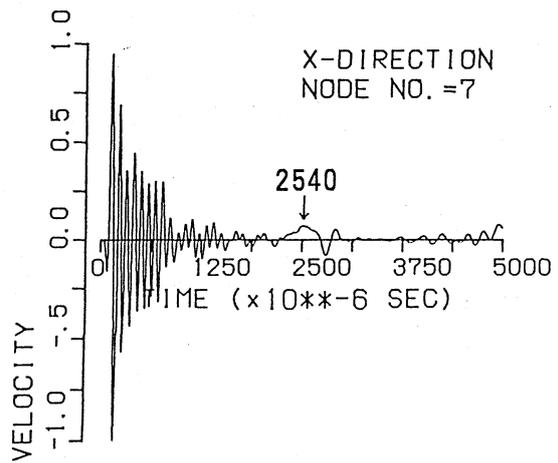


図 - 3.19 速度応答履歴 ( $l/d=9$ 、 $d=600\text{mm}$ 、 $l=5\text{m}$ の定径杭)

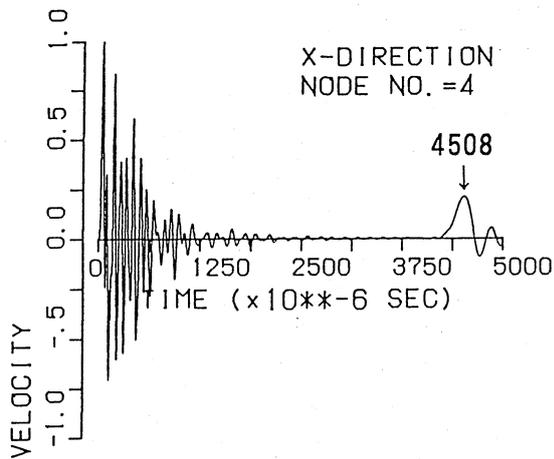


図 - 3.20 速度応答履歴 ( $l/d=30$ 、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=9\text{m}$ の定径杭)

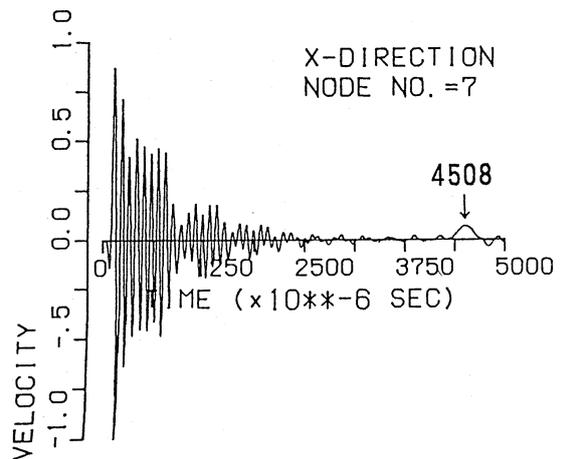


図 - 3.21 速度応答履歴 ( $l/d=15$ 、 $d=600\text{mm}$ 、 $l=9\text{m}$ の定径杭)

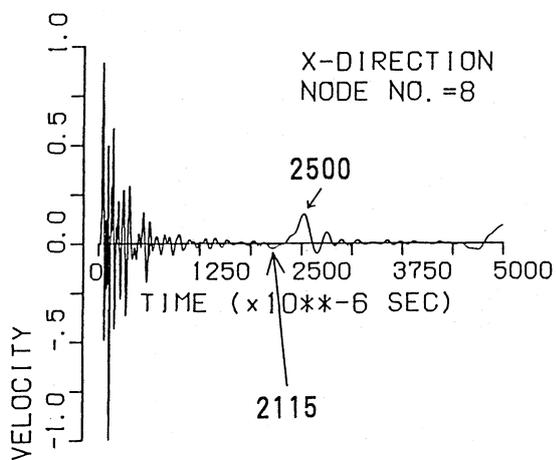


図 - 3.22 速度応答履歴 ( $d_1=300\text{mm}$ 、 $d_2=350\text{mm}$ 、 $l=5\text{m}$ の拡径杭)

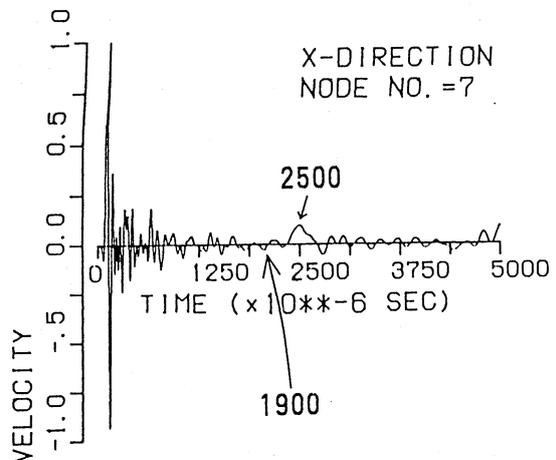


図 - 3.23 速度応答履歴 ( $d_1=500\text{mm}$ 、 $d_2=600\text{mm}$ 、 $l=5\text{m}$ の拡径杭)

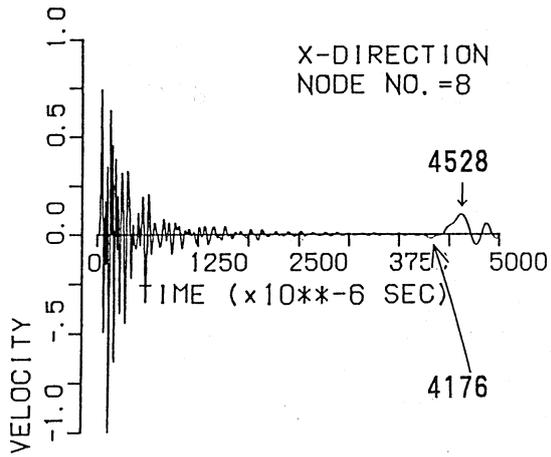


図 - 3.24 速度応答履歴 ( $d_1=300\text{mm}$ 、 $d_2=350\text{mm}$ 、 $l=9\text{m}$ の拡径杭)

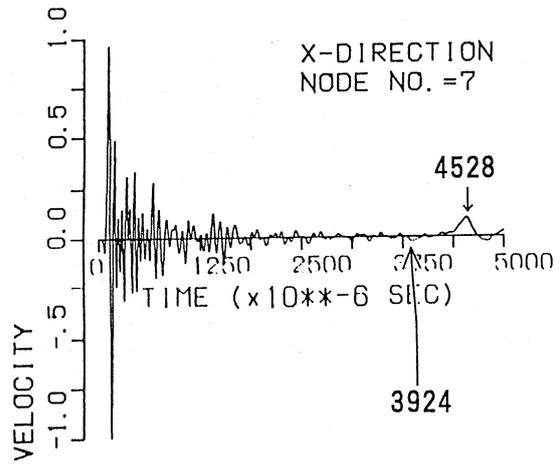


図 - 3.25 速度応答履歴 ( $d_1=500\text{mm}$ 、 $d_2=600\text{mm}$ 、 $l=9\text{m}$ の拡径杭)

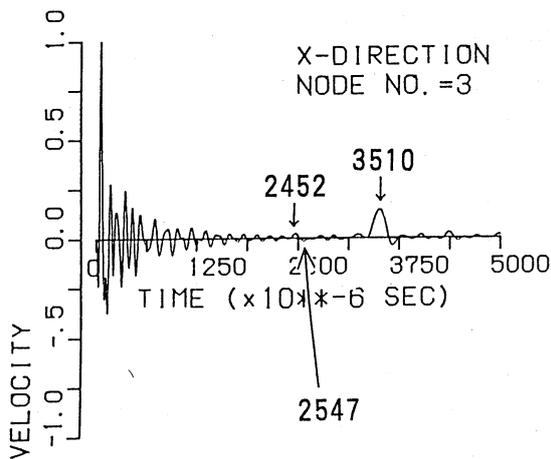


図 - 3.26 速度応答履歴 ( $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=25%の欠損杭)

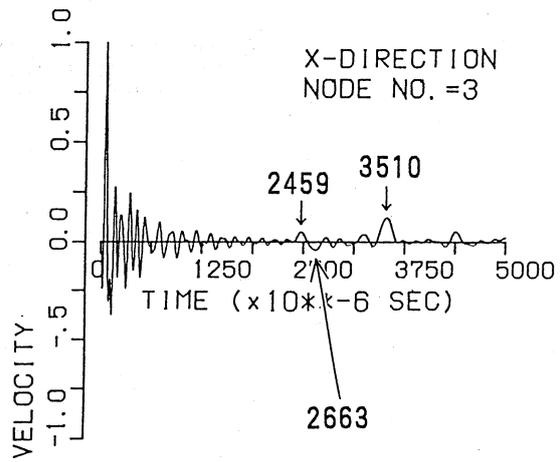


図 - 3.27 速度応答履歴 ( $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=50%の欠損杭)

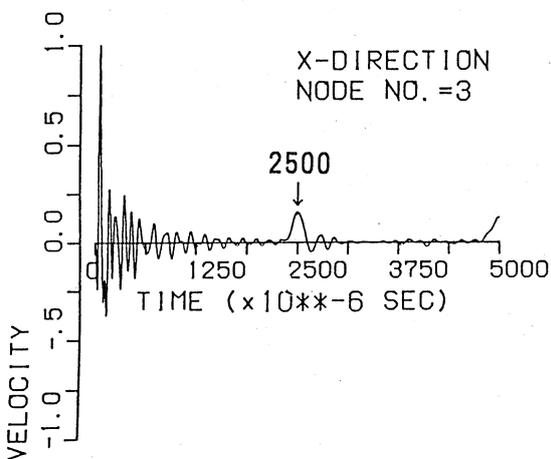


図 - 3.28 速度応答履歴 ( $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=100%の欠損杭)

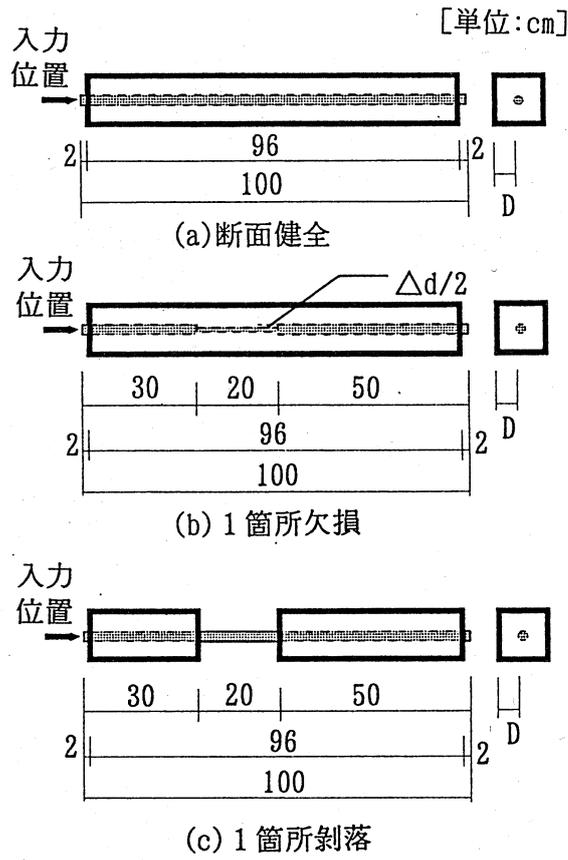


図-3.29 試験体の例

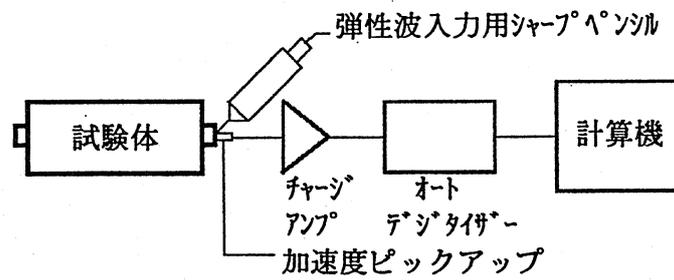
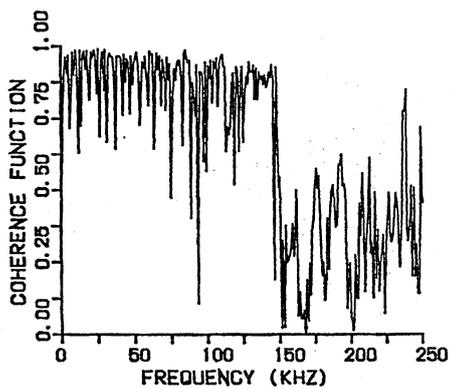
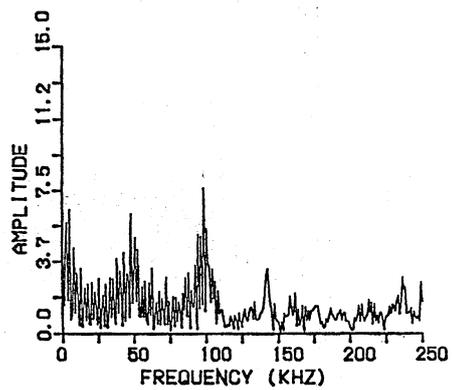


図-3.30 計測システムのブロックダイアグラム

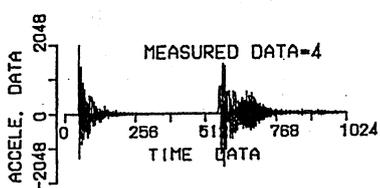


(a) コヒーレンス関数

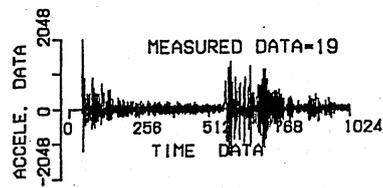


(b) 周波数伝達関数

図-3.31 計測結果の周波数特性の一例

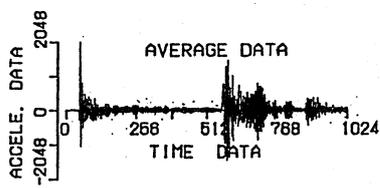


(a) 丸鋼

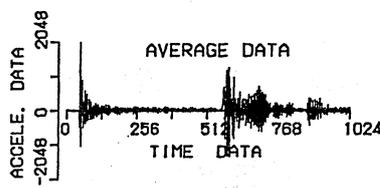


(b) 異形棒鋼

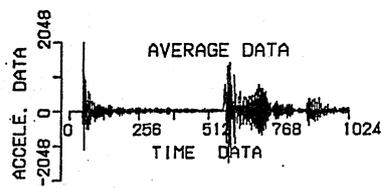
図-3.32 加速度波形データの一例 (鉄筋長さ=400cm、実験-I)



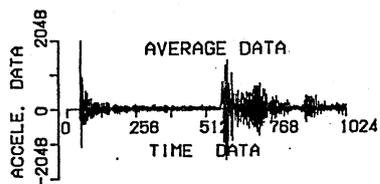
(a) 2回平均



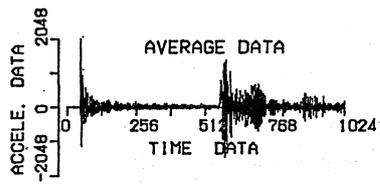
(b) 5回平均



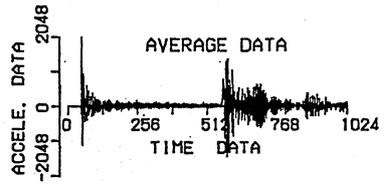
(c) 10回平均



(d) 20回平均

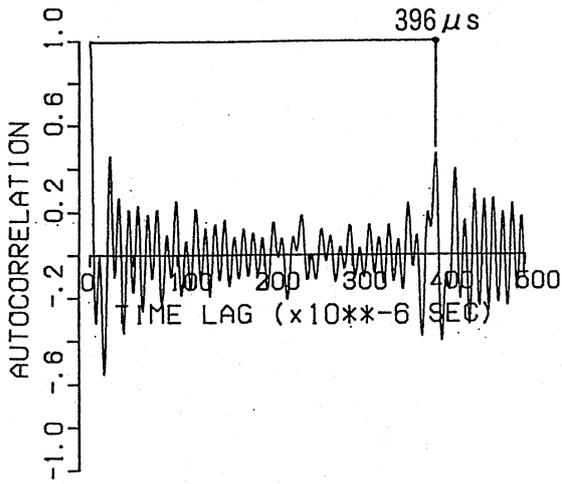


(e) 40回平均

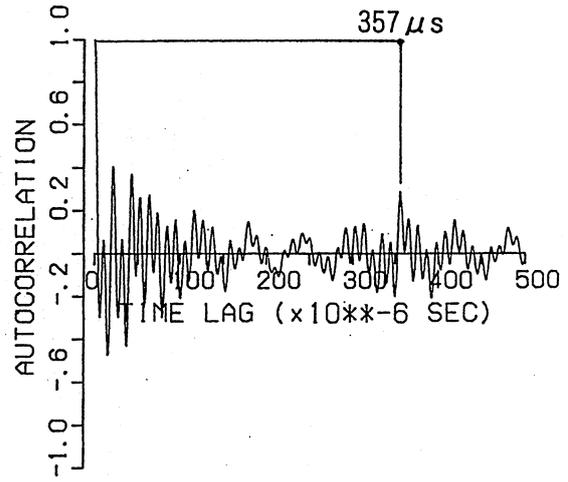


(f) 60回平均

図-3.33 平均化された加速度波形データの例 (異形棒鋼、鉄筋長さ=400cm、実験-I)

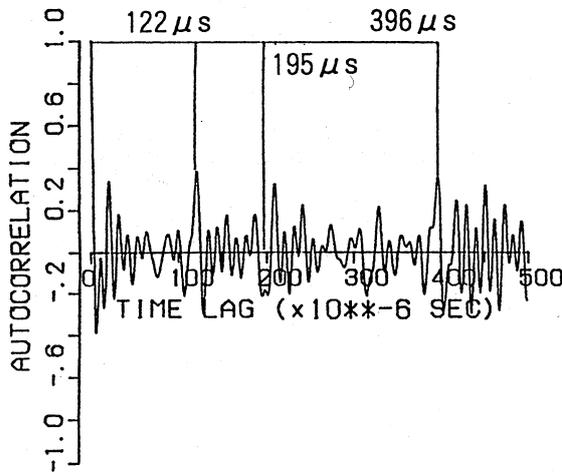


(a) 鉄筋のみ

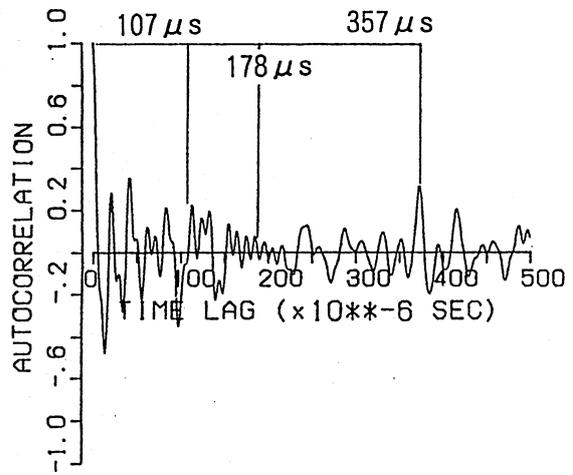


(b) かぶりコンクリートあり

図-3.34 自己相関関数 (断面健全モデル、実験-II)



(a) 鉄筋のみ



(b) かぶりコンクリートあり

図-3.35 自己相関関数 (断面1箇所欠損モデル、 $l=20\text{cm}$ 、 $\Delta d=8\text{mm}$ 、実験-II)

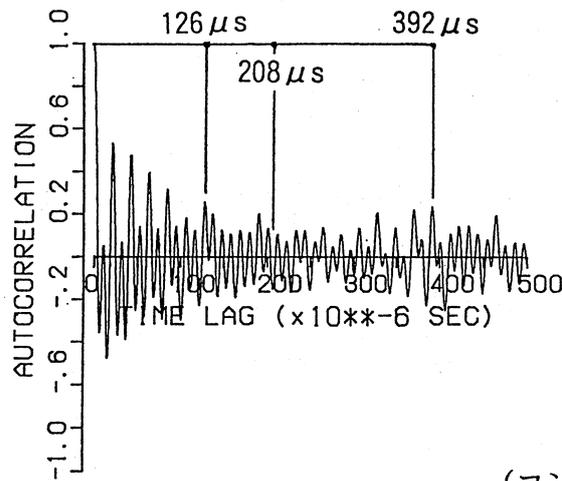
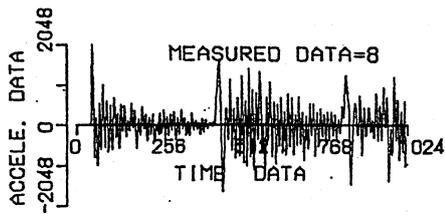
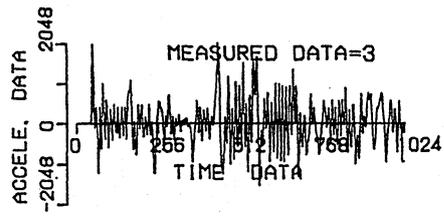


図-3.36 自己相関関数  
(コンクリート剥落モデル、 $l=20\text{cm}$ 、実験-II)

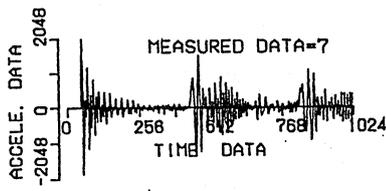


(a) 欠損深さ2mmの場合

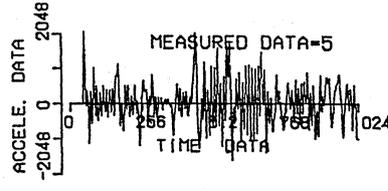


(b) 欠損深さ8mmの場合

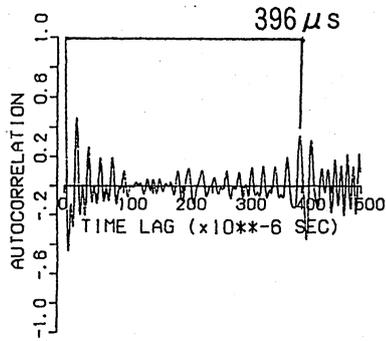
図-3.37 検出加速度波形の一例 (断面1箇所欠損モデル)



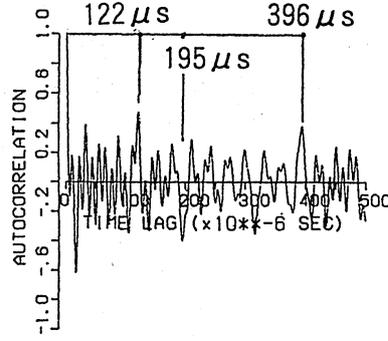
(a) 検出波形



(a) 検出波形



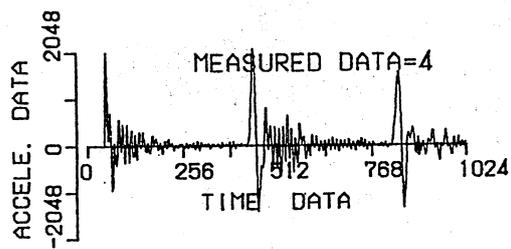
(b) 自己相関関数



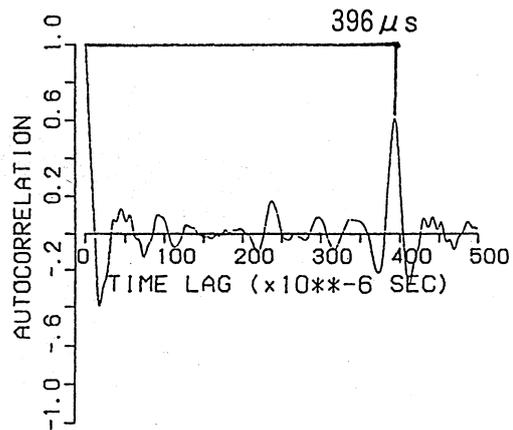
(b) 自己相関関数

図-3.38 反射波の検出性能 (断面健全モデル、空中)

図-3.39 反射波の検出性能 (断面1箇所欠損モデル、空中)

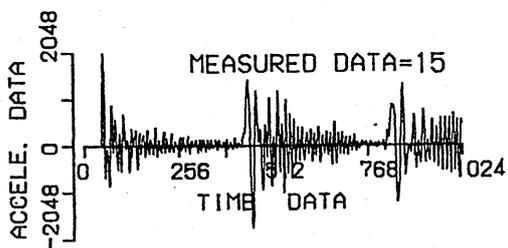


(a) 検出波形

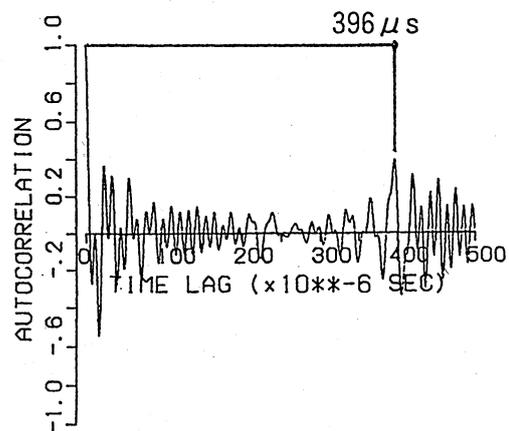


(b) 自己相関関数

図-3.40 反射波の検出性能 (断面健全モデル、媒体=水、D=4cm)

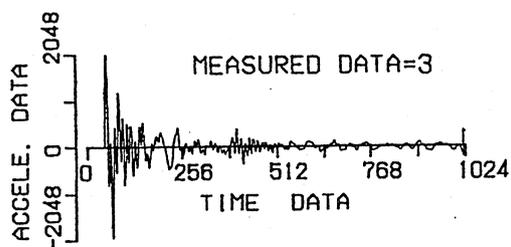


(a) 検出波形

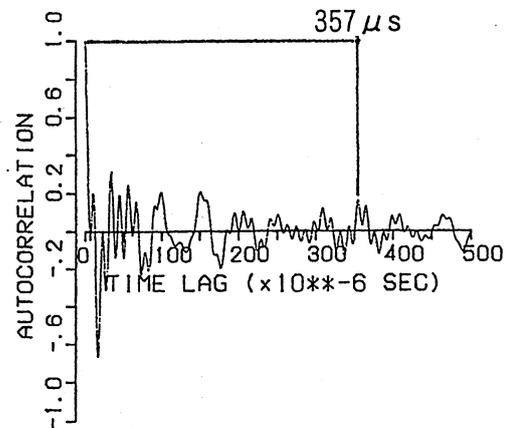


(b) 自己相関関数

図-3.41 反射波の検出性能 (断面健全モデル、媒体=砂、D=4cm)

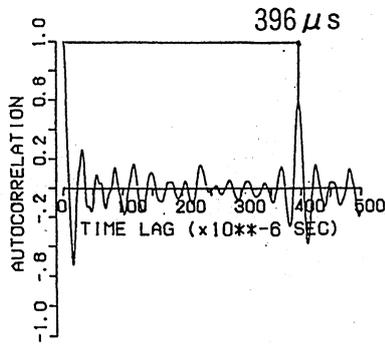
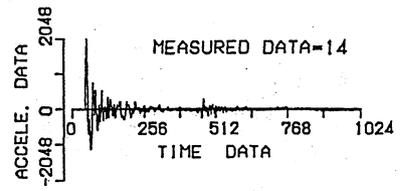
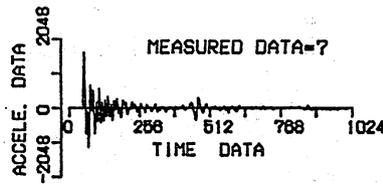
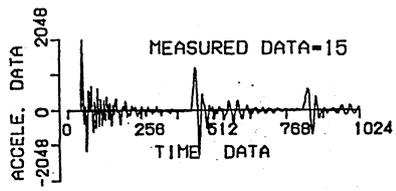


(a) 検出波形

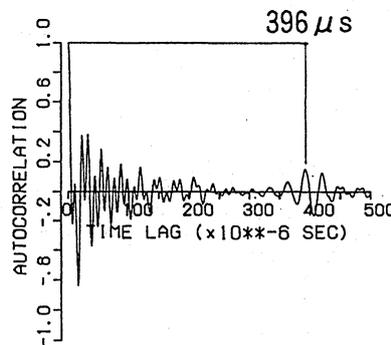


(b) 自己相関関数

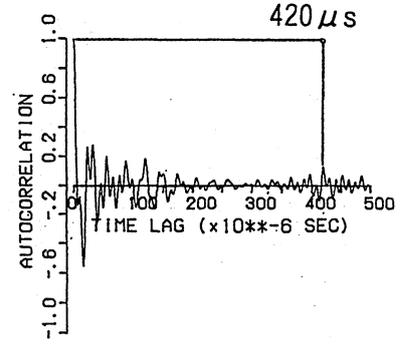
図-3.42 反射波の検出性能 (断面健全モデル、媒体=コンクリート、D=4cm)



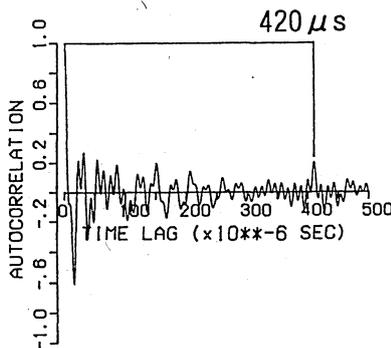
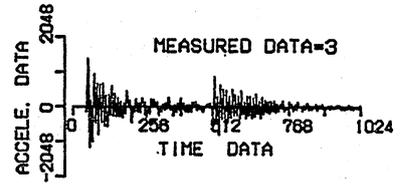
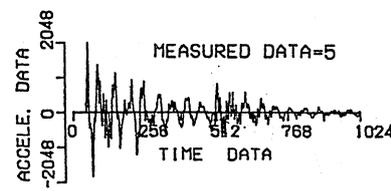
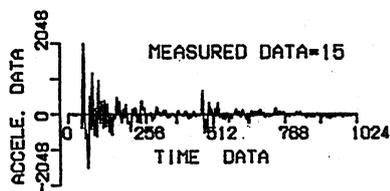
(a) 1時間後



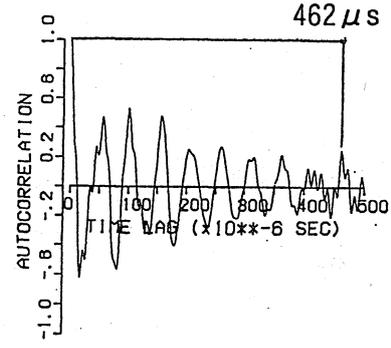
(b) 3時間後



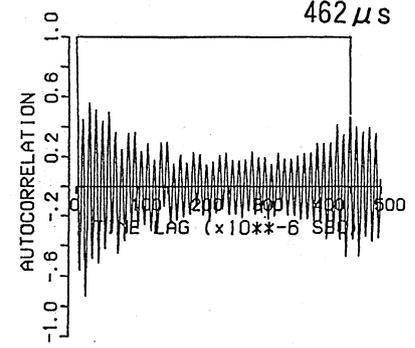
(c) 5時間後



(d) 8時間後

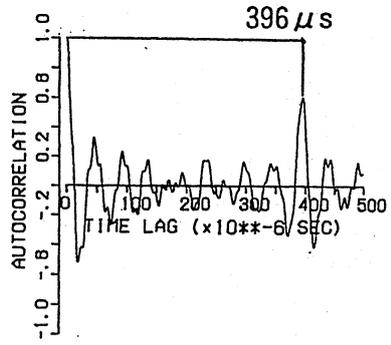
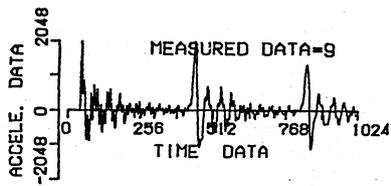


(e) 24時間後

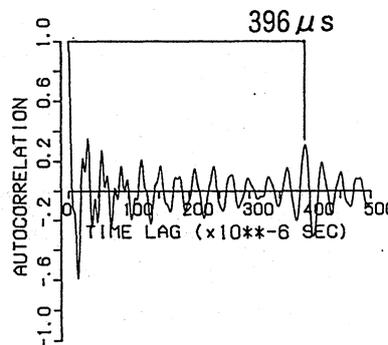
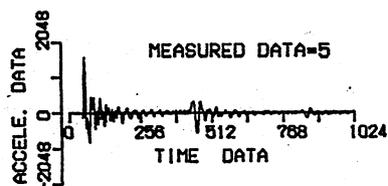


(f) 3日後

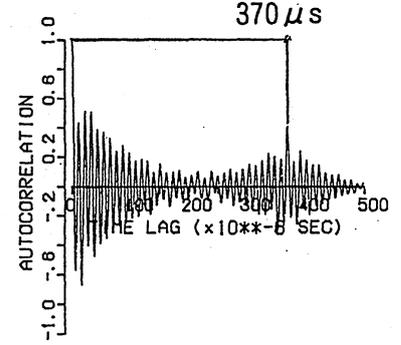
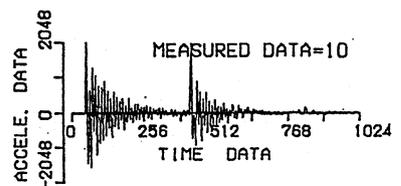
図-3.43 計測結果の経時変化 (断面健全モデル、D=2cm)



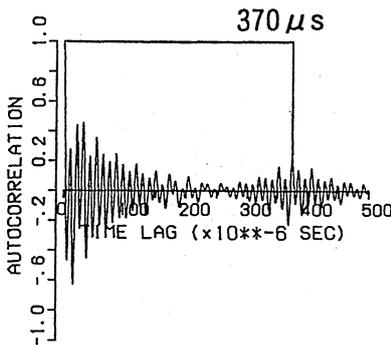
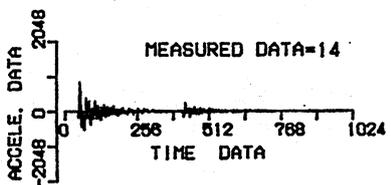
(a) 1時間後



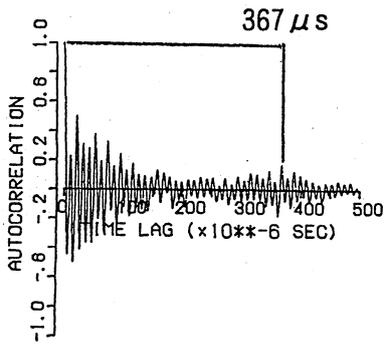
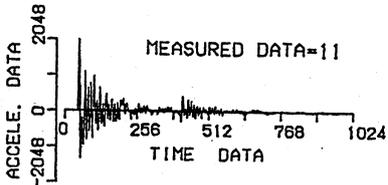
(b) 3時間後



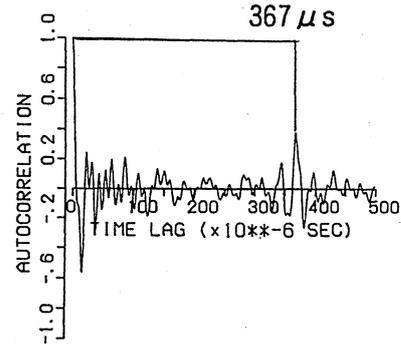
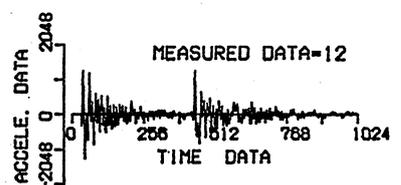
(c) 5時間後



(d) 8時間後

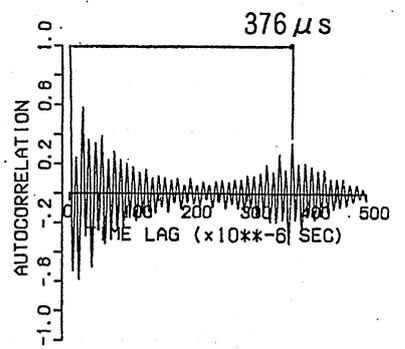
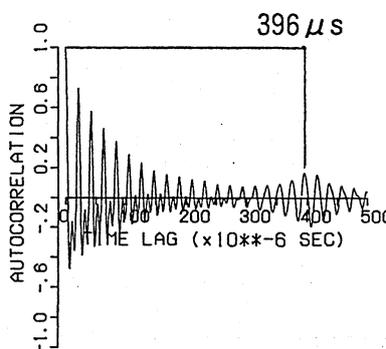
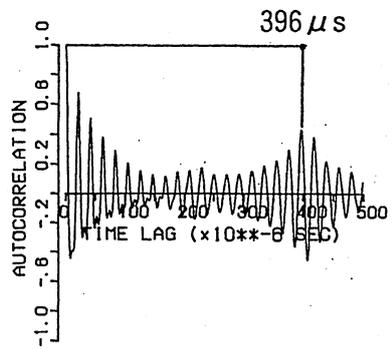
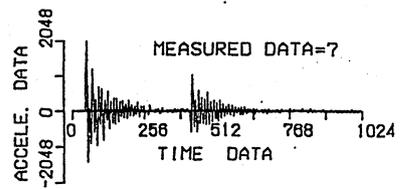
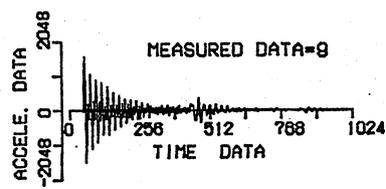
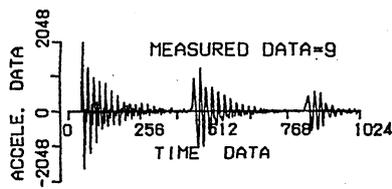


(e) 24時間後



(f) 3日後

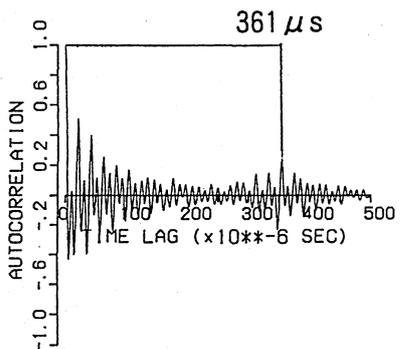
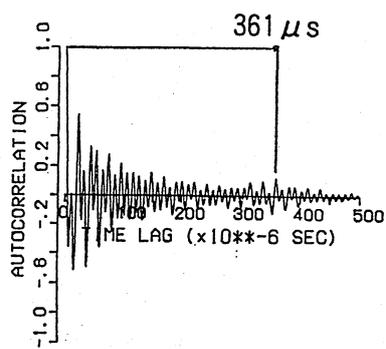
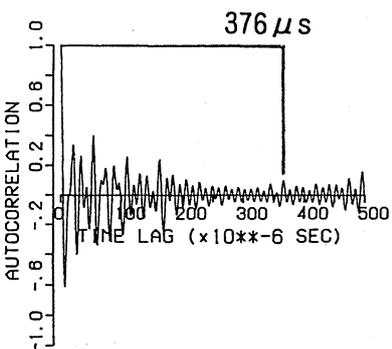
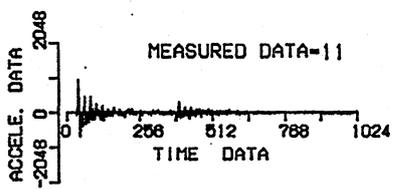
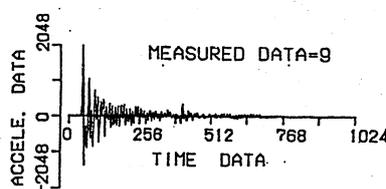
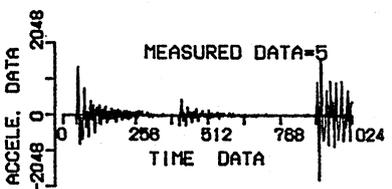
図-3.44 計測結果の経時変化 (断面健全モデル、D=4cm)



(a) 1時間後

(b) 3時間後

(c) 5時間後

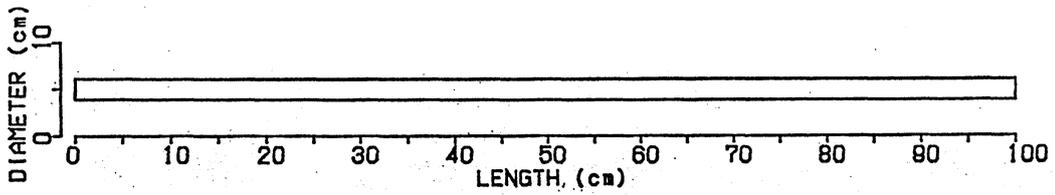


(d) 8時間後

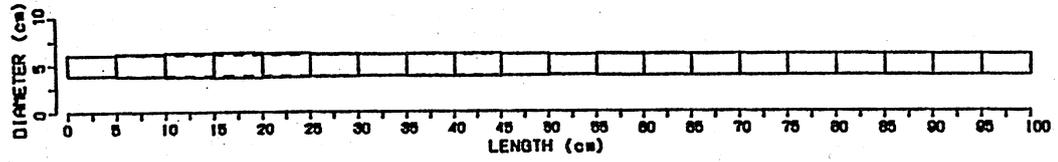
(e) 24時間後

(f) 3日後

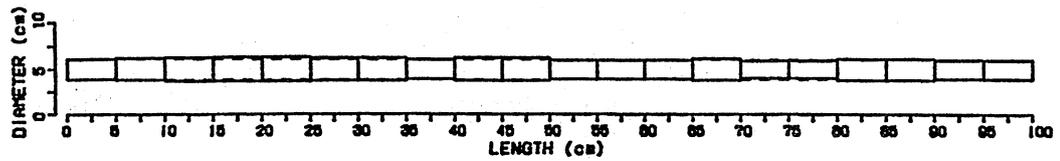
図-3.45 計測結果の経時変化 (断面健全モデル、D=10cm)



(a) モデル図

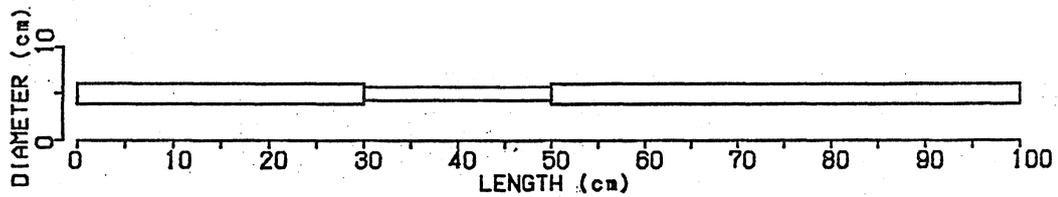


(b) 鉄筋のみ

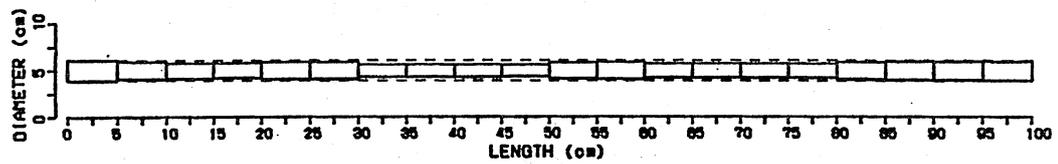


(c) かぶりコンクリートあり

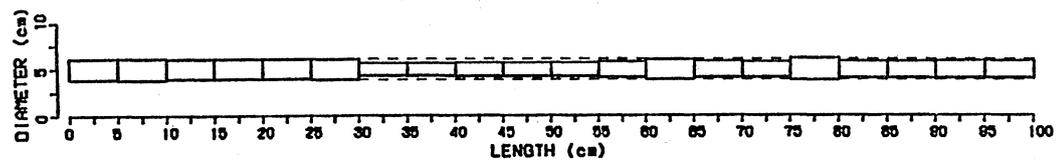
図-3.46 鉄筋の形状推定結果 (断面健全モデル、実験-II)



(a) モデル図

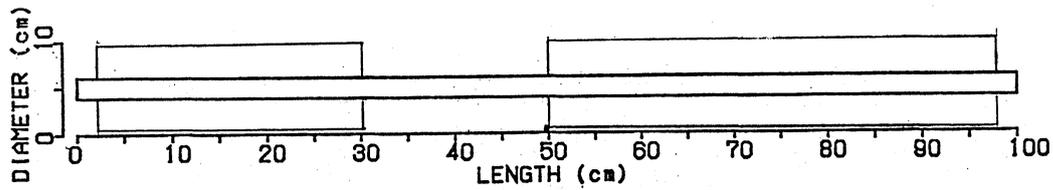


(b) 鉄筋のみ

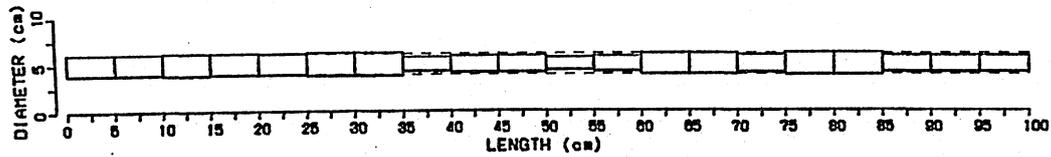


(c) かぶりコンクリートあり

図-3.47 鉄筋の形状推定結果 (断面1箇所欠損モデル、 $l=20\text{cm}$ 、 $\Delta d=8\text{mm}$ 、実験-II)

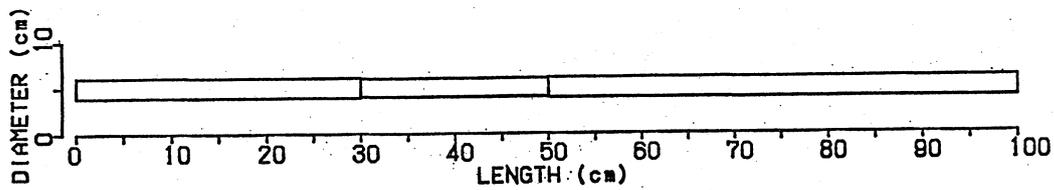


(a) モデル図

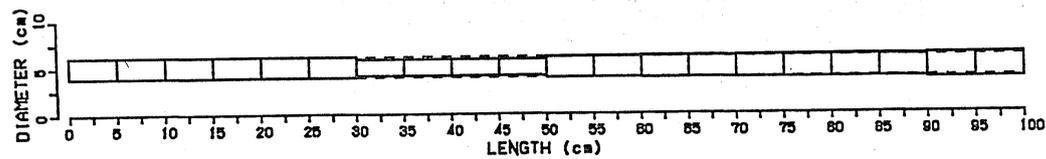


(b) 推定図

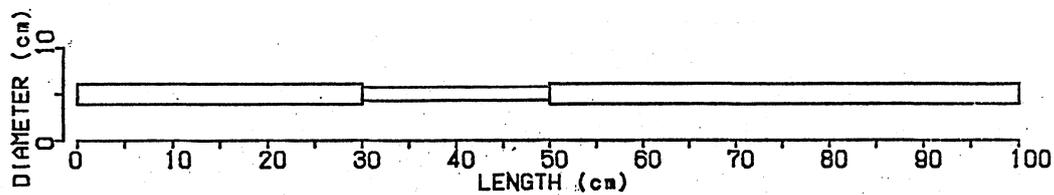
図-3.48 鉄筋の形状推定結果 (コンクリート剥落モデル、 $\ell=20\text{cm}$ 、実験-II)



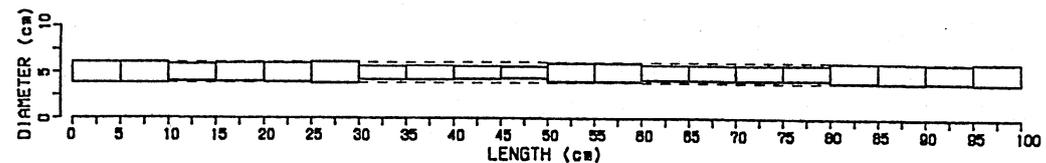
(a) モデル図 (欠損深さ2mmの場合)



(a-1) 推定図 (欠損深さ2mmの場合)

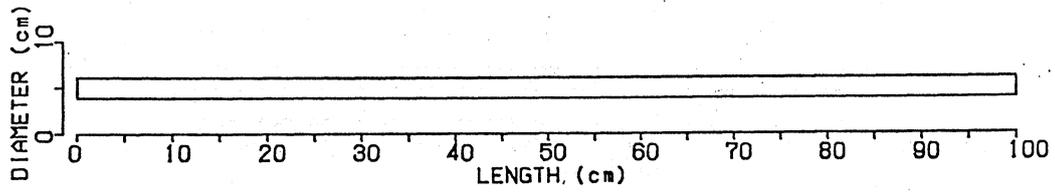


(b) モデル図 (欠損深さ8mmの場合)

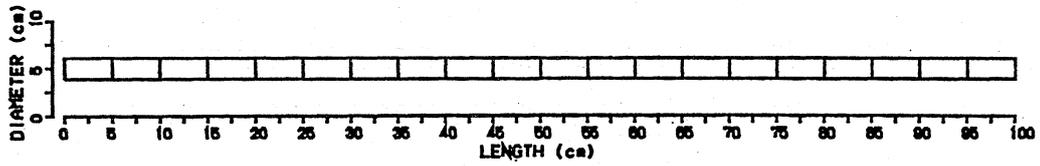


(b-1) 推定図 (欠損深さ8mmの場合)

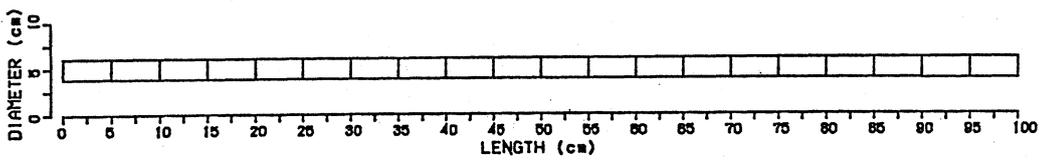
図-3.49 鉄筋の形状推定結果 (断面1箇所欠損モデル)



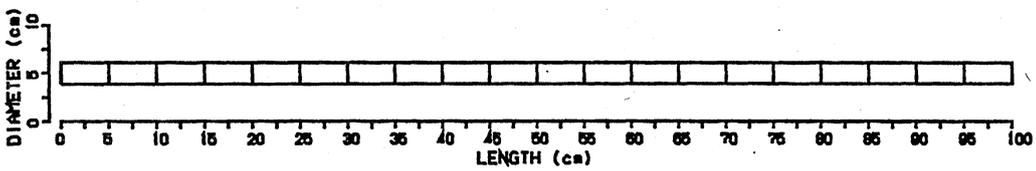
(a) モデル図



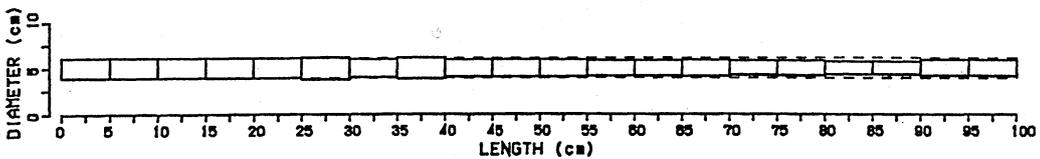
(b) 媒体=無し (空中) の場合



(c) 媒体=水、D=4cmの場合

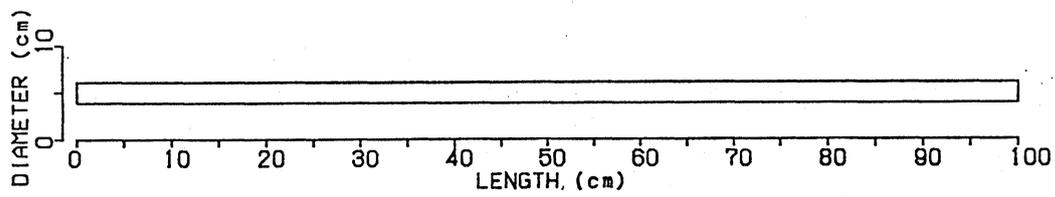


(d) 媒体=砂、D=4cmの場合

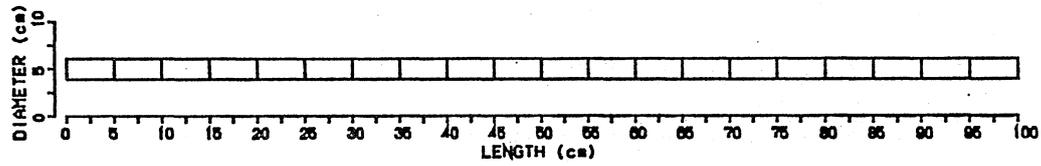


(e) 媒体=コンクリート、D=4cmの場合

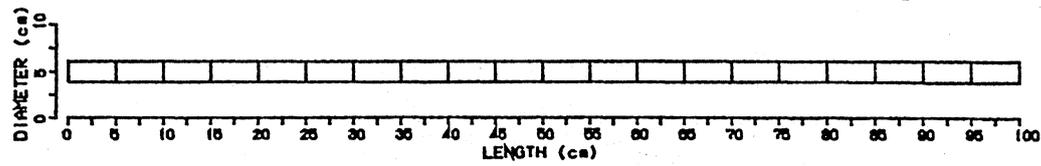
図-3.50 鉄筋の形状推定結果 (断面健全モデル)



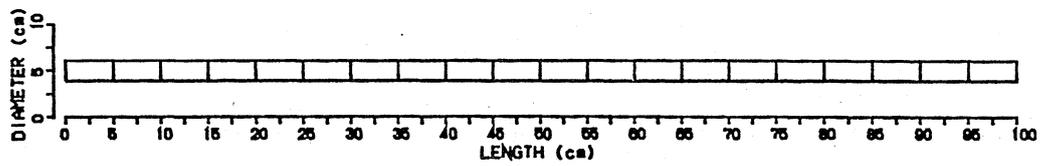
(a) モデル図



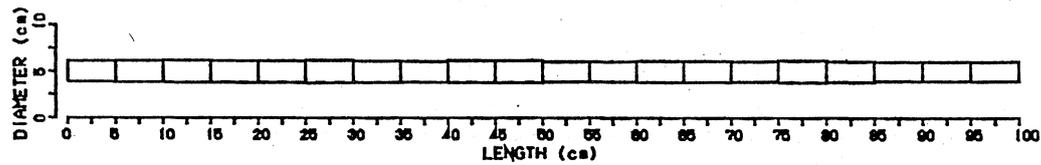
(b) 1時間後



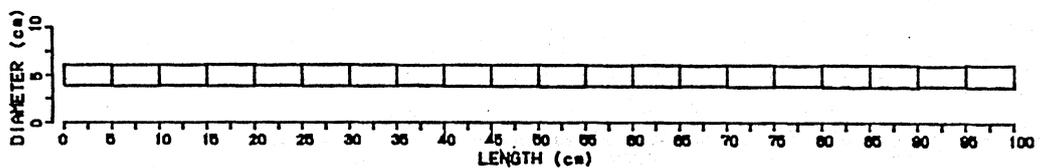
(c) 3時間後



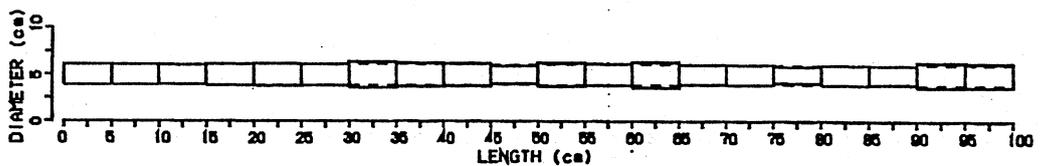
(d) 5時間後



(e) 8時間後

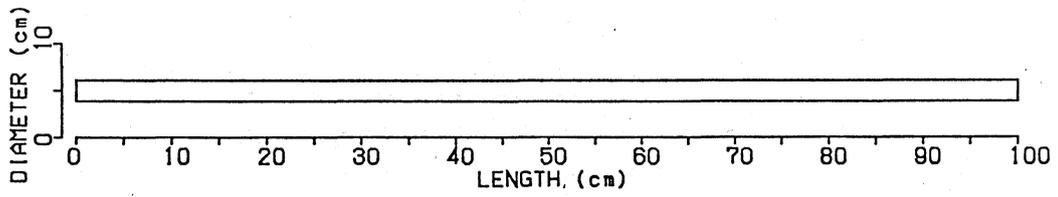


(f) 24時間後

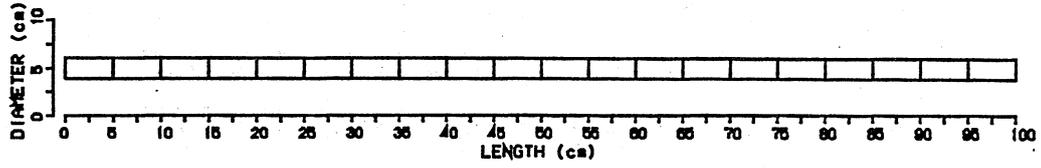


(g) 3日後

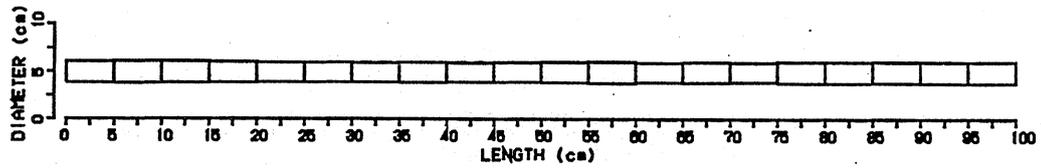
図-3.51 鉄筋の形状推定結果 (断面健全モデル、D=2cm)



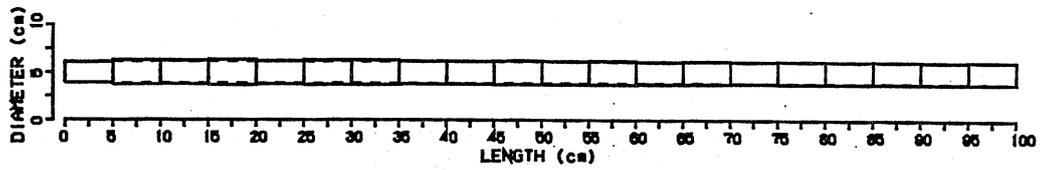
(a) モデル図



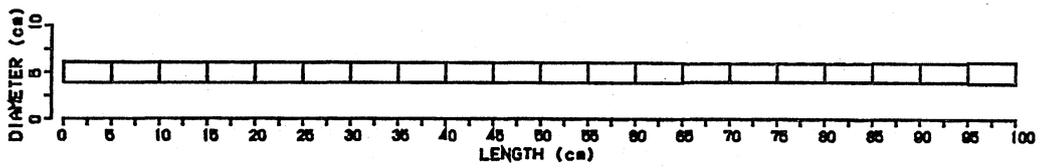
(b) 1時間後



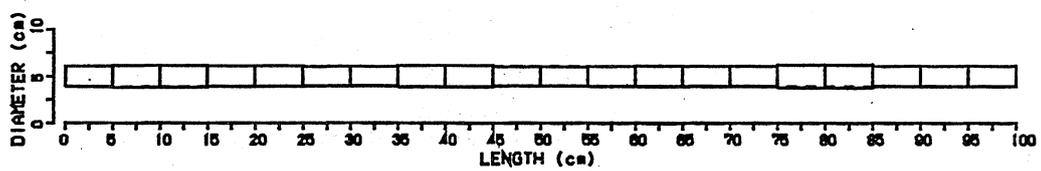
(c) 3時間後



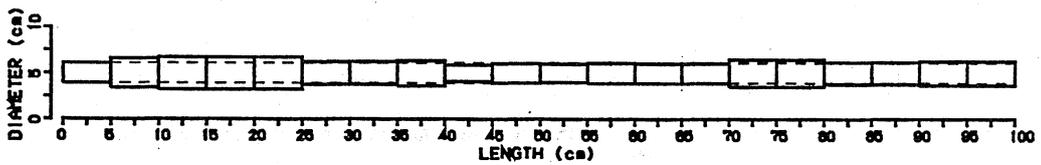
(d) 5時間後



(e) 8時間後

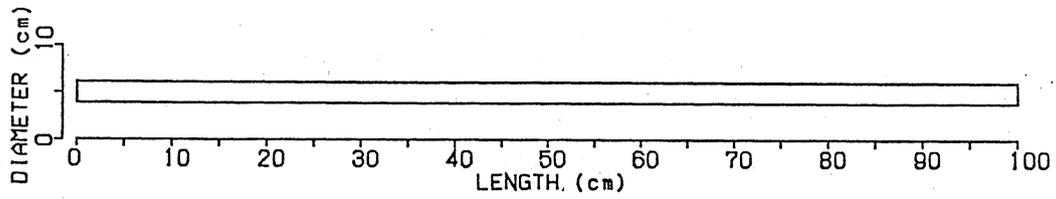


(f) 24時間後

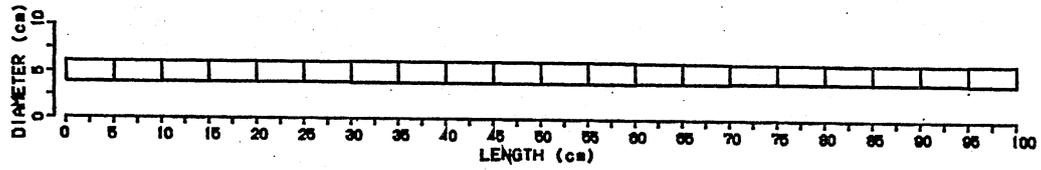


(g) 3日後

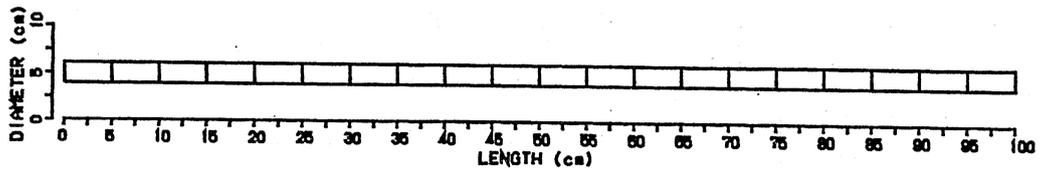
図-3.52 鉄筋の形状推定結果 (断面健全モデル、D=4cm)



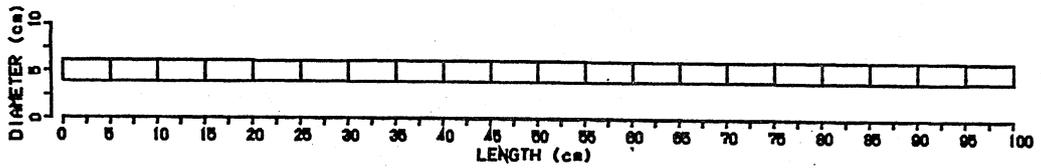
(a) モデル図



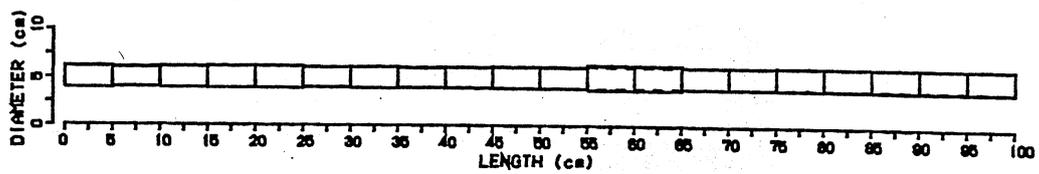
(b) 1時間後



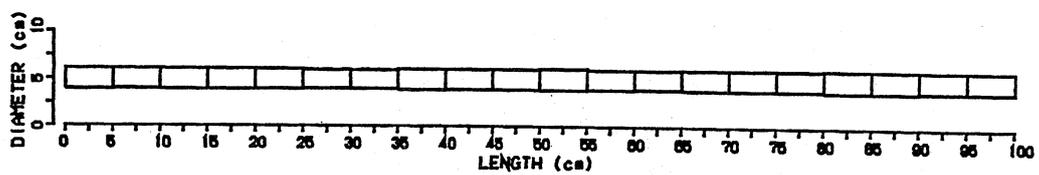
(c) 3時間後



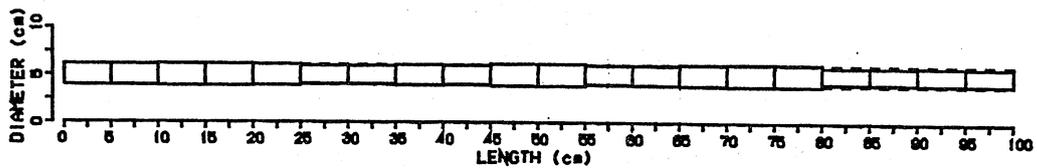
(d) 5時間後



(e) 8時間後



(f) 24時間後



(g) 3日後

図-3.53 鉄筋の形状推定結果 (断面健全モデル、D=10cm)

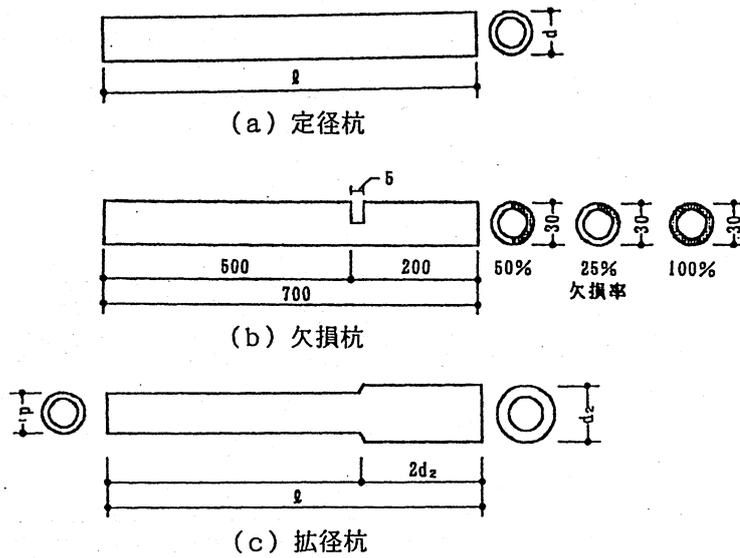


図-3.54 試験体の一例

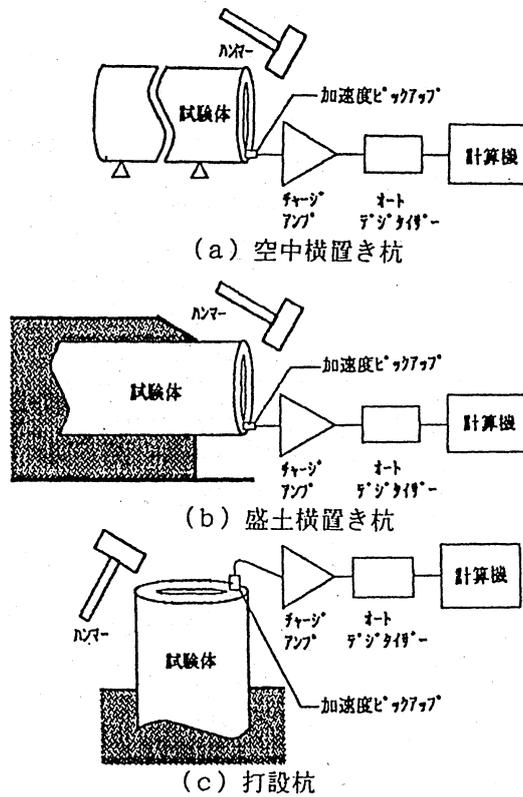
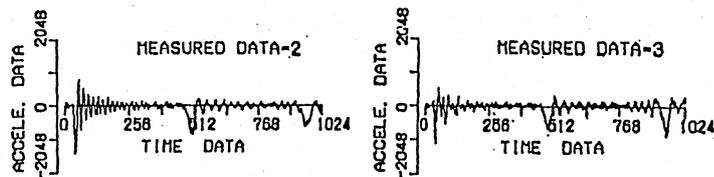
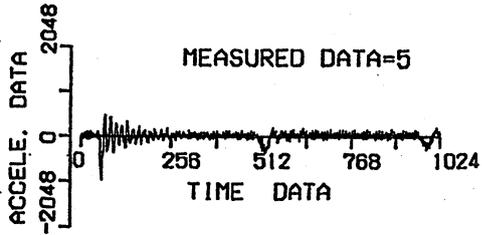


図-3.55 計測システムのブロックダイアグラム

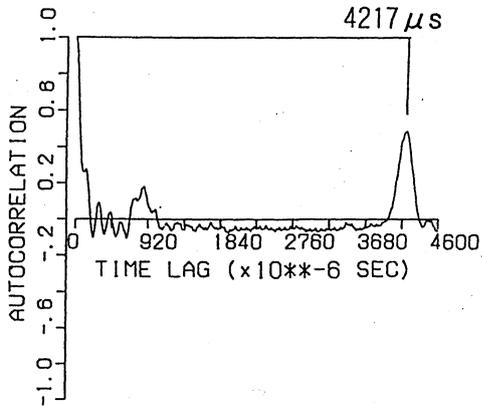


(a) 打撃点と変換子の成す角度=90° (b) 打撃点と変換子の成す角度=180°

図-3.56 加速度波形データの一部 (d=300mm、l=7mの定径杭)

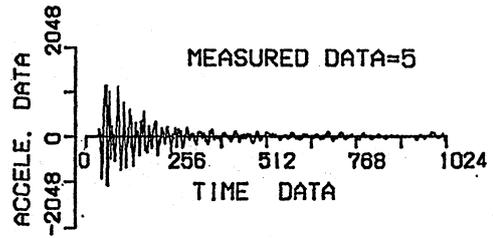


(a) 加速度波形データの一例

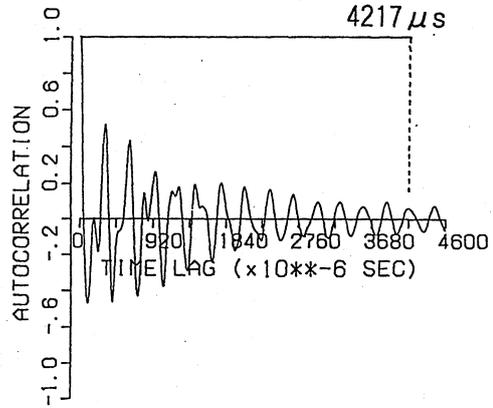


(b) 自己相関関数

図-3.57 反射波の検出性能  
( $l/d=30$ 、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=9\text{m}$ の定径杭)

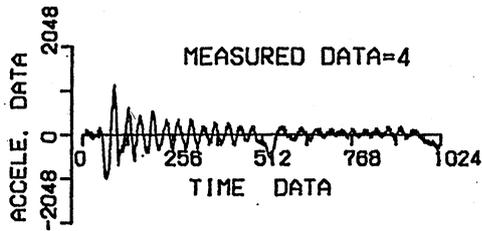


(a) 加速度波形データの一例

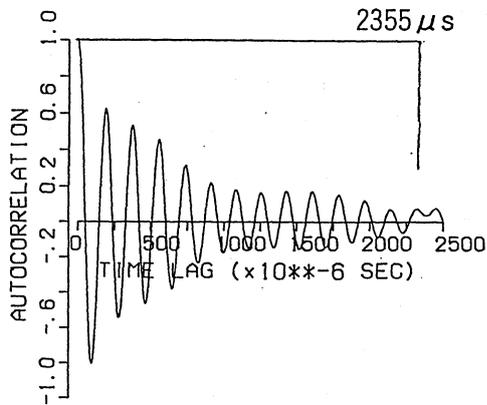


(b) 自己相関関数

図-3.58 反射波の検出性能  
( $l/d=15$ 、 $d=600\text{mm}$ 、 $l=9\text{m}$ の定径杭)

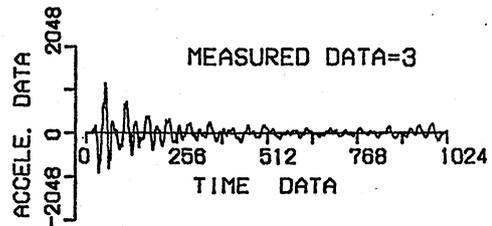


(a) 加速度波形データの一例

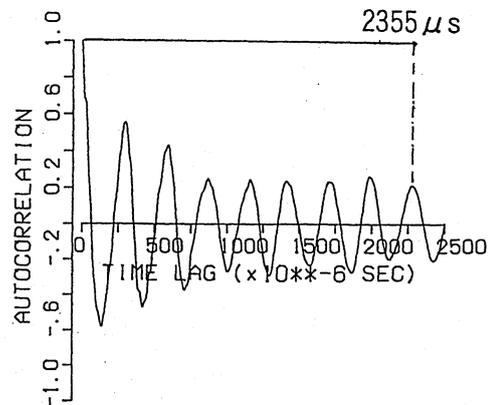


(b) 自己相関関数

図-3.59 反射波の検出性能  
( $l/d=17$ 、 $d=300\text{mm}$ 、 $l=5\text{m}$ の定径杭)

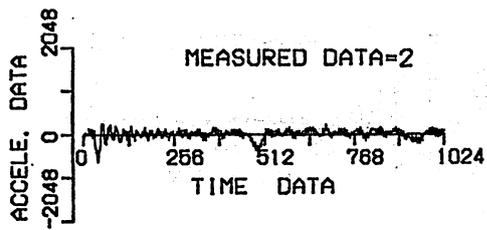


(a) 加速度波形データの一例

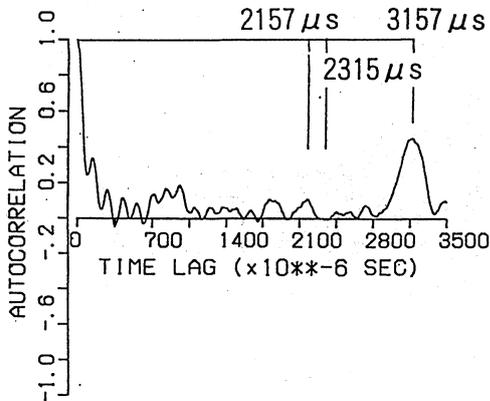


(b) 自己相関関数

図-3.60 反射波の検出性能  
( $l/d=8$ 、 $d=600\text{mm}$ 、 $l=5\text{m}$ の定径杭)

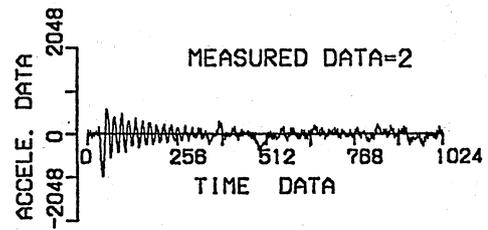


(a) 加速度波形データの一例

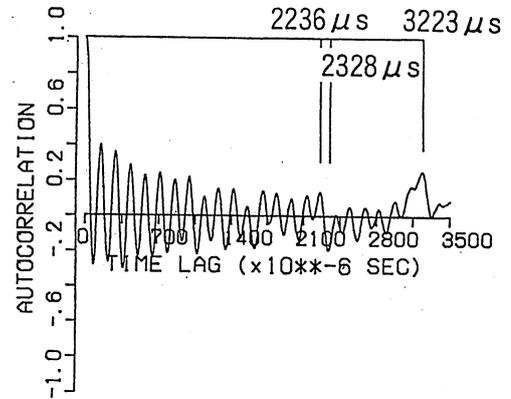


(b) 自己相関関数

図-3.61 反射波の検出性能  
( $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=25%の欠損杭)

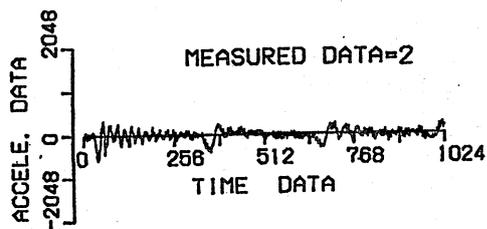


(a) 加速度波形データの一例

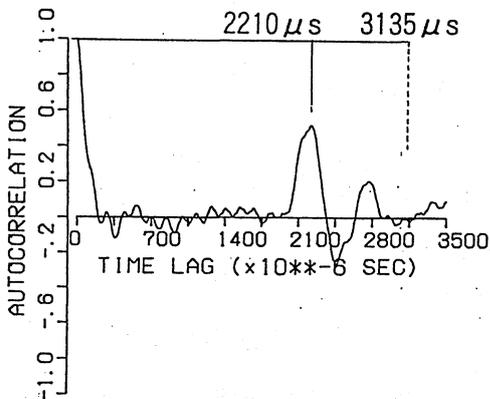


(b) 自己相関関数

図-3.62 反射波の検出性能  
( $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=50%の欠損杭)

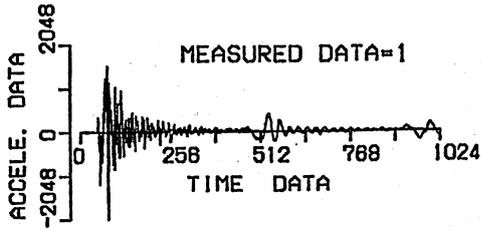


(a) 加速度波形データの一例

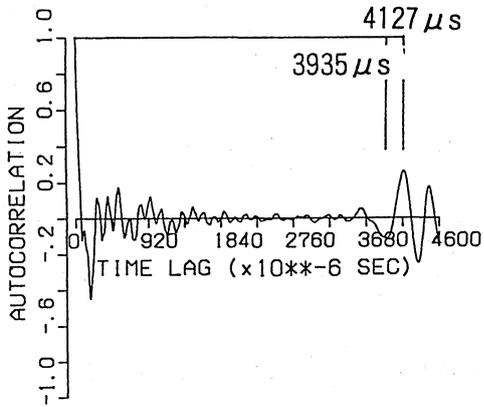


(b) 自己相関関数

図-3.63 反射波の検出性能  
( $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ 、欠損率=100%の欠損杭)

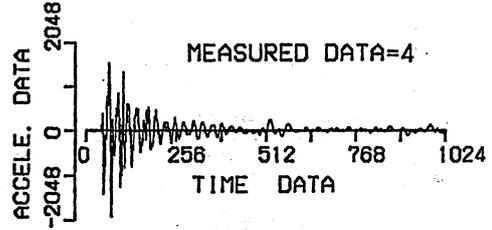


(a) 加速度波形データの一例

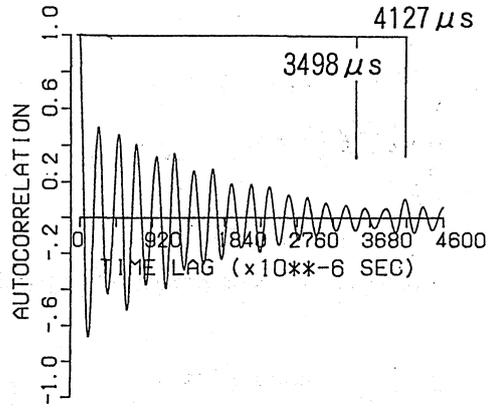


(b) 自己相関関数

図-3.64 反射波の検出性能  
( $d_1=300\text{mm}$ 、 $d_2=350\text{mm}$ 、 $l=9\text{m}$ の拡径杭)



(a) 加速度波形データの一例



(b) 自己相関関数

図-3.65 反射波の検出性能  
( $d_1=500\text{mm}$ 、 $d_2=600\text{mm}$ 、 $l=9\text{m}$ の拡径杭)

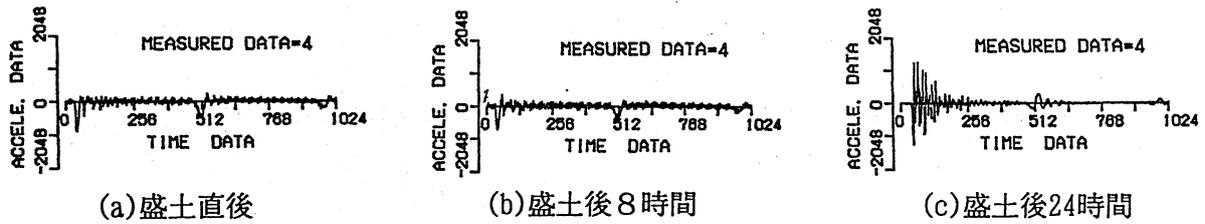


図-3.66 加速度波形データの経時変化の一例 ( $l/d=30$ ,  $d=300\text{mm}$ ,  $l=9\text{m}$ の定径杭)

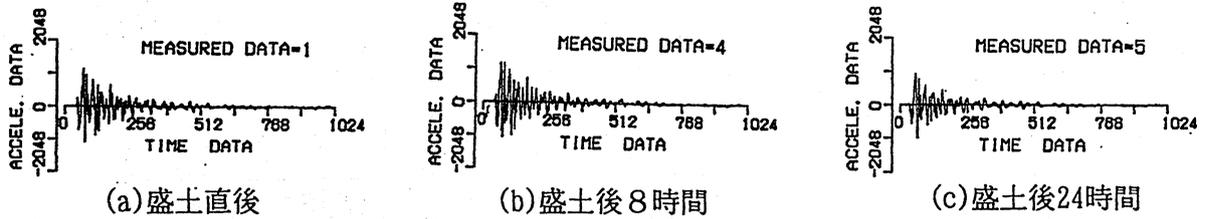


図-3.67 加速度波形データの経時変化の一例 ( $l/d=15$ ,  $d=600\text{mm}$ ,  $l=9\text{m}$ の定径杭)

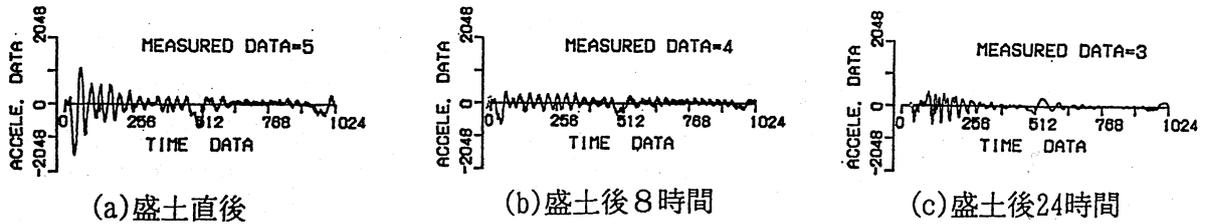


図-3.68 加速度波形データの経時変化の一例 ( $l/d=17$ ,  $d=300\text{mm}$ ,  $l=5\text{m}$ の定径杭)

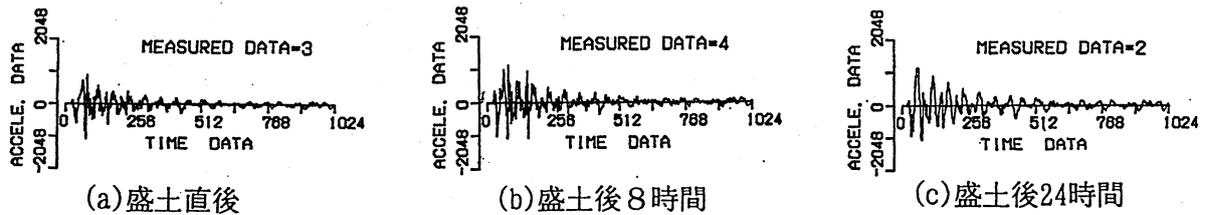


図-3.69 加速度波形データの経時変化の一例 ( $l/d=8$ ,  $d=600\text{mm}$ ,  $l=5\text{m}$ の定径杭)

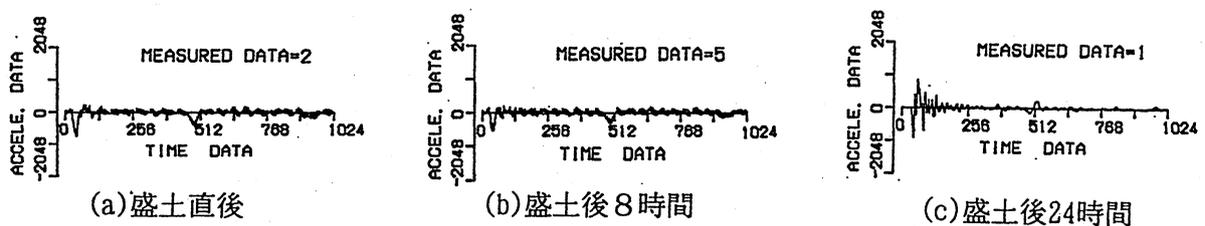


図-3.70 加速度波形データの経時変化の一例 ( $d=300\text{mm}$ ,  $l=7\text{m}$ , 欠損率=25%の欠損杭)

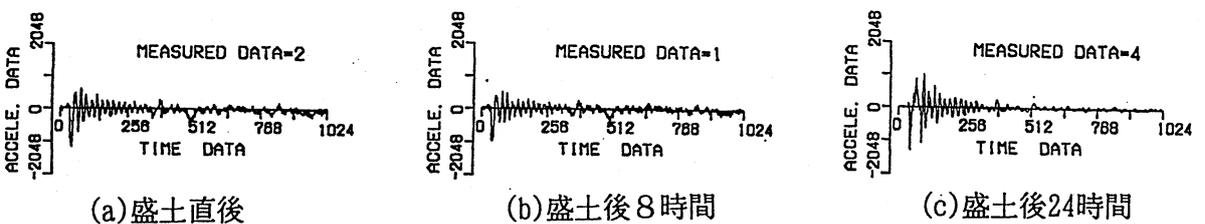


図-3.71 加速度波形データの経時変化の一例 ( $d=300\text{mm}$ ,  $l=7\text{m}$ , 欠損率=50%の欠損杭)

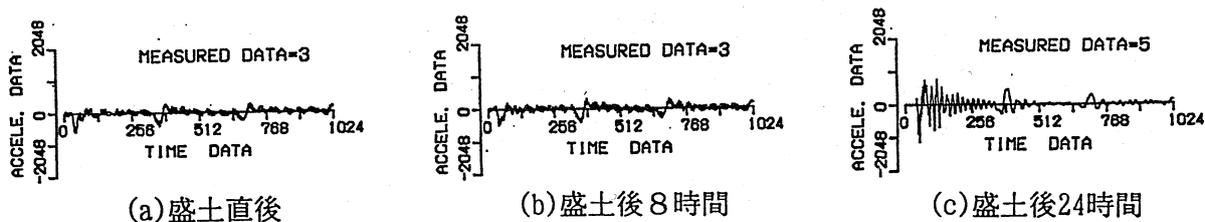


図-3.72 加速度波形データの経時変化の一例 ( $d=300\text{mm}$ ,  $\ell=7\text{m}$ , 欠損率=100%の欠損杭)

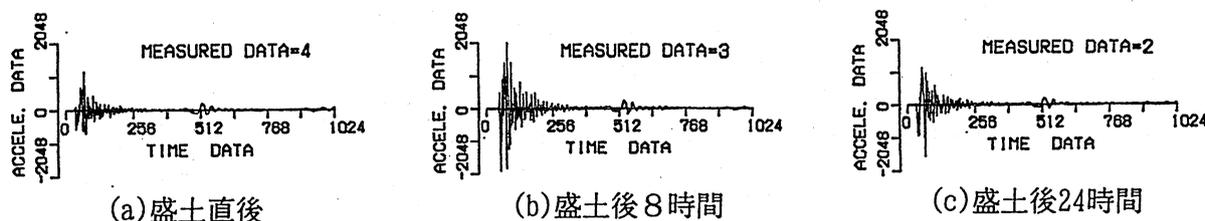


図-3.73 加速度波形データの経時変化の一例 ( $d_1=300\text{mm}$ ,  $d_2=350\text{mm}$ ,  $\ell=9\text{m}$ の拡径杭)

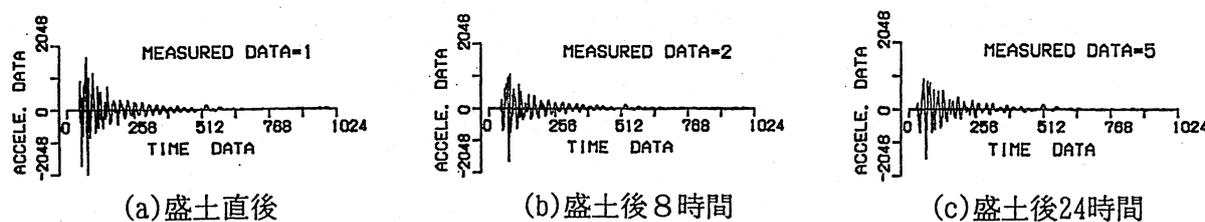


図-3.74 加速度波形データの経時変化の一例 ( $d_1=500\text{mm}$ ,  $d_2=600\text{mm}$ ,  $\ell=9\text{m}$ の拡径杭)

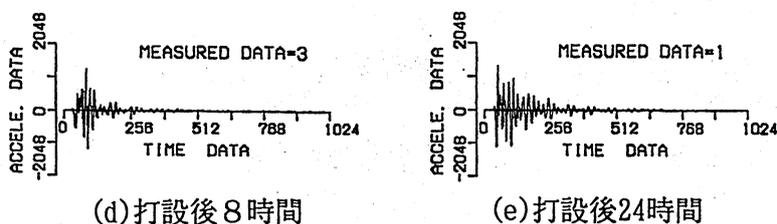
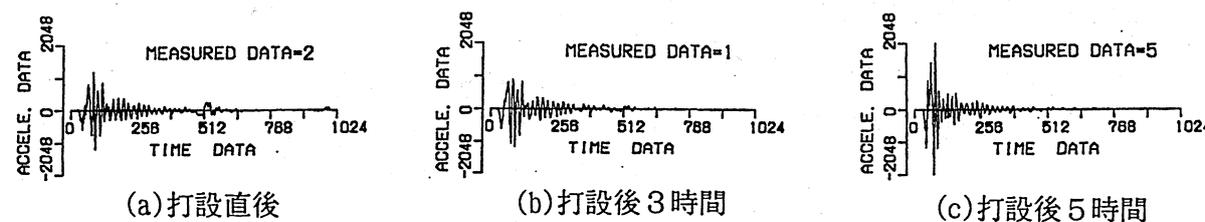


図-3.75 加速度波形データの経時変化の一例 ( $d=300\text{mm}$ ,  $\ell=7\text{m}$ の定径杭)

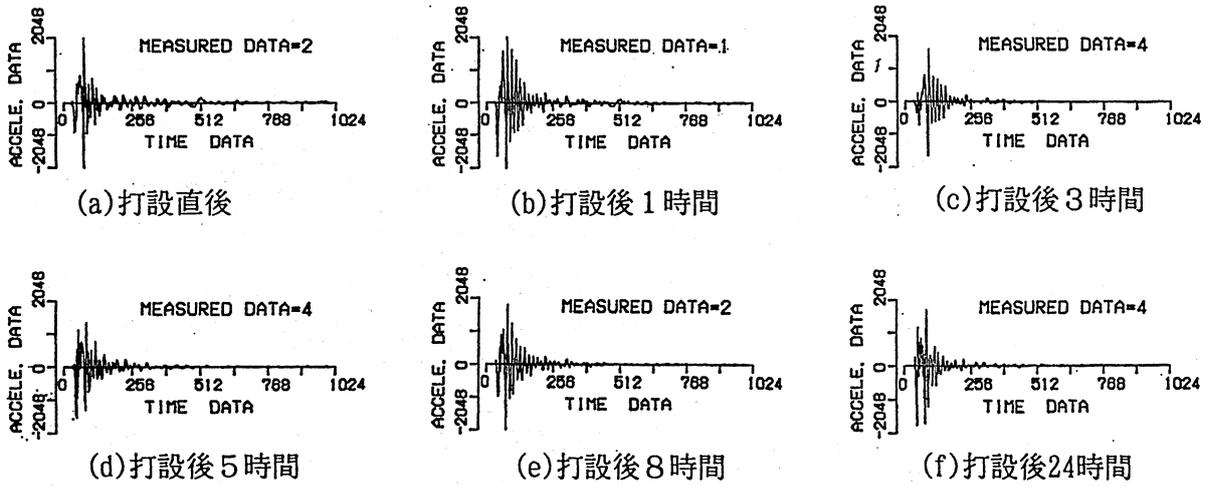


図-3.76 加速度波形データの経時変化の一例 ( $d=300\text{mm}$ 、 $\ell=7\text{m}$ 、欠損率=25%の欠損杭)

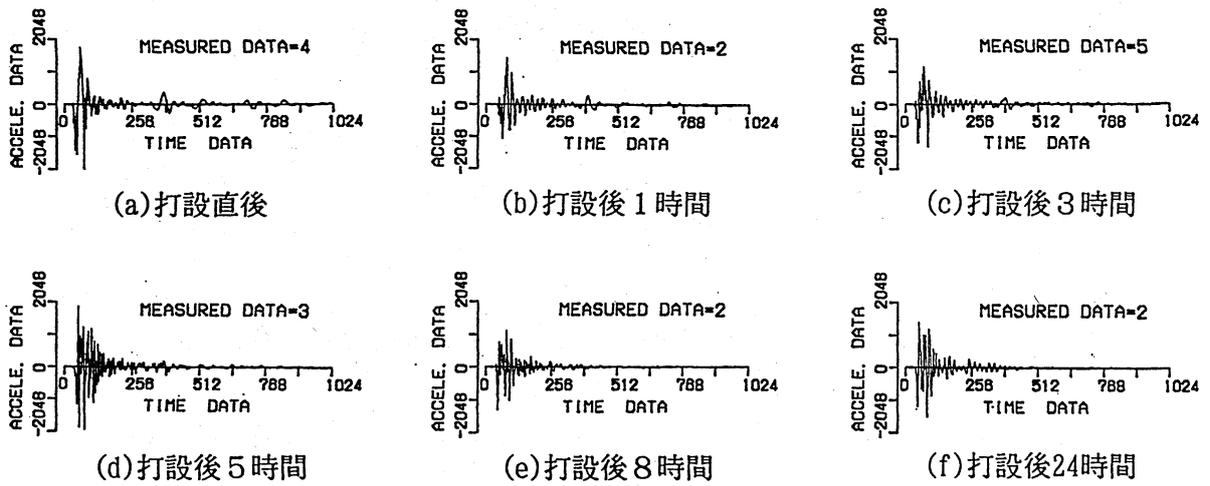


図-3.77 加速度波形データの経時変化の一例 ( $d=300\text{mm}$ 、 $\ell=7\text{m}$ 、欠損率=50%の欠損杭)

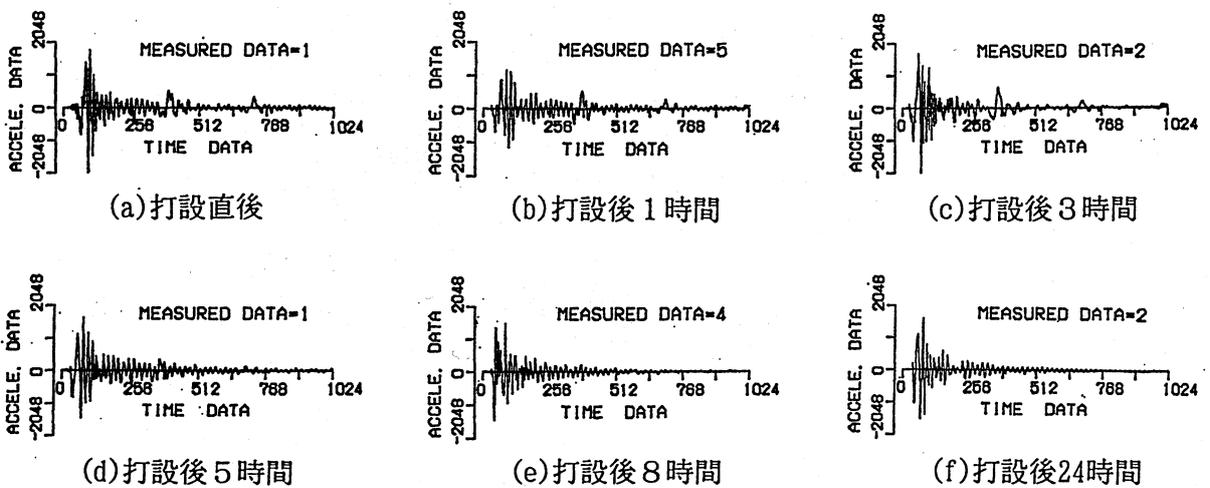
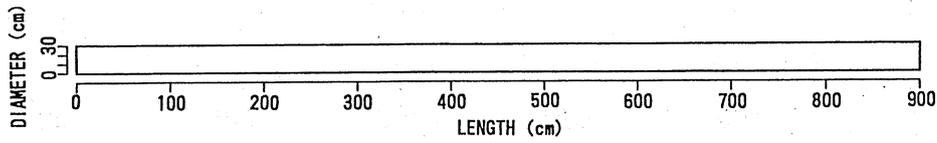
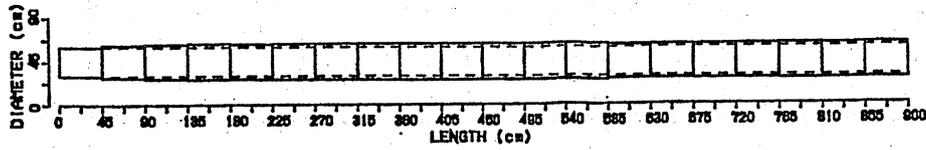


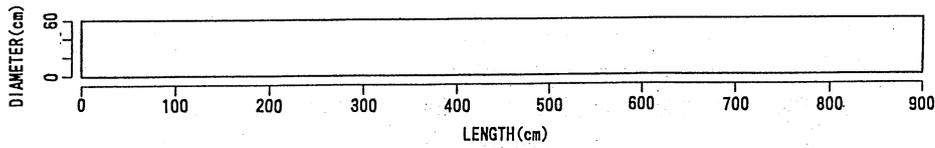
図-3.78 加速度波形データの経時変化の一例 ( $d=300\text{mm}$ 、 $\ell=7\text{m}$ 、欠損率=100%の欠損杭)



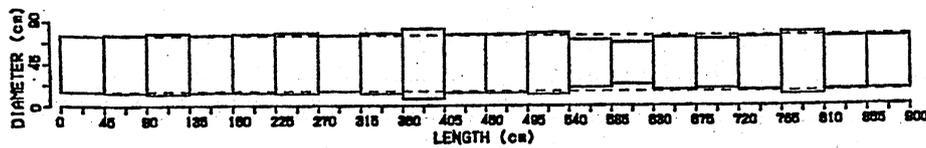
(a) モデル図 (d=300mm、 $\ell$ =9mの定径杭)



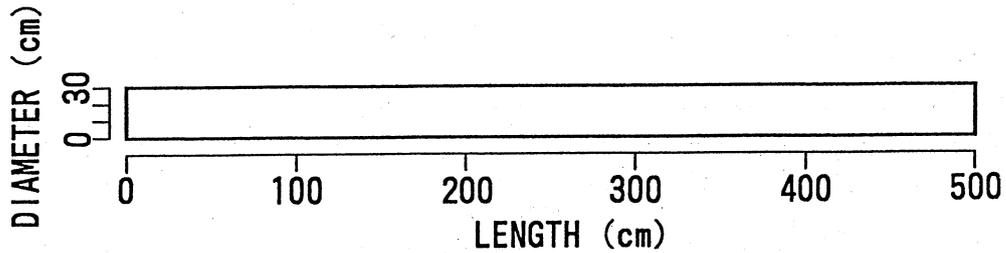
(a-1) 推定図 (d=300mm、 $\ell$ =9mの定径杭)



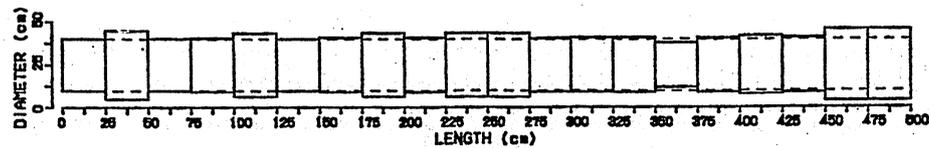
(b) モデル図 (d=600mm、 $\ell$ =9mの定径杭)



(b-1) 推定図 (d=600mm、 $\ell$ =9mの定径杭)

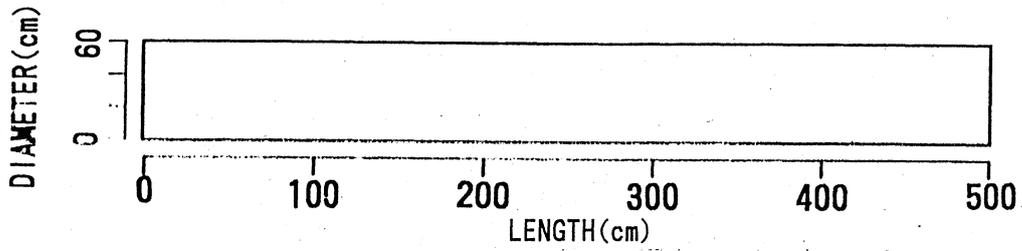


(c) モデル図 (d=300mm、 $\ell$ =5mの定径杭)

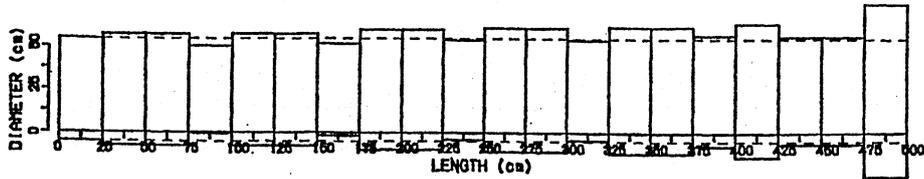


(c-1) 推定図 (d=300mm、 $\ell$ =5mの定径杭)

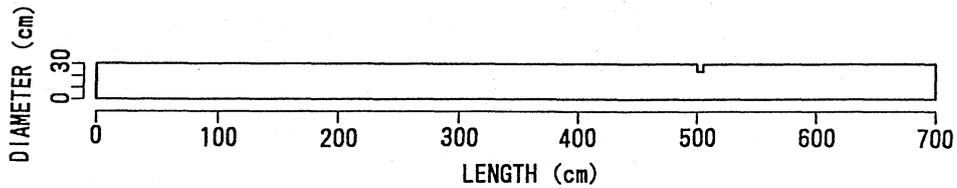
図-3.79 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (空中横置き杭)



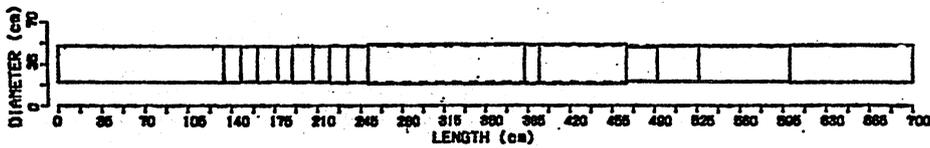
(d) モデル図 (d=600mm、 $\ell$ =5mの定径杭)



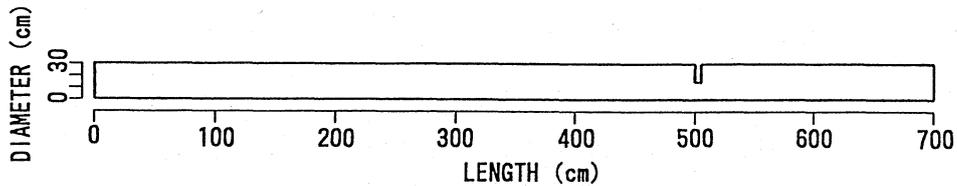
(d-1) 推定図 (d=600mm、 $\ell$ =5mの定径杭)



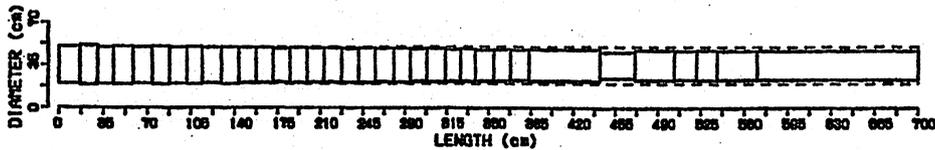
(e) モデル図 (d=300mm、 $\ell$ =7m、欠損率=25%の欠損杭)



(e-1) 推定図 (d=300mm、 $\ell$ =7m、欠損率=25%の欠損杭)

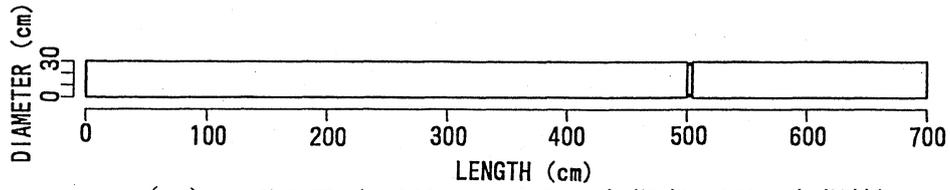


(f) モデル図 (d=300mm、 $\ell$ =7m、欠損率=50%の欠損杭)

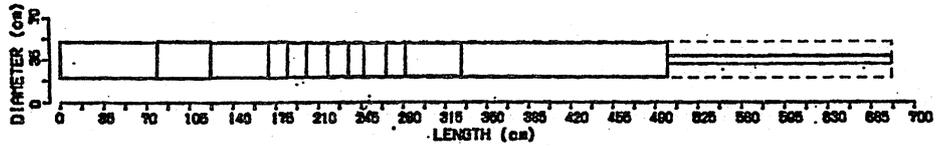


(f-1) 推定図 (d=300mm、 $\ell$ =7m、欠損率=50%の欠損杭)

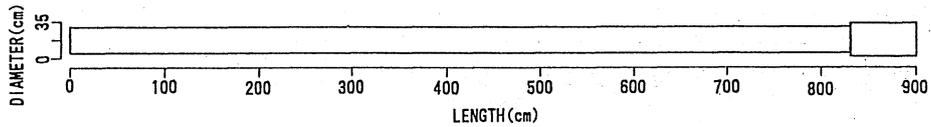
図-3.79 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (空中横置き杭)



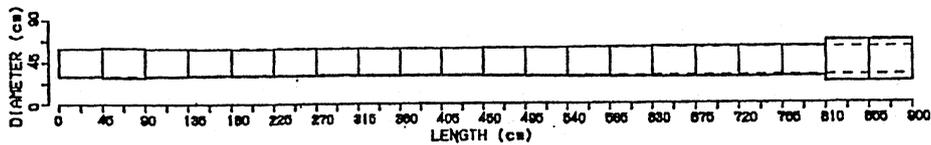
(g) モデル図 ( $d=300\text{mm}$ 、 $\ell=7\text{m}$ 、欠損率=100%の欠損杭)



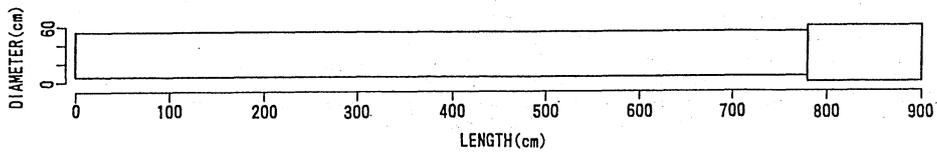
(g-1) 推定図 ( $d=300\text{mm}$ 、 $\ell=7\text{m}$ 、欠損率=100%の欠損杭)



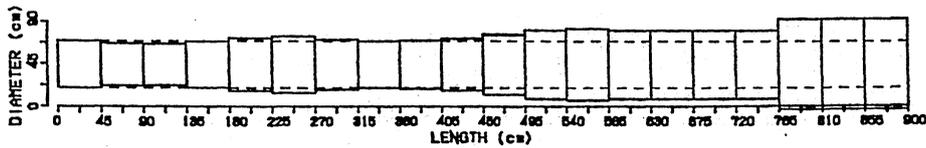
(h) モデル図 ( $d_1=300\text{mm}$ 、 $d_2=350\text{mm}$ 、 $\ell=9\text{m}$ の拡径杭)



(h-1) 推定図 ( $d_1=300\text{mm}$ 、 $d_2=350\text{mm}$ 、 $\ell=9\text{m}$ の拡径杭)

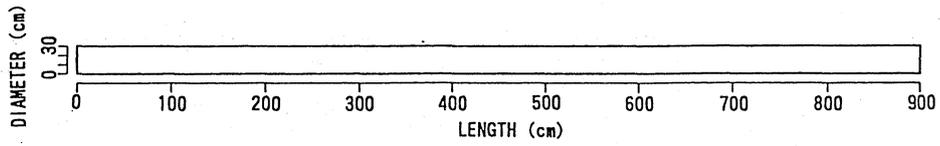


(i) モデル図 ( $d_1=500\text{mm}$ 、 $d_2=600\text{mm}$ 、 $\ell=9\text{m}$ の拡径杭)

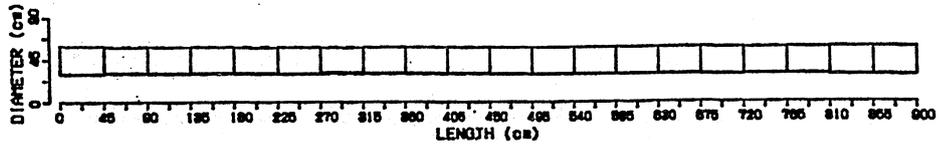


(i-1) 推定図 ( $d_1=500\text{mm}$ 、 $d_2=600\text{mm}$ 、 $\ell=9\text{m}$ の拡径杭)

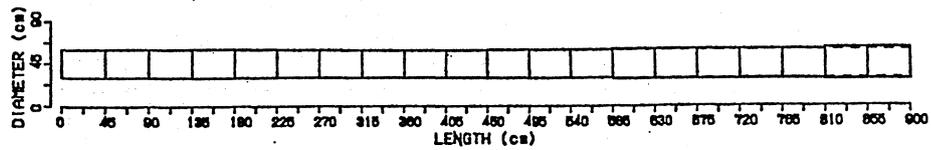
図-3.79 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (空中横置き杭)



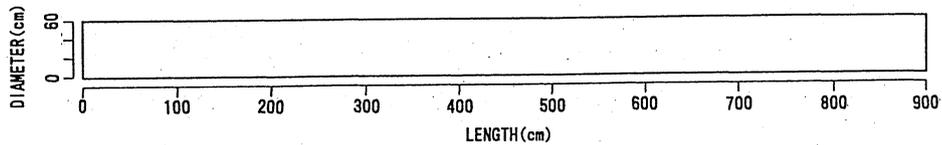
(a) モデル図 (d=300mm、 $l=9m$ )



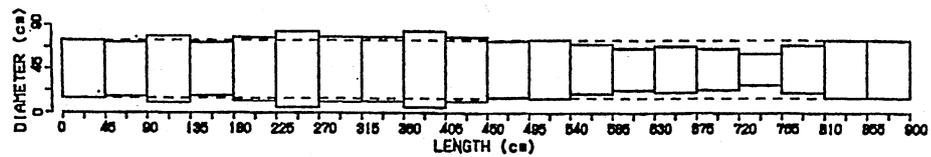
(a-1) 盛土直後の推定図 (d=300mm、 $l=9m$ )



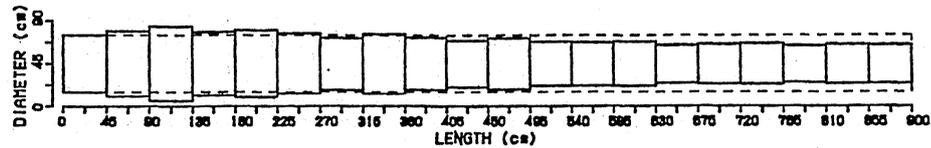
(a-2) 盛土後8時間の推定図 (d=300mm、 $l=9m$ )



(b) モデル図 (d=600mm、 $l=9m$ )

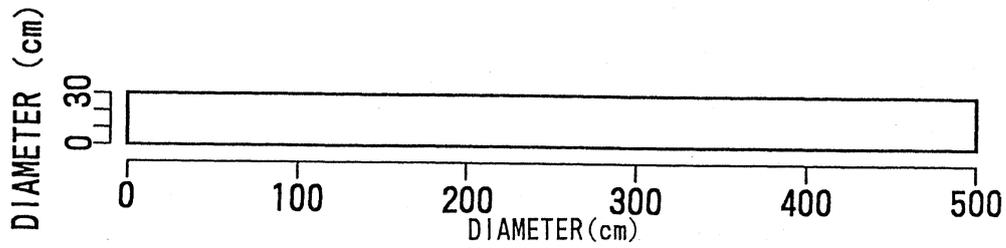


(b-1) 盛土直後の推定図 (d=600mm、 $l=9m$ )

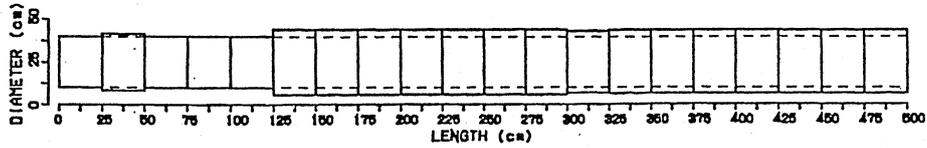


(b-2) 盛土後8時間の推定図 (d=600mm、 $l=9m$ )

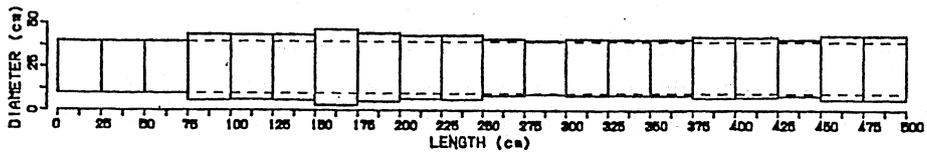
図-3.80 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (盛土杭の定径杭)



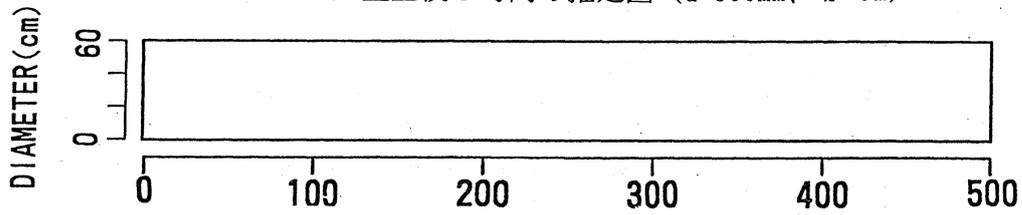
(c) モデル図 (d=300mm、 $l=5m$ )



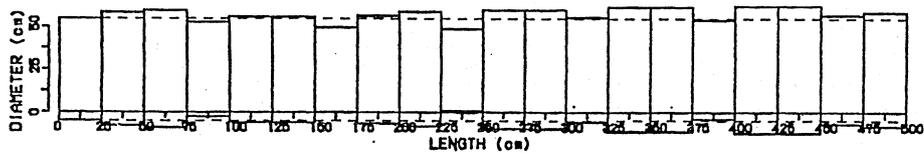
(c-1) 盛土直後の推定図 (d=300mm、 $l=5m$ )



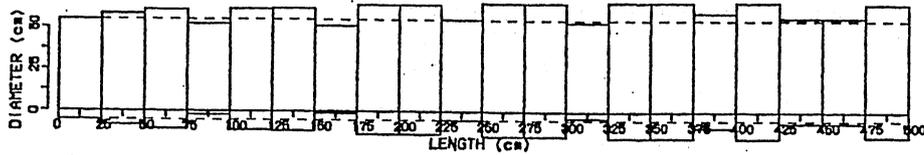
(c-2) 盛土後8時間の推定図 (d=300mm、 $l=5m$ )



(d) モデル図 (d=600mm、 $l=5m$ )

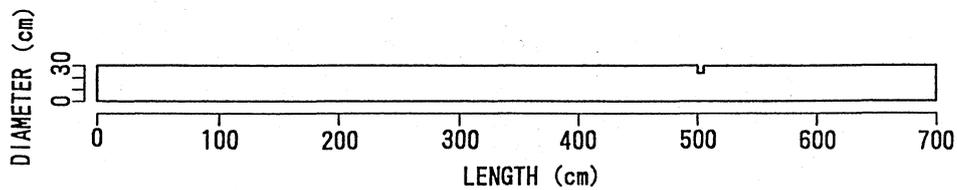


(d-1) 盛土直後の推定図 (d=600mm、 $l=5m$ )

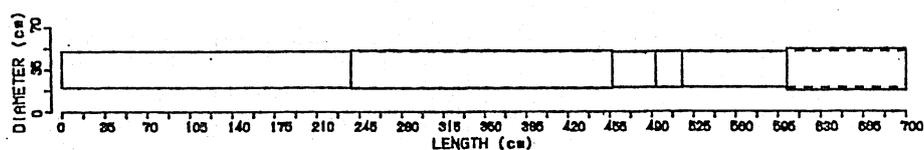


(d-2) 盛土後8時間の推定図 (d=600mm、 $l=5m$ )

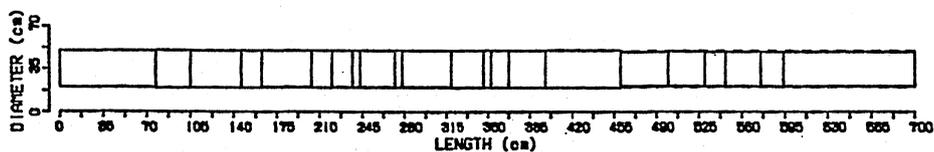
図-3.80 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (盛土杭の定径杭)



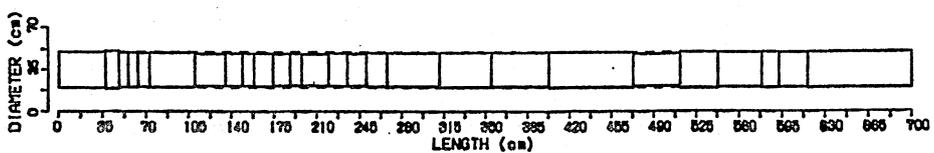
(a) モデル図 (欠損率=25%)



(a-1) 盛土直後の推定図 (欠損率=25%)

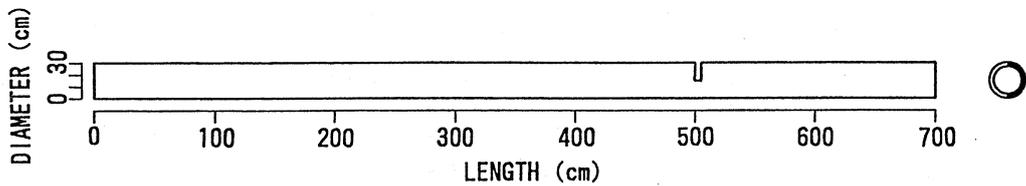


(a-2) 盛土後8時間の推定図 (欠損率=25%)

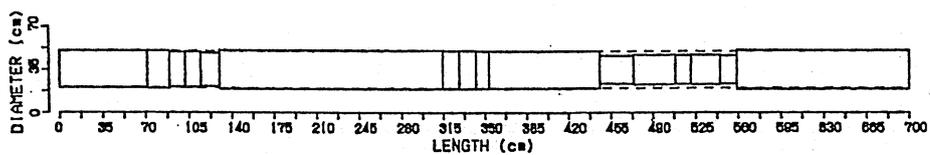


(a-3) 盛土後24時間の推定図 (欠損率=25%)

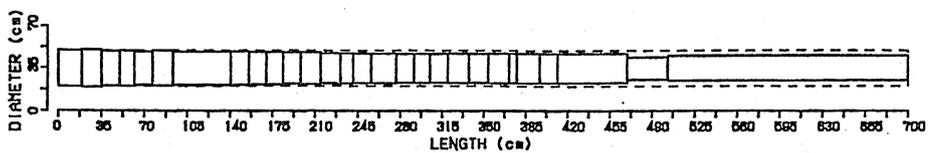
図-3.81 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (盛土杭の欠損杭(d=300mm、 $l=7m$ )



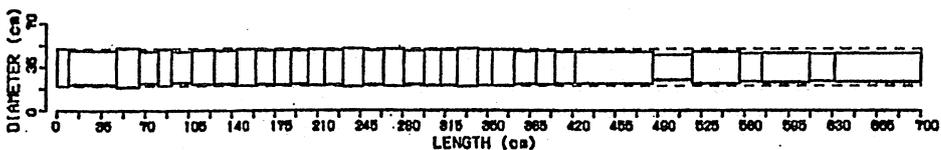
(b) モデル図 (欠損率=50%)



(b-1) 盛土直後の推定図 (欠損率=50%)

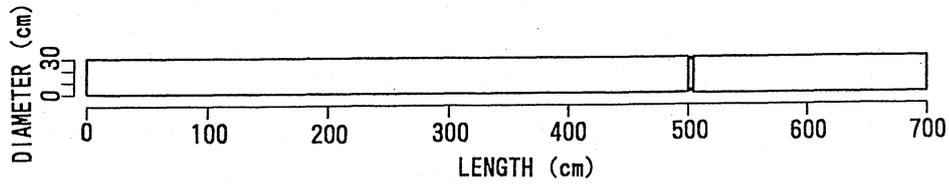


(b-2) 盛土後8時間の推定図 (欠損率=50%)

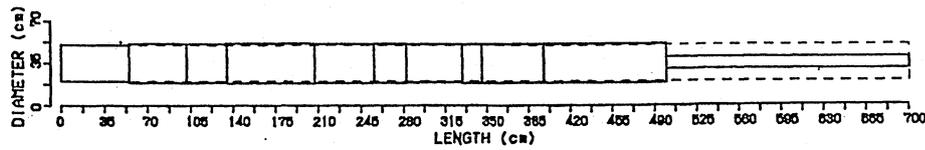


(b-3) 盛土後24時間の推定図 (欠損率=50%)

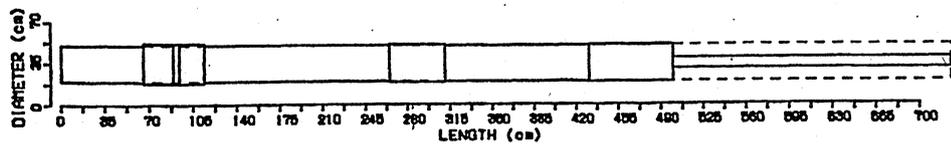
図-3.81 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (盛土杭の欠損杭(d=300mm、 $l=7m$ )



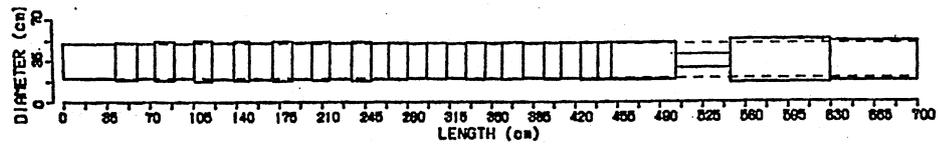
(c) モデル図 (欠損率=100%)



(c-1) 盛土直後の推定図 (欠損率=100%)

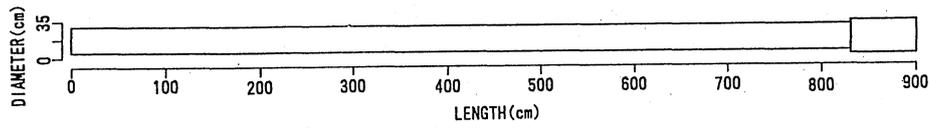


(c-2) 盛土後8時間の推定図 (欠損率=100%)

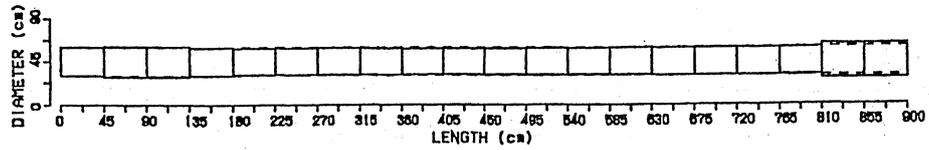


(c-3) 盛土後24時間の推定図 (欠損率=100%)

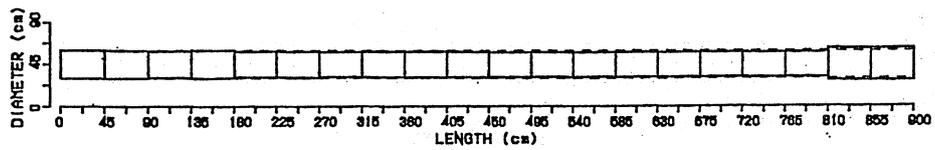
図-3.81 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (盛土杭の欠損杭( $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ ))



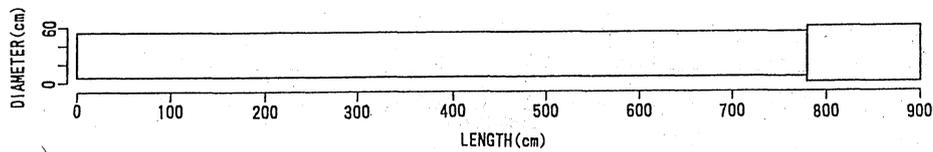
(a) モデル図 ( $d_1=300\text{mm}$ 、 $d_2=350\text{mm}$ 、 $\ell=9\text{m}$ )



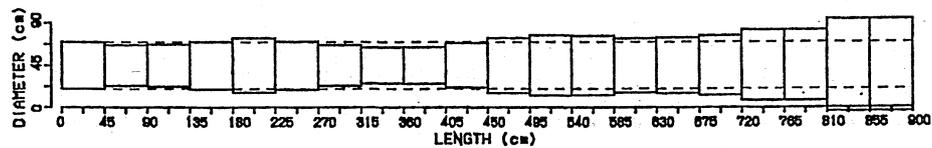
(a-1) 盛土直後の推定図 ( $d_1=300\text{mm}$ 、 $d_2=350\text{mm}$ 、 $\ell=9\text{m}$ )



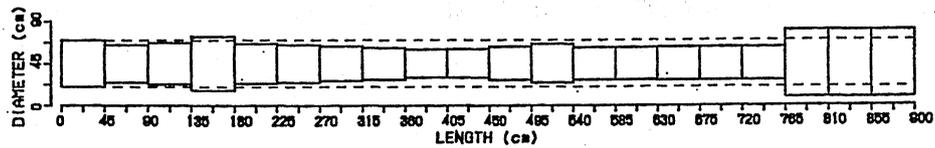
(a-2) 盛土後24時間の推定図 ( $d_1=300\text{mm}$ 、 $d_2=350\text{mm}$ 、 $\ell=9\text{m}$ )



(b) モデル図 ( $d_1=500\text{mm}$ 、 $d_2=600\text{mm}$ 、 $\ell=9\text{m}$ )



(b-1) 盛土直後の推定図 ( $d_1=500\text{mm}$ 、 $d_2=600\text{mm}$ 、 $\ell=9\text{m}$ )



(b-2) 盛土後24時間の推定図 ( $d_1=500\text{mm}$ 、 $d_2=600\text{mm}$ 、 $\ell=9\text{m}$ )

図-3.82 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (盛土杭の拡径杭)

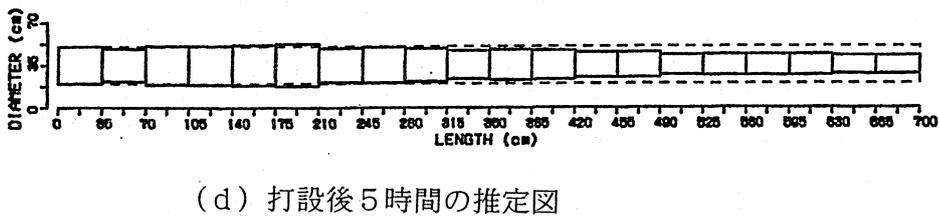
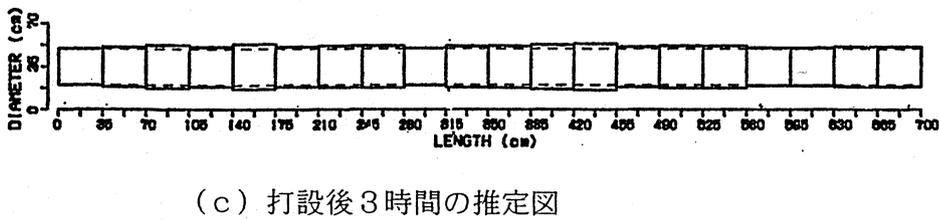
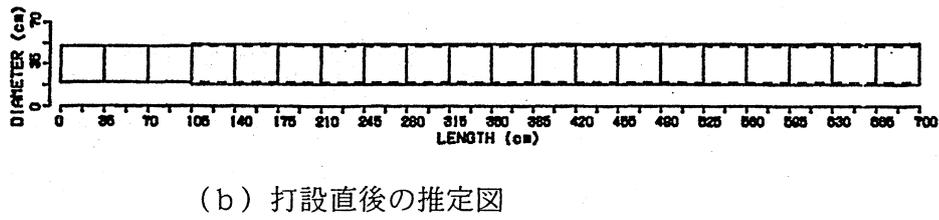
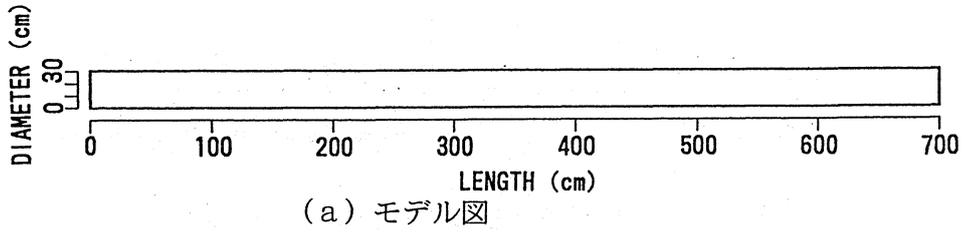
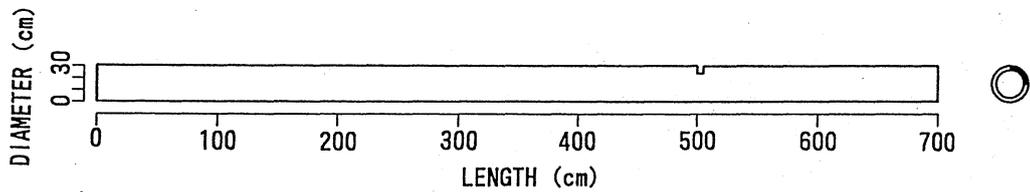
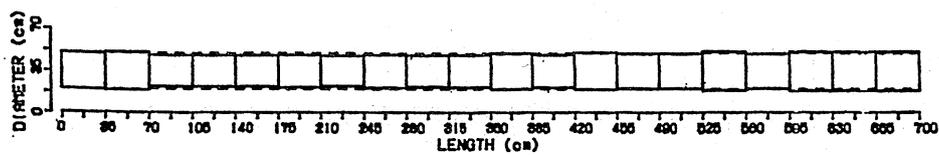


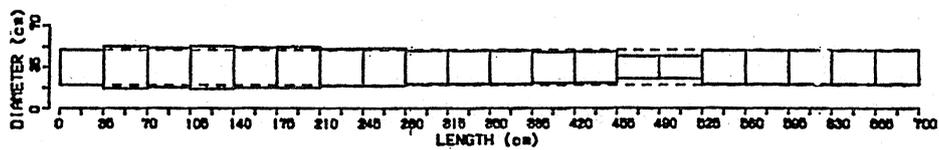
図-3.83 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (打設杭の定径杭( $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ ))



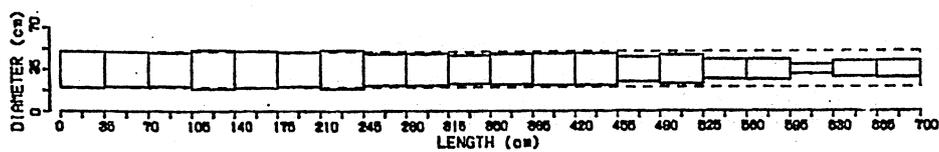
(a) モデル図 (欠損率=25%)



(a-1) 打設直後の推定図 (欠損率=25%)

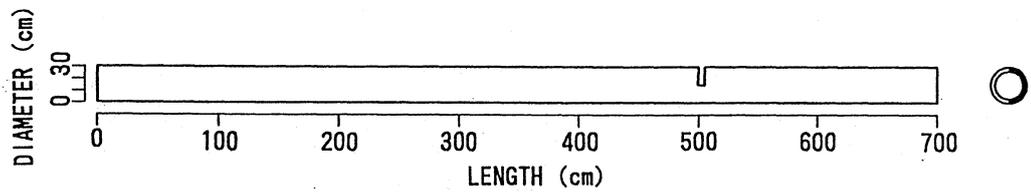


(a-2) 打設後1時間の推定図 (欠損率=25%)

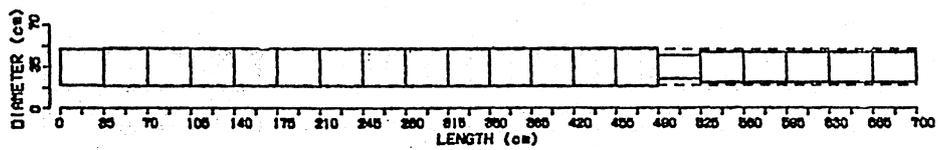


(a-3) 打設後5時間の推定図 (欠損率=25%)

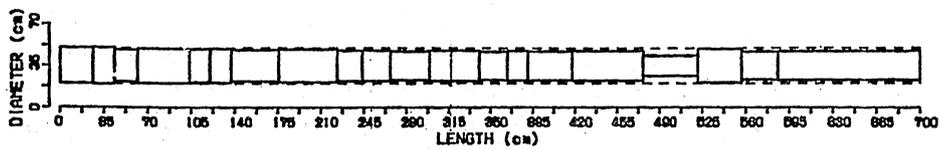
図-3.84 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (打設杭の欠損杭( $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ ))



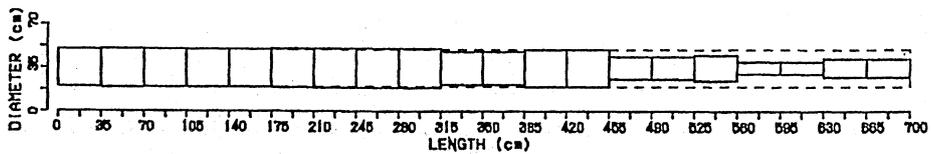
(b) モデル図 (欠損率=50%)



(b-1) 打設直後の推定図 (欠損率=50%)

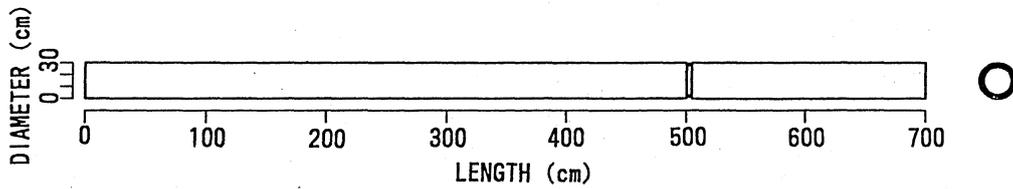


(b-2) 打設後1時間の推定図 (欠損率=50%)

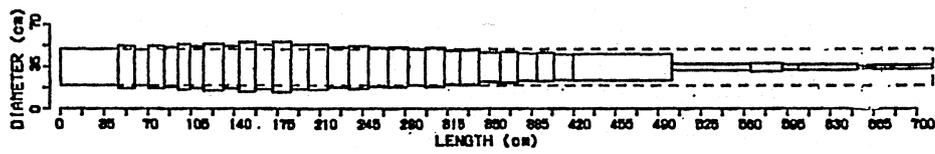


(b-3) 打設後5時間の推定図 (欠損率=50%)

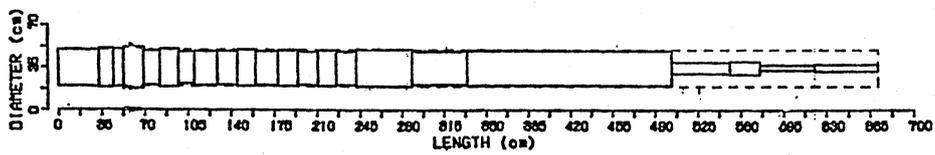
図-3.84 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (打設杭の欠損杭( $d=300\text{mm}$ 、 $l=7\text{m}$ ))



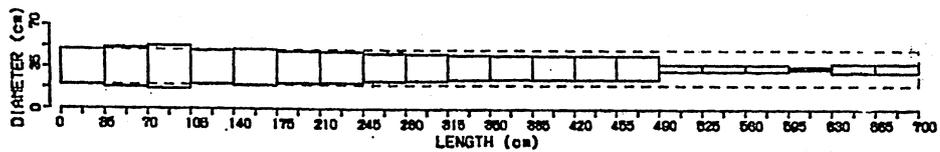
(c) モデル図 (欠損率=100%)



(c-1) 打設直後の推定図 (欠損率=100%)



(c-2) 打設後1時間の推定図 (欠損率=100%)



(c-3) 打設後5時間の推定図 (欠損率=100%)

図-3.84 コンクリート基礎杭の形状推定結果 (打設杭の欠損杭(d=300mm、 $l=7m$ ))

## 第4章

衝撃弾性波法を適用した  
兵庫県南部地震による  
コンクリート基礎杭の被害調査

## 第4章

# 衝撃弾性波法を適用した兵庫県南部地震による コンクリート基礎杭の被害調査

### 4. 1 概 説

1995年1月17日（火）午前5時46分、兵庫県南部を震源とするマグニチュード7.2の直下型地震が発生した。この地震は、建築物・家屋被害11万棟以上の甚大な人的・物的被害をもたらし、戦後最大の惨事となった。今回の地震は、国内では戦後初めて大都市地域を襲った直下地震で、死傷者数、被害規模、被害レベル等は近代都市で発生した地震災害として世界的にも稀なもので、地震工学、耐震工学、地震防災、都市防災等の各分野に携わる研究者、技術者に強い衝撃を与えた。当然、地震による基礎構造物への影響も多く確認されており、その被害の多くは、地盤の液状化による建築物の移動、あるいは、地盤の移動に伴う杭の破損等が挙げられる。実際の基礎構造物の中で、周辺地盤と基礎との間に空間が生じ直接杭頭部を観察できたケースでは、杭頭とフーチングとの接合部の破損例、建設中の構造物では、地盤内部での杭の破損例も報告されている。上部構造物の破損が顕著であった高架道路においては、杭の破損調査は地震直後に既に実施されているが、建築物においては、建設中の杭基礎の破損調査や倒壊した上部構造を取り除いた後に既存の杭基礎が安全であるか否かを調査する例が、非常に多くなっている。

本研究では、第3章で提案した衝撃弾性波法の適用性を確認することを目的として、兵庫県南部地震による杭基礎の被害調査を行った。

### 4. 2 調査概要

表-4.1は、兵庫県南部地震によるコンクリート基礎杭の被害の調査概要を示したものである。震災直後の2月2日から6月9日にわたり、兵庫地区を中心に35例の被害調査を実施した。調査対象は、マンション、事務所、倉庫、小学校、中学校などの民間建築物、公共教育機関、橋脚などで、調査時の杭頭部の状況は、大きく分類すると健全、クラック

あり、破断の3つに分けられる。計測条件は、杭頭とフーチングの接合状況、杭頭の状況等によって大きく異なるため、以下に示すような加速度計の設置位置と衝撃弾性波の入力位置で、幾つかの計測方法を併用して欠陥調査を実施した。

調査対象とした構造物は、既存の建物が80%で、建設中の建物が20%であった。なお、20%の建設中建物の殆どが杭施工中あるいは施工終了の根切りの段階での調査であった。調査を行った杭は、既製コンクリート杭、場所打ち杭および鋼管杭の3種類で、それらの杭径は、既製杭が350~600mm、場所打ち杭が1000~1800mmの範囲であった。杭長は、9~43mの範囲で、多くは25m前後であった。杭頭の状況は、既存構造物が多いことから、調査対象杭の杭頭が地上に露出していない場合が殆どで、計測方法の工夫が必要であった。また、非破壊試験後、杭の損傷程度を正確に把握するために、一部でボアホールボーリング等による詳細調査を実施した。

#### 4. 3 調査方法（計測手法）

##### 4.3.1 非破壊試験方法

本計測では、非破壊試験機としてオランダIFCO社製のITシステムを用いた。ITシステム、は打設直後の杭の品質確認試験に一般的に利用されるため、杭頭にセンサーを置いた後杭頭をハンマーで軽打して計測を行っている。今回のように地震によって被害を受けた杭の欠陥調査に適用する場合には、前述したように計測方法の工夫が必要となる。図-4.1および図-4.2には、既製杭および場所打ち杭に適用した計測方法を示す。すなわち、施工中の杭であればフーチング基礎の解体・撤去後は杭頭が露出するため、これに直接センサーを置き杭頭をハンマーで軽打して調査を行ったが（図-4.1（a）、（b）、図-4.2（a））、杭頭とフーチングが結合されたままで杭頭が露出されていない場合は、上記の方法は適用できない。そこで、杭の周囲を掘削し、杭頭部の周囲にケミカルアンカーまたはホールインアンカーを打ち込み、杭頭部の側面にセンサーを横付けしハンマーでアンカーを軽打して調査を行った（図-4.1（c））。ただし、アンカーの設置が困難な場合には、杭側面に穴をあけ、鉄筋等で軽打する方法（図-4.1（d））やフーチング基礎上端部を打撃して計測する方法（図-4.1（e）、図-4.2（c））を用いた。また、場所打ちコンクリート杭の場合には、杭側面をはつりカケヤで打撃する方法も用いた（図-4.2（b））。その他、基礎上にセンサーを置き、基礎上をハンマーで軽打する方法（図-4.1（f））、基礎上端から杭頭付近まで

センサー用と打撃用の2箇所のコアボーリングを行い、鉄筋棒等を利用し打撃を行う方法（図-4.1（g）、図-4.2（d））も用いた。

#### 4.3.2 ボアホール調査方法

ITシステムを用いて杭の健全性を調査した杭の中から損傷が推定された場所打ちコンクリート杭（図-4.16および図-4.17参照）については、ボアホールカメラによる孔壁撮影を行い、損傷の大きさ等を確認した。撮影のために必要な測定孔は、以下の要領で作成した。

- ①杭中央にボーリングマシンを設置する。
- ②削孔はダイヤモンドビット掘りとし、削孔径は66mmで清水を循環水として使用した。
- ③削孔長2mのダブルコアチューブを使用し、1m毎に収納、観察した。
- ④ボーリング終了後孔内を清掃し、24時間放置後に観察を行った。

この測定孔とコア試料を利用して調査を行った。まず最初に、非破壊試験により損傷が推定された深度のコア試料を用いてクラックの幅等を確認し、その後ボアホールを利用してボアホールカメラやボアホールスキャナーでクラックを直接撮影した。

### 4.4 調査結果

#### 4.4.1 既製コンクリート杭の調査結果

図-4.3および図-4.4は、基礎構造解体後に図-4.1（a）に示す計測方法で得られた検出波形の例である。図-4.3によれば、打撃波および杭先端からの反射波がともにかなり明確に捕らえられており、杭長もかなりの精度で推定できている。また、打撃波と反射波との間に特に問題となる反射波は観察されず、健全と判断した波形である。一方、図-4.4の場合には、杭頭から5mの付近に打撃波と同成分の反射波があり、この付近で杭にクラック等の断面欠損があると推定される。ただし、基礎構造解体後図-4.1（a）の方法で計測する場合には杭頭の状態が悪いこともあり、注意が必要なケースもあった。

図-4.5および図-4.6は、同一建物で複数の杭を対象として図-4.1（c）の方法で計測した結果を示したものであるが、いずれもホールインアンカーの設置状況がよく鮮明な検出波形が得られている。図-4.5によれば、打撃波および先端からの反射波を明瞭に確認でき、この杭は健全と判断できるが、図-4.6の場合には、杭頭から約5m

付近に打撃波と同符号の反射波が確認され、この付近で損傷を受けていることが予測される。このことから、杭頭にセンサーを置き、杭頭をハンマーで軽打する方法以外にも、図-4.1(c)の方法によって計測が可能であると思われる。

図-4.7および図-4.8は、同じ杭に対してそれぞれ図-4.1(c)の方法で計測した場合およびそのフーチング基礎を半分解体し図-4.1(b)の計測方法で再度計測した場合の結果を示したものである。図-4.7によれば、検出波形から判断すると、7mの位置で破断していると推定される。ただし、ハンマーで数回打撃するとアンカーが抜け落ちてしまうほどホールインアンカーの設置状況が悪かったため、検出波形にはアンカーの振動の影響がかなり含まれていると思われる。また、計測方法を変えて再度計測した場合(図-4.8を参照)には、先端からの反射波は不鮮明ではあるものの確認できており、健全と推定できる。ただし、図-4.1(c)の方法で計測する場合には、検出波形がアンカーの設置状況によってかなり影響されるため、注意する必要がある。

図-4.9は、図-4.1(f)の方法で計測した検出波形を示したものであるが、杭頭の位置さえ確定できれば、この方法が適用可能であることを示している。

図-4.10および図-4.11は、図-4.1(g)の方法で計測した同一データで、図-4.10が計測時の生データ、図-4.11が波形処理を施したものである。図-4.10の場合には、鉄筋棒を用いて打撃しているためか、かなり高周波のノイズが観察され、検出波形だけでは健全性を判断するのが困難であるが、図-4.11のように高周波成分のノイズを取り除く波形処理を行うと、ある程度明確な検出波形となっているのがわかる。しかし、フーチング基礎の直上に柱があるとコアボーリングができないため、この計測方法を用いることはできない。

#### 4.4.2 場所打ちコンクリート杭の調査結果

図-4.12および図-4.13は、図-4.2(b)の方法で計測した同一データで、図-4.12が計測時の生データ、図-4.13が波形処理を施したものである。図-4.12の場合には、アンカー用の鉄筋が突き出ているため、鉄筋から発生するノイズが含まれていると思われる。しかし、波形処理を行うことによって、図-4.13に示すようにある程度高周波成分のノイズを消去できることがわかる。図-4.14は、拡径杭に対して図-4.2(c)の方法で計測した検出波形を示したものである。図によれば、打撃波と拡径部および杭先端からの反射波は、明確に確認できている。ただし、波形処理を行ってもフーチング基礎上部からの多重反射と思われる波形を取り除くことができず、杭の健全性の判断を行う場合に、クラックによる反射波との区別が難しく注意を必要とする。

図-4.15は、図-4.2(d)の方法で計測した検出波形であるが、フーチングの影響を取り除くことはかなり難しいことがわかる。

#### 4.4.3 耐震場所打ち拡張杭の調査結果

本調査では、杭施工終了後の掘削中に震災に遭い、土留め壁が傾斜した工事現場で杭の損傷調査をITシステムを用いて行った結果、大きな損傷があると推定された杭に対して一部ボアホールボーリングを行い、ボアホールスキャナーを利用した詳細調査を行った。図-4.16および図-4.17は、図-4.2(a)の方法で得られた検出波形である。これらの図によれば、図-4.16では約8m付近から、図-4.17では約7m付近からそれぞれクラックからの反射波と思われる明確な波形が観察され、以後も同様の波形がほぼ同周期で繰返し観察されており、クラックが存在することを予想させる。この2本の杭に対してクラックの有無や幅等を検証するために、ボアホールカメラによる詳細調査を実施した。なお、クラック位置等は、ボアホールカメラの映像を展開図にし、その図から確認した。図-4.18は、図-4.16の杭に対するカメラの展開図を示したものであるが、8.02mの位置に約1.0mm程度の幅のクラックが確認できる。また、図-4.19は、図-4.17の杭に対するカメラの展開図であるが、これによれば6から7m付近に多数のクラックが確認され、特に6.94m付近には約2.0mm幅のクラックが確認できる。この位置は、ITシステムの反射波形から得られる結果とほぼ同じ位置であり、かなりの精度でクラック位置を推定できることがわかる。

以上のように、衝撃弾性波法を適用した実コンクリート基礎杭の欠陥調査においても、測定方法を工夫することによって、精度の良い形状推定調査が可能であることが確かめられた。

## 4.5 まとめ

衝撃弾性波法を適用して実際のコンクリート基礎杭の品質評価や欠陥調査等といった杭の健全性評価を行う場合、杭頭部の状況に応じて計測方法を工夫する必要がある。この点を踏まえて、本章では、幾つかの計測方法を提案するとともに、これらの適用性と波形処理方法について検討を行った。その結果、実現場へ適用可能な計測手法として表-4.2に示すような結果を得た。なお、表中には、ITシステム適用後の詳細調査の手法としてボアホールによるものも示してある。これらの手法を用いることによって、施工直後、基

礎立上り後、既存構造物の基礎、既存構造物の建替え時あるいは事故後の杭の健全性評価を比較的精度よく行うことが可能と考えられる。なお、本章で実施した杭の被害調査に対しても総合的に健全性評価を行うべきであるが、これを提案するとすれば、初期段階では杭頭の傾斜等による外観検査、中期段階では非破壊試験による形状推定検査、最終段階ではボアボーリングによる確認調査をそれぞれ順に適用することによって杭の健全性評価を行うことが賢明と考えられる。さらに、調査対象となった杭に対して、その杭の支持力評価を行うために第5章で提案するスタナミック試験を実施して調査対象杭の品質評価を行うことも、杭の品質保証を行ううえで非常に有効な手法であるものと考えられる。

## 第4章 付表、付図

表-4.1 兵庫県南部地震によるコンクリート杭の被害に関する調査概要

計測日	調査場所	杭仕様	杭径	杭長	計測本数	計測結果	杭頭状況	上部構造物	計測パターン
2月2日	和泉市	場所打ち	1000~	18	7	○7本		施工中	A、B
2日	西宮市	PHC	600	9	3	○2本・×1本	破断	8 FRC (新築中)	C
6日	西宮市	場所打ち	1200	21	5	○4本・×1本	クラック	1 F7-F7カ (新築中)	C
22日	西宮市	PC	400	14	16	○14本・×1本	破断	8 FRC (新築中)	C
22日	神戸市中央区	場所打ち	1000~	30	52	○31本・×21本		施工中	A、B、C、D、E
23日	大阪市堺市	PHC	500	43	1	○1本	健全	倉庫 (新築中)	d
3月7日	東灘区	PC	400	24	5	○4本・×1本・?1本	健全	タンクあり・フーチング落	c
7日	芦屋市	PHC	400	28~37	3		ヘアークラック	3 FRC (校舎)	c
7日	芦屋市	PHC	400	28~37	3		健全		c
8日	東灘区	PHC	500	28~37	4	○2本・×2本	健全	倉庫	c
10日	東灘区	PHC	600	28~32	4	○2本・?1本	健全	倉庫	c、d
11日	東灘区	PHC	400	29~33	3	○1本・×1本	健全	3 FRC (事務所)	c
12日	神戸市	PHC	400	9	2	○3本・×3本	健全	施工中	d
14日	中央区	PHC	600	17	6	○1本	健全	タンクあり・フーチング落	e
15日	東灘区	PC	400	24	1	○1本	健全	6 FRC (貸ビル)	c
15日	中央区	PC	350	13	4	○2本・?2本	2本破断	5 FRC (マンション)	c、e
15日	東灘区	PC	500	11.5	1	○1本	健全	橋脚	D、B
17日	明石市	場所打ち	1200~	8.5~9.5	8	○8本	健全	倉庫	c
17日	東灘区	PC	600	36	6	○6本	破断	6 FRC (マンション)	c
20日	西宮市	PC	400	23	4	○4本	ヘアークラック		c
21日	東灘区	PHC	600	9~11	33			施工中	a
22日	東灘区	PHC	800	29	4	○4本	健全	5 FRC (施工中)	c
23日	中央区	PC	350	13	2	○2本	2本破断	6 FRC (貸ビル)	d
24日	芦屋市	PC	500	29	4	○2本×2本	健全	2 FRC (事務所)	c
25日	芦屋市	PC	500	20	2	○2本		2 FRC (校舎)	c、e
26日	尼崎市	場所打ち	1000	10	11	○10本・?1本		高速橋脚	E
27日	神戸市	PHC	500	9	2	○1本・×1本	健全	3 FRC (事務所)	c
30日	東灘区	PHC	600	9~11	4		健全	施工中	c、a
28日	中央区	PHC	500	33	7	○7本	クラック		a
30日	東灘区	鋼管杭	600	25~30	7		キレツ有り	フーチングはつり	f、g
26日	東灘区	鋼管杭	600	25~30	7		キレツ有り	海中から引き抜き後試験	d
5月25日	神戸市兵庫区	PC	350	27	12			フーチング	f、g
26日	明石市	PC	400	19	22			はつり	d
27日	西宮市	PC	350	10	2	○1本・×1本	キレツ有り	体育館	c
6月8日	神戸市東灘区	PC	500	37	4	○2本・×2本		倉庫	c
9日	尼崎市	Xパイプ	350	21	20	○9本・×11本	キレツ有り	プール	c

表-4. 2 杭の健全性に対する評価方法

方法	概念図	作業手順	測定上の問題点	解析上の問題点	対応策
杭の打設直後のケース (基礎の解体・撤去後のケース)		<ul style="list-style-type: none"> <li>杭頭にセンサーを置き、杭頭をハンマーで軽打する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>場所打ち杭の場合、レイタンスや掘削に伴う微小クラックの発生によって、測定困難になることがある。</li> <li>鉄筋が突き出ているとノイズが発生しやすい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>突き出た鉄筋に起因するノイズは、フィルターをかけると、消去することができる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ITシステムでは本来、この状態で計測することを前提にしているため、特に対応策はない。</li> </ul>
杭頭に基礎があるケース		<ul style="list-style-type: none"> <li>杭頭部の周囲を掘削する。</li> <li>杭頭部の側面にケミカルアンカーまたはホールインアンカーを打ち込む。</li> <li>杭頭部の側面にセンサーを横付けし、ハンマーでアンカーを軽打する。</li> <li>可能ならば、基礎上部も打撃して、計測する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>掘削箇所が非常に狭い場合、作業性が悪い。</li> <li>基礎上部からの多重反射が検出された場合、測定波形のみから健全性を判断することができない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎上部からの多重反射が、コンピューター処理しても、減衰しないことがある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ステレオタイプの測定機によって計測すると、基礎上部からの波動を消去することができる。</li> </ul>
杭頭に基礎があり、掘削が不能となるケース		<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎上端から杭まで、センサー用と打撃用の2箇所のコアポリングを行う。</li> <li>打撃は鉄筋棒などを利用する。</li> <li>可能ならば、基礎上部も打撃して、計測する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎の上部に柱があると、コアポリングができないので、採用不能となる。</li> <li>基礎上部からの多重反射が検出された場合、測定波形のみから健全性を判断することができない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎上部からの多重反射が、コンピューター処理しても、減衰しないことがある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ステレオタイプの測定機によって計測すると、基礎上部からの波動を消去することができる。</li> </ul>
ボアホールを利用するケース (①ボアホールカメラ) (②ボアホールスキャナー)		<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎上部から杭中の所定の深度まで、コアポリングを行う。</li> <li>測定ソナードを孔内に降ろして、測定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎の上部に柱があると、コアポリングができないので、採用不能となる。</li> <li>ポリング径が大きいと、画像解像度が低下する。</li> <li>ポリング孔内の水が濁っていると、画像解像度が低下する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭体中の鉄筋の影響を受けるため、方位を特定することができない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭体中の鉄筋の影響を受けない方位径を開発中である。</li> </ul>

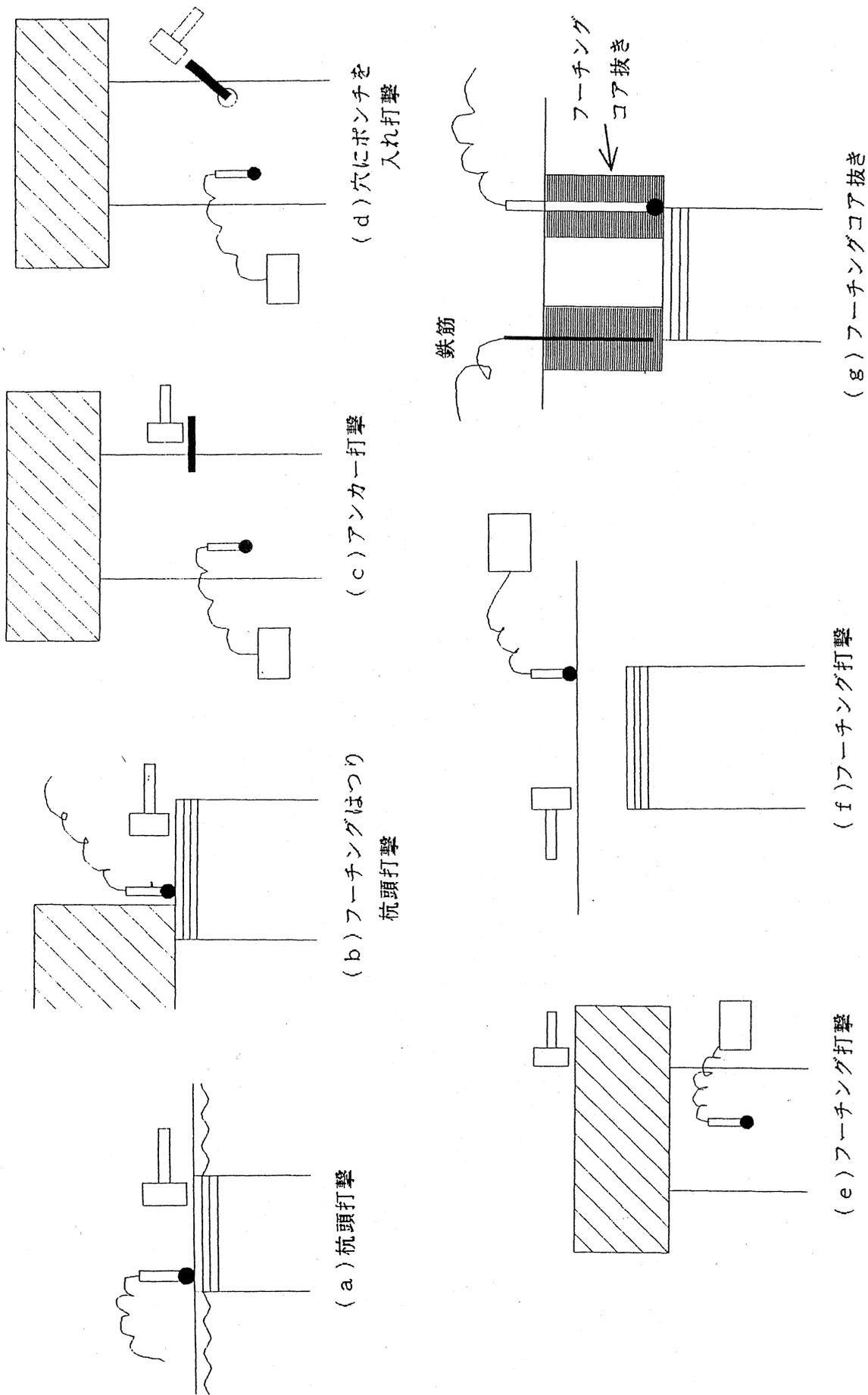
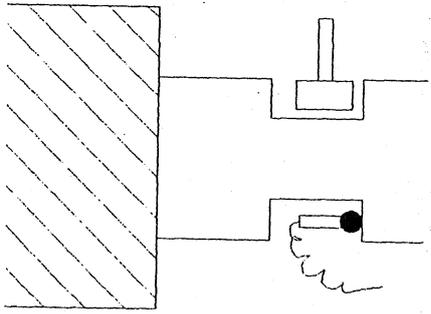
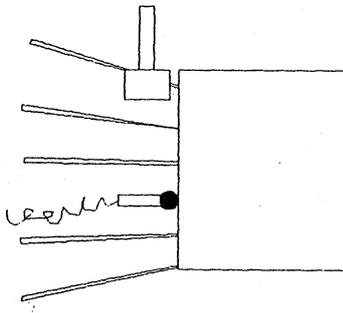


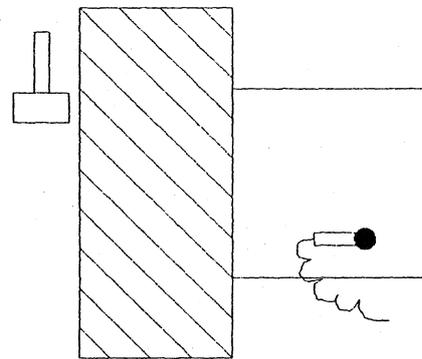
図-4. 1 既製杭の計測方法



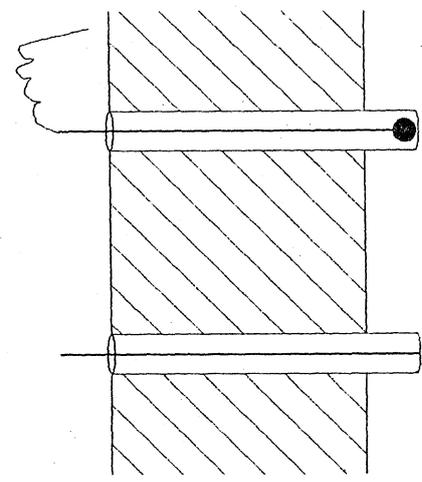
(a) 杭頭打撃



(b) 杭体をはつり  
カケヤで打撃



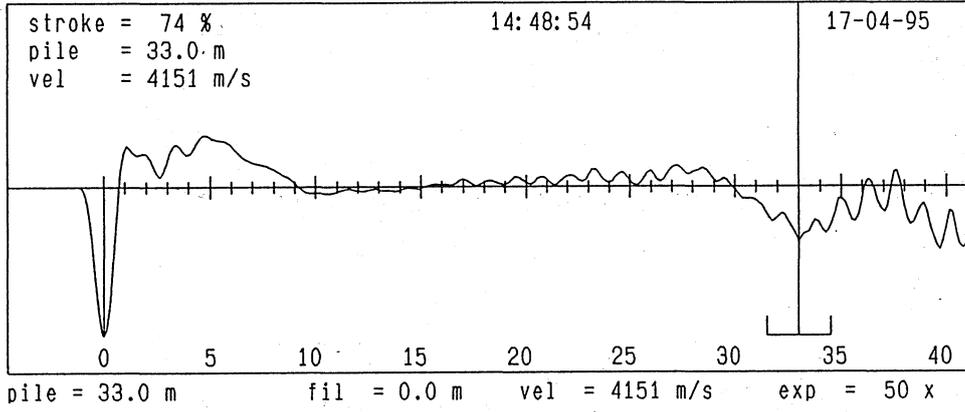
(c) フーチング上打撃



(d) フーチングコア  
抜き打撃

図-4. 2 場所打ちコンクリート杭の計測方法

pile number : 1.1



pile number : 1.2

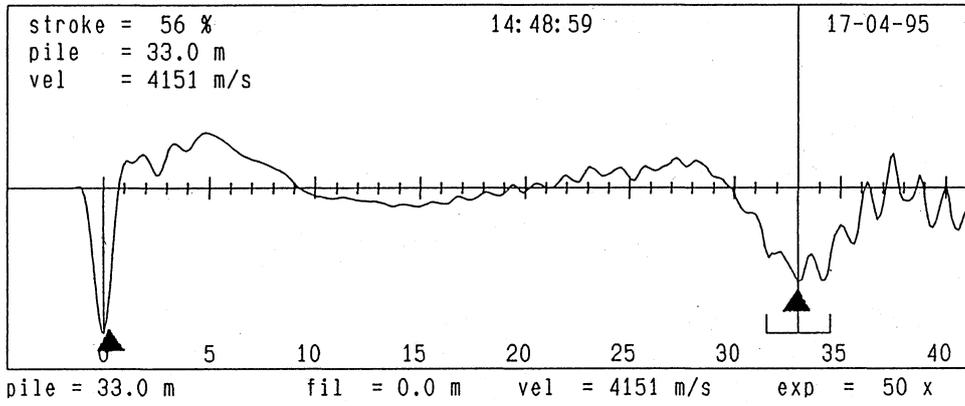
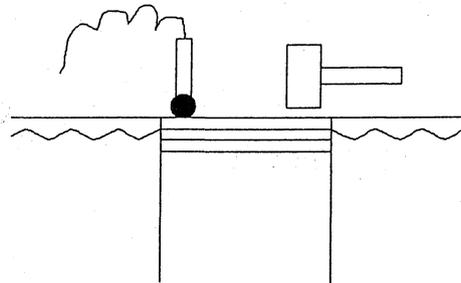
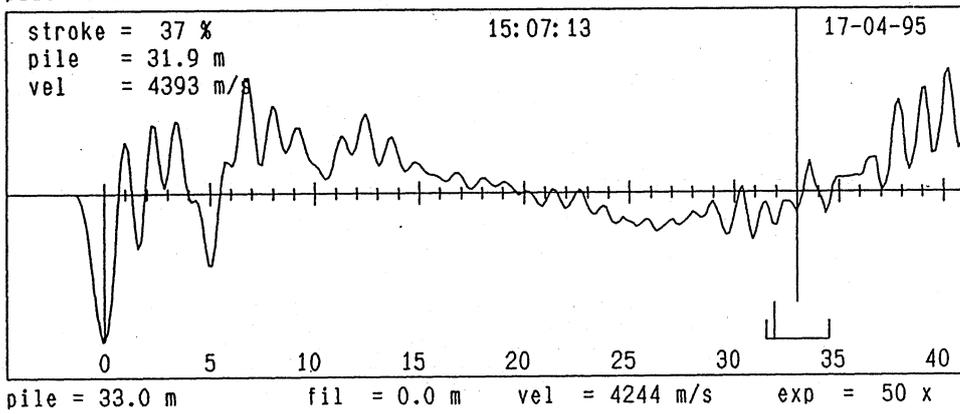


図-4.3 杭頭打撃による測定波形



pile number : 1.1



pile number : 1.2

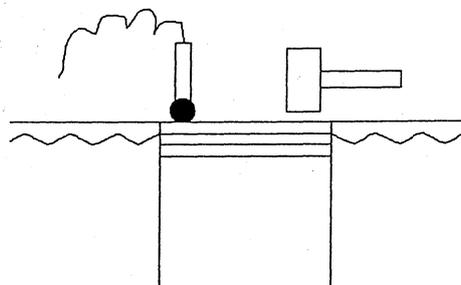
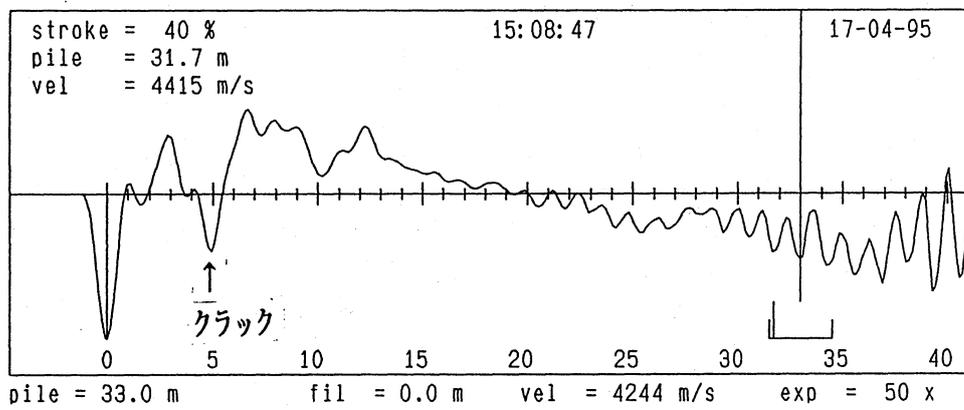
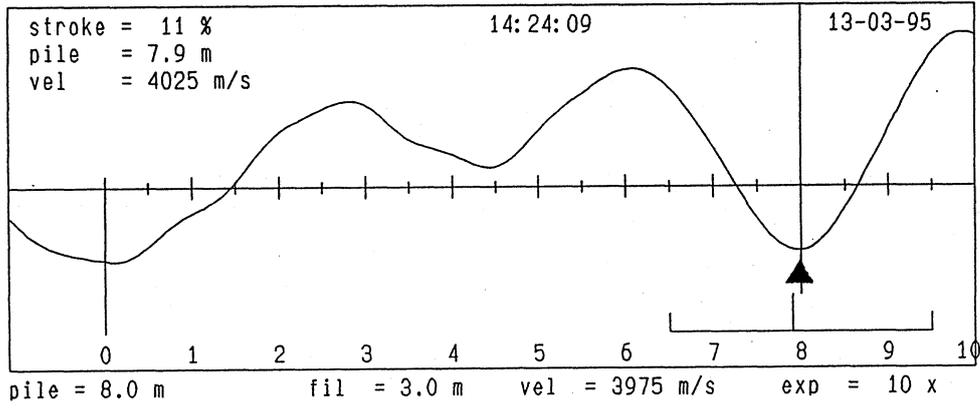


図-4.4 杭頭打撃による測定波形

pile number : 1.2



pile number : 1.1

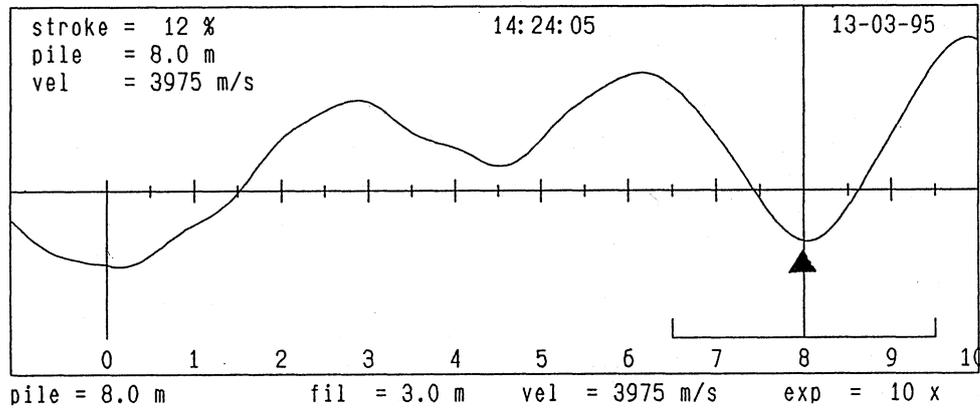
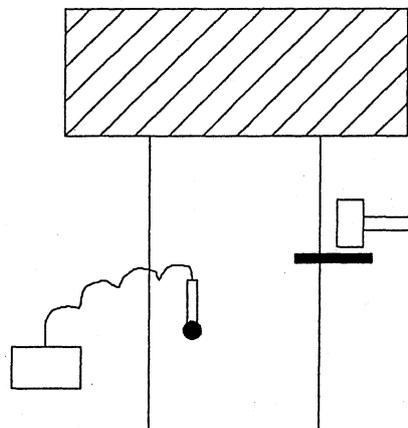
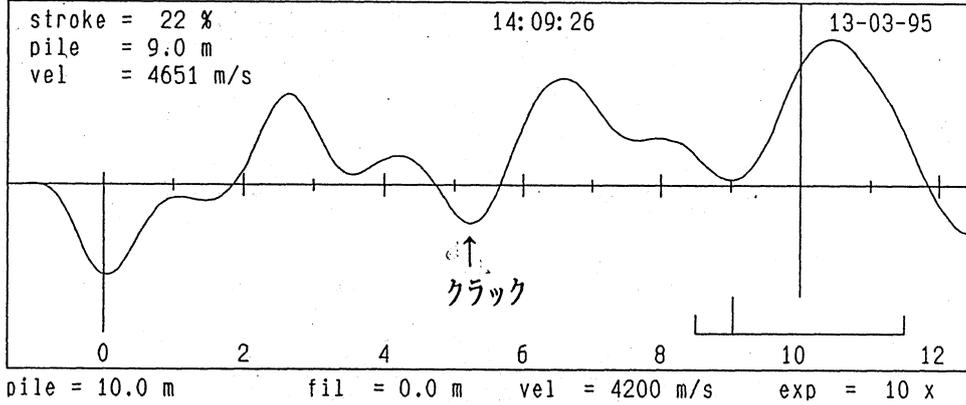


図-4.5 アンカー打撃による測定波形



pile number : 1.1



pile number : 1.2

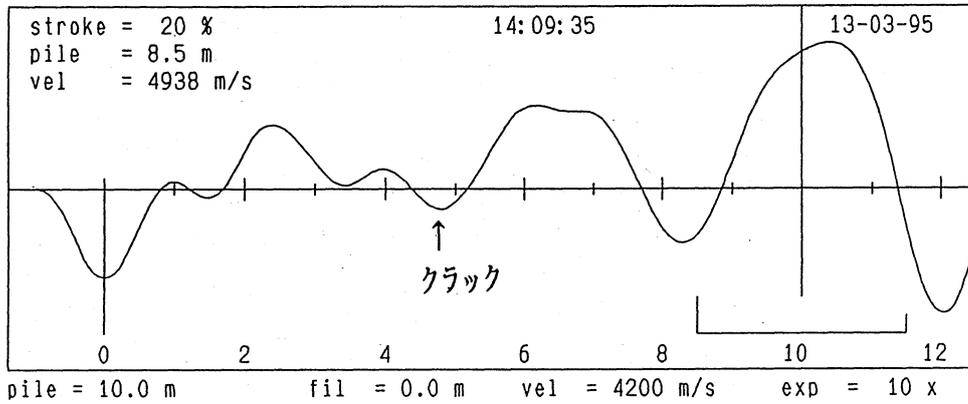
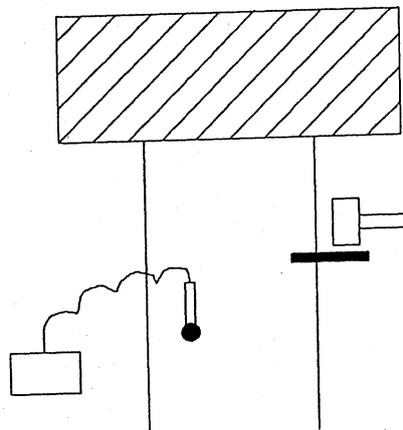
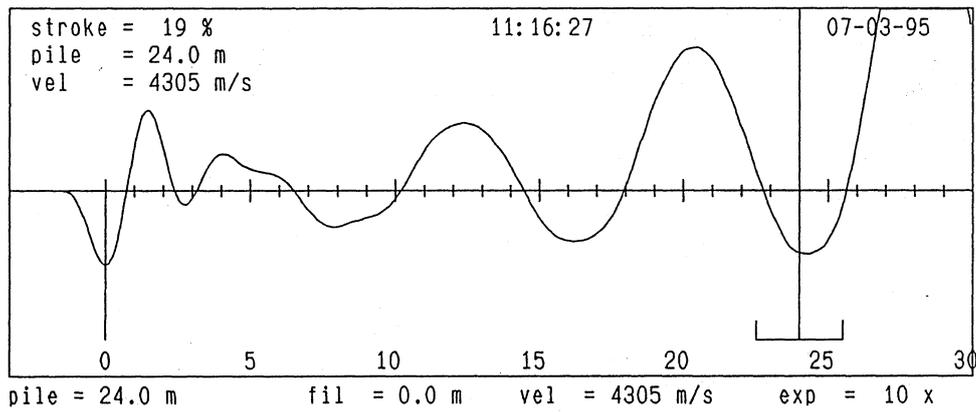


図-4.6 アンカー打撃による測定波形



pile number : 4.1



pile number : 4.2

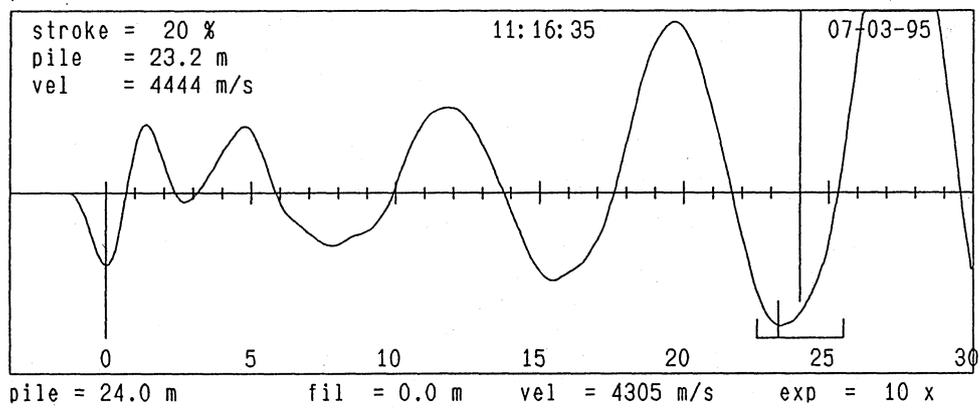
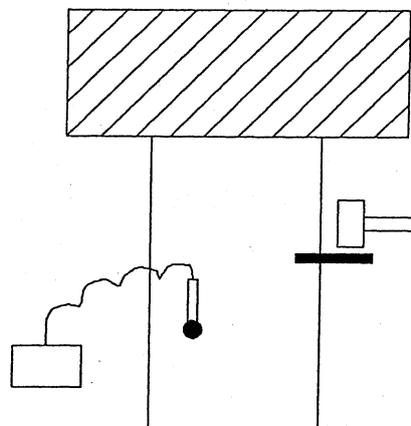
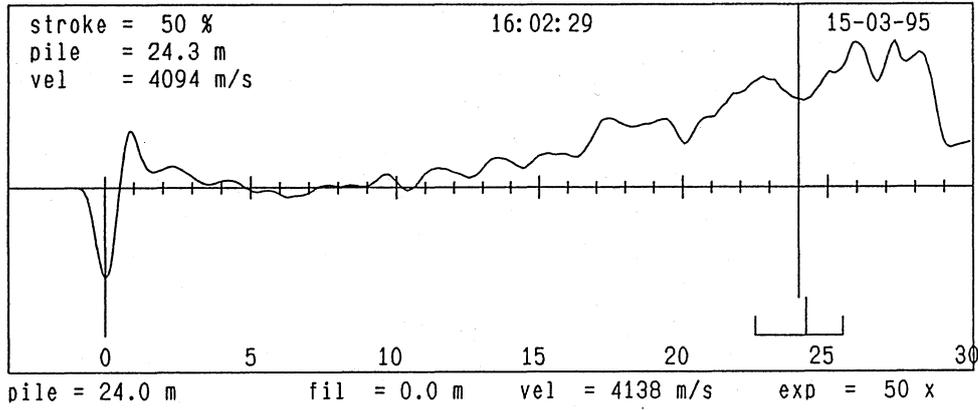


図-4.7 アンカー打撃による測定波形



pile number : 4.1



pile number : 4.2

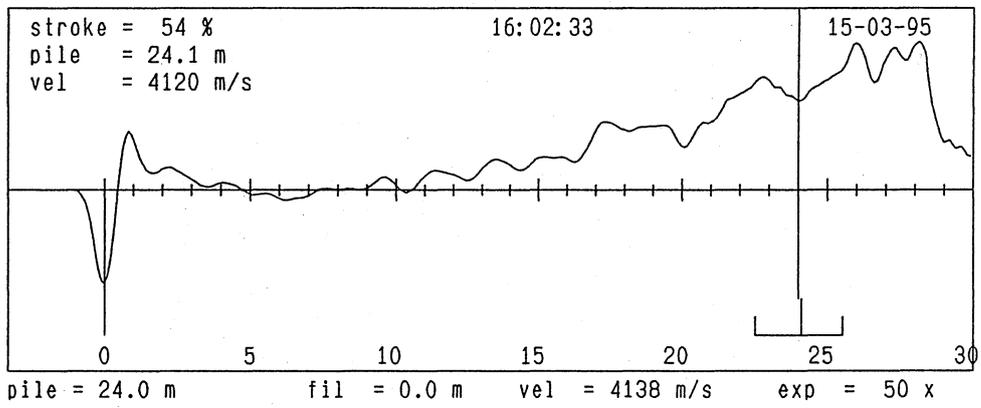
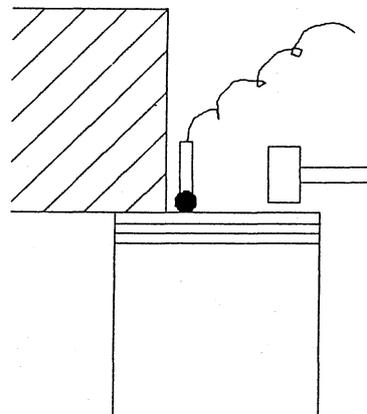
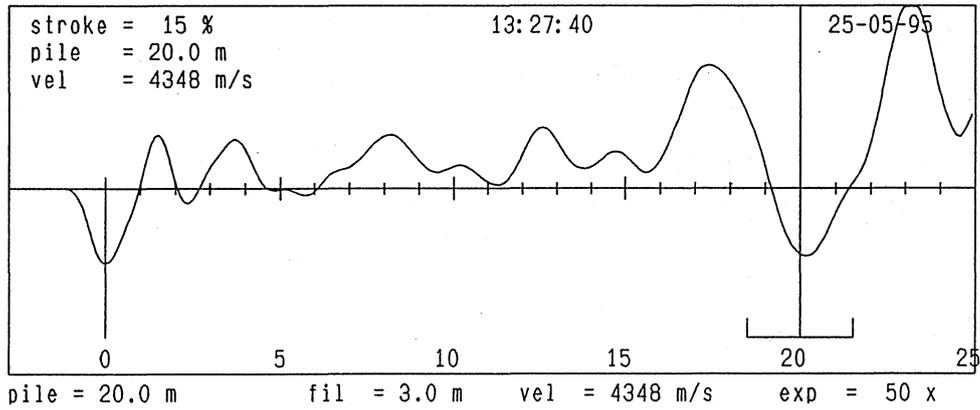


図-4.8 フーチングはつり杭頭打撃  
による測定波形



pile number : 1.1



pile number : 1.2

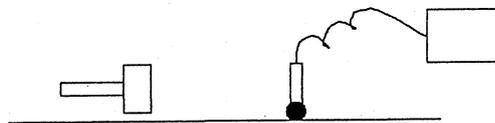
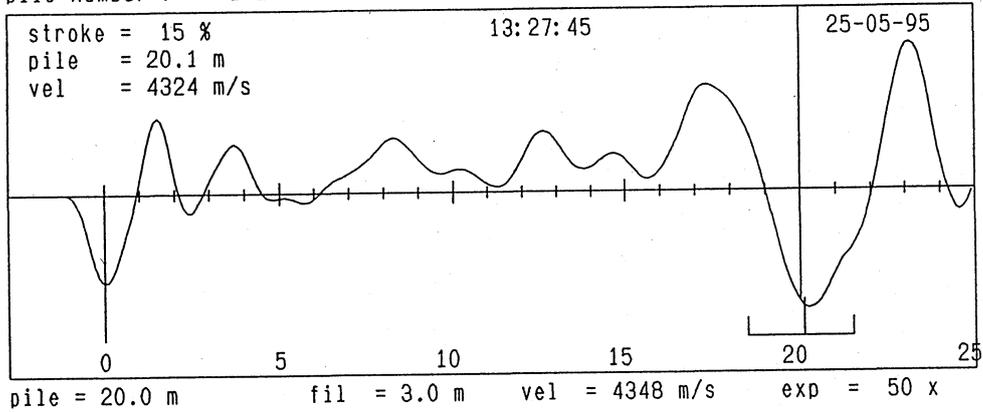
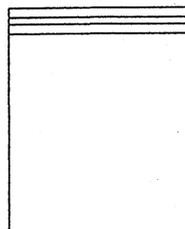
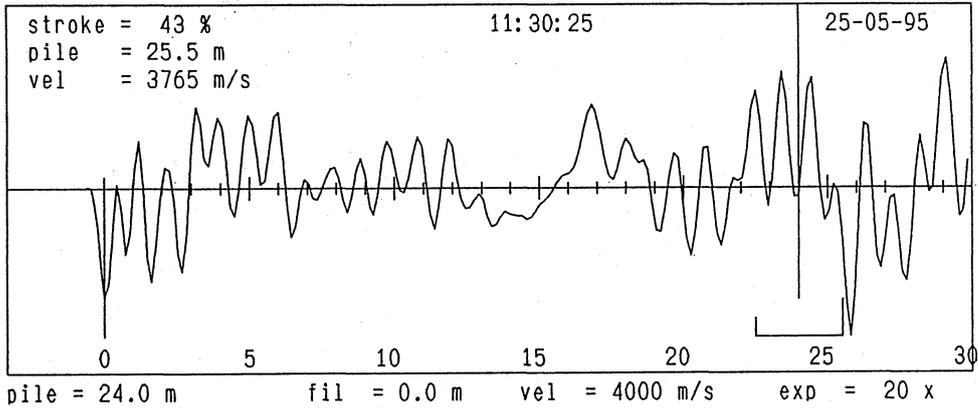


図-4.9 フーチング打撃  
による測定波形



pile number : 3.1



pile number : 3.2

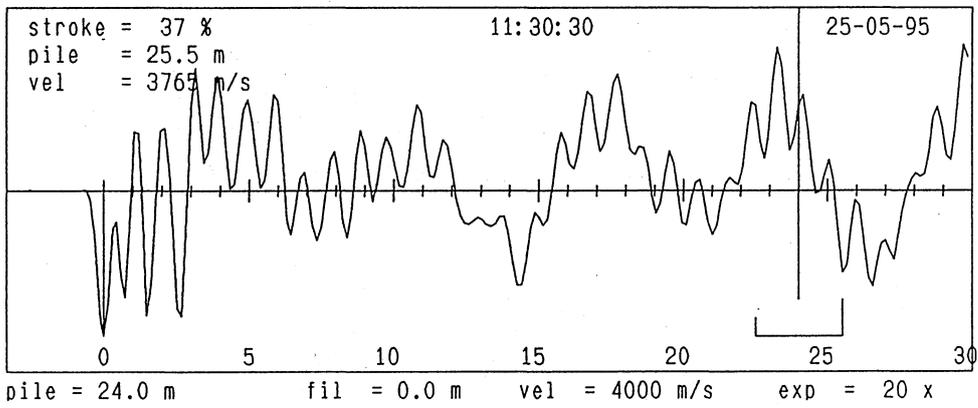
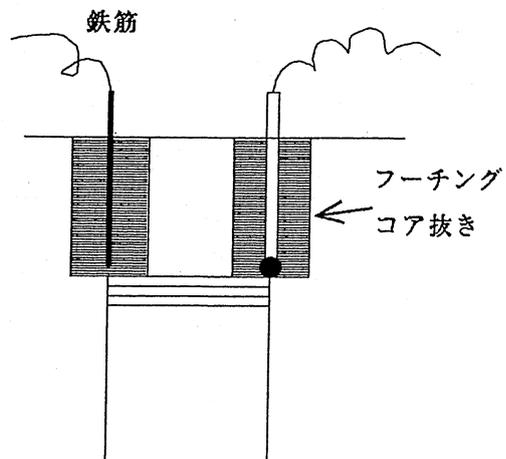
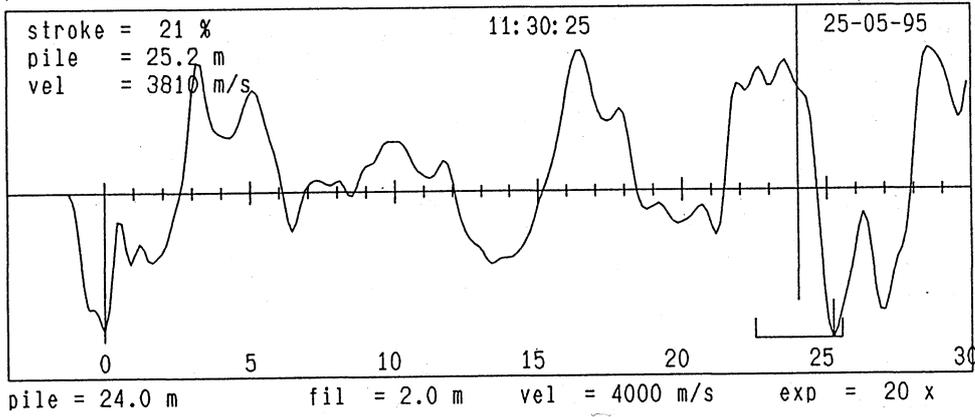


図-4.10 フーチングコア抜き  
による測定波形



pile number : 3.1



pile number : 3.2

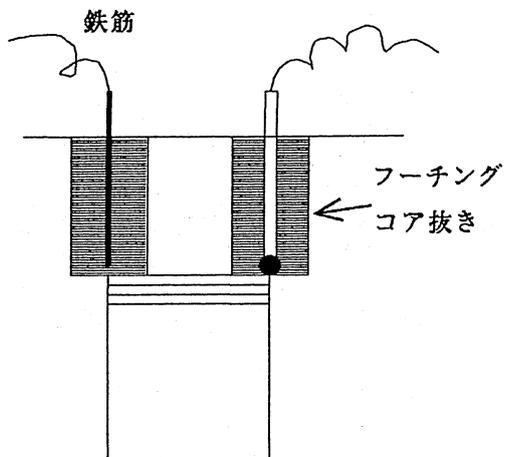
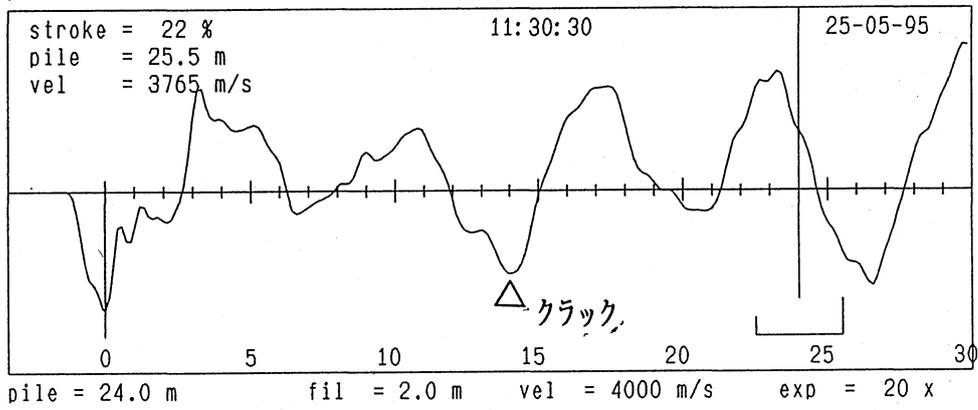
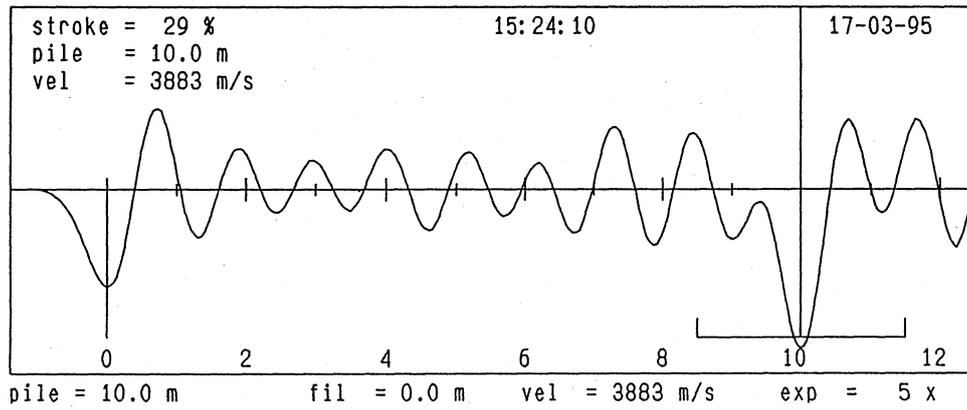


図-4.11 フーチングコア抜き

による測定波形

pile number : 1.1



pile number : 1.2

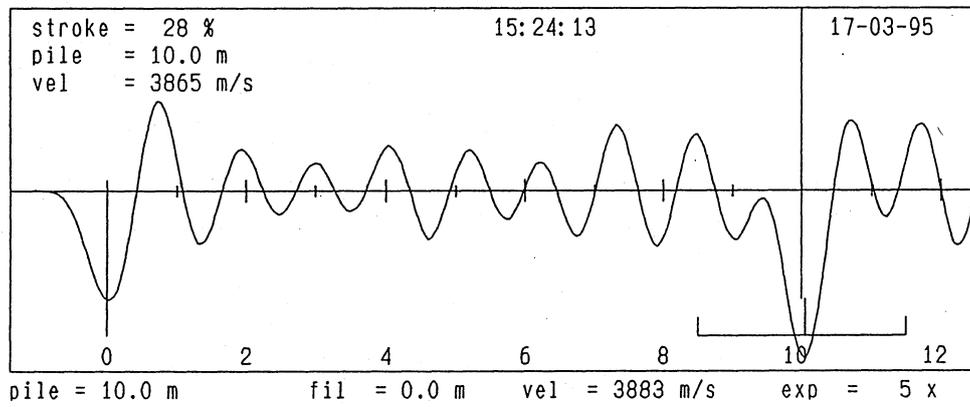
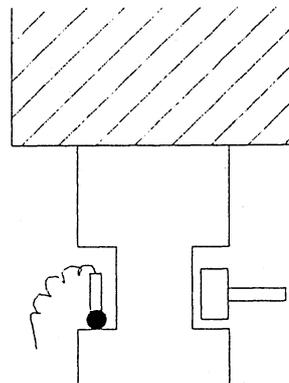
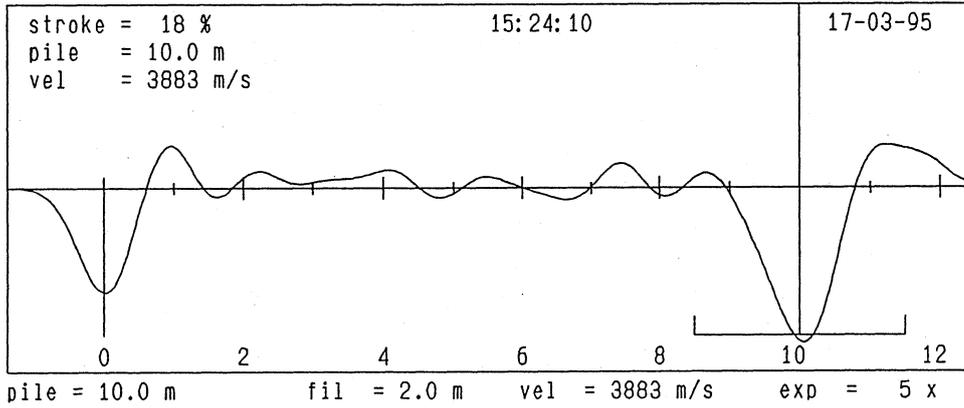


図-4.12 杭体をはつりカケヤで打撃  
による測定波形



pile number : 1.1



pile number : 1.2

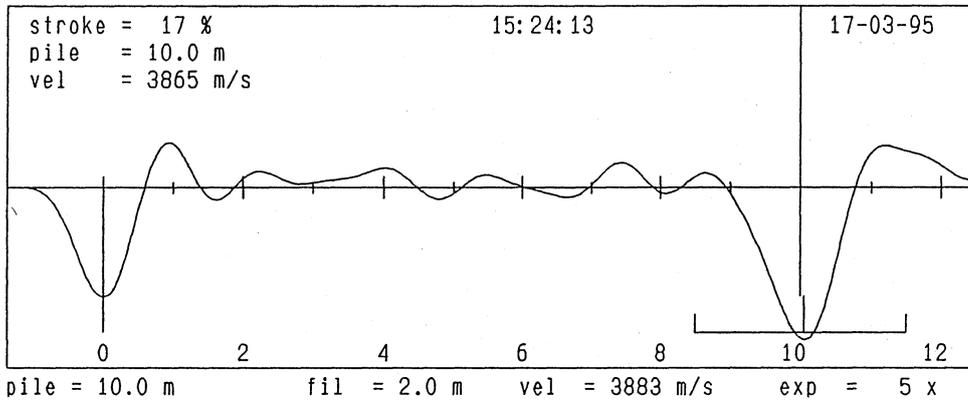
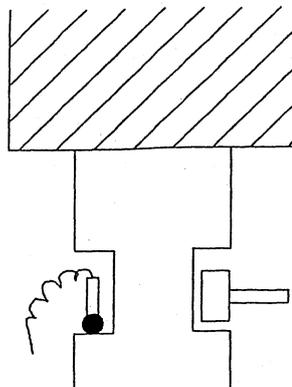
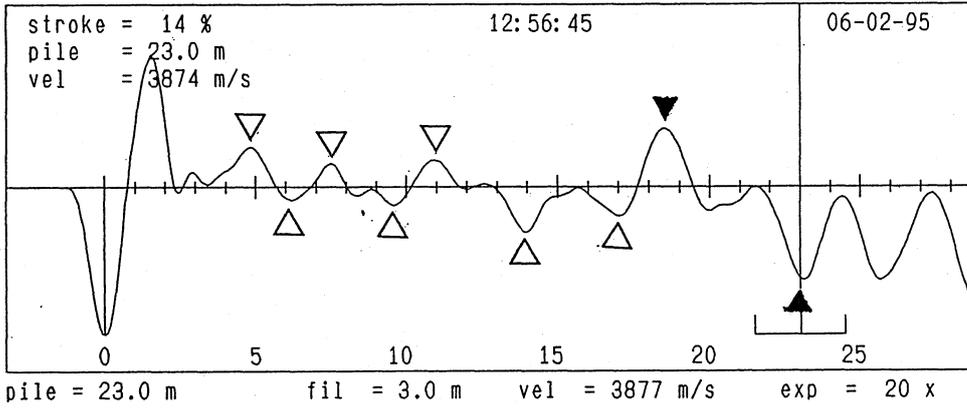


図-4.13 杭体をはつりカケヤで打撃

による測定波形



pile number : 1.1



pile number : 1.2

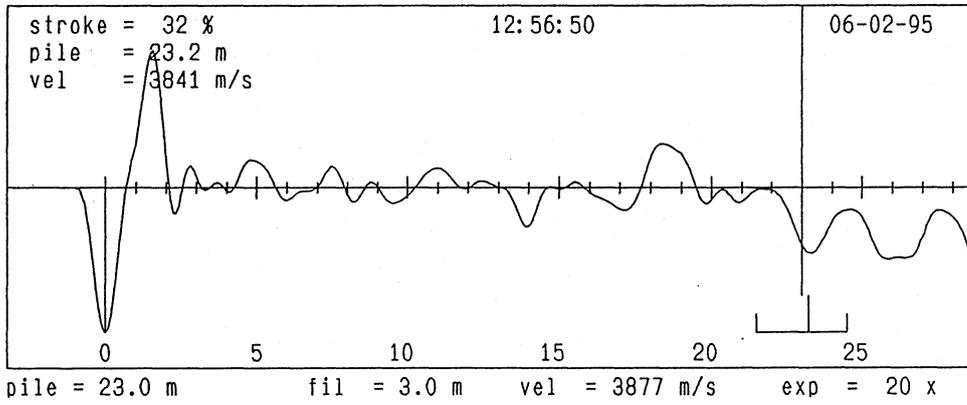
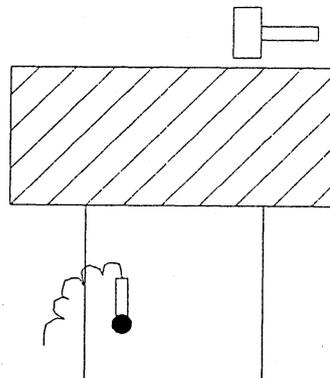
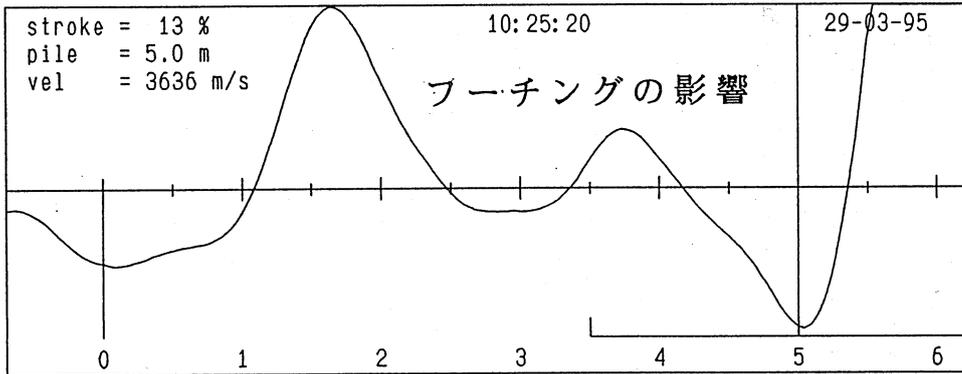


図-4.14 フーチング上打撃

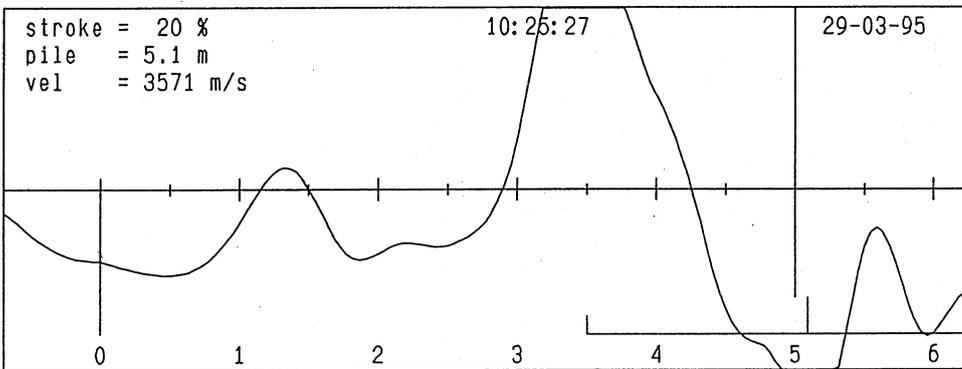


pile number : 1.1



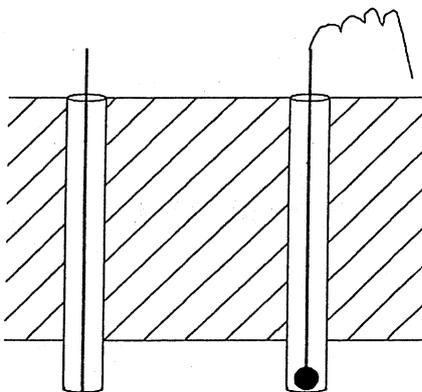
pile = 5.0 m fil = 3.0 m vel = 3636 m/s exp = 20 x

pile number : 1.2

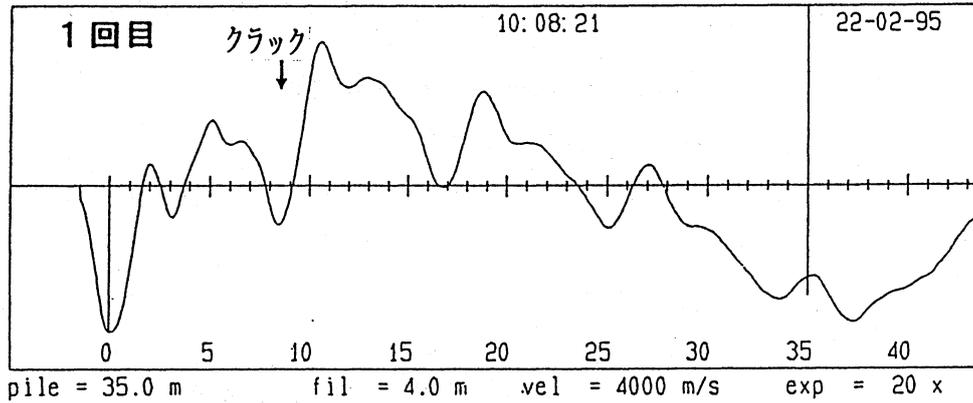


pile = 5.0 m fil = 3.0 m vel = 3636 m/s exp = 20 x

図-4.15 フーチングコア抜き  
による測定波形



pile number : 1.1



pile number : 1.2

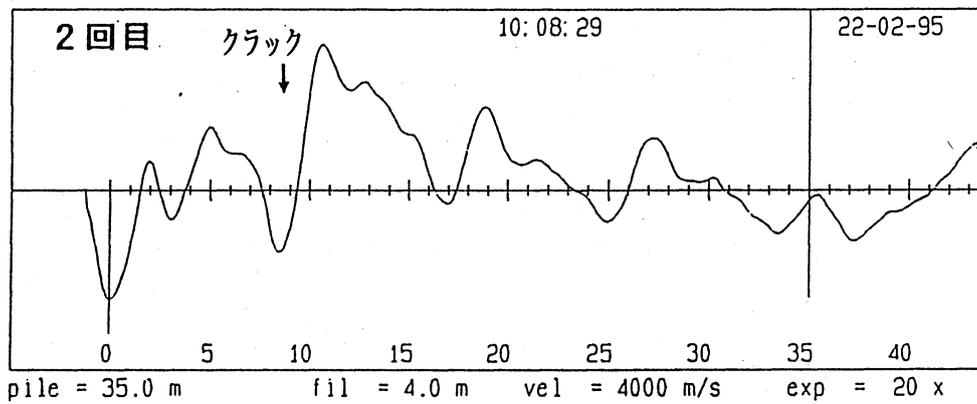
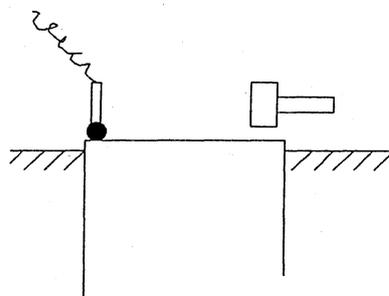
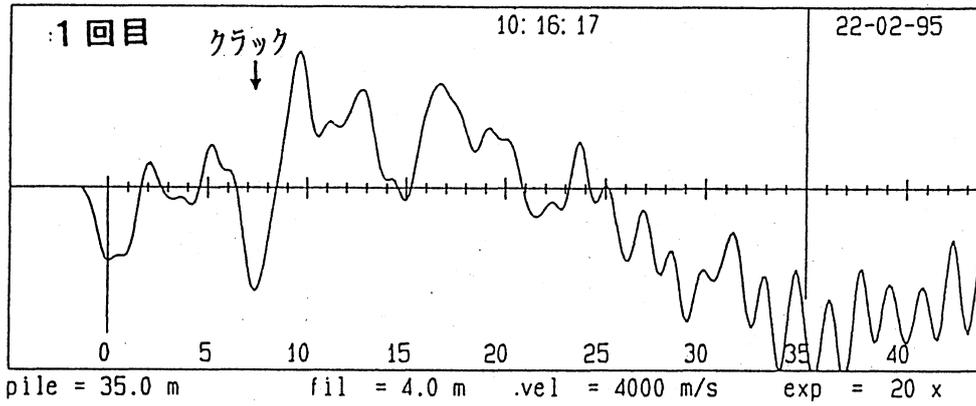


図-4.16 杭頭打撃による測定波形



pile number : 1.1



pile number : 1.2

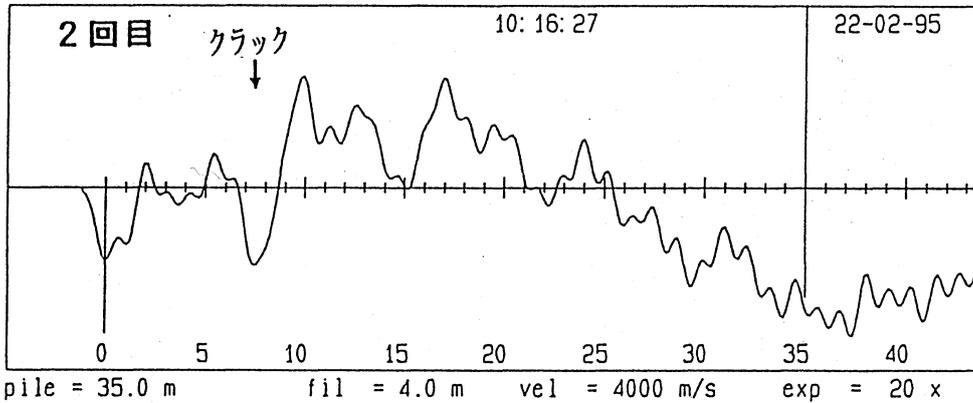
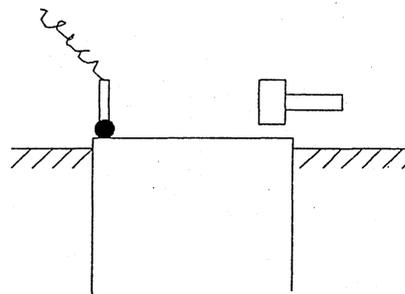
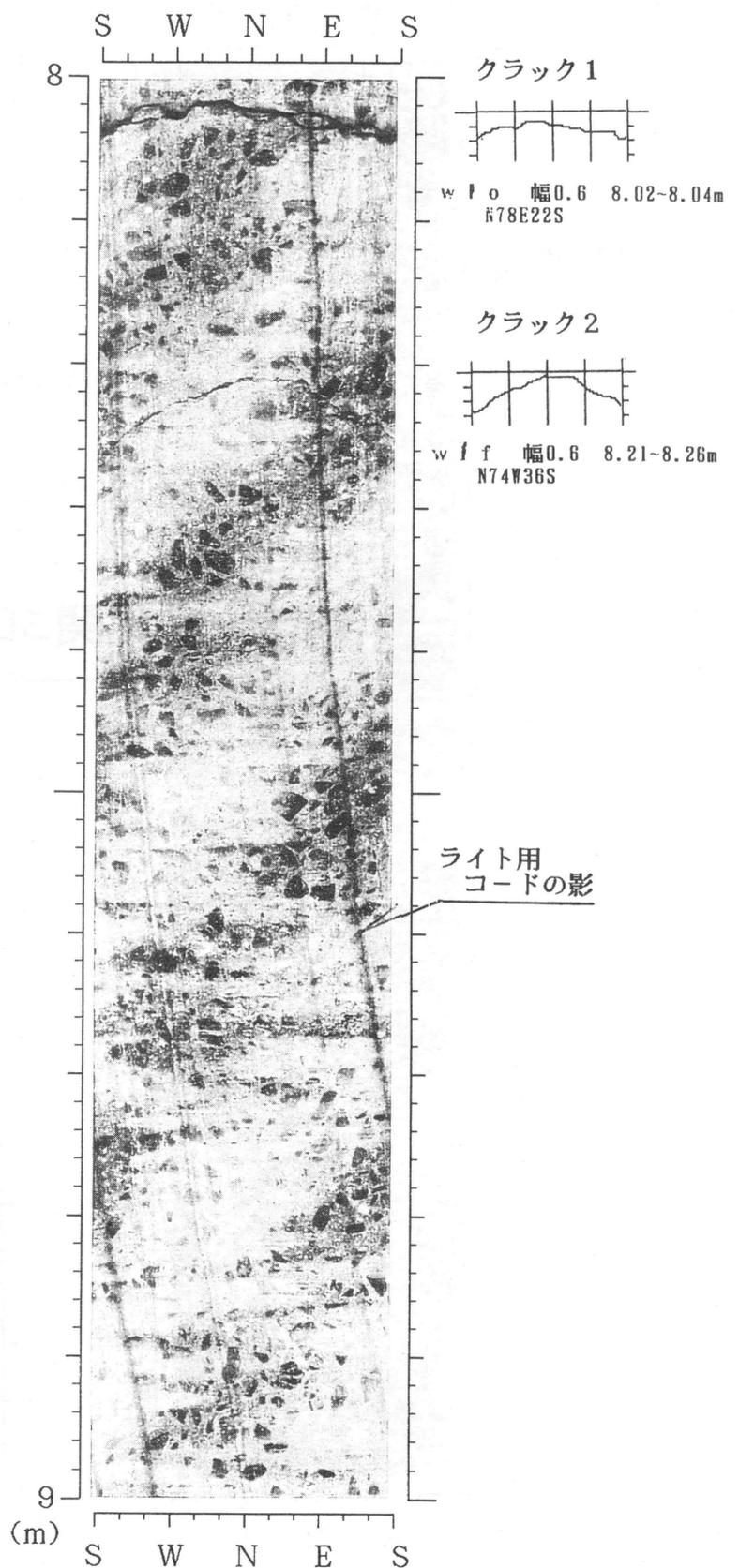
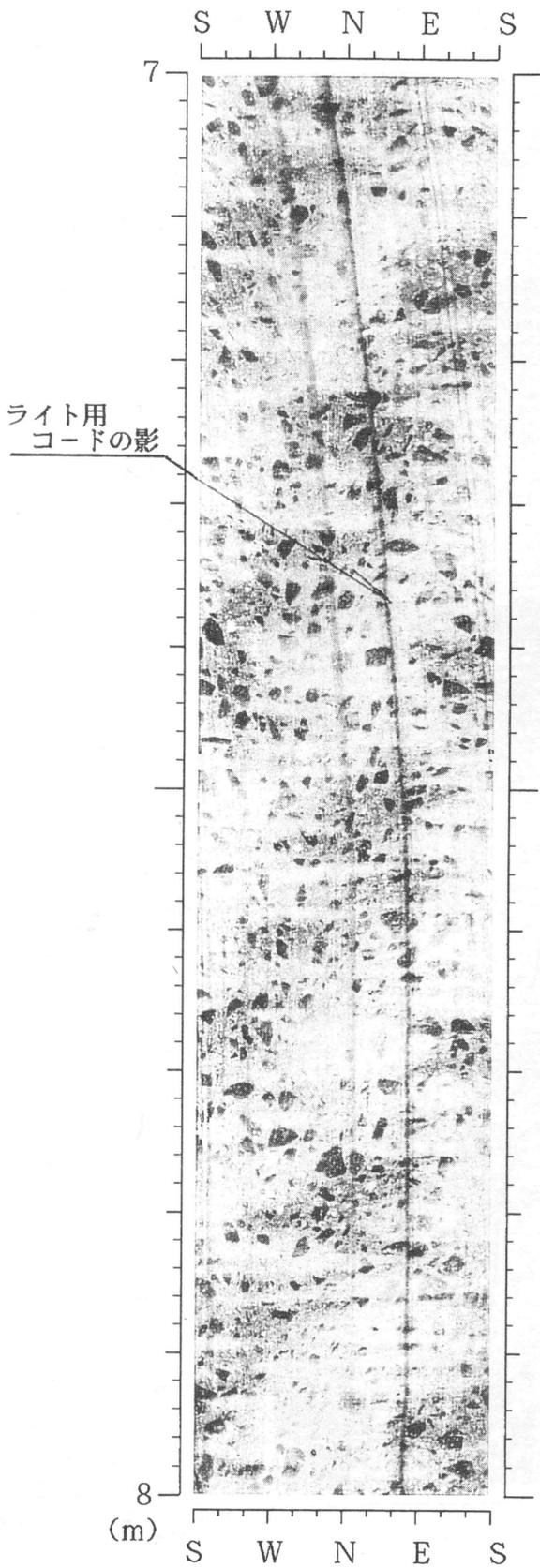


図-4.17 杭頭打撃による測定波形



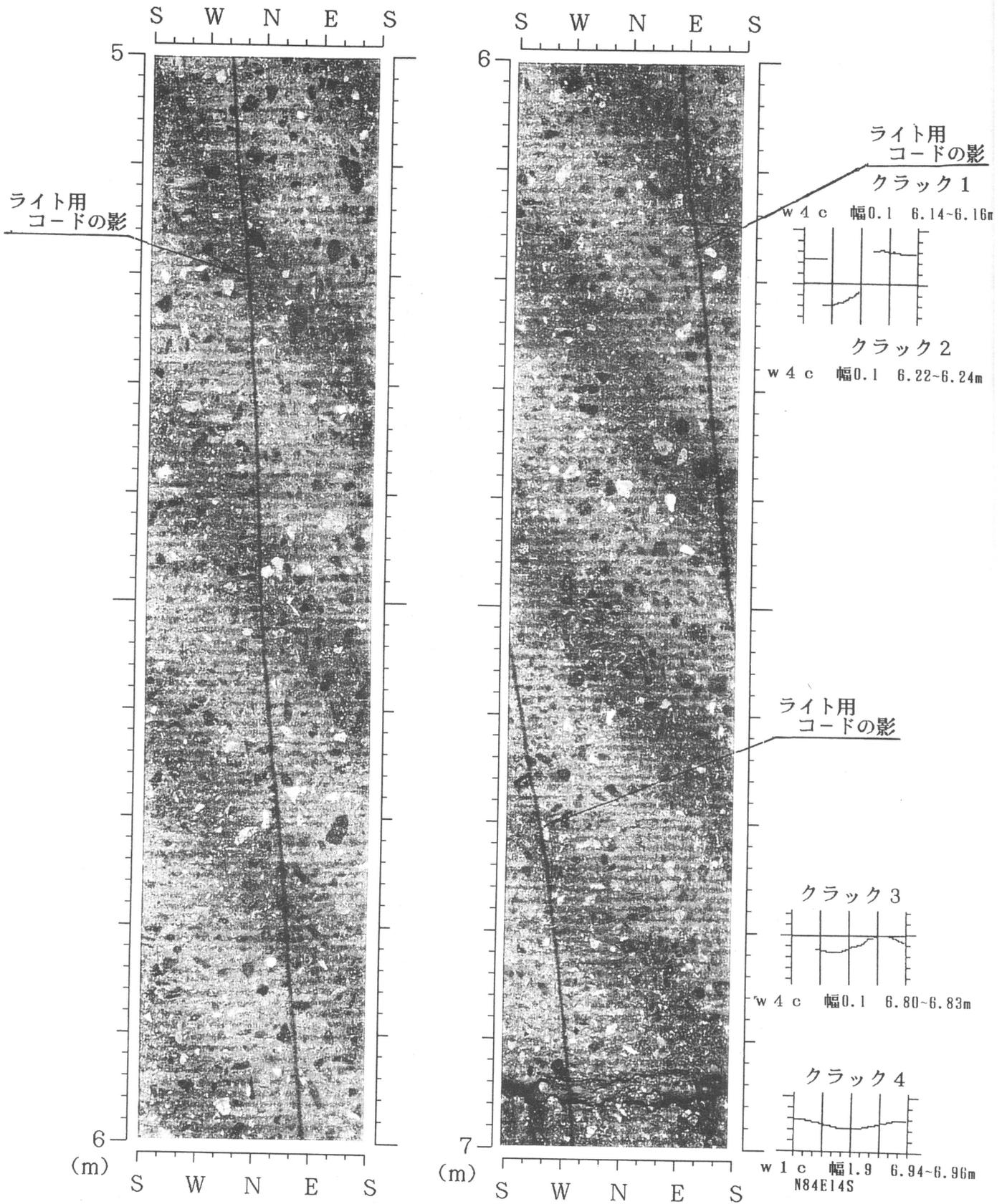


(縮尺：1/5)

図-4. 18 孔内展開図

孔番： 図-4. 16

深度： 7 m ~ 9 m



(縮尺: 1/5)

図-4. 19 孔内展開図

孔番: 図-4. 17

深度: 5 m ~ 7 m

## 第5章

急速載荷試験方法を適用した  
コンクリート基礎杭の  
支持力評価に関する研究

# 第5章

## 急速載荷試験方法を適用した コンクリート基礎杭の支持力評価に関する研究

### 5. 1 概 説

本章では、第1章で述べたように現在の支持力確認手法の中で最も信頼性の高い静的載荷試験法と今後支持力のバラツキを評価する上で適用性が高いと考えられている急速載荷試験法との比較を目的として、埋込み杭工法によって施工された1本の杭に対して、まず静的載荷試験を実施し、その後急速載荷試験を実施して両試験法による試験結果の違いを調査した。すなわち、急速載荷試験結果において観察される速度効果の補正方法、急速載荷試験から予想される“静的な”最大耐力および荷重-沈下曲線の推定精度を検討するとともに、急速載荷試験による総合管理システムの可能性について考察した。

### 5. 2 実験方法

#### 5.2.1 地盤および試験杭の概要

##### (1) 地盤の概要

試験は、愛知県海部郡弥富町で実施した。この地区の付近一帯は、1951年以降に埋め立てられた干拓地で、地盤状況から判断すると蟹江町あたりから西側は、40m以深の開析谷の地域となり、谷底には第1礫層が分布し、東側地域は熱田層の高まりが地下で台地状となっているが、基本的には第1礫層上部に沖積層が厚く堆積している地盤である。図-5.1にボーリング柱状図を示す。この図によれば、上部には南陽層と呼ばれる沖積層がG.L.から約-39.00m程度まで堆積している。この南陽層は、上部11.00m程度までが細砂層、その下部39.00m程度までがシルト層でそれぞれ構成されている。このうちの細砂層は、所々にシルト分を多く含んでおり、地下水位以下の位置では含水量が多く標準貫入試験によるN値は2~16の「非常にゆるい~中位」の相対密度の状態にあって、大半はN値5前後の非常にゆるい地層である。また、下部シルト層（一部砂混じり）は、中位~

大位の含水状態で砂の混入はあるものの粘性は大きく、全体的に軟弱で標準貫入試験によるN値が1～6程度の「非常に軟らかい～軟らかい」コンシステンシーの地層である。なお、G.L. -20.00mでの一軸圧縮強さは、 $0.99\text{kgf/cm}^2$ であった。一方、G.L. -39.00m以深は、砂とシルトの互層と砂礫層とで構成されており、前者は濃尾層、後者は第1礫層に分類される。さらに、G.L. -52.00mまでの濃尾層は、細砂～中砂の砂質土とシルト～砂質シルトの粘性土で、それぞれ0.5～4.2m毎に互層となっている。この粘性土は、全体的に腐食物や貝殻片等を含み、中位の含水状態で砂分を混入しており、砂層と互層を呈するところもある。粘性土のN値は4～19の「中位の～非常に硬い」コンシステンシー値を示している。また、砂質土は、細かい均一な砂粒子で部分的にシルト、腐食物、貝殻片や $\phi 5\text{mm}$ 程度の礫の混入が見られ、含水状態は少～中位を示している。砂質土のN値は10～60以上で「中位の～非常に密な」状態を示しているが、バラツキが大きい。G.L. -52.00m以深の第1礫層は砂礫で、N値が全て60以上の「非常に密な」相対密度を示し、 $\phi 3\sim 30\text{mm}$ の垂円礫で最大40mm程度のコアも確認されており、 $\phi 80\sim 120\text{mm}$ 程度の礫の存在も予想される。礫種はチャートで堅固である。なお、地質調査実施時の地下水位は、G.L. -0.5mであった。

試験杭の先端位置は、第1砂礫層となるように設定した。

## (2) 試験杭の概要

試験に使用した載荷試験杭は、高強度プレストレストコンクリート杭（以降、PHC杭と略記する）で、その仕様および断面諸元は表-5.1に示す通りである。杭は外径600mm、長さ54mで、杭壁内には各深度の到達荷重を測定するために5断面に各4点の計20点の鉄筋計を設置した。載荷杭のひずみ計取付け位置と土質柱状図との関係を図-5.2に示す。また、杭先端の剛性を確認するために、大きな荷重が先端に到達するように、杭施工時に杭外表面の約80%にあたる40mにわたり杭周面摩擦低減剤（パイルロック）を塗布している。

載荷杭は、埋込み杭工法のうちの中掘拡大根固め工法で杭先端をG.L. -53.50mの位置に打設した。図-5.3に中掘拡大根固め工法（アーガス工法）の施工手順を示す。この工法は、既製コンクリート杭の空部に挿入したスパイラルオーガによって杭先端直下の地盤を掘削にエアールを利用して杭頭部より排土しながら杭を連続的に沈設する方法である。杭が所定位置に到達した時点で杭の沈設を止め、杭先端から杭径の3倍の深さをオーガで先行掘削する。その後、オーガを逆回転して先端の拡大ヘッドで拡大掘削し、根固め液を注入しながら攪拌混合して根固め球根を築造する。この根固め球根に杭径の長さだけ杭を押し込み、スパイラルオーガを引き上げて施工完了となる。図-5.4に施工完成図を示す。杭の静的載荷試験時に必要な反力杭も同様な方法で施工した。

## 5.2.2 静的載荷試験方法

杭の鉛直載荷試験は、土質工学会規準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」に準じて実施した。載荷は、反力杭を8本用いた反力式で載荷試験方法Aに準じて多サイクル（6サイクル）行った。載荷最大荷重は720tfとし、60tfピッチの12段階載荷とした。載荷試験杭と反力杭の配置を図-5.5に示す。載荷杭と反力杭の間隔は、載荷試験の地盤への影響を考慮して3.0m以上とした。使用機材および載荷試験装置をそれぞれ表-5.2および図-5.6に示す。測定項目は、時間、荷重、杭頭沈下量、杭先端沈下量、反力浮上り量および杭体ひずみ量とした。これらの測定方法は、以下の通りである。

- ①載荷重は、ロードセルと荷重指示器によって所定の荷重となるように管理記録した。
- ②杭頭沈下量は、杭頭部の杭周4点に等間隔で変位計を取付けて測定し、その平均値で定義した。
- ③杭先端沈下量は、杭施工時に杭の空部に設置した案内管の中に挿入した杭先端沈下量測定用パイプの杭頭位置に2箇所変位計を取付け、その測定値の平均値とした。
- ④反力杭浮上り量は、8本の反力杭頭部に各1箇所変位計を取付け、その測定値とした。
- ⑤杭体ひずみ量は、あらかじめ杭壁内に埋め込んだひずみ計により測定し、この値を到達軸力の算定に利用した。

各荷重段階の処女荷重保持時間は60分とし、0荷重についても同様に60分間荷重を保持した。各荷重時の保持時間と各項目の測定時間を表-5.3に、荷重段階と所要時間を図-5.7に示す。試験は、杭施工後14日目に実施した。

## 5.2.3 急速載荷試験方法（スタナミック載荷試験法）

急速載荷試験（以下、スタナミック載荷試験と呼ぶ）は、載荷時間が静的載荷試験に比べれば非常に短い、動的載荷試験に比べれば十数倍と長く、かつ荷重が線形的に増大するため静的載荷試験に近い載荷状況が得られる特徴をもっている。図-5.8にスタナミック載荷装置の構成を示す。この装置は、主に燃焼ピストン、シリンダー、サイレンサーおよび反力マスから構成されている。載荷予定荷重の5%程度の反力マスを推進燃料の燃焼時に発生する推進力によって杭頭から上方に発射させ、この際に生じる反力を杭の載荷荷重として利用する方法である。この試験は、スタナミック載荷装置は、反力マスに最大20Gの加速度が発生するよう設計されている。試験杭は、全長54mの80%に摩擦低減処置が施されている長尺杭で、過去にスタナミック試験を実施した例がないため、結果に及ぼす弾性ひずみや杭質量の影響が未知であるが、ここでは700tf前後の載荷荷重を得るため

に、反力マスの重量を40ton、燃焼剤（ロングベント）量を3kgとした。なお、試験は静的載荷試験実施後14日目に行った。

装置の組立て手順を図-5.9に、載荷手順を図-5.10に示す。手順を略記すると、以下の通りである。

- ①杭頭にベースプレートを取り付ける。
- ②荷重測定用のロードセル内蔵のピストンを杭頭に設置する。
- ③ピストン内に燃料（推進剤）を装填する。
- ④コーンベントとサイレンサーをシリンダーに装着する。
- ⑤プラットフォームに反力マスを載せる。
- ⑥装置全体を筒状のコンテナで囲い、コンテナ内に砂利を充填する。
- ⑦燃料に着火し、反力マスを推進する。これと同時に杭頭の荷重と変位を測定する。  
変位は、レーザー変位計によって測定する。

図-5.10(a)はスタナミック試験開始直前の状態を示したもので、この時点では、反力マスやシリンダーの重量によって杭は静的な載荷状態にある。図-5.10(b)は、推進剤が着火されてガス圧が増加して反力マスが加速される状態を示したもので、ガス圧は同時に杭を下方に押し込む力として作用するため、この段階で杭への載荷が行われる。その後、反力マスの上昇によって生ずる隙間には砂利が流れ込み（図-5.10(c)）、打ち上げられた反力マスは、この砂利層の上に再落下する。この時の衝撃力は杭頭に直接伝達されず、砂利容器を通して杭周辺地盤表面に伝達される（図-5.10(d)）。

本スタナミック試験では、杭頭における荷重および変位の時間的変化を計測するとともに、静的載荷試験時に利用した計20点の鉄筋計で各断面のひずみ量も計測した。

## 5. 3 実験結果とその考察

### 5.3.1 静的載荷試験結果

#### (1) 結果の概要

静的載荷試験では、最大載荷荷重（ $P_{max}$ ）が720tfとなるまで載荷して試験を終了した。図-5.11および図-5.12は、それぞれ載荷試験によって得られた荷重（ $P$ ）-時間（ $t$ ）、沈下（ $s$ ）-時間（ $t$ ）、荷重（ $P$ ）-沈下（ $s$ ）、荷重（ $P$ ）-弾性戻り量・残留沈下量の各関係を示したものである。まず、 $P-s$ 関係では、600tfを超えた辺りから傾きが低下する傾向が読み取れる。また、最大荷重時の杭頭沈下量（ $s_0$ ）は122mm、杭

先端沈下量 ( $s_p$ ) は69mmであり、それぞれ杭径に対して20%および10%の沈下量となっている。図-5.13は、鉄筋計により計測した杭の軸方向ひずみ ( $\varepsilon$ ) の深さ方向の分布状況を示したものである。図によれば、摩擦低減を施した区間のひずみ差の傾きは、300tf以上の範囲になるとほぼ同じ値を示しており、最大荷重時の杭先端ひずみは、杭頭ひずみのおよそ65%の値となっている。

## (2) 結果の解析

土質工学会規準書に示されている解析手法を用いて試験結果の解析を行った。すなわち、杭の鉛直支持力の特性値として、第1限界荷重や第2限界荷重などがあるが、それぞれ次に示す方法で各荷重を判定した。まず、第1限界荷重は、 $\text{Log } P - \text{Log } s$  関係で現れる明瞭な折れ曲り点の荷重を指し、 $s - \text{Log } t$  法、 $\Delta s / \Delta \text{Log } t - P$  法、残留沈下量の急増点などを用いて総合的に判定する。次に、第2限界荷重は、杭先端直径の10%に相当する杭先端沈下量が生じた時の荷重、並びに杭頭の  $P - s$  曲線が沈下量軸にほぼ平行となる荷重のうち、小さい方の荷重として定義される。また、各土層での杭周面摩擦力と沈下量は、軸方向ひずみ分布曲線と軸方向力分布曲線とから求められる。

### 1) 第1限界荷重の判定

第1限界荷重は、荷重が次第に増大する過程で杭の支持力性状が初期段階から変化する点に対応する荷重であり、前規準の降伏荷重に相当する。なお、この降伏荷重については、支持力のクリープ限界に相当するとの力学的意味が山肩<sup>6)</sup>によって指摘されている。図-5.14に示す  $\text{Log } P_0 - \text{Log } s$  関係図から、杭頭荷重  $P_0 = 540\text{tf}$ 、杭頭沈下量  $s_0 = 68.9\text{mm}$  の点で折れ点が見られ、それ以後沈下が顕著となっている。また、同じ荷重時の杭先端沈下量 ( $s_p$ ) も同様の傾向が認められる。図-5.15および図-5.16に示す  $s - \text{Log } t$  関係からも、杭頭荷重  $P_0 = 540 \sim 660\text{tf}$  の間で単位荷重当りの沈下量の増大が認められ、さらに各荷重でのクリープ沈下も若干大きくなっているのがわかる。図-5.17は、各荷重における  $s - \text{Log } t$  の傾き、すなわち  $\Delta s / \Delta \text{Log } t$  と杭頭載荷荷重  $P_0$  の関係を示したものである。この図から、 $P_0 = 330\text{tf}$  および  $540\text{tf}$  付近に変曲点が存在するのが読み取れる。このうち  $330\text{tf}$  の変曲点は、図-5.22から判断すると地盤の摩擦力が低下した点、先端地盤の特性および荷重伝達率に変化した点、杭体の特性などが変化した点に対応するものと思われる。この現象は、埋込み杭で摩擦をカットした場合によく見られるもので、真の第1限界荷重とは判断しがたい。また、 $P_0 - s$  の関係でも  $P_0 = 540\text{tf} \sim 600\text{tf}$  の範囲で沈下量が増大する傾向が見られ、残留沈下量も  $P_0 = 600\text{tf}$  以上になると急増している。これらを総合的に判断すると、第1限界荷重は、最小値の  $540\text{tf}$  とみなせる。

### 2) 第2限界荷重の判定

第2限界荷重とは、杭が杭としての機能を果せなくなる荷重のことで、力学的には杭の

周面摩擦力および先端支持力がともに塑性状態に達して、杭が連続的に沈下する状態の荷重をいう。図-5.18に示す $P_0-s$ 曲線において、杭頭荷重 $P_0=720\text{tf}$ で杭先端沈下量 $s_p=69.1\text{mm}$ となっており、規準である杭径の10%の沈下量(60mm)を上回っている。しかし、図-5.11,12および図-5.18からわかるように、最大荷重時 $P_0=720\text{tf}$ においても杭が連続的に沈下している状況とはなっていない。したがって、第2限界荷重は720tfと判断できる。

### 3) 杭の支持力機構

杭頭の荷重は、杭周面摩擦抵抗と杭先端抵抗に分離できる。これらの抵抗力を明確にするためには、測定したひずみ値から荷重とひずみ値との関係を用いて軸力を算定する必要がある。図-5.19に各断面の杭頭荷重とひずみ値との関係を示す。この図からわかるように、各断面の荷重-ひずみ関係は、滑らかな曲線を示しており、各断面のひずみ値を用いて軸力を算定しても問題ないものと考えられる。

#### (a) 軸力の算定法

各断面の軸力は、測定ひずみ値から次式を用いて求められる。

$$N = A_e \cdot E_c \cdot \varepsilon \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

$$A_e = A_c + A_p \cdot E_p / E_c$$

ここに、 $N$  : 軸力

$A_e$  : 等価断面積

$E_c$  : コンクリートの弾性係数

$\varepsilon$  : 各断面の平均ひずみ値

$A_c$  : コンクリートの断面積

$A_p$  : PC鋼棒の断面積

$E_p$  : PC鋼棒の弾性係数

コンクリートは、低応力レベルの段階から非線形性を示すため、コンクリートの弾性係数を一定として軸力を求めることには問題があるものと思われる。一般的に、コンクリートの弾性係数は、低応力レベルで最高値を示し、応力度の増大に伴って徐々に低下する傾向を示すため、本研究では、杭頭から50cmの位置にある断面①では杭頭荷重が直接伝達されるものと仮定し、杭頭荷重と断面①のひずみ量との関係(図-5.20参照)から各ひずみレベルにおける弾性係数(図-5.21参照)を求め、式(5.1)を用いて各断面の軸力の算定を行った。

#### (b) 伝達軸力

各荷重段階における各断面の伝達軸力の算定結果を表-5.4に示す。図-5.22は

深さ方向の軸力分布状況を示したもので、一般的に深さ方向の軸力変化が小さいほど摩擦抵抗が小さいことを示している。図によれば、断面①～②は摩擦カットを行っているため、杭頭荷重が小さい段階では摩擦抵抗が小さくなっているが、他の断面においては、荷重の増加とともに摩擦抵抗が増加しており、断面②～③では、摩擦抵抗が最大となっていることがわかる。図－5.23は杭頭荷重と各断面の軸力の関係を、図－5.24は杭頭荷重と各断面の軸力比の関係を示したものである。これらの図より、断面②～⑤の間は、摩擦カットを行っていないため、この区間の摩擦抵抗は大きい、摩擦カットを行っている断面①～②の摩擦抵抗が小さくなっており、断面②までの軸力の伝達が大きいことがわかる。

(c) 杭の周面摩擦強度（周面抵抗）

杭の周面摩擦強度は、各断面の軸力差をその断面間の杭周面積で除した単位面積当りの摩擦強度で表される。算定結果の一覧を表－5.5に、また杭周面摩擦強度分布図および各区間の変位と周面摩擦強度の関係を、それぞれ図－5.25および図－5.26に示す。これらの図から、摩擦強度の大きさとその推移および各断面の最大摩擦力の値が把握できる。また、表－5.6から、断面③～④を除けば、各断面の摩擦力は最大荷重以前で極限状態を示しており、これ以降徐々に減少しているのがわかる。

(d) 杭先端抵抗

杭先端抵抗は杭先端地盤の支持力度に相当し、本試験における杭頭荷重  $P_0 = 720\text{tf}$  での杭先端地盤の支持力は、断面⑤での到達軸力  $P_P = 507\text{tf}$  となる。この値から、杭の支持力度を算定すると、以下のようなになる。

$$\begin{aligned}
 q_p &= P_P / A_P \\
 &= 507 / (\pi / 4 \times 0.6^2) \\
 &= 1794 \text{ t} / \text{m}^2
 \end{aligned}$$

また、本載荷試験杭に対して、建設省告示式<sup>97)</sup>を用いて杭先端地盤の平均N値を求めると、 $N = 57.1$ となる。図－5.27に、杭先端部の平均N値の算出結果を示す。さらに、この値を用いて杭先端支持力算出係数 ( $\alpha$ )

$$\alpha = P_P / (N \cdot A_P) \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

$P_P$  : 杭先端の到達支持力 (507tf)

$N$  : 杭先端地盤の平均N値 (57.1)

$A_P$  : 杭先端閉塞断面積 (0.2826m<sup>2</sup>)

を求めると、 $\alpha = 507 / (57.1 \times 0.2826) = 31.4$ となる。この値は、告示式にある打撃工法の杭の値に相当する。

### (3) 結果に対する考察

試験結果によれば、杭は極限状態の沈下性状を示していないが、杭の支持力分担を杭の摩擦抵抗と先端抵抗に分けて考えると、摩擦抵抗はほぼピーク状況から下降域に入っており、先端抵抗が卓越した分担状態となっていることがわかる。一方、杭先端抵抗は、日本建築学会で極限荷重を判定するための一つの指標として用いている杭先端径の10%の沈下時の荷重で評価すると約500tfとなる。しかし、杭の沈下性状から判断すると、杭の沈下が急増する状態には至っておらず、極限状態とはみなし難い。また、建設省告示式では、埋込み杭の $\alpha$ 値は20、打撃杭の $\alpha$ 値は30としているが、本載荷試験で得られた先端支持力算出係数 $\alpha$ 値は31.4と、打撃杭の値を上回っており、先端抵抗が勝っていることがわかる。なお、摩擦抵抗についても、類似の施工法の杭によって得られている一般的な値よりも大きい値となっている(図-5.28および図-5.29参照)。したがって、本施工法により施工された杭の鉛直支持力は、類似の施工法によって施工された杭のそれよりも勝れた性状を示しているといえる。

### 5.3.2 急速載荷試験結果

#### (1) 結果の概要

杭頭へ載荷装置をセットした際に生じる荷重は、前載荷としてとらえられる。本試験では、荷重が40tfで変位が2.0mmであった。図-5.30に示した測定シグナルによれば、載荷開始から75ms後にスタナミック荷重( $F_{stn}$ )は最大値582tfに達し、この時の杭頭の変位量は44.5mmであった。 $F_{stn}$ が減少しはじめても杭頭変位は増加しており、開始から90ms後に最大変位55mmに達し、さらに125ms後に完全に除荷状態となっている(図-5.30(a)および(b)参照)。杭の重量が比較的小さい摩擦鋼管杭の場合には、 $F_{stn}$ と変位の大きな位相差はみられないため、本スタナミック試験では杭の慣性力の効果が無視できないことを示している。また、杭頭変位を時刻に関して1階および2階微分して求めた杭頭の速度と加速度の経時変化(図-5.30(c)および(d)参照)によれば、スタナミック試験時の最大貫入速度 $v_{max}$ および最大加速度 $\alpha_{max}$ は、それぞれ $v_{max}=1.8\text{m/s}$ および $\alpha_{max}=-12G$ (上向き)であった。この試験による $\alpha_{max}$ は、これまで他の摩擦鋼管杭に対して実施されたスタナミック試験<sup>94)</sup>における $\alpha_{max}=2G\sim 3G$ に比べて大きな値である。これは、本試験においては杭長の80%にわたって杭周面摩擦の低減を施したために、杭周面の摩擦抵抗が非常に小さかったためと推定される。当然のことながら、除荷点においては慣性力がスタナミック荷重として加わるため、静的地盤抵抗はスタナミック荷重よりも大きくなる。

#### (2) スタナミック試験シグナルの解釈法

スタナミック試験シグナルの解釈法の一つに、除荷点法と呼ばれる方法がある。図-5.31は、Middendorpらが提案している除荷点法で用いられているスタナミック試験時の杭-地盤モデルである<sup>96)</sup>。この方法では、杭を質量mを有する質点で表し、地盤抵抗力を非線形バネとダッシュポットの2つの抵抗力で表現する。杭の弾性変形量は、非線形バネの変形量に含まれている。したがって、バネは杭頭に静的な荷重が作用したときの地盤および杭の変形を表しており、バネに発生する力が静的抵抗力 $F_u$ となる。ダッシュポットは杭の速度 $V$ に比例する抵抗力 $F_v$ を表しており、 $C$ を減衰定数として、次式を仮定する。

$$F_v = C \cdot v \quad \dots\dots\dots (5. 3)$$

全地盤抵抗力 $F_{soil}$ は、次式で与えられる。

$$F_{soil} = F_u + F_v \quad \dots\dots\dots (5. 4)$$

杭に発生する慣性力 $F_a$ は、 $\alpha$ を加速度として次式で与えられる。

$$F_a = m \cdot \alpha \quad \dots\dots\dots (5. 5)$$

図-5.31に示す杭-地盤モデルでは $F_{stn}$ 、 $F_{soil}$ および $F_a$ の三者の釣り合いは、次式のようなになる。

$$\begin{aligned} F_{stn}(t) &= F_{soil}(t) + F_a(t) \quad \dots\dots\dots (5. 6) \\ &= F_u(t) + F_v(t) + F_a(t) \\ &= F_u(t) + C \cdot v(t) + m \cdot \alpha(t) \end{aligned}$$

または、

$$\begin{aligned} F_{soil}(t) &= F_{stn}(t) - F_a(t) \quad \dots\dots\dots (5. 7) \\ &= F_{stn}(t) - m \cdot \alpha(t) \end{aligned}$$

$v$ と $\alpha$ は、測定した杭頭の変位 $u$ より次式から計算される。

$$v(t) = du(t)/dt \quad \dots\dots\dots (5. 8)$$

$$\alpha(t) = d u^2(t) / d t^2(t) \dots\dots\dots (5.9)$$

図-5.32は、F soilおよびF stnと杭頭変位 u との関係を示したものである。ただし、F soilは、F stnの値に慣性力による補正を行って算定した。除荷点での値は730tfとなり、F stnの最大値に比べて150tf程度大きくなっている。図-5.33は、除荷点法によって求めた本試験の“静的”荷重-沈下曲線を示したものである。ところで、F soilからFuを求める際には減衰定数Cの値を求めることが必要となるが、最大変位点、すなわち除荷点では杭の貫入速度 v は0となるため、除荷点ではFu = F soilであり、除荷点荷重は静的な最大荷重と解釈できる。また、除荷点荷重とF soilの最大値の差が、Fv = C · v \*となる。このv \*は、最大F soil時の杭の貫入速度であり、Fvとv \*は、測定値として既知であるため、Cを求めることができる。こうして求められたCを載荷中一定と仮定して式(5.4)に代入することでFuが求まる。杭の慣性力を考慮した除荷点法によって求めた最大静的地盤抵抗は、730tfであった。

### (3) 試験結果の考察

本試験の場合のように杭長が比較的長く、質量が大きい場合には、スタナミック荷重と杭頭変位との間に時間的なズレが生ずるため、スタナミック試験においては、このような位相差の影響を無視できない。したがって、スタナミック試験結果から静的地盤抵抗を推定する際には、杭の慣性力による補正が必要である。本試験で非常に大きな慣性力が生じているのは、前述のように杭長が54mと長く、重量が20tと比較的重い杭であったこと、さらに試験時に杭先端に荷重が到達するように摩擦カットを杭長の80%にわたって施したために試験時の摩擦抵抗が小さかったこと、などが考えられる。なお、本計測では、軸力の測定も行っているが、現在のところ慣性力の補正方法が確立されていないため、後述のように除荷開始時の軸力分布を静的試験結果と比較するに止めた。

### 5.3.3 各試験方法の比較検討

図-5.34は、除荷点法によって求めた“静的”荷重-沈下曲線(Fu-u曲線)と静的載荷試験で得られた荷重-沈下曲線とを比較したものである。なお、スタナミック試験は、前述のように計測サイクルの静的載荷試験後の残留沈下量が約70mmの状態を実施したため、スタナミック試験で得られたFu-u曲線を静的載荷試験の6サイクル除荷時の変位量(70mm)を始点として比較している。図によれば、スタナミック試験によるFu-u曲線は、静的載荷試験の6サイクル目の除荷曲線とよく一致しており、Fuの最大値も静的載

荷試験の最大荷重とほぼ同じであることがわかる。これは、静的に7サイクル目の荷重を行った場合と同様の傾向と思われる。すなわち、除荷点法により求めた荷重-沈下関係は、静的荷試験の荷重サイクルを1段階追加して荷重を実施した状態と同様であるものと判断できる。図-5.35および図-5.36は、両荷試験時に測定した杭体内に設置した鉄筋計のひずみ量から算定した軸力分布と除荷点時の周面摩擦抵抗の分布形状を示したものである。スタナミック試験時に発生する慣性力が軸力分布に及ぼす影響については、今のところ解明されていないが、本試験の範囲では、図-5.35(a)のように、荷時には杭頭よりも杭の下部の方が慣性力の影響が大きいことがわかる。一方、除荷時には、図-5.36に示すように杭の下部と比較して杭頭部の方が慣性力の影響が大きいことがわかる。また、スタナミック試験の最終段階では、若干ではあるが杭に引張力が生じているが、これも試験終了時には0となっている。さらに、除荷点時における軸力分布は、静的荷試験における軸力分布とほぼ同様な性状を示しているが、静的荷試験の最大荷重時の軸力分布とスタナミック試験の除荷点時の軸力分布から求めた周面摩擦力 $\tau$ の分布形状は、図-5.35(b)に示すように、若干異なっている。ただし、摩擦力の合計値は、両試験とも一致している。なお、形状における両者の違いも慣性力の影響によるものと思われる。

#### 5.3.4 既往の試験結果との比較

本試験結果と主な既往のスタナミック試験結果との比較を表-5.7に示す。この表によれば、ここに挙げた3種類の地盤、杭種および杭長の範囲では、スタナミック試験から静的な荷重-沈下関係（極限支持力も含めた）を実用上十分な精度で推定できる可能性のあることがわかる。さらに、従来の静的荷試験に比べて期間、費用の点で有利であるため、スタナミック試験を一現場に打設された杭を何本も抽出して実施することも可能であり、新しい杭の支持力評価手法になり得るものと期待される。今後は、既製コンクリート杭に対しても本試験法を適用し、試験データの収集を行う必要がある。

### 5.4 まとめ

本研究では、埋込み杭の中掘り拡大根固め工法によって砂れき層に施工された高強度プレストレストコンクリート杭に静的荷試験とスタナミック試験の両試験を実施し、両者の比較検討を行った。本研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

1) これまで実施されてきた軽量の摩擦杭では、発生する慣性力は“静的”な荷重-沈下

曲線を推定する上で無視できる小さな値であったが、本試験のように質量の比較的大きな杭では、大きな慣性力が発生するため、この効果は無視できない。

- 2) 本試験のようにスタナミック試験時に杭頭に大きな加速度を生ずるような場合においても、慣性力の補正を行った除荷点法により、ほぼ静的載荷試験と同等な荷重-沈下曲線が得られる。
- 3) 除荷点法によって得られた“静的”な最大荷重の値は、静的載荷試験における最大荷重とほぼ一致する。
- 4) スタナミック試験の除荷点における軸力分布および摩擦力分布は、静的載荷試験の最大荷重時のそれらとほぼ一致する。
- 5) スタナミック載荷時の軸力分布は、載荷時には杭の下部の方が除荷時には杭頭部の方が慣性力の影響が著しい。
- 6) スタナミック試験によって、実用上十分な精度で静的載荷試験の支持力性状を推定できる可能性がある。

## 第5章 付表、付図

表-5.1 載荷杭の断面諸元(公称)

区 分 項 目		鉛 直 載 荷 試 験 杭
		PHC杭 (A種)
外 径	(mm)	600
厚 さ	(mm)	90
P C 鋼 棒	径-本数 (mm-本)	$\phi 9.2-12$
	断 面 積 (cm <sup>2</sup> )	7.68
	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	$2.0 \times 10^6$
コンクリート	断 面 積 (cm <sup>2</sup> )	1,434
	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	$4.0 \times 10^5$
換 算 断 面 積 (cm <sup>2</sup> )		1,472
換算断面二次モーメント (cm <sup>4</sup> )		496,162
換 算 断 面 係 数 (cm <sup>3</sup> )		16,538
有効プレストレス量 (kgf/cm <sup>2</sup> )		40
JIS規格曲げ	ひびわれ (tf・m)	17.0
モーメント	破 壊 (tf・m)	25.5

表-5.2 使用機材

区 分	名 称	仕 様	数 量
装 置	油圧ジャッキ	φ370×550 (200tf能力)	4
	ジャッキ台	800×800×400	1
	主 桁	Ⅱ-1264×300×10000	3
	副 桁	Ⅱ-1064×300×8000	2
	補 助 桁	Ⅱ-664×380×6000	4
	反力下部ドラム	φ558.8×1,200~2,000	8
	テンションロッド	φ32×3500(PC鋼棒)	32
測定機器	電 動 ポ ン プ	油圧コントロールユニット	1
	ロ ー ド セ ル	300tf用	4
	ひずみ式変位計	CDP-100, CDP-50(1/1000mm)	14
	ひ ず み 計	SG-9A	20
	スイッチボックス	SSW-50C	1
	データロガー	TDS-601 (デジタル式)	1
他	基 準 梁	H-300×300×10×15×14,000	2
		H-200×200×8×12×3,000	4
	基準梁固定支柱	[-150×75×6.5×10×2,000	4
	先端沈下パイプ	φ21.7×54m	1
	小 屋 掛	装置養生	1式

表-5.3 荷重保持時間と測定時間

項 目		保持時間	測 定 時 間
処 女 荷 重 階	杭頭・杭先端沈下量	60分	0, 1, 2, 5, 10, 15, 30, 45, 60分
	ひ ず み 量		0, 30, 60分
	反力杭浮上り量		0, , 15, 30, 60分
履歴内の荷重階	杭頭・杭先端沈下量	5分	0, 5分
	ひ ず み 量		5分
	反力杭浮上り量		0分
0 荷 重 階	杭頭・杭先端沈下量	60分	0, 15, 30, 45, 60分
	ひ ず み 量		0, 30, 60分
	反力杭浮上り量		

表-5.4 伝達軸力の一覧

( )内は、伝達率(%)を示す。

区 分		伝 達 軸 力 N (tf)				
サ イ ク ル	ゲージ位置	①断面	②断面	③断面	④断面	⑤断面
	杭頭荷重 P <sub>0</sub> (tf)	GL-0.5m	GL-41.0m	GL-47.6m	GL-51.0m	GL-53.5m
1	60	60 (100.0)	12 (20.0)	8 (13.3)	4 (6.6)	2 (3.3)
	120	120 (100.0)	55 (45.8)	47 (39.2)	32 (26.7)	17 (14.2)
2	180	180 (100.0)	117 (65.0)	104 (57.8)	77 (42.8)	37 (20.6)
	240	240 (100.0)	183 (76.3)	166 (69.2)	124 (51.7)	80 (33.3)
3	300	300 (100.0)	250 (83.3)	228 (76.0)	174 (58.0)	120 (40.0)
	360	360 (100.0)	314 (87.2)	292 (81.1)	227 (63.1)	164 (45.6)
4	420	420 (100.0)	381 (90.7)	359 (85.5)	281 (66.9)	211 (50.2)
	480	480 (100.0)	445 (92.7)	422 (87.9)	337 (70.2)	263 (54.8)
5	540	540 (100.0)	511 (94.6)	486 (90.0)	398 (73.7)	319 (59.1)
	600	600 (100.0)	576 (96.0)	553 (92.2)	456 (76.0)	377 (62.8)
6	660	660 (100.0)	644 (97.6)	622 (94.2)	521 (78.9)	443 (67.1)
	720	720 (100.0)	711 (98.8)	689 (95.7)	583 (81.0)	507 (70.4)

表-5.5 杭周面摩擦強度および地盤反力係数の計算結果

区分 位置	Po=60tf			Po=120tf			Po=180tf			Po=240tf										
	N	Nx	δxm	N	Nx	τx	δxm	Ks	N	Nx	τx	δxm	Ks	N	Nx	τx	δxm	Ks		
①断面	60	48	0.63	0.96	0.66	120	65	0.85	4.31	0.20	180	63	0.83	9.94	0.08	240	57	0.75	15.06	0.05
②断面	12	4	0.32	0.01	32.00	55	8	0.64	1.70	0.38	117	13	1.04	5.24	0.20	183	17	1.37	8.11	0.17
③断面	8	4	0.62	0.00	—	47	15	2.34	1.39	1.68	104	27	4.21	4.54	0.93	166	42	6.55	6.95	0.94
④断面	4	2	0.42	0.00	—	32	15	3.18	1.27	2.50	77	40	8.49	4.24	2.00	124	44	9.34	6.43	1.45
⑤断面	2					17					37					80				

区分 位置	Po=300tf			Po=360tf			Po=420tf			Po=480tf										
	N	Nx	δxm	N	Nx	τx	δxm	Ks	N	Nx	τx	δxm	Ks	N	Nx	τx	δxm	Ks		
①断面	300	50	0.65	21.13	0.03	360	46	0.60	26.71	0.02	420	39	0.51	34.38	0.01	480	35	0.46	41.60	0.01
②断面	250	22	1.77	11.93	0.15	314	22	1.77	15.32	0.12	381	22	1.77	20.74	0.09	445	23	1.85	25.69	0.07
③断面	228	54	8.43	10.31	0.82	292	65	10.14	15.23	0.67	359	78	12.17	18.16	0.67	422	85	13.26	22.64	0.59
④断面	174	54	11.46	9.56	1.20	227	63	13.37	12.26	1.09	281	70	14.86	16.93	0.88	337	74	15.70	21.15	0.74
⑤断面	120					164					211					263				

区分 位置	Po=540tf			Po=600tf			Po=660tf			Po=720tf										
	N	Nx	δxm	N	Nx	τx	δxm	Ks	N	Nx	τx	δxm	Ks	N	Nx	τx	δxm	Ks		
①断面	540	29	0.38	52.60	0.01	600	24	0.31	62.22	0.00	660	16	0.21	79.11	0.00	720	9	0.12	98.92	0.00
②断面	511	25	2.01	34.28	0.06	576	23	1.85	41.40	0.04	644	22	1.77	55.53	0.03	711	22	1.77	72.39	0.02
③断面	486	88	13.73	30.74	0.45	553	97	15.13	37.32	0.41	622	101	15.67	50.86	0.31	689	106	16.54	67.09	0.25
④断面	398	79	16.70	28.98	0.58	456	79	16.77	35.28	0.48	521	483	16.55	48.50	0.34	583	76	16.13	64.40	0.25
⑤断面	319					377					443					507				

N ..... 軸力 (tf)  
 Nx = Nm - Nm<sup>-1</sup> ..... 各区間の軸力 (tf)  
 τx = Nx / S ..... 各区間平均杭周面摩擦強度 (tf/m<sup>2</sup>)  
 δxm ..... 各区間杭変形量 (mm)  
 Ks = τx / δxm ..... 地盤反力係数 (kgf/cm<sup>3</sup>)  
 S ..... 各区間の杭周面積 (m<sup>2</sup>)  
 S = U · ΔL ..... 各区間の杭周面積 (m<sup>2</sup>)  
 S①~② = 76.341 m<sup>2</sup>  
 S②~③ = 12.441 m<sup>2</sup>  
 S③~④ = 6.409 m<sup>2</sup>  
 S④~⑤ = 4.712 m<sup>2</sup>

表-5.6 各断面の最大摩擦強度並びに最大荷重時の摩擦強度

区 間	土 質 名	最大摩擦強度 $\tau_{max}(tf/m^2)$	最大荷重度の 摩擦強度 $\tau (tf/m^2)$	備 考
①~②	砂質・粘性土	0.85(120tf)	0.12	フリクションカット
②~③	砂 質 土	2.01(540tf)	1.77	
③~④	粘 性 土	16.54(720tf)	16.54	
④~⑤	砂 質 土	16.77(540tf)	16.55	

表-5.7 既往の試験結果と本試験結果の比較

	杭 種	地 盤	支持機構	杭 長	慣性効果	速度効果	推 定
愛知県	PHC杭	砂 礫 層	先端支持	54m摩擦カット	大	小	◎
石川県	鋼管杭	珪藻泥岩	摩擦支持	11m	小	大	◎
大阪府	場所打杭	砂 層	先端支持	18.2m	大	中	◎

ボーリング名	No. 5	切取位置	北緯
発注機関	大塚コンクリート本社	切取期間	平成 3 年 1 月 10 日 - 3 年 1 月 14 日
調査業者名	東京地質調査株式会社 〒105-0022 (052-037-0100)	調査場所	東京都港区新大塚南口丁地内
ボーリング 口径 標準	φ110 mm	主技師	田中 浩一
総取進長	39.05m	代理人	田中 浩一
		試錐機	カンコーSR30型(80mm) エンジン
		ポンプ	カンコー型75(7.5馬力) ポンプ
		測定機	カンコー型(601ノメ)

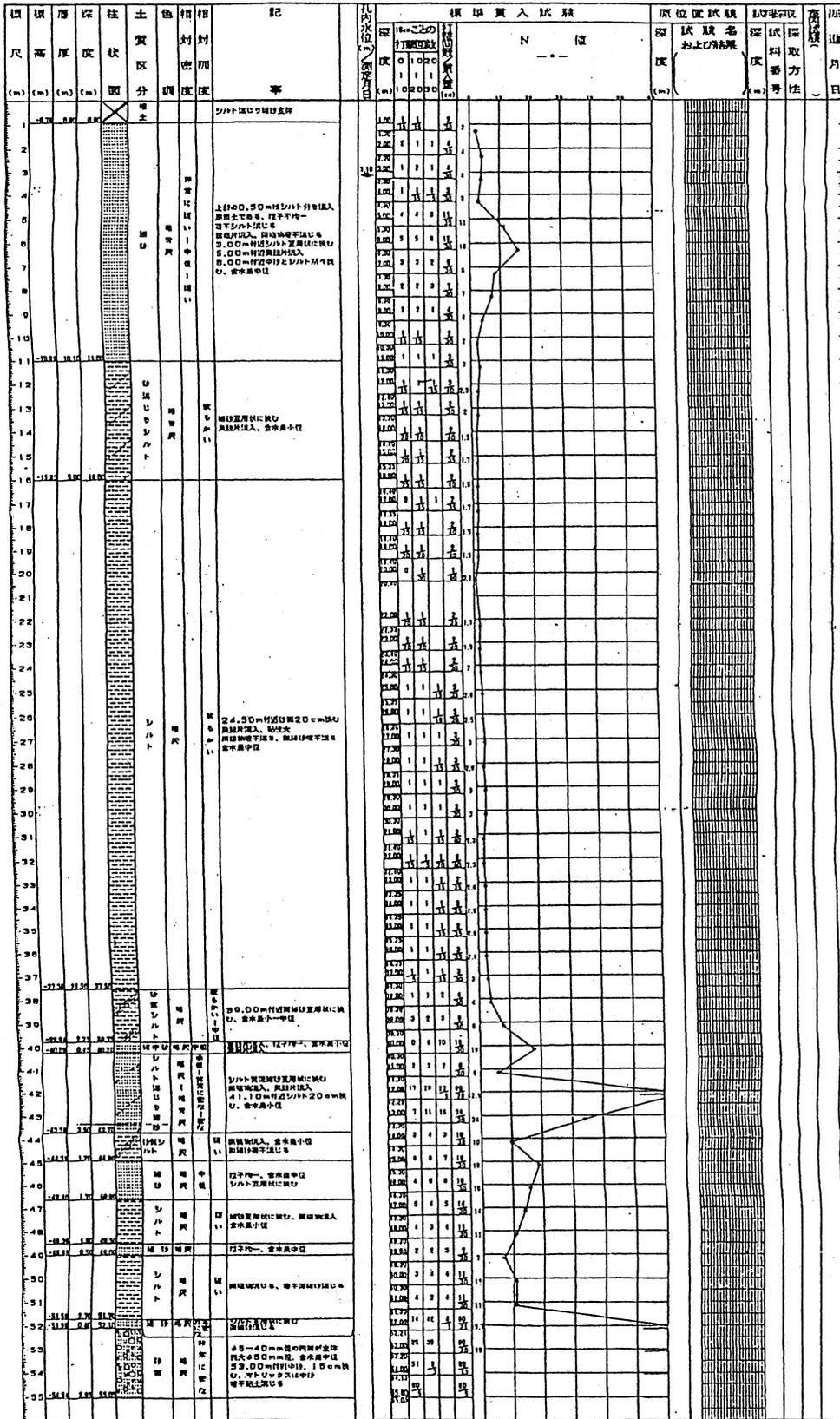


図-5.1 ボーリング柱状図

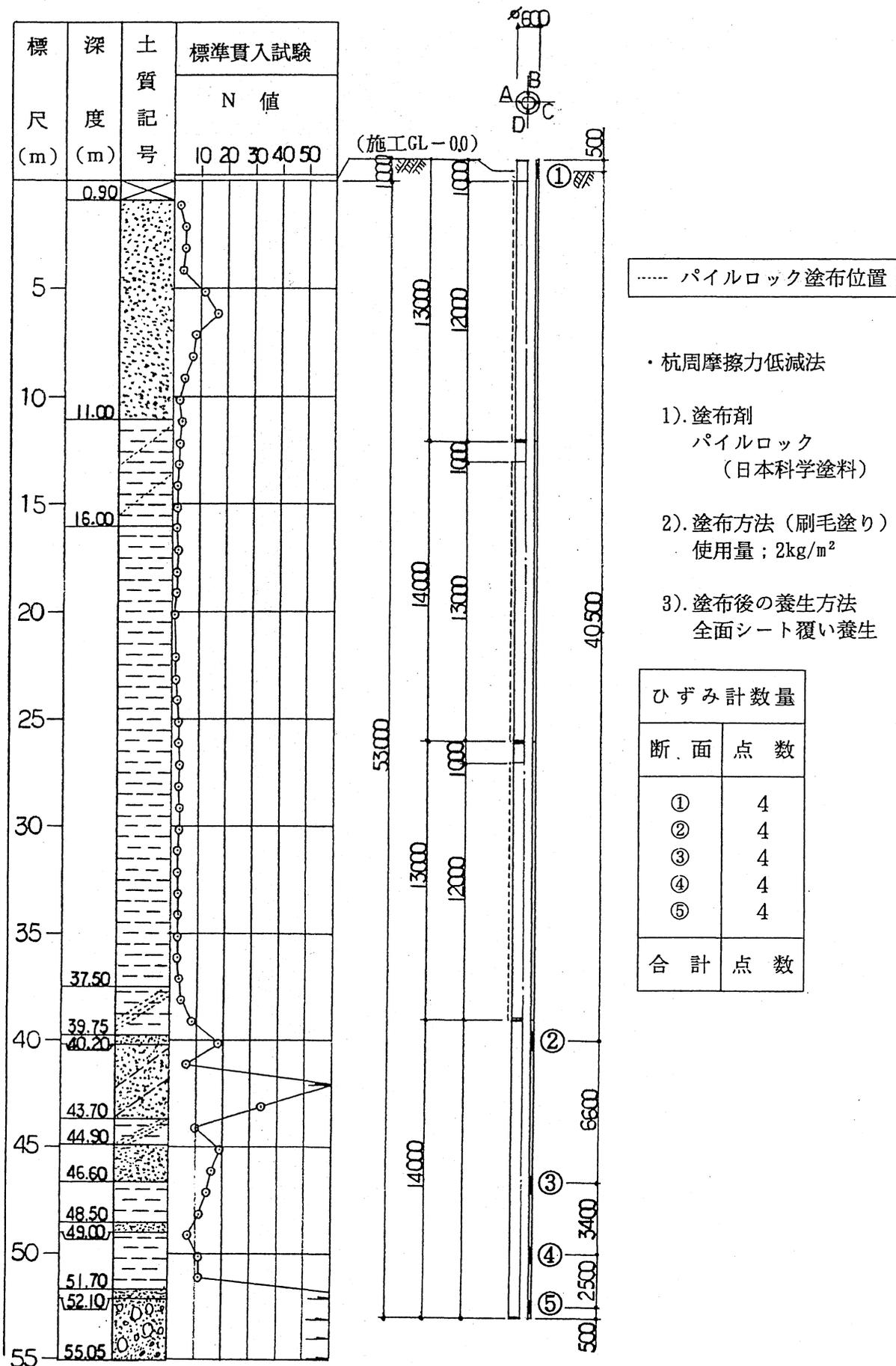


図-5.2 ひずみ計の取付位置

- ① 杭建込み ② 杭沈設開始 ③ 杭沈設 ④ 正転で3D先行掘削 ⑤ 孔底から杭先端部まで逆転で拡大掘削及び攪拌混合 ⑥ 正転で閉翼し、杭を1D圧入 ⑦ 施工完了

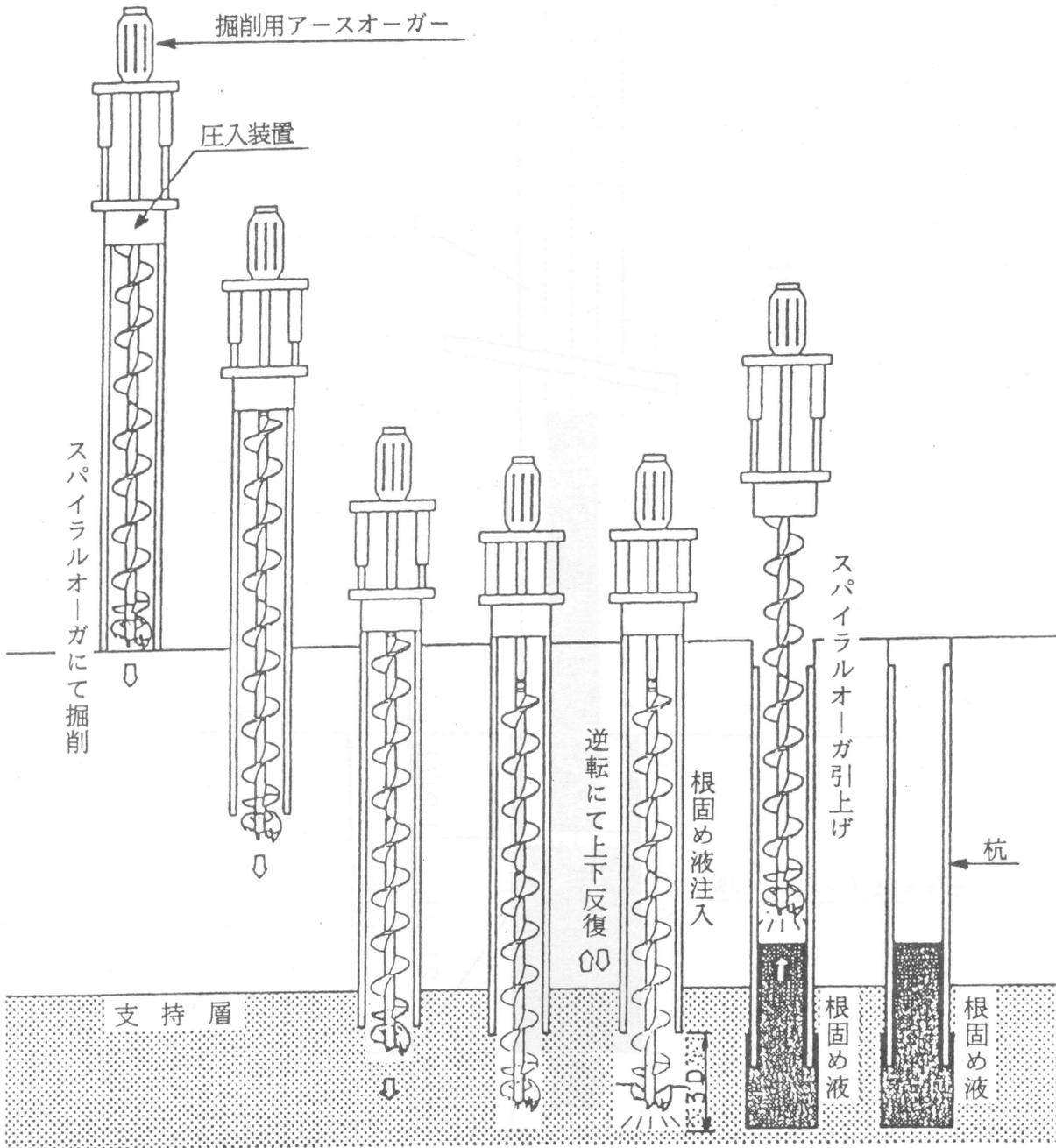


図-5.3 アーガス工法の施工手順

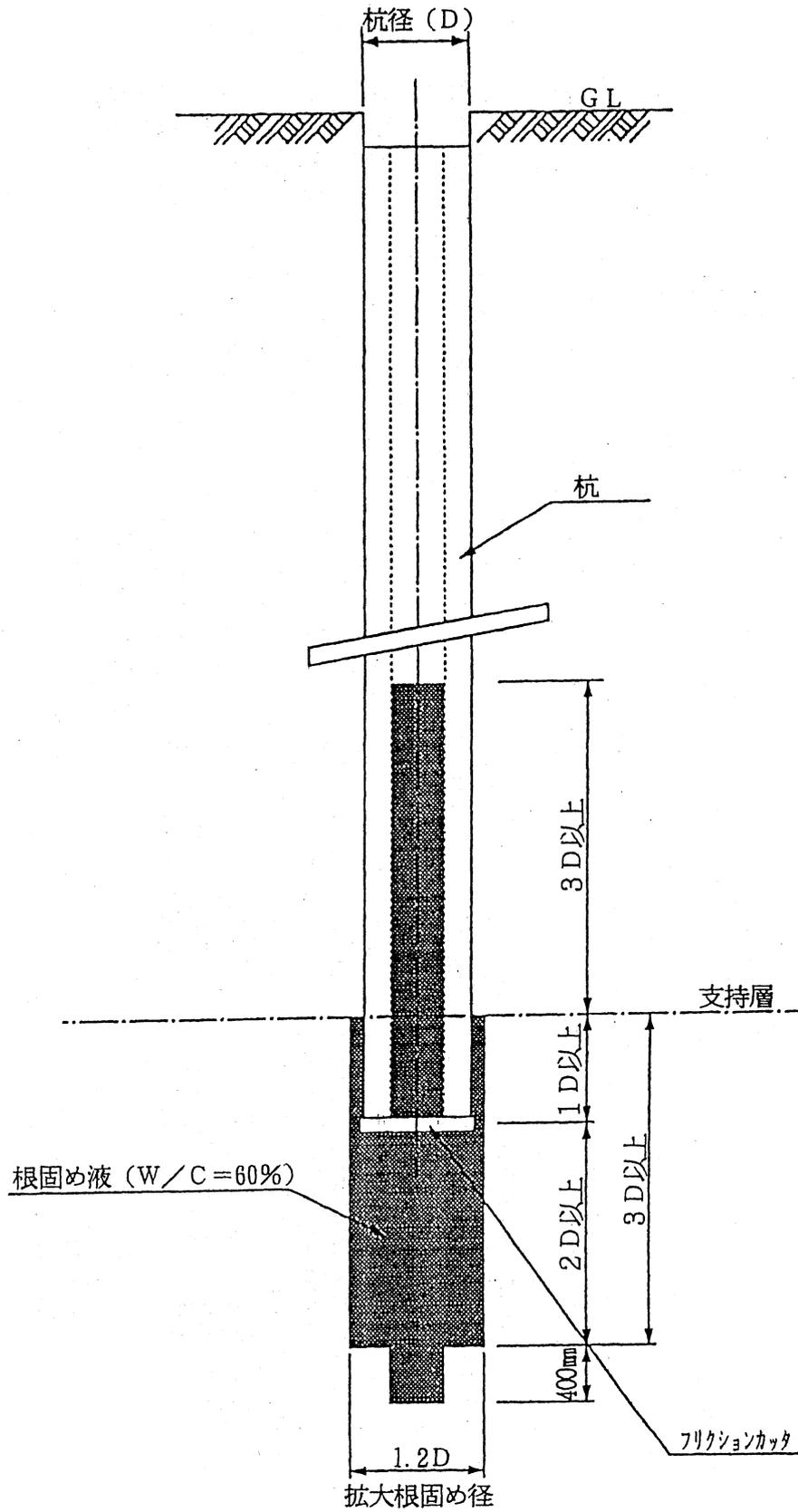


図-5.4 杭の施工完成図

- ◎ 載荷杭 PHC φ600-54m (13A+14A+13A+14A) 1 Set
- 反力杭 PHC φ600-54m (14C+13A+13A+14A) 8 Set

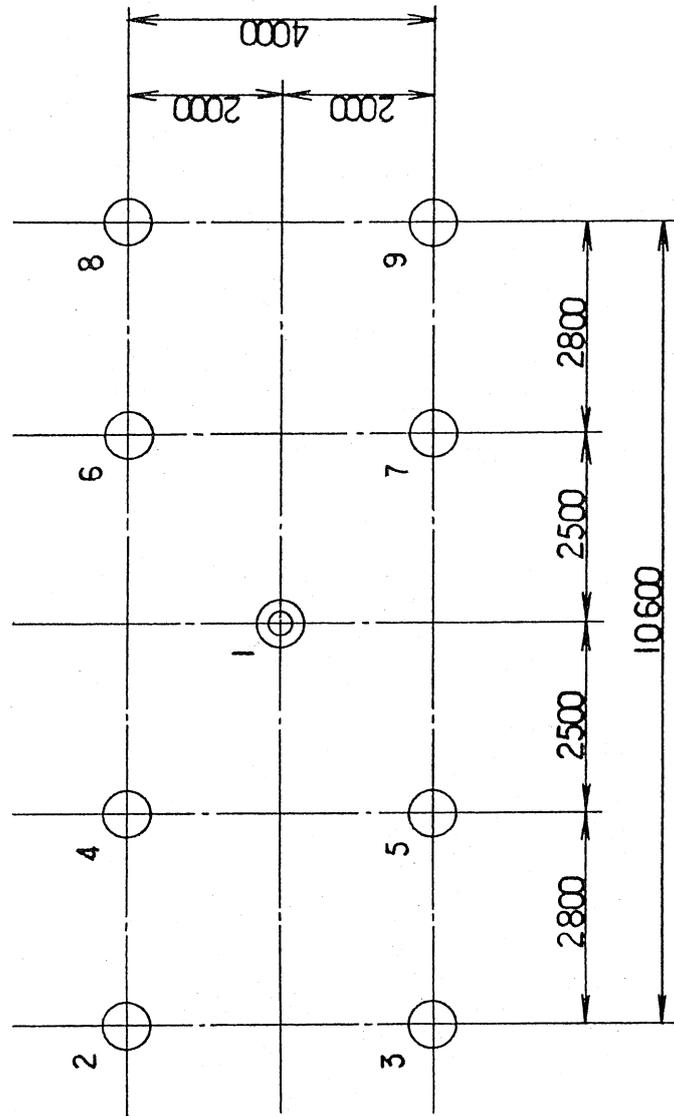


図-5.5 載荷杭と反力杭の配置

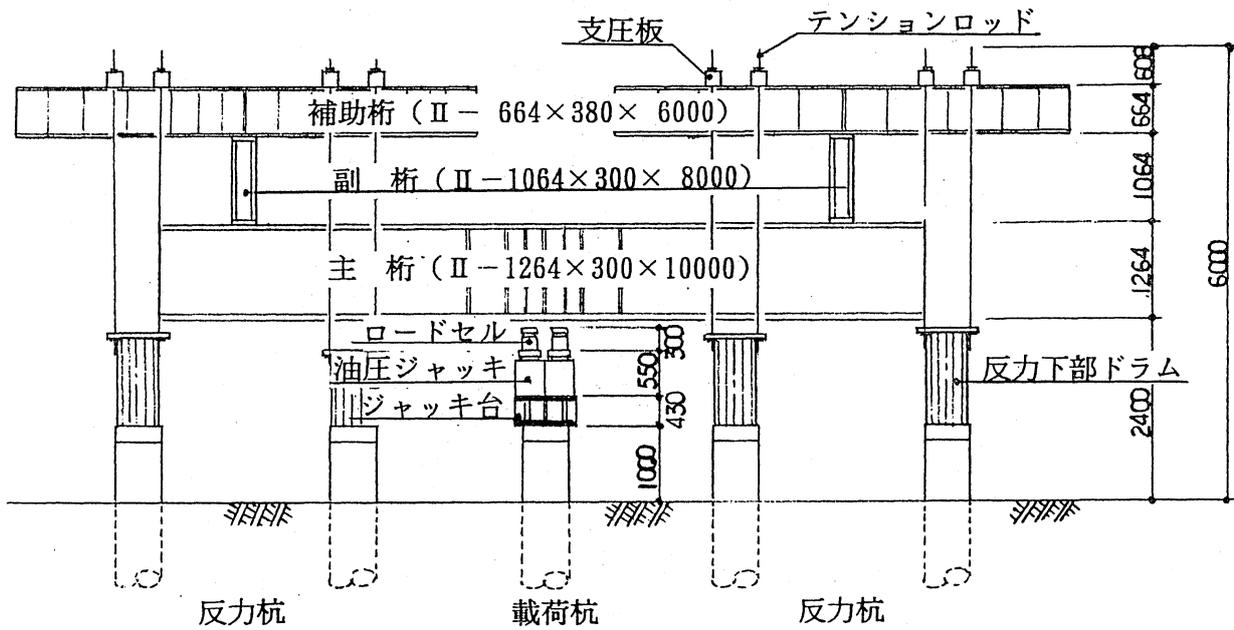
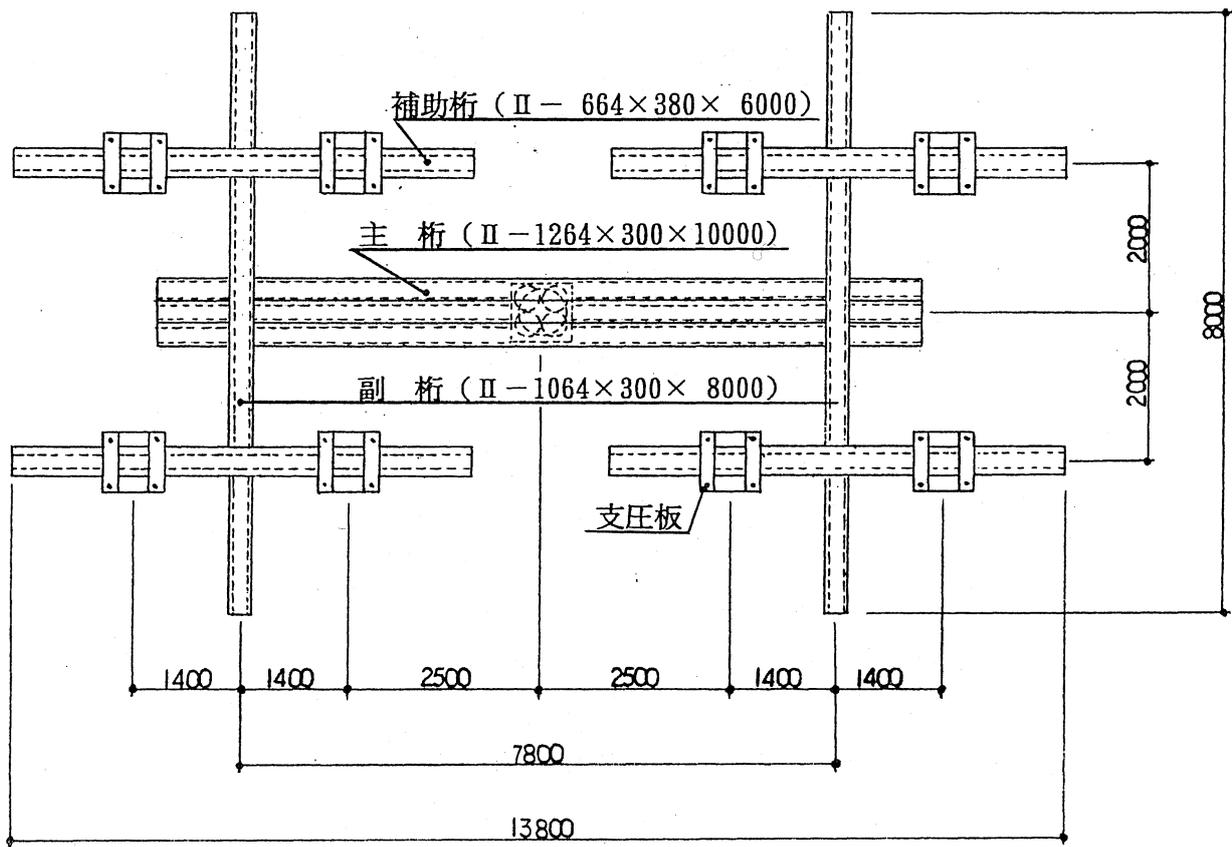


図-5.6 試験装置図

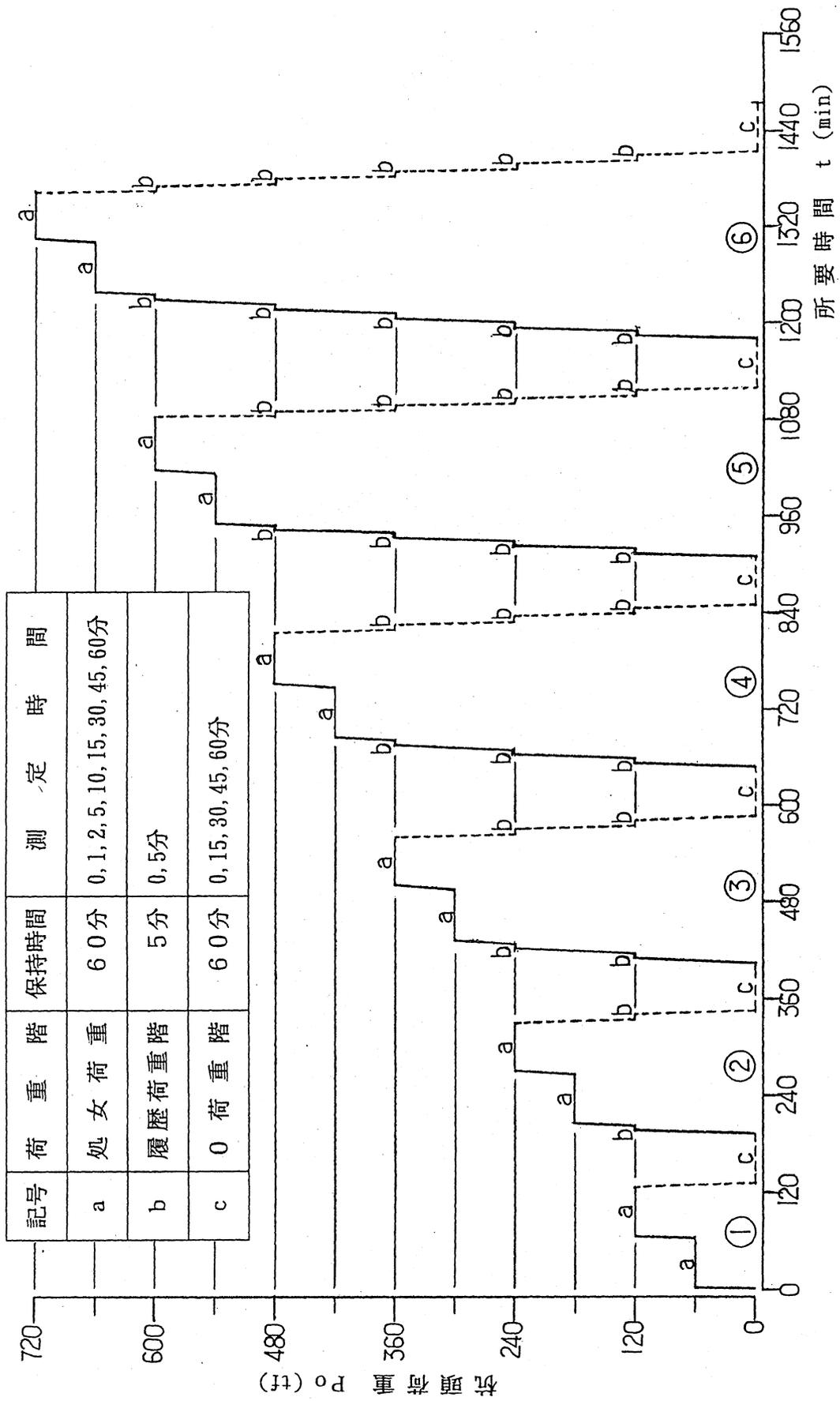
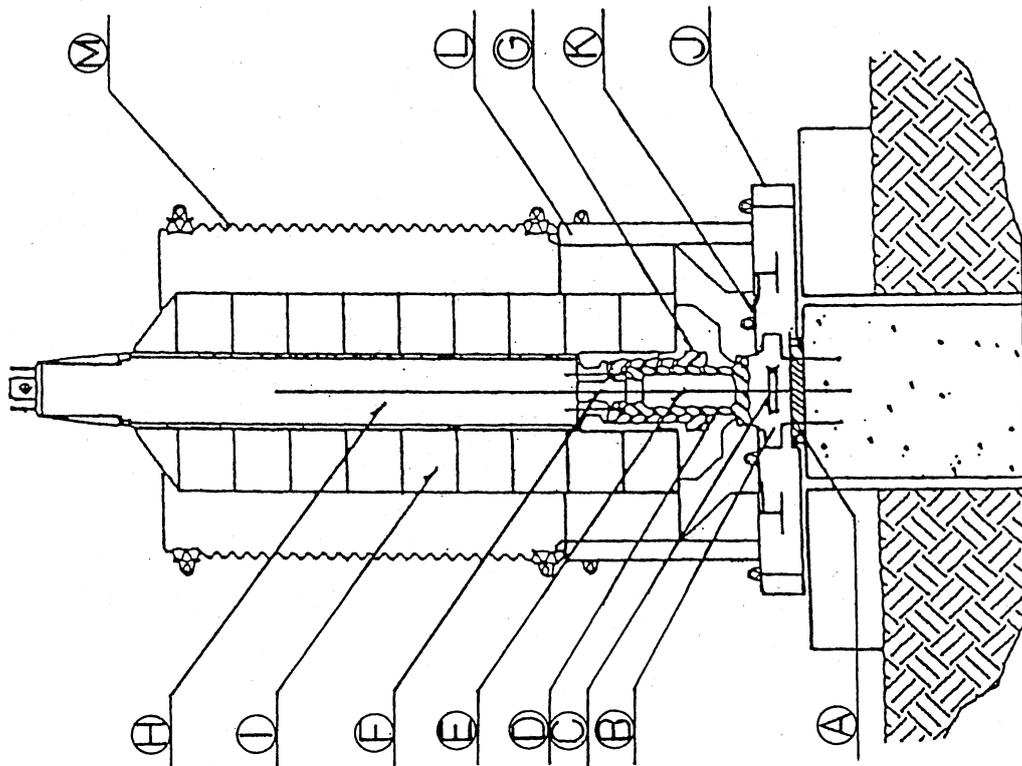


図-5.7 荷重段階と所要時間

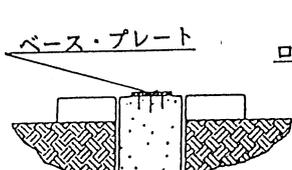


記号	システム名称
Ⓐ	ベース・プレート
Ⓑ	ピストン・ベース
Ⓒ	ロードセル/レーザー・センサー
Ⓓ	ピストン・シリンダー
Ⓔ	燃焼室
Ⓕ	コーン・ベント
Ⓖ	プラットフォーム
Ⓗ	サイレンサー
Ⓘ	反力マス
Ⓙ	砂利コンテナ・ベース
Ⓚ	砂利落下防止プレート
Ⓛ	下部砂利コンテナ
Ⓜ	上部砂利コンテナ

図-5.8 スタナミック試験装置の組立図

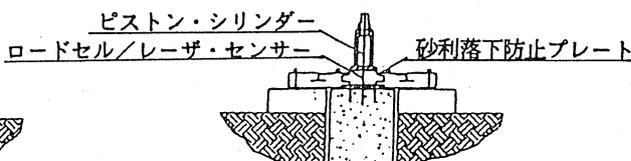
a) 杭頭処理とベースプレート取付

地盤から突出させた杭頭で、杭センサーの位置出しを行い、杭頭の水平処理をする。杭頭の高さに応じて仮設架台を用意する。場所打ち杭場合はレベリング後、ベースプレートの固定用アンカー孔を設ける。ベースプレートを水平に設置しアンカーボルトで固定する。杭頭との空隙は高強度、急速硬化モルタル充填。鋼杭の場合は杭頭に取付けプレートを溶接し、ベースプレートをボルトで固定する。



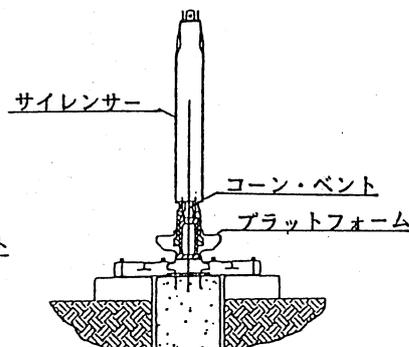
b) シリンダーと燃料 (fuel) の装着

シリンダーをベースプレートにボルトで固定する。レーザが架台中央から入射出来る様に架台をセット・ロードセルのダメージを防ぐ為、砂利落下防止プレートをシリンダー上からはめる。ピストン下部中央に内蔵されたロードセルとレーザ変位計のケーブルをFPDSに繋ぎ込む。レーザは作業震動の影響を受けない距離(10-15m)に据付け、センサーに水平誤差1%で直角に入射する様セットし、この状態を荷重"0"とする。計画荷重に対応する推進薬の量を算出し、所定数量だけ燃料筒に充填・着火材として粉末の推進薬を燃料筒下部の着火皿に充填する。燃料筒をシリンダー燃料室に固定する。イグニッション・ボックスを試験モードとし通電と電圧を確認する。



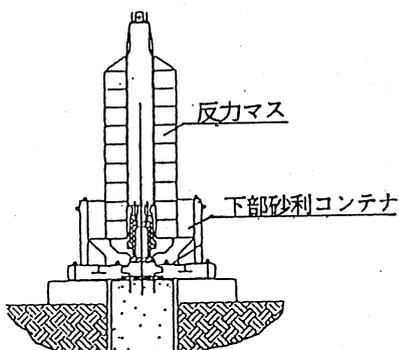
c) ピストンの装着

コーン・ベントによってピストンを密閉し、外周に潤滑グリースを塗布する。消音器内蔵のプラットフォームを吊り込み、シリンダーの上から被せ、装着する。



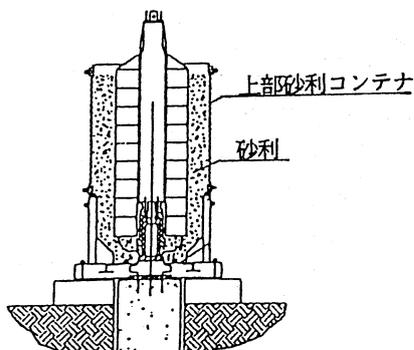
d) 反力マスと砂利コンテナの組立

下部砂利コンテナを架台に取付けた後、反力マスを順次所定個数だけプラットフォーム上に載せる。マス搭載時の荷重と変位を順次FPDSで記録する。各反力マスは上下に鎖で繋結する。



e) 砂利充填とシステムの作動確認

上部砂利コンテナを組み上げ固定する。粒径25~30mmの砂利を上部から均一に落とし込み、反力マスに等しい高さ迄充填する。セッティングが完了したらFPDSにより載荷重量と変位量の確認を行う。この時の荷重と変位が計画荷重の約5%の静的載荷試験に相当する。イグニッション・ボックスを接続し通電、電圧を確認する。異常がある場合はケーブル等を再チェックし、異常が改善されない場合は装置を解体し、推進薬セットから再度やり直す。



f) 試験実施

全ての準備完了後、作業員、見学者重機等は試験装置から十分離す。安全を確認し秒読みに入る。秒読みは5~10秒程度とし、近接道路等がある場合は交通の安全を確保する等、必要な対処を行う。近隣に家屋等がある場合は、試験実施を事前に通知する。試験後装置が安定したら解体作業に入る。計測はこの時点で終了とし、計測データをまとめる。

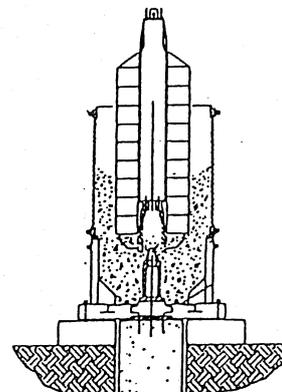
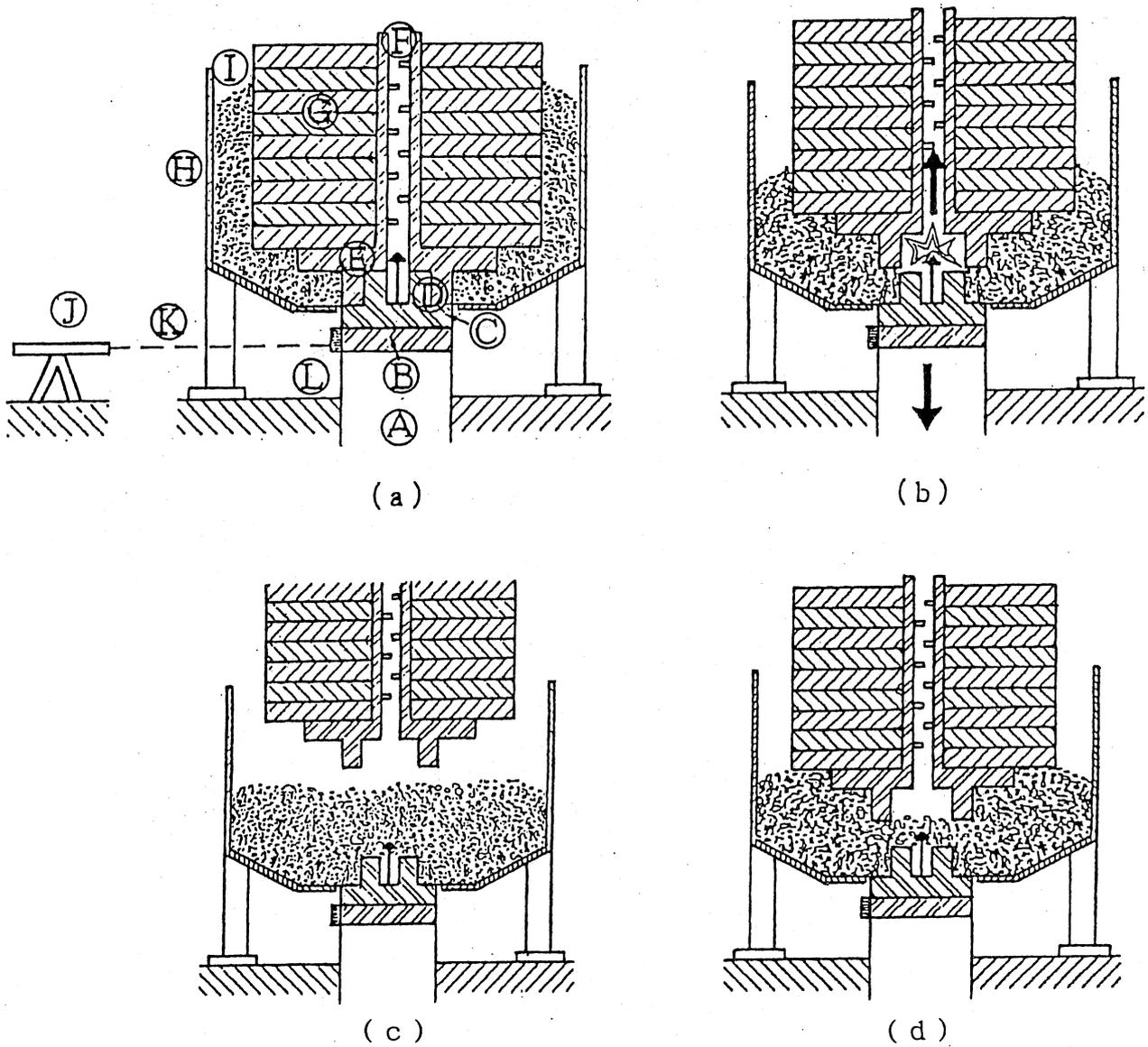


図-5.9 載荷試験手順



記号	名 称	記号	名 称	記号	名 称
Ⓐ	試 験 杭	Ⓔ	プラットフォーム	Ⓘ	砂 利
Ⓑ	ロ ードセル	Ⓕ	サイレンサー	Ⓜ	レ ー ザ ー
Ⓒ	シリンダー及び燃焼室	Ⓖ	反 力 体	Ⓚ	レーザープロジェクター
Ⓓ	ピ ス ト ン	Ⓗ	砂 利 容 器	Ⓛ	レーザーセンサー

図-5.10 スタナミック試験の載荷手順

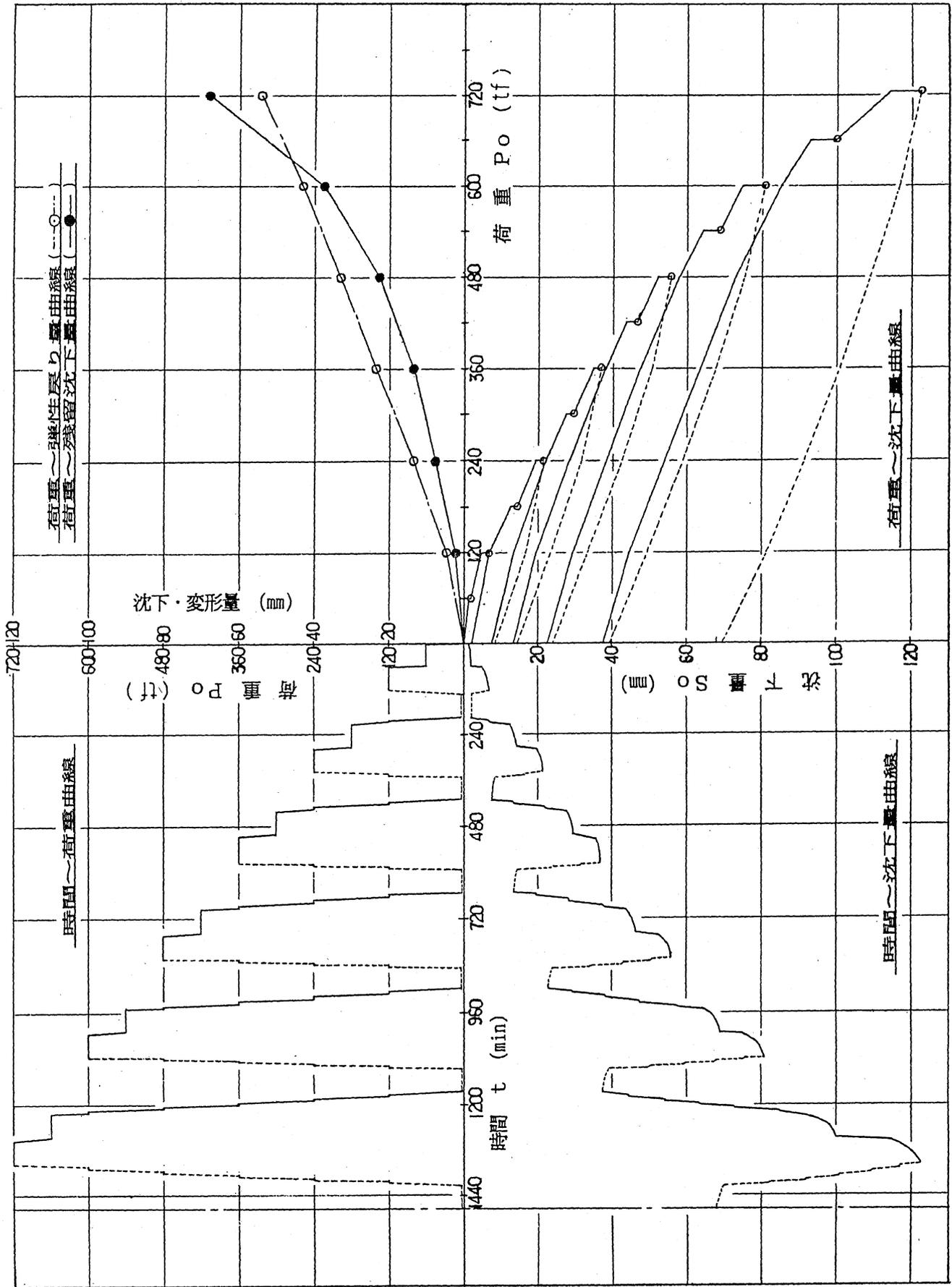


図-5.11 鉛直載荷試験結果総合図 ( $P_o \sim S_0 \sim t$ 曲線)

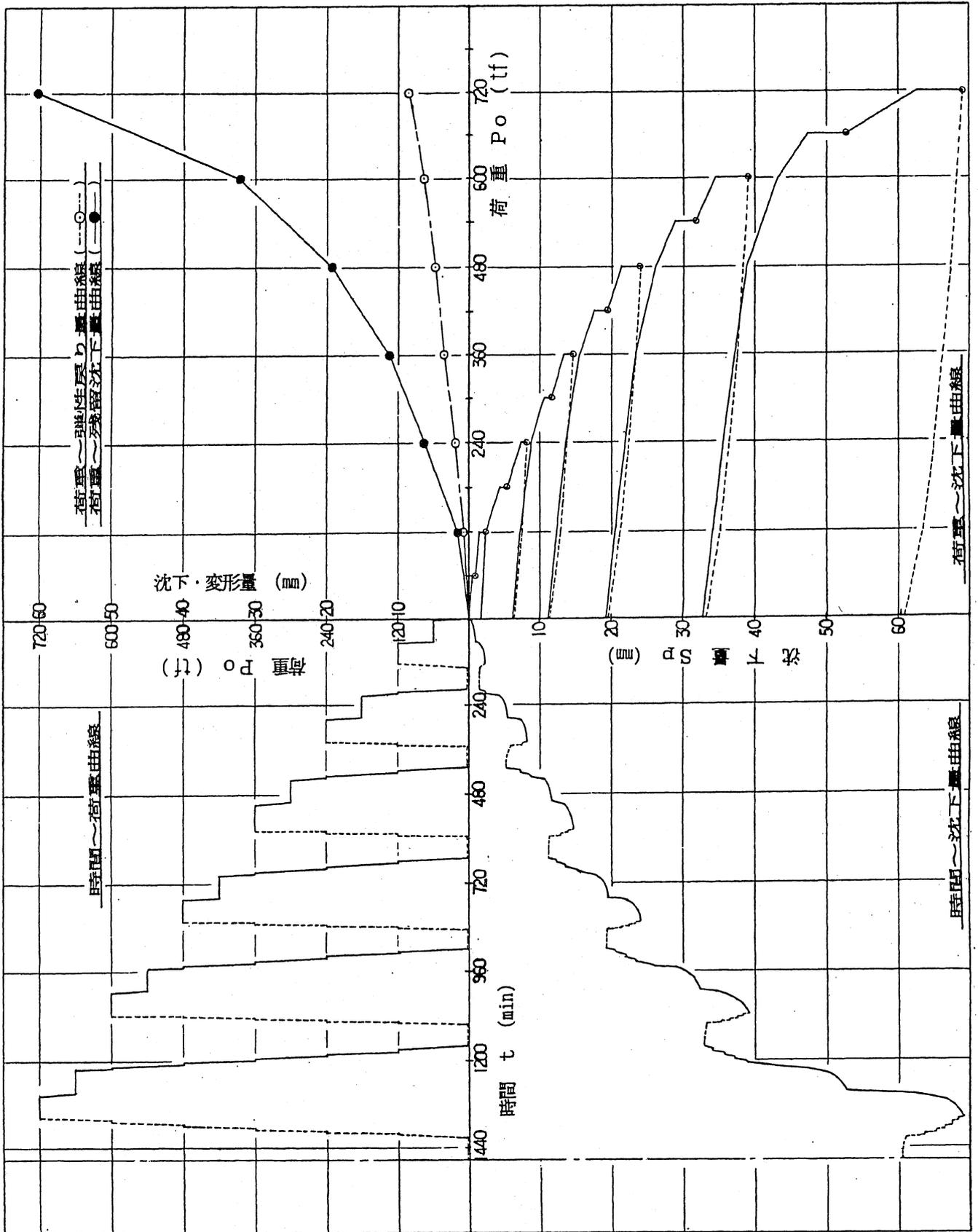


図-5.12 鉛直載荷試験結果総合図 ( $P_o \sim S_p \sim t$  曲線)

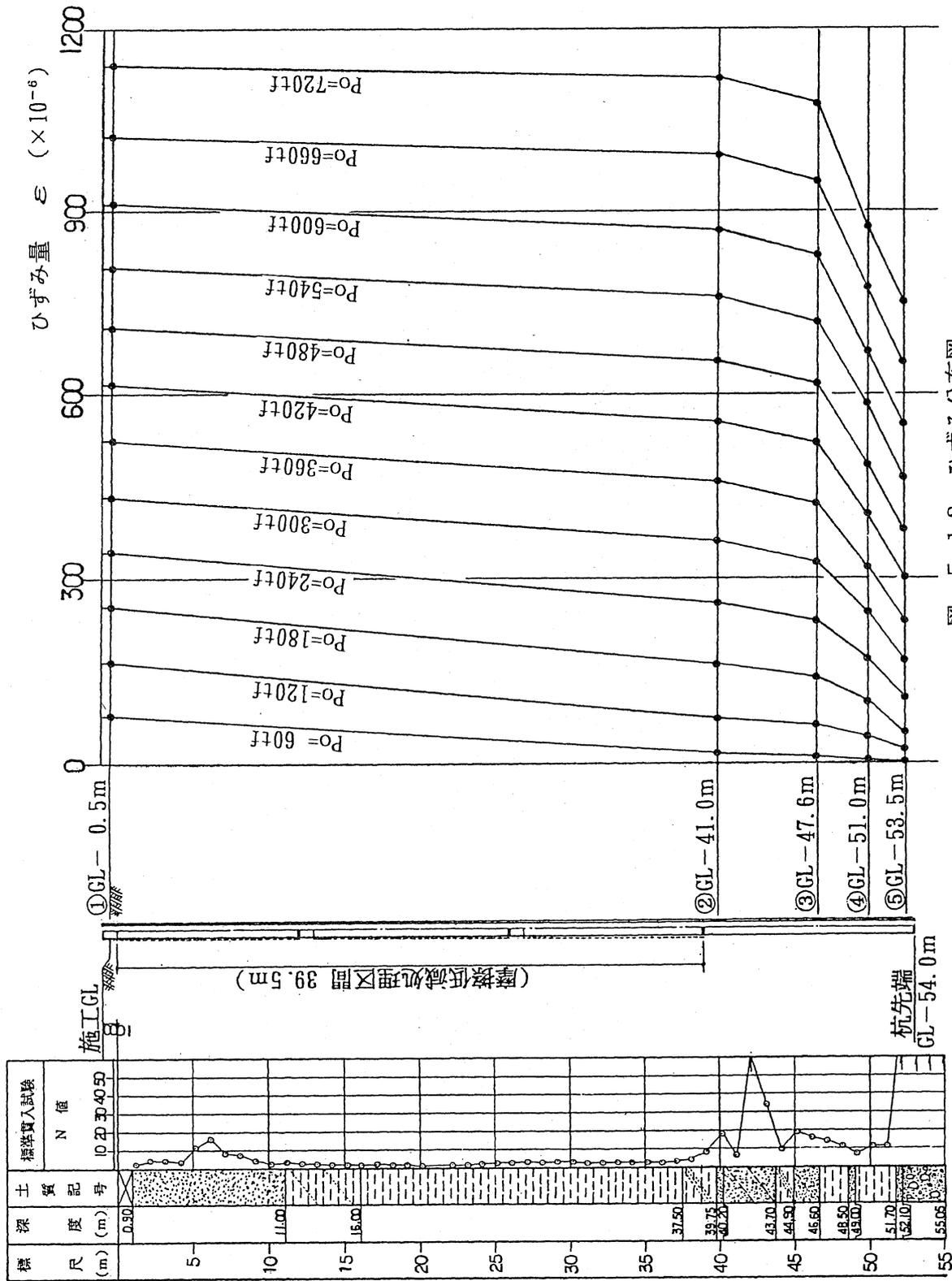


図-5.13 ひずみ分布図

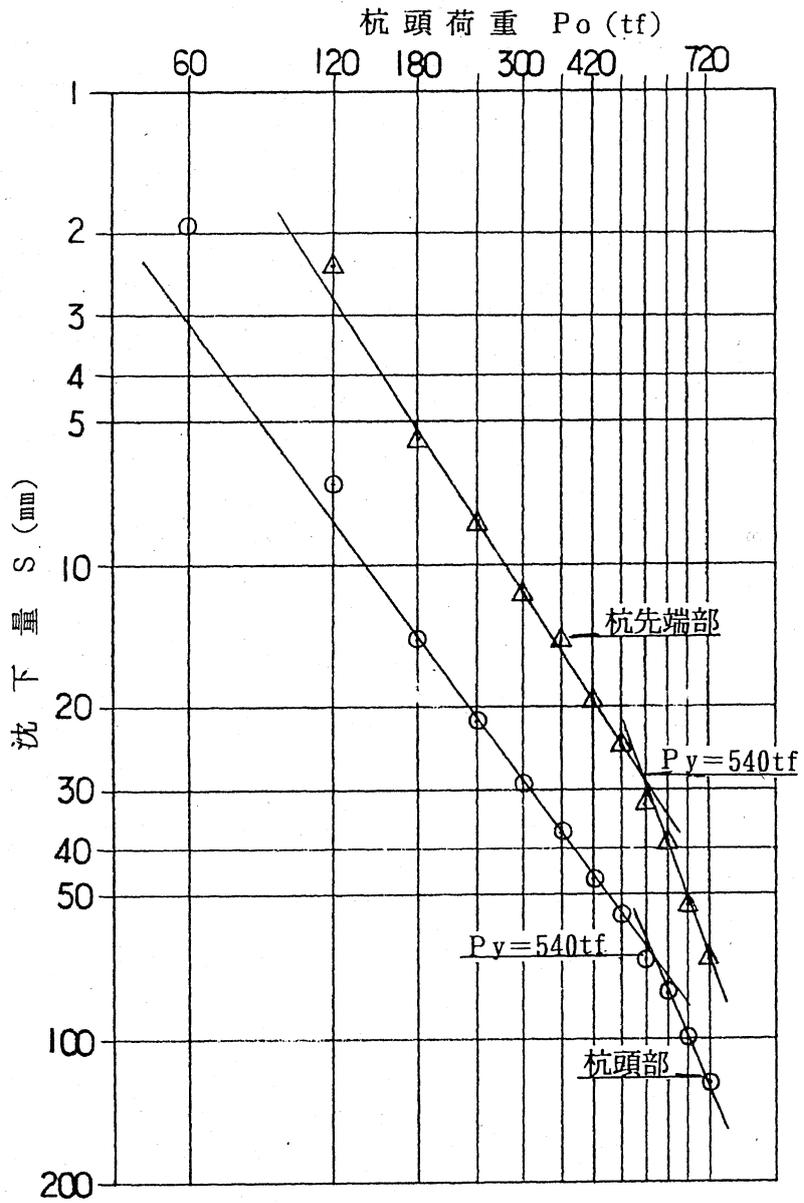


圖-5.14  $\text{Log } P_o \sim \text{Log } S$  曲線

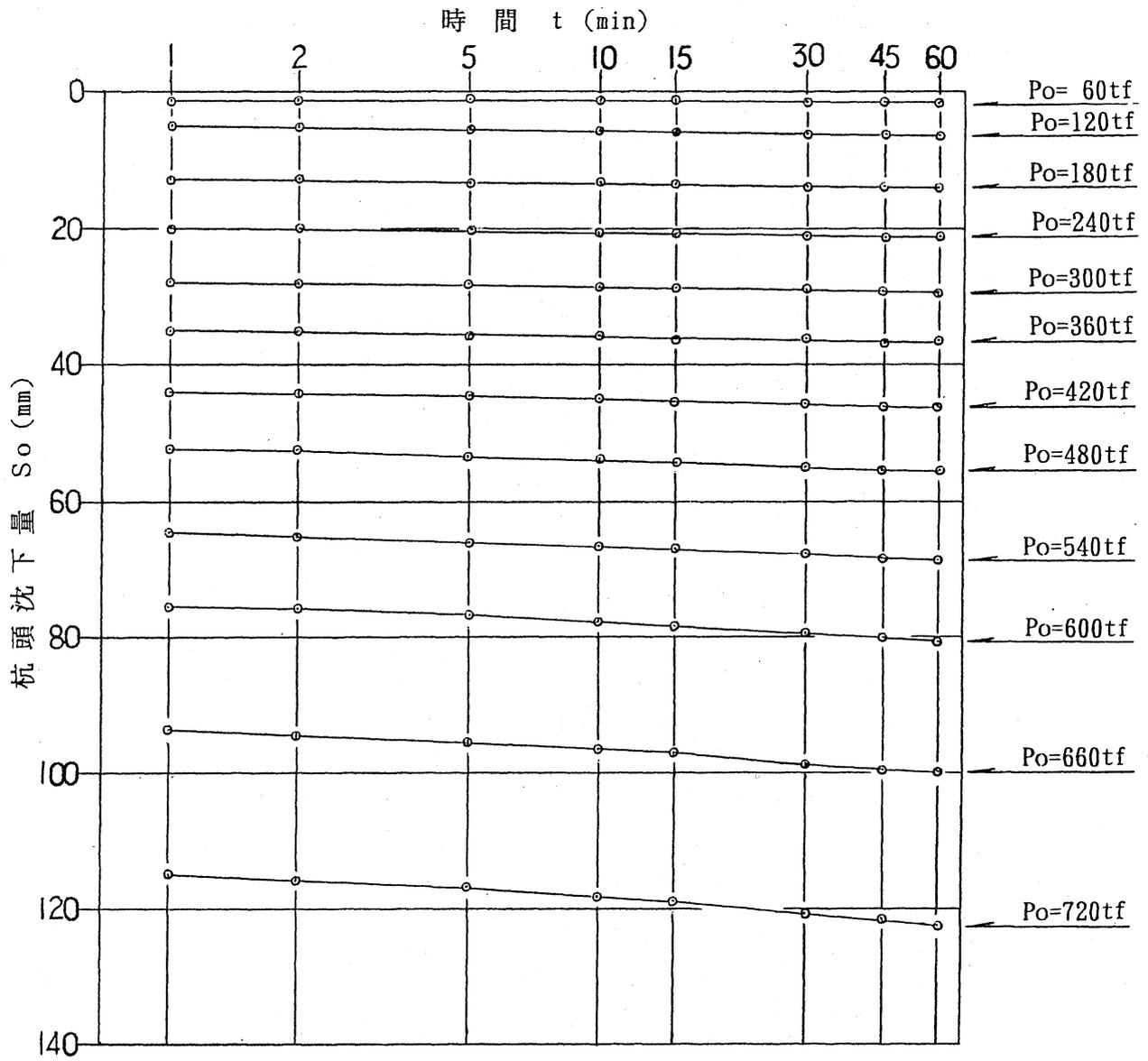


圖-5.15  $S_o \sim \text{Log } t$  曲線

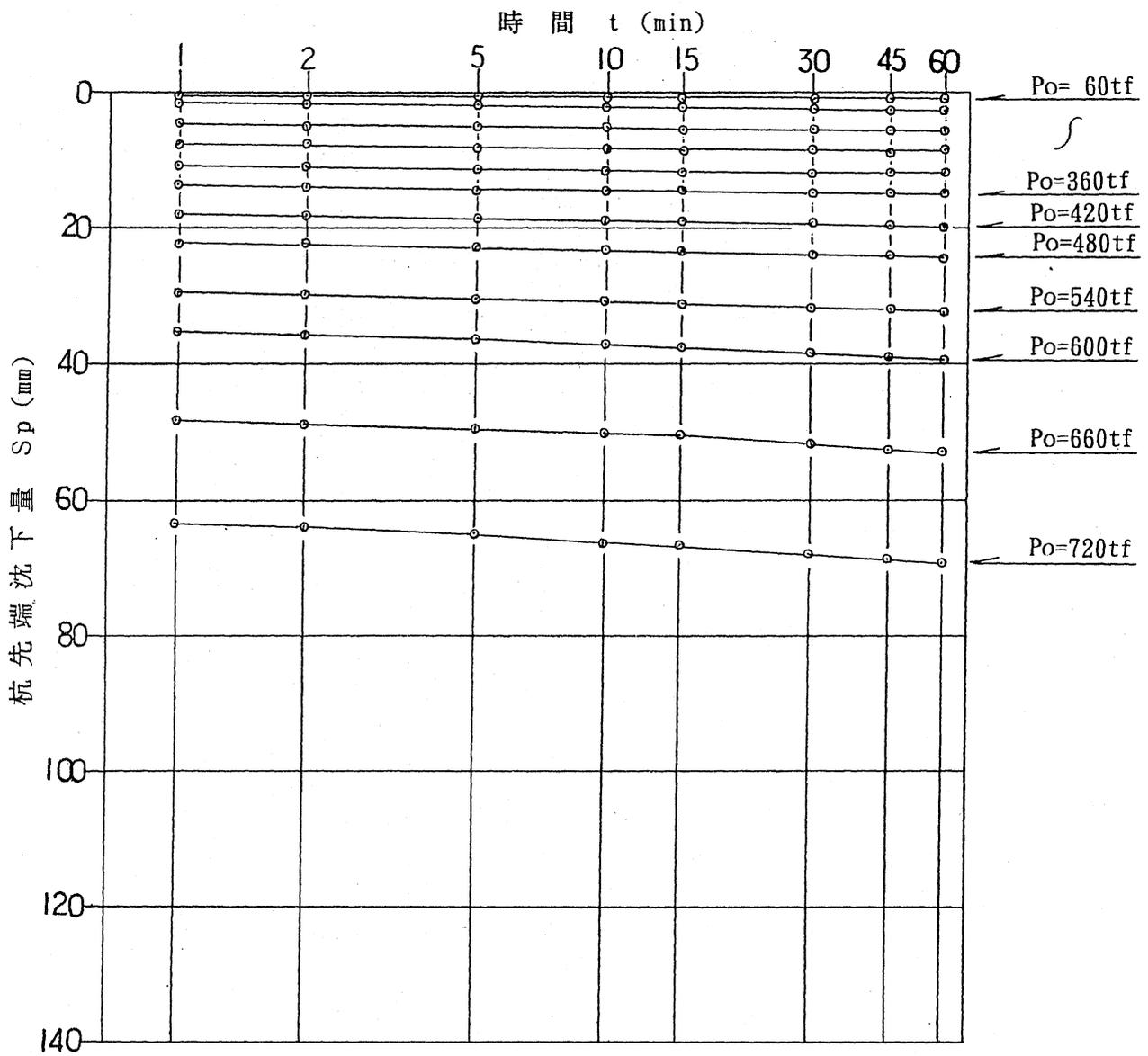


圖-5.16  $S_p \sim \text{Log } t$  曲線

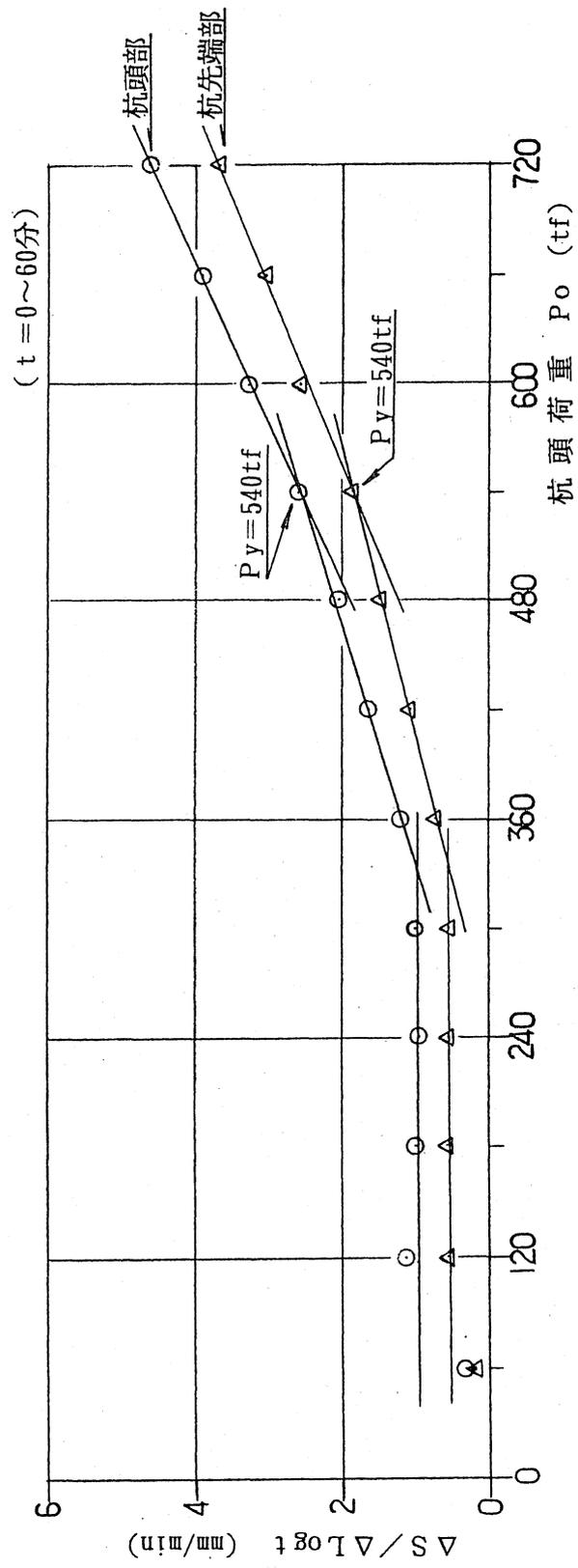


圖-5.17  $\Delta S / \Delta \text{Log } t \sim P_o$  曲線

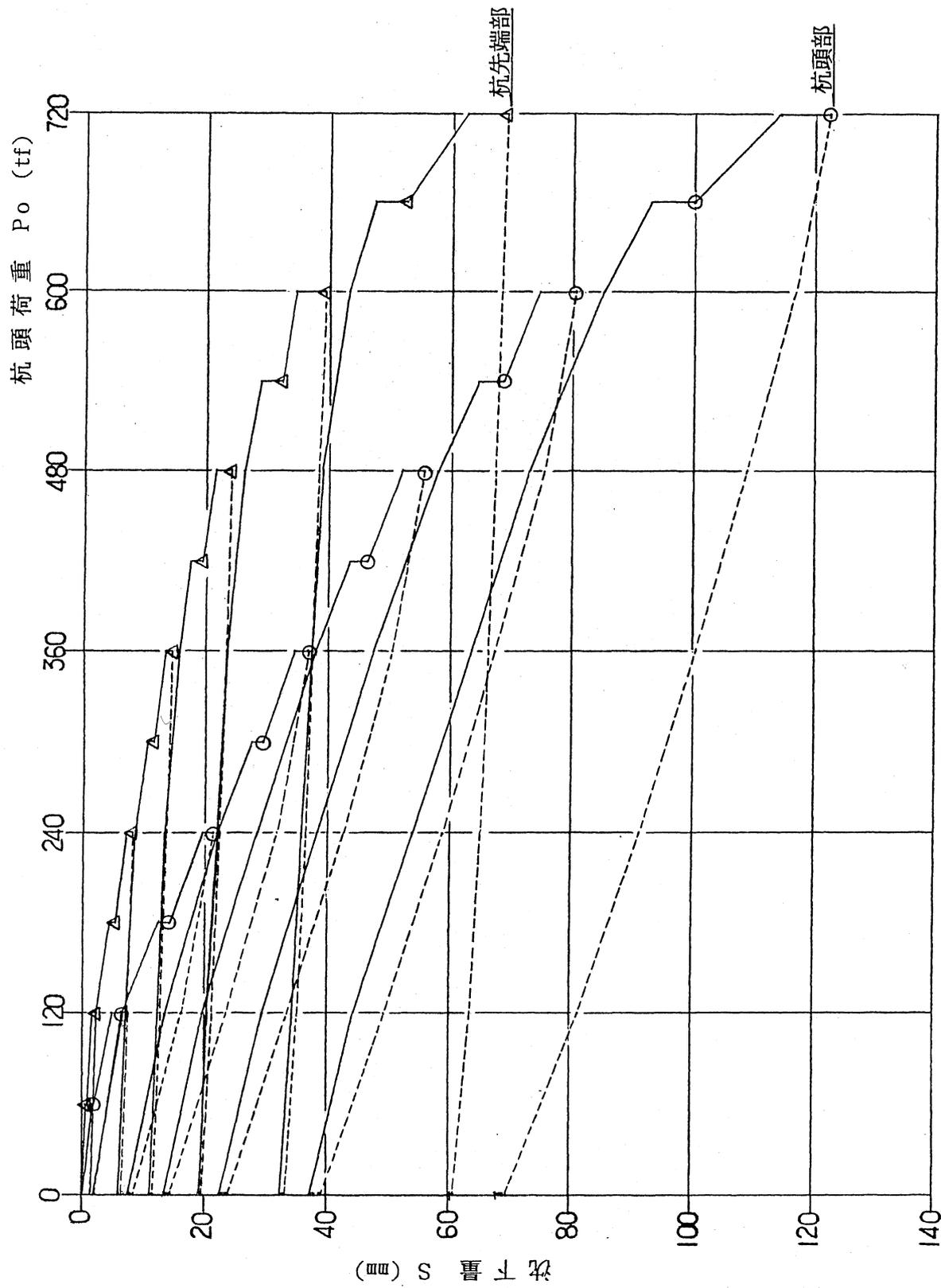


図-5.18  $P_o \sim S$  曲線

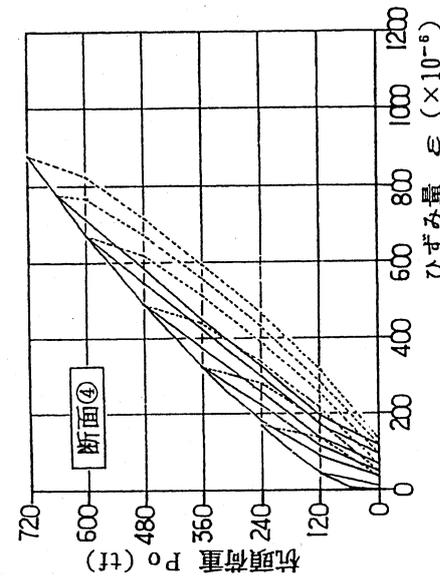
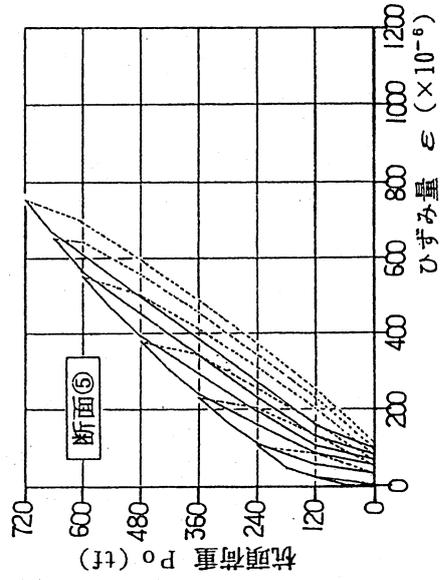
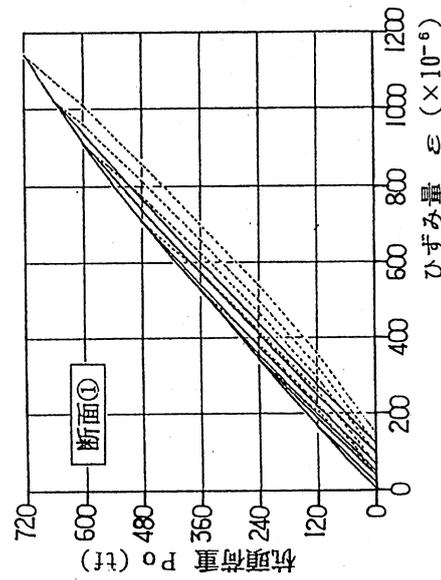
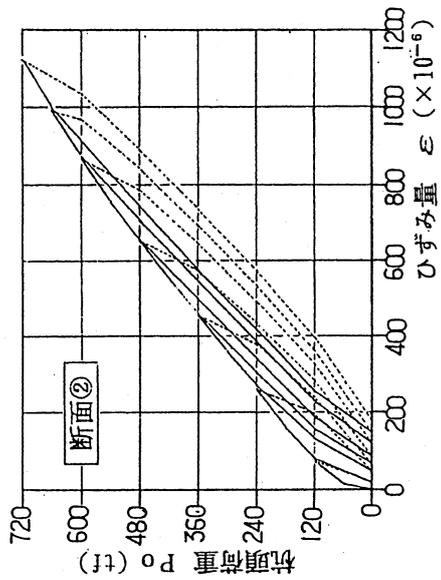
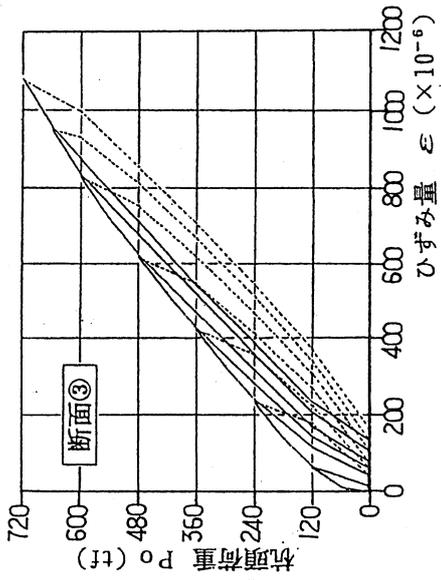


図-5.1.19 各断面における荷重とひずみ量との関係

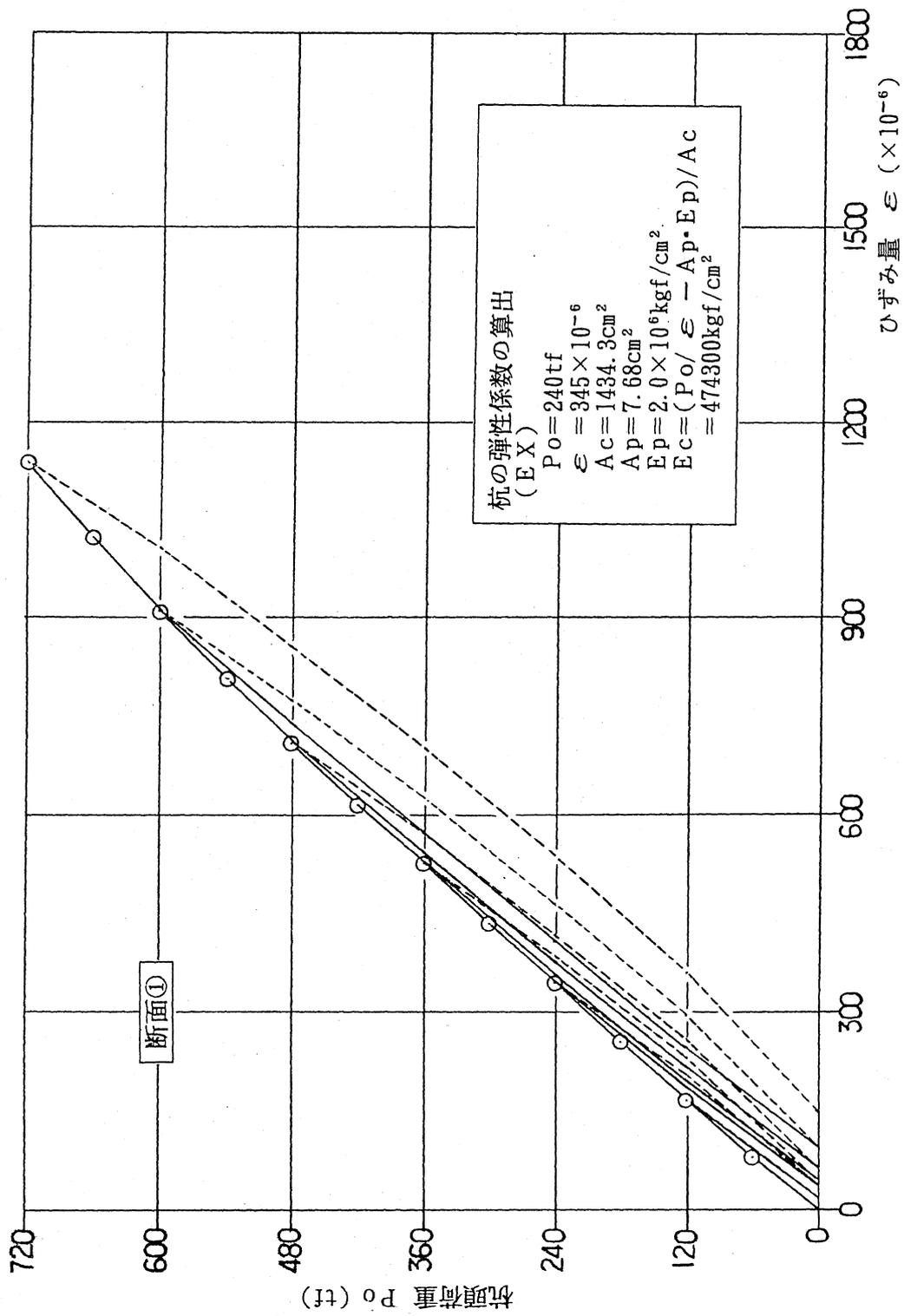


図-5.20 杭頭荷重とひずみ量との関係

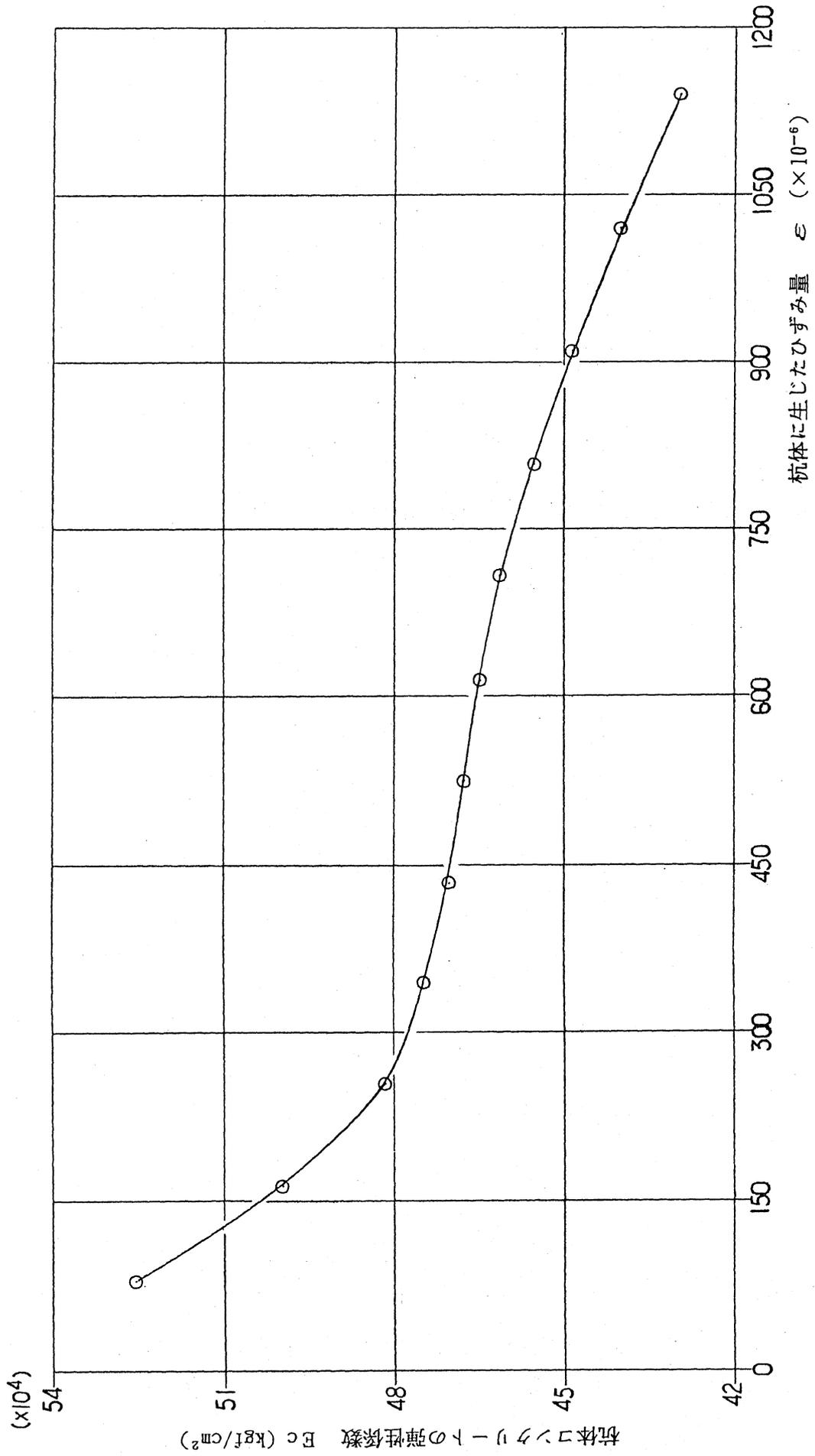


図-5.2.1 弾性係数とひずみ量との関係

標尺 (m)	深度 (m)	土質記号	標準貫入試験 N 値	
			0	50
0.30				
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
37.50				
39.75				
41.00				
43.70				
44.50				
46.50				
48.50				
49.00				
51.70				
52.00				
55.00				

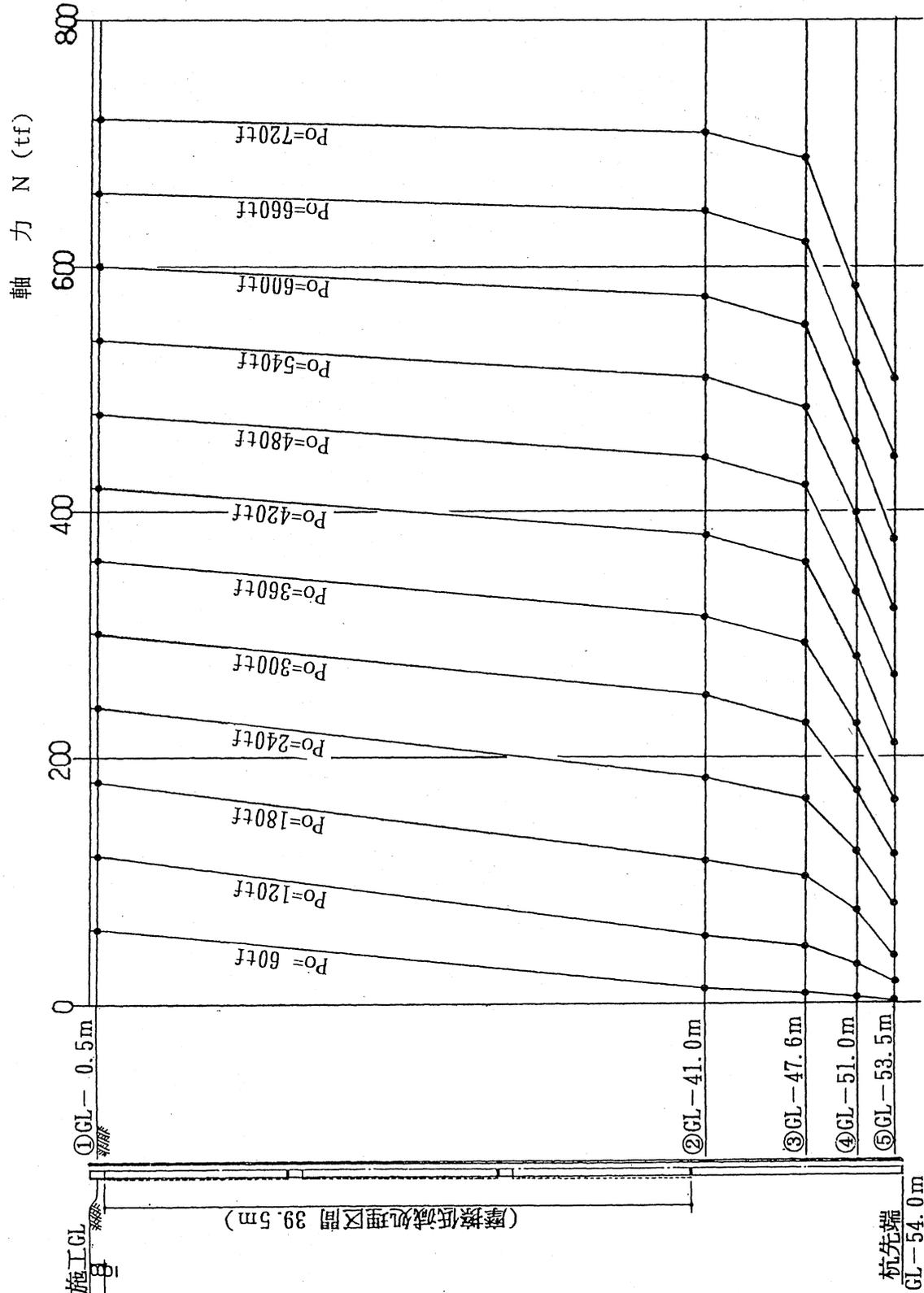


図-5.2.2 軸力分布図

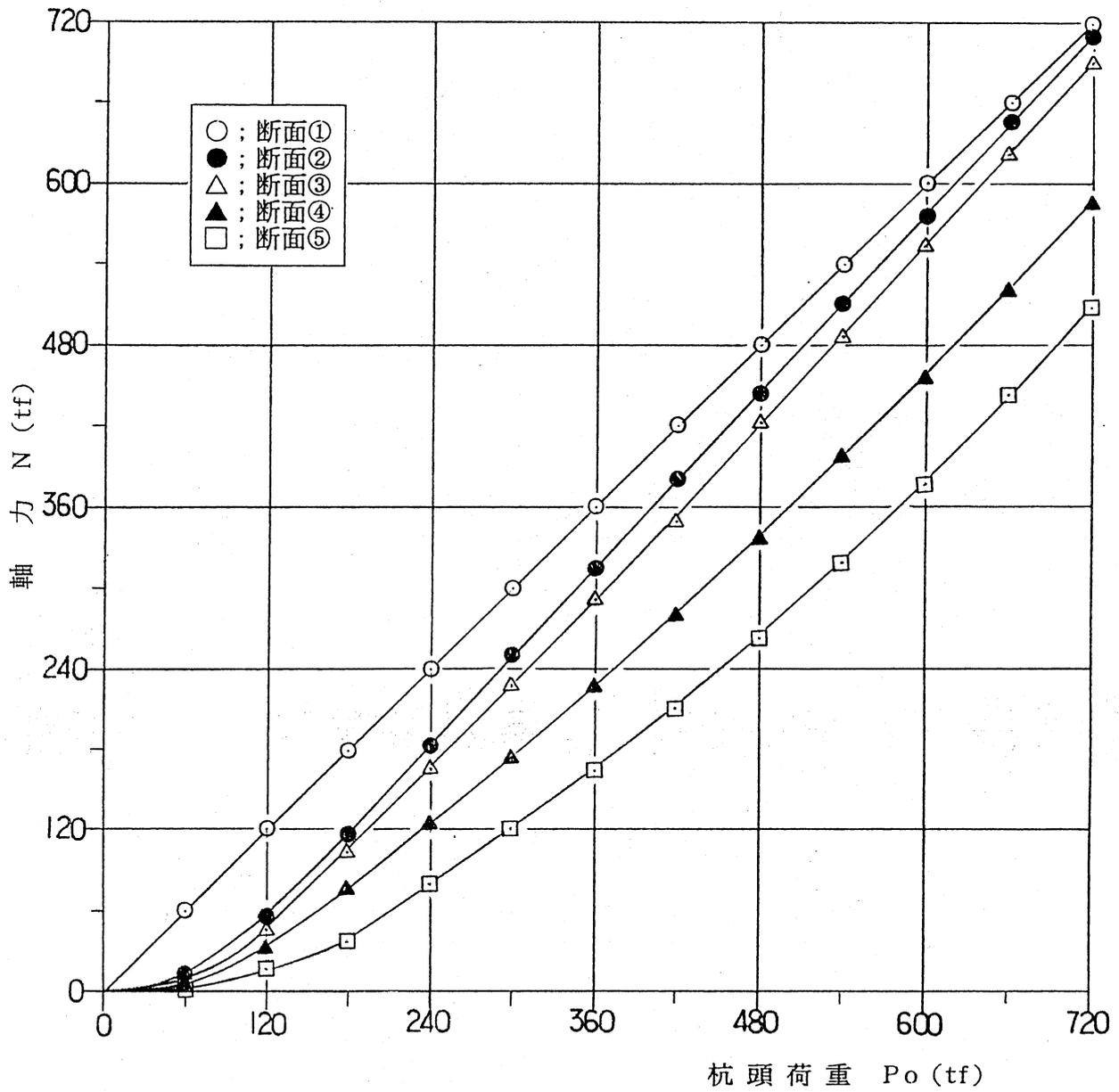


図-5.23 軸力と杭頭荷重との関係

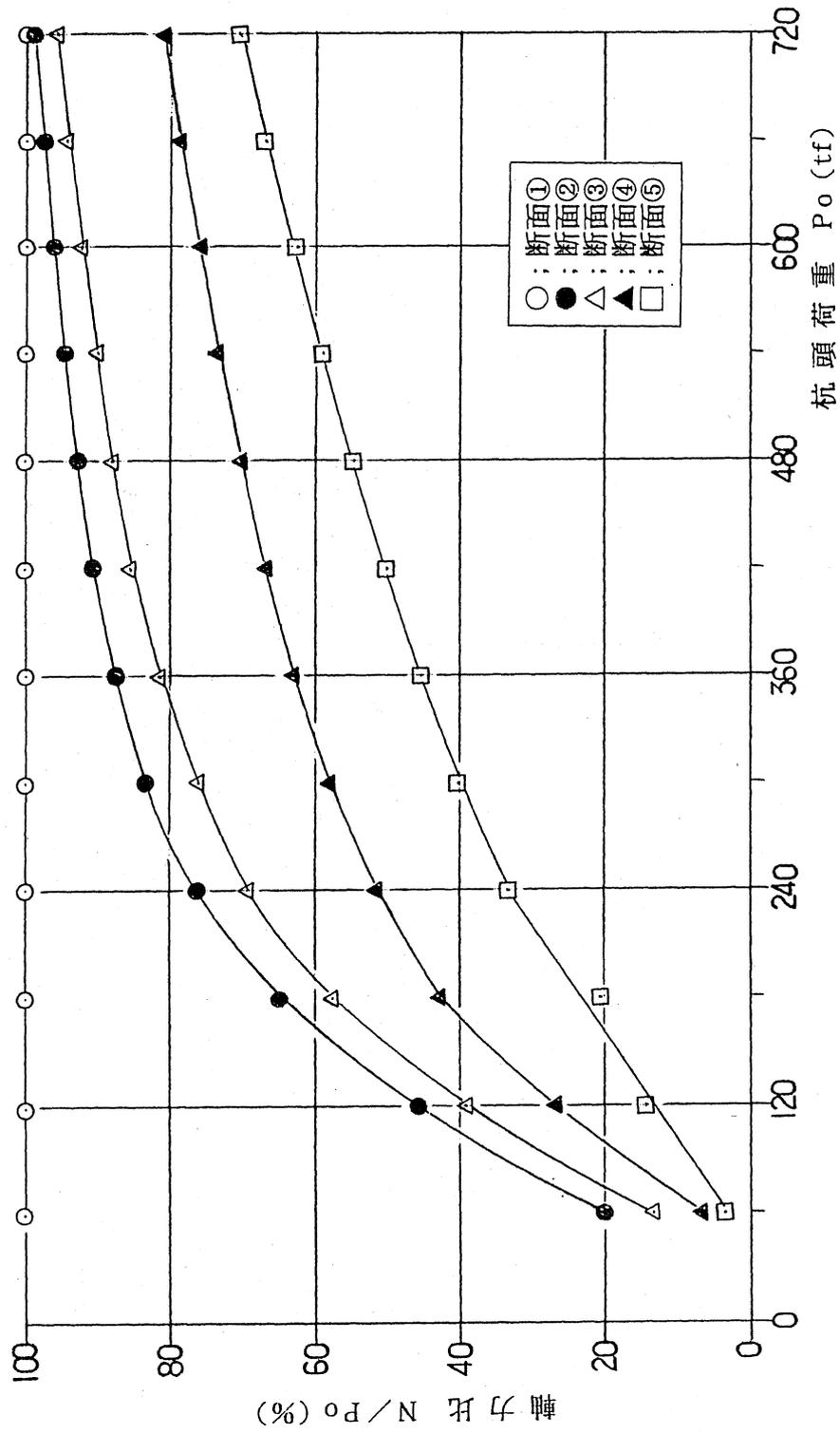


図-5.2.4 軸力比と杭頭荷重との関係

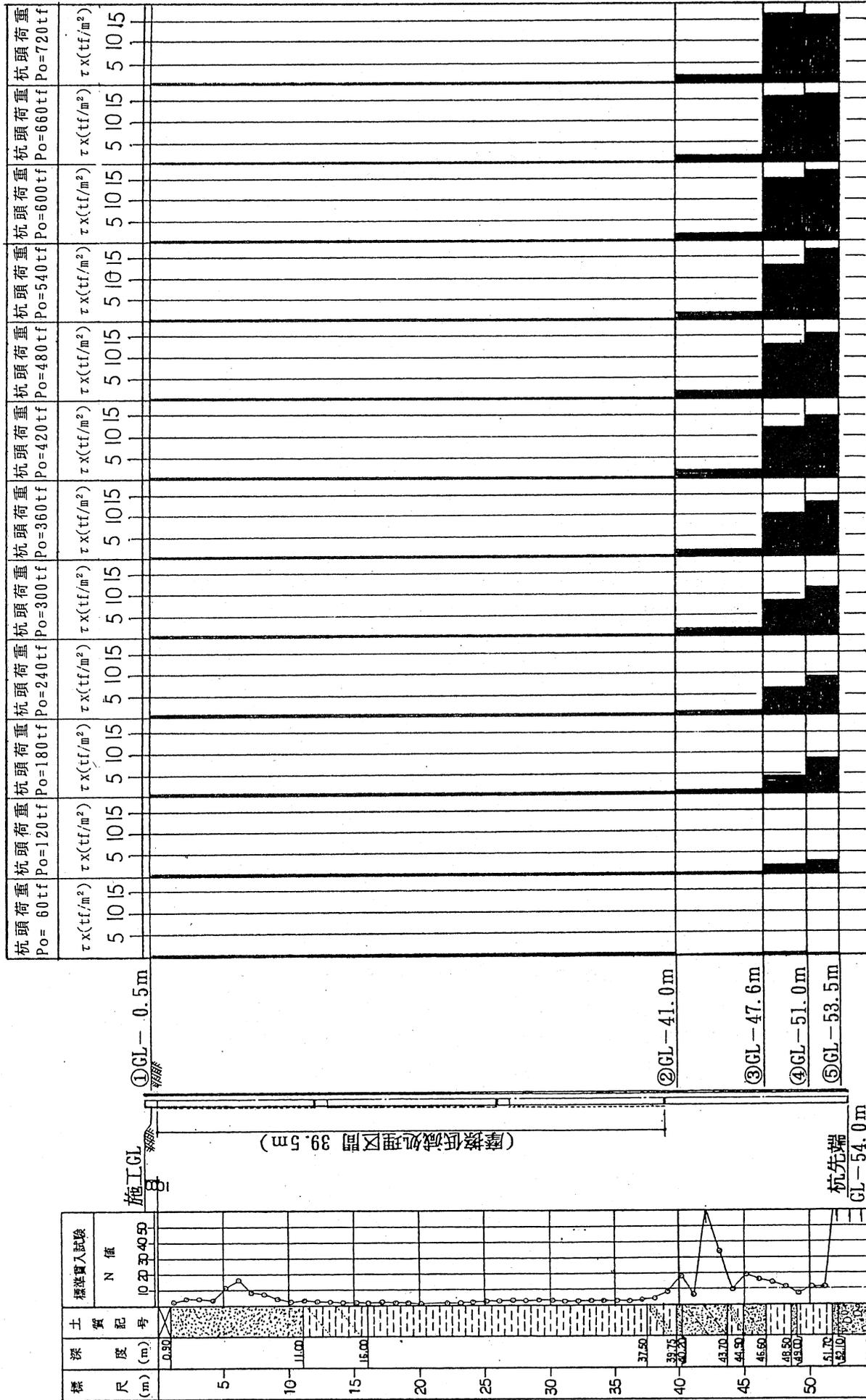


図-5.25 杭周面摩擦強度分布図

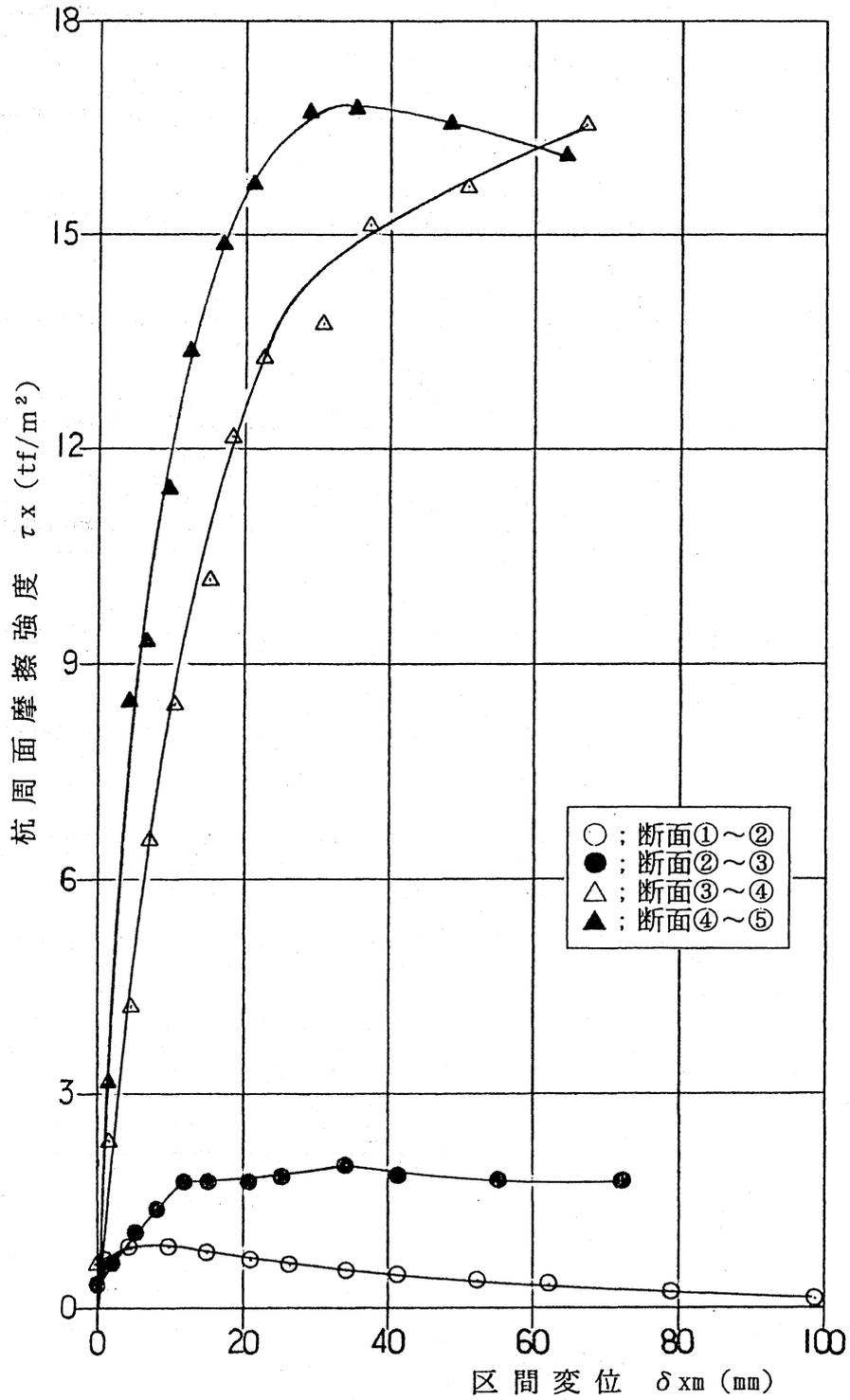
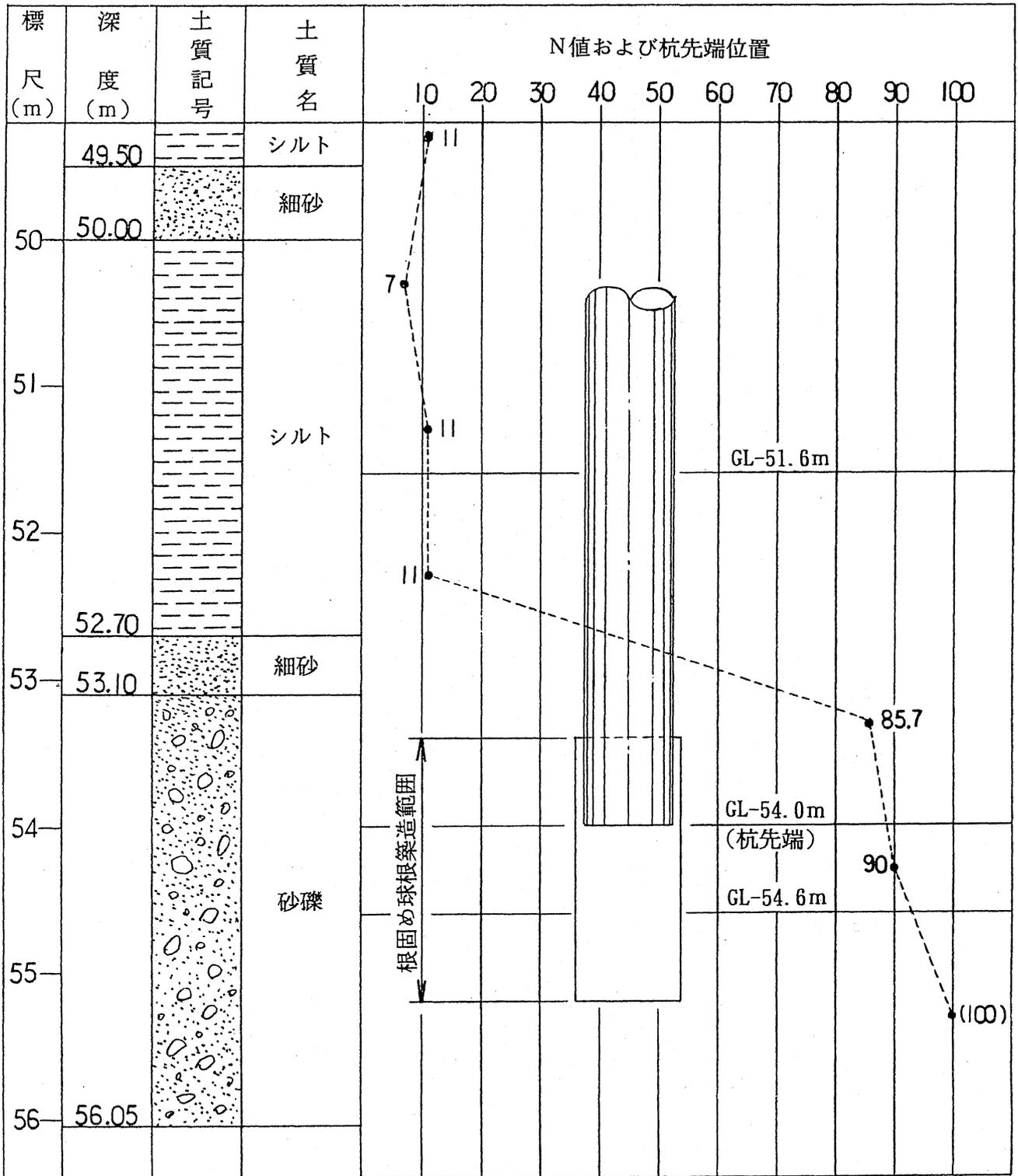


図-5.26 周面摩擦強度と杭の区間変位との関係



$$N = \frac{(11+11)/2 \times 0.7 + (11+85.7)/2 \times 1.0 + (85.7+90)/2 \times 1.0 + (90+93)/2 \times 0.3}{3.0} = 57.1$$

図-5.27 杭先端地盤詳細およびN値

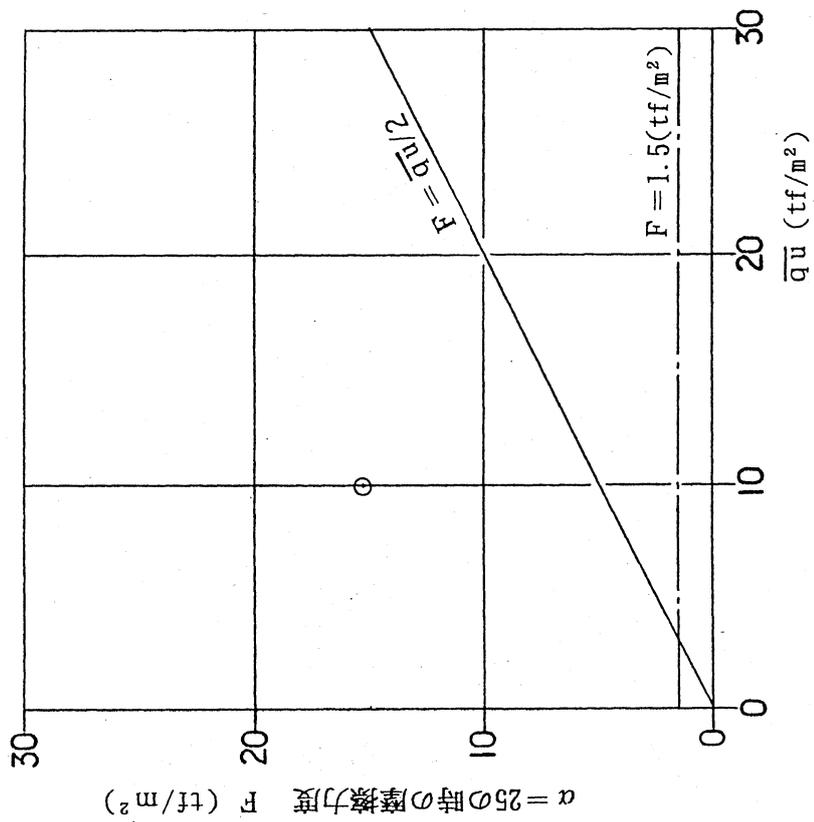


図-5.28  $\alpha = 25$ の時の摩擦力度と $\bar{q}_u$ との関係 (粘性土)

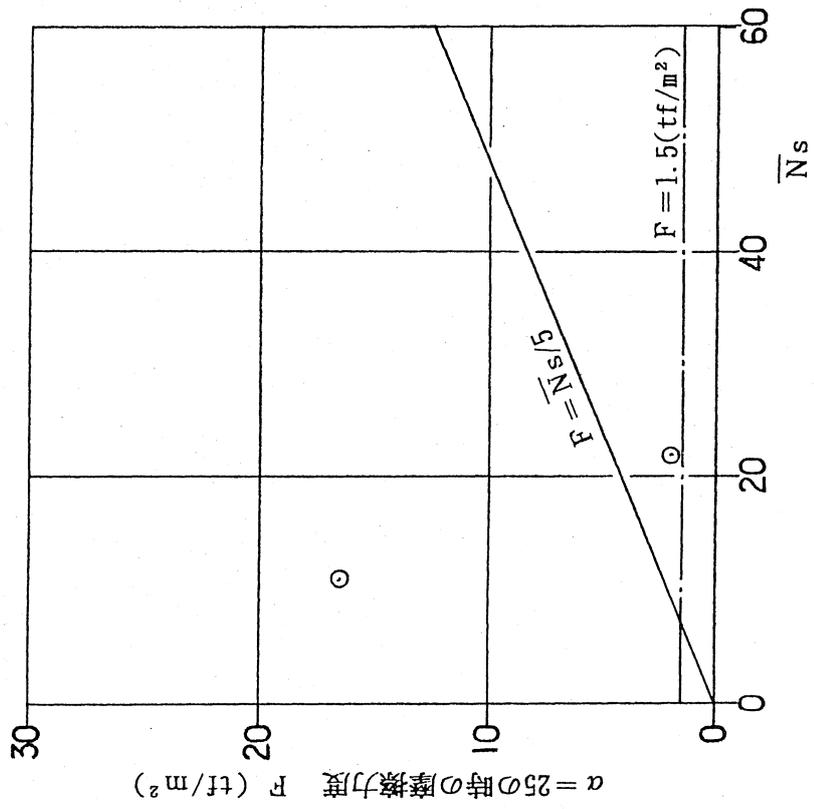


図-5.29  $\alpha = 25$ の時の摩擦力度と $\bar{N}_s$ との関係 (砂質土)

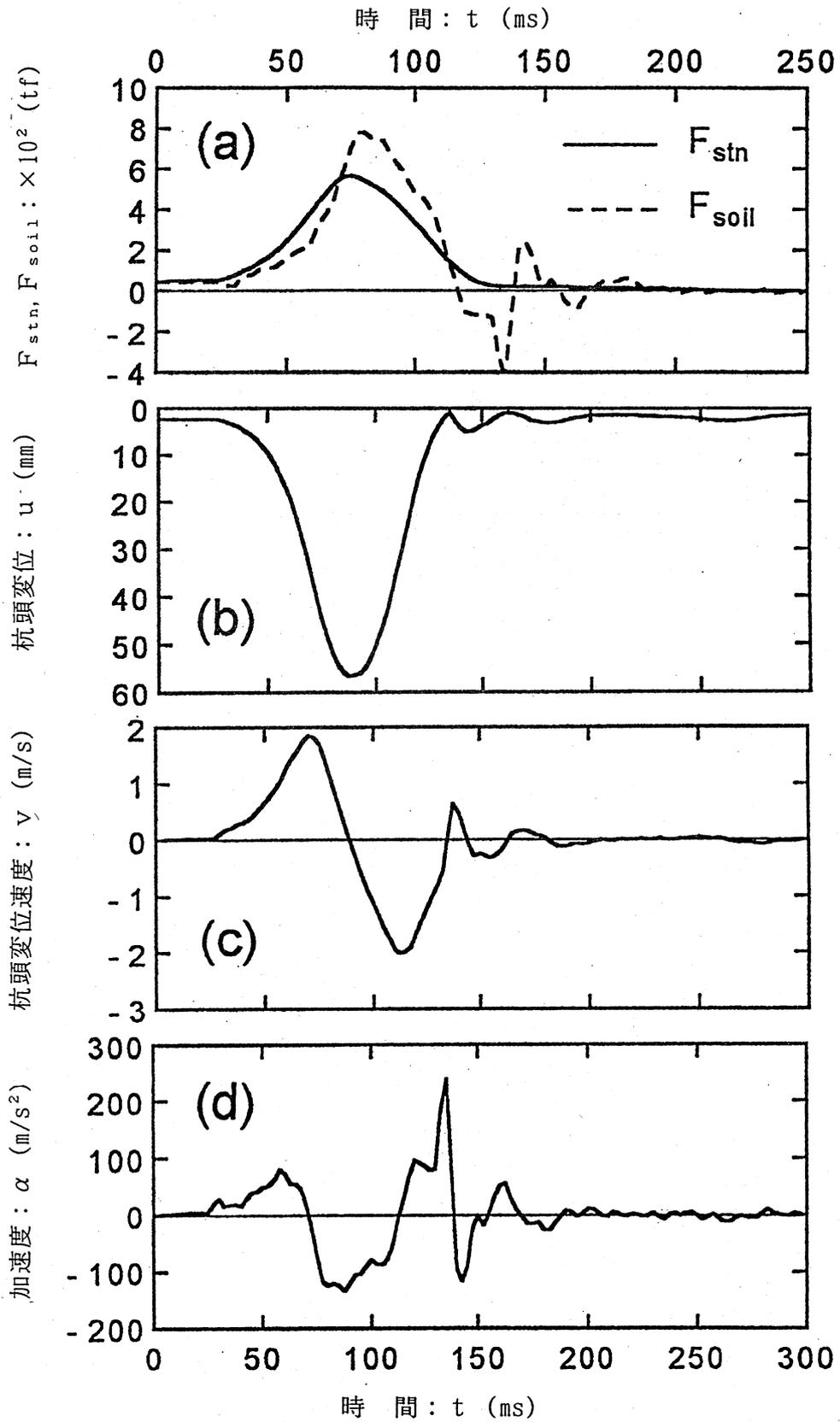


図-5.30 スタナミック試験測定シグナル

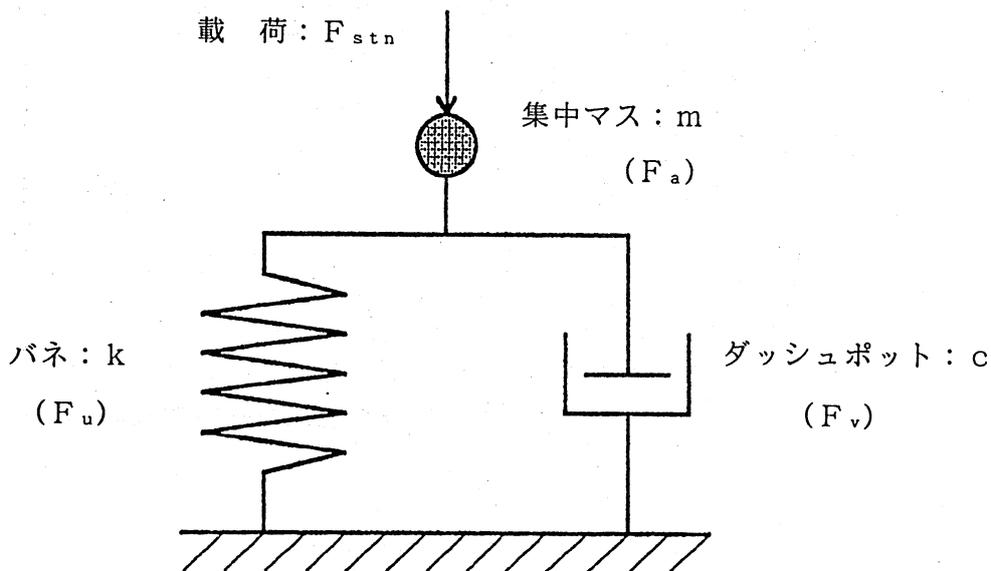


図 - 5.31 杭 - 地盤モデル

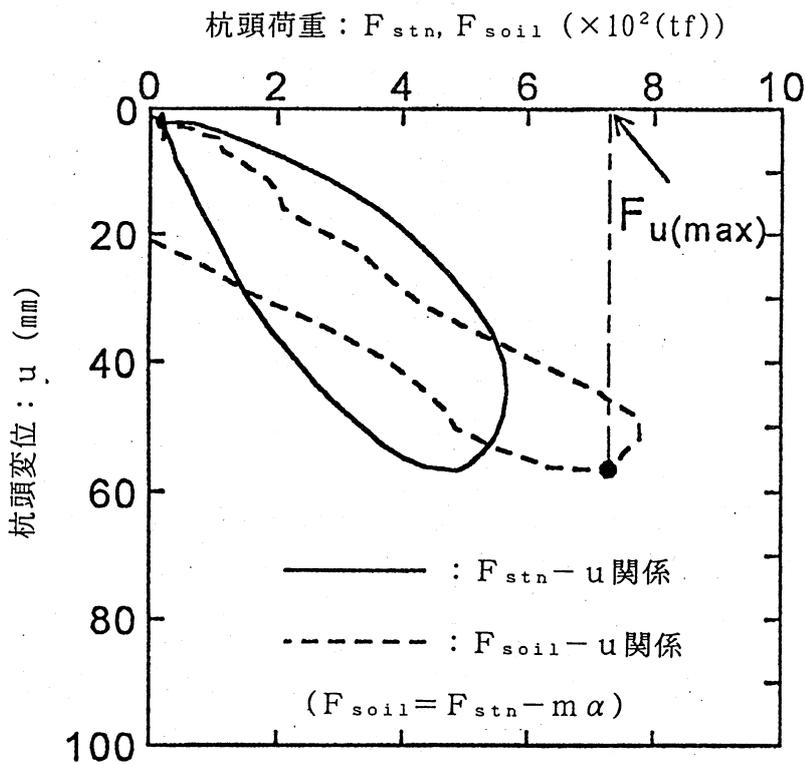


図 - 5.32  $F_{soil}$  と  $u$  並びに  $F_{stn}$  と  $u$  の関係

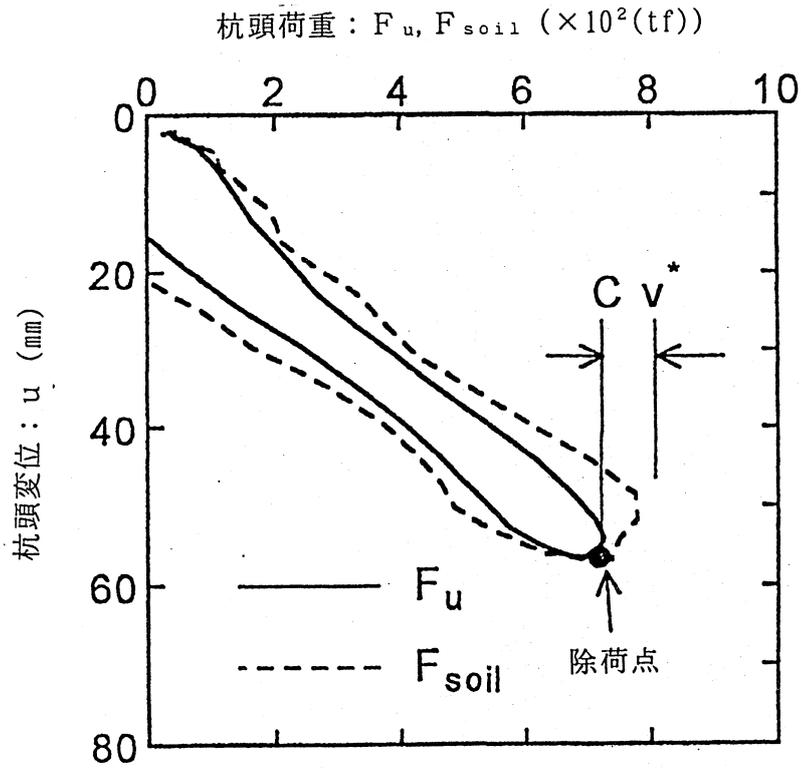


図 - 5.33 除荷点法による“静的”荷重～沈下関係

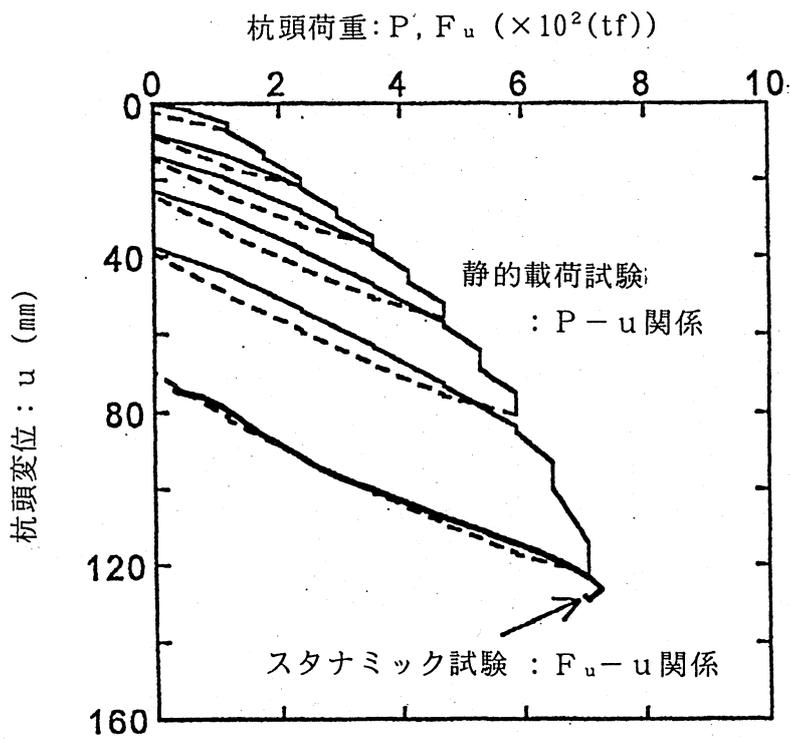


図 - 5.34 スタナミック試験による“静的”荷重～沈下曲線と静的載荷試験で得られた荷重～沈下曲線の比較

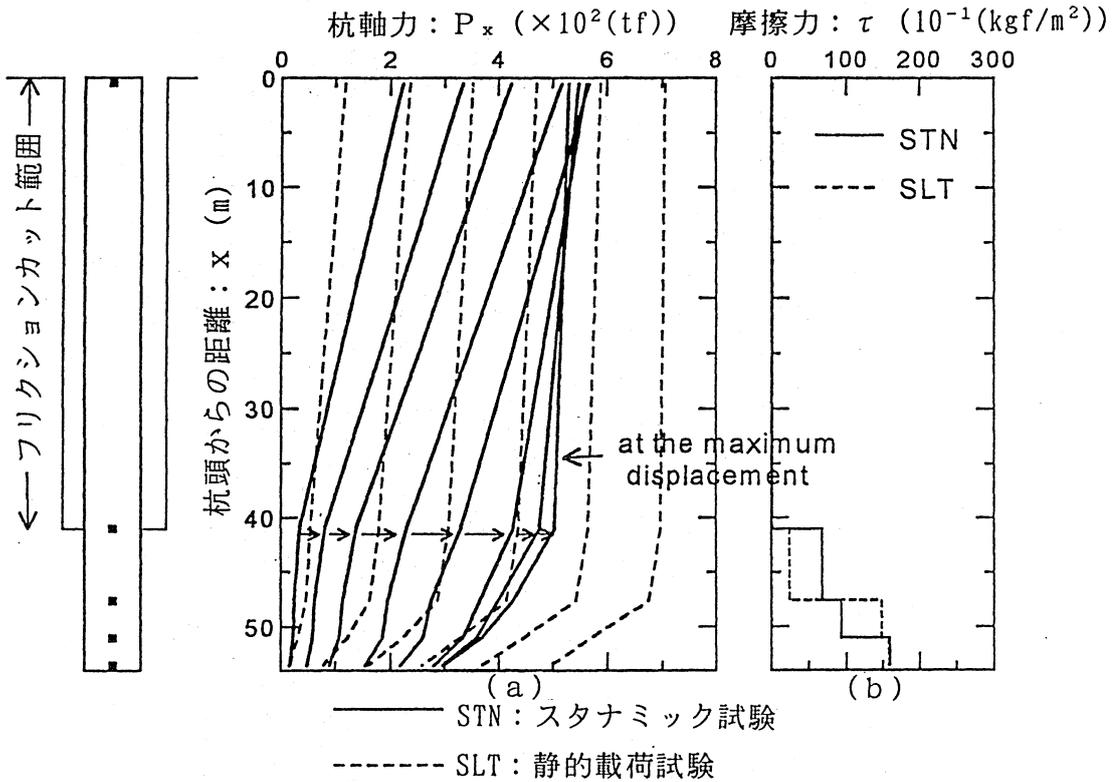


図 - 5.35      スタナミック試験と静的载荷試験との軸力分布および摩擦力の比較 (荷重時)      左図 (a), 右図 (b)

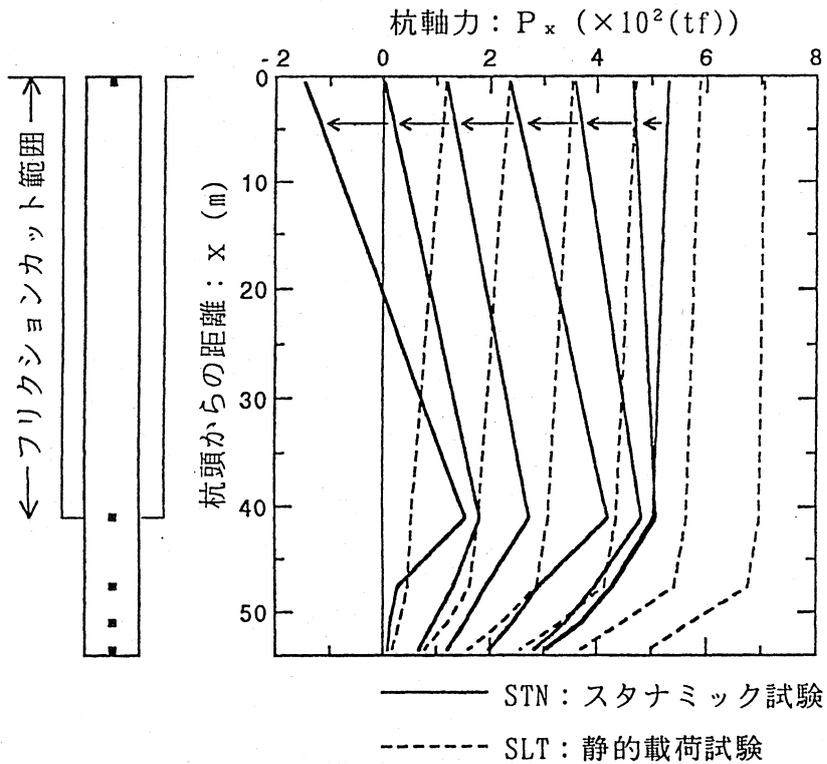


図 - 5.36      スタナミック試験と静的载荷試験との軸力分布の比較 (除荷時)

## 第6章

### 結論および今後の課題

# 第6章

## 結論および今後の課題

### 6. 1 結 論

コンクリート基礎杭の施工品質は、施工者の技量の巧拙によって当然バラツキが生じるが、一方では施工地盤の地耐力にバラツキがあるのも周知のことである。すなわち、前者のバラツキと後者のバラツキが危険側に複合された場合には、杭の性能上重大な問題を引き起こす可能性があり、また逆に安全側に複合された場合には、杭は非常に高い支持力性能を示す可能性もあるため、実際の杭の性能は設計値と著しくかけ離れている場合のあることが予想される。本論文は、この点を踏まえて、コンクリート基礎杭の設計に限界状態設計法を導入するに際して解決しなければならない幾つかの問題点の中から、特に杭の施工品質とこれに著しく影響されると考えられる支持力を取り上げ、これらの評価方法を確立することを目的として行った一連の基礎的研究の成果について述べたものである。

コンクリート基礎杭の施工品質の評価方法については、杭中を伝播・反射する弾性波の速度成分に着目した衝撃弾性波法による杭の形状推定方法を提案し、その可能性および適用性を数値実験とモデル実験によって確認するとともに、本推定方法を阪神大震災によって被害を受けたコンクリート基礎杭の実態調査に適用し、本方法の実用性についても検討を行った。また、コンクリート基礎杭の支持力評価方法については、急速載荷試験法の一つとして将来性が期待されているスタナミック試験法を取り上げ、この試験結果から杭の静的荷重-沈下曲線を精度よく推定するためのデータ処理方法について検討を行った。これらの研究成果を各項目ごとに要約すると、次のようになる。

#### 6. 1. 1 衝撃弾性波法を適用したコンクリート基礎杭の形状推定方法

コンクリート基礎杭の施工品質を非破壊的に評価する方法の確立を目的として、弾性波の中でも特に機械的方法によって発生させた衝撃弾性波を使用した試験方法を確立した。研究結果は、次のように要約できる。

- 1) 1次元弾性波動伝播解析の結果から、コンクリート基礎杭の断面欠損箇所から反射してきた弾性波の到達時間とその速度成分の振幅値とを用いることによって、杭の断面形状を精度よく推定できるが、推定精度を向上させるためには、弾性波の多重反射の

影響を考慮する必要のあること、伝播弾性波が減衰する場合には弾性波入力直後に波形が正から負の方向に変移するアンダーシュート現象が観察され、反射波の検出性能も弾性波の減衰の有無によって著しく影響を受けることが明らかとなった。

- 2) 2次元有限要素法解析の結果から、弾性波の入力位置と検出位置との成す角度が $90^\circ$ であると杭の曲げ振動の影響を受け難く、また杭長と杭径との比が17以上の細長い杭になると材軸方向への弾性波の伝播指向性が良くなるため、検出弾性波は解析に適した最も単純な波形となり、杭の形状推定精度も向上することが明らかとなった。
- 3) 鉄筋コンクリート部材を用いたモデル実験の結果から、異形棒鋼中を伝播した弾性波は鉄筋表面の凹凸の影響をかなり受けるが、集合平均化処理を施すことによって検出波形に及ぼす鉄筋表面の凹凸の影響を低減できること、鉄筋断面の形状推定精度は、鉄筋をとりまく媒体の種類によって影響を受けることが明らかとなった。
- 4) 実コンクリート基礎杭を用いたモデル実験の結果から、打設杭をモデル化した盛土杭の場合には盛土後24時間以上経過すると周辺土の影響が著しくなり、またアトラス工法によって施工された打設杭の場合には打設後3時間以上経過すると根固め液が固化して弾性波の減衰が著しくなるため、杭先端からの反射波がとらえ難くなること、杭長に比べて杭径が大きい太短い杭の場合には杭頭表面を伝播する波の影響が著しくなるため、杭の形状推定精度が低下することが明らかとなった。

### 6.1.2 コンクリート基礎杭の地震被害調査に対する衝撃弾性波法の適用性

本研究で提案した衝撃弾性波法の実用性を調べることを目的として、この方法を阪神大震災によって被害を受けたコンクリート基礎杭の調査に適用し、実際の測定現場で遭遇する各種の問題点などについて検討を行った。その結果を要約すると次のようになる。

- 1) 杭頭が露出している状態の場合には、直接杭頭にセンサーを設置した後、センサー設置位置との成す角度が $90^\circ$ となる位置の杭頭をハンマーで軽打することによって計測が可能である。
- 2) 杭頭とフーチングが結合されていて周りが掘削可能な状態の場合には、周辺を掘削した後に杭側面にセンサーを設置し、フーチング上面または杭側面に打ち込んだアンカーをハンマーで軽打することによって計測が可能となる。
- 3) 杭頭とフーチングが結合されていて周りが掘削不可能な状態の場合には、フーチング上端から杭上端までを2箇所コアボーリングすることによって杭頭が露出している状態にし、一方の杭上端部にセンサーを設置し、もう一方の杭上端部をハンマーで軽打することによって計測が可能となる。

- 4) 衝撃弾性波法によるコンクリート基礎杭の地震被害推定結果は、内視鏡および採取したコア試験体による杭の被害観察結果とよく一致し、この方法が実用上十分な推定精度を有していることがわかった。

### 6.1.3 急速載荷試験によるコンクリート基礎杭の支持力評価法

一現場で複数のコンクリート基礎杭の支持力評価試験が比較的容易に行える試験方法を確立することを目的として、スタナミック試験法の適用性を従来から用いられている静的載荷試験の結果と比較しながら検討した。その結果は、次のように要約できる。

- 1) スタナミック試験によって得られるデータは、通常加速度成分を含んでいるが、これを除荷点法を用いて静的な値に変換すると、推定される“静的”荷重-沈下曲線および“静的”最大荷重値は、静的載荷試験によって得られる結果とほぼ一致する。
- 2) スタナミック試験によって得られる杭の軸力分布性状および杭と地盤との間に生じる摩擦力は、除荷点位置においては静的載荷試験によって得られる結果とよく一致する。
- 3) 他の試験法に比べて試験が容易で、かつ杭の静的な支持力特性が推定可能なスタナミック試験は、基礎杭の設計に限界状態設計法を導入する際に要求される支持力のバラツキ評価に対しても、非常に有効な測定手段となり得る可能性がある。

### 6.1.4 コンクリート基礎杭の品質管理手法の提案

従来から用いられている手法に加えて、一連の研究成果を基に各過程ごとに新たな手法を追加で適用し、全ての杭に対して製造から施工の品質ならびに支持力評価品質を明確し、杭の品質保証を行う。

このために、一つの指標を用いて、各過程で全数の杭についてこれを適用して同レベルでのデータを保有し、このデータを杭の製造から施工までの経歴として保存する。

各過程ごとの追加する手法は以下の通りである。

#### 1) 製品管理 (第1過程)

従来の管理手法に追加し、全数の杭に非破壊試験を適用し、杭製品としての基本弾性波伝播速度を測定し、これにより杭体のコンクリート強度の推定および健全性評価を実施する。伝播速度を杭の固有の経歴として保存する。

#### 2) 施工品質管理 (第2過程)

従来の手法に追加して、全数の杭に非破壊試験を適用し、第1過程で保存した伝播速度を利用し施工された杭の健全性、施工形状および根固め部位置ならびに根固め強度の推定を実施する。第1過程により保存したものと同様に第2過程にて得られた伝播

速度も保存する。

### 3) 支持力評価 (第3過程)

1) および2) を実施した中から、複数の杭に対してスタナミック試験を適用して、杭の支持力を確認あるいは評価する。

以上のように、2つの過程を伝播速度という経歴により、品質管理をシステム化し、さらにこの経歴を持つ杭の中から複数の杭にスタナミック試験を実施することで、製造から支持力までを考慮した品質保証が可能となると考えられる。従来の管理手法を含めた総合的なコンクリート基礎杭の品質管理手法の例を表-6.1に示した。

## 6.2 今後の課題

本研究では、コンクリート基礎杭の総合的な品質管理手法を確立することを目的とした基礎的研究として、非破壊試験法を用いた施工後の杭の直接管理手法および杭の支持力評価手法を提案するとともに、それらの妥当性および適用性を実験と解析によって検討した。その結果、研究室レベルにおいては、本研究で提案した杭の品質管理手法が適用可能であることなど、有益な結論を得たが、本管理手法を実用化するためには、今後以下に示すような点を解決しなければならない。

- 1) 衝撃弾性波法によるコンクリート基礎杭の形状推定精度を向上させるために、計測方法や波形処理方法を改善するとともに、杭の形状推定結果を3次元的に表現できるような解析手法を開発する必要がある。
- 2) 衝撃弾性波法を実用化するためには、実際の現場におけるコンクリート基礎杭の露出状況に応じてセンサーの設置方法および衝撃弾性波の入力方法を適宜選択できるように、試験手順を標準化する必要がある。
- 3) スタナミック試験は、コンクリート基礎杭の静的な支持力およびそのバラツキを評価する試験法として非常に有効ではあるが、本研究の実験で用いたような非常に長い杭に対するスタナミック試験の適用例は少ないため、今後この種の杭への適用例を増し、推定精度の向上を図る必要がある。

## 第6章 付表、付図

表一6.1 総合的なコンクリート基礎杭の品質管理手法

製造管理		施工品質管理（施工後も含め）			支 持 力 評 価	
品質内容	従来手法	追加手法	品質内容	従来手法	追加手法	従来手法
形状寸法	杭径 杭長 壁厚 規格値 代表	杭に対する 音速非破壊 全数推定	形状寸法 杭径 杭長 壁厚 杭芯位置 掘削長 傾斜	搬入時全数 " " 逃げ芯全数 掘削ロット長 杭打機傾斜 リータ傾斜 電流値全数 掘削時間 材料使用量 規格値代表 想像	非破壊試験 (IT試験)  当試験により 杭の施工後の 以下の管理が 可能となる。 全 数 の 健全性 施工形状推定 根固位置推定 根固強度推定	急速載荷試験  載荷杭1本 半日程度 静的の半分程度
圧縮強度 コンクリ ート 曲げ強度	規格値 代表		掘削抵抗 速度 使用量 圧縮強度 注入位置 使用量 圧縮強度	根固め液 使用量 規格値代表 想像 杭周固定 使用量 規格値代表	殆ど実施出来ず 最大で1本程度 バラツキ評価は 出来ない。	↓  ↓  載荷試験後支持 力設定も可能 2～3本が可能 バラツキ評価も 推定可能
			間接的管理を総合して予定通り所定 位置に杭が存在すると想像している		間接から直接 想像から推定	

## 引用文献

## 引用文献

- 1) 小野日出男・阿部秋男・林隆浩：“非破壊試験を用いた既製コンクリート杭の総合的品質管理の提案” 日本建築学会大会学術講演梗概集（関連）pp. 241-242、1993
- 2) 横山幸満・日下部治・加倉井正昭・上野勝利・倉知禎直：“根固め杭の先端支持力に及ぼす形状の影響” 土質工学会第27回土質工学研究発表会、pp. 1559-1560、1993
- 3) 社団法人コンクリートパイプ建設技術協会：埋め込み杭施工便覧、1994.7
- 4) 基礎構造物の限界状態設計に関する研究委員会：基礎構造物における限界状態、土と基礎、Vol. 42、No. 9、pp. 9-14、1994
- 5) 続誠：“爆発推進力を利用した載荷試験-STANAMIC” 基礎工、Vol. 20、NO. 1、pp. 111-113、1992
- 6) 山肩邦男：“杭の鉛直載荷試験における支持力判定法と処女荷重階荷重保持時間に関する考察” 杭の鉛直載荷試験方法および支持力判定法に関するシンポジウム、pp. 31-34、1991
- 7) 社団法人日本コンクリート工学協会：“コンクリートの非破壊試験法に関するシンポジウム” 1991.4
- 8) Proceedings of International Seminar on the Application of Stress - Wave Theory on Piles, Stockholm, 1980
- 9) 谷川恭雄・山田和夫：“コンクリートの非破壊試験法に関する研究動向、コンクリート工学、Vol. 18、NO. 1、pp. 38-50、1980.1
- 10) 日本建築学会：コンクリート強度指定のための非破壊試験方法マニュアル、1983
- 11) 小阪義夫他2名：超音波速度法によるコンクリート強度指定（その1・音速のバラツキとモルタル強度の推定式）、建築学会、大78構p169
- 12) 山田和夫他2名：超音波速度法によるコンクリート強度の推定（その2・コンクリート強度の推定式と音速の表示式）、建築学会、大78構p171
- 13) 小阪義夫・谷川恭雄・山田和夫・熊谷 茂：複合非破壊試験によるコンクリートの強度推定値に及ぼす材齢の影響、第2回コンクリート工学年次講演会演習文集、pp. 141-144、1980
- 14) 伊藤憲雄・有川 晋：超音波パルスによるコンクリートの非破壊試験（モルタル比重の違いによる影響）、日本建築学会大会学術講演梗概集〈構造系〉（近畿）、pp. 149

-150、1980

- 15) 谷川恭雄・山田和夫・熊谷 茂・小阪義夫：コンクリートの複合非破壊試験法について、日本建築学会大会学術講演梗概集<構造系>（近畿）、pp. 149-150、1980
- 16) 高木隼二・中西正俊：トルクを利用して“打設したコンクリートの強度”を非破壊的に測定する方法の検討（モルタルによる予備検討）、日本建築学会大会学術講演梗概集<構造系>（近畿）、pp. 151-152、1980
- 17) 柳 俊幸・鎌田英治・田畑雅幸・吉野利幸：水銀圧入法の応用による構造体コンクリートの強度推定の試み（その5・空隙率と圧縮強度の相関性に影響する要因の検討）、日本建築学会大会学術講演梗概集<構造系>（近畿）、pp. 153-154、1980
- 18) 吉野利幸・鎌田英治・田畑雅幸・柳 俊幸：水銀圧入法の応用による構造体コンクリートの強度推定の試み（その6・実験データのあばれと試験体の上下による差の検討）、日本建築学会大会学術講演梗概集<構造系>（近畿）、pp. 155-156、1980
- 19) 佐治泰治：鉄筋コンクリート建物の耐久性と耐力診断、セメント・コンクリート、No. 405、pp. 2-9、1980. 11
- 20) 森田司朗・小松勇二郎：引き抜き試験法によるコンクリート強度の推定、セメント技術年報、第35巻、pp. 102-105、1981
- 21) 小阪義夫・谷川恭雄・金 英俊：ホールインアンカーを用いる引き抜き法によるコンクリート強度の推定、セメント技術年報、第35巻、pp. 106-109、1981
- 22) 森田司朗・小松勇二郎・田村和久・堀内成樹：引き抜き試験法によるコンクリート強度の推定、セメント技術年報、第36巻、pp. 191-194、1982
- 23) 谷川恭雄・小阪義夫・山田和夫・熊谷 茂：複合非破壊試験によるコンクリートの打込み高さ方向の強度分布の推定、第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp. 137-140、1981
- 24) 谷川恭雄・小阪義夫・山田和夫・熊谷 茂：複合非破壊試験によるコンクリート強度とコア強度との比較、日本建築学会大会学術講演梗概集<構造系>（九州）、pp. 219-220、1981
- 25) 谷川恭雄・小阪義夫・山田和夫・熊谷 茂：複合非破壊試験によるコンクリートの強度推定式、日本建築学会大会学術講演梗概集<構造系>（九州）、pp. 221-222、1981
- 26) 小阪義夫・谷川恭雄・金 英俊：ホールインアンカーの引き抜きによるコンクリート強度の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集<構造系>（九州）、pp. 223-224、1981
- 27) 吉野利幸・鎌田英治・田畑雅幸・柳 俊幸：水銀圧入法の応用による構造体コンクリートの強度推定の試み（その7・既往の強度推定式との対応性の比較）、日本建築学

会大会学術講演梗概集<構造系>(九州)、pp. 227-228、1981

- 28) 小阪義夫：コンクリート強度推定のための非破壊試験、セメント・コンクリート、No. 418、pp. 2-8、1981. 12
- 29) 俣野善治：経年コンクリートのシュミットハンマーによる推定強度とコア強度との関係、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp. 93-96、1983
- 30) 福川義明・小林信一・高橋秀明・橋田俊之：ブレイクオフ法によるモルタルの破壊靱性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集A(近畿)、pp. 89-90、1987
- 31) 白山和久・平賀友晃・篠崎 徹・篠沢清見・広川義和：凸部供試体による構造体コンクリートの強度推定に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集A(近畿)、pp. 445-446、1987
- 32) 小松勇二郎・近藤 寛・森田司朗：引き抜き試験の構造体コンクリート品質管理への応用、日本建築学会大会学術講演梗概集A(近畿)、pp. 609-610、1987
- 33) 川上嘉人・松籐泰典・池之迫健一・朝日真司：超音波横波速度法によるモルタル強度推定に関する研究(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集A(関東)、pp. 629-630、1988
- 34) 長田光正・三浦 尚・斉藤 裕：針貫入によるコンクリートの劣化度推定のための基礎的研究、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp. 268-269、1991
- 35) K. Fugita, et al.: "On the Evaluation of Static Bearing Capacity:" Application of Stress - Wave Theory on Piles, Third International Conference, Ottawa, Canada, pp. 525-534, 1988 May.
- 36) G.G. Goble et al.: "The analysis of pile driving - A state of the art," Proc. of the International Seminar on the Application of Stress - Wave Theory on Piles. Stockholm, pp. 131-161, 1980.
- 37) F.L. Beringen et al.: "Dynamic pile testing - An aid in analyzing driving behaviour," Proc. of the International Seminar on the Application of Stress - Wave Theory on Pile, Stockholm, pp. 77-97, 1980.
- 38) F. Rausche, et al: "Recent Weap Developments," Application of Stress - Wave Theory to Piles, Third International Conference, Ottawa, Canada, pp. 164-173 1988 May.
- 39) Pile Driving 国内委員会波動理論小委員会：“杭に関する波動理論の応用—その現状と問題点、波動理論小委員会中間報告、”土と基礎、土質工学会誌、Vol. 36, No. 3 pp. 112-120, 1988. 3
- 40) F.J. Reading, et al: "A Digital Approach to Sonic Pile Testing," Application

- of Stress - Wave Theory on Pile, Second International Conference, Swedish Pile Commission, Stockholm, pp. 85-93, 1985.
- 41) L. Schaap and J. de Vos: "The Sonic Pile Test Recorder and Its Application" Application of Stress-Wave Theory on Pile, Second International Conference, Swedish Pile Commission, Stockholm, pp. 79-84, 1985.
  - 42) J. Seitz: "Low Strain Integrity Testing of Bored Pile," Application of Stress - Wave Theory on Pile, Second International Conference, Swedish Pile Commission, Stockholm, pp. 94-104, 1985.
  - 43) Y. Q. Zhang, et al: "Analysis and Processing of Reflected Waves From Piles" Application of Stress- Wave Theory on Pile, Second International Conference, Swedish Pile Commission, Stockholm, pp. 103-109, 1985.
  - 44) Broms, B. B and Bredenberg, H.: "Applications of stress-wave theory on pile driving A state of the art report," Proc. 2nd Geotech. Seminar, "Pile Foundations" , Singapore, pp. BB-HB-1-BB-HB-44, 1984
  - 45) 芳賀孝成(1986): 「1.2 杭基礎の変遷」、杭基礎の設計法とその解説、土木工学会、pp. 8-40
  - 46) 高岡 勉・境 友昭・田村隆雅: 杭の支持力の動的測定技術の開発(1) - 杭の動的支持力の測定 -、第23回土質工学研究発表会、pp. 1467-1470、1988. 6
  - 47) 境 友昭・篠原敏雄: 杭の支持力の動的測定技術の開発(2) - 杭の動的支持力公式の理論的解析 -、第23回土質工学研究発表会、pp. 1471-1474、1988. 6
  - 48) Isaacs, D. V.: "Reinforced concrete pile formulas," Trans. the Institution of Engineers, Australia XII, pp. 305-323, 1931.
  - 49) Fox, E. N.: "Stress phenomena occurring in pile driving," Engineering, Set. 2, pp. 263-265, 1932.
  - 50) Smith, E. A. L.: "Impact and longitudinal wave transmission," Trans. ASME, pp. 963-955, 1955.
  - 51) Goble, G. G., Rausche, F. and Likins, G. E., Jr. (1986): "The analysis of pile driving - A state of the art," Proc. Int. Seminar on Application of stress - Wave Theory on Piles, Stockholm, pp. 131-161.
  - 52) de Juhasz, K. J.: "Graphical analysis of elastic bars," J. Applied Mech. 9, pp. A122 -A128. 1942
  - 53) Fischer, H. C.: "Theory and application of longitudinal impact Part I: Elastic longitudinal impact with some reference to rock drilling," Tryckluft,

- Atlas Copco, Stockholm, 16, pp.4-20. 1960
- 54) Fischer, H. C. : "Theory and application of longitudinal impact Part II : Pile driving and other cases of frictional resistance," Tryckluft, Atlas Copco, Stockholm, 17, pp.4-24. 1962
- 55) Nishida, Y., Sekiguchi, H. and Matsumoto, T. : "stress wave monitoring for a friction pile during driving : A new analysis procedure," Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 26, No. 4, December, pp. 89-104. 1986
- 56) Randolph, M. F. : "Modelling of the soil plug response during pile driving" Proc. 20th S. E. Asian Conf. on soil Mechanics, Bangkok, pp. 1-17. 1987
- 57) 武井正孝・松本樹典・西田義親・太田秀樹・石本一鶴 : 杭打ちにおける特性曲線解析法とSmith法の比較、第23回土質工学研究発表会、pp. 1475-1478. 1988
- 58) 松本樹典・西田義親・武井正孝 : 動的計測による杭の動的貫入挙動の評価法と応力波解析プログラムKWAVE、打ち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論文集、土質工学会、1989
- 59) 本間雅人・村上 浩・境 友昭・金井文男 : 杭の非破壊検査技術の開発(その7) - 特性曲線法を用いた杭の形状推定理論 -、第26回土質工学研究発表会、pp. 11-12 1991. 6
- 60) 村上 浩・本間雅人・小林洋一・谷川雅一 : 杭の非破壊検査技術の開発(その8) - 特性曲線法を用いた形状推定方法の適用性の検討 -、第26回 土質工学研究発表会、pp. 1325-1326、1991. 6
- 61) 稲川浩一・谷川雅一・本間雅人・宮坂亨明・田中幸芳・大本 修 : 杭の非破壊検査技術の開発(その9) - 実杭による伝播速度と減衰率の測定値 -、第26回土質工学研究発表会、pp. 1327-1 328、1991. 6
- 62) 宇都一馬・冬木衛・小山滋 : 波動理論に基づいた杭の動的支持力算定式の提案、第14回土質工学会研究発表会、pp. 901-904. 1979
- 63) 宇都一馬・冬木衛 : 波動理論に基づいた杭の打止め管理式、第15回土質工学会研究発表会、pp. 949-952. 1980
- 64) 宇都一馬・冬木衛 : 打込み杭のリバウンド測定値の補正方式、第16回土質工学会研究発表会、pp. 909-912. 1981
- 65) 宇都一馬・冬木衛・桜井学 : 杭の打止め管理式の再検討、第17回土質工学会研究発表会、pp. 2041-2043. 1982
- 66) 宇都一馬・冬木衛・桜井学 : 杭打ち公式に関する波動的考察、第18回土質工学会研究発表会、pp. 1013-1016. 1983

- 67) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 下部構造編.1980
- 68) Lundberg, B. and Henchoz, A. : “Analysis of elastic waves from two - point strain measurements, ” J. Experimental Mech., Vol.17, pp.213-218. 1977
- 69) Matsumoto T., Nishida Y., Ohta H., Kawakami K. : “Analysis of stress - wave in a pile based on two point stress measurements,” Proc. 3rd Int. Conf. Application of Stress - Wave Theory on Piles, Preprint Volume, pp.318-336. 1988
- 70) van Koten, H. and Middendorp, P. : “Equipment for integrity testing and bearing capacity of piles, ” Proc. Int. Seminar on Application of Stress Wave Theory on Piles, Stockholm, pp. 69-76. 1980
- 71) Clough, W. and Penzien, J. (大崎・渡辺・片山訳) : 構造物の動的解析、科学技術出版社、pp.623、1978
- 72) 松本樹典 : “波動理論の杭への応用における理論的背景”、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、1989
- 73) 下坪賢一・塚田幸広・境 友昭 : 杭の非破壊検査技術の開発(1) - 応力・加速度波形に及ぼす土の影響 -、第23回土質工学研究発表会、pp.1453-1456、1988.6
- 74) 山上尚幸・松本樹典 : 杭の応力波解析における逸散減衰の重要性、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、pp.782-783、1991.9
- 75) 小山信夫・本間雅人・塚田幸広 : 杭の非破壊検査技術の開発(2) - 杭の欠損位置の計測技術 -、第23回土質工学研究発表会、pp.1457-1458、1988.6
- 76) 川端規之・本間雅人・下坪賢一 : 杭の非破壊検査技術の開発(3) - 杭の形状計測技術 -、第23回土質工学研究発表会、pp.1459-1460、1988.6
- 77) 谷川雅一・杉村亮二・田村隆雅 : 杭の非破壊検査技術の開発(4) - ローム地盤における杭の周面抵抗 -、第23回土質工学研究発表会、pp.1461-1462、1988.6
- 78) 重松秀和・堀口隆司・村上 浩・続 誠 : 杭の非破壊診断、第23回土質工学研究発表会、pp.1463-1464、1988.6
- 79) 小林洋一・下坪賢一・高岡 勉・谷川雅一・宮坂亨明・城戸健一 : 杭の非破壊検査技術の開発(その5) - 杭の形状計測技術 -、第24回土質工学研究発表会、pp.1397-1398、1989.6
- 80) 稲川浩一・谷川雅一・下坪賢一・大本 修・田中幸芳 : 杭の非破壊検査技術の開発(その6) - 場所打ち杭の形状計測技術 -、第25回土質工学研究発表会、pp.1303-1304、1990.6
- 81) 境 友昭 : 杭の健全性試験における地盤の抵抗と杭形状の同時推定、第28回土質工学研究発表会、pp.1863-1864、1993.6

- 82) 阿部秋男・小野日出男・福本俊一・林 隆浩：非破壊試験を用いた埋込み杭に対する品質管理の一手法、第27回土質工学研究発表会、pp.1667-1668、1992. 6
- 83) 阿部秋男・加倉井正昭・A. F. van Weele：場所打ちコンクリート杭に対する非破壊試験の適用性、第28回土質工学研究発表会、pp.1861-1862、1993. 6
- 84) McClelland, R. : “Desing of deep penetration piles for ocean structures, ” J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.100, No. GT7, pp. 8-40. 1974
- 85) 土質工学会：クイの鉛直載荷試験基準、同解析、1973. 3
- 86) 土質工学会：杭の鉛直載荷試験基準、同解析、1993. 6
- 87) J. O. オスターバーグ（吉見吉昭訳）：杭載荷試験用の新しい加力装置 -埋込み杭および打込み杭の適用可能-基礎工、Vol. 19、No. 8、pp. 114-119、1991
- 88) 吉福 司・山田耕三・掛川誠一・岸田英明：先端載荷試験法による場所打ち杭の試験法、第29回土質工学研究会発表会、pp. 1401-1402、1994
- 89) Kishida, H. and Tsubakihara, Y. :An analytical method for predicting the displacement of a pile and soil layers, 11th SE Asian Geotechnical Conf, 1993
- 90) Bermingham, P. and Ianes, M. :An innovative approach to load testing of high capacity piles, Proc of Int. conf, piling and Deep Foundation, London, pp. 409-413, 1989
- 91) 日下部治・松本樹典：急速載荷試験（スタナミック試験）方法とその実施例、土と基礎、Vol. 43、No. 5、pp. 19-21、1995. 5
- 92) 松本樹典・道 勇治・平野忠夫・続誠：珪藻泥岩に打設された鋼管杭の急速載荷試験 -STANAMIC急速載荷試験の適用-第28回土質工学研究発表会、pp. 1675-1678、1993
- 93) 西村真二・崎本純治・椿原康則・森 康治：砂地盤における鋼管杭のスタナミック試験、第29回土質工学研究発表会、pp1415-1416、1994
- 94) 松本樹典・Middendorp, P. Bermingham, P, 続誠：珪藻泥岩に打設された鋼管杭の急速載荷試験、土木学会論文集、No. 5171 III-31、pp. 105-116、1995. 6
- 95) 長曾我部誠・山下 清・加倉井正昭・福原拓平・山田 毅：“場所打ちコンクリート杭のSTANAMIC載荷試験例”日本建築学会大会学術講演梗概集、B分冊、pp. 1761-1762、1993
- 96) Middendorp, P., Bermingham, P., and Kuiper, B. : Statnamic load testing of foundation pile, Proc. 4th Int. Conf. on Appl. Stress-Wave Theory to piles, pp. 585-588, 1993
- 97) 昭和46年1月29日建設省告示第111号（改正 昭和53年10月20日建設省告示第1623号）：“建築基準法施行令第93条の規定に基づき、地盤の許容応力度及び基礎ぐいの許容

支持力を求めるための地盤調査の方法並びにその結果に基づき地盤の許容応力度及び基礎ぐいの許容支持力を定める方法を定める件”

## 既発表論文リスト

# 既発表論文リスト

## 1. 論文

### (1) 日本建築学会構造系論文報告集

- 1) 林 隆浩・松本樹典・山田和夫：砂れき層に中掘工法で打設された長尺PHC杭のスタティック試験、第479号、pp. 51-56、1996. 1

### (2) セメント・コンクリート論文集

- 1) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：コンクリート基礎杭内部の弾性波動伝播特性に関する基礎的研究、No. 48、pp. 268-283、1994. 12
- 2) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：衝撃弾性波の伝播・反射特性に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する基礎的研究、No. 49、1995. 12（印刷中）

### (3) コンクリート工学年次論文報告集

- 1) 林、隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：衝撃弾性波法を適用した鉄筋の腐食推定に関する実験的研究、Vol. 15、No. 1、pp. 607-612、1993. 6
- 2) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：腐食した鉄筋内部の弾性波動伝播特性に関する基礎的研究、Vol. 15、No. 1、pp. 649-654、1993. 6
- 3) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：衝撃弾性波法を適用した異形鉄筋の形状推定に関する実験的研究、Vol. 16、No. 1、pp. 759-764、1994. 6
- 4) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：鉄筋中を伝播する弾性波の減衰特性に及ぼす周辺媒体の影響、Vol. 17、No. 1、pp. 713-718、1995. 6

### (4) Transactions of the Japan Concrete Institute

- 1) T. Hayashi, Y. Momoki, A. Abe and K. Yamada: Experimental Study on Estimation of Steel Corrosion by Impact Wave Method, Vol. 15, pp. 249-256, 1993. 12
- 2) T. Hayashi, Y. Momoki, A. Abe and K. Yamada: Fundamental Study on Characteristics of Elastic Wave propagating through Corroded Steel Bar, Vol. 15, pp. 257-264, 1993. 12

## (5) 国際シンポジウム

- 1) T.Hayashi and K.Yamada: Non-Destructive Testing Method of Concrete by Elastic Wave Method, Proceedings of International Symposium New Development in Concrete Science and Technology, Nanjing China, pp.886-891, 1995.9
- 2) T.Hayashi, T.Matsumoto, K.Yamada and Y.Asai: A Stanamic Test Case with High Accelerations, First International Stanamic Seminar, Vancouver, British Columbia, 1995.9 (in press)

## 2. 口頭発表

### (1) 日本建築学会大会学術講演梗概集

- 1) 林 隆浩・岡部一郎・増沢鯨男他：先端シュー打込み杭の開発研究（その1）、構造 I、pp.1013-1014、1987.10
- 2) 林 隆浩・岡部一郎・増沢鯨男他：先端シュー打込み杭の開発研究（その2）、構造 I、pp.1015-1016、1987.10
- 3) 林 隆浩・岡部一郎・増沢鯨男他：先端シュー打込み杭の開発研究（その3）、構造 I、pp.1017-1018、1987.10
- 4) 林 隆浩・岡部一郎・増沢鯨男他：先端シュー打込み杭の開発研究（その4）、構造 I、pp.1019-1020、1987.10
- 5) 林 隆浩・小野日出男・阿部秋男・福元俊一：非破壊試験を用いた既製コンクリート杭の総合品質管理の提案、材料施工、pp.241-242、1993.8
- 6) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：衝撃弾性波法による鉄筋の腐食推定に関する実験的研究、材料施工、pp.257-258、1993.8
- 7) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：衝撃弾性波法による鉄筋の腐食推定に関する解析的研究、材料施工、pp.259-260、1993.8
- 8) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：異形鉄筋の形状推定に対する衝撃弾性波法の適用性に関する基礎的研究、材料施工、pp.837-838、1994.9
- 9) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：衝撃弾性波法を適用したコンクリート基礎杭の形状推定に関する基礎的研究、材料施工、pp.839-840、1994.9
- 10) 林 隆浩・浅井陽一・桃木佳子・山田和夫：電食鉄筋の形状推定に対する衝撃弾性波法の適用性に関する実験的研究、材料施工、pp.1063-1064、1995.8

- 11) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：鉄筋中を伝播する弾性波の伝播・反射特性に及ぼす周辺媒体の影響、材料施工、pp.1051-1052、1995. 8
- 12) 林 隆浩・中野秀夫・浅井陽一：同一施工法の節付き摩擦杭の鉛直支持力性能、構造 I、pp.917-918、1995. 8

#### (2) 日本建築学会東海支部研究報告集

- 1) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：波動理論を適用した鉄筋の腐食推定に関する解析的研究、第31号、pp. 89-92、1993. 2
- 2) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：鉄筋の腐食推定に対する衝撃弾性波法の適用性定に関する実験的研究、第32号、pp. 61-64、1994. 2
- 3) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：鉄筋中を伝播する弾性波の減衰特性に関する基礎的研究、第33号、pp. 9-12、1995. 2

#### (3) 土質工学会研究発表会講演集

- 1) 林 隆浩・小野日出男・阿部秋男・福元俊一：非破壊試験を用いた埋込み杭に対する品質管理の一手法、第27回、pp. 1667-1668、1992
- 2) 林 隆浩・岡部一郎・西本憲正：同一地盤における工法の異なる節付き摩擦杭の鉛直支持力性能、第29回、pp. 1471-1472、1994
- 3) 林 隆浩・中野秀夫・浅井陽一：同一地盤における杭種の異なる杭の水平支持力性能、第30回、pp. 1471-1472、1995

#### (4) セメント技術大会講演集

- 1) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：コンクリート基礎杭内部の弾性波動伝播特性に関する基礎的研究、第48回、pp. 278-283、1994. 5
- 2) 林 隆浩・桃木佳子・阿部秋男・山田和夫：衝撃弾性波の伝播・反射特性に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する基礎的研究、第49回、pp. 640-645、1995. 5

謝 辭

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、終始励まし、高い視点からご指摘ならびにご指導をいただいた愛知工業大学工学部建築学科山田和夫助教授に深く感謝致します。

また、本論文の審査にあたり、愛知工業大学工学部土木学科大根義男教授、森野奎二教授、成田国朝教授ならびに同建築工学科大井孝和教授には貴重なご指導をいただき心から感謝の意を表します。

同様の研究に携わる立場から有益な御教示、適切なお助言をいただきました金沢大学土木建設工学科松本樹典助教授に心より感謝いたします。

最後に、社会人学生として修学の機会を与えていただき、終始激励をいただきましたヨ一コン株式会社社長新谷雅樹氏、社長新谷岳史氏ならびに社員各位に心から御礼を申し上げます。