

土 木 研 究 所 資 料

小口径摩擦杭の支持力特性に関する載荷実験

平成12年 3 月

建設省土木研究所
構造橋梁部 基礎研究室

Copyright © (2000) by P.W.R. I.

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

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

小口径摩擦杭の支持力特性に関する載荷実験

基礎研究室	室長	福井	次郎
	主任研究員	西谷	雅弘
	研究員	石田	雅博 ^{※1}
	研究員	加藤	秀章 ^{※2}
		梅原	剛
	交流研究員	三木	健男 ^{※3}
	交流研究員	古莊	伸一郎 ^{※4}

要 旨

アメリカでは近年、小口径摩擦杭（マイクロパイル）を既設橋梁基礎の耐震補強工法として用いる事例が増えつつある。小口径摩擦杭は、施工機械が小型であるため、上部空間や施工ヤードに制限がある場合でも施工可能であること、振動や騒音を最小限に抑えること等の特徴があり、日本においても基礎の耐震補強工法等に期待され、補強工事全体の経済性や施工性に優れた基礎補強が可能になると考えられている。

そこで、本実験では土木研究所内の実地盤を用いて小口径摩擦杭の試験施工を行い、鉛直及び水平交番載荷試験を実施し、小口径摩擦杭の支持力、変形特性に関する基礎的データを得た。本報告は、その実験結果について述べるものである。

キーワード：小口径摩擦杭、支持力特性、鉛直載荷、水平載荷、耐震補強、低空間、施工性

※1 平成11年3月まで在籍 現建設省土木研究所 企画部

※2 平成11年3月まで在籍 現建設省中部地方建設局 長島ダム工事事務所

※3 交流研究員在職期間（平成9年4月～平成11年3月）

※4 交流研究員在職期間（平成11年4月～平成12年3月）

目 次

1. はじめに	1
2. 実験概要	5
2.1 実験目的	5
2.2 実験場所	5
2.3 実験項目	6
3. 土質調査	7
3.1 土質調査内容	7
3.2 土質調査結果	8
4. 試験杭の施工	11
4.1 試験杭の概要	11
4.2 試験杭の諸元	11
4.3 試験杭の構造	12
4.4 施工手順	15
4.5 施工機械	18
4.6 施工管理	19
4.7 試験施工の施工性に関する考察	19
5. 材料試験	20
6. 鉛直交番載荷試験	21
6.1 鉛直交番載荷試験方法	21
6.2 鉛直交番載荷試験杭の計測位置	22
6.3 鉛直交番載荷試験載荷装置	23
6.4 鉛直交番載荷試験結果	24
6.4.1 荷重～変位関係	24
6.4.2 杭体のひずみ・軸力分布	26
6.4.3 周面摩擦力度～変位関係	29
6.4.4 鉛直交番載荷試験結果の整理	30
7. 水平交番載荷試験	33
7.1 水平交番載荷試験方法	33
7.2 水平交番載荷試験杭の計測位置	34
7.3 水平交番載荷試験載荷装置	35
7.4 水平交番載荷試験結果	37
7.4.1 荷重～変位関係	37
7.4.2 杭体のひずみ分布	38
7.4.3 杭体の曲げひずみ分布	39
7.4.4 静的非線形解析との比較	41
8. まとめ	45
参考資料	47

1. はじめに

一般に、マイクロパイルとは小口径（ $\phi 300\text{mm}$ 以下）の杭工法の一つであり、1952 年にイタリアで開発されヨーロッパに広まった後、アメリカや日本など世界各地で用いられるようになった。マイクロパイル工法はグラウンドアンカー工法等で用いられている小口径の削孔技術やグラウトの加圧注入技術を取り入れ、補強材として鋼管や異形鉄筋などを用いる工法である。施工方法の一例としては、小型のボーリングマシンにより、鋼管をケーシングとして削孔を行い、異形鉄筋挿入後、孔内にグラウトを加圧注入し地盤に定着させる。日本においては、1980 年にシールドに隣接する展望台の基礎補強として採用された後、アンダーピニング、トンネルの脚部補強、法面の崩壊防止などで用いられている。

マイクロパイルは削孔、注入をはじめとする施工方法、構成される部材等から種々のタイプが存在し、今もなお要求される性能や土質条件から多種の施工方法が開発されている。国際的な分類ではないが、マイクロパイルに用いられる補強材料の種類から分類すると、表-1.1、図-1.1 のように分けることができる。

表-1.1 補強材料に基づくマイクロパイルの分類

	タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅢ
補 強 材 料	異形鉄筋	鋼 管	鋼管・異形鉄筋
杭 径	150mm 以下	100mm～300mm	150mm～300mm

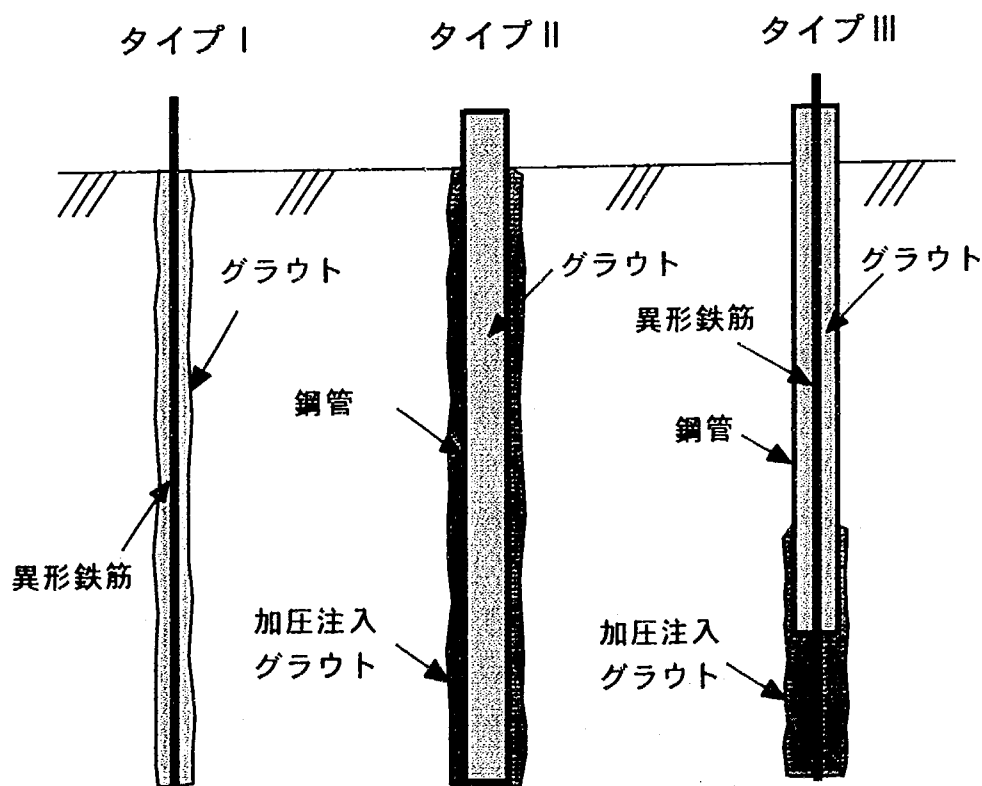


図-1.1 補強材料に基づくマイクロパイルの分類

また、マイクロパイルの施工技術のうち、注入方法による分類をすると、以下に示す Type A～Type D の 4 タイプに分けることができる。図-1.2 は、Type A～Type D の注入方法を模式的に示したものである。

①Type A（重力方式）

削孔後に孔底まで注入ホースあるいはトレミー管を挿入して、孔底から孔内水と置換するようにグラウトを注入する。注入したグラウトと同品質のグラウトが孔内からオーバーフローするまで注入を行う。この工程は、他の注入方式においても先行して行われるためその場合は、初期注入あるいは一次注入と呼ぶ。この方法の場合は、パッカーを用いた加圧注入は行わないので、外国の例では、支持地盤の加圧効果があまり期待できないと考えられる岩盤や硬質粘土の場合に採用されている。またこの方式の場合は、グラウトとしてセメント・モルタルが用いられることもある。

②Type B（低圧加圧方式）

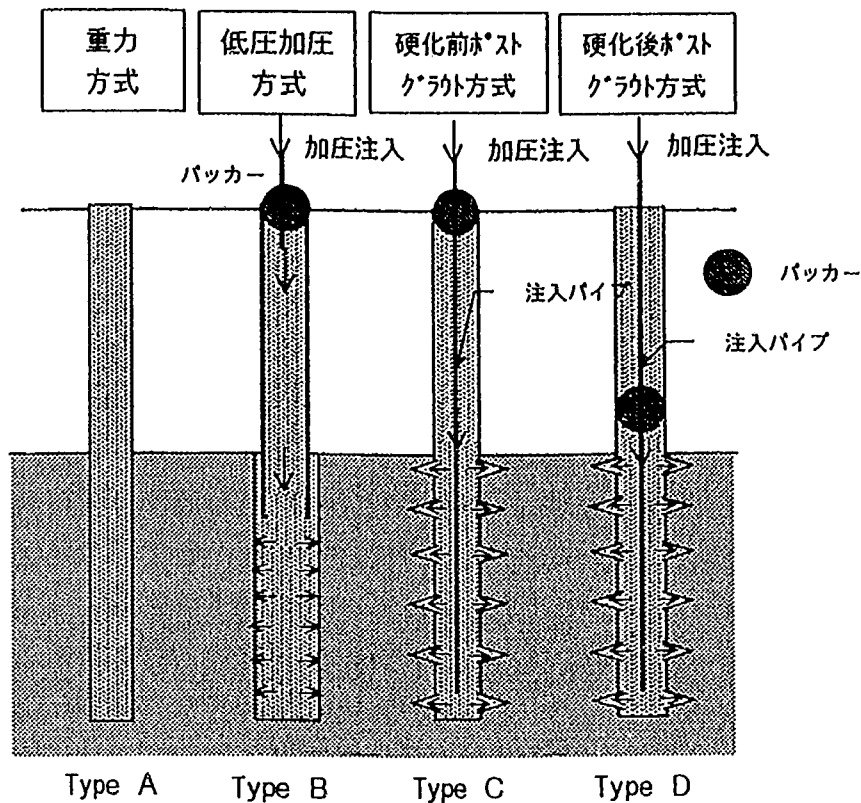
初期注入後、鋼管頭部に圧力キャップを取り付け、一定圧力下で鋼管内に注入を行う。加圧注入は、原則として HMP の定着長全長に対して鋼管を引き抜きながら実施する。ただし、適切な場合には杭全長に拡張することが出来る。加圧力は、支持地盤の地質深さ、鋼管周囲からのグラウトの漏れ等により調整が必要だが、0.5～1.0MPa の圧力が一般的である。加圧注入は、孔壁地盤の削孔による応力開放や緩みを復元すること、粒状土の場合は周囲の地盤にグラウトを浸透させて杭径を拡大すること等の目的で実施されるので、各加圧段階で数分間加圧力を保持する必要がある。また、圧力計測は、ポンプと杭頭との送管中の圧力損失を考慮して、杭頭に近い位置で測定を行うものとする。加圧力の効果は、周辺地盤へのグラウトの浸透だけではなくグラウトの強度に対してもある。特に粒状土に対する注入では、加圧による脱水効果によりグラウトの水セメント比が改善され非常に高強度になることが実験的に知られている。そのことを考えると、混和剤を使用しないとグラウトの流動性が悪化するほど、水セメント比を小さくする必要はないものと考えられる。

③Type C（硬化前ポストグラウト方式）

フランスで実施されているポストグラウト方式である。予めスリーブ付きパイプを埋め込んで初期注入を行い、注入したグラウトが硬化する前の一定時間経過後（通常 15～25 分後）に少なくとも 1.0 MPa 以上の圧力で加圧注入を行う。

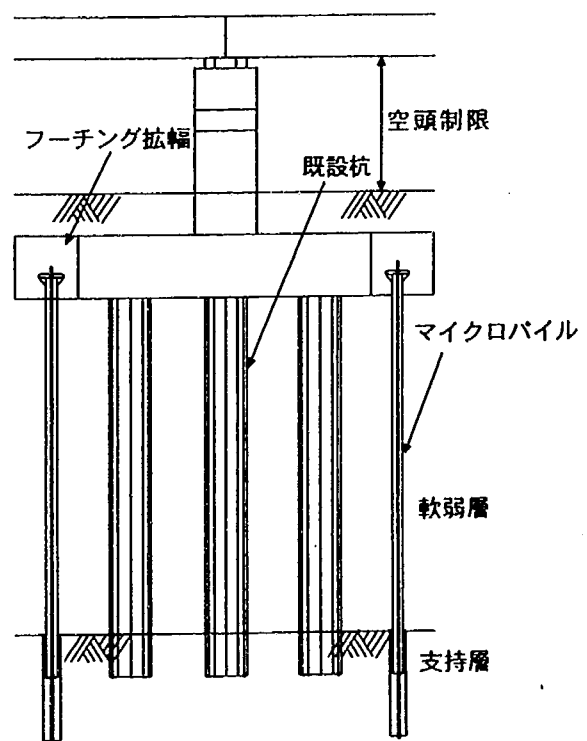
④Type D（硬化後ポストグラウト方式）

特にドイツで盛んであるが、世界中で一般的に行われているポストグラウト方式である。Type C と同様に、予めスリーブ付きパイプを埋め込んで初期注入を行い、注入したグラウトが硬化した後（通常数時間～24 時間後）に硬化したグラウトを割裂できるだけの高圧力（2～8 MPa）で 3～4 回に分けて加圧注入を行う。ポストグラウティングに使用するグラウトは、初期注入に用いるセメントミルクより流動性の良いものを用いており、水セメント比が 50～75% のセメントミルク（混和剤なし）を通常用いている。注入量は初期注入量の 50% 程度が一般的となっている。



図－1.2 グラウト注入タイプに基づくマイクロパイルの分類

マイクロパイルの特徴としては、施工機械が小型であるため、上部空間や施工ヤードに制限がある場合でも施工可能であること、振動や騒音を最小限に抑えることができること、杭角度を自由に設定できること等が挙げられる。アメリカでは環境問題・施工上の制約・経済的な面を考慮し、本工法を橋梁基礎の耐震補強工法として採用する事例が増えつつある¹⁾。その代表例は図－1.3 に示すように、既設基礎の周囲に小口径のマイクロパイルを打設し、フーチングを拡大して基礎の耐力を増加させるものである。また、マイクロパイルの構造としては図－1.1 に示したタイプⅢのように補強材として鋼管と異形鉄筋を用いたケースが多く、杭体から決まる耐力を増加させるため、高強度の鋼材を使用している。一方、日本における現状の基礎の耐



図－1.3 マイクロパイルによる耐震補強例

震補強工法は、概念的にはアメリカの施工事例と同じだが、比較的大口径の杭を用いた増し杭、増しフーチングの補強例が多い。その補強工事には大型機械を用いるため、桁下空間、施工空間などの制約によっては、施工的、経済的に困難な場合がある。よって、日本においてもマイクロパイル工法の採用により、空頭制限や用地問題、環境問題といった既設構造物基礎の補強工事につきまとう困難性も回避でき、施工性や補強工事全体の経済性に優れた基礎補強が可能になると考えられる。

マイクロパイルの設計に関しては、2つの設計手法が提案されている。ひとつは、マイクロパイルを小口径の摩擦杭として取り扱う設計手法である。アメリカにおいては、マイクロパイルを摩擦杭として設計を行っており、連邦道路局（FHWA）では設計施工マニュアルを作成中である。もうひとつは網目状に多数打設したマイクロパイルと地盤を複合構造体とする設計手法である。この設計概念はルートパイル、ネットワークとも呼ばれているが、複合構造体をどのように評価し、基礎の耐力と結びつけるかが課題である。日本において、前述したような耐震補強方法を念頭におき、マイクロパイルの現場への早期採用を考えると、杭としてマイクロパイルを評価するのが第一だと考えられる。しかし、日本においてはマイクロパイルの設計に関して統一的な取り扱いはなく、また、設計の考え方もアメリカと同一というわけではない。特に、アメリカにおける耐震設計では、既設基礎の周囲に打設したマイクロパイルの軸力抵抗のみによって、基礎に作用するモーメント荷重に抵抗させようとするものである。マイクロパイルには水平、曲げ抵抗もあり、これらを見視した設計は不経済な設計となる可能性があり、また、逆に水平、曲げに対する照査をしていないことは危険側の設計となる可能性がある。よって、マイクロパイルの鉛直・水平方向の支持力・変形特性を確認する必要がある。

本資料は、マイクロパイルの試験施工、鉛直交番載荷試験および水平交番載荷試験を行い、マイクロパイルの鉛直方向支持力特性・水平抵抗特性の基礎的データを得たものである。

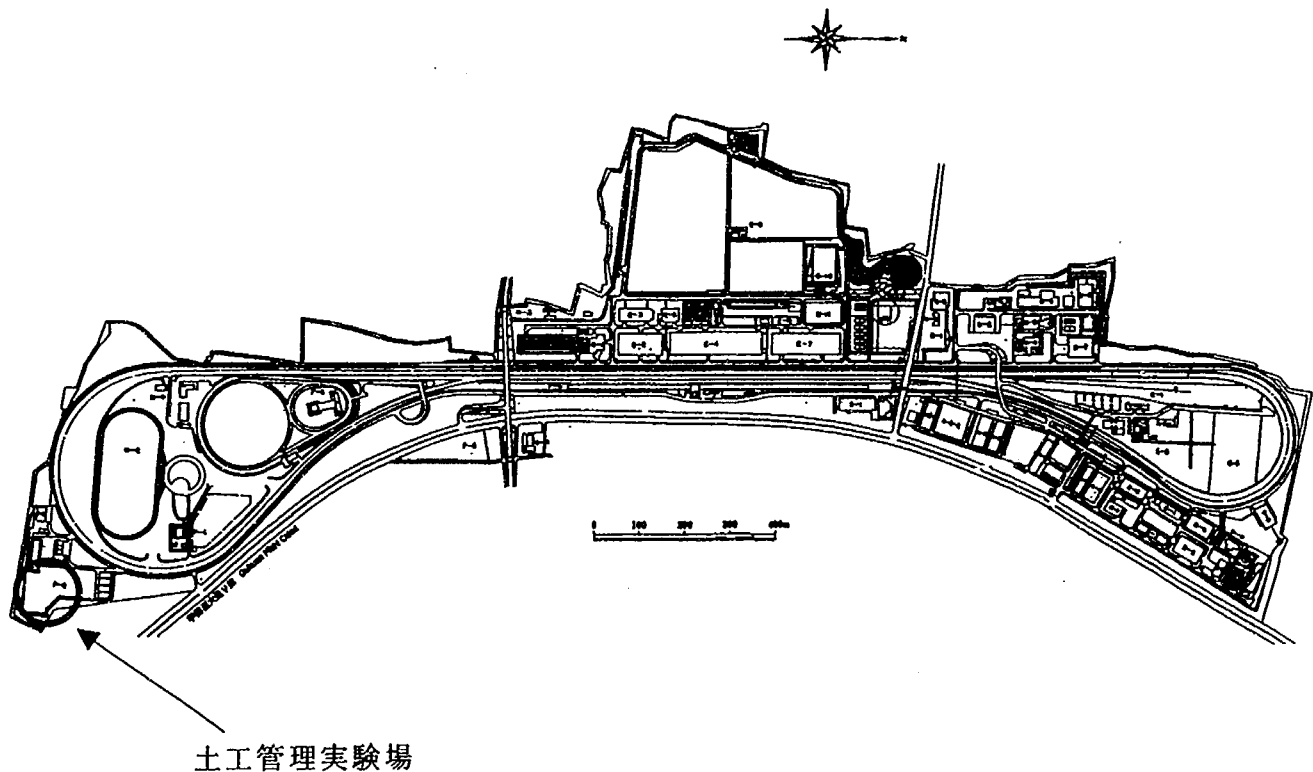
2. 実験概要

2.1 実験目的

本実験は、既設補強杭として用いられる小口径摩擦杭の鉛直方向及び水平方向の特性を知るために、実物大の小口径摩擦杭の引抜き試験及び水平載荷試験と、小口径摩擦杭の材料特性を知るための材料試験を行うものである。

2.2 実験場所

小口径摩擦杭の打設及び載荷試験の実施位置は、図－2.2.1に示す建設省土木研究所敷地内土工管理実験場とした。また、小口径摩擦杭の打設は、写真－2.2.1に示す実験場－土槽実験施設内の空地にて行い、設置されている載荷装置を反力装置として利用した。



図－2.2.1 土工管理実験場



写真-2.2.1 小口径摩擦杭の打設現場

2.3 実験項目

実験項目は、以下の4項目とした。

①土質試験

試験杭を設置する土工管理実験場の地盤情報を得るため、土質試験を行った。

②引抜き载荷試験

打設した1本の小口径摩擦杭に対して引抜き試験を実施し、引抜き力の計測、芯材補強鉄筋部のひずみ分布の計測と鋼管下端及びグラウト部下端の変位量の計測を行った。なお、試験は、地盤工学会の杭の引抜き载荷試験方法を適用した。

③水平载荷試験

打設した1本の小口径摩擦杭に対して水平载荷試験を実施し、水平方向荷重の計測、鋼管杭頭部のひずみ分布の計測と芯材補強鉄筋部のひずみ分布の計測を行った。なお、試験は、地盤工学会の杭の水平方向载荷試験方法を適用した。

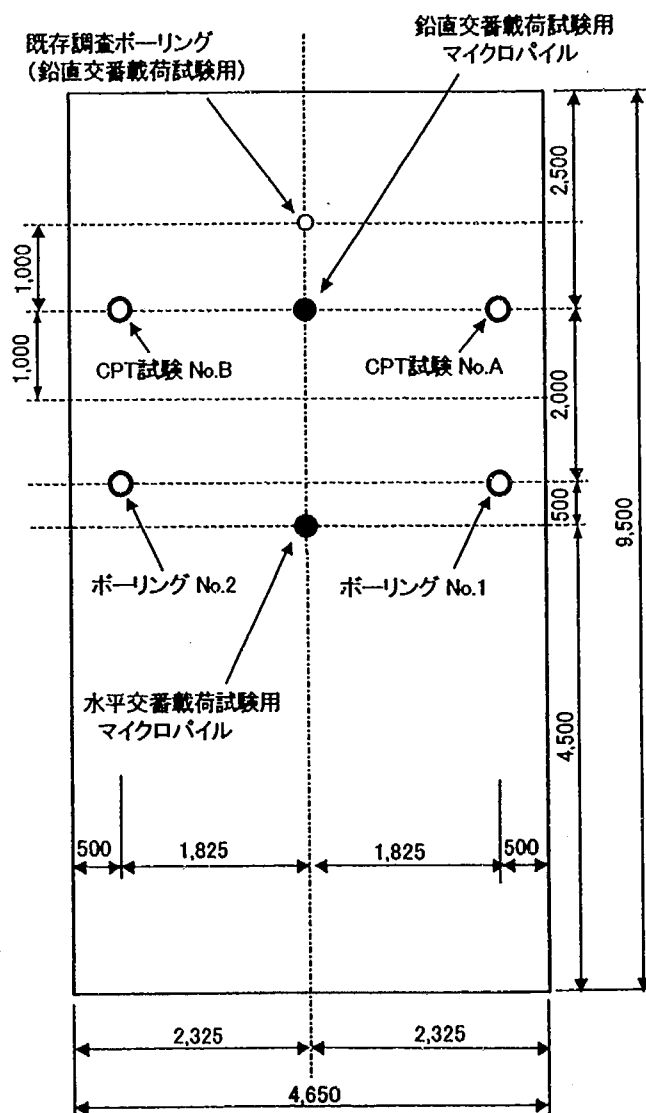
④材料試験

小口径摩擦杭の特性に関する材料試験を行った。

3. 土質調査

3.1 土質調査内容

実験位置の地盤特性を把握するため、以下に示す土質調査・試験を行った。なお、今回の土質調査は、既に鉛直載荷試験近傍の土質調査結果²⁾が得られていることから、水平載荷試験近傍を中心に土質調査を行った。



(単位；mm)

図-3.1.1 土質調査位置図

①ボーリング

図-3.1.1 に示す位置において、2本のボーリング調査(No.1, No.2)を鉛直深度 G.L.-16m まで行った。

②標準貫入試験

No.1 ボーリング箇所において、深度 1m 毎に標準貫入試験を行った。

③サンプリング

No.2 ボーリング箇所において、三軸圧縮試験および室内土質試験用のサンプリングを行った。各土質試験結果は水平載荷試験の結果解析に用いるため、地盤面から順に表層(埋土層)、ローム層、細砂層、凝灰質粘土層の4深度からサンプリングを行った。

④室内土質試験

サンプリングした4深度の地盤物性を確認するため、以下の土質試験を実施した。

- ・土の含水比試験 (JIS A 1203)
- ・土粒子の密度試験 (JIS A 1202)
- ・土の粒度試験 (JIS A 1204)
- ・土の液性限界・塑性限界試験 (JIS A 1205)
- ・土の湿潤密度試験 (A法・寸法測定法)

⑤三軸圧縮試験

上記と同じく、4深度の地盤特性を把握するため三軸圧縮試験を行った。表層(埋土層)、ローム層、凝灰質粘土層に関しては非圧密非排水(UU)条件で、細砂層に関しては圧密排水(CD)条件で試験を行った。

⑥孔内水平載荷試験

No.2 ボーリング箇所において、サンプリングとほぼ同じ4深度で孔内水平載荷試験(LLT)を実施した。

⑦静的コーン貫入試験(CPT試験)

今回の実験では図-3.1.1 に示す位置において、静的コーン貫入試験(CPT: Cone Penetration Testing)を行った。この3成分コーン貫入試験から、深度方向に連続的な周面摩擦力、先端抵抗、間隙水圧の結果を得た。

3.2 土質調査結果

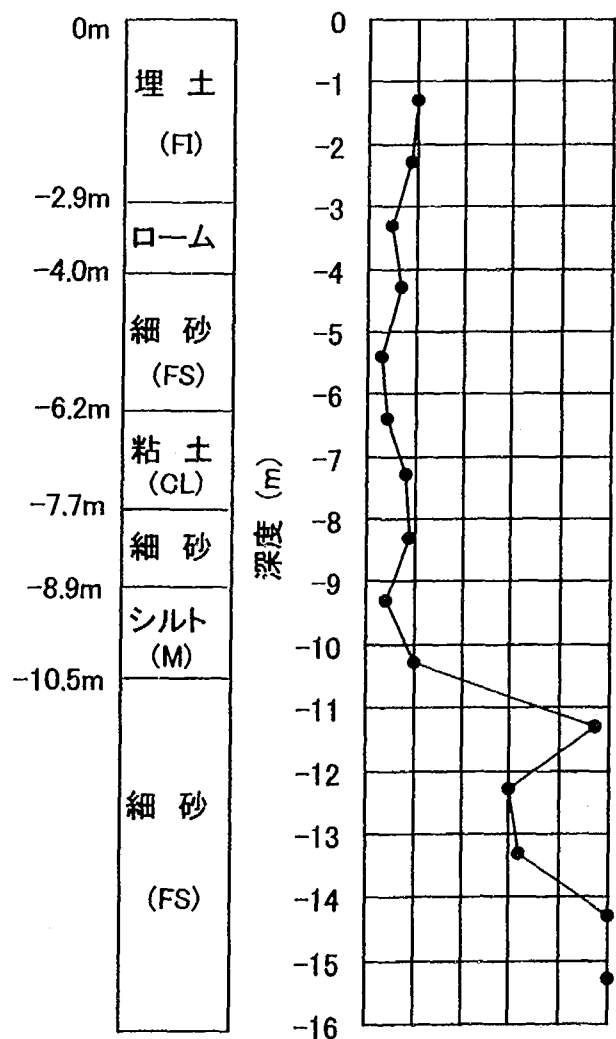
実験地盤の地層順序を表-3.2.1 に示す。表層付近には碎石・粘性土・砂質土を含んだ埋土が存在し、以深は第四紀洪積世の関東ローム層、竜ヶ崎層、比較的よく締まった成田層の順に形成されている。特に、埋土層に関しては数種の土質が混じり合っており、土質評価が難しい部分である。ボーリング調査結果として、既に調査結果が得られている鉛直載荷試験近傍の土質柱状図²⁾を図-3.2.1 に、今回行った水平載荷試験近傍の柱状図を図-3.2.2 に示す。表-3.2.2 には三軸圧縮試験等から得られた土質試験結果、表-3.2.3 には孔内水平載荷試験結果の一覧を示した。なお、巻末の参考資料には各試験の詳細結果を添付した。

表-3.2.1 地層順序表

時 代		地 層 名		土 質 名	N 値	層 厚
現 世		埋 土		埋 土	3～10	1.5m～2.8m
第 四 紀	洪 積 世	洪 積 層	関東ローム層	ロ ー ム	1～5	1.2m～2.3m
			竜ヶ崎層	細 砂	1～12	2.1m
				凝灰質粘土	1～8	1.5m～1.9m
				細 砂	1～9	1.1m～1.2m
				シルト	1～10	1.0m～1.5m
			成田層	細 砂	10～50	10.8m
		シルト混り細砂		12～37	2.3m	

N 値

0 10 20 30 40 50



N値

0 10 20 30 40 50

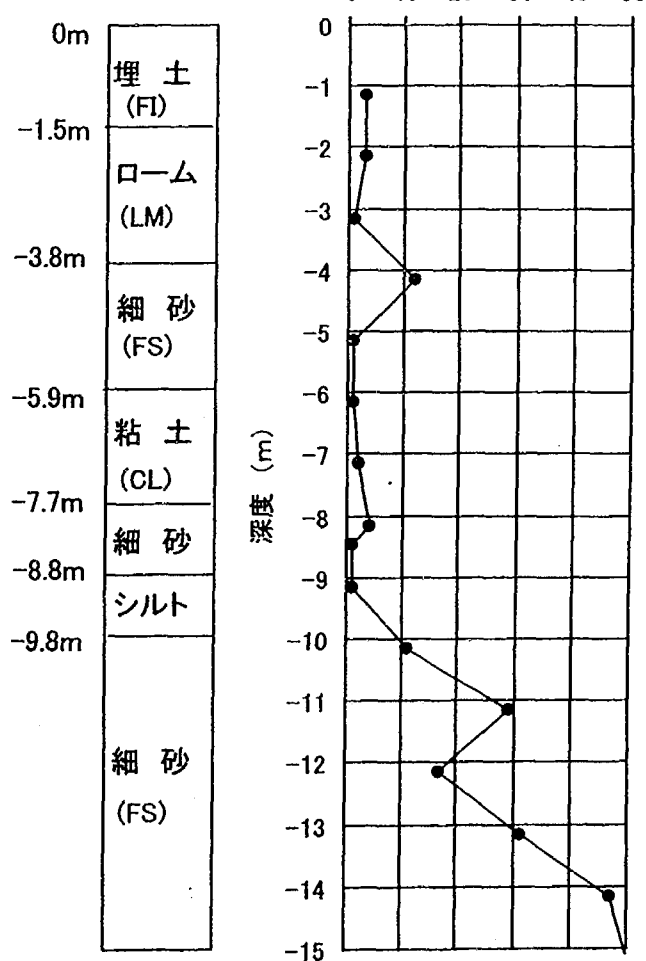


図-3.2.1 鉛直交番載荷試験近傍土質柱状図 図-3.2.2 水平交番載荷試験近傍土質柱状図

表-3.2.2 土質試験結果一覧表

		単位	埋 土	口 一 ム	細 砂	凝灰質粘土
一 般	湿潤密度 ρ_t	g/cm^3	1.353	1.204	1.684	1.663
	乾燥密度 ρ_d	g/cm^3	0.699	0.496	1.148	1.073
	土粒子の密度 ρ_s	g/cm^3	2.745	2.843	2.704	2.646
	自然含水比 ω_n	%	96.0	142.5	46.7	55.2
	間隙比 e		3.007	4.733	1.355	1.470
	飽和度 S_r	%	87.7	85.7	93.1	99.3
粒 度	礫分	%	0	0	0	0
	砂分	%	29	6	78	4
	シルト分	%	46	41	13	30
	粘土分	%	25	53	9	66
	均等係数 U_c		27.0		43.9	
	曲率係数 U_c'		0.941		9.850	
	最大粒径	mm	2.00	0.85	2.00	0.85
コンシステンシー	液性限界 ω_L		126.4	188.1	NP	90.6
	塑性限界 ω_p		78.4	98.7		30.4
	塑性指数 I_p		48.0	89.4		60.2
分 類	土質分類名		火山灰質粘性土	火山灰質粘性土	砂質土	粘土
三軸試験	試験条件		UU	UU	CD	UU
	全応力 C	kN/m^2	95	31		36
	ϕ	度	10.1	9.7		4.7
	有効応力 C	kN/m^2			13	
	ϕ	度			33.4	

表-3.2.3 孔内水平載荷試験結果一覧表

	静止土圧 P_0	降伏圧 P_y	破壊圧 P_I	地盤係数 K_m	弾性係数 E_m
	kN/m^2	kN/m^2	kN/m^2	kN/m^2	kN/m^2
埋 土 (G.L.-1.0m)	22	43	87	183	1014
口 一 ム (G.L.-3.0m)	56	32	67	114	680
細 砂 (G.L.-5.0m)	63	63	155	527	2997
凝灰質粘土 (G.L.-6.5m)	67	76	179	429	2357

4. 試験杭の施工

4.1 試験杭の概要

試験杭はアメリカでの施工実績を考慮し、1. で述べた鋼管、鉄筋、グラウトの複合構造を有するタイプⅢとした。また、グラウト注入方法は Type B とした。このマイクロパイルはグラウンドアンカーのように、杭上部の非定着部、杭下部の地盤とグラウトによる摩擦抵抗を発揮する定着部からなる。

(1) 非定着部

杭上部の比較的軟弱な地盤においてグラウトの加圧注入をしない区間であり、主に定着部への軸力伝達や曲げに対して複合部材で抵抗する部分である。

(2) 定着部

定着部は上部の鋼管挿入部と下部の非鋼管挿入部からなる。

①鋼管挿入部

加圧注入したグラウト部分に鋼管を再挿入する区間である。この部分は、非定着部と定着部境界での急激な断面変化を避け、円滑に軸力を伝達させることを目的としている。

②非鋼管挿入部

加圧注入したグラウトと異形鉄筋からなる部分で、杭体から地盤へ軸力を伝達させる部分である。杭体の耐力的には押込み力に対して異形鉄筋とグラウトが抵抗し、引抜き力に対して異形鉄筋が抵抗する。

4.2 試験杭の諸元

試験杭の各諸元に関してもアメリカでの施工事例を参考とし、表-4.2.1 に示すような材料を用いた。鋼管に関しては、油井管用継目無鋼管 $\phi 177.8\text{mm}$ を用い、低空間での施工性を確認するため 1.5m 毎の両端ネジ式カップリング継手を採用した。異形鉄筋に関しては、高強度鋼管と鉄筋とのひずみのバランスを考慮し、SD490 の材質を用いた。

表-4.2.1 試験杭の各諸元

材 料	規 格
鋼 管	油井管用継目無鋼管 (API-N80)、外径 $\phi 177.8\text{mm}$ 、肉厚 12.7mm 標準部材長さ $1,500\text{mm}$ 、両端ネジ式加工カップリング継手 降伏点強度 550N/mm^2 、弾性係数 $2.0 \times 10^5\text{N/mm}^2$
異形鉄筋	ねじ節異形鋼棒 SD490 D51、エポキシ樹脂充填式カップラー継手 弾性係数 $2.0 \times 10^5\text{N/mm}^2$
グラウト	セメントミルク (水セメント比 $W/C=45\%$) 早強ポルトランドセメント・混和剤レオビルド NL-4000 使用 設計基準強度 30N/mm^2 、弾性係数 $1.35 \times 10^4\text{N/mm}^2$ (実験値)
定着部諸元	定着部有効径 200mm (削孔径)、定着長 5.0m

4.3 試験杭の構造

(1) 鉛直交番载荷試験

鉛直交番载荷試験杭の構造一般図を図-4.3.1 に示す。定着層を 3.2 で示した土質柱状図より、N 値 30 以上の細砂層と設定し G.L.-10.5m 以深に定着部を設けた。また、载荷治具の関係から地盤を 0.85m 鋤取り、载荷試験時地盤とした。

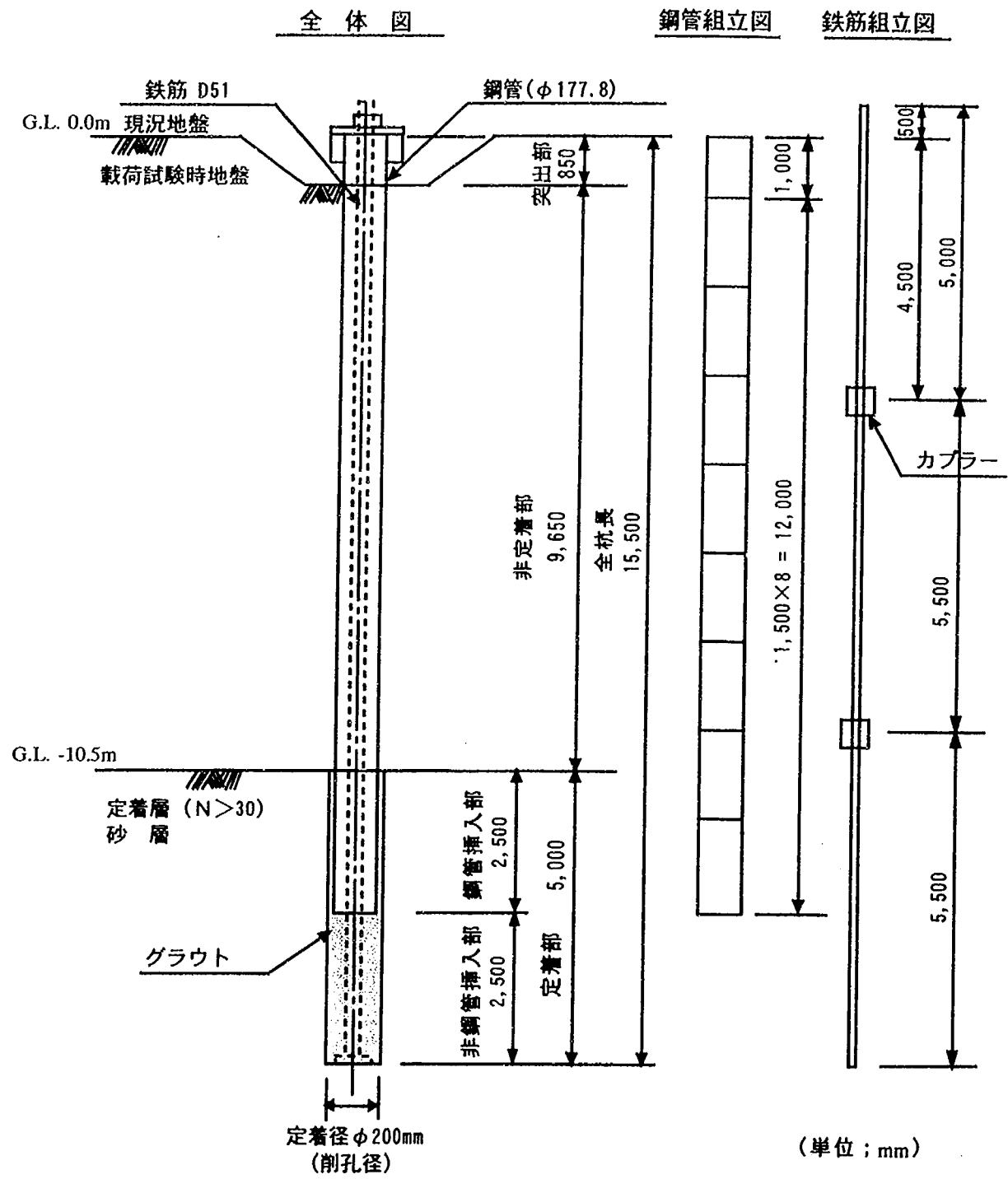


図-4.3.1 鉛直交番载荷試験用マイクロバイル構造一般図

(2) 水平交番載荷試験

水平交番載荷試験杭の構造一般図を図-4.3.2に示す。水平載荷試験杭は G.L.-10.0m の細砂層に定着部を設け、定着部への鋼管の挿入長は後述する計測用鋼管の挿入方法の関係上、4.4m とした。また、載荷治具の関係から、地盤を 0.4m 鋤取る必要があったため、載荷試験時の地盤から 1.0m 突出させた全長 15.6m のマイクロパイルを施工した。

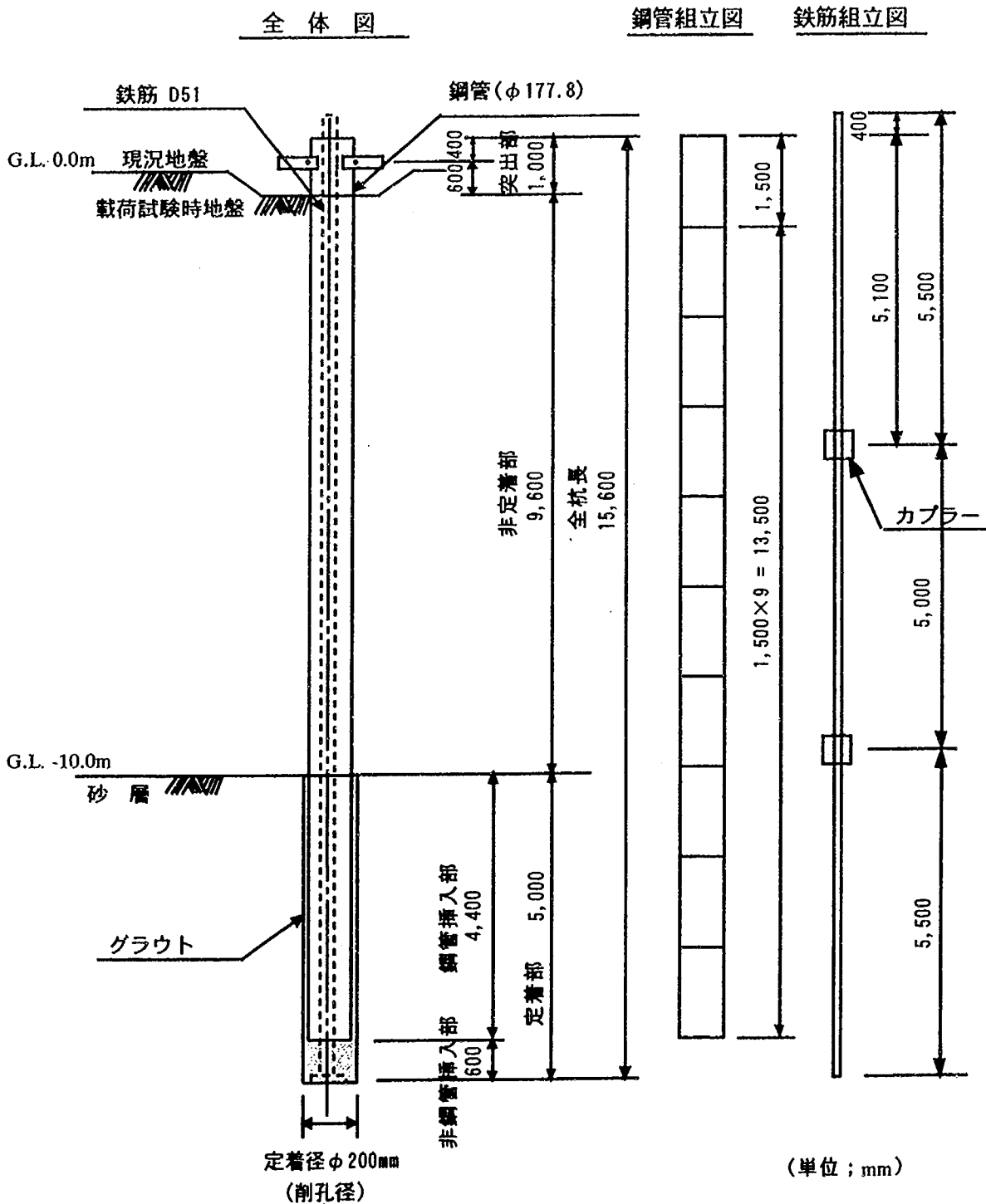


図-4.3.2 水平交番載荷試験用マイクロパイル構造一般図

(3) 杭頭部の詳細図

図-4.3.3には杭頭部の詳細図を示す。杭頭部はマイクロパイルの打設完了後、養生期間中に各プレートの現場溶接を行った。なお、この杭頭部は複合部材への均等な軸力伝達を目的としていることから、鉛直交番载荷試験杭のみに用いた。水平交番载荷試験杭については、杭頭処理を行わなかった。

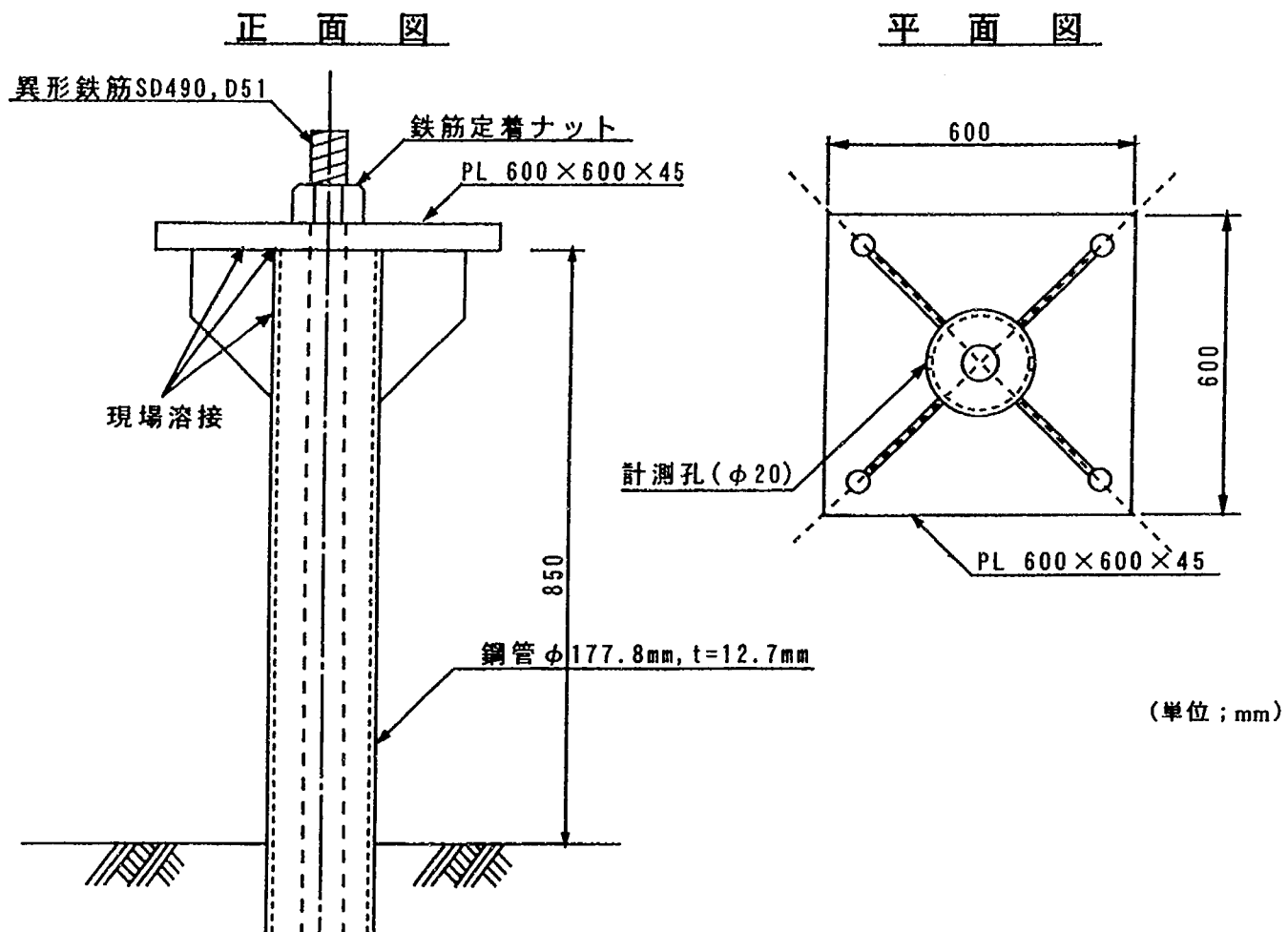


図-4.3.3 杭頭詳細図

4.4 施工手順

マイクロパイルの施工手順を図-4.4.1に示す。

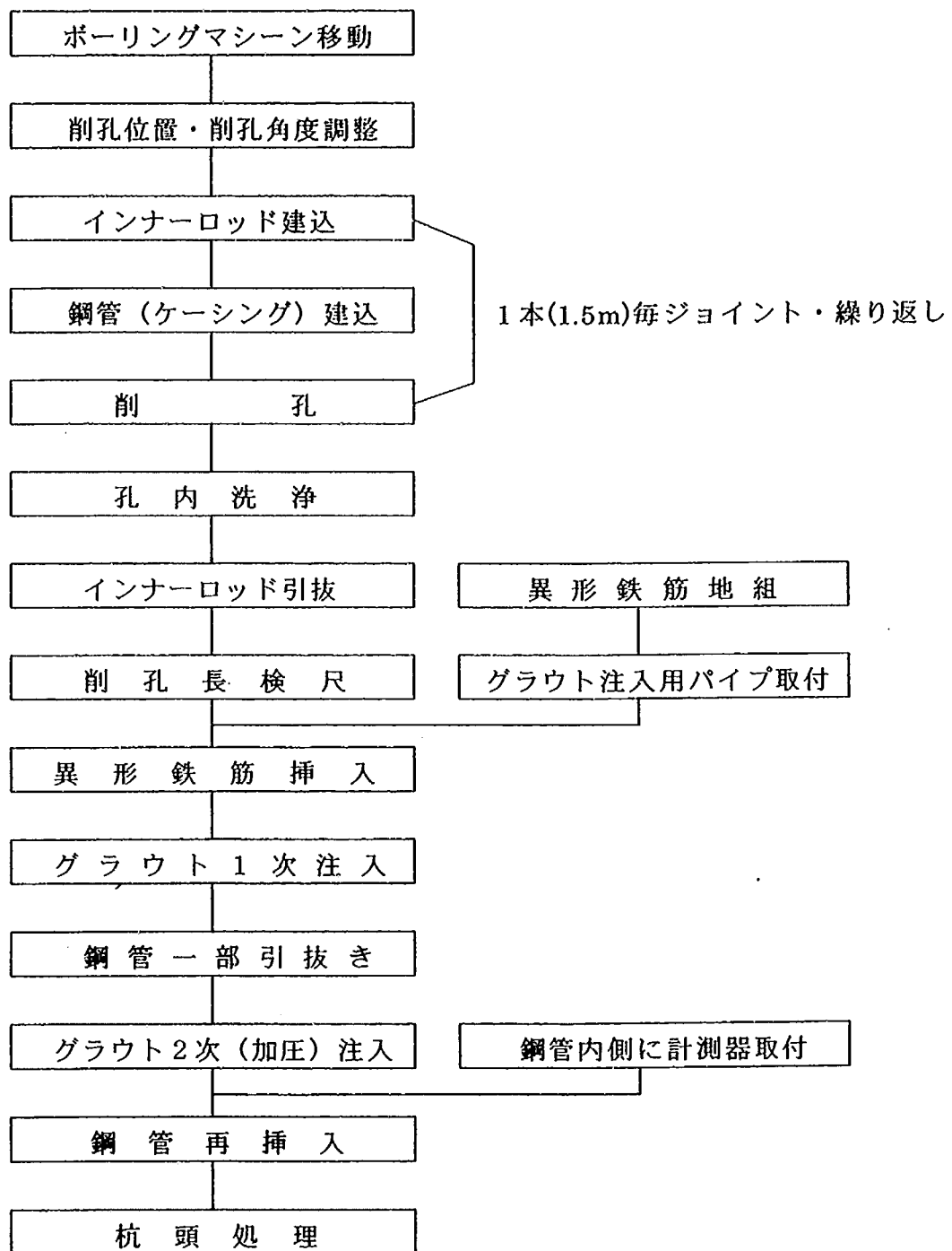


図-4.4.1 マイクロパイルの施工手順

マイクロパイルの施工概略図を図-4.4.2に示す。なお、巻末の参考資料に各施工段階の写真
を添付した。

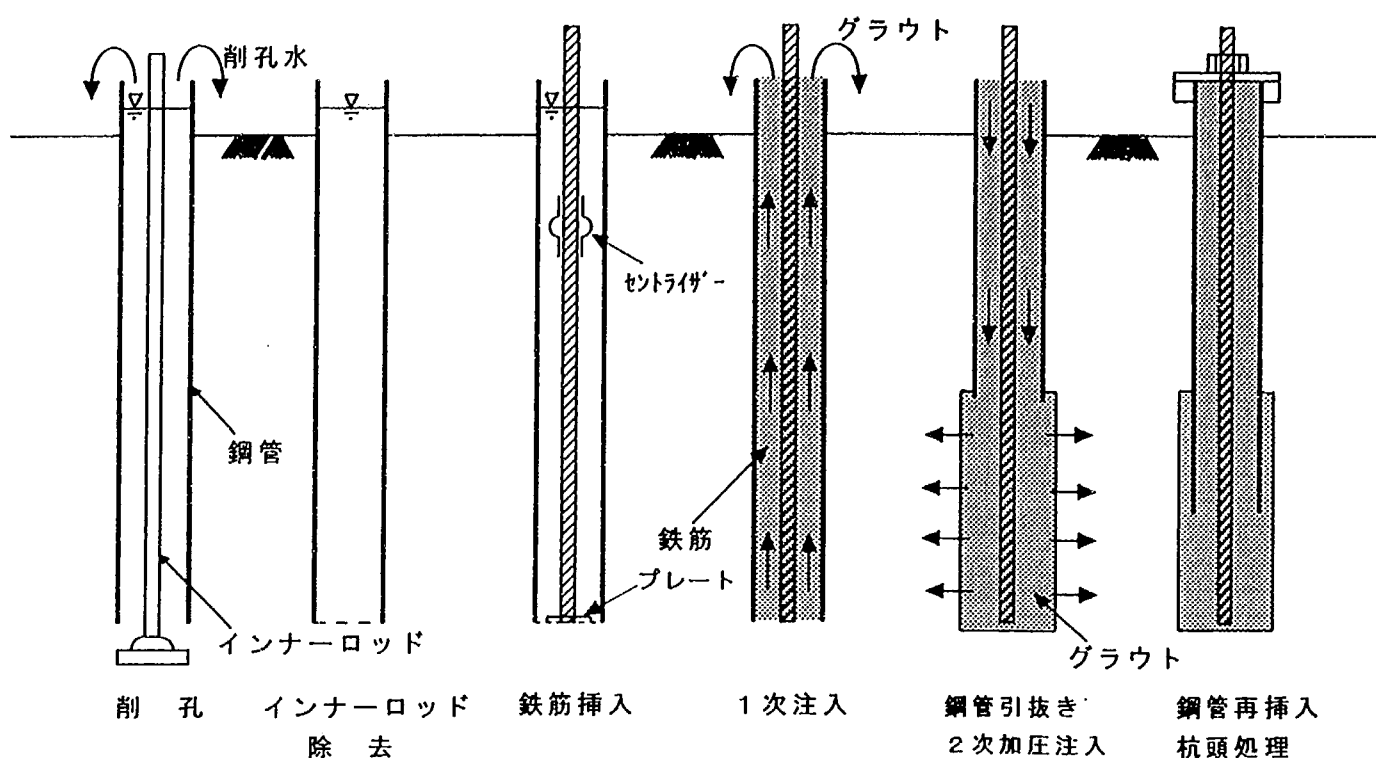


図-4.4.2 マイクロパイルの施工概略図

①削 孔

削孔は鋼管先端に取り付けた先端ビット（φ200mm）と、インナーロッド先端の削孔用ビットによる2重管回転打撃（ロータリーパーカッション）削孔を行い、削孔用ビット先端から吐出する水により排土を行った。なお、削孔中はリーダー、鋼管の角度を測定し鉛直性の管理を行った。

②鋼管の継手

鋼管には1.5m毎に両端ネジ式加工を施したカップリング継手を設け、継手作業はクレーンにより鋼管を吊り上げ、鋼管、インナーロッドを一本毎連結したが、その継手作業は比較的スムーズに施工できた。

③孔内洗浄

削孔完了後、削孔用ビット先端から吐出する水により孔内洗浄を行い、鋼管天端から溢れ出す泥水（スライム）が清水になるのを目視確認した。

④異形鉄筋挿入

インナーロッド引抜、削孔長検尺後、異形鉄筋をクレーンにより挿入した。異形鉄筋は予め地上で3本の鉄筋を継ぎ、計測用のひずみゲージを貼り付けた後、グラウト注入用のパイプを鉄筋に添わせた。なお、異形鉄筋には孔内での偏心が生じないようにセントライザーを取

り付け、鋼管引抜き時の鉄筋の共上がりを防止するため下端プレートを設置している。

⑤グラウト 1 次注入

異形鉄筋に添わせたパイプの下端から、グラウトの 1 次注入を行った。この 1 次注入の完了の目安として、注入量および鋼管天端から溢れ出すグラウトの比重を測定し、完全に孔内水を置き換えたことを確認した。なお、この注入用パイプは 1 次注入完了後、除去した。

⑥鋼管引抜き・グラウト 2 次注入

1 次注入完了直後、鋼管を引き抜きながら鋼管頭部からグラウトの 2 次注入を行った。2 次注入は 0.5MPa の加圧注入を行い、グラウトによる定着部を形成した。

⑦鋼管再挿入

グラウトの 2 次注入完了後、鋼管を再挿入した。このとき、再挿入用の鋼管はあらかじめ計測用のひずみゲージを貼り付けた鋼管と交換し、載荷試験時の方向・高さをあわせるように挿入した。また、ひずみゲージは再挿入時に地盤との接触を防ぐため、鋼管の内側に取り付けた。なお、水平交番載荷試験時には、非定着部のなるべく多くの断面におけるひずみ計測を行いたかったため、定着部への鋼管の挿入長を長くした。

⑧杭頭処理

杭打設完了後、養生期間中に杭頭のプレート類を現場溶接にて取り付けた。

4.5 施工機械

マイクロパイルの施工に用いた主要な施工機械を表-4.5.1に、ボーリングマシーンを写真-4.5.1に示す。

表-4.5.1 主要施工機械一覧表

機 械 名	型 式	動出力	台 数
ボーリングマシーン	ロータリーパーカッション	45～55 kw	1
グラウトミキサー	堅形2段	350 L	1
グラウトポンプ	—	11 kw	1
コンプレッサー	—	20 ps	1
送水ポンプ	2連式復動ピストンポンプ	22 kw	1
発 電 機	—	125 kVA	1
ラフタークレーン (鉄筋吊込用)	25t 吊	—	1

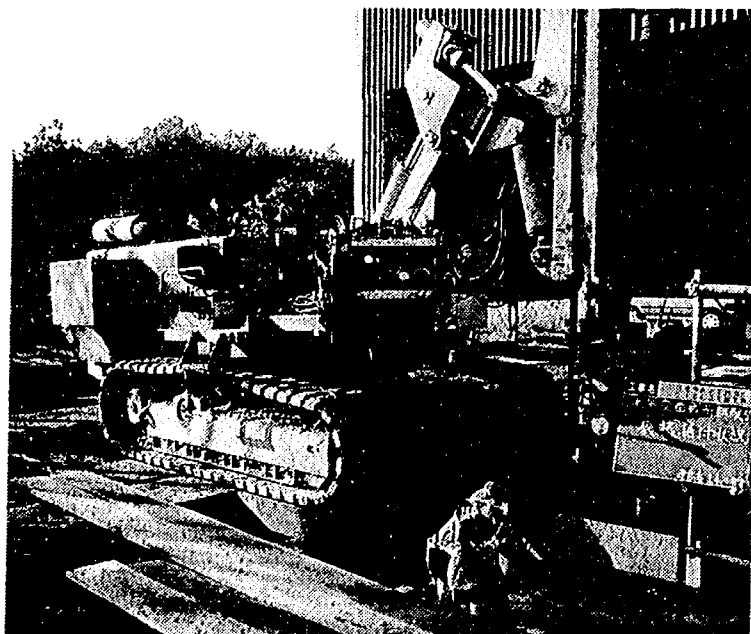


写真-4.5.1 ボーリングマシーン

4.6 施工管理

施工管理は、表－4.6.1 に示す項目において実施した。

表－4.6.1 施工管理項目

工 程	管理時期	管理項目	管理内容	規格値	測定頻度
削 孔	削孔機械 据 付 時	削孔位置	削孔位置	±100mm	全 数
		削孔角度	削孔角度	±2.5 度	全 数
	削 孔 時	削孔状況や土質 柱状との比較等	削孔速度、推力 回転トルク等		全 数
	削孔完了時	孔内洗浄度	残留スライムの確認		全 数
		削孔深度	削孔長	±100mm	全 数
グ ラウト 注 入	混 練 時	注入材の品質	材料の計量	水、セメント、 混和剤±1%	1 回／バ ッチ
			コンシステンシー (フロー値)	15±3 秒	2 回／日
			圧縮強度	設計強度以上	供試体 3 本
	注 入 中	注入状況	注入量	注入倍率管理	全 数
			加圧量	0.5N/mm ²	全 数
補強材 の挿入	挿 入 前	補強材の品質	補強材の品質	設計強度以上	供試体 3 本
			補強材の長さ		全 数
	挿 入 時	挿入状況	カップリング等の 締付度		全 数

4.7 試験施工の施工性に関する考察

今回の試験杭の施工は、桁下制限下での耐震補強施工を想定しており、1.5m 毎のネジ式カップリング継手による鋼管のジョイント方法を採用した。通常の溶接継手のようなジョイント作業では、施工時間を膨大に要するが、今回の継ぎ手方式では、一回あたりの継ぎ手作業は数分であり、スムーズに施工できた。また、削孔作業、グラウト注入などに関しても特にトラブルはなく、今回の試験施工からは、桁下制限下での耐震補強工法への適用性を確認できた。

5. 材料試験

マイクロパイルの各材料特性を把握するため材料試験を行った。

表-5.1.1 には、鉛直および水平交番載荷試験杭の施工時にプラントから採取したグラウトの一軸圧縮強度試験結果を示す。水平交番載荷試験杭の供試体で設計基準強度(30N/mm²)を下回ったものが 2 供試体あったが、これは供試体作成時のキャッピングの悪さによるものと考えられた。

表-5.1.2 には鉄筋(D51,SD490)の引張試験結果、表-5.1.3 には鋼管($\sigma_y=550\text{N/mm}^2$)の引張試験結果を示す。

表-5.1.1 グラウトの圧縮強度試験結果

ケース	供試体番号	材令 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
鉛直交番 載荷試験杭	TEN-1	20	31.64	13.28
	TEN-2		35.76	12.32
	TEN-3		32.66	13.61
	平 均		33.35	13.07
水平交番 載荷試験杭	H-1	19	35.14	15.21
	H-2		24.96	12.97
	H-3		20.92	13.10
	平 均		27.01	13.76
全 平 均			30.18	13.42

表-5.1.2 鉄筋引張試験結果

規 格	供試体番号	降伏応力度 (N/mm ²)	最大引張応力度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
異形鉄筋 D51 SD490	D-1	512.6	691.2	198.8
	D-2	513.1	689.7	203.0
	D-3	513.6	690.7	199.0
平 均		513.1	690.5	200.3

表-5.1.3 鋼管引張試験結果

規 格	供試体番号	降伏応力度 (N/mm ²)	最大引張応力度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
鋼 管 API-N80 $\sigma_y=550\text{N/mm}^2$	P-1	633.7	739.4	202.6
	P-2	608.7	719.8	199.9
	P-3	624.8	728.2	201.7
平 均		622.4	729.2	201.4

6. 鉛直交番載荷試験

6.1 鉛直交番載荷試験方法

載荷方法は地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」「杭の引抜試験方法・同解説」に基づき、最大計画荷重に至るまでの荷重を数分割し、荷重速度を一定とする荷重制御方式とした。載荷は、荷重～変位関係において非線形領域までは押込み・引拔きの交番載荷を行い両者の変形特性を把握し、その後、極限状態に至るまで単調に引抜き載荷を行った。なお、載荷サイクルは表-6.1.1に示すような多サイクル方式としたが、4サイクル目の最大引抜き荷重載荷直後、杭頭引抜装置に不具合が生じたため、一旦荷重の除荷を行っている。

表-6.1.1 鉛直交番載荷試験の荷重サイクル

サイクル	荷重段階 ○印：処女荷重	最大荷重
1	○ ○ ○ ○ 0～-150～-300～-150～0～+150～+300～+150～0	+300kN -300kN
2	○ ○ ○ ○ 0～-150～-300～-450～-600～-450～-300～0～+300～+450～+600～ +450～+300～0	+600kN -600kN
3	○ ○ ○ ○ 0～-300～-600～-750～-900～-750～-600～-300～0～+300～+600～ ○ ○ +750～+900～+750～+600～+300～0	+900kN -900kN
4	○ 0～-300～-600～-900～-1050～-600～0 杭頭部の引抜装置の不具合の為、一旦荷重の除荷を行った	-1050kN
5	○ 0～-300～-600～-900～-1050～-600～-300～0	-1050kN
-：引抜き載荷 +：押込み載荷 荷重保持時間 : 処女荷重 15 分, 履歴荷重 5 分, 0 荷重 15 分		

載荷試験の測定項目を以下に示し、測定間隔を表-6.1.2に示す。

- ① 時間
- ② 荷重（ロードセル）
- ③ 杭頭の鉛直変位量（摺動式変位計）
- ④ 杭頭の水平変位量（摺動式変位計）
- ⑤ 地中部の鉄筋先端の変位（孔内変位計）
- ⑥ 杭体のひずみ（ひずみゲージ）
- ⑦ 反力装置の変位（摺動式変位計）

表-6.1.2 鉛直交番載荷試験の測定間隔

測定項目	増荷時測定時間		減荷時測定時間
荷重、変位 ②③④⑤⑦	処女荷重	0,1,2,5,10,15 分	0,5 分
	履歴内荷重	0,5 分	
	0 荷重	0,1,2,5,10,15 分	
その他 ⑥	処女荷重	0,10 分	0,5 分
	0 荷重	0,10 分	

6.2 鉛直交番載荷試験杭の計測位置

表-6.2.1 に鉛直交番載荷試験杭の計測内容を、図-6.2.1 に計測位置図を示す。鉄筋部のひずみゲージは、鋼管内径と鉄筋のクリアランスが小さいため 6 断面の設置とし、定着部付近に集中して配置した。また、鉄筋下端のプレートには孔内変位計を取り付け、杭頭変位と杭先端の変位を比較することとした。

表-6.2.1 鉛直交番載荷試験杭の計測内容

計測機器	計測箇所
摺動式変位計	杭天端：鉛直 4 箇所、水平 2 箇所
ひずみゲージ	鋼管部（鋼管内側）2 ヶ所×3 断面 鉄筋部 2 ヶ所×6 断面
孔内変位計	鉄筋下端 1 箇所

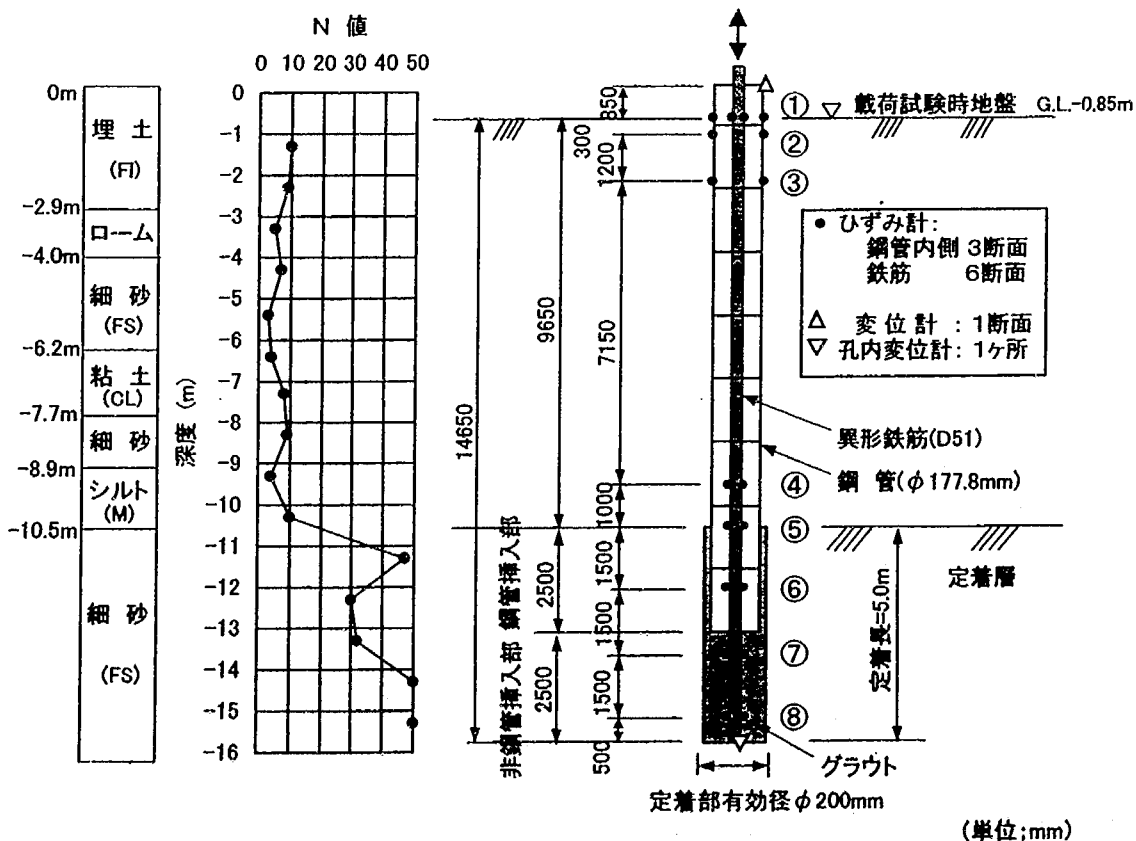


図-6.2.1 鉛直交番載荷試験の計測位置

6.3 鉛直交番載荷試験載荷装置

図-6.3.1に鉛直交番載荷試験装置、図-6.3.2に載荷試験時の杭頭結合図を示す。本載荷装置は実験場の反力装置を利用し、3000kN油圧ジャッキを2台使用して載荷を行った。押込み載荷時には下段の油圧ジャッキが、引抜き載荷時には上段の油圧ジャッキが作動し、押込み時には $\phi 36$ ゲートピンを緩め、引抜き時には杭天端のスペーサー(PL-19)を取り外して載荷している。なお、前述したように鉄筋、鋼管に荷重が均等に伝わるよう、杭頭プレートを通じて載荷を行った。

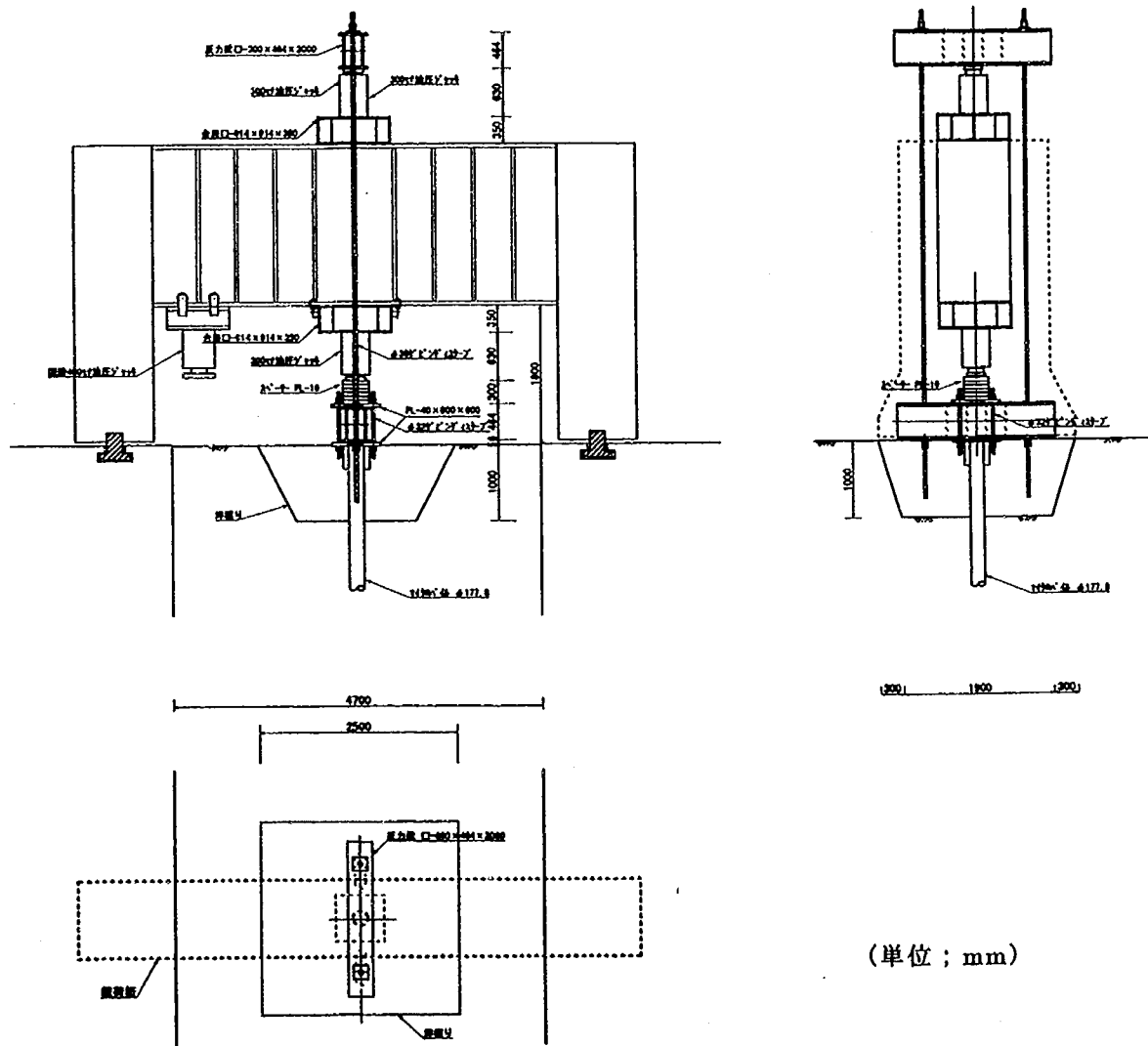


図-6.3.1 鉛直交番載荷試験装置

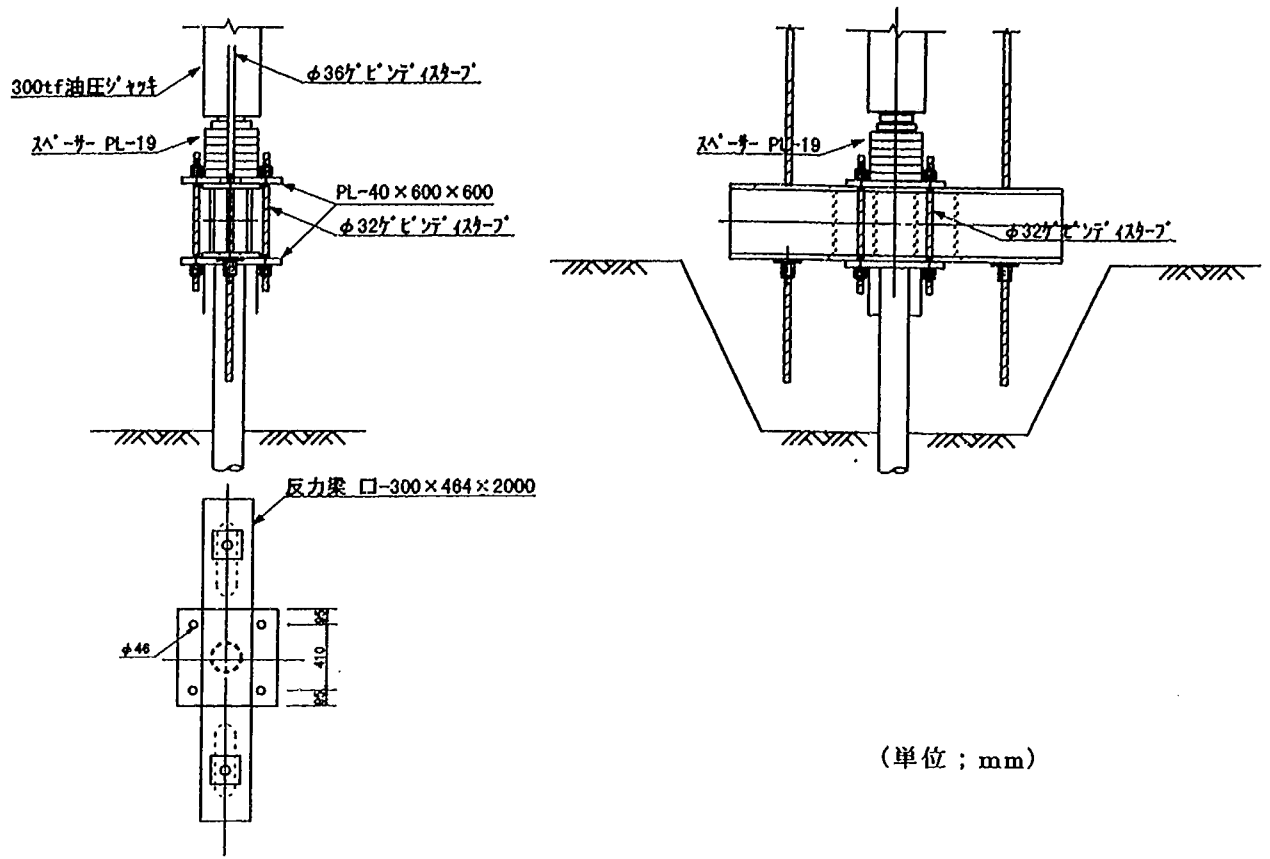


図-6.3.2 鉛直交番载荷試験杭頭結合図

6.4 鉛直交番载荷試験結果

6.4.1 荷重～変位関係

図-6.4.1には鉛直交番载荷試験の荷重 P ～変位 S 関係を示す。図-6.4.2～図-6.4.3に示す引抜き载荷時の杭頭残留変位量、 $\text{Log}P$ ～ $\text{Log}S$ 関係より判断すると、降伏引抜支持力が 900kN、極限引抜支持力が 1050kNであり、杭径の約 10%の変形量で極限状態に達している。また、荷重～変位関係における、降伏付近までの押込みと引抜きの勾配は等しく、両方向の軸方向バネは同程度の値となった。同図には杭先端変位の包絡線も併記したが、杭頭変位と追隨した線形を示している。杭頭変位と杭先端変位の差分は杭体の弾性および塑性変形を示すことになるが、载荷試験終了時に着目すると、杭体の塑性変形は約 5mm となった。

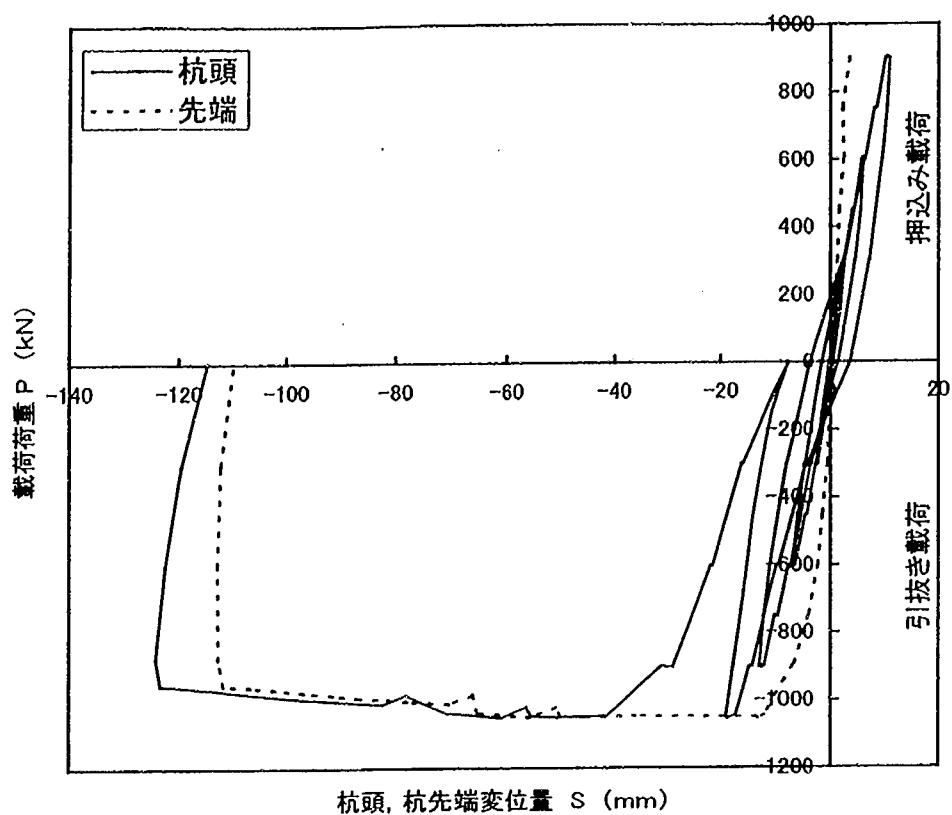


図-6.4.1 荷重 P ～ 杭頭変位 S 履歴曲線

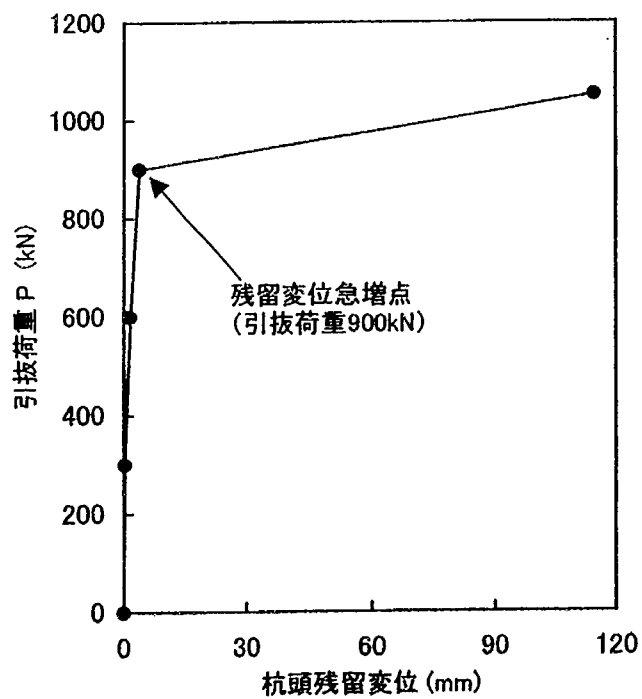
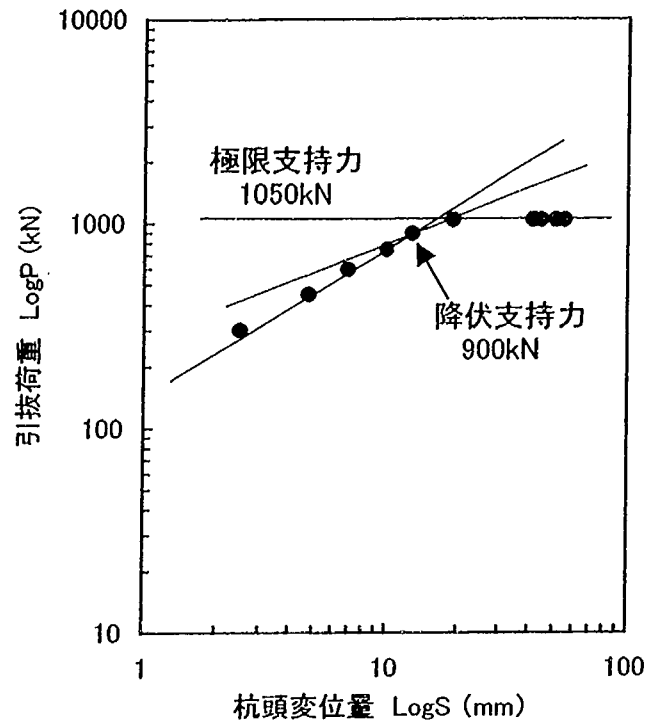


図-6.4.2 荷重 P ～ 杭頭残留変位曲線

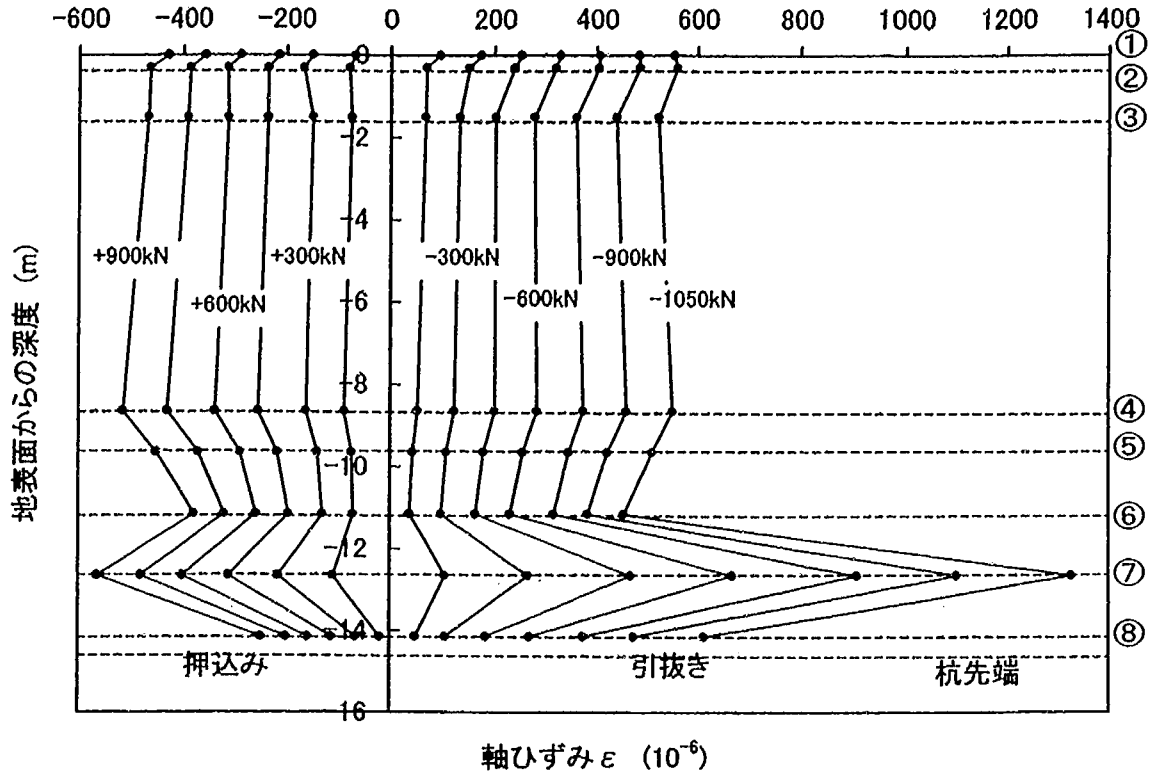


図－6.4.3 Log P ～Log S 曲線

6.4.2 杭体のひずみ・軸力分布

(1) 軸ひずみ分布

図－6.4.4 には押し込み時、引抜き時の軸ひずみ分布を示す。ここで、⑦～⑧断面は鋼管がない部分であり、断面剛性が他の区間より小さいため軸ひずみは大きな値となっている。なお、①断面は鋼管と鉄筋にひずみゲージを設置しているが、引抜き時において両者の値に若干の差が生じたため、その平均値を用いた。



図－6.4.4 軸ひずみ分布図

(2) 軸力分布

深度方向の軸力分布を図－6.4.5 に示す。軸力は各断面の軸ひずみ値を用い、各区間で構成される鋼管、鉄筋、グラウトを全断面有効として（1）式のように算定した。なお、定着部の有効径に関しては、アメリカでは加圧注入を行うことによって削孔径より拡大されるとしているが、その明確な根拠や設定方法が明らかでないため、有効径は削孔径(φ200mm)と設定した。また、引抜き時の非鋼管挿入部分(⑦～⑧断面)に関しては、グラウトのひずみ負担を無視し、鉄筋のみが負担するとして算定を行った。

$$N = - (\varepsilon_c E_c A_c + \varepsilon_{s1} E_s A_{s1} + \varepsilon_{s2} E_s A_{s2}) \quad (1)$$

N : 軸力(kN)

ε : 軸ひずみ $= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2$ (圧縮：－，引張：＋)

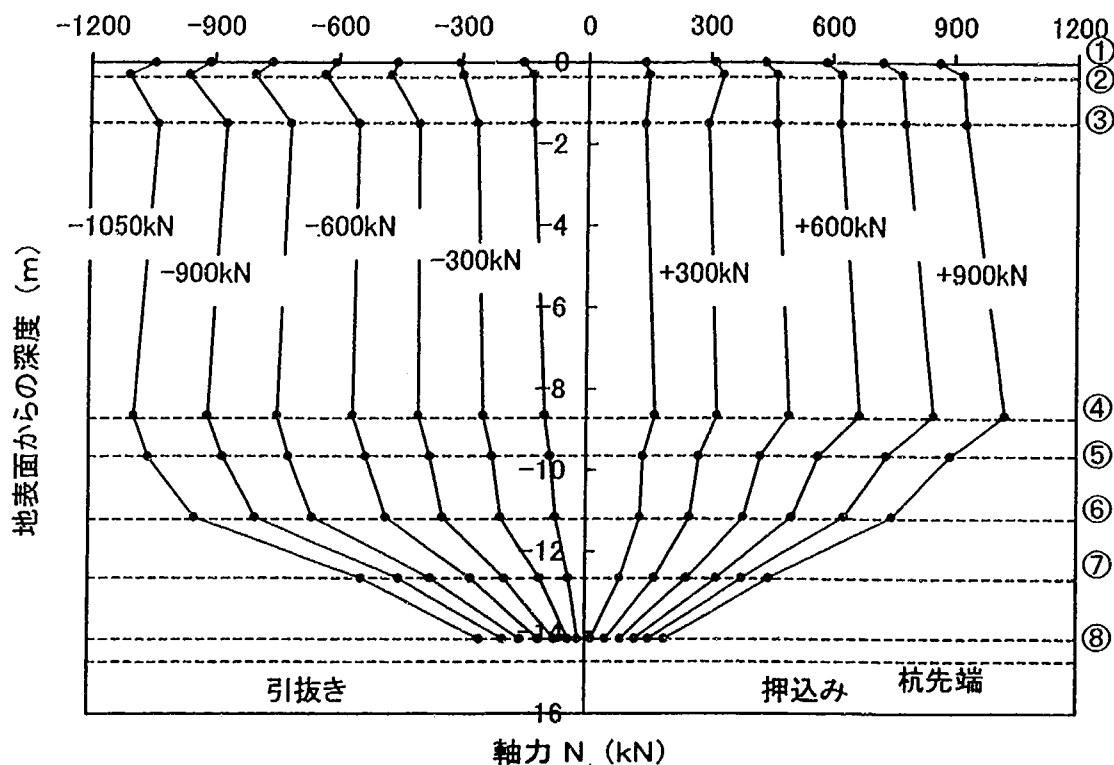
ε_c : グラウト部の軸ひずみ値

ε_{s1} : 鋼管部の軸ひずみ値

ε_{s2} : 鉄筋部の軸ひずみ値

A_c : グラウト断面積 $= 16,214\text{mm}^2$: ①,②,③,④断面
 $22,801\text{mm}^2$: ⑤,⑥断面 (定着部有効径φ200mm考慮)
 $29,389\text{mm}^2$: ⑦,⑧断面 (定着部有効径φ200mm考慮)

E_c : グラウト部弾性係数 = 13.5 kN/mm^2 (材料試験値)
 A_{s1} : 鋼管断面積 = $6,587 \text{ mm}^2$: ①～⑥断面
 A_{s2} : 鉄筋断面積 = $2,027 \text{ mm}^2$: ①～⑧断面
 E_s : 鋼材弾性係数 = 200 kN/mm^2 (材料試験値)



図－6.4.5 軸力分布図

この軸力分布図からは、各荷重段階とも①～⑤断面の軸力変動が少ない。また杭先端より0.5m上方の部分(⑧断面)には軸力が若干残るが、押込み時、引抜き時のその値はほぼ同じであることが分かる。このことから、マイクロパイルの支持機構は非定着部の摩擦抵抗及び定着部の先端支持力は小さな値であり、主に定着部の摩擦抵抗によって支持されることが確認できた。

6.4.3 周面摩擦力度～変位関係

杭周面摩擦力度～各区間の平均変位の関係を図-6.4.6に押し込み時、図-6.4.7に引抜き時を示す。なお、周面摩擦力度は非定着部を鋼管径、定着部の有効径を削孔径と設定し、(2)式を用いて算定している。定着部の有効径に関しては、前述のようにアメリカでは加圧注入を行うことによって削孔径より拡大されるとしているが、その明確な根拠や設定方法は明らかではない。定着部に鋼管を挿入した⑤～⑥区間の周面摩擦力度が他の定着部分に比べて小さな値となっているが、軸力や周面摩擦力度の算定において、このような定着部の有効径を把握しきれていないことが影響しているものと考えられる。いずれにせよ、これらの図からは軸力分布と同様に、定着部の摩擦抵抗が特に大きいことが確認できた。押し込み時と引抜き時と比較しても、定着部での杭周面摩擦力度が大きく、ほぼ等しい傾向にある。また、図-6.4.7より降伏後、杭周面摩擦力度の低下を生じない範囲での塑性変形域が長いことから変形性能に優れているものと考えられる。

$$\tau = (N_n - N_{n-1}) / (U \times L_n) \quad (2)$$

τ : 杭周面摩擦力度 (kN/m²)

N_n : n 断面の軸力 (kN)

N_{n-1} : $n-1$ 断面の軸力 (kN)

U : 杭の周長(m) (①～⑤区間:鋼管径 177.8mm, ⑤～⑧区間:定着部有効径 200mm)

L_n : 区間長 (m)

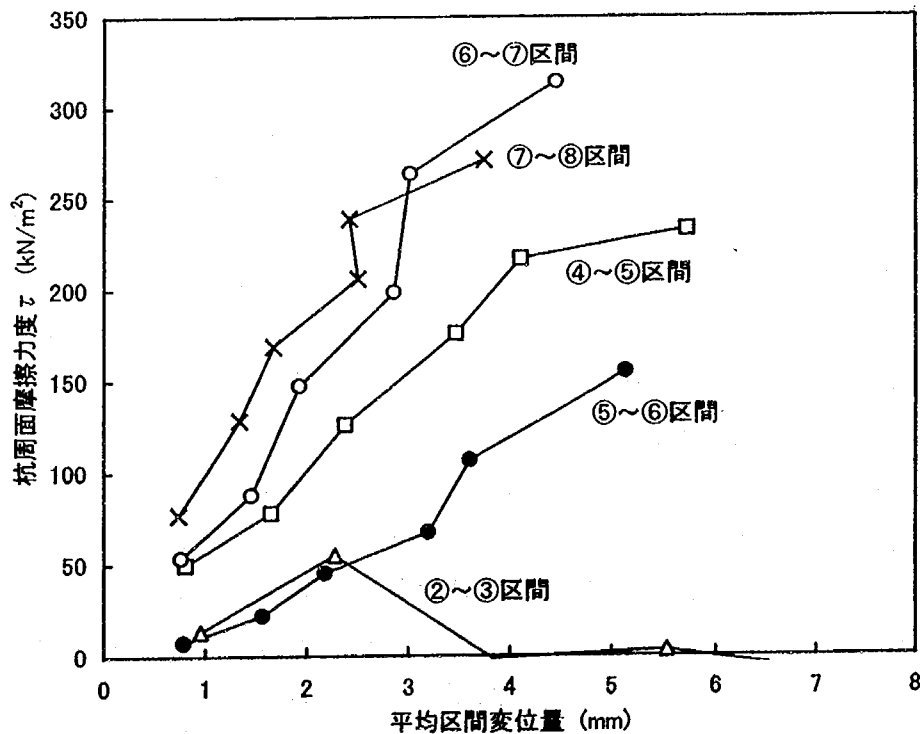


図-6.4.6 杭周面摩擦力度～平均区間変位関係（押し込み時）

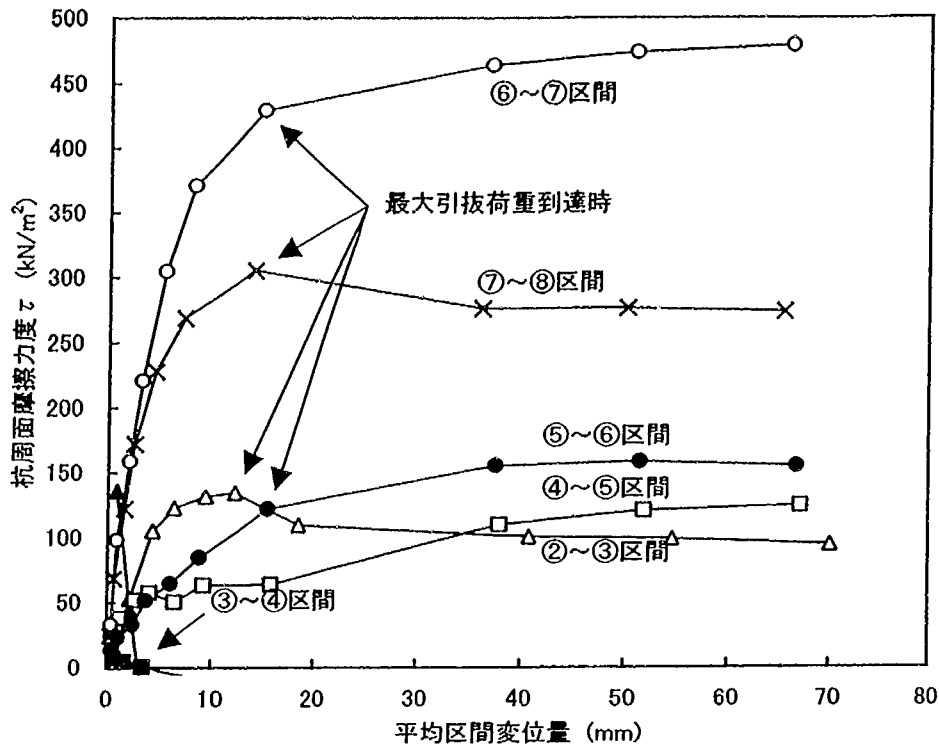


図-6.4.7 杭周面摩擦力度～平均区間変位関係（引抜き時）

6.4.4 鉛直交番载荷試験結果の整理

マイクロパイルの耐震補強工法への適用を考えると、このような小口径の杭がどのような支持力、変形特性を有し、それが従来の杭工法とどう異なるのか把握する必要がある。先に述べたように、マイクロパイルの支持機構は定着部の摩擦抵抗に大きく期待するが、道示³⁾によれば場所打ち杭の最大周面摩擦力度は 200kN/m^2 であり、今回の载荷試験からは従来の工法よりも大きい摩擦抵抗を有することが分かった。また、今回の地盤定数を用い、従来工法による同径の極限引抜き支持力を道示に準じて算定すると、場所打ち杭で 850kN 、中掘り杭で 220kN となった。今回の载荷試験ではそれらの値より大きな結果が得られていることから、マイクロパイルは小口径の杭にしては比較的高い支持力を期待できると考えられる。

次に、基礎の設計においては軸方向の変形特性を与える杭頭の軸方向バネ定数 K_v の推定も重要な事項である。道示においては各工法毎に载荷試験結果を用いて統計的に K_v 値を算定しているが、マイクロパイルに関しては国内での実績が少なく、先端支持力を大きく期待する従来工法とは変形特性が異なる。そこで、今回は定着部の鋼管挿入部と非鋼管挿入部毎に断面剛性、すべり係数を設定して、道示の $C_s \sim K_v$ 法に基づいて定着部上端における沈下量を算出し、これに非定着部の弾性変形を加えたものを杭頭における沈下量として杭頭バネ定数 K_v の算定を試みた(図-6.4.8)。表-6.4.1 に K_v の試算結果を示す。この結果、実測値の K_v に比べて試算

値は若干小さな値となった。この差は非定着部においても、わずかながらの周面摩擦は効いており、試算はこれを無視しているためだと考えられる。以上のことから、 C_s を適切に推定できれば定着部の摩擦バネのみを考慮したモデルで、マイクロパイルの軸方向の変形特性を推定することは可能だと考えられた。

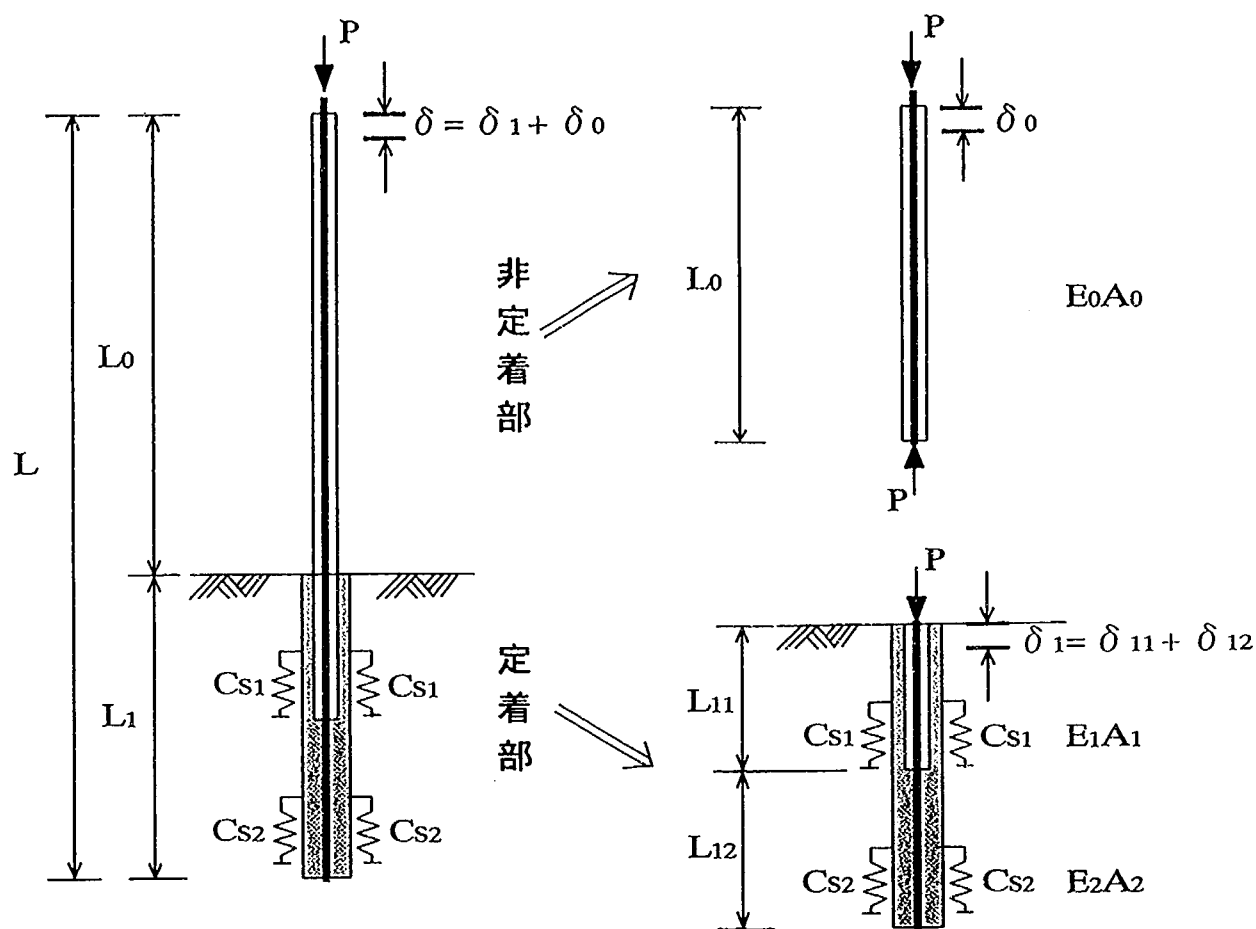


図-6.4.8 Kv 試算モデル

$$K_v = P / \delta$$

$$\delta = \delta_0 + \delta_1 = (P \times L_0) / (E_0 A_0) + P / K_{v0}$$

K_v : 杭頭の軸方向バネ定数 (kN/m)

P : 杭頭荷重 = 900 (kN)

δ : 杭頭変位量 (m)

L_0 : 非定着長 = 10.5 (m)

$E_0 A_0$: 非定着部の断面剛性 = 1,941,689 (kN)

K_{v0} : 定着部の軸方向バネ定数 (kN/m)

$$K_{v0} = \alpha_1 \times P / \delta_{11}$$

$$\delta_{11} = (P \times L_{11}) / (E_1 A_1)$$

$$\alpha_1 = ((\lambda_1 \tanh \lambda_1 + \gamma_1) / (\gamma_1 \tanh \lambda_1 + \lambda_1)) \times \lambda_1$$

$$\text{ここに、} \lambda_1 = L_{11} \times (C_{s1} \times U / E_1 A_1)^{1/2}$$

$$\gamma_1 = (A_i \times K_{v1} \times L_{11}) / (E_1 A_1)$$

L_{11} : 鋼管挿入部の定着長 = 2.5 (m)

$E_1 A_1$: 定着部の断面剛性 = 2,030,614 (kN)

C_{s1} : 鋼管挿入部のすべり係数 (kN/m³) (表-6.4.1 参照)

U : 杭の周長 = 0.628 (m)

A_i : 杭の先端閉塞面積 = 0.0314 (m²)

K_{v1} : 鋼管挿入部の軸方向反力係数 (kN/m³)

$$K_{v1} = K_{v2} / A_i$$

$$K_{v2} = \alpha_2 \times P / \delta_{12}$$

$$\delta_{12} = (P \times L_{12}) / (E_2 A_2)$$

$$\alpha_2 = ((\lambda_2 \tanh \lambda_2 + \gamma_2) / (\gamma_2 \tanh \lambda_2 + \lambda_2)) \times \lambda_2$$

$$\text{ここに、} \lambda_2 = L_{12} \times (C_{s2} \times U / E_2 A_2)^{1/2}$$

$$\gamma_2 = (A_i \times K_{v3} \times L_{12}) / (E_2 A_2)$$

K_{v2} : 非鋼管挿入部の軸方向バネ定数 (kN/m)

L_{12} : 非鋼管挿入部の定着長 = 2.5 (m)

$E_2 A_2$: 非鋼管挿入部の断面剛性 = 802,152 (kN)

C_{s2} : 非鋼管挿入部のすべり係数 (kN/m³) (表-6.4.1 参照)

K_{v3} : 杭先端地盤の軸方向地盤反力係数 = 0 (kN/m³)

表-6.4.1 杭頭軸方向バネ K_v 試算結果

	単位	値	備 考
実測杭頭 K_v 値	kN/m	70,367	引抜き降伏時の割線勾配
鋼管挿入部すべり係数 C_{s1}	kN/m ³	27,600	⑤～⑦区間の平均
非鋼管挿入部すべり係数 C_{s2}	kN/m ³	41,300	⑥～⑧区間の平均
非鋼管挿入部の軸方向バネ定数 K_{v2}	kN/m	61,071	
鋼管挿入部の軸方向反力係数 K_{v1}	kN/m ³	1,944,936	
定着部の軸方向バネ定数 K_{v0}	kN/m	97,364	
試算杭頭 K_v 値	kN/m	63,830	

7. 水平交番載荷試験

7.1 水平交番載荷試験方法

載荷試験方法は地盤工学会基準「杭の水平載荷試験方法・同解説」に基づき、最大荷重に至るまでの荷重を数分割し、荷重速度を一定とする荷重制御方式とした。載荷は正負方向の交番載荷とし、最終サイクルでは道示における地震時変位の制限値である 400mm 付近まで大変形載荷を行った。この大変位載荷を行うため、最終サイクルではジャッキストロークが 200mm のセンターホールジャッキを 2 台直列し、ストロークの限界まで載荷を行った。また、載荷サイクルは表-7.1.1 に示すような多サイクル方式とし、負方向のジャッキストロークが限界となる 4 サイクルまでは正負交番載荷、最終サイクルは正方向のみの載荷とした。

表-7.1.1 水平交番載荷試験の荷重サイクル

サイクル	荷重段階 ○印：処女荷重 単位：kN	最大荷重
1	○ ○ ○ ○ 0～+10～+20～+10～0～-10～-20～-10～0	+20kN -20kN
2	○ ○ ○ ○ 0～+10～+20～+30～+40～+30～+20～+10～0～-10～-20～-30～-40～ -30～-20～-10～0	+40kN -40kN
3	○ ○ ○ ○ 0～+10～+20～+30～+40～+50～+60～+50～+40～+30～+20～+10～0～ ○ ○ -10～-20～-30～-40～-50～-60～-50～-40～-30～-20～-10～0	+60kN -60kN
4	○ ○ ○ ○ 0～+10～+20～+30～+40～+50～+60～+70～+80～+70～+60～+50～ +40～+30～+20～+10～0～-10～-20～-30～-40～-50～-60～ ○ ○ -70～-80～-70～-60～-50～-40～-30～-20～-10～0	+80kN -80kN
5	○ ○ ○ ○ 0～+10～+20～+30～+40～+50～+60～+70～+80～+90～+80～+70～ +60～+50～+40～+30～+20～+10～0～-10～-20～-30～-40～-50～ ○ -60～-70～-80～-90～-80～-70～-60～-50～-40～-30～-20～-10～0	+90kN -90kN
6	○ ○ ○ ○ ○ ○ 0～+10～+20～+30～+40～+50～+60～+70～+80～+90～+100～+110～ ○ ○ ○ ○ ○ ○ +120～+130～+140～+150～+160～+150～+140～+130～+120～+110～ +100～+90～+80～+70～+60～+50～+40～+30～+20～+10～0	+160kN
+：正方向載荷 -：負方向載荷 荷重保持時間：処女荷重 3 分，履歴荷重 3 分，0 荷重 15 分		

載荷試験の測定項目を以下に示し、測定間隔を表－7.1.2 に示す。

- ① 時間
- ② 荷重（ロードセル）
- ③ 載荷点の水平変位量（ワイヤー式変位計）
- ④ 杭頭傾斜角（摺動式変位計）
- ⑤ 杭体のひずみ（ひずみゲージ）
- ⑥ 反力装置の変位（摺動式変位計）

表－7.1.2 水平交番載荷試験の測定間隔

測定項目	増荷時測定時間		減荷時測定時間
荷重、変位 ②③④⑥	処女荷重	0,約 2 分	0 分
	履歴内荷重	0,約 2 分	
	0 荷重	0,2,4,8,約 14 分	
その他 ⑤	処女荷重	0 分	0 分
	履歴内荷重	0 分	
	0 荷重	0,2,4,8,約 14 分	

7.2 水平交番載荷試験杭の計測位置

表－7.2.1 に水平交番載荷試験杭の計測内容を、図－7.2.1 に計測位置図を示す。天端から 4.5m の深さまでの 3 本の鋼管には、継手部から 150mm 離れた鋼管の内側にひずみゲージを貼り付け、グラウトの加圧注入完了後、再挿入させた。それ以深の鋼管には施工手順の関係から、ひずみゲージを設置できないため、この区間には鉄筋にひずみゲージを配置した。なお、地表面部の鋼管のひずみゲージ①は杭の施工完了後、鋼管の外側に貼り付けている。

表－7.2.1 水平交番載荷試験杭の計測内容

計 測 機 器	計 測 箇 所
ワイヤー式変位計	杭天端 2 箇所
摺動式変位計	地表面付近 2 箇所
ひずみゲージ	鋼管部（鋼管外側） 2 ヶ所×1 断面
	鋼管部（鋼管内側） 2 ヶ所×4 断面
	鉄筋部 2 ヶ所×6 断面

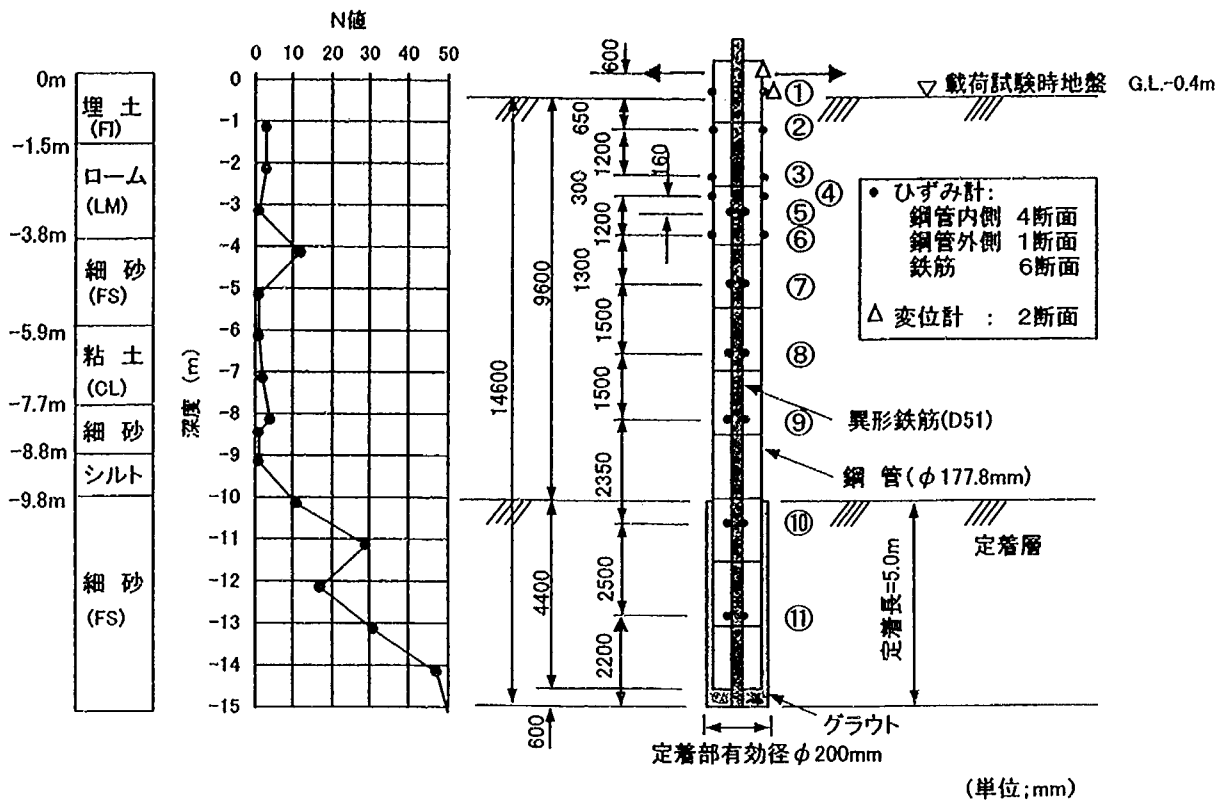
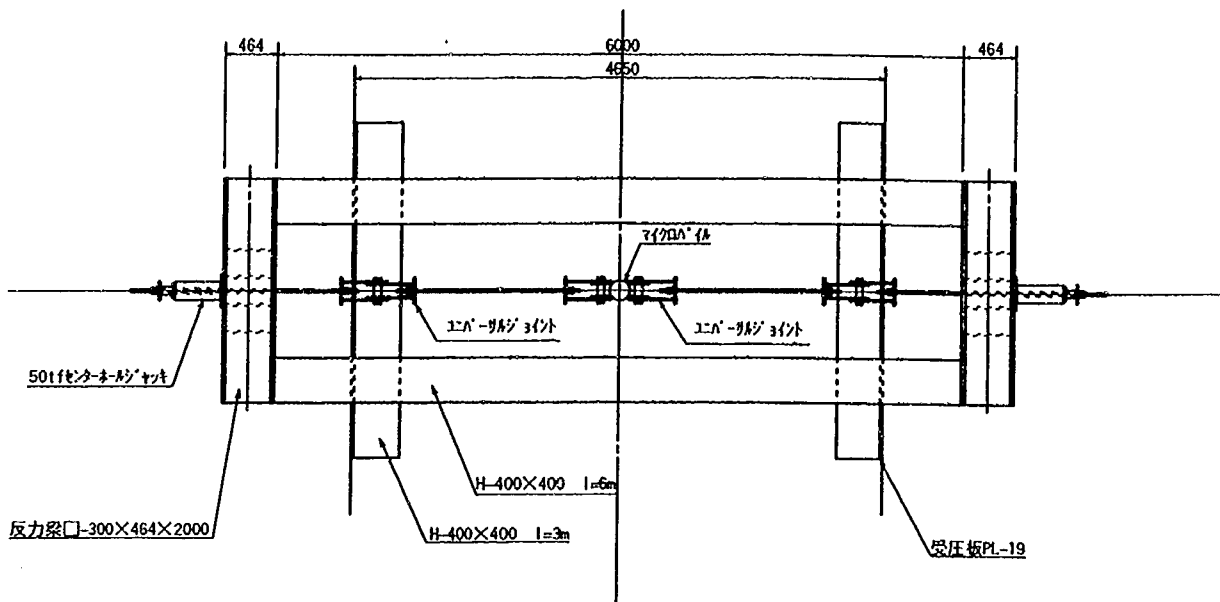


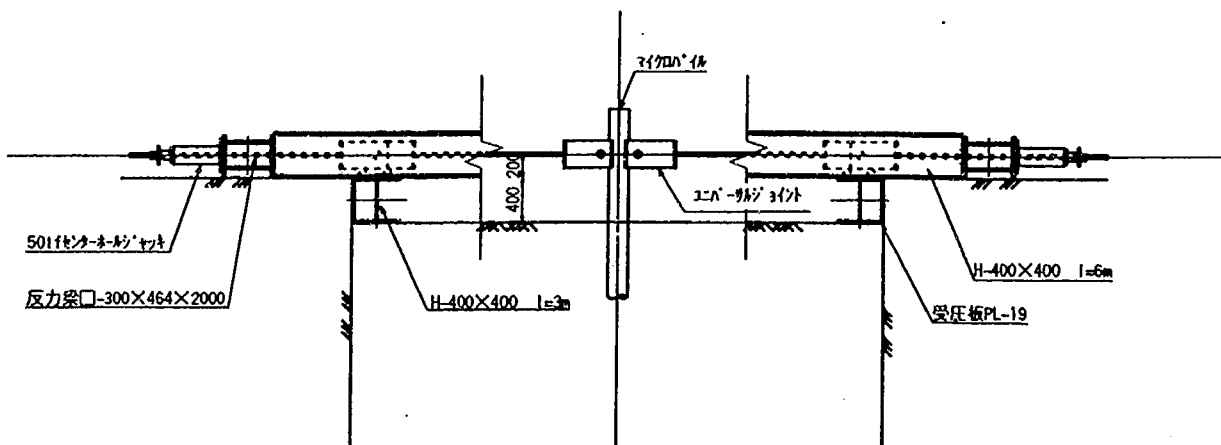
図-7.2.1 水平交番載荷試験の計測位置図

7.3 水平交番載荷試験載荷装置

図-7.3.1 に示すように、水平載荷装置は鉛直載荷用反力装置の基礎を反力として載荷を行った。また、大変形時に荷重がスムーズに伝達されるよう、ユニバーサルジョイントを正負4箇所取り付け付けたピン構造とし、ユニバーサルジョイントと受圧板の間には摩擦が働かないように、滑車を設置した。



平面図



側面図

(単位 ; mm)

図-7.3.1 水平交番載荷試験装置

7.4 水平交番載荷試験結果

7.4.1 荷重～変位関係

図-7.4.1には荷重～杭頭変位の履歴曲線を示す。最終サイクルでは最大水平荷重を正方向に160kN 載荷し、杭頭を355mm(杭径の約2倍)変位させた。後述するように160kN 載荷時に杭体は降伏していると考えられるが、荷重～変位関係における明確な変化点や残留変位の急増点は見られなかった。

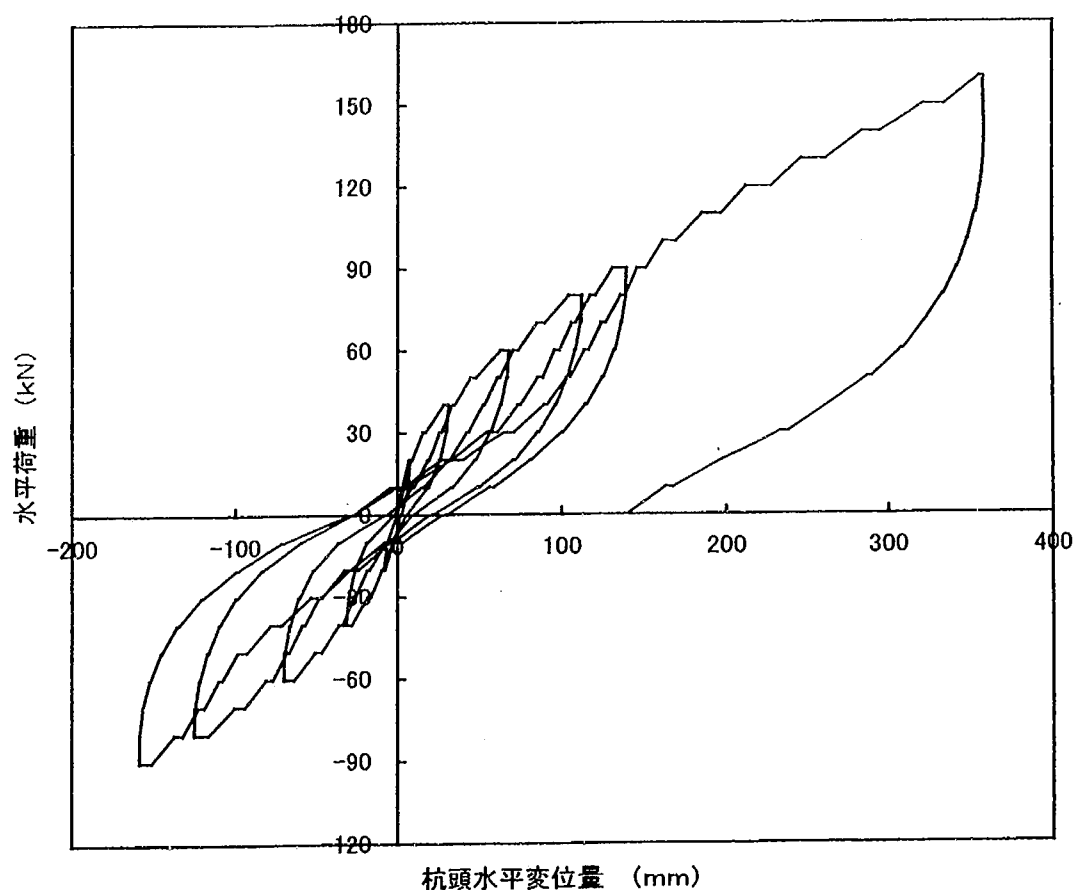


図-7.4.1 水平荷重～杭頭水平変位履歴曲線

7.4.2 杭体のひずみ分布

杭体の最外縁に補正したひずみ分布を図-7.4.2に正方向載荷時、図-7.4.3に負方向載荷時を示す。ここで、②～④断面のひずみ値は、他の断面との分布が大きく異なった。これらの計測箇所はいずれも、一般部に比べて断面剛性が大きいカップリング継手部に近かったため、その影響により過小なひずみになったものと考えられる。

最大ひずみは G.L.-2.21m の⑤断面で発生し、最大水平荷重 160kN 載荷時に引張側で 5176×10^{-6} 、圧縮側で 3511×10^{-6} となった。それに対して、5. で述べた鋼管の引張試験における降伏時のひずみは $3815 \times 10^{-6} \sim 5151 \times 10^{-6}$ であり、⑤断面の引張側で概ね杭体の降伏に至っていると考えられた。しかし、⑤断面は鉄筋部のひずみ値を、断面の平面保持として杭体の最外縁ひずみに換算したものであり、このことによる多少の誤差は含まれると考えられる。

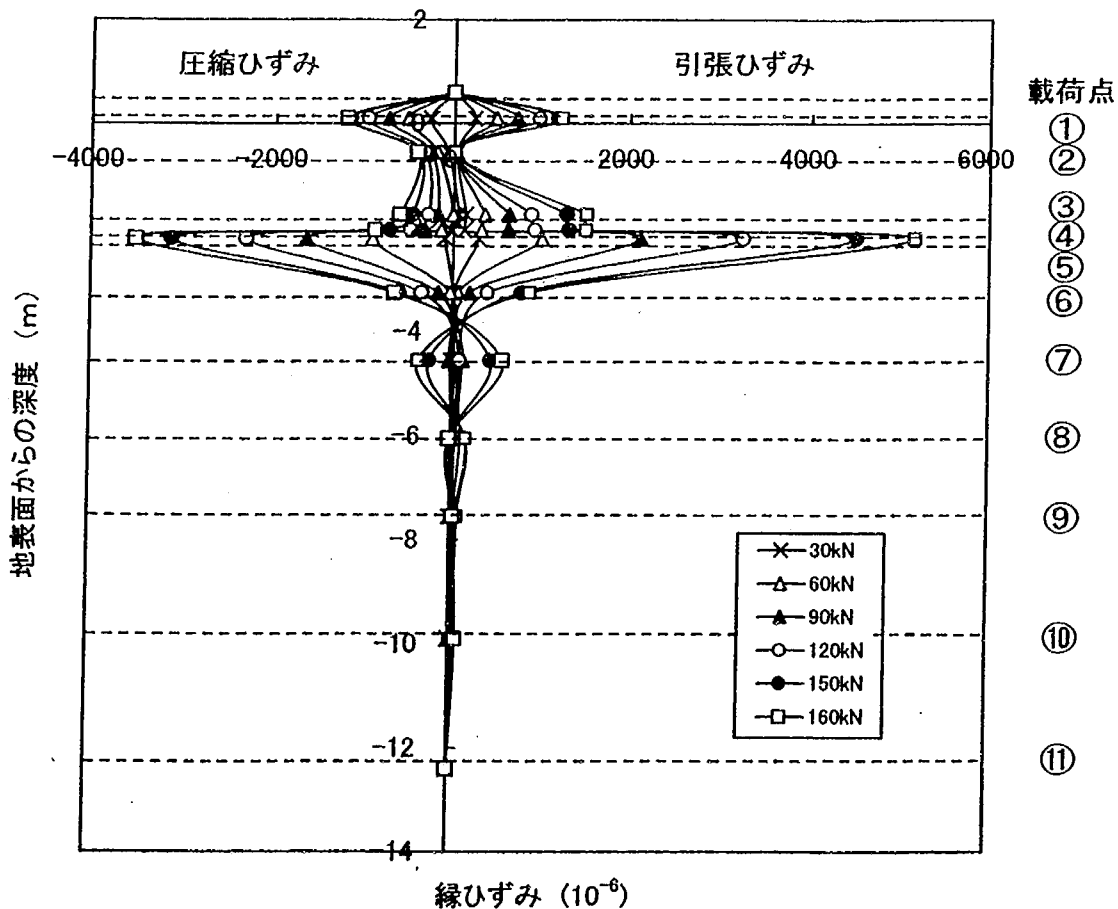


図-7.4.2 杭体ひずみ分布（正方向載荷時）

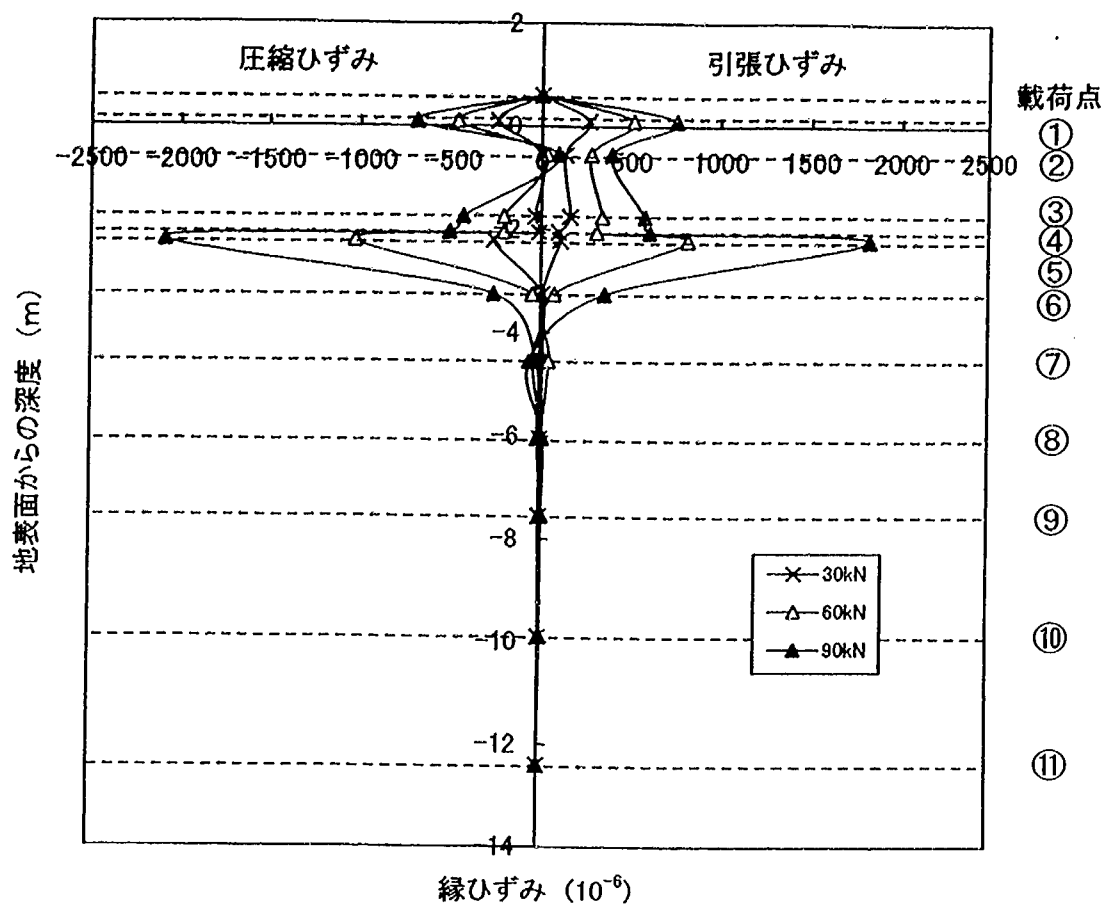


図-7.4.3 杭体ひずみ分布（負方向載荷時）

7.4.3 杭体の曲げひずみ分布

杭体の最外縁に補正した曲げひずみ分布を図-7.4.4に正方向載荷時、図-7.4.5に負方向載荷時を示す。ここで、曲げひずみは（3）式のように算出している。

$$\varepsilon_i = (\varepsilon_{ti} - \varepsilon_{ci}) / 2 \quad (3)$$

ε_i : i 断面の曲げひずみ (10^{-6})

ε_{ti} : i 断面の引張ひずみ (10^{-6})

ε_{ci} : i 断面の圧縮ひずみ (10^{-6})

本来ならば、この曲げひずみから算出した曲げモーメントを基に、微積分により変位、地盤反力度等を算定するが、今回はひずみのばらつきが大きく、鋼管継手部以外のデータでスムージング処理を行っても信頼性は劣ると考えられる。よって、今回は後述する曲げモーメントまでのデータ処理とした。

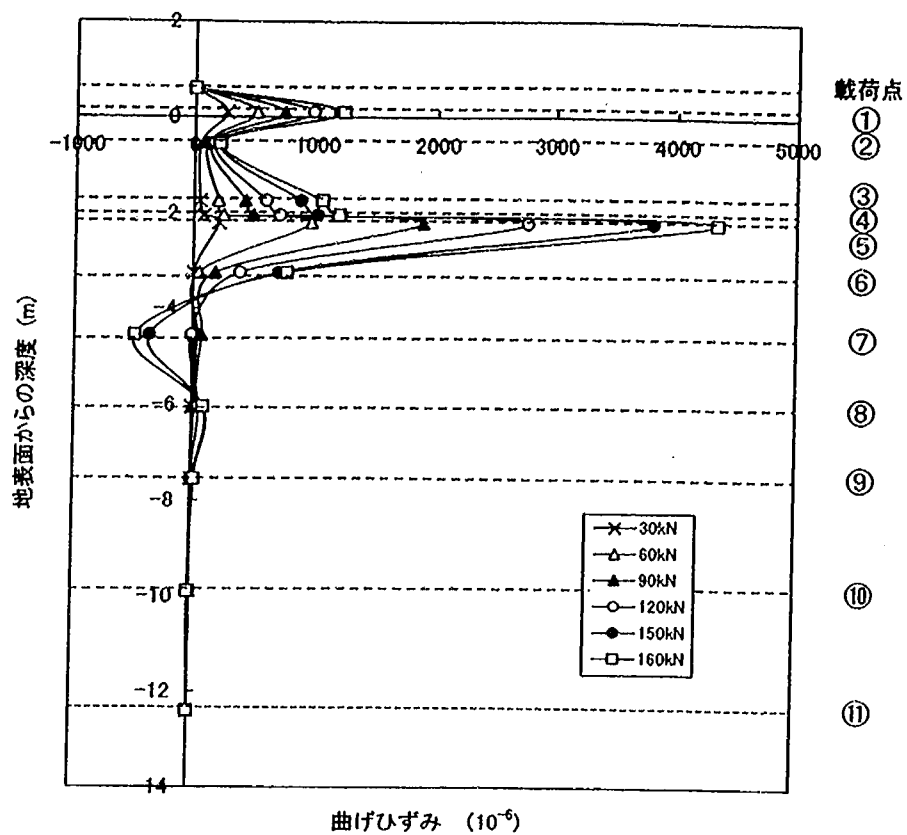


図-7.4.4 杭体曲げひずみ分布（正方向載荷時）

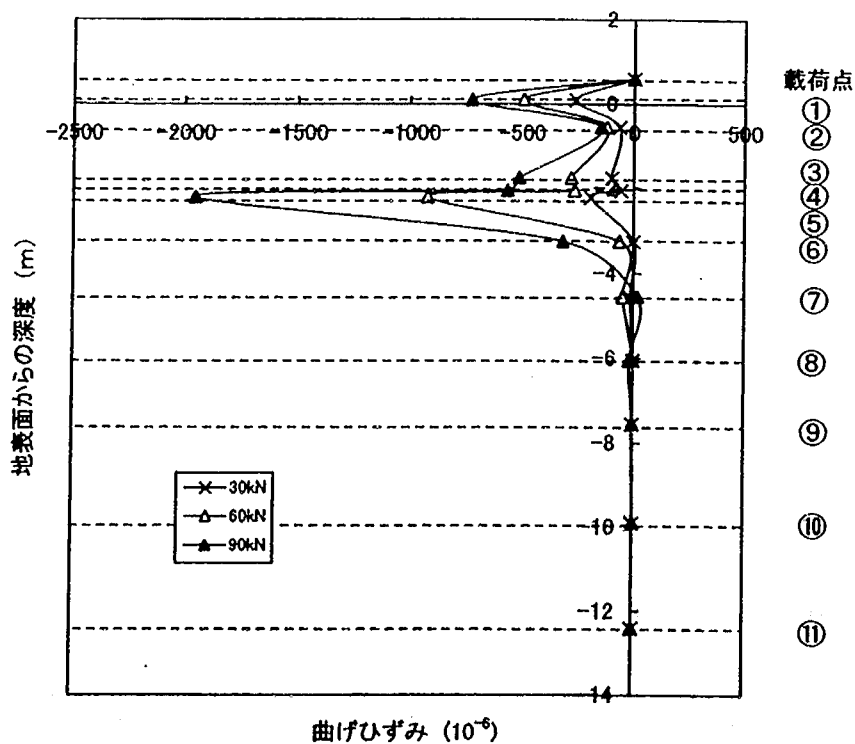


図-7.4.5 杭体曲げひずみ分布（負方向載荷時）

7.4.4 静的非線形解析との比較

(1) 解析ケース

マイクロパイルのような小口径で複合構造の杭と、道路橋の現行設計手法との整合性を確認するため、単杭の静的非線形解析を行った。ここで、地盤は完全弾塑性型とし、杭体の $M \sim \phi$ 関係は別途実施されたマイクロパイルの気中実験結果⁴⁾を参考とし、図-7.4.6 に示すものとした。なお、土質定数の設定方法から、解析は2ケース行った。解析ケース1は各土層で実施した三軸圧縮試験および孔内水平載荷試験結果を用い、表-7.4.1、図-7.4.7のように土質定数及び地盤反力度の上限値を設定したものである。また、解析ケース2はこれらの土質試験に加え、連続的な土質データを測定することを目的として実施した、静的コーン貫入試験(CPT試験)結果を用い、表-7.4.2、図-7.4.8のように土質定数及び地盤反力度の上限値を設定したものである。

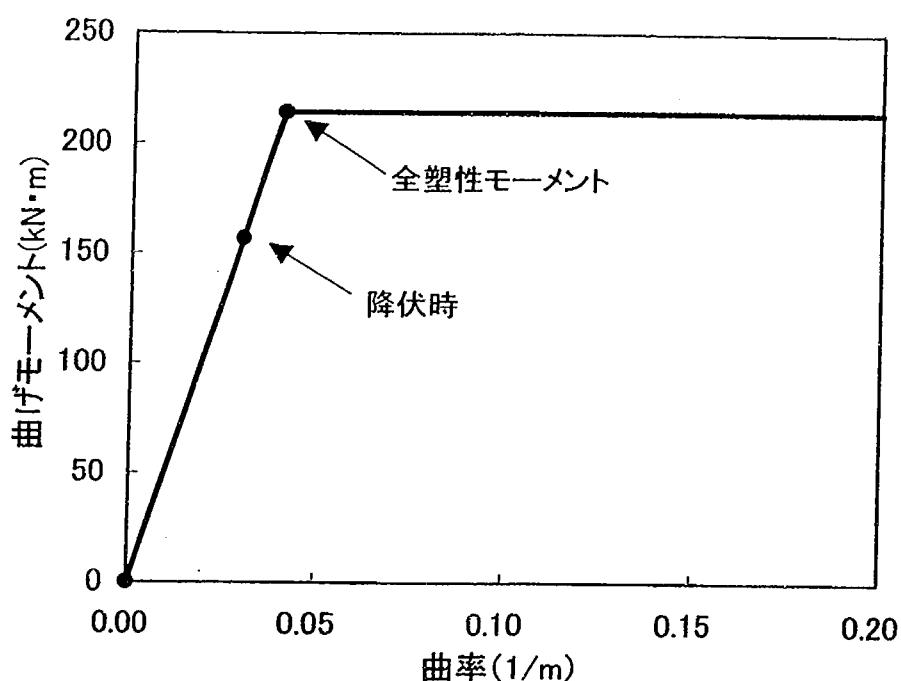


図-7.4.6 杭体の $M - \phi$ 関係

表-7.4.1 解析ケース1の土質定数（三軸試験，孔内水平載荷試験結果）

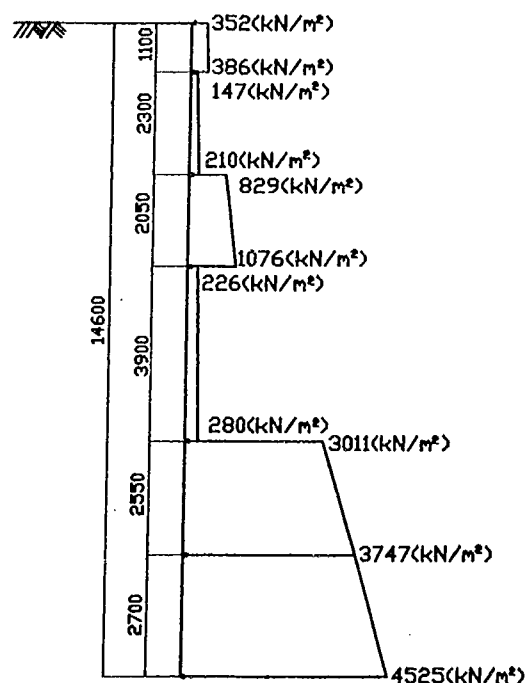
地層番号	種類	層厚 (m)	γ_t (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (度)	E _o (kN/m ²)	K _H (kN/m ³)	備考
1	粘性土	1.10	13.53	95	10.1	1,014	8,099	C, ϕ :三軸, E _o :LLT
2	粘性土	2.30	12.04	31	9.7	680	5,453	C, ϕ :三軸, E _o :LLT
3	砂質土	2.05	7.84	13	33.4	2,997	24,055	C, ϕ :三軸, E _o :LLT
4	粘性土	3.90	7.63	36	4.7	2,357	18,923	C, ϕ :三軸, E _o :LLT
5*	砂質土	2.55	9.88	23	42.2	42,000	84,193	C, ϕ :三軸 ²⁾ , E _o :N値換算
6*	砂質土	2.70	9.88	23	42.2	84,000	168,386	C, ϕ :三軸 ²⁾ , E _o :N値換算

*：参考文献²⁾の土質試験結果を参考とした。

表-7.4.2 解析ケース2の土質定数 (CPT 試験結果)

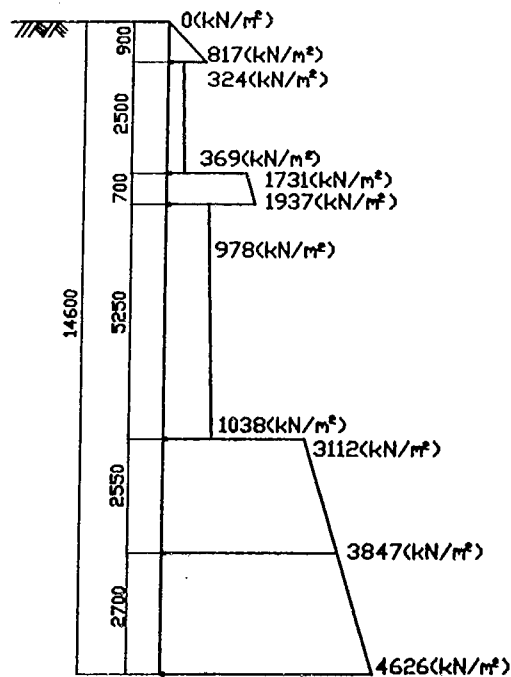
地層 番号	種 類	層厚 (m)	γ_t (kN/m ³)	先端抵抗 q_c (kN/m ²)	平均 N 値	C (kN/m ²)	ϕ (度)	E _o (kN/m ²)	K _H (kN/m ³)
1	砂質土	0.90	18.00	5,000	10	0	48.0	28,000	68,527
2	粘性土	2.50	12.04	1,000	3	100	0.0	8,400	20,558
3	砂質土	0.70	7.84	10,000	33	0	45.0	92,400	226,140
4	粘性土	5.25	7.63	3,000	10	300	0.0	38,400	68,527
5	砂質土	2.55	9.88	—	15	23	42.2	42,000	102,791
6	砂質土	2.70	9.88	—	30	23	42.2	84,000	205,582

N, ϕ , C に関しては q_c 値より換算し、E_o に関しては、E_o=28N で算定した。なお、5、6 層目に関してはケース 1 の値を用いている。



(単位 ; mm)

図-7.4.7 地盤反力度の上限値 (ケース 1)



(単位 ; mm)

図-7.4.8 地盤反力度の上限値 (ケース 2)

(2) 荷重～変位関係

図-7.4.9の水平荷重～杭頭変位曲線には載荷試験結果に加えて解析結果を示した。前述のように、載荷試験では水平荷重 160kN で杭体が降伏していると考えられるが、解析では結果 1 が 130kN、結果 2 が 140kN で杭体が全塑性に至っており、解析結果は実測値に比べて若干安全側の結果となった。また、全体的に解析結果は実測値と比較的よくあっており、マイクロパイルに関しても杭・ラーメンモデルで解析できる可能性を示すものと考えられる。ただ、今回の解析結果をみると解析ケース 1 と解析ケース 2 の変形係数 E_0 がかなり異なった値になっているにもかかわらず、解析結果 1 と解析結果 2 は、比較的一致した結果となっている。これについては、今後更なる検討が必要である。

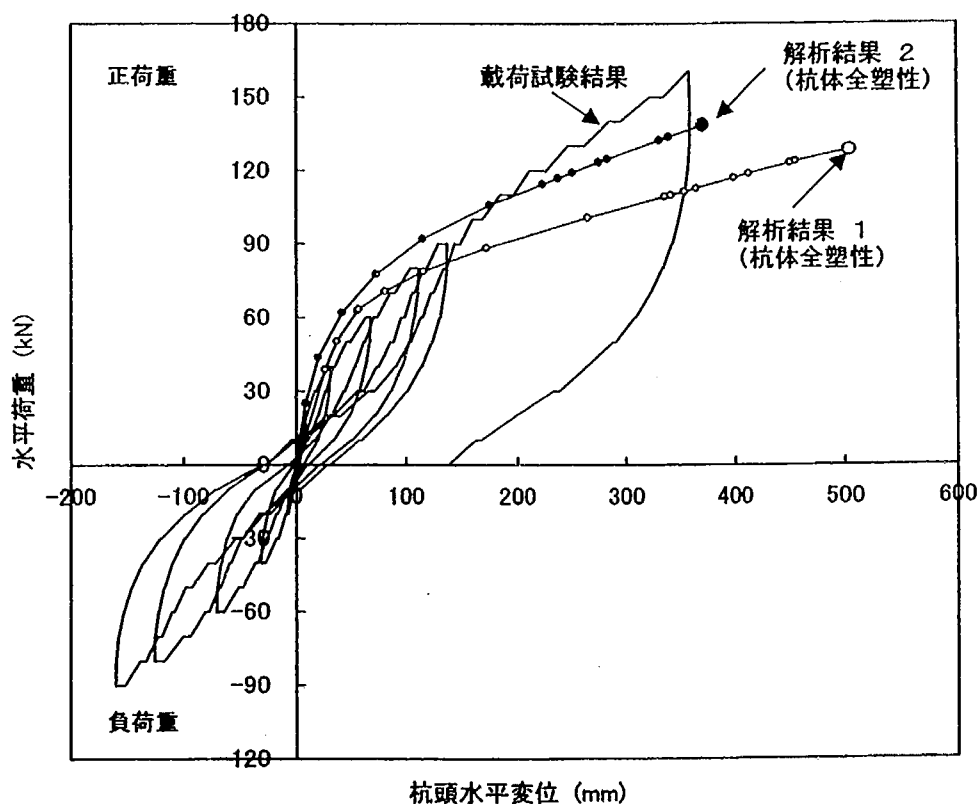


図-7.4.9 解析結果（水平荷重～杭頭水平変位）

(3) 曲げモーメント分布

図-7.4.10 には⑤断面がほぼ降伏したと思われる水平荷重 150kN および 160kN 時の曲げモーメント値をプロットし、両解析ケースにおいて杭体が全塑性モーメントに達した時点の曲げモーメント分布を示した。ここで、載荷試験結果の曲げモーメントは (4) 式を用いて算定した。

$$M = \varepsilon_i \times (EI/y) \quad (4)$$

ε_i : i 断面の最外縁に補正した曲げひずみ (10^{-6})

EI : マイクロパイルの曲げ剛性 (複合体の換算 EI) = $4953\text{kN}\cdot\text{m}^2$

y : 中立軸から鋼管縁までの距離 = 0.089m

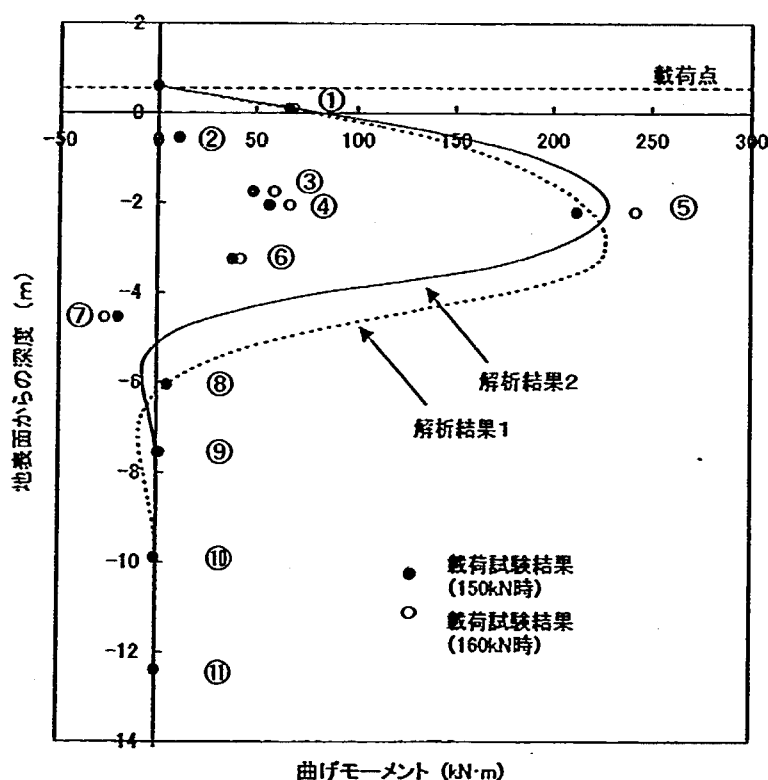


図-7.4.10 解析結果 (モーメント分布)

今回のマイクロパイルの βL は 7.4、杭の特性値である $1/\beta$ は 2.0m であり、載荷試験の最大曲げモーメントの深さとほぼ同じであった。また、この図からは前述したような鋼管継手部のデータを除けば、実測値と解析値は最大曲げモーメント発生深さや分布形状が比較的一致していると解釈できた。しかし、今回は杭体の計測点が少なく、深度方向に連続したデータを得られなかったため、十分な検証結果とはいえない。さらに、今回は一般部の $M \sim \phi$ 関係を用いて解析を行ったが、継手部は断面が一般部より大きいが一体断面ではないため、構造的弱点になる可能性がある。よって、今後は継手部を含んだマイクロパイルの気中曲げ実験などを行い、杭全体の変形特性を検討する必要がある。

8. まとめ

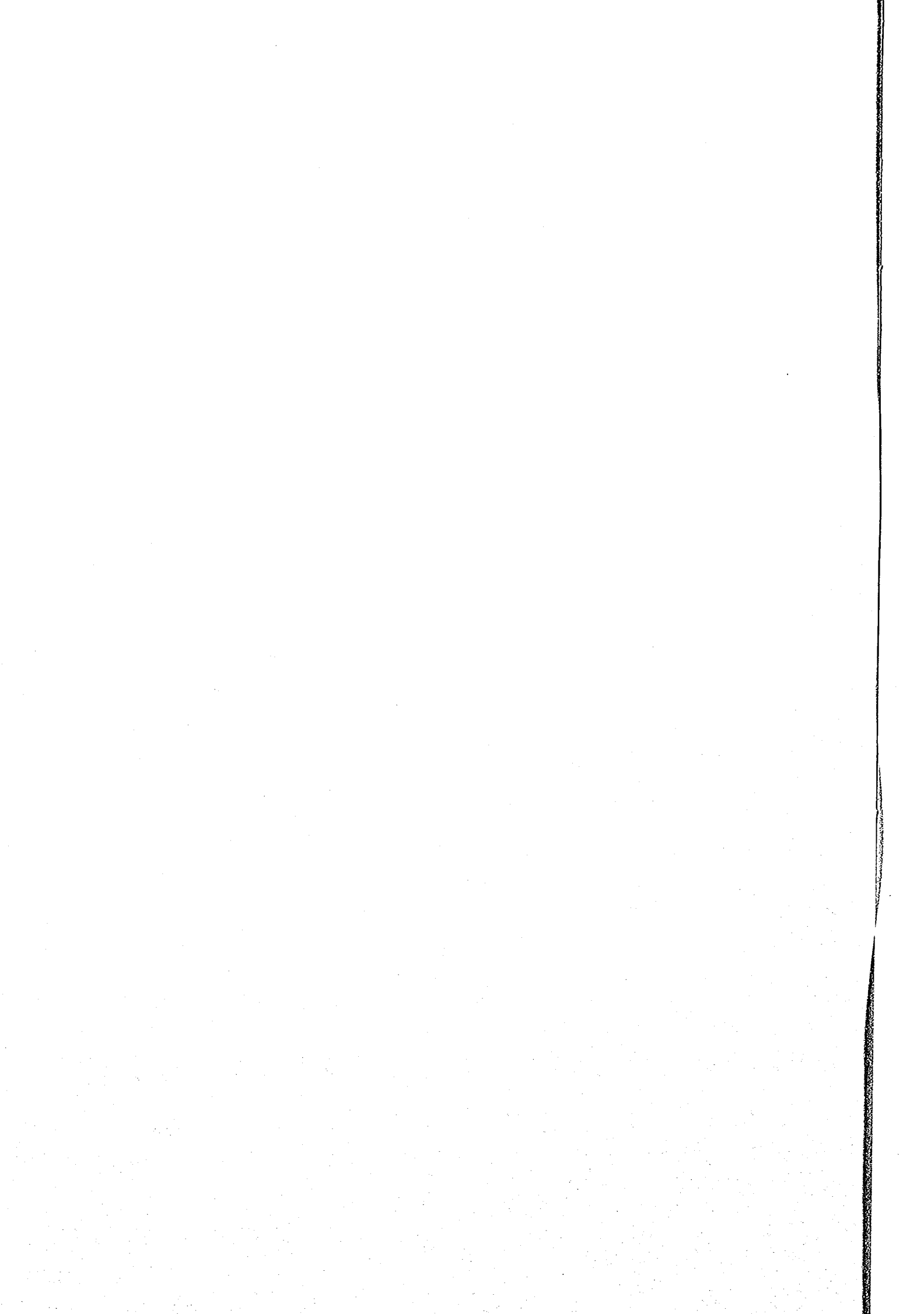
今回は桁下等の低空間を想定したマイクロパイルの試験施工を行い、その施工性からは基礎の耐震補強工法への適用性を確認できた。マイクロパイルを設計上、単杭と考えた場合、鉛直交番載荷試験からは小口径にしては従来の杭と比べて大きな支持力が得られることが分かった。しかし、マイクロパイルの支持力特性は定着部の評価が重要であり、地盤条件などによってその特性は異なると考えられる。よって、地盤条件と有効定着径、最大周面摩擦力度などの関係を、今後のデータ蓄積により定量的に把握していく必要がある。次に、水平交番載荷試験からは、明確な終局状態までは載荷を行えなかったものの、杭体(一般部)の変形特性を適切に評価することによって、荷重～変位関係を現行設計手法で概ね予測できると考えられた。しかし、継手が多い場合の杭体各部に生じる応力分布に関しては十分な検討は行えず、今回のような鋼管継手部の影響をどう評価するかが今後の課題である。また、群杭としての耐震補強効果を考えると、比較的大口径の既設杭とマイクロパイルのような小口径杭の水平抵抗分担や、網目状に打設されたネットワーク効果などの課題が残る。

【参考文献】

- 1) 岸下他：米国における基礎の耐震補強事例について，地震工学研究発表会，1997.
- 2) 相良他：鋼管を用いたマイクロパイルの支持力特性（その3），土木学会第53回年次講演会，1998.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編，1996.
- 4) 斎藤他：鋼管を用いたマイクロパイルの曲げ特性（その1），土木学会第54回年次講演会，1999.

参 考 資 料

1. 土質試験結果	49
2. 施工状況写真	75



1. 土質試験結果

3. で述べた、各試験の詳細結果を表－付 1.1～表－付 1.20 及び図－付 1.1～図－付 1.5 に示す。

試験結果と表又は図の関係は、次の通りである。

試験名	対応する表又は図番号
ボーリング調査	図－付 1.1～図－付 1.3
土の含水比試験	表－付 1.1
土粒子の密度試験	表－付 1.2
土の粒度試験	表－付 1.3～表－付 1.4
土の液性限界・塑性限界試験	表－付 1.5
土の湿潤密度試験	表－付 1.6～表－付 1.7
三軸圧縮試験	表－付 1.8～表－付 1.16
孔内水平載荷試験	表－付 1.17～表－付 1.20
静的コーン貫入試験	図－付 1.4～図－付 1.5

ボーリング名	N o 1		調査位置	南 ル ー プ			北 緯	・ , "	
発注機関	建設省土木研究所			調査期間	1997年12月19日～1997年12月22日			東 経	・ , "
調査業者名				主任技師				ボーリング責任者	
孔口標高		角度	180° 上 90° 下 0°	方向	北 0° 西 270° 東 90° 南 180°	地盤勾配	鉛直 0° 水平 90°	使用機種	
総掘進長	23.45m							試験機	YBM-05
								エンジン	ヤンマー
								ハンマー 落下用具	トンビ
								ポンプ	V-5

掘 進 尺 (m)	層 高 (m)	層 厚 (m)	柱 状 図	土 質 区 分	色 調	相 対 密 度	相 対 稠 度	記 事	孔内 水位 (m) / 測定 月日	標準貫入試験					原位置試験		試料採取		室内 試験 (月 日)
										深 度 (m)	10cmごとの 打撃回数 (n)	打撃回数 / 貫入量 (n/cm)	N 値 — o —	深 度 (m)	試 験 名 および結果	深 度 (m)	試 料 番 号	採取 方 法	
1								表層～50cm付近まで碎石に ローム若干含む。		1.15	3	4	3	10					
2								50cm以下碎石のみで、やや 締まっている。		1.45	10	10	10	30					
3		2.85		埋土 (FI)	暗 灰			2.40m付近より若干の粘性土 を含む。		2.15	4	4	2	10					
4		0.80		ローム (Ln)	黄 褐	中位		含水量少～中位、粘性中位 若干の浮石、砂を含む。		2.47	10	10	12	32					
5		0.35		シルト質細砂 (FS)	黄 褐	緩い		含水量少～中位、粒子均一 雲母片混入し、砂を全体に 含む。		3.15	1	2	2	5					
6								含水量少～中位、粒子不均一 雲母片混入し、部分的に若 干のシルトを含む。		3.46	10	10	11	31					
7								含水量少～中位、粒子不均一 雲母片混入し、部分的に若 干のシルトを含む。		4.13	4	2	2	8					
8		2.15		細砂 (FS)	暗 褐	緩い		色調やや多彩で、5m付近含 水量多い。		4.49	1	2	3	6					
9								浮石混入。色調茶褐色。 含水量中位～やや多い。		5.15	20	12	32	64					
10								粘土質、若干のスコリア 含む。		5.79	1	2	3	6					
11		1.50		凝灰質粘土 (CL)	淡黄灰	中位		色調6.25mまで黄褐色、以下 淡黄色。		6.15	1	2	3	6					
12								含水量中位、粘性中位。 若干のシルトを含む。		6.73	10	14	34	58					
13		1.20		細砂 (FS)	黄 褐	緩い		含水量中位、粘性中位。 粒は不均一。		7.15	2	3	3	8					
14								雲母片浮石等混入。		7.45	10	10	10	30					
15								含水量中位、粘性中位。 粒は不均一。		8.15	2	3	4	9					
16								雲母片浮石等混入。		8.46	10	10	11	31					
17								含水量中位、粘性中位。 粒は不均一。		9.15	1	1	2	4					
18		1.50		シルト (M)	暗 灰	硬い		9.75～10.0m付近砂質土含む。		9.46	10	10	11	31					
19								含水量中位、粒は均一。 細かい雲母片混入。		10.15	2	3	6	11					
20								12m付近含水量中位、粒は 不均一。		10.46	10	10	10	30					
21								雲母片、浮石混入。		11.15	11	16	20	47					
22								14m付近含水量中位、粒は 均一。		11.45	10	10	10	30					
23								雲母片、浮石混入し、やや 締まっている。		12.15	10	10	10	30					
24								16m付近よりφ5～15mmの重 円礫混入し粒は不均一。		12.45	10	10	10	30					
25								16.65～16.85m層層含む。		13.15	8	11	13	32					
26								17m付近含水量少～中位、 粒は細かい雲母片混入。		13.45	10	10	10	30					
27		7.50		細砂 (FS)	暗 灰	密な		浮石を線状に含む。 先端部分小礫を含む中砂。		14.15	17	20	13	50					
28								17.65～17.85m付近粘性土を 含む。		14.40	10	10	5	25					
29								含水量少～中位、粒は均一 な雲母片混入。		15.15	17	17	16	50					
30								先端部分シルト含む。		15.44	10	10	9	29					
31								18.90～19.05m付近貝殻片 含む。		16.16	17	16	12	45					
32										16.46	10	10	10	30					
33										17.15	11	16	18	45					
34										17.45	10	10	10	30					
35										18.15	6	5	6	17					
36										18.45	10	10	10	30					
37										19.15	15	14	7	36					
38										19.45	10	10	10	30					
39										20.15	9	9	17	35					
40										20.45	10	10	10	30					
41		3.30		細砂 (FS)	暗 灰	密な		含水量中位、粒は均一。 雲母片、貝殻片混入。		21.15	10	15	12	37					
42								シルトを帯状に含む。		21.45	10	10	10	30					
43								22m付近砂層中に貝殻片を含 む。		22.15	3	4	5	12					
44								全体的に砂とシルトの互層 含水量中位、粒は均一な 雲母片混入。		22.45	10	10	10	30					
45		2.30		シルト混り細砂 (FS-H)	暗 灰	中位		シルト不規則に混入し、混 入量増える。		23.15	4	6	9	19					
46										23.45	10	10	10	30					

図-付 1.1 鉛直交番載荷試験近傍ボーリング柱状図

調査名

事業・工事名

ボーリングNo.

ボーリング名	1		調査位置	茨城県つくば市旭1. 建設省土木技術研究所		シートNo.		
発注機関			調査期間	平成11年 1月 6日 ~ 平成11年 1月 7日		北緯	° / ' "	
調査業者名			主任技師			東経	° / ' "	
孔口標高	m	角	180° 上 90° 下 0°	方	北 0° 西 270° 東 90° 南 180°	地盤勾配	水平 0°	使用機種
総掘進長	16.25m		エンジン	東邦製 DO-C		ハンマー 種下用具	トンビ	
			エンジン	ヤンマー製 NF-10		ポンプ	カノー製 V-6	

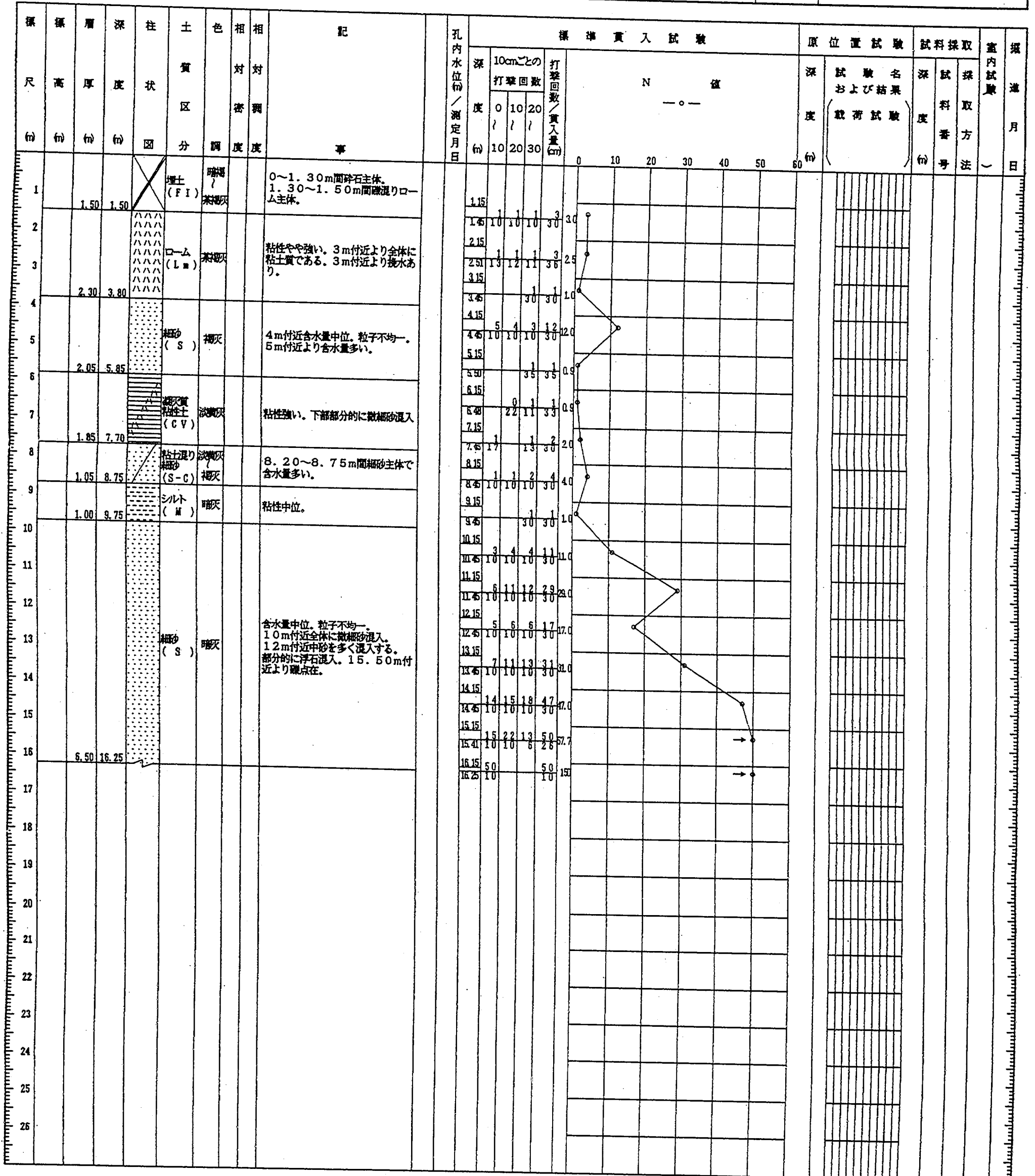


図-付 1.2 水平交番載荷試験近傍ボーリング柱状図 (No. 1)

調査名

事業・工事名

ボーリングNo.

ボーリング名	2	調査位置	茨城県つくば市旭1, 建設省土木技術研究所	シートNo.	
発注機関		調査期間	平成11年 1月 7日 ~ 平成11年 1月 8日	北緯	° ' "
調査業者名		主任技師		東経	° ' "
孔口標高	m	現場代理人	コ ア 鑑定者	ボーリング責任者	
総掘進長	16.31m	試験機	東邦製 D0-C	ハンマー	トンビ
		エンジン	ヤンマー製 NF-10	ポンプ	カノー製 V-6

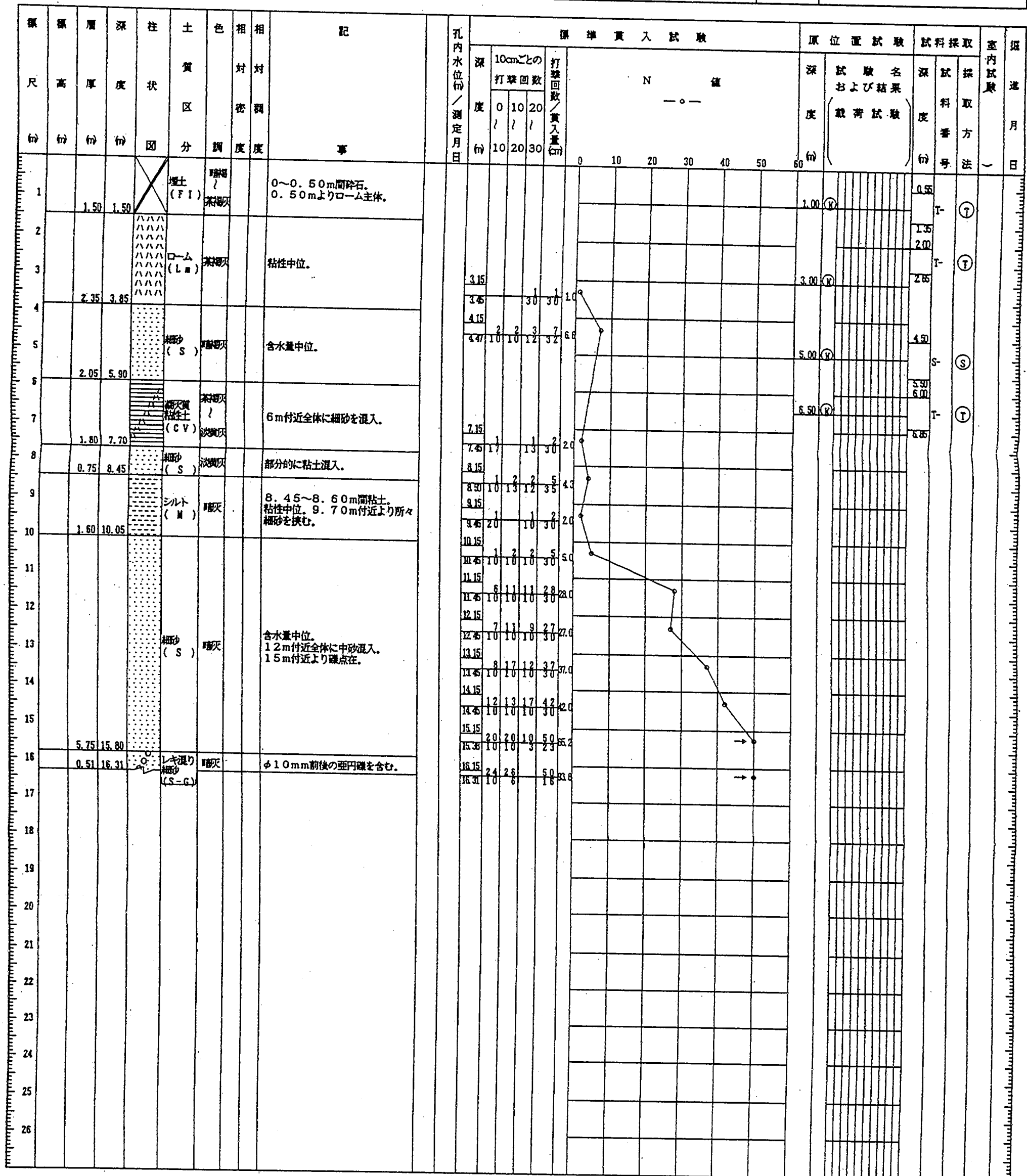


図-付 1.3 水平交番載荷試験近傍ボーリング柱状図 (No. 2)

表-付 1.1 土の含水比試験結果

JIS A 1203 JGS T 121		土の含水比試験					
調査件名		試験年月日 平成11年 1月14日					
		試験者					
試料番号(深さ)	0.55 (m) ~ 1.35 (m)			2.00 (m) ~ 2.65 (m)			
容器 No	91	92	93	94	95	96	
m_a g	34.24	38.72	41.64	29.75	30.80	33.84	
m_b g	18.75	21.20	22.68	12.55	12.95	14.24	
m_c g	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	
w %	84.97	84.72	85.56	142.98	143.60	142.86	
平均値 w %	85.1			143.1			
特記事項							
試料番号(深さ)	4.50 (m) ~ 5.50 (m)			6.00 (m) ~ 6.85 (m)			
容器 No	97	98	99	100	101	102	
m_a g	45.74	48.95	49.07	49.12	43.39	35.33	
m_b g	32.14	34.34	34.84	32.88	28.74	23.70	
m_c g	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	
w %	43.01	43.20	41.46	50.19	51.91	50.17	
平均値 w %	42.6			50.8			
特記事項							
試料番号(深さ)							
容器 No							
m_a g							
m_b g							
m_c g							
w %							
平均値 w %							
特記事項							
試料番号(深さ)							
容器 No							
m_a g							
m_b g							
m_c g							
w %							
平均値 w %							
特記事項							
試料番号(深さ)							
容器 No							
m_a g							
m_b g							
m_c g							
w %							
平均値 w %							
特記事項							

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100$$

m_a : (試料+容器)質量
 m_b : (炉乾燥試料+容器)質量
 m_c : 容器質量

表一付 1.2 土粒子の密度試験結果

JIS A 1202 JGS T 111		土 粒 子 の 密 度 試 験 (測 定)					
調査件名		試験年月日 平成11年 1月14日					
		試 験 者					
試 料 番 号 (深 さ)		0.55 (m) ~ 1.35 (m)			2.00 (m) ~ 2.65 (m)		
ピクノメーター No		211	212	213	214	215	216
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g		185.728	187.547	184.757	180.863	187.613	169.793
m_b をはかったときの内容物の温度 T °C		18	18	18	18	18	18
T °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm ³		0.9986	0.9986	0.9986	0.9986	0.9986	0.9986
温度 T °Cの蒸留水を満たしたときの (蒸留水+ピクノメーター)質量 m_a g		179.865	182.772	181.696	176.039	183.836	167.526
試 料 の 炉乾燥質量	容 器 No	211	212	213	214	215	216
	(炉乾燥試料+容器)質量 g	88.593	94.637	88.558	80.578	92.777	63.231
	容 器 質 量 g	79.367	87.134	83.750	73.156	86.942	59.737
	m_s g	9.226	7.503	4.808	7.422	5.835	3.494
土 粒 子 の 密 度 ρ_s g/cm ³		2.740	2.746	2.749	2.853	2.831	2.845
平 均 値 ρ_s g/cm ³		2.745			2.843		
試 料 番 号 (深 さ)		4.50 (m) ~ 5.50 (m)			6.00 (m) ~ 6.85 (m)		
ピクノメーター No		217	218	219	220	221	222
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g		188.063	189.548	181.852	186.079	174.277	180.215
m_b をはかったときの内容物の温度 T °C		18	18	18	18	18	18
T °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm ³		0.9986	0.9986	0.9986	0.9986	0.9986	0.9986
温度 T °Cの蒸留水を満たしたときの (蒸留水+ピクノメーター)質量 m_a g		176.688	179.094	171.463	181.266	167.037	172.311
試 料 の 炉乾燥質量	容 器 No	217	218	219	220	221	222
	(炉乾燥試料+容器)質量 g	94.253	96.063	82.904	89.829	69.288	83.557
	容 器 質 量 g	76.227	79.474	66.439	82.082	57.667	70.883
	m_s g	18.026	16.589	16.465	7.747	11.621	12.674
土 粒 子 の 密 度 ρ_s g/cm ³		2.706	2.700	2.706	2.637	2.649	2.653
平 均 値 ρ_s g/cm ³		2.704			2.646		
試 料 番 号 (深 さ)							
ピクノメーター No							
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g							
m_b をはかったときの内容物の温度 T °C							
T °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm ³							
温度 T °Cの蒸留水を満たしたときの (蒸留水+ピクノメーター)質量 m_a g							
試 料 の 炉乾燥質量	容 器 No						
	(炉乾燥試料+容器)質量 g						
	容 器 質 量 g						
	m_s g						
土 粒 子 の 密 度 ρ_s g/cm ³							
平 均 値 ρ_s g/cm ³							
特記事項							

1) ピクノメーターの検定結果から求める。

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_s + (m_a - m_b)} \rho_w(T)$$

表-付 1.3 土の粒度試験結果 (その1)

JIS A 1204 JGS T 131		土の粒度試験 (粒径加積曲線)					
調査件名		試験年月日 平成11年 1月14日				試験者	
試料番号 (深さ)	0.55 (mm) ~ 1.35 (mm)	2.00 (mm) ~ 2.65 (mm)	試料番号 (深さ)	0.55 (mm) ~ 1.35 (mm)	2.00 (mm) ~ 2.65 (mm)		
ふるい分け	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %	粗 礫 分 %	0	0
	75		75		中 礫 分 %	0	0
	53		53		細 礫 分 %	0	0
	37.5		37.5		粗 砂 分 %	4	1
	26.5		26.5		細 砂 分 %	25	5
	19		19		シルト分 %	46	41
	9.5		9.5		粘土分 %	25	53
	4.75		4.75		2mmより通過質量百分率 %	100	100
	2	100.0	2		0.425mmより通過質量百分率 %	96	99
	0.85	98.9	0.85	100.0	0.075mmより通過質量百分率 %	71	94
沈降分折	0.425	96.5	0.425	99.3	最大粒径 mm	2.00	0.850
	0.250	89.0	0.250	98.2	60 % 粒径 D_{60} mm	0.0353	0.00743
	0.106	73.7	0.106	95.2	50 % 粒径 D_{50} mm	0.0215	0.00427
	0.075	71.3	0.075	94.5	30 % 粒径 D_{30} mm	0.00658	0.00122
	0.0541	66.2	0.0525	92.1	10 % 粒径 D_{10} mm	0.00131	—
	0.0385	61.7	0.0372	89.7	均等係数 U_c	27.0	—
	0.0246	52.5	0.0238	82.6	曲率係数 U'_c	0.941	—
	0.0144	43.4	0.0139	73.2	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.745	2.843
	0.0102	38.8	0.00992	66.1	使用した分散剤	ヘキサメタリン酸 ナトリウム 10 ml	ヘキサメタリン酸 ナトリウム 10 ml
	0.00731	32.0	0.00708	59.0	溶液濃度, 溶液添加量		
沈降分折	0.00370	20.6	0.00359	47.2			
	0.00153	11.4	0.00149	33.0	記号	-O-	-x-

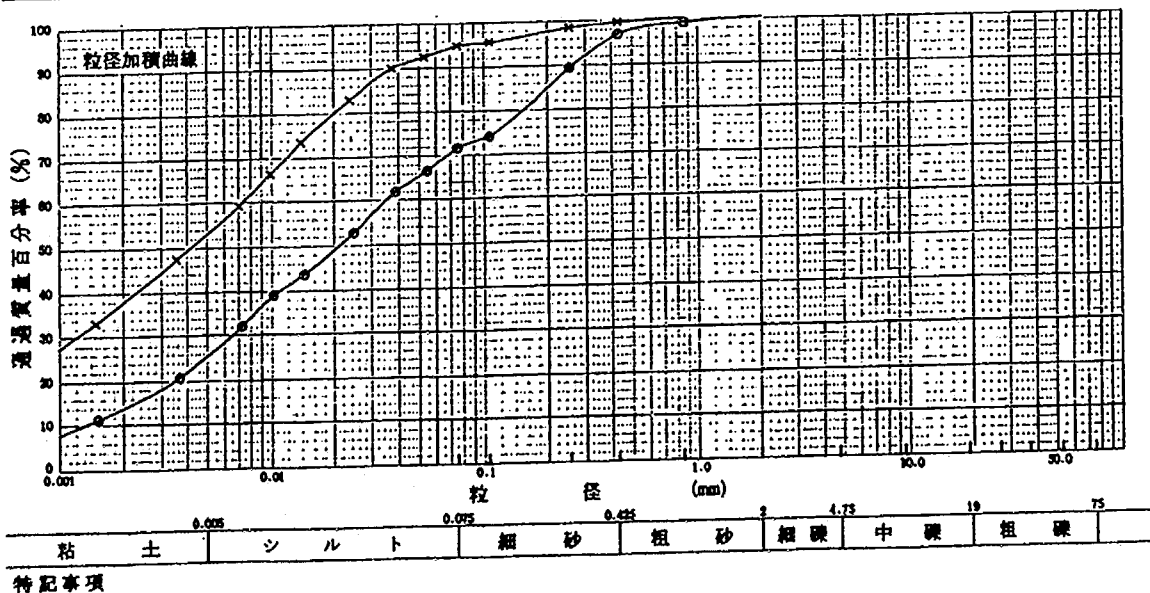
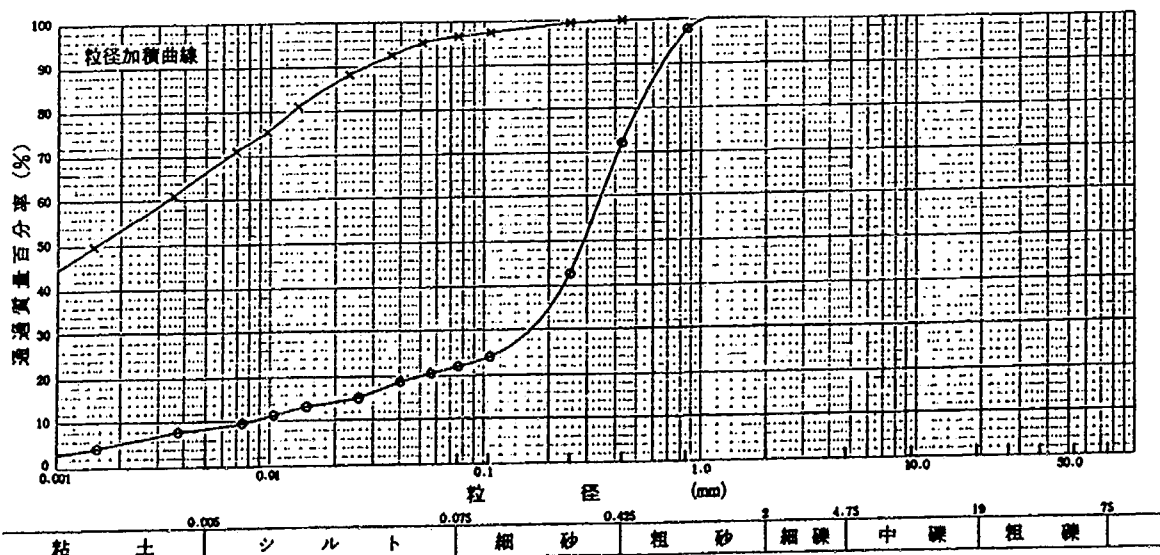


表-付 1.4 土の粒度試験結果 (その2)

JIS A 1204 JGS T 131		土 の 粒 度 試 験 (粒径加積曲線)					
調査件名		試験年月日		平成11年 1月14日			
		試験者					
試料番号 (深さ)	4.50 (mm) ~ 5.50 (mm)		6.00 (mm) ~ 6.85 (mm)		試 料 番 号 (深さ)	4.50 (mm) ~ 5.50 (mm)	6.00 (mm) ~ 6.85 (mm)
ふるい	粒 径 mm	通過質量百分率%	粒 径 mm	通過質量百分率%	粗 礫 分 %	0	0
	75		75		中 礫 分 %	0	0
	53		53		細 礫 分 %	0	0
	37.5		37.5		粗 砂 分 %	28	0
	26.5		26.5		細 砂 分 %	50	4
	19		19		シルト 分 %	13	30
	9.5		9.5		粘 土 分 %	9	66
	4.75		4.75		2mmふるい通過質量百分率 %	100	100
	2	100.0	2		0.425mmふるい通過質量百分率 %	72	100
	0.85	97.7	0.85	100.0	0.075mmふるい通過質量百分率 %	22	96
	0.425	71.9	0.425	99.8			
	0.250	42.5	0.250	99.3	最 大 粒 径 mm	2.00	0.850
	0.106	24.1	0.106	97.3	60 % 粒 径 D_{60} mm	0.344	0.00328
	0.075	21.9	0.075	96.5	50 % 粒 径 D_{50} mm	0.288	0.00152
沈 降 分 析	0.0558	20.4	0.0502	95.1	30 % 粒 径 D_{30} mm	0.163	—
	0.0397	18.6	0.0358	92.3	10 % 粒 径 D_{10} mm	0.00782	—
	0.0254	15.1	0.0229	88.0	均 等 係 数 U_c	43.9	—
	0.0147	13.3	0.0135	80.9	曲 率 係 数 U_c'	9.85	—
	0.0105	11.5	0.00966	75.2	土 粒 子 の 密 度 ρ_s g/cm ³	2.704	2.646
	0.00746	9.8	0.00691	71.0	使用した分散剤	ヘキサメタリン酸 ナトリウム 1.0 ml	ヘキサメタリン酸 ナトリウム 1.0 ml
	0.00375	8.0	0.00354	61.0	溶液濃度, 溶液添加量		
	0.00155	4.4	0.00148	49.7			
				記 号	-O-	-x-	



特記事項

表一付 1.5 土の液性限界・塑性限界試験結果

JIS A 1205 JGS T 141	土の液性限界・塑性限界試験 (試験結果)
-------------------------	----------------------

調査件名

試験年月日 平成11年 1月18日

試験者

試料番号(深 さ) 0.55 (m) ~ 1.35 (m)

液性限界試験	塑性限界試験	液性限界 w_L %
落下回数 含水比 w %	含水比 w %	126.4
49 120.8	78.2	塑性限界 w_p %
33 122.7	78.6	78.4
26 125.8	78.4	塑性指数 I_p
22 127.8		48.0
17 129.2		
11 135.3		

試料番号(深 さ) 2.00 (m) ~ 2.65 (m)

液性限界試験	塑性限界試験	液性限界 w_L %
落下回数 含水比 w %	含水比 w %	188.1
47 183.4	98.5	塑性限界 w_p %
37 185.9	98.4	98.7
27 187.3	99.0	塑性指数 I_p
22 188.8		89.4
16 190.6		
12 194.1		

試料番号(深 さ) 4.50 (m) ~ 5.50 (m)

液性限界試験	塑性限界試験	液性限界 w_L %
落下回数 含水比 w %	含水比 w %	NP
		塑性限界 w_p %
		塑性指数 I_p

試料番号(深 さ) 6.00 (m) ~ 6.85 (m)

液性限界試験	塑性限界試験	液性限界 w_L %
落下回数 含水比 w %	含水比 w %	90.6
44 86.1	30.3	塑性限界 w_p %
35 87.7	30.3	30.4
29 88.8	30.6	塑性指数 I_p
23 91.1		60.2
16 94.3		
11 98.0		

特記事項

自然のまま 0.425mm ふるいで裏ごし。

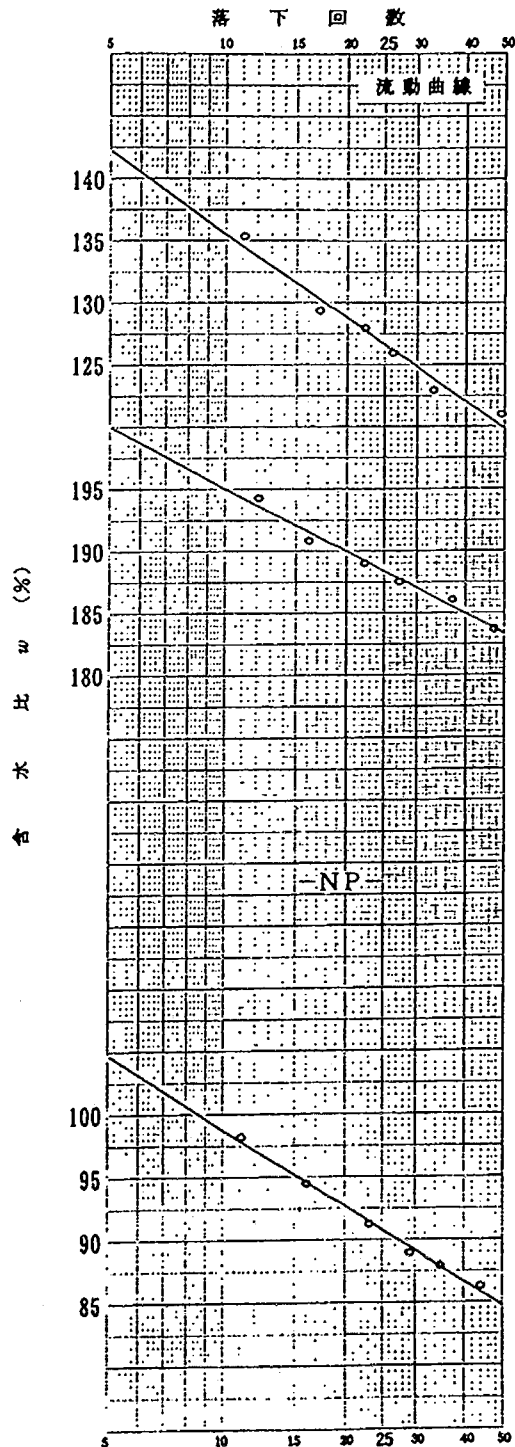


表-付 1.6 土の湿潤密度試験結果 (その1)

JGS T 191

土の湿潤密度試験 (A法: 寸法測定法)

調査件名

試験年月日

平成11年 1月18日

試験者

試料番号 (深さ)			0.55 (m) ~ 1.35 (m)			2.00 (m) ~ 2.65 (m)				
供試体 No.			1	2	3	1	2	3		
供試体の質量 m g			88.20	88.59	99.14	81.68	78.52	83.67		
供試体 径	上 部	cm	3.53	3.50	3.53	3.51	3.50	3.51		
			3.52	3.52	3.52	3.50	3.50	3.49		
	中央部	cm	3.52	3.52	3.52	3.51	3.48	3.50		
			3.51	3.52	3.53	3.51	3.49	3.49		
	下 部	cm	3.51	3.50	3.51	3.50	3.48	3.49		
			3.53	3.51	3.52	3.50	3.50	3.51		
	平均値 D cm		3.52	3.51	3.52	3.51	3.49	3.50		
	高 さ	cm	7.00	7.00	7.00	7.02	7.02	7.02		
			7.00	7.00	7.00	7.02	7.02	7.02		
		平均値 H cm	7.00	7.00	7.00	7.02	7.02	7.02		
体積 $V = (\pi D^2/4) \cdot H$ cm ³			68.12	67.73	68.12	67.93	67.15	67.54		
含 水 比	容 器 No.		1	2	3	1	2	3		
	m_a g		88.20	88.59	99.14	81.68	78.52	83.67		
	m_b g		42.21	42.69	57.78	33.91	32.17	34.48		
	m_c g		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	w %		109.0	107.5	71.6	140.9	144.1	142.7		
	容 器 No.									
	m_a g									
	m_b g									
	m_c g									
	w %									
平 均 値 w %			109.0	107.5	71.6	140.9	144.1	142.7		
湿潤密度 $\rho_t = m/V$ g/cm ³			1.295	1.308	1.455	1.202	1.169	1.239		
乾燥密度 $\rho_d = \rho_t / (1 + w/100)$ g/cm ³			0.620	0.630	0.848	0.499	0.479	0.511		
間隙比 $e = (\rho_s / \rho_d) - 1$			3.430	3.355	2.236	4.695	4.935	4.569		
飽和度 $S_r = w \rho_s / (e \rho_w)$ %			87.2	88.0	87.9	85.3	83.0	88.8		
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³			2.745			2.843				
平 均 値	w %		96.0			142.5				
	ρ_t g/cm ³		1.353			1.204				
	ρ_d g/cm ³		0.699			0.496				
	e		3.007			4.733				
	S_r %		87.7			85.7				

特記事項

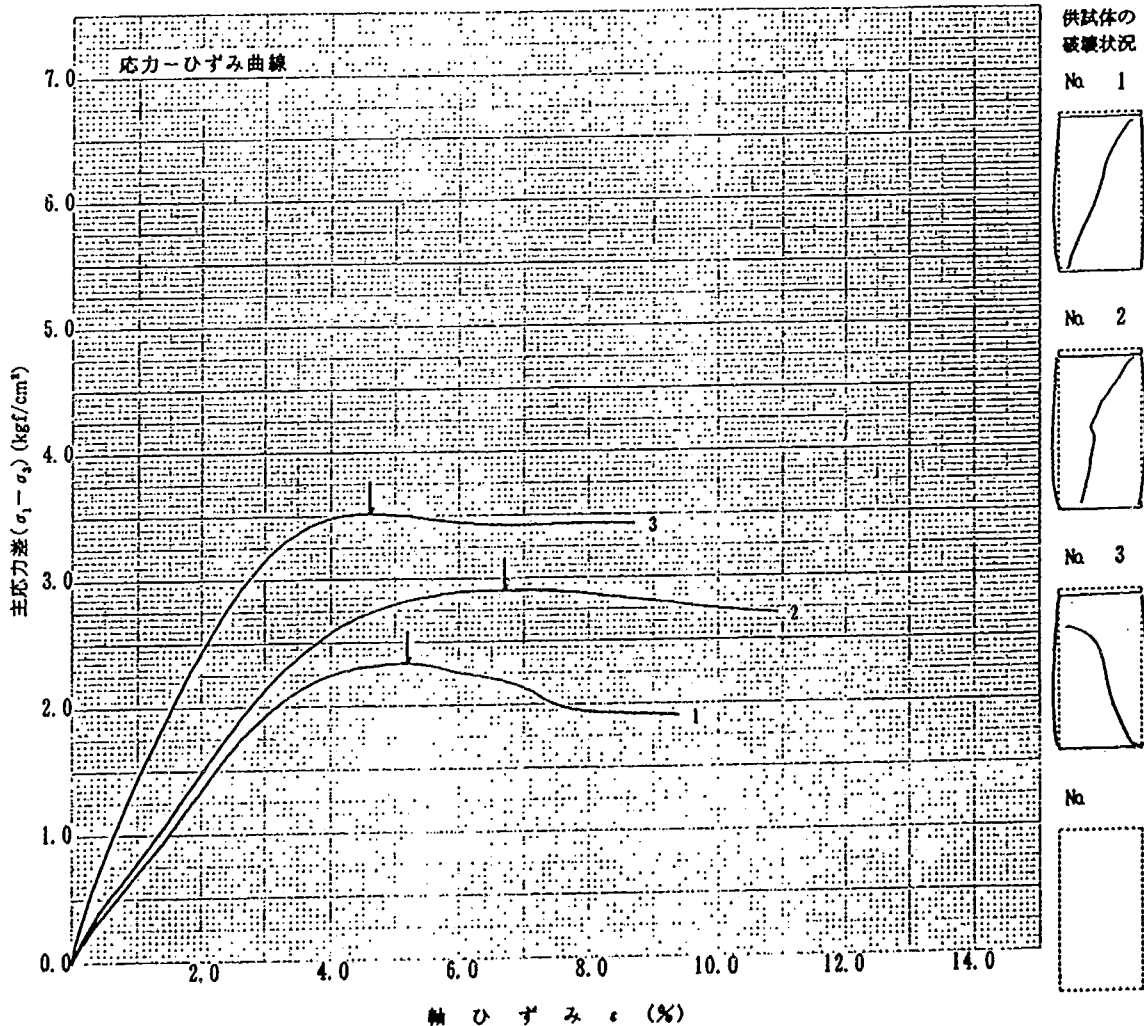
表一付 1.7 土の湿潤密度試験結果（その2）

JGS T 191		土の湿潤密度試験 (A法：寸法測定法)						
調査件名		試験年月日		平成11年 1月18日				
		試験者						
試料番号(深さ)		4.50(m)～ 5.50(m)			6.00(m)～ 6.85(m)			
供試体 No		1	2	3	1	2	3	
供試体の質量 m g		332.34	331.72	325.22	111.29	111.83	115.46	
供試体 径 高さ 体積	上部	cm	4.96	5.00	4.99	3.50	3.52	3.51
			4.96	4.99	4.99	3.51	3.51	3.50
	中央部	cm	4.96	4.98	5.00	3.50	3.50	3.51
			4.97	4.98	4.98	3.51	3.52	3.52
	下部	cm	4.96	4.98	4.99	3.52	3.51	3.52
			4.98	4.99	4.98	3.50	3.51	3.52
	平均値 D cm	4.97	4.99	4.99	3.51	3.51	3.51	
	高さ	cm	10.05	10.04	10.03	7.01	7.02	7.01
			10.05	10.04	10.03	7.01	7.02	7.01
	平均値 H cm	10.05	10.04	10.03	7.01	7.02	7.01	
体積 $V=(\pi D^2/4) \cdot H$ cm ³		194.97	196.35	196.15	67.83	67.93	67.83	
含水比	容器 No	1	2	3	1	2	3	
	m_a g	332.34	331.72	325.22	111.29	111.83	115.46	
	m_b g	223.88	225.12	225.49	70.67	70.87	76.88	
	m_c g	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	w %	48.4	47.4	44.2	57.5	57.8	50.2	
平均値	容器 No							
	m_a g							
	m_b g							
	m_c g							
	w %							
平均値 w %		48.4	47.4	44.2	57.5	57.8	50.2	
湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm ³		1.705	1.689	1.658	1.641	1.646	1.702	
乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm ³		1.148	1.147	1.150	1.042	1.043	1.133	
間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$		1.355	1.359	1.352	1.540	1.536	1.335	
飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %		96.7	94.3	88.4	98.8	99.5	99.5	
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		2.704			2.646			
平均値	w %	46.7			55.2			
	ρ_t g/cm ³	1.684			1.663			
	ρ_d g/cm ³	1.148			1.073			
	e	1.355			1.470			
	S_r %	93.1			99.3			
特記事項								

特記事項

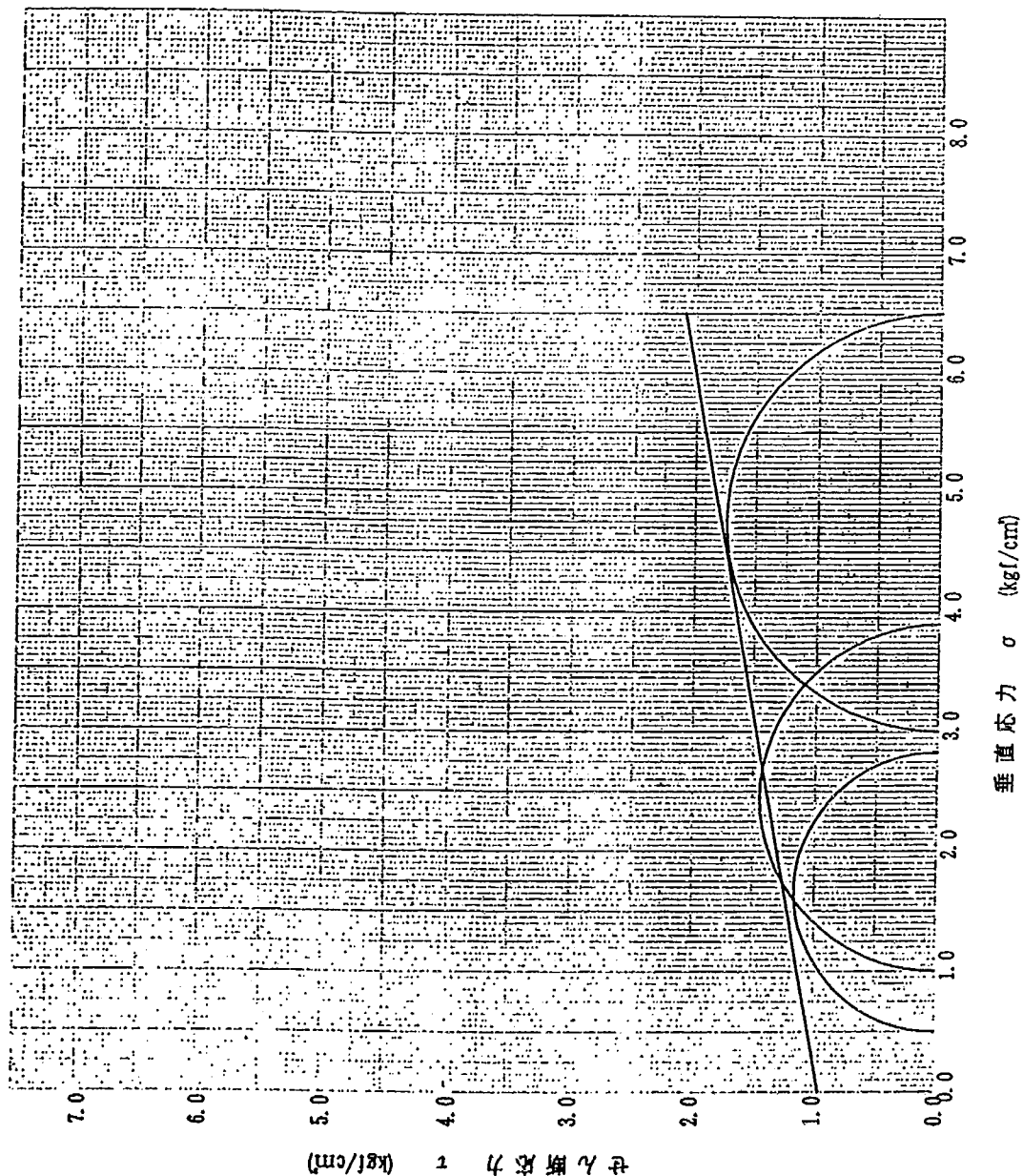
表-付 1.8 三軸圧縮試験結果 (その1)

JGS T 520 521		三軸圧縮試験 [UU] (応力-ひずみ曲線)			
調査件名		試験年月日 平成11年 1月18日			
試験番号 (深さ)		0.55 (m) ~ 1.35 (m)		試験者	
土質名称	火山灰質粘性土	供試体 No.	1	2	3
液性限界 w_L %	126.4	側方向応力 kgf/cm^2	0.50	1.00	3.00
塑性限界 w_p %	78.4	高さ H_0 cm	7.00	7.00	7.00
土粒子の密度 ρ_s g/cm^3	2.745	直径 D_0 cm	3.52	3.51	3.52
荷重計容量 kgf	50	体積 V_0 cm^3	68.12	67.73	68.12
ひずみ速度 %/min	1.00	質量 m_0 g	88.20	88.59	99.14
供試体作製方法	トリマー	含水比 w_0 %	109.0	107.5	71.6
		炉乾燥質量 m_s g	42.21	42.69	57.78
特記事項		湿潤密度 ρ_t g/cm^3	1.295	1.308	1.455
		間隙比 e_0	3.430	3.355	2.236
		飽和度 S_{r0} %	87.2	88.0	87.9
		圧縮強さ $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ kgf/cm^2	2.327	2.895	3.509
		主応力差最大時の軸ひずみ ϵ_f %	5.19	6.69	4.59
		変形係数 E50 kgf/cm^2	67.5	74.2	135



表一付 1.9 三軸圧縮試験結果（その2）

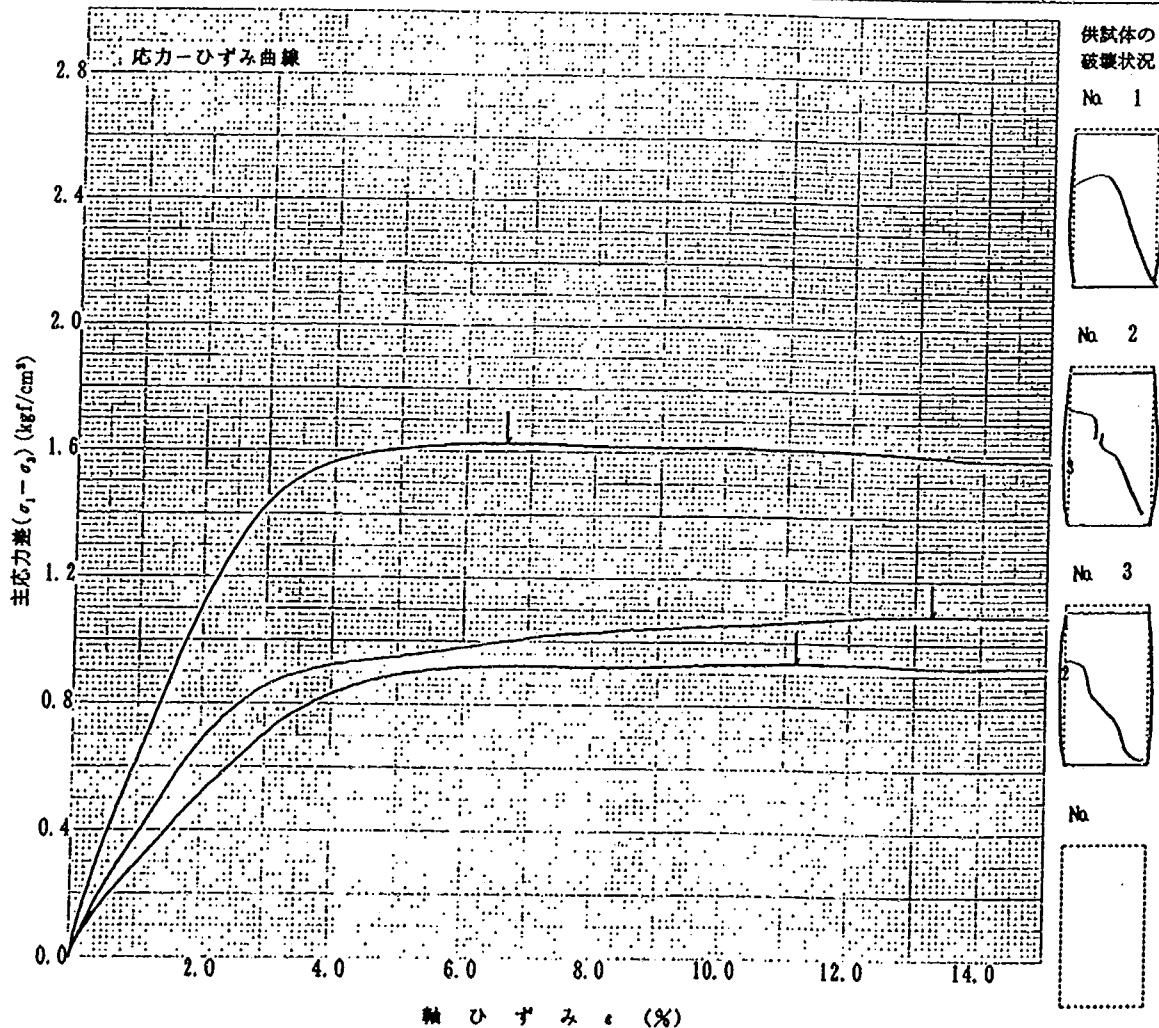
JGS T	三軸圧縮試験[UU, CU, CU, CD] (強度特性)			
調査件名		試験年月日 平成11年 1月18日		
試料番号 (深さ)		0.55(m) ~ 1.35(m) 試験者		
応力範囲	強度定数	全 応 力		有 効 応 力
	c kgf/cm ²	ϕ 度	$\tan \phi$	c' kgf/cm ² ϕ' 度
正 規 圧 密 領 域				
過 圧 密 領 域	0.95	10.1	0.1782	



特記事項

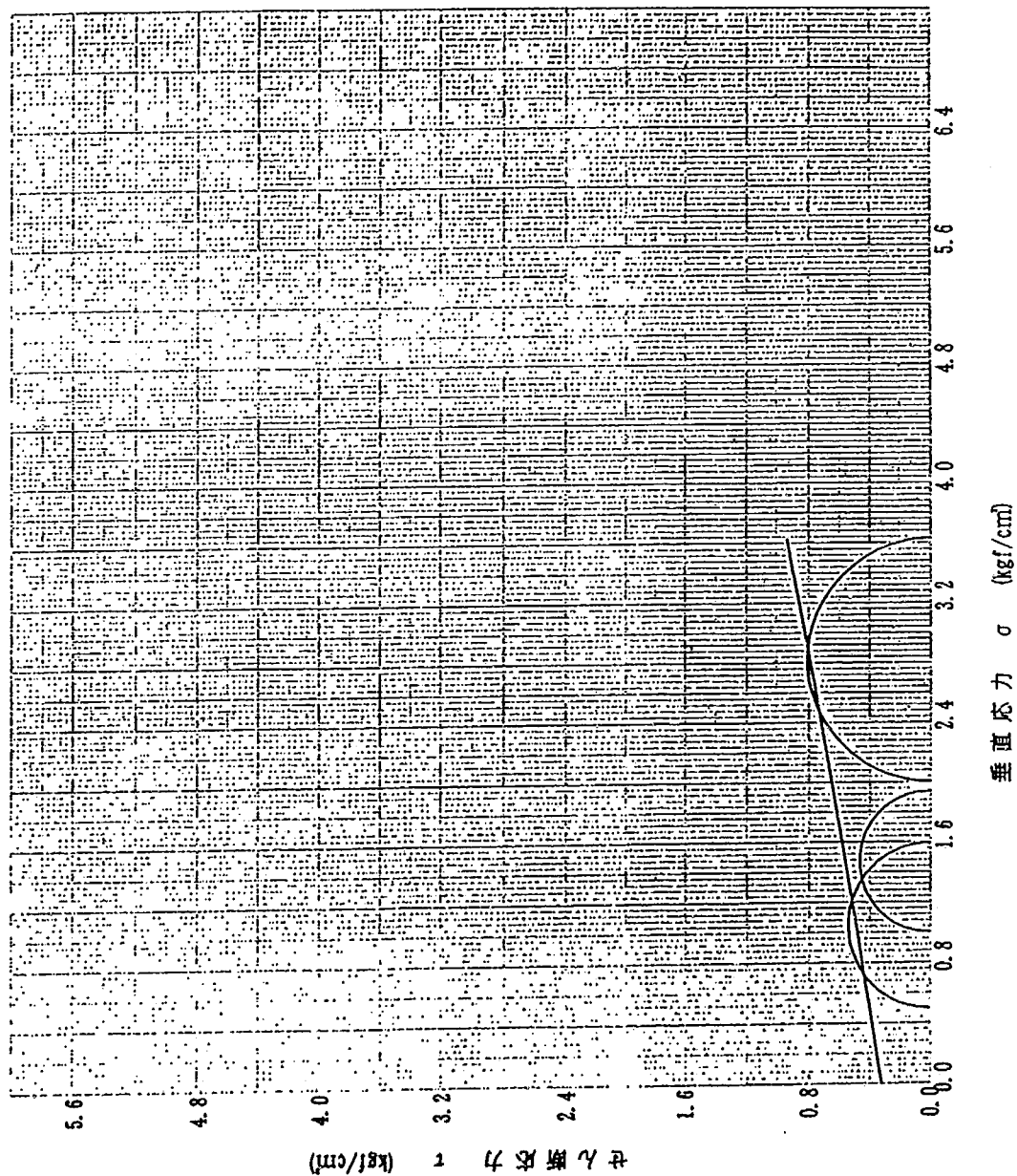
表-付 1.10 三軸圧縮試験結果 (その3)

JGS T 520 521		三軸圧縮試験 [UU] (応力-ひずみ曲線)				
調査件名		試験年月日 平成11年 1月18日				
試料番号 (深さ)		2.00 (m) ~ 2.65 (m)		試験者		
土質名称	大田灰質粘性土	供試体 No.	1	2	3	
液性限界 w_L %	188.1	側方向応力 kgf/cm^2	0.50	1.00	2.00	
塑性限界 w_p %	98.7	高 さ H_0 cm	7.02	7.02	7.02	
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.843	直 径 D_0 cm	3.51	3.49	3.50	
荷重計容量 kgf	50	体 積 V_0 cm ³	67.93	67.15	67.54	
ひずみ速度 %/min	1.00	質 量 m_0 g	81.68	78.52	83.67	
供試体作製方法	トリマー	含 水 比 w_0 %	140.9	144.1	142.7	
		炉乾燥質量 m_s g	33.91	32.17	34.48	
特記事項		湿潤密度 ρ_t g/cm ³	1.202	1.169	1.239	
		間 隙 比 e_0	4.695	4.935	4.569	
		飽 和 度 S_{r0} %	85.3	83.0	88.8	
		圧縮強さ $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ kgf/cm ²	1.087	0.934	1.626	
		主応力差最大時の軸ひずみ ϵ_f %	13.25	11.18	6.62	
		変形係数 E50 kgf/cm ²	36.0	26.4	59.0	



表一付 1.11 三軸圧縮試験結果（その4）

JGS T	三軸圧縮試験[UU, CU, CU, CD] (強度特性)				
調査件名			試験年月日 平成11年 1月18日		
試料番号 (深さ)			2.00 (m) ~ 2.65 (m)		試験者
強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c kgf/cm ²	φ 度	tan φ	c' kgf/cm ²	φ' 度
正 規 圧 密 領 域					
過 圧 密 領 域	0.31	9.7	0.1714		



特記事項

表一付 1.12 三軸圧縮試験結果（その5）

JGS T

三軸圧縮試験[CU, CU, CD](初期状態
圧密量-時間曲線)

調査件名

小口径摩擦杭の支持力特性に関する載荷実験業務

試験年月日

平成11年 1月18日

試料番号(深さ)

4.50(m) ~ 5.50(m)

試験者

土質名称		砂質土	供試体の作製方法	トリマー
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		2.704		
液性限界 w_L %		NP	圧密中の排水方法	上下排水
塑性限界 w_p %				
供試体 No.		1	2	3
セル圧 kgf/cm ²		1.50	2.00	3.00
背圧 u_0 kgf/cm ²		1.00	1.00	1.00
圧密応力 kgf/cm ²		0.50	1.00	2.00
初期状態	高さ H_0 cm	10.05	10.04	10.03
	直径 D_0 cm	4.97	4.99	4.99
	体積 V_0 cm ³	194.97	196.35	196.15
	質量 m_0 g	332.34	331.72	325.22
	湿潤密度 ρ_t g/cm ³	1.705	1.689	1.658
	含水比 w_0 %	48.4	47.4	44.2
	間隙比 e_0	1.355	1.359	1.352
	飽和度 S_{r0} %	96.7	94.3	88.4
圧密後	圧密時間 t_c min	120	120	120
	排水量 ΔV_c cm ³	2.1	3.8	7.8
	圧密後の間隙比 e_c	1.330	1.313	1.259
	炉乾燥質量 m_s g	223.88	225.12	225.49
B値	等方応力減少量 $\Delta\sigma$ kgf/cm ²			
	間隙水圧降下量 Δu kgf/cm ²			
	測定に要した時間 min			
	間隙圧係数 B値			

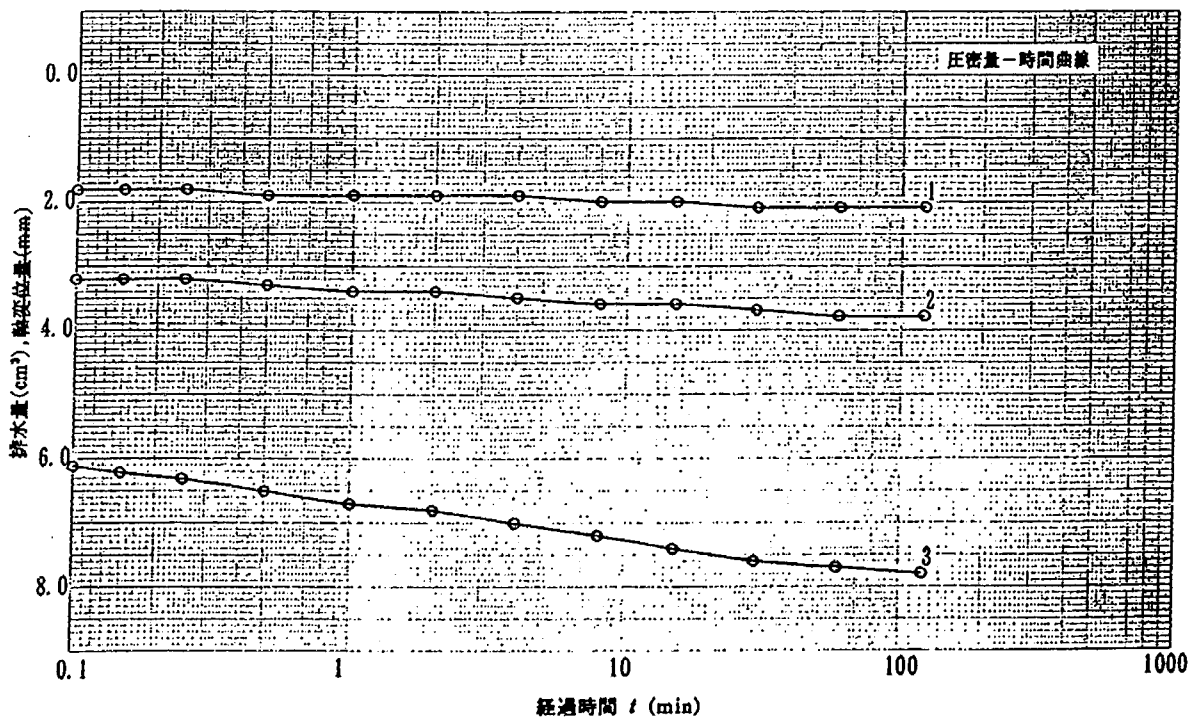
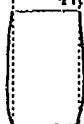
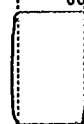
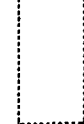


表-付 1.13 三軸圧縮試験結果 (その6)

JGS T	三軸圧縮試験[CU, CU, CD] (応力-ひずみ曲線)					
調査件名		小口径摩擦杭の支持力特性に関する載荷実験業務		試験年月日		平成11年 1月18日
試料番号 (深さ)		4.50 (m) ~ 5.50 (m)		試験者		
土質名称	砂質土	供試体 No.	1	2	3	
荷重計容量 kgf	300	圧密応力 kgf/cm ²	0.50	1.00	2.00	
間隙水圧計容量 kgf/cm ²		圧縮強さ ($\sigma_1 - \sigma_3$) _{max} kgf/cm ²	1.604	3.074	5.335	
ひずみ速度 %/min	0.30	軸ひずみ e_f %	14.89	14.54	15.00	
特記事項		主 応 力 差 最 大 時	間隙水圧 Δu_f kgf/cm ²			
			CU σ'_{3f} kgf/cm ²			
			σ'_{1f} kgf/cm ²			
			CD 体積ひずみ v_f %	2.651	5.164	8.223
			間隙比 e_f	1.268	1.194	1.073
変形係数 E50 kgf/cm ² 供試体の破壊状況			47.3	59.5	68.2	
						

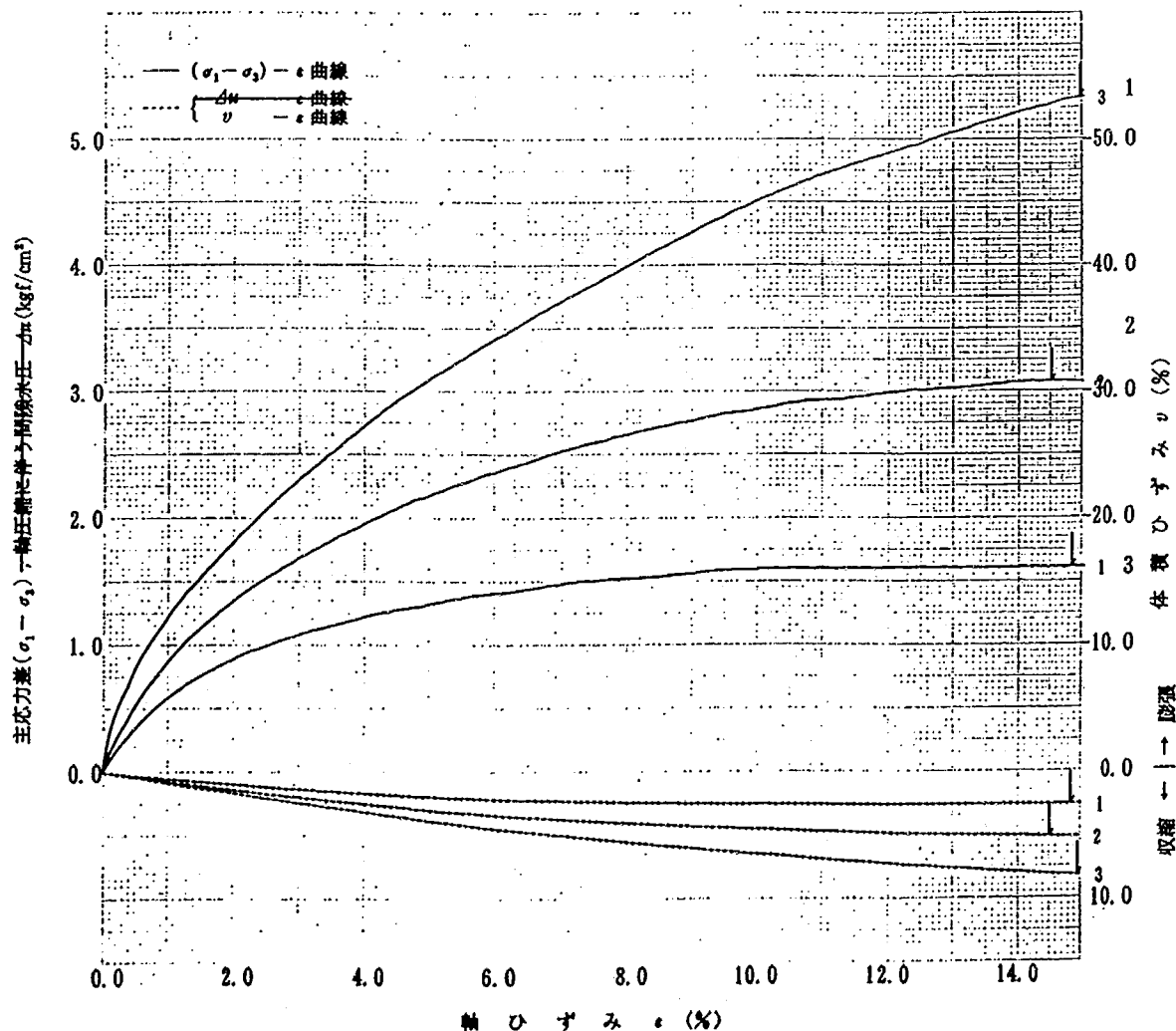
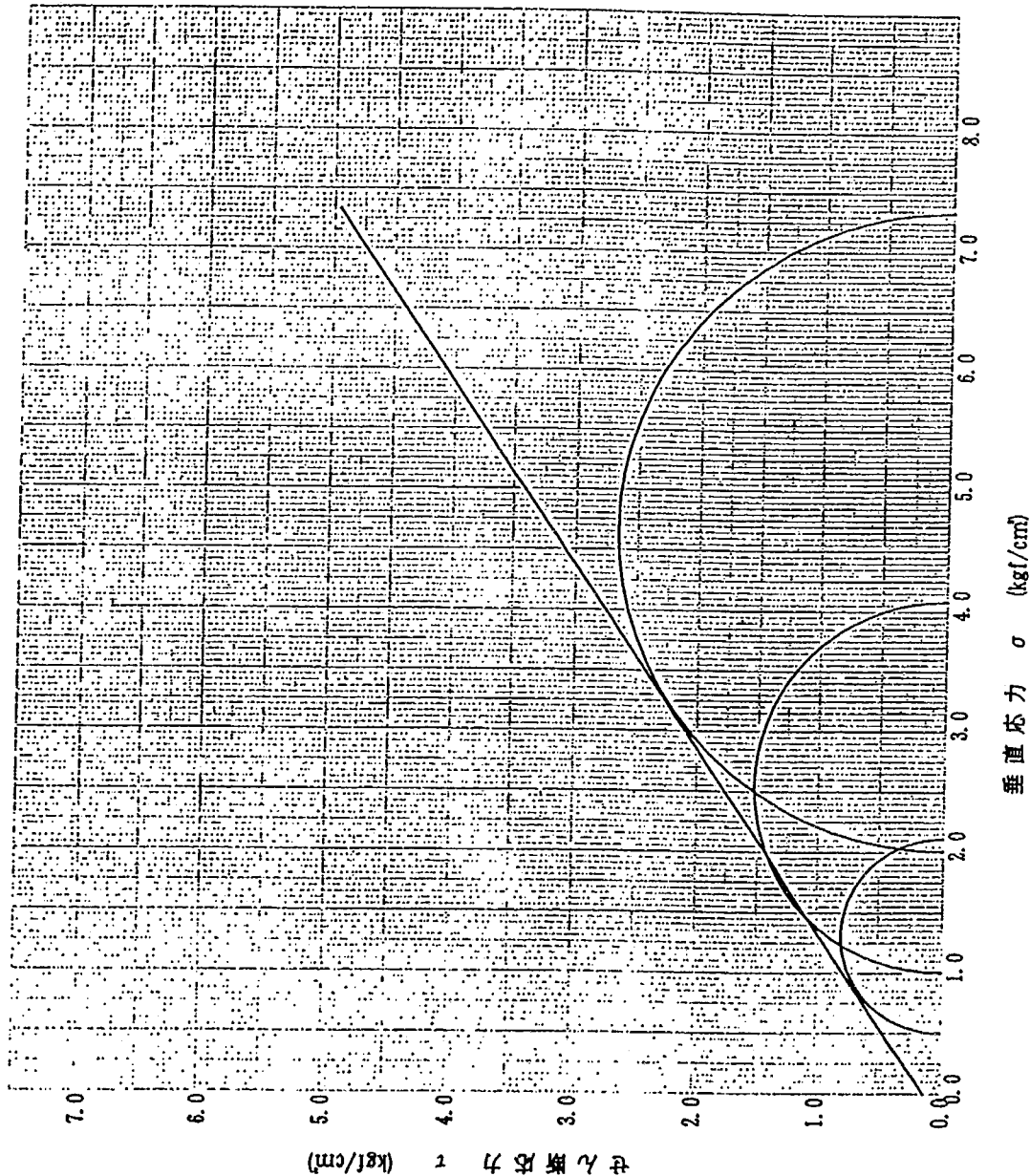


表-付 1.14 三軸圧縮試験結果 (その7)

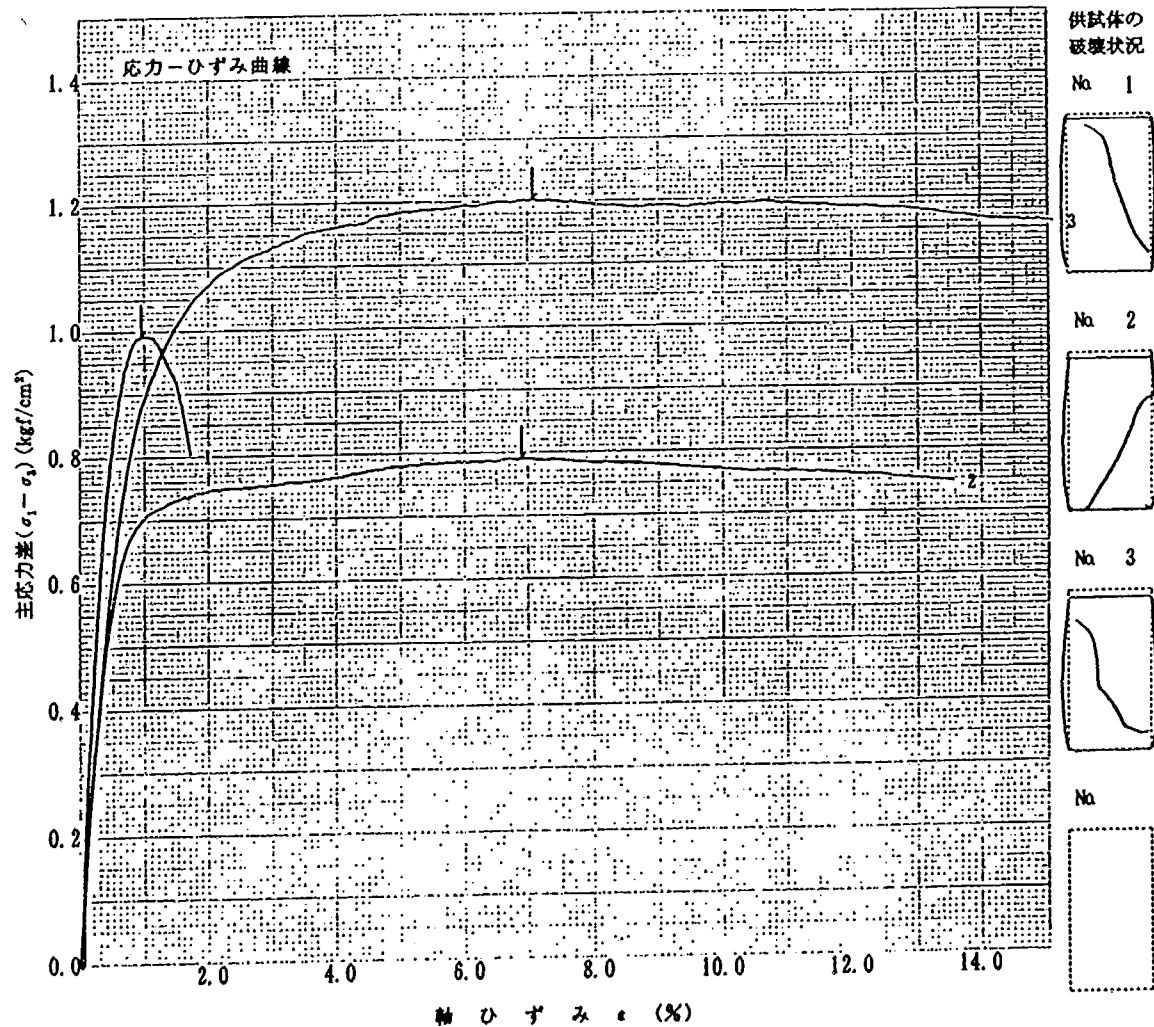
JGS T	三軸圧縮試験[~~UU~~ , ~~CU~~ , ~~CU~~ , CD] (強度特性)					
調査件名			試験年月日		平成11年 1月18日	
試料番号 (深さ)			4.50 (m) ~ 5.50 (m)		試験者	
応力範囲	強度定数	全 応 力			有 効 応 力	
	c kgf/cm ²	φ 度	tan φ		c' kgf/cm ²	φ' 度
正規圧密領域					0.13	33.4
過圧密領域						



特記事項

表-付 1.15 三軸圧縮試験結果 (その8)

JGS T 520 521		三軸圧縮試験 [UU] (応力-ひずみ曲線)			
調査件名		試験年月日		平成11年 1月18日	
試料番号 (深さ)		6.00 (m) ~ 6.85 (m)		試験者	
土質名称	粘土	供試体 No	1	2	3
液性限界 w_L %	90.6	側方向応力 kgf/cm^2	0.50	1.00	2.00
塑性限界 w_p %	30.4	高 さ H_0 cm	7.01	7.02	7.01
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.646	直 径 D_0 cm	3.51	3.51	3.51
荷重計容量 kgf	50	体 積 V_0 cm ³	67.83	67.93	67.83
ひずみ速度 %/min	1.00	質 量 m_0 g	111.29	111.83	115.46
供試体作製方法	トリマー	含 水 比 w_0 %	57.5	57.8	50.2
		炉乾燥質量 m_s g	70.67	70.87	76.88
特記事項		湿潤密度 ρ_t g/cm ³	1.641	1.646	1.702
		間 隙 比 e_0	1.540	1.536	1.335
		飽 和 度 S_{r0} %	98.8	99.5	99.5
		圧縮強さ $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ kgf/cm ²	0.994	0.792	1.205
		主応力差最大時の軸ひずみ ϵ_f %	0.94	6.89	7.06
		変形係数 E50 kgf/cm ²	216	139	126



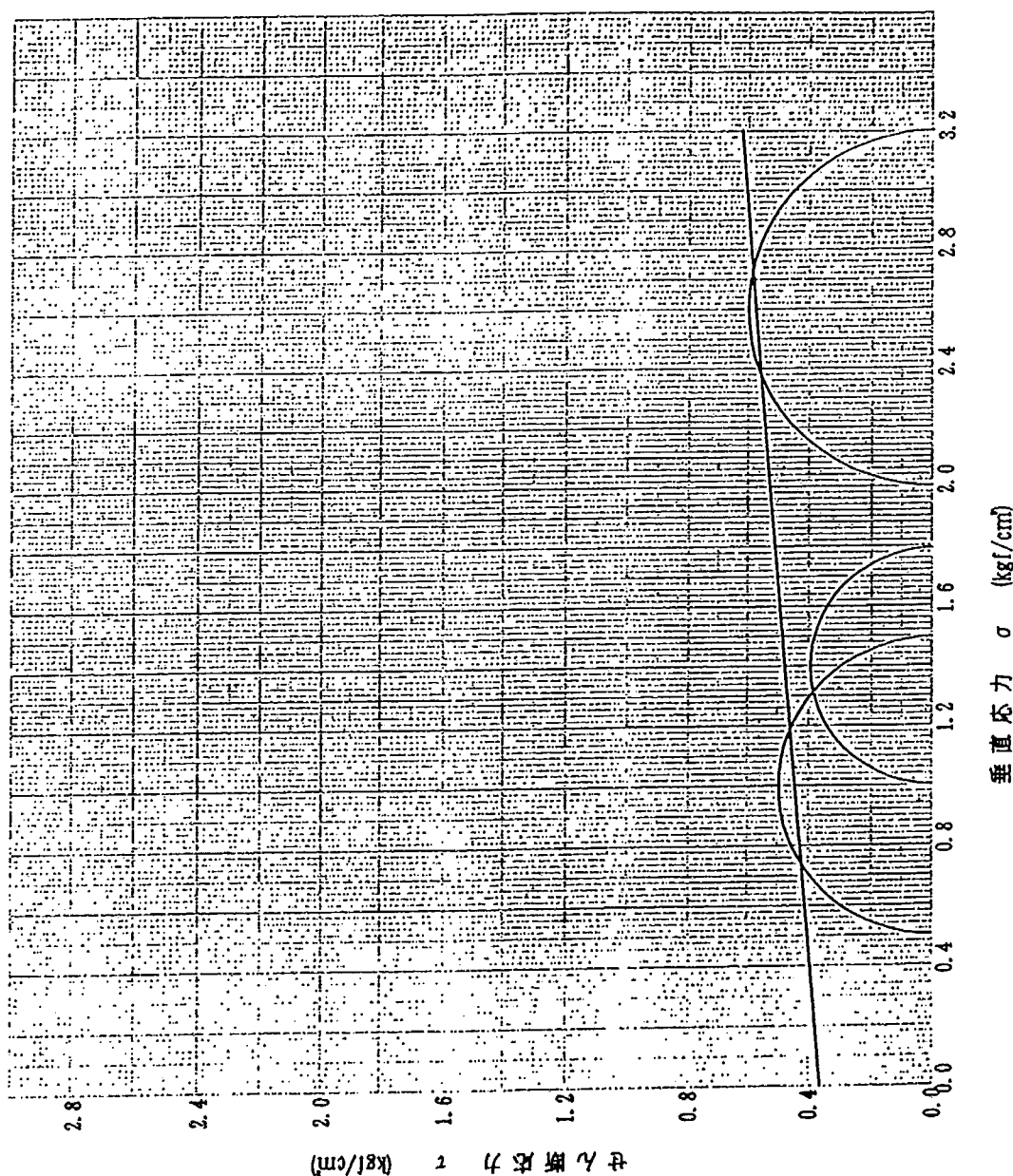
表一付 1.16 三軸圧縮試験結果 (その9)

JGS T	三軸圧縮試験[UU, CU, CU, CD] (強度特性)
-------	-------------------------------

調査件名 _____ 試験年月日 平成11年 1月18日

試料番号 (深さ) 6.00 (m) ~ 6.85 (m) 試験者 _____

強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c kgf/cm ²	ϕ 度	$\tan \phi$	c' kgf/cm ²	ϕ' 度
正規圧密領域					
過圧密領域	0.36	4.7	0.0827		



特記事項 _____

表一付 1.17 孔内水平載荷試験結果 (その 1)

調査名・地点			
試験孔(測点)番号	2K-1	初期スタンドパイプ水位 H0	11.70 (cm)
測定深度(中心深度)	GL.-1.00 (m)	挿入後スタンドパイプ水位 H0'	11.70 (cm)
試験者氏名		初期ゴムチューブ半径	4.0 (cm)
試験年月日	11年1月6日	ゴムチューブ有効長さ	60.0 (cm)
自然水位		容積計内断面積	108.50 (cm ²)
孔内水位		試験方式	等分布荷重方式 (1室型)
タンク高さ	1.00 (m)	ボアソン比	0.30 P _s = 0.03 (kgf/cm ²)

[illegible]

備考：

土質名：埋土

表一付 1.18 孔内水平載荷試験結果 (その2)

調査名・地点			
試験孔(測点)番号	2K-2	初期スタンドパイプ水位 H0	12.70 (cm)
測定深度(中心深度)	GL.-3.00 (m)	挿入後スタンドパイプ水位 H0'	13.00 (cm)
試験者氏名		初期ゴムチューブ半径	4.0 (cm)
試験年月日	11年1月7日	ゴムチューブ有効長さ	60.0 (cm)
自然水位		容積計内断面積	108.50 (cm ²)
孔内水位		試験方式	等分布荷重方式 (1室型)
タンク高さ	1.00 (m)	ポアソン比	0.30 P _s = 0.06 (kgf/cm ²)

[illegible]

備考：

土質名：口一ム

表一付 1.19 孔内水平載荷試験結果 (その3)

調査名・地点			
試験孔(測点)番号	2K-3	初期スタンドパイプ水位 H0	13.00 (cm)
測定深度(中心深度)	GL.-5.00 (m)	挿入後スタンドパイプ水位 H0'	13.10 (cm)
試験者氏名		初期ゴムチューブ半径	4.0 (cm)
試験年月日	11年1月8日	ゴムチューブ有効長さ	60.0 (cm)
自然水位		容積計内断面積	108.50 (cm ²)
孔内水位		試験方式	等分布荷重方式 (1室型)
タンク高さ	1.00 (m)	ポアゾン比	0.30
			P _s = 0.02 (kgf/cm ²)

[illegible]

備考：

土質名：細砂

表一付 1.20 孔内水平載荷試験結果 (その4)

調査名・地点				
試験孔(測点)番号	2K-4	初期スタンドパイプ水位 H0	13.20 (cm)	
測定深度(中心深度)	G.L.-6.50 (m)	挿入後スタンドパイプ水位 H0'	13.30 (cm)	
試験者氏名		初期ゴムチューブ半径	4.0 (cm)	
試験年月日	11年1月8日	ゴムチューブ有効長さ	60.0 (cm)	
自然水位		容積計内断面積	108.50 (cm ²)	
孔内水位		試験方式	等分布荷重方式 (1室型)	
タンク高さ	1.00 (m)	ポアソン比	0.30	P _s = 0.02 (kgf/cm ²)

[illegible]

備考：

土質名：凝灰質粘土
N=2

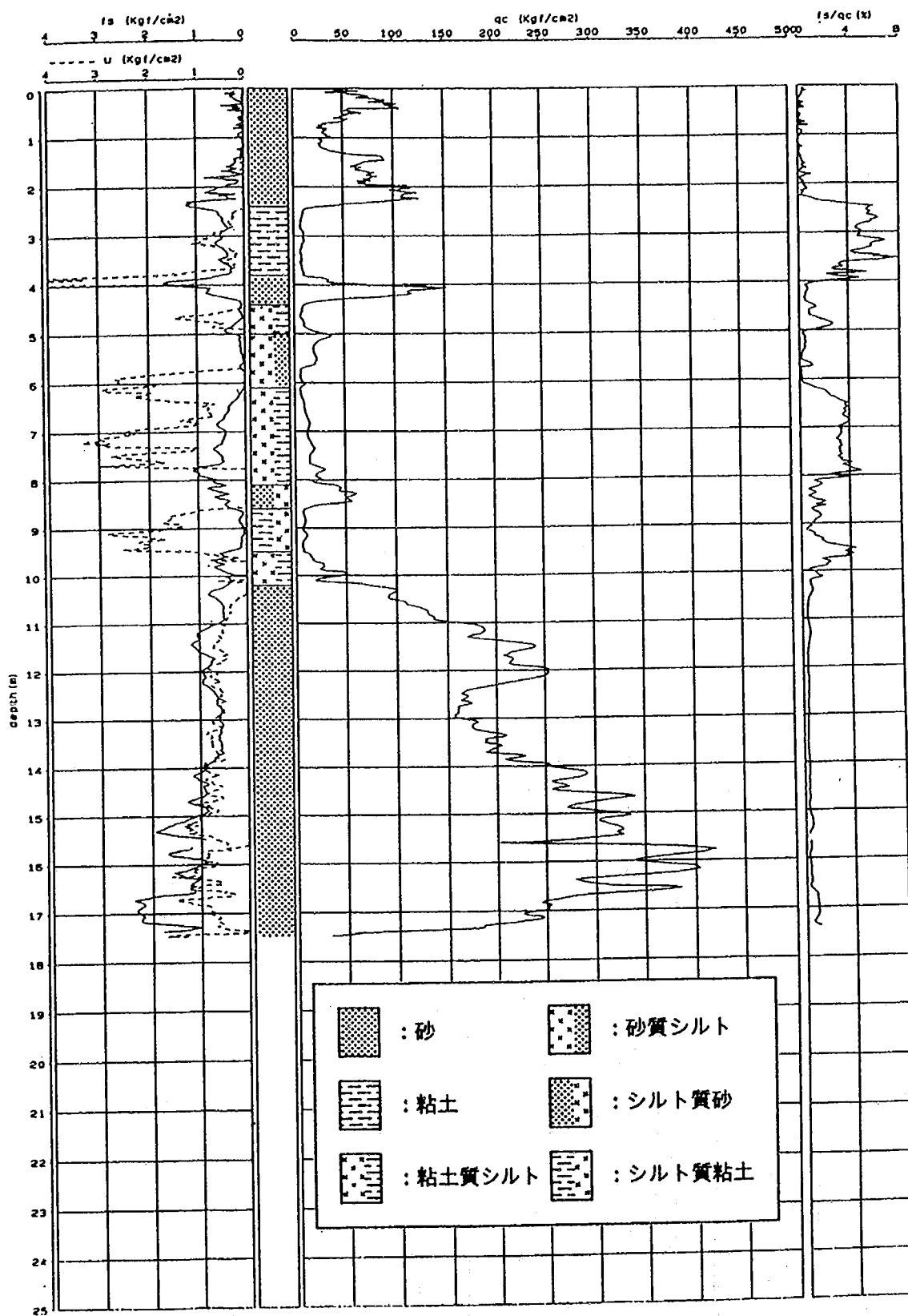
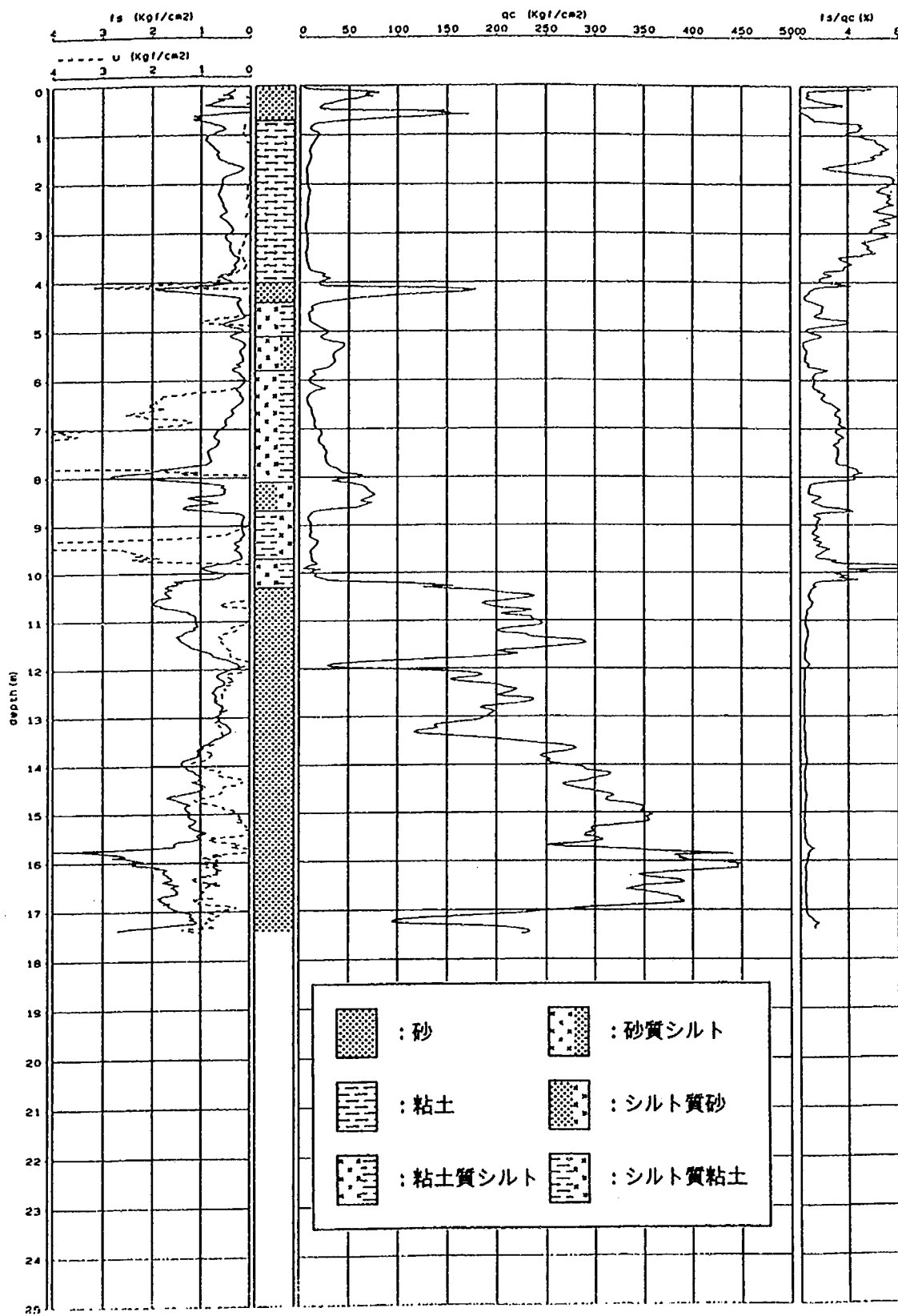


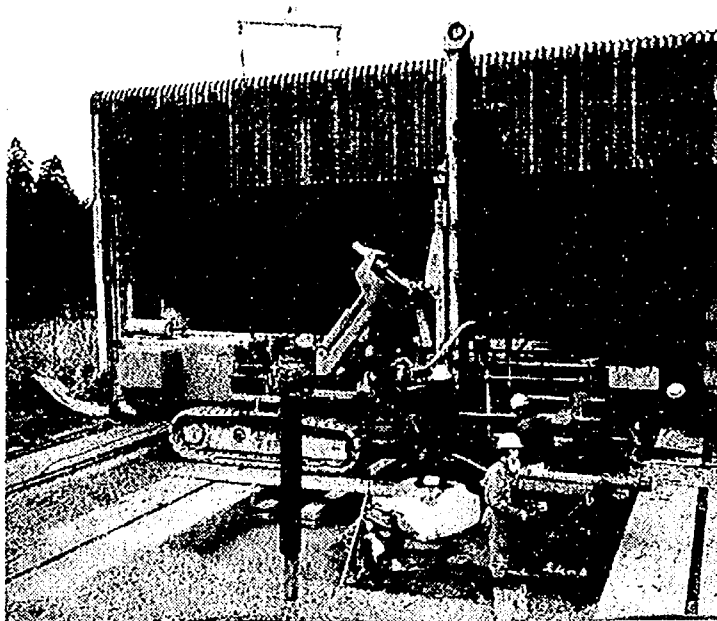
図-付 1.4 静的コーン貫入試験結果 (No. A)



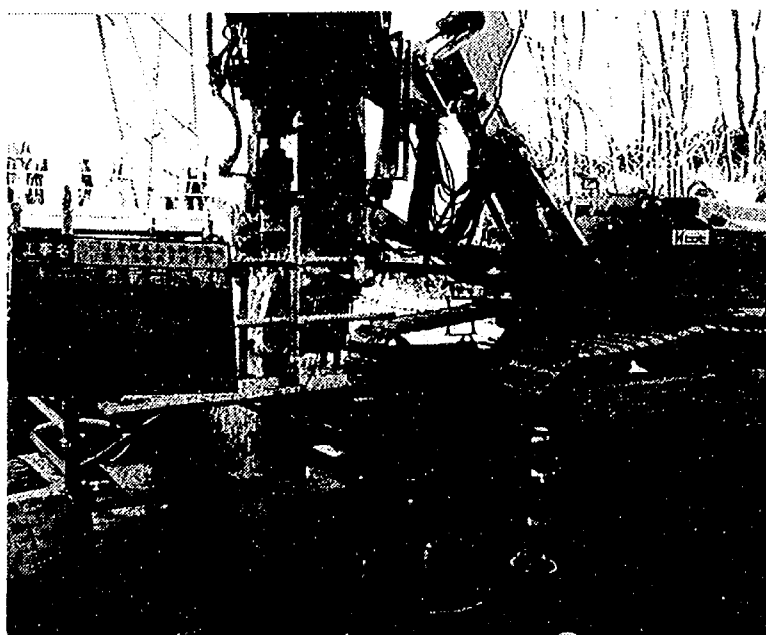
図一付 1.5 静的コーン貫入試験結果 (No. B)

2. 施工状況写真

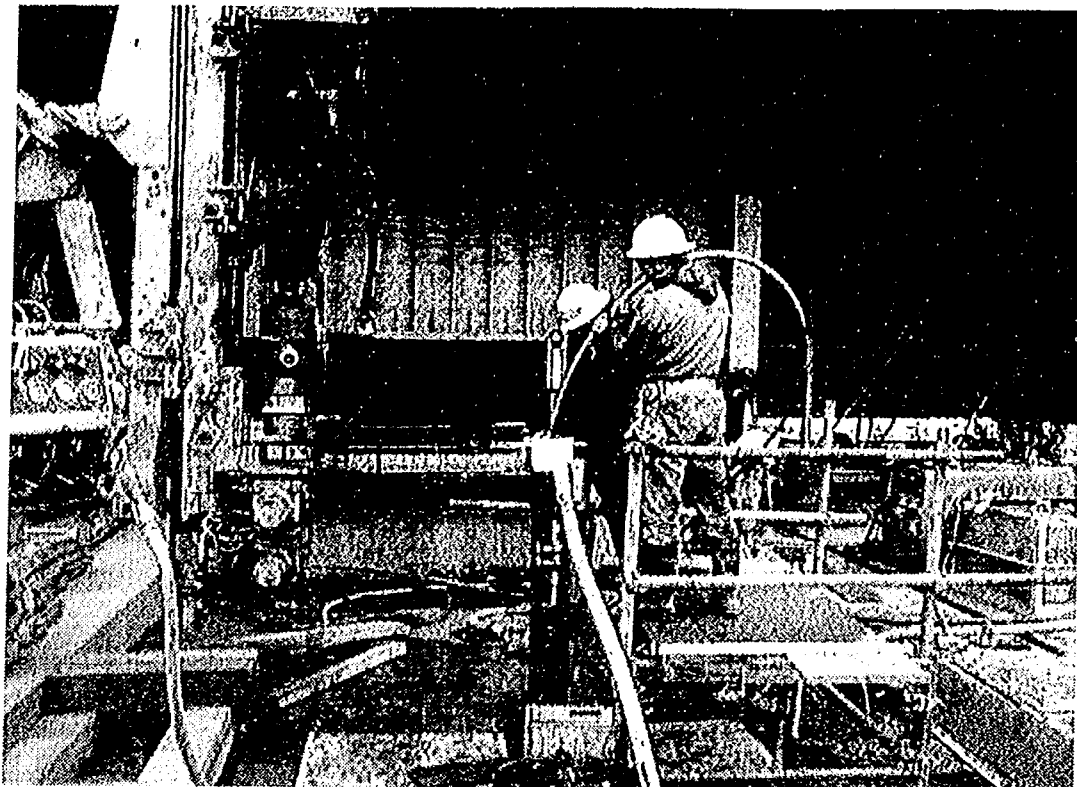
施工状況の様子を写真一付 2.1～写真一付 2.6 に示す。



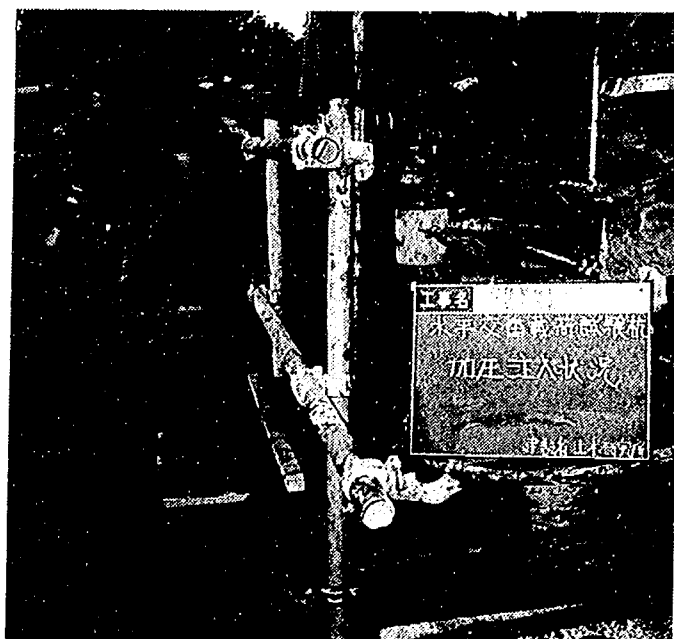
写真一付 2.1 削孔状況



写真一付 2.2 孔内洗浄状況



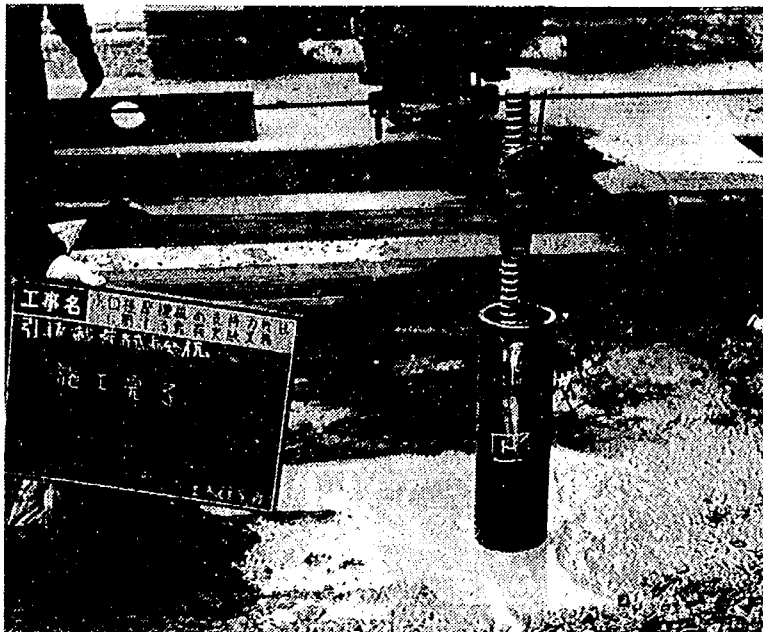
写真一付 2.3 一次注入状況



写真一付 2.4 加压注入状況



写真一付 2.5 鋼管再挿入状況



写真一付 2.6 小口径摩擦杭施工完了状況