

土 木 研 究 所 資 料

埋設杭の支持力管理手法に関する実験

昭和61年3月

建設省土木研究所
機械施工部施工研究室

[Copyright © (1 9 8 6) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of 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、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。 」

埋設杭の支持力管理手法に関する実験

施工研究室 室長 嶋津晃臣
研究員 塚田幸広
下坪賢一

要 旨

埋設杭の簡易な支持力確認手法を見出すことを目的として、軽重量ハンマ打撃による軽打法（衝撃載荷試験）を提案し、実大杭に対する適用性を調べるために深層土層実験及びフィールド実験を行なった。その実験においては、杭頭打撃力、杭頭加速度、杭頭変位などを打撃エネルギーを変えて測定した。その結果、杭頭打撃力、加速度、変位などの動的情報を波動理論に基づく各種方法に適用させることによって動的支持力の算定の手がかりをつかむとともに静的載荷試験における荷重～沈下曲線と対応できた。

キーワード：埋設杭，支持力，動的試験，波動理論

ま え が き

建設工事における振動、騒音等の公害が社会問題化し、昭和43年に騒音規制法が、また、昭和51年には、振動規制法が制定され、振動、騒音を伴う建設工事が規制されるようになり現在に至っている。その間、これに対処するため各種低公害基礎工法が開発され、多くの施工実績を蓄積してきた。しかし、これらの工法は、主として掘削により杭を沈設する工法であるため、ディーゼルハンマー等による打込み杭工法と比較して杭周辺及び支持地盤の締め固め効果が期待できないばかりでなく、掘削に伴う地盤の緩みなどに起因して支持力が劣るなどの問題を有している。そのために、現状においてはセメントミルクの注入による根固め、またはハンマー打撃による支持地盤への貫入などの先端処理を行なっている。しかしながら、その要求に耐え得るほどの低公害でかつ、十分に支持力を発現させる工法は見出されていない。

さらに、施工方法、土質条件によっては、スライムの沈積、支持地盤のボイリングといった施工管理上の問題点も有している。通常は、地盤のN値等を用いた静的支持力公式が用いられているが、地盤強度と杭の支持力とが常に明確な関係にあるとは限らず、先にあげた施工上のトラブルにより支持力が大きく低下することがある。また、埋設杭工法の場合、打込み杭工法における打止め管理式または動的支持力公式といった施工時に支持力を簡易に推定または目安とする方法がないため、上述した諸問題があるにも拘わらず現状では、事前の地盤調査から得られた情報をもとに算定した支持力のみにより管理を行なっている。

以上のように、低公害基礎杭工法として開発された埋設杭工法は種々の問題点を有しているが、市街地における騒音・振動の規制が年々強化されるに伴い、需要も急速に増加する傾向にある。そのため、これらの工法による杭の支持力を確実に増大させ、経済的でかつ信頼性の高い工法を見出すとともに簡易な施工管理手法を確立することが急務である。

そこで、本研究では、低公害基礎杭工法のうち根固め処理を伴った埋設杭工法の簡易な施工管理手法として、軽重量ハンマーによる「衝撃载荷試験」を提案して、その適用性について検討することを目的としている。

本報告は、深層土槽実験、土木研究所構内でのフィールド実験など埋設杭工法に関する一連の実験概要及び結果を取りまとめたものである。また、軽重量ハンマーによる「衝撃载荷試験」において得られた情報（杭頭応力、杭頭変位、杭頭加速度など）を各種の波動理論に適用させることによって静的载荷試験結果と比較的良好な相関が得られたので、その成果についても報告する。

昭和61年3月

施工研究室 嶋 津 晃 臣
 塚 田 幸 広
 下 坪 賢 一

目 次

まえがき

1. 調査目的と調査概要	1
2. 深層土槽実験	3
2.1 実験目的と概要	3
2.2 実験方法	4
2.2.1 実験地盤条件	4
2.2.2 試験杭の条件	6
2.2.3 埋設杭の施工	8
2.2.4 衝撃載荷試験	15
2.2.5 静的載荷試験	20
2.3 実験結果	21
2.3.1 衝撃載荷試験結果	21
2.3.2 静的載荷試験結果	33
2.3.3 掘削による埋設杭の根固め状況	38
3. フィールド実験Ⅰ（埋設杭に関する検討）	39
3.1 実験目的と概要	39
3.2 実験方法	39
3.2.1 実験地盤条件	39
3.2.2 試験杭の条件	41
3.2.3 埋設杭の施工	43
3.2.4 衝撃載荷試験	50
3.2.5 静的載荷試験	55
3.3 実験結果	58
3.3.1 衝撃載荷試験結果	58
3.3.2 静的載荷試験結果	64
4. フィールド実験Ⅱ（打込み杭に関する検討）	
4.1 実験目的と概要	70
4.2 実験方法	70
4.2.1 実験地盤条件	71
4.2.2 試験杭の条件	71

4.2.3	衝撃載荷試験	73
4.2.4	静的載荷試験	78
4.3	実験結果	84
4.3.1	衝撃載荷試験結果	84
4.3.2	静的載荷試験結果	84
5.	杭の動的支持力に関する検討	89
5.1	杭の動的支持力の抵抗力に関する既往の研究	89
5.1.1	Scanlan-Tomko による方法	89
5.1.2	Case Method (Case Western Reserve University 法)	92
5.1.3	宇都らの方法 (道路橋示方書の方法)	96
5.1.4	TNO による解析方法 (H. von Koten, P. Middendorp による方法)	99
5.2	実測データに基づく動的支持力と静的支持力の比較	101
5.2.1	既往手法による動的支持力の算定	101
5.2.2	打撃力と変位による動的支持力の算定	107
5.2.3	パイルハンマによる打ち止め時の貫入・リバウンド特性	115
5.2.4	貫入量・リバウンド量に基づく杭の動的抵抗力 (貫入抵抗力) の算定	118
	あ と が き	123
	参考文献	124
	付録 1. 静的載荷試験データ	125
	付録 2. 動的載荷試験波形集	135
	付録 3. 動的支持力の算定	157

1. 調査目的と調査概要

(1) 調査目的

本調査は、埋設杭の支持力管理手法に関する基礎資料を得ることを目的として、次の点に着目して調査した。

- ① 埋設杭の支持力性状を把握する。
- ② 軽重量ハンマによる軽打法（衝撃載荷試験）の埋設杭への適用性を把握するとともに、埋設杭を打撃した時の杭の動的挙動を把握する。
- ③ 打撃時の動的情報を各種の波動理論に基づく手法に適用させ、動的支持力算定方法を検討する。
- ④ 上記①～③の結果から埋設杭の支持力管理手法を検討する。

(2) 調査概要

上記の目的に沿って本調査では、埋設杭工法によって地盤に設置された杭の支持力性状及び簡易な施工管理手法を見出すために、以下に示すように実大杭を用いた数種の実験を試みた。本調査は、①深層土槽実験、②フィールド実験に大別され、フィールド実験は埋設杭の施工性及び支持力性状の把握を目的としたフィールド実験Ⅰと衝撃載荷試験の適用性の把握を目的においたフィールド実験Ⅱに区分される。

以下には、各々の実験の概要を順次述べてみる。

(1) 深層土槽実験（実験Ⅰ）

この実験では、土工管理実験場にある深層土槽（ $w 6.5 \text{ m} \times l 5.5 \text{ m} \times d 12 \text{ m}$ ）内に模擬砂地盤を造成し、その造成地盤中に無排土プレボーリング・セメントミルク併用工法によって $\phi 400 \times l 9,000$ の鋼管杭を4本設置する。次に、軽重量ハンマ（約 500 kgf ）により杭頭部を打撃し、打撃時の杭頭沈下量、杭頭加速度及び杭体ひずみを測定し、それらの動的測定値と埋設杭の根固め状態との比較を行なう。さらに各杭に対し静的載荷試験を実施し、根固め状態と静的支持力との対比を行うとともに、動的載荷試験（衝撃載荷試験）結果との比較を行なう。

(2) フィールド実験Ⅰ（実験Ⅱ）

この実験では、土木研究所構内（建設機械屋外実験場）において、無排土プレボーリング・セメントミルク併用工法により $\phi 500 \times l 19,000$ の鋼管杭を設置し、施工時の振動・騒音等の測定を行なうとともに、静的載荷試験により静的支持力状態を調査する。さらに、 2 tf の重量により杭頭部を打撃し、衝撃載荷試験における計測項目及び計測方法を検討する。

(3) フィールド実験Ⅱ（実験Ⅲ）

この実験では、土木研究所構内（土工管理実験場）において油圧パイルハンマによって打設された鋼管杭及びコンクリート杭に対して 1 tf の重量のハンマによる衝撃載荷試験を試み、打撃時の杭頭変位、

杭頭応力、杭頭加速度などを測定する。さらに、これらの動的測定結果をもとに波動理論による動的支持力算定方法を適用させ、静的載荷試験結果との比較を行なう。

なお、フィールド実験Ⅱ（実験3）の結果のまとめに際しては、油圧パイルハンマによる打撃時の貫入・リバウンド量や杭頭ひずみ、加速度などの動的測定結果を参考として用いている。

以上、本調査における各試験の概要について述べたが、ここで本調査の主要な調査項目の一つである衝撃載荷試験の着眼点と方法に関して触れてみる。

打込み杭の施工に際しては、算定精度に様々な議論はあるが、動的支持力公式によって支持力の確認をしており、施工管理上の重要な役割を果たしている。しかしながら、埋設杭の場合、地盤を掘削して杭を埋設する工法原理上、施工時に杭の支持力状態を把握するのが困難であり、さらにセメントミルクによる根固め工法ではある程度の養生時間を必要とする。また、この根固め状態によって杭の支持力が大きく左右される。そこで、軽重量ハンマによる軽打法（衝撃載荷試験）は、打込み杭における動的支持力管理を埋設杭に適用させようとするもので、この場合、1tf～2tf程度の重量のハンマを1～2mの落下高さから打撃し、打撃時の貫入量、リバウンド量または杭頭部の応力、加速度などの情報から支持力を推定することになる。すなわち、セメントミルクなどで先端を根固めした杭に大きな打撃力を加えると、根固め部分が破壊する恐れがあるため、その部分が破壊しない程度の打撃を与え、微少変位の貫入量とリバウンド量などを計測し、それらの情報から支持力を算定しようとするものである。

2. 深層土槽実験

2.1 実験目的と概要

本実験は、埋設杭工法のうち、先端根固めを行なう工法についてその支持力性状を把握するとともに簡便な埋設杭工法の施工管理手法として、軽重量ハンマーによる衝撃载荷試験の適用性を調べる目的で実験したものである。

実験場所は建設省土木研究所土工管理実験場の深層土槽であり、本実験は以下の8項目に分けられる。

- (1) 実験地盤の造成及びN値測定
- (2) 埋設杭のひずみゲージ施工
- (3) 埋設杭の建込み施工
- (4) 埋設杭建込み時の公害騒音、振動レベル、施工時間の測定
- (5) 衝撃载荷試験
- (6) 静的鉛直载荷試験
- (7) 埋設試験杭の掘削
- (8) 先端根固め性状の観察

また、実験のフローチャートを図2.1に示す。

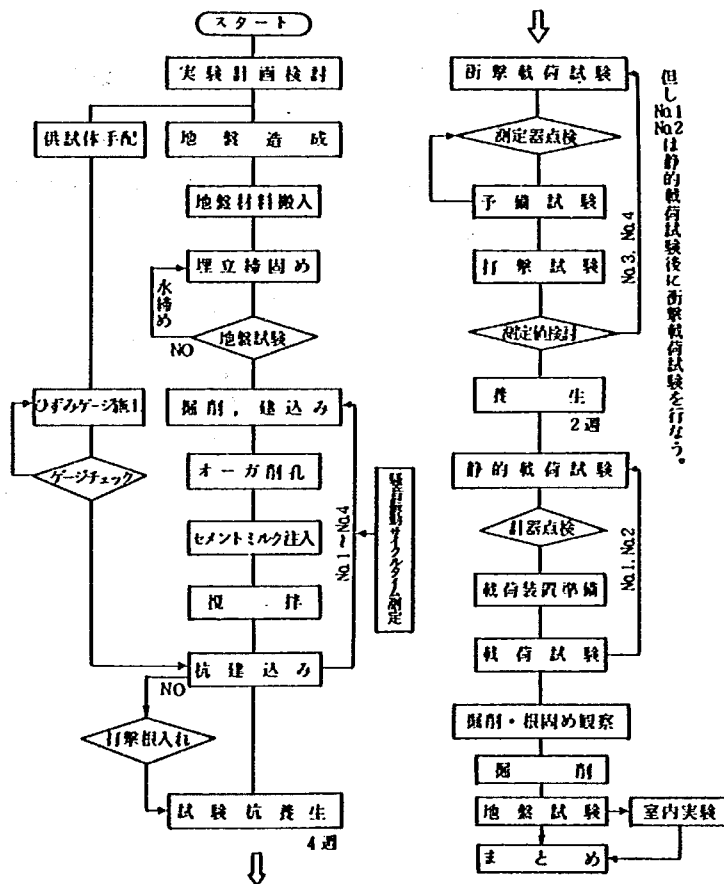


図 2.1 実験のフロー

2.2 実験方法

2.2.1 実験地盤条件

(1) 実験地盤の造成

材料は表 2.1 に示すものを用いた。透水層の碎石は $\phi 20 \sim 40 \text{ mm}$ を 120 m^3 、地盤材料の山砂は基層 4 m として 210 m^3 、表層部はシルト混り 220 m^3 合計 430 m^3 である。

表 2.1 地盤作成に用いた材料

No.	名 称	仕 様	数 量	摘 要
1	礫	$20 \sim 40 \text{ mm}$	120 m^3	
2	山 砂	シルト混り及び山砂	420 m^3	
3	排水有孔管	$\phi 300$ 塩ビ管	12 m	$\phi 20 @ 300 \text{ キリ孔加工}$

地盤造成は水中ポンプにより深層土槽内の雨水を排水してから透水層となる碎石を層厚 3 m (G L - 9 ~ -12m) に投入し敷均しを行なった。基層部の山砂は 1 m 層厚に投入、敷均し、水締めを繰返し行なった。

表層部 G L - 4 ~ G L $\pm 0 \text{ m}$ の層厚 4 m の区間は、シルト混り山砂として 1 m 毎に投入、敷均し、タンパーによる締固めを繰返し造成した。

材料の投入は 0.8 m^3 バケットショベルおよびブルドーザー、ピット内敷均しはクラブバケットを用いた。敷均し、タンパーは人力により行なった。

基層部の締固めは敷均し後、埋立深さごとに図 2.2 および写真 1 に示す棒状締固め機による水締めを繰返し、図 2.3 に示す実験地盤を造成した。

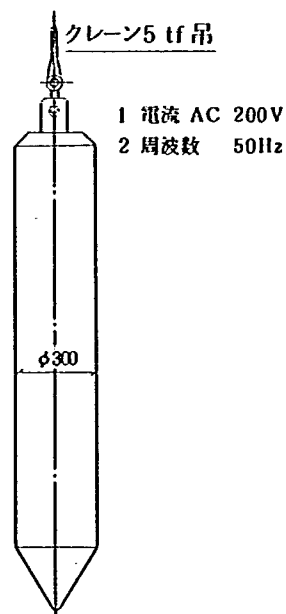


図 2.2 棒状締固め機

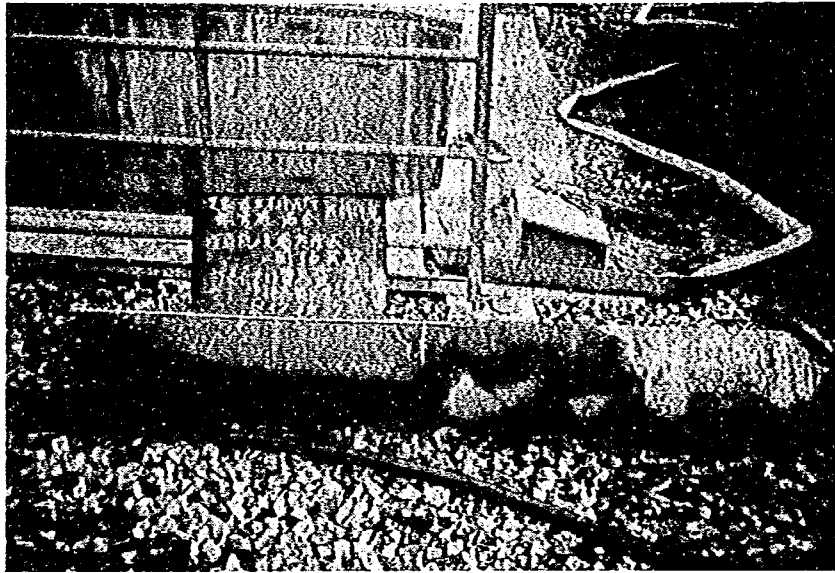


写真 1 棒状締固め機

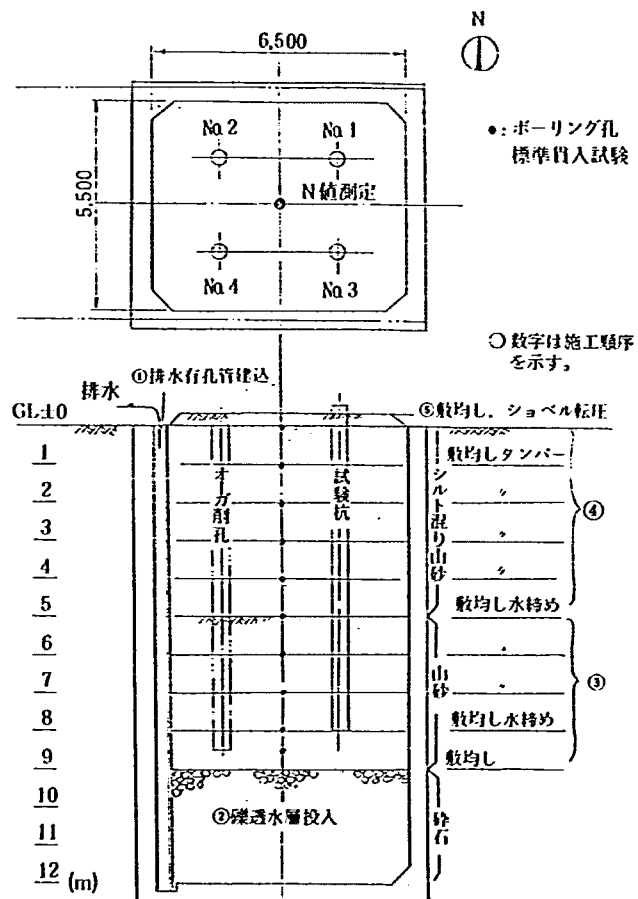


図 2.3 実験地盤

(2) 地盤の地質調査

実験地盤造成後にボーリングを行ない標準貫入試験を行なった。

また、掘削時に貫入コーンによる試験を行なった。

造成した地盤はN値が10以下の緩い砂質地盤である。図2.4には試験結果を示す。

色調	地質名	観 察	標準貫入試験														
			深度 m	N 値 回/cm	10 cm 毎の 打撃回数			N 値									
					10 cm	20 cm	30 cm	0	10	20	30	40	50				
黄・褐 黄褐色	細 砂 (盛土)	全体に粘土分混入															
		雲母片混入 有機物混入	1.15 1.58	2/43		1/24 1/19											
		全般に色調一定しない															
		粒子均一 水分少位	2.15 2.45	1/30		1/30											
		所に細中砂混在する部分 がある	3.15 3.50	2/35		1/23 1/12											
		3.40m付近より黄褐色 に変わる	4.45 4.45	5/30													
		3.70~5.90m間粘土分少 なく混入	5.15 5.46	7/31	2/11 2/9	1/11											
		5.90m付近より乳灰色の 粘土混在する	6.15 6.45	3/30													
			7.15 7.46	3/31		1/14 1/7											
			8.15 8.45	3/30	1/14 1/8	1/8											

図2.4 地質調査結果

2.2.2 試験杭の条件

鋼管杭は、一般に利用されているサイズおよびタイプのものとしてスパイラル溶接鋼管を用いた。

表2.2にその仕様を示す。

表2.2 試験杭の仕様

項 目	単 位	仕 様
材 料 規 格	JIS G 3444	一般構造用炭素鋼管 STK-41
形 状 寸 法	スパイラル鋼管	呼び寸法 $\phi 406.4 \times t 12.0 \times L 8500 \text{ mm}$
供 試 数 量	(本)	4
閉 鎖 面 積	(m^2)	0.13 (周長 1.28m)
単 位 重 量	W (kgf/m)	117.0 (1本当り 1,404 tf)
断 面 積	A (cm^2)	148.7 (腐食しろ=0)
断 面 係 数	Z (cm^3)	142 × 10
断面二次モーメント	I (cm^4)	289 × 10 ²
回 転 半 径	R (cm)	14.0
供 試 体 総 重 量	(tf)	0.117 tf/m × 8.5m = 0.995 tf/本, 3,978 tf/4本

供試した4本の試験杭には、衝撃載荷試験および静的載荷試験時の杭体伝達荷重、杭体応力分布を調べるため、試験杭体の外表面にひずみゲージを貼付けた。ひずみゲージは、衝撃試験時のひずみ波動に充分追従するものであること、また、防水、防湿プロテクターは測定値に影響のない剛性の小さなもので完全に防水、防湿できるものとした。

測定位置は、杭体底面位置とモルタル攪拌範囲上部と杭頭部の3箇所2例とする。

防湿はゴムリング付コーティング法とし、ゲージ及びリード線保護プロテクターは軽量形鋼とした。

使用ゲージおよび使用材料の仕様を表2.3に、図2.5にはひずみゲージ取付け位置とコーティングおよびプロテクターの取付け要領を示す。

表 2.3 ゲージ取付けに用いた材料

No	名 称	仕 様	数 量	摘 要
1	ひ ず み ゲ ー ジ	WFLA-6-11	96枚	2ゲージ, 2ダミー法 4本×3段×2点×4枚
2	接着, 防湿コーティング	CN P-2	各2本	
3	防 水 保 護 リ ン グ	φ100 ゴムシリング	24コ	
4	防 水 充 填 材	VM, シリコンワックス	24本	
5	延長測定ケーブル	PNCT-4C-0.5S	600m	25m×24本 シールド付
6	リ ー ド 線 保 護 材	ヤーンテープ W=60mm	100m	
7	リード線プロテクター	□ 60×30×1.6	64m	先端コーン付
8	リード線固定リング	□ t100×20×φ6	64コ	

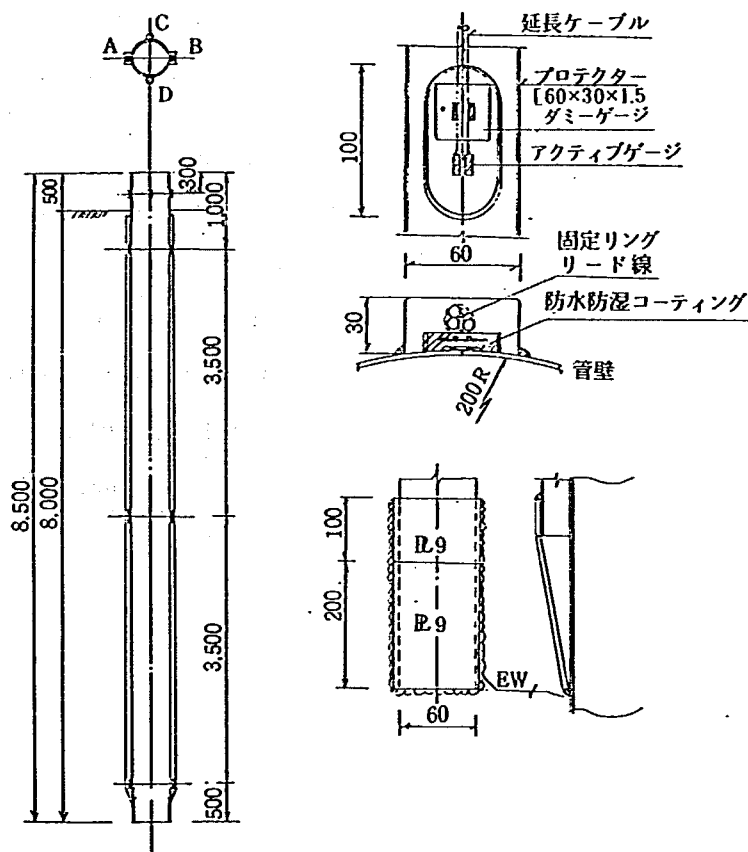


図 2.5 ひずみゲージの取付け

2.2.3 埋設杭の施工

(1) オーガ削孔およびセメントミルク注入

試験杭埋設位置にポータートラックアースオーガにより所定の削孔深度GL-8.5 mまで削孔し、予定深度まで削孔した後、あらかじめ練混ぜしたセメントミルクを注入ポンプで注入した。注入後にオーガを反転させ先端より4.5 m引上げ、2～3回反復攪拌し、攪拌完了後にオーガを反転して削孔内を無排土状態になるようオーガスクリーパー回転を調整しながら引抜き、鋼管杭を建込むための孔を作った。

表2.4にはアースオーガおよび注入機械の仕様を、表2.5にはアースオーガ掘削とセメントミルク注入条件を示す。また、図2.6にはオーガ削孔及び試験杭の建込み要領を示す。

表 2.4 アースオーガ及び注入機械の仕様

項 目	仕 様
アースオーガー	φ450, スクリュー長10m 容量45 kW
グラウトミキサー	400 ℓ×2 連式容量のもの
グラウト注入ポンプ	300 ℓ/分容量
オーガーヘッド	グラウト注入孔φ50 mm

表 2.5 掘削及び注入の条件

項 目	仕 様
使用オーガー径	φ450, 削孔数4本
掘削長	GL-8.5 m (余掘り0.5 m含む)
排土	無排土とする
根固めモルタル	普通ポルトランド W/C = 65%
モルタル注入量	400 ℓ/本, 注入圧力 約20～30 kgf/cm ²
攪拌回数	4 m範囲2～3回正逆転反復攪拌
攪拌範囲	GL-8.5 ↔ GL-4.5 m間 4.0 m範囲

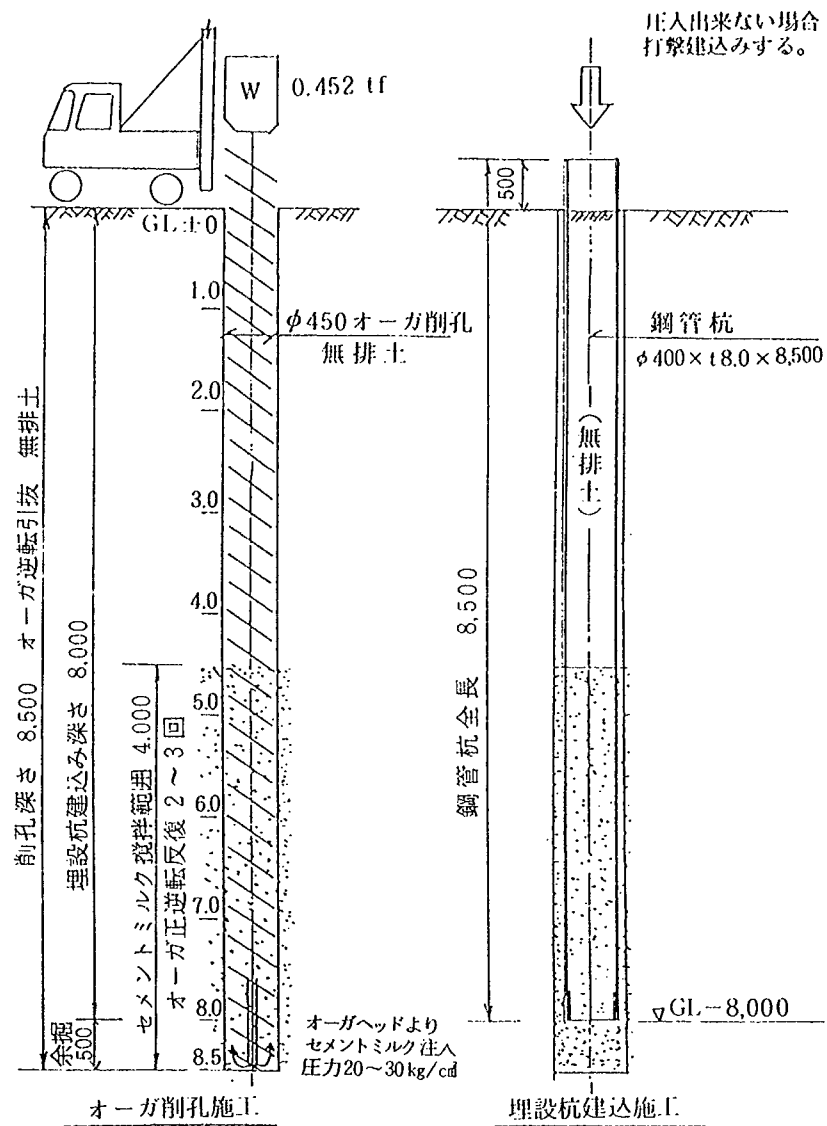


図 2.6 オーガ削孔と試験杭の建込み



写真-2 注入攪拌

(2) 注入モルタル

注入したモルタルの配合，削孔内の置換量は以下の通りである。

1) 注入モルタル配合

① モルタル混練材料

セメント	10袋×@ 40 kg	= 400 kg	266.7 ℓ (1.5 kg/ℓ)
水道水	150 ℓ × 1.0	= 150 kg	150 ℓ

			416.7 ℓ

② 配合比 $W/C = 150/266.7 = 0.56$

∴ 56 %

2) モルタル置換量

① 削孔寸法 径 $\phi 530$ × 深度 L 8,500 mm

② 削孔面積 $A_1 = 2,206.2 \text{ cm}^2$

③ 削孔容量 $V_1 = 1,875 \text{ m}^3$

④ モルタル置換上昇高

$$H = V_c / A_1 \times \frac{1}{0.5} = 400 \text{ ℓ} / 2,206 \text{ cm}^2 \times 2$$

$$= 362.6 \text{ cm} \quad \therefore 3.6 \text{ m}$$

※ V_c はモルタル注入量，モルタル注入空隙率を50%とする。

但し，No.4 杭についてはセメント26袋，水700ℓとして混練量1,100ℓ，注入量約800ℓでオーバーフローした。

(3) 試験杭の建込み

試験杭は削孔内に挿入して自沈させたのち，ポータートラックハンマー ($W = 2.0 \text{ tf}$) により低落下で静かに所定深度まで根入れした。

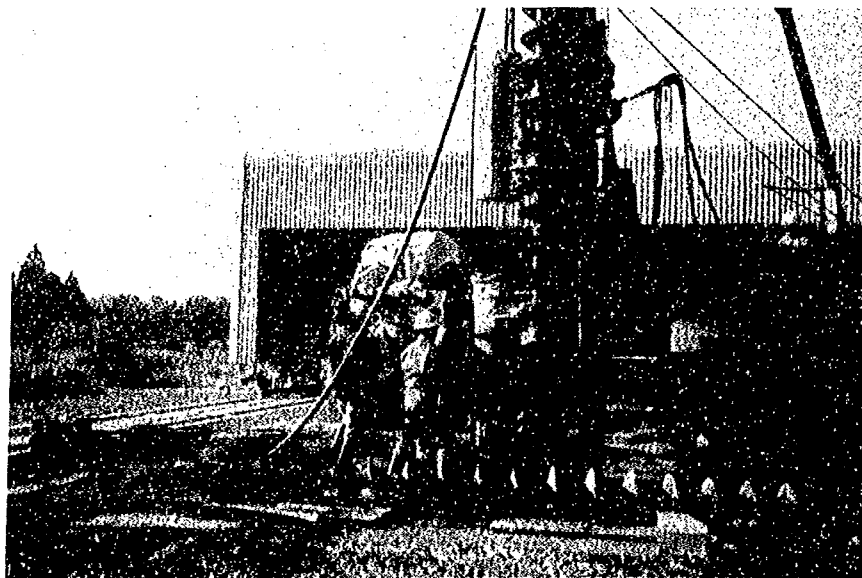


写真-3 所定深度まで建込み中（ハンマー打込み）

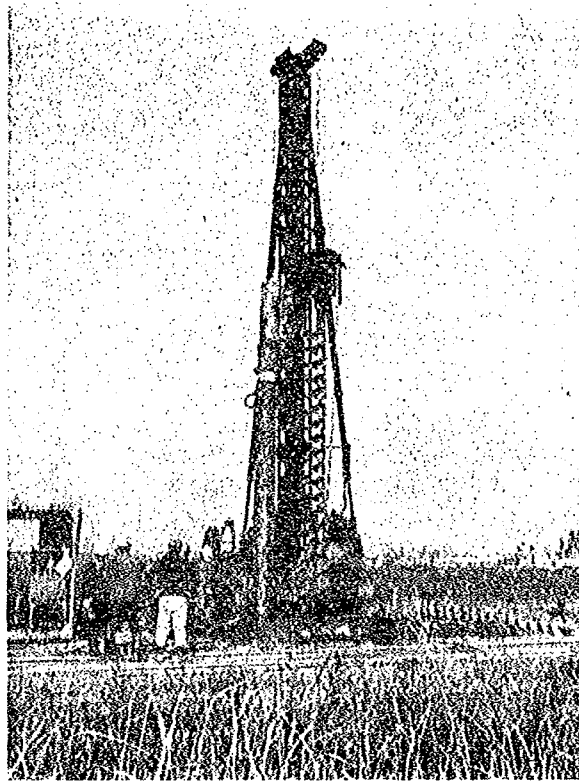


写真-4 杭の建込み

図 2.7 には試験杭の建込状況を示す。図中には試験杭管内地盤の上りおよび削孔内の地盤との変化も併せて示してある。

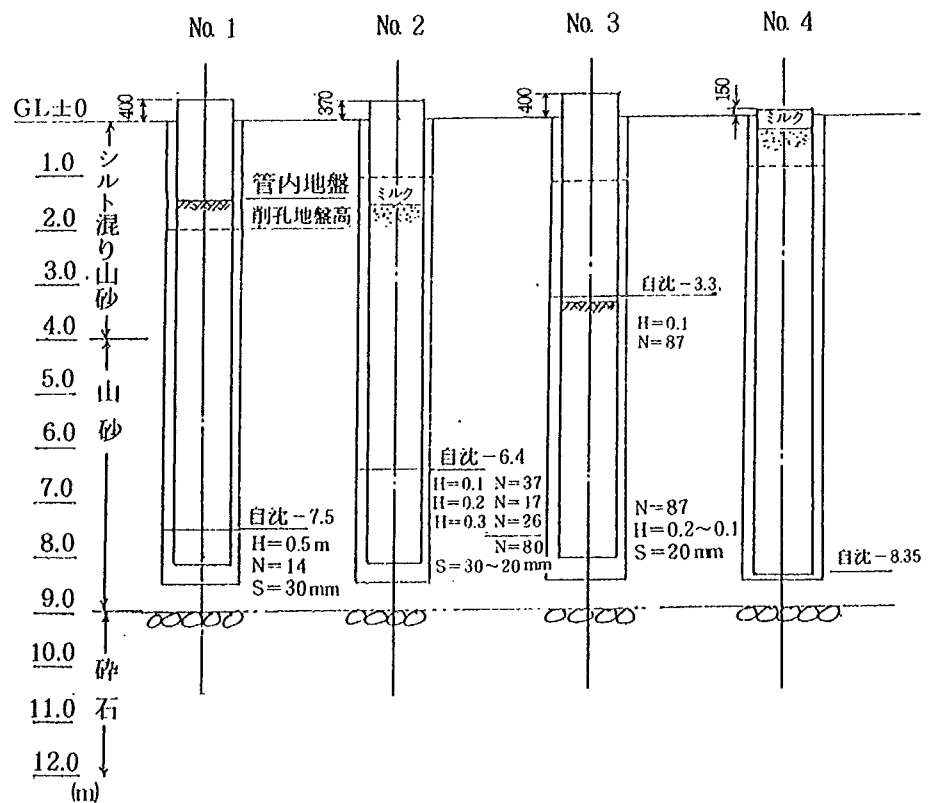


図 2.7 各試験杭の建込み状況

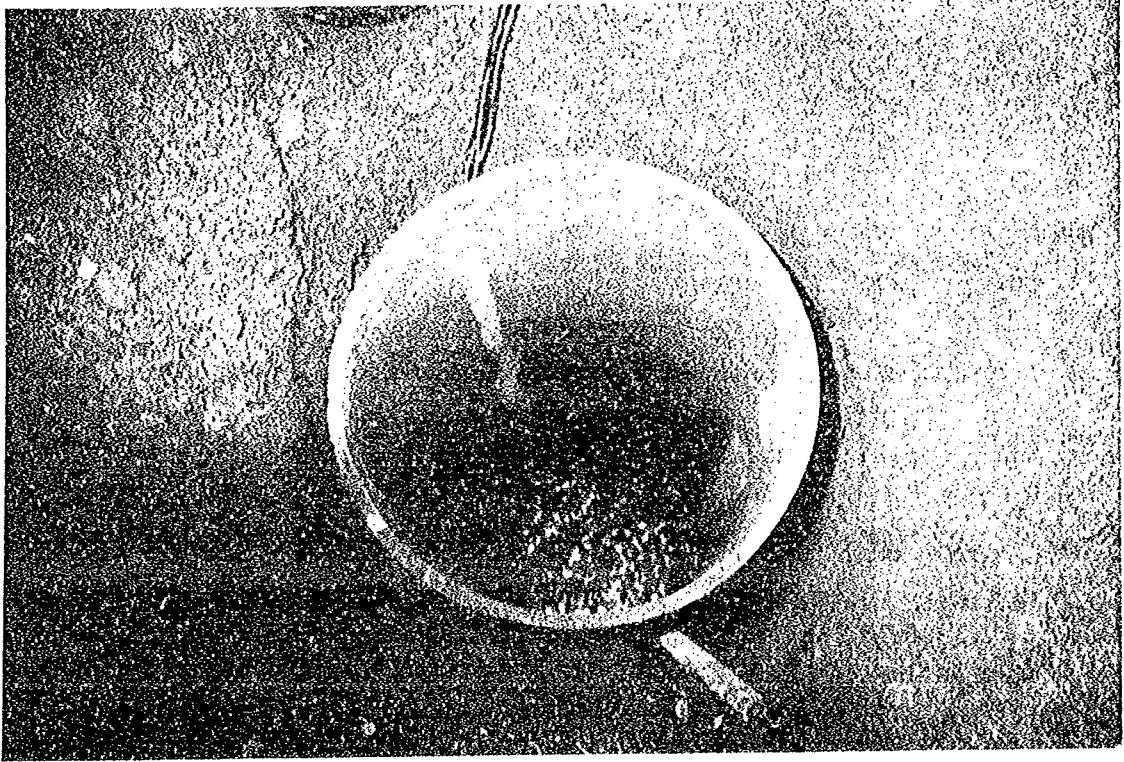


写真-5 管内状況

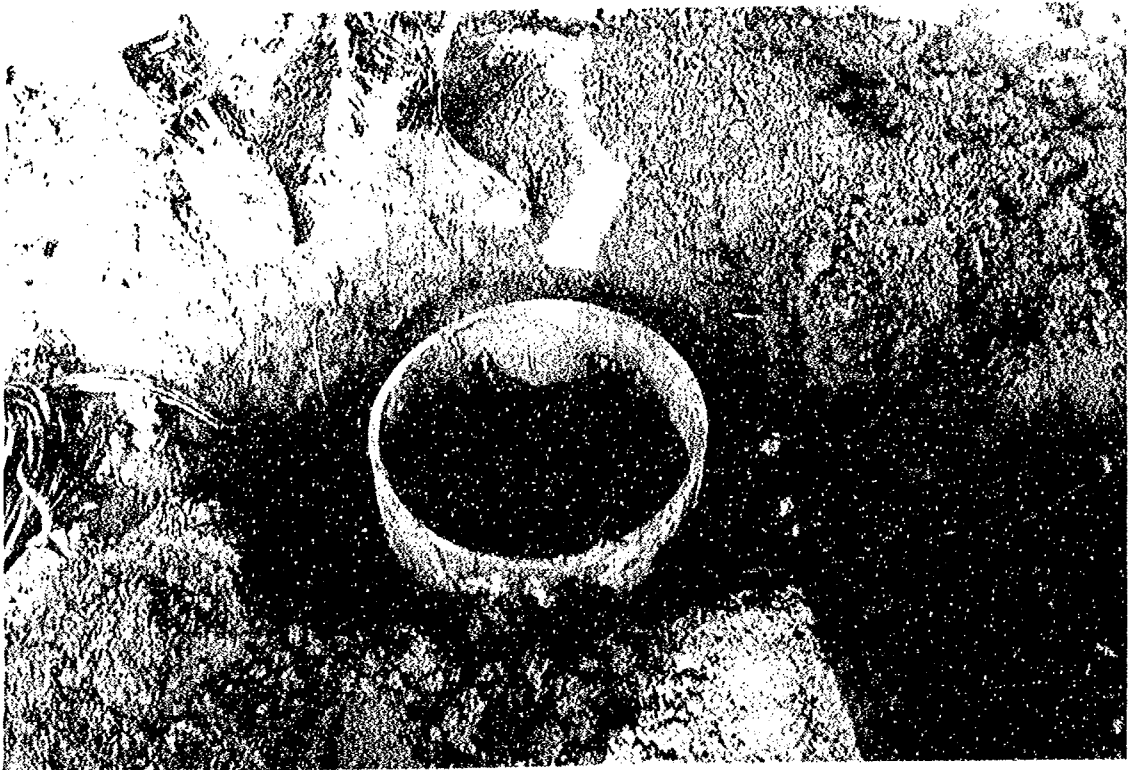


写真-6 建込み後のセメントミルクの上り

(4) 建込み施工記録

削孔時間、注入攪拌時間、および建込み時間について施工結果をまとめると表 2.6 のとおりであり、図 2.8 にはNo.3 杭の施工時間線図を 1 例として示す。

表 2.6 建込み施工結果

作業内容 \ 杭No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
実質削孔時間	7' 24"	5' 49"	5' 39"	12' 19"
攪拌時間	10分	7分	4分	15分
注入時間	4分	2分	2.5分	4分
建込み時間	4分	5分	13分	10分
掘削 - 建込延時間	60分	39分	47分	88分
作業時間	8:00 11:00解体	14:53 15:40	13:30 14:52	8:00組立 12:33

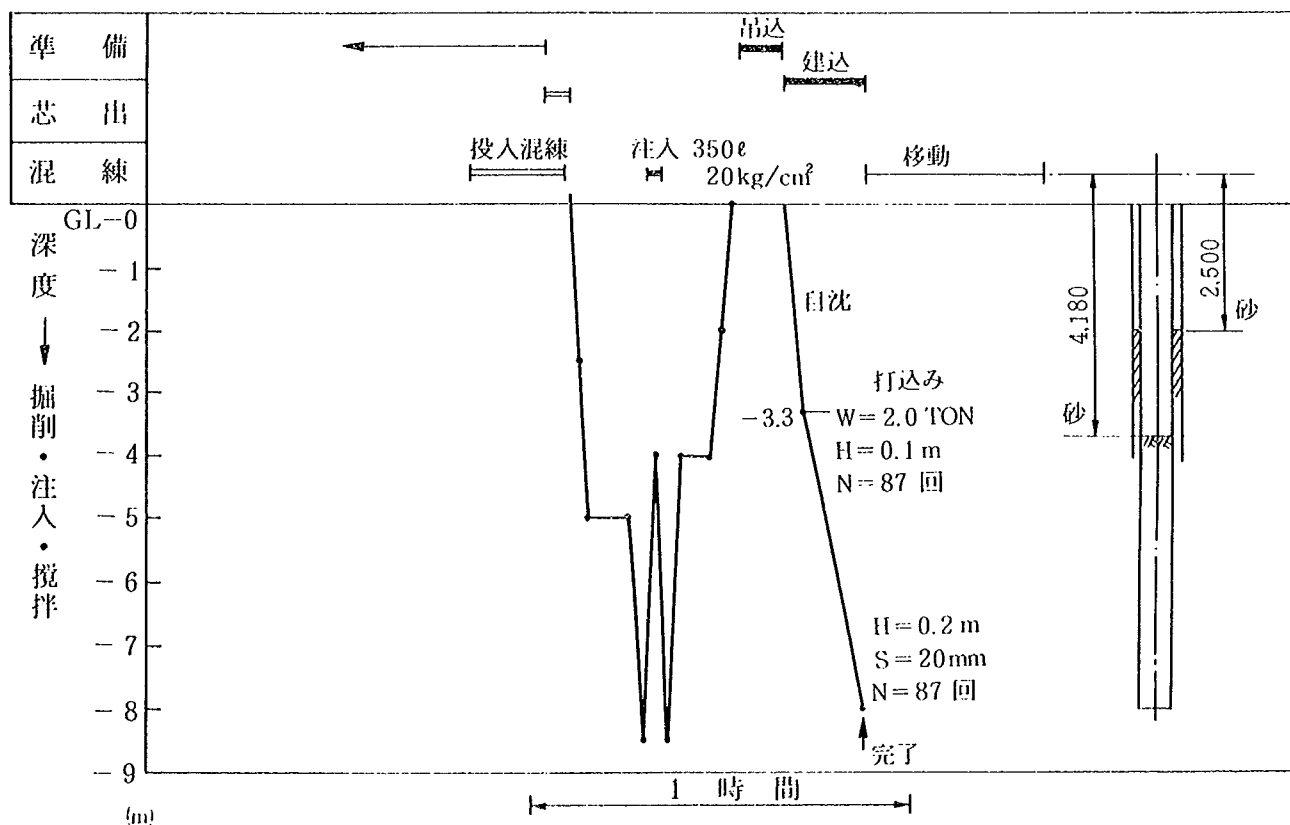


図 2.8 施工時間線図の例（埋設杭No.3）

削孔時間についてはオーガスクリーパー長が5m、2本継のものを利用したため接続時間および切放し時間が5～10分かかっているが、削孔開始より注入・攪拌・建込完了までは39分～88分である。建込み時間については5～10分間で完了した。

また、掘削時に地表面に排出された土量の概算量は次のように算出した。（表 2.7 参照）

表 2.7 排 出 土 の 概 算 量

項目 \ 杭No	Na 1	Na 2	Na 3	Na 4
堆 積 排 土 量	0.514 m ³	0.449	0.631	0.473
削 孔 内 排 土 量	0.441 m ³	0.227	0.264	0.187
排 土 量 比 $\frac{V}{V_1}$	1.16	1.97	2.39	2.53
総削孔排土率 $\frac{V_1}{V_0}$	0.24	0.12	0.14	0.09

$$\text{総削孔量 } V_0 = A \cdot L = 2,206.2 \times 850 = 1,875,270 \text{ cm}^3 = 1.875 \text{ m}^3$$

① 表面堆積土

イ. 堆積断面積 $A = 2/3 h b$

ロ. 堆積平均周長 $L = \pi r$

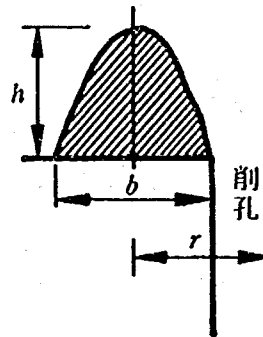
ハ. 堆積容積量 $V = A L$

② 削孔内排土量

イ. 削孔断面積 $A_1 = \pi D^2/4 \quad D=53\text{cm}$

ロ. 削孔内地盤高 $H_1 = \text{実測値}$

ハ. 削孔内排土量 $V_1 = A \cdot H$



削孔内の排土は総削孔量に対して 9～24%の排土率であり、平均排土率は 14.7%であった。

(5) 騒音・振動測定

公害騒音および公害振動の測定を試験杭施工中連続して測定した。

各試験杭とも騒音レベルの最大値はアースオーガ稼動時のエンジン音で 73～83 dB (A) で変動する大きさであった。モルタル注入時は発電機のエンジン音で 70～73 dB (A) である。

試験場所の暗騒音は 58～60 dB (A) であった。これは実験場敷地内約 60m のところで、地盤造成のブルドーザー稼動による影響があったためである。

公害振動については周囲がコンクリートよう壁にかこまれた人工地盤であるため、測定点に制約があり参考として測定した。

図 2.9 に騒音・振動測定位置、表 2.8 に測定条件を示す。

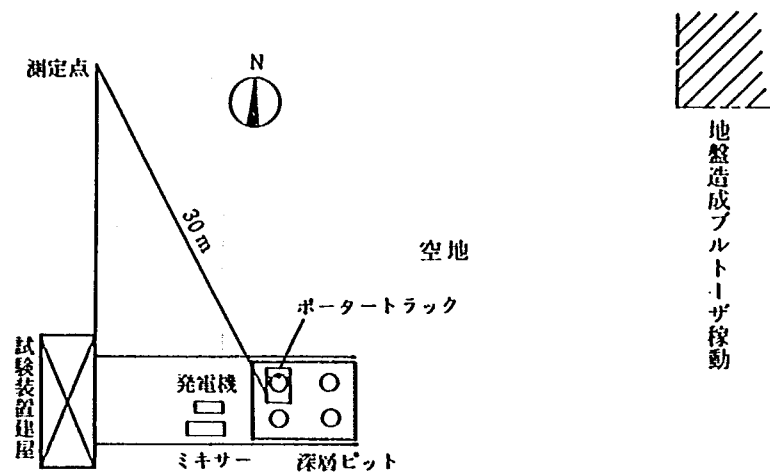


図 2.9 騒音・振動測定位置

表 2.8 騒音・振動測定条件

区分	項目	仕様および条件
騒音	測定器	普通騒音計 (A特性) レベルレコーダー記録
	記録	オーガ削孔から建込み完了まで連続測定
	測定位置	オーガ正面背面左右4カ所, 距離30m
振動	測定器	公害振動計 (VVL) レベルレコーダー記録
	記録	オーガ削孔から建込み完了まで連続測定
	測定位置	深層ビット内外で3点, 最大距離4m
施工時間	測定器	ストップウォッチ
	記録	重機準備より作業項目ごとに時間測定する

2.2.4 衝撃载荷試験

(1) 試験条件

衝撃载荷試験の試験条件は表 2.9 のとおりである。

表 2.9 衝撃载荷試験条件

項目	杭No	No 1	No 2	No 3	No 4
ハンマー重量 W_H [t]		0.452	0.452	0.452	0.452
落下高さ H [m]		0.1~1.0	0.1~1.0	0.1~1.0	0.1~1.0
落下高間隔 Δ [m]		0.05	0.05	0.05 (0.1)	0.05
落下回数 N		各1打撃	←	←	←
杭頭キップ		鋼製132mm	←	←	←
クッション		ベニヤ125mm	←	← (堅木50mm)	←
杭頭変位点数		オプト1点 ポット1点	オプト1点	非接触1点 オプト1点	←
加速計 500g		1点	←	←	←
杭頭応力		4点	←	←	←
杭体応力		3段×2点=6	←	←	←
試験日		静的載荷後 58.2.16	58.2.16	静的載荷前 58.1.24	58.1.23

また、表 2.10 に杭打ち機、表 2.11 に杭頭条件を示す。

表 2.10 杭打ち機

名 称	ポータブルパイルハンマー
型 式	K P - 10 N T - 816
リーダ	10 m 2 面
ハンマー	W = 452.3 kgf

表 2.11 杭頭条件

キ ャ ッ プ	鋼製インナーキャップ
クッション	①耐水ベニヤ $t = 25\text{ mm}$ ②ハンマー用堅木クッション $t = 50\text{ mm}$



写真 7 衝撃载荷試験に用いたハンマー

図 2.10 にハンマー形状、図 2.11 にキャップの形状を示す。

落下高さは 0.1 m ～ 1.0 m まで 5 cm 毎にハンマーガイドに標尺を設け、落下高さを実測調整して所定高さにして試験した。

落下回数は杭の残留沈下量等を考慮して 1 条件 1 打撃として試験した。

(2) 測定項目と測定方法

衝撃载荷試験の測定項目と測定方法は次のとおり行なった。

① 杭頭変位量（非接触変位計）

試験杭杭頭に鋼製取付治具を溶接し、アルミ板（ $t = 2.0\text{ mm}$ ）の標的を取付け、試験杭囲りに不動

梁を渡して、検出器を取付測定した。

検出器は非接触精密変位計（渦電流式）を用いた。

② 杭頭変位量（光学式変位計）

深層土槽のコンクリート壁頂部に光学変位計を設置し杭頭部に黒、白ターゲットを貼付け測定した。

③ 杭頭加速度

ひずみゲージ形加速度変換器を非接触変位計の標的部に接着し測定した。容量は500 Gとした。

④ 杭頭応力測定

試験杭埋設後に頂部より-30 cm の位置にひずみゲージを2倍感度（2 アクティブ 2 グミー法）により貼付して杭頭4点の表面ひずみ量を測定して応力換算した。

⑤ 杭体応力測定

試験杭埋設前に対称2列、3断面に2倍感度でひずみゲージを貼付して測定した。リード線の養生は、断面効果のないよう軽量チャンネルをすみ肉溶接として保護した。

表 2.12～表 2.15に各測定器の仕様を示すとともに図 2.12に計測の概要図を示す。

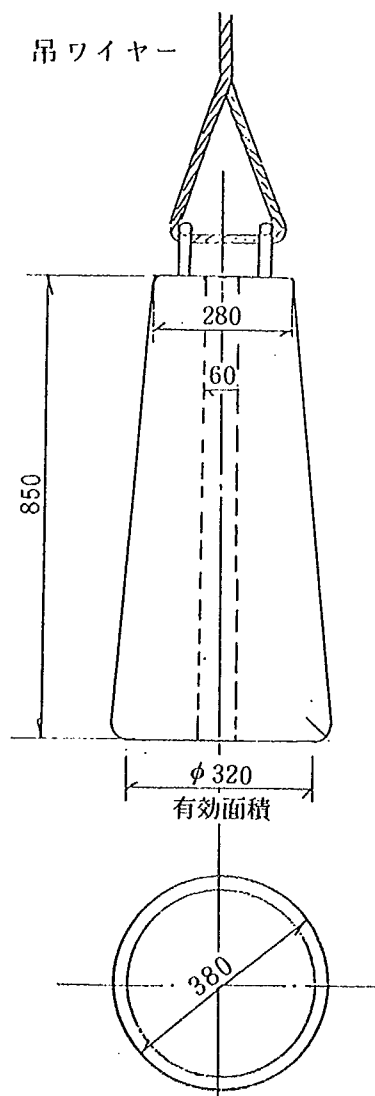


図 2.10 ハンマーの形状

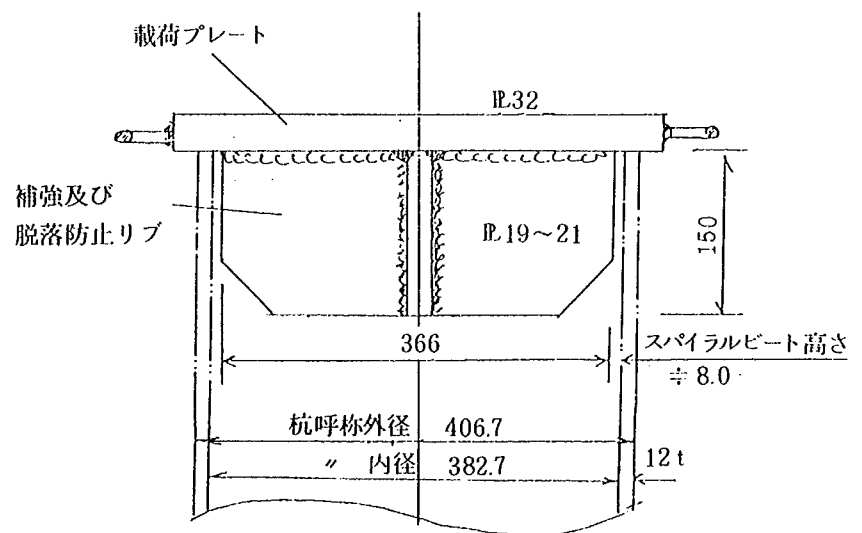


図 2.11 杭頭キャップの形状

表 2.12 ひずみゲージの仕様

名 称	箔フェステルゲージ
ゲージ抵抗	120 Ω
ゲージ長	6 mm
接 着 剤	C N
コーティング	シリコンワックス+アラルダイト+VMテープ
プロテクター	合成ゴムリング
リード線	0.5 S $\times$ 4 芯シールドケーブル

表 2.13 加速度計の仕様

名 称	高容量加速度変換器
容 量	500 G
出力電圧感度	0.5 mV/V
非直線性	1 % FS
周波数範囲	0 ~ 3,000 Hz

表 2.14 非接触変位計の仕様

測定範囲	0 ~ 5 mm
感 度	1 mV/ μ
使用温度範囲	-25 ~ +105 $^{\circ}$ C
外形寸法	ϕ 18 $\times$ 45 mm

表 2.15 オプトフォローの仕様

測定範囲	200 μ ~ ∞ (レンズ交換)
精 度	± 0.2 %
分解能	0.02 % FS
応答周波数	DC - 10 kHz (-3 dB)
自動光量補正	64 : 1 の光量変化まで

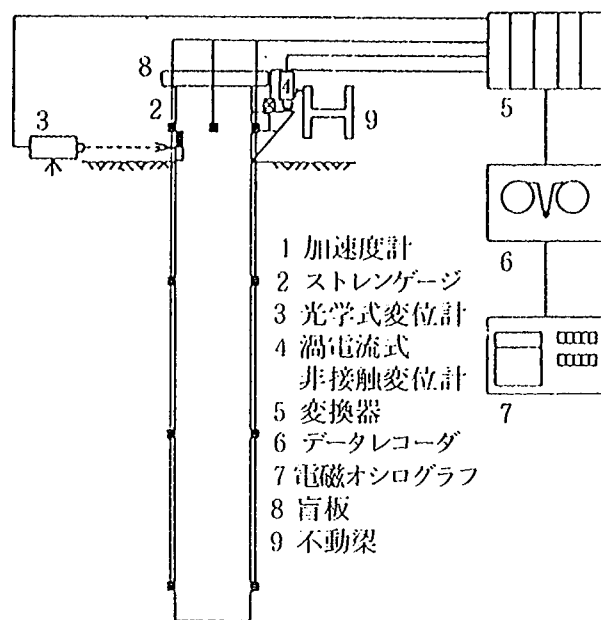


図 2.12 計測概要図



写真-- 8 衝撃载荷試験

2.2.5 静的載荷試験

(1) 載荷試験装置

載荷試験装置は土工管理実験場に設備された鉛直載荷試験装置（最大荷重 400 t f 図 2.13 参照）を利用した。

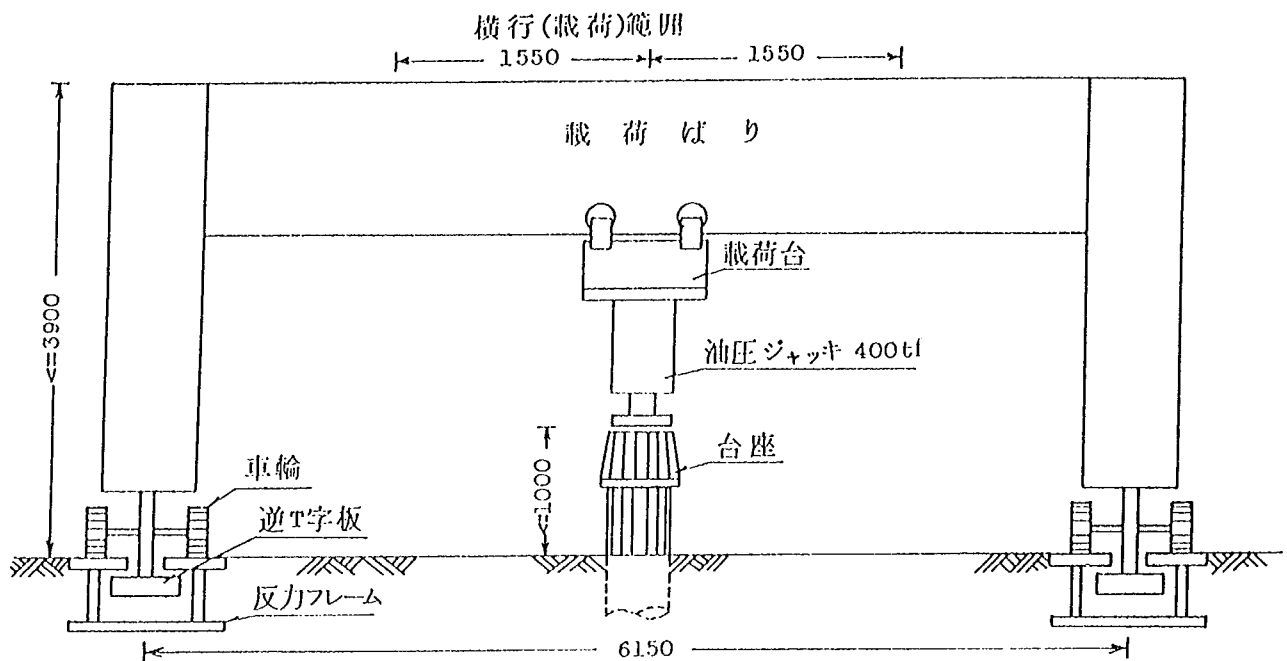


図2.13 静的載荷試験装置

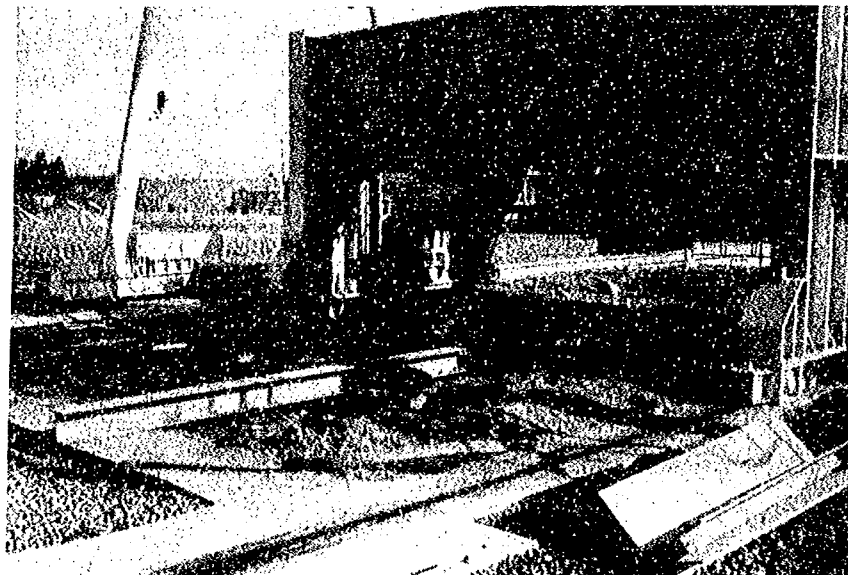


写真-9 静的載荷試験装置

(2) 試験条件

載荷試験は「クイの鉛直載荷試験基準」に基づく載荷方法Bにより実施した。

載荷荷重のステップは最初に試験したNo.2杭では10tf 毎として行ったが、3サイクル60tf であったため、No.1, No.3, No.4杭については5tf 毎4～6サイクルとして実施した。

図2.14には荷重段階図を示す。

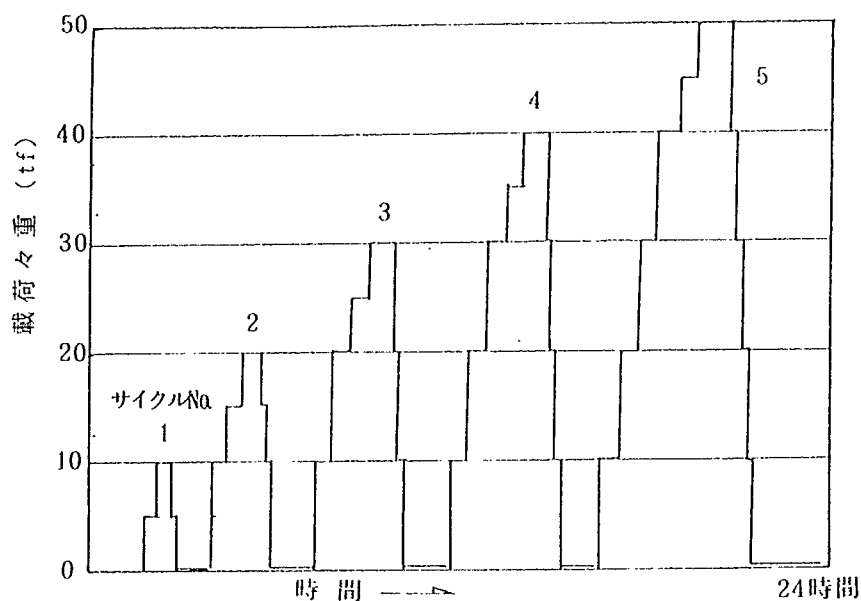


図 2.14 載荷々重段階図

(3) 測定項目と測定方法

静的載荷試験の測定項目および測定方法を表2.16に示す。測定荷重時において自動デジタルひずみ測定器を用いて各項目を同時測定した。

表 2.16 測定項目および測定方法

No.	測定項目	点数	測定計器, および仕様
1	載荷々重力	1	載荷装置, 油圧力を圧力変換器検出
2	杭頭沈下量	4	ひずみ出力精密変位計ストローク 200 mm
3	杭頭応力	4	ひずみゲージ
4	杭体応力	6	ひずみゲージ
	計	15点	

2.3 実験結果

2.3.1 衝撃載荷試験結果

衝撃載荷試験では杭体ひずみ, 杭頭変位量, 杭頭加速度の3項目を測定した。

付録2には測定波形を示す。

測定波形を項目別に説明すると以下のとおりである。

(1) ひずみ波形

№1杭では2から4段目のゲージで引張ひずみが出ている。同じように№2から№4杭では3段目にその傾向が見られる。しかも、この引張ひずみは落下高が大きくなるほど顕著に現われる。波動の減衰は例えば落高が1.0 mのとき、杭頭で8 msec 程度であるが、モルタルで根入されている3段目では200 msec 程度となり、きわめて長くなる傾向が認められる。

(2) 加速度波形

低落高時には波形の乱れがあるが、高くなるにつれて正弦波に近い形状を示す。また、減衰傾向もきれいである。波形中に見られるノイズは杭先端の支持状況による影響と考えられる。

(3) 変位波形

ア. 非接触変位計

加速度波形に追従する変化を示し、比較的きれいな波形である。なお、№1, 2杭では変位計の故障により測定できなかった。

イ. オプトフォロー

№2, 3, 4杭では測定距離とレンズの関係から変動の少ない波形である。№1杭ではオプトフォローを反力梁に載せて杭に接近したため、波形は比較的細かい変動を示している。また、その波形は加速度波形に追従する傾向が見られる。

図2.15から図2.18には杭体ひずみから求めた各試験杭の杭体応力分布を示す。

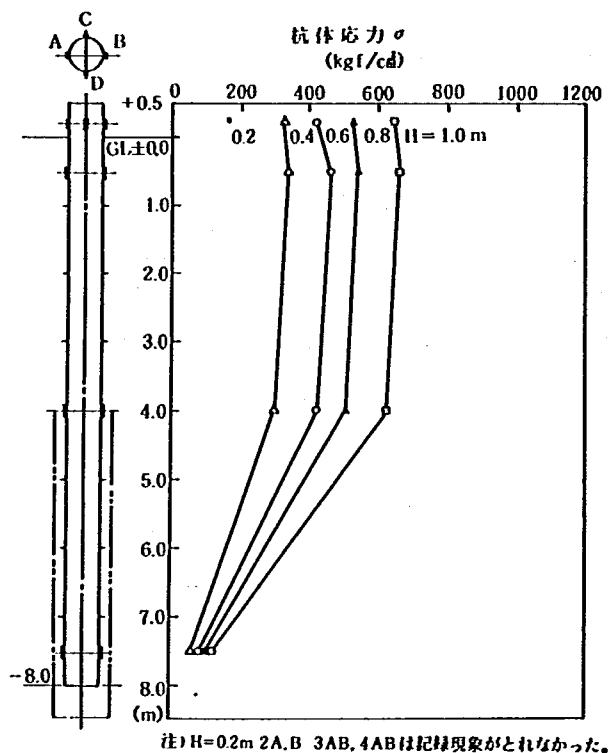


図2.15 杭体応力分布図（試験杭№1）

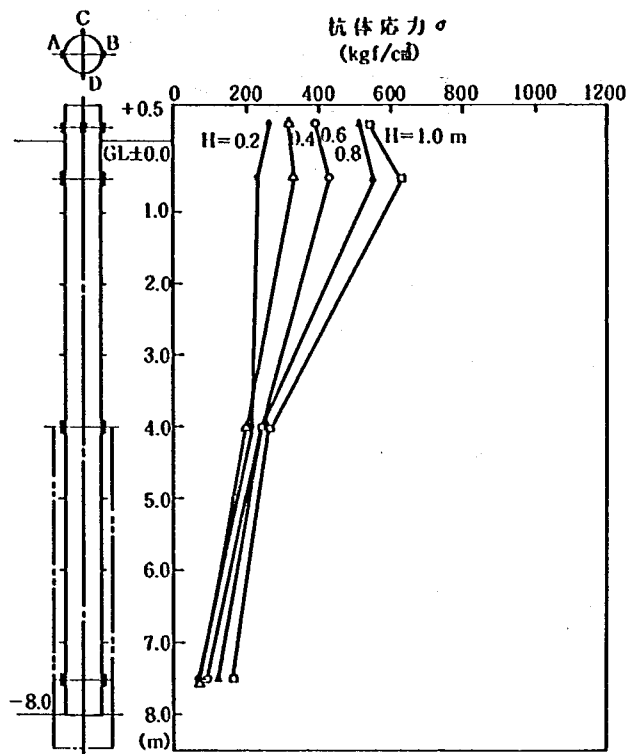


図 2.16 杭体応力分布図 (試験杭No 2)

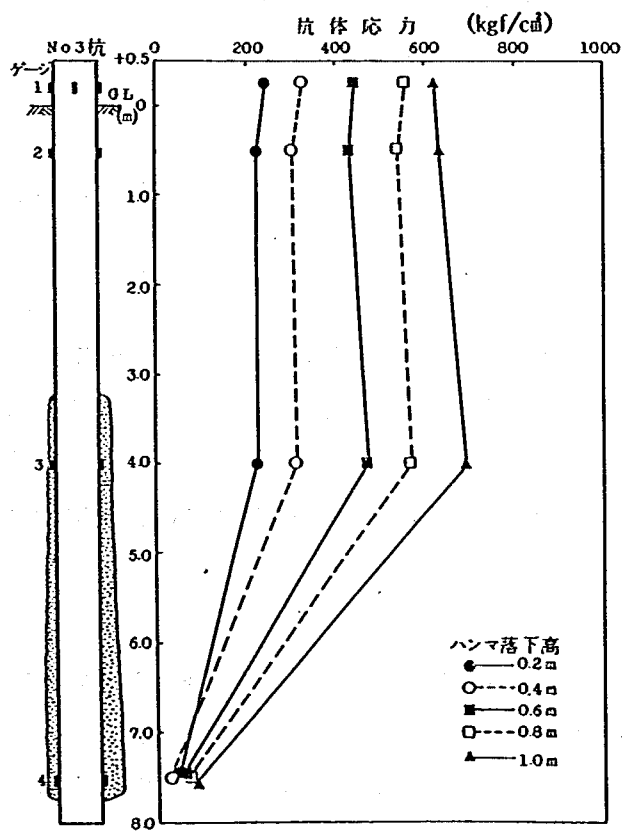


図 2.17 杭体応力分布図 (試験杭No 3)

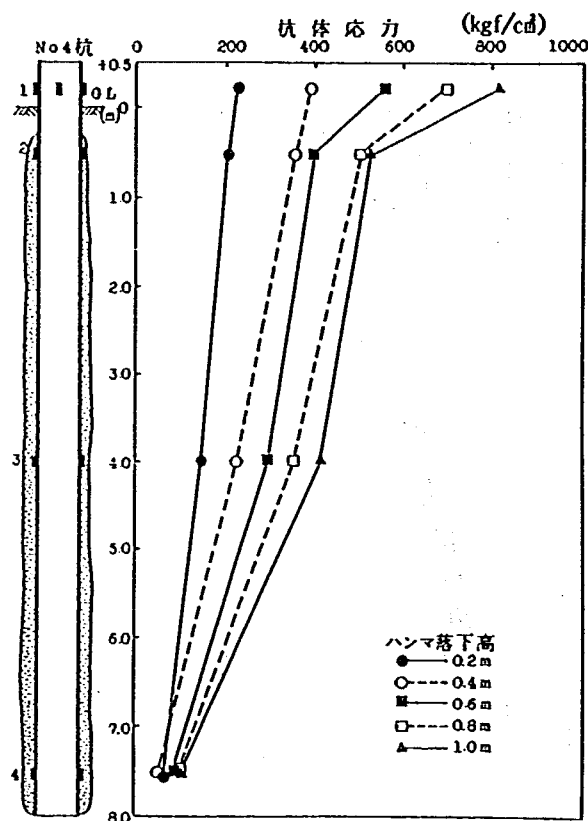


図 2.18 杭体応力分布図 (試験杭No 4)

1) No 1 杭 (図 2.15)

GL-4 mまでは大きな変化は見られないが、杭先ではモルタルと鋼管の合成による断面の増加効果のため、杭体応力は激減している。

2) No 2 杭 (図 2.16)

GL-4 mでは打撃エネルギーに関係なく杭体応力はほぼ 250 kgf/cm^2 である。これは杭先端の貫入量の影響によって現われたものと思われる。杭先部ではNo 1 杭とほぼ同じ値を示している。

3) No 3 杭 (図 2.17)

GL-4 mでは杭頭部と同じか微増している。これは周面摩擦抵抗が小さいためと思われる。No 3 杭の深度方向の分布はNo 1 杭と同様な傾向を示している。

4) No 4 杭 (図 2.18)

削孔内全部にモルタルを注入したNo 4 杭は深さ方向に対して杭体応力が漸減する傾向が見られる。これはモルタルの固結による断面増加および周面摩擦抵抗の影響と思われる。

杭体応力の分布はモルタル注入の状況により異なっている。また、根固め部にモルタルを注入したNo 1 とNo 3 杭では杭体応力分布は似ている。

次に落下高さと杭頭挙動（応力、加速度、変位量）の関係を図 2.19～図 2.24に示す。

1) 落下高さと杭頭応力 (図 2.19)

落下高さの増加にともない杭頭応力も増加する傾向を示すが、試験杭により異なる。

Na 2 杭では低落下時にばらつきが見られるが、これは杭の沈下量から生じた現象と考えられる。

2) 落下高さと杭頭加速度 (図 2.20)

この関係は 1) によく似た傾向を示す。値としては Na 4 杭が最も大きく、Na 1 ~ 3 杭はほぼ同じ値である。(例 $H = 1.0 \text{ m}$ では Na 1 杭 230 g, Na 2 杭 250 g, Na 3 杭 235 g, Na 4 杭 300 g)

Na 2 杭は低落下時にばらつきが見られる。

3) 落下高さと非接触変位計による変位

ア. 弾性沈下量 (図 2.21)

図 2.21 は非接触変位計によって測定された Na 3, Na 4 杭の打撃直後の現象波形ピーク値、すなわち杭頭の弾性変位量を示している。概ね、落下高に相関する傾向にある。Na 3 杭のばらつきは周面摩擦および先端支持力の影響と思われる。

イ. 残留沈下量 (図 2.22)

図 2.22 は波動が安定した位置で読み取った残留沈下量を表わしている。落高が 0.4 m までは大きな変化はないが、0.4 m を越えると貫入量の増加が大きくなる。

Na 3 杭の残留沈下が Na 4 杭に比べて大きい、杭頭応力では Na 4 杭に比べて小さいことやリバウンド量が Na 4 杭に比べて大きいことを考えると周面摩擦抵抗の差異によるものと考えられる。

4) 落下高さとオプトフォローによる変位

ア. 弾性沈下量 (図 2.23)

オプトフォローによる測定結果は非接触変位計より大きな値を示している。これはオプトフォローの校正値が 5 ~ 10 mm と比較的大きく測定精度を低下させていること、また現象波形が衝撃力に追従しない滑らかな波形のため読取り精度に影響されたものと思われる。

イ. 残留沈下量 (図 2.24)

残留沈下量は落下高に対してばらつきが大きい。これは周面摩擦と先端支持力等の外的要因とオプトフォローによる測定時の内的要因の両方の影響と考えられる。

図 2.25 ~ 図 2.28 には、打撃エネルギーと杭体軸力の関係を示す。Na 2 杭以外では根固め状態に対応した関係が示されている。先端部分だけにモルタルが注入された Na 1, Na 3 杭ではゲージ 1 ~ 3 でほとんど変化なく、ゲージ 4 で激減する。これに対し、全高にわたりモルタルが注入された Na 4 杭ではゲージ 1 ~ 4 で一様な軸力の減少が認められる。

図 2.29 ~ 図 2.32 には杭頭荷重と周面摩擦力の関係を示す。Na 2 杭以外はモルタルによる根固めの効果が認められる。Na 2 杭は後述するようにモルタルによる根固めがほとんど無く、これが図 2.30 に示す周面摩擦力の分布を生ぜしめたものと考えられる。また、Na 4 杭は全長にわたりモルタルが注入されたためゲージ 1 ~ 2 で周面摩擦力が顕著になり、この部分で杭頭の荷重を受け持つ状態となっている。

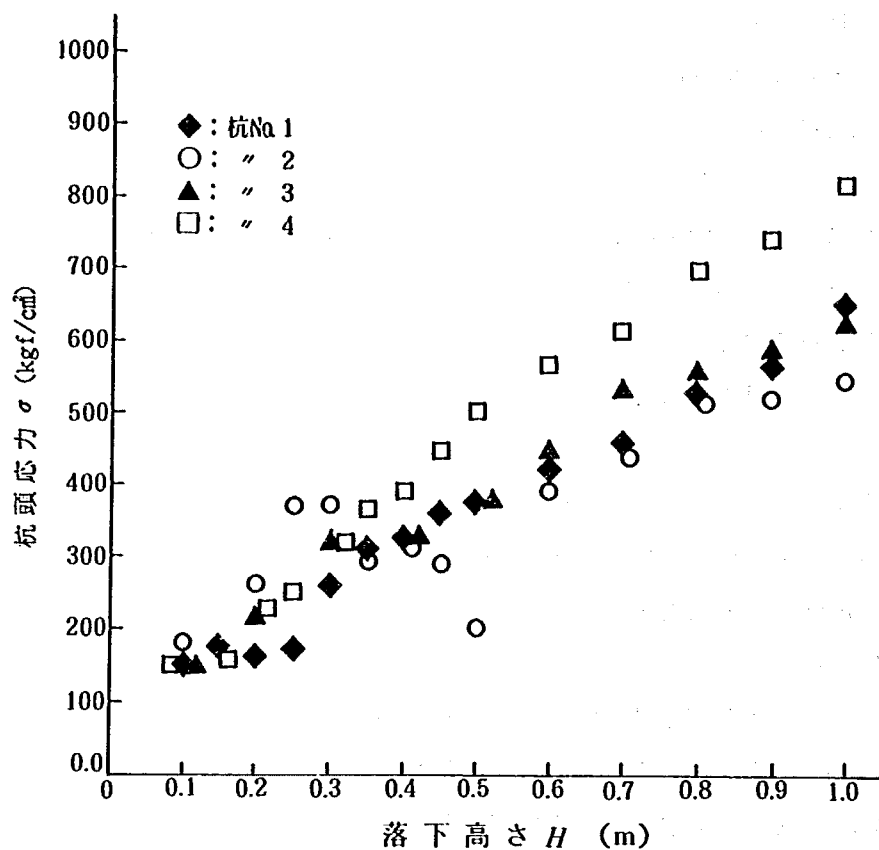


図 2.19 ハンマ落下高さと杭頭応力

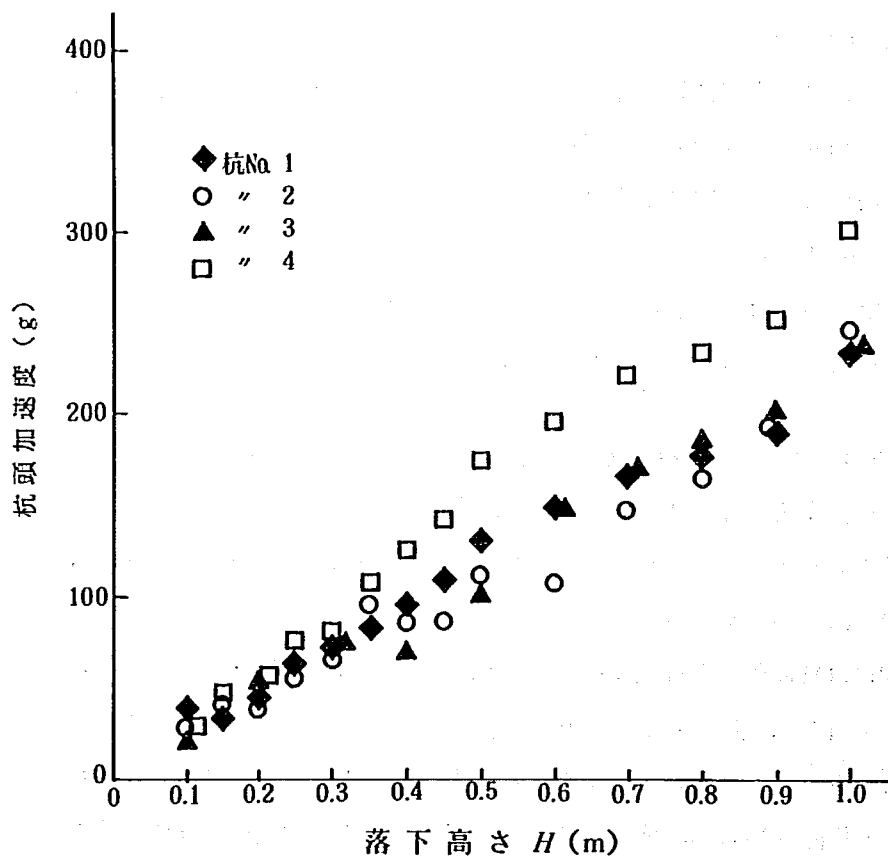


図 2.20 ハンマ落下高さと杭頭加速度

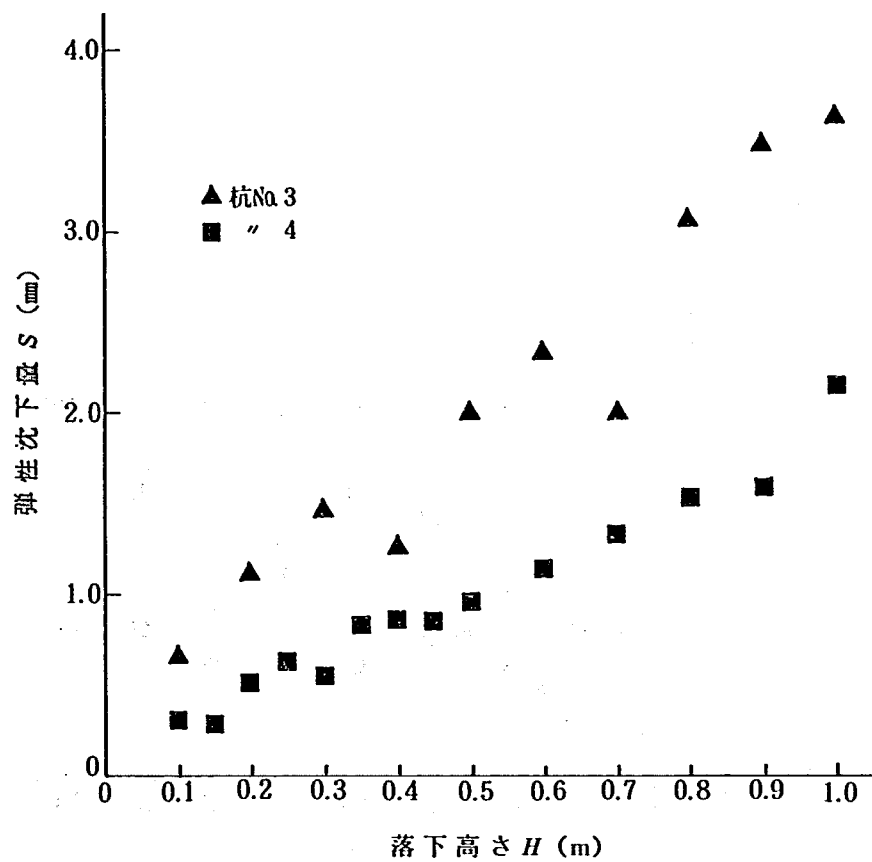


図 2.21 ハンマ落下高さと弾性沈下量（非接触変位計による測定）

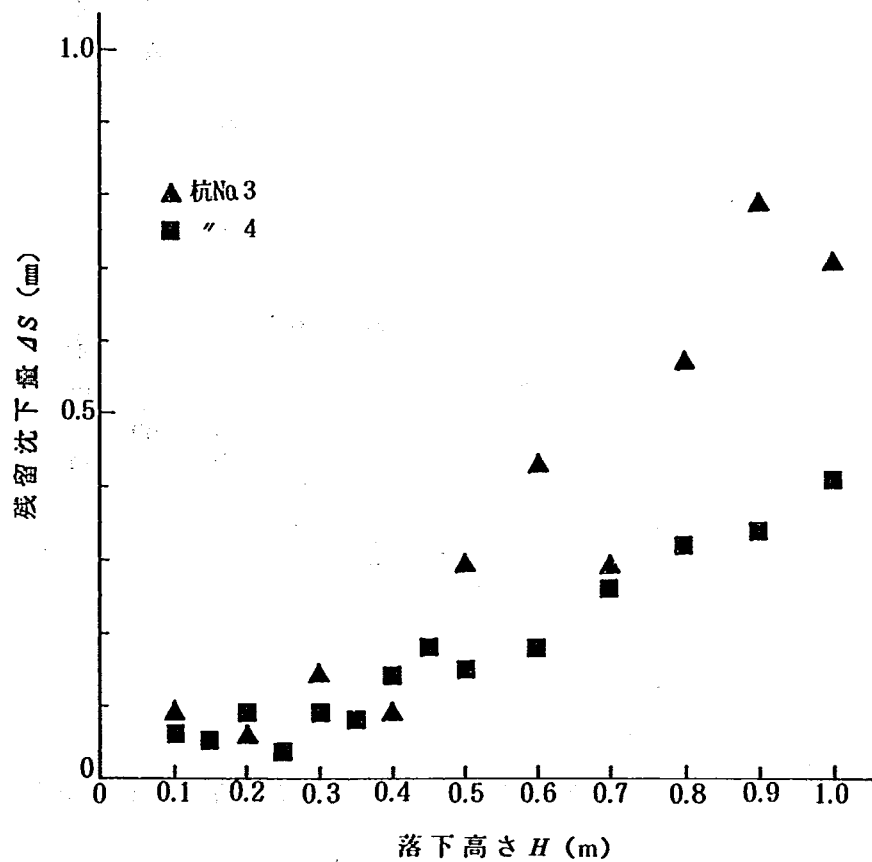


図 2.22 ハンマ落下高さと残留沈下量（非接触変位計による測定）

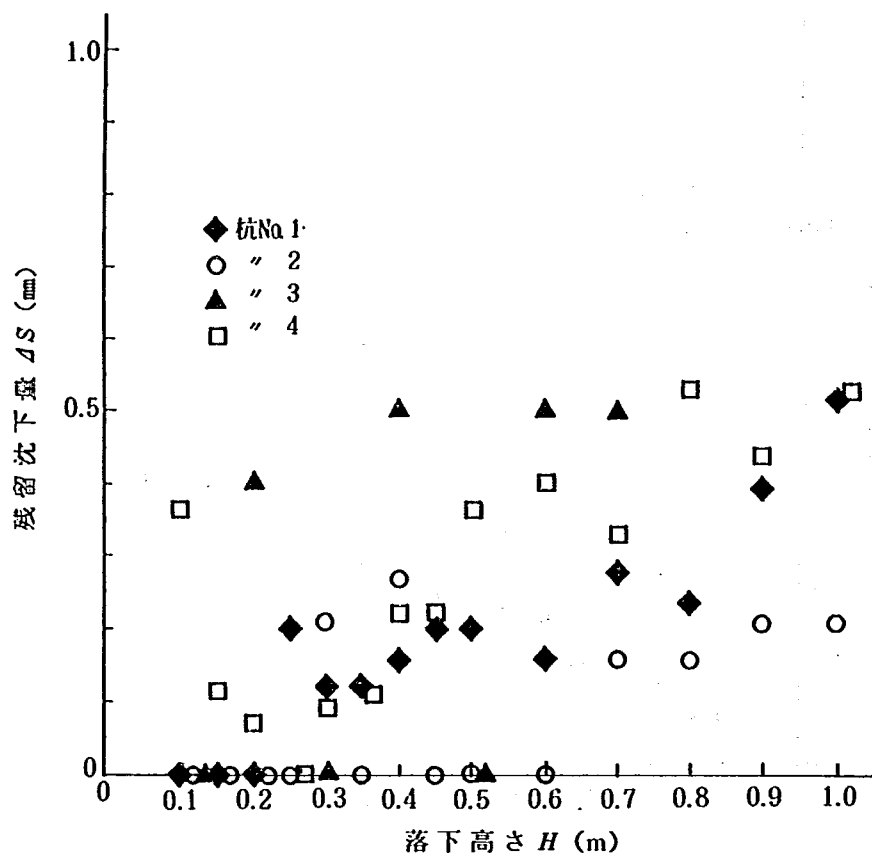


図 2.23 ハンマ落下高さと弾性沈下量 (オプトフォローによる測定)

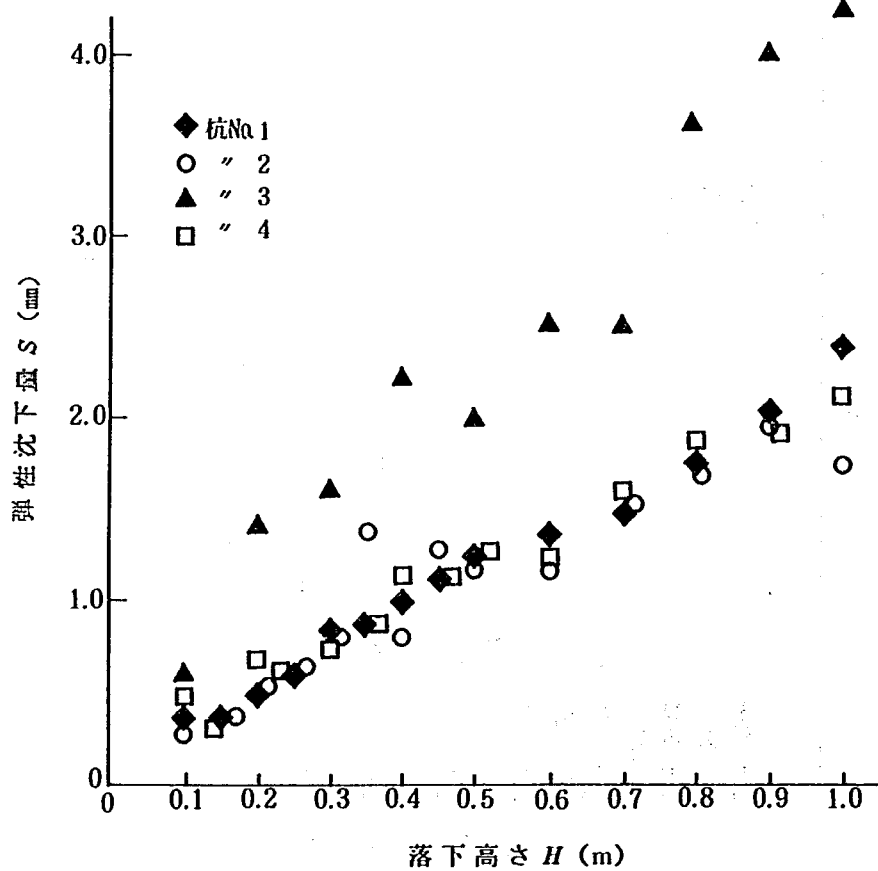


図 2.24 ハンマ落下高さと残留沈下量 (オプトフォローによる測定)

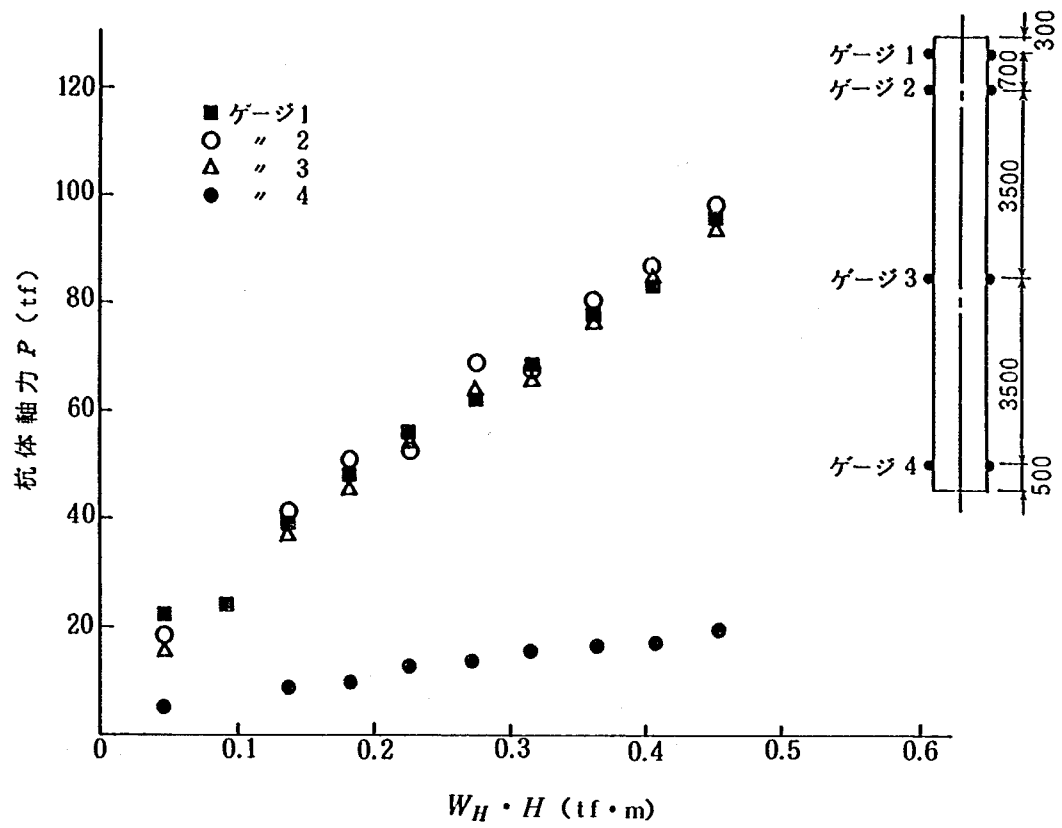


図 2.25 打撃エネルギー $W_H \cdot H$ と杭体軸力 (試験杭 No. 1)

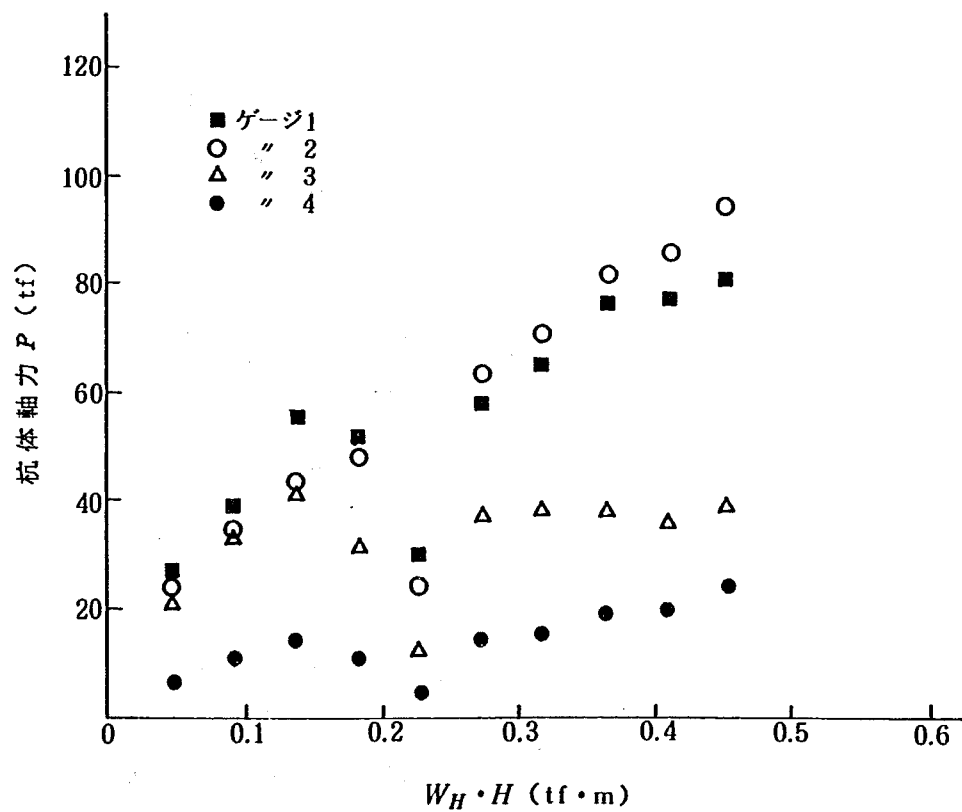


図 2.26 打撃エネルギー $W_H \cdot H$ と杭体軸力 (試験杭 No. 2)

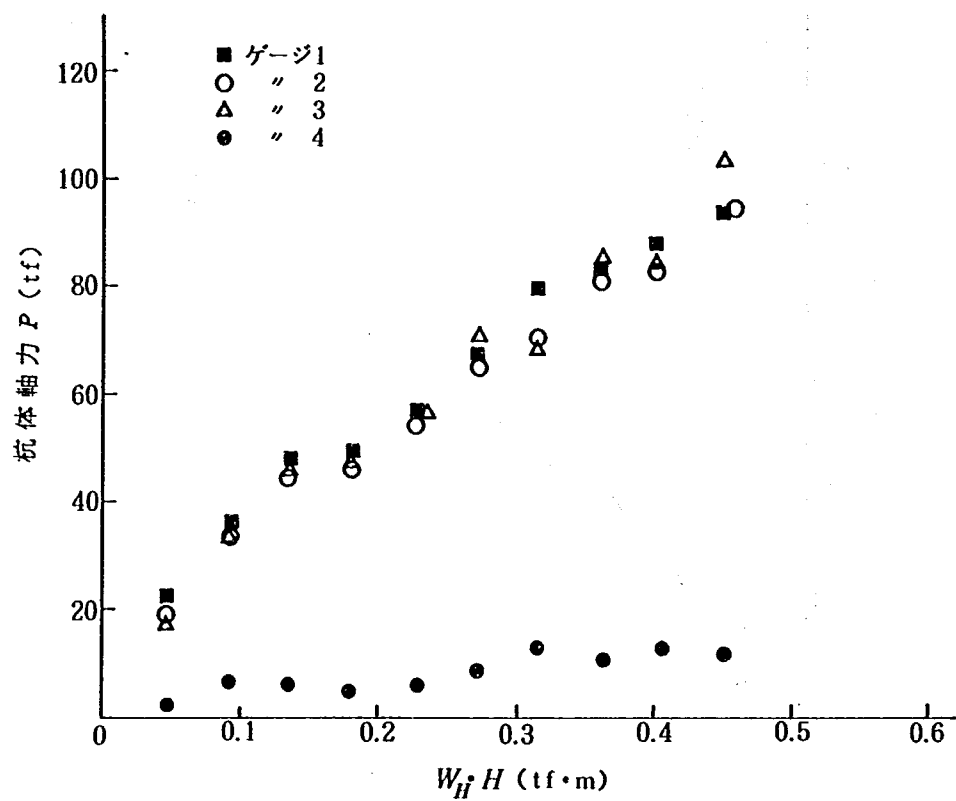


図 2.27 打撃エネルギー $W_H \cdot H$ と杭体軸力 (試験杭 No 3)

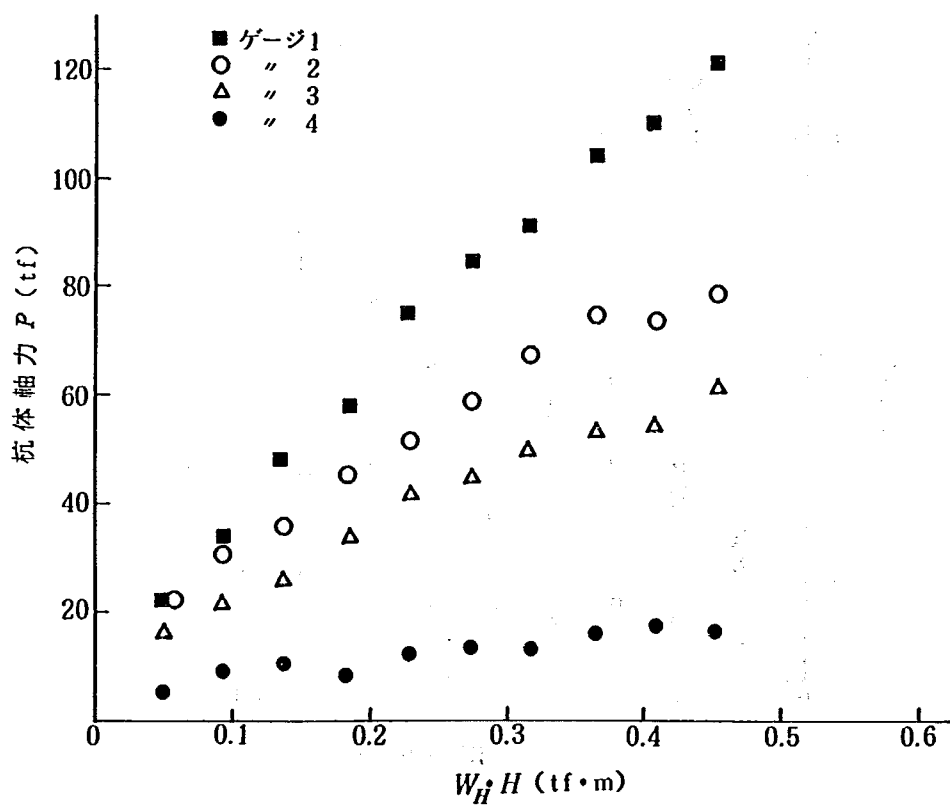
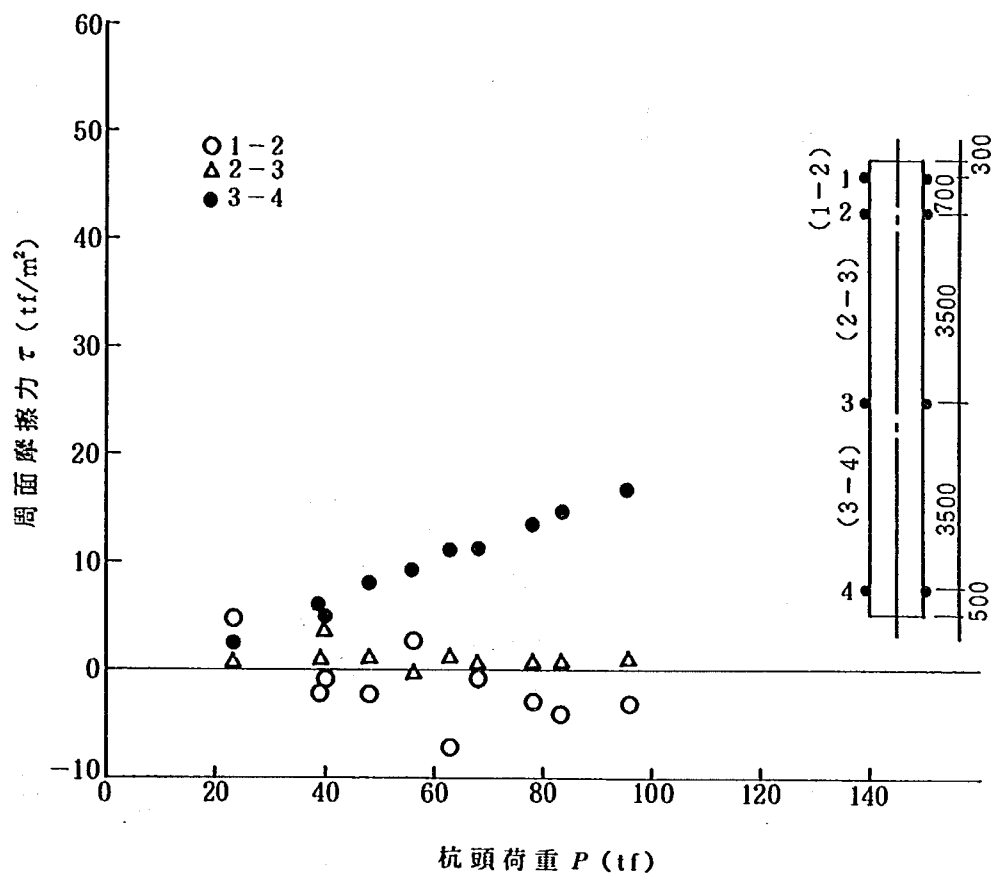


図 2.28 打撃エネルギー $W_H \cdot H$ と杭体軸力 (試験杭 No 4)



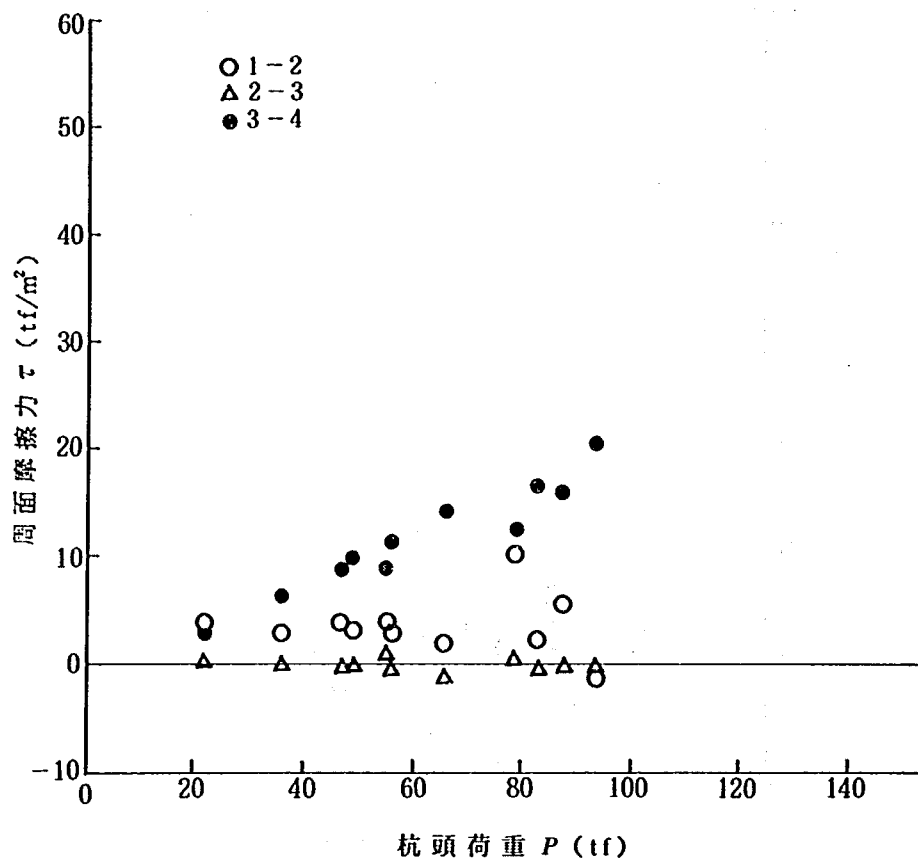


図 2.31 杭頭軸力と周面摩擦力 (試験杭No.3)

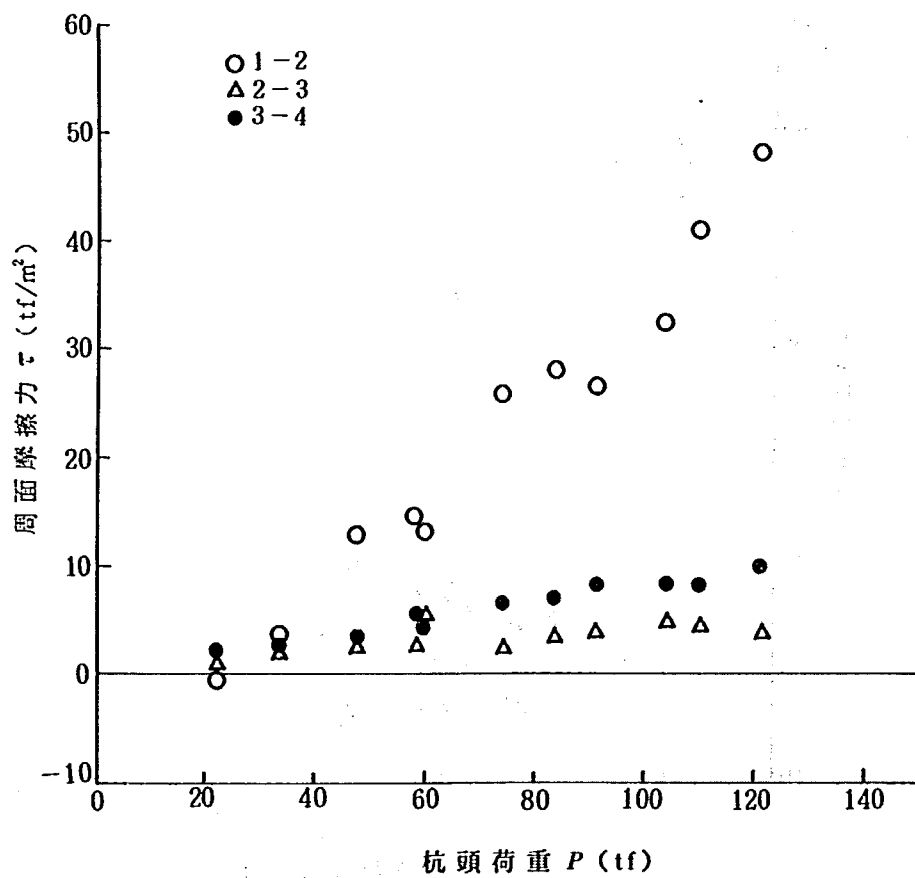


図 2.32 杭頭軸力と周面摩擦力 (試験杭No.4)

2.3.2 静的載荷試験結果

各試験杭の静的載荷試験結果を表 2.17 及び図 2.33 に示す。また、静的載荷時の杭体応力分布を図 2.34 ～図 2.37 に示す。これらもモルタルの根固め状態に対応した応力分布となっている。また、衝撃載荷試験結果と比べても良い相関性が得られている。(図 2.15～図 2.18 参照)

表 2.17 静的載荷試験結果

項目	試験杭 No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
試験杭寸法	φ406.4×t12×L8500	"	"	"
建込施工日	58.12.24 ⁽⁴⁾	58.12.23 ⁽³⁾	" (2)	" 建込順(1)
建込深度 GL-m	GL-8100	GL-8130	GL-8100	GL-8350
モルタル注入量 注入状況	400 t	400 t 管内 GL-1,730	400 t	800 t GL±0 オーバフロー
建込状況	自沈 GL-7.5 H=0.5 N=14 S=30	自沈 GL-6.4 H=0.1~0.3 N=80 S=30	自沈 GL-3.3 H=0.2~0.1 N=87 S=20	自沈-8.35
衝撃載荷試験	前	前	後	後
鉛直載荷試験日 (載荷延時間)	58.1.31 58.2.1 (17°10分)	58.1.27 58.1.28 (11°06')	58.2.3 58.2.4 (24°01')	58.2.1 58.2.2 (26°36')
サイクル数,荷重ステップ	4 サイクル 5 TON	3 サイクル 10 TON	6 サイクル 5 TON	6 サイクル 5 TON
最大荷重	40 TON	60 TON	60 TON	70 TON
最大沈下量	20.44 (打切)	113mm	83.76mm	93.11mm
降伏荷重	log P-log S	40 TON	38 TON	44 TON
	S-log t	40 TON	50 TON	55 TON
	dS/dlog t-P	33 TON	50 TON	40 TON
極限荷重	試験せず	60 TON	60 TON	60 TON

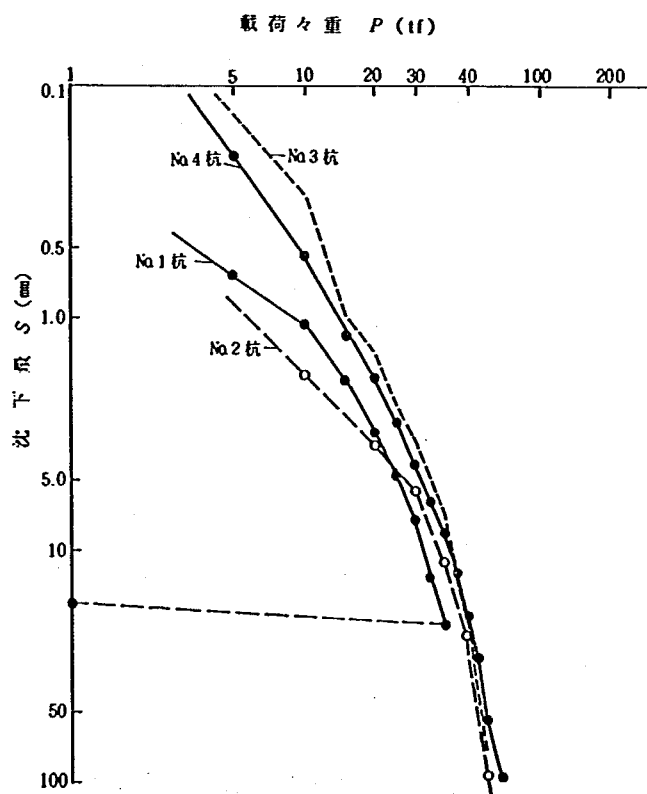


図 2.33 鉛直載荷試験結果 log P-log S 線図

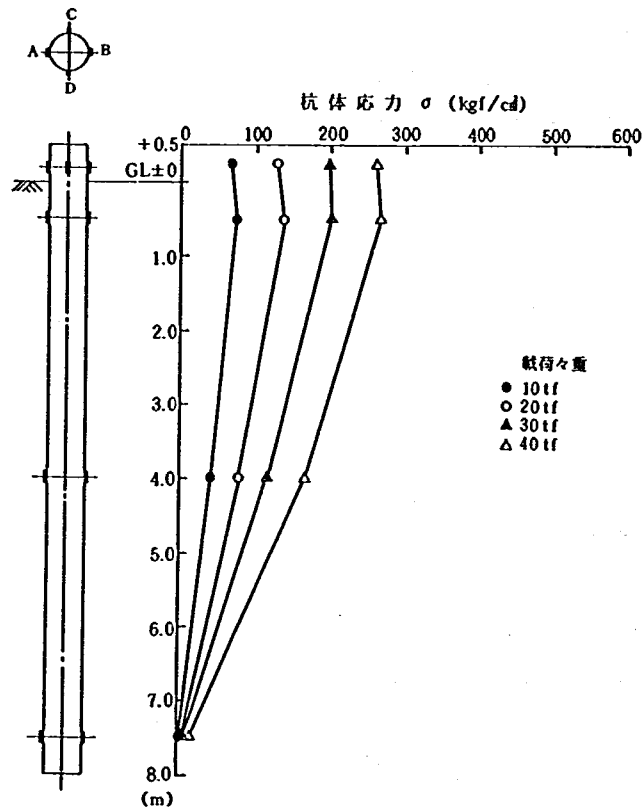


図 2.34 杭体応力分布図 (試験杭No 1)

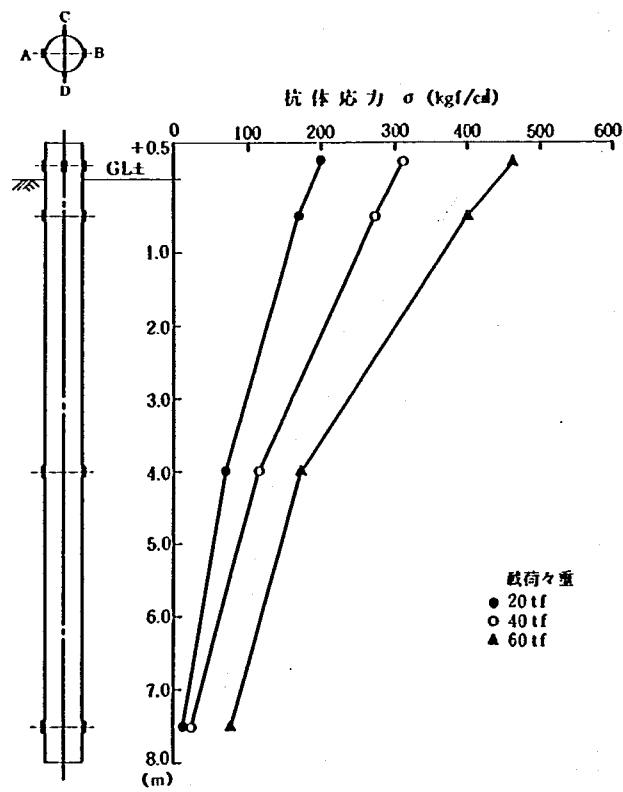


図 2.35 杭体応力分布図 (試験杭No 2)

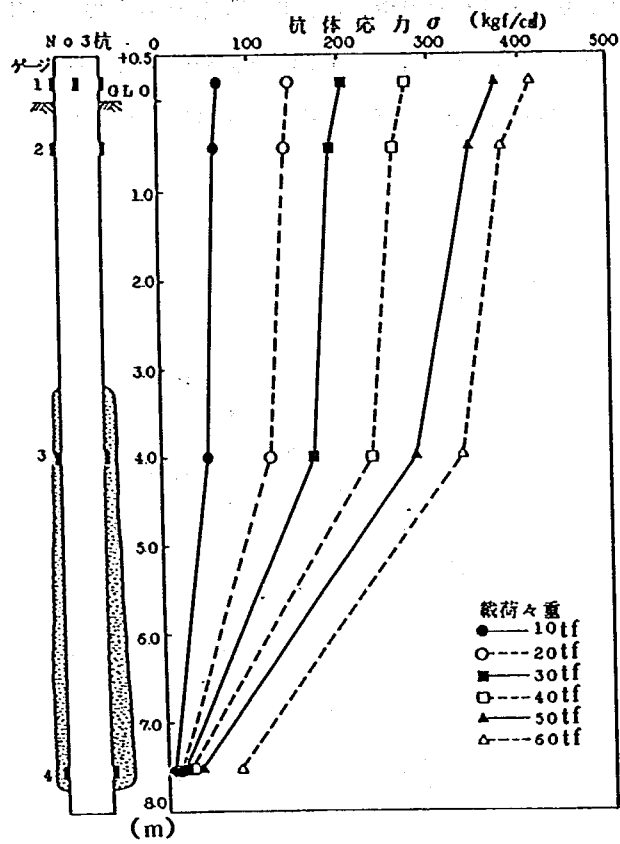


図 2.36 杭体応力分布図 (試験杭No 3)

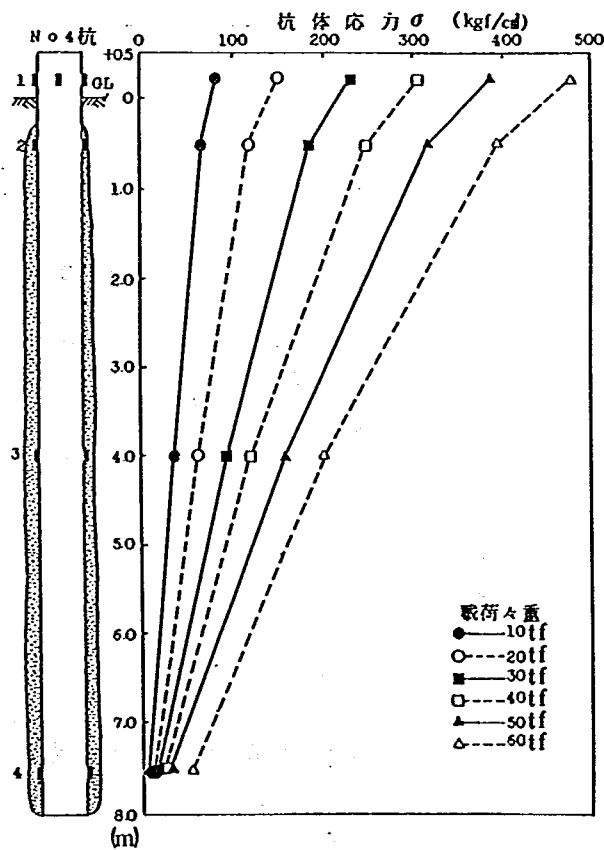


図 2.37 杭体応力分布図 (試験杭No 4)

図 2.38～図 2.41には杭頭軸力と周面摩擦力の関係を示す。既出の図 2.29～図 2.32と比べると周面摩擦力の発現において明白な差異がみられる。例えば、No 1 杭で衝撃载荷ではゲージ 3～4 間が主な周面摩擦の発現区間となっているが、静的载荷試験ではゲージ 2～3 間から発現し、衝撃载荷よりも浅い深度から周面摩擦が作用しているようである。

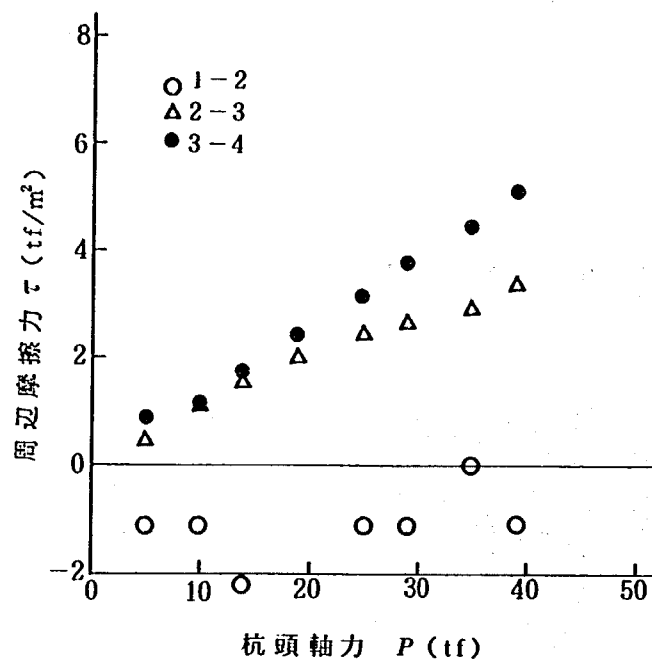


図 2.38 杭頭軸力と周面摩擦力（試験杭No 1）

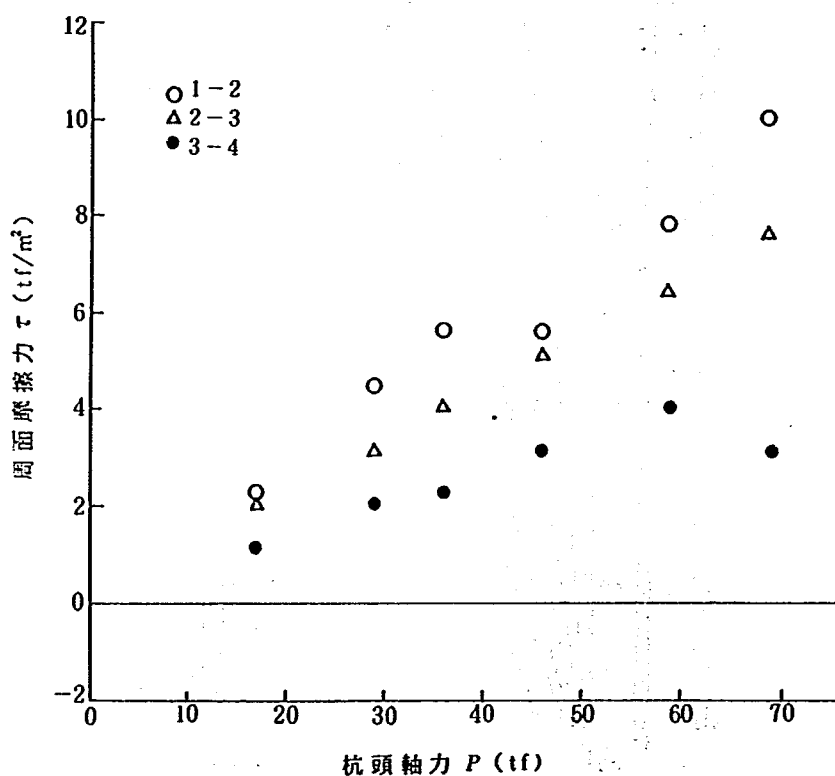


図 2.39 杭頭軸力と周面摩擦力（試験杭No 2）

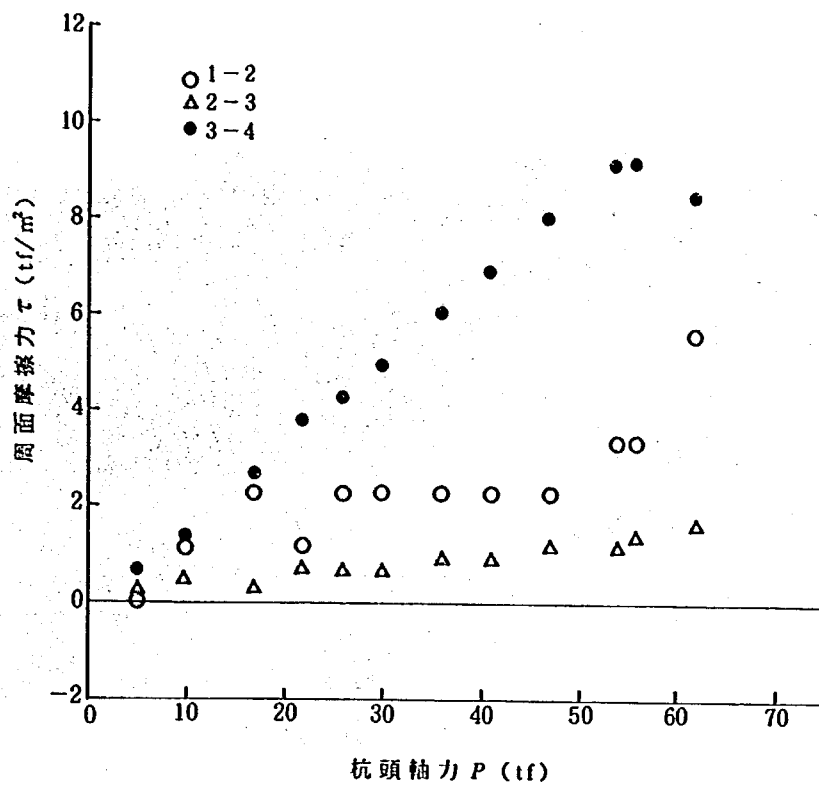


図 2.40 杭頭軸力と周面摩擦力（試験杭No 3）

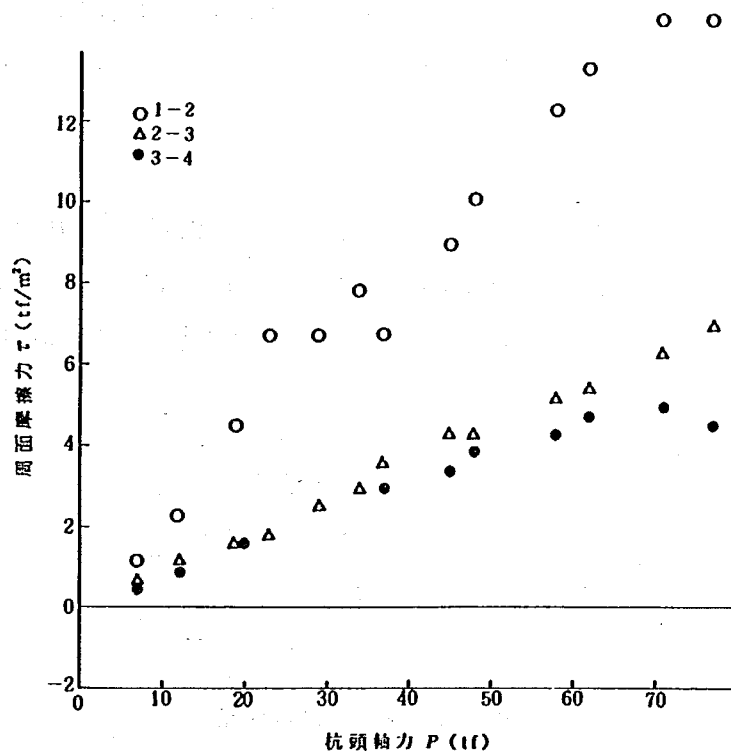


図 2.41 杭頭軸力と周面摩擦力（試験杭No 4）

2.3.3 掘削による埋設杭の根固め状況

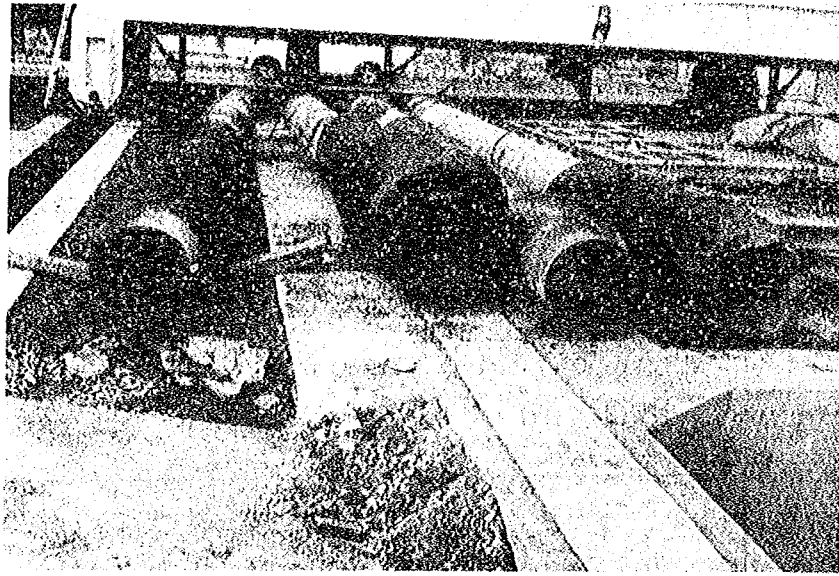


写真-10 埋設杭の掘削

(1) 掘削要領

No.1～No.4 杭について、それらの根固めを観察した。

掘削は1.2 m³バックホーによりピット囲りより掘削、杭周囲は人力により掘削し、写真記録を行なった。G L－6.0 mまでバックホーにより開削したがそれ以上はアーム長さがないためクレーン(15 tf)により、吊上げ引抜いた。先端埋込抵抗が大きいためバックホーにより前後左右にゆすぶり吊上げ引抜いた。

(2) コンクリート付着状況

掘削の結果を図2.42に示す。No.1とNo.3 杭はほぼ同じような根固めで杭中央部から下半部に良好な根固めを形成していた。No.2 杭は厚さ1cm以下のモルタルが杭全長に薄くはりついているだけであった。そして、No.4 杭は注入量が1,000ℓであったため杭全長に良好な根固めが形成されていた。

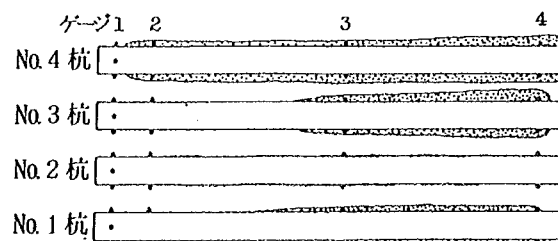


図 2.42 モルタルの付着状況

3. フィールド実験 1（埋設杭に関する検討）

3.1 実験目的と概要

本実験は根固め処理を伴う埋設杭工法の支持力増大法を検討するとともに、簡易な施工管理手法として軽重量ハンマーによる衝撃载荷試験の適用性について検討する。

本実験の概要は以下のとおりである。

- (1) 埋設杭の施工
- (2) 施工時振動・騒音の測定
- (3) 衝撃载荷試験
- (4) 静的载荷試験装置の設置
- (5) 静的载荷試験

3.2 実験方法

3.2.1 実験地盤条件

実験場所は土木研究所土工機械実験場である。実験場所の平面見取図を図 3.1 に、地質調査の代表例として No.4 ボーリングの調査結果を図 3.2 に示す。

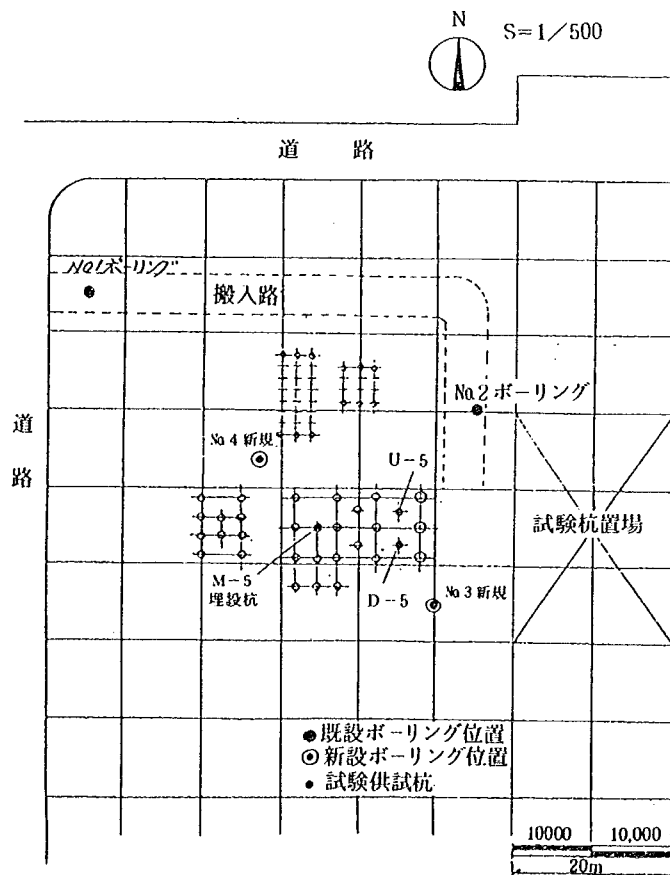


図 3.1 実験場所の平面見取図

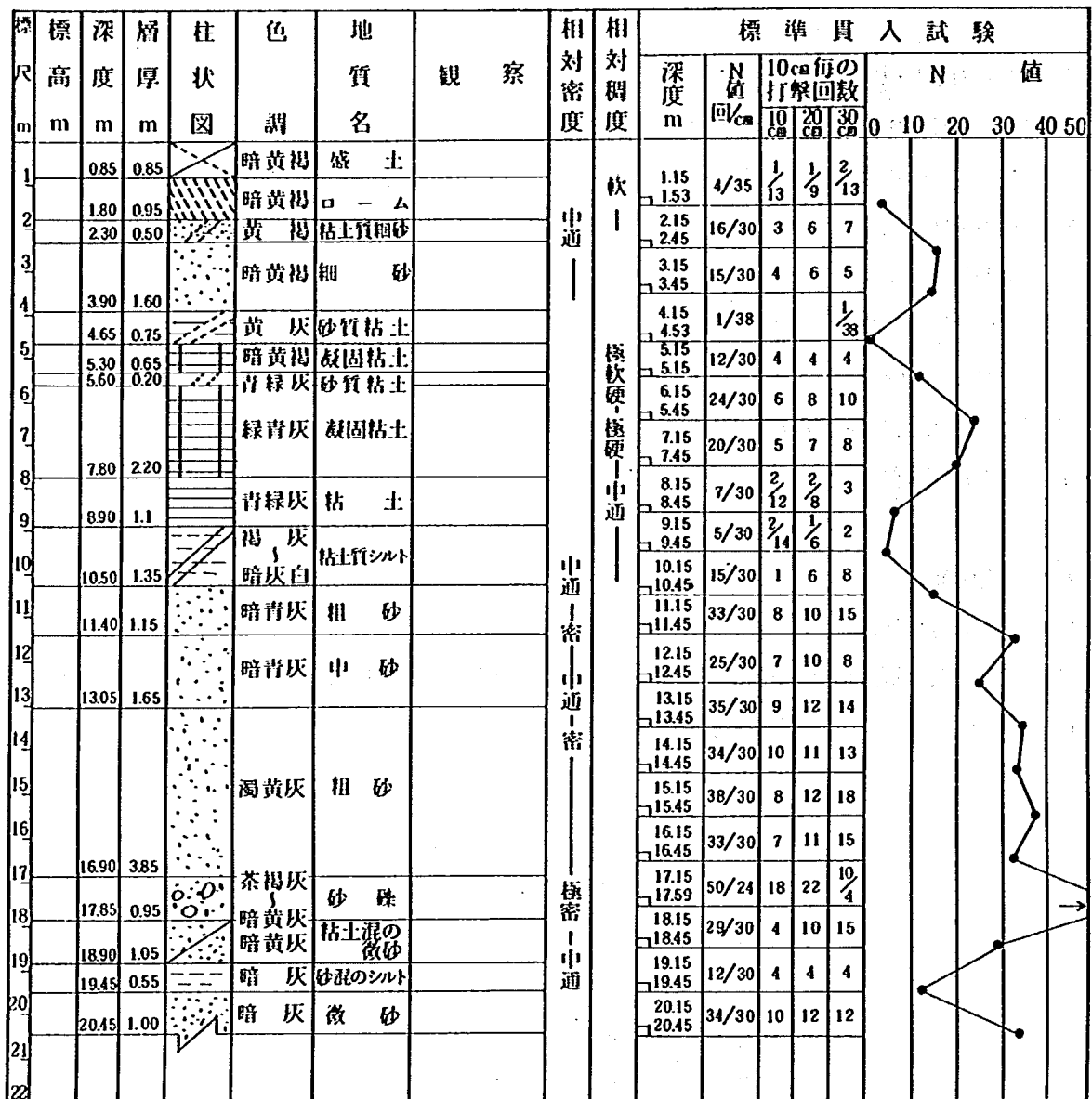


図 3.2 No 4 ボーリングの調査結果

GL-10m以浅は軟弱層が分布しているが、GL-10m以深では細砂・粗砂が多く分布しているため比較的密な地盤となっている。GL-16m以深は堅固な地盤となっている。

3.2.2 試験杭の条件

供試した試験杭の仕様は表3.1に示すとおりである。試験杭の外表面には鉛直載荷試験時および衝撃載荷試験時の杭体応力分布を測定するためストレングージを貼付し、保護プロテクターを取付けた。また、杭先沈下量を測定するため沈下ロッドガイド管を取付けた。

表3.1 試験杭の仕様

試験杭	品名	周長 L_c (m)	外径 D (mm)	厚さ t (mm)	総重量 W (kgf)	杭長 L (m)
(寸法)	バイル用鋼管	1.57	500mm	12.0mm	1,296kg	19.0
	KPS-0260	断面積 A (cm ²)	断面係数 Z (cm ³)	断面2次モーメント I (cm ⁴)	回転半径 r (cm)	閉塞面積 A_p (m ²)
	スパイラルシーム管	184.0	219×10	548×10 ²	17.3	0.2
ゲージ保護 プロテクター	品名	幅 W (mm)	高さ H (mm)	フランジ厚 t_1 (mm)	ウェブ厚 t_2 (mm)	単位重量 W_m (kg/m)
	溝形鋼	125	65	8.0	6.0	13.4
	SS-41	断面積 A (cm ²)	重心位置 C_y (cm)	断面係数 Z_y (cm ³)	断面2次モーメント I_y (cm ⁴)	断面二次半径 i_y (cm)
	——	17.11	1.94	14.4	65.5	1.96
杭先沈下ロッド 保護管	品名	外径 D (mm)	肉厚 t (mm)	単位重量 W_m (kg/m)	周長 L_c (cm)	閉塞面積 A_p (cm ²)
	圧力配管用鋼管	60.5	5.5	7.46	19.01	28.75
	STPT-42	断面積 A (cm ²)	断面係数 Z (cm ³)	断面2次モーメント I (cm ⁴)	断面二次半径 i (cm)	
	——	9.50	72.58	65.52	6.30	

試験杭の杭先先端部内面にはフリクションカッターとしてφ500×12mm 鋼管四分割したものを溶接して取付した。図3.3には埋設杭先端図を示す。

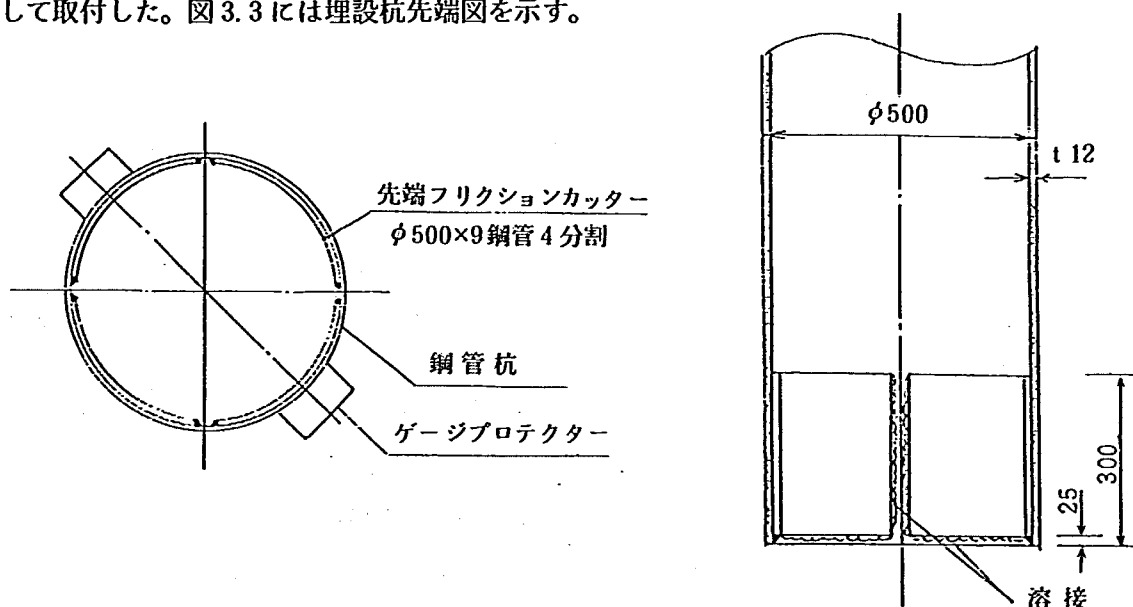


図3.3 試験杭先端図

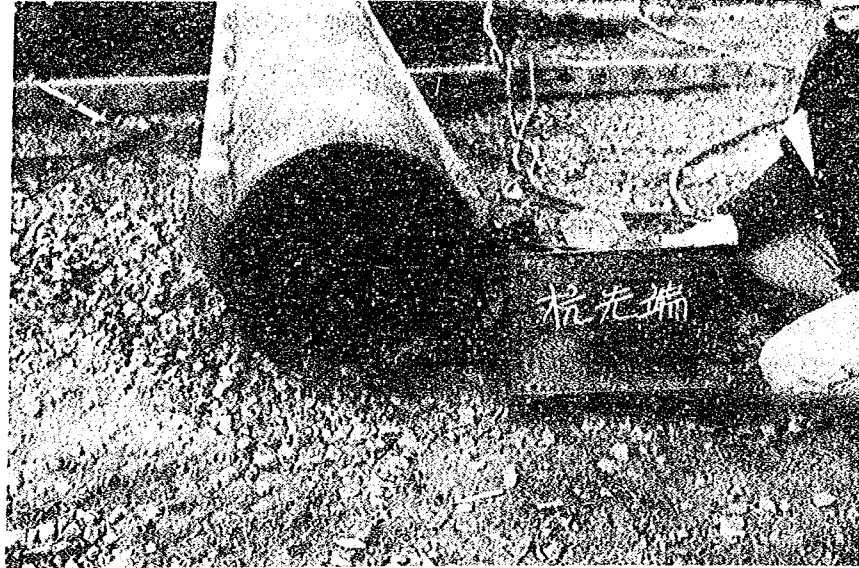


写真-11 杭先端状況

以下には、杭先端の断面積を各条件毎に示している。

- (1) 試験杭のみの場合 $A_1 = 184 \text{ cm}^2$
 閉塞断面積 $A_p = 2,000 \text{ cm}^2$ ($A_p/A_1 = 0.092$)
- (2) 先端フリクションカッター $A_2 = 368 \text{ cm}^2$ ($A_2/A_1 = 2.00$)
 を加えた場合 閉塞断面積 $A_p = 2,000 \text{ cm}^2$ ($A_{p2}/A_2 = 0.184$)
- (3) ゲージ保護プロテクターを加えた場合
 (イ) 試験杭体断面積 $A_3 = 218.2 \text{ cm}^2$ ($A_3/A_1 = 1.18$)
 $A_3 = A_1 + 2\text{ } \square = 184 + (2 \times 17.11)$
 (ロ) 先端コーンを含む場合
 閉塞断面積 $A_{p2} = 2,223.5 \text{ cm}^2$ ($A_{p2}/A_p = 1.11$)
 先端コーン $2Ac = 2 \times (14.9 \times 7.5) = 223.5 \text{ cm}^2$
 (ハ) 先端実断面積 $A_4 = 591.5 \text{ cm}^2$ ($A_4/A_1 = 3.21$)
 $A_4 = A_1 + A_2 + 2Ac = 184 + 184 + 223.5$
- (4) 沈下ロッド保護管を加えた場合
 (イ) 試験杭体断面積 $A_5 = 227.7 \text{ cm}^2$ ($A_5/A_1 = 1.24$)
 $A_5 = A_1 + 2\text{ } \square + (\pi D^2/4) = 184 + 34.2 + 9.50$
 (ロ) 先端コーンを含む場合
 閉塞断面積 $A_{p3} = 2,285.2 \text{ cm}^2$ ($A_{p3}/A_p = 1.14$)
 先端コーン $Ac_2 = 8.45 \times 7.3 = 61.7 \text{ cm}^2$
 $A_{p3} = 2,223.5 + 61.7 \text{ cm}^2$

い) 先端実断面積 $A_s = 653.2 \text{ cm}^2$ ($A_s / A_1 = 3.55$)

3.2.3 埋設杭の施工

(1) 埋設杭の建込み

表 3.2 には施工条件を示す。

表 3.2 埋設杭施工の条件

1	オーガ掘削孔径・深度	$\phi 600 \text{ mm}$, GL - 16.0 m
2	掘削液	なし, 無排土削孔
3	根固め液の配合	$W / C = 65 \%$
4	根固め液注入量	1,000 ℓ
5	上下反復回数	3 回
6	反復攪拌範囲	削孔先端より 5 m
7	埋設杭の建込深度	GL - 15.0 m

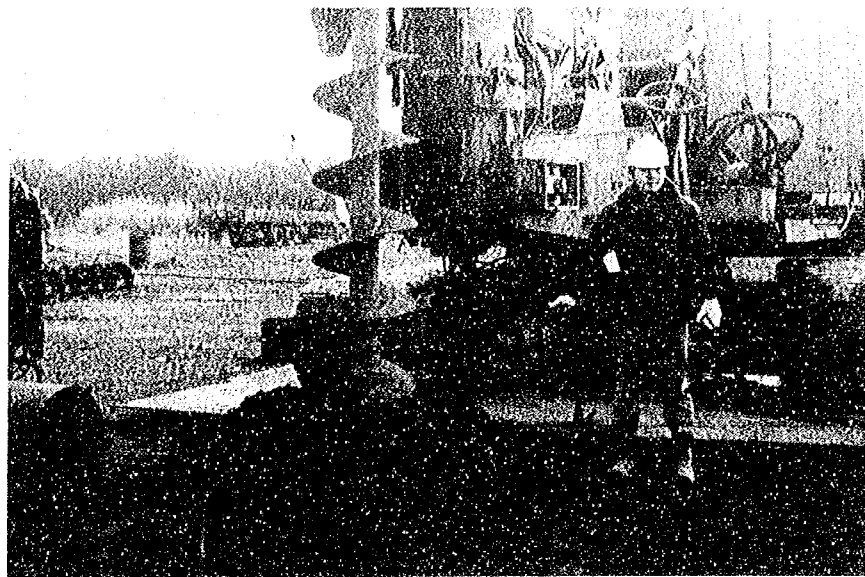


写真-12 オーガ掘削中

施工順序は下記のとおりである。

- ① 所定の杭位置に $\phi 600$ オーガにより GL - 16.0 m まで掘削する。なお, 無排土として試験杭を建込む。
- ② 所定深度まで掘削した後, オーガ先端より根固め液 ($W / C = 65 \%$ セメントミルク) を注入し, 3 回上下動させ反復攪拌する。攪拌範囲は削孔先端より 5 m とする。
- ③ 反復攪拌後, オーガを反転させ空練りしながら引上げる。
- ④ 攪拌した掘削孔芯に鋼管杭を所定深度 (GL - 15.0 m) に建込む。

⑤ 建込みは鋼管が自重のみで挿入できない場合は圧入または打込みを行なう。

⑥ 建込み完了後 4 週間養生を行なう。

(2) 施工重機

埋設杭の施工に使用した重機は表 3.3 に示す仕様のものを使用し、図 3.4 のように配置した。

表 3.3 施工重機の仕様

区 分	項 目	仕 様
杭 打 ち 機	ヤグラ形式	1 柱 2 脚 2 面 リーダー回転式
	ヤグラ全高	26.20 m
	全長, 全幅	8.53×5.7 m
	リーダー長さ	24.0 m
	打込杭・全長	15.0 m
	打込杭最大重量	8.0 tf
	最大作業半径	4.39 m
	リーダースライド半径	2.0 m
	作業時重量	99.8 tf
	エンジン定格出力	147 PS/ 1475 r. p. m.
ア ー ス オ ー ガ	削 孔 径	600 mm
	オーガ長さ	17.0 m
	定格出力	14 r. p. m. 4.09 tf・m
注 入 ポ ン プ	ミキサー容量	800ℓ×2
	注入ポンプ容量	28ℓ/min
	最大注入圧力	14 kgf/cm ²
デ ィ ー ゼ ル 発 電 機	エンジン仕様	210/245 PS
	発電機仕様	1175 r. p. m./200 kVA
	定格出力	200, 400/220 440 V
		50/60Hz, 80%, 3 P
トラッククレーン	最大吊荷重	25 tf

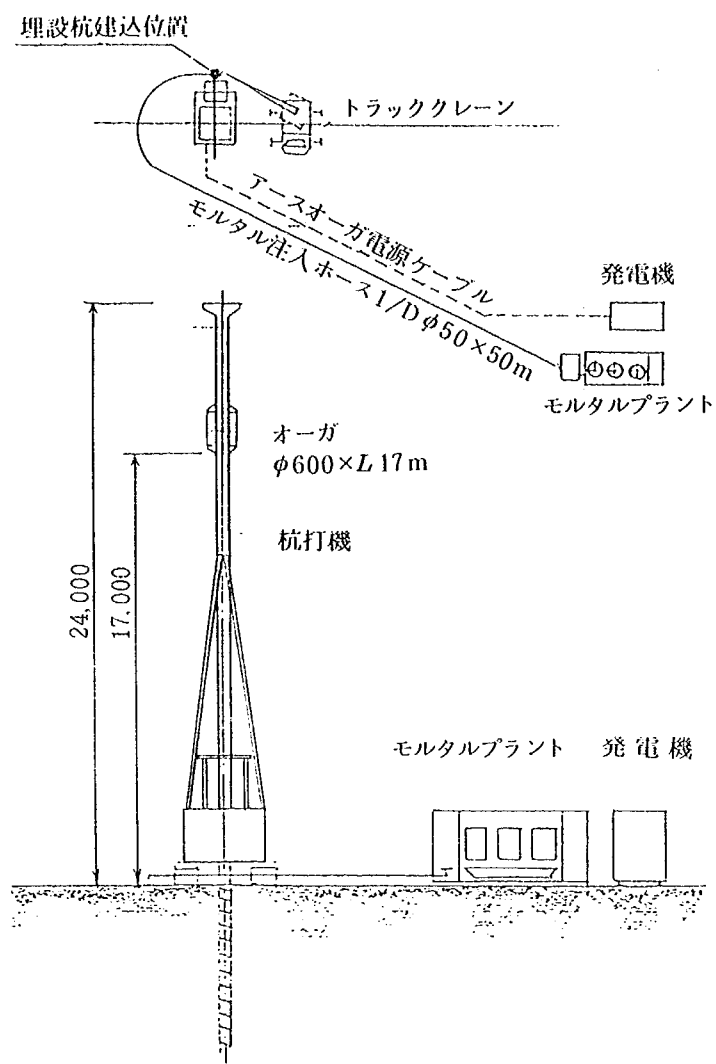


図 3. 4 施工重機の配置

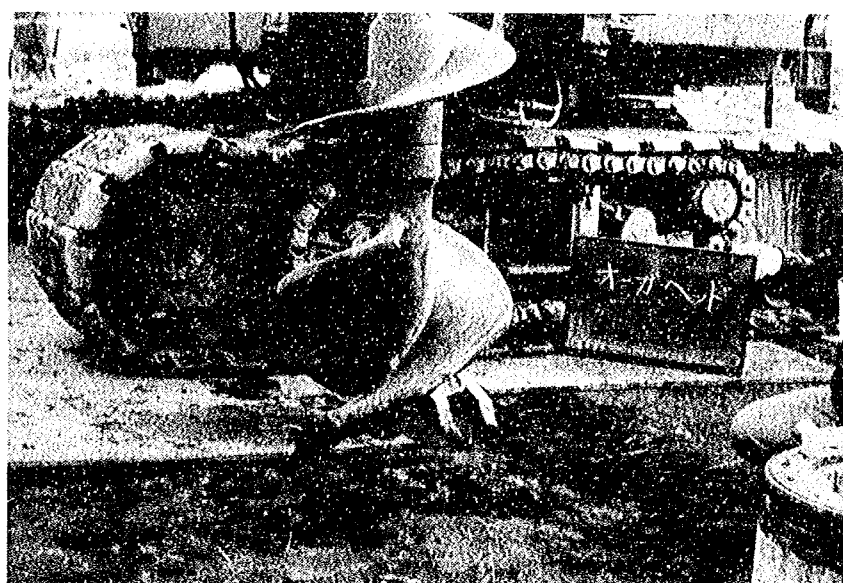


写真-13 オーガヘッド形状

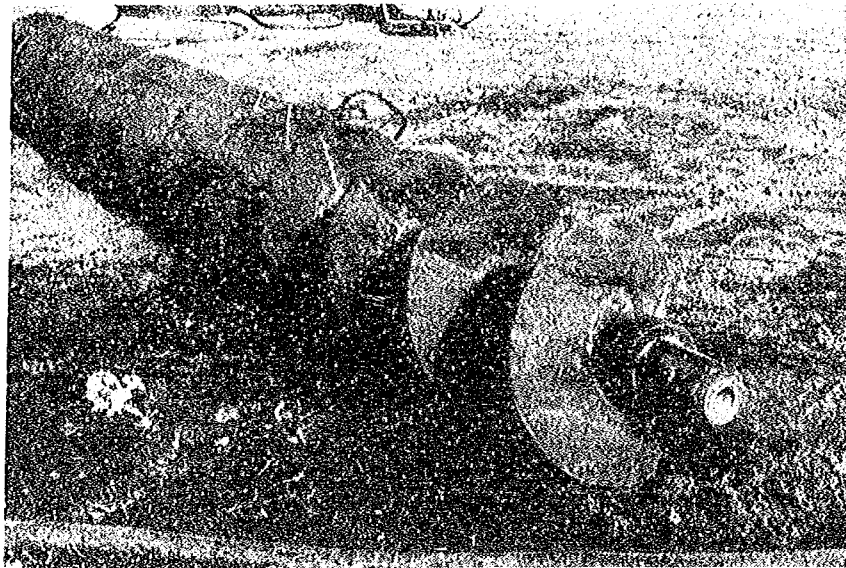


写真-14 オーガスクリュー

(3) 埋設杭の建込結果

埋設杭の施工時間線図を図 3.5 に示す。

所定の位置にアースオーガにより $\phi 600\text{mm}$ 深度 $\text{GL} - 16\text{m}$ (杭先余掘 1m) として掘削し、オーガ先端よりセメントミルクを注入した。オーガ先端の注入抵抗が大きく注入圧が 150kgf/cm^2 になったためオーガを徐々に反転引上しながら注入圧 $8 \sim 12\text{kgf/cm}^2$ (ポンプ圧力)、注入時間 $6\text{分}28\text{秒}$ 間で約 1000ℓ 注入した。

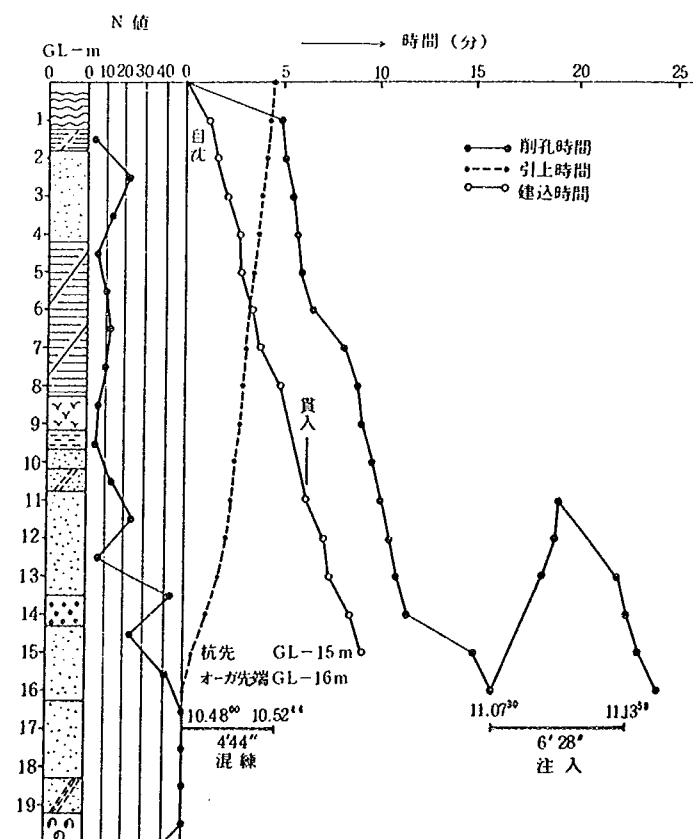


図 3.5 埋設杭施工時間線図

注入後、オーガを正転してG L - 16mまで上下復動して逆転無排土のままオーガスクリーパーを引上、削孔芯に試験杭を杭打ち機によって吊込み鉛直度を出して自重により建込んだ。杭自重（約 1.959 tf）による杭の沈下はG L - 2.5 mであった。

建込貫入しないためディーゼルハンマー（重量7.5 tf）を載せても殆んど貫入しないためディーゼルハンマーによる打撃打込みを行なった。G L - 6 mまでは発火せず、落下のみによる打込みとし、G L - 7 mでは2打発火、G L - 8 mより10.5 mまで急激に沈下し、その後に落下高さ1.2 mで連続打撃により建込みした。

打撃回数は計47回、最終根入の1打当りの貫入量は5 cmであった。

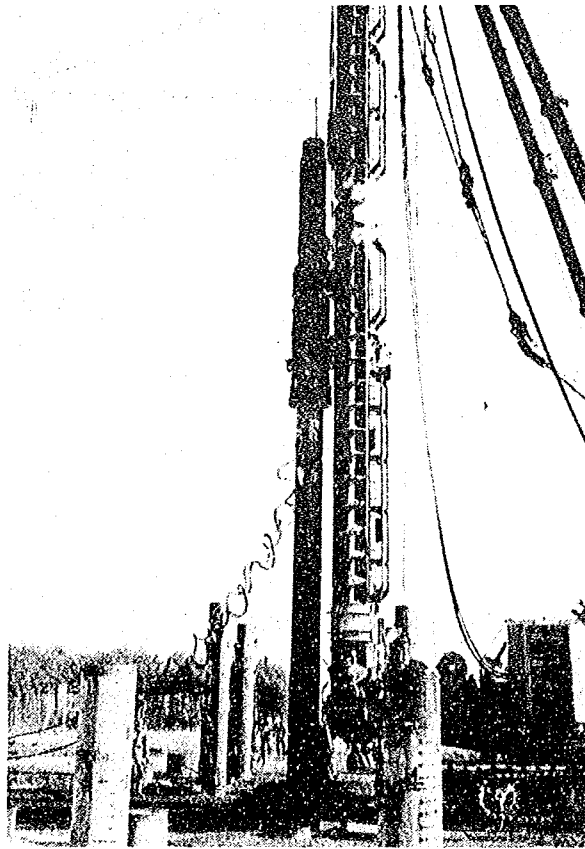


写真-15 杭建込み中（打ち込み）

図 3. 6 に打込み貫入線図を示す。

(4) 地表面排土と注入モルタル

① 地表面排土

- | | |
|--------------|------------------------|
| (1) 地表面排土量 | 約 0.411 m ³ |
| (2) 削孔開口容量 | 約 0.396 m ³ |
| (3) 地下水位 レベル | G L - 1.4 m |
| (4) 排土換算開口深度 | G L - 1.45 m |

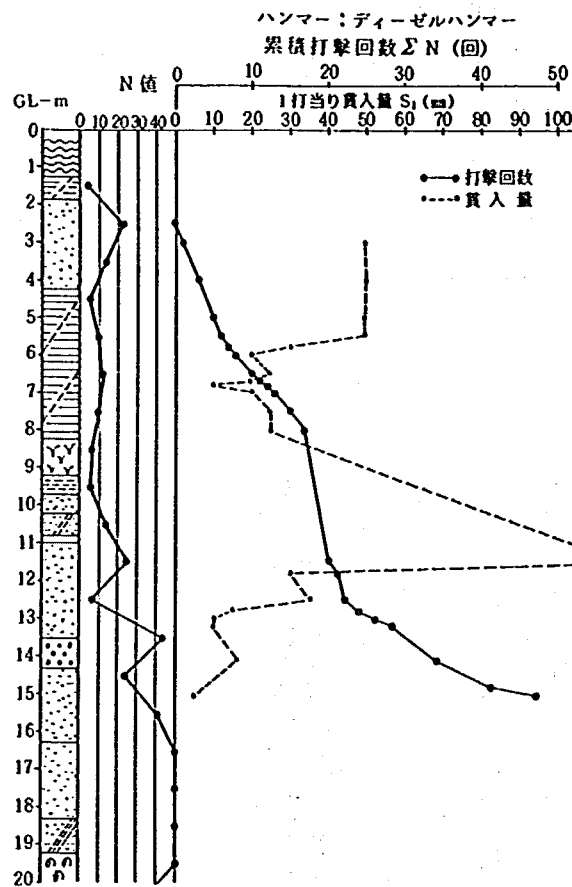


図 3.6 打込み貫入線図

② 注入モルタル

- | | |
|------------|--|
| (1) 使用セメント | 普通ポルトランドセメント |
| (2) 使用水 | 水道水 |
| (3) セメント量 | 26袋 @ 40 kg = 1,040 kg |
| (4) 水量 | 700 ℓ |
| (5) 水セメント比 | $W/C = 0.67$ |
| (6) 混練量 | 約 1,393 ℓ ($W = 693 \text{ ℓ } 1.5 \text{ kg/ℓ}$
$C = 700 \text{ ℓ}$) |
| (7) 注入圧力 | 100 kgf/cm ² ポンプ出口 |
| (8) 注入量 | 約 1,100 ℓ (ホース 100 ℓ
ミキサーホッパ 200 ℓ) |

③ 削孔容量とモルタル注入量

- | | |
|----------------|---|
| (1) 削孔総容量 | 4.52 m ³ (φ600×16m) |
| (2) 削孔内残土量 | 4.11 m ³ (4.52 m ³ - 0.411 m ³) |
| (3) 排土率 | 9.06% |
| (4) 削孔内モルタル容積率 | 24.34% (1.1kℓ/4.52 m ³) |
| (5) モルタル注入高 | 7.78m (空隙比 0.5) |
| (6) 打込による圧縮率 | 3.37% (削孔内の土量変化) |

(5) 騒音・振動測定

埋設杭の施工時に生ずる公害騒音レベル、公害振動レベルの測定を行った。

測定は暗騒音、暗振動、および重機類の稼動時と杭打込み時である。

図 3.7 に測定位置図、表 3.4 に測定器類の仕様を示す。

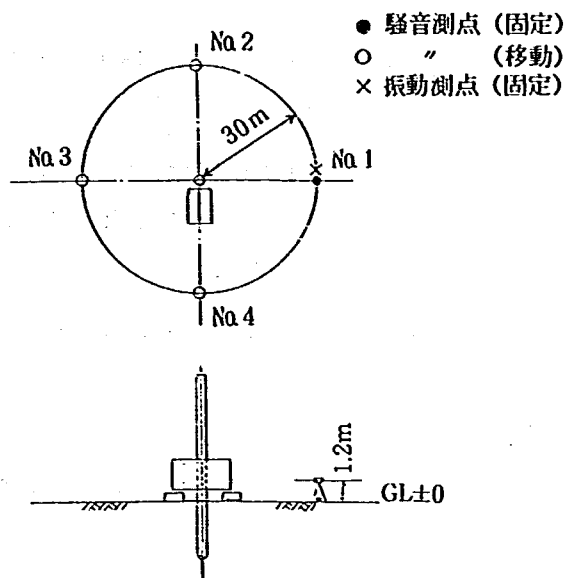


図 3.7 騒音・振動測定位置図

表 3.4 騒音振動測定器

(1) 公害騒音測定器 2 台	
(イ) 名 称	普通騒音計
(ロ) 測定範囲	35~130dB (特性A, B, C)
(ハ) マイクロホン	コンデンサ型 (風防付)
(ニ) 電 源	乾電池単21個
(ホ) 寸法・重量	8×21×6cm 約650kg
(2) 公害振動測定器 1 台	
(イ) 名 称	公害用振動レベル計
(ロ) 測定範囲	45~120dB 周波数範囲1~90Hz 振動速度 0.01~10cm/s (Peak)
(ハ) メータ指示	-5~+10dB (切換スイッチ式)
(ニ) 電源・寸法	乾電池006P×2, 26×15×11cm, 2.5kg
(ホ) ピックアップ	PV-83型 3方向 加速度形
(3) 騒音および振動記録器 2 台	
(イ) 名 称	レベルレコーダー
(ロ) 測定範囲	0~130dB 10, 25, 30dB切換式
(ハ) 周波数範囲	1~100,000Hz
(ニ) 記録ペン動特性	FAST, SLOW, VLおよび10秒

実験場所の暗騒音レベルは65～69 dBであり、埋設杭施工時は、オーガ稼動時ではほぼ70～72 dB、レッカ車のエンジン音で最も大きい79 dBであった。

試験杭建込み時に、アースオーガー孔の無排土および先端モルタル注入という条件のために杭の貫入抵抗がありディーゼルハンマーにより打撃、挿入したものでは、打撃時の騒音はハンマー落下高 $H=1\sim 1.2$ mで98～99 dBであった。

公害振動については、暗振動37～40 dB、オーガ稼動中は38～48 dB、杭打ち機移動、クレーン車稼動中に55 dB、63 dB、打込み挿入時は45～58 dBであった。

ディーゼルハンマーによる $\phi 500 \times 12$ mmの打込み時の騒音・振動では、直接打込みした場合の騒音レベルは距離30 mで96～100 dB、振動レベルは深度GL-15 m付近で71～73 dBである。

騒音レベルは杭地上部の鋼管長により騒音レベルが支配されるために大きな変化はないが、打撃回数が埋設杭の場合は非常に少ない。また、振動レベルでは掘削効果が明らかで15～46 dB低減する。

3.2.4 衝撃载荷試験

(1) 試験条件

試験杭の杭頭部を軽重量(2 t)の落下式ハンマーにより打撃して、杭頭部の沈下変位量および加速度と杭体ひずみ量を測定した。

本試験に供試した試験杭を表3.5、試験条件を表3.6に示す。また、表3.7には使用したポータラックハンマーの仕様を示す。

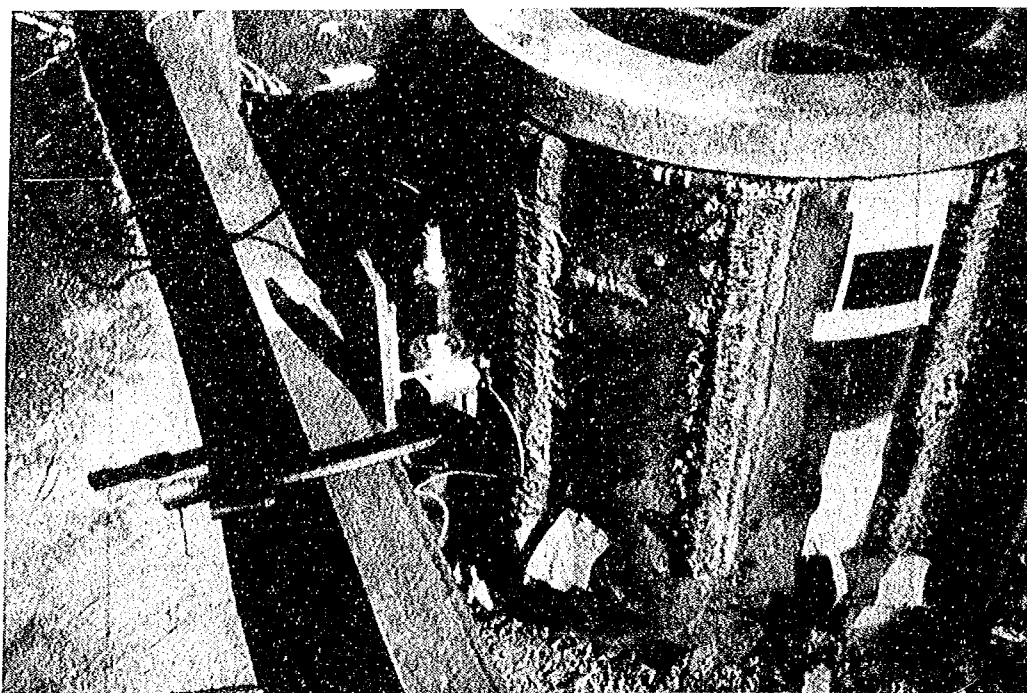


写真-16 杭頭状態



写真-17 衝撃載荷試験

表 3.5 試験杭

供試試験体	試験体名称	杭寸法 外径×肉厚×長さ	杭打方法および養生日数	数量
	①埋設杭	$\phi 500 \times t \times \ell$ $500 \times 12 \times 15.6$	$\phi 600$ アースオーガー, モルタル注入 無排土建込み養生50日	1本
	②U-5試験杭	$\phi 500 \times 12 \times 15.6$	油圧ハンマー 8.0tf $H=0.6$ m 打込, 載荷試験後11日目	1本
	③D-5試験杭	$\phi 500 \times 12 \times 15.6$	ディーゼルハンマー $H=1.2$ m 打込, 載荷試験後10日目	1本

表 3.6 衝撃載荷試験条件

区分	項目	試験条件内容
試験条件	ハンマー重量	$W = 2.0 \text{ tf}$
	落下高さ	$H = 0.1 \sim 2.0 \text{ m}$
	落下回数	各落下高さにより2～3回打撃する
	杭頭クッション	キャップ設置ハンマー直打撃

表 3.7 ハンマの仕様

く い	最 大 長 さ	10,000 mm
	最 大 重 量	1,800 kgf
掘 削 能 力	最 大 掘 削 径	450 mm
	最 大 掘 進 長	13,000 mm
パワースイペル	掘 削 ト ル ク	500 kgf・m
	回 転 数	29 r. p. m.
	引 抜 力	8,000 kgf
ハ ン マ	2,000 kgfドロップハンマ	
ウインチ(吊上)	巻 上 力	2,000 kgf
	吊 上 げ 速 度	40 m/min(素巻)
マ ス ト	形 式	丸形二面リーダ
	高 さ	11,300 mm
デ ッ キ	旋 回 角 度	245°
	旋 回 速 度	1.7 r. p. m.
	ス ラ イ ド 量	650 mm
	ス ラ イ ド 速 度	5 m/min(出)

(2) 測定方法

衝撃载荷試験では表 3.8 に示す項目を測定した。また、測定機器の仕様を表 3.9 に示す。図 3.8 にはひずみゲージの取付要領を示す。

測定値はすべてアンプを通じてデータレコーダに記録される。記録は動的現象として同時性が保たれている。

表 3.8 測定項目

No.	測 定 項 目	測 定 器 お よ び 測 定 方 法	測定点数
1	ハンマー落下高さ	ハンマー、杭頭距離のスケール測定	1
2	杭 頭 変 位 量	渦電流式非接触変位計による。	1
3	〃	オプトフォロー光学変位計による。	1
4	杭 頭 加 速 度	ひずみゲージ型加速度形による。	1
5	杭 頭 ひ ず み	A, B, C, D 4 方向 1 断面にひずみゲージによる。	4
6	杭 体 ひ ず み	2 A, B ~ 7 A, B 6 断面 2 列にひずみゲージ貼付測定	12

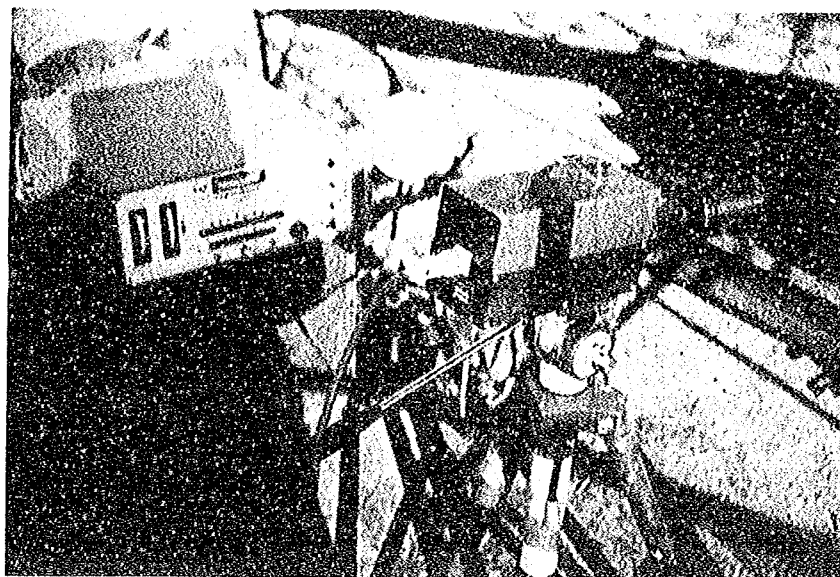


写真-18 オプトフォロカメラ

表 3.9 測定器の仕様

加 速 度 計	容量 200 g, 周波数 0~2,100 Hz, 電圧感度 0.5mV/V 容量 1,000 g, 周波数 0~5,000 Hz, 電圧感度 0.5mV/V
ひずみゲージ	ゲージ抵抗 120 Ω , ゲージ長 L 5mm, W 2mm
オプトフォロ	測定範囲 200 μ ~ ∞ , 精度 $\pm 0.2\%$ 分能率 0.02%FS, 応答周波数 DC-10 kHz
非接触型変位計	測定範囲 0~5mm, 感度 1mV/ μ

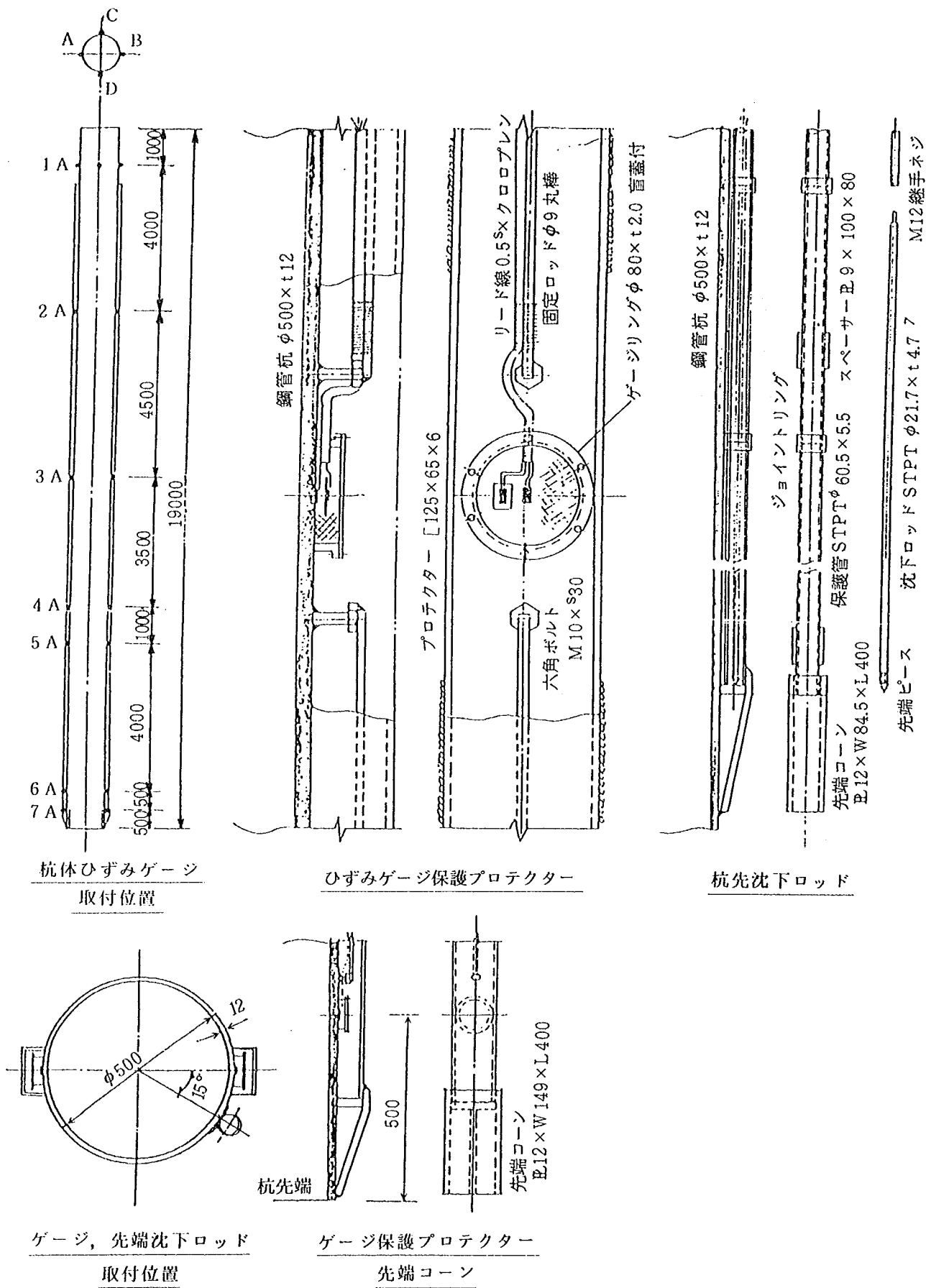


図3.8 ひずみゲージの取付け

3.2.5 静的載荷試験

(1) 試験装置

載荷装置は最大載荷荷重600 tf，反力杭6本として図3.9に示す装置を設置した。

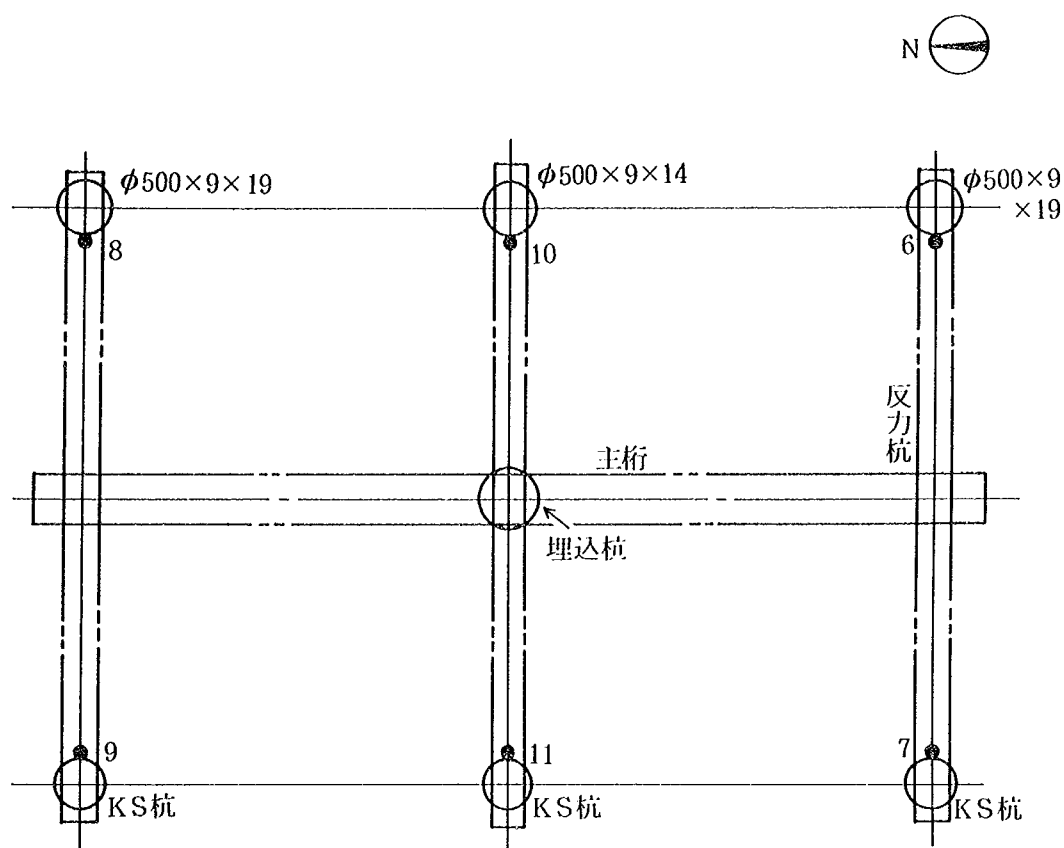


図3.9 鉛直載荷試験装置

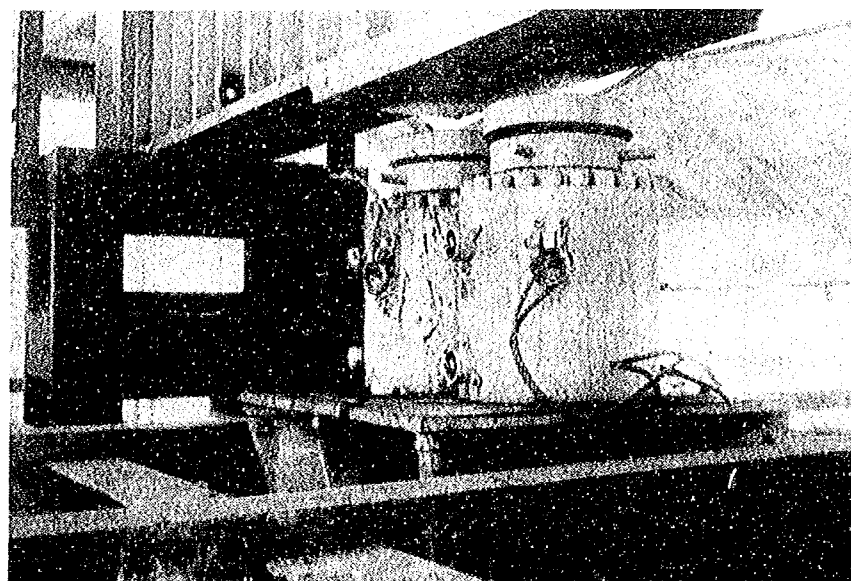


写真-19 静的載荷用油圧ジャッキ

(2) 試験条件

載荷試験は「クイの鉛直載荷試験基準」に基づく載荷方法Bにより実施した。表 3.10に試験条件を一覧する。また図 3.10には荷重段階図を示す。

表 3.10 静的載荷試験条件

項 目	試 験 条 件
載 荷 々 重	最大載荷々重 600 tf
載荷荷重段階	9 サイクル 25 tf 毎
荷 重 速 度	増荷時, 減荷時とも標準時間
荷重保持時間	処女荷重 3/100 mm以下 2 ~ 3 回沈下量記録
(処女荷重)	高荷重は 2 時間放置打切とする
(履 内荷重)	5 分間
(サイクル間 0 荷重)	60 分
測 定 時 間	0, 1, 2, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 分
測 定 項 目	載荷々重 (油圧ジャッキ 400 tf × 2) 油圧荷重力
	杭頭沈下 4 点, 杭先沈下 1 点, 反力杭引板量 6 点
	杭頭ひずみ 4 点, 杭体ひずみ 6 段 × 2 点 = 12 点
測 定 方 法	自動デジタルひずみ測定器 → 電算機

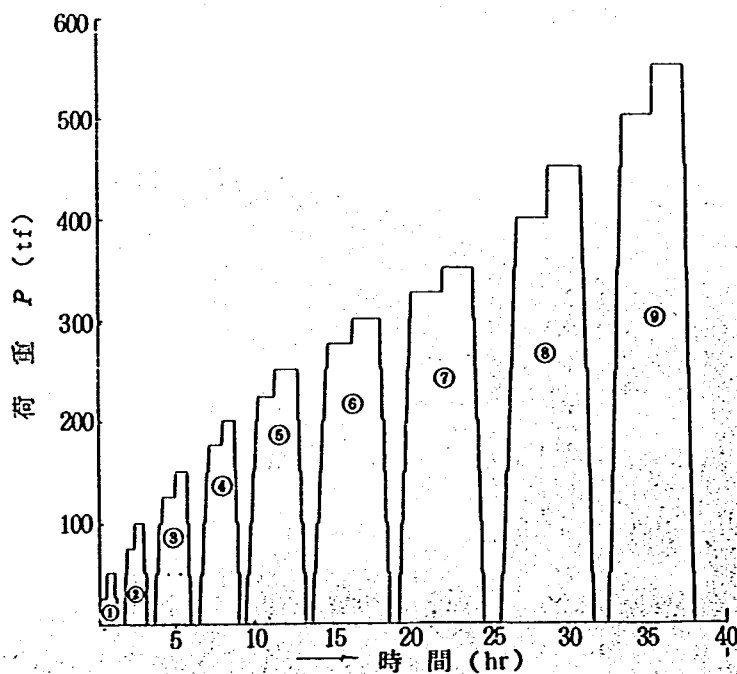


図 3.10 荷重段階図

(3) 測定項目と測定方法

静的載荷時の杭頭ひずみと杭頭変位量、そして、杭体ひずみ量、杭先沈下量を測定した。測定器を図 3.11 のように取付け、図 3.12 のように接続して載荷時の各項目を測定した。表 3.11 には各測定器の仕様を示す。

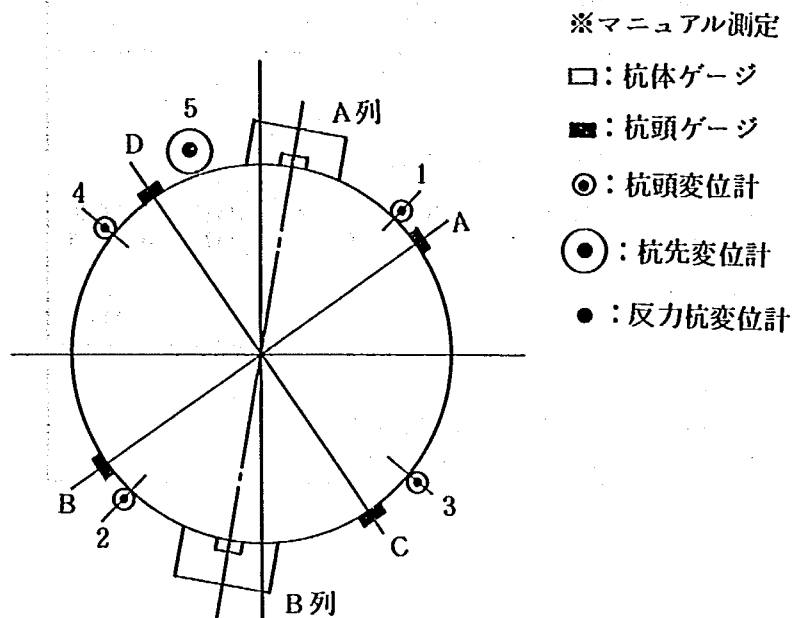


図 3.11 杭頭測定状況

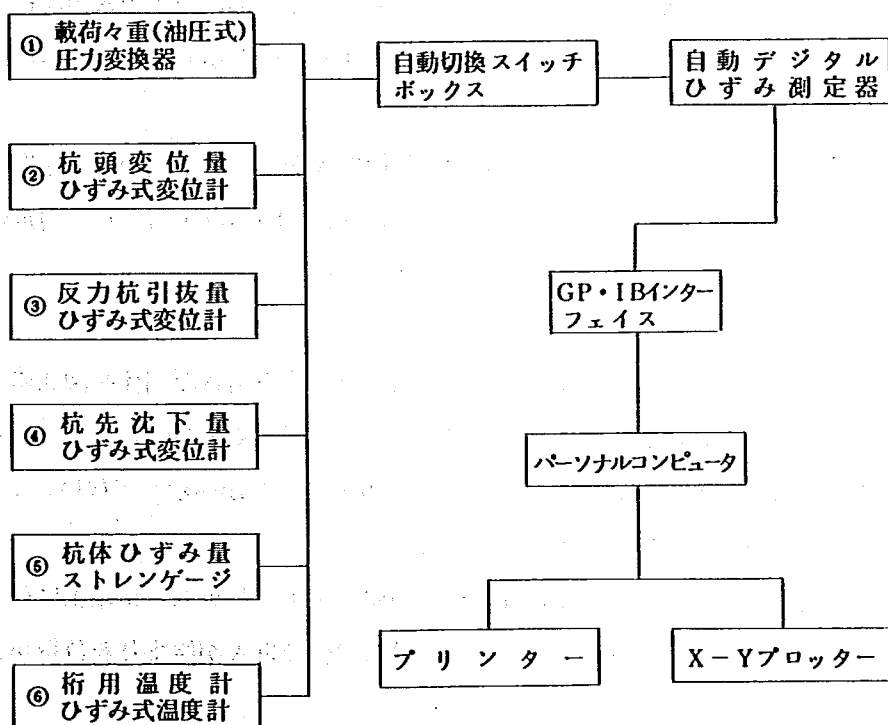


図 3.12 各測定機器の接続

表 3.11 測定器の仕様

① 荷重測定用圧力変換器				
定格容量	定格出力	非直線性		
200 kgf /cm ²	2mV/V ± 1%	0.2%FS	0.02%FS/°C	
温度範囲	入出力抵抗	荷重変換校正値		2 台
-20 ~ 70°C	350 Ω	0.1181 TON/×10 ⁻⁶		
② 杭頭, 杭先, および反力杭用変位計				
測定方法		測定範囲		
カンチレバー型ひずみゲージ変換方式		50 mm		
感 度	非直線性	温度影響	入出力抵抗	温度範囲
200 × 10 ⁻⁶ /mm	0.1%FS	1 × 10 ⁻⁶ /°C	350 Ω	0 ~ 40 °C
最大押圧力		11 台		
500 gf				
③ 杭体ひずみゲージ				
ゲージ抵抗	ゲージ率	測定ブリッジ		
120 Ω	2.13	2ゲージ法		

3.3 実験結果

3.3.1 衝撃载荷試験結果

① 杭頭変位

非接触変位計では公称測定範囲が $\pm 5.0\text{mm}$ であるが, 測定現象波形は校正值入力時に 3.0mm で過飽和現象が見られ, 変位量が大きくなるにつれて測定値が減少する傾向を示した。これは測定環境とセンサー特性の影響と思われる。

光学式非接触変位計については, 測定標点と測定距離の関係から, 測定値の校正精度および地盤振動に伴う測定センサー(カメラ)の振れが測定値に影響するという問題点があった。測定値は比較的打撃エネルギーに相関する現象を示したが, バラツキが大きい。

② 弾性変位量

埋設杭, U-5, D-5 試験杭についての弾性変位測定値と落下高さの関係を図 3.13~15 に示す。

埋設杭ではオプトフォローによる測定値は落下高さに対して杭頭変位が大きくなる傾向を示すが, 非接触変位計の出力は 0.7mm 程度でオプトフォローの14~50%の値しか指示してない。これは 3mm 以上で出力が過度現象を生ずるためと思われる。

U-5 試験杭は落下高が 0.5m 以下では比較的良い傾向を示したが 0.5m 以上になると非接触変位計に大きなバラツキが見られた。これは 0.5m 以上では試験杭の貫入が始まり変位量が大きくなるためと考えられる。

D-5 試験杭ではオプトフォローの値が他の試験杭と同じような傾向にあるが非接触変位計は埋設杭と同様, オプトフォロー出力の20~35%の値しか示していない。

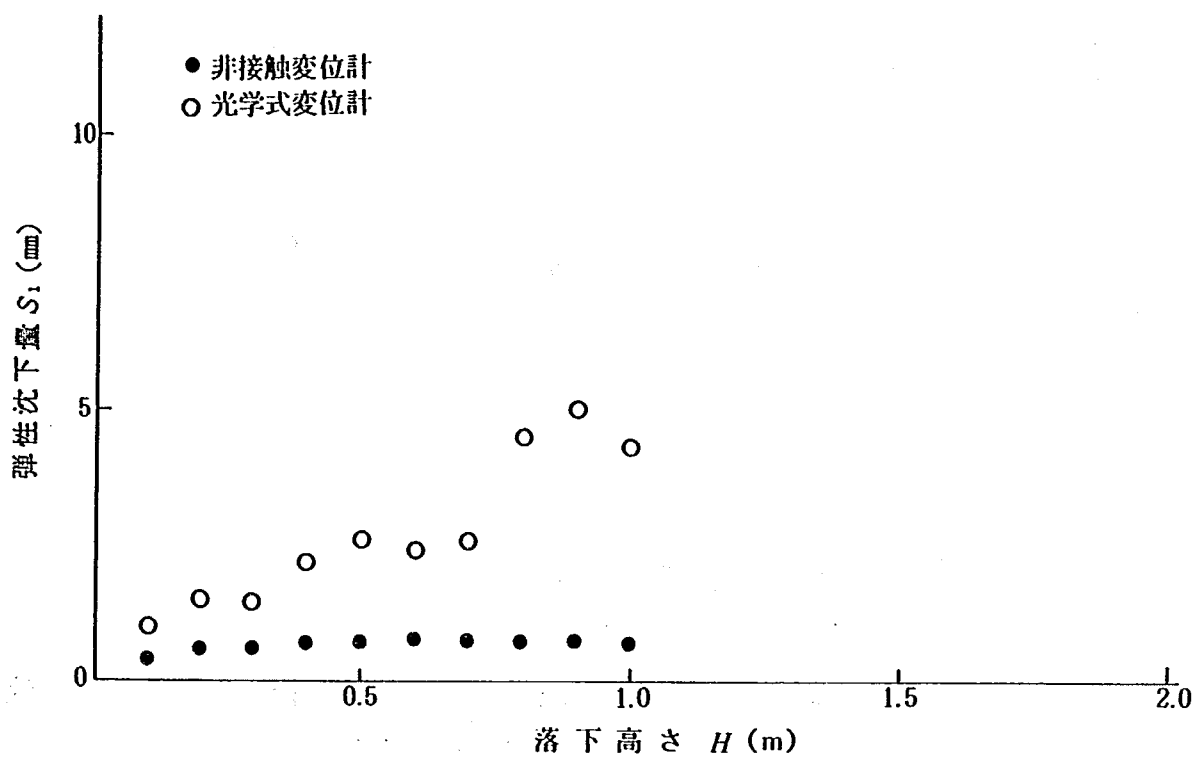


図 3.13 ハンマ落下高さと弾性沈下量 (埋設杭)

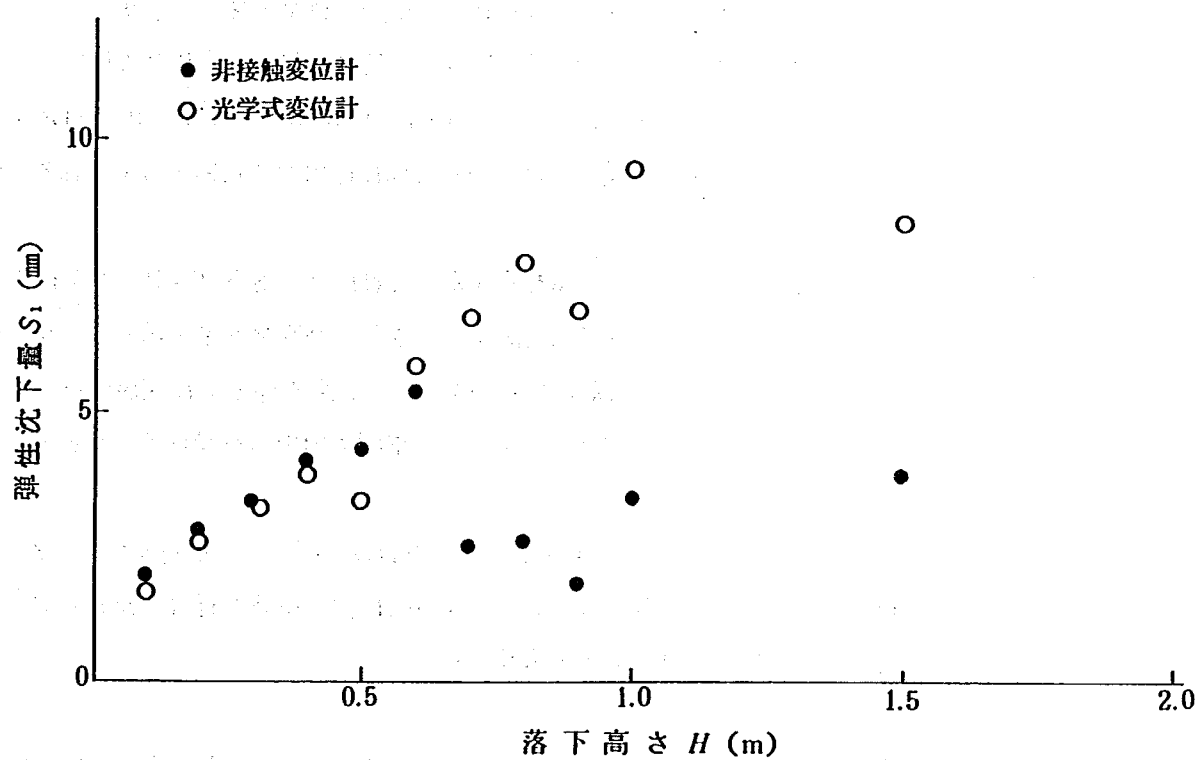


図 3.14 ハンマ落下高さと弾性沈下量 (油圧ハンマ打込杭 U-5)

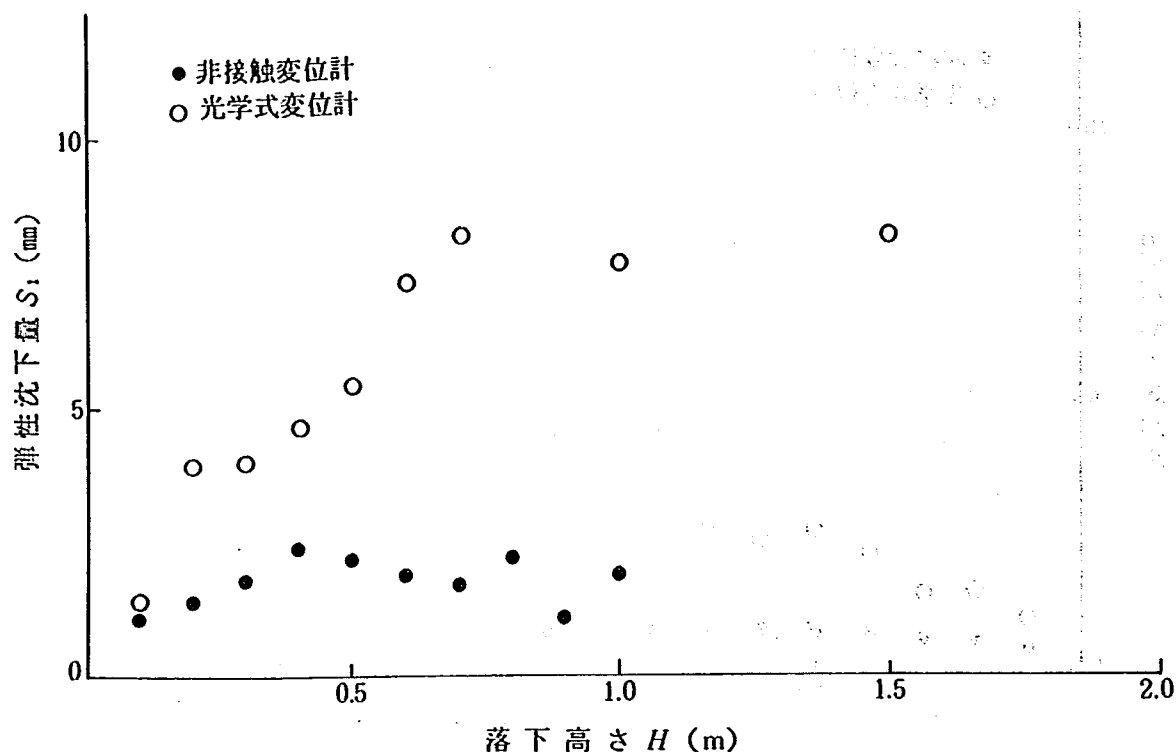


図 3.15 ハンマ落下高さと弾性沈下量（ディーゼルハンマ打込杭D-5）

図 3.16にはハンマー落下高さと各試験体のオプットフォローによる杭頭変位量の関係を示す。

打込杭U-5, D-5では $H = 1.0$ mのとき約8~9 mmの変位量を示し、杭長に対する変位量の比は $S/L = 9 \text{ mm} / 15,600 \text{ mm} = 576 \times 10^{-6}$ であった。埋込杭では $S/L = 5 \text{ mm} / 15,600 \text{ mm} = 320 \times 10^{-6}$ で打込杭の55%程度の変位である。これは埋設杭のモルタル注入の抵抗力が杭体に作用するためと考えられる。

③ リバウンド量

図 3.17に非接触変位計による各試験体のリバウンド量を示すが、埋設杭は、落下高さ $H = 0.7$ m程度まで増加しその後に1/3程度になる。U-5試験杭は低落下高時で大きなリバウンド量を示し $H = 0.6$ m以上は非常に小さな値となる。D-5試験杭は、落高に伴ない漸減する傾向を示す。測定値のバラツキが大きいこれらの傾向は埋設杭においては杭の建込みとモルタル根固めの影響を受けるためと考えられる。

U-5試験杭は、載荷試験（極現荷重350 tf、沈下量99 mm）10日後に測定試験を行ない、また、D-5試験杭は、載荷試験（極現荷重380 tf、沈下量84 mm）4日後に測定試験を行なったもので、地盤と杭周面摩擦力などの影響が測定値に含まれるものと考えられる。

④ 残留沈下量

図 3.18に各試験体の残留沈下量を示す。打込杭U-5, D-5試験体は落下高さ $H = 0.6$ m以上で貫入する傾向を示している。

埋設杭では測定値が小さく、測定誤差範囲で変動している。

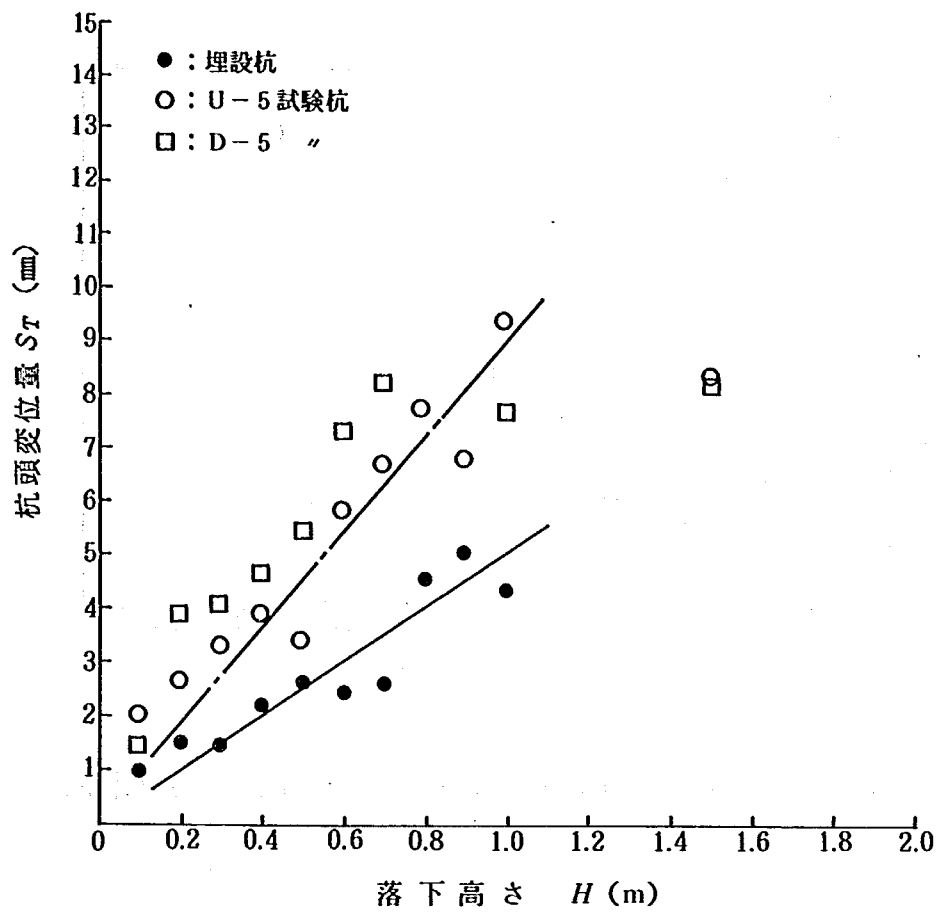


図 3.16 ハンマ落下高さと杭頭弾性沈下量 (オプトフォロー測定)

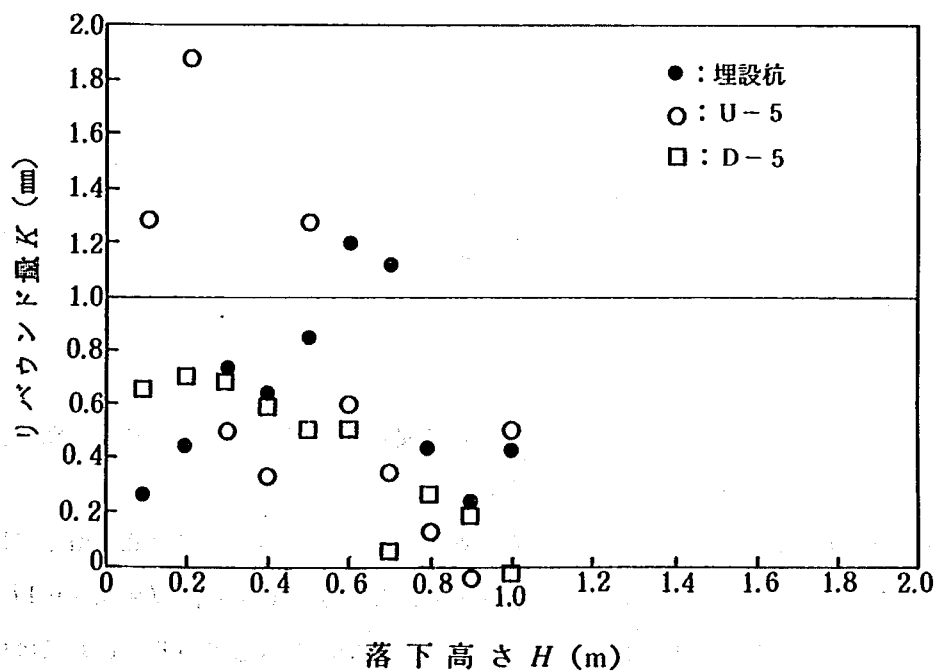


図 3.17 ハンマ落下高さと杭頭リバウンド量 (非接触変位計による測定)

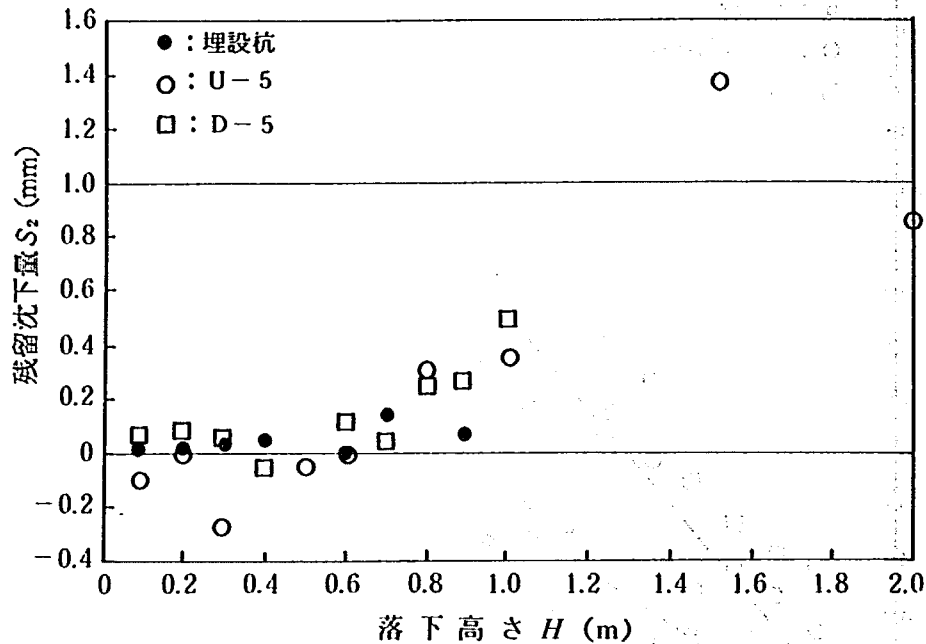


図 3.18 ハンマ落下高さと杭頭残留沈下量（非接触変位計による測定）

⑤ 埋設杭の杭体ひずみ

図 3.19には杭頭ひずみから求めた杭頭打撃応力と次式から算出した計算打撃応力を比較して示す。

$$\sigma_p = \frac{\sqrt{2 E_2 \gamma_2 H}}{1 + \frac{A_2}{A_1} \sqrt{\frac{E_2 \gamma_2}{E_1 \gamma_1}}}$$

E_1 : ラムの縦弾性係数 H : ラムの落下高さ
 E_2 : 杭の " A_1 : ラムの打撃断面積
 γ_1 : ラムの単位体積重量 A_2 : 杭の "
 γ_2 : 杭の "

両者は $H = 0.4$ m まで同じ傾向を示すが、 $H = 0.5$ m からは異なる傾向となる。これは打撃条件（打撃エネルギー、杭頭条件等）の影響を受けるためと考えられる。

図 3.20には埋設杭の杭頭打撃時の深さ方向の打撃力分布を示す。この図で、 $H = 0.4$ m までは GL-5.5 m で打撃力の減衰が見られ、GL-9.0 m で増加する傾向を示す。しかし、 $H = 0.5$ m 以上では GL-9.0 m まではほぼ同じ値を示し、GL-10 m 以深で急激な減衰傾向を示している。これらは杭の周面摩擦力和根固め用の注入モルタルによる断面増加の影響と考えられる。また、杭先ゲージ No. 6 では杭頭打撃力の約 50%，No. 7 では約 1/10 になっているのは、注入モルタルの固結効果と杭先端部内面のフリクションカッターの効果によって、杭頭の打撃力が減少するものと考えられる。

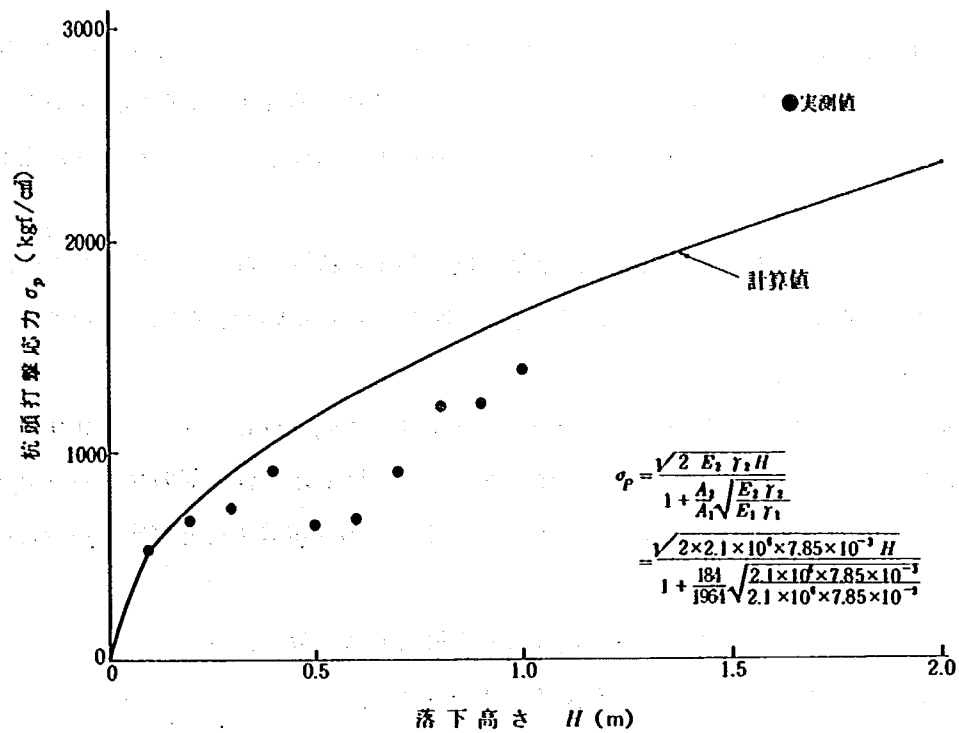


図 3.19 埋設杭の杭頭打撃応力線図

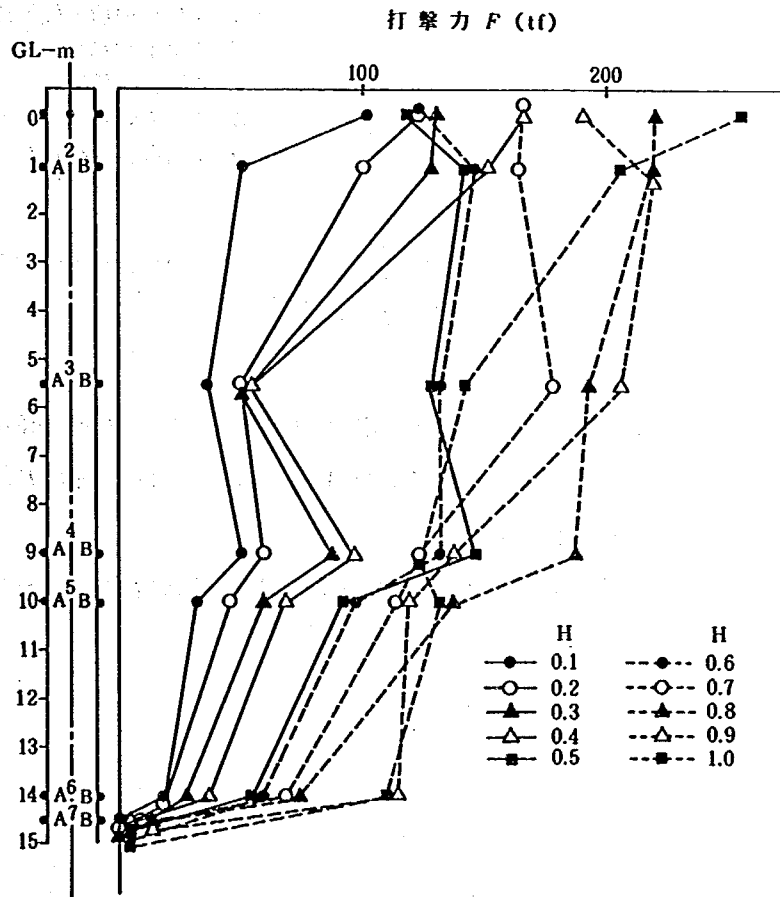


図 3.20 埋設杭の打撃力分布図

3.3.2 静的載荷試験結果

埋設杭への載荷荷重は油圧ハンマー 8.0 tf 打込杭 (U-5), デーゼルハンマー打込杭 (D-5) の試験結果を考慮して 25 tf ステップとして行った。先端モルタルの圧壊による沈下状況を把握するため荷重 350 tf まで載荷したが, 沈下量の傾向が打込杭と同じようなことから荷重ステップを 50 tf として 550 tf まで載荷した。

載荷荷重 550 tf で杭頭応力が 8,525 kgf/cm² と杭強度を超える状況となったため, 載荷を中止した。

図 3.21 には埋設杭の荷重-沈下量-時間曲線を示す。図 3.22 には杭頭および杭先の荷重沈下曲線を示す。また, 表 3.12 には載荷試験結果を要約する。

図 3.23 に載荷荷重ごとの軸力分布を示す。図からゲージ 3~4 間 (GL-5.5~9.0 m) までセメントミルクがまわり込んでいると考えられるので, ゲージ 3 以深では鋼管内部のソイルコンクリートの荷重分担を考慮したものを図 3.24 に示す。ソイルコンクリートの荷重分担を考慮する場合は次の仮定のもとで軸力および周面摩擦力を算出している。

仮定① 鋼管内部のソイルコンクリートと鋼管の間の付着力は十分である。

仮定② ソイルコンクリートと鋼管は平面保持条件を満たす。

仮定③ 断面積および弾性係数は一定である。

以上の仮定から

$$\frac{P_s \cdot \ell}{E_s \cdot A_s} = \frac{P_c \cdot \ell}{E_c \cdot A_c} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$P_s + P_c = P \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2) 式より

$$P_c = \frac{P}{\left(1 + \frac{E_s \cdot A_s}{E_c \cdot A_c}\right)} \quad P_s = \frac{P}{\left(1 + \frac{E_c \cdot A_c}{E_s \cdot A_s}\right)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

P	: 合成断面に作用する全軸力
P_s	: 鋼管に作用する軸力
P_c	: ソイルコンクリートに作用する軸力
E_s	: 鋼管の縦弾性係数
E_c	: ソイルコンクリートの縦弾性係数
A_s	: 鋼管の断面積
A_c	: ソイルコンクリートの断面積
ℓ	: 荷重分担を考慮する杭の長さ

となる。静的載荷試験時には P_s は鋼管のひずみから算出され, A_s, A_c, E_s は既知である。なお, E_c はボーリング調査等から決定すべきであるが, ここでは $E_c = 5 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$, $E_c = 10 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ の 2 つを仮定し, P_c および P を算出した。

図 3.25~図 3.27 には杭頭荷重と平均周面摩擦力の関係, 図 3.28 には杭頭荷重と荷重伝達率 (杭先端荷重/杭頭荷重) の関係を示す。

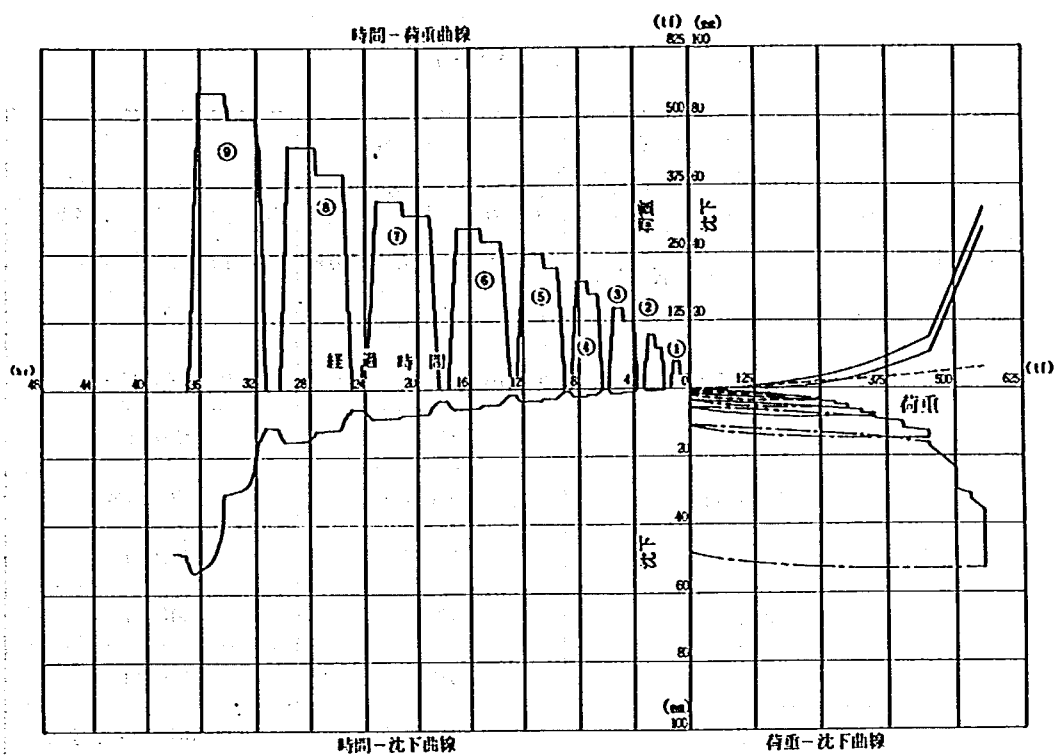


図 3.21 荷重-沈下-時間曲線 (埋設杭)

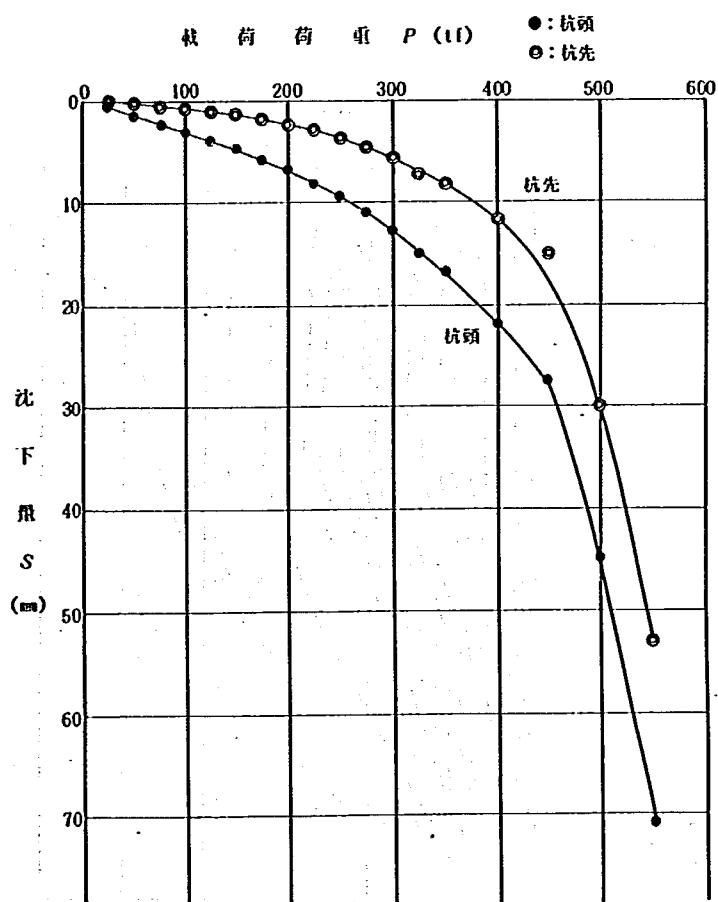


図 3.22 荷重-沈下曲線

表 3.12 静的載荷試験結果

試験体		埋 設 杭	U - 5	D - 5
項目				
施 工 方 法		φ 600アースオーガーGL-16m 無排土、先端モルタル注入	油圧ハンマー 8.0 tf H=0.3 N=1234回	ディーゼル H=2.1 N=473回
打止め時 S, K mm		ディーゼルによる建込 H=1.2m, S=5mm, N=47回	S=4.2mm, K=8.0mm	S=11mm, K=10mm
根 込 深 度		GL-15.0m	GL-15.0m	GL-15.0m
杭 寸 法		φ 500×t 12×L 15.6 m	φ 500×12×15.6 m	φ 500×12×15.6 m
最大 載 荷 荷 重		550 tf	320 tf	380 tf
最 大 沈 下 量		71.18 mm	99.5 mm	83.9 mm
降 伏 荷 重	log P - log S	450 tf	240 tf	300 tf
	S - log t	500 tf	240 tf	300 tf
	ΔS/Δlog t - P	425 tf	240 tf	270 tf
極 限 荷 重		550 tfとする	320 tfとする	380 tfとする
許 容 支 持 力	極限荷重 1/3	183 tf	106 tf	126 tf
	降伏荷重 1/2	225 tf	120 tf	150 tf

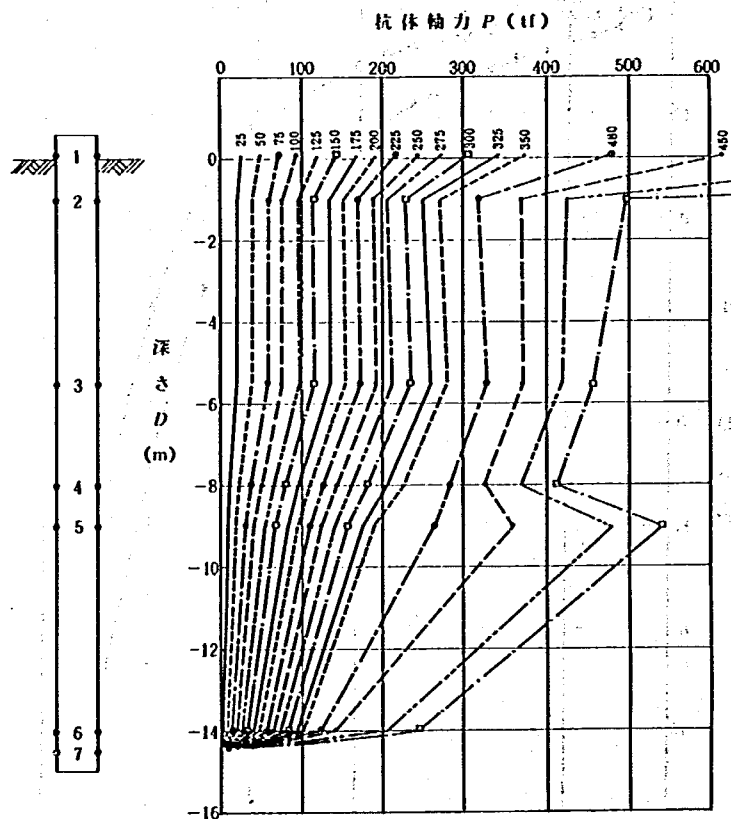


図 3.23 静的載荷試験における軸力分布 (埋設杭)

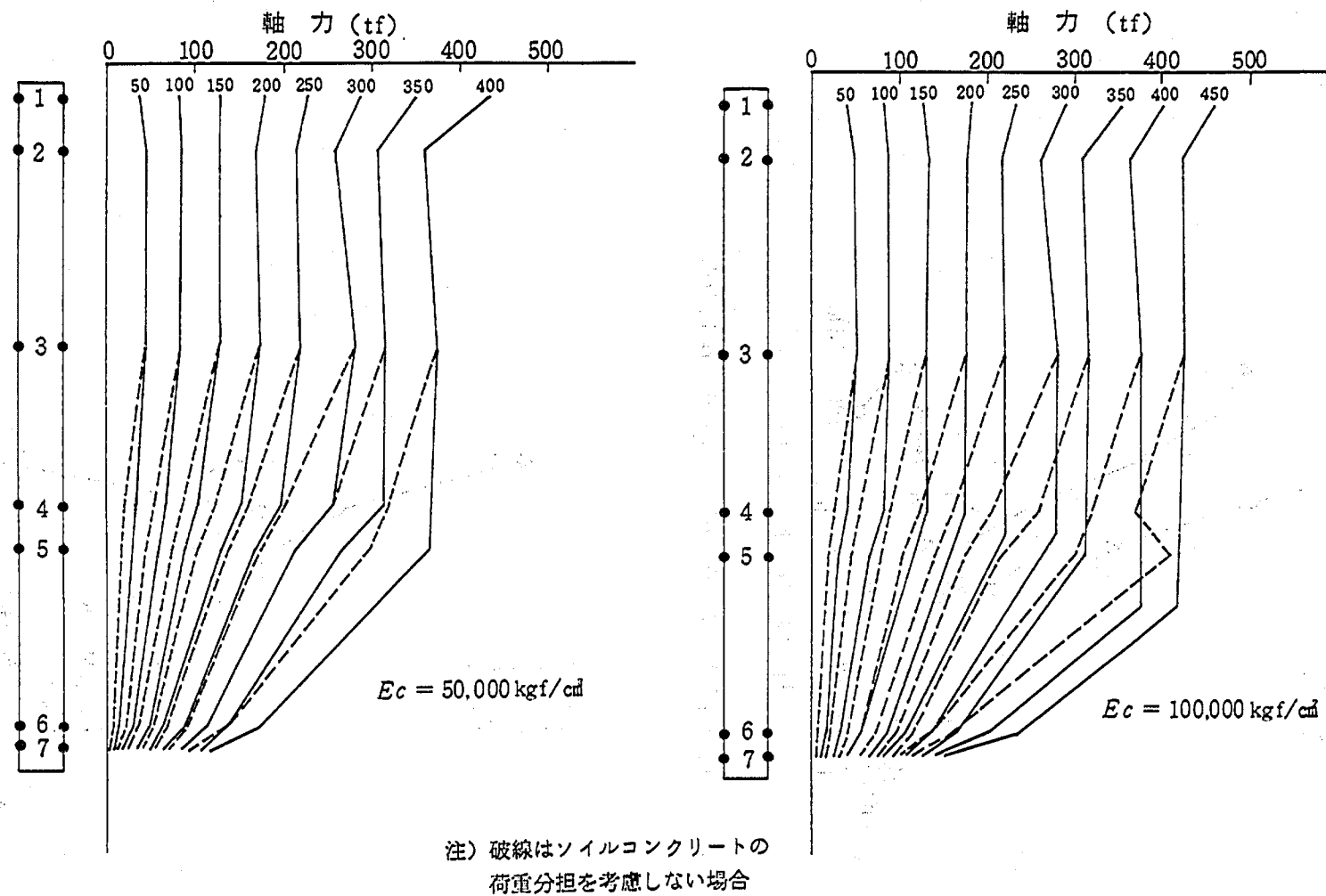


図 3.24 ソイルコンクリートの荷重分担を考慮する場合の軸力分布

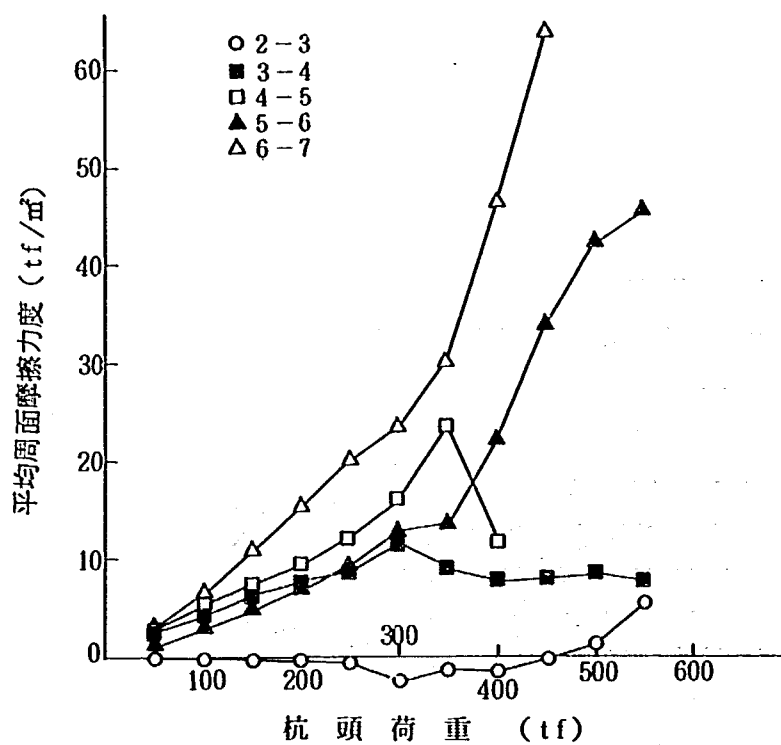


図 3.25 杭頭荷重と平均周面摩擦力 ($E_c = 0$ kg f/cm²)

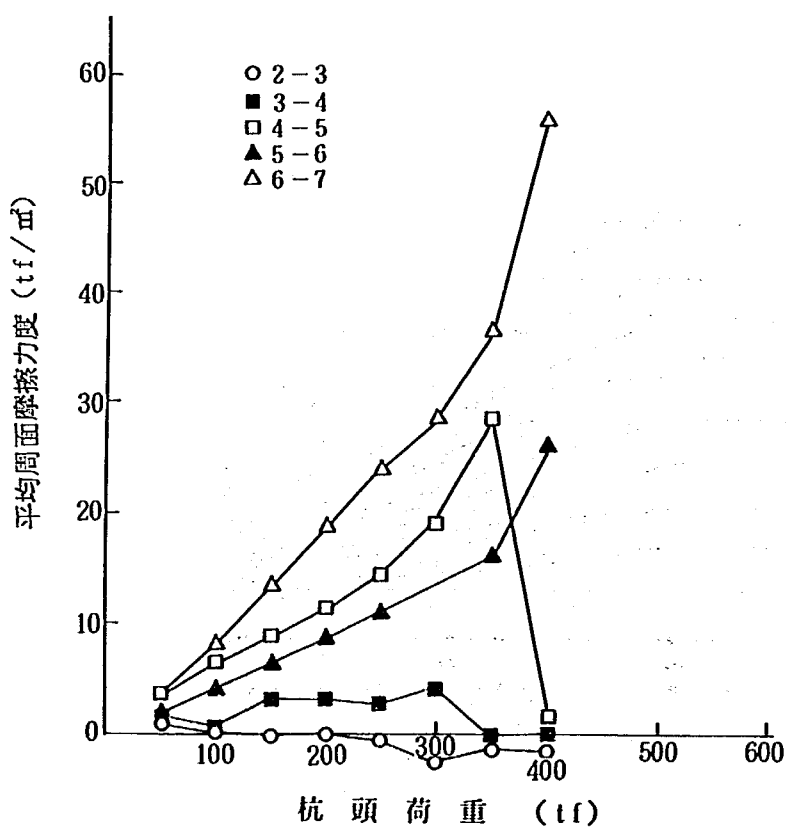


図 3.26 杭頭荷重と平均周面摩擦力 ($E_c = 5 \times 10^4$ kg f/cm²)

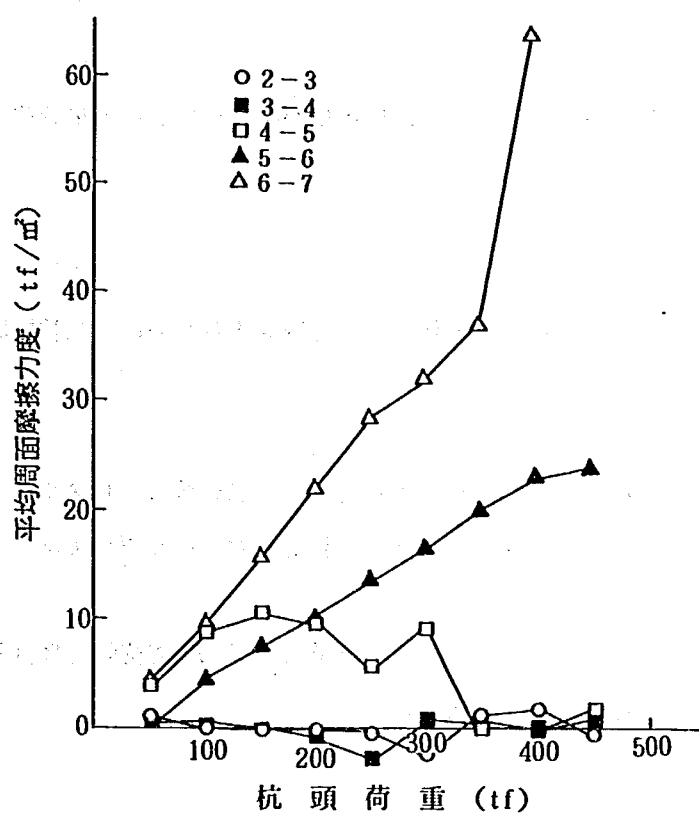


図 3.27 杭頭荷重と平均周面摩擦力 ($E_c = 10 \times 10^4 \text{ kg f/cm}^2$)

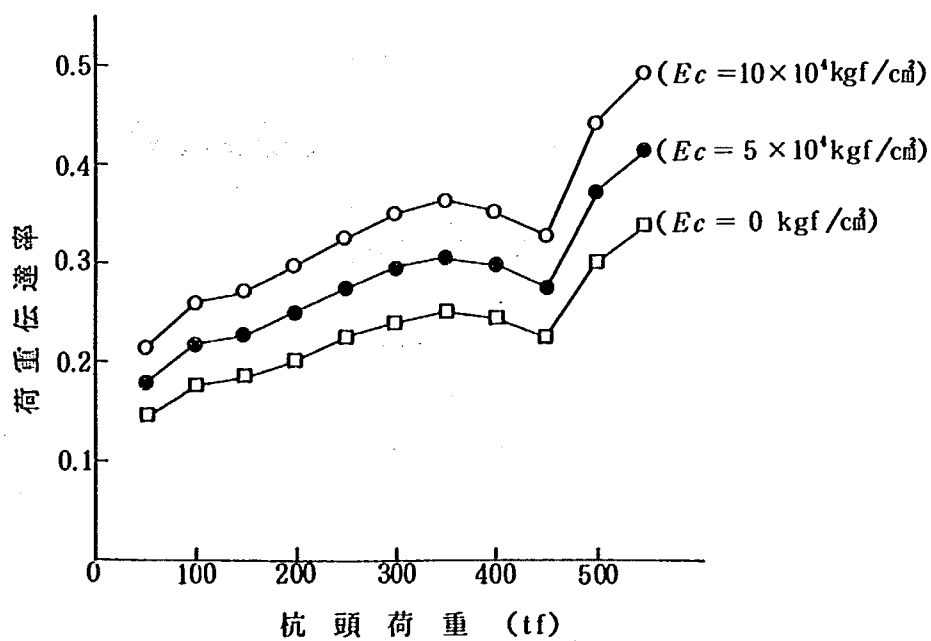


図 3.28 杭頭荷重と荷重伝達率 (杭先端荷重/杭頭荷重)

4. フィールド実験Ⅱ（打込み杭に関する検討）

4.1 実験目的と概要

本実験は、埋設杭工法の簡便な施工管理手法として、軽重量ハンマーによる衝撃载荷試験の適用性を調べるものである。

本実験は以下の項目よりなる。

(1) 地盤の掘削

本作業は、ゲージ貼付・計器類の取付等における作業空間を確保するために、試験杭周囲の掘削をおこなうものである。

(2) ゲージの貼付および結線

本作業は、衝撃载荷試験時の杭頭における応力を調べるために、試験杭表面にストレンゲージを貼付け、延長ケーブルとストレンゲージ・ブリッジボックスとの結線をおこなうものである。

(3) 衝撃载荷試験

本試験は、トラッククレーン装着式モンケン（モンケン重量1.0tf）で杭頭を軽打し、その時の杭頭応力・杭頭変位・杭頭加速度を測定するものである。

図4.1には本実験のフローを示す。

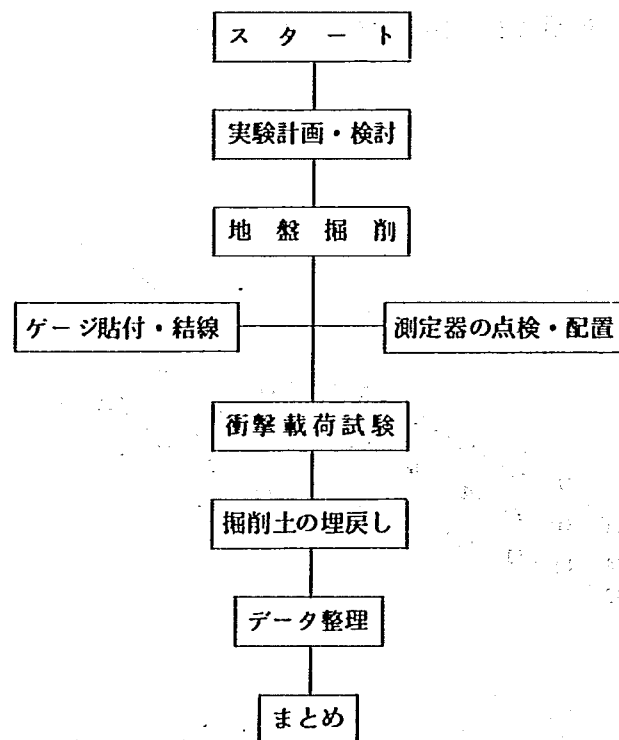


図 4.1 実験のフロー

4.2 実験方法

4.2.1 実験地盤条件

実験地盤は土木研究所土工管理実験場の地盤であり、そのボーリング結果を図4.2に示す。地盤は関東ロームがGL-5m付近、常総粘土層がGL-7.5m付近に分布し、それ以深では細砂や礫の多い成田層が位置している。N値から推察するとGL-13m以深が支持層と考えられる。

4.2.2 試験杭の条件

試験杭はφ600鋼管杭とφ500PHC杭の2種類で、すべて表4.1に示される油圧パイルハンマにより全長にわたって打込まれたものである。打止め深度は鋼管杭GL-15.5m、PHC杭GL-14.5mである。

図4.3には試験杭の配置図を示す。

試験体は、地表面近くまで打設したもので、衝撃载荷試験のために周辺地盤を掘削、杭頭を露出させ、計器（加速度計・非接触変位計・ひずみゲージの設置）の取付けをおこなった。

図4.4に掘削要領図を示す。

地表面の掘削後、杭頭1mの位置に各測定器を取付けた。

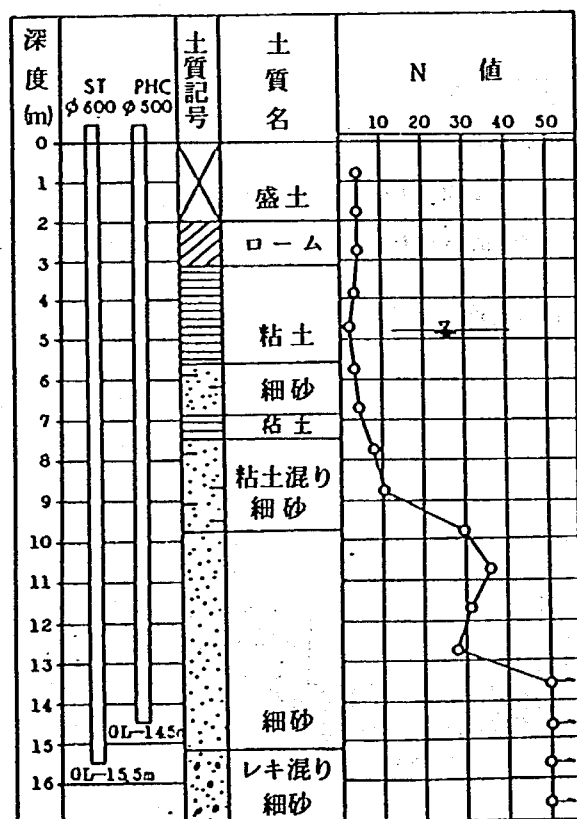
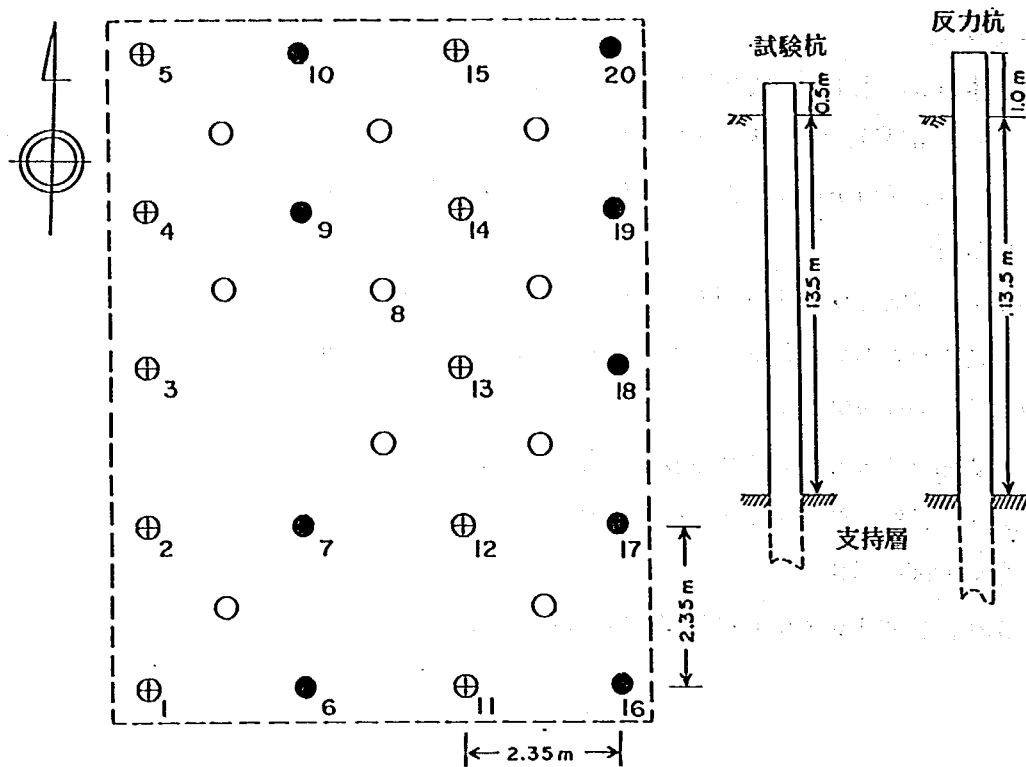


図4.2 ボーリング結果

表4.1 試験杭Noと使用油圧パイルハンマの組合せ

試験体 No	杭種別	杭 寸 法 (mm)	打込深度 (m)	使 用 ハンマー
1	鋼管	φ600×12t×16,000	15.5	E
2	"	"	15.5	A
3	"	"	15.5	F
4	"	"	15.5	D
5	"	"	15.5	G
6	PHC	φ500×85t×15,000	14.5	E
7	"	"	14.5	A
8	鋼管	φ600×9t×22,000	21.0	F
9	PHC	φ500×85t×15,000	14.5	D
10	"	"	14.5	G
11	鋼管	φ600×12t×16,000	15.5	H
12	"	"	15.5	C
13	"	"	15.5	J
14	"	"	15.5	I
15	"	"	15.5	B
16	PHC	φ500×85t×15,000	14.5	H
17	"	"	14.5	C
18	"	"	14.5	J
19	"	"	14.5	I
20	"	"	14.5	B



- PHC 杭 — $\phi 500 \times l 1500$ (mm)
 - ⊕ 鋼管杭) 試験杭 — $\phi 600 \times l 12 \times l^2 1600$ (mm)
 - 鋼管杭 (反力杭) — $\phi 600 \times l 9 \times l^2 2200$ (mm)
- * l は $l/2$ のつぎたし

図4.3 試験杭配置図

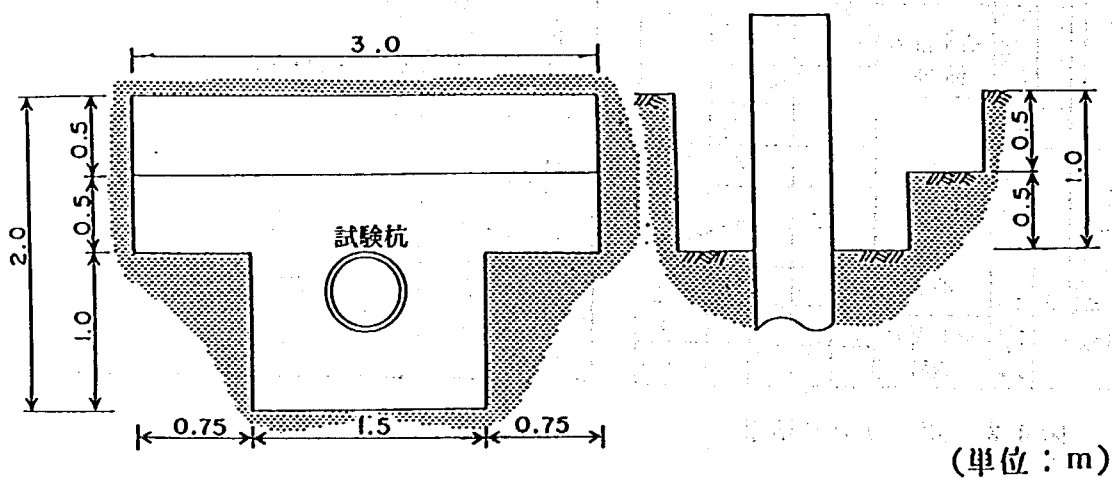


図4.4 掘削要領図

① ひずみゲージ施工

ア. 鋼管杭

杭頭1 mの位置にひずみゲージを取付け、衝撃载荷試験時の杭頭ひずみを測定した。ゲージの貼付は図4.5のようにした。1ゲージ法では測定時のノイズが大きいため、4ゲージ法として使用した。

イ. PHC杭

鋼管杭同様、杭頭1 mの位置にコンクリート用ひずみゲージを取付けた。ゲージの貼付は図4.6に示す通りである。

測定ゲージは、CN接着剤により試験体表面に貼付け、防水・防湿コーティングはP-2接着剤により防湿コーティングを一層行ない、防水コーティングとしてブチルゴム系のVMテープを貼付け施工した。

リード線の接続は、クロロプレン4芯シールドケーブルを3 m延長して取り付け、A₁ゲージ赤黒、A₂ゲージ白緑として接続した。

リード線先端にはゴムキャップをかけ、ビニールテープ止めとして防水処理を行なった。

② 光学式変位計（オプトフォロー）の取付

杭体にA-3版画用紙製のターゲットを作製して貼付け、カメラは原地盤に砂を敷ならしてブロックを置き、その上に設置した。これは打撃時に地盤の振動影響を少なくするためである。

③ 加速度計の取付

加速度計はアタッチメントに接着剤により貼付け、ビニール巻きで固定した。アタッチメントは、鋼管杭の場合、杭体に直接電気溶接して取付けた。PHC杭の場合は、図4.7に示す取付バンドを製作し、アタッチメントを溶接により取付け、杭体に巻付けボルト締めした。

④ 非接触変位計の設置

衝撃载荷による地盤振動の影響を除去するため、図4.8で示すように、H鋼を用いて不動梁を設け、取付治具により非接触変位計を設置した。

設置の方法は、まずアングル鋼（山形鋼）を地中に打ち込み、H鋼はシャコ万力でアングル鋼に固定した。非接触変位計センサは、取付け治具に固定して、シャコ万力で不動梁（H鋼）に取付けた。

一方、アルミターゲットは、加速度計取付治具に貼付け、前述したように、取付治具を鋼管杭では杭体に直接溶接し、PHC杭については取付けバンドを用いて杭体に取付けた。

なお、測定は非接触変位計の不調により実施できなかった。

4.2.3 衝撃载荷試験

本試験は油圧パイルハンマによる杭の打止め付近で実施された打込み試験と、その打ち込まれた試験杭に軽重量のハンマを自由落下させた軽打試験という打撃エネルギーの異なる2つの試験に分けられる。

(1) ハンマー

打込み試験に用いたハンマーの仕様を表4.2～表4.5、軽打試験で用いたハンマーを表4.6に示す。

(2) 杭頭状態

打込み試験に用いたハンマーA～Dは図4.9～図4.12に示すクッションおよびキャップをもつ杭頭を

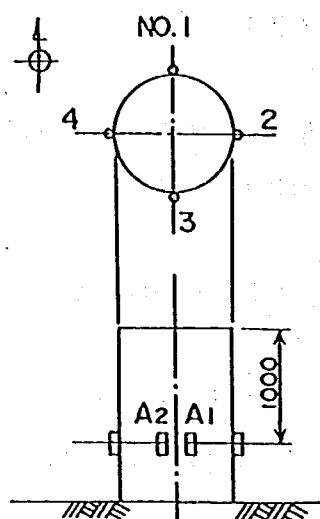


図4.6 ゲージの貼付け (PHC杭)

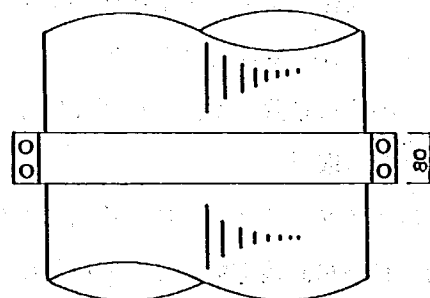
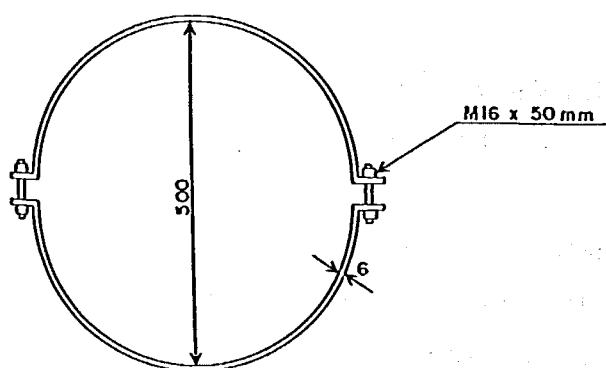


図 4.7 加速度計取付バンド (PHC 杭)

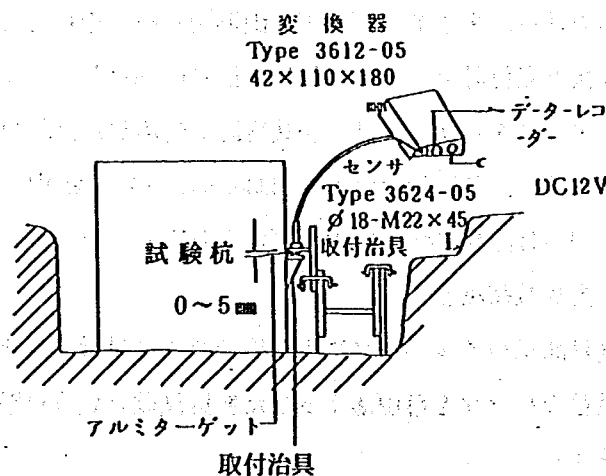
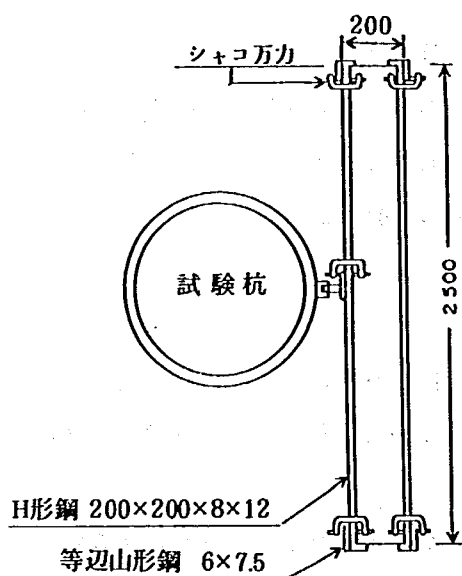


図 4.8 非接触変位計の取付要領

表 4.2 油圧パイルハンマ A の仕様

機 種	A
ハンマ本体	駆 動 方 式 ラム重量 (W_H) (tf) 6.5 ラムストローク (H) (m) 0.1 ~ 1.2 打撃回数 (回/分) 22 ~ 75 最大打撃エネルギー $(W_H \cdot H_{max})$ 7.8 総重量 (tf) 12.8 寸 法 (mm) $\phi 914 \times t 6,525$

表 4.3 油圧パイルハンマ B の仕様

機 種	B
ハンマ本体	駆 動 方 式 ラム重量 (W_H) (tf) 7.0 ラムストローク (H) (m) (自由落下相当) 1.28 打撃回数 (回/分) (最大ラムストローク時) 24 最大打撃エネルギー (tf・m) $(W_H \cdot H_{max})$ 9.0 総重量 (tf) 14.4 寸 法 (mm) $\phi 1,250 \times t 5,303$

表 4.4 油圧パイルハンマ C の仕様

機 種	C
ハンマ本体	駆 動 方 式 ラム重量 (W_H) (tf) 6.5 ラムストローク (H) (m) 0 ~ 1.2 打撃回数 (回/分) 18 ~ 70 最大打撃エネルギー (tf・m) $(W_H \cdot H_{max})$ 7.8 総重量 (tf) 13.3 寸 法 (mm) $\phi 1,300 \times t 6,530$

表 4.5 油圧バイルハンマDの仕様

機	種	D
ハンマ本体	駆 動 方 式	油圧シリンダ方式
	ラム重量 (W_H) (tf)	6.5
	ラムストローク (H) (m)	0.1~1.8
	打撃回数 (回/分)	60~18
	最大打撃エネルギー ($W_H \cdot H_{max}$) (tf・m)	11.7
	総重量 (tf)	14.3
	寸 法 (mm)	$\phi 1,100 \times t 7,950$

表 4.6 軽打試験に用いたハンマーの仕様

項 目	
杭 打 ち 機	20tトラッククレーン
リ ー ダ ー	10m ・ 2面
ハンマー	重 量 $W_H = 1,030 \text{ kgf}$
	打 撃 面 径 $D = 390 \text{ mm}$
	打 撃 面 積 $A = 1,194 \text{ cm}^2$
落 下 方 法	自 由

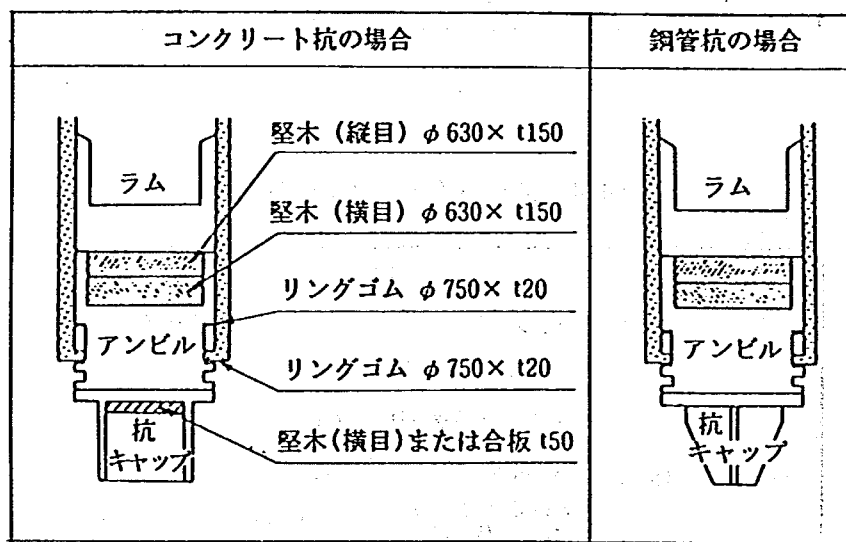


図 4.9 杭頭条件 (油圧バイルハンマA)

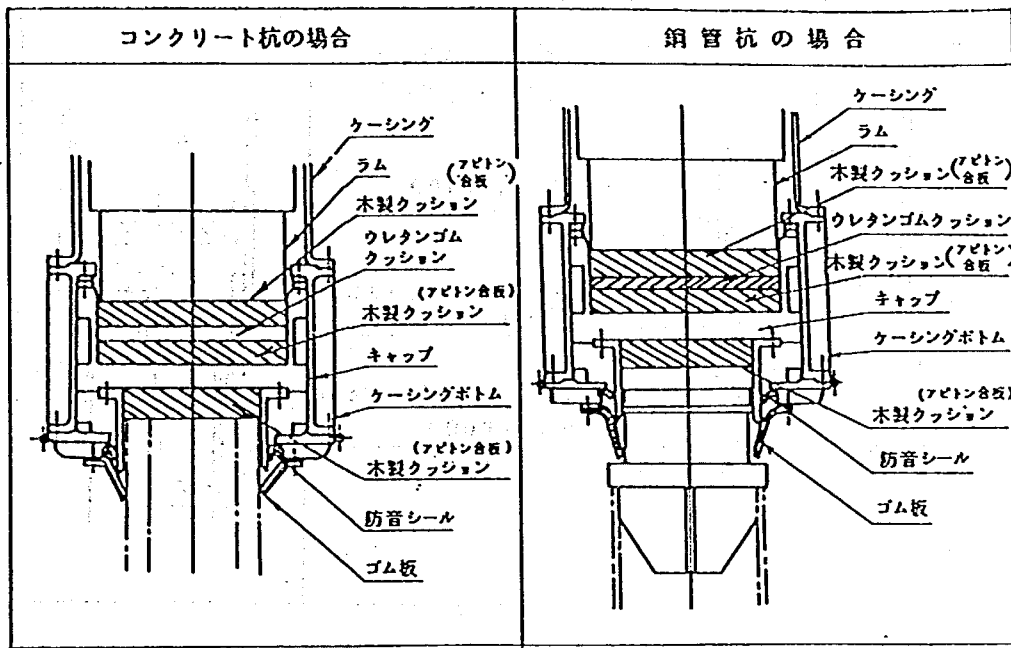


図 4.10 杭頭条件 (油圧パイルハンマ B)

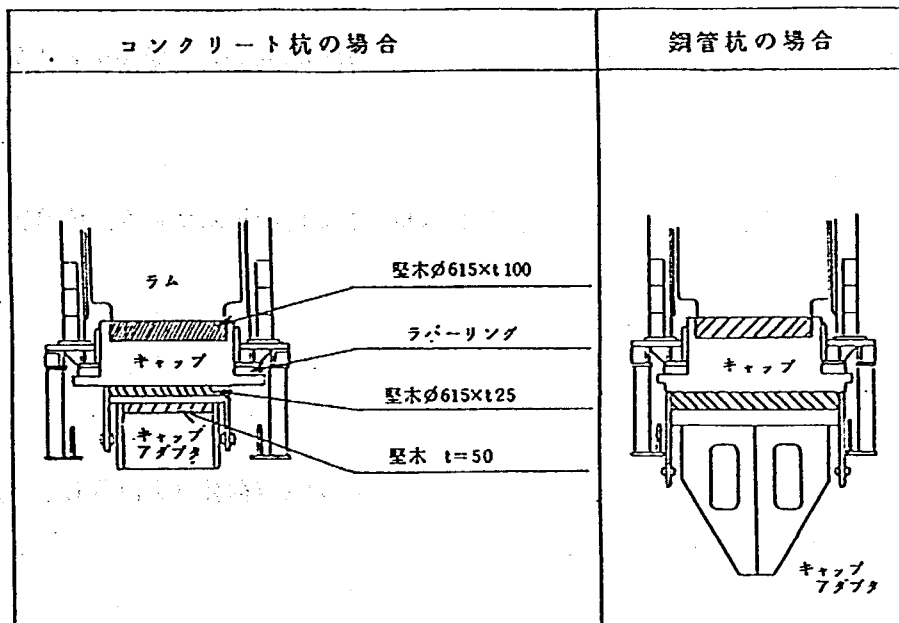


図 4.11 杭頭条件 (油圧パイルハンマ C)

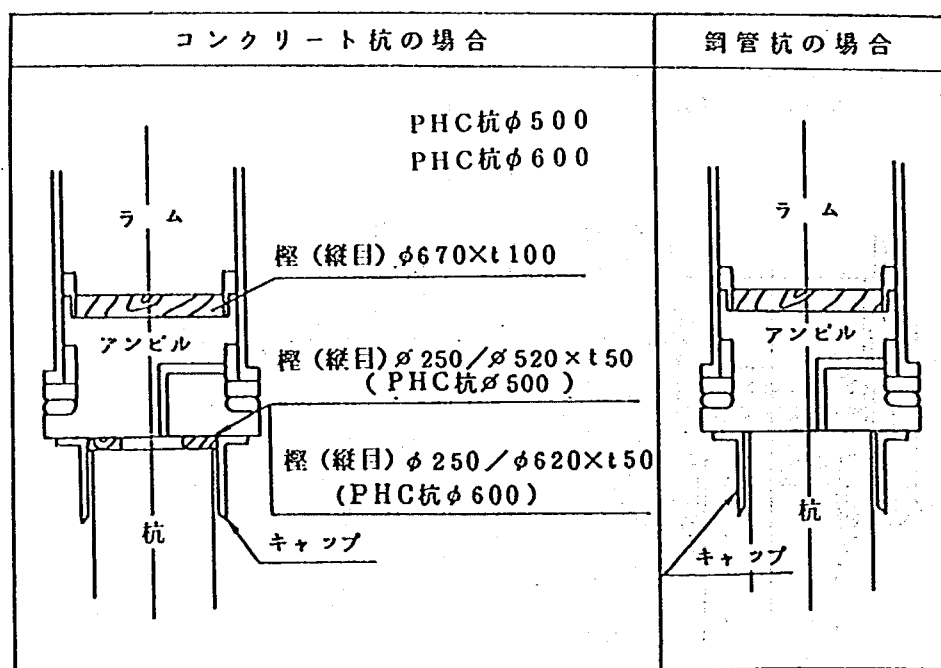


図4.12 杭頭条件 (油圧パイルハンマD)

打撃した。

軽打試験では、試験体の杭頭端面をできるだけ偏打しないようにするため、鋼管杭及びPHC杭に厚板鋼板製の特製キャップを製作してそれを打撃するようにした。図4.13～図4.16に各杭の杭頭キャップを示す。

(3) 試験条件

油圧パイルハンマによる打込み試験のうち、ハンマーA～Dの場合の試験条件を表4.7～表4.10に、軽打試験の場合の試験条件を表4.11に示す。

(4) 測定方法と測定項目

本試験での測定概要図を図4.17に示す。測定項目は杭頭打撃時の杭頭ひずみ、杭頭加速度、杭頭変位量の3つである。

表4.12には測定器の主要な仕様を示す。

4.2.4 静的載荷試験

(1) 載荷装置

載荷装置は図4.18に示す反力ぐい4本(鋼管杭)を用いた反力式載荷装置を設置し、土質工学会「クイの鉛直載荷試験、同解説」に基づくものとした。

(2) 載荷方法

表4.13に示すような荷重段階で、最大荷重500tf、40tfピッチで4サイクルの荷重段階とした。

(3) 測定項目

測定項目は荷重段階毎の杭頭沈下量だけである。差動トランス式変位計により杭頭部の変位を4点測定した。

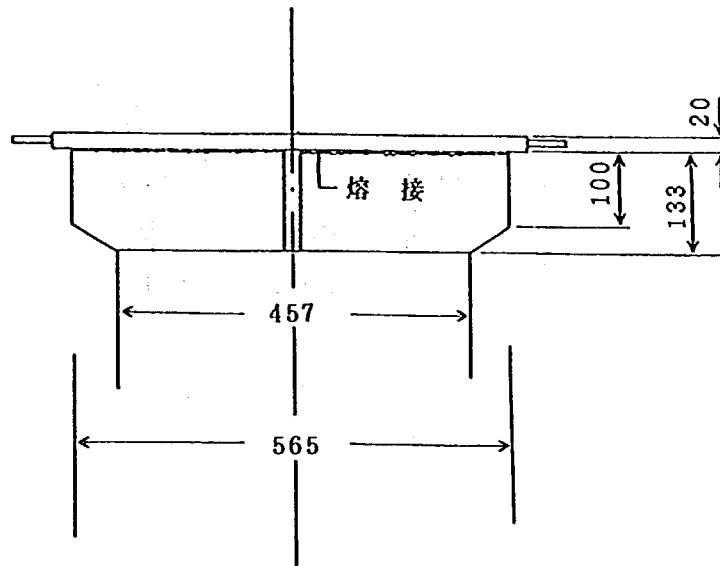


図4.13 鋼管杭用キャップ (No. 1 杭に使用)

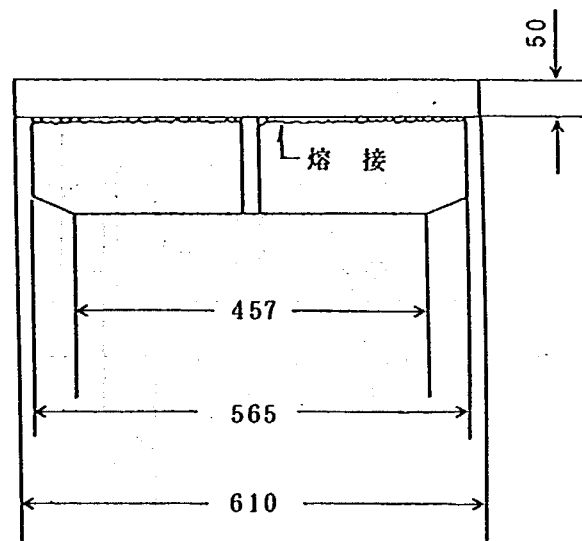


図4.14 鋼管杭用キャップ (No. 1 杭を除く鋼管杭に使用)

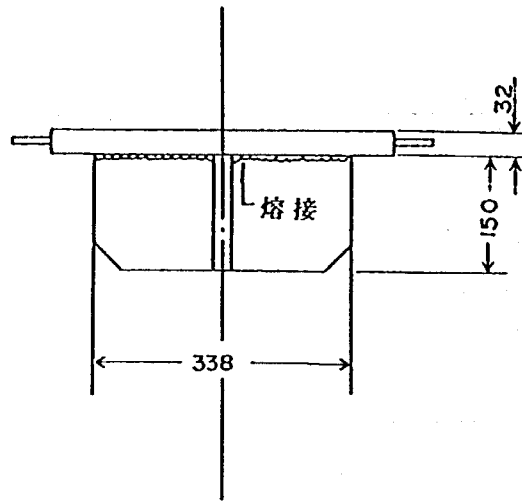


図 4.15 PHC 杭用キャップ (No 6, 7, 9, 10 杭に使用)

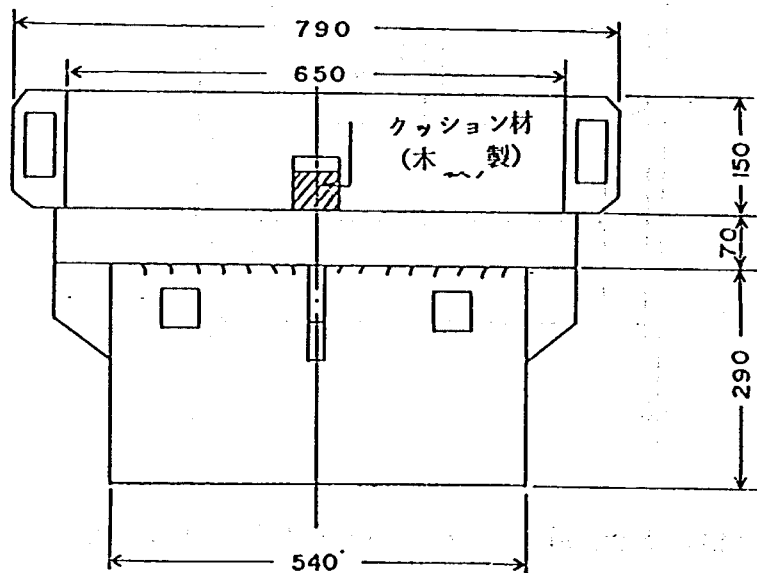


図 4.16 PHC 杭用キャップ (No16～20 杭に使用)

表 4.7 打込み試験の条件（油圧パイルハンマ A）

ハンマ重量	6.5 tf
落下方法	油 圧 解 放
落下高さ	30, 60, 90, 120 cm
落下回数	各 12～15 打撃
杭頭キャップ	図 4.9 参照
測定項目	杭頭ひずみ 4 点 杭頭変位 杭頭加速度

表 4.8 打込み試験の条件（油圧パイルハンマ B）

ハンマ重量	7.0 tf
落下方法	強制落下(ダブルアクティング)
落下高さ	20, 40, 60, 80 cm
落下回数	各 12～15 打撃
杭頭キャップ	図 4.10 参照
測定項目	杭頭ひずみ 4 点 杭頭変位 杭頭加速度

表 4.9 打込み試験の条件（油圧パイルハンマ C）

ハンマ重量	6.5 tf
落下方法	油 圧 解 放
落下高さ	30, 60, 90, 120 cm
落下回数	各 12～15 打撃
杭頭キャップ	図 4.11 参照
測定項目	杭頭ひずみ 4 点 杭頭変位 杭頭加速度

表 4.10 打込み試験の条件（油圧パイルハンマ D）

ハンマ重量	6.5 tf
落下方法	油 圧 解 放
落下高さ	30, 60, 100, 120 cm
落下回数	各 12～15 打撃
杭頭キャップ	図 4.12 参照
測定項目	杭頭ひずみ 4 点 杭頭変位 杭頭加速度

表 4.11 軽打試験の条件

ハンマ重量	1,030 kgf
落 下 方 法	自由落下
落 下 高 さ	0~2.0m (10cm毎)
落 下 回 数	各落高 1 回ずつ
杭頭キャップ	肉厚20mm リブ付き 堅木 $\phi 650 \times t 50$ 3 枚
測 定 項 目	杭頭ひずみ 杭頭変位 杭頭加速度

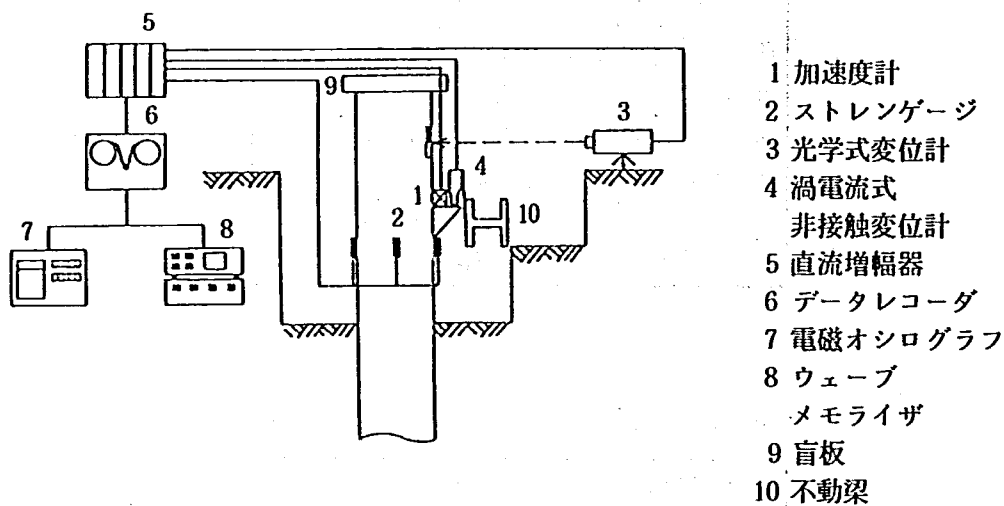


図 4.17 測定概要図

表 4.12 測定器の仕様

加 速 度 計	0~3000Hz 500 G	
ストレインゲージ	P H C	ゲージ抵抗 120 Ω ゲージ長 60 mm
	S T	ゲージ抵抗 120 Ω ゲージ長 6 mm
光学式変位計	測定範囲 200 μ ~無限 DC~35 kHz レンズ 200 mm	
渦電流式 非接触変位計	測定範囲 0~5 mm DC~20 kHz 感度 1mV/ μ	

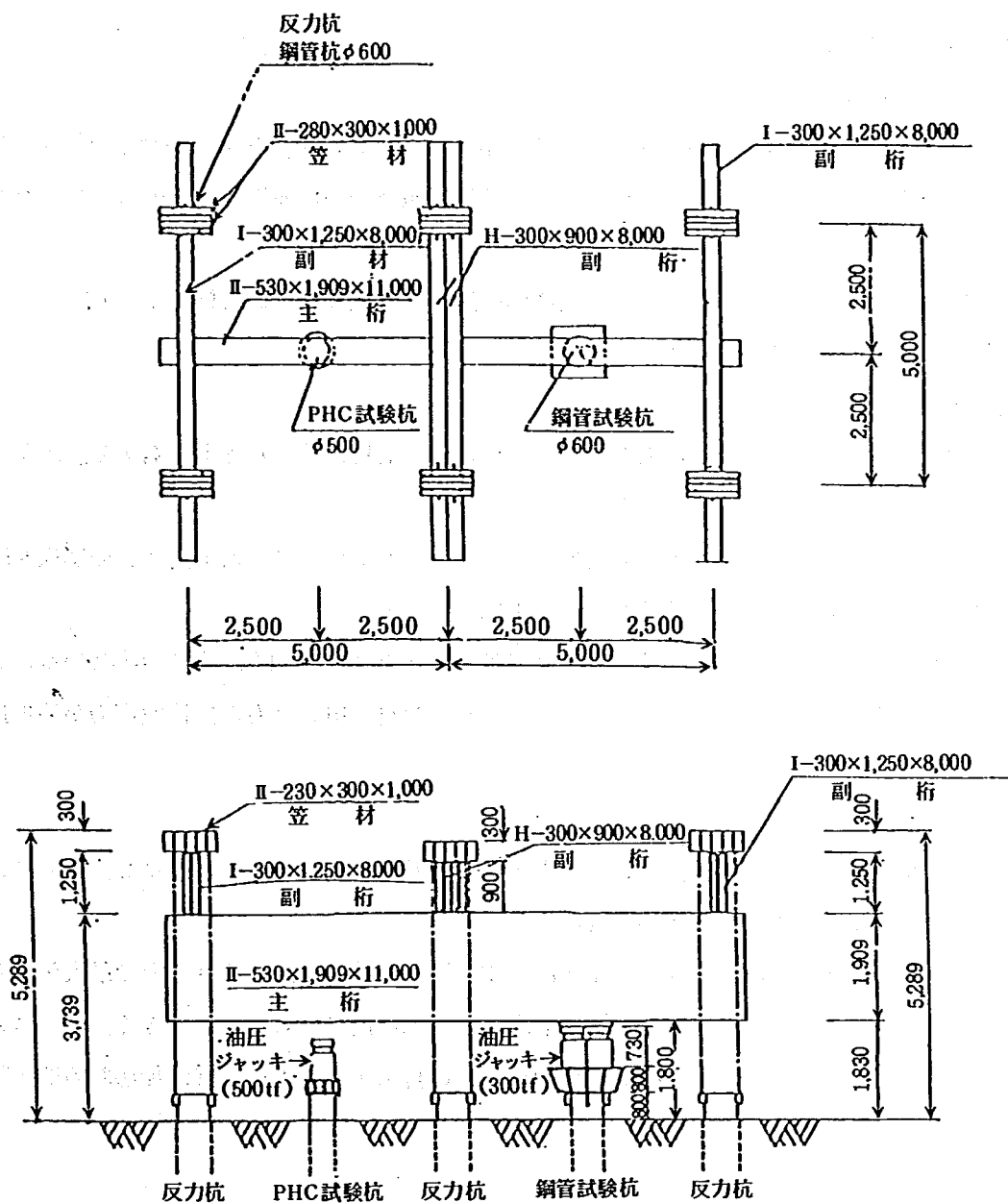


図 4.18 鉛直載荷装置

表 4.13 荷重段階表

サイクル	最大荷重 (tf)	荷 重 段 階 (tf)
1	120	0- <u>40</u> - <u>80</u> - <u>120</u> -80-40-0
2	240	80-120- <u>160</u> - <u>200</u> - <u>240</u> -160-80-0
3	360	80-160-240- <u>280</u> - <u>320</u> - <u>360</u> -320-240-160-80-0
4	500	80-160-240-280-320-360- <u>400</u> - <u>440</u> - <u>480</u> - <u>500</u>
		-480-440-400-320-240-160-80-0

= 印：処女荷重

4.3 実験結果

4.3.1 衝撃载荷試験結果

① 油圧ハンマによる打込み試験

油圧ハンマによる打込み試験の測定結果を付録 2. に示す。A～D の 4 ハンマーの測定波形は、他のハンマーによるものに比べて良好である。これは打撃条件や杭頭条件の相違によるものと考えられる。

② 軽打試験

軽打試験を実施した 20 本の試験杭のうち、測定波形の良好な 9 試験杭（鋼管杭 5 本、PHC 杭 4 本）の測定結果を整理すると以下の通りである。

(1) 杭頭ひずみ

測定電圧幅の相違により、各杭の波形が異なり、杭頭部で偏打の見られるものもある。落下高の大きいものでは引張ひずみが現われている。

これら杭頭ひずみから求めた杭頭応力と打撃エネルギー（ハンマ重量×落下高さ）の関係を図 4.19 に示す。なお、杭頭応力は 4 点のひずみゲージの平均値である。

鋼管杭と PHC 杭を比較すると、同一落下高では鋼管杭は PHC 杭の約 4 倍の値を示している。これは断面積の違いによるものである。また、PHC 杭でクッション材を用いたものは杭頭応力が他に比べて小さくなっている。

(2) 杭頭加速度

全般にノイズが見られるが、落下高が大きいときにその傾向は顕著である。ただし、波形は正弦波に近く、減衰傾向が比較的きれいに認められる。

打撃エネルギーと杭頭加速度の関係を図 4.20 に示す。図中の値は測定加速度波形の最大値とし、ノイズの影響は無いものとしている。しかし、各落高により加速度のばらつきが大きく、ノイズの影響が大きいことがわかる。クッション材を用いた PHC 杭では打撃エネルギーと杭頭加速度の間に明瞭な相関が認められる。

(3) オプトフォロー

全般に変動が細かく、良質な波形記録が得られている。ただし、鋼管杭には衝撃载荷時の地盤振動の影響を受けているものが多い。また、測定波形から残留沈下は認められない。

打撃エネルギーと杭頭変位の関係を図 4.21 に示す。図中の値は杭頭の弾性沈下のピーク値である。鋼管杭・PHC 杭のいずれも打撃エネルギーとの明瞭な相関が認められる。また、同一打撃エネルギーの場合、杭種別やクッション材の有無による変位量の差は小さい。ただし、杭頭が破損した No. 7、No. 9 杭は変位量が小さくなっている。

4.3.2 静的载荷試験結果

図 4.22 には油圧パイルハンマによる杭の打込み終了から約 1 ヶ月後に実施した各杭の静的载荷試験の結果を示す。

鋼管杭はハンマー A と D、ハンマー B と C で打ち込まれたものがほぼ同様な静的支持力特性を持ち、PHC 杭では A～D ハンマーによって異なる曲線となっている。

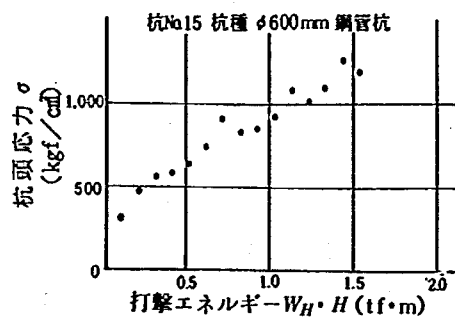
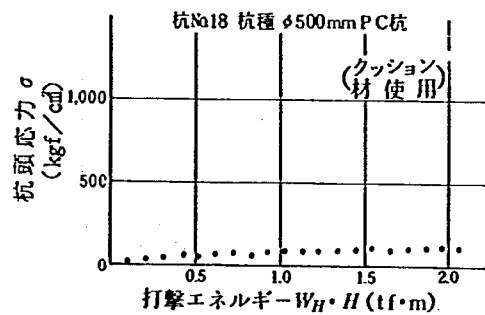
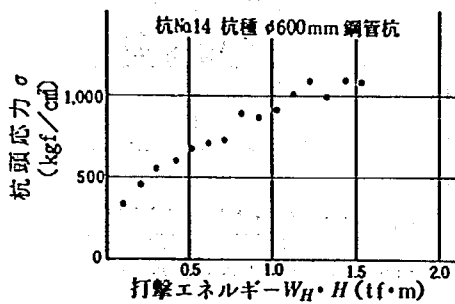
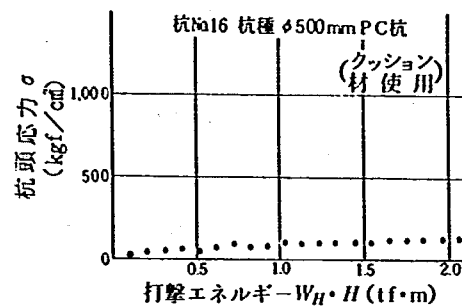
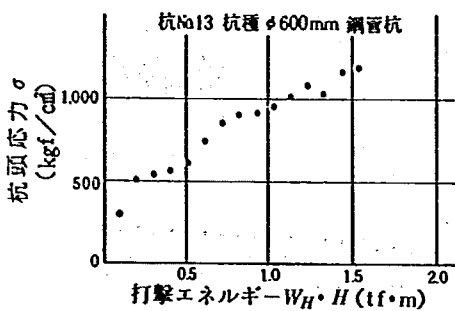
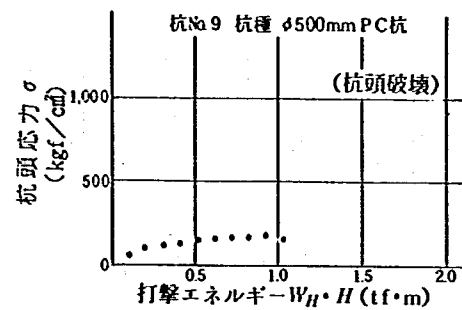
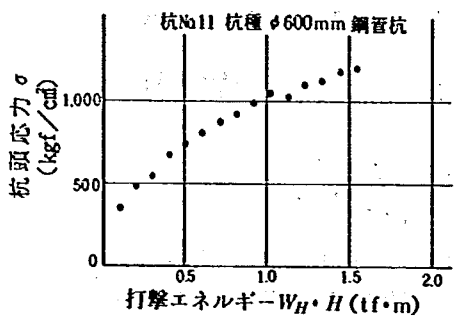
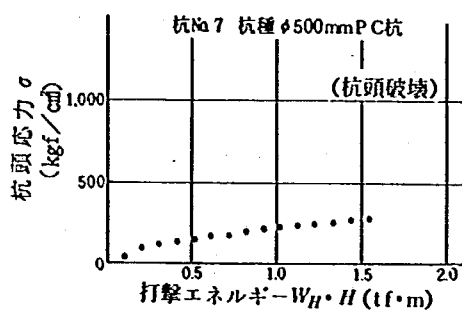
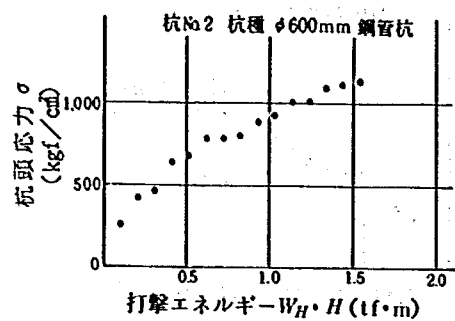


図 4.19 打撃エネルギーと杭頭応力の関係

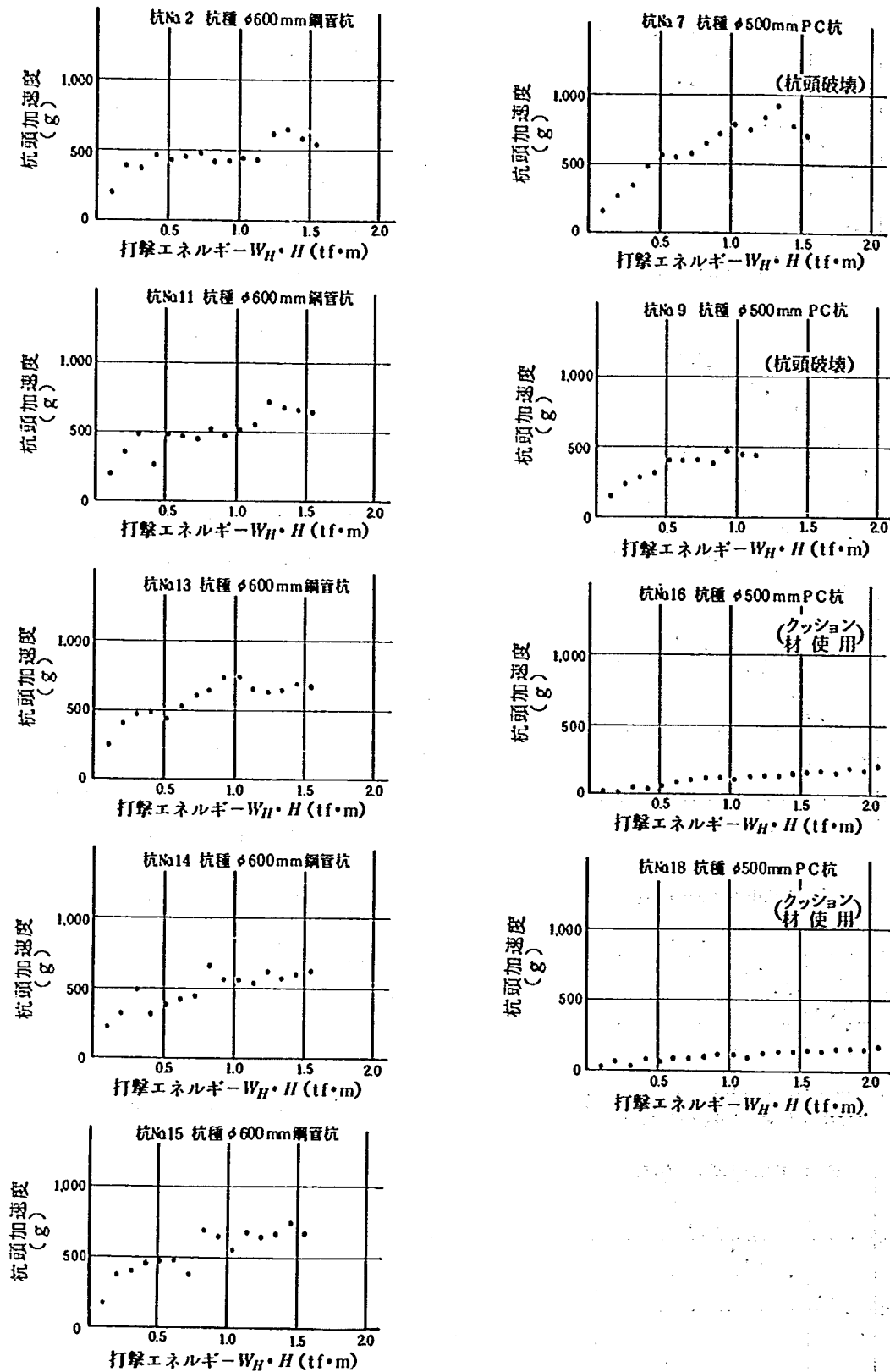


図 4.20 打撃エネルギーと杭頭加速度の関係

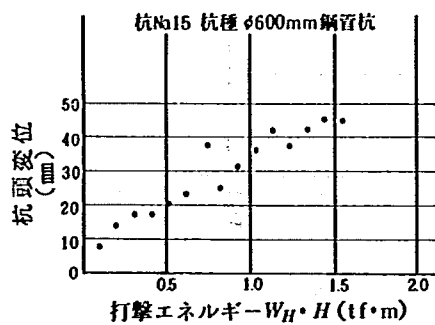
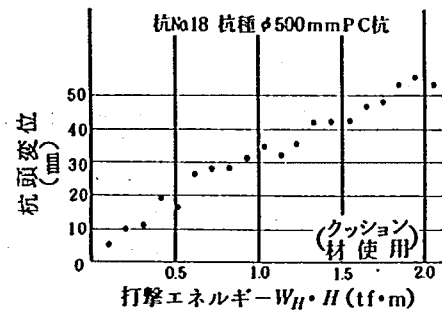
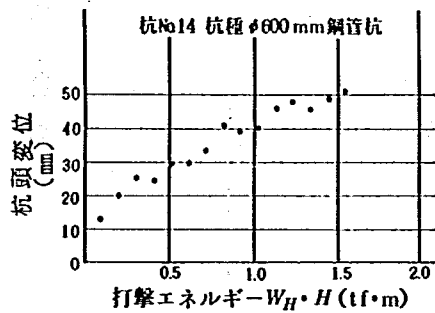
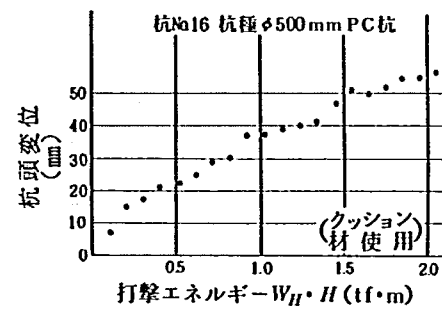
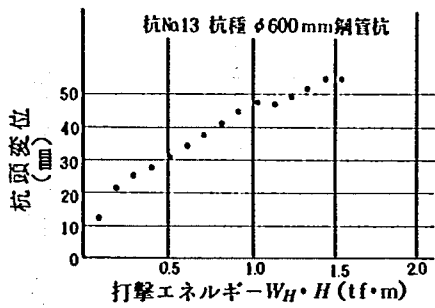
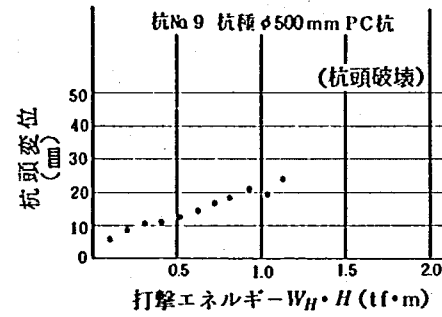
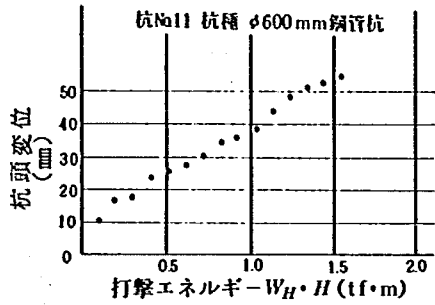
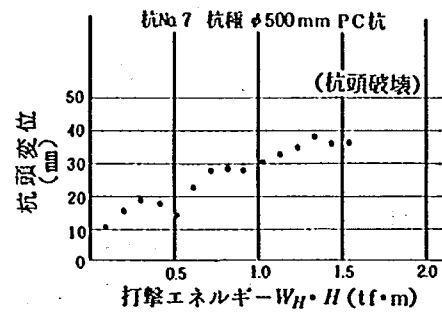
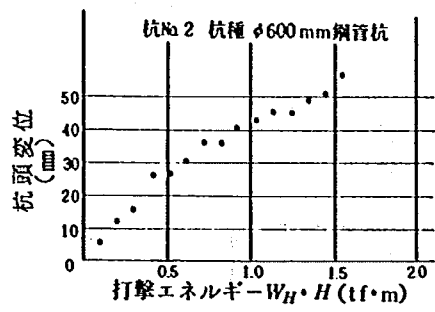


図 4.21 打撃エネルギーと杭頭変位の関係

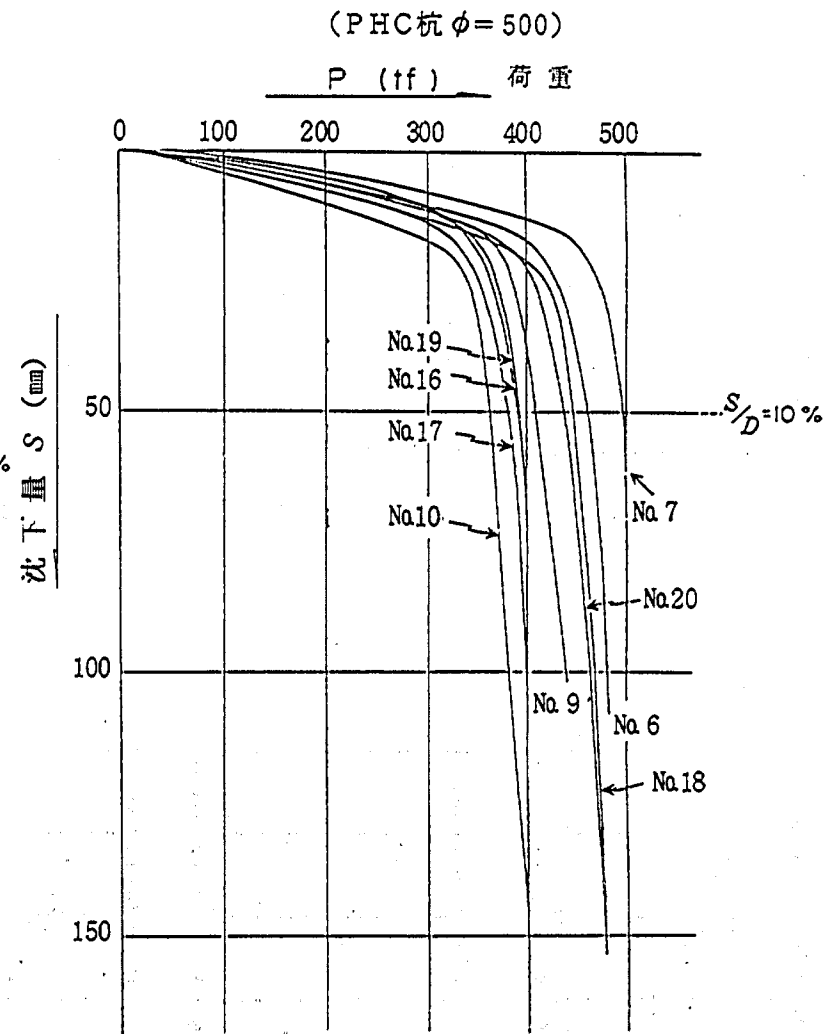
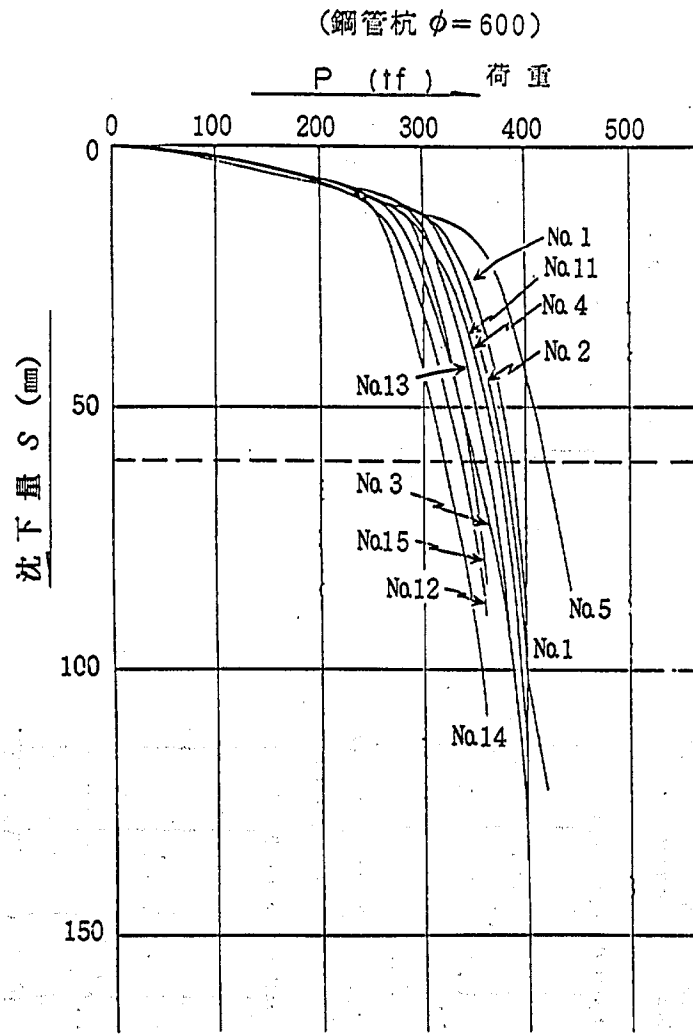


圖 4.22 靜的載荷試驗結果 (荷重~沈下曲線)

5. 杭の動的支持力に関する検討

5.1 杭の動的抵抗力の算定法に関する既往の研究

杭の動的抵抗力を算定する方法には、大別してエネルギーのつりあいに基づくものと、波動理論に基づくものとに大別できる。前者では、Hiley の公式、Dutch の公式など数多くのいわゆる「杭打ち公式」が提案されている。(表 5.1 参照)

一方、後者の波動理論に基づく方法では、Smith の数値解析法、Goble らが提唱している Case Method、宇都らの方法などがある。

ここでは、後者の波動理論に基づく幾つかの既往の研究から Scanlan らの方法、Case Method、宇都らの方法、TNO の方法を取り上げ各々の理論及び解析手法についてまとめてみる。

5.1.1 Scanlan-Tomko¹⁸⁾による方法

Scanlan-Tomko によると、杭を質点と仮定してハンマーと杭-地盤系を図 5.1 のように考えている。この様式によると運動方程式は、式 (5.1) のように示される。

$$F(t) - R \cdot L = M \ddot{x} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここに $F(t)$: ハンマーの打撃力

R : 土の抵抗力 (単位長さ)

L : 杭の根入れ長さ

M : 杭の質量 (W/g)

W : 杭の重量

g : 重力加速度

$\ddot{x}$: 杭質点の加速度

である。

また、単位長さ当たりの土の抵抗力 R は、杭打撃時の速度に依存するものとし、次式により単純化している。

$$R \cdot L = C_0 + a_1 \dot{x} + a_2 \ddot{x} + \dots\dots\dots (5.2)$$

式 (5.2) において、杭の速度 $\dot{x} = 0$ のとき $R \cdot L = C_0$ となり、この時の $R \cdot L$ を静的極限支持力と等しいと仮定している。すなわち、杭速度 $\dot{x} = 0$ の時の打撃時杭頭応力および加速度を求めることにより、 $R \cdot L$ を算出することができる。

実際には、図 5.2 に示すように杭頭部において打撃時の加速度を測定し、その加速度波形を 1 回積分することにより速度波形をもとめ $\dot{x} = 0$ となる時間 t_1 を見つける。この時のつりあいは、式 (5.3) のようになる。

$$R \cdot L = F(t_1) - M \ddot{x}(t_1) = AE \epsilon(t_1) - M \ddot{x}(t_1) \dots\dots\dots (5.3)$$

(土質工学ハンドブックより抜粋)

(注) I型：一般式において X_1 ないし X_2 の全部または一部についてある値を仮定するもの

II型; " " X_1 ないし X_2 を考慮しないもの

Ⅲ型; " " X_1 ないし X_2 を現場実測によって求めるもの

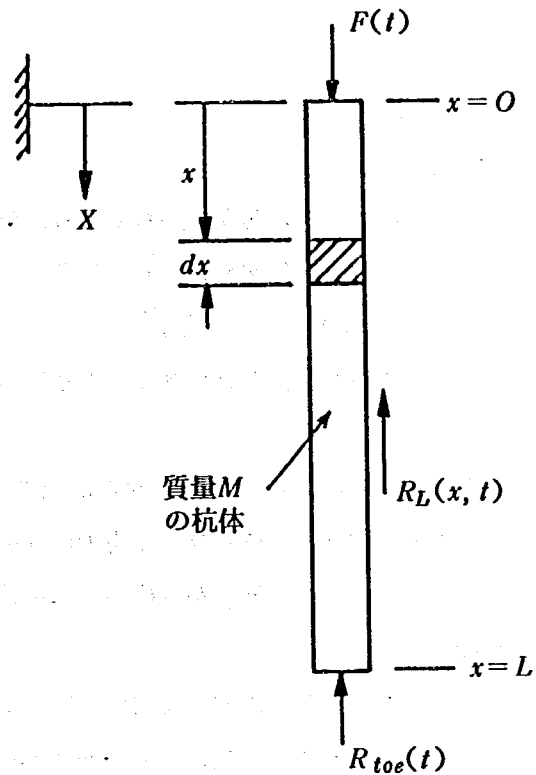


図 5.1 Scanlan らの杭打ちモデル
(簡略式では R_L と R_{toe} を分離せず求める)

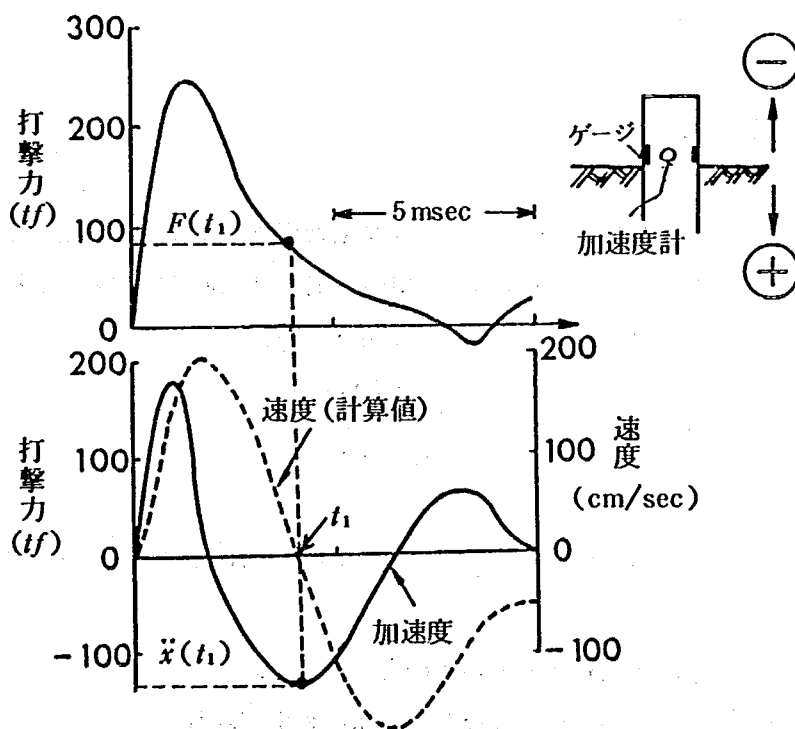


図 5.2 Scanlan らの方法における適用例

ここに、 A ：杭の実断面積

E ：杭材のヤング率

$\epsilon(t_1)$ ： t_1 時間における杭頭のひずみ

$\ddot{x}(t_1)$ ： t_1 時間における杭頭の加速度

なお、この方法に関しては、Levancher により厳密解が導かれており、杭の先端及び周面の境界条件の違いによる打撃時の杭挙動のシミュレーション結果が報告されている。

5.1.2 Case Method (Case Western Reserve University 法)¹³⁾

Case Method は、Goble らによって提案された波動理論に基づく方法である。以下には、この方法の概要と誘導過程を示す。

Case Method は、図 5.3 に示すように杭頭部にストレインゲージと加速度計を取付け、杭打撃時に発生する杭頭ひずみと加速度を測定する。この測定された杭頭ひずみを力に変換し、また、加速度を 1 回積分して速度に変換する。この杭頭部の応力波形と速度波形から杭の先端抵抗、周面摩擦力といった杭の支持力を予測しようとするものである。

Case Method の理論では、杭をまず剛体と仮定し、地盤の動的抵抗力を次式によって与えている。すなわち、このニュートンの第二法則に従うという点は、先に示した Scanlan らの仮定と同様である。

$$R = F(t) - ma(t) \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

ここに、 $F(t)$ ：杭頭の力の時間関数

$a(t)$ ：杭頭の加速度の時間関数

m ：杭の質量 (W/g)

W ：杭の重量

g ：重力加速度

である。

さらに、この理論を杭の弾性を無視し得ない長い杭にも適用させるように拡張している。すなわち、ここでは杭頭応力が最大となった時点から応力が杭中を一往復する間 ($2\ell/c$) で杭が理想的な塑性体の挙動を示すものと仮定して次式を導いている。(図 5.4 参照)

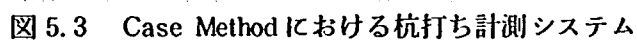
$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{2} (F(t_1) + F(t_1 + 2\ell/c)) - \frac{m}{2\ell} \int_{t_1}^{t_1 + (2\ell/c)} a(t) dt \\ &= \frac{1}{2} (F(t_1) + F(t_1 + 2\ell/c)) + \frac{mc}{2\ell} (V(t_1) - V(t_1 + 2\ell/c)) \quad \dots\dots\dots (5.5) \end{aligned}$$

ここに、 $F(t_1)$ ：打撃直後 t_1 に生じる最大の力

$F(t_1 + 2\ell/c)$ ： t_1 から応力波が一往復して杭頭に発生する力

$V(t_1)$ ： t_1 における杭頭速度

$V(t_1 + 2\ell/c)$ ： t_1 から応力波が一往復して杭頭に生じる速度



ℓ : 杭先端からピックアップの取付けている位置までの距離

m : 杭の質量 (W/g)

c : 応力波の伝播速度 ($c = E/\rho$)

$$\left(\begin{array}{l} \text{鋼 管 杭 ; } c = 5,200 \text{ m/sec} \\ \text{コンクリート杭 ; } c = 4,000 \text{ m/sec} \end{array} \right)$$

E : 杭材のヤング率

ρ : 杭材の密度

である。

次に、この理論ではこの動的抵抗力 R を地盤の静的抵抗力 R_s に変換するために次のような考えを用いている。すなわち、地盤の動的抵抗力 R は、静的抵抗力 R_s と動的ダンピング抵抗力 D の二つの成分からなると考えて次式で示している。

$$R = R_s + D \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

ダンピング抵抗力 D は、杭先端の速度に比例すると仮定して式 (5.7) で示した。

$$D = J V_{toe} = j_c \frac{EA}{C} V_{toe} \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

ここに、

J : 地盤の種類に応じたダンピング定数

j_c : 地盤の種類に応じた無次元ダンピング定数 (表 5.2 参照)

V_{toe} : 杭先端の速度

E : 杭材のヤング率

A : 杭の実断面積

c : 応力波の伝播速度

である。

さらに杭先端の速度 V_{toe} は、杭頭のと速度と地盤の動的抵抗力 R とから式 (5.8) で示される。

$$V_{toe} = 2 V_{top} - \frac{\ell}{m c} \cdot R \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

ここで、 V_{top} は、打撃直後杭頭のと速度が最大となる t_1 の値をとる。すなわち、 $V_{top} = V(t_1)$ である。

静的抵抗力 R_s は、式 (5.6) に式 (5.7) 及び式 (5.8) を代入して、次式により与えられる。

$$R_s = R - j_c \frac{EA}{c} \left[2V(t_1) - \frac{\ell}{m c} R \right] \quad \dots\dots\dots (5.9)$$

以上のような誘導から実用式を総括すると次式が得られる。

$$R = \frac{1}{2} [F(t_1) + F(t_1 + 2\ell/c)] + \frac{Wc}{2gL} [V(t_1) - V(t_1 + 2\ell/c)] \quad \dots\dots\dots (5.10)$$

$$R_s = R - j_c \frac{EA}{c} \left[2V(t_1) - \frac{g\ell}{Wc} \cdot R \right] \quad \dots\dots\dots (5.11)$$

なお、地盤の無次元ダンピング定数 j_c は Goble らによると表 5.2 のように地盤の土質に応じて 0 から

表 5.2 土質別ダンピング定数 j_c ¹⁵⁾

土 質	j_c
砂	0 ~ 0.15
砂まじりシルト	0.15 ~ 0.25
シルトまじりの粘土	0.45 ~ 0.70
粘土	0.9 ~ 1.20

1.2の値が与えられている。また、Holm らによると摩擦杭に Case Methodを適用させると Goble らが与えた j_c 値よりシルト質砂の場合 $j_c = 0.4$ 程度と大きな値となることが報告されている。

また、Goble らは、このCase Methodで算定した静的抵抗力を静的载荷試験結果と比較して図 5.5 のように対応させている。すなわち、ここで静的载荷試験から得られる支持力とはDavisson の提案する方法で行っており、必ずしも静的極限支持力を示すものではない。

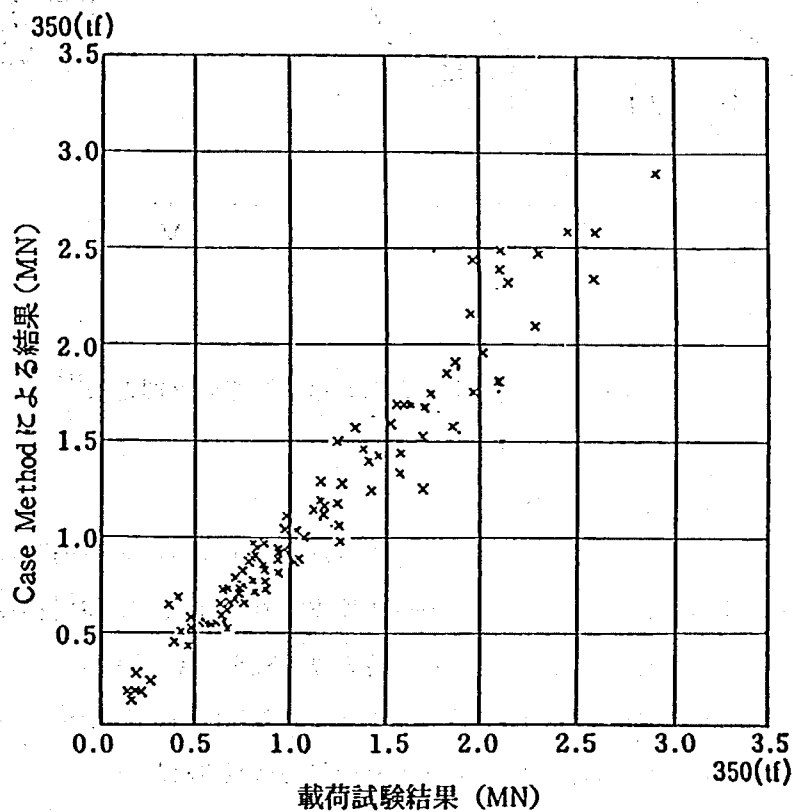


図 5.5 Goble らによる Case Method の適用例^{13), 15)}
(静的 Test との対比)

Davissonによる静的載荷試験の整理方法とは図5.6に示すように、荷重－変位曲線と変位 Δ から杭体のばね定数 K を勾配とした直線との交点の荷重を静的支持力とする方法である。 Δ 及び K は、次式より求める。

$$\Delta = 4 + d/120 \text{ (mm)} \quad \dots\dots\dots (5.11)$$

$$K = AE/\ell \quad \dots\dots\dots (5.12)$$

ここで、 d 、 A 、 E 、 ℓ ：杭の直径 (mm)、杭の断面積、杭のヤング率、杭の長さである。

なお、先に述べた Scanlan らの方法と比較すると Scanlan らの方法では速度が0となる時点での杭頭応力と加速度を用いて土の抵抗力（この場合静的支持力としている。）を求めているのに対して、Case Methodでは、 $2\ell/c$ 時間の平均値として R を求め、これに土のダンピング項を引いて静的支持力 R_s としている。

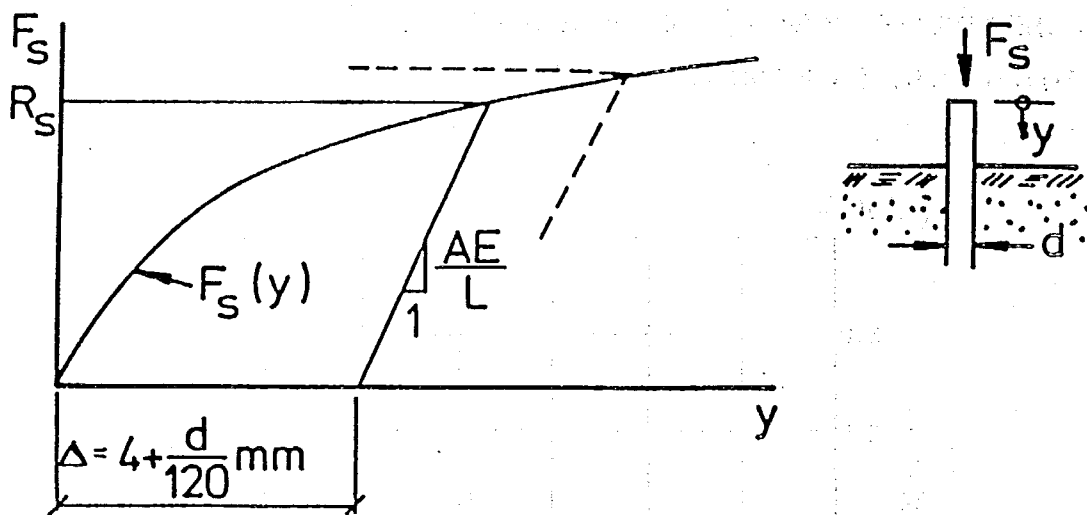


図 5.6 Davissonによる静的載荷試験結果の整理方法¹⁷⁾

5.1.3 宇都らの方法（道路橋示方書の方法）¹⁴⁾

宇都らによると杭の打止め状態において杭頭で測定された貫入・リバウンド記録（ S 、 K_0 、 K_s ）を境界条件として1次元波動方程式を解いて、杭の動的先端支持力を導き、これに打ち込み時に動的に低減したところの杭周面の摩擦力を加えて、杭の動的支持力算定式を与えている。

以下には、宇都らによる杭の動的支持力式の誘導過程とその概要について述べる。なお、杭の動的先端支持力式を誘導する過程においては、図5.7に示した記号を参照されたい。

まず、杭の一次元波動理論を導くにあたり次のような仮定を設けている。

- ① 杭体を伝播する応力波は1次元の波動として取扱う。
- ② 杭は全長にわたって断面積が等しく、材質が均一である。
- ③ 杭周面の動的摩擦力は無視する。
- ④ 杭頭の応力は、応力波の先端が杭体を一往復するのに要する時間 $T = 2\ell/c$ 継続して発生する。
- ⑤ 杭頭の変位は、図5.7に示すように打撃後 T 時間で最大値 $(S + K_0 + K_s)$ になり $2T$ 時間後、杭

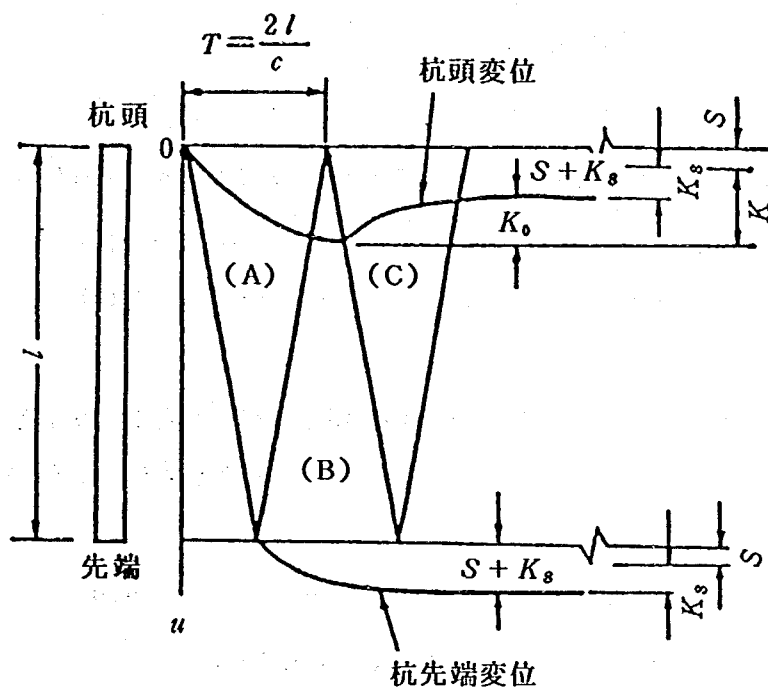


図 5.7 宇都らの時間～変位図¹⁴⁾
(理論の説明図)

の弾性によるリバウンド K_0 が生じて一定値となる。

- ⑥ 杭先端の変位は、図 5.7 に示すように打撃後 $T/2$ 時間から貫入が始まり、 $3T/2$ で最大値($S + K_s$)となる。
- ⑦ 先端のリバウンド K_s は、 $3T/2$ 時間後に生じる。
- ⑧ 杭先端に生じる応力は、 $T/2$ から $3T/2$ までの平均値で評価する。すなわち、この時間では杭先端の地盤の動的抵抗力は一定であると仮定する。

1次元波動方程式は、式(5.13)で与えられる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (5.13)$$

式(5.13)の変位に関する一般解は

$$u = f(ct - x) + g(ct + x) \quad \dots\dots\dots (5.14)$$

となり、ひずみは式(5.15)で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -f'(ct - x) + g'(ct + x) \quad \dots\dots\dots (5.15)$$

初期条件は、 $t = 0$ において

$$u = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (5.16)$$

とおける。図 5.7 の(A)領域では、杭先端へ向かう下降波のみが存在するので、杭頭 $x = 0$ においては、仮定④から $0 \leq t \leq T$ の時間の変位関係は

$$u = f(ct) \quad \dots\dots\dots (5.17)$$

となる。さらに杭頭の変位は仮定⑤から、 $t = 0$ で 0、 $t = T$ で $S + K$ であるから

$$u = f(0) = 0 \quad \dots\dots\dots (5.18)$$

$$u = f(2\ell) = S + K = S + K_s + K_0 \quad \dots\dots\dots (5.19)$$

の関係が得られる。

一方、図 5.7 の(B)の領域では、下降波と先端地盤の影響を受けたところの杭頭へ向かう上昇波がともに存在することになる。したがって、 $T/2 < t \leq 3T/2$ 時間の杭先端 $x = \ell$ における変位は式 (5.14) から

$$u = f(ct - \ell) + g(ct + \ell) \quad \dots\dots\dots (5.20)$$

となる。杭先端の変位は仮定⑥から $t = T/2$ において 0 であるから、

$$f(0) + g(2\ell) = 0 \quad \dots\dots\dots (5.21)$$

となり、式 (5.18) を代入して

$$g(2\ell) = 0 \quad \dots\dots\dots (5.22)$$

となる。さらに、 $3T/2$ において杭先端の変位は $S + K_s$ となるから

$$f(2\ell) + g(4\ell) = S + K_s \quad \dots\dots\dots (5.23)$$

となり、さらに式 (5.19) を用いて

$$g(4\ell) = S + K_s - f(2\ell) = -K_0 \quad \dots\dots\dots (5.24)$$

の関係を得る。

杭先端の動的抵抗力 R_{d0} は、仮定から $T/2 < t \leq 3T/2$ 時間の平均値として

$$\begin{aligned} R_{d0} &= -\frac{AE}{T} \int_{T/2}^{3T/2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=\ell} dt \\ &= -\frac{AE}{2\ell} (S + K_s + 2K_0) \quad \dots\dots\dots (5.25) \end{aligned}$$

を得る。これが、宇都らによる杭先端支持力の厳密解である。

しかしながら、実際の杭打ち作業における貫入・リバウンド量の測定では、地盤のリバウンド量 K_s と杭体のリバウンド量 K_0 とを分離することが不可能な場合が多い。そこで多くの杭打ち記録から、杭の打止め付近においては、 $S = K_s$ であることを見出し、この関係を式 (5.25) に用いて近似式 (5.26) を導いている。これに表 5.3 に示すようにハンマーの重量と杭体の重量の比をパラメータにして杭種ごとに係数 e_0 を用いて補正しているのが式 (5.26) の道路橋示方書で採用している動的支持力式の第 1 項

である。さらに、杭周面の摩擦力に関しては、第2項で示されている。

$$R_s = \frac{AEK}{e_o \ell} + \frac{\bar{N} u \ell}{e_f} \quad \dots\dots\dots (5.26)$$

ここに、 $\bar{N}$ ：杭周辺の平均 N 値

u ：杭周長

e_o, e_f ：補正係数（表 5.3 参照）

表 5.3 補正係数 e_o, e_f ¹⁾

く い 種	e_o	e_f
鋼ぐい（中掘り最終打撃ぐいを含む）	$1.5 \frac{W_H}{W_P}$	2.5
コンクリートぐい（PCぐい、RCぐい）	$2 \frac{W_H}{W_P}$	2.5
中掘り最終打撃ぐい（PCぐい）	$4 \frac{W_H}{W_P}$	10

さらに、宇都らは、先の Case Method と同様に式（5.27）において杭の動的先端抵抗力 R_d と動的ダンピング抵抗力 D から静的先端抵抗力を導いている。

$$R_d = R_s + D \quad \dots\dots\dots (5.27)$$

また、ダンピング抵抗力は、一般に杭体の速さに比例することから式（5.28）を示し、さらに、先に示した同一の仮定を用いて1次元方程式の一般解から貫入中の平均速度 V_p から S 及び K_s による算定式を導いている。

$$D = J \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_{x=\ell} \quad \dots\dots\dots (5.28)$$

式（5.27）から杭先端の静的抵抗力は、次式によって示される。

$$R_s = R_d - J \frac{c}{2\ell} (S + K_s) \quad \dots\dots\dots (5.29)$$

5.1.4 TNOによる解析方法（H. von Koten, P. Middendorpによる方法）¹⁹⁾

TNOの方法によると重錘による打撃によって生じる杭頭部の時間～変位波形を5つの部分に分け杭の挙動を説明している。

図 5.8 には、杭打撃時の時間～変位曲線（波形）の一例を示すが、まずこの図において①部分（ $0 \leq t \leq t_1$ ）、②部分（ $t_1 \leq t \leq t_2$ ）、③部分（ $t_2 \leq t \leq t_3$ ）、④部分（ $t_3 \leq t \leq t_4$ ）及び⑤部分（ $t_4 < t$ ）に区分する。

①の部分は杭打撃時の圧縮応力波による変位であり、式（5.30）が基本式となる。

$$\frac{du}{dt} = V(t) = \frac{F(t) \cdot C}{EA} \quad \dots\dots\dots (5.30)$$

ここで、 $F(t)$ ：杭頭応力

$u(t)$: 杭頭変位
 $V(t)$: 杭頭速度
 E : 杭材のヤング率
 c : 応力波の伝播速度
 A : 杭の断面積

である。

この式に杭頭変位曲線の勾配 $du/dt = a$, E , A , c を代入することにより杭頭の力 $F(t)$ が求められる。

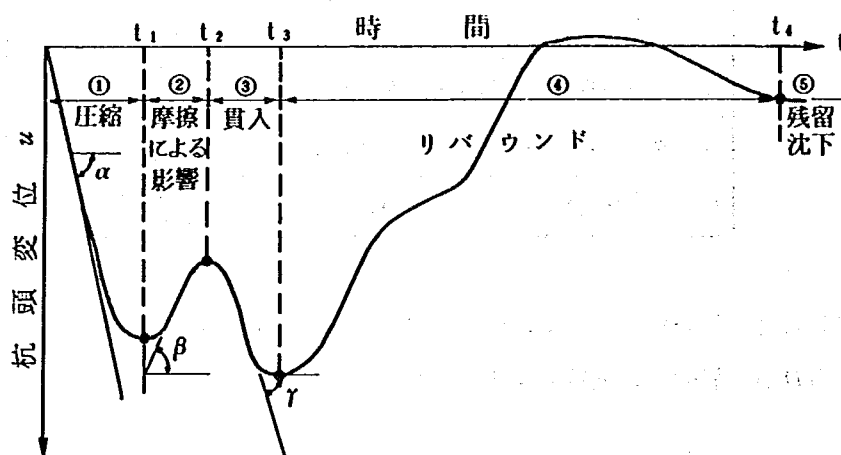


図 5.8 TNOによる時間～変位曲線の解釈¹⁹⁾

②の部分は、杭周面の摩擦力により影響を受けた部分であり、この部分においても式 (5.30) をもとに勾配 $du/dt = \beta$ を求めることによって $F(t)$ が算出できる。

③の部分は、杭の貫入過程を示したもので、先の基本式 (5.30) において $du/dt = \gamma$ を代入することにより $F(t)$ を求める。

④の部分は、衝撃後の杭と地盤の弾性的回復を示すものでこの部分で概ね応力波は消滅する。この部分での杭の挙動は、式 (5.31) に示す 1 自由度系の振動理論で表される。

$$M \frac{d^2 u}{dt^2} + C \frac{du}{dt} + K_s u = 0 \quad \dots\dots\dots (5.31)$$

ここで、 M : 杭の質量 (W/g)

C : 土の減衰定数

K_s : 土のバネ剛性

である。

⑤の部分は、残留沈下を示す。

以上のように式 (5.30) を基本として得られた情報をもとに杭の静的載荷時の挙動を双曲線近似式 (5.32) により評価することが可能であるとしている。

$$S = \frac{aF}{1 - bF} \dots\dots\dots (5.32)$$

ここに、 S ：沈下

F ：荷重

$a = 1/K$ (K は杭と地盤のバネ剛性が適用される。)

$b = 1/F_f$

$F_f : F_s + F_t = \text{破壊荷重}$

F_s, F_t ：周面摩擦力，先端抵抗

である。

5.2 実測データに基づく動的支持力と静的支持力の比較

ここでは、前節 5.1 において述べた波動理論に基づく各種算定式を取り上げ、打撃エネルギー（または落下高さ）の変化に応じた杭の動的支持力の算定値の比較を行なうとともに、この算定値を打撃時の最大変位との関係に整理し、静的載荷試験による荷重－沈下曲線との対応をみている。

さらに、油圧ハンマーによる打ち込み試験結果における貫入・リバウンド特性から動的支持力の算定方法について検討してみる。

5.2.1 既往手法による動的支持力の算定

ここでは、各種動的支持力算定手法の中から①Goble らの Case Method, ②Scanlan らの方法, ③宇都らの方法を取り上げ、杭打撃時の応力、変位または加速度などの動的情報をもとに杭の動的支持力算定値を求めている。

なお、ここで算定値を区別するために、①Goble らの Case Method による動的算定値を R_{dG} , Scanlan らの方法による動的算定値を R_{ds} , 宇都らの方法による算定値を R_{du} とする。

(1) 各種動的支持力算定値 R_d^* と打撃エネルギーの関係

(1) 埋設杭

図 5.9 には、深層土槽実験での No.3 杭における衝撃載荷試験の結果から、先に述べた①Goble らの方法, ②Scanlan らの方法及び、③宇都らの方法に基づいて算定した動的支持力 R_d^* を打撃エネルギー $W_H \cdot H$ と関連させて示す。この図より、Goble らの方法による算定値（図中▲印）は $W_H \cdot H = 0.1 \text{ tf} \cdot \text{m}$ から $0.3 \text{ tf} \cdot \text{m}$ まで R_d^* の値が、約 40 tf と静的載荷試験の降伏荷重近傍にあり、 $W_H \cdot H = 0.3 \text{ tf} \cdot \text{m}$ を超えたあたりから極限荷重に近づいている傾向がうかがえる。また、Scanlan らの方法による算定値（図中●印）は、全体にばらつきが大きく、落下高さとの顕著な相関はあまり認められない。これは、Scanlan らの方法では、打撃時の加速度をもとにして算定値を求めるため、その測定誤差、または読み取り誤差が大きく影響しているためと考えられる。ただし、全体的には、 $W_H \cdot H = 0.3 \text{ tf} \cdot \text{m}$ 程度までは Goble らの算定値に近い。一方、宇都らの方法による算定値（図中○印）は、他の方法と異なり、 $W_H \cdot H = 0.15 \text{ tf} \cdot \text{m}$ 程度まで $W_H \cdot H$ の増加に伴って算定支持力 R_d^* が増大し、 $W_H \cdot H = 0.15 \text{ tf} \cdot \text{m}$ から $W_H \cdot H = 0.3 \text{ tf} \cdot \text{m}$ の間は、ほぼ極限支持力の近傍に分布している。その後は急激に増大している。

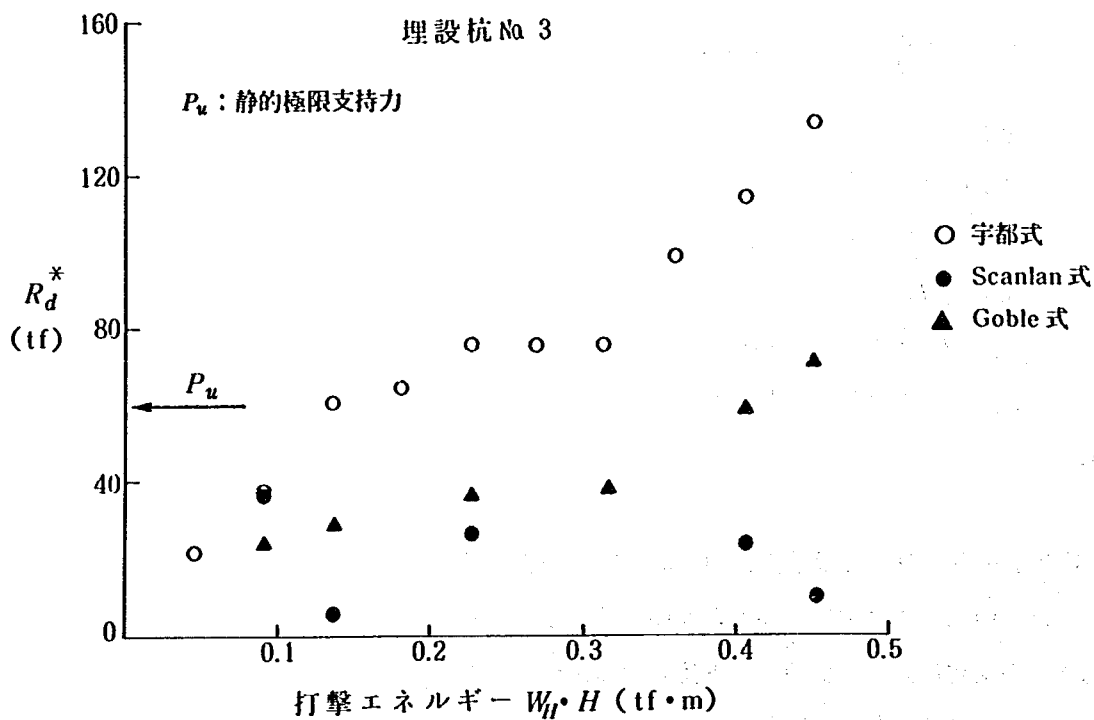


図 5.9 R_d^* と打撃エネルギー $W_H \cdot H$ の関係(1) (埋設杭 No. 3)

次に、埋設杭 No. 4 杭における $W_H \cdot H$ と算定支持力の関係を図 5.10 に示す。この図において測定の不備により Goble および Scanlan らの方法による算定値のプロット数が少ないが、Goble らの方法の場合 $W_H \cdot H$ の増加に伴い R_d^* の値が少しながら増加していく傾向がうかがえるとともに、 $W_H \cdot H = 0.15 \text{ tf} \cdot \text{m}$ から $0.4 \text{ tf} \cdot \text{m}$ の範囲では静的支持力の近傍に分布している。一方、宇都らの方法によると打撃エネルギーの増加に伴い算定支持力の増加が認められるが、 $W_H \cdot H = 0.3 \text{ tf} \cdot \text{m}$ (落下高さ $H = 0.6 \text{ m}$) を超えたところから算定値が大きくなり、静的極限支持力に近づいている。また、先に述べた No. 3 杭の場合も $W_H \cdot H = 0.3 \text{ tf} \cdot \text{m}$ 付近に同様の変曲点が認められ、静的載荷試験結果がほぼ同様であることを考慮するとこの曲線の変曲点は杭の降伏荷重（または、極限荷重）に対応するものと考えられる。

(ロ) 打込み杭

図 5.11 には、ハンマー A、ハンマー B の $\phi 600$ 鋼管杭に対する打込み試験結果および重量 1 tf による衝撃載荷試験結果から各種支持力式を用いた算定値 R_d^* と打撃エネルギー $W_H \cdot H$ の関係を示す。図よりハンマー A 及びハンマー B とともに $W_H \cdot H$ の増加に伴って Goble 式、Scanlan 式及び宇都式による算定値とも増加しており、その増加曲線は、双曲線状を呈している。この図で見る限り両ハンマーとも、静的極限支持力より算定値の方が小さく算定されているが、Goble 式により両ハンマーにおける杭の支持力の差はある程度見出せたものと考えられる。例えば、図における Goble の式による算定値をハンマー A (図中□印) とハンマー B (図中■印) とで比較してみるとハンマー A の方が若干大きく算定されている。一方、Scanlan または宇都式によるとほぼ両算定値が一致しており、その差を見出すことはできない。しかしながら、両方法とも支持力を判定する目安としては十分適用できるものと考えられ、この点については後述する $R_d^* \sim S_{dmax}$ との関係において述べることにする。

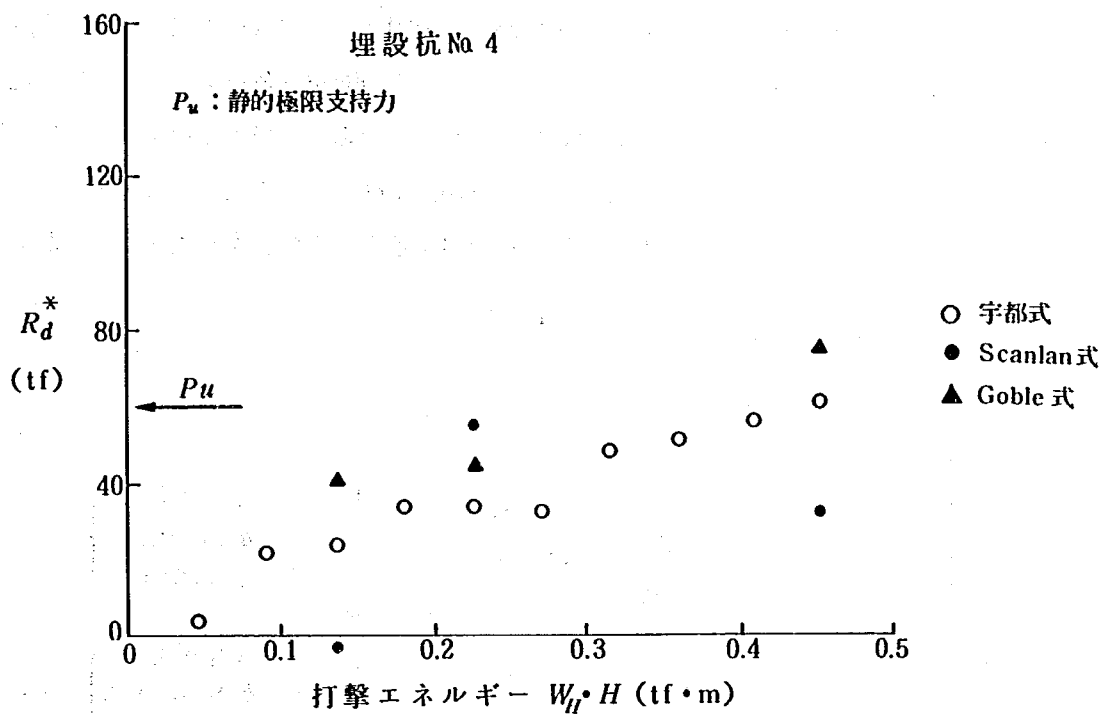


図 5.10 R_d^* と打撃エネルギー $W_H \cdot H$ の関係(2) (埋設杭 No. 4)

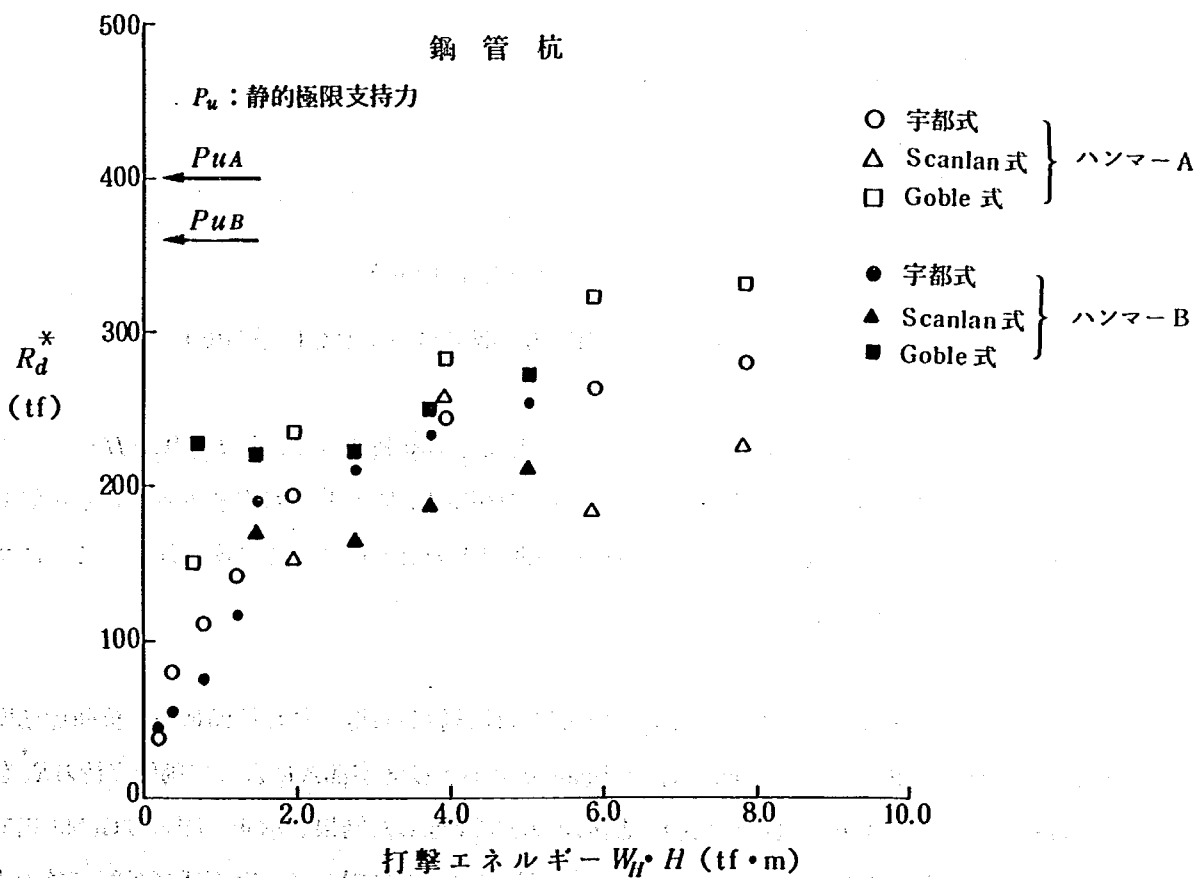


図 5.11 R_d^* と打撃エネルギー $W_H \cdot H$ の関係(3) (鋼管杭 $\phi 600$)

一方、図 5.12 には、PHC 杭における結果を示すが、この図においても鋼管杭と同様に $W_H \cdot H$ の増加に伴って算定支持力 R_d^* が各手法とも増大している。また、この図から各ハンマーにおける杭の支持力の差が明確に表れている。すなわち、図においてハンマー C の場合、静的載荷試験の結果、極限支持力が 400 tf と他のハンマーに比べて小さくなっているが、Goble らの方法による算定値（ハンマー A：○印、ハンマー B：▲印、ハンマー C：□印）に着目すると、この差を判別することができる。

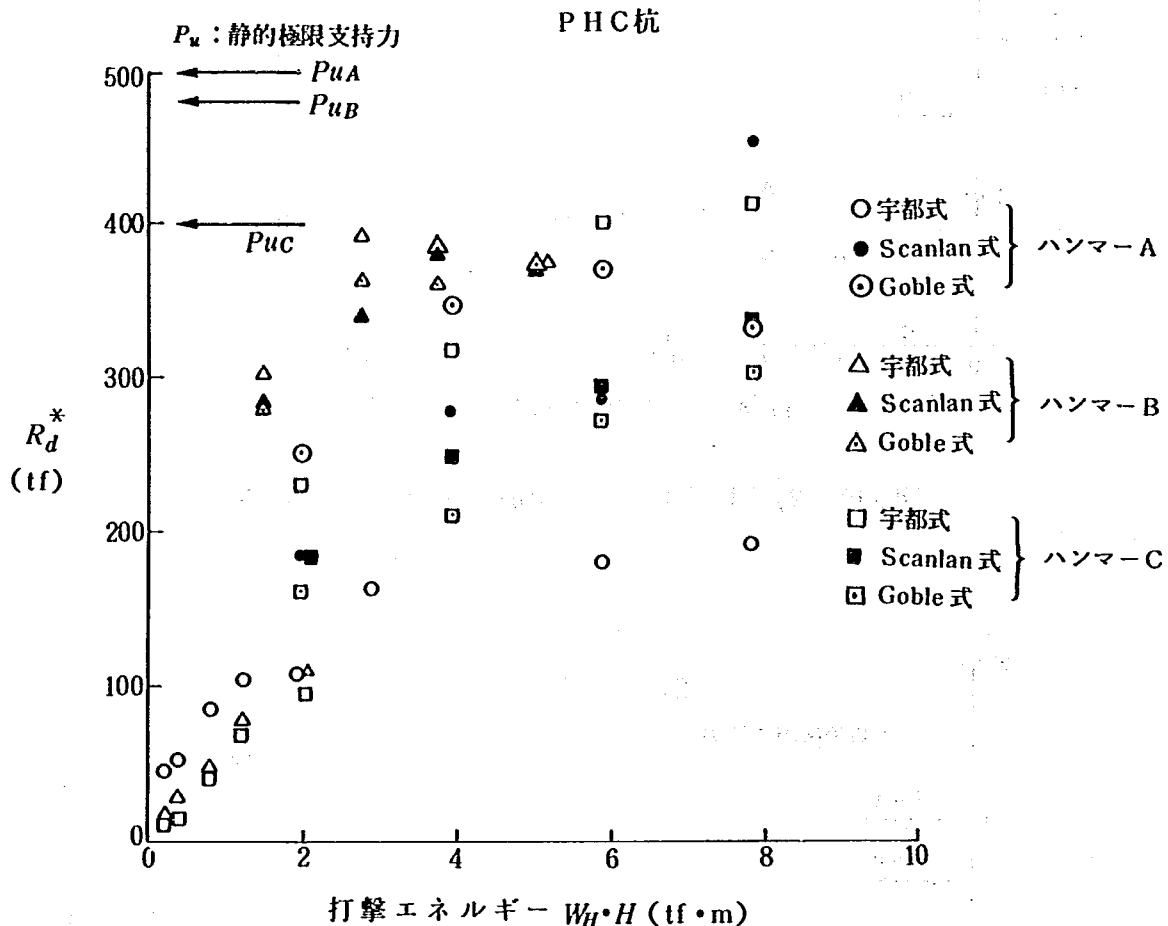


図 5.12 R_d^* と打撃エネルギー $W_H \cdot H$ の関係(4) (PHC 杭 $\phi 500$)

このように鋼管杭、PHC 杭による打ち込み試験および衝撃載荷試験の結果を $W_H \cdot H$ によって整理することによって各動的支持力算定法ともある程度静的極限支持力との対応をみることが可能であると言える。なお、静的載荷試験における荷重～沈下曲線との対応については次に述べることにする。

(2) 各種動的支持力算定値と変位の関係

(イ) 埋設杭

図 5.13 には、深層土槽実験における No. 3 杭の衝撃載荷試験から得られた杭頭応力、杭頭加速度および貫入量、リバウンド量から① Goble 式、② Scanlan 式および③ 宇都式によって動的 support 力 R_d^* を求め、これと打撃時の最大変位 $\delta_{max} (=S+K)$ と関連づけて整理した結果を示す。図より Goble 式では、比較的静的載荷試験における荷重～沈下曲線と対応しているのに対して、宇都式では算定値の方がかなり大きくなっている。また、Scanlan らの式によるとばらつきが大きく、全体として小さく見積もら

れている傾向がうかがわれる。

一方、No 4 杭における $R_d \sim S_{dmax}$ の関係を図 5.14 に示すが、Goble 式、宇都式による算定値とも静的載荷試験における荷重～沈下曲線より大きくなっており、埋設杭 No 4 に対しては、静的載荷試験の曲線との対応があまり良くないと言える。

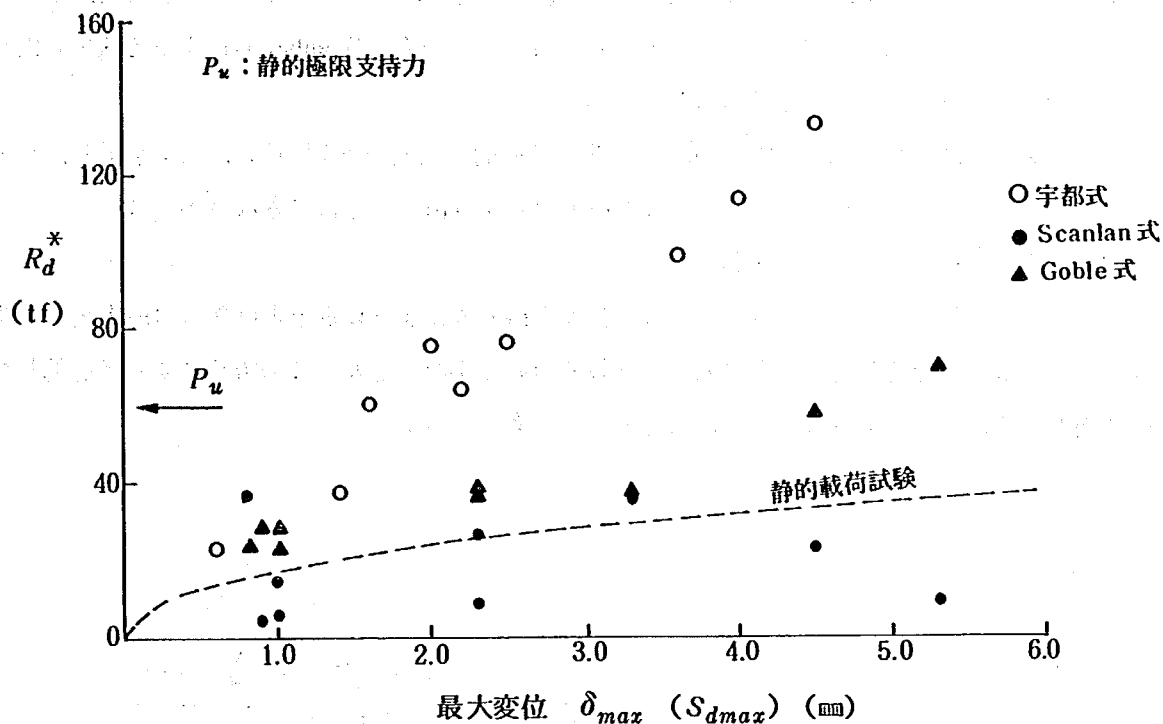


図 5.13 $R_d^* \sim$ 最大変位 δ_{max} の関係(1) (埋設杭 No 3)

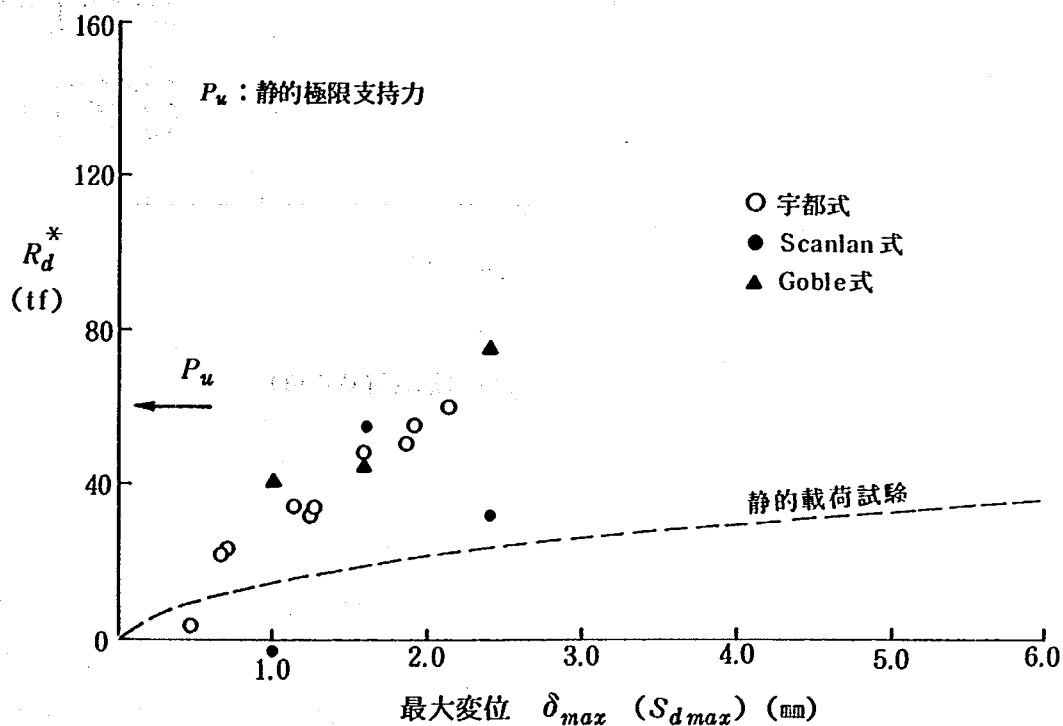


図 5.14 $R_d^* \sim$ 最大変位 δ_{max} の関係(2) (埋設杭 No 4)

(ロ) 打込み杭

図 5.15 は、 $\phi 600$ の鋼管杭に関して各種算定支持力 R_d^* と最大変位 δ_{max} の関係をハンマー A とハンマー B についてとりまとめたものであり、同図には、各杭の静的载荷曲線を併記している。図より、Goble 式による算定値（ハンマー A： $\triangle$ 印、ハンマー B： $\triangle$ 印）また、宇都式による算定値（ハンマー A： $\square$ 印、ハンマー B： $\blacksquare$ 印）は静的载荷曲線の近傍に分布しており、算定値を最大変位と関連させることによって比較的良く対応できるものと考えられる。一方、Scanlan らによる方法では両ハンマーとも静的载荷曲線より小さく見積もられている。

次に、図 5.16 は、PHC 杭の $R_d^* \sim \delta_{max}$ の関係と静的载荷曲線とを比較した結果を示したものである。この図において、両ハンマーの明確な支持力の差を見出すことはできないが、ほぼハンマー B の曲線の近傍に分布していることがわかる。

以上の結果から、打ち込み杭については、各種支持力式による算定値と打撃時の最大変位を関連づけることによって静的载荷曲線との対応が比較的良好であり、また、この方法によって静的载荷試験の傾向を見る目安としてみなすことができるものと考えられる。

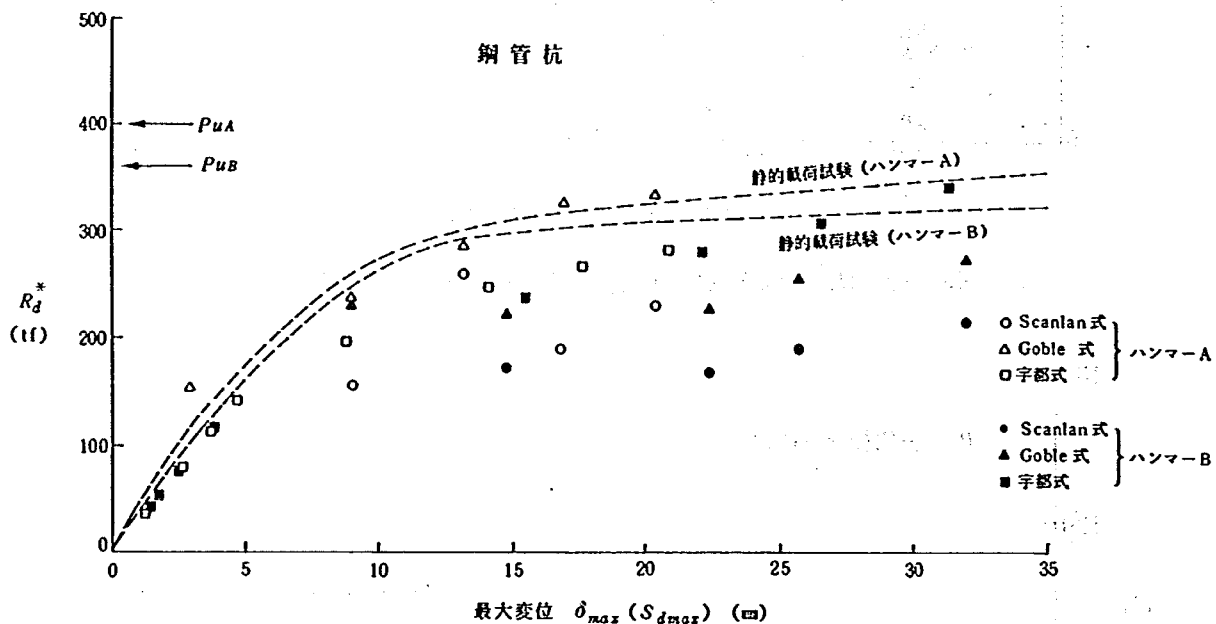


図 5.15 $R_d^* \sim$ 最大変位 δ_{max} (3) (鋼管杭 $\phi 600$)

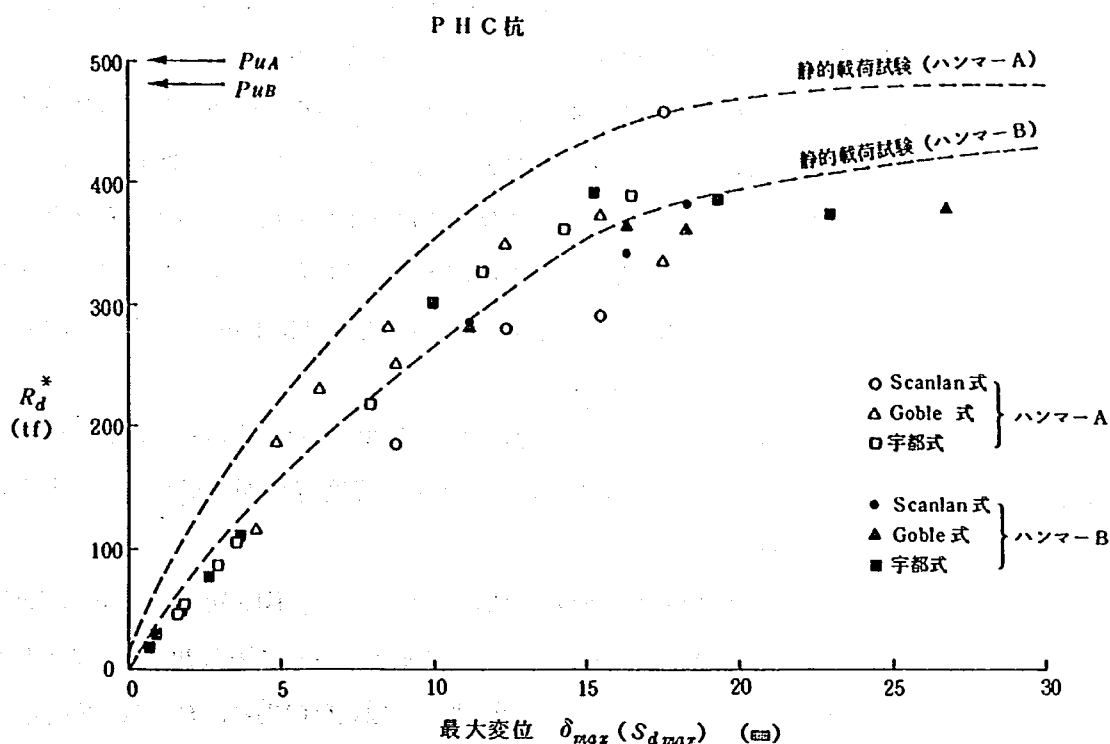


図 5.16 $R_d^* \sim$ 最大変位 δ_{max} (4) (PHC 杭 $\phi 500$)

5.2.2 打撃力と変位による動的支持力の算定

(1) 動的荷重～変位カーブの特性

ここでは、油圧ハンマーによる打撃時の動的測定結果及びフィールド実験Ⅱにおける 1 tf の重量のハンマーによる衝撃载荷試験結果から打撃時の荷重～変位カーブの特性を述べ、次にこれらの曲線から動的抵抗力和変位の関係について考察してみる。

図 5.17～図 5.24 は、各種油圧ハンマー (A, B, C, D ハンマー) により落下高さを変えて打撃した際の動的荷重 $P_d \sim S_d$ カーブ群を各々鋼管杭、コンクリート杭に分けて示したものである。これらの図より、ハンマー A、ハンマー C、ハンマー D においては、明瞭な荷重 P_d のピークが 5 mm 以内の小さな変位において認められるのに対して、ハンマー B では各落下高さの最大変位に達する付近で P_d が最大となっている。これは、ハンマーのクッションの影響によるものである。図 5.25 には、参考としてクッションの異なる油圧ハンマーによる打込み時の杭頭部における荷重～時間曲線を示したものであるが、図において樫木を用いた場合油圧ハンマー、ディーゼルハンマーとも打撃直後に急激な立上りが見られ、さらに打撃応力波の 1 往復する時間 $T = 2l/c$ に対応して力の急激な減少が認められる。これに対して、ハイドロクッションの場合では、打撃後緩やかに打撃力が増加しそのため力のピークも樫木に比べて時間の遅れがあり、T 時間後の力の急な減少は見られない。

さらに、図 5.17～図 5.24 において、各ハンマー及び杭種にかかわらず落下高さが増加するに伴い、 $P_d \sim S_d$ 曲線が増大するとともに、その曲線の形状は概ね相似していることがうかがえる。また、リバウンド過程 (最大変位～残留変位) における $P_d \sim S_d$ 曲線の勾配が鋼管杭、PHC 杭各々ハンマーの種類、

落下高さによらずほぼ等しい値となっている傾向がうかがえる。(図 5.26 参照)。これは、杭材の固有の定数である弾性係数 E および断面積 A に密接に関係しているためと考えられる。

さて、ここでこの $P_d \sim S_d$ カーブの上に静的載荷試験における荷重 $P_s \sim$ 沈下 S_s 曲線を重ね合わせてみると、各落下高さでの打撃時の最大力 P_{dmax} と最大変位量 S_{dmax} との交点を結んだ曲線と比較的似た傾向にあることがうかがえる。これは、ラム落下高さの変化を杭に作用する荷重レベルの変化と置き換えて考えることができるためであろう。しかしながら、先に述べたように各ハンマー及びクッションの種類によって P_{dmax} の表れ方が違うことを考慮すると、Goble らの Case Method のように平均的に打撃を取扱って整理する方法も一つの方法であろう。

以上落下高さを変えた場合の打撃時の動的計測によって得られた杭頭応力(ひずみ)と杭頭変位における最大値 $P_{dmax} \sim S_{dmax}$ を求め曲線を当てはめることによってある程度静的載荷試験における $P_s \sim S_s$ 曲線を類推できるものと考えられる。

以下には $P_{dmax} \sim S_{dmax}$ の結果から、図 5.27 には埋設杭 (No. 3, No. 4) を、図 5.28 には $\phi 600$ の鋼管杭 (ハンマー A, ハンマー B) について取りまとめてプロットして示す。さらに図 5.29 には、 $\phi 500$ の PHC 杭 (ハンマー A, ハンマー B) について示す。これらの図より、埋設杭の場合、 $P_{dmax} \sim S_{dmax}$ のプロットと静的載荷試験とはあまり対応していないが、 $\phi 600$ 鋼管杭、 $\phi 500$ PHC 杭の場合はハンマー A, ハンマー B とともに比較的良く一致していることがうかがわれる。また、各杭の静的極限荷重、降伏荷重とも対応していることがわかる。

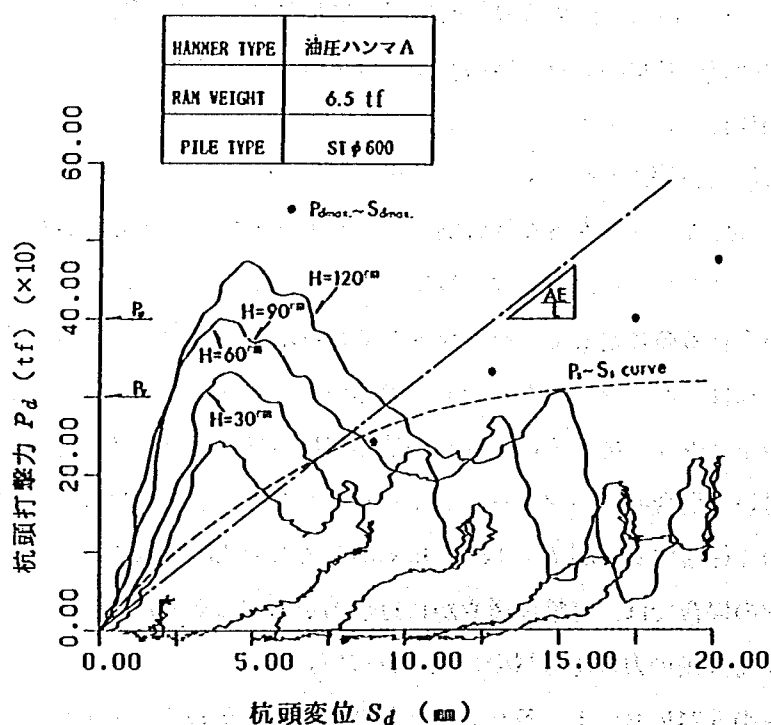


図 5.17 落下高さの変化に伴う $P_d \sim S_d$ の関係(1)
(ハンマー A, 鋼管杭 $\phi 600$)

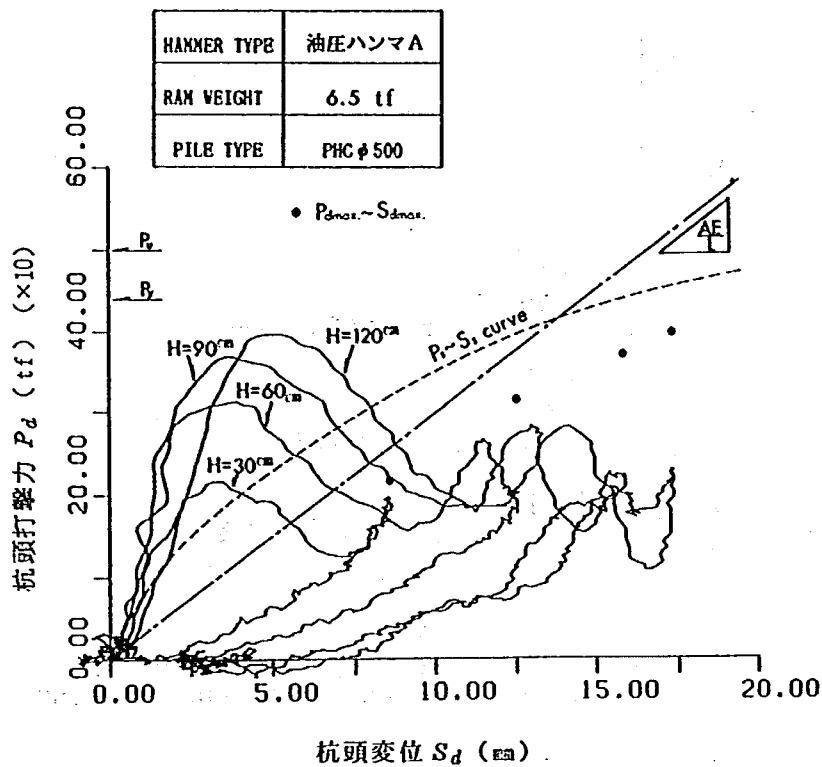


図 5.18 落下高さの変化に伴う $P_d \sim S_d$ の関係(2)
(ハンマー A, PHC 杭 ϕ 500)

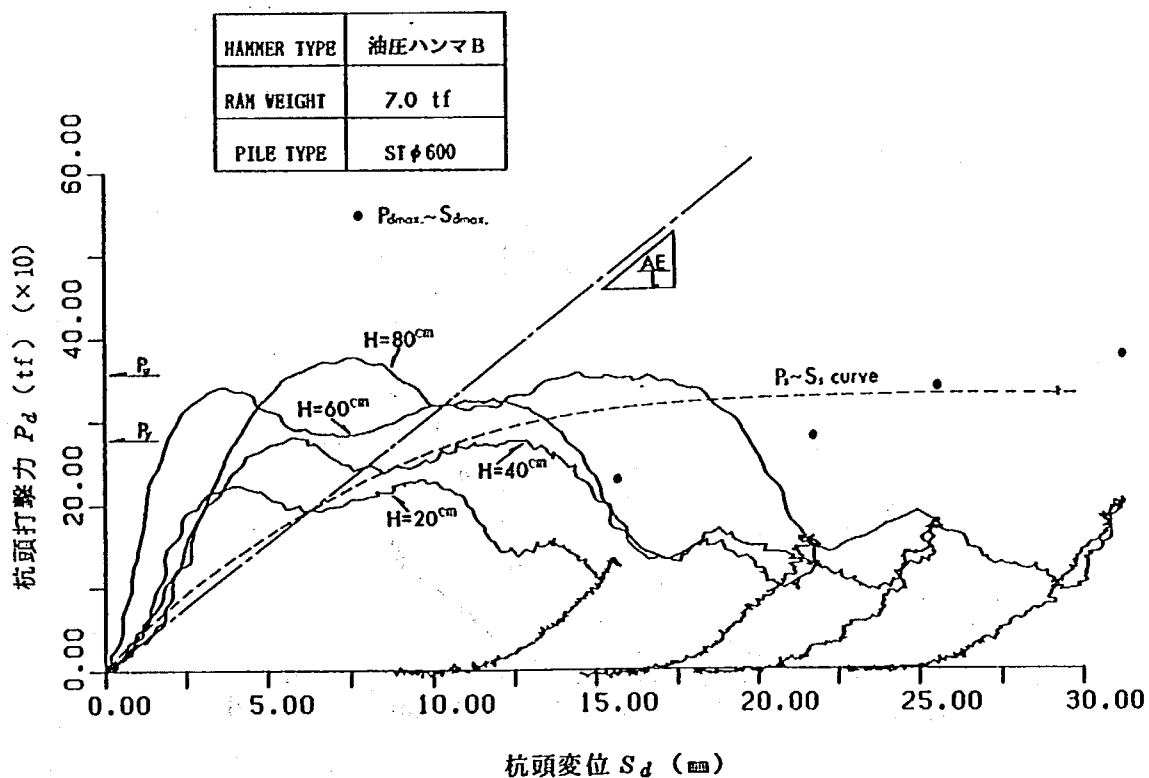


図 5.19 落下高さの変化に伴う $P_d \sim S_d$ の関係(3) (ハンマー B, 鋼管杭 ϕ 600)

[illegible]

HAMMER TYPE	油圧ハンマC
RAM WEIGHT	6.5 tf
PILE TYPE	STφ600

杭頭打撃力 P_d (tf) ($\times 10$)

杭頭変位 S_d (cm)

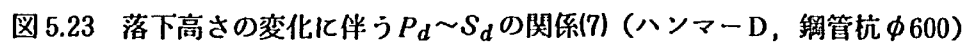
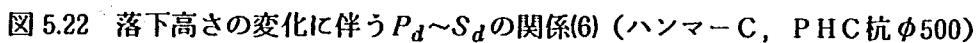
$P_p \sim S_p$ curve

$P_{pmax} \sim S_{dmax}$

$H=30\text{cm}$, $H=60\text{cm}$, $H=90\text{cm}$, $H=120\text{cm}$

$\triangle AEF$

- 110 -



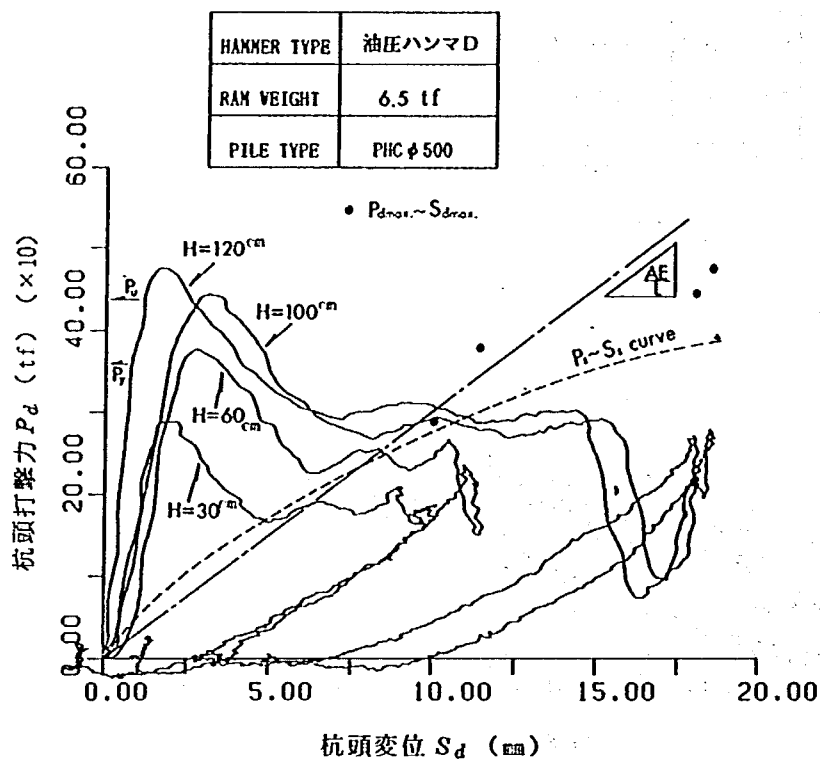


図 5.24 落下高さの変化に伴う $P_d \sim S_d$ の関係(8) (ハンマーD, PHC杭 ϕ 500)

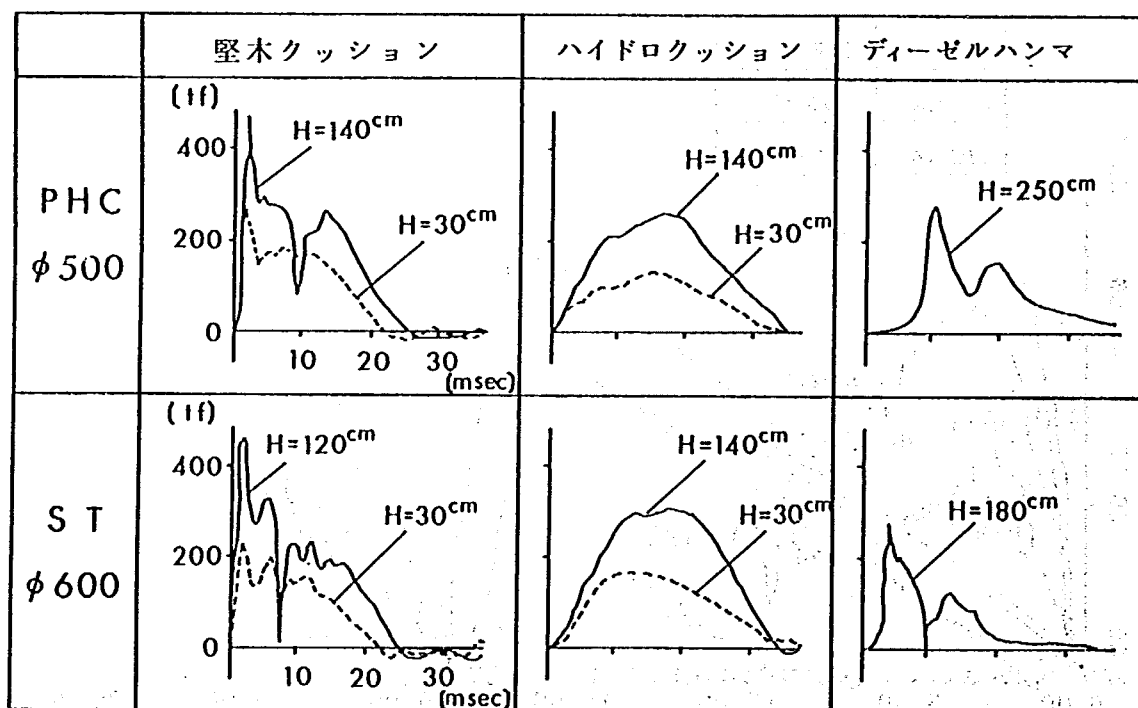


図 5.25 打撃力波形に及ぼすクッションの影響

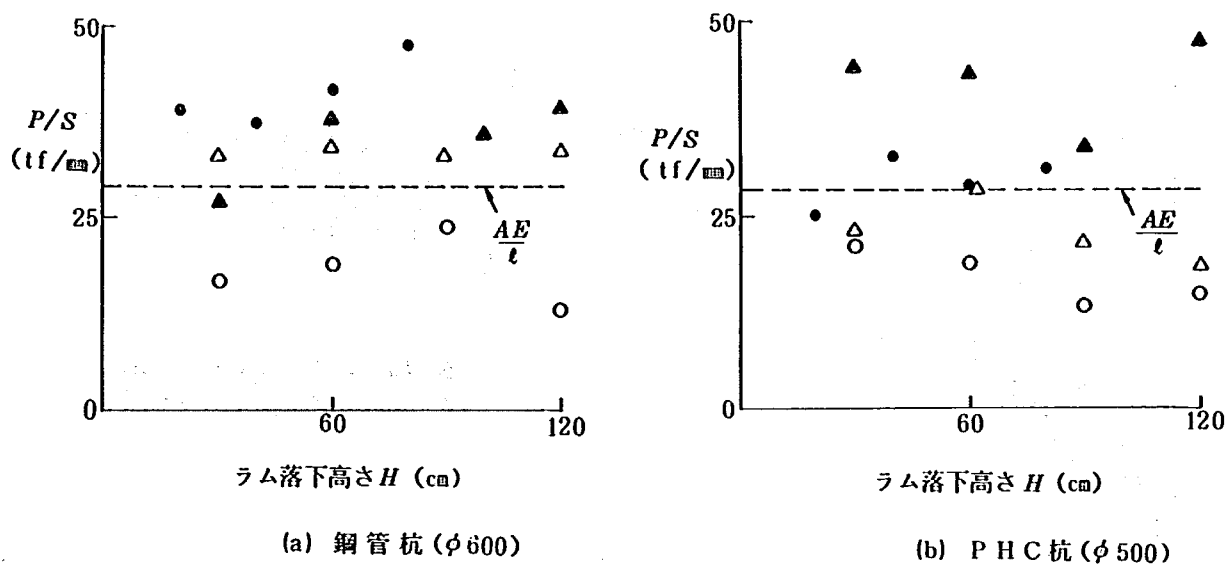


図 5.26 ラム落下高さ H と P/S の関係

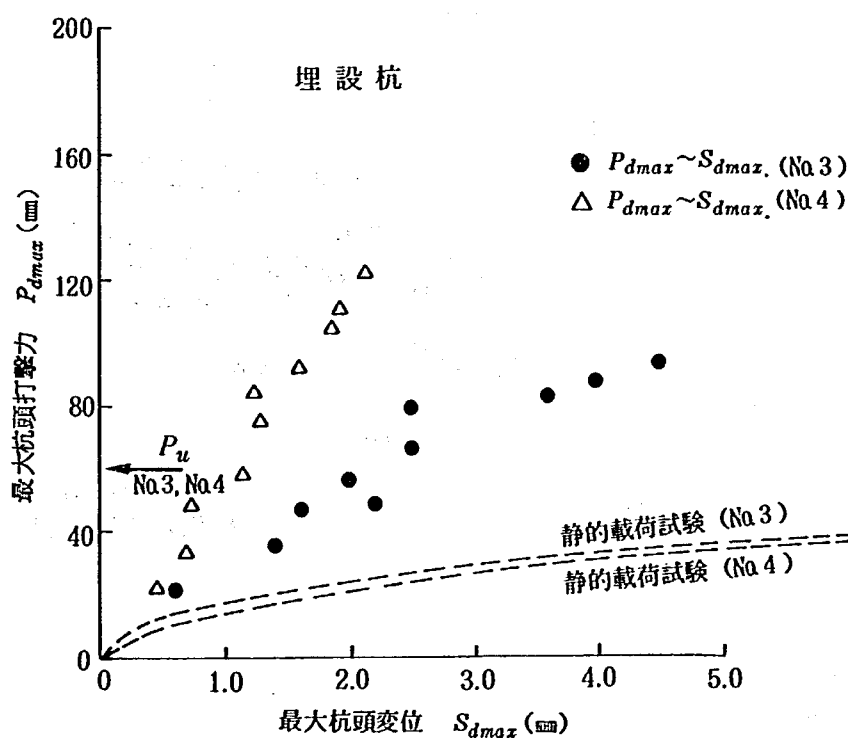


図 5.27 $P_{dmax} \sim S_{dmax}$ と静的荷重曲線との比較(1)
(埋設杭 No. 3, No. 4)

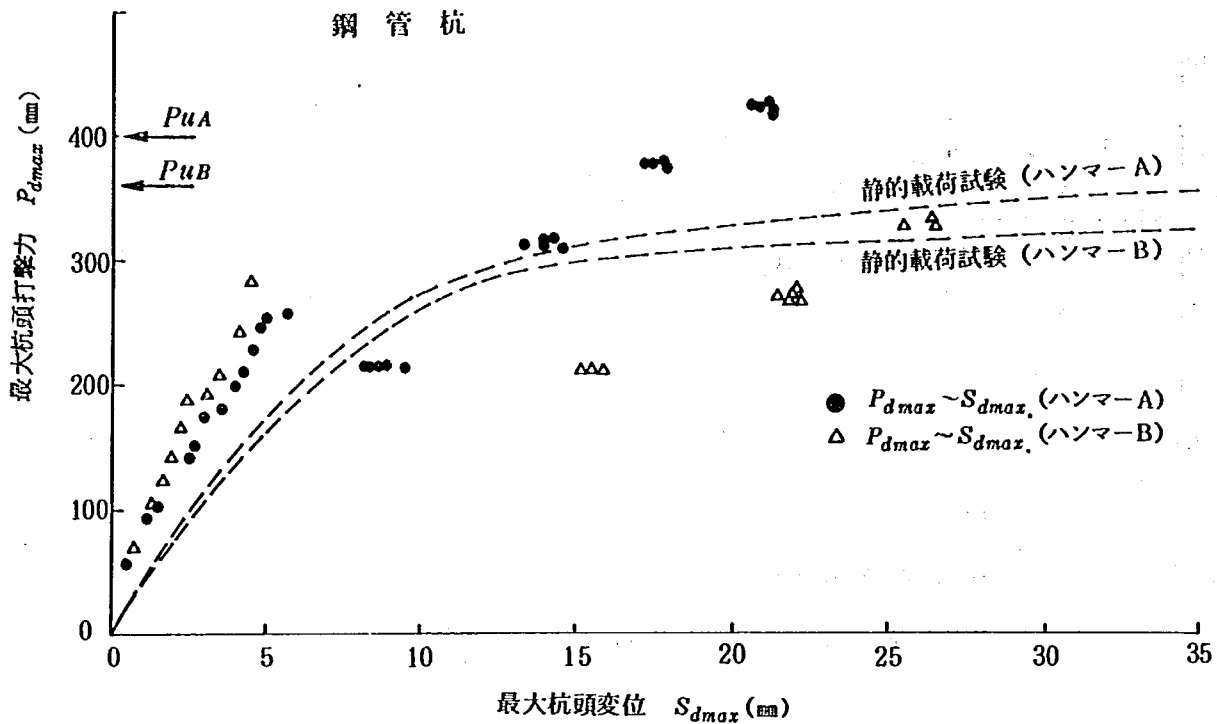


図5.28 $P_{dmax} \sim S_{dmax}$ と静的載荷曲線との比較(2)
(鋼管杭 $\phi 600$)

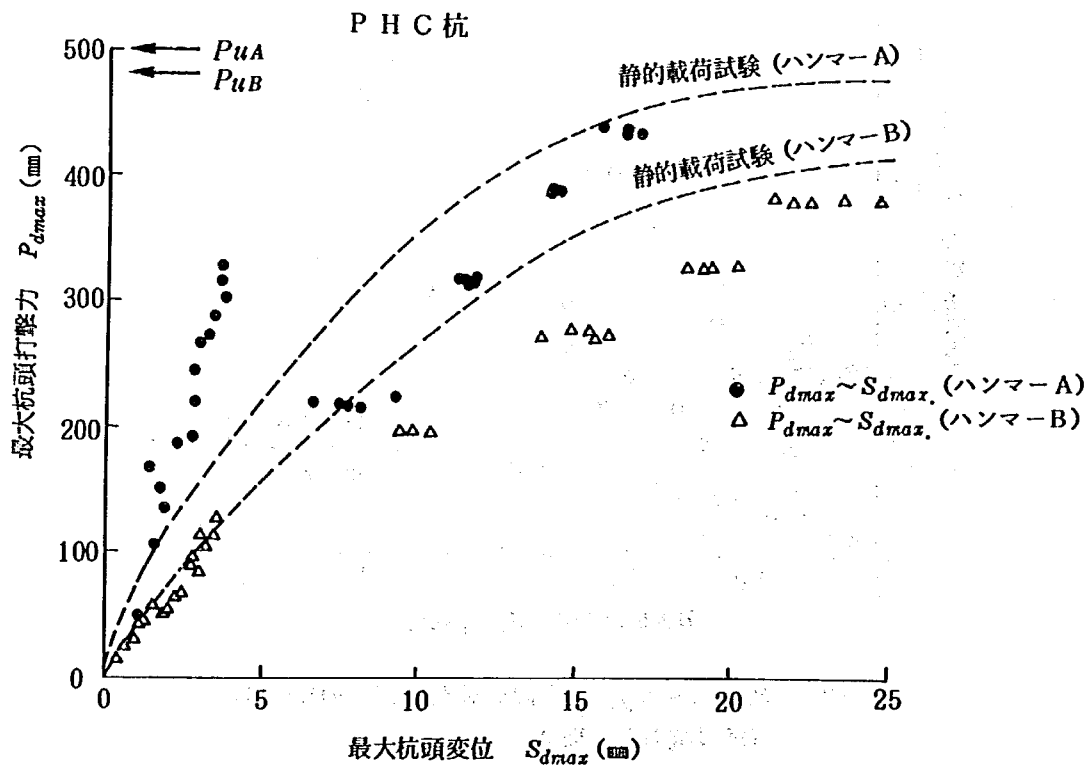


図5.29 $P_{dmax} \sim S_{dmax}$ と静的載荷曲線との比較(3)
(P H C 杭 $\phi 500$)

5.2.3 パイルハンマによる打ち止め時の貫入・リバウンド特性

ここでは、土木研究所構内における油圧ハンマーによる打込み試験から、打ち止め付近における打撃エネルギーと貫入・リバウンド量の関係を述べる。さらにこの貫入・リバウンド量に基づいた杭の動的支持力の算定について軽重量ハンマーによる衝撃载荷試験の結果を加味して考察してみる。

(1) 油圧ハンマー打込みにおける打撃エネルギー $W_H \cdot H$ と貫入量 S 、リバウンド量 K の関係

図 5.30 及び図 5.31 には、土木研究所構内（土工管理実験場）で実施した打込み試験における打ち止め時に油圧ハンマーのラム落下高さ H を 4 段階（ $1/4 H_{max}$, $2/4 H_{max}$, $3/4 H_{max}$, H_{max} ；ここで H_{max} とは各種油圧パイルハンマーの最大ラム落下高さである）に変化させて打撃した際の打撃エネルギー $W_H \cdot H$ と貫入量 S 、リバウンド量 K の関係を各々コンクリート杭（PHC 杭）、鋼管杭についてとりまとめたものである。これらの図より、ハンマ機種によらず PHC 杭、鋼管杭とも $W_H \cdot H$ の増加に伴って貫入量 S が比例的に増加しており、また、杭径に応じて貫入量 S の増加割合が異なっていることがわかる。例えば、PHC 杭についてみると $\phi 400$, $\phi 500$, $\phi 600$ と杭径（杭先端断面積）が大きくなるに伴い、同じ $W_H \cdot H$ に対して貫入量 S が減じていることがわかる。また、PHC 杭と鋼管杭を比較すると当然のことながら鋼管杭の方が同じ打撃エネルギーに対して貫入量が大きく、これは、杭先端断面積および杭先端形状（開放形、閉塞形）の差によるものと考えられる。

これに対して、リバウンド量 K は貫入量がある程度以上では $W_H \cdot H$ の増加に伴う顕著な差は認められず、また、PHC 杭、鋼管杭とも杭径が大きいものほど若干リバウンド量 K が小さくなる傾向がうかがえる。なお、図 5.31 の鋼管杭 $\phi 600$ において、同一 $W_H \cdot H$ に対して貫入量 S リバウンド量 K に若干のバラツキが認められるが、これは後で述べるように杭先端部の貫入抵抗（地盤の動的支持力）の差に起因するものと考えられ、この結果は静的载荷試験結果とも符号する。

なお、図 5.32 には他の地点（千葉県 I 市）での油圧ハンマーの打込み試験においてラム落下高さを変化させて打撃した際の打撃エネルギー $W_H \cdot H$ 、貫入量 S 、リバウンド量 K の関係を PHC 杭 $\phi 350$ 杭について取りまとめて示したものである。この図からも、先に示した土木研究所構内における結果と同様に打撃エネルギー $W_H \cdot H$ の増加に伴い貫入量 S が比例的に増加しており、さらにリバウンド量 K がある打撃エネルギー以上ではほぼ一定の値に収束していく傾向が認められる。

図 5.33、図 5.34 は、上記の結果をもとに打撃エネルギー $W_H \cdot H$ と貫入量 S とリバウンド量 K の和（ $S + K$ ）について整理したものである。これらの図より、土木研究所構内および I 市における打込み試験とも、打ち止め時に打撃エネルギーを変えた場合、打撃エネルギー $W_H \cdot H$ の増加に伴って（ $S + K$ ）の値が比例的に増加しており、この関係はハンマ機種によらず言えるようである。さらに図 5.33 に示すように、杭径が増大するに伴って（ $S + K$ ）の増加割合が減じていることがわかる。

以上のことから打ち止め時に打撃エネルギー $W_H \cdot H$ を変化させた場合の貫入量 S ・リバウンド量 K の特性として次のことが言える。

- ① 打撃エネルギー $W_H \cdot H$ の増加に伴って貫入量 S は比例的に増加するが、リバウンド量 K はある貫入量以上ではほぼ一定値に収束する傾向にある。また、このような傾向はハンマ機種及び地盤条件によらず認められる。

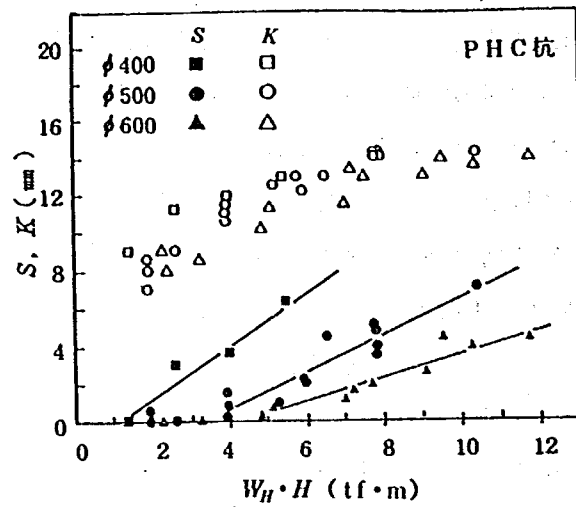


図 5.30 $S, K \sim W_H \cdot H$ の関係(1) (PHC 杭φ500)

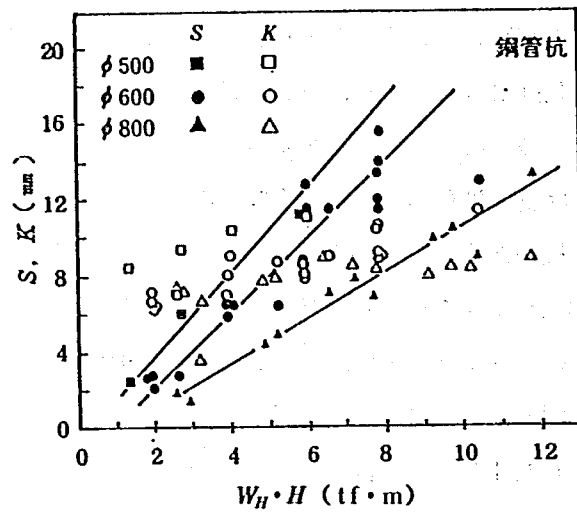


図 5.31 $S, K \sim W_H \cdot H$ の関係(2) (鋼管杭φ600)

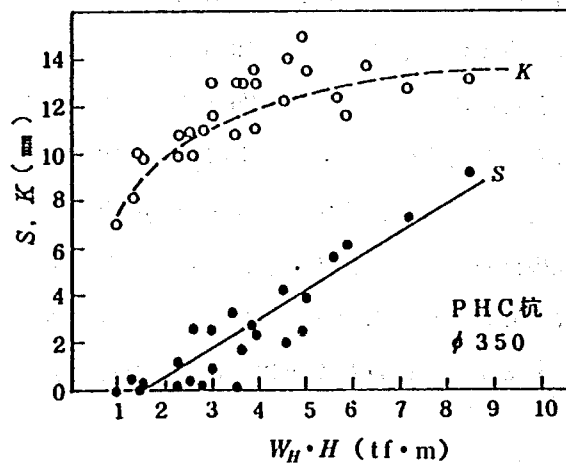


図 5.32 $S, K \sim W_H \cdot H$ の関係(3) (PHC 杭φ350)

- ② 同一の支持地盤に打止める場合、杭径（杭先端の断面積）が大きくなるほど打撃エネルギー $W_H \cdot H$ の増加に対する貫入量 S の増加割合は減ずる傾向がある。
- ③ 打撃エネルギー $W_H \cdot H$ と（貫入量 S とリバウンド量 K の和 $S + K$ ）との間には比例的な関係が認められ、またこの関係は、ハンマ機種にあまり影響されない。

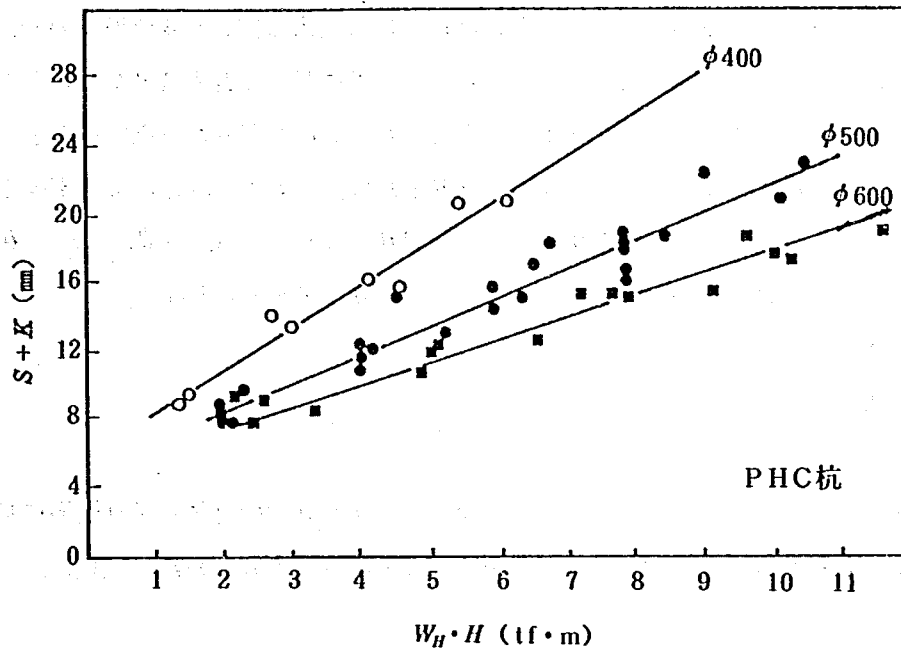


図 5.33 $(S + K) \sim W_H \cdot H$ の関係(1) (PHC 杭：土木研究所構内)

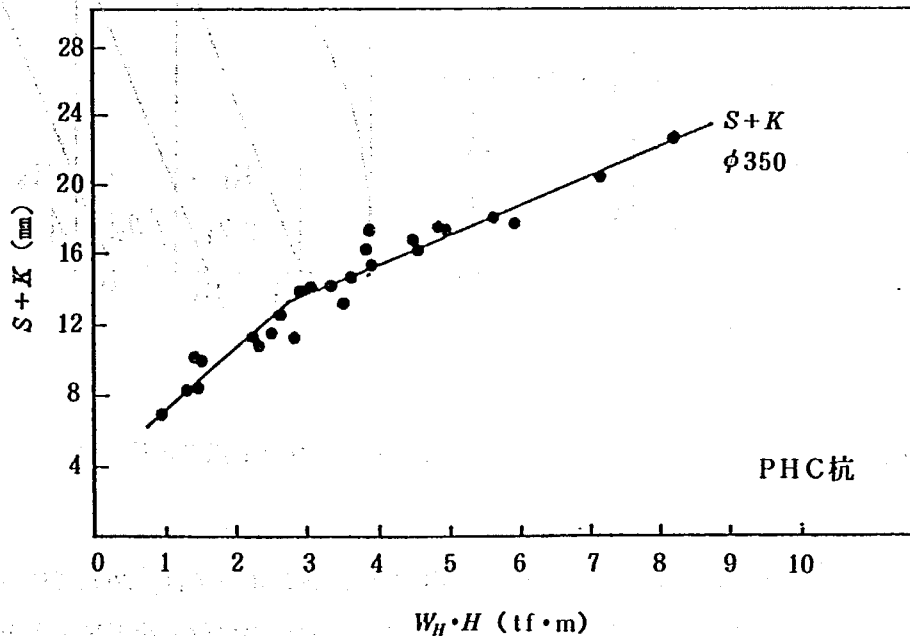


図 5.34 $(S + K) \sim W_H \cdot H$ の関係(2) (PHC 杭；I 市)⁶⁾

5.2.4 貫入量・リバウンド量に基づく杭の動的抵抗力（貫入抵抗力）の算定

上記に述べた油圧ハンマーの打込み試験における打撃エネルギー $W_H \cdot H$ と貫入量 S およびリバウンド量 K の関係を模式的に表すと図 5.35(a) のようになる。すなわち、図において $W_H \cdot H$ の増加に伴って貫入量 S は、 S_1, S_2, S_3 と増加するが、リバウンド量 K はある貫入量 S_1 以上においては同種の杭についてはほぼ一定 $K_1 = K_2 = K_3$ となる。さらに、杭打ち時に地盤の最大貫入抵抗力 R_d が存在し、かつ一定であると仮定すると、ラム落下高さの各段階における貫入抵抗 P ～変位量 δ の関係は図 5.35(b) に示すような関係にあるものと考えられる。すなわち、この図において貫入量 S が S_1 以上となる打撃エネルギーでは最大貫入抵抗力 $P = R_d$ が発現し、また、 $P = 0$ にもどった時点で貫入量 S 、リバウンド量 K が得られる。さらに先に述べたようにリバウンド量 K は、ラム落下高さによらずほぼ等しく、貫入量 S が $W_H \cdot H$ に比例して増加していくとするとその勾配 θ も等しくなる。（ $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3$ ）

また、リバウンド量は主に杭体の弾性変形によるとすると $\theta = AE/l$ となる。

ここで、 A ：杭体の断面積

E ：杭体のヤング率

l ：杭長

以下には、深層土層実験、フィールド実験Ⅱ及び油圧パイルハンマーの打込み試験結果に基づき上記の方法で杭打撃時に得られた貫入量、リバウンド量から杭の動的抵抗力 R_d' の算定を試みる。

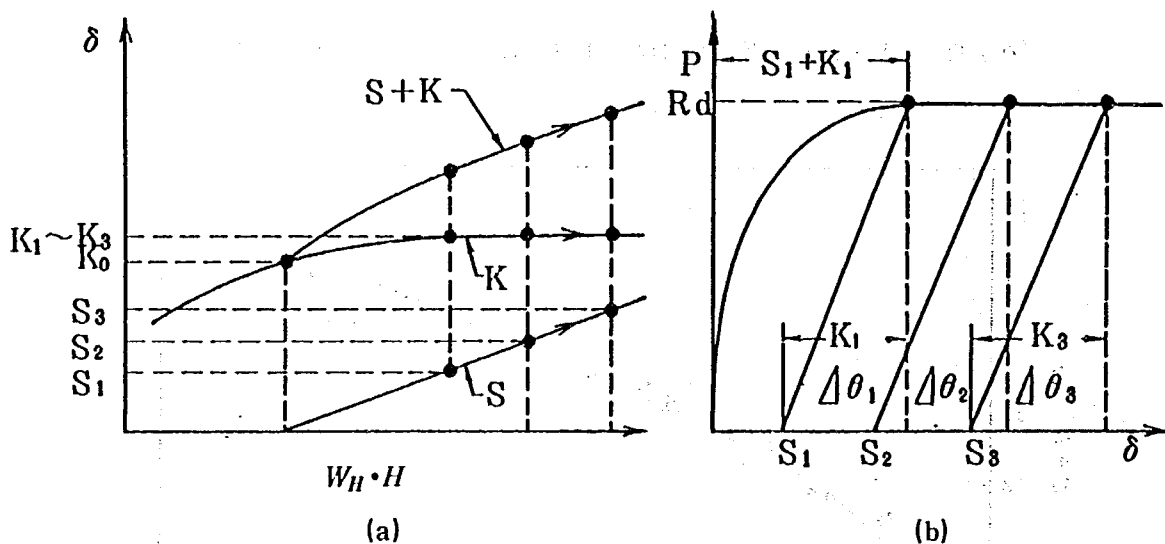


図 5.35 打撃エネルギー $W_H \cdot H$ と貫入量 S ・リバウンド量 K の模式図

なお、貫入量・リバウンド量から R_d' を求める時、変位量の解釈によっては、図 5.36 に示すように試験における前の打撃の影響を考慮しない場合、図 5.37 に示すように前の打撃の沈下量を考慮する場合とがあるが、ここでは前者の前の打撃の影響を考慮しない場合についてとりまとめている。

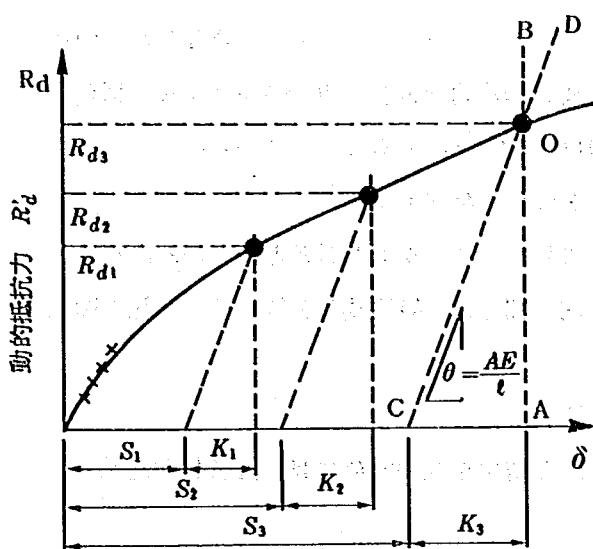


図 5.36 前の打撃による変位を考慮しない場合の $R'_d \sim \delta$ の模式図

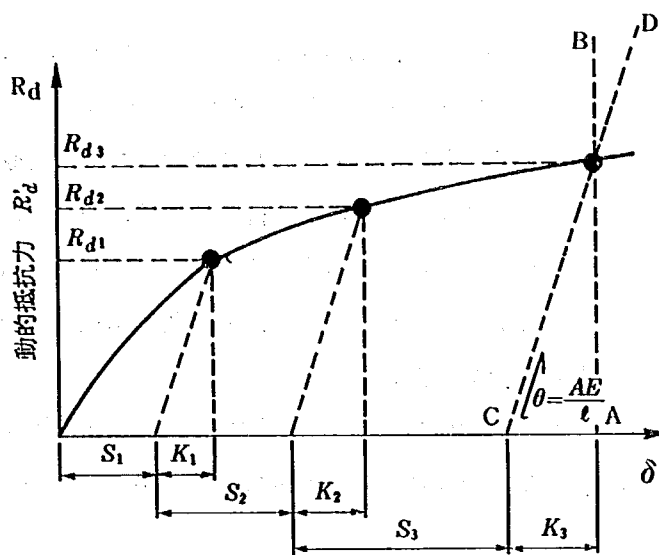


図 5.37 前の打撃による変位を考慮した場合の $R'_d \sim \delta$ の模式図

図 5.36 には、前の打撃の影響（沈下量）を無視した場合のリバウンド量 K と A 、 E 、 ℓ といった杭の諸元から杭の動的抵抗力を算定する方法を示す。すなわち、図において打撃時の最大変位（ $S + K$ ）を与える線 AB と残留沈下量 S （またはリバウンド量 K を最大変位から差し引いた点）から $\theta = AE/\ell$ の勾配で伸ばした直線 CD の交点 O を各落下高さ毎に求めプロットし結ぶものである。なお、図 5.36 において、軽重量ハンマによる衝撃载荷試験の結果は図中 $\times$ 印で示した範囲にあるものと考えられる。さらに、以上の方法で求めた曲線と静的载荷試験における荷重 $P_s \sim$ 沈下 δ_s 曲線の比較を行なった。

(a) 深層土槽実験における検討

図 5.38 には、深層土槽実験におけるセメントミルク併用法によって埋設した鋼管杭の No. 3 及び No. 4 杭に対して上記の方法で算定した動的抵抗力 $R'_d \sim$ 沈下量 δ の関係を示す。また、同図には、静的载荷試験における $R_s \sim S_s$ 曲線を併記している。

この図より深層実験での埋設杭においては、静的载荷試験における $R_s \sim S_s$ 曲線よりかなり大きい算定値となっている。

(b) フィールド実験における検討（油圧ハンマーによる打込み杭に対する検討）

図 5.39、図 5.40 には、上記の方法でハンマー A、ハンマー B による打込み結果を鋼管杭（ $\phi 600$ ）について整理したものである。この図において 5 mm 以内の変位が小さい範囲のプロットは、重量 1 tf のハンマーによる衝撃载荷試験の結果であり、それ以上の変位のものは油圧ハンマーの打撃によるものである。これらの図において、図 5.36 に示した方法で求めた動的荷重 $\sim$ 沈下曲線と静的荷重 $\sim$ 沈下曲線とは比較的良好な対応にあることがわかる。また、衝撃载荷試験結果と油圧パイルハンマーの打込み試験結果とは連続性がある。

例えば、図 5.39 においてハンマー A の場合、変位量 20 mm での算定値が 290 tf $\sim$ 300 tf の範囲に分布しているのに対して静的载荷試験結果によると 300 tf 程度である。

一方、コンクリート杭 (PHC杭; $\phi 500$) についてハンマー A 及びハンマー B に関して整理したものが図 5.41, 図 5.42 である。これらの図においても上記の鋼管杭の場合と同様にリバウンド量 K と杭材の諸元から求めた動的抵抗力と静的載荷試験結果が比較的良好な関係にあることが認められる。

以上の油圧パイルハンマによる打ち込み杭に関しては、次の事柄が言える。

- ① 軽重量ハンマによる衝撃載荷試験及び打ち込み結果におけるリバウンド量 K と杭材の断面積 A , ヤング率 E , 及び杭長 l から求めた動的抵抗の荷重～沈下関係は, 静的載荷試験の荷重～沈下関係とかなり良い相関性がある。
- ② 上記①の傾向は, ハンマ機種及び杭種によらず認められる。
- ③ 軽重量ハンマによる衝撃載荷試験結果と実際の打ち込み結果相互の関係には, 連続性が認められる。

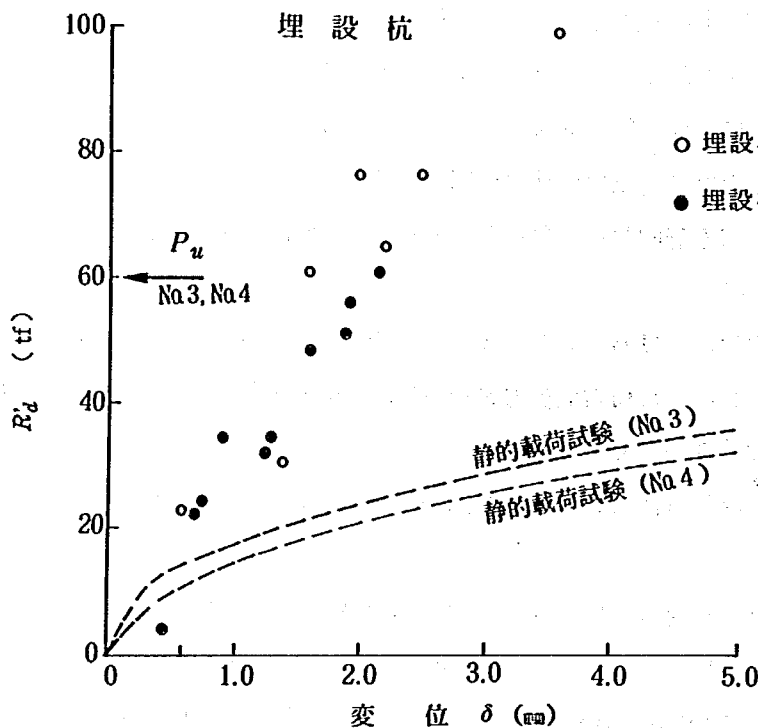


図 5.38 $R_d \sim \delta$ の関係(1) (埋設杭 No. 3, No. 4)

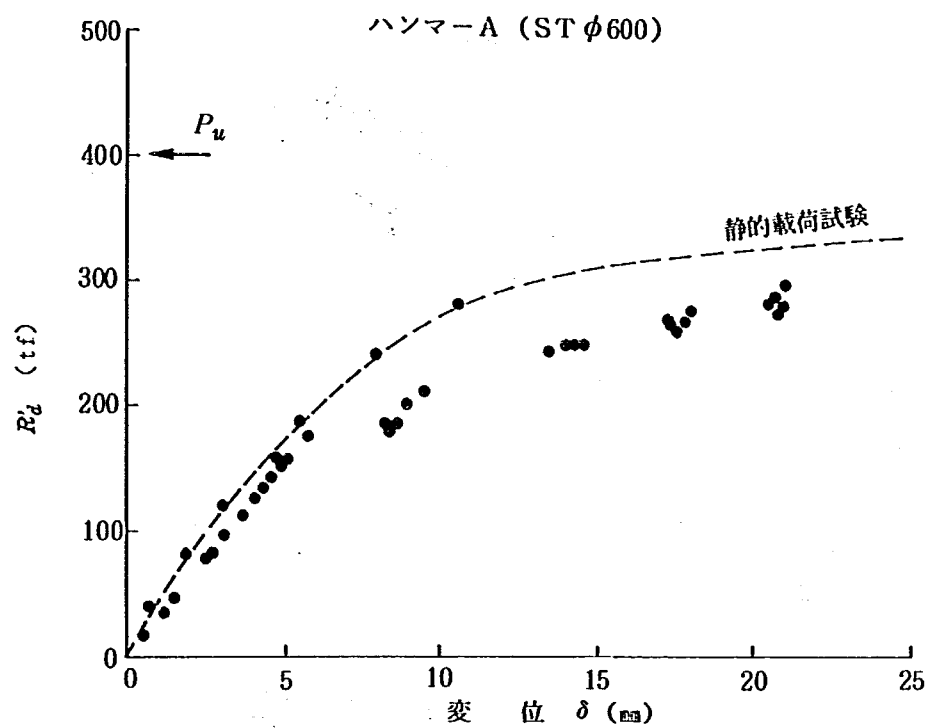


図 5.39 $R_d' \sim \delta$ の関係(2) (鋼管杭 $\phi 600$)

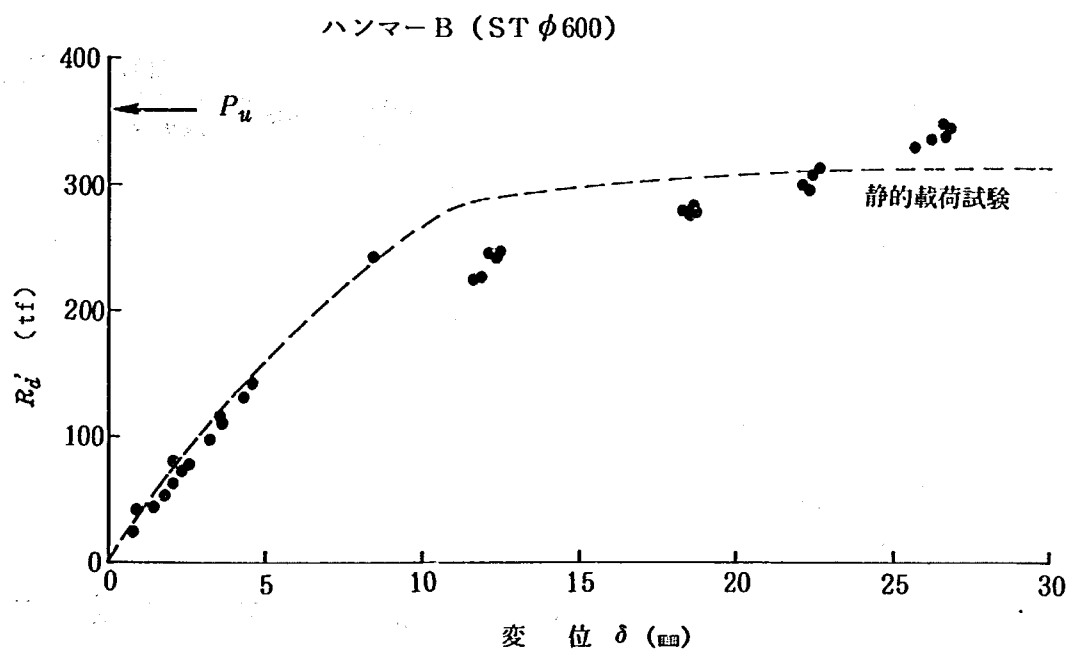


図 5.40 $R_d' \sim \delta$ の関係(3) (鋼管杭 $\phi 600$)

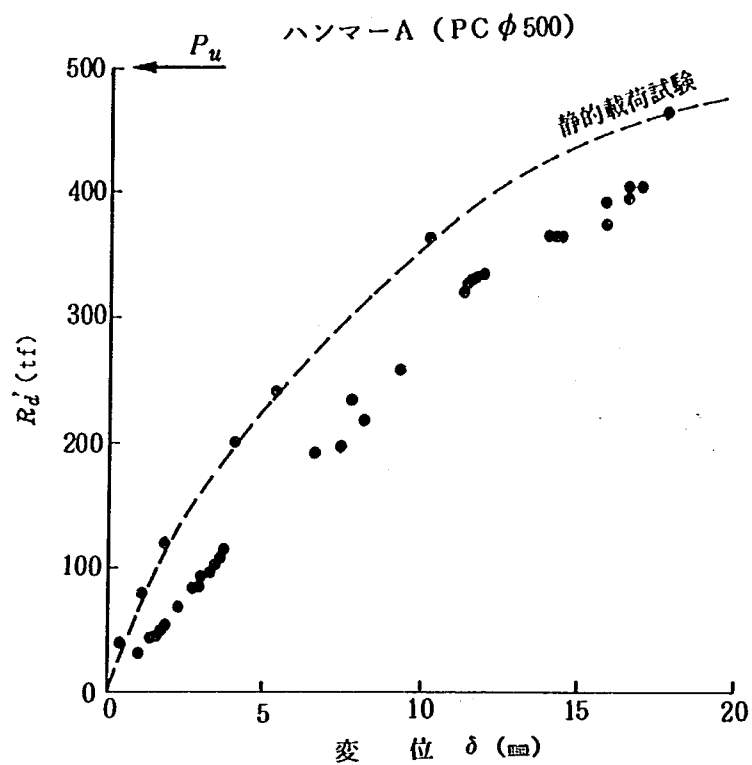


図 5.41 $R'_d - \delta$ の関係(4) (P H C 杭 $\phi 500$)

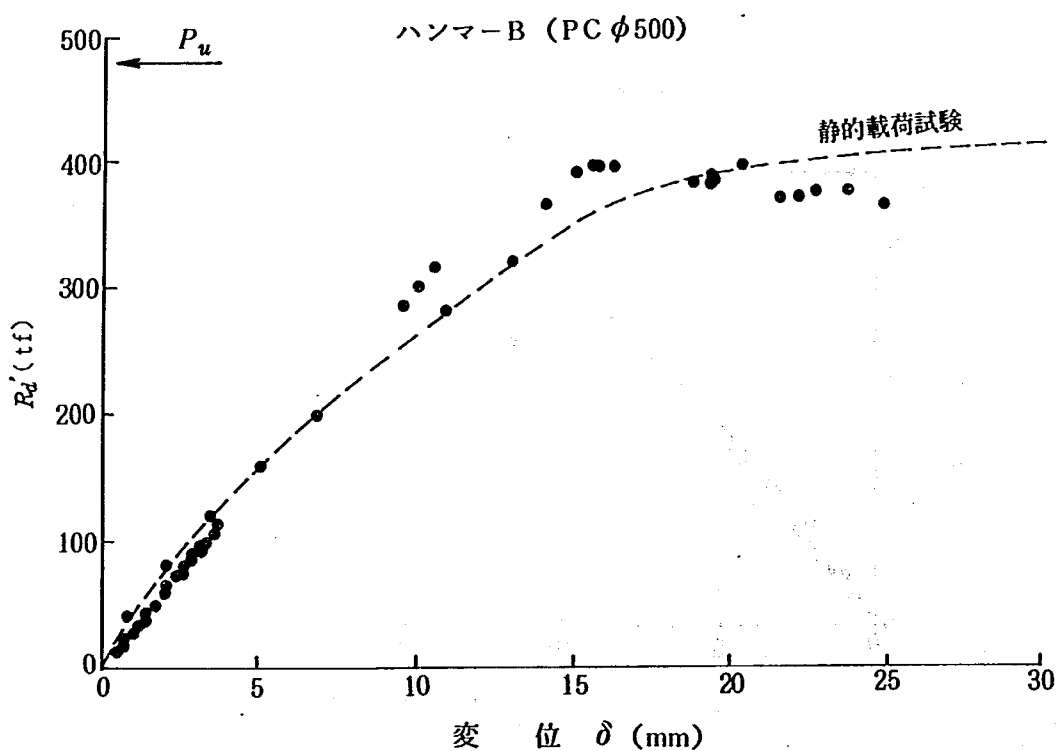


図 5.42 $R'_d - \delta$ の関係(5) (P H C 杭 $\phi 500$)

あ と が き

本報告書においては、埋設杭の支持力管理手法の一つの方法として軽重量ハンマによる軽打法（衝撃载荷試験）を提案し、その適用性について、実物大の杭を対象として調べた。また、油圧パイルハンマー等の打込み試験の結果から貫入・リバウンド特性を考察するとともに、杭の動的支持力に関する一試行を行い軽打法との関連を述べた。

その結果を要約すると以下のとおりである。

- ① 打撃時の杭頭部の打撃力、加速度、変位（貫入量、リバウンド量）を測定しCase理論（Gobleらの方法）、一次元波動理論（宇都らの方法）に適用させることによって、動的支持力の目安を得ることができた。この場合、打撃力レベル（落下高さ）を数段階に変化させるとともに、同一打撃レベルで数打撃の平均値として算定値を評価する方が良いと考えられる。
- ② 打撃力レベルを変化させた際の動的支持力算定値を打撃時の最大変位量との関係に整理することによって得られる荷重～変位曲線と静的载荷曲線とは比較的良好な相関がある。

一方、今後の課題としては、①杭頭応力、加速度などの計測の簡素化及び測定精度の向上、②杭径、杭長、地盤強度に応じた打撃力の目安の設定、③杭の周面摩擦力の評価方法をあげることができる。さらに、波動理論に基づく各種動的支持力算定手法に関するデータの蓄積と適用限界の明確化についても同様である。

そこで、今後は、上記の課題に取り組むとともに、さらに軽打法に関する解析手法（モデル化、シミュレーション手法）の検討を進めてゆきたいと考えている。

参 考 文 献

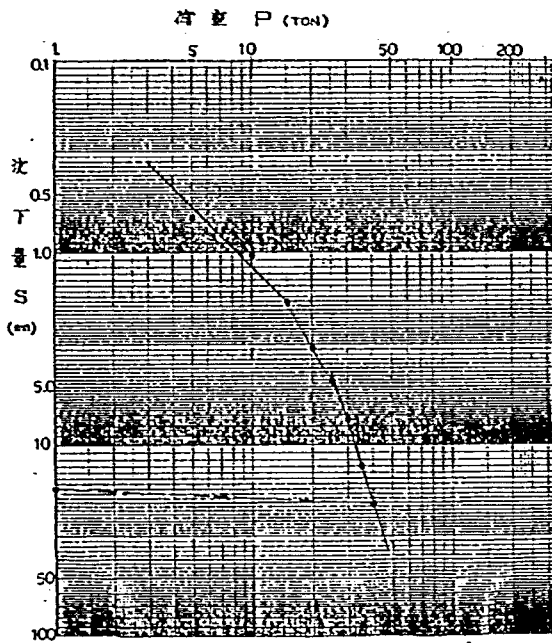
- 1) 日本道路協会；「道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編」，昭和55年5月
- 2) 日本建築学会；「建築基礎構造設計規準・同解説」，1974年，11月
- 3) 「JISA 7201 遠心力コンクリート杭の施工標準」，1974年
- 4) 鋼管杭協会；「鋼管杭—その設計と施工」，1981年
- 5) 千田昌平；「杭の打止め管理式に関する考察」，昭和57年度土木研究所講演会講演集，昭和58年3月
- 6) (財) 国土開発技術研究センター；「低騒音型油圧パイルハンマ施工研究報告書」，昭和59年9月
- 7) 建設省；「低騒音型油圧パイルハンマの開発」評価書，昭和59年8月
- 8) 千田昌平，宇都一馬，冬木 衛，桜井 学；「打込み杭の動的支持力式」，杭の貫入性・打撃性に関するシンポジウム発表論文集，昭和59年9月，土質工学会
- 9) 宇都一馬，内藤誠一，隈元幸治；「鋼管杭の動的載荷試験と静的支持力の関係について」，文献8)と同じ
- 10) 千田昌平，塚田幸広；「油圧パイルハンマの貫入特性」，文献8)と同じ
- 11) 宇都一馬，橋爪 隆，大島郁夫，酒井吉郎，渡辺正典，渡辺 健，佐藤正二，伊藤昭典，松葉征洋；「鋼管杭打ち込み管理について」，文献8)と同じ
- 12) 芳賀孝成，崎本純治，近藤次郎；「光学式変位計による打込み杭の貫入性状の計測例」，文献8)と同じ
- 13) Goble, G. G ; "The analysis of pile driving —A State—of—the—art" Intl. Seminar on the Application of Stress—wave Theory on Piles, 1980
- 14) 宇都一馬，冬木 衛，桜井 学；「杭打ち公式に関する波動論的考察」，第18回土質工学研究発表会，昭和58年6月，土質工学会
- 15) 土質工学会；「杭基礎の設計法とその解説」
- 16) K. UTO, M. FUYUKI et al ; "Dynamic Bearing Capacity, Wave Theory, Pile Driving Control", Proceeding of the Intl Symposium on Penetability and Drivability of Piles, 1985
- 17) H. BREDENBERG, G. HOLM ; "Evaluation of Pile Driving Criterion from CASE—Measurements", 文献16)と同じ
- 18) R H. Scanlan, J J. Tomko ; "Dynamic Prediction of Pile Static Bearing Capacity", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, proceedings of the ASCE
- 19) H. Van Koten, P. Middendorp, "Tesling of Foundation Piles," Heron, vol. 26. No 4, 1981
- 20) 土質工学会；「土質工学ハンドブック」.

付 録 1

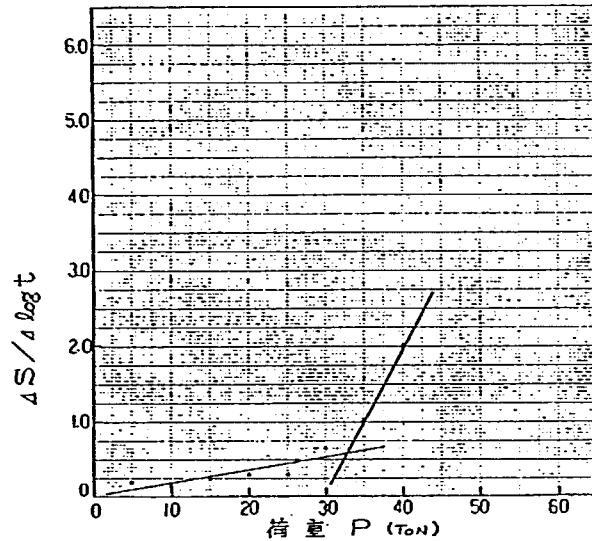
静的載荷試験データ集

深層土槽実験 埋設杭No 1 ($\phi 406.4 \times L 8,500$) 静的載荷試験

$\log P - \log S$ 線図

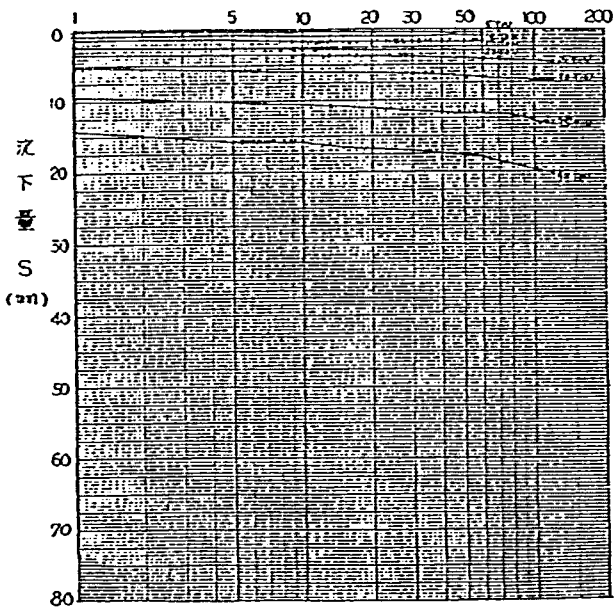


$\Delta S / \Delta \log t - P$ 線図



$S - \log t$ 線図

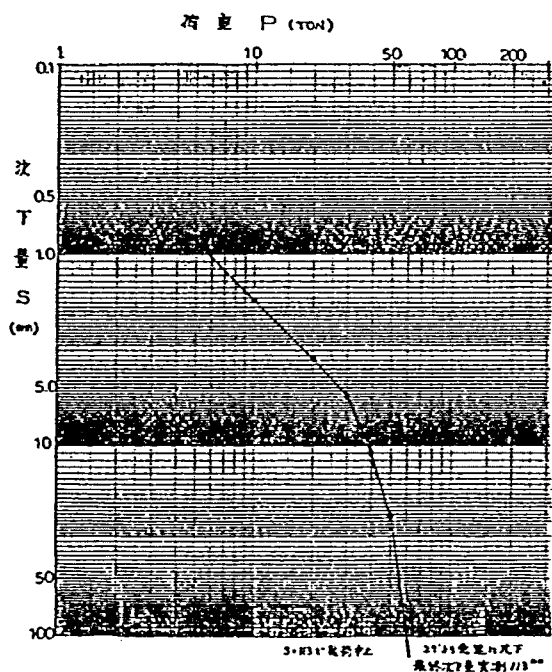
保持時間 t (分)



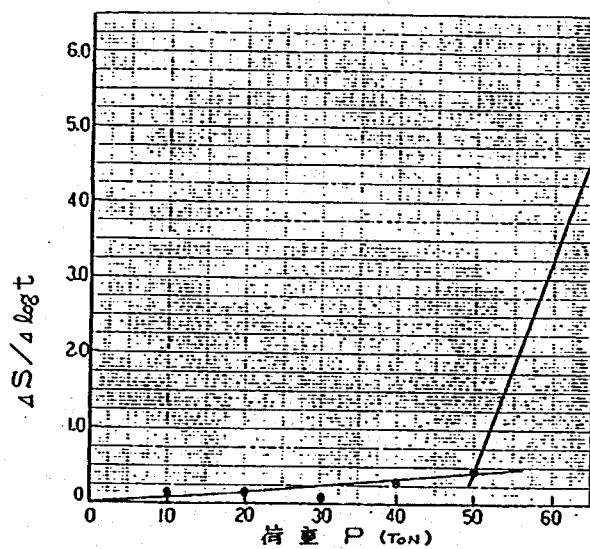
P (t)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$S(30)$	0.0	0.56	1.12	1.80	2.95	3.97	6.41	11.55	17.30
$S(1)$	0.0	0.26	0.93	1.41	2.47	3.53	5.38	9.56	14.31
ΔS	0.0	0.30	0.19	0.39	0.48	0.44	1.03	1.99	2.99
$\Delta S / \Delta \log t$	0	0.20	0.12	0.26	0.32	0.33	0.67	1.31	2.02

深層土槽実験 埋設杭No 2 ($\phi 406.4 \times L 8,500$) 静的載荷試験

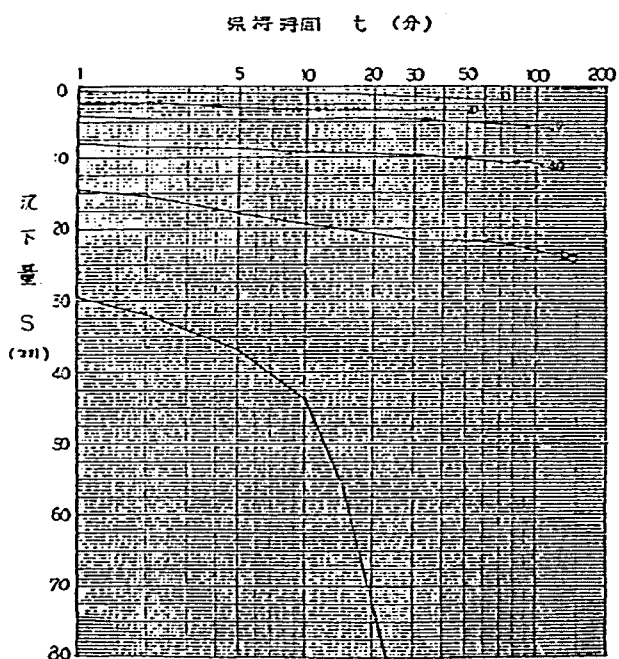
$\log P - \log S$ 線図



$\Delta S / \Delta \log t - P$ 線図



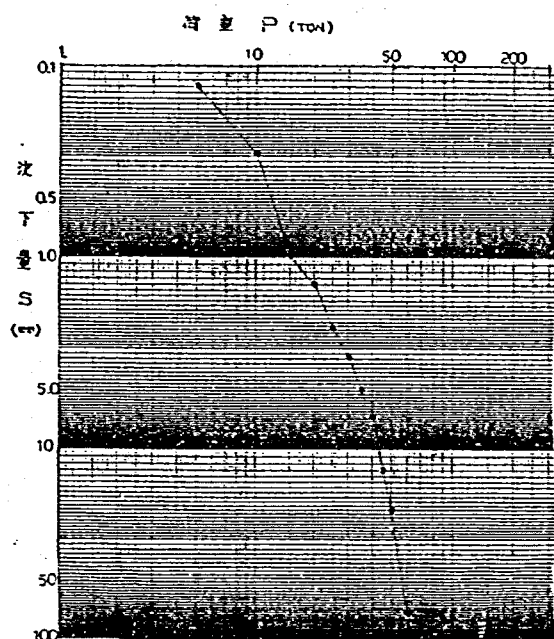
$S - \log t$ 線図



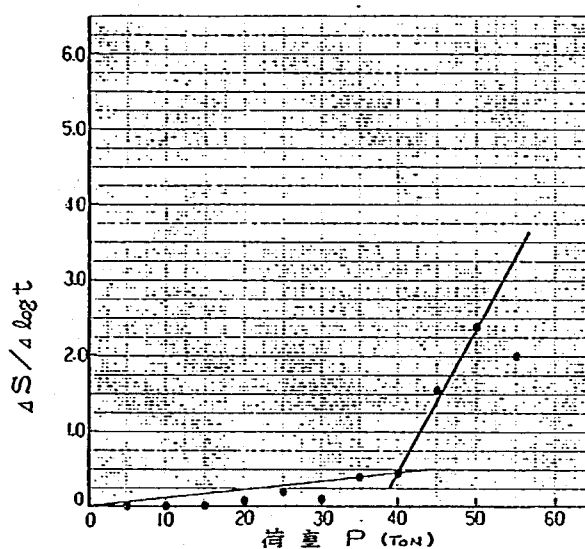
P/t	0	10	20	30	40	50	60
$S(30)$	0	0.98	2.28	4.23	8.19	14.56	29.61
$S(1)$	0	1.81	3.44	4.73	9.88	21.47	33.71
ΔS	0	0.83	1.16	0.5	1.69	6.91	64.1
$\Delta S / \Delta \log t$	0	0.56	0.78	0.38	1.14	4.67	43.3

深層土槽実験 埋設杭No 3 ($\phi 406.4 \times L 8,500$) 静的載荷試験

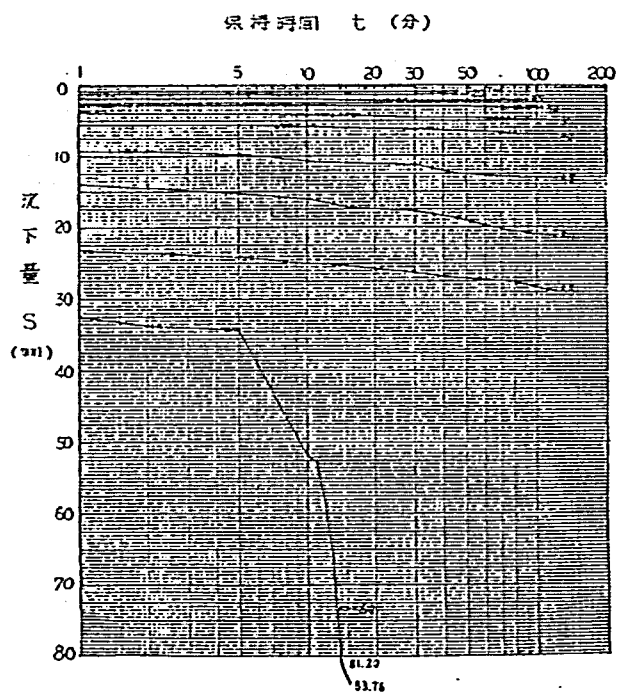
$\log P - \log S$ 線図



$\Delta S / \Delta \log t$ 線図



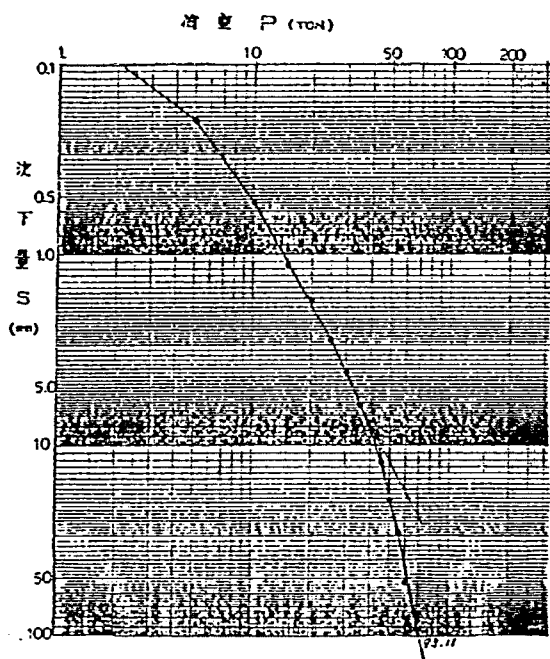
$S - \log t$ 線図



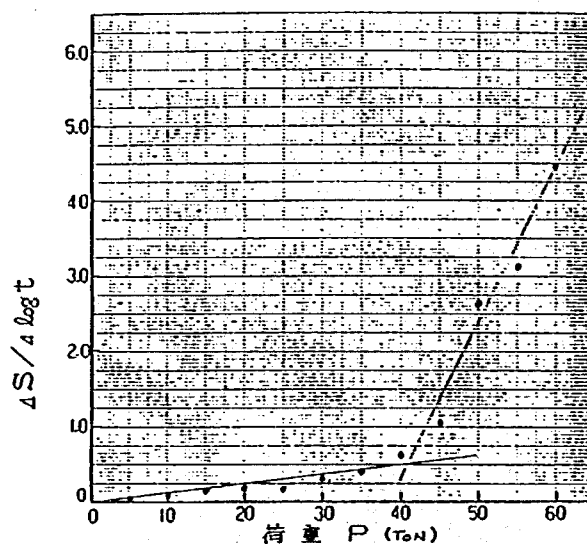
$P(t)$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$S(30)$	0.13	0.29	0.92	1.37	2.10	2.91	4.54	6.28	11.29	17.63	26.33
$S(1)$	0.13	0.28	0.90	1.26	1.80	2.73	3.95	5.60	9.01	14.12	23.36
ΔS	0	0.01	0.02	0.11	0.30	0.18	0.59	0.68	2.28	3.51	2.97
$\Delta S / \Delta \log t$	0	0.01	0.01	0.07	0.20	0.12	0.40	0.46	1.54	2.38	2.01

深層土槽実験 埋設杭No.4 ($\phi 406.4 \times L 8,500$) 静的載荷試験

$\log P - \log S$ 線図

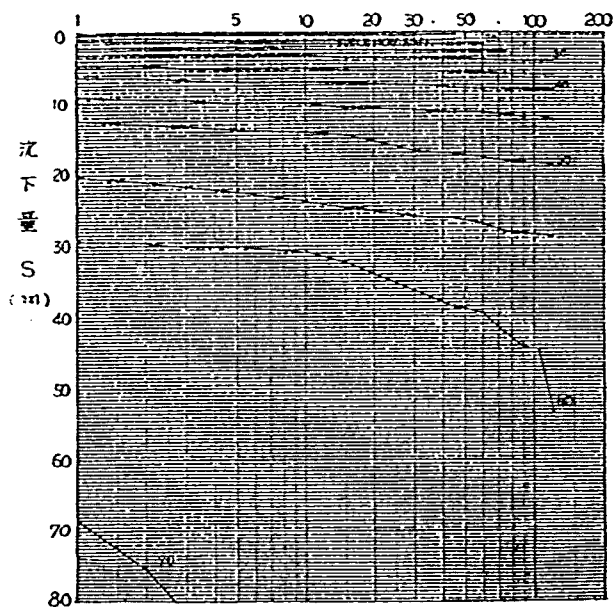


$\Delta S / \Delta \log t - P$ 線図



$S - \log t$ 線図

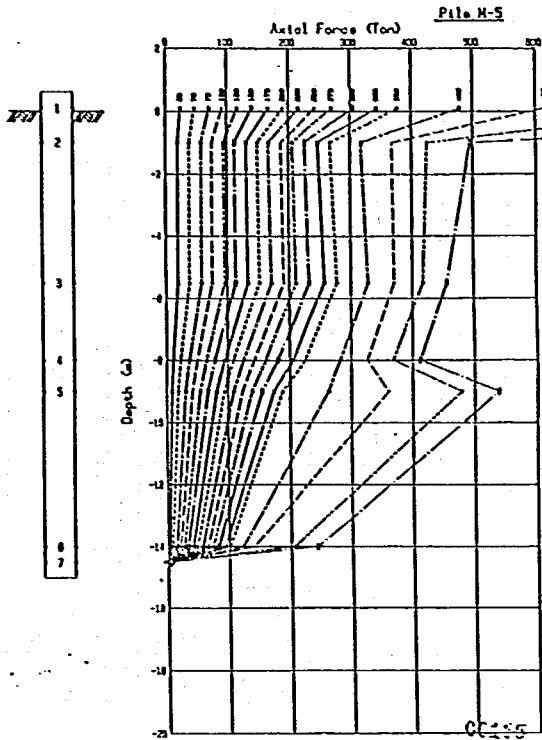
保持時間 t (分)



P (t)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$S(30)$	0.20	0.51	1.11	1.74	2.60	3.71	5.53	7.57	11.07	16.88	25.72	36.20
$S(1)$	0.16	0.39	0.86	1.45	2.32	3.26	4.89	6.65	9.52	13.01	21.12	29.61
ΔS	0.04	0.12	0.25	0.29	0.28	0.45	0.64	0.92	1.57	3.87	4.60	6.59
$\Delta S / \Delta \log t$	0.027	0.081	0.169	0.196	0.189	0.304	0.433	0.622	1.06	2.62	3.11	4.46

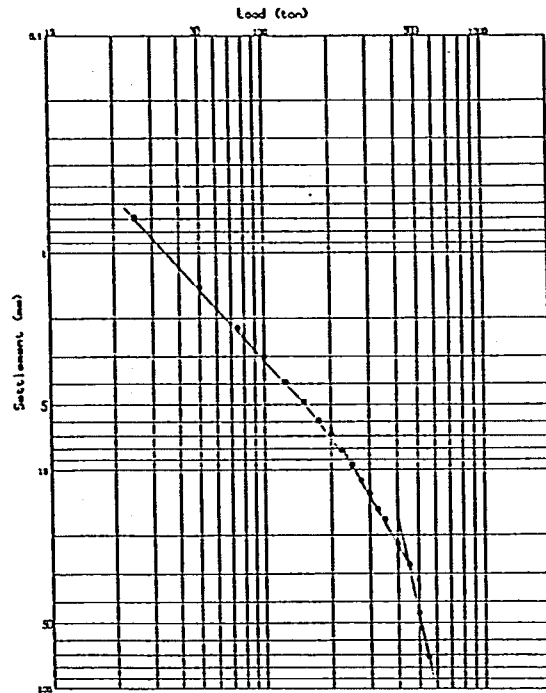
フィールド実験 I 埋設杭 M-5 ($\phi 500 \times L 19,000$) 静的載荷試験

Axial Force of Pile



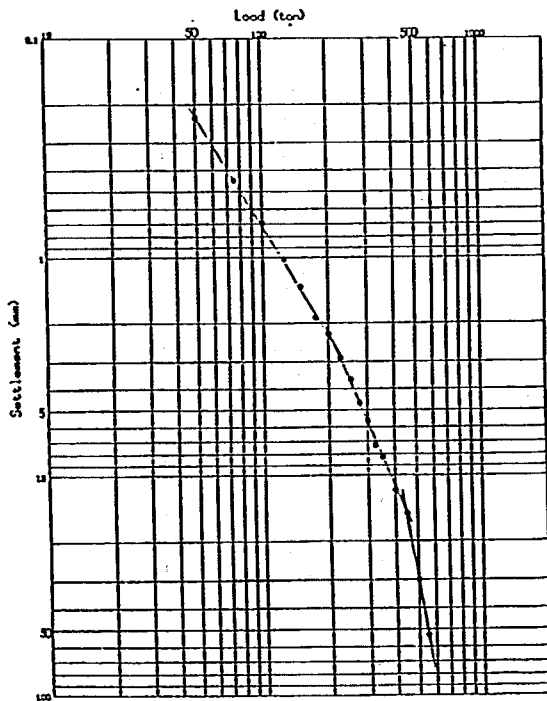
log P - log S Curve (Pile Top)

Pile H-5



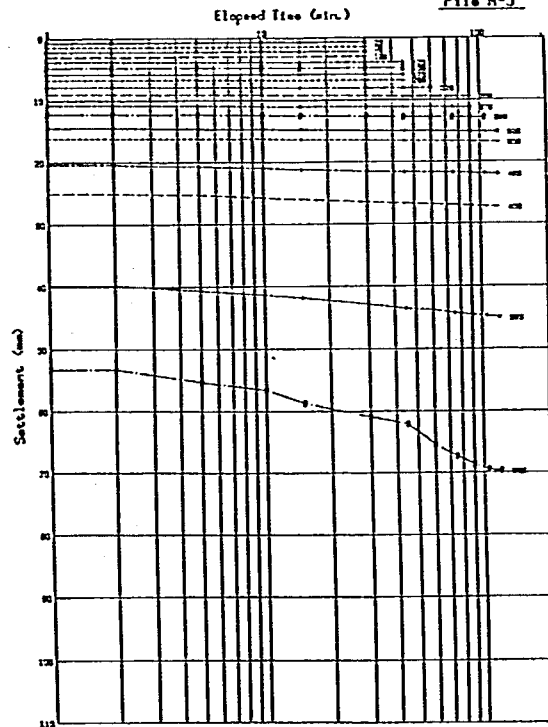
log P - log S Curve (Pile Tip)

Pile H-5



S - log t Curve (Pile Top)

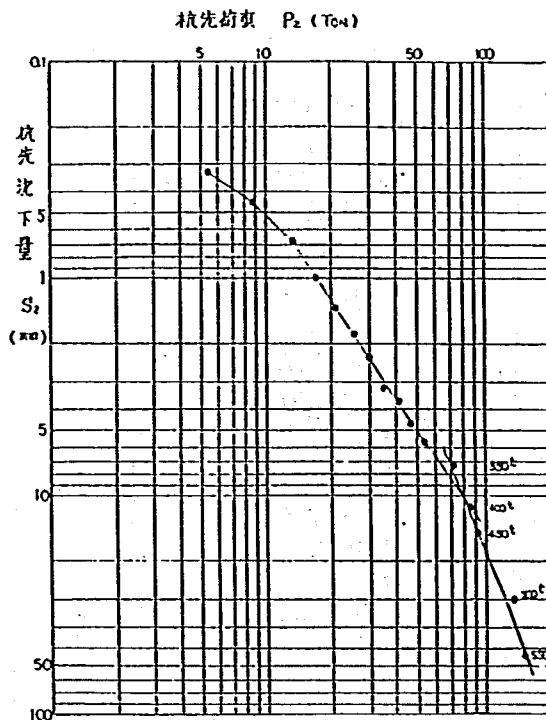
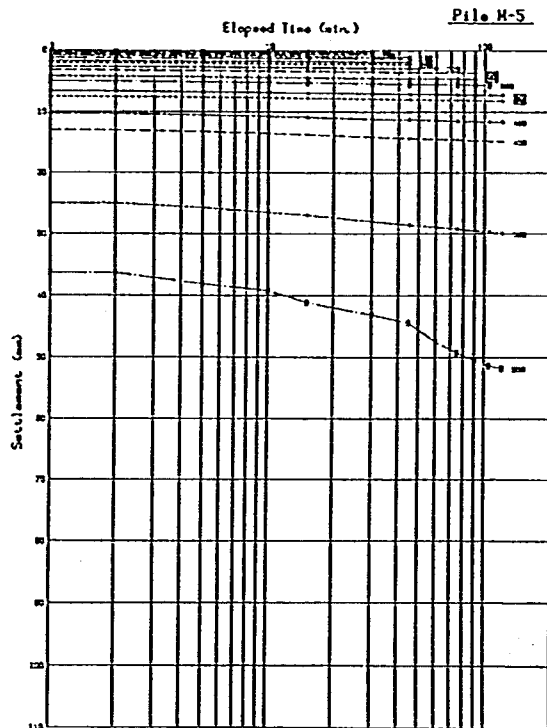
Pile H-5



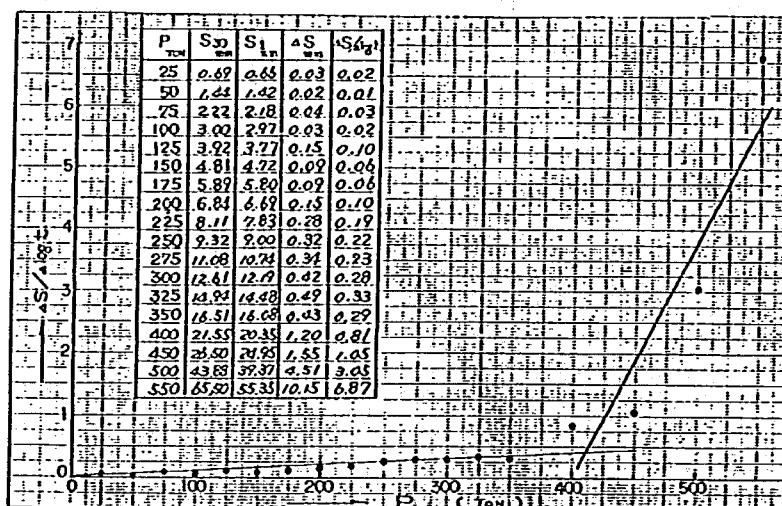
フィールド実験 I 埋設杭M-5 ($\phi 500 \times L 15,600$) 静的載荷試験

杭先荷重 $\log P - \log S$ 線図

S - log t Curve (Pile Tip)

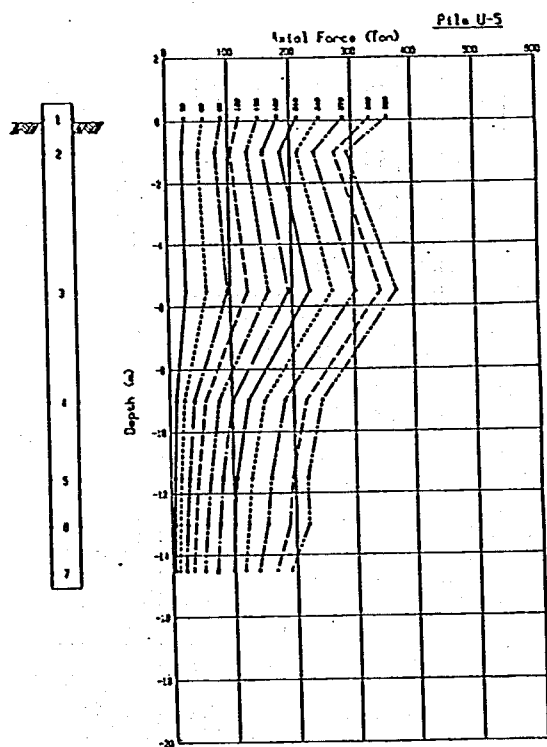


$\Delta S / \Delta \log t - P$ 線図



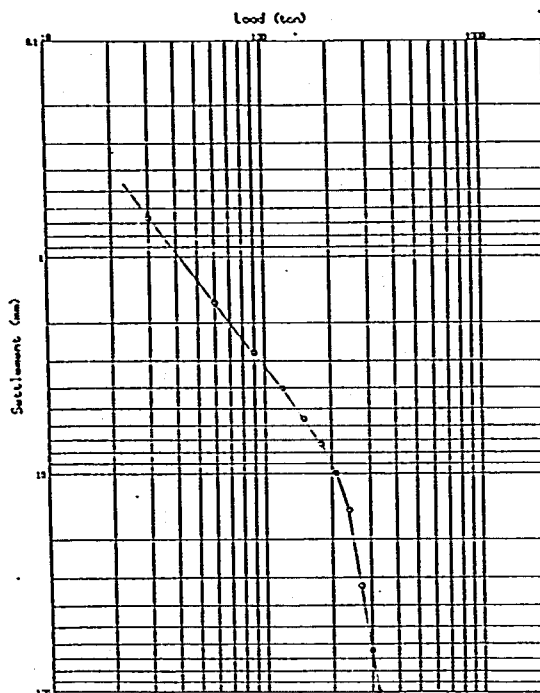
フィールド実験Ⅰ 油圧ハンマ打込杭U-5 ($\phi 500 \times L 15,600$) 静的載荷試験

Axial Force of Pile



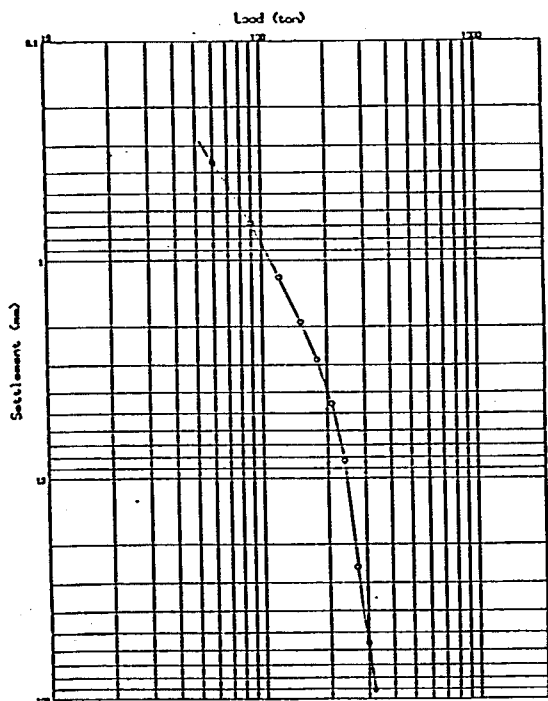
log P - log S Curve (Pile Top)

Pile U-5



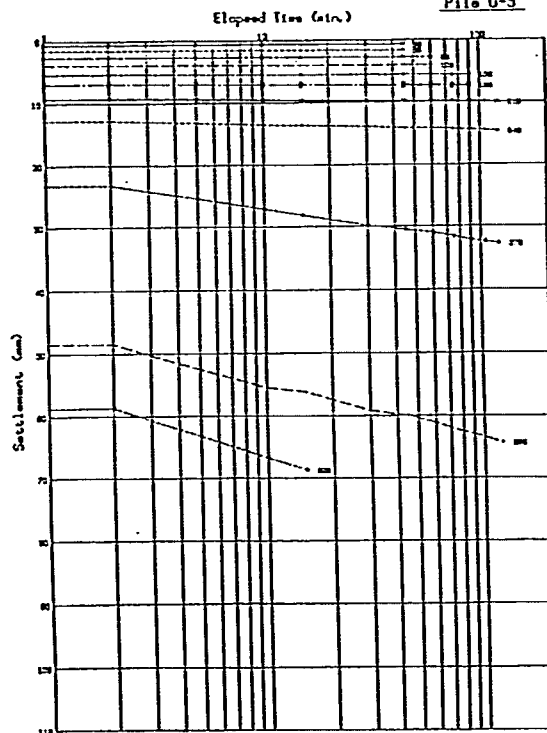
log P - log S Curve (Pile Tip)

Pile U-5



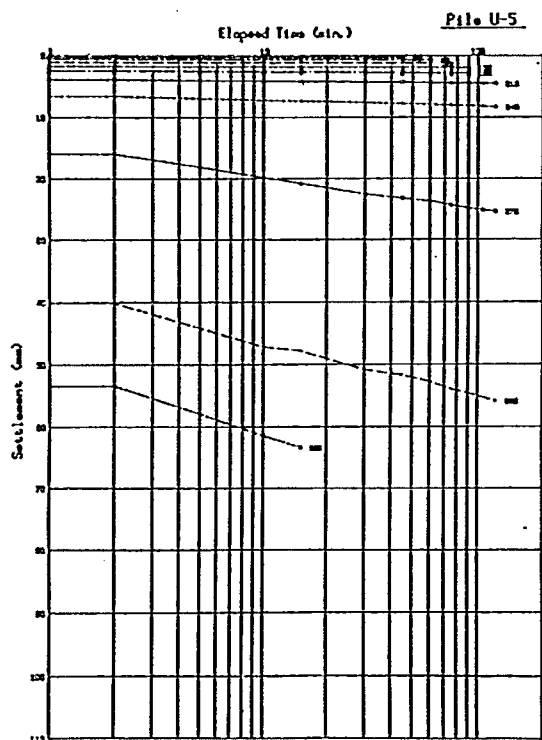
S - log t Curve (Pile Top)

Pile U-5

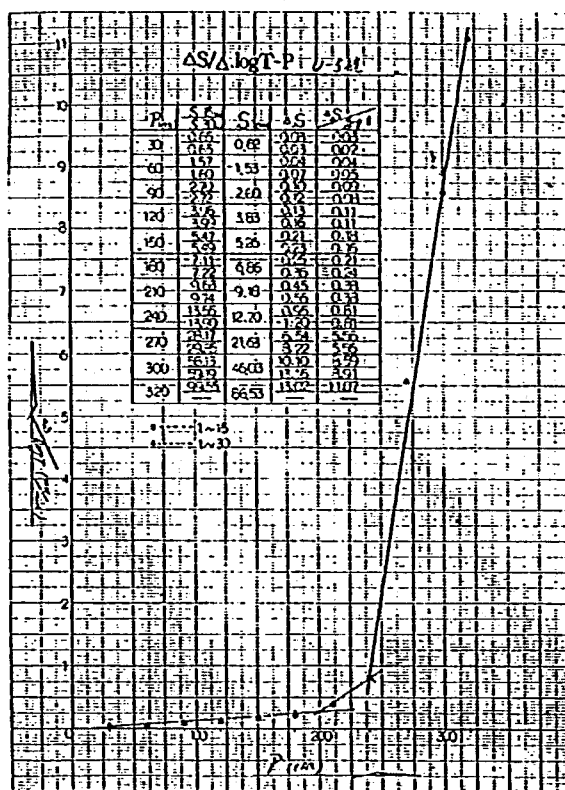


フィールド実験Ⅰ 油圧ハンマ打込杭U-5 (φ500×L15,600) 静的载荷試験

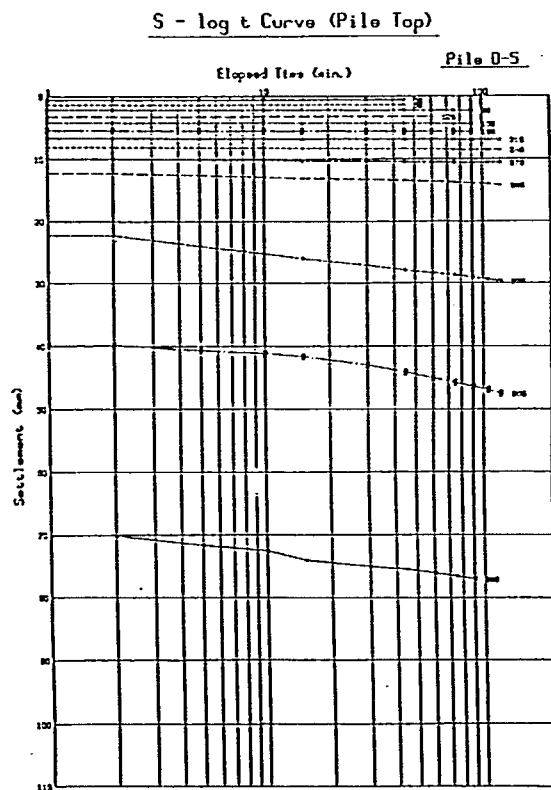
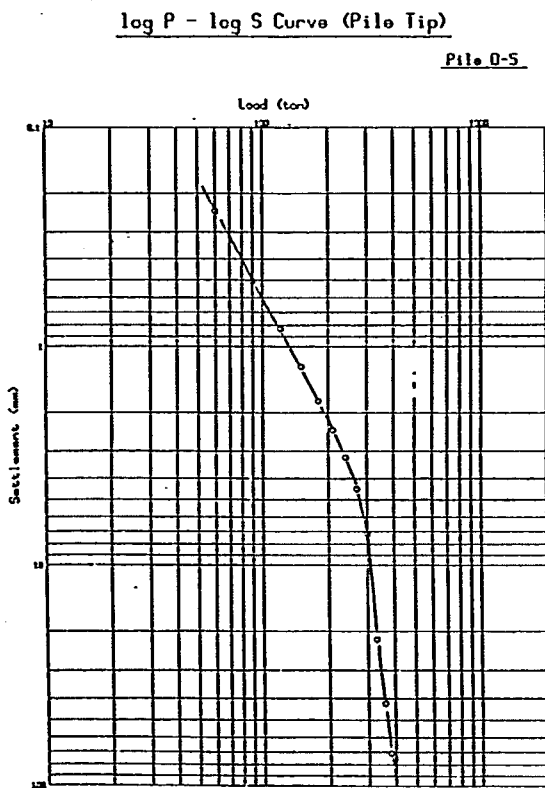
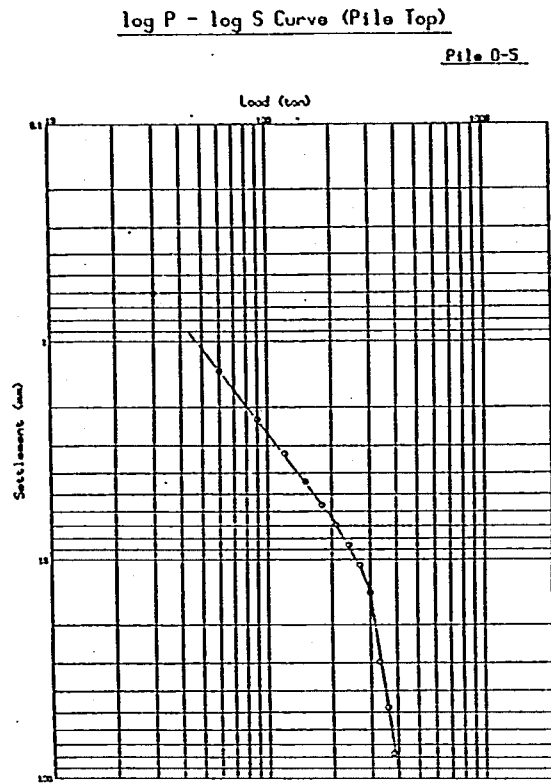
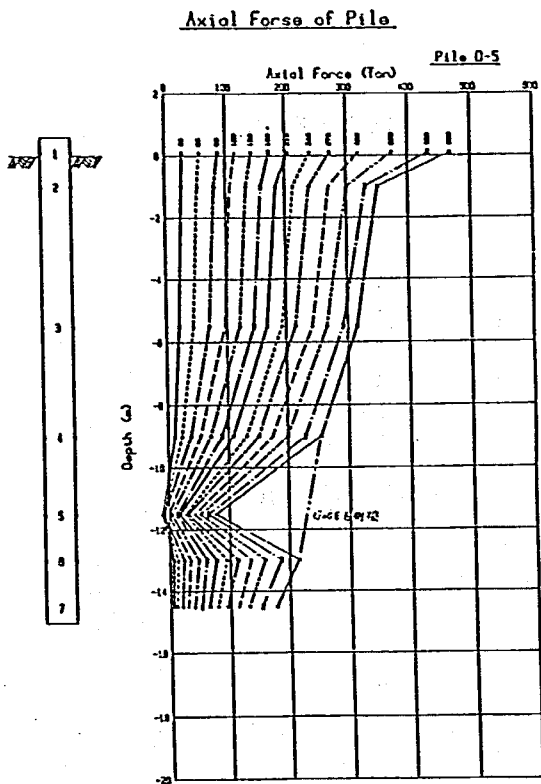
S - log t Curve (Pile Tip)



$\Delta S / \Delta \log t - P$ 線図

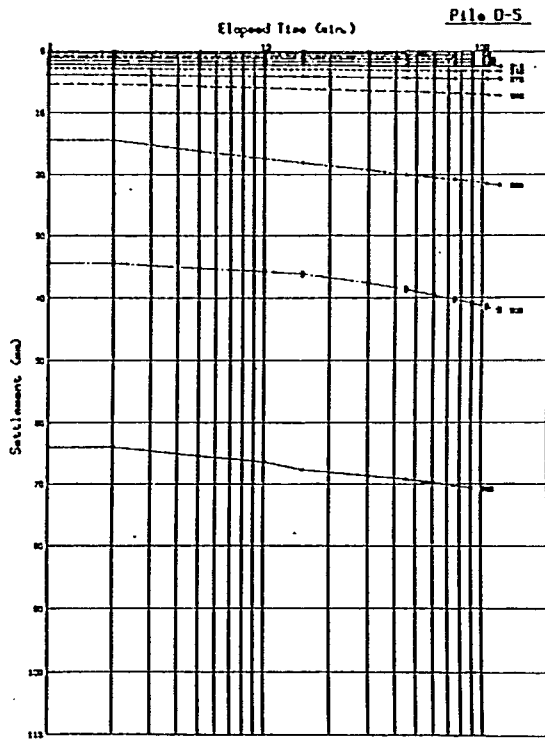


フィールド実験 I ディーゼルハンマ打込杭 D-5 ($\phi 500 \times L 15,600$) 静的载荷試験

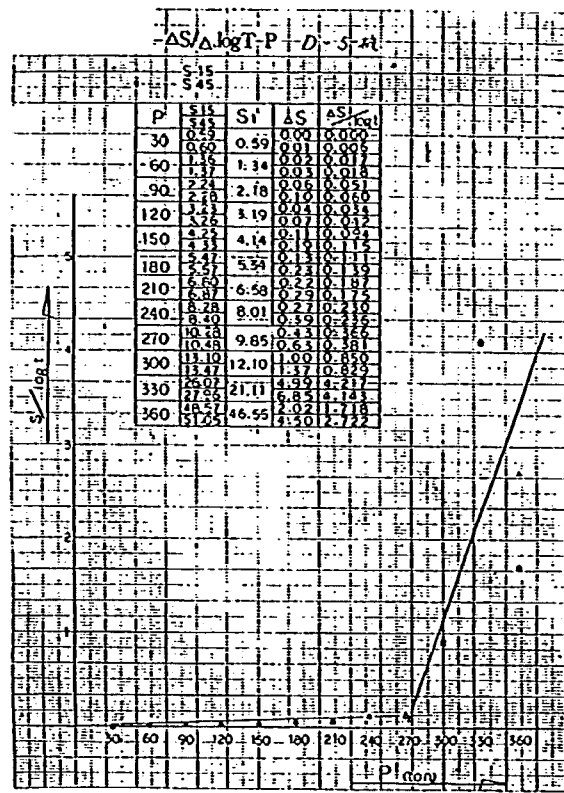


フィールド実験 I ディーゼルハンマ打込杭 D-5 ($\phi 500 \times L 15,600$) 静的載荷試験

S - log t Curve (Pile Tip)



$dS/d\log t - P$ 線図

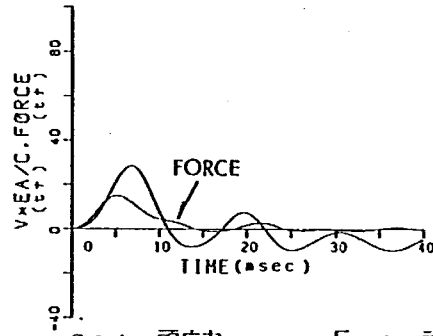
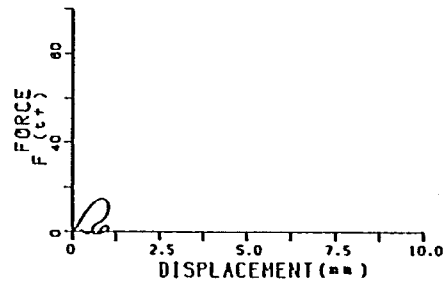
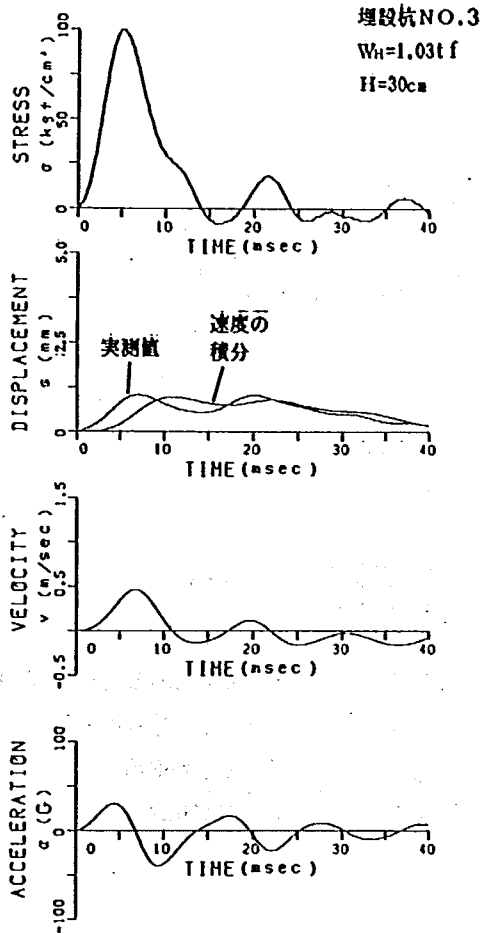


付 録 2

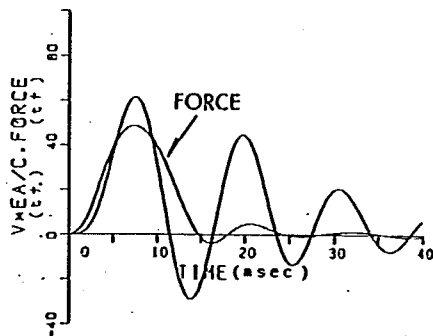
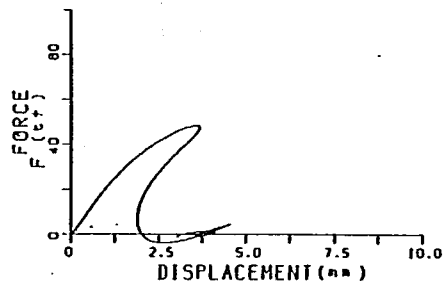
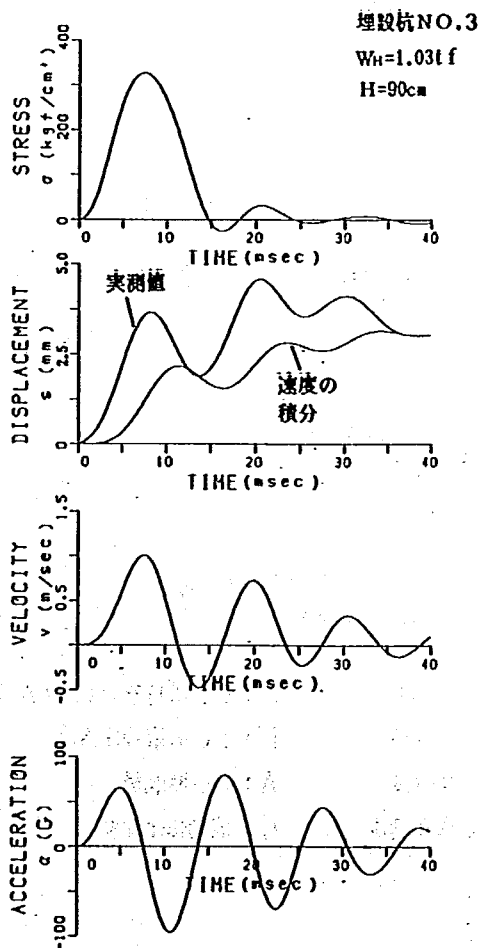
動的載荷試験波形集

深層土槽実験における衝撃载荷試験の出力波形

(埋設杭No.3)

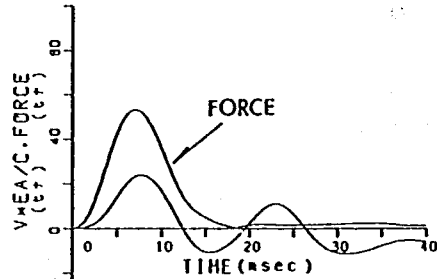
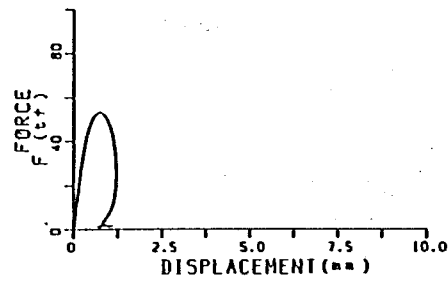
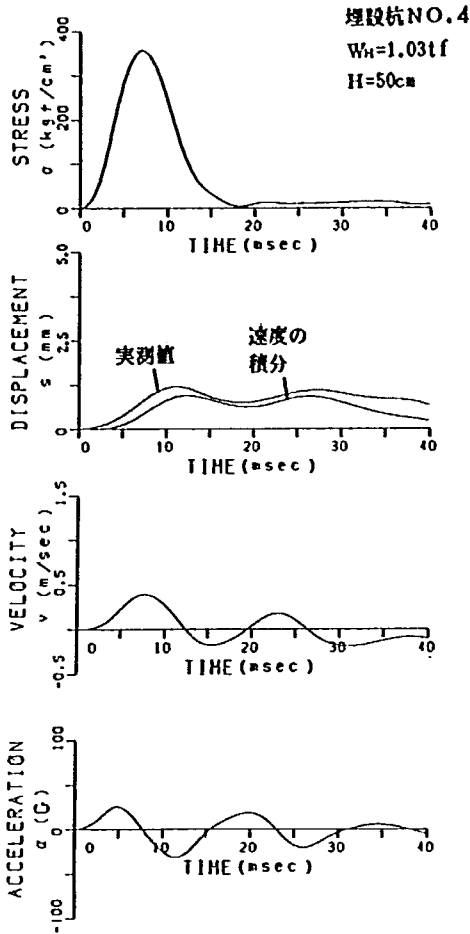


σ : σ : くい頭応力 F : F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 s : s : くい頭変位 E : E : くい縦弾性係数
 v : v : くい頭速度 A : A : くい断面積
 a : a : くい頭加速度 C : C : 波動伝ば速度

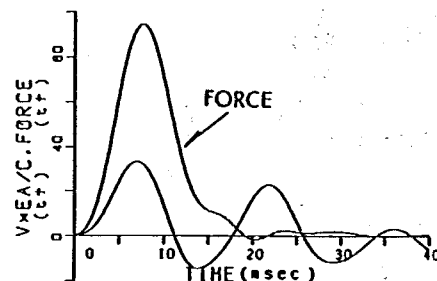
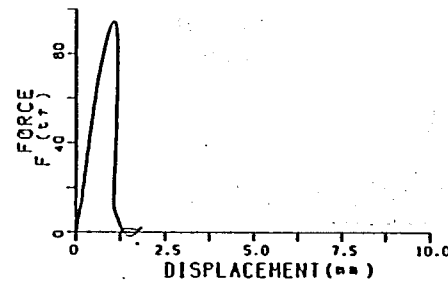
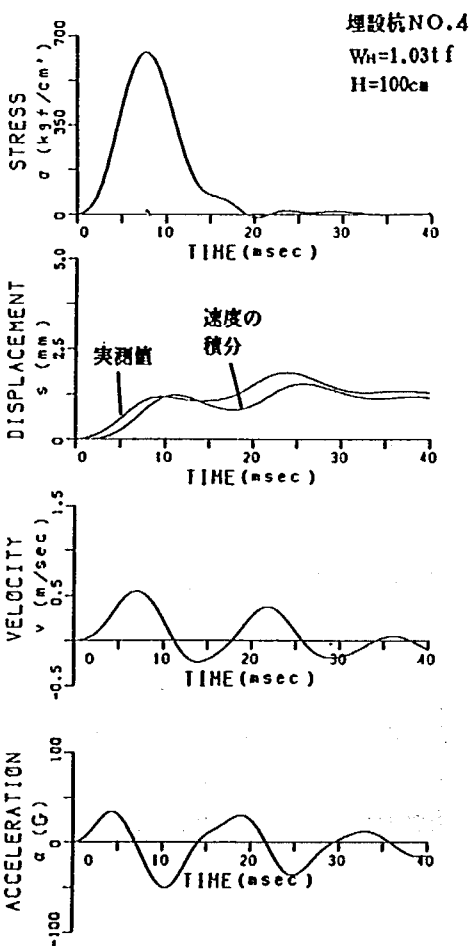


σ : σ : くい頭応力 F : F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 s : s : くい頭変位 E : E : くい縦弾性係数
 v : v : くい頭速度 A : A : くい断面積
 a : a : くい頭加速度 C : C : 波動伝ば速度

深層土槽実験における衝撃载荷試験の出力波形
(埋設杭No.4)

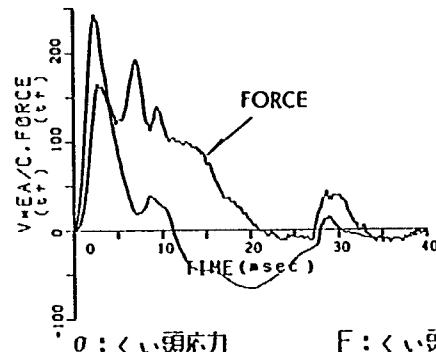
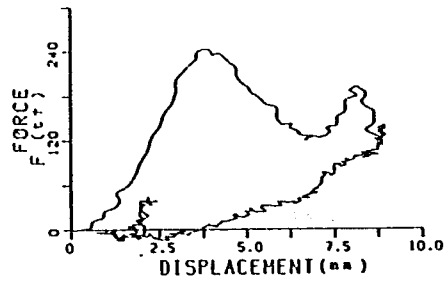
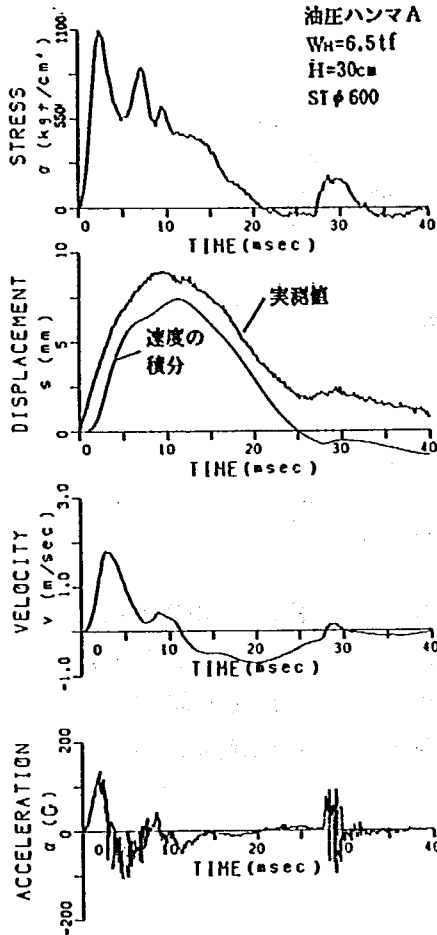


σ : σ の頭応力
 s : s の頭変位
 v : v の頭速度
 a : a の頭加速度
 F : F の頭打撃力($=\sigma A$)
 E : E の縦弾性係数
 A : A の断面積
 C : C の波動伝ば速度

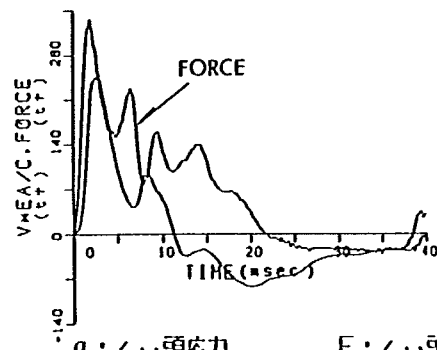
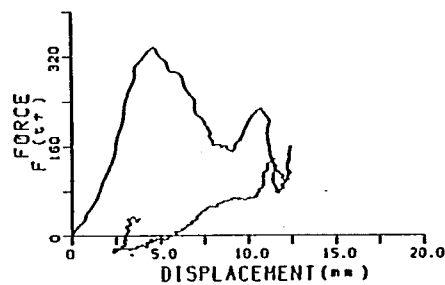
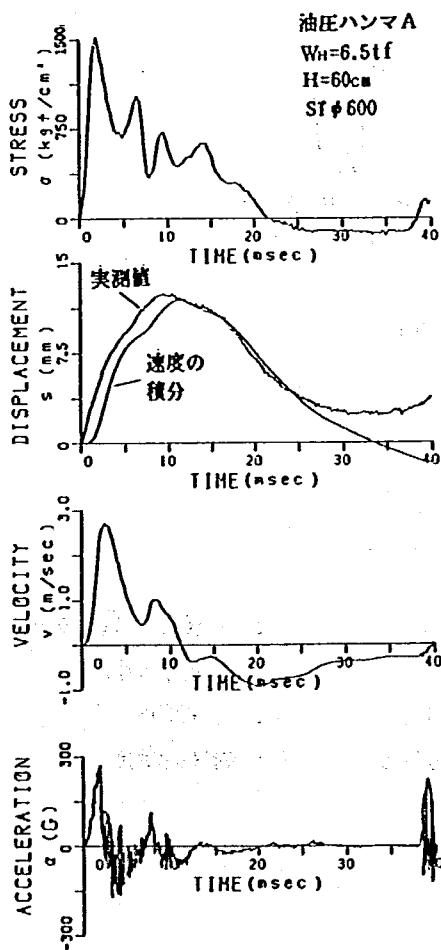


σ : σ の頭応力
 s : s の頭変位
 v : v の頭速度
 a : a の頭加速度
 F : F の頭打撃力($=\sigma A$)
 E : E の縦弾性係数
 A : A の断面積
 C : C の波動伝ば速度

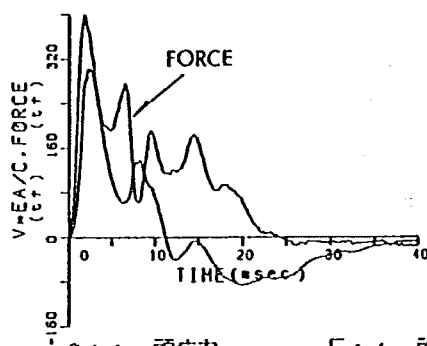
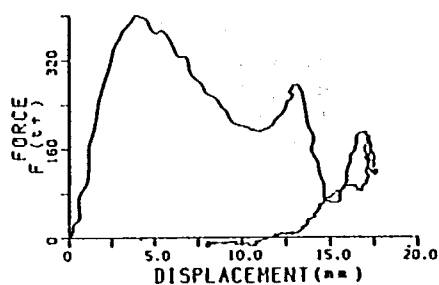
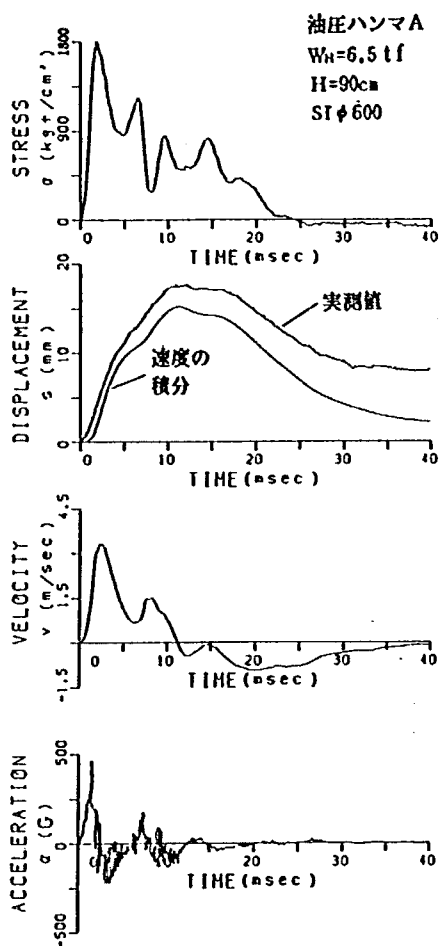
フィールド実験Ⅱにおける打ち込み試験の出力波形
(油圧ハンマA打ち込み杭)



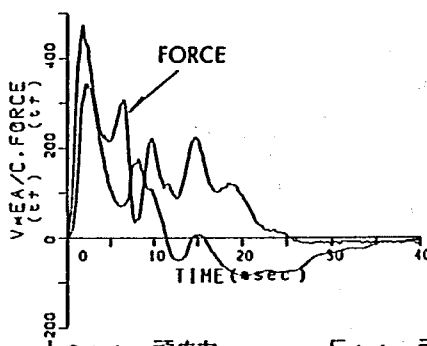
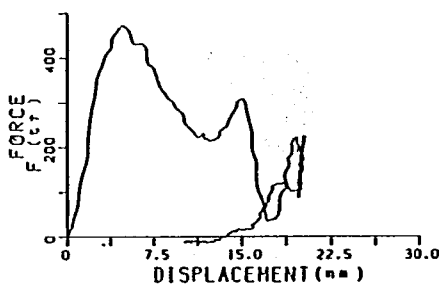
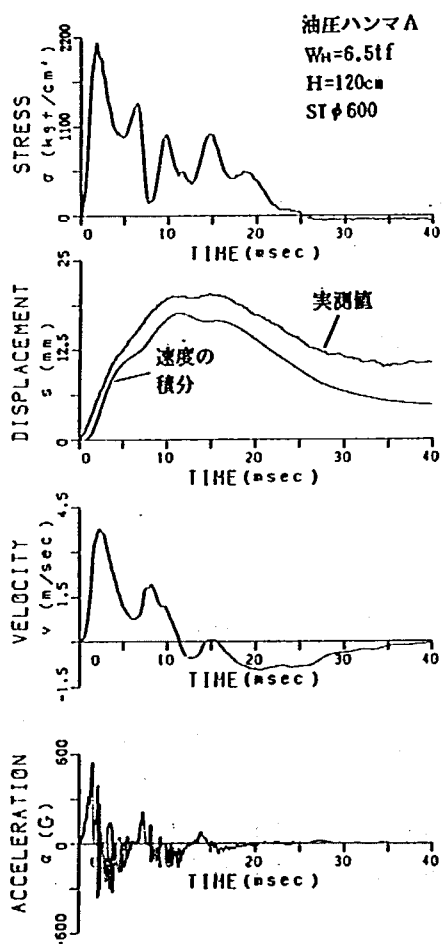
σ : くい頭応力 F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 s : くい頭変位 E : くい縦弾性係数
 v : くい頭速度 A : くい断面積
 a : くい頭加速度 C : 波動伝ば速度



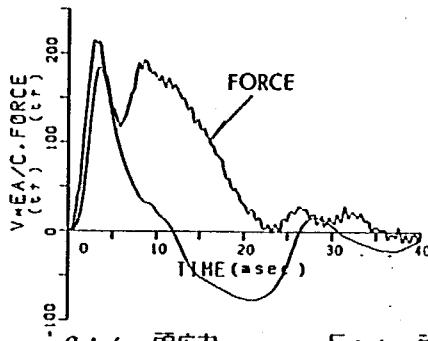
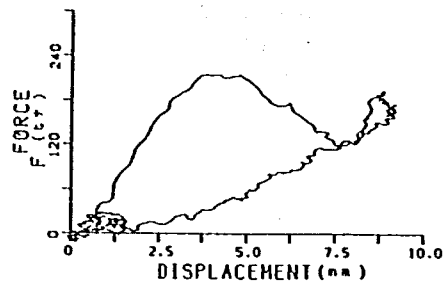
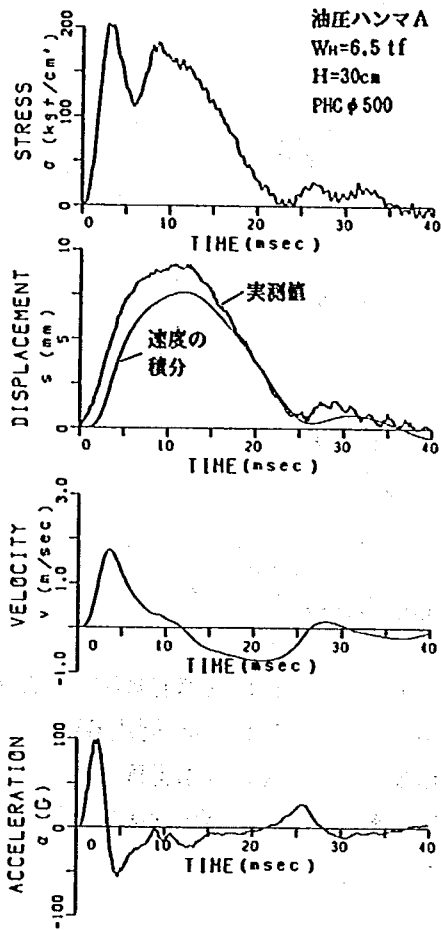
σ : くい頭応力 F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 s : くい頭変位 E : くい縦弾性係数
 v : くい頭速度 A : くい断面積
 a : くい頭加速度 C : 波動伝ば速度



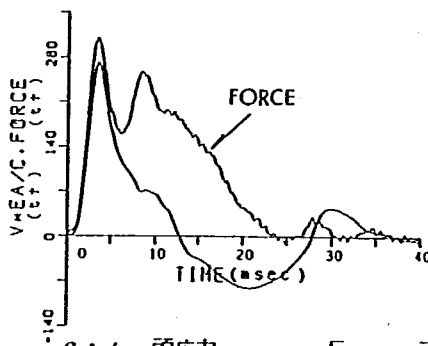
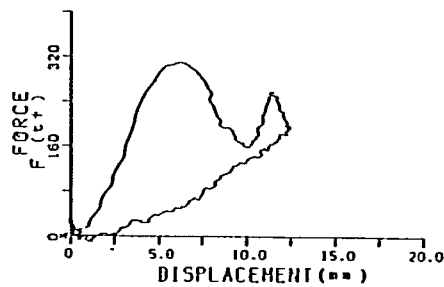
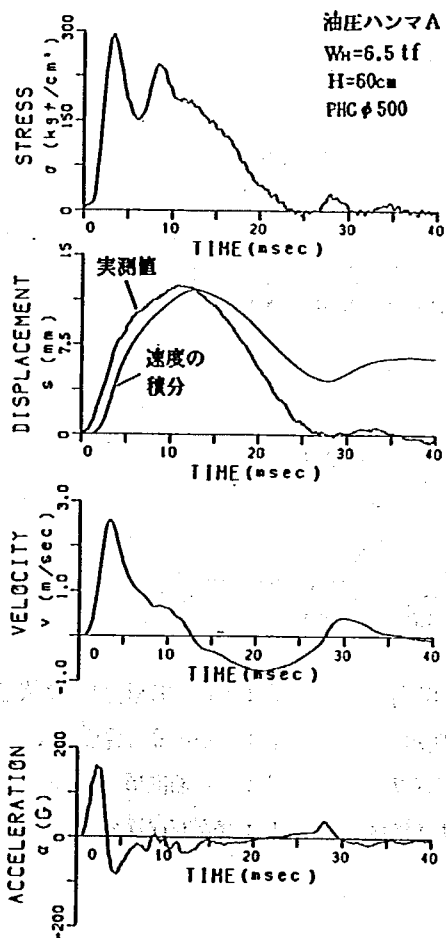
σ : σ くい頭応力 F : F くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 s : s くい頭変位 E : E くい縦弾性係数
 v : v くい頭速度 A : A くい断面積
 a : a くい頭加速度 C : 波動伝ば速度



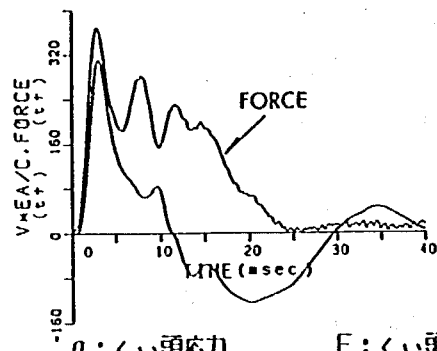
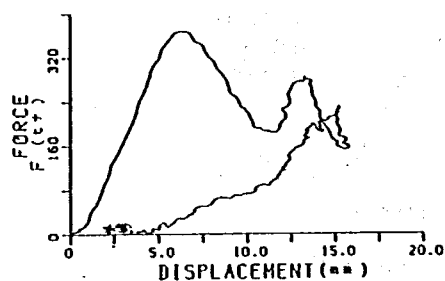
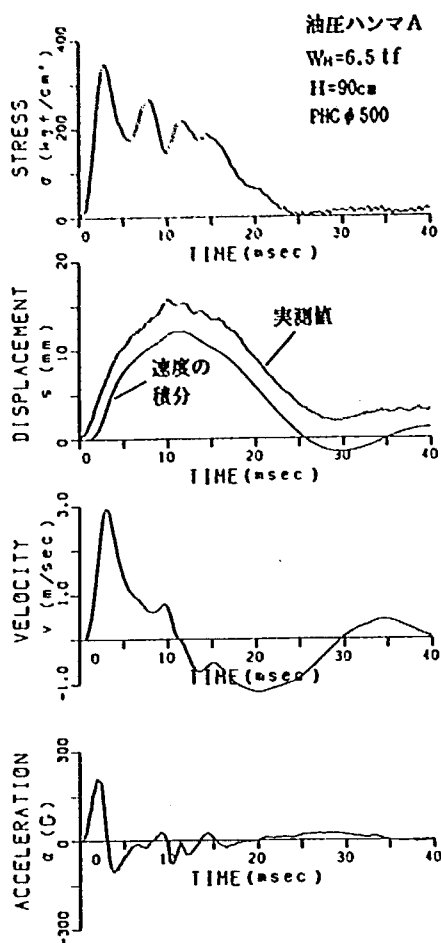
σ : σ くい頭応力 F : F くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 s : s くい頭変位 E : E くい縦弾性係数
 v : v くい頭速度 A : A くい断面積
 a : a くい頭加速度 C : 波動伝ば速度



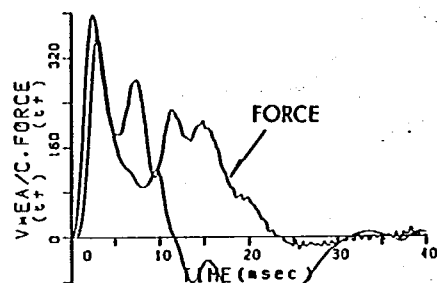
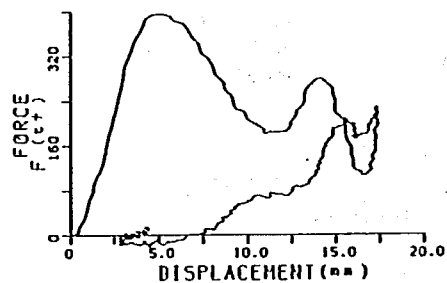
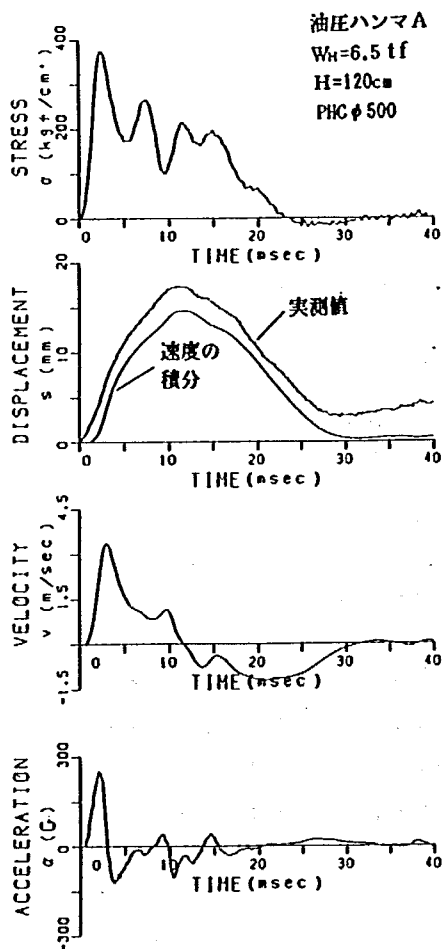
σ : くい頭応力 F : くい頭打撃力 ($= \sigma A$)
 s : くい頭変位 E : くい縦弾性係数
 v : くい頭速度 A : くい断面積
 a : くい頭加速度 C : 波動伝ば速度



σ : くい頭応力 F : くい頭打撃力 ($= \sigma A$)
 s : くい頭変位 E : くい縦弾性係数
 v : くい頭速度 A : くい断面積
 a : くい頭加速度 C : 波動伝ば速度

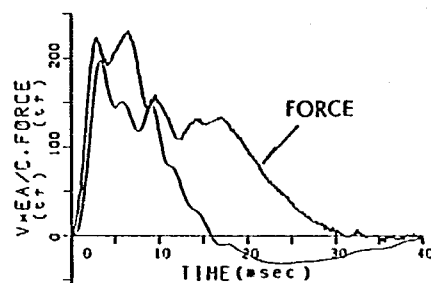
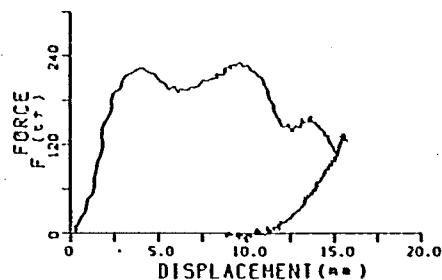
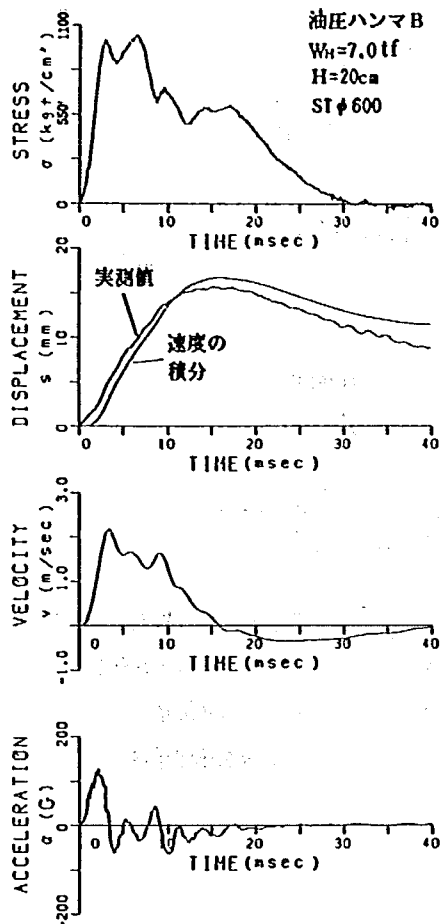


σ : σ : くい頭応力 F : F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 s : s : くい頭変位 E : E : くい縦弾性係数
 v : v : くい頭速度 A : A : くい断面積
 a : a : くい頭加速度 C : C : 波動伝ば速度

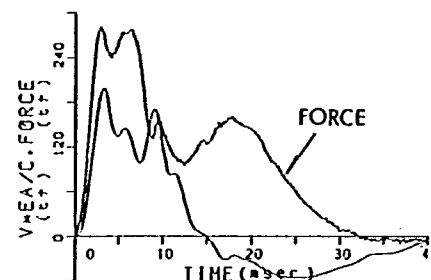
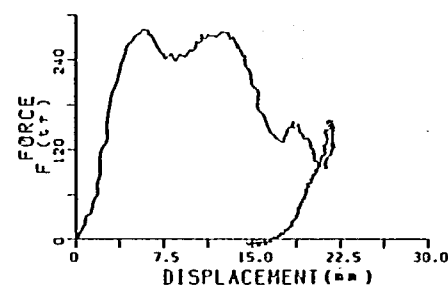
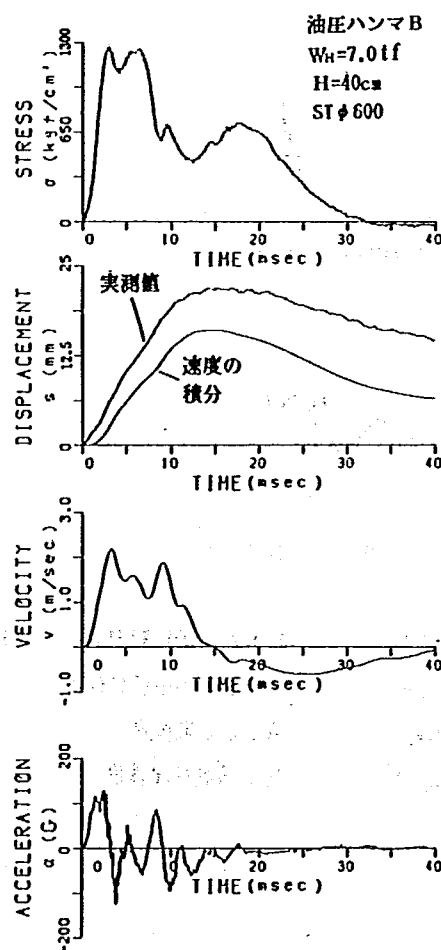


σ : σ : くい頭応力 F : F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 s : s : くい頭変位 E : E : くい縦弾性係数
 v : v : くい頭速度 A : A : くい断面積
 a : a : くい頭加速度 C : C : 波動伝ば速度

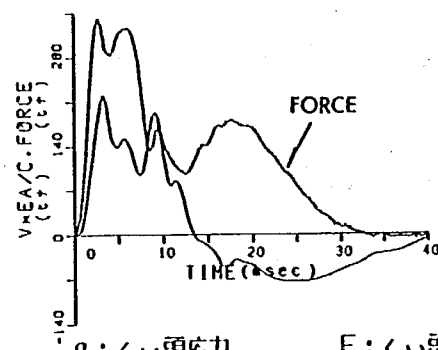
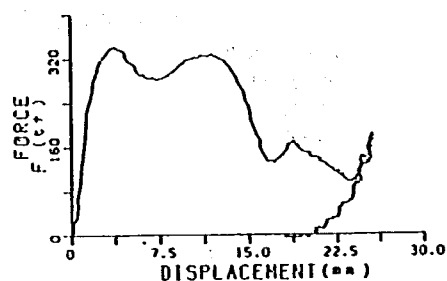
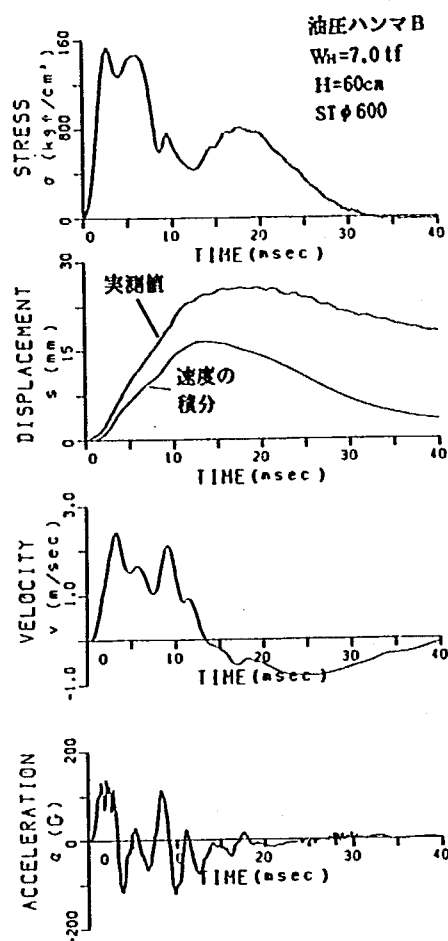
フィールド実験Ⅱにおける打ち込み試験の出力波形
(油圧ハンマB打ち込み杭)



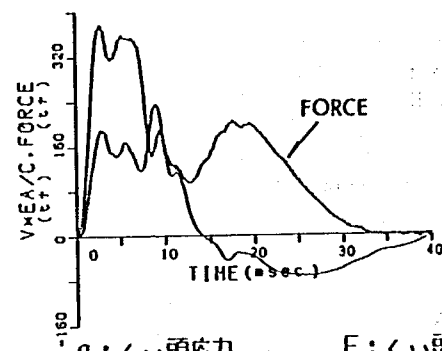
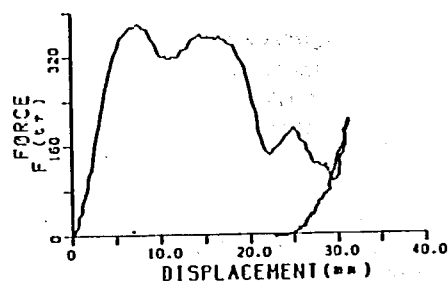
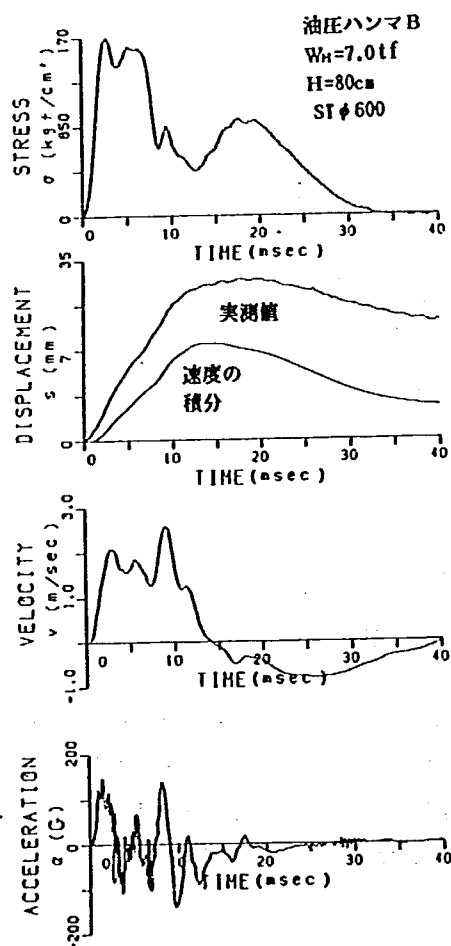
σ : σ : くい頭応力
 s : s : くい頭変位
 v : v : くい頭速度
 a : a : くい頭加速度
 F : F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E : くい縦弾性係数
 A : A : くい断面積
 C : C : 波動伝ば速度



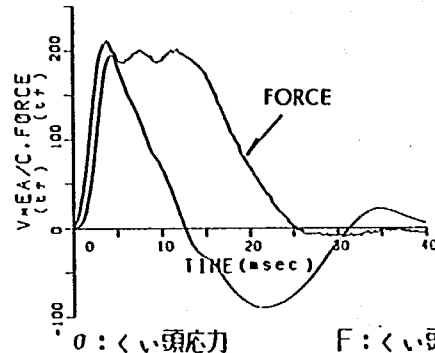
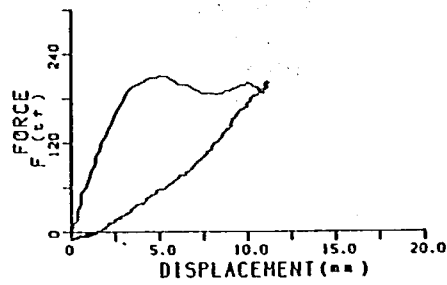
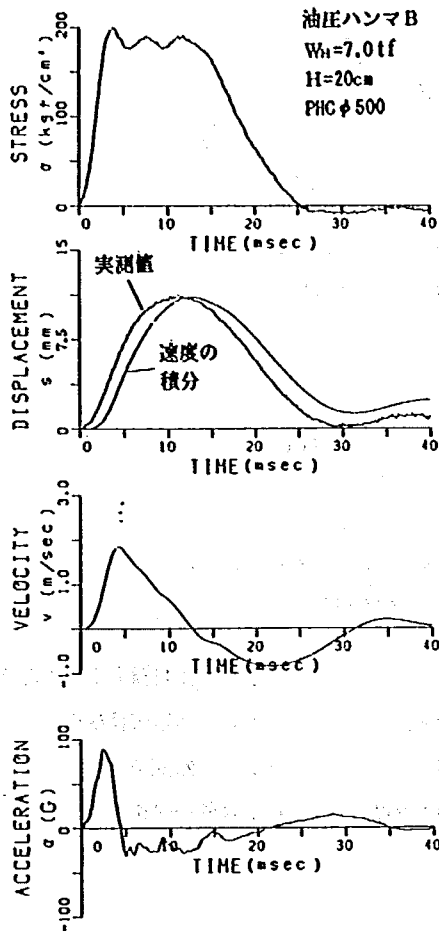
σ : σ : くい頭応力
 s : s : くい頭変位
 v : v : くい頭速度
 a : a : くい頭加速度
 F : F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E : くい縦弾性係数
 A : A : くい断面積
 C : C : 波動伝ば速度



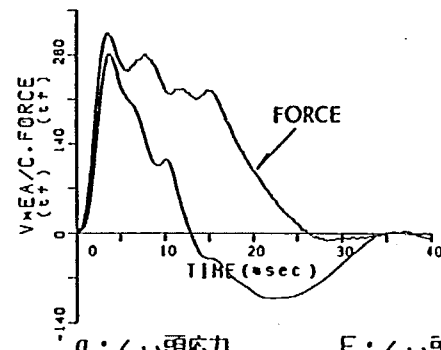
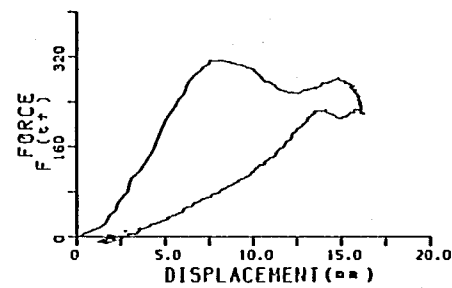
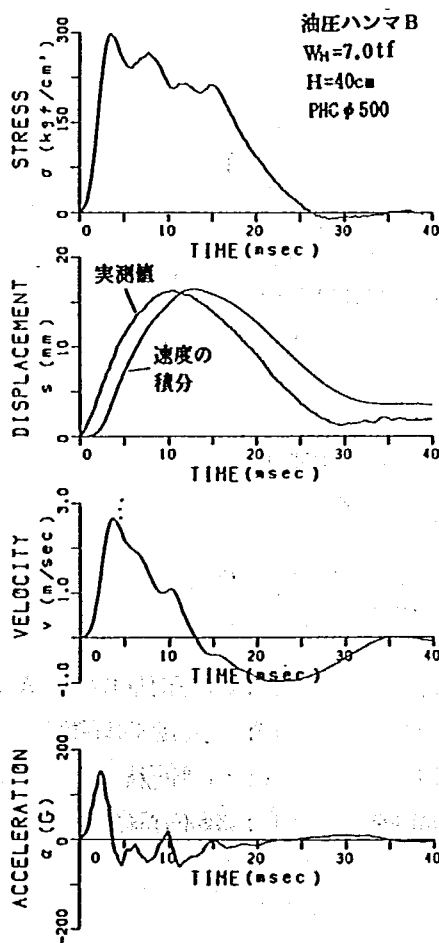
σ : σ の頭応力
 s : s の頭変位
 v : v の頭速度
 a : a の頭加速度
 F : F の頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E の縦弾性係数
 A : A の断面積
 C : 波動伝ば速度



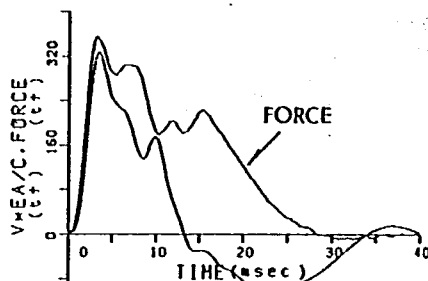
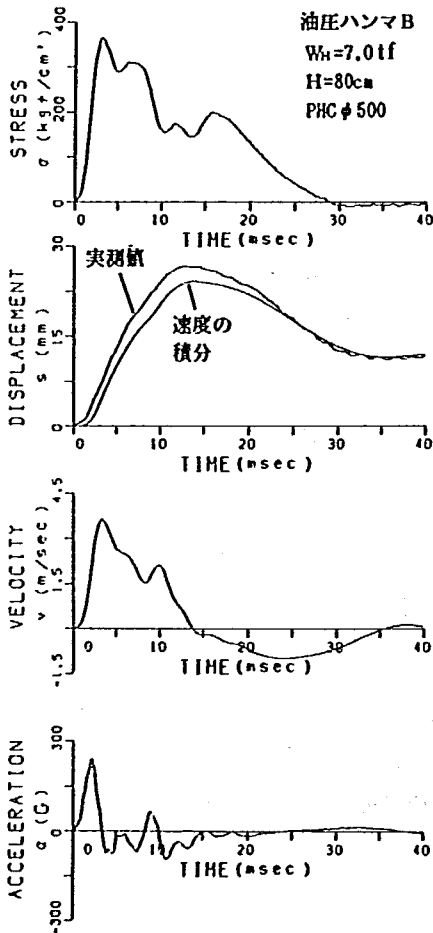
σ : σ の頭応力
 s : s の頭変位
 v : v の頭速度
 a : a の頭加速度
 F : F の頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E の縦弾性係数
 A : A の断面積
 C : 波動伝ば速度



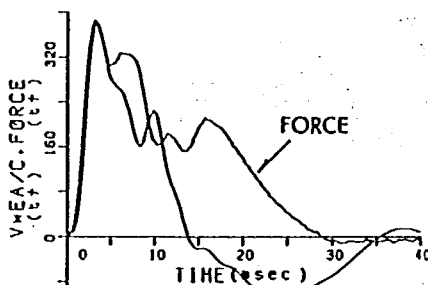
σ : σ : σ 頭応力
 s : s : s 頭変位
 v : v : v 頭速度
 a : a : a 頭加速度
 F : F : F 頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E : E の縦弾性係数
 A : A : A の断面積
 C : C : C の波動伝ば速度



σ : σ : σ 頭応力
 s : s : s 頭変位
 v : v : v 頭速度
 a : a : a 頭加速度
 F : F : F 頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E : E の縦弾性係数
 A : A : A の断面積
 C : C : C の波動伝ば速度

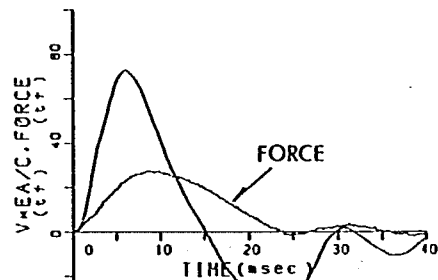
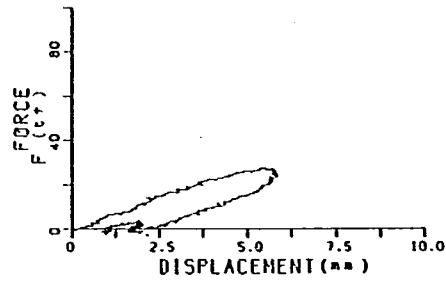
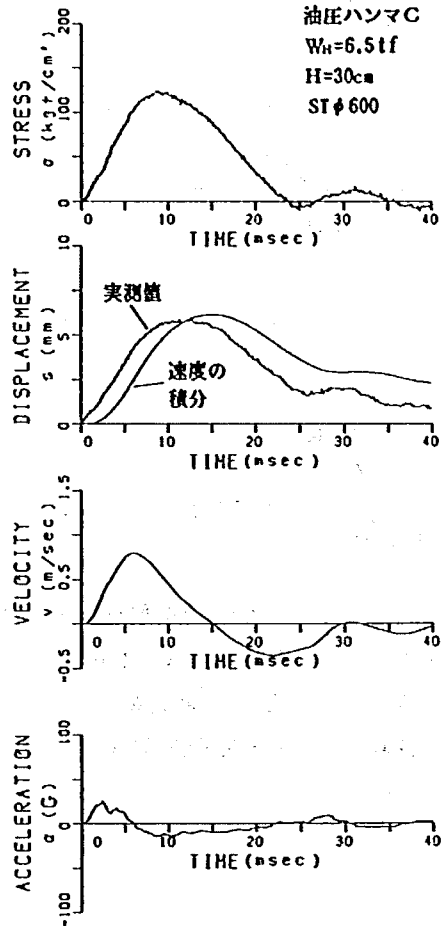


σ : $\times$ 、頭応力	F : $\times$ 、頭打撃力(= σA)
s : $\times$ 、頭変位	E : $\times$ 、の縦弾性係数
v : $\times$ 、頭速度	A : $\times$ 、断面積
a : $\times$ 、頭加速度	C : 波動伝ば速度

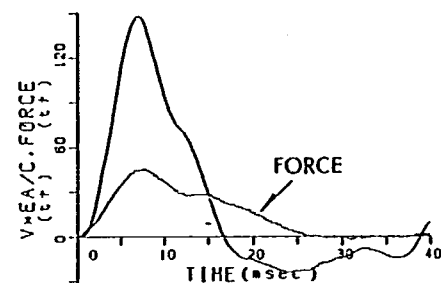
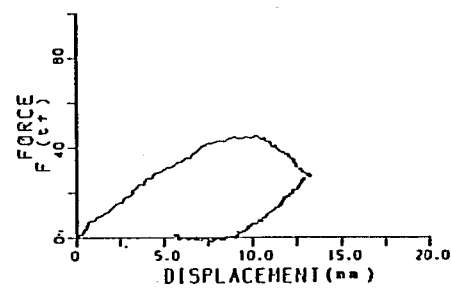
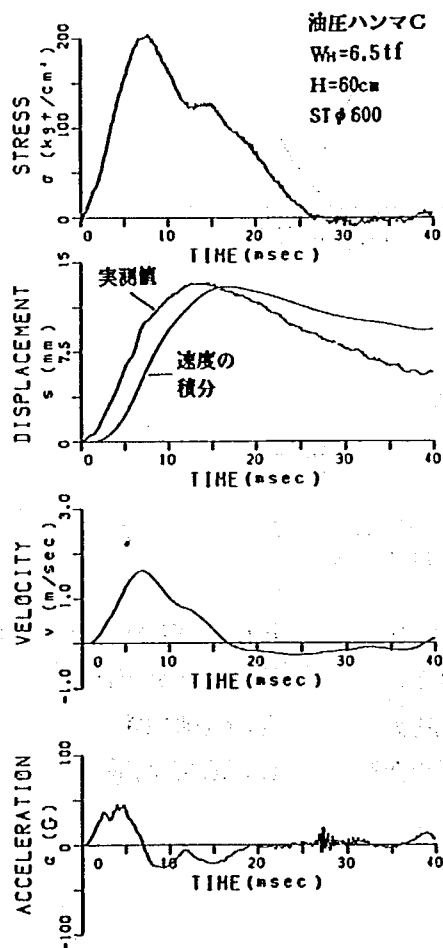


σ : $\times$ 頭応力	F : $\times$ 頭打撃力 (= σA)
s : $\times$ 頭変位	E : $\times$ の縦弾性係数
v : $\times$ 頭速度	A : $\times$ の断面積
a : $\times$ 頭加速度	C : 波動伝ば速度

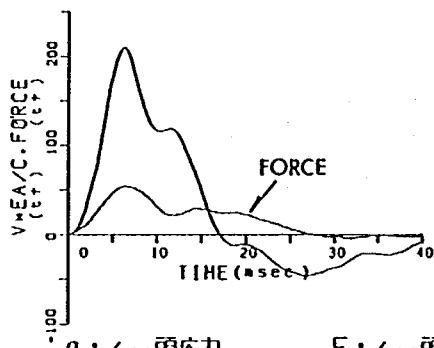
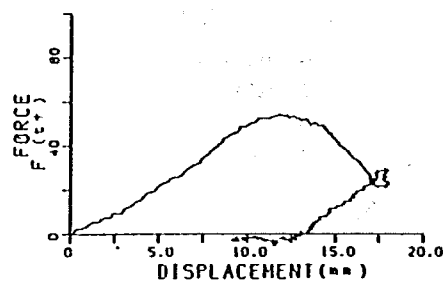
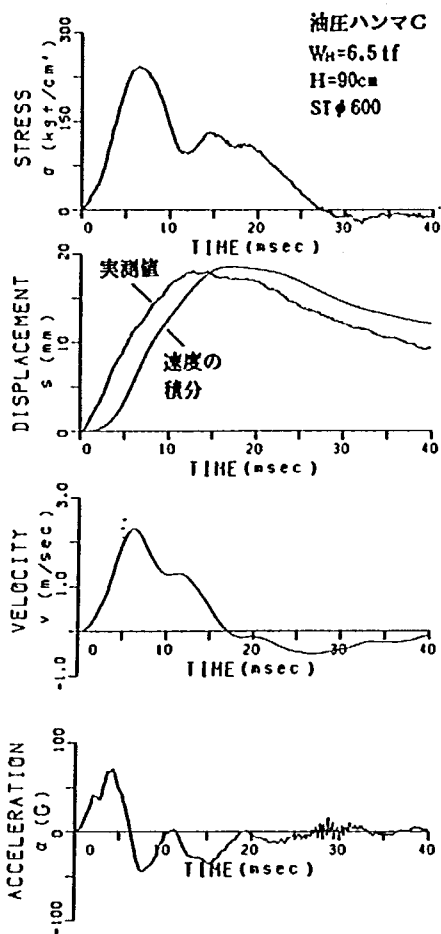
フィールド実験Ⅱにおける打ち込み試験の出力波形
(油圧ハンマC 打ち込み杭)



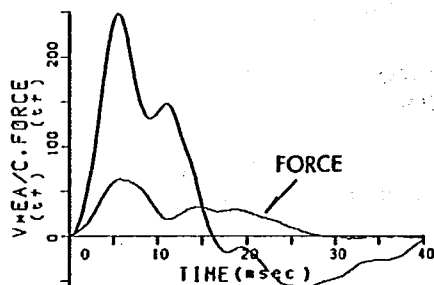
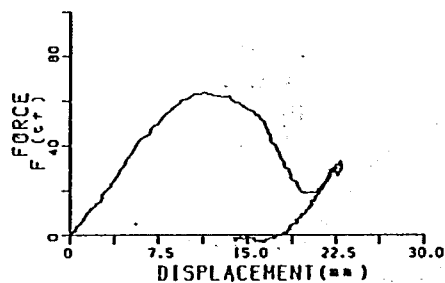
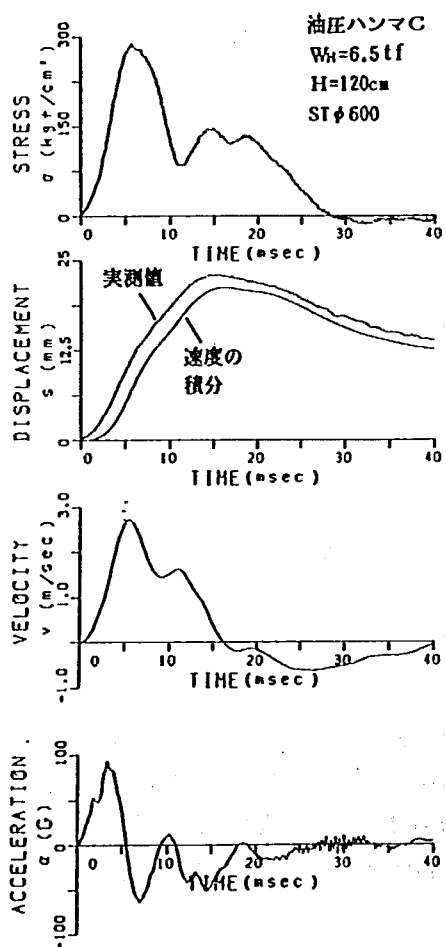
σ : σ : くい頭応力 F : F : くい頭打撃力 ($= \sigma A$)
 s : s : くい頭変位 E : E : くい縦弾性係数
 v : v : くい頭速度 A : A : くい断面積
 a : a : くい頭加速度 C : C : 波動伝ば速度



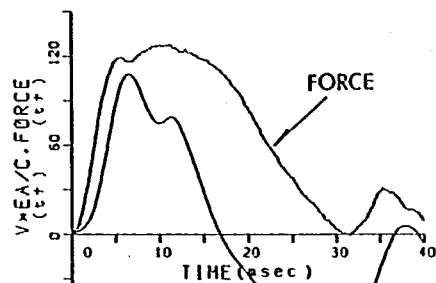
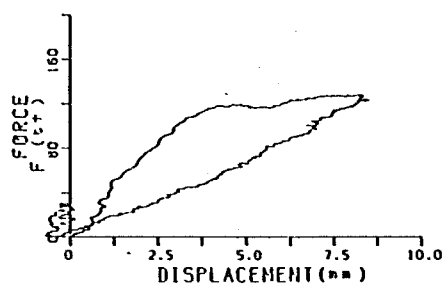
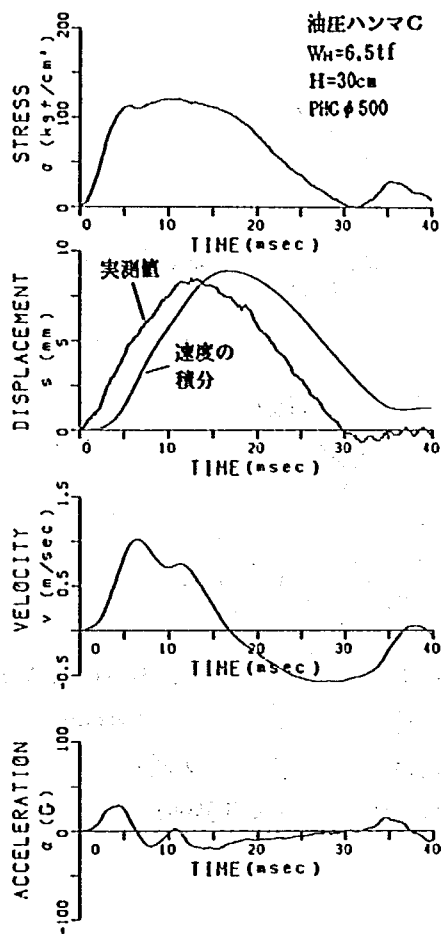
σ : σ : くい頭応力 F : F : くい頭打撃力 ($= \sigma A$)
 s : s : くい頭変位 E : E : くい縦弾性係数
 v : v : くい頭速度 A : A : くい断面積
 a : a : くい頭加速度 C : C : 波動伝ば速度



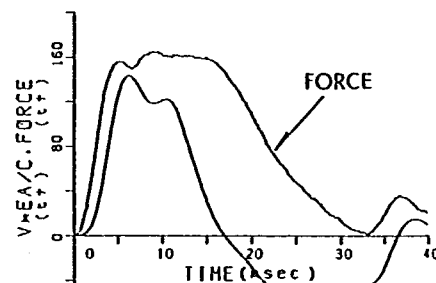
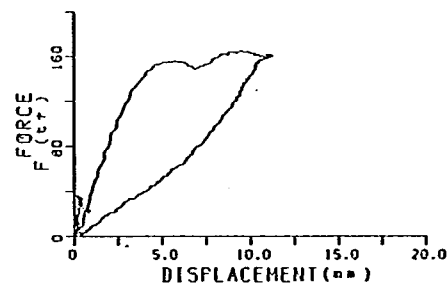
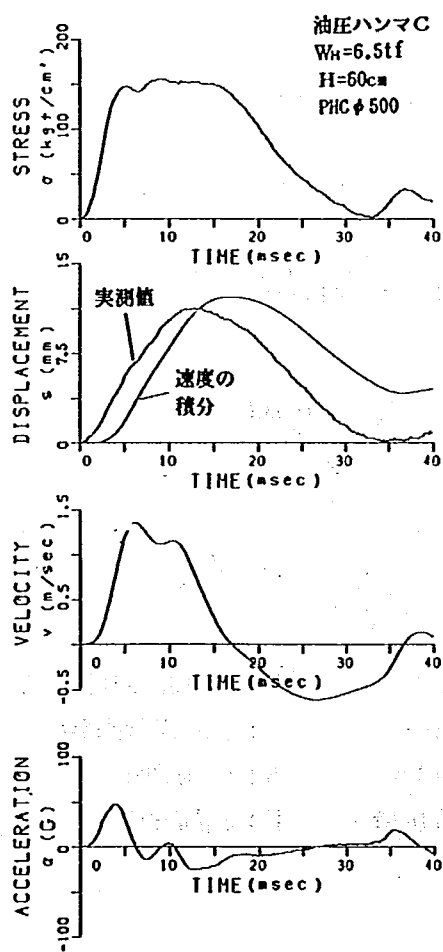
σ : σ : σ の頭応力
 s : s : s の頭変位
 v : v : v の頭速度
 a : a : a の頭加速度
 F : F : F の頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E : E の縦弾性係数
 A : A : A の断面積
 C : C : C の波動伝ば速度



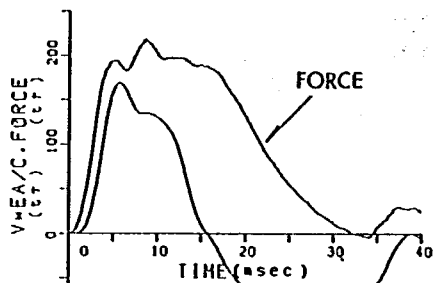
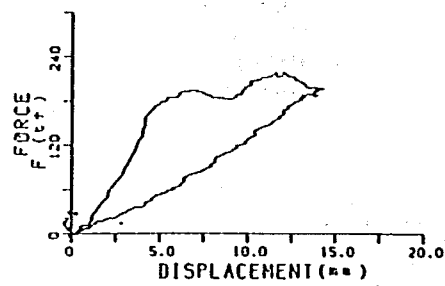
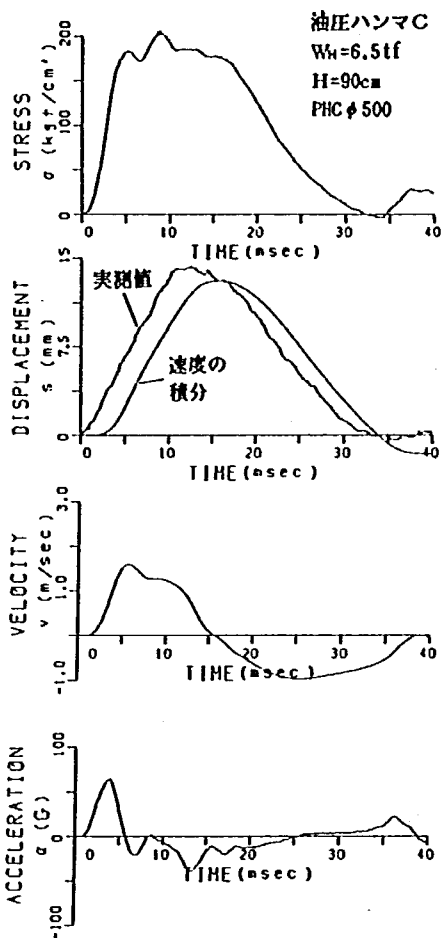
σ : σ : σ の頭応力
 s : s : s の頭変位
 v : v : v の頭速度
 a : a : a の頭加速度
 F : F : F の頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E : E の縦弾性係数
 A : A : A の断面積
 C : C : C の波動伝ば速度



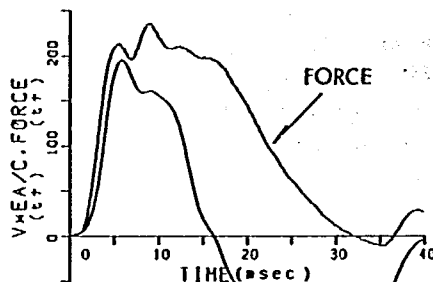
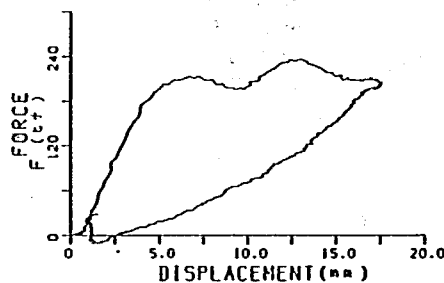
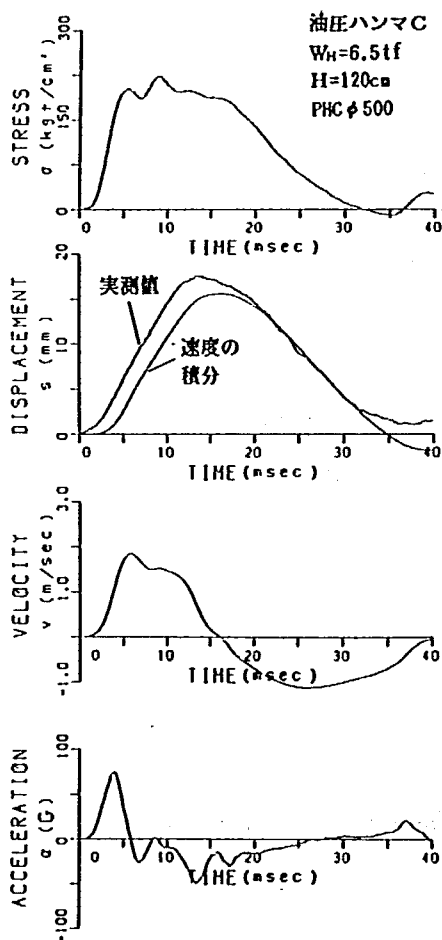
0 : <い> 頭応力 F : <い> 頭打撃力 (= σA)
 s : <い> 頭変位 E : <い> の縦弾性係数
 v : <い> 頭速度 A : <い> 断面積
 a : <い> 頭加速度 C : 波動伝ば速度



0 : <い> 頭応力 F : <い> 頭打撃力 (= σA)
 s : <い> 頭変位 E : <い> の縦弾性係数
 v : <い> 頭速度 A : <い> 断面積
 a : <い> 頭加速度 C : 波動伝ば速度

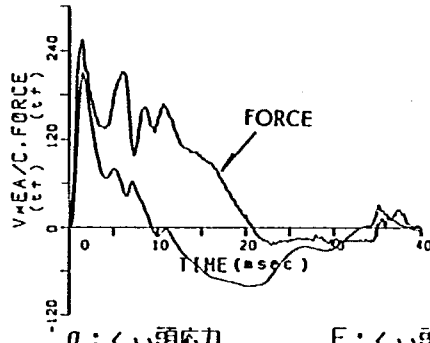
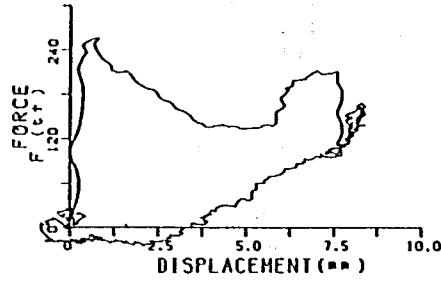
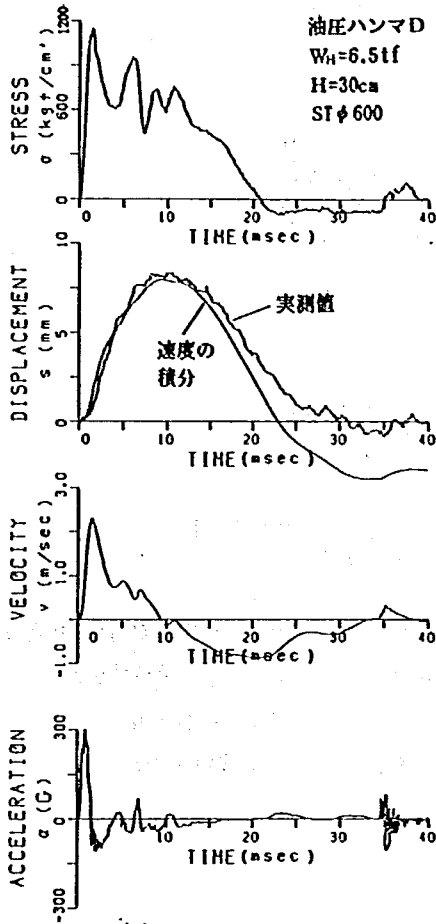


σ : σ : くい頭応力
 s : s : くい頭変位
 v : v : くい頭速度
 a : a : くい頭加速度
 F : F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E : くい縦弾性係数
 A : A : くい断面積
 C : C : 波動伝ば速度

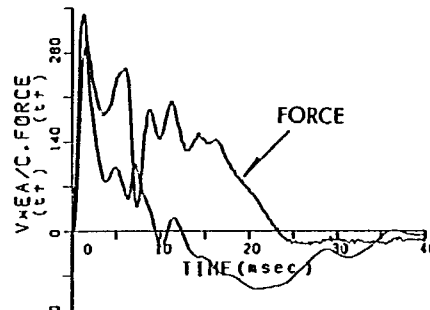
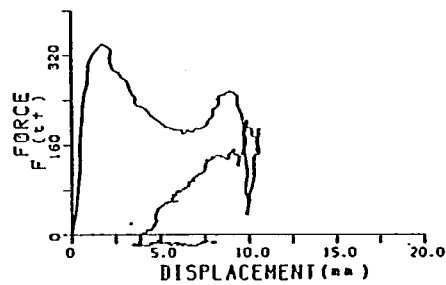
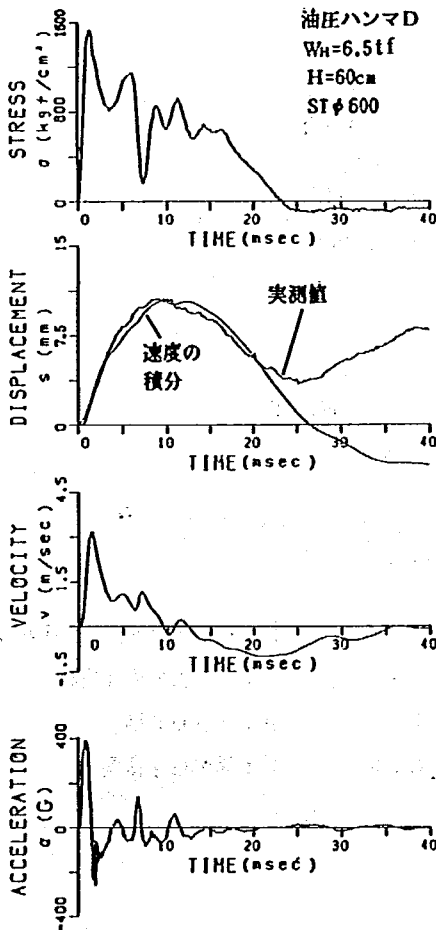


σ : σ : くい頭応力
 s : s : くい頭変位
 v : v : くい頭速度
 a : a : くい頭加速度
 F : F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E : くい縦弾性係数
 A : A : くい断面積
 C : C : 波動伝ば速度

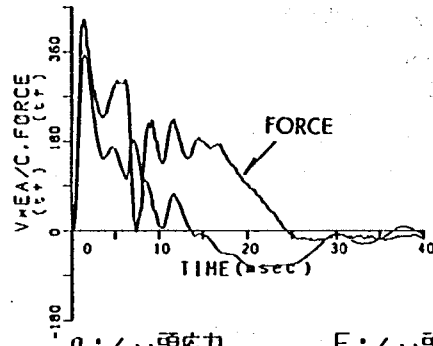
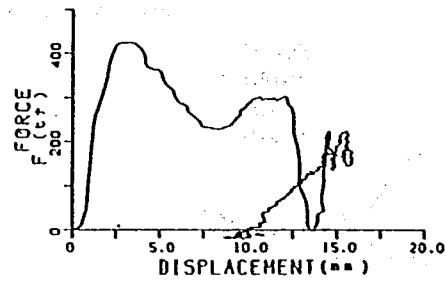
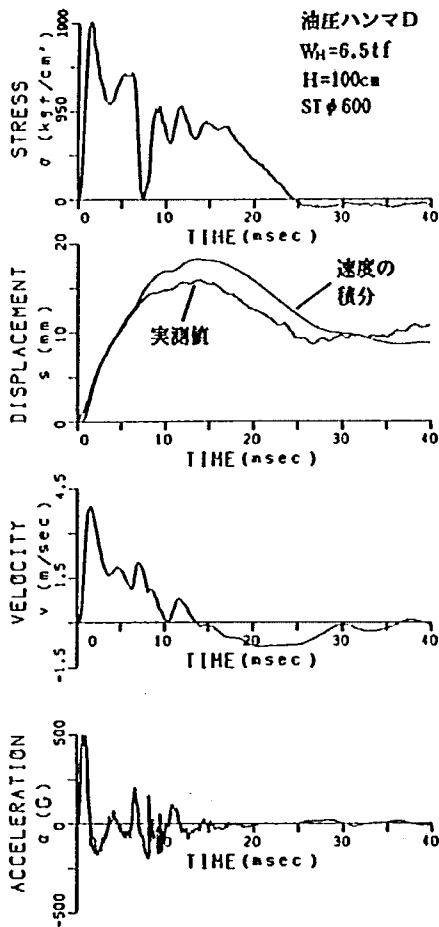
フィールド実験Ⅱにおける打ち込み試験の出力波形
(油圧ハンマD打ち込み杭)



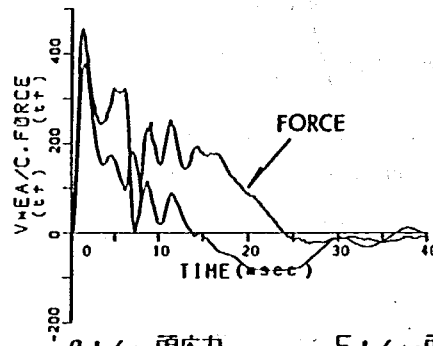
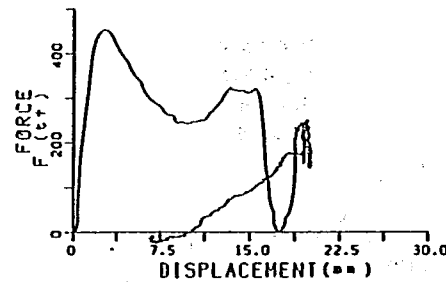
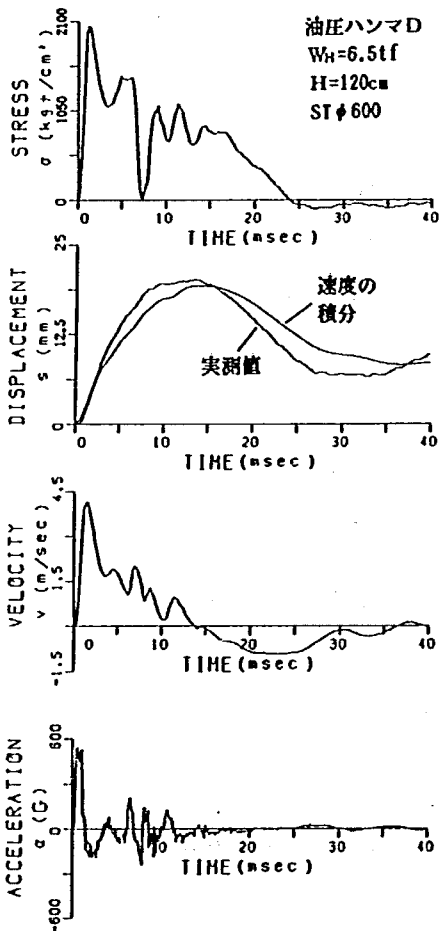
σ : くい頭応力
 s : くい頭変位
 v : くい頭速度
 a : くい頭加速度
 F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : くい縦弾性係数
 A : くい断面積
 C : 波動伝ば速度



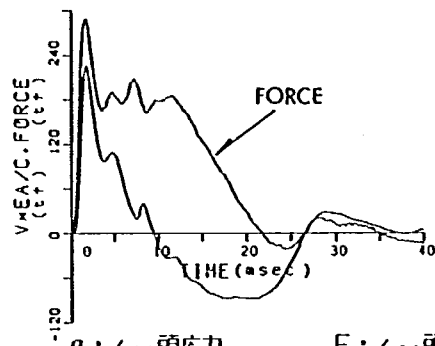
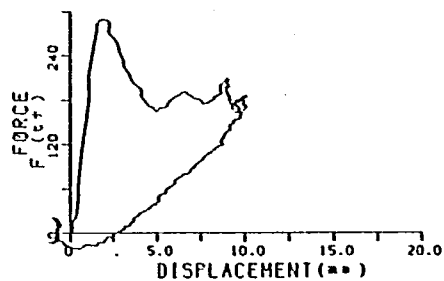
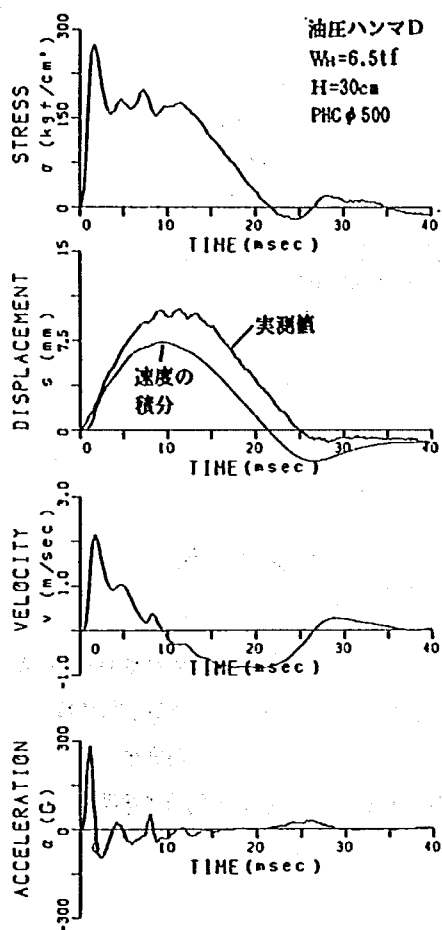
σ : くい頭応力
 s : くい頭変位
 v : くい頭速度
 a : くい頭加速度
 F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : くい縦弾性係数
 A : くい断面積
 C : 波動伝ば速度



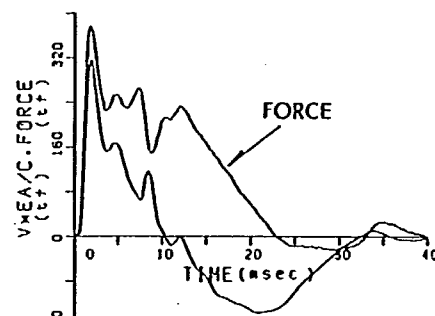
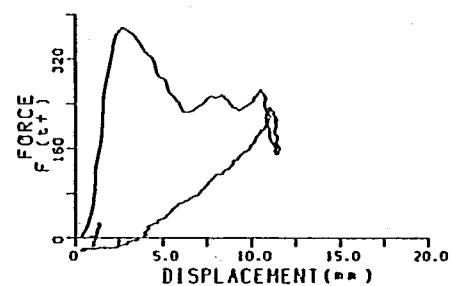
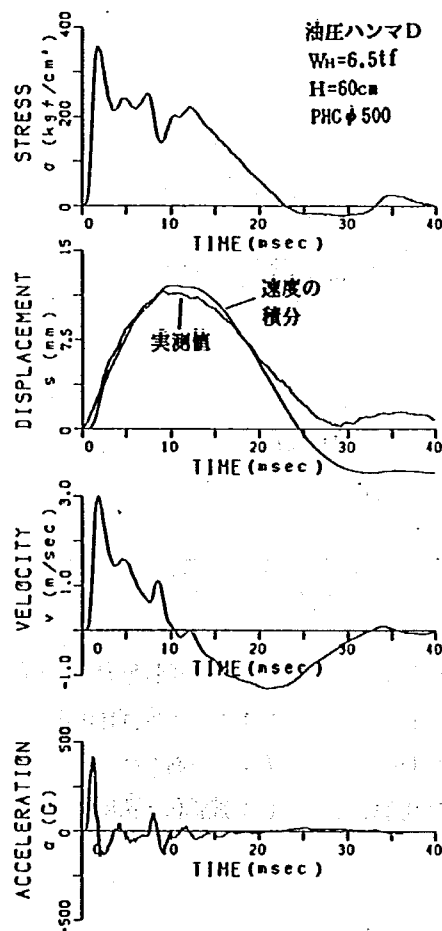
σ : σ : σ 頭応力 F : F : F 頭打撃力 ($= \sigma A$)
 s : s : s 頭変位 E : E : E の縦弾性係数
 v : v : v 頭速度 A : A : A 断面積
 a : a : a 頭加速度 C : C : C 波動伝ば速度



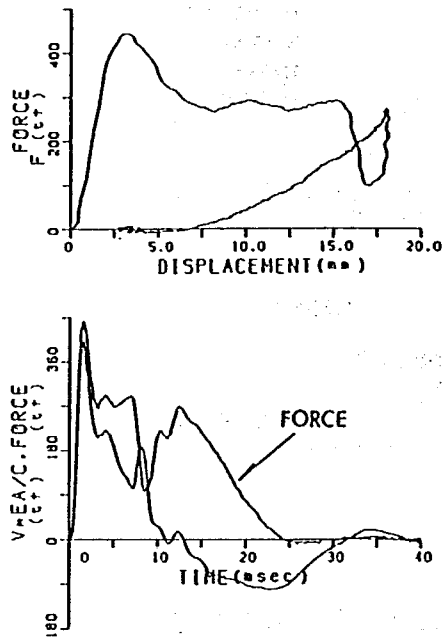
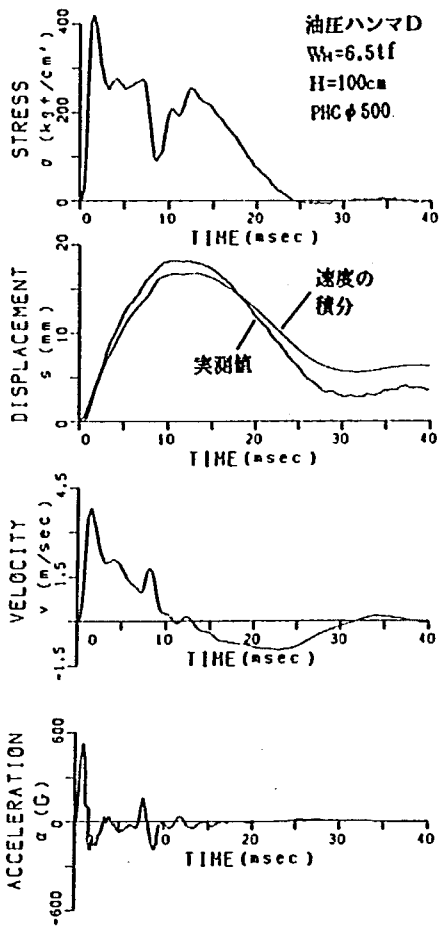
σ : σ : σ 頭応力 F : F : F 頭打撃力 ($= \sigma A$)
 s : s : s 頭変位 E : E : E の縦弾性係数
 v : v : v 頭速度 A : A : A 断面積
 a : a : a 頭加速度 C : C : C 波動伝ば速度



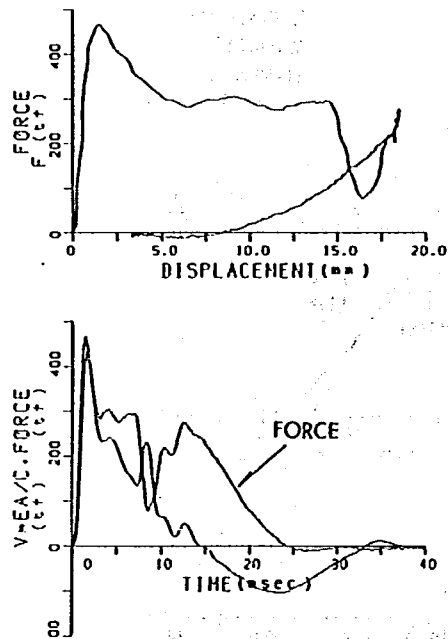
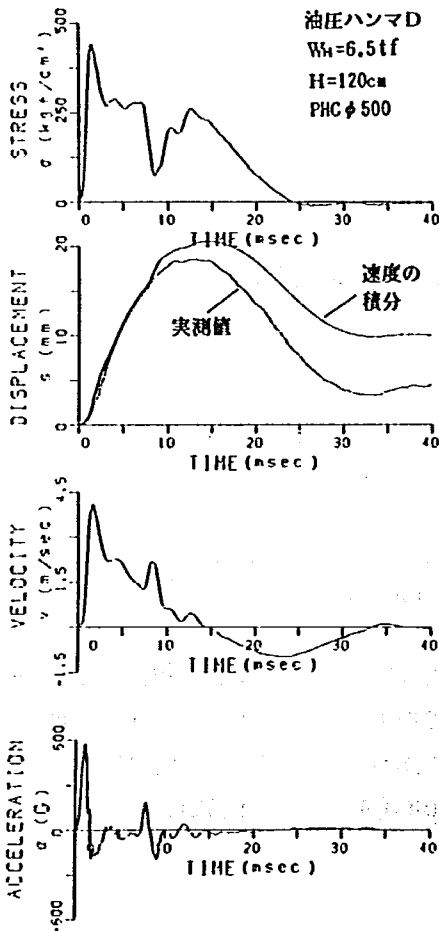
σ : σ : くい頭応力
 s : s : くい頭変位
 v : v : くい頭速度
 a : a : くい頭加速度
 F : F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E : くい縦弾性係数
 A : A : くい断面積
 C : C : 波動伝ば速度



σ : σ : くい頭応力
 s : s : くい頭変位
 v : v : くい頭速度
 a : a : くい頭加速度
 F : F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 E : E : くい縦弾性係数
 A : A : くい断面積
 C : C : 波動伝ば速度

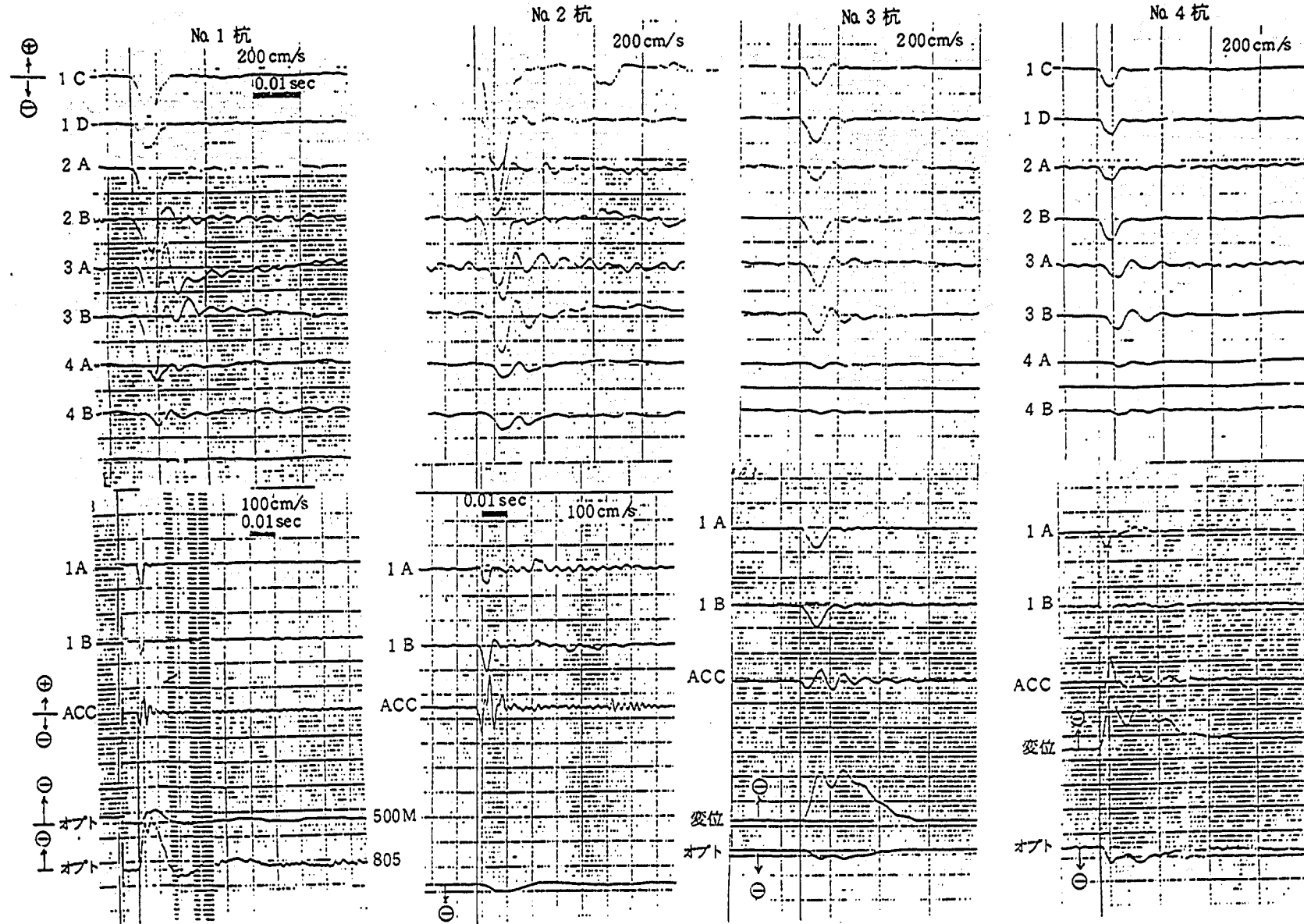


σ : くい頭応力 F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 s : くい頭変位 E : くい縦弾性係数
 v : くい頭速度 A : くい断面積
 a : くい頭加速度 C : 波動伝ば速度

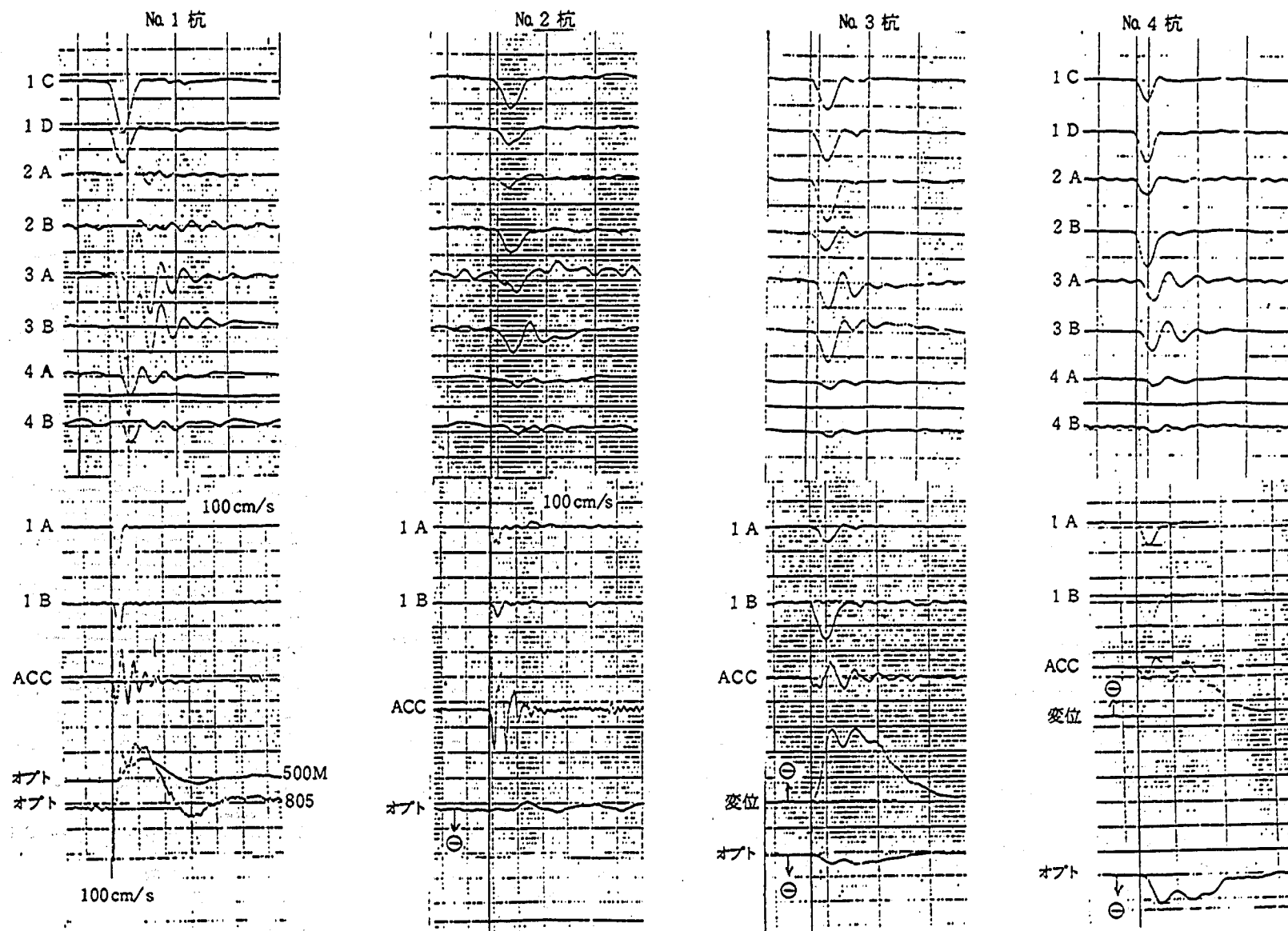


σ : くい頭応力 F : くい頭打撃力 ($=\sigma A$)
 s : くい頭変位 E : くい縦弾性係数
 v : くい頭速度 A : くい断面積
 a : くい頭加速度 C : 波動伝ば速度

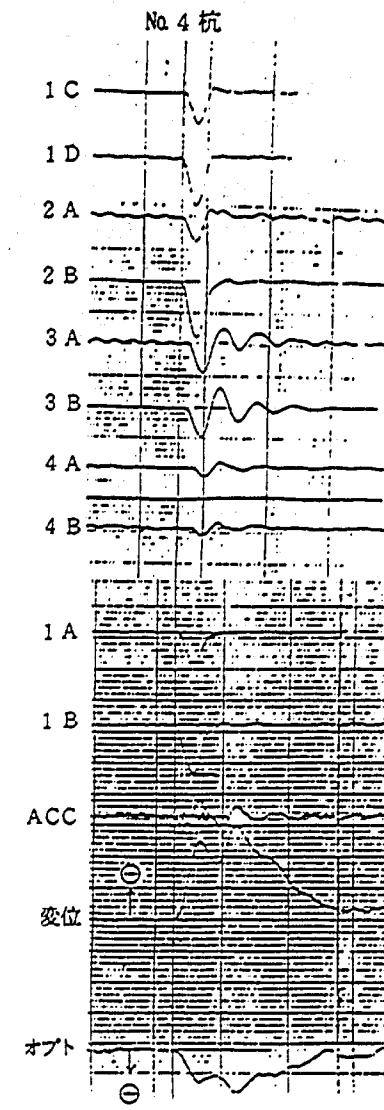
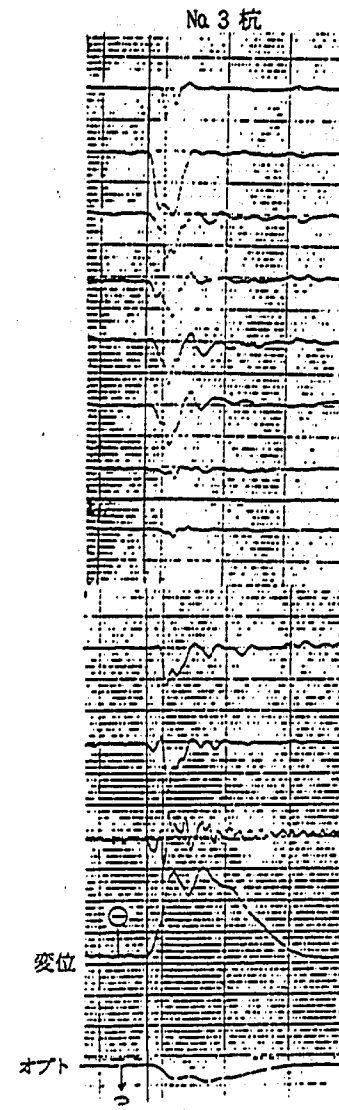
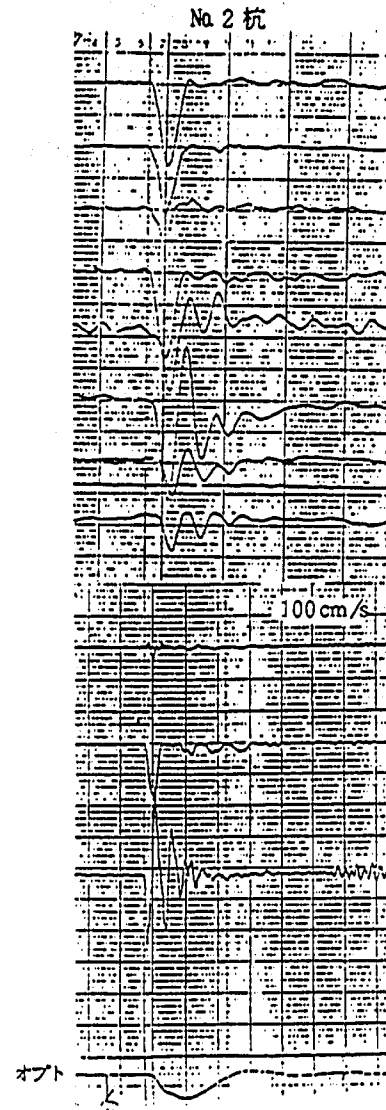
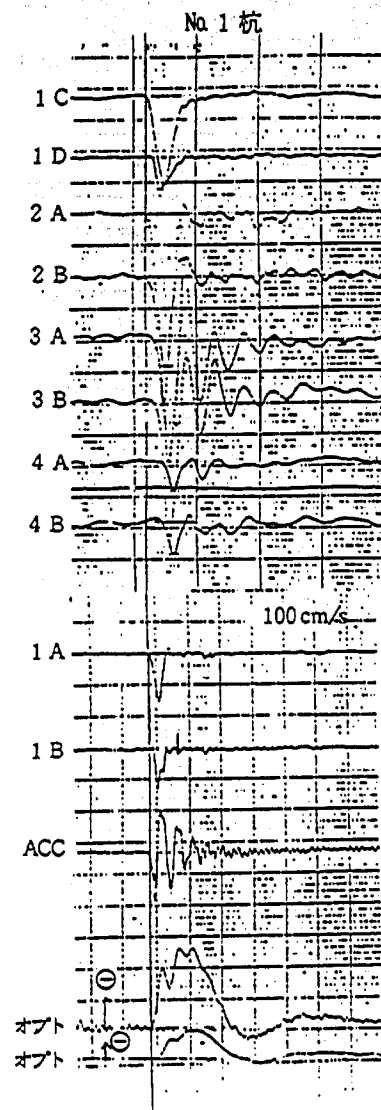
深層土槽実験における衝撃载荷試験の現象波形 (ハンマー落高 $H=0.3\text{ m}$, クッション $t=25\text{ mm}$)



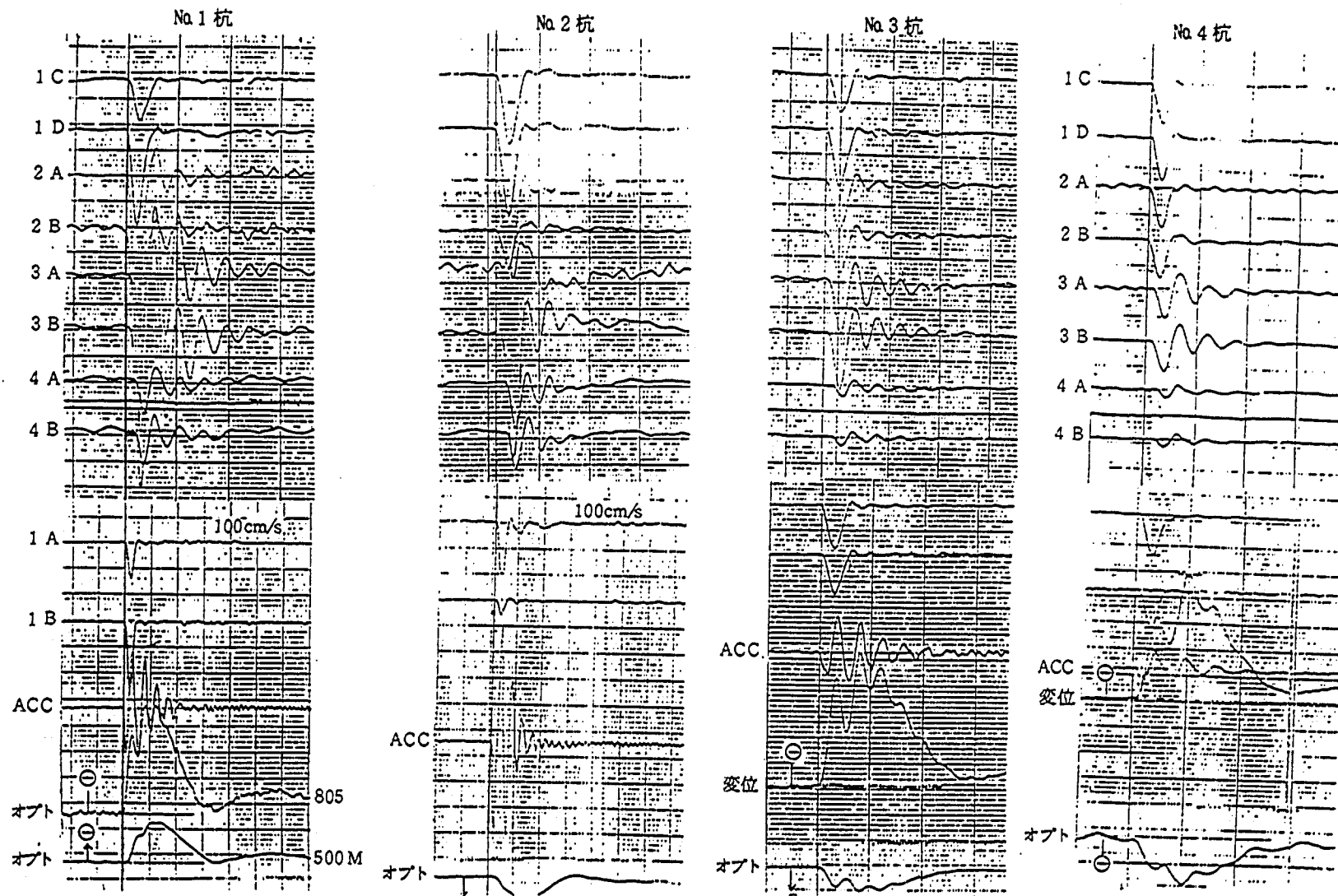
深層土槽実験における衝撃载荷試験の現象波形 (ハンマー落高 $H = 0.5\text{m}$, クッション $t = 25\text{mm}$)



深層土槽実験における衝撃载荷試験の現象波形 (ハンマー落高 $H = 0.7$ m, クッション $t = 25$ mm)



深層土槽実験における衝撃载荷試験の現象波形 (ハンマー落高 $H=1.0\text{m}$, クッション $t=25\text{mm}$)



付 録 3

動的 支 持 力 の 算 定

支持力算定に用いた変数の値

埋設杭NO.3 $W_H=0.452tf$ 鋼管杭 $\phi 400$

①Gobleらの方法

H (cm)	F_1 (kgf/cm ²)	F_2 (kgf/cm ²)	v_1 (m/sec)	v_2 (m/sec)	R_d (tf)
20	107.0	11.5	0.3	-0.2	24
20	172.1	16.8	0.3	-0.2	29
30	123.8	14.6	0.4	-0.2	29
30	99.7	9.4	0.3	-0.2	23
50	211.0	29.3	0.5	-0.2	37
50	218.3	36.7	0.5	-0.2	39
70	367.4	93.4	0.2	0.1	38
90	326.5	-20.0	1.0	-0.3	59
100	570.1	-15.8	1.0	0.0	71

②Scanlanらの方法

H (cm)	F (kgf/cm ²)	$\ddot{x}$ (G)	R_d (tf)
20	107.0	-25.9	37
20	172.1	19.5	5
30	123.8	11.7	6
30	99.7	-3.7	15
50	211.0	-25.6	27
50	218.3	-9.0	9
70	367.4	-25.0	36
90	326.5	-19.6	24
100	570.1	-7.3	10

記号の説明

W_H :ハンマ重量
 H :ハンマ落下高さ
 F_1 :杭頭最大打撃力
 F_2 : F_1 発生後 $2L/C$ 時間後の杭頭打撃力
 F : $\ddot{x}$ 発生時の杭頭打撃力
 v_1 : F_1 発生時の杭頭速度
 v_2 : F_2 発生時の杭頭速度
 K :杭頭のリバウンド量
 $\ddot{x}$:杭頭変位が最大の時の杭頭加速度
 R_d :動的支持力算定値
 L :杭長
 C :波動の伝ば速度

③宇都らの方法

H (cm)	K (mm)	R_d (tf)
10	0.6	22.8
20	1.0	38.1
30	1.6	60.9
40	1.7	64.7
50	2.0	76.2
60	2.0	76.2
70	2.0	76.2
80	2.6	99.0
90	3.0	114.2
100	3.5	133.3

埋設杭NO.4 $W = 0.452tf$ 鋼管杭 $\phi 400$

①Gobleらの方法

H (cm)	F_1 (kgf/cm ²)	F_2 (kgf/cm ²)	v_1 (m/sec)	v_2 (m/sec)	R_d (tf)
30	363.2	39.9	0.2	-0.2	41
50	357.0	31.5	0.3	-0.2	45
100	635.2	68.2	0.4	-0.3	75

②Scanlanらの方法

H (cm)	F (kgf/cm ²)	$\ddot{x}$ (G)	R _d (tf)
30	1.0	2.8	-3
50	165.8	-30.8	55
100	13.6	-30.6	32

③宇都らの方法

H (cm)	K (mm)	R _d (tf)
10	0.11	4.2
20	0.60	22.8
30	0.64	24.4
40	0.91	34.6
50	0.91	34.6
60	0.84	32.0
70	1.27	48.4
80	1.34	51.0
90	1.47	56.0
100	1.60	60.9

油圧パイルハンマ Aハンマ(W_H=6.5 tf) 鋼管杭φ600

(1) 打ち込み試験

①Gobleらの方法

H (cm)	F ₁ (kgf/cm ²)	F ₂ (kgf/cm ²)	v ₁ (m/sec)	v ₂ (m/sec)	R _d (tf)
10	594.2	470.3	0.7	0.0	149
10	594.2	426.2	0.7	-0.3	155
10	550.2	430.5	0.6	-0.4	154
30	1096.1	537.6	1.5	0.2	242
30	1071.0	495.5	1.5	0.3	231
30	1058.4	518.6	1.6	0.3	237
60	1495.2	348.6	2.4	0.9	280
60	1514.0	371.7	2.3	0.7	282
60	1522.5	411.6	2.4	0.8	293
90	1801.8	283.5	3.0	1.2	314
90	1873.1	325.5	3.0	1.1	334
90	1877.4	312.8	3.0	1.2	326
120	2129.3	174.3	3.3	1.5	337
120	2097.9	157.5	3.3	1.6	328
120	2142.0	174.3	3.3	1.6	337

②Scanlanらの方法

H (cm)	F (kgf/cm ²)	$\ddot{x}$ (G)	R _d (tf)
30	627.8	-16.2	242
30	506.0	-9.1	138
30	508.2	-8.4	137
60	627.8	-31.8	231
60	705.5	-44.1	284
60	531.2	-50.3	263
90	569.0	-58.0	294
90	550.2	-15.9	168

90	858.8	31.1	100
120	982.7	19.3	162
120	630.0	-32.4	233
120	844.2	-36.8	294

③宇都らの方法

H (cm)	K (mm)	R _d (tf)
30	6.0	186.5
30	6.0	186.5
30	6.3	195.8
30	6.5	202.0
30	6.8	211.3
60	8.0	248.6
60	8.0	248.6
60	8.0	248.6
60	7.8	242.4
60	8.0	248.6
90	8.5	264.2
90	8.8	273.5
90	8.6	267.3
90	8.3	258.0
90	8.6	267.3
120	8.8	273.5
120	9.0	279.7
120	9.0	279.7
120	9.5	295.3
120	9.2	285.9

(2) 軽打試験 W_H=1.03tf

Aハンマ打ち込み杭 鋼管杭φ600

宇都らの方法

H (cm)	K (mm)	R _d (tf)
10	0.56	17.4
20	1.18	36.7
30	1.53	47.6
40	2.57	79.9
50	2.64	82.1
60	3.06	95.1
70	3.61	112.2
80	3.61	112.2
90	4.03	125.3
100	4.31	134.0
110	4.58	142.3
120	4.58	142.3
130	4.86	151.0
140	5.07	157.6
150	5.69	176.8

油圧パイルハンマ Aハンマ($W_H=6.5\text{tf}$) PHC杭 $\phi 500$

(1) 打ち込み試験

①Gobleらの方法

H (cm)	F_1 (kgf/cm ²)	F_2 (kgf/cm ²)	v_1 (m/sec)	v_2 (m/sec)	R_d (tf)
10	97.5	84.4	0.8	0.1	131
10	88.0	42.0	0.0	-0.4	92
10	88.7	76.0	0.7	0.0	125
30	186.0	138.3	1.5	0.1	247
30	192.3	129.1	1.4	-0.1	255
30	184.8	142.4	1.4	0.0	253
60	278.3	180.8	1.8	0.4	323
60	274.7	181.1	2.4	0.3	359
60	279.9	172.0	2.5	0.2	364
90	336.3	142.7	2.7	0.9	355
90	340.0	135.1	3.0	0.5	389
90	330.0	140.3	3.0	0.8	369
120	370.7	107.5	2.8	1.3	336
120	370.7	100.7	2.5	1.3	317
120	381.1	118.0	2.8	1.2	349

②Scanlanらの方法

H (cm)	F (kgf/cm ²)	$\ddot{x}$ (G)	R_d (tf)
30	155.1	-8.4	198
30	142.4	-7.2	179
30	142.7	-7.2	180
60	162.8	-27.7	285
60	183.5	-17.5	265
60	172.0	-25.4	286
90	196.7	-43.4	386
90	174.3	-15.0	245
90	126.4	-24.0	232
120	181.1	-74.1	495
120	209.1	-52.9	438
120	209.1	-52.5	436

③宇都らの方法

H (cm)	K (mm)	R_d (tf)
30	8.5	256.4
30	6.3	190.1
30	6.5	196.1
30	7.2	217.2
30	7.7	232.3
60	11.0	331.9
60	10.6	319.8
60	10.8	325.9
60	11.0	331.9
60	10.8	325.9

90	12.0	362.1
90	12.0	362.1
90	12.0	362.1
90	12.0	362.1
90	12.0	362.1
120	13.3	401.3
120	12.5	377.1
120	13.0	392.2
120	12.3	371.1
120	13.3	401.3

(2) 軽打試験 $W_H=1.03tf$

Aハンマ打ち込み杭 PHC杭φ500

宇都らの方法

H (cm)	K (mm)	R_d (tf)
10	1.07	32.3
20	1.57	47.4
30	1.86	56.1
40	1.79	54.0
50	1.43	43.1
60	2.29	69.1
70	2.79	84.2
80	2.86	86.3
90	2.86	86.3
100	3.07	92.6
110	3.29	99.3
120	3.50	105.6
130	3.79	114.3
140	3.64	109.8
150	3.64	109.8

油圧パイルハンマ Bハンマ($W_H=7.0tf$) 鋼管杭φ600

(1) 打ち込み試験

①Gobleらの方法

H (cm)	F_1 (kgf/cm ²)	F_2 (kgf/cm ²)	v_1 (m/sec)	v_2 (m/sec)	R_d (tf)
10	913.5	749.7	0.8	-0.2	229
10	890.3	705.5	1.0	-0.1	228
10	894.5	724.0	0.9	-0.2	231
20	1037.3	512.3	1.5	0.4	223
20	1043.6	522.9	1.4	0.3	223
20	1029.0	476.7	1.5	0.4	219
40	1264.1	617.3	2.0	1.6	233
40	1085.6	415.7	0.9	-0.2	220
40	1125.5	441.0	1.0	-0.2	229
60	1524.5	617.3	1.9	1.7	246
60	1442.6	659.4	1.9	1.5	253
60	1524.5	636.2	1.9	1.6	257

80	1701.0	720.2	1.9	2.1	263
80	1787.0	630.0	1.8	1.8	274
80	1806.0	653.0	1.8	1.7	282

②Scanlanらの方法

H (cm)	F (kgf/cm ²)	$\ddot{x}$ (G)	R _d (tf)
20	569.0	-22.0	190
20	604.7	-13.5	173
20	560.7	-9.9	153
40	550.2	-13.1	160
40	701.3	3.3	146
40	604.7	-21.2	195
60	764.3	-9.0	195
60	653.0	-23.5	213
60	785.3	4.4	161
80	896.6	10.8	167
80	856.7	-18.3	243
80	900.9	-10.4	230

③宇都らの方法

H (cm)	K (mm)	R _d (tf)
20	6.2	245.5
20	6.0	242.4
20	6.0	245.5
20	6.0	226.9
20	6.6	226.9
40	6.7	282.8
40	6.5	276.6
40	6.8	279.7
40	7.0	276.6
40	7.0	279.7
60	7.6	295.3
60	7.6	313.9
60	7.5	298.4
60	7.6	313.9
60	7.5	307.7
80	-	329.4
80	8.5	348.1
80	8.0	338.8
80	-	345.0
80	-	335.7

(2) 軽打試験 W_H=1.03 tf

Bハンマ打ち込み杭 鋼管杭φ600

H (cm)	K (mm)	R _d (tf)
10	0.78	24.2
20	1.41	43.8
30	1.72	53.5
40	1.72	53.5

50	2.03	63.1
60	2.34	72.7
70	—	—
80	2.50	77.7
90	3.13	97.3
100	3.59	111.6
110	4.22	131.2
120	3.75	116.6
130	4.22	131.2
140	4.53	140.8
150	4.53	140.8

油圧パイルハンマ Bハンマ($W_H=7.0\text{tf}$) PHC杭 $\phi 500$

(1) 打ち込み試験

①Gobleらの方法

H (cm)	F_1 (kgf/cm ²)	F_2 (kgf/cm ²)	v_1 (m/sec)	v_2 (m/sec)	R_d (tf)
20	199.5	188.7	1.8	0.3	284
20	187.9	185.1	1.8	0.4	276
20	205.1	190.4	1.7	0.4	282
40	296.3	208.0	2.6	0.7	370
40	300.3	207.6	2.6	0.8	367
40	287.6	201.5	2.6	0.9	353
60	335.1	174.3	3.0	1.3	365
60	337.2	177.9	3.0	1.5	355
60	335.1	172.8	3.0	1.4	359
80	347.6	155.1	3.5	1.6	373
80	364.3	155.1	3.6	1.8	375
80	365.2	158.0	3.5	1.7	376

②Scanlanらの方法

H (cm)	F (kgf/cm ²)	$\ddot{x}$ (G)	R_d (tf)
20	189.1	-23.9	297
20	177.1	-21.4	274
20	183.9	-21.2	281
40	208.0	-10.7	263
40	208.3	-32.8	354
40	200.8	-47.1	405
60	175.6	4.0	168
60	190.4	-76.8	516
60	172.8	-66.6	456
80	148.3	-52.3	371
80	155.1	-45.5	350
80	146.8	-57.3	390

③宇都らの方法

H (cm)	K (mm)	R_d (tf)
20	10.0	301.7
20	10.0	301.7
20	10.5	316.8

40	13.2	398.3
40	13.2	398.3
40	13.0	392.2
40	13.2	398.3
40	12.2	368.1
60	12.7	383.2
60	12.5	377.1
60	13.2	398.3
60	12.7	383.2
60	12.8	386.2
80	12.5	377.1
80	12.3	371.1
80	12.2	368.1
80	12.5	377.1
80	12.4	374.1

(2) 軽打試験 $W_H=1.03 \text{ tf}$

Bハンマ打ち込み杭 PHC杭 $\phi 500$

H (cm)	K (mm)	R (tf)
10	0.43	13.0
20	0.62	18.7
30	0.74	22.3
40	0.95	28.7
50	1.14	34.4
60	1.24	37.4
70	1.36	41.0
80	1.63	49.2
90	1.94	58.5
100	2.07	62.5
110	2.37	71.5
120	2.58	77.8
130	2.52	76.0
140	2.89	87.2
150	2.86	86.3
160	3.16	95.3
170	3.10	93.5
180	3.24	97.8
190	3.57	107.7
200	3.66	110.4

油圧パイルハンマ Cハンマ ($W_H=6.5 \text{ tf}$)

鋼管杭 $\phi 600$

(1) 打ち込み試験

① Gobleらの方法

H (cm)	F_1 (kgf/cm ²)	F_2 (kgf/cm ²)	v_1 (m/sec)	v_2 (m/sec)	R (tf)
30	632.0	403.1	0.3	-0.3	144
30	852.5	625.7	0.7	-0.1	201
30	829.5	577.5	0.8	-0.1	200
60	1142.3	661.5	1.5	0.4	252
60	1071.0	653.0	1.5	0.5	239
60	1081.5	667.7	1.3	0.1	251

90	1348.1	619.5	1.7	0.5	275
90	1312.5	588.0	2.0	0.8	263
90	1257.8	560.7	2.0	0.8	262
120	1518.3	564.8	2.0	0.7	291
120	1499.3	632.0	2.0	0.9	288
120	1509.9	472.4	2.4	1.0	292

②Scanlanらの方法

H (cm)	F (kgf/cm ²)	x (G)	R (tf)
30	577.5	-10.4	158
30	758.0	-13.7	208
30	508.2	-11.2	145
60	678.2	-18.7	204
60	642.5	-16.8	191
60	671.9	-24.8	221
90	585.8	-28.7	213
90	678.2	-36.0	254
90	527.1	-22.5	182
120	720.2	-48.3	299
120	779.0	-42.8	297
120	743.4	-37.1	272

油圧パイルハンマ Cハンマ(W_H=6.5tf) PHC杭φ500

(1) 打ち込み試験

①Gobleらの方法

H (cm)	F ₁ (kgf/cm ²)	F ₂ (kgf/cm ²)	v ₁ (m/sec)	v ₂ (m/sec)	R (tf)
10	66.7	56.7	0.2	-0.1	77
10	88.0	81.5	0.6	0.1	113
10	68.0	64.7	0.3	-0.1	88
30	118.3	89.5	0.6	0.0	147
30	114.7	92.8	0.3	-0.8	174
30	114.7	87.5	0.5	-0.6	166
60	155.1	136.7	0.9	0.0	206
60	151.2	138.0	1.1	0.0	213
60	152.7	136.4	0.8	-0.3	214
90	200.0	164.7	1.2	-0.3	276
90	201.1	169.1	1.2	-0.1	270
90	193.6	166.3	1.2	-0.4	276
120	225.9	183.9	1.4	-0.2	305
120	218.7	178.8	1.3	-0.4	306
120	221.9	187.9	1.5	0.0	301

②Scanlanらの方法

H (cm)	F (kgf/cm ²)	x (G)	R (tf)
30	109.5	-13.7	171
30	110.0	-19.4	195
30	110.7	-17.3	188

60	142.7	-22.8	244
60	146.8	-24.2	254
60	144.3	-22.8	246
90	178.8	-33.1	324
90	179.5	-27.0	300
90	173.1	-18.9	260
120	187.1	-9.9	238
120	188.3	-49.1	400
120	192.0	-43.5	381

③宇都らの方法

H (cm)	K (mm)	R (tf)
30	7.3	220.3
30	7.8	235.3
30	8.0	241.4
30	7.3	220.3
30	7.7	232.3
60	10.6	319.8
60	10.7	322.8
60	10.2	307.7
60	10.9	328.9
60	10.3	310.8
90	13.2	398.3
90	13.8	416.4
90	13.6	410.3
90	12.9	389.2
90	13.0	392.2
120	13.5	407.3
120	14.1	425.4
120	13.8	416.4
120	13.7	413.3
120	13.8	416.4

(2) 軽打試験 $W_H=1.03\text{tf}$

Cハンマ打ち込み杭		PHC杭 $\phi 500$
H (cm)	K (mm)	R (tf)
10	0.30	9.05
20	0.44	13.3
30	0.74	22.3
40	0.89	26.9
50	0.92	27.8
60	1.00	30.2
70	1.33	40.1
80	1.39	41.9
90	1.75	52.8
100	1.75	52.8
110	1.85	55.8
120	2.30	69.4
130	2.19	66.1

140	2.33	70.3
150	2.67	80.6
160	2.67	80.6
170	2.52	76.0
180	2.92	88.1
190	2.84	85.7
200	3.14	94.7

油圧パイルハンマ Dハンマ($W_H=6.5$ tf) 鋼管杭 $\phi 600$

(1) 打ち込み試験

①Gobleらの方法

H (cm)	F_1 (kgf/cm ²)	F_2 (kgf/cm ²)	v_1 (m/sec)	v_2 (m/sec)	R (tf)
20	1003.7	583.7	1.7	0.2	251
20	987.0	609.0	1.8	0.2	256
20	989.0	609.0	1.8	0.2	252
30	1190.7	489.3	2.3	0.4	279
30	1152.9	510.2	2.2	0.7	259
30	1127.7	491.3	2.2	0.5	267
60	1509.9	170.0	3.0	0.9	291
60	1533.0	182.6	3.0	0.6	310
60	1560.3	184.8	3.0	0.9	304
100	1936.1	69.2	3.8	1.6	336
100	1902.5	65.0	3.8	1.6	331
100	1913.0	10.4	3.8	1.7	329
120	2156.6	-21.0	4.0	1.9	351
120	2047.5	35.6	4.1	1.6	357
120	2074.7	10.4	4.1	1.6	358

②Scanlanらの方法

H (cm)	F (kgf/cm ²)	x (G)	R (tf)
30	495.5	-13.3	148
30	613.2	-22.8	202
30	676.2	5.5	134
60	816.9	-44.8	311
60	840.0	-45.2	317
60	247.7	-78.8	283
100	753.9	-22.2	231
100	835.7	-40.8	303
100	684.6	-32.5	246
120	898.7	14.5	157
120	663.5	-23.4	215
120	678.2	-53.2	304

③宇都らの方法

H (cm)	K (mm)	R (tf)
30	8.0	241.4
30	8.5	256.5
30	8.0	241.4
30	8.5	256.5

30	9.0	271.5
60	11.0	331.9
60	11.0	331.9
60	11.0	331.9
60	11.0	331.9
60	11.0	331.9
100	13.0	392.2
100	12.5	377.1
100	13.0	392.2
100	13.0	392.2
100	12.5	377.1
120	13.0	392.2
120	13.5	407.3
120	14.0	422.4
120	13.0	392.2
120	14.0	422.4

杭頭最大変位と各動的支持力算定値

① 埋設杭 NO.3 鋼管杭 $\phi 400$ $W_H = 1.03$ tf

Scanlanらの方法		Gobleらの方法		宇都らの方法	
Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)
0.8	37	0.8	24	0.6	22.8
0.9	5	0.9	29	1.4	38.1
1.0	6	1.0	29	1.6	60.9
1.0	15	1.0	23	2.2	64.7
2.3	27	2.3	37	2.0	76.2
2.3	9	2.3	39	2.5	76.2
3.3	36	3.3	38	2.5	76.2
4.5	24	4.5	59	3.6	99.0
5.3	10	5.3	71	4.0	114.2
				4.5	133.3

②埋設杭 NO.4 鋼管杭 $\phi 400$ $W_H = 1.03$ tf

Scanlanらの方法		Gobleらの方法		宇都らの方法	
Sdmax(mm)	Rd(TF)	Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)
1.0	-3	1.0	41	0.47	4.19
1.6	55	1.6	45	0.67	22.8
2.4	32	2.4	75	0.73	24.4
				1.13	34.6
				1.27	34.6
				1.24	32.0
				1.60	48.4
				1.87	51.0
				1.91	56.0
				2.13	60.9

③Aハンマ($W_H=6.5\text{tf}$) 鋼管杭 $\phi 600$

Scanlanらの方法		Gobleらの方法		宇都らの方法			
Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)
8.7	187	3.2	149	0.56	17.4	8.2	186.5
8.8	138	3.0	155	1.18	36.7	8.6	186.5
9.2	137	2.5	154	1.53	47.6	8.4	195.8
12.7	231	8.7	242	2.57	79.9	8.9	202.0
12.2	284	8.8	231	2.64	82.1	9.5	211.3
14.4	263	9.2	237	3.06	95.1	14.6	248.6
17.4	294	12.7	280	3.61	112.2	14.3	248.6
16.6	168	12.2	282	3.61	112.2	14.0	248.6
16.3	100	14.4	293	4.03	125.3	13.4	242.4
20.1	162	17.4	314	4.31	134.0	14.0	248.6
20.7	233	16.6	334	4.58	142.3	17.3	264.2
20.2	294	16.3	326	4.58	142.3	18.0	273.5
		20.1	337	4.86	151.0	17.8	267.3
		20.7	328	5.07	157.6	17.5	258.0
		20.2	337	5.69	176.8	17.3	267.3
						20.8	273.5
						21.0	279.7
						20.5	279.7
						21.0	295.3
						20.7	285.9

④Aハンマ($W_H=6.5\text{tf}$) PHC杭 $\phi 500$

Scanlanらの方法		Gobleらの方法		宇都らの方法			
Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)
8.5	198	4.5	186	1.07	32.3	9.3	256.4
8.8	179	5.3	191	1.57	47.4	6.6	190.1
9.1	180	5.0	185	1.86	56.1	7.5	196.1
12.5	285	4.9	213	1.79	54.0	8.2	217.2
12.5	265	7.0	240	1.43	43.1	7.8	232.3
12.2	286	7.0	240	2.29	69.1	11.9	331.9
15.8	386	8.0	287	2.79	84.2	11.4	319.8
15.1	245	7.8	289	2.86	86.3	11.5	325.9
15.5	232	9.7	264	2.86	86.3	11.8	331.9
17.2	495	8.5	247	3.07	92.6	11.6	325.9
17.6	438	8.8	255	3.29	99.3	14.5	362.1
18.1	436	9.1	253	3.50	105.6	14.2	362.1
		12.5	323	3.79	114.3	14.3	362.1
		12.5	359	3.64	109.8	14.3	362.1
		12.2	364	3.64	109.8	14.2	362.1
		15.8	355			17.1	401.3
		15.1	389			15.9	377.1
		15.5	369			16.7	392.2
		17.2	336			15.9	371.1
		17.6	317			16.7	401.3
		18.1	349				

⑤ Bハンマ($W_H=7.0\text{tf}$) 鋼管杭 $\phi 600$

Scanlanらの方法		Gobleらの方法		宇都らの方法			
Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)
15.5	190	8.8	229	0.78	24.2	15.2	245.5
14.3	173	8.9	228	1.41	43.8	15.2	242.4
14.3	153	9.0	231	1.72	53.5	15.6	245.5
21.7	160	15.5	223	1.72	53.5	15.2	226.9
22.6	146	14.3	223	2.03	63.1	16.0	226.9
22.7	195	14.3	219	2.34	72.7	21.9	282.8
25.6	195	21.7	233	2.50	77.7	21.5	276.6
25.4	213	22.6	220	3.13	97.3	22.3	279.7
25.8	161	22.7	229	3.59	111.6	22.0	276.6
31.1	167	25.6	246	4.22	131.2	22.2	279.7
31.8	243	25.4	253	3.75	116.6	25.6	295.3
32.8	230	25.8	257	4.22	131.2	26.6	313.9
		31.1	263	4.53	140.8	26.5	294.8
		31.8	274	4.53	140.8	26.6	313.9
		32.8	282			26.5	307.7
						-	348.1
						31.5	348.1
						31.0	338.8
						-	345.0
						-	335.7

⑥ Bハンマ($W_H=7.0\text{tf}$) PHC杭 $\phi 500$

Scanlanらの方法		Gobleらの方法		宇都らの方法			
Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)	Sdmax(mm)	Rd(tf)
11.2	297	11.2	284	0.43	13.0	10.0	301.7
12.0	274	12.0	276	0.62	18.7	10.0	301.7
10.4	281	10.4	282	0.74	22.3	10.5	316.8
16.1	263	16.1	370	0.95	28.7	10.0	301.7
16.7	354	16.7	367	1.14	34.4	9.5	286.6
16.5	405	16.5	353	1.24	37.4	15.7	398.3
16.5	168	16.5	365	1.36	41.0	16.2	398.3
19.2	516	19.2	355	1.63	49.2	15.0	392.2
19.4	456	19.4	359	1.94	58.5	15.6	398.3
26.2	371	26.2	373	2.07	62.5	14.0	368.1
26.5	350	26.5	375	2.37	71.5	18.7	383.2
27.8	390	27.8	376	2.58	77.8	19.3	377.1
				2.52	76.0	20.3	398.3
				2.89	87.2	19.3	383.2
				2.86	86.3	19.4	386.2
				3.16	95.3	23.7	377.1
				3.10	93.5	21.5	371.1
				3.24	97.8	24.9	368.1
				3.57	107.7	22.7	377.1
				3.66	110.4	22.1	374.1

埋設杭の支持力管理手法に関する
実験

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2307号
昭和61年3月(1986)

施工研究室 室長 嶋津晃臣
研究員 塚田幸広
下坪賢一

要 旨

埋設杭の簡易な支持力確認手法を見出すことを目的として、軽重量ハンマ打撃による軽打法(衝撃載荷試験)を提案し、実大杭に対する適用性を調べるために深層土層実験及びフィールド実験を行なった。その実験においては、杭頭打撃力、杭頭加速度、杭頭変位などを打撃エネルギーを変えて測定した。その結果、杭頭打撃力、加速度、変位などの動的情報を波動理論に基づく各種方法に適用させることによって動的支持力の算定の手がかりをつかむとともに静的載荷試験における荷重～沈下曲線と対応できた。

キーワード：埋設杭，支持力，動的試験，波動理論

郵便はがき

40円
切手
はがき
を貼る

305-□□

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地
建設省土木研究所
機械施工部施工研究室 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第2307号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏名

