

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 4107 号

土木研究所資料

回転杭の群杭効果に関する実験的研究

平成**20**年**3**月

独立行政法人土木研究所
構造物研究グループ基礎チーム

Copyright © (2008) by P.W.R.I.

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

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事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、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

回転杭の群杭効果に関する実験的研究

構造物研究グループ（基礎） 上席研究員 中谷 昌一
主任研究員 竹口 昌弘
交流研究員 井落 久貴*
交流研究員 横幕 清

* 交流研究員在職期間：平成17年4月～平成19年3月

要 旨

回転杭とは、杭先端に羽根（鋼板翼）を設けた鋼管杭を回転させることにより、地盤中に貫入させる杭であり、道路橋の基礎として用いられるのは、杭径 $\phi 400\text{mm}$ ～ $\phi 1,200\text{mm}$ 、羽根外径が杭径の1.5倍もしくは2倍のものである。これまで、回転杭の単杭における鉛直支持力特性については、載荷試験などで明らかにされているが、群杭での鉛直支持力特性に関する知見は少ない。

そこで、回転杭の配置間隔をパラメータとした遠心加速度場での模型鉛直載荷実験を行い、先端支持力に及ぼす群杭効果の影響を検討した。その結果、杭中心間隔が杭径の3倍以上あれば、群杭の影響は比較的小さく、設計上、群杭の極限支持力を単杭の極限支持力を杭本数倍したものをを用いることが可能であることを確認した。

キーワード：回転杭, 杭先端支持力, 群杭効果

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 試験概要	2
2.2 杭模型の諸元	4
2.3 地盤作成および杭模型の設置	6
2.4 試験ケース	12
2.5 載荷方法	13
2.6 試験項目とデータ処理方法	15
3. 試験結果および考察	18
3.1 試験結果の再現性および杭周面抵抗の大きさ	18
3.2 単杭および群杭の荷重-変位関係	20
3.3 杭位置による荷重-変位関係の相違	24
3.4 群杭の影響に関する考察	28
4. まとめ	29
参考文献	30
付属資料	
I. 土質試験結果	31
II. 試験のシミュレーション解析結果	46

1. はじめに

回転杭とは、杭先端に羽根と呼ばれる鋼板翼を設けた鋼管杭を回転させることにより、地盤中に貫入させる杭で、道路橋の基礎に用いられるものは杭径 $\phi 400\text{mm}$ 以上、羽根外径が杭径の1.5倍もしくは2倍のものである。回転杭は、杭先端の羽根により広い先端面積を有するため、大きな先端押込み支持力とアンカー効果による引抜き抵抗力が得られる。また、施工時における騒音・振動が小さい、掘削残土の排出がない、斜杭を比較的精度よく容易に施工できるなどの特徴を有している。

道示Ⅳには、杭の中心間隔を杭径の2.5倍、すなわち杭の純間隔を杭径の1.5倍以上確保すれば、群杭としての影響が少なく、群杭の軸方向および軸直角方向の抵抗力は、単杭の抵抗力を杭本数倍したものをを用いることができると解説されている¹⁾。しかし、回転杭の場合、杭中心間隔が杭径の2.5倍、純間隔にして杭径の1.5倍あったとしても、杭先端羽根部での杭純間隔は1.5倍未満となる。この場合、杭先端支持力については、群杭としての影響を無視できなくなる可能性がある。

道路橋基礎において、杭先端支持力に対する群杭の影響が最も大きく懸念される状況として、杭周面地盤が軟弱あるいは地震時に液状化を生じるために杭周面抵抗力が期待できず、杭頭支持力の多くを杭先端支持力が占める場合が挙げられる。

これまで、回転杭単杭での鉛直支持力特性については、実地盤に実大杭を設置して行われた載荷試験や模型実験などで研究され、支持力推定式などが整備されているが、群杭での鉛直支持力特性に関する知見は少ない。さらに、杭軸方向に杭径が一定である従来の杭を対象とした場合でも、群杭の影響に関する研究成果は極めて少ない。

本研究では、羽根部（杭先端部）の外径が杭径の2倍である模型を用い、杭の中心間隔をパラメータとして遠心加速度場での鉛直載荷試験を実施した²⁾³⁾⁴⁾。試験は、杭先端支持力に対する群杭の影響を確認するために、杭周面抵抗力が極力小さくなるような地盤を準備して行った。試験の結果、群杭では単杭と異なる先端支持力特性を示すと考えられるものの、設計上は、杭の中心間隔が杭径の3倍（杭先端径の1.5倍、杭先端部の純間隔が杭径の1倍）以上であれば、群杭の影響は比較的小さく、群杭の極限支持力として、単杭の極限支持力を杭本数倍したものをを用いることが可能であることを確認した。

なお、本研究成果は、杭基礎設計便覧（平成18年度改訂版）⁵⁾に反映されている。

2. 試験方法

2.1 試験概要

試験は、土槽内に杭模型および地盤を設置し、これを 30G の遠心加速度場において杭頭部に鉛直荷重を静的に作用させる方式とした。使用施設は、土木研究所が保有する中型遠心力载荷装置（図-2.1）である。

杭先端支持力に対する群杭の影響を試験において把握するためには、杭周面を地盤中ではなく気中に露出した状態として杭周面抵抗力の影響を排除する方法が考えられる。しかし、地盤中に設置された実際の杭基礎では、支持地盤の上方に堆積する杭周面地盤の重量により支持地盤の変形を拘束する効果があるが、上記の方法ではこれを再現することができない。支持地盤上面に上層地盤によるものと同等の圧力を強制的に加えて拘束効果を付与する方法や、杭を地盤に根入れしつつも、杭周面に摩擦低減材料を塗布するあるいは 2 重管方式とする等の方法も考えられたが、いずれも実施が困難であると判断されたため、杭を設置した後に周面地盤を空中落下方式で緩めに作成し、特に締固め等を行わないことで、杭周面抵抗が極力小さくなるようにした。図-2.2 に土槽内の杭模型および地盤の設置状況を示す。土槽の寸法は、長さ 800mm×高さ 605mm×奥行き 500mm である。試験地盤は、杭先端下面より下方に厚さ 200mm の乾燥砂を相対密度 90%で設け、上層の杭周面部には厚さ 180mm の乾燥砂を相対密度 60%で設けることにした。

試験ケースは、杭中心間隔の異なる 3 列×3 列の 9 本群杭を 6 ケース、比較のための単杭の 1 ケースを併せた合計 7 ケースである。杭模型は、30G の遠心加速度場における相似則を満足するように、実大の 1/30 の縮尺とした。すなわち、杭模型の寸法は、杭径 $D_p=10.5\text{mm}$ 、杭先端の羽根外径 $D_w=21.0\text{mm}$ であり、実大換算では、杭外径 $D_p=315\text{mm}$ 、羽根外径 $D_w=630\text{mm}$ となる。各杭模型には、杭頭部および杭先端部の軸力を評価するためにひずみゲージを貼り付けた。

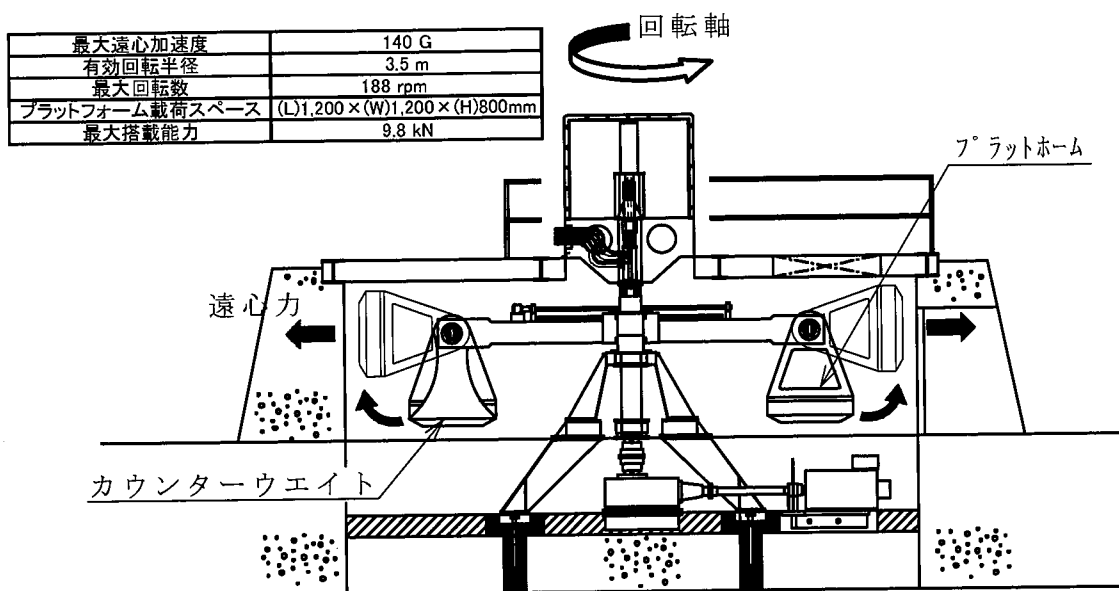


図-2.1 遠心力載荷装置

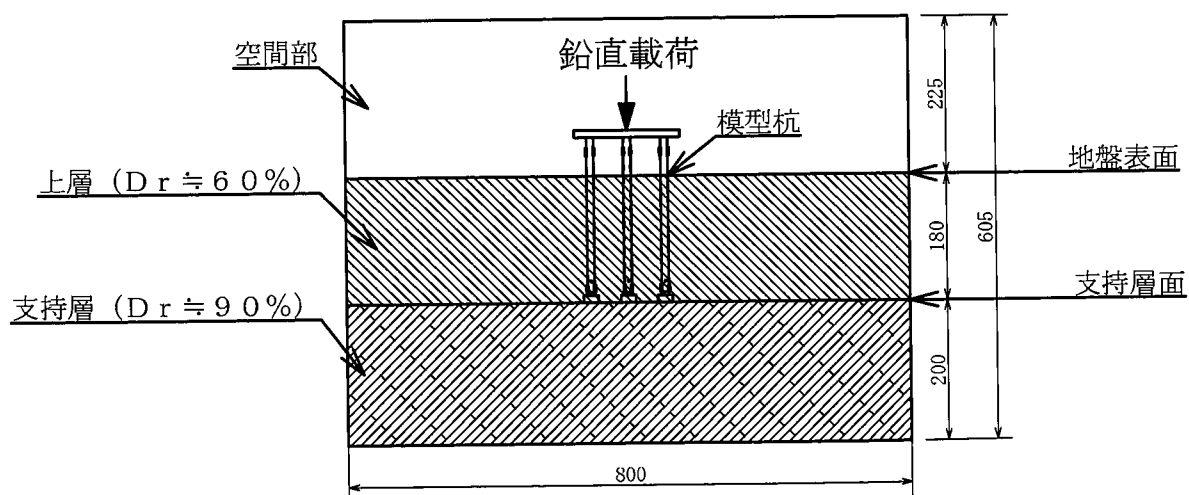


図-2.2 土槽内の杭模型および地盤の設置状況

2.2 杭模型の諸元

実験に使用した杭模型の諸元を表-2.1 に、概要図を図-2.3 に示す。杭模型は、30G の遠心加速度場における相似側を満足するように、実大の 1/30 の縮尺とした。すなわち、杭一般部は、外径 $D_p = 10.5\text{mm}$ 、板厚 $t=1.5\text{mm}$ のステンレス製 (SUS304) パイプ、杭先端の羽根部は外径 $D_w = 21.0\text{mm}$ (充実断面) の真鍮製とした。長さは 235mm である。実大換算では、杭一般部の外径 $D_p = 315\text{mm}$ 、羽根部の外径 $D_w = 630\text{mm}$ 、長さ 7,050mm となる。なお、模型材料の調達の都合上、板厚は相似側を満足しておらず、実大換算で $t=45\text{mm}$ となる。

各杭模型には、4 枚のひずみゲージを杭の外表面に貼り付けた。貼り付け位置は、杭一般部の杭頭部近傍および杭先端部近傍の 2 断面とし、各断面あたり円周方向に 180 度の間隔で 2 方向とした。杭先端部近傍に貼り付けたひずみゲージのケーブルは、ゲージ貼り付け位置から円周方向に 90 度、軸方向に 10mm の位置に設けた孔から杭内へ送り、模型杭の内部を通して杭頭部から引き出すことにし、断面欠損が計測値に与える影響が最小限となるよう配慮した。また、各杭模型の頭部には、杭頭高さを微調整できる構造の治具を取り付け、群杭の試験ケースにおいて、各杭頭と鉛直載荷ジャッキ先端の載荷板とが均等に接触できるように配慮した。

表-2.1 模型杭の諸元

	模型杭	実大杭
材質	SUS304	SKK400
杭外径 D_p (mm)	10.5	315
板厚 t (mm)	1.5	45
羽根外径 D_w (mm)	21	630
弾性係数 E (N/mm ²)	1.97E+05	2.00E+05
杭長(先端羽根部含む)	235	7,050
実大／模型	1 / 30	1

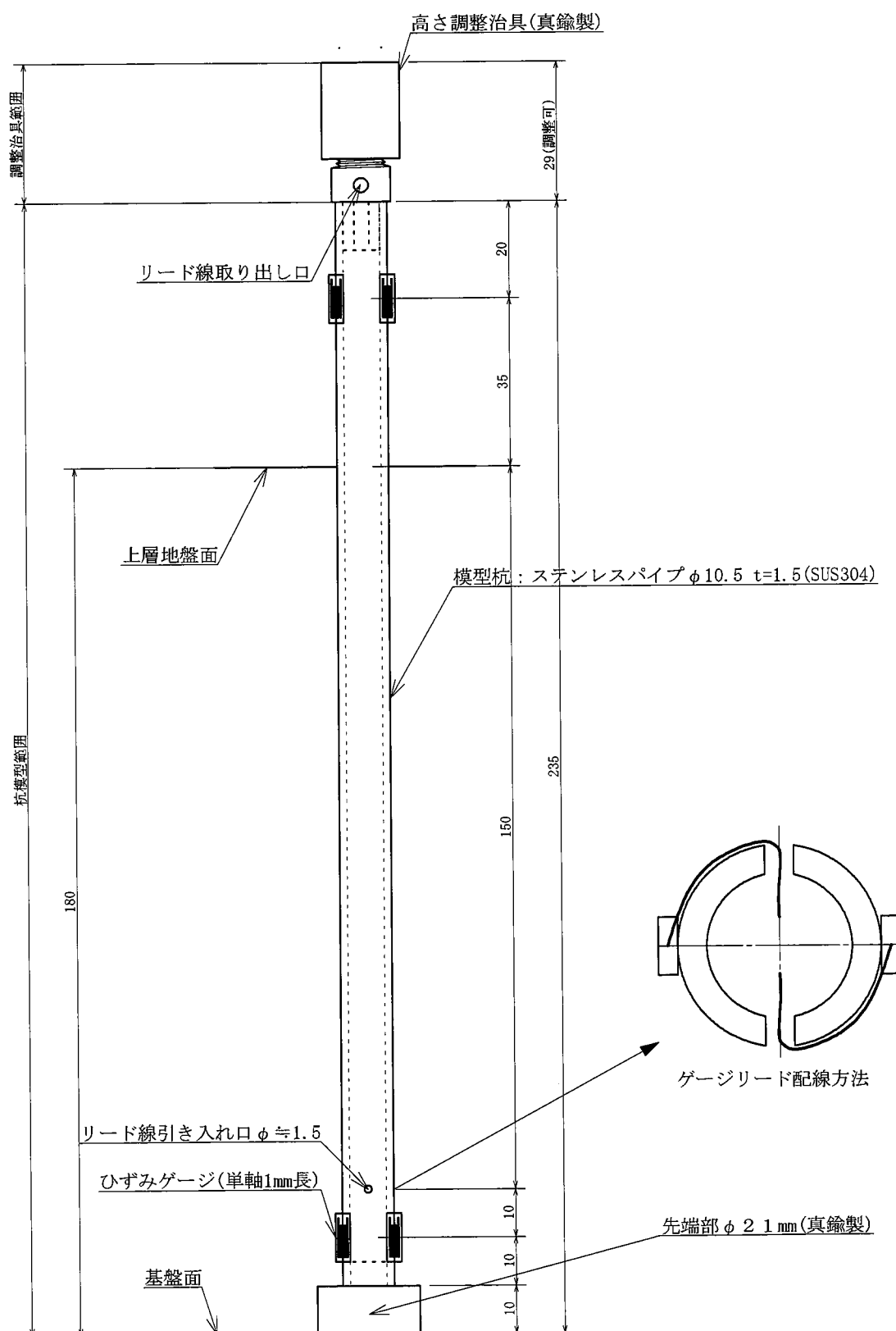


図-2.3 杭模型

2.3 地盤作成および杭模型の設置

(1) 地盤作成

試験地盤の仕様を表-2.2 に示す。試験地盤は、東北珪砂 7 号 ($D_{50} = 0.166 \text{ mm}$) を用いて、長さ 800mm×高さ 605mm×奥行き 500mm の土槽内に作成した。試験地盤の作成方法は、各層において目標の相対密度が得られるように予備試験により決定した。

地盤作成および杭模型の設置順序は次のとおりである。まず、厚さ 100mm の層をバイブレータを用いた振動締固めにより相対密度 90% を目標に作成し、これを 2 度繰り返して厚さ 200mm の支持地盤を作成する。次に、支持地盤上の所定の平面位置に杭模型を配置する。そして、空中落下方式（スリット幅 3mm、落下高さ 700mm）により相対密度 60% を目標に厚さ 180mm の上層部を作成する。

表-2.3 に作成地盤の相対密度を、表-2.4、2.5 には試験に使用した東北珪砂 7 号の物理試験結果および三軸圧縮試験結果を示す。試験ケースについては後述する。

表-2.2 試験地盤の仕様

	支持地盤	上層
使用材料	東北珪砂 7 号	
相対密度（目標）	90%	60%
層厚	200mm	180mm
作成方法	振動締固め方式 (層厚 100mm 毎に締固め)	空中落下方式

表-2.3 作成地盤の相対密度

試験 CASE	支持地盤			上層(ハ'ラツキ:%)
	下部	上部	平均(ハ'ラツキ:%)	
目標値	90.0			60.0
1-1	90.8	89.3	90.1(100.1%)	61.5(102.5%)
1-2	90.9	89.5	90.2(100.2%)	59.8 (99.7%)
1-3	90.1	89.4	89.8 (99.8%)	60.0(100.0%)
2	89.4	90.5	90.0(100.0%)	60.5(100.8%)
3	89.6	89.6	89.6 (99.6%)	60.4(100.7%)
4-1	89.7	90.7	90.2(100.2%)	62.2(103.7%)
4-2	89.4	89.5	89.5 (99.4%)	61.2(102.0%)
4-3	89.4	89.9	89.7 (99.7%)	60.6(101.0%)
5	90.0	89.4	89.7 (99.7%)	58.9 (98.2%)
6	89.2	89.3	89.3 (99.2%)	59.1 (98.5%)
7	90.2	89.4	89.8 (99.8%)	60.2(100.3%)
平均	89.9	89.7	89.8 (99.8%)	60.4(100.7%)

表-2.4 物理試験結果

材 料		東北珪砂 7 号
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.640
含水比 ω (%)		0.20
粒 度	礫分含有率 (%)	0.0
	砂分含有率 (%)	98.0
	シルト分含有率 (%)	2.0
	粘土分含有率 (%)	
	均等係数 U_c	1.64
	曲率係数 U_c'	0.957
最小乾燥密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)		1.256
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)		1.607

表-2.5 圧密排水(CD)三軸圧縮試験結果

供試体 No.		相対密度 60%			相対密度 90%		
		1	2	3	1	2	3
圧密応力 σ_c (kN/m ²)		35	49	98	35	49	98
初期状態	乾燥密度 ρ_{d0} (g/cm ³)	1.446	1.446	1.446	1.563	1.563	1.563
	間隙比 e_0	0.826	0.826	0.826	0.689	0.689	0.689
圧密後	乾燥密度 ρ_{dc} (g/cm ³)	1.456	1.459	1.463	1.572	1.575	1.581
	間隙比 e_c	0.814	0.809	0.804	0.680	0.676	0.670
主応力差 最大時	圧縮強さ ($\sigma_1 - \sigma_3$) _{max} (kN/m ²)	133	176	349	165	247	491
	軸ひずみ ε_f (%)	2.2	2.6	3.1	3.8	3.5	3.7
	体積ひずみ V_f (%)	-0.739	-0.872	-0.803	-2.095	-1.831	-1.547
強度定数	せん断抵抗角 ϕ_{cd} (°)	39.3			45.4		
	粘着力 c_{cd} (kN/m ²)	2.38			0.00		
変形係数 E_{50} (MN/m ²)		15.3	20.5	37.5	13.8	17.7	37.1

(2) 杭模型の設置

杭模型は、支持地盤の作成後に固定治具等を用いて所定の中心間隔で鉛直に設置した。杭模型の設置状況を写真-2.1、図-2.4、2.5に示す。また、杭模型設置および地盤作成の完了状況を写真-2.2、写真-2.3に示す。

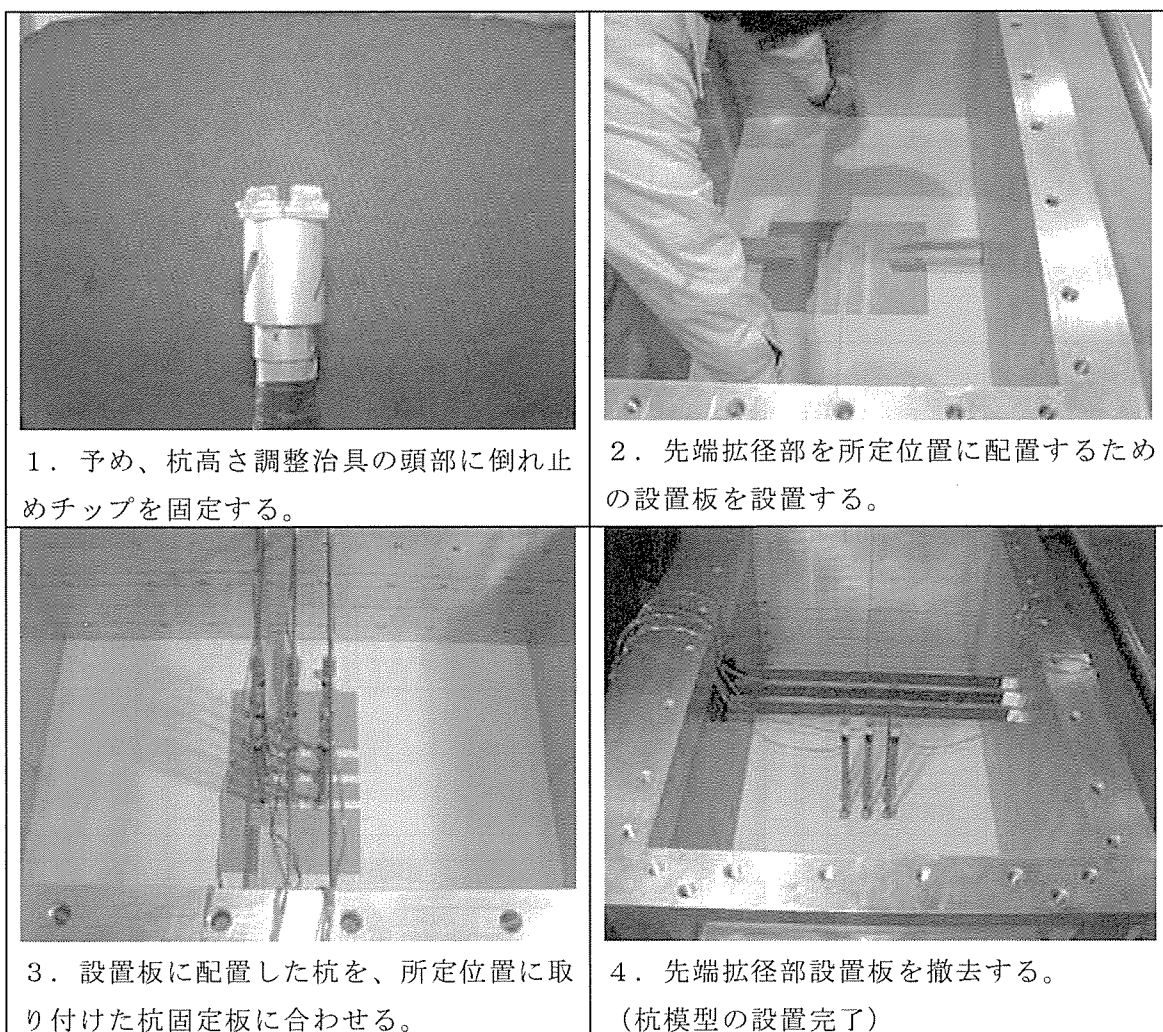


写真-2.1 杭模型の設置方法

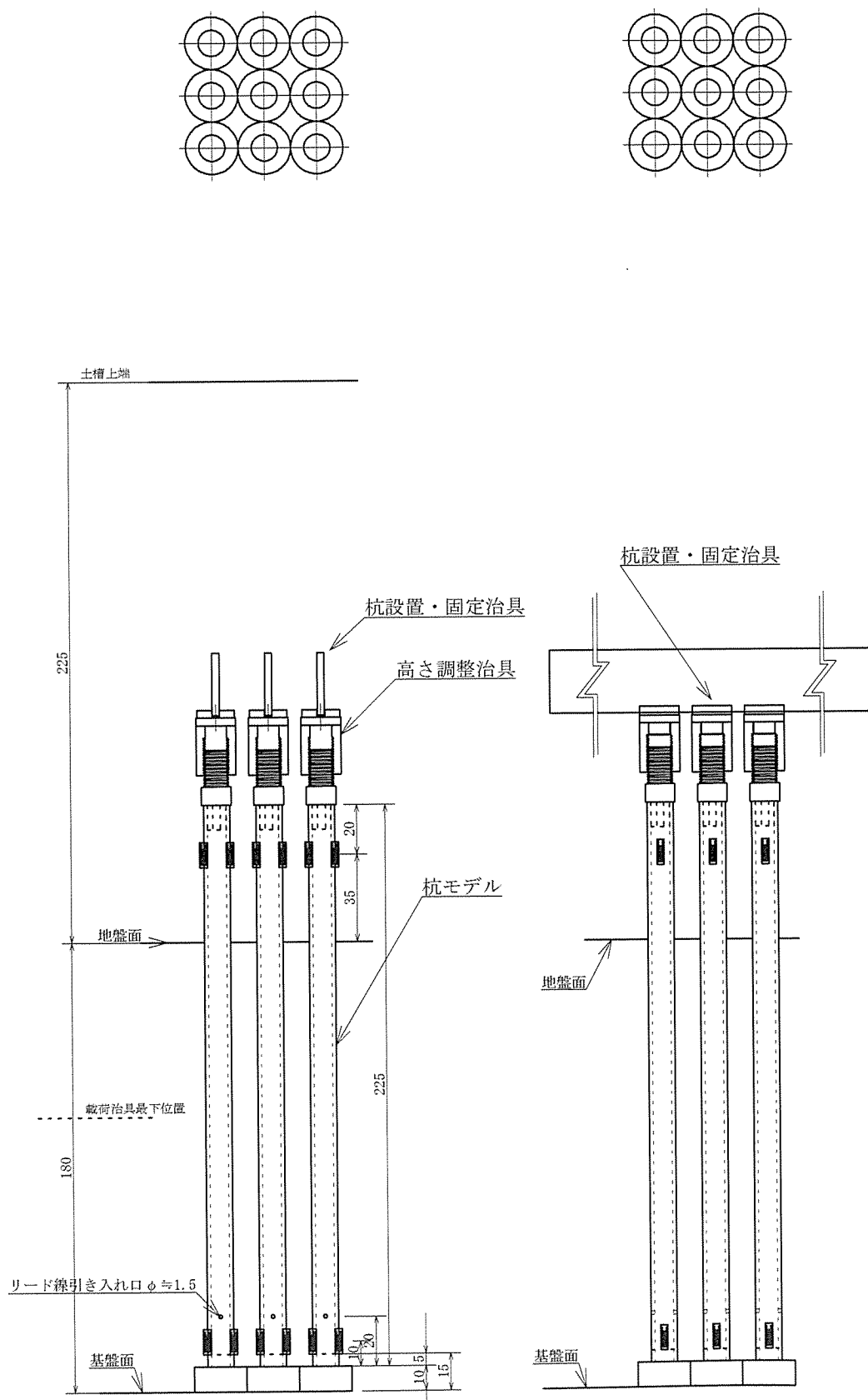
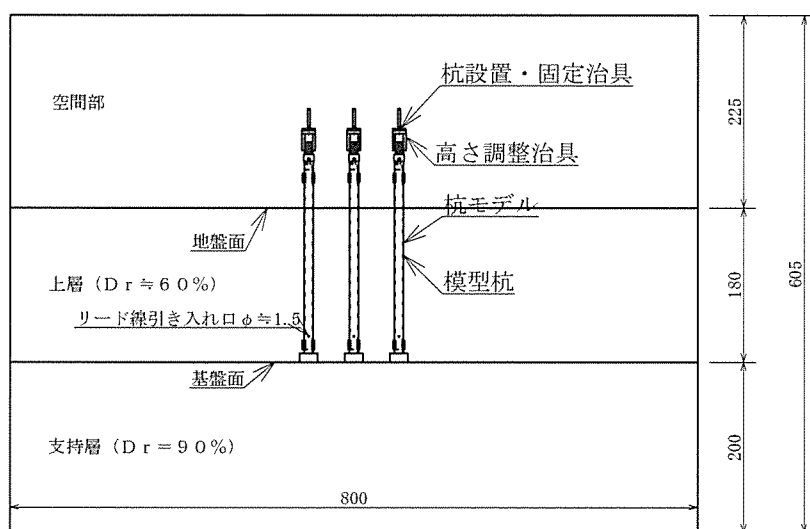
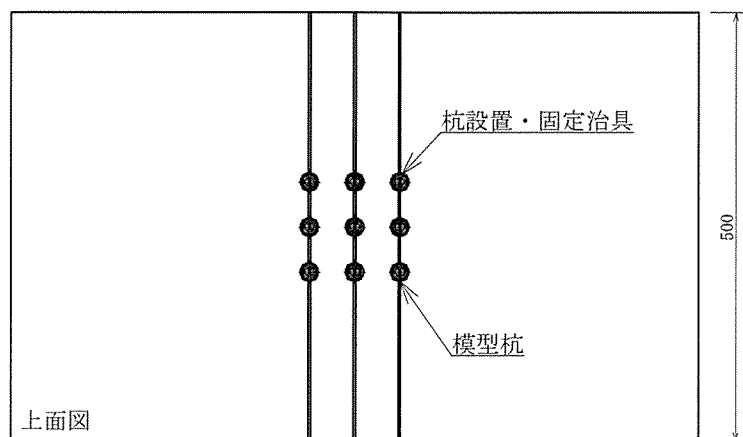
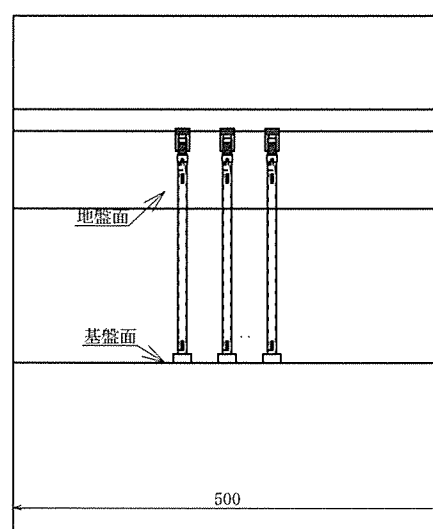


図-2.4 杭模型固定治具取り付け概要図



正面図



側面図

図-2.5 杭模型設置概要図

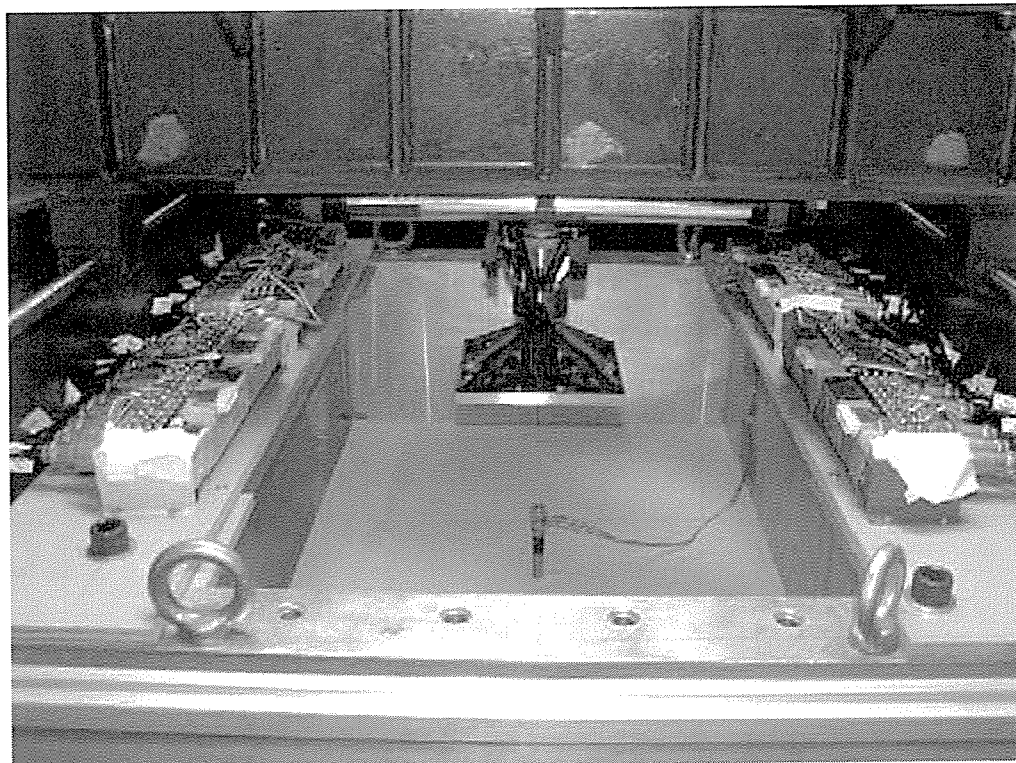


写真-2.2 模型セット完了状況 (CASE 1 / 単杭)

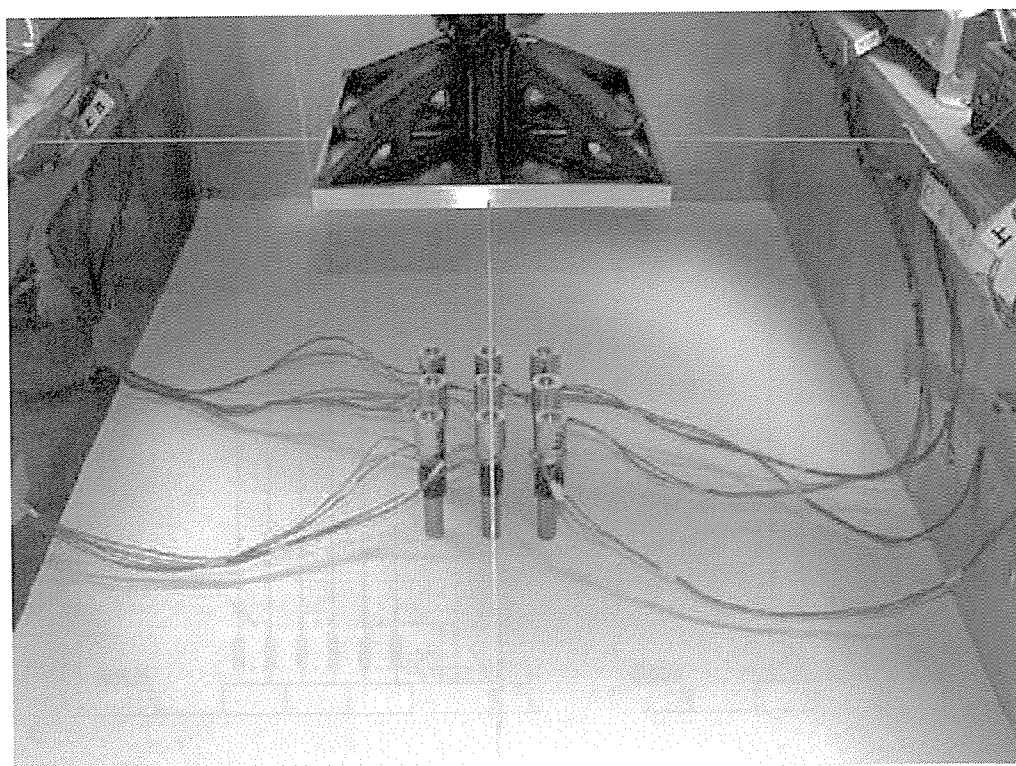


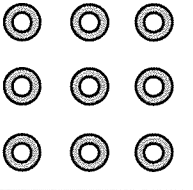
写真-2.3 模型セット完了状況 (CASE 4 / 群杭)

2.4 試験ケース

表-2.6 に試験ケースの一覧を示す。CASE 2～7 は、杭の中心間隔をパラメータとした 3 列×3 列=9 本の群杭模型であり、比較のために単杭模型（CASE 1-1～1-3）でも試験を行った。本試験は、杭先端支持力に対する群杭の影響を把握するために計画したものであるが、杭の中心間隔と杭先端径との関係に着目すると、道示Ⅳの解説に従って杭の中心間隔を杭径の 2.5 倍確保して配置されたものに相当するのは、CASE 6（杭中心間隔 $5 D_p = 2.5 D_w$ ）である。

なお、試験の再現性を確認する目的で、CASE 1（単杭）と CASE 4（群杭；中心間隔 $3.0 D_p$ ）については、試験数をそれぞれ 3 体としている。

表-2.6 試験ケース一覧

試験 CASE	模型杭の配置間隔					杭本数・配置
	杭中心間隔			羽根部純間隔		
	実寸	杭径比	羽根径比	杭径比	羽根径比	
1-1	—	—	—	—	—	1 本 
1-2						
1-3						
2	20mm	2.0 D _p	1.0 D _w	0.0 D _p	0.0 D _w	9 本=3×3 列 
3	25mm	2.5 D _p	1.25 D _w	0.5 D _p	0.25 D _w	
4-1	30mm	3.0 D _p	1.5 D _w	1.0 D _p	0.5 D _w	
4-2						
4-3						
5	40mm	4.0 D _p	2.0 D _w	2.0 D _p	1.0 D _w	
6	50mm	5.0 D _p	2.5 D _w	3.0 D _p	1.5 D _w	
7	60mm	6.0 D _p	3.0 D _w	4.0 D _p	2.0 D _w	

2.5 載荷方法

土槽上にセットした図-2.6、表-2.7 に示す中型遠心力載荷装置専用の XYZ 三方向載荷装置を用いて、30G の遠心加速度場において、載荷速度 1.0 mm/min の一定速度で鉛直下向きに加力した。

試験データの計測は、中型遠心力載荷装置に付属する計測システム（遠心力載荷試験用ソフトウェア）による自動計測とし、サンプリング間隔は 1sec とした。遠心力載荷試験用ソフトウェアは、1 台で最大 64 チャンネルのシングルコンディショナと 16 ビット A-D 変換器を内蔵しており、耐 G 型アンプユニット（MCA-164AS7）用計測システムである。本実験におけるデータ処理に関する計測システムの設定条件を表-2.8 に示す。

本実験で実施した具体の載荷手順は以下のとおりである。なお、時間は全て相似側を考慮しない実時間スケールである。

【載荷手順】

（1）予備回転および杭頭レベルの調整

- ①遠心力載荷装置への土槽、載荷装置等の設置が完了した段階で遠心力を 30G まで与える（予備回転）。この際、鉛直載荷用ジャッキと杭頭と間に十分な間隔を確保しておく。
- ②遠心力が 30G の状態を 2 分間保持する。この間に、回転状態におけるセンサーのゼロバランス確認や不都合箇所がないかなどのチェックを行う。
- ③遠心力 30G の状態を 2 分間保持した後、装置を停止し、目視で確認しながら鉛直載荷用ジャッキを杭頭高さ直前まで下げる（杭頭とジャッキ先端の載荷板とが接触寸前となった段階でジャッキを停止）。
- ④杭頭部の高さ調整治具により、全杭の杭頭を載荷板に接触させる。

（2）本回転および鉛直載荷

- ①鉛直載荷用ジャッキを 1mm 上げ、載荷板と杭頭との間にスペースを確保する。
- ②装置を作動させ、遠心力が 30G になった段階で、データ収録装置から各センサーのゼロクリアを行うとともに、ジャッキコントロールソフトのオフセット処理を行う。
- ③データ収録装置とジャッキコントロールソフト側のデータ収録を同時に開始する。
- ④ジャッキにより 1 mm / min (0.017mm / sec) の一定速度で鉛直載荷する。
- ⑤載荷能力の上限 (20kN) 付近に達するか、沈下量 30mm に達するかのいずれかの状態になった時点で載荷を停止し実験を終了する。

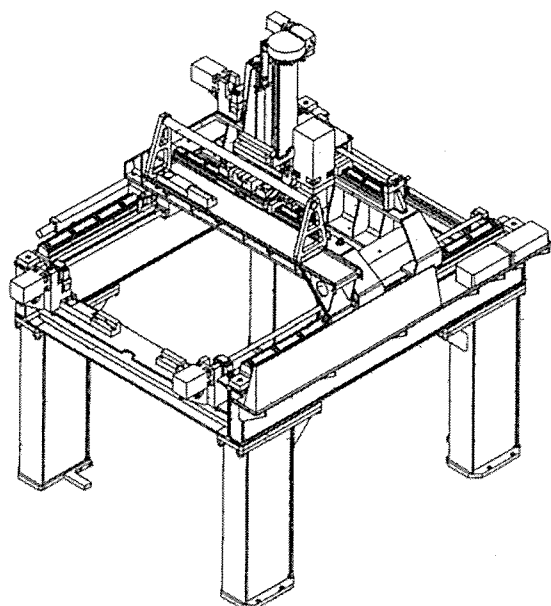


図-2.6 XYZ 三方向载荷装置

表-2.7 XYZ 三方向载荷装置の能力

動作範囲、 速度設定範囲	X 軸 : 0~700 [mm] (X 軸モータ側を原点とする) 0.001~5.0 [mm/sec] Y 軸 : 0~400 [mm] (Y 軸モータ側と反対側を原点とする) 0.001~3.0 [mm/sec] Z 軸 : 0~385 [mm] (下方向を原点とする) 0.001~1.0 [mm/sec] R 軸 : 0~360 [°] 0.001~5.0 [°/sec]
载荷能力	X 軸 : 10 [kN] Y 軸 : 5 [kN] Z 軸 : 20 [kN]
本実験での使用軸	Z 軸 (鉛直) (X 軸及び Y 軸は土槽センターで固定)

表-2.8 計測システムの設定条件

ローパスフィルター	10 Hz
計測サンプリング間隔	1 sec

2.6 計測項目とデータ処理方法

(1) 計測項目

本試験では、載荷時の鉛直荷重、杭頭鉛直変位、および杭頭近傍と杭先端近傍の軸方向ひずみを計測した。鉛直荷重および鉛直変位は、遠心力載荷装置からの出力信号により算出した。また、杭の軸方向ひずみは、杭表面に貼り付けたひずみゲージの計測値により算出した。表-2.9 に計測項目および数量を示す。

表-2.9 計測項目および数量

計測項目	数量			センサー
鉛直載荷荷重	1 点			試験機出力
杭頭鉛直変位	1 点			試験機出力
杭の 軸方向ひずみ	杭頭近傍部 (地盤外部)	2 方向/断面 (模型杭外表面)	計 4 点	FLA-1-17(テフロン加工 3 線式リード線付)
	杭先端部近傍	2 方向/断面 (模型杭外表面)		
合計：CASE 1、1-1、1-2 (1 本杭)			6 点	
CASE 2～7 (9 本杭)			38 点	
サンプリング間隔：1sec				

(2) データ処理方法

試験で得られたデータは、次の要領で整理した。

①軸方向ひずみ（生データ）の平均化

杭頭および杭先端の各断面の 2 方向のひずみゲージから得られるひずみ値を平均した。

$$\text{軸方向ひずみ値} = (\text{表ひずみ値} + \text{裏ひずみ値}) / 2$$

②ゼロ点補正

載荷板が杭頭に接触して載荷が開始された瞬間における各計測値をゼロとして補正した。

③軸力（杭頭荷重、杭先端荷重）の算定

軸方向ひずみに模型杭の弾性係数および断面積を乗じて軸力を算定した。なお、9 本群杭（CASE 2～7）のケースでは、9 本の軸力の総和を杭本数 9 で除した値を杭 1 本当たりの軸力とした。

$$\text{軸力（杭先端荷重、杭頭荷重）} = \text{軸ひずみ} \times \text{弾性係数} \times \text{断面積}$$

ここで、弾性係数および断面積は次の値を用いた。

弾性係数； $1.93 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ (SUS304)

断面積； 42.41 mm^2 (外径 $\phi 10.5 \text{ mm}$ 、肉厚 $t 1.5 \text{ mm}$)

④軸力の補正

本試験では、模型杭の弾性係数および断面積の測定は行っていない。杭頭近傍のひずみゲージ貼り付け位置は、気中であるので、このひずみより算定される杭頭部の軸力の合計は、載荷荷重と等しいはずである。図-2.7 に示すように、ひずみから求めた杭頭荷重と載荷荷重とは大きくはないものの相違がある。そこで、③により算定した軸力を、次の要領で補正した。

各杭の軸力 = 軸ひずみ $\times$ 弾性係数 $\times$ 断面積 $\times$ 補正率

補正率 = 載荷荷重 / (杭頭部の軸ひずみ $\times$ 弾性係数 $\times$ 断面積)

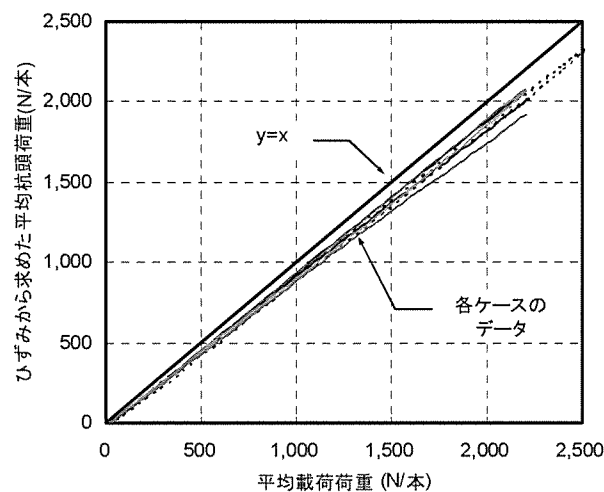


図-2.7 ひずみから求めた杭頭荷重と載荷荷重との関係

⑤杭周面抵抗力の算定

上記④で得られた軸力（杭頭荷重、杭先端荷重）の差分を杭周面抵抗力とした。なお、9本群杭（CASE 2～7）のケースでは、9本の周面抵抗力の総和を杭本数9で除した値を杭1本当たりの周面抵抗力とした。

杭周面抵抗力 = 杭頭荷重 - 杭先端荷重

⑥同一条件（CASE 1,4）における荷重-変位関係の平均化

CASE 1およびCASE 4は、同一条件の試験を3体実施している。各計測項目は、1sec毎の時刻暦で得られる。

図-2.8 に示すように、載荷速度は両ケースともに一定であると見なすことができる。よって、CASE 1およびCASE 4における平均荷重-変位関係は、同一時刻における荷

重および変位を平均した値を用いることにした。

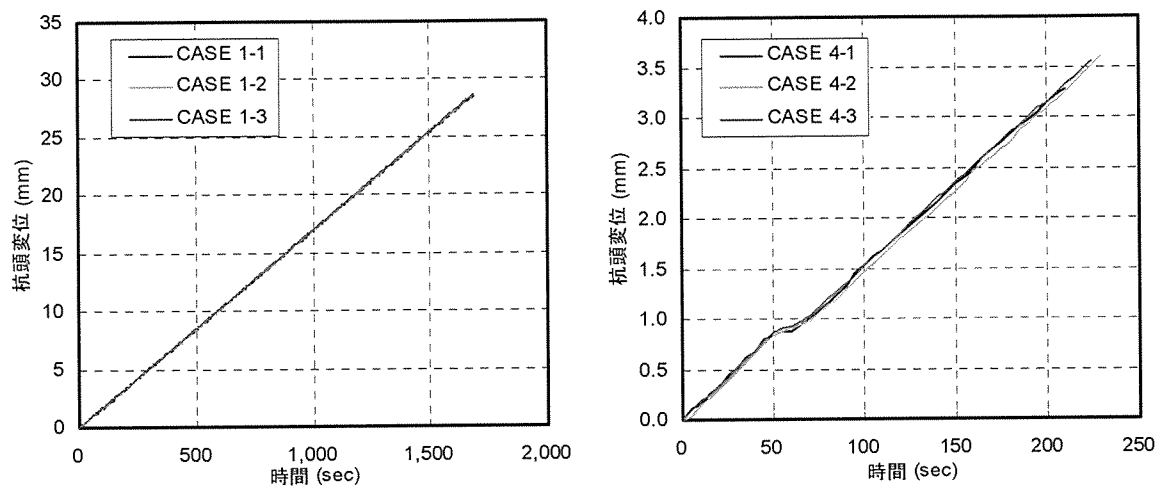


図-2.8 杭頭変位-時間関係

3. 試験結果および考察

3.1 試験結果の再現性および杭周面抵抗の大きさ

CASE 1 (1-1~1-3) および CASE 4 (4-1~4-3) の杭頭荷重-杭頭変位の関係を図-3.1 に示す。群杭模型である CASE 4 では、同一の杭頭変位における杭頭荷重はほぼ同一であるとみなせる。一方、単杭模型である CASE 1 では、同一の杭頭変位における杭頭荷重に $\pm 10\%$ 程度のばらつきが見られる。

試験結果に誤差を与えうる因子としては、試験地盤の強度、試験機から出力される載荷荷重および杭頭変位、ひずみゲージで計測されるひずみ、ひずみゲージの貼り付け精度(鉛直精度)、模型杭の設置精度等が挙げられる。試験機は十分な検定を行っており、出力値の誤差は考えにくい。また、先に示したように、試験地盤の相対密度はいずれも同一とみなすことができる。定かではないものの、単杭の場合のばらつきが群杭に比べて大きくなる主な要因は、模型杭の設置精度ではないかと考えられる。群杭の場合には、荷重が平均化するため、模型杭の設置精度の影響が緩和されるのであろう。

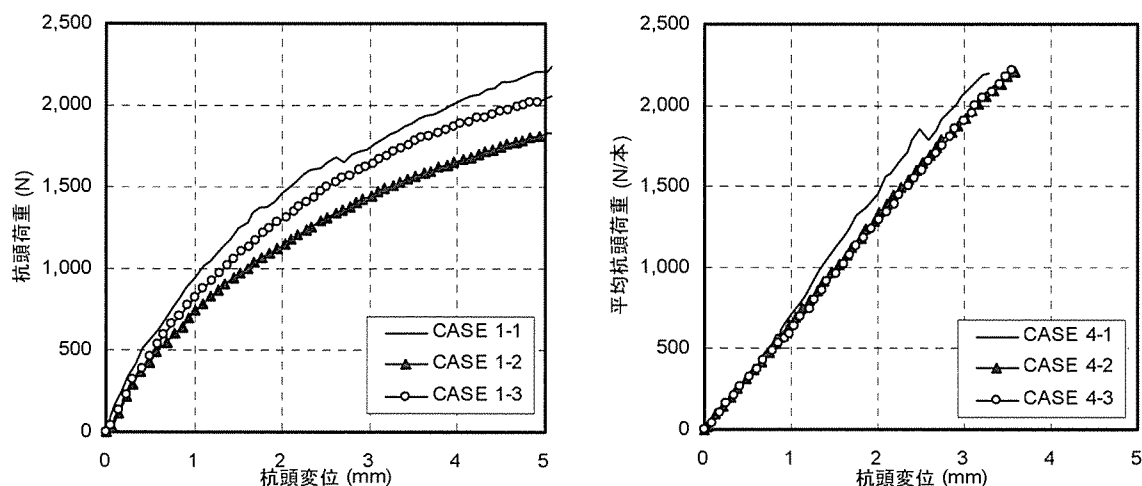


図-3.1 杭頭荷重-杭頭変位の関係 (CASE 1 および CASE 4)

次に、各ケースの杭周面抵抗力-杭頭変位関係を図-3.2 に示す。

単杭に比べ、群杭ではいずれも大きな杭周面抵抗力を示す一方で、最大抵抗力が発揮される時の変位も大きい。群杭間の比較においても同様の傾向であり、杭中心間隔が小さいほど最大抵抗力が大きい一方で、これが発揮される時の変位も大きくなる。なお、後述するように、杭頭荷重および杭先端荷重が最大となった CASE 4 の杭周面抵抗力が群杭のうち最も小さい点は、興味深い。

また、単杭 (CASE 1) および群杭の影響が最も小さいと考えられる CASE 7 (杭中心間隔 $6.0 D_p$) では、杭周面抵抗力が最大値を発揮した後、これが急激に低下し、単杭では最終的にこれが負の値となっている。実地盤に設置した実大杭の鉛直載荷試験においても、

杭周面抵抗力が最大値を発揮した後に低下する現象は時折見受けられるが、筆者らの経験ではこれほど大きく低下することはなかった。本試験では、杭周面抵抗力の影響を極力排除するために、なるべく緩めの上層としたため、遠心加速度の影響により、これが締まることによって沈下を生じた可能性が考えられるが、定かではない。

以上の結果は、模型の作成方法・手順に依存している可能性もあり、これが一般的な傾向であるのかどうか、さらに検証が必要である。

本試験では、杭周面抵抗力を極力排除することが望ましいと考えていたが、杭周面抵抗力の最大値は 100N~200N 程度であり、杭頭荷重あるいは杭先端荷重の 1/10~1/20 と極めて小さく、当初の意図のとおりであった。

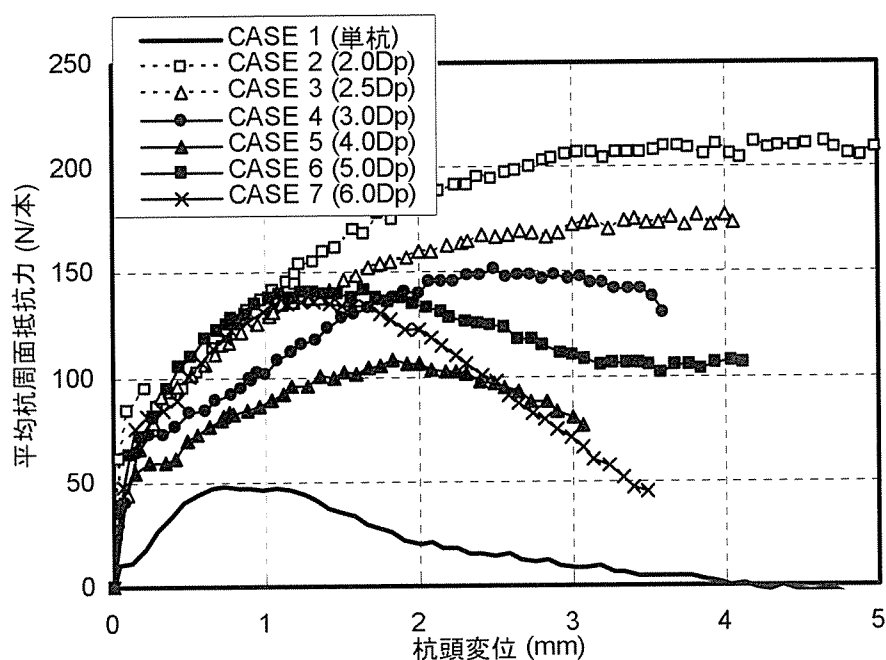


図-3.2 杭周面抵抗力-杭頭変位の関係

3.2 単杭および群杭の荷重-変位関係

各試験ケースの杭頭荷重-杭頭変位関係を図-3.3 に、杭先端荷重-杭頭変位関係を図-3.4 に示す。群杭 (CASE 2~CASE 7) の荷重-変位関係は、杭 1 本当たりの平均荷重を示している。なお、CASE 1 および CASE 4 は、前述の方法によって求めた 3 体の平均値を示している。また、杭模型の板厚は十分に大きく、杭体の弾性変形量は杭頭変位に比べて無視できるほど小さいため、全て杭頭変位で整理している。

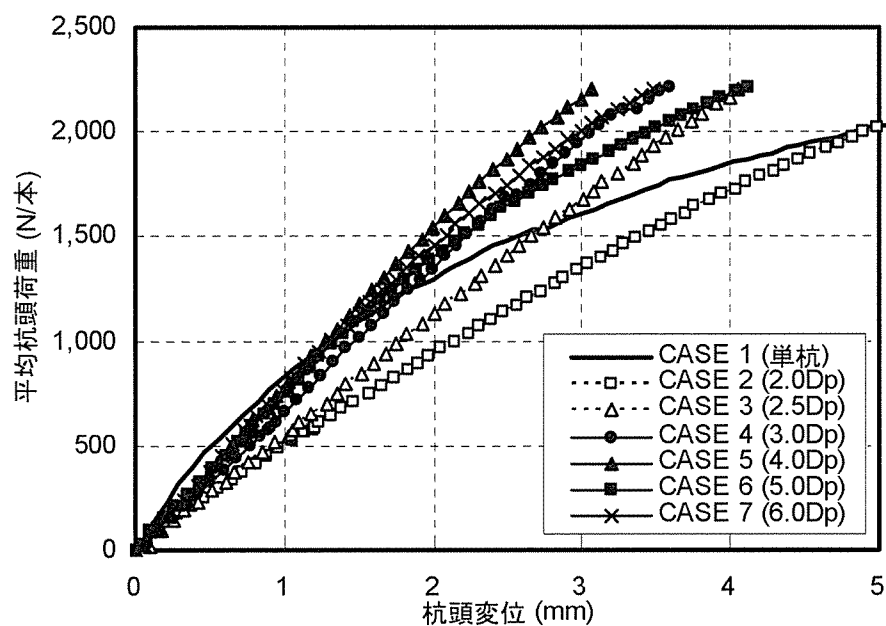


図-3.3 杭頭荷重-杭頭変位の関係

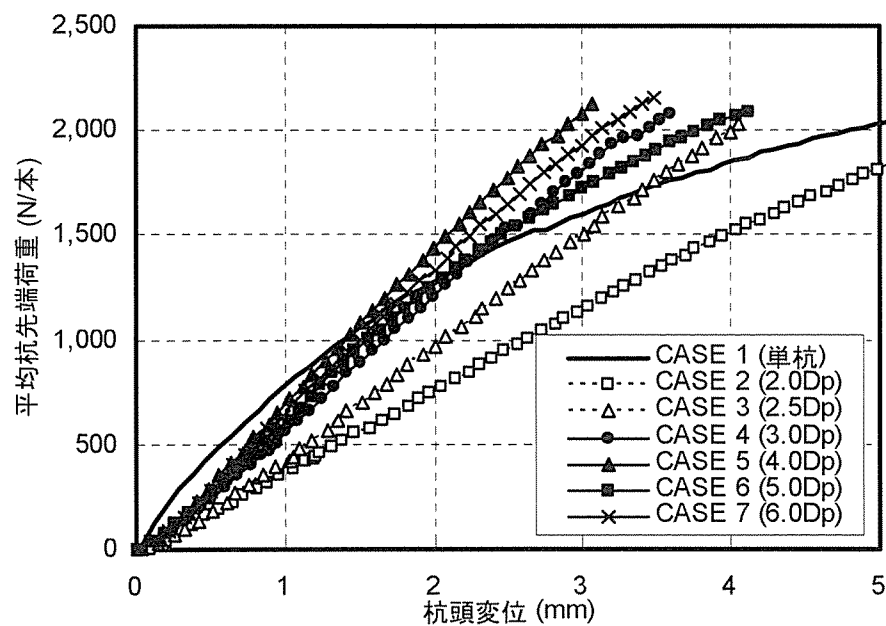


図-3.4 杭先端荷重-杭頭変位の関係

いずれのケースにおいても、杭頭荷重-杭頭変位曲線と杭先端荷重-杭頭変位曲線とはほぼ同一であり、意図したように杭周面抵抗力の影響が小さく抑えられていることが分かる。

単杭と群杭の荷重-変位関係を比較すると、単杭の荷重-変位曲線は、上に凸の形状、すなわち変位の増加に伴い荷重-変位曲線の勾配が低下していくのに対し、群杭ではこれがほぼ直線状であり、変位が大きくなると群杭の杭 1 本当たりの平均荷重は単杭のそれを上回っている。

次に、群杭間で比較すると、同一変位における杭頭荷重あるいは杭先端荷重は、杭中心間隔 $3.0 D_p \sim 7.0 D_p$ では大きな相違がないのに対し、杭中心間隔が $2.5 D_p$ 、 $2.0 D_p$ と小さくなるとこれが明らかに小さい。視点を変えれば、杭中心間隔が $2.5 D_p$ あるいは $2.0 D_p$ と小さい場合には、同一の荷重となるまでには大きな変位を要することになる。なお、荷重が最大となったのは杭中心間隔が $4.0 D_p$ の場合であった。既往の研究⁶⁾においても、杭中心間隔が杭径の 3 倍～4 倍のときに最大荷重を示したとの報告があるが、本試験結果はこれと同様の傾向である。よく言われるように、杭中心間隔が小さいと群杭全体がそれを取り囲む仮想の単杭あるいはケーソンのように挙動し、杭中心間隔が大きければ、各杭が単杭と同様に挙動すると考えた場合、両者の境界は本試験結果からは $4.0 D_p$ 付近である可能性が示唆される。

ここで、本試験における極限支持力とこれが発揮される時の変位との関係について触れておく。道示IVでは、杭頭変位が杭径の 10%に達する時の杭頭荷重を杭の極限支持力と定めている¹⁾。これは、実大杭を実地盤に設置した一般的な鉛直載荷試験結果においては、杭径の 10%程度の杭頭変位を付与すればほぼ極限支持力が発揮されることが統計的に示される⁷⁾こと等が反映されたものである。一方、杭先端変位が杭先端径の 10%に達する時の杭頭荷重を極限支持力と定義する基準もある⁸⁾。

本試験でこれらに相当する、杭頭変位が 1 mm あるいは 2 mm のときにおいても、杭頭荷重および杭先端荷重が一定の値に落ち着きそうな気配はなく、載荷能力の上限に達したために試験を終了した時点においても、荷重の増加傾向に変化はない。よって、本試験結果から極限支持力を判定することは困難である。ちなみに、最大荷重が約 4,000N であった単杭の試験結果を用いて Weibull 分布関数⁹⁾への当てはめを行い、極限支持力を推定すると、約 9,500 N となり、これは、杭頭変位 1mm の時の杭頭荷重（約 800N）の 10 倍以上である。なお、実大寸法の回転杭を実地盤に設置して行われた鉛直載荷試験¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾において得られる極限支持力は、杭頭変位が杭径の 10%に達する時の杭頭抵抗より大きくなる傾向が認められるものの、両者の差は本試験結果ほどは大きくないようである。

また、同様のことが降伏支持力および降伏変位についても言える。図-3.5 は、荷重-変位関係に非線形性が認められる単杭（CASE 1）の杭頭荷重-杭頭変位関係を両対数軸上に表したものである。図より曲線の折れ点を探してみると、降伏変位は 2mm をやや超えたあたりに見える。すなわち、本試験における単杭の降伏変位は、杭先端径 D_w の 10%（杭径

D_p の 20%) 以上となる。一方、実地盤に設置した実大杭の鉛直載荷試験における降伏変位は、杭径の 1%~2%となることが多く、杭径の 5%を超えることはほとんどない⁷⁾。

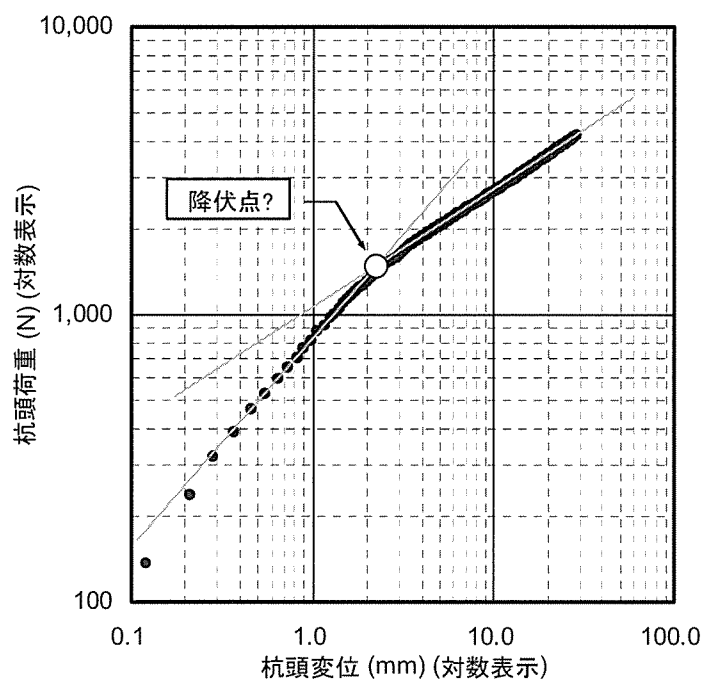


図-3.5 杭頭荷重-杭頭変位関係 (CASE 1、両対数表示)

以上のように、本試験では、極限支持力および降伏支持力が発揮される時の変位は、既往の研究における統計値に比較してかなり大きい。ただし、既往の統計値の対象は、杭軸方向に一定の外径を有する実大杭を実地盤に設置した試験であるから、これらは杭先端支持力に加え、必ずしも小さくない相応の杭周面抵抗力が発揮された条件下のものである。これに対し、本試験では、人工的に作成した地盤中に、杭先端支持力が卓越する状況を意図的に設けたものであり、試験条件が異なる。

図-3.6 は、CASE 3 (杭中心間隔 $2.5 D_p = 1.25 D_w$)、CASE 4 (杭中心間隔 $3.0 D_p = 1.5 D_w$) および CASE 6 (杭中心間隔 $5.0 D_p = 2.5 D_w$) を抽出して杭先端荷重-杭頭変位関係を示したものである。杭中心間隔と杭先端径との関係に着目した場合、CASE 6 (杭中心間隔 $5.0 D_p = 2.5 D_w$) は、道示Ⅳに解説される杭の最小中心間隔で配置したことに相当する。

CASE 4 (杭中心間隔 $3.0 D_p = 1.5 D_w$) の荷重-変位関係は、CASE 6 のそれと同等と見なすことができ、道示Ⅳの極限支持力の定義である杭頭変位が杭径の 10% (1mm) に達する時においても同様である。一方、これより杭中心間隔の小さい CASE 3 (杭中心間隔 $2.5 D_p = 1.25 D_w$) では、発揮される抵抗力が小さい。

よって、杭中心間隔を $3.0 D_p$ ($1.5 D_w$) 以上確保すれば、群杭としての平均的な荷重-変位関係においては、群杭の影響を無視しても大きな支障はないと考えられる。

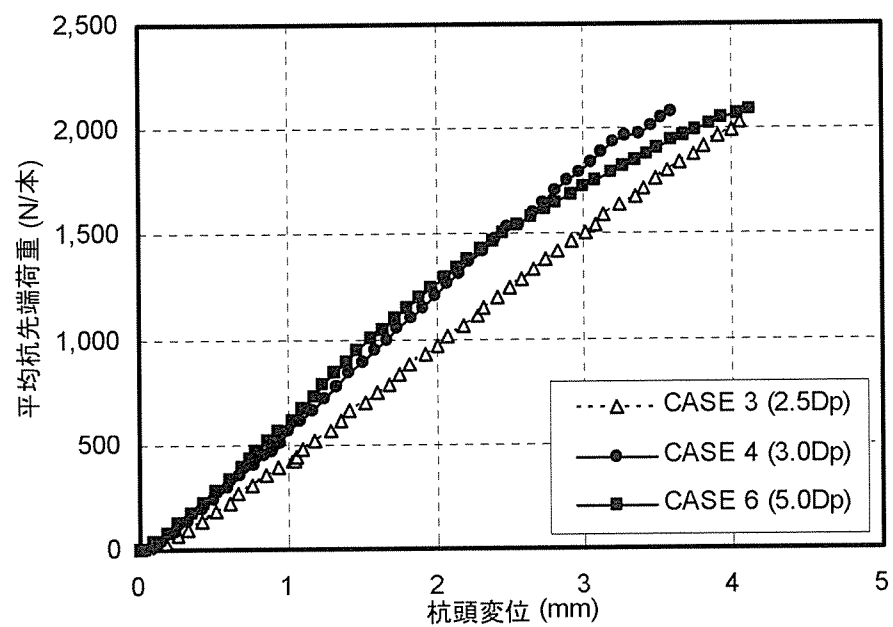


図-3.6 杭先端荷重-杭頭変位の関係 (CASE 3,4,6 抽出)

3.3 杭位置による荷重-変位関係の相違

杭位置による荷重-変位関係の相違に着目してみる。図-3.7～図-3.12 に、群杭中心に配置した杭（中心杭、杭番号 5）、外周部のうち隅角部に配置した杭（隅角杭、杭番号 1,3,7,9 の平均）および外周部のうち辺中央に配置した杭（辺中央杭、杭番号 2,4,6,8 の平均）の杭頭荷重-杭頭変位関係を示す。なお、CASE 6 の辺中央杭では、杭番号 2 の杭体ひずみが計測できなかったため、対象から除外している。

杭中心間隔が $2.0 D_p$ の CASE 2 では、変位が小さい時に、外周部の杭（隅角杭および辺中央杭）に比べ、中心杭の負担する荷重が小さい。これは、地盤を弾性体と考えた時の剛体基礎の接地圧分布と同様である。ただし、変位の増加に伴って杭位置による負担荷重の差異は縮小し、最終的には逆転している。杭中心間隔が $2.5 D_p \sim 3.0 D_p$ あたりになると、小変位領域においても杭位置による負担荷重の相違は比較的小さい。次に、外周部の杭のうち、隅角杭と辺中央杭との負担荷重を比較すると、いずれのケースにおいてもほぼ同等であるが、最終的には辺中央杭の負担荷重が大きくなる。すなわち、最終的には、中心杭、辺中央杭、隅角杭の順に負担荷重が大きくなるようである。なお、杭中心間隔が $6.0 D_p$ の CASE 7 では、いずれの変位においても杭位置による負担荷重の相違はない。

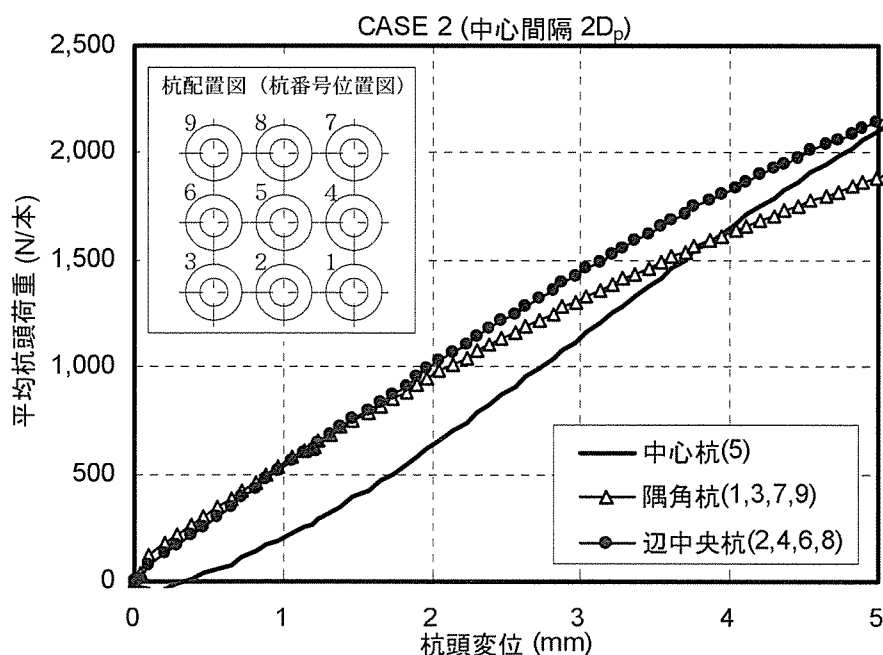


図-3.7 杭位置による荷重-変位関係の相違（CASE 2：杭中心間隔 $2.0 D_p$ ）

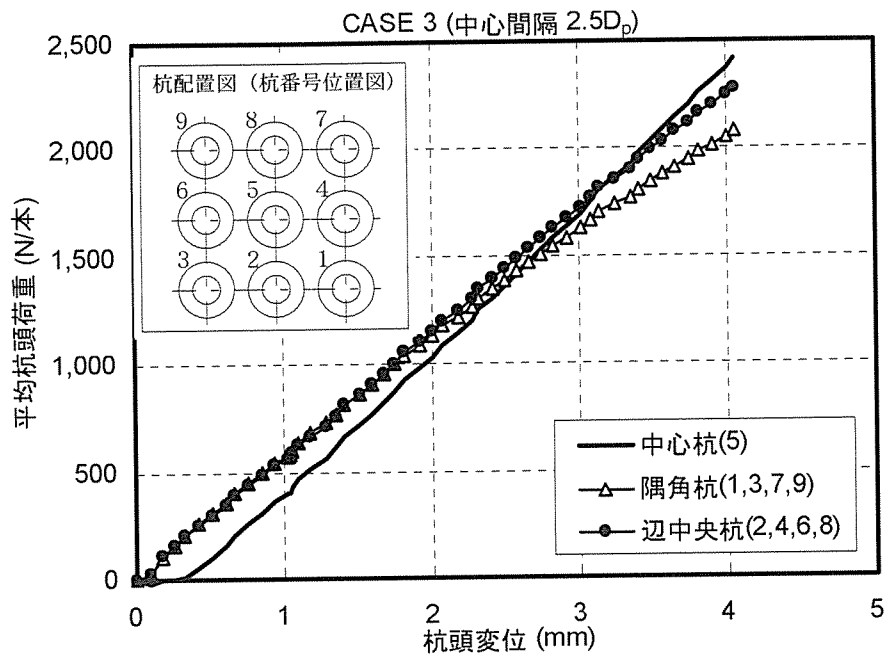


図-3.8 杭位置による荷重-変位曲線の相違 (CASE 3 : 杭中心間隔 $2.5 D_p$)

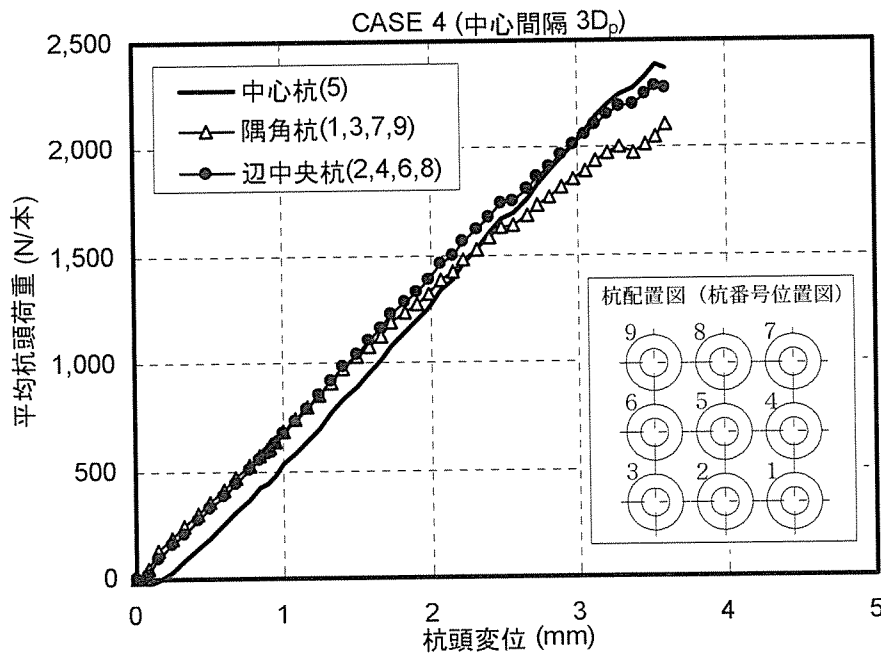


図-3.9 杭位置による荷重-変位曲線の相違 (CASE 4 : 杭中心間隔 $3.0 D_p$)

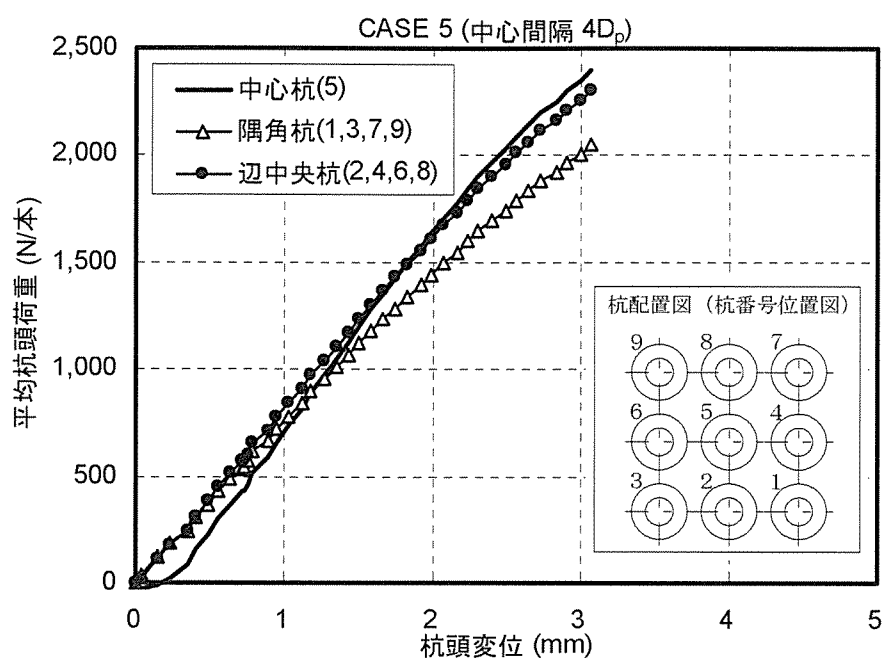


図-3.10 杭位置による荷重-変位曲線の相違 (CASE 5 : 杭中心間隔 $4.0 D_p$)

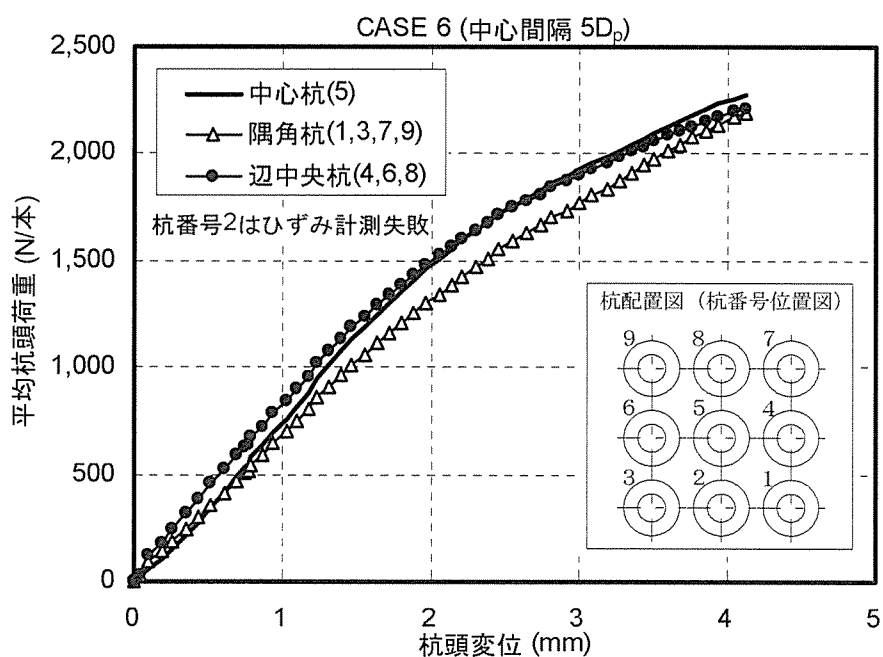


図-3.11 杭位置による荷重-変位曲線の相違 (CASE 6 : 杭中心間隔 $5.0 D_p$)

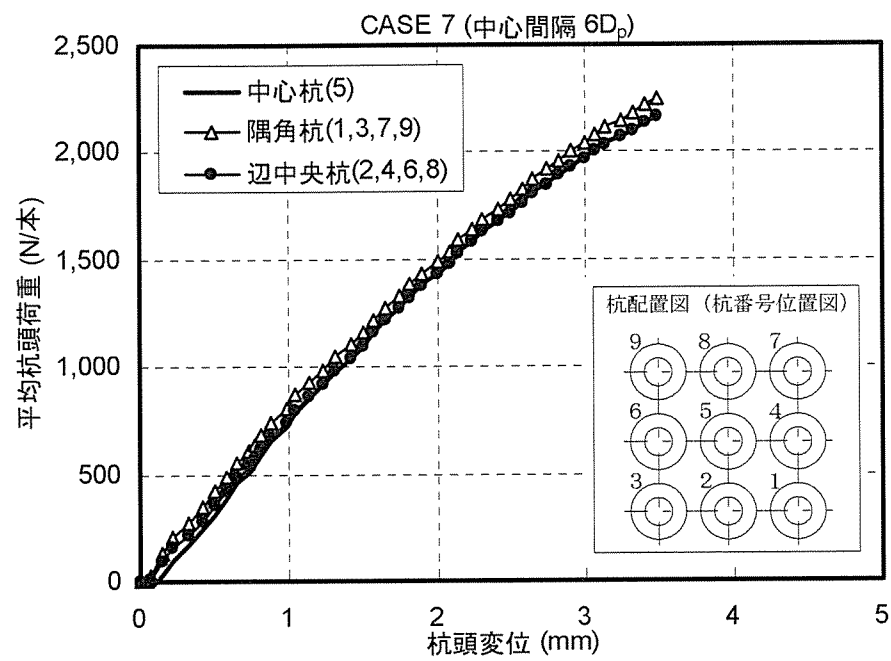


図-3.12 杭位置による荷重-変位曲線の相違 (CASE 7 : 杭中心間隔 $6.0 D_p$)

3.4 群杭の影響に関する考察

群杭の影響について考察する。

杭先端直下の地盤は、杭先端から作用する荷重により変形を生ずる。群杭の場合、隣接する杭先端直下の地盤でも同様の現象が生じており、隣接する杭相互の距離が小さければ、土粒子間のせん断力の作用により、地盤の変形も伝播することになる。一方で、隣接杭による地盤への载荷は、地盤の拘束圧を高めてせん断強度を増加させる効果をも有すると思われる。すなわち、鉛直荷重を受ける群杭の先端直下の地盤への影響は、地盤変形の伝播効果と拘束圧上昇効果とが同時に影響したものであると考えることができる。

本来、地盤の荷重-変位関係は非線形であり、単杭の試験結果にはその特徴が見られる。一方、群杭の荷重-変位関係が直線状となるのは、隣接杭による拘束圧上昇効果によって、杭先端直下の地盤のせん断強度が変位の増加に伴い増加するためであると考えられる。また、地盤変形の伝播効果の考え方によって、杭間隔による荷重-変位曲線の差を説明できる。

本研究で対象とした杭先端径 D_w が杭径 D_p の 2 倍である杭模型を用いた試験結果からは、杭中心間隔が小さいほど、各杭は均等に荷重を分担しなくなる傾向が見られ、変位の小さい領域では、群杭全体が発揮する荷重が単杭条件で発揮される荷重を杭本数倍した値に比べて小さかった。しかし、杭中心間隔が $3.0 D_p$ 以上であれば、その差は比較的小さい。

また、杭基礎設計便覧における回転杭単杭の極限支持力推定式は、道示Ⅳの定義する極限支持力（杭頭変位が杭径の 10% に達する時の杭頭支持力）を推定できるように定められている。すなわち、支持力推定式における杭先端支持力には、その極限值に対して余裕があると考えられる。

以上のことから、当面は、杭中心間隔を $3.0 D_p$ ($1.5 D_w$ 、杭先端部の純間隔では $1.0 D_p$) 以上確保すれば、これまでの設計実務において、杭軸方向に一定の外径を有する一般的な杭を用い、これを杭径の 2.5 倍の杭中心間隔で配置した場合と同様に、群杭の極限支持力を単杭の極限支持力の和として見積もることが可能であると考えられる。ただし、単杭の極限支持力は道路橋示方書の定義に従って評価したものであること、杭先端径 D_w が杭径 D_p の 2 倍以下であることが前提となる。

4. まとめ

回転杭の先端支持力に及ぼす群杭の影響を確認することを目的として、回転杭模型の中心間隔をパラメータとした遠心加速度場での鉛直載荷実験を実施した。その結果、確認された事項は以下のとおりである。

- ① 単杭の荷重-変位関係は、実大杭の鉛直載荷試験における荷重-変位関係と同様に、地盤の非線形性の影響を受け、変位の増加とともに沈下剛性が低下していく非線形性を示した。一方、群杭の荷重-変位関係は、ほぼ直線状となった。
- ② 杭中心間隔が $2.0 D_p$ 、 $2.5 D_p$ と小さい場合、杭中心間隔がこれらより大きい場合に比べて群杭全体が発揮する抵抗力が小さい。
- ③ 杭中心間隔によって、群杭全体がそれを取り囲む仮想の単杭あるいはケーソンのように挙動する場合と、群杭を構成する各杭が単杭と同様の挙動をする場合とがあるとしたとき、その境界は、 $4.0 D_p$ 付近である可能性が推察される。
- ④ 降伏支持力あるいは極限支持力が発揮される時の変位の杭径比は、既往の統計値に比べて大きかった。
- ⑤ 変位が小さい領域では、外周部に比べて中心部に位置する杭の分担荷重が小さい。特に、杭の中心間隔が $2.0 D_p$ の場合には、この傾向が顕著である。
- ⑥ 先端支持力に及ぼす群杭の影響は、隣接杭による杭先端直下の地盤変位によって同一変位における荷重が低下する効果と、隣接杭による拘束圧の上昇に伴い地盤のせん断強度が上昇する効果とが、同時に作用した結果であると考えられる。
- ⑦ 杭先端径 D_w が杭径 D_p の 2 倍である杭では、当面は、杭の中心間隔を $3.0 D_p$ ($1.5 D_w$ 、杭先端の純間隔で $1.0 D_p$) 以上確保すれば、設計上は、群杭の極限支持力として、単杭の極限支持力を杭本数倍したものをを用いることができると考えられる。ただし、単杭の極限支持力は道路橋示方書の定義に基づき評価することが前提である。

最後に、本研究は、研究費の一部に（社）日本鉄鋼連盟の助成金を活用して実施しており、また、鋼管杭協会の澤石正道氏からは付属資料Ⅱに関するデータの提供をしていただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 2002.3.
- 2) 中谷昌一, 竹口昌弘, 井落久貴, 澤石正道：回転杭の先端支持力に及ぼす群杭効果の検討, 土木技術資料, Vol.48 No.12, pp.66-71, 2006.12.
- 3) 竹口昌弘, 中谷正一, 井落久貴, 前田良刀, 龍田昌毅, 澤石正道, 石澤毅, 田中宏征, 鈴木規彦：回転杭の群杭効果に関する研究(その 1), 第 41 回地盤工学研究発表講演集, pp.1459-1460, 2006.7.
- 4) 澤石正道, 竹口昌弘, 中谷昌一, 井落久貴, 前田良刀, 龍田昌毅, 石澤毅, 田中宏征, 鈴木規彦：回転杭の群杭効果に関する研究(その 2), 第 41 回地盤工学研究発表講演集, pp.1461-1462, 2006.7.
- 5) (社) 日本道路協会：杭基礎設計便覧(平成 18 年度改訂版), 2007.1.
- 6) Vesic, A.S.: Experiments with Instrumented Pile Groups in Sand, ASTM STP 444, pp. 177~222, 1969.
- 7) 岡原美知夫, 高木章次, 中谷昌一, 木村嘉富：単杭の支持力と柱状体基礎の設計法に関する研究, 土木研究所資料第 2919 号, 1991.1.
- 8) 例えば、(社) 地盤工学会：地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説 -第一回改訂版-, 2002.5.
- 9) 宇都一馬, 冬木衛, 桜井学：杭の載荷試験結果の整理方法, 基礎工, 1982.9.
- 10) (財) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書 先端翼付き回転貫入鋼管杭 つばさ杭, 2003.
- 11) (財) 国土技術研究センター：建設技術審査証明事業（一般土木工法）報告書 NS-エコパイル工法, 2004.
- 12) (財) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書 先端翼付き回転貫入鋼管杭 ジオウイング・パイル, 2005.

付属資料 I 土質試験結果

土質試験結果一覧表（基礎地盤）

調査件名 杭基礎の先端支持力に関する実験業務

試験年月日

試験者 小川 良紀

試料番号 (深 さ)			Dr=60%	Dr=90%		
一般	湿潤密度 ρ_t g/cm ³					
	乾燥密度 ρ_d g/cm ³					
	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.640				
	自然含水比 w_n %	0.2				
	間隙比 e					
粒 度	飽和度 S_r %					
	石 分 (75mm以上) %					
	礫 分 ¹⁾ (2~75mm) %	0				
	砂 分 ¹⁾ (0.075~2mm) %	98				
	シルト分 ¹⁾ (0.005~0.075mm) %	2				
	粘土分 ¹⁾ (0.005mm未満) %					
	最大粒径 mm	0.850				
	均等係数 U_c	1.64				
コ ン シ ス テ ン シ ー 特 性	曲率係数 U_c'	0.957				
	液性限界 w_L %					
	塑性限界 w_P %					
分 類	塑性指数 I_P					
	地盤材料の 分類名	砂				
	分類記号	(S)				
圧 密	試験方法					
	圧縮指数 C_c					
	圧密降伏応力 p_c kN/m ²					
一 軸 圧 縮						
	一軸圧縮強さ q_u kN/m ²					
せん断	試験条件		CD 三軸	CD 三軸		
	全応力	c kN/m ²	2.38	0.00		
		ϕ °	39.3	45.4		
	有効応力	c' kN/m ²				
		ϕ' °				
	最大乾燥密度 g/cm ³	1.607				
	最小乾燥密度 g/cm ³	1.256				

特記事項

1) 石分を除いた75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。

[1kN/m² ≒ 0.102kgf/cm²]

J I S A 1 2 0 2 J G S 0 1 1 1	土 粒 子 の 密 度 試 験 (測 定)	
----------------------------------	-----------------------	--

調査件名 杭基礎の先端支持力に関する実験業務

試験年月日

試験者 野田 保美

試料番号(深さ)						
ピクノメーター No.		58	59	60		
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g		196.803	191.283	199.085		
m_b をはかったときの内容物の温度 T °C		19	19	19		
T °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm ³		0.9984	0.9984	0.9984		
温度 T °Cの蒸留水を満たしたときの (蒸留水+ピクノメーター)質量 $m_a^{1)}$ g		174.465	170.637	177.401		
試料の 炉乾燥質量	容器 No.	58	59	60		
	(炉乾燥試料+容器)質量 g	106.893	99.951	110.019		
	容器質量 g	70.971	66.743	75.140		
	m_s g	35.922	33.208	34.879		
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		2.640	2.639	2.639		
平均値 ρ_s g/cm ³		2.640				
試料番号(深さ)						
ピクノメーター No.						
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g						
m_b をはかったときの内容物の温度 T °C						
T °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm ³						
温度 T °Cの蒸留水を満たしたときの (蒸留水+ピクノメーター)質量 $m_a^{1)}$ g						
試料の 炉乾燥質量	容器 No.					
	(炉乾燥試料+容器)質量 g					
	容器質量 g					
	m_s g					
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³						
平均値 ρ_s g/cm ³						
試料番号(深さ)						
ピクノメーター No.						
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g						
m_b をはかったときの内容物の温度 T °C						
T °Cにおける蒸留水の密度 $\rho_w(T)$ g/cm ³						
温度 T °Cの蒸留水を満たしたときの (蒸留水+ピクノメーター)質量 $m_a^{1)}$ g						
試料の 炉乾燥質量	容器 No.					
	(炉乾燥試料+容器)質量 g					
	容器質量 g					
	m_s g					
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³						
平均値 ρ_s g/cm ³						

特記事項

1) ピクノメーターの検定結果から求める。

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

調査件名 杭基礎の先端支持力に関する実験業務

試験年月日

試験者 野田 保美

試料番号 (深さ)						
容 器 No.	19	20	21			
m_a g	56.11	54.87	47.43			
m_b g	56.00	54.78	47.36			
m_c g	0.52	0.52	0.52			
w %	0.2	0.2	0.1			
平 均 値 w %	0.2					
特 記 事 項						

試料番号 (深さ)						
容 器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平 均 値 w %						
特 記 事 項						

試料番号 (深さ)						
容 器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平 均 値 w %						
特 記 事 項						

試料番号 (深さ)						
容 器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平 均 値 w %						
特 記 事 項						

試料番号 (深さ)						
容 器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平 均 値 w %						
特 記 事 項						

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

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

調査件名

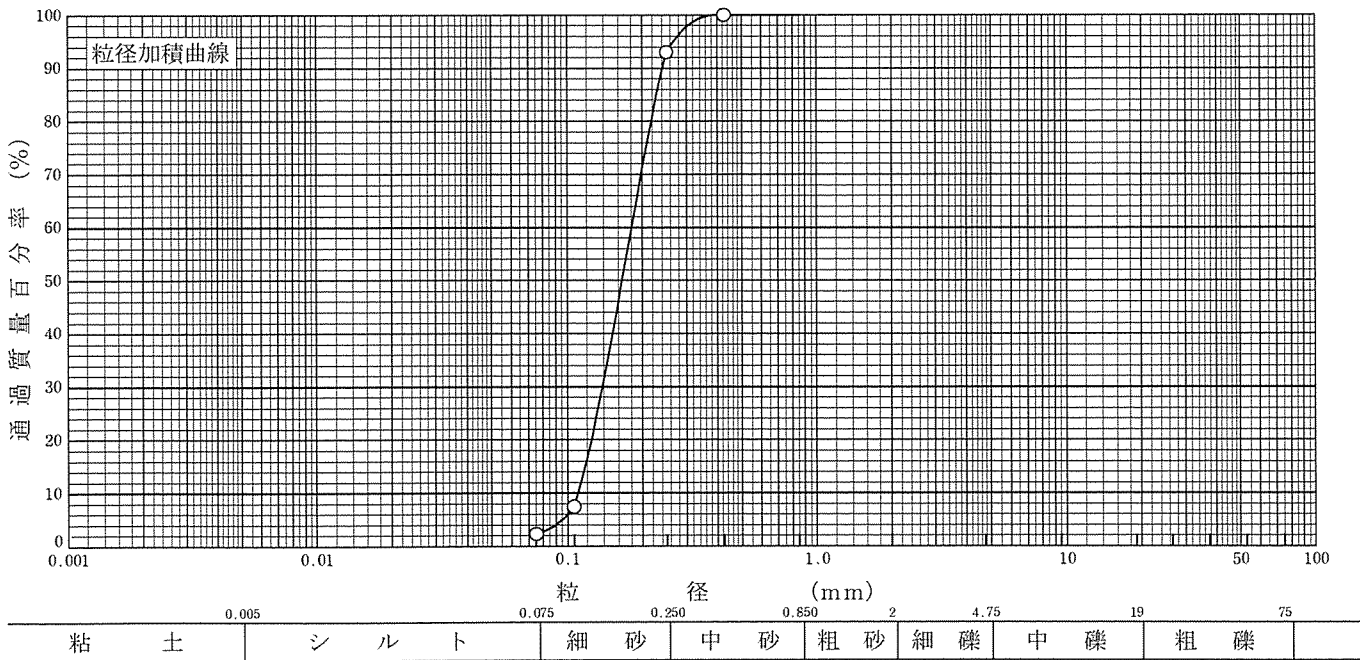
杭基礎の先端支持力に関する実験業務

試験年月日

試験者

野田 保美

試料番号 (深さ)					試料番号 (深さ)		
	粒径 mm	通過質量百分率%	粒径 mm	通過質量百分率%	粗 礫 分 %	0	
ふるい分け析	75		75		中 礫 分 %	0	
	53		53		細 礫 分 %	0	
	37.5		37.5		粗 砂 分 %	0	
	26.5		26.5		中 砂 分 %	7	
	19		19		細 砂 分 %	91	
	9.5		9.5		シルト分 %	2	
	4.75		4.75		粘土分 %		
	2		2		2mmふるい通過質量百分率 %	100	
	0.850	100.0	0.850		425 μ mふるい通過質量百分率 %	100	
	0.425	100.0	0.425		75 μ mふるい通過質量百分率 %	2	
	0.250	93.0	0.250		最大粒径 mm	0.850	
	0.106	7.4	0.106		60 % 粒径 D_{60} mm	0.181	
	0.075	2.3	0.075		50 % 粒径 D_{50} mm	0.166	
沈降分析					30 % 粒径 D_{30} mm	0.138	
					10 % 粒径 D_{10} mm	0.110	
					均等係数 U_c	1.64	
					曲率係数 U_c	0.957	
					土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.640	
					使用した分散剤		
					溶液濃度、溶液添加量		
					記 号	-C-	



特記事項

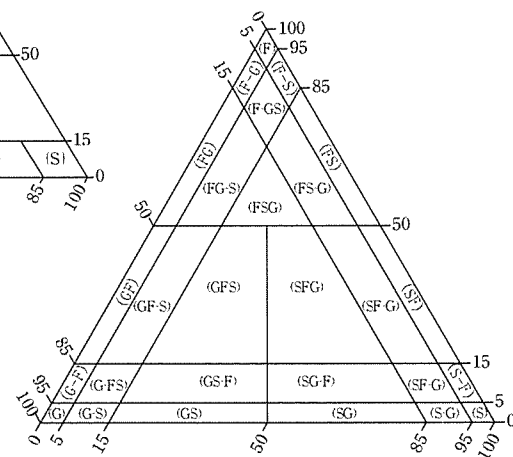
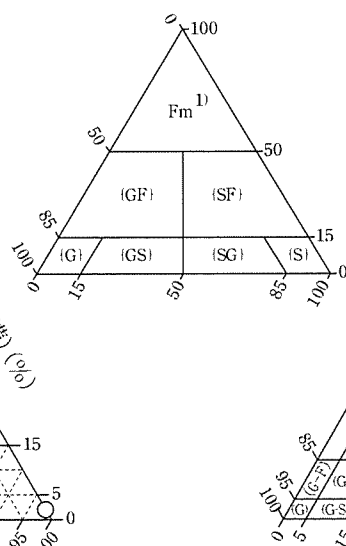
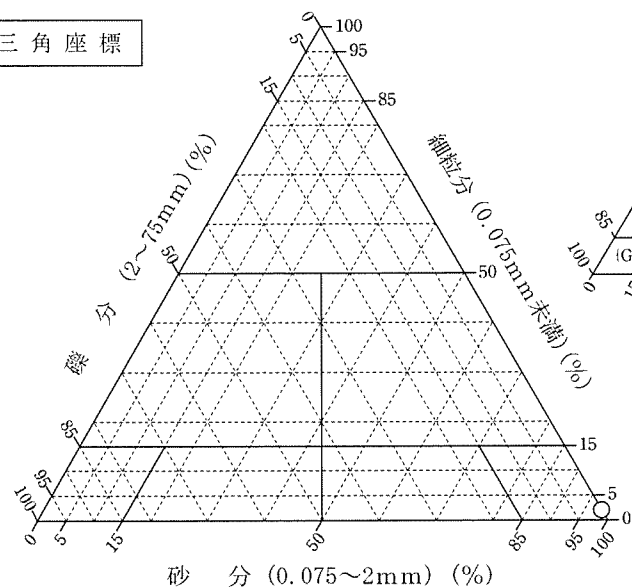
調査件名 杭基礎の先端支持力に関する実験業務

試験年月日

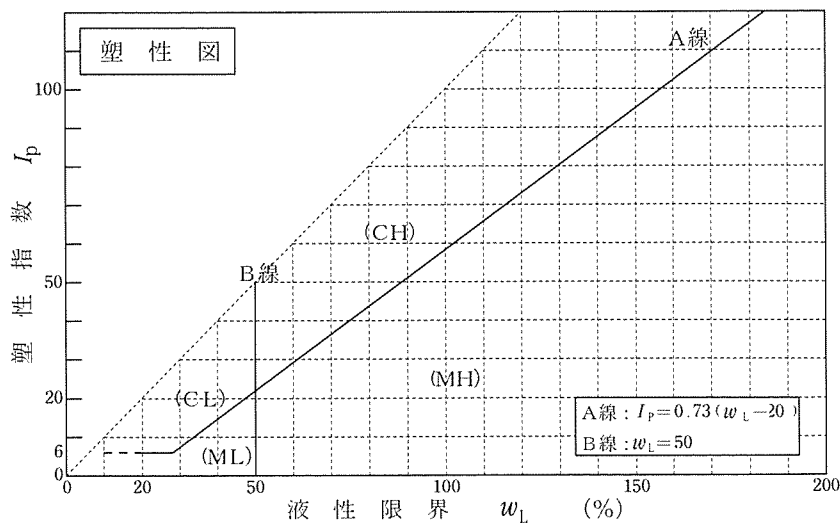
試験者 小川 良紀

試料番号 (深さ)					
石分(75mm以上)	%				
礫分(2~75mm)	%	0			
砂分(0.075~2mm)	%	98			
細粒分(0.075mm未満)	%	2			
シルト分(0.005~0.075mm)	%				
粘土分(0.005mm未満)	%				
最大粒径	mm	0.850			
均等係数 U_c		1.64			
液性限界 w_L					
塑性限界 w_P	%				
塑性指数 I_p	%				
地盤材料の分類名		砂			
分類記号		(S)			
凡例記号		○			

三角座標



(b) 粗粒土の小分類および細粒土の細区分用三角座標



特記事項 1) 主に観察と塑性図で判別分類

JGS 0520	土の三軸試験の供試体作製・設置	
----------	-----------------	--

調査件名 杭基礎の先端支持力に関する実験業務

試験年月日

試料番号(深さ) Dr=60%

試験者 内野 隆尚

供試体を用いる試験の基準番号と名称		JGS 0524 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験				
試料の状態 ¹⁾	乱した	土粒子の密度 $\rho_s^{3)}$ g/cm ³		2.640		
供試体の作製 ²⁾	Dr=60%密度に合わせて作製			⁴⁾		
土質名称				⁴⁾		
供試体 No.		1	2	3		
初期状態	直径 cm	5.00	5.00	5.00		
		5.00	5.00	5.00		
		5.00	5.00	5.00		
	平均直径 D_i cm	5.00	5.00	5.00		
	高さ cm	10.00	10.00	10.00		
		10.00	10.00	10.00		
		10.00	10.00	10.00		
	平均高さ H_i cm	10.00	10.00	10.00		
	体積 V_i cm ³	196.35	196.35	196.35		
	含水比 w_i %					
	質量 m_i g	283.92	283.92	283.92		
	湿潤密度 $\rho_{ti}^{3)}$ g/cm ³	1.446	1.446	1.446		
	乾燥密度 $\rho_{di}^{3)}$ g/cm ³	1.446	1.446	1.446		
	間隙比 $e_i^{3)}$	0.826	0.826	0.826		
	飽和度 $S_{ri}^{3)}$ %	0.0	0.0	0.0		
	相対密度 $D_{ri}^{3)}$ %					
設置・飽和過程	軸変位量の測定方法					
	設置時の軸変位量 cm					
	飽和過程の軸変位量 cm					
	軸変位量 $\Delta H_i^{5)}$ cm					
	体積変化量の測定方法					
	設置時の体積変化量 cm ³					
	飽和過程の体積変化量 cm ³					
	体積変化量 $\Delta V_i^{5)}$ cm ³					
	高さ H_0 cm	10.00	10.00	10.00		
	直径 D_0 cm	5.00	5.00	5.00		
圧密前(試験前)	体積 V_0 cm ³	196.35	196.35	196.35		
	乾燥密度 $\rho_{d0}^{3)}$ g/cm ³	1.446	1.446	1.446		
	間隙比 $e_0^{3)}$	0.826	0.826	0.826		
	相対密度 $D_{r0}^{3)}$					
炉乾燥後	容器 No.	1	2	3		
	(炉乾燥供試体+容器)質量 g	283.92	283.92	283.92		
	容器質量 g					
	炉乾燥質量 m_s g	283.92	283.92	283.92		

特記事項

- 1) 試料の採取方法、試料の状態（塊上、凍結、ときほぐされた）等を記載する。
- 2) トリミング法、負圧法の種別、凍結試料の場合は解凍方法等を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界、塑性限界、砂質土の場合は最小乾燥密度、最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 設置時の変化と飽和過程およびB値測定過程での変化を合わせる。

[1kN/m² ≒ 0.0102kgf/cm²]

調査件名

杭基礎の先端支持力に関する実験業務

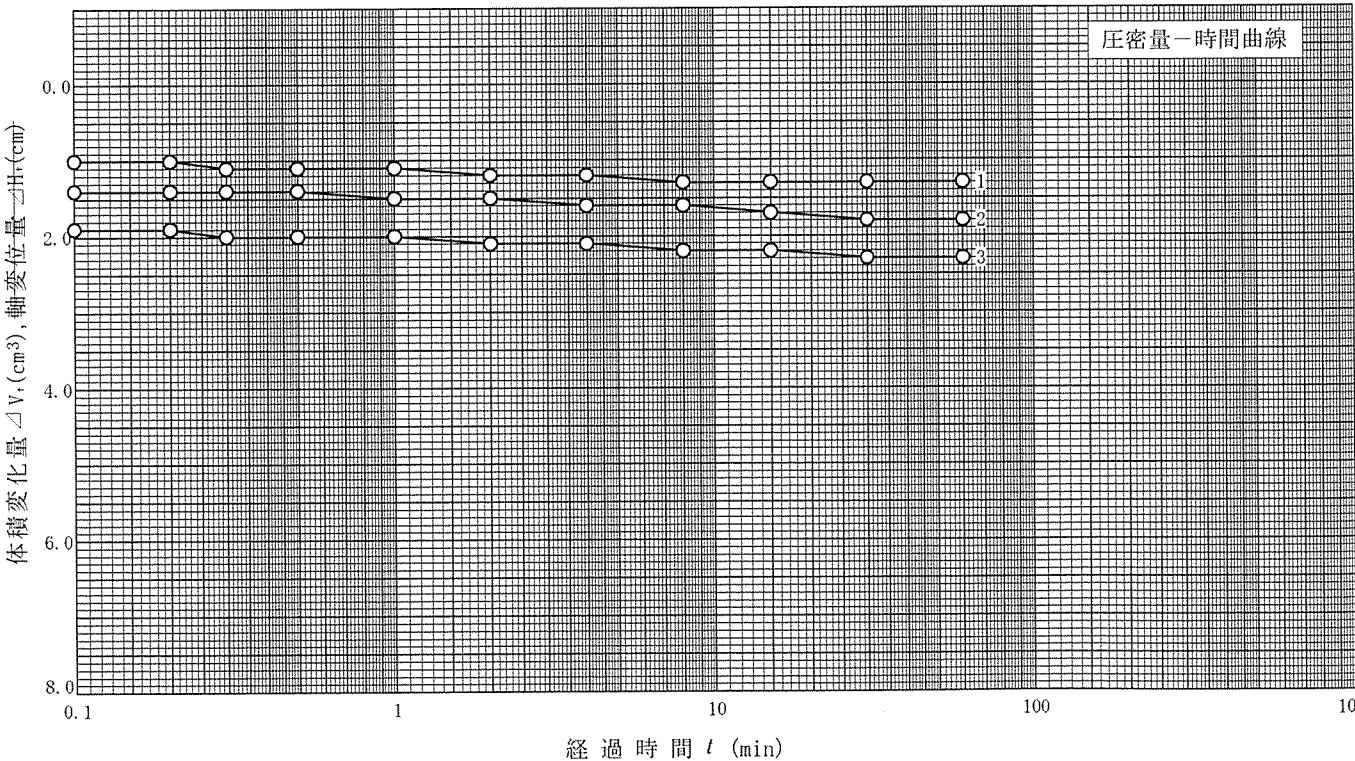
試験年月日

試料番号(深さ) Dr=60%

試験者

内野 隆尚

試料の状態 ¹⁾		乱した			4)
供試体の作製 ²⁾		Dr=60%密度に合わせて作製		4)	
土質名称			圧密中の排水方法	上下排水	
土粒子の密度 ρ_s ³⁾ g/cm ³		2.640			
供試体 No.		1	2	3	
試験条件	セル圧 σ_c kN/m ²	135	149	198	
	背圧 u_b kN/m ²	100	100	100	
	圧密応力 σ'_c kN/m ²	35	49	98	
圧密前	高さ H_o cm	10.00	10.00	10.00	
	直径 D_o cm	5.00	5.00	5.00	
	間隙比 e_o ³⁾	0.826	0.826	0.826	
圧密後	圧密時間 t_c min	60	60	60	
	体積変化量 ΔV_c cm ³	1.30	1.80	2.30	
	軸変位量 ΔH_c cm	0.02	0.03	0.04	
	体積 V_c cm ³	195.05	194.55	194.05	
	高さ H_c cm	9.98	9.97	9.96	
	炉乾燥質量 m_s g	283.92	283.92	283.92	
	乾燥密度 ρ_{dc} g/cm ³	1.456	1.459	1.463	
	間隙比 e_c ³⁾	0.814	0.809	0.804	
間隙圧係数 B	等方応力増加量 $\Delta\sigma$ kN/m ²				
	間隙水圧増加量 Δu kN/m ²				
	測定に要した時間 min				
	B 値				



特記事項

1) 試料の採取方法, 試料の状態 (塊状, 凍結, ときほぐされた) 等を記載する。

2) トリミング法, 負圧法の種類, 凍結試料の場合は解凍方法等を記載する。

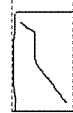
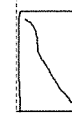
3) 必要に応じて記載する。

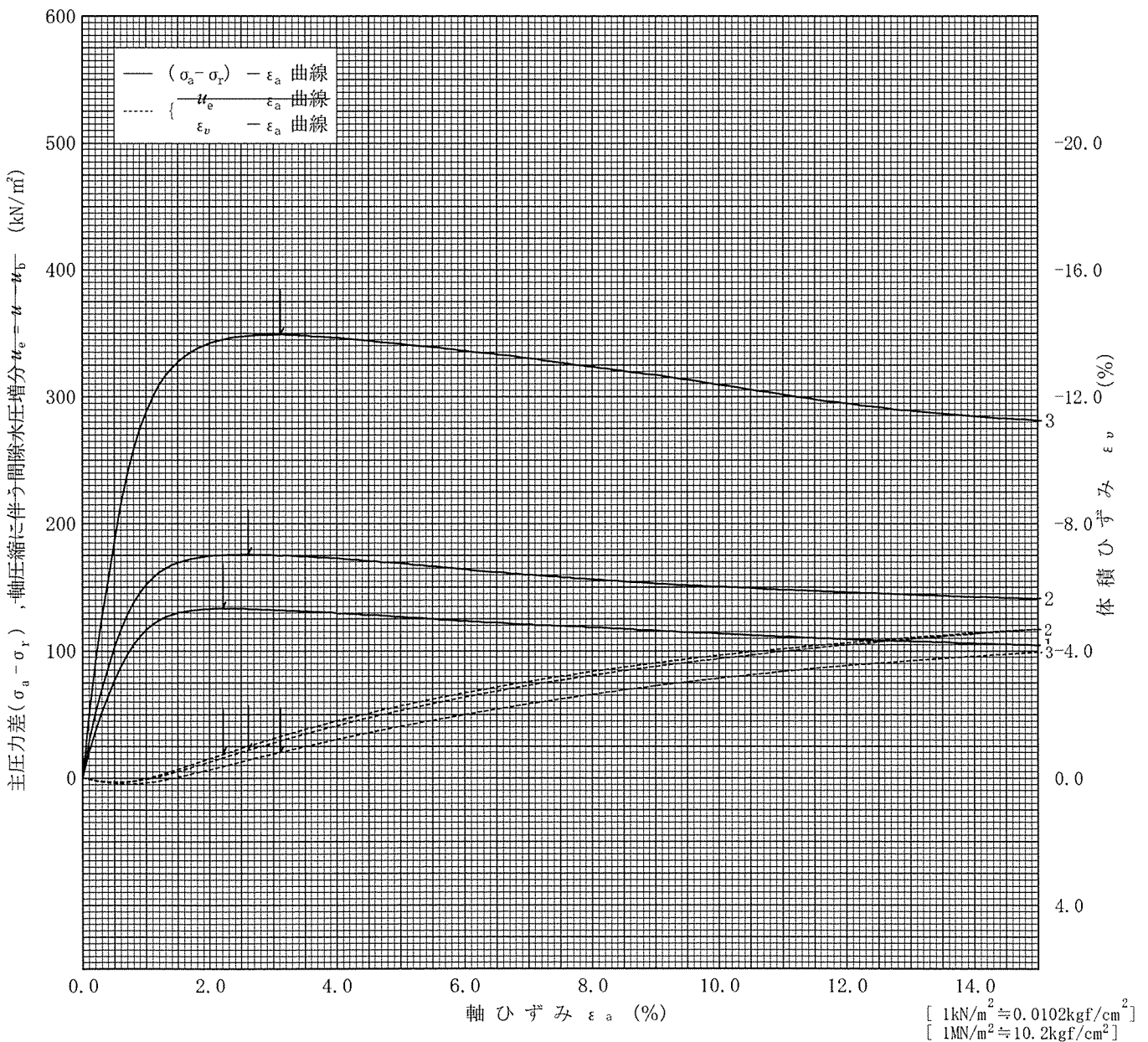
4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。

[1kN/m² ≒ 0.102kgf/cm²]

調査件名 杭基礎の先端支持力に関する実験業務	試験年月日
-----------------------------	-------

試料番号(深さ) Dr=60%	試 験 者 内野 隆尚
-----------------	------------------

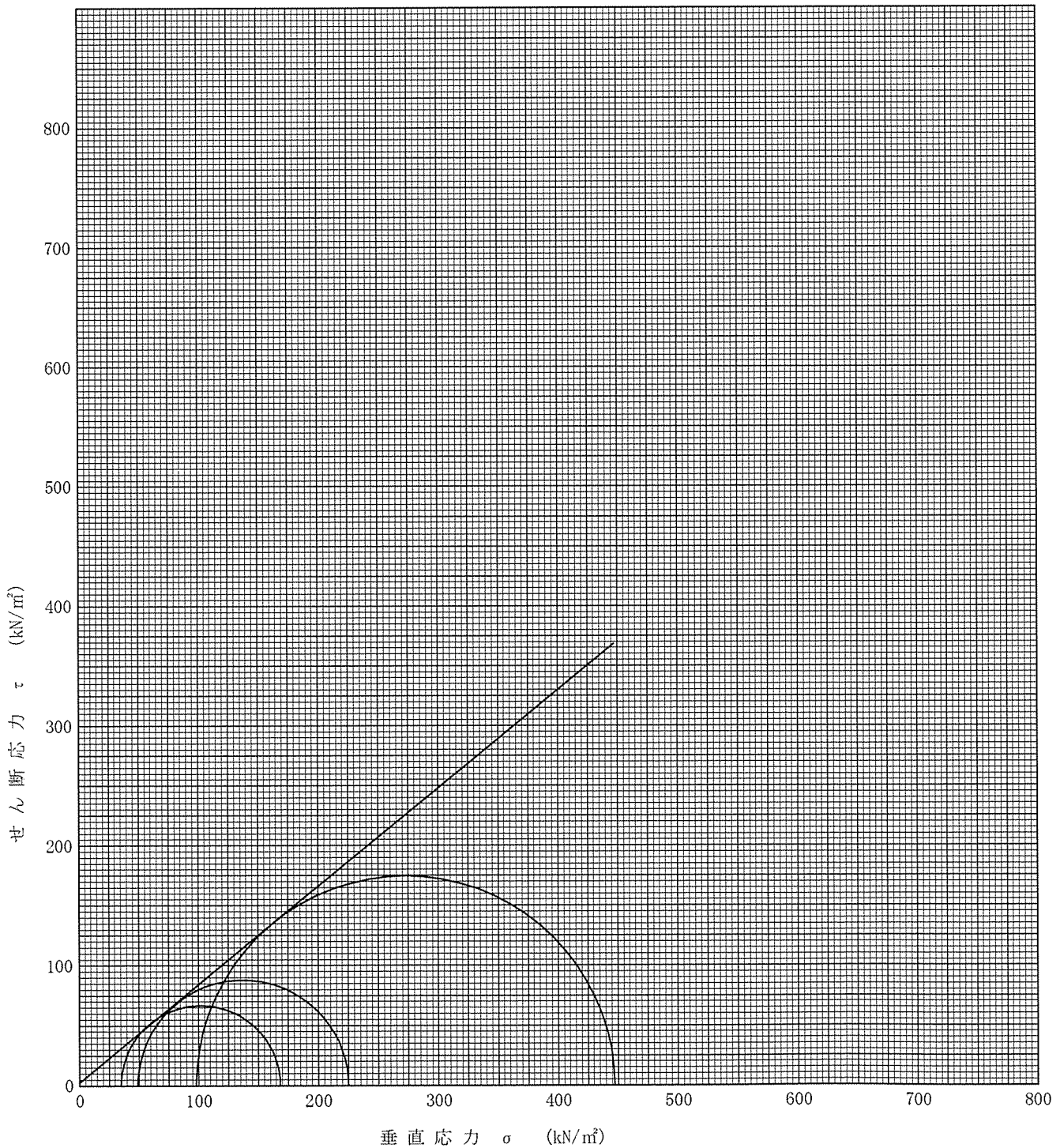
土 質 名 称		供 試 体 No.		1	2	3			
1)		セル圧・圧密応力		kN/m ²	135	149	198		
1)		背 圧 u_b		kN/m ²	100	100	100		
ひずみ速度 %/min							0.5		
特記事項 1) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界、塑性限界、砂質土の場合は最小乾燥密度、最大乾燥密度等を記載する。		主 応 力 差 最 大 時	圧縮強さ $(\sigma_a - \sigma_r)_{\max}$		kN/m ²	133	176	349	
			軸ひずみ ε_{af}		%	2.2	2.6	3.1	
			CU	間 隙 水 圧 u_f		kN/m ²			
				有効軸方向応力 σ'_{af}		kN/m ²			
				有効側方向応力 σ'_{rf}		kN/m ²			
			CD	体積ひずみ ε_{vf}		%	-0.739	-0.872	-0.803
		間 隙 比 e_f			0.827	0.825	0.819		
				変 形 係 数 E50		MN/m ²	15.3	20.5	37.5
				供試体の破壊状況					



調査件名 杭基礎の先端支持力に関する実験業務 試験年月日

試料番号(深さ) Dr=60% 試験者 内野 隆尚

強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cd} kN/m ²	ϕ_{cd} °	$\tan \phi_{cd}$	c' kN/m ²	ϕ' °
正 規 圧 密 領 域	2.38	39.3	0.8176		
過 圧 密 領 域					



特記事項

JGS 0520	土の三軸試験の供試体作製・設置	
----------	-----------------	--

調査件名 杭基礎の先端支持力に関する実験業務

試験年月日

試料番号(深さ) Dr=90%

試験者 内野 隆尚

供試体を用いる試験の基準番号と名称		JGS 0524 土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験			
試料の状態 ¹⁾	乱した	土粒子の密度 $\rho_s^{3)}$ g/cm ³		2.640	
供試体の作製 ²⁾	Dr=90%密度に合わせて作製			4)	
土質名称				4)	
供試体 No.		1	2	3	
初期状態	直径 cm	5.00	5.00	5.00	
		5.00	5.00	5.00	
		5.00	5.00	5.00	
	平均直径 D_i cm	5.00	5.00	5.00	
	高さ cm	10.00	10.00	10.00	
		10.00	10.00	10.00	
		10.00	10.00	10.00	
	平均高さ H_i cm	10.00	10.00	10.00	
	体積 V_i cm ³	196.35	196.35	196.35	
	含水比 w_i %				
	質量 m_i g	306.90	306.90	306.90	
	湿潤密度 $\rho_{ti}^{3)}$ g/cm ³	1.563	1.563	1.563	
	乾燥密度 $\rho_{di}^{3)}$ g/cm ³	1.563	1.563	1.563	
	間隙比 $e_i^{3)}$	0.689	0.689	0.689	
	飽和度 $S_{ri}^{3)}$ %	0.0	0.0	0.0	
	相対密度 $D_{ri}^{3)}$ %				
設置・飽和過程	軸変位量の測定方法				
	設置時の軸変位量 cm				
	飽和過程の軸変位量 cm				
	軸変位量 $\Delta H_i^{5)}$ cm				
	体積変化量の測定方法				
	設置時の体積変化量 cm ³				
	飽和過程の体積変化量 cm ³				
	体積変化量 $\Delta V_i^{5)}$ cm ³				
圧密前(試験前)	高さ H_0 cm	10.00	10.00	10.00	
	直径 D_0 cm	5.00	5.00	5.00	
	体積 V_0 cm ³	196.35	196.35	196.35	
	乾燥密度 $\rho_{d0}^{3)}$ g/cm ³	1.563	1.563	1.563	
	間隙比 $e_0^{3)}$	0.689	0.689	0.689	
	相対密度 $D_{r0}^{3)}$				
炉乾燥後	容器 No.	1	2	3	
	(炉乾燥供試体+容器)質量 g	306.90	306.90	306.90	
	容器質量 g				
	炉乾燥質量 m_s g	306.90	306.90	306.90	

特記事項

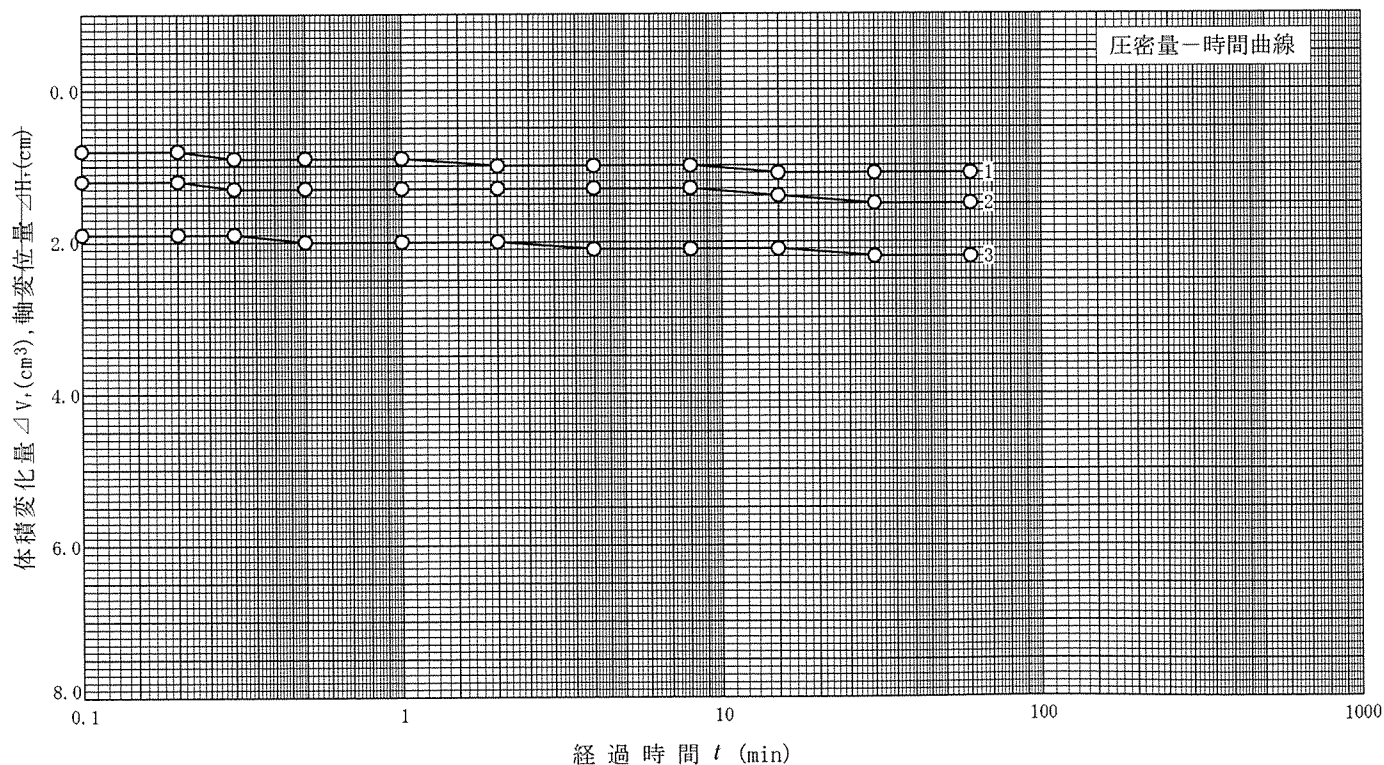
- 1) 試料の採取方法, 試料の状態 (塊上, 凍結, ときはぐされた) 等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種別, 凍結試料の場合は解凍方法等を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。
- 5) 設置時の変化と飽和過程およびB値測定過程での変化を合わせる。

[1kN/m² ≒ 0.1012kgf/cm²]

調査件名 杭基礎の先端支持力に関する実験業務
試験年月日

試料番号(深さ) Dr=90%
試験者 内野 隆尚

試料の状態 ¹⁾		乱した			⁴⁾
供試体の作製 ²⁾		Dr=90%密度に合わせて作製			⁴⁾
土質名称			圧密中の排水方法		上下排水
土粒子の密度 ρ_s ³⁾ g/cm ³		2.640			
供試体 No.		1	2	3	
試験条件	セル圧 σ_c kN/m ²	135	149	198	
	背圧 u_b kN/m ²	100	100	100	
	圧密応力 σ'_c kN/m ²	35	49	98	
圧密前	高さ H_o cm	10.00	10.00	10.00	
	直径 D_o cm	5.00	5.00	5.00	
	間隙比 e_o ³⁾	0.689	0.689	0.689	
圧密後	圧密時間 t_c min	60	60	60	
	体積変化量 ΔV_c cm ³	1.10	1.50	2.20	
	軸変位量 ΔH_c cm	0.02	0.03	0.04	
	体積 V_c cm ³	195.25	194.85	194.15	
	高さ H_c cm	9.98	9.97	9.96	
	炉乾燥質量 m_s g	306.90	306.90	306.90	
	乾燥密度 ρ_{dc} g/cm ³	1.572	1.575	1.581	
	間隙比 e_c ³⁾	0.680	0.676	0.670	
間隙圧係数 B	等方応力増加量 $\Delta\sigma$ kN/m ²				
	間隙水圧増加量 Δu kN/m ²				
	測定に要した時間 min				
B 値					



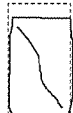
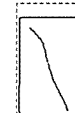
特記事項

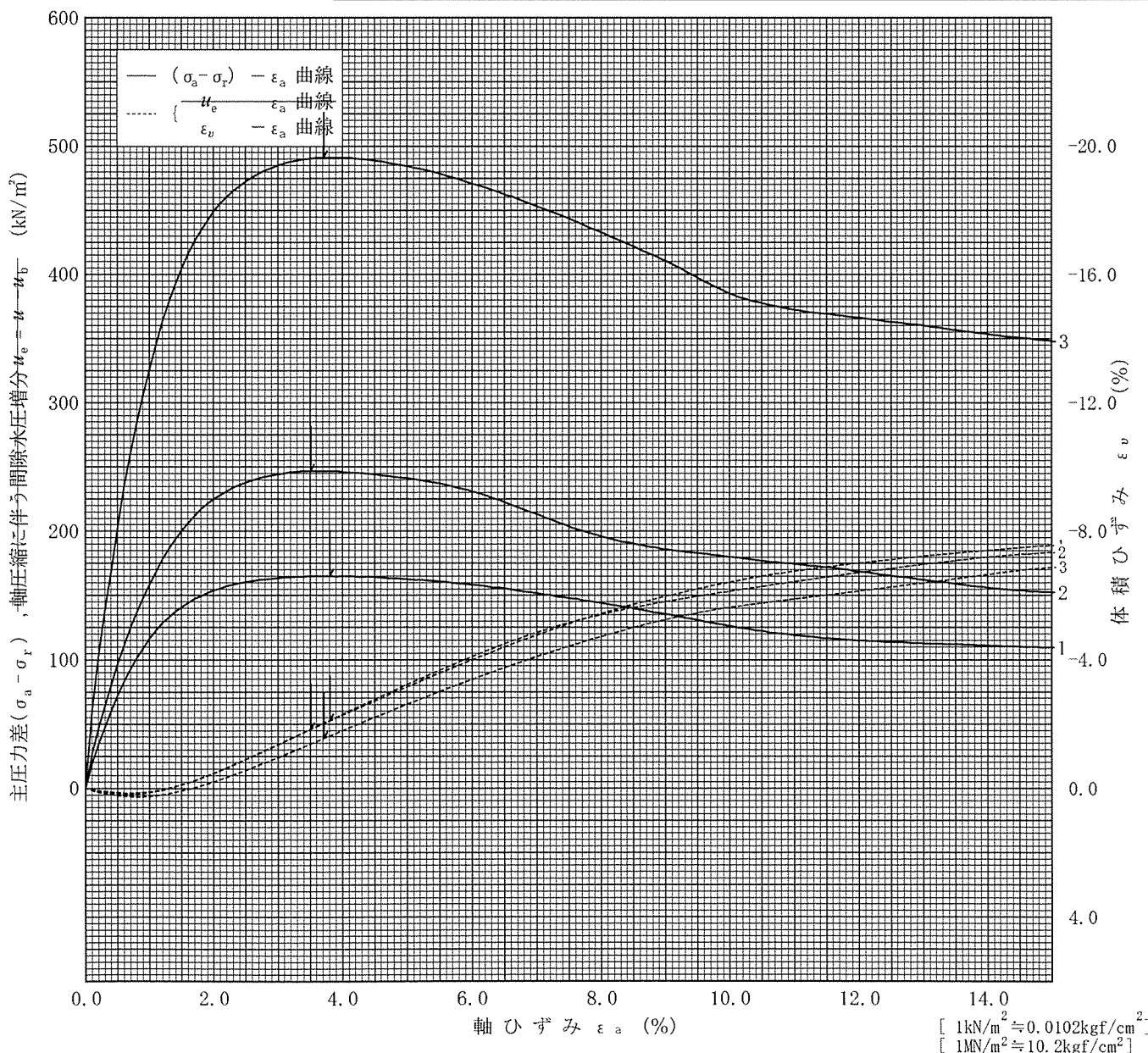
[1kN/m² ≒ 0.102kgf/cm²]

- 1) 試料の採取方法, 試料の状態 (塊状, 凍結, ときほぐされた) 等を記載する。
- 2) トリミング法, 負圧法の種類, 凍結試料の場合は解冻方法等を記載する。
- 3) 必要に応じて記載する。
- 4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界, 塑性限界, 砂質土の場合は最小乾燥密度, 最大乾燥密度等を記載する。

調査件名	杭基礎の先端支持力に関する実験業務	試験年月日
------	-------------------	-------

試料番号(深さ)	Dr=90%	試験者	内野 隆尚
----------	--------	-----	-------

土 質 名 称		供 試 体 No.	1	2	3		
1)		セル圧・圧密応力	kN/m ²	135	149	198	
1)		背 圧 u_b	kN/m ²	100	100	100	
ひずみ速度 %/min	0.5	圧縮強さ ($\sigma_a - \sigma_r$) _{max}	kN/m ²	165	247	491	
特記事項 1) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界、塑性限界、砂質土の場合は最小乾燥密度、最大乾燥密度等を記載する。	主 応 力 差 最 大 時	軸ひずみ ε_{af}	%	3.8	3.5	3.7	
		CU	間 隙 水 圧 u_f	kN/m ²			
			有効軸方向応力 σ'_{af}	kN/m ²			
			有効側方向応力 σ'_{rf}	kN/m ²			
		CD	体積ひずみ ε_{vf}	%	-2.095	-1.831	-1.547
			間 隙 比 e_f		0.715	0.707	0.696
			変 形 係 数 E50	MN/m ²	13.8	17.7	37.1
			供試体の破壊状況				

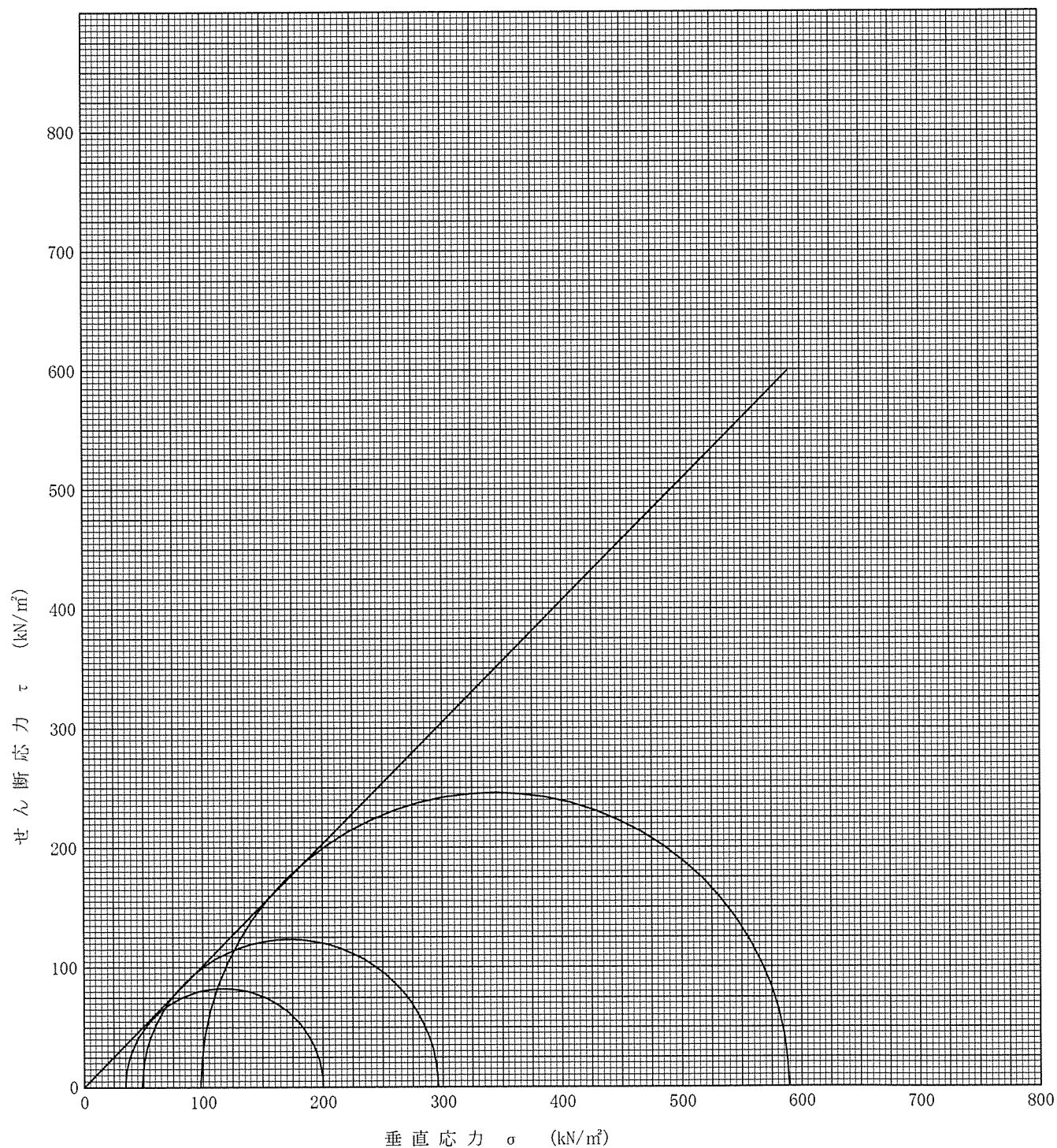


J G S	0 5 2 4	土の強度特性	三軸圧縮試験 [CD]	
-------	---------	--------	-------------	--

調査件名 杭基礎の先端支持力に関する実験業務 試験年月日

試料番号(深さ) Dr=90% 試験者 内野 隆尚

強度定数 応力範囲	全 応 力			有 効 応 力	
	c_{cd} kN/m ²	ϕ_{cd} °	$\tan \phi_{cd}$	c' kN/m ²	ϕ' °
正 規 圧 密 領 域	0.00	45.4	1.0156		
過 圧 密 領 域					



特記事項

[1kN/m² $\approx$ 0.0102kgf/cm²]

J I S A 1 2 2 4 J G S 0 1 6 1	砂 の 最 小 密 度 ・ 最 大 密 度 試 験	
----------------------------------	---------------------------	--

調査件名 杭基礎の先端支持力に関する実験業務 試験年月日

試 験 者 安 斉 仁

モールド		No.	1		容 積 V cm^3		113.1	
		質 量 m_d g	819.00					
試 料 番 号 (深 さ)								
最 小 密 度	(炉乾燥質量+モールド)質量 m_1 g		960.68	961.13	961.14	961.45	960.87	
	炉乾燥質量 $m_1 - m_d$ g		141.68	142.13	142.14	142.45	141.87	
	乾 燥 密 度 ρ_{dmin} g/cm ³		1.253	1.257	1.257	1.260	1.254	
	平 均 値 ρ_{dmin} g/cm ³		1.256					
最 大 密 度	(炉乾燥質量+モールド)質量 m_2 g		1000.23	1001.14	1000.87			
	炉乾燥質量 $m_1 - m_d$ g		181.23	182.14	181.87			
	乾 燥 密 度 ρ_{dmax} g/cm ³		1.602	1.610	1.608			
	平 均 値 ρ_{dmax} g/cm ³		1.607					
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		2.640	最大間隙比 e_{max}		1.102	乾 燥 密 度 ρ_d g/cm ³		
間 隙 比 e			最小間隙比 e_{min}		0.643	相 対 密 度 D_r g/cm ³		
特 記 事 項								
試 料 番 号 (深 さ)								
最 小 密 度	(炉乾燥質量+モールド)質量 m_1 g							
	炉乾燥質量 $m_1 - m_d$ g							
	乾 燥 密 度 ρ_{dmin} g/cm ³							
	平 均 値 ρ_{dmin} g/cm ³							
最 大 密 度	(炉乾燥質量+モールド)質量 m_2 g							
	炉乾燥質量 $m_1 - m_d$ g							
	乾 燥 密 度 ρ_{dmax} g/cm ³							
	平 均 値 ρ_{dmax} g/cm ³							
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³			最大間隙比 e_{max}			乾 燥 密 度 ρ_d g/cm ³		
間 隙 比 e			最小間隙比 e_{min}			相 対 密 度 D_r g/cm ³		
特 記 事 項								
試 料 番 号 (深 さ)								
最 小 密 度	(炉乾燥質量+モールド)質量 m_1 g							
	炉乾燥質量 $m_1 - m_d$ g							
	乾 燥 密 度 ρ_{dmin} g/cm ³							
	平 均 値 ρ_{dmin} g/cm ³							
最 大 密 度	(炉乾燥質量+モールド)質量 m_2 g							
	炉乾燥質量 $m_1 - m_d$ g							
	乾 燥 密 度 ρ_{dmax} g/cm ³							
	平 均 値 ρ_{dmax} g/cm ³							
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³			最大間隙比 e_{max}			乾 燥 密 度 ρ_d g/cm ³		
間 隙 比 e			最小間隙比 e_{min}			相 対 密 度 D_r g/cm ³		
特 記 事 項								
試 料 番 号 (深 さ)								
最 小 密 度	(炉乾燥質量+モールド)質量 m_1 g							
	炉乾燥質量 $m_1 - m_d$ g							
	乾 燥 密 度 ρ_{dmin} g/cm ³							
	平 均 値 ρ_{dmin} g/cm ³							
最 大 密 度	(炉乾燥質量+モールド)質量 m_2 g							
	炉乾燥質量 $m_1 - m_d$ g							
	乾 燥 密 度 ρ_{dmax} g/cm ³							
	平 均 値 ρ_{dmax} g/cm ³							
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³			最大間隙比 e_{max}			乾 燥 密 度 ρ_d g/cm ³		
間 隙 比 e			最小間隙比 e_{min}			相 対 密 度 D_r g/cm ³		
特 記 事 項								

$$\rho_{dmin} = \frac{m_1 - m_d}{V} \quad \rho_{dmax} = \frac{m_2 - m_d}{V}$$

付属資料Ⅱ 試験のシミュレーション解析結果

1. 解析方法

回転杭の群杭効果に関する遠心模型実験を 3 次元 FEM 解析でシミュレートし、試験結果を補足する。

(1)モデル

1)解析モデル

中心杭を回転軸とする 1/8 円筒モデル、ソリッド要素とする（図-付Ⅱ.1）。

2)境界条件

地盤の領域端部をローラー支持とした。鋼管外面は半径方向変位を地盤と一致させた。羽根下面は鉛直方向変位を地盤と一致させる。鋼管と地盤との周面摩擦はバイリニアモデルとし、実験結果から表-付Ⅱ.1 の値を用いた。

3)地盤モデル

地盤モデルは、Duncan & Chang の非線形弾性体構成式と Mohr-Coulomb の破壊基準を組み合わせたモデルとした（式-付Ⅱ.1、付Ⅱ.2）。内部摩擦角 ϕ は、試験地盤の 3 軸圧縮試験結果を最大値とする応力依存を考慮した値とし、その他の解析パラメータは、単杭の試験で得られた荷重-変位関係を模擬できるように試行錯誤で求めた（図-付Ⅱ.2）。解析に用いたパラメータを地盤の物性値と併せて表-付Ⅱ.2 に示す。

$$E_t = \begin{cases} \left[1 - \frac{R_f(1-\sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos\phi + 2\sigma_3 \sin\phi} \right]^2 \cdot K \cdot P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n & (\sigma_1 - \sigma_3) \leq (\sigma_1 - \sigma_3)_f \\ E_t = 0 & (\sigma_1 - \sigma_3) > (\sigma_1 - \sigma_3)_f \end{cases} \quad \text{..... (付Ⅱ.1)}$$
$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cdot \cos\phi + 2\sigma_3 \sin\phi}{1 - \sin\phi}$$

$$B = K_b \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad \text{..... (付Ⅱ.2)}$$

ここに、 E_t ：接線弾性係数、 σ_1 ：最大主応力、 σ_3 ：最小主応力、 c ：粘着力、 ϕ ：内部摩擦角、 B ：接線体積圧縮係数、 P_a ：大気圧(1.033N/mm²)、 K, n, K_b, m, R_f ：モデルパラメータ(無次元量)、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ：Mohr-Coulomb の破壊条件

4)杭モデル

杭は線形弾性体とし、表-付Ⅱ.3 に示す物性値を用いた。杭先端径 D_w と杭径 D_p の比は、 $D_w / D_p = 2.0$ である。

(2)解析ケース

単杭および群杭（杭の中心間隔 $2.0D_p$ 、 $3.0D_p$ ）の 3 ケース

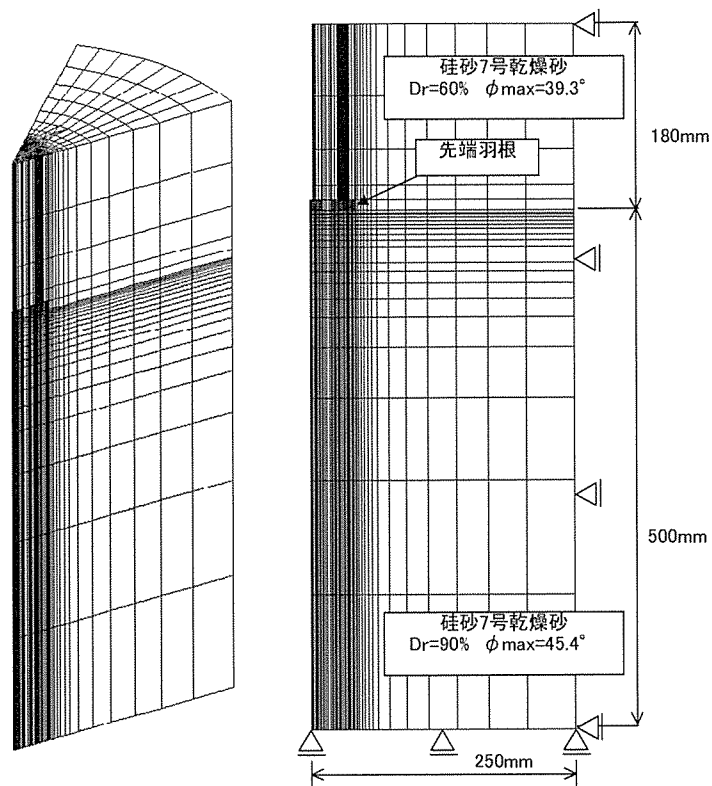


図-付Ⅱ.1 解析モデル（群杭の場合）

表-付Ⅱ.1 杭と地盤の周面摩擦

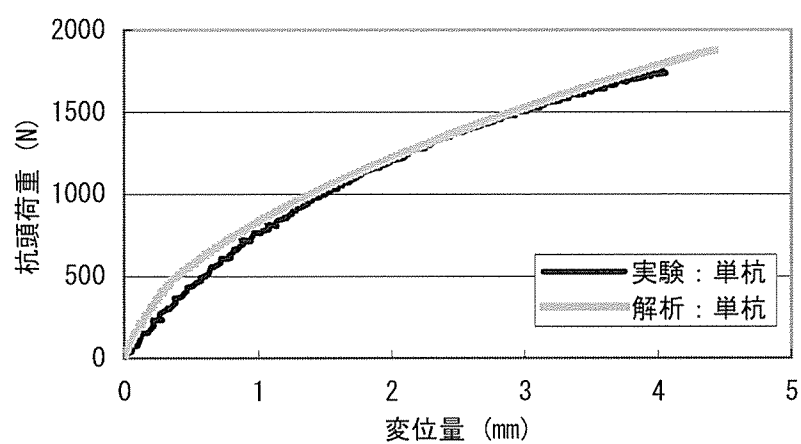
	単杭	群杭
周面摩擦力 Q_{max} (N)	74	124
τ_{max} (N/mm ²)	0.013	0.022
A_s (mm ²)	5608	5608
Δ_{max} (mm)	0.200	0.200

表-付Ⅱ.2 解析に用いる地盤パラメータ

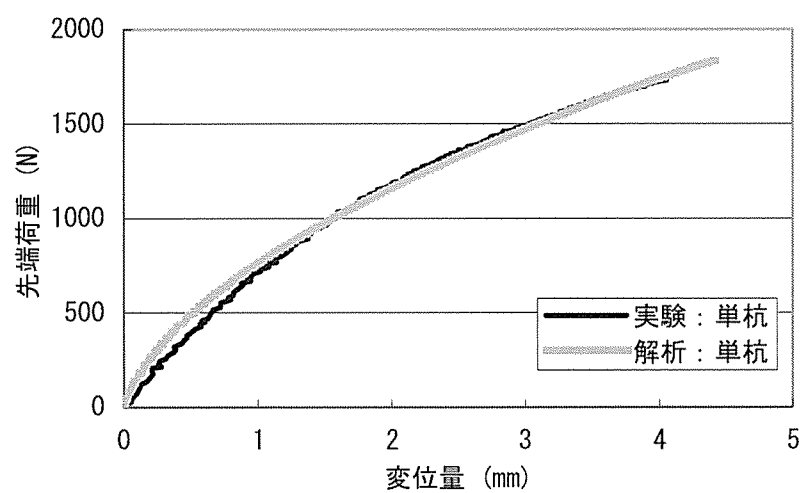
層	土質	密度 (kN/m ³)	解析用パラメータ						
			K	n	Kb	m	Rf	C	ϕ
上層	硅砂7号 乾燥砂 Dr=60%	14	700	0.6	0.75K	0.3	0.8	0	max39.3° 応力依存
支持層	硅砂7号 乾燥砂 Dr=90%	15	1350	0.6	0.75K	0.3	0.8	0	max45.4° 応力依存

表-付Ⅱ.3 杭の物性値

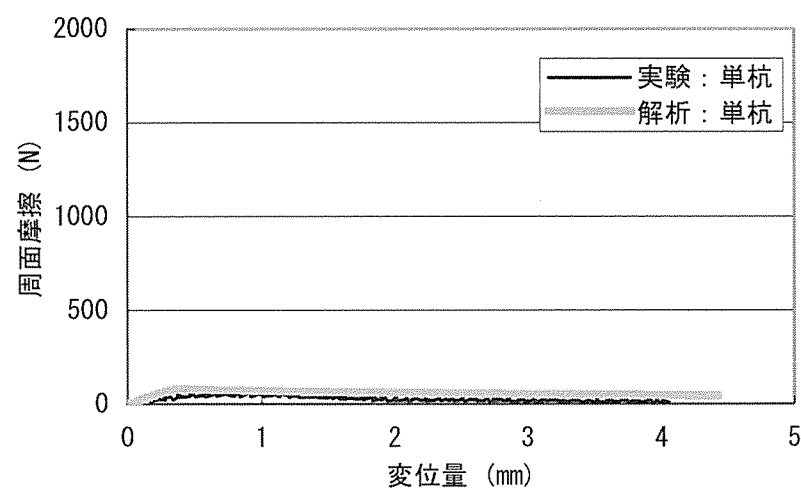
	外径 (mm)	E (N/mm ²)	ν	比重
鋼管部	10.5	206000	0.3	7.93
羽根部	21.0	206000	0.3	8.30



(1)杭頭荷重-杭頭変位関係



(2)杭先端荷重-杭頭変位関係



(3)杭周面抵抗力-杭頭変位関係

図-付Ⅱ.2 単杭の実験結果と解析結果

2. 解析結果

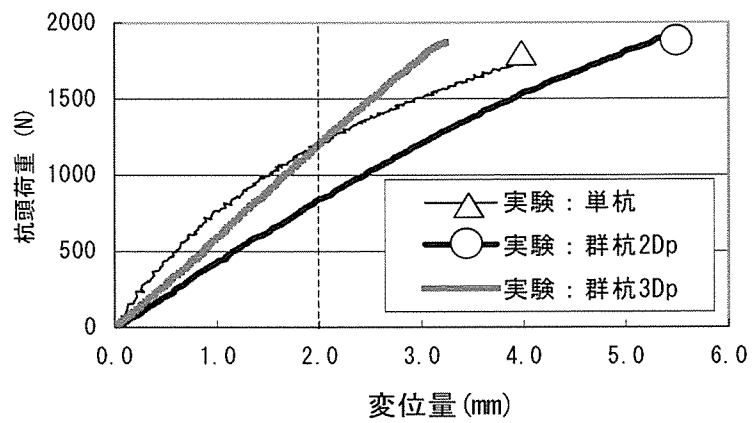
試験と解析の杭 1 本当たりの杭頭荷重-杭頭変位関係を図-付Ⅱ.3 に示す。単杭と群杭の試験結果を比較して以下の傾向が解析においても再現できていることが分かる。

- ① 初期の変位段階における荷重-変位量曲線の勾配（沈下剛性）は、単杭、群杭 3.0 D_p 、群杭 2.0 D_p の順に小さくなる。
- ② 変位が 2.0mm を超えると、群杭 3.0 D_p の杭 1 本当たりの杭頭荷重（鉛直支持力）は、単杭の値よりも大きくなる。

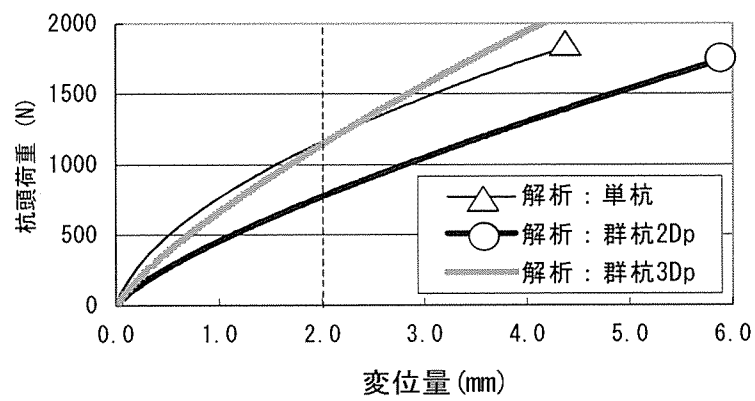
杭位置による杭頭荷重-杭頭変位の関係を図-付Ⅱ.4 に示す。変位が大きくなると、中心杭、辺中央杭、隅杭の順に荷重分担が大きくなっており、試験結果と比較的整合している。なお、この傾向は杭中心間隔が小さい群杭 2.0 D_p の方が顕著である。

図-付Ⅱ.5 に支持地盤の鉛直応力分布を示す。単杭と群杭とを比較すると、鉛直応力の大きさを表す塗りつぶしの濃度は同程度であるが、群杭は変位が 0.5mm の時点においても同程度の応力となる範囲が隣接杭と繋がっている。さらに、同程度の応力の範囲は、群杭では鉛直・水平方向ともに単杭に比べて大きくなっており、地盤の変形範囲が広くなることを示している。これより、変位が小さい時点において、群杭の沈下剛性が小さくなるという実験結果を説明できる。

図-付Ⅱ.6 に支持層の各有限要素毎のせん断応力比 $((\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)_f)$ を示す。塗りつぶしの濃度が薄い程、せん断破壊に近い状態であることを表している。単杭直下の支持地盤は、変位が 2.0mm の段階でせん断破壊であることを示す領域が球根状に広がっているのに対し、群杭 3.0 D_p では中心杭直下の支持地盤がせん断破壊には至っていない。これより、支持地盤が砂である場合、群杭では隣接する杭によって地盤の拘束圧を高めてせん断強度を増加させる効果があると考えられる。

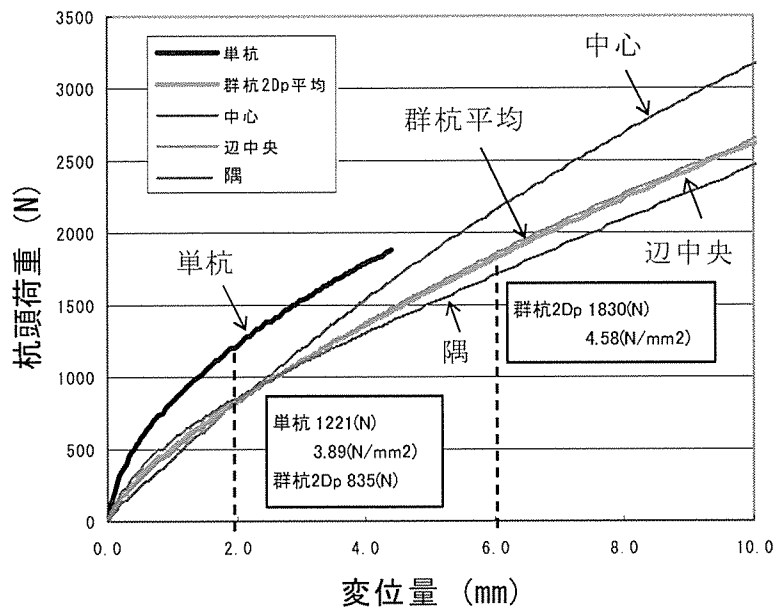


(a) 実験結果

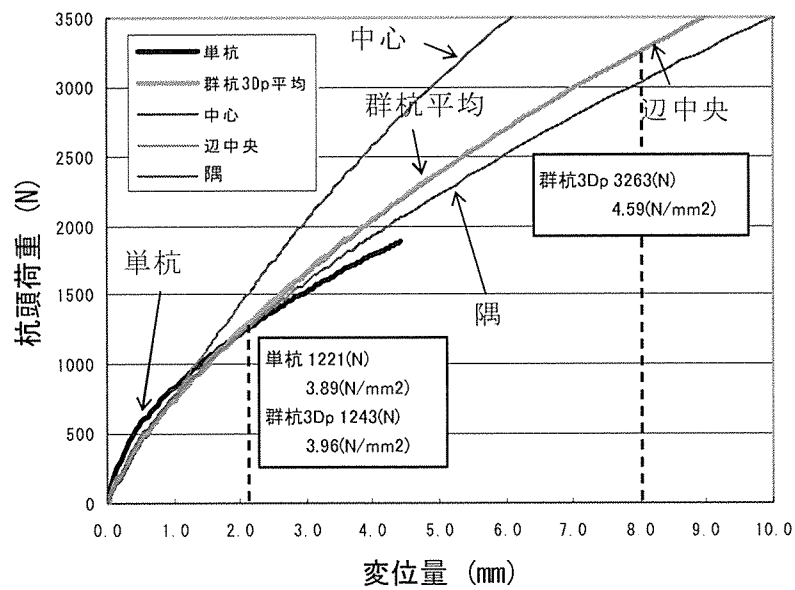


(b) 解析結果

図-付Ⅱ.3 群杭の杭頭荷重-杭頭変位関係（試験結果と解析結果）

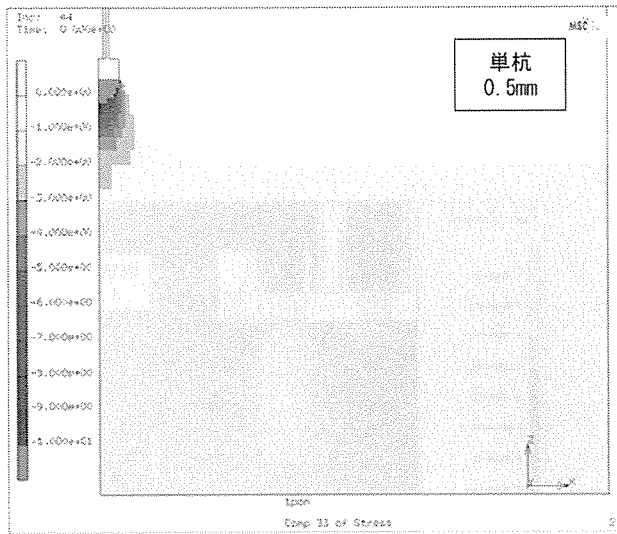


(a) 群杭 2.0 D_p

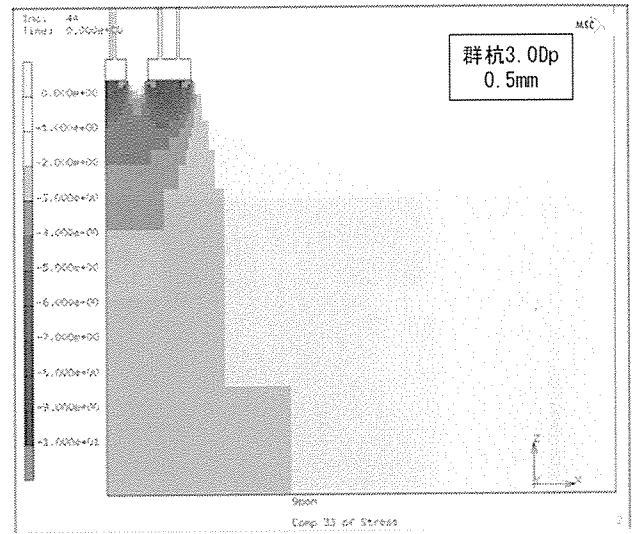


(b) 群杭 3.0 D_p

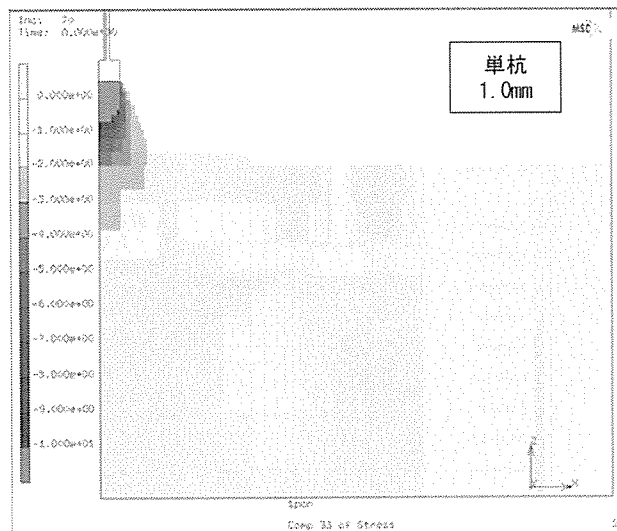
図-付Ⅱ.4 杭位置による杭頭荷重-杭頭変位関係



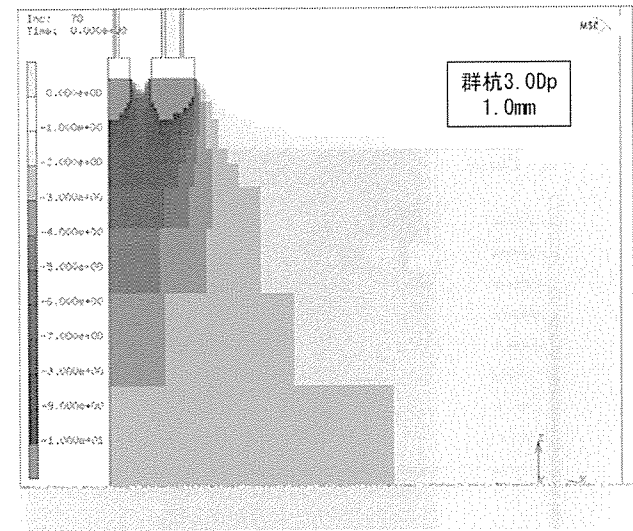
(a) 单杭、変位 0.5mm



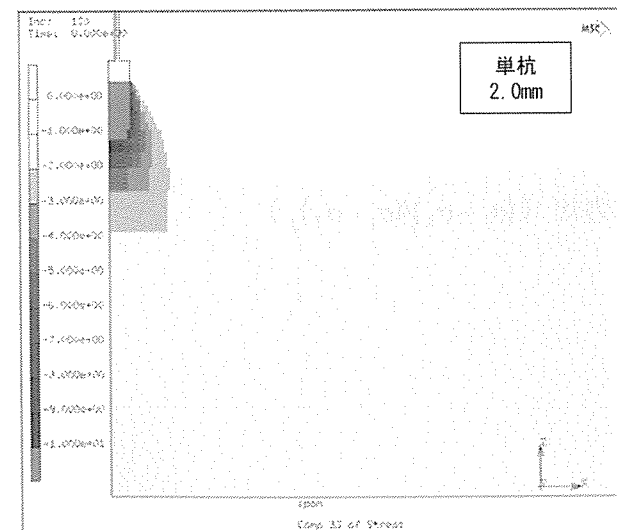
(b) 群杭 3.0D_p、変位 0.5mm



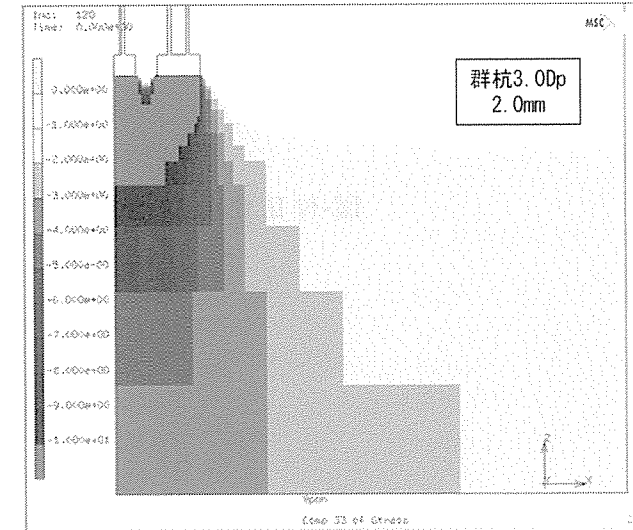
(c) 单杭、変位 1.0mm



(d) 群杭 3.0D_p、変位 1.0mm

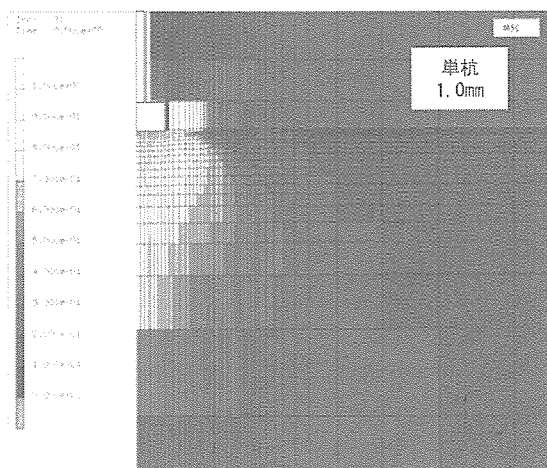


(e) 单杭、変位 2.0mm

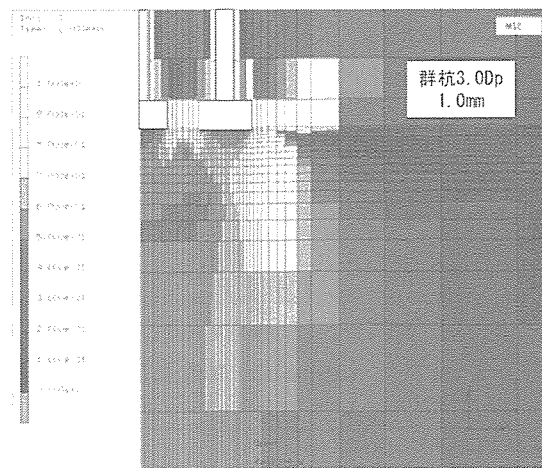


(f) 群杭 3.0D_p、変位 2.0mm

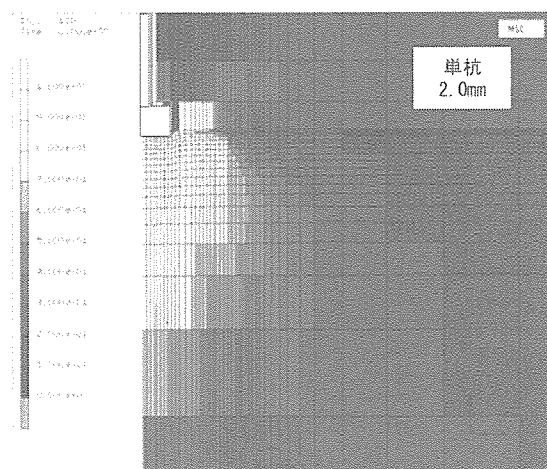
図-付Ⅱ.5 支持地盤の鉛直応力分布



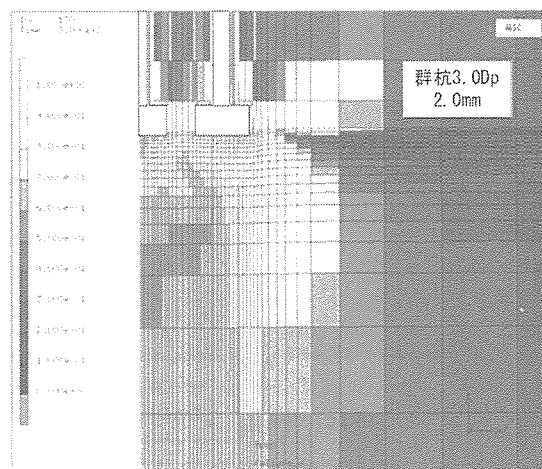
(a) 单杭、変位量 1.0mm



(b) 群杭 3.0D_p、変位量 1.0mm



(c) 单杭、変位量 2.0mm



(d) 群杭 3.0D_p、変位量 2.0mm

図-付Ⅱ.6 支持地盤のせん断応力比 $((\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)_f)$

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4107 March 2008

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754