

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

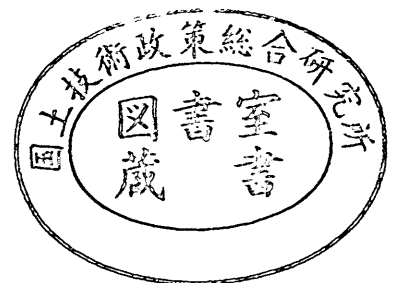
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 38

NO. 3

Sept. 1999

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第 38 卷 第 3 号 (Vol. 38, No. 3), 1999 年 9 月 (Sept. 1999)

目 次 (CONTENTS)

1. Nonlinear Model for Wave Fields with Current
..... Md. Hasanat ZAMAN and Tetsuya HIRAISHI 3
(流れが考慮できる非線形波浪の計算モデルについて
..... エムディ・ハサナット ジャーマン・平石哲也)
2. 液化した砂地盤による消波システムの開発
... 姜 閔求・高橋重雄・山本 悟・三浦裕信・高野忠志・下迫健一郎・鈴木高二朗 29
(Development of a New Wave Absorbing System Using a Sand Liquefaction
..... Yoon-Koo KANG, Shigeo TAKAHASHI, Satoru YAMAMOTO, Hironobu MIURA,
Tadashi TAKANO, Ken-ichiro SHIMOSAKO and Kojiro SUZUKI)
3. 海面水位の変動が内湾域への水環境に及ぼす影響
— 大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構 —
..... 日比野忠史・豊田政史・西守男雄・細川恭史・鶴谷広一 91
(Consequence of Sea level Distribution for an Estuary Environment along Japanese Coastal Waters
— Generation and Breakdown Mechanisms for Anoxic Layers in Ohfunato Bay —
..... Tadashi HIBINO, Masashi TOYOTA, Dan-o NISHIMORI, Yasushi HOSOKAWA
and Hiroichi TSURUYA)
4. 数値処理からみた CVM (仮想評価法) の信頼性分析
— 船舶事故による流出油対策の評価への適用事例 —
..... 鈴木 武 125
(An Analysis on the Reliability of CVM in Data Treatment Process
— The Application to Value the Countermeasures against Oil Spill Caused by Ship Accidents —
..... Takeshi SUZUKI)
5. 海成粘土地盤の間隙比 - 有効土被り圧関係に関する統一的な解釈
..... 土田 孝 153
(Unified Interpretation on the Void Ratio-Overburden Pressure Relationship of Marine Deposits
..... Takashi TSUCHIDA)

6. 低改良率で改良された杭式深層混合処理地盤の鉛直支持力
..... 北誥昌樹・中村 健・森永真朗・宇高 泰 181
(Centrifuge Model Tests on Bearing Capacity of Column Type DMM Ground with Low
Improvement Ratio
..... Masaki KITAZUME, Takeshi NAKAMURA, Masao MORINAGA and Yasushi UDAKA)
7. コンテナターミナルにおける荷繰り最小化による荷役効率化
..... 門前唯明・田邊俊郎・中島 晋 199
(Increasing the Container-Handling Efficiency by Minimizing of Rehandling at a Container Terminal
..... Tadaaki MONZEN, Toshiro TANABE and Susumu NAKASHIMA)
8. ファジィ制御および泥水リサイクルによるドラグサクシオン浚渫船の高効率化
..... 加藤英夫・谷本裕史・原田貴久 209
(Efficiency Improvement of Trailing Suction Hopper Dredger by Soil-water Mixture Recycling
System and Automatic Operation System with Fuzzy Control
..... Hideo KATO, Hirofumi TANIMOTO and Takahisa HARADA)

低改良率で改良された杭式深層混合処理地盤の鉛直支持力

北詰昌樹*・中村 健**・森永真朗***・宇高 泰****

要 旨

深層混合処理工法は、軟弱粘土にセメントやセメント系固化材などの化学的安定材を原位置で添加し、強制的に攪拌混合して地盤中に強固な安定処理土を形成する工法である。同工法による改良地盤の形式は、ブロック式、格子式、壁式、杭式の4つに大きく分類できる。このうち杭式改良地盤は、現在では主として沈下対策や側方変位対策などを目的に盛土下または盛土法尻下部に造成されることが多い。杭式改良地盤に関する現行設計法では、円弧すべり計算による改良地盤の安定性の検討と応力分担比を考慮した沈下の検討が行われている。

杭式改良地盤の支持力や破壊挙動に関しては、これまでいくつかの実験的・解析的研究が行われている。その中で、改良杭はせん断破壊するものがあるものの、大きな水平力を受ける改良杭は曲げ破壊を生じることが述べられている。さらに、改良杭が一度に破壊するのではなく、順次破壊していく進行性破壊現象が生じることも述べられている。一方、セメント改良土の曲げ強度や引張り強度は圧縮強度に比べて小さいことも知られており、改良杭の破壊モードの違いや進行性破壊挙動を考慮していない現行設計法は支持力を過大に評価している可能性が高いと考えられる。

これらの地盤の挙動についても、個々の改良杭の破壊モードの違いや進行性破壊などに不明瞭な点も多い。そこで、本研究では、比較的低い改良率 ($ap=30\%$ 程度まで) で広い範囲に杭状に改良された地盤の鉛直支持力について、遠心模型実験と円弧すべり計算による検討を行った。また、低改良率の杭式地盤は表層固化処理工法と併用されることも多いため、本研究では表層固化処理層の支持力への効果についても検討を行った。

キーワード：土質安定処理，粘性土，支持力，破壊，遠心模型実験，円弧すべり計算

* 土質部地盤改良研究室長

** 土質部地盤改良研究室 研究官

*** 土質部地盤改良研究室 研究員

**** 不動建設(株) (前土質部地盤改良研究室研修生)

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 電話番号：0468-44-5023 FAX 番号：0468-41-8098

e-mail：kitazume@cc.phri.go.jp

Centrifuge Model Tests on Bearing Capacity of Column Type DMM Ground with Low Improvement Ratio

Masaki KITAZUME * • Takeshi NAKAMURA **

Masao MORINAGA ** • Yasushi UDAKA ***

Synopsis

In Japanese coastal areas, many constructions often encounter very soft clay deposits. A large number of soil improvement techniques have been developed in order to reinforce these soft marine clays. Deep Mixing Method (DMM) is frequently used in Japan in the constructions of port and harbor facilities. Numerous research papers have described different aspects of the DMM. It is known that the compressive strength of the improved soil is much greater than that of the soft soil. The modulus of deformation is large and the strain at failure is very small range. In contrast to the compressive strength the bending and tensile strengths are very small range. Due to these features the DMM improved ground is considered to possess a brittle behavior which is very different from that of the unimproved soft soil.

Principally four improvement patterns of the DMM application are known – block, wall, grid and column types. The column type DMM has been often applied for constructions of embankment and lightweight structure. In the current design in Japan the stability of the group column type DMM should be investigated mainly by a slip circle analysis in which the shear strength of the improved ground is estimated as average shear strength of improved and unimproved soils. But the behavior of column type improved ground has not yet been clarified precisely.

The authors investigated the behavior of the DMM column type improved ground with relatively low improvement ratio. The investigation was carried out by centrifuge model tests where a prototype behavior can be simulated in a scaled model by means of the centrifugal acceleration. The model foundation was subjected to vertical load under a 50g acceleration field in order to investigate failure pattern of the column and bearing capacity of the improved ground. It was found that the bearing capacity of column type DMM improved ground was governed not only by the shear strength but also by the bending tensile strength of the columns. The experimental data were compared with slip circle analyses. In this paper, the failure pattern of the column and bearing capacity of the ground were described as well as the model ground preparation and procedure.

Keywords : Soil stabilization, Clay, Bearing capacity, Failure, Centrifuge model test

* Chief of Soil Stabilization Laboratory, Geotechnical Engineering Division

** Research Engineer of Soil Stabilization Laboratory, Geotechnical Engineering Division

*** Fudo Construction Co. Ltd. (former Research Trainee of Soil Stabilization Laboratory, Geotechnical Engineering Division)

Nagase 3-1-1, Yokosuka 239-0826, JAPAN

Pone : +81-468-44-5023 FAX : +81-468-41-8098 e-mail : kitazume@cc.phri.go.jp

目 次

要 旨	181
1. まえがき	185
2. 実験装置および試料	185
2.1 遠心模型実験装置	185
2.2 試料容器および載荷装置	186
2.3 地盤材料	186
3. 地盤作製方法および実験方法	186
3.1 模型地盤の作製	186
3.2 実験ケース	188
4. 実験結果および考察	189
4.1 地盤の強度分布	189
4.2 荷重～沈下関係	189
4.3 破壊パターン	192
4.4 改良率と破壊荷重の関係	194
4.5 支持力の推定	196
5. 結論	196
6. あとがき	197
参考文献	197
記号一覧表	197

1. まえがき

深層混合処理工法（DMM）は、軟弱粘性土地盤にセメントやセメント系固化材などを添加し、現地盤で攪拌混合して強固な改良地盤を造成する工法である。同工法による改良パターンは一般に、ブロック式、格子式、壁式、杭式に大別される。このうち、ブロック式、壁式改良パターンは比較的大きな抵抗力が期待できることから、防波堤や護岸・岸壁などの港湾構造物などに広く用いられている¹⁾。一方、杭式改良パターンは改良体に作用する水平外力が比較的小さい陸上工事において、盛土基礎の支持力増強、沈下低減、滑り破壊防止などに用いられることが多い²⁾。

杭式改良地盤に関する現行設計法²⁾では、円弧すべり計算による改良地盤の安定性の検討と応力分担比を考慮した沈下の検討が行われている。安定性の検討では、改良地盤の強度として、改良杭の非排水せん断強度と粘土地盤の非排水せん断強度より求められる平均せん断強度を用いた円弧すべり計算が行われている。

杭式改良地盤の支持力や破壊挙動に関しては、これまでいくつかの実験的・解析的研究^{3) - 6)}が行われている。その中で、改良杭はせん断破壊するものがあるものの、大きな水平力を受ける改良杭は曲げ破壊を生じることが指摘されている³⁾。さらに、改良杭が一度に破壊するのではなく、順次破壊していく進行性破壊現象が生じることも述べられている³⁾。一方、セメント改良土の曲げ強度や引張り強度は圧縮強度に比べて小さいことも知られており、改良杭の破壊モードの違いや進行性破壊挙動を考慮していない現行設計法は支持力を過大に評価している可能性が高いと考えられる。

筆者らは杭式深層混合処理工法により改良された地盤の変形・破壊挙動ならびに支持力特性について、粘土地盤上に建設された防波堤を例に遠心模型実験で検討している。これまでの研究⁶⁾では、ケーソン式防波堤を対象に改良率（ ap ）が56%～79%と比較的高く、またケーソン下の狭い範囲のみを改良したケースを対象としている。そして、研究の結果、荷重条件や改良杭の位置によって、改良杭の破壊モードが異なり、安定性の検討では個々の改良杭の破壊モードを考慮する必要性を指摘している。

一方、道路などの比較的平坦な地盤の沈下対策として、低改良率の杭式深層混合処理工法も用いられる事例が増加している²⁾。この場合にも円弧すべり計算による支持力の検討や応力分担比による沈下量の計算が行われている。これらの地盤の挙動については、個々の改良杭の破

壊モードの違いや進行性破壊などに不明瞭な点も多い。そこで、本研究では、比較的低い改良率（ $ap=30\%$ 程度まで）で広い範囲に杭状に改良された地盤の鉛直支持力について、遠心模型実験と円弧すべり計算による検討を行った。また、低改良率の杭式地盤は表層固化処理工法と併用される事例も多いため、本研究では表層固化処理層の支持力への効果についても検討を行った。

2. 実験装置および試料

2.1 遠心模型実験装置

本研究では、当研究所の所有する遠心模型実験装置（Mark II）を用いて実験を行った。本装置は、対象となる実物地盤の $1/N$ の模型地盤に Ng の遠心加速度を付加することによって、実物と模型の幾何学的に相似な位置での外力と自重による応力を一致させることができ、小型の模型実験で現地の挙動を再現できるものである。当研究所の遠心模型実験装置は、最大有効半径3.8m、最大遠心加速度113g、最大搭載質量2.71ton、最大容量300g*tonである。装置の詳細な緒元および周辺機器の詳細については文献⁷⁾を参照されたい。

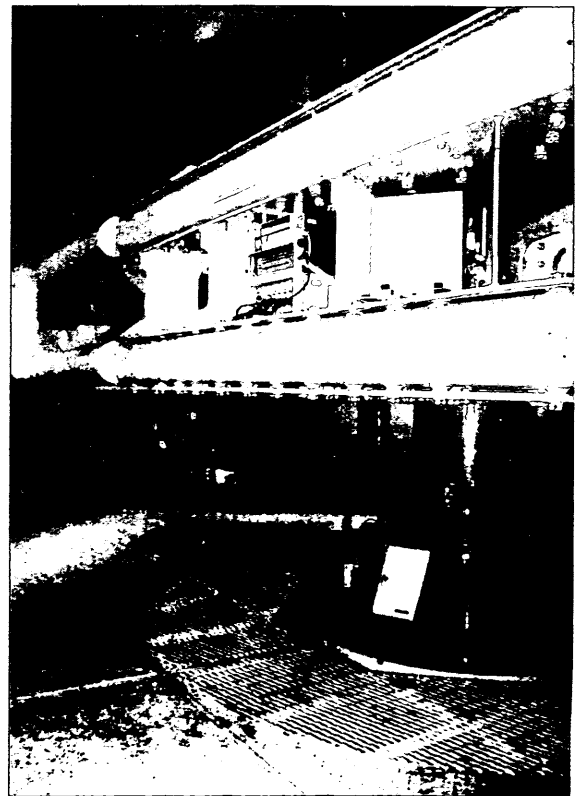


図-1 遠心模型実験装置

2.2 試料容器および載荷装置

本実験で使用した試料容器は、内寸法で横幅70cm、深さ60cm、奥行き20cmの剛性の高いものである。容器前面にはガラス窓が取り付けられており、実験中の模型地盤の挙動が観察できるようになっている。その他の容器内面にはレキサンシートと呼ばれる厚さ1mmのポリカーボネイト樹脂シートを貼り付け、その表面にシリコンオイルとシリコングリースを混合したものを塗付して、試料容器と模型地盤との間での摩擦をできる限り低減させるように工夫している。また、載荷試験には図-2に示す鉛直載荷装置を用い、改良地盤に一定の載荷速度（6.9mm/min）で鉛直に載荷を行った。

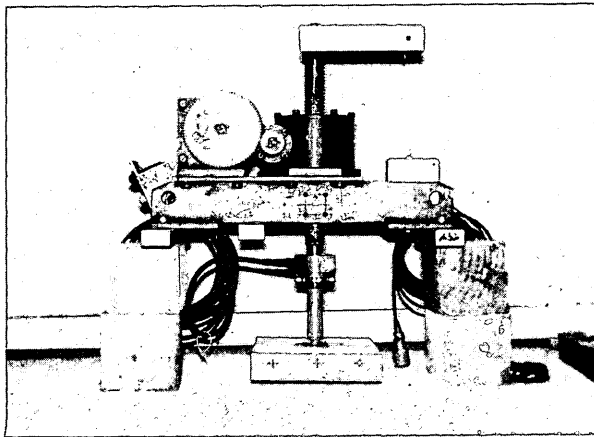


図-2 鉛直載荷装置

2.3 地盤材料

本実験では粘土地盤として市販のカオリン粘土（ASP-100と5Mカオリンの1:1の混合土）（いずれも土屋カオリン工業製、平成8年度に購入）を用いた。用いたカオリン粘土は一般の海成粘土に比べ圧密係数（ C_v ）が大き

く、圧密に要する時間が短くなる利点がある。粘土層下部の基礎砂層およびマウンドには、特性の良く知られている豊浦標準砂を用いた。さらに、改良杭には当研究室で長年用いられ特性値も良く調べられている川崎粘土を普通ポルトランドセメントと安定処理をして作製した。表-1と表-2にはカオリン粘土と川崎粘土について物理特性ならびに力学特性をそれぞれ示している⁶⁾。

3. 地盤作製方法および実験方法

3.1 模型地盤の作製

模型地盤の概略と実験手順のフローを図-3と図-4にそれぞれ示した。実験フローに従い、以下に地盤の作製方法を述べる。

(1) 下層地盤の作製（透水砂層）

まず、地盤下層に豊浦標準砂で厚さ25cm程度の支持層を作製した。この砂層は粘土地盤の圧密中には排水層として機能し、また載荷実験中には基礎砂層としても機能するものである。そのため、砂層は十分に締固めを行った後に容器底部の通水口より水を徐々に浸透させて十分に飽和させるように努めた。

(2) 粘土地盤の作製（カオリン粘土層）

下部砂層作製後、容器の内側にシリコンオイルとシリコングリースを1:1の割合で混合したものを均等に塗付し、試料容器と模型地盤との摩擦を極力抑えるようにした。その後、約3時間真空中で攪拌してスラリー状になった含水比120%のカオリン粘土を気泡が入らないように注意しながら試料容器内に投入した。その後、ベロフラムシリンダーを用いて 10kN/m^2 の圧密圧力の下で予備圧密を行った。

表-1 カオリン粘土および川崎粘土の物理特性

粘土の種類	比重 G_s	コンシステンシー特性 (%)			粒度特性 (%)		
		W_i	W_p	I_p	砂分	シルト分	粘土分
カオリン粘土(S60年度)	2.692	59.0	16.8	42.2	0	35.6	64.4
カオリン粘土(H8年度)	2.689	63.8	26.8	37.0	1.0	22.0	77.0
川崎粘土	2.688	83.4	38.6	44.8	2.7	44.8	52.2

表-2 カオリン粘土および川崎粘土の力学特性

粘土の種類	強度増加率 C_u/P	圧密係数 C_v (cm ² /min)	圧縮係数 C_c	膨潤指数 C_s
カオリン粘土(S60年度)	0.314	0.15	0.49	0.12
カオリン粘土(H8年度)	—	0.10	0.54	0.09
川崎粘土	0.300	0.03	0.59	0.11

予備圧密の終了後、地盤表面に変位計、水位計を設置した。その後、遠心模型実験装置に搭載し、50gの遠心加速度場で自重圧密を行った。圧密中は地表面沈下を計測し、 \sqrt{t} 法により90%以上の圧密を確認して自重圧密を終了した。自重圧密後には地盤の含水比の測定とハンドペーンによるペーン試験を行った。また、いくつかの実験ケースでは、自重圧密終了直後に50g場で作動するペーン試験機を用いて地盤強度の計測を行った。

(3) 改良杭の作製

改良杭は模型地盤とは別に以下の手順に従い作製した。含水比を16%に調整した川崎粘土に、粘土の乾燥重量に対して20%程度の普通ポルトランドセメントを添加して約10分攪拌した。作製したスラリー状の処理土を、改良杭用の直径2cm、長さ25cmの円筒形の亚克力パイプ内に打設した。その後、温度20°で湿度98%の恒温恒湿槽

内で3週間程度養生の後、図-5に示すように電動ジャッキで亚克力パイプより脱型した。その後、改良杭の長さを各実験ケースに適合するように両端の整形を行った。

(4) 改良杭の粘土地盤への打設

自重圧密の完了した粘土地盤に所定の改良率になるように改良杭を打設した。改良杭の打設ではまず、粘土地盤に外径20mmの薄肉アルミパイプを貫入し、パイプの外側の粘土地盤を乱さぬようにパイプ内の粘土を排出した。そして、アルミパイプを引き抜いた後の粘土地盤に出来た内径20mmの孔に作製しておいた改良杭をゆっくりと押し込んだ(図-6参照)。

(5) 表層固化処理層の作製

本研究では、後掲する表-3に示すように全部で11ケースの実験を行った。そのうち、CASE9～CASE12については杭式改良と表層固化処理を行った。表層固化処理層は、

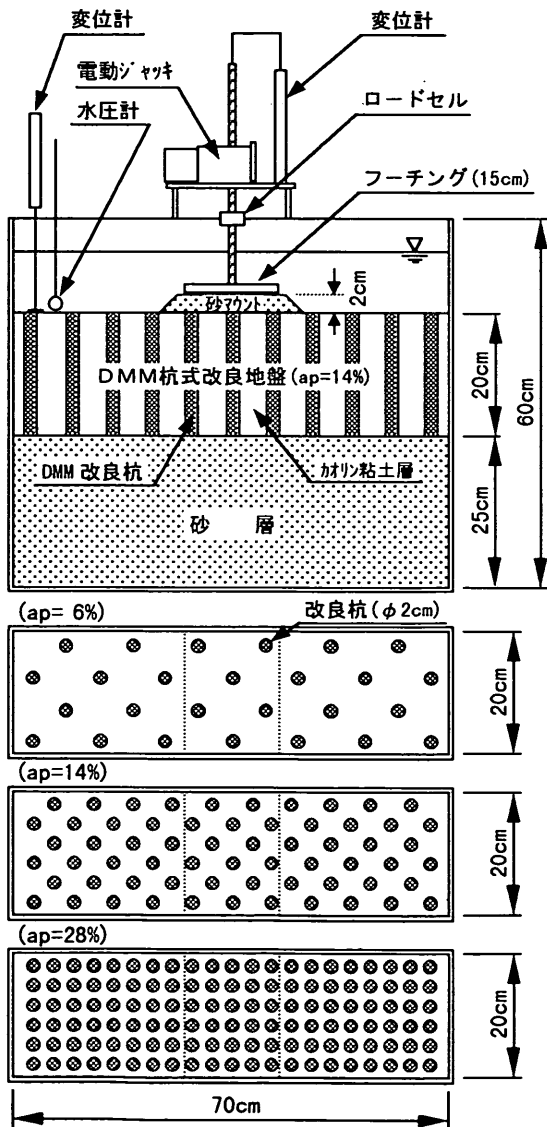


図-3 模型地盤の概略図

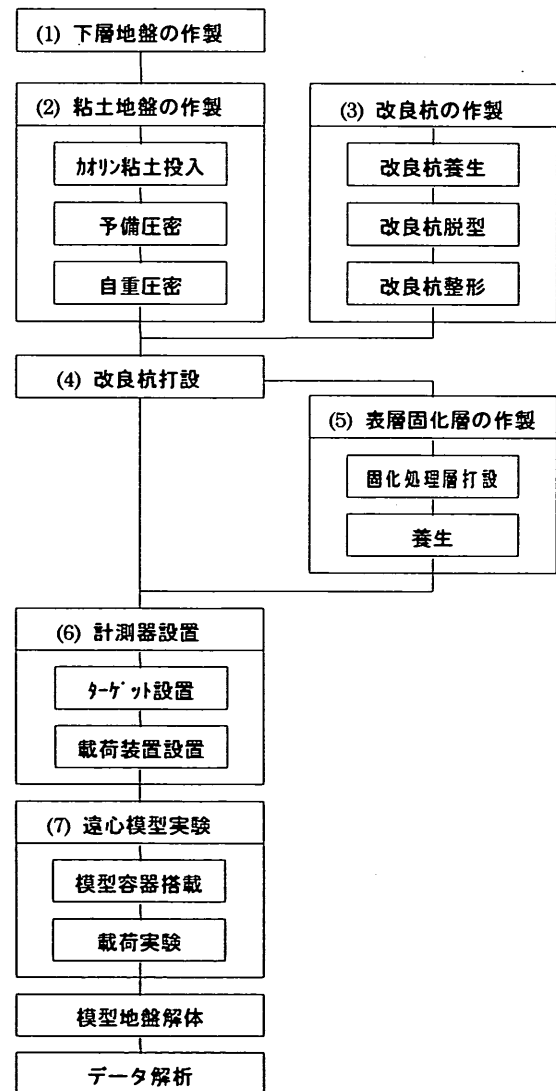


図-4 実験フロー図

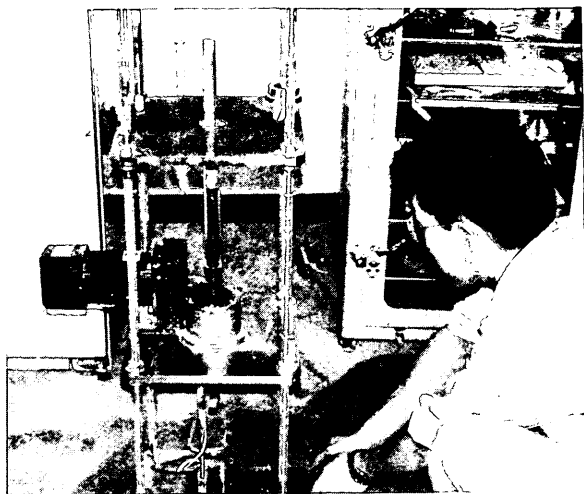


図-5 改良杭の脱型状況

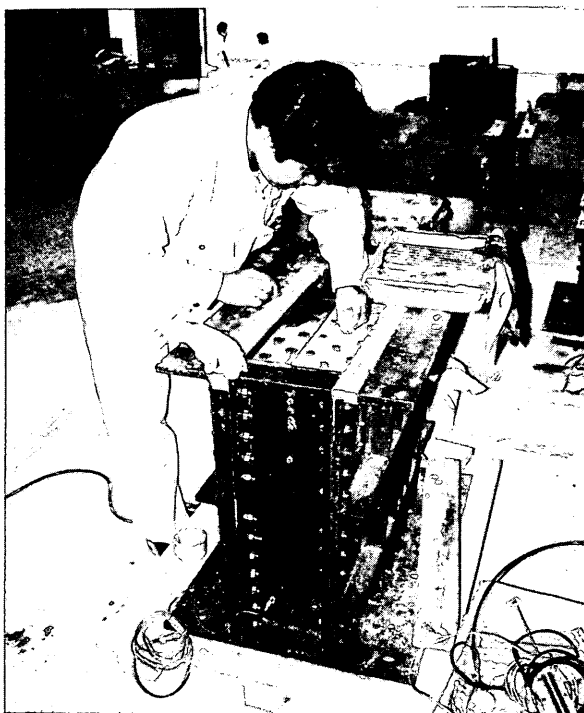


図-6 改良杭の打設状況

含水比を160%に調整した川崎粘土に普通ポルトランドセメントを添加し、約10分攪拌したスラリー状の処理土を杭状に改良された粘土地盤表面全体に所定の高さまで処理土を流し込んで作製した。表層固化処理層のある場合の改良杭は粘土地盤の層厚よりも5mm~10mm長目にしておき、打設時には杭頭が少し地盤から出た状態にして、表層固化処理層と密着するようにした。なお、その場合の粘土地盤は表層固化処理の層厚だけ薄く作製しており、粘土地盤と表層固化処理層の厚さの合計が全実験ケースで20cm程度となるようにした。

(6) 計測器と載荷装置の設置

改良杭および表層固化処理層の打設後、試料容器前面のガラス面を取り外して粘土地盤側面に手芸用ビーズと着色した素麺をターゲットとして配置し、実験中の地盤の変位挙動を観察出来るようにした。さらに、載荷実験中の地表面の鉛直変位および水位の変動を計測するために、変位計と水位計を試料容器に取り付けた。また、容器下部にも水圧計を設置して砂層中の水圧を測定した。

改良地盤に鉛直荷重を作用させるために、フーチングを剛結した鉛直載荷装置を試料容器上面に設置した。載荷装置にはロードセルおよび変位計が取り付けられており、フーチングに作用する鉛直荷重と変位を測定できるようになっている。なお、フーチングの底面は豊浦標準砂を貼り付けて粗な状態にしている。

(7) 遠心模型実験

準備の完了した模型地盤及び載荷装置は、遠心模型実験装置に搭載され50gの遠心加速度まで加速した。50g場で再度圧密し改良粘土地盤を安定させた。圧密中は粘土地盤表面の沈下を計測して圧密の進行を確認した。地盤の圧密終了を確認した後、載荷装置を用いて模型地盤に鉛直載荷を行った。載荷実験は数分程度以内に行ったため、ほぼ非排水状態での載荷と考えられる。

3.2 実験ケース

本研究では表-3に示した11ケースの実験を行った。表中、CASE5を除くCASE1~CASE8までは模型地盤全域にわたって杭式改良を施しが表層固化処理は行わなかった。一方、CASE9~CASE12の場合には、杭式改良と表層固化処理を実施した。なお、表中の改良杭の強度(q_u)は、実験終了後に試料容器を解体して取り出した改良杭に対する一軸圧縮試験結果の平均値であり、また表層固化処理層の強度は同時に作製した供試体(直径5cm、高さ10cm)に対する一軸圧縮試験で求めた平均値である。

表-3 実験ケース一覧

	粘土層厚 (cm)	改良率 (%)	改良杭強度 (KN/m^2)	固化処理層 の表層厚 (cm)	固化処理層 の表層強度 (KN/m^2)	破壊荷重 (N)
CASE1	20.3	14	465	-	-	1534
CASE2	21.2	28	515	-	-	2338
CASE3	21.5	28	420	-	-	2585
CASE4	21.4	6	476	-	-	980
CASE6	21.3	6	1200	-	-	2186
CASE7	22.2	28	591	-	-	3145
CASE8	21.1	28	1137	-	-	4204
CASE9	23.3	6	554	2	1137	1414
CASE10	21.1	28	689	2	943	5228
CASE11	17.9	14	621	4	147	2406
CASE12	17.9	28	755	8	1218	10163

4. 実験結果および考察

4.1 地盤の強度分布

まず、50g場での自重圧密終了後に測定した地盤中の含水比分布を図-7に示した。図には、すべての実験ケースで得られたの値をプロットしている。図より、実験値にはばらつきが見られるが、全般的には深度方向に低下する含水比分布が得られている。カオリン粘土は除荷に伴う膨潤量が大きいので、図中の圧密試験からの推定値よりも実験値は全体に大きいことが分かる。

いくつかの実験ケースでは、自重圧密終了後に50gの遠心加速場でペーン試験を行い、粘土地盤の深度方向の強度分布を測定した。なお、試験では直径2cm、高さ4cmのペーン羽根を用いた。得られた地盤強度分布を図-8に示した。ここでも、試験値には多少ばらつきが見られるが、全般的には深度方向に増加する強度分布が得られていることが確認された。

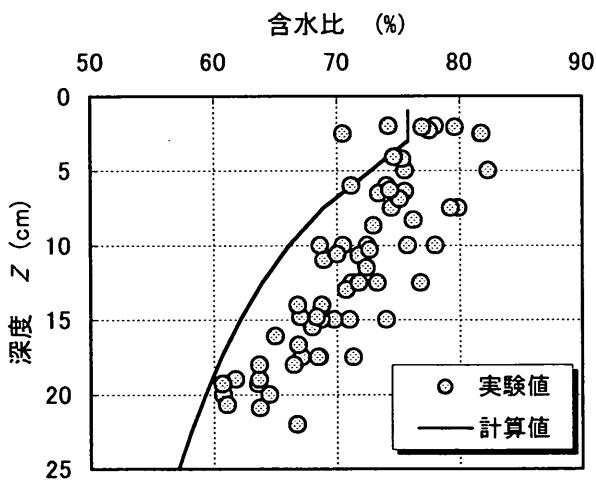


図-7 含水比の深度分布

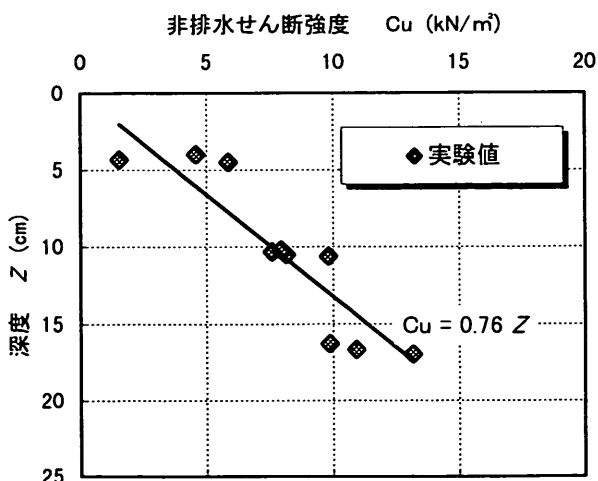


図-8 地盤強度の深度分布

4.2 荷重～沈下関係

(1) 表層固化処理層のない場合

まず、表層固化処理層がなく改良杭の改良率 (ap) が6%で強度の異なるCASE4とCASE6について、フーチングの鉛直荷重と沈下の関係を図-9に示した。図-9(a)では、縦軸は鉛直荷重をフーチング断面積で除した応力を、横軸はフーチングの沈下量をフーチングの幅で無次元化した値をそれぞれ示している。まず、改良杭の強度が大きいCASE6について見ると、載荷開始より鉛直応力が急増し、フーチングの沈下量 ($\delta v/B$) が0.07程度の比較的小さい沈下量の時にピークを示しているのが分かる。その後は、一旦は大きく減少するが載荷にともない再び増加を示しより大きなピーク荷重を示している。一方、改良杭の強度が比較的小さいCASE4では、載荷の初期にはCASE6とほぼ同じ荷重増加傾向を示しているが、フーチング沈下量が0.05程度で曲線に偏曲点が見られ、その後は載荷にともない鉛直荷重がわずかながら増加する傾向が見られる。

図-9(b)には、鉛直荷重を改良地盤の平均非排水せん断強度 (Cua) で除して求めた支持力係数 (Nc) との関係を示した。平均非排水せん断強度 (Cua) ならびに支持力係数 (Nc) は下式に示すように求めた。なお、粘土地盤のせん断強度 (Cuc) は図-8に示した様に深度方向にほぼ直線的に増加するが、ここでは地盤中央深度での非排水せん断強度を代表値として計算した。図より、載荷初期には、改良杭の強度の小さいCASE4の方が大きな荷重増加傾向を示していることが分かる。しかし、荷重～沈下曲線のピーク時及び偏曲点での支持力係数は改良杭の強度に拘わらず、ほぼ同程度の支持力係数となっていることが分かる。また、その係数の大きさは、1.6程度であり、通常の粘土地盤での値 (5.14) に比較すると1/3程度以下と小さいことが分かる。

$$Cua = Cut ap + Cuc (1 - ap) \quad (1)$$

$$Nc = P / A / Cua \quad (2)$$

ここに、

A : フーチングの断面積

ap : 改良杭の改良率

Cua : 改良地盤の平均非排水せん断強度

Cuc : 粘土地盤の非排水せん断強度

Cut : 改良杭の非排水せん断強度

Nc : 支持力係数

P : フーチングの鉛直荷重

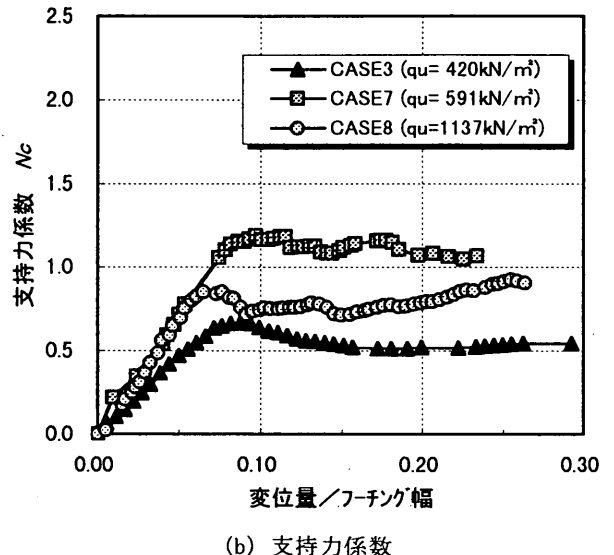
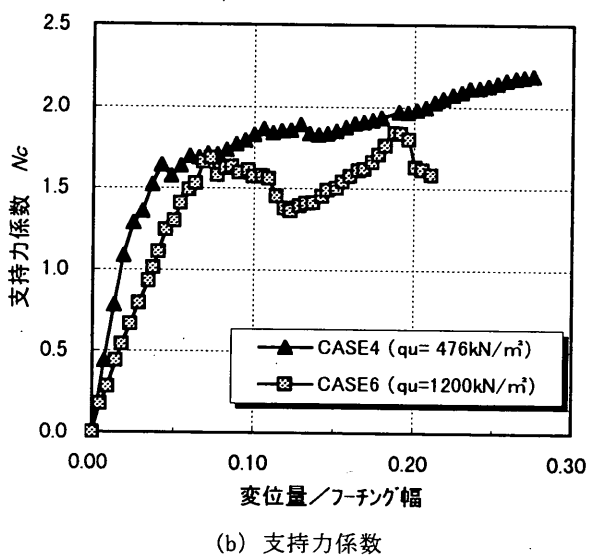
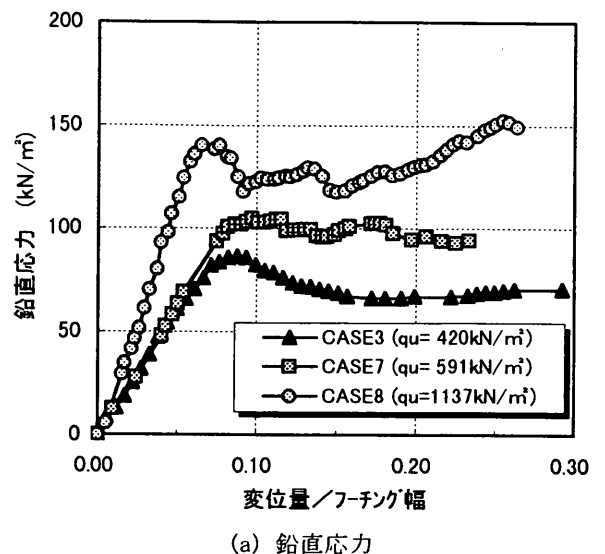
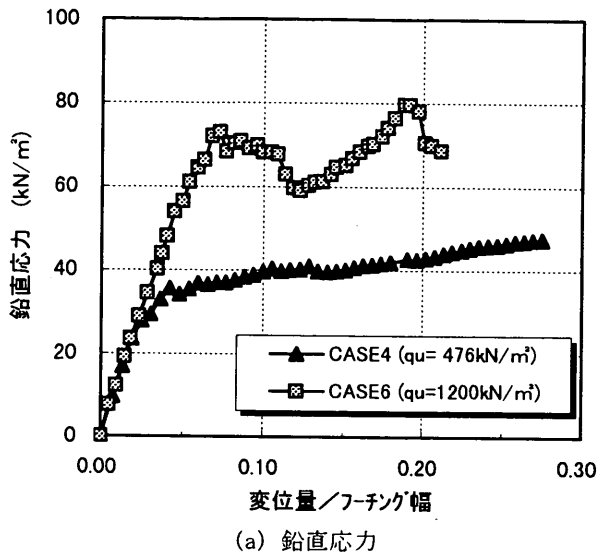


図-9 荷重～沈下関係 ($a_p=6\%$)

図-10 荷重～沈下関係 ($a_p=28\%$)

次に、改良率が 28%の場合について、改良杭の強度の異なる 3 ケースの荷重～沈下関係を図-10 に示した。まず、改良杭の強度が大きいCASE8 について見ると（図-10(a)）、荷重初期に非常に大きな荷重増加傾向を示し、その後フーチング沈下量（ $\delta v/B$ ）が0.07程度の非常に小さい沈下量でピークを示していることが分かる。一方、改良杭の強度が小さいCASE3 及びCASE7 の場合には、荷重初期に荷重が急増するものの、その増加傾向はCASE8 よりも多少小さいことが分かる。また、荷重～沈下曲線にはわずかにピークが見られるもののCASE8 ほどは明瞭ではない。さらにピーク後には荷重はほぼ一定値を示すことが分かる。

図-9(b)と同様に、支持力係数（ N_c ）と沈下との関係を図-10(b)に示した。図より、改良杭の強度が最も小さ

いCASE3 の場合には支持力係数も最小の値を示しているが、改良杭の強度が最も大きいCASE8 よりも改良杭強度の小さいCASE7 の方がより大きな支持力係数を示していることが分かる。このように、同じ改良率であっても改良杭の強度によって支持力係数の大きさが異なることが確認された。

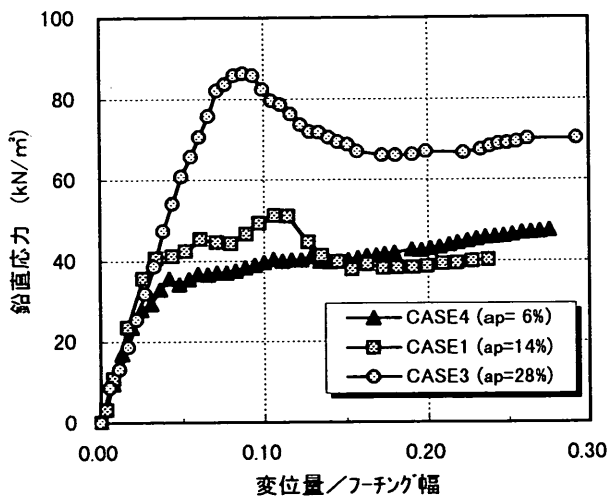
さらに、図-11 には改良杭の強度がほぼ同じで、改良率が 6%、14%、28%と異なる 3 ケースについての荷重～沈下曲線を示した。図より、3 ケースの中で改良率が 28%と最も大きいCASE3 では、荷重初期に急速に荷重が増加した後に荷重に明確なピークが現れ、ピーク後に比較的大きな荷重低下現象が見られている。一方、改良率の一番低いCASE4 の場合には荷重初期の荷重増加傾向はCASE3 とほぼ同程度であるが、荷重～沈下曲線にはピーク

が見られず、荷重の偏曲点以降は沈下にともない鉛直荷重が徐々に増加し続ける傾向が見られる。また、改良率がCASE4 とCASE3 の間であるCASE1 について見ると、載荷初期の荷重増加傾向は他の2ケースとほぼ同様であり、小さい沈下の時に荷重の増加傾向が小さくなり、荷重～沈下曲線に偏曲点が見られる。その後、沈下にともない荷重は徐々に増加して小さなピークを示していることが分かる。

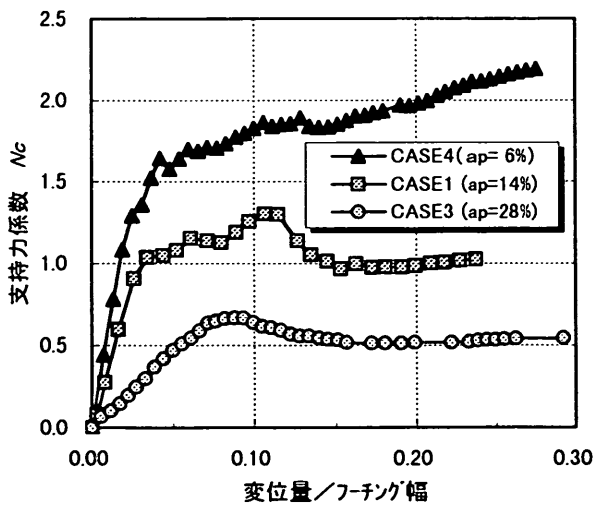
図-11 (b)には、支持力係数 (N_c) との関係を示した。この場合、改良率の最も大きなCASE3 が最も小さな支持力係数を示し、最も改良率の小さいCASE4 が最も大きな値を示していることが分かる。改良杭の改良率によっても支持力係数は大きく変化し、改良率が大きいほど支持力係数は小さくなる傾向が見られる。このことは、改良

杭の占める割合が大きくなっても、比例的に支持力が大きくなるものではないことを示しており、改良杭の脆性的な特徴や後述する改良杭の破壊パターンの影響が大きいものと考えられる。

これらのことから、改良杭の改良率が低く、強度も比較的小さい場合には、載荷初期には比較的大きな荷重増加傾向を示すものの、その荷重～沈下曲線には明瞭なピークが見られず、軟弱な粘土の応力～ひずみ曲線に似た傾向の形状となり、粘土地盤の挙動が強く現れていることが分かった。しかし、改良率が高く、改良杭の強度も比較的大きくなるにしたがって、その荷重～沈下曲線には明瞭なピーク荷重が見られるようになり、改良土の応力～ひずみ曲線に似た脆性的な傾向を示すようになることが分かった。



(a) 鉛直応力



(b) 支持力係数

図-11 荷重～沈下関係 (改良率の影響)

(2) 表層固化処理層のある場合

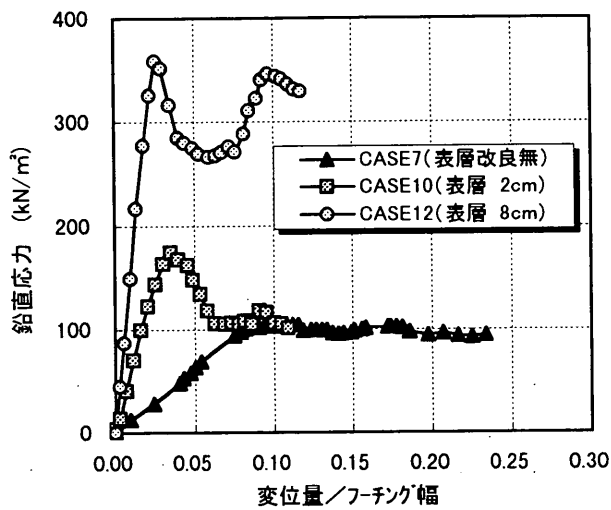
次に、地盤の表層部分に厚さ 2cm～8cmの表層固化処理層を設けたケース (CASE9～CASE12) について検討する。図-12 には、改良杭の改良率が 28%で表層固化処理層の厚さの異なるCASE10とCASE12の荷重～沈下曲線を示している。

まず、表層固化処理層の厚さが 2cmのCASE10について見ると、載荷に伴い急速に鉛直荷重が増加し、フーチングの沈下量 ($\delta v/B$) が 0.04程度の非常に小さい沈下量の時にピークが見られる。そして、その後は載荷に伴い鉛直荷重が約 45%ほど急激に減少した後、ほぼ一定値に収束する傾向が見られる。次に表層固化処理層の厚さが 8cmと厚い場合 (CASE12) について見ると、載荷初期に鉛直荷重が急増し、非常に小さい沈下量でピーク荷重が見られる。その後は一旦荷重が減少するが、その低下割合は約 25%程度でCASE10よりも小さい。さらに載荷を続けると、再度鉛直荷重が増加しピークを生じている。図には、比較のために改良率が 28%で表層固化処理層の無いCASE7 も併せて示している。表層固化処理層のない場合には、載荷に伴う鉛直荷重の増加傾向は表層固化処理層のある場合に比べて小さいことが分かる。また、載荷を続けると荷重～沈下曲線に偏曲点は見られるがピークは見られずほぼ一定の荷重となっている。

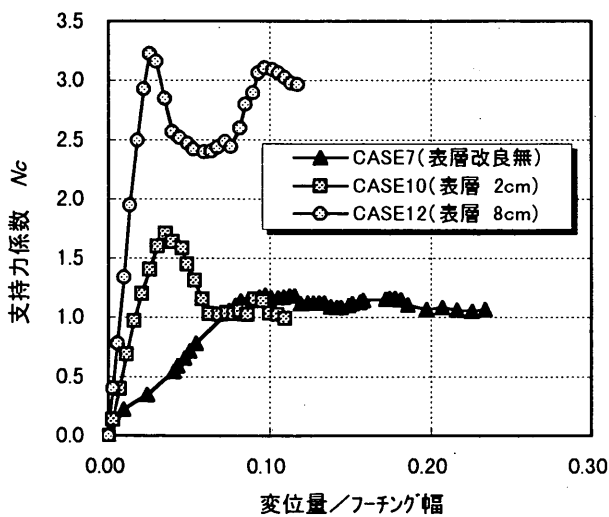
CASE7 とCASE10での改良杭の強度は、表-3に示す通り 14%程度異なっているが、図より、CASE7 の載荷後半の荷重の大きさとCASE10の大きさがほぼ同じであることが分かる。これは、表層固化処理層は載荷初期の支持力や沈下抑制に大きな効果を及ぼすものの、載荷を続け表層固化処理層が破壊した後は支持力にほとんど寄与しなくなることを示している。特に、この場合後掲する地盤の

破壊パターンを見ると分かるように、表層固化処理層はフーチング端部で打ち抜かれるように破壊しており、改良杭の破壊パターンには大きな影響を与えていないことから推定できる。

図示した3ケースとも改良杭の改良率は28%と同じであるが、杭強度は590~750kN/m²程度と多少異なっている。そこで、これまでと同様に地盤の平均強度を基にした支持力係数(N_c)と沈下量との関係を図-12(b)に示す。ここで、地盤の平均強度は表層固化処理層を無視して式(1)で求めた。図より、表層固化処理層の厚さや強度が大きければ大きいほど、改良地盤の破壊荷重も増加し、荷重~沈下曲線もより急激な荷重増加の割合を示し、改良体特有の脆性的な挙動が明瞭に表れてくることが分かった。



(a) 鉛直応力



(b) 支持力係数

図-12 荷重~沈下関係 (表層固化処理層の影響)

4.3 破壊パターン

(1) 表層固化処理層の無い場合

遠心場での载荷実験後、模型地盤を解体して模型杭の破壊状況を観察した。そのうち、図-13には改良杭の改良率(a_p)が6%で表層固化処理層が無いCASE6についての改良杭の破壊状況を示した。改良率が非常に小さく千鳥状に配置したため、フーチング下には一列あたり1~2本の改良杭しかフーチング下にはない。図より、フーチング中央の直下に配置されていた改良杭はフーチングの沈下とともに大きな圧縮を受け、それによって改良杭には上から下へ斜め方向に走る破壊面が見られ、改良杭がせん断破壊されていることが分かる。一方、フーチング外側に配置された改良杭やフーチング下でも端部近くの改良杭はフーチングの貫入にともない、圧縮よりもフーチング外側に大きく押し出される傾向が見られる。そして、改良杭には直線的な破壊断面が見られ、せん断破壊ではなく曲げ破壊を起こしていることが分かる。

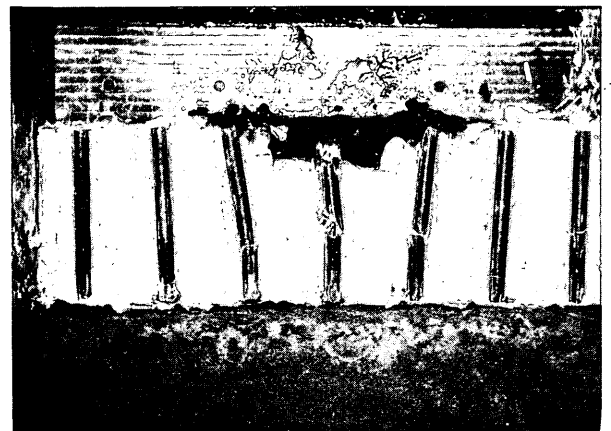


図-13 改良杭の破壊パターン (CASE6)

次に、改良率(a_p)が28%のCASE7についての破壊パターンを図-14に示した。この場合には、フーチング直下の3本の改良杭は、フーチングの貫入によって大きく圧縮を受け、上から下へ斜めに走る明確なせん断破壊断面が生じていることが分かる。一方、フーチングの外側に位置する改良杭は、フーチングの沈下に伴い外側に押し出され、大きな水平力を受けていることが分かる。そして、大きな水平力による曲げモーメントが発生し、その結果改良杭の数カ所直線的な折れ曲がる箇所が見られ、そこで曲げ破壊が生じていることが分かる。このように、改良率に拘わらず、改良杭の設置位置によってせん断破壊または曲げ破壊のように破壊パターンが大きく変化することが分かった。

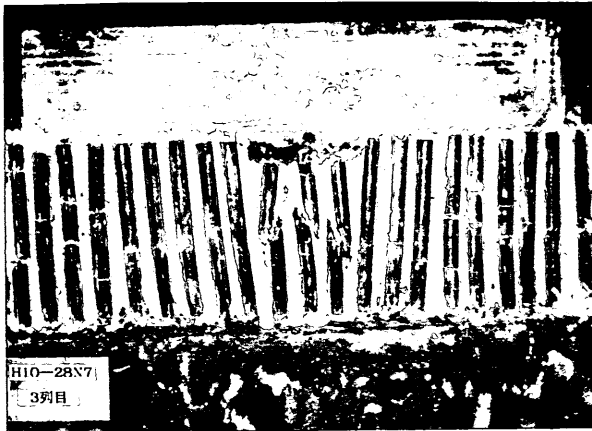


図-14 改良杭の破壊パターン (CASE7)

以上のことより、表層固化処理層のない杭式改良の地盤では、改良杭の改良率によらず荷重に伴いフーチング直下の改良杭は大きく圧縮されてせん断破壊を生じるが、フーチング端部やフーチングの外側に位置する改良杭は外向きに大きく押し出されるように変位し、その結果、曲げ破壊が生じるものと考えられる。これらのことより、改良杭の破壊にはせん断破壊と曲げ破壊という2つの破壊モードが存在し、それぞれの破壊モードはフーチングとの相対的な位置関係によって大きく変化することが分かった。

(2) 表層固化処理層のある場合

次に、粘土地表面に表層固化処理層のある場合について、改良杭ならびに表層固化処理層の破壊パターンについて考察する。

図-15には改良率28%で地盤表面に比較的層厚の小さい表層固化処理(層厚2cm)をしたCASE10の鉛直荷重実験後の破壊パターンを示している。図より、フーチングの貫入に伴い表層固化処理層がフーチングの部分だけ押し抜かれていることが分かる。そして、フーチングの直下の改良杭は大きく圧縮されてせん断破壊特有の破壊パターンが見られる。一方、フーチングの外側に位置する改良杭は、改良杭頭部は表層固化処理層によってほぼ固定されているが、地盤中央深度付近では外側方向へ大きく押し出され、直線的な破壊断面が見られている。このような破壊パターンは、表層固化処理層のないCASE7(図-14)とほぼ同様である。

次に、改良率が28%で地表面に比較的厚い(8cm)表層固化処理を施した場合(CASE12)の破壊パターンを図-16に示した。この場合には、フーチングを貫入させても表層固化処理層には図-15で見られた様なパンチング

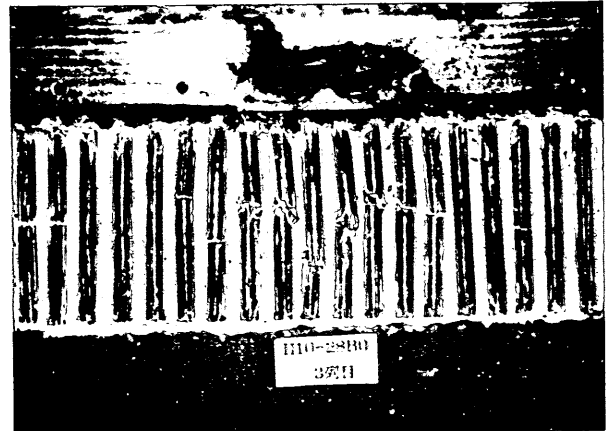


図-15 破壊パターン (CASE10)

破壊は見られていない。そして、表層固化処理層はフーチングだけでなく、その両側の10cm~15cmの範囲の処理層が鉛直方向に大きなたわみを起こして沈下している。その結果、フーチングよりも広い範囲の改良杭が下へ押し込まれていることが分かる。そのため、フーチング直下だけでなく、その近辺の改良杭も大きな圧縮を受けて明確なせん断破壊をしていることが分かる。一方、それより外側の改良杭は、頭部は固定されているものの外側に押し出されて曲げ破壊を生じていることが分かる。

これらのことより、表層固化処理層の層厚の小さい場合には表層固化処理がパンチング破壊するために、処理層がない場合とほぼ同様な破壊パターンを示すが、表層固化処理層が厚くなると表層処理層の破壊パターンが変化することによって、フーチング直下及びその外側の比較的広い範囲の改良杭も大きく圧縮されてせん断破壊を生じ、表層固化処理層のない場合と改良杭の破壊状況が大きく変化することが分かった。

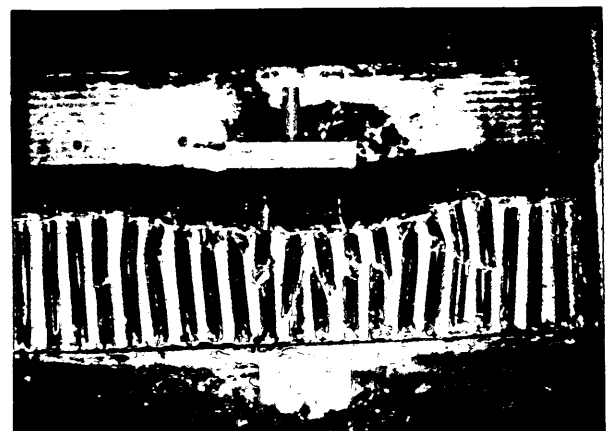


図-16 破壊パターン (CASE12)

4.4 改良率と破壊荷重の関係

(1) 表層固化処理層のない場合

ここでは、表層固化処理層のない場合について、各実験ケースで得られた極限支持力と改良杭の改良率の関係について図-17 に示した。図中の横軸は、改良杭の改良率 (ap) を示しており、縦軸は式(1) で定義される一種の支持力係数 (Nc) を示している。

図より、改良率 (ap) が大きくなるほど実験値より求められた Nc の値は、1.0程度から 0.5程度へ徐々に減少する傾向が見られる。現行の設計法²⁾ による計算結果も図中に (a-1) として併せて示した。現行の設計法では、改良杭のせん断強度を $qu/2$ として改良地盤全体の平均せん断強度を用いた修正フェレニウス法による円弧滑り計算を行うこととなっている。計算値は、改良率が0%の時の 3.8程度から ap が大きくなるに従って約 2 近くまで減少する傾向が見られる(今回の整理では深度方向に強度の増加する地盤の支持力を地盤中央での Cu で代表させた支持力係数で表している)。実験値と比較すると、計算値は実験値を 2 倍程度も過大に評価していることが分かる。

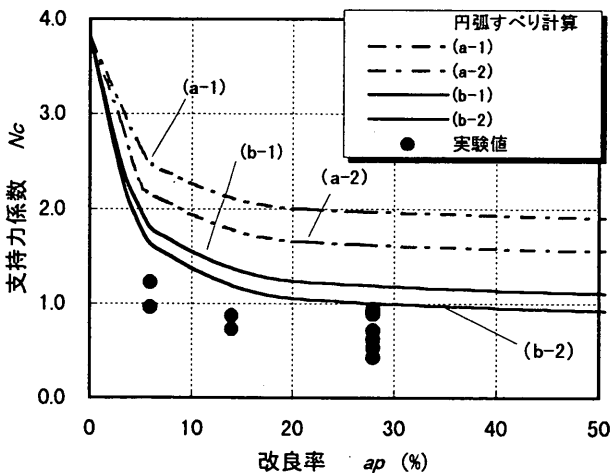


図-17 改良率～破壊荷重関係

これまでいくつかの研究でも指摘されているように、本実験の場合でも改良杭は全ての杭が一度に破壊するのではなく順次に破壊する進行性破壊現象が生じていると予想される。そこで次に、この進行性破壊³⁾ を考慮した計算を行う。進行性破壊の影響を詳細に考慮するためには、载荷中の個々の改良杭の破壊状況を詳細に観察することが必要である。本研究でも、改良杭上に土圧計を設置して改良杭の破壊状況の把握に努めたが、実験値のばらつきもあり改良杭の破壊状況についての十分な知見を

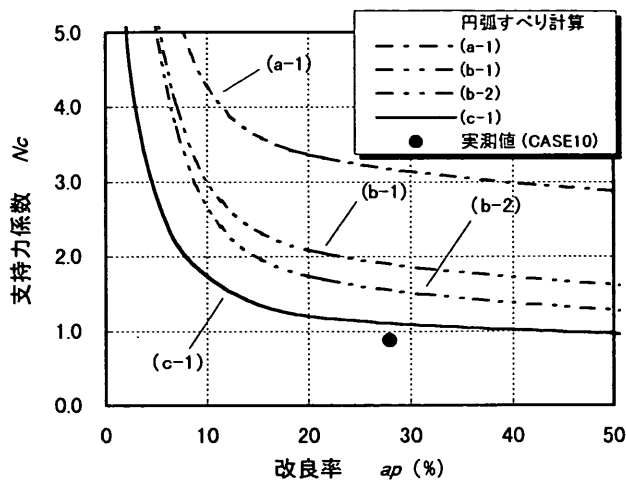
得るまでには至らなかった。そこで、ここでは簡単のため改良杭がすべて破壊したとした場合についての計算を行うこととした。このような計算は、実際の支持力の下限値を与えるものと考えられる。セメントによる安定処理土の残留強度に関してはいくつかの研究例⁹⁾ があるが、拘束圧がわずかでもある場合の残留強度は一軸圧縮強さの約 75%～95%程度と言われている。そこで、本計算では改良杭の残留強度を一軸圧縮強さの 80%と仮定し、その 1/2を改良杭の非排水せん断強さ (Cut) として計算を行った。このようにして求められた支持力係数と改良率の関係を図-17 に(a-2) として示した。計算値は ap が 0%の時(粘土地盤の場合)には(a-1) の計算結果と同じであるが、 ap の増加とともに Nc は約 1.6にまで減少することが分かる。計算は、 ap が大きくなるほど Nc が減少するという点は実験値と同様な傾向を示しているが、依然として実験値を過大に評価していることが分かる。これは、図-13 と図-14 で示した様に、個々の改良杭はせん断破壊や曲げ破壊を生じているにも拘わらず、改良杭の破壊形態としてせん断破壊のみを仮定しているためと考えられる。

そこで、改良杭の破壊パターンを考慮した計算を行うこととした。载荷実験後の観察より改良杭の破壊モードをせん断破壊と曲げ破壊の2つに区分し、せん断破壊に区分された改良杭の強度は qu で、曲げ破壊に区分される改良杭の強度を曲げ強度程度 ($qu/10^9$) と仮定) として評価した。また、改良杭の曲げ強度を円弧すべり計算に導入するに当たっては仮定の水平力に置き換えた⁹⁾。このようにして求めた Nc と ap の関係を図に (b-1) として示した。また、進行性破壊を考慮した計算を (b-2) として示した。まず、計算値 (b-1) は、 ap が 0%の時には、(a-1) と (a-2) の計算結果は同じであるが、 ap の増加とともに Nc は (a-2) と比較しても急速に減少し、 ap が 20%程度になると約 1.2程度にまで減少することが分かる。また、計算値 (b-2) は (b-1) よりも小さめの値を示している。実験値と比較すると、計算値 (b-2) は実験を多少過大評価しているものの、全般的には実験値と比較的良好一致を示してくることが分かる。

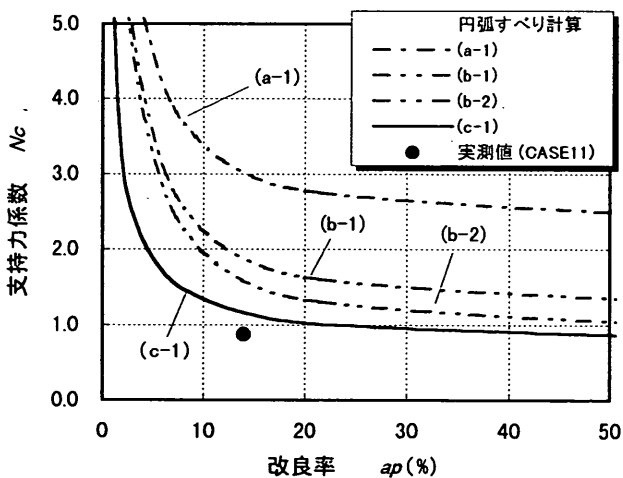
これらのことより、杭式改良地盤の支持力の推定には、改良杭の破壊モード及び進行性破壊の影響を考慮することが重要であることが分かった。

(2) 表層固化処理層のある場合

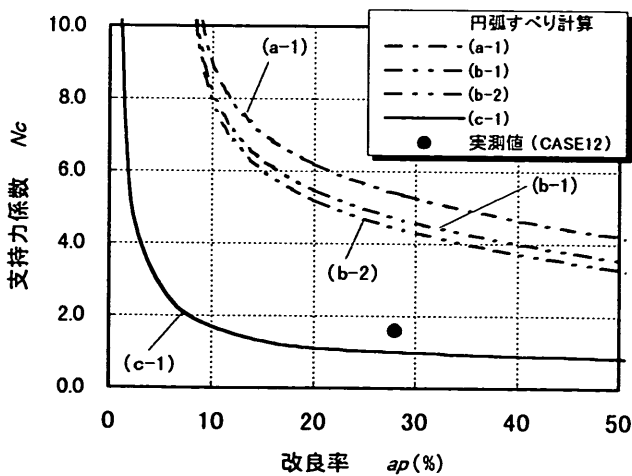
次に表層固化処理層のある場合について、図-18 に改良率 (ap) と支持力係数 (Nc) との関係を示した。ここで、支持力係数は表層固化処理層の強度は考慮せず、式



(a) 表層固化処理層厚2cm



(b) 表層固化処理層厚4cm



(c) 表層固化処理層厚8cm

図-18 鉛直支持力～改良率

(1) に示すように粘土地盤と改良杭の強度との面積平均をして求めた地盤強度を用いて計算を行った。

まず、表層固化処理層の層厚が 2cm の場合 (CASE10) について見る (図-18(a) 参照)。図中、改良杭及び表層固化処理層の破壊パターンをせん断破壊のみとした計算結果を (a-1) として示した。この場合には改良率の増加にしたがって表層固化処理層の効果が相対的に小さくなるため、改良率の増加にともない計算の支持力係数も減少する傾向が見られる。しかし、図にあわせて示した実験値と比較すると、計算値は実験値を非常に過大評価していることが分かる。そこで、表層固化処理層の破壊パターンはせん断破壊のままとし、改良杭の破壊パターンのみせん断破壊と曲げ破壊に区分した計算結果を図に (b-1) として示した。計算値は、(a-1) よりも小さな値となり実験値に近づく傾向が見られる。しかし、実験値と比較すると依然として過大に評価していることが分かる。また、改良杭の進行性破壊を考慮した計算値を (b-2) として示したが、この場合にはより実験値に近い値を示すことが分かる。このように改良杭の破壊パターンのみを考慮することでは不十分であることが分かる。

そこで、表層固化処理層の破壊パターンも考慮した計算を行った。表層固化層の破壊パターンは図-15 に示した様に比較的小さい層厚の場合にはパンチング破壊の様な破壊が生ずることが分かる。そこで、表層固化処理層の強度の発揮割合として、 qu の 30% として計算を行った結果を図に (c-1) として示した。図より、計算値は実験値と比較的良好一致を示すことが分かる。改良杭ならびに表層固化処理層の破壊パターンを考慮することで実験値を適切に評価できるようになることが分かる。

表層固化処理層の厚さが、4cm と 8cm の場合についても同様の計算を行い、図-18(b) 及び図-18(c) に示した。ここでも、改良杭の破壊モードのみを考慮した場合の計算結果を (a-1) や (b-1) と示しているが、計算値は実験値を適切に評価することはできないことが分かる。一方、改良杭と表層固化処理層の両方の破壊モードを考慮した計算を図に (c-1) の様に示しているが、計算値は実験値と比較的良好一致を示すようになることが分かる。なお、表層固化処理層が 8cm と大きい場合 (図-18(c)) には、表層の強度の発揮割合を 10% 程度まで小さくする必要があるようである。

このように、表層固化処理層のある場合には、改良杭だけでなく表層固化処理層の破壊パターンも考慮することが重要であり、これらを考慮した計算値は実験値を比較的良好に評価できることが分かった。

4.5 支持力の推定

これまで、改良杭ならびに表層固化処理層の破壊パターンと進行性破壊現象を考慮することで、実験値をある程度適切に評価することができることを述べてきた。しかし、計算に取り入れた破壊パターンは実験後に観察されたものであり、これらの計算値はいわゆる逆解析である。また、破壊パターンに対応する改良土の強度にはいくつかの仮定を行っている。設計などに適用する場合には、外力条件や地盤条件ごとに適切な方法によって各改良杭ならびに表層固化処理層の破壊パターンを推定し、個々について強度を推定することが重要である。しかし、これについては現在適切な方法がなく、今後の研究課題である。

そこで、ここでは得られた支持力と粘土地盤強度、改良杭の強度ならびに表層固化処理層の強度との関係を最小二乗法で整理することとした。表層固化処理層の最も大きいCASE12については、他のケースと改良杭の破壊パターンが大きく異なっていたため、ここでの計算には考慮していない。残りの実験ケースについて計算すると、下式で示すような関係が得られた。なお、式中表層固化処理層に関する項では層厚の効果を表すために層厚をフーチング幅で無次元化した係数を導入している。

$$P/A = 0.3 quc (1 - ap) + 0.61 qut ap + 0.92 qus H/B \quad (3)$$

ここで、

- A : フーチング断面積
- ap : 改良杭の改良率
- B : フーチング幅
- H : 表層固化処理層の厚さ
- P : 鉛直荷重
- quc : 粘土地盤の一軸圧縮強さ
- qus : 表層固化処理層の一軸圧縮強さ
- qut : 改良杭の一軸圧縮強さ

得られた係数の内、改良杭に関する係数は0.61と1以下であり、改良杭の一軸圧縮強さに相当する支持力も期待できないことを示している。これは、多数の改良杭がフーチング下やその周辺にあってもせん断破壊するのはそのごく一部の杭であり、その他の杭は曲げ破壊をするため、全体としては小さな支持力しか発揮できないことの表れと考えられる。また、表層固化処理層に関する係数は0.92と比較的大きな値を示しており、図-18で設定した値と大きく異なっている。

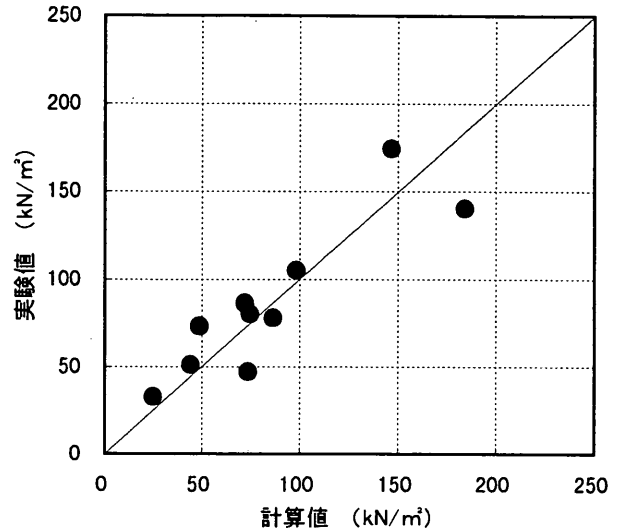


図-19 支持力値の比較

計算で得られた式をもとに、実験値との比較を図-19に示した。大きな支持力の場合に、実験値と計算値とに多少差が見られるが全体的には良い一致をしていることが分かる。このことより、今回の計算法は遠心実験での条件よりもさほど大きく異なる地盤条件の下での支持力値の推定に役立つものと考えられる。

5. 結論

本研究では、比較的小さい改良率で広範囲に改良された杭式深層混合処理地盤の鉛直支持力に関して遠心模型実験ならびに円弧すべり計算を行い、改良杭と表層固化処理層の破壊パターンと進行性破壊の影響について検討した。本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 表層固化処理層の有無によらず、改良率が大きくなると改良地盤の荷重～沈下関係には明瞭なピーク荷重が見られるようになり、改良杭の応力～ひずみ特性が反映されるようになる。
- 2) 改良杭の破壊モードには、せん断破壊と曲げ破壊の2つがあり、改良杭の位置、表層固化処理層の有無によって異なる。
- 3) 表層固化処理層のない場合について、改良杭の破壊モードと進行性破壊を考慮した円弧すべり計算は、実験値ほぼを適切に評価することができる。
- 4) 表層固化処理層のある場合には、改良杭と表層固化処理層の破壊モードと進行性破壊を考慮することが重要で、両者を考慮した円弧すべり計算は実験値をほぼ適

切に評価できる。

- 5) 改良杭，表層固化処理層ならびに粘土地盤の強度の平均強度を用いる支持力の推定では，各強度の発揮割合を適切に定めることで支持力の推定は可能である。

6. あとがき

本研究では，杭式改良地盤の破壊挙動を詳細に検討し，改良杭の破壊パターンを考慮した設計法の重要性を指摘した。その結果，現在主として陸上工事で多用されている杭式改良地盤の設計法が改良杭の破壊パターンと進行性破壊を考慮していないために，過大な支持力を与えている可能性が明らかになった。一方で，これまで杭式改良地盤が破壊した事例はあまり報告されていない。これは，改良杭の設計強度に比較的大きな安全率が設定されていること，現地で打設される改良杭の強度が設計強度よりもかなり大きいこと，また陸上部で頻繁に見られる地表面付近のドライクラストの効果などが原因と考えられる。そのため，現行設計法で設計された既設構造物がすぐに危険であることは考えにくい。

近年建設工事の経済化が叫ばれており，実際の挙動を正當に再現・評価し，設計での影響因子と影響を洗い出すとともに正當に評価した設計法の確立が必要と考えられる。本研究の成果が，実際の地盤挙動を理解し，現行設計法の改善・改良に役立てられることを願っている。

(平成11年6月30日受付)

参考文献

- 1) CDM研究会：セメント系深層混合処理工法－設計と施工マニュアル（設計・施工編），1992年，192p.
- 2) 噴射攪拌工法研究会：噴射攪拌工法（DJM工法）技術マニュアル，1992年，48p.
- 3) 寺師昌明，田中洋行：深層混合処理工法による杭状改良地盤の支持力および圧密特性，港湾技術研究所報告，第22巻，第2号，1983年6月，pp. 213～266.
- 4) 千田昌平，塚田幸広，岩瀬真二，加藤俊昭：模型複合地盤の載荷試験，土質工学会，複合地盤の強度および変形に関するシンポジウム，1984年，pp. 41～46.
- 5) 三宅達夫：改良地盤の変形挙動に関する遠心力場における基礎的研究，広島大学学位請求論文，1988年，181p.

- 6) 北誥昌樹，山本浩司：着底型杭状深層混合処理地盤の破壊挙動について，港湾技術研究所報告，第37巻 第2号，1998年6月，pp. 1-28
- 7) 北誥昌樹：新遠心装置の開発と研究への適用，港湾技研資料，No.812，1995年，35p.
- 8) Tatsuoka, T. and Kobayashi, A. : Triaxial strength characteristics of cement treated soft clay, *Proc. of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, 1983, pp.421-426.
- 9) 寺師昌明，田中洋行，光本 司，本間定吉，大橋照美：石灰・セメント系安定処理土の基本的特性に関する研究（第3報），港湾技術研究所報告，第22巻 第1号，1983年3月，pp. 69～96.

記号一覧表

A	: フーチング断面積
ap	: 改良杭の改良率
B	: フーチング幅
Cua	: 改良地盤の平均非排水せん断強度
Cuc	: 粘土地盤の非排水せん断強度
Cut	: 改良杭の非排水せん断強度
H	: 表層固化処理層の厚さ
Nc	: 支持力係数
P	: 鉛直荷重
quc	: 粘土地盤の一軸圧縮強さ
qus	: 表層固化処理層の一軸圧縮強さ
qut	: 改良杭の一軸圧縮強さ
δv	: フーチング沈下量