

# 港 湾 技 研 資 料

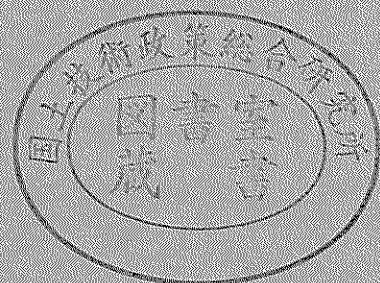
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 790      Dec. 1994

砂マウンドを有する粘土地盤中の杭の横抵抗

北 詰 昌 樹  
宮 島 正 悟

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

## 要 旨

1. まえがき .....	4
2. 実験装置および模型試料 .....	4
2.1 実験装置 .....	4
2.2 模型試料 .....	5
3. 模型地盤の作製 .....	5
3.1 地盤の作製方法 .....	5
3.2 遠心加速度場での圧密過程 .....	6
4. 水平載荷実験 .....	7
4.1 実験方法 .....	7
4.2 実験ケース .....	8
5. 実験結果および考察 .....	8
5.1 地盤強度の確認 .....	8
5.2 杭間隔の影響（予備実験） .....	9
5.3 粘土地盤中の杭の横抵抗に及ぼす曲げ剛性の影響（シリーズⅠ） .....	10
5.4 杭に及ぼすマウンドの厚さの影響（シリーズⅡ） .....	14
5.5 杭に及ぼすマウンドの幅の影響（シリーズⅢ） .....	18
6. 結 論 .....	20
7. あとがき .....	21
参考文献 .....	21
記号表 .....	22

# 砂マウンドを有する粘土地盤中の杭の横抵抗

北 詰 昌 樹 \*  
宮 島 正 悟 \*\*

## 要 旨

日本の沿岸域には軟弱な粘土地盤が厚く堆積していることが多く、このような地盤中に打設される杭構造物の横抵抗は非常に小さいため、何らかの対策が求められることが多い。地盤の横抵抗力を補強する工法として、置換工法やサンドコンパクションパイル工法などがよく行なわれている。しかし、これらの工法は改良効果は大きい反面、施工に要する費用も大きく、置換工法は浚渫した軟弱粘土の捨て場所の確保や、海域の汚濁といった問題も解決せねばならず、近年では施工がますます困難になると考えられる。そのため、波力などの水平荷重が比較的小さい場合には、このような本格的な地盤改良工法ではなく、杭の周囲に砂・捨て石マウンドを設けることで杭の横抵抗力の改善を図りたいとする声もある。

そこで本研究では、杭周辺に砂マウンドを設置した場合の水平載荷実験を遠心模型実験装置を用いて行い、マウンドの設置が水平荷重を受ける杭の挙動に及ぼす影響について検討を加えた。実験では、正規圧密された粘土地盤を用いて、25gの遠心加速度場で静的な杭の水平載荷実験を行った。研究では、まず粘土地盤中に設置された杭について載荷荷重、杭頭変位、曲げモーメント分布等の計測を行い、杭の挙動に及ぼす曲げ剛性の影響を調べるとともに、測定された曲げモーメント分布から得られる地盤の横抵抗係数について検討した。次にマウンドを有する場合の杭についてマウンドの高さおよび幅を変化させ、杭の挙動に及ぼすマウンドの影響について検討を加えた。実験より、粘土地盤の横抵抗係数は深度に比例して増加しており、杭の曲げ剛性によらず同一の直線上に分布することが分かった。また、実験から得られたマウンドの横抵抗係数を用いて有限要素法による計算を行うことで、杭の挙動をある程度推定することが可能であると考えられる。

キーワード：杭、軟弱地盤、水平荷重、載荷試験、模型実験（遠心模型実験）

---

\* 土質部地盤改良研究室長

\*\* 土質部地盤改良研究室

# Lateral Resistance of a Long Pile in Clay Ground underlain by Sand Mound

Masaki KITAZUME \*

Shogo MIYAJIMA \*\*

## Synopsis

In Japan, many construction projects for port facilities have been progressed in coastal areas where very soft clay deposits are often encountered. Pile foundations are often used for port facilities such as dolphins and piers, and are usually surrounded by rubble-mound for protection against erosion due to wave force.

Pile foundations are subjected to not only vertical loads but also lateral loads due to wave force, earth pressure and/or earthquake motion. The pile behavior under lateral loads is much affected by the property of the surrounding soil, the flexural rigidity of the pile, loading condition, and so on. The rubble-mound also affects pile behavior. However, its effect on the pile behavior is not thoroughly investigated and is not taken into consideration in the current design procedure.

Therefore a series of centrifuge model tests was carried out in order to investigate the pile behavior subjected to lateral load and the effect of the mound on the pile behavior. In the tests, model piles embedded in soft clay ground whose shear strength increased with depth were subjected to lateral load under 25 g acceleration field. The loading tests were performed changing the thickness and the width of the mound and the pile flexural rigidity. This paper presented the model ground preparation, loading test and test results in detail.

Key Words : Pile, Soft Ground, Horizontal Load, Load Test,

Model Test (Centrifuge Model Test)

---

\* Chief of Soil Stabilization Laboratory, Geotechnical Engineering Division

\*\* Soil Stabilization Laboratory, Geotechnical Engineering Division

## 1. まえがき

現在、我が国の港湾地域においてはドルフィンや棧橋などの港湾構造物の建設プロジェクトが数多く計画・実施されている。これらの杭基礎には鉛直荷重だけでなく、波力や土圧また地震慣性力などによる水平荷重が作用することが多い。このような水平荷重を受ける杭基礎の挙動は、杭の特性の他に杭周辺の地盤の特性、荷重条件など様々な要素に影響される。したがってこれらの港湾構造物の建設を安全にかつ経済的に進めていくためには、鉛直・水平荷重を受ける杭基礎の挙動について検討することが必要である。

一般に日本の沿岸域には軟弱な粘土地盤が厚く堆積している。このような地盤中に打設される杭構造物に対して地盤の横抵抗は非常に小さいため、何らかの対策が求められることが多い。地盤の横抵抗力を補強する工法として、置換工法やサンドコンパクションパイル (SCP) 工法などもよく行われている。しかし、これらの工法は改良効果大きい反面、一般に施工に要する費用も大きい。また、置換工法は浚渫した軟弱粘土の捨て場所の確保や、海域の汚濁といった問題も解決せねばならず、今後施工がますます困難になると考えられる。そのため水平荷重が比較的小さい場合には、このような本格的な工法ではなく、杭の周囲に砂・捨石マウンドを設けることで杭の横抵抗力の改善を図りたいとする声もある。

杭の横抵抗については古くから数多くの実験・研究がなされており、現地実験によるデータも数多く報告されている。現地実験は、複雑な条件を有する地盤においても個々の地点における挙動を正確に知るための最良の方法であるが、その結果から得られるものは特定の地盤条件でしかも特定の荷重条件での知見であり、多種多様な地盤条件・荷重条件に適用できる普遍的な知見を得ることは難しい。さらに現地実験は一般に長期間を要し、経費も膨大となるためパラメトリックな実験研究は非常に困難である。そこで実物の挙動を模型で再現させようとする模型実験による研究も多くなされている。その例として砂地盤中に設置された杭に対しては、久保<sup>1)</sup>、Scott<sup>2)</sup>、Oldham et al.<sup>3)</sup>、Ting et al.<sup>4)</sup>、寺師ら<sup>5),6)</sup>、高橋ら<sup>7)</sup>などの研究があり、粘土地盤中に設置された杭に対しては、Barton et al.<sup>8)</sup>、Matlock<sup>9)</sup>、Hamilton et al.<sup>10)</sup>などの研究がある。これら多くの研究を基に、砂地盤あるいは粘土地盤という単純な地盤条件下の杭の横抵抗については、たわみ～地盤反力関係をはじめとする式が提案されており比較的良い精度で推定することが可能となってきた。しかしながら、沿岸域

で多く見られるような軟弱な正規圧密粘土地盤中の杭の横抵抗に関する研究は少なく、さらに粘土地盤上に設置されたマウンドが杭の横抵抗に及ぼす影響については未解明の点が多く残されている。そこで筆者らは、捨石マウンドが水平荷重を受ける杭の挙動に及ぼす効果を検討するために遠心模型実験による検討を行っている<sup>11),12)</sup>。一般に、重力場の模型実験では実物の現象を再現するために模型規模を大きくする必要があり、問題の解明には大変な労力を費やすことが多い。それに対して遠心模型実験は小型の模型地盤に遠心加速度を作用させることで応力の相似性を満足させるもので、パラメトリックな検討を精度良く実現できる手法である。本研究は、まず正規圧密された粘土地盤を用いて遠心加速度場で杭の水平載荷試験を行い、次に捨石マウンドの縮尺模型として砂マウンドを設けた場合にも同じく水平載荷試験を行い、杭の挙動と横抵抗特性について、杭の曲げ剛性、マウンドの厚さおよび幅を変化させ、その影響を実験的に検討したものである。

## 2. 実験装置および模型試料

### 2.1 実験装置

本研究で使用した各種の実験装置について以下に説明を加える。

#### (1) 遠心模型実験装置

本研究では、遠心模型実験装置を用いて模型地盤に大加速度を作用させ、現地規模の応力条件下で載荷実験を行った。装置の有効半径は3.8m、最大加速度110g、最大搭載質量は2.7tonである。装置の詳細については寺師<sup>13)</sup>を参照されたい。

#### (2) 試料容器

使用した試料容器は、内寸で幅70cm、深さ60cm、奥行20cmであり、鋼製で剛性の高いものである。試料容器と模型の状況を模式的に図-1に示す。

#### (3) 模型杭

模型杭には図-2のような幅2cm、長さ60cmの板状のものを用いた。杭の表裏両面には17箇所の位置にひずみゲージを貼付しており、水平載荷中に杭に発生する曲げモーメントを計測できるようになっている。用いた杭の諸元を表-1に示す。表中、杭の幅、厚さ、曲げ剛性をそれぞれB、W、EIで表しており、添字mは模型の諸量を示すものである。杭の材料には、曲げ剛性を調整するために弾性係数(E)の異なる鉄、アルミニウムおよびアクリル樹脂の3種類を用い、また杭の厚さを変えて合計5種類の曲げ剛性を有する杭を使用した。模型杭の表面にはひずみゲージに加えゲージからのワイヤならび

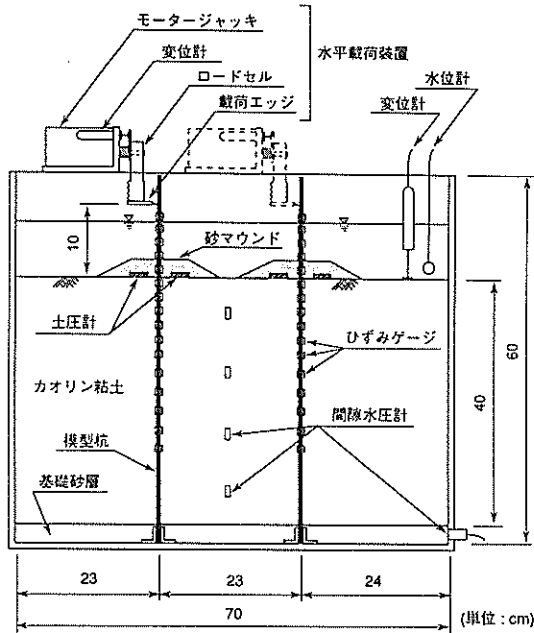


図-1 実験装置概略図

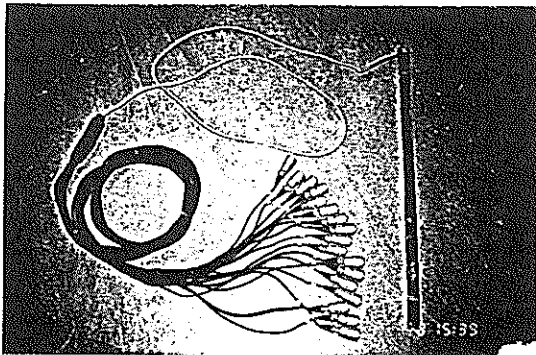


図-2 ひずみゲージ付き模型杭

表-1 模型杭の諸元

模型杭名称	材料	杭幅 $B_m$ (cm)	杭の厚さ $W_m$ (cm)	曲げ剛性 $EI_m$ (N m <sup>2</sup> )
AC-5	アクリル樹脂	2.0	0.5	0.799
AC-6	アクリル樹脂	2.0	0.6	1.04
AL-3	アルミニウム	2.0	0.3	3.55
AL-5	アルミニウム	2.0	0.5	12.5
ST-5	鉄	2.0	0.5	40.5

にこれらを保護するためのコーティングが施されている。そのため、曲げ剛性が多少変化していることが予想され

たため、載荷実験に先立って模型杭の曲げ剛性ならびに各ひずみゲージの較正係数を求めるための検定試験を行った。表-1に示した曲げ剛性は検定試験結果によるものである。

#### (4) 水平載荷装置

杭頭に水平荷重を作用させるために、遠心加速度場で作動する水平載荷装置を使用した。水平載荷装置は、図-1に示したように電動のモータージャッキと片持ち梁型のロードセルおよび変位計からなっている。載荷中には、載荷点における水平荷重と水平変位をロードセルおよび変位計でそれぞれ測定する。なお、載荷速度は毎分1.15 mmで一定である。なお、本文中ではこの載荷点での水平荷重と変位をそれぞれ杭頭荷重、杭頭変位と呼ぶことにする。

## 2.2 模型試料

### (1) 粘土試料

本研究では、深さ方向に強度の増加する正規圧密粘土地盤を再現するため、通常海成粘土に比べて圧密係数( $C_v$ )の大きい市販のカオリン粘土を使用した。用いたカオリン粘土はASP-100カオリンと5Mカオリンを1:1の比率で混合したものであり、その物理特性は表-2に示すとおりである<sup>10)</sup>。

### (2) 基礎砂層およびマウンド

図-1に示したように、粘土層下部の基礎砂層およびマウンドには、特性がよく知られている豊浦標準砂<sup>15)</sup>を用いた。

表-2 カオリン粘土の物理特性

比重 $G_s$	コンステン特性(%)			粒度特性(%)		
	$W_L$	$W_P$	$I_P$	砂分	シルト分	粘土分
2.692	59.0	16.8	42.2	0	35.6	64.4

## 3. 模型地盤の作製

### 3.1 地盤の作製方法

#### (1) 予備圧密

模型地盤は、まず試料容器底面に模型杭を設置し自立させた後、豊浦標準砂で基礎砂層を作製した。この砂層は基礎砂層としての機能の他に排水層として機能するため、十分締め固めた後、容器底部の通水孔より水を徐々に浸透させ十分に飽和させるように努めた。また、粘土試料として使用したカオリン粘土は、初期含水比120%に調整した後、約3時間真空脱気しながら攪拌して粘土スラリーとした。

深さ方向に強度の増加する正規圧密地盤を再現するために、これまで当研究室では実験室内で小さな圧力で予備圧密を行った後、遠心加速度場での自重圧密を行って作製する方法がしばしば行われてきていた。しかし、この方法では本研究で使用する層厚40cmの粘土地盤では遠心加速度場における自重圧密に約80時間を要することが予想された。そこで、本研究では遠心場での圧密時間を短縮するため、図-3に示すように粘土層を8層に分割して模型地盤の作製を行った。図には25gの遠心加速度場での鉛直圧力、各粘土層での予備圧密圧力および予備圧密終了時点での各層の厚さをあわせて示している。まず第I粘土層として、基礎砂層上に空気が混入しないように十分注意してスラリーを投入した。その後、ペロフラムシリンダーを用いて予備圧密を行った。なお、予備圧密の大きさは図に示したように25gの遠心加速度場での鉛直圧力に等しい圧力とした。予備圧密中には地盤表面での沈下量を計測し、圧密の進行を監視した。第I粘土層の予備圧密終了後、第II～第VIII粘土層を上記と同様の方法で作製した。以上のようにして作製された粘土地盤は、地盤強度が深さ方向に段階的に増加する地盤である。このように、予備圧密の大きさを遠心加速度場での鉛直圧力にほぼ等しくすることで、遠心場での圧密時間を粘土層厚40cmの場合で約8時間程度とすることができた。

なお、図-1には模型地盤中に2本の模型杭が示されている。これは、粘土層を以上に示したように8段階に分けて行ったこと、ならびに使用した試料容器が比較的大型のものであり実験室内での模型粘土地盤の作製に約1ヶ月もの長時間を要したことから、実験の効率を高めるために一度に2本の杭の載荷実験を行うためである。5.2に予備実験の結果を示し、一本の杭の挙動が他方の

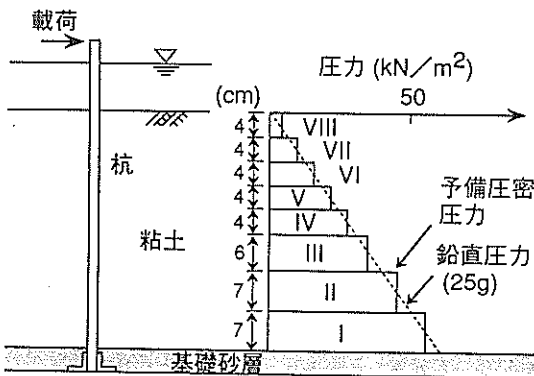


図-3 予備圧密圧力

杭の影響を受けないことを確認している。

## (2) 計測器および水平載荷装置の設置

遠心加速度場での自重圧密の監視およびマウンドの設置による過剰間隙水圧の測定のため、図-1に示したように粘土地盤の数箇所に間隙水圧計を設置した。用いた間隙水圧計は直径 0.6cm、長さ 0.8cmの小型のものである。計測器の設置は、まず設置位置の粘土地盤に直径約 0.6cmの孔をあけ、専用の取付治具を用いて間隙水圧計を挿入し、その後、含水比 120%程度の粘土スラリーを注入して孔をふさいで行った。また、マウンドによる鉛直土圧を測定するために、直径 1.0cm、厚さ 0.3cmの土圧計を杭の前後の粘土地盤上に設置した。その他、水平載荷装置、水位計および粘土地盤表面の沈下量を測定する変位計を設置して試料容器の準備を完了した。

## (3) 遠心加速度場での自重圧密

準備の完了した模型地盤を遠心模型実験装置のスイングプラットフォームに搭載した後、25gの遠心加速度まで一気に加速し、遠心加速度の下で自重圧密を進行させた。自重圧密中は粘土地盤表面の沈下および粘土地盤中の間隙水圧を計測して圧密の進行状況を監視した。地盤表面の沈下量の計測値より圧密がほぼ90%進行したことを確認して圧密過程を終了した。

## 3.2 遠心加速度場での圧密過程

### (1) 時間～地表面沈下曲線

25gの遠心加速度場における自重圧密過程で得られた経過時間と粘土地表面の沈下量との関係の一例を図-4に示した。横軸には時間の平方根をとっており、同図より時間の経過に伴い徐々に沈下が進行して行く傾向が見られる。自重圧密過程の終了は、 $\sqrt{t}$ 法により圧密がほぼ90%進行したことを確認して判断した。ここに示した例では、圧密に要した時間は約500分であった。

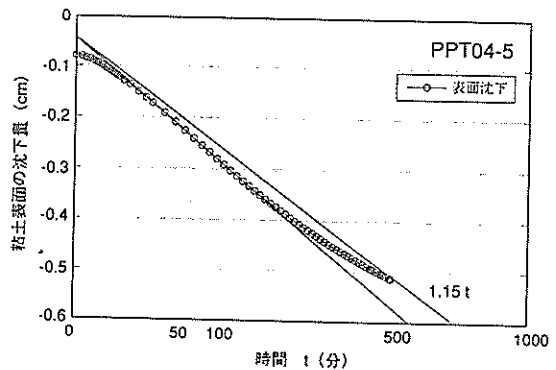


図-4 時間～表面沈下関係

## (2) 間隙水圧の挙動

粘土地盤中に設置した間隙水圧計で計測された間隙水圧の経時変化を図-5に示した。実験値は自重圧密過程初期にはほぼ全土被り圧に相当する圧力を示していた。地表面より5cmの深さ ( $x_m = 5\text{cm}$ ) では全土被り圧と静水圧の大きさに大差がないため、自重圧密が進行しても圧力の減少はわずかな量にとどまっている。一方、地表面より35cmの深さ ( $x_m = 35\text{cm}$ ) での間隙水圧は時間

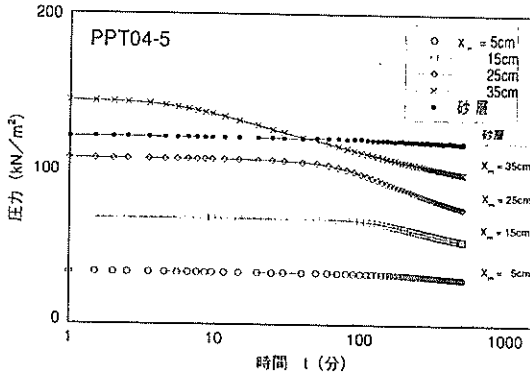


図-5 時間～間隙水圧関係

の経過とともに明瞭に減少する傾向を示しており、圧密の進行が確認できる。粘土層の中央付近 ( $x_m = 15\text{cm}$ ) における間隙水圧も、排水長が長い間隙水圧の減少傾向が遅いものの時間の経過に伴って徐々に減少しており、自重圧密が順調に進行したことが分かる。以上のようにして、層厚が約40cmで、深さ方向に強度の増加する正規圧密粘土地盤を作製した。

## 4. 水平載荷実験

### 4.1 実験方法

自重圧密終了後、粘土地盤中の杭の場合には直ちに水平載荷を行った。またマウンドを有する場合には、一旦遠心装置を停止させ杭の周囲にマウンドを設置し、再度25gの遠心加速度の下で約10分間地盤を安定させた後、水平載荷を行った。なおマウンドの相対密度は約60%である。

水平載荷中は、杭頭荷重、杭頭変位ならびに杭に発生する曲げモーメント分布を測定した。載荷は、設計で通常いられる最大水平変位を参考にして杭頭変位が約0.6cm (実物規模換算で約0.15m) になるまで行い、一旦除荷した後、再度杭頭変位が約1.2cm (同約0.3m)

表-3 実験ケース

	実験名称	杭名称	模型実験条件			実物換算の条件		
			杭の曲げ剛性 $EI_m$ ( $\text{N m}^2$ )	マウンドの厚さ $H_m$ (cm)	杭～マウンド法厚 $W_m$ (cm)	杭の曲げ剛性 $EI_p$ ( $\text{MN m}^2$ )	マウンドの厚さ $H_p$ (m)	杭～マウンド法厚 $W_p$ (m)
杭間隔の影響 (予備実験)	PPT01-1	AC-5	0.799	0	0	0.312	0	0
	PPT01-4	AC-5	0.799	3	$\infty$	0.312	0.75	$\infty$
	PPT01-5	AC-5	0.799	6	$\infty$	0.312	1.5	$\infty$
	PPT01-2	AC-6	1.06	0	0	0.414	0	0
	PPT01-3	AC-6	1.06	3	$\infty$	0.414	0.75	$\infty$
	PPT01-6	AC-6	1.06	6	$\infty$	0.414	1.5	$\infty$
杭の曲げ剛性の影響 (シリーズI)	PPT04-5	AC-5	0.799	0	0	0.312	0	0
	PPT01-2	AC-6	1.06	0	0	0.414	0	0
	PPT02-2	AL-3	3.55	0	0	1.39	0	0
	PPT03-2	AL-5	12.5	0	0	4.88	0	0
	PPT03-1	ST-5	40.5	0	0	15.8	0	0
マウンドの厚さの影響 (シリーズII)	PPT07-1	AC-5	0.799	0	0	0.312	0	0
	PPT07-5	AC-5	0.799	3	$\infty$	0.312	0.75	$\infty$
	PPT07-9	AC-5	0.799	6	$\infty$	0.312	1.5	$\infty$
	PPT07-2	AL-5	12.5	0	0	4.88	0	0
	PPT07-6	AL-5	12.5	3	$\infty$	4.88	0.75	$\infty$
	PPT07-10	AL-5	12.5	6	$\infty$	4.88	1.5	$\infty$
	マウンドの幅の影響 (シリーズIII)	PPT07-4	AC-5	0.799	3	3	0.312	0.75
PPT07-8		AC-5	0.799	6	3	0.312	1.5	1.5
PPT07-5		AC-5	0.799	3	$\infty$	0.312	0.75	$\infty$
PPT07-9		AC-5	0.799	6	$\infty$	0.312	1.5	$\infty$
PPT07-3		AL-5	12.5	3	3	4.88	0.75	1.5
PPT07-7		AL-5	12.5	6	3	4.88	1.5	1.5
PPT07-6		AL-5	12.5	3	$\infty$	4.88	0.75	$\infty$
PPT07-10		AL-5	12.5	6	$\infty$	4.88	1.5	$\infty$



まで行った。一本の杭に対して一連の水平載荷実験を行うのに要した時間は約30分であった。

#### 4.2 実験ケース

本研究で行った実験ケースの一覧表を表-3に、杭とマウンドの概略図を図-6に示した。表中、杭の曲げ剛性、マウンドの厚さ、杭前面からマウンドの法肩までの距離をそれぞれEI, H, Wで表しており、 $W = \infty$  と記しているケースは容器全面にわたってマウンドを設置した場合を示している。なお、添字mは模型における諸量を、添字pは実物規模に換算した諸量を示すものである。今後本文では、他の記号についても同様の添字を用いて表すこととし、特に断らない限り実物換算の値(添字p)により議論を行うものとする。

まず予備実験として、試料容器中に2本の杭を設置したことによる杭間隔の影響を検討するために6ケースの実験を行った。実験シリーズIでは5ケースの実験を行い、粘土地盤中の杭の挙動について杭の曲げ剛性の影響を検討した。次にシリーズII, IIIでは、合計10ケースの実験を行い、マウンドの厚さと幅の影響を検討した。

### 5. 実験結果および考察

#### 5.1 地盤強度の確認

##### (1) 含水比分布

図-7に実験終了後に測定した含水比分布を示した。図には3ケースの実験について数段階の深さでの測定値を示している。実験ケースおよび測定位置により多少のばらつきが見られるものの、いずれの場合においても含水比は深さ方向に減少する傾向を示しており、自重圧密の効果が現れ正規圧密地盤が形成されていることが確認できる。同図には遠心場での鉛直有効応力と標準圧密試験結果による含水比の推定値もあわせて示している。実験値と推定値とでは若干の相違が見られるが、これは、

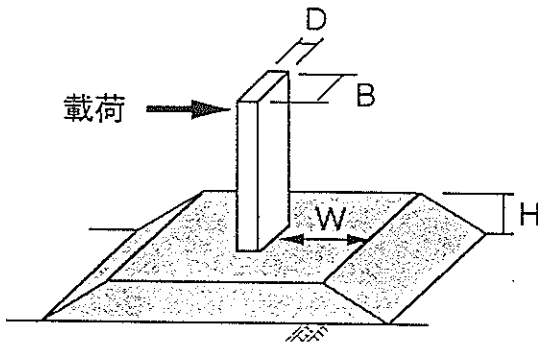


図-6 杭とマウンドの概略図

実験時には約90%圧密までであったのに対し、標準圧密試験時には圧密が約100%まで進行したことによるものと考えられる。なお、重力場での予備圧密では階段状の圧密荷重を作用させたため含水比分布についても階段状であったと考えられるが、遠心加速度場では自重圧密の進行により滑らかな正規圧密地盤の含水比分布になると考えて推定値を求めている。

##### (2) せん断強度

先に述べた方法で作製された地盤のせん断強度を求めるために、遠心模型実験装置の停止直後、重力場でハンドペーン試験機を用いてせん断強度の測定を行った。6地点においてそれぞれ5段階の深さでハンドペーン試験を行った結果を図-8に示した。試験で用いた羽根は直径2cm、高さ4cmである。地盤の厚さに比べて羽根の高さが大きく、羽根の上面と下面位置での地盤強度も異なっていると考えられるが、ここでは試験結果を羽根中心位置での強度として示している。試験結果より、地盤の強度は深さに伴ってほぼ一様に増加する傾向が見られる。また同図には、大加速度の下で作動するペーン試験機を用いて測定した強度もあわせて示している。本試験機は地盤の数段階の深さでの強度を連続して測定することが

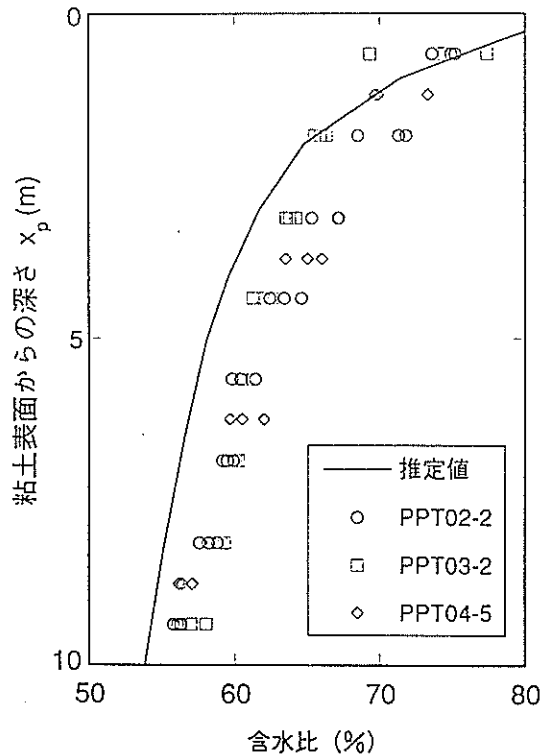


図-7 含水比分布

可能なものである。本装置の詳細については北詰ら<sup>14)</sup>を参照されたい。遠心場での測定値も深さ方向に増加する傾向が見られており、重力場での測定値とほぼ同一の直線上に分布している。このことから、正規圧密地盤となっていることが分かる。

図中には要素試験（等方圧密非排水(CIU) 三軸圧縮試験）から得られた強度増加率を用いた推定値もあわせて示している。ベーン試験より求められた地盤強度は要素試験からの推定値に比べて小さいことが分かる。これは、ベーン試験においては三軸試験よりも地盤の異方性の影響を受ける可能性が大きく、そのため差異が生じたものと考えられる。ここではせん断強度の深度方向の増加率 ( $C_u/X_p$ ) を要素試験およびベーン試験の値の平均値として  $1.5 \text{ kN/m}^3$  とした。この値は、北詰ら<sup>14)</sup> が 50 g の遠心加速度場でカオリン粘土地盤を用いて同様の試験を行った結果とほぼ等しいものである。

### 5.2 杭間隔の影響（予備実験）

今回の研究では単杭の横抵抗について検討したが、前述のとおり実験の効率を高めるために試料容器内に 2 本の杭を設置して載荷実験を実施している。2 本の杭は 23

cm の間隔で設置されているが、これらが互いの載荷時に影響を及ぼさないことを確認するため、一連の実験に先立って予備実験を行った。

この種の実験では 2 本の杭の間隔を種々に変えて載荷試験を行い、杭の間隔と荷重～変位関係ならびに杭の曲げモーメント分布への影響を調べることが一般的と考えられる。しかし、この方法では数多くの実験を行う必要があり、限られた期間内では困難であった。そこで図-9 に示すように、杭①の載荷中に杭②で発生する曲げモーメント分布 ( $\alpha$ ) と、杭②の載荷中に杭②で発生する曲げモーメント分布 ( $\beta$ ) とを比較して影響の検討を行うこととした。一連の実験では粘土地盤のみの場合に加え、マウンドを有する場合についても載荷実験を行った。

粘土地盤のみの場合に測定された曲げモーメント分布を図-10 に示す。図には杭頭変位 ( $y_{top,p}$ ) が 0.1m の時点での  $\alpha$ 、 $\beta$  の曲げモーメント分布を示している。 $\alpha$  の場合にはほとんど曲げモーメントの発生は認められず、最大曲げモーメントの大きさは最大でも  $\beta$  の場合の約 4% であった。同様の結果はマウンドを設置した場合にも見られた。これらのことより、2 本の杭の間隔を今回の実験程度 (23cm) に離すことで互いの杭の影響は無視できるものと考えられる。

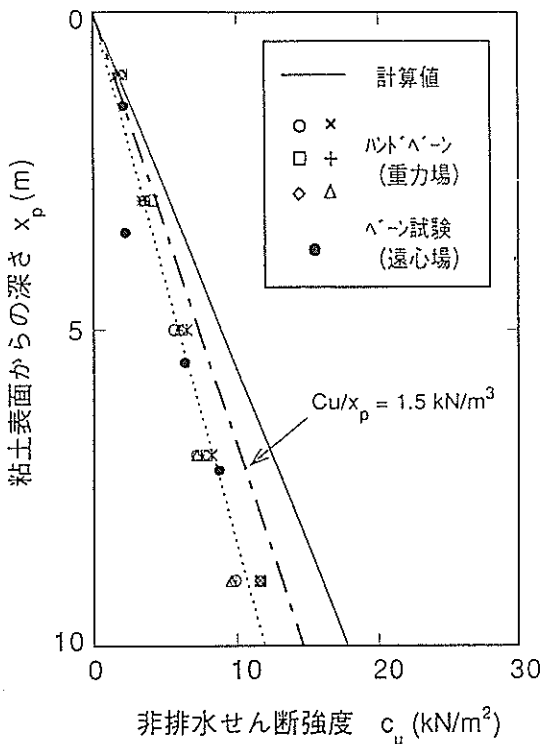


図-8 地盤の強度分布

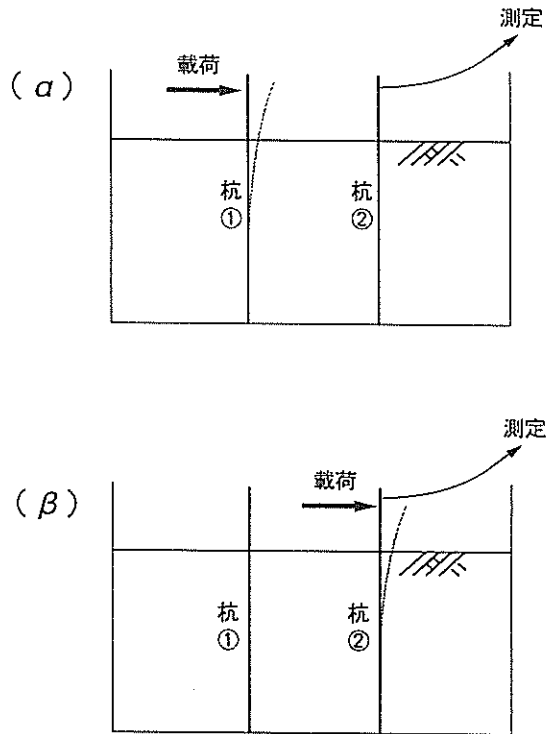


図-9 予備実験説明図

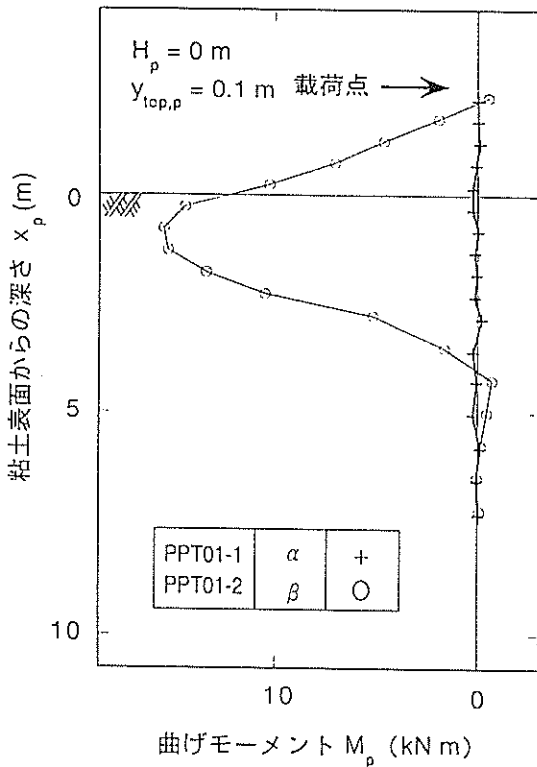


図-10 杭間隔の影響

図-12には曲げ剛性の異なる5種類の杭についての結果を示した。いずれのケースにおいても載荷～除荷～再載荷を行っており、図-11に述べた傾向が確認されたが、図面では煩雑を避けるため過程①および④で得られた荷重～変位曲線のみを示している。図では約50倍に杭の曲げ剛性を変化させた結果を示しているが、杭の曲げ剛性の違いにより計測された荷重は大きく異なっており、水平荷重が杭の曲げ剛性に大きく影響を受けることが分かる。

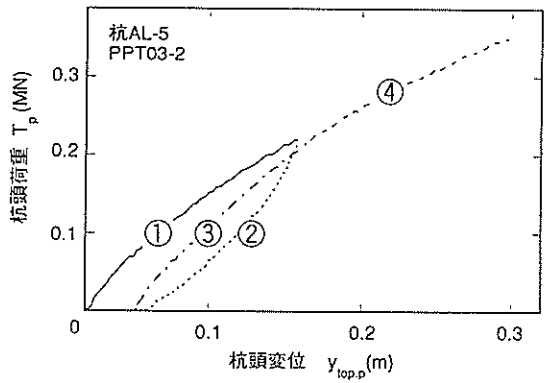


図-11 杭頭荷重～杭頭変位関係 (杭AL-5)

5.3 粘土地盤中の杭の横抵抗に及ぼす曲げ剛性の影響 (シリーズI)

(1) 杭頭荷重～杭頭変位関係

水平載荷中の杭頭荷重と杭頭変位との関係を杭AL-5の場合について図-11に示した。実験では杭頭変位 ( $y_{top,p}$ ) が約 0.15m に達するまで載荷を行った後、一旦除荷し再度載荷を行った。これら一連の載荷実験を図に示すように、載荷開始から杭頭変位が約0.15m に達するまでの過程、除荷過程、再載荷過程、既往最大荷重に達した後の過程の4つに分け、それぞれ過程①、②、③、④と呼ぶことにする。過程①においては、載荷の進行に伴って荷重が単調に増加する傾向が見られる。過程②では除荷に伴い部分的に杭頭の変位が回復するものの、その一部は残留変位として残る傾向が見られる。さらに再載荷を行うと (過程③)、既往最大荷重に達するまでは過程①より大きな勾配で荷重が増加し、既往最大荷重に達した時点でほぼ同一の点を通る。このことから、過程②、③では弾性的な変形が生じたことが分かる。過程④になると荷重～変位曲線が過程①で得られた曲線の延長上をたどっており、本実験の範囲内ではピーク荷重や一定荷重となる傾向は見られなかった。

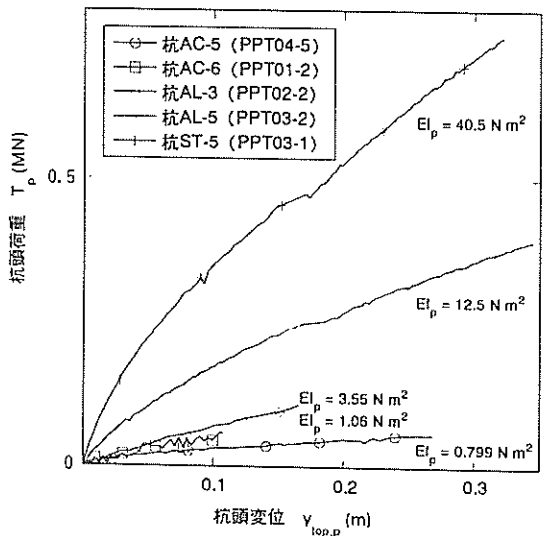


図-12 杭頭荷重～杭頭変位関係 (EIの影響)

(2) 曲げモーメント分布

a) 繰返し載荷の影響

載荷中に測定された曲げモーメント分布のうち杭AL-

5について図-13に示した。図には5本の曲線を示しており、A~Gの記号は図中の荷重~変位曲線の概略図で示す荷重段階に対応している。

過程における曲げモーメント分布を点B (図中○) において見ることにする。ここでは、最大曲げモーメント ( $M_{max, p}$ ) は粘土表面からの深さ約2mで発生していることが分かる。また第一曲げモーメント零点の深さ ( $l_{m1, p}$ ) は約5mであった。水平荷荷が進行し杭頭荷重が約2倍となると (図中点C),  $M_{max, p}$  の大きさも約2倍になっていることが分かる。また最大曲げモーメントの発生する深さ ( $l_{mmax, p}$ ) および  $l_{m1, p}$  はそれぞれ約2.5m および約6mと、荷荷の進行に伴ってやや深くなっており、荷荷に伴って比較的大きな曲げモーメントがより深い位置まで発生するようになる傾向が見られる。

繰返し荷荷の影響を調べるため、杭頭荷重 ( $T_p$ ) がほぼ等しい時点 (B, D, F) での曲げモーメント分布について見る (それぞれ○, □, △)。深さ約2m以内の範囲では3つの曲線に大きな違いは見られていないが、Dの時点 (□) ではより深い位置に大きな曲げモーメントが発生していることが分かる。またFの時点 (△) での曲げモーメント分布は他の2曲線の中間程度に位置していることが分かる。これらのことから、曲げモーメント分布は繰返し荷荷により、特に最大曲げモーメントの発生位置よりも深い部分で大きな影響を受けることが分かる。

次に、繰返し荷荷後、既往最大荷重に達した場合 (点C, G) について見ると、Gの曲げモーメント分布はCの曲げモーメント分布とほぼ一致していることが分かる。このことから繰返し荷荷によって、既往最大荷重に達するまでは曲げモーメント分布は大きく異なるものの、杭頭荷重が既往最大荷重に達すると繰返し荷荷の影響はほとんど見られなくなることが分かる。

#### b) 杭の曲げ剛性の影響

杭の曲げ剛性 (EI) が約11倍異なる2種類の杭AL-5および杭AC-5について得られた曲げモーメント分布を図-14に示した。図中の曲線は、ともに杭頭変位 ( $y_{top, p}$ ) が0.25mの時点での測定値である。 $M_{max, p}$  の大きさは両者で大きく異なっており、曲げモーメント分布が曲げ剛性に大きく影響されることが分かる。また、曲げ剛性の大きい杭AL-5の最大曲げモーメントの発生する深さ ( $l_{mmax, p}$ ) ならびに第一曲げモーメント零点の深さ ( $l_{m1, p}$ ) はそれぞれ約2.5m, 約6mであった。曲げ剛性の小さな杭AC-5では、 $l_{mmax, p} \approx 1.5$ m ならびに  $l_{m1, p} \approx 3.5$ m であり、杭AL-5の場合に比べていずれも浅い位置で発生している。これより、杭の

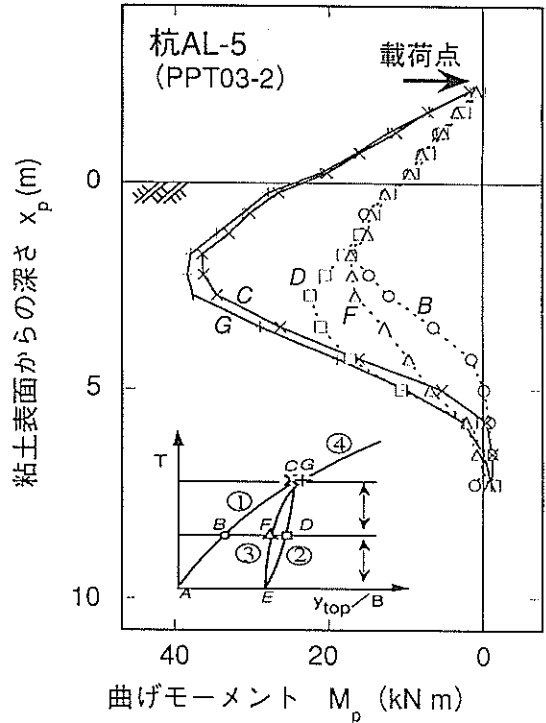


図-13 曲げモーメント分布 (繰返し荷荷への影響)

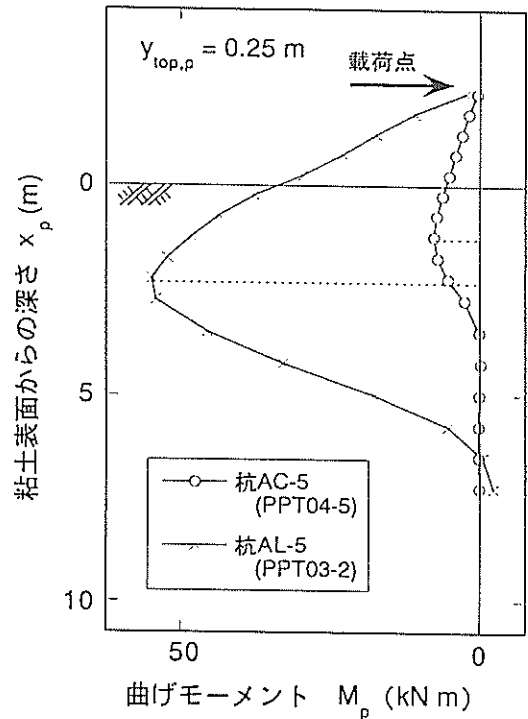


図-14 曲げモーメント分布 (EIの影響)

曲げ剛性によって、曲げモーメントの大きさだけでなく、その発生位置も大きく影響されることが分かる。

(3) たわみと地盤反力の関係について

杭の剛性が横抵抗に及ぼす影響をより定量的に把握するために、杭の各深さでのたわみ ( $y_p$ ) と地盤反力 ( $p_p$ ) との関係を調べた。本研究では、杭に作用するたわみや反力を直接測定することができなかったため、それらを曲げモーメントの測定値より推定して求めた。各実験で得られた曲げモーメント分布をある関数で近似し、これを2回微分または2回積分すると、杭に作用する地盤反力と杭のたわみをそれぞれ求めることができる。近似関数としては多項式やスプライン関数がよく用いられており、前者を用いた研究としては、3次多項式を用いたHamilton<sup>16)</sup>や4次から13次までで最適の次数を用いた荘司<sup>16)</sup>などが、後者を用いた研究としてはFinn et al.<sup>17)</sup>や菊池ら<sup>18)</sup>が挙げられる。本研究においては、従来より実施してきた砂地盤中の杭の解析における知見を踏まえ、多項式による近似を行った。

図-15および図-16には、上記の方法により推定された地盤反力およびたわみの深さ方向の分布をそれぞれ示している。図-15では、地盤反力は杭の幅で除し単位面積あたりの反力で示しており、粘土表面の地盤反力がほ

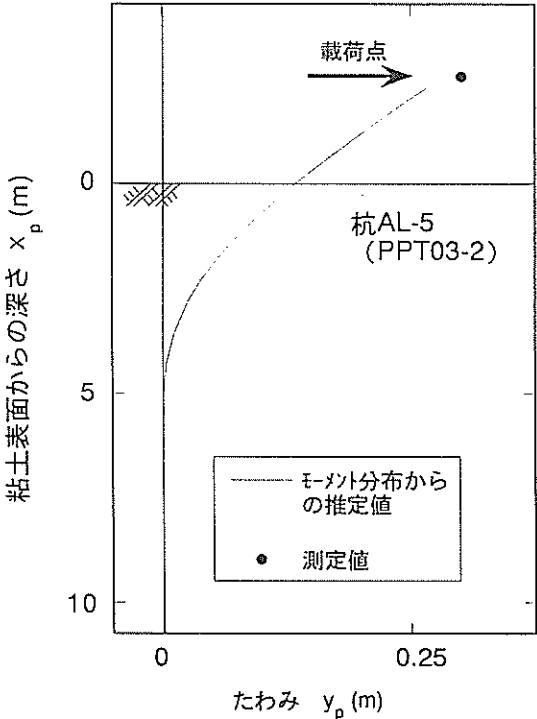


図-16 たわみ分布

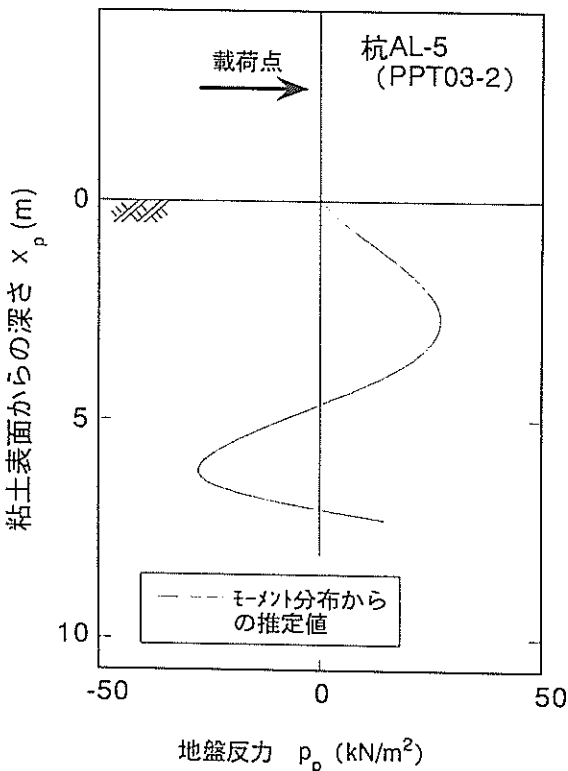


図-15 地盤反力分布

ぼ0になっていることから精度良く近似計算が行われたと考えられる。また図-16の推定値は、杭頭変位の測定値および杭下端固定を境界条件として求めたものである。

杭AL-3について得られたたわみと地盤反力の関係を図-17に両対数で表した。図には5種類の深さ ( $x_p = 0.25 \sim 2.25\text{m}$ ) における関係を示しているが、 $\log(p_p)$  は  $\log(y_p)$  の増加に伴ってほぼ直線的に増加していることが分かる。 $x_p = 0.25\text{m}$  の場合を除き、直線の傾きは深さによらずほぼ一定でその傾きを求めると約  $1/2$  であり、地盤反力がたわみのほぼ0.5乗に比例することが分かる。地表面に近い  $x_p = 0.25\text{m}$  の場合には変位の増加に伴って曲線の勾配が減少しており、地盤反力が飽和状態に達していることを示している。同様の作業を曲げ剛性の異なる杭についても行ったが、このような傾向は杭の曲げ剛性によらず見られた。

以上より、地盤反力～たわみ関係は次式で表すことができる。

$$p_p = k_p(x) \cdot y_p^{0.5} \quad \dots (1)$$

ここに、

$p_p$  : 深さ  $x_p$  における地盤反力 ( $\text{N/m}^2$ )

$y_p$  : 深さ  $x_p$  におけるたわみ (m)

$k_p(x)$  : 深さ  $x_p$  における横抵抗係数 ( $\text{N/m}^2$ )

各実験において横抵抗係数の深度分布を求めた結果を図-18に示した。図には曲げ剛性の異なる5種類の杭について計算値を示しており、いずれの杭でも深さが大きくなるに従って横抵抗係数も一様に増加する傾向が見られる。また杭の曲げ剛性の大きさによらずほぼ同じ直線上に分布しており、横抵抗係数の深さ方向の増加率は $0.08 \text{ MN/m}^{3.5}$ であった。曲げ剛性が50倍以上異なる場合でも横抵抗係数の分布にほとんど違いは見られないことから、横抵抗係数は地盤に固有の値であることが分かる。したがって杭に作用する地盤反力は、次式のように $x_p$ 、 $y_p$ の関数で与えることができる。

$$p_p = k_s \cdot x_p \cdot y_p^{0.5} \quad \dots\dots (2)$$

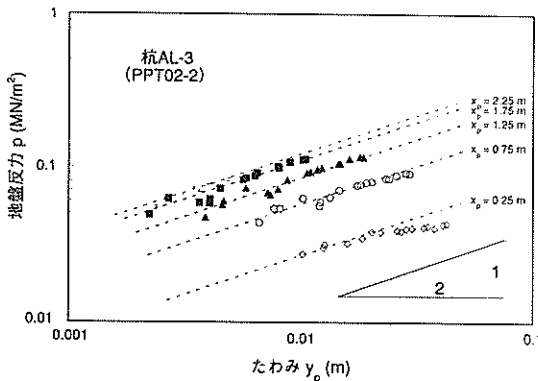


図-17 たわみ～地盤反力関係

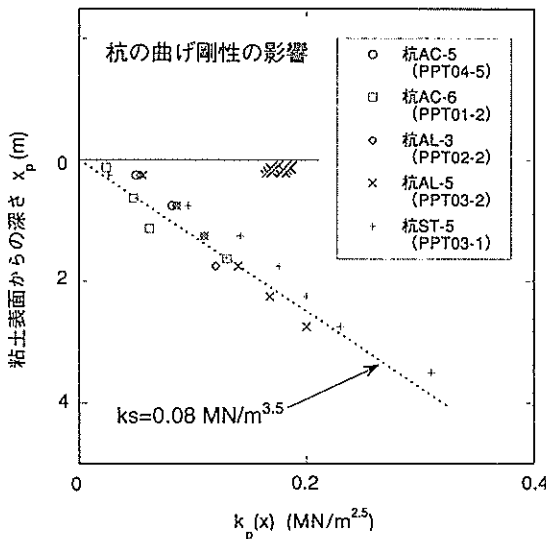


図-18 横抵抗係数の深度分布

ここに、

$k_s$ : 横抵抗係数  $k_p(x)$ の深さ方向増加率  
( $\text{MN/m}^{3.5}$ )

(2)式は、久保<sup>19)</sup>により1960年代に砂を用いた大型模型実験で見出され港研方式の基礎となったものと同一の関係であり、さらに砂地盤を用いた遠心模型実験によって再確認されている関係でもある<sup>9)</sup>。なお港研方式は、技術基準<sup>19)</sup>で軸直角方向力を受ける杭の挙動の推定に用いられている方法であり、(2)式に示した関係により地盤反力を求めることを特徴としている。(1)式で用いた $k_p(x)$ および(2)式で用いた $k_s$ は、港研方式ではそれぞれC型地盤の横抵抗係数およびS型地盤の横抵抗係数と表現されている。

このようにして求められた $k_s$ を用い港研方式で計算された曲げモーメント分布を測定値と比較して図-19に示した。図は、杭AL-5において杭頭荷重( $T_p$ )がほぼ310kNの場合について示したものであり、地表面から最大曲げモーメントの発生位置までは両者はほぼ一致する分布形状を示していることが分かる。また図-20には、剛性の異なる5種類の杭の杭頭荷重～杭頭変位関係について測定値と計算値との比較を示した。図より、いずれの杭の場合でもほぼ両者は一致する傾向が見られており、

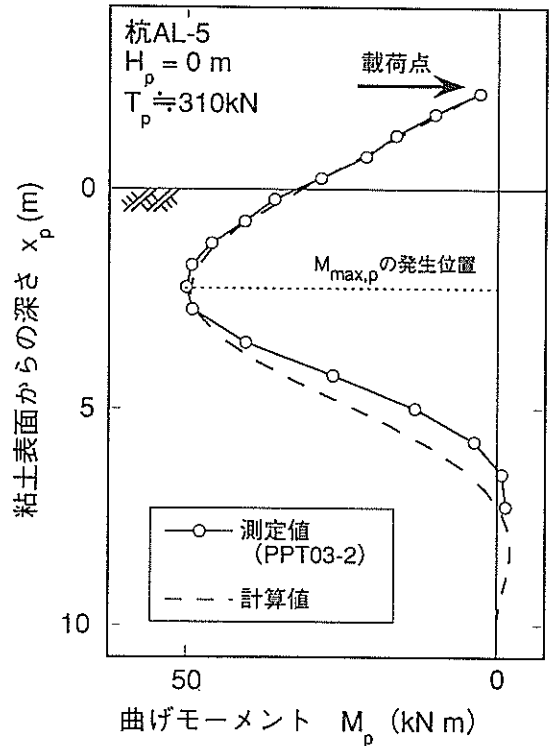


図-19 曲げモーメント分布

上記の計算で水平荷重を受ける杭の挙動をある程度推定できることが分かった。

上で得られた  $k_p(x)$  と非排水せん断強度 ( $c_u$ ) との関係を図-21に示した。図より  $k_p(x)$  は  $c_u$  の増加に伴って一様に増加しており、両者にはほぼ比例関係があることが分かった。同図には、現地実験から得られた  $c_u$  と  $N$  値との関係<sup>20)</sup> により Terzaghi-Peck の式<sup>21)</sup> を

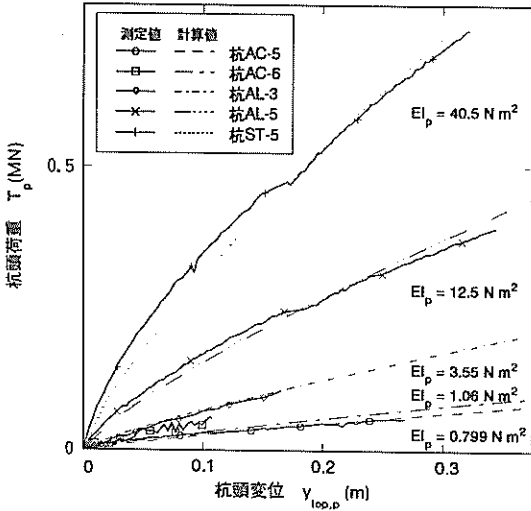


図-20 杭頭荷重～杭頭変位関係

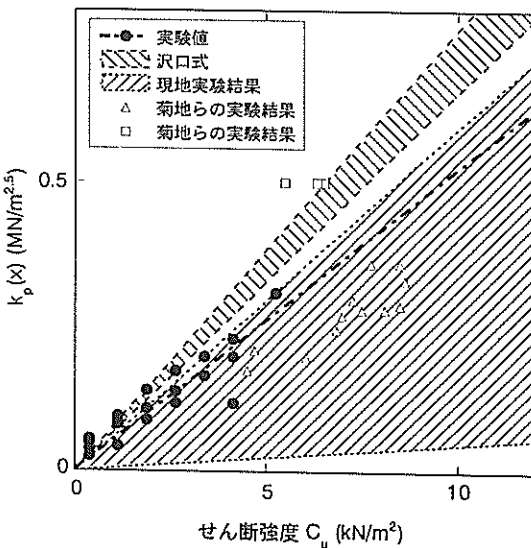


図-21 横抵抗係数～せん断強度関係

用いて求めた推定値、菊池ら<sup>18), 22)</sup> による重力場での大型模型による実験値、および沢口<sup>23)</sup> の提案した理論式による計算値もあわせて示している。現地実験による推定値は同一の  $c_u$  に対して若干小さい  $k_p(x)$  値を示す傾向が見られるが、これは  $N$  値により計算を行っており誤差が大きくなる可能性があるためと考えられる。しかしながら、一連の遠心模型実験結果は他と比較して同様の分布傾向が見られ、したがって遠心模型実験でも現地実験、大型の模型実験および理論式と同程度の精度で現地の杭の挙動を推定できることが分かった。

#### 5.4 杭に及ぼすマウンドの厚さの影響 (シリーズII)

##### (1) 杭頭荷重～杭頭変位関係

杭AC-5について、3種類のマウンドの厚さ ( $H_p = 0\text{m}, 0.75\text{m}, 1.5\text{m}$ ) における杭頭荷重と杭頭変位の関係を図-22に示した。なお 5.3で述べたように、今回の一連の実験ではすべて載荷～除荷～再載荷を行っているが、図面では煩雑を避けるため載荷過程 (過程①) と既往最大荷重に達した後の過程 (過程④) において得られた荷重～変位関係のみを示している。図示した曲線はいずれも載荷の進行に伴って杭頭荷重が単調に増加しており、実験した範囲ではピーク荷重や一定荷重は見られなかった。このような傾向は粘土地盤に対する実験結果と同様であった。また、図よりマウンドの厚さが大きい場合には杭頭荷重も増加することが分かる。そして、その増加の倍率は杭頭変位によらずほぼ一定であり、 $H_p = 0\text{m}$  の場合と比較して、 $H_p = 0.75\text{m}$  の場合には杭頭荷重は約3倍、 $H_p = 1.5\text{m}$  の場合には約5倍であった。

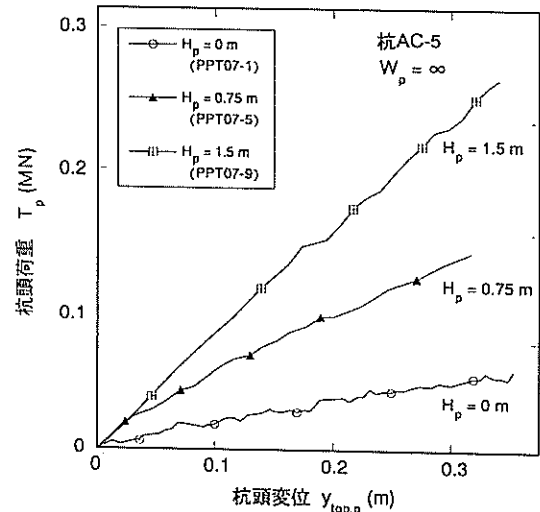


図-22 杭頭変位～杭頭荷重関係 (杭AC-5)

図-23には、杭AC-5の約11倍の曲げ剛性をもつ杭AL-5において得られた関係を示した。  $H_p=0\text{m}$  の場合と比較した杭頭荷重の増加倍率は、  $H_p=0.75\text{m}$  の場合には約 1.5倍、  $H_p=1.5\text{m}$  の場合には約 2.5倍と増加しているが、その増加傾向は杭AC-5の場合より小さくなっている。以上より、マウンド厚さは杭頭荷重～杭頭変位に大きな影響を及ぼすものの、曲げ剛性の大きい杭の場合にはその影響は小さくなることが分かった。

(2) 曲げモーメント分布

図-24には、杭AC-5で測定された曲げモーメント分布を示した。図には3種類のマウンドの厚さ ( $H_p=0\text{m}$ ,  $0.75\text{m}$ ,  $1.5\text{m}$ ) について示しており、それぞれはほぼ同じ杭頭荷重 ( $T_p \approx 47\text{kN}$ ) における測定値である。  $H_p=0\text{m}$  の場合は約1.5mの深さにおいて最大曲げモーメント ( $M_{\text{max},p}$ ) が発生しており、第一曲げモーメント零点の深さ ( $l_{\text{ml},p}$ ) は約3.5mであった。  $H_p=0.75\text{m}$  においては、最大曲げモーメントの発生する深さ ( $l_{\text{max},p}$ ) は粘土とマウンドとの境界付近に移動しており、  $M_{\text{max},p}$  の大きさも大幅に減少する傾向が見られる。またそれに伴って、  $l_{\text{ml},p}$  も上方へ移動しており、粘土地盤中ではほとんど曲げモーメントが発生しない傾向が見られる。したがって杭AC-5の場合、マウンドが杭の挙動に及ぼす影響が支配的であり、粘土地盤の影響は小さいと考えられる。

杭の曲げ剛性が約11倍大きい杭AL-5で得られた曲げモーメント分布曲線を図-25に示した。杭AC-5の場合と同様に、マウンドの厚さの増加に伴って  $l_{\text{max},p}$  およ

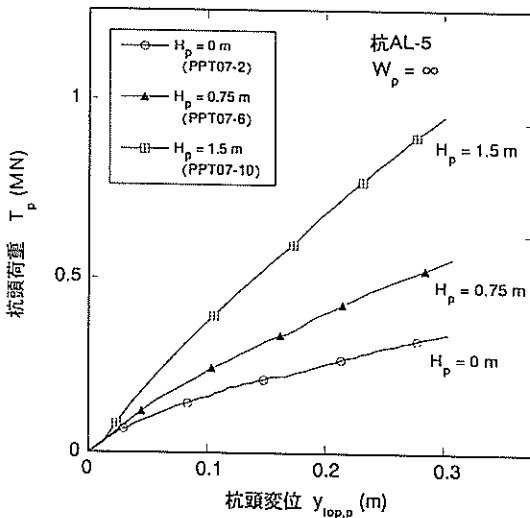


図-23 杭頭変位～杭頭荷重関係 (杭AL-5)

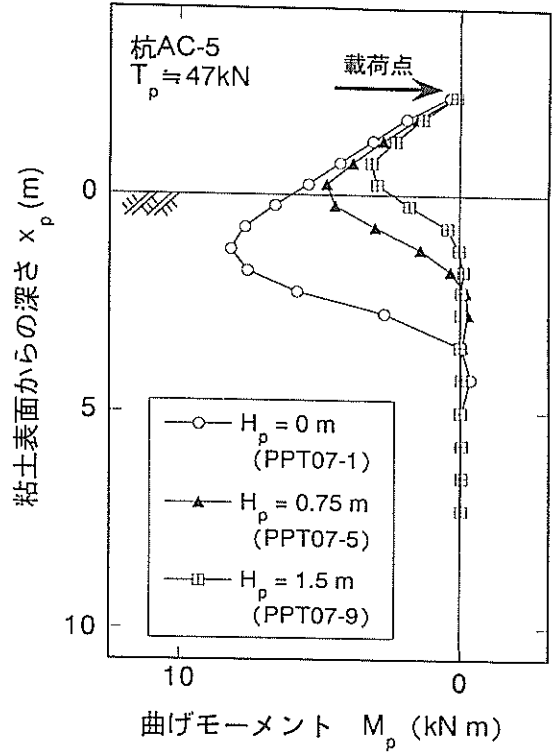


図-24 曲げモーメント分布 (杭AC-5)

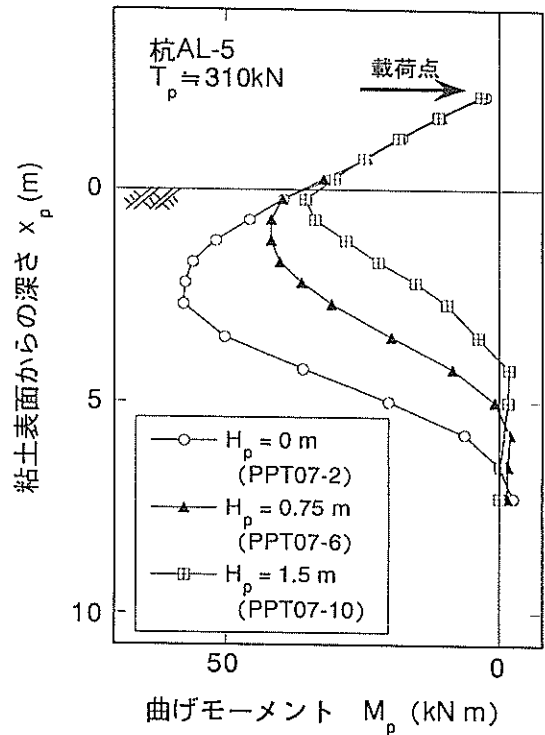


図-25 曲げモーメント分布 (杭AL-5)



び  $l_{m1,p}$  は上方に移動し、 $M_{max,p}$  の大きさも小さくなる傾向が見られる。また杭AC-5の場合に比べると、いずれのマウンド厚の場合においても粘土地盤中で発生する曲げモーメントは大きく、 $l_{max,p}$  および  $l_{m1,p}$  はともに深くなっていることが分かる。したがって杭AL-5の場合、マウンドおよび粘土地盤ともに杭の挙動に比較的大きな影響を及ぼすと考えられる。

### (3) マウンドの効果の検討

マウンドが杭の挙動に及ぼす効果には、マウンド自体による効果とマウンド重量による粘土地盤の圧密による強度増加の効果が考えられる。前項まではこれらの影響を分離せずに検討を行ってきたが、ここでは個々の検討を行った。

まず、マウンド自体による効果は、マウンドの横抵抗係数の深さ方向増加率 ( $k_s$ ) が粘土地盤の  $k_s$  と異なることに起因すると考えられる。今回の研究で用いたマウンドの  $k_s$  を求めた結果を図-26に示す。マウンド中に曲げモーメント計測点を多く設置できなかったためデータのばらつきが大きい。砂地盤であることから、これまでの知見<sup>6)</sup>により深さ方向に横抵抗係数が増加すると仮定してフィッティングを行うと、 $k_s \approx 0.24 \text{ MN/m}^{3.5}$  の値が得られ、この値は今回の粘土地盤の  $k_s$  の約3倍の値であった。

次に、マウンド重量による粘土地盤の圧密の効果について検討する。載荷実験では所定の遠心加速度に達した後、実験終了まで約30分を要しており、粘土表面付近の地盤は多少圧密を生じていると考えられる。図-27には杭AL-5で得られた  $k_p(x)$  分布を示しているが、破線で示した粘土地盤のみの場合に比べ、マウンドの厚さが大きくなるに従ってより大きな  $k_p(x)$  を示す傾向が見られる。なお、全体の粘土層は  $x_p = 10\text{m}$  までであり、今回の実験では粘土表面付近の  $k_p(x)$  のみが増加していることが分かる。また、マウンドの有効重量と、図-21の  $c_p$  と  $k_p(x)$  との実験値の関係より推定した粘土表面の  $k_p(x)$  を表面付近における代表値として、図に一点鎖線で示した。計算値と測定値とは比較的良好一致を示しており、この  $k_p(x)$  の増加は圧密による粘土地盤の強度の増加によるものと考えられる。

ここで、マウンド自体の効果および粘土地盤の圧密の効果を分離して考慮するため、 $k_p(x)$  分布を任意に設定可能な有限要素法による地盤解析汎用プログラム<sup>20)</sup>を用いて計算を行った。なお、計算は港研方式の杭として行っている。計算条件として図-28に示すように4種類を設定することにした。まず、マウンド自体による効果を明らかにするため、条件1では粘土地盤のみを、条

件2では粘土地盤に加えてマウンド自体による効果をそれぞれ考慮した場合としている。次に、粘土地盤の圧密の効果を明らかにするため、条件3では今回の実験のように粘土表面付近のみ圧密が進行した効果を、条件4ではマウンドによる圧密が粘土地盤全体に生じた場合の効果をそれぞれ考慮した。

曲げ剛性の大きい杭AL-5について、各計算条件による杭頭荷重～杭頭変位および曲げモーメント分布の計算値を測定値と比較して、図-29および図-30にそれぞれ

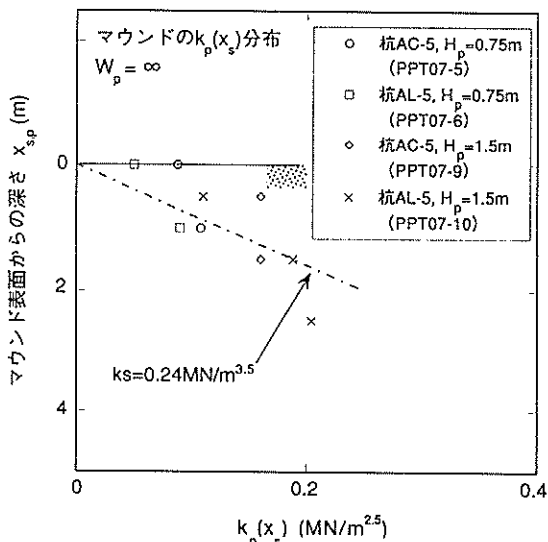


図-26 横抵抗係数の深度分布 (砂地盤中)

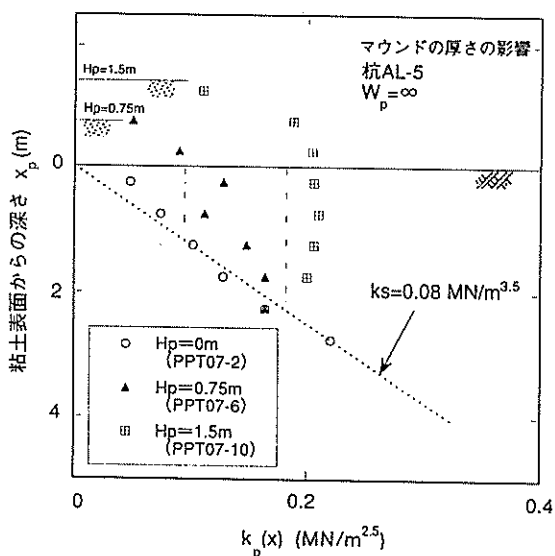


図-27 横抵抗係数の深度分布 (粘土地盤中)

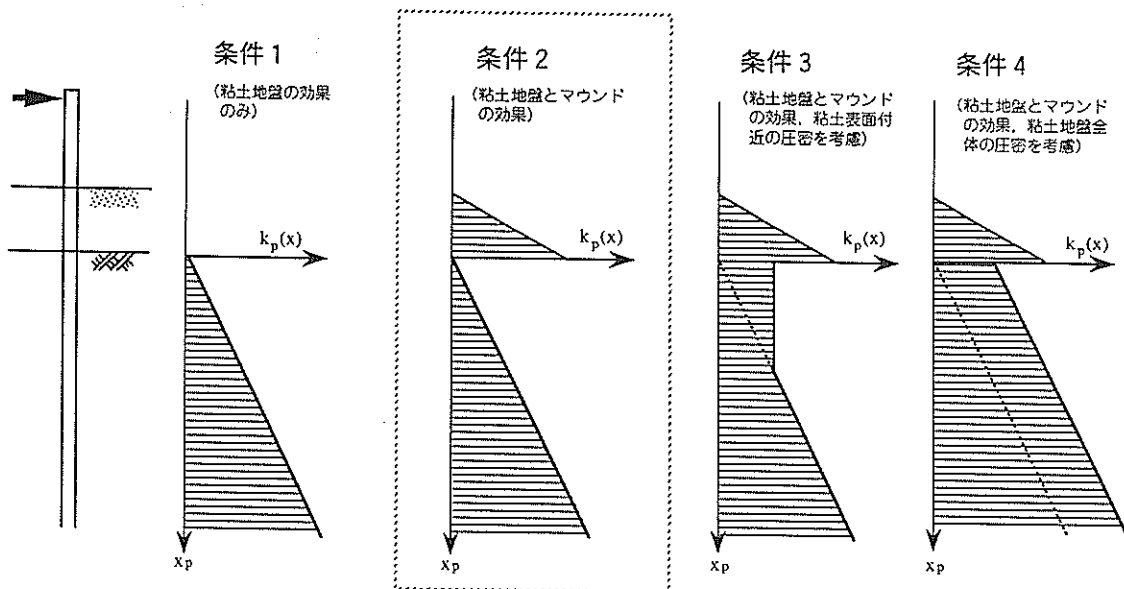


図-28 解析計算の条件

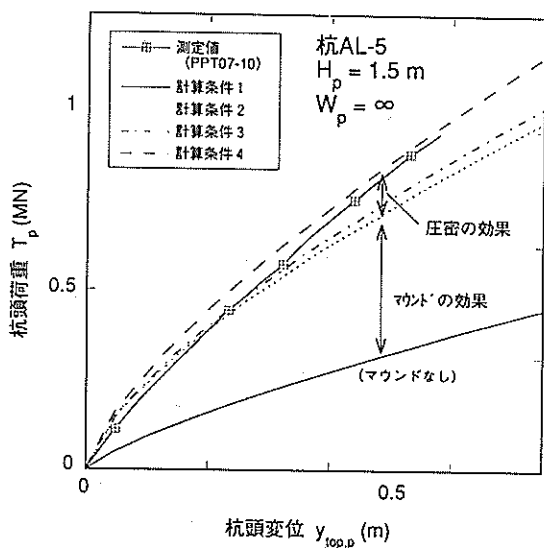


図-29 杭頭変位～杭頭荷重関係

示した。図-29において、条件1は粘土地盤のみの場合であり、シリーズIで測定値とほぼ等しいことが確かめられている。条件1と条件2とを比較すると、マウンドの効果はこれらの計算値の差で表される。図より、条件2の計算値は条件1よりも非常に大きな杭頭荷重を示しており、マウンド自体の効果が非常に大きいことが分かる。一方、条件2、条件3および条件4による計算値に

は、さほど大きな差が見られておらず、圧密の効果はマウンド自体の効果に比べて小さいことが分かる。

図-30に示した曲げモーメント分布について見ると、ここでも、マウンドの効果によって曲げモーメントが非常に小さくなっている。また、粘土地盤の圧密の効果はマウンド自体の効果に比べて小さいことが分かる。

曲げ剛性の小さい杭AC-5についても同様の計算を行った。その結果、マウンド自体の効果については杭AL-5とほぼ同様の結果であったが、圧密の効果は杭AL-5よりも小さくほとんど無視できる程度のものであった。これは、図-24で述べたように、粘土地盤中のたわみが非常に小さいためと考えられる。

以上のようにマウンドの効果はマウンド自体によるものと、地盤の圧密によるものがあるものの、今回の実験の範囲では、マウンド自体の効果が大きいこと、杭の曲げ剛性によっても異なることが分かった。

杭AL-5について、計算条件2を用いて有限要素法による港研方式の計算を行い、得られた杭頭荷重～杭頭変位関係を図-31に示した。図には3種類のマウンド厚さについて示している。図を見ると、計算値と測定値とは最大10%程度の差異が見られるものの、全体的に見ると比較的良い一致を示していることが分かる。また図-30に示したように曲げモーメント分布についても、粘土地盤中において若干差異が見られるものの、全般に良い一致を示している。これらのことから、今回の実験で得ら

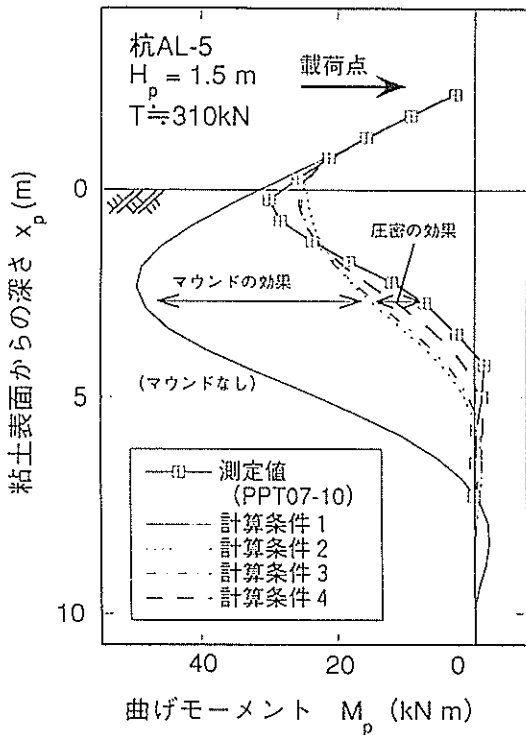


図-30 曲げモーメント分布

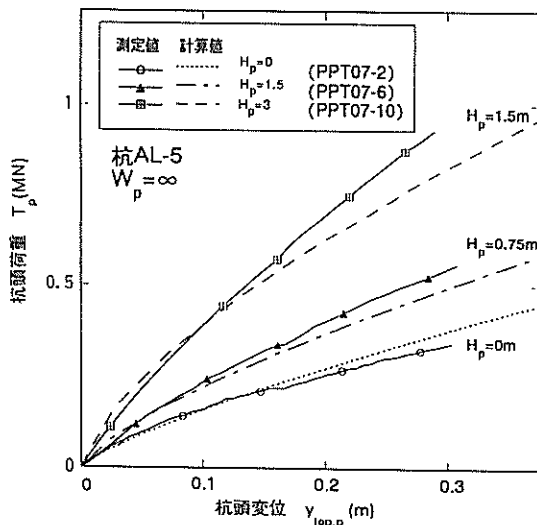


図-31 杭頭荷重～杭頭変位関係

れた横抵抗係数を用いた港研方式によれば、水平荷重を受ける杭の杭頭荷重～杭頭変位関係および曲げモーメント分布を精度良く推定することが可能であることが分かった。

## 5.5 杭に及ぼすマウンドの幅の影響 (シリーズⅢ)

### (1) 杭頭荷重～杭頭変位関係

杭AC-5に対する水平載荷中の杭頭荷重と杭頭変位との関係を図-32に示す。図にはマウンドの厚さ ( $H_p$ ) が0mの場合に加え、 $H_p=1.5$ mで杭前面からマウンドの法肩までの距離 ( $w_p$ ) を0.75m,  $\infty$ とした実験の結果を3種類の曲線で示している。

$w_p=0.75$ mの場合の杭頭荷重 ( $T_p$ ) の大きさは厚さが0mの場合の約4倍になっており、 $w_p=\infty$ の場合が約5倍であることから、マウンドの幅が比較的小さい場合にもマウンド設置の影響が比較的大きく現れる傾向があることが分かる。

杭の曲げ剛性 (EI) が約11倍大きい杭AL-5で得られた杭頭変位と杭頭荷重との関係を図-33に示す。図には杭AC-5の場合と同様に3種類の曲線を示している。 $w_p=0.75$ mの場合の杭頭荷重の大きさは厚さが0mの場合の約2倍になっており、 $w_p=\infty$ の場合が約2.5倍であることから、杭AL-5の場合でもマウンドの幅が比較的小さい場合にもマウンド設置の影響が比較的大きく現れる傾向があることが分かる。しかしその増加の割合は杭AC-5の場合に比べて小さく、曲げ剛性が大きい杭の場合にはマウンドの幅の杭頭荷重～変位関係に及ぼす影響が小さくなる傾向が見られる。

### (2) 曲げモーメント分布

図-34には杭AC-5で得られた曲げモーメント分布を示す。図にはマウンドの厚さ ( $H_p$ ) が0mの場合に加え、 $H_p=1.5$ mで杭前面からマウンドの法肩までの距離 ( $w_p$ ) を0.75m,  $\infty$ とした実験の結果を3種類の曲線で示している。厚さが0mから  $w_p=0.75$ m,  $\infty$  とマウンドの幅が大きくなるほど、最大曲げモーメント ( $M_{max,p}$ ) の発生する位置および第一曲げモーメント零点の深さ ( $\ell_{m1,p}$ ) はともに上方に移動する傾向が見られる。また  $w_p=0.75$ mの場合の  $M_{max,p}$  の大きさは厚さが0mの場合の約1/2 になっており、その発生位置もほぼ粘土地盤表面付近にまで上方へ移動していることが分かる。 $w_p=\infty$ の場合の  $M_{max,p}$  が厚さが0mの場合の約1/2.5であることから、杭頭荷重～杭頭変位関係で述べた傾向と同様に、マウンドの幅が比較的小さい場合にもマウンド設置の影響は大きく現れる傾向があることが分かる。

杭の曲げ剛性が約11倍大きい杭AL-5で得られた曲げモーメント分布を図-35に示す。図には杭AC-5の場合と同様に3種類の曲線を示している。 $w_p=0.75$ mの場合の  $M_{max,p}$  の大きさは厚さが0mの場合の約1/1.5 になっており、 $w_p=\infty$ の場合が約1/2 であることから、杭AL-5の場合でもマウンドの幅が比較的小さい場合にもマ

マウンド設置の影響が比較的大きく現れる傾向があることが分かる。しかしその増加の割合は杭AC-5の場合に比べて小さく、曲げ剛性が大きい杭の場合にはマウンドの幅の曲げモーメント分布に及ぼす影響が小さくなる傾向が見られる。

### (3) 横抵抗係数に及ぼすマウンドの幅の影響

シリーズIIにおいて述べたように、マウンドが杭の挙動に及ぼす影響にはマウンド自体による効果とマウンドによる粘土地盤の圧密の効果があるが、本研究の実験条件ではマウンド自体の効果が卓越していることを述べた。

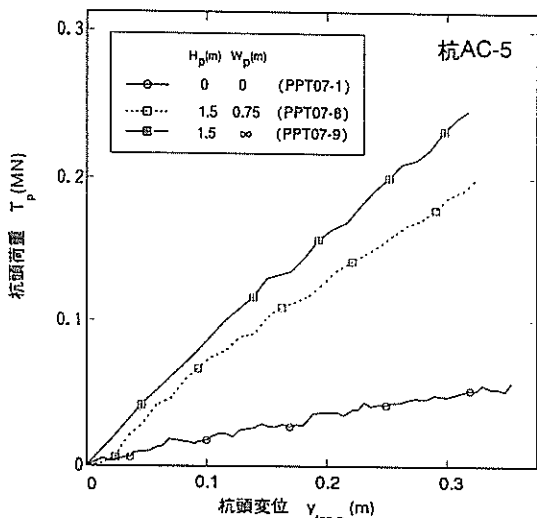


図-32 杭頭変位～杭頭荷重関係 (杭AC-5)

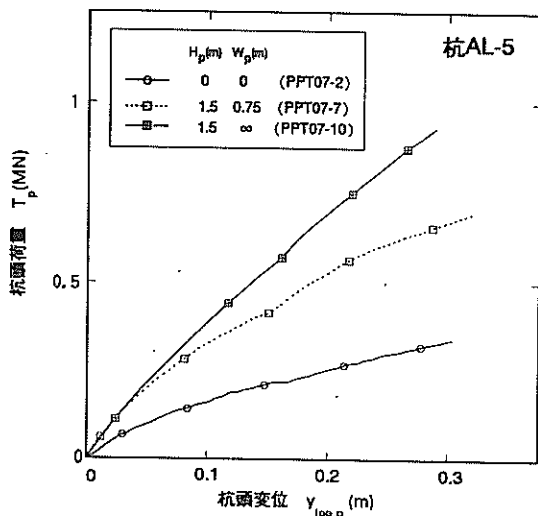


図-33 杭頭変位～杭頭荷重関係 (杭AL-5)

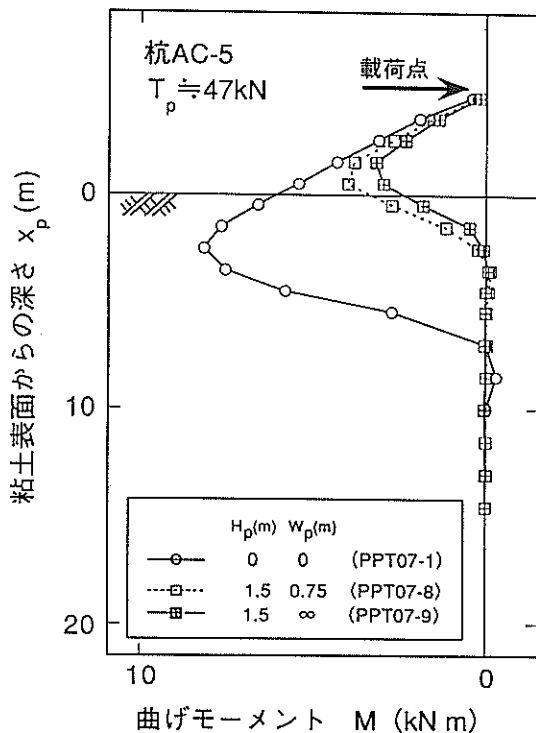


図-34 曲げモーメント分布 (杭AC-5)

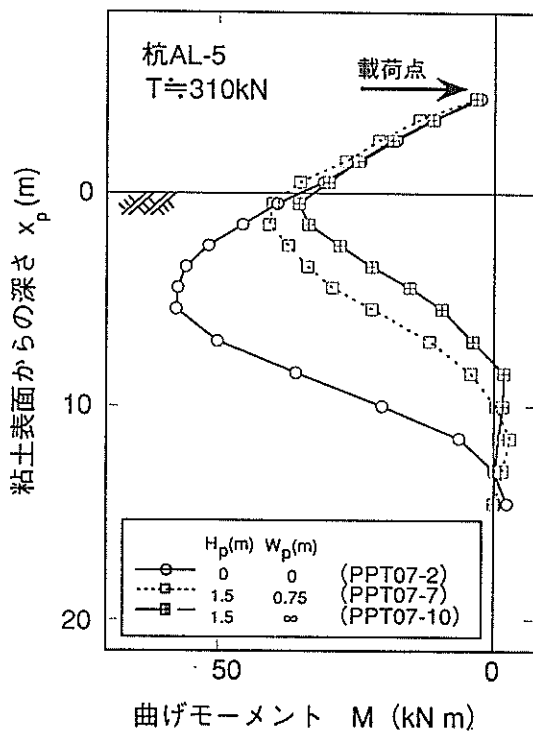


図-35 曲げモーメント分布 (杭AL-5)

そこで、ここではマウンド自体の効果のみを考慮することにする。マウンドの横抵抗係数の深さ方向増加率( $k_p$ )はマウンド幅に大きく影響を受けると考えられるが、マウンド幅と横抵抗係数の関係を明確に示している文献は数少なかった。その中で、寺師ら<sup>9)</sup>は砂地盤を対象に斜面近傍の杭の横抵抗の低減に関する実験を行っている。それによると、マウンドの幅( $w_p$ )が0.75mの場合( $w_p/B_p=1.5$ )には $w_p=\infty$ の $k_p$ の約70%と述べている。図-36に実験結果の曲げモーメント分布より推定した $k_p(x)$ 分布を示した。マウンド部分の $k_p$

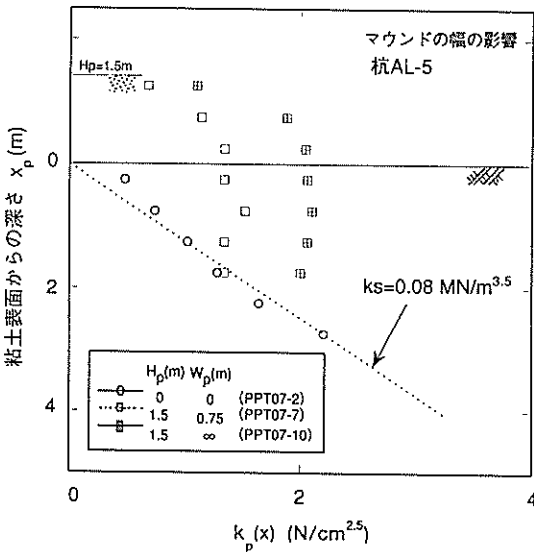


図-36 横抵抗係数分布

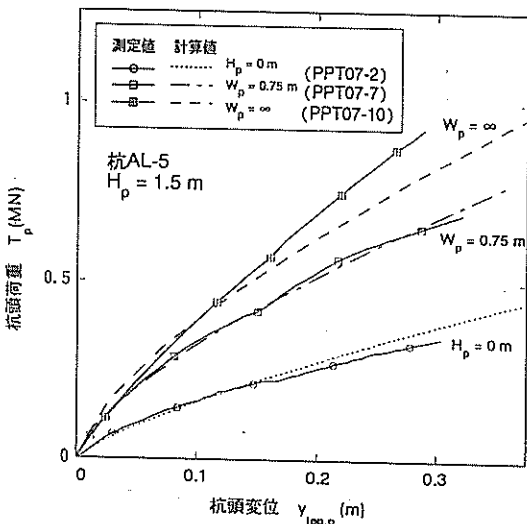


図-37 杭頭荷重～杭頭変位関係

(x) 分布に着目すると、 $w_p=0.75m$ の場合の値は、 $w_p=\infty$ の場合の約60~70%の値であり、寺師らの低減率と同じ傾向が見られたことから、ほぼ妥当な値となっていることが分かった。

杭AL-5について、 $k_p$ の推定値を用いて計算条件2(図-28参照)により港研方式の計算を行い、得られた杭頭荷重～杭頭変位関係を図-37に示す。図にはマウンドの厚さ( $H_p$ )が0mの場合に加え、厚さが1.5mで2種類の $w_p$ の場合についてそれぞれ計算値と測定値を比較して示しており、 $w_p=0.75m$ の場合には計算値と測定値とが非常に良い一致を示していることが分かる。

ここでは $w_p=0.75m$ の場合について検討を行ったのみであり、マウンドの幅が種々に変化した場合の結果について評価することはできなかったが、寺師らによるマウンド幅と $k_p$ の関係は他のマウンド幅についても適用できると考えられる。以上のことから、 $k_p(x)$ 分布を適切に設定し比較的簡便な有限要素法による港研方式の計算を行うことにより、杭の杭頭荷重～杭頭変位関係および曲げモーメント分布の推定が可能であることが分かった。

## 6. 結論

正規圧密粘土地盤中の杭および周辺にマウンドを有する杭に水平載荷実験を行って得られた結論は以下のように要約される。

- 1) 測定された曲げモーメント分布から地盤反力およびたわみを推定すると、粘土表面からの深さによらず地盤反力がたわみのほぼ0.5乗に比例することが分かる。この関係は港研方式で用いられているものと同一の関係であった。
- 2) 遠心実験から得られた地盤の横抵抗係数は深さに比例して増加しており、杭の曲げ剛性によらずほぼ同じ直線上に分布することが分かった。また港研方式による計算を行う際に、得られた横抵抗係数を用いることで杭頭荷重～杭頭変位の関係および曲げモーメント分布をある程度推定することが可能であることが分かった。
- 3) 遠心模型実験の結果得られた横抵抗係数はせん断強度の増加に伴って一様に増加する傾向が見られた。またこの横抵抗係数～せん断強度関係は、現地実験、大型模型実験および理論式から得られた関係と同様の傾向を示していることから、遠心模型実験でも他の方法と同程度の精度で杭の挙動を推定できると考えられる。
- 4) マウンドの厚さおよび幅は杭の挙動に大きな影響を及ぼし、その影響は曲げ剛性の大きい杭ほど小さい傾

向が見られた。

- 5) マウンドの設置による影響は、マウンド自体による効果ならびにマウンドによる粘土地盤の圧密の効果によるものと考えられる。今回の実験範囲ではマウンド自体による効果が卓越しており、粘土地盤の圧密の効果は比較的小さいことが分かった。
- 6) マウンドを有する地盤においても、遠心模型実験の結果から得られた横抵抗係数を用いて港研方式による計算を行うことで、杭の挙動をある程度推定することが可能であると考えられる。その際、砂地盤の斜面近傍の杭に関する研究を参考にしてマウンドの横抵抗係数を低減することにより、マウンドの幅をも考慮した杭の挙動を推定できることが分かった。
- 7) 一連の実験を通じて、水平荷重を受ける杭の挙動に対して、遠心模型実験手法が有効であることが分かった。

## 7. あとがき

本研究では、日本の沿岸地域に多く見られる深さ方向に強度の増加する軟弱粘土地盤中に設置された杭について水平載荷実験を行い、杭周辺のマウンドが杭の横抵抗に及ぼす影響を検討した。その結果、マウンドの厚さおよび幅の影響をある程度定量的に明らかにすることができ、本テーマについて遠心模型実験による検討を進めることの有用性を確認できた。今後は、本研究の成果を踏まえて、砂マウンドの材料や密度を変化させた実験ならびによりパラメトリックな解析を行うことにより、マウンドと杭の相互作用について解明することができると考えられる。

(1994年9月30日受付)

## 謝 辞

本研究の取りまとめにあたり、小林土質部長ならびに菊池主任研究官には貴重な助言を頂いた。末尾を借りて感謝の意を呈する。

## 参考文献一覧

- 1) 久保浩一：杭の横抵抗の新しい計算法，港湾技術研究所報告，第2巻第3号，pp.1-37，1964.
- 2) Scott, R.F. : Pile Testing in a Centrifuge, Proc. 10th Int'l Conf. on S.M. and F.E., Stockholm, Vol.2, pp.839-842, 1981.
- 3) Oldham, D.C.E., Allott and Lomax : Experiments with lateral loading of single piles in sand, Proc. a symposium on

the application of centrifuge modeling to geotechnical design, pp.122-142, 1984.

- 4) Ting, J.M., C.R. Kauffmann and M.Lovicsek : Centrifuge static and dynamic lateral pile behavior, Canadian Geotechnical Journal Vol.24 No.24, pp.198-206, 1986.
- 5) 寺師昌明, 北詰昌樹, 川端浩二: 砂地盤中の単杭の横抵抗に関する遠心模型実験, 第23回土質工学研究発表会, pp.1431-1434, 1988.
- 6) 寺師昌明, 北詰昌樹: 斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗, 港湾技術研究所報告, 第30巻第2号, pp.327-348, 1991.
- 7) 高橋邦夫, 壺岐幸史: 杭の横抵抗における捨石層の評価, 港湾技術研究所報告, 第30巻第2号, pp.229-273, 1991.
- 8) Barton, Y.O. : Response of pile groups to lateral loading in the centrifuge, Proc. a symposium on the application of centrifuge modeling to geotechnical design, pp.456-472, 1984.
- 9) Matlock, H. : Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay, Proc. 2nd Offshore Tech. Conf., Houston, Texas, pp.577-594, 1970.
- 10) Hamilton, J.M., T.W. Dunnivant, J.D. Murff and R. Phillips : Centrifuge study of laterally loaded behavior in clay, Proc. Conf. Centrifuge 91, pp.285-292, 1991.
- 11) 北詰昌樹, 宮島正悟: 二層地盤中の単杭の横抵抗に関する遠心模型実験, 第28回土質工学研究発表会, pp.1781-1784, 1993.
- 12) Kitazume, M. and S. Miyajima : Lateral resistance of a long pile in soft clay. Proc. Conf. Centrifuge 94, pp.485-490, 1994.
- 13) 寺師昌明: 遠心力載荷試験手法とその適用例—深層混合処理改良地盤の挙動—, 昭和60年度港湾技術研究所講演会講演集, pp.119-184, 1985.
- 14) 北詰昌樹, 遠藤敏雄・寺師昌明: 正規圧密地盤上の浅い基礎の支持力, 港湾技術研究所報告, 第27巻第3号, pp.185-203, 1988.
- 15) 藤井斉昭: 遠心力載荷装置による浅基礎の支持力機構に関する研究, 東京工業大学学位請求論文, p.314, 1976.
- 16) 荘司嘉博: 砂地盤における地中杭の横抵抗に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第23巻第2号,

pp.75-179, 1984.

## 記号表

- 17) Finn, W.D.L., Y.O. Barton and I. Towhata :  
Seismic response of offshore pile foundations, centrifuge data and analyses, Proc.7th Pan-American Conf. on S.M. and F.E. Vancouver, B.C., pp., 1983.
- 18) 菊池喜昭, 高橋邦夫, 鈴木操 : 繰り返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動, 港湾技術研究所報告, 第31巻第4号, pp.33-60, 1992.
- 19) 運輸省港湾局監修 : 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (改訂版), 日本港湾協会, pp.375-398, 1989.
- 20) 横山幸満 : 杭構造物の計算法と計算例, 山海堂, p.14, 1977.
- 21) Terzaghi, K. and Peck, R.B. : Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons., pp.294-304, 1948.
- 22) 菊池喜昭, 高橋邦夫, 中村竜一 : 着底くし形構造物模型の静的載荷実験, 港湾技研資料, No.679, pp.1-26, 1990.
- 23) 沢口正俊 : くいの横抵抗における地盤常数に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第7巻第2号, pp.65-94, 1968.
- 24) 小林正樹 : 地盤の安定・沈下解析における有限要素法の適用に関する研究, 土性研究室資料, No.1, pp.1-71, 1990.
- |            |                          |                      |
|------------|--------------------------|----------------------|
| B          | : 杭の幅                    | (m)                  |
| $C_u$      | : 粘土の非排水せん断強度            | (N/m <sup>2</sup> )  |
| D          | : 杭の厚さ                   | (m)                  |
| E I        | : 杭の曲げ剛性                 | (Nm <sup>2</sup> )   |
| g          | : 地球の重力加速度               | (g)                  |
| H          | : マウンドの厚さ                | (m)                  |
| $k_s$      | : 横抵抗係数の深さ方向増加率          | (N/m <sup>25</sup> ) |
| $k(x)$     | : 深さ x における横抵抗係数         | (N/m <sup>25</sup> ) |
| $l_{m1}$   | : 第一曲げモーメントゼロ点の深さ        | (m)                  |
| $l_{mmax}$ | : 最大曲げモーメントの発生する深さ       | (m)                  |
| M          | : 深さ x における杭の曲げモーメント     | (N·m)                |
| $M_{max}$  | : 最大曲げモーメント              | (N·m)                |
| p          | : 深さ x における杭の単位面積当りの地盤反力 | (N/m <sup>2</sup> )  |
| S          | : 深さ x における杭のせん断力        | (N)                  |
| T          | : 載荷点における水平荷重 (杭頭荷重)     | (N)                  |
| W          | : 杭よりマウンド法層までの距離         | (m)                  |
| x          | : 粘土表面からの深さ              | (m)                  |
| y          | : 深さ x における杭の水平変位量       | (m)                  |
| $y_{top}$  | : 載荷点における杭の水平変位量 (杭頭変位)  | (m)                  |

港湾技研資料 No. 790

1994. 12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 あんざい

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright © (1994) by P.H.R.I

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

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。