

# 港湾技研資料

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

No.917      Sept.1998

中間弱層の存在により側方移動する地盤中の杭の挙動

菊池喜昭  
廣瀬栄樹

運輸省港湾技術研究所

## 目 次

要旨	3
1. まえがき	3
2. 模型実験	3
2.1 実験装置	3
2.2 模型杭	4
2.3 模型地盤	5
2.4 実験方法	6
2.5 実験条件	8
3. 実験結果及び解析	9
3.1 シリーズ1(下部層の強度が比較的大きい場合)	10
3.2 シリーズ2(下部層の強度が比較的小さい場合)	13
4. 考察	15
5. 結論	18
6. あとがき	19
参考文献	19

# 中間弱層の存在により側方移動する地盤中の杭の挙動

菊池 喜昭\*  
廣瀬 栄樹\*\*

## 要旨

側方流動をおこす地盤中にある構造物の被害事例は多く、さまざまな研究が行われてきている。本研究は、比較的しっかりした地盤に挟まれた弱層の存在により上下の層が相対的に側方に移動するような条件の地盤中にある杭の挙動について実験的に検討したものである。このような条件が発生するケースの一つに、中間層での液状化の問題があり、兵庫県南部地震を契機に注目を浴びてきている。この実験では、層厚 80cm の模型地盤(上部 50cm を硬層、下部 30cm を弱層とした)を作成し、土槽底板を静的に引抜くことにより側方流動を模擬した。このとき、弱層の地盤強度と杭間隔をいくつか選び、それらのパラメータが杭の挙動にどのように影響するかを調べた。その結果、以下のような結論を得た。

- 1) 中間弱層の強度の違いは、杭の挙動に大きな影響を与える。
- 2) 中間層が液状化する場合のように、中間弱層の強度が極端に低い場合には、弱層と硬層の片方の境界で杭を回転固定として水平に強制変位させるようなモデルで現象を再現することができ、港研方式を適用して計算できる。
- 3) 杭中心間隔が小さいほど、側方流動に対する杭による抵抗力の割合が大きくなる。

キーワード：杭，側方流動，液状化，模型実験

## 1. まえがき

構造物の基礎に用いられる杭の主な機能は、鉛直荷重の支持、水平荷重に対する抵抗である。水平荷重に対する抵抗に着目した場合、地盤は、杭に作用する水平方向の荷重に対して抵抗する機能を発揮する。しかし、何らかの原因により地盤が側方流動を起こした場合、地盤が杭に対して水平方向の荷重を与えるようになる。この場合、杭は時として破壊に至ることがあり、最近では兵庫県南部地震において港湾構造物が地震に伴う地盤の側方流動により甚大な被害を受けたことが報告されている。このような状況に対応するために、側方流動を起こしうる地盤に建設される杭基礎構造物及び既設の杭基礎構造物に対する設計・対策についての考え方を取りまとめる必要がある。そのためは、地盤が側方流動を起こしたときに、その地盤中の杭基礎構造物がどのような影響を受け、どのような破壊メカニズムを示すのかを解明する必要がある。

この研究では、図-1に示すような中間に弱層を挟む上下層が水平方向に相対的に動く場合を想定し、その地盤

中にある杭の挙動をシミュレートする実験を行った。ここで想定しているような側方流動が起きたときに杭の挙動を支配する要因はさまざまであると考えられるが、この研究では、中間弱層の強度と杭の間隔をパラメータとして実験をし、これらの要因が杭の挙動に及ぼす影響を中心に検討した。

## 2. 模型実験

### 2.1 実験装置

実験は、基礎工研究室で開発した実験土槽を用いて行った。土槽の内寸法は、図-2に示すように縦1600mm、横600mm、深さ800mmである。

この土槽の底板は、下部にローラーがついており、図-2中の左側に示してある引き抜き装置で引っ張ることによりスライドすることができる構造となっている。底板は最大で約85mm変位させることができ、底板の変位速度は1mm/hour～100mm/hourの範囲で任意に設定することができる。また引き抜き装置には荷重計と変位計を取

\* 土質部基礎工研究室長

(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所

TEL 0468-44-5024 FAX 0468-44-0618 E-mail: kikuchi@phri.go.jp)

\*\* 土質部基礎工研究室研修生(大成基礎設計(株))

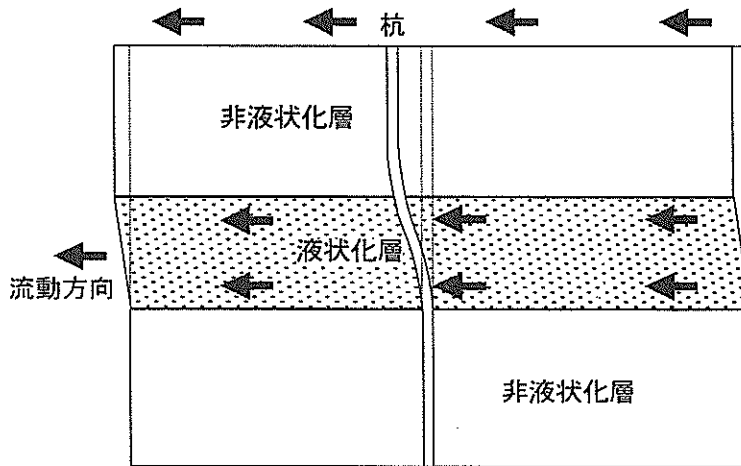


図-1 中間弱層の存在による地盤の側方流動

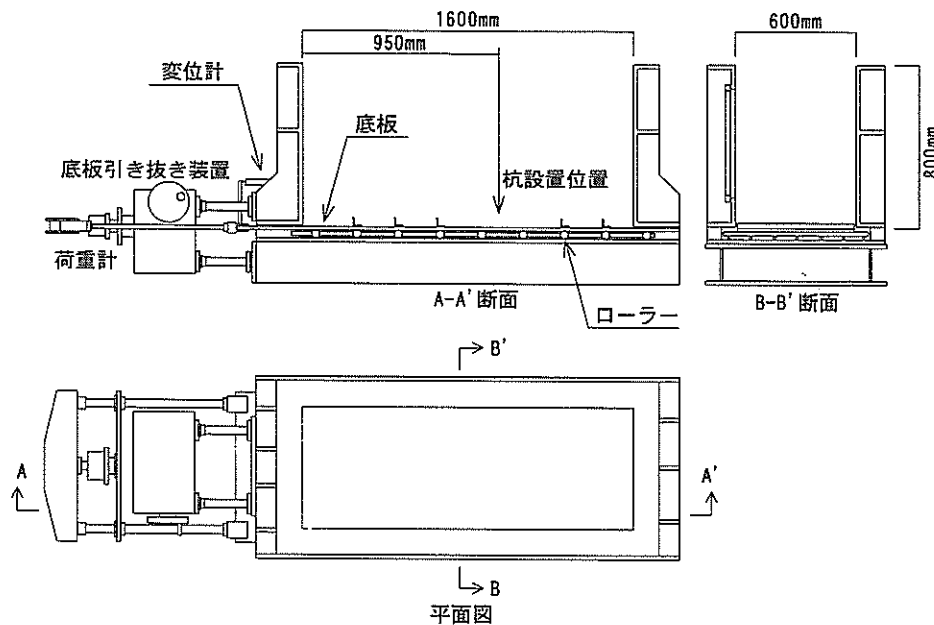


図-2 実験に用いた土槽

り付けてあり、底板をスライドさせたときの水平方向の変位と荷重を計測することができる。

また、土槽の底板には引き抜き装置側の端から950mmの位置に杭を固定できるようにネジが切っている。

## 2.2 模型杭

実験での模型杭には、アルミニウム製の板杭を用いた。模型杭の寸法は図-3に示すように、長さ $L1000\text{mm}$ 、幅 $D30\text{mm}$ 、厚さ $t5\text{mm}$ である。模型杭の長さは実験土槽の深さより長くしてある。これは、水平載荷実験時に杭の上部で水平方向に発生する変位をレーザー変位計により計測するためである。また、模型杭は底板に固定するためのベースを有している。

土槽幅の中央部分に設置する模型杭には変形挙動を観

察するために図-4に示す位置にひずみゲージを貼付してある。この時、1測点あたり片面に1枚ずつ(両面で2枚)ひずみゲージを貼付しており、杭1本あたり計28枚貼り付けてある。測定に際しては、1側点について両面2枚でブリッジを組み、水平載荷実験中に杭に発生する曲げひずみを測定した。ひずみゲージを貼付した模型杭のベースから800mmの部分には両面に2液混合のエポキシ樹脂系接着剤を用いてコーティングを施した。コーティングをした部分は実験中に地盤と接触する部分であり、このコーティングはひずみゲージの絶縁の確保と地盤とひずみを測定する杭の接触面の状態を一定にすることが目的である。

引抜き実験の前にひずみゲージを貼付したすべての模型杭のキャリブレーションを行った。キャリブレーション

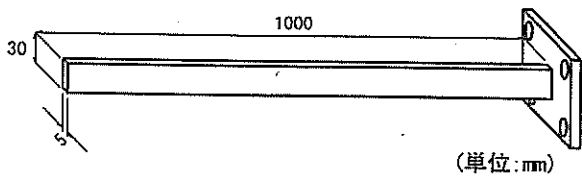


図-3 模型杭

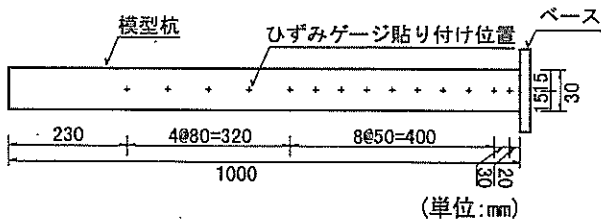


図-4 ひずみゲージ貼付状況

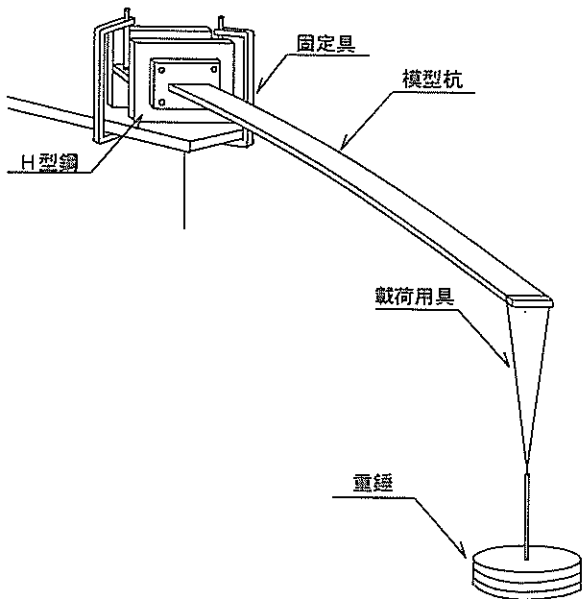


図-5 キャリブレーション

は、図-5に示すように杭のベース部分を固定し、杭の先端付近に荷重を載荷することにより実施した。載荷は模型杭が弾性的な挙動を示す範囲内で行った。キャリブレーションでは、載荷重、杭に発生する曲げひずみを測定した。

キャリブレーションの結果から、各側点で測定した曲げひずみに対する曲げモーメントの換算係数  $EZ'$  (曲げモーメント  $M=EZ'e$ ) を求めた。また、この換算係数の平均的な値に杭本体の杭軸からゲージを添付したところまでの距離  $l/2$  を乗ずることにより杭全体の曲げ剛性  $EI$  を求めた。杭全体の曲げ剛性  $EI$  は杭によって少しずつ異なるが、概ね  $2.33 \sim 2.45 \times 10^4 \text{ kgfcm}^2$  の範囲であった。

表-1 配合試験の条件

実験 No.	養生日数 (日)	セメント添加率 (%)
1	3	15,20,25,30
2	4	3,10

### 2.3 模型地盤

模型地盤は上部層と下部層の2層とし、それぞれ硬い層と軟らかい層を想定した。今回の実験では、強度の管理が簡便となるように、粘性土を用いて実験を行うことにした。この時、想定する地盤-杭系モデルを考慮し、杭の曲げ剛性と地盤の剛性の関係から地盤強度の目標値を設定した。

硬い層の強度は杭の剛性と比較して十分大きな剛性を持つものと考えられる値とし、一軸圧縮強さ  $q_u$  で  $3 \text{ kgf/cm}^2$  程度を目標値とした。また、軟らかい層の強度は、地盤の液状化もしくは液状化にいたるまでの過程における強度低下の程度が違う場合を想定して2種類の強度を設定することにした。強度低下が小さい場合としては、硬い層の十分の一程度の強度となるように、一軸圧縮強さ  $q_u$  で  $0.3 \text{ kgf/cm}^2$  を目標値とした。一方、強度低下が大きい場合としては、液性限界以下の含水比 ( $w=45\%$ ) で練り混ぜたものを用いることにした。

用いた粘土は粉末カオリン粘土 (土粒子比重  $G_s=2.730$ , 液性限界  $w_L=55.4\%$ ) である。最も強度の低い地盤条件の場合を除いて、母材のカオリン粘土に普通ポルトランドセメントを添加して強度調整することにした。

模型地盤の強度が目標値となるようなセメント配合量を決定するために予備実験としてカオリン粘土の配合試験を実施した。表-1に配合試験の条件の一覧を示す。表-1に示すように、養生日数は2種類選んでいる。これは実験の工程から、下部層 (軟らかい層) と上部層 (硬い層) の養生日数が4日と3日と異なることを考えたためである。なお、これらの実験では、カオリン粘土に対する含水比  $w$  (=水の重量/カオリン粘土の乾燥重量) が液性限界の1.5倍 ( $w=83\%$ ) となることを目標とした。また、表-1中のセメント添加率とあるのは、粉末のカオリン粘土の気乾状態での重量に対する普通ポルトランドセメントの気乾重量の割合のことである。

配合試験の方法を以下に示す。

所定の含水比 ( $w=45\%$ ) になるように粉末カオリン粘土と水道水を計量し、ミキサーで十分混練した。セメントを所定の添加率となるように計量し、水道水を混ぜスラ

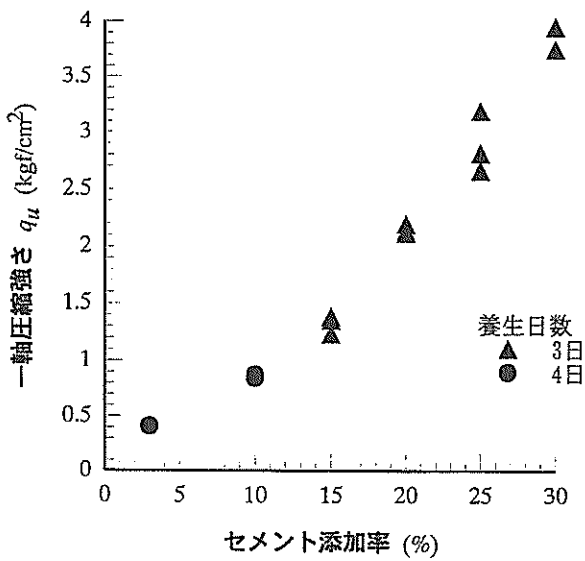


図-6 セメント添加率と一軸圧縮強さの関係

リー状にしたものをカオリン粘土に注入し、再び十分混練した。この際にセメントに加えた水道水は、最終的に出来上がる地盤材料(セメントを添加したカオリン粘土)に加えるべき水道水の一部である。セメントを添加したカオリン粘土をモールド内にタッピングして充填し、上部をビニールで密閉して所定の期間養生した。

図-6に配合試験の結果得られたセメント添加率と一軸圧縮強さ  $q_u$  の関係を示す。図-6の結果より、考えている養生日数と強度の目標値から硬い地盤のセメント添加率を25%、軟らかい地盤の強度低下率が小さい場合のセメント添加率を3%として実験を行うことにした。

#### 2.4 実験方法

模型地盤を打設する前に土槽の側面には、摩擦除去のためにビニールシートを貼り付けた。ビニールシートの貼り付け方は以下の通りである。①まず側面にシリコン

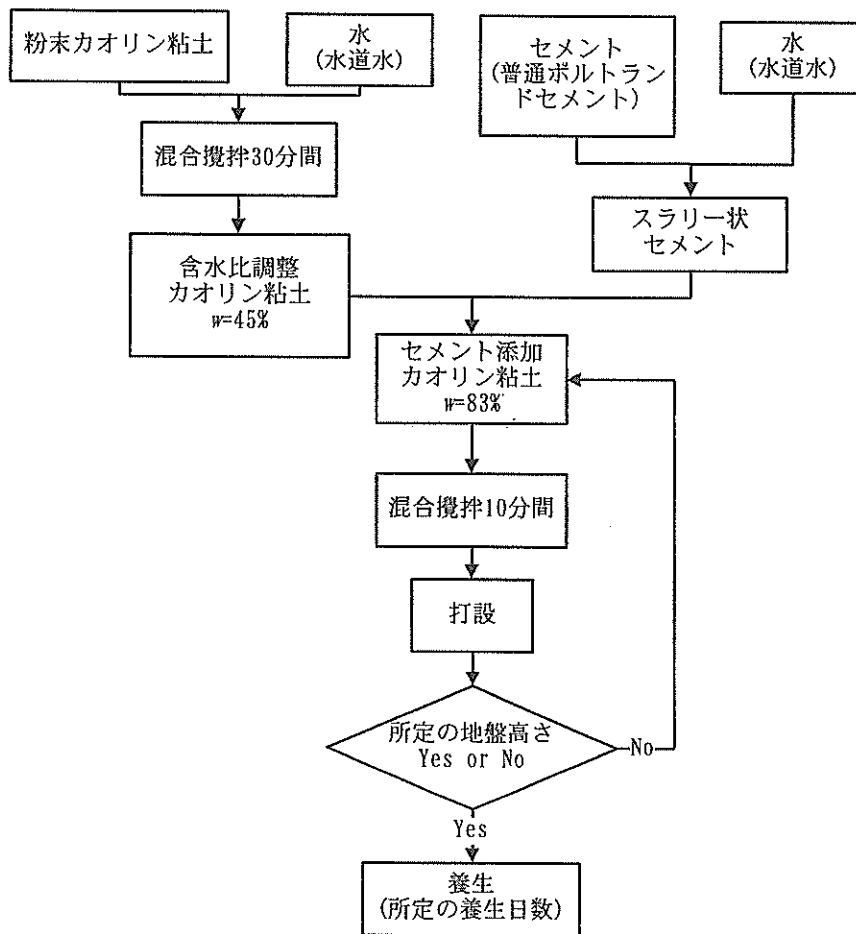


図-7 地盤作成方法のフローチャート

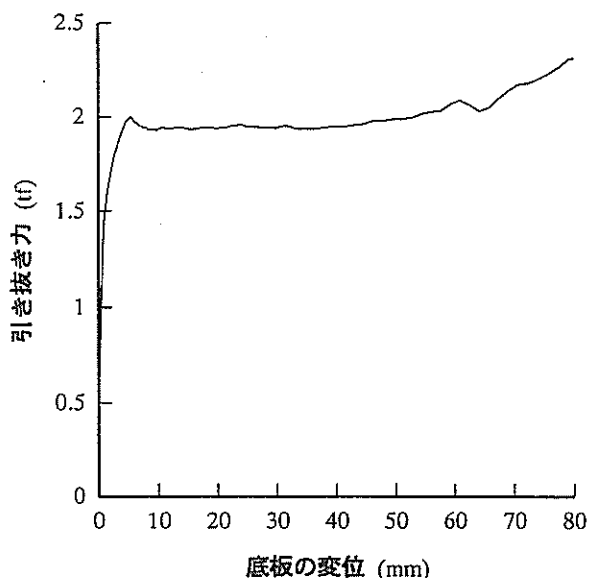


図-8 底板の摩擦の影響

グリースを均一になるようにはけで塗りつける、②その上に一枚目のビニールシートを空気が入らないように貼り付ける、③その上から再びシリコングリースを塗り付ける、④さらにその上にビニールシートを一枚目と同様に貼り付ける。このような方法で、側面と土との間にシリコングリースとビニールシートのサンドイッチ構造を作った。

土槽に摩擦除去処理を施した後、模型杭を土槽の所定の位置に設置した。模型杭は模型杭のベースと底板とをネジで固定されている。このとき、模型地盤作成後の地表面の杭の位置が所定の位置となるように、断面がL型の鋼材を土槽上部に2本渡して杭上部を挟み、固定した。これらのL型断面の鋼材は、水平載荷実験を行う直前に撤去した。なお、地盤作成時には杭に異常な変形が起きないように十分注意を払った。

模型地盤は、上部層と下部層の2層からなる。今回の実験では、それぞれの層の厚さは50cmと30cmとした。地盤材料の作成は、下部層・上部層とも同様の方法とした。基本的な地盤材料の作成方法のフローチャートを図-7に示す。地盤の作成では、まず下部層を作成し、その翌日に上部層を作成した。

上部層の養生期間が3日となるように放置した後、底板の引き抜き実験を行った。底板の引き抜き実験は、底板を底板引き抜き装置で引っ張りスライドさせることにより、杭下端及び下層部下面を強制的に変位させるものである。この時の底板の引き抜き速度は、1cm/hourとした。

引き抜き実験時には、杭に発生する曲げひずみ、杭上端部での変位とたわみ角、底板の引き抜き力、底板の変位を測定した。各項目の測定は30秒間隔で行った。なお、杭

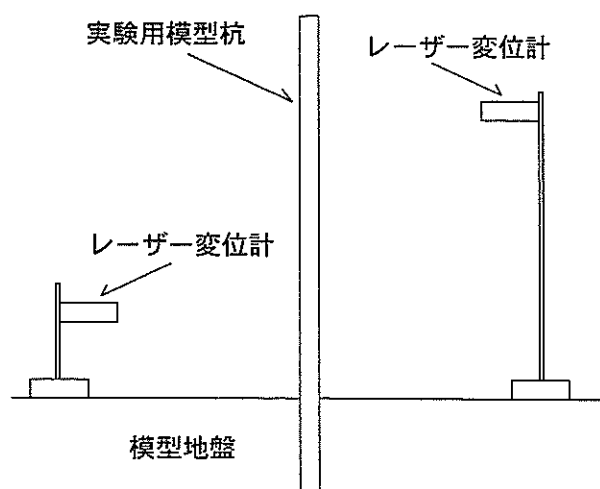


図-9 杭上端部でのたわみ角と変位の測定

に関する測定は列杭の中心の杭について行った。また、土槽側面の覗き窓から地盤の変位を観察し、適宜写真撮影を行った。

2.1で述べたように、引き抜き装置には荷重計を設置してあるが、底面の摩擦の程度によっては、荷重計による計測が困難になることが考えられる。そこで、土槽が空の状態では底板をスライドさせ、底板の変位と水平荷重の関係を調べた。その結果を図-8に示す。このときの変位速度は、1cm/hourとした。図-8より、底板を引きはじめると荷重が著しく増加し、底板の変位が5mm付近で引き抜き力がピーク(約2tf)に達した。それ以降、荷重はほぼ一定の値を保ちながら変位が大きくなった。変位初期に見られる荷重の増加は、土槽と底板の間にある摩擦であると考えられる。今回行う水平載荷実験では、土槽内に地盤を作成するため地盤の重量及び地盤と側壁の間の摩擦も考慮しなければならないことを考えると底板の引き抜き装置についている荷重計で求めた底板の変位と荷重の関係から地盤の抵抗の差を適切に評価することは困難であると考えられる。

杭上端部でのたわみ角と変位は、図-9に示すように地盤より上の部分における杭の前面と背面の2つのレーザー変位計での測定値を用いて計測した。この計測方法について簡単に説明する。

図-10に示すように引き抜き実験前の地表面における杭の位置を原点としたときの測定点の座標及び引き抜き実験中の任意の時点における測定点の座標を以下のように設定する。

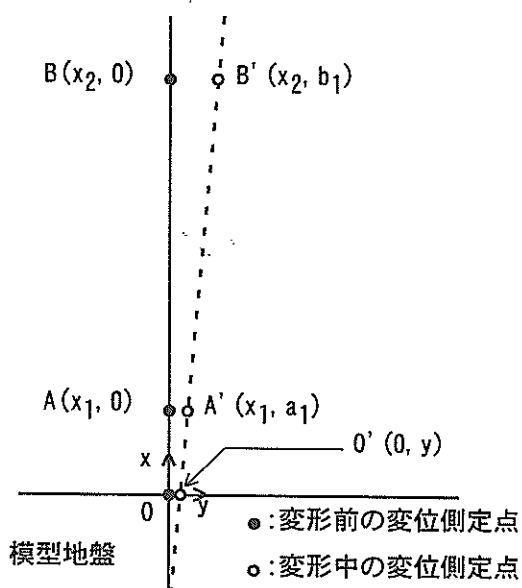


図-10 測定点の座標

引き抜き前 引き抜き中

$$A(x_1, 0) \rightarrow A'(x_1, a_1)$$

$$B(x_2, 0) \rightarrow B'(x_2, b_1)$$

このときの $x$ 座標は、実験の際にレーザー変位計を設置した高さから求められるため既知のものである。なお、実験ケースによって多少位置は異なるが、この実験での引き抜き前の $x_1$ はおよそ4.4cm、 $x_2$ はおよそ18cmであった。

これより杭のたわみ角と図-10の $O'$ 点における $y$ 座標は以下のように表すことができる。 $O'$ 点は、実験での地表面でありたわみ角及び $y$ 座標は、地表面での値である。

たわみ角

$$i_0 = -(b_1 - a_1) / (x_2 - x_1)$$

$y$ 座標

$$y_0 = a_1 - (b_1 - a_1) / (x_2 - x_1) * x_1$$

ここで傾きに負の記号がついているがこれは、解析を実施するために便宜上つけたものである。

このようにして任意の時点における地盤より上のたわみ角と $O'$ の座標を求めることにより、杭上端での境界条件を明確なものにしている。

## 2.5 実験条件

本研究では、中間弱層の存在による側方流動が起こったときにその地盤の中にある杭がどのような影響を受けるのか、どのような特徴を示すのかというものである。この

とき、杭の挙動を支配する要因はたくさんあると考えられるが、今回はパラメータとして杭間隔及び弱層の強度の2項目を設定した。

杭間隔は、杭間の土のすり抜け挙動に影響を及ぼす。すなわち、杭の間隔が広い場合には杭間の土がすり抜けやすく、杭間が狭い場合には杭間の土はすり抜けにくくなる。このことが、側方流動する地盤中にある杭の抵抗力とどのような関係にあるかが着目点である。

弱層の強度は、想定している弱層の間げき水圧の上昇の程度などによって軟化の程度が異なることを想定してパラメータとしたものである。一般に杭の挙動を梁ばねモデルで考えようとした場合、杭の曲げ剛性と地盤ばねの比が杭の挙動を支配すると考えられるが、このことと同様に、地盤の強度の低下の度合いの違いにより杭の挙動が異なってくるものと考えられる。

今回行った実験ケースは表-2に示すとおりである。ここでは、便宜的に全ケースを2つのシリーズに分けてある。第1のシリーズでは、下部層の強度が比較的大きいものであり、第2シリーズは下部層の強度が小さいものである。それぞれのシリーズの中では杭の配置を変えることにより実験条件を変化させている。

表-2には杭中心間隔を示しているが、各杭中心間隔のときの杭の配置は、図-11に示すようなものである。なお、ここでは隣接する杭の中心間の距離を杭中心間隔 $B$ と呼んでいる。

各ケースの地盤強度比は表-2に示した。この時の、各ケースにおける上部層と下部層の一軸圧縮強さ $q_u$ の範囲は表-3に示した。ここで、モールドの $q_u$ とは、地盤打設時に地盤材料の一部をモールドに詰めて養生した試料を所定の養生後脱形し、成形して $q_u$ を求めたものである。サンプリングの $q_u$ とは、底板引き抜き実験終了後、模型地盤解体時に、杭の近傍ではあるが杭の変形の影響を余りうけていないと考えられるところで、ブロックサン

表-2 実験条件一覧

実験シリーズ	実験 No.	使用した杭の No.	杭中心間隔 $B$	地盤強度比 $R_p$ 下部層:上部層
S1	1	P-5	2.5D	1:6.9
	2	P-1	4.5D	1:6.5
	3	P-2	9D	1:7.9
	4	P-3	10.0D	1:6.7
S2	1	P-6	2.5D	1:53
	2	P-4	9D	1:40



リングを行い、成形して $q_u$ を求めたものである。なお、シリーズ2の下部層は低含水比で混練りしただけの試料であるので、モールドによる強度調査を実施していない。また、シリーズ2の下部層の試験後の強さについては、地盤に直接ベーンを挿入して、ベーンせん断強度を求めて $q_u$ が $2\tau_v$ であるとして推定したものである。

今回の実験で作成した地盤の一軸圧縮強さは、各ケース内でのばらつきに加えて各ケース間でのばらつきが大きくなっている。2.2で述べたように上部層及び下部層の目標とした一軸圧縮強さはそれぞれ $3.0\text{kgf/cm}^2$ 、 $0.3\text{kgf/cm}^2$ であり予備実験の結果からセメントの添加率を決定したが、載荷実験での地盤の強度は、目標とした強度より大きい結果となった。これらの原因は、予備実験と載荷実験とで試料を作成する際のボリュームの違いによる混ざり具合のばらつきの他に、養生中の地盤の温度の違いが影響しているものと考えられる。つまり、模型地盤ではマスが大きいため養生中に地盤中の温度が上昇したと考えられるが、温度上昇の程度を十分にコントロールできていなかったことが考えられる。また、シリーズ全体としての

実験期間は長期間に渡ったため、この間各実験ごとに実験室内の平均温度が異なっていた。この室内の温度変化が地盤中の温度に影響したと考えられる。

さらに、同じ実験ケースの同じ層でもモールド試料とサンプリング試料では、サンプリング試料で一軸圧縮強さが大きくなっている。これはサンプリング試料の場合の養生日数がモールド試料の場合より一日多いことが原因の一つであると考えられる。

### 3. 実験結果及び解析

実験中に杭に発生する各測点の曲げモーメントは曲げひずみの測定値に換算係数をかけて求めた。梁の方程式で示されるように、曲げモーメント分布を積分もしくは微分をすることにより、たわみ角、変位、せん断力、地盤反力を求めることができる。ここでは、曲げモーメント分布を曲線の近似が比較的適切にできるスプライン関数<sup>9)</sup>を用いて近似を行い、曲げモーメント分布の微分及び積分をした。また、曲げモーメント分布の積分については、2.4

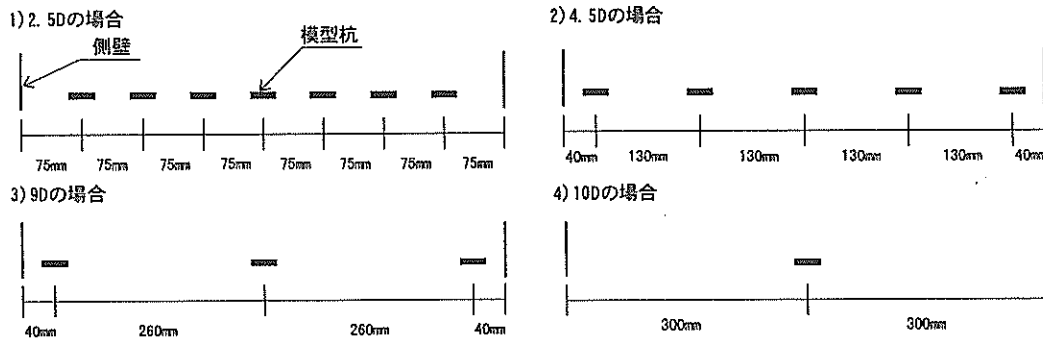


図-11 杭の配置

表-3 実験各ケースにおける一軸圧縮強さ

実験 No.	上部層(3日養生)	下部層(4日養生)	上部層(4日養生)	下部層(5日養生)
	モールド $q_u(\text{kgf/cm}^2)$	モールド $q_u(\text{kgf/cm}^2)$	サンプリング $q_u(\text{kgf/cm}^2)$	サンプリング $q_u(\text{kgf/cm}^2)$
S1-1	$5.38 \pm 0.23$	$0.78 \pm 0.11$	6.92	0.99
S1-2	$3.76 \pm 0.20$	$0.58 \pm 0.03$	5.89	0.93
S1-3	$4.08 \pm 0.14$	$0.52 \pm 0.05$	5.45	0.73
S1-4	$5.13 \pm 0.10$	$0.77 \pm 0.04$	7.19	1.04
S2-1	$5.34 \pm 0.44$	—**	7.05	0.10***
S2-2	$4.58 \pm 0.17$	—**	6.04	0.089***

注 \* モールドの結果は平均値とその95%信頼区間を示した。

サンプリングの結果は平均値である。

\*\* 一軸圧縮試験を行っていない。

\*\*\* 実験土槽で行ったベーン試験結果から求めた強度の2倍の値 $2\tau_v$ を記載した。

で示している杭上端での杭のたわみ角と変位を境界条件とした。

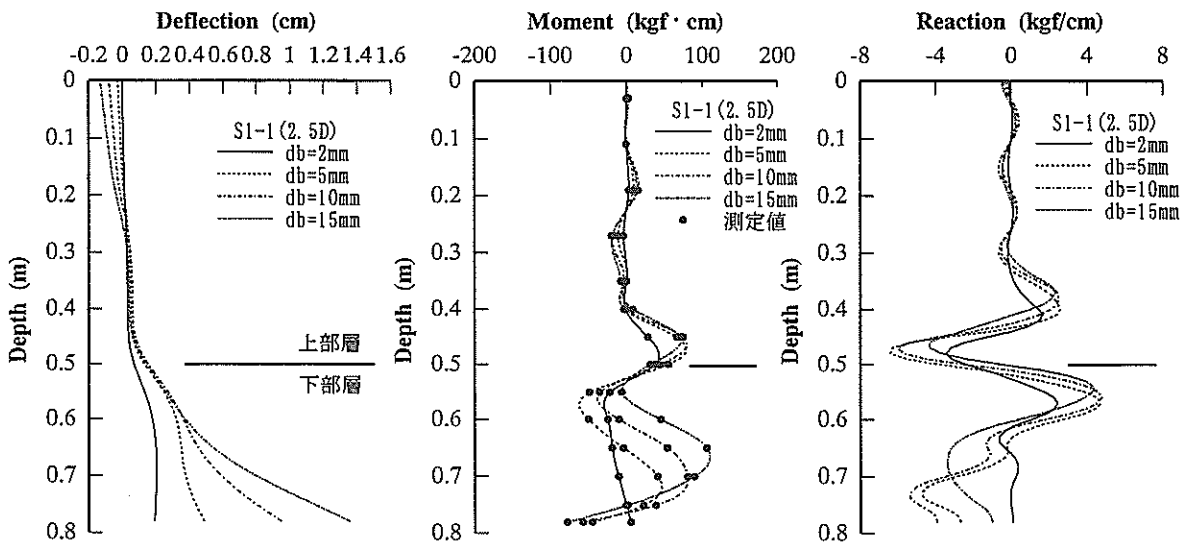
### 3.1 シリーズ1(下部層の強度が比較的大きい場合)

ここでは、弱層地盤の強度低下が小さい場合を想定した実験を行った。

図-12～図-15にシリーズ1の各実験ケースで得られた杭の変位分布、曲げモーメント分布、地盤反力分布を示

す。これらの図の縦軸は、深さであり、深さ0mが地表面で、深さ0.8mが底板面である。従って、下部弱層は、深さ0.5mから0.8mの部分である。図-12～図-15の各結果は、杭下端での変位 $d_b$ が2mm～15mmの範囲のいくつかの変位の場合を選んで示している。この実験では、曲げひずみの測定点は深さ0.78mが最深点であり、この点から杭下端までの結果は図に示していない。

図-12には、ケースS1-1で求められた変位分布

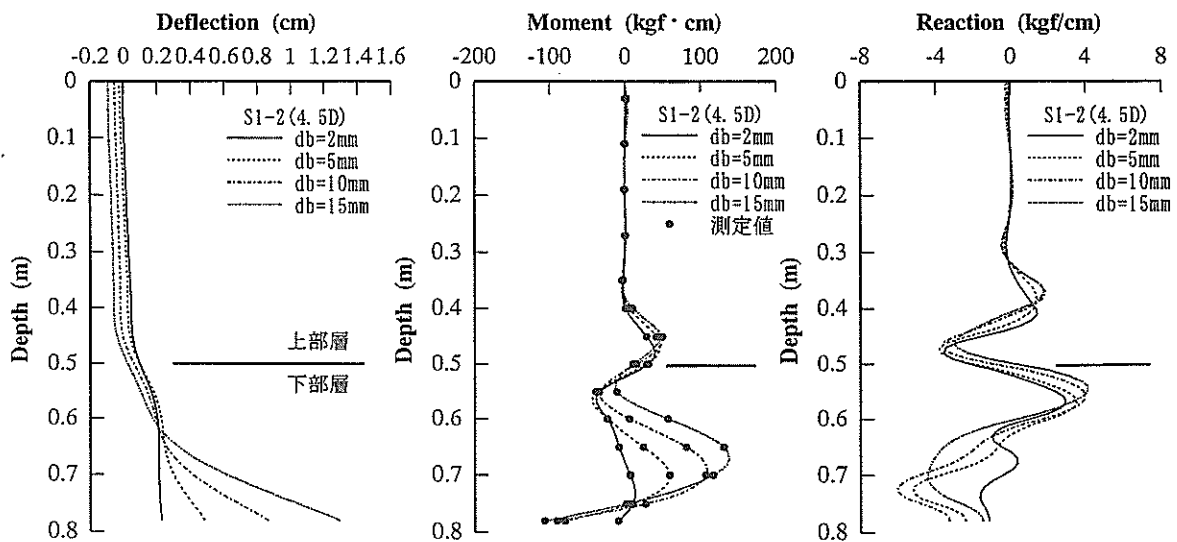


(a) たわみ分布

(b) 曲げモーメント分布

(c) 地盤反力分布

図-12 実験結果(S1-1)



(a) たわみ分布

(b) 曲げモーメント分布

(c) 地盤反力分布

図-13 実験結果(S1-2)

(図-12(a)), 曲げモーメント分布(図-12(b)), 地盤反力分布(図-12(c))を示す。

図-12(b)には、測定した曲げモーメントとスプライン関数で近似した曲げモーメント分布を示す。測定した曲げモーメントから見ると曲げモーメント分布は比較的複雑であるようであるが、スプライン関数で近似した分布形状は概ね曲げモーメント分布の全体的傾向を再現できているものと考えられる。ただし、細部を見ると必ずしも

想定される曲げモーメント分布とはなっていないと考えられるところもあるので、微分、積分したときの値については注意してみる必要がある。

図-12(b)の曲げモーメント分布の全体的傾向と特徴として以下のようなことが挙げられる。杭下端の変位量が小さい範囲では、層境の上下の曲げモーメントがまず大きくなる。しかし、層境の最大曲げモーメントは杭下端の変位量が大きくなってあまり変化しない。特に層境

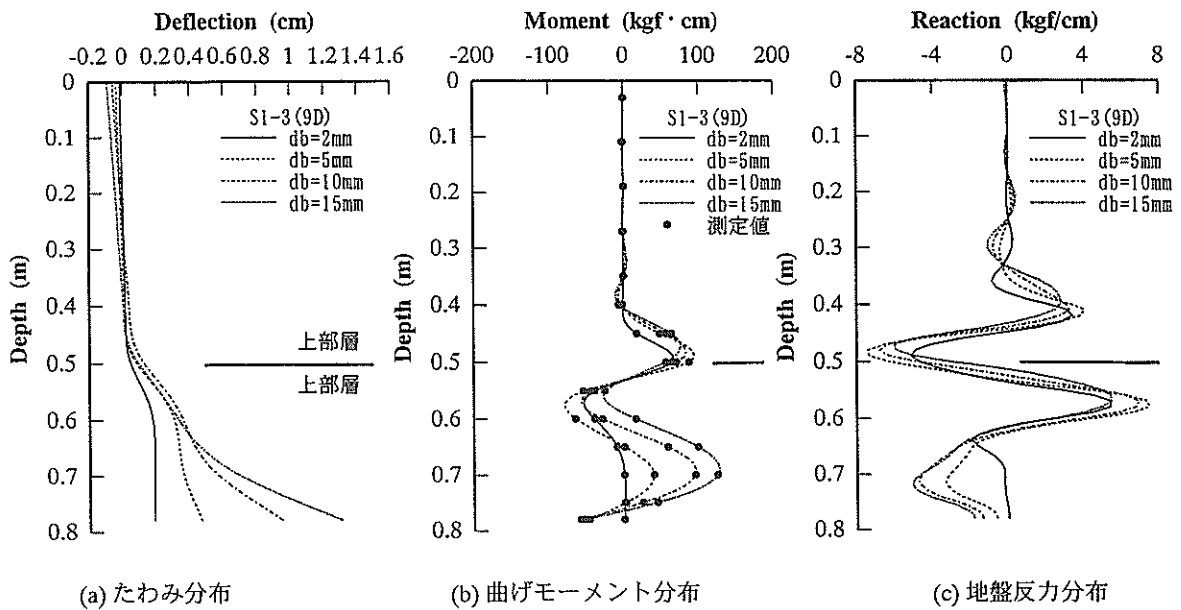


図-14 実験結果 (S1-3)

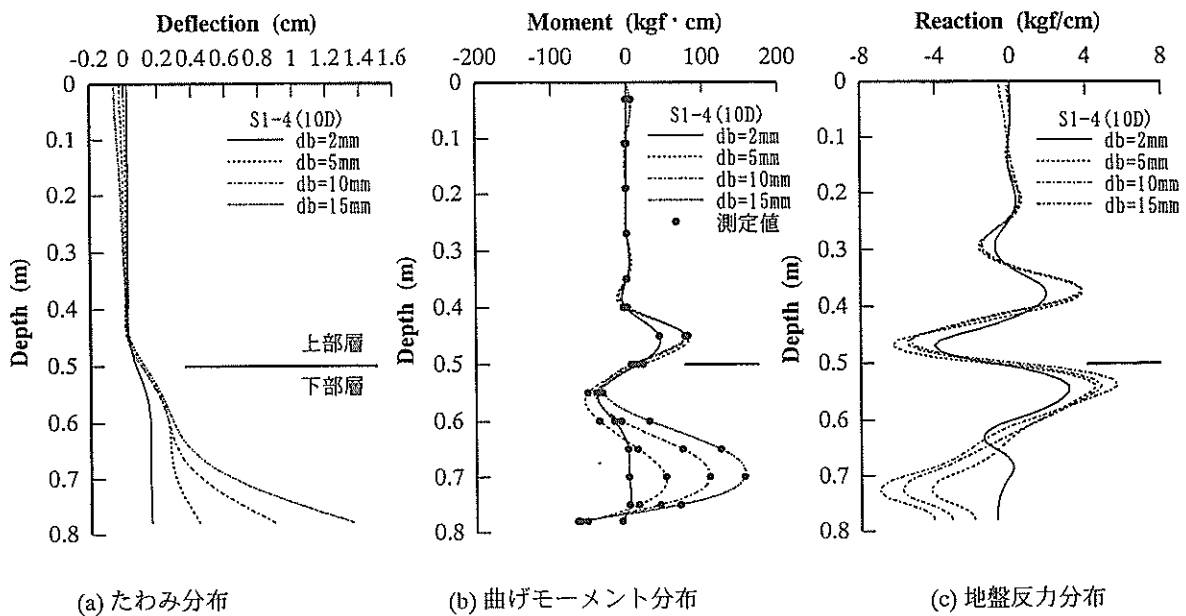


図-15 実験結果 (S1-4)

のすぐ下の最大曲げモーメントは一旦は大きな値を示すが、変位が進むと、変位とともに小さくなる傾向にあるくらいである。層境のすぐ上の最大曲げモーメントはこのケースでは杭下端の変位 $d_b$ が5mm程度以降ではほぼ一定値となってしまうている。一方、下部層の中間付近の曲げモーメントと杭下端付近の曲げモーメントは変位の増大とともに増加する傾向にある。特に、下部層中間部の最大曲げモーメントはその発生位置が上昇しながら、次第に大きくなる。このケースでは、杭下端の変位 $d_b$ が10mmに達したあたりで層境の最大曲げモーメントにほぼ等しくなり、その後は層境の最大曲げモーメントよりも大きくなる傾向にある。杭下端の曲げモーメントの推定は十分な精度では行えないが、このケースでは杭下端が固定条件となっているために、変位とともに大きなモーメントが発生しているものと考えられる。図-12(b)には示していないが、この実験では、下部層内の2箇所最大曲げモーメントを生じるところで、杭の降伏が生じることが観察された。

以上のことは、杭下端の変位が小さい場合には層境の曲げモーメントが杭にとってクリティカルであるが、杭の変位が大きくなってくると下部層の中間部分での曲げモーメントがクリティカルになることを示している。

なお、この実験では、杭下端の変位に伴い剛性の高い上部層内にある部分でもある程度の曲げモーメントが杭に発生していることが観察された。

図-12(a)の変位分布は図-12(b)に示した曲げモーメントの近似曲線を2回積分して求めたものである。積分のための境界条件は杭上端部で与えている。図-12(a)によると、杭下端の変位 $d_b$ が小さいときには、杭は層境の下部分でせん断を受けたような変形を生じるが、変位が大きくなるにつれて、下部層の中間部分でもせん断を受けていることを示すような変形が生じている。また、上部層中にも顕著な折れ曲がり点があることが分かる。

図-12(c)の地盤反力分布は図-12(b)に示した曲げモーメントの近似曲線を2回微分して求めたものである。ここでは図-12(b)の曲線を微分したものをそのまま示しているもので、この曲線は全体的な傾向はそれなりに示しているものと考えられるが、部分的には現象を十分に示していない恐れがあることには注意が必要である。層境では杭下端の変位 $d_b$ が小さいときから大きな地盤反力が生じこの付近に大きなせん断力を生じさせていることが分かる。また、下部層の中間付近では、杭下端変位 $d_b$ が大きくなると地盤反力が生じてくる様子が示されている。

図-12(c)に示した地盤反力分布は、見方を変えると地盤と杭の相対変位を示しているものとも考えられる。図-12(c)では、杭下端の移動方向を正とし、杭に正の方向

に地盤反力が作用している場合を地盤反力の正としている。従って、地盤反力が負であるということは、杭が正の方向に変位しようとしているのを地盤が妨げていることを意味している。このことは杭が地盤に対して相対的に正の向きに変位しているためと考えることができる。また、同様に、正の地盤反力が生じている部分は杭が地盤に対して相対的に負の向きに変位している部分と考えることができる。この試験の境界条件から考えて、杭下端では地盤と杭の動きは一致していると考えてよいものと思われる。そこで、杭と地盤の相対変位について地盤の深い所から見てみることにする。下部層の深い部分では地盤反力が負となっているので、この付近では地盤は杭の変位よりも小さい傾向にあるが、下部層の上部付近、層境の下部では、逆に地盤は杭の変位より大きくなる傾向にある。一方層境の上部では、地盤は杭の変位より小さくなる傾向にある。更に上の方で、地盤は杭の変位より大きくなる傾向を示す部分があるが、層境から離れると杭と地盤はほぼ同じ動きをするようになる。このように、層境の下部では、地盤の変位の方が大きく、層境の上部では地盤の変位の方が小さくなるといった傾向があるようである。

図-13～図-15には、ケースS1-2、S1-3、S1-4で求められた変位分布、曲げモーメント分布、地盤反力分布を示した。各実験ケースの結果は、最大曲げモーメントの生じている位置や大きさなど細かい部分ではS1-1の結果と異なっているが、基本的には同じ傾向を示している。ただ、S1-1では深さ0.4m付近から浅い部分で曲げモーメントが発生していたが他の実験では発生していない。

ケースS1-1の結果について詳細に見たように、シリーズ1の曲げモーメント分布で着目すべき点は、層境の上下、下部層の中間付近及び杭下端付近である。そこで、この部分での最大曲げモーメントの変化の傾向を細かく見るために図-16に杭下端の変位 $d_b$ と各部分での最大曲げモーメントの関係をプロットした。なお、ここで示している曲げモーメントの発生する深さは、杭下端の変位 $d_b$ により多少異なっている。

図-16(a)に、杭下端変位 $d_b$ と層境の上下での最大曲げモーメントの関係を示す。層境の上下での最大曲げモーメントは杭下端の変位 $d_b$ が0.5cm程度まで変位の増大とともに急激に増加しておりこの付近でピークに達する。層境の上と下ではこの付近までそれぞれ符号は逆であるが、最大曲げモーメントの発生についてほぼ同じ傾向を示している。層境のすぐ上での最大曲げモーメントはピークに達した後、杭下端変位 $d_b$ の増大によってわずかに低下する傾向にある。層境のすぐ下での最大曲げモーメントはピークに達した後、杭下端変位 $d_b$ の増大とともに

に減少し、いずれは逆向きモーメントが生じるようになる。

図-16(b)に、杭下端変位 $d_b$ と下部層の中間付近での最大曲げモーメントの関係を示す。下部層の中間付近での最大曲げモーメントは杭下端変位 $d_b$ が0.8cm程度まで各ケースとも同じ傾向を示している。変位 $d_b$ が0.8cmより大きいところでケースS1-1, S1-2は一時的に最大曲げモーメントの増大しなくなり、しばらくして再び増大する傾向を示した。杭間隔が広いケースS1-3, S1-4ではそのような傾向が見られずそのまま増加する傾向を示した。各ケースでいくつか異なるところはあるが、弱層中間部では、杭下端変位 $d_b$ が0.2cm付近から杭下端の変位の増大とともに最大曲げモーメントが増加し、杭下端変位 $d_b$ が2~3cmに達するあたりで杭が降伏する。この杭の降伏モーメントはおおよそ200kgf・cmであり、このシリーズの場合には、杭はこの付近で最初に降伏することが分かる。また、杭間隔が広いほど杭下端変位の小さいところで杭が降伏する傾向にあることも分かる。

図-16(c)に、杭下端変位 $d_b$ と杭下端付近での最大曲げモーメントの関係を示す。杭下端付近での最大曲げモーメントの絶対値は、変位 $d_b$ が0.5cm付近まで急激に増加し、変位 $d_b$ が0.5cm程度より大きくなると、増加する割合が小さくなっていく。杭下端変位 $d_b$ が0.5cm以上と大きく変位してからの最大曲げモーメントに注目すると杭間隔の狭いケースほど大きな曲げひずみが発生する傾向にあることが分かる。

以上のことから、このシリーズでは杭下端の変位が小

さい場合には、層境の曲げモーメントがクリティカルであるが、変位が大きくなると下部層の中間部分での曲げモーメントがクリティカルになり、この付近で最初の降伏がおきることがわかった。

### 3.2 シリーズ2(下部層の強度が比較的小さい場合)

ここでは、地盤の強度低下が大きい場合を想定して実験を行った。この実験でもシリーズ1と同様に下部弱層は、深さ0.5mから0.8mの部分である。

図-17~18には、シリーズ2の各実験で得られた変位分布、曲げモーメント分布、地盤反力分布を示す。各図での深さ0.78mから杭下端まではシリーズ1の結果と同じ理由で示していない。図中の各結果は、杭下端での変位 $d_b$ が2mm~15mmの範囲のいくつかの変位の場合を選んで示している。

図-17には、S2-1で求められた変位分布(図-17(a))、曲げモーメント分布(図-17(b))、地盤反力分布(図-17(c))を示している。曲げモーメント分布には、曲げひずみ測定点での曲げモーメントとスプライン関数で近似した曲げモーメント分布を示している。

図-17(b)を見ると、曲げモーメントの測定値の分布形状は、シリーズ1の場合よりは単純であるが、深さ0.5mのところでも不連続になっている恐れがある。不連続となる部分がある場合には、スプラインによるなめらかな近似が困難となるので、この付近では測定した曲げモーメントとスプライン関数で近似した曲げモーメント分布とで多少ずれが生じている。そのため、特に微分結果を見る

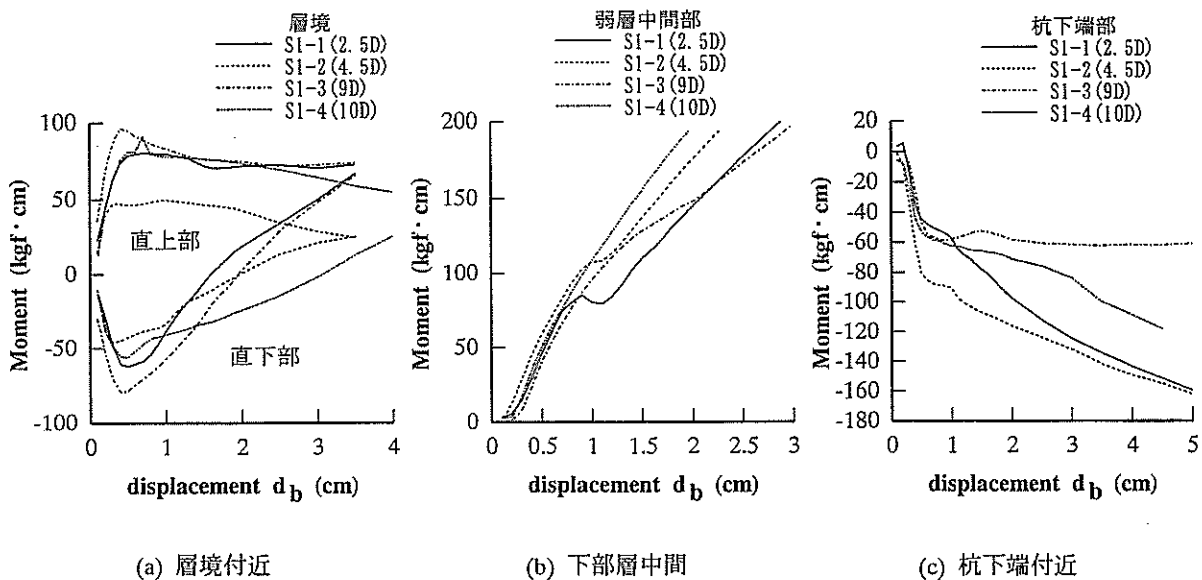


図-16 最大曲げモーメントの変化の状況

ときには注意が必要である。この付近以外については、測定点と曲げモーメント分布近似曲線とは良く対応が取れている。

図-17(b)の曲げモーメント分布をみると、下部の弱層内での曲げモーメント分布はほぼ直線状であり、また、弱層内でモーメントが0となる点はほぼ下部層の中心深さにある。これらのことは、下部層では、杭には地盤反力がほとんど生じていないことと、下端の完全拘束状態と下部

層上面の層境における杭の拘束状態がほぼ同等であったことを意味している。なお、この図には示していないが、杭は最終的には杭下端と層境の二ヶ所で降伏を生じることを観察した。以上のことは、下部層の強度が極めて低いときには、下部層全体がせん断層となっていることを示している。

図-17(a)に示す杭の変位分布をみる。杭下端の変位 $d_s$ が大きくなるにしたがって変位の第一ゼロ点は、徐々に

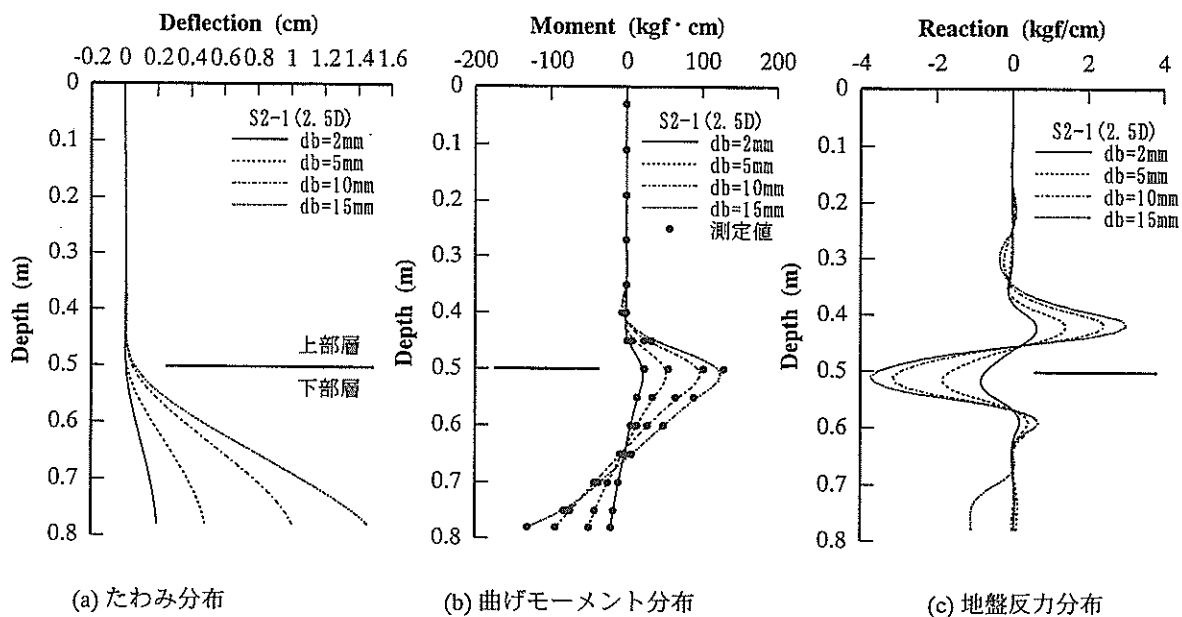


図-17 実験結果 (S2-1)

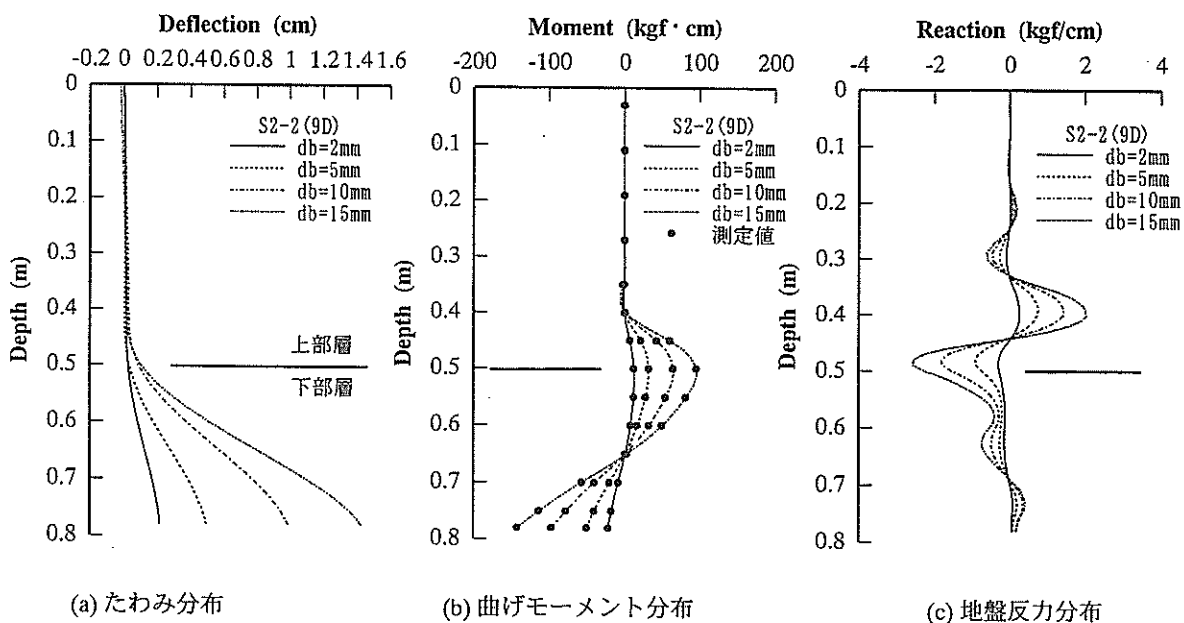


図-18 実験結果 (S2-2)

層境より上になってくる。また、下部層内では、杭はS字型の変形をしていることが分かる。このような変形の傾向はシリーズ1の場合とは全く異なっている。また、図-17(b)からも推察されるように、図-17(a)のような変位分布は、一般的な横荷重を受ける杭頭回転拘束の杭の変位と同じ傾向となっている。

図-17(c)に地盤反力分布を示す。下部の弱層内ではほとんど地盤反力を生じず、上部層内ではC型地盤で水平載荷をしたときの地盤反力分布をさかさまにしたような地盤反力を示していることが分かる。なお、詳細を見ると杭下端の変位 $d_b$ が大きくなると弱層内にも地盤反力が生じているように見られるが、これはスプラインで近似した曲線をそのまま微分したために生じたものであって、実際には、弱層内ではほとんど地盤反力が生じていないと考えて良いと思われる。また、杭下端変位 $d_b$ が10mmから15mmになる間に杭下端での地盤反力が急激に増加しているところがあるが、これについては原因はよく分からない。

なお、このケースでは下部層の地盤反力係数 $k_c$ が小さかったと考えられるので、図-17(c)から杭と地盤の相対変位についての議論をすることは困難であると考えられる。

図-18には、S2-2で求められた変位分布、曲げモーメント分布、地盤反力分布を示す。図-18(b)の曲げモーメント分布は、全体的にはS2-1と同じ傾向を示している。ただし、このケースの場合には、弱層内の曲げモーメント分布がほぼ直線状であるとは言い難く、層境での曲げモーメントは、S2-1と比較して小さい値を示している。図-18(c)を見ると下部層内で多少の地盤反力が生じているが、図-18(b)からも推察されるように多少の地盤反力は生じていたものと考えられる。S2-1とS2-2とで条件が異なるのは杭間隔であり、軟らかい層の強度にはそれほど大きな差がない。したがって、ここで見られるような地盤反力分布の違いは杭間隔の影響による可能性がある。

#### 4. 考察

既に述べたようにこの実験で考えている杭の挙動に対するファクターは杭間隔と下部層の強度の2項目である。ここではこれらのファクターの影響について考察を行う。

3. に示したシリーズ1, 2の実験結果を比較すると曲げモーメント分布及び地盤反力分布は、下部層の地盤強度により大きな影響を受けていることがわかる。ここでは、変位分布の傾向の違いを見ることを目的として図-19と図-20にシリーズ1及び2の各実験での杭下端変位 $d_b$ に

対して深さが70cm, 60cm, 50cmにおける杭の変位をプロットしたものを示す。

図-19はシリーズ1の結果である。図-19(a)~(c)を見ると、S1-2のケースのみ他の場合と傾向が異なっているようであるので、このケース以外の結果を中心に見ていくことにする。図-19(a)に70cmの深さのところの杭の変位の様子を示す。実験データには多少のばらつきがあるようであるが、杭下端変位の増大に比例する形でこの地点の杭の変位が増えていることがわかる。図-19(b)は60cmの深さのところの杭の変位の様子を示したものである。この付近では $d_b$ が小さい範囲では杭が下端と同じ向きに変位するが、その後 $d_b=3$ cmくらいまでは杭の変位がとまり、 $d_b$ が3cmを超えると再び変位するような挙動が現れている。図-19(c)は50cmの深さのところの杭の変位の様子を示したものである。ここでは杭はほとんど変位していないことがわかる。

図-20はシリーズ2の場合について図-19に示したものと同一深度の杭の変位を示したものである。この結果を見るといずれの深度でも $d_b$ の増加にしたがって杭の変位が増加する傾向にあることが分かる。また、 $d_b$ のどのレベルにおいても弱層内の杭のたわみ角が深度方向に変化していないことが伺える。

以上のように、シリーズ1, 2とも深さが70cmの場合には、同様に変位が伸びていく傾向を示しているものの深さが浅くなるにしたがって傾向が異なってくることがわかる。このような結果になった理由は、図-12~図-15、図-17、図-18に示した杭の変形図からも分かるように、下部層の強度が比較的大きい場合には下部層でのせん断挙動が複雑であるのに対して、下部層の強度が小さい場合には下部層でのせん断挙動が比較的単純であることによるものである。

弱層の強度と杭の変形の関係は、弱層の強度低下が小さい場合には弱層の抵抗力によって弱層内で複雑に杭が変形する上、杭の変形が上部まで及ぶのに対し、弱層の強度低下が大きいときには弱層は水や空気のように杭に対する抵抗をほとんど生じず、上部層の硬いところにだけ地盤が存在するような挙動をすると考えられる。

以上のように上部層と弱層の地盤強度差が異なることにより曲げモーメント分布、地盤反力分布、変位分布の各結果について大きな影響があることがわかった。

弱層の強度低下が大きい場合の挙動は、横荷重を受ける杭頭回転拘束の杭の挙動に近い。そこで下部層の強度が小さい場合について、港研方式の杭の横抵抗推定法と実験結果との比較を行った。港研方式の杭の計算には基礎工研究室で開発した非線形ばねと杭の曲げ理論による

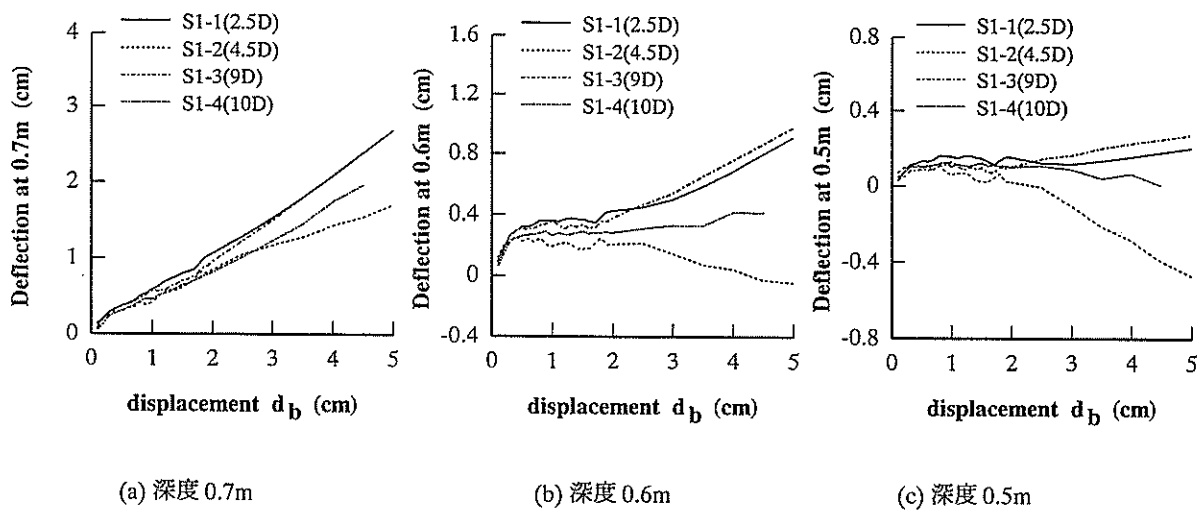


図-19 各深さでの杭のたわみの変化(シリーズ1)

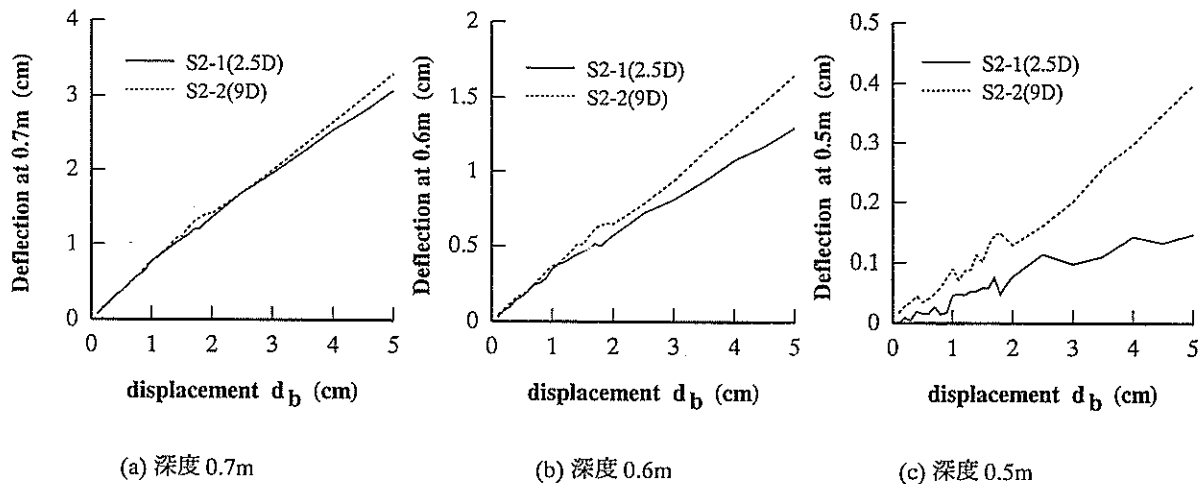


図-20 各深さでの杭のたわみの変化(シリーズ2)

FEMプログラム<sup>3)</sup>を用いた。表-4に計算に用いた杭の $EI$ と地盤反力定数を示す。計算での地盤の層厚は、実験での層厚と同じとして上部層で層厚0.5m、下部層で0.3mとしている。

図-21と図-22に実験結果と計算結果の例を示す。たわみ分布についてはよく一致した結果となっている。曲げモーメント分布についても、層境における分布が若干異なるものの弱層内及び杭下端についてよく一致している。また、地盤反力分布については、層境界の上部及び弱層内の地盤反力分布の傾向が再現できている。

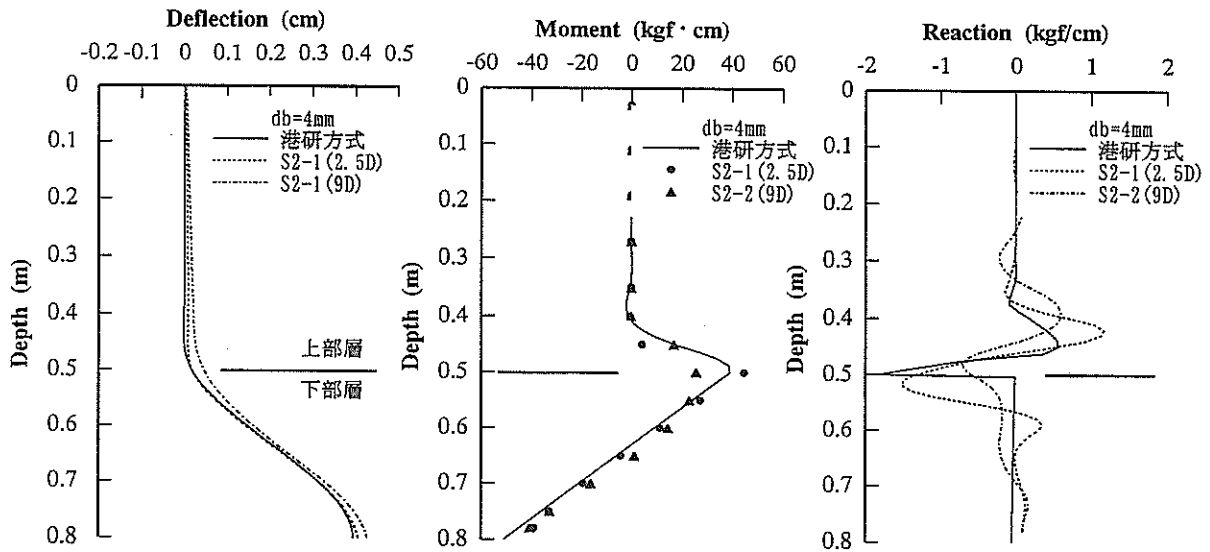
シリーズ1のように弱層の強度低下が小さい場合は頭部固定条件で杭を水平に強制変位させる計算を実施しても、計算結果と実験結果は一致しない。これは、杭の水平変位挙動が単に杭を水平変位させればよいといったような単純なメカニズムにはなっていないためであり、弱層の強度低

下が大きいたときにはその地盤の杭に対する抵抗を無視できるため、上記のような単純な考え方で、側方流動地盤中の杭の挙動としてシミュレーションできたものと思われる。

次に、杭の間隔が地盤の側方流動力をどの程度押さえているかについて検討する。一般的に考えて、流動する縦断面中に杭の占める割合が多くなれば、その分だけ杭が側方流動力に抵抗すると考えられるが、杭間隔の違いによるすり抜けの効果、地盤強度の影響などを含めて検討することにする。

実験の結果を見ると、下部層の強度が比較的小さい場合には下部層全体がせん断帯となっている様子が見られた。また、下部層の強度が比較的大きい場合には、はじめは、下部層の上部にせん断帯が発生し、その後二つ目のせん断帯が下部層の中間部にも生じるといった挙動を示した。



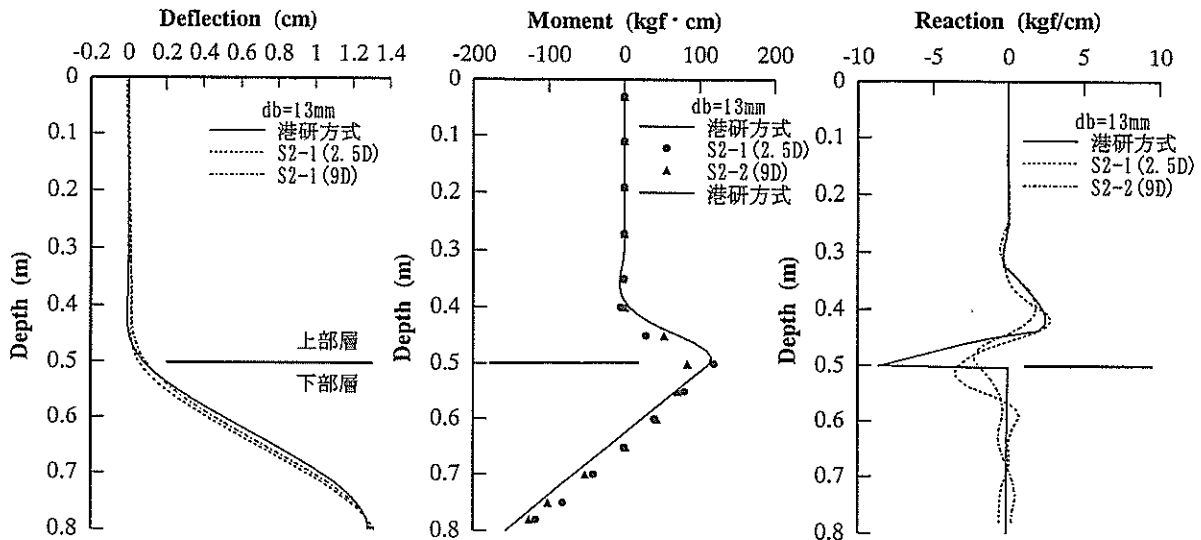


(a) たわみ分布

(b) 曲げモーメント分布

(c) 地盤反力分布

図-21 計算結果と実験結果の比較 (杭下端変位4mm のとき)



(a) たわみ分布

(b) 曲げモーメント分布

(c) 地盤反力分布

図-22 計算結果と実験結果の比較 (杭下端変位13mm のとき)

表-4 計算に用いた入力値

$EI$ (kgfcm <sup>2</sup> )	地盤反力定数 $k_s$ (kgf/cm <sup>2.5</sup> )	
	上部層	下部層
$2.5 \times 10^4$	10.0	0.04

このようなことから、いずれにしてもせん断帯は下部の軟らかい層内に発生すると考えて良いので、ここでは実験結果を正規化するため、以下のようなパラメータを用いて実験結果を比較することにした。

$$S_c = \frac{s \cdot D}{\tau \cdot A_s}$$

ここに、

$S_e$ : 杭による水平抵抗分担率  
 $s$ : 曲げモーメントを微分して求められた杭下端部(深さ0.78m)でのせん断応力(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $D$ : 杭幅(cm)  
 $\tau$ : 下部層のせん断強度  
 $A_c$ : 各杭の分担する地盤幅  
 $A_c = nD$   
 $n$ : 杭中心間隔比

である。

図-23(a)にシリーズ1の結果を示す。どのケースについても、杭下端の変位 $d_b$ が0.2cmに達するまではほとんど杭に抵抗力が生じず、その後急速に抵抗力が生じるようになり、杭下端変位 $d_b$ が1cm程度になると抵抗力の増加割合が低下したり、一度減少したりする傾向にあることが分かる。特に、杭間隔の狭いS1-1とS1-2については杭下端変位 $d_b$ が1cm付近で抵抗力がピークに達し、その後一度抵抗力が減少するが、杭間隔が広い場合にはそのような現象はおきない。また、ピークに達する前の抵抗率を見ると杭間隔の違いにより、抵抗力の分担率が異なっていることが分かる。その傾向は、杭間隔が狭いほど杭の持つ抵抗力分担率が大きくなるという傾向である。

杭下端の変位が小さいときに抵抗力が生じなかったり、杭中心間隔が小さい場合に水平抵抗分担率に明確な極大値が現れたりしていることは杭間粘土のすり抜けと関係があるものと思われるが、この点には今後詳細な検討を必要としている。

図-23(b)にシリーズ2の結果を示す。これを見ると、杭中心間隔が2.5Dの場合には、杭下端変位 $d_b$ が1cm付近ま

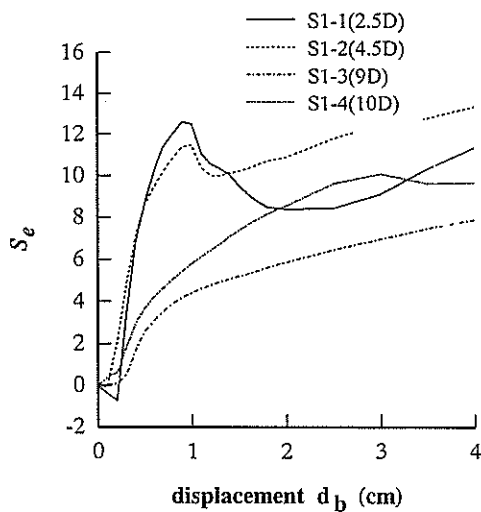
で抵抗力の増加が小さく、変位が1cmを超えたあたりから抵抗力が増加してくる。9Dの場合には、変位が1cm程度までは、2.5Dと抵抗力にあまり差が見られないが変位が大きくなって抵抗力の増加が小さい。いずれにせよ、シリーズ2の結果では、シリーズ1に比べ $S_e$ が非常に大きく、地盤中に杭が存在することによる抵抗力の増加は非常に大きいことを示している。

図-23からシリーズ1, 2どちらにおいても杭中心間隔が小さいほど側方流動に対して大きい抵抗力を示しており優位であることがわかる。

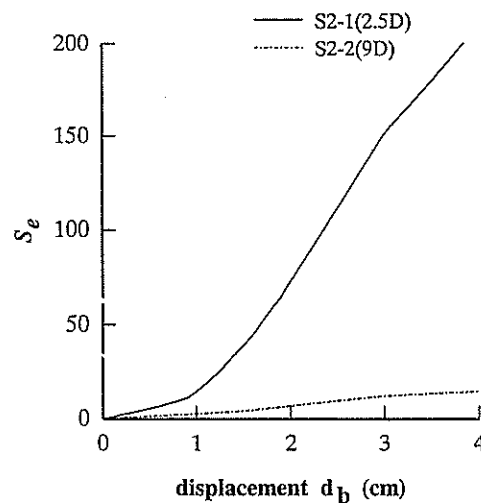
### 5. 結論

側方流動をおこす地盤中にある構造物の被害事例は多く、さまざまな研究が行われてきている。本研究では、特に上下の比較的しっかりした地盤の中間に弱層が存在し、その影響で、上下の層が相対的に側方に移動するような条件のもとで、そのような地盤中にある杭の挙動について実験的に検討したものである。実験では、層厚80cmの模型地盤(上部50cmを硬層、下部30cmを弱層とした)を作成し、土槽底板を静的に引抜くことにより側方流動を模擬した。このとき、地盤強度比と杭間隔をいくつか選び、それらの影響を調べた。その結果、以下のような結論を得た。

- 1) 中間弱層の強度低下の程度の違いは、杭の挙動に大きな影響を与える。
- 2) 中間弱層の強度低下が大きい場合の杭の挙動は、一方の弱層端で回転固定として水平に強制変位させるようなモデルで現象を再現することができ、港研方式を適



(a) シリーズ1



(b) シリーズ2

図-23 杭による水平抵抗分担率

用して計算できる。

- 3) 杭中心間隔が小さいと側方流動を起こす地盤に対して大きい抵抗を示す。

## 6. あとがき

本研究では、中間弱層の存在による側方流動地盤中の杭の挙動に与える地盤強度比と杭間隔の影響について検討するために模型実験を実施した。この結果から、杭に与える地盤強度比及び杭間隔の影響について確認することができたと考えている。側方流動と杭を考えた場合すり抜けは、非常に重要な問題であると考えられ、側方流動を起こしている地盤で杭間の土は、杭間をすり抜けており杭間隔の違いによりすり抜けする量も異なると考えられる。本報告では、杭間の土のすり抜けについて明確な結果が提示することができておらず、これについての検討も必要であると考えられる。

なお、本研究を進めるにあたり、実験計画の段階で第一港湾建設局新潟調査設計事務所高橋邦夫所長(当時土質部動土質研究室長)に、実験計画および実験手法の検討については土質部渡部要一主任研究官に貴重なご助言、ご協力を頂いた。また、論文をまとめるにあたり土質部善功企部長に適切なるご助言をいただいた。ここに、記して謝意を表します。

(1998年6月30日受付)

## 参考文献

- 1) 稲富隆昌他 24 名：1995 年兵庫県南部地震による港湾施設等構造物被害考察，港湾技研資料 No.857，1997.
- 2) 菊池喜昭・高橋邦夫・鈴木操：繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動，港研報告第31巻第4号，pp. 41-43，1992.
- 3) 荘司喜博：砂地盤における地中杭の横抵抗に関する実験的研究，港研報告第23巻第2号，pp. 75-179，1984.

港湾技研資料 No. 917

1998・9

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 (有)つばさ印刷技研

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

Copyright © (1998) 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。