

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¹・廣瀬 栄樹²

¹ 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 土質部基礎工研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

² 正会員 大成基礎設計株式会社 技術本部地盤解析室 (〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-5-6)

The responses of piles installed in the ground where an upper layer laterally flows relatively to a lower layer are examined by experimental study. In the experiment, the lateral flow of the upper to the lower layer is simulated by pulling out the base of the sand box statically. The model ground is consisted of the healthy upper layer of 50cm thick and the weak lower layer of 30cm thick. Discussion as to the effect of the strength ratio of the upper and lower layers and the interval of piles to the responses of piles is made.

Key Words : pile, lateral flow, lateral resistance, model test

1. はじめに

水平荷重に対する杭の抵抗に着目した場合、地盤は杭を支える形で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。そのためには、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

実験は、図-2に示すような実験土槽(内寸法、縦1600mm、横600mm、深さ800mm)を用いて行った。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。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。

模型杭には、図-3に示すようなアルミニウム製の板杭を用いた。模型杭の寸法は、長さL1000mm、幅D30mm、厚さt5mmである。この模型杭は底板に固定するためのベースを有しており、実験では、ベースの4ヶ所で土槽底板に固定した。実験では、土槽幅の中央部分に設置する模型杭にひずみゲージを貼付し、曲げひずみを測定することにより変形挙動を推定した。底板引き抜き実験に先立ち、模型杭のキャリブレーションを行ったところ、杭全体の曲げ剛性EIは概ね22.8～24.0 kNm²の範囲であった。

模型地盤は上部層(硬層、層厚50cm)と下部層(軟層、層厚30cm)の2層とし、強度の管理が簡便となるように、粉末カオリン粘土($\rho_s=2.730 \text{ g/cm}^3$, $w_L=55\%$)に普通ポルトランドセメントを添加したものをを用いて実験を行った。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を設定した。硬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 相当で600kN/m²程度とした。また、軟層の強度は、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種類の強度を設定した。強度低下が小さい場合としては、硬層の十分の一程度の強度とし、強度低

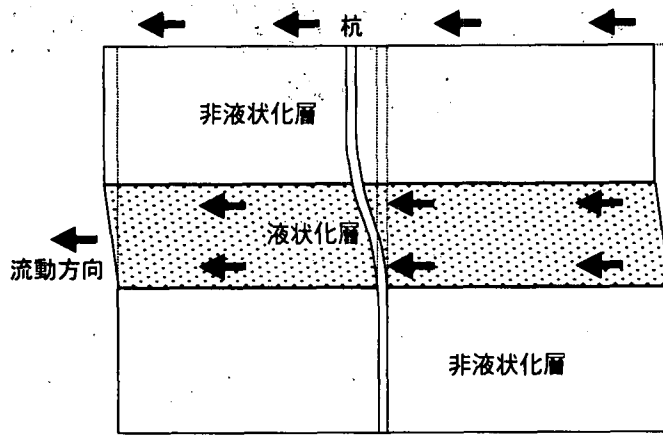


図-1 弱層の存在による地盤の相対移動

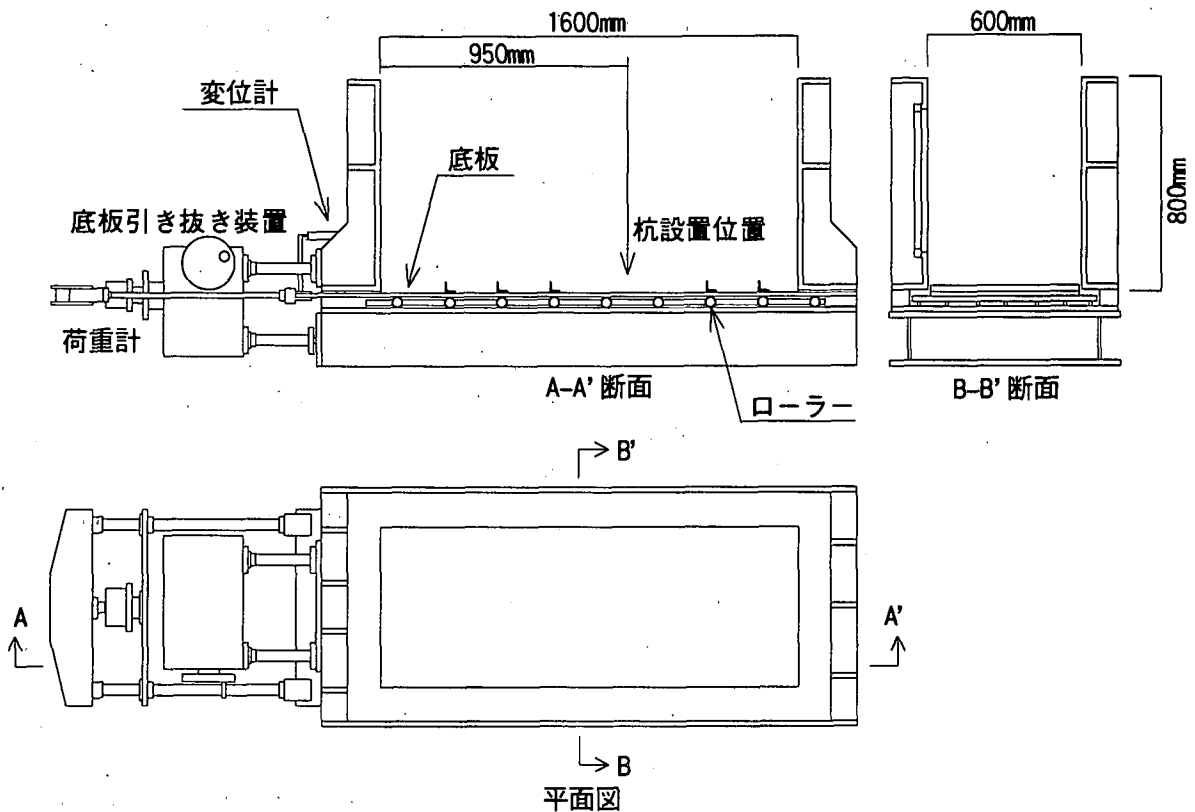


図-2 実験に用いた土槽

下が大きい場合としては硬層の50分の一程度の強度とした。硬層の場合のセメント添加率は25%、軟層の強度低下が小さい場合のセメント添加率は3%とした。軟層の強度低下が大きい場合についてはセメントを添加していない。

まず、土槽の側面の摩擦逓減処理をし、模型杭を土槽の所定の位置に設置した。この際、杭は底板の引き抜き方向から見て横一列に配置した。杭の本数は、実験ケースにより1本～7本と変化させている(図-4参照)。ついで、模型地盤を作成した。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

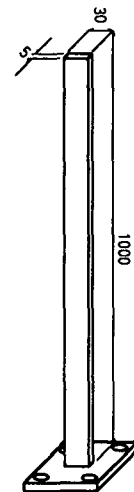


図-3 実験に用いた杭

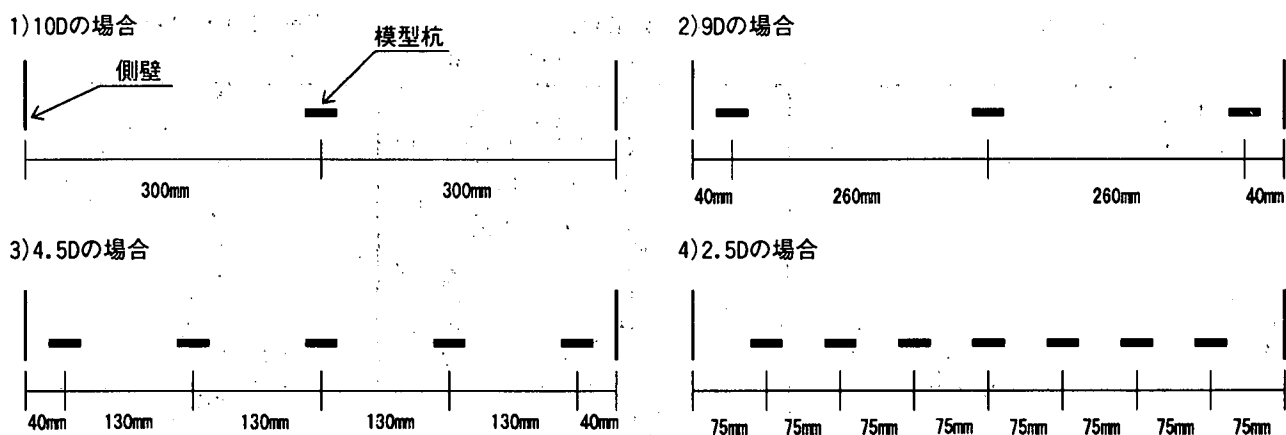


図-4 模型杭の配置 (平面図)

表-1 実験条件一覧

実験シリーズ	実験 No.	杭中心 間隔 B	上部層強度 q_u (kN/m ²)	地盤強度比 下部層:上部層
S1	1	2.5D	680	1:6.9
	2	4.5D	580	1:6.5
	3	9D	530	1:7.9
	4	10D	700	1:6.7
S2	1	2.5D	690	1:53
	2	9D	590	1:40

端及び下部層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。底板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、杭に関する測定は列杭の中央の杭について行った。杭上端部ではたわみ角と杭頭変位を測定するために、地盤より上の部分の2点において杭の変位を測定した。

3. 実験結果及び考察

今回の実験では、杭中心間隔(2.5D~10D;Dは杭幅)と上部層と下部層の地盤強度比(下部層:上部層=約1:7と約1:50)をパラメータとして選んだ。表-1に実験ケースの一覧を示す。実験の各シリーズの違いは、下部層の強度の違いによるものであり、S1シリーズは下部の軟層の強度が比較的強いシリーズであり、S2シリーズは下部層が弱いケースとなっている。図-4には実験に用いたそれぞれの杭中心間隔における杭の配置を示した。

実験中に杭に発生する各測点の曲げひずみから曲げモーメントを求め、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

た。ここでは、曲線の近似が比較的適切にできるスプライン関数²⁾を用いて曲げモーメント分布の近似を行い、曲げモーメント分布の微分及び積分をした。また、積分にあたっては、杭上部での杭のたわみ角と変位を境界条件とした。

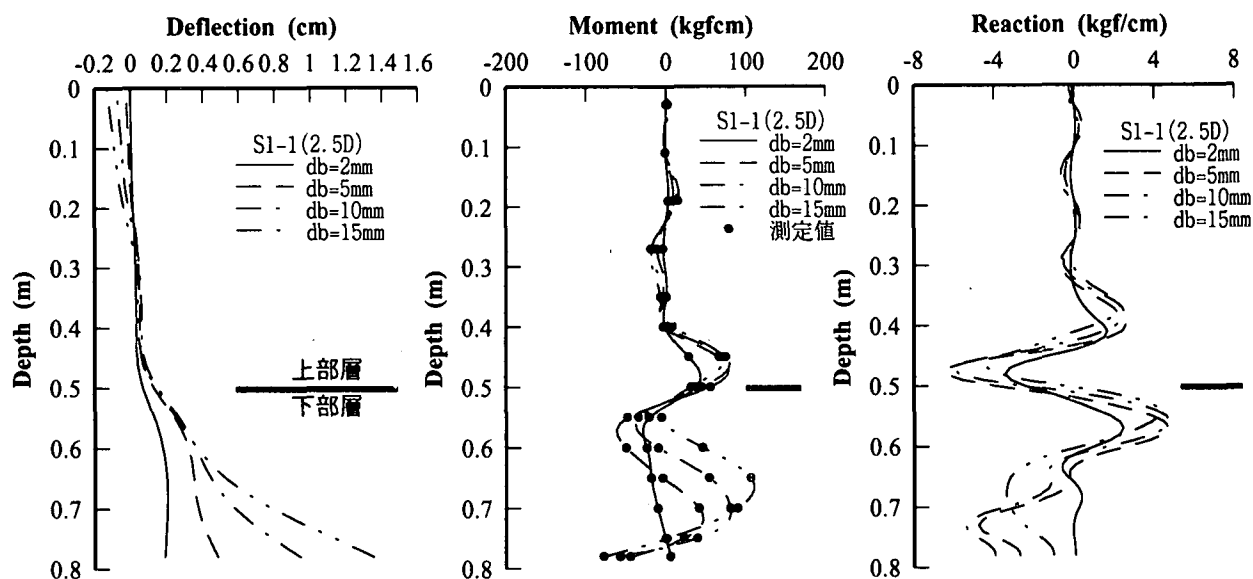
(1) 地盤強度比の違い

図-5に下部層の強度が比較的大きい場合の実験結果の一例(S1-1, 杭中心間隔2.5D, 地盤強度比1:7)を示す。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。下部軟層は、深さ0.5mから0.8mの部分である。

図-5(b)の曲げモーメント分布の全体的な傾向と特徴は以下のようなものである。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もあまり変化しない。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。なお、この実験では、下部層内の2箇所の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。

図-5(a)には杭の変位分布を示す。図によると、杭下端の変位 d_b が小さいときには、杭は層境の下の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-5(c)の地盤反力分布を示す。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

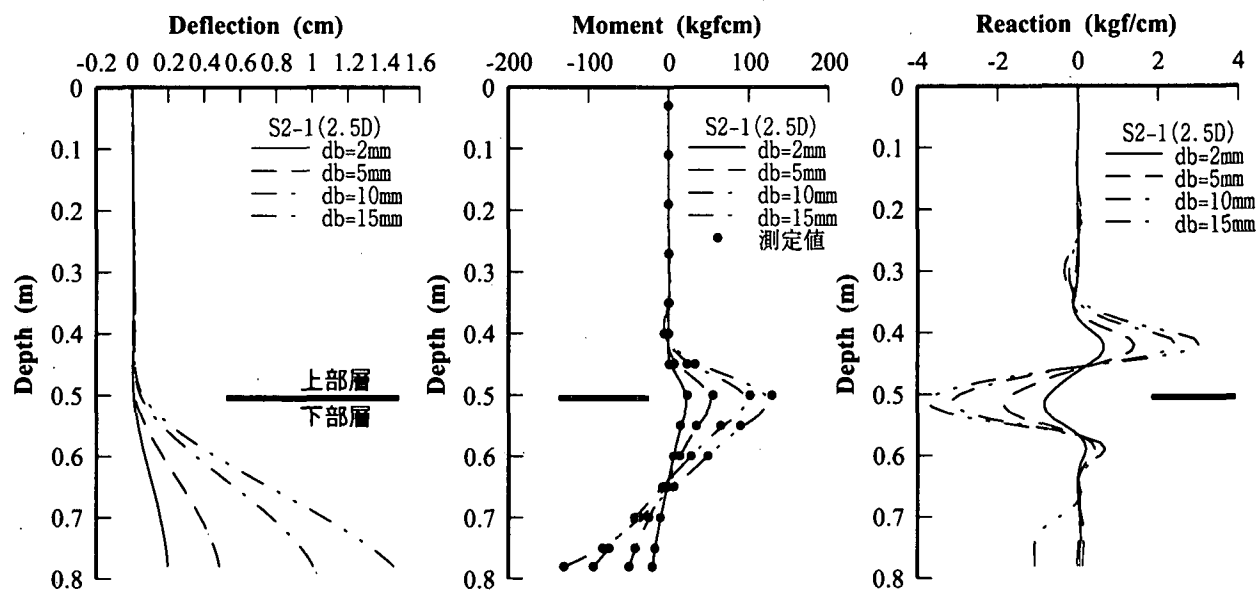


(a) たわみ分布

(b) 曲げモーメント分布

(c) 地盤反力分布

図-5 実験結果 (S1-1, 杭中心間隔 2.5D, 地盤強度比 1:7)



(a) たわみ分布

(b) 曲げモーメント分布

(c) 地盤反力分布

図-6 実験結果 (S2-1, 杭中心間隔 2.5D, 地盤強度比 1:53)

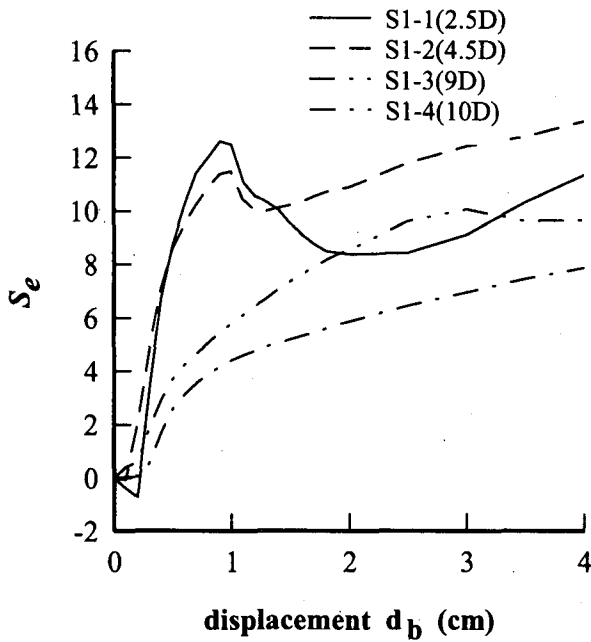
いる。

以上のことから、下部層の強度が比較的大きい場合に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。

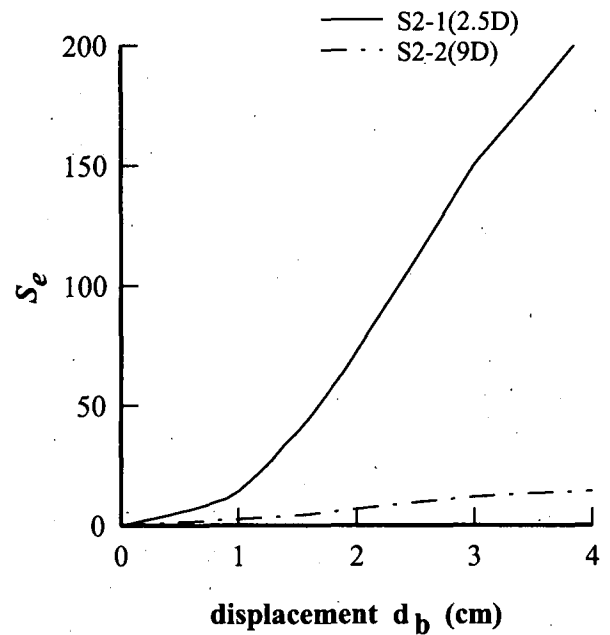
図-6に下部層の強度がかなり小さい場合の実験結果の一例 (S2-1, 杭中心間隔 2.5D, 地盤強度比 1:53) を示す。図-6(b)の曲げモーメント分布をみると、下部の弱層内での曲げモーメント分布はほぼ直線状であり、また、弱層内でモーメントが0となる点はほぼ下部層

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ところ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-6(a)に杭の変位分布を示す。杭下端の変位 d_b が大きくなるにしたがって変位の第一ゼロ点は、徐々に層境より上になってくる。また、下部層内では、杭



(a) 地盤強度比約 1:7



(b) 地盤強度比約 1:50

図-7 杭による水平抵抗分担率

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S1シリーズの場合とは全く異なっている。また、図-6(b)からも推察されるように、図-6(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-6(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、上部層内では港研方式の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、詳細に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、これは解析上の誤差によるものであり、実際には、軟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。

以上のように、軟層の強度と杭の変形の関係は、軟層の強度低下が小さい場合には軟層の抵抗力によって軟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、軟層の強度低下が大きいときには軟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に地盤が存在するような挙動をした。このように上部層と軟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。

(2) 杭間隔の違いによる抵抗性の違い

次に、杭の間隔を変えることにより地盤の側方流動をどの程度押さえているかについて検討する。

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う挙動を示した。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と判断し、各杭の受け持つ地盤幅における地盤のせん断強度に対する杭下端で生じているせん断力の比を調べることにし、実験結果を比較することにした。ここに定義する杭による水平抵抗分担率は次式のようなものである。

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

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

D : 杭幅

τ : 下部層のせん断強度

A_s : 各杭の分担する地盤幅、ただし、 $A_s = nD$ (n : 杭中心間隔比)

である。

図-7(a)に下部層の強度が比較的大きい場合の結果を示す。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、杭中心間隔の狭い 2.5D と 4.5D の結果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起きない。また、ピークに達する前の S_b を見ると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がある。

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-7(b)に下部層の強度がかなり小さい場合の結果を示す。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も抵抗力の増加が小さい。いずれにせよ、下部層の強度がかなり小さい場合には、下部層の強度が大きい場合に比べ S_b 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が非常に大きいことを示している。

4. 結論

本研究では、比較的しっかりした地盤の中間に弱層を境に、上下の層が相対的に水平方向に移動するような条件のもとでの杭の挙動について実験的に検討した。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) 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。

参考文献

- 1) 菊池喜昭, 廣瀬栄樹: 中間弱層の存在により側方移動する地盤中の杭の挙動, 港湾技研資料, No. 917, 19 p., 1998.
- 2) 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. 41-43, 1992.