

側方流動と基礎杭の水平挙動

Horizontal Behavior of Pile Foundations by Lateral Flow

木村 誠一* 森 康夫** 逢坂 秀俊***

軟弱地盤で側方流動を受ける基礎杭に関して、現場および室内試験を行い、杭背面に作用する水平荷重、いわゆる流動圧や前面に発生する地盤反力などについて検討を加えた。この結果、側方流動地盤中の基礎杭の水平挙動は、地盤の水平変位を勘案した流動圧を軟弱層の杭背面から作用させ、弾性床上のはりとして考えることにより説明しうることが明らかとなった。

《軟弱地盤；杭基礎；側方流動》

1. ま え が き

軟弱地盤上における橋台、擁壁などの基礎杭は「側方流動」と呼ばれる現象により、しばしば過大な変位を生ずることがある。しかし、この側方流動の影響を適切に評価することはむずかしく、特に杭背面に作用する水平荷重（以下流動圧）、前面に発生する地盤反力については測定結果も少なく未解明な部分も多い。このため、現場において軟弱地盤に単杭を打設し、杭背面地盤に偏載荷重を作用させ、流動圧、地盤反力とともに地盤や杭の挙動を測定した。また、室内においてこの現場試験結果の再現性を確認し、あわせて境界条件が比較的単純な単杭と組杭の挙動推定法について検討する目的で模型実験を実施した。

本文では、これら現場および室内の試験結果について述べ、側方流動の影響を受ける単杭と組杭の挙動推定法について検討を加えた。

2. 現 場 試 験

(1) 試 験 概 要

試験実施箇所は、美咲市大曲、石狩川河川敷にあり、土層構成は図-1に示すように、地表面より約4.8 mまでは泥炭および泥炭混じりシルトの軟弱層で、4.8 m以深については、砂質シルトおよびシルト層となっている。軟弱層についての土質試験結果を表-1に示す。

試験は図-2に示すように、H形鋼杭 300×300×10/15を試験杭として打設し、杭背面地盤上に高さ約4 mの盛

土を偏載荷重として作用させて行った。

盛土は1 mごとの段階施工とし、図-3に示すように杭に取付けた各種計器により、側方流動時の杭の変位、曲げ応力および杭に作用する流動圧、地盤反力の測定を各盛高ごとに行った。また、地盤の変位は変位杭および変位測定用ガイドパイプにより、盛土の沈下については盛土中に設置した沈下板によりそれぞれ測定を行った。

(2) K_h 値の検討

側方流動の検討にあたり、地盤の横方向地盤反力係数 K_h 値を把握する必要がある。このため、試験杭の水平載荷試験を行った。図-4は各荷重段階ごとの杭の水平

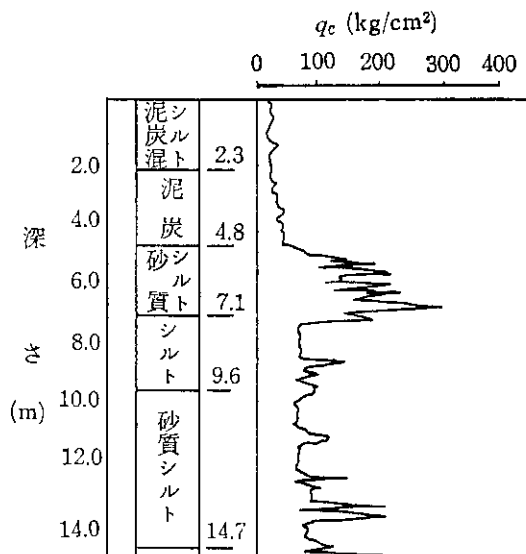
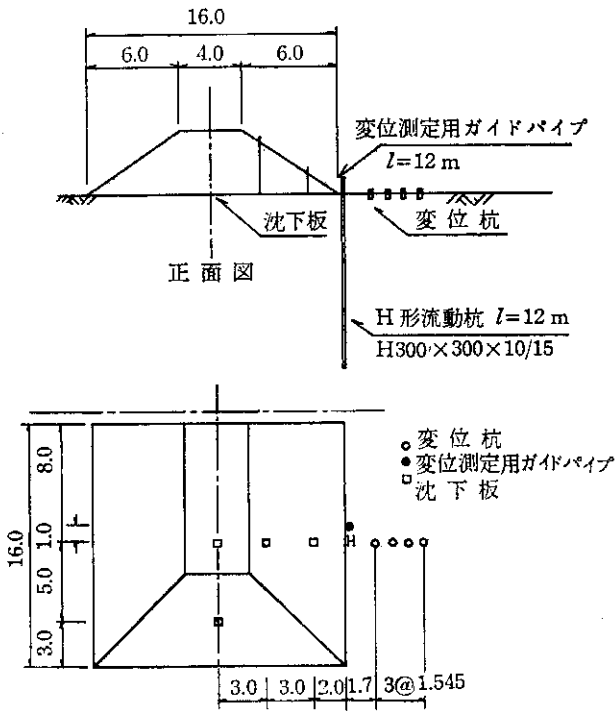


図-1 試験地盤

*基礎工研究室員 **同室長 ***同室主任研究員

表—1 地盤特性

	單位	記号	泥炭混 シルト	泥炭
含水比	%	w_n	140~145	335~340
比重		G_s	2.425	1.916
液性限界	%	w_L	142.0	—
塑性限界	%	w_P	42.0	—
塑性指数		IP	100.0	—
單位体積重量	g/cm^3	γ_t	1.295	1.061
一軸圧縮強度	g/cm^2	q_u	0.31	0.37

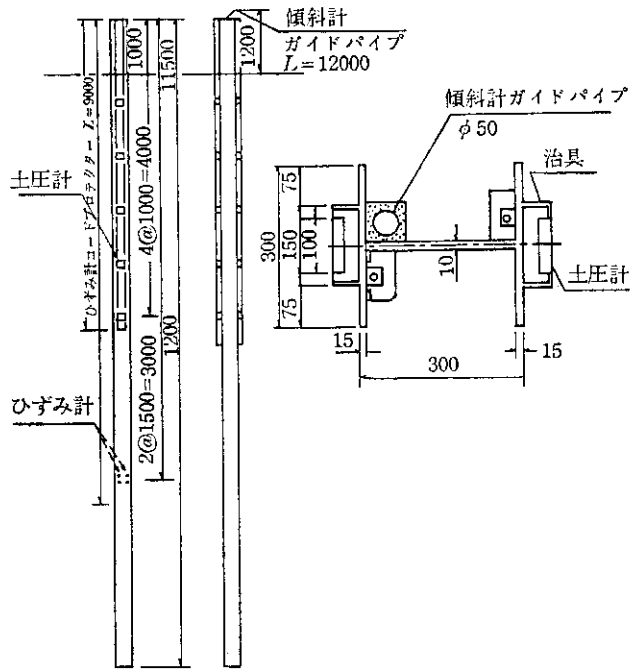


図一2 現場試験配置図

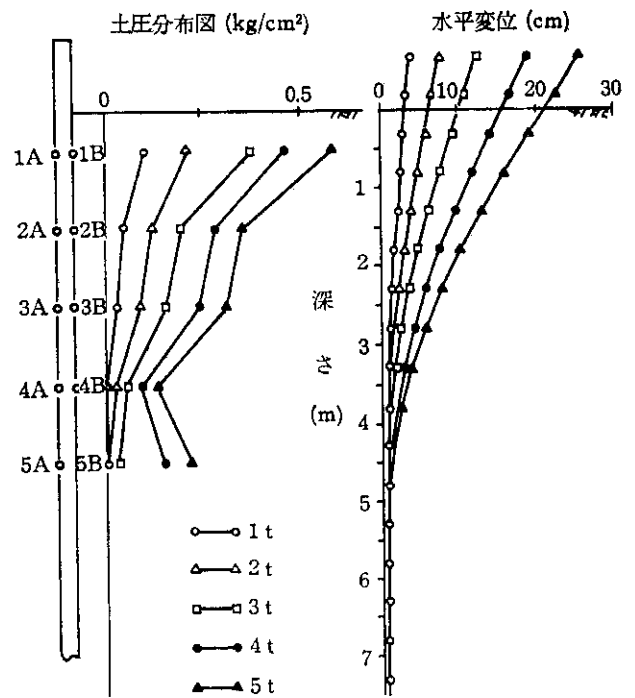
変位 (y) と杭前面の地盤反力 (p) の実測値を示したものの
だが、地盤反力は水平変位に比例して増加している。

これらの実測値から、 K_h 値を $K_h = p/y$ として求め、土圧計の取付け深さごとに、変位との関係で示すと図-5のようになる。図によると、 K_h 値は深さ方向に多少のバラツキがあり、変位が大きくなると若干小さくなる傾向はあるが、 $0.3 \sim 0.45 \text{ kg/cm}^3$ 程度のほぼ一定値をとる。

この結果に基づき、土層構成も勘案して深さ 5 m までの K_h 値を 0.4 kg/cm^3 、それ以深の K_h 値を 10.0 kg/cm^3 とする二層系地盤とし、杭を弾性床上のはりとして杭の



圖一-3 試驗杭計器配置圖



图一4 土压·变位分布图

変位、曲げモーメントを求め、実測値と対比すると図-6のようになる。図によると、変位については実測値と計算値はよい対応を示している。また、曲げモーメントの計算値は、実測値より総じて大きめの値を示しているようであるが、実測値のバラツキを考慮すると深さ4 m程度までは比較的よい対応を示している。なお、5 m以深の Kh 値に関する実測値がなく、その大きさが問題とな

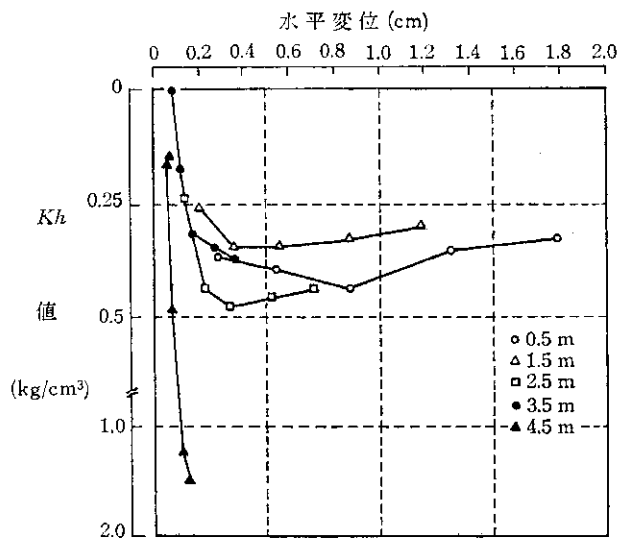


図-5 土圧計より算出される Kh 値

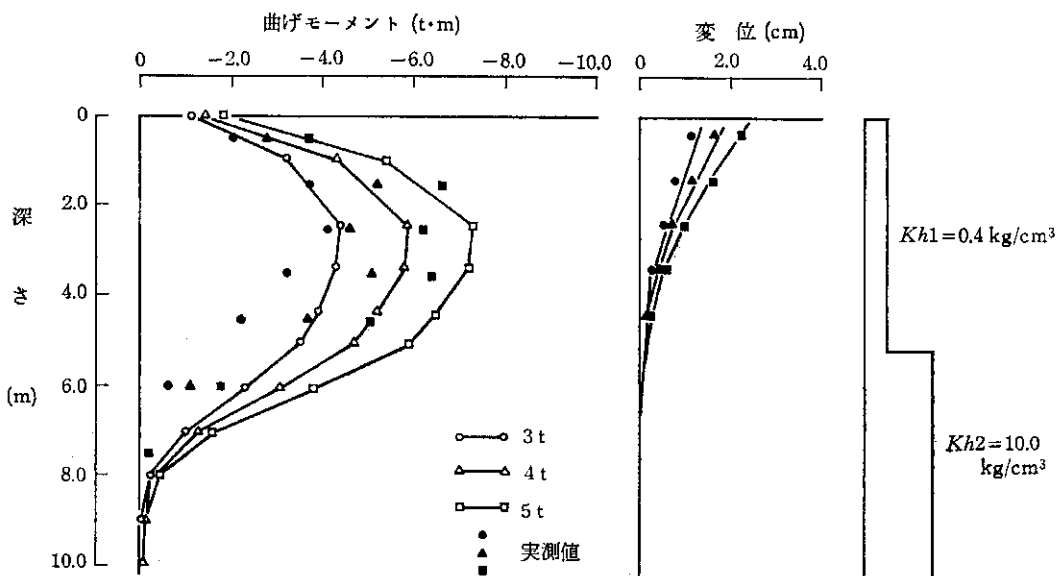


図-6 変位・曲げモーメント

今、杭に作用する側方流動圧について検討するため、杭の変位 δp と地盤の変位 δq との相対的な関係についてまとめると図-9のようになる。すなわち、側方流動により地盤が δq 変位すると、杭背面には $P' = \delta q \cdot Kh'$ に相当する外力が作用する。このため杭は変位するが、地盤と杭の剛性の相違により、杭は最終的に δp の変位を生じてつり合いを保つことになる。このとき杭表面には $P'' = \delta p \cdot Kh''$ の力が作用しており、最終的に流動圧、あるいは地盤反力として土圧計により測定されるものは、 $Kh' = Kh''$ とすると $P_0 = (\delta q - \delta p) \cdot Kh$ となる（流動圧に関しての一般的な定義はないが、ここでは $P' = \delta q \cdot Kh$ を流動荷重として流動圧 P_0 と区別して用いることとした）。

今、 $Kh = 0.4 \text{ kg/cm}^3$ とし $P_0 = (\delta q - \delta p) \cdot Kh$ により

るが、 Kh 値を小さくすることにより曲げモーメント分布が多少実測値に近似してくるが、傾向に大きな変化はみられなかった。

したがって、今回の側方流動の検討は、杭を弾性床土のはりとして扱い、地盤は深さ 5 m までの軟弱層とそれ以深のシルト層の二層系地盤と考えることとし、軟弱層の Kh 値は 0.4 kg/cm^3 とすることとした。

(3) 杭に作用する側方流動圧の検討

図-7 は盛土の沈下と杭の水平変位を、また、図-8 は試験杭の隣接位置における地盤の水平変位を示したものである。盛高の増加に伴い地盤は沈下し、側方流動により杭と地盤は水平方向に変位するが、地盤の側方流動の大部分は、深さ約 5 m までの軟弱層で起こっていることがわかる。

計算した流動圧、あるいは地盤反力と土圧計により測定されたものとを対比して示すと図-10のようになる。これより、深さ 0.5 m 以外は比較的よい対応を示している。深さ 0.5 m で計算値と実測値が大きく異なる原因としては、地盤の変位測定用ガイドパイプの剛性が小さく、盛土施工時に乱されたため実際より変位が小さく計測されたこと、また、杭前面の地盤反力は変位に比例するものと考えているが、実際は極限地盤反力以上の値はとり得ないことなどが考えられる。しかし、水平載荷試験において杭前面の深さ 0.5 m の位置の地盤反力 P が 0.5 kg/cm^3 以上の値を示していることから、前者が大きな原因として考えられる。

以上述べてきたように、杭に作用する流動圧は、杭と地盤の相対的な変位や Kh 値、すなわち、荷重状態、地

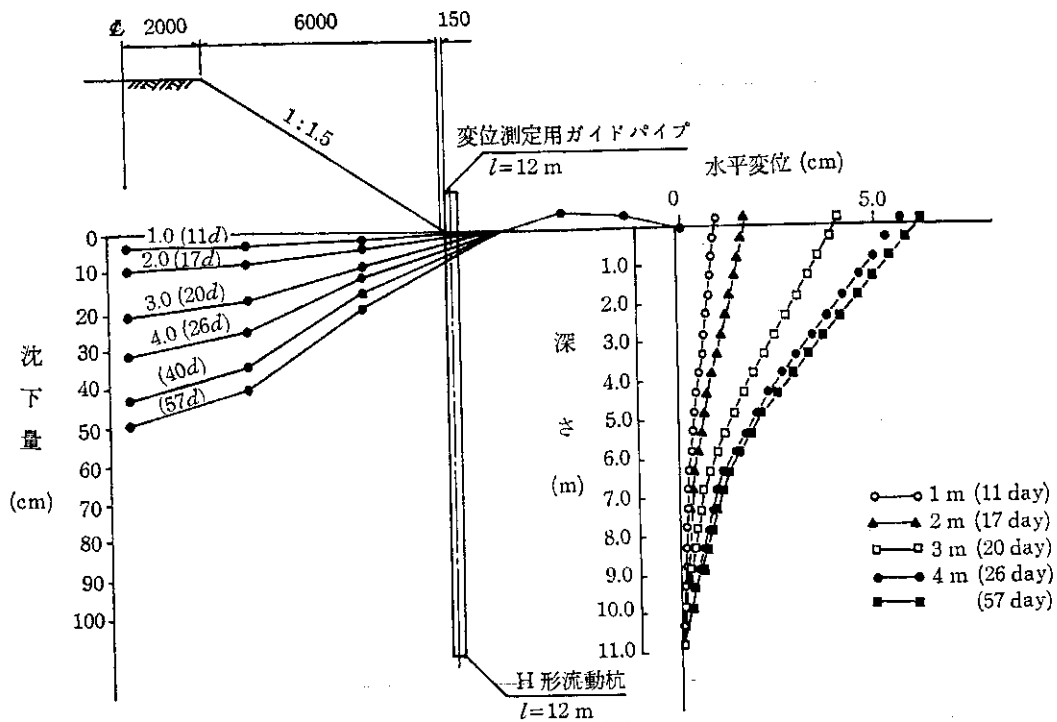


図-7 地盤の沈下と杭の水平変位

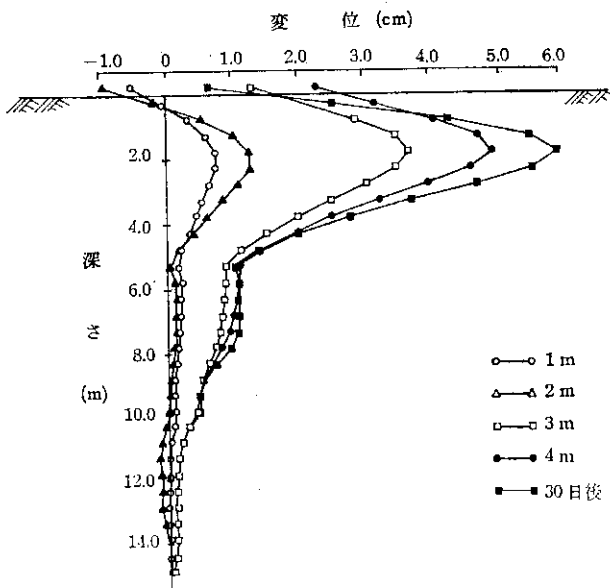


図-8 地盤の水平変位

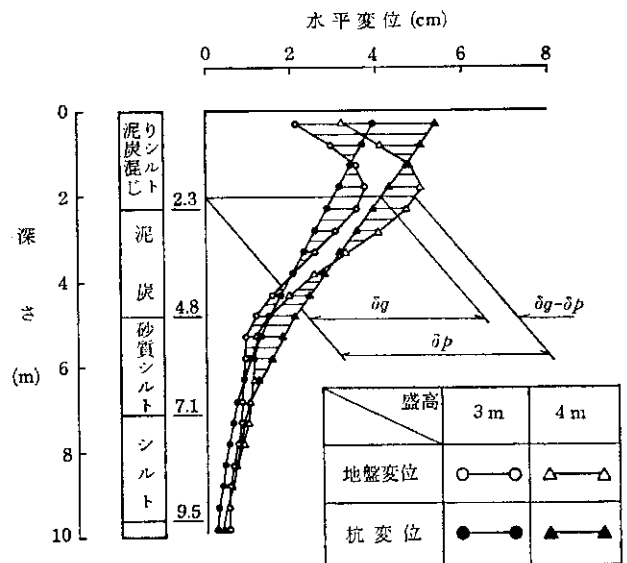


図-9 地盤と杭の相対変位

盤の土層構成や力学的諸性質、杭の剛性などによって分布形状や大きさが決まり、さまざまな形態の流動圧が考えられる。

(4) 杭の水平挙動推定法の検討

図-11は、盛土中央部の地盤沈下量と図-9における地盤と杭の側方変位量の最大値との関係を示したものである。盛高の増加に伴って沈下量、側方への水平変位も増加するが、盛土完了後において沈下は進行するが、水平変位は一定値に収れんしてくる傾向がみられる。すなわ

ち、側方流動の影響を受ける杭基礎の検討は、盛土完了直後を対象として行えばよいと思われる。また、今回の検討は図-8に示した変位分布などから、深さ5m以下の軟弱層の側方流動現象に着目し検討することとした。

前述したように、側方流動が杭基礎に与える影響を検討するためには、杭位置における地盤の変位分布と量を把握する必要がある。今回の調査によって図-8のような測定結果を得ているが、実際の設計においては事前に把握することがむずかしいため、計算により推定するこ

ととなる。

図-12は、三軸圧縮試験などより土の変形係数(E)、ポアソン比(ν)を推定し、弾性体($E=12$, $\nu=0.35$)と考えF.E.Mにより地盤の変位を計算し、実測値と対比して示したものである。この場合、計算値は変形係数(E)を一定としており、一部実測値とかけはなれた値となっている。

いる部分もあるが、沈下量などを勘案し適切な E , ν を推定できれば、ある程度の精度で推定可能なことがわかる。

今回、杭の水平挙動推定法の検討にあたり、図-10で説明した地表面付近の実測変位の測定精度の問題や、また、計算の繁雑さをさけるため、図-12に示した実測値に近い台形分布の地盤変位を計算に用いることとした。なお、 Kh 値は軟弱層で 0.4 kg/cm^3 、それ以深で変位量を勘案し 2.0 kg/cm^3 とし、軟弱層の杭背面から $\delta g \cdot Kh$ の水平荷重が作用する弾性床の上のほりとして挙動を推定

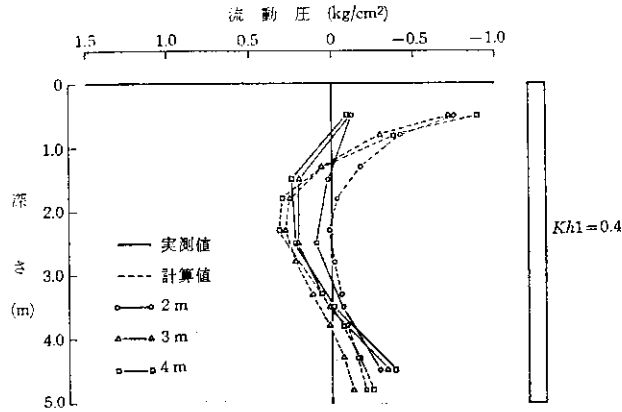


図-10 実測流動圧の対比

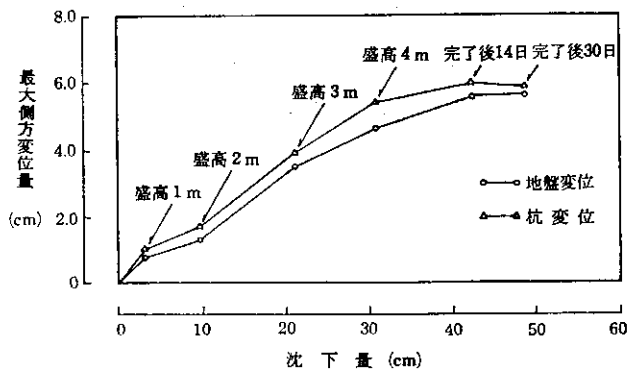


図-11 沈下と側方移動

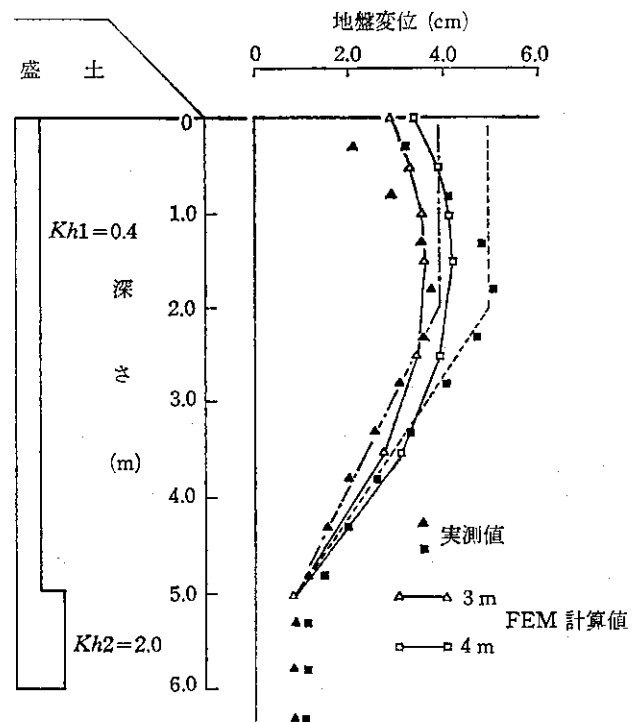


図-12 地盤の変位と流動荷重

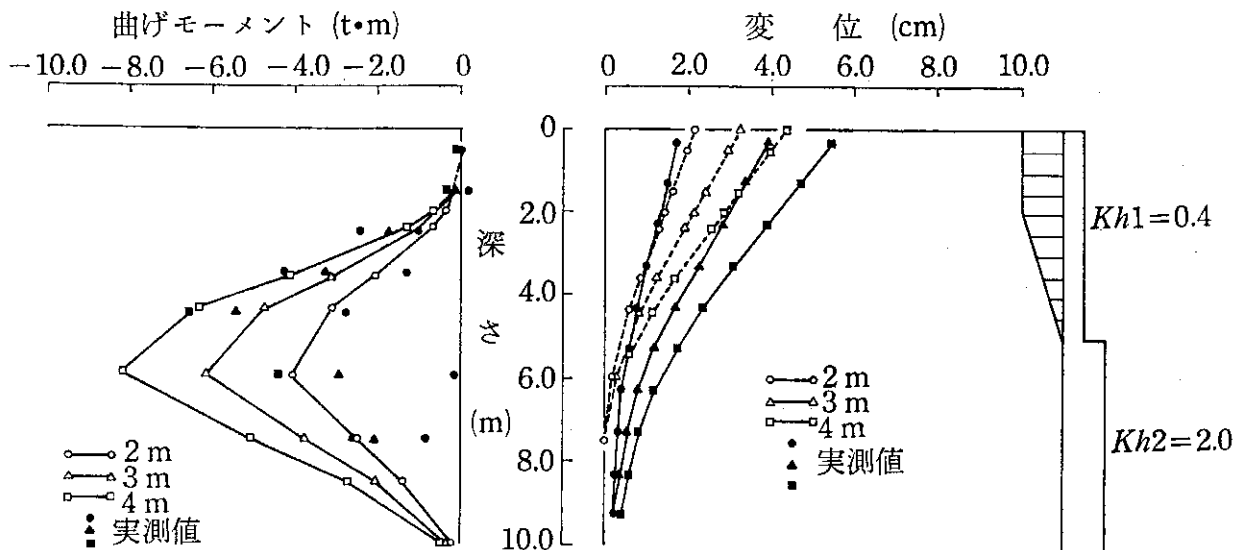


図-13 曲げモーメント・変位

することとした。

図-13に、杭軸方向の曲げモーメントと変位の各分布について実測値と計算値を対比させて示した。曲げモーメントについては実測値にバラツキはあるが、深さ4.0m程度まで両者は比較的良好な対応を示すが、変位については盛高3~4mで計算値が実測値より総じて小さな値となっている。これは、今回の検討対象を5m以浅の軟弱層としており、実測値によれば5m以深でも多少の側方流動が生じているが、それを考慮しなかったことによるものと考えられる。

図-14に、これらの検討を通じ求める計算流動圧 $P_0 = (\delta q - \delta p) \cdot Kh$ と土圧計による実測値との両者を示したが、総じて計算値が大きい値を与えている。これは、実際の挙動時における杭側面の影響や、5m以深の側方流動の影響などによるものと考えられる。しかし、地盤性状や実測値の精度あるいは計算上の仮定などを考えると比較的良好な対応を示しており、今回の推定法は良好な適合性を有している。

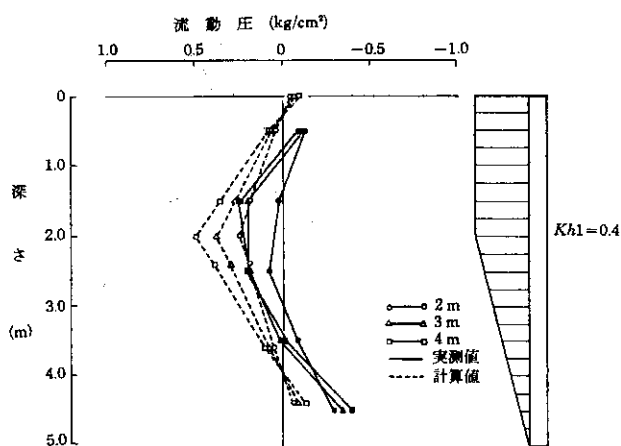


図-14 実測流動圧と計算流動圧

3. 室内模型試験

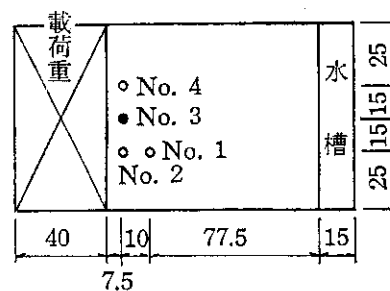
(1) 試験概要

室内模型試験は、図-15に示すような装置により実施した。

試験地盤は、表-2に示すような特性の偏載荷重により、側方流動を起こすような軟弱粘土層を30cm、杭の変位を拘束する砂層を70cmの二層系地盤とし、軟弱粘土については現場から採取してきたものに水と焼石こうを加えながらできるだけ均一になるよう攪拌混合し、再生したものを使用した。

模型杭はアルミニウムパイプ ($\phi 19\text{ mm}$, $t=1.9\text{ mm}$, $l=123\text{ cm}$) を用い、杭前面および背面にはひずみゲージ、圧力センサを取付け、側方流動時の杭の曲げ応力、

平面図



No. 1, 2, 4 (ひずみゲージ杭)
No. 3 (圧力センサ杭)

側面図

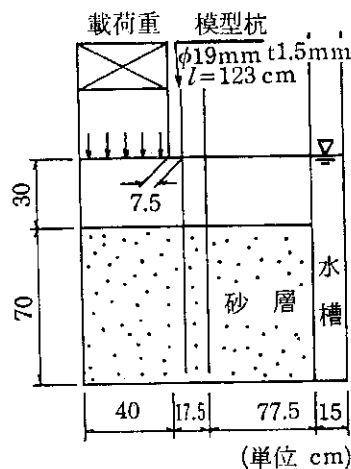


図-15 試験装置略図

表-2 地盤特性

		単位	記号	試料
含	水 比	%	w	45~58
比	重		G_s	2.79
液	性 限 界	%	u_r	49.0
塑	性 限 界	%	w_p	29.0
塑	性 指 数		I_p	20.0
単	位 体 積 重 量	t/m	P_t	1.77
三 軸	粘 着 力	kg/cm ²	C	0.015~0.025
	内部摩擦角	°	ϕ	1°12'
圧 密	圧 縮 指 数		C_c	0.313
	降 伏 応 力	kg/cm ²	P_c	0.19

側方流動圧、地盤反力を測定した。また、地表面の隆起については変位計により、地中部の変位は、土中に埋設している標点棒により把握ができるようにした。また、杭には地表面より上 10 cm および 25 cm (組杭については 27.5 cm) の位置に変位計を設置し、変位、傾斜角がわかるようにした。なお、試験槽壁面と地盤の摩擦抵抗は、シリコングリスを壁面に塗布し低減をはかった。

試験は単杭および組杭の 2 ケースについて実施した。偏載荷重は、等分布荷重となるよう 50 kg (0.016 kg/cm²) ~ 400 kg (0.125 kg/cm²) (組杭については 500 kg) まで数回にわけて作用させ、各段階の荷重保持時間は原則として 2 時間とした。なお、荷重強度、保持時間は、試験地盤の性状や既往の試験結果などを参考にして決めた。

(2) 試験結果

図-16 は偏載荷重による地盤の移動状況を示したもので、沈下、隆起、水平変位の様子がよくわかる。

図-17 は、荷重と杭変位および最大曲げ応力との関係を示した。また、図-18 は杭に取付けた圧力センサによ

る土圧応力を示したもののだが、軟弱層間においては杭背面より流動圧を受けているが、前面での地盤反力は発生していない。砂層地盤内では表面付近の杭前面に反力が発生しているが、背面からの流動圧は作用しておらず、この傾向は深さ約 60 cm で逆転している。

(3) 側方流動圧と杭の水平挙動の検討

室内模型試験においても現場試験と同様に、圧力センサにより測定される側方流動圧は、 $P_0 = (\delta g - \delta p) \cdot Kh$ と考え検討を行った。ここで、この検討に必要な杭位置での地盤変位を測定していないため、現場試験と同様に弾性体 ($E=0.5$, $\nu=0.45$) と考え、F. E. M により地盤の変位を求めた。この計算に必要な地盤定数 (E , ν) は、土質試験結果や他機関での解析結果を参考にして決定した。計算結果と実測値を対比させたものは、図-16 に示したように、実測値の数が少ないことなどにより一部かけはなれた値となっているところもあるが、全体的により対応を示している。この変位分布を便宜上現場試験と同様に台形と置き換え、軟弱層で杭背面から $P = \delta g \cdot Kh$ の流

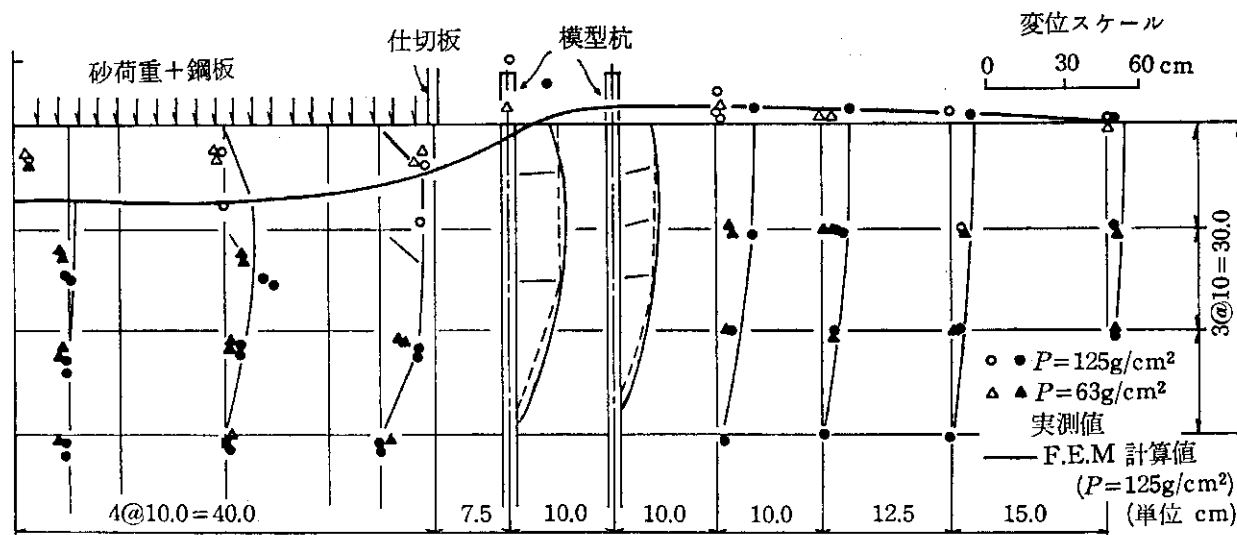


図-16 地盤の移動状況

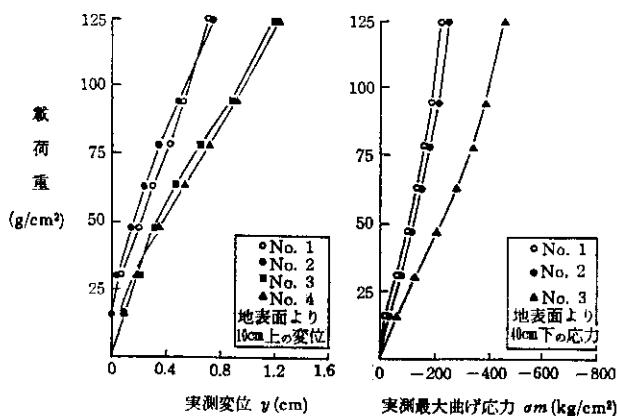


図-17 荷重～変位・応力～

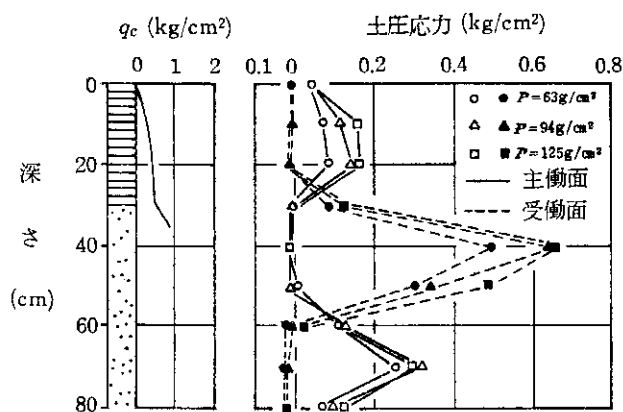


図-18 流動圧および地盤反力

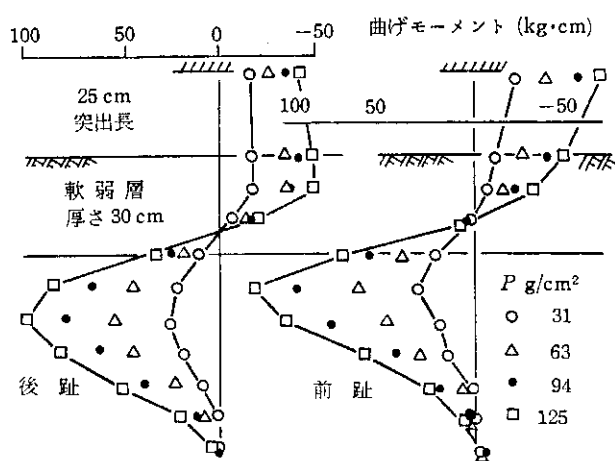


図-19 曲げモーメント (組杭)

動荷重を受ける弾性床土のはりとして杭の変位、曲げモーメント、流動圧、地盤反力を計算し実測値と対比した。ここで計算に必要な K_h 値は、水平載荷試験結果より軟弱粘土層で 0.2 kg/cm^3 、砂層で 2.0 kg/cm^3 とした。また、図-19は組杭における実測曲げモーメントを示したもののだが、前趾杭と後趾杭とは曲げモーメントの大きさが違うことから、杭に作用する流動圧の大きさの異なることが考えられるため、図-16において杭位置での変位分布の比が約0.8となっていることより、前趾の杭背面には $0.8 P_0$ の流動圧を作用させることとした。

図-20, 21は、単杭および組杭における変位、曲げモーメント、土圧強度について計算値と実測値を対比させたものである。両者とも変位、曲げモーメントについてはよい対応を示しているが、組杭後趾杭については最大

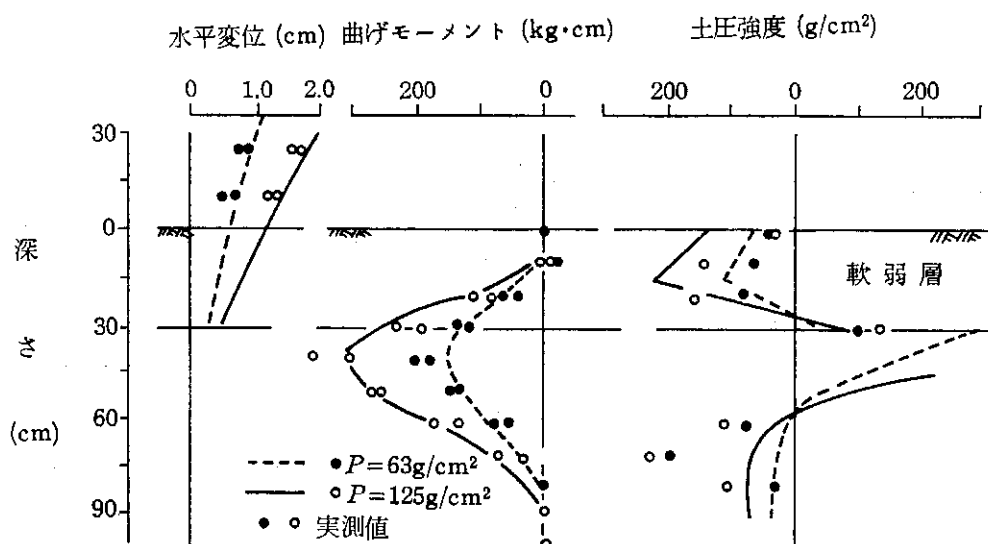


図-20 実測値と計算値の対比 (単杭)

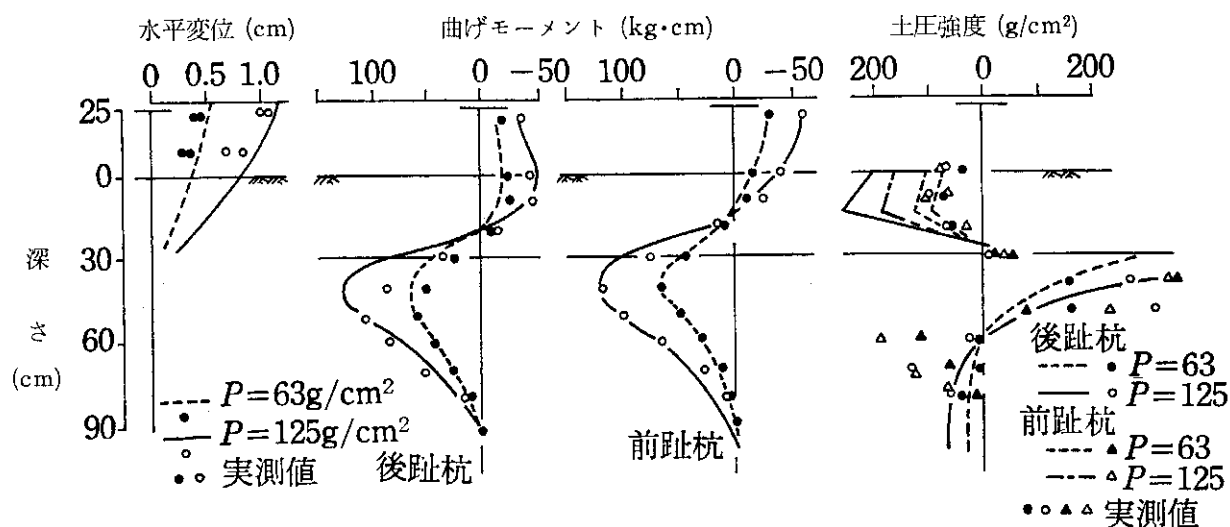


図-21 実測値と計算値の対比 (組杭)

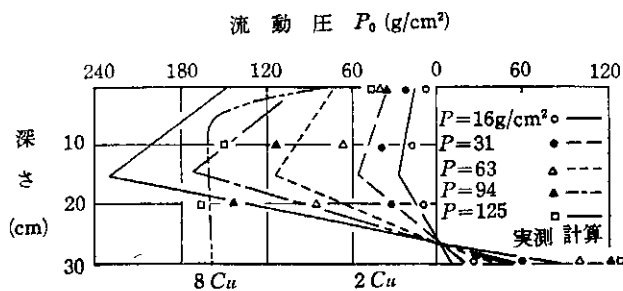


図-22 流動圧分布図 (単杭)

曲げモーメントの生ずる位置で両者に差が生じている。

図-22は、単杭の軟弱層間における杭背面よりの流動圧を前述した $P_0 = (\delta g - \delta p) \cdot Kh$ により算出し、実測流動圧と対比したものである。これより、偏載荷重が小さいうちは、両者は比較的よい対応を示すが、偏載荷重が大きくなるにつれ計算値は大きめの値を示している。また、地表面付近については、Broms の提唱している $P_0 = 2Cu$ とほぼ一致する約 0.4 kg/cm^3 の一定値となっている。実測値と計算値が一致しない原因としては、地盤と杭の相対変位が増してくると杭の側面の影響がでてくること、砂層についての地盤反力が実測値は計算値よりかなり大きな値となっていること、今回砂層の移動は考えなかったことなどの計算モデルによるもののほか、 Kh 値の推定法や圧力センサの性能などが考えられる。

以上のように、実測値と計算値は一部合致しない部分

もあるが、設計計算における側方流動の検討に際して必要となる杭応力、変位についての実測値と計算値は、比較的よい対応を示している。

4. あとがき

以上、側方流動の影響を受ける杭の挙動推定はかなりの精度で可能なことがわかったが、今後の課題として、地盤性状 (E , ν , Kh 値など) の的確な推定法、杭と地盤の相対変位における杭側面の影響の解明などが残された。さらに、室内模型試験などにより、群杭効果および対策工法を施した場合の抑止効果などについても試験、検討を行い、設計法について取りまとめていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 森 康夫ほか；側方流動と構造物および杭基礎の挙動，土と基礎，1982/5，土質工学会。
- 2) 森 康夫ほか；軟弱地盤における側方流動と杭基礎，技術報告集第24号，1983/2，pp. 89-92，土質工学会。
- 3) 逢坂秀俊ほか；側方流動圧と杭の水平抵抗に関する模型実験，第38回年次学術講演会，1983/9，土木学会。

*

*

*