

# 粘性土地盤における群杭の水平大変形挙動 の実験的検討

小野 勇<sup>1</sup>・山田 清臣<sup>2</sup>・菊田 征勇<sup>3</sup>・松浦 聖<sup>4</sup>・岡田 勝也<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 日本大学大学院理工学研究科（博士後期課程）（〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8）

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 日本大学教授 工学部土木工学科（〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8）

<sup>3</sup>フェロー会員 工修 国士館大学教授 工学部土木工学科（〒154-8515 東京都世田谷区世田谷4-28-1）

<sup>4</sup>フェロー会員 工博 国士館大学教授 工学部土木工学科（〒154-8515 東京都世田谷区世田谷4-28-1）

粘性土模型地盤を用いて4本と9本の正方配列の群杭の大変形をともなう水平載荷実験を実施した。また、群杭効率を把握するための単杭の水平載荷実験も実施した。実験結果にもとづいて、粘性土地盤における群杭の列ごとの荷重分担率を算出し、水平大変形挙動について考察した。その結果、9本群杭よりも4本群杭が地盤強度の影響を大きく受けることが明らかとなった。また、フーチング変位率、群杭本数と地盤と杭の相対剛性にもとづいた、群杭効率を求めるための経験式も提案した。

*Key Words : pile group, cohesive soil, model test, lateral load, efficiency of pile group*

## 1. はじめに

杭基礎の水平方向荷重に対する設計法は、おおむね完成されたものが示されている<sup>1), 2)</sup>。しかし、実務における地盤反力の算定法では、複雑な基礎と地盤の相互作用を相当に簡略化したモデルが用いられている。このため、実際の基礎の挙動とは異なる場合があることが指摘されている<sup>3)</sup>。また、今後の基礎の大型化をはじめ、限界状態設計法や耐震設計法の合理化の観点からも改善すべき課題が指摘されている<sup>4)</sup>。

これらを背景として、地盤の非線形性や杭の大変形時における挙動的重要性が認識されている<sup>5), 6), 7)</sup>。しかしながら、その多くは砂質地盤を対象にしたものである。

砂質地盤を対象とした杭の水平挙動に関する研究は数多くおこなわれている。たとえば、群杭効率に及ぼす杭本数と杭間隔の影響については玉置ら<sup>8)</sup>、長谷川ら<sup>9)</sup>、脇田<sup>10)</sup>、芳賀ら<sup>11)</sup>、西田ら<sup>12)</sup>、竹下ら<sup>13)</sup>、山肩ら<sup>14)</sup>、岡田ら<sup>15)</sup>、建築業協会基礎部会<sup>16)</sup>の研究があり、また、FEM解析などによって、水平挙動を明らかにしようとする木村<sup>17)</sup>、若井ら<sup>18)</sup>、近藤ら<sup>19)</sup>の研究がある。

粘性土地盤における杭の水平方向挙動に関する研究としては、Broms, B.B.<sup>20)</sup>およびRandolph, M. F<sup>21)</sup>の研究が有名であるが、これらは、おもに理論解析を

中心とした杭の水平抵抗の検討である。また、実験的な研究としては小倉ら<sup>22)</sup>による研究などがある。

本論文は、粘性土地盤を対象とした群杭の大変形水平載荷実験を実施し、その実験的考察を述べたものである。ただし、この大変形実験では、地盤の非線形挙動や塑性化を対象としたもので、杭体は線形弾性の範囲にあるものとした。2章で実験の概要を示し、実験の境界条件や地盤物性を明らかにした上で、3, 4, 5章において、4本群杭と9本群杭に対する水平載荷実験の結果を示し、これらをもとに荷重分担率や群杭効率の定量的評価について論じたものである。

## 2. 実験の概要

### (1) 模型実験の相似律

実現場では、一般に、外径500 mm～1016 mmまでの鋼管杭が多く用いられている<sup>23)</sup>。ここでは、外径914.4 mm、厚さ14 mmの鋼管杭（断面積534.5 cm<sup>2</sup>、単位質量420 kg/m、断面二次モーメント 536×10<sup>3</sup> cm<sup>4</sup>、ヤング係数205.8 GPa）を対象とする。

模型実験の長さの縮尺を1/50とし、さらに実験における加工性等も考慮して、直径18.01 mm、厚さ0.95 mm（断面積0.510 cm<sup>2</sup>、単位質量0.434 kg/m、断面二次モーメント0.187 cm<sup>4</sup>、ヤング係数132.3 GPa）の銅

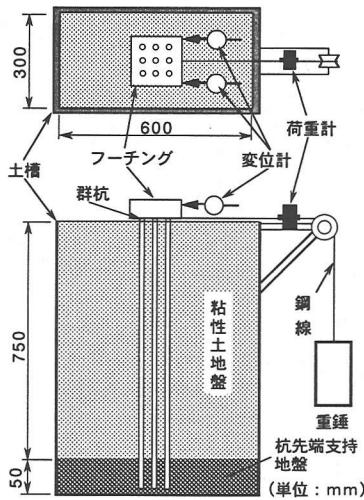


図-1 実験概要図 (9本群杭)

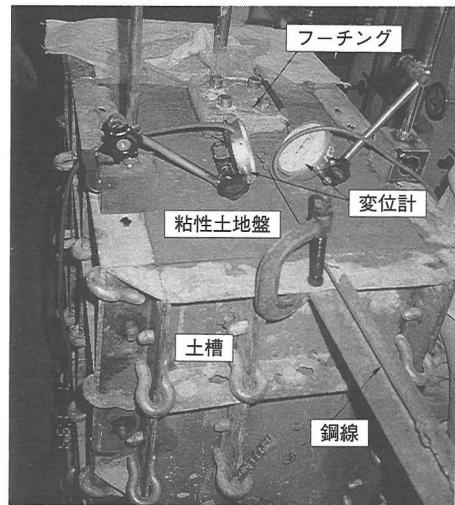


図-2 群杭載荷状況 (4本群杭)

管を模型杭として用いることにした。

粘性土模型地盤の作成にあたっては、相似律の整合に注意を払った。すなわち、杭の特性値を、

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kD}{4EI}} \quad (1)$$

と与え<sup>23)</sup>、これに対して相似律を合わせると、模型地盤と実地盤の地盤反力係数比は、

$$\frac{k_m}{k_p} = \frac{4 \frac{(EI)_m}{(EI)_p}}{\frac{D_m}{D_p}} \times \left[ \frac{\beta_m}{\beta_p} \right]^4 \quad (2)$$

となる。ここに、 $\beta$ は杭の特性値、 $k$ は地盤反力係数、 $D$ は杭径、 $EI$ は杭の曲げ剛性である。また、下添え字 $m$ と $p$ はそれぞれ模型と実物の値であることを表している。

式(2)において、 $(\beta_m/\beta_p)=50$ 、 $(D_m/D_p)=50$ 、 $(EI_m/EI_p)=1/4377000$ であるので、模型地盤と実地盤の地盤反力係数比は、 $k_m/k_p=17.6$ となる。実地盤の地盤反力係数 $k_p$ は、一般的には $k_p=1.0$ から $17.0 \text{ N/cm}^3$ の範囲にあるので、 $k_m=20$ から $300 \text{ N/cm}^3$ の模型地盤を作成すればよいことになる。

## (2) 実験装置・実験方法

図-1に実験装置および載荷方法の概略を示す。本実験は、埋込み杭や場所打ち杭を対象としたものである。図-2に4本群杭の実験状況の様子を示す。実験に

は、コンクリート用メタルフォームを接合した高さ0.8 m、幅0.6 m、奥行き0.3 mの鋼製土槽を用いた。土槽の縫目には、グリスを十分塗布し、模型地盤からの水の流出を防いだ。

模型地盤の作成手順はつぎのとおりである：

- 1) 模型杭の位置を土槽上端で固定器具を用いて定める；
- 2) 木節粘土、ペントナイト、セメント、水を混合したスラリー状の粘性土材料を土槽に流し込む。その際、振動締固めなどの特別の措置はとっていない；
- 3) 粘性土材料が固化する際のブリージング水排出による沈下を見込んで、3 cm程度の余盛りをおこなう；
- 4) ラップフィルムで模型地盤の表面全体を覆って乾燥を防ぎ、約3日間放置する；
- 5) 載荷実験を実施する直前に、ナイフエッジで前述の余盛り部分を削り取り、平面に仕上げる。

したがって、あらかじめセットされた模型杭の周囲に模型地盤を打設したことになるので、杭の設置方法は、「打込み杭」ではなく、「場所打ち杭」あるいは「埋込み杭」に近い打設状況となっている。

模型地盤の強度は、載荷実験終了後、コーンベネトロメーターを用いて計測した。

載荷は、1方向に荷重を段階的に増加させる单サイクル載荷とした。すなわち、鋼線によって吊り下げた重錘を水平荷重としてフーチングに作用させる方式とした。計測は、各載荷段階ごとに載荷直後から一定の時間で複数回おこなった。杭頭部の変位が落ち着いたのを確認してから次の載荷段階に移った。

表-1 地盤の物性値（材齢7日）

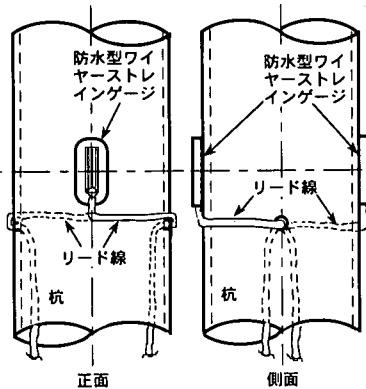


図-3 ワイヤーストレインゲージ詳細図

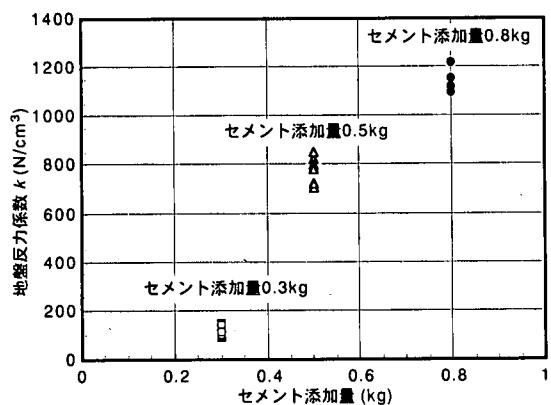


図-4 7日強度のセメント添加量と地盤反力係数

なお、計測項目は、載荷荷重（1個所）、フーチングの変位（2個所）、および各杭の側面のひずみ（群杭全体で30個所）とした。

### (3) 模型杭のひずみ測定

図-3に模型杭のひずみ測定の詳細を示す。杭には1本あたり前面、背面に各15枚（変形が大きい杭上部には30mm間隔で11枚、変形が小さい杭下部では100mm間隔で4枚）の防水型ワイヤーストレインゲージを貼設した。リード線は杭の変形を妨げないように、杭の中立軸の部分に2mmの穴を開け、杭内部を通して底部から土槽の外へ逃がした。

### (4) 模型地盤の地盤特性

#### a) 地盤反力係数

図-4に示すように、模型地盤の作成に先立って、セメント添加量と地盤反力係数kとの関係を把握するために、木節粘土、ペントナイト、水の配合は変え

配合割合	模型地盤の種類	s		
		1	2	3
木節粘土(kg)	4.0	4.0	4.0	
ペントナイト(kg)	1.0	1.0	1.0	
水(kg)	8.0	8.0	8.0	
普通ポルトランドセメント(kg)	0.2	0.6	0.8	
液性限界WL(%)	171.6	165.8	155.2	
塑性限界WP(%)	—	89.2	116.1	
塑性指数Ip	—	76.6	39.1	
密度 $\rho_s$ (g/cm³)	2.131	2.502	2.49	
均等係数Uc	21.0	11.7	4.4	
曲率係数	4.45	4.30	0.803	
*逆算k値(N/cm³)	23	50	100	
せん断弾性係数G <sub>s</sub> (MPa)	0.88	2.75	4.63	

\*杭頭変位率 $\varepsilon=1\%$

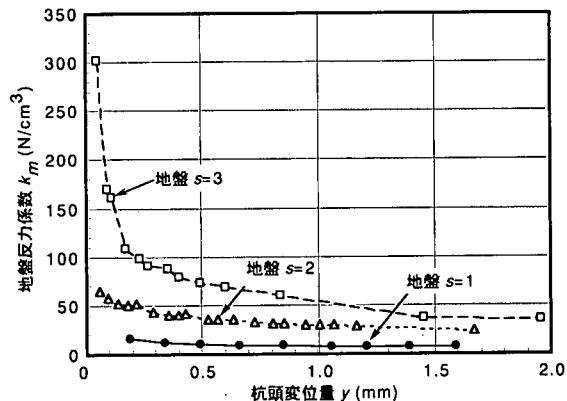


図-5 単杭載荷試験の逆算地盤反力係数

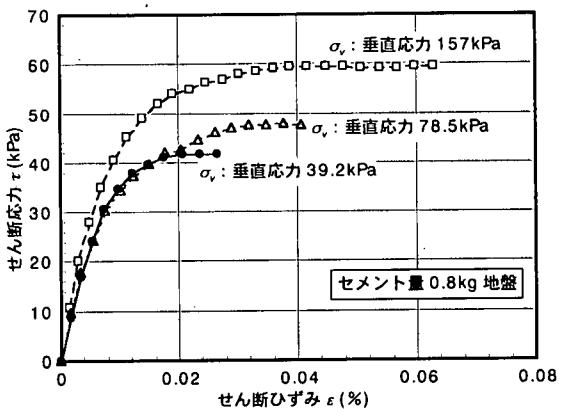


図-6 直接せん断試験結果

ず、セメントの添加量だけを3通りに変化させて、予備実験をおこなった。ここで、地盤反力係数kは、小型平板載荷試験（平板直径：75.05 mm）によって求め

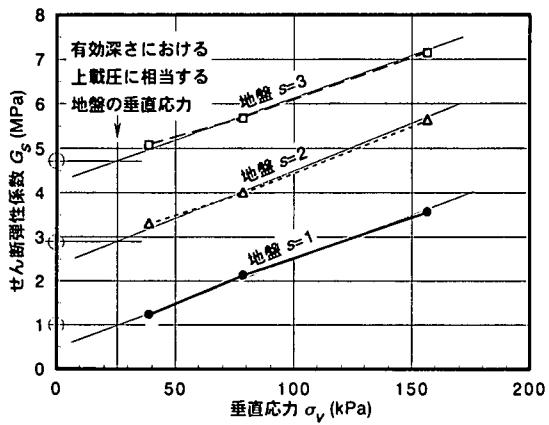


図-7 せん断弾性係数の決定

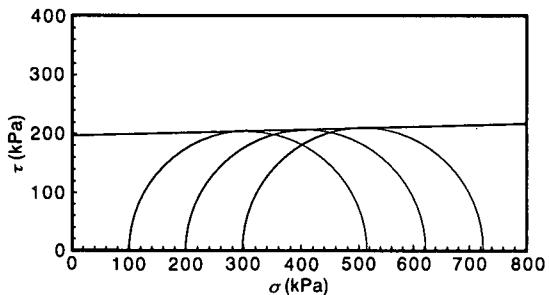


図-8 三軸圧縮試験結果

た。この予備実験から、セメント添加量を増加させると、ほぼ比例して地盤反力係数が増大することが確認できた。

この結果をもとに、前述の(1)に示す所定の範囲内で地盤反力係数  $k$  が異なる3種類の粘性土模型地盤を準備することにした。表-1に水平載荷実験に用いる3種類の粘性土模型地盤の物性をまとめた。さらに、表-1に示す模型地盤に対して、杭頭固定条件で単杭の水平載荷実験を実施し、計測した変位から地盤反力係数  $k$  を逆算した。なお、杭頭固定条件を満たすために、十分に間隔をとった2本の単杭の杭頭を強固な梁で剛結した。その結果を図-5に示す。逆算された地盤反力係数  $k$  は、ひずみレベルによって変動するが、 $k_m = 20 \sim 300 \text{ N/cm}^3$  の範囲におさまることが確認できた。

#### b) せん断弾性係数

図-6と図-7に示すように、杭と地盤の相対剛性  $E_p/G_s$  を算出するため、3種類の地盤における3通りの垂直応力について直接せん断試験をおこない、地盤のせん断弾性係数  $G_s$  を求めた。なお、図-7中に示す有効深さとは、Changの式による杭頭固定条件の最大曲げモー

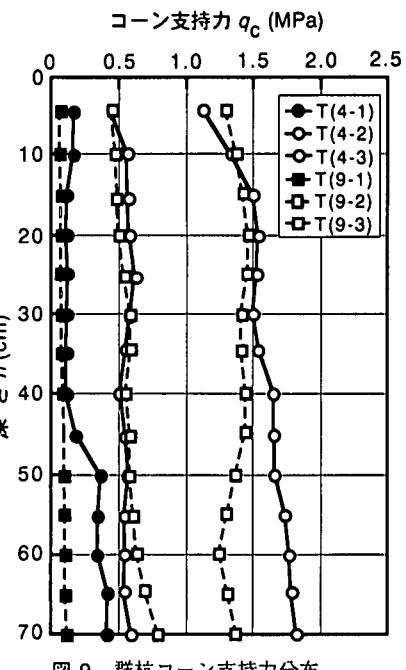


図-9 群杭コーン支持力分布

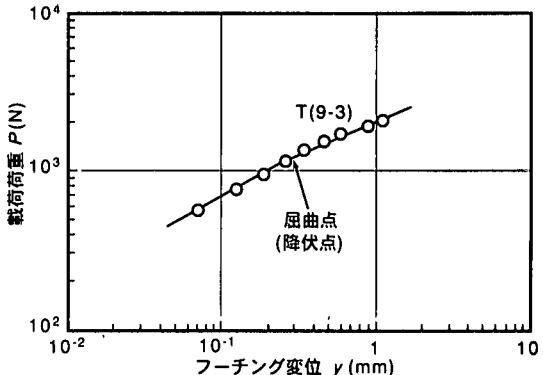


図-10 群杭の荷重-変位曲線

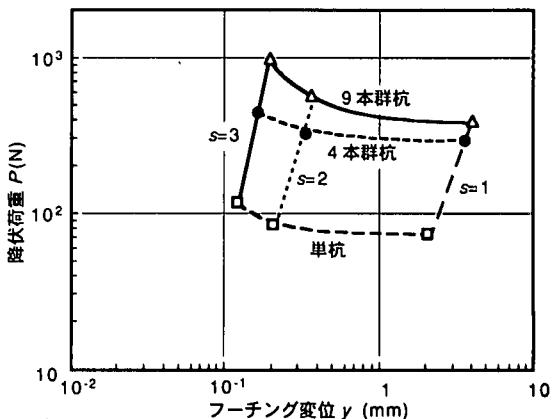


図-11 降伏時の荷重-変位曲線

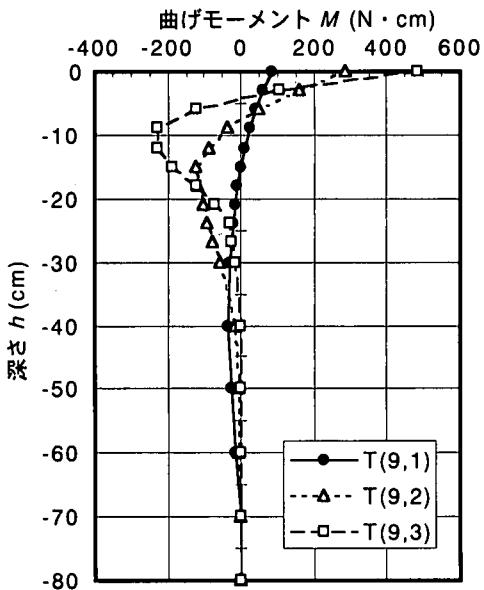


図-12 9本群杭T(9-s)の曲げモーメント分布

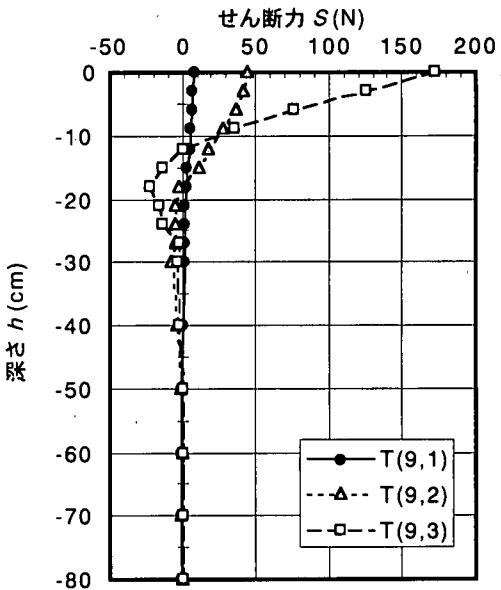


図-13 9本群杭T(9-s)のせん断力分布

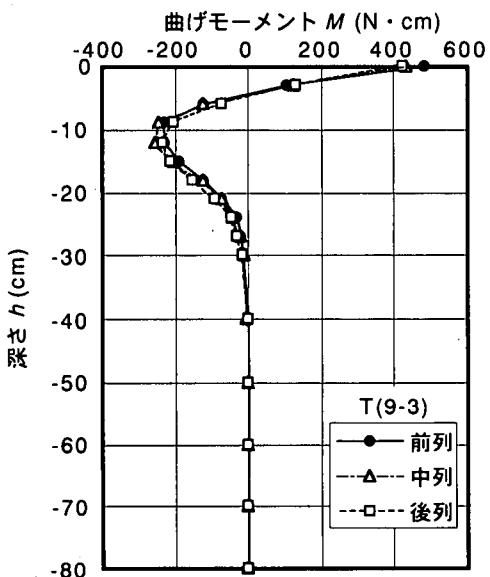


図-14 9本群杭T(9-s)の時の前・中・後列杭の曲げモーメント分布

メント発生深さ ( $l_m = \pi/2\beta$ ) を指す。

なお、地盤の強度特性を調べるために、三軸圧縮(UU)試験をおこなった。図-8は、粘性土地盤( $s=3$ )の三軸圧縮試験結果で、 $c=200\text{ kPa}$ ,  $\phi=1.67^\circ$ であった。

### c) 鉛直方向の地盤強度分布特性

実験ケースはT( $n\cdot s$ )で表し、 $n$ が群杭の本数(4本

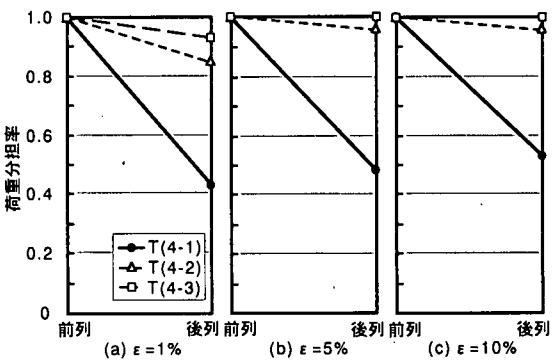


図-15 4本群杭の荷重分担率

もしくは9本),  $s$ が表-1に示される模型地盤の種類(1~3)を表している。群杭の載荷実験を実施した後、杭周辺地盤にコーンペネトロメーターを貫入して、地盤内の強度分布を測定した。図-9に各模型地盤における四つの隅(各側壁から10cm)での平均値を、後述の(5)における実験ケースについて示した。これから、鉛直方向にはほぼ一定な地盤強度が得られていることがわかる。

### (5) 実験の種類

群杭として、4本杭(前列に2本、後列に2本)の場合と9本杭(前列、中列、後列に3本づつ)の場合の2種類を取り上げた。杭間は、杭径の2.5倍~3倍程度で施工される場合がほとんどであるので、当実験では、

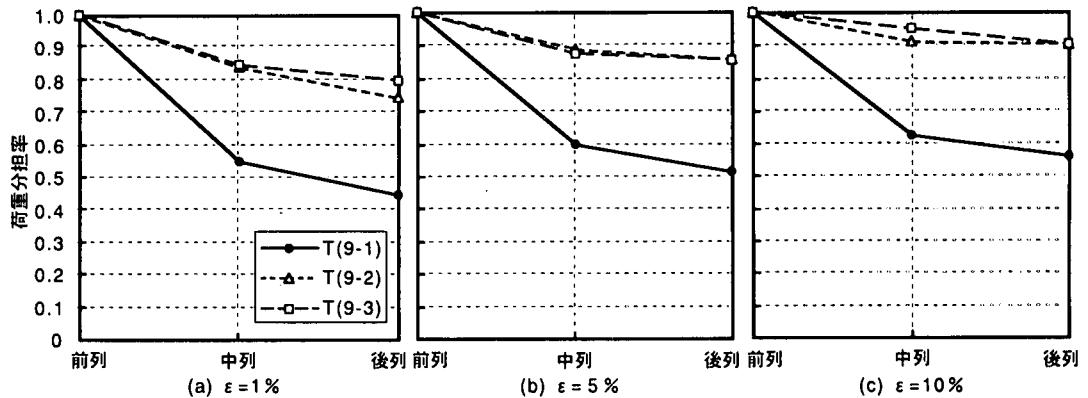


図-16 9本群杭の荷重分担率

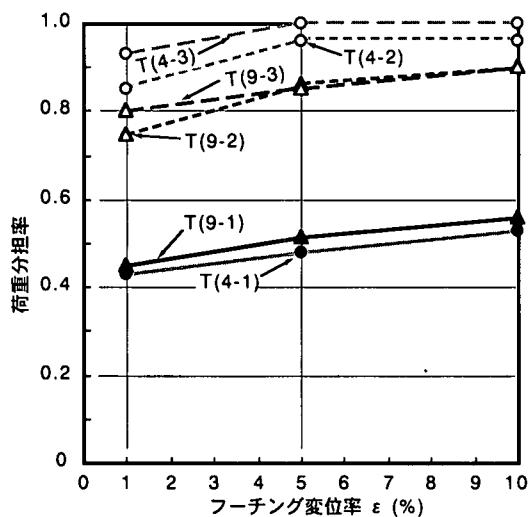


図-17 群杭の荷重分担率

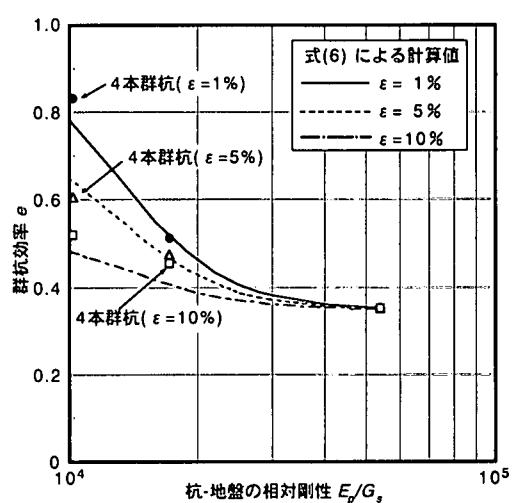


図-18 杭・地盤の相対剛性と群杭効率 (4本群杭)

杭径の2.5倍 ( $2.5D$ ,  $D$ は杭径) とすることにした。

2種類の群杭に対する水平載荷実験を、それぞれ3種類の異なる粘性土模型地盤（表-1）を用いて実施した。したがって、単杭の場合の3通りを含めて、合計9通りの実験をおこなった。これらの実験ケースを群杭本数 $n$ と模型地盤の種類 $s$ を用いて、 $T(n \cdot s)$ として表すことにする。

### 3. フーチング変位と杭の曲げモーメントに関する実測結果

#### (1) フーチング変位

図-10に群杭のフーチング下面の水平変位と水平荷重の関係を示す。実験T(9-3)の場合、両対数上で、単杭の載荷実験に見られるように<sup>24)</sup>、屈曲点が認めら

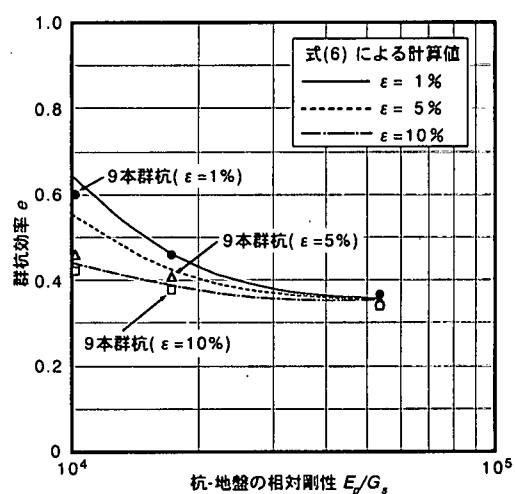


図-19 杭・地盤の相対剛性と群杭効率 (9本群杭)

表-2 T(9-s), (s=1, 2, 3)における前部端部の杭のひずみ分布の実測値

測定番号	杭頭部からの深さ(cm)	s = 1		s = 2		s = 3	
		背面ひずみ( $\times 10^{-6}$ )	前面ひずみ( $\times 10^{-6}$ )	背面ひずみ( $\times 10^{-6}$ )	前面ひずみ( $\times 10^{-6}$ )	背面ひずみ( $\times 10^{-6}$ )	前面ひずみ( $\times 10^{-6}$ )
1	0	59.4	-52.8	297.0	-264.0	362.1	-298.0
2	-3	54.7	-48.1	213.1	-144.3	211.2	-98.1
3	-6	49.0	-42.4	128.2	-51.9	82.0	38.7
4	-9	41.5	-35.8	59.4	13.2	-14.1	150.9
5	-12	32.1	-27.3	6.6	80.2	-83.9	221.6
6	-15	24.5	-20.7	-37.7	130.1	-128.2	260.3
7	-18	15.1	-9.4	-74.5	151.8	-133.0	264.0
8	-21	1.9	-1.9	-103.7	171.6	-121.6	245.2
9	-24	-10.4	7.5	-124.5	185.8	-92.4	197.1
10	-27	-18.9	20.7	-136.7	199.0	-51.9	155.6
11	-30	-30.2	28.3	-132.0	191.4	-12.3	103.7
12	-40	-49.0	41.5	-50.9	90.5	27.3	37.7
13	-50	-49.0	40.5	-7.5	21.7	15.1	29.2
14	-60	-37.7	32.1	-4.7	-6.6	8.5	22.6
15	-70	-25.5	12.3	-8.5	-24.5	0.0	14.1

れる。この屈曲点は、これを境に、載荷増分に対する変位増分が増大することから、群杭-地盤系における一種の降伏点と理解することができる。

図-11は、全ての実験に対してこの降伏点を読み取り、プロットしたものである。ここから、地盤強度が高くなるほど、降伏荷重も高くなるが、降伏時のフーチング変位は小さくなることがわかる。ただし、群杭の杭本数ごとに、それぞれに降伏荷重の下限値が存在するようである。

また、群杭を構成する杭の本数を増すほど降伏荷重は大きくなるが、いたずらに杭の本数を増やしても、降伏荷重の増加はさほど見られない。すなわち、群杭の杭本数が多くなっても、群杭の降伏荷重は、単杭の降伏荷重を単純に杭本数倍したものとはならず、相当に下回るものとなる。このことから、いわゆる群杭効果が表れていることがわかる。

## (2) 地盤強度と杭の曲げモーメント分布

表-2に杭表面の表側と裏側に貼設したひずみ計の実測値の一例を示した。この表に示すひずみは、実験T(9-s)、ただし(s=1, 2, 3)における前部端部の杭のひずみ分布を杭頭の変位率 $\epsilon=5\%$ について深さ方向に示したものである。これらのひずみ分布から杭の曲げモーメントを図-12のように求めることができる。図-12は、実験T(9-s)、すなわち9本群杭の前部端部の杭の曲げモーメントを地盤強度sをパラメーターに描いたものであるが、地盤が強い(s=3)場合は、同じ杭頭変位率( $\epsilon=5\%$ )の時には、地盤が弱い(s=1)よりも曲げモーメントを発生させることができることがわかる。これは真に群杭の影響を表すものであり、荷重分担率の検討の基礎データを与えることになる。図の実験T(9-3)のときの前列・中列・後列の曲げモーメント分布

を示すと図-14のようになる。

これによると、地盤強度が高くなるほど、s=1, 2, 3の順に、杭上端に作用する曲げモーメントと杭地中部に作用する曲げモーメントが大きくなることがわかる。さらに、杭地中部の最大曲げモーメントが作用する位置は浅くなっていることもわかる。

## 4. 群杭の杭列に対する荷重分担率

曲げモーメントを微分することによって、杭に作用するせん断力を求めることができる。図-13に図-12から求めたせん断力分布を示す。地盤強度の違いによるせん断力分布の違いは、曲げモーメント分布のそれと同様の傾向を示している。

フーチングと地盤が接触していないことから、群杭に載荷した水平荷重は、各杭頭に作用するせん断力の総和であると考えてよいから、各杭頭に作用するせん断力の比を求めれば、それぞれの杭の荷重分担率となる。ただし、実際の群杭では、列の中でも行によってそれぞれの杭の荷重の分担は相違するが、ここでは、列に着目して、荷重分担率を定義したものである。荷重分担率をつぎのように定義する。すなわち、

$$\text{荷重分担率} = \frac{\text{各列の杭頭せん断力の合計}}{\text{前列の杭頭せん断力の合計}} \quad (3)$$

図-15に式(3)で定義された荷重分担率をT(4, s)について示した。図はフーチング変位率 $\epsilon$ ごとに示されているが、フーチング変位率 $\epsilon$ とは、フーチングの変位を杭径で割った無次元化変位である。

フーチング変位率 $\epsilon$ が大きく(載荷荷重が大きく)

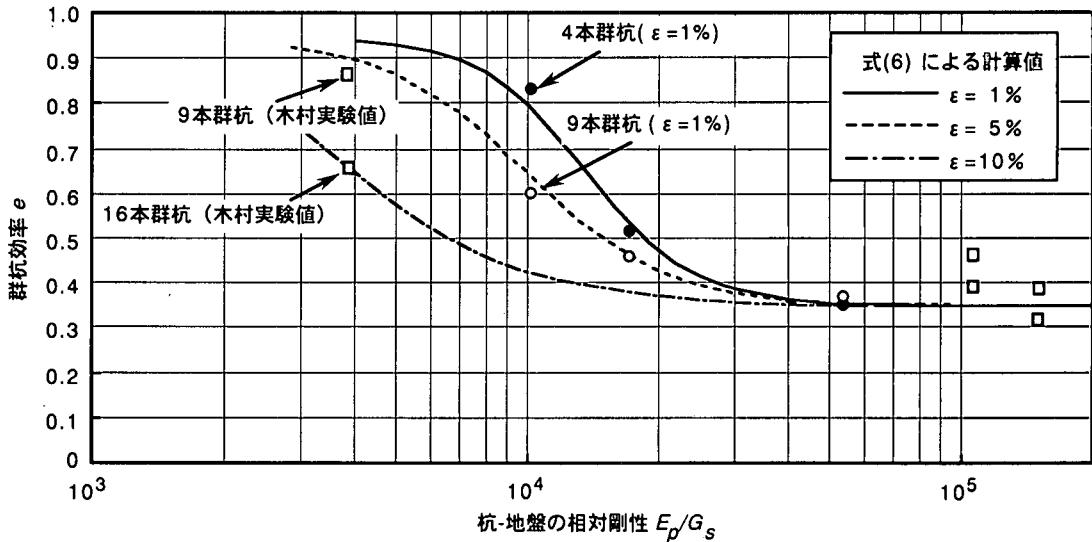


図-20 群杭効率と杭・地盤の相対剛性 (1%)

なるにつれて、群杭後列の荷重分担率は大きくなり、地盤強度が大きくなるほどその傾向は顕著となる。地盤強度が十分に大きい場合には、群杭前列と後列とで、ほぼ均等に荷重を受け持つことが分かる（後列の荷重分担率が、ほぼ1となる）。

図-16に9本群杭の場合の荷重分担率を示す。4本群杭と同様の傾向を示していることが明らかになる。

図-17に4本群杭（●, ○, ○）と9本群杭（▲, △, △）の後列の荷重分担率の比較を示す。ここから、地盤強度が小さい場合（ $s=1$ ）には、4本群杭（●）でも9本群杭（▲）でも荷重分担率にほとんど差はないが、地盤強度が大きくなる（ $s=2, 3$ ）に従って、4本群杭（●:  $s=2$ , ○:  $s=3$ ）の方が9本群杭（△:  $s=2$ , △:  $s=3$ ）よりも荷重分担率が大きくなることがわかる。さらに、横軸に示すフーチング変位率  $\epsilon$  が大きくなるほど（載荷荷重が大きくなるほど）、荷重分担率は大きくなる。すなわち、式(3)からわかるように、前列杭の負担が相対的に小さくなることも確認できた。

## 5. 群杭効率

### (1) 群杭効率の実験値

群杭効率  $e$  は、一般に、

$$e = \frac{\text{同一変位における群杭全体の荷重}}{\text{同一変位における杭頭固定単杭荷重} \times \text{群杭本数}} \quad (4)$$

で与えられる<sup>8)</sup>。

図-18の●, △と□印は、4本群杭の実験における群杭効率  $e$  を、フーチング変位率  $\epsilon = 1\%, 5\%, 10\%$  ごとに、杭と地盤との相対剛性  $E_p/G_s$  について示したものである。ここに、 $E_p$  は杭のヤング係数、 $G_s$  は地盤のせん断弾性係数である。

図によれば、相対剛性  $E_p/G_s$  の増大（地盤剛性  $G_s$  が小さくなる）につれて、群杭効率は低下する。同様にフーチング変位率  $\epsilon$  が大きいほど（載荷荷重が大きいほど）、群杭効率  $e$  は小さく、その低下傾向も小さい。相対剛性  $E_p/G_s$  が十分に大きいと（地盤剛性  $G_s$  が十分に小さいと）、フーチング変位の大小に関わらず、群杭効率はある一定値に収束する傾向が見られる。

図-19の●, △と□印（それぞれ、 $\epsilon = 1, 5, 10\%$ ）は、9本群杭の実験値を示したものである。図から4本群杭の場合と同様な低下傾向を示しているが、相対剛性に対する群杭効率の変化は、4本群杭の場合より鈍いことがわかる。

図-20の●と○印は、これらの関係をより明らかにするために、フーチング変位率  $\epsilon$  が1%の時の4本群杭と9本群杭の群杭効率  $e$  を比較のために、同じ図上に示したものである。

杭本数が多くなるほど、群杭効率  $e$  は小さくなり、相対剛性  $E_p/G_s$  の影響を受けにくくなることがわかる。しかも、相対剛性  $E_p/G_s$  が十分に大きくなると、9本群杭と4本群杭の群杭効率  $e$  は同じ値、0.35に収束する傾向を有する。

### (2) 群杭効率の予測式の提案

上述の（1）にしたがえば、群杭効率  $e$  は、相対剛性

表-3 群杭効率の比較

研究者	4本杭の群杭効率	条件	文献番号
玉置ら	0.568	$k=1, R=2.5, m=2, n=2$	8)
脇田	0.660	$a=0.75, b=0.75, R=2.5, m=2, n=2$	10)
山肩ら	0.704	$R=2.5, m=2, n=2$	14)
岡田ら	0.80	$R=2.5, m=2, n=2$	15)
建築業協会基礎部会	0.58	実験値	16)

ただし、 $k$ :杭頭固定度、 $R$ :杭間隔と杭径の比、 $m$ :加力方向の杭本数、 $n$ :加力方向と直角方向の杭本数、 $a$ 、 $b$ :定数である。

$E_p/G_s$ 、フーチング変位率 $\epsilon$ 、群杭本数 $n$ に依存し、

$$e = f(E_p/G_s, n, \epsilon) \quad (5)$$

で表すことができそうである。

$E_p/G_s$ が十分大きい場合には、 $e$ は $\epsilon$ に収束し、かつ、それが小さい場合には $e$ が1.0に収束することを考慮し、

$$e = \frac{\zeta}{\eta + \kappa(E_p/G_s)^\lambda} \mu + \xi \quad (6)$$

を満足するような実験式を求めた。ここに、 $\zeta$ 、 $\eta$ 、 $\kappa$ 、 $\lambda$ 、 $\mu$ 、 $\xi$ は杭本数 $n$ 、フーチング変位率 $\epsilon$ の関係、あるいは定数である。

実験値を満足するように、 $\zeta$ ～ $\xi$ を求めるところになった。

$$\left. \begin{array}{l} \zeta = 11.67 \\ \eta = 19.5 \\ \kappa = 1.02 \times 10^{-20} \times n^{22.2} \\ \lambda = 5.67 \times n^{-0.684} \\ \mu = 1.077 - 0.077\epsilon \\ \xi = 0.35 \end{array} \right\} \quad (7)$$

式(6)を用いてフーチング変位率 $\epsilon = 1, 5, 10\%$ について傾向線を描いたものが図-18～図-19の実線、破線、および一点鎖線である。式(6)は、ほぼ実験値を満足する傾向線を与えることを示している。

図-20は、フーチング変位率 $\epsilon = 1\%$ で、群杭本数が $n = 4, 9, 16$ の例を式(6)により描いたものである。●と○印は本実験における4本群杭と9本群杭の結果を示した。さらに図中には、木村ら<sup>25)</sup>が模型実験で求めた砂質地盤における9本群杭(□印)と16本群杭(■印)の群杭効率と相対剛性の関係も示した。木村らのおこなった実験は、砂地盤を対象とし、杭径20～

125 mm、杭長44～445 cm、杭本数4本、9本、16本である。また、杭の材料としては、アルミ、塩ビ、鋼を用いた。これらのことから、木村らの実験と本実験の実験条件は一致しないところがあるが、傾向的には式(6)の曲線は、木村らの実験値に近似していると考えてもよい。

なお、群杭効率については、上述の木村らの実験値以外に、玉置らの式をはじめ多くの実験式、あるいは実験図表が提案されている。本論における粘性土地盤の実験結果のうち4本群杭に着目してこれらの式あるいは図表をもちいて、群杭効率を計算してみると表-3のようになる。

しかし、表-3に示す群杭効率の値は、杭間隔、杭径、杭本数、杭配列、杭頭固定度などのパラメーターのみによって表されるもので杭頭変位率 $\epsilon$ 、相対剛性 $E_p/G_s$ などを考慮したものではない。したがって、地盤の強さやひずみに対しては表-3の値は一定値となる。式(6)によってフーチング変位率 $\epsilon$ 、群杭本数 $n$ 、相対剛性 $E_p/G_s$ のそれぞれ任意の値に対して、群杭効率 $e$ を計算することが可能である。しかし、木村らが示すように、実際の現場における相対剛性 $E_p/G_s$ の範囲は $10^4 \sim 10^5$ の範囲<sup>25)</sup>であることから、式(6)の適用範囲としては、 $10^4 < E_p/G_s < 10^5$ である。

## 6. 結論

粘性土の地盤強度を変えて実施した群杭の模型実験の結果は、次のようにまとめることができる。

- 1) フーチング変位率 $\epsilon$ が大きくなるにつれて、群杭後列の荷重分担率は大きくなる。その傾向は、地盤強度の増大とともにあって、顕著となる。
- 2) 地盤強度が十分に大きくなるにしたがって、群杭の前列と後列で、ほぼ同等の荷重分担率になる。
- 3) 地盤強度が小さい場合には、4本群杭と9本群杭の

- 荷重分担率にほとんど差はない。しかし、地盤強度の増大にともない、前者の荷重分担率が後者よりも大きくなる。
- 4) 相対剛性 $E_p/G_s$ の増大につれて、群杭効率 $e$ は低下する。同様にフーチング変位率 $\epsilon$ が大きいほど、群杭効率 $e$ は小さく、その低下傾向も小さい。
  - 5) 相対剛性 $E_p/G_s$ が十分に大きいと、フーチング変位率 $\epsilon$ の大小に関わらず、群杭効率 $e$ はある一定値に収束する。
  - 6) 相対剛性 $E_p/G_s$ に対する群杭効率 $e$ の変化は、9本群杭のほうが4本群杭の場合より鈍い。すなわち、杭本数が多くなるほど、群杭効率 $e$ は地盤剛性 $G_s$ の影響を受けにくくなる。
  - 7) 式(6)によって、フーチング変位率 $\epsilon$ 、群杭本数 $n$ 、および相対剛性 $E_p/G_s$ に対する群杭効率 $e$ を求めることができる。

**謝辞：**本研究の発端は、國士館大学工学部において、故高田清美助教授によって与えられたものである。ここに生前のご指導に謝意を表します。

貴重な資料を提供していただきました京都大学の木村亮先生に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（I共通編、IV下部構造編）, 1996.
- 2) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物・抗土圧）, 1996.
- 3) 平山英喜、岡田鉄三：基礎設計における基準の背景と用い方—杭基礎の設計（水平抵抗），土と基礎，40-7, pp.75-79, 1992.
- 4) 木村嘉富、前田良刀、松井謙二、横田康行：拡張変位法による杭基礎の実用安定計算法について、土木学会論文集, No. 568/III-39, pp.79-87, 1997.
- 5) 木村亮、幸左賢二、伊藤恭平、坂本眞徳：場所打ち杭の大変形水平挙動に関する研究、構造工学論文集, Vol. 39A, pp.1385-1394, 1993.
- 6) 斎藤亮、飯古道則、五瀬伸吾、易鋒：杭基礎の水平方向大変形時の挙動に関する研究、構造工学論文集, Vol. 39A, pp.1395-1408, 1993.
- 7) 高橋邦夫、菊池喜昭、鈴木操：大変形繰返し荷重を受ける単杭の水平抵抗特性、構造工学論文集, Vol. 38A, pp.1409-1416, 1992.
- 8) 玉置脩、三橋晃司、今井常雄：水平抵抗における群杭効率の研究、土木学会論文集, No. 192, pp.79-89, 1971.
- 9) 長谷川明機、河原満：粘性土地盤の水平方向群杭模型試験、第7回土質工学研究発表会講演集, pp.467-470, 1972.
- 10) 脇田英治：水平力を受ける群杭基礎の二次元有限要素法による解析、土と基礎, pp.35-42, 1979.
- 11) 芳賀孝成、崎本純治、土屋幸三郎：群杭の水平抵抗に関する模型実験、第16回土質工学研究発表会講演集, pp.997-1000, 1981.
- 12) 西田義親、北哲郎、山本善行、北川伸衛：群杭の水平抵抗分担率と群杭効果に関する一実験、金沢大学工学部紀要第7巻第1号, pp.33-43, 1973.
- 13) 竹下貞雄、安田祐作：杭の水平地盤反力係数に関する模型試験、第21回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1207-1208, 1986.
- 14) 山肩邦男、富永晃司、小椋仁志：砂地盤中の模型群グアイの水平加力試験結果（クイ間隔との関係）、第11回土質工学研究発表会講演集, pp.621-624, 1976.
- 15) 岡田勝也、安田祐作、佐藤昌彦、那須誠：群杭の動的水平載荷試験における群杭効果、第23回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1445-1446, 1988.
- 16) 建築業協会基礎部会・杭の水平耐力分科会編：杭の水平載荷試験結果に関する調査報告書, pp.71-78, 1979.
- 17) 木村亮：水平力を受ける群杭の挙動に関する基礎的研究、京都大学学位論文, 1993.
- 18) 若井明彦、鶴飼恵三：単杭の水平載荷挙動に関する模型実験と解析、土木学会論文集, No. 517/III-31, pp.159-168, 1995.
- 19) 近藤正弘、奥村文直、西村昭彦、青木一二三：大変形時の群杭基礎の挙動に及ぼす水平地盤抵抗の影響、第31回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1719-1720, 1996.
- 20) Broms, B. B.: Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils, Proc. ASCE, Vol. 90, SM2, pp.27-62, 1964.
- 21) Randolph, M. F.: The response of flexible piles of lateral loading, Geotechnique, Vol. 31, No.2, pp.247-259, 1981.
- 22) 小倉正己、竹下貞雄、渕上俊宏、安田祐作、金井正好：クイの水平支持力に関する研究、鉄道技術研究所速報, No. A-83-43, pp.1-86, 1983.
- 23) 土質工学会：杭基礎の設計法とその解説, 1985.
- 24) 岡田勝也：鉛直H鋼杭の水平載荷試験、鉄道技術研究所速報, No. 70-201, pp.1-43, 1980.
- 25) 木村亮、柴田徹：大型土槽を用いた群杭の水平抵抗に関する模型実験、土と基礎, 40-5, pp.41-46, 1992.

(1999.5.14受付)

# AN EXPERIMENTAL STUDY ON LARGE LATERAL DEFORMATION BEHAVIOR OF PILE GROUPS IN A GROUND OF COHESIVE SOIL

Isamu ONO, Kiyoomi YAMADA, Yukio KIKUTA, Sei MATSUURA  
and Katsuya OKADA

Lateral loading tests on pile groups of four and nine piles arranged on square grids were performed using a model ground of cohesive soil, which resulted in large deformation of piles. In addition, lateral loading tests on a single pile were also performed in order to clarify the efficiency of pile groups. Based on the results, the load burden ratio for each row of grouped piles was calculated, and the large lateral deformation behavior of the piles was studied. It was found that the group of four piles was more significantly affected by the ground strength than the group of nine piles. Furthermore, empirical equations to derive the efficiency of pile groups were proposed based on the footing displacement ratio, number of piles in a group, and relative rigidity between the ground and piles.