

## 群杭の水平抵抗に関する実験的研究

木村 亮・柴田 徹・八嶋 厚

### EXPERIMENTAL STUDY FOR Laterally LOADED PILE GROUP

By Makoto KIMURA, Toru SHIBATA and Atsushi YASHIMA

#### Synopsis

Laterally loading tests are made on large scale model fixed-headed pile groups to clear up the relationship between model test and prototype test. The test piles (diameter; 16.52 cm, length; 4.45 m) are embedded in loose sand made by means of multiple sieves method. Data of displacement and distribution of load for 2×2 and 3×3 Box arrangement pile are presented to compare with the theoretical predictions based on the method developed by M.F.Randolph (1981). To research the effect of earth pressure acting on the front of footing, the laterally loading tests of embedded footings are also carried out.

#### 1. ま え が き

構造物の支持杭の設計には、群杭の水平抵抗に対する考え方が重要なポイントとなるが、この問題は杭群に囲まれた土の挙動、杭頭の拘束条件、荷重分担率等複雑な要因を含んでおり、未解明の点を多く残している。一般に、杭中心間隔が狭くなるほど、水平支持力の低減は顕著となるが、果たして杭の水平抵抗に対する低減率をどのように評価すればよいのか、不明である。

水平力を受ける群杭の問題に対して、Fig. 1 に示すように模型実験・原型実験・理論解析の3つのアプローチがとられてきたといえる。原型実験は実用上最も有効な定量的結果を導くが、規模が大きくなるために経費の点で制約を受ける。また模型実験は、同一の目的や実験条件に対して数多くの要因を変化させることができるので有効な手段ではあるが、実物杭に応用するためには相似則を一致させる必要があり、重力(1g)下における模型実験では定性的結果を示すにすぎない。

筆者らは、群杭の水平抵抗に関する一連の研究<sup>1),2),3)</sup>を進めており、現在までに杭と地盤の相対剛性を広い範囲で変えるように配慮した、直径2cmの杭を用いた模型実験を実施した。そして解析手法が幅広い相対剛性のもとでの結果を定量的にカバーできれば(Fig. 1の③で表される流れ)、実際の設計への指針(Fig. 1の④の流れ)となり得ると判断し、杭頭自由の群杭模型実験において、杭配置、杭本数、杭中心間隔および杭剛性を種々に変化させたとき、これらの各要因が群杭効率、荷重分担率にどのような影響を与えるかを検討した。また筆者

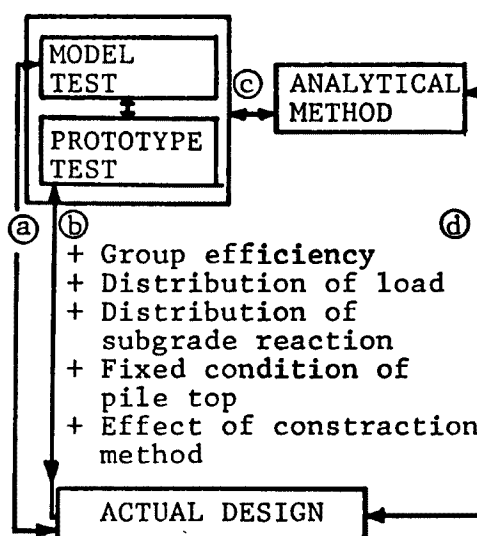


Fig. 1 Three approaches of pile groups' study.

らが開発した擬似三次元有限要素解析<sup>4)</sup>と, Randolph の提案する **PIGLET**<sup>5)</sup> は実験結果を概ね説明し得た。

本研究の目的は, 大型の土槽を用いることによって, **Fig.1** に示す小さい模型実験と原型実験との中間的な杭の水平載荷試験を実施し, 小さい模型実験の結果と比較検討することにある。つまり, 模型実験と原型実験の関係をより明確にし, 研究アプローチの流れをスムーズにすることを目的としている。また現在の設計法では, 群杭基礎に作用する水平力は杭体だけで抵抗するとされているが, 実際はフーチングの根入れがある場合, フーチング前面および側面の抵抗も無視しえないと思われる。そこで, 群杭基礎は杭とフーチングの協同作業により水平力に抵抗するという考えに基づき, それらの荷重分担を求める試験も合わせて実施した。

## 2. 実験の方法

### 2.1 実験装置

本実験に用いた実験土槽は, **Fig.2** に示すように, 内のり 6m×4m, 深さ 5m のコンクリート製の大型土

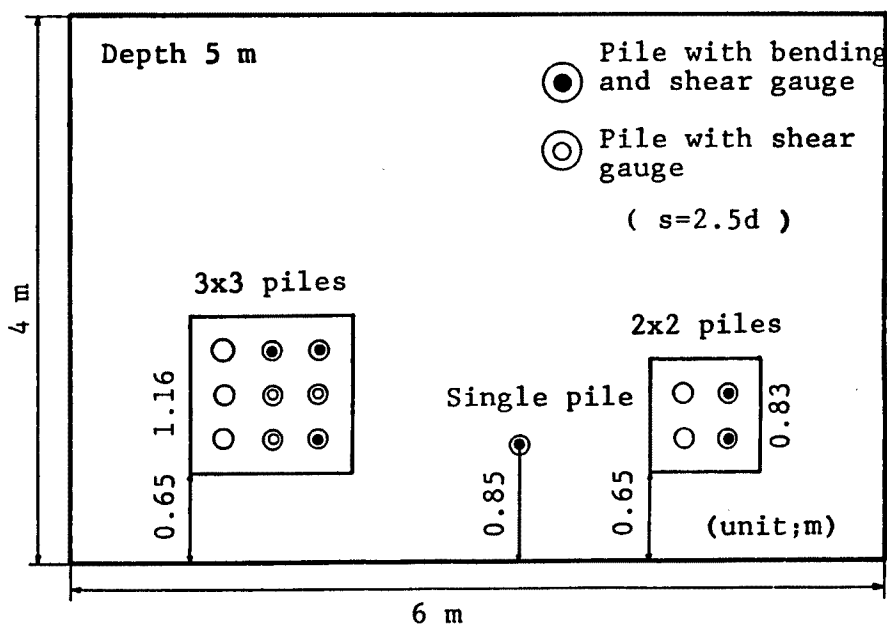


Fig. 2 Sketch of soil tank (plane figure).

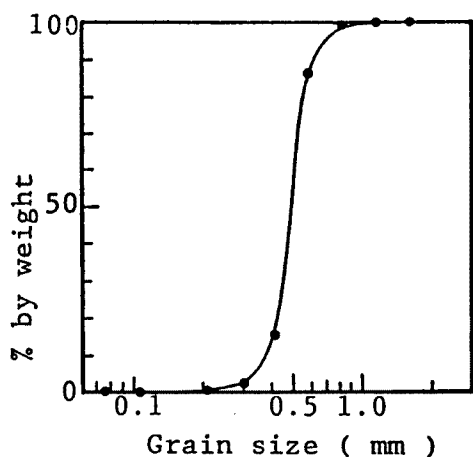


Fig. 3 Grain size distribution.

Table 1 Properties of model ground

$D_{50}$	0.36 mm
$U_c$	1.34
$\gamma_{max}$	1.62 gf/cm <sup>3</sup>
$\gamma_{min}$	1.29 gf/cm <sup>3</sup>
$e_{max}$	1.02
$e_{min}$	0.63
$G_s$	2.66

槽である。地盤材料には、Fig. 3 に示す粒径加積曲線を持つ 5 号硅砂を用いた。物性値をまとめて Table 1 に示す。Fig. 4 に示すように模型杭は、長さ  $l=4.45\text{m}$ 、直径  $d=16.52\text{cm}$ 、肉厚  $t=3.8\text{mm}$  の鋼管杭で、地盤の  $k$  値を  $1.0\text{kgf/cm}^3$  と仮定すると  $\pi/\beta=4.2\text{m}$  となり、長い杭として取り扱える。杭本数は 1, 4, 9 本の 3 種類である。杭頭条件は鋼管 A 種の杭頭処理<sup>9)</sup> に従い、高さ 50cm のフーチング内に杭頭を 20cm 入れることによって固定条件とした。なお、フーチングはあらかじめ厚さ 5mm の鉄板を所定の箱型に成形しておき、1 日強度  $400\text{kgf/cm}^2$  に配合したコンクリートの中に充填する。

杭体には、Fig. 4 に示すように曲げゲージを 7 点、またフーチング底面下 10cm に杭体に作用するせん断力を測定するためのせん断ゲージを貼りつけた。Fig. 2 に示すように、例えば 9 本杭の場合、すべての杭に曲げゲージとせん断ゲージが貼られているわけではなく、載荷方向に向かって左右対称な杭は同じ挙動をすると仮定し、右側 6 本の杭を計測杭としている。また、6 本中 3 本は杭頭のせん断力だけを測定する杭である。

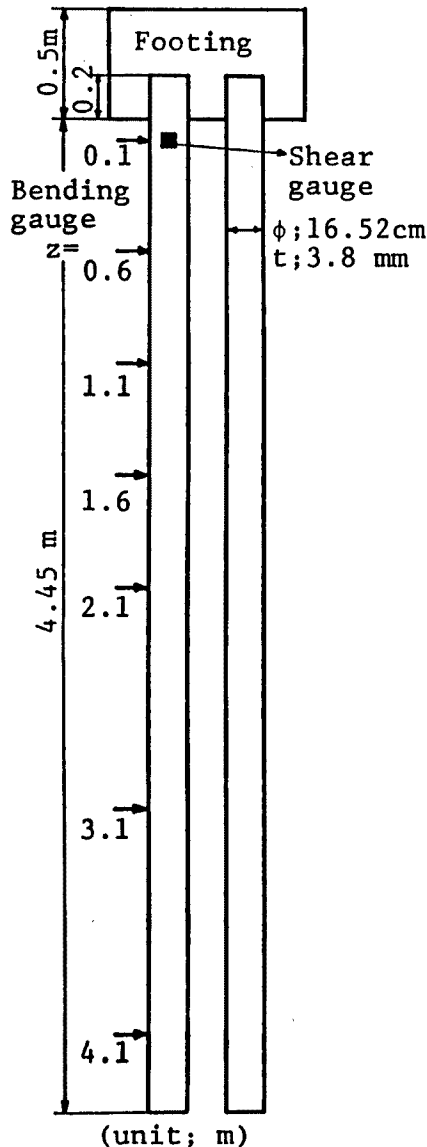


Fig. 4 Sketch of model piles and footing.

水平載荷試験は、土槽の側壁を反力壁として、Fig. 5 に示すようにフーチングの中心高さ (25cm) に載荷する。載荷方法は 20t 用油圧ジャッキにより、球座、ロードセル、台座を通してフーチングに水平載荷する。測定項目は、各ゲージの値、フーチングの鉛直変位 (2点)、水平変位 (2点、載荷位置と同じ高さ) である。

## 2.2 地盤作成方法

杭体が 2 cm のモデル杭の実験では、土槽が小さいため地盤をボイリングさせて均質な地盤を作成した<sup>2),3)</sup>。本実験では地盤の土量が  $120\text{m}^3$  と大規模であり、地盤を作成してから杭を打つ打ち込み杭ではなく、あらかじめ土槽内に杭を建て込んだあと地盤を作成する埋め込み杭を想定している。そのため、一定まき出し厚の地盤を締固める方法と、大型のふる

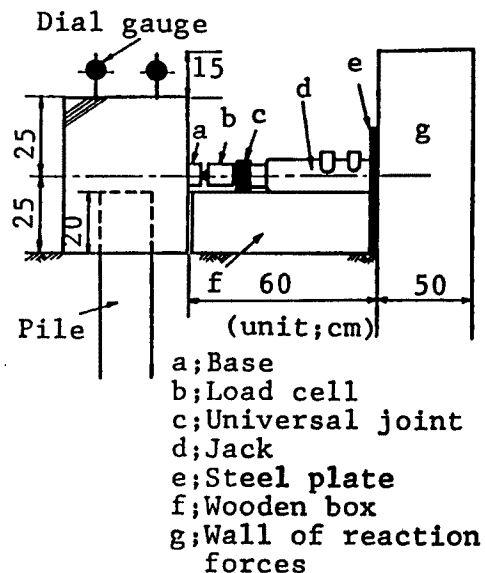


Fig. 5 Sketch of laterally loading apparatus.

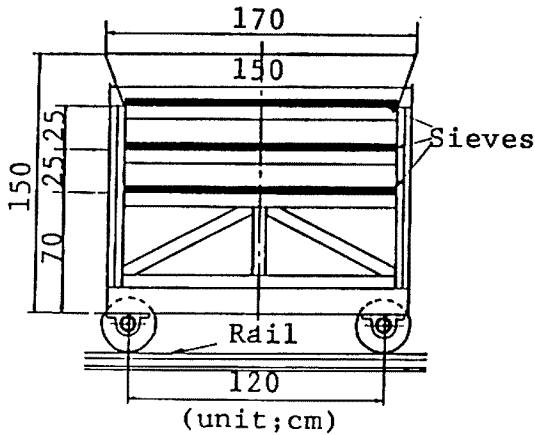


Fig. 6 Multiple sieves.

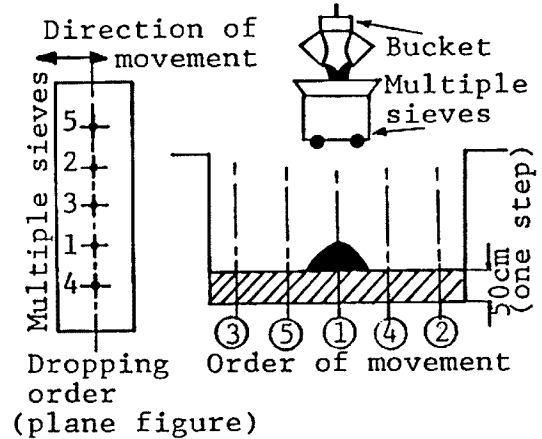


Fig. 7 Procedure for making up ground.

いによって地盤を作成する方法について検討した。地盤を締固める方法によると、群杭間の土の密度が均一にならない可能性があり、仕事量が120人時間と多大な労力を要することから今回は Fig. 6 に示す大型の多重ふるいを作成し、ふるい分けによる地盤作成方法を採用した。この多重ふるいによると、仕事量は30人時間となる。多重ふるいは、高さ 1.5m、幅 1.7m、奥行き 5.3m で、内部に3段のふるいを取り付け、レール上を走行し移動できる。ふるいの材質は溶接金網で形状は正方形網目である。また網目寸法は上段から 7.5cm, 5cm, 5cm, 溶接金網の線形はそれぞれ 4.0mm, 3.2mm, 3.2mm とした。予備実験によって砂が金網の目をスムーズに通るかどうかが検討された。地盤材料を土槽内に投入および搬出する場合は、自走式の門型クレーンに取り付けられた電動クラムシェルバケットを用いた。このバケットの1回の運搬量は最大 0.6m<sup>3</sup> である。

杭を土槽内に建て込んだあと地盤を作成するが、その際に1ステップのまき出し高さを 50cm とした。1ステップの作成手順は以下のである。

- (1) 多重ふるいを Fig. 7 に示す所定の位置にセットする。番号は多重ふるいの幅が 1.7m しかないため、ふるいを移動させる順序である。
- (2) 各位置で多重ふるい上の 1~5 の順に 0.6m<sup>3</sup> ずつ地盤材料をかたよらないように投入する (Photo. 1 参照)。1回の投入ごとに高さ 60cm、半径 1.5m の円すい形の山ができる。必ずしもまき出し厚さは 50cm

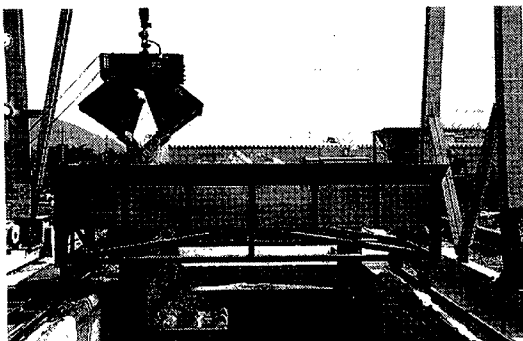


Photo. 1 Multiple sieves and procedure for making up ground.

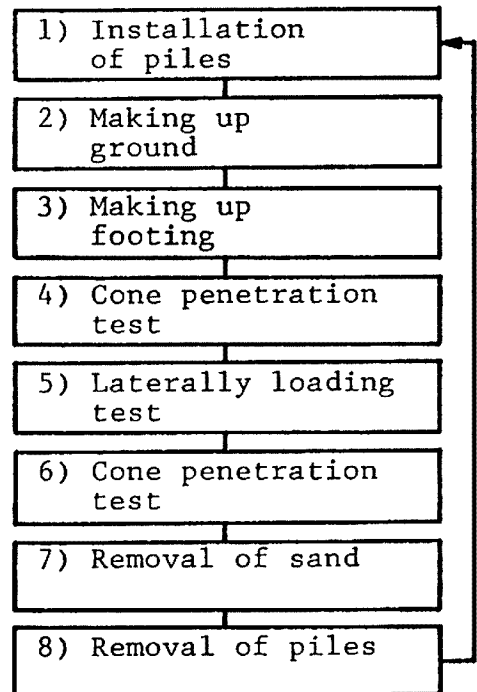


Fig. 8 Procedure of experiment.

一定に保てないが、ほぼ水平になるように少量の地盤材料を適宜投入する。

- (3) ①～⑤の順に順次多重ふるいを移動させ、(2)の操作を繰り返す。最終的に投下量が少ないと判断される部分には余分に投入する。
- (4) (1)～(3)のステップを9ステップ（計 4.5m）繰り返したあと、とんぼとスコップで地盤を平坦にしたのち、パイプロプレートで地表面を一定の締固め度で締固める。

### 2.3 実験手順

本実験の実験手順は Fig. 8 に示すとおりである。以下に各項目について詳細を説明する。

- 1) 杭の建て込み；杭体の建て込みは Fig. 9 に示す手順で行った。
  - (a) ゲージの位置を確認し、杭をクレーンで水平につりながら、杭頭をあらかじめ作成しておいた杭頭固定金具にボルトで接合する。ボルトを締め終った段階で、杭先端を鉄筋で図中下側の杭と溶接する。
  - (b) すべての杭を水平に固定したあと、杭頭固定金具をクレーンで土槽内につりこむ。土槽底には、杭先端固定キャップ（ $\phi=19.07\text{cm}$ ,  $t=5\text{mm}$  の鋼管杭を長さ 18cm に切ったもの）をアンカーボルトで所定の位置に固定しておく。杭先端を固定した鉄筋を切って、キャップの中に群杭を静かにおろす。
  - (c) 各杭が鉛直に保たれていることを確認したのち、杭頭金具につけたロープで群杭を固定し、キャップ内にモルタルを注入する。

以上(a)～(c)の手順を繰り返して、1, 4, 9本杭を土槽内に建て込んだ（Photo. 2 参照）。
- 2) 地盤の作成；地盤の作成は 2.2 に示すとおりであるが、地盤作成時に含水比、間隙比測定のため直径 5cm 高さ 10cm のカップを地盤中に20個埋め込んだ。
- 3) フーチングの作成；鉄板で作ったフーチング外枠を杭が 20cm フーチング内に入るように挿入し、内

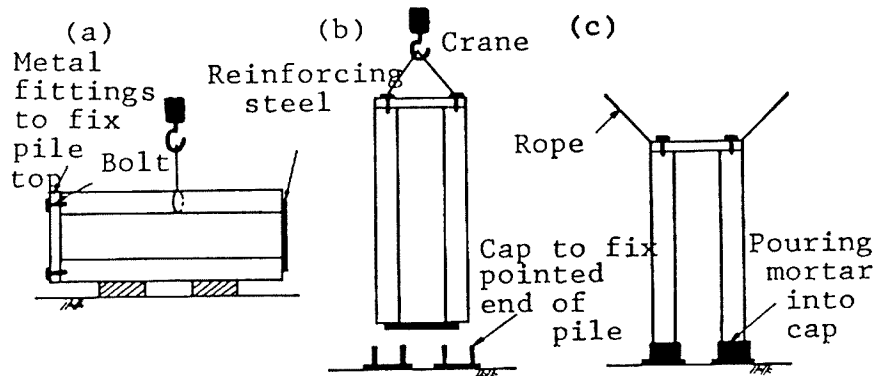


Fig. 9 Procedure for installation of piles.

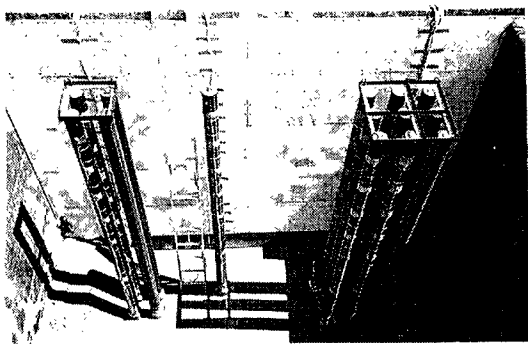


Photo. 2 Installation of piles.

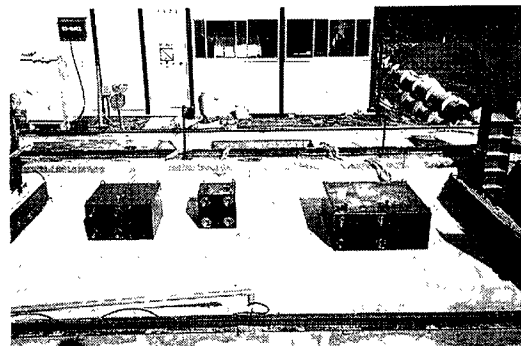


Photo. 3 Footing and model ground.

部にコンクリートを打設する (Photo. 3 参照)。フーチング端から近接する杭中心までの距離は、すべての場合杭径の1.5倍 (25cm) とした。

- 4), 6) コーン貫入試験; 地盤の均一性, 強度定数を知るために, 試験前 (6ポイント) と試験後 (3ポイント) でオランダ式2重管コーン貫入試験を実施した。測定位置は地表面から深さ 25cm ずつである。
- 5) 水平載荷試験; 実施した水平載荷試験は Table 2 に示す12種類でパラメータは, 杭本数, 杭中心間隔, フーチングの抵抗条件である。ここで表中フーチング前面土圧有りという試験はフーチングの根入れを考慮した試験である。Fig. 10 左側に示すように, 現在の設計法では杭基礎に作用する水平力Hは原則として杭体で抵抗させ, フーチング前面, 側面, 底面の抵抗は無視している。底面は沈下により空隙ができる可能性があり, 抵抗を期待できないが, 根入れの影響は大きく, フーチングも水平力を分担しているはずである。そこで, 右側に示すようにフーチング前面に土の無い場合と, 前面に土を盛り土圧の抵抗を期待した場合の試験を行った。この場合, Fig. 11 に示すようにフーチング前面に  $\phi=7.8$  cm, 容量 5kgf/cm<sup>2</sup> の土圧計を4個挿入し, 前面に作用する土圧を測定した。土圧有の実験は土圧無の実験後, 新たに砂を前面にだけ投入し同一地盤で再び載荷した。

載荷ステップは杭1本当たり 100kgf ずつ載荷し, 300kgf, 600kgf で除荷し再載荷した。フーチングに前面土圧が有る場合は水平変位が 3 cm になるまで載荷した。載荷方法は2.1に示したとおりであるが, 載荷時間は1ステップ5分とし, 1分, 3分, 5分でそれぞれ計測し, 結果をひずみ計測器に印字させ

Table 2 Kinds of laterally loading test

Ground	Central space of pile(s)	pile arrang.	Free standing length(h)	Footing condition
A	/	Single pile	0 cm	Excluding earth pressure, 50 cm×50 cm, 330 kgf
		Single pile	4 cm	Including earth pressure, 50 cm×50 cm, 330 kgf
	s=2.0d	2×2 piles	0 cm	Excluding earth pressure, 83 cm×83 cm, 860 kgf
		2×2 piles	4 cm	Including earth pressure, 83 cm×83 cm, 860 kgf
		3×3 piles	0 cm	Excluding earth pressure, 116 cm×116 cm, 1665 kgf
		3×3 piles	4 cm	Including earth pressure, 116 cm×116 cm, 1665 kgf
B	/	Single pile	4 cm	Excluding earth pressure, 50 cm×50 cm, 340 kgf
		Single pile	4 cm	Including earth pressure, 50 cm×50 cm, 340 kgf
	s=2.5d	2×2 piles	4 cm	Excluding earth pressure, 91 cm×91 cm, 1064 kgf
		2×2 piles	4 cm	Including earth pressure, 91 cm×91 cm, 1064 kgf
		3×3 piles	4 cm	Excluding earth pressure, 132 cm×132 cm, 2203 kgf
		3×3 piles	4 cm	Including earth pressure, 132 cm×132 cm, 2203 kgf

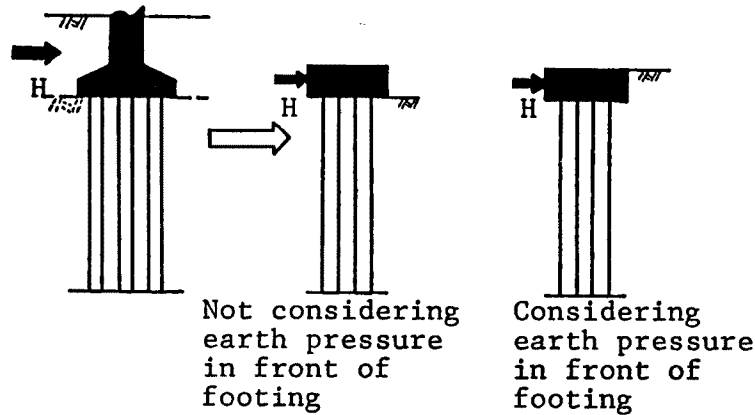


Fig. 10 Condition of footing.

た。

7), 8) 砂出し・杭の撤去; 含水比・間隙比計測カップを回収しながら, 電動クラムシェルバケットと人力で砂出しを行った。砂をすべて出したのち, 杭先端固定キャップのアンカーボルトをとり, フーチングと杭体を撤去した。

杭中心間隔  $s=2.0d$  と  $2.5d$  の実験をそれぞれ1サイクルとし, 上述した1)~8)のサイクルを2回実施した。実験期間は1サイクル約2週間である。以後 Table 2 に示すように,  $s=2.0d$  で杭を建て込んだ地盤をA地盤,  $s=2.5d$  で杭を建て込んだ地盤をB地盤と略称する。

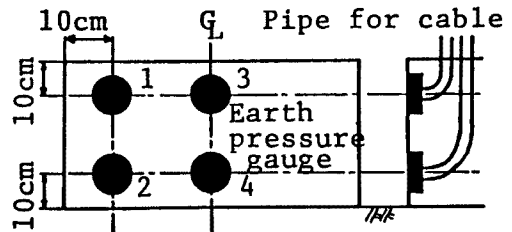


Fig. 11 Earth pressure gauge on footing.

### 3. 実験結果と考察

実験結果は紙面の制約上, 多重ふるいを用いて作成した地盤の均一性の検討, 各実験の荷重-変位関係, 荷重分担率, 地盤内のモーメント, 地盤反力分布等について順を追って示す。

#### 3.1 地盤の均一性

初めに, 地盤の作成時に埋め込んだ計量カップによる含水比, 間隙比の深さ方向分布を Fig. 12 (a), (b)に示す。縦軸の深さ  $z$  はフーチング底面を  $z=0m$  として表示している。図中△印は, 各深さで直径 20cm 高さ 20cm の円柱モールド内に, 砂をサンプリングして求めた結果である。Fig. 12 (a) の含水比の結果でA地盤と比較して, B地盤の深部の含水比が大きいのは, 深部の地盤作成中降雨があったためで, 図からA, B両地盤の含水比は 5~10%といえる。Fig. 12 (b) には円柱モールドの間隙比の結果のみを示すが,  $e_{max}$ ,  $e_{min}$  の値から多重ふるいによって作成した地盤は非常にゆるい状態で, 相対密度は 0~30%である。

A地盤の, 試験前に実施したコーン貫入試験結果を Fig. 13 (a)に示す。試験位置は図に示すとおりである。白抜き記号は壁面に近い地盤(壁面から 75cm)の貫入抵抗値であるが, 黒記号に比べて小さくゆるい状態になっている。これは地盤作成段階で多重ふるいによって, 壁面近くの地盤を正確に作成することが難しかったためである。黒記号だけに着目すると“く”の字型をした  $q_c$  の分布となっている。また Fig. 13 (b)はB地盤の, 試験前と試験後(各フーチングから 1.4m 前方の位置)の結果を示すが, ほぼ同じ値をとっている。また (a), (b) 両図を比較して, 本試験に用いた地盤作成法により, 場所によらずほぼ再現性の高い

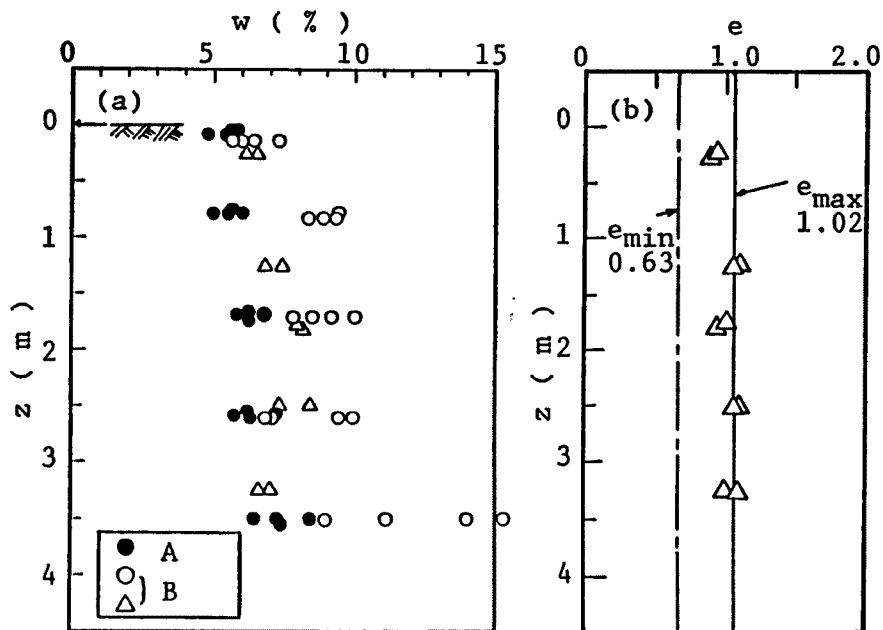


Fig. 12 Distribution of water content and void ratio.

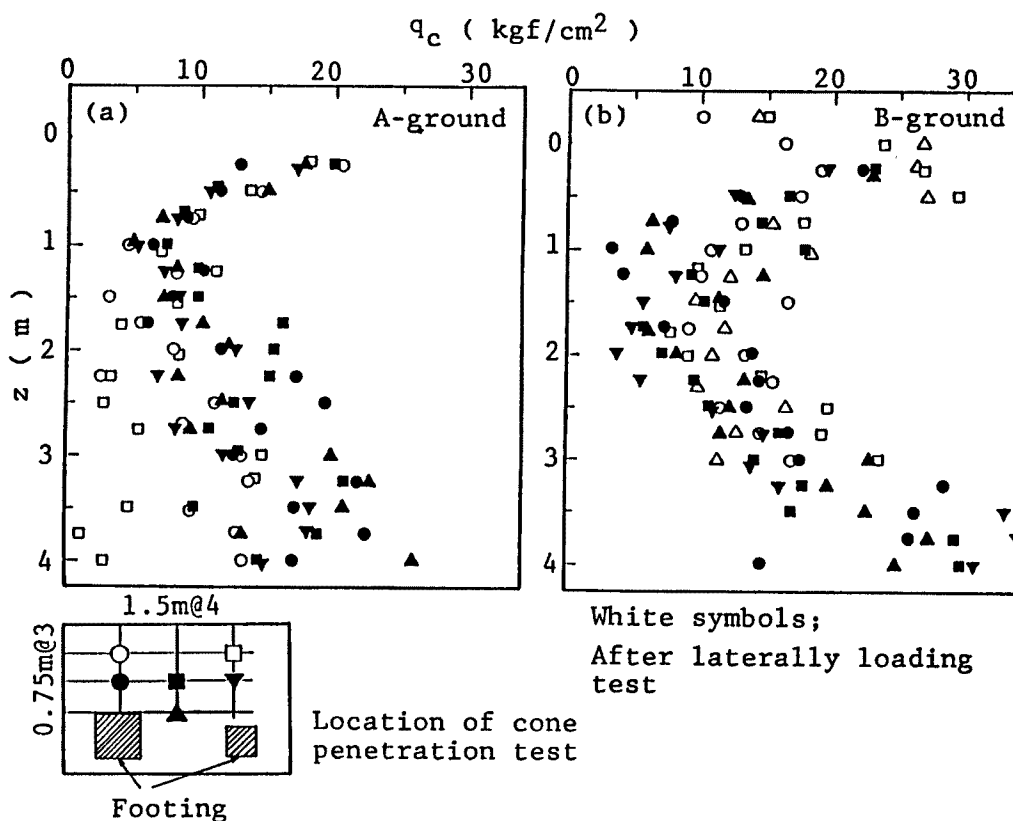


Fig. 13 Distribution of cone bearing capacity.



地盤が作成できたと思われる。

### 3.2 荷重—変位関係

ここでは、フーチングが根入れされていない場合の各実験の荷重—変位関係について、結果を示し考察を加える。

まず初めに Fig. 14 に単杭の荷重—変位関係を示す。これら2本の単杭の載荷試験結果から、B地盤の方がA地盤より変形量が多いので、地盤の剛性が小さいことがわかる。Fig. 13 のコーン貫入抵抗値の分布から、A、B両地盤はほぼ同一の強度定数をもつと推定されるが、600kgf 再載荷時の変位増分を比較すると、B地盤の方が単杭の変位にして1.3mm大きい。以後ことわりのないかぎり、杭1本当りの平均水平力をHとし、H=600kgf 作用時（再載荷）の杭の挙動について考察する。

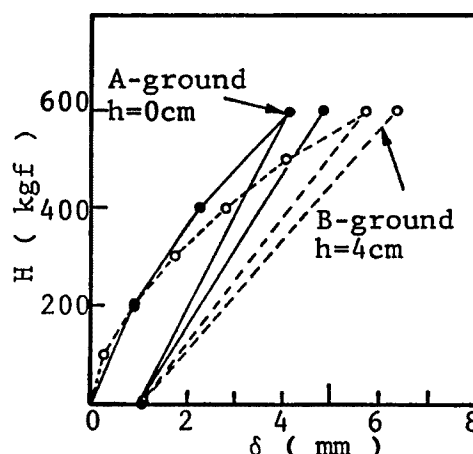


Fig. 14 Load vs. lateral displacement curves for single pile.

実験結果を Randolph の提案式<sup>3)</sup>で解析するために、単杭の載荷試験の結果から地盤定数を決定する。Randolph の解では地盤定数として地表面のせん断弾性係数  $G_0$ 、深さ方向のせん断弾性係数の変化率  $\Delta G/\Delta z$ 、およびポアソン比  $\nu$  が必要である。ポアソン比  $\nu$  を0.33と仮定して、簡単のため  $G_0$  または  $\Delta G/\Delta z$  のどちらか一方がゼロになる地盤定数を求めると、Table 3 のようになる。ここで  $G_0=0\text{kgf/cm}^2$ 、 $\Delta G/\Delta z=0\text{kgf/cm}^3$  となる地盤をそれぞれS型地盤、C型地盤と呼ぶ。表中には参考のため Chang の式による逆算  $k$  値も示した。

ここでA地盤の単杭に関して、杭に作用する曲げモーメント分布の実測値と、Table 3 の値を用いて計算した計算値の比較を Fig. 15 に示す。一般に  $G_0 \neq 0\text{kgf/cm}^2$  かつ  $\Delta G/\Delta z \neq 0\text{kgf/cm}^3$  の条件を満たし、単杭の杭頭変位量が3.37mmになる地盤定数は何種類かある。しかしそれらの地盤定数を用いて計算した地中の曲げモーメント分布は、S型地盤とC型地盤の曲げモーメント分布の中間にくる<sup>3)</sup>。以上のことと Fig. 15 の結果から、20%程度の誤差はあるが、本実験の地盤を以後S型地盤とみなして考察する。

Table 3 Material properties from single pile test

Ground	Displacement of single pile	Calculated displacement	Material properties
A	3.37 mm	3.29 mm	$G_0=0\text{kgf/cm}^2$ , $\Delta G/\Delta z=0.21\text{kgf/cm}^3$ , Ground of S-type
		3.36 mm	$G_0=10.9\text{kgf/cm}^2$ , $\Delta G/\Delta z=0\text{kgf/cm}^3$ , Ground of C-type
		3.40 mm	$k\text{ value}=1.90\text{kgf/cm}^3$ , (Chang's equation)
B	4.67 mm	4.61 mm	$G_0=0\text{kgf/cm}^2$ , $\Delta G/\Delta z=0.14\text{kgf/cm}^3$ , Ground of S-type
		4.62 mm	$G_0=8.0\text{kgf/cm}^2$ , $\Delta G/\Delta z=0\text{kgf/cm}^3$ , Ground of C-type
		4.70 mm	$k\text{ value}=1.33\text{kgf/cm}^3$ , (Chang's equation)

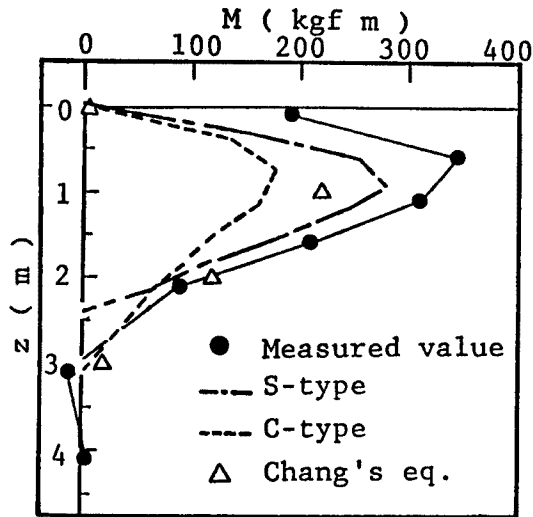


Fig. 15 Bending moment profile for single pile.

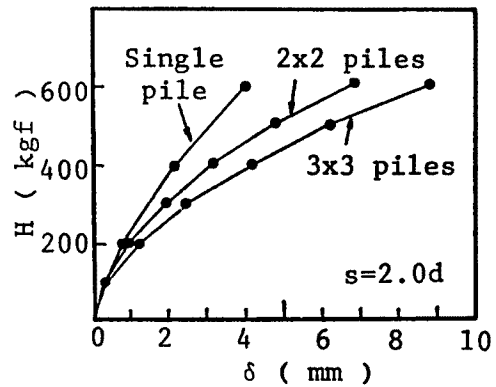


Fig. 16 Load vs. displacement curves ( $s=2.0d$ ).

Fig. 16 はA地盤における、杭本数による荷重-変位関係の違いを表した図である。図から杭1本当りの作用荷重が同じならば、杭本数が多くなるほど、変形は大きくなり、従来からの結果と同じ結論が導かれる。ここで単杭は杭頭自由の条件であるが、4、9本群杭は杭頭固定に近い状態になっていることに注意する必要がある。一般に杭頭自由の方が固定より同じ作用荷重でも変形量は大きく、杭頭固定という仮想的な条件で単杭の載荷試験を実施したとすれば、曲線は左にシフトする可能性がある。そこで杭頭の固定条件をチェックするために、Fig. 17 に各試験の水平力とフーチングの回転角の結果を示す。フーチングの回転角を固定度の1つの指標とすれば、杭本数が増えるほど、また杭中心間隔が大きくなるほど回転角は小さいので、固定度が大きくなるのが分かる。

筆者らは単杭と群杭に各1本当たり平均して同じ荷重が作用する時の、再載荷時の変位量をもって群杭効率を定義した。本実験のように各杭の固定度が違う場合、厳密な議論はできないが Fig. 18 (a), (b)に  $s=2.0d$ ,  $s=2.5d$  における各杭の再載荷時の変位を示す。(a)と(b)で各々4本杭と9本杭を比較すると杭中心間隔が広がるほど変位は抑制される。しかし単杭の挙動は全く逆である。(a)と(b)の自由長はそれぞれ0cmと4cmと若干の違いはあるが、それだけの理由では説明がつかず今後検討を要する。

Fig. 19 は Table 2 のA地盤の地盤定数 ( $G_0=0\text{kgf/cm}^2$ ,  $\Delta G/\Delta z=0.21\text{kgf/cm}^3$ , S型地盤) を用いて、Randolph の提案式によって群杭の変位を単杭の変位から予測したものである。4、9本杭は固定杭として取り扱った。図から Randolph の提案式によると、実験結果をある程度定量的にうまく説明できると思われる。

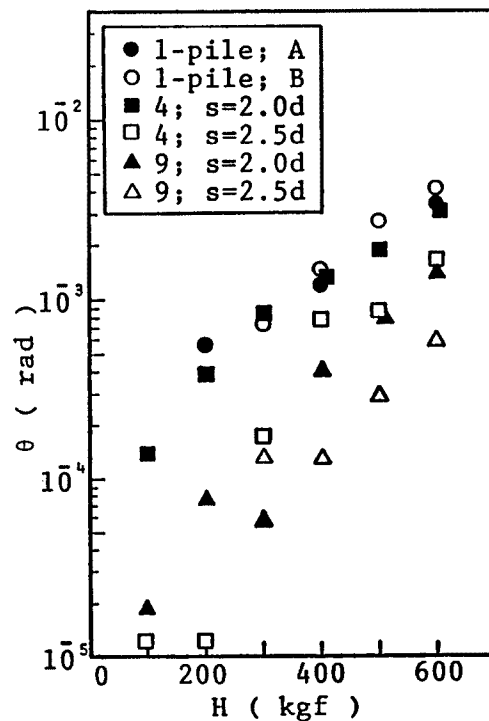


Fig. 17 Load vs. rotational angle of footing.

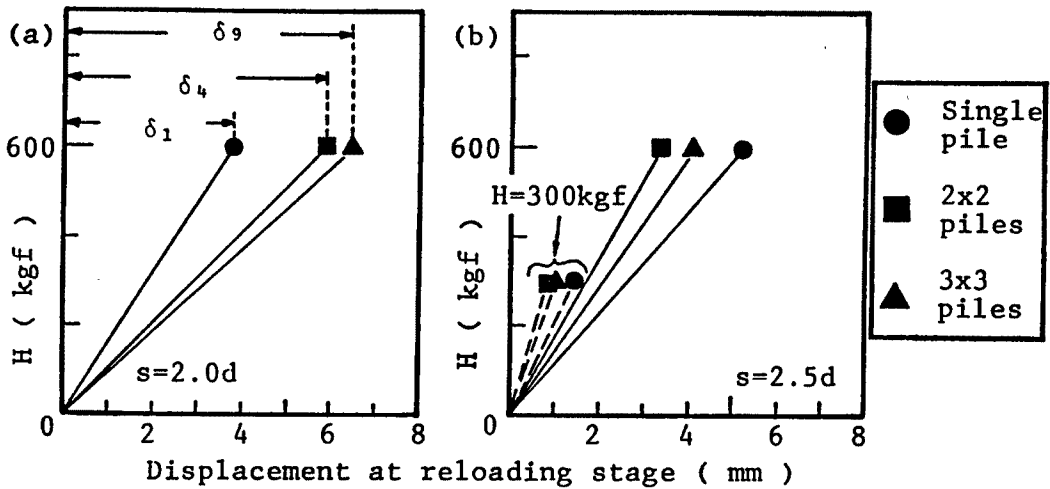


Fig. 18 Load vs. lateral displacement at reloading stage.

3.3 荷重分担率

杭頭（厳密に言えば地表面から 10cm 下）に貼ったせん断ゲージの値から杭に作用するせん断力を求め、各杭の和をとると各ケースとも載荷した水平力にほぼ等しく、誤差は±5%程度であり実験の精度は良好であった。

Fig. 20 (a)に 9 本群杭の各杭に作用する荷重分担率を示す。各杭に図に示す番号付けを行い、縦軸は①番の杭に作用するせん断力を 1 としたときの、各杭の分担率を表している。図から  $s=2.0d$  と  $s=2.5d$  では分担率に顕著な差は見られないが、杭間隔を広くするほど分担割合の差は小さくなる。図中実線は  $s=2.5d$  の場合の Randolph 解の結果である。この解は弾性解であるため①-③、④-⑥と対称な位置にある杭は同一の分担率を示し、破線の③、⑥番の杭の挙動を説明し得ない。比較のため Fig. 20 (b)に、直径 2.2cm の塩ビ管モデル杭による 9 本杭の実験結果を示す。小

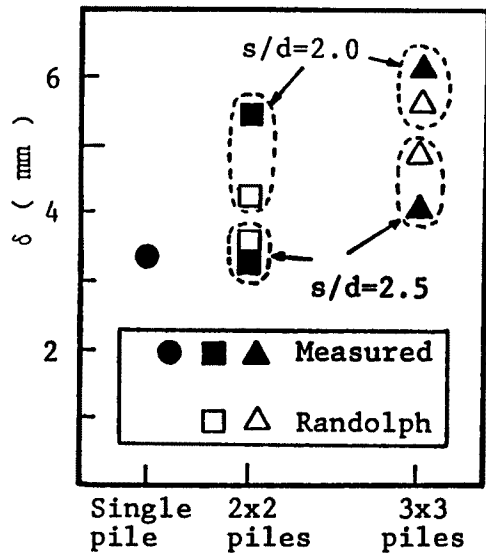


Fig. 19 Test results and theoretical value on lateral displacement.

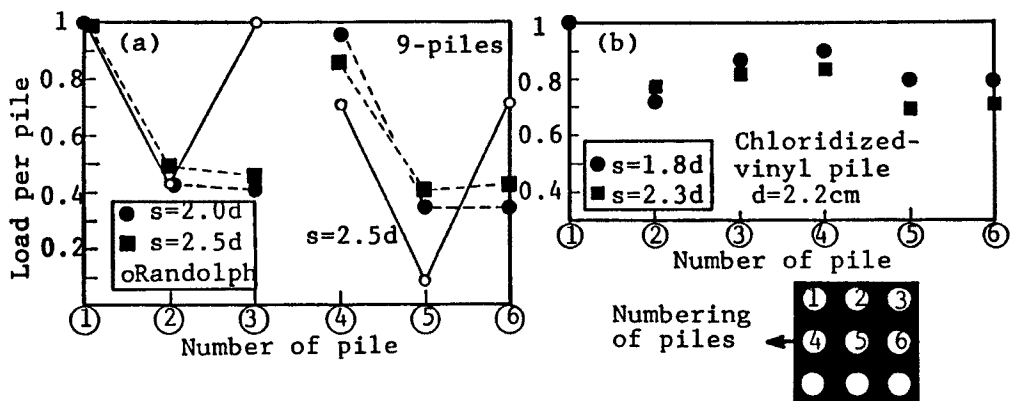
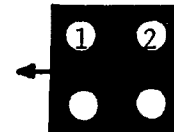


Fig. 20 Distribution of load for 3x3 Box arrangement piles.

Table 4 Distribution of load for 2×2 Box arrangement piles

Ground, Footing condition, Central space of pile(s)	Distribution of load		
	Lateral load (H)	No. 1	No. 2
A-ground, Excluding earth pressure, $s=2.0 d$	300 kgf 600 kgf	1 1	0.485 0.347
A-ground, Including earth pressure, $s=2.0 d$	600 kgf 1200 kgf 1600 kgf	1 1 1	0.651 0.383 0.290
B-ground, Excluding earth pressure, $s=2.5 d$	300 kgf 600 kgf	1 1	0.621 0.493
B-ground, Including earth pressure, $s=2.5 d$	600 kgf 1200 kgf 1600 kgf	1 1 1	0.725 0.511 0.348

Numbering  
of pile's



さな模型では杭径と砂粒子との相対的な大きさの関係から、杭間隔があまり小さいと、群杭に囲まれた土塊が杭と一体となって動くことが観察されており、また  $s=1.8d$  と  $s=2.3d$  の結果が本実験の傾向と逆である。今回の実験はある程度原型実験に近い模型実験を実施しているのので、(a)の結果の方が現実に近いと思われる。現在の設計法では斜杭の無い場合、各杭の荷重分担は等しく計算されるが、Fig. 20 のように後列杭はかなり小さな荷重しか受け持たず、前列杭に大きな負担がかかるものと考えられる。参考のため4本杭のすべてのケースについて荷重分担を Table 4 に示す。上述と同じ傾向がうかがえ、荷重分担は荷重レベルによっても大きく変化し、作用荷重が大きいほど後列杭の分担割合は小さくなるのが分かる。

次にフーチングが根入れされており、前面の土圧が期待できるときのフーチングと杭の荷重分担率について考察する。Fig. 21 (a), (b) はそれぞれ  $s=2.5d$  で4本群杭、9本群杭の場合を示している。図は上から (i)  $\delta-H_i$  関係、(ii)  $P-H_i$  関係、(iii)  $\Sigma S/H_i-H_i$  関係である。ここで、各記号は  $H_i$ ; 杭基礎に作用する全水平力、 $P$ ; フーチング前面に作用する土圧の合力、 $S$ ; 各杭に作用する水平力を表している。フーチング前面に作用する土圧の合力  $P$  は4個の土圧計の測定値を単純に平均して前面の面積をかけたものである。杭基礎は  $\Sigma S$  と  $P$  で  $H_i$  に抵抗することになるが、こうして求めた  $P$  を用いても各荷重段階で、 $\Sigma S+P=H_i$  となった。

(i)~(iii)の各図より以下のことが読み取れる。

- (i)の $\delta-H_i$  関係にはフーチングの抵抗が無い場合の結果も合わせて示すが、根入れの効果により変形はかなり抑えられる。
- (ii)の $P-H_i$  関係と(i)図から、前面土圧が極限状態に近くなると杭基礎の変形は急激に進行する。
- (iii)の $\Sigma S/H_i-H_i$  関係より、 $H_i$  が増加するに従って徐々に杭の分担割合は増加するが、変形の小さい範囲では4本群杭で水平力の高々50~60%、9本群杭で60~70%しか受け持たない。(iii)図には参考のため  $s=2.0d$  の結果もあわせて示した。

他の実験ケースに関しても同様の傾向がうかがえ、杭体の荷重分担率はフーチング前面の面積、杭本数、

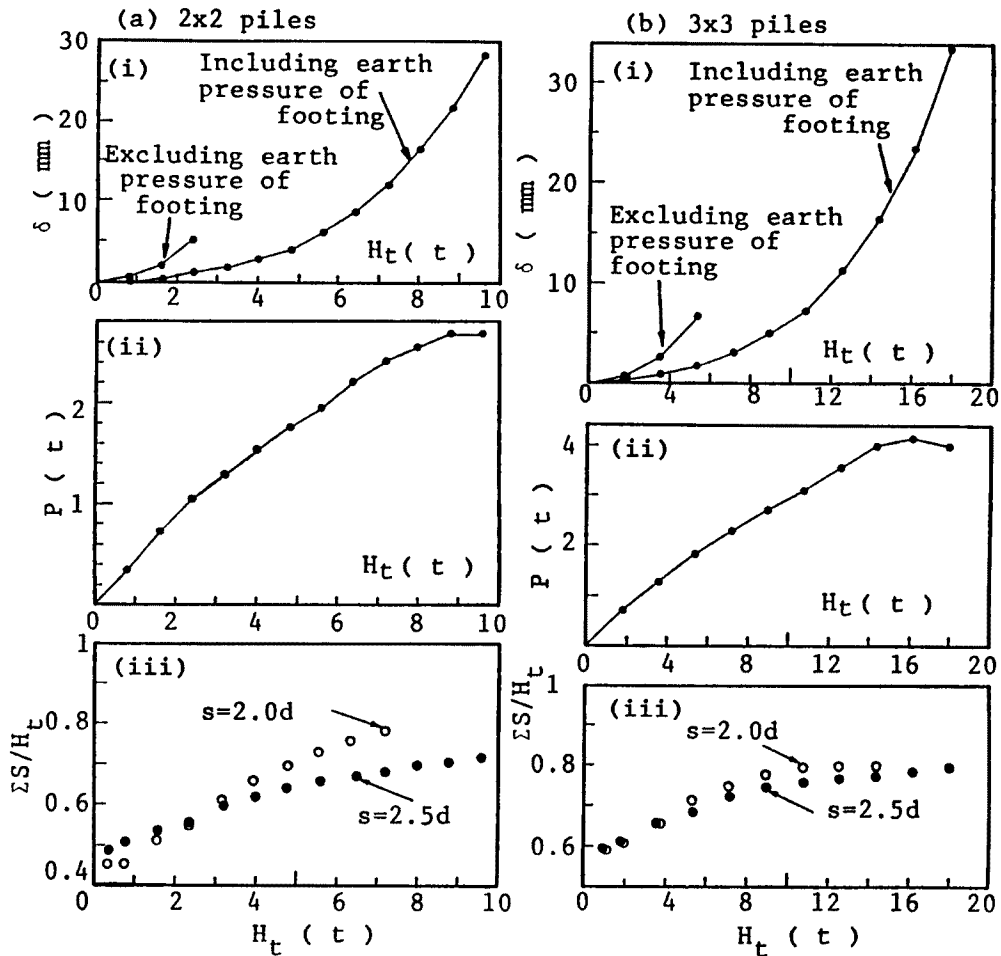


Fig. 21 Effect of earth pressure acting on the front of footing.

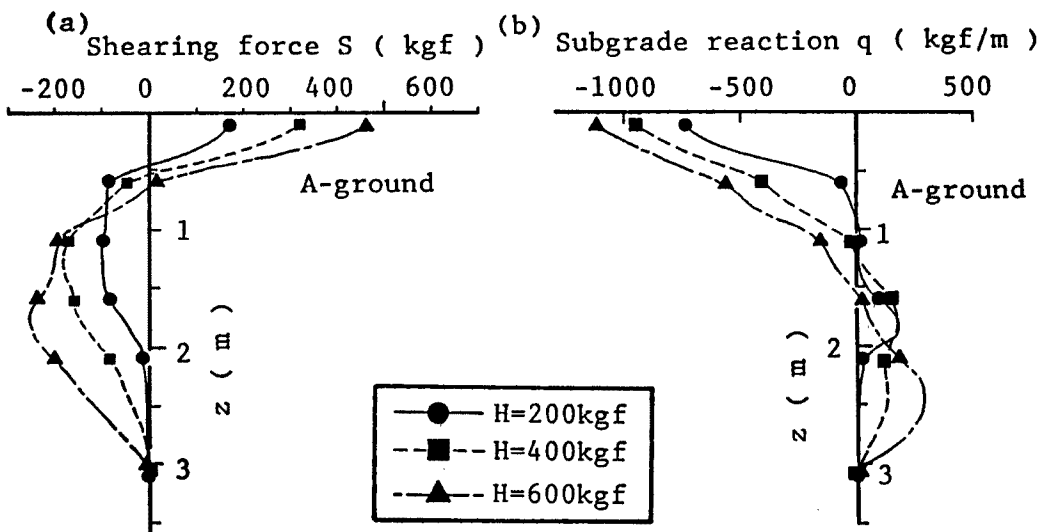


Fig. 22 Shearing force and subgrade reaction profiles for single pile.

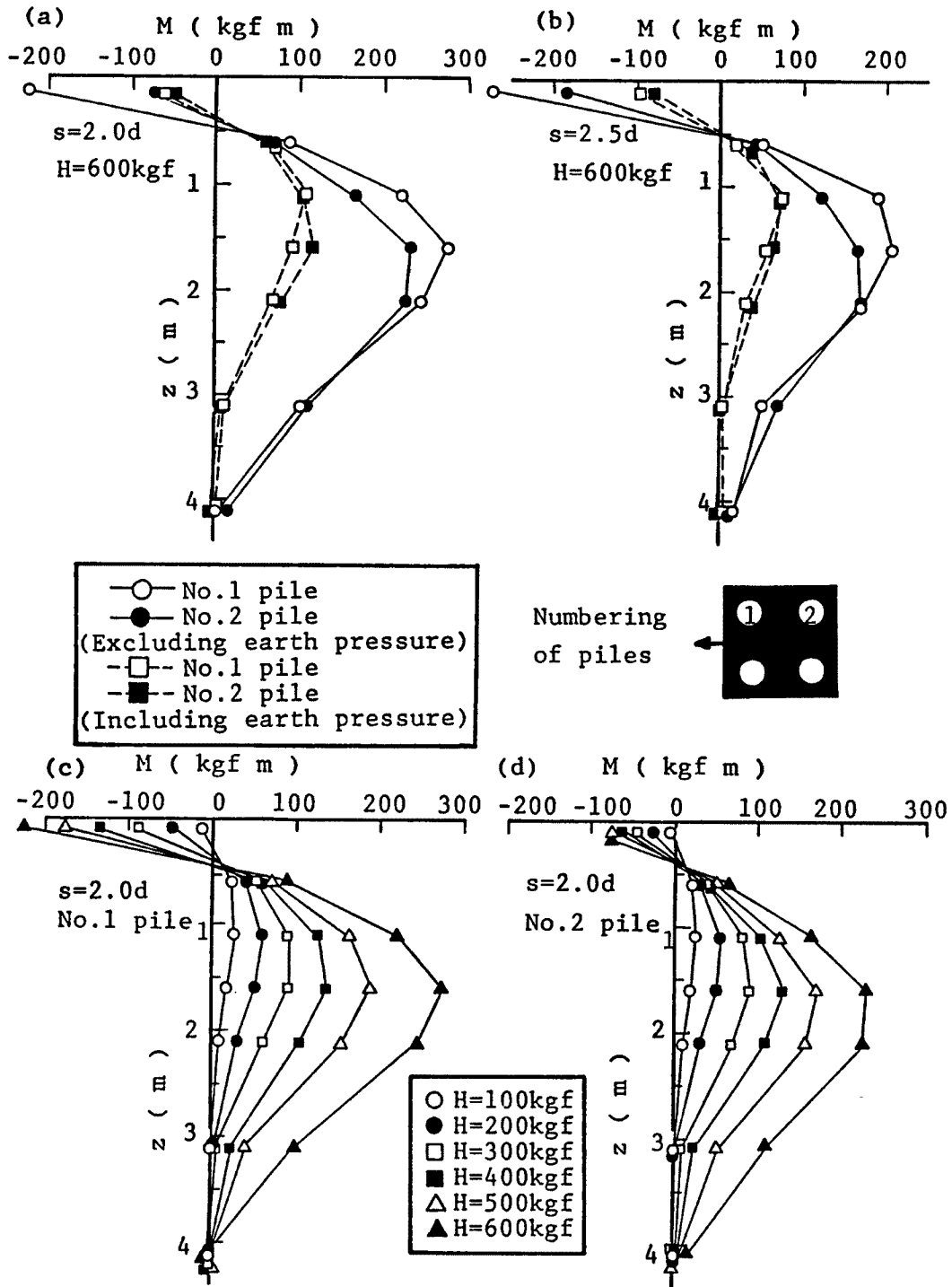


Fig. 23 Bending moment profiles for  $2 \times 2$  piles.

杭間隔等によって変化すると考えられる。

3.4 地盤内のモーメント、地盤反力分布

本実験では、Fig. 4 に示したように深さ方向に7点曲げゲージを貼り、杭体の曲げモーメント分布を求めている。これら7点のモーメントの実測値をスプライン関数で3次関数に近似し、10cm ごとに分割し積分、微分することにより、せん断力  $S$ 、地盤反力  $q$ 、たわみ角  $\theta$ 、およびたわみ  $y$  の分布を求めた。

まず、単杭 (A地盤) のせん断力、地盤反力分布を Fig. 22 に示す。作用荷重  $H$  をパラメータとするが、(a)図から作用荷重が大きくなるほど杭の深部にまでせん断力が伝達されることが分かる。また(b)図を見ると、地表面付近で大きな地盤反力が発生している。

次に、Fig. 23 に4本群杭のモーメント分布の結果を示す。(a)、(b)図は  $H=600\text{kgf}$  作用時のモーメント

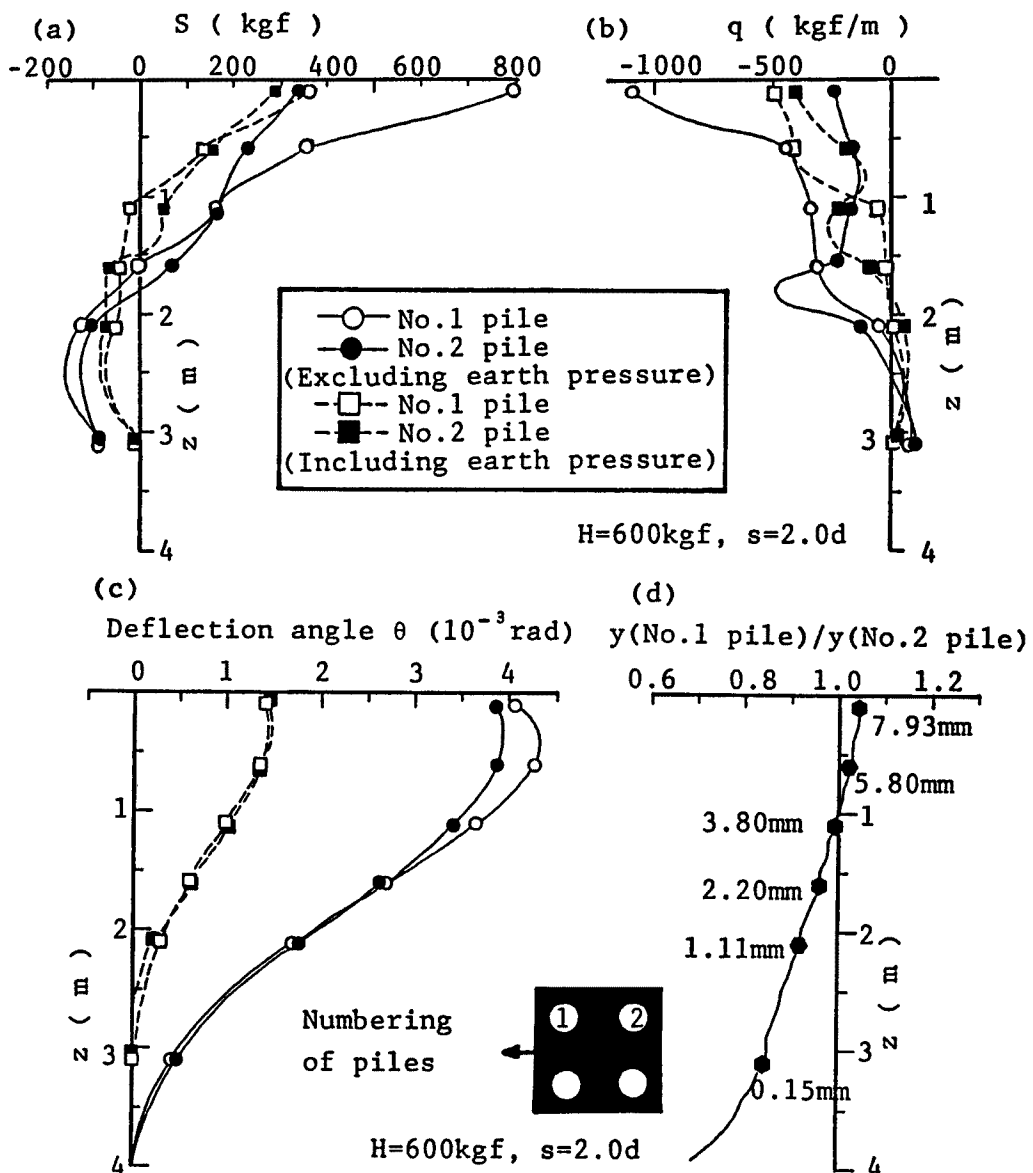


Fig. 24 Shearing force, subgrade reaction, deflection angle and displacement profiles for 2x2 piles.

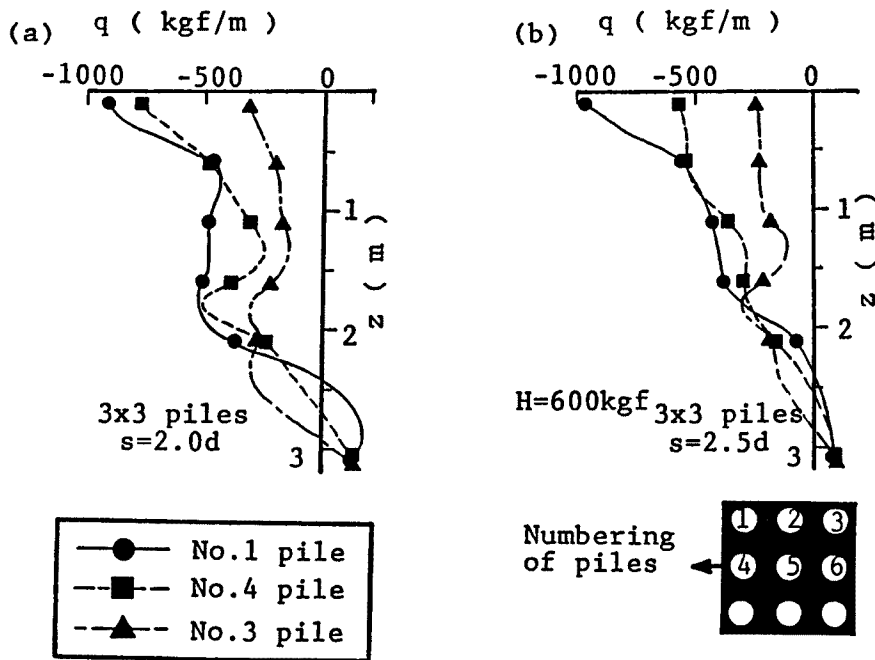


Fig. 25 Subgrade reaction profiles for 3x3 piles.

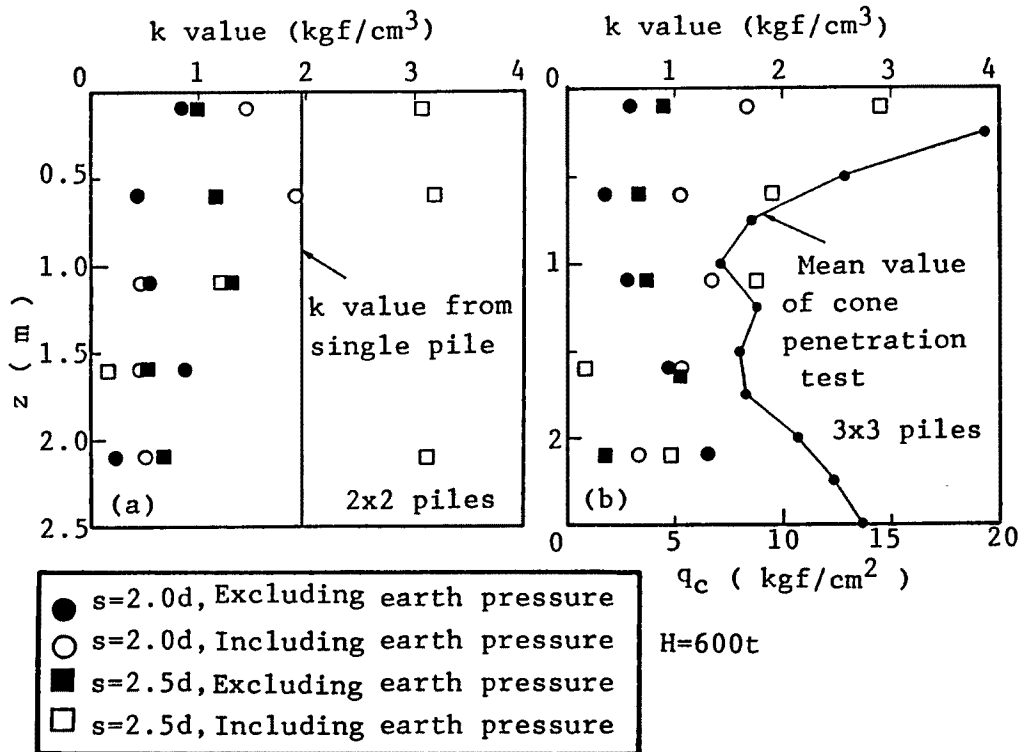


Fig. 26 k value profiles.



分布で、(a)図は  $s=2.0d$ 、(b)図は  $s=2.5d$  の結果である。①番杭と②番杭の挙動を見ると、荷重分担から①番杭に作用する荷重が大きいため、地表面から2m付近までのモーメントには差がでる。しかし  $z=2m$  以深では同一の挙動をする。(c)、(d)図は  $s=2.0d$  の場合の  $H=100\text{kgf}$  から  $600\text{kgf}$  までの推移を示したもので、 $H=500\text{kgf}$  作用時までは地表面を除いて①番杭と②番杭のモーメントの絶対値に差は見られない。またプラス側のモーメントの最大値は荷重の増加と共に深くなる傾向がうかがえる。(a)図と(c)、(d)図を比較すると、フーチング前面の土圧が有る場合のモーメント分布は、(c)、(d)図の  $H=300\text{kgf}$  作用時のモーメント分布と類似している。Fig. 24 に  $s=2.0d$  のせん断力、地盤反力、たわみ角、たわみの分布曲線を示す。(d)図は横軸に (①番杭のたわみ) / (②番杭のたわみ) をとり、記号の横の値は①番杭のたわみを示している。2m以深においては②番杭のたわみの方が①番杭のたわみより大きいことが分かる。Fig. 23 と同様にして、フーチング前面土圧の影響により杭体の  $S$ 、 $q$ 、 $\theta$  はかなり抑えられる。

Fig. 25 は9本杭の地盤反力を示したものであるが、群杭前面の①番杭と④番杭の挙動は概ね同じである。Fig. 13 のコーン貫入抵抗の値は、1m付近で最小となるが地盤反力も1m前後で小さくなっており、この傾向は1、4本杭でも同じである。

最後に、Fig. 26 (a)、(b) は4本杭と9本杭の地盤内の  $k$  値分布を示したものである。対象杭は Fig. 20、Fig. 23 の①番杭である。地盤反力  $q$  とたわみ  $y$  から  $P=kyd$  によって各位置の  $k$  値の分布を求めた。(b)図には Fig. 13 (a)、(b)の8点の黒いシンボルの  $q_c$  の値を平均して、 $q_c$  の分布も合わせて示した。また(a)図には Table 3 の単杭からの逆算  $k$  値を直線で示した。Fig. 26 から以下のことが考察される。

- 1) (a)、(b) 両図から杭中心間隔が大きいほど、また前面土圧が期待できるほど  $k$  値は大きい。
- 2) (a)図の単杭の  $k$  値  $=1.90\text{kgf/cm}^3$  と4本の  $k$  値 (●印と○印) を比較すると、フーチング前面の土圧の影響により、土圧無しの場合は単杭の  $k$  値よりかなり小さくなる。
- 3) (b)図の  $q_c$  の分布から  $q_c$  と  $k$  値の間には相関があり、 $q_c$  がある区間で小さい場合  $k$  値も小さくなる可能性がある。

#### 4. む す び

本研究は群杭の水平抵抗に関する問題点を実験的に解明しようと試み、杭径 16.52cm、杭長 4.45m のモデル杭を用いて、杭本数と杭中心間隔を変えた模型実験を実施したものである。参考文献1)~3)に示す直径 2cm の小さい模型実験の結果との整合性は良好で、Randolph の提案式である程度群杭の挙動を説明し得た。

また群杭基礎は、杭とフーチングの協同作業により水平力に抵抗するという観点から、杭とフーチングの荷重分担を求める試験を実施した。その結果、水平荷重のレベル、杭本数、フーチング面積によって分担率は変化するが、9本群杭 ( $s=2.5d$ ) で水平力の約30%程度はフーチングが受け持つことが分かった。

今後は実大試験の結果等を参照しながら、試験結果を説明できる新しい解析手法を開発する予定である。最後に本実験を実施するにあたり、御協力御指導いただいた(株)武智工務所の細川義隆氏、上紺屋好行氏および武智工務所山梨工場の皆さまに感謝の意を表します。また実験およびデータ整理を協力してくれた京都大学工学部大学院生の太谷司郎、多田智両君に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 柴田徹・八嶋厚・寺田典夫：群杭の水平抵抗に関する模型実験(1)，京都大学防災研究所年報，第26号 B-2，1983，pp. 35-44
- 2) 柴田徹・八嶋厚・木村亮：群杭の水平抵抗に関する模型実験(2)，京都大学防災研究所年報，第27号 B-2，1984，pp. 77-85

- 3) 柴田徹・八嶋厚・木村亮：群杭の水平抵抗に関する模型実験(3)，京都大学防災研究所年報，第28号 B-2, 1985, pp. 97-110
- 4) 柴田徹・八嶋厚・深田久：群杭の水平抵抗に対する擬似三次元有限要素解析，第20回土質工学研究発表会概要集，1985, pp. 1125-1126
- 5) Randolph, M. F. : The response of flexible piles to lateral loading, Geotechnique Vol. 31, No. 2, 1981, pp. 247-259
- 6) 杭基礎の設計法とその解説，土質工学会編，1985, pp. 610-615.