

## 水平力を受ける杭と地盤の相互作用に関する研究

足立 紀尚・木村 亮・草薙 秀典・勝本 卓

### INTERACTION BETWEEN LATERALLY LOADED GROUP PILES

By *Toshihisa ADACHI, Makoto KIMURA,*  
*Hidenori KUSANAGI and Suguru KATSUMOTO*

#### Synopsis

In order to estimate the displacement of the laterally loaded group piles from that of the single pile, interaction factor becomes important. In this study, to investigate this interaction factor in detail, we dealt with the simplest case, that is, the interaction between two rectangular aluminum piles (pile width: 2 cm, pile length: 44 cm), and conducted the tests on model piles for which the same lateral load was applying to each pile separately. From the experimental results, it was found that the load distribution becomes small as the pile positioned behind since the interaction factors between each pile were not equal because of the difference in subgrade reactions in front of two piles.

#### 1. はじめに

構造物の支持杭には、偏土圧、地震、波、風などによって、その頭部に水平外力を受けるものや、地すべり抑止杭のように、周辺地盤の動きに抵抗するものがある。これらの設計には、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。

水平力を受ける杭の研究は、まず単杭の水平抵抗について実施されてきた。また群杭の水平抵抗に関しては、模型実験、原型実験、理論解析の3つのアプローチから数多くの研究が行われている。しかし、群杭の水平抵抗を、単杭の示す変位や応力の重ねあわせで評価するのは不十分である。すなわち、杭配置、杭本数、杭中心間隔、杭頭拘束条件、地盤性状、荷重レベル、施工法など種々の要因によって群杭の支持力が変化する。そこで、群杭を取り扱うには、まず群杭と地盤の相互作用を明確に把握し、さらに数値解析手法によってそれらを結び付ける必要がある。

現在採用されている群杭基礎の設計法では、群杭と地盤の相互作用を定量的に評価できるまでには至っておらず、例えば道路関係の現行設計法では、杭中心間隔が $2.5d$  ( $d$ は杭直径)以上ならば、群杭は単杭の集合体として取り扱えるとしている。一方、都市内の土木工事では地価の高騰や耐震設計上の観点から、限られた面積に所定本数の杭を打設せざるを得ないケースが増えてきている。そのため、杭中心間隔が $2.5d$ を確保できない場合もでてくる。杭中心間隔が狭くなるほど、水平抵抗の低減は顕著となるが、は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か問題となる。

そこで、本研究では単杭の挙動から群杭の水平挙動を推定するために用いる杭相互間の影響係数(interaction factor)<sup>1)</sup>に着目し、杭頭自由の単杭および群杭の室内水平載荷模型実験を行った。影響係数とは、隣接した杭の影響によって群杭中の各杭の杭変位を増加させる係数を意味する。今回の実験では、群杭の中で最も簡単な2本群杭の問題を取り上げ、各杭の杭頭がフーチング等で連結されていない状態で、

各杭に同一荷重を載荷し、各杭の挙動を実験的に調べた。また、杭中心間隔と杭中心線と載荷方向のなす角度を種々に変化させ、これらの各要因が荷重～変位曲線や影響係数に与える影響を検討した。ついで、群杭の挙動を説明する解析方法として理論的な根拠もあり、実用的と判断した Randolph 解<sup>2)</sup>を取り上げ、実験結果と比較しながら検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験装置

模型杭の水平載荷実験は、Fig. 1 a) および Photo. 1 に示す装置を用いて行なった。土槽は高さ 40.5 cm、内径 60 cm の鋼製円筒形であり、水平荷重を載荷するために、外壁に滑車を取付けている。地盤材料には、乾燥した豊浦標準砂を用いた。

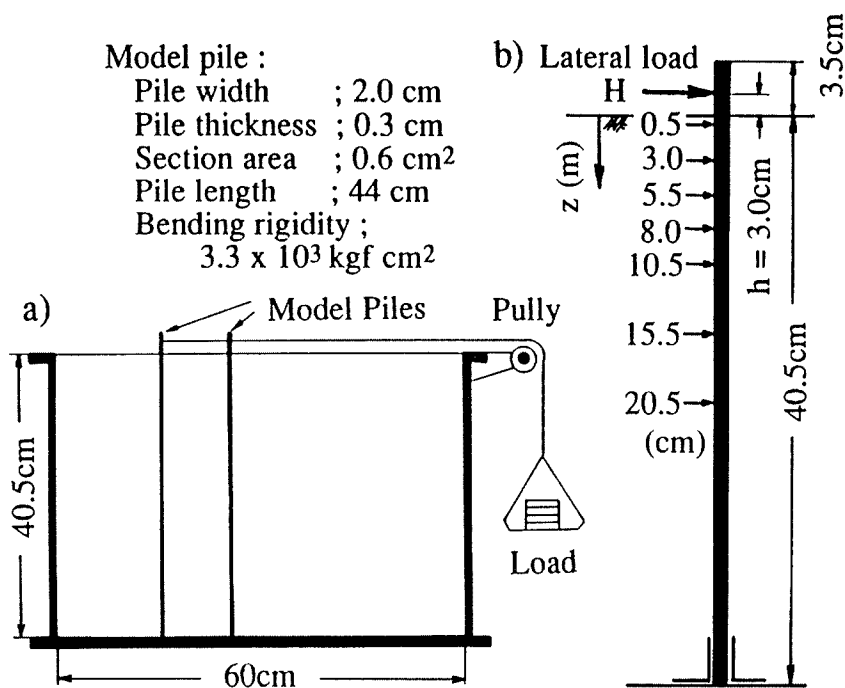


Fig. 1. Sketch of lateral loading apparatus and details of the model piles.

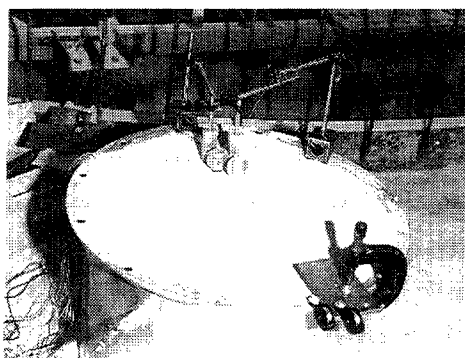


Photo. 1. Soil chamber and lateral loading apparatus.

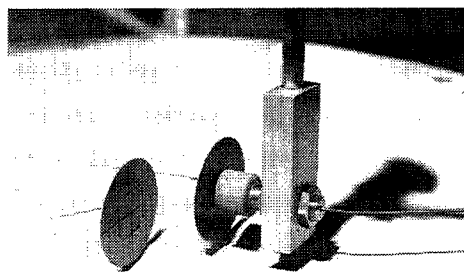


Photo. 2. Displacement gauge.

模型杭は Fig. 1 b) に示すように、杭幅  $d=2\text{ cm}$ 、長さ  $44\text{ cm}$  の長方形断面アルミニウム杭である。模型杭を片持ちばりとして載荷試験を行ない、ヤング率  $E$  を測定した結果、 $E=7.34 \times 10^5\text{ kgf/cm}^2$  となった。アルミニウムのヤング率は、 $E=7.2 \times 10^5\text{ kgf/cm}^2$  程度であるが、実験で用いた模型杭は、ひずみゲージの配線を固定するためにビニールテープで周囲を覆っているため、若干大きめのヤング率になったと考えられる。杭の曲げモーメントを測定するため、地表面下7つのポイントにそれぞれ一対、計14個のひずみゲージを貼り付けている。

杭先端は固定、杭頭は自由とし、地表面からの載荷高さ  $h$  (自由長) が  $3.0\text{ cm}$  となるよう杭頭部に糸を固定し、その糸を滑車にかけて荷重を作用させた。また杭頭には、直径  $5\text{ cm}$  の鉄製円形ターゲットを取付け、Photo. 2 に示す非接触型変位計を用いて高さ  $3.0\text{ cm}$  の点の変位を測定した。

## 2.2 実験地盤作成方法

精度の良い模型実験を実施する際、均一な模型地盤を作成することが重要なポイントとなる。今回の実験では、実験装置の規模を考慮して、ふるいを用いて地盤材料を落下させる方法を採用し、以下に述べる a) ~d) の手順で地盤を作成した。

- 土槽の縁に木の枠を設置して、その上に  $70\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 、網目  $1\text{ mm}$  の二重ふるいを載せる。Fig. 2 に示す番号順に一定の高さ(地盤面上約  $1\text{ m}$ ) から、土槽の各部分に均等にいきわたるように、一定の乾燥した豊浦標準砂を落下させる。
- 地盤面が土槽の半分まで達すると、土槽の側面を外側から木づちで一定回数打撃し、締固める。
- a) の操作を同様に繰り返して、土槽が砂で満たされたら再度締め固める。
- 地盤の表面を整形し、試験を開始する。

ここで、杭頭がフーチング等で拘束されていないので、群杭実験で a) および c) の作業を行う時、2本の模型杭の杭頭間隔を一定に保つことができない。よって、杭間隔を一定に保つために、針金で枠組みを作り杭頭部を固定した。枠組みは、d) の作業の後、静かに取り外す。

## 2.3 杭配置

今回は Fig. 3 に示すように、

- 単杭実験
- 後方の模型杭のみに載荷する群杭実験 I
- 両方の模型杭に載荷する群杭実験 II

の3種類の実験を行なった。

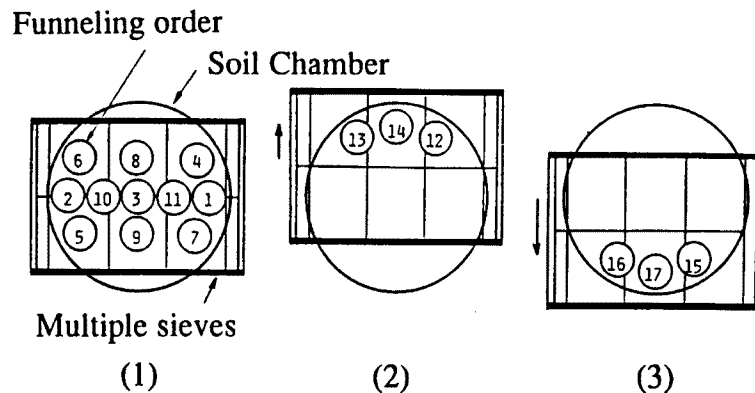


Fig. 2. Method of ground making ; funnel the sand through multiple sieves.

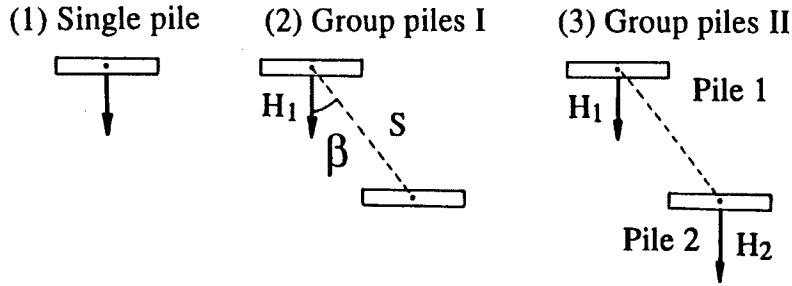
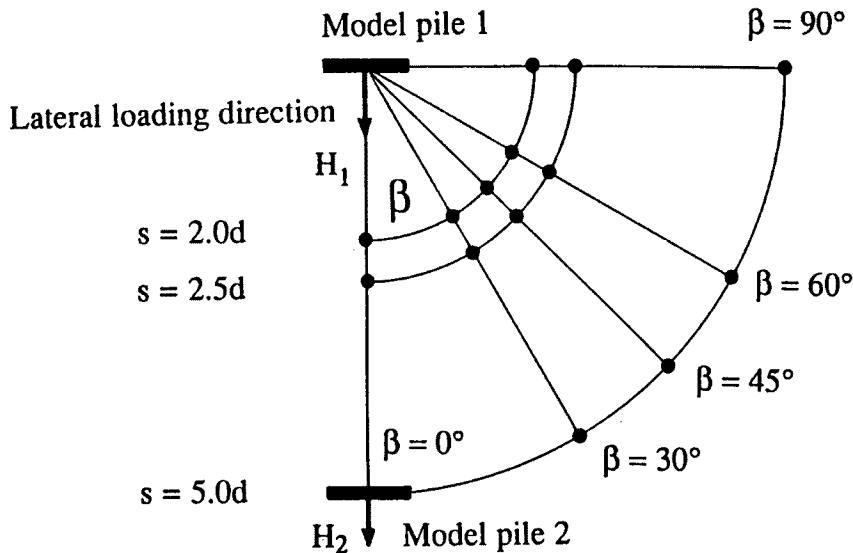


Fig. 3. Three different kinds of model tests.

Fig. 4. Arrangement of piles for model tests and parameters  $s$  and  $\beta$ .

$s$ ; spacing between pile center lines

$\beta$ ; angle from the loading direction of the pile

群杭実験における2本の杭の配置は、Fig. 4に示すように杭中心間隔 $s$ 、および、後方に位置する模型杭1からみた杭中心線と荷重方向のなす角度 $\beta$ をパラメータにとった15のパターンを考えた。すなわち、 $s$ は杭幅 $d$ の2.0, 2.5, 5.0倍とし、 $\beta$ は $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ と変化させた。以下、模型杭1、模型杭2をそれぞれ杭1、杭2と略称する。

#### 2.4 荷重荷重方法および測定方法

模型杭への水平力は、杭一本あたりの荷重ステップを200 gfずつ加え、800 gf, 1600 gfにおいて、一旦0 gfまで除荷してから再荷した。群杭実験IIでは、2本の模型杭に同時に荷重するように特に注意した。水平荷重の保持時間は1分間で、測定項目は、前述した各ひずみゲージの値および水平変位測定のための非接触型変位計の値である。これらは、各測定時間(1分後)に自動記録装置付きのひずみ測定器に印字される。

#### 2.5 模型地盤の物性

地盤材料には乾燥した豊浦標準砂を用いたが、土槽の中心部と端部の2箇所、深さ方向に2点、5 cm, 15 cmの計4箇所から得られた試料から、間隙比 $e$ の平均値を求めると0.800となった。模型地盤の他の物性値は、 $G_s = 2.64$ ,  $\gamma = 1.47 \text{ gf/cm}^3$ ,  $e_{max} = 0.859$ ,  $e_{min} = 0.760$ である。

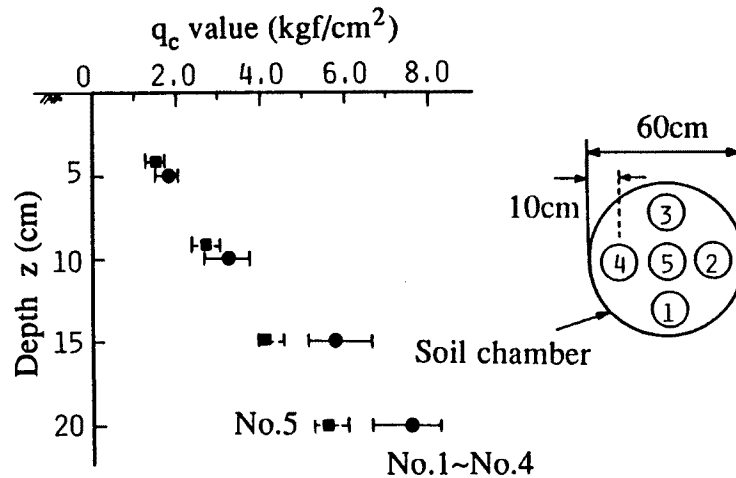


Fig. 5.  $q_c$  value from portable cone penetration test for the model ground and test locations in soil chamber.

また、実験を1回行うごとに、荷重試験後にポータブルコーンを用いて、Fig. 5に示すように同一地盤で5点ずつ貫入試験を行なった。 $q_c$ は深さ方向に比例して分布しており、ばらつきはあるものの、本実験の地盤作成法はかなり再現性の良いものであったといえる。また、土槽を周囲から打撃して締め固めたため、中心部における分布は端部よりも20%程度小さい。

### 3. 実験結果と考察

本研究においては、2章で述べたように単杭実験、群杭実験Ⅰ（1本荷重）、群杭実験Ⅱ（2本荷重）の3種類の実験を行った。以下に、それぞれの実験結果および考察を述べる。なお群杭の実験は、15のパターンについて各々3回ずつ行っており、実験の再現性は良好で、それらのデータの平均値をもとに考察した。

#### 3.1 単杭実験の結果およびRandolph解

単杭実験を11回行った結果得られた、杭の荷重～変位曲線をFig. 6に示す。図中破線で囲まれた部分は、11回の実験における測定値の幅を示しており、実線は、各変位の平均値を結んだものである。本実験では、多重ふるいと木づちによる締め固めによって模型地盤を作成したが、測定水平変位のばらつきは小さいので、単杭の実験結果からも模型地盤の再現性は良好であったといえる。

水平力を受ける単杭の変位から地盤定数を決定し、群杭の変位を推定する方法として、Randolph解<sup>2)</sup>の適用性は良好である<sup>3)</sup>。このRandolph解は、弾性地盤中の杭の挙動を有限要素法に基づいてパラメトリックに求めたもの

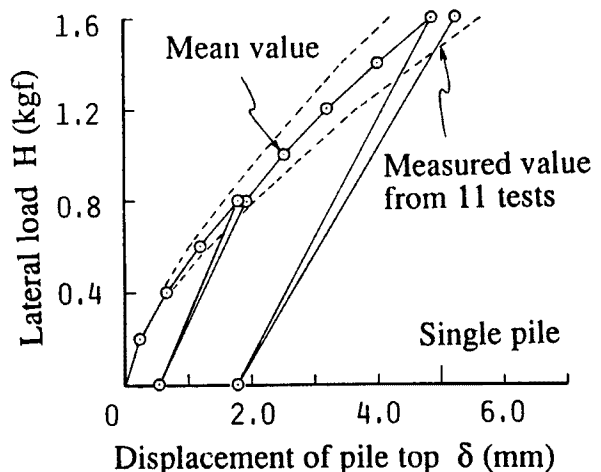


Fig. 6. Relation between load and lateral displacement on single pile.

で、単杭の杭頭変位に対して杭と地盤の相対剛性をも考慮した簡便式を誘導し、群杭に対して Poulos<sup>1)</sup> の提案した杭相互間の影響係数を用いている。いま単杭の剛性を  $K_s$  (=荷重/変位) としたとき、 $n$  本の群杭中の  $i$  番目の杭の変位  $\delta_i$  は一般に

$$\delta_i = \frac{1}{K_s} \sum \alpha_{ij} H_j \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。

ここに、 $\alpha_{ij}$ :  $i \sim j$  番杭に作用する影響係数 ( $\alpha_{ii} = 1$ )

$H_j$ :  $j$  番目の杭に作用する荷重

である。そして、水平力に対する影響係数は、次のように定義される。

$$\alpha_{ij} = 0.5 \rho_c \left( \frac{E_p}{G_c} \right)^{1/7} \left( \frac{d}{2s} \right) (1 + \cos^2 \beta) \dots\dots\dots (2)$$

この式中、 $G_c$  は杭の有効長さに対する平均的な地盤のせん断弾性係数  $G$  の値、 $\rho_c$  は地盤剛性の均一性を表すパラメータである。

実験結果を上記の Randolph 解で解するために、単杭の載荷試験の結果から地盤定数を逆算する。Randolph 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。本実験では  $q_c$  分布の傾向から、模型地盤を  $G_0 = 0 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\Delta G / \Delta z \neq 0 \text{ kgf/cm}^3$  となる S 型地盤とした。ポアソン比を  $\nu = 0.33$  と仮定して、0.8 kgf、1.6 kgf 再載荷時の杭頭変位の実験値から地盤定数を逆算すると **Table 1** のようになる。表中には、参考のために Chang 式による逆算  $k$  値も示した。

ここで、単杭に対して杭に作用する曲げモーメント分布の実測値と、**Table 1** の値を用いて計算した Randolph 解および Chang 式による計算値の比較を **Fig. 7** に示す。図より、Randolph の解法による計算値は、Chang 式の計算値よりも実験値を定量的に表現していることがわかる。

**3.2 群杭実験 I に関する実験結果と考察**

載荷方向に対して後方に位置する杭 (杭 1) だけに水平荷重を載荷する群杭実験 I において、杭 1 および杭 2 の 0.8 kgf、1.6 kgf 再載荷時の変位量を、杭中心線と載荷方向のなす角  $\beta$  をパラメータにして **Table 2** に示す。また参考のため、表中に単杭実験における変位量の平均値とその幅を示す。まず、杭 1 の変形に着目する。この実験において杭 1 の変位量は、単杭の変位量よりも大きい、その要因として、杭 2 が杭 1 の前に存在するために杭 1 前面の地盤反力が小さいこと、また、ふるいをとおして地盤材料を落下させる方法では、2 本の杭が存在することにより、群杭周辺の地盤は単杭の周辺の地盤より緩くなってしまうことなどが挙げられる。杭 2 は、単杭の変位に比べてきわめて小さな変位しか示さないが、杭間隔  $s$  が小さくなるほど、また角  $\beta$  が  $0^\circ$  に近づくほど変位が大きくなる。この傾向は、杭 1 が杭 2 に与え

Table 1. Properties of the ground based on single pile's behavior by Randolph's equation

Lateral load	Displacement of single pile	Calculated value	Ground constant
1.6 kgf	3.45 mm	3.45 mm	$G_0 = 0 \text{ kgf/cm}^2$ , $\Delta G / \Delta z = 0.131 \text{ kgf/cm}^3$ $k = 0.97 \text{ kgf/cm}^3$ (Chang's formula)
0.8 kgf	1.38 mm	1.38 mm	$G_0 = 0 \text{ kgf/cm}^2$ , $\Delta G / \Delta z = 0.200 \text{ kgf/cm}^3$ $k = 1.42 \text{ kgf/cm}^3$ (Chang's formula)

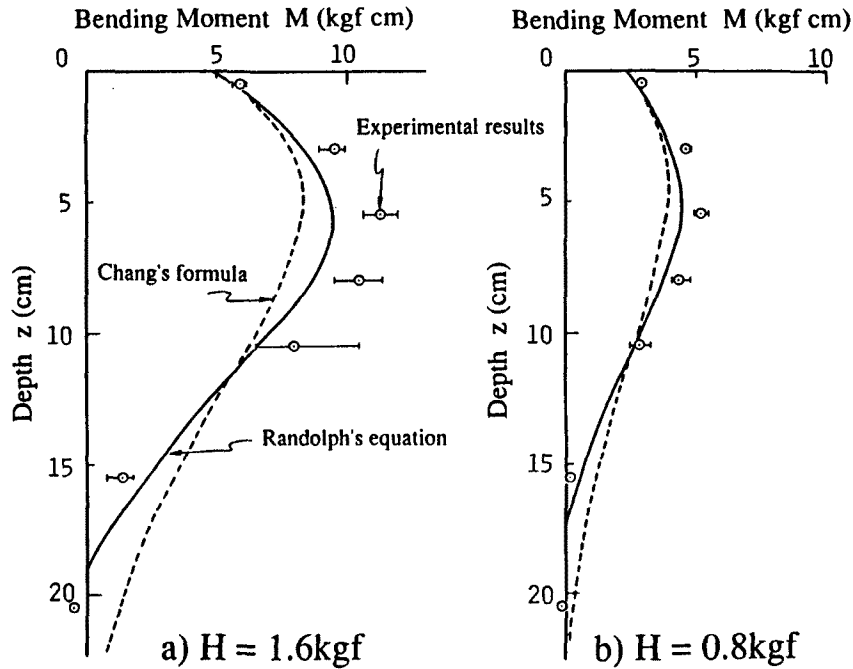


Fig. 7. Distribution of bending moment on single pile.  
a) Lateral load  $H=1.6$  kgf, b)  $H=0.8$  kgf

る影響の範囲を考えると妥当である。

### 3.3 群杭実験Ⅱに関する実験結果と考察

#### (1) 荷重～変位曲線と曲げモーメント分布

2本の杭に水平載荷した群杭実験Ⅱについて、 $s$  および  $\beta$  をパラメータとして得られた杭1、杭2の  $s=2.5d$  に対する荷重～変位曲線を Fig. 8 に示す。これらの図と単杭の荷重～変位曲線 (Fig. 6) とを比較すると、杭1、杭2ともに、概ね単杭よりも大きな変位を示している。また、 $\beta=90^\circ$  の場合を除くすべてのパターンについて杭1の変位の方が杭2の変位を上回っている。これは、杭1と杭2との間の荷重分担率の違いによる。ここで、荷重分担率が小さい杭とは、本実験のように杭頭自由の荷重制御の実験では、一定荷重を載荷させた場合に、より大きな変位を示す杭のことである。よって、同一荷重に対して後方杭の変位が大きいので、同一変位を発生させるための荷重が少ない、すなわち“後方杭ほど荷重分担が小さい”という従来の実験結果<sup>3)</sup>に一致している。このように、荷重分担率の違いが生じる原因として、次のような要因が考えられる。

- 1) 杭前面の受働領域の重なり合いによって、各杭の受働土圧の大きさが異なること。

Table 2. Experimental results on Group piles I; displacement of pile 1 and pile 2

Group piles I		Displacement (mm)	
s/d	$\beta$	Pile 1	Pile 2
5.0	$90^\circ$	3.72	0.0014
	$60^\circ$	3.43	0.0016
	$45^\circ$	3.94	0.0070
	$30^\circ$	4.04	0.0131
	$0^\circ$	3.34	0.0404
2.5	$90^\circ$	4.16	0.0016
	$60^\circ$	3.89	0.0158
	$45^\circ$	4.00	0.0438
	$30^\circ$	3.84	0.2462
	$0^\circ$	1.87	0.2462
2.0	$90^\circ$	4.18	0.0032
	$60^\circ$	4.09	0.0248
	$45^\circ$	3.71	0.0997
	$30^\circ$	3.59	0.3410
	$0^\circ$	4.47	0.4452
Single pile			
Mean value		3.45 mm	
Scatter range		0.94 mm	

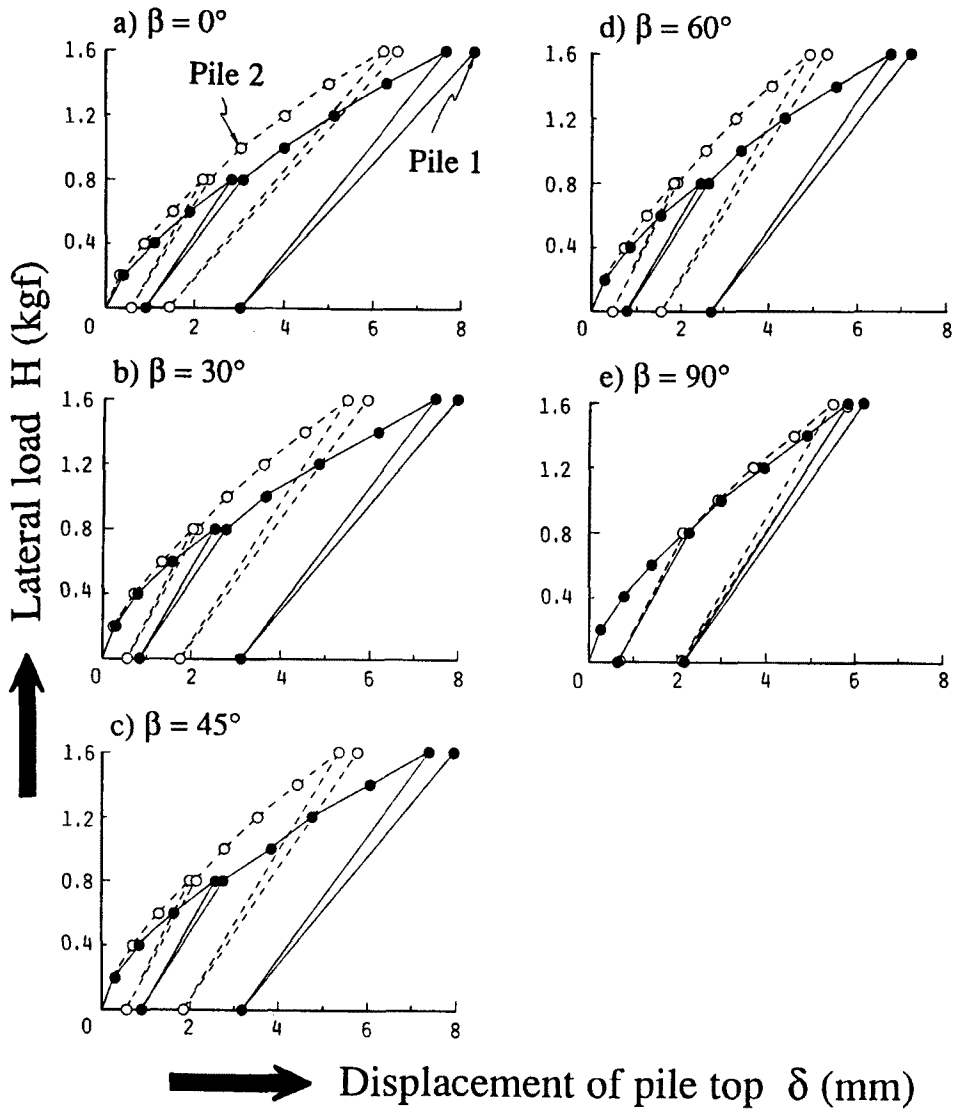


Fig. 8. Relation between load and lateral displacement (group piles II,  $s=2.5d$ )

2) 杭の前面で別の杭が変形することによって、後列杭に対して反力を発揮する地盤が緩むこと。Brownら<sup>4),5)</sup>は1), 2)の効果をまとめて“shadowing”効果と呼んでいる。

次に、 $\beta$ をパラメータとして $s=2.5d$ の場合の、杭1、杭2および単杭の曲げモーメント分布をFig. 9に示す。群杭各杭の最大曲げモーメントは、単杭の最大曲げモーメントよりも一般に大きく、より深いところで発生していることがわかる。さらに、杭1のモーメントと杭2のモーメントの大小は $\beta=0^\circ$ を除いて、 $\text{杭1} \geq \text{杭2}$ となる。最大曲げモーメントのこのような傾向は、群杭の変位が単杭の変位に比べて大きいことと一致する。

(2) 群杭効率

群杭の支持力が、(単杭の支持力) × (群杭本数) とはならず、低減させる係数のことを一般に群杭効率 ( $e$ ) といい、変位を対象にした群杭効率は以下のように定義できる。

$$\text{群杭効率 } e = \frac{\text{一定荷重に対する単杭の変位}}{(\text{一定荷重} \times \text{杭本数}) \text{に対する単杭の変位}} \dots\dots\dots (3)$$



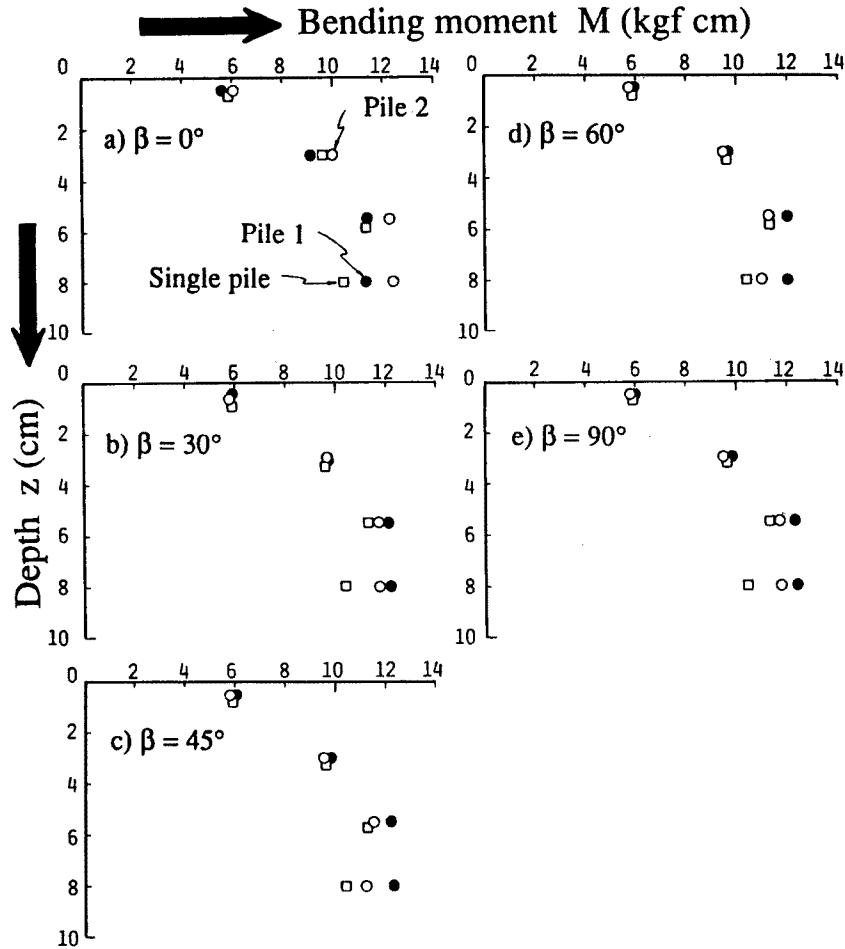


Fig. 9. Distribution of bending moment (group piles II,  $s=2.5d$ )

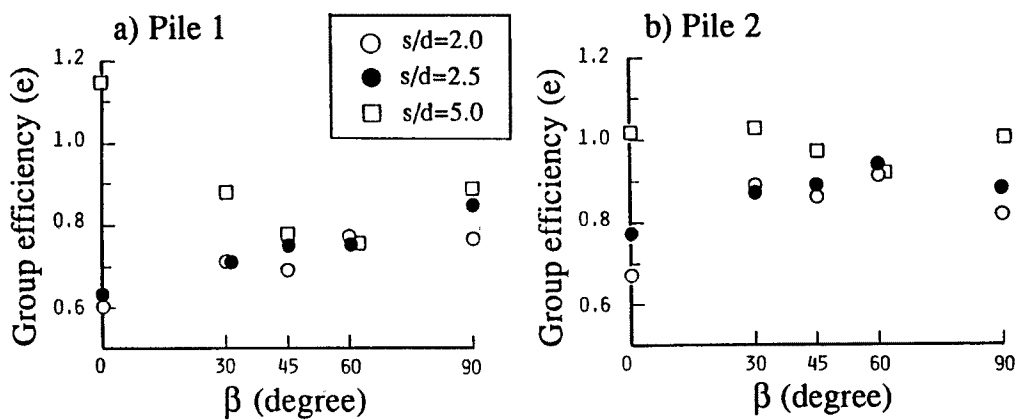


Fig. 10 Relationship between group efficiency ( $e$ ) and angle from the loading direction of the pile ( $H=0.8 \text{ kgf}$ , a) pile 1, b) pile 2)

したがって、群杭と単杭の1本当りの水平荷重が同じ場合のそれぞれの変位量を $\delta_s$  (単杭),  $\delta_g$  (群杭)とすれば、群杭効率 $e$ は、 $e=\delta_s/\delta_g$ として求められる。

杭1, 杭2について、この群杭効率 $e$ を縦軸に、 $\beta$ を横軸にとって、杭中心間隔比 $s/d$ をパラメータと

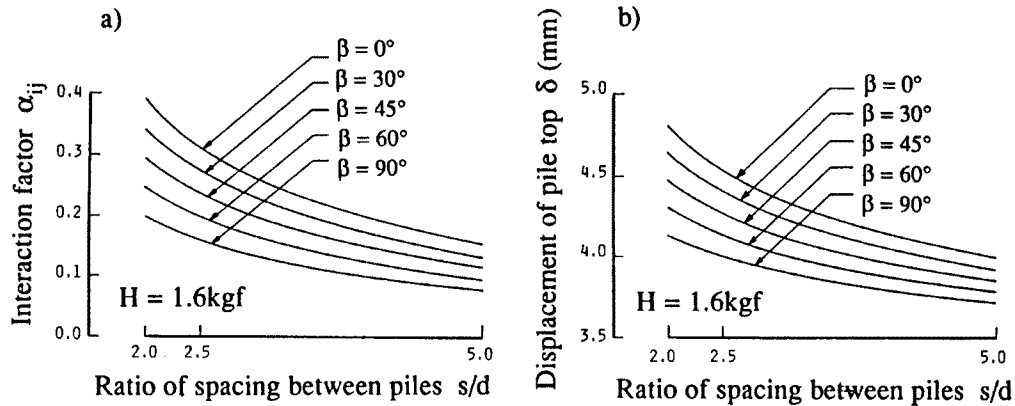


Fig. 11. Analytical results of Randolph's equation ;  
 a) relationship between interaction factor ( $\alpha_{ij}$ ) and ratio of spacing between piles ( $s/d$ ),  
 b) relationship between displacement of pile top ( $\delta$ ) and ratio of spacing between piles ( $s/d$ )

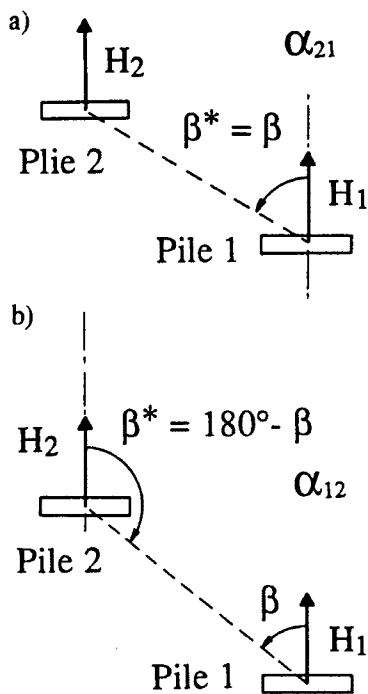


Fig. 12. Definition of new parameter  $\beta^*$

して 0.8 kgf 再載荷時についてプロットしたものを Fig. 10 に示す。図よりばらつきはあるものの定性的には、 $s/d$  が大きくなるほど、また、 $\beta$  が  $90^\circ$  に近づくほど群杭効率は 1 に近づいていくことがわかる。

(3) Randolph 解と影響係数

Randolph の提案する (1)式に、S 型地盤の  $\rho_c = 0.5$ 、 $EI$  が長方形断面のモデル杭と等価な円形断面杭に置き換えた場合の有効ヤング率  $E_p = 4.20 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$  および  $H = 1.6 \text{ kgf}$  のときの地盤定数を用いた  $G_c = 1.56 \text{ kgf/cm}^2$  を代入して得られた影響係数  $\alpha_{ij}$  の理論値を、杭中心間隔  $s/d$  を横軸にとり  $\beta$  をパラメータとして Fig. 11 a) に示す。また、Fig. 11 a) の  $\alpha_{ij}$ 、 $H = 1.6 \text{ kgf}$  のときの単杭の剛性  $K_s = (1.6 \text{ kgf}) / (0.345 \text{ cm}) = 3.53 \text{ kgf/cm}$ 、 $H_1 = H_2 = 1.6 \text{ kgf}$  を (2)式に代入して得られた変位の理論値を Fig. 11 b) に示す。図から、影響係数  $\alpha_{ij}$ 、群杭変位  $\delta$  はともに、 $s/d$  が小さくなるほど、また  $\beta$  が  $0^\circ$  に近づくほど大きくなるのがわかる。

Randolph 解によると、式(2)において  $\cos\beta$  の項が二乗であり、 $\cos^2\beta = \cos^2(180^\circ - \beta)$  であることから、 $\alpha_{12} = \alpha_{21}$  となる。これは、地盤を弾性体としてモデル化しているためで、杭 1 と杭 2 がどのような配置をとっても、2 本の杭の変位が同じになることを意味している。実験では、杭の変位量として再載荷時の変位の弾性成分を取っているにもかかわらず、 $\delta_1 \neq \delta_2$  となる。よって、 $\alpha_{11} = \alpha_{22} = 1$

を仮定し、 $\alpha_{12} \neq \alpha_{21}$  を前提として、次式を解いて影響係数  $\alpha_{12}$ 、 $\alpha_{21}$  を求める。

$$\begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{K_s} \begin{Bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

ここでは、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$  はそれぞれ実験で得られた杭 1、杭 2 の変位量を用いた。さらに、数々に  $\beta^*$  なるパラ

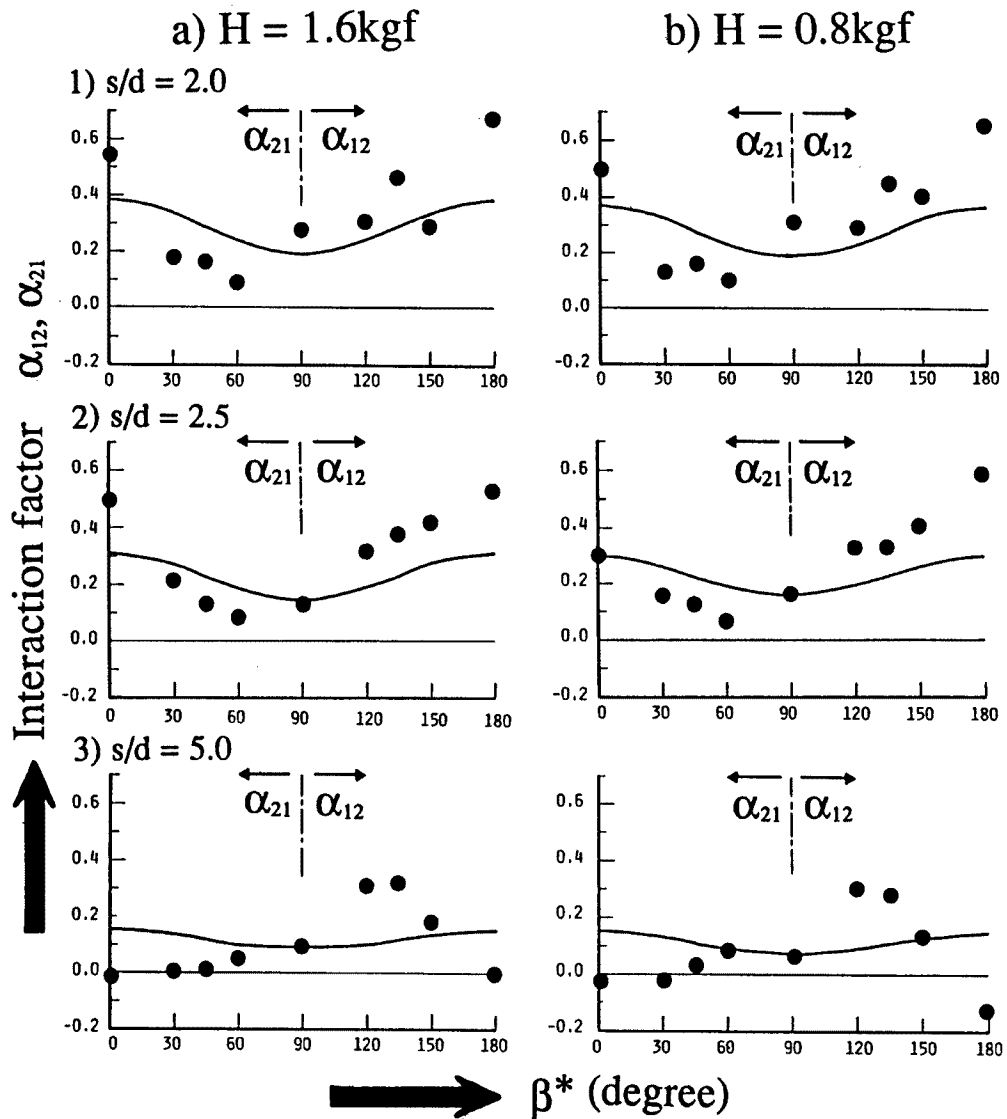


Fig. 13. Relationship between Interaction factor ( $\alpha_{12}$ ,  $\alpha_{21}$ ) and angle from the loading direction of the pile (a)  $H=1.6$  kgf, b)  $H=0.8$  kgf)

メータを導入して、杭中心線と載荷方向のなす角  $\beta^*$  と影響係数  $\alpha_{12}$ ,  $\alpha_{21}$  との関係について検討する。

まず、新たに導入する  $\beta^*$  について説明する。本実験では、杭中心を結んだ線と載荷方向とのなす角  $\beta$  については杭 1 を基準として  $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$  となるように設定したが、 $\beta^*$  については  $0^\circ \leq \beta^* \leq 180^\circ$  の範囲について考える。Fig. 12 a) に示すような杭配置のとき、つまり杭 1 から杭 2 への影響係数  $\alpha_{21}$  を考えるときは、従来通り  $\beta^* = \beta$  となる。しかし、Fig. 12 b) に示すように模型杭 2 から模型杭 1 への影響を表す  $\alpha_{12}$  を考える場合には、 $\beta^* = 180^\circ - \beta$  とする。つまり  $\beta^*$  は、影響を及ぼす杭から影響を受ける杭を見たときの杭中心を結ぶ線と載荷方向とのなす角度である。

上記のように定義した  $\beta^*$  を横軸にとり、式(4) から求めた影響係数を縦軸にとって、杭中心間隔比  $s/d$  をパラメータとしてプロットしたものを Fig. 13 に示す。図中実線は Randolph 解を示し、黒丸でプロットしたものが上記の計算より求めた影響係数である。Randolph 解は  $\beta^* = 90^\circ$  を軸として左右対称の曲線となるが、計算値には多少のばらつきはあるものの、杭間隔が狭い場合には  $\beta^* = 0^\circ \sim 90^\circ$  に対応す

る影響係数  $\alpha_{21}$  よりも、 $\beta^* = 90^\circ \sim 180^\circ$  に対応する影響係数  $\alpha_{12}$  の方が大きい傾向がある。これは杭間の地盤が緩むために、群杭中で相対的に後方に位置する杭の方がより大きく変形するというを別の形で表現したものである。

なお、Ochoa & O'Neill<sup>6)</sup> も、砂質地盤における実大実験（杭径 27.3 cm, 杭根入れ長 13 m）により同様の分析を行っている。実験は 9 本群杭のうちの 2 本に着目して  $s = 3.0d$  の状態で影響係数を考察したもので、周辺の 2 本以上の杭から実験杭は影響を受けることになる。しかし、定性的な傾向は上記の結果と一致しており、Randolph 解では群杭中の各杭に対する影響係数の違いを定量的に説明できないことを示す。以上より、より幅広い変位レベルにわたって詳細に群杭の水平挙動を説明しうる解析手法を開発するためには、地盤の塑性変形およびそれを含んだ影響係数を考慮しなければならない。

#### 4. お わ り に

本研究は、各杭の杭頭がフーチング等で連結されていない状態で、杭頭自由の 2 本群杭の室内模型実験を行ったもので、杭中心間隔、杭配置を種々に変化させたとき、これらの要因が杭の荷重～変位曲線、影響係数に及ぼす影響を実験的に調べ、杭と地盤の相互作用について検討した。実験結果より、以下の知見を得た。

- 1) 群杭中相対的に後方に位置する杭の荷重分担率は、前方に位置する杭の荷重分担率よりも小さい。
- 2) 群杭の最大曲げモーメントは、単杭の最大曲げモーメントよりも一般に大きく、より深いところで発生する。
- 3) 杭中心間隔比  $s/d$  が大きくなるほど、また杭中心線と載荷方向のなす角が  $90^\circ$  に近づくほど、群杭効率は 1 に近づく。
- 4) 実験結果より計算した影響係数は、 $\beta^* = 0^\circ$  に対応する  $\alpha_{21}$  よりも、 $\beta^* = 180^\circ$  に対応する  $\alpha_{12}$  の方が大きな値を示し、弾性解である Randolph の解法ではその挙動を定量的に説明できない。

以上得られた結論は、室内模型実験という限られた条件のもとで行われたものである。よって、この結果と実際の杭の挙動を直接結び付けることはできない。しかし、定性的とはいえ、杭頭に荷重を受ける群杭の挙動をある程度解明したといえる。

今後さらに本研究を発展させるためには、杭本数を増加させた同種の実験の実施や、既存の現場実験結果の再整理が必要となる。さらに、FEM 解析などの数値解析では、地盤を弾性体と仮定する計算法<sup>7)</sup>からさらに進んで、荷重分担の実験結果を説明しうる地盤の塑性化をも含んだ解析手法の開発を行う必要がある。

#### 参 考 文 献

- 1) Poulos, H.G.: Behaviour of laterally loaded piles: II-Pile groups, ASCE, Vol. 97, SM 5, 1971, pp. 733 - 751
- 2) Randolph, M.F.: The response of flexible piles to lateral loading, Geotechnique, Vol. 31, No. 2, 1981, pp. 247 - 259
- 3) Shibata T., A. Yashima and M. Kimura: Model tests and analyses of laterally loaded pile groups, Soils and Foundations, Vol. 29, No. 1, 1989, pp. 31 - 44
- 4) Brown D.A., L.C. Reese and M.N. O'Neill: Cyclic lateral loading of a large-scale pile group, ASCE SE, Vol. 113, No. 11, 1987, pp. 1326 - 1343
- 5) Brown D.A., C. Morrison and L.C. Reese: Lateral load behaviour of pile group in sand, ASCE SE, Vol. 114, No. 11, 1988, pp. 1261 - 1276

- 6) Mauricio, O. and M.W. O'Neill: Lateral pile interaction factors in submerged sand, ASCE SE, Vol.115, No. 3, 1989, pp.359 - 378
- 7) Shibata T., A. Yashima, M. Kimura and H. Fukada: Analysis of laterally loaded piles by quasi-three-dimensional finite element method, Proc. 6th Numerical method in Geomechanics, Balkema, 1988, pp.1051 - 1058