

群杭の水平抵抗に関する模型実験 (2)

柴田 徹・八嶋 厚・木村 亮

MODEL TEST OF Laterally LOADED PILE GROUPS-(2)

By Toru SHIBATA, Atsushi YASHIMA and Makoto KIMURA

Synopsis

Lateral load tests are carried out on model free-headed pile groups. Pile details and arrangement of pile groups are shown in Fig. 2. The test piles are embedded in relatively dense sand made by means of boiling procedure. The variations of group efficiency with pile spacing for Box-pile groups are shown in Fig. 7. Some comparisons are made between the test results and theoretical predictions based on the method developed by M. F. Randolph (1981). The predicted and measured values of group efficiency are generally in good agreement, with the maximum discrepancy being about 30% (see Fig. 8).

1. ま え が き

構造物基礎としての杭は列杭、組杭あるいは群杭として用いられるが、これらの挙動解析に当っては、まず基本的に単杭の水平抵抗、水平支持力が研究されてきた。その結果、単杭の水平抵抗については、理論的、実験的にかなりの程度まで説明されたと言える。しかし、群杭の水平抵抗を単杭の示す挙動や応力の重ね合わせで評価するのは不十分である。したがって群杭を取り扱うには、まず単杭と地盤と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、それらを結びつけなければならない。

筆者らは前報において¹⁾、杭頭回転自由の条件下で、模型直列杭、並列杭およびボックス配列杭の中心間隔と本数を種々に変えた水平載荷試験を実施した。また、その実験結果を説明する手法として、Randolph の解²⁾を用い比較検討した。それによれば、実験上の問題として、各試験ごとに必ずしも同一の地盤条件が再現できないためにデータはかなりばらついてはいるが、群杭効率の計算値は、約30%以内の精度で実測値を推定し得ると結論された。

この報告では、次の2つの点で前報を改良した。すなわち、①模型実験における均一地盤の再現性の向上を図るため、砂地盤のボイリング現象を利用した杭のたて込みを行った。その結果、再現性がかなり良好な模型地盤を作ることができた。②前報では、Randolph の解を用いて杭の水平変位を計算する際、地表での杭変位と杭頭（載荷点）変位とを近似的に等しいとしたが、今回は地表面上の自由長を考慮し、この部分を片持梁として取り扱うことにした。

2. 実験の方法

模型杭の水平載荷実験は、Fig. 1 の装置を用いて行った。土槽は高さ 105 cm、内径 165 cm の鋼製円筒形であり、水平荷重を載荷するために、外壁に滑車を取り付けられている。

模型杭は長さ 80 cm のアルミニウム管で、外径 20 mm、壁厚 1.6 mm である。杭頭部の曲げモーメントおよびせん断力を測定するために、それぞれ一対、計 4 個のひずみゲージを貼附している。また杭頭における拘束条件を回転自由とする目的で、頂板と杭頭との間にユニバーサル・ジョイントを使用した。

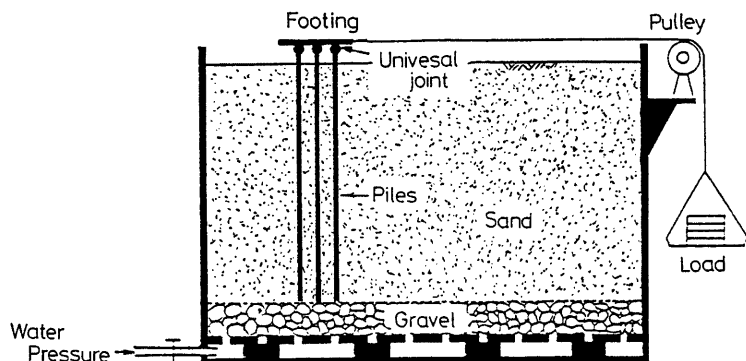


Fig. 1 Sketch of lateral loading apparatus

模型地盤の作成に際しては、できるだけ均一な地盤となるように、以下に述べる i)~iii) の作業を行った。i) 土槽下端 4 ケ所より圧力水をポンプ給水して模型地盤をボイリングさせる。ii) 模型杭を地盤内へ静かに挿入し、杭頭の高さおよび滑車に対する方向を調節する。iii) ポンプからの給水を止め、土槽下端 4 ケ所から排水して 24 時間放置する。

模型杭の配置は、Fig. 2 に示すように載荷方向に対して並列、直列およびボックス配置とし、杭本数を 2, 3, 4 本 (ボックス配列杭では 4, 9, 16 本)、杭中心間隔 s を杭径 d の 2.0, 2.5, 5.0 倍とした。なお群杭の影響が及ばない距離において、その都度、単杭の実験を並行して行った。模型杭への水平力は、杭 1 本当りの荷重ステップを 2 kg ずつ加え、8 kg, 16 kg において一旦ゼロまで戻して再載荷した。測定項目は、杭頭から約 6 cm 下 (地表面) の曲げモーメントとせん断力 (ひずみゲージ)、水平変位 (ダイヤルゲージ) および水平荷重 (テンションゲージ) である。これらは、各測定時間毎に自記装置付きのひずみ測定器に印字される。

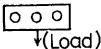
	Number of piles	s/d
Parallel-piles 	2	2.0, 2.5, 5.0
	3	2.0, 2.5, 5.0
	4	2.0, 2.5, 5.0
Series-piles 	2	2.0, 2.5, 5.0
	3	2.0, 2.5, 5.0
	4	2.0, 2.5, 5.0
Box-piles 	4	2.0, 2.5, 5.0
	9	2.0, 2.5, 5.0
	16	2.0, 2.5, 5.0

Fig. 2 Arrangement of pile groups

3. 実験結果と考察

3.1 群杭の荷重-変位関係

本実験においては、上記のようにボイリングによって模型地盤を作成した。実験は各杭配置について原則として 4 回ずつ行い、また単杭の試験は、群杭と並行して合計 64 回実施した。Fig. 3 にそれぞれの配列における群杭の荷重-変位曲線を示す。Fig. 3(a) は並列杭、Fig. 3(b) は直列杭、Fig. 3(c) はボックス配列杭をそれぞれ表わす。図中破線で囲まれた部分は、4 回の実験における測定値の範囲を示しており、実線は各変位の平均値を結んだものである。各図からわかるように、測定水平変位のばらつきはかなり小さいので、今回用いた地盤作成法による模型実験の再現性は良好であったといえる。同様のことは単杭試験についても

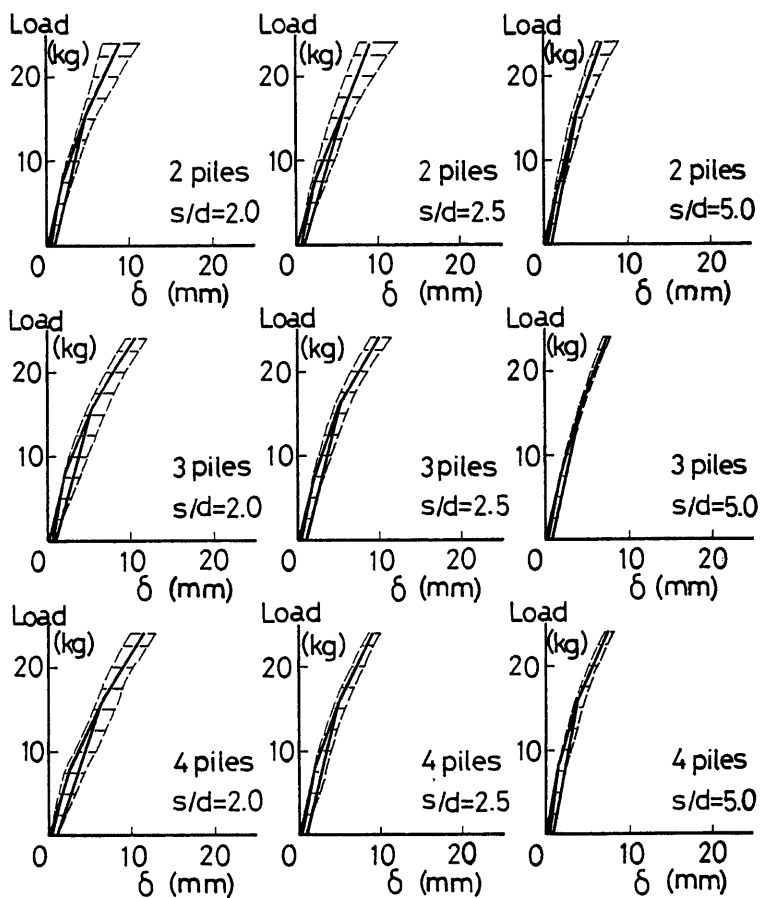


Fig. 3(a) Load vs. lateral displacement curves for Parallel arrangement piles

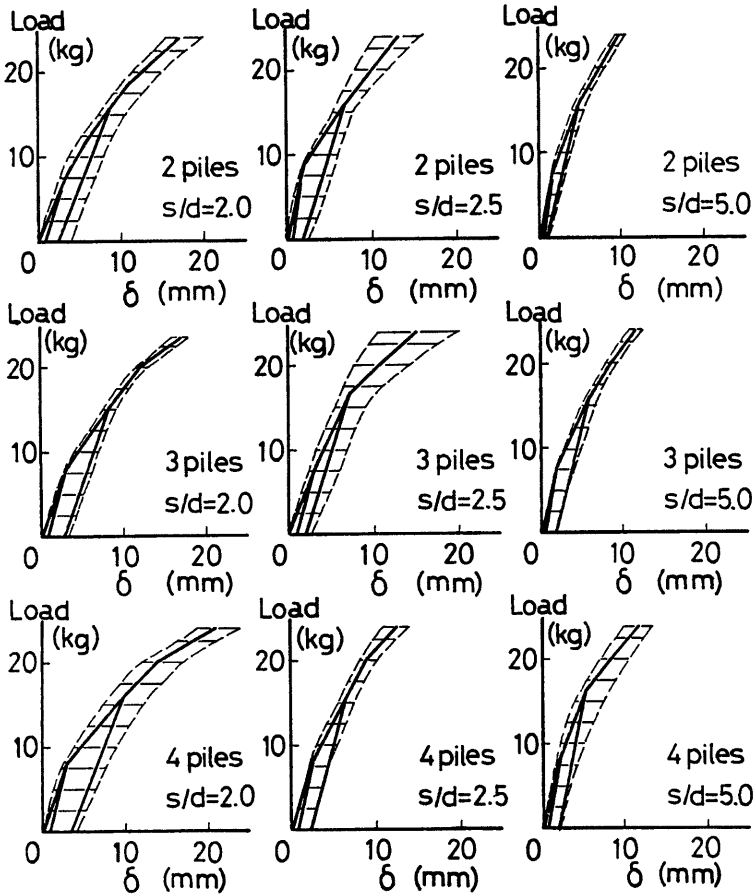


Fig. 3(b) Load vs. lateral displacement curves for Series arrangement piles

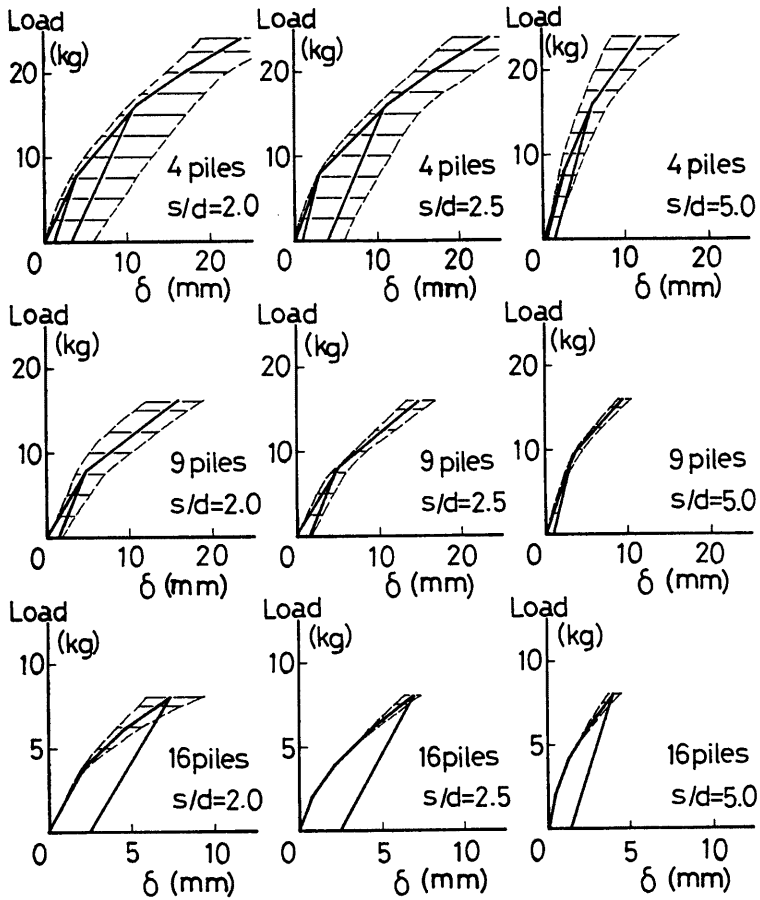


Fig. 3(c) Load vs. lateral displacement curves for Box arrangement piles

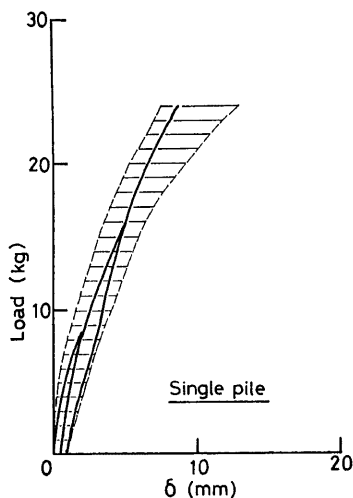


Fig. 4 Load vs. lateral displacement curve for single pile

いえ (Fig. 4 参照), 地盤表面から 6.1 cm の自由長を有する単杭の 0→8 kg 再載荷時の変位増分量の平均値として, $\delta_s = 1.98$ mm を得ている。

3.2 Randolph の解法

本研究では, 実験結果を解析する一つの方法として, M. F. Randolph (1981) の提案をとりあげた。これは, 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るもので, 群杭間の相互作用については, Poulos³⁾ と同様に Mindlin の第 2 解を応用している。また地盤剛性率の変化は Fig. 5 に示すように, 地表面における G_0 と深さ方向の変化率 $\Delta G/\Delta z$ で表わす。さらに, 地表面上の杭の挙動については片持梁としてその自由長を考慮している。

ここで実験で得られた単杭の平均変位 $\delta_s = 1.98$ mm を Randolph の解に当てはめると, ポアソン比 $\nu = 0.33$ と仮定した場合, 砂質地盤では $G_0 = 0 \text{ kgf/cm}^2$, $\Delta G/\Delta z = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ を, また $\Delta G/\Delta z = 0$ となるような粘性地盤では $G_0 = 2.75 \text{ kgf/cm}^2$ を得る。これら 2 組の値は, G_0 と $\Delta G/\Delta z$ のいずれかをゼロと仮定した場合であり, 実際には $G_0 \neq 0$, $\Delta G/\Delta z \neq 0$ になると考えられる。Fig. 6 は砂質地盤 ($G_0 = 0 \text{ kgf/cm}^2$, $\Delta G/\Delta z = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$) および粘性地盤 ($G_0 = 2.75 \text{ kgf/cm}^2$, $\Delta G/\Delta z = 0 \text{ kgf/cm}^2$) を

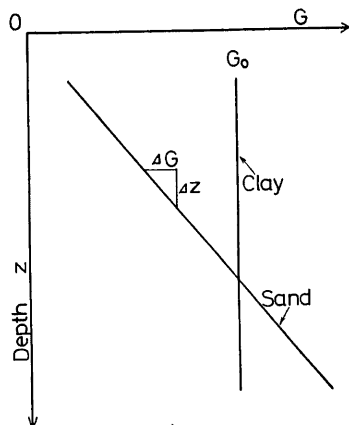


Fig. 5 Variation of shear modulus of soil with depth

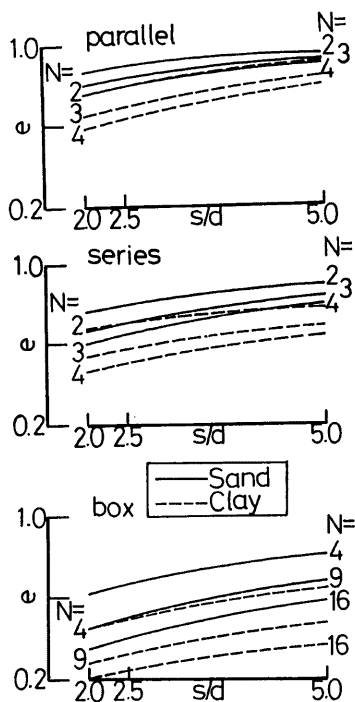


Fig. 6 Calculated group efficiencies by Randolph's solution

想定したとき、後述式(1)の群杭効率の計算結果である。
 この図より、単杭変位が同じ値を示す地盤であっても、
 粘性地盤の群杭効率が砂質地盤に比べて小さく評価され
 ることがわかる。

3.3 群杭効率

群杭効率は前報と同様に、変位を対象にした群杭効率
 e を採用した。すなわち

$$e = \frac{\text{一定荷重に対する単杭の変位}}{\text{(一定荷重} \times \text{杭本数) に対する群杭の変位}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で定義し、単杭の平均変位と同様に、群杭においても
 $0 \rightarrow 8 \text{ kg}$ 再載荷時の変位増分をとり両者を比較した。

Fig. 7 に 4, 9, 16本のボックス配列杭について群
 杭効率を示す。図中の縦線は各4回の実験値の範囲、ま
 た丸印は平均値である。実線の曲線は Randolph (砂質
 地盤) の解であり、杭本数の少ない場合 (2×2 本) を
 除いて、実験結果をほぼ近似できている。なお図中には、
 参考のために玉置の提案式⁴⁾ による結果を破線で示した
 が、(2×2 本) 杭を除けば群杭効率を過大に見積っ
 ているといえる。

Fig. 8 は、直列杭およびボックス配列杭について、実
 験から得られた群杭効率と Randolph 理論による群杭効
 率を比較したものである。これによれば、群杭効率の計

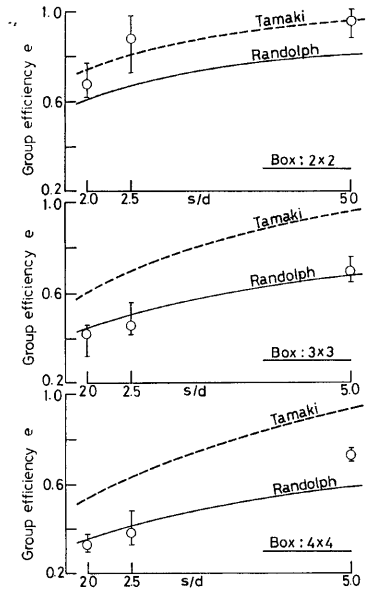
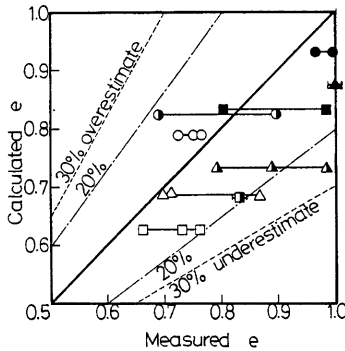
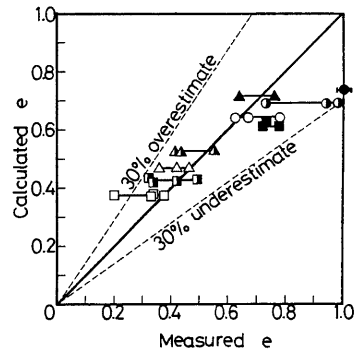


Fig. 7 Test results and theoretical curves on group efficiencies for Box arrangement piles



Number of piles	s/d=2.0	s/d=2.5	s/d=5.0
2	○	●	●
3	△	▲	▲
4	□	■	■

Fig. 8(a) Measured and calculated group efficiencies for Series arrangement piles



Number of piles	s/d=2.0	s/d=2.5	s/d=5.0
2 X 2	○	●	●
3 X 3	△	▲	▲
4 X 4	□	■	■

Fig. 8(b) Measured and calculated group efficiencies for Box arrangement piles

算値は、直列杭においては約20%以内、ボックス配列杭においては約30%以内の精度で実測値を推定できることがわかる。

3.4 荷重分担率

直列杭(4本)とボックス配列杭(4×4本)を例にとって、それらの群杭を構成する各杭の荷重分担率および地表面におけるモーメント分担率を Fig. 9 と Fig. 10 に示す。図中の実線は Randolph 理論による計算結果であり、弾性理論に基づいていることから、その分担率は対称配置となる杭(例えば Fig. 9 の①と④、および②と③)では同値となる。しかし、実験値、特にボックス配列杭では必ずしもそのような傾向を示さず、荷重方向に対して後方に位置する杭ほど、弾性論による分担率よりもかなり小さな値となっている。

4. む す び

前報に引き続き、模型杭の中心間隔と本数を種々に変えて、並列杭、直列杭およびボックス配列杭の水平荷

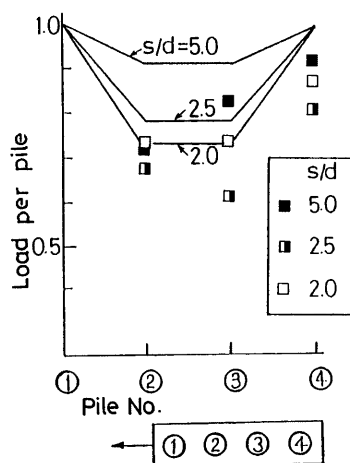


Fig. 9 Distribution of load for Series arrangement piles

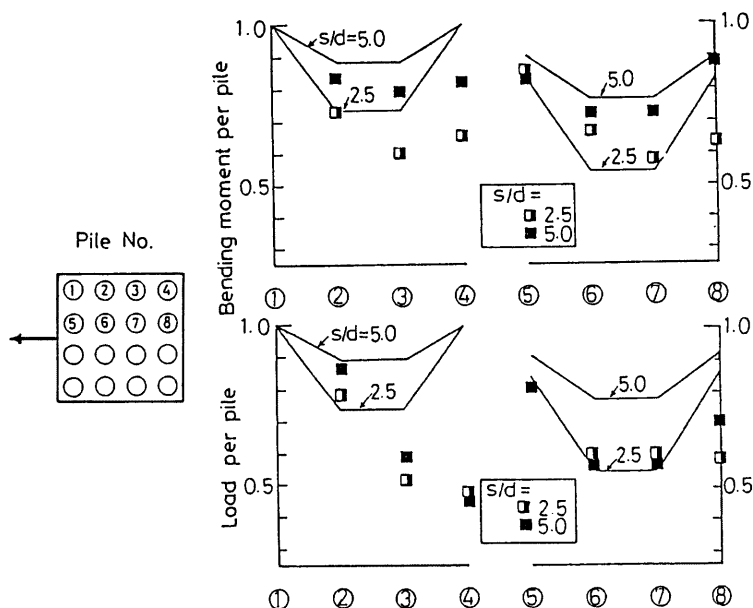


Fig. 10 Distribution of bending moment and load for Box arrangement piles

実験を実施した。杭頭はすべて回転自由の条件である。各種の測定値の中から、杭頭変位に着目して群杭効率に対する比較検討を行った。実験結果と比較する手法として Randolph の解を用いた。

模型実験における均一地盤の再現性はかなり良好であった。また Randolph の解による群杭効率の計算値は、 $\pm 30\%$ 程度の精度で実測値を推定し得るといえる。しかし、杭周辺地盤に塑性変形が生じ、弾性論の適用範囲を越えるためか、群杭効率や荷重分担率を説明できないケースもあった。

筆者らは群杭の水平支持力について、汎用性のある解析手法を開発するために、擬似三次元の有限要素プログラミングを別途に実施している⁹⁾。今後は Randolph 解との整合性を図りつつ、杭頭固定条件や杭と地盤の相対剛性を考慮した室内実験、実地盤における大規模な試験などと合わせて、成果を続報に盛り込みたいと考えている。

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)，京大防災研年報，第26号B-2，1983，pp. 35-44.
- 2) Randolph, M. F.: The response of flexible piles to lateral loading, *Géotechnique*, Vol. 31, No. 2, 1981, pp. 247-259.
- 3) Poulos, H. G.: Behavior of laterally loaded piles II-pile groups, *J. Soil Mech. Fdn. Div., ASCE*, Vol. 97, SM5, 1971, pp. 733-751.
- 4) 玉置 修・三橋晃司・今井常雄：水平抵抗における群杭効果の研究，土木学会論文報告集，No. 192，1971，pp. 79-89.
- 5) 柴田 徹・八嶋 厚・深田 久：杭の水平抵抗に対する擬似三次元有限要素解析（その1），第38回土木学会年次学術講演会，第3部，1983，pp. 637-638.