

群杭の水平抵抗に関する模型実験（１）

柴田 徹・八嶋 厚・寺田 典生

MODEL TEST OF LATERALLY LOADED PILE GROUPS-(1)

By Toru SHIBATA, Atsushi YASHIMA and Norio TERADA

Synopsis

Lateral load tests are made on model free-headed pile groups. Pile details and arrangement of pile groups are shown in Tables 1 and 2. The test piles are embedded in relatively dense sand of $D_r \approx 70\%$. The variations of group efficiency with pile spacing for Parallel-, Series- and Box-pile groups are shown in Figs. 8-10. 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. 11).

1. ま え が き

構造物の支持杭には、偏土圧、地震、波、風等によってその頭部に水平外力を受ける主働杭と称するものや、地すべり防止杭のように、周辺地盤の動きに抵抗する受働杭といわれるものがある。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になるが、この問題は杭群に囲まれた土の挙動、杭頭の拘束条件、荷重分担率等の複雑な要因を含んでおり、未解明の点を多く残しているのが現状である。

一方都市内の土木工事をみると、用地の制約を受けて、限られた面積に所要本数の杭を打設せざるを得ないケースがふえてきている。そのために杭中心間隔が杭径の2.5倍あるいは2.0倍を割る場合も出てくる。群杭間隔が狭くなるほど、水平支持力の低減は顕著となるが、果して杭の水平抵抗に対する低減率をどのように考えればよいのか。これが本報文のねらいの一つである。

著者らは、既に群杭の水平支持力に関する一連の研究を進めてきた。その目的は、汎用性のある解析法を開発し、それを駆使して設計指針に対する有益な示唆を与えることにある。そのために擬似三次元の有限要素プログラミングを実施しつつあり、単杭の挙動に対しては見通しが立てられたが、まだ群杭に適用できる段階には至っていない¹⁾。今回は別途に、杭頭固定の模型群杭の水平力試験、実地盤での大規模な杭頭自由水平載荷試験等も実施したので、それらと合わせて引続き報告する予定である。

ここでは第1報として、まず杭頭自由の室内模型実験において、杭中心間隔や杭本数を種々に変えて、並列、直列およびそれらを組合わせたボックス配列杭の水平載荷試験を行う。同時に、群杭と同じ模型地盤を用いた単杭の試験も数多く実施する。ついで群杭の水平支持力に関して、これまでに提案された多くの手法の中から、理論的な根拠もあり、最も新しく、かつ実用的と判断した M. F. Randolph の方法 (1981)²⁾ をとりあげ、実験結果との比較検討を行う。

2. 実験の方法

模型杭の水平載荷試験は、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 110 cm のアルミニウム管で、その諸元を Table 1 に示す。杭各部のモーメントを測定する

Table 1 Details of aluminium model pile.

External diameter	Wall thickness	Length	Bending rigidity
20 mm	1.6 mm	110 cm	$2.84 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$

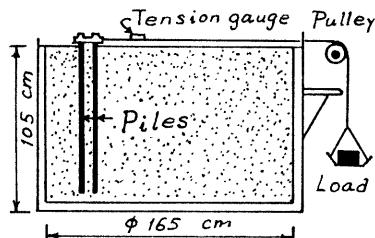


Fig. 1 Sketch of lateral loading apparatus.

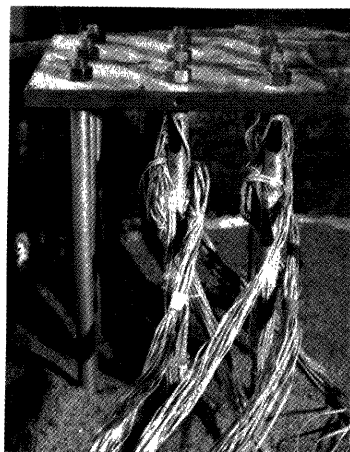


Photo. 1 Piles and strain gauges.

ために、杭表面に一对ずつのひずみゲージを貼り、コーティング剤で被覆した。ゲージの位置は杭頭から 40 cm まで 10 cm 間隔、それ以深は 20 cm 間隔の合計 16 コである (Photo. 1)。

今回の実験では、杭頭における拘束条件を回転自由とするために、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。このジョイントは、前後左右の 2 方向に対して自由な回転を許すものである (Photo. 2)。

模型地盤の作成に関しては、できるだけ均一な地盤となるように、以下の作業を行った。まず模型杭をたて込んでから、土槽上端よりの深さ 50 cm までは、砂を投入して足で 200 回踏み固める。その際に任意の 10 点の地盤剛性をポータブルコーンで調べ、地盤が均一であることを確かめる。その後は厚さ 10 cm ずつ砂を投入していき、そのたびに 200 回踏み固めてポータブルコーンで均一性を確認する。このようにして土槽の上端まで地盤が造成されると、最後に 400 回踏み固める。なお群杭の載荷実験においては、杭間の地盤剛性が重要と考えられる

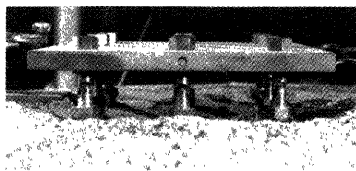


Photo. 2 Universal joints.

ので、杭間の地盤作成には特に細心の注意を払った。

Fig. 2 には、使用した砂の粒径加積曲線を示す。また別途にモールド内で締固め度を変え、コーン貫入抵抗値を媒介として模型地盤の間隙比を推定したところ、約 0.55 (相対密度 $Dr \approx 70\%$) であった。

模型杭の配列は、Table 2 の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、杭本数と杭中心間隔 s を $s=2.0d, 2.5d, 5.0d$ に変えた (Fig. 3)。なお群杭の試験期間を通じて、単杭の実験を並行して実施した。

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 および 24 kg において一旦ゼロまでもどして再載荷した。杭 1 本当りの荷重サイクルを Fig. 4 に示す。

測定項目は、上述した各ひずみゲージの値、Fig. 5 に示す水平変位のためのダイヤルゲージ ($D(H_1)$, $D(H_2)$), 垂直変位のためのダイヤルゲージ ($D(V_1)$, $D(V_2)$), およびテンションゲージの値である。これらは、

各測定時間に自記装置付きのひずみ測定器に自動的に印字される。

Table 2 Details of laterally loaded group pile tests.

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

s: spacing between pile centreline, d: diameter of pile

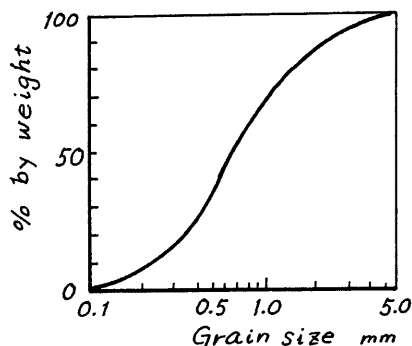


Fig. 2 Grain size distribution curve.

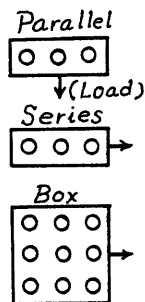


Fig. 3 Arrangement of pile groups.

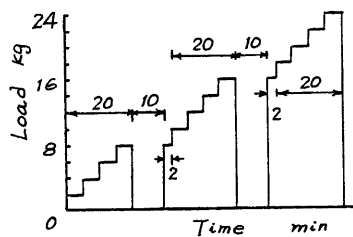


Fig. 4 Lateral loading cycles.

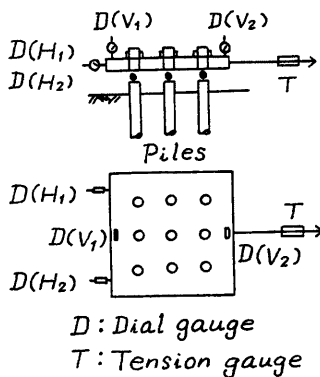


Fig. 5 Piles and gauges.

3. Randolph の解法の概要

水平力を受ける群杭の問題は、その理論的研究が1930年前後から手掛けられたにも拘わらず、実物実験による検証の困難さや地盤の力学挙動の複雑さなどと相まって、いまだに古くて新しい課題といわれている。

過去50年間にわたる理論的研究の動向については、西田³⁾が詳細なレビューを行っているのでここでは繰返さないこととし、まず Randolph の解法を概説する。

この方法は、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で、群杭間の相互作用については、Poulos⁴⁾と同様に Mindlin の第2解を応用している。

まずヤング率が深さに比例して増加するような地盤中に単杭があり、それに水平力が載荷された場合、杭の変形に関係するのは、次の各量であるとする。

- ①外力：一杭頭に作用する水平力 H 、杭に地表面で作用する曲げモーメント M 。
- ②杭材：一杭の直径 d 、有効ヤング率 $E_p = 64(EI)_p/\pi d^4$ 。
- ③地盤：一剛性率 G の深さ z 方向の増加率 $m = dG/dz$ 、あるいはポアソン比 ν を導入して $m^* = m(1 + 3\nu/4)$ 。

すなわち、単杭の地表面における変位量 δ_s は

$$\delta_s = f\left(\frac{H}{m^* d^2}, \frac{E_p}{m^* d}, \frac{M}{m^* d^3}\right) \quad (1-a)$$

この関数形は、後述の式 (1-b) にて与えられる。

次に群杭に対しては、Poulos⁴⁾と同様に杭相互間の影響係数 (interaction factor) を考える。いま単杭の剛性を k (=荷重/変位) としたとき、 n 本群杭中の i 番目杭の変位は一般に

$$\delta_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} P_j \quad (2)$$

ここに α_{ij} : i 番目と j 番目杭の間の影響係数 ($\alpha_{ii}=1$)、 P_j : j 番目杭の荷重である。そして水平力を受ける頭部自由杭では、水平力によって杭変位を増加させる係数 (α_H)、モーメントによって杭変位を増加させる係数 (α_M) その他が定義される。

これら影響係数は、次の各量の関数として表わされる。

$$\alpha = g\left(\frac{E_p}{G_c}, \rho_c, \frac{d}{s}, \beta\right) \quad (3-a)$$

この式中 G_c は、杭の限界長さ l_c を次式 (4) で求めるが、 $l_c/2$ 深さにおける $G^* = G(1+3\nu/4)$ に等しい (Fig. 6 の $G_c = G^*_{0.5l_c}$)。

$$l_c = d \left(\frac{2E_p}{m^* d} \right)^{2/9} \quad (4)$$

また ρ_c は地盤剛性の均一性を表わすパラメータで、 $l_c/4$ と $l_c/2$ 深さにおける $G(1+3\nu/4)$ 値の比、 s は杭中心間隔、 β は杭中心線と載荷方向のなす角度である (Fig. 6 参照)。

式 (3-a) の具体的な関数形は、後述の式 (3-b) に示される。

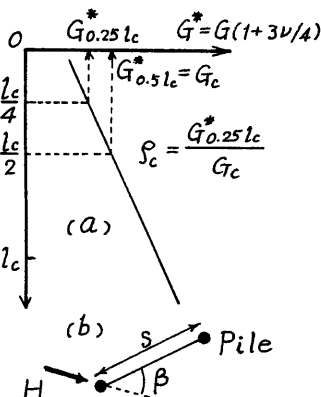


Fig. 6 (a) Definition of ρ_c and G_c ;
(b) s and β .

4. 実験結果と考察

一連の実験では、群杭の杭頭変位、各杭の荷重分担率、曲げモーメントの深さ方向分布、地中での変形パターンなどを調べた。これらの中から、以下では群杭効率に重点を置いて実験結果を検討し、曲げモーメントについても少し触れることにする。

4.1 群杭効率の定義

群杭の支持力が、(単杭支持力) × (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とい

い、次のように表わされる。

$$\text{群杭効率} = \frac{\text{群杭の支持力}}{(\text{単杭の支持力}) \times (\text{群杭本数})}$$

このほかに群杭効率は、同一荷重に対する変位の増加、あるいは各杭の荷重分担率の違いなどによっても表現できる。本報文では支持力に対する群杭効率ではなく、変位を対象にした群杭効率 e を採用した。すなわち

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

で定義し、上式の一定荷重はすべて 8 kg とし、再載荷 (0→8 kg) 時の変位増分量で比較した。

Fig. 7 は e を求める際の具体例であり、単杭と群杭 (16 ボックス配列杭, $s=2.5d$) の荷重と杭頭変位の関係を示している。ただし群杭に対する荷重は、杭 1 本当りの平均荷重をとる。上述のように、0→8 kg 再載荷時の変位増分量を δ_s (単杭) と δ_g (群杭) とすれば、群杭効率は $e=\delta_s/\delta_g$ として求められる。

なお単杭の δ_s については、模型地盤を造り直して群杭試験を実施するごとにそれを測定し、全体の平均値として、 $\delta_s=176 \times 10^{-2}$ mm を得ている。

4.2 群杭の変位と群杭効率

並列杭、直列杭およびボックス配列杭についての杭頭変位 δ_g の実験結果が、(杭中心間隔 s /杭径 d) に対して、Fig. 8~10 (a) にプロットされている。実験値は、地盤条件をそろえることの困難さから、相当ばらついてはいるが、 s/d 比が大きくなるほど δ_g は小さくなる傾向

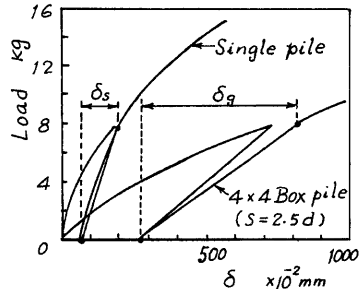


Fig. 7 Deflections of single pile and group piles.

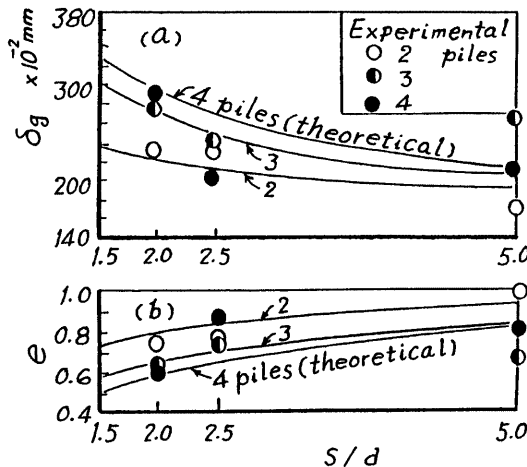


Fig. 8 Test results and theoretical curves for Parallel arrangement piles: (a) pile deflections at the loaded end; (b) group efficiencies.

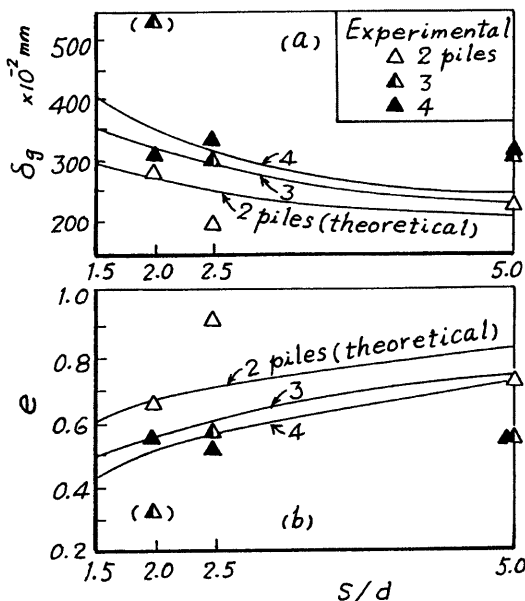


Fig. 9 Test results and theoretical curves for Series arrangement piles:

(a) pile deflections at the loaded end; (b) group efficiencies.

がみられる。また Fig. 8~10 (b) には、単杭の変位 $\delta_s = 176 \times 10^{-2}$ mm としたときの群杭効率 e がプロットしてある。

さてこれらの図における曲線は Randolph による解を示したものであり、以下のような手順で求めた。

まず単杭の地表面における変位 δ_s は、さきに式 (1-a) で与えられたが、その関数形は

$$\delta_s = 2.16 \frac{H}{m^* d^2} \left(\frac{E_p}{m^* d} \right)^{-3/9} + 4.80 \frac{M}{m^* d^3} \left(\frac{E_p}{m^* d} \right)^{-5/9} \quad \dots \dots \dots (1-b)$$

上式を用いて、未知数 m^* を求める。ここで δ_s (地表) と δ_s (杭頭) とは実際には等しくないが、水平力載荷点が地上 4 cm で杭全長 110 cm に比べて小さいこともあり、近似的に $\delta_s \approx \delta_s$ とみなす。そして $H = 8$ kg, $d = 2.0$ cm, $E_p = 3.616 \times 10^5$ kg/cm², $M = 8 \times 4 = 32$ kg·cm を代入すると、結果として $m^* = 0.2633$ kg/cm³ が求まる。これは深さ変化 $\Delta z = 1.0$ m に対して、地盤の剛性率増分 $\Delta G(1 + 3\nu/4)$ が 26.33 kg/cm² であることを意味している。

以上の計算により、式 (1-b) 右辺の第 1 項は 1.48 mm, 第 2 項は 0.28 mm となる。従って群杭の変位 δ_g は、影響係数 α を用いて、

$$\delta_g = 1.48(1 + \Sigma \alpha_H) + 0.28(1 + \Sigma \alpha_M) \quad \text{単位: mm}$$

ここで α_H と α_M の内容は、既に式 (2-a) にて説明したが、具体的には次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_H &= 0.25 \rho_c \left(\frac{E_p}{G_c} \right)^{1/7} \frac{d}{s} (1 + \cos^2 \beta) \\ \alpha_M &= \alpha_H^2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2-b)$$

ただし $\alpha_H > 0.5$ の場合は、 $1 - (4\alpha_H)^{-1}$ に補正。

今回の模型実験に対しては、 $\rho_c = 0.5$ (次節の曲げモーメント分布より), $l_c = 46.23$ cm, $G_c = 6.09$ kg/cm²

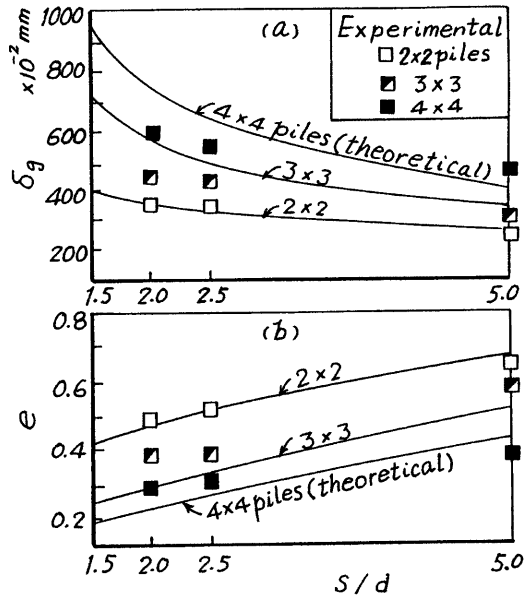


Fig. 10 Test results and theoretical curves for Box arrangement piles: (a) pile deflections at the loaded end; (b) group efficiencies.

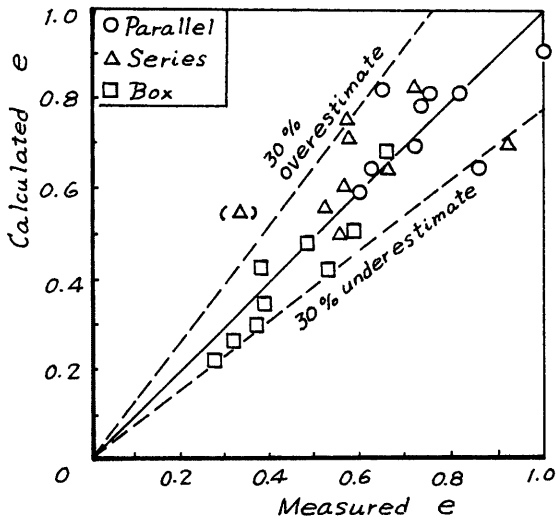


Fig. 11 Measured and calculated group efficiency.

となるので、式 (2-b) を用いて杭相互間の影響係数 α_H と α_M を計算することができる。

Fig. 8~10 に示した理論曲線、すなわち $\delta_e \sim (s/d)$ 曲線および $e \sim (s/d)$ 曲線は、以上の手順を経て描いたものである。実測値にかなりのばらつきがあるので厳密な議論はできないが、理論値は概ね実験値を量的にも説明し得ると評価される。

Fig. 11 は、今回対象とした杭頭自由の各種群杭の実験と Pandolph 理論との比較をしたものである。これによれば、群杭効率の計算値は、約30%以内の精度で実測値を推定できることが分かる。なお参考までに玉置らの方法⁵⁾を用いて同様の検討を行ったが、計算結果は e の値を極めて過大(最大2.5倍)に見積もることになった。

4.3 曲げモーメントの深さ分布

頭部自由の単杭に生じる曲げモーメントの深さ方向分布は、 ρ_c をパラメータとして、Randolph より

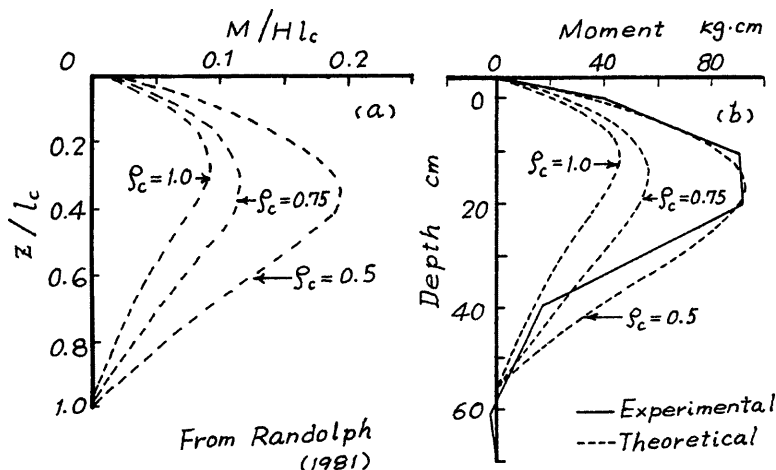


Fig. 12 Bending moment profile: (a) theoretical curves; (b) comparison with test result for single pile.

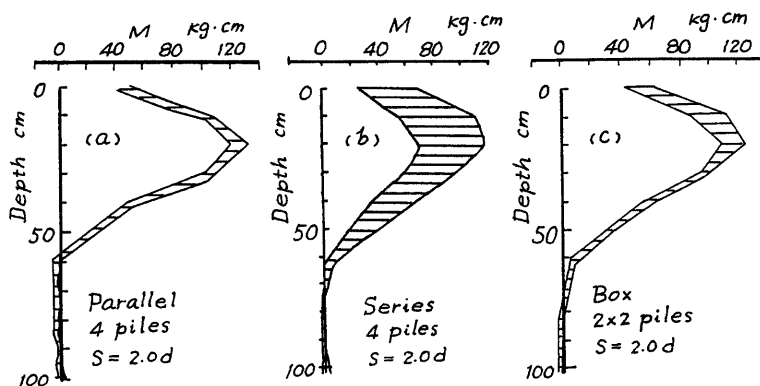


Fig. 13 Examples of bending moment distributions for pile groups.

Fig. 12 (a) のように与えられている。これによれば、最大曲げモーメントが発生する深さは、地盤の剛性が均一な場合 ($\rho_c=1.0$) に $l_c/4$ 、剛性が深さに比例する場合 ($\rho_c=0.5$) に $l_c/3$ であり、また最大モーメントは

$$M_{max} \approx \left(\frac{0.1}{\rho_c} \right) H l_c$$

で表わせる。このことから、水平力 H と実測の M_{max} および杭の限界長さ l_c より、 ρ_c を推定することができる。

Fig. 12 (b) は、単杭の実測モーメント（実線）と、上記の方法で求めた理論曲線（破線）との比較である。図によれば、実測モーメントの深さ方向分布は、およそ $\rho_c=0.5$ に相当していることが分かる。

次に群杭の例として、並列 4 本杭、直列 4 本杭およびボックス 4 本杭の場合を Fig. 13 に示す。杭間隔はいずれも $s=2.0d$ であるが、杭配列の違いによる差はほとんどみられない。しかし 16 本ボックス杭 (Fig. 14) になると、 M_{max} の値とその発生深さには Fig. 13 と差がないが、限界深さ l_c が杭先端付近まで下がる点特徴的である。この傾向は、ボックス配列杭で 9 本以上に多くなると、杭間隔の大小に拘わらずみられるので、今後、群杭挙動を解析する上で、考慮すべきポイントの一つとなろう。

5. む す び

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載荷試験を実施した。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、今回は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。

理論の根拠としては、最近に提案された Randolph の解を用いた。それは単杭の水平載荷試験より地盤の弾性パラメータを推定し、その値を適用すると同時に、Mindlin の第 2 解に基づく影響係数を導入して、群杭の変位（あるいは群杭効率）を求めようとするものである。

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ず、従って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。また杭に発生する曲げモーメントの深さ方向分布についても、単杭の理論解は実測値をよく説明できると評価された。

冒頭にも述べたように、著者らは群杭の水平支持力について、汎用性のある解析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実施している。しかし単杭の挙動に対しては見通しが立てられたが、まだ現時点では群杭に適用できる段階には至っていない。今後は杭頭固定条件を考慮した室内試験、実地盤における大規模な試験などと合わせて、成果を統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・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，昭. 58，pp. 637-638.
- 2) Randolph, M. F.: The response of flexible piles to lateral loading, *Géotechnique*, Vol. 31, No. 2, 1981, pp. 247-259.

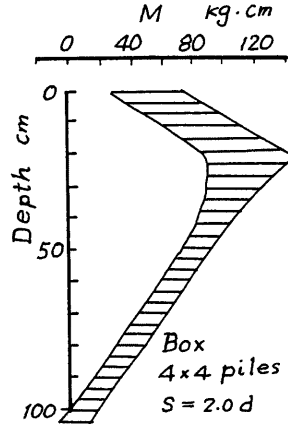


Fig. 14 Example of bending moment distribution for Box-piles.

- 3) 西田義親：杭基礎の水平支持力—文献資料と研究解説，鋼管杭協会報告第 1 号，鋼管杭協会，昭 50.
- 4) Poulos, H. G.: Behaviour of laterally loaded piles II—pile groups, J. Soil Mech. Fdn. Div., ASCE, Vol. 97, SM 5, 1971, pp. 733–751.
- 5) 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, 昭. 46, pp. 79–89.