

群杭の水平抵抗に関する研究

木村 亮・柴田 徹・八嶋 厚

STUDY FOR LATERALLY LOADED PILE GROUPS

By Makoto KIMURA, Toru SHIBATA and Atsushi YASHIMA

Synopsis

When designing piled foundations, how to assess the reduction factor of lateral resistance is one of the most important problems. In order to help elucidate the above question, a series of model tests of laterally loaded piles were carried out, and the quasi-three-dimensional finite element method (GPiLE) was also developed. In this paper, firstly how to evaluate the ground constants using prototype single pile tests has been researched by PIGLET developed by M. F. Randolph (1981). Secondly, the prototype group piles' foundation was analysed by PIGLET.

1. ま え が き

構造物の支持杭の設計には、群杭の水平抵抗に関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、各杭の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。一般に杭の水平抵抗に関する問題点を列挙すると、以下のようにまとめられる。

- (1) 地盤と杭の相互作用により、杭が地盤から受ける地盤反力
- (2) 杭周辺地盤の応力分布
- (3) (1)、(2)による地盤と杭の変形状態とその非線形性
- (4) 地盤の弾性域と塑性域
- (5) 群杭による低減効果と各杭の荷重分担率
- (6) 杭周辺地盤のクリープ性状
- (7) 主働杭と受働杭
- (8) 杭頭の固定度
- (9) 各種施工法による挙動の差異

群杭基礎の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ことは知られているが、果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、現在のところ不明である。

そこで筆者らは群杭の水平抵抗の問題点を解明するために、上記のポイントを念頭におき Fig. 1 の流れに従い、現在までに以下のような模型実験を実施した。

- 1) 杭径 (D) 2 cm, 杭長 (ℓ) 80 cm の室内模型実験¹⁾²⁾
パラメータ; 杭配置, 杭中心間隔, 杭本数, 杭と地盤の相対剛性
- 2) 杭径 16.5 cm, 杭長 4.5 m の大型模型実験³⁾
パラメータ; 杭配置, 杭中心間隔, 杭本数, フーチング抵抗の有無
また実験結果を説明できる数値解析手法として、地盤を層状に分割した擬似 3 次元 FEM モデル

Interpretation of group' piles
model tests using back-analysis
technique from single pile

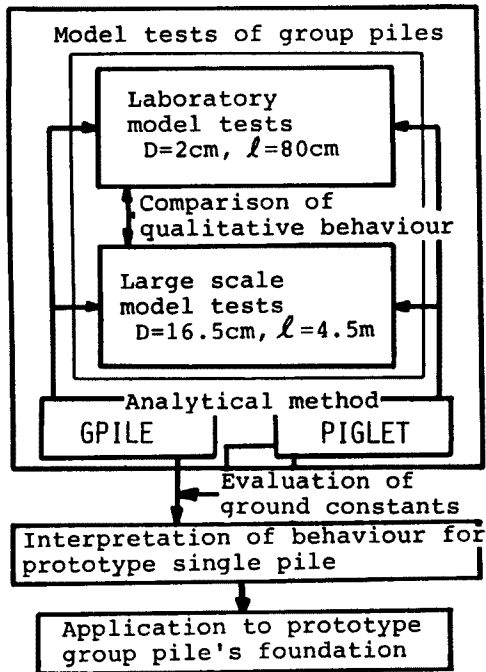


Fig. 1. Flow of pile group's study.

(GPILE)⁴⁾を開発し、Randolphが提案した簡便法(PIGLET)⁵⁾と共にその適用性に対して検討を加え、以下のような結果を得た。

- (1) 群杭の水平抵抗は、杭配置、杭間隔、杭本数および杭と地盤の相対剛性に大きく依存する。
- (2) 杭径16.5cmの模型実験の定性的挙動は杭径2cmの実験結果と一致した。
- (3) フーチング前面の土による抵抗は無視できなく、群杭基盤は杭とフーチングの協同作業により水平力に抵抗する。
- (4) GPILEとPIGLETは、単杭の実験結果より逆算した地盤定数を用いると、群杭の実験結果を概ね説明することができる。
- (5) 杭間隔が同じ場合、杭本数を増やせば群杭効果より支持力は低減するので、杭本数を増せば支持力は比例的に増加するという考え方は見直す必要がある。

本研究はFig. 1に示すように、実際問題にGPILEおよびPIGLETを適用する第一歩として、地盤定数の決定に関し単杭の実大水平載荷試験の結果を用い検討を加え、さらに実大群杭基礎に適用したものである。ただしGPILEは準3次元解析であるため、容量の大

きな計算機を必要とするが、PIGLETはマイコン等でも計算ができ、弾性解ではあるがその簡便性から有用な手法であると考えられ、ここではPIGLETを用いて計算を行った。

2. 単杭の実大水平載荷試験結果の評価

2.1 単杭の実大水平載荷試験

本研究では単杭の実大水平載荷試験として、足立⁶⁾が収集した135例の載荷試験結果を用いた。試験結果として明記されているものは、Table 1に示すように杭の種類、杭の寸法、荷重作用点、変位の測定点、杭頭変位(δ) 5,10,15 mm時の作用荷重、地盤の種類および杭の根入れ長1/3深さまでの平均N値の7項目である。またFig. 2に示すように、杭の種類は鋼管杭、PC杭および場所打ち杭の3種類で、地盤条件は粘性土、砂質土および互層に分類されており、さらにN値に関しては杭根入れ1/3深さまでの平均値(深さを重みとして平均化)が与えられている。また杭径は30 cm~120 cm、杭根入れ長さは5 m~60 mである。これらの情報だけを用いてPIGLETで単杭の杭頭変位を推定した結果を次節に示す。

2.2 地盤定数の決定法とPIGLETによる載荷試験結果の評価

まず始めにPIGLETは弾性計算であるので、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 ν が必要である。ここではポアソン比 ν を0.33と仮定して、砂質土および粘性土の地盤定数をFig. 3のように簡略化して考える。すなわち、地盤を $G_0=0$ kgf/cm²のS型地盤と、 $\Delta G/\Delta z=0$ kgf/cm²のC型地盤の2種類に分類する⁷⁾。Fig. 3の破線のような地盤はS、C型地盤としては表現しにくい、ここではC型地盤として取り扱い、互層はすべてC型地盤と

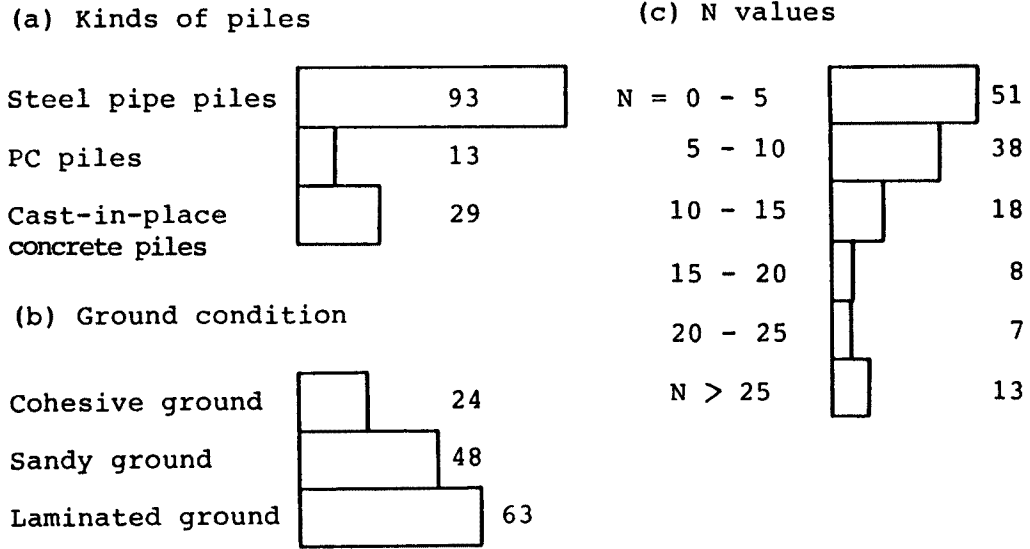


Fig. 2. Classification of prototype single pile's tests.

する。

PIGLET を用いて杭頭変位を推定する場合最も問題となるのは、平均的な N 値だけで表されている地盤をどのように評価するかである。そこでまず始めに N 値からせん断弾性係数 G を推定するために、プレッシャーメータから得られた $E = 7N^{0.8}$ を用いて次式により G を評価した。

$$G = E / \{2(1+\nu)\} = 7N / \{2(1+\nu)\} = 2.69N \dots\dots\dots (1)$$

道路橋示方書では地盤反力係数 k (kgf/cm²) を N 値から求める場合 $E = 28N$ を適用し、次式を用いる⁹⁾。

$$k = \alpha ED^{-3/4}y^{-1/2} (y: \text{水平変位}) \dots\dots\dots (2)$$

ここで α は E の設定方法による補正係数で、N 値から E を求める場合 0.2 となり $0.2 \times 28N = 5.6N$ であるから、 $E = 7N$ として G を評価するのはある程度妥当と思われる。

Fig. 4 は載荷試験の杭頭変位 1 cm 時に作用する水平荷重と、PIGLET で杭頭変位が 1 cm と計算される水平荷重とを比較したものである。図から PIGLET は粘性土、砂質土および互層という地盤の種類に関わらず、1 cm の杭頭変位に必要な荷重が小さいので変位を過大評価し、約 2 倍の変位を計算していることになる。また杭の種類によってプロット点に有為な傾向の差はみられなかった。

そこで Chang 式と PIGLET を比較するために、1 cm の変位を与える水平荷重の実測値を用いて Chang 式、

Table 1. Items of results of laterally loaded prototype single pile tests

1) Kinds of pile
2) Dimension of pile length, diameter, thickness
3) Loading point
4) Measuring point of displacement
5) Acting load when displacement of pile top (δ) equal 5, 10, 15mm
6) Kinds of ground
7) Mean value of N value

Shear modulus G (kgf/cm²)

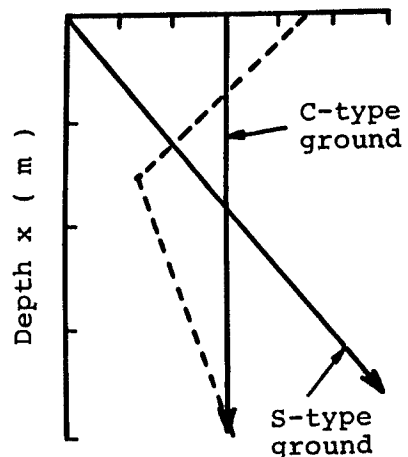


Fig. 3. C-type and S-type ground.

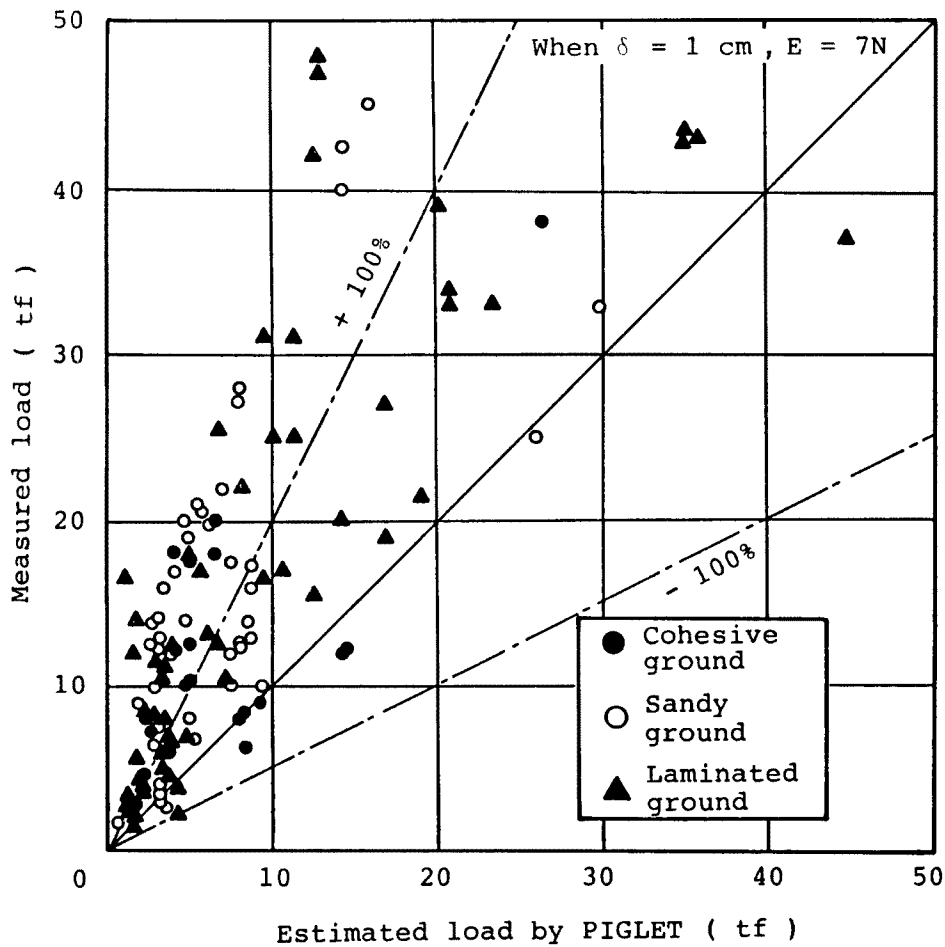


Fig. 4. Comparison between measured and calculated lateral load when $\delta = 1$ cm.

PIGLET から得られる杭頭変位をそれぞれ縦軸，横軸にプロットしたものが Fig. 5 である。両手法が実測値を正しく評価できれば，全てのプロット点は A 点に集中する。しかし PIGLET は Chang 式よりも約 2 倍の変位を与えている。いま $\pm 30\%$ までの誤差を許容すると，PIGLET および Chang 式が実測変位をうまく表現できる範囲はそれぞれ領域 B，C となるが，135 例のプロット点に対して領域 B，C 内にある点の割合を求めると，それぞれ 16% と 37% で Chang 式の方が単抗の挙動をうまく表現していることは明かである。また Fig. 6 は $\delta = 1$ cm の場合，(2) 式を用いて N 値から k 値を計算した結果と，実測の杭頭変位から Chang 式を用いて逆算した k 値を比較したものである。図では杭の種類をパラメータとしているが，ばらつきはあるものの (2) 式より得られる k 値と逆算 k 値は概ね等しい。

ここで再び Fig. 5 に注目すると，粘性土および互層に比べて砂質土の変位が大きいことがわかる。E = 7 N から PIGLET で推定した単抗の変位は実測値よりも大きいので地盤定数を過小評価している。そこで E = 28 N として (1) 式より G を推定し，Fig. 4 と同様に $\delta = 1$ cm 時の作用荷重の推定値と測定値を比較したものが Fig. 7 である。Fig. 7 と Fig. 4 を比較すると地盤定数を大きく評価したため，Fig. 7 では $\delta = 1$ cm に必要な作用荷重は大きくなりプロット点は右にシフトして，白丸の砂質土に対してはかなりうまく作用荷重を推定できている。しかし黒三角印の互層に関しては推定作用荷重がかなり大きくなり，逆に地盤定数を過大に評価している傾向にある。図中には示していないが，互層のプロット点の内 15 ケースは作用荷重が 50 tf 以上と推定され図の右上にはみ出した。しかし Fig. 7 では 50% のケースが $\pm 30\%$ の誤差内に収まり，Fig. 4 の結果よりかなり改善され，地盤定数のある程度うまく評価している

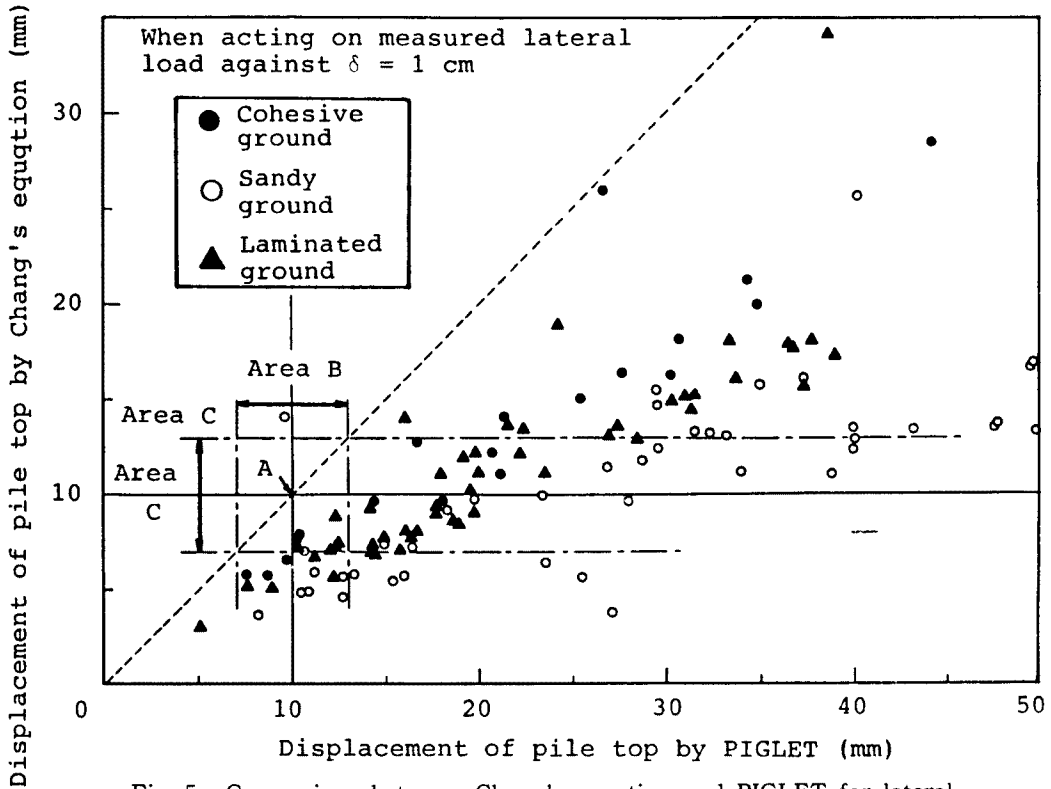


Fig. 5. Comparison between Chang's equation and PIGLET for lateral displacement of pile top.

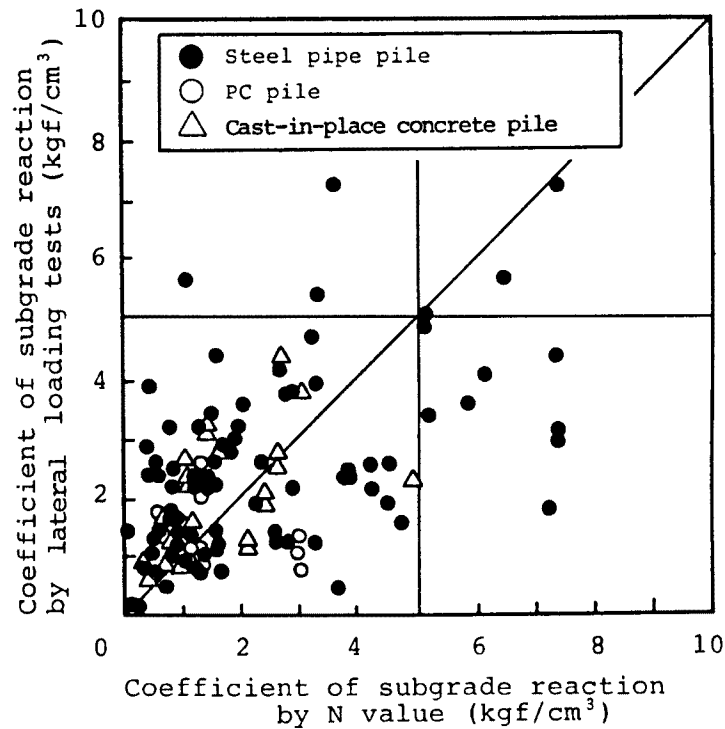


Fig. 6. Comparison between estimated and back-analysed k values.

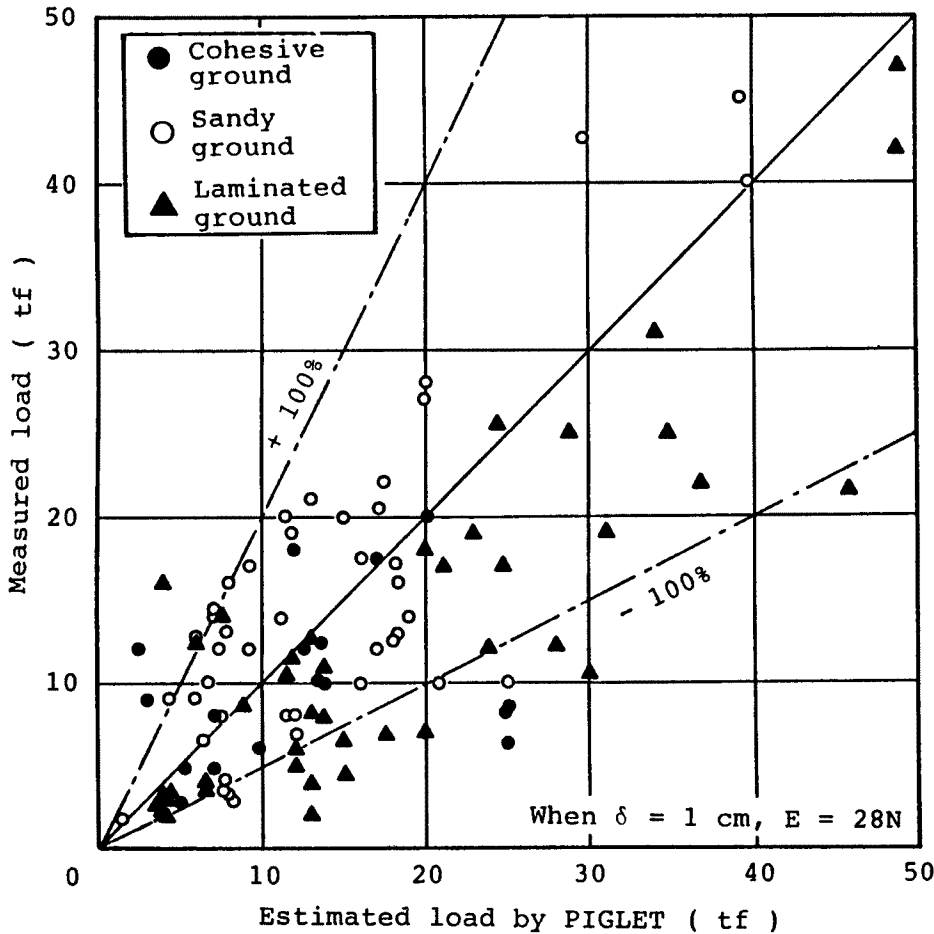


Fig. 7. Comparison between measured and calculated load by using E=28N.

と考えられる。

以上のように平均 N 値から地盤定数を求めた場合、単杭の実大試験の結果をより良く表現するためには、S 型地盤の場合は、E=28N で地盤を評価すればよいことがわかる。ただし地表面の G をゼロとしている点には問題が残る。また C 型地盤に関しては E=7N では δ を 2 倍程度に過大評価し、E=28N では小さく評価する傾向にあるので PIGLET の中で用いられている基本式を用いて以下の考察を行った。

PIGLET の杭頭水平変位 δ は C 型地盤の場合次のように表現される。

$$\delta = \frac{(E_p/G_c)^{1/7}}{G_c} \left\{ 0.27H \left(\frac{l_c}{2} \right)^{-1} + 0.30M \left(\frac{l_c}{2} \right)^{-2} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 E_p : 杭の有効ヤング率、 H : 杭頭の水平荷重、 M : 杭頭の曲げモーメント、 l_c : 杭の有効長 (限界長さ) $l_c = D (E_p/G_c)^{2/7} \dots\dots\dots (4)$,

G_c : $l_c/2$ 深さの G である。

いま (3) 式に (4) 式を代入して G_c を 2 倍、3 倍、4 倍にすると、δ は初期の 61%、46%、38% となる。つまり E=7N で評価した場合の水平変位は Fig. 4 より約 1/2 なので (1) 式で計算した地盤定数 G を 3 倍程度にすれば Fig. 7 の PIGLET の結果は改善される。よって C 型地盤の場合、地盤定数として N 値だけから単杭の変位を推定する場合は、E を 20N 程度と評価する必要がある。

3. 軟弱地盤に打設された鋼管杭の水平載荷試験の評価

3.1 載荷試験の概要

関西新国際空港と陸上部を結ぶ、全長 3.75 km の空港島連絡橋の基礎形式として、鋼管杭基礎が用いられるが、架橋位置の地盤は軟弱で支持杭の対象となる砂れきの支持層 (S-4 層) は 2~3 m 厚と薄く、薄層先端支持の先端支持力、周面摩擦抵抗および杭の水平抵抗などが支持力評価の重要な課題となっている。そこで、現地地盤の支持力特性を調査するため現場載荷試験が実施された¹⁰⁾。本節では S-4 層打止めの口径 1.5 m の支持杭の水平載荷試験結果を、PIGLET を用いて評価した。

試験実施場所は Fig. 8 に示す通りであり、土質断面図は Fig. 9 に示す。試験に用いた鋼管杭の形状寸法は杭径 1.5 m、肉厚 (t) 2.2 cm、杭長 58 m であり、海上部で載荷を行うため自由突出長が 20.2 m と非常に長い点に特徴がある。試験は水平交番載荷で行われ、最大水平荷重は 18 t である。

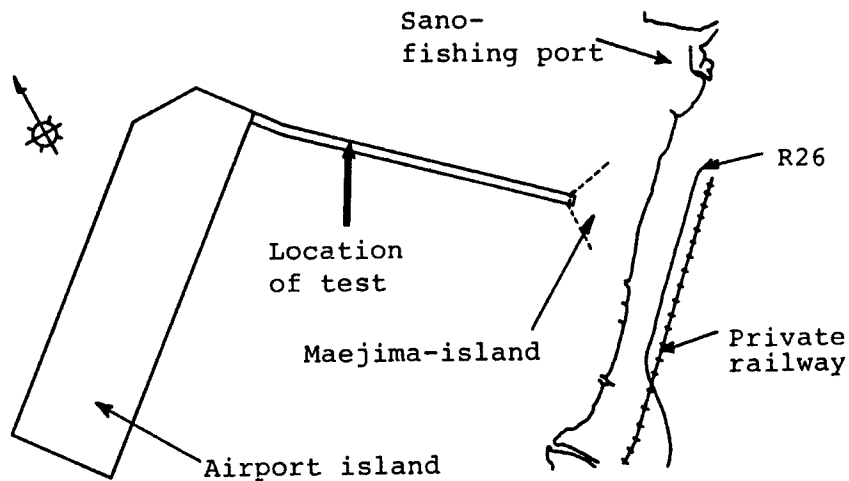


Fig. 8. Location of test site.

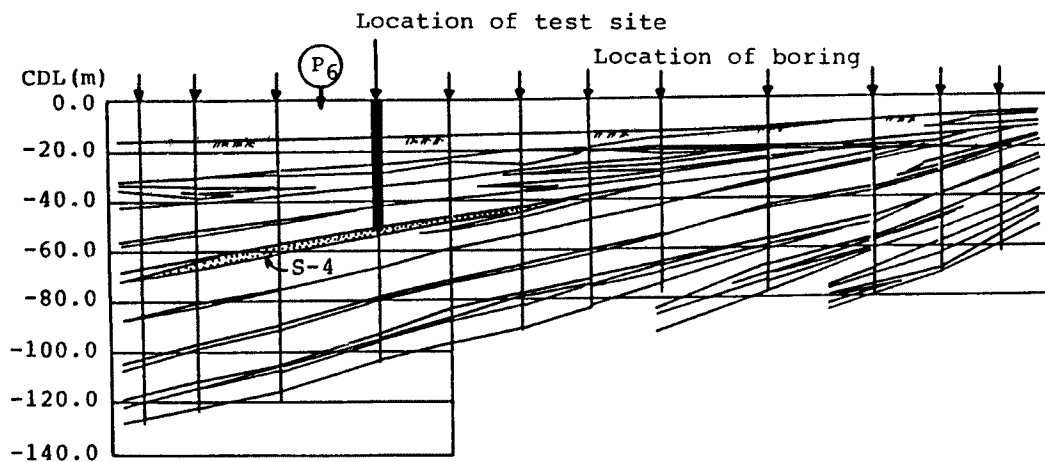


Fig. 9. Cross section of the ground.

3.2 解析ケースと地盤定数

載荷位置のボーリングより得られた N 値分布を Fig. 10 に示すが、海底面下約 10 m は N 値がゼロの非常に軟弱な粘土 (A_c層) が堆積し、その下部に N 値の大きい砂れき層 (T_g層) と 20 程度の砂層 (S 1

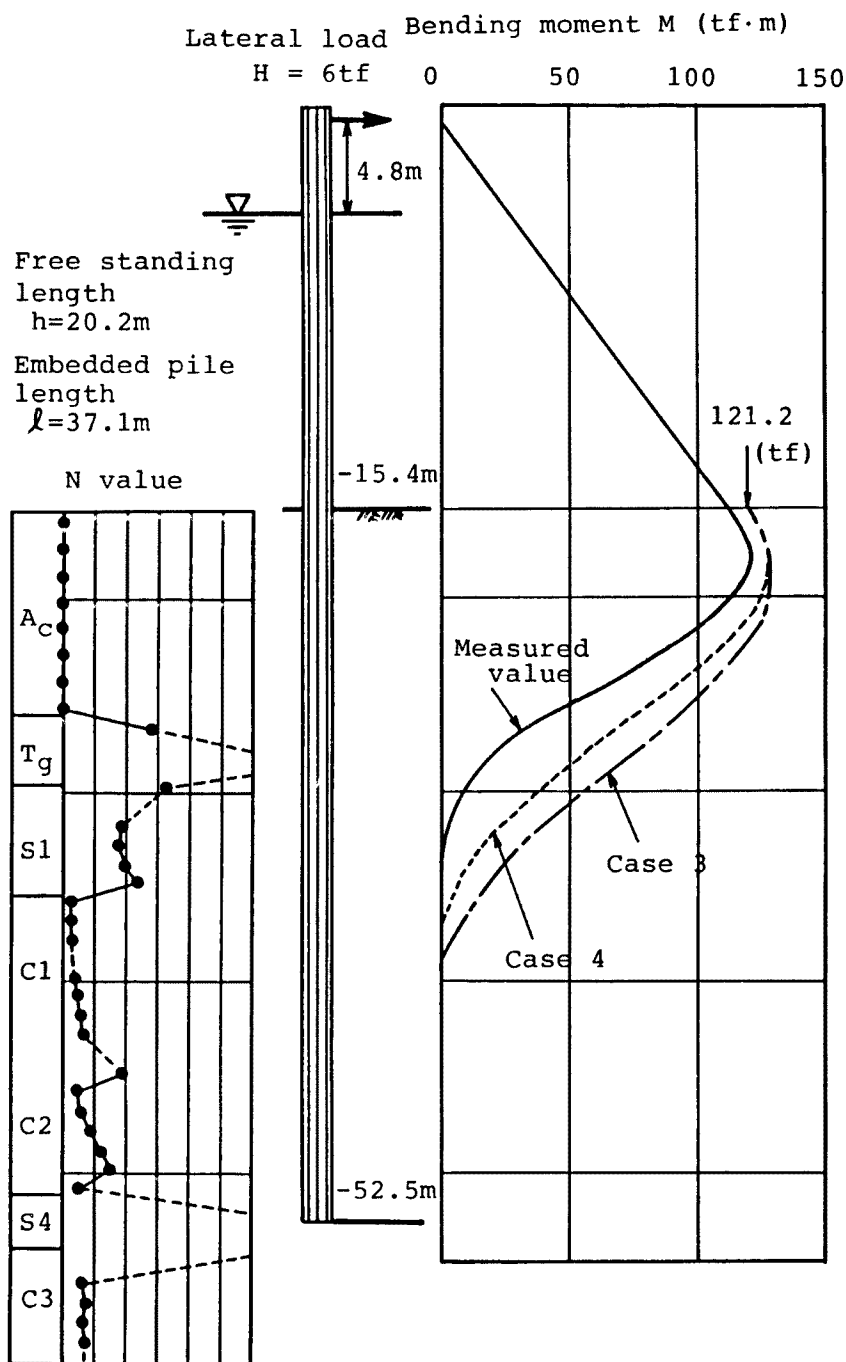


Fig. 10. Distribution of N value and bending moment.

層)が続く。一般に杭の水平抵抗では、杭の限界長 (l_0) が定義されそれ以下の部分は杭の上部の変形に関与しない。よってここではS1層付近までの地盤定数を評価すればよいことになるが、Ac層のN値がゼロであるため地盤定数の評価は難しい。そこで以下のようなケースに分けて地盤を評価し、荷重作用点および海底面の水平変位を計算した。

1) ケース 1

前章の単杭の載荷実験の計算結果を参考にして、C型地盤を想定し杭長の1/3までのN値の平均値2.8を用いて、 $E = 20N$ よりせん断弾性係数Gを推定した。

2) ケース 2

ケース1と同様にしてC型地盤とし、 $E = 7N$ よりGを推定した。

3) ケース 3

A_c 層の一軸および三軸圧縮試験結果を考慮して、 A_c 層を評価する設計値¹⁰⁾として採用されている $E = 2.5x$ (kgf/cm²) (ただしxは深さで、単位はm) から(1)式を用いてGを推定する。

4) ケース 4

Fig. 11に示すように A_c 層を4層に分割し、実験結果より得られた地盤反力pと杭の変位yの関係からEを評価する¹⁰⁾。その手法は以下のようである。

まず始めに測定された杭の曲げモーメント分布の2回微分により、各深さにおける単位長さ当りの地盤反力p (kgf/cm) を求める。次に杭内に設置された孔内傾斜計の測定値を用いて、各深さの杭変位y (cm) を求め、先の地盤反力pの結果と併せてp~y曲線を求める。

また道路橋示方書によると、地盤反力pと杭変位yの関係は次のようになる。

$$p = k \cdot D \cdot y \dots\dots\dots (5)$$

(5)式と(1)式から

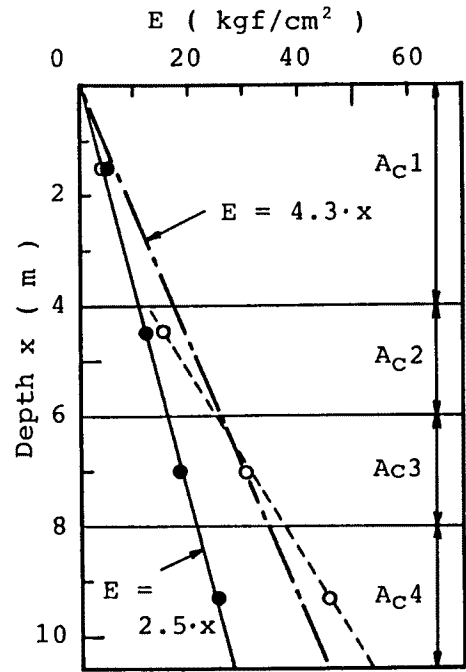


Fig. 11. Modulus of deformation for A_c layer (Case 3, 4).

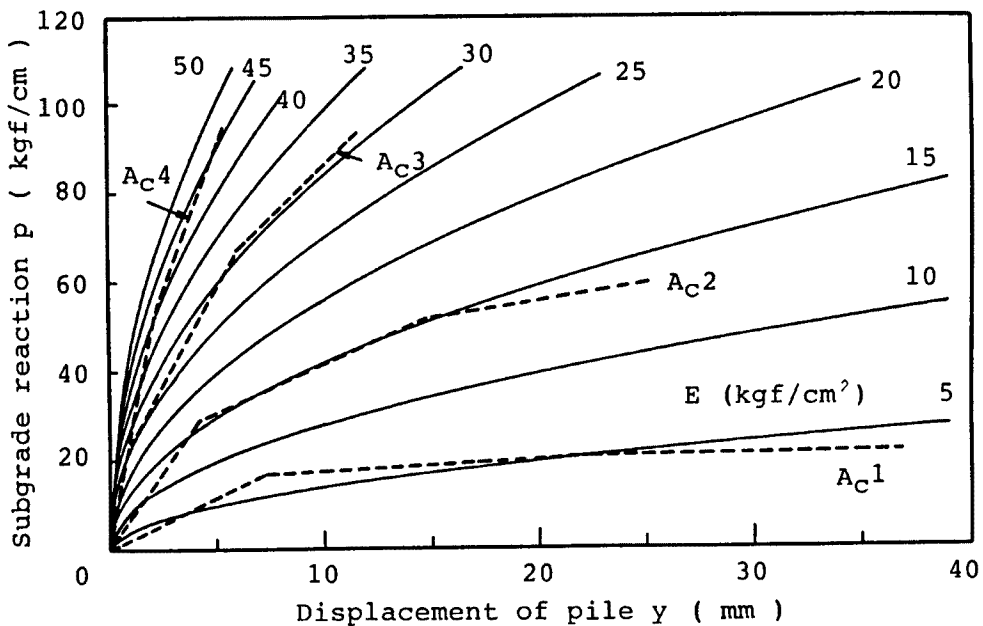


Fig. 12. Relationship between subgrade reaction (p) and displacement of pile (y), p~y curves.

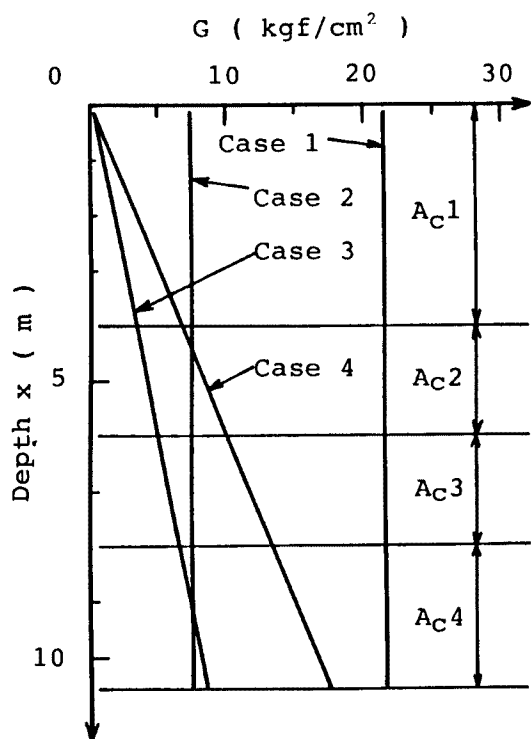


Fig. 13. Distribution of shear modulus for each case.

間荷重を保持し、測定時間は0.2分であるが、+6tfと+12tf荷重時は30分間荷重を保持しており、0分と30分の変位を図中には示している。載荷荷重を保持する時間が長くなるにつれ、水平変位は矢印のように増加するが、12tf荷重時までは杭は弾性的挙動を示しているといえる。

次にケース1からケース4のそれぞれの地盤定数を用いて計算した、作用荷重6tf時の杭頭変位 (δ) と海底面変位 (δ_s) の解析結果を Table 2 にまとめて示す。表中には計算された杭の有効長も併せて表記している。Table 2 の結果と実測値を比較すると、 $E=20N$ より地盤定数を推定したケース1の δ_s は実測値の約半分であり、ケース1、ケース2、ケース4、ケース3の順に杭の水平変位は大きくなるのがわかる。Fig. 13 の G の推定値の図からも、上記の順序の結果が予測されたが、ケース2とケース3を比較すると、ケース3のようなS盤では海底面下5mまでの G の値が小さいので、ケース2よりも大きい変位が生じているようであり、表層の地盤定数の取り方が重要であることがわかる。ケース2の結果が最も定量的に実測値を説明し得ているが、 A_c 層の N 値がゼロで、 N 値の大きい T_g 層によって平均 N 値が決定することを考慮すると、この場合平均 N 値で地盤定数を定める方法には問題が残る。よって2章で提案した $E=20N$ は表層部に軟弱粘土が厚く堆積するような場合には注意して適用する必要がある。

ケース3とケース4の水平変位の結果は、Fig. 14 にそれぞれ一点鎖線で示されており、先の Fig. 10 では曲げモーメント分布に関して実測値と解析値を比較している。曲げモーメント分布に関しては、両ケースとも実測値より深いところまで曲げモーメントが伝達されていることが分かる。これはケース3、4では T_g 層の地盤定数を過小に評価しているため、モーメントが収束しにくいためと考えられる。また水平変位に関しては、ケース4は実測値をうまく説明し得ているが、このケースの場合は実測値から逆算した地盤定数を用いているので当然の結果であり、逆に言えば PIGLET の有用性が検証されたことになる。またケース3の設計値を用いて計算した結果は、作用荷重が12tfまでは水平変位を少し大きく評価するものの、安全側であるので実用上は地盤を適切に評価していると言える。

$$p = a \cdot E \cdot D^{1/4} \cdot y^{1/2} \dots \dots \dots (6)$$

となるので E を5~50 (kgf/cm²) と変化させ $p \sim y$ 曲線を (6) 式より描くと Fig. 12 のようになる。ここでは補正係数 a は E を一軸または三軸圧縮試験結果と比較するため0.8としている。

次に Fig. 12 に実測値から求めた $p \sim y$ 曲線 (破線) を描くことにより A_c 層の E を求めると Fig. 11 の白丸のようになり、一点鎖線のように $E=4.3x$ と推定される。Fig. 11 から水平載荷試験結果から逆算された地盤の変形係数 E の値は、 A_c 層のいずれの部分においても設計値 $E=2.5x$ を上まわっておりケース3の設計値は安全側であることがわかる。

以上の各計算ケースで推定されたせん断弾性係数 G をまとめて図示すると Fig. 13 のようになる。

3.3 解析結果と考察

ここで取り扱う単杭の水平載荷試験は交番水平載荷試験で $0tf \rightarrow 6tf \rightarrow 0tf \rightarrow -6tf \rightarrow 0tf$ のようなサイクルで水平荷重を与え、6tf, 12tf, 18tfまでの3サイクルの載荷を行っている。Fig. 14 に+12tf載荷までの実験結果を示す。各荷重ステップで3分

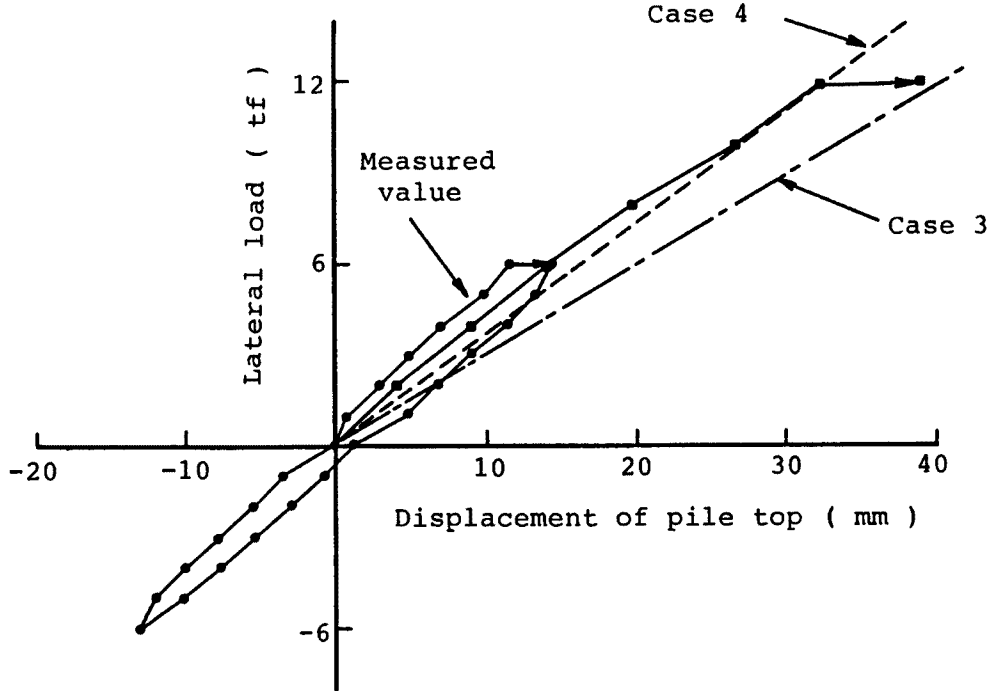


Fig. 14. Lateral load vs displacement of pile top.

Table 2. Results of analyses for lateral displacement of single pile.

Kinds of cases	Displacement at the seabed's surface (δ_s)	Displacement at the loading point (δ)	Active length of pile (l_c)
Case 1	0.71 mm	6.71 mm	20.0 m
Case 2	1.44 mm	8.77 mm	27.0 m
Case 3	2.16 mm	10.91 mm	23.9 m
Case 4	1.64 mm	9.58 mm	21.2 m
Measured values	1.46 mm	7.75 mm	

3.4 実大群杭基礎への PIGLET の適用

実際に計画されている橋脚に対して PIGLET を適用し、群杭効果を調べた結果を以下に示す。
 解析した橋脚 (P_0) の位置は Fig. 9 に示す通りであり、S-4 層を支持層とする。橋脚の構造は Fig. 15 に示すように、杭径 1.5 m、杭長 53.5 m の杭を 64 本 (8 × 8 本) 打設した群杭基礎で、フーチング厚さは 6 m である。前節の単杭の載荷試験位置は P_0 橋脚に近接しているので、ケース 4 の地盤定数を用いる。ただし Fig. 11 の破線に示すように、フーチングは海底面を掘削して施工されるので、掘削面の E の値を見込んだ地盤定数 ($E = 13 + 6.0x$) を用いた。Fig. 15 の杭中心間隔は 3.75 ~ 4.375 m と杭径の 2.5 ~ 2.9 倍であり杭間隔は狭いが、道路橋示方書⁹⁾では群杭効率率は杭間隔が杭径の 2.5 倍以上離れていれば考える必要はないとしている。

Table 3 に単杭と Fig. 15 の群杭の、杭 1 本当り 10 tf 作用時の杭頭変位を示すが、群杭効率 $e = 0.51$ cm / 2.28 cm = 0.22 となり、近接杭間の影響により群杭の変位は大きくなると予想される。逆にフーチング根入れ部の土の抵抗および杭打設による地盤の強度増加等の、群杭基礎の変位を抑えるプラスの要因が

Table 3. Results of lateral displacement for single pile and group piles.

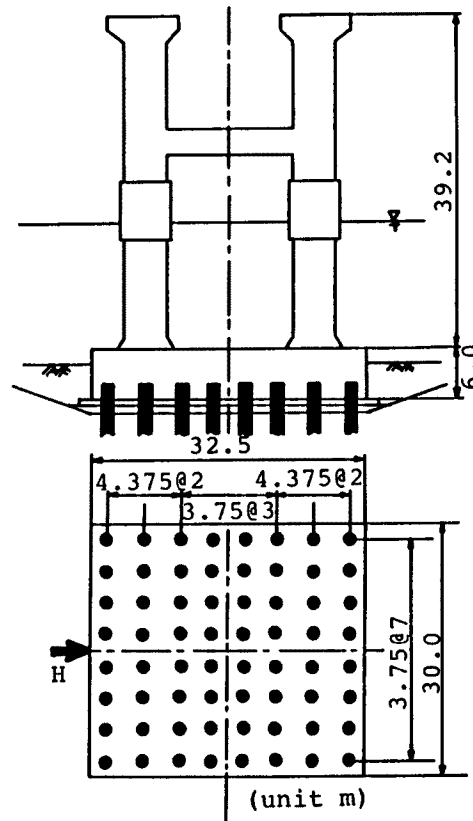
Kinds of pile	Condition of pile top	Lateral load H (tonf)	Displacement of pile top	Group efficiency
Single pile	Fixed-headed pile	H = 10 tf	$\delta = 0.51$ cm	e=0.51/2.28 = 0.22
Group piles	Fixed-headed pile	H = 640tf	$\delta = 2.28$ cm	

考えられるので、一概に支持力が1/5に低減するとは上記の結果だけでは結論できない。

4. むすび

本研究は現在までの杭の水平抵抗に関する模型実験の結果を踏まえて、実際問題に筆者らの開発した **GPILE** および Randolph の提案する **PIGLET** を適用する第一歩として、地盤定数の決定に関し、単杭の実大載荷試験の結果を用い検討を加えたものである。解析手法としては簡便である **PIGLET** を用いた。135例の単杭の試験結果から、平均 N 値と地盤の種別だけの情報から杭頭の水平変位を推定するためには、砂質地盤 (S型地盤) に対しては $E=28N$ を、また粘性地盤および互層 (C型地盤) に対しては $E=20N$ を適用すればよいことが分かった。

今後はさらに新しい杭の水平載荷試験のデータを収集すると共に、**PIGLET** より詳細な地盤の情報を入力できる **GPILE** を用いて、さらに研究を進める予定である。



Footing; 30x32.5x6.0m
64 piles (8x8 piles)
D=1.5m, $l=53.5$ m

Fig. 15. Dimension of group piles' foundation.

参考文献

- 1) 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
- 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（3），京都大学防災研究所年報，第28号B-2，1985，pp.97-110
- 3) 木村 亮・柴田 徹・八嶋 厚：群杭の水平抵抗に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，第30号B-2，1987，pp.149-166
- 4) Shibata, T., Yashima, A., Kimura, M. and Fukada, H.: Analysis of Laterally Loaded Piles by Quasi-Three-Dimensional Finite Element Method, 6th Int. Conf. on Numerical Method in Geomechanics, Innsbruck, 1988, pp.1051-1058.
- 5) Randolph, M.F.: The response of flexible piles to lateral loading, Geotechnique, Vol. 31, No. 2, 1981, pp.247-259
- 6) 足立義雄：くい基礎の静的水平抵抗に関する実験的研究，土木研究所報告，1974，pp.51-149
- 7) 久保浩一：杭の横抵抗に関する実験的研究，運輸技術研究報告，No.11-12，12-2，1962
- 8) 宇都一馬：基礎地盤調査，構造物の基礎，土木学会関東支部，1967，p.46
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（IV 下部構造編），1980，pp.271-279
- 10) 関西国際空港株式会社，鋼管杭協会：空港連絡橋鋼管杭載荷試験報告書，Ⅲ載荷試験編，1987