

# 拡底杭の水平抵抗挙動に関する実験的研究

文 松霖<sup>1</sup>・横山幸満<sup>2</sup>・今泉繁良<sup>3</sup>

1 学生員 工修 宇都宮大学大学院 工学研究科 (〒321 宇都宮市石井町 2753)

2 正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科 (〒321 宇都宮市石井町 2753)

3 正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科 (〒321 宇都宮市石井町 2753)

拡底杭の水平抵抗機構とそれに及ぼす幾何形状の影響を、密な砂地盤で模型拡底杭の水平載荷実験により実験的に考察したものである。拡底部の存在によって、拡底杭の水平抵抗は非拡底杭のそれより 8-24% を增加了。その水平抵抗は拡底角によって変化する。同じ荷重の下では、拡底杭の水平変位と杭体モーメントは非拡底杭のそれより小さい。極限時に杭体の不動点は地表面下 2/3 の点に接近した。杭水平地盤反力は杭の水平変位の 0.75 乗、深さの 0.5 乗に比例することを述べている。

**Key Words:** pile with enlarged base, dense sand, lateral resistance behavior, moment, soil reaction, p-y curve.

## 1. まえがき

拡底杭は機械掘削または人力掘削によって場所打ち杭の下端を拡大して、杭の押込み抵抗と引抜き抵抗を増大することを目的として開発された基礎形式である。大規模構造物の増加、海洋地域開発の増加、さらに経済性の追求などに伴って、拡底杭の需要はますます多くなっている。しかし、拡底杭に関する既往の研究は引抜きと押込みの抵抗挙動に限定されており、水平荷重作用下の拡底杭の抵抗挙動に対する研究はほとんどなされていない。

杭頭に集中荷重が作用する場合の単杭 (Fig.1) の水平抵抗の問題は、以下の方程式で記述できる<sup>1,2)</sup>。

$$EI(x) \frac{d^4y}{dx^4} + p(x, y)d = 0 \quad (1)$$

ここに、 $EI(x)$ ：杭の曲げ剛性、 $x$ ：杭軸に沿った座標、 $y$ ： $x$  軸に直交する方向の杭のたわみ、 $p(x, y)$ ：杭水平地盤反力度、 $d$ ：杭径である。拡底杭の場合には非拡底杭の場合と比べて、同じ境界条件であっても拡底部の存在により、杭下部の曲げ剛性と杭径がそれぞれ大きくなつてその解も違つてくる。また、Songlin<sup>3)</sup>と菊池ら<sup>4)</sup>が指摘しているように、杭頭変位の大きい時の杭の水平抵抗力はその一部分が杭の軸方向の引抜き抵抗によって発揮される。

剛な杭では、杭先端の変位を無視しないので、杭の水平抵抗挙動に及ぼす拡底の影響があると考えられる。すなわち、次式の第二項に示す軸力  $N$  による影響が発揮される。

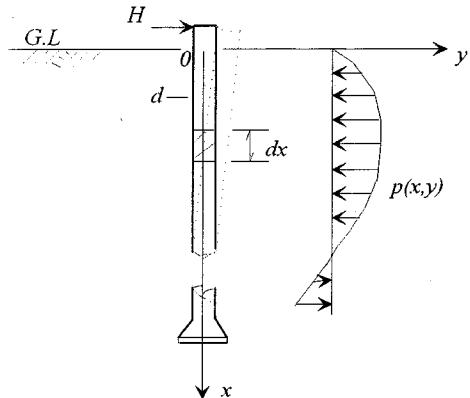
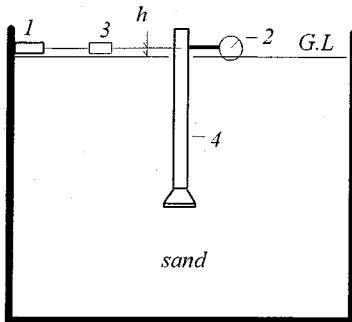


Fig.1 The direction of coordinates & forces of laterally loaded pile

$$EI(x) \frac{d^4y}{dx^4} - N \frac{d^2y}{dx^4} + p(x, y)d = 0 \quad (2)$$

ここに、 $N$  は拡底部の抵抗によって杭軸に生じる引張り力である。

しかし、拡底部の幾何形状が水平抵抗挙動に及ぼす影響について、これまでほとんど考察されていない。筆者らはこの問題を密な砂地盤における拡底杭の模型実験により解明することを目的に基礎的な研究を行っているが、本論文は、模型実験の結果をとりまとめ、これから得られた知見を述べたものである。



1: BF air cylinder  
2 : displacement dialgauge  
3 : load cell  
4 : pile with enlarged base

Fig.2 Horizontal loading system

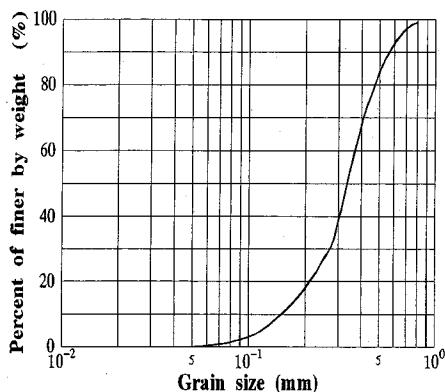


Fig.4 Particle size distribution of INAGI sand

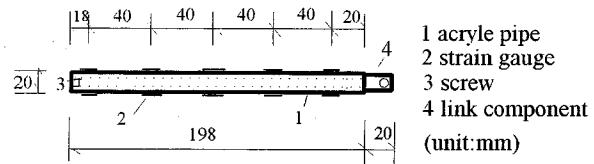
## 2. 実験装置と実験概要

実験に用いた砂箱の大きさは、内のりで幅40 cm × 長さ60 cm × 深さ40 cmであり、その載荷計測装置を Fig.2 に示す。水平荷重は Air cylinder によって、load cell を介して杭頭に作用させた。載荷方式は荷重制御で、荷重増分は 5 N (0.5 kgf) であり、載荷高さ  $h$  は 33 mm である。定荷重は後述する杭軸に貼ったひずみゲージのひずみ増分が 1 分間に 4  $\mu$  以内となるまで保持し、データを記録後、次の荷重増分を加えた。

模型杭は、Fig.3 に示すように杭長 = 223 mm、軸部杭径 = 20 mm、肉厚 = 1.5 mm のアクリル pipe 杭 (ヤング係数  $E = 2.74 \text{ GPa}$ 、断面積  $A = 0.87 \text{ cm}^2$ ) である。

杭の曲げ剛性  $EI = 1.03E - 05 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 、予備実験の荷重一変位曲線からの逆算より、特性値  $\beta l = (k_h B / 4EI)^{1/4} = 1.05$  であったので、模型杭は半剛性杭 ( $1 < \beta l \leq 3$ ) に属する。

杭体にはそれぞれ 5 対、計 10 点のひずみゲージを貼



a) Model pile

case No.	$\alpha^\circ$	enlarged base sizes (unit:mm)	
		h1	h2
1	14	20	0
2	20	11.2	8.8
3	30	8.7	11.3
4	45	5.0	15.0
5	60	2.9	17.1
6	90	0	20
7	0		20

b) Enlarged base pattern

Fig.3 Model pile and enlarged bases

Table.1 Physical and mechanical properties of the tested sand

Maximum unit weight $\gamma_{\text{dmax}}$	17.199 kN/m <sup>3</sup>
Minimum unit weight $\gamma_{\text{dmin}}$	14.063 kN/m <sup>3</sup>
Angle of shearing resistance $\phi$	42.1°
Relative density $D_r$	82 %
Specific gravity $G_s$	2.635
Effective grain size $D_{10}$	0.161 mm
Coefficient of uniformity $U_c$	2.336
Coefficient of curvature $U_c'$	1.227

付けた。6種類の角度の拡底部 (Fig.3.b) はアルミで作成し (拡底径  $D = 30 \text{ mm}$ )、ネジを介して杭体と結合した。杭と土の間の条件を実際に近いものとするために、杭体と拡底部の表面には接着材によって砂を貼った。

2 mm ふるいを通過した稻城砂を実験に用いたが、その粒径加積曲線を Fig.4 に、物性値を Table 1 に示す<sup>5)</sup>。模型地盤の作成は空中落下法によりボアリングを行った。落下高さは 42 cm で、目標相対密度  $D_r$  は 82 % であるが、実測密度の変動範囲は 81 % - 83.6 % であった。

## 3. 実験結果とその考察

### (1) 拡底杭水平抵抗機構及び拡底角の影響

Fig.5 に拡底角を  $\alpha = 14^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  及び  $90^\circ$  と変化させた時の水平抵抗力  $H$  と杭頭変位  $\delta$  の関係を示す。非拡底杭と同じように、拡底杭の  $H-\delta$  曲線も強い非線形特性を示した。載荷初期、荷重の増加に伴って杭頭変位が線形的に増加するが、その後、非線形的挙動を示すのは後に Fig.6 を用いて詳述するように荷重の

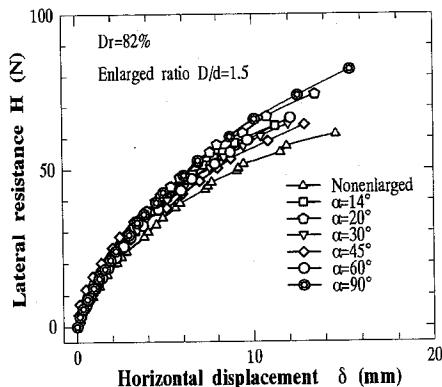


Fig.5 The relationships between lateral resistance and displacement at top

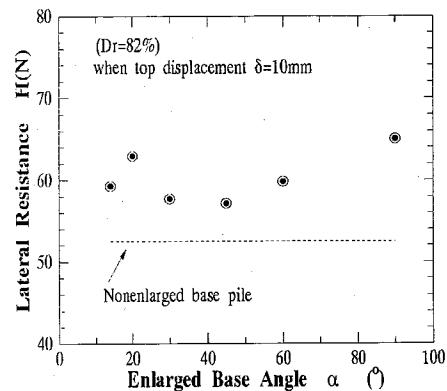


Fig.7 Variation of lateral resistance  $H$  with enlarged base angle  $\alpha$  in tests

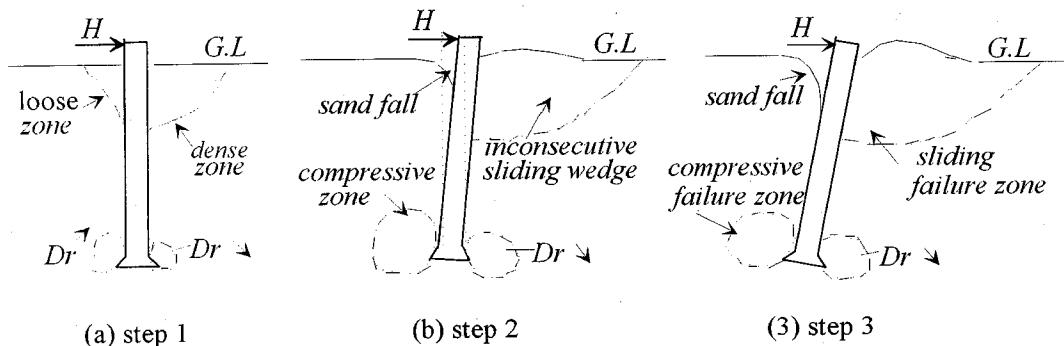


Fig.6 The failure process of pile with enlarged base under horizontal load  $H$  in sand

増大に伴って地表面近傍が塑性化し、次第にその塑性領域が深くなっていくためと考えられた。

実験中の観察によれば、荷重の増大に伴って、杭前面の地盤が徐々に盛り上がり、杭の背面の地盤は杭が前方に向て変位するに従って、背面の間隙を埋めるように砂が崩れ落ち、徐々に大きな穴があいていった。この水平抵抗の発揮過程は、Fig.6 に示したように次の三つの段階に分けて考えることができた。第一段階：拡底杭が小さい水平荷重を受けると、杭前面の砂の密度は増加するが、杭背面の密度が減少する。荷重の増加に従って杭頭水平変位は近似的に線形的に増加する。第二段階：水平荷重の増加に伴い、杭前面の砂が更に押され、一つのすべり土塊が発生する。砂表面に小さい範囲の盛り上がりが発生し、杭背面に深い穴が出現する。第三段階：杭前面のすべり土塊が更に発展して、上方向へ移動する。杭前面地盤が広い範囲で盛り上がる（本実験では盛り上り量が1.5 cm程度であった）。杭背面の地盤に深い穴が生じる。杭頭変位が急激に増加して、杭周地盤が極限破壊状態に達する。

杭の極限水平支持力をどのように設定するかは難しい

問題で、通常は地盤の変形、杭体の応力及び杭頭変位の三つの要素を考慮して決定される。ここでは解析の便宜上、模型杭の杭頭変位  $d=10$  mm に対応する水平荷重をもって限界水平支持力とした。

Fig.7 に杭頭水平変位  $\delta=10$  mm のときの水平支持力と拡底角の関係を示した。この図より、拡底角によって拡底杭の水平抵抗に及ぼす影響が明確に認められる。本実験の場合に、拡底部の存在によって、杭の水平支持力が非拡底杭のそれより8%~24%程度増加した。すなわち拡底角が30°~50°程度を最低にして、拡底角が小さくなるか大きくなるに従って増加する傾向にある。この拡底角に伴う水平抵抗力の変化曲線の形状は、拡底杭の引き抜き支持力一拡底角関係曲線と類似する<sup>6)</sup>。杭の引き抜き抵抗が大きいほど、その水平抵抗も大きい。この結果から、杭の水平抵抗に及ぼす杭の引抜き抵抗の影響が存在することを説明できる。

## (2) 杭体応力、変位及び杭水平地盤反力度分布

実験で得られた杭体ひずみの測定値に基づき、杭体に生じる曲げモーメント  $M$ 、せん断力  $S$ 、及び水平変位  $y$

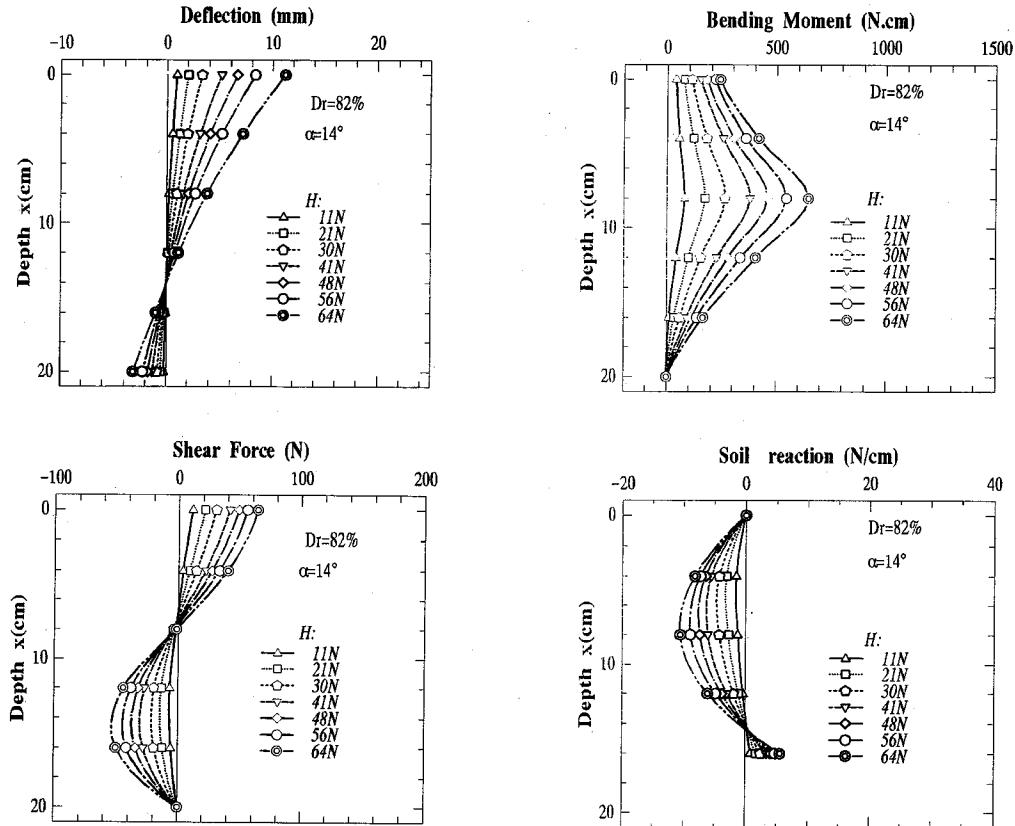


Fig.8 Response of pile with enlarged base subjected to horizontal load ( $\alpha=14^\circ$ ) (a) Deflection, (b) Bending moment, (c) Shear force, (d) Soil reaction

と杭水平地盤反力度  $p$  の値を計算できる。

一例として、Fig.8に $\alpha=14^\circ$ のときの $M$ ,  $S$ ,  $y$ ,  $p$ の分布曲線を示した。荷重の増大に従って、杭体のモーメントがほぼ線形的に増加する。そして、その最大モーメントの発生位置が大体一定値（地表面から8 cm）を保つ。荷重の増大に伴い、杭体の水平変位の増大率が徐々に大きくなっている。杭体の変位は非線形的性状を示す。杭体の変位零点（不動点）は地表面より杭長の $5/7$ から $2/3$ まで変化する。破壊に接近する時、杭体は地表面から杭長の $2/3$ の点を中心として回転している。

Fig.9は拡底角が異なる時の同じ荷重下の曲げモーメント、地盤反力及び杭体たわみの分布の一例を示したものである。Fig.9aより同じ水平荷重のもとで、拡底杭のモーメント値は非拡底杭のそれより幾分小さい。そして、引抜き抵抗が大きい場合( $\alpha=14^\circ, 20^\circ, 90^\circ$ )<sup>6)</sup>に、杭体モーメントが最も小さい。Fig.9bは杭頭荷重 $H=50\text{ N}$ のときの杭水平地盤反力度分布である。拡底杭の場合、表層( $z=0\text{--}4\text{ cm}$ )での杭水平地盤反力度の大きさは非拡底杭のそれより幾分大きく、それより以下の杭水平地盤反力度の発揮度は相対的に幾分小さい。表層地

盤の抵抗は杭の水平変位と杭体のモーメントに対して生じる影響が大きいから、この面から見れば拡底杭の杭体変位とモーメントがすべて非拡底杭のそれより小さいはずである。

Fig.9cは杭頭荷重 $H=50\text{ N}$ のときの杭体の変位を比較したものである。この図より、拡底杭の杭体変位は非拡底杭のそれより小さく、拡底角の違いによって異なる値を示している。これは拡底部の存在により、杭下端部(pile tip)の固定度を増大させて、杭体の回転を減少させる結果による。Fig.10は杭下端部の水平変位と杭頭荷重の関係を示したものである。図に見られるように、同じ荷重の下で非拡底杭の端部水平変位が最大で、 $\alpha=14^\circ, 20^\circ, 90^\circ$ の時の水平変位が最小である。拡底部の運動形態を考慮すると、もし杭先端拡底部の運動が単純な水平移動であれば、 $14^\circ$ の場合、拡底部運動によって発揮される水平抵抗が大きく、杭下端部の水平変位が $90^\circ$ の場合のそれより小さいはずである。しかし実験の結果は同じ程度の数値を示した。従って、杭先端拡底部の運動が単純な水平移動ではなく、回転を伴う引抜き運動であると判断できる。従って杭先端の変位を左右する

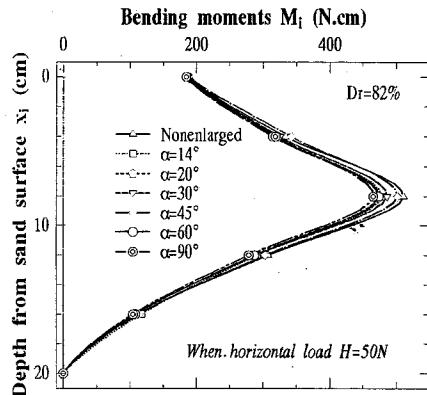


Fig.9 a Moments of pile with enlarged base in different base angle at  $H=50$  N

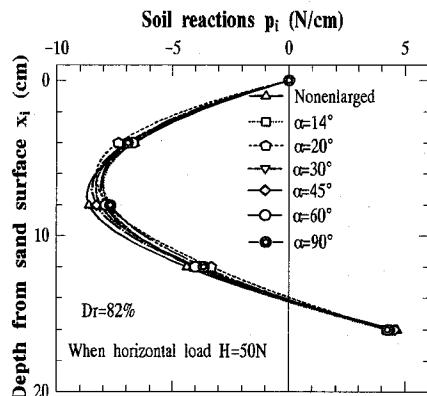


Fig.9 b Soil reaction of pile with enlarged base in different base angle at  $H=50$  N

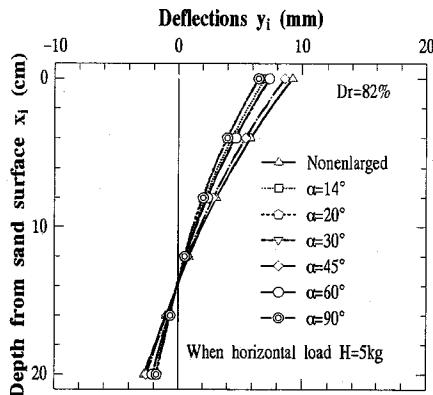


Fig.9 c Deflection of pile with enlarged base in different base angle at  $H=50$  N

のは水平抵抗土圧と引抜き抵抗の総合作用の結果であると考えられる。

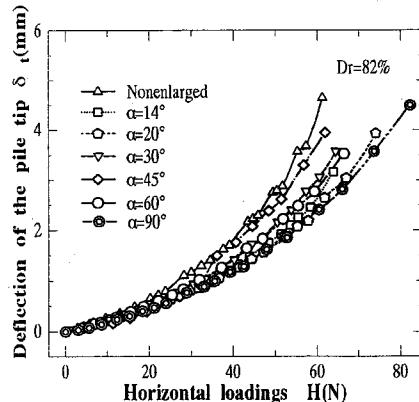


Fig.10 Relationships between tip movements & horizontal load with different base angle

### (3) $p-y$ 曲線に及ぼす拡底の影響

$p-y$  曲線法は McClelland and Focht によって開発され、水平荷重を受ける深い基礎の設計計算に対する実用的な解析方法である<sup>11)</sup>。数値解析が盛んになってきたので、杭と土の特性が深さに沿って変化する条件でも、この方法が採用される。しかし、この方法の前提は適切な  $p-y$  曲線を求めることである。拡底杭の場合には、拡底の影響によって杭の変形挙動が変化するから、拡底杭の  $p-y$  曲線は非拡底杭のそれとは異なるはずである。

実験によって求められた各拡底杭における杭水平地盤反応力と杭の変位の関係を、各深さごとにプロットすると、Fig.11 に示すような  $p-y$  曲線が得られた。これらの曲線によって、 $p-y$  曲線に及ぼす拡底角の影響が求められる。前述したように、拡底部の存在によって杭先端の固定度が増加し、杭の水平変位が減少する。実験結果は拡底杭の  $p-y$  曲線は非拡底杭のそれより上にあることを示している。

各深さの非拡底杭の  $p-y$  曲線を基準として、式(3)により拡底杭の  $p-y$  曲線に対する正規化処理を行うことを試みた。

$$p_\alpha(x, y) = g(\alpha) C(x/l) p_{non}(x, y) \quad (3)$$

ここに、 $p_\alpha(x, y)$  は拡底角  $\alpha$  ときの拡底杭の  $p-y$  曲線、 $p_{non}(x, y)$  は非拡底杭の  $p-y$  曲線、 $g(\alpha)$  は拡径比と拡底角に依存する正規化係数、 $C(x/l)$  は深さに関する修正係数である。

まず、地表面に最も近い深さ  $x=x_l$  における  $p-y$  曲線に着目して、深さ修正係数  $C(x/l)$  を 1 と仮定して、 $g(\alpha) = p_\alpha(x_l, y)/p_{non}(x_l, y)$  の値を求めた、次に、この  $g(\alpha)$  を用いてそれぞれの拡底杭についての深さ修正係数  $C(x/l)$  を、式(4)によって決定した。

$$C(x/l) = \frac{p_\alpha(x, y)}{g(\alpha) \cdot p_{non}(x, y)} \quad (4)$$

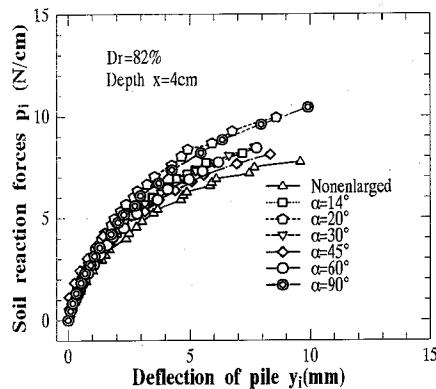


Fig.11 a The  $p$ - $y$  curves for pile with enlarged base at  $x=4$  cm

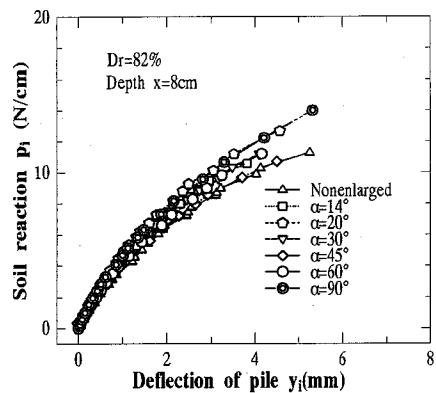


Fig.11 b The  $p$ - $y$  curves for pile with enlarged base at  $x=8$  cm

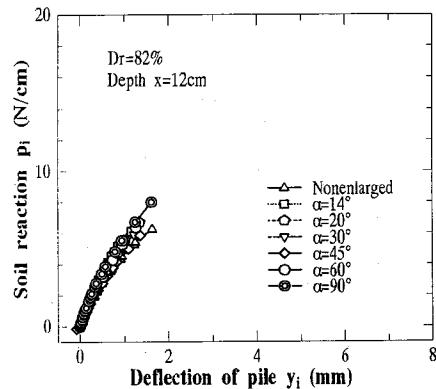


Fig.11 c The  $p$ - $y$  curves for pile with enlarged base at  $x=12$  cm

$D/d=1.5$ ,  $L/d=20$ とした本実験の場合、Fig.12に示すような拡底角  $\alpha$  と正規化係数  $g(\alpha)$ 、深さ修正係数  $C(x/l)$  の関係が得られた。従って、拡底杭の  $p$ - $y$  曲線は非拡底杭の  $p$ - $y$  曲線に正規化係数  $g(\alpha)$  を乗することによって求められる。

なお、非拡底杭の  $p$ - $y$  曲線の求め方法については、

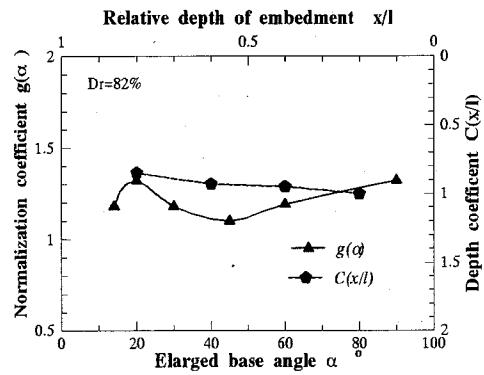


Fig.12 The normalization coefficient for  $p$ - $y$  curve of pile with enlarged base

Reese et al.<sup>7)</sup>, Scott<sup>8)</sup>, Murchison, and O'Neill<sup>9)</sup>, DnV<sup>10)</sup>など種々な提案がある。

#### (4) $p$ - $y$ 曲線の変化則について

既往の研究<sup>11), 12), 13)</sup>によって、杭水平地盤反力度と杭の水平変位の関係は一つのベキ関数(式5)で表わせる。すなわち、

$$p(x, y) = kx^m y^n \quad (5)$$

ここに  $p(x, y)$ : 杭水平地盤反力度 (N/m), 杭径  $d$  の影響を含んでいる,  $x$ : 地表面からの深さ,  $y$ : 杭の水平変位,  $k$ ,  $n$ ,  $m$  は実験定数である。  $k$  は杭と地盤条件によって支配される地盤定数であり,  $m$ ,  $n$  は土の特性によって変化する。砂地盤に対する  $n$  の値については、Broms<sup>11)</sup>が総括したように三種類の提案がある。すなわち,  $n=0.5 \sim 0.69$ ,  $n=0.5$  及び  $n=0.75 \sim 0.79$  である。

Fig.13 a と Fig.13 b は今回の実験の杭水平地盤反力度と杭水平変位の関係を示したものである。図よりわかるように、拡底杭と非拡底杭のいずれも、対数で表わした時の杭の変位と杭水平地盤反力度の関係の平均的な勾配はほぼ 0.75 となっている。

深さに沿う杭水平地盤反力度の変化の形について検討するために、杭の変位を一定とおいた場合の杭水平地盤反力度の深さ分布を求めてみると、 $y=1\text{ mm}$ ,  $2\text{ mm}$  に対して、Fig.14 a, Fig.14 b が得られる。図で見られるように、その分布は深さ  $x$  の 0.5 乗に比例している。従って、実験範囲内では、杭水平地盤反力度と杭の水平変位  $y$ , 地表面からの深さ  $x$  の関係式(5)は式(6)のようになる。

$$p(x, y) = kx^{0.5} y^{0.75} \quad (6)$$

また、拡底杭と非拡底杭の杭水平地盤反力度は同じ変化則を持ち、それらの差異は式(5)中の違い  $k$  値によって反映された。

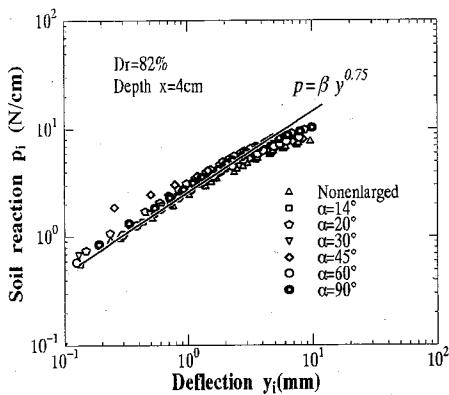


Fig.13 a  $p$ - $y$  relations at depth of  $x=4$  cm

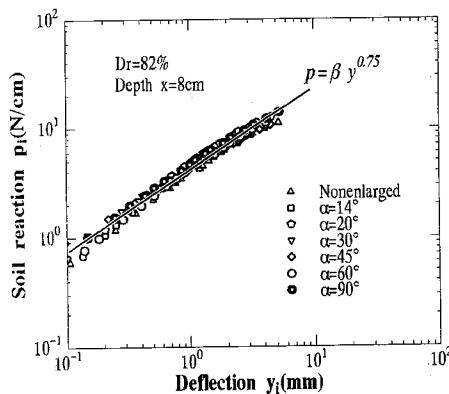


Fig.13 b  $p$ - $y$  relations at depth of  $x=8$  cm

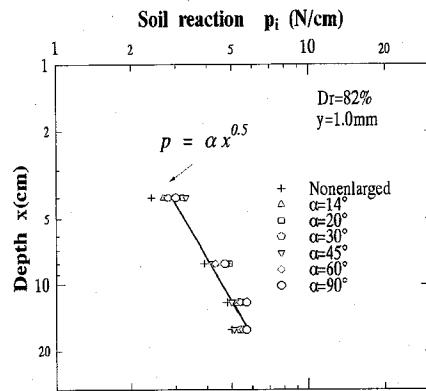


Fig.14 a Relation between  $p$  and  $x$

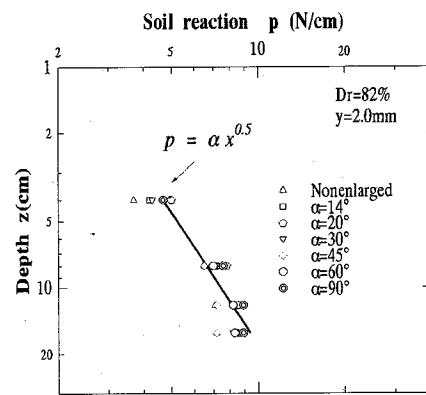


Fig.14 b Relation between  $p$  and  $x$

例えば、同じ深さ  $x$ 、杭水平変位  $y$  の場合、非拡底杭の地盤定数を  $k_{non}$  と仮定して、拡底杭のそれを  $k_\alpha$  と仮定すると、 $p_{non}(x, y) = k_{non}x^{0.5}y^{0.75}$  及び  $p_\alpha(x, y) = k_\alpha x^{0.5}y^{0.75}$  が得られる。この両式を式(3)に代入すると、式(7)が得られる。

$$\frac{k_\alpha}{k_{non}} = g(\alpha) C(x/l) \quad (7)$$

したがって前述した正規化係数の実質は、拡底部の幾何形状が地盤定数  $k$  に及ぼす影響を表わすものである。

#### 4. まとめ

密な砂地盤における水平荷重を受ける拡底杭の水平抵抗特性として、今回の水平載荷模型試験のような剛な杭に対して以下の結論を得ることができた。

1. 拡底の存在により、杭の下端部の固定度が増加し、杭の水平抵抗力も増加した。本実験の場合、水平抵抗力が非拡底杭のそれに比べて 8 % ~ 24 % 程度 ( $y_0 = 10$  mm) 増加した。
2. 拡底杭の水平支持力は拡底角の違いによって変化す

る。30° ~ 50° 程度を最低にして、拡底角が小さくなるか大きくなるに従って徐々に増加する。

3. 水平抵抗に及ぼす拡底部の幾何形状（拡底角）の影響は、主に引抜き抵抗に対する影響を通じて発揮される。
4. 本実験の場合、極限時の拡底杭の不動点は地表面から杭長の 2/3 点に接近する。即ち、剛性杭に類似する。
5. 同じ荷重の下で、拡底杭の杭体水平変位と曲げモーメントは非拡底杭のそれより小さい。
6. 拡底杭の  $p$ - $y$  関係は、まず非拡底杭の  $p$ - $y$  曲線を求めて、それに拡底形状による正規化係数を乗じることにより得られる。
7. 本実験の条件では、拡底杭と非拡底杭のいずれも、杭水平地盤反応力は  $p = kx^{0.5}y^{0.75}$  で表わせた。

実験を行うにあたっては、上野勝利助手に負う所が多い。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 横山幸満：くい構造物の計算法と計算例，山海堂，1977.
- 2) Yokoyama, Y. : A non-linear analysis of pile structures, *Soils and Foundations*, Vol.25, No.4, pp.92-102, 1985.
- 3) Songlin, W. : Experimental study of horizontal resistance of wing-pile on sand, *China Geotechnical Engineering Journal*, Vol.12, No.4, pp.61-67, 1990 (in Chinese).
- 4) 菊池喜昭, 高橋邦夫, 鈴木 操: 繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動, 港湾技術研究所報告, 第31巻, 第4号, pp.33-60, 1992.
- 5) 堀越豊司: 空洞押し広げ理論による杭先端の支持力機構に関する研究, 宇都宮大学修士論文, 1987.
- 6) 文松霖, 横山幸満, 今泉繁良: 砂地盤における拡底杭の引抜き抵抗挙動, 第30回土質工学研究発表会, pp.1507-1508, 1995.
- 7) Reese, L. C., Cox, W. R. and Koop, F.D. : Analysis of laterally loaded piles in sand. *Proceedings, 6th Offshore Technology Conference, Houston, Tex.*, pp.473-483, 1974.
- 8) Scott, R.F. : Analysis of centrifuge pile tests : simulation of pile driving. *Research Report, American Petroleum Institute, OSAPR*, Project 13, 1980.
- 9) Murchison, J.M. and O'Neill, M.W. : Evaluation of  $p-y$  relationships in cohesionless soils. In *Analysis and Design of Pile Foundations*. Edited by Joseph Mayer. ASCE, New York, pp.174-191, 1984.
- 10) Det Norske Veritas (DnV) : Rules for the design, construction and inspection of offshore structures. *Appendix F: Foundations. Hovik, Norway*, 1980.
- 11) Broms, B.B. : Stability of flexible structures (pile and pile groups), *Proc. 5th European Conf. S. M. F. E.*, Vol.2, pp.239-269, 1972.
- 12) Rowe, P.W. : The single pile subject to horizontal force, *Geotechnique*, Vol.6, pp.70-85, 1956.
- 13) 篠原登美男, 久保浩一: 杭の横抵抗に関する実験的研究(その1)—垂直自由単杭の横抵抗—, 運輸技術研究所報告, 第11巻第6号, pp.169-242, 1961.

(1995. 11. 14 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON LATERAL RESISTANCE BEHAVIOR OF PILE WITH ENLARGED BASE IN SAND

Songlin WEN, Yukimitsu YOKOYAMA and Shigeyoshi IMAIZUMI

In order to investigate the lateral resistance behavior of a pile with enlarged base and the geometrical influence of enlarged base on lateral resistance behavior, lateral loading model tests of piles with enlarged base were performed in dense sand in the laboratory. The measured data and phenomenon are discussed. As a result, the following conclusions have been obtained : (1) Due to enlarged base, the lateral resistance of pile increased about 8-24%, and varied with the enlarged base angle. (2) According to the analysis of test results, at the depth  $x$  below the surface, the soil reaction  $p(x, y)$  per unit length of the pile can be expressed by the equation of  $p(x, y) = kx^{0.5}y^{0.75}$ .