

「大径つばさ杭」

Development of the Large Sized Screw Steel Pipe Pile with Toe Wing

林 正宏 基盤技術研究所 都市工学研究部 主任研究員
 市川 和臣 基盤技術研究所 都市工学研究部
 篠原 敏雄 建材センター 建材技術開発部 主査
 勝谷 雅彦 建材センター 建材技術開発部 統括スタッフ
 森 玄 建材センター 建材技術開発部 統括スタッフ

Masahiro Hayashi
 Kazuomi Ichikawa
 Toshio Shinohara
 Masahiko Katsuya
 Gen Mori

杭先端に設けた平板状の鋼製翼を利用して地盤に回転貫入させる杭工法「つばさ杭」の用途拡大を目指し、最大杭径 1200mm まで適用範囲を広げた「大径つばさ杭」を開発した。杭の拡大に伴い、施工方法を従来の杭頭部回転方式から杭胴体回転方式に変更し、大きな回転トルクにより安定した施工を可能とした。また、異なる杭径の載荷試験を実施することにより、先端支持力が翼面積に比例することを確認し、その支持力特性を明確にした。

“Tsubasa Pile”, the screw pile with toe wing, screws into the ground utilizing the wing attached on its toe. NKK has extended its application to larger scales up to 1200mm. The piles with smaller diameters are screwed gripping the pile top. The piles with larger diameters are screwed chucking the pile body using the casing machine. This method is useful to make large torque and stabilize construction. The static load tests were performed to the large sized screw piles to determine the characteristics of the bearing capacity.

1. はじめに

回転貫入鋼管杭「つばさ杭」は、杭先端部に平板状の鋼製翼を設けた杭で、鋼管に回転力を与えると翼による推進力で地盤に貫入される。無排土・低騒音・低振動で施工できるため、環境に配慮した杭工法として位置付けられている。「つばさ杭」は、杭外径 318.5～508.0mm（翼径は杭外径の 2 倍、637～1016mm）の範囲で商品化している。

この「つばさ杭」の適用範囲を拡大するため、杭径の拡大（最大径 1200mm）、杭先端部の支持層への根入れ長の変更、先端翼傾斜角度の追加、杭径に対する先端翼径比率の追加について、施工試験、載荷試験および FEM 解析により妥当性の検討を実施した。本稿では、これらの結果を述べ、「大径つばさ杭」の適用性について報告する。

2. 工法の概要

「大径つばさ杭」の先端翼は、従来の「つばさ杭」と同様に、半円形の鋼製平板を互いに交差させて鋼管先端に取り付けることにより構成される（Fig.1）。先端閉塞面積は、翼径比率の 2 乗値を杭閉塞面積に掛けた値となる。杭外径と翼径比率の関係を Table 1 に示す。先端翼の板厚は、杭に作用する軸力に応じて選定する。

施工は 杭外径 318.5～600mm の範囲では 3 点式杭打ち機を用いた頭部回転方式（Fig.2 (a)）とし、杭外径 500mm 以上は全周回転機を用いた胴体回転方式（Fig.2 (b)）とした。杭径の拡大に伴い、施工時の周面および先端抵抗が増

加し、大きな回転トルクを必要としたため、胴体回転方式を採用した。どちらの施工方式も、木ねじの要領で杭を回転貫入させるため、無排土・低騒音・低振動での施工が可能となる。

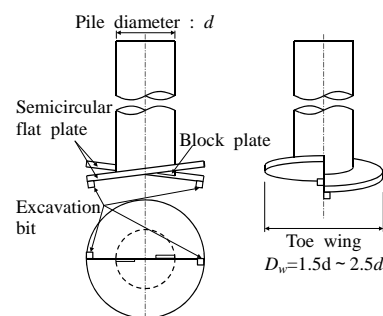


Fig.1 Composition of “Tsubasa Pile”

Table 1 Relationship of pile and wing diameters

Pipe outer diameter	Ratio of the toe wing diameter	Toe wing	
		Diameter	Thickness
318.5	2.0	637.0 ~ 796.3	20 ~ 40
355.6		711.2 ~ 889	20 ~ 40
400, 406.4		800 ~ 1016	20 ~ 45
450, 457.2		900 ~ 1143	20 ~ 50
500, 508.0	1.5 1.75 2.0	1000 ~ 1270	20 ~ 50
600		900 ~ 1500	20 ~ 35
700		1050 ~ 1400	20 ~ 45
800		1200 ~ 1600	20 ~ 50
900		1350 ~ 1800	20 ~ 55
1000		1500 ~ 2000	20 ~ 60
1100		1650 ~ 2200	20 ~ 65
1200		1800 ~ 2400	20 ~ 70

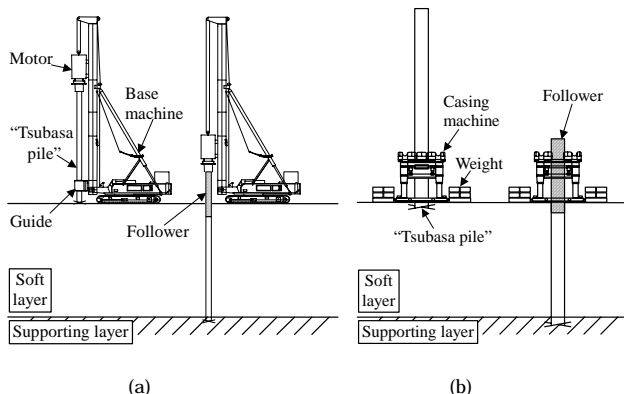


Fig.2 Construction method

3. 根入れ長，翼傾斜角，翼径比率の影響調査

3.1 概要

「大径つばさ杭」の開発に伴い、施工性の向上、経済的な設計を目的として、支持層への根入れ長、翼傾斜角度、杭径に対する翼径比率が杭支持力特性へ及ぼす影響について、載荷試験および FEM 解析により検討を実施した。

支持層への根入れ長は、従来の「つばさ杭」では $2d$ (d : 杭外径) 根入れすることとしていたが、砂礫地盤のように硬い地盤に杭を貫入させるには時間がかかり、結果的に地盤を乱してしまう恐れがあった。また、「つばさ杭」のような先端に拡大部を有する杭では、杭先端下方の地盤の硬さが良好であれば、翼部で十分な支持力を得ることができ、根入れ長を少なくとも先端支持力は十分確保できると考えられるため、支持層への根入れ長を $1d$ に変更することとした。

先端翼の傾斜角度は、従来まで 7.2° であったが、施工速度の向上と地盤条件に応じて使い分けができるように、2 倍の 14.4° の傾斜角度を追加した。

杭径に対する翼径比率は、鉛直抵抗力と水平抵抗力のバランスを考慮し、より経済的な杭設計を可能とするため、翼径比率を 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5 の 5 種類に拡張した。

3.2 載荷試験

砂地盤を支持層とする同一地盤で、支持層への根入れ長、先端翼の形状をパラメータとした 5 種類の試験を実施した (Table 2, Fig.3)。今回の試験では、同一条件での比較試験とするため、支持層境界が比較的明確な地盤を選定した。

Table 2 Specification of test piles

Test No.	1	2	3	4	5
Outer diameter (mm)	318.5				
Wall thickness (mm)	16				
Wing diameter (mm)	637 (2d)	637 (2d)	796.3 (2.5d)	637 (2d)	477.8 (1.5d)
Angle ($^\circ$)	7.2	7.2	14.4	14.4	14.4
Setting length to the supporting layer (mm)	637 (2d)	318.5 (d)	318.5 (d)	318.5 (d)	318.5 (d)

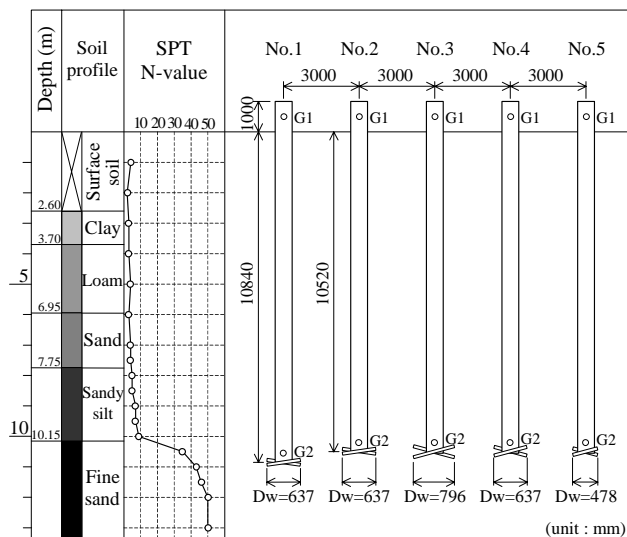


Fig.3 Test site (soil profile)

全試験の結果について、翼面積および翼径で正規化した杭先端荷重 / 翼面積 ~ 杭先端変位量 / 翼径の関係を Fig.4 に示す。杭先端荷重は先端部に貼り付けたひずみゲージの測定結果より求めた。ある程度のばらつきは見られるが、ほぼ同様な傾向を示した。試験結果より、以下のことが明らかとなった。

- (1) No.1, No.2, No.4 の結果に相違が見られないことより、杭先端の荷重 ~ 変位量関係は支持層への根入れ長および翼傾斜角度の相違に影響がない。
- (2) No.3, No.4, No.5 の結果もほぼ同様であり、先端翼の面積に応じた支持力を有していた。

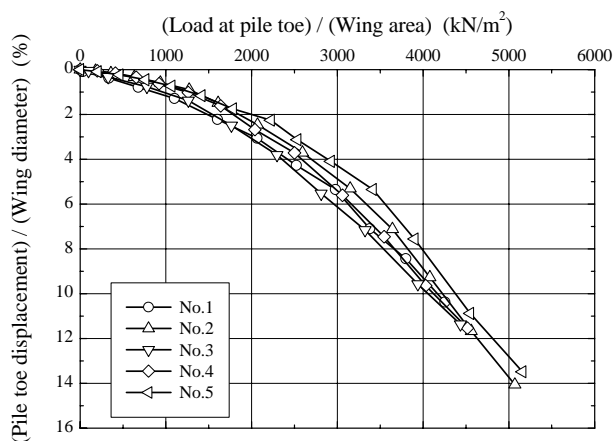


Fig.4 Normalized load-displacement curves

3.3 FEM 解析

FEM 解析を用いて載荷試験結果のシミュレーションを行った。解析方法は、非線形弾性モデル (Duncan-Chang モデル) ¹⁾を用いた FEM 解析とした。また、翼部の非対称性を考慮するため、三次元モデルを用いた (Fig.5)。解析

領域は、支持層から下の地盤をモデル化し、上部地盤は上載荷重により考慮した (Fig.6)。杭は弾性体とし、地盤の構成方程式は、Duncan と Chang らが提案した式(1)、式(2)を用いた。

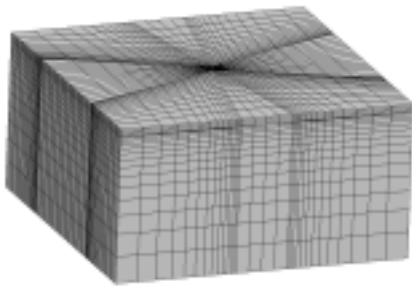


Fig.5 Mesh (nodal points=23852, elements=22072)

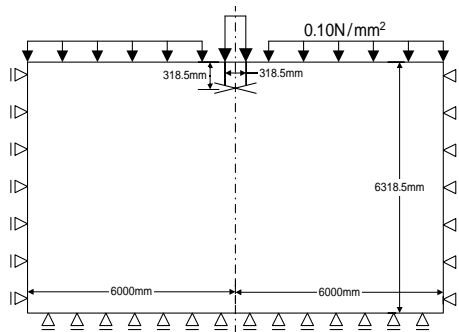


Fig.6 Analysis domain

$$\left. \begin{aligned} E_t &= \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2c \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2 K \cdot P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \\ &\quad \text{for } (\sigma_1 - \sigma_3) \leq (\sigma_1 - \sigma_3)_f \\ E_t &= 0 \quad \text{for } (\sigma_1 - \sigma_3) > (\sigma_1 - \sigma_3)_f \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

$$B = K_b \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \dots\dots(2)$$

ここに、 E_t は接線ヤング係数、 B は接線体積圧縮係数である。粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 、パラメータ K, n, K_b, m, R_f は、三軸圧縮試験より決定される定数である。Duncan-Chang モデルのパラメータは、支持層の砂地盤の三軸圧縮試験より決定した (Table 3)。

Table 3 Parameters of the Duncan-Chang model

Parameter	Value	Parameter	Value
c (N/mm ²)	0.012	K_b	489
($^\circ$)	41.3	m	0.178
K	742	R_f	0.84
n	0.146		

Fig.7 に No.1 ~ No.5 の全試験に対する解析結果を示す。杭先端の荷重度 ~ 変位置関係はFig.4と良く一致しており、シミュレーションが良好に行われたことが示された。また、この解析手法を用いれば、異なる地盤での根入れ長や翼形状をパラメータとした杭挙動を調査することが可能であると言える。

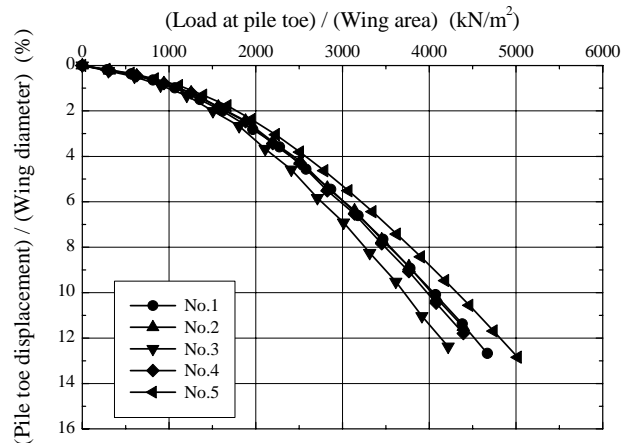


Fig.7 Normalized load-displacement curves derived from FEM analyses

載荷試験および FEM 解析の結果から、支持層への根入れ長 ($d \sim 2d$)、翼傾斜角度 ($7.2^\circ \sim 14.4^\circ$)、杭径に対する翼径比率 ($D_w = 1.5d \sim 2.5d$) を変更しても杭先端支持力度は変化しないことが示された。

4. 施工性調査

「大径つばさ杭」の施工性を明確にするため、全周回転機を用いた胴体回転方式での施工試験を実施した。Table 4 に試験杭の諸元を示す。試験杭はすべて翼径比率を 2.0、翼傾斜角度を 14.4° 、支持層への根入れ長を 1d として施工した。施工地盤は G.L. - 47 ~ 50m 付近に N 値 50 超えの中間砂層を有し、G.L. - 58.6m から支持砂層となっている。Photo 1 に施工状況を示す。

Table 4 Specifications of test piles

Pile outer diameter d (mm)	800 *	1000	1200 *
Wall thickness t (mm)	40	16	50
Length (m)	60.6	60.0	61.0
Standard	SKK490	SKK490	SKK490
Wing diameter D_w (mm)	1600 (2d)	2000 (2d)	2400 (2d)
Wing thickness T_w (mm)	80	100	110
Angle ($^\circ$)	14.4	14.4	14.4
Setting length to the supporting layer (mm)	800 (d)	1000 (d)	1200 (d)

*Static load test pile



Photo 1 Construction method

Fig.8～Fig.10に施工記録を示す。トルク T (kN・m) は油圧ユニットからの油圧を測定することにより、換算して求めた。貫入量 S (cm) は1回転ごとの杭施工深度を計測し、その増分を1回転当たりの貫入量として求めた。硬さ指標 K (kN・m/cm) は、式(3)に示すトルク T を1回転当たりの貫入量 S で除した値であり、その変化により支持層到達の判断指標とした。

$$K = T/S \quad \dots\dots(3)$$

これらの指標は、パソコンを用いた施工管理計で記録され、常に施工状況を把握することができる。

施工性調査試験の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 従来までの杭頭回転方式で施工した際の施工記録と同様に、 N 値の分布に対応した硬さ指標の記録が得られた。よって、これまでの「つばさ杭」の施工管理手法をそのまま適用することができる。
- (2) 支持層付近で硬さ指標 K が明確な変化を示し、支持層へ確実に貫入していることが確認できた。
- (3) 杭径 800mm と 1200mm を比較すると、硬さ指標で 1.3 倍程度 1200mm の方が大きい結果であった。

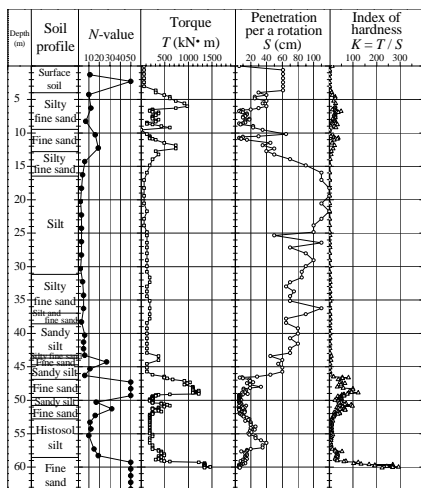


Fig.8 Case of d=800mm

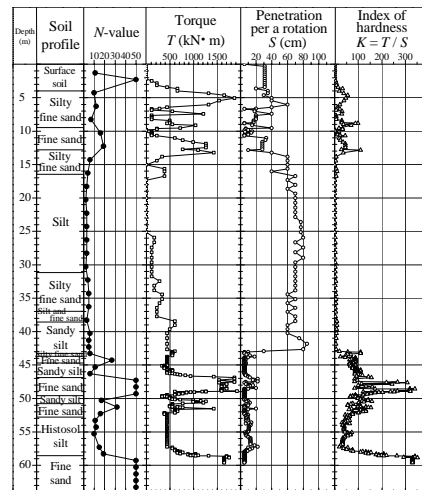


Fig.9 Case of d=1000mm

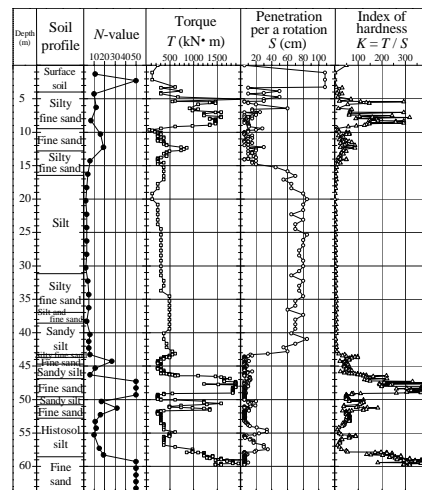


Fig.10 Case of d=1200mm

5. 載荷試験

「大径つばさ杭」の実大載荷試験を実施した。本試験では、同一地盤で同一先端翼径比率における杭径の相違による支持力特性の調査を行うため、施工性調査試験を実施した杭径 800mm と杭径 1200mm の 2 種類について載荷試験を実施した (Table 4)。深度方向 6 断面にひずみゲージを貼り付け、各層ごとの周面摩擦力と先端の支持力を計測した。載荷試験杭と反力杭の配置を Fig.11 に示す。杭径 800mm では 4 本、杭径 1200mm では 8 本の反力杭を使用した。反力杭はすべて杭径 1000mm、翼径 2000mm であり、載荷試験杭と同じ支持砂層まで打設した。載荷試験は、地盤工学会基準²⁾に準拠して実施した。Photo 2 に杭径 1200mm の載荷試験状況を示す。杭径 800mm の試験では、最大杭頭荷重 21500kN、杭径 1200mm の試験では、最大杭頭荷重 44100kN まで載荷した。

Fig.12 に各試験杭の杭頭荷重～杭頭変位量関係を示す。Fig.13 に各試験杭について翼面積および翼径で正規化した杭先端荷重 / 翼面積～杭先端変位量 / 翼径の関係を示す。

「大径つばさ杭」

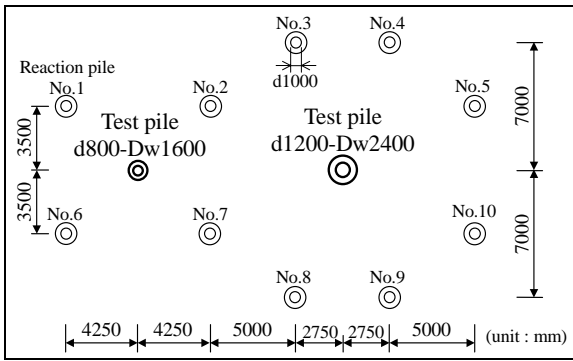


Fig.11 Layout of test and reaction piles



Photo 2 Static load test (d=1200mm)

両試験とも载荷装置の制限で、杭先端変位量が先端翼径の10%に至るまで変位させることができなかった。また、変位の挙動から明確な折れ曲がり点が見られないことより、杭先端支持力は極限状態に至っていないものと判断できる。先端支持力と先端翼閉塞面積は、ほぼ比例関係にあることが示された。特に、第1限界抵抗力付近までは同様な挙動を示した。これは先端翼より下方の地盤が非常に硬く良好であるため、杭径の相違に影響を与えない支持力が得られたものと推定される。以上のことから、「大径つばさ杭」は先端翼面積に応じた支持力を得られることが明らかとなった。

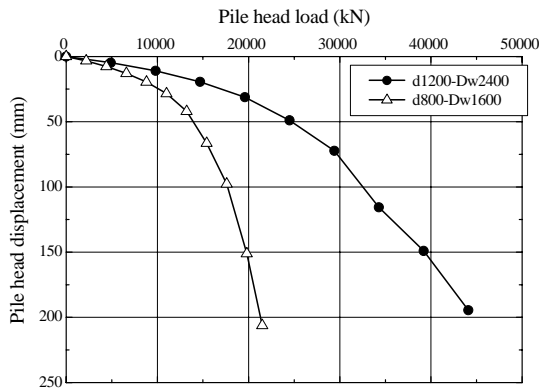


Fig.12 Load-displacement relations

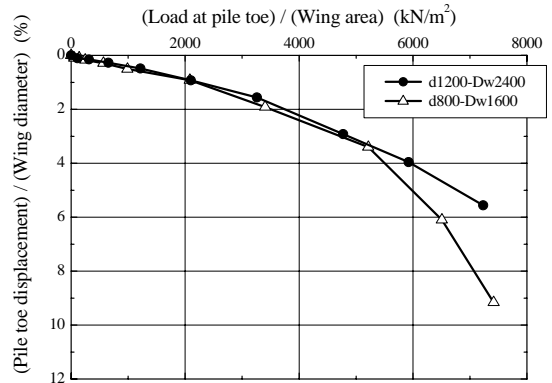


Fig.13 Normalized load-displacement curves

Fig.14, Fig.15 に各試験の軸力分布, Fig.16, Fig.17 に各試験のひずみゲージ間における相対変位量と杭周面摩擦力度の関係を示す。両試験とも軸力分布はほぼ同様な分布傾向を示した。各層の周面摩擦力度は、杭径 800mm より杭径 1200mm の方が若干大きい値を示した層が見られた。杭径 1200mm は杭径 800mm に比べて 2.25 倍の体積があり、杭体積分の土を周囲に圧縮しながら施工されるので、杭周辺地盤の密度が増加し、周面摩擦力度が大きくなったものと推定される。

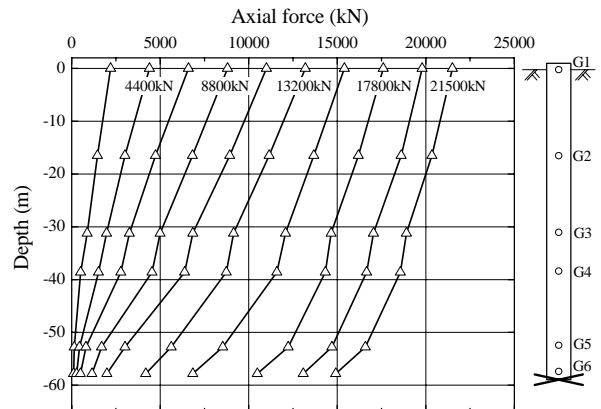


Fig.14 Distribution of axial forces (d=800mm)

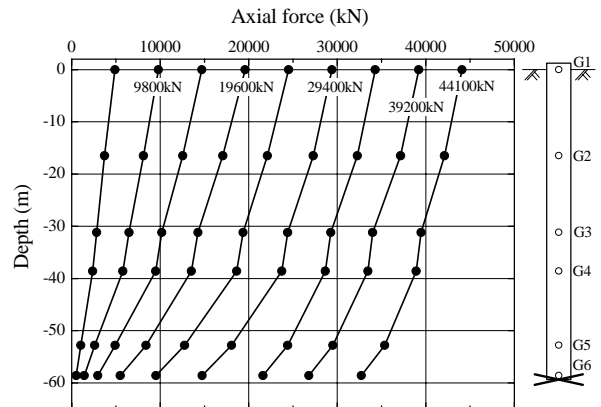


Fig.15 Distribution of axial forces (d=1200mm)

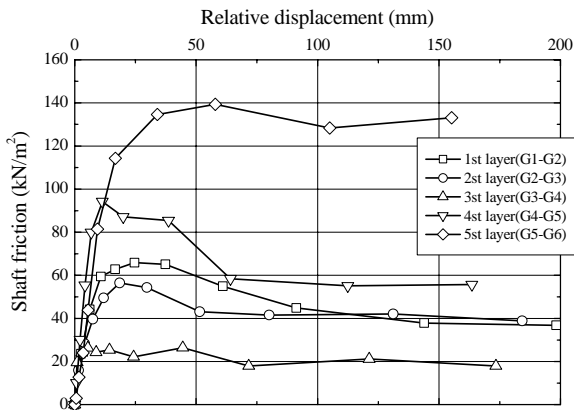


Fig. 16 Distribution of shaft friction (d=800mm)

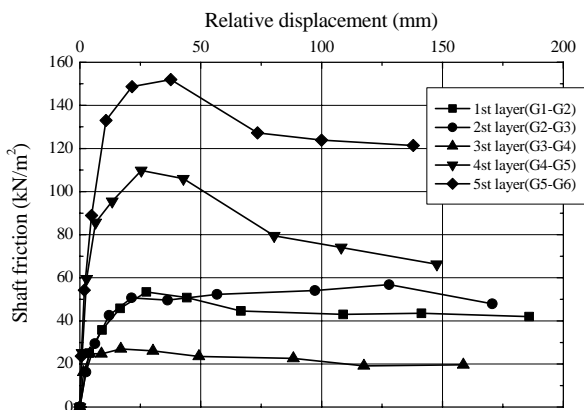


Fig. 17 Distribution of shaft friction (d=1200mm)

6. おわりに

最大杭径 1200mm まで拡大した「大径つばさ杭」の開発を行った。支持層への根入れ長の変更、翼傾斜角度の追加、翼径比率の追加を実施することにより、施工性の向上が図られ、経済的な設計が可能となった。また、全周回転機による胴体回転方式の採用により、大きな回転トルクで安定した施工ができた。さらに、大径杭の載荷試験により、先端支持力が先端翼面積に比例することが確認できたため、従来の「つばさ杭」と同じ設計式の適用が可能となった。

参考文献

- 1) Duncan, J. M. et al. "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.96, No.SM5, pp.1629-1653(1970).
- 2) 地盤工学会. "杭の鉛直載荷試験方法・同解説". 東京, 地盤工学会. 1993.

<問い合わせ先>

建材センター 建材技術開発部

Tel. 03 (3217) 2211 篠原 敏雄

E-mail address : Toshio_Shinohara@ntsgw.tokyo.nkk.co.jp

基盤技術研究所 都市工学研究部

Tel. 044 (322) 6221 林 正宏

E-mail address : mahaya@lab.keihin.nkk.co.jp