

拡頭構造を有する大支持力鋼管杭工法

High Bearing Capacity Steel Pipe-Piles with Enlarged Pile-Head

協屋 泰士 WAKIYA Yasushi JFE スチール 建材センター 建材技術部土木技術室 主任部員(課長)
市川 和臣 ICHIKAWA Kazuomi JFE スチール 建材センター 建材技術部土木技術室 主任部員(副課長)
林 正宏 HAYASHI Masahiro JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(課長)

要旨

JFE スチールでは大支持力鋼管杭工法である「つばさ杭工法」と「Super KING 工法」に対して、杭頭部の水平耐力を向上させるために 2 種類の拡頭杭構造を開発した。拡頭杭の製作においては直径の異なる杭を接続するが、その接続方法として、つばさ杭工法には円盤継手を、Super KING 工法においてはリブプレート継手を採用した。それぞれの拡頭杭構造に対して軸圧縮試験、曲げ試験および FEM 解析を実施し、必要性能を満たす継手仕様を明らかにした。円盤継手については円盤板厚を増加させた場合、リブプレート継手についてはプレート枚数が 12 枚以上の場合に杭体部以上の継手耐力が得られることが確認された。

Abstract:

JFE Steel has developed two types of enlarged pile head structures, to improve the horizontal resistance of the pile, especially for “Tsubasa Pile Method” and “Super KING Method” that have high bearing capacity. Piles with different pile diameter are joined together in the production of the enlarged pile head structures. Joining methods employed are: disk plate joint for Tsubasa Pile Method and the rib plate joint for Super KING Method. Axis compression tests, bending tests and FEM analysis are carried out to confirm the performance of each enlarged pile head structures, and appropriate joint specifications are clarified. When the disk plate thickness increases and the number of rib plates is more than 12 pieces, the joint strength is larger than that of the pile.

1. はじめに

杭基礎の分野では、杭本数を削減し、経済性を高めるために、より大きな支持力を得ることのできる杭工法の開発が継続的に行われてきた。特に近年においては、鋼管杭や既製コンクリート杭の大支持力化が積極的に進められ、新工法が相次いで市場に投入されている¹⁾。JFE スチールにおいても、大支持力かつ、低排土施工が可能で環境に優しいという特長を合わせ持つ「つばさ杭工法」²⁾と「Super KING 工法」³⁾を開発し、それらは現在、建築基礎分野における JFE スチールの主力商品となっている。

つばさ杭工法は、杭先端に鋼製平板を取り付けた翼付き回転貫入鋼管杭であり、Super KING 工法は、杭先端部に大型の根固め球根を有する埋込鋼管杭である。これらの工法は、従来の鋼管杭工法に比べ 2 倍以上の先端支持力を有していることから、杭の本数を減らすことができる一方、1 本の杭が負担する荷重が非常に大きい。特に、杭頭部には鉛直荷重のみでなく、水平荷重も同時に作用するため、従来以上に大きな曲げ耐力が求められる。

そこで、曲げ耐力を増加させるために、杭頭部の杭径を大きくして断面性能を高めた拡頭杭を開発した。拡頭杭は軸部と拡頭部の杭径や板厚を任意に設定することが可能となるため、鉛直および水平荷重に対して最適な杭構造を与えることができる。拡頭杭は直径の異なる杭を接続して製作するが、その接続方法は施工方法を考慮して、つばさ杭工法には円盤継手を、Super KING 工法においてはリブプレート継手を採用した。

本論文ではつばさ杭工法と Super KING 工法に対して採用した拡頭杭構造の特徴を述べるとともに、その構造性能を実験および解析により確認した結果を示している。さらに拡頭杭を適用した設計事例についても紹介し、その有効性を明らかにした。

2. つばさ杭工法

2.1 工法概要

つばさ杭工法は Fig. 1 に示すように杭先端に半円形の鋼製平板を交差させて取り付けた翼付き鋼管杭であり、杭体を回転させ、翼の推進効果によって地盤に貫入させる工法

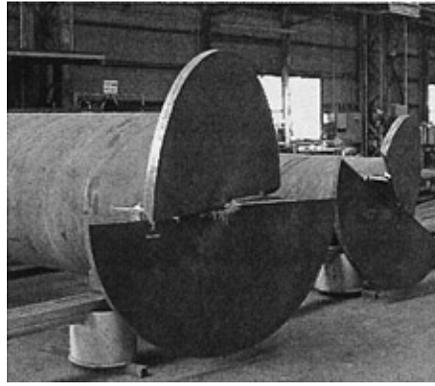
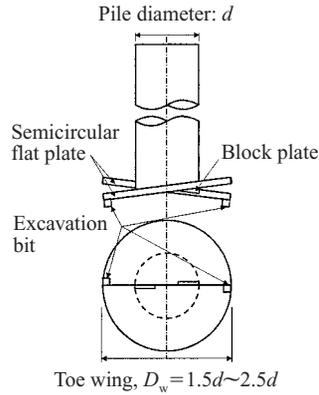


Fig. 1 Composition of Tsubasa Pile

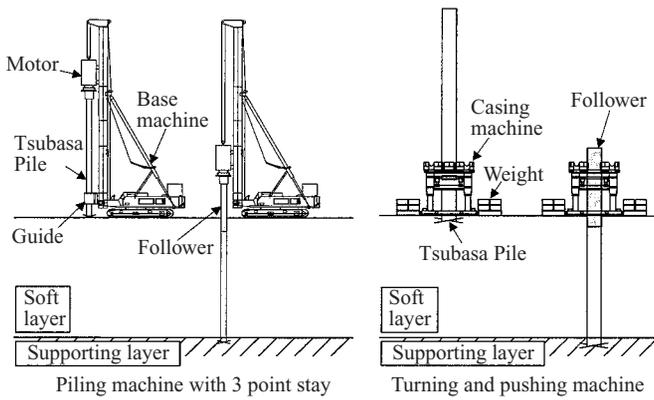


Fig. 2 Construction method

である。「環境にやさしい鋼管杭」として、完全無排土、セメントミルク不使用、低騒音・低振動の施工を実現し、都市部や地下水利用地区での施工が可能であるとともに、杭径の1.5~2.5倍の先端翼を利用して大きな先端支持力を得ることができる。

つばさ杭工法は杭径に応じて2種類の施工機械を使い分けている。杭径318.5~600mm(地盤条件によっては600mm超も可能)の場合には3点式杭打ち機を用い、杭径500~1200mmの場合には全周回転機を用いて施工する。各施工機械および施工方法について、Fig. 2に示す。

2.2 拡頭杭の構造特性

つばさ杭工法は杭体を回転させて施工を行うため、施工時の杭体には大きなトルクが作用する。よって、拡頭継手部もトルクに対して強い構造が必要であり、鋼管以上のトルク強度を有する平板継手を採用した(Fig. 3)。

この継手構造の性能を明確にするために、軸圧縮試験、曲げ試験およびFEM(有限要素法)解析を実施した。

2.2.1 軸圧縮特性

拡頭継手部の軸圧縮特性を確認するために軸圧縮試験を実施した。試験体の諸元をTable 1に、試験方法の模式図をFig. 4に示す。拡頭継手部試験体は、拡頭部鋼管径φ800mm、一般部鋼管径φ500mmの組み合わせで、円板継手板厚を50mmおよび70mmとした。また、比較のた

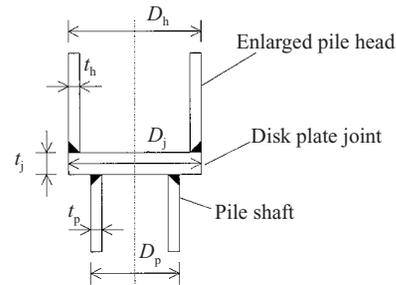


Fig. 3 Composition of enlarged pile head

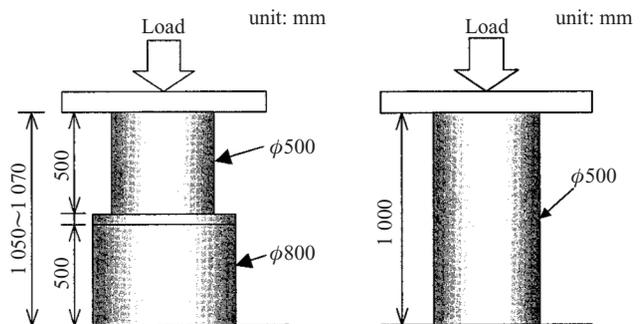


Fig. 4 Compression test

Table 1 Test piece of compression test

Case	Pile shaft		Enlarged pile head		Disk plate joint		Specification		
	D_p (mm)	t_p (mm)	D_h (mm)	t_h (mm)	D_j (mm)	t_j (mm)	Pipe	σ_y (N/mm ²) (Measurement)	Joint
1	500	9	800	9	800	50	SKK400	264	SM490A
2	500	9	800	9	800	70	SKK400		SM490A
3	500	9	-	-	-	-	SKK400	-	-

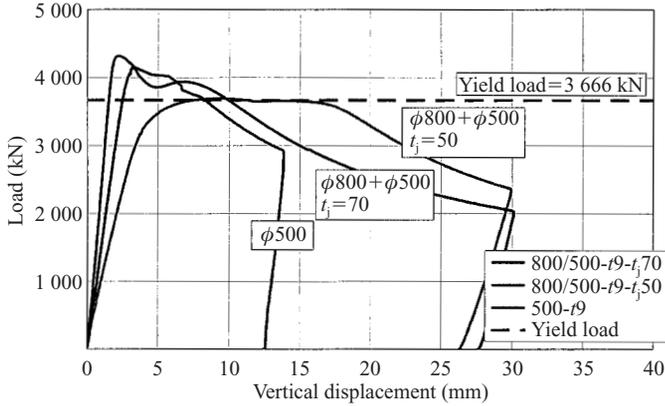


Fig. 5 Load-displacement curve



Photo 1 Deformed shape

めに一般部鋼管（素管）の試験も実施した。

荷重～軸方向変位（載荷板位置で測定）関係を Fig. 5 に示す。杭の要求性能として、一般部の鋼管と同等以上耐力を有することが求められるが、円盤継手板厚が 50 mm の場合には、円盤継手の曲げ変形の影響が大きいいため、最大耐力、剛性ともに素管より小さくなる結果であった。一方、円盤継手板厚が 70 mm の場合には、最大耐力が降伏荷重 3 666 kN（鋼材の引張試験結果から求めた素管の降伏応力度 σ_y より算出）を上回る結果であった。円盤継手板厚を増加させることにより、曲げ変形の影響が小さくなり、素管とほぼ同等の軸圧縮耐力を確保することができた。なお、試験終了後の破壊形状は、Photo 1 に示すように一般部鋼管の座屈となっている。

次に、軸圧縮試験体をモデル化して FEM 解析により試験を再現した。杭体をシェル要素、円盤継手をソリッド要素でモデル化し (Fig. 6)、3 次元弾塑性 FEM 解析を実施した。円板継手板厚 70 mm の場合の解析結果と軸圧縮試験結果の比較を Fig. 7 に示す。両者ともよく一致しており、

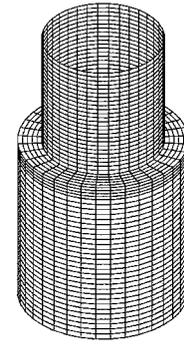


Fig. 6 FEM model

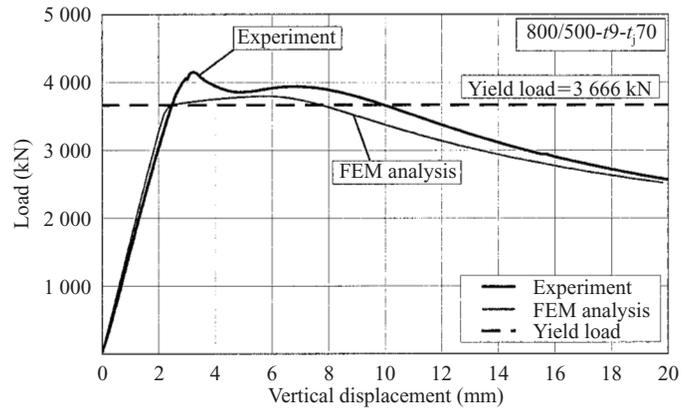


Fig. 7 Comparison of FEM analysis with experiment

FEM 解析により拡頭継手部の軸圧縮特性を評価できることが示された。

2.2.2 曲げ特性

拡頭継手部の曲げ特性を確認するために、4 点曲げ試験および 3 次元弾塑性 FEM 解析を実施した。試験体の諸元を Table 2 に、試験体の形状・寸法を Fig. 8 に示す。円盤継手の板厚は、十分な軸圧縮耐力を有する 70 mm を用いた。

Fig. 9 に各荷重段階における試験体の変形挙動を、Photo 2 に試験終了後の試験体の状況を示す。最大変形が生じているのは、一般部鋼管 φ500 mm 側の拡頭継手部から 500～600 mm の位置であり、一般部鋼管の圧縮側が座屈す

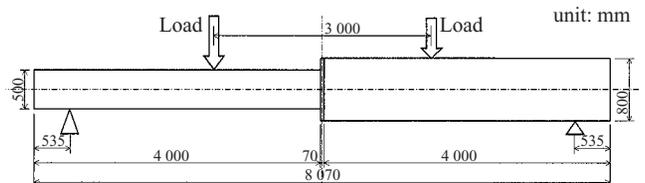


Fig. 8 Bending test

Table 2 Test piece of bending test

Pipe shaft		Enlarged pile head		Disk plate joint		Specification	
D_p (mm)	t_p (mm)	D_h (mm)	t_h (mm)	D_j (mm)	t_j (mm)	Pipe	σ_y (N/mm ²) (Measurement)
500	9	800	9	800	70	SKK400	384
							SM490A

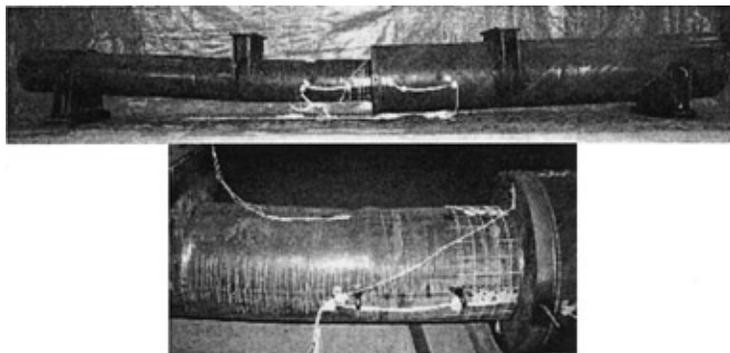


Photo 2 Deformed shape

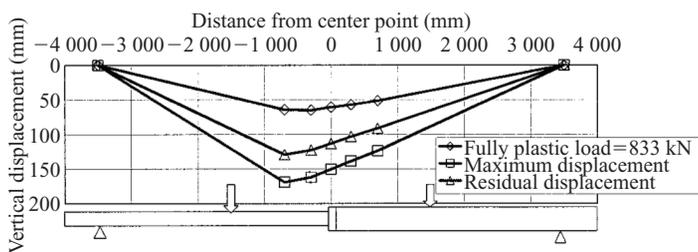


Fig.9 Deformation of test piece

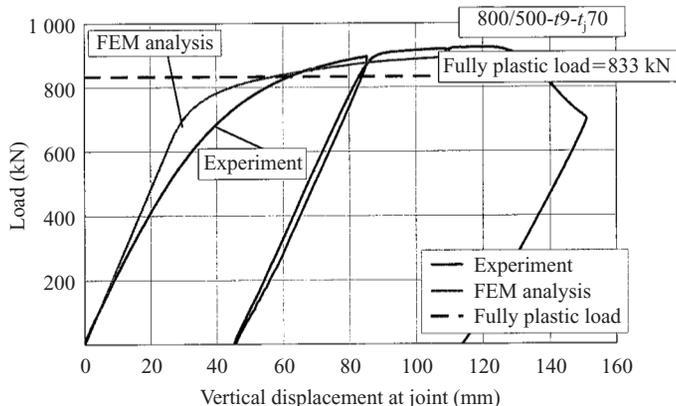


Fig. 10 Load-displacement curve

る挙動を示した。

Fig. 10 に継手位置（支間中央部）における荷重～変位関係を示す。図中には FEM 解析によるシミュレーション結果も合わせて示した。拡頭継手部の曲げ耐力は一般部の鋼管の曲げ耐力（鋼材の引張試験から求めた素管の降伏応力度 σ_y より算出）と同等以上であることが確認できた。

FEM 解析における鋼材の応力～ひずみ関係は、鋼材の引張試験結果を一般的なバイリニア型でモデル化しており、試験結果と解析結果で剛性の相違は多少見られるが、最大荷重は実験結果と一致する結果となり、一般部鋼管の全断面降伏荷重を上回る結果が得られた。したがって、FEM 解析により軸圧縮特性と同様に、拡頭継手部の曲げ特性を評価できることが示された。

2.2.3 円盤継手仕様

拡頭継手部の仕様は、軸圧縮試験で妥当性が確認された FEM 解析を用いて決定した。拡頭倍率（（拡頭部鋼管径）／（一般部鋼管径））を 1.2～1.6 倍として、杭径や板厚ごとに円盤継手板厚を変化させて計算し、最大耐力が一般部鋼管の降伏荷重を上回る円盤継手板厚を算定し、仕様を決定した。

3. Super KING 工法

3.1 工法の概要

Super KING 工法は支持層において最大で鋼管径の 2 倍の根固め球根を築造し、先端外周に 3 段のスパイラル突起を取り付けた鋼管（Fig. 11）を根固め球根内に回転圧入して、鋼管と根固め球根の一体化を図り大きな支持力を発現させる工法である。掘削を併用しながら杭を回転貫入させる施工方法であるため、施工が速く、高い鉛直精度も確保することができる。本工法には、インサイドボーリング方式およびプレボーリング方式の 2 つの施工方法がある。

インサイドボーリング方式は、Fig. 12(a) に示すように

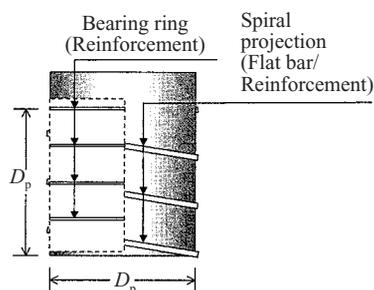


Fig. 11 Composition of Super KING Pile

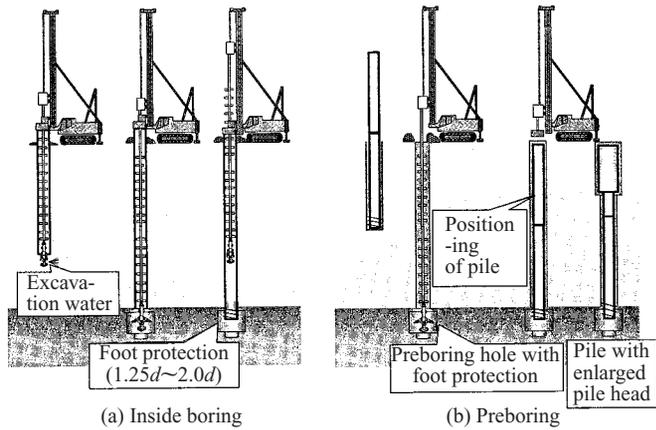


Fig. 12 Construction method

鋼管内に掘削ロッドを挿入し、掘削ビットの先端から掘削水を噴出しながら、掘削した土砂を泥土化させ、杭を回転貫入させる施工方式であり、地上への排出土を極力抑えることが可能となる。

プレボーリング方式は、Fig. 12(b)に示すように、あらかじめ杭を沈設するための地盤を掘削し、泥土化した掘削孔を築造した後に杭を建て込む方式であり、杭長40m未満の比較的短い杭に適する工法である。さらに、このプレボーリング方式では拡頭杭の施工が可能であり、杭頭部の径に合わせて地盤を掘削し、その掘削孔に拡頭杭を建て込む方法で施工する。

3.2 拡頭杭の構造特性

Super KING 工法における拡頭杭の施工は、プレボーリング方式で行うため、杭沈設時には、浮力が発生しないよ

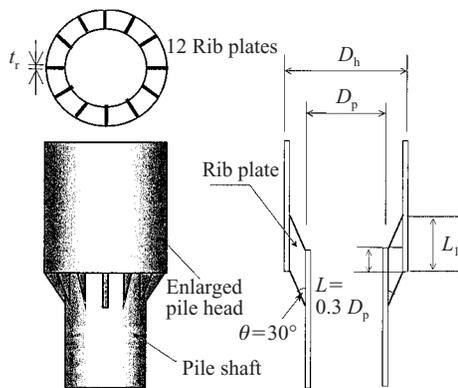


Fig. 13 Composition of enlarged pile head

うに、杭内外に泥土が流入する必要がある。そこで、Fig. 13に示すように、拡頭継手部の円周方向に等間隔にリブプレートを設置し、継手をスリット状にした構造を採用した。

この継手構造の性能を明確にするために、軸圧縮試験、曲げ試験およびFEM解析を実施した。

3.2.1 軸圧縮特性

軸圧縮試験の試験体の諸元をTable 3に、試験方法の模式図をFig. 14に示す。拡頭部鋼管径φ762mm、一般部鋼管径φ508mmとした拡頭継手部試験体2体と、比較のための一般部鋼管φ508mm(素管)1体の試験を実施した。拡頭継手部試験体は、リブプレート枚数を8枚、12枚とした。

荷重～軸方向変位(載荷板位置で測定)関係をFig. 15に示す。杭の要求性能として、一般部の鋼管と同等以上の耐力を有することが求められるが、リブプレート8枚の場合には、最大耐力が降伏荷重4190kN(鋼材の引張試験結果から求めた素管の降伏応力度 σ_y より算出)を若干下回る結果となった。一方、素管およびリブプレート12枚の場合には、最大耐力が降伏荷重を上回る結果であった。試験体はPhoto 3(リブプレート12枚の場合)に示すように一般部の座屈で破壊に至っている。Fig. 16にリブプレート12枚の場合の一般部鋼管、拡頭部鋼管およびリブプレートにおける軸方向ひずみの挙動を示す。4000kNを超えるあたりから一般部鋼管のひずみが急激に増加しているのに対して、拡頭部鋼管、リブプレートのひずみは小さくいずれも弾性域にあることが分かる。以上の結果より、拡頭継手部はリブプレートが12枚の場合に、一般部鋼管の軸圧縮耐力以上の性能が得られることが確認できた。

次に、軸圧縮試験体をモデル化してFEM解析により試験を再現した。解析は、Fig. 17に示すシェル要素を用いた3次元弾塑性FEM解析とした。リブプレート12枚の場

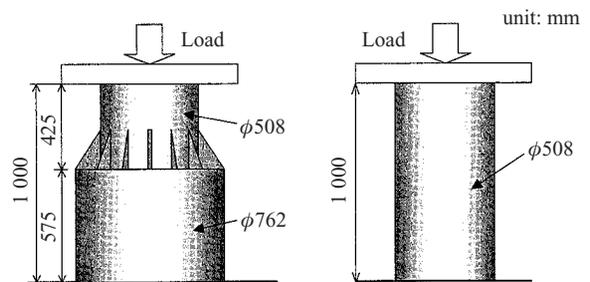


Fig. 14 Compression test

Table 3 Test piece of compression test

Case	Pile shaft		Enlarged pile head		Rib plates		Specification		
	D_p (mm)	t_p (mm)	D_h (mm)	t_h (mm)	Number	t_r (mm)	Pipe	σ_y (N/mm ²) (Measurement)	Rib plates
1	508	9	762	9	8	12	SKK400	297 (ϕ 508) 290 (ϕ 762)	SS400
2	508	9	762	9	12	12	SKK400		SS400
3	508	9	-	-	-	-	SKK400	-	-

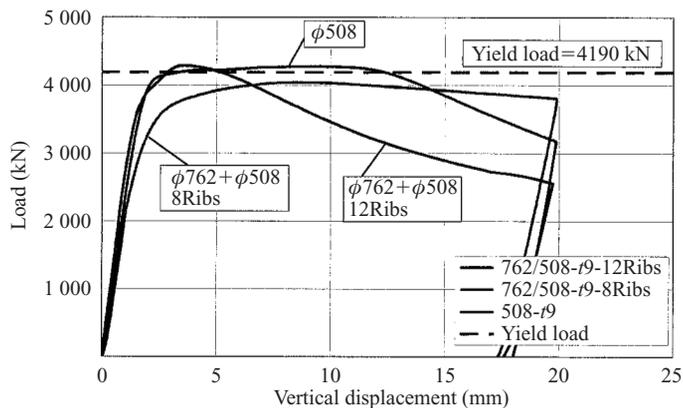


Fig. 15 Load-displacement curve

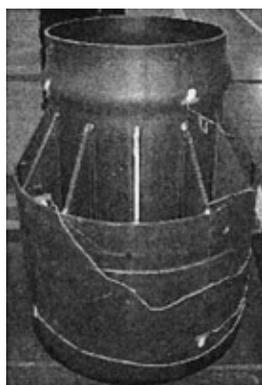


Photo 3 Deformed shape

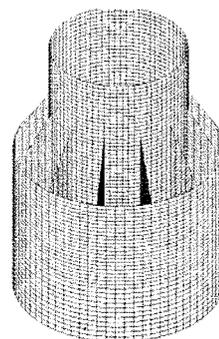


Fig. 17 FEM model

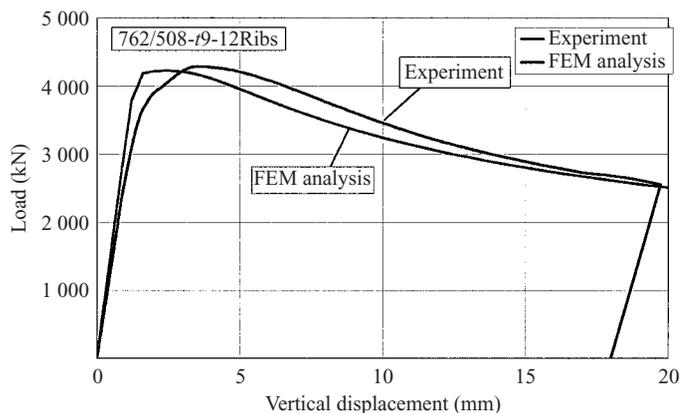


Fig. 18 Comparison of FEM analysis with experiment

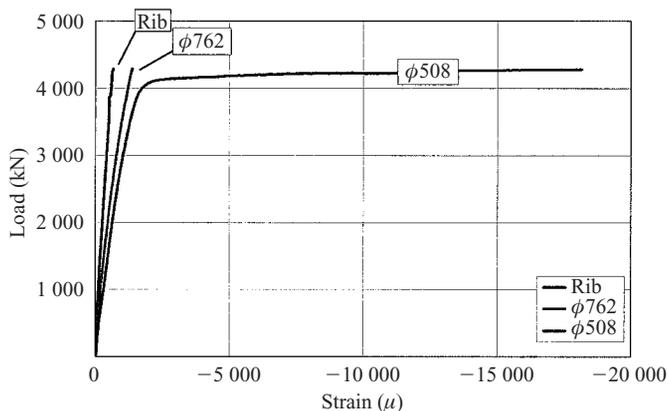


Fig. 16 Load-strain curve

合の解析結果と軸圧縮試験結果の比較を Fig. 18 に示す。両者とも解析と実験結果は良く一致しており、FEM 解析の妥当性が検証された。

3.2.2 曲げ特性

拡頭継手部の曲げ特性を確認するために、4点曲げ試験

および3次元弾塑性FEM解析を実施した。試験体の諸元を Table 4 に、試験体の形状・寸法を Fig. 19 に示す。リブプレート枚数は十分な軸圧縮耐力を有することが確認された12枚とした。

Fig. 20 に各荷重段階における試験体の変形挙動、Photo 4 に試験終了後の試験体の状況を示す。最大変形が生じているのは、中央から1m程度、一般部鋼管φ508mm側の位置であり、一般部鋼管の圧縮側が座屈する挙動を示した。

Fig. 21 に継手位置（支間中央部）における荷重～変位

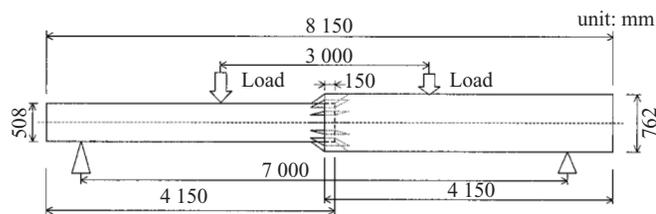


Fig. 19 Bending test

Table 4 Test piece of bending test

Pipe shaft		Enlarged pile head		Rib plates		Specification		
D_p (mm)	t_p (mm)	D_h (mm)	t_h (mm)	Number	t_r (mm)	Pipe	σ_y (N/mm ²) (Measurement)	Rib plates
508	11.4	762	11.3	12	16	SKK400	313	SS400

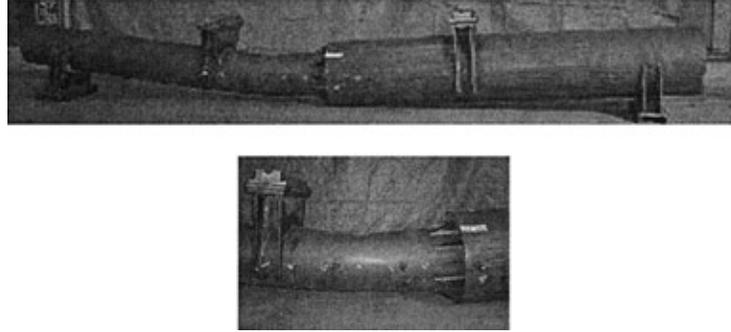


Photo 4 Deformed shape

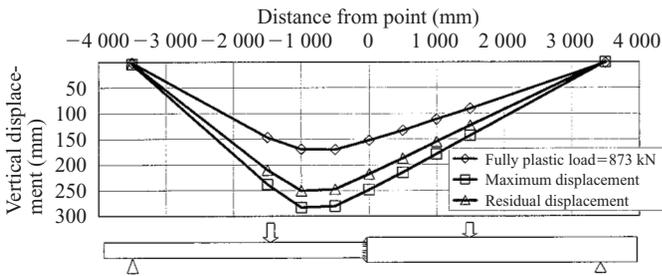


Fig.20 Deformation of test piece

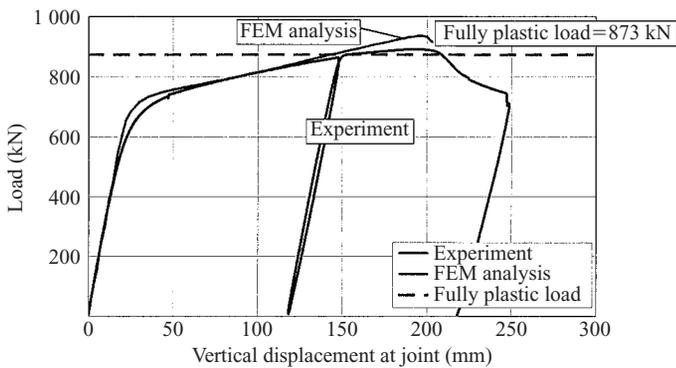


Fig.21 Comparison of FEM analysis with experiment

関係を示す。図中にはFEM解析によってシミュレーションした結果も合わせて示した。拡頭継手部の曲げ耐力は、鋼材の引張試験から求めた一般部の鋼管の曲げ耐力と同等以上であることが確認できた。また、解析結果とも非常に一致した結果となった。

FEM解析における鋼材の応力～ひずみ関係は、鋼材の引張試験結果をほぼ再現したマルチリニアでモデル化した。試験結果と解析結果は良く一致しており、FEM解析により軸圧縮特性と同様に、拡頭継手部の曲げ特性を評価できることが示された。

3.2.3 リブプレート継手仕様

拡頭継手部の仕様は、軸圧縮試験で妥当性が確認されたFEM解析を用いて決定した。拡頭倍率（拡頭部鋼管径／一般部鋼管径）を1.2～1.5倍として、杭径や板厚ごとに、リブプレートの枚数、板厚を変化させて計算し、最大耐力が一般部鋼管の降伏荷重を上回るリブプレートの仕様を算定し、仕様を決定した。

4. 適用事例

拡頭杭の適用性を確認するため、15階建ての共同住宅の事例をもとに、Super KING工法と場所打ち杭との比較設計を行った。条件をFig. 22に示す。このような高層の共同住宅の場合、地震時荷重の変動分が大きくなり、さらに大支持力工法を用いた場合には、杭1本当たりの負担する水平力も大きくなるため、杭頭部に大きな耐力が必要となる。

設計結果としての杭配置、杭仕様をそれぞれFig. 23, Table 5に示す。場所打ち杭は、拡底・拡頭構造による1柱1基礎の杭配置となっている。一方、Super KING工法においては、拡頭構造を用いない場合では水平力に対する抵抗が不足するため、一部の柱において1柱1基礎構造が不可能であった。しかし、φ1200mmの杭頭部径を

Long term loading (kN)	5 824～10 600
Short term loading (kN)	-10～15 200

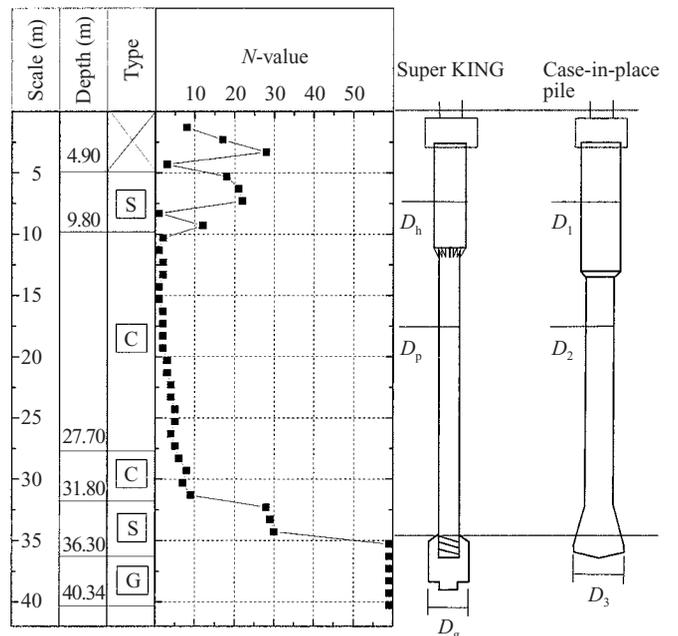


Fig.22 Drilling log, pile shape and loading

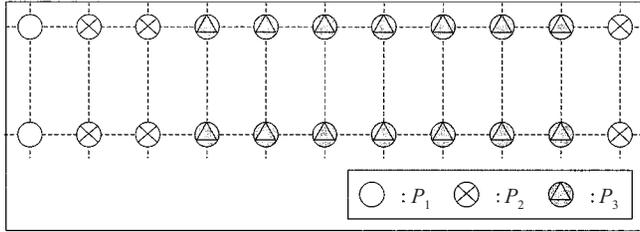


Fig. 23 Arrangement of piles

Table 5 Composition of piles

Super KING (mm)			
Type	Diameter		
	Enlarged pile head	Pile shaft	Tip
	D_h	D_p	D_g
P1	$\phi 1\ 200-t22$	$\phi 900-t15, t12$	$\phi 1\ 125$
P2	$\phi 1\ 600-t23$	$\phi 1\ 100-t19, t16$	$\phi 1\ 925$
P3	$\phi 1\ 800-t25$	$\phi 1\ 200-t22, t20$	$\phi 2\ 100$

Cast-in-place pile (mm)			
Type	Diameter		
	Enlarged pile head	Pile shaft	Tip
	D_1	D_2	D_3
P1	$\phi 2\ 100$	$\phi 1\ 500$	$\phi 1\ 500$
P2	$\phi 2\ 300$	$\phi 1\ 700$	$\phi 2\ 300$
P3	$\phi 2\ 100$	$\phi 1\ 500$	$\phi 2\ 500$

Table 6 Composition of surplus soil

	Super KING	Cast-in-place pile
Number of piles	22	22
Ratio of surplus soil	0.23	1.00

$\phi 1\ 800\text{ mm}$ に拡径することにより、全柱において場所打ち杭と同様に1柱1基礎化を実現することができた。**Table 6** に杭本数、残土量を比較した結果を示す。場所打ち杭に対して、Super KING 工法の残土量が非常に少ないことが分かる。

5. おわりに

JFE スチールの大支持力鋼管杭工法である「つばさ杭工

法」および「Super KING 工法」の支持力性能をフルに発揮させるため、それぞれの工法に適した拡頭杭の開発を行った。

拡頭杭構造とするための継手には、つばさ杭工法では「円盤継手」を、Super KING 工法では「リブプレート継手」を採用し、実験やFEM解析によってその性能を確認した。円盤継手については、円盤の板厚を適切に設定することで、また、リブプレート継手についてはリブ枚数を12枚とすることで小径部の圧縮および曲げ耐力以上の性能が得られることが明らかとなった。さらに、拡頭杭を適用した場合の試設計を実施し、拡頭構造によって鉛直支持力と水平抵抗力のバランスの取れた合理的な設計が可能になることを紹介している。

これらの工法は建設発生土が他工法に比べ極めて少ないという特長を合わせ持っており、今後は本工法を適用することで経済性に優れ、かつ環境負荷の少ない基礎構造を提案できるものと確信している。

参考文献

- 1) 最新の埋め込み杭工法. 基礎工. vol. 31, no. 9, 2003, p. 24-88.
- 2) 先端翼付き回転貫入鋼管杭 (名称: つばさ杭). 国土交通大臣認定. TACP-0001.
- 3) Super KING 工法. 国土交通大臣認定. TACP-0163, 0164.



脇屋 泰士



市川 和臣



林 正宏