

二重管式既製コンクリート杭工法 〔ヘッドギアパイル工法〕の開発

遠藤正美* 森利弘* 小川敦*

近年の既製コンクリート杭は、高支持力杭により、適用できる鉛直荷重の範囲が拡大しており、同時に設計する水平荷重も増加の傾向にある。そこで、既製コンクリート杭の杭頭部に直径の大きい鋼管を取付け、二重管式構造とすることで水平荷重に対する抵抗性を高める二重管式既製コンクリート杭（ヘッドギアパイル）工法を開発した。本稿では、本工法の性能確認のために実施した原位置での施工性試験と水平載荷試験の結果について報告する。

キーワード：既製コンクリート杭，鋼管，水平載荷試験，梁ばねモデル

1. はじめに

1. 1 開発経緯

既製コンクリート杭は、明治30年代の振動詰め成形によるRC杭を初めてとしている。昭和9年になると遠心力成形によるRC杭が開発された。後に、PC杭・PHC杭・SC杭などの開発と改良が行われ、近年では構造物の大型化に伴う鉛直荷重の増大に対し、高支持力の杭が開発されている。既製コンクリート杭が使用できる鉛直荷重の範囲が拡大し、同時に設計する水平荷重も増加の傾向にある。このため、水平荷重に対して外殻鋼管付きコンクリート杭（SC杭）を用いても耐力が不足する、あるいは場所打ちコンクリート杭を採用せざるを得ない場合がある。そこで著者らは、既製コンクリート杭の、特に杭頭部の耐震性を向上させることが可能な工法¹⁾の開発を進めてきた。

1. 2 開発工法技術概要

Fig. 1 に開発を行った杭工法の概要、Photo. 1 に実施工状況（建込状況）を示す。建物荷重を鉛直支持する既製コンクリート杭（以下、本杭）の頭部に、本杭よりも径の大きな鋼管（以下、外管）を、地震時水平抵抗部材として設置する二重管式既製コンクリート杭工法（以下、二重管杭工法）である。二重管部は地震時水平力の一部を外管に負担させることができ、主として本杭杭頭部の耐震性能を確保できる工法である。本工法の本杭は既往の高支持力杭とし、掘削方法は、プレボーリング根固め工法で行う。

なお、本工法は一般社団法人日本建築センターから工法評定（BCJ 評定-FD0565-01）を取得している。

1. 3 研究目的

本研究の最終目的は二重管杭工法の耐震性能の確認を

することにある。本工法の性能確認のために原位置において施工性試験と水平載荷試験を実施した^{2,3,4)}。

施工性試験は、本工法の施工性および施工精度の確認を目的としている。また、水平載荷試験では、水平荷重作用時における二重管杭の挙動の確認を行う。さらに、梁ばねモデルの解析を実施し、二重管杭の挙動と応力評価を検討する⁵⁾。

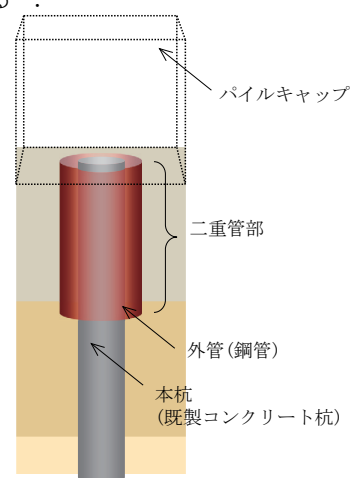


Fig. 1 二重管式既製コンクリート杭工法の概要

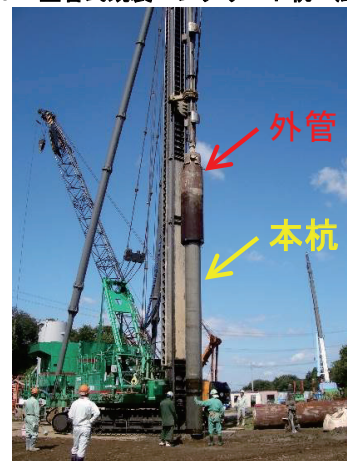


Photo. 1 二重管杭の施工状況（建込み状況）

* 技術本部 技術研究所 基盤技術研究室

2. 施工性試験

2.1 施工方法

二重管杭工法は、杭の建込み方法によって2通りの施工方法に大別できる。本杭と外管を同時に建て込む『同時建込み方式』と外管と本杭をそれぞれ順に建て込む『別建込み方式』である。杭や外管の仕様および現場の状況等を考慮して施工方法を決定する。

Fig. 2 に同時建込み方式の施工フローおよび施工状況を示す。初めに“別孔”と称する掘削孔を任意の位置に設け、その位置で外管と本杭を一体化するための治具を設けている。その後正規の位置に“本孔”と称する掘削孔を設け、杭周固定液を注入、攪拌した後別孔で一体化した二重管杭を所定深度まで建込む。

Fig. 3 に別建込み方式の施工フローおよび施工状況を示す。正規の位置に本孔を掘削し、杭周固定液を注入、攪拌した後、先に外管を建込み、続いて本杭を建込むため、建込み時は一体化せずに二重管杭を施工する。

Fig. 4 に二重管部となる掘削孔上部の拡大部の施工方法を示す。所定位置にあらかじめセットした拡大部掘削用の部材ロッドを用いて行うことによる。なお、試験地の土質柱状図はFig. 6 と同一である。



Fig. 2 同時建込み方式の施工フローおよび施工状況



Fig. 3 外管別建込み方式の施工フローおよび施工状況

2.2 試験体概要

Table 1 に施工性試験ケース一覧を示す。施工試験杭はC1, C2 とし、建込み方式による違いをそれぞれ確認した。施工試験では、本杭と称する既製杭と外管とで二重管杭を構築する方法の施工性、建込み時の施工精度などを確認することを目的とした。二重管杭を構築する方法は2種類を考案し、それぞれC1, C2 で確認した。

2.3 試験結果

Table 2 に施工試験結果一覧を示す。別孔で一体化したC1 を本孔に建込む際には、本杭および外管ともに2方向からトランシットおよびデジタル傾斜計で鉛直精度を目視し、管理値とした 1/100 rad 以内の精度である事を確認した。外管と本杭を別々に建込んだ C2 も同様の鉛直精度を確保できた。杭芯からのずれは、建込み時に2方向の逃げ芯から確認し、C1, C2 ともに管理値とした 50 mm 以内の精度を確保できた。

C1 では二重管杭の上端部には外管と本杭を一体化するための治具を設けている。これにより外管と本杭の上下・水平方向のずれは治具のクリアランスが上限となるため、大きな施工誤差は生じないことになる。一方、外管と本杭を別建込みとするC2 には一体化の為の治具は不要となるが、その分、ずれがやや大きめとなっている。

Table 1 施工性試験ケース一覧

No.	本杭	外管	備考
C1	PHA (A種) Φ600mm, L=10.5m	Φ900mm, L=3.2m, t=22mm	同時建込み
C2	PHA (A種) Φ600mm, L=9.0m	Φ1000mm, L=5.0m, t=22mm	別建込み

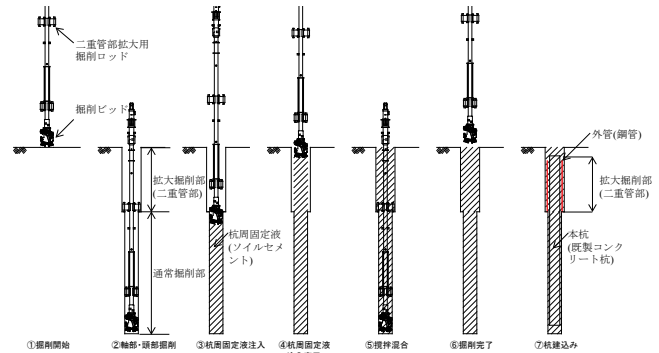


Fig. 4 施工方法

Table 2 施工性試験結果一覧

管理項目	管理値	実測値	
		C1	C2
(1) 建込み時の傾斜	1/100 rad 以内 (89.43°)	本杭/ X89.8°, Y:89.9° 外管/ X90.0°, Y:89.5°	本杭/ X89.5°, Y:89.8° 外管/ X90.0°, Y:90.0°
(2) 杭頭レベル	± 50 mm	0 mm	0 mm
(3) 本杭の杭芯ずれ	50 mm 以内	X:20 mm, Y:0 mm	X:20 mm, Y:-30 mm
(4) 杭の相対ずれ	50 mm 以内	X:10 mm, Y:13 mm	X:37 mm, Y:15 mm

管理項目 (1), (2) は外管、本杭建込み時に実測
管理項目 (3), (4) は杭頭部掘削後に実測

3. 水平載荷試験

3. 1 試験目的と載荷方法

本試験の目的は、実大規模での二重管杭の水平抵抗力および本杭と外管の挙動を把握することにある。

Fig. 5 に載荷方法を示す。本試験方法は、既往の研究⁶⁾を参考に、杭頭部の回転を拘束した条件での試験とした。具体的には、パイルキャップ上に鉄骨梁を設置し、その先端部側に設置した鉛直方向のジャッキのストロークを調整することにより、パイルキャップの傾斜を補正して杭頭部の回転を拘束した。載荷は一方方向漸増載荷とし、杭が降伏ひずみに達した後は装置の限界まで正方向に載荷することとした。なお、試験時には、杭頭水平荷重、パイルキャップ変位、本杭・外管の鋼管のひずみ、杭頭定着筋のひずみ等を計測した。

3. 2 試験方法

3. 2. 1 地盤条件と使用材料

Fig. 6 に試験地の土質柱状図および杭姿図を示す。二重管杭の区間は主にロームとなっている。なお、水平方向の性状把握が目的のため、本杭先端部には拡大根固め部は設けていない。

Table4 に鋼材とコンクリートの材料試験結果の一覧を示す。試験に使用した外管、本杭の鋼管、コンクリートの

材料試験を行った。鋼管の試験片は実際に載荷試験で使用した外管および本杭(CASE-3)から試料を切り出した後作製し、引張試験を行った。また、コンクリートの供試体は本杭作製時に同一バッチから採取して作製後圧縮試験を行った。なお、コンクリートの圧縮試験は水平載荷試験となるべく試験時期を合わせて実施した。

3. 2. 2 試験体概要

水平載荷試験ケース一覧を Table3 に示す。CASE-1 は本杭のみ、CASE-6 は外管のみで、CASE-2~CASE-5 が二重管杭である。CASE-3 を二重管の標準タイプと位置付けた。標準タイプに対して、CASE-2 は外管長=1.4 m とし、CASE-5 は外径径=1,200 mm とした。また、CASE-4 は標準タイプ CASE-3 と同じ杭形状であるが、二重管内部の杭周固定部ソイルセメントの強度を高く(目標一軸圧縮強さ=5 N/mm²)したケースである。本杭はすべて SC 杭を使用している。Fig. 7 に二重管部の杭周固定部ソイルセメント(杭を建込んでいる際のオーバーフロー液も含む)の一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} の関係を示す。CASE-4 は、一般的な埋め込み杭の杭周固定部よりは強度が高いため、他と区別して整理した。 q_u - E_{50} 関係には正の相関が認められ、CASE-4 以外の供試体の比例定数は $E_{50}/q_u=265$ であり、地盤改良や流動化処理土と同程度の値であった⁷⁾。

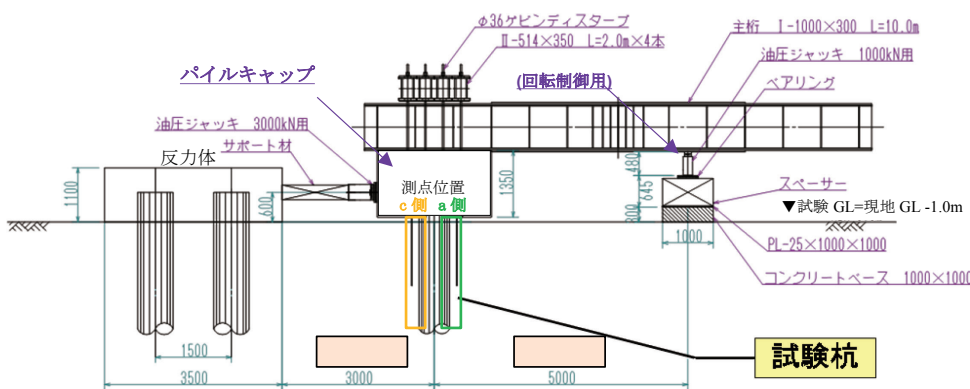


Fig. 5 載荷方法 (左図: CASE-2~4, 6, 右図: 影響範囲概念図)

試験CASE	2D (m)	5D (m)
CASE-1	3.0	5.0
CASE-2	3.0	5.0
CASE-3	3.0	5.0
CASE-4	3.0	5.0
CASE-5	3.0	7.0
CASE-6	3.0	5.0

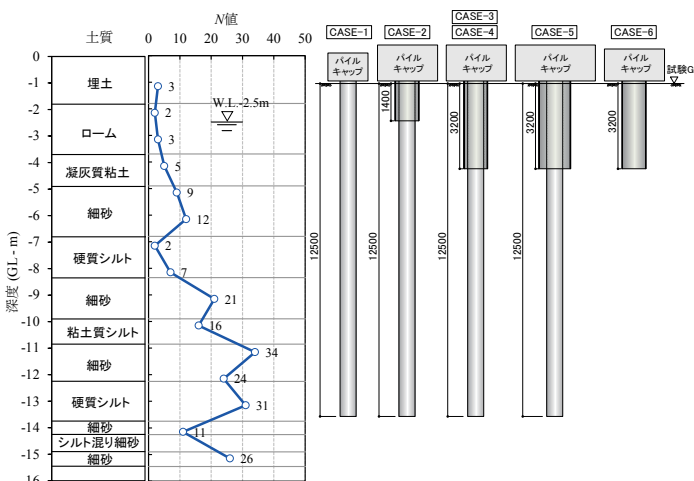


Fig. 6 試験地の土質柱状図および杭姿図

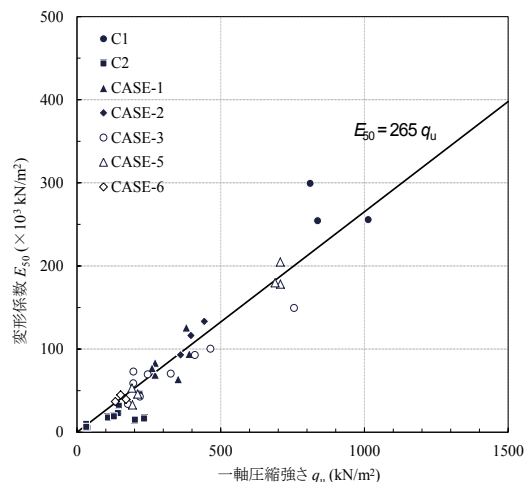


Fig. 7 一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} 関係

3.3 試験結果

Fig. 8 に杭頭部の水平荷重(P)－水平変位(y)関係を示す。なお、図中には、参考として本杭のみのCASE-1と外管のみのCASE-6を単純和した値も併記している。また、本杭および外管の降伏は鋼管のひずみで判断した。本杭のみのCASE-1はy=32mm付近で杭頭部が、y=52mm付近で地中部が降伏ひずみに達したが、最終載荷まで荷重が漸増した。外管のみのCASE-6では鋼管の降伏は見られなかった。CASE-3の水平変位y=48mm付近で本杭の地中部が降伏ひずみに達した。なお、CASE-3の荷重はCASE-1とCASE-6の単純和と同程度の値を示した。また、割線剛性(水平変位y=10mm時、以下同様)は、CASE-1に対して約1.6倍となった。外管長が短いCASE-2はy=28mm付近で本杭の杭頭部が、y=44mm付近で地中部が降伏ひずみに達したが、外管は弾性域にとどまった。割線剛性は、CASE-1に対して1.2倍程度であった。杭周固定部の強度が高いCASE-4は、CASE-3と同様の荷重－変位関係を示し、割線剛性はCASE-1に対して1.7倍程度であった。外管径の大きなCASE-5ではy=36mm付近で外管の杭頭部が、y=44mm付近で本杭の杭頭部と地中部が降伏ひずみに達し、荷重はCASE-3より大きな値で推移した。割線剛性はCASE-1に対して1.8倍程度であった。

次に本杭および外管に貼付したひずみゲージにより得られたひずみ値から、曲げモーメント分布(以下、M分布)とせん断力分布(以下、Q分布)を以下の方法により求めた。最初に、杭の断面(i断面)における曲率 Φ_i を式(1)により求めた。

$$\Phi_i = -(\epsilon_{ai} - \epsilon_{ci}) / D \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 ϵ_{ai} : i断面における測点a側のひずみ

ϵ_{ci} : i断面における測点c側のひずみ

D : 杭径

上記の式より、材料試験結果から得られた諸数値(本杭肉厚、コンクリート強度、コンクリート及び鋼管のヤング係数)を用いて、本杭、外管それぞれのM- Φ 関係図を作成し、その関係図から断面(i断面)における曲げモーメント M_i を求め深度方向のM分布図を作成した。最後に、M分布の連続する3点を二次式で表し、微分することでその傾きを求め、その深度におけるせん断力を算出し、深度方向のQ分布図を作成した。

Fig. 9にCASE-1, 3, 4, 5, 6のM分布図およびQ分布図を示す。CASE-1(本杭のみ)、CASE-6(外管のみ)の1断面(杭頭からの深度0.0m)のせん断力はジャッキ荷重とし、その他、二重管杭の本杭の1断面のせん断力はジャッキ荷重から外管のせん断力を減じた値とした。また、CASE-2における本杭のM分布の1断面はデータ欠測により比較ができないため結果は示さないことにした。

本杭のM分布をCASE-1と、CASE-3, 4, 5と比較してみると分布傾向は似ている。ただし、外管の長さが3.2mのCASE-3, 4, 5はそれぞれCASE-1より値が40%減、25%減、50%減となっており、所定の長さの外管を設置することにより、杭頭部の曲げモーメントを低減する効果がある事がうかがえる。また、反曲点は、CASE-1で約2m、CASE-3, 4, 5で約2.5~3mと外管を有する本杭の方が深くなる傾向がある。

本杭のQ分布は、地中部最大曲げモーメント発生深度以深では似た傾向となっているが、それ以浅の杭頭部付近では4ケースそれぞれ違った分布になっている。外管径が900mmの二重管杭であるCASE-3, 4では、1~2m付近でせん断力が減少しほぼ0kNとなる特徴的な分布になっている。また、二重管杭で、外管径が1,200mmと大きいCASE-5では杭頭部付近のせん断力が小さい値となっている。これらの結果から、外管の有無およびその径や長さが本杭のせん断力に影響を与えていることがわかる。一方、外管のQ分布は、CASE-3, 5, 6は1断面の杭頭部が最も大きく、地中深くなるに従って小さくなっているが、CASE-4では異なる傾向を示しており、せん断力の深度方向の分布に違いが生じている。

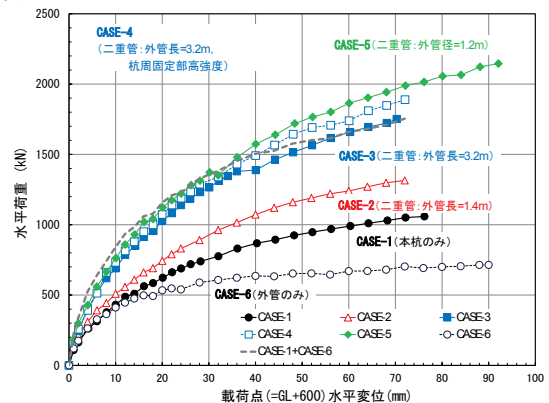


Fig. 8 水平荷重(P)－水平変位(y)関係

Table 3 試験体ケース一覧

試験ケース		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6	
		本杭のみ	外管長(短)	標準タイプ	杭周固定部(強)	外管径(大)	外管のみ	
本杭	杭種	SC杭						
	杭径 ϕ (mm)	600						
	杭長 L (m)	12.9	13.2					
			(試験区間12.5)					
	コンクリート厚さ t_c (mm)	90(設計厚さ)						
	F_c (N/mm^2)	80(設計強度)						
鋼管材質		SKK400						
鋼管厚 t_s (mm)	9							
外管	鋼管材質	SKK400						
	鋼管径 ϕ (mm)	-	900		1200		900	
	鋼管長 L (m)	-	1.8	3.6				
			(試験区間1.4)		(試験区間3.2)			
	鋼管厚 t_c (mm)	-	12				-	
杭周固定液目標強度 (N/mm^2)		0.5		5		0.5		

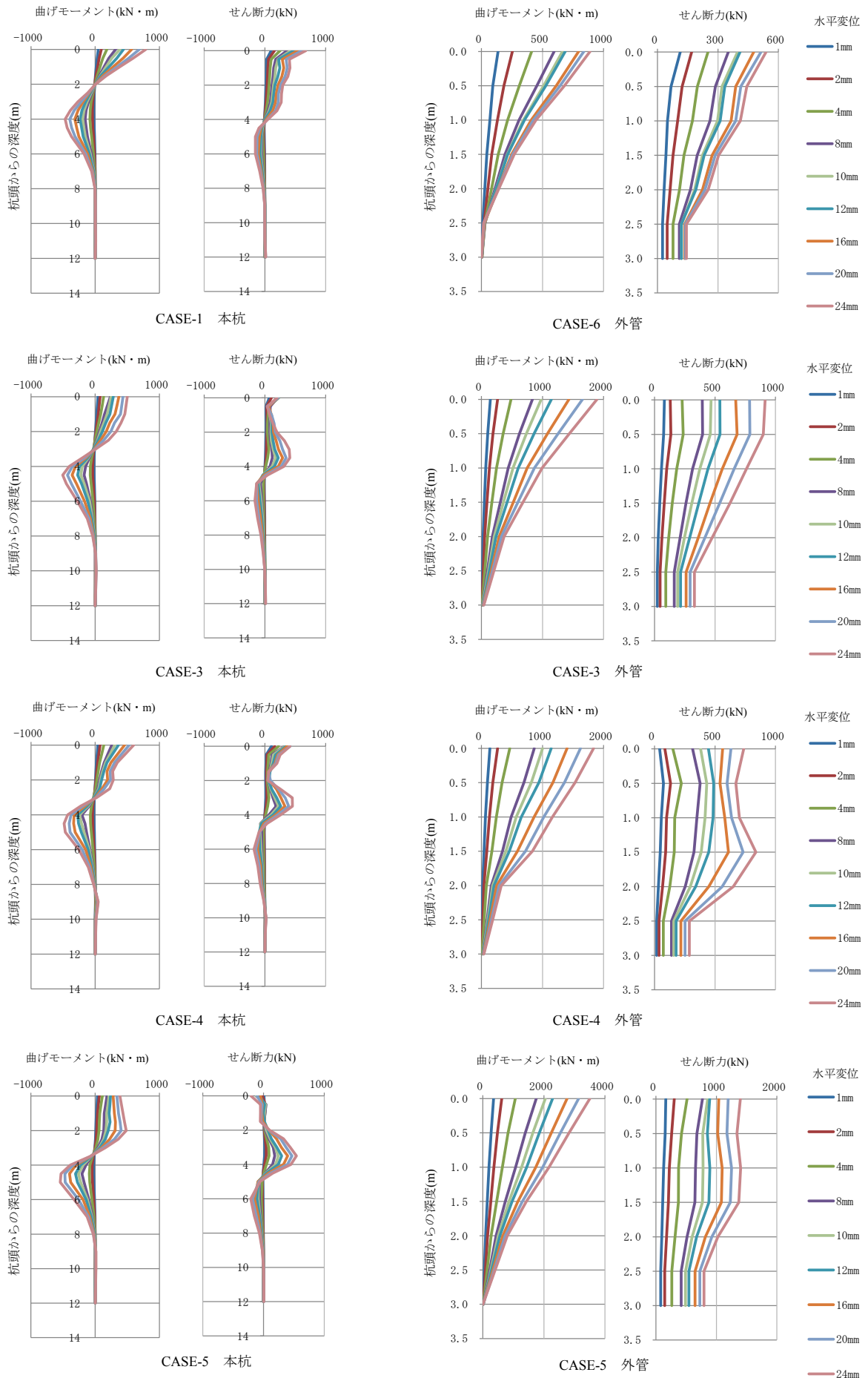


Fig. 9 M分布図, Q分布図

3. 4 解析的検討(梁ばねモデル)

3. 4. 1 解析条件

本解析は、梁ばねモデルによる二重管杭の挙動と応力評価の検討をする。解析タイプは、標準ケースの CASE-3 と外管径が大きいCASE-5について示す。Fig. 9に解析モデルを示す。荷重時はパイルキャップの回転を拘束制御している。全体的な力のつり合いを確認するため回転拘束用の載荷梁を含めてモデル化した。地盤物性はFig. 6を参考に GL-8m 程度までの変形係数を 700N の 2~3 倍(LLT の値と同程度)とした。地盤の非線形性は基礎指針に従い、杭変位による低減と表層近くの粘性土に塑性水平地盤反力を考慮した。これらは荷重変位関係を実験値に合わせるために必要であった。Table 4, 5 に杭材料と二重管内のソイルセメントの物性を示す。本杭、外管の曲げモーメント(以下、M)と曲率 ϕ の関係は断面解析によった。結果を Fig. 11 に示す。パイルキャップと本杭、外管の接合部には回転ばねを配し、回転剛性は Fig. 12 に示す杭頭部 M と回転角 θ の実測値から設定した。解析結果と比較する実験結果の応力も杭材料の非線形性を考慮して評価した。

3. 4. 2 解析結果

Fig. 13 に杭頭変位と杭頭のせん断力の関係を示す。本杭頭部のせん断力は CASE-3 の初期に解析で過小に評価されているが、大変形域では実験との対応がよくなっている。両ケースとも外管せん断力は実験と解析が対応しており、外管と本杭の和(解析)とジャッキ荷重も概ね対応している。また、部材降伏後に荷重・応力の低下はなく二重管杭の水平抵抗が安定して増加していることが実験、解析ともに確認できている。

Fig. 14 に外管、本杭の M の深度分布関係を示す。外管降伏前後に外管杭頭 M の実験、解析の乖離が大きくなるが他の部分ではほぼ対応している。回転制御鉛直ジャッキによる杭頭回り反力モーメント(水平荷重補正)と外管、本杭の杭頭 M の和は実験、解析ともにほぼ対応し、実験結果と解析のモデル化は妥当と考えられる。

Fig. 15 には外管、本杭のせん断力の深度分布を示す。全体的に実験と解析は対応しており、二重管部のせん断力の分布の特徴も解析で表現できている。本解析より、杭体、接合部、地盤の非線形性を考慮した梁ばねモデル解析により、大変形に至るまでの大局的な挙動と応力をほぼ評価できることが確認できた。

Table 4 杭材料物性

材料	本杭コンクリート	本杭外殻鋼管	外管
圧縮強度 (N/mm ²)	110	—	—
引張強度 (N/mm ²)	7.5	—	—
降伏値 (N/mm ²)	—	330	390
終局強度 (N/mm ²)	—	500	—
限界ひずみ	0.005	0.1	0.22t/r (t:厚, r:半径)
ヤング係数 (N/mm ²)	4.5×10 ⁴	2.05×10 ⁵	2.05×10 ⁵

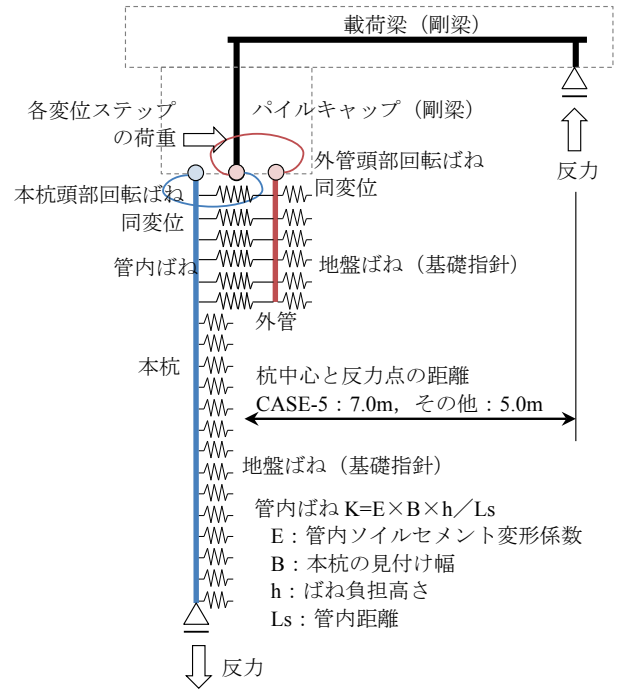


Fig. 10 解析モデル(梁ばね)

Table 5 管内ソイルセメント物性(弾完全塑性)

項目	CASE-3	CASE-5
一軸圧縮強さ (kN/m ²)	500	800
降伏値(kN/m ²)	500	1200
変形係数 (MN/m ²)	125	200

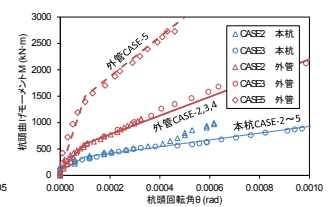
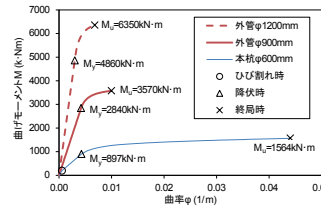


Fig. 11 杭材 M- ϕ 関係

Fig. 12 杭頭 M- θ 関係

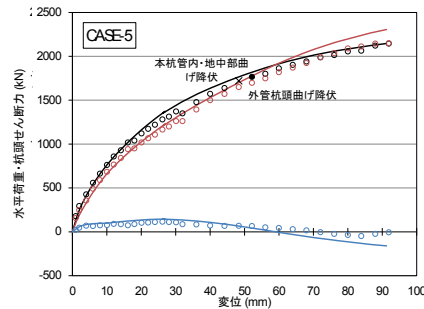
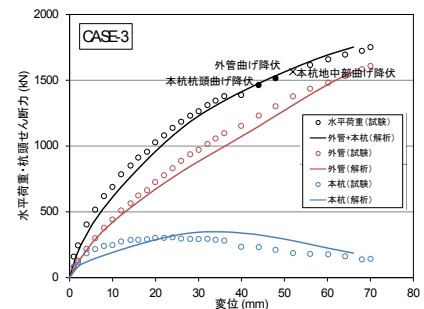


Fig. 13 杭頭変位と杭頭のせん断力関係

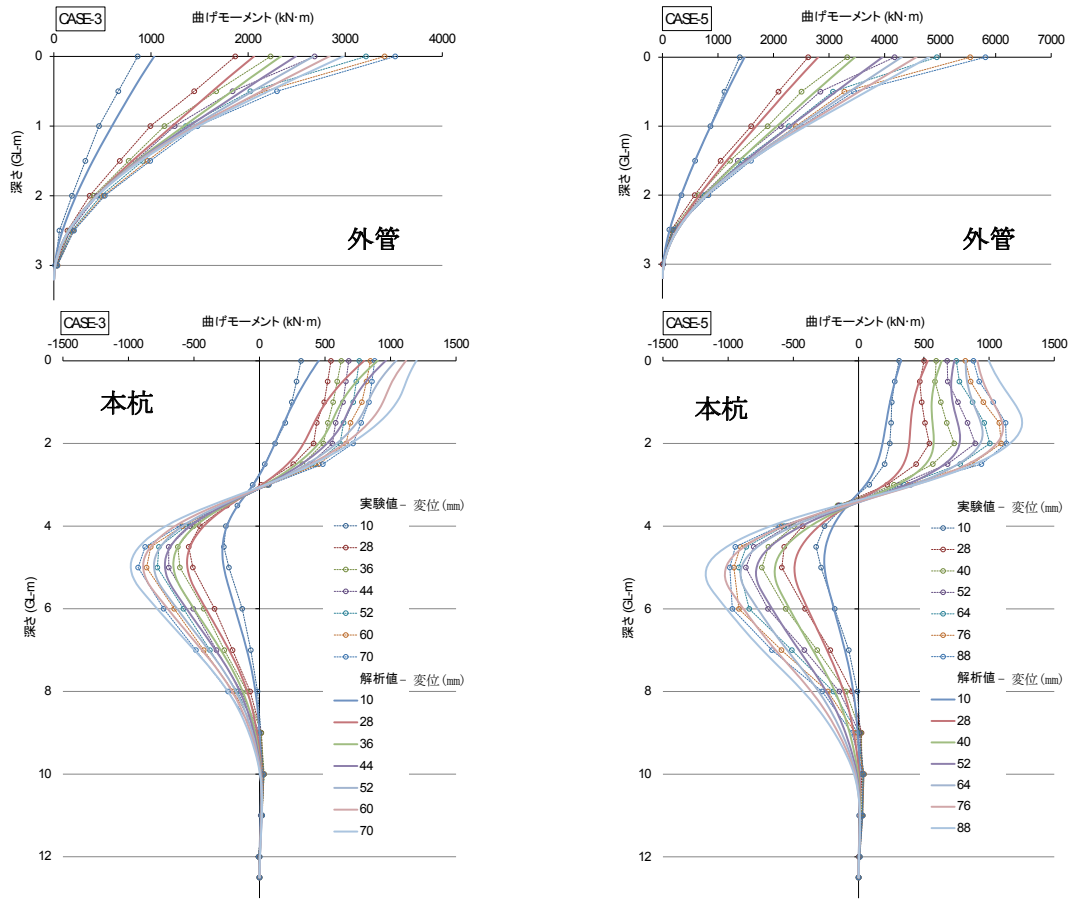


Fig. 14 本杭・外管のMの深度分布

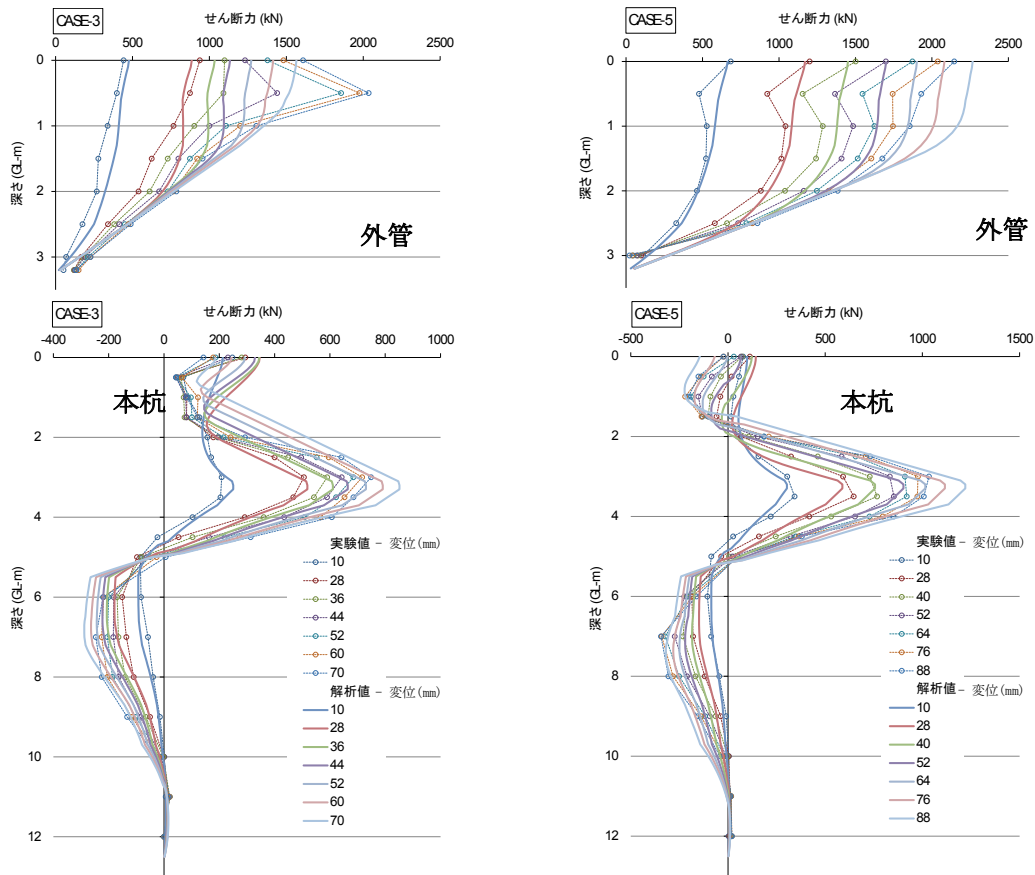


Fig. 15 本杭・外管のせん断力の深度分布

4. まとめ

本研究の成果のまとめを以下に示す。

(1) 原位置における二重管杭の実大施工性試験を実施し、考案した二重管杭の構築方法によって所定の施工精度を確保できることが確認できた。

(2) 二重管杭の原位置における水平載荷試験を実施し、二重管杭の諸条件での二重管杭の水平抵抗能力の向上およびM分布、Q分布の違いを確認した。また、杭体降伏後の大変形時にも荷重低下なく水平抵抗が漸増することを確認した。

(3) 杭体、接合部、地盤の非線形性を考慮した梁ばねモデル解析により、終局の大変形に至るまでの大局的な挙動と応力をほぼ評価できることが確認できた。

謝辞

本開発は、西松建設株式会社、安藤ハザマ、株式会社トーヨーアサノ、三谷セキサン株式会社との共同開発である。試験の実施にご協力を頂いた関係者の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 竹内章博，風間 了：地震時における耐震杭の水平挙動（その1 解析的検討），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 533-534, 1997. 9
- 2) 新井ほか：杭上部に外管を有する既製コンクリート杭工法の開発（その1 工法および水平載荷試験の概要），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 745-746, 2016. 8
- 3) 横山ほか：杭上部に外管を有する既製コンクリート杭工法の開発（その4 二重管杭の原位置施工試験），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 711-712, 2016. 8
- 4) 松江ほか：杭上部に外管を有する既製コンクリート杭工法の開発（その2 水平載荷試験結果），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 747-748, 2016. 8
- 5) 西ほか：杭上部に外管を有する既製コンクリート杭工法の開発（その7 大変形時挙動の梁ばねモデルによる解析），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 475-476, 2017. 8
- 6) 富永晃司，山本春行：杭頭自由および固定の単杭が終局状態に至るまでの水平挙動性状に関する理論と実験，構造工学論文集，Vol. 37B, pp. 1-10, 1991.
- 7) 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針-セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法-，日本建築センター，2016. 12

Development of precast concrete pile method guarded with the outer steel pipe in upper part of the pile (headgear pile)

Masaharu ENDO, Toshihiro MORI and Atsushi OGAWA

Abstract

In recent years, the applicable range of vertical load of precast concrete piles has been increasing with the development of high bearing-capability pile. Simultaneously there is the tendency that the design horizontal load grows. Here, a method, so called double-tube type precast concrete pile (headgear pile), has been developed. That is, the steel pipe with large diameter is attached at the head of precast concrete pile, forming the double-tube structure, so that the horizontal resistance can be improved. In order to validate the performance of the method, the in-situ construction experiment and the lateral loading test were conducted and the results are presented in this report.

Keywords: Precast concrete pile, Steel pipe, Lateral loading test, Beam-spring model
