

二重管式既製コンクリート杭（ヘッドギアパイル）工法の開発 Development of Precast Concrete Pile Method Guarded with the Outer Steel Pipe to Upper Part of the Pile

新井 寿昭* 郡司 康浩*
Toshiaki Arai Yasuhiro Gunji
竹内 章博** 岡 賢治***
Akihiro Takeuchi Kenji Oka
山名 由記*
Yuki Yamana

要 約

本工法は、建物の鉛直荷重を支持する既製コンクリート杭の上部に、地震時水平抵抗部材として、径の大きな鋼管を設置する工法である。この鋼管に、地震時水平力の一部を負担させることで、建物の鉛直荷重を支持する既製コンクリート杭の、特に杭頭部の曲げモーメントを低減でき、耐震性を向上させることが可能になる。

本報では、工法概要を述べるとともに、本工法の性能確認を目的として実施した原位置水平載荷試験とそのシミュレーション解析結果、さらに施工性を確認するために実施した実大施工試験結果を報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工法概要
- § 3. 水平載荷試験
- § 4. シミュレーション解析
- § 5. 施工試験
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

近年の既製コンクリート杭（以下、既製杭）は高支持力化が図られたことにより、従来よりも荷重の大きな構造物への適用が拡大している。それに伴って杭の水平力負担も増加しており、構造物を安全に支持するためには、水平力に対する耐震性確保が重要となる。そこで、既製杭の、特に杭頭部の耐震性を向上させることが可能な工法を開発した。

本報では、工法の概要と、本工法の性能確認を目的として実施した原位置水平載荷試験結果^{1),2)}とそのシミュレーション解析結果³⁾さらに、施工性を確認するために実施した実大施工試験結果⁴⁾を報告する。

* 技術研究所建築技術グループ

** 建築設計部構造一課

*** 関東建築(支)建築設計部

§ 2. 工法概要

本工法は、**図-1**に示すように、建物荷重を支持する既製杭（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（以下、二重管杭）工法である。二重管杭は地震時水平力の一部を外管に負担させることができ、

主として本杭の杭頭部の耐震性向上を図ることが可能になる。既に模型実験や解析的検討がなされており⁵⁾、外管を設置することにより、本杭の杭頭および地中部ともに曲げモーメントを低減できることから、実大規模の試験により同様の効果を確認できれば、合理的な設計が可能になると考えられる。

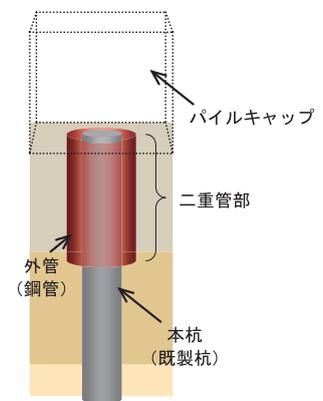


図-1 工法概要

§ 3. 水平載荷試験

3-1 試験概要

二重管杭の水平抵抗力および本杭と外管の水平力負担率を確認するために、原位置水平載荷試験を実施した。

水平載荷試験ケース一覧を表-1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を標準タイプと位置付け、本杭径=600mm、外管径=900mm、外管長=3.2m（本杭径の約5倍）とした。標準タイプに対して、CASE-2は外管長=1.4m（本杭径の約2倍）とし、CASE-5は外管径=1,200mm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 $q_u = 5\text{ N/mm}^2$ ）したケースである。本杭は全てSC杭を使用している。

試験地の土質柱状図および杭姿図を図-2に示す。二重管杭の区間は主にロームとなっている。なお、本杭先端部には拡大根固め部は設けていない。

ここで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水平力分担率を把握することが主な試験目的であることから、既往の研究⁶⁾を参考に、杭頭部の回転を拘束した状態での試験とした。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を回転拘束した¹⁾。荷重は一方向繰返し荷重とし、杭が降伏ひずみに達した後は装置の限界まで正方向に荷重することとした。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。本杭および外管の鋼管ひずみの計測は、一軸ゲージを荷重方向の前面・後面に、深度方向には主に500mmピッチで貼付した。さらに外管には、水平荷重時の挙動を確認するために、荷重方向に対して90°の位置等に三軸ゲージを貼付した。

3-2 試験結果

(1) 水平荷重-水平変位関係

水平荷重-水平変位関係を図-3に示す。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。

本杭のみのCASE-1は32mm付近で杭頭部が、52mm付近で地中部が降伏ひずみに達したが、最終荷重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ず、杭前面地盤の破壊が進行していくことで荷重はほぼ一定の値を示した。

標準タイプのCASE-3では44mm付近で本杭および外管の杭頭部が、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28mm付近で本杭の杭頭部が、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

表-1 試験ケース一覧

試験ケース	本杭			外管			杭周固定部 ^{*2} q_u (N/mm^2)	備考
	杭径 ϕ (mm)	長さ L^{*1} (mm)	杭種・材質	径 ϕ (mm)	長さ L^{*1} (mm)	材質		
CASE-1	600	12,500	SC杭 $F_c=80\text{N/mm}^2$ 杭肉厚90mm 鋼管SKK400 鋼管厚 $t=9\text{mm}$ 【設計値】	—	—	—	0.5	本杭のみ
CASE-2				—	1,400	SKK400 鋼管厚 $t=12\text{mm}$		5
CASE-3				900	3,200		標準	
CASE-4				1,200			杭周固定部 ソイルセメント強度	
CASE-5				—	—	—	900	—

*1 長さは試験区間を示す(突出長およびパイルキャップへの埋込長を除く)

*2 杭周固定部 q_u は目標強度を示す

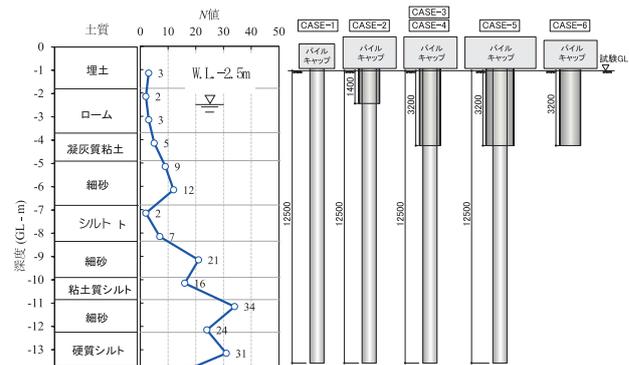


図-2 試験地の土質柱状図および杭姿図

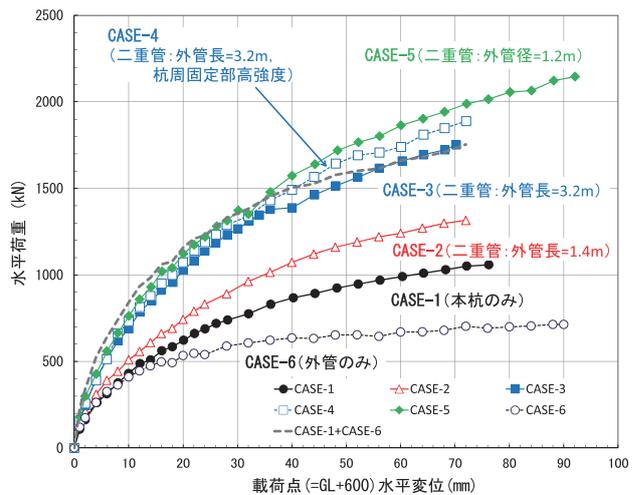


図-3 水平荷重-水平変位関係

て1.2倍程度であった。

杭周固定部のソイルセメント強度が高い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36mm付近で外管の杭頭部が、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。以上の結果から、標準的な二重管杭の杭頭変位10mm時の割線剛性は本杭のみのCASE-1に対して1.5～1.8倍程度であること、二重管杭の降伏時水平荷重はCASE-1に対して1.7～2.0倍となることを確認した。

(2) 本杭および外管の曲げモーメント，せん断力分布

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算定した，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）を図-4に示す。なお，CASE-1（本杭のみ），CASE-6（外管のみ）の1断面（杭頭からの深度0 m）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。外管のせん断力は，外管に貼付した三軸ゲージをもとに算定した¹⁾。また，CASE-2の本杭のM分布の1断面はデータ欠測のため表示していない。ここでは，二重管杭が降伏ひずみに達する以前の杭頭変位レベルの分布を示している。

本杭のM分布で，CASE-1と二重管杭（CASE-2～CASE-5）では概ね同様の傾向を示している。なお，杭頭変位24 mm時の杭頭部の曲げモーメントの比較では，外管長が1.4 mと短いCASE-2ではCASE-1と同程度の値を示している。外管長が3.2 mのCASE-3～CASE-5では，それぞれCASE-1に対して約40%減，約25%減，約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認められる。また，反曲点は，CASE-1で約2 m，CASE-2～CASE-5で約2.5～3 mと外管を有する本杭の反曲点は深くなる傾向が認められた。

本杭のQ分布で，地中部最大曲げモーメント発生深度以深では同様の傾向を示しているが，それ以浅の杭頭部付近では各試験ケースでそれぞれ異なった分布形状を示している。外管径が900 mmの二重管杭であるCASE-2～CASE-4では，外管長が短いCASE-2を除き，1～2 m付近でせん断力が減少してほぼ0 kNとなる特徴的な分布を示している。また，二重管杭で，外管径が1,200 mmと大きいCASE-5では杭頭部付近のせん断力が小さな値となっている。これらの結果から，外管の有無のほか外管径および外管長が本杭のせん断力に影響を及ぼすことがわかる。一方，外管のQ分布は，CASE-3，5，6では1断面の杭頭部が最大で，深度が深くなるにしたがって小さくなっていくが，CASE-2，4では異なる傾向を示しており，せん断力の深度方向分布に違いが生じている。

(3) 本杭と外管のせん断力分担割合

二重管杭のCASE-3およびCASE-4で測定された1断面

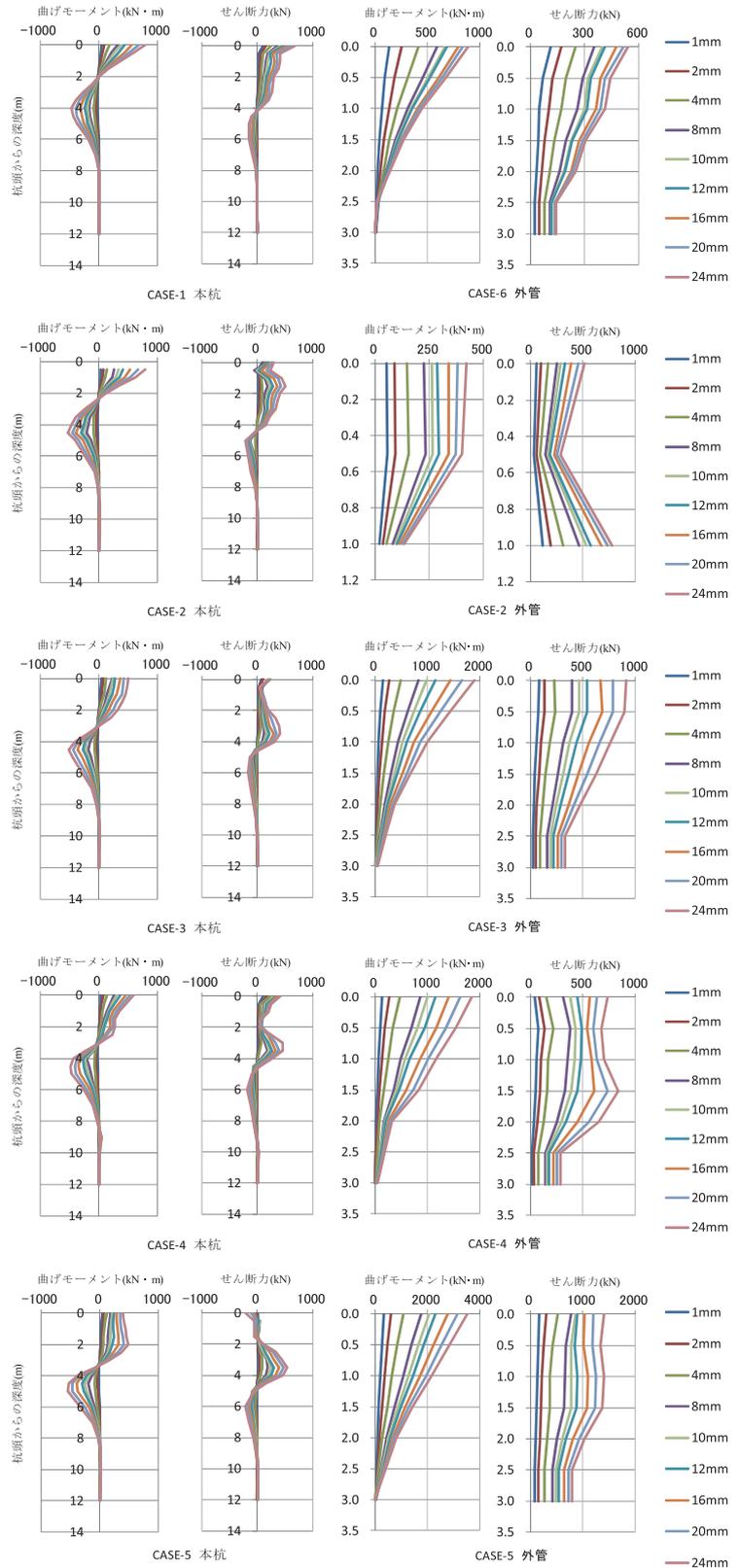


図-4 本杭および外管のM，Q分布

面の本杭と外管のせん断力分担割合を図-5に示す。

CASE-3，CASE-4ともに，変位が進むにつれて外管の分担割合が増加する傾向を示している。また，本杭と外管の分担割合を比較すると，変位レベルによらずにCASE-3よりもCASE-4の外管の分担が大きく，変位10 mm時でCASE-3では本杭：外管が約3：7，CASE-4で

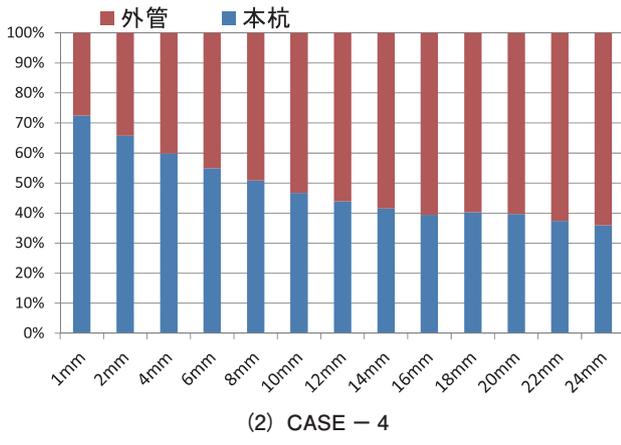
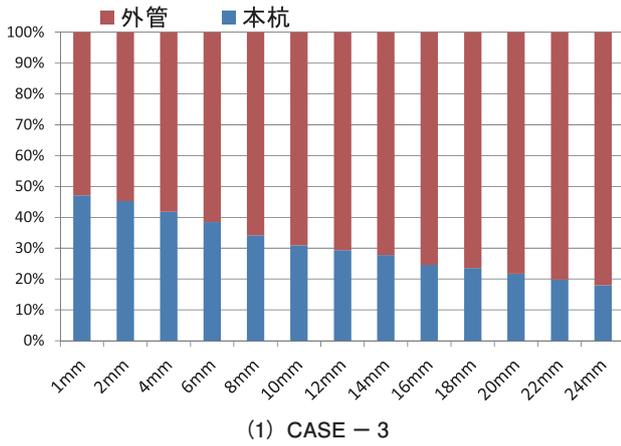


図-5 せん断力分担割合

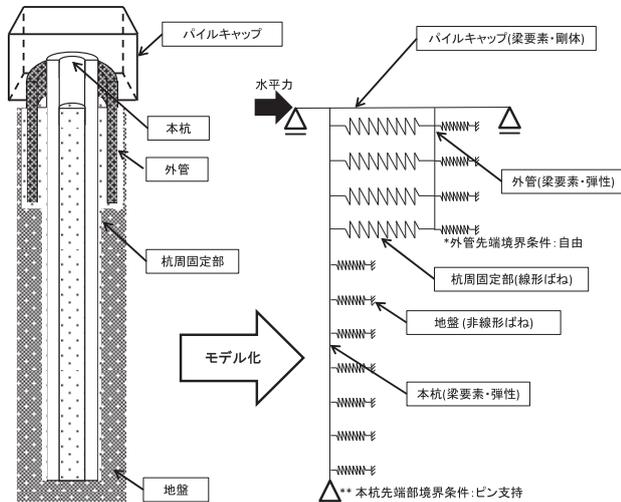


図-6 解析モデル（梁ばねモデル）

は本杭：外管が約5：5となっている。これらの結果から、杭周固定部のソイルセメント強度が、杭頭部のせん断力分担割合に及ぼす影響を把握できた。

§4. シミュレーション解析

4-1 解析概要

3章で示した水平載荷試験のシミュレーション解析に用いた解析モデルを図-6に示す。本杭および外管は、

表-2 解析用地盤物性

深度 (m)	土質名	N値	E_0 (700N)	E_0 (LLT)	E_0 (採用値)	杭断面図
			(kN/m^2)	(kN/m^2)	(kN/m^2)	
0.00 ~ 1.80	埋土	3	2.10×10^3		2.10×10^3	
1.80 ~ 2.60	ローム	2	1.40×10^3	2.90×10^3	2.90×10^3	
2.60 ~ 3.70	ローム	3	2.10×10^3	4.56×10^3	4.56×10^3	
3.70 ~ 4.90	凝灰質粘土	5	3.50×10^3	9.00×10^3	9.00×10^3	
4.90 ~ 5.45	細砂	9	6.30×10^3		2.76×10^4	
5.45 ~ 6.80	細砂	12	8.40×10^3	2.76×10^4	2.76×10^4	
6.80 ~ 8.35	シルト	2	1.40×10^3		1.40×10^3	
8.35 ~ 8.45	細砂	7	4.90×10^3		4.90×10^3	
8.45 ~ 9.90	細砂	21	1.47×10^4		1.47×10^4	
9.90 ~ 10.85	粘土質シルト	16	1.12×10^4		1.12×10^4	
10.85 ~ 11.45	細砂	34	2.38×10^4		2.38×10^4	
11.45 ~ 12.25	細砂	24	1.68×10^4		1.68×10^4	
12.25 ~ 13.75	硬質シルト	31	2.17×10^4		2.17×10^4	
13.75 ~ 14.25	細砂	11	7.70×10^3		7.70×10^3	

地盤ばねを付加した梁要素でそれぞれモデル化した。本杭と外管間には二重管内にソイルセメントが充填された状態を反映した水平ばね（以下、管内ばね）を設定し、本杭と外管を連結した。

原位置で実施した標準貫入試験および孔内水平載荷試験結果と、解析に用いた地盤物性を表-2に示す。地盤の変形係数は、地盤面から6.8mまでは孔内水平載荷試験結果を、6.8m以深はN値から求めた。

管内ばね値(k_s)は、後述する二重管内ソイルセメントの q_u-E_{50} 関係(図-13)を参考に設定した変形係数(E_{50})と、本杭と外管の間隔(L_s)および本杭の見付け幅(=本杭径, B)ならびに管内ばねの負担深さ(l)を用いて、 $k_s = E_{50} \times B \times l / L_s$ により求めた。

解析モデルに作用させる水平力は、実験で計測された杭頭部のジャッキ荷重とした。

4-2 解析結果

二重管杭の標準タイプであるCASE-3の、杭頭変位が10mm時および本杭の降伏直前の変位として24mm時の2種類の試験結果と比較した本杭および外管の曲げモーメント分布を図-7に、せん断力分布を図-8に示す。

解析結果による本杭および外管の曲げモーメント分布、せん断力分布は、杭頭変位レベルによらず試験結果と概ね同様の傾向を示している。

以上の結果より、本杭および外管を管内ばねで連結した梁ばねモデルにより、杭の降伏前までの二重管杭の挙動を評価できることを確認した。

§5. 施工試験

5-1 施工概要

施工試験ケース一覧を表-3に示す。C1, C2は施工試験杭、CASE-1~CASE-6は3章で示した水平載荷試験杭である。施工試験では、二重管杭の施工性、建込み時の施工精度などを確認することを目的とし、二重管内に満たされる杭周固定部ソイルセメントの強度や変形係数も確認した。

二重管杭を構築する方法は、杭頭レベルや本杭と外管

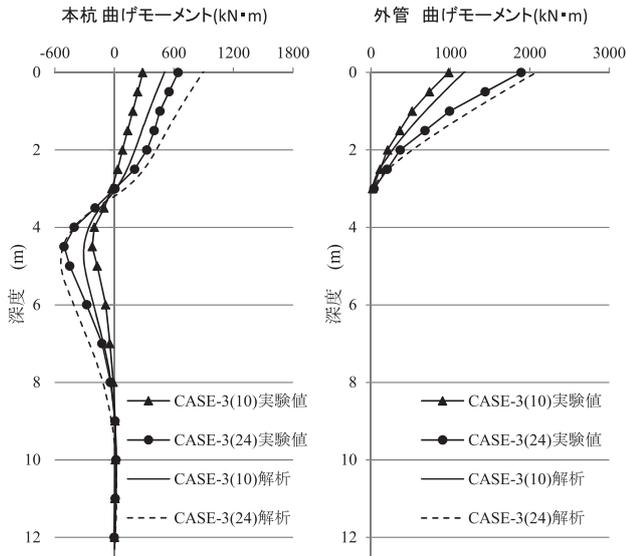


図-7 曲げモーメント分布 (CASE-3)

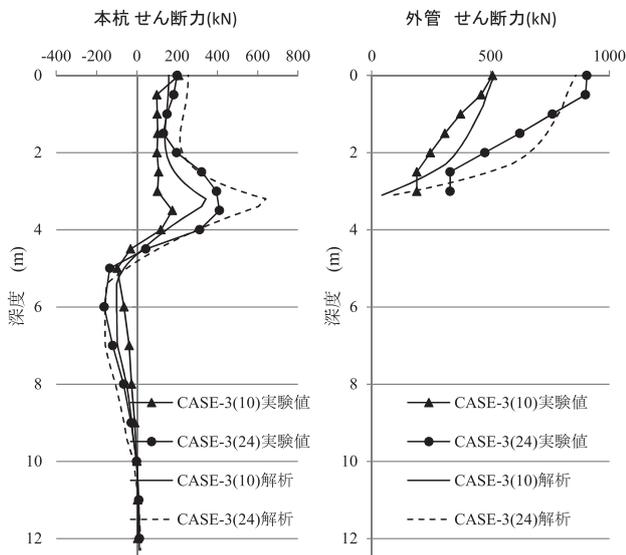


図-8 せん断力分布 (CASE-3)

の径の組合せ等に応じて対応できるように2種類を考案し、それぞれC1、C2で確認した。C1の施工フローおよび施工状況を図-9に示す。C1はまず“別孔”と称する掘削孔を任意の位置に設け、その位置で本杭と外管を一体化する。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、攪拌した後に別孔で一体化した二重管杭を所定深度まで建込む。C2の施工フローおよび施工状況を図-10に示す。C2は正規の位置に本孔を掘削し、杭周固定液を注入、攪拌した後に、先に外管を建込み、続いて本杭を建込んで二重管杭とする（条件によって本杭を先に建込む場合もある）。

二重管杭となる掘削孔上部の拡大部の施工は、図-11に示すように、ロッドの所定位置にあらかじめセットした拡大部掘削用の部材を用いて行うことによる。なお、試験地は3章と同様である。

表-3 施工試験ケース一覧

No.	本杭	外管	区分	備考
C1	PHC(A種)φ600, L=10.5	φ900, L=3.2, t=22	施工試験杭	同時建込み
C2	PHC(A種)φ600, L=9	φ1000, L=5.0, t=22	試験杭	別建込み
CASE-1	SCφ600, L=12.9	なし		—
CASE-2	SCφ600, L=13.2, t=9	φ900, L=1.8, t=12	載荷試験杭	同時建込み
CASE-3	SCφ600, L=13.2, t=9	φ900, L=3.6, t=12		
CASE-4	SCφ600, L=13.2, t=9	φ900, L=3.6, t=12		
CASE-5	SCφ600, L=13.2, t=9	φ1200, L=3.6, t=12		別建込み
CASE-6	なし	φ900, L=3.6, t=12		—

φ: 杭径(mm), L: 杭長(m), t: 鋼管厚(mm)

杭周固定部の目標強度: CASE-4のみ 5000 kN/m²とし、それ以外は 500 kN/m²



図-9 C1の施工フローおよび施工状況



図-10 C2の施工フローおよび施工状況

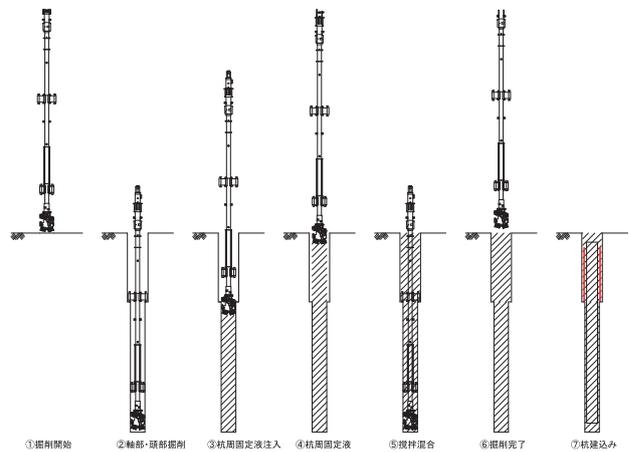


図-11 施工方法

5-2 試験結果

(1) 施工試験結果

施工試験結果一覧を表-4に示す。

別孔で一体化した二重管杭（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確認し、管理値とした1/100 rad 以内の精度であることを確認した。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。

表-4 施工試験結果一覧

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/ X:89.8°, Y:89.9° 外管/ X:90.0°, Y:89.5°	本杭/ X:89.5°, Y:89.8° 外管/ X:90.0°, 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

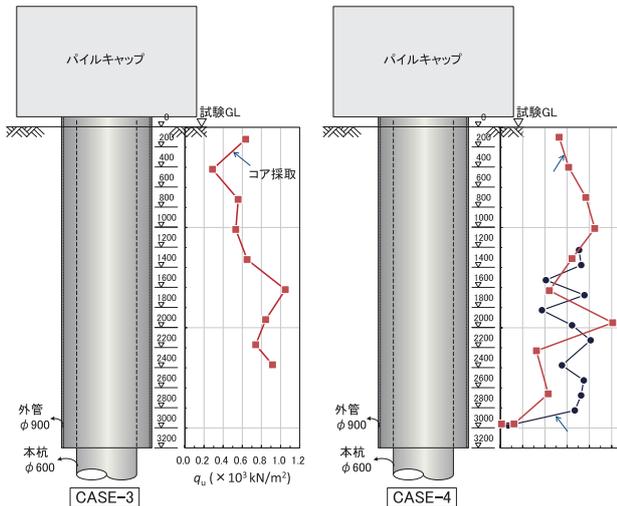


図-12 杭周固定部ソイルセメントの強度分布

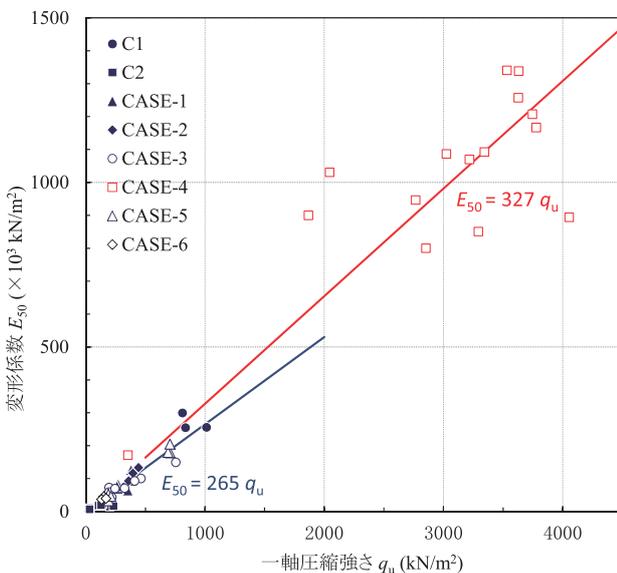


図-13 杭周固定部ソイルセメントの $q_u - E_{50}$ 関係

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では一体化する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では一体化のため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。

この施工試験結果を受けて載荷試験杭も同様に施工し、いずれも所定の精度を確保することができた。

(2) 杭周固定部ソイルセメントの強度

載荷試験杭のCASE-3, CASE-4の二重管内ソイルセメントの強度分布を図-12に示す。載荷試験終了後、二重管杭部分を掘出して外管を取り外し、二重管内の杭周固定部ソイルセメントから採取したコアによる一軸圧縮強さ q_u が■プロットである。一方、施工直後にソイルセメントの採取器を二重管内に挿入し、固化後に採取した供試体による q_u がCASE-4の●プロットである。

CASE-3では二重管の上部から下部にかけて強度が漸増する傾向が認められるが、概ね安定した品質といえる。なお、GL-2.4 m以深は、外管を取り外している際にソイルセメントが剥がれてしまい、本杭と外管との間のコア採取ができなかった。CASE-4では二重管の下端部付近の強度が低い傾向を示している。

二重管内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 q_u と変形係数 E_{50} の関係を図-13に示す。CASE-4は、一般的な埋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 $E_{50}/q_u = 265$ であった。

§6. おわりに

既製杭（本杭）と外管で構成される二重管杭の原位置水平載荷試験を実施し、二重管杭の水平抵抗力や本杭および外管の応力分布、せん断力分担割合を確認した。また、水平載荷試験を対象にしたシミュレーション解析から、本杭と外管を管内ばねで連結した梁ばねモデルにより、二重管杭の応力を評価できることを確認した。さらに、二重管杭の実大施工試験により、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。

参考文献

- 1) 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 (九州), pp.745-746, 2016年8月.
- 2) 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 (九州), pp.747-748, 2016年8月.
 - 3) 遠藤ほか: 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3 水平載荷試験結果のシミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.749-750, 2016年8月.
 - 4) 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 (九州), pp.751-752, 2016年8月.
 - 5) 竹内ほか: 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年9月.
 - 6) 佐藤ほか: 杭頭回転固定条件による実物大単杭の大変形水平載荷実験, 土木学会論文集 JSCE714, pp.95-109, 2002年.