

二重管式既製コンクリート杭工法の開発

西 正晃^{*1}・崎浜博史^{*2}・堀井宏謙^{*3}・内田晃一^{*3}

近年、既製コンクリート杭工法の開発が進展してその鉛直支持性能が向上するに伴い、杭が負担する地震時水平力も増大の傾向にある。杭の耐震性を高めるために、地震力を負担できる鋼管を杭頭部に設置することで杭に作用する水平力を低減する二重管式の耐震杭工法が研究されており、これを既製コンクリート杭に適用し実用化を目指して共同開発を行った。実大施工実験を行い施工方法、品質管理手法を確立するとともに、理論と小規模模型実験で示されていた二重管杭の効果を、実大規模の水平載荷試験で検証し、応力解析手法の妥当性を確認した。本報では、実大施工実験と水平載荷試験について報告する。

キーワード： 二重管、既製コンクリート杭、鋼管、水平抵抗、梁ばねモデル、ソイルセメント

1. はじめに

近年、既製コンクリート杭（以下、既製杭）の工法開発により、その鉛直支持性能の向上（高支持力化）が図られ、既製杭の利用が増加するとともに、従来よりも荷重の大きな構造物への適用が増加している。これに伴って地震時に杭が負担する水平力も増加しており、既製コンクリート杭の耐震性能の向上が求められている。杭の耐震性を高める手法として、鋼管を杭頭部に設置することで杭に作用する水平力を低減する二重管式の耐震杭工法が研究されており、その原理は模型実験や解析等によって明らかにされている¹⁾。そこで筆者らはこの二重管式の耐震杭工法を既製杭に適用して、その実用化を図ることとした^{2)~5)}。本報告では、本工法の施工性を確認するために実施した実大施工試験の結果、および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とそのシミュレーション解析結果について述べる。

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、本杭よりも直径の大きな鋼管（以下、外管）を被せるように設置して、本杭の水平力負担を低減する工法である。外管を設置することにより、二重管となった範囲における本杭の曲げモーメントとせん断力を低減できることから、二重管杭としての耐震性を向上させることができる。図-2に施工方法の概要を示す。通常のプレボーリング工法と大きく異なる点は外管の範囲を拡大掘削することと、本杭と外管を一体として、あるいは別々に建て込むことである。

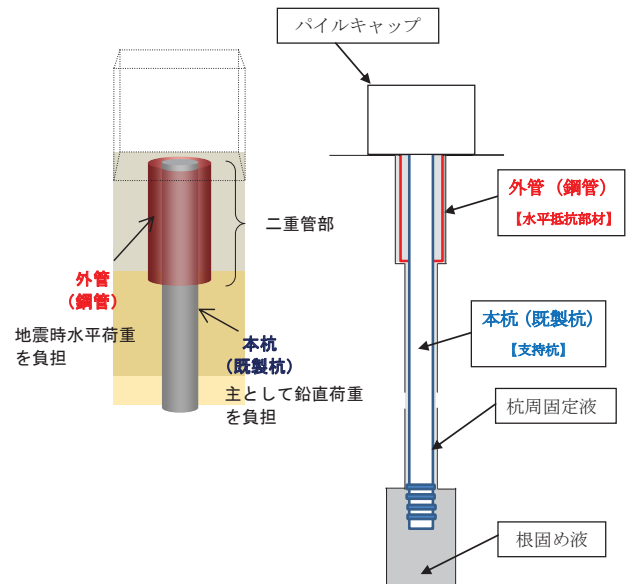


図-1 工法概要

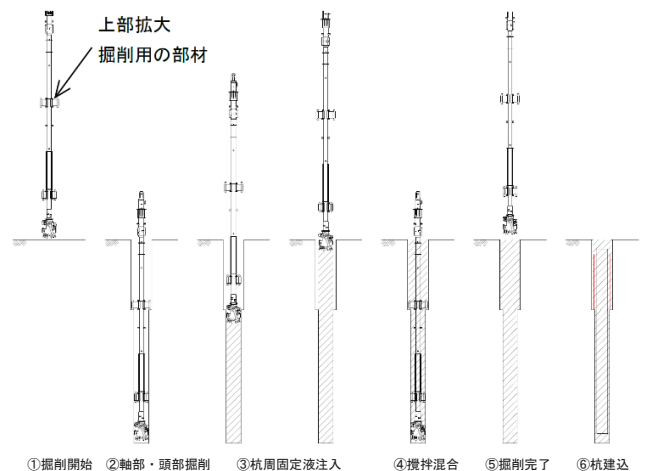


図-2 二重管式杭の施工方法

*1 建築研究第二部 *2 技術企画部 *3 構造技術部

3. 施工性確認試験

本工法の実用化に当たり、施工方法、施工手順および施工性の確認と、施工管理・品質管理手法の妥当性を確認することを目的として施工性確認試験を実施した。

3.1 試験概要

施工性確認試験の試験ケースを表-1に示す。C1, C2 は施工試験杭、CASE-1~CASE-6 は後述する水平載荷試験に用いる杭である。施工試験では、本杭に外管を被せて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。また、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と変形係数が二重管杭の応力評価に影響することから、施工試験時のデータを取得した。二重管杭の施工方法は、施工地盤と杭頭のレベル関係や、本杭と外管の径の組合せ等の施工条件に対応できるように2種類(C1:同時建込み, C2:別建込み)を考案した。各ケースの施工状況を図-3に示す。

C1(同時建込み)ではまず“別孔”と称する孔を施工上支障のない位置に掘削し、そこで本杭と外管を一体化する。その後、正規の杭位置に“本孔”を掘削して杭周固定液を注入、攪拌し、一体化した二重管杭を所定深度まで建込む。

C2(別建込み)では正規の杭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、後から本杭を建込んで二重管杭とする(逆順の場合もある)。

3.2 試験結果

施工試験の結果を表-2に示す。C1では一体化した二重管杭を本孔に建込む際に、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1/100rad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。本杭の杭芯からのずれは、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50mm以内の精度を確保できた。C1では本杭と外管を一体化するための治具を上端部に取り付けている。これにより本杭と外管の上下・水平方向の相対ずれは治具同士の隙間の間隔が上限となるため、大きな施工誤差は生じないことになる。一方、別々に建込むC2では一体化のための治具は不要となるが、その分、相対ずれがやや大きめとなっている。以上の施工試験結果を受けて載荷試験杭も同様に施工し、いずれも所定の施工精度を確保することができた。

表-1 施工性確認試験ケース一覧

No.	本杭	外管	区分	施工方法
C1	PHC杭(A種) φ600, L=10.5	φ900, L=3.2, t=22	施工試験杭	同時建込み
C2	PHC杭(A種) φ600, L=9.0	φ1000, L=5.0, t=22		別建込み
CASE-1	SC杭 φ600, L=12.9, t=9	なし	載荷試験杭	単独
CASE-2	SC杭 φ600, L=13.2, t=9	φ900, L=1.8, t=12		同時建込み
CASE-3	SC杭 φ600, L=13.2, t=9	φ900, L=3.6, t=12		
CASE-4	SC杭 φ600, L=13.2, t=9	φ900, L=3.6, t=12		
CASE-5	SC杭 φ600, 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		単独

φ:外径(mm), L:使用部材の全長(m), t:鋼管厚さ(mm)
杭周固定部の目標強度:CASE-4のみ5000kN/m², 他は500kN/m²



図-3 施工性確認試験での施工状況

表-2 施工試験結果

管理項目	管理値	実測値	
		C1	C2
(1) 建て込み時の傾斜	1/100以内 (89.43° ~ 90.0°)	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	±50mm	0mm	0mm
(3) 本杭の杭芯ずれ	50mm以内	X:+20mm, Y:0mm	X:+20mm, Y:-30mm
(4) 本杭と外管の相対ずれ	50mm以内	X:+10mm, Y:+13mm	X:+37mm, Y:+15mm

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

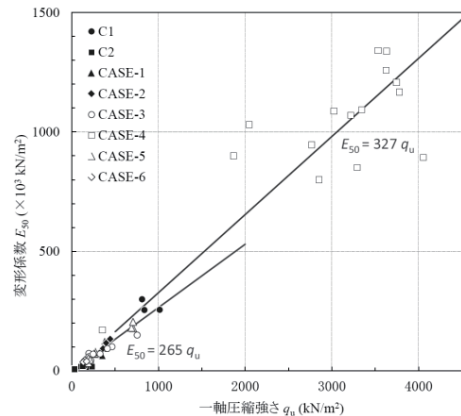


図-4 二重管内ソイルセメントのqu - E50関係

(3) 二重管内ソイルセメントの強度と変形係数

二重管内のソイルセメント(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quと変形係数E50の関係を図-4に示す。CASE-3, CASE-4では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て固化後に採取器を引き抜いて採取した供試体と、載荷試験終了後、二重

管杭部分を掘り出して外管を切断して取り外し、二重管内のソイルセメントからコア採取した供試体の試験結果を含んでいる。CASE-4 は一般的な埋込み杭の杭周固定部より強度が高いため、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 $E_{50}/q_u = 265$ となり、地盤改良や流動化処理土等のソイルセメントと同程度の値であることが確認できた。

4. 水平抵抗性能の検証

4.1 水平載荷試験

二重管杭の水平抵抗性能および本杭と外管の水平力分担を確認するとともに、応力解析方法の妥当性を確認することを目的として、実大杭の水平載荷試験を実施した。

(1) 試験概要

水平載荷試験の試験ケースを表-3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 を標準試験体と位置付け、本杭径 $\phi = 600\text{mm}$ 、外管径 $\phi = 900\text{mm}$ 、外管長 $L = 3.2\text{m}$ (本杭径の約 5 倍) とした。標準の CASE-3 試験体に対して、CASE-2 は外管長を短く $L = 1.4\text{m}$ (本杭径の約 2 倍) とし、CASE-5 は外管径を大きく $\phi = 1,200\text{mm}$ とした。また、CASE-4 は CASE-3 と同じ杭仕様であるが、二重管内のソイルセメントの強度を高く設定した (目標一軸圧縮強さ 5000kN/m^2) 試験体である。本杭は全て SC 杭を使用している。

試験地の地盤概要および試験体姿図を図-5に示す。二重管部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。

水平載荷方法の概要を図-6に示す。ここでは二重管杭の設計条件に即した水平抵抗性能および本杭と外管の水平力分担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。載荷は一方向繰返し載荷とし、杭が降伏ひずみに達した後は載荷の限界まで正方向に載荷することとした。

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。二重管の範囲に貼付したひずみゲージの位置を図-7に示す。本杭および外管の鋼管ひずみの計測は、一軸ゲージを載荷方向の前面・後面に、深度方向には主に 500mm ピッチで貼付した。外管には、水平載荷時の挙動を確認するために、載荷方向に対して 90° の位置等に三軸ゲージを貼付した。

表-3 水平載荷試験ケース

試験ケース	本杭		外管		杭周固定部 目標強度 (N/mm^2)	特徴			
	杭径 (mm)	地中長さ (m)	杭種・材質	外径 (mm)			地中長さ (m)	杭種・材質	
CASE-1			SC杭			本杭のみ			
CASE-2	600	12.5	Fc=80 N/mm^2 杭肉厚:90mm	900	1.4	SKK400 鋼管厚:12mm	0.5		
CASE-3							標準		
CASE-4							杭周强度高い		
CASE-5					1200		3.2	0.5	外管径大きい
CASE-6							900		外管のみ

地中長さは、突出長とパイルキャップへの埋込み長を含まない
杭肉厚、鋼管厚は設計値を示す

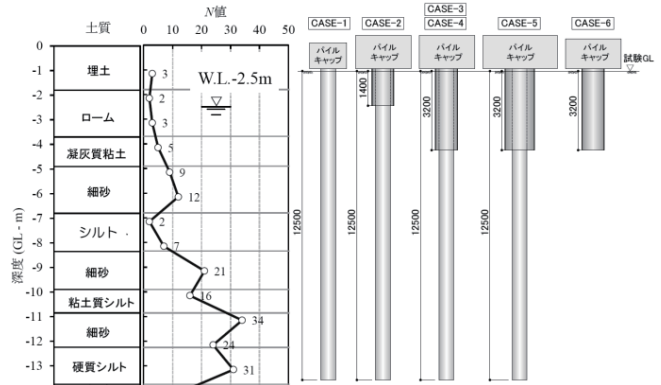


図-5 試験地盤の地盤概要と試験体姿図

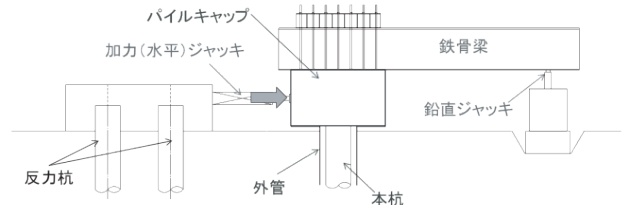


図-6 載荷方法概要

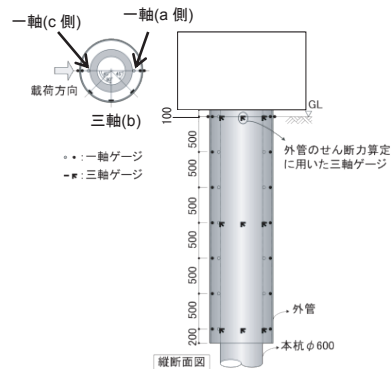


図-7 ひずみゲージ貼付位置

表-4 材料試験結果

材料	項目	本杭	外管
鋼材	降伏点 (N/mm^2)	330.8	392.5
	ヤング係数 (N/mm^2)	2.16×10^5	2.29×10^5
コンクリート	圧縮強度 (N/mm^2)	111.4 ~114.2	-
	ヤング係数 (N/mm^2)	4.50~ 4.53×10^4	-

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の結果を表-4に示す。鋼管の試験片は載荷試験後にCASE-3の外管および本杭から切り出して作製した。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、水平荷重試験の試験時期に合わせて圧縮試験を行った。

(2) 水平荷重－水平変位関係

加力ジャッキによる水平荷重とパイルキャップの荷点高さの水平変位 (y_0) の関係 (包絡線) を図-8 に示す。図中には参考として本杭のみの CASE-1 と外管のみの CASE-6 の同変位における水平荷重の単純和も併記している。本杭のみの CASE-1 は $y_0=32\text{mm}$ 付近で杭頭部, 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。

二重管杭の標準試験体 CASE-3 では $y_0=44\text{mm}$ 付近で本杭および外管の杭頭部が, 50mm 付近で本杭の地中部が降伏ひずみに達した。CASE-3 の荷重は, 同変位における CASE-1 と CASE-6 の荷重の単純和と同程度の値を示した。 $y_0=10\text{mm}$ 時の割線剛性 (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 $y_0=28\text{mm}$ 付近で本杭の杭頭部が 48mm 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。

杭周固定部および二重管内のソイルセメントの強度が高い CASE-4 は CASE-3 と同様の荷重－変位関係を示し, $y_0=44\text{mm}$ 付近で外管頭部が 50mm 付近で本杭の杭頭部および地中部が降伏ひずみに達した。割線剛性は CASE-1 に対して 1.7 倍程度, CASE-3 に対して 1.06 倍であった。

外管径の大きな CASE-5 では $y_0=36\text{mm}$ 付近で外管の頭部が, 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, CASE-3 に対して 1.1 倍程度であった。

以上の結果から, 外管長が短い CASE-2 を除く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 $1.5\sim 1.8$ 倍程度となること, 二重管杭の降伏時水平荷重は, CASE-1 に対して $1.7\sim 2.0$ 倍程度となり, 二重管杭としたことによる水平剛性の向上効果が確認できた。

(3) 本杭および外管の曲げモーメント, せん断力分布

本杭および外管の曲げモーメント分布 (以下 M 分布), せん断力分布 (以下 Q 分布) は, それぞれに貼付したひずみゲージにより得られたひずみ値から求めた。ひずみ測定位置の断面における曲率 ϕ を両側 2 点のひずみ値より求め, あらかじめ材料試験結果から得られた諸数値を用いて

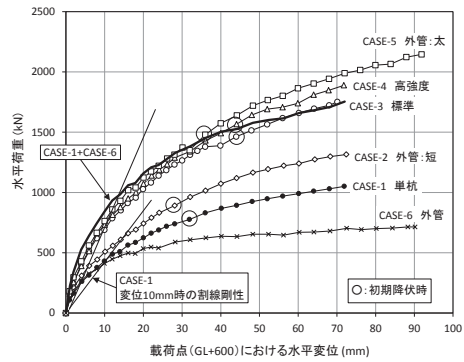


図-8 水平荷重－杭頭変位関係

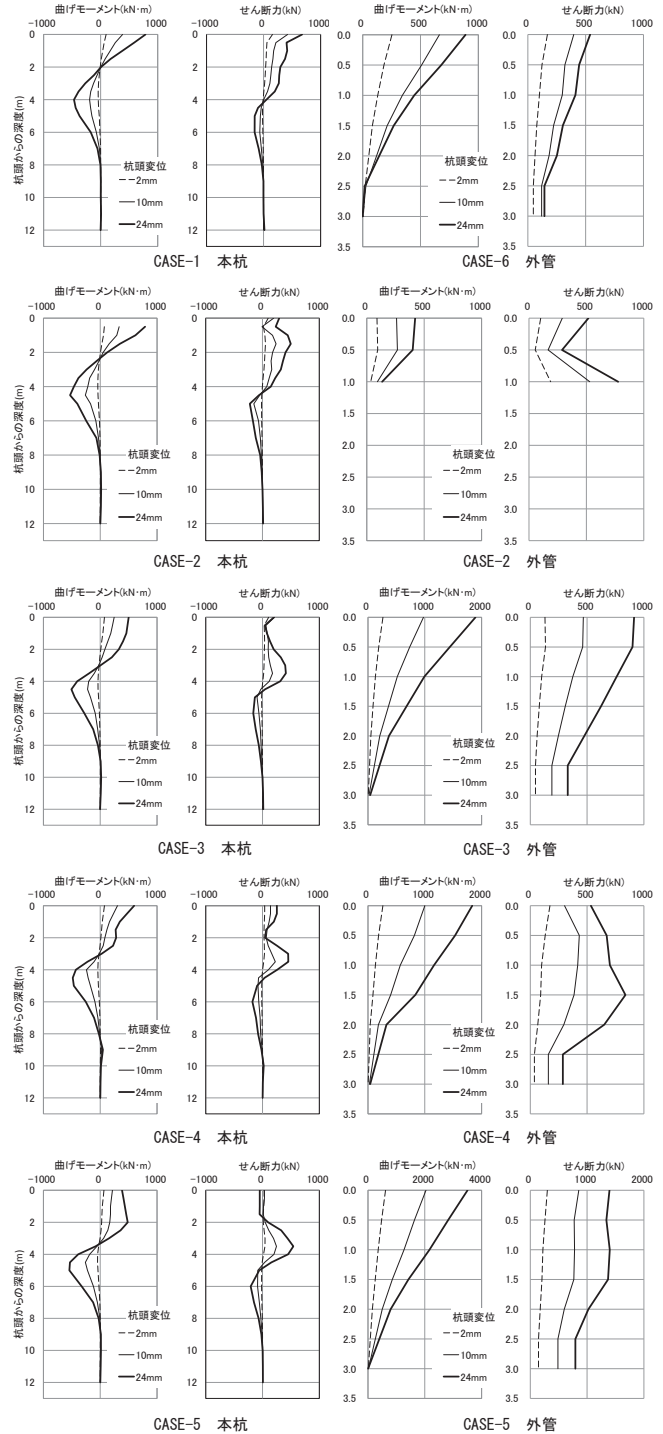


図-9 曲げモーメント・せん断力分布

計算した曲げモーメント-曲率 (M-φ) 関係から測定φに対応する曲げモーメントMを求めた。せん断力は曲げモーメントの深度分布において連続する3点間の曲げモーメント分布を二次式で表し、これを微分して着目点における傾きをその断面のせん断力Qとした。CASE-1~6のM分布およびQ分布を図-9に示す。CASE-1(本杭のみ)、CASE-6(外管のみ)の第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、CASE-2~5の二重管杭の本杭の第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。CASE-2本杭のM分布の第1断面は欠測となっている。

本杭のM分布をCASE-1と比較すると、CASE-2は全体的に同様の分布傾向だが、曲げモーメントの第一ゼロ点がCASE-1の杭頭-2.0mから-2.5mに深くなっている。CASE-3, 4, 5では第一ゼロ点がさらに-3.0m程度に深くなるとともに、二重管部における曲げモーメントの分布傾向がそれぞれ異なっている。杭頭変位24mm時の杭頭部の曲げモーメントの比較では、外管長が短いCASE-2ではCASE-1と同程度となったが、CASE-3, 4, 5はCASE-1よりそれぞれ約40%, 25%, 50%減となっており、ある程度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できることが確認できた。

CASE-2~4の本杭のQ分布では、外管先端付近で最大せん断力が発生し、それ以深では同様の傾向となっているが、それ以浅の二重管部では各ケースで異なった分布となっている。外管径が900mmのCASE-2, 3, 4では、外管長が短いCASE-2を除き、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、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く負の値となっている。これらの結果より、外管の径、長さや二重管内ソイルセメントの剛性が本杭のせん断力分布に影響を及ぼすものの、二重管杭の最大せん断力は外管先端付近で発生することが確認できた。

(4) 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の本杭と外管の杭頭せん断力の分担割合を図-10に示す。両ケースとも変位が進むにつれて外管の分担割合が増加する傾向になっている。また、本杭と外管の分担割合を比較すると、いずれの変位においてもCASE-3がCASE-4より外管の分担割合が大きく、変位10mm時ではCASE-3の外管:本杭が約7:3、CASE-4で約5:5となっている。この結果から、杭周固定部の強度が杭頭部のせん断力分担割合に影響を及ぼすこと、強度が大きい場合は本杭の負担割合が増加することが把握できた。

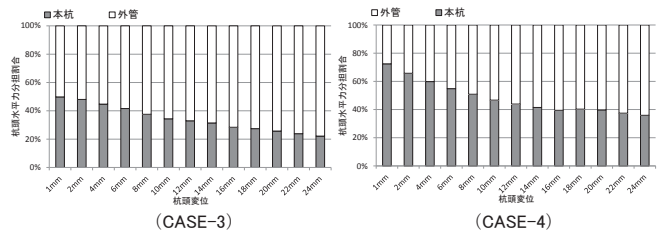


図-10 杭頭せん断力分担割合

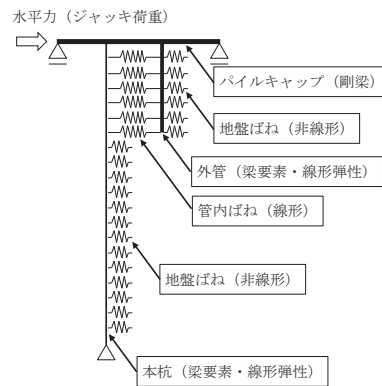


図-11 二重管杭の応力解析モデル

表-5 地盤特性

深度 GL-(m)	土質	N値	E ₀ (700N) (kN/m ²)	E ₀ (LLT) (kN/m ²)	E ₀ (採用値) (kN/m ²)	試験杭配置
0.00 ~ 1.80	埋土	3	2,100	-	2,100	[Diagram of pile location]
1.80 ~ 2.60	ローム	2	1,400	2,900	2,900	
2.60 ~ 3.70	ローム	3	2,100	4,560	4,560	
3.70 ~ 4.90	凝灰質粘土	5	3,500	9,000	9,000	
4.90 ~ 5.45	細砂	9	6,300	-	27,600	
5.45 ~ 6.80	細砂	12	8,400	27,600	27,600	
6.80 ~ 8.35	シルト	2	1,400	-	1,400	
8.35 ~ 8.45	細砂	7	4,900	-	4,900	
8.45 ~ 9.90	細砂	21	14,700	-	14,700	
9.90 ~ 10.85	粘土質シルト	16	11,200	-	11,200	
10.85 ~ 11.45	細砂	34	23,800	-	23,800	
11.45 ~ 12.25	細砂	24	16,800	-	16,800	
12.25 ~ 13.75	硬質シルト	31	21,700	-	21,700	
13.75 ~ 14.25	細砂	11	7,700	-	7,700	

4.2 二重管杭の応力解析手法の検証

二重管杭の応力解析手法の妥当性を確認することを目的として、前述の水平荷重試験を対象に二重管杭の応力解析モデルによるシミュレーション解析を実施した。

(1) 解析条件

二重管杭の応力解析モデルを図-11に示す。本杭および外管は地盤ばねを付加した梁要素でモデル化した。本杭と外管の同一深度の節点は、ソイルセメントが充填された状態を模擬して線形ばね要素により連結した。

原位置で実施した標準貫入試験および孔内水平荷重試験の結果とシミュレーションに用いた地盤の地盤特性を表-5に示す。地盤の変形係数は、地盤面から6.8mまでは孔内水平荷重試験による値を、6.8m以深はN値から700Nとして求めた値を用いた。杭の材料特性は表-4の値を用いた。二重管内ソイルセメントの変形係数は一軸圧縮強度 q_u と変形係数 E_{50} の関係を基に設定した。管内ばね値(K_s)は、本杭径(B)、本杭と外管の間隔(L_s)および杭間ばねの負担高さ(h)から、 $K_s = E_{50} \times B \times h / L_s$ として求めた。荷重は各杭頭変位段階における水平加力ジャッキの実測荷重

を杭頭部に作用させた。

(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 24mm 時の解析結果と実験値との比較として、図-12 に曲げモーメント分布を、図-13 にせん断力分布を示す。解析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，杭頭変位量によらず試験結果と概ね同様の傾向を示しており，本杭および外管を管内ばねで連結したはり-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が確認できた。

5. まとめ

二重管式既製コンクリート杭工法では，建物荷重を支持する既製コンクリート杭（本杭）の頭部に鋼管（外管）を設置することで，水平抵抗力の増大，および本杭と外管の水平力分担による本杭頭部の曲げモーメント，せん断力の低減を図る。本工法の実用化を目指して実施した原位置での実大杭による施工試験，および水平載荷試験とそのシミュレーション解析により，以下の知見を得た。

- ・本杭と外管を一体化して同時に，あるいは外管，本杭を別々に掘削孔に建込むことができ，傾斜や位置ずれに関して所定の施工精度を確保することができる。
- ・二重管杭の建込み時に二重管内に杭周固定部のソイルセメントが充填され，通常の杭周固定部の強度を確保でき，その強度と変形係数の関係は従来のソイルセメントと同程度である。
- ・二重管杭の降伏時水平荷重は本杭のみの場合の 1.7~2.0 倍程度，杭頭変位 10mm 時の割線剛性は本杭のみの場合の 1.5~1.8 倍程度となり，二重管杭としたことの効果といえる。
- ・杭頭せん断力の分担割合は，杭頭変位の増加とともに外管の割合が増加，本杭の割合が減少する傾向にある。
- ・本杭と外管を梁要素，地盤と二重管内のソイルセメントをばねでモデル化した梁ばねモデルにより，二重管杭の地震時応力を評価することができる。

これらの知見を含む調査，試験の結果と検討により，二重管式既製コンクリート杭工法を実用化し，第三者機関の技術評定を取得した。なお，本開発は平成 26 年度および平成 27 年度住宅・建築関連先進技術開発助成事業費補助金の交付を受けて，西松建設株式会社，株式会社熊谷組，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で実施されたものである。

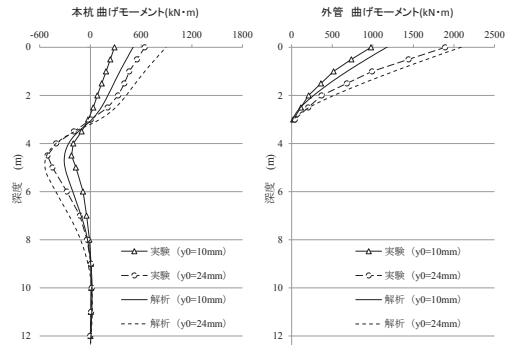


図-12 曲げモーメント分布の比較 (CASE-3)

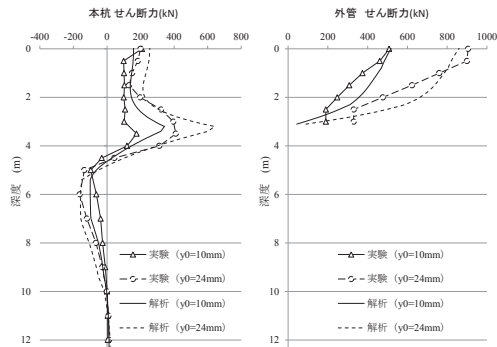


図-13 せん断力分布の比較 (CASE-3)

参考文献

- 1) 風間了，竹内章博：外管杭を有する耐震杭の水平挙動（その 1 模型実験および解析方法），日本建築学会構造系論文集，525，pp. 63-70，1999
- 2) 新井寿昭，堀井宏謙，森利弘，西村裕，加藤洋一：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
- 3) 松江繁尚，郡司康浩，小川敦，横山雅樹，内田晃一：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
- 4) 遠藤正美，竹内章博，西正晃，浅井陽一，加藤洋一：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，pp. 749-750，2016
- 5) 横山雅樹，新井寿昭，崎浜博史，森利弘，長澤和彦：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. 751-752，2016
- 6) 佐藤 博，大矢 孝，松島 学：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 JSCE 714，pp. 95-109，2002

Development of Double-pipe Ready-made Concrete Piling Method

Masateru NISHI, Hirofumi SAKIHAMA, Hironori HORII and Koichi UCHIDA

In recent years, as the ready-made concrete piling method progresses and its vertical support performance have been improved, the horizontal force of an earthquake burden on the piles has also tended to increase. In order to enhance the earthquake resistance of the piles, a double-pipe earthquake pile construction method has been proposed, which reduces the horizontal force acting on the pile by installing a steel pipe that can bear the seismic force on the head of the pile. We applied this to ready-made concrete piles and jointly developed them for practical application. The effect of the double-pipe pile, which was shown in theory, and the small-scale model experiment was verified by the large-scale horizontal loading tests and the validity of the stress analysis method was confirmed.

In this paper, we report the results of the horizontal loading tests and construction experiments that were conducted to establish the construction methods and quality control methods.