二重管式既製コンクリート杭（ヘッドギアパイル）工法における杭頭接合部の構造性能

Structural Performance of the Pile Head Joint for Precast Concrete Pile Method Guarded with the Outer Steel Pipe to Upper Part of the Pile

郡司　康浩*　Yasuhiro Gunji
新井　寿昭*　Toshiaki Arai
竹内　章博**　Akihiro Takeuchi
岡　賢治***　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およびせん断力を低減でき，耐震性を向上させることが可能になる．

本報では，本工法の杭頭接合部について，構造性能確認実験および有限要素法解析により確認した構造性能の詳細について報告する．

目　次

§1.　はじめに
§2.　工法概要
§3.　構造性能確認実験
§4.　有限要素法解析
§5.　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建築物への適用が拡大し，それに伴って杭の水平力負担も増加している．建築物を安全に支持するためには，水平力に対する性能確保も重要となることから，筆者らは既製杭の，特に杭頭部の耐震性能を向上させることが可能な工法を開発し，既報[例えば1)～7)]にて報告している．

本報では，工法概要を述べるとともに，本工法の杭頭接合部の構造性能について，構造性能確認実験[3)～5)]および三次元有限要素法解析[6)～7)]にて確認した結果について報告する．

§2.　工法概要

本工法の概要を**図―1**に示す．本工法は，建物荷重を鉛直支持する既製杭（以下，本杭）の頭部に，本杭径よりも大径の鋼管（以下，外管）を被せるように設置し（以下，二重管杭），この外管に水平力の一部を分担させることで，本杭の水平力分担を低減する工法である．外管を設置することにより，本杭頭部の曲げモーメントおよびせん断力を低減できることから，本杭の耐震性能を向上させることができる．

また，本工法は**図―1**に示す二重管部（本杭と外管が重なり，ソイルセメントが充填される部分）の許容応力度設計における水平力分担について，本杭および外管の構造安全性評価の妥当性に関して第三者機関から一般評定を取得している．本工法の適用範囲の詳細等は，既報[2)]を参照されたい．

本工法では，本杭および外管の頭部に定着筋を配置するとともに，両者をパイルキャップ内に埋込むことから，定着筋の引張圧縮抵抗や杭側面部の支圧抵抗などが，在来工法とは異なる挙動を示す可能性が考えられる．そこ

*　技術研究所建築技術グループ
**　建築設計部構造一課（現：構造二課）
***　関東建築（支）建築設計部
****　技術研究所建築技術グループ（現：建築設計部）

で，二重管杭の杭頭接合部の挙動を把握するため，構造性能確認実験および有限要素法解析を実施した．

§3. 構造性能確認実験

3—1　実験概要

二重管杭の杭頭接合部の構造性能を確認するため，構造性能確認実験を実施した．

試験体の概要を**図—2**に，実験パラメータの一覧を**表—1**に示す．試験体は，本杭および外管に定着筋を配置し，パイルキャップへの埋込み長が本杭で550 mm，外管で300 mmであるNo.3を二重管杭の標準とし，二重管杭の各パラメータを変更した試験体（No.2：本杭・外管ともに定着筋無し，No.3-2：本杭軸力無し，No.4：外管径大，No.5：本杭の埋込み長が短い）を設定した．また，比較のため本杭のみのNo.1も準備した．試験体総数は6体である．本杭はφ 500 mmのSC杭，外管はφ 800 mmの鋼管を基本とし，外管径を大きくしたNo.4ではφ 1,000 mmの鋼管を使用した．試験体に用いた材料の試験結果を**表—2**に示す．

載荷装置の概要を**図—3**に示す．載荷は鉛直ジャッキにて本杭に圧縮軸力（1,600 kN．No.3-2は無し）を載荷後，本杭および外管に接続したアクチュエーターを用いて，水平力を片持ち梁形式の正負交番繰返し載荷で与える形式で行った．なお，軸力は定荷重保持装置を用いて一定に制御した．水平載荷は，定着筋が降伏に至るまでの範囲を荷重制御方式で，それ以降は本杭および外管の部材角が同一となるように変位制御方式で行った．

各試験体の載荷目標荷重・部材角の一覧を**表—3**に示す．荷重制御範囲では，既報[1)]で示している原位置水平載荷実験におけるせん断力分担割合を模擬できるように，原則として本杭と外管の荷重分担率（全水平荷重に対する本杭と外管の分担割合）を2：8～5：5となるように制御した．具体的な載荷順序としては，外管を所定の荷重まで載荷した後，本杭の荷重を所定の荷重分担率となるように漸増させる形で実施した．また，除荷はその逆順とした．変位制御範囲では，本杭および外管の目標部材角まで外管，本杭の順で載荷した．

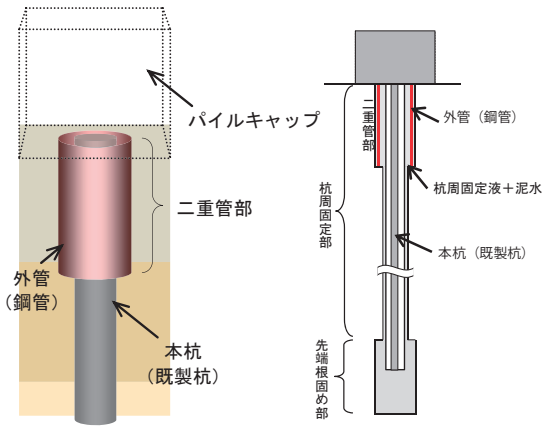
3—2　実験結果

(1)　荷重制御範囲（定着筋降伏まで）

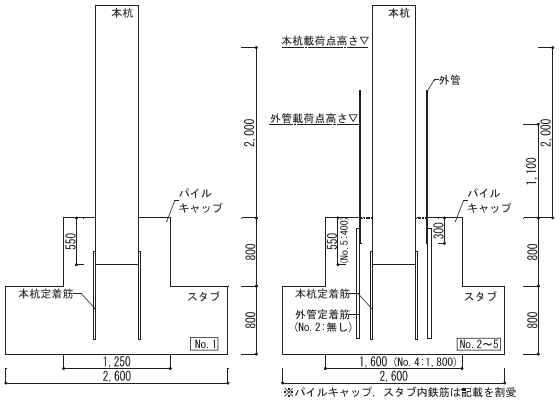
標準試験体であるNo.3の本杭および外管の載荷点水平荷重（P1：本杭，P2：外管）と部材角（R1：本杭，R2：外管）の関係（荷重制御範囲）を**図—4**に示す．なお，部材角は載荷点の水平変位を載荷点高さ（本杭：2,000 mm，外管：1,100 mm）で除した値である．

図—4を見ると，本杭は概ね弾性的で安定した挙動を示しており，定着筋の降伏が生じた時点の部材角はR1＝-12/1000 rad.であった．外管は，各サイクルのピーク荷重時に部材角の進行が見られるが，これは外管を載荷後，荷重を保持し本杭の載荷を行った影響である．

荷重分担率が5：5時点における，各試験体の本杭および外管の載荷点水平荷重－部材角関係を包絡線として**図—5**に示す．本杭は，R1＝2.5/1000 rad.までNo.3-2を除く全ての試験体で同様の挙動を示した．それ以降の部



図—1　工法概要



図—2　試験体の概要

表—1　実験パラメーター覧

試験体No	タイプ	主たるパラメータ	本杭 径(mm)	本杭 埋込み(mm)	外管 径(mm)	外管 埋込み(mm)	パイルキャップ平面寸法(mm)
No.1	単杭	本杭のみ	500	550	－	－	1250×1250
No.2	二重管	定着筋なし			800	300	1600×1600
No.3		標準					
No.3-2		本杭軸力なし					
No.4		外管径：大			1000		1800×1800
No.5		本杭埋込み：短		400	800		1600×1600

※1：本杭は全てSC杭。定着筋は8-D22
※2：外管はSKK490。定着筋は12-D32。No.4のみ12-D29
※3：定着方法は，No.2を除いて「埋込み＋定着筋」．No.2は「埋込みのみ」

表—2　材料試験結果

Steel		σ_y(N/mm^2)	E(×10^{5}N/mm^2)
鋼管(SKK490)	t=12(本杭)	446	2.07
	t=16(外管)	386	2.10
	t=19(外管)	393	2.11
鉄筋	D16(SD295A)	351	1.86
	D22(SD345)	374	1.91
	D29(SD390)	418	1.91
	WD32(SD390)	463	1.91

CON		E(×10^{4}N/mm^2)	σ_B(N/mm^2)	σ_t(N/mm^2)	ポアソン比
杭	SC杭	4.63	129.9	－	－
パイルキャップ	No.1	3.07	31.2	2.11	0.192
	No.2	3.22	34.2	2.48	0.174
	No.3	3.29	35.2	2.48	0.187
	No.3-2	3.30	35.3	2.46	0.215
	No.4	3.40	34.0	2.32	0.195
	No.5	3.06	32.9	2.25	0.173

材角では，No.2 と No.5 が No.1 と似た挙動を示した．また，No.3 と No.4 の剛性は No.1 を上回っており，両試験体の挙動はよく似た性状を示した．外管の部材角は，各試験体でばらつきがみられるが，R2＝1.8/1000 rad. 以降で No.3 と No.4 は同様の挙動を示した．

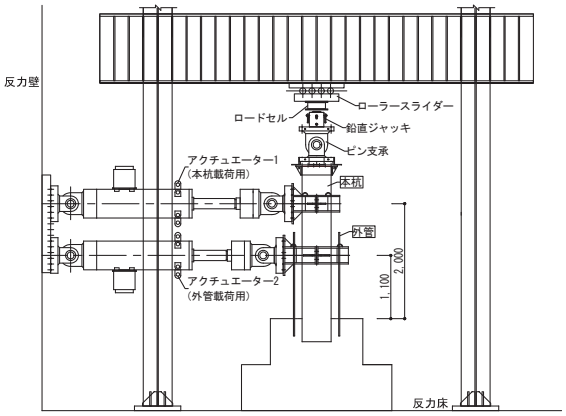
各試験体の本杭定着筋降伏時の荷重一覧を**表―4** に示す．No.3 と No.4 の本杭定着筋降伏時荷重は，No.1 と比較して約 40％増加しており，No.1 以上の降伏耐力を有していることが確認できた．No.3 と No.4 を比較すると，本杭定着筋降伏時荷重は概ね同等であり，外管径の違いによる顕著な影響は認められなかった．また，No.3 と比較して，本杭定着筋降伏時荷重は No.3-2 で約 25％，No.5 で約 35％低下する結果となっており，本杭定着筋降伏時荷重には，軸力および埋込み長による影響があることが確認できた．

⑵　変位制御範囲（定着筋降伏以降）

変位制御範囲における本杭および外管の載荷点水平荷重－部材角関係を包絡線として**図―6** に示す．本杭では，R1＝約 10/1000 rad. まで全ての試験体で概ね同じ様な挙動を示していたが，それ以降で試験体毎に挙動の違いが見られた．No.3 および No.4 は，載荷終了まで安定的な挙動を示し，最大荷重も No.1 と比較してほぼ同等であった．一方，No.5 は R1＝約 10/1000 rad. 以降で荷重が上がらず，変形のみが増大する挙動であった．No.2 では R1＝約 25/1000 rad. で最大荷重となり，それ以降で荷重が低下し最終的には最大荷重の約 60％の荷重まで低下した．No.3-2 では，R1＝約 30/1000 rad. で最大荷重となり，その後最大荷重の約 80％の荷重まで低下する挙動であった．これらより，定着筋が降伏した後の本杭の挙動についても，軸力や定着筋，埋込み長による影響があることが確認できた．

外管は，R2＝約 4/1000 rad. まで全ての試験体で概ね同様の挙動となっていたが，それ以降で試験体毎に違いが見られた．No.2 以外は，載荷終了まで大きな荷重低下が見られず安定的な挙動であった．一方，No.2 は R2＝約 4/1000 rad. 以降で荷重が上がらず，変形のみが進行する挙動となっていた．

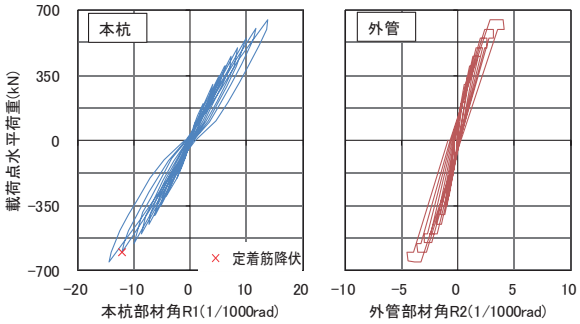
本杭の軸力と部材角の関係を**図―7** に示す．**図―7** には，前サイクルの R1 を更新した点のみプロットした．**図―7** より，載荷終了まで軸力を概ね精度よく制御できていたことを確認した．また，軸力の急激な低下等は生じておらず，比較的大きな変形の領域まで軸力保持能力があることを確認した．



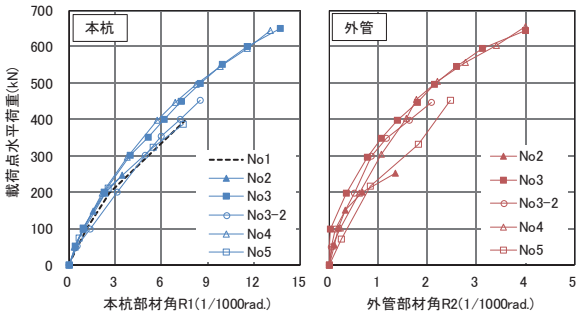
図―3　載荷装置の概要

表―3　載荷目標荷重・部材角一覧

試験体		No. 1	No. 2	No. 3	No. 3-2	No. 4	No. 5	
区分：		本杭	本杭外管共通	本杭外管共通	本杭外管共通	本杭外管共通	本杭	外管
荷重制御範囲	初期サイクルピーク荷重(kN)：	50	50	50	50	50	75	70
	最終サイクルピーク荷重(kN)：	400	250	650	450	650	400	450
変位制御範囲	初期サイクルピーク：部材角(1/1000rad)	10	10	5	5	10	10	
	最終サイクルピーク：部材角(1/1000rad)	45	40	45	45	45	30	



図―4　載荷点水平荷重－部材角関係（No.3）

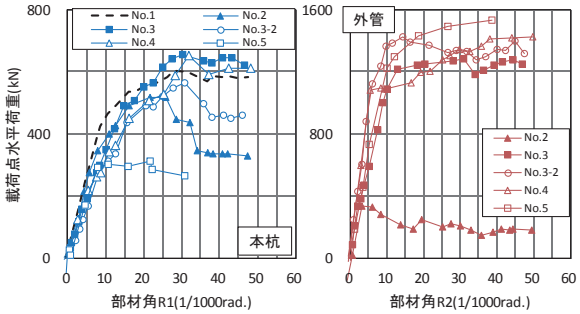


図―5　載荷点水平荷重－部材角関係（荷重制御範囲）

表―4　本杭定着筋降伏時荷重一覧

試験体		載荷点荷重(kN)			比率(本杭，絶対値)	
		本杭P1	本杭P2	合計	各No/No. 1	各No/No. 3
No. 1	荷重制御範囲	434.7	−	434.7	−	0.72
No. 2		−	−	−	−	−
No. 3		−601.7	−599.8	−1201.5	1.38	1.00
No. 3-2		452.1	450.2	902.3	1.04	0.75
No. 4		−600.2	−600.3	−1200.5	1.38	1.00
No. 5		392.7	450.4	843.1	0.90	0.65

※No. 2は定着筋なし



図―6　載荷点水平荷重－部材角関係（変位制御範囲）

§4. 有限要素法解析

4—1　解析概要

構造性能確認実験の事後評価と，実験では確認できなかったパラメータによる影響を確認するために三次元有限要素法解析を実施した．

解析は二段階に分けて実施した．まず，第一段階として解析モデルの妥当性確認と，解析における杭頭接合部の基本的性状を把握するため，一方向載荷による解析を実施した．次に，第二段階として実験と同様の正負交番載荷による解析を実施して実験結果をシミュレートするとともに，実験では実施できなかったパラメータについても検討を行った．

一方向載荷では，構造性能確認試験のパラメータのうち，紙面の都合上，特に二重管杭の標準である No.3 と，比較のための No.1（本杭のみ）の検討結果について述べる．正負交番載荷では，特に軸力による影響を確認するため，No.3（本杭軸力 N＝1,600 kN）および No.3-2（N＝0 kN）の解析に加えて，実験では実施できなかった引張軸力（N＝-400 kN）が作用した場合の性状について，No.3-3 として検討を行った結果についても述べる．

4—2　解析モデル

(1)　共通条件

モデル化等について，一方向載荷と正負交番載荷では一部異なる箇所があるため，両解析で共通な条件と各解析で特有な条件に分けて以下に記載した．解析モデルの概要を**図—8** に示す．解析モデルは，載荷方向と形状の対称性を考慮して 1/2 対称モデルとした．境界条件は，底面固定，Y 方向変位拘束とした．モデル化について，スタブ，パイルキャップ部はソリッド要素で，本杭および外管はシェル要素でモデル化した．定着筋については，トラス要素でモデル化した．本杭，外管および定着筋とパイルキャップコンクリートの界面には，インターフェイス要素を配置し付着すべりによる影響を考慮した．材料モデルについて，コンクリートには分散ひび割れモデルを採用し，履歴特性について圧縮側では修正 Ahmad モデル[8] とした．引張側については，ひび割れが発生するまでは弾性剛性とし，ひび割れ発生後は鉄筋の付着による引張応力負担をテンションスティフニングとして考慮した．鉄筋は，修正 Menegotto-Pinto[9] を用い，包絡線はバイリニアを仮定し，降伏後の剛性は弾性剛性の 1/1000 とした．鋼材とコンクリートの付着は，文献[10] を参考に設定した．杭頭定着筋の付着特性は，CEB-FIP モデルコード 1990 を用いた．解析に用いる材料特性には，原則として**表—2** に示す値を用いているが，正負交番載荷のモデルでは統一して No.3 の材料特性を用いている．

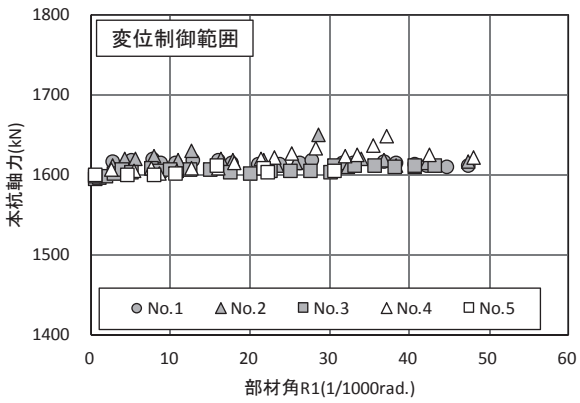
(2)　一方向載荷特有の条件

パイルキャップ内の鉄筋について一方向載荷のモデルでは，ソリッド要素内の分散埋込み鉄筋としてモデル化し，配筋方向毎に鉄筋比を指定することで考慮した．一方向載荷では，解析での基本的な性状を把握するため，構造性能確認実験における荷重制御範囲（概ね，短期許容（定着筋降伏）レベルまで）での比較を実施した．

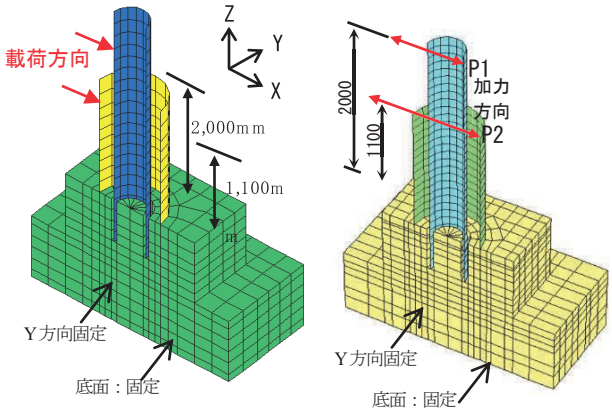
解析は，本杭に圧縮軸力（1,600 kN）を載荷後，水平載荷を実施した．手順としては，外管を所定荷重まで載荷後保持し，次に本杭と外管の荷重分担率が最終的に 5：5 になるように本杭の荷重を漸増させた．その後，外管の荷重を増加させ前述の載荷方式を繰返し実施した．

(3)　正負交番載荷特有の条件

正負交番載荷のモデルでは，パイルキャップ内鉄筋の状態をより明確に把握するため，トラス要素でモデル化するように修正を行った．この変更に伴って，正負交番載荷のモデルは一方向載荷のモデルと比較して，ソリッド要素の分割を細かくしている．正負交番載荷時の繰返し応力下における材料の履歴特性として，コンクリートは曲線で表現するモデル[11] とし，鋼材は移動硬化則を適用して再載荷時は弾性剛性とした．解析は，原則として構造性能確認実験と同様の載荷ルールで実施した．



図—7　本杭軸力と部材角の関係（変位制御範囲）



(a)　一方向載荷モデル　　(b)　正負交番載荷モデル

図—8　解析モデルの概要

4—3　解析結果

(1)　一方向載荷

荷重制御範囲で，本杭と外管の荷重分担率が 5：5 時点の本杭および外管の載荷点水平荷重－杭頭回転角関係を

実験結果と比較して包絡線として**図―9**に示す．ここで，解析における杭頭回転角は，杭頭部（パイルキャップ上面近傍）の杭要素Z方向変位の差を杭径で除した値であり，実験は同位置に設置した変位計の値を基に算定した値である．

図―9を見ると，モデル化の基本となるNo.1の解析値と実験結果はよく対応しており，本検討における基本的なモデル化は概ね妥当と考えられる．一方，今回の検討では，定着筋の降伏について圧縮鉄筋が先行して降伏する（実験では，引張鉄筋が先行）結果となった．実験結果と解析値で差が生じているNo.3の本杭については，前述の鉄筋降伏性状の違いによる影響もあるものと考えられる．

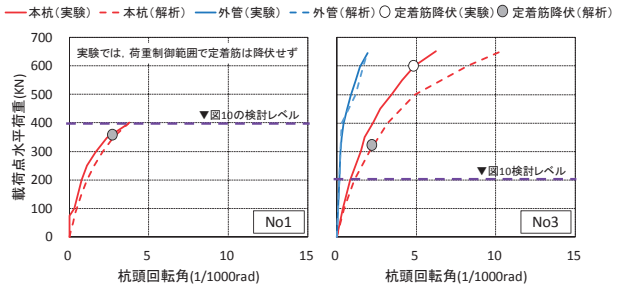
杭頭せん断力が同一（本杭：200 kN，外管：200 kN，合計400 kN．No.1は単杭で400 kN）時点における，パイルキャップの載荷方向（X方向）応力コンター立面図を**図―10**に示す．**図―10**は対称面をY方向から見ており，本杭および外管の要素は表示していない．**図―10**を見ると，二重管杭として比較的荷重の小さい範囲ではあるが，単杭と比較すると載荷方向の応力分布に違いが見られ，No.1では本杭の載荷前面側のパイルキャップ上部付近で圧縮応力が大きくなっているのに対して，No.3では本杭と外管の間の部分で圧縮応力が大きくなっていた．この要因の一つとして，**図―9**を見るとNo.3では同一荷重時の杭頭回転角が，本杭よりも外管の方が小さくなっており，その影響で当該部分がNo.1よりも拘束されている影響もあると考えられる．

⑵　正負交番載荷

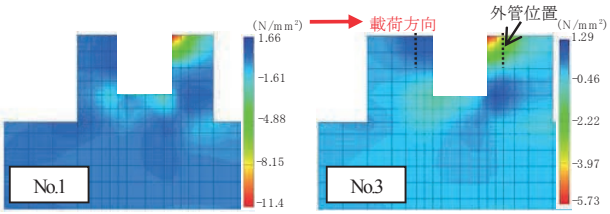
パイルキャップ上面における本杭および外管の曲げモーメント（杭頭M）と杭頭回転角（θ）の関係を**図―11，12**に示す．荷重制御範囲（定着筋降伏まで）では，軸力に関係なく本杭，外管ともに実験よりも解析のほうが杭頭の回転剛性が若干小さい結果となっていた．これは，解析において定着筋溶接部による抵抗の効果までモデル化できていないことも一因と考えられる．**図―11**中に示した定着筋の降伏時期は，本杭，外管ともに解析のほうが若干早く，実験よりも小さな荷重で降伏に至っているが，概ね対応した結果となっていた．

変位制御範囲における実験の本杭は，$\theta = \pm 5/1000$ rad.で一旦杭頭Mが低下し，その後上昇傾向となって定着筋降伏時の杭頭Mまで回復しているが，解析では実験値を若干下回っている．この本杭杭頭Mの一時的な低下は，実験時の制御において本杭と外管の部材角を同一になるように制御した結果，外管に拘束された本杭が一緒に回転したことの影響による．実験での外管の杭頭Mは定着筋降伏後もそのまま$\theta = \pm 20 \sim 30/1000$ rad.まで杭頭Mを維持しているが，解析では$\theta = \pm 10/1000$ rad.以降で杭頭Mの低下が顕著であり，またθが実験よりも大きく増加している．

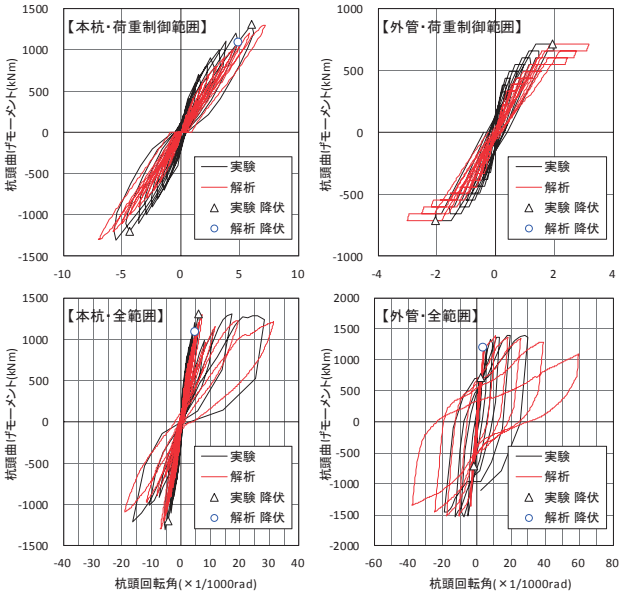
これらの結果より，大変形時の外管の挙動の対応はよ



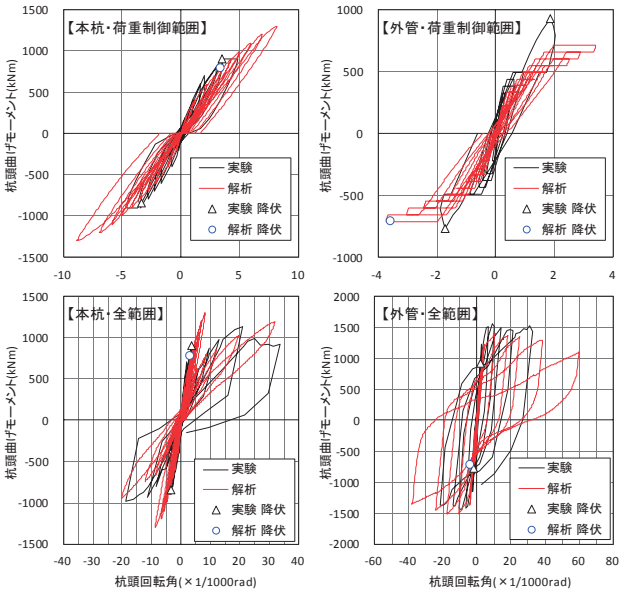
図―9　載荷点水平荷重－杭頭回転角関係（包絡線）



図―10　載荷方向応力コンター図（立面図）



図―11　杭頭M－θ関係（No.3：N＝1600 kN）



図―12　杭頭M－θ関係（No.3-2：N＝0 kN）

くないが，全体的に解析は実験結果をよく説明しており，本解析手法で二重管杭の杭頭接合部の挙動をある程度評価できると考えられる．

引張軸力を作用させた No.3-3 も含め，全解析ケースの杭頭 M-θ 関係を**図―13** に示す．本杭は，軸力が小さいと定着筋降伏時期が早くなり，$\theta = \pm 5/1000$ rad. 以降の挙動に不安定さが見られる．外管は，定着筋降伏時期に違いが見られるものの，解析による杭頭 M-θ 関係は本杭軸力の影響を殆ど受けていないように見受けられる．実験においても，No.3 と No.3-2 の外管の挙動の違いは本杭ほど大きくなかった．

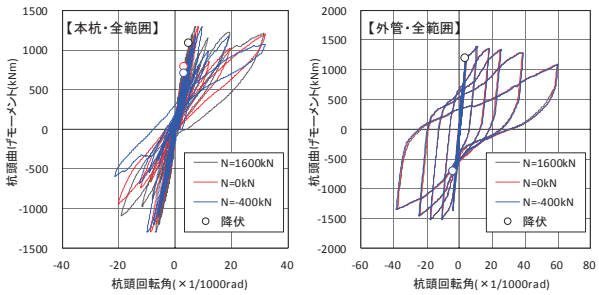
図―14 に本杭軸力 N＝1600 kN, -400 kN の場合の本杭定着筋降伏時におけるパイルキャップの最小主応力分布を示す．外管の内外でコンクリートの要素が連続していないため，定着筋が降伏する荷重レベルでは外管を境界に応力が不連続となっている．軸力が大きい場合には，本杭，外管の端部付近で圧縮応力が最大となり，本杭と外管に挟まれた部分の応力は比較的小さい．引張軸力の場合は，本杭端部の応力は小さく，本杭外管間の圧縮応力が大きくなるが，荷重レベルが小さいこともありコンクリート強度の半分以下にとどまっている．

§5. おわりに

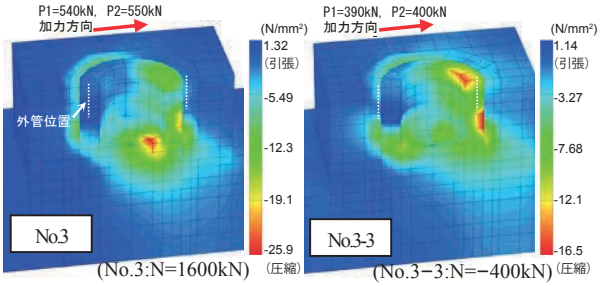
二重管杭の杭頭接合部の構造性能について，構造性能確認実験を実施し，本杭の性状には在来工法と同様に軸力，定着筋の有無，埋込み長の長短による影響があることを確認した．また，本工法の標準的な杭頭接合部について，比較的大きな変形領域まで安定した変形性能，軸力支持能力を有していることを確認した．

構造性能確認実験結果のシミュレートと，実験で実施できなかったパラメータに対する検討を実施するため三次元有限要素法解析を実施し，本報で示したモデル化手法で二重管杭の杭頭接合部の挙動をある程度評価できることを示した．更に，実験で実施できなかった引張軸力下における杭頭接合部の挙動について，本杭では在来工法と同様に引張軸力による挙動への影響が確認されたが，外管への影響は小さいことなどを確認した．

なお，本工法は西松建設，安藤・ハザマ，熊谷組，トーヨーアサノ，三谷セキサンの 5 社による共同研究で開発したものである．



図―13　杭頭 M－θ 関係（全解析ケース）



図―14　パイルキャップの最小主応力分布
（本杭定着筋降伏時）

参考文献

1）新井他：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，西松建設技報，VOL. 40, 2017
2）郡司他：二重管式既製コンクリート杭（ヘッドギアパイル）工法の概要と設計，西松建設技報，VOL. 41, 2018
3）山名他：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 5　杭頭接合部の構造実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp. 753–754, 2016. 8
4）崎浜他：山名他：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 6　杭頭接合部の構造実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp. 755–756, 2016. 8
5）郡司他：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 10　杭頭接合部の構造実験結果の検証，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp. 481–482, 2017. 8
6）郡司他：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 11　杭頭接合部の三次元有限要素法解析（一方向載荷），日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp. 661–662, 2018. 9
7）西他：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 12　杭頭接合部の三次元有限要素法解析（正負交番載荷），日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp. 663–664, 2018. 9
8）長沼洋一：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第 474 号，pp. 163–170, 1995. 8
9）Ciampi, V., et al：Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized, Report No UCB/EERC-82/23, Univ of California, Berkley, Nov., 1982
10）松浦他：鋼板とコンクリートの付着特性に関する基礎的検討，日本建築学会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp. 1037–1038, 2005. 9
11）長沼洋一，大久保雅章：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル，日本建築学会構造系論文集，第 536 号，pp. 135–142, 2000. 10