

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

Design and Overview of Precast Concrete Pile Method Guarded with the Outer Steel Pipe to Upper Part of the Pile

郡司 康浩*

Yasuhiro Gunji

竹内 章博**

Akihiro Takeuchi

山名 由記*

Yuki Yamana

新井 寿昭*

Toshiaki Arai

岡 賢治***

Kenji Oka

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、工法概要および適用範囲について述べるとともに、設計法を構築する際に実施した解析的検討の内容を紹介する。さらに、試設計を示し、本工法の効果について述べる。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工法概要および適用範囲
- § 3. 設計方法の概要
- § 4. 管内ばねの変動要因に関する検討
- § 5. 試設計
- § 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)~5)}にて報告している。また、本工法は2017年3月に第三者機関より一般評定を取得した。

本報では、工法概要および適用範囲について述べるとともに、設計法を構築する際に実施した解析的検討のう

ち、本杭と外管間のソイルセメント強度、本杭と外管の杭心ずれ（以降、相対杭心ずれ）および傾斜が本杭と外管の応力に及ぼす影響について報告する。また、最後に試設計を示し、本工法の効果について述べる。

§ 2. 工法概要および適用範囲

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）、この外管に水平力的一部分担させることで、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。なお、鉛直荷重は、原則として全て本杭で負担する。

本工法の概要を図-1に、本杭と外管の水平力分担の概要を図-2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）の本杭と外管のせん断力分布は、本杭と外管の曲げ剛性、地盤の剛性、二重管内（本杭と外管の間）のソイルセメントの剛性等の相互作用に依存することから、図-2ではある条件の場合を想定して示している。

本杭の適用対象は、技術評価を取得したプレボーリング工法である。二重管部の本杭はストレート形状の外殻鋼管付きコンクリート杭（以下、SC杭）とし、適用杭径

* 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

は既製杭で一般的に使用されている 400~1,200 mm の範囲である。外管径は、施工性に配慮して本杭径に 300 mm を加算した値以上とし、外管径の最大は、本杭径に 600 mm を加算した値、または、本杭径の 2 倍のうち大きい値、かつ 1,600 mm を上限とした。本杭と外管の径の組合せを表一に示す。なお、外管の径厚比は 100 以下とし、外管厚は運搬時や施工時の取り扱いに配慮して 9 mm 以上とした。外管長は、建込み時の鉛直性を確保するために、外管径の 2.5 倍以上とした。

本杭および外管とパイルキャップの接合部は固定接合とし、ピン接合、半剛接合、ローラーやすべり支承を用いない。また、二重管杭は、1 柱につき 1 本とした。なお、同一建物で、本工法と評価機関による技術評価を得たプレボーリング工法との併用は可能である。

本工法は、前述の適用条件を満足した上で、二重管部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た。

§3. 設計方法の概要

本工法の水平力に対する二重管杭の検討フローを図一3に、応力解析モデル（以降、設計モデル）を図一4に示す。応力解析には、本杭および外管の径・長さ・杭種等を反映した曲げ剛性を有する線材（はり要素）に、地盤を水平ばねと仮定したはり-ばねモデルによる設計モデルを用いる。二重管内については、施工時に充填されるソイルセメントを水平ばね（以下、管内ばね）として考慮する。

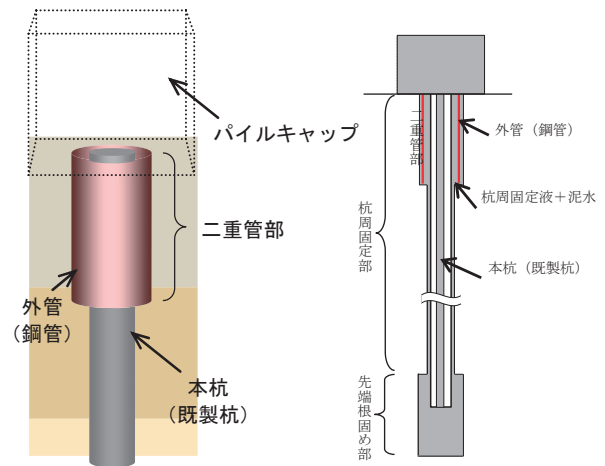
ソイルセメントは泥水と杭周固定液を攪拌・混合したもので、その性状は地盤等の影響を受けて変動して一律の強度範囲を設定することが困難であることから、適用範囲には二重管内のソイルセメントに関して規定していない。

管内ばねは、二重管内のソイルセメントの強度範囲や、変形係数と一軸圧縮強さ（ q_u ）の関係の変動を考慮した複数ケースのばね値を設定し、二重管内ソイルセメントの性状の変動が本杭・外管の応力に及ぼす影響を考慮する。また、施工時に生じる可能性のある相対杭心ずれに関しても、適切に設計段階から考慮し、管内ばねの設定に反映させる。

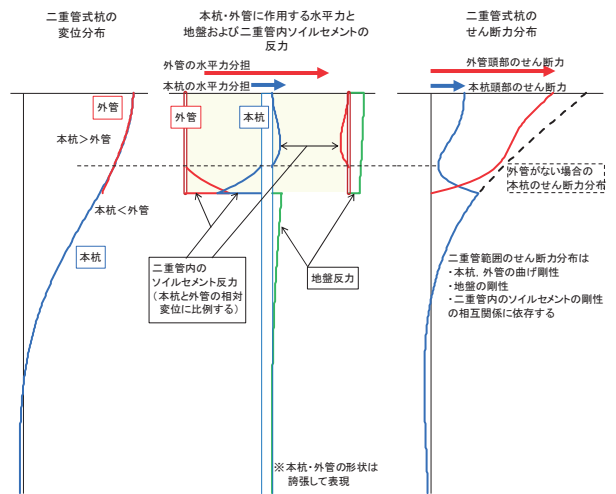
杭頭部は、固定条件あるいは基礎梁を適切にモデル化し、本杭と外管の頭部は同一変位条件とする。地盤は多層地盤とし、非線形性を考慮する。また、液状化が想定される地盤では、その影響を適切に考慮して設計を行う。

§4. 管内ばねの変動要因に関する検討

本工法の応力解析に用いる管内ばねは、前述した様に二重管内のソイルセメントの強度範囲や、変形係数と一



図一 工法概要



図二 本杭と外管の水平力分担の概要

表一 本杭と外管の径の組合せ

外管径 d_o (mm)	本杭径 d_i (mm)	本杭径 d_i (mm)									
		400	450	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
700	700	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-
800	800	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-
900	900	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
1000	1000	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-
1100	1100	-	-	○	○	○	-	-	-	-	-
1200	1200	-	-	-	○	○	○	-	-	-	-
1300	1300	-	-	-	-	○	○	○	-	-	-
1400	1400	-	-	-	-	-	○	○	○	-	-
1500	1500	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○
1600	1600	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○

軸圧縮強さの関係による影響を受ける。また、本杭と外管の間隔が異なることによっても、管内ばねは影響を受けるため、3章で示した設計法を構築するにあたり、ソイルセメント強度や変形係数、本杭と外管の相対杭心ずれ、本杭と外管の傾斜が、本杭と外管の応力にどの程度影響を及ぼすのかについて、複数の CASE を設定して解析的に検討を行った。本章では、その結果の一部⁴⁾を報告する。

共通解析条件を表二に示す。本報では、本杭径と外管径の異なる 2 つの CASE について示す。CASE-A は、本杭径が 400 mm、外管径が 700 mm、CASE-B は本杭径が 900 mm、外管径が 1,200 mm である。本杭の杭種は、解

析の単純化のため両 CASE ともに全長で SC 杭とし、杭長は 40 m で同一とした。外管長は、両 CASE ともに外管径の 2.5 倍とし、CASE-A では 1,800 mm、CASE-B では 3,000 mm とした。また、外管の厚さについては、共通で 12 mm とした。検討に用いる地盤についても、解析の単純化のため一様地盤とし、 N 値 = 1 の地盤を想定した。地盤の非線形性は、基礎指針⁶⁾の方法（変位 10 mm から非線形性考慮）で考慮した。解析に用いるモデルは、はりばねモデル（図-4）とした。解析では、杭頭部に CASE-A では 200 kN、CASE-B では 300 kN を載荷し検討を行った。

管内ばね値 (k_s) は、既報¹⁾に示される二重管部のソイルセメントの q_u - E_{50} 関係を参考に設定した変形係数 (E_{50}) と、本杭と外管の間隔（以降、管内距離： 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。

4-1 ソイルセメント強度による影響

まず、ソイルセメント強度の違いによる影響について示す。本検討で想定したソイルセメントの一軸圧縮強度は、 $q_u = 0.5 \sim 3.0 \text{ N/mm}^2$ の範囲である。なお、本節で示す検討結果には、相対杭心ずれの影響は考慮していない。

検討結果の一覧を表-3 に、CASE-A の曲げモーメント・せん断力の深度方向分布を図-5 に示す。なお、表中の各 CASE 名に関する記号の意味に関しては、表下部に示す通り（以下、4 章中の表でも同様）である。また、表中に示し比較する値は、二重管部内での応力最大値（絶対値表示。以下、4 章中で同様）である。本節では、 $q_u = 0.5 \text{ N/mm}^2$ の CASE を基準として比較を行った。

表-3 を見ると、CASE-A の本杭では $q_u = 0.5 \text{ N/mm}^2$ の場合とその他のソイルセメント強度で比較すると、曲げモーメントで最大約 4%、せん断力で最大約 20% の違いが見られた。外管についても、曲げモーメントで最大約 10%、せん断力で最大約 6% の違いが見られた。一方、CASE-B の本杭では $q_u = 0.5 \text{ N/mm}^2$ の場合とその他のソイルセメント強度で比較すると、曲げモーメントで最大約 4%、せん断力で最大約 1% の違いが見られた。外管についても、曲げモーメントで最大約 3%、せん断力で最大約 8% の違いが見られた。

4-2 相対杭心ずれによる影響

次に、相対杭心ずれの影響について示す。相対杭心ずれの影響を検討する際に、比較用として用いた検討モデル（以降、検証モデル）の概要を図-6 に、相対杭心ずれの模式図を図-7 に示す。施工上の理由などで、相対杭心ずれが生じると例えば図-7 に示すような状態となり、 L_s の値が載荷前面側と後面側で異なる状態となって、 k_s の値も異なってくる。検証モデルは、載荷前面側と後面側で k_s の値を変化させることができるモデルである。

本検討では、本杭と外管が図-7 に示す X、Y 軸上でそれぞれ 25 mm 近づく方向にずれた場合を想定し、その際

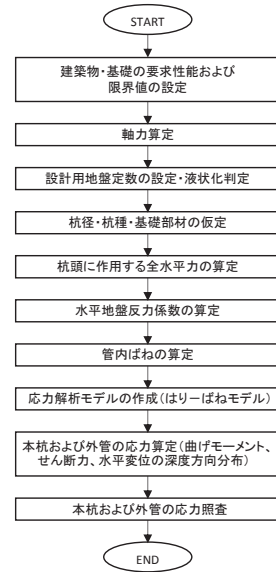


図-3 検討フロー

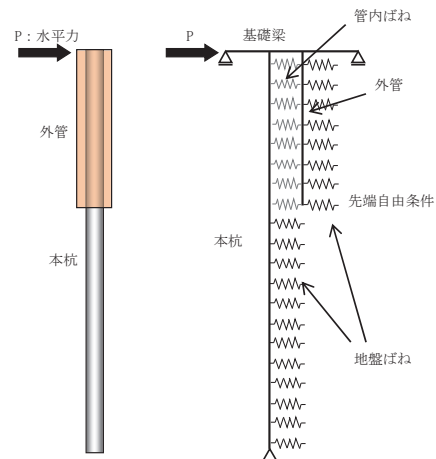


図-4 解析モデル（一組の二重管杭モデルの例）

表-2 共通解析条件

		CASE-A	CASE-B
本杭仕様	本杭径 (mm)	400	900
	本杭長 (m)	40	40
外管仕様	外管径 (mm)	700	1,200
	外管長 (m)	1.8	3.0
載荷荷重 (kN)		200	300
地盤条件		N = 1 (一様地盤)	

表-3 検討結果（ソイルセメント強度）

CASE	q_u (N/mm^2)	本杭				外管			
		M (モーメント)		Q (せん断力)		M (モーメント)		Q (せん断力)	
		(kNm)	比率 (%)	(kN)	比率 (%)	(kNm)	比率 (%)	(kN)	比率 (%)
A-	0.5-N-N	205	-	118	-	388	-	291	-
	1.0-N-N	209	2.0	120	1.7	418	7.7	290	-0.3
	2.0-N-N	211	2.9	124	5.1	425	9.5	275	-5.5
	3.0-N-N	213	3.9	141	19.5	422	8.8	287	-1.4
B-	0.5-N-N	984	-	292	-	1136	-	496	-
	1.0-N-N	972	-1.2	293	0.3	1165	2.6	457	-7.9
	2.0-N-N	944	-4.1	288	-1.4	1130	-0.5	467	-5.8
	3.0-N-N	942	-4.3	289	-1.0	1106	-2.6	498	0.4

[凡例] (CASE 名前)-(ソイルセメント強度)-(杭心ずれの有無)-(傾斜の有無)
無 : N 無 : N

に L_s が一番狭くなる・広がる方向（斜め 45° 方向）に荷重が作用した場合を想定して検討を行った。

検討結果を表-4 に示す。なお、本節では $q_u = 0.5 \text{ N/mm}^2$ の場合を代表して示す。CASE-A の本杭では、相対杭心ずれがない場合と比較して、曲げモーメントで最大約 2%、せん断力で最大約 1% の違いが見られた。外管でも、曲げモーメントで最大約 8%、せん断力で最大約 5% の違いが見られた。一方、CASE-B の本杭では、相対杭心ずれがない場合と比較して、曲げモーメントで最大約 1% の違いが見られ、せん断力ではその違いが 1% 未満であった。外管についても、曲げモーメントで最大約 5%、せん断力で最大約 1% の違いが見られた。

4-3 傾斜による影響

最後に、傾斜による影響について示す。傾斜に関する模式図を図-8 に示す。本工法は、深度方向で本杭と外管を結合している訳では無いため、施工管理値以内（本杭・外管ともに、 $1/100 \text{ rad}$. 以内の傾斜）で施工したとしても、図-8 に示す様な状況になる可能性も考えられる。

本検討では、図-8 中に示す 2 つの傾斜パターンに関する影響について検討を行った。杭頭部において、4-2 節に示した相対杭心ずれが生じ、合わせて傾斜も生じて載荷前面側の L_s が、広がる場合と、その逆の場合である。傾斜については、本杭と外管で逆方向に $1/100 \text{ rad}$. の傾斜が生じた場合を想定し、深度方向に 0.1 m 刻みで異なる L_s を設定した。検討には、図-6 に示す検証モデルを用いた。

検討結果を表-5 に示す。なお、本節においても $q_u = 0.5 \text{ N/mm}^2$ の場合を代表して示す。CASE-A の本杭では、相対杭心ずれのみで傾斜が無い場合と比較して、曲げモーメントで最大約 1%、せん断力で最大約 2% の違いが見られた。外管でも、曲げモーメントで最大約 7%、せん断力で最大約 4% の違いが見られた。一方、CASE-B の本杭では、相対杭心ずれのみで傾斜が無い場合と比較して、曲げモーメントで最大約 1% の違いが見られ、せん断力ではその違いが 1% 未満であった。外管についても、曲げモーメントで最大約 4%、せん断力で最大約 2% の違いが見られた。

4-4 検討結果のまとめ

検討の結果、ソイルセメント強度、相対杭心ずれ、傾斜の影響により、本杭および外管の応力に変動が生じることが分かった。よって、管内ばねの設定の際には、各因子の影響を適切に反映することとした。

§ 5. 試設計

5-1 設計概要

本工法の効果を確認するため、試設計を行った。結果を以下に示す。

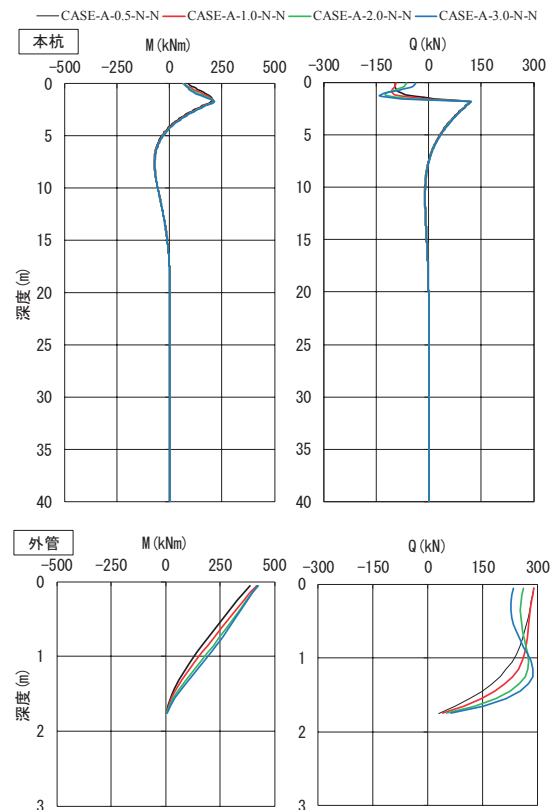


図-5 曲げモーメント・せん断力深度分布 (CASE-A)

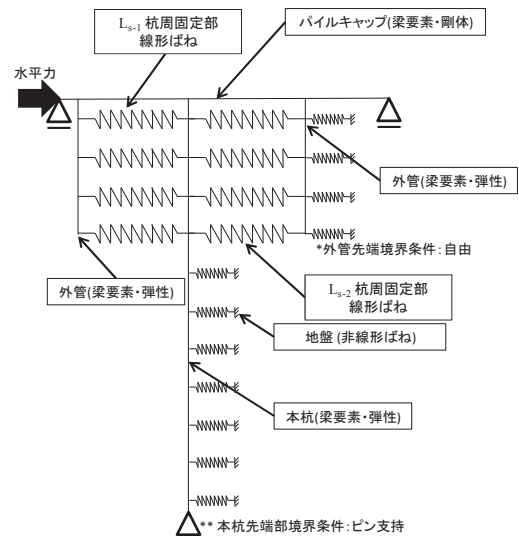


図-6 検証モデルの概要

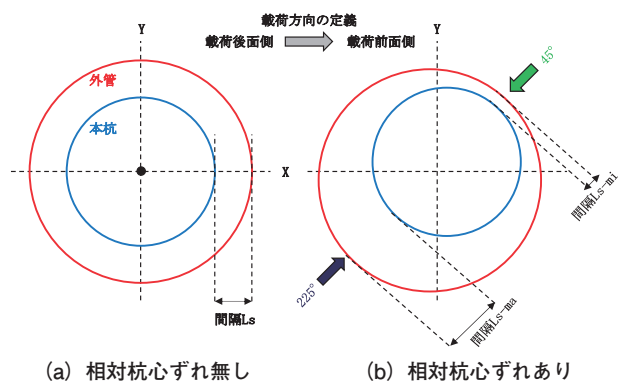


図-7 相対杭心ずれの模式図

地盤条件を図-9に、対象建物の伏図を図-10に示す。対象建物は、鉄筋コンクリート造の地上6階建ての共同住宅とした。杭頭レベルは設計GL-2.26mで、支持層を設計GL-35m以深の細砂層とし、支持層への根入れ長も考慮して杭長は34.0mとした。上部構造物からの設計用慣性力は19,400kNとし、当該慣性力にパイルキャップの重量を考慮して杭検討用の水平力を算定した。また、設計は設計モデルを用いて行った。

本報では、図-10中に示すP2の杭に着目して比較を行った。P2の設計用軸力は、長期で7,074kN、短期で圧縮側11,103kN、引張側1,724kNである。本杭径と外管径の組合せについて、今回の試設計では杭頭接合部の納まりにも配慮して、外管径を本杭径+400mmとして設計を行った。外管長は、別途実施した本杭のみの事前解析結果より、第一曲げモーメントゼロ点深さが設計GL-7m（杭頭レベルから約5m）付近となったことから外管長=5.0mに設定した。なお、当該長さは外管長≥外管径×2.5倍の規定を満足している。設計上想定するソイルセメント強度は、そのばらつきも考慮して0.5～3.0N/mm²を想定し、変形係数は文献¹⁾に示す関係性を参考に算定した。また、設計では本杭と外管の相対杭心ずれ(X, Y軸上で50mmの相対杭心ずれが生じた場合の、斜め45°方向の相対杭心ずれとして75mm)も考慮した。

今回の試設計では、本工法の効果について比較検討するため、諸条件を同一とした在来工法（プレボーリング工法）の設計も行ったので、次節で結果を併記して示す。また、本工法および在来工法ともに、各部材の検定比（応力/許容応力度）が同水準となるように設計を行った。

5-2 設計結果の比較

曲げモーメント・せん断力・変位の深度分布を図-11に、定まった杭仕様を表-6に示す。なお、図-11中には短期許容荷重（軸力依存があるものは、最小値）も併記して示す。

図-11を見ると、本工法を採用することで二重管部の本杭の曲げモーメントおよびせん断力が、在来工法と比較して大きく低減（設計用曲げモーメントで約60%程度、

設計用せん断力約50%程度）しており、本工法の効果を確認することができた。また、杭頭変位に関しても在来工法と比較して約6mm（約10%）程度低減しており、杭頭変位抑制の観点から、本工法の採用が建物全体の耐震安全性の向上につながることも確認できた。

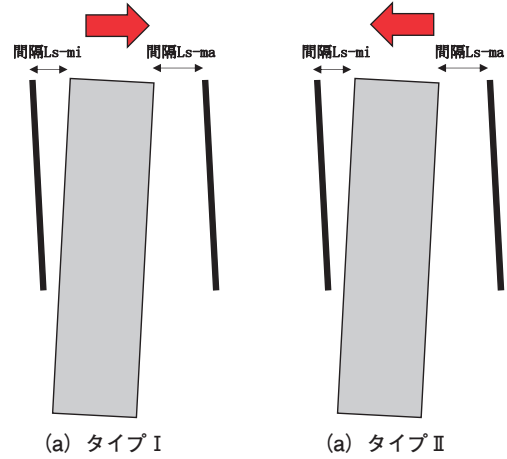


図-8 傾斜の模式図

表-5 検討結果（傾斜）

CASE	管内距離 上段(前面側) 下段(後面側) (mm)	本杭				外管			
		M(モーメント) (kNm)	比率 (%)	Q(せん断力) (kN)	比率 (%)	M(モーメント) (kNm)	比率 (%)	Q(せん断力) (kN)	比率 (%)
A-	0.5-45-N 209 67	209	-	120	-	420	-	296	-
	0.5-45-I >209 67>	206	-1.4	118	-1.7	391	-6.9	293	-1.0
	0.5-225-N 67 209	203	-	117	-	359	-	278	-
	0.5-225-II 67> >209	205	1.0	118	0.9	385	7.2	288	3.6
B-	0.5-45-N 209 67	972	-	293	-	1187	-	489	-
	0.5-45-I >209 67>	986	1.4	292	-0.3	1144	-3.6	500	2.2
	0.5-225-N 67 209	994	-	291	-	1089	-	495	-
	0.5-225-II 67> >209	983	-1.1	292	0.3	1127	3.5	490	-1.0

[凡例] (CASE名前)-(ソイルセメント強度)-(杭心ずれの有無)-(傾斜の有無)
無:N or 載荷方向 無:N or 傾斜タイプ

表-4 検討結果（相対杭心ずれ）

CASE	管内距離 上段(前面側) 下段(後面側) (mm)	本杭				外管			
		M(モーメント) (kNm)	比率 (%)	Q(せん断力) (kN)	比率 (%)	M(モーメント) (kNm)	比率 (%)	Q(せん断力) (kN)	比率 (%)
A-	0.5-N-N 138 138	205	-	118	-	388	-	291	-
	0.5-45-N 209 67	209	2.0	120	1.7	420	8.2	296	1.7
	0.5-225-N 67 209	203	-1.0	117	-0.8	359	-7.5	278	-4.5
B-	0.5-N-N 138 138	984	-	292	-	1136	-	496	-
	0.5-45-N 209 67	972	-1.2	293	0.3	1187	4.5	489	-1.4
	0.5-225-N 67 209	994	1.0	291	-0.3	1089	-4.1	495	-0.2

[凡例] (CASE名前)-(ソイルセメント強度)-(杭心ずれの有無)-(傾斜の有無)
無:N or 載荷方向 無:N

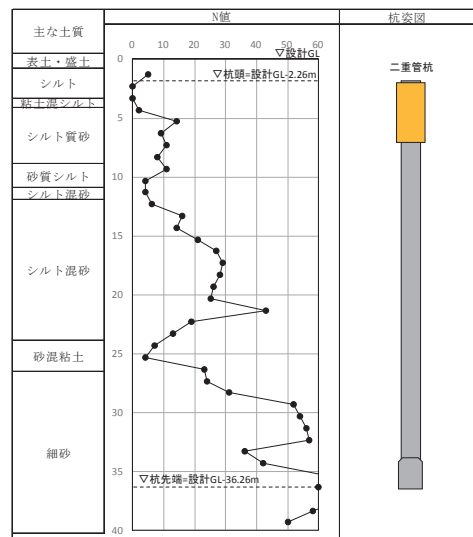


図-9 試設計の地盤条件

杭仕様に関して、表-6を見ると本工法を採用し二重管部の本杭の応力が低減された効果により、本杭径を在来工法と比較して200mm縮小することが可能となった。本報では、紙面の都合上1種類の杭（P2）に着目して示したが、前述した結果の傾向に関しては建物全体と同様であった。また、軸力に関する検討も別途行っており、本杭径を縮小した場合でも問題ないことを確認している。

§6. おわりに

既製杭の頭部に、本杭径より大径の外管を設置し、この外管に水平力の一部を負担させることで、本杭の水平力分担率を低減する本工法について、工法概要および適用範囲について述べた。また、ソイルセメント強度、相対杭心ずれ、傾斜の影響を確認し、管内ばねの設定の際には各因子の影響を適切に考慮することの必要性を示した。さらに、本工法の効果を確認するために試設計を行い、今回の設計条件においては、本工法を採用することで本杭（既製杭）を合理的に設計でき、かつ建物全体の耐震安全性も向上させる効果があることを示した。

なお、本工法は西松建設、安藤・ハザマ、熊谷組、トヨーアサノ、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。

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) 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（中国），pp. 475-476, 2017. 8
- 3) 新井他：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8 3次元有限要素法によるシミュレーション解析，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp. 477-478, 2017. 8
- 4) 遠藤他：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9 管内ばねを変動させたシミュレーション解析，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp. 479-480, 2017. 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) 建築基礎構造設計指針（2001），日本建築学会，2001. 10

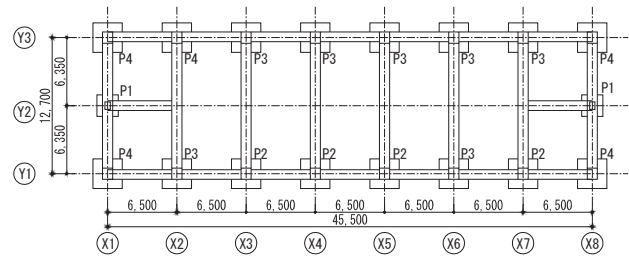


図-10 検討建物の伏図（杭符号併記）

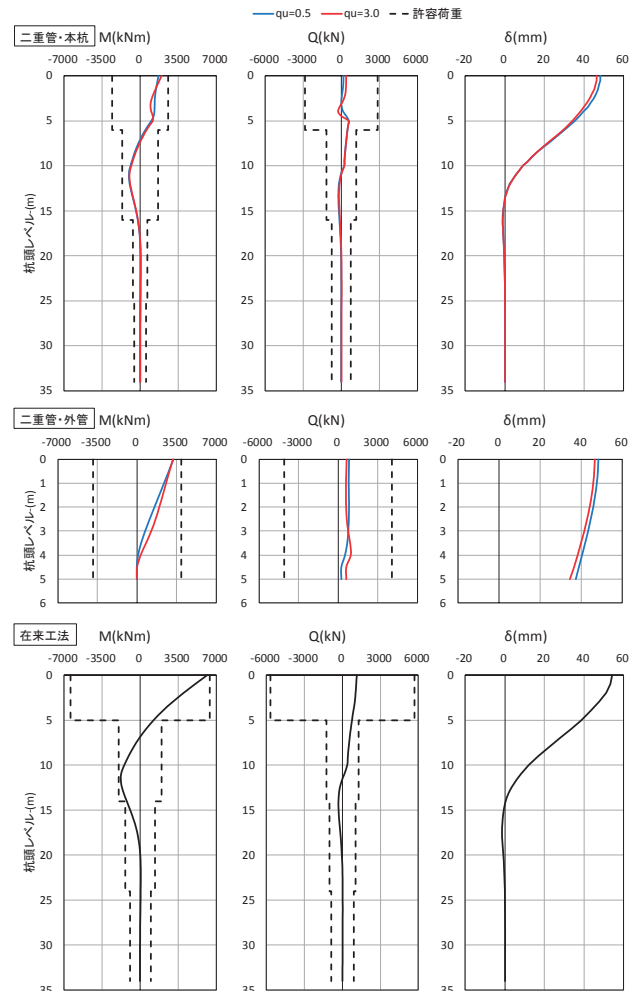


図-11 曲げモーメント・せん断力・変位分布

表-6 杭仕様一覧

杭：P2	二重管式 既製コンクリート杭工法		在来工法 (プレボーリング工法)
	上杭	杭径 900 mm 杭種 SC杭 (Fc105,SKK490) t=12 杭長 6.0 m	杭径 1100 mm 杭種 SC杭 (Fc105,SKK490) t=19 杭長 5.0 m
中杭1	杭径 900 mm 杭種 CPRC杭IV種 (Fc105) 杭長 10.0 m	杭径 1100 mm 杭種 PHC杭C種 (Fc105) 杭長 9.0 m	
中杭2	杭径 900 mm 杭種 PHC杭A種 (Fc105) 杭長 9.0 m	杭径 1000-1100 mm 杭種 ST杭B種 (Fc105) 杭長 10.0 m	
下杭	杭径 900-1000 mm 杭種 ST杭A種 杭長 9.0 m	杭径 1000-1100 mm 杭種 ST杭A種 (Fc105) 杭長 10.0 m	
外管	杭径 1200 mm 杭種 SKK400 t=12 杭長 5.0 m	-	