

場所打ちコンクリート杭用杭頭半固定工法の開発

－キャプテンパイル工法の開発－

Development of Semi-rigid Head Connection Method for Cast-in-place Concrete Pile

- Development of CAPTEN PILE Method -

舟木秀尊* 秦 雅史* 鈴木真吾**

要 旨

近年、杭基礎の応力低減や損傷軽減を目的として、杭頭の固定度を緩和する杭頭接合法が数多く提案され、実用化されている。キャプテンパイル工法は、杭頭部にプレキャスト製のリングを被せることで杭頭接合部を半固定とする工法である。杭頭接合部を半固定とすることで、地震時における杭頭回転を容易にし、杭材の損傷を軽減することができる。今回、載荷試験を実施して、杭頭半固定接合部の構造特性を確認するとともに、設計モデルの妥当性を検証した。また、実際の工事における原位置試験を通じて、本工法の施工法を検証し、施工性に優れていることを確認した。

キーワード：場所打ちコンクリート杭、杭頭、半固定接合、回転特性、載荷試験

1. まえがき

兵庫県南部地震において杭基礎構造物の杭頭部被害が発生したことを教訓に杭頭接合部を剛接合とする従来の工法を見直し、杭頭を半固定とする工法が注目されている。このような状況の中、鹿島建設が既に実用化しているキャプリングパイル工法¹⁾をベースにして、引張抵抗機能を付加し、適用杭径の拡大、杭頭接合部の断面縮小による効率的な半固定化の実現を盛り込んだキャプテンパイル工法を10社の共同研究によって開発した。

本工法は場所打ちコンクリート杭に適用し、杭頭の曲げモーメントを低減でき、在来工法に比べて杭体の損傷が少なく耐震性が向上する。また、杭頭モーメントの低減により杭や基礎梁の断面が小さくでき、コンクリート量・鉄筋量の削減が図れる。

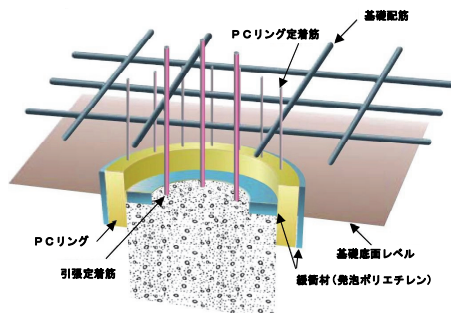


図-1 工法の構成

本報告では、工法の概要、開発のために実施した各種試験および設計法の概要について報告する。

2. 工法の概要

2.1 構成

工法の構成を図-1に、在来工法との比較を図-2に示す。本工法はプレキャスト製のリング（以下：PCリング）を杭頭にかぶせて杭と基礎を接合し、杭頭半固定を実現している。地震時に生じる上部構造からのせん断力はPCリングを介して杭に伝達される。大口径の杭を効果的に半固定状態とするために、杭頭には断面を縮小した絞りを設けることを標準とし、絞りはドーナツ状の緩衝材を設置して成形する。杭に生じる引張力には、杭頭中央部に引張定着筋を配置することで対応する。

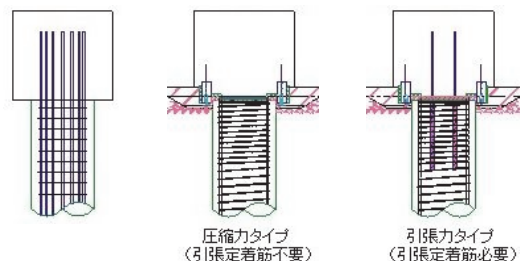


図-2 在来工法との比較

*技術研究所 **東京支社建築工務部

2.2 施工手順

本工法の標準的な施工フローを図-3に示す。本工法特有の作業として、鉄筋かごを組立てる際に、引張定着筋を挿入するためのシースと杭頭部せん断補強筋（ウルボンスパイラル）をあらかじめ設置し、杭鉄筋を建て込む。コンクリートを打設して硬化した後、余盛り部コンクリートのはつりと撤去作業を行う。その際、杭天端外周部をPCリングが納まるようにはつり、レベル精度に留意して捨てコンクリートを敷設する。PCリングは天端整形後の杭心に合わせて設置し、PCリングの下端に合わせて緩衝材を巻き付ける。次にシース内の洗浄および洗浄水の吸引を行う。モルタルをシース内に充填し、引張定着筋をシース内に挿入する。引き続きモルタルを杭頭に充填し、天端レベルを調整する。モルタルが硬化した後、杭頭部の緩衝材（杭頭絞り部成形用）を設置する。その後は、PCリング外周部に捨てコンクリートを打設し、パイルキャップ部および基礎部の工事を行う。

施工上の品質管理や施工法を確認するために、5現場にて実大施工実験を行った。その際の杭鉄筋の建て込み状況を写真-1に、杭頭接合部の施工状況を写真-2に示す。各工程とも施工基準に規定する施工精度を満足し、施工性の良い杭頭半固定を構築することが確認できた。



写真-1 杭鉄筋の建て込み状況



写真-2 杭頭接合部の施工状況

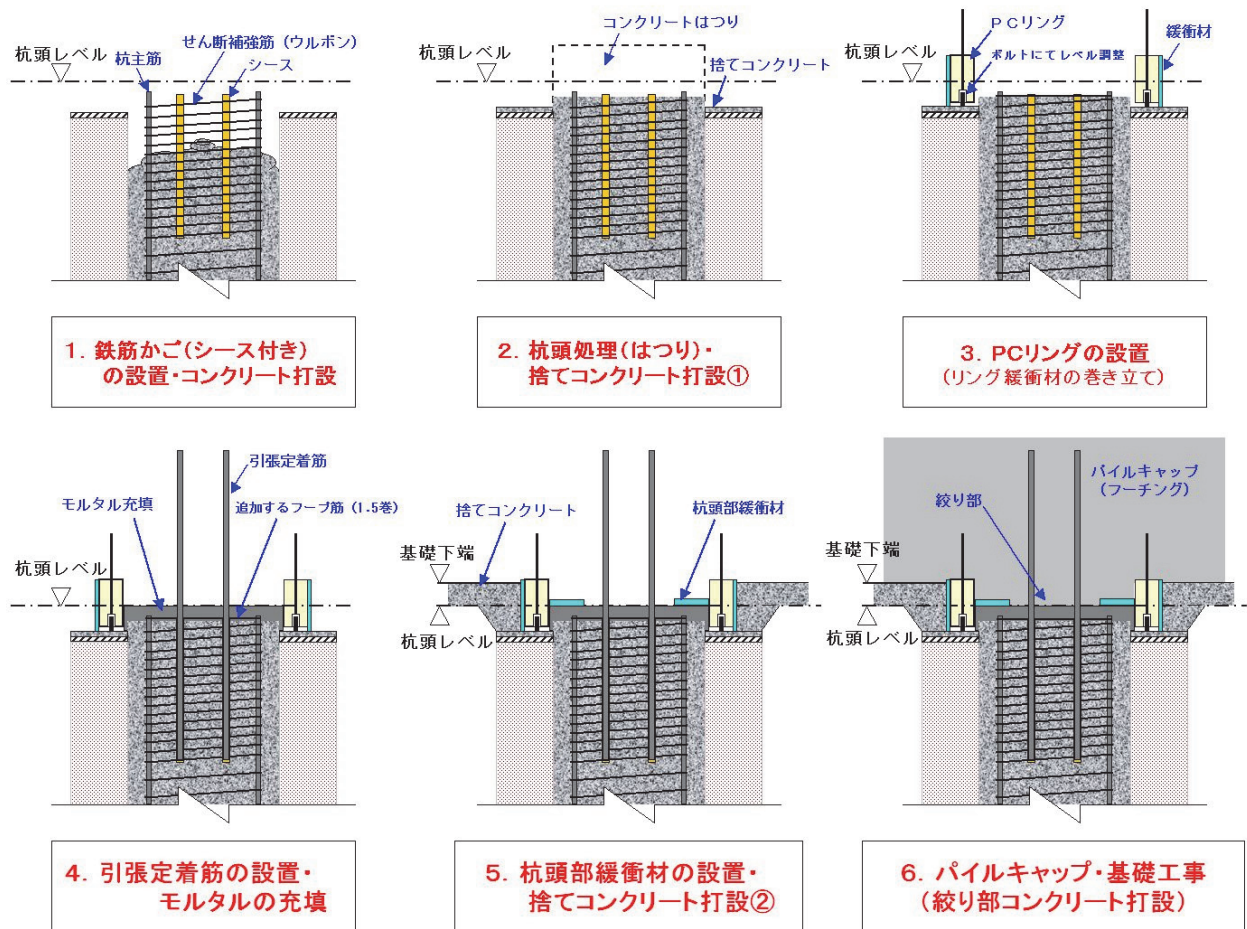


図-3 施工手順 (引張定着筋：シースタイプ)

3. 構造性能確認実験

表-1 試験体一覧 (接合部圧縮実験)

No.	パラメータ	コンクリート強度	杭頭部モルタル強度	絞り部高さ (mm)	拘束筋有無	絞り部径 / 杭径	絞り部径 / 絞り部高さ	偏心量 (mm)
0	無筋、鋼板なし	Fc24	Fc50	10	なし	0.7	28	0
1	基準							140
2	偏心载荷							0
3	拘束筋							0
4	杭頭部モルタル強度							0

3.1 接合部圧縮実験

a. 概要

本工法の接合部は、杭天端にドーナツ状の緩衝材(発泡ポリエチレン)を設置して杭径断面を杭頭部に

において絞ることにより、杭頭の固定度をより低減させる効果がある。杭頭半固定接合部の絞り部について構造性能を確認するために圧縮実験を行った。試験体数は表-1に示す5体で、実験パラメータは、杭頭モルタル強度、絞り部を補強する拘束筋の有無、および载荷位置の偏心量とし、無筋で鋼板がない試験も行った。基準の試験体 (No. 1) を図-4に示す。杭頭半固定接合部にはPCリングを模擬して鋼板を設置している。また、接合部には厚さ10mmの発泡ポリエチレンを敷設して絞り部を設けている。コンクリートの力学的特性を表-2に、鋼材の力学的特性を表-3に示す。加力方法を図-5に示す。油圧ジャッキから球座を介して試験体が破壊するまで载荷した。载荷位置は No. 0、No. 1、No. 3、No. 4 については試験体の中心位置とし、No. 2 については中心から一方向に140mm偏心させた位置とした。なお、偏心载荷については、試験体の損傷と共に球座に回転が生じたため、最大耐力に達する前に除荷した。試験では、载荷荷重、試験体の変形、鋼板のひずみ、絞り部内部のひずみ、拘束筋のひずみについて計測した。

b. 実験結果及び考察

圧縮強度の実験結果一覧を表-4に、応力度(载荷軸力/絞り部面積)とひずみ(試験体全体)関係を図-6に示す。No. 1、No. 3、No. 4 は、最大荷重を絞り部面積で除した値が56.2~59.0 N/mm²となり、テストピースの圧縮強度20.3 N/mm²に対して2.80~2.94倍の値となった。絞り部の支圧効果²⁾に加えて、補強筋の効果で圧縮強度が上昇していると考えられる。No. 2の偏心载荷の実験では最大耐力まで载荷できなかったが、最大荷重を絞り部面積で除した値が44.3 N/mm²となり、テストピースの圧縮強度に対して2.20倍の値まで確認した。絞り部を拘束筋で補強したNo. 3と杭頭部モルタル強度を低めにしたNo. 4については、基準のNo. 1と比較して圧縮強度に殆ど影響がないことを確認した。無筋コンクリートのNo. 0では、最大荷重を絞り部面積で除した値が27.3 N/mm²となり、テストピースの圧縮強度に対して1.34倍の値となった。試験体の絞り部まわりには、No. 0を除いてPCリングを模擬した鋼板を巻いており、縦ひび割れの発生に伴ってコンクリー

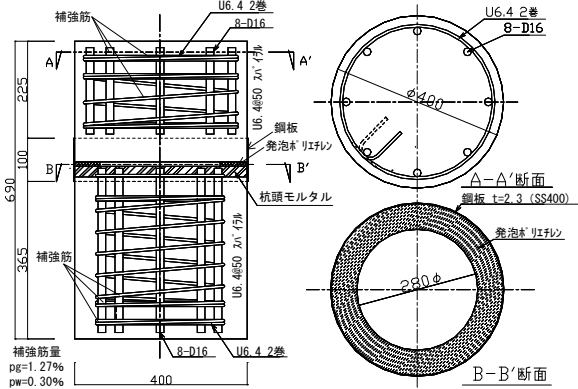


図-4 試験体図 (No. 1)

表-2 コンクリートの力学的特性 (接合部圧縮実験)

No.	部位	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ³ N/mm ²)	
0	杭部コンクリート	20.3	24.0	
1, 2, 3, 4		20.1	24.0	
1, 2, 3		杭頭モルタル	59.1	27.7
4			43.5	21.0

表-3 鋼材の力学的特性 (接合部圧縮実験)

材料	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (10 ³ N/mm ²)	降伏ひずみ (%)
D16	341	491	177.9	0.192
PL2.3	283	351	191.0	0.148
U6.4	1460	1484	199.9	0.730

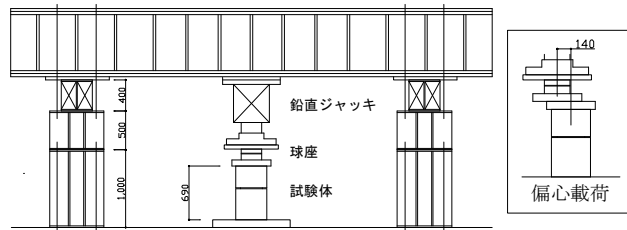


図-5 加力方法

表-4 実験結果一覧

No.	パラメータ	最大荷重 (kN)	最大荷重/絞り部面積 (N/mm ²)	コンクリート強度との比
0	無筋、鋼板なし	1678	27.3	1.34
1	基準	3600	58.5	2.91
2	偏心	(2726)*	(44.3)*	(2.20)*
3	拘束筋	3633	59.0	2.94
4	モルタル強度	3461	56.2	2.80

* No. 2試験は球座の回転が限界に達して除荷したため終局まで载荷していない

トが面外に拡がろうとするのを鋼板が拘束した効果によるものと推察される。破壊性状は縦ひび割れがパイルキャップ及び杭体で発生した後、横ひび割れが発生した。試験体はすべて杭体側の破壊によって終局に至った。実験後の破壊状況を写真-3に示す。杭体の補強筋がパイルキャップに比べて内側に配筋されている等によって、杭体かぶり部が割裂状に破壊した。その際、No.3においては杭体側の高強度せん断補強筋が破断した。

杭頭半固定接合部を模擬した試験体について圧縮実験を行った結果、コンクリート断面を絞った杭頭部は支圧効果や補強筋の効果によって十分な圧縮強度を有していることがわかった。

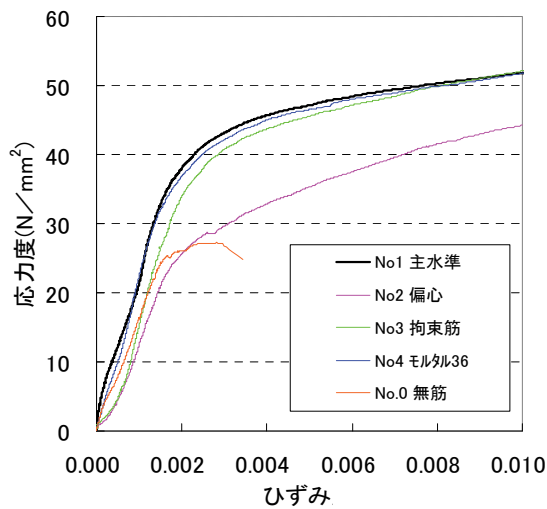


図-6 応力度-ひずみ関係

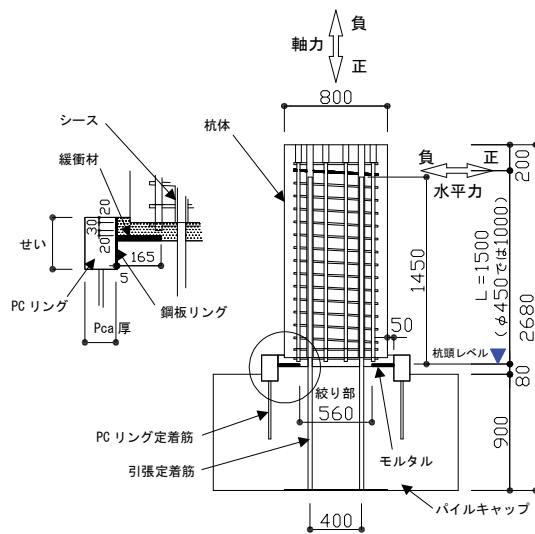


写真-3 試験後の破壊状況 (No.1)

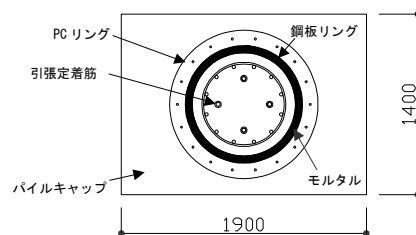
3.2 曲げせん断実験

a. 概要

杭頭半固定接合部の構造性能を確認するために曲げせん断実験を実施した。試験体一覧を表-5に示す。No.0は杭主筋をパイルキャップに定着した在来工法の試験体で、No.1~No.6は杭頭半固定接合の試験体である。試験体の一例を図-7に示す。パイルキャップの上に杭体が載っており、実際の杭頭接合部とは上下が逆である。使用材料であるコンクリートの力学的特性を表-6に、鋼材の力学的特性を表-7に示す。実験は杭に所定の軸力を作用させた状態で、水平力を正負交番漸増繰り返し載荷した。No.5とNo.6については、同じ試験体に対して軸力を大きくしていく載荷実験を計4回実施した。



a) 立面



b) 平面

図-7 試験体 (No.1、No.2)

表-5 試験体一覧 (曲げせん断実験)

試験体 No.	杭			絞り部	PCリング				引張定着筋	シース	軸力
	径 (mm)	主筋 (mm)	帯筋 (mm)		径 (mm)	PCa厚 (mm)	せい (mm)	鋼板リガ*厚 (mm)			
0	450	12-D16	U9.0@50	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし	-481
1	800	12-D25	U12.6@100	560	120	200	4.5	18-D16	4-D32 (SD490)	#1055	-700
2	800	12-D25	U12.6@100	560	120	200	4.5	18-D16	4-D32 (SD490)	#1055	+1357
3	450	12-D16	U9.0@50	320	90	150	3.0	12-D13	8-D22 (SD345)	なし	-481
4	450	12-D16	U9.0@50	320	90	150	3.0	12-D13	8-D22 (SD345)	なし	+1074
5	450	12-D16	U9.0@50	320	90	150	3.0	12-D13	8-D22 (SD345)	なし	-192~-769
6	450	12-D16	U9.0@50	320	90	150	3.0	12-D13	8-D22 (SD345)	なし	+429~+1718

b. 実験結果及び考察

杭頭曲げモーメント M_{PT} と杭頭回転角 θ_{PT} の関係(No.1~No.4)を図-8に示す。杭頭回転角は接合部近傍の鉛直変位量と計測点長さから算出した。引張定着筋降伏時、杭主筋降伏時、絞り部コンクリート圧縮応力 $0.85\sigma_B$ 時(σ_B :コンクリート圧縮強度)及び最大杭頭曲げモーメント時の各点を図中にプロットした。破壊性状については、引張軸力を載荷したNo.1、No.3では、引張軸力や曲げによる杭体の横ひび割れが発生後、モルタルとPCリング間で剥離が生じ、PCリングがひび割れ、引張定着筋が降伏した後、 θ_{PT} が急激に増加した。これに対して、圧縮軸力を載荷したNo.2、No.4では、モルタルとPCリング間での剥離やPCリングのひび割れが杭体の横ひび割れに先行し、絞り部コンクリート圧縮応力が $0.85\sigma_B$ に達している。軸力比の高いNo.4では、引張定着筋の降伏に先行して絞り部コンクリートの圧縮応力が $0.85\sigma_B$ に達し θ_{PT} が増加し始めている。

試験終了後の状況(No.0、No.3)を写真-4に示す。在来工法であるNo.0は激しい杭頭損傷が見られるが、杭頭半固定接合であるNo.3はPCリングで回転しやすくなったことなどにより杭頭の損傷は軽微であった。

最大モーメントと杭頭軸力の関係(No.5、No.6)を図-9に示す。引張軸力下のNo.5は、最初の加力で引張定着筋が降伏したため、2回目の軸力(-385kN)を加えたケースで耐力が大きく低下したものの、以後の耐力低下は引張軸力増加に対応してわずかである。一方、圧縮軸力のNo.6は段階的に圧縮軸力を高くしたので、最大杭頭曲げモーメントの低下がなく、圧縮軸力増加に対応して耐力が若干増加した。

実験の結果、在来の工法より杭体の損傷が少なく、本工法が安定した回転性能を有することが確認できた。また、杭頭接合部の回転性能は、絞り部や引張定着筋で発揮されることが確かめられた。

表-6 コンクリートの力学的特性(曲げせん断実験)

部位	圧縮強度 σ_{cu} (N/mm ²)			弾性係数 E_c ($\times 10^3$ N/mm ²)		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小
杭体	33.6	31.1	27.3	30.5	28.7	26.8
PCリング	58.9	52.6	48.0	32.3	30.6	28.7
モルタル	54.9	54.1	53.5	26.5	26.0	25.4
パイルキャップ	38.1	36.1	33.4	32.6	30.1	27.3

表-7 鋼材の力学的特性(曲げせん断実験)

部位	呼び名	鋼種	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	弾性係数 E_s ($\times 10^2$ N/mm ²)
杭体主筋	D25	SD345	384	574	192.5
	D16	SD345	394	571	192.5
杭体帯筋	U12.6	SBPD1275/1420	1369	1500	215.4
	U9.0	SBPD1275/1420	1365	1474	204.6
引張定着筋	D32	SD490	528	707	198.3
	D22	SD345	400	582	192.7
鋼板リング	4.5	SS400	330	458	206.5
	3.0	SS400	380	483	208.1
PCリング帯筋	U9.0	SBPD1275/1420	1400	1484	206.7
PCリング帯筋	U7.1	SBPD1275/1420	1434	1501	212.4
PCリング帯筋	D16	SD390	448	624	193.1
定着筋	D13	SD390	446	620	191.7
パイルキャップ	D25	SD345	382	553	192.8

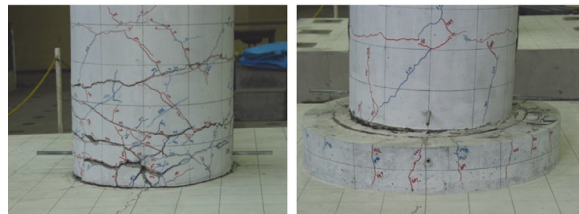


写真-4 試験後の損傷状況(No.0、No.3)

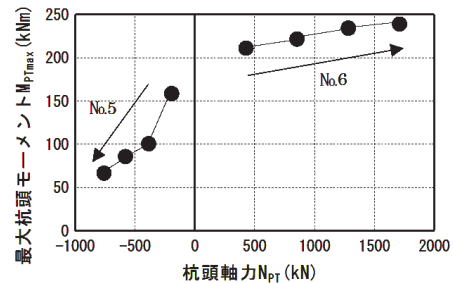


図-9 最大杭頭モーメントと杭頭軸力の関係(No.5、No.6)

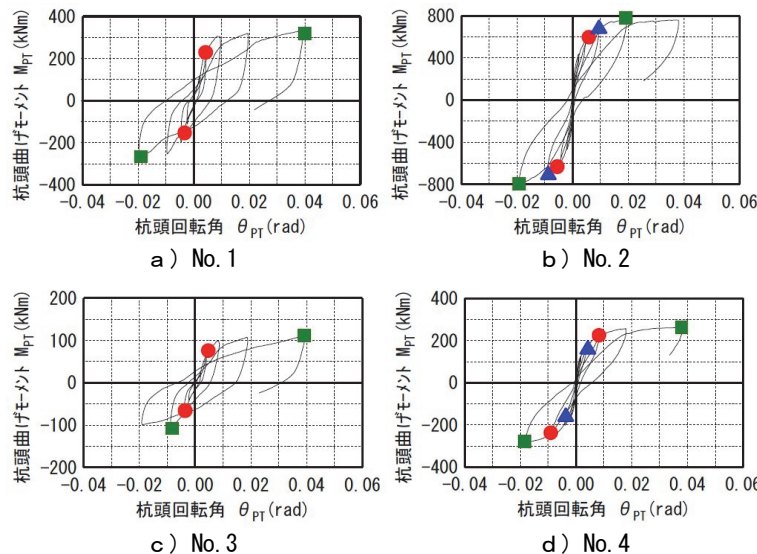
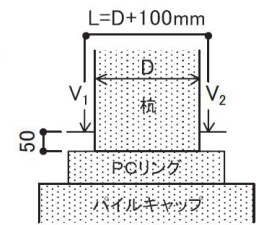


図-8 杭頭曲げモーメント-杭頭回転角関係



$$\theta_{PT} = (V_1 - V_2) / L$$

杭頭回転角の計算式

- 引張定着筋主筋降伏
- ▲ 絞り部コンクリートの圧縮応力 $0.85\sigma_B$
- 最大杭頭曲げモーメント

4. 設計法

杭頭接合部の設計フローを図-10に示す。また、杭頭モーメントと回転角の評価法を図-11に示す。離間時曲げモーメント (M_l) は、杭頭接合部の軸応力度と杭頭接合部の断面係数から算定する。初期回転剛性 (K_1) は杭体部分の回転剛性とPCリング内コンクリート及びパイルキャップ部分の回転剛性の累加で評価する。降伏時曲げモーメント (M_p) 及び終局時曲げモーメント (M_u) については、断面力の釣り合いとひずみ度の適合条件を考慮した塑性曲げ理論に基づいて算定する。

固定度と杭の曲げモーメント分布の関係を図-12に示す。杭頭部曲げモーメントと地中部曲げモーメントは固定度 0.41 の場合に等しくなる。合理的な杭配筋とするためには固定度のばらつきが極力小さくなるような杭頭接合部仕様とすることが必要となる。杭頭固定度とせん断力関係の例を図-13に示す。設計では、杭1本あたりの設計せん断力と軸力(圧縮・引張)に対応する杭頭固定度を求め、この固定度に基づく剛性比に従って杭のせん断力を再分配し、各杭の杭頭変位が同じとなるまで収束計算を行う。その後、杭頭変位・応力を求めて杭の断面算定を行い、PCリングのタイプを選択する。

5. まとめ

本工法は、以下の特長を有している。

- i. 杭頭の曲げモーメントが低減でき、杭材の損傷が在来工法に比べて少なく杭の耐震性が向上する
- ii. 基礎梁や杭の断面が小さくでき、コンクリート量・鉄筋量の削減が図れる
- iii. 掘削工事に伴う残土などの産業廃棄物を削減し、環境負荷を低減できる
- iv. 杭頭の納まりがシンプルで、杭頭はつり時に突出鉄筋もなく、施工が速くて簡単である

6. あとがき

今後、上記の特長をアピールし、場所打ちコンクリート杭の物件へ適用していきたい。なお、本開発は鹿島建設、奥村組、五洋建設、戸田建設、飛鳥建設、西松建設、長谷工コーポレーション、松井建設、三井住友建設、高周波熱錬による共同研究で実施した。

【参考文献】

- 1) 宮田、吉松ほか、「半固定杭頭接合法の開発 その5 杭頭接合部の構造性能確認実験」、日本建築学会大会梗概集、B-1、pp. 635-636、2003.9
- 2) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料、コンクリートの支圧強度(1)、pp. 90-97、1987

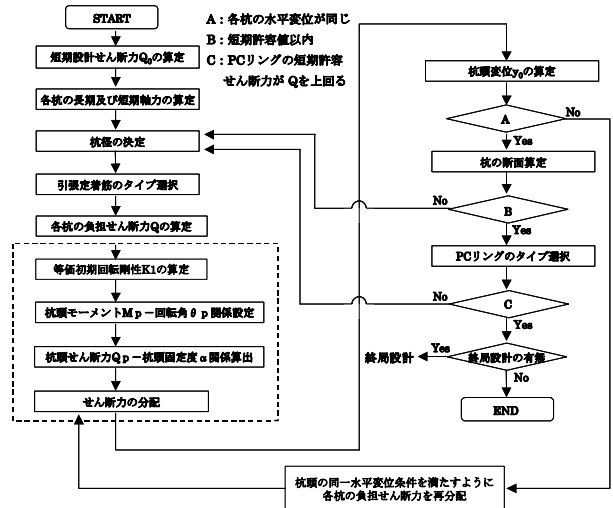


図-10 杭頭接合部の設計フロー

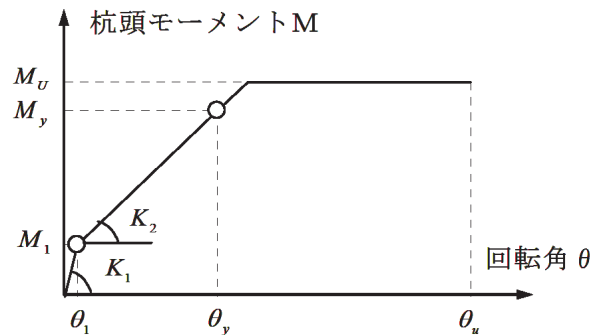


図-11 杭頭モーメントと回転角の評価法

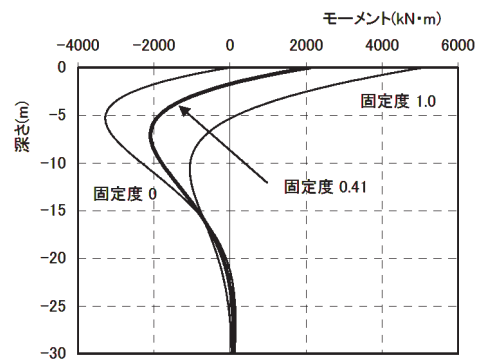


図-12 固定度と杭の曲げモーメント分布の関係

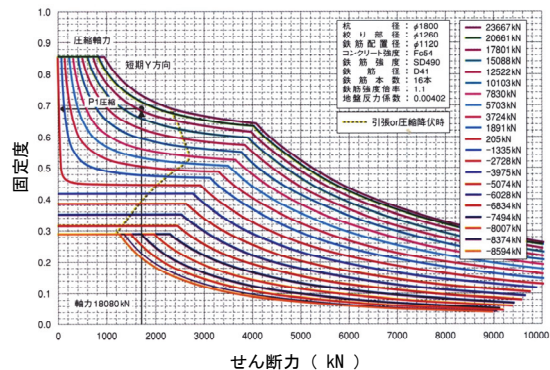


図-13 杭頭固定度-せん断力関係の例