

主筋を基礎に定着しない場所打ちコンクリート杭の構造性能

- 変動軸力を考慮した構造実験と実施適用例 -

安田 聡・川端一三・小室 努^{*1}・征矢 克彦^{*1}

Keywords : cast-in-place concrete pile, flexible connection of pile head, rotation of connection, high strength steel bar

場所打ちコンクリート杭、杭頭半剛接合、杭頭固定度、異形PC鋼棒

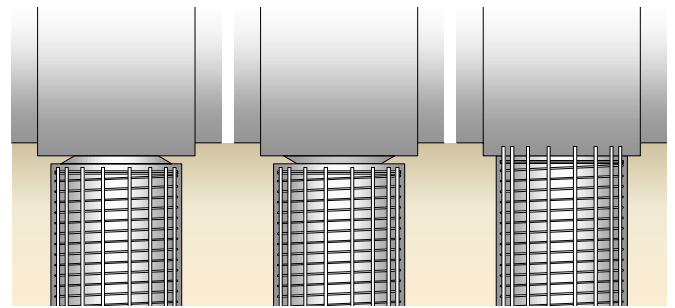
1. はじめに

従来、杭とパイルキャップの接合部は、杭主筋をパイルキャップに定着するなど剛接合を目指したものが主流であり、杭基礎の耐震設計においても、杭頭の境界条件を完全固定とするのが一般的であった。そのため、地震時には杭頭部に大きな曲げモーメントが発生し、それが杭のみならずパイルキャップや基礎梁の設計に対しても支配的要因になっていた。

しかし、杭頭を完全固定とするよりも回転を許した方が、地震時の杭頭モーメントは低減でき、基礎構造全体の耐震性向上を図れるとともに、これを積極的に設計に取り入れることによって、杭や基礎梁の合理化、およびこれにともなう掘削土量の削減など、大きなコストメリットが得られる可能性が高い¹⁾。

そこで当社では、杭の主筋をパイルキャップに定着させず、杭頭部の回転剛性と曲げモーメントを制御可能にした杭頭半剛接合構法を考案し、これまでに実用化を目的に各種構造実験を実施してきた。この杭頭半剛接合構法における杭頭接合部は、図-1に示すように、杭頭部の回転性能をさらに高めるため、杭頭部にテーパを設けて錘台形状とした「杭頭テーパタイプ」、パイルキャップ側に同様のテーパを設けた「基礎テーパタイプ」、テーパを設けずフラット形状とした「フラットタイプ」の3タイプがある。また、3タイプともに杭頭断面中央部に芯鉄筋を配することで、杭に引張軸力が作用する場合にも適用可能である。なお、本構法では杭の横補強筋に高強度異形PC鋼棒のスパイラル鉄筋を採用し、杭の変形能力を高めている²⁾。

既報³⁾では、この杭頭半剛接合構法の一定圧縮軸力下における構造実験により、杭頭部に作用する曲げモーメントは低減され、杭頭部の損傷を軽微に抑えることがで



(a) 杭頭テーパタイプ (b) 基礎テーパタイプ (c) フラットタイプ

図-1 杭頭半剛接合構法

Flexible connection of pile head

きることを明らかにした。本報では、変動軸力(引張軸力)および高圧縮軸力下における杭頭接合部の構造性能を把握するために実施した構造実験と実施プロジェクトへの本構法の適用例について報告する。

2. 実験計画

2.1 試験体

表-1に試験体一覧を、図-2に各試験体の杭頭形状を示す。図-3に試験体の配筋図例を示す。試験体は長さ3m、直径 $\phi 500\text{mm}$ の場所打ちコンクリート杭である。

試験体数は6体で、それぞれ杭頭形状を変化させた。No.1～No.4は、杭頭部の回転性能を高めるとともに杭頭部の損傷低減を図った「杭頭テーパタイプ」(No.1、No.2)および「基礎テーパタイプ」(No.3、No.4)である。杭軸部と杭頭接合面の断面積比は2:1とした。また、これらの試験体は、杭に変動軸力(引張軸力)が生じる場合や杭頭接合面のせん断伝達能力を高める場合を想定した芯鉄筋を有する試験体である。芯鉄筋は杭頭中央部に $\phi 180\text{mm}$ の円形状に配した。

No.5、6は杭と基礎を接するのみとした芯鉄筋のない試験体で、高圧縮軸力下における杭頭回転性能を把握す

*1 設計本部 構造グループ(原)

主筋を基礎に定着しない場所打ちコンクリート杭の構造性能

表-1 試験体一覧
List of specimens

試験体	杭形状	芯鉄筋	軸力制御	軸力(kN)	軸応力	杭頭形状
No.1	杭軸径 500mm	16-D13	変動 軸力	1924 ~ -999	$\sigma_o=10 \sim$ $-0.65 \sigma_{ty}$	杭頭テーパ -
No.2	接触面径 350mm			2886 ~ -1383	$\sigma_o=15 \sim$ $-0.90 \sigma_{ty}$	
No.3	主筋 28-D13 ($\rho_g=1.8\%$)			-1383: 載荷2	$-0.90 \sigma_{ty}$	基礎テーパ -
No.4	横補強筋 U5.1-@27 ($\rho_w=0.3\%$)			1924 ~ -999	$\sigma_o=10 \sim$ $-0.65 \sigma_{ty}$	
No.5	主筋 28-D13 ($\rho_g=1.8\%$)	-	一定 軸力	2886 ~ -1383	$\sigma_o=15 \sim$ $-0.90 \sigma_{ty}$	杭頭テーパ - 芯鉄筋なし
No.6	接触面径 500mm			2886	$\sigma_o=15$	
				192	$\sigma_o=1$	フラット 芯鉄筋なし
				962	$\sigma_o=5$	
				1924	$\sigma_o=10$	
				85	$\sigma_o=0$	

σ_o : 軸力 / 杭軸部面積 (N/mm²)

σ_{ty} : 芯鉄筋の降伏耐力

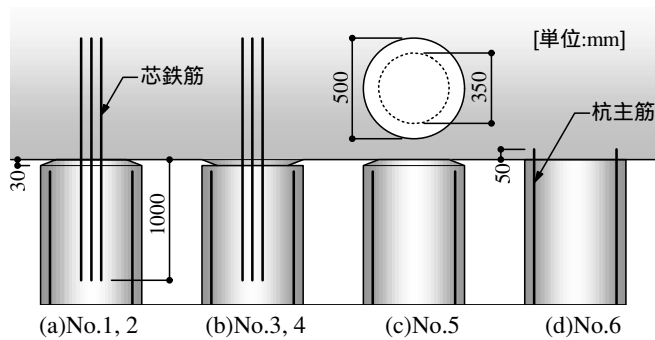


図-2 杭頭部の形状

Figure of pile head joint

る。No.5は「杭頭テーパタイプ」とした。No.6はテーパを設けない「フラットタイプ」とし、杭主筋を基礎側に50mmのみ込ませた。

2.2 使用材料および製作方法

表-2に使用した鉄筋の機械的性質を、表-3に実験時のコンクリート強度を示す。いずれの試験体も主筋にSD390を、横補強筋に高強度異形PC鋼棒(SBPD1275/1420)のスパイラル筋を使用した。No.1～4に使用した芯鉄筋はUSD685である。

試験体は、加力装置の都合上、杭体と基礎の位置関係を逆にした状態で製作した。コンクリートの呼び強度は、杭・基礎スタブともにFc30とした。試験体のコンクリート打設は縦打とし、基礎スタブ→杭体の2段階に分けて行った。打ち継ぎ部は木ゴテ仕上げとした。

2.3 加力方法

図-4に加力装置を示す。杭体と基礎の位置関係を逆にした状態で試験体をセットし、試験体杭最上部を杭先端とした。加力は、杭先端(反力スタブ)をピン支持し、杭長中間部(加力ブロック)にせん断力を作用させる正負繰返し載荷とした。試験体の実験時応力状態は、1次不静定の曲げモーメント分布となる。加力ブロック中心が

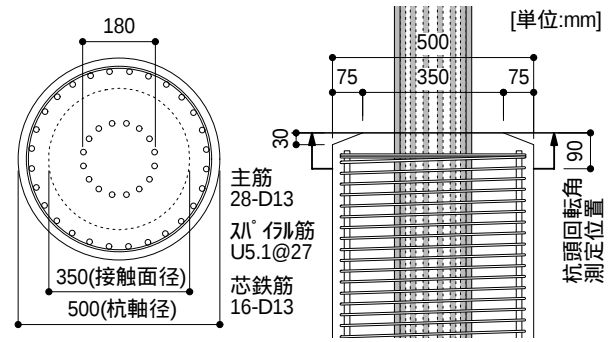


図-3 試験体図 (No.1, 2)

Figure of specimen

表-2 鉄筋の機械的性質
Mechanical properties of rebar

呼び径	鋼種	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	使用部位
D13	SD390	416	615	16.1	主筋
	USD685	756	960	11.1	芯鉄筋
U5.1	SBPD1275/1420	1465	1470	9.6	横補強筋

表-3 コンクリート強度
Material properties of concrete

試験体	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
圧縮強度 (N/mm ²)	基礎	38.4	36.7	36.9	39.0	39.1
	杭	43.1	39.1	39.8	33.6	36.5

基礎スタブ上面から3D(D:杭径)となる載荷1を基本とし、No.2のみ引張軸力下における杭頭部のせん断性状を把握する目的で、加力ブロック中心が基礎スタブ上面から1.5Dとなる載荷2を載荷1に引き続き行った。

加力は、加力ブロック下部の杭に対する部材角 R_1 (加力ブロックと基礎スタブの水平変位差を高さで除した値)で制御した。軸力は、杭先端の反力ブロック上部に鉛直に取り付けた2台の複動ジャッキにより与えた。No.1～4には、図-5に示すように、載荷荷重Pに対応した変動軸力Nを与え、No.5、6には、表-1に示す一定圧縮軸力を与えた。

なお、実験結果における軸力のP-Δ効果は、反力スタブの回転量から軸力用ジャッキ下側ピン位置の水平移動量を算出し、この水平移動量と軸力用ジャッキの傾斜を考慮して補正した。

3. 実験結果

3.1 荷重 - 変形関係および破壊性状

図-6に杭頭部に作用するせん断力 Q_1 - 部材角 R_1 関係を示す。いずれの試験体も、 $R_1=1/30$ に至っても耐力は低

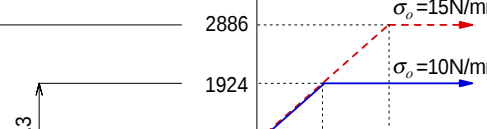
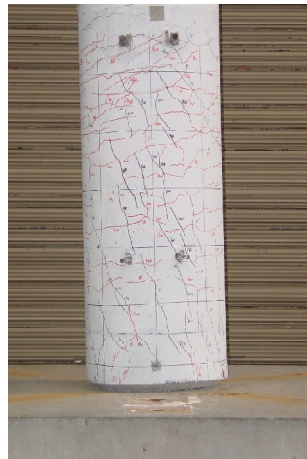


Figure 10 is a graph showing the Load-Displacement Relationship of Specimen No. 2. The vertical axis represents Load (N) and the horizontal axis represents Displacement (P in kN). The curve shows a peak load of 1924 N at a displacement of 107 kN, followed by a drop to 962 N at 107 kN displacement, and then a recovery to 2886 N at 214 kN displacement. The load is divided into three regions: No. 1 (0 to 107 kN), No. 2 (107 to 214 kN), and No. 3 (214 to 2886 N). The load is labeled as $\sigma_o = 15 \text{ N/mm}^2$ for the peak and $\sigma_o = 10 \text{ N/mm}^2$ for the recovery. The load is also labeled as $-0.65\tau_t N_y$ and $-0.90\tau_t N_y$ for the negative displacement regions.

13-3



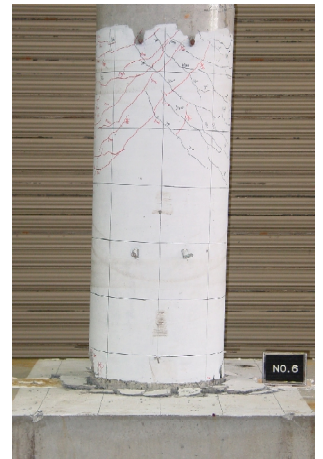
(a) 従来型 (杭頭剛接)



(b) No.1



(c) No.3



(d) No.6

写真-1 最終破壊状況
Final failure pattern

ず、また、すべりも発生していない。

杭主筋を基礎に50mmのみ込ませたNo.6は、 $R_1=1/200$ に基礎スタブ表面の杭頭部周囲100 mm、深さ10mm程度のコンクリートが剥離したが、損傷は軽微であることから $Q_1 - R_1$ 関係にはこの影響は見られず、良好な耐力・変形性状を示した。また、 $R_1=1/50$ においても杭頭部にひび割れは発生しなかった。

3.2 杭頭部の曲げモーメント - 回転角関係

図-7に杭頭部の曲げモーメント M_1 - 回転角 θ 関係を示す。杭頭回転角 θ は、図-3に示すように杭対面2点の鉛直変位の差を測定スパンで除して求めた。変動軸力を

与えたNo.1～4の杭頭部は、引張軸力時(負加力)に杭頭の回転剛性が大きく低下し、負担曲げモーメントが低下することがわかる。負加力時の除荷経路で杭頭モーメントが増加しているが、これは軸力を作用せん断力に応じて制御しているため、荷重除荷時に引張から圧縮軸力に移行し、杭頭部の曲げ耐力が増加したためである。No.1とNo.3およびNo.2とNo.4の $M_1 - \theta$ 関係における差はなく、杭頭テーパ・基礎テーパタイプの相違による影響は見られない。

基礎と接触するのみのNo.6は、履歴ループ面積を持たない非線形弾性の履歴性状を示し、その除荷経路は載荷

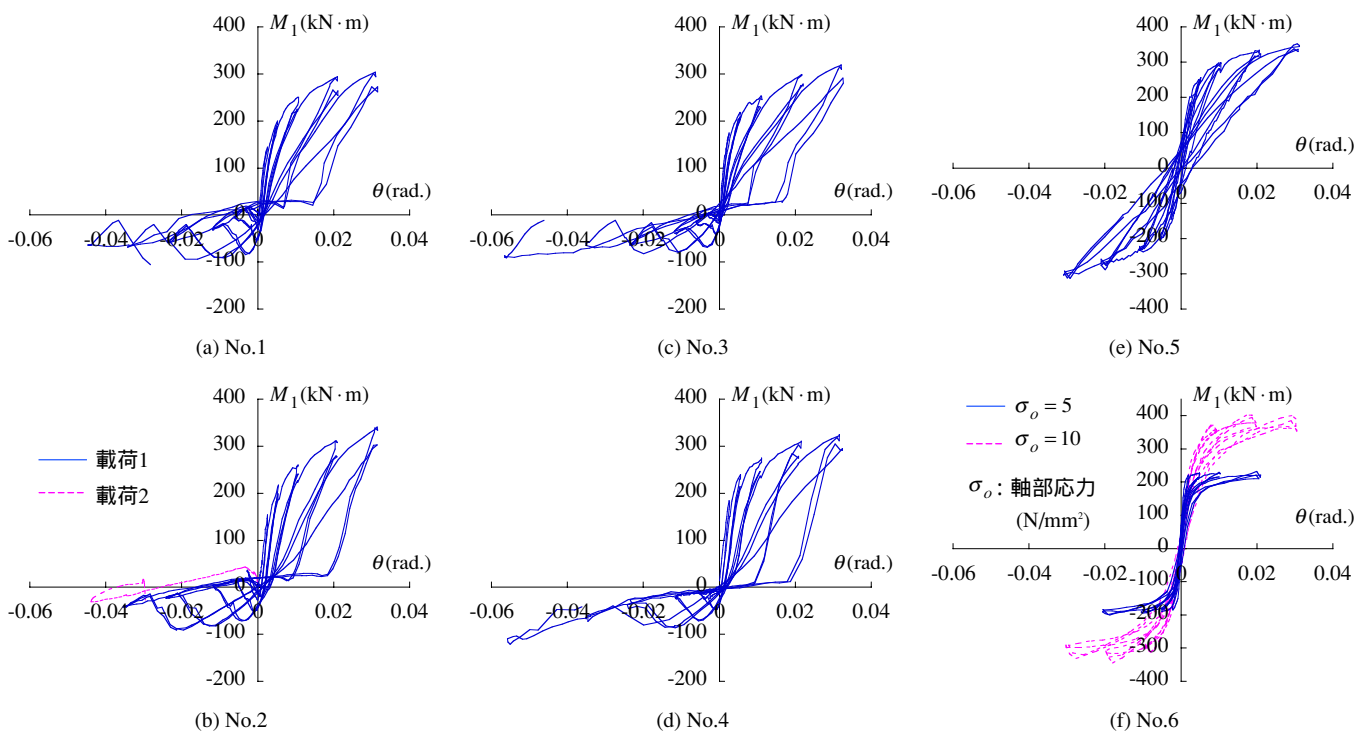


図-7 杭頭部の曲げモーメント - 回転角関係
Moment of pile head joint - rotation relations

経路をもどる傾向を示した。No.5は基礎と接触するのみの試験体であるが、No.6と比較して履歴ループは若干面積を持っている。これは、杭頭テーパを有するNo.5の杭頭接触面に作用する圧縮応力が高いため、基礎および杭の接触面のコンクリートの塑性変形が大きくなるためと考えられる。加力終了後に杭頭接触面の基礎スタブへのめり込み（1mm程度）が観察された。

3.3 杭頭接合部のせん断伝達機構

3.3.1 芯鉄筋のダウエル抵抗によるせん断伝達

図-8(a)に変動軸力を与えたNo.2の杭頭部のせん断力 Q_1 -杭頭水平変位 δ_G 関係を示す。これより、圧縮軸力側（正加力）はずれをとまなわない摩擦伝達により杭頭部のせん断力を伝達し、引張軸力側（負加力）は多少のずれをとまなう芯鉄筋のダウエル抵抗によりせん断力を伝達しているものと思われる。

載荷2では、引張軸力を芯鉄筋の引張降伏耐力の90%まで導入して回転角 $\theta=1/20$ まで単調載荷を行ったが、荷重の低下をとまなうようなすべりは発生しなかった。表-4に下記に示す(1)式⁴⁾から求まる芯鉄筋のダウエル

表-4 芯鉄筋のダウエル耐力
Shear force with dowel reinforcement

試験体	せん断力 ${}^e Q_{\max}$ (kN)	ダウエル耐力		$\frac{{}^e Q_{\max}}{{}^c Q_{d1}}$
		${}^c Q_{d1}$ (kN)	${}^c Q_{d2}$ (kN)	
No.2	366以上	251	575	1.46

載荷2の実験結果（引張軸力時）

表-5 杭頭接合部のすべり
Slide displacement of pile head joint

試験体	軸力 N (kN)	せん断力 Q_1 (kN)	回転角 θ (rad.)	$\frac{Q_1}{N}$	変位 (mm)	すべりの有無
No.5	192	160	0.015	0.84	0.13	すべり発生
No.6	85	218以上	0.029	2.56	4.99	すべりなし

杭頭部の基礎スタブに対する水平ずれ変位を示す

耐力 ${}^c Q_d$ と杭頭部に作用する最大せん断力実験値との比較を示す。表には、芯鉄筋の降伏点を引張応力分だけ低減した ${}^c Q_{d1}$ と、芯鉄筋の降伏点をそのまま使用した ${}^c Q_{d2}$ （ $\alpha=0$ ）の2通りを示している。載荷2は最大せん断力に達する前に実験を終了しているが、実験値は ${}^c Q_{d1}$ に対して1.4倍以上の余裕度があるのが確認された。

$${}^c Q_d = 1.65 \cdot a_{\text{dowel}} \cdot n_D \cdot \sqrt{\sigma_B \cdot \sigma_y \cdot (1 - \alpha^2)} \quad (1)$$

ここで、 a_{dowel} ：芯鉄筋1本の断面積（mm²）、 n_D ：芯鉄筋の本数、 σ_B ：コンクリート強度（N/mm²）、 σ_y ：芯鉄筋の降伏点（N/mm²）、 $\alpha = \sigma_s / \sigma_y$ 、 σ_s ：軸方向力による芯鉄筋の引張応力度（N/mm²）

3.3.2 杭頭部コンクリートの摩擦伝達

杭と基礎が接触のみで接合されている場合、杭頭部のせん断力は接触面圧縮力に依存した摩擦により伝達される。図-8(b)、(c)にNo.5、6の Q_1 - δ_G 関係を、表-5に杭頭接合部のすべり発生時の状況を示す。杭頭テーパタイプのNo.5において、軸応力度を低くした載荷（ $\sigma_o = 0.5 \text{ N/mm}^2$ ）ですべりが発生し、荷重が低下した。すべり発生時の摩擦係数（ Q_1/N ）は0.84であった。

杭主筋を基礎に50mmだけのみ込ませたフラットタイプのNo.6において、低い軸応力度（ $\sigma_o = 0.5 \text{ N/mm}^2$ ）でせん断力を増加させると、杭頭部には5mm程度の水平変位が生じたが、荷重の低下をとまなうすべりは発生していない。これより、杭主筋を基礎に少しのみ込ませることでせん断伝達をより確実なものにすることができると言える。

3.4 杭頭固定度

表-6に各試験体の杭頭固定度を示す。ここで、杭頭固定度とは杭頭モーメント実験値 M_1 を杭頭を完全固定と仮定した際に杭頭に発生するモーメント理論値 M_c で除した値である。この杭頭固定度の指標は、弾性理論値 M_c を基準としているため、杭頭部の回転剛性と曲げモーメントの非線形性を活用する本構法については、実験値と

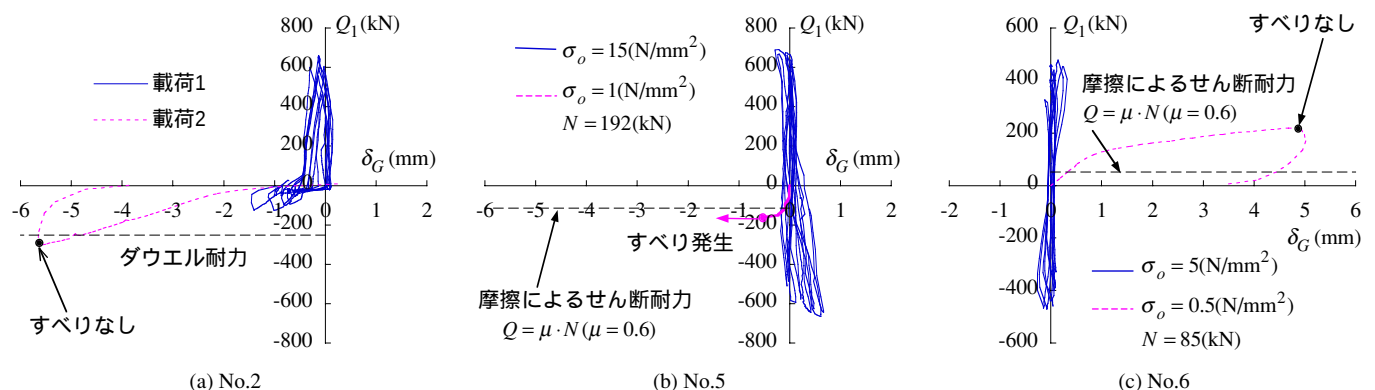


図-8 杭頭部のせん断力 - 杭頭水平変位関係
Shear force - slide displacement of pile head relations

の単純な比較はできない。そのため表には、杭軸部がほぼ弾性範囲の $R_1=1/400$ および $1/200$ 時の正加力（圧縮軸力）について示している。No.1～5の杭頭固定度は0.5～0.6程度でありテーパタイプのモーメント低減効果が伺われる。フラットタイプのNo.6は $R_1=1/400$ では杭頭接合面が全面圧縮のため固定度は0.81と高いが、杭頭接合面の引張縁が離間するに従い $R_1=1/200$ では0.66に減少しているのが確認された。

本構法の設計では、後述する実施適用例のように、非線形性を示す杭頭モーメント - 回転角関係を杭頭回転ばねとしてモデル化し、これを設計に用いることで杭頭固定度の低下と回転性能を実質的に評価している。

3.5 初期剛性および最大耐力

表-7に杭頭部の曲げモーメント M_1 - 回転角 θ 関係における初期剛性および最大曲げ耐力の実験値と計算値との比較を示す。初期剛性および最大曲げ耐力の計算値は、文献5)に提案されている手法により算出した。この手法は、図-9に示すように、コンクリート接触面の応力重心位置における基礎へのめり込み量(θ_j)と杭頭部の変形(θ_i)を算出し、回転角を求めるもので、また、その時々々の接触面積に応じた支圧によるコンクリートの強度上昇を考慮して曲げモーメントを求めている。基礎へのめり込み量およびコンクリートの支圧効果を適切に評価することにより、初期剛性および最大耐力実験値を精度良く推定できていると言える。

4. 実施適用

本構法は、2003年3月時点で15件（その内7件は超高層建物）のプロジェクトに適用されている。ここでは、東京都中央区に建設されたマンションへの適用例について



図-10 外観パース
Perspective of the building

表-6 杭頭固定度
Rotation of pile head joint

試験体	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
固定度						
$R_1 = 1/400$	0.51	0.56	0.59	0.62	0.63	0.81
$R_1 = 1/200$	0.54	0.58	0.56	0.62	0.61	0.66

正加力（圧縮軸力時）の固定度を示す

表-7 初期剛性および最大耐力
Initial stiffness and maximum strength

試験体	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
初期剛性						
実験値	113	69	99	91	88	207
計算値	101	98	104	99	88	251
実験値 / 計算値	1.12	0.71	0.95	0.92	1.00	0.83
最大耐力						
実験値	341	400	361	405	431	460
計算値	345	375	339	351	278	499
実験値 / 計算値	0.99	1.07	1.06	1.16	1.55	0.92

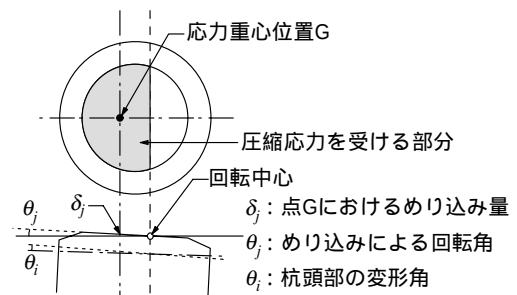


図-9 解析手法概念図
Concept of analysis method

紹介する。図-10に建物外観パースを、表-8に建物概要を示す。この建物は地上12階、地下1階の鉄筋コンクリート造で、横補強筋に高強度異形PC鋼棒を使用した場所打ちコンクリート拡底杭を採用し、杭頭とパイルキャップとの接合部に本構法を採用した。

図-11に杭伏図を示す。軸力変動の小さい中杭にフラットタイプを、軸力変動が大きい側杭に杭頭テーパタイプ（芯鉄筋あり）を採用した。図-12に地盤状況を

表-8 建物概要
Outline of the building

用途	共同住宅
建設地	東京都中央区
主要構造	鉄筋コンクリート造
階数	地下1階，地上12階
最高高さ	36.77 m
延床面積	6462 m ²
基礎形式	場所打ちコンクリート拡底杭（アースドリル工法） フラットタイプ（中杭）：φ1600(2500) テーパタイプ（側杭）：φ1300(1800)～φ1400(2000) ()内数値は拡底径を示す
基礎底	GL-5.3 m
杭先端	GL-35.0 m

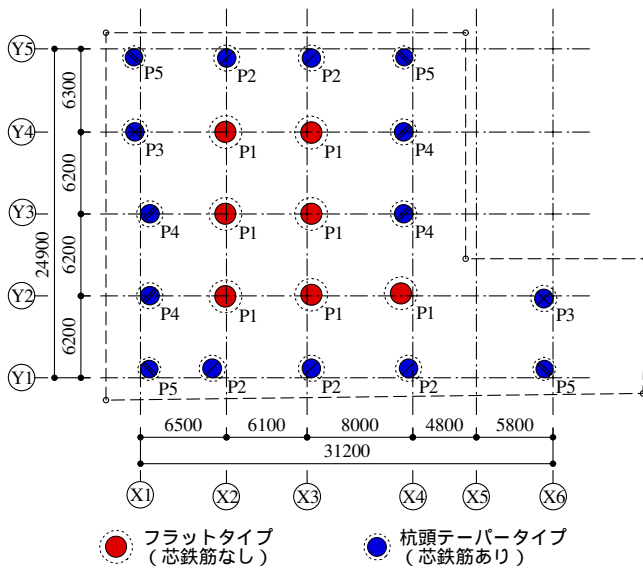


図-11 杭伏せ図
Plan of the pile

示す。基礎底はGL-5.3mであり、基礎底以深約20mの地盤は、N値の小さい沖積層が続く軟弱地盤である。杭支持層は、GL-35mのN値50以上の砂礫層とした。

4.1 構造設計

杭の地震時の応力は、上部建物の地震応答による慣性力と地震時の地盤変形を考慮した静的非線形解析を用いた。図-13に解析モデルを示す。基礎は剛と仮定し、杭体は曲げ変形およびせん断変形を考慮した線材に置換し、杭と基礎の接合部に杭頭回転ばねを設けている。図-14に杭頭モーメント - 回転角関係の実験結果と杭頭回転ばねの解析値の比較を示す。杭頭回転ばねの解析値は文献5)の手法により求め、これをトリリニアに置換したものを静的非線形解析に使用した。地盤と杭は、建築基礎構造設計指針⁶⁾の方法により求まる地盤水平ばねでつなぎ、地盤側の節点に強制変位を与えた。

図-15に極めて希に起こる地震に対する解析結果の最大曲げモーメントと最大せん断力を、杭頭固定とした場合のものと比較して示す。杭頭接合部を固定した場合に比べ、杭頭部に生じる曲げモーメントが35～65%程度に低下しており、本構法の有効性が確認された。杭頭部に生じるせん断力は杭頭接合部を固定した場合と大きな差は見られない。

4.2 施工

掘削方法および杭頭部以外の杭体のコンクリート打設などの施工方法は、従来の場所打ちコンクリート杭と同様である。写真-2(a)に鉄筋籠の吊り込み状況を示す。芯鉄筋を用いる場合、芯鉄筋は外周主筋の環状保持材に固定した芯鉄筋支持材(プレート・鉄筋など)により位置を確保し、外周主筋と芯鉄筋を一体として建込を行っ

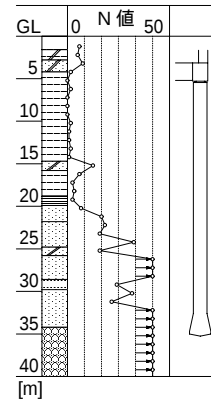


図-12 地盤概要
The soil profile

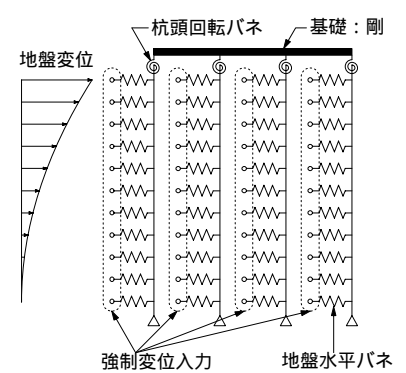


図-13 解析モデル
Analysis model

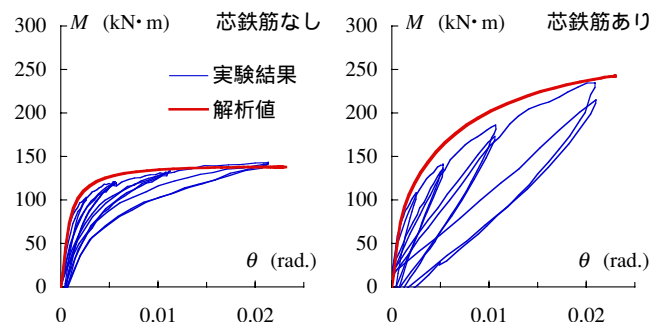
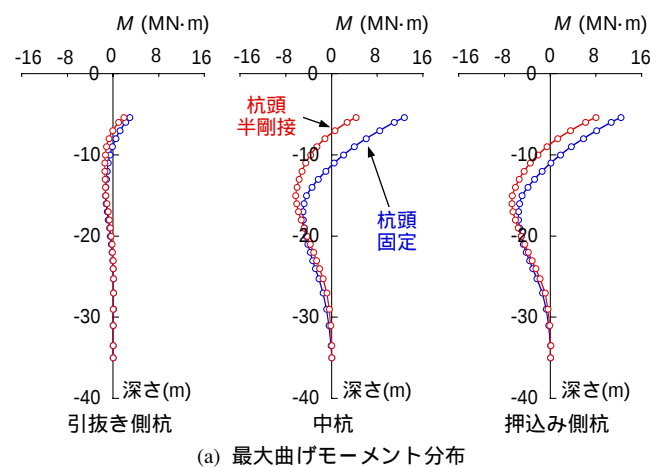
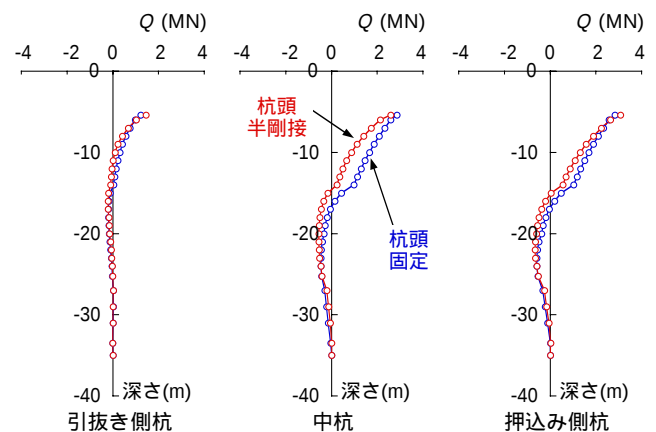


図-14 杭頭回転ばね
Spring of the pile head



(a) 最大曲げモーメント分布



(b) 最大せん断力分布

図-15 静的非線形解析による結果
Result of static analysis



(a) 鉄筋籠の吊り込み



(b) 杭頭型枠設置状況



(c) 杭頭部の仕上がり

写真-2 施工状況

た。なお、芯鉄筋は円形配置とし、その直径はトレミー管が挿入できる最小径とした。

杭頭テーパタイプでは、杭頭部に高強度コンクリート (Fc48) を使用し、精度良く錘台形状のテーパに成型するため、杭頭部のコンクリート打設は杭体の打設後別途気中にて行った。杭頭余盛コンクリートのはつり処理を行った後、写真-2(b) に示すように、杭頭部にテーパ成型用の型枠を設置した。型枠の天端には緩衝材 (スタイロフォーム) を錘台形状に成形したものを固定している。写真-2(c) に杭頭部の仕上がり状況を示す。

この建物では、本構法を採用したことにより、従来に比べて杭径は300mm、基礎梁せいは400mm縮小し、掘削土量の削減とともにコスト低減に大きく寄与している。また、本構法は杭主筋をパイルキャップに定着していないため、杭頭余盛コンクリートのはつり作業やパイルキャップおよび基礎梁の配筋作業が従来よりも容易であった。

5. おわりに

紹介した杭頭半剛接合構法は、杭頭部の回転剛性と曲げモーメントを積極的に制御することで、コスト低減と施工の合理化をともなって杭・基礎構造の耐震性能を高めることを目的として考案・開発した構法である。本構法の構造性能を把握するために実施した構造実験によ

り、杭頭部に作用する曲げモーメントは低減され、杭頭部の損傷を軽微に抑えることができることが明らかになった。本構法は、これらの結果を設計施工指針としてまとめ、(財)日本建築センターの「杭頭接合工法評定」(BCJ 評定-FD0071-01) を取得している。また、多くの超高層プロジェクトで個別の大臣認定を取得して実施しており、あらゆる規模・用途の構造物の場所打ちコンクリート杭に適用可能である。

損傷のない高性能の杭・基礎構造をコスト低減をともなって実現する本構法を、杭・基礎の標準構法として、今後、拡く普及展開を図っていきたい。

参考文献

- 1) 是永健好ほか：異形PC鋼棒で横補強した場所打ちRC杭の大型模型実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.475-480，1999
- 2) 川端一三ほか：高性能場所打ちコンクリート杭の開発，コンクリート工学，Vol.38，No.7，pp.42-45，2000.7
- 3) 安田聡ほか：主筋を基礎に定着しない場所打ちコンクリート杭の構造性能，大成建設技術センター報，No.35，2002
- 4) 日本建築学会：現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針（案）・同解説，2002
- 5) 今井和正ほか：めり込みを考慮したRC部材端部の回転変形解析法，日本建築学会構造系論文集，第562号，pp.99-106，2002.12
- 6) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001