

論文 杭主筋を基礎に定着しない杭頭接合部の変動軸力下における構造性能

安田 聡^{*1}・小室 努^{*2}・辰濃 達^{*2}・川端 一三^{*1}

要旨: 杭頭部の回転剛性を制御するために杭頭接合面を鍾台形状またはフラット形状とし, 杭主筋を基礎に定着しない場所打ちコンクリート杭について, 変動軸力および高圧縮軸力下における構造性能を把握するために大型模型実験を実施した。試験体は計6体で, 杭頭ディテールおよび軸力範囲を変化させた。実験の結果, 本接合方式の杭頭モーメント - 回転角関係は, 変動軸力下においても終始安定した履歴性状を示すとともに, 杭頭モーメントは低減され杭頭部の損傷を軽微に抑えられることを明らかにした。

キーワード: 場所打ちコンクリート杭, 主筋非定着, 杭頭固定度, 異形 P C 鋼棒, 芯鉄筋

1. はじめに

これまでに筆者らは, 場所打ちコンクリート杭を用いる基礎構造において, 杭主筋を基礎に定着させず, また杭頭接合面を鍾台形状またはフラット形状とした杭頭半剛接合構法を開発してきた。この杭頭半剛接合構法は, 地震時の杭頭部に生じる応力を従来(剛接合)より半分程度に低減できるため, 杭体の変形性能の向上および基礎梁などの合理化が可能となっている。

既報¹⁾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性能を明らかにした。本報告では, 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について述べる。

2. 実験計画

2.1 試験体

表 - 1 に試験体一覧を, 図 - 1 に各試験体の杭頭形状を示す。図 - 2 に試験体の配筋図例を示す。試験体は長さ 3m, 直径 ϕ 500mm の場所打ちコンクリート杭である。試験体数は6体で,

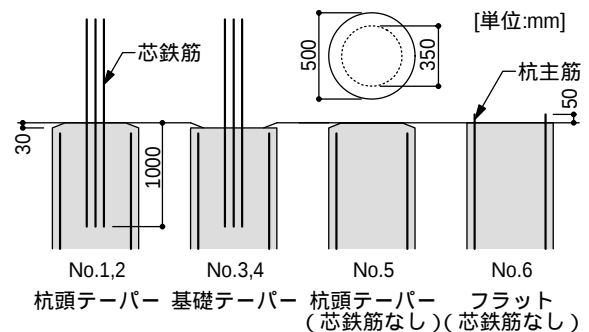


図 - 1 杭頭部の形状

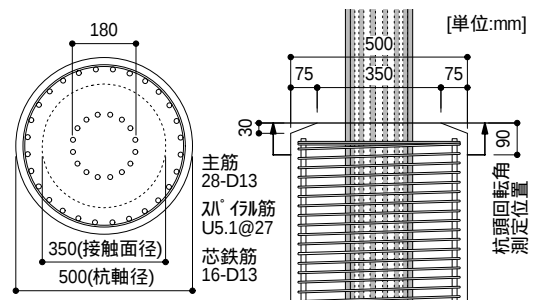


図 - 2 配筋図例 (No.1,2)

表 - 1 試験体一覧

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 接触面径 350mm	16-D13	変動軸力	1924 ~ -999	$\sigma_o = 10 \sim -0.65 \cdot N_y$	杭頭テーパ [*]
No.2				2886 ~ -1383	$\sigma_o = 15 \sim -0.90 \cdot N_y$	
No.3	主筋 28-D13 ($p_g = 1.8\%$)			-1383: 載荷2	$-0.90 \cdot N_y$	
No.4	横補強筋 U5.1-@27 ($p_w = 0.3\%$)			1924 ~ -999	$\sigma_o = 10 \sim -0.65 \cdot N_y$	基礎テーパ [*]
No.5		-	一定軸力	2886 ~ -1383	$\sigma_o = 15 \sim -0.90 \cdot N_y$	
				2886	$\sigma_o = 15$	
				192	$\sigma_o = 1$	
No.6	接触面径 500mm			962	$\sigma_o = 5$	杭頭テーパ [*] - 芯鉄筋なし
				1924	$\sigma_o = 10$	フラット 芯鉄筋なし
				85	$\sigma_o = 0$	

σ_o : 軸力 / 杭軸部面積 (N/mm^2)

N_y : 芯鉄筋の降伏耐力

*1 大成建設(株) 技術センター (正会員)

*2 大成建設(株) 構造設計部 (正会員)

それぞれ杭頭形状を変化させた。No.1 ~ No.4 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φ180の円形状に配した。また、これらの試験体は杭頭部の回転性能を高めるとともに、地震時の杭頭部の損傷低減を図るために、杭軸部と杭頭接触面の断面積が2:1となるように、No.1,2は杭頭部を錘台形状に成形し、No.3,4については基礎側に同様の錘台形状のテーパを成形した。

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、高軸力下における杭頭回転性能を把握する。No.5は杭頭部を錘台形状に成形した。No.6は杭頭部をフラットに成形し、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。試験体のコンクリート打設は縦打とし、基礎（Fc30）→杭（Fc30）の2段階に分けて打設した。打ち継ぎ部は木ゴテ仕上げとした。

2.3 加力方法

図 - 3 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た。試験体の実

表 - 2 鉄筋の機械的性質

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

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

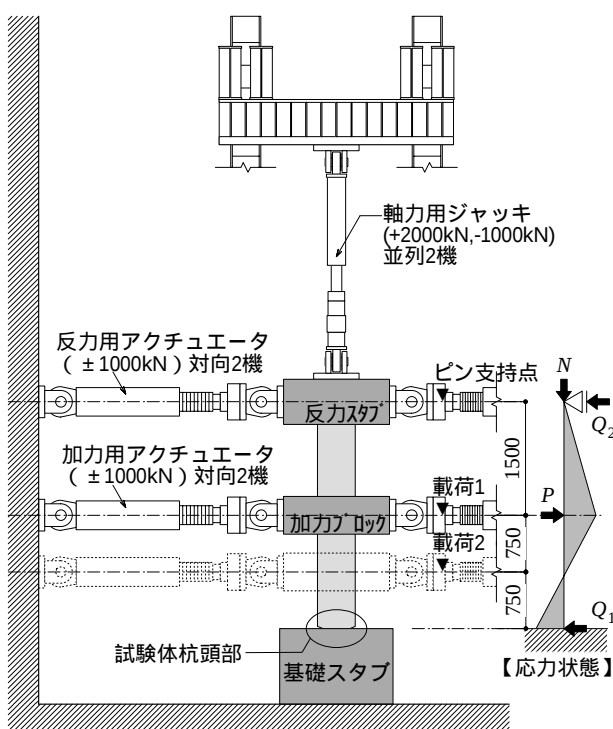


図 - 3 加力装置

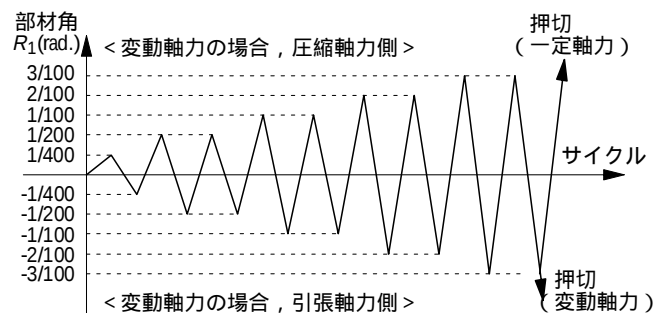


図 - 4 加力サイクル

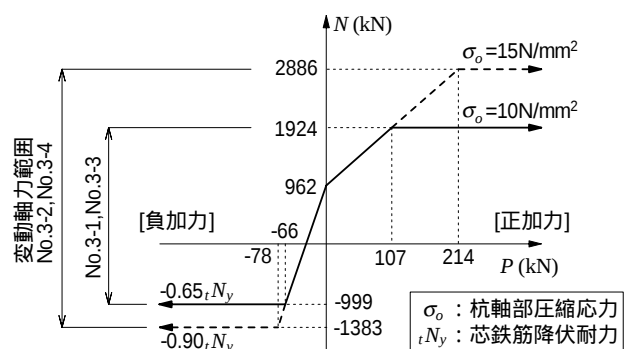


図 - 5 変動軸力の設定

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を追加して行った。

図-4に加力サイクルを示す。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 $P-\Delta$ 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下せず、曲げ降伏型の良好な変形性能を示した。

図-7にNo.1およびNo.6の $R_1=1/50$ 時のひび割れ発生状況を示す。変動軸力を与えたNo.1~4のひび割れなどの諸現象発生順序は同様の傾向を示した。 $R_1=1/400$ の引張軸力時に引張りひび割れが杭全体に発生し、 $R_1=1/200$ の圧縮軸力時には加力ブロック近傍で曲げひび割れが発生した。杭頭部においては、 $R_1=1/100$ の圧縮軸力時にせん断ひび割れ(ひび割れ幅:最大0.4mm,除荷時0.1mm以下)が発生したが、曲げひび割れは発生しておらず損傷は極めて軽微であった。変動軸力範囲が大きいNo.2,4は、No.1,3に比べてこのせん断ひび割れ角度は材軸方向に進展している。芯鉄筋の引張降伏は、 $-0.65N_y$ の引張軸力時: $R_1=1/250$ 付近で、 $-0.90N_y$ の引張軸力時: $R_1=1/350$ 付近で降伏した(N_y : 芯鉄筋の降伏点)。杭頭テーパ形式と基礎テーパ形式の相違による損傷状況の違いは見られなかった。また、No.2では載荷2(引張軸力の単調載荷)を行い、杭体(杭頭側)へのせん断力の入力を大きくしたが、杭頭部の横補強筋は降伏しておら

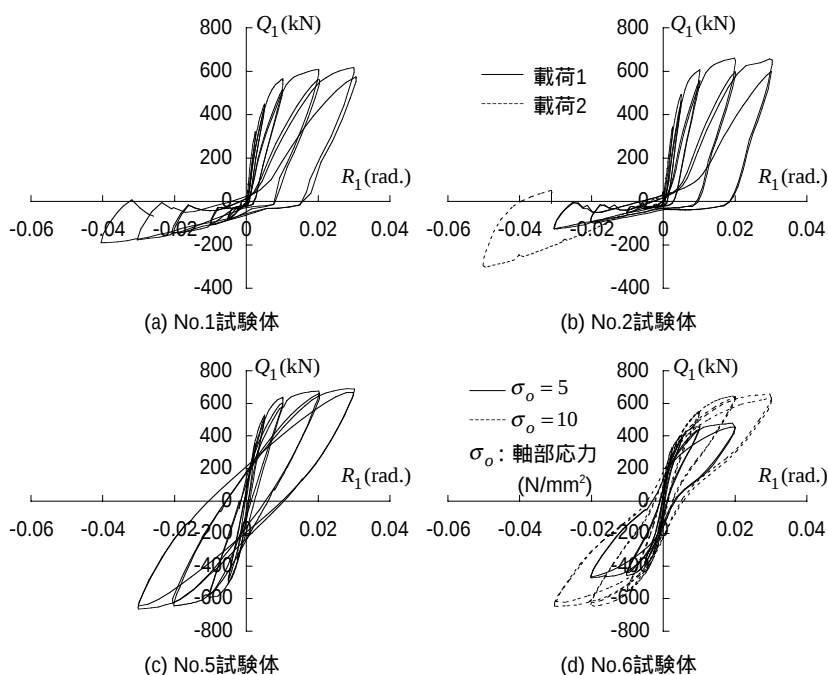


図-6 せん断力 - 部材角関係

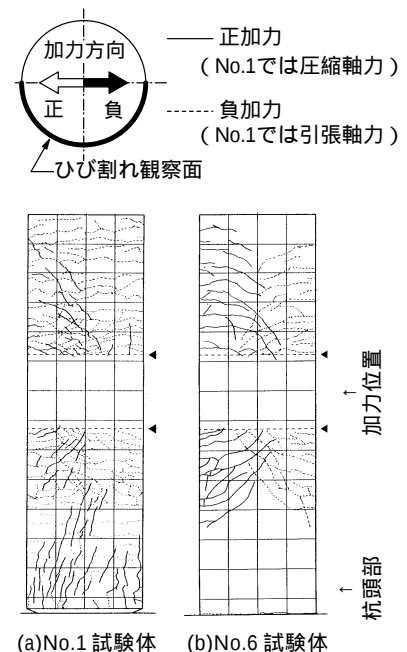


図-7 ひび割れ状況
($R_1=1/50$ 時)

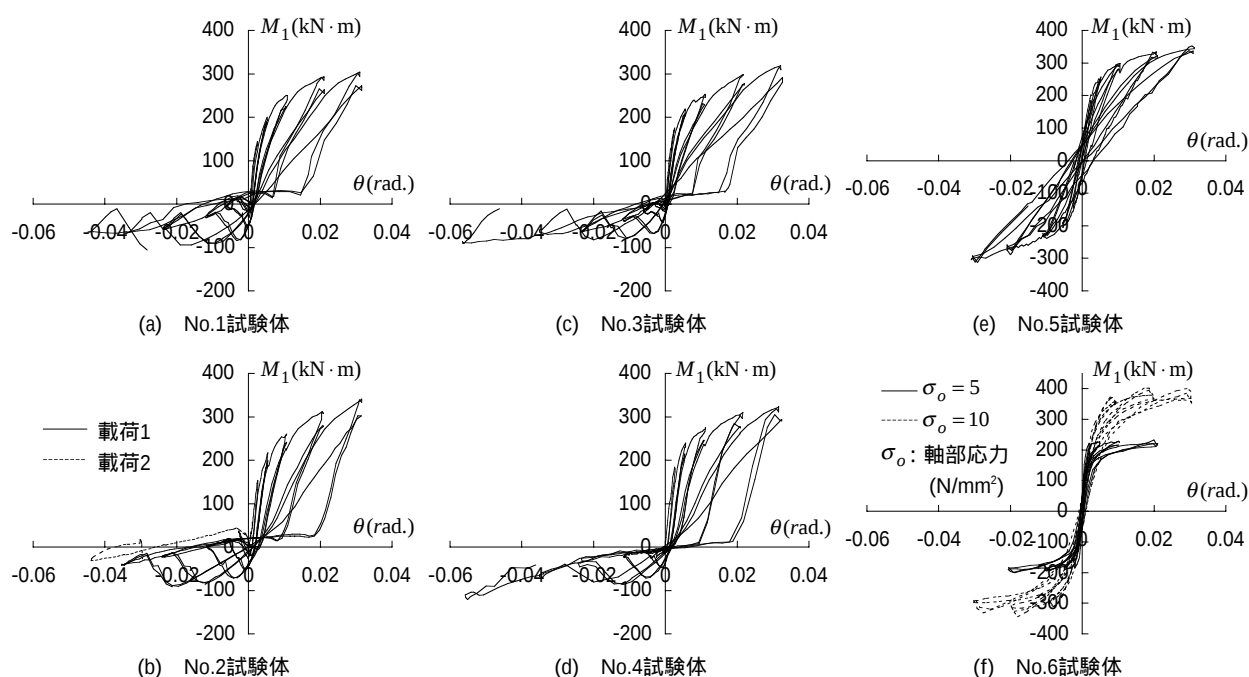


図 - 8 杭頭部のモーメント - 回転角関係

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 - 8 に杭頭部の曲げモーメント M_1 - 回転角 θ 関係を、図 - 9 に No.1 ~ 4 の包絡線を示す。杭頭回転角 θ は、図 - 2 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）にほとんど曲げモーメントを負担していないことがわかる。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、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。図 - 9 に示すように、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・基礎テーパ形式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

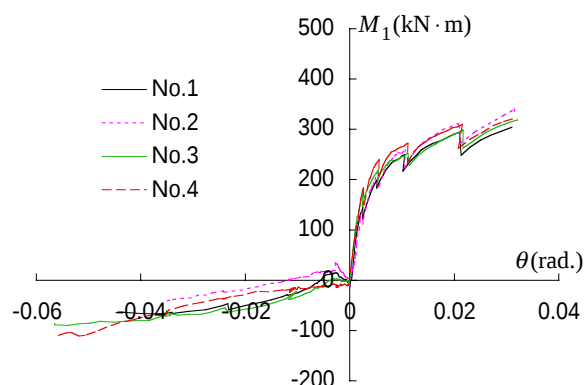


図 - 9 $M_1 - \theta$ 関係（包絡線）

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

(1) 芯鉄筋のダウエル抵抗によるせん断伝達

図 - 10(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_c 関係を示す。こ

れより，圧縮軸力側（正加力）はずれをとまわら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²⁾から求まる芯鉄筋のダウエル耐力 cQ_{d1} 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 cQ_{d1} と，芯鉄筋の降伏点をそのまま使用した cQ_{d2} ($\alpha=0$) の2通りを示している。載荷2は最大せん断力(引張軸力時)に達する前に実験を終了しているが，実験値は cQ_{d1} に対して1.4倍以上の余裕度があるのが確認された。

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

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)， $\alpha = \sigma_s / \sigma_y$ 1， σ_s ：軸方向力による芯鉄筋の引張応力度(N/mm²)

(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 - 10(b),(c)にNo.5,6の

せん断力 Q_1 - 杭頭水平変位 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。杭頭テーパ形式のNo.5に荷重の急激な低下をとまなうすべりが発生した。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だけのみ込ませた杭頭フラット形式のNo.6は，低い軸力($N=85$ kN)での単調載荷を行った。杭頭部には4.99mm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

表 - 4 芯鉄筋のダウエル耐力

試験体	せん断力	ダウエル耐力		$\frac{eQ_{max}}{cQ_{d1}}$
	eQ_{max} (kN)	cQ_{d1} (kN)	cQ_{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

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

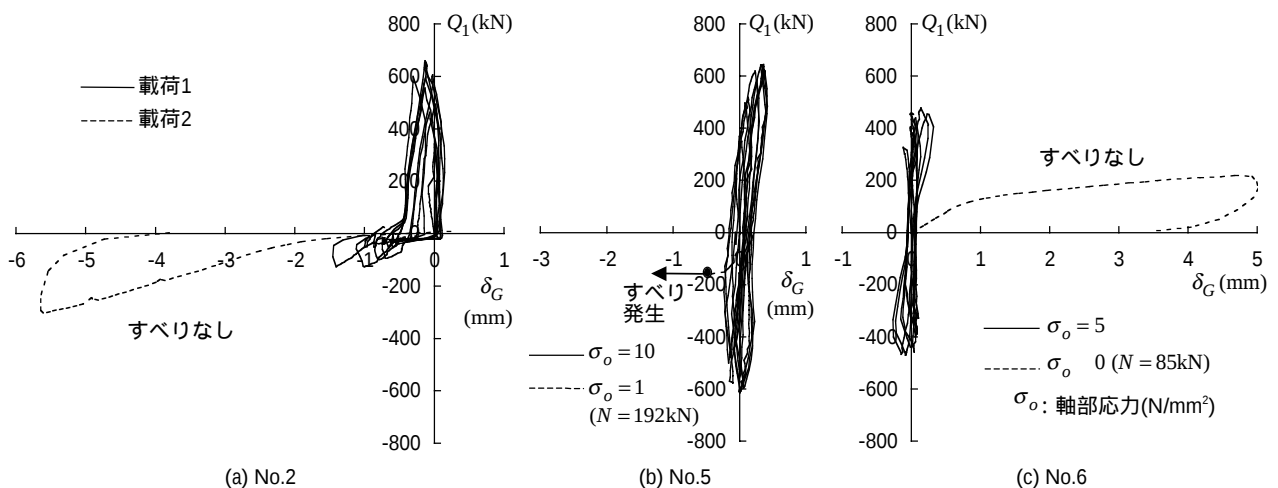


図 - 10 杭頭部のせん断力 - 杭頭水平変位関係

モーメント理論値 M_c で除した値である。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とともに杭軸部が非線形性を示す範囲では実験値と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程度でありテーパ形式のモーメント低減効果が伺われる。フラット形式の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。

4. 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3)に提案されている手法により算出した。この手法は、図 - 11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。

5. まとめ

本杭頭半剛接合構法について、変動軸力および高圧縮軸力下における構造実験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 本杭頭半剛接合構法は、変動軸力下においても安定した履歴性状を示し、杭頭回転角 $1/30$ に至っても耐力は低下せず、優れた回転性能を有する。
- (2) 本構法により、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

表 - 6 杭頭固定度（圧縮軸力）

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

表 - 7 初期剛性および最大耐力

試験体	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
初期剛性						
実験値 (MN・m)	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 (kN・m)	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

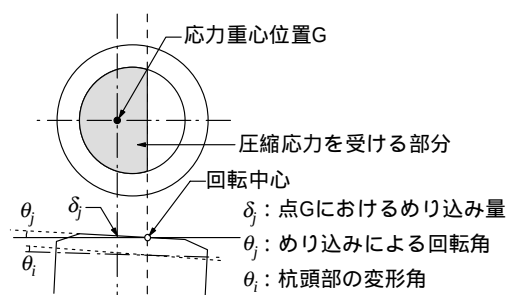


図 - 11 解析手法概念図

抑えることができる。

- (3) 杭頭部と基礎のコンクリート接触面のすべり発生時の摩擦係数は0.84であった。
- (4) 芯鉄筋のダウエル抵抗によるせん断伝達力は、既往の算定式を用いて安全側に評価できる。

参考文献

- 1) 安田聡ほか：杭主筋を基礎に定着しない杭頭接合部の構造性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.1585-1590，2002.6
- 2) 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
- 3) 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