

論文 実大ト形杭頭接合部部分架構の曲げ抵抗機構に関する研究

千濱 彬比古*1・土佐内 優介*2・平尾 一樹*3・向井 智久*4

要旨: 本研究では、設計法が確立されていない杭頭接合部における曲げ抵抗機構の解明及び、曲げ耐力、変形性能の定量化に焦点を当て、杭、パイルキャップ、基礎梁、柱から構成されるト形杭頭接合部部分架構試験体を用いた静的載荷実験を行った。杭頭接合部における曲げ抵抗機構は埋め込み部にてこ作用による機構及び、杭頭定着筋とパイルキャップ部コンクリートによって形成される機構が存在する事がわかった。ただし、それらの曲げ抵抗機構の寄与分は今後検討する必要がある。杭頭接合面の曲げ耐力と回転角の実験値を既往の評価式を用い比較するとその精度は十分でなく、より精度の高い評価方法を提案する必要がある。

キーワード: 杭頭接合部, ト形部分架構, 曲げ抵抗機構, 杭頭曲げモーメント, 杭頭接合面回転角, 変動軸力

1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災において、杭基礎が被害を受ける事によって建物が傾斜し、継続的な使用が困難となった事例が報告されている¹⁾。杭体頭部の被害に比べて杭頭接合部を含むパイルキャップの被害は比較的少なく、耐震上の課題が余り明確でなかったが、大地震後の継続使用を可能とする工法を開発する場合には、杭頭部に加え杭頭接合部の構造性能評価が必要となる。特に、負担応力の大きい大口径杭を対象に、杭頭部の応力を基礎梁に伝達する応力伝達機構と高軸力下での軸力変動による影響を明らかにする事が求められている。

そこで、本研究では設計法が確立されていない杭頭接合部における曲げ抵抗機構の解明と耐力及び、変形性能の定量化を目的とした。地震時に建物に作用した力は柱、基礎梁、パイルキャップを介して、杭頭接合部にせん断力や曲げモーメントとして作用する。そういった建物基礎部分の応力状態を再現しながら、杭頭の抜け出しを含めた杭頭接合部の曲げモーメント-杭部材関係(M-R_p)を終局時に至るまで高精度に再現し、履歴復元力特性と損傷状態を記録した。得られた実験結果と各種設計指針

に記載の設計方法を比較し、破壊機構や設計式の妥当性

表-2 コンクリートの力学的特性

使用箇所	試験体	圧縮強度 MPa	弾性係数 GPa	圧縮強度時歪 ×10 ⁻⁴
鋼管内	SP1	126.8	47.1	2738.9
	SP2	126.9	47.2	2706.1
パイルキャップ	SP1	28.6	25.3	2152.6
	SP2	28.9	24.1	2229.1

表-3 鋼材の力学的特性

鋼種	降伏応力 MPa	ヤング係数 GPa	引張強さ MPa
D10(SD295A)	339	178	482
D13(SD295A)	341	192	480
D16(SD345)	373	184	593
D29(SD345)	392	196	593
D32(SD390)	437	195	621
D38(WSD490)	530	190	706
SKK490	514	197	584

表-1 試験体緒元

試験体		SP1	SP2
軸力比(N/N ₀)		-0.4-0.54	-0.4-0.36
柱	幅×せい	720mm×720mm	
	主筋	12-D32(SD390)	
	帯筋	D16(SD345) @50	
基礎梁	幅×せい	900mm×2000mm	
	主筋	16-D32(SD390)	
	補強筋	D16(SD345) @50	
杭	SC杭	φ400,鋼管厚t=21mm,SSK490,Fc105MPa	
	杭頭定着筋	8-D29(SD345)	14-D38(WSD490)
パイルキャップ	FC	21MPa	
	幅×せい×高さ	900mm×900mm×2350mm	
	縦筋	8-D13(SD295A)	
	帯筋	D10(SD295A) @185	
柱帯筋	D10(SD295A) @145		

※1: Nは圧縮が正 ※2: N/N₀=N/(σ₀·(A-A_s)+f_{sy}·A_s) (N>0時),
N/N₀=N/(f_{sy}·A_s) (N<0時) (A_s:鋼管断面積 [mm²], f_{sy}:鋼管降伏強度 [MPa])

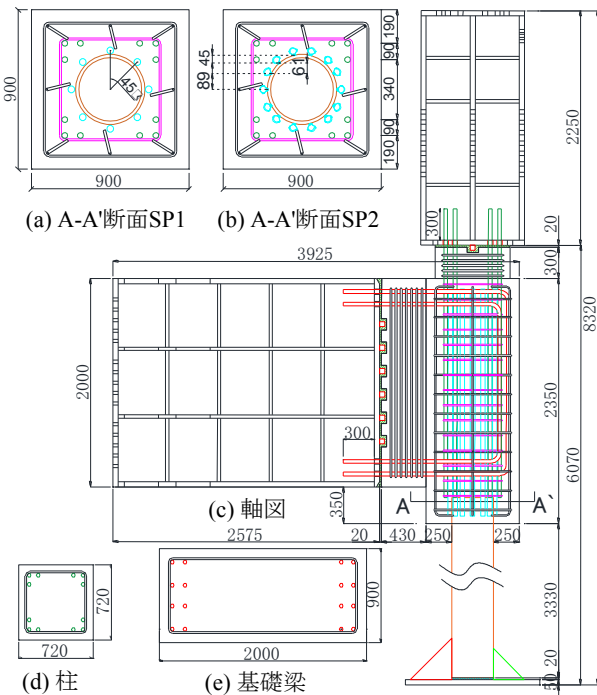


図-1 試験体詳細図(単位:mm)

*1 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院 建築学系 (学生会員)

*2 株式会社フジタ 修士(工学)

*3 一般社団法人 コンクリートパイル建設技術協会 修士(工学) (正会員)

*4 国立研究開発法人 建築研究所 博士(工学) (正会員)

を把握した。

2. 試験体概要

図-1 に試験体詳細図, 表-1 に試験体緒元, 表-2, 表-3 に材料の力学的特性をそれぞれ示す。試験体は建物側柱下部を模擬したト形部分架構試験体とし, 実大スケールで2体作製した。杭体は, 杭径 ϕ 400mm, 鋼管厚 $t=21\text{mm}$ の既製鋼管コンクリート杭(以下, SC杭)を使用し, パイルキャップ内へ250mm埋め込んだ。杭頭接合部の破壊性状を確認する事が目的であるため, 杭体が塑性化しないように強度の高いSC杭(通常の鋼管厚は $t=6\text{mm}$ 程度)を用いた。また, 基礎梁と柱は鉄骨と定着用の鉄筋で模擬した。杭頭定着筋量と変動軸力パスを実験変数とし, SP1では杭頭接合部での曲げ破壊, SP2ではパイルキャップのせん断破壊が先行するように杭頭定着筋量を増やした。杭頭定着筋以外の配筋及び, 寸法は各試験体で同一の仕様としている。

3. 荷重装置と計測計画

本実験は国立研究開発法人建築研究所内の実大構造物実験棟にて実施した。図-2に荷重装置, 図-3に変動軸力パス, 図-4に正荷重時に試験体に作用するモーメント分布を示す。本実験では試験体を横にした状態で柱, 杭部で単純支持し基礎梁部から水平力 $2P$ を荷重した。荷重方向は杭と基礎梁が閉じる方向を正荷重とした。杭側支持点はピンローラー支承とし両側支持点の水平反力を同一にするため, 荷重中は杭側支持点下(図-4中H点)に取り付けた水平ジャッキによって水平力 $2P$ の半分の力 P を荷重方向と逆向きに付加した。即ち, 杭体に加わる軸力は水平ジャッキによる軸力 N と杭側支持点水平反力 P の合計値 $N+P$ となる。軸力 N は荷重装置柱側端部に取り付けた水平ジャッキ4台によって加力した。地震時の軸力変動を考慮し杭体に作用する軸力を変動させた。図-3において黒実線はSC杭(設計上の想定鋼管厚 $t=6\text{mm}$)の終局曲げモーメントを基礎梁せん断力 $2P$ に換算した値である。変動軸力は過去のSC杭曲げ実験²⁾を参考にし, SP1では正荷重時最大軸力比 (N/N_0) が0.52, SP2では0.36, 負荷時は両試験体共に0.4とした。ここで軸耐力 N_0 は通常の鋼管厚である6mmのSC杭で次式により算出した。

$$N_0 = (\sigma_B \cdot (A - A_s) + f_{sy} \cdot A_s) \quad (N > 0 \text{ 時}) \quad (1)$$

$$N_0 = (f_{sy} \cdot A_s) \quad (N < 0 \text{ 時}) \quad (2)$$

ただし, A_s :鋼管断面積, f_{sy} :鋼管降伏強度である。

実験開始時には長期軸力相当である2115kN(軸力比0.2)の圧縮軸力を導入した。荷重中は荷重装置両端及び, 基礎梁上端に取り付けた鉛直ジャッキによって荷重装置全体を吊り上げ, 荷重装置と試験体の自重を相殺しながら

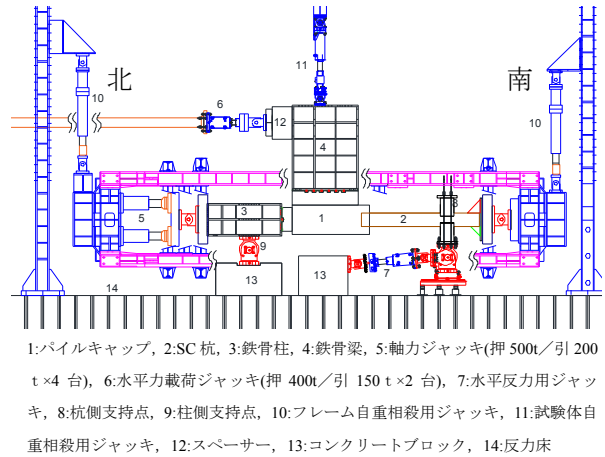


図-2 荷重装置

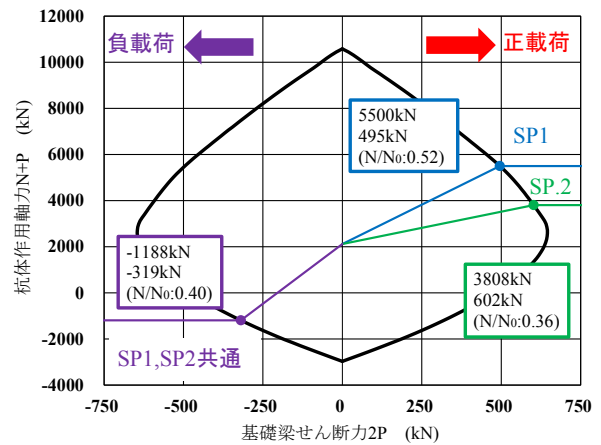


図-3 杭体作用軸力と基礎梁せん断力のパス

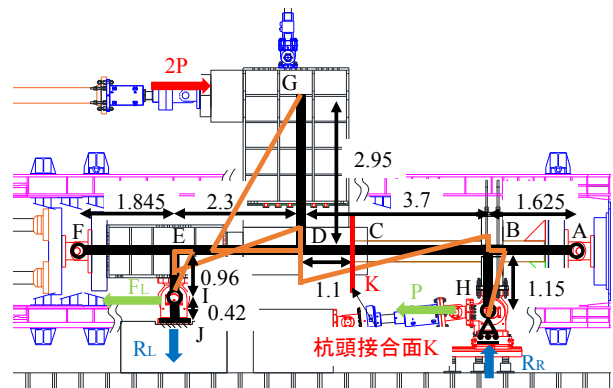


図-4 試験体に作用するモーメント分布(単位:m)

から荷重を行った。荷重はパイルキャップ中央点(図-4中D点)と荷重点(図-4中G点)を結ぶ直線 L_{DG} と杭側支持点(図-4中B点)と柱側支持点(図-4中E点)を結ぶ直線 L_{BE} がなす角度(代表変形角 R)の変化量によって変位制御による正負交番繰り返し荷重を行った。SP1では代表変形角 $R=\pm 0.125\%$, $\pm 0.25\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 0.75\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, をそれぞれ2回ずつとし, SP2は, $R=\pm 0.125\%$, $\pm 0.25\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 0.75\%$, $\pm 1.0\%$ の後, 負側に押し切り荷重とした。

4. 実験結果

4.1 杭頭曲げモーメント-杭部材角関係 (M-R_p)

図-5 に杭頭接合面における曲げモーメント(以下、杭頭曲げモーメント)と杭部材角 R_p の関係を示す。ここで、杭頭接合面とはパイルキャップ内に入っている杭体先端(図-4 中 K 点)と定義している。図-5 中の凡例は杭頭定着筋の配筋段数とひずみゲージ貼付位置を示している。

(a) SP1

正載荷時は杭部材角 R_p=0.2%で1段目杭頭定着筋が圧縮降伏しその後、3段目までの杭頭定着筋が圧縮降伏した。多くの鉄筋の圧縮降伏が先行したため、引張側鉄筋の引張降伏を直接計測した歪からは判断できなかった。そこで本実験では、鉄筋の応力ひずみ関係に完全弾塑性モデルを仮定して鉄筋の応力を推定し、その応力が降伏強度に達した時点を鉄筋が引張降伏したと定義した。最外縁引張鉄筋である5段目杭頭定着筋が R_p=1.0%で引張降伏し、剛性が初期剛性の80%以下に低下した。その後、耐力は横這いとなり R_p=2.0%で一度耐力低下したが再度上昇した。負載荷時も同様に最外縁引張鉄筋である1段目杭頭定着筋が引張降伏する事によって剛性が初期剛性の80%以下に低下した。その後、4段目までの杭頭定着筋が引張降伏したが、耐力は伸び続け変位計の計測容量を超えたため実験を終了し、その地点を負側実験最大耐力とした。

(b) SP2

正載荷時に1段目定着筋が圧縮降伏し、剛性が初期剛性の10%程度低下した。その後、R_p=1.0%で最外縁引張鉄筋が降伏する事により耐力が横這いになりだったが、耐力低下は見られず変位計の計測容量を超えたため、載荷方向を反転して負載荷方向で押し切り載荷とした。負載荷時は最外縁引張鉄筋が降伏し、その後 R_p=1.0%で剛性低下し耐力が横這いとなった。R_p=2.3%程度で3段目

杭頭定着筋が引張降伏した後、負側最大耐力に到達した。

4.2 各種鉄筋の応力度の状況

図-6 に各種鉄筋に貼り付けたひずみゲージの位置、図-7 に各種鉄筋の応力度の状況を示す。応力度の状況は剛性が初期剛性の80%以下となり、各載荷方向の主な曲げ抵抗機構がほぼ形成されたと判断された時点である杭部材角 R_p=±1.0%時相当を示している。図中の丸印は各種鉄筋に貼り付けたひずみゲージで計測したひずみを完全弾塑性モデルを仮定して応力 σ に変換し、各種鉄筋の降伏応力 σ_y で除して(σ/σ_y)基準化しており、丸印の大き

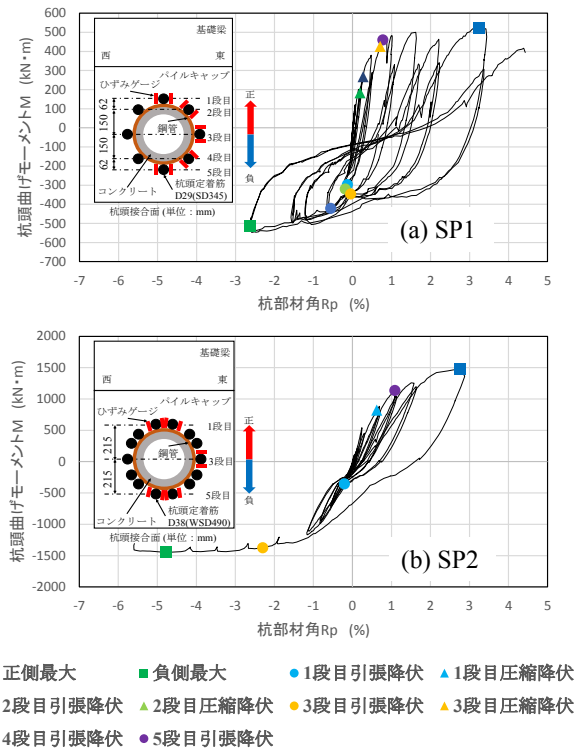


図-5 杭曲げモーメント-杭部材角関係 (M-R_p)

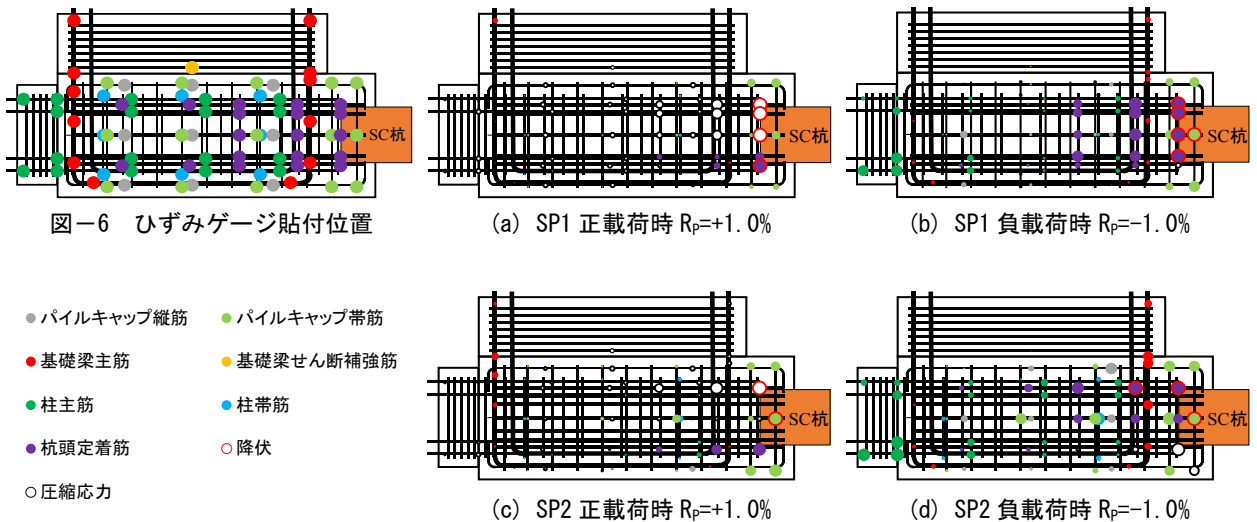


図-7 各種鉄筋の応力度の状況

さによって応力の大きさを示している。塗潰された丸印を引張、白丸を圧縮、丸印に赤枠が付いたものを降伏として示している。

(a) SP1

両載荷時共通して杭頭接合部近傍の杭頭定着筋、パイルキャップ帯筋(以下、帯筋)に大きなひずみが集中した。負載荷時はパイルキャップ西面中央部まで杭頭定着筋ひずみが大きくなっており、柱主筋のひずみも大きくなっていった。正載荷時は曲げモーメントによる圧縮力と圧縮軸力を受けているため引張応力を負担している定着筋が4段目と5段目のみとなっており中立軸深さが深い事がわかる。一方負載荷時は引張軸力を加力しているため引張側となる杭頭定着筋の本数が増え中立軸深さが浅くなっていた。

(b) SP2

正載荷時はSP1同様に杭頭接合部近傍の鉄筋に大きなひずみが集中した。負載荷時は杭頭定着筋、帯筋に加えパイルキャップ縦筋、柱主筋、梁主筋のひずみがパイルキャップの広範囲で降伏近くまで上昇した。SP2は杭頭定着筋量を増やしたため、軸力比の同じ負載荷時には中立軸深さがSP1に比べ浅くなっていた。

4.3 破壊性状

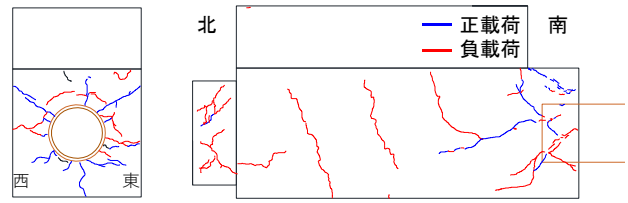
図-8にひび割れ状況、写真-1に最終破壊状況を示す。ひび割れ状況は最後にひび割れ観測をした代表変形角 $R=-1.5\%$ 時のものを示している。ひび割れ観測はパイルキャップに杭が取り付く南面(以下、パイルキャップ底面)とパイルキャップ西面で行った。青線が正載荷時、赤線が負載荷時に発生したひび割れ、黒線は初期ひび割れを示している。

(a) SP1

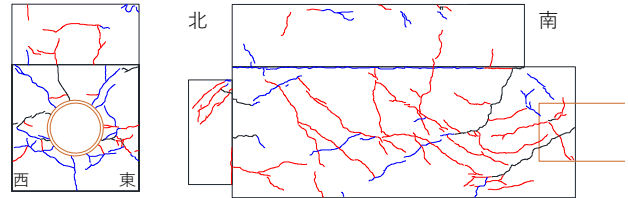
杭部材角 $R_p=0.2\%$ でパイルキャップ南面にひび割れが数本放射状に発生しその後、パイルキャップ西面へと進行していた。ひび割れは杭頭接合部に集中し、柱側(北側)への進展は見られず杭頭接合部に発生したひび割れの拡幅が顕著であった。載荷方向に対し両観測面共に圧縮側となる側にひび割れが現れた。

(b) SP2

$R_p=0.1\%$ でパイルキャップ底面から左右方向にひび割れが発生し、 $R_p=0.3\%$ でパイルキャップ底面から斜め方向にひび割れが発生した。その後、パイルキャップ西面へと進行していった。SP1同様に杭頭接合部近傍にひび割れが多く見られたが負載荷時はパイルキャップ西面全域にせん断ひび割れが多数発生し、実験終了時はせん断ひび割れ幅の拡幅も顕著であった。また、杭頭接合部に加え基礎梁部、柱部のひび割れも見られた。正載荷時はパイルキャップ底面、負載荷時はパイルキャップ西面にひび割れが発生しており載荷方向による違いが見られた。

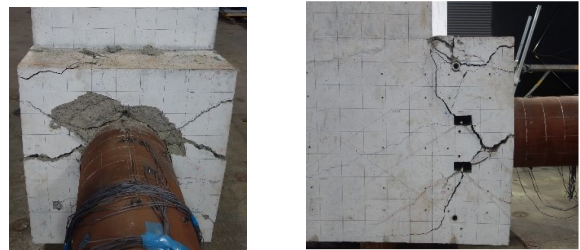


(a) SP1 (左：パイルキャップ底面, 右：西面)



(b) SP2 (左：パイルキャップ底面, 右：西面)

図-8 ひび割れ状況 ($R=-1.5\%$ 時)

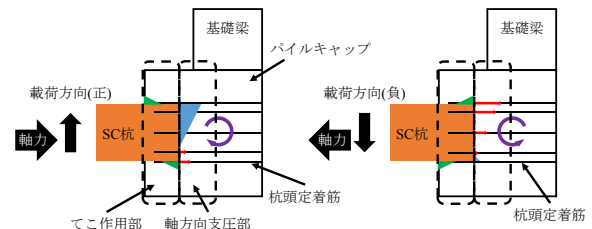


(a) SP1 (左：パイルキャップ底面, 右：西面)



(b) SP2 (左：パイルキャップ底面, 右：西面)

写真-1 最終破壊状況



(a) 正載荷時(圧縮軸力) (b) 負載荷時(引張軸力)

図-9 杭頭接合部の曲げ抵抗機構(模式)

4.4 杭頭接合部の抵抗機構

図-9に杭頭接合部の曲げ抵抗機構(模式)を示す。両試験体共に正載荷時に圧縮側となる杭頭接合面基礎梁側は曲げモーメントによる圧縮力と圧縮軸力を受けている。そのため杭頭接合面に付加される軸力が大きくなると中

立軸深さが深くなる。また、杭頭接合部は杭頭部を埋め込んでいるパイルキャップ部コンクリートの杭体へのでこ作用による支圧効果がはたらく。この支圧効果は両試験体ともに杭頭接合部のひび割れ幅拡が顕著でありパイルキャップ帯筋が降伏した杭部材角 $R_p=1.0\%$ 程度で耐力上昇が見込めない状態となり、その後は引張側にある杭頭定着筋と圧縮側のパイルキャップ部コンクリートが曲げに抵抗していたと考えられる。ただし、

4.5 杭頭曲げモーメントの計算値と実験値の比較

杭頭曲げモーメントを基礎構造部材の耐震設計指針案・同解説³⁾(以下、RC基礎指針)、道路橋示方書⁴⁾に記載の評価方法を用いて実験値と比較した。これらの評価方法は杭頭接合面における平面保持を仮定した断面解析によって杭頭曲げモーメントを得る。各評価方法の違いは断面モデル、材料モデルである。RC基礎指針の評価方法はパイルキャップ部コンクリートの軸方向支圧力による圧縮強度上昇を考慮してコンクリート圧縮強度 σ_B を2倍としている。また、杭頭部のパイルキャップ内への埋め込みによってこ作用を考慮している。

$$uM_{ph} = F_c \cdot (D \cdot h^2 \cdot L) / (6L + 4h) \quad (3)$$

ただし、 uM_{ph} :パイルキャップへの埋込み部前・後面のでこ作用による曲げモーメント(N・mm)、D:杭外径(mm)、h:杭のパイルキャップへの埋込み長さ(mm)、L:杭頭の曲げモーメントとせん断力の比 M/Q とする。道路橋示方書に記載の評価方法は杭頭接合面断面モデルを杭径 $D+200\text{mm}(=600\text{mm})$ の仮想RC断面(図-10)として断面解析を行う。

図-11に計算値と実験値の比較を示す。SP1正載荷時は道路橋示方書に記載の計算値と対応が良かった。また、RC基礎指針の評価方法では計算値が下回った。負載荷時はRC基礎指針の計算値と実験値の比率(exp/cal)が1.6、道路橋示方書では3.1と安全側ではあるが十分に評価出来なかった。SP2正載荷時は比率1.5から1.8となりすべての評価方法で安全側の評価となったが良く対応しなかった。負載荷時ではすべての計算値で良好な評価は出来

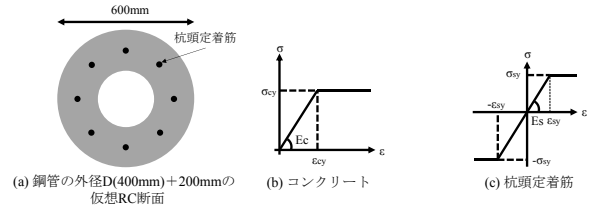


図-10 断面モデルと材料モデル

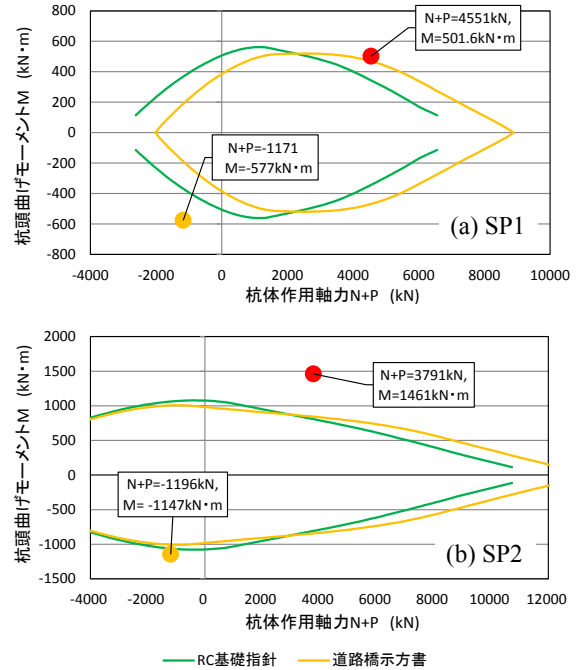


図-11 杭頭曲げモーメント計算値と実験値の比較

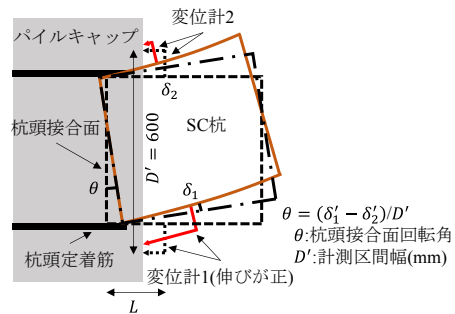


図-12 杭頭接合面回転角の測定方法

表-5 計算法①を用いた計算値と実験値の比較

		ε_y	dbp	lbo	α	dn	S_{by}	$exp\theta_y$	$cal\theta_y$	$exp\theta_y/cal\theta_y$
		10^{-5}	mm	mm	-	mm	mm	%	%	-
SP1	正載荷時	2000	28.6	915.2	32	160.8	0.92	0.72	0.57	1.27
	負載荷時	2000	28.6	915.2	32	399.7	0.92	-0.14	-0.23	0.61
SP2	正載荷時	2789	38.1	1219.2	32	178.6	1.70	0.60	0.95	0.63
	負載荷時	2789	38.1	1219.2	32	268.3	1.70	-0.37	-0.63	0.58

表-6 計算法②を用いた計算値と実験値の比較

		σ_B	τ_b	$s\sigma_y$	A_s	d	L_b	ϕ_y	$exp\theta_y$	$cal\theta_y$	$exp\theta_y/cal\theta_y$
		MPa	MPa	MPa	mm ²	mm	mm	$10^{-6}1/\text{mm}$	%	%	-
SP1	正載荷時	28.6	3.74	392	642.4	29	738.8	11.51	0.72	0.85	0.85
	負載荷時	28.6	3.74	392	642.4	29	738.8	4.75	-0.14	-0.35	0.40
SP2	正載荷時	28.9	3.76	530	1140	38	1346.4	6.47	0.60	0.87	0.69
	負載荷時	28.9	3.76	530	1140	38	1346.4	9.49	-0.37	-1.28	0.29

なかった。ただし、RC基礎指針に記載の評価方法では、軸方向支圧力による圧縮強度上昇が適切に評価出来なかった事、道路橋示方書に記載の評価方法は杭頭部のパイルキャップ内への埋め込みによるてこ作用曲げモーメント耐力寄与分は陽に含まれていないため、より正確な評価方法を提案する必要がある。

4.6 杭頭接合面回転角の計算値と実験値の比較

RC基礎指針に記載の評価方法を用い最外縁引張鉄筋降伏時の杭頭接合面回転角 θ_y を算出し実験値と比較した。ただし、RC基礎指針には本研究で用いたSC杭を対象とした評価方法の記載がないため、場所打ちコンクリート杭、場所打ち鋼管コンクリート杭、鋼管杭を対象とした評価方法を用いた。なお、コンクリート、鋼材の力学的特性は材料試験値を用いた。ここで、杭頭接合面回転角とは杭頭部主筋の拔出し変形による回転成分と定義する。また、実験から得られた杭頭接合面回転角 θ は図-12に示すように杭体からパイルキャップ底面にあてている変位計1, 2で測定した杭体拔出し量 δ_1 , δ_2 から杭体表面上下に貼り付けたひずみゲージ計6点により計測した杭体の弾性伸びを差し引いて杭頭接合面での杭体拔出し量 δ'_1 , δ'_2 を算出し、変位計取り付け区間D'で除した値を杭頭接合面回転角 θ の実験値として用いた。ただし、計測したひずみは概ね線形に分布しており、ひずみゲージの貼り付けていない杭頭接合面のひずみは外挿して求め、ひずみを長さ方向に積分して杭体の弾性伸びを求めた。

(a) 場所打ち鉄筋コンクリート杭の杭頭接合面回転角 θ の評価方法(評価法①)

$$\theta_y = S_{by}/d_n \quad (4)$$

ただし、 θ_y :最外縁引張鉄筋降伏時の変形角、 S_{by} :最外縁引張鉄筋の拔出し量(mm)、 d_n :断面解析による回転中心までの距離(mm)とする。

$$S_{by} = \epsilon_y \cdot l_{bo}/2 = \epsilon_y \cdot \alpha \cdot d_{bp}/2 \quad (5)$$

ただし、 ϵ_y :杭頭定着筋降伏ひずみ、 l_{bo} :一様な付着長さを仮定した場合の付着長さ(mm)、 d_{bp} :杭頭定着筋径(mm)、 $\alpha = l_{bo}/d_{bp}$ (RC基礎指針では=32)とする。

(b) 鋼管杭、場所打ち鋼管コンクリート杭の杭頭接合面回転角 θ の評価方法(評価法②)

$$\theta_y = \phi_y \cdot L_b \quad (6)$$

ただし、 ϕ_y :鋼管の直径D+200mmの仮想RC断面の断面解析で、最外縁引張鉄筋が降伏した時の曲率(1/mm)、 L_b :杭頭定着筋の付着長さ(mm)

$$L_b = (\tau_{\sigma_y} \cdot rA) / (\tau_b \cdot \pi \cdot d) \quad (7)$$

ただし、 τ_{σ_y} :杭頭定着筋の材料強度(MPa)、 rA :杭頭定着筋の断面積(mm²)、 τ_b :杭頭定着筋とパイルキャップ部コンクリートとの付着強度(MPa)

$$\tau_b = \min\{\sigma_B/10 \cdot 1.5, (1.35 + \sigma_B/25) \cdot 1.5\} \quad (8)$$

d:杭頭定着筋の呼び名(mm)とする。

表-5, 表-6に計算結果を示す。評価法①では実験値と計算値の比率(exp/cal)がSP1正載荷時は1.27, 負載荷時0.61, SP2正載荷時では0.61, 負載荷時0.58と良好に対応しなかった。評価法②では、SP1正載荷時は比率が0.85と概ね一致したが、SP1負載荷時では0.4, SP2正載荷時0.69, 負載荷時0.29と危険側の評価となった。良好に評価出来なかった要因として杭頭定着筋の定着長さの実験値と計算値に差異があった事が考えられる。

5. 結論

本研究ではSC杭、パイルキャップ、基礎梁、柱から構成されるト形部分架構試験体を用いて杭頭接合部の曲げ性能を把握する事を目的に静的載荷実験を行った。以下にまとめを示す。

- (1) 杭頭接合部における曲げ抵抗機構は埋め込み部のてこ作用による機構及び、杭頭定着筋とパイルキャップ部コンクリートによって形成される機構が存在している事がわかった。ただし、その寄与分については各抵抗機構を模擬した要素実験等でデータを蓄積し抵抗機構モデルの構築を行う必要がある。
- (2) 既往の評価式を用い、杭頭曲げモーメントを計算し実験値と比較した。SP1正載荷時は道路橋示方書に記載の計算値と対応が良かった。SP1負載荷時及び、SP2正載荷時は2つの計算値は実験値を過小評価した。SP2負載荷時では2つの評価式で精度よく評価出来た。
- (3) RC基礎指針に記載の2通りの計算方法を用い最外縁引張鉄筋降伏時の杭頭接合面回転角を算出し実験値と比較した。その結果、良好な対応は見られずまた、危険側となる場合があるため今後精度がよい評価方法の提案が必要である。

謝辞

本研究は平成29年度年度住宅・建築物技術高度化事業「大地震後の継続使用性に資する杭および杭頭接合部の技術開発」および(国研)建築研究所指定課題「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性評価技術の開発」により実施しました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 東日本大震災合同調査報告, 建築編5, 建築基礎構造, 津波の特徴と被害, 2014.
- 2) 田中広夢, 長澤和彦, 土佐内優介, 向井智久: 引張軸力または高圧縮軸力をうける既製コンクリート杭の曲げ性能, コンクリート工学年次論文報告集, JCI, 40(2), pp. 781-786, 2018.
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)・同解説, 2017.3
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(IV下部構造編), 2017.11