

論文 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

田中 広夢^{*1}・長澤 和彦^{*2}・土佐内 優介^{*3}・向井 智久^{*4}

要旨: 既製コンクリート杭の曲げ性能を確認することを目的に, SC 杭および PRC 杭, PHC 杭の曲げ試験を行った。SC 杭の場合, 変形性能は作用軸力の増大に伴って低下したが, 破壊後も軸力保持性能は喪失しなかった。PRC 杭および PHC 杭の場合, 高圧縮軸力下では変形性能が非常に乏しく, 脆性的な破壊となった。引張軸力下では, PHC 杭は PC 鋼材の破断によって終局に至り引張軸力を保持できなくなったが, PRC 杭では PC 鋼材が破断した後も主筋の存在によって引張軸力を保持した。また, 平面保持を仮定した断面解析によって曲げモーメント-曲率関係の評価を行い, その評価精度を確認した。

キーワード: 既製コンクリート杭, 引張軸力, 高圧縮軸力, 曲げ耐力, 変形性能, 断面解析

1. はじめに

2011 年の東日本大震災では, 杭基礎の損傷によって建物の沈下や傾斜などの被害が発生し, 建物が継続使用できない事例があった¹⁾。この要因の一つに, 基礎構造には大地震に対する検討が義務付けられておらず²⁾, 主に許容応力度設計法による設計が行われていることが挙げられる。このため, 建築基礎構造設計指針の次期改定版には, 二次設計についてより詳細な記載がなされる予定である³⁾。一方で, パイルメーカーが行う既製コンクリート杭の製品検査は, 曲げ耐力の確認が主目的となっている。また, 既製コンクリート杭の変形性能に着目した研究はいくつかある(例えば, 文献 4~6)ものの, 引張

軸力・高圧縮軸力下での実験データの集積は十分でなく, 二次設計に資する資料が不足している。

本研究では, 引張軸力・高圧縮軸力下での既製コンクリート杭の曲げ性能を確認することを目的に杭体の曲げ実験を行い, 作用軸力の違いが杭体の曲げ耐力, 変形性能, 破壊性状に与える影響を確認した。また, 文献 7 の方法に従い, 平面保持を仮定した断面解析によって, 曲げモーメント-曲率関係の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体諸元を表-1, 試験体断面図を図-1 に示す。

表-1 試験体諸元
(a) SC 杭

試験体名	D (mm)	T (mm)	t _s (mm)	T/D	A (×10 ⁴ mm ²)	A _e (×10 ⁴ mm ²)	σ _B (MPa)	N (kN)	N/N ₀	L (m)	L _s (m)
SC_1 ①	400	77	6.0	0.19	7.82	11.0	114	1000	0.09	8.0	6.0
SC_1 ②	400	75	6.0	0.19	7.69	10.8	110	1000	0.09	8.0	6.0
SC_2 ①	400	77	6.0	0.19	7.79	11.0	111	2000	0.18	8.0	6.0
SC_2 ②	400	78	6.0	0.19	7.87	11.0	110	2000	0.18	8.0	6.0
SC_6	400	70	6.0	0.17	7.23	10.4	112	5290	0.52	6.0	5.0
SC_N5	400	73	6.0	0.18	7.46	10.6	110	-1200	-0.40	6.0	5.0

[共通] D:杭径 T:杭肉厚(鋼管厚を含み, 規格値は 65mm) T/D:厚径比 A:実断面積=π(D²-(D-2T)²)/4 N:軸力(圧縮正) L:試験体長さ

L_s:試験体支持長さ E_c:コンクリート弾性係数(材料試験値) σ_B:コンクリート圧縮強度(材料試験値)

[(a)のみ] t_s:鋼管厚 A_e:コンクリート換算断面積=A+A_s*(E_s/E_c-1) A_s:鋼管断面積 E_s:鋼管弾性係数(材料試験値)

N/N₀:軸力比=N/(σ_B*(A-A_s)+f_{sy}*A_s)(圧縮軸力時), N/(f_{sy}*A_s)(引張軸力時) f_{sy}:鋼管降伏強度(材料試験値)

(b) PRC 杭 PHC 杭

試験体名	D (mm)	T (mm)	T/D	A (×10 ⁴ mm ²)	A _e (×10 ⁴ mm ²)	σ _B (MPa)	PC 鋼材	P _{g1} (%)	主筋	P _{g2} (%)	らせん筋	σ _{ce} (MPa)	N (kN)	N/N ₀	L (m)	L _s (m)
PRC_III_6	400	73	0.18	7.47	8.38	132	8-φ10	0.84	8-D19	3.07	φ6.5@70	7.0	4590	0.41	6.0	5.0
PHC_C_6	400	73	0.18	7.46	7.80	110	10-φ11.2	1.32	-	-	φ3.2@100	10.3	4100	0.43	6.0	5.0
PRC_III_N3	400	71	0.18	7.34	8.25	132	8-φ10	0.86	8-D19	3.12	φ6.5@70	7.1	-439	-0.25	6.0	5.0
PHC_C_N3	400	74	0.18	7.55	7.88	123	10-φ11.2	1.31	-	-	φ3.2@100	10.1	-344	-0.26	6.0	5.0

[(b)のみ] A_e:コンクリート換算断面積=A+A_d*(E_d/E_c-1)+A_p*(E_p/E_c-1) A_d:主筋の全断面積 E_d:主筋の弾性係数(材料試験値)

A_p:PC 鋼材の全断面積 E_p:PC 鋼材の弾性係数(材料試験値) P_{g1}:PC 鋼材比=A_p/A P_{g2}:主筋比=A_d/A

σ_{ce}:有効プレストレス量=σ_p*A_p/(A-A_p+(E_d/E_c-1)*A_d) σ_p:PC 鋼材の緊張力

N/N₀:軸力比=N/(σ_B*(A-A_p-A_d)+f_{py}*A_p+f_{dy}*A_d)(圧縮軸力時), N/(f_{py}*A_p+f_{dy}*A_d)(引張軸力時) f_{py}:PC 鋼材降伏強度 f_{dy}:主筋降伏強度

*1 清水建設(株)(元東京工業大学大学院生) 修士(工学) (正会員)

*2 (一社)コンクリートパイル建設技術協会(元建築研究所交流研究員) 修士(工学) (正会員)

*3 (株)フジタ 技術センター 主任研究員 修士(工学)

*4 (国研)建築研究所 構造研究グループ 主任研究員 博士(工学) (正会員)

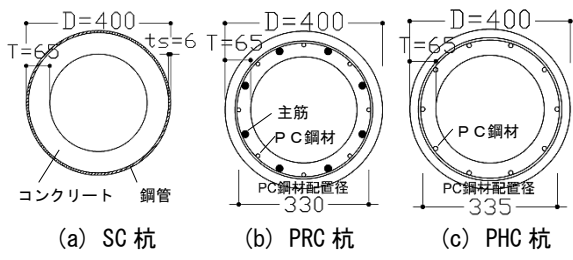


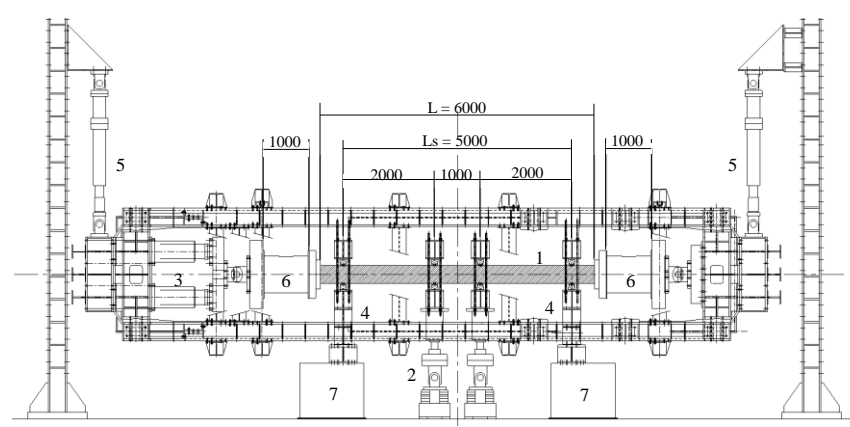
図-1 試験体断面図

試験体はSC杭6体, PRC杭(Ⅲ種)2体, PHC杭(C種)2体で、杭径400mm、規格厚径比 T/D が0.16の実大試験体である。同杭種間で仕様は共通しているが、表中の厚径比、断面積、鋼材比、有効プレストレスは、杭肉厚の実測値と材料試験値を用いて算出しているため試験体によって値が異なっている。表-1の欄外には各数値の定義を示しており、(a)、(b)間で共通のものは(a)の欄外のみ、定義の異なるものはそれぞれに記載した。コンクリートの設計基準強度は 105N/mm^2 であり、圧縮強度は遠心成形供試体(外径200mm、高さ300mm、肉厚40mm)の圧縮試験により測定した。使用したコンクリートと鋼材の力学的性質を表-2に示す。

試験体に作用させる軸力は、地震時の軸力変動を考慮し、引張軸力として設計軸力比-0.5(SC杭)または-0.3(PRC杭, PHC杭)を、高圧縮軸力として設計軸力比0.6を計画した。設計軸力比は肉厚と材料強度の規格値を用いて表-1の欄外の定義によって算出した軸力比である。また、SC杭では設計軸力比0.1及び0.2相当(N値60を想定し、支持力係数 $\alpha=400$ とした極限支持力3014kNの1/3及び2/3)についても試験を行った。これらの試験体は実験精度の確認を目的として同条件で2体ずつ荷重を行っている。実際の軸力比は表-1に示す通りである。

2.2 加力および測定方法

本実験では図-2、写真-1に示すように杭体を横向き



1:試験体 2:せん断力荷重ジャッキ(押400t/引150t×2台) 3:軸力荷重ジャッキ(押500t/引200t×4台) 4:試験体支持点(スライド可) 5:フレーム自重相殺用ジャッキ 6:スペーサー 7:コンクリートブロック

図-2 加力装置図(L=6mの場合)

表-2 材料の力学的性質

(a) コンクリート

試験体名	圧縮強度 σ_B (MPa)	ヤング係数 E_c (GPa)	圧縮強度時ひずみ ϵ_m (%)
SC_1 ①	114	40.5	0.306
SC_1 ②	110	41.2	0.309
SC_2 ①	111	40.6	0.313
SC_2 ②	110	40.9	0.300
SC_6	112	41.2	0.312
SC_N5	110	41.2	0.326
PRC_Ⅲ_6	132	49.2	0.280
PHC_C_6	110	48.2	0.278
PRC_Ⅲ_N3	132	49.2	0.280
PHC_C_N3	123	49.3	0.303

(b) 鋼材

	降伏強度 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)	ヤング係数 E_s (GPa)	降伏ひずみ ϵ_y (%)	
鋼管	SKK490	404 ^{*1}	540	215	0.188 ^{*2}
PC鋼材	$\phi 10$	1410 ^{*1}	1467	207	0.681 ^{*2}
	$\phi 11.2$	1366 ^{*1}	1477	216	0.632 ^{*2}
主筋	D19	384	572	202	0.191
らせん筋	$\phi 3.2$	—	540 ^{*3}	—	—
	$\phi 6.5$	490 ^{*3}	—	—	—

※1 0.2%オフセット法で求めた値 ※2 $\epsilon_y = f_y / E_s$
 ※3 材料規格値

に単純支持し、一定軸力を加えた状態で中央の2台のジャッキ(図中の2)により同一方向にせん断力を加えた。軸力荷重装置の重量が試験に影響を与えないように、装置両端の柱に設置したジャッキ(図中の5)により、装置重量を相殺する一定荷重で装置を吊り上げている。これらの実験は建築研究所実大構造物実験棟にて実施した。

中央のせん断力荷重ジャッキ間の距離は1mであり、この曲げモーメント一定区間内で曲率の計測を行った。試験体長さ $L=8\text{m}$ の場合は試験体支持長さ $L_s=6\text{m}$ とした。 $L=6\text{m}$ の場合は $L_s=5\text{m}$ とし、杭両端部に1mのスペーサーを介して装置と接続した。

支持点と杭体中央点の相対鉛直変位を測定し、これを

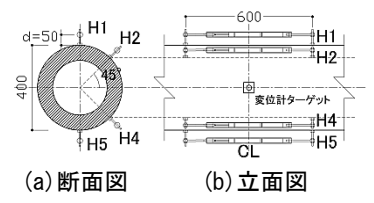


図-3 曲率用変位計の設置位置

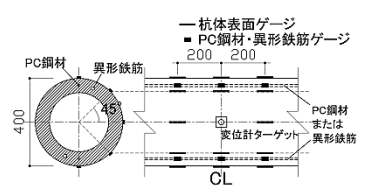


図-4 ひずみゲージ貼付位置

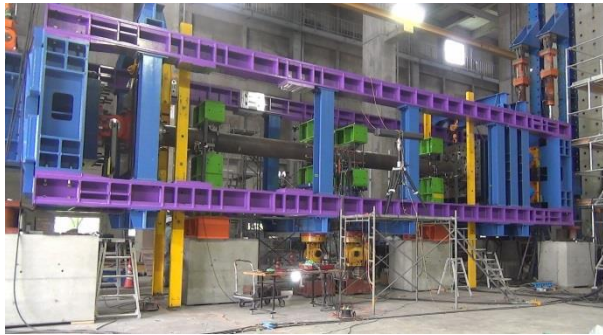


写真-1 加力装置

L_s の半分で除した値を変形角 R とした。加力は正負交番繰り返し載荷とし、 $R=\pm 0.125\%$, $\pm 0.25\%$, $\pm 0.375\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 0.75\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 3.0\%$, $\pm 4.0\%$, $\pm 5.0\%$ で各 2 回ずつ繰り返した。なお、上方向への加力を正載荷と定義し、はじめに正側から載荷した。

図-3 に示すように軸方向に変位計を設置し、式(1)により曲率を算出した。

$$\phi = (\delta_{H1} - \delta_{H5}) / (L_d \cdot (D + 2 \cdot d)) \quad (1)$$

ここで $\delta_{H1} \cdot \delta_{H5}$: H1 または H5 の伸び計測値 (mm)

L_d : 変位計の検長 (600mm)

d : 変位計と杭表面の距離 (50mm)

また杭体表面には、図-4 に示すようにひずみゲージを貼付し、軸方向ひずみの計測を行った。PHC 杭、PRC 杭の場合、載荷時に圧縮縁、引張縁に位置する PC 鋼材、主筋にはひずみゲージをそれぞれ 3 枚ずつ貼付した。

SC 杭の鋼管の局部座屈は全て載荷点の付近で発生した。座屈の発生後は圧縮変形が座屈点に集中するため、曲率計測区間で圧縮変形が進行しにくくなる。本実験では座屈の発生を検知するため、SC 杭には図-5 のように載荷点を挟んで軸方向変位計を設置した。

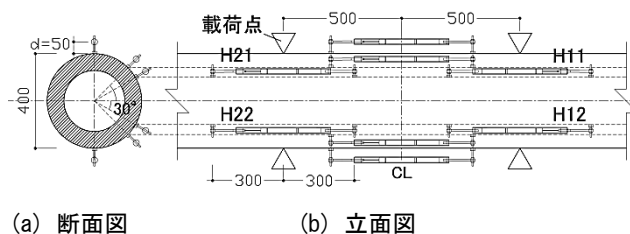


図-5 局部座屈検知用変位計の設置位置

3. 実験結果

3.1 曲げモーメント M - 曲率 ϕ 関係

図-6 に杭体中央の曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係を示す。同図には特性点をマークし、これらのうちで解析値と比較する点を表-3 に示した。曲げモーメントは軸力による付加モーメントを考慮して算出した。

図-6 中の破壊点は、SC_N5 を除く SC 杭は鋼管の局部座屈、PRC_III_6 および PHC_C_6 はコンクリートの圧壊、PRC_III_N3 および PHC_C_N3 は PC 鋼材の破断を表している。SC_N5 は載荷装置の不具合により、破壊に至る前に載荷を終了した。また PRC_III_N3 は、載荷ミスにより $R=0.75\%$ まで荷重を正確に計測できなかった。そのため、図-6(i) には $R=1\%$ の載荷サイクル以降を示した。なお、 $R=0.75\%$ 以前に曲げひび割れおよび主筋の引張降伏が発生している。

PHC 杭および PRC 杭における曲げひび割れ発生点は、コンクリート表面のひずみゲージ計測値の変化から決定した。鋼材の降伏は、各鋼材に貼付したひずみゲージの計測値が表-2(b) に示す降伏ひずみ ϵ_y に到達した点とした。同様に、コンクリートの ϵ_m 到達とは、鋼管のひずみゲージまたは曲率用変位計から圧縮側コンクリートのひずみを推定し、それが表-2(a) に示す圧縮強度時ひずみ ϵ_m に到達した点である。

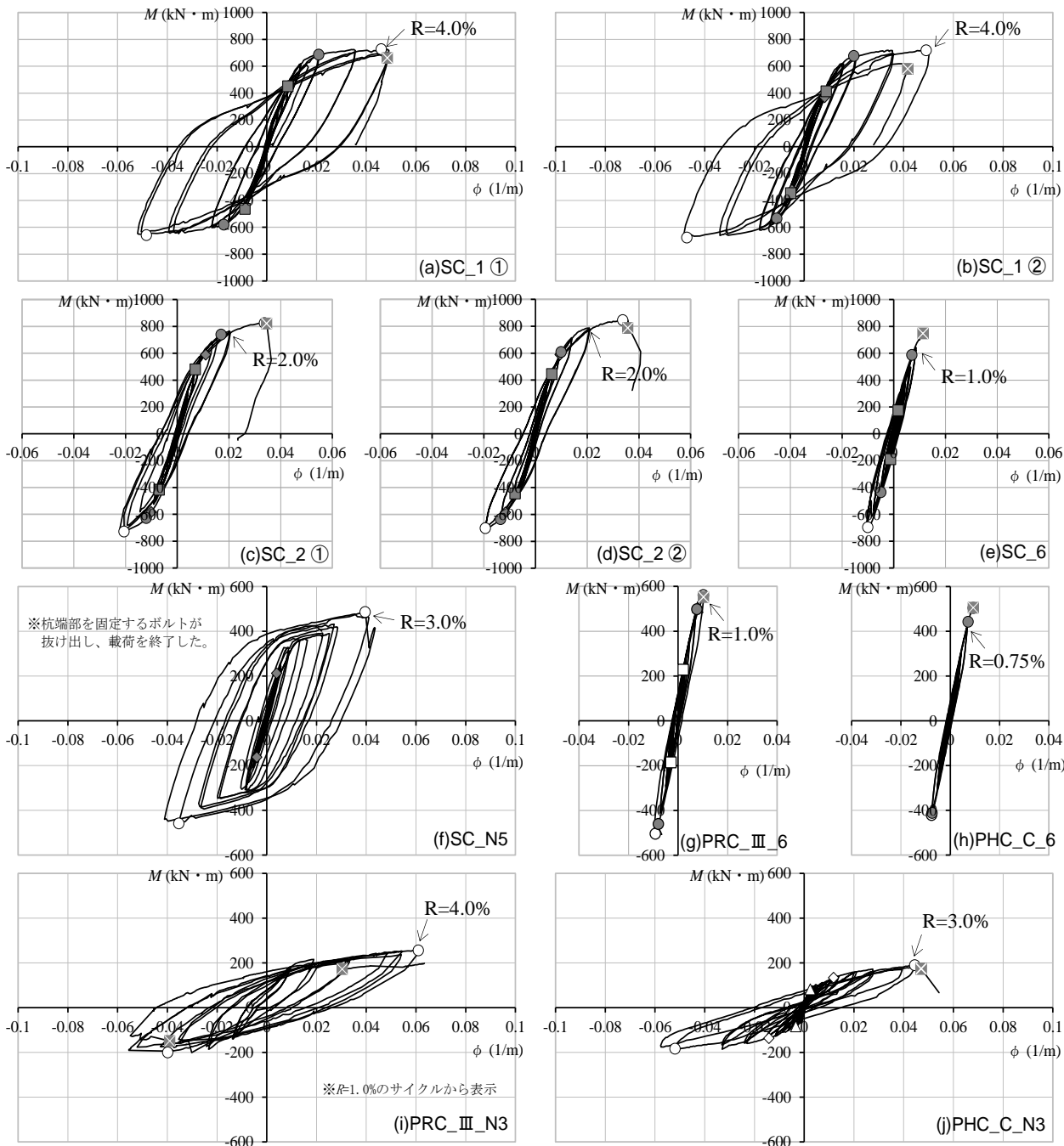
また、鋼管の局部座屈の発生点は変形角 R が増加しているにもかかわらず式(1)により算出した曲率 ϕ が減少に転じた点、または、図-5 に示す圧縮側変位計の計測値が急激に増加した点と定義した。

$M - \phi$ 関係は全試験体とも正負でおおよそ対称であり、曲げひび割れ、鋼材の降伏といった各特性点も正負でほぼ同様の位置で発生した。ただし、鋼管の引張降伏・圧縮降伏の両方が見られた SC 杭では、降伏の発生順序が正負で異なる場合があった。各特性点の曲げモーメントは、はじめに載荷した正側がやや高い傾向にあった。同条件で 2 体の実験を行った SC_1, SC_2 については、それぞれ同様の耐力・履歴性状が得られることを確認した。

3.2 破壊過程

SC_1 は載荷に伴って鋼管の引張降伏と圧縮降伏が発生し、その後にコンクリートひずみが ϵ_m に到達した。SC_2 は圧縮降伏が先行し、その後に引張降伏と ϵ_m 到達が起こった。SC_6 は圧縮降伏後に ϵ_m に到達し、SC_N5 は載荷した範囲では引張降伏のみが発生した。

圧縮軸力を与えた SC_1, SC_2 および SC_6 は、 ϵ_m に到達した後も、曲げモーメントおよび曲率は増大した。SC_1 は 2 体とも $R=4\%$ ($\phi \approx 0.05\text{m}^{-1}$) のサイクル 1 周目で最大耐力を迎え、①は $R=5\%$ のサイクル 1 周目、②は $R=4\%$ の 2 周目において鋼管の局部座屈が発生した。SC_2①および②、SC_6 は最大耐力を迎えるとほぼ同時に鋼管の局部座屈が発生した。 ϵ_m 到達後から最大耐力および破壊を迎えるまでの変形量は、作用させた圧縮軸力が大きい試験体ほど小さくなった。しかし、破壊を確認できなかった SC_N5 を除いて、全ての SC 杭は局部座屈が発生した後まで圧縮軸力を保持していた。



◆鋼管引張降伏 ■鋼管圧縮降伏 △ひび割れ ○PC鋼棒引張降伏 □主筋圧縮降伏 ●コンクリート ϵ_m 到達 ○最大耐力 ■破壊

図-6 曲げモーメント M -曲率 ϕ 関係

PRC_III_6 は荷重に伴って主筋が圧縮降伏し、その後コンクリートひずみの ϵ_m 到達と曲げひび割れが発生した。主筋が降伏しても、顕著な剛性低下はみられなかった。 $R=1\%$ ($\phi \approx 0.01\text{m}^{-1}$) のサイクル 1 周目で最大耐力を迎えた後、2 周目でコンクリートが圧壊した。PHC_C_6 についてはひび割れ、PC 鋼材の降伏は見られず、 ϵ_m 到達後の $R=1\%$ ($\phi \approx 0.01\text{m}^{-1}$) のサイクル 1 周目でコンクリートが圧壊した。これらの試験体は変形性能が非常に乏しく、破壊断面では引張縁を含めた杭体全周のコンクリートが激しく圧壊し、圧縮軸力を保持できなくなった。

PRC_III_N3 は曲げひび割れ、主筋の引張降伏、PC 鋼材の引張降伏が順に発生し、 $R=4\%$ ($\phi \approx 0.06\text{m}^{-1}$) の 1 周目で最大耐力を迎えた。負側 $R=4\%$ の 2 周目の荷重で PC 鋼材が破断し、耐力が最大時の 6 割程度まで低下したが引張軸力は保持した。続く正側 $R=5\%$ の荷重でも PC 鋼材が破断して耐力が最大時の 8 割程度まで低下し、荷重を終了した。PHC_C_N3 は曲げひび割れ、PC 鋼材の引張降伏が順に発生し、 $R=3\%$ ($\phi \approx 0.05\text{m}^{-1}$) で最大耐力を迎えた。正側 $R=4\%$ の荷重で PC 鋼材が破断して急激な耐力低下を起こし、引張軸力を保持できなくなった。

表-3 各特性点の曲げモーメントMおよび曲率φ

(a) SC杭

		鋼管引張降伏				鋼管圧縮降伏				コンクリートε _m 到達				破壊性状
		M (kN・m)		φ (×10 ⁻³ /m)		M (kN・m)		φ (×10 ⁻³ /m)		M (kN・m)		φ (×10 ⁻³ /m)		
		正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	
SC_1 ①	実験値	451	-457	8.50	-8.77	450	-464	8.50	-8.77	686	-581	20.9	-17.3	鋼管座屈
	解析値	434	-434	9.05	-9.05	482	-482	10.8	-10.8	582	-582	24.5	-24.5	ε _m 到達
	比率	1.04	1.05	0.94	0.97	0.93	0.96	0.79	0.81	1.18	1.00	0.85	0.71	
SC_1 ②	実験値	434	-459	8.60	-7.23	485	-459	9.70	-7.23	677	-534	20.1	-14.5	鋼管座屈
	解析値	435	-435	9.05	-9.05	483	-483	10.8	-10.8	584	-584	24.7	-24.7	ε _m 到達
	比率	1.00	1.06	0.95	0.80	1.00	0.95	0.90	0.67	1.16	0.91	0.81	0.59	
SC_2 ①	実験値	589	-584	11.1	-10.1	480	-418	7.43	-6.53	739	-628	17.1	-11.9	鋼管座屈
	解析値	534	-534	10.5	-10.5	452	-452	8.35	-8.35	649	-649	18.5	-18.5	ε _m 到達
	比率	1.10	1.09	1.06	0.96	1.06	0.92	0.89	0.78	1.14	0.97	0.92	0.64	
SC_2 ②	実験値	589	-585	9.50	-11.6	444	-445	6.30	-7.90	608	-636	9.90	-13.5	鋼管座屈
	解析値	535	-535	10.5	-10.5	456	-456	8.40	-8.40	641	-641	17.4	-17.4	ε _m 到達
	比率	1.10	1.09	0.90	1.10	0.97	0.98	0.75	0.94	0.95	0.99	0.57	0.78	
SC_6	実験値	-	-	-	-	244	-254	2.63	-2.10	587	-436	7.43	-5.07	鋼管座屈
	解析値	-	-	-	-	222	-222	3.30	-3.30	509	-509	9.25	-9.25	ε _m 到達
	比率	-	-	-	-	1.10	1.14	0.80	0.64	1.15	0.86	0.80	0.55	
SC_N5	実験値	212	-163	4.47	-4.07	× ^{※1}	× ^{※1}	× ^{※1}	× ^{※1}	× ^{※1}	× ^{※1}	× ^{※1}	× ^{※1}	× ^{※2}
	解析値	182	-182	5.60	-5.60	309	-309	31.3	-31.3	321	-321	82.7	-82.7	ε _m 到達
	比率	1.16	0.90	0.80	0.73	-	-	-	-	-	-	-	-	

※1: 載荷した範囲では発生しなかった。 ※2: 載荷装置の不具合により、破壊前に載荷を終了した。

(b) PRC杭 PHC杭

		曲げひび割れ				主筋引張降伏				主筋圧縮降伏				PC鋼材引張降伏				コンクリートε _m 到達				破壊性状
		M (kN・m)		φ (×10 ⁻³ /m)		M (kN・m)		φ (×10 ⁻³ /m)		M (kN・m)		φ (×10 ⁻³ /m)		M (kN・m)		φ (×10 ⁻³ /m)		M (kN・m)		φ (×10 ⁻³ /m)		
		正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	正	負	
PRC_III_6	実験値	506	-484	7.95	-8.55	-	-	-	-	228	-186	2.15	-2.85	-	-	-	-	498	-461	7.61	-7.93	コンクリート圧壊
	解析値	439	-439	7.60	-7.60	-	-	-	-	269	-269	4.50	-4.50	-	-	-	-	466	-466	8.25	-8.25	ε _m 到達
	比率	1.15	1.10	1.05	1.13	-	-	-	-	0.85	0.69	0.48	0.63	-	-	-	-	1.07	0.99	0.92	0.96	
PHC_C_6	実験値	-	-	-	-	/	/	/	/	/	/	/	/	-	-	-	-	443	-412	7.23	-7.37	コンクリート圧壊
	解析値	378	-378	7.45	-7.45	/	/	/	/	/	/	/	/	-	-	-	-	380	-380	7.55	-7.55	ε _m 到達
	比率	-	-	-	-	/	/	/	/	/	/	/	/	-	-	-	-	1.17	1.08	0.96	0.98	
PRC_III_N3	実験値	× ^{※4}	× ^{※3}	1.10	× ^{※3}	× ^{※4}	× ^{※4}	6.88	-7.90	-	-	-	-	× ^{※4}	× ^{※4}	7.50	-8.60	-	-	-	-	PC鋼材破断
	解析値	33.1	-33.1	1.15	-1.15	151	-151	8.10	-8.10	-	-	-	-	160	-160	9.10	-9.10	218	-218	44.7	-44.7	ε _m 到達
	比率	-	-	0.96	-	-	-	0.85	0.98	-	-	-	-	-	-	0.82	0.95	-	-	-	-	
PHC_C_N3	実験値	81.4	-84.1	2.42	-3.38	/	/	/	/	/	/	/	/	110	-104	6.80	-6.77	-	-	-	-	PC鋼材破断
	解析値	60.9	-60.9	1.60	-1.60	/	/	/	/	/	/	/	/	133	-133	10.0	-10.0	172	-172	52.6	-52.6	ε _m 到達
	比率	1.34	1.38	1.51	2.11	/	/	/	/	/	/	/	/	0.83	0.78	0.68	0.68	-	-	-	-	

※3: 負側曲げひび割れ発生点はひずみゲージの計測値から特定できなかった。 ※4: 載荷ミスによりモーメントは計測できなかった。

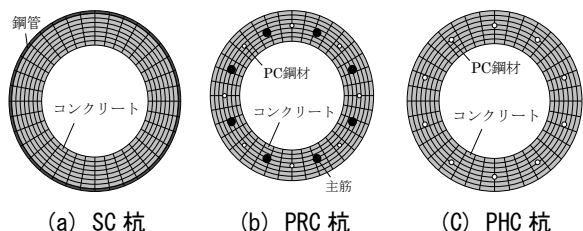


図-7 断面のモデル化

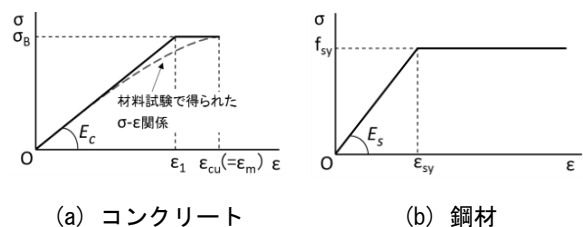


図-8 断面要素の応力-ひずみ関係

4. 断面解析によるM-φ関係の評価

4.1 解析概要

杭体断面の平面保持仮定に基づいた断面解析を行った。図-7に示すように、杭体断面のコンクリートは円周方向に36分割、厚み方向に7分割、鋼管は円周方向に36分割した。PC鋼材と主筋によるコンクリートの断面

欠損は考慮していない。

断面要素の応力-ひずみ関係を図-8に示す。建築基礎構造設計指針⁷⁾を参考に、コンクリート、鋼材ともにバイリニア型のモデルとした。コンクリートの応力は圧縮強度 σ_B に達してから終局ひずみ ϵ_{cu} まで σ_B を維持する。 ϵ_I は σ_B を E_c で除した値、 ϵ_{cu} は材料試験の圧縮強度時ひずみである ϵ_m を用いた。また、コンクリートの引張側の応力負担は無視した。

すべての鋼材は、引張側・圧縮側共にひずみ硬化の影響を無視し、完全弾塑性とした。降伏強度 f_{sy} 等は表-2(b)の値を用いた。また、鋼管の局部座屈はモデル化しておらず、PC鋼材にのみ終局ひずみ ϵ_{pu} (5%)を設定した。

平面保持の仮定に基づき曲率を単調に増加させ、軸方向の釣り合いを満たすように中立軸位置を決定し、各時点の曲率に対応する曲げモーメントを求めた。なお、繰返し載荷の影響は考慮していない。

また、コンクリートのプレストレスは各要素に初期ひずみを与えることで考慮した。材料諸元、有効プレストレス量は表-1、表-2の数値を用いた。解析における各特性点の定義は表-4に示す通りである。曲げひび割れ点の算出に用いたコンクリートの曲げ強度⁸⁾は式(2)によって算出した。

$$\sigma_f = 0.440 \cdot \sigma_B^{0.678} \quad (2)$$

ここで σ_f : コンクリートの曲げ引張強度 (MPa)

σ_B : コンクリートの圧縮強度 (MPa)

表-4 解析における各特性点の定義

	SC 杭	PRC 杭および PHC 杭
曲げひび割れ	—	引張最外縁コンクリート要素のひずみが曲げ強度時ひずみ $\epsilon_f = \sigma_f / E_c$ に達した点。
鋼材の降伏	鋼材のひずみが降伏ひずみ ϵ_y に達した点。	
終局	圧縮最外縁コンクリート要素のひずみが終局ひずみ ϵ_{cu} ($= \epsilon_m$) に達した点。	圧縮最外縁コンクリート要素のひずみが終局ひずみ ϵ_{cu} ($= \epsilon_m$) に達した点。引張最外縁 PC 鋼材のひずみが終局ひずみ ϵ_{pu} (5%) に達した点。

4.2 特性点の評価

表-3 に、各特性点の曲げモーメントおよび曲率の解析値、および実験値を解析値で除した比率を示す。解析値の終局点は、全ての試験体においてコンクリートが終局ひずみに達することによって決まった。

i) SC 杭

表-3 より、耐力の比率は 0.86~1.18 であるが、変形の比率は 0.55~1.10 となっており、変形の評価精度がやや悪いことが分かる。また、解析上の最大耐力は ϵ_m 到達時であるが、実験では ϵ_m 到達後に変形が進んでから最大耐力を迎えた。これらの原因には、実際の SC 杭のコンクリートは鋼管に拘束されているにもかかわらず、解析に用いたコンクリートの応力-ひずみ関係が無拘束の供試体による圧縮試験結果に基づいていることが考えられる。

ii) PRC 杭および PHC 杭

高圧縮軸力を加えた試験体の ϵ_m 到達の評価精度は、耐力・変形共にかなり良い。しかし、引張軸力を与えた試験体では、実験では PC 鋼材が破断したのに対し、解析ではコンクリートが ϵ_m に到達して終局となった。この時の解析上の引張外縁 PC 鋼材のひずみは、1.8~2.0% 程度であった。PC 鋼材の伸びを適切に評価できなかったのは、今後の検討課題である。

5. まとめ

既製コンクリート杭の一定軸力下における曲げ実験を行い、作用軸力が杭体の曲げ耐力、変形性能、破壊性状に与える影響を確認した。また、断面解析による曲げモーメント-曲率関係の評価を行った。以下に結論をまとめる。

- 1) 圧縮軸力を加えた SC 杭は鋼管の局部屈曲により終局に至った。変形性能は作用軸力の増大に伴って低下したが、全試験体とも破壊後も軸力保持性能は喪失しなかった。
- 2) PRC 杭および PHC 杭は高圧縮軸力下では変形性能が

非常に乏しく、脆性的な破壊となった。また引張軸力下では、PHC 杭は PC 鋼材の破断によって終局に至り引張軸力を保持できなくなったが、PRC 杭では PC 鋼材が破断した後も主筋の存在によって引張軸力を保持した。

- 3) 杭体の曲げモーメント-曲率関係は平面保持を仮定した断面解析によって概ね評価が可能である。しかし、SC 杭については鋼管に拘束されたコンクリートのモデル化、PRC 杭および PHC 杭については PC 鋼材のモデル化に課題が残った。

謝辞

本研究は、平成 27 および 28 年度住宅・建築物高度化事業「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) 金子治, 中井正一, 阿部秋男, 飯場正紀, 久世直哉, 平出務: 2011 年東日本大震災における建築物の杭基礎の被害状況と要因分析, 地盤工学会誌, vol.62, No.1, pp.16-19, 2012.1.
- 2) 2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書, pp.75-89, 2015.
- 3) 日本建築学会: 改定によって基礎構造設計指針はどのように変わるのか, 2017 年度日本建築学会大会 PD 資料, p.108, 2017.8
- 4) 黒正清治, 和田章, 小林克己, 光木史朗, 上田邦成: 軸力と水平力を受ける高強度 PC 杭の力学的性状に関する実験 高強度 PC 杭の耐力変形性能向上に関する研究 (1), 日本建築学会構造系論文報告集, No.376, pp.71-80, 1987.6
- 5) 長江拓也, 岸田慎司, 柳瀬高仁, 香取慶一, 林静雄: PRC 杭の耐震性能と横補強筋量の関係—杭径および軸力が異なる場合—, 日本建築学会構造系論文集, No.551, pp.95-102, 2002.1
- 6) 田中佑二郎, 関口徹, 中井伸, 中井正一: 単純梁方式曲げ試験による SC 杭の中空部に中詰めした効果の検討 SC 杭の変形性能向上に関する研究 (1), 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.736, pp.823-829, 2017.6
- 7) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, pp.301-303, 2001.10.
- 8) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 472 号, pp.11-16, 1995