

論文 PRC 杭の曲げ性状に及ぼす軸方向異形鉄筋量と横補強筋量の影響

岸田慎司^{*1}・長江拓也^{*2}・香取慶一^{*3}・林静雄^{*4}

要旨：脆性破壊が問題となっている PHC 杭に対し、靱性能の改善を行なった PRC 杭が注目されている。しかし、実験資料に乏しく、その諸性状に関して不明な点が少なくない。本研究では、PRC 杭および補強型 PHC 杭に対して曲げせん断実験を行ない、軸方向に配した異形鉄筋量と横補強筋量とその曲げ性状に及ぼす影響について考察した。

キーワード：軸方向異形鉄筋量、横補強筋量、軸力、肉厚、せん断ひび割れ幅

1. はじめに

脆性破壊が問題となっている PHC 杭に対し、靱性能の改善を行なった PRC 杭が注目されている。PRC 杭が従来の PHC 杭と異なる点は①横補強筋量を増やしていること②軸方向に異形鉄筋を配していることである。しかし、この2つの要因が曲げ性状に及ぼす影響について系統的に検討した例は少ない。本研究では、中空部に対する普通強度コンクリートの充填を前提とし、現在使われている一般的な PRC 杭、横補強筋量を増やした PRC 杭、および横補強筋量を増やした補強型 PHC 杭に対して曲げせん断実験を行なった。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体諸元を表-1 に、試験体の配筋を図-1 に示す。

現在使われている一般的な PRC 杭の特徴を以下に示す。

①各杭径における肉厚比（杭径と肉厚の比）を PHC 杭の JIS 規格に従っており、杭径が大きくなるにつれて肉厚は相対的に小さくなる。②杭種には、曲げ耐力の小さいものから I 種、II 種、III 種、IV 種があり、異形

表-1 試験体諸元

試験体	D (mm)	t (mm)	Pg1 (%)		Pg2 (%)	ps (%)	σe (MPa)	N (kN)	σg (MPa)
NO.1	300	60	1.68 (6-D13)	I種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ4.5@50)	5.3	343	12.1
NO.2	300	60	5.13 (12-D16)	IV種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ4.5@50)	4.7	343	10.8
NO.3	300	60	5.13 (12-D16)	IV種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ4.5@50)	4.7	687	16.9
NO.4	300	60	1.68 (6-D13)	I種	1.04 (6-U10)	1.49 (φ8.0@45)	5.3	343	12.1
NO.5	300	60	5.13 (12-D16)	IV種	1.04 (6-U10)	1.49 (φ8.0@45)	4.7	343	10.8
NO.6	300	60	5.13 (12-D16)	IV種	1.04 (6-U10)	1.49 (φ8.0@45)	4.7	687	16.9
NO.7	300	45	4.40 (8-D10,8-D13)	IV種	0.89 (8-U7.1)	0.42 (φ4.5@50)	4.9	343	12.7
NO.8	300	45	4.40 (8-D10,8-D13)	IV種	0.89 (8-U7.1)	0.42 (φ4.5@45)	4.9	687	20.7
NO.9	300	45	4.40 (8-D10,8-D13)	IV種	0.89 (8-U7.1)	1.49 (φ8.0@45)	4.9	343	12.7
NO.10	300	60	-	C種	1.41 (10-U9)	1.49 (φ8.0@45)	9.8	343	17.0

D:杭径 t:肉厚 Pg1:異形鉄筋全主筋比(As1/As) Pg2:異形PC鋼棒全主筋比(As2/As)

As1:異形鉄筋全断面積 As2:異形PC鋼棒全断面積 Ap:杭体断面積

ps:横補強筋容積比=4Aw/(D・s) Aw:らせん筋一本の断面積 s:らせん筋のピッチ

σe:有効プレストレス N:軸力 σg:軸方向応力度

* NO.10は横補強筋を増やした補強型PHC杭のC種である

*1 東京都立大学助手 建築学科 博士(工学)(正会員)

*2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻 修士(工学)(正会員)

*3 東京工業大学助手 建築物理研究センター 博士(工学)(正会員)

*4 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博(正会員)

PC 鋼棒の量を一定にし、異形鉄筋の量を変化させている。また、杭径が大きくなると杭径に対する軸方向筋の断面積が小さくなるが、異形 PC 鋼棒と異形鉄筋の断面積比は各杭種において等しくなっている。③I 種は PHC 杭の C 種と曲げ耐力がほぼ等しく、IV 種の曲げ耐力は軸力の無い状態でその 1.5 倍程度である。④横補強筋量は従来の PHC 杭の 4 倍程度（横補強筋容積比 $\rho_s=0.42\%$ ）である。⑤有効プレストレス σ_e は、6.0MPa 程度となっており、PHC 杭の B 種（7.8MPa）と A 種（3.9MPa）の中間に位置し、C 種（9.8MPa）と比べるとかなり低くなっている。

今回の実験では、NO.1, 2, 3 が現状の PRC 杭にあたり、杭径 300mm の実大試験体となる。また、NO.7, 8 が現状の杭径 600mm の PRC 杭をモデル化した縮小試験体であり、杭径に対する肉厚の比、および杭径に対する軸方向筋断面積の比を等しくしてその影響を検討した。

横補強筋量を更に増大させた試験体は、NO.4, 5, 6 が NO.1, 2, 3 に対応しており、NO.9 が NO.7 に対応している。これらの試験体は、当研究室の提案するせん断強度式¹⁾において検討し、せん断破壊に対して十分な余裕を有する量の横補強筋を配した。（ $\rho_s=1.49\%$ ， $\sigma_y=1283$ MPa）また、これらと比較する目的で同量の横補強筋を配した杭径 300mm の補強型 PHC 杭 C 種も計画した。

軸力は、長期軸力、短期軸力について計画した。標準的と考えられる N 値 50 程度の支持地盤を想定し、

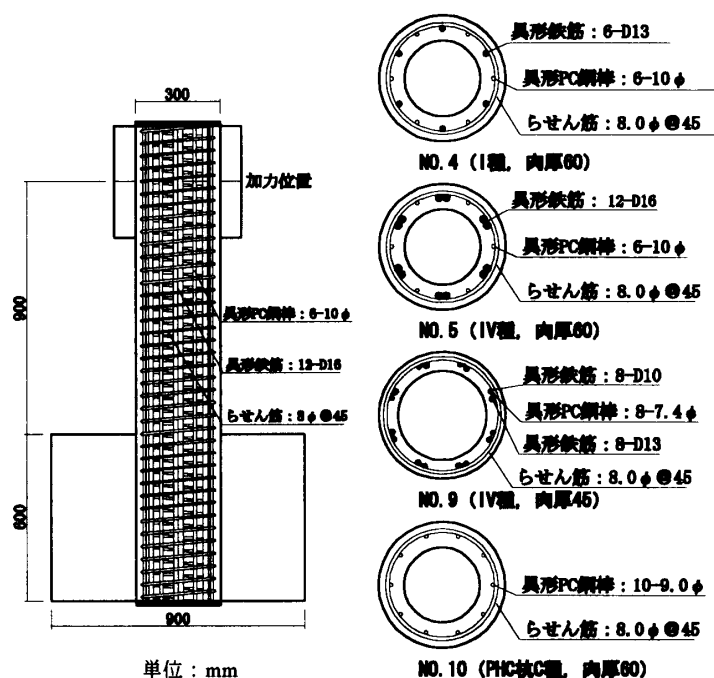


図-1 試験体配筋図

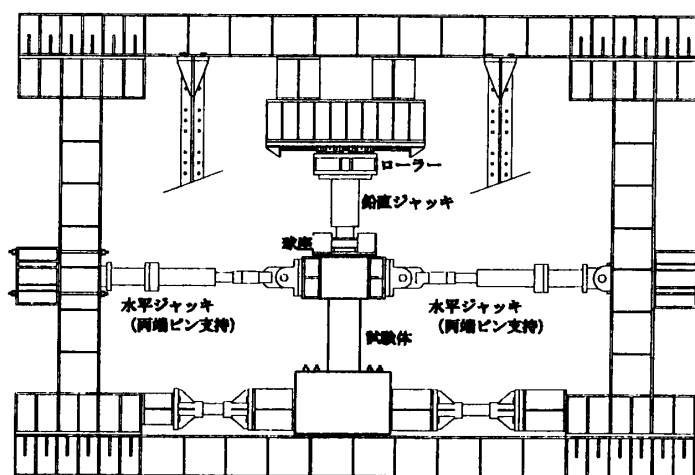


図-2 加力装置図

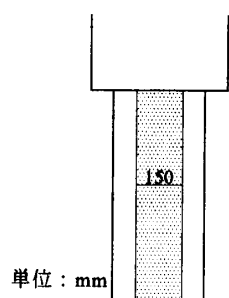


図-3 せん断ひび割れ幅測定範囲

表-2 鋼材の力学的性質

	σ_y (MPa)	σ_t (MPa)	E_s (GPa)
D10	376	547	169
D13	369	527	178
D16	382	561	185
U10*	1340	1418	200
U9.0*	1330	1399	191
U7.1*	1307	1411	197
$\phi 8.0^*$	1283	1370	204
$\phi 4.5^*$	665	776	176

σ_y :降伏強度 σ_t :引張強度

E_s :ヤング係数

* σ_y は0.2%オフセット値

長期許容支持力に相当する 343kN を長期軸力とした。短期軸力については、長期軸力分だけ変動があるとして 687kN とした。

せん断スパン比は、杭頭固定とした時の杭頭部のせん断スパン比を検討して 3.0 を採用した。

杭体に使用したコンクリートは、遠心成形後オートクレーブ養生した圧縮強度 90.1 ～ 97.6MPa の高強度コンクリートである。全試験体の中空部分に充填した普通強度コンクリートの圧縮強度 $\sigma_B=30\text{MPa}$ である。杭体に使用した鋼材の力学的特性を表-2 に示す。

2.2 加力方法

試験体は、杭頭部をモデル化しており、図-2 に示す片持ち梁形式の加力装置で加力することにより、せん断スパン比を 3.0 とした。

加力は、部材角による変形制御とし、 $R=\pm 1/400$ で一回、 $R=\pm 1/200$, $\pm 1/100$, $\pm 1/67$, $\pm 1/50$, $\pm 1/33$, $\pm 1/25$, $\pm 1/20$ で各 2 回繰り返した。ただし、最大耐力の 70% まで耐力が低下した場合はそのサイクルで加力を終了した。

2.3 せん断ひび割れ幅

試験体表面に想定した測定範囲（図-3 の網掛け部分）内に生じたせん断ひび割れについて、そのひび割れ幅をひび割れに沿って 30mm 間隔で測定した。ひび割れ幅の測定に

関しては、簡易型のマイクロスコープを用い、ひび割れ方向に対して直交方向の幅として扱った。最小目盛は 0.02mm である。

3. 実験結果

実験結果一覧を表-3 に示す。

3.1 破壊状況

代表的な試験体の最終破壊状況を図-4 に示す。また、全ての試験体のせん断力-部材角関係を図-5 に示す。せん断力-部材角関係には曲げ解析により求めた曲げ耐力計算値を付記している。

a) 杭径 300 実大（肉厚 60mm）

PRC 杭は、I 種、IV 種に関わらず、曲げせん断ひび割れが分散して発生した。全ての試験体が正負いずれかで曲げ解析値に達しているが、破壊性状には横補強筋量の違いにより差がでた。 $\rho_s=0.42\%$ の試験体においては、コンクリートの圧縮破壊に伴う軸方向筋の座屈（NO.1）、およびせん断破壊特有のスリップ性状を伴う耐力低下（NO.2）が起きている。耐力の大きい NO.2 では腹部のコンクリートの剥離も見られた。杭体の圧縮側コンクリートは、 $R=1/67$ のサイクルでかぶりコンクリートが圧壊し始めたが、 $\rho_s=1.49\%$ の試験体は、加力終了時の部材角 $R=1/20$ まで、横補強筋内側のコンクリートが十分に拘束されていた。また、PRC 杭に関しては軸方向に配した異形 PC 鋼棒の破断は確認されな

表-3 実験結果

試験体	Qbc (kN)	Qsc (kN)	Qmax (kN)	calQb (kN)	Ru (rad)
NO.1	77	104	157	142	0.023
NO.2	107	118	198	197	0.020
NO.3	136	137	215	216	0.016
NO.4	87	115	160	142	0.044
NO.5	103	119	216	197	0.050*
NO.6	128	166	228	216	0.050*
NO.7	85	98	165	159	0.017
NO.8	122	141	163	178	0.011
NO.9	92	116	164	159	0.019
NO.10	111	138	157	136	0.028

Qbc:曲げひび割れ強度 Qsc:せん断ひび割れ強度
Qmax:最大耐力 calQb:曲げ解析による最大耐力計算値 Ru:最大耐力の90%まで耐力低下した時点での限界変形角(*最大耐力の90%まで耐力低下することなく加力終了時の $R=1/20$ に達した試験体)

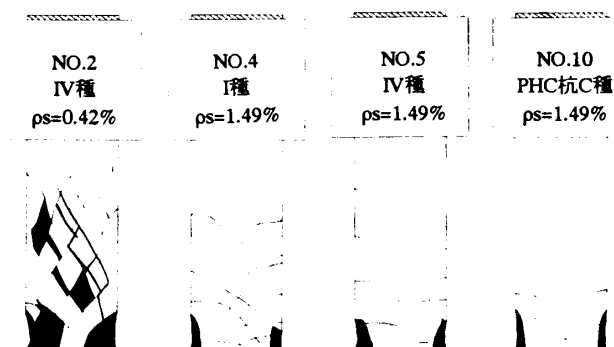


図-4 最終破壊状況

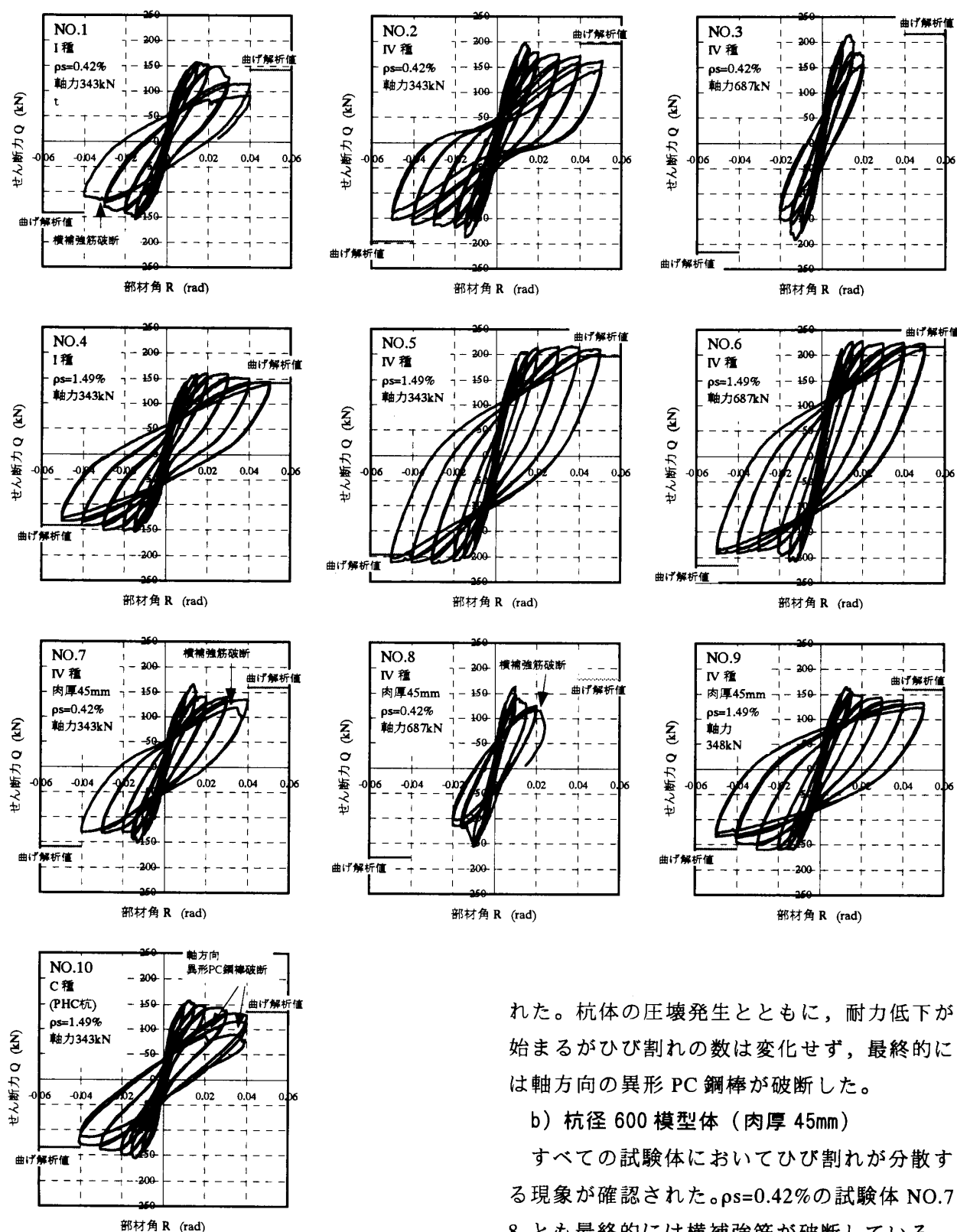


図-5 セン断力-部材角関係

った。

$\rho_s = 1.49\%$ のPHC杭C種であるNO.10は、正負とも2本の曲げせん断ひび割れが確認さ

れた。杭体の圧壊発生とともに、耐力低下が始まるがひび割れの数に変化せず、最終的には軸方向の異形PC鋼棒が破断した。

b) 杭径 600 模型体 (肉厚 45mm)

すべての試験体においてひび割れが分散する現象が確認された。 $\rho_s = 0.42\%$ の試験体NO.7, 8とも最終的には横補強筋が破断している。短期軸力作用下における試験体NO.8の耐力低下は特に激しく、正負ともに曲げ解析値に達していない。 $\rho_s = 1.49\%$ の試験体は肉厚60mmの試験体同様、 $R = 1/20$ まで横補強筋内側のコンクリートが十分に拘束されていた。

3.2 ヒンジ領域

曲げ降伏後の塑性変形の大部分はヒンジ領域の回転による変形に依存している。この回転は、圧縮領域を中心とした曲げせん断ひび割れの拡大により生じており、曲げせん断ひび割れの発生区域をヒンジ領域と見なす事ができる。

図-6 には $\rho_s = 1.49\%$ の試験体を対象として、この区域の長さ L_h を杭径 D で除した値を示し

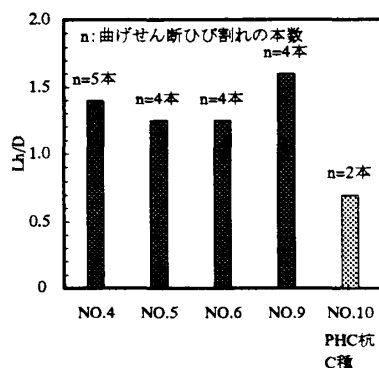


図-6 ヒンジ領域

ている。また図には試験体の左右に発生した曲げせん断ひび割れのうち多い方の本数を付記している。

図に示すように、PRC 杭は I 種、IV 種に関わらず L_h が杭径の 1.25 倍以上となっている。一方、PHC 杭の L_h は杭径の 0.7 倍で PRC 杭の半分程度となっている。すなわち、軸方向異形鉄筋が曲げせん断ひび割れを分散させており、大変形時においても PRC 杭の異形 PC 鋼棒が破断しなかった理由として、異形鉄筋の効果でヒンジ領域が拡大し、異形 PC 鋼棒に大きな変形能力が要求されなかったことが考えられる。逆に軸方向異形鉄筋を配さない PHC 杭は、固定端部付近の狭い領域に塑性変形が集中したために異形 PC 鋼棒に大きな変形能力が要求されたと考えられる。

3.3 せん断ひび割れ幅

PRC 杭はせん断ひび割れの発生を前提とするためその幅の制御が必要となる。図-7 には $R=1/100$ 時のピーク時せん断力とその直後の除荷時せん断ひび割れ幅の関係を示す。 $R=1/100$ は圧壊が始まる直前のサイクルであり、そのピーク時せん断力は最大耐力の 90% 程度である。 $\rho_s = 0.42\%$ の試験体は NO.1 の

み 0.1mm の残留ひび割れが確認されたが、他の試験体は 0.06mm 以下にある。 $\rho_s = 1.49\%$ の試験体の矢印はその幅がマイクロスコプの最小目盛である 0.02mm より小さいことを示しているが、実際にはほぼ完全に閉じた状態であった。

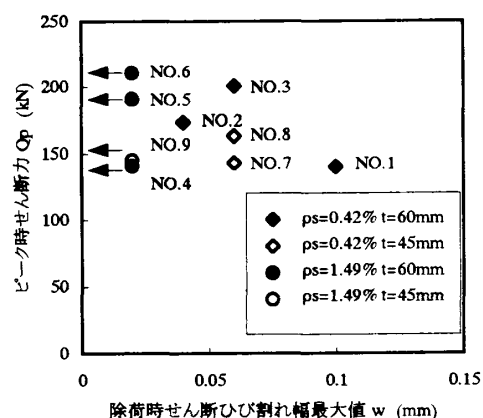


図-7 ピーク時せん断力-

除荷時せん断ひび割れ幅最大値関係

(ピーク時部材角 $R=1/100$)

3.4 限界変形角

図-8 に限界変形角 R_u と軸方向応力度 σ_g の関係を示す。この場合の R_u は包絡線を用いて求めており、最大耐力の 90% まで耐力低下した時点での部材角と定義している。正負の両方について求め、その内小さいほうを採用した。 σ_g はプレストレスおよび軸力から求めた杭体の総軸方向応力度である。

$\rho_s = 0.42\%$ の試験体は σ_g が大きくなるにつれて R_u が小さくなる傾向にあり、0.011 ~ 0.023 の範囲にある。

肉厚 60mm で横補強筋量を $\rho_s = 1.49\%$ 配した試験体の内、PRC 杭は σ_g に関係無く R_u にして 2 倍以上の変形能力の向上が確認される。この中で PHC 杭 C 種 (NO.10) は R_u が一番小さくなっているが、変形が端部に集中することと圧縮鉄筋がないことが原因と推察される。また、 $\rho_s = 1.49\%$ で肉厚が 45mm の試験体 NO.9 も R_u に対する横補強筋の効果が小さくなっている。

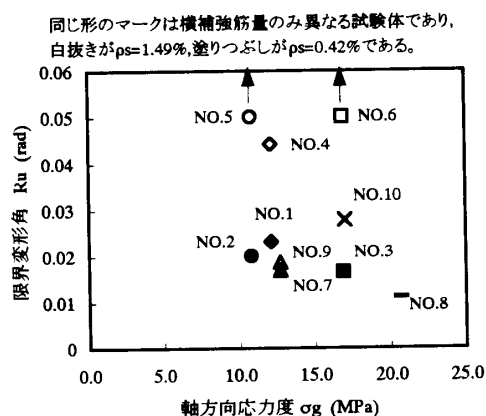


図-8 限界変形角-軸方向応力度関係

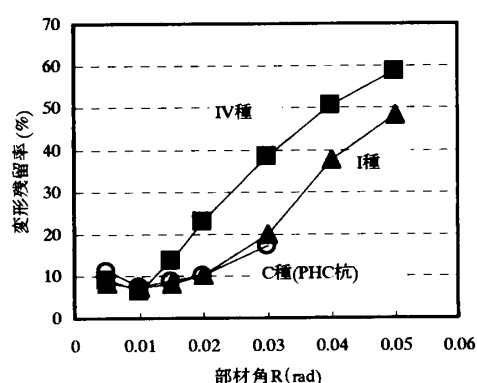


図-9 残留変形率-部材角関係

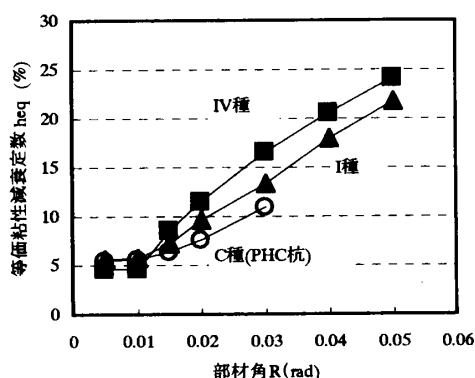


図-10 等価粘性減衰定数-部材角関係

3.5 履歴性状

せん断に対して十分な余裕度を確保した長期軸力作用下の試験体 NO.4, 5, 10 で、軸方向異形鉄筋の影響を比較する。図-9 に残留変形率（除荷時の変位をその直前のピーク時の変位で除した値）とピーク時部材角の関係、図-10 に等価粘性減衰定数と部材角の関

係を示す。部材角 $R=1/66$ 以降において、IV種の RC 的傾向が強くなるが、I 種においては、 $R=1/33$ まで PHC 杭 C 種とほぼ残留変形率が等しくなっている。等価粘性減衰定数を比較すると、I 種は C 種に比べエネルギー吸収能力に優れており、IV 種はさらに優れている。このことより、軸方向に配した異形鉄筋により、エネルギー吸収能力を向上させ得ることが分かる。

4. まとめ

杭体中空部に普通強度コンクリートを充填したせん断スパン比 3.0 の PRC 杭および PHC 杭の曲げせん断実験で得られた知見をまとめると次のようになる。

- 1) PRC 杭に配した軸方向異形鉄筋はひび割れを分散させ、十分な横補強筋を配した場合、大変形時においてヒンジ領域を確保する。
- 2) 最大耐力の 90% 程度のせん断力を受ける $R=1/100$ のサイクルにおいて、残留ひび割れ最大値は横補強筋容積比 $\rho_s=0.42\%$ で 0.1mm 以下、 $\rho_s=1.49\%$ の場合はほぼ閉じた状態であった。
- 3) $\rho_s=0.42\%$ 、横補強筋降伏強度 $\sigma_y=665\text{MPa}$ の PRC 杭は限界変形角 R_u が $0.011\sim0.023$ にある。また、 $\rho_s=1.49\%$ 、 $\sigma_y=1283\text{MPa}$ の PRC 杭は限界変形角 R_u にしてその 2 倍以上の変形能力がある。
- 4) PRC 杭は、十分な横補強筋を配すことにより、変形性能が向上するとともにエネルギー吸収能力に優れた部材となり得る。

謝辞 本研究は、東京工業大学建築物理研究センター全国共同研究の一貫として行なわれたものであり、COPITA との共同研究であります。ここに関係者各位に対しまして深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岸田他：大口径 PHC 杭のせん断強度に関する研究（その 7）、日本建築学会学術講演梗概集，pp.555-556，1999