

論文 PRC 杭のせん断性状に軸方向異形鉄筋が及ぼす影響

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 杭が近年注目されているが、その諸性能に関しては定性的把握の域を脱していない。本研究では、特に、実験資料が乏しいせん断性状に注目し、杭径 300mm の実大 PRC 杭を中心に曲げせん断実験を行なった。その結果、軸方向に配した異形鉄筋、及び軸力などがせん断性状に及ぼす影響が明らかとなった。

キーワード：軸方向異形鉄筋、軸力、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、軸方向異形鉄筋（以降、異形鉄筋）を配し、プレストレス量を低く抑え、さらに、らせん筋量を増やすことで、曲げ終局強度の増大、靱性能の改善を行なった PRC 杭が近年注目されている。しかし、実験資料が乏しいため、その諸性能に関しては定性的把握の域を脱していない。

本研究では、杭径 300mm の実大 PRC 杭を中心に曲げせん断実験を行ない、軸力、異形鉄筋が、そのせん断性状に及ぼす影響について検討を行なった。

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。

試験体数は、杭径 300mm、肉厚 60mm の実大試験体 11 体と、杭径 600mm を想定した杭径 300mm、肉厚 45mm の縮小模型体 2 体で計 13 体である。試験体名は、想定する杭径、杭種、軸力、せん断スパン比で表した。

PRC 杭の各杭径における杭径と肉厚の比は、PHC 杭の JIS 規格に従っており、杭径が大きくなるにつれて小さくなる。今回の実験では、軸力を加えるため、加力装置の性能上、杭径に対する肉厚の比を等しくした縮小模型体において、この影響を検討した。

杭種には、曲げ終局強度の小さいものから I 種、II 種、III 種、IV 種があり、異形 PC 鋼棒の量を一定にし、異形鉄筋（SD345）の量を変化させている。今回は I 種、及び IV 種を対象とした。I 種は PHC 杭の C 種と曲げ終局強度をほぼ等しくしており、IV 種の曲げ終局強度は軸力の無い状態でその 1.5 倍程度である。300-I、300-IV については、異形鉄筋の本数を変えず、鉄筋径を呼び名 D13 から D22 にすることで IV 種の異形鉄筋量を確保した。600-I、600-IV 及び 300-I60、300-IV60 については、D10 と D13 を束ねることにより本数を増やし、IV 種の異形鉄筋量を確保した。

らせん筋量は、通常の PHC 杭に使われる量の 4 倍程度であり、想定する杭径にかかわらず、中実断面として計算した容積比 ρ_s が等しくなるようにした。

*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境物理工学専攻 工修（正会員）

*2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境物理工学専攻（正会員）

*3 東京工業大学助手 建築物理研究センター 工修（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）

表-1 試験体諸元

	試験体名	D (mm)	t (mm)	M/QD	Pg1 (%)		Pg2 (%)	ps (%)	σe (MPa)	N (kN)	Ae (×10 ⁴ mm ²)	σg (MPa)
NO.1	300-I-0-1.5	300	60	1.5	1.68 (6-D13)	I種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ5.5@75)	5.3	0	5.01	5.3
NO.2	300-I-343-1.5	300	60	1.5	1.68 (6-D13)	I種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ5.5@75)	5.3	343	5.01	12.1
NO.3	300-I-687-1.5	300	60	1.5	1.68 (6-D13)	I種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ5.5@75)	5.3	687	5.01	19.0
NO.4	300-I-980-1.5	300	60	1.5	1.68 (6-D13)	I種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ5.5@75)	5.3	980	5.01	24.9
NO.5	300-IV-0-1.5	300	60	1.5	5.13 (6-D22)	IV種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ5.5@75)	4.7	0	5.63	4.7
NO.6	300-IV-343-1.5	300	60	1.5	5.13 (6-D22)	IV種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ5.5@75)	4.7	343	5.63	10.8
NO.7	300-IV-687-1.5	300	60	1.5	5.13 (6-D22)	IV種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ5.5@75)	4.7	687	5.63	16.9
NO.8	300-IV-980-1.5	300	60	1.5	5.13 (6-D22)	IV種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ5.5@75)	4.7	980	5.63	22.1
NO.9*	300-I60-343-1.5	300	60	1.5	1.26 (8-D10)	I種*	0.71 (8-U7.1)	0.42 (φ4.5@50)	4.3	343	4.87	11.4
NO.10*	300-IV60-343-1.5	300	60	1.5	3.50 (8-D10,8-D13)	IV種*	0.71 (8-U7.1)	0.42 (φ4.5@50)	4.0	343	5.28	10.5
NO.11	300-IV-343-3.0	300	60	3	5.13 (6-D22)	IV種	1.04 (6-U10)	0.42 (φ5.5@75)	4.7	343	5.63	10.8
NO.12	600-I-343-1.5	300	45	1.5	1.58 (8-D10)	I種	0.89 (8-U7.1)	0.42 (φ4.5@50)	5.4	343	3.96	14.0
NO.13	600-IV-343-1.5	300	45	1.5	4.40 (8-D10,8-D13)	IV種	0.89 (8-U7.1)	0.42 (φ4.5@50)	4.9	343	4.36	12.7

D:杭径 t:肉厚 M/QD:せん断スパン比 Pg1:異形鉄筋全主筋比(A_{s1}/A_p) Pg2:異形PC鋼棒全主筋比(A_{s2}/A_p)

A_{s1} :異形鉄筋全断面積 A_{s2} :異形PC鋼棒全断面積 A_p :杭体断面積 $ps=4A_w/(D \cdot s)$ A_w :らせん筋一本の断面積 s :らせん筋のピッチ
 σ_e :有効プレストレス N:軸力 軸方向応力度 $\sigma_g=\sigma_e+N/A_e$ A_e :コンクリート換算断面積

*注) NO.9,10は杭径600模型体と主筋断面積(異形鉄筋, 異形PC鋼棒)を等しくした杭径300実大試験体である

表-2 鋼材の力学的性質

	σy (MPa)	σt (MPa)	Es (GPa)
D10	370	511	188
D13	398	584	193
D22	385	537	186
U10*	1340	1418	200
U7.1*	1307	1411	197
φ5.5*	523	623	197
φ4.5*	564	662	178

σy:降伏強度 σt:引張強度

Es:ヤング係数

*σyは0.2%オフセット値

軸力については、長

期軸力、短期軸力、終局時支持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、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 0kN とした。終局状態については、地盤の極限支持力に相当する長期軸力の 3 倍程度の軸力 980kN とした。

有効プレストレスは、4.0~5.4MPa であり、各試験体により若干異なるのは異形鉄筋量、肉厚の影響である。

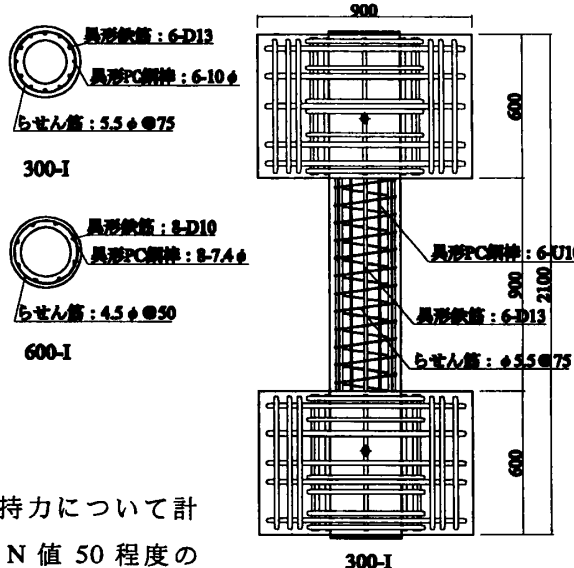


図-1 試験体配筋図(mm)

せん断スパン比は、せん断破壊先行を意図し、1.5 を主とした。但し、300-IV-343-3.0 においては、PRC 杭 IV 種の靱性能を確認する目的でせん断スパン比 3.0 とした。

杭体を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。

杭体を使用した鋼材の力学的特性を表-2 に示す。

2.2 加力方法

せん断スパン比 1.5 の試験体は図-2 に示す加力装置で試験体中央部が反曲点になるよう

な逆対称正負交番繰り返し载荷とした。図には示さないが、300-IV-343-3.0 においては、同様の試験体を片持ち梁形式で加力することにより、せん断スパン比を 3.0 とした。

加力サイクルについては「地震力に対する建築物の基礎の設計指針」¹⁾の規定によるコンクリートの短期許容斜張力 ($\sigma_d=1.76\text{MPa}$) から求めた短期許容せん断力 Q_a をせん断ひび割れ幅測定の基本として、その 1.0 倍、1.5 倍、1.75 倍、2.0 倍でそれぞれ正負 1 回ずつ繰り返す荷重制御を行なった。その後、部材角 $R=1/150$ 、 $1/100$ 、 $1/50$ 、でそれぞれ正負 1 回ずつ繰り返す変形制御に切り替え、最終的に正側で $R=1/30$ 程度まで加力することを目標とした。但し、荷重制御中に部材角が $1/150$ に達した場合は、その時点で変位制御に切り替えた。

せん断スパン比 3.0 の試験体 300-IV-343-3.0 については、同様の条件で加力後 $R=1/30$ で正負繰り返し、さらに最終的に正側で $R=1/20$ 程度まで加力した。

2.3 せん断ひび割れ幅

各サイクルのピーク時、及び除荷時にせん断ひび割れ幅の測定を行なった。ひび割れ幅の測定に関しては、クラックスケールを用い、ひび割れ長さ方向に対して直交の幅として扱った。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

代表的な試験体の最終破壊状況、せん断力-部材角関係を図-3、図-4 にそれぞれ示す。

せん断スパン 1.5 の試験体は、曲げひび割れ発生後、軸力の小さなものは端部より杭径

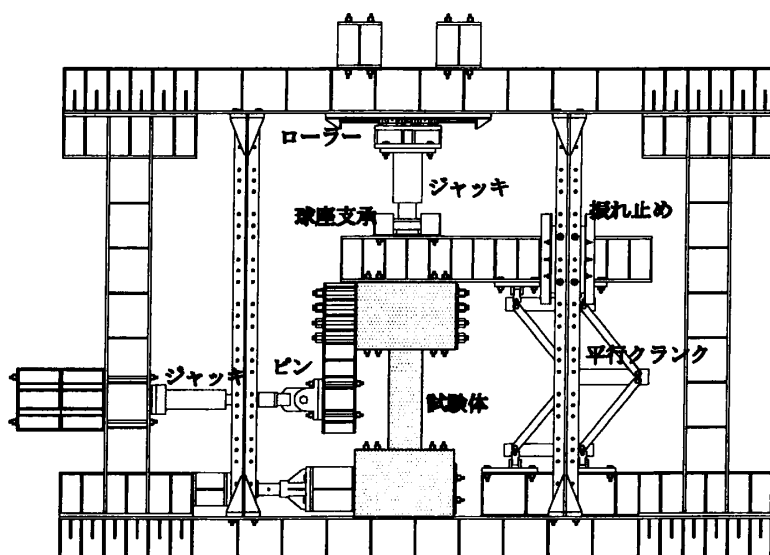


図-2 加力装置図

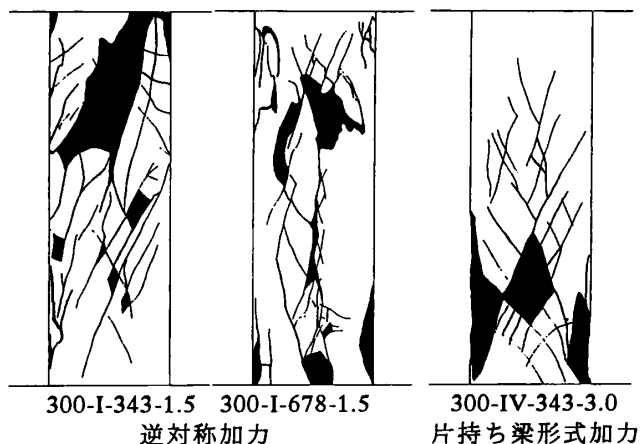


図-3 最終破壊状況

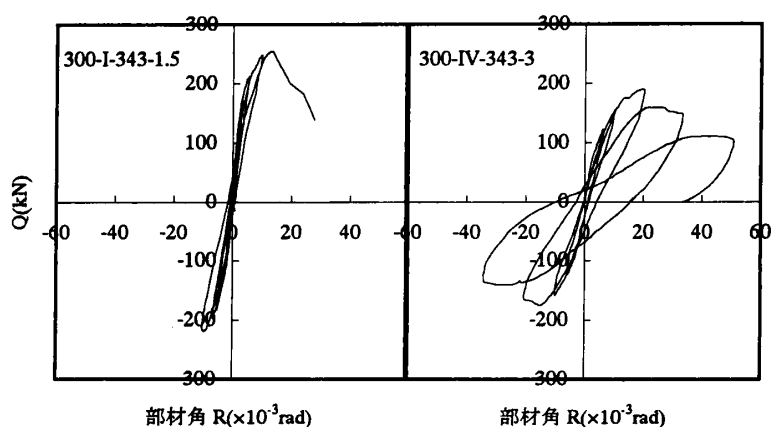


図-4 せん断力-部材角関係

程度の距離の範囲内に曲げせん断ひび割れが入り、その後、材軸に対して約 45° のひび割れが全長にわたって多数発生した。軸力が高くなるとせん断ひび割れの角度が材軸方向に変化し、繰り返しのに伴いそのひび割れが、杭

の腹部異形鉄筋にそって集中した。

せん断スパン比 3.0 の 300-IV-343-3.0 は、曲げひび割れ発生後、端部より杭径程度の距離の範囲内に曲げせん断ひび割れが発生し、約 $R=1/100$ で圧壊が始まった。さらに変形が進むと、せん断ひび割れが多数発生し、曲げ圧縮側のコンクリートの剥離に伴って耐力が低下するせん断圧縮型の破壊となった。

3.2 荷重-包絡線

図-5 にせん断スパン比 1.5 の試験体における包絡線の比較を示す。

図-5(a)は、軸力を変化させた場合の比較を示したものであるが、軸力が大きくなるほど、

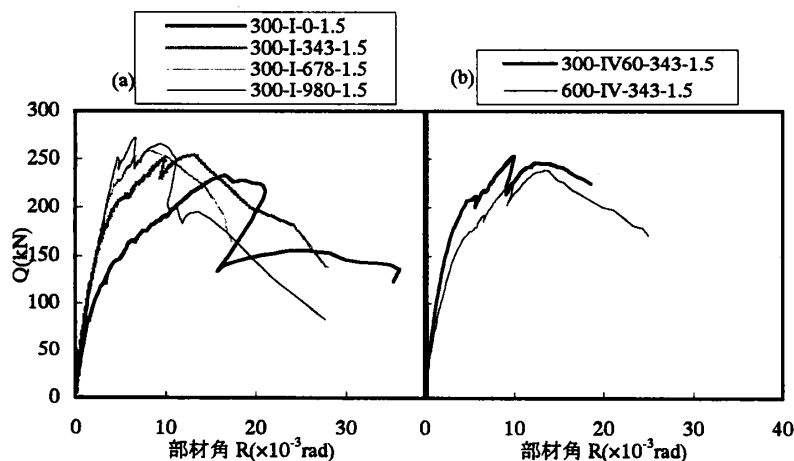


図-5 包絡線比較

表-3 実験値及び諸強度計算値一覧

	試験体名	expQsc (kN)	expQsu (kN)	Qa (kN)	calQsu (kN)	calQf (kN)	expQsc /Qa	expQsu /calQsu	expQsu /calQf
NO.1	300-I-0-1.5	129	233	83	198	225	1.56	1.18	1.03
NO.2	300-I-343-1.5	176	254	117	233	294	1.51	1.09	0.86
NO.3	300-I-678-1.5	210	259	142	268	351	1.48	0.97	0.74
NO.4	300-I-980-1.5	219	272	161	273	387	1.36	1.00	0.70
NO.5	300-IV-0-1.5	108	210	80	228	343	1.35	0.92	0.61
NO.6	300-IV-343-1.5	127	212	111	263	404	1.15	0.80	0.52
NO.7	300-IV-678-1.5	172	236	135	298	453	1.27	0.79	0.52
NO.8	300-IV-980-1.5	187	251	153	306	469	1.22	0.82	0.53
NO.9	300-I60-343-1.5	172	250	113	220	240	1.53	1.14	1.04
NO.10	300-IV60-343-1.5	182	253	110	247	313	1.66	1.03	0.81
NO.11	300-IV-343-3.0	122	190	111	171	202	1.09	1.11	0.94
NO.12	600-I-343-1.5	124	233	97	209	243	1.28	1.12	0.96
NO.13	600-IV-343-1.5	122	239	93	233	317	1.31	1.03	0.76

expQsc:せん断ひび割れ強度実験値 expQsu:せん断終局強度実験値

Qa:「地震力に対する建築物の基礎の設計指針」1)に示される規定から求めた短期許容せん断力

calQsu:文献2)における終局せん断強度式による計算値

calQf:関数法による終局曲げモーメント時せん断力

最大強度は高いが、その時の変位は幾分小さく最大強度以降の保持力の低下率も大きい。

図-5(b)は、肉厚の異なる試験体を示したものであるが、肉厚が大きなものの方が剛性、最大強度ともに大きい。

3.3 せん断ひび割れ強度及びせん断終局強度

表-3 に実験値及び諸強度計算値一覧を示す。

図-6 にせん断スパン比 1.5, 長期軸力 343kN 時の試験体における異形鉄筋全主筋比とせん断終局強度、せん断ひび割れ強度の関係をそれぞれ示した。表-1 に示すように各試験体において軸方向応力度が若干異なるが、300-I60 と 300-IV60,

600-I と 600-IV について比較すると異形鉄筋全主筋比がせん断終局強度、せん断ひび割れ強度に及ぼす影響は、わずかである。しかし、300-I と 300-IV を比較すると異形鉄筋全主筋比の増加により、明らかにせん断終局強度、せん断ひび割れ強度が減少している。これは、300-IV60, 600-IV

が、D10,D13 を束ねて使用しているのに対し、300-IV が D22 を使用していることにより、肉厚に対して太径の異形鉄筋にせん断応力が集中したことによると思われる。

図-7 に、せん断スパン比 1.5 の 300-I,300-IV における軸方向応力度と終局せ

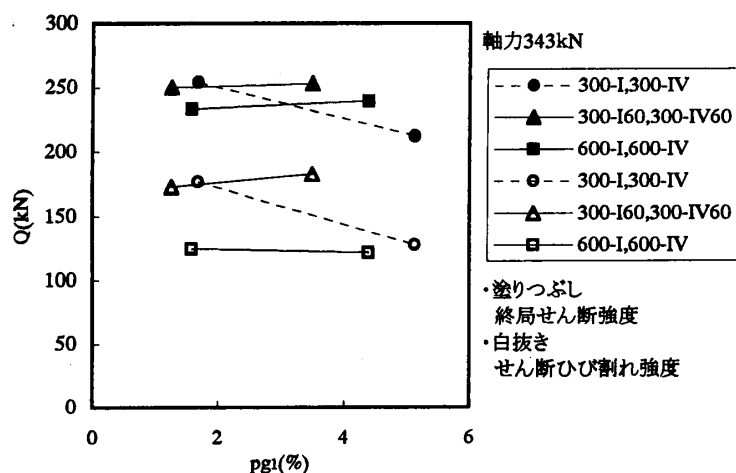


図-6 セン断終局強度 - 異形鉄筋全主筋比関係
せん断ひび割れ強度 - 異形鉄筋全主筋比関係

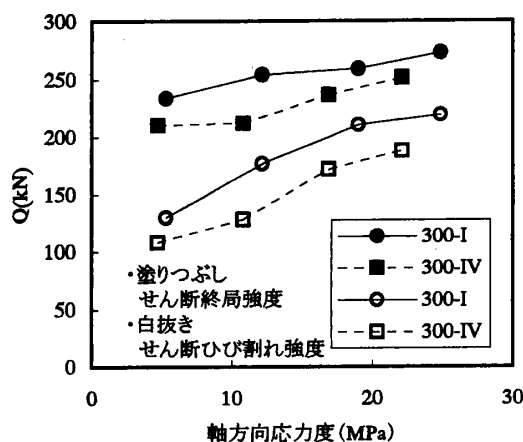


図-7 セン断終局強度-軸方向応力度関係
せん断ひび割れ強度-軸方向応力度関係

せん断強度，せん断ひび割れ強度の関係をそれぞれ示す。

図から，せん断ひび割れ強度，せん断終局強度ともに，軸方向応力度が大きくなるほど，高くなるが，その勾配はせん断ひび割れ強度のほうが大きいことがわかる。

また，前述の 300-IV の耐力低下が，すべての軸力下において確認できる。

3.4 セン断ひび割れ幅

図-8 に，異形鉄筋の影響が小さい 300-I において，各軸力下におけるせん断ひび割れ幅とせん断力の関係について示す。この場合のせん断ひび割れ幅は，正側の各サイクルにおけるピーク時直後の除荷時($Q=0\text{kN}$)における最大せん断ひび割れ幅である。図中の矢印は，

次のサイクルにおいてせん断ひび割れ幅増大に伴う損傷が激しくなり，せん断ひび割れ幅の最大値が測定不能になったことを意味している。

軸力 0kN の場合は，せん断終局強度のせん断ひび割れ強度に対する余裕率が比較的大きいため，ひび割れ発生後も，せん断ひび割れ幅が急激に増大することは無い。しかし，軸力が高くなるにつれ，せん断終局強度のせん断ひび割れ強度に対する余裕率が小さくなるため，ひび割れ幅の抑制が困難になることが分かる。

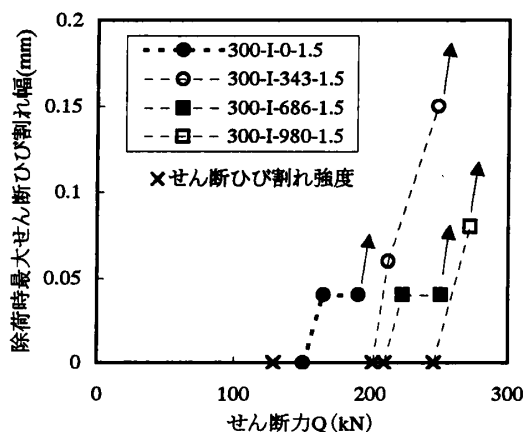


図-8 セン断力-除荷時残留ひび割れ幅関係

3.5 実験結果と計算値の比較

図-9 に，短期許容せん断力とせん断ひび割れ強度の関係を示す。すべての試験体において，せん断ひび割れ強度が短期許容せん断力に対して安全側にあるが，その余裕度には $1.09 \sim 1.56$ とばらつきがあり，軸力，鉄筋径，せん断スパン比が余裕度に与える影響は無視できない。

図-10 に，文献 2)におけるせん断終局強度式による計算値と実験値の比較を示す。図より， 600mm を想定した肉厚の薄い試験体を含め良い適合性が示されている。しかし，この式は，PHC 杭を対象として柱のせん断終局強度式を修正しているため，PRC 杭への適用には異形鉄筋の扱いなど若干問題が残る。危険

側に位置する 300-IV はこの影響がでているものと思われる。

鉄筋径の比較的小さい試験体においても、高軸力下においては、せん断ひび割れが異形鉄筋付近に集中する傾向が確認されていることから、PRC 杭の高軸力下におけるせん断挙動の把握も今後の検討課題であろう。

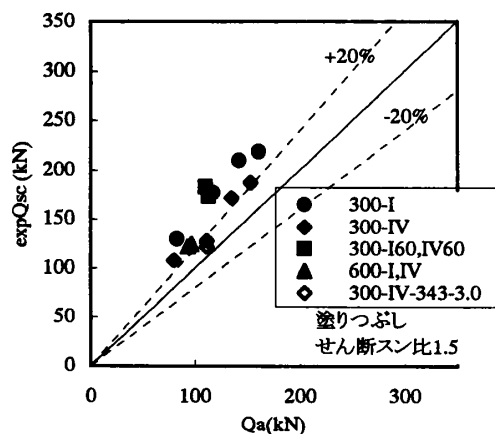


図-9 せん断ひび割れ強度実験値-短期許容せん断力関係

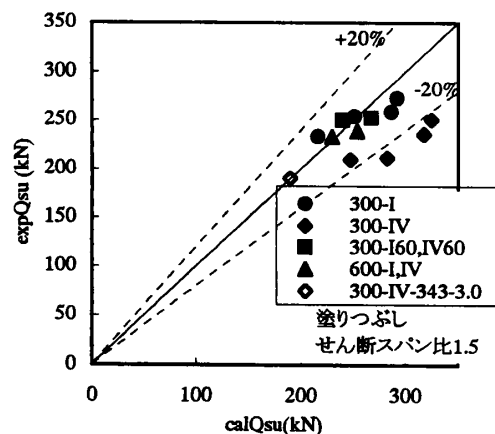


図-10 終局せん断強度実験値-終局せん断強度式値関係

4. まとめ

今回の杭径 300mm の実大試験体, および杭径 600mm を対象とした縮小模型体における PRC 杭の曲げせん断実験において以下の知見が得られた。

(1) 長期軸力下の杭径 300mm (肉厚 60mm) の実大試験体において、異形鉄筋径が呼び名 D13 以下ならば、異形鉄筋全主筋比がせん断ひび割れ強度、せん断終局強度に及ぼす影響

はわずかであるが、比較的大径の D22 を使用した場合は、せん断ひび割れ強度、せん断終局強度ともに低下した。

(2) 今回の PRC 杭は、らせん筋量を通常の PHC 杭の約 4 倍としたが、PRC 杭 IV 種は長期軸力下、せん断スパン比 3.0 の条件でせん断圧縮型の破壊となった。

(3) 軸力の増加により、せん断ひび割れ強度とせん断終局強度の差は小さくなり、せん断ひび割れ幅を制御することは困難となる。

(4) 異形鉄筋の扱いなどに問題点はあるものの、文献 2) におけるせん断終局強度式によって、PRC 杭のせん断終局強度を概ね評価できる。

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) 日本建築センター：地震力に対する建築物の基礎の設計指針, pp.21-35, 1984
- 2) 岸田慎二：大口径高強度プレストレストコンクリート杭のせん断強度に関する研究, 東京工业大学学位論文 1999.3

付録 文献 2) における終局強度式

$$\frac{\text{calQsu}}{b \cdot e \cdot j} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$$

$$\tau_1 = \frac{0.115 k_u \cdot k_p (\sigma_B + 17.7)}{\frac{M}{Q_d} + 0.115}$$

$$\begin{aligned} p_w \cdot w_{oy} \leq 7.4 & \quad \tau_2 = 0.657 p_w \cdot w_{oy} \\ 7.4 \leq p_w \cdot w_{oy} & \quad \tau_2 = 4.87 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_e + \sigma_0' \leq 27.4 & \quad \tau_3 = 0.102 (\sigma_e + \sigma_0') \\ 27.4 \leq \sigma_e + \sigma_0' & \quad \tau_3 = 2.79 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= -1.24t/D + 1.19 & b \cdot e &= \alpha A_c / D & d &= D - t/2 & j &= 7/8d \\ d &= 260, 270, 280 \text{ mm} & \text{でそれぞれ} & k_u &= 0.83, 0.82, 0.80 \\ k_p &= 0.82 (100 \text{ pt})^{0.23} \\ p_g &= A_s / (b \cdot e \cdot j) \times 100 & p_t &= p_g / 4 \\ p_w &= a_w / (b \cdot e \cdot s) \times 100 & \sigma_e + \sigma_0' &= \sigma_e + N / (b \cdot e \cdot j) \\ t &: \text{肉厚 (mm)} & D &: \text{杭径 (mm)} & A_c &: \text{杭体断面積 (mm}^2\text{)} \\ A_s &: \text{全軸筋断面積 (mm}^2\text{)} \\ a_w &: \text{一組のらせん筋断面積 (mm}^2\text{)} & s &: \text{らせん筋ピッチ (mm)} \end{aligned}$$