

せん断破壊するPCaPC柱の破壊モードとせん断耐力評価

京都大学工学研究科	○内山 元希
京都大学工学研究科	工博 坂下 雅信
京都大学工学研究科 正会員	Ph. D. 河野 進
京都大学工学研究科 正会員	工博 西山 峰広

Abstract : Three post-tensioned precast concrete columns were tested under anti-symmetrical loading. The experimental parameters were shear reinforcement ratio and its strength, and the location of prestressing bars. The three specimens failed in different types of shear mode, and the effectiveness of shear reinforcement at the peak load was different. The shear capacities of 31 post-tensioned precast beam and column specimens, including experimental results collected from the literature in the past, were evaluated by design formulae from the following two sources; the AIJ code for design and construction of prestressed concrete and the NewRC project. The NewRC formula and a crack capacity formula based on the principal tensile stress criterion gave a good estimation of the shear capacities and predicted well the shear failure modes of the 31 specimens, including specimens with concrete strength of up to 168MPa.

Key words : Post-tensioned, Column, Shear capacity, Shear crack strength, High strength concrete

1. はじめに

PCaPC 柱のじん性能を確保するためには、せん断破壊を防ぐことが基本である。PCaPC 部材のせん断耐力については、湯浅らの研究^{1),2),3),4)}、谷らの研究⁵⁾で評価法が提案されているが、実験データが少なく、設計に必要な情報が十分ではない。現在、PC 部材のせん断終局耐力の算定式として、日本建築学会のプレストレストコンクリート設計施工規準・同解説⁶⁾ (以下 PC 規準と略記)に記載されているトラス・アーチ機構に基づいた(71.2)式が用いられているが、部材端の目地部で普通鉄筋が連続していない PCaPC 圧着柱部材に適用する際には、再検討が必要となる。

また、PC 規準(71.2)式はコンクリート圧縮強度が約 100MPa 以下の部材に対して検証されている為、コンクリート圧縮強度有効係数 ν に下限値 0.65 が設けられており、 wf_y の上限値を 295MPa とするなど、材料の高強度化に十分に対応していない。NewRC プロジェクトで提案されたせん断耐力式⁷⁾の超高強度 RC 部材への適用性は文献 8)で調査されているが、150MPa 以上の超高強度コンクリートを用いた PCaPC 柱部材への適用可能性は未だ検証されていない。

さらに、せん断終局耐力よりもせん断ひび割れ強度の方が高い部材の場合、部材のせん断耐力はせん断ひび割れ強度に支配される。したがって、破壊形式に見合った耐力の予測にはせん断ひび割れ強度も考慮に入れる必要がある。

著者らは、高強度材料を用いた PCaPC 柱のせん断破壊性状に関する実験資料を収集し、既往のせん断耐力算定式の妥当性を検討する目的で、3 体の PCaPC 柱の曲げせん断実験を行い、既往の実験結果 28 体と合わせて、計 31 体の PCaPC 部材のせん断耐力を(71.2)式及び NewRC 式の算定値と比較した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は高層 PCaPC 建造物の 1 階中柱を対象とした計 3 体である。文献 9)で得られた知見に基づき、

各試験体の破壊モードがそれぞれせん断斜張力破壊, せん断引張破壊, せん断圧縮破壊となるように設計した。試験体諸元を表-1 に示す。試験体配筋を図-1 に, 柱断面を図-2 に示す。柱は断面400×400mm と 400×600mm の2種類とし, せん断スパン比がいずれも1.0となるよう内法高さはそれぞれ800mm, 1200mmとした。試験体の柱と上下スタブは別々にコンクリートを打設し, 柱部分と上下スタブを厚さ20mmの目地モルタルを介し, PC鋼棒4本により圧着した。PC鋼棒はC種1号SBPR1080/1230の丸鋼(26mm)を用い, シース管は内径50mm(標準型#1050)とした。鉄筋およびPC鋼棒の力学的性状を表-2 に, コンクリート, 目地モルタル, PCグラウトの力学的性状を表-3 に示す。

2.2 荷重方法

荷重装置を図-3 に示す。荷重では, 表-1 に示すように軸力荷重後におけるPC鋼棒の有効プレストレスと, 2台の8000kN鉛直ジャッキによる軸力の和が, コンクリートの材料試験値を用いて求めた軸力比0.33に相当する値となるよう制御した。また, これら2台の鉛直ジャッキを用いて, 荷重中に柱頭側スタブと柱脚側スタブが常に平行に保たれるように制御した。

なお, 変位制御に用いた層間変形角(以下R)は, 上下スタブの相対水平変位を柱試験区間長で除

表-1 試験体一覧

試験体名	予想される破壊モード※	せん断スパン比	PC鋼棒間距離(mm)	せん断補強筋規格降伏強度 f_y (MPa)	せん断補強筋量 p_w (%)	$p_w \cdot f_y$ (N/mm ²)	軸力荷重後有効プレストレス P_1 (kN)	鉛直ジャッキ軸力目標値 P_2 (kN)	軸力合計値 P_1+P_2 (kN)	軸力比
R-10-L21	DT	1.0	200	785	0.207	1.62	1464	2217	3681	0.33
R-10-L28	ST		400	785	0.279	2.19	1349	4171	5520	0.33
R-10-N75	SC		400	295	0.745	2.20	1459	4068	5527	0.33

※ST:せん断引張破壊 SCせん断圧縮破壊 DT:せん断斜張力破壊

表-2 鉄筋及びPC鋼棒の力学的性状

種類	降伏強度(MPa)	引張強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
D10 (295MPa)	383	529	184
D6 (295MPa)	444	526	181
S6 (785MPa)	1090※	1195	204
φ26mm C種1号	1220※	1295	200

※ 降伏強度は0.2%オフセット値である。

表-3 コンクリート等の力学的性状

種類	圧縮強度(MPa)	割裂強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
コンクリート	69.7	5.5	32.0
目地モルタル	70.8	3.5	27.2
PCグラウト	48.5	2.6	16.1

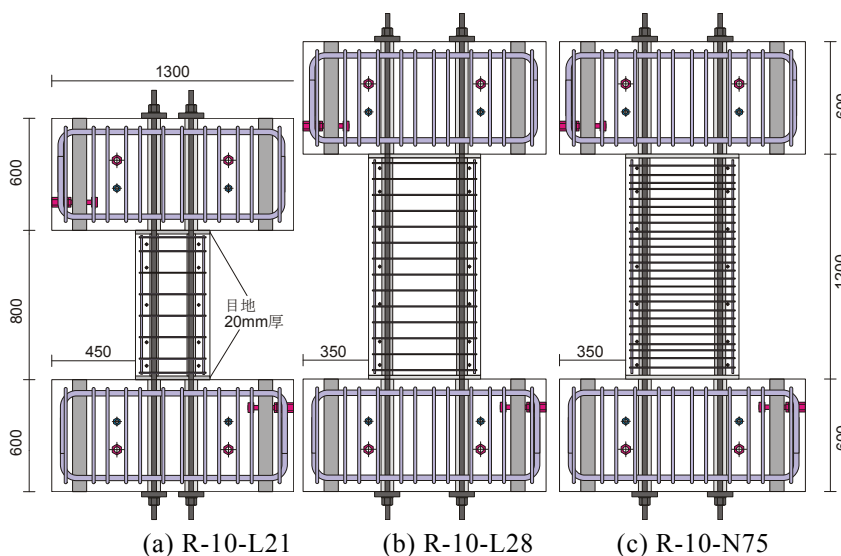


図-1 試験体立面(単位: mm)

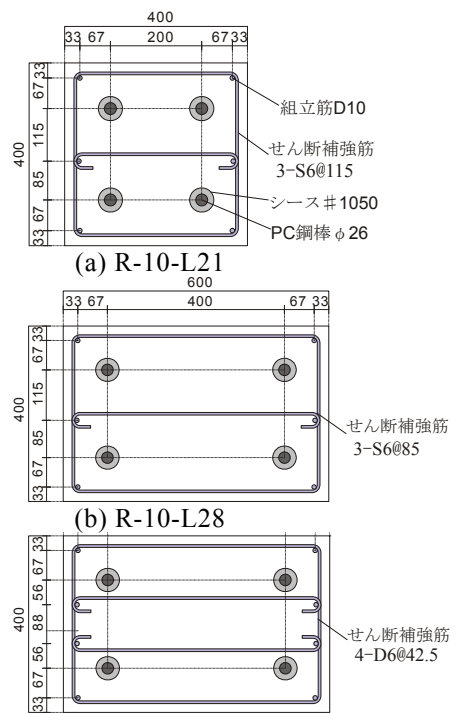


図-2 柱断面(単位: mm)

した値である。南方向への荷重を正方向とし、水平荷重（以下 Q ） $\pm 100\text{kN}$ で 1 回、層間変形角 $R=\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.25\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 0.75\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 1.5\%$ で各 2 回の正負繰り返し荷重を行った。

3. 破壊性状及び破壊モード

最大耐力に達したサイクル終了時における各試験体のひび割れ状況を図-4 に、 $R=\pm 2\%$ までの水平荷重-層間変形角関係を図-5 に示す。水平荷重には $P-\delta$ 効果による付加曲げモーメントを考慮している。また、図-4 に示す位置のせん断補強筋ひずみ-層間変形角関係を図-6 に示す。表-4 に各試験体の最大耐力、及び最大耐力時の層間変形角を示す。また、耐力値の下の括弧内に破壊モードを記号で示す。

3 体の試験体は全てせん断破壊した。 $R-10-L21$ では、せん断ひび割れ発生が最大耐力となった。このときせん断補強筋ひずみがほぼ 0 であることから、せん断斜張力破壊であると判断した。

残る 2 体については、せん断ひび割れが発生した後も徐々に耐力が上昇し、最大耐力に達した。このときせん断補強筋が弾性範囲にあった $R-10-L28$ はせん断圧縮破壊、降伏に至っていた $R-10-N75$ はせん断引張破壊であると判断した。これらの試験体は最大耐力到達時においてせん断補強筋に 0.2%以上のひずみが発生しており、トラス機構が形成されていたものと考えられる。

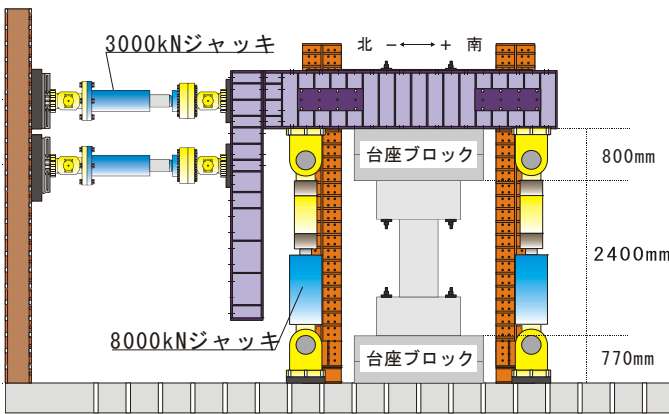


図-3 荷重装置(単位: mm)

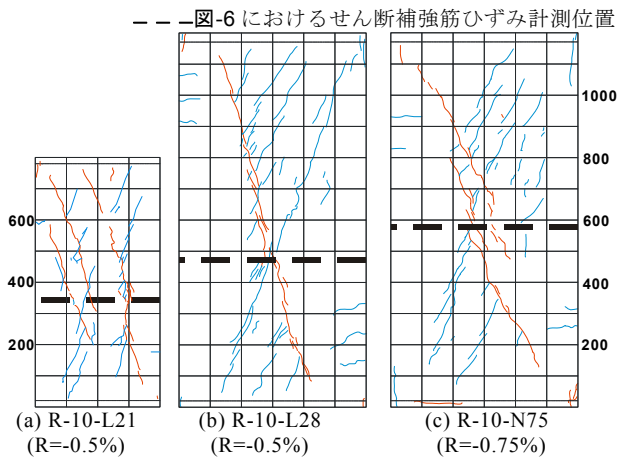


図-4 ひび割れ状況

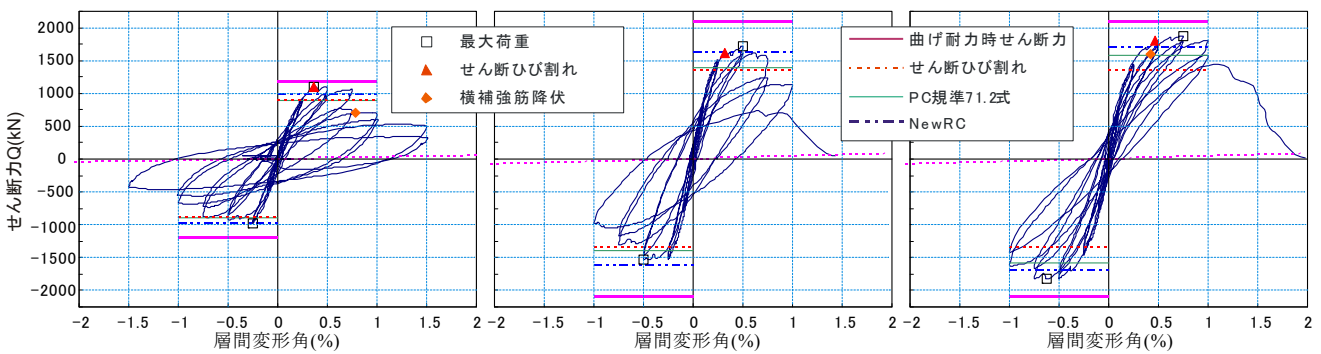


図-5 荷重-層間変形角関係

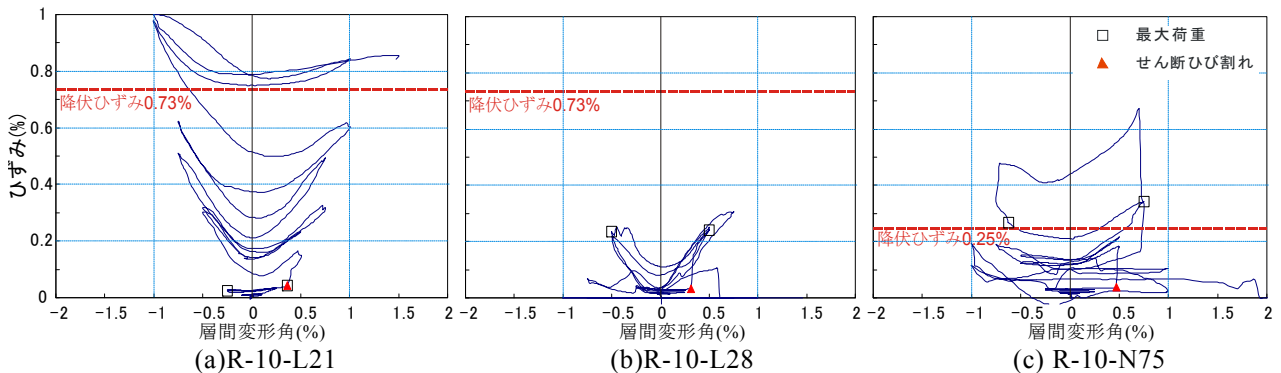


図-6 せん断補強筋ひずみ-層間変形角関係

表-4 実験結果と計算値の比較

試験体名	実験結果(破壊モード)*				計算結果[実験最大耐力/計算値]				せん断余裕度			
	正側		負側		PC 規 準 71.2 式 Q_u (kN)	NewRC 式 Q_s (kN)	せん断 ひび割 れ Q_c (kN)	曲げ耐力 時せん 断力 Q_f (kN)	Q_u/Q_f	$\max[Q_u, Q_c]/Q_f$	Q_s/Q_f	$\max[Q_s, Q_c]/Q_f$
	最大 耐力 (kN)	変形 角 (%)	最大 耐力 (kN)	変形 角 (%)								
R-10 -L21 (DT)	1102	+0.36	-973	-0.48	890 [1.24]	979 [1.13]	899 [1.23]	1163 [0.95]	0.76	0.77	0.84	0.84
R-10 -L28 (ST)	1721	+0.50	-1530	-0.50	1396 [1.23]	1609 [1.07]	1348 [1.28]	2067 [0.83]	0.68	0.68	0.78	0.78
R-10 -N75 (SC)	1876	+0.75	-1821	-0.62	1584 [1.18]	1699 [1.10]	1348 [1.39]	2072 [0.91]	0.76	0.76	0.82	0.82

*ST:せん断引張破壊 SC せん断圧縮破壊 DT:せん断斜引張力破壊 NA:部材の耐力に達していない。

4.水平耐力

曲げ耐力は、コンクリートの圧縮応力分布を、ACI ストレスブロックにより置換し、平面保持仮定に基づいて計算した。ただし、曲げ耐力時の圧縮縁ひずみは 0.3%、曲げ耐力時における PC 鋼棒の張力は、軸力載荷時の有効プレストレス力とした。図-5 及び表-4 に曲げ耐力の計算値を示す。

せん断耐力は、PC 規準⁶⁾の(71.2)式、及び文献 7)に示される提案せん断強度式(以下、NewRC 式)を用いて計算した。両式ともに、トラス・アーチ両機構の形成を仮定したせん断耐力式である。それぞれの計算式を、式(1)、(2)に示す。

PC 規準⁶⁾(71.2)式

$$Q_u = b_0 j_0 p_w w f_y + \frac{b_0 D}{2} (\nu F_c - 2 p_w w f_y) \tan \theta \quad \left[\begin{array}{l} \nu = \alpha L_r \left(1 + \frac{\sigma'_s}{F_c} \right) \\ \alpha = \sqrt{60/F_c} \quad L_r = M/2QD \\ \sigma'_s: \text{軸力を含めた平均プレストレス} \\ 0.65 \leq \nu \leq 1.0 \end{array} \right] \quad (1)$$

NewRC⁷⁾式

$$Q_s = b j_i p_w f_{wy} \cot \phi + \alpha (1 - \beta) b D \nu_0 f'_c \quad \left[\begin{array}{l} \nu_0 = 1.7 \cdot (1 + 2n) \sigma_B^{-1/3} \leq 1.0 \quad n: \text{無次元化軸力比} \end{array} \right] \quad (2)$$

式(1)の j_0 、及び式(2)の j_i は PC 鋼棒間距離とした。また、式(1)における $w f_y$ には文献 10)の記述に基づき 390MPa の上限値を設けた。コンクリート圧縮強度有効係数 ν については、PC 規準では下限値 0.65 が設定されているが、NewRC 式においては下限値が設定されていない。その他の記号の説明については紙面の都合上割愛する。

せん断ひび割れ強度は、主応力度に基づいた鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説¹¹⁾(以下、靱性指針と略記)の式(3)を用いた。図-5 及び表-4 にせん断ひび割れ強度の計算値を示す。

靱性指針主応力度式¹¹⁾

$$Q_c = \phi \left(\sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_T \cdot \sigma_o} \right) \cdot b \cdot D / 1.5 \quad \left[\begin{array}{l} \phi: \text{安全率}(=1.0), \sigma_o: \text{軸応力度} \\ \sigma_T = 0.33 \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \end{array} \right] \quad (3)$$

結果を表-4 に、 Q_u 、 Q_s を図-5 に示す。表-4 に示す各算出値の下の括弧内には、実験の正側最大耐力を各計算値で除した値も併せて示す。

部材の耐力は、せん断終局強度計算値よりも、せん断ひび割れ強度の算出値の方が大きい場合は、せん断ひび割れ強度式によって決定される。この場合の破壊モードはせん断斜張力破壊である。

PC 規準(71.2)式で評価した場合、R-10-L28、R-10-N75 のせん断耐力を安全側に誤差 23%以下で評価できる。また、R-10-L21 については、トラス・アーチ抵抗機構を仮定する PC 規準(71.2)式によるせん断耐力算定値をせん断ひび割れ強度算定値が上回っており、実験の破壊モードが、せん断ひび割れにより耐力が決定するせん断斜張力破壊であることと適合する。

一方、NewRC 式を用いた場合、R-10-L21 においてせん断耐力算定値がせん断ひび割れ強度算定値を 80kN 上回り、実験の破壊モードと適合しない。しかし、R-10-L28、R-10-N75 に対するせん断耐力の予測誤差は安全側に 10%以下であり、PC 規準 (71.2)式を用いる場合よりも誤差が小さくなった。

5. 既往の研究による試験体を用いた検討

4章で検討した3体の試験体に加え、既往の研究に示されている試験体について4章と同様の耐力算定を材料の実強度を用いて行った。対象としたのは、文献1)~5)、文献9)、及び文献12)~17)に示されているせん断破壊したPCaPC圧着柱および梁試験体28体である。ただし、45度方向や、変動軸力で載荷された試験体は除外した。曲げ耐力は、 $F_c=100\text{MPa}$ を超える試験体については圧縮強度まで線形の応力-ひずみ関係を仮定し¹⁸⁾、その他の試験体は4章と同様に計算した。結果をまとめたのが図-7である。縦軸に最大耐力時せん断力実験値の曲げ終局強度時せん断力計算値に対する比(Q_{exp}/Q_f)をとり、横軸には、図-7(a), (c)では各せん断終局強度計算値の曲げ終局強度時せん断力計算値に対する比($Q_u/Q_f, Q_s/Q_f$)を、図-7(b), (d)では、せん断斜張力破壊する試験体においては、 Q_u, Q_s よりも Q_c に破壊モードが支配されることを考慮して、せん断終局強度、せん断ひび割れ強度の値の大きい方と曲げ終局強度計算値に対する比($\max[Q_u, Q_c]/Q_f, \max[Q_s, Q_c]/Q_f$)をとった。

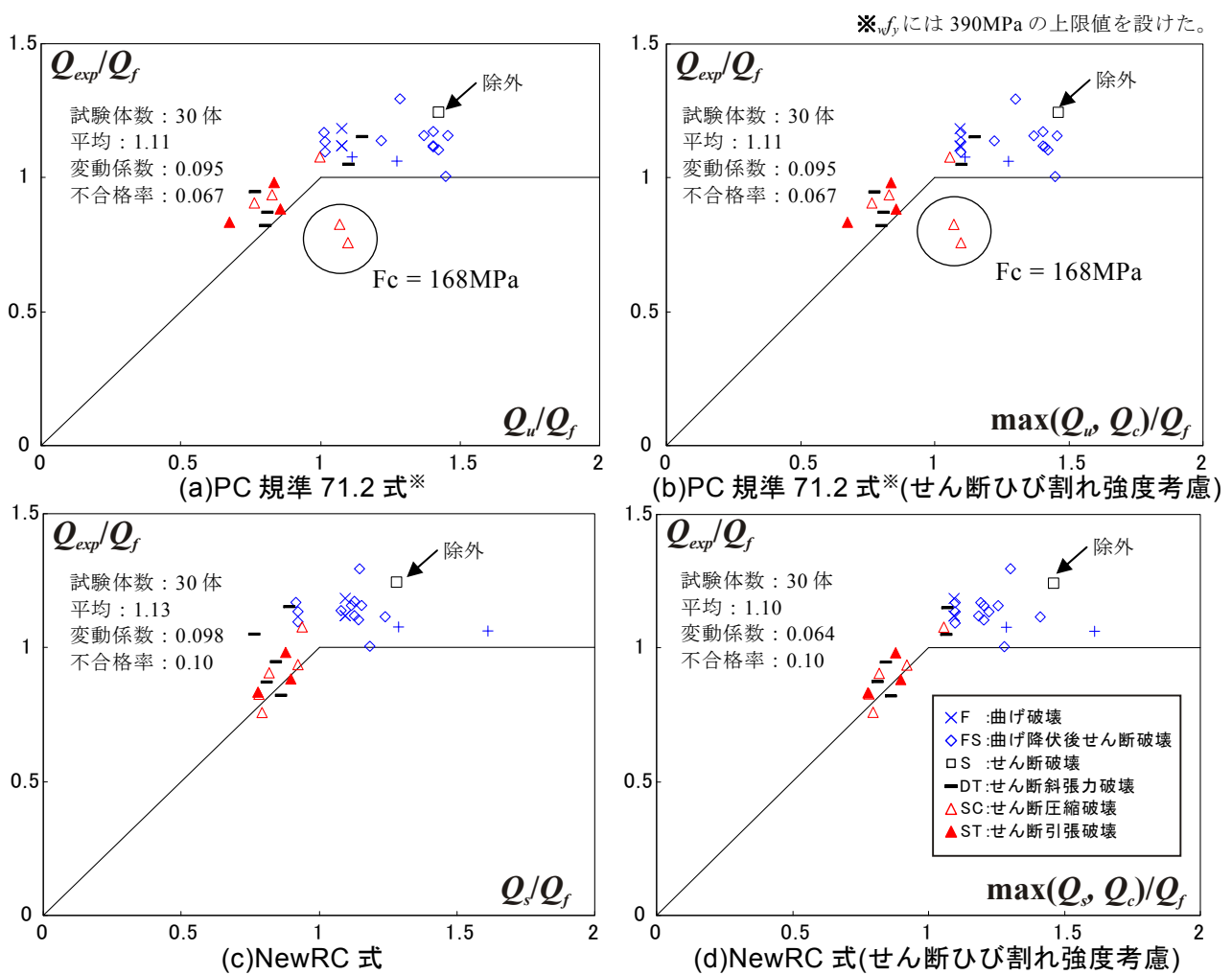


図-7 各耐力式を用いたせん断余裕度

文献12)の試験体のうちせん断破壊と報告された試験体(記号□)については、破壊性状や図-7中の座標が文献12)の曲げ降伏後せん断破壊(記号◇)した試験体と似ている。これは、試験体部材端部の圧縮側コンクリートが、曲げとせん断の影響で圧壊する曲げせん断混在モードであるためと考え、以下の考察からは除外し、計30体について考察を進める。

図-7(a), (b)では、文献17)に示されるコンクリート強度が168MPaの試験体について大きく危険側の評価となっている。これは、PC規準(71.2)式において、コンクリート有効係数 ν に下限値が設けられており、コンクリート強度増加による破壊領域の有効圧縮強度の低下が反映されていないことが原因

である。その他のせん断破壊した試験体については、一部曲げ破壊の判定とはなるが、(a)、(b)ともに耐力の予測精度は良好である。

図-7(c)、(d)ではいずれも予測精度は良好である。NewRC 式においてコンクリート有効係数 ν が高強度コンクリートにも対応しているため、PC 規準(71.2)式を用いると危険側の評価となった 2 体についても精度よく評価できている。また、図-7 において大きく安全側の評価となっているせん断斜張力破壊 (記号-) した 2 体の試験体は、せん断ひび割れ強度を考慮に入れた図-7 (d)において、曲げ破壊の判定となるものの、平均は(c)が 1.13 であるのに対して(d)では 1.10 となり、変動係数は(c)が 0.098 であるのに対して(d)では 0.064 と低下し、全体の予測精度は向上する。

6. 結論

- 1) 本実験における試験体の破壊モードはそれぞれ、せん断引張破壊、せん断圧縮破壊、せん断斜張力破壊の 3 種類であり、設計時における予想と一致した。
- 2) 主応力度に基づいたひび割れ強度式と、PC 規準(71.2)式を用いることでせん断破壊モードとせん断耐力を予測できることが確認できた。ただし、文献 17)に示される $F_c=168\text{MPa}$ の高強度コンクリートを用いた試験体に対しては、大きく危険側の評価となった。
- 3) NewRC 式を用いれば、現状では $F_c=168\text{MPa}$ の高強度コンクリートを使用してもせん断耐力を精度よく評価できる。さらに主応力度に基づいたせん断ひび割れ強度を考慮に入れば、トラス・アーチ抵抗機構の適用範囲外であるせん断斜張力破壊を含めて、高い予測精度で破壊モードとせん断耐力を評価することができる。

謝辞

本研究は、文部科学省 科学研究費基盤研究(B)(課題番号：26360252, 研究代表者：河野進)を用いて行われました。

参考文献

- 1) 小川哲郎ら：プレキャストプレストレストコンクリート部材のせん断性状に関する実験的研究 (その 1～その 3), 日本建築学会 学術講演梗概集, C-2, pp. 1077-1082, 1999
- 2) 湯浅哲廣ら：プレキャストプレストレストコンクリート部材のせん断性状に関する実験的研究 (その 1～その 3), 日本建築学会 学術講演梗概集, C-2, pp. 965-970, 2000
- 3) 湯浅哲廣ら：プレキャストプレストレストコンクリート部材のせん断性状に関する実験的研究 (その 1～その 3), 日本建築学会 学術講演論文集, C-2, pp. 955-960, 2001
- 4) 湯浅哲廣ら：プレキャストプレストレストコンクリート部材のせん断性状に関する実験的研究 (その 4～その 5), 日本建築学会 学術講演論文集, C-2, pp. 991-994, 2002
- 5) 谷昌典, 西山峰広：PC 鋼材の付着を考慮したプレストレストコンクリート部材のせん断終局強度, 日本建築学会構造系論文集, vol. 73, No. 627, pp. 835-842, 2008
- 6) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1998
- 7) 建設省総合技術開発プロジェクト：鉄筋コンクリート造建築物の軽量化・超高層技術の開発, 平成 4 年度構造性能分科会報告書, 1993
- 8) 黒沢俊也ら：超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱および梁部材の実験結果データベースによる各種強度算定式の適合性の検討, コンクリート工学 Vol. 44, No.2, pp.14-22, 2006.
- 9) 内山元希, 長谷川弘明, 坂下雅信, 河野進：785MPa 級のせん断補強筋を用いた PCaPC 柱のせん断性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 32, No. 2, pp. 487-492, 2010.
- 10) 2009 年版プレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例編集委員会：2009 年版プレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例, 全国官報販売共同組合, pp. 120-128, 2009
- 11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 12) 谷昌典, 西山峰広：プレキャストプレストレストコンクリート圧着柱の曲げせん断性状と変形性能, 日本建築学会構造系論文集, vol. 73, No. 623 pp. 103-110, 2008
- 13) 岡村拓弥ら：高性能材料を用いた PCaPC 柱の曲げせん断性状に関する研究 (その 1, その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系, C2, pp. 843-846, 2009.
- 14) 内山元希, 長谷川弘明, 坂下雅信, 河野進：785MPa 級のせん断補強筋を用いた PCaPC 柱のせん断性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 32, No. 2, pp. 487-492, 2010.
- 15) 李在満, 谷昌典, 坂下雅信, 河野進：高強度せん断補強筋を有するプレキャストプレストレストコンクリート梁のせん断斜張力破壊に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, JCI, Vol. 32, No.2, pp. 493-498, 2010.
- 16) 浜田公也ら：100N/mm² 級の高強度コンクリートを用いた PCaPC 柱の実験的研究 (その 1, その 2), 日本建築学会講演梗概集, C-2 構造IV, pp.1025- 1028, 2003.
- 17) 八田有輝ら：高性能材料を用いた PCaPC 柱のせん断耐力評価 (その 1, その 2), 日本建築学会講演梗概集, C-2 構造IV, 出版予定, 2011
- 18) 村松晃次ら：超高強度コンクリート RC 柱の曲げ耐力へのストレスブロックの適用, 日本建築学会講演梗概集, C-2, pp.169-170, 2005