

論文 軸圧縮力を受ける RC 造柱の最大耐力以降の拘束効果の評価

阿部 博之^{*1}・李 柱振^{*2}・本多 良政^{*3}・加藤 大介^{*4}

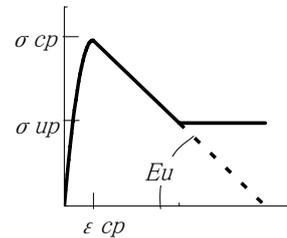
要旨：RC造柱の軸力保持性能を評価する際に、柱の単純軸圧縮加力の挙動、特に最大耐力後の挙動が大きく影響することが分かっている。また、その挙動は配筋詳細に依存する帯筋の拘束効果に大きく影響される。本研究では、この観点からRC柱の最大耐力後の挙動のモデル化を行う。具体的には、本報告で報告する新たに実験を行った5体の試験体に、同じシリーズで報告してきた配筋詳細の影響を実験的に検討した結果を用いてモデル化を行う。さらに、既往の実験結果を用いてその適合性も検討する。

キーワード：RC造柱，軸応力度—軸ひずみ関係，負勾配，配筋詳細

1. はじめに

筆者らは、文献1)でさまざまな配筋詳細をもつRC造柱の、せん断破壊後の軸力保持能力の評価実験について報告した。この実験は、単純軸圧縮実験結果（軸力—軸変形関係）と曲げせん断加力実験結果（軸力保持能力喪失部材角）との関連を検討することを第一の目的とし、軸加力実験と曲げせん断実験を同じ諸元を持つ試験体を用いて行っている点の特徴である。さらに、軸圧縮実験における滑り開始時摩擦軸力実験値が同じ諸元を持つ曲げせん断試験体の軸力保持能力喪失時の部材角と相関関係がある、と結論づけており、今後この滑り開始時摩擦軸力の評価法が重要となる。なお摩擦軸力とは、後で詳述するが、軸圧縮試験体が最大軸力以降に斜めひび割れ面での摩擦力により軸力に抵抗している状態を想定した軸力で、斜めひび割れ面で滑りが開始するときの摩擦軸力を滑り開始時摩擦軸力と呼んでいる。

一方、筆者らは、文献2)でさまざまな配筋詳細をもつ帯筋により拘束されたコンクリートの軸方向一軸変形のモデルを提案している。図-1に文献2)で提案したモデルの概要を示す。このモ



$$\sigma_{cp} = \sigma_c + 4.1 \cdot \sigma_{tp}$$

$$\epsilon_{cp} = \epsilon_c + 0.0015 \cdot \sigma_{tp}$$

$$\sigma_{tp} = \sigma_{np} \cdot \frac{\cos\theta \cdot \sin\theta + \mu(\sigma_c) \cdot \sin\theta \cdot \sin\theta}{\cos\theta \cdot \sin\theta - \mu(\sigma_c) \cdot \cos\theta \cdot \cos\theta}$$

$$\sigma_c = 0.85 \cdot \sigma_B$$

$$\epsilon_c = 1.37 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_c + 0.00169$$

$$\sigma_{tp} = \frac{\epsilon_c}{\frac{2.8 + 0.0035_e K_{cf}}{K_{cf}} - 0.0015}$$

$$K_{cf} = \frac{a_w \cdot E_s}{D_c \cdot S} \quad e K_{cf} = K_{cf} \cdot f(\alpha) \cdot g(N_{BUN})$$

$$f(\alpha) = \sqrt{\frac{S}{D_c}} \quad g(N_{BUN}) = \frac{1}{N_{BUN}^2}$$

$$\sigma_{np} = \frac{a_w \cdot \sigma_{wy}}{D_c \cdot S} \cdot \frac{2}{1 + C_o} + N_{BUN} - 1$$

$$\mu(\sigma_c) = 0.32 + 0.0064 \cdot \sigma_c \quad (\leq 1)$$

$$C_o = \frac{1}{20} \cdot \left(\frac{D_c}{\phi_w}\right) \cdot \gamma \quad \gamma = 0.0005 \cdot \sigma_{wy} \quad (\gamma \leq 2)$$

記号 (単位は N, mm) : D_c : コア幅、 ϕ_w : 帯筋径、 a_w : 一組の帯筋断面積、 σ_{wy} : 帯筋降伏応力度、 S : 帯筋間隔、 σ_B : コンクリート強度、 N_{BUN} : 帯筋による断面の分割数 (外周のみは 1, 中子 1 本は 2)、 θ : 滑り

図-1 文献2)の拘束コンクリートのモデル

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科 大学院生 (正会員)
 *2 新潟大学大学院 自然科学研究科 大学院生 修士 (工学) (正会員)
 *3 新潟大学大学院 自然科学研究科 博士研究員 博士 (工学) (正会員)
 *4 新潟大学 工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

デルでは、帯筋からコアコンクリートへの拘束応力度 σ_{tp} を配筋詳細に依存して評価し、拘束コンクリートの最大応力度 σ_{cp} 、そのときの軸歪度 ε_{cp} 、および最大応力度後の負勾配 E_u をこの拘束応力度 σ_{tp} の関数として評価している。さらに、最大応力度以降の安定した状態を表すために、 σ_{up} も配筋詳細に依存して評価している。ただし、この安定した応力 σ_{up} は帯筋に溶接等の閉鎖型のものを使った場合のみとし、通常のフック付きの場合は図中の破線のようにモデル化されている。

この文献 2) による σ_{up} は、軸圧縮試験体が斜めひび割れ面での摩擦力により軸力に抵抗している状態を想定して導いており、これは文献 1) の摩擦軸力と同じ状態である。そこで、本報告では、文献 1) の手法を参考に、 σ_{up} のモデルを再考し、帯筋で拘束されたコンクリートの応力度-ひずみ度関係の負勾配の評価式を作成する。具体的には、今年度行った試験体 5 体の実験について紹介し、その後文献 1) のデータも含め、モデルを提案する。最後に、文献 2) で検討した試験体も対象にモデルの適合性を検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

本節では今年度行った軸圧縮試験体について簡単に報告する。今年度は、以下のことに着目して試験体を作成することを試みた。i)配筋詳細の悪い古い建物を念頭においた低強度コンクリートを用いる、ii)文献 1) では試験体は断面 (180mm×180mm) に対して帯筋径 (D6) が若干大きかったため、より現実的な比率となる帯

筋径(D4)を用いる、および iii)中子筋を用いた場合の 3 点である。

試験体の形状は文献 1) と同じである。5 種類の試験体を作成したが、それぞれの諸元を表-1 に、形状及び配筋を図-2 に示す。シリーズ名の最初の文字は断面の配筋詳細を表しており、H は 135° フック付 (余長 6d) で横補強筋は外周の帯筋のみ、I は 135° フック付 (余長 6d) で横補強筋は帯筋と中子筋、S は 90° フック付 (余長 4d) で横補強筋は帯筋のみである。数字は帯筋間隔を表しており単位は mm である。表-1 の後半には図-1 に示したコンクリートモデルにおける拘束応力度 σ_{tp} とその最大値である $a_w \sigma_{wy}/D_c S$ を示した。帯筋の配筋詳細により、その拘束効果の低減の程度がわかる。

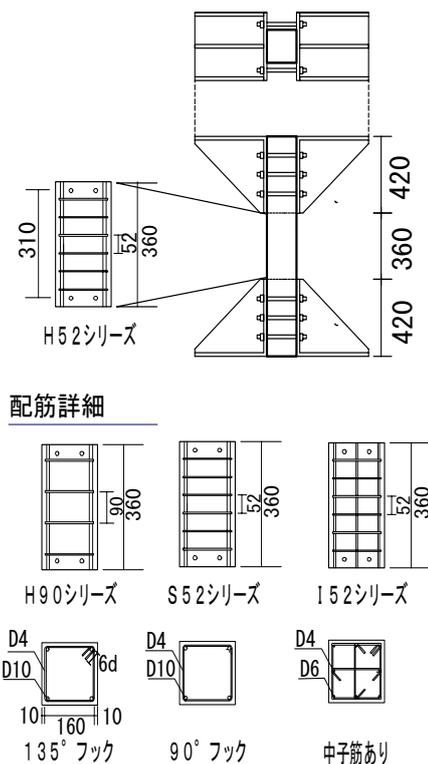


図-2 試験体形状及び配筋図

表-1 試験体諸元と実験結果

試験体名	柱寸法		主筋(SD295)			帯筋(SD295)					コンクリート強度 (N/mm ²)	最大強度時		拘束応力度 σ_{tp} (N/mm ²)	$a_w \cdot \sigma_{wy} / D_c \cdot S$ (N/mm ²)		
	断面 (mm ²)	高さ (mm)	鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	形状	間隔 (mm)		中子筋	軸強度 (kN)			軸変形 (mm)	座屈区間
H52LLシリーズ	180×180	360	4-D10	345	477	2-D4	420	570	135deg(6d)	52	無	16.8	589	1.03	3	0.40	1.34
H90LLシリーズ										90			572	0.67	2	0.22	0.77
H52Lシリーズ										52			615	1.32	3	0.40	1.34
S52Lシリーズ										52			590	4.83	3	0.40	1.34
I52Lシリーズ										52			646	1.2	3	1.04	2.01

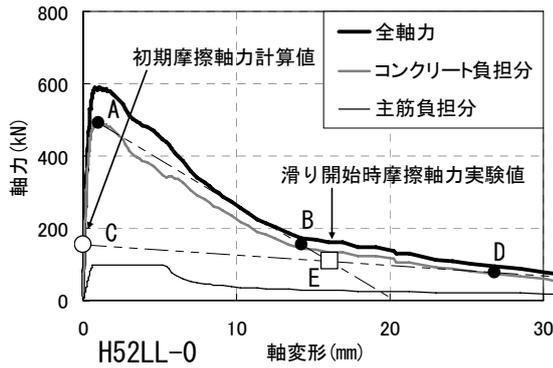


図-3 コンクリート部分のみの軸力-軸変形関係の分離結果とそのモデル化の例

試験体は上下部分を三角形の基礎治具で挟み込んで固定し、試験区間はその中間の360mmである。また、軸変形は表面と裏面でそれぞれ2箇所計4箇所測定し、その平均とした。変位計位置は図-2の○で示してあるが、試験区間の高さ360mmの内側の310mmが測定区間である。

2.2 コンクリート負担分の抽出

図-3(a)~(e)に各試験体の軸力-軸変形関係を示す。本報告では、コンクリートのみの軸力を求めるために、文献3)と同じ手法で主筋の軸力を推定した。文献3)では文献4)で提案された座屈モデル(図-4)を用いているが、この座屈モデルの挙動は帯筋の有効係数 α に影響され、またコンクリートの挙動も帯筋の有効係数 α により影響されるので、各加力ステップでそれぞれの有効係数が同じになるときの、それぞれの軸力を求めることをしている。図-3には分離結果も示されている。

次に、抽出されたコンクリートの負担分の負勾配部分を文献1)の方法でモデル化した。文献1)では、式(1)で表される初期摩擦軸力計算値 P_{fr0} を基準に、軸力-軸変形関係の下り勾配を2本の折れ線でモデル化している。なお、文献1)では主筋も含めているが、本報告ではコンクリートのみを対象とする。図-3に例が示されているが、最大軸力点(点A)と軸力が P_{fr0} になるときの点Bを結んだ線と、 P_{fr0} の点(点C)と軸力が P_{fr0} の半分になるときの点Dを結んだ線である。

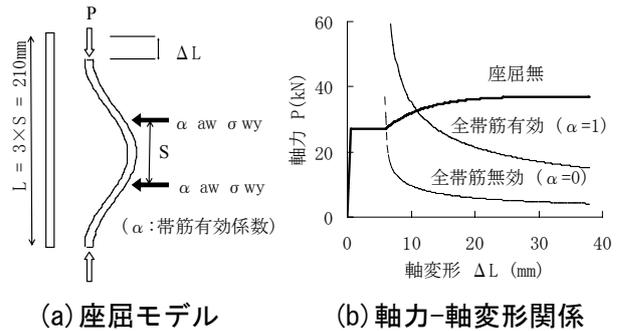


図-4 帯筋有効係数 α を用いた主筋負担軸力の推定法

文献1)では、この交点Eを滑り開始時摩擦軸力実験値 P_{fr} と呼んでおり、本実験でもそれぞれの試験体でこの値を求めた。

$$P_{fro} = b \cdot D \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \frac{\sin\theta \cdot \cos\theta + \mu \cdot \sin^2\theta}{\sin\theta \cdot \cos\theta - \mu \cos^2\theta} \quad (1)$$

ここで、式(1)は、RC柱が角度 θ の滑り面で摩擦力(摩擦係数を μ (≈ 0.77 としている))により抵抗しているときの軸力のモデルを表しており、 bD は断面の幅とせい、 $p_w \sigma_{wy}$ は帯筋比と降伏強度である。なお角度 θ は文献2)では、文献6)に従って $\theta = 45^\circ$ としてあるが、本報告では実験結果の滑り角度の平均的は値である $\theta = 60^\circ$ とした。

3. 負勾配のモデル化

3.1 モデル化の概要

本報告では、図-3(a)に示したように、負勾配部分を2本の直線でモデル化する。最大点の点Aは既往の方法(例えば文献2), 5))で評価可能である。点Cは式(1)で表されるので、点Eの軸力(すなわち滑り開始時摩擦軸力 P_{fr})とそのときの軸変形が分かれば2つの直線が決定できる。そこで、実験で得られた点Eの値を評価する方法を考える。検討用の試験体としてはここで報告した5体の他に文献1)で報告した13体を含め18体とした。文献1)の試験体のパラメータを表-2に示しておく。

3.2 最大軸力点

本報告の直接の目的ではないが、最大軸力点(図-3の点A)をみておく。図-5(a)~(c)は最

表-2 文献 1) の試験体パラメータ一覧

試験体名	試験体諸元					
	主筋	主筋の降伏応力度 $\sigma_y(N/mm^2)$	帯筋	帯筋間隔 S(mm)	帯筋の降伏応力度 $\sigma_{wy}(N/mm^2)$	コンクリート強度 $\sigma_B(N/mm^2)$
H-0	4-D10	383	D6(135度フック(6d))	70	316	35.2
P-0			D6(90度フック(8d))			
W-0		377	D6(溶接)		343	23.4
S-0			D6(90度フック(4d))			
W52-0	4-D13	382	D6(溶接)	52	337	28.2
W90-0			90			
D13S-0	4-D13	335	D6(90度フック(4d))	70	335	26.7
D13W-0			D6(溶接)			
ϕ 4W-0	4- ϕ 4	502	D6(溶接)		316	19.1
D10WH-0	4-D10	371	D6(90度フック(4d))			
D10SH-0			D6(溶接)			
D10WL-0			D6(90度フック(4d))			
D10SL-0			D6(90度フック(4d))			

大軸力を計算値と比較したものである。図-5(a)が拘束効果を見逃したもので、すなわち、コンクリート強度 σ_B に全断面積を乗じたものである。図-5(b)は文献 2)、すなわち、図-1 に示したモデルによるものである。この場合は、拘束されたコンクリートの最大応力度 σ_{cp} にコア断面積を乗じたものと残りのカバーコンクリートの断面積にコンクリート強度 σ_B を乗じたものの和としている。図-5(c)は NewRC モデル⁵⁾によるものである。この場合もコアとカバーの和で評価した。結果をみると、最大軸力は拘束を見逃してもあまり影響がない。これらの試験体はせん断破壊を念頭においているので、帯筋比が小さく、最大軸力時にはコンクリートを十分拘束できるほどの量ではないといえる。

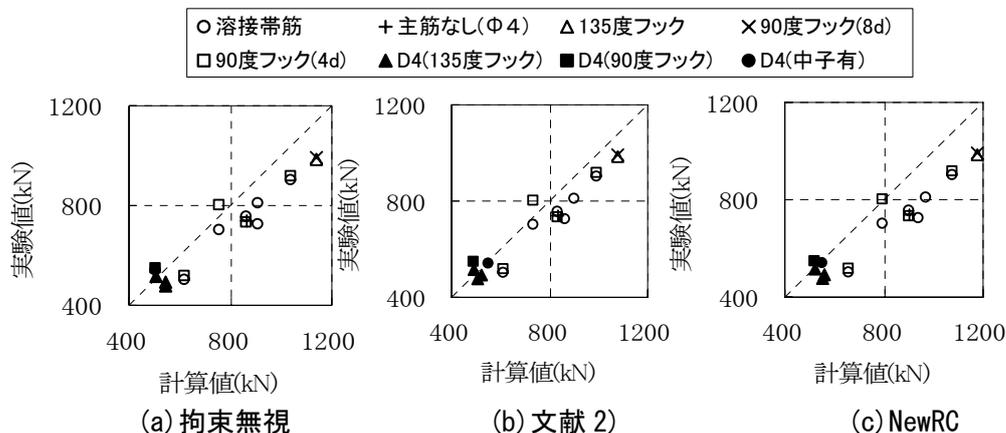


図-5 最大軸力と各種モデルの比較

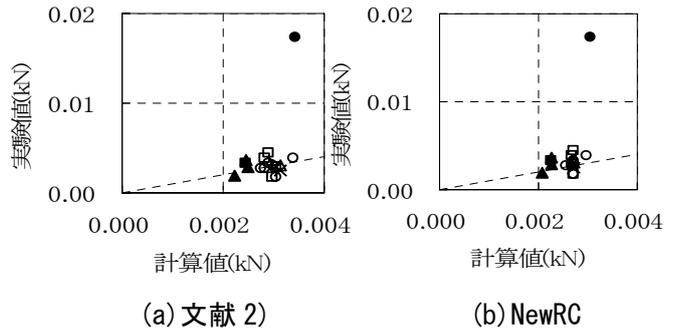


図-6 最大軸力時の軸ひずみと各種モデルの比較 (図中の記号は図-5 と同じ)

図-6(a) (b)は最大軸力時の軸ひずみを計算値と比較したものであり図-6(a)は文献 2)、図-6(b)は NewRC モデルである。ここで、実験値は試験体軸変形を軸変形測定間隔で除して歪度としている(後述する滑り開始時摩擦軸力時のひずみと違うので注意されたい)。結果は、中子筋が有る場合で大きくはずれる試験体があった。

3.3 滑り開始時摩擦軸力

前述したように、文献 2)による安定した部分の軸応力度 σ_{up} は、軸圧縮試験体が斜めひび割れ面での摩擦力により軸力に抵抗している状態を想定して導いており、これは文献 1)の摩擦軸力と同じ状態である。そこで、この σ_{up} が滑り開始時摩擦軸力実験値と相関があるかを検討した。まず図-7(a)は比較のために文献 1)の最大軸力計算値(図-5(b)の横軸と同じ)との関係を見たものであるが、滑り開始時摩擦軸力実験値は最大軸力計算値とは相関が低い。

次に、図-7(b)は文献 2)による最大耐力後の

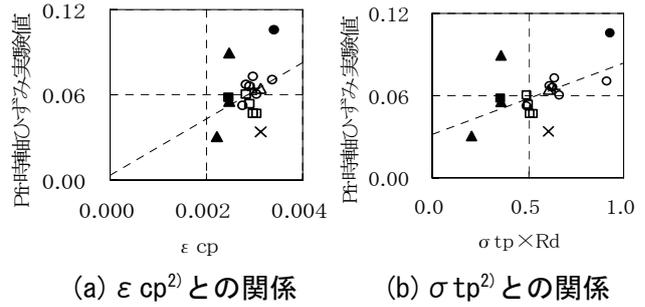
安定した軸力, すなわち σ_{up} にコア断面積を乗じたもの, と比較したものである。なお, 文献 1) では配筋詳細に関する係数 Rd として, 溶接帯筋が $Rd=1$, 135 度フックが $Rd=0.9$, 90 度フックが $Rd=0.8$ を提案しているが, 本検討では σ_{up} にこの係数 Rd を乗じて評価したケースを示している。図をみると相関 (図中の r が相関係数) は高いが計算値は平均的に実験値の 2/3 程度となった。

以上の検討より滑り開始時摩擦軸力実験値は σ_{up} と相関が高いことが分かったので, σ_{up} を計算に用いるときに用いる配筋詳細に係わる低減係数 (図-1 参照) に着目した。この係数を β とし(2)式で表す (記号は図-1)。

$$\beta = \frac{\frac{2}{1+C_o} + N_{BUN} - 1}{N_{BUN} + 1} \quad (2)$$

この低減係数 β の意味は文献 2) に詳述してあるが, 外周の帯筋の効果 (低減係数) を $1/(1+C_o)$, 中子筋の効果を 1 (すなわち低減なし) とした場合の全体の低減率を意味している。また, C_o は図-1 に示してあるが, 帯筋径と断面幅の比と帯筋の降伏応力度より求められる外周の帯筋の効果を評価する指標であるが, これは文献 2) で実験的に定めている。

図-7(c) は, 式(1)で表される初期摩擦軸力計算値 P_{fro} にこの低減係数 β を乗じたものを横軸にとって, 滑り開始時摩擦軸力実験値と比較したものである。評価値は平均的に実験値を表しており, 相関も高い。なお, この検討でも横軸は配筋詳細の係数 Rd を乗じて評価したケースを示



(a) ϵcp^2 との関係 (b) σtp^2 との関係
図-8 滑り開始時 (Pfr) 時の軸ひずみの検討 (図中の記号は図-5 と同じ)

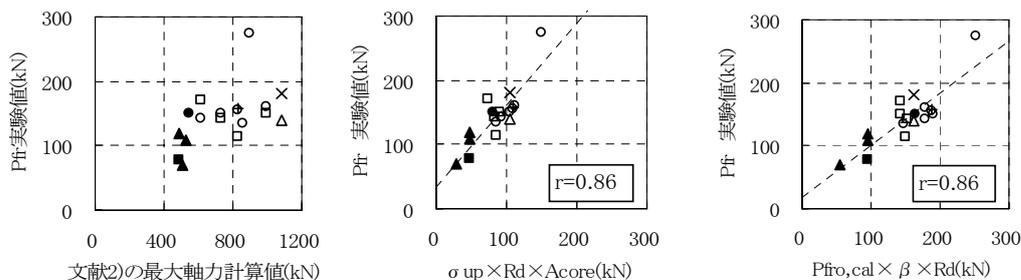
している。改めて滑り開始時摩擦軸力 P_{fr} の評価式を式(3)として示しておく。なお, P_{fro} , β は式 (1) (2) による。 Rd は前述した配筋詳細の係数である。

$$p_{fr} = p_{fro} \times \beta \times Rd \quad (3)$$

3.4 滑り開始時摩擦軸力時の軸ひずみ

コンクリートモデルの軸歪をも精度良く表現することは難しいが, 本報告では滑り開始時摩擦軸力のときの軸歪も文献 2) を参考にモデル化を試みる。なお, このときの軸歪度実験値は, 最大軸力時とは異なり, 試験体軸変形を断面せいで除して求めている。これは最大軸力時には試験体全高さにわたって同じ軸歪度になるが, その後の安定した領域では破壊領域以外は弾性復活し, その領域の歪はほぼ無視できるからである。なお, 破壊領域長さとしては断面せいを仮定した。

滑り開始時摩擦軸力のときの軸歪も帯筋の拘束効果の影響を受けるので, まず, 文献 2) の拘



(a) 文献 2) の最大軸力 (b) 文献 2) の安定軸力 (c) 文献 2) の低減率を用いた場合

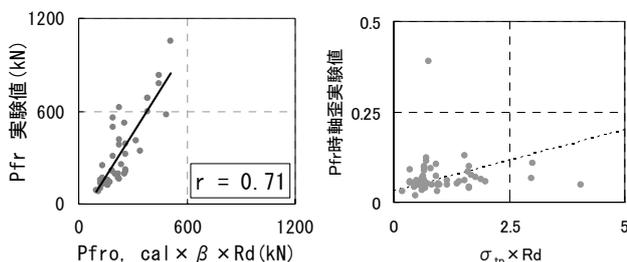
図-7 滑り開始時軸力 (Pfr) 実験 (図中の記号は図-5 と同じ)

束コンクリートの最大応力度時軸歪 ε_{cp} との相関をみた。図-8(a)がその比較であるが、相関は低い。図-8(b)は ε_{cp} の評価式(図-1参照)に使われている帯筋による拘束応力度そのものの σ_{tp} との相関を見たものであるが、図-8(a)に比べると若干ではあるが相関がよくなっている。なお、この検討でも横軸は配筋詳細の係数 R_d を乗じて評価したケースを示している。これを式(4)として滑り開始時摩擦軸力のときの軸歪 ε_{fr} の評価式とするが、歪度の評価式は軸力に比べ不十分であり、今後の検討が必要である。なお、記号は図-1にあるが、 σ_{tp} の単位は N/mm^2 である。

$$\varepsilon_{fr} = 0.03 + 0.05 \cdot \sigma_{tp} \cdot R_d \quad (4)$$

3.5 文献2)のデータでの適用性の検討

本節では式(3)(4)の適用性を文献2)で報告した軸圧縮試験体のデータを用いて検討しておく。文献2)の材料強度の範囲はコンクリート強度が $25 \sim 93 N/mm^2$ 、帯筋が $34 \sim 138 N/mm^2$ である。図-9(a)が式(3)による滑り開始時軸力の比較、図-9(b)はそのときの軸歪との $\sigma_{tp} \times R_d$ との比較で、図中には式(4)も示した。いずれもほぼ妥当な評価となっていることがわかる。



(a) 滑り開始時軸力 (Pfr) (b) Pfr 時の軸ひずみ

図-9 既往のデータ²⁾を用いた比較

4. まとめ

さまざまな帯筋により拘束されたコンクリートの軸力-軸変形関係の実験データを用い、最大軸力以降を2つの直線によりモデル化した。すなわち、最大軸力点と滑り開始時摩擦軸力点

を結ぶ直線と初期摩擦軸力点と滑り開始時摩擦軸力点を結ぶ直線である。このうち、最大軸力点は既往の評価式で評価できる。初期摩擦軸力点は式(1)で評価する(軸ひずみは0)。滑り開始時摩擦軸力点の軸力は式(3)で評価できる。そのときの軸歪は式(4)で評価できる。ただし、軸変形に換算するときは、柱の破壊領域長さ(本報告では断面せい)を乗じる。

謝辞 本研究は平成17年度科学研究費補助金基盤研究(B)「単純軸圧縮挙動に基づいたRC系柱の軸力負担能力の評価手法の開発」(代表加藤大介)によった。

参考文献

- 1) 加藤大介, 李柱振, 中村友紀子, 本多良政: 配筋詳細に着目したRC造せん断破壊柱の軸力保持性能に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第610号, pp153-159, 2006.12
- 2) 加藤大介: 角形補強筋で拘束されたコンクリート柱の軸応力度-歪度関係に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第422号, pp65-74, 1991.4
- 3) 加藤大介, 李柱振, 菅勝博, 中村友紀子: 異なる配筋詳細を有するRC造柱のせん断破壊後の軸力負担能力の評価実験, 第26回コンクリート工学年次論文報告集26-2, pp. 199-204, 2004
- 4) 加藤大介, 若月康二: 高強度材料を用いたRC部材の主筋の座屈性状, 日本建築学会構造系論文報告集, 第453号, 11月, pp. 141-147, 1993
- 5) 平成4年度 New RC 研究開発概要報告書 C-7) コンファイト[®]コンクリートの力学特性に関する資料のとりまとめ, 国土開発技術センター, 1993
- 6) 谷 資信ほか: 鉄筋コンクリート構造物の復元力特性(スパイラルフープによって補強されたシリンダー試験体の最大耐力以後の特性について), 日本建築学会大会, pp. 1389~1390, 昭和51年