

論文 RC造柱のせん断破壊後の軸力負担能力に及ぼす配筋詳細の影響の評価実験

宮島 雄代^{*1}・富田 泰宇^{*2}・李 柱振^{*3}・加藤 大介^{*4}

要旨：本報告では、せん断破壊するRC造柱の地震時の軸伝達能力喪失のメカニズムに及ぼす配筋詳細の影響を実験的に検討した結果を報告する。試験体は断面配筋詳細及び帯筋間隔を変えた4シリーズを作成し、それぞれのシリーズで中心軸圧縮実験を各1体、繰り返し載荷実験の作用軸力を変えて各1体もしくは2体ずつ、計11体の試験体の実験を行った。

キーワード：RC造柱，軸力伝達能力，せん断破壊，中子筋，配筋詳細

1. はじめに

筆者らは、RC造せん断破壊柱を対象に軸力保持能力喪失時の水平部材角の評価法を配筋詳細の影響に着目して検討してきた。その結果、中心軸圧縮加力実験の結果と軸力保持能力喪失部材角に関係があることを報告した¹⁾。

本報告では、文献1)に対して、パラメータを広い範囲で試験体を作成することを試みた。具体的には、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)が若干大きかったので、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。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状は4シリーズあるが、それぞれのシリーズの諸元を表-1に、形状及び配筋を図-1に、鉄筋の材料強度を表-2に示す。試験体はH52LLシリーズ3体とH90LLシリーズ3体、S52Lシリーズ3体、S90Lシリーズ2体の計11体からなる。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。このフック部分は同じ隅角部に連続して配置されないように90°ずつローテーションして配置した。数字は帯筋間隔を表しており単位はmmである。LLとLはコンクリート強度を表している。呼び強度ではLLが15(N/mm²)、Lが18(N/mm²)であったが、結果としてほぼ同程度の強度となった。

試験体形状は180×180×1200mmの長方体であり、実大の1/4程度の縮尺となる。上下端部は載荷用の基礎部分となっているため試験範囲は中央の360mmとなる。また主筋は、中子筋のないH,SシリーズはD10を4本用い、中子筋のあるIシリーズはD6を8本用いた。

試験体は配筋詳細を変えたシリーズとなっているが、横補強筋はすべてD4を用いている。帯筋間隔は52mmと90mmの2種類としたが、これは文献1)で用いた70mmを中心に、試験体がせん断破壊する条件内でその範囲を広げた結果である。

2.2 加力装置と載荷履歴

試験体は上下部分を三角形の基礎治具で挟み

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科 大学院生 (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科 大学院生

*3 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)

*4 新潟大学 工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

表-1 試験体諸元

シリーズ名	柱寸法		主筋	引張り鉄筋比	帯筋				コンクリート強度(N/mm ²)
	断面(mm ²)	高さ(mm)			帯筋	形状	間隔(mm)	中子筋	
H52LLシリーズ	180×180	360	4-D10	0.0044	2-D4	135deg(6d)	52	無	0.0027
H90LLシリーズ						135deg(6d)	90		0.0016
S52Lシリーズ			90deg(4d)	52	0.0027				
I52Lシリーズ			135deg(6d)	52	有	0.0040			

表-2 鉄筋強度(N/mm²)

鉄筋	降伏強度	最大強度
D10	345	477
D6	333	478
D4	420	570

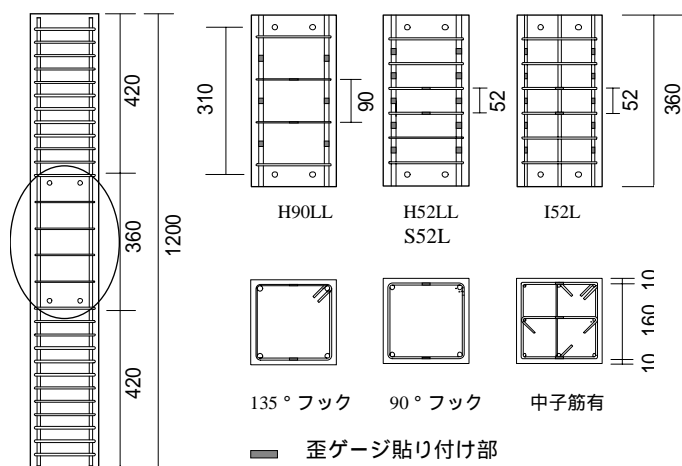


図-1 配筋詳細図

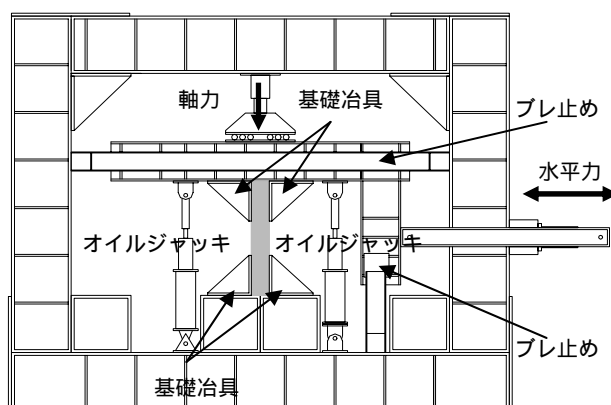


図-2 加力装置

込んで固定し、上下の鉄骨加力装置にとりつけた。載荷は、図-2の試験体上部のL型フレームの上に設置されている軸力ジャッキにより軸方向載荷を行い、水平ジャッキにより水平方向載荷を行った。また、左右の軸方向ジャッキによりL型フレームの平行を保持した。水平変形は上下の基礎治具間の水平変形とし、水平変形角はそれを試験区間360mmで除した値とした。また、軸変形は図-1に示したように試験区間内の310mmで表裏計4箇所測定し、その平均とした。なお、本試験体はすべてせん断破壊であるので、試験体試験区間上下の曲げヒンジ領域の変形は僅かであり、本測定法による軸変形は試験体全体の軸変形と考えた。

試験体 H52LL-0, H90LL-0, I52L-0, S52L-0 の4体は中心軸圧縮実験を行った試験体である。他の7体の試験体は、一定軸力下で繰り返し水平載荷を行った。水平載荷は、±0.5/100rad (各シリーズで軸力の高い試験体のみ)、±1/100rad、±1.5/100rad、±2/100rad... というように各部材角につき正負それぞれ2サイクルずつ行いながら部

材角を増加させ、軸力を保持できなくなるまで実験を行った。

3. 実験結果

3.1 軸圧縮実験結果

図-3(a)~(d)には各試験体の軸力-軸変形関係を示す。文献1)では、式(1)で表される初期摩擦軸力計算値 P_{fro} 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。すなわち、最大軸力点(点A)と軸力が P_{fro} になるときの点Bを結んだ線と、 P_{fro} の点(点C)と軸力が P_{fro} の半分になるときの点Dを結んだ線である。文献1)では、この交点Eを滑り開始時摩擦軸力実験値 P_{fri} と呼んで曲げせん断実験と関連づけている。表-3(a)にこれらの軸圧縮試験体の実験結果の一覧を示す。

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

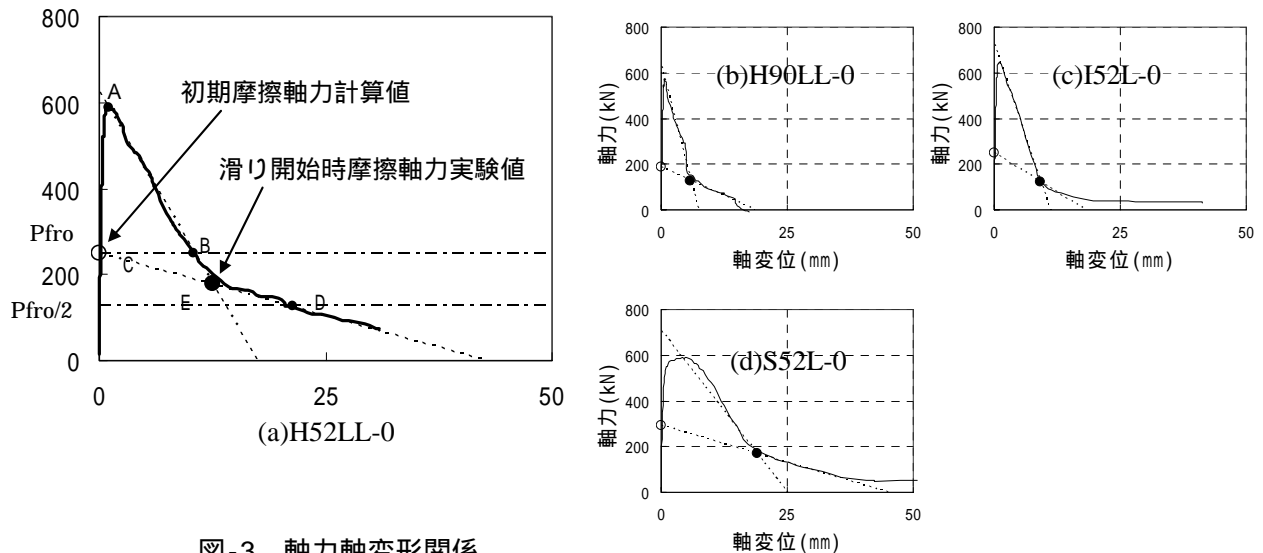


図-3 軸力軸変形関係
(滑り開始時摩擦軸力実験値 P_{fr} (E点の軸力) の決め方)

表-3 実験結果 (a) 軸圧縮実験

試験体名	最大強度時		滑り開始時		初期摩擦軸力計算値 P_{fro} (kN)	$P_{fro} \times \beta_1$	配筋詳細に関する係数 R_d	$P_{fro} \times \beta$
	軸強度 (kN)	軸変形 (mm)	摩擦軸力 P_{fr} (kN)	軸変形 (mm)				
H52LL-0	589	1.03	177	12.58	252	217	0.9	195
H90LL-0	572	0.67	129	5.76	187	140	0.9	126
I52L-0	590	4.83	170	18.95	316	271	0.9	244
S52L-0	646	1.2	124	9.14	252	217	0.8	174

$$\beta_1 = (1 - 0.5 \frac{S}{D}) \quad \beta = (1 - 0.5 \frac{S}{D}) \times R_d$$

(b) 曲げせん断実験

試験体名	試験体諸元		実験結果					計算値など				対応する軸加力試験体の実験結果	
	対応する軸加力試験体名	作用一定軸力 (kN)	最大水平強度 (kN)	軸力保持能力喪失ステップの水平力 (kN)	軸力保持能力喪失までの最大値		せん断強度 (kN)	等価軸力 eN (kN)	計算値に合致する摩擦軸力 P_{fr} (kN)	軸変形 (mm)	軸変形 (mm)	軸変形 (mm)	P_{fr} (kN)
H52LL-1	H52LL-0	300	82.1	16.7	5.4	(0.015)	4.2	59.9	78.6	342	183	177	195
H52LL-2		150	76.4	13.7	10.8	(0.030)	5.0	59.9	73.4	192	206		
H90LL-1	H90LL-0	300	70.3	52.4	5.12	(0.014)	0.5	47.5	73.2	333	169	129	126
H90LL-2		150	73.9	-17.6	10.8	(0.030)	3.5	47.5	67.9	183	196		
I52L-1	I52L-0	300	101.2	-38.5	9	(0.025)	3.6	69.7	79.3	349	311	170	244
I52L-2		450	73.8	32.8	3.6	(0.010)	5.5	69.7	79.3	499	178		
S52L-1	S52L-0	150	79.5	11.0	10.8	(0.030)	2.6	56.8	72.0	190	203	124	174

ここで、式(1)は、RC 柱が角度 θ ($\neq 60$ 度としている)の滑り面で摩擦力(摩擦係数を μ ($\neq 0.77$ 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、 ρ は帯筋比と降伏強度、 A_s は主筋の全断

面積と降伏応力度である。

3.2 曲げせん断実験

図-4(a) ~ (g)に曲げせん断試験体の実験結果を示す。いずれも上に水平力 水平変形関係を、下に軸変形 水平変形関係を示してある。図中

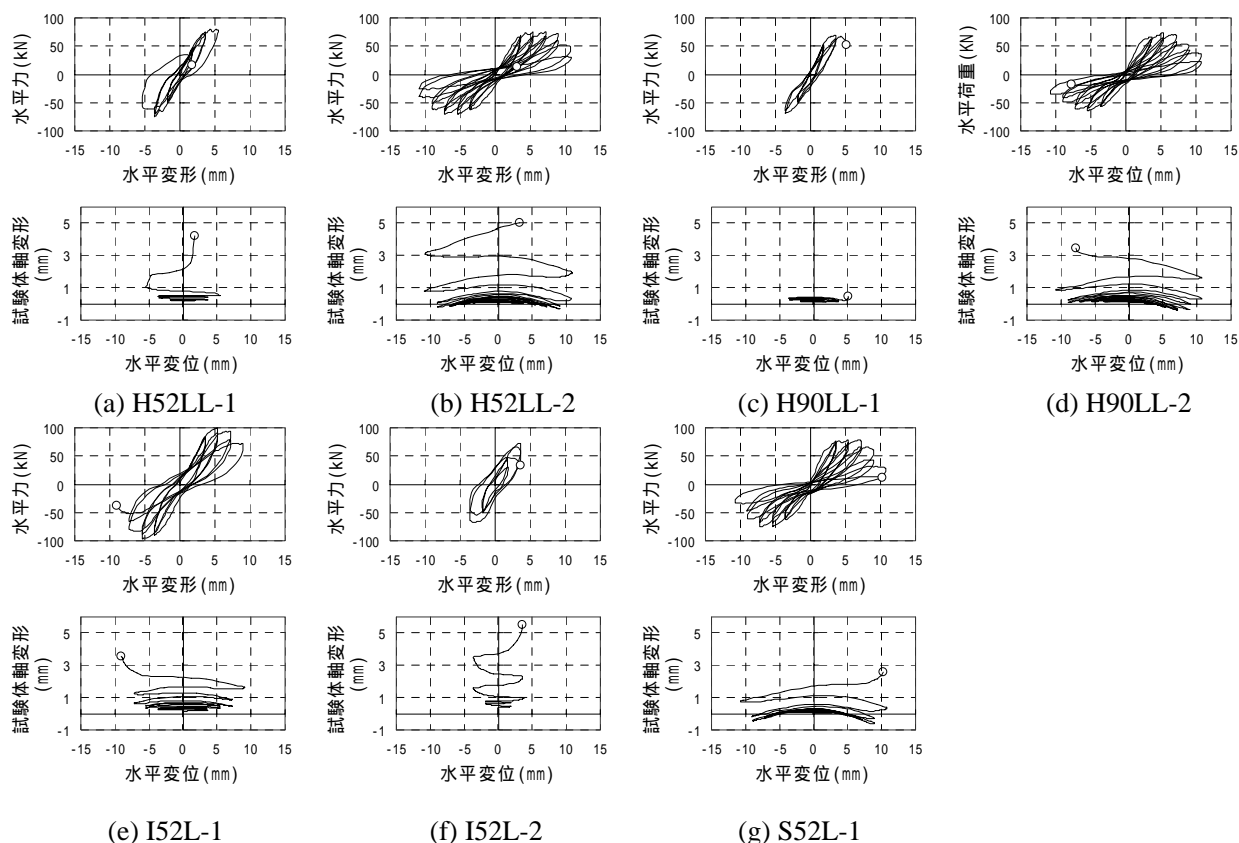


図-4 曲げせん断実験結果

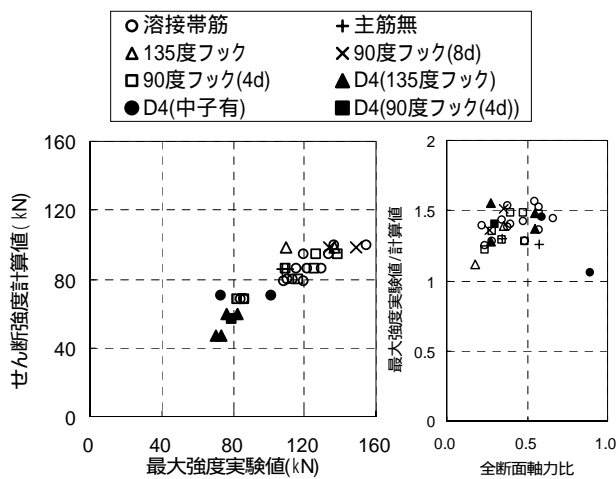
のは最初に設定した一定軸力が負担できなくなった点であり、曲げせん断加力終了点を示している。この点を軸力保持能力喪失ステップ(必ずステップという言葉が入る)と呼ぶ。この軸力保持能力喪失ステップの変形がそれまでの試験体の最大変形であることもあるが、そうでない場合も多い。そこで、それまでに経験した最大部材角を軸力保持能力喪失までの最大部材角(あるいは略して軸力保持能力喪失部材角、この場合はステップという言葉は入らない)と呼ぶ。表-3(b)にこれらの実験結果を示した。3シリーズでは軸力の大きさをパラメータにしているが、いずれも軸力の高い試験体の方(H52LL-1,H90LL-1,I52L-2)が早く軸力負担能力を喪失し、またそのときの軸変形は小さかった。軸力が同じ300kNで帯筋が異なる3体を比較すると、中子有(I52L-1)の軸力保持能力喪失部材角は最も大きかったが、帯筋間隔52mm(H52LL-1)と帯筋間隔90mm(H90LL-1)では変わらなかった。

軸力が150kNでも帯筋間隔52mm(H52LL-2)と帯筋間隔90mm(H90LL-2)の差はなく、帯筋間隔の大小による差は少なかった。さらに、軸力150kNで配筋詳細が異なる2体(H52LL-2とS52L-1)を比較しても、差は観察されなかった。これらの結果は、高軸力では配筋詳細の影響がなく、低軸力では配筋詳細の影響が大きく出ると結論づけた文献1)の結果と異なる。この点については今後以下の2つの観点からの検討が必要である。すなわち、i)今回はコンクリート強度が低かったが、軸力が低い方(150kN)でも試験体としては高軸力であったか、ii)配筋詳細に及ぼす寸法効果は大きい、この違いが帯筋の径(D6,D4)によるものなのか、である。

4. 実験結果の考察

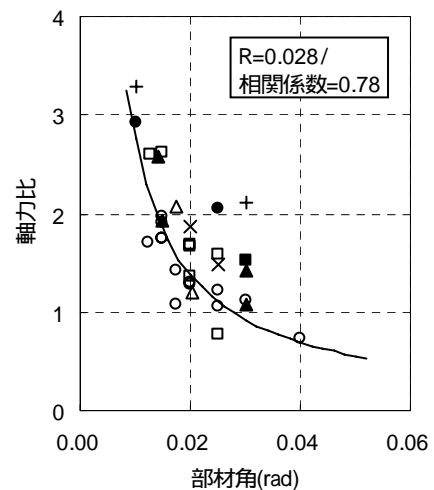
4.1 せん断強度に対する配筋詳細の影響

本節では、既往の実験結果¹⁾も含めせん断強度に及ぼす配筋詳細の影響をみておく。図-5(a-1)

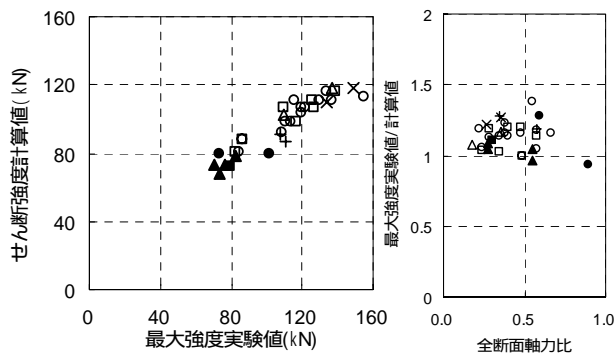


(a-1)強度の比較 (a-2)実験値/計算値と軸力比

(a)靱性保証指針のトラスアーチ式



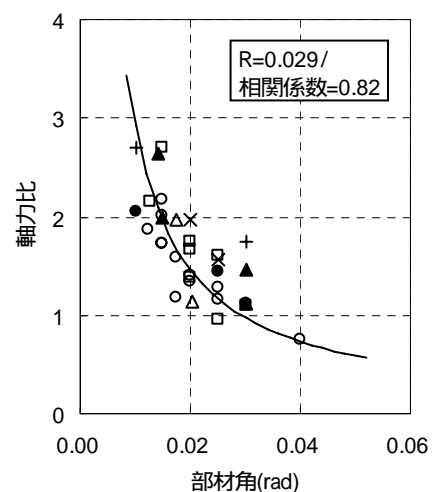
(a)軸力比を(等価軸力/滑り開始摩擦軸力実験値 Pfr)とした場合



(b-1)強度の比較 (b-2)実験値/計算値と軸力比

(b)技術基準解説書の実験式

図-5 最大強度とせん断強度計算値の比較



(b)軸力比を(等価軸力/初期摩擦軸力計算値 \times)とした場合

図-6 等価軸力比(せん断強度使用)と軸力負担能力喪失までの最大部材角の関係

$$\beta = (1 - 0.5 \cdot \frac{S}{D}) \cdot R_d$$

は日本建築学会の靱性保証型設計指針²⁾による柱のせん断強度計算値と実験値を比較したものである。文献1)では、溶接帯筋、90°および135度フックの配筋詳細を用いているが、それらに含めて今回の実験結果を黒塗りの記号で示した。

図をみるといずれも計算値は安全側になっているが、配筋詳細の影響はみられない。図-5(a-2)は計算値に対する実験値の比を、横軸に軸力比(全軸力を全断面積×コンクリート強度で除した)をとってみたものである。靱性保証の式は軸力には依存しないが、実験目的上かなり高軸力比で行っていることが安全率を高くしている。ただし、軸力比が1に近い場合は安全率は1に近づく。

一方、図-5(b-1)(b-2)は現在設計で使われている実用的なせん断強度式³⁾を用いた場合である(いわゆる荒川式系統で実験値の平均を与える式)。この式は軸力比が0.4まではその影響を評価する式であるが、それ以上になるとやや安全率があがる。また、この場合も配筋詳細の影響は観察されない。

4.2 軸力保持能力喪失部材角の検討

本節では、今回の実験結果を文献 1)で提案された手法により検討する。図-6(a)は軸力保持能力喪失部材角実験値(横軸)と3.1節で示した対応する軸圧縮試験体の滑り開始時摩擦軸力実験値 P_{fr} に対する等価軸力 eN (説明は後述)の比(縦軸)との関係を示したものであるが、文献 1)では両者に相関があるとしている。図中の実線は文献 1)で示された近似曲線であるが、今回の実験結果は黒塗りの記号(図-5と同じ記号)で加筆してある。

図をみると、今回の試験体はやや安全側に評価される試験体もあるが、全体的には文献 1)と同じ傾向があると判断できる。個別の試験体での適合性をみるために、試験体毎にこの近似曲線に合致する P_{fr} を逆算し、表-3(b)の計算値の最後の欄に示した。その右には対応する軸試験体の P_{fr} を表-3(a)から書き写してあるが、両者を比べると、中子筋のある試験体は軸力によって合致する P_{fr} が大きく異なり、今後の検討課題である。

滑り開始時摩擦軸力実験値は実験結果なので、文献 1)では、これに代わるものとして、以下の式(2)を提案している。

$$R = \frac{0.029}{\eta} \quad (\eta = \frac{eN}{P_{fr,cal}}) \quad (2)$$
$$eN = N + Q \frac{\sin^2 \theta - \cos^2 \theta - 2\mu \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{\sin \theta \cdot \cos \theta - \mu \cdot \cos^2 \theta}$$
$$P_{fr,cal} = P_{fro} \cdot (1 - 0.5 \cdot \frac{S}{D}) \cdot R_d = \beta \cdot P_{fro}$$

この式は軸力にせん断力の影響を取り入れた等価軸力 eN と式(1)を配筋詳細の影響で補正した $P_{fr,cal}$ による軸力比 を、喪失部材角 R と関連づけたものである。ここで、 N は作用軸力、 Q は軸力保持能力喪失ステップ時のせん断力であるが、せん断強度としてよい。さらに、 R_d は配筋詳細の有効係数で、溶接帯筋で 1、135 度フックは 0.9、90 度フック(余長 4d)では 0.8 である。

図-6(b)は軸力保持能力喪失部材角実験値(横軸)と式(2)による軸力比 (縦軸)との関係で

あるが、図中には式(2)も示した。実験値は図-6(a)よりも近似曲線の近傍に集まり、結果的にはあるが、式(2)は今回の実験データを加えても評価式としては妥当であったといえる。

5. まとめ

(1)軸力が同じで、帯筋が異なる場合、中子有の軸力保持能力喪失部材角は最も大きかったが、帯筋間隔の影響は無かった。また、配筋詳細が異なる 2 体を比較しても、差は観察されなかった。この点については、コンクリート強度と寸法効果の観点からの検討が今後必要である。

(2)せん断強度に及ぼす配筋詳細の影響は観察されなかった。

(3)軸力保持能力喪失部材角実験値と対応する軸圧縮試験体の滑り開始時摩擦軸力実験値 P_{fr} に対する等価軸力 eN の比には、文献 1)と同様に相関があったが、今回の試験体はやや安全側に評価される試験体もあった。

(4)文献 1)による軸力保持能力喪失部材角評価式(式(2))は今回の実験データを加えても評価式としては妥当であった。

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) 日本建築学会: 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, 1999
- 3) 日本建築センター: 2001 年版建築物の構造関係技術基準解説書