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 造柱の地震時の軸力負担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,軸力負担能力,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負担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負担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,I52Lシリーズ3体,S52L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 180×1200 mm 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。

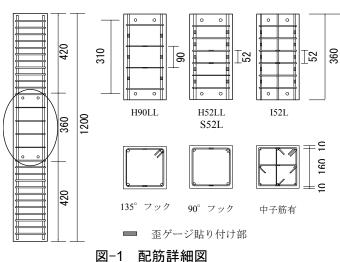
2.2 加力装置と載荷履歴

試験体は上下部分を三角形の基礎冶具で挟み

- *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			引っ張り		コンクリート強					
	断面 (mm²)	高さ (mm)	主筋	鉄筋比	帯筋	形状	間隔 (mm)	中子筋		度(N/mm ²)	
H52LLシリーズ	180×180		4-D10	0.0044	2-D4	135deg(6d)	52	無	0.0027	16.0	
H90LLシリーズ		×180 360				135deg(6d)	90		0.0016	16.8	
S52Lシリーズ						90deg(4d)	52		0.0027	15.6	
I52Lシリーズ			8-D6	0.0030	3-D4	135deg(6d)	52	有	0.0040	15.0	



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箇所で測定し、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、 $\pm 0.5/100$ rad(各シリーズで軸力の高い試験体のみ)、 $\pm 1/100$ rad、 $\pm 1.5/100$ rad、 $\pm 2/100$ rad…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

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

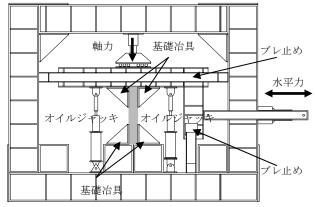


図-2 加力装置

材角を増加させ、軸力を負担できなくなるまで 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一軸変形関係を示す。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、軸力一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_{fr} 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。

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

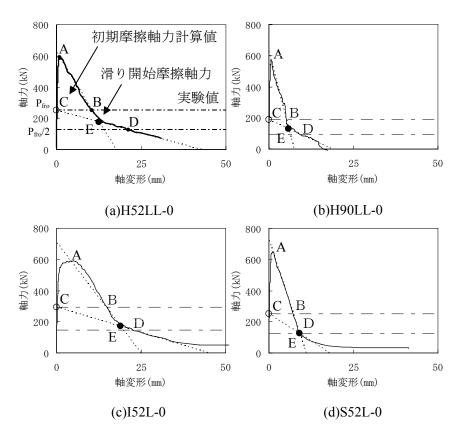


図-3 軸カー軸変形関係 (滑り開始時摩擦軸力実験値 *P_{fr}* (*E* 点の軸力) の決め方)

表-3 実験結果 (a) 軸圧縮実験

試験体名	最大强	鱼度時	滑り開	開始時	初期摩		配筋詳		
	軸強度 (kN)	軸変形 (mm)	. //		擦軸力 計算値 <i>P_{fro}</i> (kN)	$Pfro \times \beta_1$	細に関		
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	

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

(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			
	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	計算値に		体の実 吉果		
					71 1 2	変形(mm) 角 (rad))	軸変形 (mm)	靭性保 証型	技術基 準解説 書	カ eN(kN)	一百 以りる	Pfr(kN)	Pfro× β (kN)		
H52LL-1	H52LL-0	F1251 1 =0	F1251 1 =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	177	190		
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	129	120		
I52L-1	I52L-0	IESI O	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	170	444		
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 (これまで行ってきた実験の平均的な値として 60° としている)の滑り面で摩擦力 (文献 2) に伴い摩擦係数 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、 $p_w\sigma_{my}$ は帯筋比と降伏強度、 $A_s\sigma_y$ 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 れも上に水平力一水平変形関 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。この点を軸力負担能 力喪失ステップ(必ずステッ プという言葉が入る)と呼ぶ。 この軸力負担能力喪失ステッ 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そこ で、それまでに経験した最大 部材角を軸力負担能力喪失ま での最大部材角(あるいは略

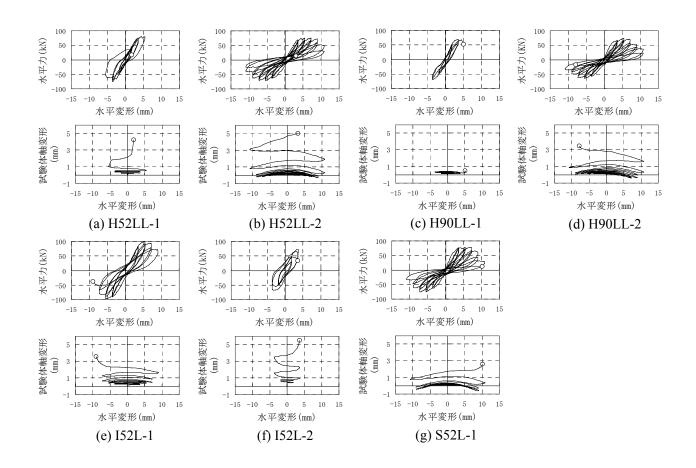


図-4 曲げせん断実験結果

して軸力負担能力喪失部材角,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小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)の軸力負担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

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

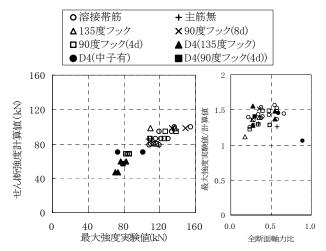
点については今後以下の 2 つの観点からの検討が必要である。すなわち, i)今回はコンクリート強度が低かったが, 軸力が低い方(150kN)でも試験体としては高軸力であったか, ii)配筋詳細に及ぼす寸法効果は大きいが, この違いが帯筋の径(D6,D4)によるものなのか, である。

4. 実験結果の考察

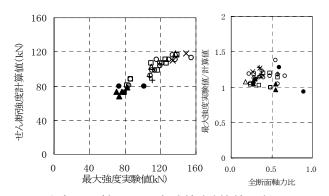
4.1 せん断強度に対する配筋詳細の影響

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)** は 日本建築学会の靭性保証型設計指針³⁾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° 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



(a-1)強度の比較 (a-2)実験値/計算値と軸力比 (a) 靭性保証指針のトラスアーチ式



(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

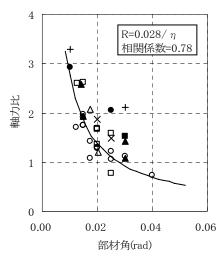
図-5 最大強度とせん断強度計算値の比較

(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。靭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、安全率は1に近づく。

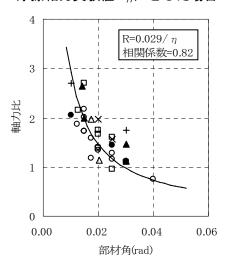
一方**, 図-5(b-1)(b-2)**は現在設計で使われている実用的なせん断強度式⁴⁾として荒川 mean 式に軸力の効果を加えた式(2)を用いた場合である。

$$Q_{su} = {}_{R}Q_{su} + 0.1\sigma_{0} \cdot b \cdot j \tag{2}$$

式(2)の σ_0 は平均軸方向応力度(=N/(b·D))であり、0.4Fc 以下としている。そのため、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。



(a)軸力比を(等価軸力/滑り開始 摩擦軸力実験値 P_{fr}) とした場合



(b)軸力比を(等価軸力/初期摩 擦軸力計算値×β)とした場合

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

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

4.2 軸力負担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)**は軸力負担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)で示された軸力比に、等価軸力/滑り開始摩擦軸力実験値 P_{fr} をとった場合の近似式 R であ

り、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、 $\mathbf{表}$ - $\mathbf{3}$ (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 \mathbf{x} - $\mathbf{3}$ (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(3)を提案している。

$$R = \frac{0.029}{\eta} \qquad (\eta = \frac{e^{N}}{P_{fr,cal}})$$

$$e^{N = N + Q} \frac{\sin^{2}\theta - \cos^{2}\theta - 2\mu \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{\sin\theta \cdot \cos\theta - \mu \cdot \cos^{2}\theta}$$

$$P_{fr,cal} = P_{fro} \cdot (1 - 0.5 \cdot \frac{S}{D}) \cdot R_{d} = \beta \cdot P_{fro}$$
(3)

この式は軸力にせん断力の影響を取り入れた等価軸力 $_{e}N$ 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 $_{f}$ を,喪失部材角 $_{f}$ と関連づけたものである。ここで, $_{f}$ は作用軸力, $_{f}$ は軸力負担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, $_{f}$ は配筋詳細の有効係数で,溶接帯筋で 1,135° フックは 0.9,90° フック(余長 4d)では 0.8 である。

図-6(b)は軸力負担能力喪失部材角実験値(横軸)と式(3)による軸力比 η (縦軸)との関係であるが,図中の実線は文献 1)で示された軸力比に,等価軸力/初期摩擦軸力計算値× β をとった場合の近似式(すなわち式(3))である。実験値は図-6(a)よりも近似曲線の近傍に集まり,結果的にではあるが,式(3)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

軸力負担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)軸力負担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)による軸力負担能力喪失部材角評価式(式(3)) 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) 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
- 3) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靭 性保証型耐震設計指針・同解説,1999
- 4) 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