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 180×180×1200mm 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)

帯筋 柱寸法 コンクリート強 引っ張り シリーズ名 断面 主筋 高さ 間隔 鉄筋比 中子筋 帯筋比 度(N/mm²) 帯筋 形状 (mm^2) (mm)(mm) H52LLシリーズ 135deg(6d) 52 0.0027 16.8 H90LLシリーズ 4-D10 0.0044 2-D4 135deg(6d) 90 無 0.0016 180×180 360 S52Lシリーズ 90deg(4d) 52 0.0027 15.6152Lシリーズ 0.0030 3-D4 8-D6 135deg(6d) 52 有 0.0040





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 は上下の基礎冶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、±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

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)

試験体名	最大強度時		滑り開始時		初期摩		配筋詳	
	軸強度 (kN)	軸変形 (mm)	摩擦軸 力 P _f (kN)	軸変形 (mm)	擦軸力 計算値 P _{fro} (kN)	<i>Pfro</i> × β_1	細に関 する係 数Rd	Pfro ×β
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
					G			×

表-3 実験結果 (a) 軸圧縮実験

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

計算値など 試験体諸元 実験結果 対応する軸加 軸力保持能力喪失までの 最大値 力試験体の実 軸力保 せん断強度 (kN) 計算値に 験結果 持能ナ 対応する 作用 最大水 等価軸 試験体名 合致する 喪失ス 軸加力試 平強度 定軸力 技術基 力 水平変形(mm) 軸変形 靭性保 摩擦軸力 Pfro × 験体名 (kN) (kN) 水平力 準解説 eN(kN Pfr(kN) (部材角 (rad)) Pfr(kN) β (kN) (mm) 証型 (kN) 書 H52LL-1 300 82.1 16.7 5.4 (0.015)4.2 59.9 183 342 78.6H52LL-0 177 195 H52LL-2 150 10.8 (0.030)5.0 59.9 206 76.4 13.7 73.4 192 H90LL-1 300 70.3 52.4 5.12 (0.014)0.5 47.5 169 73.2 333 H90LL-0 129 126 H90LL-2 73.9 -17.6 10.8 (0.030)47.5 196 1503.567.9 183 I52L-1 300 101.2 -38.5 9 (0.025)3.6 69.7 311 79.3 349 I52L-0 170244 I52L-2 450 32.8 3.6 (0.010)5.5 69.7 178 73.8 79.3 499 S52L-1 S52L-0 15079.5 11.0 10.8 (0.030)2.656.8 203 124 174 72.0 190

(b) 曲げせん断実験

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、 $p_w \sigma_{wy}$ 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 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が, この違いが帯筋の径 (D6,D4)によるものなのか, である。

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



(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。

 $Q_{su} = {}_{B}Q_{su} + 0.1\sigma_{0} \cdot b \cdot j$ (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_f)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_f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_f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_f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。

$$R = \frac{0.029}{\eta} \qquad (\eta = \frac{e^N}{P_{fr,cal}}) \tag{3}$$
$${}_e N = N + Q \frac{\sin^2 \theta - \cos^2 \theta - 2\mu \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{\sin \theta \cdot \cos \theta - \mu \cdot \cos^2 \theta}$$
$$P_{fr,cal} = P_{fro} \cdot (1 - 0.5 \cdot \frac{S}{D}) \cdot R_d = \beta \cdot P_{fro}$$

この式は軸力にせん断力の影響を取り入れた 等価軸力 $_{a}N$ 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 $_{n}$ 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、 R_{d} 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

- 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靱 性保証型耐震設計指針・同解説,1999
- 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