論文 試験体寸法を変化させた RC 造柱の軸力負担能力の評価実験

宮島 雄代*1・阿部 博之*1・加藤 大介*2

要旨:本報告では,せん断破壊する RC 造柱の滑り開始時摩擦軸力を用いた軸力比と軸力負担能力喪失部材 角との関係を,寸法を変化させた試験体を用いて実験的に比較,検討した結果を報告する。試験体は断面寸 法及び試験体長さを変えた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6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, 寸法効果

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^{1,2)}。

本報告では,文献2)の試験体に対して寸法を変化させ, それによって中心軸圧縮加力実験の結果と軸力負担能 力喪失部材角の関係の影響を報告する。具体的には, i) 昨年度の試験体に関して全てのパラメータを 1.5 倍にし た V シリーズ, ii)長さのみ 1.5 倍にした, L シリーズの 2 つのシリーズを作成し,実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 に各シリーズの試験体諸元を示す。V, Lシリーズは本年度行った実験の試験体であり、*の付いている Hシリーズは文献2)で報告した試験体から寸法効果の観 点から比較する試験体を示している。V, Lシリーズの 形状及び配筋を図-1 に示す。Vシリーズは文献2)の長さ に係わる断面と配筋の寸法を全て1.5 倍に変更した相似 形の試験体である。また, Lシリーズは, 文献2)の試験 体の試験体長さのみを1.5 倍にしたもので断面と配筋は 文献2)と同じ試験体である。

V78LL シリーズ 2 体と V135LL シリーズ 3 体, L52LL シリーズ 2 体, L52LL シリーズ 3 体の計 10 体を作製し た。シリーズ名の最初の文字は断面の寸法を表しており, 数字は帯筋間隔を表しており単位は mm である。LL は 低強度のコンクリートを表している。

試験体形状は、V シリーズが 270×270×1600mm, L シリーズが 180×180×1600mm の直方体である。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 540mm となる。また主筋は、V シリーズは D16 を 4 本用い、L シリーズは D10 を 4 本用いた。試験体の横 補強筋は V シリーズに D6, L シリーズに D4 を用いてい る。帯筋間隔は L シリーズが 52mm と 90mm の 2 種類, V シリーズはその 1.5 倍の間隔としている。

各シリーズ1体ずつ中心軸方向載荷試験体を行って おり,試験体名の最後の番号が0となっている。他の6 体の試験体は,一定軸力下で繰り返し水平載荷を行った。 表-2に曲げせん断加力試験体の強度の計算値を示す。表 中の曲げ強度は,軸力比が0.4 で変わる終局曲げ強度の 略算式により算定した。また,いずれの試験体も既往の 研究の方針通りせん断破壊となるように計画したが,L シリーズにおいては結果として,せん断強度の値が曲げ 強度の値を上回る結果となった。

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

	柱寸法		主筋				いがした改産							
試験体名	断面 [mm×mm]	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]	帯筋比	1779-179重度 [N/mm ²]		
V-78LL	270 - 270	540	A_D16 275 52A 2_D6	245	100		78	0. 0027						
V-135LL	2/0~2/0		4-010	3/3	JJ4	2-00	343	433	135deg	135	0.0016	14.1		
L-52LL	100 - 100		J4U	80×180	4_D10	264	521	2-D4	432	590	(6d)	52	0. 0027	14.1
L-90LL	100 ~ 100				4-010	304						90	0.0016	
H52LL*	100 \(\col_100)	260	260	260	4_D10	245	477	2_D4	420	E 7 0	135deg	52	0. 0027	16 0
H9OLL*	100 ~ 100	300	4-010	J4J	4//	2-D4	420 370		(6d)	90	0.0016	10.0		
*: 文献 2)による詞											る試験体			

表-1 試験体諸元

*1 新潟大学院 自然科学研究科 大学院生 (正会員) *2 新潟大学 工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

-163-

2、 2 山い この町山県 平田 ル											
	試験体調	諸元	計算値など								
		<u>.</u>	1	せん断強度[kN]							
試験体名	対応する軸加 力試験体名	作用一定 軸力[kN]	囲け強度 [kN]	靭性保証型 ³⁾	技術基準解説 書 ⁴⁾						
V78LL-1	V78LL-0	675	170	124	169						
V135LL-1	V12511_0	675	170	97.2	157						
V135LL-2	VIJJLL-U	337.5	231	97.2	151						
L52LL-1	L52LL-0	300	42.8	53.1	61.9						
L90LL-1		300	42.8	40.3	56.4						
L90LL-2	L9ULL-U	150	60	40.3	53.9						
H52LL-1*	H52LL-0	300	81.8	59.9	78.6						
H90LL-1*		300	81.8	47.5	73. 2						
H90LL-2*	NJULL-U	150	91.9	47.5	67.9						

表-2 曲げせん断試験体諸元

*: 文献 2) による試験体

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。測定関係は水 平変形、柱の曲げ変形と軸変形、および鉄筋の歪みを測 定した。水平変形は上下の基礎冶具間の水平変形とし, 変位計を試験体の中心に設置し、測定している。水平変 形角はそれを試験区間540mmで除した値とした。また, 軸変形であるが、表面は試験区間の 540mm を左半分と 右半分でそれぞれ 5 箇所に分割し(測定区間は 10,105,310,105,10mm となる。),計10箇所で測定し左右 5 箇所の総和を軸変形としている。裏面は試験区間内の うちその内部 465mm 区間で左右1箇所,計2箇所で測 定した。そして、表裏左右4箇所で平均をとり、平均軸 変形としている。なお、裏面では試験区間より少ない測 定間隔で軸変形を測定しているが、この上下端部の未測 定領域は損傷していないので、裏面での軸変形も試験区 間の軸変形とほぼ同等と考えている。また、曲げ変形は 表面で測定した軸変形から算定する。曲げせん断加力の 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、軸力を負担できなくなるまで実 験を行った。L90LL-2 は曲げ変形が卓越し,通常の正負 漸増載荷では実験終了までの繰り返し載荷数が多くな るため、一方向の水平加力により試験体を破壊させた。

3. 実験結果

3.1 軸圧縮実験結果

図-3(a)(b)にシリーズ L の軸応力度-平均軸歪関係を 示す。ここで、縦軸は全軸力を全断面積で、横軸は平均 軸変形を試験体区間 540mm で除したものとしている。 試験体せいの540mm で除したものである。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、軸応 力度-平均軸歪関係の下り勾配を2本の折れ線でモデル 化している。すなわち、最大軸応力度点(点 A)と応力 度が P_{fro}になるときの点 B を結んだ線と、P_{fro}の点(点 C)



図-2 加力装置

と応力度が *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。

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

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 (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。

図-3(c)(d)には文献 2)の試験体を含め全試験体 6 体を 帯筋比別に比較したものを示す。これらの図には滑り開 始摩擦軸力実験値のみ示してある。それぞれの図で V シ リーズとHシリーズは相似の試験体であり、Lシリーズ はHシリーズと柱高さが異なる試験体である。相似試験 体同士を比較すると、帯筋比が低い場合(図(d))はほぼ 同じ挙動となったが、帯筋比が高い場合(図(c))は寸法 が大きい試験体がより脆性的な挙動を示した。コンクリ ート強度が両シリーズで若干違うこともあるが、この原 因については今後の検討が必要である。

一方,同図でLシリーズとHシリーズを比較すると,

柱高さが長いLシリーズの方がHシリー ズに比べて同軸力での平均歪度が小さい 傾向がある。この理由を検討するために、 図-3(e)(f)には図-3(c)(d)の横軸のみを軸 変形に代えたものを示す。それぞれの図 でLシリーズとHシリーズがほぼ同じ挙 動となることがわかる。すなわち、L シ リーズとHシリーズでは破壊領域がほぼ 同じで, 軸変形の絶対値がほぼ同程度と なっていることがわかる。従って、それ を柱高さ長さで除して平均軸歪に換算す ると差が生じてしまうと解釈できる。

3.2 曲げせん断実験

図-4(a)~(f)に文献 2)の試験体も含め 全試験体の曲げせん断試験体の実験結果 を示す。ただし、相似試験体は同一の図 に示している。いずれも上にせん断応力 度--部材角関係を,下に平均軸歪--部材 角関係を示してある。ここで、せん断応 力度は水平力を断面積で除したものとし ている。V シリーズおよび試験体 L52LL-1, L90LL-1 は典型的なせん断破壊 を示したが、試験体 L90LL-2 はせん断破 壊を起こしたものの, 顕著な曲げひび割 れが観察された。

図中の〇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い。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 (あるいは略して軸力負担能力喪失部 材角)と呼ぶ。表-3(b) にこれらの実



図-3 軸応力度-平均軸歪, 軸応力度-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	滑り間	開始時	初期摩擦軸	_	配筋詳細に	$P_{fro} \times \beta$
	軸強度[kN]	軸変形[mm]	摩擦軸力 P _{fr} [kN]	軸変形[mm]	力計算値 Pfro[kN]	P _{fr₀} ×β ₁	関する係数 Rd	
V78LL-0	1224	0.61	322	7.32	659	564		507
V135LL-0	1263	1.43	293	10.1	507	380	nq	390
L52LL-0	625	1.64	189	11.5	281	240	0. 3	216
L90LL-0	613	1.57	145	6.12	206	155		159
H52LL-0*	589	1. 03	177	12.6	252	217	0.0	195
H9OLL-O*	572	0.67	129	5.76	187	140	0.3	126

*: 文献 2) による試験体

(b) 曲げせん断実験

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

	試験体諸元		実験結果								「値など	対応する軸加力試験体	
计时间	対応する	作用一定 軸力[kN]	= + + -	軸力保持能力		軸力保持能力喪失までの最大値					計算値に合致	の実験結果	
武 駅14-石	軸加力試 験体名		最大水平 強度[kN]	喪失ステップ の水平力[kN]	全変形[mm] (部材角[rad])		せん断変形[mm] (部材角[rad])		軸変形 [mm]	寺価軸刀 。N[kN]	する摩擦軸力 P _{fr} [kN]	P _{fr} [kN]	P _{fro} ×β [kN]
V78LL-1	V78LL-0	675	176.4	10.7	10.7	(0. 020)	8.7	(0. 016)	4.1	762	540	659	507
V135LL-1	V12511_0	675	165.9	5.7	5.9	(0. 011)	5.4	(0. 010)	2.4	743	290	507	200
V135LL-2	VIJJLL-U	337.5	152.9	9.1	10.3	(0. 019)	7. 0	(0. 013)	15.9	405	276	307	330
L52LL-1	L52LL-0	300	72. 0	-10.2	13.4	(0. 025)	9. O	(0. 017)	9. O	337	299	281	216
L90LL-1	10111-0	300	74. 0	-10.7	10.8	(0. 020)	7.8	(0. 014)	2.4	328	235	206	150
L90LL-2	LJULL U	150	62.2	45.9	27. 0	(0. 050)	9.7	(0. 018)	4.2	178	318	200	100
H52LL-1*	H52LL-0	300	82.1	16.7	5.4	(0. 015)	(-)	(-)	4. 2	342	183	177	195
H90LL-1*	H0111-0	300	70.3	52.4	5.1	(0. 014)	(-)	(-)	0. 5	333	169	120	126
H90LL-2*	* HOULL-U	150	73.9	-17.6	10.8	(0.030)	(-)	(-)	3.5	183	196	123	120

験結果を示し た。本実験シリ ーズではせん 断破壊後の軸 力保持能力喪 失部材角を対 象にしている。 ところが,今回 行った L シリ ーズはシアス パン比が大き いので,一部曲 げ変形が無視 できない試験 体もあること が予想された。 そこで,今年度 の試験体では 前述したよう に曲げ変形成 分を測定して いる。曲げ変形 の算定は表面 のみとし,5箇 所に分割した 左右の変位計 の伸び量の差 を,変位計の測 定区間で掛け,



ぞれの曲げ変形成分を足し合わせ、全体の曲 げ変形成分としている。図-5 は今年度の曲げ せん断加力試験体 6 体のせん断変形の全変形 に対する比を縦軸に,横軸に部材角をとって 示したものである。せん断変形は全変形より 前述の曲げ変形を減じたものとし、また、図 は各加力サイクルの1回目のピークのみ示し た。図を見ると特にシアスパン比の大きいL シリーズでせん断変形成分の比率が少なくな っていることがわかる。そこで、今年度の6 体の試験体については前述の軸力負担能力喪 失部材角を求める際せん断変形のみを対象に したものも求めた。この値を表-3(b)に併せて示した。ま

た,図-6(a)~(c)にはLシリーズの3体のせん断応力度-せん断変形のみによる部材角の関係を示しておく。

結果をみると、軸力の大小をパラメータにした L90LL シリーズ, V135LLシリーズとも、軸力の高い試験体の

方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。

▲L90LL-2

●V135LL-2

0.03

0.04

図-4(d)~(f)で寸法効果の影響についてみてみると,軸 力の高い試験体(V78LL-1, V135LL-1)では比較している 試験体(H52LL-1, H90LL-1)とほぼ同じ実験結果が得られ

0.4

0.2

0

0

◆L52LL-1

 \times V78LL-1

0.01

L90LL-1

*V135LL-1

0.02

部材角[rad]

図-5 せん断変形/全変形-部材角

ているが,軸力 の低い試験体 (V135LL-2)にお いては寸法が大 きい試験体の軸 力負担能力喪失 部材角が小さか った。

文献 1)では,
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,
と結論づけてい



2.4

1.2

0

-1.2

-2.4

0.02

0.015

0.01

0.005

0

-0.02

平均軸盗

-0.02

せん断応力度[N/mm²]

4. 実験結果の考察

今回の実験結果を文献1)で提案され た手法により寸法効果の影響の観点か ら検討する。図-7(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 Pf 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 Pf をとった場合の近似式 R であり、V シ リーズを黒塗りの記号で、L シリーズ を演算の記号で示し、V シリーズに対 応する試験体(H シリーズ)を白塗りの 記号で加筆し、対応が分かるように点 線で結び示している。図-7(a-1)は全変 形で部材角を取り, 図-7(a-2)はせん断 変形のみで部材角を取っているが、文 献 2)の試験体は曲げ変形成分を測定 していなく,実験の中でせん断破壊を 顕著に見せていたため、曲げ変形成分 はごくわずかだと考え,図-7(a-1)と同 じ値を示している。

図をみると、図-7(a-1)では曲げ変形 を起こした試験体 L90LL-2 が大きく近



図-7 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

似曲線状からずれていることが分かる。図-7(a-2)では、 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、表-3(b)のデータ を用い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、V135LL シリーズの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。

寸法効果の観点から見ると, **図−7** (a-2) で V135LL シリ ーズについては,軸力の高い試験体では寸法効果の影響 があまり見られず評価式として妥当であったといえる が,軸力の低い試験体では近似曲線の近傍にはあるもの の部材角において大きく差ができ,寸法効果の影響が表 れた。また, V78LL シリーズでは軸力が高い試験体でも 寸法効果の影響が若干表れていることが分かる。これは, 軸圧縮実験において負勾配以降の実験結果の違い,滑り 開始時摩擦軸力実験値の誤差などからなると考えられ 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。

 $R = \frac{0.029}{\eta} \qquad (\eta = \frac{e^N}{P_{fr,cal}}) \qquad (2)$ ${}_e N = N + Q \frac{\sin^2 \theta - \cos^2 \theta - 2\mu \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{\sin \theta \cdot \cos \theta - \mu \cdot \cos^2 \theta}$

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

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 $_{n}$ を,喪失部材角 Rと関連づけ たものである。ここで、等価軸力とは作用せん断力のひ び割れ面を滑ろうとする力への寄与を考慮した軸力と いう意味である。また、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-7(b)は軸力負担能力喪失部材角実験値(横軸)と式 (2)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(2))で ある。図-7(a-1)に比べ図-7(b-1)の方が近似曲線の近傍に 集まってはいるが,曲げ変形の影響が多い試験体 L90LL-2が大きく近似曲線からずれた結果となった。し かし図-7(b-2)では図-7(a-2)に比べ近似曲線の近傍に集 まり結果的にではあるが,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。 寸法効果の影響は, 図−7(b-2)において V78LL シリー ズに関しては軸力比が低くなったため, 誤差が少なくな り寸法効果の影響が見られない結果となった。しかし, V135LL シリーズは変化が見られず, 寸法効果の影響が 表れたままの結果となった。

このことから,今後も寸法効果の観点から曲げせん断 実験を行い既往の方法で中心軸圧縮加力実験の結果と 軸力負担能力喪失部材角の関係の影響を,検討していく 必要があると考えられる。

5. まとめ

- (1)単純軸圧縮実験において、相似試験体同士を比較する と、帯筋比が低い場合はほぼ同じ挙動となったが、帯 筋比が高い場合は寸法が大きい試験体がより脆性的 な挙動を示した。
- (2) 断面寸法が同じで,長さのみが異なる試験体の単純軸 圧縮実験においては,破壊領域がほぼ同じであった。 従って,軸変形を柱高さ長さで除して平均軸歪に換算 すると差が生じる。
- (3)曲げせん断加力実験において、相似試験体同士を比較 すると、軸力の高い試験体ではほぼ同じ実験結果が得 られているのに対し、軸力の低い試験体では寸法が大 きい試験体の軸力負担能力喪失部材角が小さかった。
- (4) 上記(1)(3)のまとめについてはコンクリート強度 などの性能が両シリーズで若干違うこともあり、この 原因については今後の検討が必要である。
- (5) 文献 1)による軸力負担能力喪失部材角評価式(式 (2)) は今回の寸法の異なる実験データを加えても, 評価式としては妥当であった。ただし,曲げ変形成分 が多い場合には曲げ変形を除いてせん断変形のみと する必要があった。

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) 宮島雄代,富田泰宇,李柱振,加藤大介: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,第29回コンクリート工学年次論文報 告集29-3, pp. 79-84, 2007
- 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