論文　試験体寸法と中子筋の有無を変化させた RC 造柱のせん断破壊後の軸力負担能力評価実験

伊井　宏樹[*1]・広瀬　裕三郎[*2]・佐藤　充晴[*3]・加藤　大介[*4]

要旨： 本報告では，せん断破壊する RC 造柱を対象に，滑り開始時摩擦軸力（軸圧縮実験においてひび割れ面に生じる摩擦力が限界に達して変形が著しく大きくなる時の軸力）を用いた軸力比と軸力負担能力喪失部材角との関係を，寸法と中子筋の有無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。既往の研究で提案されている軸力負担能力喪失部材角の評価法の妥当性について検討した結果，中子筋の影響については概ね評価できたが，寸法については評価できなかった。また，今後の検討方法として，中心軸圧縮試験体における中子筋と寸法効果の影響を検討していくことが有用であることが確認された。

キーワード：RC 造柱，軸力負担能力，せん断破壊，寸法効果，中子筋

1. はじめに

1971 年以前の旧耐震設計基準で造られた RC 造建物は，1995 年の兵庫県南部地震において，柱がせん断破壊し軸力を伝達する能力を失って建物の一層分が瞬時に潰れてしまう層崩壊が発生した例が多く見られた。これは柱がせん断破壊した後軸力負担能力を喪失したものであるが，そのメカニズムはまだ解明されていない。筆者らは，配筋量(帯筋間隔)，配筋詳細(フック形状等)，載荷履歴，試験体寸法をパラメータとして実験を行い，試験体諸元と設定軸力がわかれば対象の軸力負担能力喪失部材角を評価することができる式を提案した[1)]。また，この評価式に様々な寸法での実験結果を当てはめることによって，評価式の妥当性を検討してきた[2)3)]。

本報告では，既往の評価式で考慮できていない寸法による影響と中子筋による影響を，様々な寸法や中子筋の有無を変化させた試験体による実験結果から考察し，より適用性の高い評価式の提案を目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究で作製した試験体諸元を**表-1** に，試験体配筋詳細図を**図-1** に示す。大きく分けて，断面寸法が 180mm×180mm の H シリーズ，270mm×270mm の V シリーズ，370mm×370mm の W シリーズの３種類の試験体を作製した。試験区間高さと試験体全長は，H シリーズが区間高さ 360mm、全長 1200mm，V シリーズが区間高さ 540mm，全長 1600mm，W シリーズが区間高さ 740mm，全長 1800mm とした。**図-2** における灰色部分が試験体，斜線部分が試験区間となる。試験区間以外の部分は加力装置に取り付ける際の基礎部分となる。また，本研究の試験体は同時に打設する等寸法以外の要素を極力同じにして寸法を変化させている。**表-1** の相似関係の欄において同じ記号で表される試験体同士が相似関係（寸法の比率が同じ）にあることを示している。シリーズ名の後に I と記されている試験体は中子筋を配した試験体で，中子筋の無い試験体と帯筋比を同一にした試験体と帯筋間

表 - 1　試験体諸元

試験体名	断面 [mm^2]	高さ [mm]	主筋	帯筋				コンクリート強度 [N/mm^2]	相似関係	加力方法
			配筋	配筋	形状 (余長)	間隔 [mm]	帯筋比 [%]			
H67-0	180×180	360	4-D10	2-D4	135deg(6d)	67	0.23	13.4	A	中心軸圧縮
H67-1										曲げせん断
HI100-0			8-D6	3-D4		100			B	中心軸圧縮
HI100-1										曲げせん断
HI67-0						67	0.35		C	中心軸圧縮
V100-0	270×270	540	4-D16	2-D6		100	0.23		A	中心軸圧縮
V100-1										曲げせん断
VI150-0			8-D10	3-D6		150			B	中心軸圧縮
VI150-1										曲げせん断
VI100-0						100	0.35		C	中心軸圧縮
W133-1	370×370	740	4-D19	2-φ9		133	0.26		A	曲げせん断
WI200-1			8-D13	3-φ9		200			B	

*1 新潟大学大学院　自然科学研究科　（正会員）
*2 新潟大学大学院　自然科学研究科
*3 東京大学地震研究所大学院
*4 新潟大学　工学部建設学科教授　工博　（正会員）

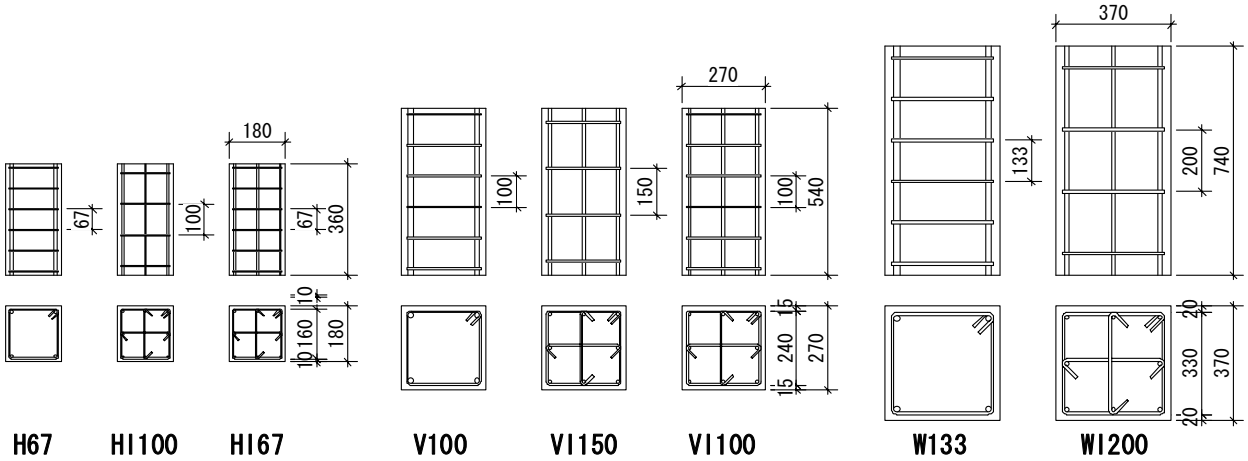


図 - 1　配筋詳細図

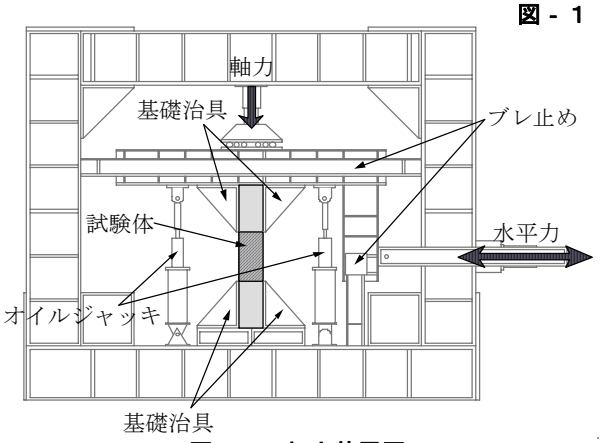


図 - 2　加力装置図

隔を同一にした試験体を作製（W シリーズにおいては帯筋比を同一にした試験体のみ作製）した。この中で，中心軸圧縮試験体として, H67, HI100, HI67, V100, VI150, VI100 の計 6 体，曲げせん断試験体として H67，HI100，V100，VI150，W133，WI200 の計 6 体，合わせて全 12 体の試験体を作製した。なお，全ての試験体は曲げ破壊よりもせん断破壊が先行するように設計した。

2.2 加力装置と載荷方法

図-2 に加力装置を示す。試験体は上下部分を三角形基礎治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** 上部の L 型フレームの上に設置されている軸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，曲げせん断試験では，試験体の上下で逆対称になるようにした。

載荷方法は、中心軸圧縮試験では，L 型フレームを水平に保ちながら，軸方向載荷を行った。曲げせん断試験では，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,±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，一定軸力を負担出来なくなるまで加力を行った。

3. 実験結果

3.1 中心軸圧縮試験結果

表-2 に中心軸圧縮試験結果，**図-3** に試験の結果得られた軸応力度－平均軸変形関係を示す。ここで，縦軸は全軸力を全断面積で，横軸は軸変形を試験区間高さ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，平均軸応力度－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（**図-4** 参照）。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）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，曲げせん断試験と関連づけている。

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

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 $\mu(=0.77$ 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 の○で示す点は滑り開始時摩擦軸力点の実験値

表 - 2　中心軸圧縮試験結果

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]	$P_{fr.cal}$ [kN]
	軸強度 [kN]	軸変形 [mm]	摩擦軸力 P_{fr}[kN]	軸変形 [mm]		
H67-0	568	1.08	157	15.3	225	165
HI100-0	592	0.669	147	16.7	195	143
HI67-0	622	1.09	201	15.5	252	164
V100-0	1248	0.652	273	12.9	491	360
VI150-0	1203	1.36	283	13.0	436	319
VI100-0	1170	1.16	439	13.8	546	355

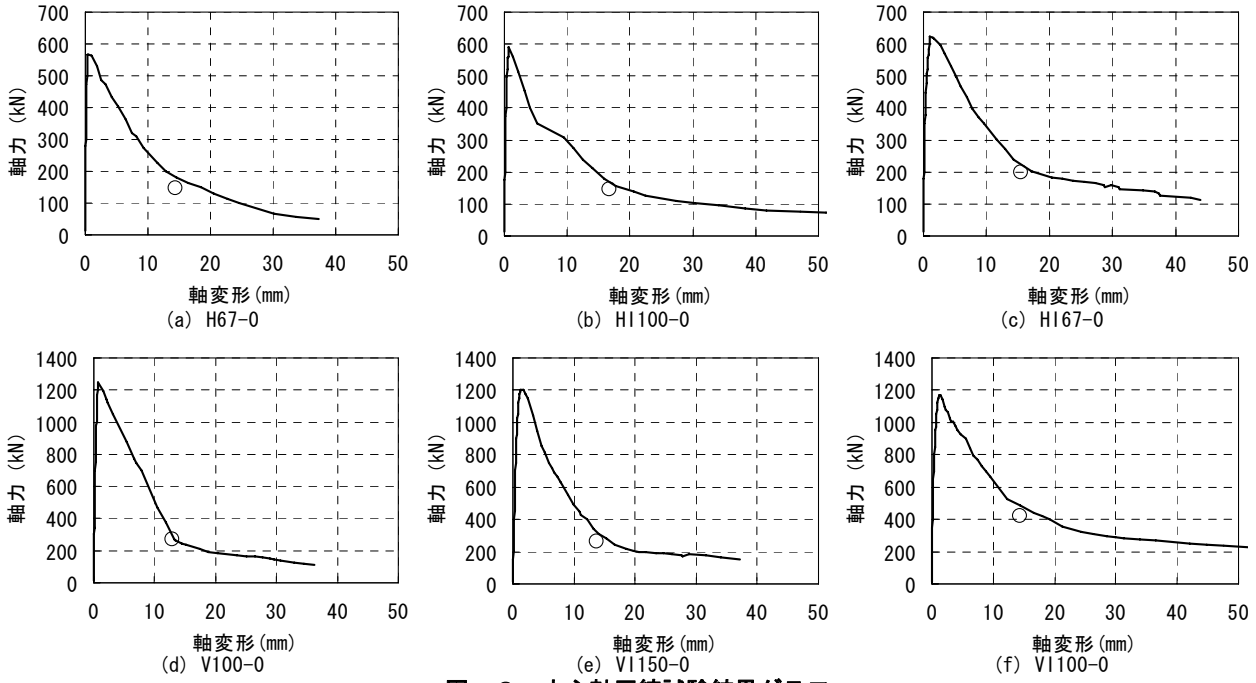


図 - 3　中心軸圧縮試験結果グラフ

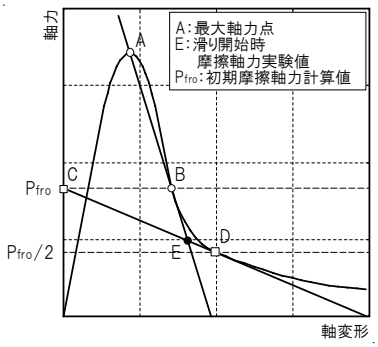


図-4　中心軸圧縮試験結果の整理法

である。滑り開始時摩擦軸力点とは，試験体内部で発生する摩擦面に生じる摩擦力が限界に達し，試験体の変形が著しく大きくなり始める点の事を指す。**図-3** を見ると，帯筋比を同一とした試験体同士では，滑り開始時摩擦軸応力度がほぼ同じ値になり，帯筋比が大きい試験体ではそれよりも高い値が得られた。また，滑り開始時軸歪は断面積や中子筋の有無に関係なくほぼ同じ値であった。

3.2 曲げせん断試験結果

表-3 に曲げせん断試験結果，**図-5** に実験結果を相似試験体同士で比較したものを示す。せん断応力度は水平力を断面積で除したもの，部材角は水平変形量を試験区間高さで除したものとしている。

図-5 中の○は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試験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とは限らないため，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。本試験では，せん断破壊後の軸力負担能力喪失部材角を対象にしている。

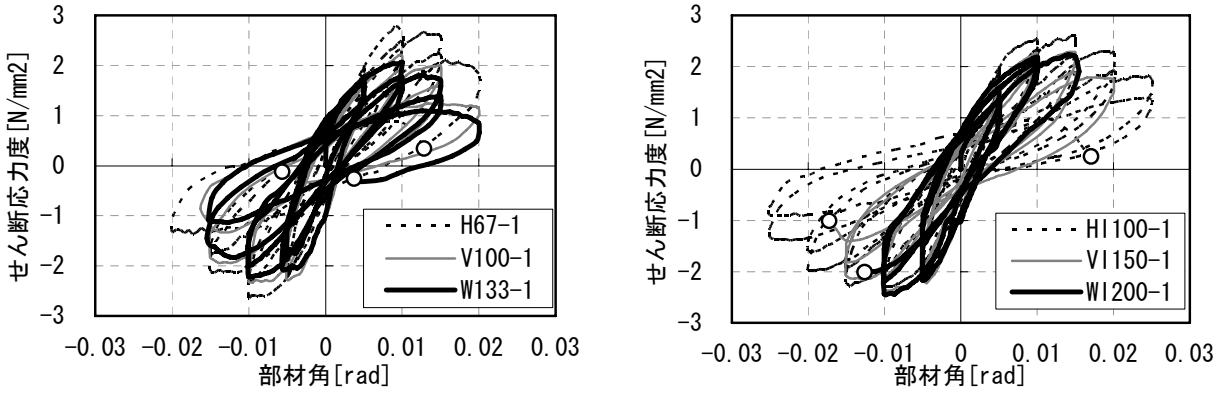
結果を見ると，中子筋を配さなかった試験体では寸法による軸力負担能力喪失部材角の差はあまり見られていない。ただし，これらの試験体では結果的に軸力負担能力喪失時の部材角が同じになっているが，実際には寸法が小さいほうが繰り返したサイクル数は大きくなっていた。一方，中子筋を配した試験体においてはより大きな試験体である W シリーズ試験体の軸力負担能力喪失部材角が最も小さくなり，試験体のスケールが小さくなるにつれて軸力負担能力喪失部材角が大きくなる傾向が見られた。これらから，軸力負担能力喪失ステップには寸法による影響があると考えられる。これについては後で詳細に検討する。次にせん断応力度を見てみると，試験体のスケールが大きいほど同じ部材角でもせん断応力度が低く計測される傾向が見られた。

4. 曲げせん断試験結果の考察

本章では，文献 1)で提案した軸力負担能力喪失部材角の評価式の元に本実験結果について考察する。文献 1)では、軸力負担能力喪失部材角を，柱の軸力―軸歪度関係における滑り開始点の軸力により評価している。式(2)

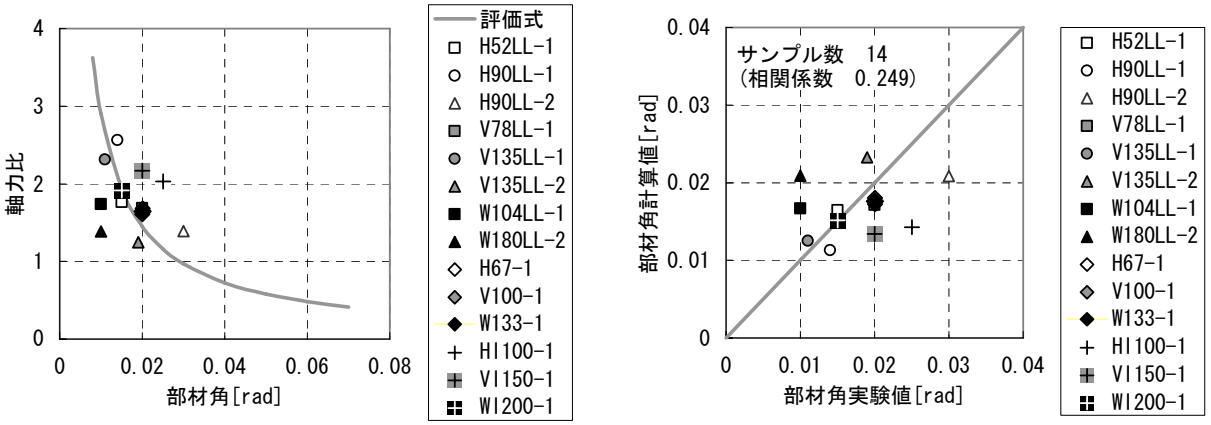
表 - 3　曲げせん断試験結果

試験体名	作用一定軸力 [kN]	実験結果				
		最大水平強度 [kN]	軸力負担能力喪失ステップの水平力	軸力負担能力喪失までの最大値		
				水平変形[mm]	部材角 [rad]	軸変形 [mm]
H67-1	225	90.7	11.0	7.23	0.020	8.2
HI100-1		84.6	-13.5	-9.1	0.025	4.6
V100-1	506.5	170	9.07	10.8	0.020	10.9
VI150-1		174	9.1	10.8	0.020	1.9
W133-1	949.5	303	35.5	14.8	0.020	15.6
WI200-1		336	9.1	11.0	0.015	0.6



(a) 中子筋無し　　(b) 中子筋有り

図 - 5　曲げせん断試験結果の相似試験体同士での比較



(a)　軸力比 - 部材角関係　　(b) 実験値と計算値の整合性

図 - 6　等価軸力比と軸力負担能力喪失部材角の関係

～式(6)に軸力負担能力喪失部材角の評価式を示す。

$$R = 0.029/\eta \tag{2}$$

$$\eta = {}_eN/P_{fr,cal} \tag{3}$$

$${}_eN = N + Q\cdot\frac{\sin^2\theta - \cos^2\theta - 2\mu\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta}{\sin\theta\cdot\cos\theta - \mu\cdot\cos^2\theta} \tag{4}$$

$$P_{fr,cal} = P_{fro} \times \beta \times R_d \tag{5}$$

$$\beta = 1 - 0.5\,\frac{S}{D} \tag{6}$$

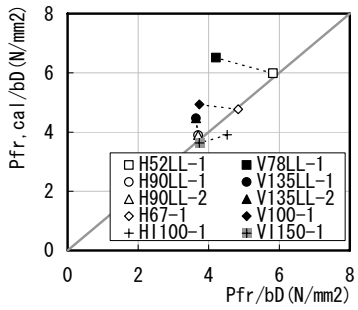
この式は，軸力に作用せん断力のひび割れ面を滑ろうとする力を考慮した軸力である等価軸力 ${}_eN$ と式(1)を配筋詳細の影響で補正した $P_{fr,cal}$ による軸力比 η を軸力負担能力喪失部材角 R と関連づけたものである。また，N は作用軸力、Q は軸力負担能力喪失時のせん断力であるが，この Q を試験体のせん断強度とする。R_d は配筋詳細の有効係数で，溶接帯筋で 1，135° フックは 0.9，90° フック（余長 4d）では 0.8 である。

図-6(a) に等価軸力比と軸力負担能力喪失までの最大部材角の関係を，**図-6(b)** に軸力負担能力喪失部材角の実験値と式(2)による計算値を直接比較したものを示す。菱形で表される点と十字で表される点は本研究で加力を行った試験体，四角形，円，三角形で表されている点は文献 2)3)で報告されている試験体を示す。また，白，灰，黒色で表される試験体同士が相似関係にある事を示している。**図-6(a)** 中の灰色曲線で表される近似曲線 R は式(2)による評価式である。

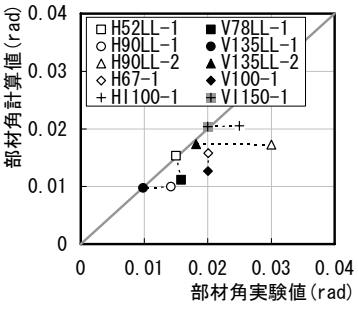
図-6(a) を見てみると，ばらつきが見られるが，それらは文献 2)3)とほぼ同レベルのばらつきであった。すなわち，後述するように，詳細に検討すると本実験結果には中子筋や寸法の影響が見られるが，それらは中子筋や寸法を考慮しないで設計式を作成した段階でのばらつき [1)]と同程度であるともいえる。

5. 寸法と中子筋の影響についての考察

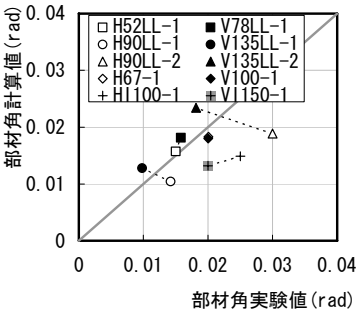
図-7(a) は中心軸圧縮試験における滑り開始摩擦軸力実験値(P_{fr})と式(5)による滑り開始摩擦軸力計算値($P_{fr,cal}$)を比較したものであり，それぞれ試験体の断面積(b×D)で除して基準化している。さらに，相似試験体同士は点線で結んでいる。**図-7(b)** は縦軸に滑り開始摩擦軸力の実験値を計算値で除したもの，横軸に試験体の断面寸法をとったものである。実験値と計算値の比が 1 に近いほど，実験値と計算値の整合性がよいということになる。



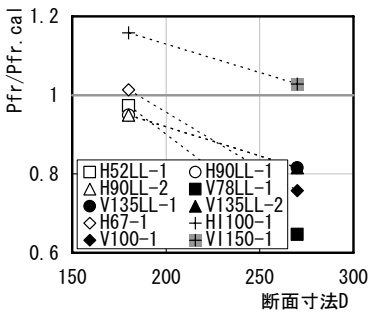
(a)実験値と計算値の整合性(Pfr,Pfr.cal)



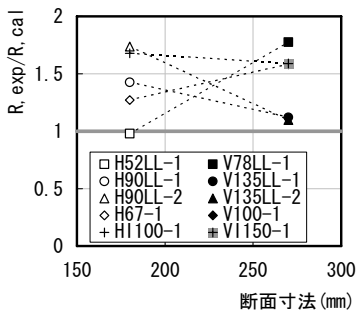
(a)部材角実験値と計算値の関係



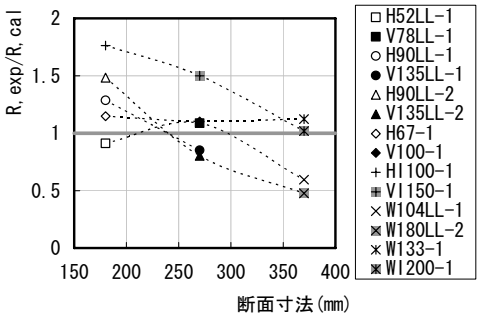
(a)部材角実験値と計算値の関係



(b)Pfr/Pfr,calと断面寸法の関係



(b)部材角実験値/計算値と断面寸法との関係



(b)部材角実験値/計算値と断面寸法との関係

図-7　Pfr/Pfr.cal - 断面寸法関係　　**図-8　式（7）（8）による検討**　　**図-9　式（2）（3）による検討**

図-7(b)を見ると，中子筋を配した試験体において，中子筋を配していない試験体に比べて計算値が実験値を大きくした回る結果となり，式(5)では中子筋の影響を考慮できていないことがわかる。また，中子筋を配していない試験体に注目すると，断面寸法が大きくなるに従って実験値の計算値に対する比が小さくなる傾向が見て取れる。すなわち，式(5)による滑り開始摩擦軸力計算値($P_{fr,cal}$)は寸法の影響を考慮できていないことがわかる。

次に，部材角の評価法，つまり式(2)に関して寸法と中子筋の影響の有無を確認する。式(2)は，滑り開始摩擦軸力実験値(P_{fr})を軸力負担能力喪失時の部材角に関連づけた以下の式を基にして提案されている [1)]。

$$R = 0.029/\eta \tag{7}$$

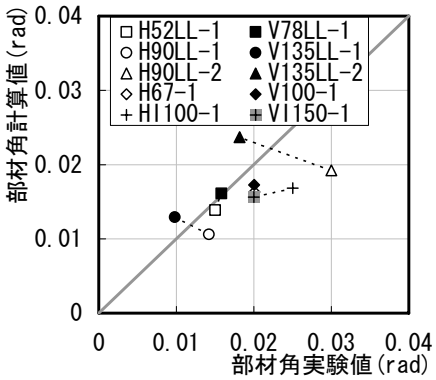
$$\eta = {}_eN/P_{fr} \tag{8}$$

すなわち，式(8)で定義した軸力比が軸力負担能力喪失時の部材角と関連があり，実験値である Pfr を計算値である Pfr,cal に置き換えたものが式(3)である。そこで，まず式(7)(8)を用いて寸法と中子筋の影響の有無を確認してみる。なお，実験値(Pfr)は中心軸圧縮試験の結果によって求められるものであるので、ここでの検討は中心軸圧縮試験を行うことのできた H シリーズ，V シリーズの試験体によってのみ行うこととする。

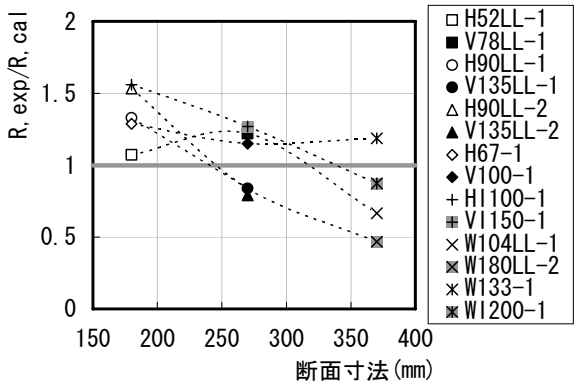
図-8(a)は軸力負担能力喪失時の部材角について実験値と式(7)(8)によって求めた計算値の比較を行ったものである。また，縦軸に計算値と実験値の比をとり，横軸を断面寸法としたものを**図-8(b)**に図示した。計算値に式(7)(8)を用いたものでは，明確な寸法と中子筋の影響は確認されず，計算値と実験値の誤差はばらつきの範囲内であるといえる。つまり，軸力負担能力喪失時の部材角と滑り開始時摩擦軸力を関連付けている式(7)(8)の考え方自体には寸法と中子筋の影響がないと言える。

一方，**図-9(a)(b)**は**図-8(a)(b)**と同様の図であるが，式(7)(8)の代わりに式(2)(3)を用いたものである。同図には，曲げせん断試験のみを行った W シリーズ試験体のデータもプロットしてある。**図-9(b)**をみると全体として右下がりの傾向，すなわち寸法効果が見てとれる。また，中子筋のある試験体が他の試験体より上に位置しており，中子筋のある試験体は同量の帯筋比をもつ試験体より軸力負担能力喪失時の部材角が大きいこともわかる。なお，この図で今回実験を行った中子筋が無い相似試験体(H67-1,V100-1,W133-1)のみ他の試験体と傾向が異なり寸法効果がない結果となっている。ただし，3.2 節で述べたように，これらの試験体では結果的に軸力負担能力喪失時の部材角が同じになっているが，実際には寸法が小さい方が繰り返したサイクル数は大きくなっており，本載荷履歴と喪失時部材角の定義(喪失まで経験した最大部材角)ではその差を表現できなかったと言える。

以上の結果より，式(5)で表される中心軸圧縮試験体における滑り開始時摩擦軸力の評価式を寸法と中子筋の影響を考慮しうる評価式にすることにより，式(2)は有効な評価法となりうることがわかる。すなわち，**図-7(b)**で見られている，中心軸圧縮試験体における滑り開始時摩擦軸力評価式における寸法と中子筋による効果を検討していくことが有効である。



(a)部材角実験値と計算値の関係



(b)部材角実験値/計算値と断面寸法との関係

図-１０　式（１０）による検討

6. 中子筋の効果の検討例

寸法効果は今後の課題とするが，中子筋について検討した例があるので，それを参考に評価式の改善を試みる。式(3)内の式(6)で表される配筋詳細に関する係数βは，帯筋の配置間隔は考慮されているが，中子筋の有無に関しては考慮されていない。そこで，文献 4)で提案した式(10)で表される中子筋の影響を考慮した配筋詳細に関する係数βを用いることで得られた結果を図-10 に示す。

$$\beta = \frac{\dfrac{2}{1+Co} + Nbun - 1}{Nbun + 1} \tag{10}$$

$$Co = \frac{1}{20} \cdot \left(\frac{\mathrm{Dc}}{\phi w} \right) \cdot \gamma$$

$$\gamma = 0.0005 \cdot \sigma wy \quad [\mathrm{N/mm^2}]$$

式(10)中の Nbun は帯筋の分割数で，中子筋が無い場合は 1，1 つある場合は 2 とする。Dc はコア幅，ϕw は帯筋径，σwy は帯筋の降伏強度である。

図-9(b)と図-10(b)において中子筋を用いた試験体を表す点に着目すると，式(10)を用いた図-10(b)のグラフの方で中子筋の無い試験体を表す点に近づいており、式(10)は中子筋の影響を考慮できていることが読み取れる。しかしながら，寸法による影響ついては依然考慮できておらず，引き続き検討が必要である。

7. まとめ

(1) 寸法と中子筋の有無をパラメータにした中心軸圧縮試験の結果，それらの違いによって滑り開始時摩擦軸力に影響が見られた（図-7(b)）。

(2) 寸法と中子筋の有無をパラメータにした曲げせん断試験の結果，中子筋を配した試験体において軸力負担能力喪失部材角に寸法の影響がみられたが（図 5(b)），中子筋なしの試験体ではみられなかった。ただし、実際には寸法が小さいほうが繰り返したサイクル数は大きくなっていた（図 5(a)）。

(3) 文献 1)で提案した軸力負担能力喪失部材角を評価する式は，今回の試験体に対しても同程度のばらつきであった。

(4) しかしながら，文献 1)の計算値では（式(2)(3)）ではその中子筋と寸法による影響を評価できなかった（図-9(b)）。ただし，滑り開始時摩擦軸力に実験値（式(8)）を使うことによりその影響は評価できた（図-8(b)）。

(5) よって，式(5)で表される中心軸圧縮試験体における滑り開始時摩擦軸力の評価法を寸法の影響を考慮していくことで，有効な評価式を導くことができる。

(6) 文献 4)による評価法を用いることによって中子筋の有無による影響は評価できたが、寸法による影響は評価できていない。引き続き検討が必要である。

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) 宮島雄代，阿部博之，加藤大介：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，コンクリート工学年次論文集 Vol.30,No.3,pp.163-168,2008.6

3) 松野葵，飯田大貴，伊井宏樹，加藤大介：RC 造柱の軸力負担能力に及ぼす試験体の寸法の影響，日本建築学会構造工学論文集，Vol.56B，2010.3

4) 阿部博之，李柱振，本多良政，加藤大介：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，コンクリート工学年次論文集 Vol.29,No.3pp.103-108, 2007.6

5) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説 2001