

## RC 造柱の中心軸圧縮挙動における負勾配領域の評価法 中子筋の効果及び寸法効果に関する検討

F08D027G                      飯田大貴  
 指導教員                      加藤大介教授

### 1. 研究背景

1995 年 1 月に発生した兵庫県南部地震では、腰壁・たれ壁付きの短柱、ピロティ部分の柱のせん断破壊により層崩壊を起こす建物が多く見られた。1981 年に現設計基準に改正されたが、層崩壊を起こした建物の大部分が 1981 年以前に建てられた建物である。崩壊した建物の中には中間層が崩壊するというこれまでに見られない被害が発生した。また、せん断補強筋の配筋詳細が悪い建物が多い。層崩壊を起こす原因である柱のせん断破壊により軸力保持能力が喪失すると、瞬時に建物が潰れてしまい人命の安全確保が困難である。そのためせん断補強筋がせん断破壊にどのような影響を与えるかが検討されるようになった。

### 2. 研究目的

RC 造柱に入っている帯筋は柱内部のコアコンクリートを拘束する能力を持ち、拘束する力が強いほど柱の軸力保持能力も高くなると考えられる。また、柱の軸力保持能力は過去の研究によって、中心軸圧縮試験の最大耐力以降の挙動に着目することで推定できることが分かっている。既往の研究では試験体寸法が 180 mm 断面の試験体で実験を行い、軸圧縮試験体の負勾配領域の評価法を提案した。しかしこの評価法は寸法の小さい試験体の実験結果から導かれた式である。本研究では、中心軸圧縮実験の最大軸力以降の挙動をモデル化するための評価式に与える寸法効果の影響及び、中子筋の影響を検討することを目的とする。

### 3. 研究計画

#### 3.1 試験体計画

過去の研究では、帯筋形状やコンクリート強度をさまざまな値に設定し、RC 造柱の『中心軸圧縮実験』を行い、コンファインドコンクリートの最大耐力、また最大耐力以降の挙動をモデル化するため評価式の提案を行ってきた。2007 年から 2009 年に

かけて計 13 体の中心軸圧縮試験体を作成した。これらの試験体は以下のことを目的にして作成した。

- 1) 寸法を変化させた試験体に既往の評価式の適用
- 2) 破壊領域の検討
- 3) 評価式に与える中子筋による影響の検討
- 4) コンクリート強度と寸法効果の関連性

試験体の諸元を表 1 に示す。

#### 3.2 加力方法

図 1 に本研究で用いた加力装置を示す。

加力は L 型フレーム上部に付いている軸ジャッキにより加力し、水平力は L 型フレームに取り付けてある横力用ジャッキによって加力する。2 つのオイルジャッキによって載荷中に回転がかからないようにする。

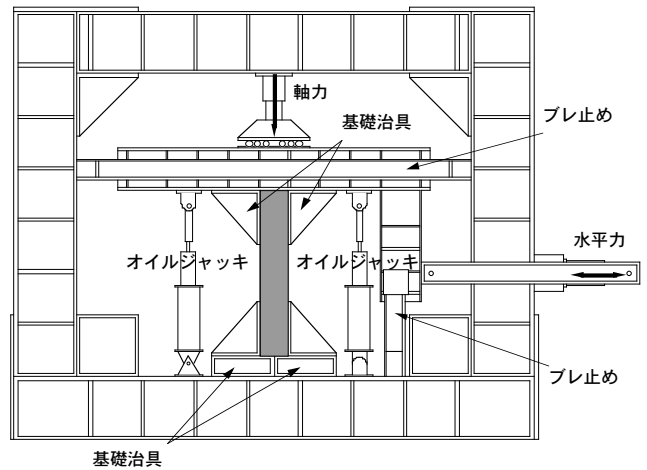


図 1 加力装置

表 1 試験体諸元

年度	試験体名	柱寸法		主筋		帯筋			コンクリート強度 [N/mm <sup>2</sup> ]							
		断面[mm]	高さ[mm]	配筋	引張鉄筋比 [%]	配筋	形状	間隔[mm]		中子筋	帯筋比 [%]					
2007	L52LLシリーズ	180×180	540	4-D10	0.44	2-D4	135°フック	52	無	0.27						
	90							0.16								
	78							0.30								
	135							0.17								
2008	L52LLシリーズ	180×180	540	4-D10	0.44	2-D4	135°フック	52	無	0.27						
	78							0.30								
	78							0.45								
	78							0.30								
2009	VH78LLシリーズ	180×270	360	4-D10	0.82	2-D6	135°フック	78	有	0.21						
	V78LLシリーズ	270×270								0.54	0.30					
	H67シリーズ	180×180								0.44	0.21					
	H16シリーズ	180×180								0.29	0.31					
	H1100シリーズ	180×180								0.29	0.21					
	V100シリーズ	270×270								540	4-D16	0.54	3-D6	100	無	0.23
	V1100シリーズ															0.35
	V1150シリーズ															0.23
V1150シリーズ	0.23															

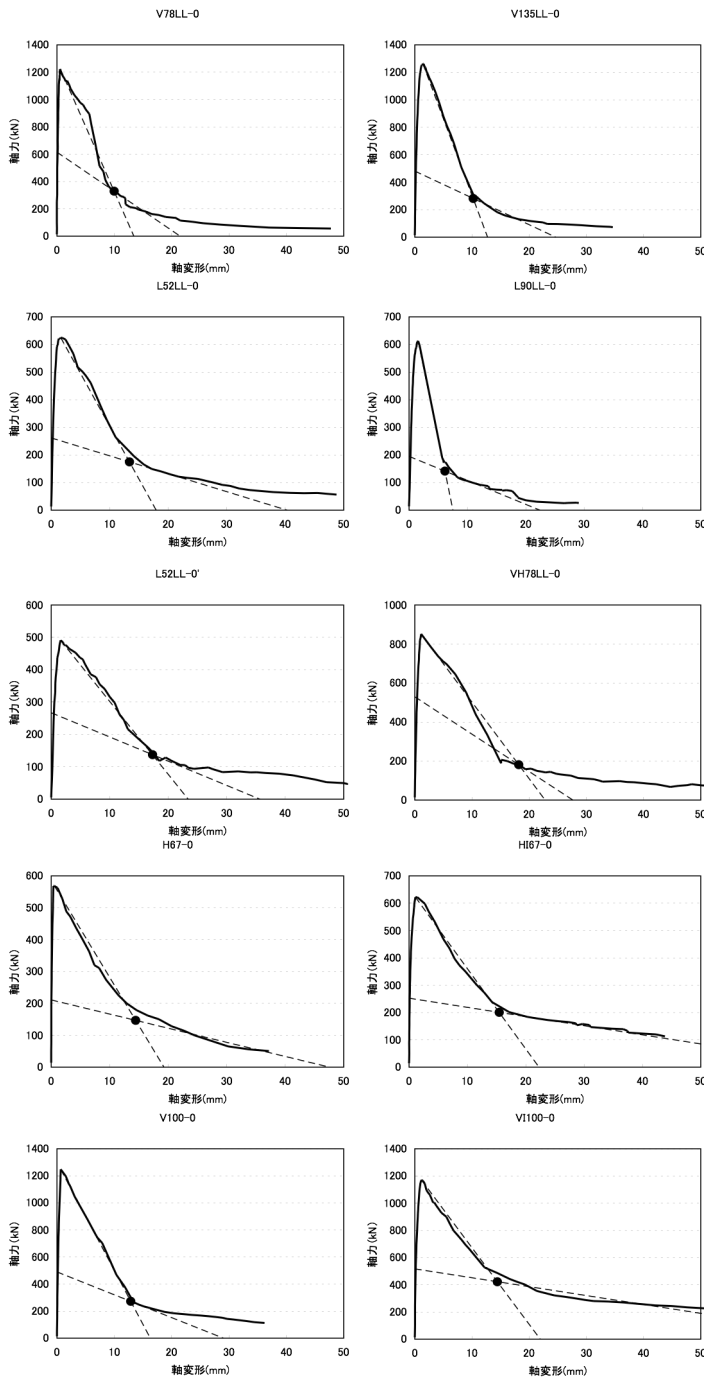


図2 中心軸圧縮実験結果

#### 4. 実験結果

##### 4.1 実験結果及び既往のデータについて

本研究で行った実験結果を表2に示す。図2は軸力-軸変形関係である。表3、表4は参考文献4)5)6)の試験体及び過去に研究室で行った試験体の実験データである。図中の(-)は最大軸力以降の実験データが初期摩擦軸力点  $P_{fro}$  の半分の点までない試験体でモデル化が行えない試験体である。

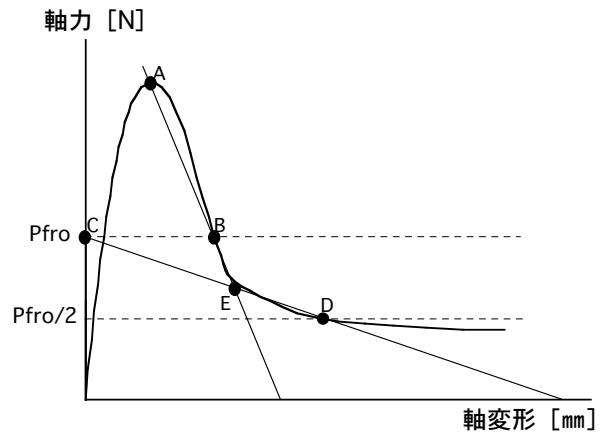


図3 モデル化の概要

##### 4.2 モデル化概要

過去の研究の成果により図3に示すように軸力-軸変形関係のグラフの負勾配部分を2本の直線でモデル化を行う。この2本の直線は、最大耐力点 (A点) と軸力が  $P_{fro}$  になる点 (B点) を結んだ線と、初期摩擦軸力点 (C点) と軸力が  $P_{fro}$  の半分になる点 (D点) を結んだ線である。2本の直線の交点 (E点) が滑り開始点(実験値)となる。

ここで、文献1)で

提案している初期摩擦軸力点  $P_{fro}$  を式(1)に示す。

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

$b$ 、 $D$  は断面幅と断面せい、 $p_w$ 、 $\sigma_{wy}$  は帯筋比と帯筋降伏強度、 $\theta$  は滑り角度で本研究では文献1)に倣い  $60^\circ$ 、 $A_s$ 、 $\sigma_y$  は主筋全断面積と主筋降伏強度、摩擦係数  $\mu$  は  $0.77$  とした。図2に各試験体の実験値によるモデ

ル化を合わせて示す。図中の黒い点が滑り開始点（実験値）である。

計算値によるモデル化を行うためには、最大耐力点、初期摩擦軸力点、滑り開始点の3点（A点、C点、E点）が分かれば2本の直線が決定できる。本研究ではE点の評価法を検討する。

## 5. 既往の評価式の精度と問題点

### 5.1 最大軸力点の検討

最大軸力点の検討には文献3)のNewRCモデルを用いた。NewRC式のコンクリート強度適用範囲は30~120N/mm<sup>2</sup>だが低強度の試験体も含めて検討を行った。図4は最大軸力点における計算値と実験値を比較してのものである。(a)をみると軸力は概ね評価できているが、(b)の軸変形に関

表2 本研究実験結果

年度	試験体名	寸法		最大軸力点		初期摩擦軸力点		滑り開始点	
		断面[mm×mm]	試験体高さ[mm]	軸変形[mm]	軸力[KN]	Pfro[KN]	軸変形[mm]	摩擦軸力[KN]	
2009	H67-0	180×180	360	0.55	568	211	14.4	147	
	H67-0			1.09	622	252	15.4	201	
	H1100-0			0.67	592	194	16.7	147	
	V100-0	270×270	540	0.65	1248	490	12.9	273	
	V1100-0			1.16	1170	517	14.4	422	
2008	V1150-0	180×180	540	1.36	1203	407	13.7	265	
L52LL-0	1.62			491	267	17.3	137		
VH78LL-0	1.11			851	529	18.2	181		
2007	V78LL-0	1.63	1091	640	20.0	300			
	L52LL-0	180×180	540	1.64	625	262	11.7	181	
	L90LL-0			1.57	613	195	6.2	141	
	V78LL-0	270×270	540	0.59	1224	615	10.0	330	
	V135LL-0			1.43	1263	481	10.2	282	

表3 参考文献実験結果

年度	試験体名	寸法		最大軸力点		初期摩擦軸力点		滑り開始点	
		断面[mm×mm]	試験体高さ[mm]	軸変形[mm]	軸力[KN]	Pfro[KN]	軸変形[mm]	摩擦軸力[KN]	
文献4	4L9718	125×125	325	1.53	1275	638	-	-	
	4L17210			3.63	1638	754	-	-	
	2L9508			2.80	5884	3120	15.3	1903	
	2S9508			2.40	5992	3120	9.7	1733	
	2L9522			3.05	5472	2869	19.1	1780	
	2S9522	2.60	5629	2869	13.8	1736			
	2L17112	500×500	1300	3.75	6688	3755	16.0	2535	
	1L7012			3.00	19937	9194	-	-	
	1L9708			3.50	20761	11333	27.5	5858	
	1L9712			3.90	20967	12025	23.2	7218	
1L17212	4.20			22693	11096	-	-		
文献5	No.1	400×400	520	1.46	5521	1801	-	-	
	No.2			1.40	5403	1873	-	-	
	No.3			1.51	5698	1873	-	-	
	No.4			1.61	5492	1873	10.3	985	
	No.5			1.51	5472	1873	13.3	934	
文献6	LN30-NM	220×220	300	3.11	342	250	-	-	
	LN60-NM			6.08	391	500	-	-	
	LN90-NM			9.7	488	750	-	-	
	HN30-NM			1.03	937	250	-	-	
	HN60-NM			1.43	1057	500	-	-	
	HN90-NM			1.83	1162	750	9.84	635	
	LR60-NM			7.19	574	670	-	-	
	HR60-NM			1.72	1180	670	14.9	358	
	LN30-RMa			2.40	377	250	13.0	178	
	LN30-RMb			6.89	408	250	11.1	181	
	LN60-RM			4.82	445	500	-	-	
	LN90-RMa			14.3	565	750	-	-	
	LN90-RMb			9.95	566	750	-	-	
	LR60-RM			6.54	609	670	-	-	
	HR60-RM			1.76	1247	670	8.0	412	

しては一部の試験体で実験値が大きくなっているが概ね評価できている。(c)は縦軸に軸変形の精度、横軸にコンクリート強度をとったものである。コンクリート強度が低い試験体で変形が大きくなる傾向がある。

### 5.2 滑り開始時摩擦軸力の精度

文献7)で提案された評価式を式(2)に示す。

$$P_{fr} = P_{fro} \cdot \beta \cdot R_d \quad (2)$$

$\beta$ は配筋詳細に関する低減係数、 $R_d$ はフック形状に関

表4 既往の実験結果

年度	試験体名	寸法		最大軸力点		初期摩擦軸力点		滑り開始点			
		断面[mm×mm]	試験体高さ[mm]	軸変形[mm]	軸力[KN]	Pfro[KN]	軸変形[mm]	摩擦軸力[KN]			
2006	H52LL-0	180×180	360	1.03	589	242	12.8	172			
	H90LL-0			0.67	572	178	5.71	125			
	H52L-0			1.32	615	242	8.52	182			
	S52L-0			1.20	646	242	9.18	125			
	I52L-0			4.83	590	315	18.8	178			
2005	D10SH-0	180×180	360	1.01	1018	322	7.98	214			
	D10SL-0			1.37	618	322	9.54	252			
	D10WH-0			0.62	1002	322	9.87	285			
	D10WL-0			0.96	607	322	11.7	265			
2004	D13S-0	180×180	360	0.66	901	399	7.10	214			
	D13W-0			1.14	920	399	14.1	319			
	φ4W-0			1.08	764	254	11.4	169			
2003	W52-0	180×180	360	1.37	916	419	-	-			
	W90-0			0.94	834	288	10.2	233			
	S-0			1.56	911	342	7.73	222			
	W-0			1.20	805	342	-	-			
2002	H-0	180×180	360	1.11	1092	325	9.44	222			
	P-0			0.91	1098	325	6.16	248			
1992	F6S30	150×150	530	0.87	1373	336	7.79	222			
	F6S45			0.94	1383	234	8.59	165			
	F6S30T			1.10	1531	520	6.84	296			
	F6S45T			1.22	1544	366	8.19	219			
	F6S60T			1.04	1400	289	7.09	180			
	F6S45T2			1.44	1564	498	6.41	231			
	F6S60T2			1.13	1498	396	9.79	227			
	F3S30			0.91	685	336	6.76	231			
	F3S45			1.08	743	234	8.69	149			
	F3S30T			3.31	861	520	20.4	125			
	F3S45T			2.29	770	366	10.4	196			
	F3S60T			1.39	768	289	6.62	154			
	F3S45T2			3.37	870	498	11.9	273			
	F3S60T2			1.43	808	396	9.60	173			
	1990			F4Y4S30	150×150	530	1.25	1016	396	-	-
				F4Y4S60			0.92	926	213	-	-
F4Y8S30		1.50	1044	692			-	-			
F4Y8S60		0.90	916	361			-	-			
F4Y12S60		1.02	942	466			-	-			
F6Y4S30		1.12	1537	396			-	-			
F6Y4S60		3.15	1461	213			-	-			
F6Y8S30		1.55	1569	692			-	-			
F6Y8S60		1.31	1522	361			-	-			
F6Y12S30		1.20	1571	902			-	-			
F6Y12S60		1.10	1508	466			-	-			
F8Y4S30		1.05	1743	396			-	-			
F8Y4S60		1.09	1548	213			-	-			
F8Y8S30		1.36	1752	692			-	-			
F8Y8S60		0.95	1647	361			-	-			
F8Y12S30		1.39	1779	902			-	-			
F8Y12S60	1.16	1667	466	-	-						
F8SP30	1.30	1695	1148	-	-						
F8SP60	0.96	1626	589	-	-						
1989	2D10S140	150×150	530	0.58	511	235	2.64	161			
	2D10S93			0.78	601	343	5.81	214			
	2D10S70			1.90	581	449	-	-			
	2D6S93			1.25	493	183	6.58	107			
	2D6S70			1.09	555	236	6.84	131			
	2D6S47			1.28	570	341	-	-			
	3D6S70			1.84	587	364	7.14	214			
	2φ4S47			0.80	497	171	6.92	103			
	2φ4S35			1.50	541	222	6.65	147			
	2φ4S23			1.45	571	327	-	-			
	3φ4S70			1.11	552	193	7.98	104			
	3φ4S35			3.36	644	344	10.1	188			

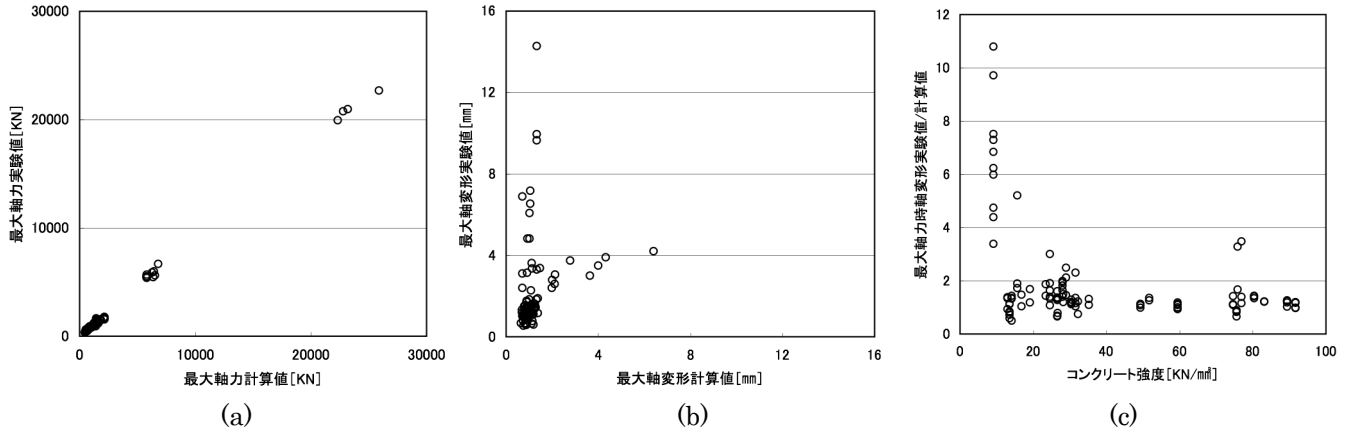


図4 最大軸力点の評価

$$\beta = \frac{2}{1 + C_o} + N_{BUN} - 1$$

$$N_{BUN} + 1$$

する係数である。Rdは溶接帯筋、スパイラル筋の場合は1、135°フックの場合は0.9、90°フックの余長4dは0.8としている。Coについては後述する。中子筋を有していても外周筋のフック形状でRdは決まる。

図5 (a) は式 (2) から求められた計算値と実験値の比と寸法を比較したもので、(b)は計算値と実験値の比較である。既往の評価式では図 (a) をみると寸法が大きくなるほど縦軸の値が小さくなっていることがわかる。つまり寸法が大きくなる程強度が低下（寸法効果）する傾向がある。ここで重要な事は、大きな寸法の試験体で縦軸の値が1以下（計算値が実験値大きくなる）になっていることである。これは危険側の評価なので、安全側の評価を出来るように改善が必要である。

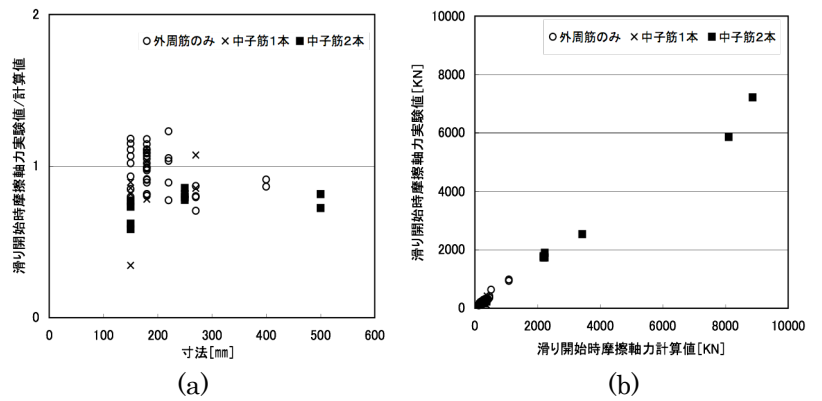


図5 既往の滑り開始時摩擦軸力評価式の検討

### 5.3 滑り開始時軸変形の精度

図6に滑り開始点における破壊領域のイメージを示す。この図の斜めに黒い部分が破壊領域と考えた場合、柱断面が縦半分になった場合でも、3等分した場合でも滑り出す瞬間の破壊領域は同じと考えられる。この要因として、骨材の寸法が試験体寸法に関わらず全ての試験体でほぼ同じ骨材寸法を使用していることが挙げられる。よって、骨材寸法が異なる場合は検討が必要になる。この考えから滑り開始時軸歪評価式ではなく軸変形評価式として考える。

既往の軸歪評価式を用いて検討を行う。

$$\epsilon_{fr} = 0.03 + 0.05 \cdot \sigma_{tp} \cdot R_d \quad (3)$$

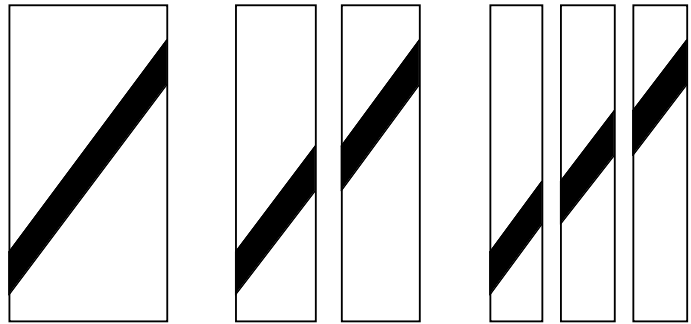


図6 破壊領域の概念

$$\sigma_{tp} = \frac{\epsilon_c}{\frac{2.8 + 0.0035 \cdot c K_{cf}}{K_{cf}} - 0.0015}$$

$$\sigma_{mp} = \frac{a_w \cdot \sigma_{wy}}{D_c \cdot S} \cdot \frac{2}{1 + C_o} + N_{BUN} - 1$$

$$N_{BUN} + 1$$

$$c K_{cf} = K_{cf} \cdot f(\alpha) \cdot g(N_{BUN}) \quad K_{cf} = \frac{a_w \cdot E_s}{D_c \cdot S}$$

$$f(\alpha) = \sqrt{\frac{S}{D_c}} \quad g(N_{BUN}) = \frac{1}{N_{BUN}^2}$$

$$C_o = \frac{1}{20} \cdot \frac{D_c}{\phi_w} \cdot \gamma \quad \gamma = 0.0005 \cdot \sigma_{wy}$$

$$\epsilon_c = 1.37 \cdot 10^{-5} \sigma_c + 0.00169 \quad \sigma_c = 0.85 \cdot \sigma_B$$

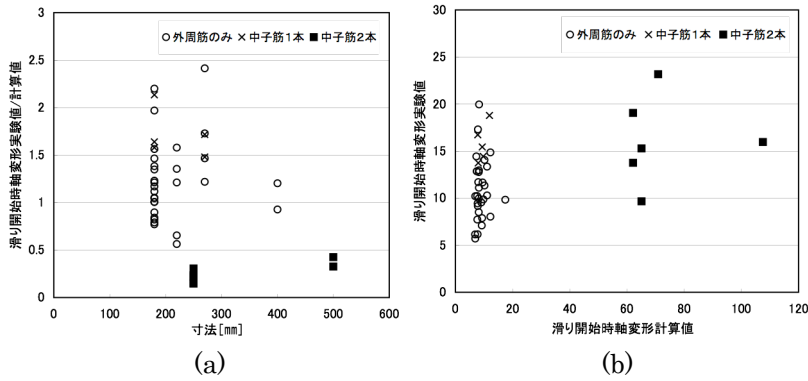


図7 既往の軸歪評価式の検討

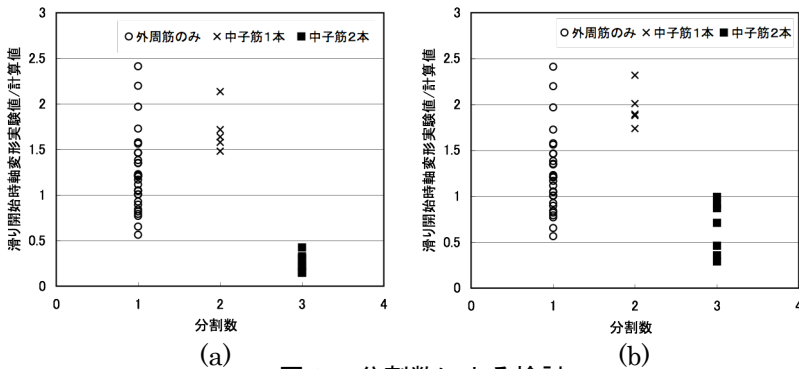


図8 分割数による検討

(ただし、 $\sigma_{tp} > \sigma_{tup}$ 、あるいは、 $\sigma_{tp} < 0$  の場合は  $\sigma_{tp} = \sigma_{tup}$  となる)

$\sigma_B$ 、 $\sigma_{wy}$  はコンクリート強度と帯筋降伏強度、 $D_c$ 、 $S$  はコア長さで帯筋間隔、 $\phi_w$ 、 $a_w$ 、 $E_s$  は帯筋径、一組の帯筋断面積、帯筋ヤング係数である。 $N_{BUN}$  は帯筋による断面の分割数で外周筋のみの場合は1、中子筋1本の場合は2とする。

ここで、注意すべき点は軸歪を軸変形に変換する時に乗じる破壊領域の長さである。この評価式は180 mm断面の試験体の実験データから導き出した式で、その際に破壊領域長さとして断面せい(180 mm)用いている。本研究では寸法が変化した試験体でも破壊領域は同じ(図5)と考えているのでどの寸法の試験体でも180 mmを乗じている。

図7は既往の軸歪評価式から軸変形を求めて比較をしたものである。(a)では精度と寸法、(b)では滑り開始時軸変形実験値と計算値の比較をしている。軸変形に関しては寸法の影響が見られないが、中子筋2本(■)の計算値が過大に評価されている。

図8は式(3)に含まれる分割数に着目して検討を行った図で、(a)は分割数を考

慮したもの、(b)は分割数を考慮しないものである。中子筋1本の試験体(×)は(a)のほうが縦軸の値が1に近く、中子筋2本の試験体(■)では(b)の方が精度は良い。この二つの図を比較しただけではこれといった関係がみられない。そこで、2009年の試験体に限っては中子筋を有する試験体の方が軸変形は大きくなる結果が得られていることから中子筋の係数を考慮し、他のパラメータで検討を行った。最大軸力点の軸変形がコンクリート強度による影響を受けやすかったことは図4(c)からもわかる。低強度コンクリート程、軸変形が大きくなる傾向がある。この関係が滑り開始点においてもあると考えた。

## 6. 評価式の提案

### 6.1 滑り開始時摩擦軸力評価式

寸法効果に関する補正係数として荒川式の $ku$ に着目した。この $ku$ は断面が大きくなるほど強度を低減する。補正係数 $ku$ を式(4)に示す。

$$ku = -0.012 \cdot D[cm] + 1.19 \quad (4)$$

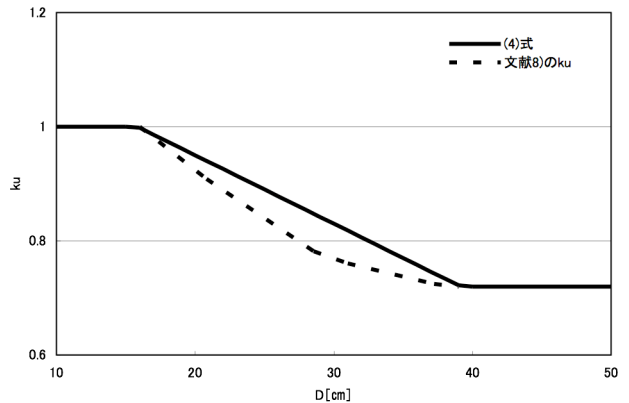


図9  $ku$  の概念

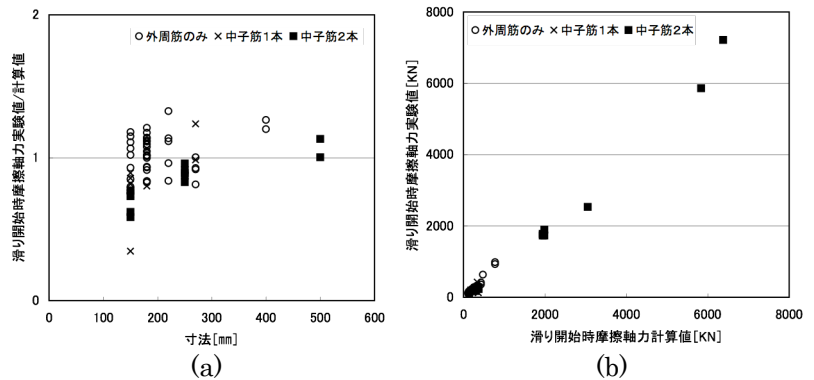


図10  $ku$  を用いた計算値との比較

ただし ( $1 \geq k_u \geq 0.72$ )  $k_u$  が 1 以上の場合は 1 に、0.72 以下の場合は 0.72 とする。D の単位は cm である。

図 9 は文献 8) における  $k_u$  と式 (4) をあわせて示す。式 (4) は文献 8) の  $k_u$  を簡略化したものである。

寸法の影響を考慮した式を以下に示す。

$$P_{fr} = k_u \cdot P_{fro} \cdot \beta \cdot R_d \quad (5)$$

式 (5) は式 (2) に寸法による補正係数  $k_u$  式 (4) を乗じたものである。

図 10 は式 (5) による計算値と実験値、及び寸法を比較したもので (a) をみると寸法の大きい試験体で安全側の評価ができています。また、中子筋を有する試験体でも概ね評価ができています。

## 6.2 滑り開始時軸歪評価式

図 11 縦軸に精度、横軸にコンクリート強度とったもので、図の曲線はデータを近似したものである。この曲線がコンクリート強度による低減係数となる。低減係数を式 (6) に示す。  $\sigma_o = 21 \text{ N/mm}^2$ 、 $\sigma_B$  の単位は  $\text{N/mm}^2$  とする。

$$\alpha = \frac{\sigma_o}{\sigma_B} \quad (6)$$

本研究で提案する軸変形評価式を式 (7) に示す。

$$\delta_{fr} = \alpha \cdot \varepsilon_{fr} \cdot 180 \text{ [mm]} \quad (7)$$

$\varepsilon_{fr}$  は式 (3)、 $\alpha$  は式 (6) を用いる。図 12 は式 (7) の計算値と実験値、及びコンクリート強度を比較した図である。図 12 (a) をみると低強度コンクリートから高強度コンクリートすべて範囲で評価ができています。また、中子筋を有する試験体も概ね評価ができています。

## 7. まとめ

1) 滑り開始時摩擦軸力は荒川式の断面寸法に関する係数  $k_u$  を用いる事で断面の大きい試験体でも安全側の評価が可能になった。

2) 滑り開始時軸変形は既往の評価式を軸変形にする際に 180 mm を乗じ、コンクリート強度による低減係数を用

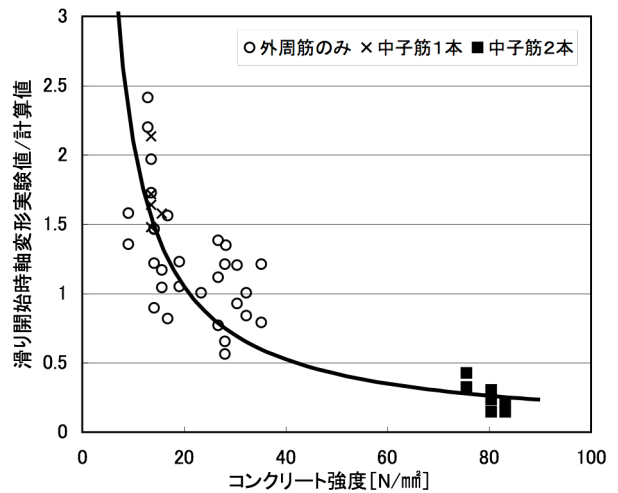


図 11 コンクリート強度による低減係数

いる事で評価した。

3) 既往の評価式における中子筋の効果を補正する係数は滑り開始時摩擦軸力計算値、滑り開始時軸歪計算値ともに概ね妥当だった。

### 《参考文献》

- 1) 加藤大介: 角形補筋で拘束されたコンクリート柱の軸方向応力度—歪度関係に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 422 号、1991 年 4 月
- 2) 加藤大介他: 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集、第 610 号、2006 年 12 月
- 3) 平成 4 年度 NewRC 研究開発概要報告書 C-7) コンファインドコンクリートの力学特性に関する資料のとりまとめ、国土開発技術センター、1993
- 4) 堀栄真他: 横補強された高強度鉄筋コンクリート造柱の中心軸圧縮性状に及ぼす寸法効果 (その 1—その 2)、日本建築学会大会学術論文梗概集、pp365-368、1994 年 9 月
- 5) 石川裕次他: 帯筋端部のフック形状を変数とした柱の中心圧縮試験、日本建築学会大会学術論文梗概集、pp43-44、1996 年 9 月
- 6) 荒木秀夫他: 低強度コンクリートを用いた RC 柱の中心圧縮性状、コンクリート工学年次論文集、vol30、No3、2008
- 7) 阿部博之他: 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、vol29、No3、pp103-108、2007
- 8) 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、1999、日本建築学会

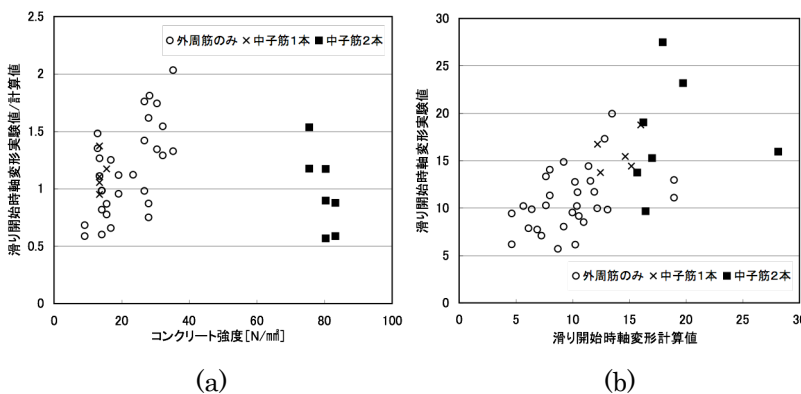


図 12  $\sigma_B$  による低減係数を用いた計算値の比較