

RC造柱の軸力負担能力に及ぼす試験体寸法の影響

F08D063C
指導教員

松野葵
加藤大介教授

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判明す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、評価式の妥当性を検討してきた²⁾³⁾。

本研究では、軸力負担能力喪失部材角の評価式の寸法による影響を考察して、評価式の妥当性について検討することを目的としている。本研究は、配筋詳細の悪い古い建物を念頭においているため、低強度コンクリートを用いており、せん断破壊が先行するような柱に適用可能である。

3.実験概要

3.1.試験体パラメータ

本章では本研究で用いた実験の概要を説明する。表1に試験体を示す。また、表2には、それらの実験結果を示す。

次に、各シリーズの概要を示す(表1参照)。H、Pシリーズは基本的な配筋詳細の影響を検討するため、Hシリーズは

表1 試験体諸元と中心軸圧縮実験の結果

試験体名	試験体諸元							最大軸強度 [kN]	滑り開始時摩擦軸力実験値: Pfr[kN]	初期摩擦軸力計算値: Pfro[kN]	配筋詳細に関する補正係数: Rd	滑り開始時摩擦軸力計算値: Pfr,cal [kN]										
	断面 [mm ²]	高さ [mm]	主筋	主筋降伏強度: σ_y [N/mm ²]	帯筋 (フック形状)	帯筋間隔: S [mm]	帯筋降伏強度: σ_{wy} [N/mm ²]						コンクリート強度: F_c [N/mm ²]									
P-0*1	180 × 180	360	4-D10	383	2-D6(90deg 6d)	70	316	35.2	1098	230	320	0.9	176									
H-0*1				2-D6(135deg 8d)	1088		219	176														
W-0*1				377	2-D6(溶接閉鎖)		343	23.4	805	257			318	194								
S-0*1				2-D6(90deg 4d)	296		911	199	175													
W52-0*1				383	2-D6(溶接閉鎖)		52	354	28.2	916			348	425	1	302						
W90-0*1				90			834		229	295			147									
D13W-0*1			4-D13	360	335	2-D6(90deg 4d)	70	335	26.7	316	920	332	412	0.8	252							
D13S-0*1											894	221			201							
φ4W-0*1											502	2-D6(溶接閉鎖)			316	19.1	764	160	258	1	158	
WH-0*1											4-D10	371					2-D6(90deg 4d)	1002	277		199	
SH-0*1												2-D6(溶接閉鎖)					1018	202	325		0.8	159
WL-0*1												2-D6(溶接閉鎖)					607	253	1		199	
SL-0*1			D6(90deg 4d)	618	247	0.8	159															
H52LL-0*2			180 × 180	360	4-D10	312	2-D4(135deg 6d)	420	420	16.8	589	189	270	0.9	173							
H90LL-0*2	90	572					120				197	89										
S52L-0*2	52	646					131				270	0.8			154							
I52L-0*2	8-D6	333					2-D4(135deg 6d)				590	197			342	219						
V78LL-0*3	270 × 270	540	4-D16	375	2-D6(135deg 6d)	432	412	14.1	1224	307	616	0.9	394									
V135LL-0*3					135				1263	266			481	217								
L52LL-0*3					4-D10				364	2-D4(135deg 6d)			52	625	182	280	179					
L90LL-0*3													90	613	140	206	92					
H67-0	180 × 180	360	4-D10	330	2-D4(135deg 6d)	67	412	13.4	568	150	211	0.9	155									
HI100-0			8-D6	305	3-D4(135deg 6d)	100			592	147			194	127								
HI67-0						67			622	201			252	185								
V100-0						100			1248	273			490	360								
VI150-0	270 × 270	540	4-D16	341	2-D6(135deg 6d)	305	305	13.4	1203	265	408	0.9	265									
VI100-0					3-D6(135deg 6d)				150	1170			422	517	379							

*1: 文献 1)による試験体

*2: 文献 2)による試験体

*3: 文献 3)による試験体

一般的な配筋詳細の例として135度フック(余長6d)、Pシリーズは悪い配筋詳細の例として90度フック(余長8d)を有するシリーズである。そして、W、Sシリーズは配筋詳細の影響を極端にしたものとなる。Wシリーズは良好な配筋詳細の例として溶接帯筋を有し、Sシリーズは、非常に悪い配筋

筋詳細の例として90度フック(余長4d)としたものになる。

W52、W90シリーズは、帯筋間隔52mmと90mmに変化させ、影響を見たものとなる。D13S、D13W、φ4Wの3シリーズは、主筋量の影響をみるシリーズとなる。

WH、SH、WL、SLの4シリーズは、コンクリート強度の影響を見たシリーズとなる。

H52・90LL、S52・I52Lの4シリーズは、帯筋をより実寸の縮尺に合わせるようにD4を使い、帯筋間隔やフック形状や中子筋の有無など、配筋における影響を見たものとなる。

V78・135、L52・90LL、W104・W180の6シリーズは評価式に対する寸法の影響を見るため、断面や試験体高さを変えて評価式と対応する試験体との関係性を見たものになる。

H67・HI100・HI67・V100・VI150・VI100・W133・WI200の8シリーズは断面や試験体高さを変えて評価式と対応する試験体との関係性及び、中子筋の影響をみたものとなる。

図1に配筋の詳細図を示す。ただし、一例として自らが関わった2007年の試験体のみを掲載する。

表2 試験体諸元と曲げせん断実験の結果

試験体名	試験体諸元		実験結果			
	対応する 中心軸圧縮試験体	作用軸力 [kN]	最大水平強度 [kN]	軸力負担能力喪失の水平力 [kN]	軸力負担能力喪失までの最大値	
					水平変形 [mm]	部材角 [rad]
P-3*1	P-0	400	149	69.8	7.2	0.020
P-4*1		300	134	44.1	9.0	0.025
H-3*1	H-0	400	137	112.9	6.3	0.018
H-4*1		200	110	67.4	7.3	0.020
W-3*1	W-0	300	111	59.5	9.0	0.025
W-4*1		500	114	83.1	5.4	0.015
S-3*1	S-0	300	117	41.7	9.0	0.025
W52-1*1	W52-0	500	155	74.0	6.3	0.018
W52-2*1		350	137	44.6	9.0	0.025
W90-1*1	W90-0	350	120	104.6	4.5	0.013
W90-2*1		200	109	102.2	6.3	0.018
D13W-1*1	D13W-0	300	122	25.2	10.8	0.030
D13W-2*1		500	130	78.9	5.4	0.015
D13W-3*1		500	116	47.8	5.4	0.015
D13S-1*1	D13S-0	300	110	12.7	7.2	0.020
D13S-2*1		500	126	99.2	4.6	0.013
φ4W-1*1	φ4W-0	300	111	52.4	10.8	0.030
φ4W-2*1		500	108	83.5	3.6	0.010
WH-1*1	WH-0	300	120	103.4	7.2	0.020
WH-2*1		500	134	113.4	5.4	0.015
SH-1*1	SH-0	300	127	90.7	7.2	0.020
SH-2*1		500	139	127.9	5.4	0.015
WL-1*1	WL-0	150	84.5	20.6	14.4	0.040
WL-2*1		300	86.7	15.4	7.2	0.020
SL-1*1	SL-0	150	82.7	12.0	9.0	0.025
SL-2*1		300	87.2	19.1	7.2	0.020
H52LL-1*2	H52LL-0	300	82.1	16.7	5.4	0.015
H52LL-2*2		150	76.4	13.7	10.8	0.030
H90LL-1*2	H90LL-0	300	70.3	52.4	5.1	0.014
H90LL-2*2		150	73.9	17.6	10.8	0.030
S52L-1*2	S52L-0	150	79.5	11.0	10.8	0.030
I52L-1*2	I52L-0	300	101	38.5	9.0	0.025
I52L-2*2		450	73.8	32.8	3.6	0.010
V78LL-1*3	V78LL-0	675	176	45.8	5.8*	0.016*
V135LL-1*3	V135LL-0	675	166	72.5	3.6*	0.010*
V135LL-2*3		337.5	153	23.0	4.7*	0.013*
L52LL-1*3	L52LL-0	300	71.5	19.1	5.9	0.016
L90LL-1*3	L90LL-0	300	74.0	27.7	5.2	0.014
L90LL-2*3		150	62.2	7.60	6.6	0.018
W104-1*4	-	1266	264	107	7.4	0.010
W180-2*4	-	633	232	45.3	7.4	0.010
H67-1	H67-0	225	90.7	11.0	7.2	0.020
HI100-1	HI100-0	-	85.0	13.5	9.1	0.025
V100-1	V100-0	506.5	170	9.1	10.8	0.020
VI150-1	VI150-0	-	174	9.1	10.8	0.020
W133-1	-	949.5	303	35.5	14.8	0.020
WI200-1	-	-	336	9.1	11.0	0.015

*1:文献1)による試験体 *2:文献2)による試験体
*3:文献3)による試験体 *4:文献4)による試験体

*:V78LL・V135LLの水平変形は曲げ変形成分を除き、せん断変形のみとしたものを用いた。

3.2.加力装置

図2に加力装置を示す。試験体は上下部分を三角形の基

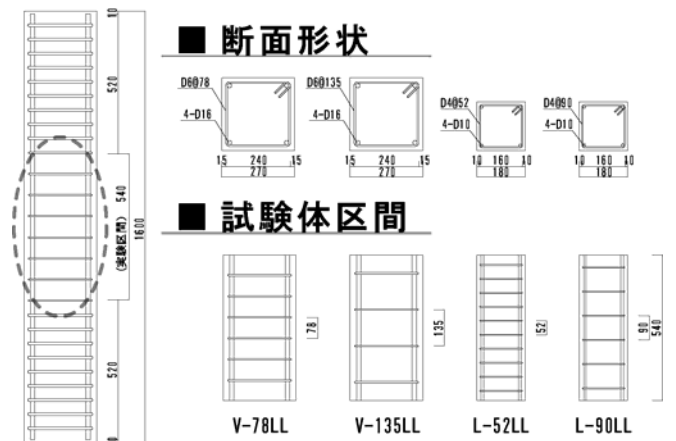


図1 配筋詳細図(2007年)

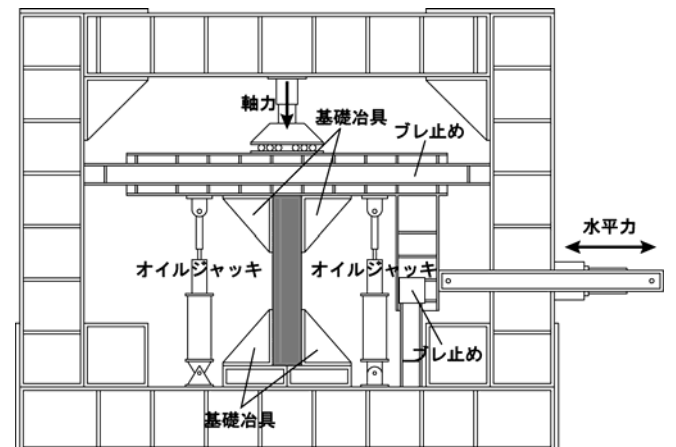


図2 加力装置図

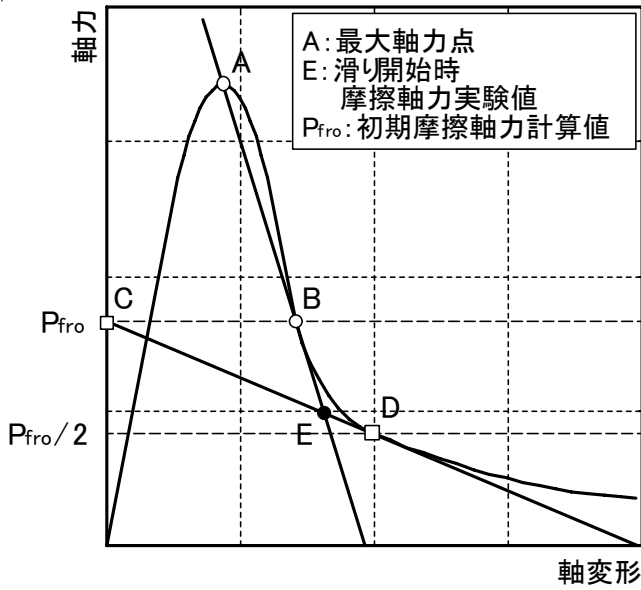


図3 中心軸圧縮実験結果のモデル化

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。荷重は、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荷重を行い、水平ジャッキにより水平方向荷重を行った。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、曲げせん断実験では、試験体の上下で逆対称変形になるようにした。

3.3. 荷重方法

曲げせん断加力実験の荷重は、一定軸力下で繰り返し水平荷重を行った。水平荷重は、 $\pm 0.5/100\text{rad}$, $\pm 1/100\text{rad}$, $\pm 1.5/100\text{rad}$, $\pm 2/100\text{rad}$... 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。

4. 軸力負担能力喪失部材角の評価法

4.1 中心軸圧縮実験における負勾配以降のモデル化

軸力負担能力喪失部材角の評価法には中心軸圧縮試験体の負勾配の挙動が大きく影響する。具体的には、部材角の評価の際に、滑り開始時摩擦軸力実験値(P_{fr})を使用している。そこで、まず中心軸圧縮実験の評価法、特に、滑り開始時摩擦軸力実験値(P_{fr})について説明する。

図3を見てもらうと、初期摩擦軸力計算値(P_{fro})を基準に、軸力-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事が分かる。すなわち、最大軸力点(点A)と軸力が P_{fro} になる時の点Bを結んだ線と、 P_{fro} の点(点C)と軸力が P_{fro} の半分になる時の点Dを結んだ線である。この交点Eを滑り開始時摩擦軸力実験値(P_{fr})とし、部材角・軸歪の評価に使用している。ここで、初期摩擦軸力計算値(P_{fro})とは、鉄筋の劣化のない初期状態での摩擦軸抵抗力を表し、帯筋の抵抗力と主筋の抵抗力を表したものとなり、式(1)で求める事ができる。

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

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。

4.2 軸力負担能力喪失部材角の評価法

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)~式(6)に軸力負担能力喪失部材角の評価式を示す。

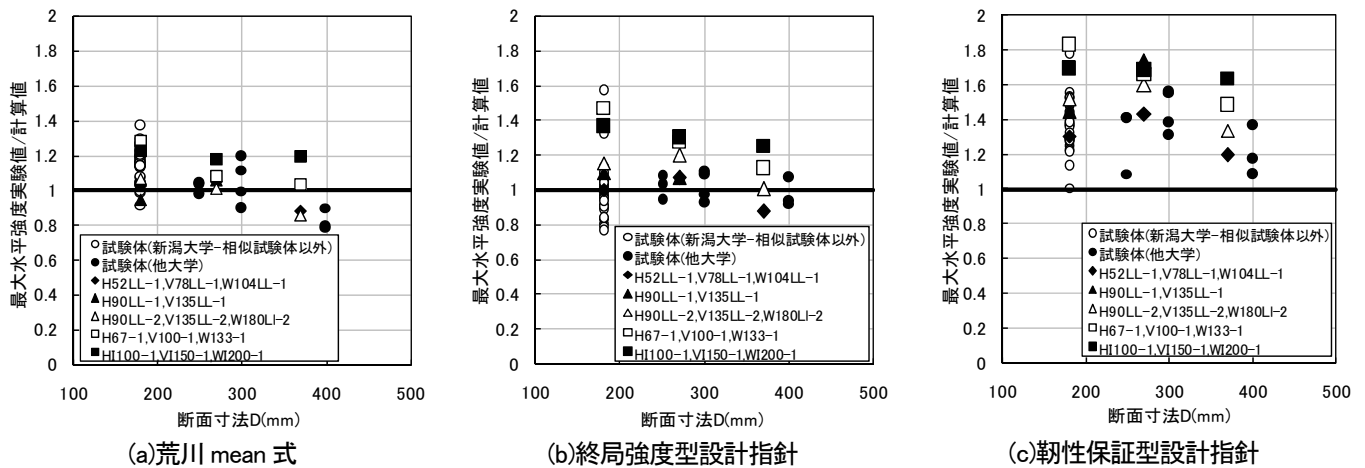


図4 最大水平強度実験値/計算値と断面寸法の関係

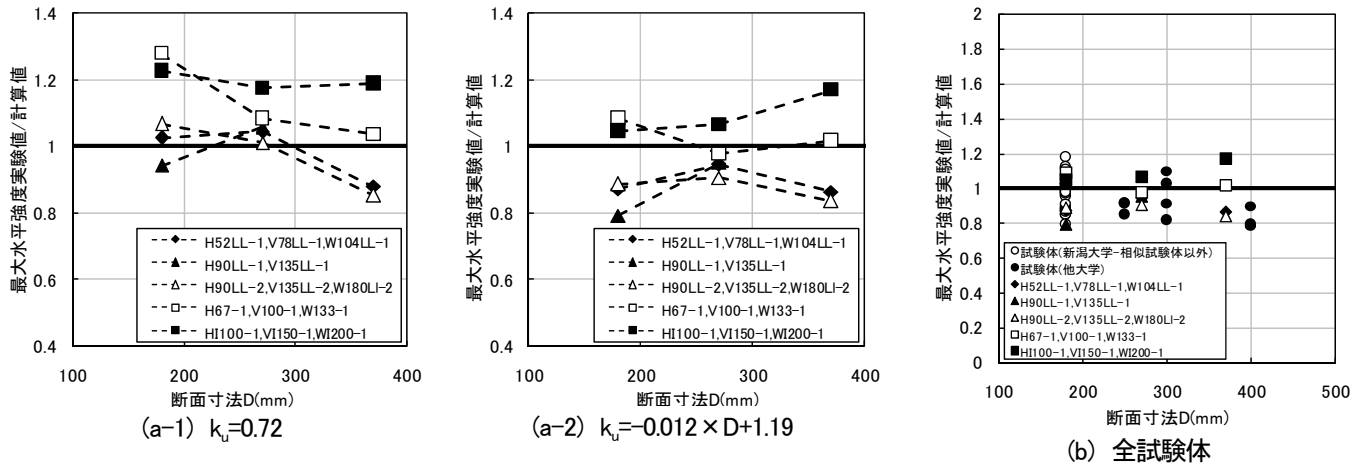


図5 最大水平強度実験値/計算値(荒川 mean 式)と断面寸法

$$R = 0.029/\eta \quad (2) \quad \eta = e N/P_{fr,cal} \quad (3)$$

$$e N = N + Q \cdot \frac{\sin^2 \theta - \cos^2 \theta - 2\mu \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{\sin \theta \cdot \cos \theta - \mu \cdot \cos^2 \theta} \quad (4)$$

$$P_{fr,cal} = P_{fro} \times \beta \times R_d \quad (5) \quad \beta = 1 - 0.5 \frac{S}{D} \quad (6)$$

この式は軸力にせん断力の影響を取り入れた等価軸力 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、作用軸力に作用せん断力のひび割れ面を滑ろうとする力を加え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、せん断強度計算値としてもよい。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。

5. 寸法の影響についての考察

5.1.各せん断強度計算値に対する寸法の影響

本節では、せん断強度に及ぼす試験体寸法の影響を見ておく。図4(a)(b)(c)は柱のせん断強度計算値に対する実験値の比を縦軸にとり、横軸に断面寸法 D をとったものである。ここで、相似関係にある試験体は同じ図形であらわしている。また、文献4)では他大学における本研究の類似実験の試験体を加えて寸法の影響の検討を行っており、本研究でも文献4)で用いた他大学の試験体を加えた上で寸法の影響の検討を行う。

図4(a)は現在設計で使われている実用的なせん断強度式として以下に示す、荒川mean式に軸力の効果を加えた式(7)を用いた場合である。

$$Q_{su} = {}_B Q_{su} + 0.1\sigma_0 \cdot b \cdot j \quad (7)$$

式(7)の ${}_B Q_{su}$ は後述する式(8)において、 $k_u=0.72$ 、 $k_p=0.82p_t^{0.23}$ としたものであり、また σ_0 は平均軸応力度($N/(b \cdot D)$)であり、 $0.4F_c$ 以下としている。図4(a)をみると寸法が大きくなるに従って右下がりの傾向が確認できる。

図4(b)は日本建築学会の終局強度型設計指針による柱のせん断強度計算値を用いた場合である。これを見ると終局強度型設計指針による柱のせん断強度計算式は寸法が大きくなるにしたがって右下がりの傾向があることがわかる。

図4(c)は日本建築学会の靱性保証型設計指針による柱のせん断強度計算値を用いた場合である。靱性保証型設計指針による柱のせん断強度式では寸法にかかわらず、せん断強度の下限値を評価できていることがわかる。しかし、相似試験体同士に注目すると右下がりの傾向がみられ、寸法が大きくなるに従って、計算値が大きく評価されていることがわかる。

5.2.寸法を考慮したせん断強度式の検討

本節では寸法を考慮した式の検討を行う。前節では、荒川mean式を用いて検討を行った結果、寸法の影響がみられたが、以下に示すように本来の荒川式には寸法の影響を考慮した係数 k_u が入っているが、実用上 $d > 400\text{mm}$ を想定して $k_u=0.72$ としているために影響が見られた可能性がある。そこで、式に k_u を取り入れた上でせん断強度計算値を算出し改めて断面寸法ごとの比較を行ったものを、図5に示す。

$${}_B Q_{su} = \left\{ \frac{0.115k_u k_p (18 + \sigma_B)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85\sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} \cdot b \cdot j \quad (8)$$

k_u : 断面寸法による補正係数

k_p : 引張鉄筋比 p_t (%)による補正係数

ここで、図5(a-1)(a-2)はそれぞれ、式(8)において k_u として寸法を考慮していないものと、考慮したものでせん断

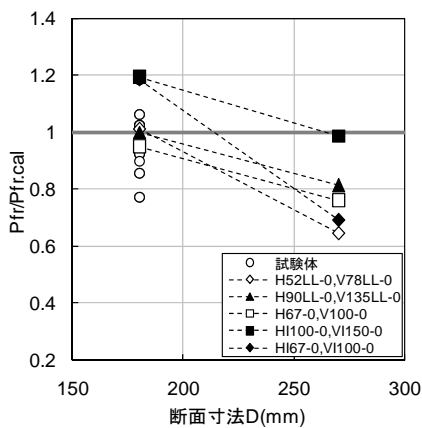


図 6 $P_{fr}/P_{fr.cal}$ と断面寸法Dの関係

強度を求めたものであり、相似試験体同士を同形の点でプロットしている。図 5(b)は検討を行った全試験体について寸法を考慮した計算値に対する実験値の比をとり、寸法の影響をみたものである。

図 5(a-1) (a-2) 及び、図 4(a), 図 5(b)を比較すると、寸法による影響が見られなくなっており、 k_u を取り入れたせん断強度式は最大水平強度を精度よく算定できるといえる。

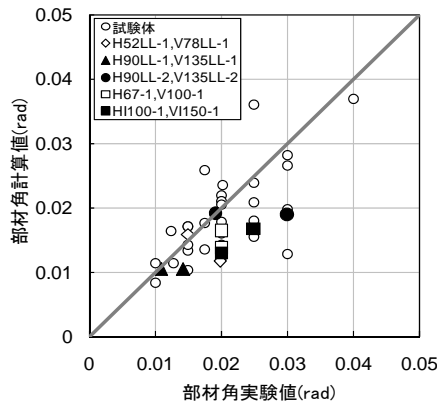
5.3.部材角評価式における寸法の影響

図 6 は縦軸に中心軸圧縮実験における滑り開始摩擦軸力実験値 (P_{fr}) を式 (5) による滑り開始摩擦軸力計算値 ($P_{fr.cal}$) で除したものの、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。図 6 を見ると、試験体の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明瞭な傾向が見て取れる。すなわち、式 (4) 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。

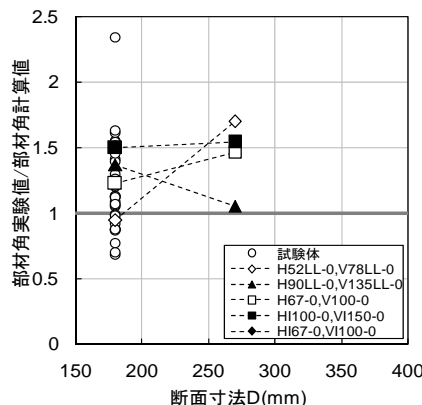
そこで、部材角の評価法、つまり式 (2) に関して寸法の影響の有無を確認する。式 (2) は、滑り開始摩擦軸力実験値 (P_{fr}) を軸力負担能力喪失時の部材角に関連づけた以下の式を基にして提案されている¹⁾。ここで、式 (2) (3) と式 (9) (10) の違いは等価軸力比 η の計算の際の滑り開始摩擦軸力に前者は計算値、後者は実験値を用いている点にある。

$$R = 0.029/\eta \quad (9) \quad \eta = \frac{N}{P_{fr}} \quad (10)$$

そこで、式 (9) (10) を用いて、寸法の影響の有無を確認し

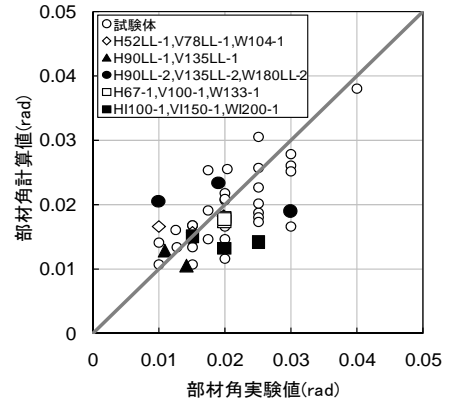


(a)部材角実験値と計算値の比較

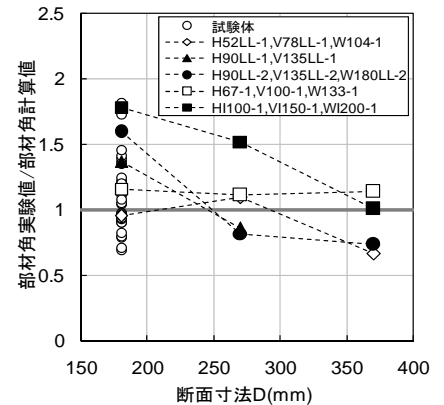


(b)部材角実験値/計算値と断面寸法の関係

図 7 式(9)(10)による検討



(a)部材角実験値と計算値の比較



(b)部材角実験値/計算値と断面寸法の関係

図 8 式(2)(3)による検討

てみる。なお、滑り開始摩擦軸力実験値 (P_{fr}) は中心軸圧縮実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実験を行うことのできた試験体によってのみ行うこととする。図 7(a) は軸力負担能力喪失時の部材角について実験値と式 (9) (10) によって求めた計算値の比較を行ったものである。また、縦軸にそれぞれの実験値と計算値の比をとり、横軸を断面寸法としたものを図 7(b) として図示した。相似関係にある試験体同士は同じ図形の点で表している。図を見ると、計算値に式 (9) (10) を用いたものでは、明確な寸法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 (9) (10) の考え方自体には寸法の影響がないということになる。

一方、図 8(a) (b) は図 7(a) (b) と同様の図であるが、式 (9) (10) の代わりに式 (2) (3) を用いたものである。なお、同図には曲げせん断実験のみを行った W シリーズ試験体のデータもプロットしてある。図 8(b) をみると全体として右下

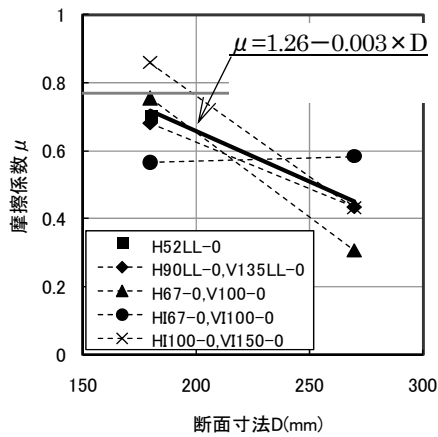


図9 摩擦係数 μ -断面寸法

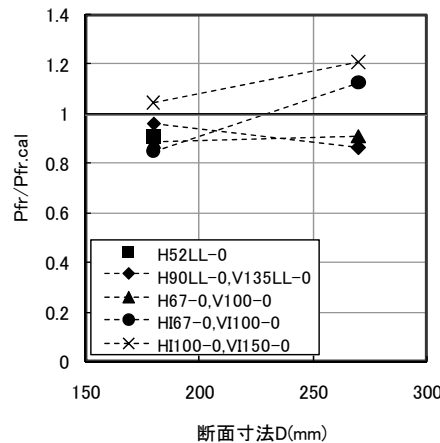


図10 $P_{fr}/P_{fr.cal}$ -断面寸法

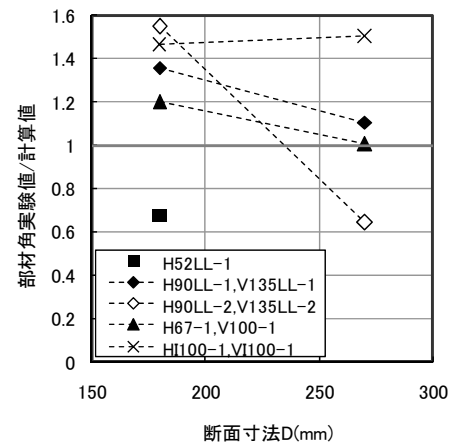


図11 部材角実験値/計算値-断面寸法

がりの傾向、すなわち、寸法の影響がみてとれる。以上の結果をまとめると以下ようになる。曲げせん断加力実験における軸力負担能力喪失時の部材角の実験値には寸法の影響はあり(図8(b))、その効果を式(2)では評価できない。しかしながら、式(9)(10)では寸法に影響なく評価可能である(図7(b))。すなわち、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効果を考慮す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。また、実際に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は明瞭な寸法効果があった(図8(b))。

5.4. 摩擦係数 μ についての検討

前節において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は明瞭な寸法の影響があることがわかった(図8(b)参照)。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式を寸法効果を考慮する評価式にするための検討を行う。ここでは、式(1)の中の摩擦係数 μ に着目した。滑り開始時摩擦軸力を精度よく評価できる摩擦係数 μ を求め、横軸に断面寸法をとって図示したものを図9に示す。また、新たに求めた摩擦係数 μ を用いた滑り開始時摩擦軸力計算値に対する実験値の比と寸法の間を関係を図10に示す。これを見ると、滑り開始時摩擦軸力を精度よく評価する摩擦係数 μ は寸法が大きくなるにしたがって小さくなっていることがわかる。

図11は部材角実験値と、新たに求めた摩擦係数 μ を用いた式(2)による部材角計算値の比を縦軸にとり、横軸に寸法をとったものである。これをみると、明確な寸法の影響は見られず、摩擦係数 μ を精度よく評価することで前節から述べてきたような部材角評価式における寸法の影響は考慮できているといえる。

以上の結果から本研究では寸法を考慮した摩擦係数 μ の算定式として以下の式(11)を提案する。

$$\mu = 1.26 - 0.003 \times D \quad (11)$$

6. まとめ

- (1) せん断強度式における寸法の影響をみた結果、程度の差はあるが寸法の影響がみられた。
- (2) 荒川 mean 式に寸法を考慮した係数 ku をとりいれることでせん断強度を精度よく評価できる。
- (3) 中心軸圧縮試験の滑り開始時摩擦軸力に関して寸法の影響をみたところ、実験値を計算値で評価する過程で寸法の影響が見られた。
- (4) 曲げせん断加力実験における軸力負担能力喪失時の部材角の実験値には寸法の影響はあり、その効果を式(2)(3)では評価できない。しかしながら、式(9)(10)では寸法に影響なく評価可能である。すなわち、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効果を考慮す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。
- (5) 摩擦係数 μ について検討を行った結果、滑り開始時摩擦軸力を精度よく評価する摩擦係数 μ と寸法には相関があり、適当な摩擦係数 μ を用いることで、評価式における寸法の影響は見られなくなった。

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) 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, コンクリート工学年次論文 Vol. 29, No. 3 (2007) pp. 79 -84
- 3) 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 Vol. 30, No. 3 (2008) pp. 163-168
- 4) 伊井宏樹, 飯田大貴, 松野葵, 加藤大介: RC 造柱のせん断破壊後の軸力負担能力に関する研究(寸法を変化させた実験結果), 日本

