

論文 腰壁・たれ壁が中心接合されたRC柱のせん断耐力の低下率と評価

當房和博^{*1}・塩屋晋一^{*2}・廣實亮太^{*3}・吉留潤平^{*4}

要旨：腰壁・たれ壁が中心接合されたRC柱のせん断耐力の低下率を明らかにする目的で、既往の腰壁・たれ壁付柱試験体に対して、それらの開口内法高さの柱試験体の追加実験を行い、柱のせん断耐力の低下率を実験により明らかにした。また、既に提案している腰壁・たれ壁付柱のせん断耐力の低下率の評価モデルを修正した。その結果、修正したモデルで腰壁・たれ壁が中心接合されたRC柱のせん断耐力の低下率を概ね評価できることを確認した。

キーワード：腰壁，たれ壁，せん断耐力，柱，中心接合，鉄筋コンクリート

1. はじめに

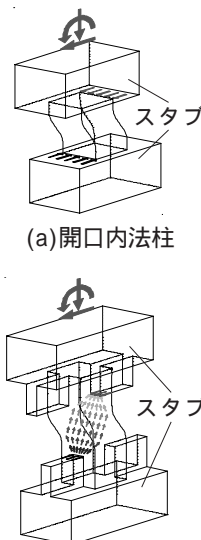
本研究は、腰壁・たれ壁が中心接合されたRC柱のせん断耐力⁸⁾に関するものである。既往の腰壁・たれ壁付柱試験体に対して、それらの開口内法高さを柱長さとする柱(以後、開口内法柱)の追加加力実験を行い、腰壁・たれ壁付柱のせん断耐力が開口内法柱のせん断耐力に対して低下する比率を明らかにした。そして、今回、明らかになったせん断耐力の低下率の実験値を基に、筆者ら⁹⁾が既に提案しているせん断耐力の低下率の評価モデルを修正した。

本論文は、それらの結果を述べる。

2. 開口内法柱のせん断耐力に対する低下率

既往のせん断耐力式は、図 - 1 (a)に示すように柱の上下端がスタブに支持された柱の実験データに基づいて構築されている。この場合、柱頭・柱脚での加力方向のせん断応力は柱幅全体に分布し、開口内法区間でも柱幅全体で伝達する。これに対して腰壁・たれ壁付柱では、図 - 1 (b)に示すように壁端の断面で、壁厚の範囲から柱幅に対して局所的に伝達し、開口内法区間のせん断破壊する領域でせん断応力の集中が生じる。これにより腰壁・たれ壁付柱のせん断耐力は、開口内法柱のせん断耐力に対して低下する。

表 - 1 対象試験体と試験体の構造因子



No.	研究者	試験体名称	文献番号	対象にする既往の腰壁・たれ壁付柱試験体							本実験の開口内法柱試験体									
				D×B	ho	h	tw	hwb	hwt	M/QD	Fc	σwy	σo	柱引張主筋	pw (%)	グループ記号	Fc	σwy	σo	柱引張主筋
				(cm)							(N/mm ²)			(N/mm ²)						
1		No.1-10	1)								22.8	224		3-D10						
2		No.1-5-1	2)			100		40			22.1			3-D13	0.13	T1	22.2		3-D13	
3		No.1-5-2	2)	20×20	20		5			0.50	19.8	185	3.92							
4		No.2-5	2)			120		60			25.3									
5		No7M	3)			100		40			26.6	265		4-D10	0.31					
6		KT20-3.0	4)				3				25.6									
7		KT20-4.5	4)	15×15	20	60	4.5	20	20	0.67	25.6	130	0.00	2-D10	0.28	T2	27.4		2-D10	
8		KT20-6.0	4)				6				27.4									
9	武田	No.1-9	1)					30	30		21.7	224		3-D10						
10		No.1-4-1	2)			100				1.00	21.5									
11		No.1-4-2	2)	20×20	40		5	40	20		20.9	185		3-D13	0.13	T3	22.2		3-D13	
12		No.2-4	2)			120		40			25.3									
13		No.1	5)			100		30	30		14.7	380	3.92	3-D10	0.33					
14		No.1-8	1)								27.0	224		3-D10						
15		No.1-3-1	2)			100		20			21.5									
16		No.1-3-2	2)	20×20	60		5	20	20	1.50	20.9	185		3-D13	0.13	T4	22.2		3-D16 (3-D13*)	
17		No.2-3	2)			120		40			19.8									
18	広沢	0710CW-0904CW-	6)	24×24	36	100	5	40	24	0.75	26.9	285	2.94	4-D10	0.10	H	27.4	2.94	4-D10	
19			6)								0.26									
20	塩屋	No.6	7)	11×20	50	110	6	30	30	2.27	24.4	526	2.49	4-D10	0.06	S	24.4	526	2.49	4-D10

注) D: 柱せい, B: 柱幅, ho: 開口内法高さ, h: 柱長さ, tw: 壁厚, hwb: 腰壁高さ, hwt: たれ壁高さ, M/QD: せん断スパン比, Fc: コンクリート圧縮強度, wy: 帯筋の降伏強度, o: 柱軸力の軸心力度, pw: 帯筋比, (3-D13*): T4のせん断耐力の補正の計算で用いた鉄筋量

図 - 1 応力の伝達

■: 本実験の開口内法柱試験体で用いた材料強度と諸量に対して±10%以上の差がある材料強度と諸量

*1 鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻 (正会員)
 *2 鹿児島大学工学部建築学科助教授 工博 (正会員)
 *3 鹿児島大学工学部建築学科卒業
 *4 戸田建設株式会社 (元鹿児島大学 大学院理工学研究科 大学院生)

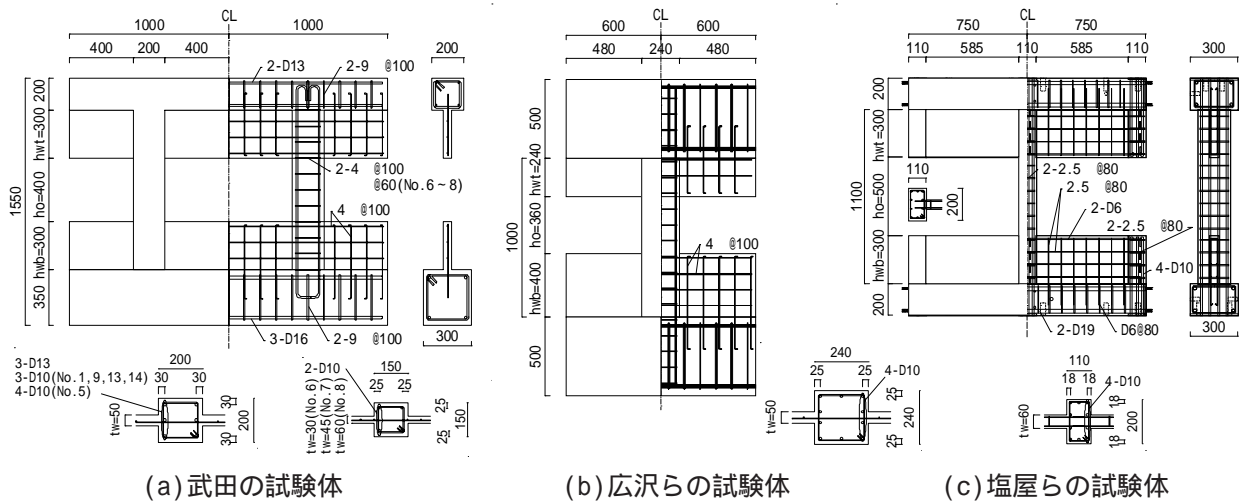


図 - 2 対象試験体の形状と寸法

腰壁・たれ壁付柱のせん断耐力の評価に、既往のせん断耐力式を準用する場合、開口内法柱のせん断耐力に対する低下率を評価し、その低下率を開口内法柱のせん断耐力の計算値に乘じて評価するのが適切と考えられる。

3. 対象にする腰壁・たれ壁付柱試験体

表 - 1 に対象にする試験体の一覧と諸構造因子を示す。以下に実験概要を記す。

(a) 武田の実験

図 - 2 (a) に試験体の基本形状を示す。左右の柱、基礎梁、上梁および腰壁・たれ壁からなる門形フレームである。繰り返しの水平加力が行われている。柱には水平加力により変動軸力が生じるが、その変動量は不明である。最大耐力がせん断破壊により決定した試験体を対象にした。柱断面は 20 × 20cm のシリーズと 15 × 15cm シリーズの 2 種類である。柱長さ h は 60cm, 100cm, 120cm の 3 種類である。主変数は、腰壁・壁梁の高さ $hw \cdot hwt$, 壁厚 tw , 柱主筋量である。

(b) 広沢らの実験

図 - 2 (b) に試験体の基本形状を示す。試験体は 2 体である。寸法は同じであるが柱のせん断補強筋間隔が異なる。柱軸力は一定である。水平力による繰り返しの曲げせん断加力が行われている。

(c) 塩屋らの実験

図 - 2 (c) に試験体の基本形状を示す。試験体数は 1 体である。扁平な長方形断面で、腰壁・たれ

壁部分は壁梁となっている。柱軸力は一定で、水平加力による繰り返しの曲げせん断加力が行われている。開口内法柱の加力実験は行われている。

4. 開口内法柱のせん断耐力の推定方法

対象にする全ての腰壁・たれ壁付柱試験体の、開口内法高さを柱長さとする開口内法柱のせん断耐力を、加力実験により把握することは実験の労力との関係で難しい。また、実験を行っても材料強度も完全に一致させることも難しい。ここでは、対象にする試験体を、表 - 1 の右側に示すように柱断面と柱の開口内法高さで分類して各グループの代表的な開口内法柱のせん断耐力を加力実験により把握し、材料強度や柱主筋量の違いによるせん断耐力の増減量は、既往のせん断耐力式で補正する。具体的な補正方法は 6.1 節で後述する。

5. 開口内法柱のせん断破壊実験

5.1 試験体

図 - 3 に試験体の基本形状を示す。柱の上下に薄肉の角形鋼管で拘束したスタブを設け、その間 h_0 を開口内法柱の試験区間とした。表 - 1 の右側に試験体の一覧と材料強度と構造因子の一覧を示す。試験体数は各グループで 1 体として計 5 体とした。ここではグループ名を試験体記号とする。

腰壁・たれ壁付柱試験体でせん断破壊していても、開口内法柱試験体ではせん断耐力が増加し

て曲げ破壊する可能性がある。表 - 1 に示しているように武田の試験体では、グループ内で柱主筋の配筋が2種類または3種類に分かれている。せん断破壊を先行させるために主筋量が多い配筋とした。T4では、3-D16とした。また、広沢のグループでも曲げ破壊する可能性があったので高強度鉄筋を使用した。

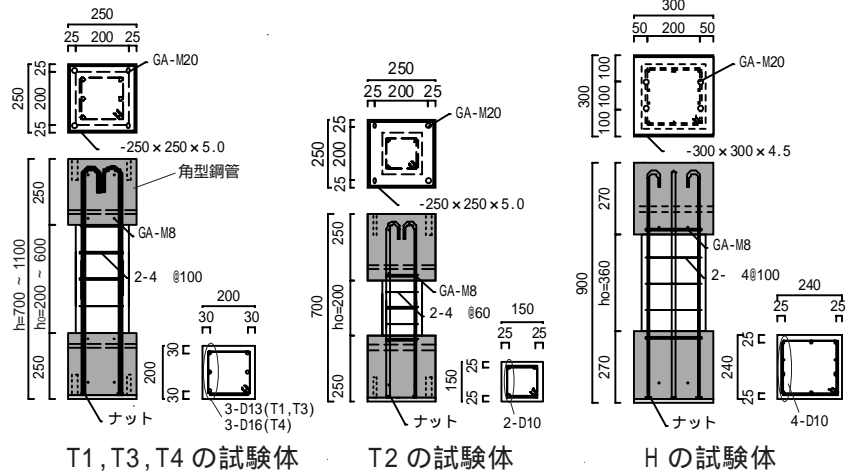


図 - 3 試験体の基本形状

表 - 2 に使用材料の力学的特性を示す。コンクリートは、各グループの代表的な圧縮強度を参考に2種類の配合とした。せん断補強筋4の降伏強度も一種類である。

表 - 2 使用材料の力学的特性

(応力の単位: N/mm ²)					
コンクリート	Type	$E_c (\times 10^4)$	$c\sigma_B$	$c\varepsilon_B (\%)$	試験体
		I	2.45	22.2	0.23
	II	2.75	27.4	0.20	T2, H
鉄筋	種類	$E_s (\times 10^5)$	$s\sigma_y$	$s\varepsilon_y (\%)$	試験体
	4φ	1.91	285	0.18	T1, T2, T3, T4, H
	D10	1.66	343	0.21	T2
	D13	1.60	370	0.27	T1, T3
	D16	1.69	370	0.22	T4
D10*	1.77	1020	0.78	H	

E_c : コンクリートのヤング係数, $c\sigma_B$: 圧縮強度, $c\varepsilon_B$: 圧縮強度時のひずみ度, E_s : 鉄筋のヤング係数, $s\sigma_y$: 降伏強度, $s\varepsilon_y$: 降伏強度時のひずみ度, *は高強度鉄筋

5.2 加力状況及び測定状況

図 - 4 に加力状況と測定状況を示す。二台の水平ジャッキにより上下のスタブに取り付けられた傾斜計の角度が等しくなるように制御しながら、柱頭・柱脚間の水平変形を漸増させる繰り返し加力を行った。軸力は、一定の加力とした。

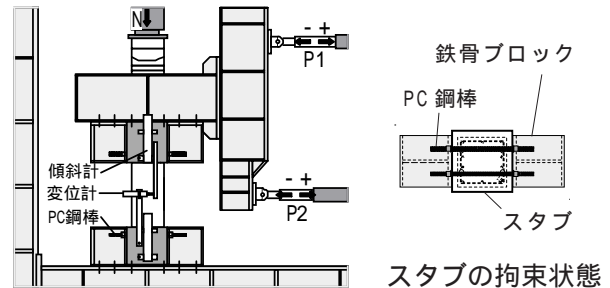


図 - 4 加力状況及び測定状況

水平変形の漸増は、変形履歴が各研究者のものと同じになるようにし、腰壁・たれ壁付柱試験体で生じる変形が、開口内法柱試験体で生じるものとした。

5.3 荷重 - 部材角関係と破壊経過

図 - 5 に各試験体の水平荷重 - 部材角関係を示す。また同図には最終破壊状況も示す。部材角は、腰壁・たれ壁付き柱の柱長さhで除したものである。また開口内法高さ h_o で除した補助目盛りを同図に示している。

T1試験体は曲げひび割れを生じることなく対角せん断ひび割れが生じ、その後、荷重が増加してせん断破壊した。その後の負加力時も、同様なせん断破壊が観察された。

最大荷重に達した。負加力時では対角せん断ひび割れが発生して、その後、せん断破壊した。

T2試験体の正加力時は、曲げひび割れ発生後、対角せん断ひび割れが発生すると同時に最大荷重でせん断破壊した。負加力時も同様であった。

T4試験体は曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、付着割裂ひび割れの順で発生して付着割裂破壊した。-2サイクルで付着割裂ひび割れが発生し、前サイクルの最大荷重を上回ることなく付着割裂破壊した。正加力時では+3サイクルで付着割裂ひび割れが発生して+2サイクルのピーク時の最大荷重を上回ることなく付着割裂破壊した。

T3試験体の正加力時は、曲げひび割れ発生後、対角せん断とは異なるせん断ひび割れが生じて

H試験体は+2サイクルで曲げひび割れが発生した後、対角せん断破壊した。

6. 腰壁・たれ壁付き柱のせん断耐力の低下率

6.1 せん断耐力の補正方法

腰壁・たれ壁付き柱の構造因子の諸量に基づき、せん断耐力式でその開口内法高さの柱のせん断耐力を算出する。これを $c1Q_{suo}$ とする。本実験の構造因子の諸量に基づき、開口内法柱試験体のせん断耐力を算出する。これを $c2Q_{suo}$ とする。前述の諸量の違いにより $c1Q_{suo}$ と $c2Q_{suo}$ には差が生じる。 $c2Q_{suo}$ に対する $c1Q_{suo}$ の比を、補正する比率 とする。この を本実験の実験値 eQ_{suo} に乗じて、既往の腰壁・たれ壁付き試験体の開口内法柱のせん断耐力を推定する。これを mQ_{suo} とし(1)式で表される。

$$mQ_{suo} = \gamma_{su} \cdot eQ_{suo} \quad (1)$$

ここで、 $\gamma_{su} = c1Q_{suo} / c2Q_{suo}$

せん断耐力式には荒川博士のmean式を用いた。計算では試験体の寸法効果も考慮した。T4試験体では付着割裂破壊により最大耐力が決定したため、柱の引張鉄筋量を3-D16として pt 項によりせん断耐力を補正するのは過剰であるので、実験時の鉄筋ひずみを考慮して3-D13相当として算定した。T4の最大荷重は、3-D13とした場合の曲げ耐力の84%であった。

6.2 せん断耐力の低下率

表 - 3 にせん断耐力に関する実験値と計算値を比較して示す。実験値を補正した開口内法柱のせん断耐力 mQ_{suo} に対する腰壁・たれ壁付き柱のせん断耐力の実験値 eQ_{su} の割合をせん断耐力の低下率 $\gamma_{su} (=eQ_{su} / mQ_{suo})$ とする。図 - 6 にせん断耐力の低下率 γ_{su} と補正比率 λ の関係を示す。ほとんどの試験体の低下率は0.7 ~ 0.9の値になっている。特に点線で囲んだ試験体は、開口内法柱のせん断耐力をほとんど補正する必要が無かったもので、腰壁・たれ壁が中心接合されていて柱のせん断耐力は開口内法柱のせん断耐力より低下することが確認される。また同図には、材料強度、諸量の違いを全く補正しないで eQ_{suo} による低下率を黒点で示している。

7. せん断耐力の低下率の評価

7.1 既に提案している評価モデル⁹⁾

壁が中心接合された柱のせん断耐力の低下率の

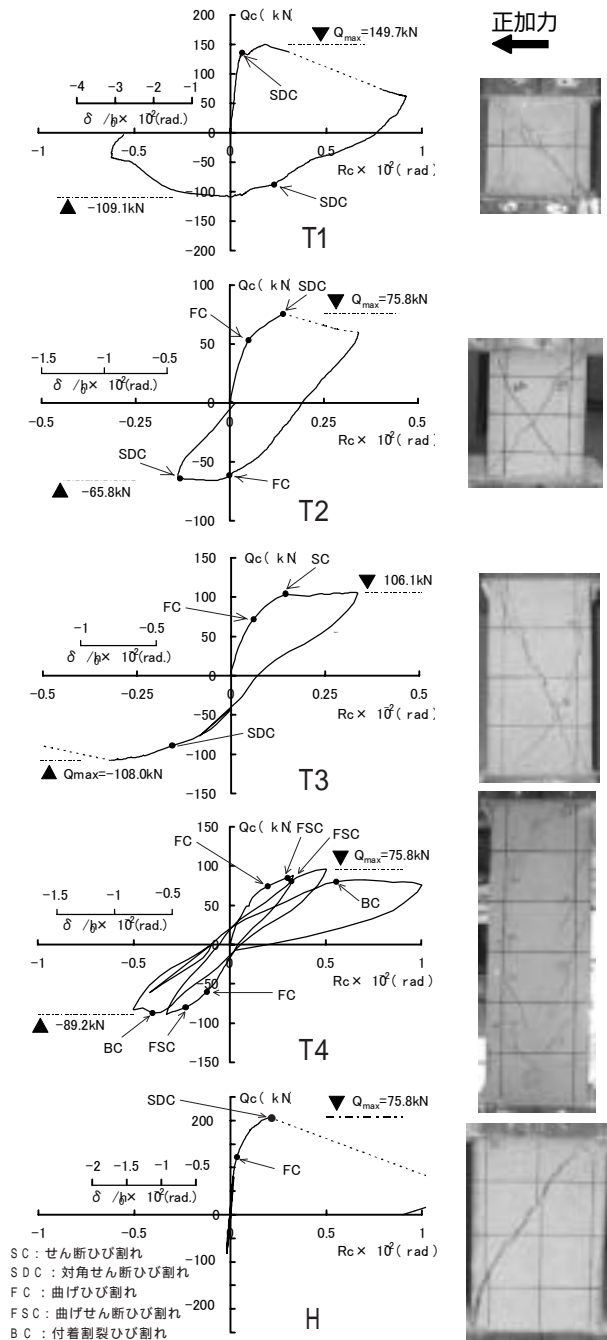


図 - 5 水平荷重 - 部材角関係

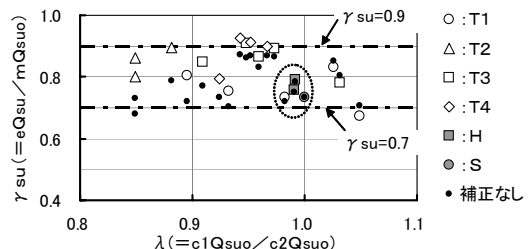


図 - 6 せん断耐力低下率と補正比率の関係

原因は、2章で述べたように応力集中による。筆者ら⁹⁾は、その応力集中の傾向を三次元弾塑性有限要素解析により明らかにして、開口内法区間においてせん断抵抗できるコンクリートの有効

な領域をモデル化している。図 - 7 にそのモデルを示す。その領域の幅は、壁端から開口中央高さ方向に角度 ψ で柱幅まで広がる。これに図 - 8 (a), (b) に示すように壁端から斜め上方に向くせん断破壊面が形成されるものとし、その破壊面の全面積 A に対するせん断抵抗できる有効な面積 A_e の割合を低下率としている。その評価式を(2)式に示す。破壊面の角度 ψ は(3)式としている。

Type A: $B_1/\tan\psi \leq D \cdot \cot\phi < h_0 - B_1/\tan\psi$ の場合

$$\gamma_0 = 1 - B_1^2 / (B \cdot D \cdot \tan\psi \cdot \cot\phi) \quad (2-1)$$

Type B: $D \cdot \cot\phi < B_1/\tan\psi$ の場合

$$\gamma_0 = 1 - (2 \cdot B_1 - D \cdot \tan\psi \cdot \cot\phi) / B \quad (2-2)$$

Type C: $h_0 - B_1/\tan\psi \leq D \cdot \cot\phi < h_0$ の場合

$$\gamma_0 = 1 - \frac{B_1^2 + \{B_1 - \tan\psi(h_0 - D \cdot \cot\phi)\}^2}{B \cdot D \cdot \tan\psi \cdot \cot\phi} \quad (2-3)$$

Type D: $h_0 \leq D \cdot \cot\phi$ の場合

$$\gamma_0 = 1 - 2 \cdot B_1^2 / (B \cdot h_0 \cdot \tan\psi) \quad (2-4)$$

表 - 3 せん断耐力に関する実験値と計算値

No.	研究者	試験体名称	本実験の開口内法柱試験体				せん断耐力の低下率 γ_{su}	
			実験値 eQ_{su} ($\times 10kN$)	グループ記号	実験値 eQ_{suo} ($\times 10kN$)	補正率 λ		補正耐力 mQ_{suo} ($\times 10kN$)
1	武田	No.1-10	10.78	T1	14.97	0.90	13.4	0.80
2		No.1-5-1	10.78			0.98	14.7	0.73
3		No.1-5-2	10.53			0.93	14.0	0.75
4		No.2-5	10.56			1.05	15.7	0.67
5		No.7M	12.74			1.03	15.4	0.83
6		KT20-3.0	5.15	T2	7.58	0.85	6.4	0.80
7		KT20-4.5	5.54			0.85	6.4	0.86
8		KT20-6.0	5.98			0.88	6.7	0.90
9		No.1-9	9.36	T3	10.80	0.97	10.5	0.89
10		No.1-4-1	8.97			0.96	10.4	0.87
11		No.1-4-2	9.31			0.95	10.2	0.91
12		No.2-4	8.70			1.03	11.1	0.78
13		No.1	8.33			0.91	9.8	0.85
14		No.1-8	8.33	T4	9.59*	0.97	9.3	0.90
15		No.1-3-1	8.34			0.95	9.1	0.91
16		No.1-3-2	8.35			0.94	9.0	0.92
17		No.2-3	7.03			0.92	8.9	0.79
18	広沢	0710CW-	15.48			H	20.64	0.99
19	0904CW-	16.18	0.99	20.5	0.79			
20	塩屋	No.6	3.98	S	5.40	1.00	5.4	0.73

eQ_{su} : せん断耐力の実験値、武田の試験体は柱一本あたりのせん断耐力
 eQ_{suo} : 本実験のせん断耐力の実験値、 mQ_{suo} : 補正された開口内法柱のせん断耐力
 *: T4については付着破壊したため、せん断耐力は示した付着耐力以上の耐力となる。

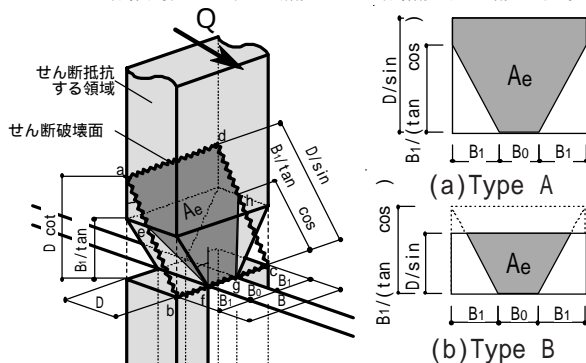


図 - 7 せん断抵抗する柱領域と破壊面

ここに B : 柱幅, D : 柱せい,

$$B_1 = 0.5(B - B_0), B_0: \text{有効幅}$$

$$\cot\phi = 1.8 - 2\sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy} / c_B}$$

$$\text{かつ } \cot\phi \geq 1.0 \quad (3)$$

ここに, p_w : せん断補強筋比

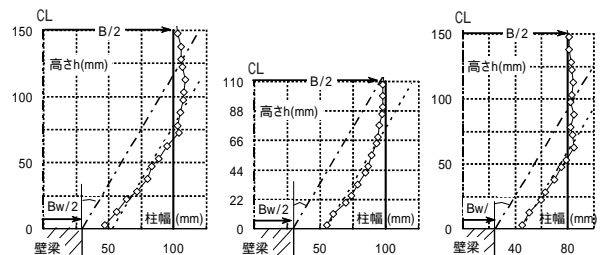
σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度

c_B : コンクリートの圧縮強度

図 - 9 に解析による有効幅を再掲する。せん断応力に基づいて柱の各断面で、せん断力を等価に評価できる有効幅を算出している。ここではせん断耐力を評価する場合は、この有効幅より多少、小さい幅にした方が適切であるとして、図 - 8 の B_0 を壁厚 t_w としている。詳細は文献⁹⁾を参照されたい。

7.2 有効幅の修正

図 - 10 に有効幅と壁厚および柱幅に関する寸法を示す。 W は有効幅 B_0 から壁厚 t_w を差し引いた片側の幅である。図 - 11 に解析より得られた W を h_0/D の関係で示す。 h_0 は開口内法高さで D は柱せいである。 W が長方形断面で W が正方形断面である。長方形断面()の W は h_0/D が小さくなると大きくなる傾向がある。また正方形断面()の W は長方形断面のデータを結ぶ一点鎖線よりも多少、大きくなっている。解析

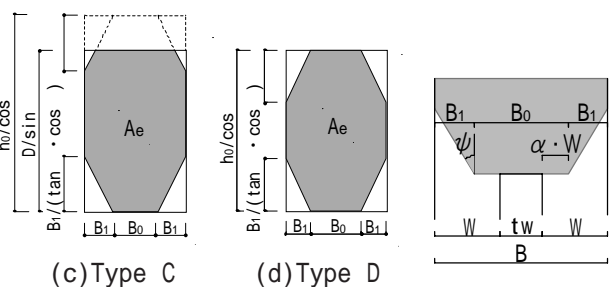


(i) 開口内法柱 (ii) 極短柱 (i) 開口内法柱

(a) 長方形断面

(b) 正方形断面

図 - 9 せん断抵抗する柱の有効幅



(c) Type C

(d) Type D

図 - 8 破壊面における有効断面積

図 - 10 有効幅

のデータは少なく更に解析が必要であるが、 h_0/D が小さくなると増加する傾向がある。文献⁷⁾では、開口内法柱の実験が行われて低下率の実験値が明らかな試験体は、表 - 1 の No.20 (長方形断面柱)の一体だけであった。そこでは

が0.0,すなわち B_0 が tw とした場合の計算値が実験値に適合した。前節で述べたようにせん断耐力を評価するための有効幅を解析による幅より小さくする必要がある。この試験体のデータを図 - 11 に示す。これと同様に、他の試験体についてもせん断耐力の低下率の実験値に適合するように試行計算により求めた。その図 - 11 に のデータを小さな黒点で示す。それらのデータにも h_0/D が小さくなると増加する傾向が確認できる。下記の(4)式はそれらのデータに対して求めた近似直線式である。

$$\alpha = 0.37 - 0.08 \cdot h_0/D \quad (4)$$

ただし、 $0 \leq \alpha \leq 0.3$

この α を用いて(2)式の有効幅 B_0 を(5)式とする。

$$B_0 = tw + 2 \cdot \alpha \cdot W \quad (5)$$

ここに、 tw : 壁梁厚, $W = 0.5 \cdot (B - tw)$

図 - 13に全試験体の低下率の実験値と B_0 に(5)式を用いた場合の計算値を比較して示す。横軸は表 - 1の試験体番号である。横軸の上には h_0/D の範囲も示している。 α が実験値で、白抜きの丸が計算値である。計算では開口内法高さが小さくなると(2.1)式と(2.2)式の適用範囲外となる。今回の計算では図 - 8 (c), (d)のような破壊面となる試験体もあった。それらの低下率の式を図中に示す。白抜きの記号は適用した式ごとに分類している。図中の小さな白丸は 図 - 6と同様に補正を行わなかったデータである。破線で囲んだデータは計算値と実験値の差が大きく、原因を分析する必要はあるが、これらを除くと(4), (5)式と図 - 7のモデルを用いてせん断耐力の低下率を概ね評価できる結果になっている。No.6 ~ No.8の試験体は壁厚 tw だけが変化している。図 - 12にそれらの低下率と壁厚比の関係を示す。壁厚比の変化に伴うせん断耐力の低下率の増減量を計算値は説明できる結果となっている。

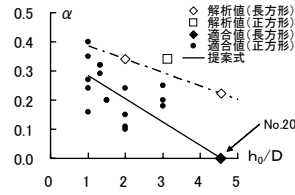


図 - 11 h_0/D 関係

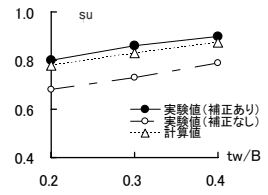


図 - 12 su - tw/B 関係

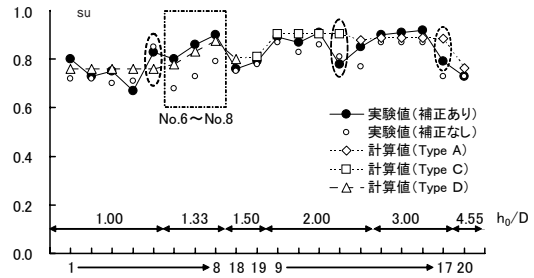


図 - 13 せん断耐力の低下率と h_0/D 関係

8. まとめ

- (1)腰壁・たれ壁が中心接合される場合でも、柱のせん断耐力は開口内法高さの柱のせん断耐力より低下し、その低下率は0.7 ~ 0.9であることが実験により確認された。
- (2)筆者らが既に提案しているせん断耐力の低下率の評価モデルに(4), (5)式による増加幅を考慮すると、腰壁・たれ壁が中心接合された柱のせん断耐力の低下率を概ね評価できた。

参考文献

- 1), 2), 5) 武田寛ほか：鉄筋コンクリート造腰壁・垂壁付きラーメンの耐力及び変形性状に関する実験的研究(その3. 帯筋量の少ない場合、及び、純ラーメンの h_0/D が異なる場合、日本建築学会北海道支部研究報告集, No.54, pp.56 ~ 59, 昭和56年3月)(その4. 柱主筋量が多い場合、日本建築学会北海道支部研究報告集, No.55, pp.27 ~ 30, 昭和57年3月)(その6. 壁が偏心する場合および壁厚が変化する場合、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1939 ~ 1940, 昭和58年9月)
- 3) 武田寛ほか：鉄筋コンクリート造腰壁・垂壁及び有開口壁の剛性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.455 ~ 456, 1991年9月
- 4) 武田寛ほか：鉄筋コンクリート造雑壁付き柱の耐力及び変形性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1753 ~ 1754, 昭和59年10月
- 6) 広沢雅也ほか：大変形下におけるRC造腰壁・垂れ壁付き柱の耐震性能に関する実験的研究, 第26回コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp.235 ~ 240, 2004年
- 7) 當房和博・塩屋晋一ほか：壁梁が偏心接合されるRC柱のせん断破壊性状とせん断耐力の低下率, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, pp.187-192, 2005
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, pp.36, 1987年
- 9) 吉留潤平・塩屋晋一ほか：壁梁付きRC柱におけるせん断応力集中とそれによるせん断耐力の低下率, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, pp.181-186, 2005