論文 腰壁・たれ壁が中心接合された R C 柱のせん断耐力の評価

松木和彦*1・塩屋晋一*2・當房和博*3・今岡宏暢*4

要旨:腰壁・たれ壁が中心接合された RC 柱のせん断耐力を評価することを目的にし た研究である。中心接合される柱のせん断力は,開口内法高さを柱長さとする柱のせ ん断耐力に対して小さくなる。この原因は,開口内法区間において応力集中が生じて 応力分布が変化するためである。開口内法区間では有効にせん断抵抗できる領域とで きない領域に分かれる。既にこの領域をモデル化してせん断耐力の低下率の評価式を 提案している。本論文では評価式で用いるせん断破壊面の角度とせん断抵抗できる領 域の大きさを表す幅を修正して,せん断耐力の低下率の変化傾向を明らかにしている。 キーワード:せん断耐力,柱,腰壁,たれ壁,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 柱のせん断耐力の評価を目的にしたものである。

一般に柱のせん断実験は、図 - 1(a)に示すよ うに柱の上下端がスタブに支持されて行われる。 柱頭・柱脚での加力方向のせん断応力は柱幅に 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・たれ壁が中心接合される柱 (以後,腰壁・たれ壁付柱)では、図 - 1(b)に 示すように壁端で、壁厚の範囲から柱幅に対し て局所的に応力が生じて、開口内法区間でせん 断応力の集中が生じる。この応力集中が主な原 因で腰壁・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。腰壁・た れ壁付柱のせん断耐力を既往のせん断耐力式を 用いて評価する場合、その既往の耐力式により 開口内法柱のせん断耐力を算出し、それに低下 率を乗じて評価するのが適切と考えられる。

本論文では既に提案している開口内法区間の 応力分布のモデル¹⁾に基づいて,せん断耐力の 低下率の評価式を再整理し,その式の一部の係 数を修正した。そして,その評価式に基づいて 低下率の各構造因子の違いによる変化傾向を実 験値と比較して検討した。



(a)Model
 (b)Model
 図 - 2 せん断抵抗する領域のモデル

2. せん断抵抗する領域のモデル

塩屋ら¹⁾は三次元弾塑性有限要素解析により 腰壁・たれ壁付柱の開口内法区間の応力状態の 特徴を明らかにし、その区間でコンクリートが せん断抵抗できる領域をモデル化している。

図 - 2 に領域のモデルを示す。図 - 2 (a)は開 口内法高さhoが比較的大きい場合で,図 - 2 (b) はhoが比較的小さい場合である。両者の違いに

*1	鹿児島大学	大学院理工学研究科建筑	藥学専攻	(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	鹿児島市役所	F		(元鹿児島大学	大学院理工学研究科大学院生)						
*4	鹿児島大学工学部建築学科										

ついては4.1節で述べる。これらのモデルでは開 口端近傍では応力集中が原因でせん断抵抗でき ない領域を考えている。有効にせん断抵抗でき る領域は,開口端の幅tの両端からtan (=0.6) で拡がる領域としている。

3. せん断破壊面とせん断耐力の低下率

図 - 3 に腰壁側のせん断抵抗できる領域を 示す。せん断破壊面 abcd(波線で囲んだ領域) を考える。その破壊面は平面で開口内法区間 内に形成されるものとする。破壊面はせん断 抵抗する領域とせん断抵抗しない領域に分け られる。壁厚が柱幅に等しいと,応力集中が生 じないので破壊面の全面積 Ao がせん断抵抗す るが,壁厚が小さくなり応力集中が生じると, そのせん断抵抗する有効な面積Aeは減少する。

Aoに対するAeの割合Ae/Aoが,せん断耐力と 密接な関係があると考え,その割合Ae/Aoをせん 断耐力の低下率 suとして評価する。破壊面はせ ん断耐力が最も小さくなる位置に形成されるも のとする。腰壁・たれ壁が上下に設けられる場合 では少なくとも上下の開口端のどちらかを含む。 以下では腰壁側を含むものとして論述する。

4. せん断耐力の低下率 su の評価式

4.1 Model IとModel の適用範囲

図 - 2 (a)のように開口内法高さhoが比較的 大きいと,中央高さ位置に応力集中の影響を受 けない領域が存在するが,hoが小さくなると, 図 - 2 (b)のようにその領域がなくなる。それ ぞれのモデルをModel I と Model とする。各 モデルの適用範囲はつぎのように表される。

$$Model I: ho \quad 2 \cdot hc \tag{1}$$

Model :
$$ho < 2 \cdot hc$$
 (2)

$$\Box \Box \Box I \Box, hc = (B - t) / (2 \cdot \tan \psi)$$
(3)

hc は図 - 2 (a) において応力集中の影響を受ける高さである。hc/Dをcot 1とする。式(1), 式(2)の両辺を柱せいDで除し,hc/Dをcot 1 で表すと,両式はつぎのように表される。

$$Model I : ho/D \quad 2 \cdot \cot \phi_1 \tag{4}$$



図 - 3 せん断抵抗する柱の領域とせん断破壊面



表 - 1 各破壊面の低下率 suの評価式

A	$\gamma_{SU} = t/B + \tan\psi \cdot \cot\phi/\kappa$
В	$\gamma_{su} = 1 - \kappa \cdot (1 - t/B)^2 / (4 \cdot \kappa \cdot \tan \psi \cdot \cot \phi)$
С	$\gamma_{su} = 1 - \frac{\left\{\kappa \cdot (1 - t/B)\right\}^2 + \left\{\kappa \cdot (1 - t/B) - 2 \cdot \tan \psi \cdot (ho/D - \cot \phi)\right\}^2}{4 \cdot \kappa \cdot \tan \psi \cdot \cot \phi}$
D	$\gamma_{SU} = 1 - \kappa \cdot (1 - t/B)^2 / \{2 \cdot \tan \psi \cdot (ho/D)\}$
E	Type Aの評価式と同じ
F	$\gamma_{su} = t/B + \tan \psi \cdot \left\{ \left(ho/D \right)^2 / 2 - \left(ho/D - \cot \phi \right)^2 \right\} / \left(\kappa \cdot \cot \phi \right)$
G	$\gamma_{SU} = t/B + \tan \psi \cdot (ho/D) / (2 \cdot \kappa)$

 $\tan \psi = 0.6 \quad \kappa = B/D$

Model
$$: ho/D < 2 \cdot \cot \phi_1$$
 (5)
 $\Box \Box \Box$, $\cot \phi_1 = \{(B-t)/(2 \cdot \tan \psi)\}/D$
 $= 0.5 \cdot \kappa \cdot (1-t/B)/\tan \psi$ (6)

は柱せいDに対する柱幅Bの比(=B/D)で ある。tan は0.6である。

4.2 Model の評価式

図 - 3 に示すように破壊面と柱軸のなす角度 を と定義する。cot の値は4.5節で後述する ように1.0~2.45の範囲で変化することになる。



cot により破壊面に占める有効な領域の面積の
 形状は異なり,評価式も異なる。評価式が異なる境界の角度を図-4(a)に示すように
 2, 3とする。cot 1, cot 2, cot 3は,
 つぎのように表される。

$$\cot\phi_1 = 0.5 \cdot \kappa \cdot (1 - t/B) / \tan\psi \tag{7}$$

 $\cot\phi_2 = ho/D - \cot\phi_1 \tag{8}$

$$\cot\phi_3 = ho/D \tag{9}$$

cot 1は式(3)と同じである。破壊面は cot の値により図 - 5の TypeA ~ Dの4種類に分 類される。表 - 1に各破壊面のせん断耐力の低 下率 suの評価式を整理して示す。

4.3 Model の評価式

Model と同様に評価式が異なる境界の角度 を図 - 4 (b)に示すように 4, 5とすると, cot 4, cot 5はつぎのように表される。

$$\cot\phi_4 = ho / (2 \cdot D) \tag{10}$$

$$\cot\phi_5 = ho/D \tag{11}$$

破壊面はcot の値により図 - 5のTypeE ~ G の3種類に分類される。これらの種類の suの 評価式も表 - 1 に示す。

4.4 低下率 suの評価式の適用手順

低下率 suの評価式を選択する流れを図 - 6



に示す。最初にho/Dと2・cot 」により Model を判断し,つぎにcot の値により破壊面の Typeを判断する。そして該当する表 - 1の低下 率の評価式を選択する。

4.5 開口内法柱のせん断破壊面の角度

せん断破壊面の角度 は曲げの中立軸位置の 応力状態で決まるせん断ひび割れの角度で近似 する。図 - 7に想定する中立軸位置の応力状態 とせん断ひび割れ角度を示す。鉛直応力 oは 柱の平均軸応力度とする。圧縮応力を正として 扱う。角度 に対する帯筋の影響は無視する。

コンクリートの破壊基準には図 - 8 に示す修 正 Mohr-Coulombを用いる。内部摩擦角を一般 的な37°とし,引張強度ftは一軸圧縮強度fcの 1/10とする。この仮定に基づくと図 - 8のよう に引張側の破壊基準を表す応力円は,引張主応 カがftで圧縮主応力がftの6倍である円になる。 引張主応力 1 が ft に達して引張破壊する条 件は,圧縮主応力 2が引張破壊基準を与える応 力円の圧縮主応力(6ft)より小さいことである。

2は, oとftで表すと o+ftとなる。この ことから oが5ftより小さいと引張破壊によ りせん断破壊し,それより大きいとせん断す べり破壊する。破壊面の角度 を2倍した角度 2 は図 - 8に示すものとなる。cos2 はモー ル円から式(12)で表される。右辺の分子,分母 をfc/2で除すと式(13)となる。o/fcを とし, ft/fcを1/10とすると式(14)となる。三角関数に は式(15)と式(16)の関係がある。式(15)と 式(16)から式(17)が得られる。式(17)に式(14) を代入すると式(18)が得られる。

$$\cos 2\phi = (\sigma o/2)/(ft + \sigma o/2) \tag{12}$$

$$= (\sigma o / fc) / (2 \cdot ft / fc + \sigma o / fc)$$
(13)

$$=\eta/(0.2+\eta) \tag{14}$$

$$\cos^2 \phi = (\cos 2\phi + 1)/2 \tag{15}$$

$$\sin^2\phi + \cos^2 = 1 \tag{16}$$

$$\cot \phi = \sqrt{2/(1 - \cos 2\phi)} - 1$$
 (17)

$$=\sqrt{10\eta+1}\tag{18}$$

ここに,
$$\sigma o$$
:軸応力, f :引張強度,
 fc : 圧縮強度, $\eta = \sigma o / fc$

これは が0.5以下の場合でそれ以上は式(18) で を0.5とした一定値となる。これらをまとめ ると cot は式(19)として表せる。なお帯筋の 影響については鉄筋の等価断面積に基づいて検 討したが,帯筋比が0.5%以下で大きな差を生 じさせなかったので,式を簡略なものにするた めに無視した。

$$\cot \phi = \begin{cases} \sqrt{10\eta + 1} & (0 \eta & 0.5) \\ 2.45 & (0.5 < \eta) \end{cases} ho/D 以下 (19)$$

軸力が圧縮であればcot は1.0~2.45の範囲 となる。写真に式(19)で が0.5以下の式による 破壊面を白い破線で示す。試験体は4.6節で後述 する表 - 2のものである。最大荷重時に拡大し たせん断ひび割れの柱せい中央位置に計算によ



るひび割れ角度を一致させて線を描いている。 T2とT3-1およびHでは概ね一致している。 しかし,T1-3では一致していない。これは開口 内法高さが小さく上下がスタブに拘束されるた めである。このような場合には式(19)で示すよ うにcot をho/D以下と制限するのが適切と考 えられる。なお式(19)の誘導はせん断補強筋比 pwが小さい場合を前提としている。4.8節で述 べるせん断耐力の低下率の検証に用いる試験体 のpwは0.33%以下で,そこでは計算値と実験 値の対応が良好になる。このため,式(19)の適 用範囲は現時点ではpwが0.33%以下とする。 4.6 腰壁・たれ壁付柱のせん断破壊面

前述したように,破壊面は有効にせん断抵抗 する領域とそうでない領域に分かれる。開口内 法高さが小さくなるとさらに顕著になり,上下 の壁の拘束を受けて破壊面の角度が制限される。 図 - 9にそれらの領域でのせん断ひび割れの角 度の状況を模式的に示す。壁厚の幅を中心にす る領域Aのcot はho/Dに近く,そうでない 領域Bでは領域Aより遠ざかるほどその制限が 弱くなると考えられる。ho/Dが小さくなるほ ど両領域の破壊面の角度には大きな差が生じ, 破壊面の平面性は大きく崩れることになる。 4.7 有効にせん断抵抗する領域の開口端の幅 t

図 - 3の有効な領域の開口端の幅tを式(20)

		既往の腰壁・たれ壁付柱試験体														開口内法柱試験体			任下玄	
No.	研究者	名称	B×D	ho	h	tw	hwb	hwt		св WУ О		0	柱引張	帯筋		eQsu	夕称		eQsuo	
					(cm)			W/QD	(N/mm ²)		主筋	径	pw(%)	(kN)	百孙		(kN)	0 50		
1		No.1-10								22.8	224		3-D10			107.8			133.9	0.80
2		No.1-5-1 No.1-5-2 No.2-5	20 × 20	20	100		40		0.50	22.1		3.92		4	0.12	107.8		-1	147.0	0.73
3						5.0		40		19.8	185		3-D13 4	0.13	105.3	T1		139.7	0.75	
4					120	6	60			25.3						105.6	-	-2	148.1	0.71
5	1 	No7M			100		40			30.2	265		4-D10	6	0.30	127.4		-3	178.8	0.71
6		KT20-3.0			60	3.0			0.67	25.6		0.00	2-D10	4	0.28	51.5	T2		63.8	0.81
7		KT20-4.5	15 × 15	20		4.5	20	20		25.6	131					55.4			63.8	0.87
8		KT20-6.0				6.0				27.4						59.8			66.1	0.90
9	武田	No.1-9					30	30	1.00	21.7	224	3.92	3-D10		0.13	93.6	-1 T3 -2 -3 -4	-1	112.4	0.83
10		No.1-4-1			100	5.0 4		20		21.5	185			3 4		89.7		-2	103.7	0.86
11		No.1-4-2	20 × 20	40			40	20		20.9	100		3-D13			93.1		-2	102.5	0.91
12		No.2-4		1	120			40		25.3	185					87.0		-3	104.8	0.83
13		No.1			100		30	0 30		14.7	381		3-D10	6	0.33	83.3		-4	89.4	0.93
14		No.1-8				5.0	20	20	1.50	27.0	224	3-D10 3.92 3-D13	3-D10		0.13	83.3	T4		93.2	0.89
15		No.1-3-1 No.1-3-2	20 × 20	60	100					21.5	3			4		83.4			92.1	0.91
16						0.0				20.9	185		3-D13			83.5			91.1	0.92
17		No.2-3			120		40			19.8						70.3			89.3	0.79
18	小室	07C10CW-	24 × 24	36 10	100	50	40	24	0.75	26.9	285	2 94	4-D10	4	0.10	154.8	н		202.7	0.76
19	9 ^{7,1} 09040		2124			0.0	.0		0.70	20.0	200	2.04	1 010	•	0.26	161.8			215.9	0.75
20	塩屋	No.6	20 × 11	50	110	6.0	30	30	2.27	24.4	526	2.49	4-D10	2.5	0.06	39.8	Ś		54.2	0.73

表 - 2 対象にした試験体の構造因子と実験値

注) B:柱幅, D:柱せい,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,c B:コンクリートの圧縮強度 wy:帯筋の降伏強度, O:柱軸力の軸応力,pw:帯筋比,eQsu,eQsuo:せん断耐力,e su(=eQsu/eQsuo):せん断耐力の低下率の実験値

で表す。t は壁厚 tw 以上で柱幅 B 以下となる。 このため は0.0 ~ 1.0 の範囲の値になる。

筆者らは既往の研究の腰壁・たれ壁付柱試 験体を対象に開口内法柱試験体の加力実験を 行い、それらのせん断耐力の低下率の実験値を 明らかにしている。^{2),3)} 表 - 2 に一覧を示す。 詳細は文献を参照されたい。このせん断耐力の 低下率の実験値と、表 - 1 の suの評価式による 計算値を一致させる は試行計算で特定できる。

図 - 10 に特定された を で示す。横軸は ho/2hc'で としている。hc'は式(3)でtをtw として応力集中の影響を受ける高さ hc を近似 したものである。 は応力集中を受ける領域が 開口内法区間で占める割合の程度を表す。付着 破壊した開口内法柱試験体(T4)に関係する データは除いている。 はせん断耐力の実験値 を基に算出しているため,バラツキを考慮し-点鎖線のデータAを除くと, 横軸の値が小さく なるに伴い増加する傾向がある。これは前節で 述べたように開口内法高さが小さくなると開口 内法区間に応力集中の影響を受ける領域の占め る割合が大きくなり,破壊面の平面性が崩れ て,その崩れの程度により が増加していると 考えられる。ここでは破壊面の平面性の崩れの 程度と には関係があるものとし, を の関 数で近似する。求めた近似式が式(21)である。



これによる関係を図 - 10に実線で示す。

$$t = tw + \alpha \cdot (B - tw) \tag{20}$$

$$\alpha = 0.16/\xi^2$$
かつ 0.3 以下 (21)

ここに,
$$\xi = ho/(2 \cdot hc') = 0.6 \cdot ho/(B - tw)$$

の実験データの最小値は0.8でこれに対応す る実験データBを点線で囲んでいる。データBの

の平均値を参考に の上限値を 0.3 とした。 4.8 せん断耐力の低下率の実験値と計算値の比較 図-11にせん断耐力の低下率の実験値と計 算値を比較して示す。横軸は表 - 2 の試験体 番号で,横軸の上にho/Dも示している。 は 表 - 2 の実験値で, は計算値である。 は適用した式ごとに分類している。計算は

図 - 6の流れに従って表 - 1の評価式を用いて いる。角度 には式(19)を用い,幅tには式(20) と式(21)を用いている。

図 - 12 には低下率の実験値を計算値で除し た比の分布も示す。両図において,破線で囲ん



だものは開口内法柱(T4)の耐力が付着破壊で 決定したもので,仮にせん断耐力が特定できる のであれば実験値はさらに小さくなる。せん断 耐力の実験値にはバラツキが生じるので,低下 率にもばらつきは生じる。計算値が±5%以内 の誤差で実験値を推定しているデータが多く, その割合は全試験体数の85%であった。

No.6 ~ No.8 の試験体は形状については壁厚だ けが異なっている。図 - 13にそれらのせん断耐力 の低下率と壁厚比tw/Bの関係を示す。壁厚の変化 に伴う低下率の変化量を計算値は推定している。 4.9 せん断耐力の低下率の傾向

図 - 14 に計算による su - ho/D 関係の曲線 を示す。対象にした腰壁・たれ壁付柱試験体を4 グループに分類している。図 - 14(a)は武田の試 験体で壁厚比tw/Bが0.25で軸力比 が0.13,0.2 の2種類である。図 - 14(b)も武田の試験体で が0.0でtw/Bが0.2,0.3,0.4の3種類である。 図 - 14(c)は小室の試験体でtw/Bが0.21で が 0.1である。図 - 14(d)は塩屋の長方形柱断面の 試験体でtw/Bが0.3で が0.1である。各図に 対応する実験データを記号で示している。実験 データは該当する曲線に近く,評価式はho/Dに 伴う suの変化傾向をよく推定している。

5.まとめ

腰壁・たれ壁が中心接合されたRC柱のせん 断耐力を評価する目的で,既に提案している 開口内法区間の応力分布のモデルに基づいて, せん断耐力の低下率を評価式を再整理し,その 式の一部の係数を修正した。そしてその評価式 に基づいて低下率の実験値の各構造因子の違い



による変化傾向を検討した。その結果,せん断 耐力の低下率は表 - 1の評価式により精度よく 推定できた。またせん断耐力の低下率は,柱断面 形状と壁厚比および軸力比などの影響を受けて, その定性的な傾向を図 - 14に示した。

参考文献

- 1) 吉留潤平,塩屋晋一ほか:壁梁付き RC柱に おけるせん断応力の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, Vol.27, No.2, pp.181 ~ 186,2005 年
- 2) 當房和博,塩屋晋一ほか: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,コンクリート工学,Vol.28,No.2, pp.193~198,2006年
- 3)塩屋晋一ほか: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,日本建築学会九州支部研究報告,pp.441~444,2007年