# 論文 せん断破壊型そで壁付き柱に関する実験的研究

壁谷澤 寿成\*1・壁谷澤 寿海\*2・東條有希子\*1・壁谷澤 寿一\*1

要旨:本研究ではそで壁付き柱の力学性状の把握,耐震診断基準における終局強度式の修正案の提案および その妥当性の検討を目的として,そで壁の配筋の異なる4体のそで壁付き柱の破壊試験を行った。本試験で の実験結果と既往のそで壁付き柱の実験結果を用いて既往式と分割累加による修正式を比較したところ,修 正式は既往式と比べて実験値と良い対応を示していることが確認できた。 キーワード:そで壁付き柱,せん断終局強度,耐震診断基準,荒川式,

1. はじめに

現在の鉄筋コンクリート造建物において, そで壁は耐 震要素として有効に働くにもかかわらず , 耐震スリット などにより構造部材と切り離して設計されることが多 い。これはそで壁付き柱の耐力, 靭性および損傷レベル の評価法が不明確であるためである。柱自体の耐力はそ で壁によって向上するので,スリットを設けるのは多く の場合合理的とはいえない。現在,日本建築センターの 構造関係技術解説書<sup>1)</sup>(以下構造技術指針)や日本建築防 災協会の耐震診断基準<sup>2)</sup>に示されているそで壁のせん断 終局強度の評価式はそで壁付き柱のモデル化という点 において力学的な根拠があいまいである。さらに片側そ で壁付き柱においては, 耐震診断基準では柱のみの終局 強度との平均値としているが,構造技術指針ではその評 価法が明確になっていない。本研究はそで壁付き柱のせ ん断強度に関して実用的な評価式を提案し,本実験結果 および過去に行われた既往の実験結果と比較すること により提案式の妥当性を検証したものである。

# 2. 実験の概要

#### 2.1 試験体の概要

実験対象とした試験体4体のうち,配筋詳細図の一例 を図-1に,断面および配筋の詳細を表-1に示す。また表-2に各試験体のコンクリート及び鉄筋の材料特性 を示す。試験体は試験体 SW を標準試験体とした計4体 である。試験体の形状は全て共通でスパン長1800mm, 壁内法高さ1400mmの1層1スパン鉄筋コンクリート造



図 1 試験体配筋詳細図の一例(試験体 SW)

	柱			壁				
試験体名	断面 (mm×mm)	主筋(Ps)	帯筋(Pw)	幅 (mm)	厚さ (mm)	縦横筋	端部鉄筋	斜め筋
SW			D6@50			D6@200double (0.32%)	4-D10	-
SWS	400 × 400	16-D16 (2.0%)	(0.32%)	400	100	D6@100single (0.32%)	2-D10	-
SWW			4-D6@50 (0.64%)			D6@100double (0.64%)	4-D10	-
SWX			D6@50 (0.32%)			D6@200double (0.32%)		4-D13

表 - 1 各試験体の一覧

\*1 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 (正会員)

\*2 東京大学 地震研究所 教授 (正会員)

そで壁付き柱4体である。柱の断面は400mm×400mm, そで壁の水平長さは柱のせいと同じ400mm,厚さは 100mmとし,実大スケールの約1/2を想定した。柱の配 筋は主筋が全て共通で16-D16(Ps=2.0%)とし,帯筋は試 験体SW,SWS,SWXがD6@50(Pw=0.32%),SWWは 4-D6@50(Pw=0.64%)とした。そで壁の配筋は試験体によ りそれぞれ異なり,試験体SWおよび試験体SWXの壁 縦横筋はD6@200ダブル(Psh=0.32%),縦筋端部4-D10と し,試験体SWSはD6@100シングル(Psh=0.32%) とした。壁横筋は全て柱の内部を通している。また試験 体SWXはそで壁全体の両方向に4-D13(傾斜角=55°) の斜め筋を施した。

表	2	各試験体の材料特性
	(a	a) コンクリート

試験体名	圧縮強度			
	(N/mm <sup>2</sup> )			
SW	27.8			
SWS	24.6			
SWW	25.1			
SWX	25.4			

(b) 鉄筋

種類	配筋	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤンケ係数 (10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	
D6	柱帯筋 壁縦横筋	405.0	17.71	556.8	
D10	壁縦筋端部	385.3	17.96	517.8	
D13	壁斜め筋	381.2	18.41	526.1	
D16	柱主筋	365.2	18.64	522.2	

#### 2.2 載荷装置及び加力計画

図 - 2 に載荷装置図,図 3 に加力サイクルを示す。 加力には容量 1000kN,ストローク±200mmの油圧式ジ ャッキを水平方向に1台,鉛直方向に2台使用した。水 平方向には変位制御で正負繰り返し載荷を行い,鉛直方 向には試験体両端部に400kN ずつ,計800kN(柱の断面 積に対する軸力比 0.2)の軸力を加えた。また  $M/(Q \cdot$ 1w)=0.58 [1w: そで壁全体長さ(1200mm)]を維持し,なお かつ試験体の両端部の鉛直変形を維持しながら水平力 に比例させてモーメントを制御した。載荷履歴は部材変 形角±1/400,±1/300,±1/200,±1/150,±1/100,±1/75, ±1/50,±1/37.5,±1/25の順で各1回である。変形角 は試験体頂部で計測した変位に柱の内法高さ(1400mm) を除した値とした。またせん断破壊後に鉛直ジャッキ2 台を用いて軸耐力の圧縮試験を行った。

#### 3. 実験結果

## 3.1 破壊状況

各試験体の最終破壊状況を写真 1に,水平荷重-水



平変形の関係を図 4 示す。図 4 には耐震診断基準に 示される略算式による曲げ終局強度 Qmu,既往式による せん断終局強度 Qsu,次節で示す修正式によるせん断終 局強度 Qsu,RC造計算規準改訂案<sup>3)</sup>による許容せん断力 Qsa,せん断ひび割れ発生時の強度を示している。

SW は+1/400rad の加力中にそで壁部分に曲げひび割れ およびせん断ひび割れが生じた。±1/300rad でそで壁の 上端部の左右にコンクリートの圧壊が生じた。+1/200rad の加力中に柱に曲げひび割れおよびせん断ひび割れが 生じた。+1/150rad の加力中に変形 9.35mm(1/150rad)で最 大耐力 652kN に達した。-1/25rad の加力中に耐力が緩や かに低下し崩壊に至った。崩壊後に圧縮試験を行ったが, 軸力は 802kN(軸力比 0.2)以降柱帯筋や主筋の破断が進行 し軸力を維持できなくなったため,試験を終了した。

SWS は+1/400rad の加力中にそで壁部分に曲げひび割 れおよびせん断ひび割れが生じた。±1/00rad の加力中に そで壁の上端部の左右にコンクリートの圧壊が生じ,柱 に曲げひび割れおよびせん断ひび割れが生じた。 +1/100rad の加力中に変形 14.02mm(1/100rad)で最大耐力 636kN に達した。+1/50rad 加力中に急激に耐力が低下し, -1/37.5rad の加力中に崩壊に至った。SWS は SW と同じ 壁筋比ではあるが,最大耐力や変形が低い結果となった。 これは SW に比べ端部の鉄筋が少ないためと考えられる。 崩壊後に圧縮試験では,軸力は 535kN(軸力比 0.14)以降 柱帯筋や主筋の破断が進行し軸力を維持できなくなっ

## たため,試験を終了した。

SWW は+1/400rad の加力中にそで壁部分に曲げひび割 れおよびせん断ひび割れが生じた。+1/200rad の加力中に そで壁上端部の左右にコンクリートの圧壊が生じた,柱 に曲げひび割れおよびせん断ひび割れが生じた。 +1/50rad の加力中に変形 28.05mm(1/50rad)で最大耐力 748kN に達した。その後耐力はサイクルごとに低下した が-1/25rad の加力後も崩壊に至らず安定していたので, 崩壊に至るまで正方向に押しきった。+1/20rad の時に耐 力が急激に低下し,そで壁と梁の境界面でスリップが生 じ崩壊に至った。SWW は SW に比べ強度,靭性ともに 増大することが確認できた。これは SWW の柱帯筋量お よび壁筋量が SW より多かったためと考えられる。崩壊 後の圧縮試験では,軸力は 1402kN(軸力比 0.35)まで加力 したが試験体が安定していたため,試験を終了した。

試験体 SWX は+1/400rad の加力中にそで壁部分に曲げ ひび割れおよびせん断ひび割れが生じた。+1/200rad の加 力中に柱に曲げひび割れおよびせん断ひび割れが生じ, そで壁上端部の左右にコンクリートの圧壊が生じた。 +1/100rad の加力中に変形 13.55mm(1/103rad)で最大耐力 779N に達した。-1/75rad 加力中に急激に変形が進行し, +1/50rad の加力中に耐力が低下し崩壊に至った。崩壊後 の圧縮試験では,軸力 780kN(軸力比 0.19)以降柱帯筋や 主筋の破断が進行し軸力を維持できなくなったため,試 験を終了した。



(a) 試験体 SW

```
(b) 試験体 SWS
```



 (c) 試験体 SWW
 (d) 試験体 SWX

 写真 1 最終破壊状況



4. 分割累加によるせん断終局強度評価式の提案

# 4.1 既往のせん断終局強度式

耐震診断基準および構造技術指針に示されているそ で壁付き柱の既往の設計式(式(1),式(2))は,耐震壁と 同様にそで壁を含む柱断面積を等価な壁厚に置換する 考え方に基づいている。しかしながら,実際は コンク リ-トの応力度負担が過大になる端部の断面幅が等価 壁厚より小さい, 一般に端部が拘束されていない、の で既往式をそのまま用いると算定値は危険側の評価に なる。さらに,これまで用いられてきた等価な補強筋効 果の算定式(式(2))は,帯筋を等価壁厚の補強筋比(長 方形の長辺)に置換すること,それを壁筋と足すこと, 2 重の意味で明らかな過大評価となっている。

そこで,耐震診断基準に示される,別の算定方法では, 図 5(b)のように壁長さは引張側壁を無視して評価する ことにしている(この点は構造技術基準も同様)。ただ し,両側そで付き壁の場合は左右の壁長さが異なる場合 は適用できず,片側のみにそで壁がつく場合には安全側 に評価する方法は不明である。また,2つの方法では de の長さが同じでありながら等価壁厚 be への置換方法が 異なっているが,その根拠あるいは背景が不明である。 さらに,せん断補強筋が多い場合や壁長さが長い場合な どに補強筋の効果が累加する評価式ほどの効果がある かどうかも不明である。



(0) 耐震が断率率 図 - 5 既往式のモデル概念図



$$p_{we} = p_w(\frac{b}{b_e}) + p_s(\frac{t}{b_e})$$
 (2)  
 $\frac{M}{Q}$ : せん断スパン、ただし、 $0.5 \le \frac{M}{Qd_e} \le 2$  とする  
 $_{wy}$ : せん断補強筋の材料強度( $N/mm^2$ )  
 $j_e: \frac{7}{8}d_e(mm)$   
 $p_s: 壁の横筋比$   
 $p_t = 100a_t/(b \cdot D)(\%)$ 

4.2 分割累加によるせん断終局強度式

図 - 6 のように,壁と柱の断面を縦(壁長さ)方向に 分割してそれぞれせん断強度を算出し,累加してせん断 強度を算出する。式(3)に示すように式(4)の壁部分の評価 式,式(5)が柱部分の評価式に軸力によるせん断力を足し 合わせる。ア - チ機構,トラス機構の累加などで試みら れてきた考え方と同様であり,柱と壁の実用せん断設計 式に対しても同様に応用することが可能である。それぞ れ矩形に置換した柱,壁でそれぞれ主筋比,せん断補強 筋比を定義して,独立にせん断抵抗機構を設定して累加 することにより,断面形状によらず物理的に安全側の評 価になるものと想定される。そのために,主筋,補強筋 比などは累加の際に重複して評価しないように以下の ように算出する。

柱帯筋比は,壁横筋が貫通していない場合は,その分 だけ帯筋から壁筋として必要な断面を除き,残りで柱の 残余断面に対する帯筋比を定義する。同様に主筋比も柱 残余断面に対して定義する。壁筋の引張側主筋は2段目 まで考慮してよいものとする。シアスパン比は,壁には 全せいL 柱には柱せいDに対応する有効せいを用いて, 柱には壁による断面欠損を考慮することにより,既往の ような一体化による評価式より工学的な機構を考慮し た評価になると考えられる。左右で壁厚さ,壁筋比など が異なる場合は実験結果もないので小さい方で評価す る。この修正式は片側そで壁でも壁長さが異なる場合で も同様に適用可能である。



$$Q_{su} = Q_{suw} + Q_{suc} + 0.1N \tag{3}$$

$$Q_{suw} = \left\{ \frac{0.053 p_{twe}^{0.23} (F_c + 18)}{\frac{M}{Qd_w} + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{wh} \sigma_{why}} \right\} t_w j_w \quad (4)$$

$$Q_{suc} = \left\{ \frac{0.053 p_{tce}^{0.23} (F_c + 18)}{\frac{M}{Qd_{ce}} + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{cwe} \sigma_{cwy}} \right\} b_{ce} j_{ce} \quad (5)$$

٢

$$\begin{split} p_{twe} &= \frac{a_{tw}}{t_w d_w} \qquad (a_{tw}: \textbf{引張鉄筋、そで壁縦筋 2 段目まで)} \\ \frac{M}{Q}: \textbf{せん断スパン、ただし、} 0.5 \leq \frac{M}{Q d_w} \leq 2 \textbf{ とする} \\ d_w &= 0.95(D+l_1+l_2) \\ p_{wh} &= a_{wh} / t_w s_w: \textbf{そで壁横筋比} \\ \sigma_{why}: 壁筋降伏強度、 t_w: \textbf{そで壁厚さ。} j_w = \frac{7}{8} d_w \end{split}$$

$$\begin{split} p_{vce} &= \frac{a_{vc}}{(B-t_w)d_{ce}} \quad (a_{vc}: 柱引張側主筋 1 段目まで) \\ p_{vce} &= \frac{a_{vc} - a_{vw}}{(B-t_w)d_{ce}} \quad (片側そで壁柱の場合、 a_{vv}: 引張側壁縦筋2段目まで) \\ \frac{M}{Q}: せん断力スパン、ただし、 1 \leq \frac{M}{Qd_{ce}} \leq 3 とする \\ d_{ce} &= 0.95D \\ p_{cwe} &= \frac{a_w - p_{wh}t_ws}{b_{ce}s} \quad : 柱等価帯筋比(壁横筋が柱に定着されている場合*) \\ p_{cwe} &= \frac{a_w}{b_{ce}s} \quad : 柱等価帯筋比(壁横筋が柱を通して配筋されている場合) \\ b_{ce} &= B - t_w \\ a_w: 柱帯筋 1 組の断面積、s: 柱帯筋間隔、 p_{wh}: そで壁横筋比 \\ \sigma_{cwy}: 帯筋降伏強度、B: 柱幅、 t_w: そで壁厚さ、 j_c = \frac{7}{8}d_{ce} \end{split}$$

# 5. 既往式と既往式による計算値と実験値の比較

修正式の妥当性を検討するため,本試験および既往の 試験結果(文献[4~9])での実験値と計算値との比較をし た。各計算値と実験値の比較を図 7 および図 8 に示 す。検討の対象とした試験体は計 26 体で,図中には両 側そで壁付き柱・片側そで壁付き柱,柱心が壁心と一致 しているか,偏心しているかを場合分けして示している。



				終局強度(kN)					
动歌中石	計台 C /U 创 / J (KIN)				せん断		曲げ		
					既往式	修正式	既往式	曲げ解析	
	実験値	計算値(Qsa)	実/計	実験値	実/計	実/計	実/計	実/計	
SW-S	470	246	1.91	652	1.12	0.99	0.73	0.68	
SWS-S	480	239	2.00	637	1.13	1.06	0.73	0.79	
SWW-S	425	376	1.13	748	1.15	1.03	0.85	0.80	
SWX-S	450	352	1.28	780	1.15	1.04	0.71	0.68	

表-3 実験結果一覧

既往式を適用した場合,構造技術指針の評価式は概ね 安全側に評価しているが本実験においては分割累加式 に比べ過小評価している。これは,既往式では鉄筋によ るアーチ機構が柱の引張鉄筋のみで作用していると考 慮しているが,修正式では縦筋の端部を適切に考慮した ためと考えられる。また,耐震診断基準による評価式は 等価壁厚 b。の値が大きいため過大評価となっているケ ースが多い。一方,分割累加式では多少危険側になって いるケースはあるものの,図-7(c),図-8(c)に示すとお り既往式にくらべばらつきは少なく,概ね実験値に近い 値を評価することができた。また RC 規準改定案による 許容せん断力 Qsa とせん断ひび割れ強度を比較したとこ ろ、計算値を大きく上回っていることを確認した。

## 6. まとめ

本論文は分割累加によるそで壁の実用せん断終局強 度の評価式を提案し,配筋の異なる4体のそで壁付き柱 の静的加力試験における実験結果および既往の実験結 果と比較した。本論文では以下の結論が得られた。

- (1) 壁筋をダブル配筋した SW の最大耐力は 652kN であったのに対し,概ね同じ鉄筋量のシングル配筋である SWS の最大耐力は 636kN であり,強度と靭性がSW を下回っていた。これは SW に比べ SWS のそで壁縦筋端部の鉄筋量が少なかったためであると考えられる。
- (2) 柱帯筋量と壁筋量が試験体 SW の 2 倍である試験体 SWW は最大耐力が 748kN であり,試験体 SW に比 べ強度,変形能力ともに上回った。
- (3) 試験体 SW に斜め筋を施した試験体 SWX は最大耐 力が 779kN になり,斜め筋の補強効果を確認した。
- (4) 各試験体のひび割れ発生時の水平荷重とRC計算規 準改定案による許容せん断力Qsaを比較したところ, どの試験体もひび割れ強度がQsaを上回っているこ とが確認できた。
- (5) 本研究の実験結果を既往式と本論文にて提案した 分割累加式で比較したところ,分割累加式のほうが

実験値に近い値であることが確認できた。これは, 既往の評価式には等価壁厚置換や等価補強筋比の 評価など明らかな問題点があるが、分割累加式では 物理的に明快に既往式による累加を適用している ためであると考えられる。

#### 参考文献

- 日本建築センター:建築物の構造関係技術基準解説
   書, pp.526-527, 2001.3
- 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,pp.229-237,2001.5
- 3) 日本建築学会鉄筋コンクリート構造運営委員会鉄 筋コンクリート構造計算規準改訂小委員会:鉄筋コンクリート構造計算規準の改定案,公開小委員会資料,日本建築学会,2006.11.29
- 4) 大宮幸:袖壁付き柱の破壊形式を考慮したせん断終 局強度に関する実験および考察,日本建築学会構造 系論文集,pp.175-180,2002.3
- 5) 東洋一,大久保全陸:鉄筋コンクリート短柱の崩壊 防止に関する総合研究(その9 CW シリーズ:袖壁 付き柱の実験),日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1305-1306,1974.10
- 赤井裕史ほか: RC 造そで壁付き柱の耐震性能に関 する大変形加力実験(その1:実験概要と結果),日本 建築学会大会学術講演梗概集,pp.183-184,2003.9
- 小室達也ほか:RC 造そで壁付き柱の耐震性能に関 する大変形加力実験(その5:軸力比の違いによる影響),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.231-232, 2005.9
- 8) 加藤大介ほか: Pca 袖壁で簡略補強された既存 RC 柱に関する実験,日本コンクリート工学年次論文集, pp.253-258,2004.7
- 9) 加藤大介ほか: RC 造増設袖壁付き柱の静的加力実
   験,日本コンクリート工学年次論文集,pp.1471-1476, 2003.7