

[176] スリップ破壊する有開口連層耐震壁の強度と変形に関する研究

正会員○ 望月 洵 (工学院大学工学部)  
竹原 雅夫 (東京建築専門学校)

■ 1 はじめに

R、C耐震壁は、せん断破壊しないように補強、補剛された周辺フレームをもつ場合、スリップ破壊し最大せん断強度を示し、さらに破壊後も柱の降伏せん断力に相当する強度と安定した変形能力をもつことが認められている。このため、耐震壁の設計としては次の方法をとるのが適切であると筆者らは考えている。すなわち、せん断強度としてスリップ破壊時せん断強度を与え、全体曲げ強度としてせん断強度を十分に下回るせん断力で降伏が生じる強度を与える。このようにして初めて、耐震壁の靱性が確保できると考えられる。このような設計手法の確立のためには、スリップ破壊と全体曲げ降伏に及ぼすせん断亀裂の影響を把えることが必要である。本研究は、上記の観点に立ってスリップ破壊の把握を目的として、有開口連層耐震壁のせん断実験を試みたものである。

■ 2 実験計画

2.1 試験体

試験体はAおよびBシリーズからなり、Aシリーズは一方向対角圧縮加力、Bシリーズは、加力方法の影響を調べるために、柱高さの1/2の位置に反曲点をもつ曲げ・せん断加力としている。形状、配筋、加力および計測方法を図1, 2に示す。柱は、無開口壁の実験をもとに、せん断破壊が生じないように補強、補剛されている。梁は、連層壁を想定して、曲げおよびせん断破壊が生じないよう大きな形状にしてある。実験のパラメータは開口寸法、開口補強筋の定着長さ、および加力方法で、開口寸法は開口周比  $\xi' = \sqrt{h_0 l_0 / h' l'}$  = 0.45, 0.30, 0.15 の3種類、定着長さは補強筋が柱、梁中に達するもの(記号:L)、および壁中にあるもの(記号:S)の2種類、そして加力方法は前記A, Bの2種類である。試験体名称はこれらのパラメータを考慮している。例えば、WAR15L-1はA:加力方法、15:開口周比  $\xi' = 0.15$ 、

L:定着長さのタイプで、番号が1の長方形耐震壁(WR)である。この他の因子はすべて共通で、モルタルの4週設計基準強度  $F_c = 250 \text{ k/cm}^2$ ,  $P_s = 0.76\%$ ,  $P_w = 0.80\%$ ,  $P_t = 0.57\%$  (Aシリーズ),  $1.27\%$  (Bシリーズ), 板厚は2.0 cmである。表1, 2にモルタルの調合比および鉄筋強度を示す。試験体とシリンダーは、打設後7日間水でぬらしたむしろで覆い、その後、屋根のある野外に放置した。

2.2 加力と計測

加力は、30tオイルジャッキによる手動加力、層間変形角Rによる変位制御とし、最大強度時までRの増分  $\Delta R = 0.5 \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ ごとに3回の正負交番加力とした。柱の定軸力 ( $N_0 = 0.2 F_c \times 10 \times 10 \text{ kg}$ )はPc鋼棒によって導入され、常に一定になるように制御した。Rは上、下梁の水平相対変位  $\delta_1, \delta_2$  (両面)を変位計(1/200mm)で計測し、 $R = (\delta_1 + \delta_2) / h'$ で求めた。

■ 3 実験結果

実験結果を表3に示す。

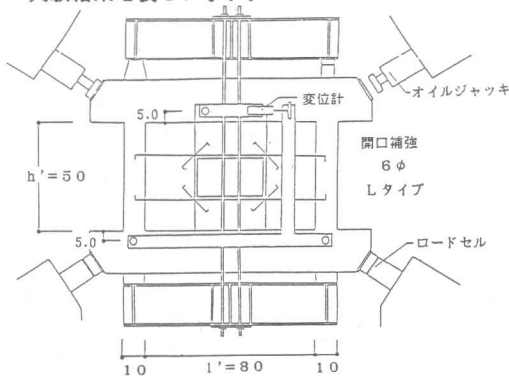


表1 モルタル調合比

水セメント比 (%)	単位水置 (kg/m <sup>3</sup> )	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	砂 (kg/m <sup>3</sup> )	設計基準強度 $F_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
60	189	315	945	250

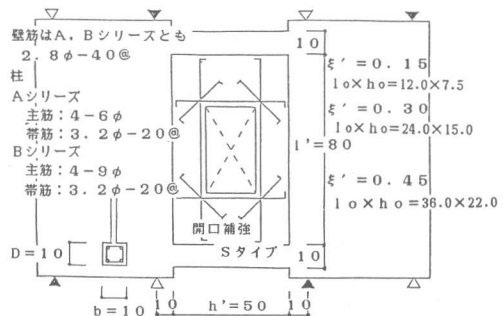


図2 Bシリーズ試験体 単位 cm

表2 鉄筋の強度

種類	原断面積 (mm <sup>2</sup> )	$E_s (\times 10^4)$ (kg/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )
$\phi$ -2.8	5.45	1.980	17.80	31.47
$\phi$ -3.2	7.79	1.955	23.64	34.72
$\phi$ -6.0	24.34	2.080	43.90	51.16
$\phi$ -9.0	62.45	2.006	34.43	47.63

表3 実験結果

シリーズ	試験体名称	F <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	t (cm)	Q <sub>c</sub> (t)	R <sub>c</sub> (10 <sup>-3</sup> )	Q <sub>max</sub> (t)	R <sub>max</sub> (10 <sup>-3</sup> )	Q <sub>u</sub> (t)	Q <sub>cal(a)</sub> (t)	Q <sub>cal(b)</sub> (t)	Q <sub>max</sub> Q <sub>cal(a)</sub>	Q <sub>max</sub> Q <sub>cal(b)</sub>
A	WAR45L-1	256.0	2.2	4.32	1.23	8.06	4.65	4.12	7.13	9.19	1.13	0.88
	WAR45L-2	323.5	2.3	4.53	1.05	9.26	4.42	8.70	11.49	1.06	0.81	
	WAR45S-1	227.3	2.0	4.78	1.12	9.64	5.46	4.46	7.77	8.22	1.24	1.17
	WAR45S-2	342.6	2.2	5.12	1.00	12.27	6.08	5.65	8.84	12.17	1.40	1.01
	WAR30L-2	275.0	2.3	4.89	0.92	12.41	5.12	4.46	10.20	11.50	1.22	1.08
	WAR30S-1	221.6	2.2	4.19	0.72	10.74	5.69	4.24	8.98	9.29	1.20	1.16
	WAR30S-2	252.7	2.3	3.83	0.49	11.21	5.85	4.36	9.71	10.58	1.16	1.06
	WAR15L-1	242.9	2.3	5.19	0.69	16.38	4.75	5.27	13.05	12.36	1.26	1.33
	WAR15L-2	253.1	2.2	4.02	0.80	12.32	5.18	4.87	13.31	12.89	0.93	0.96
	B	WBR45L-1	196.0	2.4	2.86	0.77	8.63	6.24	4.49	7.68	8.34	1.12
WBR45L-2		219.0	2.4	2.66	0.87	9.74	5.81	6.35	8.05	9.13	1.21	1.07
WBR45S		206.0	2.2	2.75	0.41	9.57	6.14	5.96	8.10	8.70	1.18	1.10

F<sub>c</sub> : 実験時モルタルシリンドラ圧縮強度  
 Q<sub>c</sub> : 斜めキレット発生時せん断力  
 t : 測定板厚(参考値)  
 R<sub>c</sub> : 同上層間変形角  
 Q<sub>max</sub> : 最大せん断力(破壊側)  
 R<sub>max</sub> : 同上層間変形角(破壊側)  
 Q<sub>u</sub> : R = 20.0 × 10<sup>-3</sup>rad時せん断力  
 Q<sub>cal(a)</sub> : トラス置換モデルによる最大せん断力  
 Q<sub>cal(b)</sub> : 式(2)による最大せん断力

3.1 破壊経過

図3に WAR45S-2 の最大強度時の亀裂状況、および Q-R 関係を示す。破壊経過は、定着長さ L タイプが S タイプに比べて、多少、亀裂幅の拡がりに拘束を与える点を除けば、パラメータの相違に関係なく、いずれも大要同じで、次のようにまとめることができる。

(1) 開口隅角部を始点とする斜め亀裂、(2) 開口隅角部に接する斜線と柱、梁で囲まれる三角形領域に斜め亀裂、(3) 柱頭、柱脚部に曲げおよびせん断亀裂、(4) (2)の重なる領域で直交した亀裂状態となり、コンクリートのスリップ状はく離を伴う滑落、(5) (4)の領域で柱に沿うスリップ破壊、(6) 柱頭、柱脚曲げ降伏への移行である。(5)が最大強度時で、(5)と(6)にかけてはξ'が小さいものほど急激に移行する。(4)で生じたせん断亀裂は局所的で、破壊性状に影響を与えていない。

■ 4 最大せん断強度

4.1 既往の実験式による最大せん断強度の検討

有開口壁の最大せん断強度を直接的に求める強度式は、現時点では発表されていない。このため、無開口壁の強度に開口による低減係数を乗じる形で求めている。多くの研究者によって提案されている無開口壁の強度式は、いずれも実験データを統計処理した実験式であるが、大別すれば、壁板のせん断力だけを考慮した富井<sup>1)</sup>、菅野、山田らの諸式<sup>2)</sup>と壁板と柱のせん断力の和の形の望月(重)<sup>3)</sup>、徳広他<sup>4)</sup>、筆者ら<sup>5)</sup>の諸式、およびその中間の広沢の式<sup>6)</sup>となる。低減係数としては、弾性剛性によるものと(γ = 1 - ξ)、徳広他<sup>7)</sup>による破壊領域の面積を考慮したものがある(γ' = √ΣAe/h'・1')。

図 4~7 は強度式として富井式、広沢式、徳広他<sup>7)</sup>の式、および筆者らの式を用い、これにγまたはγ'を乗じて有開口壁の最大せん断強度の計算値を求め、実験値と比較したものである。この結果から、計算値と実験値とのいちじるしい差は、基本的には低減係数よりも、強度式に起因しているといえる。筆者らの式は比較的よく実験値を把えている。これは、式(1)に示すように、柱の曲げ降伏時せん断力と壁板のせん断力の和の形になっている。

$$Q_{max} = 2 \cdot c \cdot Q_y + (0.368 F_c + 0.109 P_s \cdot \sigma_y - 17.9) t \cdot l' \dots \dots \dots (1)$$

式(1)は、一方向対角圧縮加力のもとでスリップ破壊した36体のデータをもとにしたものであるが、全体曲げ降伏に先行してスリップ破壊が生じるとき、曲げ・せん断加力の場合もよく把えている。また、式(1)は小型試験体によるものであるが、比較的大型のものでも、柱・梁が十分な寸法をもつ場合、適用できる<sup>8)</sup>。図 7 からは、最大せん断強度に加力方法は影響していないといえる。同様に補筋筋の定着長さも影響を与えていない。

4.2 トラス置換モデルによる弾塑性解析

実験式 × γ, γ' の形の強度評価は、無壁架構の場合、γ' = 0 となり、γ もまた極めて小さくなる。その結果、柱・梁架構のせん断抵抗力を過小評価している。ここでは、トラス置換モデルの解析を行うことで破壊のメカニズムを検討し、物理的に意味のある実験式を求める。

図 8 は、壁板に十分斜め亀裂が生じた状態を想定した解析モデルで、圧縮ブレースはコンクリート、引張ブレースはたて、よこの壁筋の合成である。その方向は亀裂状況から45°としている。その部材特性を次のようにした。(1) 梁：軸力、曲げについて弾性で、破壊は生じない。(2) 柱：軸力について弾性曲げについては弾塑性型とし、曲げ降伏のみ生じる。降伏モーメントは規準式(My = 0.8・a<sub>1</sub>・s<sub>y</sub>・D + 0.5・N・D(1 - N/b・D・F<sub>c</sub>))で求める。(3) 引張ブレース：s<sub>y</sub>σ<sub>y</sub>で降伏する完全弾塑性型。(4) 圧縮ブレース：完全弾塑性型で、降伏強度はcσ<sub>y</sub> = 0.56 F<sub>c</sub>とする。これは引張ブレースが降伏した状態では式(1)とほぼ等価な条件である<sup>9)</sup>。鉄筋のEsはEs = 2.1 × 10<sup>6</sup> k<sup>6</sup>/cm<sup>2</sup>とし、コンクリートのEcはEc = 2.1 × 10<sup>5</sup> √ F<sub>c</sub>/200 k<sup>6</sup>/cm<sup>2</sup>を用いて求める。

図 9,10 に WAR45S-1 の Q-R 関係および応力図を示す。どの試験体もその破壊は、大要、次のようである。(1) 開口隅角部に近い圧縮および引張ブレースの降伏、(2) 柱頭または柱脚の曲げ降伏、(3) ブレースの降伏、(4) 柱の弾性化と再度の降伏、(5) すべてのブレースの降伏。

このような破壊のメカニズムは、大要、式 (1) を誘導した際に設定したメカニズムに合致している。

図 11 は実験値と解析値  $Q_{cal}(a)$  の関係を示したもので、強度の点ではモデルと部材特性は妥当といえる。しかし変形の追跡は必ずしも適切でない。

#### 4.3 開口壁の最大せん断強度式の提案

上記の解析結果は、二本の柱のせん断力の和はほぼ一定で柱頭、柱脚曲げ降伏時せん断力の概略2倍になることを示している。これから、開口壁の最大強度式として、筆者らは式 (1) と同様な形の次式を提案する。

$$Q_{max} = 2 \cdot c \cdot Q_y + \tau_{max} \cdot t \cdot \Sigma \Delta l' \quad \dots \dots (2)$$

ここで、 $\Sigma \Delta l'$  は開口をよこ切らない圧縮ブレースの梁に沿う幅で(図8)、 $\tau_{max}$  は式(1)の ( ) 内の項である。図 12 に実験値と式(2)の計算値  $Q_{cal}(b)$  の関係を示した。4.1で述べた方法に比べて良い結果を示しており、無壁架構における矛盾もなく、スリップ破壊する有開口連層耐震壁のせん断強度式として適切なものといえる。

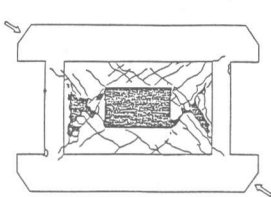


図 3 (a) WAR45S-2 の最大強度時の主要なキレツ状況

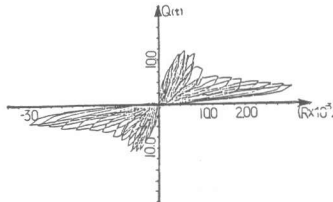


図 3 (b) WAR45S-1 の Q-R 関係

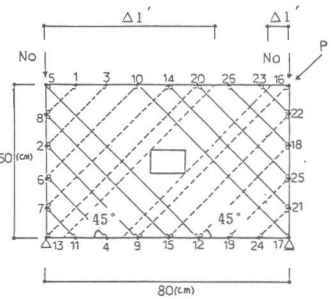


図 8 解析用トラス置換モデル

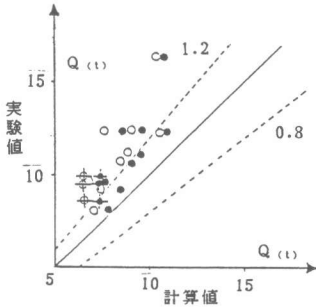


図 4 実験値と富井式  $\times r, r'$

● A シリーズ ( $\times r$ )  
○ ( $\times r'$ )

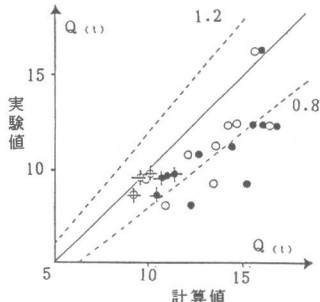


図 6 実験値と徳広式  $\times r, r'$

● B シリーズ ( $\times r$ )  
○ ( $\times r'$ )

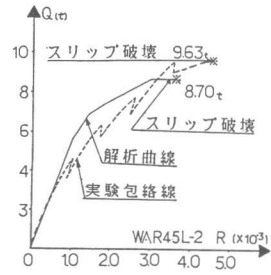


図 9 トラス置換モデルによる Q-R 曲線

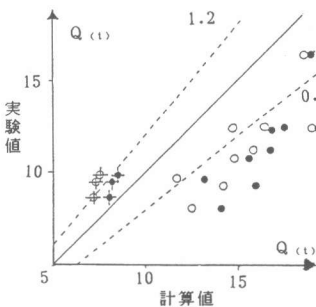


図 5 実験値と広沢式  $\times r, r'$

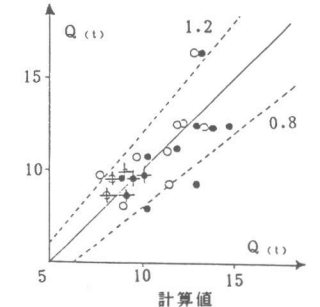


図 7 実験値と式(1)  $\times r, r'$

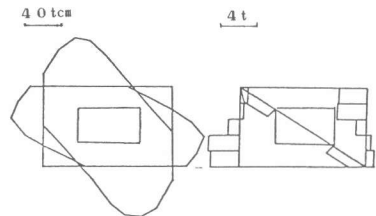


図 10 曲げ、せん断力および軸力の解析値

## ■ 5 変形について

ここでは、耐震壁の固有ループおよび包絡線について述べる。

### 5.1 固有ループ

せん断破壊する無開口壁の履歴曲線には、ある変形域で固有ループが存在することが既に認められている。図 13 は、 $\bar{R}/R_{max} = 0.3 \sim 0.7$  の変形域における WAR45S-2 の第 2 のループ曲線を、その最大強度時の座標  $(\bar{Q}, \bar{R})$  で除した無次元化固有ループである。スリップ破壊する開口壁の場合にも固有ループが存在するといえよう。固有ループの解析的表示として谷ら<sup>10)</sup> は次式を提案している。

$$(Q/\bar{Q}) = \mp a(-R/\bar{R})^4 + b(R/\bar{R})^3 + (1-b)(R/\bar{R}) \pm b \quad \dots \dots (3)$$

ここで、 $a$  はループのふくらみの、 $b$  はループ面積の指標である。図 14 は係数  $a$ 、 $b$  と開口周比  $\xi'$  の関係を片対数グラフについてプロットしたもので、A シリーズについては、補強筋の定着長さに関係なくほぼ直線関係にある。B シリーズの係数  $b$  が A シリーズに比べて大きいのは、せん断変形に加えて、全体曲げ変形が含まれていることに起因していると考えられる。

### 5.2 包絡線の折線表示

固有ループと同様に、包絡線を解析的に表示できれば、耐震壁のせん断変形特性を骨組解析に組み込むことが容易になる。図 15 は、WAR45S-2 の破壊側各ループの  $(\bar{Q}, \bar{R})$  点を座標  $(Q_{max}, R_{max})$  で除し、無次元化したものである。図中に示したように、包絡線は主要 tri-linear の折線で近似できる。図 16 は、A シリーズについて第 2 折線と第 3 折線の傾斜角と切片を開口周比  $\xi'$  についてプロットしたものである。この場合も、補強筋の定着長さによる差はない。図 17 は、WAR45S-2 の履歴曲線に、これと同じ変位制御で描いた解析曲線を重ね書きしたものである。類似性の一つの検討としてループの面積を求めると、実験値の 8.883t に対して計算値は 7.379t となる。式(3)の形について再考が必要である。

## ■ 6 結び

本報告の試験体の形状および寸法は限定されたものである。その限定のもとで次のようにいえる。

- (1) 最大せん断強度は、式(2)で求めることができる。
  - (2) 履歴特性は、固有ループと折線表示の包絡線で解析的に表すことができる。
- これらの結果は、より大きい試験体によって、さらに検討する必要がある。

## ■ 参考文献

- 1) 富井: 建築雑誌, 1982.7, 2), 3), 6) 望月(重): コンクリート工学, Vol.18, 1980.4, 4) 徳広, 三谷, 宮崎: 日本建築学会構造系論文報告集, 1985.9, 5) 望月, 竹原: 第6回日本地震工学シンポジウム, 1982.12, 7) 徳広, 小野: 日本建築学会大会梗概集, 1983.9, 8) 望月, 竹原: 工学院大学研究報告, 第58号, 1985.4, 9) 望月, 竹原: 日本建築学会大会梗概集, 1986.8, 10) 谷, 野村, 永坂, 平松: 日本建築学会論文報告集, 1975.2

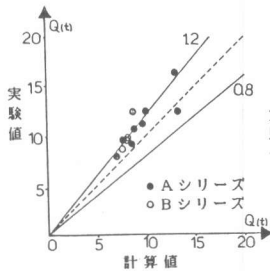


図 11 実験値と  $Q_{cal}(a)$  の関係

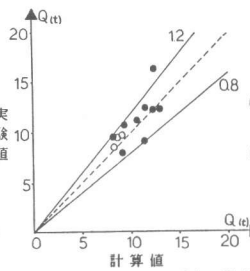


図 12 実験値と  $Q_{cal}(b)$  の関係

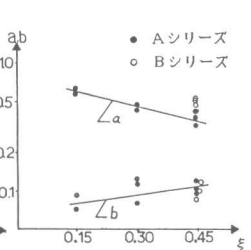


図 14 開口周比と係数

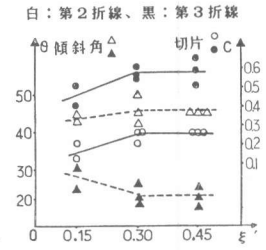


図 16 折線の係数と開口周比

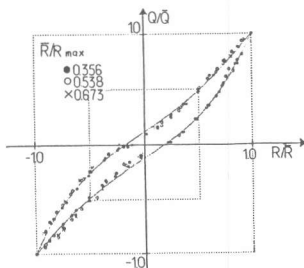


図 13 WAR45S-2 無次元化固有ループ

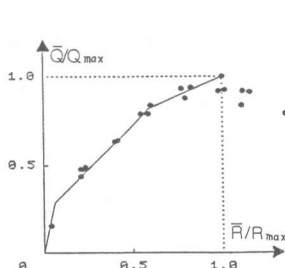


図 15 WAR45S-2 試験体の無次元化包絡線 (破壊側)

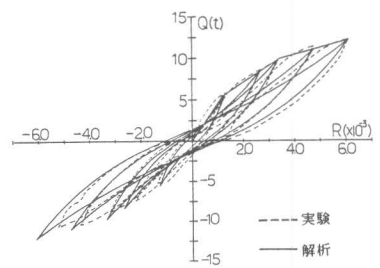


図 17 実験と解析の履歴曲線