

論文 特殊補強した偏在開口耐震壁の力学性状

小城圭史^{*1}・小野正行^{*2}・江崎文也^{*3}・藤井量久^{*4}

要旨: 偏在開口耐震壁の靱性を改善する方法として、壁板を鋼板で特殊補強するとともに、側柱脚部を鋼管で局部補強する新しい補強法を考案した。この方法で補強された偏在開口耐震壁について、一定速度で水平力を載荷させた載荷実験を実施した。実験結果によれば、開口横の壁板を鋼板で補強すれば、せん断破壊が先行する試験体でも耐力と靱性の改善により曲げ破壊モードに移行すること、および偏在開口耐震壁の水平せん断耐力の評価に著者らが提案した耐力低減率が適用されることなどがわかった。

キーワード: 耐震壁, 開口, 鋼板, せん断破壊, 曲げ破壊

1. 序

耐震壁の壁板に開口を設けた有開口耐震壁の力学性状については、多くの実験的および解析的研究が行われている。しかし、出入り口などに多用されている側柱横に開口を設けた偏在開口に関する実験資料は少ない。これらに関する既往の研究によれば、開口横の壁板のスリップ状せん断破壊により壁板に接する側柱脚部のせん断圧縮破壊、開口横の側柱の短柱化によるせん断破壊が生じて、急激に水平せん断耐力が低下する脆性的な破壊性状を示すことが観察されている¹⁾。したがって、著者らは、開口横の側柱および壁板のせん断破壊を防止するため、両側柱脚部を鋼管で補強し、圧力場を形成する開口横壁板を鋼板で局部的に開口高さまで鋼板補強した偏在開口耐震

壁の一定軸力下の正負繰返し水平力載荷実験を行い、偏在開口耐震壁の力学性状に及ぼす鋼板および鋼管補強の効果について検討を行った²⁾。その結果、鋼管で補強された側柱のせん断破壊は確実に防止されたが、開口上部近傍の補強鋼板境界部分の壁板にスリップ状のせん断破壊が生じたため、十分に靱性を改善することは困難であることがわかった。

このような耐震壁の靱性を改善するためには、開口横の壁板のスリップ状せん断破壊を防止する補強鋼板の形状および補強範囲を検討する必要がある。したがって、本実験では、無開口耐震壁に関して提案されている水平せん断耐力算定式を用いて、そのせん断余裕度が0.7程度のせん断破壊先行の無開口耐震壁に開口周比がおよそ0.4の開口を設けた偏在開口

表 - 1 試験体一覧

Specimen	Column			Thickness t (mm)	Wall		Dimension of opening h _o × l _o (mm × mm)	Steel reinforcement (mm)
	Cross section b×D (mm × mm)	Longi. Rein. P _g (%)	Hoop P _w (%)		Reinforcement			
					Arrangement	P _s (%)		
SW5-0.394E-0T	150×150	6-D13 3.39	4φ@50 0.33 -150×150× 1.6	50	4φ@50 Single	0.5	260 × 500	-
SW5-0.394E-PL2T					4φ@100 Double layer			PL-1.6 L-20×20
SW5-0.394E-PSL2T								PL-1.6 L-20×20 M8 Stud @100
SW5-0.394E-PSL3T								PL-1.6 L-20×20 M8 Stud @100

*1 株式会社 阪神住建 工修 (正会員)
 *2 近畿大学教授 九州工学部建築学科 博士 (工学) (正会員)
 *3 九州共立大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)
 *4 近畿大学大学院生 産業技術研究科造形学専攻 (正会員)

耐震壁試験体により補強鋼板の形状および補強範囲を実験変動因子とした水平載荷実験を計画した。鋼板による壁板の補強範囲は、開口上部壁板部を除いた部分補強と開口部を除いた壁板全面補強である。

本論は、壁板を鋼板によって特殊補強した偏在開口耐震壁の力学性状について述べるものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

図 - 1 に試験体形状・配筋・寸法および補強詳細図、表 - 1 に試験体一覧、表 - 2 に使用した材料の力学的性質を示す。試験体には SWt- ξ E-AaT の記号を付けている。S はせん断破壊先行を示し、W は壁板、t は壁厚 (cm)、 ξ は開口周比 $\sqrt{h_0 l_0 / hl}$ (h_0 : 開口高、 l_0 : 開口幅、 h : 壁板の高さ、 l : スパン長)、E は偏在開口をそれぞれ示している。A は壁板の特殊補強 (0: なし、P: 鋼板、S: スタッド付き、L: L型定着

付き)、a は鋼板の補強範囲 (2: 開口横、3: 壁板全面)、T は開口横側柱脚部鋼管補強を示している。試験体の断面設計にあたっては、無開口耐震壁に関して提案されている曲げ破壊によって決まる水平せん断耐力 $Q_{uf}^{3)}$ とせん断破壊によって決まる水平せん断耐力 $Q_{us}^{4)}$ を用いて、無開口耐震壁のせん断余裕度 Q_{us}/Q_{uf} が 0.7 程度となるように、断面を設計した。

表 - 2 材料の力学的性質

(1) コンクリート

Specimen	σ_B	σ_t
SW5-0.394E-0T	32.1	3.0
SW5-0.394E-PL2T	25.2	2.2
SW5-0.394E-PSL2T		
SW5-0.394E-PSL3T	25.6	2.5

σ_B : シリンダー圧縮強度 (MPa), σ_t : 引張強度 (割裂強度) (MPa)

(2) 鉄筋

Bar	a	σ_y	σ_u	E_s	ϵ (%)
4	0.13	160	301	131	37.7
D10	0.71	362	504	189	22.5
D13	1.27	354	486	185	21.5
-150 × 150 × 1.6	-	192	345	92	40.2

a: 断面積 (cm²), σ_y : 降伏強度 (MPa), σ_u : 引張強度 (MPa)

E_s : ヤング係数 (GPa), ϵ : 伸び (%)

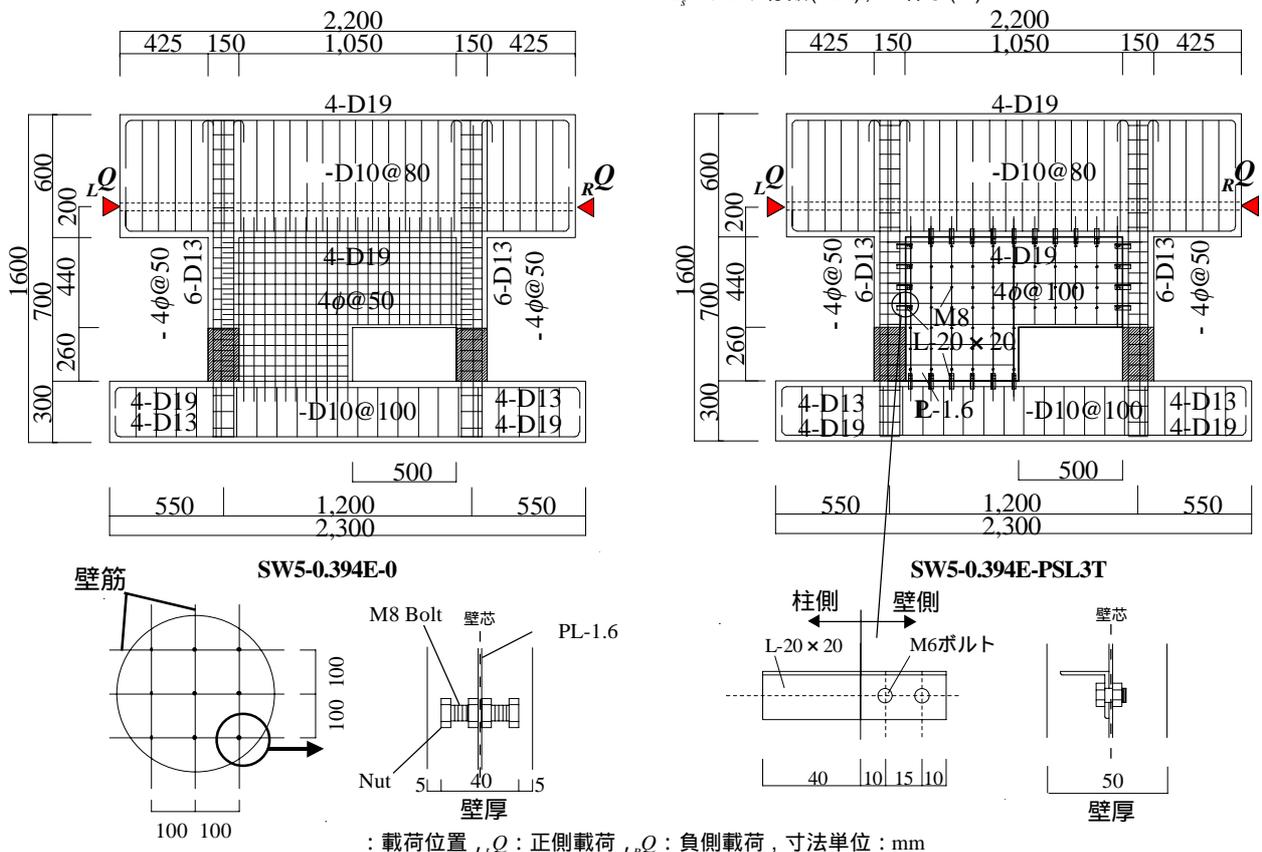


図 - 1 試験体形状・配筋・寸法および補強詳細図

2.2 荷重方法および荷重プログラム

図 - 2 に示す荷重装置を用いて，試験体両側柱の中心に，それぞれ 110kN の鉛直荷重を 2 台のアクチュエータで荷重し，鉛直荷重荷重後，図 - 3 のように計画した荷重プログラムにて，試験体に変位漸増正負繰返し水平力 Q をアクチュエータにて荷重した。水平力の荷重はせん断スパン比 ($= M/Ql$, M : 耐震壁に作用する最大曲げモーメント) が 0.75 となるように，基礎梁上端より 90cm の位置にて荷重した。鉛直荷重は，実験終了時まで一定に保持するようにした。水平力の荷重速度は，上部の剛な側梁下端の水平変位の速度 V_R で 0.01cm/sec，すなわち，層間変形角 R の速度で 0.014%/sec になるようにした。図 - 3 に示す層間変形角 R は，上部の剛な梁の中央部における水平変位 δ を基礎梁上端より上部梁下端までの高さ $h(=70\text{cm})$ で除した値 δ/h である。

2.3 測定装置

試験体に荷重した荷重は，アクチュエータ先端に取り付けたロードセルにて測定した。また，試験体の変位を求めるため，図 - 4 に示す変位測定装置により耐震壁各部の水平と鉛直の各変位を測定した。柱主筋の表面に貼付したひずみゲージにて側柱脚部の主筋のひずみを測定した。水平および鉛直の各荷重，試験体各部の水平と鉛直の各変位および鉄筋のひずみは，いずれも動ひずみ測定器にてデータを取り込んだ。データのサンプリング間隔は 0.2sec である。試験体に生じたひび割れおよびコンクリートの剥落の記録は，目視，写真撮影およびビデオカメラによる撮影によった。

3. 実験結果

3.1 履歴性状

図 - 5 に，各試験体の Q と R の時刻歴，履歴曲線および実験終了時のひび割れと破壊の状況を示す。図中に示した R_b は限界変形角である。本研究では水平せん断耐力以後，どれだけ変形可能かで規定される耐震性能の指標である破壊モードにより各試験体の破壊モード

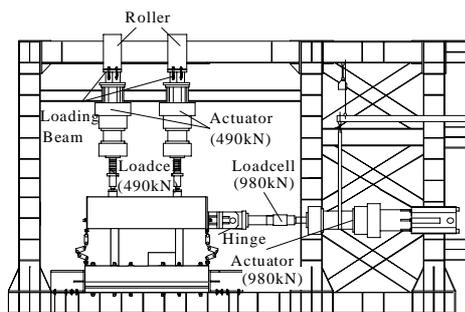


図 - 2 荷重装置

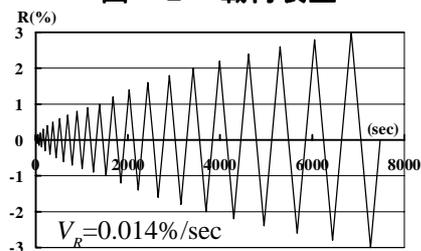


図 - 3 計画荷重プログラム

- 1: 水平変位制御用変位計
- 2: 側柱はらみ量測定用変位計
- 3: 側柱伸び量測定用変位計
- 4: 側梁はらみ量測定用変位計
- 5: 斜め変位測定用変位計

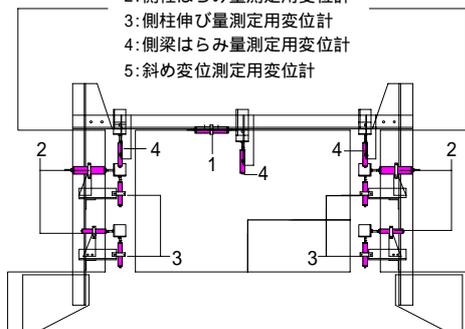
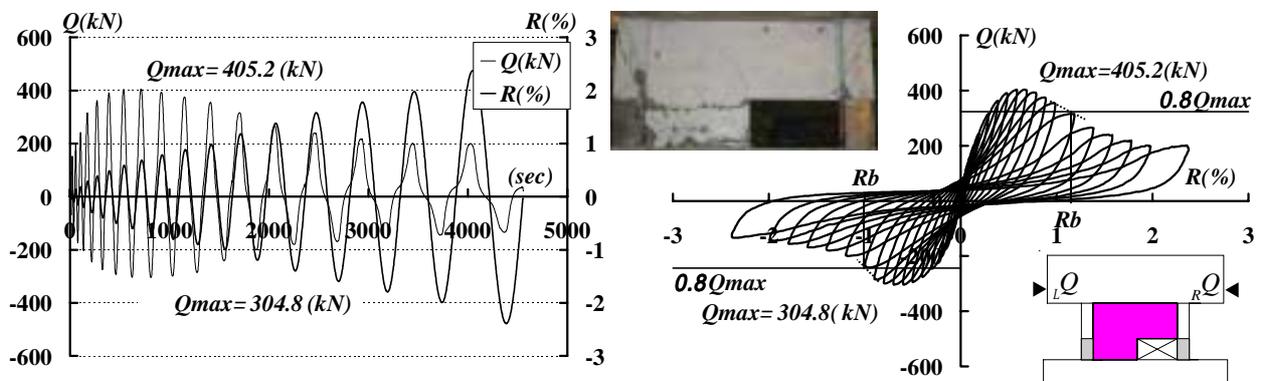
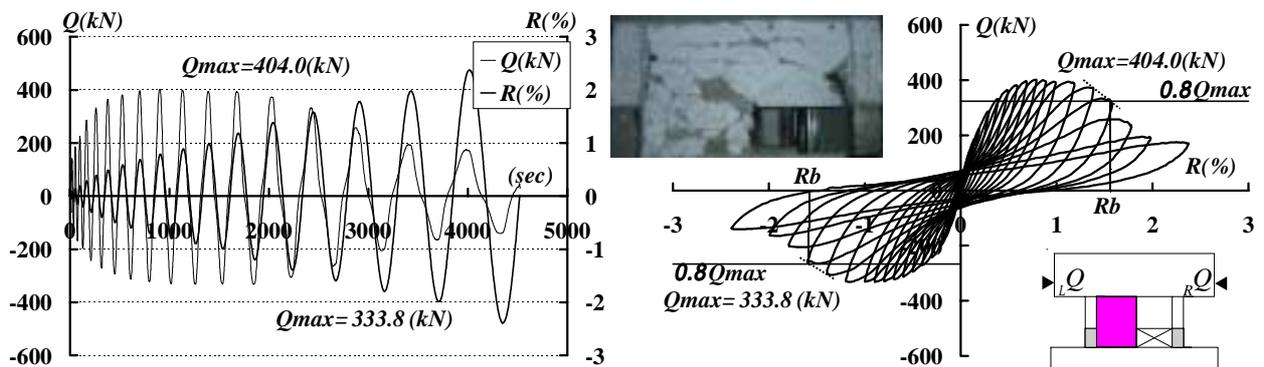
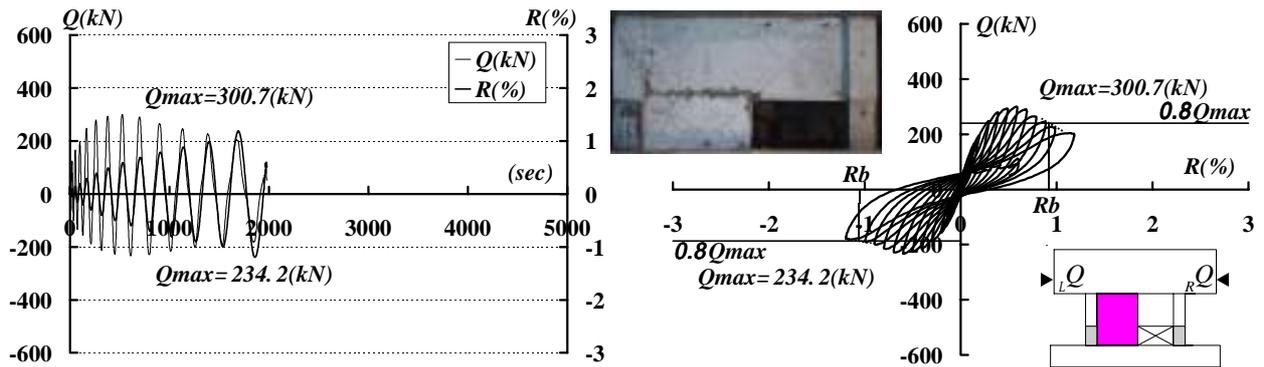
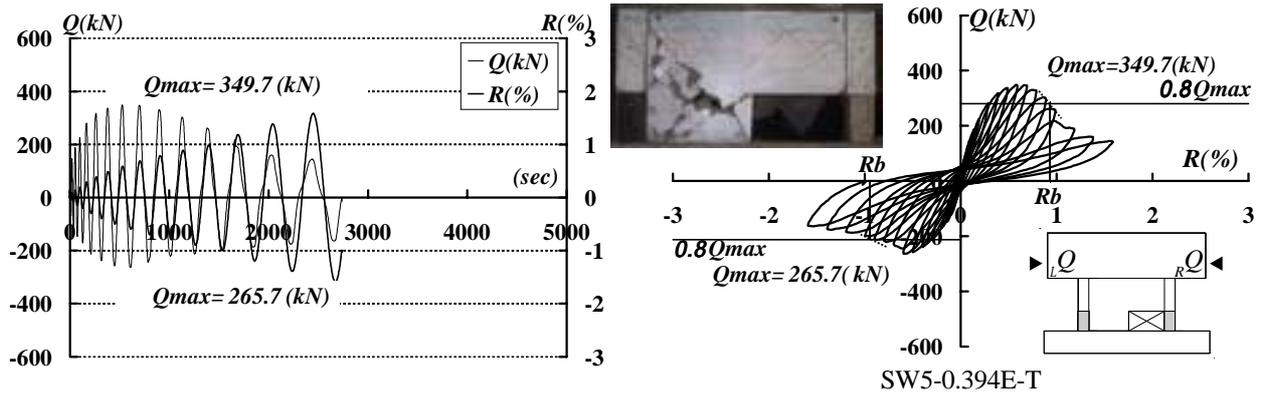


図 - 4 変位測定装置

を R_b の値により判別した。 R_b は，図 - 5 に示すように $0.8Q_{max}$ (Q_{max} : 最大荷重) の水平線と $Q-R$ の包絡曲線との交点のうち大きいほうの値で，その正側と負側荷重の R_b の値が異なるときには小さいほうの値を R_b とした。

図 - 5 の $Q-R$ の時刻歴の結果によれば，ほぼ図 - 3 の計画荷重プログラムの速度とほぼ一致していることがわかる。無開口耐震壁の試験体は壁板にスリップ状のせん断破壊が生じて急激に水平耐力が低下する脆性的な履歴性状を示し，破壊モードはせん断破壊モードである。側柱脚部を鋼管で補強した試験体は，開口横壁板にスリップ状のせん断破壊が生じたが，側柱のせん断破壊は確実に防止され鉛直荷重の支持能力も低下せず比較的安定した履歴性状を示した。破壊モードはせん断破壊モードである。壁板を鋼板で補強した場合は，



R_b : 限界変形角⁵⁾ $R_b < 1.0$: せん断破壊モード, $R_b = 1.0$: 曲げ破壊モード

図 - 5 試験体の Q と R の時刻歴, 履歴曲線および実験終了時のひび割れ・破壊状況

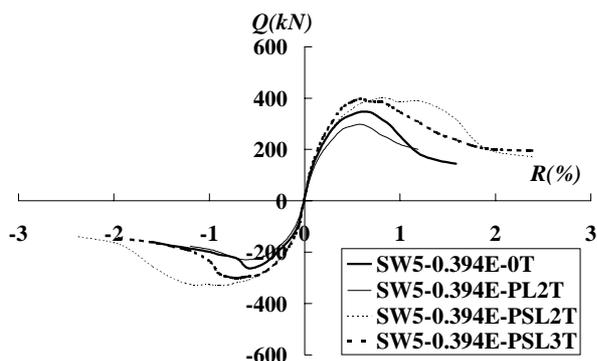


図 - 6 Q-R の包絡曲線

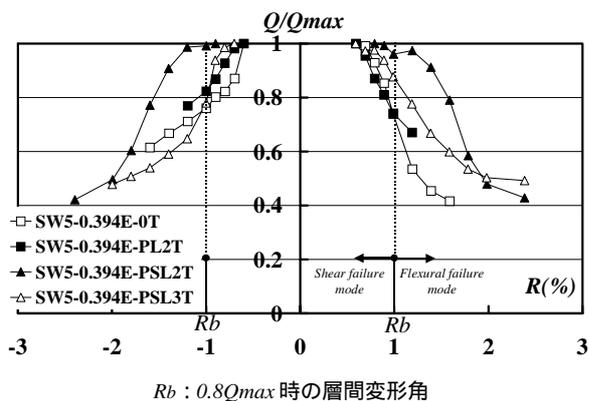


図 - 7 水平耐力以後の包絡曲線の耐力低下率

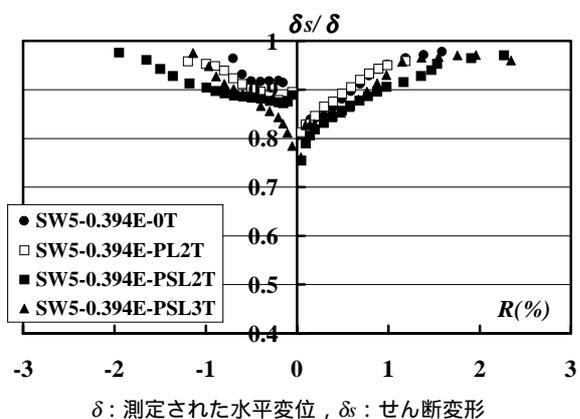


図 - 8 せん断変形率

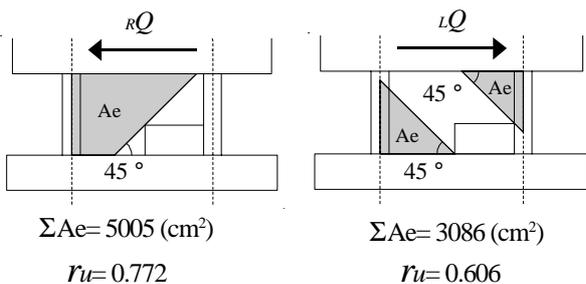


図 - 9 圧力場を形成する壁板の面積 Ae と耐力低減率の計算値 ru

正側では R が 0.5 ~ 0.7% 近傍で水平せん断耐力に達した。壁板をスタッドなしの鋼板で補強している試験体の場合は、上部開口隅角部近傍の壁板が側柱まで水平にスリップ状のせん断破壊をし、補強鋼板と両面のコンクリートが完全に分離し、補強鋼板が座屈し面外に膨らむ破壊性状を示した。破壊モードはせん断破壊モードである。スタッド付き鋼板による部分補強と全面補強の両試験体とも曲げ破壊特有の安定した履歴性状を示し、その破壊モードは曲げ破壊モードであるが、部分補強の試験体のほうが全面補強の試験体よりも靱性が改善されている。壁板の補強範囲の違いにより、壁板のひび割れや靱性に違いがあるが、これらについては今後検討する必要がある。図 - 6 に $Q-R$ の包絡曲線を、図 - 7 には、水平耐力以後の包絡曲線の耐力低下率を示した。これらの結果によれば、側柱脚部を鋼管で補強し、壁板をスタッド無しの鋼板やスタッド付き鋼板で補強すれば、壁板を鋼板で補強していない偏在開口試験体よりも水平耐力以後の耐力低下を小さくすることができ、その靱性が改善され、側柱のせん断破壊が確実に防止できるものと考えてよい。図 - 8 にせん断変形率 δ_s/δ を示す。せん断変形 δ_s は両側柱の鉛直変位から曲げ変形 δ_b を求め、上梁中央の測定された水平変位 δ から δ_b を差し引いて求めた。補強した試験体のせん断変形は変形の増大により $R=1\%$ 近傍まで直線的に増大する。図 - 9 に示す壁板の圧力場を形成する面積和 ΣAe の大きいほうが図 - 8 に示すように水平せん断耐力以前ではせん断変形が小さくなる傾向があるが、補強方法による顕著な影響はみられない。

3.2 強度性状

本実験からも明らかのように、開口が偏在すると図 - 9 に示すように載荷方向で圧力場を形成する壁板の面積和 ΣAe の大きさが異なるため、その水平せん断耐力が載荷方向で異なることがすでに知られている^{1), 5)}。現行の RC 規準の耐力低減率⁶⁾では開口位置などが考

表 - 3 RQ_{ue} / LQ_{ue} と Rr_u / Lr_u の関係

Specimen	$\frac{RQ_{ue}}{LQ_{ue}}$ (kN)	$\frac{Rr_u}{Lr_u}$	$\frac{RQ_{ue}}{LQ_{ue}}$	$\frac{Rr_u}{Lr_u}$
SW5-0.394E-0T	349.7 265.7	0.772 0.606	1.32	1.27
SW5-0.394E-PL2T	300.7 234.2	0.772 0.606	1.28	1.27
SW5-0.394E-PSL2T	404.0 333.8	0.772 0.606	1.21	1.27
SW5-0.394E-PSL3T	405.2 304.8	0.772 0.606	1.33	1.27

慮されていないために偏在開口耐震壁の水平せん断耐力を精度よく評価できない。したがって、著者らは、有開口耐震壁の実用的な水平せん断耐力の評価方法として図 - 9 に示す ΣAe にもとづいた耐力低減率 $r_u (= \sqrt{\Sigma Ae/hl})$ を提案した^{1), 5)}。 r_u を求めるにあたっては壁板の斜めひび割れ傾斜角を図 - 9 に示すように 45 度 (文献 1, 文献 5 参照) として、 ΣAe を求め、正側載荷の耐力低減率 Rr_u と負側載荷の耐力低減率 Lr_u を求めた。表 - 3 に水平せん断耐力の正側実験値 RQ_{ue} と負側実験値 LQ_{ue} との比 RQ_{ue}/LQ_{ue} と正側耐力低減率 Rr_u と負側耐力低減率 Lr_u との比 Rr_u/Lr_u を示す。図 - 10 に RQ_{ue}/LQ_{ue} と Rr_u/Lr_u の関係を示す。

表 - 3 と図 - 10 は、コンクリート強度などの材料定数や補強鋼板などの影響がないものであり、 RQ_{ue}/LQ_{ue} は Rr_u/Lr_u によく一致している。このことは、 ΣAe が水平せん断耐力に寄与していることを示しており、著者らの提案した r_u により、補強した偏在開口耐震壁の正側と負側の水平せん断耐力比が評価できる。

4. 結論

開口横壁板および壁板全体を鋼板で補強し、側柱脚部を鋼管で補強した偏在開口耐震壁について、一定軸力下の正負繰返し水平力載荷実験を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 側柱脚部を鋼管で補強し、壁板を鋼板で補強すれば、せん断破壊が先行する試験体でも耐力と靱性の改善により曲げ破壊モードに移行する。しかし、鋼板の補強範囲の優劣については、今後の検討が必要である。

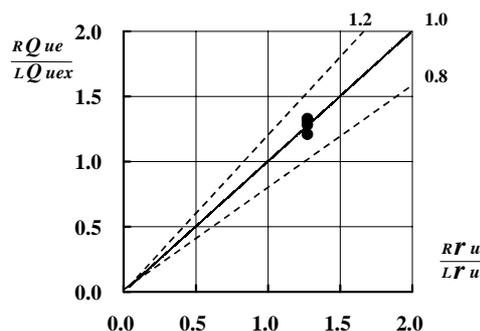


図 - 10 RQ_{ue} / LQ_{ue} と Rr_u / Lr_u の関係

- 2) 著者らが提案している耐力低減率により、補強した偏在開口耐震壁の正側と負側の水平せん断耐力比が評価できる。

謝辞

本研究の試験体制作および実験の実施にあたっては、平成 13 年度の近畿大学九州工学部建築学科小野研究室および九州共立大学工学部建築学科江崎研究室の卒論生の協力を得た。ここに、関係者各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 小野正行, 徳広育夫: 鉄筋コンクリート造耐震壁の開口の影響による耐力低減率の提案, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 435 号, pp.119-129, 1992.5
- 2) 小城圭史, 小野正行, 江崎文也: 偏在開口耐震壁の補強法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.463-468, 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・同解説, pp.11-12, 1992.8
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990.11.1, pp.122-135
- 5) 小野正行: 鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の弾塑性性状に関する研究, 第 4 章 RC 有開口耐震壁の水平載荷実験, 学位論文, pp.59-63, 2001.3.15 (提出先: 工学院大学)
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999 改定