

論文 偏在開口耐震壁の補強法に関する実験的研究

小城圭史*1・小野正行*2・江崎文也*3

要旨：偏在開口耐震壁の靱性を改善する方法として、開口横の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、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、補強部分のせん断破壊を防止することができ、靱性の改善に効果があること、側柱脚部を鋼管で補強すれば、側柱のせん断破壊を確実に防止できること、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：有開口耐震壁、偏在開口、鋼板、鋼管、せん断破壊

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、開口位置および開口数の組み合わせにより、有開口耐震壁は、複雑な抵抗機構および破壊機構を示すことから、その力学性状を明らかにするためには、実験資料がまだ不十分であると考えられる。とくに、出入口口として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¹⁾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にもせん断圧縮破壊が生じて、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。また、開口横の側柱が開口により短柱化し、せん断破壊が生じる恐れが大きくなり、無開口耐震壁では曲げ破壊先行となるように断面設計しても、側柱横に開口を設けた偏在開口耐震壁では脆性的なせん断破壊を起こす事例¹⁾が報告されている。

著者らは、開口横の側柱のせん断破壊を防止するため、開口横の側柱脚部を鋼管で局部的に補強した偏在開口耐震壁の一定軸力下での正負繰返し水平力載荷実験を行い、偏在開口の力学性状に及ぼす鋼管

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、開口横の壁板のスリップ状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必要がある。そのためには、開口横壁板部分を厚くしてせん断応力度を小さくするか、または、X型筋や鋼板などで特殊補強を施す方法が考えられる。そこで、開口横を鋼板で補強した実験例がほとんどないことを考慮し、開口横壁板を鋼板で補強した有開口耐震壁の力学挙動に及ぼす鋼板の補強効果の影響を実験的に明らかにする目的で、開口横の壁板補強法および開口横の側柱脚部補強法を実験変動因子とした水平力載荷実験を計画した。

耐震壁の断面は、無開口耐震壁の水平せん断耐力算定式^{3),4)}を用いて、せん断余裕度が0.7程度を下回るようなせん断破壊先行の無開口試験体となるように設計し、その各試験体の側柱横に、開口周比がおよそ0.4の開口を設けた偏在開口試験体について実験を行った。

本論は、偏在開口を有する有開口耐震壁の開口横

*1近畿大学大学院 産業技術研究科造形学専攻 (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)

の壁板を特殊補強した耐震壁の力学性状について検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 試験体形状および加力方法

図-1に試験体形状・配筋および壁板補強詳細図を、表-1に試験体一覧を示す。表-2には、使用材料の力学的性質を示す。実験変動因子は、開口横壁板の補強法と開口横側柱脚部の補強法である。

試験体にはSWt- ξ -A-B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 :階高、 l :スパン長)をそれぞれ示している。Aは開口横壁板の特殊補強(0:なし、S:スタッド付き鋼板補強、C:溝型鋼付き鋼板補強)を示し、Bは開口横側柱脚部特殊補強(0:なし、T: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算定値 $Q_{uf}^{3)}$ およびせん断破壊によって決まる水平せん断耐力 $Q_{us}^{4)}$ を用いた。無開口耐震壁のせん断余裕度 $\alpha = Q_{us} / Q_{uf}$ を0.7程度となるように断面を設計した。

表-2 使用材料の力学的性質

(1)コンクリート

試験体	σ_B	σ_t	σ_B : シリンダー 圧縮強度 (MPa) σ_t : 引張強度 (割裂強度) (MPa)
SW5-0.394-0-0	32.1	3.0	
SW5-0.394-0-T			
SW5-0.394-S-T			
SW5-0.394-C-T			

(2)鉄筋

種別	a	σ_y	σ_u	E_s
4 ϕ	0.12	178	289	120
D10	0.71	334	473	179
D13	1.27	361	505	182
□-150×150×1.6	-	274.4	335.5	-

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)

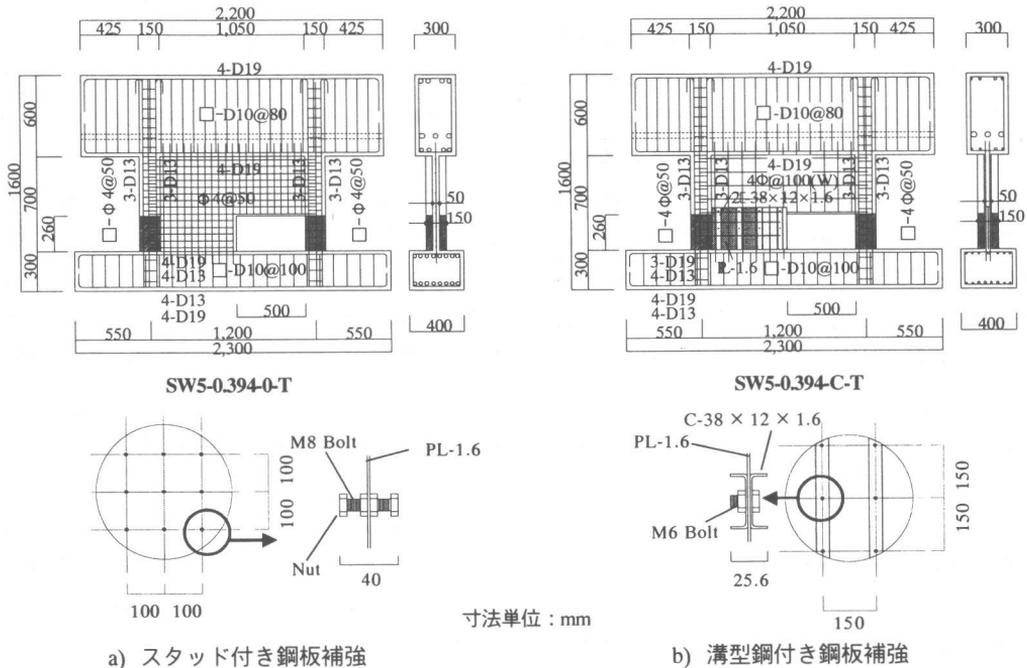


図-1 試験体形状・配筋および壁板補強詳細図

表-1 試験体一覧

試験体	柱断面 b×D (cm×cm)	柱 主筋 (主筋比) ($P_g=3.39\%$)	帯筋・鋼管		壁厚 t (cm)	壁筋		開口寸法 $h_0 \times l_0$ (cm×cm)
			径-間隔 (mm)	P_w (%)		径-間隔 (mm)	P_s (%)	
SW5-0.394-0-0	15×15	6-D13 ($P_g=3.39\%$)	4 ϕ -@50	0.33	5	4 ϕ @50 シングル	0.5	26×50
SW5-0.394-0-T								
SW5-0.394-S-T								
SW5-0.394-C-T								

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。鉛直荷重荷重後は、図-3に示すような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。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。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が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 で除した値 δ/h である。

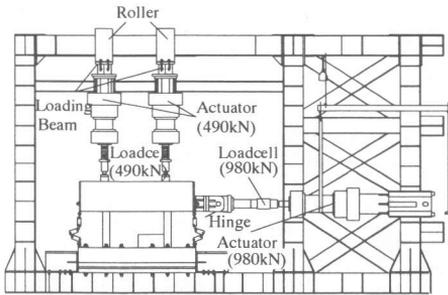


図-2 荷重装置

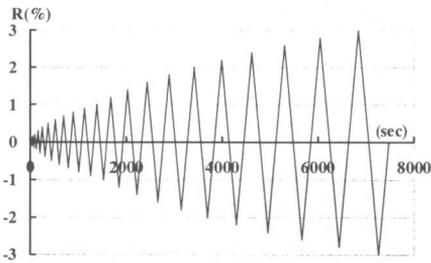


図-3 荷重プログラム

2.2 測定方法

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、試験体の変形を求めるため、図-4に示すような、試験体の剛な基礎梁に埋め込まれたボルトにて固定された変位測定用フレームに取り付けた高感度変位計に

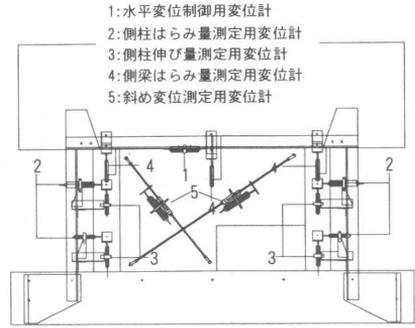


図-4 変位測定装置

て、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。パソコンに取り込んだ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 破壊性状および履歴性状

図-5に、各試験体の Q と R の履歴曲線、 Q と R の時刻歴および実験終了時のひび割れと破壊の各状況を示す。観測された Q と R の時刻歴によれば、図-3に示す計画した荷重プログラムとほぼ同じ結果となり、計画した荷重が行われたことがわかる。各試験体の破壊性状および履歴性状について述べると以下のようである。

開口横の壁板を鋼板で補強していない試験体SW5-0.394-0-0の場合は、比較的初期の荷重サイクルで開口横の壁板に斜めせん断ひび割れが生じた。Rがおよそ0.5%近傍で水平せん断耐力(最大荷重)に達し、その後水平変形が増大すると開口横の壁板が徐々に圧壊し、これらの圧壊が繋がるいわゆるスリップ状のせん断破壊を起こして急激に耐力が低下し、脆性的な履歴性状を示した。壁板のせん断破壊時には側柱もせん断破壊を起こしてかなり損傷し、鉛直支持能力が低下する傾向を示したため、その後

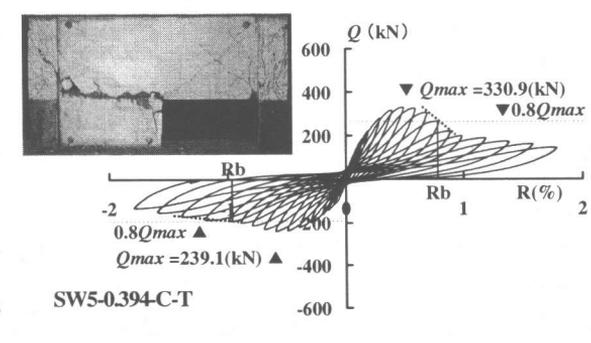
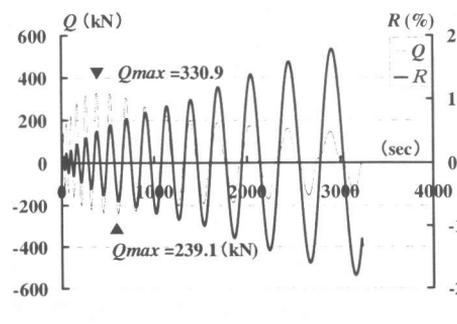
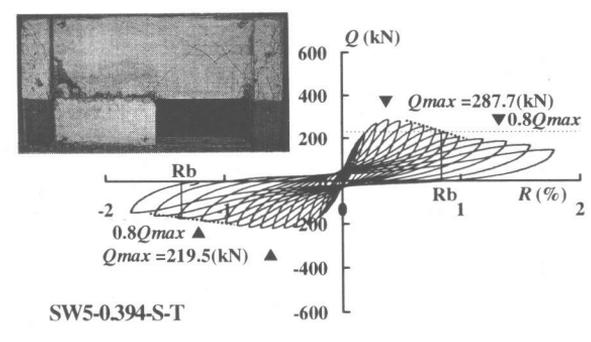
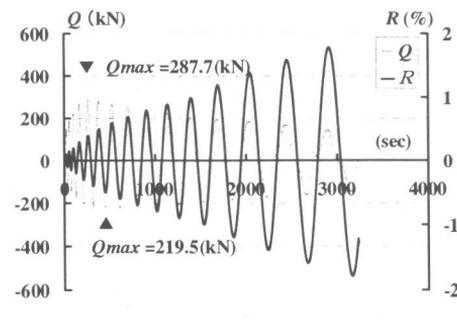
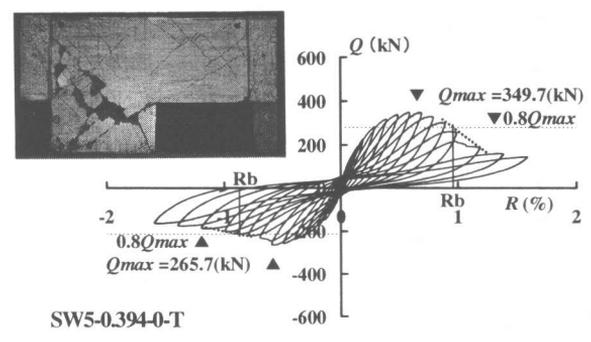
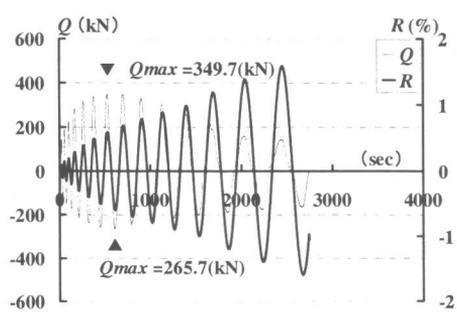
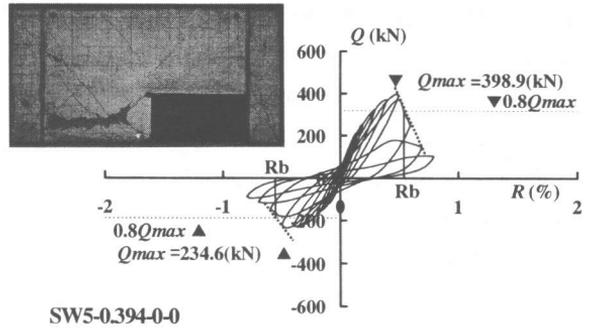
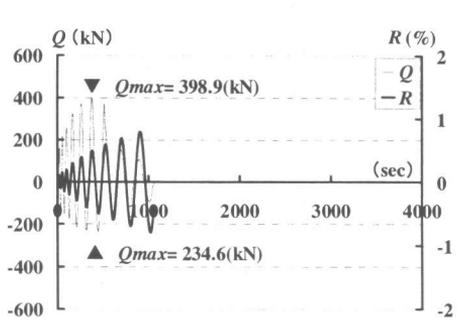


図-5 試験体の Q と R の履歴曲線と時刻歴, および実験終了時のひび割れと破壊状況

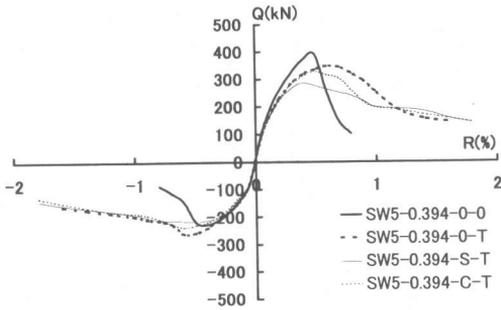


図-6 荷重変形の包絡曲線

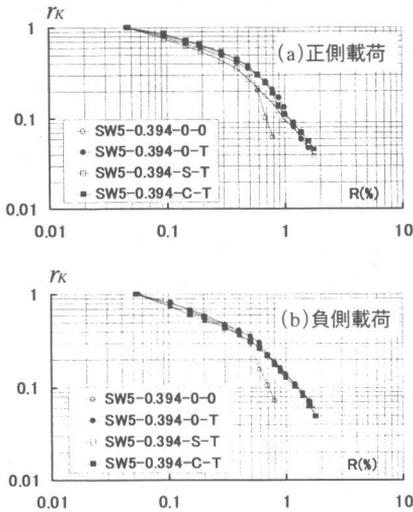
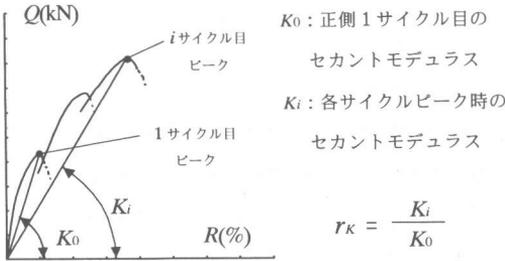


図-7 r_K と R との関係

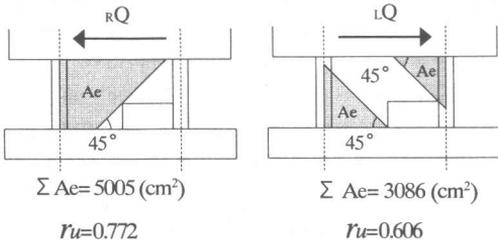


図-8 圧力場を形成する壁板の面積 A_e と耐力低減率計算値 r_u

水平力荷重を中止した。一方、側柱脚部を鋼管で被覆補強した試験体SW5-0.394-0-Tの場合には、補強しない場合よりも水平せん断耐力が小さく、耐力時の変形も大きい結果となった。これは、補強鋼管によって壁板と側柱のコンクリートが完全に一体となっていないことから、開口横の壁板のせん断応力度分布が、補強していない場合と異なるためと考えられる。つまり、側柱と壁板とのせん断応力度の伝達が不完全のため、開口横の壁板のせん断応力度分布が一体となった場合の応力度分布よりも不均一となって応力集中が起こり、早期にコンクリートが破壊し始めることがその一因と思われる。しかし、壁板の破壊後も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。

開口横を鋼板で補強した試験体SW5-0.394-S-TおよびSW5-0.394-C-Tの場合は、初期の荷重サイクルでは補強部分のせん断ひび割れは観察されず、せん断ひび割れの発生は、開口上部の補強鋼板境界部分で生じた。水平変形の増大とともにこの部分で小さなせん断ひび割れが多数発生した。鋼板補強の場合は、正側では R が0.5%以前または近傍で水平せん断耐力に達した。鋼板補強により補強部分の壁板のせん断ひび割れの発生が少なかったことから、スタッドまたは軽量溝型鋼を取り付けた鋼板で補強された試験体は、いずれも鋼板と壁板コンクリートとの一体性は確保されているものと考えられる。

水平せん断耐力以後は、水平変形の増大とともに開口上部近傍の補強鋼板境界部分のひび割れ近傍からコンクリートのスリップ状のせん断破壊が起こり、徐々に水平せん断耐力が低下した。このような壁板の破壊性状から判断すると、壁板の破壊による荷重低下を防止するためには、開口上部の壁板高さの中央近傍まで補強鋼板を設けておくことが望ましいものと考えられる。

図-6に荷重変形履歴曲線の包絡線を示した。これらによれば、開口横の壁板を鋼板で補強し、側柱脚部を鋼管で補強すれば、耐震壁の靱性を改善することができるとともに、側柱のせん断破壊を確実に防止することができるものと考えてよいようである。

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

試験体名	$\frac{RQ_{uex}}{LQ_{uex}}$ (kN)	$\frac{Rr_u}{Lr_u}$	$\frac{RQ_{uex}}{LQ_{uex}}$	$\frac{Rr_u}{Lr_u}$
SW5-0.394-0-0	398.9 234.6	0.772 0.606	1.70	1.27
SW5-0.394-0-T	349.7 265.7	0.772 0.606	1.32	1.27
SW5-0.394-S-T	287.7 219.5	0.772 0.606	1.31	1.27
SW5-0.394-C-T	330.9 239.1	0.772 0.606	1.38	1.27

る。また、図-7には、剛性低下率 r_K として、正側1サイクル目のセカントモデュラス K_0 に対する各サイクルピーク時のセカントモデュラス K_i の割合 $r_K = K_i / K_0$ を、各ピーク時の層間変形角 R との関係で示した。これらによれば、開口横の壁板を鋼板で補強し、側柱脚部を鋼管で補強すれば、水平せん断耐力以後の耐力低下を小さくすることができ、耐震壁の靱性が改善される可能性があることを示している。また、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。なお、開口上部近傍の補強鋼板境界部分の破壊により耐力が低下していることを考慮すると、鋼板補強の範囲は、開口上部の壁板高さの中央付近まで広げる必要があるとされているが、これらについては、今後、更に検討する必要がある。

3.2 強度性状

表-3に水平せん断耐力の正側実験値 RQ_{uex} と負側実験値 LQ_{uex} との比を示す正負耐力比 RQ_{uex} / LQ_{uex} と正側水平せん断耐力低減率 Rr_u と負側水平せん断耐力低減率 Lr_u との比を表す正負耐力低減率比 Rr_u / Lr_u を示す。表中の計算値は、著者らが提案している耐力低減率¹⁾ $r_u (= \sqrt{\sum Ae/hi})$ を用いて求めた。 r_u を求めるにあたっては、壁板のせん断ひび割れ傾斜角を 45° として、図-8に示すような圧力場を形成する壁板の面積を求めた。

図-9に RQ_{uex} / LQ_{uex} と Rr_u / Lr_u の関係を示す。図-9は、コンクリート強度などの材料定数、および柱や壁板の補強による影響が全くない完全に無次元化されたものであり、 RQ_{uex} / LQ_{uex} は Rr_u / Lr_u にほぼ一致している。このことは開口が偏在している有開口耐震壁の水平せん断耐力の評価に圧力場を形成する壁板の面積から求められる水平せん断耐力低減率が適

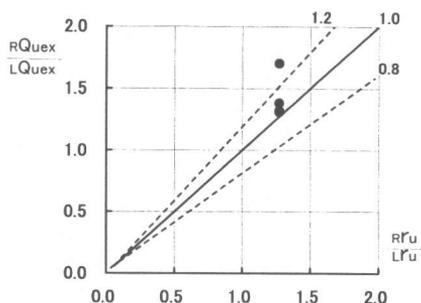


図-9 RQ_{uex} / LQ_{uex} と Rr_u / Lr_u の関係

用されることを示している。

4. 結論

開口横の壁板を鋼板で補強し、側柱脚部を鋼管で補強した偏在開口耐震壁について、一定軸力下で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) 開口横の壁板を鋼板で補強すれば、補強部分のせん断破壊を防止することができ、靱性の改善に効果がある。しかし、鋼板の補強範囲については、今後の検討が必要である。
- 2) 側柱脚部を鋼管で補強すれば、側柱のせん断破壊を確実に防止できる。
- 3) 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。

謝辞

試験体製作および実験の実施にあたっては、平成12年度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、関係各位に感謝致します。

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，1992.5，pp.119～129
- 2) 小城圭史・小野正行・江崎文也・松岡良智：側柱脚部を局部補強した偏在開口耐震壁の弾塑性性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，2000.6，pp.421～526
- 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，1992.8，pp.11-12
- 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