

論文 開口横壁板を補強したRC有開口耐震壁の力学性状

藤井量久^{*1}・小野正行^{*2}・江崎文也^{*3}・姜優子^{*4}

要旨: 壁板中央に開口を設けた有開口耐震壁の靱性を改善する方法として、壁板を鋼板で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有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実施した。実験結果によれば、開口横の壁板を鋼板で特殊補強すれば、せん断破壊が先行する試験体でも水平せん断耐力が増大し靱性の改善により曲げ破壊モードに近い性状を示すこと、および開口幅が同じ袖壁型有開口耐震壁に近い耐力低下率を示すことがわかった。

キーワード: 鋼板補強, 水平せん断耐力, 靱性, 破壊モード, 耐力低下率

1. 序

RC造構造物における耐震壁は、その水平剛性と耐力が大きいことから水平力を負担させる重要な耐震要素として用いられるため、無開口や有開口耐震壁に関する実験的および解析的研究が多く行われている。既往のRC造有開口耐震壁の研究によると、せん断破壊が先行する耐震壁の場合は、比較的初期の荷重サイクルで開口横壁板にひび割れが生じ、層間変形角 R が $0.5\% \sim 0.6\%$ 近傍で水平せん断耐力に達した後、開口横壁板がスリップ状のせん断破壊を起こし、急激に耐力が低下する極めて脆性的な破壊性状を示すことが観察されている。また、水平せん断耐力は載荷速度や履歴パスの影響を受けることも観察されている¹⁾。したがって、壁

板の破壊に伴うコンクリートの膨張を拘束する簡便で適切な方法を見出す必要があるが、壁板のせん断破壊を確実に防止できる補強法はいまのところないようである。開口横壁板にブレース鉄筋を用いた補強法²⁾による実験資料があるが、確実に壁板のせん断破壊を防止することはできていない。そこで、有開口耐震壁の力学挙動に及ぼす鋼板の補強効果を実験的に明らかにするため、無開口耐震壁の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 程度となるようなせん断破壊先行の耐震壁について、壁板を鋼板補強した場合の水平力載荷実験を計画した。

本論は、開口横壁板を鋼板で補強した有開口耐震壁および比較検討のために壁板を補強して

表 - 1 試験体一覧

Specimen	Column			Wall				
	Cross section $b \times D$ (mm \times mm)	Longi. Rein. P_g (%)	Hoop P_w (%)	Thickness (mm \times mm)	Reinforcement		Dimension of opening $h_o \times l_o$ (mm \times mm)	Steel reinforcement (mm)
					Arrangement	P_s (%)		
SW5-0.00-0	150 \times 150	6-D13 3.39	4 ϕ @50 0.33	50	4 ϕ @50 Single Layer	0.5	-	-
SW5-0.51C							700 \times 315	
SW5-0.28C-0							210 \times 315	
SW5-0.28C-PSL					PL-1.6 L-20 \times 20 M8 Stud @100			

*1 近畿大学大学院生 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)

*4 近畿大学大学院生 産業技術研究科造形学専攻 (正会員)

いない無開口と有開口耐震壁および有開口耐震壁の開口幅と同じ袖壁型有開口耐震壁について行った一定軸力下での正負繰返し水平力载荷実験結果について述べたものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

図 - 1 に試験体形状・配筋の一例, 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 C-A 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, C は中央開口, A は開口横壁板の特殊補強 (P: 鋼板, S: スタッド付き, L: L型定着付き) をそれぞれ示している。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 $Q_{us}^{4)}$ を用いた。無開口耐震壁のせん断余裕度 Q_{us}/Q_{uf} を 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
SW5-0.00-0	27.7	2
SW5-0.51C	25.6	2.4
SW5-0.28C-0	30.9	2.3
SW5-0.28C-PSL	24.6	2.9

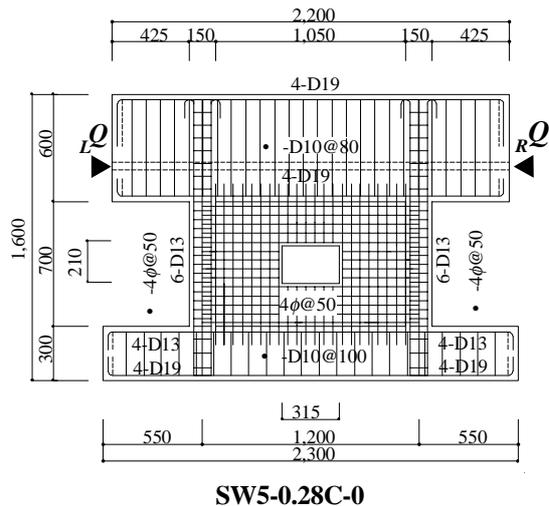
σ_B : シリンダー圧縮強度 (MPa) σ_t : 引張強度 (割裂強度) (MPa)

(2) 鉄筋

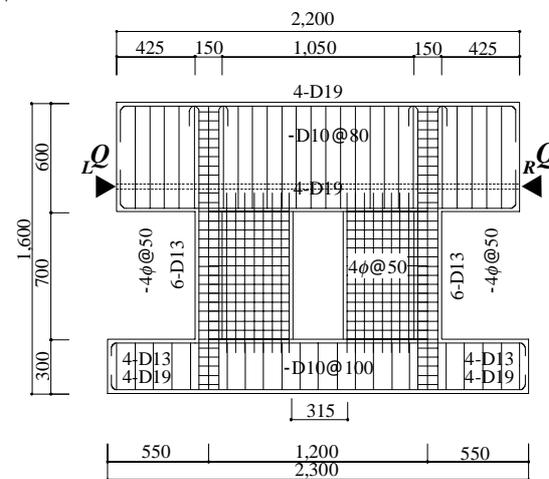
Bar	a	σ_y	σ_u	E_s	ϵ
4	0.12	178	289	120	120
D10	0.71	362	504	189	189
D13	1.27	354	486	185	185

a: 断面積(cm^2), σ_y : 降伏強度 (MPa), σ_u : 引張強度 (MPa),

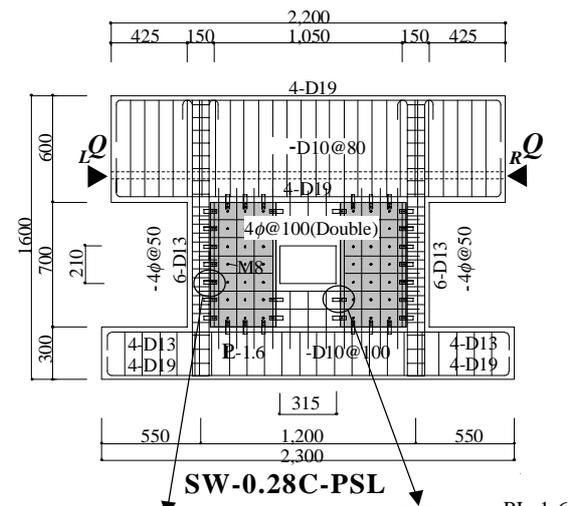
E_s : ヤング係数(Gpa), ϵ : 伸び(%)



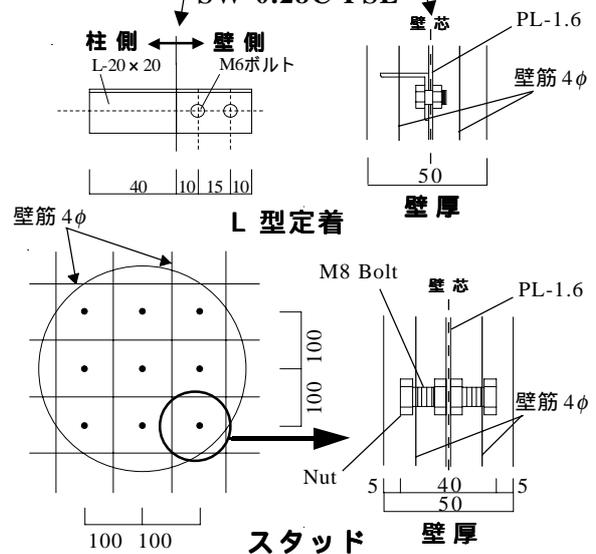
SW5-0.28C-0



SW5-0.51C



SW5-0.28C-PSL



: 载荷位置, RQ : 正側载荷, LQ : 負側载荷, 寸法単位: mm

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、鉛直荷重荷重後は、図 - 3 に示す計画荷重プログラムにて、各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、層間変形角 R の速度で 0.014%/sec になるようにした。 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

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て測定した。測定装置の詳細については文献 5) を参照されたい。補強鉄筋については、側柱脚部位置にて主筋にひずみゲージを貼付し、側柱主筋のひずみを測定した。荷重、試験体各部の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 0.2sec のサンプリング間隔でデータを取り込んだ。試験体に生じたひび割れおよび破壊状況の記録は、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 - 4 に、各試験体の水平荷重 Q と層間変形角 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各状況を、図 - 5 には、各試験体の Q と R の包絡曲線を示す。図 - 6 に、各試験体の水平せん断耐力以後の Q を最大荷重 Q_{max} で除した値と R との関係を示す。図 - 7 には、各試験体側柱脚部の主筋のひずみを示す。図 - 8 に、各試験体の等価粘性減衰定数 h_{eq} と R の関係を示す。

耐震壁の破壊性状を分類する際、本研究では

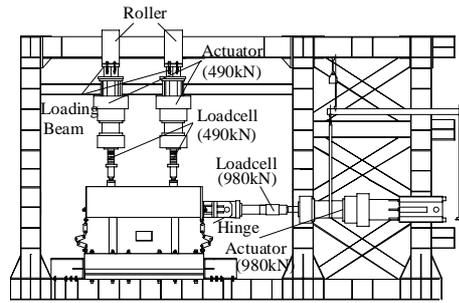


図 - 2 荷重装置

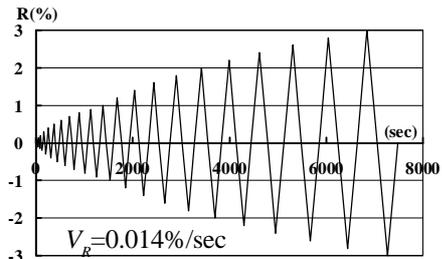


図 - 3 計画荷重プログラム

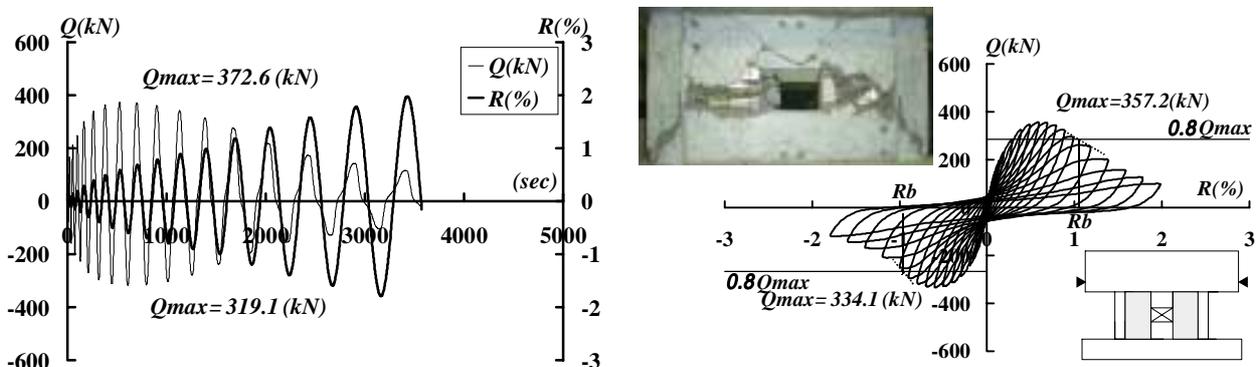
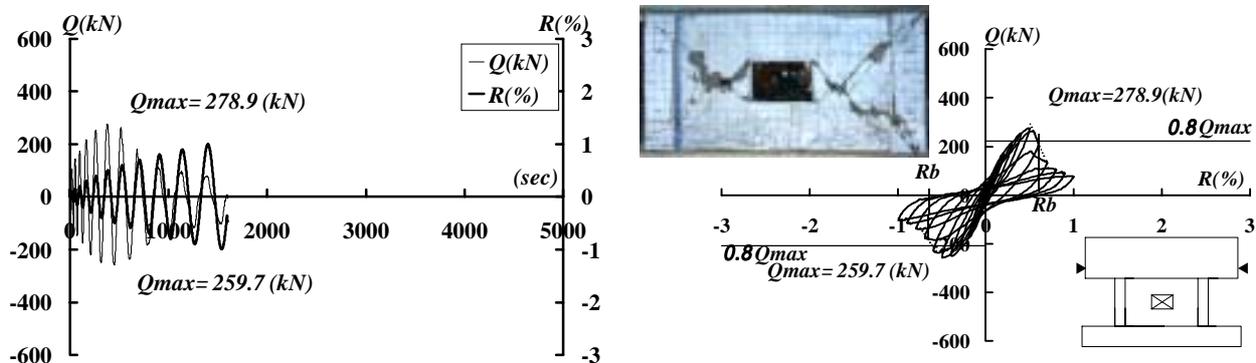
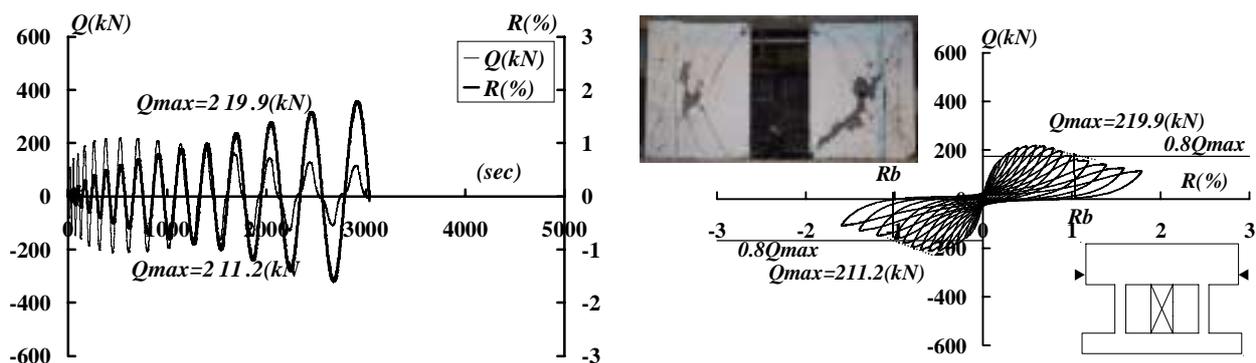
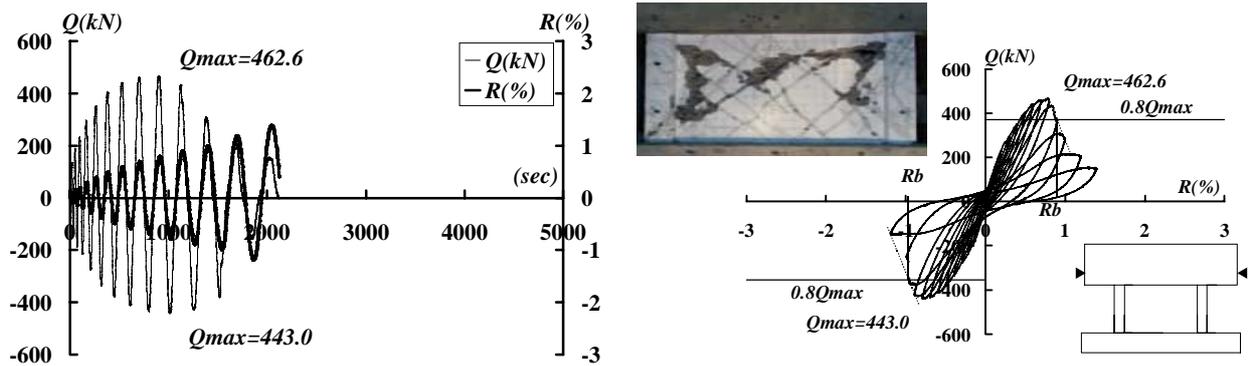
水平耐力以降、どれだけ変形可能かで規定される耐震性能の指標である破壊モードによった。破壊モードは、せん断破壊モード、曲げ・せん断破壊モードおよび曲げ破壊モードに区分され、側柱のせん断破壊と圧壊が、壁板の圧壊よりも先行しなければ、耐震壁の変形は壁板の圧壊により限界づけられる。どのような破壊モードになるかは、側柱の軸引張降伏の発生の有無に影響される。

本実験における破壊モードの定義は、図 - 4 中に示す限界変形角 R_b が、 $R_b < 1.0\%$ の時をせん断破壊モード、 $R_b \geq 1.0\%$ で主筋が降伏している時を曲げ破壊モードとした。 R_b は、図 - 4 に示すように $0.8Q_{max}$ 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を、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。

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なものである。

図 - 4 の Q と R の時刻歴によれば、測定された荷重速度は、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。なお、無開口耐震壁の試験



R_b : 限界変形角⁶⁾ $R_b < 1.0\%$: せん断破壊モード $R_b \geq 1.0\%$: 曲げ破壊モード

図 - 4 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

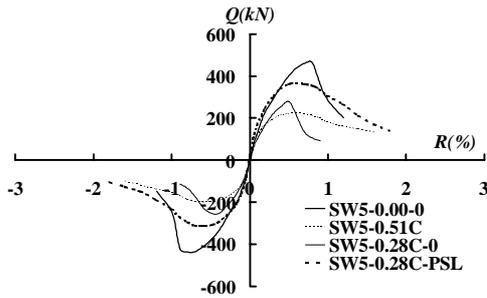


図 - 5 Q-R の包絡曲線

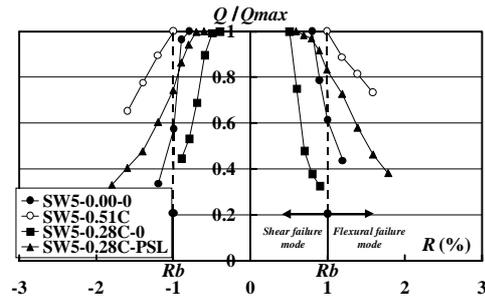
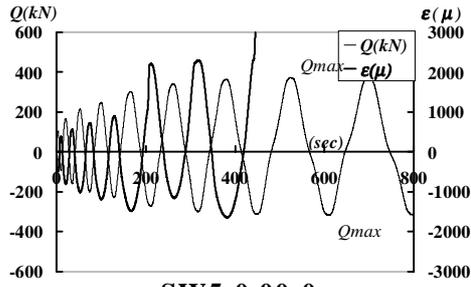
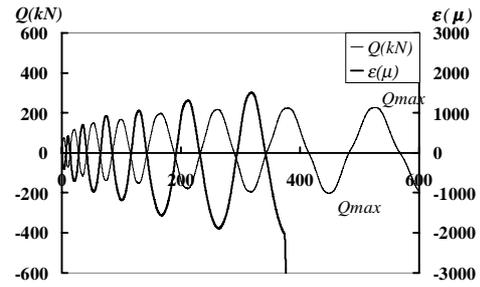


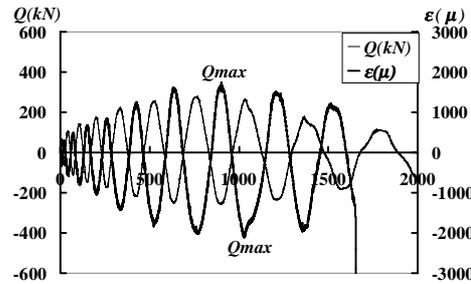
図 - 6 水平せん断耐力以後の包絡曲線の耐力低下率



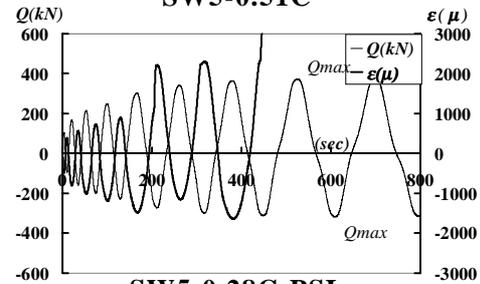
SW5-0.00-0



SW5-0.51C



SW5-0.28C-0



SW5-0.28C-PSL

図 - 7 側柱脚部主筋のひずみ $\epsilon(\mu)$

体は、せん断余裕度が0.7程度となるようなせん断破壊先行に計画したが、使用した材料定数によるせん断余裕度 Q_{us}/Q_{uf} は、 $Q_{us}/Q_{uf}=352^{kN}/532^{kN}=0.66$ となり、実験の水平せん断耐力値 $Q_{u}^{ex}=443^{kN}$ (正側と負側荷重の小さいほうの値を採用) と計算値の水平せん断耐力値の比 Q_{u}^{ex}/Q_{u}^{cal} は、それぞれ1.26, 0.83となった。

上下梁の耐力が十分大きい袖壁型有開口試験体は、水平せん断耐力以前に主筋が降伏し、水平せん断耐力に達した後も極めて緩やかな耐力低下を示した。水平せん断耐力は無開口耐震壁に比べると小さくなるが、比較的靱性のある曲げ破壊モードに近い履歴性状を示している。

壁板を補強していない有開口耐震壁の試験体では、 R がおよそ0.5% 近傍で水平せん断耐力に達し、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。側柱脚部の主筋は水平せん断耐力以後に降伏し、壁板のせん断破壊時には両側柱はかなりの損傷を受けるが、鉛直荷重の支持能力は維持された。

一方、開口横壁板を補強した試験体の場合は、初期の荷重サイクルでは補強部分の壁板の斜めひび割れは観察されず、水平せん断耐力近傍までは壁板を補強していない有開口耐震壁の試験体よりもひび割れ幅が小さく壁板の斜めひび割れ数も少なかった。 R がおよそ0.5% 近傍で水平せん断耐力に達した。水平せん断耐力以後は、水平変形の増大とともに開口横壁板が徐々にせん断破壊を起こし、鋼板の座屈をとめない水平荷重が低下した。開口横壁板を補強した有開口耐震壁の側柱脚部の主筋は水平せん断耐力に達する以前に降伏している。このことから、開口横壁板を鋼板で補強することにより、

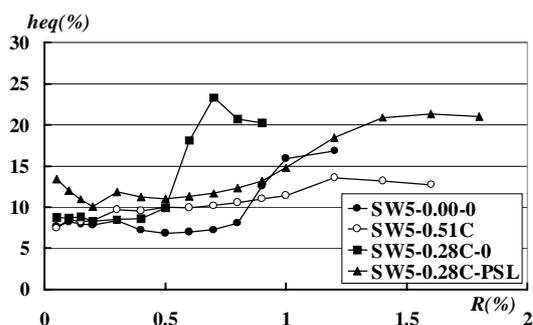


図 - 8 等価粘性減衰定数

破壊モードは曲げ破壊モードに移行していると言える。

図 - 5 と図 - 6 によれば、無開口および壁板を補強をしていない有開口耐震壁の試験体は水平せん断耐力以後急激に耐力低下しているのに対して、開口横壁板を鋼板で補強した有開口耐震壁の試験体は、水平せん断耐力以後緩やかな耐力低下をしていることが確認できる。このことは、スタッドとL型定着により鋼板と壁板コンクリートとの一体性が確保された鋼板の補強効果によるものと考えられるが、無開口耐震壁の耐力までの強度上昇は期待できない。しかし、本実験の範囲では、袖壁型有開口耐震壁の履歴性状に近い性状を示していることから、開口横壁板を鋼板で特殊補強すれば、壁板の脆性的な破壊を防止し、靱性をかなり改善することができることを示している。

図 - 8 に示している等価粘性減衰定数 heq は、1 変位振幅 1 サイクルの正負繰返しによる各ループ面積より求めた。これらによると、開口横壁板を鋼板で補強した有開口耐震壁の場合は、袖壁型有開口試験体とほぼ同じ傾向を示していることがわかる。

上下梁の耐力が十分に大きい本実験結果に限れば、開口横壁板を鋼板で補強すると、袖壁型有開口耐震壁より水平せん断耐力が増大し、靱性も同程度期待できそうである。

4. 結論

開口横壁板を鋼板で補強した有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)スタッドとL型定着による鋼板を用いて壁板を補強すれば、鋼板の補強効果が期待できる。
- 2) 有開口耐震壁の開口横の壁板を鋼板で特殊補強すれば、水平せん断耐力が増大するとともに曲げ破壊モードに近い性状を示し、靱性が改善された。
- 3)水平せん断耐力以後の耐力低下率が、開口幅が同じ袖壁型有開口耐震壁に近い低下率を示した。

謝辞

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、江崎文也：有開口耐震壁の力学性状に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究、その 1、日本建築学会九州支部研究報告、第 40 号、pp.645-648、2001.3
- 2)壁谷澤寿梅他：厚壁型鉄筋コンクリート耐震壁の変動シアスパン加力実験、第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.369-372、1985
- 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、pp122-135、1990.11.1
- 5)江崎文也・小野正行・松岡良智・徳田俊宏：一定速度を受ける RC 無開口耐震壁の履歴性状 その 1、その 2、日本建築学会九州支部研究報告、第 39 号、2001.3、pp.497 ~ 450
- 6)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)