

論文 一定速度載荷を受ける RC 有開口耐震壁の変形と強度

山口圭二^{*1}・小野正行^{*2}・江崎文也^{*3}・新貝正明^{*4}

要旨：有開口耐震壁の力学挙動に及ぼす載荷速度の影響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、せん断余裕度が1.5程度を超えるように断面を設計した曲げ破壊モードとせん断余裕度が1.0程度になるような曲げ・せん断破壊モードの無開口試験体の各試験体中央に、開口周比が0.28の開口を設けた有開口試験体について、載荷速度と破壊モードを実験変動因子とした水平力載荷実験を行った。その結果、載荷速度が速くなると水平せん断耐力が上昇することなどがわかった。

キーワード：有開口耐震壁，載荷速度，破壊モード，曲げ破壊，せん断余裕度

1. 序

地震時には種々の速度で連続的に水平力が建物に作用する。このため、RC造建築物の重要な耐震要素として用いられている耐震壁の地震時の挙動を解明するためには種々の速度で水平力が作用する場合の力学的挙動を明らかにする必要がある。

著者らは、RC造無開口耐震壁に関し、曲げ破壊が先行する曲げ破壊モード試験体とせん断破壊が先行するせん断破壊モード試験体について、一定速度の水平力を載荷させた正負繰返し載荷実験を行い、無開口耐震壁の力学挙動に及ぼす載荷速度の影響について検討を行った¹⁾。その結果、載荷速度が速くなると、いずれの破壊モードの試験体とも水平せん断耐力が上昇したが、その上昇の割合は、せん断破壊モード試験体の方が大きくなった。一方、有開口耐震壁の水平力載荷実験に関する既往の研究によれば、終局時には開口横の壁板がせん断破壊を起こし、急激に水平力が低下する現象が観察されている²⁾。このことは、無開口耐震壁では曲げ破壊モードになるように断面を設計した試験体でも、壁板に開口を設けると開口横壁板のせん断応力度が集中するため、せん断破壊モードに

なる恐れが大きくなる。また、載荷速度が速くなると水平せん断耐力が上昇することが指摘されていることから、場合によっては想定した破壊モードが変化することも十分考えられる。そこで、有開口耐震壁の力学挙動に及ぼす載荷速度の影響を実験的に明らかにするため、せん断余裕度が1.5程度と1.0程度になるように断面を設計した曲げ破壊モードと曲げ・せん断破壊モードの無開口試験体の各試験体の中央に、開口周比が0.28の開口を設けた有開口試験体について、載荷速度と破壊モードを実験変動因子とした水平力載荷実験を計画した。本論は、中央開口を有する試験体について、一定速度で水平力を載荷させた有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、試験体形状および配筋の1例を、表-1に、使用した材料の力学的性質を、表-2に、試験体一覧を示す。実験変動因子は、破壊モードと載荷速度である。試験体にはF[FS]aWt-C-pg-V_Rの記号を付けている。Fは曲げ破壊モードの試験体、FSは曲げ・せん断

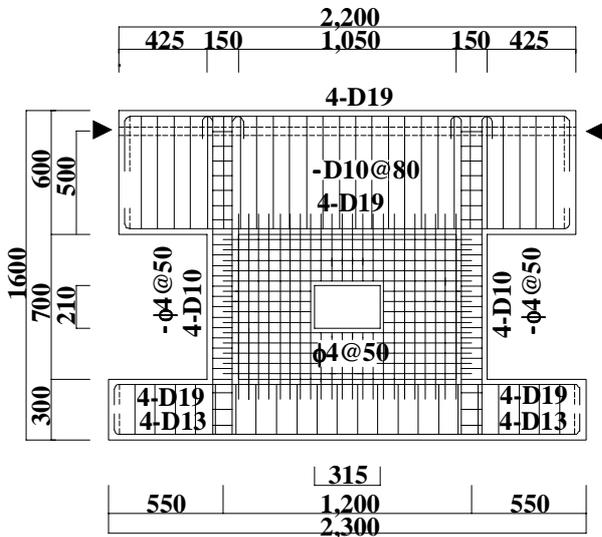
*1 近畿大学大学院 産業技術研究科造形学専攻 (正会員)

*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)

*4 近畿大学大学院 産業技術研究科造形学専攻 (正会員)

破壊モードの試験体を示し, a は制御変位での繰返しサイクル数, t は壁厚 (cm), l_0 は開口周比 $h_0 l_0 / h l$ (h_0 : 開口高さ, l_0 : 開口幅, h : 壁板の高さ, l : スパン長), C は中央開口, p_g は



▶ : 載荷位置 寸法単位 : mm

図 - 1 試験体形状および配筋の 1 例

表 - 1 使用材料の力学的性質

(1) コンクリート

specimen	σ_B	σ_t
F0W5-0.28C-1.3-0.014	25.1	2.0
F0W5-0.28C-1.3-1.4		
F1W5-0.28C-1.3-0.014	26.9	2.8
F1W5-0.28C-1.3-1.4		
FS1W5-0.28C-2.5-0.014	31.7	2.3
FS1W5-0.28C-2.5-1.4		

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
4	0.13	160	301	131
D10	0.71	362	504	189
D13	1.27	354	486	185

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)

表 - 2 試験体一覧 (*: 昨年度実験済みで参考文献 5 を参照)

Specimen	Column			Wall			
	Cross section bxD (mmxmm)	Longi. Rein. p_g (%)	Hoop p_w (%)	Thickness t (mm)	Reinforcement		Dimension of opening $h_0 \times l_0$ (mm x mm)
					Arrangement	p_s (%)	
F0W5-0.28C-1.3-0.014	150 x 150	4-D10 1.3	4 ϕ @50 0.3	50	4 ϕ @50 Single Layer	0.5	210 x 315
F0W5-0.28C-1.3-1.4							
F1W5-0.28C-1.3-0.014*							
F1W5-0.28C-1.3-1.4*							
FS1W5-0.28C-2.5-0.014							
FS1W5-0.28C-2.5-1.4							

柱主筋比(%), V_R は載荷速度 (%/sec) をそれぞれ示している。各破壊モード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算定値 Q_{us} ⁴⁾ を用いた。曲げ破壊モード試験体は, せん断余裕度 Q_{us}/Q_{uf} を 1.5 程度となるように, また, 曲げ・せん断破壊モード試験体は, せん断余裕度が 1.0 程度となるように各試験体の断面を設計した。

2.2 載荷方法および載荷プログラム

図 - 2 に示す載荷装置を用いて, 試験体両側柱の中心に, それぞれ 110kN の鉛直荷重を載荷した後, 図 - 3 に示す計画載荷プログラムにて, 試験体に変位漸増正負繰返しおよび一方向単調変位漸増の各水平力を載荷した。鉛直荷重は, 実験終了時まで一定に保持するようにした。曲げ破壊モードおよび曲げ・せん断破壊モード試験体は, せん断スパン (= M/Ql) が 1 となるように基礎梁上端より 120cm の位置で水平力を載荷した。

水平力の載荷速度は, 上部の剛な側梁下端の水平変位の速度が 0.01cm/sec と 1cm/sec, すなわち, 層間変形角 R の速度 V_R で 0.014%/sec と 1.4%/sec になるようにした。図 - 3 に示す 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 (=70cm) で除した値 δ/h である。

2.3 測定方法

試験体に載荷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に、**図 - 4** に示す変位測定装置にて 耐震壁各部の水平と鉛直の各変位および壁板コンクリートの斜め変位を測定した。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，鉛直 壁板コンクリートの斜め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、載荷速度が0.014%/secの時は0.2sec，1.4%/secの時は0.002sec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、各試験体の水平力 Q と R の時刻歴，履歴曲線，限界変形角 R_b および実験終了時のひび割れと破壊の各状況を，**図 - 6** に，側柱脚部の主筋のひずみ例を示す。**図 - 7** に、各試験体の水平せん断耐力以降の包絡曲線の耐力低下率 Q/Q_{max} (Q_{max} : 最大荷重) を示す。各試験体とも，ほぼ**図 - 3** に示した計画載荷プログラムの V_R で載荷されていることがわかる。

本研究では、耐震壁の破壊性状を分類する際、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より影響される。本実験における破壊モードの定義は、**図 - 5** 中に示す R_b が、 $R_b < 1.0\%$ で側柱が軸引張降伏をしていない時をせん断破壊モード、 $R_b < 1.0\%$ で側柱が軸引張降伏をしている時を曲げ・せん断破壊モード、 $R_b \geq 1.0\%$ で側柱が軸引張降伏をしている時を曲げ破壊モードとした。 R_b は、**図 - 5** に示すように

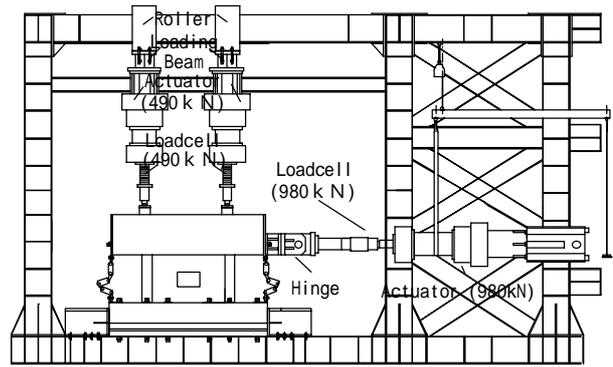


図 - 2 載荷装置

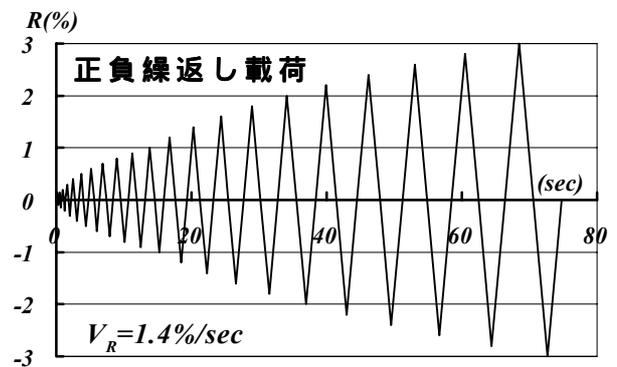
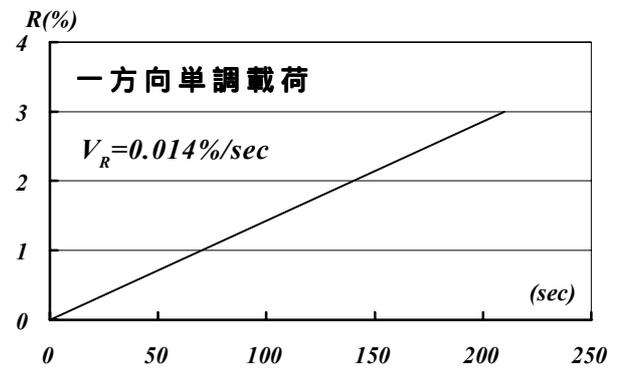


図 - 3 計画載荷プログラムの一例

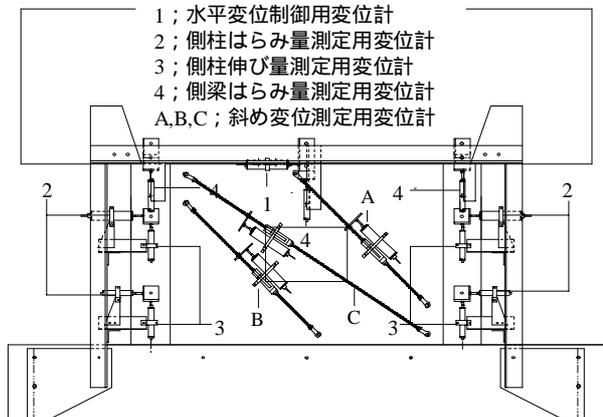


図 - 4 変位測定装置

$0.8Q_{max}$ と $Q-R$ の包絡曲線との交点のうち大きいほうの値を、正側と負側載荷の 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。

正負繰返し載荷の曲げ破壊モード試験体については正側載荷のみを示し、詳細については参考文献5)を参照されたい。

一方向載荷での曲げ破壊モード試験体は、 R が $0.8 \sim 0.9\%$ 近傍で水平せん断耐力に達し、 R が 1.0% 以降は、載荷速度の遅い方が載荷速度の速い場合と比較して急激な耐力低下をしている。水平せん断耐力に達したときの R は、載荷速度が速くなると若干小さくなる。また、繰返し載荷の場合と比較すると、水平せん断耐力に達した時の R と水平せん断耐力は一方向載荷の場合

の方が大きい結果となった。これは、壁板の抵抗性能が繰返しにより徐々に低下したためと考えられる。破壊モードは水平せん断耐力に達する以前に側柱が軸引張降伏をしており、計画した破壊モードと同じ曲げ破壊モードとなった。

曲げ・せん断破壊モード試験体では、水平せん断耐力に達した後、開口横の壁板がスリップ状のせん断破壊を起こし、水平せん断耐力が急激に低下した。載荷速度が速くなると、水平せん断耐力が上昇するとともに、水平せん断耐力後は壁板の破壊も激しく、急激な耐力の低下が生じている。繰返し載荷の場合は、水平せん断耐力に達する少し前で側柱が軸引張降伏をして

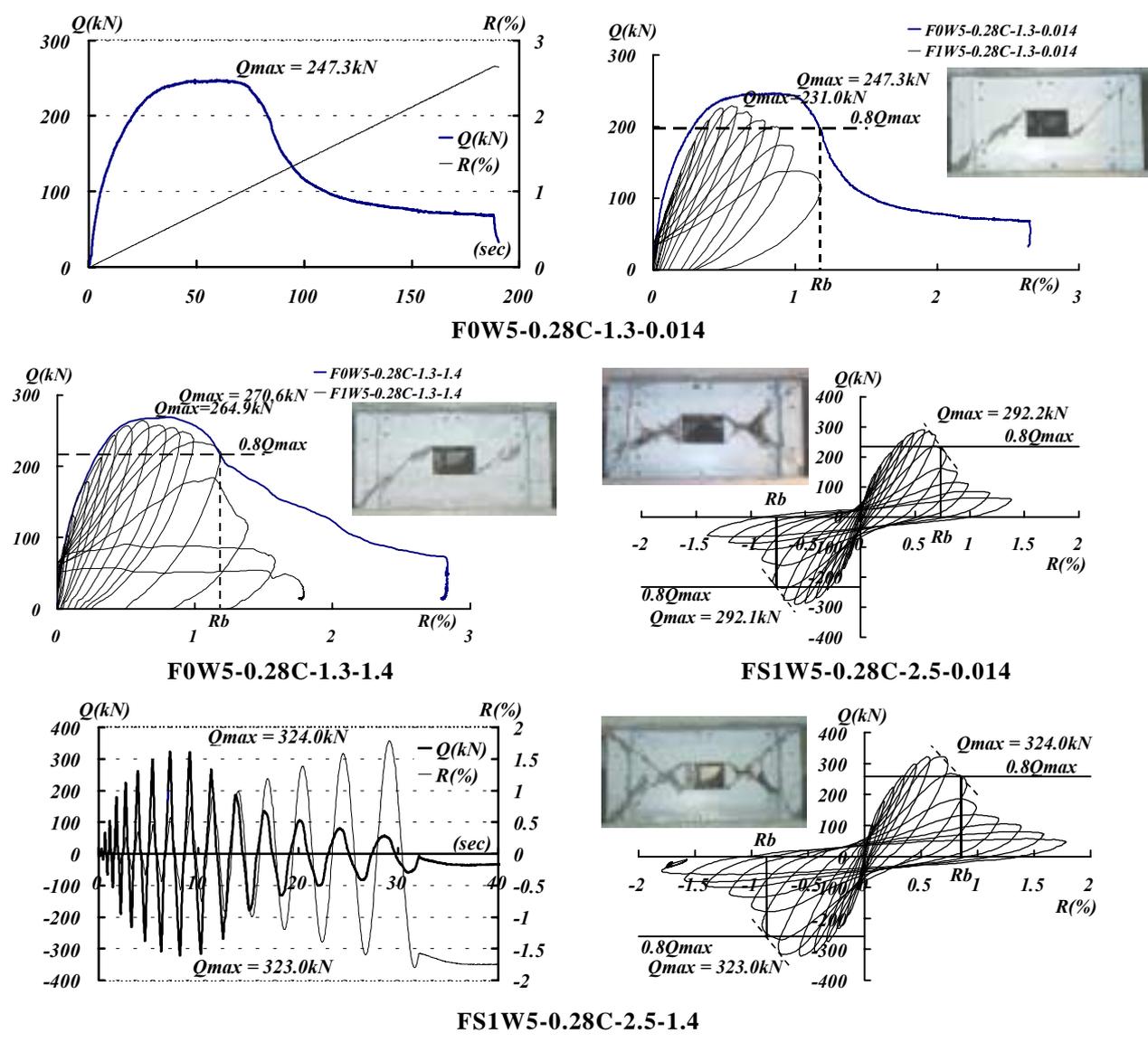


図 - 5 曲げ破壊モードおよび曲げ・せん断破壊モード試験体の Q と R の時刻歴、履歴曲線および実験終了時のひび割れと破壊の状況

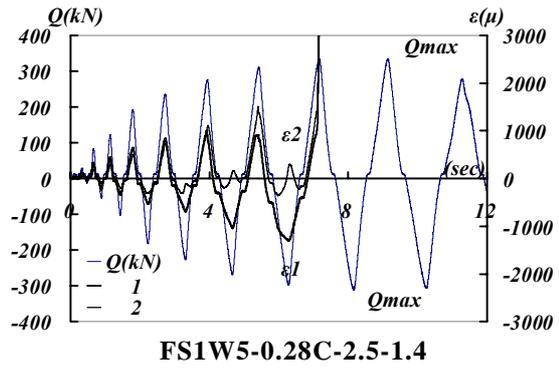
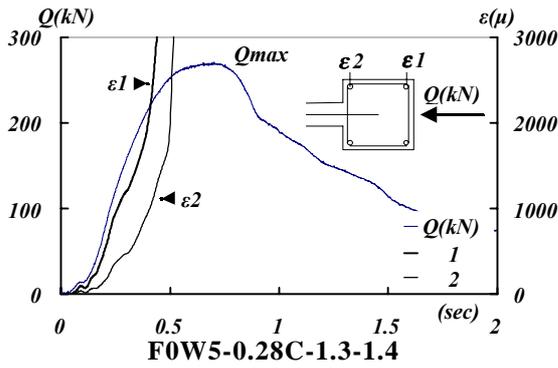


図 - 6 曲げおよび曲げ・せん断破壊モード試験体の側柱脚部の主筋のひずみ $\epsilon(\mu)$

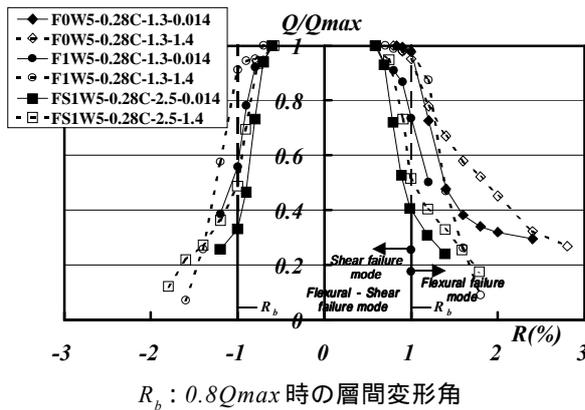


図 - 7 最大耐力以降の包絡曲線の耐力低下率

おり、計画した破壊モードと同じ曲げ・せん断破壊モードになった。

いずれの試験体とも、水平せん断耐力以降の耐力低下は載荷速度が速くなると小さくなる。

3.2 耐力上昇率

表 - 3 に、実験の水平せん断耐力値 $ex Q_u$ と

その時の層間変形角 $ex R_u$ 、実験値と算定値による耐力上昇率 $ex \alpha_Q$ 、 $cal \alpha_Q$ および鉄筋とコンクリートのひずみ速度の上昇率 $ex \alpha_\epsilon$ の一覧を示す。表 - 3 に示している $ex \alpha_Q$ 、 $cal \alpha_Q$ 、 $ex \alpha_\epsilon$ は、 $V_R = 1.4 \% / sec$ 時の実験値や算定値を $V_R = 0.014 \% / sec$ 時の実験値や算定値で除した値である。 $cal \alpha_Q$ の計算にあたっては、表 - 3 に示す主筋および壁板コンクリートのひずみ速度実験値を用いて、提案されている鉄筋およびコンクリートの材料強度に及ぼすひずみ速度の影響を考慮した強度上昇率算定式^{6), 7)}により算定した。本実験では、図 - 4 に示した変位計 A, B, C により壁板コンクリートの斜め変位を測定した。壁板コンクリートのひずみ速度は、圧力場を形成する壁板部の変位計 A, B で測定するか、圧力場を形成しえない壁板部の変位計 C で測定するかによって異なるものと考えられ

表 - 3 曲げおよび曲げ・せん断破壊モード試験体の $ex \alpha_Q$ 、 $ex \alpha_\epsilon$ 、 $cal \alpha_Q$

試験体	$ex Q_u$ (kN)	$ex R_u$ (%)	実験値				算定値 $cal \alpha_Q$
			ひずみ速度		$ex \alpha_Q$	$ex \epsilon$	
			主筋 (μ/sec)	壁板 (mm/mm/sec)			
F0W5-0.28C-1.3-0.014	247	0.69	94	0.06×10^{-3}	1.00	105.30 ^{*1}	1.00
F0W5-0.28C-1.3-1.4	271	0.80	9898	6.89×10^{-3}	1.10	114.83 ^{*2}	1.14 ^{*1} 1.18 ^{*2}
F1W5-0.28C-1.3-0.014	231	0.56	165	0.07×10^{-3}	1.00	87.25 ^{*1}	1.00
F1W5-0.28C-1.3-1.4	265	0.63	14397	5.22×10^{-3}	1.15	74.57 ^{*2}	1.15 ^{*1} 1.16 ^{*2}
FS1W5-0.28C-2.5-0.014	292	0.58	65	0.08×10^{-3}	1.00	65.45 ^{*1}	1.00
FS1W5-0.28C-2.5-1.4	312	0.68	4254	5.20×10^{-3}	1.07	65.00 ^{*2}	1.09 ^{*1} 1.16 ^{*2}

注) *1: 鉄筋のひずみ速度による値 *2: 壁板コンクリートのひずみ速度による値

る。有開口耐震壁では、圧力場を形成する壁板が耐力に寄与する壁板である²⁾。したがって、F0とFS1試験体では、変位計A、Bの斜め変位により検討を行ったところ変位計A、Bにより算定したひずみ速度はほぼ同じであった。したがって、表-3に示した壁板コンクリートのひずみ速度は変位計Aにより算定した値を採用している。また、F1試験体は、変位計A、Bによる測定をしていないので、変位計Cによる測定値を採用している。表-3によれば、各試験体とも載荷速度を100倍すると水平せん断耐力の上昇がみられるが、その上昇は曲げ破壊モードのほうが曲げ・せん断破壊モードよりも大きい。鉄筋と壁板コンクリートのひずみ速度は、載荷速度が速いほど大きくなり、曲げ破壊モードでは、一方向載荷のほうが繰返し載荷よりもその速度が大きい。測定された鉄筋と壁板コンクリートのひずみ速度から求めた耐力上昇率算定値は、壁板コンクリートのひずみ速度によるほうが鉄筋のひずみ速度よりも大きい。本実験の結果によれば、両破壊モード試験体とも、側柱が水平せん断耐力以前に軸引張降伏をしている。そのため、両試験体の水平せん断耐力は主筋強度に依存するものと考えられる。したがって、両試験体の水平せん断耐力の上昇は、主筋のひずみ速度による耐力上昇で説明できそうである。

4. 結論

壁板の中央に開口を有する耐震壁について、載荷速度と破壊モードを実験変動因子とした実験を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 曲げ破壊モードおよび曲げ・せん断破壊モードのいずれの場合とも、水平せん断耐力と水平せん断耐力以降の耐力低下は、載荷速度の影響を受けた。
- 2) 水平せん断耐力は、繰返し載荷の場合が一方向載荷の場合よりも水平せん断耐力が小さくなった。
- 3) 曲げ破壊モードおよび曲げ・せん断破壊モードのいずれの場合とも、試験体の側柱

は、水平せん断耐力以前に軸引張降伏し、破壊モードは載荷速度による影響が見られなかった。

- 4) 本実験の結果では、両破壊モード試験体の水平せん断耐力の上昇は鉄筋強度に及ぼすひずみ速度の影響を考慮した既往の提案式で大略説明できそうである。

謝辞

本研究は、平成13年度文部省科学研究費(基盤研究C、課題番号12650590、研究代表者:小野正行)の助成を受けた。

参考文献

- 1) 江崎文也・小野正行・松岡良智・徳田俊宏:一定載荷速度を受ける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,2000.3,pp.497~504
- 2) 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
- 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
- 5) 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,日本建築学会九州支部研究報告,第40号,2001.3,pp.645~648
- 6) 藤本盛久ほか:地震動を受ける単一山形鋼筋かいの高速引張実験,地震時の衝撃的過荷重による鋼筋かいの破断に関する実験的研究その1,日本建築学会構造系論文報告集,第389号,pp.32-41,1988.7
- 7) 中村和行ほか:鉄筋コンクリート構造物の挙動における載荷速度の影響に関する研究,その1コンクリート材料の高速載荷実験,日本建築学会大会梗概集(関東),pp.787-789,1997.9