# 論文 RC 無開口耐震壁の変形と強度に及ぼす載荷速度の影響

松岡良智\*1·小野正行\*2·江崎文也\*3·久保田雅和\*4

要旨:耐震壁の力学的挙動に及ぼす載荷速度の影響を検討するため,一定速度で水平力 を作用させた耐震壁の載荷実験を実施した。実験の変動因子は,載荷速度および破壊 モードである。実験結果によれば測定された載荷速度は,ほぼ計画した載荷速度と同じ であること,載荷速度を速くすると水平せん断耐力が上昇すること,繰返し載荷により 水平せん断耐力が低下することなどがわかった。

キーワード: 耐震壁, 載荷速度, せん断破壊モード, 曲げ・せん断破壊モード

#### 1. 序

耐震壁の力学挙動に及ぼす載荷速度の影響を 検討するため,著者らは,載荷速度を一定にし たRC無開口耐震壁の一定軸力下の変位漸増一 方向単調水平力載荷実験と正負繰返し水平力載 荷実験を行った<sup>1)</sup>。その結果,せん断余裕度が 0.7程度のせん断破壊モード試験体と1.5程度 の曲げ破壊モード試験体に,静的載荷実験で載 荷されている程度の層間変形角速度0.014%/ secの100倍の速さを載荷した場合には,破壊 モードが変化することはないが,載荷速度を速 くすると水平せん断耐力が上昇し,曲げ破壊 モード試験体では水平せん断耐力以後の壁板の せん断破壊が生じる層間変形角が小さくなるこ となどが観察された。また,せん断破壊モード 試験体では履歴パスの影響を受け,制御変位で の繰返し回数が多くなると水平せん断耐力が低下し,水平せん断耐力時の層間変形角が小さくなる傾向になることなどを明らかにした。これらの結果は,せん断余裕度が0.7と1.5程度の場合で,これと異なるせん断余裕度の場合について検討する必要があるものと考えられる。

そこで、せん断余裕度が0.5程度のせん断破 壊モード試験体および1.0程度の曲げ・せん断 破壊モード試験体について、一定軸力下の変位 漸増一方向単調水平力載荷実験と正負繰返し水 平力載荷実験を計画した。

本論は、これらの実験結果について述べると ともに、一方向単調水平力載荷実験と正負繰返 し水平力載荷実験との比較検討を行い、載荷速 度が履歴性状に及ぼす影響について、実験的に 検討を行ったものである。

		Column			Wall	looding rate	looding noth	
Specimen	section	longitudinal transversal		thickness	reinforcement	loaung rate	ioaunig path	
	(mm×mm)	reinforcement	reinforcement	(mm)		(%/sec)		
FS0W5-2.5-0.014		8 D10				0.014	monotonia	
FS0W5-2.5-1.4		(10, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0	$4\phi@50$ (p <sub>w</sub> =0.003)	50	$4\phi@50$ (single layer)	1.4	monotonic	
FS1W5-2.5-0.014		(pg-0.023)				0.014	reversed cyclic	
S0W5-4.5-0.014	150×150	150×150 8-D13				0.014		
S0W5-4.5-1.4					(p <sub>s</sub> =0.005)	1.4	monotonic	
S1W5-4.5-0.014		$(p_g = 0.045)$				0.014	roverged avalia	
S1W5-4.5-1.4		- 5				1.4	leverseu cyclic	

表一1 試験体一覧

\*1 近畿大学工業高等専門学校助手 建設システム工学科 修士(工学)(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)

## 2. 実験概要

# 2.1 試験体

図-1にせん断破壊モード試験体の形状お よび配筋の一例を,表-1に試験体一覧を,表 -2に使用した材料の力学的性質を示す。ま た,せん断破壊モードおよび曲げ・せん断破壊 モード試験体のせん断余裕度(Q<sub>us</sub><sup>2)</sup>/Q<sub>uf</sub><sup>3)</sup>)は,そ れぞれ0.5および1.0程度となるようにした。実 験変動因子は,載荷速度である。試験体には, S[FS]aWb-c-vの記号を付けている。Sはせん断 破壊モード試験体,FSは曲げ・せん断破壊モー ド試験体を示し,aは制御変位における繰返し サイクル数,bは壁厚の値(cm),cは柱主筋比 p<sub>g</sub>(%),vの値は載荷速度をそれぞれ示してい る。載荷速度は,耐震壁の層間変形角Rのおよ その速度(%/sec)の値である。

# 2.2 載荷方法および載荷プログラム

 2台のアクチュエータで各側柱にそれぞれ
110kNの鉛直荷重を載荷した後,容量980kNア クチュエータで水平力を載荷した。載荷速度 V<sub>R</sub>は0.014%/secとその100倍の速さの1.4%/ secである。載荷プログラムを図ー2に示す。
鉛直荷重は,実験終了時まで一定に保持するよ

表 - 2	材料の	力学的性	質
-------	-----	------	---

## (1) 鉄筋

Bar	а	$\sigma_{\rm v}$	$\sigma_{u}$	Es	3
4Φ	0.13	160	301	131	37.7
D10	0.71	362	504	189	22.5
D13	1.27	354	486	185	21.5

a : 断面積 (cm<sup>2</sup>) σ<sub>y</sub>:降伏点 (MPa) σ<sub>u</sub>: 引張強度 (MPa) E<sub>e</sub>: ヤング係数 (GPa)

ε: 伸び(%)

(	2	)	ン	ク	IJ	—	ト	
•		,	-	-	-		-	

Specimen	$\sigma_{\rm B}$	$\sigma_{t}$
FS0W5-2.5-0.014	26.2	2.5
FS1W5-2.5-0.014	20.2	2.5
FS0W5-2.5-1.4	26.9	2.0
S0W5-4.5-0.014		
S1W5-4.5-0.014	27.0	1.0
S0W5-4.5-1.4	27.0	1.0
S1W5-4.5-1.4		

 $\sigma_{_{\rm B}}$ : シリンダー圧縮強度 (MPa)  $\sigma_{_{\tau}}$ : 引張強度 (割裂強度) (MPa) うに制御した。載荷装置の詳細は,文献4)を参照されたい。

# 2.3 測定装置

基礎梁に予め埋め込んだボルトにて固定した 変位測定用フレームに取り付けた高感度変位計 にて試験体各部の変位を測定した。また,側柱 脚部の主筋の表面にゲージを貼付し,主筋ひず みを測定した。荷重,試験体の各部の変位およ び鉄筋のひずみは,載荷速度 V<sub>R</sub>が0.014%/sec の場合は0.2sec,1.4%/secの場合は0.002secの 各サンプリング間隔で測定し,パソコンに記録 した。ひび割れ状況および破壊状況については 目視およびビデオカメラ等による写真撮影に よった。



図-1 試験体形状・配筋・寸法



#### 3. 実験結果

## 3.1 履歴性状

図-3 a), b)は、せん断破壊モード試験体の 水平力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・破壊状況を示す。 一方向載荷の図中に破線で繰返し載荷の正側実 験結果を比較のため示している。

図-3 a), b)によれば, R曲線の傾きから測定された載荷速度は, S0W5-4.5-1.4 試験体を除いて,計画した載荷プログラムとほぼ一致していることがわかる。S0W5-4.5-1.4 試験体の載荷速度にみだれが生じているのは,載荷途中で載荷装置のボルトー本が破断した影響である。いずれの試験体も水平せん断耐力に達した後は,壁板のスリップ状せん断破壊により急激に水平荷重が低下した。一方向載荷の場合,せん断余裕度が0.7程度では主筋の降伏が観察されたが<sup>1)</sup>, 0.5程度では主筋は降伏せず, 脆性的な履歴性状を示した。壁板のせん断破壊後は,側柱もかなり損傷を受けたが,鉛直荷重の支持能力は維持された。履歴性状についてみると,

繰返し載荷よりも一方向載荷のほうが同一変形 時による水平荷重が大きくなる傾向があるとと もに,水平せん断耐力時の変形も大きくなる。 しかも,載荷速度の速いほうが水平せん断耐力 および水平せん断耐力時の変形も大きくなる。 これは,繰返しにより壁板コンクリートの損傷 が徐々に進行するためと考えられる。

図-3 c)に曲げ・せん断破壊モード試験体 の水平力Qと層間変形角Rの時刻歴,QとRと の関係(図中の破線は繰返し載荷)および実験 終了時のひび割れ状況と破壊状況を示す。図 -3 c)によれば測定された載荷速度は,計画 した載荷プログラムにほぼ一致していることが わかる。繰返し載荷よりも一方向単調載荷の方 が同一変形時における水平荷重が多少大きくな る傾向があるが,ほぼ正負繰返し載荷実験の履 歴曲線に近い結果となった。いずれの試験体と も水平せん断耐力以前に,主筋は降伏ひずみに 達し,水平変形が増大しても水平力が低下する ことがなく,曲げ破壊モードの履歴性状を示し た。一方向単調載荷では,水平せん断耐力に達





図一3a) せん断破壊モード試験体の水平力 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・破壊状況





S1W5-4.5-1.4

図-3 b) せん断破壊モード試験体の水平力 *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・破壊状況

		1	ひずみ速度		上昇率											
試験体名	ex Qu	ex R u	主筋	壁板	実験値	計算	筸値	cal	cal Q uf		cal Q us1		cal Q us2		cal Q uws	
	~		$(\mu / sec)$	( mm/mm / sec )	ex $\alpha_Q$	主筋	壁板				-	'	-		-	
FS0W5-2.5-0.014	360	0.97	78	0.07×10 <sup>-3</sup>	1.00	1.00	1.00		1.11		1.02		1.02		0.76	
FS0W5-2.5-1.4	378	0.89	6738	0.71×10 <sup>-3</sup>	1.05	1.12	1.14	325	1.16	353	1.07 353	353	1.07 472	472	0.80	
FS1W5-2.5-0.014	345	0.68	101	-	1.00	1.00	-		1.06		0.98		0.98		0.73	
S0W5-4.5-0.014	544	0.73	45	0.08×10 <sup>-3</sup>	1.00	1.00	1.00		0.81		1.54		1.52		1.15	
S0W5-4.5-1.4	574	0.91	3444	-	1.10	1.11	-	(())	0.86	252	1.63	257	1.61	470	1.22	
S1W5-4.5-0.014	488	0.67	56	0.06×10 <sup>-3</sup>	1.00	1.00	1.00	669	0.73	353	1.38	35/	1.37	37 472	1.03	
S1W5-4.5-1.4	524	0.80	3345	0.83×10 <sup>-3</sup>	1.11	1.10	1.17		0.78		1.48		1.47		1.11	

表一3 実験結果

exQu:水平せん断耐力実験値 exRu:水平せん断耐力時の層間変形角 calQus1:建築学会終局強度式による水平せん断耐力計算値<sup>2)</sup> calQuws:スリップ破壊による水平せん断耐力計算値<sup>4)</sup>

した後, Rが1.2% 近傍で水平耐力が低下する 履歴性状を示した。水平せん断耐力以後は,壁 板に生じた斜め45度のせん断ひび割れが拡幅 するとともに引張側柱脚部が浮き上がるように ひび割れが拡大して水平力を維持しながら水平 変形が増大した。しかし,その後の水平変形の 増大によって,圧縮側柱脚部および柱頭部近傍 の壁板がスリップ状せん断破壊を起こし,壁板 に生じている斜め45度方向のせん断ひび割れ が引張側柱を貫通するとともに,圧縮側柱脚部 がせん断破壊を起こし,急激に水平力が低下し calQuf:曲げ破壊による水平せん断耐力計算値<sup>3)</sup> calQus2:広沢式による水平せん断耐力計算値<sup>5)</sup>

た。このときのRは、載荷速度が速くなるほど 大きくなる傾向がある。せん断余裕度が1.5程 度の場合は、急激に水平力が低下するRが2% を超えているが<sup>1)</sup>、1.0程度になると2%を超え ることはない。しかし、せん断余裕度が1.0程 度では、主筋が降伏し曲げ破壊が先行するよう である。

## 3.2 耐力上昇率

**表-3**に実験結果一覧を示す。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がそれぞれに



# 図-3 c) 曲げ・せん断破壊モード試験体の水平力 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・破壊状況

提案されている<sup>5), 6)</sup>。そこで、本実験で得られた主筋および壁板コンクリートのひずみ速度を用いてこれらの算定式で求めた強度上昇率計算値を示した。上昇率 $_{ex}\alpha_{Q}$ は、載荷速度1.4%/secの水平せん断耐力を基準載荷速度0.014%/sec時の水平せん断耐力で除した値である。これらによるとせん断破壊モード試験体の場合では載荷速度を100倍にすると1割程度の上昇がみられ、曲げ・せん断破壊モード試験体では0.5割程度の上昇が見られた。測定された側柱主筋の



ひずみ速度によれば,そのひずみ速度は載荷速 度が速いほど大きく、曲げ・せん断破壊モード 試験体のほうがせん断破壊モード試験体の場合 よりも大きい。また, 測定された壁板対角線方 向の平均圧縮ひずみ速度によれば,そのひずみ 速度は載荷速度が速いほど大きい。一方向載荷 試験体について、V<sub>p</sub>=1.4%/sec 時の主筋または 壁板圧縮方向平均ひずみ速度を $V_R$ =0.014%/sec 時のそれらで除したひずみ速度比率 $_{a}\alpha_{a}$ と $_{a}\alpha_{a}$ との関係を図-4に示す。図-4には文献1) の資料も示している。曲げ破壊または曲げ・せ ん断破壊モードの場合は主筋強度に依存するの で,主筋ひずみ速度で,また,せん断破壊モー ドの場合は壁板コンクリート強度に依存するの で、壁板ひずみ速度で $_{a}\alpha_{s}$ を求めた。これらに よれば,ひずみ速度の上昇とともに耐力が上昇 し, 載荷速度が速くなれば, 試験体を構成して いる材料のひずみ速度も速くなった結果,耐力 が上昇したものと考えられる。本実験での結果 によれば,両破壊モード試験体とも提案式で求 めたほどの耐力上昇は見られなかった。

## 4. 結論

せん断破壊モードと曲げ・せん断破壊モー ド試験体について,載荷速度を実験変動因子と した一定軸力下の一方向単調水平力載荷実験と 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。

- 測定された載荷速度は計画した速度とほぼ 一致した。
- 一方向単調載荷での水平せん断耐力と水平 せん断耐力以後の耐力低下は載荷速度の影 響を受けた。
- 3) 水平せん断耐力は載荷履歴により影響を受けるが載荷速度の遅い場合は、載荷履歴が 異なってもほぼ同じ履歴性状を示した。
- 4) 本実験での結果によれば、両破壊モード試験体とも材料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求めたほどの耐力上昇は見られなかった。
- 5) せん断余裕度を0.5程度にすると、載荷方

法にかかわらず主筋が降伏せず脆性的な履 歴性状を示した。

#### 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。ここに, 関係者各位 に感謝いたします。

# 参考文献

- 松岡良智,小野正行,江崎文也:耐震壁の履 歴性状に及ぼす載荷速度の影響に関する実験 的研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.433-438, 2001.7
- 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, pp.122-135, 1990.11.1
- 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
- 江崎文也、小野正行:無開口耐震壁の破壊 モードに及ぼす載荷速度の影響に関する実験 的研究、コンクリート工学年次論文報告集、 Vol.21, No.3, pp.745-750, 1999
- 5) 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.32-4,1988.7
- 6) 中村和之ほか: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
- 7) 江崎文也,富井政英,光山祐朗:せん断破壊 を起こす連層耐震壁の水平耐力に及ぼす鉛直 荷重の影響に関する研究:日本建築学会大会 学術講演梗概集,pp.529-530,1988.10
- 広沢雅也ほか:鉄筋コンクリート造耐震壁の 耐震性に関する総合研究,日本建築学会大会 学術講演梗概集,pp.1173-1174,1975.9