

論文 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

松岡良智*1・小野正行*2・江崎文也*3

要旨: 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、一定の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。実験変動因子は、載荷速度、破壊モードおよび履歴パスである。実験結果によれば、測定された載荷速度は、ほぼ計画した速度と同じであること、曲げ破壊先行試験体では、載荷速度が速くなるほど最大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、載荷速度が速くなるとせん断強度が上昇する傾向があること、正負繰返し載荷を受けると一方向載荷の場合よりせん断強度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, 履歴パス, せん断破壊, 曲げ破壊

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、載荷速度を一定に保持しながら試験体に水平力を載荷し、荷重載荷中に連続的に荷重および変位等を測定できる装置を用いて、RC無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った¹⁾。その結果、せん断余裕度(せん断破壊強度算定値²⁾/曲げ破壊強度算定値³⁾が1.5程度の曲げ破壊先行試験体および0.7程度のせん断破壊先行試験体のいずれの場合とも、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倍の速さで載荷された場合には、破壊モードが変化することはないことがわかった。しかし、載荷速度を速くすると、いずれの破壊モード試験体とも水平せん断耐力が上昇し、その上昇の割合は、せん断破壊モードの場合の方が大きいことなどが観察された。この実験では、試験体に正負繰返しの水平力を載荷しているため、耐力時には変位が反転し、載荷速度が0となっている。このことは、耐力時の速度依存の影響を明らかにするには問題があるとの指摘もあるが、水平せん断耐力時近傍までは所定の載荷速度が維持されているので、結果的には、力学挙動に及ぼす載荷速度の影響がでているものと考えている。しかし、耐力時の速度依存の影響をより明

らかにするには、耐力時以降まで一定の速度載荷実験を行うことが必要と思われる。そこで、正負繰返し載荷実験で採用した試験体と同様な曲げ破壊先行試験体およびせん断破壊先行試験体に関し、一定軸力下の変位漸増一方向単調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、正負繰返し載荷実験結果との比較検討を行い、耐震壁の履歴性状に及ぼす載荷速度および履歴パスの影響について、実験的に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に試験体形状および配筋の一例を、表-1に試験体一覧および表-2に材料の力学的性質を示す。試験体にはF[S]aWb-cの記号を付けている。Fは曲げ破壊先行シリーズの試験体を示し、Sはせん断破壊先行シリーズの試験体を示す。aは制御変形における繰返しサイクル数を示し、bは壁厚の値(cm)を示している。cの値は載荷速度を示している。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。

*1近畿大学工業高等専門学校助手 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)

2.2 荷重方法および荷重プログラム

試験体上部の2台のそれぞれ容量500kN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、容量1100kNアクチュエータで水平力を漸増変位一方向単調または正負繰返し載荷した。鉛直荷重は、実験終了時まで一定に保持するように制御した。正負繰返し載荷は、制御変位($R=0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8\%$)での1回および3回の正負繰返しで、加力装置の詳細については文献1)を参照されたい。

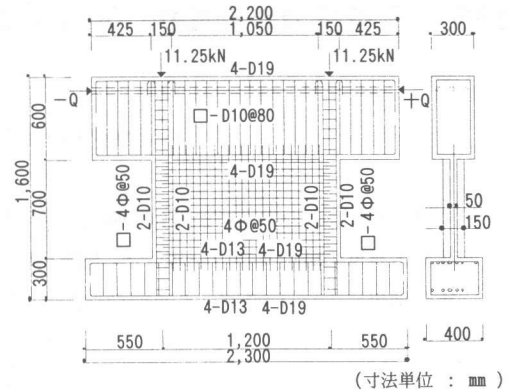


図-1 試験体形状・配筋

2.3 測定方法

基礎梁に予め埋め込んだボルトで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を用いて、試験体各部の変位を測定した。測定装置の詳細については文献1)を参照されたい。また、側柱脚部の主筋の表面にゲージを貼付し、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、荷重速度が0.014%/secの場合は0.2sec、0.14%/secの場合は0.02secおよび1.4%/secの場合は0.002secの各サンプリング間隔で測定し、ハードディスクに記録した。ひび割れ状況および破壊状況は、目視およびビデオカメラ等による写真撮影によった。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

図-2に曲げ破壊先行シリーズの試験体について

表-1 試験体一覧

試験体名	側柱配筋	V_R (%/sec)	繰返し回数
F0W5-0.014	主筋4-D10 ($P_g=0.0126$)	0.014	0
F1W5-0.014			1
F3W5-0.014			3
F0W5-0.14	帯筋4φ@50 ($P_w=0.0033$)	0.14	0
F1W5-0.14			1
F0W5-1.4			0
F1W5-1.4	1.4	1.4	1
F3W5-1.4			3
S0W5-0.014	主筋6-D13 ($P_g=0.0340$)	0.014	0
S1W5-0.014			1
S3W5-0.014			3
S0W5-0.14	帯筋4φ@50 ($P_w=0.0033$)	0.14	0
S1W5-0.14			1
S0W5-1.4			0
S1W5-1.4	1.4	1.4	1
S3W5-1.4			3

て、水平力 Q と層間変形 R との関係、 R の時刻歴および実験終了時のひび割れ状況と破壊状況を示す。図中には正負繰返し載荷の正側実験結果も示している。図-2によれば、測定された荷重速度は、計画した速度とほぼ一致していることがわかる。いずれの試験体とも曲げ降伏が先行し、降伏後かなり水平変形が増大しても水平力が低下することがなく、典型的な曲げ破壊を起こす安定した履歴曲線を示した。初ひび割れは、引張側柱の水平方向に生じた。その後、壁板に斜め45度方向のせん断ひび割れが発生し、水平変形の増大とともに壁板のせん断ひび割れが連続・伸展した。引張側柱では、柱に生

表-2 使用材料の力学的性質

(1) 鉄筋

試験体名	種別	α	σ_y	σ_u	E_s	伸び(%)
F,S0W5-0.014	D10	0.71	334	473	176	15.8
F,S0W5-0.14	D13	1.27	361	505	182	17.8
F,S0W5-1.4	4φ	0.12	178	289	120	—
F,S1W5-0.14						
F,S1W5-0.014	D10	0.71	376	543	174	15.9
F,S1W5-1.4	D13	1.27	350	514	173	262
F,S3W5-0.014	4φ	0.13	160	301	131	37.7
F,S3W5-1.4						

α : 断面積(cm^2), σ_y : 降伏点(MPa), σ_u : 引張強度(MPa),
 E_s : ヤング係数(GPa)

(2) コンクリート

試験体名	σ_B	σ_t	試験体名	σ_B	σ_t
F0W5-0.014	32.8	3.15	F1W5-0.01	27.3	2.13
F0W5-0.14			F1W5-1		
F0W5-1.4			F3W5-0.01		
F1W5-0.14			F3W5-1		
S0W5-0.014	26.5	2.96	S1W5-0.01	27.7	2.01
S0W5-0.14			S1W5-1		
S0W5-1.4			S3W5-0.01		
S1W5-0.14			S3W5-1		

σ_B : シリンダー圧縮強度(MPa),

σ_t : シリンダー引張強度(割裂強度, MPa),

E_s : ヤング係数(GPa)

じる引張力および壁板の異方性化による壁板の膨張のために生じる側柱の曲げモーメントによって水平方向のひび割れが連続した。水平せん断耐力(最大水平荷重)を発揮した後は、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荷重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、圧縮側柱脚部近傍の壁板がスリップ状せん断破壊を起こし、引張側柱脚部近傍から伸展している斜め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、急激に水平荷重が低下した。この時のRは、載荷速度が速くなるほど小さくなる傾向がある。このことは、曲げ破壊が先行するように設計された耐震壁でも、地震時のような速い速度で水平力が作用するような場合には、比較的小さな層間変形角でせん断破壊が生じる恐れがあることを想定しておく必要があることを示しているものと考えられる。履歴性状についてみると、一方単調載荷の方が同一変形時における水平荷重が多少大

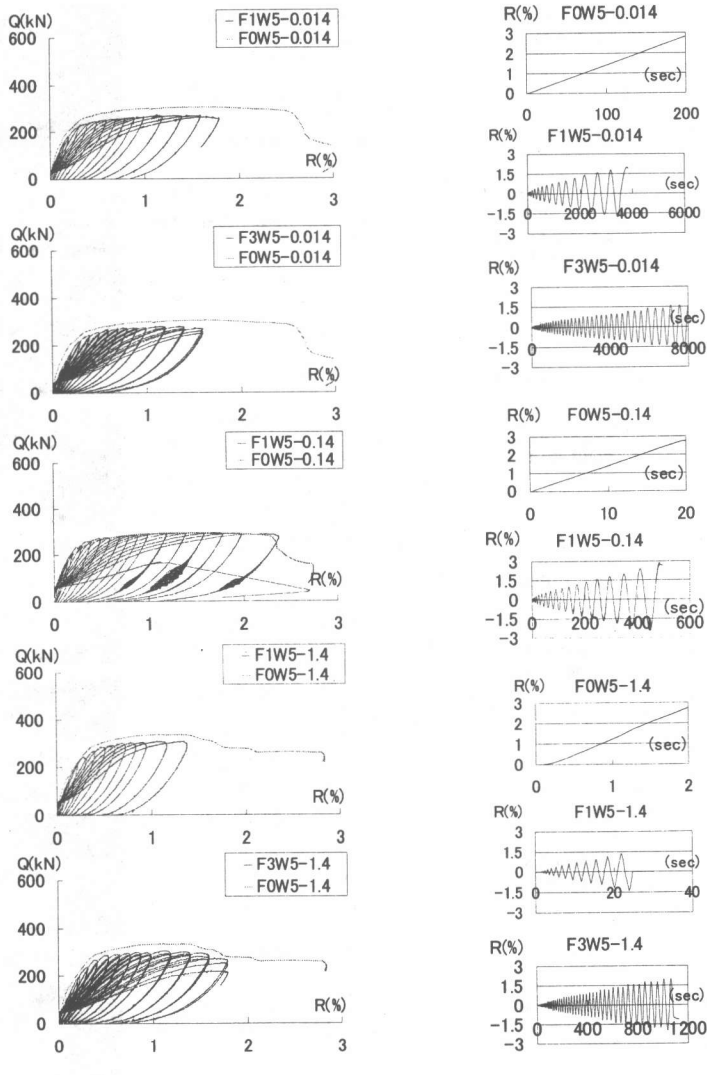


図-2 曲げ破壊先行シリーズ試験体のQとRの履歴曲線、Rの時刻歴、および実験終了時のひび割れと破壊状況

きくなる傾向があるが、ほぼ正負繰返し载荷実験の履歴包絡曲線に近い結果となった。本実験シリーズのように曲げ破壊モードの場合は、水平せん断耐力が主筋の降伏強度に依存しているため、一方向载荷試験体と正負繰返し試験体の主筋の降伏点強度が異なると、両者の比較は厳密にはできない。しかし、両者の強度の差は少ないので、同一の図に両者の結果を示した。これらによれば、曲げ破壊が先行する試験体の場合、荷重変形履歴曲線に及ぼす履歴パスの影響はみられないようである。これは、水平せ

ん断耐力が側柱の主筋強度に依存しているため、壁板のせん断応力度が小さくなり、その結果、繰返しによる壁板コンクリートの損傷が拡大しなかったことによるものと考えられる。

図-3にせん断破壊先行シリーズの試験体について、水平力 Q と層間変形角 R との関係、 R の時刻歴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によれば、測定された载荷速度は、計画した速度とほぼ一致していることがわかる。いずれの試験体とも水平せん断耐力に達した後は、壁板の

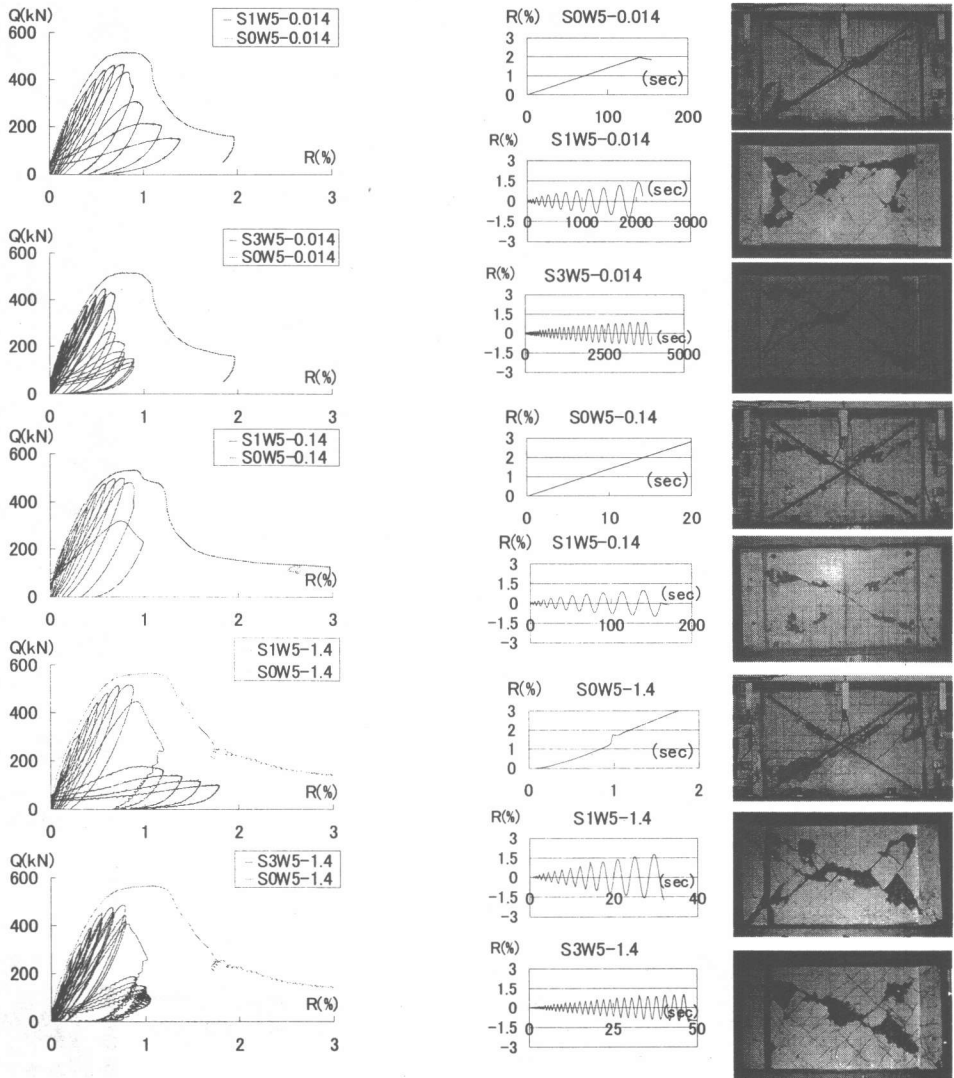


図-3 せん断破壊先行シリーズ試験体の Q と R の履歴曲線、 R の時刻歴、および実験終了時のひび割れと破壊状況

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。一方向単調載荷を行うと、正負繰返し載荷時にはみられなかった側柱主筋が耐力時近傍で降伏を起こして、一時水平荷重を維持する履歴性状を示し、降伏直後のせん断破壊を起こす曲げせん断破壊モードを示した。これは、一方向載荷の場合には壁板コンクリートの水平抵抗性能が正負繰返し載荷の場合よりも低下しなかったためではないかと思われる。壁板のせん断破壊後は、側柱もかなりの損傷を受けたが、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、一方向単調載荷のほうが同一変形時におけ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。せん断破壊先行の試験体では、水平せん断耐力がコンクリート圧縮強度に依存しているため、一方向載荷試験体の圧縮強度と正負繰返し試験体の圧縮強度が異なると、両者の比較は厳密にはできない。しかし、両者の強度の差は少ないので、同一の図に両者の結果を示した。これらの図によれば、荷重変形履歴曲線に及ぼす履歴パスの影響が明らかにみられる。これは、水平せん断耐力が壁板コンクリートの圧縮強度に依存していることから、壁板のせん断応力度が大きくなると、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。

3.2 載荷速度および履歴パスの影響

表-3に実験結果一覧を示す。また、図-4に載荷速度と水平せん断耐力上昇率 α_0 との関係を示す。測定された側柱主筋のひずみ速度によれば、載荷速度が速いほど大きく、曲げ破壊先行試験体のほうがせん断破壊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、載荷速度が速いほど大きく、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ていることがわかる。Fシリーズは鉄筋、Sシリーズは壁板コンクリートの各測定ひずみ速度を用いて、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既往の提案式^{4),5)}で求めた強度上昇率を同表に示した。上昇率は、各載荷速度時の水平せん断耐力を基準載荷速度 $v_R=0.014\%/sec$ 時の水平せん断耐力で除した値である。これらによれば、曲げ破壊先行の試験体の場合は、提案式で求めたほどの耐力上昇はなかったが、せん断破壊先行試験体の場合は、提案式で求めた程度の耐力上昇となった。実験資料が少ないので、定量的な評価については、今後検討が必要であるが、本実験での結果によれば、耐震壁の水平せん断耐力に及ぼす影響は、材料強度に及ぼすひずみ速度の影響を考慮することにより説明できそうである。

表-3 実験結果一覧

破壊先行	試験体名	実験値				計算値		計算値 (kN), 実験値/計算値									
		exQu (kN)	exRu (%)	ひずみ速度		ex α_0 Q	上昇率	calQuf		calQus1		calQus2		calQuws		calQucs	
				主筋 (μ/sec)	壁板 (mm/mm/sec)			calQuf	calQus1	calQus2	calQuws	calQucs					
曲げ破壊先行	F0W5-0.014	307	1.62	110	0.11×10^{-3}	1.00	1.00	229	1.34	398	0.77	282	1.09	496	0.62	420	0.73
	F1W5-0.014	300	1.72	113	-	1.00	1.00	238	1.26	349	0.86	257	1.17	471	0.64	429	0.70
	F3W5-0.014	282	1.10	104	-	1.00	1.00	238	1.18	349	0.81	257	1.10	471	0.60	429	0.66
	F0W5-0.14	295	1.24	1425	1.11×10^{-3}	0.96	1.07	229	1.29	398	0.74	282	1.05	496	0.59	420	0.70
	F1W5-0.14	296	1.51	1467	-	0.99	1.07	238	1.24	349	0.85	257	1.15	471	0.63	429	0.69
	F0W5-1.4	335	1.32	6803	14.42×10^{-3}	1.09	1.12	229	1.46	398	0.84	282	1.19	496	0.68	420	0.80
	F1W5-1.4	310	1.07	6867	-	1.03	1.12	238	1.30	349	0.89	257	1.21	471	0.66	429	0.72
	F3W5-1.4	305	1.13	6810	-	1.08	1.12	238	1.28	349	0.87	257	1.19	471	0.65	429	0.71
	せん断破壊先行	S0W5-0.014	518	0.82	54	0.09×10^{-3}	1.00	1.00	546	0.95	344	1.50	333	1.55	465	1.11	559
S1W5-0.014		463	0.78	-	-	1.00	1.00	532	0.87	352	1.32	338	1.37	473	0.98	550	0.84
S3W5-0.014		446	0.59	-	-	1.00	1.00	532	0.84	352	1.27	338	1.32	473	0.94	550	0.81
S0W5-0.14		533	0.87	635	0.84×10^{-3}	1.03	1.05	546	0.98	344	1.55	333	1.60	465	1.15	559	0.95
S1W5-0.14		500	0.71	-	-	1.08	-	532	0.94	352	1.42	338	1.48	473	1.06	550	0.91
S0W5-1.4		567	1.04	4812	9.51×10^{-3}	1.10	1.11	546	1.04	344	1.65	333	1.70	465	1.22	559	1.01
S1W5-1.4		519	0.83	-	-	1.12	-	532	0.98	352	1.47	338	1.54	473	1.10	550	0.94
S3W5-1.4		487	0.77	-	-	1.09	-	532	0.92	352	1.38	338	1.44	473	1.03	550	0.89

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²⁾

calQus2: 広沢式による水平せん断耐力計算値¹⁾

calQuf: 曲げ破壊による水平せん断耐力計算値³⁾

calQuws: スリップ破壊による水平せん断耐力計算値⁶⁾

calQucs: 側柱せん断破壊による水平せん断耐力計算値⁶⁾

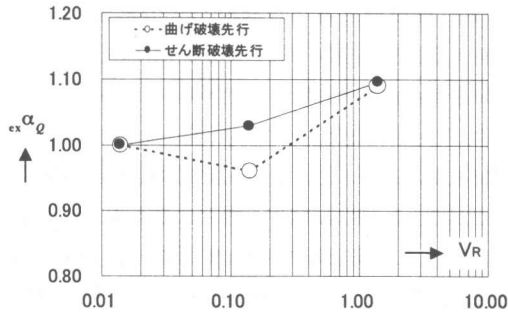


図-4 載荷速度 v_R と水平せん断耐力増大率 $ex\alpha_Q$

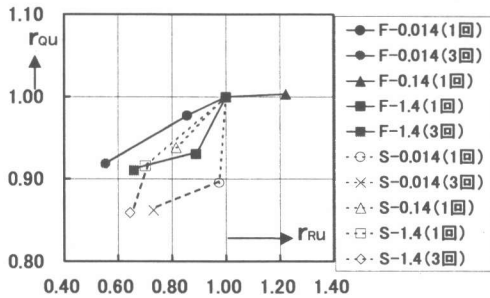


図-5 履歴パスによる水平せん断耐力低下率

図-5に一方単調載荷時の水平せん断耐力 exQ_{u0} と繰返し載荷時の水平せん断耐力 exQ_u の比率 $r_{Qu} = exQ_u / exQ_{u0}$ と、一方単調載荷の水平せん断耐力時層間変形角 exR_{u0} と繰返し載荷の水平せん断耐力時層間変形角 exR_u の比率 $r_{Ru} = exR_u / exR_{u0}$ との関係を示す。これによれば、曲げ破壊先行の場合、水平せん断耐力は、制御変位での繰返し回数が増えても一方単調載荷の場合に得られた水平せん断耐力より低下する割合は小さい。一方、せん断破壊先行の場合は、制御変位での繰返し回数が増えると一方単調載荷の場合に得られた水平せん断耐力よりもかなり低下する傾向がある。また、いずれの破壊モード試験体とも水平せん断耐力時の層間変形角は繰返し回数が増えるにつれて小さくなる傾向がある。これらの結果は、耐震壁の水平抵抗機構が、主としてせん断ひび割れが生じた壁板コンクリートの圧縮ストラットの圧縮性能に依存していることから、繰返しによる壁板コンクリート圧縮ストラットの損傷の程度によって、耐震壁の抵抗性能が左右されると考えられることから予測される。

4. 結論

曲げ破壊先行およびせん断破壊先行の各試験体について、載荷速度を実験変動因子とした一定軸力下の一方水平力載荷実験を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 測定された載荷速度は計画した速度とほぼ一致した。
- 2) 曲げ破壊先行の場合は、載荷速度が速くなるほど、水平せん断耐力後のせん断破壊が生じる層間変形角が小さくなる傾向がある。
- 3) 水平せん断耐力は載荷速度の影響を受けた。
- 4) 曲げ破壊先行の場合は、荷重変形履歴に及ぼす履歴パスの影響は小さい。
- 5) せん断破壊先行の場合は、履歴パスの影響を受け、制御変位での繰返し回数が増えると、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も小さくなる傾向がある。

謝辞

本研究は、平成12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。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) 松岡良智・小野正行・江崎文也:一定速度の水平力を受けるRC耐震壁の履歴性状,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.22, No.3, 2000.6, pp.451~456
- 2) 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
- 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) 藤本盛久ほか:自信動を受ける単一山形鋼筋かいの高速度引張実験,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
- 5) 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度載荷実験,日本建築学会大会梗概集(関東), pp.787-789, 1997.9
- 6) 江崎文也・富井政英・光山祐明: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,1988.10, pp.529-530
- 7) 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,1975.9, pp.1173-1174