

論文 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研究

江崎文也*¹, 小野正行*²

要旨: H形鋼が埋め込まれたSRC造側柱を有する無開口耐震壁の実物の約1/3試験体モデルを用い、載荷速度が0.01cm/secおよび1cm/secの場合について、左右の側柱に作用する軸力を水平力に対して一定の割合で変化させ、正負交番繰り返し水平力載荷による実験を行った。その結果、H形鋼強軸および弱軸のいずれの配置の場合とも壁板のスリップ破壊が先行し、載荷速度が速いと初期剛性および水平耐力が10%程度大きくなり、耐力時の変形も小さく、壁板のスリップ破壊後は側柱の損傷が大きくなることがわかった。

キーワード: 耐震壁, 載荷速度, SRC側柱, スリップ破壊

1. 序

RC造耐震壁の荷重-変形関係、破壊性状および水平耐力などの力学的性状は、繰り返し静的載荷実験により評価されている。しかし、実際の地震時には、大きなひずみ速度・変形速度で変形するので、静的な載荷実験で得られた結果と異なる可能性が考えられる。

コンクリートおよび鋼材についての材料の力学的性質に及ぼすひずみ速度の影響に関する研究、およびRC造梁・柱などの線材部材の力学的性状に及ぼす載荷速度の影響について検討した結果によると、コンクリート圧縮強度、弾性係数および鋼材の降伏強度は、ひずみ速度の対数値に比例して増大すること、部材に関してはその初期剛性、せん断ひび割れ荷重および水平耐力が増大することなどが実験的に指摘されている^{1)~8)}。しかし、比較的試験体が大きい側柱を有する耐震壁のような面材部材に関する載荷速度の影響についての実験的研究は、著者らが実施した実物大の約1/3の大きさの側柱を有するRC造有開口耐震壁の実験⁹⁾のほかは報告されていないようである。そのため、載荷速度が耐震壁のような面材部材のひび割れ性状、破壊性状および各破壊モードに対応した水平耐力にどの程度影響を及ぼすのかなどについてはまだ

十分な実験資料がないのが現状である。

そこで、実物大の約1/3試験体モデルを用いて、曲げ破壊によって決まる水平せん断耐力計算値¹⁰⁾と壁板のスリップ破壊によって決まる水平せん断耐力計算値¹¹⁾との比が1.1未満となるような両者の値が比較的近い場合について、載荷速度が破壊モードの変化に及ぼす影響を検討するため、側柱を有するRC造無開口耐震壁に関し、載荷速度を変化させた繰り返し水平力載荷実験を実施した。本論は、静的実験から提案されている水平せん断耐力計算値ではせん断破壊が予測される耐震壁に関し、ひび割れ性状、破壊性状、荷重-変形関係および水平せん断耐力などに及ぼす載荷速度の影響について検討を行ったものである。

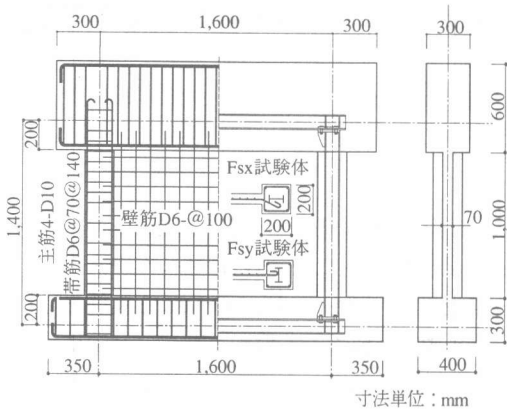
2. 実験概要

2.1 試験体

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。図-1には、試験体形状および配筋を示す。試験体名は、FdWt-Lの記号を付けている。Fdは側柱に埋め込まれたH形鋼の向きを表し、耐震壁面内方向に対して強軸に配置した場合がF_{sx}、弱軸に配置した場合がF_{sy}である。tは壁厚 (cm)、Lは載荷速度 (S : 0.01cm/sec,

* 1九州共立大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

* 2近畿大学教授 九州工学部建築学科 (正会員)



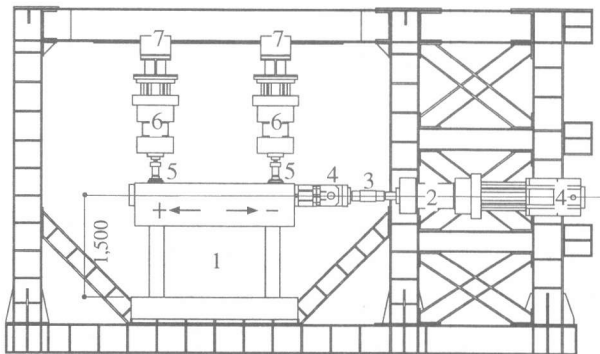
図一 試験体形状および配筋

D:1cm/sec)を表している。地震時に実際の建物の耐震壁に作用する地震荷重速度は本実験の載荷速度よりかなり速いと考えられるが、本実験で採用した載荷速度は試験機的能力を考慮して決めた。

H形鋼を側柱に配置したのは、壁板のせん断破壊後の衝撃による側柱のせん断破壊を防止するとともに、側柱のせん断破壊よりも壁板のスリップ破壊が先行する条件¹²⁾を満足させ、せん断破壊モードが壁板のスリップ破壊先行となるように計画したためである。

2.2 載荷方法・載荷プログラム

図一2に載荷装置を示す。水平力および鉛直力の載荷は、コンピュータ制御によるアクチュエータ3台を用いて行った。試験体への正負水平力の繰り返し載荷は、剛な上部の梁に埋め込まれたパイプに通したPC鋼棒を介して行った。鉛直荷重は、試験体



1:試験体, 2:100tf アクチュエータ, 3:100tf ロードセル 4:ピン, 5:50tf ロードセル, 6:50tf アクチュエータ, 7:ローラ (寸法単位:mm)

図一2 載荷装置

表一 試験体一覧

試験体名	側柱配筋	壁板配筋
FsxW7-S	主筋4-D10($p_g=0.00713$)	D6@100mm ($p_s=0.00401$)
FsxW7-D	鉄骨H-100x50x5x7	
FsyW7-S	($p_g=0.0296$)	
FsyW7-D	帯筋D6@70mm ($p_w=0.00401$)	

p_g :主筋比 ($=a_g/A_c$, a_g :側柱主筋断面積, A_c :側柱断面積),
 p_g :鉄骨比 ($=a_g/A_c$, a_g :側柱鉄骨断面積), p_w :帯筋比 ($=a_w/b_c x$,
 a_w :1組の帯筋断面積, b_c :側柱の幅, x :帯筋間隔),
 p_s :壁筋比 ($=a_s/t x$, a_s :壁筋断面積, t :壁厚, x :帯筋間隔),

表一 2 使用材料の力学的性質

(1)鉄筋および鉄骨

種別	a (cm^2)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	E_s (GPa)	伸び ^o (%)
D6	0.281	407	546	164	22.8
D10	0.71	335	479	176	18.1
H形鋼	0.821	412	475	186	26.5

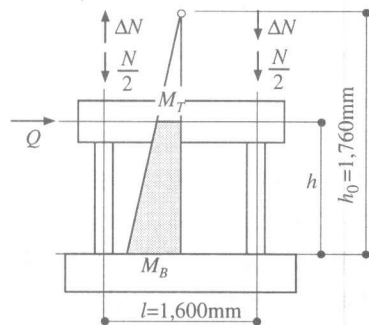
a :断面積, σ_y :降伏点強度, σ_u :引張強度,
 E_s :ヤング係数

(2)コンクリート

試験体名	σ_B (MPa)	ϵ_B (%)	E_c (GPa)
全試験体	18.7	0.21	21.3

σ_B :シリンダー圧縮強度, ϵ_B :圧縮強度時ひずみ,
 E_c :ヤング係数

の左右の側柱中心位置へ2台のアクチュエータを用いて、それぞれ196kNの圧縮力を作用させた。試験体の曲げモーメント分布が、図一3に示すような状態が保持されるように、水平力載荷と同時に左右の側柱の荷重を水平力 Q に対して一定の割合 ΔN だけ変動させ、曲げモーメントが0となる反曲点位置が試験体より上部の位置になるようにした。本実験では、



$$M_T = \Delta N l = 0.163 Q l$$

$$\alpha = \frac{M_B}{Q l} = \frac{M_T + Q h}{Q l} = (0.163 + \frac{h}{l}) = 1.1$$

図一3 変動動力とせん断スパン比 α

せん断スパン比 $\alpha=M/(QD)=1.1$ (M, Q :耐震壁に作用する最大曲げモーメントおよび水平せん断力, l :側柱中心間距離)となるように鉛直荷重を変化させた。図-4に左右アクチュエータの鉛直変動荷重 ΔN の荷重プログラム時刻歴を示す。

水平力荷重方法は、いずれの荷重速度とも変位制御で、制御変位で2サイクル正負交番繰り返し加力である。基礎梁上端より高さ $h=100\text{cm}$ の位置の上部梁中央での水平変位 δ を h で除した層間変形角 $R=\delta/h$ を漸増させ、図-4に示すような荷重プログラムとした。本論では、 0.01cm/sec の荷重速度の場合を静的荷重、 1cm/sec の場合を動的荷重と呼ぶことにする。

2.3 測定方法

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。試験体各部の変位は、図-5に示す試験体の基礎梁に固定させた変位測定用フレームに取り付けた高感度変位計により測定した。変位計の感度は、水平変位制御用が $100\mu\text{/mm}$ 、その他は、 $200\mu\text{/mm}$ 、 $500\mu\text{/mm}$ および $1000\mu\text{/mm}$ である。側柱脚部位置での主筋およびH形鋼のフランジおよびウェブにひずみゲージを貼付し、鉄筋および鉄骨のひずみを測定した。各測定値を、静的荷重の場合が 0.4sec 、動的荷重の場合が 0.004sec の各サンプリング間隔で取り込み、ハードディスクに記録した。ひび割れの記録は、目視によるスケッチ、写真撮影およびビデオカメラ撮影によった。

3. 実験結果

各試験体の水平荷重 Q -層間変形角 R 関係、 Q および R の時刻歴および実験終了時のひび割れ状況を図-6に示す。図中の Q_{max} は、正側および負側の各最大水平荷重である。以下に、各試験体のひび割れ状況および破壊性状を述べる。
(静的荷重の場合): R が 0.15% 制御時に壁板の初せん断ひび割れが目視され、その後、 R の増大とともにせん断ひび割れが連続・進展し、 R が 0.2% 制御時には柱の水平ひび割れが目視された。 R が 0.6% 制御時を超えると圧縮側の側柱脚部近傍に沿って壁板コンクリートのスリップ状破壊の兆候が生じ、その後の R の増大とともに壁板中

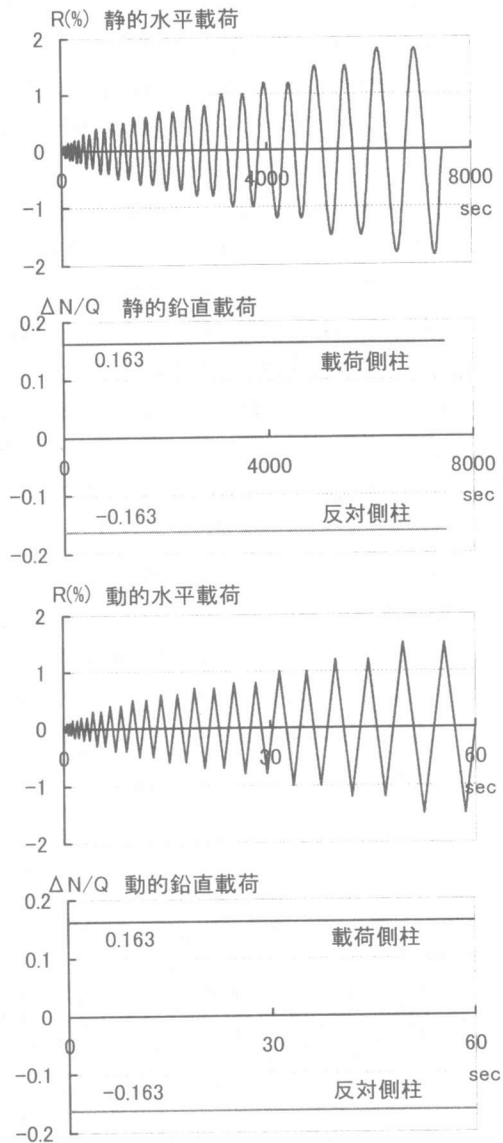


図-4 水平・鉛直の各荷重プログラム

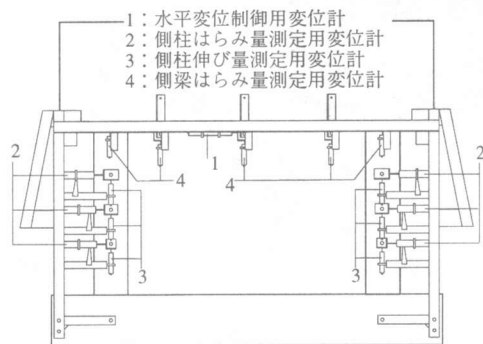


図-5 変位測定装置

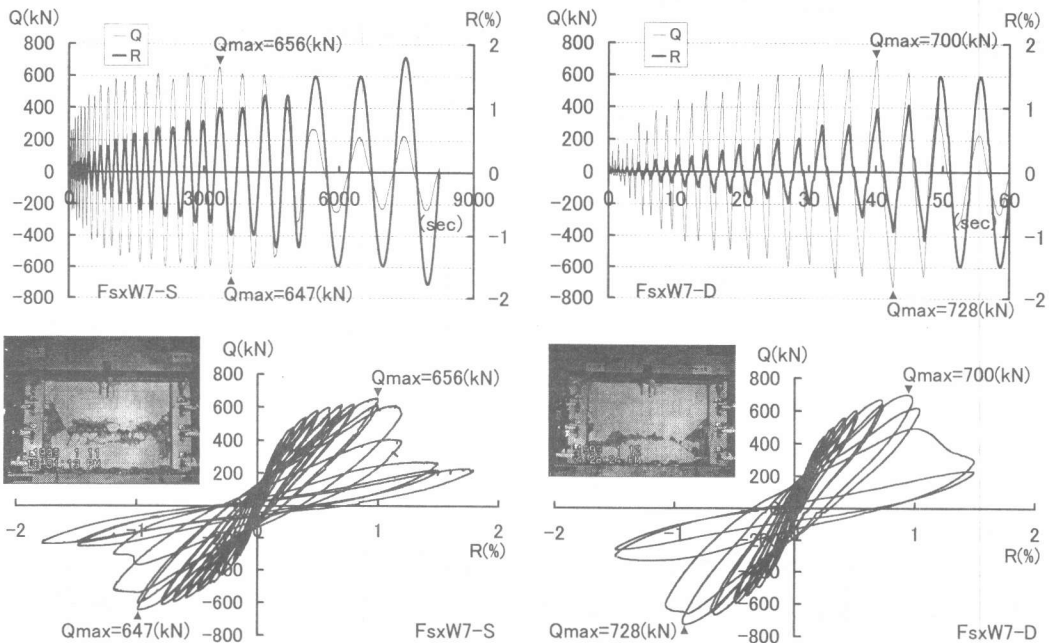
央にも進展し、圧縮側柱脚部のコンクリートの圧壊および多数のせん断ひび割れが生じた。 $R=1.2\%$ 制御時に最大水平荷重に達し、その後の繰り返し時に壁板のスリップ破壊が壁板全体に広がるとともに圧縮側の側柱脚部にも大きなせん断ひび割れが生じ、急激に水平荷重の低下が生じたが、側柱の鉛直荷重支持能力は低下しなかった。H形鋼弱軸の場合の方が強軸の場合よりも側柱脚部の損傷が大きい。しかし、強軸および弱軸の配置の相違が耐震壁の水平耐力および変形性能に及ぼす影響はとくに認められない。弱軸でも鉄骨が配置されているとRC造の場合よりはせん断破壊および鉛直荷重支持能力の低下を防止する効果が十分期待できそうである。(動的荷重の場合): R が 0.05% 制御時に壁板の初せん断ひび割れが目視され、その後のひび割れの続発・進展は静的荷重の場合と同様である。 R が 1% 制御時に最大水平荷重となり、その後の繰り返し時に圧縮側の側柱脚部近傍の壁板にスリップ破壊現象が生じた。その後スリップ破壊

が壁板中央部まで広がり、急激に水平荷重の低下が生じたが、鉛直荷重支持能力は低下しなかった。動的荷重の場合は壁板の破壊が短時間に生じるため、静的荷重の場合よりも側柱脚部の損傷が大きく、壁板のせん断破壊が先行する場合は、側柱脚部のせん断強度に十分余裕を持たせることが必要と考えられる。

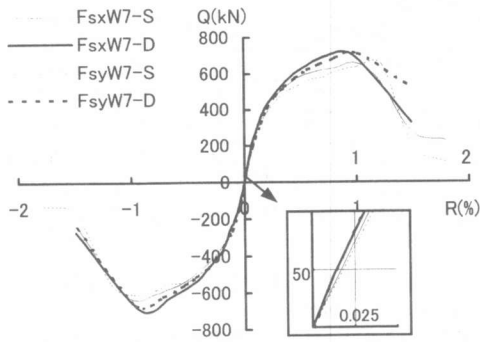
図一七に荷重-変形の包絡曲線を示す。動的荷重の方が初期剛性および水平耐力とも 10% 程度大きく、耐力時の層間変形が小さい。これは、載荷速度の影響により材料の強度および剛性が上昇し、水平荷重が大きくなったことによるものと考えられる。そのため、図一八に示すように、動的荷重のほうがせん断ひび割れによって生じる耐震壁の面積膨張の度合いを示す面積膨張率 $\phi (= \Delta S / S, \Delta S$: 載荷時の耐震壁面積増分, S : 載荷前の耐震壁面積)が、大きくなっている。

4. 水平耐力

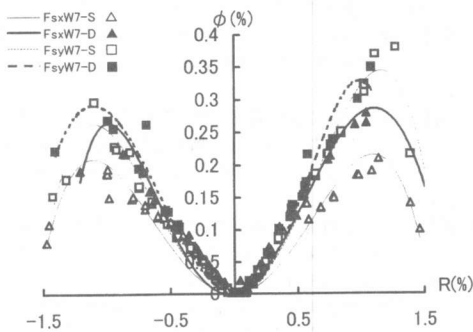
表一三に水平せん断耐力実験値 Q_{ex} および耐



図一六 a H形鋼強軸配置したFsx試験体の水平荷重 Q -層間変形角 R 関係、 Q および R の時刻歴、および実験終了時のひび割れ状況

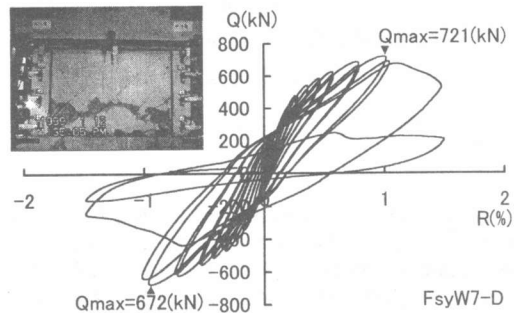
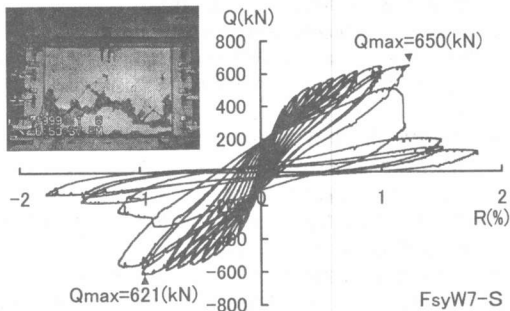
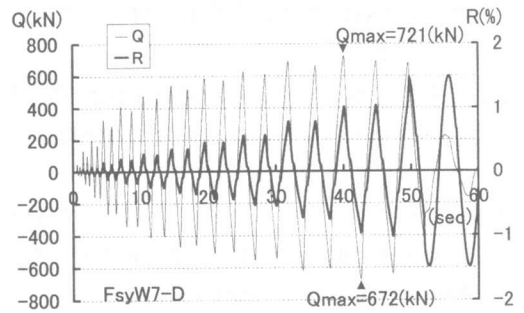
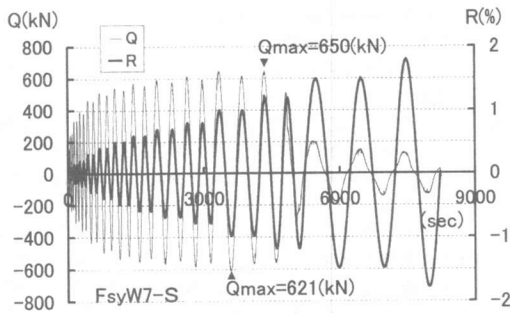


図一七 荷重-変形の包絡曲線



図一八 面積膨張率 ϕ と層間変形角 R との関係

力時の層間変形角実験値 R_u の一覧を示す。前述したように、水平せん断耐力は動的載荷の方が静的載荷の場合よりも 10% 程度大きく、耐力時の変形は小さい。一方、H 形鋼強軸および弱軸配置の相違が水平耐力に及ぼす影響はほとんどないと考えてよさそうである。同表には、曲げ破壊による水平せん断耐力¹⁰⁾ Q_{fu} 、終局強度型設計指針式による水平せん断耐力¹³⁾ Q_{us1} 、広沢式による水平せん断耐力¹⁴⁾ Q_{us2} 、著者らが提案した壁板のスリップ破壊による水平せん断耐力¹¹⁾ Q_{uws} および側柱のせん断破壊による水平せん断耐力¹¹⁾ Q_{ucs} を示している。ひずみ測定結果によれば、側柱主筋は水平耐力時に降伏ひずみに達しているが、鉄骨の場合は全断面が降伏ひずみに達していない。側柱を鉄骨で補強しているため側柱の強度が大きく、曲げ破壊強度に達する以前に壁板のスリップ破壊が生じたものと考えられることから、水平耐力実験値は、 Q_{uws} の値に近い。文献 15) による壁板コンクリート圧縮強度から求めたせん断強度 $\tau_{cu} = 1.85 \sqrt{\sigma_B}$ を用い、本



図一六 b H 形鋼弱軸配置した Fsy 試験体の水平荷重 Q - 層間変形角 R 関係、 Q および R の時刻歴、および実験終了時のひび割れ状況

表一 3 実験結果および計算値一覧

試験体名	実験値					計算値(kN), (最大実験値) / (計算値)					
	Q_u (kN)		$Q_u / (tl\sqrt{\sigma_B})$		R_u (%)		Q_{fu}	Q_{us1}	Q_{us2}	Q_{us}	Q_{ucs}
	+	-	+	-	+	-	781	515	499	740	1056
FsxW7-S	656	647	1.35	1.33	0.979	0.980	0.840	1.27	1.31	0.886	0.621
FsxW7-D	701	729	1.46	1.50	0.919	0.903	0.933	1.42	1.46	0.985	0.690
FsyW7-S	650	621	1.34	1.28	1.230	0.965	0.832	1.26	1.30	0.879	0.616
FsyW7-D	722	673	1.49	1.39	0.980	0.943	0.924	1.40	1.45	0.976	0.684

実験の壁板のせん断応力度集中係数を $k=1.2$ と仮定して水平せん断耐力時の壁板の見掛けのせん断強度 $\tau_u (=Q_u / (tl), Q_u$: 水平せん断耐力), t : 壁厚, l : 側柱中心間距離) を求めると, $\tau_u=(1.85/1.2)\sqrt{\sigma_B}=1.54\sqrt{\sigma_B}$ となり, 表一 3 に示す実験値にほぼ近い値となった。ゆえに, このような破壊となる耐震壁の水平せん断耐力は, 文献15) で得られた強度でも評価できそうである。

5. 結論

本実験から得られた結果について検討したものをまとめると, 以下のようである。

- 1) 破壊モードに対応した水平せん断耐力算定値から予測した破壊モードは, 本実験の載荷速度の範囲では載荷速度の相違で変化することはなかった。
- 2) 載荷速度が上昇すると初期剛性および水平耐力が10%程度上昇し, 耐力時の変形も小さくなった。
- 3) 載荷速度が上昇すると壁板のスリップ破壊以後側柱の損傷が大きくなる傾向となった。
- 4) 壁板のスリップ破壊強度は, 文献14) および15) の強度でおおよそ評価できそうである。
- 5) H形鋼配置の相違が荷重変形関係および水平耐力に及ぼす影響は本実験の範囲ではとくに認められなかった。

謝辞

試験体製作および実験の実施にあたっては, 平成10年度近畿大学九州工学部建築学科および九州共立大学工学部建築学科卒業生の協力を得た。鉄骨フレーム製作では, 九州共立大学工学部建築学科技能員栗山哲生, 花田憲一の各氏にお世話になった。ここに, 関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 岩井 哲他: 構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に

関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第314号, pp.102-111, 1972.4

- 2) 最上達雄・小林 淳: 高速荷重を受ける鉄筋コンクリート梁の耐力と変形に関する実験的研究(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1579-1580, 1978.9, 高速荷重を受ける鉄筋コンクリート梁の耐力と変形に関する実験的研究(軸力のある部材に対する曲げ・剪断実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1293-1294, 1979.9
- 3) 遠藤孝夫・加藤 治・田辺忠顕: 動的な外力を受ける鉄筋コンクリート柱部材のせん断性状に関する研究, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.689-692, 1984
- 4) 睦好宏史・町田篤彦: 動的な外力を受ける鉄筋コンクリート部材の動的非線形地震応答解析, 土木学会論文集, 第366号/IV-4, pp.113-122, 1986.2
- 5) 睦好宏史・町田篤彦・鶴田和久: ひずみ速度を考慮した鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究, 土木学会論文集, 第354号/IV-2, pp.81-90, 1985.2
- 6) 藤井 栄ほか: 鉄筋コンクリート柱の挙動に及ぼす載荷速度の影響(その1, その2) 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.411-414, 1986.8
- 7) 藤本盛久ほか: 高速荷重を受ける鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究(その1~その12), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1978.9~1991.9
- 8) 中西三和・小池正昭・安達 洋: 鉄筋コンクリート造柱の力学的性状に及ぼす載荷速度の影響に関する研究(その1, その2) 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.167-170, 1991.9
- 9) 小野正行・江崎文也・阿部浩一: 有開口耐震壁の弾塑性性状に及ぼす載荷速度の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.595-600, 1998
- 10) 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
- 11) 江崎文也・富井政英・光山裕朗: 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
- 12) 江崎文也・富井政英: Predicting Method for Shear Failure Modes of Reinforced Concrete Framed Shear Walls, Trans. of JCI, Vol.4, pp.297-304, 1982
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 江崎文也: 外部拘束を受けるRC壁板の圧縮性能に及ぼす壁筋強度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, 第19巻2号, pp.1065-1070, 1997.6