

論文 一定速度の水平力を受ける RC 耐震壁の履歴性状

松岡良智*1・小野正行*2・江崎文也*3

要旨:一定速度で水平力を載荷できる装置, および連続的に荷重・変位・ひずみを測定できる装置を用いて, 耐震壁の一定軸力下の正負交番繰り返し水平力載荷実験を実施した。曲げ破壊先行シリーズとせん断破壊先行シリーズの各試験体について計画し, 実験変動因子は載荷速度と履歴パスである。実験結果によれば, いずれのシリーズとも予測された破壊モードとなったが, 累積履歴の増大による水平せん断耐力の低下率は, せん断破壊モードの場合が大きいく, 載荷速度の増大による水平せん断耐力の上昇率は, せん断破壊モードの場合が大きいくことがわかった。

キーワード:耐震壁, 載荷速度, 履歴パス, 破壊モード, 曲げ破壊, せん断破壊

1. 序

構造部材に関する従来の静的載荷実験では, 所定の変位まで比較的ゆっくりと水平力を手動で載荷し, 制御変位に達すると一旦載荷を一時停止し, その直後に試験体のひずみ, 変位および荷重等を測定しているのが一般的である。しかし, 実際の地震時の場合, 静的載荷の場合よりも速い種々の速度で連続的に載荷を受けているため, 静的載荷実験で得られた挙動と異なることが十分予測されることから, RC 構造部材の復元力特性, 破壊性状および強度性状等の力学的性状に及ぼす載荷速度の影響に関する研究が行われるようになった。

既往の研究によると, コンクリートおよび鉄筋などの材料に関する研究, 柱や梁などの線材部材に関するものは比較的多い^{1)~26)}。しかし, 耐震壁のような面材部材に関する研究は, 原子力建物に関する壁板の実験のほかは, 筆者らが行った実物の約 1/3 縮尺モデルの実験など^{27)~35)}がある程度で, 面材部材に関する実験資料が少ないのが現状である。そこで, 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, 一定速度で載荷が可能な装置を用い, 載荷時の挙動を連続的に測定しな

がら耐震壁の力学的性状を把握するための実験を計画した。

本論は, 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, 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行った RC 無開口耐震壁の一定軸力下の正負交番繰り返し水平力載荷実験から, 耐震壁の履歴性状に及ぼす載荷速度の影響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を, 表-1 に試験体一覧を示す。表-2 には, 鉄筋の力学的性質を示す。曲げ破壊による水平せん断耐力 Q_{uf} ³⁶⁾ およびせん断破壊による水平せん断耐力 Q_{usI} ³⁷⁾ の各算定式を用いて求めたせん断余裕度 Q_{usI}/Q_{uf} が 1.7 程度の曲げ破壊先行試験体シリーズと 0.78 程度のせん断破壊先行試験体シリーズについて計画した。各シリーズの実験変動因子は, 載荷速度および履歴パスである。試験体には F[S]aWb -c の記号を付け, F は曲げ破壊先行シリーズ試験体, S はせん断破壊先行シリーズ試験体, a は制御変位

*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(正会員)

*3九州共立大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

表-1 試験体一覧

試験体名	側柱配筋	v_R	σ_B	σ_t
F1W5-0.01	主筋 4-D10	0.014	27.3	2.13
F1W5-1	($p_g=0.0126$)	1.4		
F3W5-0.01	帯筋 4 ϕ @50	0.014		
F3W5-1	($p_w=0.0069$)	1.4	27.7	2.01
S1W5-0.01	主筋 6-D13	0.014		
S1W5-1	($p_g=0.0339$)	1.4		
S3W5-0.01	帯筋 4 ϕ @50	0.014	27.7	2.01
S3W5-1	($p_w=0.0069$)	1.4		

共通事項: 壁板配筋 4 ϕ @50 シングル(壁筋比 $p_s = a_s / (tx) = 0.005$, a_s : 壁筋断面積, t : 壁厚, x : 壁筋間隔), p_g : 主筋比(= $a_g / (bD)$, a_g : 主筋断面積, b : 側柱幅, D : 側柱せい), p_w : 帯筋比(= $a_w / (bx)$, a_w : 1組の帯筋断面積, b : 側柱幅, x : 帯筋間隔), v_R : 載荷速度(%/sec), σ_B : シリンダー圧縮強度(MPa), σ_t : 割裂強度(MPa)

表-2 鉄筋の力学的性質

種別	a	σ_y	σ_u	E_s	伸び(%)
D10	0.71	376	543	174	15.9
D13	1.27	350	514	173	262
4 ϕ	0.13	160	301	131	37.7

a : 断面積(cm²), σ_y : 降伏点(MPa), σ_u : 引張強度(MPa), E_s : ヤング係数(GPa)

における正負繰り返しのサイクル数, b は壁厚の値(cm), c の値は載荷速度 v_R をそれぞれ示す。 v_R は, 上梁下端の相対水平変位を側柱内法高さで除した層間変形角 R のおよその速度の値(%/sec)を示し、速い方の速度値は、地震動による応答速度のおよそ 1/2~1/50 程度に対応していると考えられる。

2.2 載荷方法および載荷プログラム

試験体上部の2台のそれぞれ容量 490kN 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、実験終了時まで一定に保持するように制御した。一定軸力を載荷後は、層間変形角 $R = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2\%$ を制御変位として、水平力を載荷した。制御変位で1サイクルおよび3サイクルの変位漸増正負交番繰り返し載荷とした。加力装置の詳細については、文献 35) を参照されたい。

2.3 測定方法

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、また、主筋の表面に貼付したゲージにて側柱脚部の主筋のひずみを、それぞれ測定した(詳細は文献 35) 参照のこと)。 $v_R = 0.014$ %/sec の場合は 0.1sec, $v_R = 1.4$ %/sec の

場合は 0.001sec の各サンプリング間隔で測定値を取り込み、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。

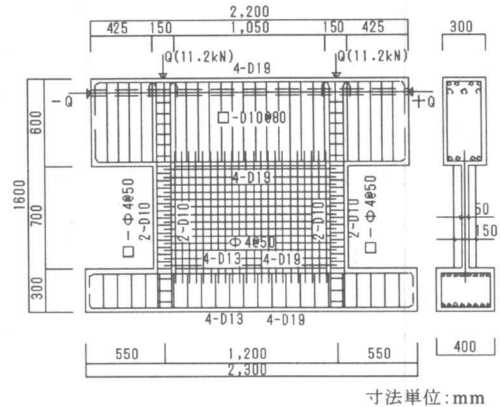


図-1 試験体形状および配筋

3. 実験結果とその検討

3.1 破壊性状

図-2 に曲げ破壊先行およびせん断破壊先行の各シリーズのそれぞれの試験体について、水平力 Q と層間変形角 R との関係、 Q と R の時刻歴および最大水平力時近傍のひび割れ状況を示す。曲げ破壊先行シリーズの場合は、いずれの試験体とも曲げ降伏が先行し、典型的な曲げ破壊を起こす安定した履歴曲線を示した。一方、せん断破壊先行シリーズの場合は、いずれの試験体とも水平せん断耐力(最大水平荷重)に達した直後の繰り返し時にスリップ状せん断破壊が壁板の大部分に生じ、水平力が急激に低下するせん断破壊特有の履歴曲線を示した。しかし、壁板の広範囲なスリップ状のせん断破壊時においても側柱のせん断破壊は起こらず、 $R = 1.8\%$ 程度まで鉛直荷重支持能力の低下はなかった。両シリーズとも計算値から予測した破壊モードとなり、本実験で計画したせん断余裕程度程度の試験体の場合、本実験で採用した載荷速度の範囲では、予測した破壊モードは変化しなかった。

3.2 履歴パスの影響

図-3 に水平せん断耐力時における1サイクル目の水平力 Q_1 および層間変形角 R_1 と3サイクル目の

水平力 Q_3 および層間変形角 R_3 との比率関係を示す。また、各制御変位時の 1 サイクル目の水平力 Q_{C1} と 3 サイクル目の水平力 Q_{C3} との比率関係を示す。これらによると、両シリーズとも制御変位での繰り返し回数が増えると水平せん断耐力が低下し、耐力時の変形も小さくなった。これは、累積履歴が増大して損傷が徐々に進行したためと考えられる。

せん断破壊先行の場合は、曲げ破壊先行の場合と比べると繰り返し回数の増大による耐力の低下が大きくなった。これは、せん断破壊先行の場合、壁板のせん断応力度が曲げ破壊先行の場合より大きいことから、繰り返しを受ける度に水平抵抗主要素である壁板の損傷が徐々に大きくなり、その結果、壁板の水平抵抗が劣化するためと考えられる。

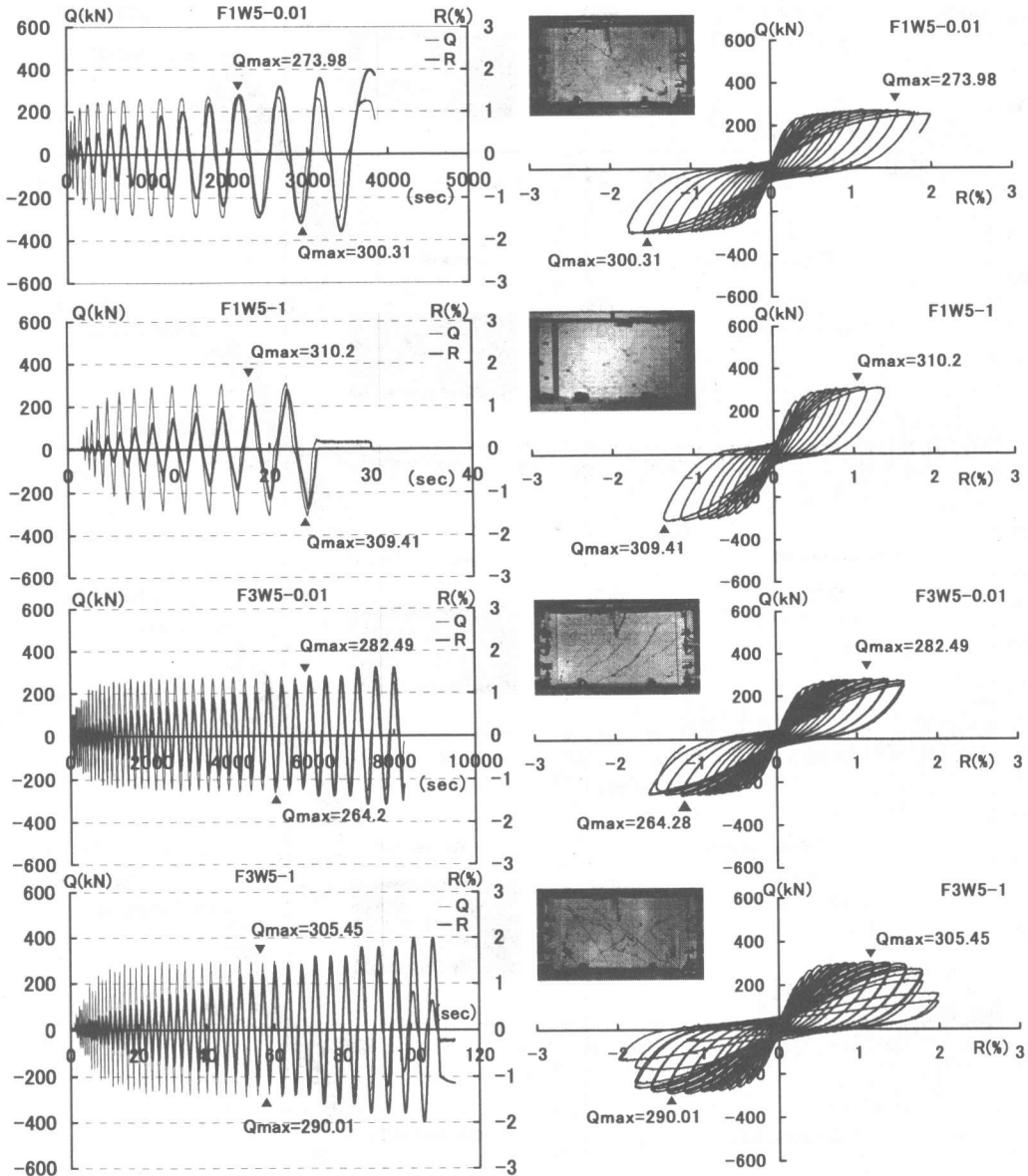


図-2 a 曲げ破壊先行シリーズ試験体の水平力 Q -層間変形角 R 履歴曲線, Q と R の時刻歴および水平せん断耐力時近傍のひび割れ状況

3.3 荷速度の影響

両シリーズとも、荷速度が速い場合には遅い場合に比べて水平せん断耐力が上昇した。図-4に示すように、曲げ破壊モードの場合 3~8%程度、せん断破壊モードの場合 9~12%程度大きく、曲げ破壊モードの場合よりもせん断破壊モードの場合のほうが耐力上昇率が大きくなった。これらの結

果から判断すると、曲げ破壊モードの場合は耐力が鉄筋の降伏強度に依存するのに対して、せん断破壊モードの場合はコンクリート圧縮強度に依存していることから、荷速度の影響がコンクリート圧縮強度により大きく影響していることが考えられる。

3.4 水平せん断耐力

表-3に実験結果と計算値を示す。曲げ破壊先

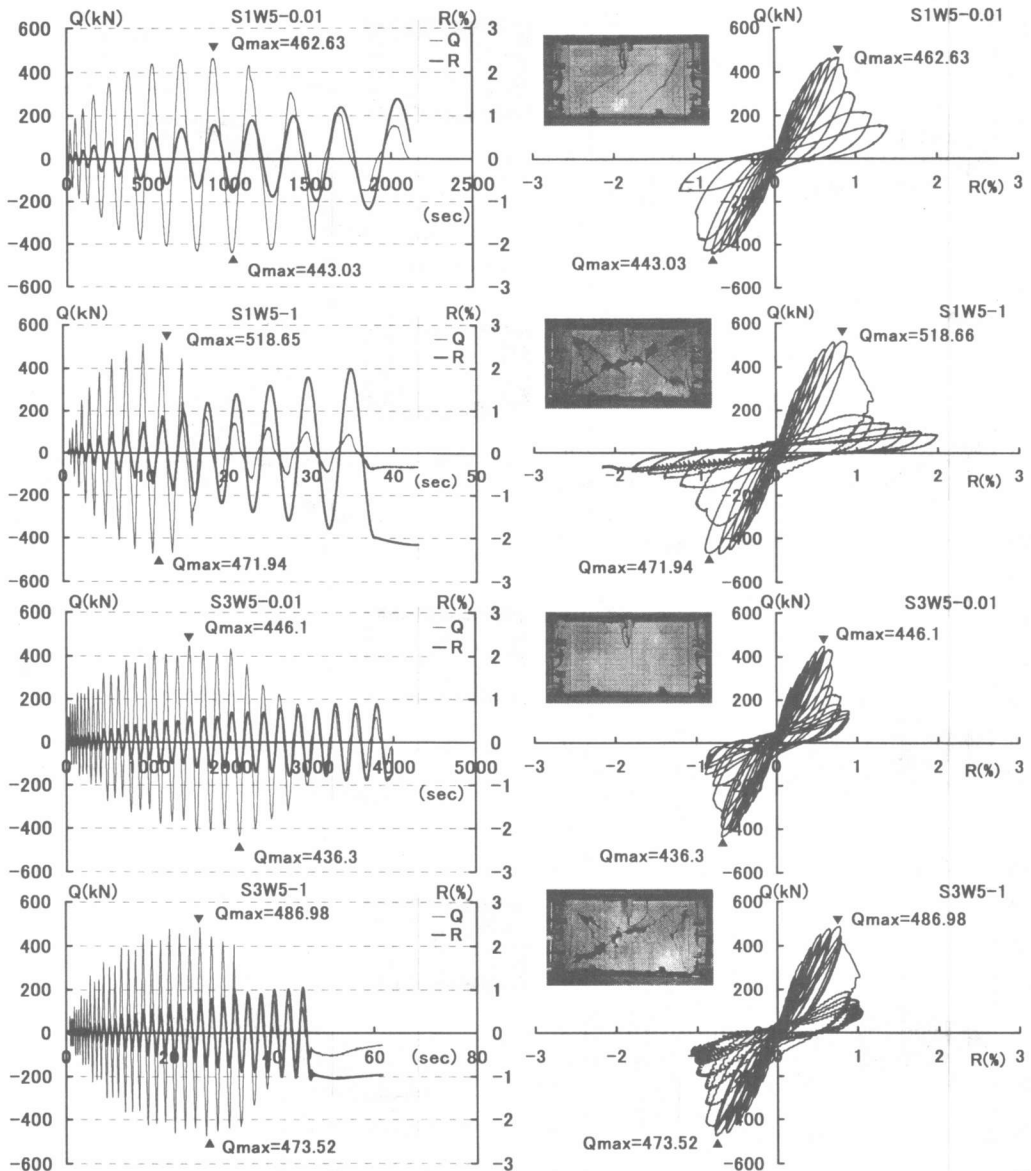
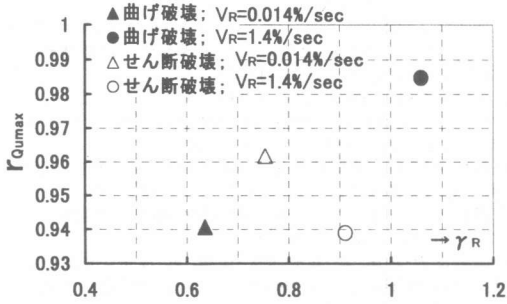


図-2 b せん断破壊先行シリーズ試験体の水平力 Q -層間変形角 R 履歴曲線, Q と R の時刻歴および水平せん断耐力時近傍のひび割れ状況

表-3 実験結果および計算値一覧

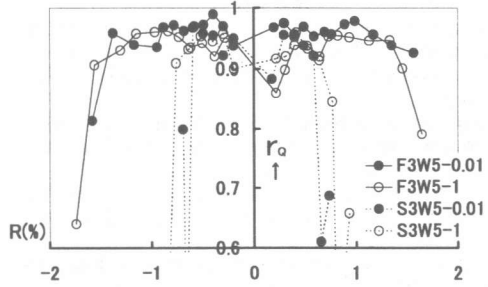
試験体名	実験値						計算値(kN), (実験値)/(計算値)									
	$ex Q_u$ (kN)		$ex Q_u / (tH\sigma_R)$		R_u (%)		$cal Q_{uf}$		$cal Q_{us1}$		$cal Q_{us2}$		$cal Q_{uws}$		$cal Q_{ucs}$	
	+	-	+	-	+	-										
F1W5-0.01	274	300	0.88	0.96	1.13	1.72	239	1.25	414	0.72	257	1.17	471	0.64	430	0.7
F1W5-1	310	309	0.99	0.99	1.07	1.26		1.3		0.75		1.21		0.66		0.72
F3W5-0.01	282	264	0.9	0.84	1.1	1.17		1.18		0.68		1.1		0.6		0.66
F3W5-1	305	290	0.98	0.93	1.13	1.14		1.28		0.74		1.19		0.65		0.71
S1W5-0.01	463	443	1.48	1.41	0.78	0.76	532	0.88	418	1.12	338	1.38	473	0.99	550	0.85
S1W5-1	519	472	1.64	1.5	0.83	0.71		0.98		1.24		1.54		1.1		0.94
S3W5-0.01	446	436	1.42	1.38	0.59	0.68		0.84		1.07		1.33		0.95		0.82
S3W5-1	487	474	1.54	1.5	0.77	0.76		0.92		1.65		1.44		1.03		0.89

$ex Q_u$: 水平せん断耐力実験値, R_u : 耐力時の層間変形角, $cal Q_{uf}$: 曲げ破壊による水平せん断耐力計算値³⁶⁾, $cal Q_{us1}$: 建築学会終局強度式による水平せん断耐力計算値³⁷⁾, $cal Q_{us2}$: 広沢式による水平せん断耐力計算値³⁸⁾, $cal Q_{uws}$: スリップ破壊による水平せん断耐力計算値³⁹⁾, $cal Q_{ucs}$: 側柱せん断破壊による水平せん断耐力計算値³⁹⁾, t : 壁厚, l : 側柱中心間距離



$r_{Q_{max}} = Q_3 / Q_1$ Q_1 : 水平せん断耐力時1サイクル目の Q
 Q_3 : 水平せん断耐力時3サイクル目の Q
 $\gamma_R = R_3 / R_1$ R_1 : Q_1 時の R R_3 : Q_3 時の R

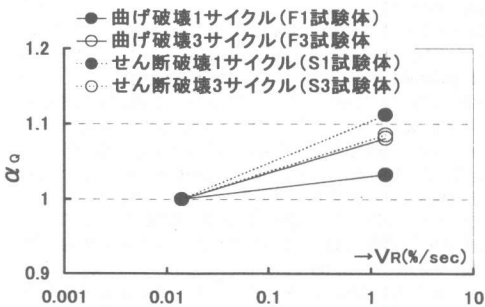
(1) 水平せん断耐力時の耐力低下率 $r_{Q_{max}}$



$r_Q = Q_{c3} / Q_{c1}$ Q_1 : 制御変位時1サイクル目の Q の最大値
 Q_3 : 制御変位時3サイクル目の Q の最大値

(2) 制御変位時の耐力低下率 r_Q

図-3 繰り返しによる耐力低下率 $r_{Q_{max}}$, r_Q



$\alpha_Q = Q / Q_0$ Q_0 : $V_R = 0.014\%/sec$ 時 Q の最大値
 Q : $V_R = 1.4\%/sec$ 時 Q の最大値

図-4 荷重速度 V_R と耐力上昇率 α_Q との関係

行シリーズの場合、曲げ破壊による耐力 $cal Q_{uf}$ より大きい、せん断破壊による耐力よりは小さい。一方、せん断破壊先行シリーズの場合はスリップ破壊による耐力 $cal Q_{uws}$ の値に近く、計算値による破壊モ

ードと一致した。また、この実験値は、文献 40) の壁板ストラットの強度を用いて、耐力時近傍のせん断応力度形状係数を 1.2 程度と仮定して求めた耐力時の壁板の見掛けのせん断応力度の値、 $1.54 \sqrt{\sigma_B}$ とほぼ一致した。

4. 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、以下のである。

- 1) 本実験から観察された破壊モードは、破壊モード別の水平せん断耐力算定値から予測される破壊モードと同じとなった。
- 2) 制御変位での繰り返し回数を多くすると、水平せん断耐力が低下するが、その低下の割合は、曲げ破壊モードの場合よりもせん断破壊モードの場合のほうが大きくなった。

- 3) 載荷速度を速くすると、いずれの破壊モードとも水平せん断耐力が上昇するが、その上昇の割合は、せん断破壊モードの場合のほうが大きい。
- 4) 本実験のひずみ速度の範囲では、壁板のスリップ破壊によって支配される水平せん断耐力は、スリップ破壊より算定値または、壁板の圧縮ストラットの強度から得られた算定値でおよそ評価できる。

謝辞

試験体製作および実験の実施にあたっては、平成 11 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、関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 山田稔・渋谷雄三: 鉄筋コンクリート梁の弾塑性性状に及ぼす載荷速度の影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(以下, 大会号と略称する), pp.651-652, 1970.9
- 2) 藤井 学ほか: 衝撃荷重下における鋼繊維コンクリート版の破壊機構, 第3回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.197-200, 1981
- 3) 遠藤孝夫・加藤 治・田辺忠顕: 鉄筋コンクリートシェルモデルの振動破壊実験, 第4回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.369-372, 1982
- 4) 小谷俊介: 鉄筋コンクリートにおける載荷速度の影響, コンクリート工学 Vol.21, No.11, 1983, pp.23-33
- 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3 低高温を付与した太径鉄筋の高速載荷実験, 大会号, pp.877-878, 1998.9
- 6) 今津洋也ほか: ティ金物と高力ボルトで取付けられた耐震補強プレースの動的載荷実験, 大会号, pp.887-888, 1999.9
- 7) 見波 進: 鋼材の応力歪関係の温度歪速度依存性と脆性延性破壊遷移, 大会号, pp.323-324, 1999.9
- 8) 稲葉雄一郎・桑村 仁: 建築構造用鋼材の破壊靱性に及ぼす温度と載荷速度の影響, 大会号, pp.325-326, 1999.9
- 9) 富森雅春ほか: 金属系素材の力学的特性に及ぼす切欠, 温度, 歪速度の影響(その5) 温度, 歪速度をパラメータとした応力-歪度関係の定式化, 大会号, pp.327-328, 1999.9
- 10) 村山啓司ほか: 金属系素材の力学的特性に及ぼす切欠, 温度, 歪速度の影響(その6)-シャルピー衝撃試験結果とR指数との相関関係-, 大会号, pp.329-330, 1999.9
- 11) 大野和男ほか: 動的正負繰返水平力を受けるRC柱の曲げ降伏破壊性状(その1 亀裂性状・耐力および変形能力), 大会号, pp.1443-1446, 1976.10
- 12) 大野和男ほか: 鉄筋コンクリート柱の曲げ破壊時の靱性について(特 耐力および変形能力), 大会号, pp.1551-1556, 1977.10
- 13) 荒川 卓ほか: 鉄筋コンクリート柱の耐力と靱性に及ぼす繰返し載荷速度の影響, 第4回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.325-328, 1982
- 14) 睦好宏史・町田篤彦: 動的外力を受ける鉄筋コンクリート橋脚の力学的特性に関する研究, 第4回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.373-375, 1982
- 15) 遠藤孝夫・加藤 治・田辺忠顕: 鉄筋コンクリート柱部材の動的特性に関する研究, 第5回コンクリート工学年次講演会論文集, 1983, pp.481-484
- 16) 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
- 17) 野村祥一ほか: 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 実験計画及び実験結果), 大会号, pp.411-414, 1986.8
 - 18) 小池正昭・中西三和・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. 実験結果の概要), 大会号, pp.167-170, 1991.9
 - 19) 的場 耕ほか: 試験温度と載荷速度が柱梁溶接接合部の変形能力に与える影響に関する実験的研究, 大会号, pp.495-496, 1999.9
 - 20) 前川健児・亀川隆史・望月 洵: 高速・繰返し荷重を受けるRCフレームの劣化性状, 大会号, pp.785-786, 1991.9
 - 21) 大野和男ほか: 鉄筋コンクリート梁の抵抗性状に及ぼす荷重経歴の影響(その1 変位漸増正負繰返加力の場合), 大会号, pp.1273-1274, 1973.10
 - 22) 大野和男ほか: 鉄筋コンクリート梁の抵抗性状に及ぼす荷重経歴の影響(その2 定荷重正負繰返加力の場合), 大会号, pp.1275-1278, 1973.10
 - 23) 大野和男ほか: 曲げとせん断の動的繰返を受ける鉄筋コンクリート梁の抵抗性状(その1. 実験内容と破壊性状), 大会号, pp.1271-1274, 1975.10
 - 24) 柴田拓二ほか: 曲げとせん断の動的繰返を受ける鉄筋コンクリート梁の抵抗性状(その3. 定変位繰返後変位漸増繰返加力時の性状), 大会号, pp.1275-1276, 1974.10
 - 25) 大野和男ほか: 動的曲げせん断繰返加力を受ける鉄筋コンクリート梁の抵抗性状(軸筋の付着性能の影響-その1 概活), 大会号, pp.1067-1072, 1975.10
 - 26) 荒井康幸ほか: 片振繰返曲げせん断加力を受けるRC梁の曲げ降伏破壊性状, 大会号, pp.1357-1358, 1976.10
 - 27) 深田泰夫: 鉄筋コンクリート造耐震壁の動的破壊実験, 大会号, pp.1521-1522, 1979.9
 - 28) 岡田恒男・神田 順・秋野金次・遠藤 彰: 原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その1 試験の概要), 大会号, pp.1217-1222, 1988.10
 - 29) 小池健仁ほか: 原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その6 ひずみ速度試験・結果の評価(特)) 大会号, pp.1369-1372, 1990.10
 - 30) 長嶋俊雄ほか: 原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その8 減衰性能のうち仮動的試験), 大会号, pp.1373-1376, 1990.10,
 - 31) 丸田 誠ほか: 原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その11 終局応答試験: 試験概要), 大会号, pp.1559-1562, 1993.10
 - 32) 島崎和司ほか: 原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その15) 復元力特性確認試験のうち RA, RC シリーズの仮動的試験, 大会号, pp.1011-1014, 1995.10
 - 33) 水野 淳ほか: 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4 鉄筋コンクリート壁要素の高速せん断載荷実験, 大会号, pp.879-880, 1998.10
 - 34) 後藤 寛・服部英一・望月 洵: 高速・繰返し荷重をうける無開口耐震壁の劣化性状, 大会号, pp.431-432, 1999.10
 - 35) 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
 - 36) 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
 - 37) 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
 - 38) 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, 大会号, pp.1173-1174, 1975.9
 - 39) 江崎文也・富井政英・光山祐朗: せん断破壊を起こす連想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, 大会号, pp.529-530, 1988.10
 - 40) 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, コンクリート工学戦時論文報告集, 第19巻2号, pp.1065-1070, 1997