

# 論文 RC耐震壁の耐震性能に与える動的加力の影響

小野里憲一\*1・兼平雄吉\*2・下山哲男\*3・松田宏之\*3

要旨：RC耐震壁の耐震性能に与える動的加力の影響を調べるために、加力速度と繰返し回数をパラメータとした曲げ破壊、曲げせん断破壊、およびせん断破壊モードの試験体を計画し、加力実験を行った。その結果、最大強度は加力速度の影響により大きくなり、その増加率が予測可能であること、限界変形角は繰返しの影響により小さくなるが、回数が増すと増加に転じる場合があること、および曲げ破壊モードの最大強度時の変形角は繰返し回数の影響により著しく小さくなることなどを捉えた。

キーワード：RC耐震壁、破壊モード、動的加力、最大強度、スケルトンカーブ

## 1. はじめに

RC耐震壁の力学的挙動に関する研究は静的な実験が主に行なわれ、動的な実験は少ない。RC耐震壁の耐震性能の評価方法は静的な実験をもとに確立され、動的加力がどのような影響を及ぼすのか十分な研究はなされていない。RC耐震壁が構造設計で期待される耐震性能を地震時に発揮できるかどうか、動的加力の影響を研究することは重要である。

筆者らは地震荷重が高速加力、繰返し加力、および衝撃加力の組み合わせであるとして、RC耐震壁に加力速度と繰返しを組み合わせた加力実験、および加力速度と衝撃を組み合わせた加力実験 1)、2)を行ってきた。その結果、繰返し加力により強度の低下が起こり、高速加力は低速加力の実験に比べて大きな変形で最大強度

に達することなどの知見を得た。しかし、これらの実験は加力の組み合わせが十分でないため、それぞれの加力の影響を的確に捉えるには至っていない。

本研究はこれらの結果をふまえて、同一形状の耐震壁に低速加力と高速加力、および繰返し回数の異なる繰返し加力を加えてその影響の違いを調べることを目的としている。実験は、破壊モードに与える影響も調べるため、柱主筋量を変えることで曲げ破壊、曲げせん断破壊、およびせん断破壊モードの試験体を計画し、一連の加力実験を行なう。

## 2. 実験計画

### 2.1 試験体

試験体は加力装置の性能に制限され、実物の

表1 試験体の諸性質

番号	試験体名	柱			壁			$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	破壊 モード	加力方法			
		$P_g$ (%)	$g\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$P_w$ (%)	$w\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$P_s$ (%)	$s\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )			$t$ (mm)	速度	繰返し 回数	
1	02FS0	1.28 (4D6)	358	0.84 (2φ4@30)	247	0.78	250	23	曲げ	低速	0		
2	02FS1					0.88		20			38	1	
3	02FS2					0.87		20			39	2	
4	02FD1					0.79		22			37	高速	1
5	03FSS2	5.08 (4D13)	339	0.84 (2φ4@30)	240	0.86	205	21	曲げ せん断	低速	2		
6	03FSD2					0.83		21			41	高速	2
7	02SS0	7.96 (4D16)	331	0.84 (2φ4@30)	247	0.79	250	22	せん断	低速	0		
8	02SS1					0.87		20			32	1	
9	02SS2					0.79		22			32	2	
10	02SD0					0.86		21			35	0	
11	02SD1					0.84		21			35	高速	1
12	02SD2					0.83		21			32	2	

[共通]  
 柱幅 : b=100mm  
 柱せい : D=100mm  
 壁の内法高さ : h'=550mm  
 壁の内法幅 : λ'=600mm  
 柱芯々間距離 : λ=700mm  
 加力点高さ : h=850mm

[記号]  
 $P_g$  : 柱全主筋比  
 $g\sigma_y$  : 柱主筋降伏強度  
 $P_w$  : 帯筋比  
 $w\sigma_y$  : 帯筋降伏強度  
 $P_s$  : 壁筋比  
 $s\sigma_y$  : 壁筋降伏強度  
 $t$  : 壁厚  
 $\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度

\*1 工学院大学 建築都市デザイン学科助教授 博士(工学) (正会員)

\*2 システム計測(株) 技術部 (正会員)

\*3 工学院大学 大学院生

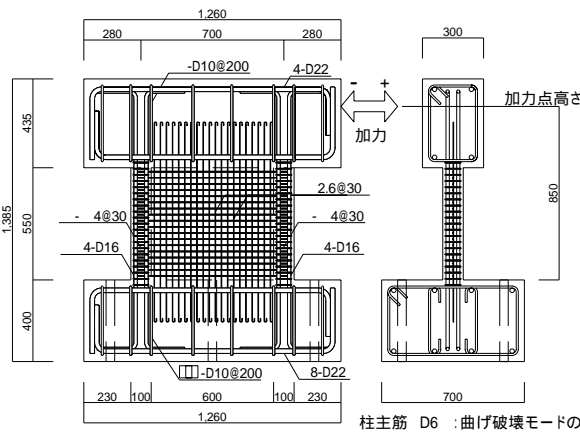


図1 試験体の形状と配筋

柱主筋 D6 : 曲げ破壊モードの試験体  
 D13 : 曲げせん断破壊モードの試験体  
 D16 : せん断破壊モードの試験体

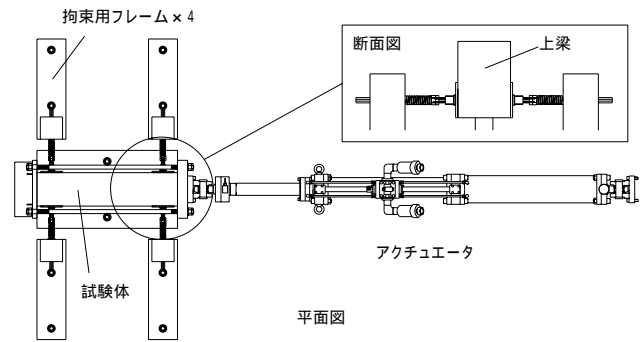


図2 試験体と加力装置の配置

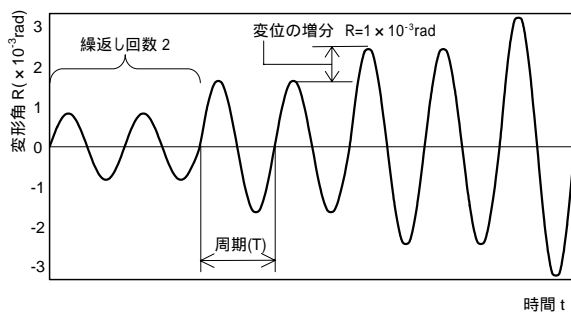


図3 加力サイクル

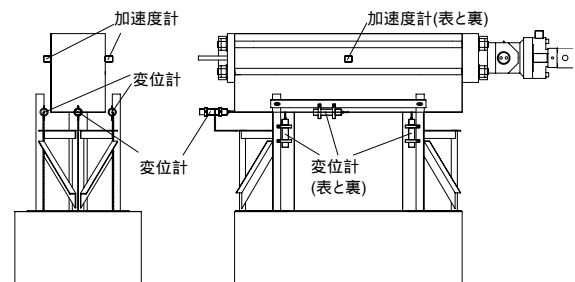


図4 変位計と加速度計の設置

約 1/6 ~ 1/7 スケールの RC 耐震壁を用いる。試験体は計 12 体で、表 1 に全試験体の諸性質を、図 1 に試験体の形状と配筋を示す。試験体は連層耐震壁を模しているため強剛な上下梁を有している。試験体は柱主筋量により破壊モードを区別しているほか、配筋と形状はすべて同じとして計画した。図 2 に試験体と加力装置の配置を示す。試験体は、捩れ防止のために上梁 4 箇所を加力方向に直交した方向に拘束されている。

## 2.2 加力と計測の方法

加力は正弦波の変位増分繰返し力である。正弦波の振動数は、建物高さ約 20m を想定して高速加力を 2.5Hz(周期:  $T=0.4\text{sec}$ )、低速加力を高速加力の約 1/1000 の 0.003Hz( $T=333\text{sec}$ )とした。変位の増分は変形角  $R=1 \times 10^{-3}\text{rad}$  である。同じ変形角を繰返し回数は 1 および 2 とした。図 3 に繰返し回数 2 の加力サイクルの一部を示す。なお、表 1 の加力方法で繰返し回数 0 は片押し加力である。図 4 は変位計と加速度計の設置図である。加速度計は加力点高さで上梁に設置し、慣性力を計算した。実験の結果は全ての慣性力

表2 最大強度と変形角

番号	試験体名	最大強度 (kN)		最大強度時変形角 ( $\times 10^{-3}\text{rad}$ )		限界変形角 ( $\times 10^{-3}\text{rad}$ )	
		正	負	正	負	正	負
1	02FS0	73		26.0		計測不能	
2	02FS1	59	-57	4.8	-10.0	18.4	-17.1
3	02FS2	59	-58	4.0	-4.9	21.2	-21.8
4	02FD1	65	-63	4.0	-2.9	15.4	-14.1
5	03FSS2	115	-118	7.0	-6.9	9.0	-8.6
6	03FSD2	155	-138	6.8	-7.6	9.4	-9.0
7	02SS0	154		6.8		11.8	
8	02SS1	149	-142	6.1	-6.0	7.9	-7.4
9	02SS2	136	-134	6.0	-5.9	7.2	-6.7
10	02SD0	180		6.3		10.7	
11	02SD1	173	-167	6.4	-6.1	10.0	-7.6
12	02SD2	171	-176	7.4	-7.1	9.6	-9.0

を除いた値を示す。計測間隔は高速加力で 0.005sec、低速加力で約 4sec ごとに、破壊経過は写真とビデオに記録した。

## 3. 実験結果

表 2 に全試験体の最大強度、最大強度時の変形角、および限界変形角を示す。表 3 は上梁に加えた水平力と壁板の上端の表裏の変位の平均で表した力 - 変形関係と最終ひび割れ状況を示す。曲げ破壊モード、曲げせん断破壊モード、せん断破壊モードともに低速加力と高速加力による破壊経過に大きな違いはみられない。なお、

限界変形角は最大強度が 20% 低下した時点での変形角である。

#### 4. 耐震性能に与える影響

##### 4.1 最大強度に与える影響

最大強度に与える動的加力の影響は、試験体の製作寸法と材料強度のばらつきが最大強度に与える影響を除くため、最大強度の実験値を製作寸法と材料強度を考慮した計算値で除した最大強度比の値で評価する。最大強度の計算値は筆者らが文献5)で提案したマクロモデルによる解析方法を用いて計算する。このマクロモデルは国内で行われた 518 体の低速加力の試験体に対して優れた精度を持つことが検証されている6)。実験値は正加力と負加力時の平均を用いる。表 4 はマクロモデルによる各試験体の計算値と実験値の比較を示す。図 5 は破壊モードごとに、最大強度が最も小さい低速加力の繰返し回数 2 回を基準値 1.0 として最大強度比の変化を示している。最大強度は加力速度の影響で大きくなり、繰返しの影響で小さくなる傾向を示す。せん断破壊モードの高速加力の繰返し回数 1 と 2 の関係は逆転しているが、これは表 2 の力 - 変

形関係から、02SD1 試験体では、加力制御が試験体の脆性破壊による急激な強度低下に対応できず正側加力で壁板に大きな損傷を与えたため、負側で正確な強度が得られていないことが原因と考えられる。このため 02SD1 試験体の実際の最大強度はより高いものと予想される。

図 6 は加力速度による最大強度の増加率を示すために、低速加力に対する高速加力の最大強度比を縦軸にし、横軸を繰返し回数としている。加力速度による最大強度の増加率は曲げ破壊モードが約 10%、せん断破壊モードが 02SD1 試験体を除き約 15~31%であった。加力速度による最大強度の増加率は曲げ破壊モードよりせん断破壊モードの方が大きくなる傾向がある。これは曲げ破壊モードの最大強度が鉄筋の強度により決定され、せん断破壊モードの最大強度が壁板コンクリートの強度により決定されているためと考えられる。曲げ破壊モードの高速加力の 02FD1 試験体について、鉛直変位計から得られる引張側柱全長のひずみ速度は、最大強度が得られた加力サイクルの無荷重~最大荷重までの平均値で評価すると約 33000  $\mu/s$  である。せん

表 4 計算結果

番号	試験体名	実験値 Q <sub>exp</sub> (kN)	解析値 Q <sub>cal</sub> (kN)	$q_e = \frac{Q_{exp}}{Q_{cal}}$
1	02FS0	73	57	1.27
2	02FS1	58	54	1.08
3	02FS2	58	54	1.08
4	02FD1	64	54	1.18
5	03FSS2	116	140	0.83
6	03FSD2	147	150	0.98
7	02SS0	154	157	0.98
8	02SS1	145	149	0.97
9	02SS2	135	157	0.86
10	02SD0	180	159	1.13
11	02SD1	170	160	1.06
12	02SD2	174	153	1.13

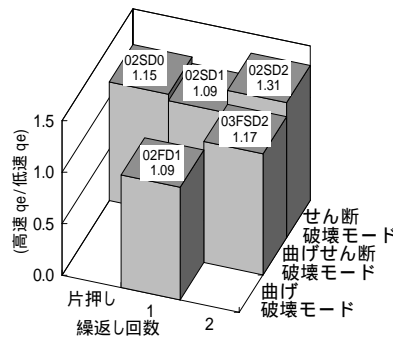


図 6 最大強度と加力速度

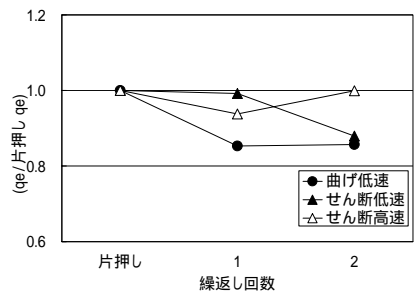
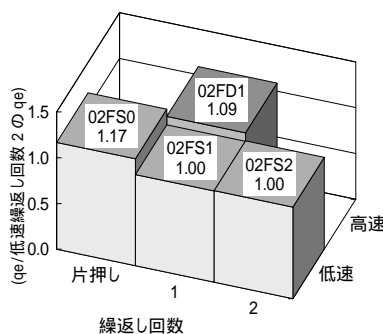
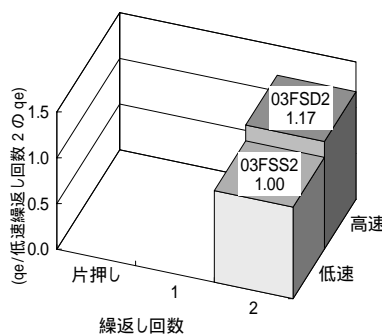


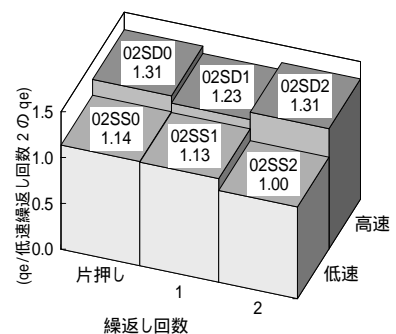
図 7 最大強度と繰返し回数



(a) 曲げ破壊モード

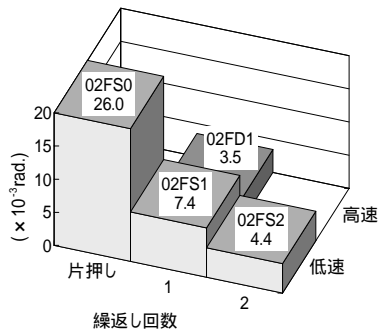


(b) 曲げせん断破壊モード

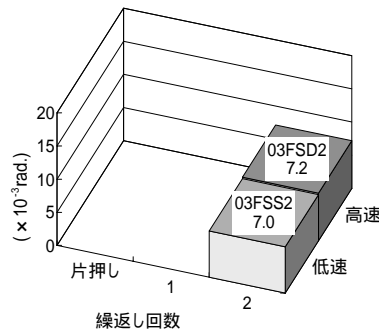


(c) せん断破壊モード

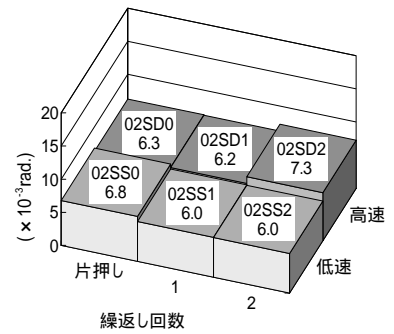
図 5 最大強度と破壊モード



(a)曲げ破壊モード

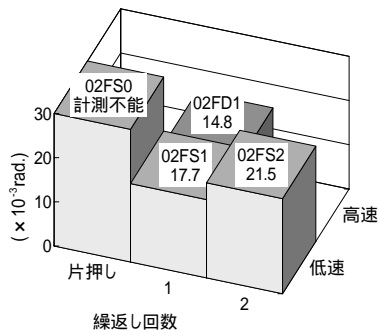


(b)曲げせん断破壊モード

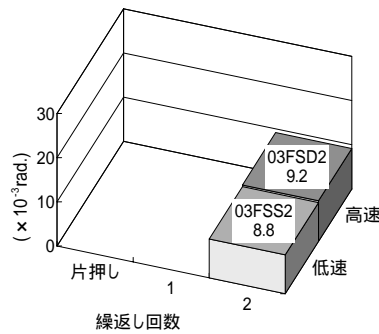


(c)せん断破壊モード

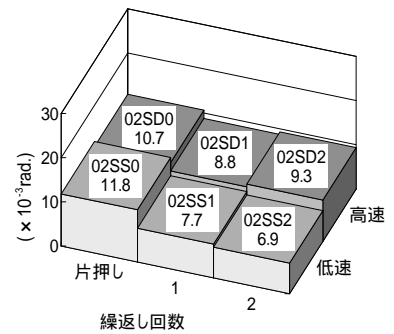
図8 最大強度時の変形角と破壊モード



(a)曲げ破壊モード



(b)曲げせん断破壊モード



(c)せん断破壊モード

図9 限界変形角と破壊モード

断破壊モードの高速加力の 02SD0 と 02SD2 試験体について、壁板を 45° の傾斜角をもつ圧縮ストラットに仮定して、そのひずみ速度を同様に求めると約 2800  $\mu$ /s である。中村らは文献 3) で鉄筋とコンクリートのひずみ速度と強度増加率の関係式を示している。これらの関係式から計算される強度増加率は、曲げ破壊モードが鉄筋により約 8%、せん断破壊モードがコンクリートにより約 16% となり、せん断破壊モードの強度増加率が曲げ破壊モードに比較して大きくなることは本実験結果と一致しており、その値も同程度である。

図 7 は繰返し回数による最大強度の影響を示すために、片押し加力を基準値 1.0 とした最大強度比を縦軸とし、横軸を繰返し回数としている。繰返しの影響は最大強度を低下させ、曲げ破壊モードの低速加力の場合に最大で約 14% の低下を示しているが、ほとんど影響を受けていない実験結果もある。

#### 4.2 変形角に与える影響

図 8 は最大強度時の変形角を正加力と負加力

の平均値で示したものである。曲げ破壊モードの場合、最大強度時の変形角は繰返し回数の影響を受けて小さくなり、さらに加力速度の影響を受けて小さくなる傾向にある。曲げせん断破壊およびせん断破壊モードの最大強度時の変形角には、曲げ破壊モードに比較して大きな変化がみられない。

図 9 は限界変形角について同様に示したもので、曲げ破壊モード、せん断破壊モードとも限界変形角は繰返し回数の影響を受けて小さくなる傾向を示している。ただし曲げ破壊モードにおいて繰返し回数 1(02FS1 試験体)と 2(02FS2 試験体)の関係が逆転している。図 10 は 02FS1 と 02FS2 試験体について、横軸を変形角として縦軸に柱の伸びを比較できるように示した。繰返し回数の多い 02FS2 試験体の柱の伸びは 02FS1 試験体より常に大きいことがわかる。さらに 02FS2 試験体において、1 サイクル目と 2 サイクル目の柱の伸びを比較すると、引張側では同じ程度の伸びであるが、圧縮側では 2 サイクル目の方が大きくなっている。曲げ破壊モードに

において、繰返し回数 0(片押し)から 1 では、繰返し回数の影響でコンクリート壁板の損傷が増すことで限界変形角が小さくなる。しかし繰返し回数 1 から 2 では繰返し回数の影響で柱の伸びが増すことで限界変形角が大きくなると考えられる。せん断破壊モードにおいては 02SD1 試験体を除くと全て限界変形角が繰返し回数の影響を受けて小さくなっている。また限界変形角に与える加力速度の影響は、限界変形角を小さくするものと考えられる。図 9 において曲げせん断およびせん断破壊モードの繰返し回数 1 と 2 はこれと逆転する。これは、表 2 の力 - 変位関係にみられるように、高速加力の 02FSD2、02SD1 および 02SD2 試験体の最大強度以降の下降域における加力制御が正確でないため、3 試験体の限界変形角の妥当性は低く、限界変形角が大きめに評価されていることに起因している。

図 11 は曲げ破壊モードの繰返し回数 2 とせん断破壊の片押しについて、高速加力と低速加力のスケルトンカーブの比較を示している。図中の曲線の太さが変化しているのは、正加力と負加力の曲線を重ねて塗り潰したためである。縦軸の力は最大強度の実験値を計算値で除している。図 11 から高速加力の強度は低速加力の強度と同じ程度が常に上回っていることがわかる。加力速度の影響を受けても同じ変形角の強度は高速加力の方が常に上回っており、変形性能が低下するものでないといえる。しかし最大強度の 80%として定義された限界変形角で評価した場合、限界変形角は小さくなる。

## 5. まとめ

曲げ破壊、曲げせん断破壊、およびせん断破壊モードの試験体に加力速度と繰返し回数をパラメータとした加力実験を行なった。実験の結果から次のことが得られた。

- 1) 加力速度の影響により、最大強度は大きくなる。その最大強度の増加率は文献 3)の計算式により予測可能である。
- 2) 加力速度の影響により、限界変形角は小さ

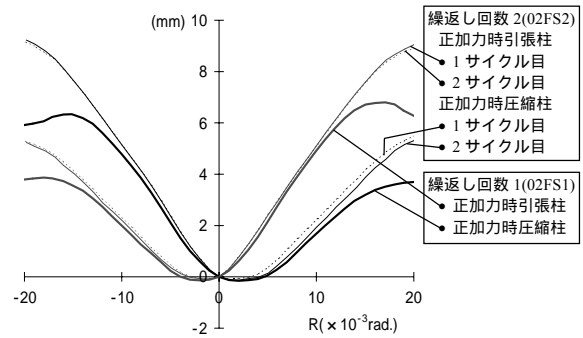
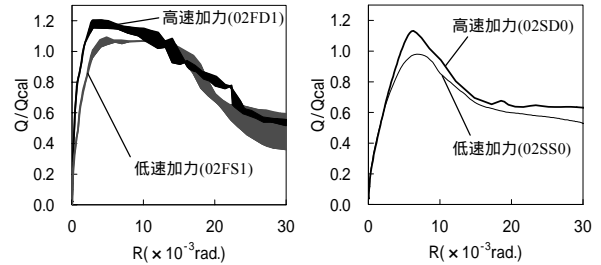


図 10 柱の伸縮と変形角の関係



(a)曲げ破壊モード

(b)せん断破壊モード

図 11 スケルトンカーブの比較

くなる。ただし、同一変形角時の強度は大きくなる。

- 3) 繰返し回数の影響により、最大強度は小さくなる。
- 4) 繰返し回数の影響により、限界変形角は小さくなる。ただし 2 回以上の繰返しの増加が限界変形角を大きくする場合がある。
- 5) 曲げ破壊モードの試験体の場合、最大強度時の変形角は繰返し回数の影響により著しく小さくなり、加力速度の影響により小さくなる。他の破壊モードの場合、最大強度時の変形角は大きな変化がない。

## 謝辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業(建築物の地震防災技術の研究開発)の一環として行なわれたもので、研究費の一部が補助された。記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 杉山洋一郎・兼平雄吉・小野里憲一・望月洵: 高速・繰返し荷重をうけるせん断破壊モードの RC 耐震壁の破壊実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.563~564, 2001年9月
- 2) 兼平雄吉・杉山洋一郎・小野里憲一・望月洵: 衝撃的荷重を受ける RC 耐震壁の破壊実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.567~568, 2001年9月
- 3) 中村和行他: 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 その2 太径鉄筋の高速載荷実験, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), pp.787~790, 1997年9月
- 5) 望月洵・小野里憲一: 連層耐震壁のマクロモデルとその解析法, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.1, pp.121-132, 1990.1
- 6) 望月洵・小野里憲一・竹原雅夫・兼平雄吉: マクロモデルによる無開口耐震壁の最大強度の解析精度, コンクリート工学論文集, Vol.14, No.2, pp.11~22, 2003

表3 各試験体の力 - 変形関係と最終ひび割れ状況

