

論文 高速・繰返し荷重を受ける開口耐震壁の劣化性状

兼平雄吉*1・望月洵*2・竹原雅夫*3

要旨:地震荷重の高速性と繰返し性に着目して、荷重速度 30~40cm/sec, 繰返し回数 2 または 15 を受ける開口耐震壁の破壊実験を行った。試験体の他のパラメータは破壊モードで、曲げ破壊モードのもの 4 体, せん断破壊モードのもの 6 体である。実験結果から、1)最大強度は静的荷重を受ける場合と変わらない、2)最大強度以降の強度低下率と劣化率は荷重速度と繰返し回数の影響を著しく受ける、などの性状が捉えられた。また、変形域に応じた固有ループが確認された。

キーワード:高速・繰返し荷重, 開口耐震壁, 破壊モード, 最大強度, 強度低下率, 劣化率

1. はじめに

RC 構造物の耐震性能を捉えるために、地震荷重の動的特性を考慮した部材の実験的研究が多数行われている。この動的特性として、一般に、衝撃性、高速性、および繰返し性が考えられているが、衝撃性に関する研究は、加力装置の関係から数少ない。高速性と繰返し性については、柱部材を中心にかんがりの成果がまとめられている¹⁾。しかし、中層 RC 構造の主要な耐震要素である耐震壁については端緒についた状況といえる。志賀ら²⁾は、その先駆的研究で繰返し荷重を受ける I 型形状の無開口耐震壁について、最大強度以降に著しい劣化が生じることを示した。一方、室井ら³⁾は 20cm/sec 程度の高速荷重を受ける H 型形状の無開口耐震壁について、最

大強度に至るスケルトンカーブの強度増大率を求めている。いずれも、繰返し性または高速性だけを独立に取り上げ、その複合効果は考慮していない。直下型または境界型の大地震のもとでは、40~100cm/sec の荷重速度と同一変位で 5~10 回程度の繰返し回数をもつ地震荷重が想定される。このような高速・繰返し荷重は、脆性的な挙動を示しがちな耐震壁の最大強度以降の劣化性状に著しい影響を与えると考えられる。

本研究は、このような観点に立って、高速・繰返し荷重が開口耐震壁の劣化性状に与える影響を、実験から捉えることを目的としている。

2. 実験計画

2.1 試験体

表-1 試験体の諸性質

番号	試験体	柱		壁板		コンクリート	破壊モード	平均荷重速度 v ₀ (cm/sec)	繰返し回数 N
		P _g (%)	gσ _y (N/mm ²)	P _s (%)	sσ _y (N/mm ²)				
1	98SWOFS2	1.98 (4-D10)	342.53	0.49 (φ 2.6~φ35)	543.19	38.12	曲げ	0.5	2
2	98SWOFD2							0.6	
3	98SWOFS15							39.1	
4	98SWOFD15							42.6	
5	98SWOSS2	5.53 (4-D-16)	324.27	0.49 (φ 2.6~φ35)	543.19	38.12	せん断	0.4	2
6	98SWOSD2-1							39.2	
7	98SWOSD2-2							37.5	
8	98SWOSD15-1							38.14	
9	98SWOSD15-2							54.9	
10	98SWOSD15-3							41.4	

【共通】
 柱幅:b=120mm 柱せい:D=120mm
 壁板の内法高さ:h'=750mm
 壁板の内法幅:l'=500mm
 壁板の厚さ:t=30mm
 加力点高さ:h=850mm 柱芯間:l=620mm
 開口高さ:ho=200mm
 開口幅:lo=130mm
 【記号】
 P_g:柱全主筋比
 gσ_y:柱主筋の降伏点強度
 P_s:壁板の縦横補強筋比
 sσ_y:壁板の縦横補強筋の降伏点強度
 σ_B:コンクリートの圧縮強度

*1 工学院大学 工修 (正会員)
 *2 工学院大学教授 工学部 建築学科 工博 (正会員)
 *3 東京建築専門学校 工修 (正会員)

試験体は、静的荷重時に予測される破壊モードが、曲げ破壊モードのもの4体およびせん断破壊モードのもの6体の計10体である。試験体は、柱の主筋量を除いて形状と配筋が同じ開口耐震壁で、開口($l_0 \times h_0 = 130 \times 200$, 開口周比=0.26)は壁板中央に位置している。試験体の他のパラメータは、荷重速度 v と変位増分ごとの繰返し回数 N で、 $v = 0.3 \sim 0.4 \text{ cm/sec}$ 程度を静的荷重、 $v = 30 \sim 40 \text{ cm/sec}$ 程度を動的荷重または高速荷重とし、 $N = 2$ または 15 とした。試験体の名称は、これらのパラメータを表している。98SWO・F/S・S/D・2/15-2は、98SWO:98年度開口耐震壁、F/S:曲げ破壊モード/せん断破壊モード、S/D:静的荷重/動的荷重、2/15: $N = 2/N = 15$ を表し、最後の数字は同じグループの通し番号である。表-1 に試験体の諸性質を、図-1 に試験体の形状と配筋を示す。

2.2 加力と計測の方法

荷重は、設定された荷重速度をもつ正負交番水平力で、上梁中心高さ位置に作用する。荷重速度は、ゼロ変位時における上梁の水平変位速度と定義した。実測された荷重速度は図-2 に示すようにばらつきが生じた。表-1 には層間変形角 $R = 5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ (以下、 $R = 5$ と略す) ~ 最終状態までの平均荷重速度 v_0 を記した。ここで、 $R = \delta / h'$, δ : 水平変位, h' : 壁板の内法高さである。加力には動的アクチュエーター(最大荷重 245kN, 無載荷時荷重速度 50cm/sec)を用いた。加力の増分ステップは、曲げ破壊モードの試験体で層間変形角の増分 $\Delta R = 2$, せん断破壊モードの試験体で $\Delta R = 1$ とした。変形は、上下梁の相対変位を非接触型変位計で計測し、その測定間隔は、静的荷重で 0.2sec, 動的荷重で 0.002sec である。試験体の破壊経過はビデオカメラで撮影した後、パソコンに取り込んだ。

3. 実験結果

3.1 破壊経過

破壊経過はビデオカメラによる画像の鮮明度は悪く、ひび割れ発生の判定が目視に比べて著

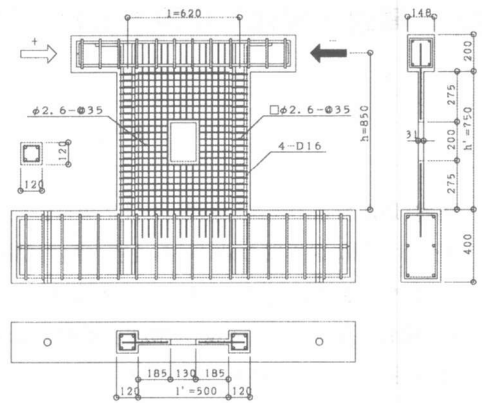
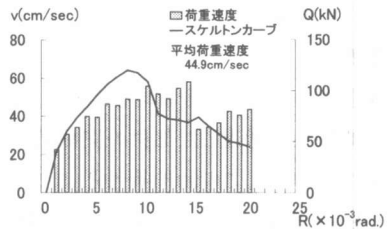


図-1 試験体の形状と配筋 単位(mm)



試験体 98SWOSD15-1

図-2 荷重速度-層間変形角

しく不確実であった。このため最終ひび割れ状況から破壊経過の概略を示すにとどめる。初斜めひび割れが開口隅角部に接する対角方向に生じ、その後、開口部左右壁板に斜交ひび割れ網が形成された。さらに圧縮ストラットに移行した壁板からの作用力および全体曲げを受けて柱に斜めひび割れと水平ひび割れが多数生じた。最大強度には開口部左右壁板の圧壊で達し、その後、曲げ破壊モードの場合、強度は漸減し、せん断破壊モードの場合、急激に低下するとともに、両側柱の主筋に沿う付着破壊が生じた。これらの破壊経過は、通常の静的荷重を受ける試験体の実験で観察されるものと、付着破壊の発生を除外して大きく変わらない。試験体の破壊経過に、荷重速度、繰返し回数、および破壊モードの違いによる著しい差異は特になかった。図-3 および図-4 に、それぞれ曲げ破壊モードおよびせん断破壊モードの試験体の最終ひび割れ状況と力-変形関係を示す。

3.2 破壊性状

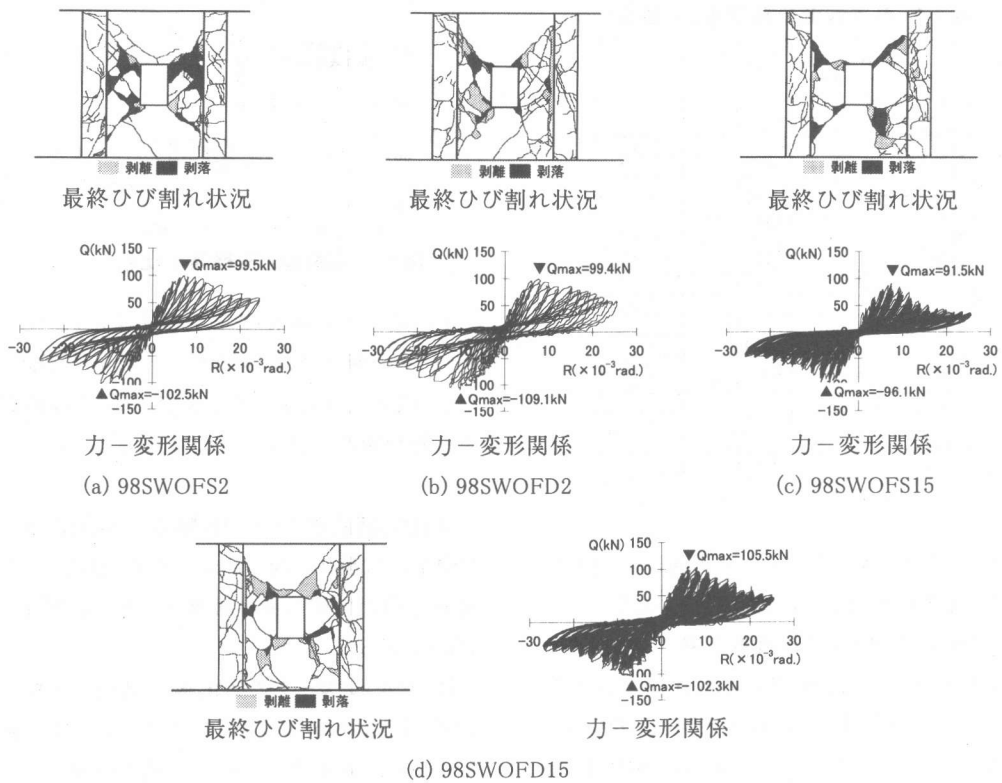


図-3 曲げ破壊モードの試験体の破壊性状

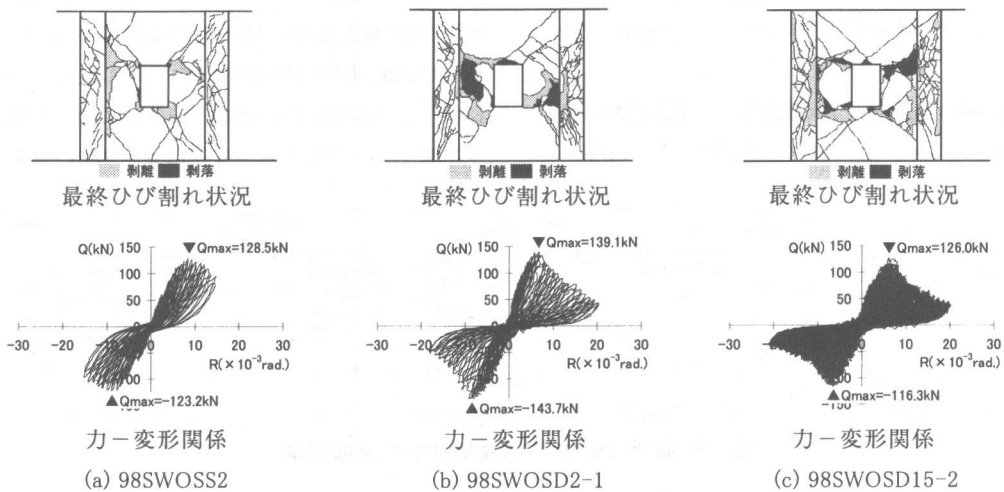


図-4 せん断破壊モードの試験体の破壊性状

a)最大強度 表-2 に最大強度の実験結果を示す。最大強度は、繰返し回数が初回、すなわちn=1の力-変形関係におけるスケルトンカーブの最大値である。最大強度の実験値は、同じ破壊モードの試験体で著しい差はない。すなわ

ち、最大強度は荷重速度と繰返し回数に依存していないといえる。図-5 は最大強度の実験値と静的荷重を受ける開口耐震壁の最大強度を評価する簡略強度式⁴⁾による解析値との関係である。試験体の解析精度: Q_{exp}/Q_{cal} が 0.8~1.2

表-2 最大強度の実験値と解析値

番号	試験体名	正負	Q _{exp} (kN)	Q _{cal} (kN)	Q _{exp} /Q _{cal}
1	98SWOFS2	+	99.5	92.4	1.08
		-	102.5		1.11
2	98SWOFD2	+	99.4	92.4	1.08
		-	109.1		1.18
3	98SWOFS15	+	91.5	92.4	0.99
		-	96.0		1.04
4	98SWOFD15	+	105.5	92.4	1.14
		-	102.3		1.11
5	98SWOSS2	+	128.5	123.4	1.04
		-	123.2		1.00
6	98SWOSD2-1	+	139.1	123.4	1.13
		-	143.7		1.16
7	98SWOSD2-2	+	124.4	120.5	1.03
		-	134.4		1.12
8	98SWOSD15-1	+	120.1	123.3	0.97
		-	124.2		1.01
9	98SWOSD15-2	+	126.0	120.5	1.05
		-	116.3		0.97
10	98SWOSD15-3	+	101.1	120.5	0.84
		-	100.4		0.83

【記号】 Q_{exp}: 実験値の最大強度 注: 簡略式は曲げとせん断破壊モードの試験体と同じ方法で解析できる
 Q_{cal}: 解析値の最大強度

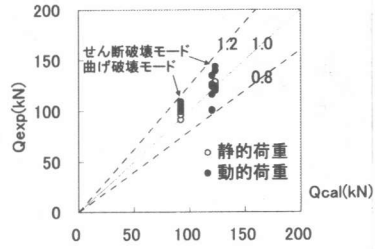


図-5 解析値と実験値の比較

1.0 の間にあり、両者に著しい差はみられない。
 N=15 の試験体では、強度低下率は n が増えるごとに低下し、 $n=15$ で 0.7 程度になるが静的荷重と動的荷重の試験体との間に著しい差はない。

ii) せん断破壊モードの試験体 静的荷重で N=15 の試験体がないため不確実であるが、強度低下率の性状は曲げ破壊モードの試験体と同じといえる。

c) スケルトンカーブの劣化率 繰返し回数 of 初回、すなわち $n=1$ のスケルトンカーブの最大強度に対する $n=n$ の各サイクルの最大強度の比を劣化率と定義した。繰返し回数ごとの最大強度までのスケルトンカーブに著しい差はみられなかったため、最大強度以降の正負荷重域の $R=5, 10, 15, 20$ 近傍の劣化率を図-8 および図-9 に示す。それぞれ曲げ破壊モードおよびせん断破壊モードの試験体すべての正側と負側の劣化

の範囲にある。静的解析手法で動的荷重を受ける試験体の最大強度を評価できるといえる。

b) スケルトンカーブの強度低下率 強度低下率は繰返し回数が初回、すなわち $n=1$ の各サイクルの最大強度に対する $n=n$ の同じサイクルの最大強度の比と定義した。図-6 および図-7 は、それぞれ曲げ破壊モードおよびせん断破壊モードの試験体の強度低下率と層間変形角の関係である。図中の細線は $n=n$ のスケルトンカーブである。

i) 曲げ破壊モードの試験体 静的または動的荷重で N=2 の試験体の強度低下率は、0.8~

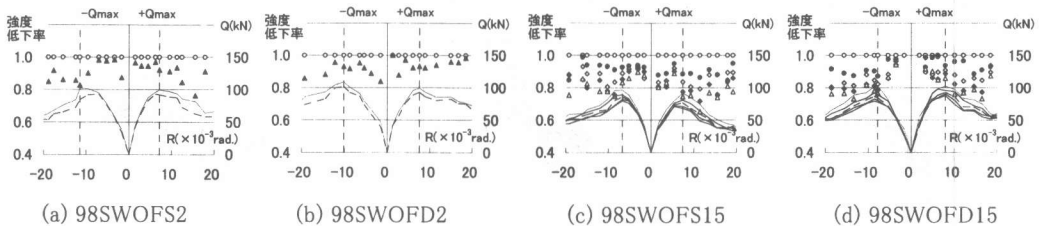


図-6 曲げ破壊モードの試験体の強度低下率

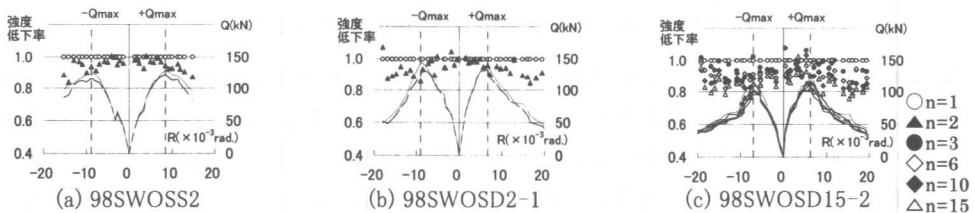


図-7 せん断破壊モードの試験体の強度低下率

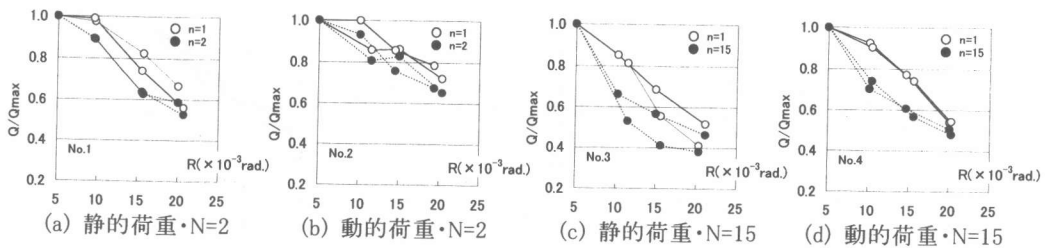


図-8 曲げ破壊モードの試験体の劣化率

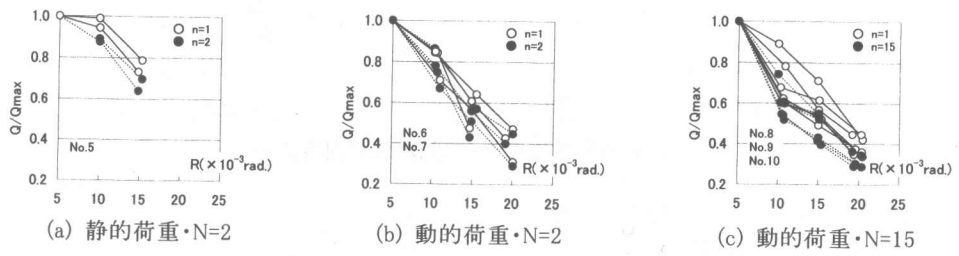


図-9 せん断破壊モードの試験体の劣化率

率を $n=1$ と 2 または 15 について重ねて描いたものである。

i) 曲げ破壊モードの試験体 $N=2$ の静的および動的荷重の試験体では $R=10$ 以降、直線的に劣化しているが、前者の方が劣化の勾配は大きい。 $N=15$ の静的または動的荷重の試験体では、ともに同じような劣化傾向を示している。 $N=2$ と同様に静的荷重の方が劣化率は大きく、 $R=20$ で $0.4 \sim 0.5$ にまで低下している。

ii) せん断破壊モードの試験体 静的荷重で $N=2$ の試験体の劣化性状は、せん断破壊モー

ドで終わる耐震壁で一般的にみられるものである。これに比べて動的荷重で $N=2$ の試験体の劣化は著しく $R=15$ で $0.4 \sim 0.6$ にまで低下する。また、動的荷重で $N=15$ の試験体の劣化は急激で、 $R=10$, $n=15$ で 0.6 , $R=20$, $n=15$ で 0.4 を下回った。

d) 固有ループと等価粘性減衰定数 図-10 および図-11 は、それぞれ曲げおよびせん断破壊モードの試験体の履歴曲線から求めた無次元化固有ループを $R=5$ 前後と $R=20$ 前後の変形域について重ねたものである。二つの図に共通

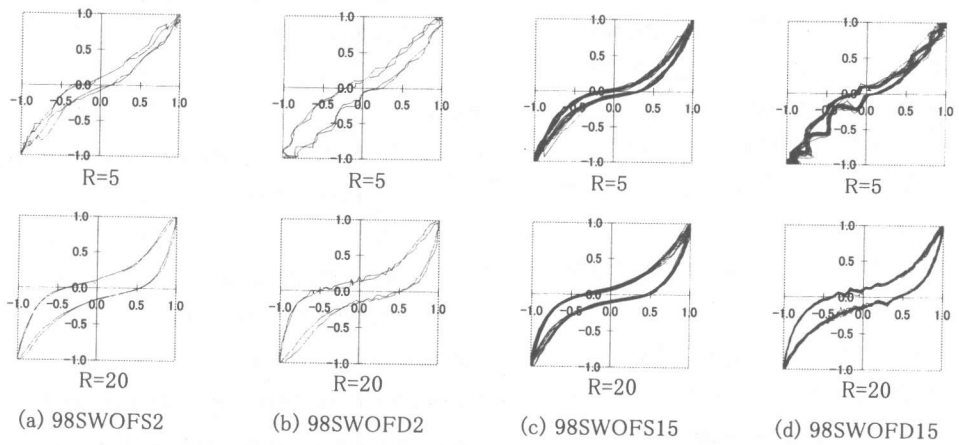


図-10 曲げ破壊モードの試験体の固有ループ

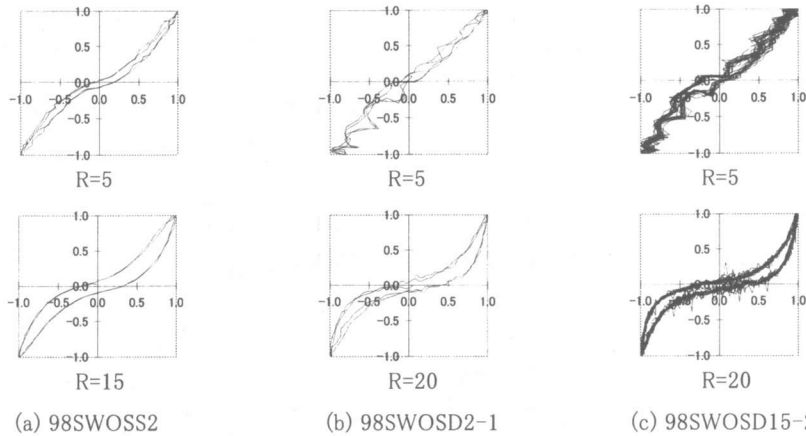


図-11 せん断破壊モードの試験体の固有ループ

して、静的荷重で $R=5$ の場合に偏平なS型を、動的荷重で $R=5$ の場合ほぼ直線型を示すが、 $R=10\sim 20$ に変形が進むに伴い、ともに完全なS型に移行している。しかし、同じ破壊モードで同じ荷重速度の場合、固有ループの形状に繰返し回数による有意な差はない。破壊モード間の差は $R=10$ 程度までは明確ではないが、 $R=15$ 以降、曲げ破壊モードの試験体の固有ループはループ面積が大きくなり、せん断破壊モードの試験体の場合、ループ面積が小さくなる傾向を示した。図-12は曲げ破壊モード4体およびせん断破壊モード6体の固有ループから求めた等価粘性減衰定数で、この間の状況を示している。

4. まとめ

本研究の結果は、荷重速度 $v=30\sim 40\text{cm/sec}$ 、繰返し回数 $N=2$ または 15 の荷重を受ける開口耐震壁の実験から、次のようにまとめられる。

- 1) 最大強度と最大強度に至るまでのスケルトンカーブに荷重速度と繰返し回数は著しい影響を与えない。
- 2) 最大強度以降のスケルトンカーブは荷重速度と繰返し回数の影響を受ける。特に、強度低下率は繰返し回数の、劣化率は荷重速度と繰返し回数の影響を著しく受ける。
- 3) 固有ループは $R=10$ 以降、破壊モードと変形域に応じた特有な形状があるが、同じ破壊モ

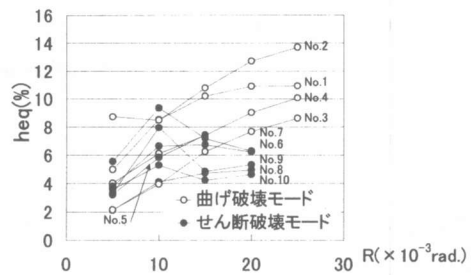


図-12 等価粘性減衰定数と層間変形角

ードで同じ荷重速度の場合、繰返し回数による有意な差はない。

- 4) 1)および 2)のは、曲げ破壊モードとせん断破壊モードの試験体に共通している。

これらの結果は、別的高速荷重、繰返し回数、および試験体の寸法などについて、さらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会:「塑性域の繰返し劣化状態に関するシンポジウム, 委員会報告書-論文集, '98年8月20・21日
- 2) 志賀ほか:「鉄筋コンクリート耐震壁の動的挙動に関する研究, 日本建築学会大会学術論文集(近畿), 昭和46年11月, pp.579~580
- 3) 室井ほか:「原子炉建屋耐震壁の動的復元力特性, 日本建築学会構造系論文集, 第498号, 75-81, 1997年8月
- 4) Mochizuki, M et al.: Proposal of Macroscopic Models for Evaluating Strength and Deformation of Framed Shear Walls with an Opening, Pacific Conference on Earthquake Engineering Australia, 20-22 November 1995, pp.245-254