

論文 制振デバイスを有する RC 造建築物の地震応答評価に関する研究

吉川 直子*1・倉本 洋*2・松本 和行*3・中坂 亮*4

要旨：制振デバイスを有する多層建築物に対する等価 1 自由度系の等価粘性減衰定数の評価に関する一方法を示し、4 層および 12 層 RC 造建築物を対象とした地震応答解析結果との比較により、その妥当性および予測精度を検証する。さらに、限界耐力計算による耐震性能評価法も併せて検討する。

キーワード：制振デバイス、地震応答解析、等価 1 自由度系、等価粘性減衰定数

1. はじめに

本研究は、制振デバイスに低降伏点鋼材による履歴系ダンパーを用いた鉄筋コンクリート（以下、RC と略記）造制振建築物に対する縮約等価 1 自由度系の等価粘性減衰定数の評価に関する一方法を提案する。4 層および 12 層 RC 造建築物を対象とした地震応答解析を実施し、解析結果との比較により、提案した評価法の妥当性および精度を検討する。さらに、限界耐力計算による制振デバイスを有する建築物の地震応答予測精度を検討する。

2. 解析概要

2.1 解析対象建築物

解析対象とした建築物は、制振デバイスの配置にあたって平面的および立面的に比較的自由度があること、制振効果に及ぼす建築物高さの影響の比較検討が容易であること等を考慮して、日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」のシステム部会において試設計された解析検討用建築物の中から、図-1 に示すような 4 層および 12 層の純ラーメン RC 造建築物¹⁾を選択し、それらに間柱タイプの制振デバイスを組み込んだものとした。平面形状は両建築物共通で、桁行および張間方向ともに 6.0m×3 スパンであり、建築物高さは 4 層および 12 層建築

物でそれぞれ 15m および 45m（1 層 4.0m、2 層以上 3.5m）である。

制振デバイスは図-2 に示すように、間柱中央部に降伏強度が $\sigma_y = 100N/mm^2$ 級（ $\tau_y = 57.7N/mm^2$ ）の極低降伏点鋼材からなる履歴ダンパーを組み込んだものであり、履歴系ダンパーの形状を 500×500mm×12mm とし、上下端に高さが 1,000mm で奥行きが 400mm の RC スタブを有するものとした。表-1 に解析対象建築物の断面および配筋、表-2 に極低降伏点鋼の材料特性を示す。

2.2 解析パラメータ

解析変数には、建築物の層数、制振デバイス

表-1 解析対象建築物の断面および配筋

	部位	階	断面等			種別	主筋			せん断補強筋		
			Fc	B	D		X-dir	Y-dir	芯筋	種別	配筋	
4	中柱	1~4	24	600	600	SD345	5-D25	5-D25	0	SD295	2-D13@100	
	側柱	3~4					4-D25	4-D25				
		1~2					5-D25	5-D25				
12	中柱	9~12	24	850	850	SD390	5-D29	5-D29	0	SD345	2-D13@100	
			5~8				30	5-D32			5-D32	3-D13@100
			1~4				36	6-D35			6-D35	
	側柱	9~12	24	5-D29	5-D29	0	8-D35	2-D13@100				
			5~8	30	5-D32			5-D32				
			2~4	36	6-D35			6-D35	3-D13@100			
			1~2	36	6-D35			6-D35				

		階	断面等			種別	主筋			せん断補強筋	
			Fc	B	D			1段筋	2段筋	種別	配筋
4	梁	R	24	400	700	SD345	上下	4-D25	0	SD295	2-D13@200
		4					上下				
		3					上(下)				
12	梁	2	24	500	800	SD345	上下	4-D25	1-D25(0) 2-D25(1)	SD345	3-D13@150
		R					上下	4-D25			
		12					上(下)	4-D25			
	側梁	8~11	30	SD390	上下	4-D29	1-D29	SD345	4-D13@150		
		5~7	上(下)		4-D32	4-D32(2)					
		2~4	下		4-D35	4-D35					
			上		4-D35	3-D35					

*1 ドーコン 工修（正会員）

*2 豊橋技術科学大学 工学教育国際協力研究センター 工博（正会員）

*3 藤木工務店 本社技術研究所 工博（正会員）

*4 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻

の設置量，入力地震波の種類および入力地震波レベルを選択した。解析対象建築物は前述したように，層数が4層および12層（以下，RC04およびRC12と呼称）であり，各建築物に対して制振デバイスの配置を各層均等（同量，同位置）に2基，4基および6基とし，それぞれをType1, Type2およびType3と称することとした。なお比較のため，制振デバイスを有しない建築物（Type0）も解析した。図-3に制振デバイスの平面配置を示す。

地震応答解析に用いた入力地震波はEl Centro NS (1940), JMA-Kobe NS (1995), Hachinohe EW (1968) および Taft EW (1952) の4波であり，それぞれ最大速度を25kine, 50kine および75kine に基準化したものを用いた。なお，地震波入力時間は，地震動の主要な10秒間と地震終了後に建築物を十分に減衰させるための自由振動15秒間の計25秒間とした。

2.3 解析方法

解析は，各モデル建築物に対して静的非線形荷重増分解析と時刻歴地震応答解析のそれぞれを実施した。解析には柱部材にマルチスプリングモデル（以下，MSモデルと略記）を適用できるプログラムを使用した²⁾。解析建築物のモデル化に際しては，制振デバイスの周辺架構も含めて，RC梁部材はすべて材端バネモデルとし，柱部材は中柱を材端バネモデル，外柱をMSモデルとした。制振デバイスの部材モデルは，図-2に示すように，RCスタブ部分の変形

を考慮するために材端部を弾性曲げバネモデルとし，中間部を履歴ダンパーの復元力を表す弾塑性せん断バネとした。履歴ダンパーの復元力特性は，図-4に示すように，第1および第2降伏点を有するノーマルトリニアモデルとした。

地震応答解析における粘性減衰は，弾性1次固有周期に対して3%と仮定した初期剛性比例型とした。また，静的非線形荷重増分解析にお

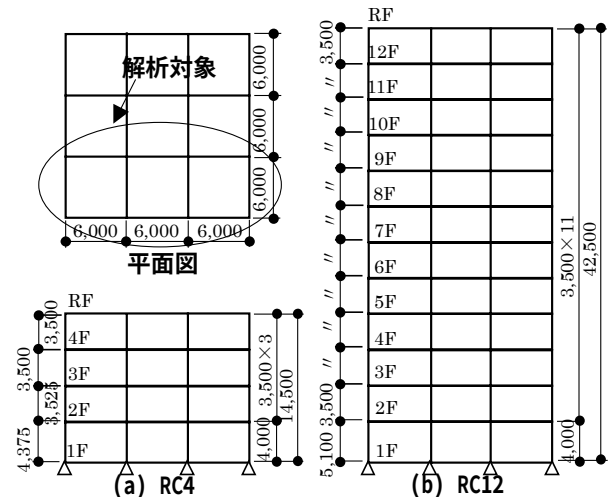


図-2 制振デバイスの概念図

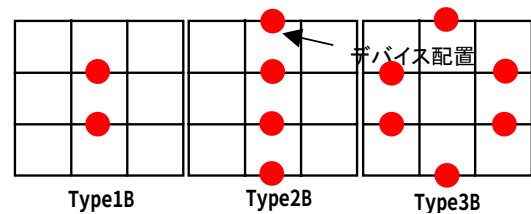


図-3 デバイスの配置図（平面）

表-2 極低降伏点鋼の材料特性

鋼材厚(mm)	12
降伏応力度： σ_y (N/mm ²)	100
せん断降伏応力度： τ_y (N/mm ²)	57.7
ウェブ断面積(mm ²)	6000
初期剛性： K_0 (kN/mm)	806.5

表-3 固有周期一覧 (sec.)

		Type0	Type1	Type2	Type3
RC04	1次	0.4737	0.4334	0.3984	0.3825
	2次	0.1517	0.1395	0.1294	0.1242
	3次	0.0838	0.0785	0.0733	0.0708
RC12	1次	0.8649	0.8263	0.7991	0.7782
	2次	0.2875	0.2754	0.2664	0.2617
	3次	0.1619	0.1539	0.149	0.2423

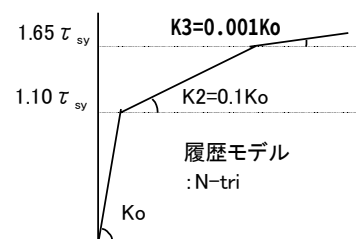


図-4 ダンパーの復元力特性

ける外力分布は、弾塑性 1 次モード比例分布³⁾とした。解析は建築物平面の対称性を考慮し、張間方向の外側構面 1 フレームと中間構面 1 フレームの 2 フレームについて行なった。各解析タイプの固有周期を表-3 に示す。

3. 地震応答解析結果

75kine 入力に対する各解析タイプの各層における最大応答変形の分布を、入力波別に比較したものを一例として図-5 に示す。

最もデバイス量の少ない Type1 では、RC04 および RC12 とともにデバイスを配しない Type0 の応答値を若干上回るものもあるが、全般的にデバイス量が多くなるほど、各層の最大応答値が小さくなる傾向があり、デバイスの応答制御効果が認められる。一方、RC12 の Hachinohe 波 75kine 入力に対しては、デバイス量が多くなるほど下層で応答変位が大きくなっており、上記と逆の傾向を示した。これは高次モードによるものと考えられ、地震波特性によっては高次モードの影響により、デバイスによる応答制御効果が得られない場合があることが認められた。

4. 等価 1 自由度系の等価粘性減衰定数

本章では、制振デバイスを有する建築物を等

価 1 自由度系に縮約した場合の等価粘性減衰定数の評価法を検討する。

1 自由度系の地震応答において、地震が終了し、応答が十分減衰した後では、エネルギーの釣り合いより次式が成り立つ。

$$\int_0^t c \dot{y}^2 dt = 2h \cdot \omega \cdot m \int_0^t \dot{y}^2 dt = \int_0^t (-m \ddot{y}_0) \dot{y} dt \quad (1)$$

ここで、 $\ddot{y}_0$ および $\dot{y}$ はそれぞれ地動の加速度および応答速度であり、 c 、 h 、 m および ω はそれぞれ粘性減衰係数、等価粘性減衰定数、質量および固有円振動数を表している。

また、 t は地震が終了し、応答が十分減衰するまでの時間である。(1)式より、過渡応答を考慮した平均等価減衰(substitute damping) h_s は、

$$h_s = - \int_0^t \ddot{y}_0 \dot{y} dt / (2 \omega \int_0^t \dot{y}^2 dt) \quad (2)$$

で与えられる⁴⁾。

一方、周辺フレームおよび制振デバイスの粘性減衰を定数 $f_c c$ および $d_c c$ とし、それぞれが複合した減衰機構を有する系に対して(1)式を拡張すると、

$$\begin{aligned} \int_0^t (f_c c + d_c c) \dot{y}^2 dt &= 2h \cdot \omega \cdot (f_m + d_m m) \int_0^t \dot{y}^2 dt \\ &= \int_0^t (-m \ddot{y}_0) \dot{y} dt \end{aligned} \quad (3)$$

が得られる。ここに、 f_m および $d_m m$ は周辺フレームおよび制振デバイスそれぞれの減衰に対して寄与する質量を表す。ここで、図-6 に示すように、系全体の最大応答変形時における周辺フ

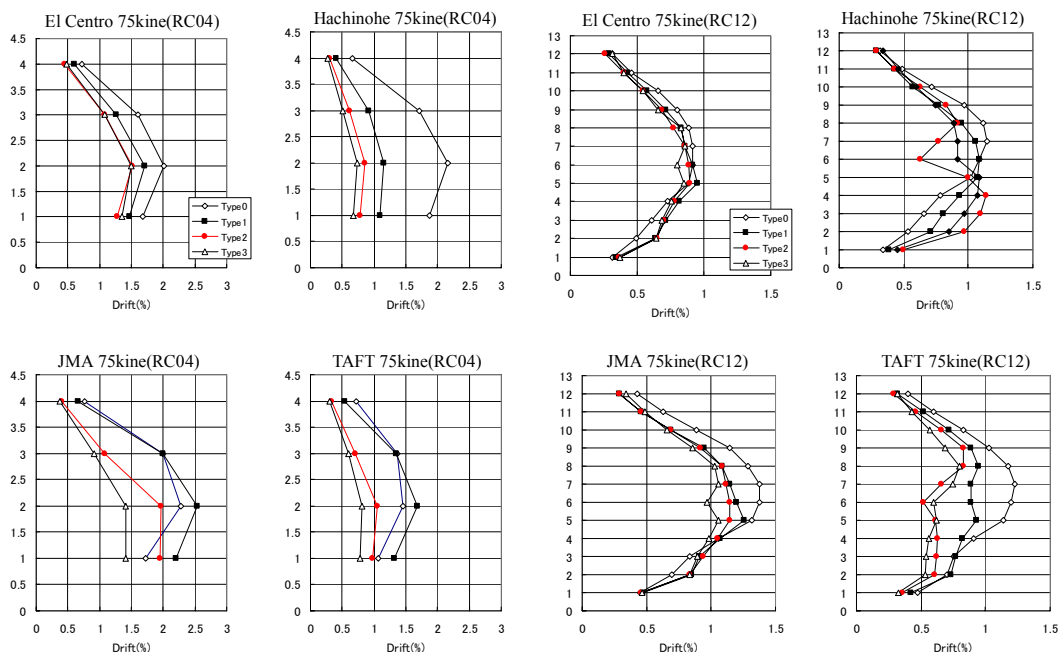


図-5 最大応答変位分布

レームおよび制振デバイスの等価剛性がそれぞれ ${}_f K$ および ${}_d K$ であるとき、周辺フレームおよび制振デバイスを、それぞれ質量 m の独立の系とした場合の等価粘性減衰定数を ${}_f h$ および ${}_d h$ とすると、(3)式は下式のように書き換えられる。

$$2({}_f h \cdot {}_f \omega \cdot m + {}_d h \cdot {}_d \omega \cdot m) \int_0^t \dot{y}^2 dt = \int_0^t (-m \ddot{y}_0) \dot{y} dt \quad (4)$$

ここで、 ${}_f \omega$ および ${}_d \omega$ は周辺フレームおよび制振デバイスそれぞれの系の各固有円振動数であり、 ${}_f \omega^2 = {}_f K/m$ および ${}_d \omega^2 = {}_d K/m$ の関係がある。ところで、周辺フレームおよび制振デバイスは同一の系であるので、周期が等しいという条件より、

$${}_f m = m \cdot {}_f K / ({}_f K + {}_d K) = m \cdot {}_f \omega^2 / \omega^2 \quad (5)$$

$${}_d m = m \cdot {}_d K / ({}_f K + {}_d K) = m \cdot {}_d \omega^2 / \omega^2 \quad (6)$$

の関係が成り立つ。したがって、(2)、(4)、(5) および(6)式より、複合減衰機構を有する1自由度系の平均等価減衰 h_s は次式で与えられる。

$$h_s = ({}_f h \cdot {}_f \omega^3 + {}_d h \cdot {}_d \omega^3) / \omega^3 \quad (7)$$

すなわち、(7)式は複合減衰機構（並列減衰機構）を有する1自由度系の最大応答変形時に対する平均等価減衰を、周辺フレームおよび制振デバイスをそれぞれ独立の系と仮定した場合の平均等価減衰を用いて周期の同一性を考慮して評価したものである。

図-7 に、(2)式と(7)式から求められた h_s を RC04 および RC12 それぞれについて比較したものを示す。なお、等価1自由度系における h_s は、解析対象建築物が概ね整形な純フレームであり、弾性時および塑性時に関わらず、1次等価質量がほぼ一定であることを考慮して、最大応答時における刺激関数 $\beta \cdot u$ が1.0となる建築物高さでの水平変位（代表変形）とベースシア（代表荷重）を用いて計算した。

建築物全体の履歴から求めた平均等価減衰(2)式は、周辺フレームおよび制振デバイスそれぞれの履歴から求められた平均等価減衰を用いたもの(7式)と一致している。したがって、制振デバイスを有する建築物における等価

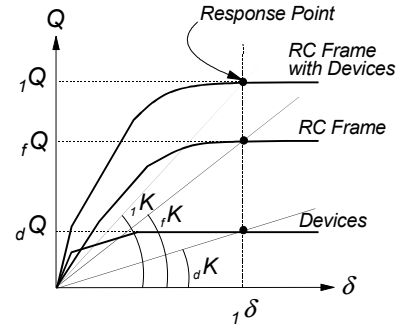


図-6 Q-δ 曲線と各要素の関係

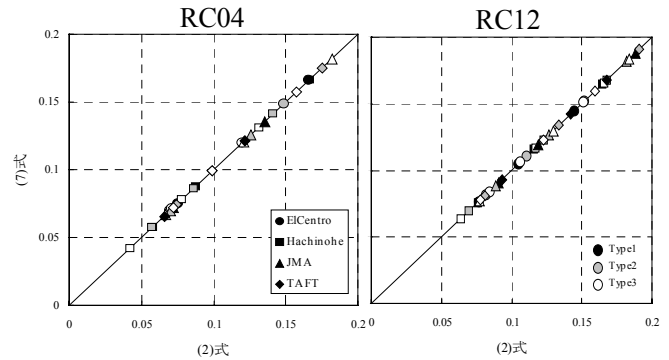


図-7 全体 h_s - 各要素からの h_s 比較

1 自由度系の等価粘性減衰は、周辺フレームと制振デバイスのそれぞれの等価粘性減衰を用いて、(7)式によって評価できることが確認された。

5. 限界耐力計算による応答値評価

5.1 評価手順

制振デバイスを有する RC 造建築物に対する限界耐力計算は、以下の手順で行なった。

- ① 外力分布を弾塑性 1 次比例分布とした静的非線形荷重増分解析³⁾を行い、各層の層せん断力-層間変形関係、並びに各層における制振デバイス負担せん断力-層間変形関係および周辺フレームの負担せん断力-層間変形関係を求める。
- ② ①における静的増分解析結果を用いて、以下の(8)式～(11)式により等価1自由度系における $S_a - S_d$ 曲線を作成する。

$$S_a = Q_B \cdot \sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i^2 / \left(\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i \right)^2 \quad (8)$$

$$S_d = \sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i^2 / \sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i^2 \quad (9)$$

$${}_dS_a = Q_B \cdot \sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i^2 \cdot Q_i / Q_i / \left(\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i \right)^2 \quad (10)$$

$${}_fS_a = Q_B \cdot \sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i^2 \cdot {}_fQ_i / Q_i / \left(\sum_{i=1}^N m_i \cdot \delta_i \right)^2 \quad (11)$$

ここに、 m_i および δ_i はそれぞれ i 層の質量および基礎からの相対水平変位であり、 Q_i 、 ${}_dQ_i$ および ${}_fQ_i$ は、それぞれ i 層における層せん断力、デバイスの負担せん断力およびフレームの負担せん断力である。また、 Q_B はベースシアを表す。

- ③ ②で作成した各 $S_a - S_d$ 曲線に基づいて制振デバイスおよび周辺フレームの層せん断力—代表変位曲線をバイリニアにモデル化し、各等価粘性減衰定数—代表変位関係を算定する。なお、制振デバイスおよび周辺フレームの等価粘性減衰定数—代表変位関係の作成の際には、次式で与えられる等価粘性減衰定数—塑性率 (μ) の関係式を用いる。

$${}_d h = 0.8 \times 2 (1 - 1/\mu) / \pi \quad (12)$$

$${}_f h = 0.25 (1 - 1/\sqrt{\mu}) \quad (13)$$

また、建築物全体の等価粘性減衰定数は、(7)式に 5%の粘性減衰を考慮することにより求める。なお、(13)式は告示式⁵⁾であり、(12)式は履歴形状をバイリニアと仮定したものに対して平均等価減衰を考慮して 80%の値を採っている。

図-8 に、一例として El Centro 波 75kine 入力の Type3 について、以上の手順で作成したものを示す。なお、図中の■は推定値を表している。

5.2 評価結果

5.1 節の手順に従って求めた最大応答変形推定値 (CalS) と時刻歴解析における等価 1 自由度系の最大応答変形値 (ResS) を比較したものを図-9 に示す。

RC04 では、時刻歴応答解析から求められた応答値は、ほとんどのタイプにおいて推定値に比して小さい値となっており、安全側に評価されていることが認められる。JMA 波および TAFT 波に対しては、入力レベルが大きくなるにつれて、デバイス量が少ないものほど危険側

になっている。これは、 $S_a - S_d$ 曲線において変形が片方向に集中するドリフト現象が生じたためと考えられる。

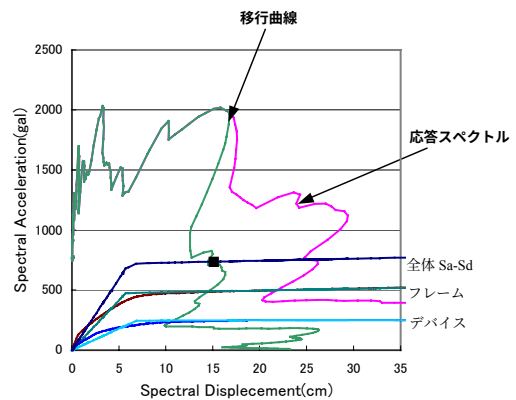


図-8 スペクトル図

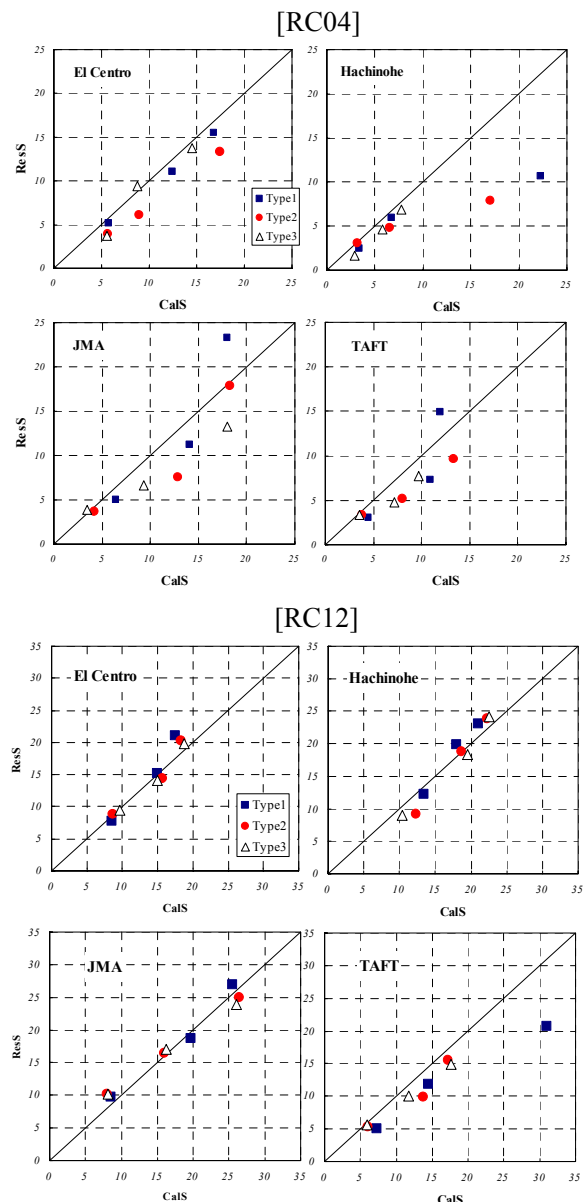


図-9 CalS—ResS 比較

RC12 では、RC04 に比べばらつきも少なく、概ね一致した結果となった。RC04 で危険側に評価された TAFT 波は、RC12 では逆に安全側となっているなど、RC12 では地震波特性によるばらつきもあり見られず、概ね良好に評価がされている。

5.3 各層の応答値評価

等価 1 自由度系の最大応答変形推定値 (CalS) から、静的弾塑性応答解析結果を介して求めた各層の応答推定値 (CalM) と、時刻歴解析における各層の最大応答変形値 (ResM) の関係を、比率 CalM/ResM で表したものを図-10 に示す。

RC04 では、Type1 で若干危険側へ評価となるものもあるが、全般的に概ね安全側に評価する傾向にある。JMA 波 75kine 入力に対して、デバイス量が多くなるほど安全側に評価される傾向にある。一方で、Hachinohe 波 75kine 入力のよう、上記と逆の傾向が見られ、また 2 倍以上も安全側に評価されるものもある。

RC12 では RC04 に比べ、危険側に評価する傾向にあることが認められる。これは、5.2 節で示したように等価 1 自由度系における最大応答変形の対応が良好であったことに加え、解析対象が比較的高層であるため、高次モードの影響が大きく寄与したためであると考えられる。すなわち、ResM は（発生時刻の異なる）各層の最大応答変形で、高次モードの影響が顕著なものであり、ResS の発生時刻における各層の応答変形よりも大きな場合が多い。したがって、CalS から推定した各層の最大応答変形に対して ResM が過大（危険側）となる傾向が現れたものと推察できる。

6. まとめ

制振デバイスを有する RC 造建築物に対する地震応答解析を実施し、以下の知見を得た。

- (1) デバイス量が多くなるほど、各層の最大応答変形が小さくなる傾向があるが、入力地震波によっては、特定層で応答が増加する場合もある。

- (2) 等価 1 自由度系の等価粘性減衰は、周辺フレームと制振デバイスのそれぞれの等価粘性減衰を用いて(7)式によって評価できる。
- (3) (7)式を用いた限界耐力計算による等価 1 自由度系の応答変形推定値は、地震応答解析値に対して、RC04 では安全側に、RC12 では概ね良好な対応を示す。
- (4) 限界耐力計算から得られた各層の応答変形推定値は、地震応答解析による最大応答変形に対して、RC04 では全般的に安全側の評価となり、RC12 では高次モードの影響により危険側に評価される。

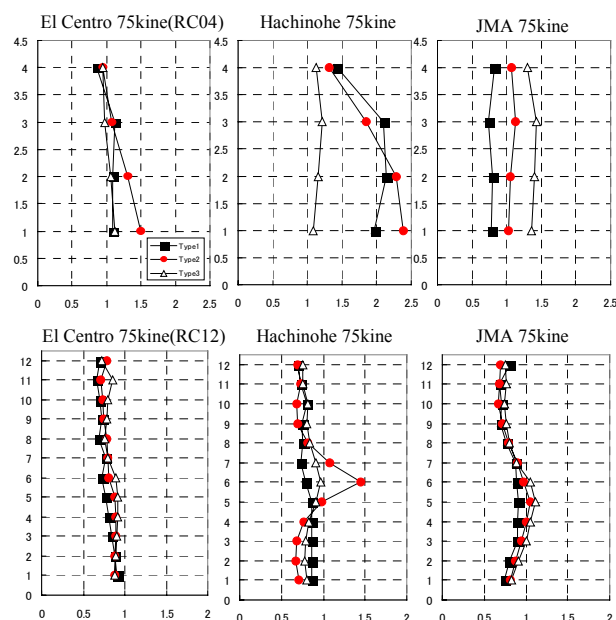


図-10 CalM/ResM の比率関係

謝辞

本研究は日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」(委員長:小谷俊介 東京大学教授)のシステム部会(和田章 東京工業大学教授)損傷制御システムWG(主査:壁谷澤寿海 東京大学教授)における研究の一環として実施されたものである。関係各位に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 松本和行、他4名:高知能建築構造システムに関する日米共同構造実験研究(その61~63)、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、構造II、2002年8月、pp.943-948
- 2) Gu J.H., Inoue N. and Shibata M.: Inelastic Analysis of RC Member Subjected to Seismic Loads by Using MS Model, Journal of Structural Engineering, Vol.44B, pp.157-166, 1998, AIJ
- 3) 松本和行、倉本洋:多層RC造建築物のモード適応型非線形荷重増分解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、2002年
- 4) 柴田明徳:最新耐震構造解析、最新建築学シリーズ9、森北出版
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課、他3団体共編:2001年版 限界耐力計算法の計算例とその解説、2001年3月、276pp.