減衰量の高さ方向分布に不均等性を有する均等フレームの振動特性 等価モード減衰定数と減衰消費エネルギー

VIBRATION CHARACTERISTICS OF UNIFORM FRAMES TO HAVING OF INHOMOGENEITY FOR DAMPING QUANTITY ALONG THE HEIGHTS

Equivalent modal damping factor and damping energy

荒川 利治*, 渡邊 智明**

Toshiharu ARAKAWA and Tomoaki WATANABE

This paper describes the vibration characteristics of bending-shear type uniform frames to having of inhomogeneity for damping quantity along the heights. It is installed viscous damper in arbitrary story so that the analytical structure has inhomogeneity for damping quantity. Based on the strain energy theory, two methods are carried out to evaluate the equivalent modal damping factors. One method is using classical normal modes, the other is using complex modes. It is analytically explained that the equivalent modal damping factors for these structures could be accurately calculated by using classical normal modes, at the installed damper coefficient less than 15% concerning the first mode. Through the seismic response studies, the energy absorbing is divided into each mode. It is discussed the relationship between equivalent modal damping factors and the effectiveness of the overall responses reductions.

Keywords: uniform frame, damping, viscous damper, modal analysis, seismic response, energy absorbing
均等フレーム、減衰、粘性ダンパー、モード解析、地震応答、消費エネルギー

1. 序論

建築構造物の高さ方向における構造特性は、バランス良く分布しているのが一般的である。構造特性の分布にアンバランスが生じた場合には、耐震性能が低下することは周知の事実である。特に、1995年の兵庫県南部地震においては、途中階、あるいは下層部のみに損傷が集中する被害例が少なくなかった。高さ方向の構造特性分布に不均等性を有する建物の力学・振動性状を把握しておくことは、構造設計においても不可欠な事項の一つである。筆者らは、建物の構造特性を支配する力学パラメータとして質量、剛性、強度、減衰をとりあげ、それらの高さ方向分布に不均等性がある場合の基本的な力学・振動性状を調べて、これまでに報告を行ってきた^{1), 2), 3)}。

一方、建物の耐震設計・解析における減衰特性は、通常、剛性比例型の内部粘性減衰を用いており、減衰量の高さ方向分布はおおむね均等に仮定されている。

近年、地震、あるいは強風に対するパッシブ制震の観点から、各種減衰装置を設置して応答を制御・抑制する設計理論が定着しつつある。減衰装置として粘弾性ダンパーを用いる場合の最適な配置層、付加するダンパー容量などの解析と、実験的な検証をし

た研究⁴⁾、設置する粘性ダンパーの高さ方向分布の最適化を検討した研究⁵⁾、粘性ダンパーの効率的な配置方法を調べた研究⁶⁾、超々高層建物を対象として制震ダンパーの最適配置を検討した研究⁷⁾、建物中の粘性ダンパーの総量が一定という条件での最適配置を検討した研究⁸⁾など、粘性タイプのダンパー配置方法に関する報告はあるものの、減衰量の高さ方向の不均等性が建物の振動性状に与える影響を検討した研究はほとんどみあたらない。

本論文は中高層の曲げせん断型均等フレームにおける高さ方向の減衰量分布に着目し、その分布に不均等性を有する場合の振動性状を検討したものである。任意の1~2層が、建築計画・構造設計上の制約、あるいは付加ダンパー等によって、建物の剛性に比例しない減衰性を有した場合における建物全体の減衰特性を評価し、減衰の不均等性が減衰消費エネルギーに与える影響を中心に考察した。特に、高さ方向の減衰量分布に不均等性を有する建物の振動解析において、モードの直交性を前提とした古典モードが適用できる限界を調べた。

減衰量が局所的に相異なる場合の建物全体の減衰性能を評価する方法としては、歪エネルギー比例減衰理論に基づく数式的な評価方法と、弾性地震応答における消費エネルギー量を検討するこ

* 明治大学理工学部建築学科 専任講師・工博

** 日産建設(株)建築設計部(元明治大学大学院) 工修

Tenure Lecturer, Dept. of Architecture, School of Science and Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

Structural Engineering Division, Nissan Construction, M. Eng.

図1 解析対象とした建物（平面図）

図2 付加ダンパーモデル

表1 基本モデル(Basic)の諸元

階	梁材 $b \times D$ [cm ²]	柱材 $b \times D$ [cm ²]	重量 [tf]
R	40×70	—	39.6
10,9	"	75×75	"
8,7,6	45×75	80×80	"
5,4	50×80	"	"
3,2	55×80	"	"
F	55×150	"	—

表2 解析モデル名の例

モデル名	粘性ダンパーの付加層と減衰量
1s	第1層に5% (s型)
2m	第2層に10% (m型)
3l	第3層に15% (l型)

とによって評価する方法を用いている。本研究は粘性ダンパーを任意の層に設置する場合の最適配置位置、また、付加する粘性ダンパーの容量を検討するための設計資料として実用設計にも十分適応できるものと考えられる。

2. 解析モデルと解析仮定

2.1 解析モデル

平面的・立面的に整形な RC 造 10 層事務所ビルとして設計した図 1 に示す建物の代表構面を取り、その中央 1 スパン分のフレームを梁の反曲点から切り出して基本モデルとする（柱・梁の諸元は表 1）。図 2 のように任意層、または任意の連続した 2 層分に粘性ダンパーを付加したモデルを設定した。付加する粘性ダンパーの減衰定数は、基本モデルの水平剛性に比例させて与えることとし、1 次モードに対して 5%、10%、15% をとりあげた。粘性ダンパー付加モデル名の例を表 2 に示す。

基本モデルの水平剛性分布を明確化するために、部材設計を極端に変化させた場合(基本モデルの水平剛性分布に対して、①は上層を小さくし、下層を大きくした分布。②は上層を大きくし、下層を小さくした分布)の D 値の概形と、層間刺激関数を図 3 に示した。この基本モデルは、1 次モードの低層部に大きな変形が生じる平均的な構造設計例である。

応答解析で用いた地震動の加速度応答スペクトルを図 4 に示した(入力最大速度 10kine)。なお、部材の応力・変形などは、三項方程式⁹⁾を基本として算出しており、曲げせん断型の解析モデルとなっている。

2.2 粘性ダンパー付加モデルの減衰マトリックス

基本モデルの減衰マトリックスは、1 次モードに対して剛性比例型 2% と仮定している。この基本モデルに層間の速度差に有効な粘性ダンパーを付加する。第 i 層に付加する粘性ダンパーの減衰定数 h_{id} を基本モデルの 1 次固有円振動数 $\omega^{(1)}$ に対して与えることとすると、第 i 層に粘性ダンパーを付加したモデルの減衰マトリックスは、(1)式となる。

$$[C_{id}] = 2h^{(1)} / \omega^{(1)} [K(\text{Full Matrix})]$$

図3 基本モデルの層間刺激関数

図4 入力地震動の加速度応答スペクトル（減衰2%）

表3 各層の水平剛性

層	k_i	水平剛性 [tf/cm]
10	k_{10}	68.2
9	k_9	74.2
8	k_8	86.3
7	k_7	87.6
6	k_6	93.4
5	k_5	101.5
4	k_4	104.7
3	k_3	107.5
2	k_2	112.3
1	k_1	142.2

$$+2h_{id}/\omega^{(i)} \begin{bmatrix} 0 & & 0 \\ & k_i & -k_i \\ & -k_i & k_i \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad \cdots(1)$$

ここで、 k_i ；第 i 層の水平剛性

h_{id} ；第 i 層に付加する粘性ダンパーの減衰定数

なお、基本モデルにおける各層の水平剛性は、Ai 分布を仮定した水平力を静的に加えたときの等価せん断剛性を用いている(表 3)。

2.3 等価モード減衰定数の定式化

任意層に粘性ダンパーを付加した場合の建物全体の減衰性能を定式化する方法を誘導する。なお、本論では等価モード減衰定数、刺激関数、減衰固有周期の算定にあたり、質量 $[M]$ と剛性 $[K]$ から算出する古典モードを用いる評価法を古典モード法、質量 $[M]$ と剛性 $[K]$ に減衰 $[C_{id}]$ も含めたモードを用いる評価法を複素モード法と呼ぶことにする。

1) 古典モード法

粘性ダンパーを任意の第 i 層に付加した場合においてもモードの直交性が成立すると仮定し、(2)式のように非対角項を無視して MK 型の振動モード $[U]$ で近似できるとする^{10), 11)}。すなわち、 j 次の等価モード減衰定数 $h_{ec}^{(j)}$ は、規準減衰係数 $c_{id}^{(j)}$ (4)式と規準ばね係数 $k^{(j)}$ を用いて(3)式のように取り扱うことができるとしたものである。

$$[U]^T [C_{id}] [U] = \begin{bmatrix} c_{id}^{(1)} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & c_{id}^{(j)} & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & c_{id}^{(n)} \end{bmatrix} \quad \cdots(2)$$

$$h_{ec}^{(j)} = c_{id}^{(j)} \omega^{(j)} / 2k^{(j)} \quad \cdots(3)$$

$$c_{id}^{(j)} = \{u^{(j)}\}^T [C_{id}] \{u^{(j)}\} \quad \cdots(4)$$

$$= 2h^{(i)} k^{(i)} / \omega^{(i)} + 2h_{id} k_i / \omega^{(i)} \cdot (u_i^{(j)} - u_{i-1}^{(j)})^2$$

(4)式を(3)式に代入すれば、古典モード法を用いた場合の等価モード減衰定数 $h_{ec}^{(j)}$ は、(5)式で表すことができる。また、古典モード法による減衰固有周期 $T_{ec}^{(j)}$ は(6)式となる。

$$h_{ec}^{(j)} = \omega^{(j)} / \omega^{(i)} (h^{(i)} + \psi_i^{(j)} h_{id}) \quad \cdots(5)$$

ここで、 $\psi_i^{(j)} = k_i (u_i^{(j)} - u_{i-1}^{(j)})^2 / k^{(j)}$ ；第 i 層に粘性ダンパーを

付加した場合の j 次の比例定数

$$T_{ec}^{(j)} = T^{(j)} / \sqrt{1 - (h_{ec}^{(j)})^2} \quad \cdots(6)$$

ここで、 $T^{(j)}$ ； j 次の非減衰固有周期

2) 複素モード法

剛性比例型と仮定した減衰マトリックスに粘性ダンパーを付加するとモード間の連成が生じて非比例減衰系となる。Foss の解法によれば¹²⁾、非比例減衰系の運動方程式(7)式に加え、適宜恒等式を考えることで、運動方程式を減階でき(8)式、通常の固有値問題方程式(9)式に帰着できるとしている。算定される j 次の固有値と固有ベクトルは、(10)式、(11)式のように複素数となっており、複素モード法による等価モード減衰定数 $h_{ed}^{(j)}$ 、減衰固有周期 $T_{ed}^{(j)}$ はそれぞれ(12)式、(13)式で表すことができる。^{10), 13), 14)}なお、複素モー

ドの刺激関数は(14)式の刺激係数を用いて表すことができる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C_{id}]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{P\} \quad \cdots(7)$$

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & -[K] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{x}\} \\ \{x\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{id}] & [K] \\ [K] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{x}\} \\ \{x\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad \cdots(8)$$

$$[R]\{v\} = \lambda\{v\} \quad \cdots(9)$$

$$\lambda^{(i)} = \xi^{(i)} \pm \zeta^{(i)}i \quad \cdots(10)$$

$$\{v\} = \begin{Bmatrix} \lambda\{\bar{u}\} \\ \{\bar{u}\} \end{Bmatrix} \quad \cdots(11)$$

$$h_{ed}^{(j)} = -\xi^{(j)} / \sqrt{(\xi^{(j)})^2 + (\zeta^{(j)})^2} \quad \cdots(12)$$

$$T_{ed}^{(j)} = 2\pi / \sqrt{(\xi^{(j)})^2 + (\zeta^{(j)})^2} = 2\pi / \zeta^{(j)} \quad \cdots(13)$$

$$\beta^{(j)} = \frac{2\lambda^{(j)} \{\bar{u}^{(j)}\}^T [M] \{1\}}{\langle (\lambda^{(j)})^2 \{\bar{u}^{(j)}\}^T [M] \{\bar{u}^{(j)}\} - \{\bar{u}^{(j)}\}^T [K] \{\bar{u}^{(j)}\} \rangle} \quad \cdots(14)$$

2.4 消費エネルギーの算定法

1) 応答消費エネルギー

任意の第 i 層に粘性ダンパーを付加したモデルにおける地震時の運動方程式を、(15)式で表現する。増分時間 dt における微小変位 $\{dx\}^T$ を両辺にかけることによって、慣性項、減衰項、復元力項がした各々の仕事の釣り合い式を求める。 $dx = \dot{x}dt$ を考慮して地震継続時間 t で積分することによって、地震入力終了時において各項が消費したエネルギーを算定することができる。各項が消費したエネルギー量の名称を(17)式から(19)式で定義する。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C_{id}]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{1\}\ddot{x}_0 \quad \cdots(15)$$

$$\text{入力エネルギー； } E_T = \int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{1\} \ddot{x}_0 dt \quad \cdots(16)$$

$$\text{慣性エネルギー； } E_M = \int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{x}\} dt \quad \cdots(17)$$

$$\text{減衰消費エネルギー； } E_C = E_c + E_{id} \\ = \int_0^t \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt + \int_0^t 2h_{id} k_i / \omega^{(i)} (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})^2 dt \quad \cdots(18)$$

ここで、 $\dot{x}_i$ ；第 i 層の相対速度

$$\text{歪みエネルギー； } E_K = \int_0^t \{\dot{x}\}^T [K] \{x\} dt \quad \cdots(19)$$

2) 等価モーダルエネルギーの算定

任意の第 i 層に粘性ダンパーを付加した場合の地震応答において、各次モードが消費したエネルギーの算定も、MK 型のモード $[U]$ を用いて近似できると仮定する。この場合も(4)式から各次の規準減衰係数を求める。一方、運動方程式を時々刻々直接積分して算定する多質点系の速度ベクトルに対して、(20)式の変換を行うことで、各次モードに分解された速度ベクトルを求めることができる。 j 次の等価モーダルエネルギー $E_i^{(j)}$ は、(21)式となる。

$$\{\dot{q}\} = [U]^{-1} \{\dot{x}\} \quad \cdots(20)$$

$$E_i^{(j)} = \int_0^t c_{id}^{(j)} (\dot{q}^{(j)})^2 dt \quad \dots\dots(21)$$

以下に、消費エネルギー量を検討するためのパラメータを定義する。

①ダンパーエネルギー比 R_{id}

$$R_{id} = (E_{id} / E_c) \times 100(\%)$$

2%と仮定した基本モデルが消費したエネルギー E_c と任意層に付加した粘性ダンパーが消費したエネルギー E_{id} の和 E_c に対して、付加した粘性ダンパーが消費したエネルギー E_{id} を示す割合。

②等価モーダルエネルギー比 $R_{id}^{(j)}$

$$R_{id}^{(j)} = \left(E_i^{(j)} / \sum_{i=1}^m E_i^{(j)} \right) \times 100(\%)$$

各次モードが消費したエネルギー量の総和に対して、 j 次モードが消費したエネルギー $E_i^{(j)}$ が占める割合。

③無次元化モーダルエネルギー $r_{id}^{(j)}$

$$r_{id}^{(j)} = E_i^{(j)} / \text{基本モデルの } E^{(j)}$$

基本型の j 次モードが消費したエネルギー量 $E^{(j)}$ に対して、粘性ダンパー付加モデルの j 次モードが消費したエネルギー量 $E_i^{(j)}$ の割合。

3. 固有値解析

3.1 刺激関数

粘性ダンパーを付加したモデルの複素モード法による刺激関数を算定し、基本モデルとの比較を行った。粘性ダンパー付加モデルの刺激関数は、1 次、2 次に関しては、いずれの層に粘性ダンパーを付加した場合においても古典モードとほとんど差異はない。3 次以降では、モードの腹において若干変動している。図 5 は 15% の粘性ダンパーを偶数層のみに付加した場合の刺激関数を絶対値で示したものである。

3.2 固有周期

粘性ダンパーを付加したモデルの減衰固有周期を両換算法によって算定して比較した。複素モード法による減衰固有周期 T_{ei} は、各次モードとも古典モード法の T_{ec} よりも若干短くなっている。2 次以降においては、モードの腹付近に粘性ダンパーを付加した場

図5 複素モード法による刺激関数 ($\eta_{id}=15\%$)

合、両換算法による減衰固有周期にほとんど差異を生じていないのが特徴である。表 4 には 15%の粘性ダンパーを付加した場合を示しているが、各次モードとも換算法による相異は数%程度である。

4. 等価モード減衰定数

任意の 1~2 層に粘性ダンパーを付加したモデルの等価モード減衰定数を古典モード法と複素モード法によって、各次毎に算定して比較検討した。

任意の 1 層のみに粘性ダンパーを付加したモデルの等価モード減衰定数を図 6 に示した。1 次の等価モード減衰定数は、どちらの換算法によってもほとんど差異がないことがわかる。なお、1 次モードの減衰にもっとも有効な付加層は、第 2 層となっており、15% の粘性ダンパーを付加した場合には、両換算法ともに $h_e^{(1)}=4.4\%$ となっている。しかしながら、高次モードにおいては、付加する粘性ダンパーの減衰定数が大きいほど、また付加ダンパーが有効に作用する層ほど、両換算法による等価モード減衰定数に差異が生じていた。

任意の連続した 2 層分に同時に付加したモデルの等価モード減衰定数を図 7 に示した。付加する粘性ダンパーの減衰定数を増大させた場合の傾向は、1 層分モデルと類似している。

次に、粘性ダンパーを付加する層を各次の等価モード減衰定数に有効な層に限定し、付加する粘性ダンパーの減衰定数を増大させて、換算法による影響を検討した(図 8)。古典モード法においては、換算される等価モード減衰定数が付加する粘性ダンパーの減衰定数に比例して増大することがわかる。古典モード法における直線の勾配は、(5)式中の $\Psi_i^{(j)}$ である。この $\Psi_i^{(j)}$ は、フレームが j 次の振動モード形態をとったときのポテンシャル歪みを、粘性ダンパー付加層のポテンシャル歪みで重み付けした形となっている。古典モード法においては、付加ダンパーの減衰定数 h_{id} を $\Psi_i^{(j)}$ 倍し、MK 型の振動数に比例させて高次を評価したことになる。これに対して、複素モード法によって換算される等価モード減衰定数は、2 次では 30%、3 次では 20%以上において、付加ダンパーの減衰定数を増大させても等価モード減衰定数は増大しなくなる。

5. 地震応答解析

任意層に粘性ダンパーを付加した場合の地震応答性状を検討した。2.4 で定義したパラメータによって、粘性ダンパーを付加した

表 4 古典モード法と複素モード法による固有周期 [sec]

モデル名	1 次モード		2 次モード		3 次モード	
	古典 モード法	複素 モード法	古典 モード法	複素 モード法	古典 モード法	複素 モード法
基本モデル	0.814		0.284		0.170	
10l	0.814	0.814	0.284	0.281	0.170	0.160
9l	0.814	0.814	0.286	0.277	0.171	0.161
8l	0.815	0.814	0.286	0.278	0.168	0.166
7l	0.815	0.813	0.286	0.279	0.168	0.167
6l	0.815	0.813	0.285	0.281	0.169	0.163
5l	0.815	0.813	0.284	0.284	0.170	0.160
4l	0.815	0.812	0.284	0.284	0.168	0.164
3l	0.815	0.812	0.284	0.282	0.167	0.167
2l	0.815	0.812	0.285	0.280	0.168	0.166
1l	0.815	0.812	0.285	0.279	0.169	0.162

図6 古典モード法と複素モード法による等価モード減衰定数 (1層分)

図7 古典モード法と複素モード法による等価モード減衰定数 (2層分)

図8 換算法の違いによる付加ダンパーの減衰定数と等価モード減衰定数

場合の消費エネルギー量を調べた。なお、線形加速度法により地震応答解析を行い、入力地震動は最大 10kine に規準化して用いた。

5.1 層せん断力と層間変位

任意層に粘性ダンパーを付加した場合の応答層せん断力によれば、いずれの地震動においても、層せん断力の低減に有効な付加層は第 2 層であった。特徴的なことは、下層部に付加した場合には、層せん断力低減の程度に差異はないが、付加する層を上層とするほど、付加ダンパー効果は小さくなっていった。15%の粘性ダンパーを付加した応答層せん断力を示した図 9 によれば、第 2 層に付加した場合の Elce、Toho では、応答が約 3 割低減している。Hach の場合では、1 割程度の低減と、加速度応答スペクトル(図 4)の特

性からも明らかのように、Elce、Toho に比べて応答低減効果が小さい。

図 10 に示した応答層間変位から、層せん断力と同じ程度の層間変位低減が期待できることがわかる。

5.2 減衰消費エネルギー

1) 減衰消費エネルギー

消費エネルギー時刻歴応答の例(Elce)を図 11 に示した。同図 a) は基本モデルを示し、同図 b) は第 2 層に 15%の粘性ダンパーを付加した 2I を示したものである。なお、 E_c は、2%と仮定した基本モデルが消費したエネルギーを表している。この例では、粘性ダンパーを付加した場合においても入力エネルギーの総量 E_T はほと

図9 付加ダンパーモデルの応答層せん断力

図10 付加ダンパーモデルの応答層間変位

図11 消費エネルギーの時刻歴の例 (Elce)

図12 ダンパーエネルギー比 R_{id}

んど変化していない。このように、弾性系においては、 E_T と減衰消費エネルギー E_c は等しい。粘性ダンパーを有効に作用する層に付加した場合ほど E_{id} は増大し、 E_c における E_c の割合は減少する。

2) ダンパーエネルギー比 R_{id}

粘性ダンパーを付加する層を変化させた場合のダンパーエネ

ギー比 R_{id} を図12に示した。 R_{id} は付加する層と粘性ダンパーの減衰定数、すなわち付加減衰量に依存していることがわかる。付加層の違いによる傾向は、1次等価モード減衰定数の分布形に近似する。また、 R_{id} は入力地震動によらない。 R_{id} は、第2層に付加した場合に最大となり、15%の粘性ダンパーを付加すると53%となる

ことがわかった。なお、最上層である10層に付加した場合の R_{id} は、10%以下となっていた。

3) 等価モーダルエネルギー比 $R_{id}^{(i)}$

15%の粘性ダンパーを付加した1型についての等価モーダルエネルギー比 $R_{id}^{(i)}$ を検討した。基本モデルにおける1次の $R_{id}^{(1)}$ は、Elce、Hachでは95%、Tohoで98%となっており、1次モードが応答時の減衰消費エネルギーの大部分を支配していることがわかる(表5)。これに対して、粘性ダンパーを付加した場合でも、各次の $R_{id}^{(i)}$ はほとんど変化していない。 $R_{id}^{(i)}$ の各次モード和と、付加ダンパー分を含めた減衰消費エネルギー E_c を示した表6によれば、エ

表5 等価モーダルエネルギー比 $R_{id}^{(i)}$ [%]

次数	1次モード			2次モード			3次モード		
モデル名	Elce	Hach	Toho	Elce	Hach	Toho	Elce	Hach	Toho
基本モデル	95.1	95.2	98.1	4.2	4.3	1.8	0.4	0.6	0.1
10l	93.8	94.0	97.8	4.9	4.8	1.9	0.2	0.9	0.2
9l	93.4	93.5	97.7	5.1	5.2	1.8	1.0	1.1	0.3
8l	94.2	94.0	97.9	4.7	5.0	1.7	0.6	0.6	0.1
7l	94.4	94.2	98.0	4.4	4.7	1.6	0.4	0.6	0.1
6l	94.6	94.6	98.1	4.1	4.3	1.4	0.7	0.7	0.2
5l	95.0	94.9	98.0	3.8	3.9	1.4	0.7	0.7	0.3
4l	94.8	94.8	98.0	4.0	4.1	1.4	0.5	0.5	0.2
3l	94.3	94.3	98.0	4.5	4.6	1.4	0.4	0.5	0.1
2l	94.3	94.2	98.2	4.4	4.8	1.4	0.6	0.7	0.1
1l	94.3	94.3	98.0	4.5	4.7	1.5	0.6	0.7	0.2

表6 各次等価モーダルエネルギーの和 $\Sigma E_{id}^{(i)}$ と減衰消費エネルギー E_c

地震波	Elce			Hach			Toho		
	$\Sigma E_{id}^{(i)}$ [tf·cm]	E_c [tf·cm]	誤差率 [%]	$\Sigma E_{id}^{(i)}$ [tf·cm]	E_c [tf·cm]	誤差率 [%]	$\Sigma E_{id}^{(i)}$ [tf·cm]	E_c [tf·cm]	誤差率 [%]
基本モデル	24847		0.0	10022		0.0	23046		0.0
10l	25438	25075	1.5	10234	10098	1.4	23757	23588	0.7
9l	25999	25443	2.2	10449	10235	2.1	25074	24725	1.4
8l	26284	25832	1.8	10546	10379	1.6	26500	26087	1.6
7l	26787	26305	1.8	10703	10540	1.6	28374	27853	1.9
6l	27105	26630	1.8	10788	10645	1.3	29817	29267	1.9
5l	27230	26793	1.6	10824	10673	1.4	30826	30244	1.9
4l	27455	26935	1.9	10905	10674	2.2	31753	31118	2.0
3l	27672	26924	2.8	10997	10650	3.3	32348	31668	2.2
2l	27664	26602	4.0	11023	10585	4.1	32510	31823	2.2
1l	27332	26082	4.8	10893	10435	4.4	30937	30173	2.5

図13 付加ダンパーモデルの無次元化モーダルエネルギー (Elce)

図14 付加ダンパーモデルの無次元化モーダルエネルギー (Hach)

図15 付加ダンパーモデルの無次元化モーダルエネルギー (Toho)

エネルギー量の誤差率(等価モーダルエネルギーの各次モード和と消費エネルギー E_c の差を消費エネルギー E_c に対して算定したもの)は最大で 5%と僅少であった。したがって、地震応答時の減衰消費エネルギーを各次モードに分離して評価できることがわかる。

4) 無次元化モーダルエネルギー $r_{id}^{(i)}$

粘性ダンパー付加層を変化させた場合における各次毎の無次元化モーダルエネルギー $r_{id}^{(i)}$ を図 13~15 に示した。粘性ダンパー付加層の違いによる傾向は、各次モードにおける等価モード減衰定数の分布形に類似することがわかった。ただし、付加層毎の $r_{id}^{(i)}$ は、入力地震動に依存していた。

6. 結論

粘性ダンパーを付加することで、減衰量の高さ方向分布に不均等性を有する RC 造中高層曲げせん断型均等ブレイムを取り上げ、不均等性が生じる層、そのアンバランス量が建物全体の減衰特性に与える影響を定式化して検討した。さらに地震応答時の減衰消費エネルギーを考察して、明らかとなった知見を要約すると以下のようなものである。

- 1) 均等フレームの任意層に粘性ダンパーを付加した場合の等価モード減衰定数を、歪みエネルギー比例減衰理論に基づいて、MK 型の古典モードを用いた簡潔な形で定式化することができた。これにより、MK 型固有値解析から、粘性ダンパーが有効に作用する層を特定できる。1 次モードにおいては、層間刺激関数が大きい低層部に粘性ダンパーを付加することが効果的であり、上層部に付加することが有効な質量ダンパーとの明瞭な違いが認められた。
- 2) MCK 型の複素モード法から換算した等価モード減衰定数を精算値と考えて、MK 型の古典モード法と比較した。付加する粘性ダンパーの減衰定数が 15%までは、1 次モードにおいて両換算法による差異はほとんどなく、古典モード法を用いることで十分に評価できることを明らかにした。ただし、高次では若干の差異があった。中高層均等フレームに古典モード法が適用できる限界は、付加するダンパーの減衰定数が 15%程度までと考えられる。
- 3) 本解析では、粘性ダンパーを第 2 層に付加した場合の建物全体の等価モード減衰定数が最も大きく、15%の粘性ダンパーを付加した場合における 1 次の等価モード減衰定数は 4.4%となった。また、地震応答解析からは、第 2 層に 15%の粘性ダンパーを付加したときには、層せん断力と層間変位が最大で 3 割程度低減できることがわかった。
- 4) 地震応答時に付加ダンパーを含めた減衰機構で消費する全エネルギーに対して、付加したダンパーが消費するエネルギーの割合であるダンパーエネルギー比 R_{id} は、入力地震動に関わらず、下層部に付加した場合に大きくなった。15%の粘性ダンパーを第 2 層に付加した場合、 R_{id} は約 50%となり、減衰消費エネルギーの半分程度を付加粘性ダンパーに集約させる構造設計も可能であることが明らかとなった。

- 5) 地震応答時の減衰消費エネルギーを、MK 型の古典モード各次に分離して評価できると仮定した、全モード和に対する各次毎の等価モーダルエネルギー比 $R_{id}^{(i)}$ は、粘性ダンパーを付加した場合でもほとんど変化していない。また、等価モーダルエネルギーの全モード和と、付加ダンパー分を含めた減衰消費エネルギーとを比較すると、付加する粘性ダンパーが 15%の場合における誤差は最大でも 5%程度であった。したがって、消費エネルギーを検討することによって、付加する粘性ダンパーの減衰定数が極端に大きくない場合には、減衰の不均等性が応答時の振動モードに与える影響は小さいことがわかった。

現在、構造各部の剛性・強度に基づいた履歴型減衰の場合、あるいは、高さ方向で減衰タイプが複合している場合などの減衰の不均等性について検討中である。

謝辞

本研究を行うにあたり、明治大学教授洪忠憲先生から貴重な御教示を頂いたことを記して感謝いたします。また、本論文作成にあたり、明治大学卒論生加藤誠一君から御助力を得ました。

参考文献

- 1) 渡辺智明、荒川利治、洪 忠憲：減衰の高さ方向分布に不均等性を有する曲げせん断型均等フレームの振動特性（等価モード減衰定数と減衰消費エネルギー）、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.37-40、1996.3
- 2) 荒川利治、渡辺智明、洪 忠憲：高さ方向に構造的不均等性を有する曲げせん断型均等フレームの振動特性（その 1. 各層質量の不均等性）、（その 2. 剛性と梁強度分布の不均等性）、日本建築学会学術講演梗概集、B-1、pp.365-368、1996.9
- 3) 渡辺智明、荒川利治、洪 忠憲：減衰量の高さ方向分布に不均等性を有する RC 造中高層均等フレームの地震時エネルギー吸収性状、日本建築学会学術講演梗概集、B-1、pp.433-434、1997.9
- 4) Zhang, R. H., and Soong, T. T.: Seismic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Applications, ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol.118, No.5, pp.1375-1392, 1992.5
- 5) 岩城光浩、金川 基、浅野幸一郎：地震入力を受ける構造物の最適粘性減衰分布について、日本建築学会学術講演梗概集、B、pp.1009-1010、1994.9
- 6) 佐野剛志、鈴木哲夫、関 松太郎：応答スペクトルを用いたモーダルアナリシスによる減衰装置の効率配置手法について、日本建築学会学術講演梗概集、B、pp.1011-1012、1994.9
- 7) 相沢 覚、小林喜久二、石黒三男：超々高層建物における制振ダンパーの最適配置、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、pp.783-784、1995.8
- 8) 原田幸博：粘性型エネルギー吸収要素の最適配置の基本的性状、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.45-48、1996.3
- 9) 荒川利治、田村 正、洪 忠憲：RC 均等フレームの弾塑性性状（その 1）柔域モデルによる柱および壁柱平面架構の耐力と変形、日本建築学会構造系論文報告集、No.420、pp.19-30、1991.2
- 10) 大崎順彦：振動理論、彰国社、1980.4
- 11) Caughey, T. K.: Classical Normal Modes in Damped Linear Dynamic Systems, ASCE, Journal of Applied Mechanics, pp.269-276, 1960.6
- 12) Foss, K. A.: Co-ordinates Which Uncoupled the Equations of Motion of Damped Linear Dynamic Systems, Technical Report, Massachusetts Institute of Technology, pp.25-30, 1956.3
- 13) 武藤 清、小林俊夫：各部別減衰振動系のモーダルアナリシス法、日本建築学会論文報告集、No.204、pp.37-43、1973.2
- 14) 武藤 清、小林俊夫：原子炉施設の耐震設計に慣用されている各種減衰理論の比較研究、日本建築学会論文報告集、No.255、pp.35-45、1977.5

(1997年11月4日原稿受理、1998年6月10日採用決定)