

## 非線形制振ダンパーを有する曲げせん断型モデルの層方向縮約法と最適ダンパー配置法

正会員 ○市橋直樹\* 同 吉富信太\* 同 辻 聖晃\* 同 竹脇 出\*

## 2. 構造—3. 応用力学・構造解析

## 制振, 非線形ダンパー, 曲げせん断型モデル, モデル縮約, 最適配置

## 1. 序

本論文の目的は、非線形復元力特性を有する制振ダンパーが組み込まれた曲げせん断型モデルの層方向縮約モデルを提案することと、それを用いた最適配置法を提案することにある。さらには高硬度ゴムダンパー<sup>2)</sup>を有するせん断型モデルの層方向縮約法及び最適配置法を展開した。ここではそれを曲げせん断型モデルに拡張する。

本論文では、非線形復元力特性を有する制振部材として高硬度ゴム<sup>2)</sup>を用いる。この高硬度ゴムは、アクリル系などの粘弾性材料に比べて温度・振動数依存性が低く、極微小変形時にはコンクリートに近い剛性を有し、せん断ひずみが5%程度以上になると鋼材に近い剛性を有している。これを多層曲げせん断型モデルに組み込む。主体構造物は弾性範囲にとどまるものとする。

## 2. 曲げせん断型モデル

## 2.1 曲げせん断型モデルの定義

本論文では図1に示すせん断ばねと回転ばねを直列に配置したモデルを用いる<sup>3)</sup>。

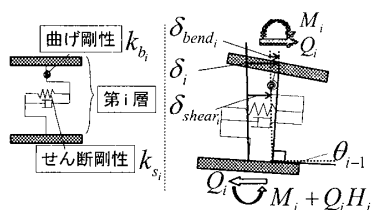


図1 曲げせん断型モデル

力-変位関係式は以下のように表される。

$$\begin{Bmatrix} Q_i \\ M_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{shear_i} \\ \phi_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_{s_0} & -H_i k_{s_0} & k_{s_0} & 0 \\ 0 & -k_{b_0} & 0 & k_{b_0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_{i-1} \\ \theta_{i-1} \\ y_i \\ \theta_i \end{Bmatrix} \quad (1)$$

## 2.2 曲げせん断型モデルとせん断型モデル

## 2.2.1 対象モデル

アスペクト比4、1次固有周期4秒の40層曲げせん断型モデルを対象とする。

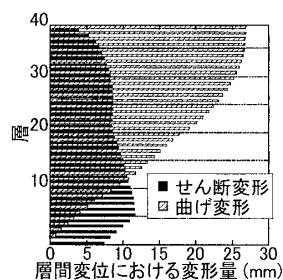


図2 層間変形

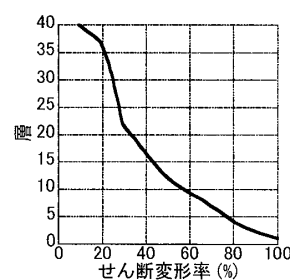


図3 せん断変形率

## 2.2.2 比較するせん断型モデルと曲げせん断型モデルの等価性条件

曲げせん断型モデルと、各層の質量 $m_i$ 、1次固有円振動数 $\omega^{(1)}$ 、1次モード形が等価となるようにせん断型モデルの剛性を設定。また、曲げせん断型モデルのせん断変形率をせん断型モデルに設置するダンパーの実効率として設定(図2, 3)。

## 2.2.3 入力地震動

NewmarkとHallの応答スペクトルに適合する模擬地震動を入力地震動として採用する。

## 2.2.4 層間変位の比較

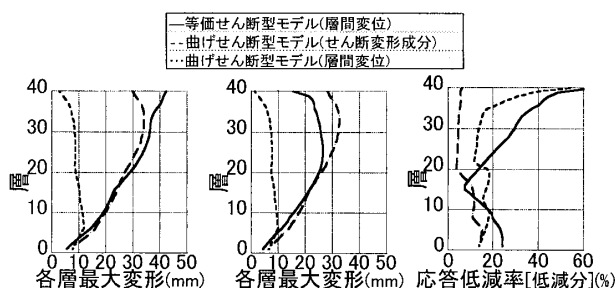


図4 ダンパー設置前後での各層層間変形及び各層せん断変形

図4(a), (b)より、ダンパー設置によりせん断型モデルの層間変位及び曲げせん断型モデルのせん断変形が低減されている。また図4(c)から、曲げ

せん断型モデルの層間変位については、上層においてあまり低減効果が見られないことが分かる。

アスペクト比の大きい高層曲げせん断型モデルでは、上層ほど層間変位に占める曲げ変形成分の割合が大きくなる（図2）。ダンパーを設置することによりせん断変形は低減されるが、その絶対値が小さいためトータルの層間変位にはその効果が表れにくい。一方、せん断型モデルでは、このダンパー効率の低減を実効率の導入により近似的に表現できるが（図3）、層間変位全体がダンパーの有効範囲となるため、本来ダンパーの効果がほとんど影響しない曲げ変形成分に相当する部分の応答も低減される。従って、特にアスペクト比の大きい高層建物については曲げせん断型モデルを使用することが必要となる。

### 3. 1 次固有振動特性の等価性に基づく縮約モデル

逆問題型定式化に基づき、多自由度曲げせん断型モデルを少自由度の曲げせん断型モデルに縮約する方法を述べる。

#### 3.1 主体構造の縮約法

図5のような第*i*層の質量 $m_i$ 、回転慣性 $I_i$ 、せん断剛性 $k_{s_i}$ 、曲げ剛性 $k_{b_i}$ が指定された4層モデルを2層モデルに縮約する過程を示す。尚、 $(\bar{\cdot})$ は、縮約構造モデルに関する量を表す。縮約構造モデルの質量及び回転慣性は、原構造モデルの縮約代表位置間の各層質量及び回転慣性の総和とする。縮約構造モデルの各層質量及び回転慣性は既知量として扱う。図5の場合は次式。

$$\bar{m}_1 = m_1 + m_2, \bar{m}_2 = m_3 + m_4, \bar{I}_1 = I_1 + I_2, \bar{I}_2 = I_3 + I_4 \quad (2a, b)$$

縮約構造モデルの剛性は、図5に表される等価性条件を逆問題的に解くことにより決定する。

$$\bar{k}_{s_j} = \bar{\omega}^{(1)^2} \sum_{l=j}^2 \bar{m}_l \bar{u}_l / \bar{v}_j \quad (j=1, 2) \quad (3)$$

$$\bar{k}_{b_j} = \begin{cases} \bar{\omega}^{(1)^2} \sum_{l=1}^2 \left( \bar{I}_l \bar{\theta}_l + \bar{m}_l \bar{u}_l \sum_{k=j+1}^l H_k \right) / \bar{\phi}_1 & (j=1) \\ \bar{\omega}^{(1)^2} \bar{I}_2 \bar{\theta}_2 / \bar{\phi}_2 & (j=2) \end{cases} \quad (4)$$

$\bar{v}_j$ は縮約構造モデルの1次固有モード第*j*層層間変位のせん断変形成分、 $\bar{\phi}_j$ は同モデル1次固有モード第*j*層床の層間相対回転角。

#### 3.2 ダンパーの縮約法

原構造モデルの第*i*層主体骨組のせん断剛性 $k_{s_i}$

に、第*i*層ダンパーの等価剛性 $k_{eq_i}$ を加えたものを「ダンパー付き原構造モデルの第*i*層せん断剛性」とし $k'_{s_i}$ で表す。ダンパー付き原構造モデルの1次固有円振動数 $\omega^{(1)}$ と1次固有モード $u_i^{(1)}$ 、 $\theta_i^{(1)}$ を別途求め、 $\bar{k}_s$ 算出の式に代入してダンパー付き縮約構造モデルの第*j*層せん断剛性 $\bar{k}'_{s_j}$ を求める。

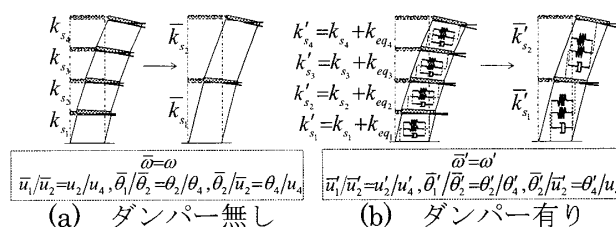


図5 モデル図

ダンパー付きの縮約構造モデルのせん断剛性 $\bar{k}'_{s_j}$ と主体骨組のみの縮約構造モデルのせん断剛性 $\bar{k}_{s_j}$ の差を縮約構造モデルに付加されるダンパーの等価剛性 $\bar{k}_{eq_j}$ とする。すなわち、縮約構造モデル第*j*層のダンパーの等価剛性を次式で求める。

$$\bar{k}_{eq_j} = \bar{k}'_{s_j} - \bar{k}_{s_j} \quad (5)$$

$\bar{k}_{eq_j}$ に相当する量のダンパーを、縮約構造モデルのダンパー量とする。

### 4. 静的変位等価性に基づく地震時慣性力の縮約法

#### 4.1 地震時慣性力

構造モデルの縮約のみでは十分な精度が確保できないため、入力地震動の荷重効果を縮約する。

原構造モデルの運動方程式は次式で表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}}_g(t) \quad (6)$$

(6)式の右辺の第*i*成分を原構造モデル第*i*層に作用する地震時慣性力と定義する。

#### 4.2 縮約地震時慣性力の定義

原構造モデルに地震時慣性力を、縮約構造モデルに縮約地震時慣性力 $\bar{\mathbf{f}}(t)$ を静的に作用させたときの、各層の相対変位ベクトルを $\mathbf{y}^*$ 及び $\bar{\mathbf{y}}^*$ とする。せん断型モデルに対して提案された縮約地震時慣性力は水平力のみであるが、曲げせん断型モデルでは水平力だけでなくモーメントも存在する。

両モデルにおける静的釣り合い式は次式で表される。静的な釣り合いは $\bar{\mathbf{f}}(t)$ の算出時のみ使用。

$$-\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}}_g(t) = \mathbf{K}\mathbf{y}^*, \bar{\mathbf{f}}(t) = \bar{\mathbf{K}}\bar{\mathbf{y}}^* \quad (7a, b)$$

縮約地震時慣性力ベクトル $\bar{\mathbf{f}}(t)$ は次式で表される。

$$\bar{\mathbf{f}}(t) = \{\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_N, \bar{m}_1, \bar{m}_2, \dots, \bar{m}_N\}^T \quad (8)$$

主体構造は弾性範囲にあるため  $\mathbf{K}$ ,  $\bar{\mathbf{K}}$  は常に一定。縮約変換行列  $\mathbf{T}$  を用い、等価性条件を表す。

$$\bar{\mathbf{y}}^* = \mathbf{T}\mathbf{y}^* \quad \dots\dots\dots (9)$$

以上より、縮約地震時慣性力  $\bar{\mathbf{f}}(t)$  は次式となる。

$$\bar{\mathbf{f}}(t) = \bar{\mathbf{K}}\mathbf{T}\mathbf{y}^* = -\bar{\mathbf{K}}\mathbf{T}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g(t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

## 5. 縮約モデルを用いたダンパーの最適配置法

本論文では、図 6 に示す最適化アルゴリズムに従い、ダンパーの層方向の最適配置を決定する。

(i) 原モデルに設置するダンパー配置パターンの決定。第 1～ $p$  層、 $p+1 \sim q$  層、 $\dots$ 、 $x+1 \sim N$  層配置を pattern 1, 2, X と呼び、各パターン内の層には等量のダンパーを配置する。

(ii) 感度計算で用いるダンパー増分量  $dS$  を設定。

(iii) 評価関数を設定。

次に、時刻歴解析を伴う感度解析の手順を示す。

(iv) (i) で設定したパターンの 1 つだけにダンパー量  $dS$  を付加したうえで縮約した計 X 個の縮約構造モデルを作成。各配置パターンが 1 つの層に対応するように縮約する。

(v) (iv) の X 個の縮約モデルの時刻歴解析を実行。

(vi) 評価関数が最小となる(感度が最も大きい)パターンにのみダンパーを  $dS$  だけ原構造モデルに付加する。次に(iv)に戻り、(iv)～(vi)を繰り返す。

この(iv)～(vi)を最適配置決定上の 1 ステップとする。この 1 ステップを図で表したものが図 6。

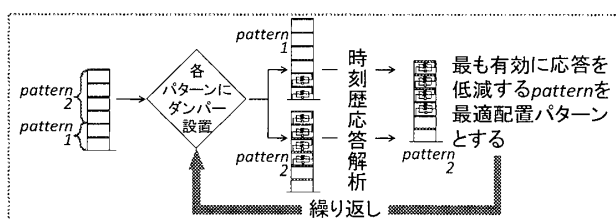


図 6 最適配置法

## 6. 縮約モデルを用いた最適配置の数値例題

本最適配置法の妥当性を検証するために、感度解析に原構造モデルを用いた場合 (Method O) と、縮約構造モデルを用いた場合 (Method S) について最適配置を求め、両配置を比較する。さらに、ダンパーを均等配置したものを Method E と呼ぶ。応答比較には、原モデルに各ダンパー配置を適用して評価した応答を用いる。

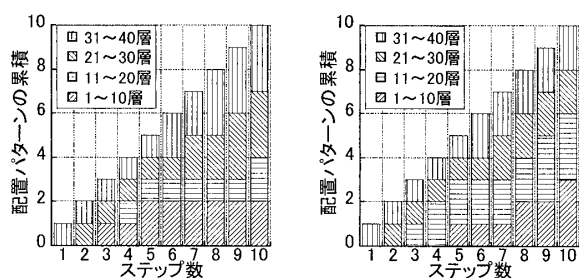
目的関数としては最大層間変位の層方向最大値、

及び頂部最大絶対加速度の 2 ケースとする。

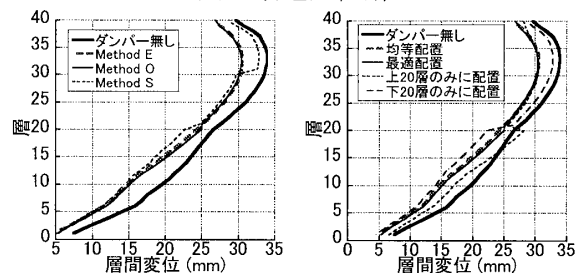
現実的な層剛性分布を有する 40 層曲げせん断型モデルを、第 10, 20, 30, 40 層を縮約代表層として 4 層に縮約し時刻歴応答解析を行う。

### 6.1 最大層間変位の層方向最大値を最小化

図 7 より、原モデルと縮約モデルを用いて算出した最適解が類似のものとなる。ただし、縮約モデルを用いた方が低層に多くダンパーが設置されている。図 8(a)の Method O と Method S では、上層の層間変位が最大となる付近での応答低減効果に差が現れている。



(a)原構造モデルで最適化 (b)縮約モデルで最適化  
図 7 最適配置解

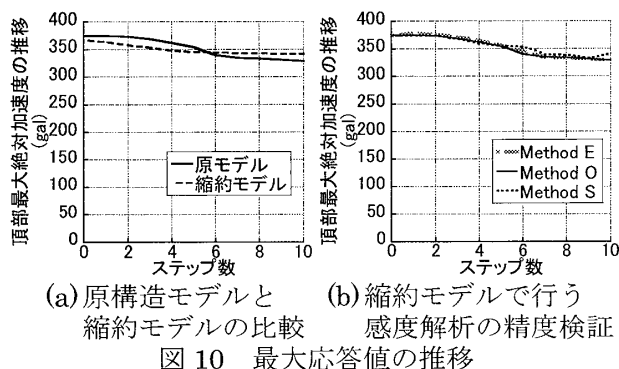
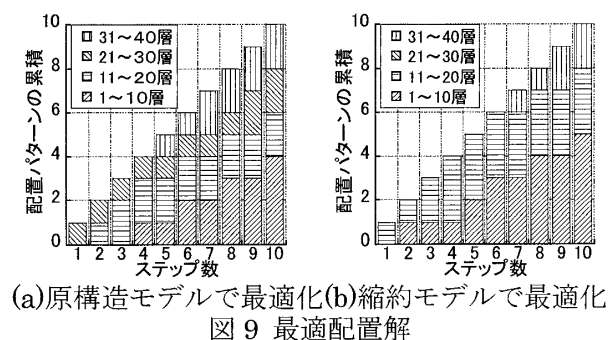


(a)縮約法の解を採用 (b)原モデルのみで解析  
図 8 最大層間変位分布の比較

また原構造モデルによる最適配置、均等配置、上層のみ配置、下層のみ配置の各ケースの層間変位分布を図 8(b)に示す。最適配置を行った方が、最大層間変位の大きい層の最大値を僅かながら低減できており、最適配置法の有効性を示している。

### 6.2 頂部絶対加速度を最小化

頂部最大絶対加速度を最小化する場合の最適配置を図 9 に、各配置に対する応答を図 10(b)に示す。Method S と Method O の最適配置や応答の推移は概ね対応しており、縮約法を用いた最適配置法の有効性を示している。また、Method O 最適配置について、原モデルと縮約モデルの応答の比較を図 10(a)に示す。縮約モデルにより原構造モデルの最大応答値の推移を定性的に表現可能である。



### 6.3 曲げ剛性の大きさによるダンパー効率の違い

本節では、曲げ剛性が前節の 5 倍で全体曲げ変形の影響が小さいモデルについて最適配置を行う。せん断変形率及び層間変位分布を図 11, 12 に示す。

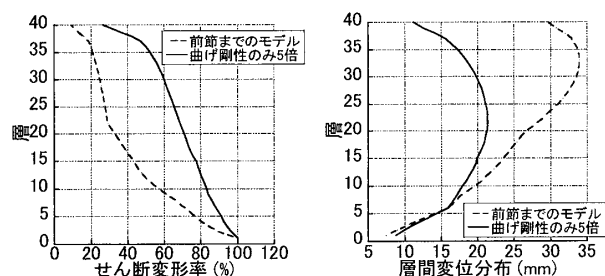


図 13 に最大層間変位を最小化した結果を示す。曲げ剛性を大きくすることで、ダンパーによる応答低減効果がより向上し、特に最適配置の応答低減効果が顕著となることわかる。

図 13(a)の Method O と Method S では、中間層の最大層間変位に対してほぼ同等の応答低減効果を有することから、提案手法の有効性が理解される。図 13(b)に、原構造モデルによる最適配置、均等配置、上 20 層のみ配置、下 20 層のみ配置の各

ケースの層間変位分布示す。上 20 層のみにダンパーを設置しても下 20 層の応答をあまり低減できないのに対し、下 20 層のみにダンパーを設置すると上 20 層を含め全層にわたり効果的に応答を低減できることがわかる。

曲げ剛性の大きいモデルではダンパーの効果がより顕著に現れ、最適配置の有用性がより向上するのに対して、曲げ剛性の小さいモデルではダンパーを設置しても応答をあまり低減できず、最適配置の有用性が現れにくいといえる。

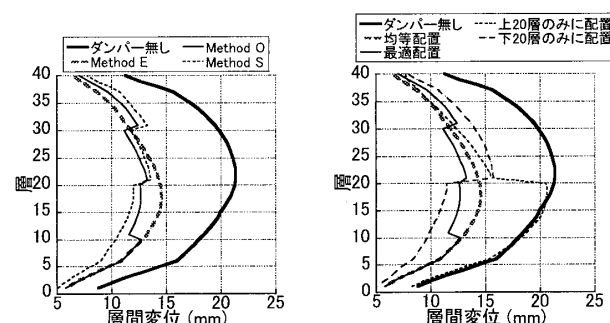


図 13 最大層間変位分布の比較

## 7. 結論

- 1) 非線形ダンパーを有する曲げせん断型モデルを、少自由度曲げせん断型モデルに層方向縮約する方法、及び地震入力効果を縮約する方法を提案した。
- 2) 1)の縮約モデルを用いて数値感度解析を行うことにより、非線形復元力特性を有する高硬度ゴムダンパーを効果的に設置する効率的かつ汎用性の高い方法が構築できることを示した。
- 3) 40 層曲げせん断型構造物モデルに対して、本論文で提案した縮約法を用いた最適配置法が許容される精度を有しかつ有効であることを示した。

### 参考文献

- 1) 辻聖晃他, 非線形復元力特性を有する制振ダンパーの構造縮約モデルを用いた最適配置法, 構造系論文集, 2010.
- 2) 谷翼他, 高硬度ゴム粘弾性体の力学モデルの構築, 構造系論文集, 2008.
- 3) 竹脇出, 中村恒善, 弾性支持された曲げ剪断型構造物モデルの混合型逆定式化による地震時変形制約設計, 構造工学論文集, 1993.