

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*

制振 非線形ダンパー 高硬度ゴム
曲げせん断型モデル モデル縮約 最適ダンパー配置

1. 序

本研究の目的は、非線形復元力特性を有する制振ダンパーを設置した曲げせん断型モデルの層方向縮約法を提案すること、縮約法を用いたダンパーの最適配置法を提案することにある。本論文では、辻らが展開した高硬度ゴムダンパー¹⁾を有するせん断型モデルの層方向縮約法を用いた最適配置法を²⁾、曲げせん断型モデルに拡張する。

本研究で制振部材として用いる高硬度ゴム¹⁾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、剛性は極微小変形時にはコンクリートに近く、せん断ひずみが5%程度以上になると鋼材に近いという非線形性を有する。主体構造物は弾性範囲に留まるものとする。

2. 曲げせん断型モデルの特徴

本論文ではせん断ばね k_{sj} と回転ばね k_{rj} を直列に配置した曲げせん断型モデルを用いる³⁾。曲げせん断型モデルの特徴を示すために比較的全体曲げの影響の大きい40層モデルに対し、各層の質量 m_j 、1次固有円振動数 $\omega^{(1)}$ 、1次モード形がこのモデルと等しくなるように剛性を設定したせん断型モデルとの層間変位比較の一例を図1に示す。

図1(c)より、ダンパー設置によりせん断型モデルと曲げせん断型モデルのせん断変形は概ね同程度低減することがわかる。一方、図1(a,b,c)より曲げせん断型モデルでは、全体曲げによる層間変位の割合が大きい上層の層間変位はほとんど低減しないことがわかる。これはダンパーがせん断変形成分の低減には有効であるのに対し、全体曲げ変形の低減効果が極めて小さいことを示している。

アスペクト比の大きい高層曲げせん断型モデルでは、特に上層で層間変位におけるせん断変形成分の割合(=実効率)が小さくなるため、ダンパー設置によるトータルの層間変位の低減効果が表れにくい。せん断型モデルにおいては実効率によりこのような特性を近似的に考慮することが出来る。ただし、実効率によりダンパーの正味の変形量が低減する影響を考慮しても、本来ダンパーの効果が小さい曲げ変形成分も含んだ層間変位を低減するため、ダンパーの効果を過大に見積もる傾向がある。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用いる必要がある。

3. 縮約モデル

次の3点の縮約を行う。()は縮約モデルの量を表す。

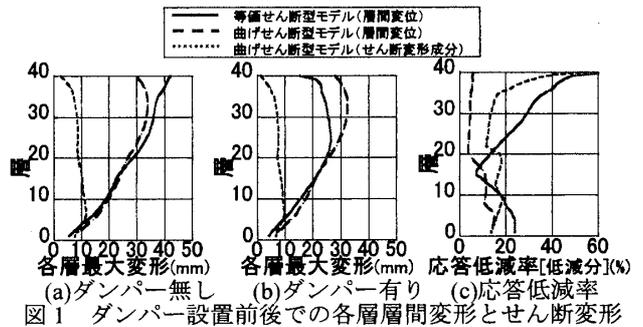


図1 ダンパー設置前後での各層層間変形とせん断変形

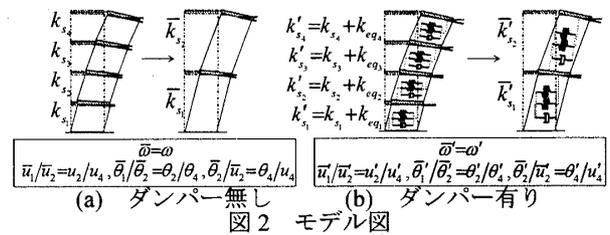


図2 モデル図

(i) 主体骨組の縮約 (図2(a))

原モデルと縮約モデルの対応位置における1次固有振動特性の等価性より縮約モデルの剛性を得る。

$$\bar{k}_{sj} = \bar{\omega}^{(1)2} (\sum_{i=1}^N \bar{m}_i \bar{u}_i) / \bar{v}_j \quad (1)$$

$$\bar{k}_{rj} = \begin{cases} \bar{\omega}^{(1)2} \sum_{i=1}^N (\bar{I}_i \bar{\theta}_i + \bar{m}_i \bar{u}_i \sum_{k=j+1}^i H_k) / \bar{\phi}_j & (j < N) \\ \bar{\omega}^{(1)2} \bar{I}_N \bar{\theta}_N / \bar{\phi}_N & (j = N) \end{cases} \quad (2)$$

$\bar{v}_j, \bar{\phi}_j, \bar{u}_j, \bar{\theta}_j$ は1次固有モードの第j層の層間変位のせん断変形成分, 床の層間相対回転角, 水平変位, 回転角。

(ii) 制振ダンパーの縮約 (図2(b))

ダンパー付き及びダンパー無し原モデルの縮約構造モデルのせん断剛性 $\bar{k}'_{sj}, \bar{k}_{sj}$ の差 $\bar{k}_{eqj} = \bar{k}'_{sj} - \bar{k}_{sj}$ を縮約構造モデルに付加するダンパーの等価剛性とする。ダンパー厚さ是对応層間の総和とし \bar{k}_{eqj} に相当するダンパー量を決める。

(iii) 静的変位の等価性に基づく地震時慣性力の縮約

原モデルの運動方程式の右辺を地震時慣性力と呼ぶ。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{\mathbf{u}}_g(t) \quad (3)$$

剛性のみを考慮した変位の等価性より求めた、縮約モデルに作用させる縮約地震時慣性力 $\bar{\mathbf{f}}(t)$ は次式となる。

$$\bar{\mathbf{f}}(t) = -\bar{\mathbf{K}}\mathbf{T}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{\mathbf{u}}_g(t) \quad (4)$$

$\mathbf{K}, \bar{\mathbf{K}}, \mathbf{T}$: 原モデルと縮約モデルの剛性行列, 縮約変換行列

4. 縮約構造モデルを用いたダンパーの最適配置

本節では、原構造モデルに設置するダンパーの最適配

置を縮約構造モデルを用いて決定する方法を提案する。各ダンパー配置に対する感度計算を原構造モデルでなく縮約構造モデルの時刻歴応答解析結果を用いて行うことにより計算負荷を大幅に削減する。また、数値差分による感度を用いるため、非線形ダンパーを有するモデルの時刻歴応答を扱う問題に対しても容易に適用可能である。

4-1 最適化アルゴリズム

本節では、最大層間変位を最小化するように総量の指定されたダンパーを各層に配置する問題に対し、ダンパー総量を0から漸増させるアルゴリズムを提案する。

(i) 原モデルのダンパー設置層のグルーピング (各グループ内の層には等量のダンパーを配置)。第1~p層, p+1~q層, ..., x+1~N層配置を pattern 1, 2, Xと呼ぶ。

(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。

(iv) 時刻歴解析を伴う感度解析を行う。(i)で設定したグループの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。各配置グループが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応答解析を実行。

(vi) (iv)のモデルのうち評価関数が最小となる(応答低減効果が最も大きい)グループにのみダンパーを dS だけ付加する。次に(iv)に戻り、(iv)~(vi)を繰り返す。

(iv)~(vi)を最適配置決定上の1ステップとする(図3)。

4-2 数値例題

本節では、4-1節に示す最適化アルゴリズムを用いたダンパーの最適配置の数値例題を行う。例題で用いる原構造モデルは現実的な層剛性分布を有するアスペクト比4, 1次固有周期4秒の40層曲げせん断型モデルとする。縮約構造モデルは4自由度曲げせん断型モデルとし、第10, 20, 30, 40層を縮約代表位置とする。ダンパーは厚さ15mmの高硬度ゴム¹⁾とする。このとき、縮約構造モデルのダンパー厚さは150mmとなる。解析で用いる地震動はNewmarkとHallの設計用応答スペクトルから作成した模擬地震動(レベル1)とする。目的関数は最大層間変位の層方向最大値とし、ダンパー増分量を $dS=10.0\text{ m}^2$ とする。

本最適配置法の妥当性検証のために、感度解析に原構造モデルを用いた最適配置 (Method O)、縮約構造モデルを用いた最適配置 (Method S)、全層均等配置 (Method E) を比較する。

図4より、Method Sの最適配置の方がMethod Oの最適配置より低層に多くダンパーが設置されているものの、両者はほぼ類似しており、本手法は妥当であるといえる。ただし、図5(a)のMethod O(原モデルによる解析)とMethod S(縮約モデルによる解析)の応答を比較すると、原モデルと縮約モデルで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る。

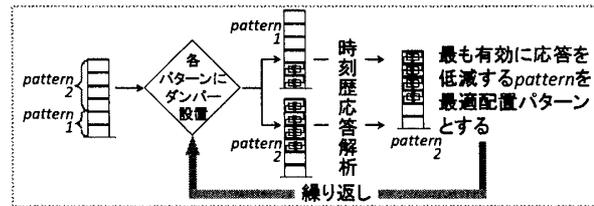
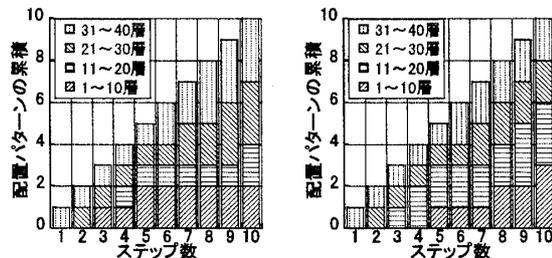
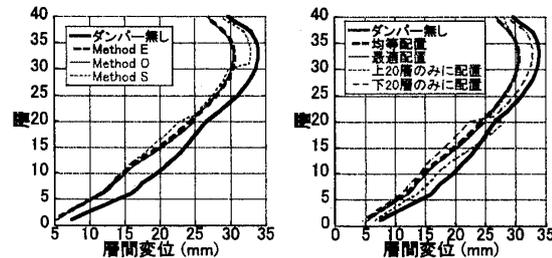


図3 最適配置法



(a)原構造モデルで最適化 (b)縮約モデルで最適化

図4 最適配置解



(a)各モデルによる解析 (b)原モデルによる解析

図5 最大層間変位分布の比較

また Method O, Method E, 上層のみ配置, 下層のみ配置の各ケースの層間変位分布(原モデルによる解析)を図5(b)に示す。最適配置は他の配置と比べて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。

5. 結論

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、そ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方法が構築できることを示した。

また、40層曲げせん断型構造物モデルの数値例題により、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) 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.
- 2) 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.
- 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.

*京都大学大学院工学研究科

* Graduate School of Engineering, Kyoto University