

地震動を受ける粘性ダンパー付建物の層方向自由度に関する縮約法

MODEL REDUCTION METHOD FOR BUILDINGS WITH VISCOUS DAMPERS UNDER EARTHQUAKE LOADING

辻 聖晃*, 田中英稔**, 吉富信太***, 竹脇 出****
*Masaaki TSUJI, Hidetoshi TANAKA, Shinta YOSHITOMI
and Izuru TAKEWAKI*

A model reduction method is proposed for an elastic high-rise building with viscous dampers subjected to earthquake ground motion. A set of story stiffnesses of the reduced model is found under the equivalent conditions that the original model without dampers and its reduced model possess the same fundamental natural frequency and fundamental mode shape. A reduced model of the time-dependent earthquake inertia force is also proposed by requiring the equivalence of displacements at representative floor levels in both models without inertia and damping terms. A set of damping coefficients and a set of relief loads of bilinear-type viscous dampers of the reduced model are found under the equivalent conditions that the original model with dampers and its reduced model possess the same lowest-mode damping ratio and energy dissipation mode shape. Numerical examples are presented to demonstrate the efficiency and accuracy of the proposed method. It is concluded that the proposed method can substantially reduce the number of degrees of freedom in the time history analysis within an acceptable accuracy.

Keywords : Viscous damper, Reduced model, Reduced earthquake inertia force, Dissipated energy, Earthquake response

粘性ダンパー, 縮約モデル, 縮約地震時慣性力, 消費エネルギー, 地震応答

1. はじめに

1.1 研究の背景

粘性ダンパーは、建築物の地震応答や風応答を受動的に制御するデバイスとして、広く一般的に用いられている。粘性ダンパーは速度に依存して抵抗力を生じるため、地震や風などの外乱に対する応答を精度良く評価するためには、時刻歴応答解析が必要となる。建築物の主構造体が弾性範囲内にあり、ダンパーの抵抗力が速度に関して線形であれば、複素固有値解析を用いた応答スペクトル法¹⁾²⁾により良好な精度で最大応答の予測が可能となるが、建築物の主構造体が非弾性領域に入るような場合や、ダンパーの抵抗力が速度に関して非線形となる場合には、応答スペクトル法は直接的には適用できない。応答スペクトル法に等価線形化法を導入することで、このような場合に対してもある程度の精度により最大応答を予測することは可能であるが、常に良好な精度が期待できるわけではない。

粘性ダンパーとしてオイルダンパーを用いる場合、リリーフ荷重は、ダンパー設置コストと最も関係性が強いダンパー諸元である。リリーフ荷重が小さければ、ダンパーに生じる最大減衰力もそれに応じて小さくなるため、ダンパー自身とダンパー周辺架構のコストも抑えることができる。一方、リリーフ荷重を小さくすれば、ダンパーによるエネルギー吸収量も小さくなるため、応答低減効果も小さくなる³⁾。

ダンパーリリーフ荷重が、オイルダンパーの制振性能に与える影響を明らかにすることができれば、設計上極めて有用である。しかしながら、リリーフ機構を有するダンパーは非線形の抵抗力—速度関係を示すため、応答評価には一般に非線形時刻歴応答解析が必要となり、パラメトリックスタディーや最適化のための有限差分感度解析を実行するには計算負荷が大きい。

動的な地震外乱を受ける多自由度構造物モデルの解析自由度を縮約する方法として最も簡易なものは、1自由度モデルへの縮約である⁴⁾。構造物モデルの復元力特性が線形である場合、1自由度モデルへの縮約は、一般に、多自由度モデルの1次モードに対する等価質量、等価減衰係数、等価剛性を計算し、これらを質量、減衰係数、剛性として持つような1自由度モデルに、1次の刺激係数を乗じた地動加速度を作用させ、このときに得られた応答を、多自由度モデルの1次モード等価高さにおける応答とみなす。構造物モデルの復元力特性が非線形の場合には、例えば多自由度モデルに対するプッシュオーバー解析などにより、弾性1次モード等価高さにおける変位とベースシアアに関する復元力特性を計算し、これを1自由度モデルの復元力特性とすることで、構造物の非線形性を考慮した解析を行うことも可能である。任意高さでの応答は、1自由度モデルの応答に、1次モード等価高さでの刺激関数に対する任意高さでの刺激関数の比を乗じて求めることとなる。従って、一般的な1自由度

* 京都大学工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)

** 京都大学工学研究科建築学専攻 大学院生

*** 京都大学工学研究科建築学専攻 助教・博士(工学)

**** 京都大学工学研究科建築学専攻 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto University, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto University
Assist. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto University, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

モデルへの縮約では、高次モードの影響が全く考慮されないこととなる。高層建築物の地震時変位応答においては、上層の一部の層を除き、1次モードが卓越することは経験的な事実としてよく知られているため、このような縮約法でも、ある程度の精度での応答評価は可能である。例えば長周期地震動に対しては、かなりの精度での評価が期待できる⁵⁾。しかしながら、高次モードの影響が顕著な加速度応答や、建物の高次の固有周期と共振するような周期特性を有する地震動に対する応答は、このような一般的な1自由度モデルへの縮約では十分な精度で評価することは困難である。

多自由度モデルに対する自由度の縮約法としてはモーダルアナリシスもよく知られている。上で述べた1自由度系に対する縮約法は、この縮約法で1次モードのみを用いる方法であるといえる。また、厳密なモード分解に基づくのではなく、適当に定めた直交ベクトル系(Ritzベクトル)を用いて、多自由度モデルの自由度を縮約する方法⁶⁾は、一部の汎用構造解析プログラムにも組み込まれている。しかしながら、これらのモード分解(あるいは擬似的モード分解)を用いる方法は、基本的には構造物が線形である場合にその精度がある程度保証されるものであり、非線形構造物に対する適用は困難である。

一方、笠井と岩崎は、間柱や方杖などを介して骨組に組み込まれる各種ダンパーと骨組からなる多自由度1層モデルを、層の変位とダンパーと取付部材の中間に設定された中間節点変位の2自由度からなる1層モデルに縮約する方法を提案している⁷⁾。この方法は高い精度を有しており、かつ多層モデルにも拡張可能であるが、層数×2の解析自由度が必要である。

1.2 本論文の目的と提案する方法の特徴

本論文の目的は、リリーフ機構によりダンパーの抵抗力が速度に関して非線形となる粘性ダンパー(オイルダンパー)を有する建築物が地震動を受ける場合について、時刻歴応答解析における建築物の自由度を層方向に縮約し、簡易かつ高精度に地震時応答を評価することが可能な縮約法を提案することにある。

筆者らは、複雑な非線形復元力特性を有する粘弾性ダンパー付き建築物⁸⁾に対して、時刻歴応答解析における建築物の自由度を層方向に縮約し、簡易かつ高精度に地震時応答ならびに風荷重時応答を評価することが可能な縮約法を提案した^{9),10)}。この縮約法では、ダンパー付き建物モデルを、原モデルと縮約モデルが同じ1次固有円振動数と相似形状の1次固有モードを有するように、任意の自由度を有するモデルに縮約するとともに、地動加速度により建物モデル各層に作用する地震時慣性力、あるいは、建物モデル各層に直接作用する風荷重を、原モデルと縮約モデルの縮約代表自由度における変位の等価性条件が成立するように縮約することで、少ない自由度モデルへの縮約でも、変位応答のみならず加速度応答も高い精度での評価を可能としている。また、応答評価は時刻歴解析によるので、ダンパーが複雑な非線形復元力特性を有していても、その性格を十分に反映させた応答評価が可能である。しかしながら、建物モデルの縮約においては、1次固有円振動数と1次固有モードの等価性条件を用いているため、オイルダンパーに代表されるような付加剛性をほとんど有しない粘性ダンパーを用いる場合には、この方法はそのままでは適用できない。

そこで本論文では、縮約モデルに設置する粘性ダンパー量を決定

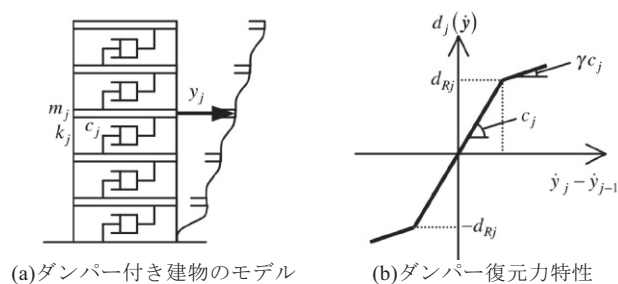


図1 建物モデル(左)と粘性ダンパー復元力特性(右)

するために、1次減衰定数の等価性条件ならびに本論文で「1次消費エネルギーモード」と称する量の等価性条件を導入し、この二つの条件を満足するように、原モデルよりも自由度の少ない縮約モデルの各層に設置するダンパー量を決定する方法を提案する。この方法では、原モデルと縮約モデルとの間で、粘性ダンパーによる消費エネルギー量の層方向の分布が相似形状となるような等価性条件を課すため、粘性ダンパーがある少数の層に集中して配置されているような場合であっても、縮約モデルにそのようなダンパー配置特性を的確に反映させることができるという特徴を有している。

1.3 縮約法の意義と適用範囲

近年では、相当の多自由度モデルの非線形時刻歴応答解析であっても、パーソナルコンピュータ上で短時間のうちに実行することも可能となっている。しかしながら、ダンパー配置やダンパー容量が制振効果に与える影響をパラメトリックな解析を通じて明らかにしたり、ダンパーや建物骨組の最適設計のための有限差分感度解析を実行するためには、極めて多数回の時刻歴応答解析を実施しなければならない。このような用途に対しては、実用上十分な精度を有し、かつ、計算負荷を格段に縮小できる本縮約法は有用であるといえる。

本論文では、主構造を弾性せん断型質点系とする場合について、主構造とリリーフ機構付き粘性ダンパーの縮約法の手順とその精度を示す。著者らはこれまでに、超高層建築における全体曲げ変形を考慮できる曲げせん断型質点系¹¹⁾、偏心によるねじれ応答を考慮できる立体せん断型質点系¹²⁾についても、本論文と同様の手順により、主構造の縮約が可能であり、またその精度も実用上十分なものであることを示している。これらのモデルにリリーフ機構付き粘性ダンパーを設置した場合についても、本論文で示すものと同様の精度が期待できる。

2. 地震動を受ける粘性ダンパー付き建物の縮約法

2.1 地震動を受ける粘性ダンパー付き建物のモデル化

提案する手法の基本的な考え方を示すため、主構造は弾性せん断質点系にモデル化し、リリーフ機構付き粘性ダンパーは、パイリニア型の速度—抵抗力関係を有する粘性要素にモデル化する。また、せん断質点系と粘性ダンパーは剛な部材により接続されているものとする。すなわち、せん断質点系に生じる層間速度と、ダンパーへの入力速度は一致するものとする。粘性ダンパーと主構造物を接続する部材(ダンパー支持部材)の剛性は、ダンパーによる付加減衰性能に大きな影響を与えることが知られている¹³⁾。この影響を評価するには、ダンパーとダンパー支持部材を、ダッシュポットとバネを直列に接続した Maxwell 要素によりモデル化すればよい。また、簡易的には、層間変位に対するダンパー変位の比(実効率)を仮定

し、この実効率に応じてダンパー減衰係数を減じることでも、この影響を考慮することは可能である。また、ある与えられた振動数下で Maxwell 要素と等価な力学特性を有する等価 Voigt 要素¹⁴⁾を導入して、ダンパー支持部材剛性の影響を評価する方法もよく知られている。

本論文で取り扱う建物モデルを図 1(a)に示す。第 j 層質量を m_j 、第 j 層剛性を k_j 、第 j 層の地表面に対する相対変位を y_j で表す。構造減衰は、粘性ダンパーを設置しない場合の 1 次固有円振動数 $\omega^{(1)}$ を規準振動数とする剛性比例型減衰とし、構造減衰による 1 次減衰定数を h_s で表す。

建物モデルの第 j 層に設置する粘性ダンパーの粘性減衰係数を c_j 、リリーフ荷重を d_{Rj} とし、リリーフ後の粘性減衰係数を γc_j で表す。この粘性ダンパーの速度—抵抗力関係を図 1(b)に示す。

上記の粘性ダンパーを各層間に有する建物モデルに、強制地動加速度 $\ddot{u}_g$ が作用した時の運動方程式は以下のように書ける。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}_s\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{D}(\dot{\mathbf{y}}) + \mathbf{K}\mathbf{y} = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}_s$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{y}$ 、 $\mathbf{r}$ はそれぞれ、質量行列、構造減衰行列、剛性行列、変位ベクトル、影響係数ベクトルを表し、 $\mathbf{D}(\dot{\mathbf{y}})$ はダンパーによる減衰力を表す。本論文で取り扱う平面せん断モデルにおいては、 $\mathbf{r}$ は各成分が 1 のベクトルとなる。

$\mathbf{D}(\dot{\mathbf{y}})$ の第 j 要素 $D_j(\dot{\mathbf{y}})$ は、第 j 層の質点において、第 j 層に設置されたダンパーによる減衰力 $d_j(\dot{\mathbf{y}})$ から第 $j+1$ 層に設置されたダンパーによる減衰力 $d_{j+1}(\dot{\mathbf{y}})$ を引いたものであり ($D_j(\dot{\mathbf{y}}) = d_{j+1}(\dot{\mathbf{y}}) - d_j(\dot{\mathbf{y}})$)、 $d_j(\dot{\mathbf{y}})$ は以下のように表される。

$$d_j(\dot{\mathbf{y}}) = \begin{cases} (1-\gamma)d_{Rj} + \gamma c_j(\dot{y}_j - \dot{y}_{j-1}) & ; d_{Rj} \leq d_j(\dot{\mathbf{y}}) \\ c_j(\dot{y}_j - \dot{y}_{j-1}) & ; -d_{Rj} \leq d_j(\dot{\mathbf{y}}) \leq d_{Rj} \\ -(1-\gamma)d_{Rj} + \gamma c_j(\dot{y}_j - \dot{y}_{j-1}) & ; d_j(\dot{\mathbf{y}}) \leq -d_{Rj} \end{cases} \quad (2)$$

リリーフ荷重到達後の勾配比 γ は全層で同一としている。ダンパー減衰力 $d_j(\dot{\mathbf{y}})$ がリリーフ荷重 d_{Rj} に達していない場合には、 $\mathbf{D}(\dot{\mathbf{y}})$ は以下の形式で書くことができる。

$$\mathbf{D}(\dot{\mathbf{y}}) = \mathbf{C}_d\dot{\mathbf{y}} \quad (3)$$

ここで $\mathbf{C}_d$ は、リリーフ荷重に達していない場合のダンパー減衰係数 c_j から構成される付加減衰行列である。

構造減衰行列 $\mathbf{C}_s$ は、構造減衰による 1 次減衰定数 h_s 、粘性ダンパーを設置しない場合の 1 次固有円振動数 $\omega^{(1)}$ 、および剛性行列 $\mathbf{K}$ を用いて以下のように表される。

$$\mathbf{C}_s = \frac{2h_s}{\omega^{(1)}} \mathbf{K} \quad (4)$$

2.2 主構造の縮約

鈴木らは、逆問題型定式化に基づき、多自由度モデルを層方向の少自由度モデルに縮約する方法を提案している^{9),10)}。本論文でも、主構造についてはその縮約方法を用いる。ここでは縮約過程の明快な提示のため、図 2 のような 4 層せん断型構造物モデルを 2 層モデルに縮約する場合を示す。($\bar{\cdot}$) は縮約モデルに関する量を表す。原モデルおよび縮約モデルの層数を一般的に表す場合には、それぞれ

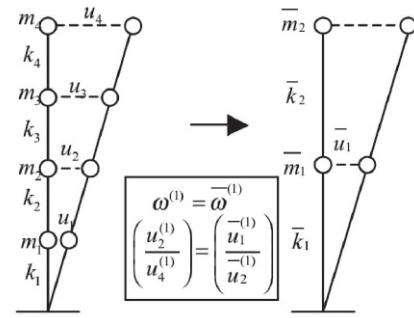


図 2 原モデル (左) と縮約モデル (右)

N 層、 $\bar{N}$ 層とする。

主構造の等価性条件は、ダンパーを設置していないときの原モデルと縮約モデルが、同じ 1 次固有円振動数を有することと、原モデルの N 個の層のうち、指定した $\bar{N}$ 個の層 (この各層のことを「縮約代表層」と称する) の 1 次の固有ベクトルの成分からなるベクトル (固有モード) と、縮約モデルの固有モードが相似となることであり、それぞれ次式で表される。

$$\bar{\omega}^{(1)} = \omega^{(1)}, \quad \frac{\bar{u}_2^{(1)}}{\bar{u}_1^{(1)}} = \frac{u_4^{(1)}}{u_2^{(1)}} \quad (5a,b)$$

ここで $u_j^{(1)}$ は原モデルの 1 次固有ベクトルの第 j 成分を表す。縮約モデルの質量 $\bar{m}_j$ は、原モデルの縮約代表層間の質量を、上側の縮約代表層へ単純和したものとする。すなわち、

$$\bar{m}_1 = m_1 + m_2, \quad \bar{m}_2 = m_3 + m_4 \quad (6a,b)$$

逆固有モード問題に対する閉形解表現¹⁵⁾を用いて、主構造縮約モデルの層剛性 $\bar{k}_j$ は以下のように書ける。

$$\bar{k}_j = \bar{\omega}^{(1)2} \frac{\sum_{k=j}^2 \bar{m}_k u_k^{(1)}}{\bar{u}_j^{(1)} - \bar{u}_{j-1}^{(1)}} \quad (j=1,2) \quad (7)$$

2.3 縮約モデルに設置する粘性ダンパー諸元の決定

次に、ダンパーの縮約法について述べる。粘性ダンパーを建物に設置すると、一般には非比例減衰系となり、非減衰固有ベクトルでは厳密な意味でのモード分解はできない。固有振動方程式を状態方程式で記述して、それに対する複素固有ベクトルを用いれば、非比例減衰系でも厳密なモード分解が可能であるが¹⁶⁾、本論文では、縮約ダンパー量を決定するための等価性条件を記述するためには、非減衰時の固有円振動数と固有ベクトルを用いることとする。以下では非減衰時の固有円振動数と固有ベクトルをそれぞれ単に固有円振動数、固有ベクトルと呼ぶこととする。

本論文で取り扱うリリーフ機構付き粘性ダンパーの場合、縮約モデルに設置するために決めるべきダンパー諸元は、減衰係数とリリーフ荷重の 2 つの量となる。なお、リリーフ後の勾配比 $\bar{\gamma}$ は、縮約前の値 γ と同じとする。本論文では、縮約モデルに設置するダンパーの減衰係数は、ダンパー減衰力がリリーフ荷重に到達しないものとして決定する。リリーフ荷重の決定方法は 2.3.2 節で述べる。

2.3.1 ダンパーの減衰係数の決定

まず最初に、ダンパー減衰係数の決定方法について述べる。2.2 節と同様に、4 層せん断型構造物モデルを 2 層モデルに縮約する場合を例と

して、ダンパー減衰係数の決定方法を示す。ダンパー設置後の原モデルと縮約モデルの変位が、ともに1次振動成分のみを用いて表されるとする。

$$y_j = \alpha u_j^{(1)} e^{i\omega^{(1)} t}, \quad \bar{y}_j = \bar{\alpha} \bar{u}_j^{(1)} e^{i\bar{\omega}^{(1)} t} \quad (8a,b)$$

ここで、 α と $\bar{\alpha}$ は、振幅を調整するための係数、 i は虚数単位である。変位が上のように表せるとき、原モデルおよび縮約モデルの各層の層間速度の最大値 $|\dot{y}_j|_{\max} = |\dot{y}_j - \dot{y}_{j-1}|_{\max}$ および $|\dot{\bar{y}}_j|_{\max} = |\dot{\bar{y}}_j - \dot{\bar{y}}_{j-1}|_{\max}$ はそれぞれ次のようになる。

$$|\dot{y}_j|_{\max} = \alpha (u_j^{(1)} - u_{j-1}^{(1)}) \omega^{(1)}, \quad |\dot{\bar{y}}_j|_{\max} = \bar{\alpha} (\bar{u}_j^{(1)} - \bar{u}_{j-1}^{(1)}) \bar{\omega}^{(1)} \quad (9a,b)$$

一方、両モデルの各層のダンパーの抵抗力の最大値 p_j および $\bar{p}_j$ は、ダンパーがリリーフ荷重に達するまではそれぞれ次のようになる。

$$p_j = \alpha c_j \omega^{(1)} (u_j^{(1)} - u_{j-1}^{(1)}), \quad \bar{p}_j = \bar{\alpha} \bar{c}_j \bar{\omega}^{(1)} (\bar{u}_j^{(1)} - \bar{u}_{j-1}^{(1)}) \quad (10a,b)$$

従って、両モデルの各層のダンパーが描く履歴ループの面積 S_j および $\bar{S}_j$ はそれぞれ次のようになる。

$$S_j = \alpha^2 \pi c_j \omega^{(1)} (u_j^{(1)} - u_{j-1}^{(1)})^2, \quad \bar{S}_j = \bar{\alpha}^2 \pi \bar{c}_j \bar{\omega}^{(1)} (\bar{u}_j^{(1)} - \bar{u}_{j-1}^{(1)})^2 \quad (11a,b)$$

$S = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}^T$ および $\bar{S} = \{\bar{S}_1, \bar{S}_2\}^T$ のことを「1次消費エネルギーモード」と定義する。さらに、次のような関係を1次消費エネルギーモードの等価性と呼ぶことにする。

$$\bar{S}_1 = S_1 + S_2, \quad \bar{S}_2 = S_3 + S_4 \quad (12a,b)$$

式(11a,b)と式(12a,b)より、縮約モデルのダンパー減衰係数 $\bar{c}_j$ は次のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{c}_1 &= \left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} \right)^2 \frac{c_1 u_1^{(1)2} + c_2 (u_2^{(1)} - u_1^{(1)})^2}{\bar{u}_1^{(1)2}} \\ \bar{c}_2 &= \left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} \right)^2 \frac{c_3 (u_3^{(1)} - u_2^{(1)})^2 + c_4 (u_4^{(1)} - u_3^{(1)})^2}{(\bar{u}_2^{(1)} - \bar{u}_1^{(1)})^2} \end{aligned} \quad (13a,b)$$

式(13a,b)には未定係数 $\alpha/\bar{\alpha}$ が含まれている。これを決定するために、原モデルおよび縮約モデルに対して、非連成近似（非減衰固有ベクトルで近似的にモード分解ができるとする近似）を適用して評価した原モデルの1次付加減衰定数 $h^{(1)}$ および縮約モデルの1次付加減衰定数 $\bar{h}^{(1)}$ に関する以下の等価性条件式を用いる。

$$h^{(1)} = \bar{h}^{(1)} \quad (14)$$

ここで、 $h^{(1)}$ と $\bar{h}^{(1)}$ はそれぞれ以下の式で求められる。

$$h^{(1)} = \frac{\mathbf{u}^{(1)T} \mathbf{C}_d \mathbf{u}^{(1)}}{2\omega^{(1)} \mathbf{u}^{(1)T} \mathbf{M} \mathbf{u}^{(1)}}, \quad \bar{h}^{(1)} = \frac{\bar{\mathbf{u}}^{(1)T} \bar{\mathbf{C}}_d \bar{\mathbf{u}}^{(1)}}{2\bar{\omega}^{(1)} \bar{\mathbf{u}}^{(1)T} \bar{\mathbf{M}} \bar{\mathbf{u}}^{(1)}} \quad (15a,b)$$

(15b)式の $\bar{\mathbf{C}}_d$ は $\bar{c}_j$ から構成される減衰行列を表す。式(13a,b)において $\alpha/\bar{\alpha} = 1$ としたときの減衰係数 $\bar{c}_j$ を $\bar{c}_j$ とし、 $\bar{c}_j$ を $\bar{c}_j$ のかわりに式(15b)に代入して得られる $\bar{h}^{(1)}$ を $\bar{h}^{(1)}$ で表す。このとき $\bar{h}^{(1)} = (\alpha/\bar{\alpha})^2 \bar{h}^{(1)}$ であるから、式(14)も考慮して $\alpha/\bar{\alpha}$ について解くと、

$$\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} = \sqrt{\frac{\bar{h}^{(1)}}{h^{(1)}}} = \sqrt{\frac{\bar{h}^{(1)}}{\bar{h}^{(1)}}} \quad (16)$$

を得る。例えば、 $m_j = m$, $u_j^{(1)} = j$, $c_j = c$ の原モデル ($k_1 = 10\omega^{(1)2} m$,

$k_2 = 9\omega^{(1)2} m$, $k_3 = 7\omega^{(1)2} m$, $k_4 = 4\omega^{(1)2} m$) について上記の縮約を適用すると、 $\bar{m}_1 = \bar{m}_2 = 2m$, $\bar{u}_2^{(1)}/\bar{u}_1^{(1)} = u_4^{(1)}/u_2^{(1)} = 2$, $\bar{k}_1 = 6\omega^{(1)2} m$, $\bar{k}_2 = 4\omega^{(1)2} m$, $\alpha/\bar{\alpha} = 1/\sqrt{3}$, $\bar{c}_1 = \bar{c}_2 = 2(\alpha/\bar{\alpha})^2 c = (2/3)c$ となる。

2.3.2 縮約モデルにおけるリリーフ荷重の決定

原モデルとその縮約モデルがともに1次振動成分のみで振動し、全てのダンパーの抵抗力の最大値がちょうどリリーフ荷重に達していると仮定する。このとき、両モデルで

$$d_{Rj} = \alpha c_j (u_j^{(1)} - u_{j-1}^{(1)}) \omega^{(1)}, \quad \bar{d}_{Rj} = \bar{\alpha} \bar{c}_j (\bar{u}_j^{(1)} - \bar{u}_{j-1}^{(1)}) \bar{\omega}^{(1)} \quad (17)$$

が成り立つ。ここで、 $\bar{d}_{Rj}$ は縮約モデルの第 j 層に設置されるダンパーのリリーフ荷重を表す。このときのダンパーが描く履歴ループの面積は、両モデルでそれぞれ

$$S_j = \alpha d_{Rj} \pi (u_j^{(1)} - u_{j-1}^{(1)}), \quad \bar{S}_j = \bar{\alpha} \bar{d}_{Rj} \pi (\bar{u}_j^{(1)} - \bar{u}_{j-1}^{(1)}) \quad (18)$$

となる。1次消費エネルギーモードの等価性条件式に式(18)を代入すれば、 $\bar{d}_{Rj}$ を原モデルおよび縮約モデルに関する既知量を用いて表すことができる。4層から2層へ縮約する場合の1次消費エネルギーモードの等価性条件式(12)に式(18)を代入すると、以下を得る。

$$\begin{aligned} \bar{d}_{R1} &= \frac{\alpha}{\bar{\alpha}} \frac{d_{R1} u_1^{(1)} + d_{R2} (u_2^{(1)} - u_1^{(1)})}{\bar{u}_1^{(1)}} \\ \bar{d}_{R2} &= \frac{\alpha}{\bar{\alpha}} \frac{d_{R3} (u_3^{(1)} - u_2^{(1)}) + d_{R4} (u_4^{(1)} - u_3^{(1)})}{\bar{u}_2^{(1)} - \bar{u}_1^{(1)}} \end{aligned} \quad (19a,b)$$

なお、原モデルにおいてダンパーが存在しない層 ($c_j = 0$) については、ダンパーのリリーフ荷重もゼロとする。

2.4 最大層間変位分布の推定

高層建築物の構造安全性の検討では、層間変位の最大値が主たる応答量の一つとなる。ところが、本論文で提案する縮約モデルにおいては、原モデルの縮約代表層に相当する層の応答、および、その層間の相対応答しか計算することができない。そこで、原モデルの縮約代表層間の相対変位に相当する縮約モデルでの層間変位分布から、原モデルの層間変位分布を推定する方法を以下に示す。

縮約モデルの第 j 層の最大層間変位を $\bar{\delta}_{j\max}$ とする。縮約モデルの第 j 質点位置が原モデルの第 i 質点位置に、第 $j-1$ 質点位置が原モデルの第 i_{j-1} 質点位置に対応しているとする。ダンパー無し原モデルの第 i_j 質点から第 i_{j-1} 質点間の層間変位分布と、ダンパー有り原モデルの第 i_j 質点から第 i_{j-1} 質点間の層間変位分布が相似であると仮定し、以下の式から原モデルの第 i 層の最大層間変位 $\delta_{i\max}$ を推定することとする。

$$\delta_{i\max} = \frac{\delta_{i\max}^o}{\sum_{l=i_{j-1}}^{i_j} \delta_{l\max}^o} \bar{\delta}_{j\max} \quad (20)$$

$\delta_{i\max}^o$ は、ダンパー無し原モデルの第 i 層の最大層間変位を表す。

3. 縮約地震時慣性力

国分らは、縮約モデルの自由度に合わせて地震時慣性力も縮約する方法を提案している^{10),17)}。縮約モデルの自由度が1ないし2のように、自由度が極端に小さいモデルへの縮約の場合に、地震時慣性

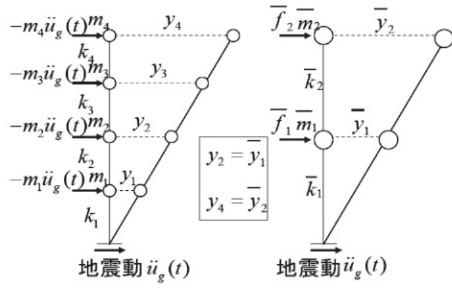


図3 原モデルの地震時慣性力(左)と縮約地震時慣性力(右)

力の縮約を組み合わせることで顕著な精度の向上がみられるため、本論文でもその縮約方法を用いる。

3.1 地震時慣性力の定義

建物モデルに地震動 $\ddot{u}_g$ が入力されたときの原モデルの運動方程式は式(1)で表される。式(1)の右辺の第 j 成分 $-m_j\ddot{u}_g$ を原モデルの第 j 層に作用する「地震時慣性力」と定義する。本論文で扱う時刻歴応答解析では、この地震時慣性力が各層に作用する外力となる。

3.2 地震時慣性力の縮約法

地震時慣性力の縮約においては、主体構造の復元力のみで抵抗するモデルを考え、このモデルを復元力抵抗モデルと称する。多自由度モデルを縮約する際、復元力抵抗モデルを用いた変位の等価性条件により地震時慣性力を縮約する。縮約された地震時慣性力を縮約地震時慣性力と表記する。

2.2 節と同様に、図3に示すような4層モデルを2層モデルに縮約する例を示す。原モデルの第 j 層に、地震時慣性力 $-m_j\ddot{u}_g$ を静的に（注：ここでいう「静的」とは、運動方程式(1)における慣性力の一部の項 $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}$ および減衰力の項 $\mathbf{C}_s\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{D}(\dot{\mathbf{y}})$ を無視し、抵抗力の項 $\mathbf{K}\mathbf{y}$ と地震時慣性力の項 $-\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g$ のみの釣り合いを考えると意味である）作用させた時の原モデルの各層の水平変位ベクトルを $\mathbf{y}^*$ とする。このとき、縮約モデルの第 i 層に作用する縮約地震時慣性力を $\bar{f}_i$ とし、縮約モデルの第 i 層に $\bar{f}_i$ を静的に作用させた時の縮約モデルの各層の水平変位ベクトルを $\bar{\mathbf{y}}^*$ とする。図3の両モデルにおける力の釣り合い式は次式で表わされる。

$$-\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g = \mathbf{K}\mathbf{y}^*, \quad \bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{K}}\bar{\mathbf{y}}^* \quad (21a,b)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{K}}$ は縮約モデルの剛性行列である。本論文では主構造物は弾性範囲にあるとしているので、 $\mathbf{K}$ 、 $\bar{\mathbf{K}}$ は一定である。

原モデルの縮約代表位置における水平変位と、それに対応する縮約モデルの水平変位が等しいという条件より縮約地震時慣性力を導く。図3のモデルの場合、変位の等価性条件は次式となる。

$$y_2^* = \bar{y}_1^*, \quad y_4^* = \bar{y}_2^* \quad (22a,b)$$

式(21a,b)と式(22a,b)より、縮約地震時慣性力は次式となる。

$$\bar{f}_1 = -\left\{ \frac{\bar{k}_1}{k_1}(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) + \frac{\bar{k}_1}{k_2}(m_2 + m_3 + m_4) - \frac{\bar{k}_2}{k_3}(m_3 + m_4) - \frac{\bar{k}_2}{k_4}m_4 \right\} \ddot{u}_g \quad (23a)$$

$$\bar{f}_2 = -\left\{ \frac{\bar{k}_2}{k_3}(m_3 + m_4) + \frac{\bar{k}_2}{k_4}m_4 \right\} \ddot{u}_g \quad (23b)$$

表1 原モデルと縮約モデルの層剛性と1次固有ベクトル

原モデル					1層縮約モデル				
Model-U		Model-R			Model-U		Model-R		
層	k_i [kN/m]	$u_i^{(1)}$	k_i [kN/m]	$u_i^{(1)}$	層	k_i [kN/m]	$\bar{u}_i^{(1)}$	k_i [kN/m]	$\bar{u}_i^{(1)}$
20	19.74×10^4	1.000	44.00×10^4	1.000	1	19.74×10^4	1.000	10.44×10^4	1.000
19	38.49×10^4	0.950	47.00×10^4	0.989	2層縮約モデル				
18	56.26×10^4	0.900	51.00×10^4	0.970					
17	73.04×10^4	0.850	54.00×10^4	0.943					
16	88.83×10^4	0.800	56.00×10^4	0.909					
15	103.6×10^4	0.750	60.00×10^4	0.870					
14	117.5×10^4	0.700	63.00×10^4	0.826					
13	130.3×10^4	0.650	66.00×10^4	0.778					
12	142.1×10^4	0.600	73.00×10^4	0.726	4層縮約モデル				
11	153.0×10^4	0.550	74.00×10^4	0.675					
10	162.9×10^4	0.500	77.00×10^4	0.621					
9	171.7×10^4	0.450	78.00×10^4	0.564					
8	179.6×10^4	0.400	80.00×10^4	0.503					
7	186.5×10^4	0.350	81.50×10^4	0.441					
6	192.5×10^4	0.300	83.00×10^4	0.376					
5	197.4×10^4	0.250	85.00×10^4	0.310					
4	201.3×10^4	0.200	90.00×10^4	0.244					
3	204.4×10^4	0.150	100.0×10^4	0.179					
2	206.3×10^4	0.100	100.0×10^4	0.120					
1	207.3×10^4	0.050	100.0×10^4	0.060					

上記の縮約は、一般的なせん断質点系に対しては以下のように書ける。縮約変換行列として、 T_{ij} を第 i 行 j 列成分とする $\bar{N}$ 行 N 列の行列 $\mathbf{T}$ を定義する。 N 層せん断質点系からなる原モデルの第 j 層変位と、 $\bar{N}$ 層せん断質点系からなる縮約モデルに対する縮約モデルの第 i 層変位が対応するとき $T_{ij} = 1$ とし、対応する自由度がない場合には $T_{ij} = 0$ とする。例えば、上で例に用いた4層から2層への縮約のケースでは、次のようになる。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

縮約変換行列 $\mathbf{T}$ を用いると変位等価性条件は次のように表される。

$$\bar{\mathbf{y}}^* = \mathbf{T}\mathbf{y}^* \quad (25)$$

式(21a,b)と式(25)より、縮約地震時慣性力 $\bar{\mathbf{f}}$ は次式で表される。

$$\bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{K}}\mathbf{T}\mathbf{y}^* = -\bar{\mathbf{K}}\mathbf{T}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g \quad (26)$$

主構造が弾性範囲内である場合には、式(26)右辺における行列 $\bar{\mathbf{K}}\mathbf{T}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r}$ は時刻に関わらず同じ行列となる。従って、原モデルに対する入力地動加速度 $\ddot{u}_g$ と、原モデルと縮約モデルの自由度の対応関係が用意されていれば、縮約地震時慣性力 $\bar{\mathbf{f}}$ は時刻歴応答解析に先立ち予め計算しておくことができる。縮約地震時慣性力 $\bar{\mathbf{f}}$ が計算されれば、以下の運動方程式を解いて、縮約モデルの地震時応答 $\bar{\mathbf{y}}$ を評価する。

$$\bar{\mathbf{M}}\ddot{\bar{\mathbf{y}}} + \bar{\mathbf{C}}_s\dot{\bar{\mathbf{y}}} + \bar{\mathbf{D}}(\dot{\bar{\mathbf{y}}}) + \bar{\mathbf{K}}\bar{\mathbf{y}} = \bar{\mathbf{f}} \quad (27)$$

4. 数値例題

4.1 建物モデルと入力地震動

本数値例題では、以下に示す2種類の20層建物を、原モデルのためのせん断質点系モデルとする。

(a)Model-U: 1次固有ベクトルが逆三角形となるように層剛性分布を決定したもの。1次固有振動のみを考えた場合には、各層に

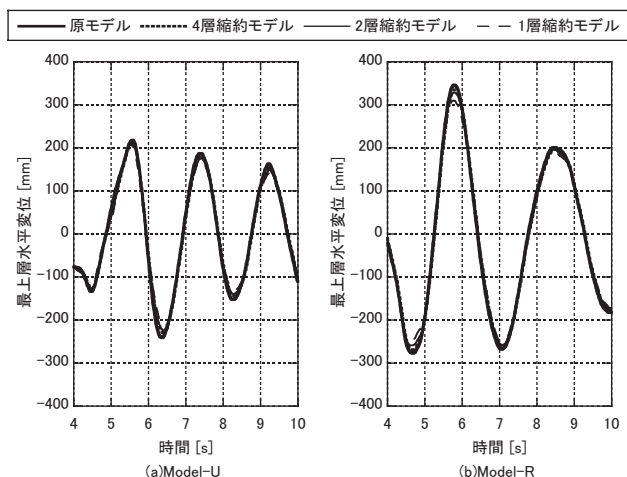


図4 最上層変位（剛性比例型のダンパー配置， $h^{(1)}=5\%$ ）

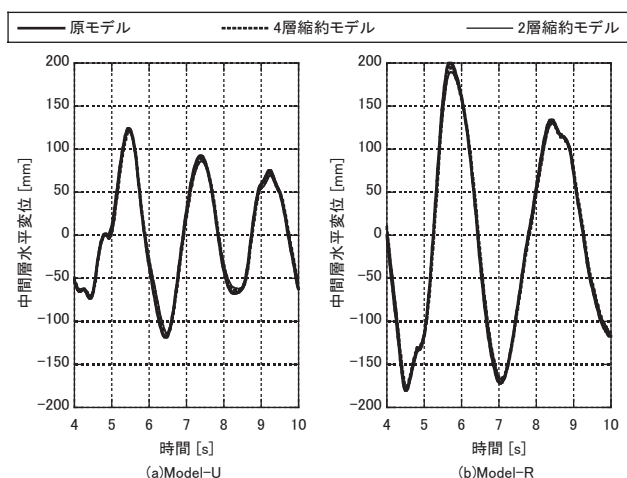


図5 中間層変位（剛性比例型のダンパー配置， $h^{(1)}=5\%$ ）

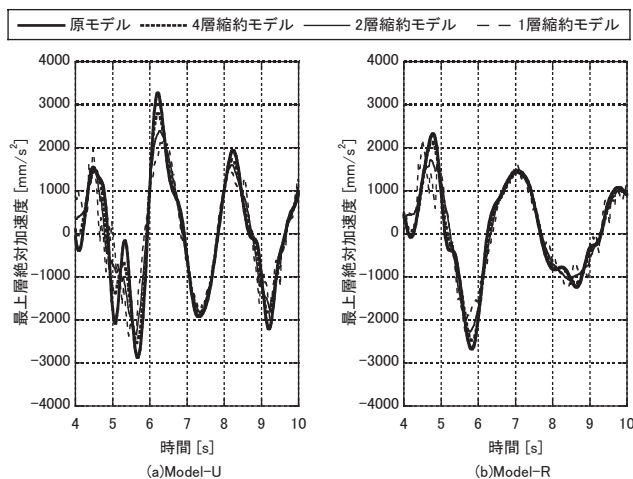


図6 最上層絶対加速度（剛性比例型のダンパー配置， $h^{(1)}=5\%$ ）

生じる層間変位は全層で同じ値になる。これを高層建物の標準モデルとして取り上げる。床質量は各層 $1,000 \times 10^3 \text{ kg}$ とし、1次固有周期は2.0sとする。

(b)Model-R：実在する建物を参考に層剛性分布を決定したもの。高層建物の現実的なモデルの一例として取り上げる。床質量は1層～10層は各層 $1,000 \times 10^3 \text{ kg}$ 、11層～20層は各層 $800 \times 10^3 \text{ kg}$ とする。1次固有周期は2.61sである。

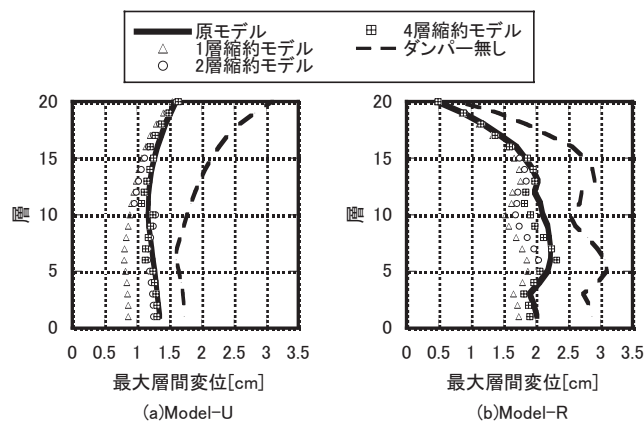


図7 最大層間変位分布（剛性比例型のダンパー配置， $h^{(1)}=5\%$ ）

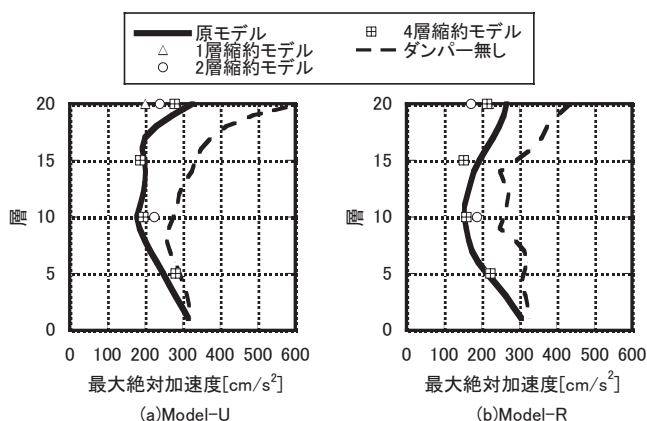


図8 最大絶対加速度分布（剛性比例型のダンパー配置， $h^{(1)}=5\%$ ）

両モデルの層剛性と、非減衰時の1次固有ベクトルの成分 $u_j^{(1)}$ を表1に示す。ただし $u_j^{(1)}$ は最上層での値が1となるように正規化している。なお、両モデルとも、ダンパーがない場合の構造減衰は、1次減衰定数が2%となる剛性比例型減衰とした。

縮約モデルは、1層モデル、2層モデル、4層モデルの3種類を設定した。1層縮約モデルでは原モデルの第20層を、2層縮約モデルでは原モデルの第10層と第20層を、4層縮約モデルでは原モデルの第5層、第10層、第15層、第20層を、それぞれ縮約代表層とした。それぞれの建物モデルに対する縮約モデルの層剛性と、非減衰時の1次固有ベクトルの成分 $\bar{u}_j^{(1)}$ を表1に示す。ただし $\bar{u}_j^{(1)}$ は最上層での値が1となるように正規化している。

縮約の精度は、記録地震波に対する時刻歴応答解析で検証した。本論文では、特に断らない限り、El Centro 1940 NS波の原波（地動最大加速度 341.7 cm/s^2 ，継続時間 53.74s）に対する結果を示す。

4.2 剛性比例型減衰となるようなダンパー配置とした場合

本論文で提案する縮約法では、非減衰固有ベクトルを用いて構造物やダンパーの等価性条件を定義している。非比例減衰の影響が強く出るようなダンパー配置の場合、非減衰固有ベクトルと減衰を考慮した固有ベクトル（複素ベクトル）の差が大きくなるため、等価性条件そのものが厳密には成立せず、原モデルと縮約モデルの差が、等価性条件が厳密に成立していないことによるものなのか、縮約を行ったことによるものなのか区別できない。そこで本節では、剛性分布に比例するように粘性ダンパーの減衰係数分布を与えて、厳密に固有モードの等価性条件が成り立つモデルについて、本論文で

提案する縮約法の精度を示す。

4.1 節で示した両建物モデルに対して、ダンパーにより付加される 1 次減衰定数 $h^{(1)}$ が 5% となるように、各層のダンパー減衰係数を決定した。尚、4.1～4.3 節では、リリーフ機構を設定しないものとする。この両モデルについて、原モデルおよび縮約モデルの、最上層の変位の時刻歴を図 4 に、中間層（原モデルでは第 10 層、2 層縮約モデルでは第 1 層、4 層縮約モデルでは第 2 層）の変位の時刻歴を図 5 に、最上層の絶対加速度の時刻歴を図 6 に示す。尚、図示の範囲は、最大応答となる時間を含む、地震入力開始後から 4s～10s とした。また図 7 には、両建物モデルについて、原モデルの最大層間変位分布と、2.4 節で示した方法により縮約モデルの最大層間変位分布から推定した最大層間変位分布を示す。さらに図 8 には、両建物モデルについて、原モデルおよび縮約モデルの最大絶対加速度分布を示す。ただし、縮約モデルの絶対加速度は、原モデルの縮約代表層の位置にあわせて表示している。

図 4 より、最上層の水平変位の時刻歴については、Model-U、Model-R とともに、1 層縮約モデルでも良好な精度で原モデルの時刻歴を表現できていることがわかる。また、図 5 より、中間層の水平変位の時刻歴についても、同様の傾向があるといえる。

図 6 より、最上層の絶対加速度の時刻歴については、原モデルにみられる高次振動成分が、特に少自由度の縮約モデルでは表現できていないものの、加速度の時間的变化の特徴は 1 層縮約モデルでも良好に表現できていることがわかる。

図 7 より、最大層間変位分布については、1 層縮約モデルを用いた場合には、高次モードの影響による上層と下層における最大層間変位の（1 次モードのみを考慮した場合からの）増幅効果を考慮することができないため、原モデルで評価した最大層間変位分布と 1 層縮約モデルから推定した最大層間変位分布との間には有意な差が生じているが、2 層または 4 層縮約モデルを用いた場合には、両者の差は小さくなり、高次モードが最大層間変位分布に与える影響を考慮できるようになることがわかる。

図 8 より、最大加速度分布については、4 層縮約モデルにおいても、上層部では原モデルとの間に有意な差がみられ、2 層縮約モデルにおいては、最大加速度の層方向分布の傾向が原モデルとは明らかに異なっている。しかしながら、4 層縮約モデルでは、最大加速度分布の層方向分布の傾向をよく表現できている。

尚、ダンパーによる付加減衰定数 $h^{(1)}$ が 10% となる場合についても、原モデルと縮約モデルの時刻歴応答の差の傾向は、本節で結果を示した $h^{(1)}$ が 5% の場合と同様であった。

4.3 非比例減衰となるようなダンパー配置とした場合

高層建築では、層間変形に占める全体曲げ変形成分の割合が、特に上層部で無視できない大きさになるため、上層部でダンパーの効率が低下することが知られている。このため、実際の粘性ダンパー付き建物では、上層部にはダンパーを配置せず、下層部のみにダンパーを配置する場合も多い。また、一般には、ダンパーの減衰係数やリリーフ荷重は各層での微調整は行わず、複数層でまとめて同一のダンパーとすることが多い。そこで本節では、層剛性分布に比例しないダンパー減衰係数分布を与えた現実的なダンパー配置の場合について、本論文で提案する縮約法の精度を示す。

本節では、Model-R の建物モデルに対し、次の 3 種類のダンパー

表 2 両モデルにおけるダンパー減衰係数と付加減衰定数

		ダンパー減衰係数[kNs/m]			減衰定数(複素固有値解析)[%]			
	層	D・U	D・LW	D・UP	次	D・U	D・LW	D・UP
1層縮約	1	4340	4340	4340	1	7.0	7.0	7.0
2層縮約	2	5910	0	19900	1	7.0	7.0	6.5
	1	5200	7410	0	2	18.5	9.2	41.6
4層縮約	4	9540	0	32100	1	7.0	7.0	6.5
	3	8300	0	27900	2	20.0	10.7	45.6
	2	8280	11780	0	3	31.0	34.4	15.2
	1	8280	11780	0	4	38.4	12.7	過減衰
原モデル		11～20層	11～20層	11～20層	1	7.0	7.0	6.4
		33400	0	112000	2	21.0	11.0	48.1
		1～10層	1～10層	1～10層	3	35.3	23.5	27.2
		33400	47500	0	4	48.5	29.8	22.3

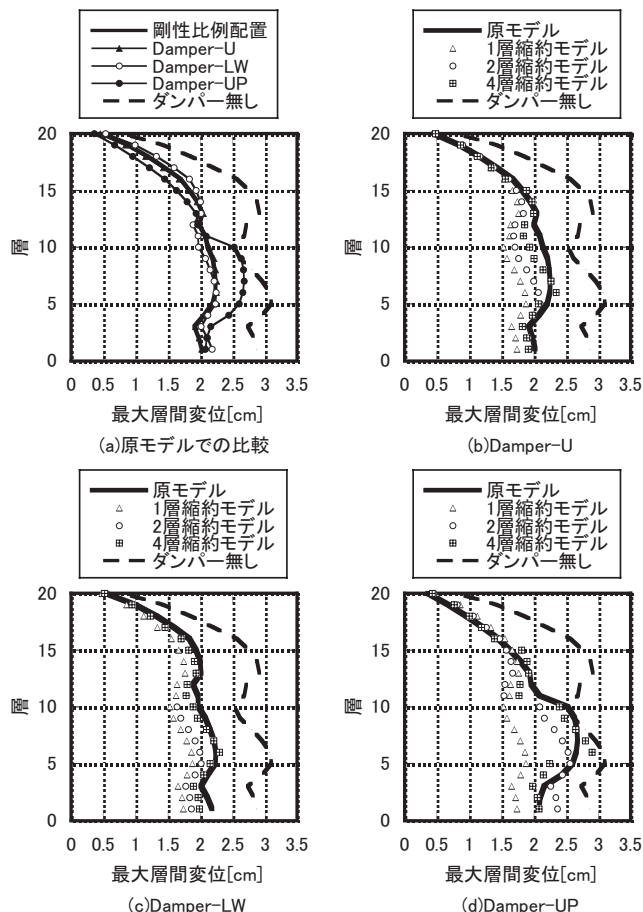


図 9 Model-R の最大層間変位分布（縮約モデルは推定値）

配置を与えた場合の結果を示す。

Damper-U：ダンパー減衰係数は全層で同一

Damper-LW：第 1 層～第 10 層に同一減衰係数のダンパーを設置し、第 11～20 層にはダンパーを設置しない

Damper-UP：第 11 層～第 20 層に同一減衰係数のダンパーを設置し、第 1～10 層にはダンパーを設置しない

各ケースとも、原モデルにダンパーを配置したときの非連成近似により評価した 1 次減衰定数が 7%（ダンパーにより付加される 1 次減衰定数 $h^{(1)}$ が 5%）となるようにダンパー減衰係数を設定した。

原モデル及び縮約モデルにおけるダンパー減衰係数を表 2 に示す。原モデルでは、ダンパー減衰係数は各層で同じ値であったのに対し、縮約モデルにおいては、ダンパー量の決定に 1 次モードの形状が影

響を与えるため、各層で必ずしも同じ値とはなっていない。

複素固有値解析で評価した減衰定数 $\tilde{h}^{(r)}$ を表 2 に示す。なお、非連成近似で評価した 1 次モードの減衰定数は、原モデル、縮約モデルとも、すべてのモデルで 7.0% となっている。1 層縮約モデルは、原モデルのダンパー配置に関わらず、すべて同じダンパー減衰係数となるため、複素固有値解析で評価した減衰定数もすべて同じとなっている。原モデルにおいて、1 次モードの減衰定数 $\tilde{h}^{(1)}$ と高次(r 次)モードの減衰定数 $\tilde{h}^{(r)}$ の関係は、ダンパーの配置により異なっている。また、Damper-UP では、 $\tilde{h}^{(1)}$ は 6.5% であり、非連成近似で評価した 1 次モードの減衰定数の値 (7.0%) から有意な差が生じている。2 層縮約モデルおよび 4 層縮約モデルでは、各ダンパー配置とも、 $\tilde{h}^{(1)}$ と $\tilde{h}^{(2)}$ は原モデルでの値を良好な精度で評価できていることがわかる。このことから、本論文で提案する粘性ダンパーの縮約法は、縮約モデルを 2 自由度モデル以上とした場合には、原モデルにおけるダンパーの不均等配置からくる減衰特性を、縮約モデルに対して的確に反映させることができるといえる。

図 9 には、各ダンパー配置について、原モデルの最大層間変位分布と、縮約モデルの最大層間変位分布から 2.4 節で示した方法により推定した最大層間変位分布を示す。

図 9 (a) より、非連成近似で評価された 1 次減衰定数が同じであっても、ダンパー減衰係数分布の違いにより層間変位分布には有意な差がみられることがわかる。このことは同時に、ダンパーなしの場合とダンパーありの場合の層間変位分布は、必ずしも相似的であるとはいえないことを意味している。ただし本例では、Damper-U と Damper-LW での層間変位分布の差は顕著ではなく、また、ダンパーなしの場合の層間変位分布との相似性は高い。

図 9 (b)-(d) より、いずれのダンパー配置においても、1 層縮約モデルおよび 2 層縮約モデルの最大層間変位分布から式(20)を用いて推定された原モデルの最大層間変位分布は、原モデルを用いて直接的に計算された層間変位分布を明らかに過小に評価していることが分かる。特に、Damper-UP では両分布の差が大きい。従って、Damper-UP のようにダンパー配置が極端に特定層に集中している場合には、1 層縮約モデルないし 2 層縮約モデルでは層間変位分布を十分な精度で推定することは困難であるといえる。一方、4 層縮約モデルを用いた場合には、いずれのダンパー配置の場合にも、原モデルにおける層間変位分布の特徴を、定量的、定性的によくとらえた層間変位分布の推定が行えていることがわかる。従って、縮約モデルの自由度と代表層の選択を適切に行えば、縮約モデルでも原モデルの層間変位分布を十分な精度で推定することが可能であるといえる。

4.4 リリーフ機構付きダンパーを用いた場合

4.3 節で示した数値例題 (Model-R) に対して、ダンパーのリリーフ荷重を設定した場合の結果を示す。ダンパーのリリーフ荷重 d_{Rj} は、ダンパーを設置している層については全層で同じ値とした。本節では、丹羽の研究³⁾にならい、リリーフ荷重の大きさを「減衰力制限比 L = リリーフ荷重 / リリーフ機構を設けない場合にダンパーに発生する最大減衰力」で表現することとし、ダンパー設置層の最下層のダンパーにおける減衰力制限比 L が、0.50、0.25、0.125 の 3 ケースを設定した。また、リリーフ荷重到達後の勾配比 γ は全てのケースで 0.1 とした。各ダンパー配置および縮約自由度に対するリリーフ荷重を表 3 に示す。なお、実務構造設計では、減衰力制限比

表 3 原モデルと縮約モデルにおけるダンパーリリーフ荷重

	ダンパーリリーフ荷重[kN] (減衰力制限比 0.50)		
	Damper-U	Damper-LW	Damper-UP
原モデル	1500	2800	3900
1 層縮約モデル	2304	2672	2272
2 層縮約モデル	1868	3492	4868
4 層縮約モデル	1668	3112	4340

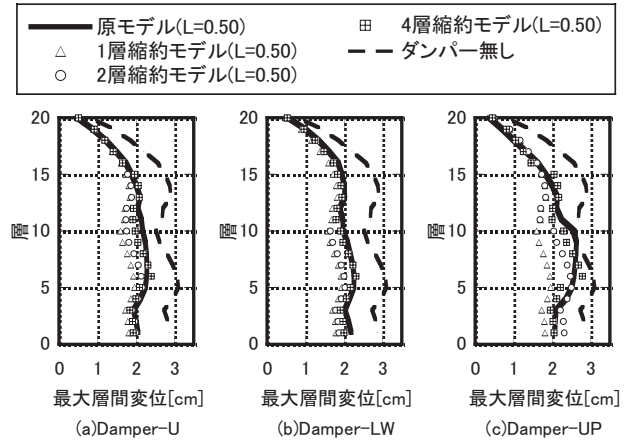


図 10 最大層間変位分布 (減衰力制限比=0.50)

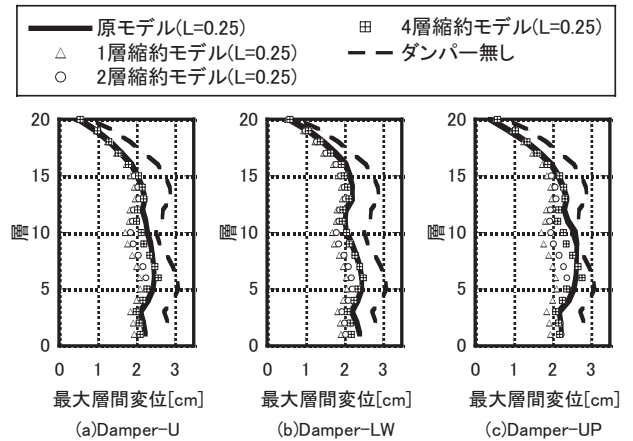


図 11 最大層間変位分布 (減衰力制限比=0.25)

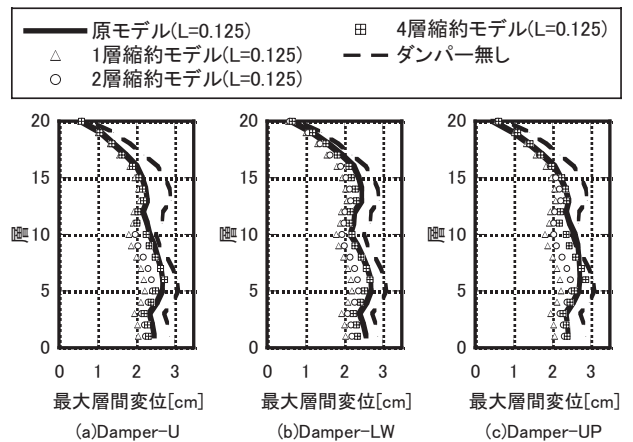


図 12 最大層間変位分布 (減衰力制限比=0.125)

L は 0.5 程度以上の値を用いることが一般的である。

縮約モデルに対するリリーフ荷重は、2.3.2 節に示した方法で算出

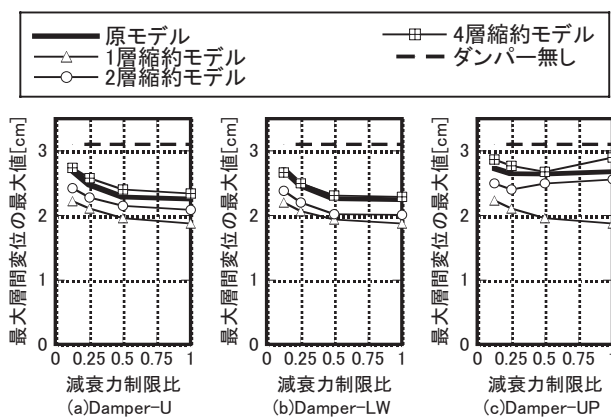


図 13 最大層間変位の層方向の最大値と減衰力制限比の関係

した。減衰力制限比 L が 0.50 の場合について、原モデルおよび各縮約モデルに対するリリーフ荷重を表 3 に示す。ただし、リリーフ荷重はダンパーが存在する層での値のみを示している。 $L=0.25$ および $L=0.125$ の場合については、リリーフ荷重を $L=0.50$ の場合の 0.5 倍、0.25 倍とすればよい。

図 10 から図 12 に、各減衰力制限比の場合についての、原モデルの最大層間変位分布と、4 層縮約モデルの最大層間変位分布から式 (20) を用いて推定した原モデルの最大層間変位分布の比較を示す。参考のため、各図には、原モデルでのダンパーなしの場合の最大層間変位分布をあわせて示す。また、図 13 には、最大層間変位の最大値と減衰力制限比の関係を示す。

図より、以下のことが観察される。

- いずれのダンパー配置の場合においても、減衰力制限比 L を小さくするにつれて、原モデルでの最大層間変位の最大値は大きくなる (図 13)。ただし、 $L=0.5$ とした場合 (図 10) には、 $L=1.0$ とした場合 (図 9) との違いは殆ど見られない。また、 $L=0.125$ とした場合 (図 12) には、 $L=1.0$ とした場合と明らかに有意な差が見られるが、ダンパーなしの場合に比べると最大層間変位は低減されており、ダンパーによる応答低減効果は保持されている。
- 前節までに示したリリーフ機構なしの場合と同様、1 層縮約モデルおよび 2 層縮約モデルから推定した最大層間変位分布は、原モデルの最大層間変位分布を明らかに過小評価している。一方、4 層縮約モデルでは、 $L=0.125$ の場合でも、減衰力を大幅に制限したことによる応答低減効果の減少を、良好な精度で評価できている。
- ダンパーを全層に一樣に配置した場合 (Damper-U) とダンパーを下半分層に一樣に配置した場合 (Damper-LW) については、いずれの縮約モデルにおいても、減衰力制限比 L が最大層間変位の最大値に対して与える影響は、良好に予測できているといえる (図 13)。

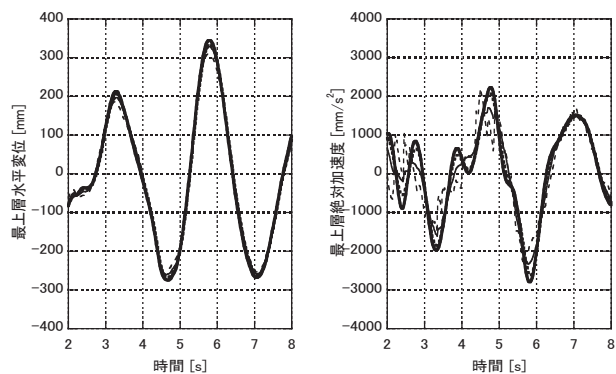
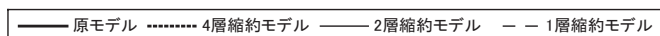
尚、本節では El Centro 1940 NS 波に対する解析結果のみを示したが、他の記録地震波についても、上記と同様の観察が得られた (Appendix 参照)。以上のことから、本論文で提案する、リリーフ機構付き粘性ダンパーが組み込まれた構造物に対する縮約法は、減衰力制限比が実務構造設計で設定される範囲を大きく下回るような場合についても、十分な精度で原モデルの最大層間変位分布を推定することが可能であるといえる。

5. 結論

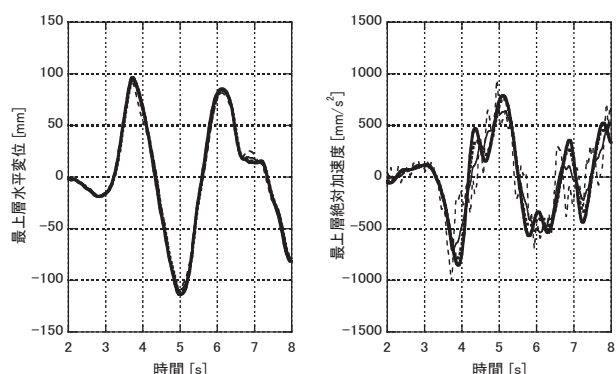
本論文では、リリーフ機構を有し、抵抗力と速度の関係が線形ではない粘性ダンパーが組み込まれた建築物が地震動を受ける場合について、時刻歴応答解析における建築物の自由度を層方向に縮約し、簡易かつ高精度に地震時応答を評価することが可能な縮約法を提案した。本論文の成果は以下の通りである。

- 1) リリーフ機構によりバイリニア型速度—抵抗力関係を示す粘性ダンパーが各層間に設置された多層せん断質点系モデル (原モデル) に対して、構造物モデルを層方向に縮約する方法を提案した。具体的には、逆問題型定式化に基づき主構造を 1 次固有周期及び 1 次固有モードの等価性条件により縮約⁹⁾し、1 次消費エネルギーモードの等価性条件及び非連成近似のもとで評価した 1 次減衰定数の等価性条件により粘性ダンパーを縮約する方法を提案した。また、変位の等価性条件に基づく縮約地震時慣性力^{10),17)}を導入して、一層の高精度化をはかった。さらに、縮約代表層間の最大層間変位分布がダンパー無し原モデルの最大層間変位成分に比例するという仮定に基づき、縮約モデルの最大層間変位分布から原モデルの最大層間変位分布を推定する方法を提案した。
- 2) 1 次固有モードが逆三角形となる層剛性分布と、実在する建物を参考に設定した現実的な層剛性分布を有する建物モデルに、粘性ダンパー (リリーフ機構なし) の減衰係数を層剛性に比例するように設置した場合と層剛性に比例しないように配置した場合のそれぞれについて、1) で提案した縮約法を用いて時刻歴応答解析を行った。その結果、縮約代表層の水平変位応答については、原モデルの挙動を縮約モデルで精度よく表現できることを示した。また、最大層間変位分布については、1 層縮約モデルおよび 2 層縮約モデルの最大層間変位分布から推定した層間変位分布は、原モデルの最大層間変位分布を過小評価するものの、4 層縮約モデルでは良好な精度で推定できることを示した。縮約代表層の加速度応答については、特にダンパーを上層に配置しない場合には、高次モードの影響により精度が低下する場合がみられた。
- 3) 原モデルにおいて各ダンパーが丁度リリーフ荷重に到達するような振動が生じていると仮定した場合に、対応する縮約モデルにおいても各ダンパーが丁度リリーフ荷重に到達するという等価性条件のもとで縮約モデルのリリーフ荷重を決定することにより、減衰力制限比 (リリーフ荷重/リリーフ機構を設けない場合にダンパーに発生する最大減衰力) が 0.125 といった極端にリリーフ荷重が小さいモデルについても、十分な精度で地震時最大層間変位分布を推定することが可能であることを示した。

本論文で提案した地震動を受ける粘性ダンパー付き建物に対する縮約法は、十分な精度を保ちながら、時刻歴応答解析における自由度を大幅に減少させることが可能であるので、リリーフ機構付き粘性ダンパーのように非線形復元力特性を有するダンパー付き建物に対しては特に有効である。また、本提案手法は、新しく開発されたダンパーや複数のダンパーを直列・並列に組み合わせる用いた場合の制震・制振特性の把握、および、有限差分感度解析と組み合わせたダンパー最適配置設計^{11),17)}にも利用できる。

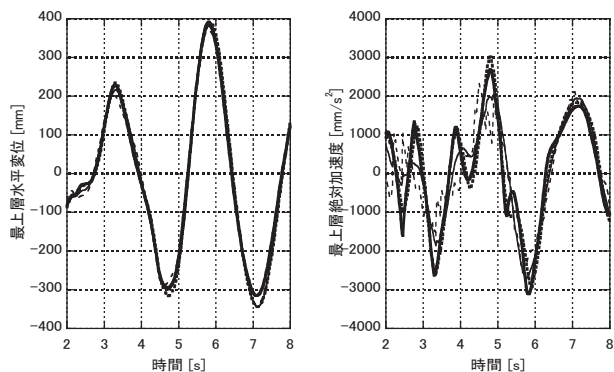


(a) El Centro 1940 NS 原波に対する時刻歴応答波形

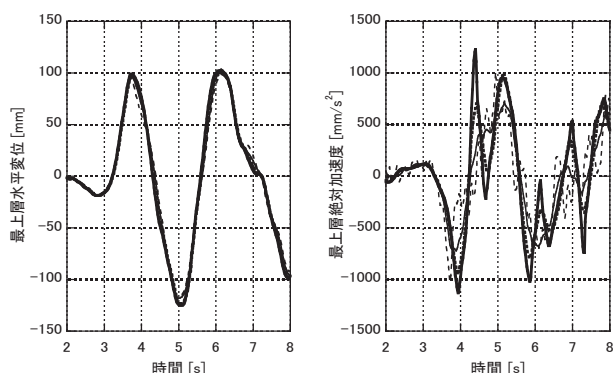


(b) Taft 1952 EW 原波に対する時刻歴応答波形

図 14 一様ダンパー配置，リリース機構なし， $h^{(1)}=5\%$



(a) El Centro 1940 NS 原波に対する時刻歴応答波形



(b) Taft 1952 EW 原波に対する時刻歴応答波形

図 15 一様ダンパー配置，減衰力制限比=0.125， $h^{(1)}=5\%$

Appendix 時刻歴応答波形の比較

El Centro 1940 NS 波および Taft 1952 EW 波の原波をそれぞれ入力地震動とした場合、原モデルと縮約モデルの時刻歴応答波形の比較を示す。解析対象とした原モデルは、4.1 節で示した Model-R である。このモデルについて、ダンパーによる付加減衰定数が 5% となるように全層で同一の減衰係数からなるダンパーを設置し、両地震波の原波をそれぞれ入力地震動とした場合、原モデルおよび縮約モデルの最上層変位および最上層絶対加速度の時刻歴応答波形の比較を図 14 および図 15 に示す。図 14 はリリース機構なし、図 15 は減衰力制限比が 0.125 の場合の結果を示している。

図より、原モデルと縮約モデルの時刻歴応答波形の関係については、リリース機構の有無に関わらず、地震波による顕著な違いはみられないことがわかる。

参考文献

- 1) T. Igusa, A. Der Kiureghian, and J. L. Sackman : Modal Decomposition Method for Stationary Response of Non-Classically Damped Systems, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, **12**, pp.121-136, 1984.
- 2) J. N. Yang, S. Sarkani, and F. X. Long : A Response Spectrum Approach for Seismic Analysis of Nonclassically Damped Structures, *Engng. Struct.*, **12**, pp.173-184, 1990.
- 3) 丹羽直幹：構造物に設置されたオイルダンパーの必要減衰力に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.545，pp.43-50，2001.7.
- 4) 柴田明徳：最新耐震構造解析，森北出版.
- 5) 中川佳久：構造設計における力学現象のモデル化，上部構造のモデル化と応答，2005 年度日本建築学会大会 PD「建築構造設計者のための理」資料，pp.37-42，2005.
- 6) E. L. Wilson, M. W. Yuan, and J. M. Dickens : Dynamic Analysis by Direct Superposition of Ritz Vectors, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, **10**, pp.813-513, 1982.
- 7) 笠井和彦，岩崎啓介：様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平バネ系への変換法，日本建築学会構造系論文集，No.605，pp.37-46，2006.7.
- 8) 谷翼，辻聖晃，吉富信太，竹脇出，松本達治：高硬度ゴム粘弾性体の極微小変形から大変形までのひずみ・振動数依存性のモデル化 高硬度ゴム粘弾性体の力学モデルの構築 その 1，日本建築学会構造系論文集，No.629，pp.1079-1086，2008.7.
- 9) 鈴木ちひろ，辻聖晃，吉富信太，竹脇出：風外力を受ける超高層建築物の逆問題定式化に基づく時刻歴解析用縮約外力と縮約構造モデル，日本建築学会構造系論文集，No.640，pp.1073-1081，2009.6.
- 10) 国分宏樹，吉富信太，辻聖晃，竹脇出：高硬度ゴムダンパーを付加した建物の逆問題型手法に基づく構造モデルと地震時慣性力の縮約法，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），B-1 分冊，pp.359-360，2009.9.
- 11) 市橋直樹，吉富新太，辻聖晃，竹脇出：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，日本建築学会近畿支部研究報告集，第 51 号，2011.6.（印刷中）
- 12) F. Adachi, S. Yoshitomi, M. Tsuji, and I. Takewaki : Enhanced Reduced Model for Elastic Earthquake Response Analysis of a Class of Mono-Symmetric Shear Building Structures with Constant Eccentricity, *Soil Dynamics and Earthquake Engng.*, 2011. (Online published, April 8, 2011)
- 13) N. Niwa, T. Kobori, M. Takahashi, T. Hatada, H. Kurino, and J. Tagami : Passive Seismic Response Controlled High-Rise Building with High Damping Device, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, **24**, pp.655-671, 1995.
- 14) 曾田五月也，和田純一，平田裕一，山中久幸：繰返加力実験に基づく粘弾性ダンパーの力学モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，No.457，pp.29-36，1994.3.
- 15) T. Nakamura and T. Yamane : Optimum Design and Earthquake-Response Constrained Design of Elastic Shear Buildings, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, **14**, pp.797-815, 1986.9.
- 16) K. A. Foss : Coordinates which Uncouples the Equations of Motion of Damped Linear Dynamic Systems, *J. Appl. Mech.*, ASME, **25**, pp.361-364, 1958.
- 17) 辻聖晃，国分宏樹，吉富信太，竹脇出：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，日本建築学会構造系論文集，No.658，pp.2143-2152，2010.12.

(2011年2月10日原稿受理，2011年4月5日採用決定)