

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

REDUCED LOAD AND STRUCTURE MODELS VIA INVERSE FORMULATION FOR
TIME-HISTORY WIND RESPONSE ANALYSIS OF HIGH-RISE BUILDINGS鈴木 ちひろ^{*1}, 辻 聖晃^{*2}, 吉富信太^{*3}, 竹脇 出^{*4}

Chihiro SUZUKI, Masaaki TSUJI, Shinta YOSHITOMI

and Izuru TAKEWAKI

A set of reduced models of structures and wind loads is proposed for a high-rise building under time-dependent wind loading. A reduced structural model is constructed first based on an inverse problem formulation in terms of fundamental eigenfrequency and eigenmode. Then a reduced model of time-dependent wind loads is proposed by requiring the equivalence of displacements at representative nodes in the frame model and the reduced model without inertial and damping terms. These reduced models are applied to both the bare frame and the frame with high hardness rubber dampers. The validity of the proposed reduced models is investigated by the comparison with the results by the time-history analysis for an original full model.

Keywords: Super high-rise building, Time-history wind response, Reduced structural model, Reduced load model, Inverse problem formulation, Structural control

超高層建物, 時刻歴風応答, 縮約構造モデル, 縮約外力モデル, 逆問題型定式化, 制振構造

1. 序

建築物の超高層化に伴い, 風荷重は地震荷重とともに重要な設計用外力となりつつある。地震動とは異なり, 風荷重による振動は長時間継続するため, 居住性・使用性の観点からの対策が必要となる。その対策の一つとして, 粘性・粘弾性・弾塑性ダンパーなどの種々のエネルギー吸収要素や TMD を設置することが考えられる¹⁻⁶⁾。建築物の風荷重に対する現行の設計では, 制振装置の有無に関係なく, 静的な荷重に対する使用性や安全性の検討がなされるのが一般的である。しかしながら, 居住性⁷⁾などの検討においては, 風荷重に対する時刻歴応答解析が望まれている。制振装置を組み込んだ建築物の風荷重に対する時刻歴応答の検討は, そのようなモデルに対する風洞実験の困難さ等から実験的に行う事は難しく^{8,9)}, 実験が可能であるとしてもパラメトリックな検討は極めて困難である。従って, 計算機の容量や時間的制約などの困難さを克服した精度の高い数値解析法の開発が求められている。

これらの困難を克服する方法として, 多自由度モデルの自由度を縮小し, 風応答を簡易的に求めるためのモデルを用いることが考えられる¹⁰⁻¹²⁾。多自由度モデルを 1 自由度に置換する方法として, モーダルアナリシスにおいて 1 次モード成分のみに着目する方法があり, 実務構造設計でも一般的に使用されている。地震時応答に関し

て, このようなモーダル 1 自由度縮約を超高層建物に適用すると, 高次モードの影響により精度面での問題が生じるが(例えば 13)), 長周期地震動などに対しては 1 次モード成分が卓越するため高精度の結果が得られる¹⁴⁾。風応答の特性に関して, 丸川らは多質点弾性模型とロッキング模型の風応答をスペクトルモーダル解析による応答と比較して, 建物密度, 構造減衰および振動数比が風応答に与える影響について検討している¹¹⁾。佐藤らは, 粘弾性ダンパーを設置した 1 自由度の制振構造の風応答特性を, 異なる振動数依存性を有する分数微分を用いた時刻歴応答解析により明らかにしている¹⁵⁾。その際に, パワースペクトル密度と高さ方向の位相・相関を考慮して風力時刻歴を作成し詳細な風応答特性の検討を行っている。

自由度の縮約に関する研究には他に次のようなものがある。笠井・岩崎は, 1 層骨組架構に各種のダンパーを組み込んだ場合に, ダンパー取付部材の剛性も考慮可能なせん断質点系に縮約する方法を示した¹⁶⁾。ここでは, ダンパー及び架構からなる制振構造を骨組の静的解析を用いて 2 自由度に縮約する方法を示している。しかしながら, その縮約は層内部の自由度を縮約する方法であり, 層方向の縮約に注目する本研究のものとは異なる。また, N 自由度系の動的解析において, 固有ベクトルを $L(<N)$ 個の直交ベクトル系 (Ritz ベクトル) の線形結合で近似表現し, 運動方程式の次元を N 自由度から L 自

*1 京都大学工学研究科都市環境工学専攻

大学院生

Graduate Student, Dept. of Urban and Environmental Eng., Kyoto Univ.

*2 京都大学工学研究科都市環境工学専攻

准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Urban and Environmental Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

*3 京都大学工学研究科都市環境工学専攻

助教・博士(工学)

Assist. Prof., Dept. of Urban and Environmental Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

*4 京都大学工学研究科都市環境工学専攻

教授・工博

Prof., Dept. of Urban and Environmental Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

自由度に縮約する方法がよく知られており¹⁷⁾、多くの汎用構造解析プログラムに組み込まれている。しかしながら、精度の高い解析を少ない自由度で実現するためには、Ritzベクトルを慎重に選定する必要がある。

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高層建築物が動的な風外力を受ける場合について、多自由度モデルを少自由度のモデルに縮約し、簡易かつ高精度な時刻歴風応答解析が可能な方法を提案することにある。具体的には、逆問題型定式化に基づき、1次固有周期と1次固有モードの等価性条件から構造モデルを縮約し、同時に外力に対する変位の等価性条件から外力を縮約する。本方法の特徴は、指定した位置における変位の等価性条件が成立するように構造物と外力の両者を縮約するため、極めて少ない自由度でも指定した位置における高精度の変位応答評価が可能となることにある。また、加速度についても、変位応答に比べれば精度は劣るものの、居住性能評価のためには十分な精度での応答評価が可能となる。

本論文においては、居住性や使用性に関わる範囲の風応答を対象としてその応答解析法の提案を主たる目的とする。従って、風洞実験による風外力の時刻歴データを用い、風直交方向の応答の変動特性に強い影響を及ぼす建物形状や風速などの要因については取り扱わない。

また、本論文では、制振部材を含まない骨組と含む骨組の両者の縮約法について論じる。非線形復元力特性を有する制振材料の一例として高硬度ゴムを取り上げる。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・振動数依存性が低い。また、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平行四辺形状の復元力ループを描くという特徴を有している^{18),19)}。この高硬度ゴムを、履歴依存性を有する弾塑性要素、振動数依存性を有する弾性要素、速度依存性を有する非線形粘性要素の並列モデルによりモデル化し、せん断質点系にモデル化した多層建物に組み込む。

2. 1次固有振動特性の等価性に基づく縮約構造モデル

2-1 主体構造の縮約

逆問題型定式化に基づき、多自由度モデルを少自由度のモデルに縮約する。本論文では、主体構造はせん断質点系モデルとする。縮約前のモデルを原モデル、縮約後のモデルを縮約構造モデルと表記する。一般層の表記を、原モデルにおいては第 j 層、縮約構造モデルにおいては第 i 層とする。縮約過程の明かな提示のため、図1のような第 j 層の質量 m_j 及び層剛性 k_j が指定された4自由度モデルを2自由度モデルに縮約する過程を示す。 $(\bar{\cdot})$ は、縮約構造モデルに関する量を表す。

本縮約法において、縮約構造モデルの質点位置は、原モデルの特定の質点位置に対応するように設定する。これらの特定の質点位置を原モデルの縮約代表位置と呼ぶ。図1の例では、縮約代表位置として原モデルの第2質点と第4質点を選択している。原モデルの縮約代表位置は等間隔である必要はなく、応答を評価したい任意の質点を選択することができる。

縮約構造モデルの質量は、原モデルの縮約代表位置間の各層の質

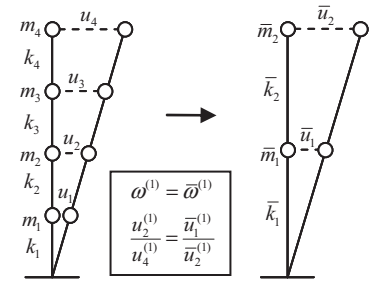


図1 原モデル(左)と縮約構造モデル(右)

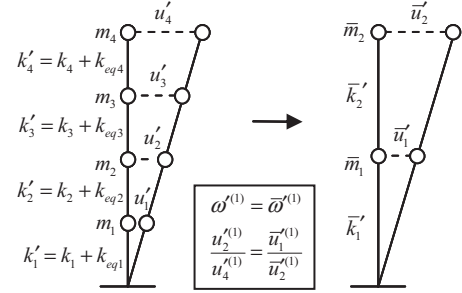


図2 ダンパーを設置した原モデル(左)と縮約構造モデル(右)

量を、上層側の縮約代表位置において単純に加えたものとする。図1の場合、縮約構造モデルの各層質量は $\bar{m}_1 = m_1 + m_2, \bar{m}_2 = m_3 + m_4$ であり、既知量として扱う。

縮約構造モデルの剛性は、それを未知量とした1次固有振動特性の等価性条件を逆問題的に解くことで決定する。図1の場合、未知量である縮約構造モデルの層剛性 $\bar{k}_1, \bar{k}_2$ を、以下の等価性条件に基づき決定する。すなわち、原モデルの1次固有円振動数 $\omega^{(1)}$ と縮約構造モデルの1次固有円振動数 $\bar{\omega}^{(1)}$ が等しく、原モデルの縮約代表位置における1次モード成分比 $u_2^{(1)}/u_4^{(1)}$ と、縮約構造モデルの1次モード成分比 $\bar{u}_1^{(1)}/\bar{u}_2^{(1)}$ が等しくなることをモデルの等価性条件とする。

モデルの等価性条件を数式で表すと次のようになる。

$$\omega^{(1)} = \bar{\omega}^{(1)} \quad (1.a)$$

$$(u_2^{(1)}/u_4^{(1)}) = (\bar{u}_1^{(1)}/\bar{u}_2^{(1)}) \quad (1.b)$$

式(1.a,b)より、縮約構造モデルの層剛性 $\bar{k}_1, \bar{k}_2$ は次のようになる²⁰⁾。

$$\bar{k}_i = \bar{\omega}^{(1)2} \frac{\sum_{k=1}^2 \bar{m}_k \bar{u}_k^{(1)}}{\bar{u}_i^{(1)} - \bar{u}_{i-1}^{(1)}} \quad (i=1, 2) \quad (\bar{u}_0^{(1)} = 0) \quad (2)$$

2-2 主体構造に設置される制振用ダンパーの縮約

本節においては、制振ダンパーが設置された多自由度モデルを縮約する際のダンパーの縮約法について述べる。

本手法では、ひずみ依存性や振動数依存性などの非線形特性を有する粘弾性ダンパーや弾塑性ダンパーを想定する。まず第 j 層のダンパーを、等価剛性 k_{eqj} と等価減衰係数 c_{eqj} を有する線形のダンパーに置換し、次に、等価剛性 k_{eqj} を用いて縮約構造モデルに導入するダンパー量を決定する。前節と同様に、4自由度モデルを2自由度モデルに縮約する過程を示す。

原モデルの主体骨組の剛性 k_j に、ダンパーの等価剛性 k_{eqj} を加えたものを「ダンパー付きの原モデルの剛性」とし、 k_j' と表す。一般には、ダンパー付きの原モデルの1次固有周期は原モデルに比べて短くなるため、ダンパー付きの原モデルの1次固有円振動数 $\omega'^{(1)}$ と1次固有モード $u_j'^{(1)}$ を別途求め、(2)式に代入してダンパー付きの縮約構造モデルの層剛性 $\bar{k}_i'$ を求める。ただし(2)式において $\bar{\omega}^{(1)}$ の代

わりに $\bar{u}^{(1)}$ を, $\bar{u}_1^{(1)}/\bar{u}_2^{(1)}$ の代わりに $\bar{u}_1^{(1)}/\bar{u}_2^{(1)}$ を用いる。

次に, ダンパー付きの縮約構造モデルの第 i 層における剛性 $\bar{k}_i$ と主体骨組の縮約構造モデルの剛性 $\bar{k}_i$ 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 $\bar{k}_{di}$ とする。すなわち, 縮約構造モデルの第 i 層のダンパーの等価剛性 $\bar{k}_{di}$ を次式で求める。

$$\bar{k}_{di} = \bar{k}_i - \bar{k}_i \quad (i=1,2) \quad (3)$$

以上より求めた縮約構造モデルのダンパーの等価剛性 $\bar{k}_{di}$ に対応する量のダンパーを, 縮約構造モデルに導入する。

ここで, ダンパーがひずみ依存性を有する場合, ダンパーの等価剛性を決めるためのダンパーの変形量 $\delta_{\max}$ は, (4)式で表されるとする。

$$\delta_{\max} = \Delta_{\max} = \frac{y_{\max}}{N} \quad (4)$$

$y_{\max}$ は別途解析で求めたダンパーを含まない原モデルの最大頂部変位を表し, N は原モデルの自由度数, $\Delta_{\max}$ は最大層間変位の層方向の平均値である。この値を, 原モデルの全層に適用する。

次に, 縮約構造モデルのダンパーの等価剛性 $\bar{k}_{di}$ に対応するダンパー量を決定する際のダンパーの変形量 $\delta_{\max i}$ は, 次式で表されるものとする。

$$\delta_{\max i} = n_i \delta_{\max} = \frac{n_i y_{\max}}{N} \quad (5)$$

ここで, n_i は, 縮約によって縮約構造モデルの第 i 層に集約される原モデルの層数を表す。図2の場合, 原モデルの2層分を1層に縮約しており, $n_1 = n_2 = 2$ となる。

(4), (5)式は, 変形モードが直線形であると仮定して, 層数 N や n_i に関する比例関係を利用して導いているが, ダンパー設置によって応答レベルが極端に低減する場合や, ダンパー設置後の各層の最大水平変位分布が直線形から大きく外れる場合は, その影響を適切に取り入れる必要がある。また, ダンパーの取り付け部材剛性の影響を直接考慮する場合は, 本節の手法は直接的には適用できないが, 層間変位に対するダンパーの正味の変形量を表す実効率を取り入れることで, 簡易的に取り付け部材剛性の影響を考慮することが可能である(Appendix)。

3. 変位の等価性に基づく外力の縮約法

縮約構造モデルの自由度に合わせて外力も縮約する。外力の縮約においては, 主体構造の復元力のみで外力に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。ここでは, 復元力抵抗モデルを用いた変位の等価性条件により質点外力を縮約する。縮約された外力を縮約外力と表記する。

前節と同様に, 図3の4自由度モデルを2自由度モデルに縮約する過程を示す。原モデルの第 j 層質点に作用する外力 f_j は既知量であり, 縮約外力 $\bar{f}_1, \bar{f}_2$ を未知量とする。

以下の等価性条件により未知量 $\bar{f}_1, \bar{f}_2$ を決定する。すなわち, 復元力抵抗モデルを仮定し, 原モデルの縮約代表位置における変位 y_2, y_4 と, それに対応する縮約構造モデルの変位 $\bar{y}_1, \bar{y}_2$ が等しいことを変位の等価性条件とする。

$$y_2 = \bar{y}_1, \quad y_4 = \bar{y}_2 \quad (6.a,b)$$

式(6.a,b)より, 縮約外力 $\bar{f}_1, \bar{f}_2$ は次のように求められる。

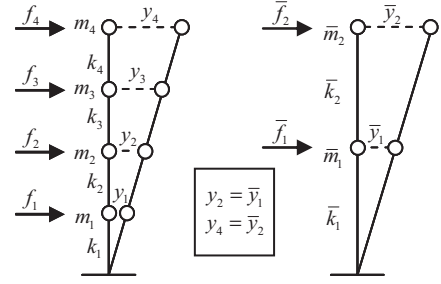


図3 原構造モデル・原外力(左)と縮約構造モデル・縮約外力(右)

$$\bar{f}_1 = \frac{\bar{k}_1}{k_1}(f_1 + f_2 + f_3 + f_4) + \frac{\bar{k}_1}{k_2}(f_2 + f_3 + f_4) - \frac{\bar{k}_2}{k_3}(f_3 + f_4) - \frac{\bar{k}_2}{k_4}f_4 \quad (7.a)$$

$$\bar{f}_2 = \frac{\bar{k}_2}{k_3}(f_3 + f_4) + \frac{\bar{k}_2}{k_4}f_4 \quad (7.b)$$

ここで, M 自由度の原モデルの外力を N 自由度の縮約外力に縮約する一般化した場合を考え, T_{ij} を第 i 行第 j 列成分とする $N \times M$ の縮約変換行列 $\mathbf{T}$ を導入する。原モデルの第 j 層変位と縮約構造モデルの第 i 層変位が対応する場合 $T_{ij} = 1$ とし, 対応する自由度がない場合には $T_{ij} = 0$ とする。図3の場合, $\mathbf{T}$ は次式となる。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$\mathbf{T}$ を用いると変位の等価性条件は次のように表される。

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

ここで, $\mathbf{y}$ は原モデルの変位ベクトル, $\bar{\mathbf{y}}$ は縮約構造モデルの変位ベクトルである。両モデルの力-変位関係を次のように表す。

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}\mathbf{y}, \quad \bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{K}}\bar{\mathbf{y}} \quad (10.a,b)$$

$\mathbf{K}, \bar{\mathbf{K}}$ は, 各々復元力抵抗モデルとしての原モデル及び縮約構造モデルの剛性行列である。式(9), (10.ab)より, 縮約外力 $\bar{\mathbf{f}}$ は次式で表わされる。

$$\bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{K}}\mathbf{T}\mathbf{y} = \bar{\mathbf{K}}\mathbf{T}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{f} \quad (11)$$

4. 数値例題

前節では復元力抵抗モデルを用いた変位の等価性条件から, 静的な外力に対して縮約外力を求める方法を提示した。本節では, 動的な外力においても同様の変位の等価性条件が成り立つと仮定する。動的な外力を作用させる場合には, (11)式の縮約を各時刻において行う。この仮定の精度を検証するために時刻歴応答解析を実施する。尚, 4-1, 4-2 節では, ダンパーを含まないモデルを扱う。また, 4-3, 4-4 節のダンパーを含むモデルでも, (11)式の外力の変換は主体骨組のみの剛性を用いて行う。

4-1 逆三角形1次固有モードの40層せん断質点モデル

1次固有モードが逆三角形分布となる40自由度モデル(以下, Model A)を, 4自由度及び1自由度モデルに縮約し, 両モデルについて時刻歴応答解析を行う。ダンパーを含まない原モデルと縮約構造モデルの固有周期は4[s], 40自由度モデルの質量は $m_1 \sim m_{40} = 1280 \times 10^3 \text{ kg}$ とし, 主体構造の層剛性は1次固有モードが逆三角形分布となるよう決定する。構造減衰は剛性比例型とし, 1次の減衰定数を1%とする。

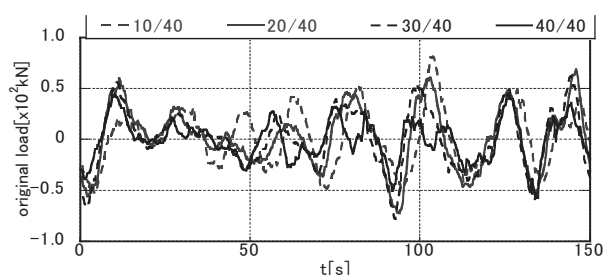
外力は再現期間1年(頂部平均風速23.5[m/s])の風直交方向風外力として風洞実験で得られた風外力の時刻歴を用いる²¹⁾。この外力は, アスペクト比4, 高さ160m, 正方形の平面形状を有する建物の1/500

の模型を用いて、25m 間隔の 6 箇所の高さ相当位置において計測した風圧をもとに算出されたものであり²¹⁾、時刻歴応答解析においては、これら 6 箇所の風外力をそれぞれ 2～10 階、11～17 階、18～24 階、25～30 階、31～35 階、36～40 階に入力する。ただし、2～10 階などでは各階に同一の風力を入力する。風外力のパワースペクトルのピーク振動数は約 0.05[Hz]であり、建物の 1 次固有振動数(0.25[Hz])と比べて 1/5 程度である。4 自由度縮約構造モデルにおいては、10, 20, 30, 40 層を縮約代表位置とし、1 自由度縮約構造モデルにおいては、40 層を縮約代表位置とする。

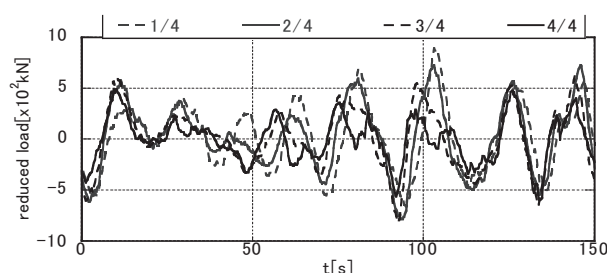
図 4(a),(b),(c)に原モデルの外力及び両縮約構造モデルの縮約外力を示す。図 4 の凡例において、例えば 20/40 とは「40 自由度モデルの第 20 層位置における量」を指している。以下の図でも同様である。4 自由度縮約構造モデルの縮約外力は原モデルの外力のほぼ 10 倍となっている。

本論文で扱う風外力は、長時間継続して作用する定常的な風外力の 150 秒分を取り出したものに相当する。また、風外力に対する応答も定常的な応答を想定して、風外力入力直後 100 秒間の応答は過渡的なものとして扱い、提案手法の検討においては考慮しないものとする。

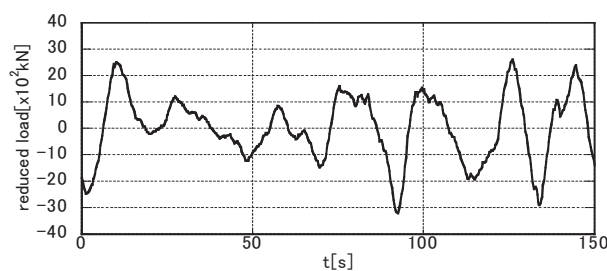
図 5 に原モデルと縮約構造モデルの建物頂部および建物高さの 1/2 の高さの縮約代表位置における変位の比較を示し、図 6 に原モデルと縮約構造モデルの建物頂部および建物高さの 1/2 の高さの縮約代表位置における加速度の比較を示す。上述のように解析を 150 秒間行い、そのうちの 100～150 秒の応答を取り出して比較を行う。



(a) 原モデルの外力(10, 20, 30, 40 層)



(b) 4 自由度縮約外力(1, 2, 3, 4 層)

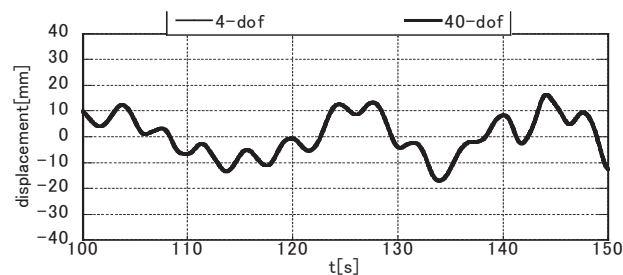


(c) 1 自由度縮約外力

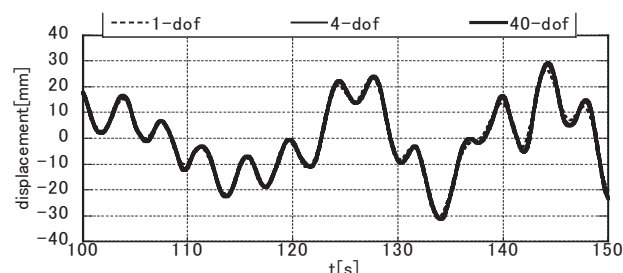
図 4 質点に作用する風外力の時刻歴

Model A において、原モデルと縮約構造モデルの頂部変位は良好に一致している。また、頂部以外の縮約代表位置においても両モデルの変位は良く一致している。ピーク値に注目すると、1 自由度縮約構造モデルより 4 自由度縮約構造モデルの方が精度よく原モデルを表現可能であるといえる。

変位応答ほど精度が良好ではないものの、加速度応答においても原モデルと縮約構造モデルは良好に一致している。構造減衰のないモデルに対して同様の比較を行うと、縮約構造モデルの加速度応答の精度はかなり低下することから、上記のモデルの加速度応答の精度が良好な理由は、構造減衰(剛性比例型)によって原モデルの高次モードが抑えられるためであると考えられる。しかし、特にピーク値では差が見られ、縮約構造モデルの加速度は原モデルよりも小さな値となっている。その傾向は縮約構造モデルの自由度が小さいほど顕著である。

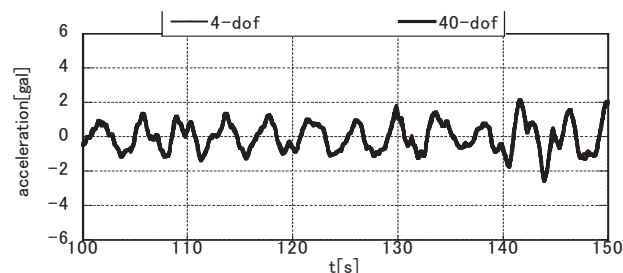


(a) 全高さの 1/2 の高さにおける縮約代表位置(4, 40 自由度モデル)

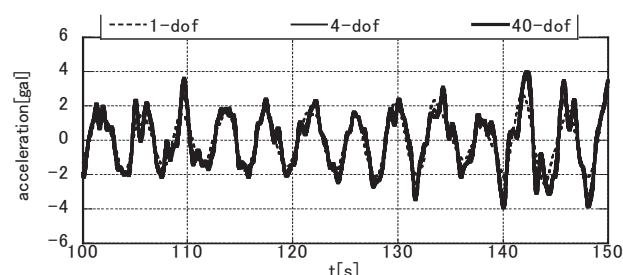


(b) 頂部(1, 4, 40 自由度モデル)

図 5 変位の比較(Model A, 1, 4, 40 自由度モデル)



(a) 全高さの 1/2 の高さにおける縮約代表位置(4, 40 自由度モデル)



(b) 頂部(1, 4, 40 自由度モデル)

図 6 加速度の比較(Model A, 1, 4, 40 自由度モデル)

4-2 現実的な層剛性分布が与えられた 40 層せん断質点モデル

現実的な層剛性分布¹⁹⁾が与えられた 40 自由度モデル(以下, Model B)を, 4 自由度及び 1 自由度モデルに縮約する。原モデルと縮約構造モデルの 1 次固有周期, 質量, 構造減衰定数, 外力は 4-1 節と同様とする。図 7(a),(b)に原モデルと縮約構造モデルの層剛性を示し, 図 7(c),(d)に原モデルと縮約構造モデルの変位の 1 次モードの比較と層間変位の 1 次モードの比較を示す。縮約構造モデルの層剛性が上層で減少せず増加しているのは, 縮約構造モデルの層間変位モード分布が上層で小さくなっているためである。

図 8 に原モデルと縮約構造モデルの建物頂部および建物高さの 1/2 の高さの縮約代表位置における変位の比較, 図 9 に原モデルと縮約構造モデルの建物頂部および建物高さの 1/2 の高さの縮約代表位置における加速度の比較を示す。

Model B においても, 変位応答では両モデルの変位は良好に一致している。加速度応答は, 変位応答に比べて精度は低下するものの, 原モデルと縮約構造モデルで良好に一致している。また, 1 自由度縮約構造モデルより 4 自由度縮約構造モデルの方が精度よく原モデルを表現可能であるといえる。

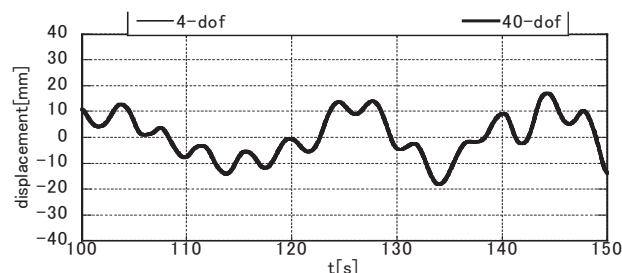
これらの解析より, 現実的な層剛性を有するモデルでも, 本論文で提案する縮約方法は有効であるといえる。

4-3 高硬度ゴムダンパーが設置された 40 層せん断質点モデル

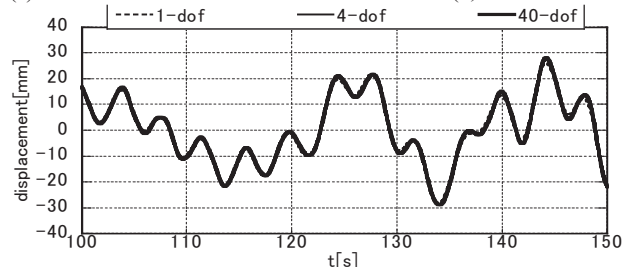
1 次固有モードが逆三角形分布となる 40 自由度モデル(Model A)に文献 18)で取り扱われている高硬度ゴムダンパーを設置する場合を扱う。この高硬度ゴムは, せん断ひずみが 5%程度までの微小変形時には傾斜した楕円状の履歴ループを描き, せん断ひずみが 5%程度以上のときにはバイリニア型の履歴ループを描く, 強いひずみ依存性を有する粘弾性体である。高硬度ゴムを, 履歴依存性を有する弾塑性要素, 振動数依存性を有する弾性要素, 速度依存性を有する

非線形粘性要素を並列配置した力学モデルを用いた復元カーループと, 材料試験結果を図10に示す。

この力学モデルを用いると, 第 j 層の高硬度ダンパーの断面積を S_j [mm²], 厚さを d_j [mm] としたときの各層ダンパーの等価剛性は (12)式で表される²²⁾。

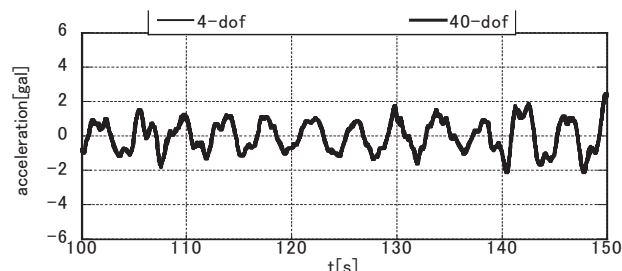


(a) 全高さの 1/2 の高さにおける縮約代表位置(4, 40 自由度モデル)

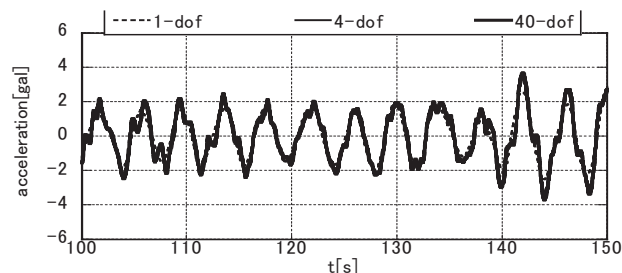


(b) 頂部(1, 4, 40 自由度モデル)

図 8 変位の比較(Model B, 1, 4, 40 自由度モデル)



(a) 全高さの 1/2 の高さにおける縮約代表位置(4, 40 自由度モデル)



(b) 頂部(1, 4, 40 自由度モデル)

図 9 加速度の比較(Model B, 1, 4, 40 自由度モデル)

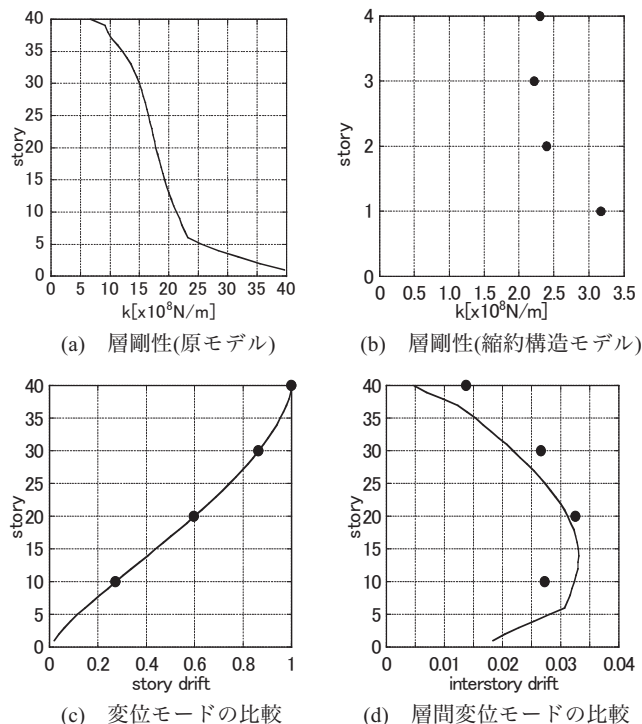


図 7 原モデルと縮約構造モデルの剛性・モードの比較(Model B)

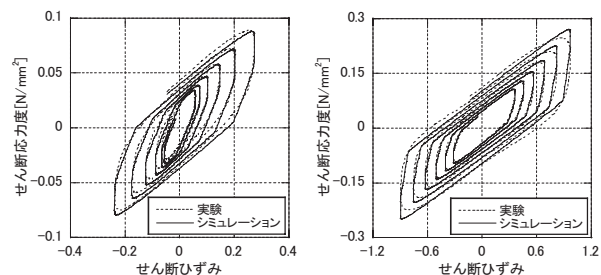


図 10 1Hz の漸減载荷時の履歴ループ¹⁸⁾

$$k_{eqj} = \frac{S_j}{d_j} (0.32\gamma_{\max j}^{-0.62} + 0.10\gamma_{\max j}^{-0.66}) \quad (12)$$

ここで、 $\gamma_{\max j}$ は第 j 層の高硬度ゴムの最大せん断ひずみとする。 $\gamma_{\max j}$ はダンパーの変形量 $\delta_{\max}$ をダンパー厚さ d_j で除したもので、 $\gamma_{\max j} = \delta_{\max} / d_j$ の関係と、(4)式より次式を得る。

$$\gamma_{\max j} = \frac{\delta_{\max}}{d_j} = \frac{y_{\max}}{Nd_j} \quad (13)$$

ダンパー厚さ d_j が全層で共通の場合は、(13)式で与えられるひずみレベル $\gamma_{\max j}$ も全層で共通となる。

高硬度ゴムダンパーが設置された 40 自由度モデルを 4 自由度及び 1 自由度モデルに縮約する。解析プログラムは、文献 18) で提案された構成則を組み込んだ風応答解析用のもの¹⁹⁾を使用する。高硬度ゴムダンパーは制振壁型ダンパーに組み込むことを想定し、制振壁 1 枚あたりの高硬度ゴムの形状は厚さ 15[mm]、面積 0.96[m²]とする。

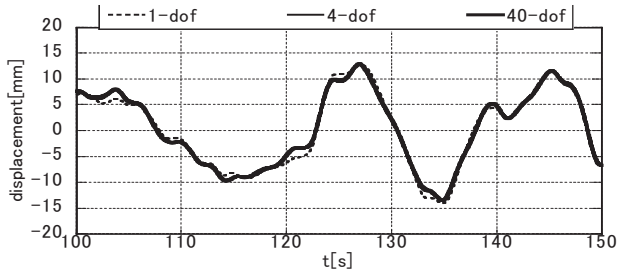


図 11 頂部変位の比較(ダンパー5枚設置)
(Model A, 1, 4, 40 自由度モデル)

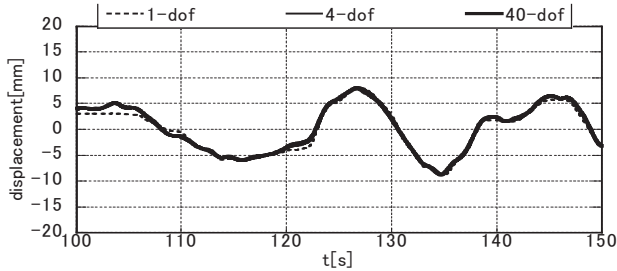


図 12 頂部変位の比較(ダンパー10枚設置)
(Model A, 1, 4, 40 自由度モデル)

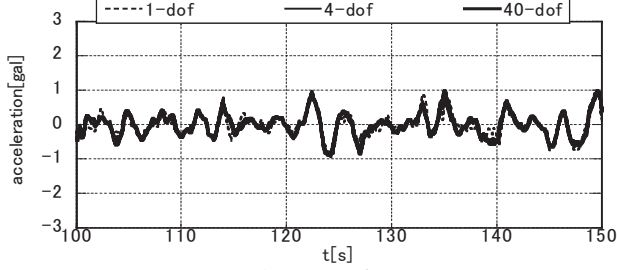


図 13 頂部加速度の比較(ダンパー5枚設置)
(Model A, 1, 4, 40 自由度モデル)

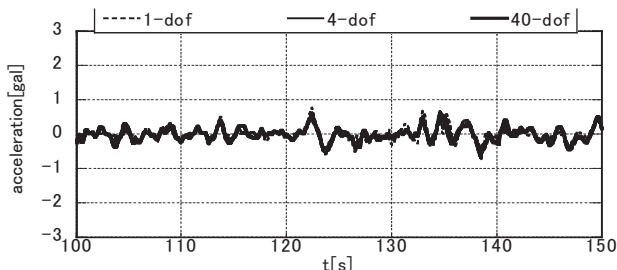


図 14 頂部加速度の比較(ダンパー10枚設置)
(Model A, 1, 4, 40 自由度モデル)

縮約構造モデルの第 i 層に付加されるダンパーの断面積、厚さ及び最大せん断ひずみを $\bar{S}_i$ 、 $\bar{d}_i$ 、 $\bar{\gamma}_{\max i}$ とする。以下に、2-2 節の手法に基づいて、縮約構造モデルに付加すべきダンパーの断面積 $\bar{S}_i$ を求める手順について説明する。まず、(3)式より、縮約構造モデルの第 i 層のダンパーの等価剛性 $\bar{k}_{di}$ を求める。

次に、原モデルの第 j 層と対応する縮約構造モデルの第 i 層においてダンパーの最大せん断ひずみが等しい ($\bar{\gamma}_{\max i} = \gamma_{\max j}$) という仮定と、 $\bar{\gamma}_{\max i} = \bar{\delta}_{\max i} / \bar{d}_i$ の関係及び(5),(13)式より、縮約構造モデルの第 i 層のダンパー厚さに関して次式を得る。

$$\bar{d}_i = \frac{\bar{\delta}_{\max i}}{\bar{\gamma}_{\max i}} = \frac{\bar{\delta}_{\max i}}{\gamma_{\max j}} = \frac{n_i y_{\max}}{N} \cdot \frac{Nd_j}{y_{\max}} = n_i d_j \quad (14)$$

(14)式より、縮約構造モデルの第 i 層のダンパー厚さ $\bar{d}_i$ は、原モデルのダンパー厚さ d_j を、縮約後の第 i 層に集約される原モデルの層数倍したものとなる。以上より得られた $\bar{k}_{di}$ 、 $\bar{\gamma}_{\max i}$ 、 $\bar{d}_i$ を(12)式に代入することにより、断面積 $\bar{S}_i$ が得られる。

図 11, 12 に原モデル(1 層あたりダンパー5, 10 枚)と縮約構造モデルの頂部変位の比較を示し、図 13, 14 に原モデルと縮約構造モデルの頂部加速度の比較を示す。

変位応答ではピーク値に若干の差が見られるが、原モデルと縮約構造モデルの頂部変位は良好に一致している。また、1 自由度縮約構造モデルより 4 自由度縮約構造モデルの方が精度よく原モデルの応答を表現可能であるといえる。加速度応答では、1 自由度及び 4 自由度縮約構造モデルともに原モデルの加速度と良好に一致している。また、ダンパーが無い場合に比べ、頂部加速度の両モデルの差が小さい。これは、構造減衰に加えてダンパーにより高次モードの影響が一層抑えられるためであると考えられる。

4-4 高硬度ゴムダンパーが設置された現実的な層剛性分布を有する 40 層せん断質点モデル

現実的な剛性分布を有する 4-2 節のモデル (Model B) にダンパーを設置した場合を扱う。図 15, 16 に原モデル(1 層あたりダンパー5, 10 枚)と縮約構造モデルの頂部変位の比較を示し、図 17, 18 に原モデルと縮約構造モデルの頂部加速度の比較を示す。

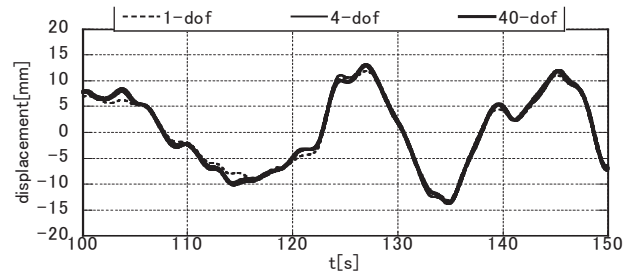


図 15 頂部変位の比較(ダンパー5枚設置)
(Model B, 1, 4, 40 自由度モデル)

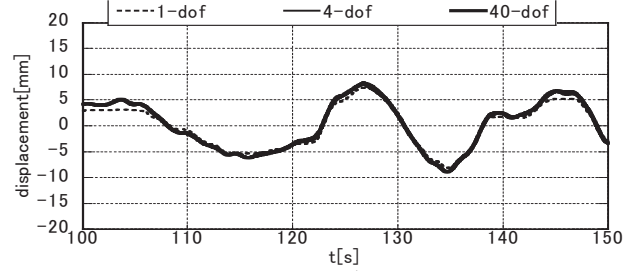


図 16 頂部変位の比較(ダンパー10枚設置)
(Model B, 1, 4, 40 自由度モデル)

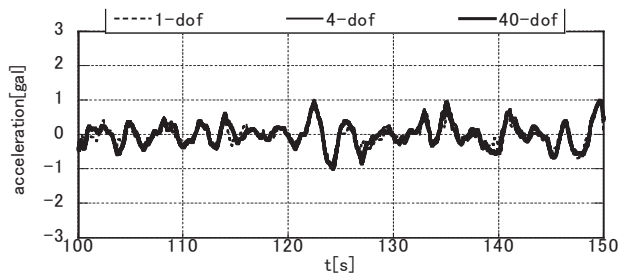


図 17 頂部加速度の比較(ダンパー5枚設置)
(Model B, 1, 4, 40 自由度モデル)

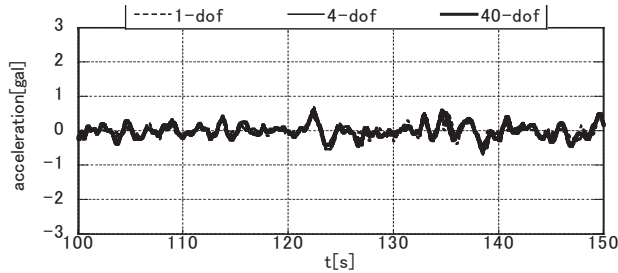


図 18 頂部加速度の比較(ダンパー10枚設置)
(Model B, 1, 4, 40 自由度モデル)

現実的な剛性分布を有する場合についても、4-3 節とほぼ同じ結果が得られている。原モデルと縮約構造モデルの頂部変位はピーク値の若干の差を除いて良好に一致し、縮約自由度が大きい方が精度が良い。加速度応答では、両縮約構造モデルともに原モデルの加速度と良好に一致しており、ダンパーが無い場合に比べ頂部加速度の両モデルの差が小さい。

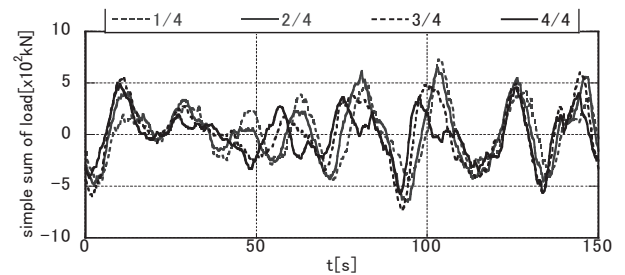
2-2 節のダンパー縮約方法は、直線形の変形モードを仮定して導いたものであるが、変形モードの直線形からのずれが図 7(c)に示す程度であれば、現実的な剛性分布のモデルにおいても本論文で提案する縮約法は有効であるといえる。

5. 縮約外力と単純和外力に対する応答の比較

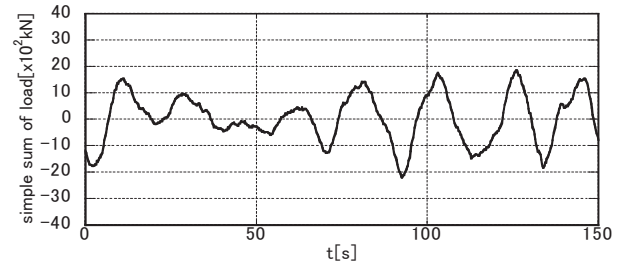
本論文で提案する外力の縮約方法は、変位の等価性条件により質点外力を縮約外力 $\bar{f}_j$ に縮約するものである。一方、一般的な外力の縮約法としては原モデルの縮約代表位置間の各層に作用する質点外力を、上層側の縮約代表位置において単純に加えた外力 f_j' (単純和外力と称する) が用いられる。縮約外力にはモデル剛性が反映されるが、単純和外力には反映されないという違いがある。本節では、通常用いられる単純和外力との比較において、提案した縮約外力の妥当性を示すことを目的とし、両外力に対する時刻歴応答解析結果を比較する。尚、本節ではダンパーを含まない 40 層モデルを扱う。1 次固有モードが逆三角形分布となる 40 自由度モデル (Model A) を、4 自由度及び 1 自由度モデルに縮約する。モデルの諸元は 4 節と同様である。外力は再現期間 1 年の風直交方向風外力とする。

図 19(a),(b)に、4 自由度及び 1 自由度の単純和外力を示す。縮約外力は図 4(b),(c)と同様とする。原モデルの各層の外力はほぼ同位相である。このような原モデルの外力を基に縮約外力、単純和外力を作成した場合、4 自由度の両外力は同程度であるが、1 自由度では縮約外力は単純和外力に対して 1.5 倍程度の大きさとなっている。

図 20, 21 に原モデルと 4 自由度縮約構造モデルの頂部変位と頂部加速度の比較を示す。図 22, 23 に原モデルと 1 自由度縮約構造モデルの頂部変位と頂部加速度の比較を示す。



(a) 4 自由度単純和外力



(b) 1 自由度単純和外力

図 19 質点に作用する風外力の時刻歴

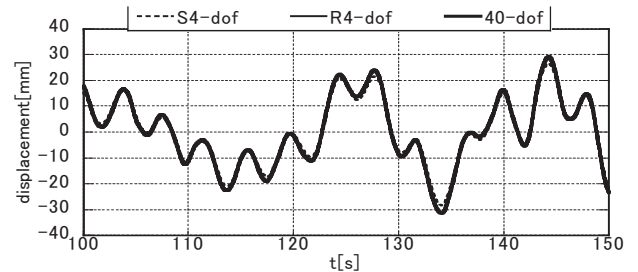


図 20 頂部変位の比較 (S: 単純和外力, R: 縮約外力)

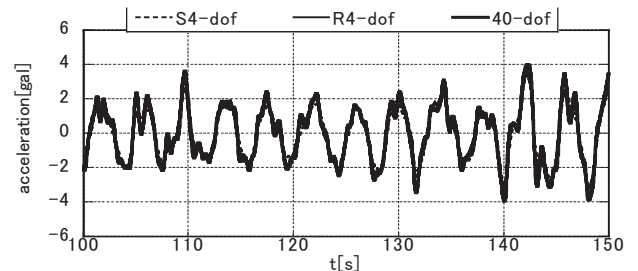


図 21 頂部加速度の比較 (S: 単純和外力, R: 縮約外力)

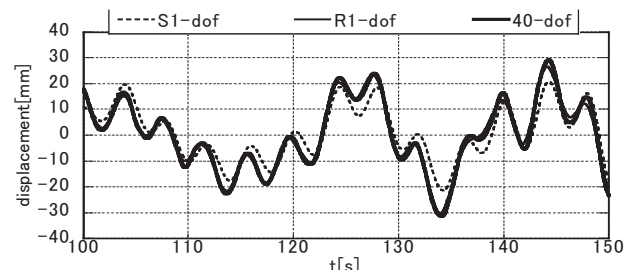


図 22 頂部変位の比較 (S: 単純和外力, R: 縮約外力)

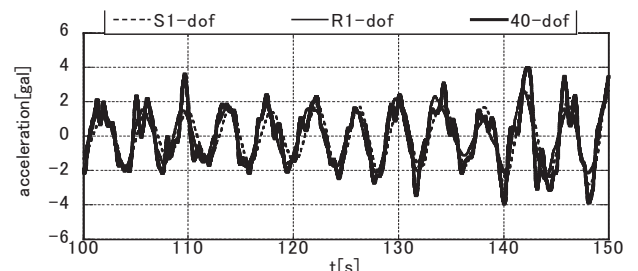


図 23 頂部加速度の比較 (S: 単純和外力, R: 縮約外力)

4 自由度縮約構造モデルでは、単純和外力による応答でピーク値に差がみられるものの、縮約外力、単純和外力ともに原モデルと良好に一致している。1 自由度縮約構造モデルでは、縮約外力による応答は原モデルを精度よく表現できているが、単純和外力による応答では大きな差が見られる。尚、現実的な剛性分布を有する 40 層モデル (Model B) について同様の検討を行ったところ、Model A と同様に、4 自由度縮約構造モデルでは、縮約外力、単純和外力ともに原モデルと良好に一致し、1 自由度縮約構造モデルでは、単純和外力による応答に大きな精度低下が見られた。

以上より、縮約構造モデルの自由度が十分大きい場合は、外力を単純和として縮約する方法でも原モデルを精度よく表現することが可能であるが、縮約構造モデルの自由度が小さい場合、原モデルの応答を精度よく表現できないといえる。一方、提案する縮約外力を用いる方法では、縮約構造モデルの自由度に関わらず原モデルを精度よく表現することが可能である。

6. まとめ

- 1 次固有周期と 1 次固有モードの等価性条件を用いた逆問題型定式化により、縮約構造モデルを構築する方法を提案した。さらに、復元力抵抗モデルを用いた縮約代表位置における変位の等価性条件から縮約外力を構築する方法を提案した。
- 1 次固有モードが逆三角形分布となる層剛性分布と現実的な層剛性分布を有する場合について、1)において構築した縮約構造モデルと縮約外力を用いて時刻歴応答解析を行い、原モデルの縮約代表位置における変位と、対応する縮約構造モデルの変位が良好に一致することを明らかにした。また、変位ほどの精度ではないものの、頂部加速度応答についても、両モデルの応答が良好に一致することを明らかにした。これは、構造減衰 (剛性比例型) により原モデルの高次モードが抑えられるためであると考えられる。
- 高硬度ゴムダンパーを設置した多自由度モデルについて、頂部変位と加速度応答において、縮約構造モデルと原モデルは良好に一致することを明らかにした。これは、高硬度ゴムダンパーは高振動数領域ほど大きな履歴ループを描くという特徴を有しており、ダンパーにより高次モードの影響が抑えられることに起因すると考えられる。
- 縮約構造モデルの自由度が十分大きい場合は、外力を単純和として縮約する方法でも原モデルを精度よく表現することができる。縮約構造モデルの自由度が小さい場合には、単純和外力は原モデルの応答を精度よく表現できない場合があるのに対し、縮約外力は縮約構造モデルの自由度に関わらず原モデルの応答を精度よく表現できる。

謝辞

高硬度ゴムダンパーの材料特性に関して(株)SRI ハイブリッドから有用な情報を提供いただいた。また、図 4(a)の風洞実験による風外力の時刻歴データを、竹中工務店技術研究所の大竹和夫博士から提供いただき、データに関連する有益な助言も頂戴した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Tsai CS, Lee HH : Application of viscoelastic dampers to highrise buildings, *J. Structural Engineering*, ASCE, **119**(4), pp1222-1233, 1993
- 2) Soong TT, Dargush GF : *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, John Wiley & Sons Ltd, 1997
- 3) Kasai K, Munshi JA, Lai ML, Maison BF : Viscoelastic damper hysteretic model: theory, experiment and application, *Proc. ATC-17-1 on Seismic Isolation, Energy Dissipation, and Active Control*, Vol.2, pp521-532, 1993.
- 4) Chan CM, Chui JKL : Wind-induced response and serviceability design optimization of tall steel buildings, *Engineering Structures*, **28**, 503-513, 2006.
- 5) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊 潔, 所 健 : 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則 (その 1 線形領域における温度・振動数依存のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, No.543, pp77-86, 2001.5
- 6) Kitamura, H, Tamura, Y and Ohkuma, T : Wind Resistant Design and Response Control in Japan, PartIII Structural Damping and Response Control, *Habitat and the High-rise, Proceedings of the Fifth World Congress on Tall Buildings, Council on Tall Buildings and Urban Habitat*, pp405-430, 1995.
- 7) 日本建築学会 : 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 日本建築学会, 2004.
- 8) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎 : 高層建物の制振を対象とした風洞実験装置の開発および風応答に関する基礎的研究 ―粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建築物の一樣流中における風洞実験―, 日本建築学会構造系論文集, No.609, pp.65-73, 2006.11.
- 9) 佐藤大樹, 笠井和彦 : 長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波による評価手法, 構造工学論文集, Vol.53B, pp67-74, 2007.3.
- 10) 菊池浩利, 田村幸雄, 上田 宏, 日比一喜 : 高層建物に作用する変動風圧力の POD 解析, 日本建築学会構造系論文集, NO.509, pp25-32, 1998.7.
- 11) 丸川比佐夫, 片桐純治, 勝村 章, 藤井邦雄 : 多質点系弾性模型の開発と高層建築物の風応答評価についての検討, 日本建築学会構造系論文集, NO.484, pp39-48, 1996.6.
- 12) Yoshie, R, Kawai, H., Shimura, M and Wei, R. : A study on wind-induced vibration of super high rise building by multi-degree-of freedom model, *J. Wind Eng. Industrial Aerodynamics*, 69-71, pp745-755, 1997.
- 13) Chopra, A.K. *Dynamics of Structures : Theory and application to earthquake engineering*, Chapter 18, 1995.
- 14) 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, pp37-42, 2005.
- 15) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎 : 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, No.635, pp75-82, 2009.1.
- 16) 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, pp37-46, 2006.7.
- 17) Wilson, E.L, Yuan, M.W. and Dickens, J. M : Dynamic analysis by direct superposition of ritz vectors, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**, pp813-513, 1982.
- 18) 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力学モデルの構築 (その 1 極微小変形から大変形までの歪・振動数依存性のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, No.629, pp1079-1086, 2008.7.
- 19) Tani, T., Yoshitomi, S., Tsuji, M. and Takewaki, I. : High-performance control of wind-induced vibration of high-rise building via innovative high-hardness rubber damper, *J. of The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Published online, DOI: 10.1002/tal.457, 2008.
- 20) Nakamura, Tsuneyoshi and Yamane, T. : Optimum design and earthquake-response constrained design of elastic shear buildings, *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, 14(5), 797-815, 1986.9.
- 21) 大竹和夫 : 高層建物の外装材用ピーク風圧係数に関する研究 (その 1 ピーク風圧性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp193-194, 2000.7.
- 22) 鈴木ちひろ, 辻 聖晃, 谷 翼, 吉富信太, 竹脇 出, 松本達治 : 高硬度ゴム粘弾性ダンパーによる建物の風応答低減効果に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp611-612, 2007.

Appendix 取り付け部材の影響

制振ダンパーの変形に伴い取り付け部材も変形するため、ダンパーの変形量は一般に層間変形よりも小さくなる。この取り付け部材の変形により減少したダンパー変形量を取り付け部材の変形を含む全体の変形量で除したものをダンパーの実効率とする。

図 24, 25 に、40 層せん断質点系モデルに各層においてダンパーを 10 枚組み込んだ場合の実効率による頂部変位と加速度の応答を示す。また、図 26 には実効率 100%の値で無次元化した最大変位と最大加速度の変化を表す。実効率 50～100%の応答では、変位最大値で 18.7%、加速度最大値で 43.2%の差が見られるものの、本論文で意図する目的には大きな影響はない。そこで、本論文のダンパーを組み込んだモデルの時刻歴応答解析では、実効率 100%として解析を行っている。

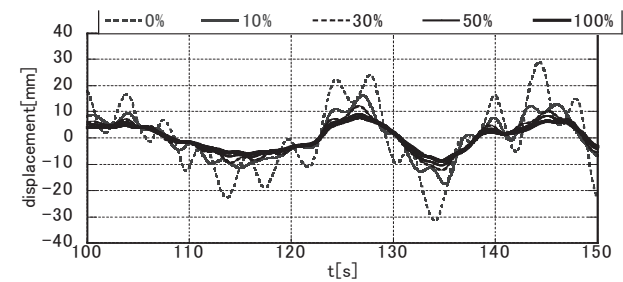


図 24 実効率による頂部変位の比較

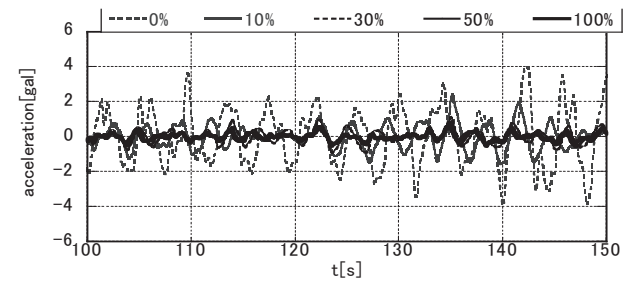


図 25 実効率による頂部加速度の比較

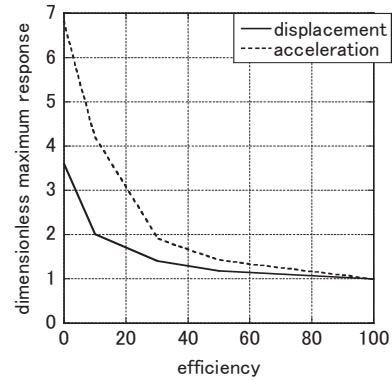


図 26 実効率による最大変位と最大加速度の変化
(実効率 100%の値で無次元化)

(2008年12月 5 日原稿受理，2009年 2 月26日採用決定)