

# 履歴型ダンパーと粘性型ダンパーを直列連層配置した 超高層鋼構造建物の制振設計に関する研究

東京理科大学大学院 添田 幸平

## 1. はじめに

曲げ変形が卓越する超高層制振建物は、中層から上層にかけてダンパーの制振性能が低下する。応募者は、下層に履歴ダンパーを設置し上層に粘性ダンパーを設置した地上30階の超高層鋼構造建物を、粘性ダンパー設置層で制振性能が改善され、履歴ダンパーおよび粘性ダンパーをそれぞれ単独に用いたときよりもエネルギー吸収効率が高くなることを部材モデルにおける時刻歴応答解析結果から確認した。さらに、粘性ダンパーの量を増加すると、粘性ダンパー設置層の最大層間変形角が減少するため、境界層付近における変形増大を抑制することが可能であることを確認した<sup>1)</sup>。

実務設計でも、時刻歴応答解析により適切なダンパーの配置と量を検討することが多いが、時刻歴応答解析のみに頼り過ぎると初期設定の見当違いにより発散に陥ることがある。時に現実とかけ離れた低減効果を期待することや、設計の目標である安全性・居住性の向上まで見失ってしまう恐れがある<sup>2)</sup>。このような状況を避けるために、ダンパーと応答の関係を包括的に把握できる応答予測手法を用いて概略設計を行い、その過程で得られる指標から制振性能を把握することが必要である。

本論文では、併用モデルに対して有用かつ併用モデルの特徴の理解に繋がるせん断モデル（以後、本モデル）の作成手法、制振効果の理解に繋がる簡易的な応答予測手法を示す。さらに、応答予測手法の過程で得られる指標に基づく併用モデルの制振性能評価について示す。

## 2. せん断モデルの作成手法と応答予測手法の概要

### 2.1 既往モデル<sup>3),4)</sup>の作成方法

提案されている骨組特性値を用いた制振構造に有用なせん断モデル<sup>3),4)</sup>は、擬似ブレースとダンパー要素を直列結合により構成される（図1）。骨組特性値 $\alpha_N$ および擬似ブレース剛性 $K_{bs}$ は、主架構のみの弾性部材モデル（図2(b)状態N）および主架構の制振部材設置位置に剛性が極端に大きい弾性

バネを挿入した（図2(c)状態R）2ケースの静的解析結果から得られ、式(1)によって算出される。静的解析時の荷重はAi分布に基づくものとする。

$$\alpha_N = \delta_{dN} / \delta_N, K_R = F_{dR} / \delta_R, K_{bs} = \alpha_N K_R \quad (1a, b, c)$$

ここで、 $K_R$ : ダンパー設置箇所の架構の曲げ剛性、 $\delta_d$ : ダンパー設置箇所の相対変形の水平成分、 $\delta$ : 架構の層間変形、 $F_d$ : ダンパー設置箇所の弾性バネが負担する軸力の水平成分、右下の添え字  $N$  および  $R$  は、状態  $N$  および状態  $R$  の計算値であることを示す。

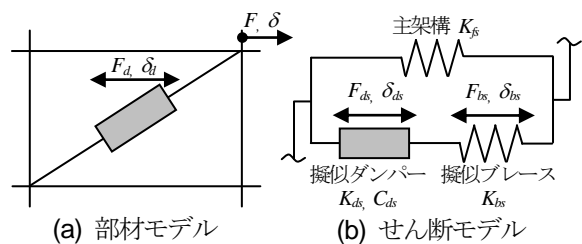


図1 部材モデルとせん断モデルの対応

### 2.2 骨組特性値および擬似ブレース剛性の修正

曲げ変形はダンパーがせん断力を負担することで誘発され、その傾向は、ダンパー量が多いほど、また集中的に連層配置した場合に顕著となる<sup>5)</sup>。併用モデルでは、履歴ダンパーが負担するせん断力と粘性ダンパーが負担するせん断力との間に位相差が生じることから<sup>6)</sup>、併用モデルは全層に履歴ダンパーを設置したときに比べて曲げ変形が緩和される<sup>1)</sup>。また、履歴ダンパーを高さ方向に部分的に配置するとダンパー非設置層の実効変形比が減少する。この傾向は履歴ダンパー設置層が多いほど顕著になる。本論文では、それらの影響を粘性ダンパー設置層の骨組特性値 $\alpha_N$ および履歴ダンパー設置層の架構の曲げ剛性 $K_R$ を修正することで考慮する。図2の併用モデルをもとに、修正法の概略を以下に示す。

まず、粘性ダンパー設置層の骨組特性値の修正法について示す。粘性ダンパー設置層における骨組特性値の修正値 $\alpha_{PN}$ は、履歴ダンパー設置層のみに、使用する履歴ダンパーの初期剛性を持つ弾性

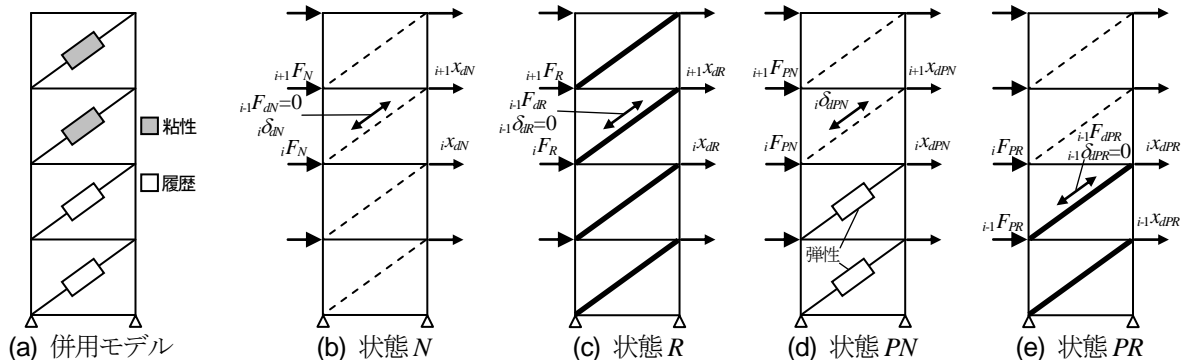


図2 部材モデルと状態N・R・PN・PR

バネを挿入した状態  $PN$  (図 2(d)) の静的解析結果から得られ、式(2)により求められる。

$$\alpha_{PN}(K_d) = \delta_{dPN} / \delta_{PN} \quad (2)$$

ここで、右下の添え字  $PN$  は状態  $PN$  の計算値であることを示し、 $(K_d)$  は弾性バネの剛性  $K_d$  によって変化する値であることを意味する。

次に、履歴ダンパー設置層の架構の曲げ剛性の修正法について述べる。架構の曲げ剛性の修正値  $K_{PR}$  は、粘性ダンパー設置層のダンパーを外し、履歴ダンパー設置層には剛性が極端に大きい弾性バネを挿入した状態  $PR$  (図 2(e)) の静的解析結果から得られ、式(3)により求められる。

$$K_{PR} = F_{dPR} / \delta_{PR} \quad (3)$$

ここで、右下の添え字  $PR$  は、状態  $PR$  の計算値であることを示す。状態  $PN$  および状態  $PR$  における静的解析時の荷重は  $A_i$  分布に基づくものとする。

各層のダンパーの骨組特性値および擬似ブレース剛性の組合せを以下に示す。

・履歴ダンパー設置層：  
骨組特性値  $\alpha_N$ 、擬似ブレース剛性  $K_{bs} = \alpha_N K_{PR}$  (4)

・粘性ダンパー設置層：  
骨組特性値  $\alpha_{PN}$ 、擬似ブレース剛性  $K_{bs} = \alpha_{PN} K_R$  (5)

### 2.3 応答予測手法の概要

本論文では、竹内ら<sup>7)</sup>により提案された等価線形化法による応答予測手法を適用する。図 3 に応答

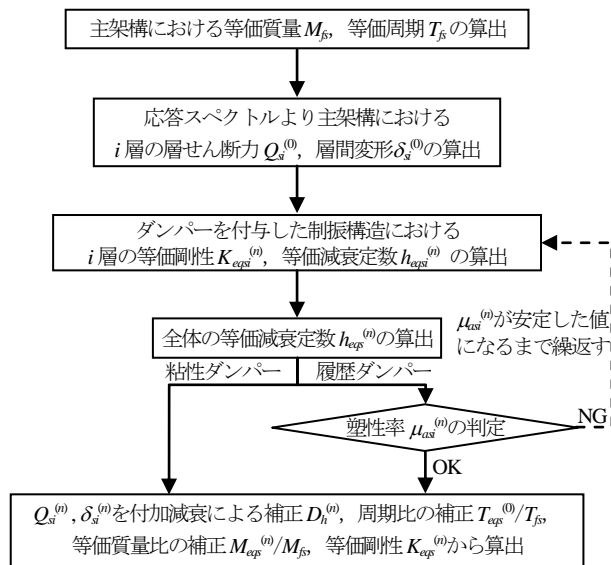


図 3 応答予測手法の手順

予測手法の手順を示し、図 4 にシステムの履歴モデルを示す。各ダンパーにおける骨組特性値および擬似ブレース剛性は、計算の簡略化のため各層に設置される  $n$  本の平均値を用いる。

### 3. 本手法の適用

骨組特性値に基づいて作成したせん断モデルが併用モデルの応答性状を再現できるか時刻歴応答解析結果と比較することで確認する。

#### 3.1 検討用建物および入力地震動の概要

検討対象建物は、図 5 に示す地上 30 階の超高層鋼構造建物<sup>1)</sup>であり、解析は  $X$  方向のみを対象とする。なお、主架構は弾性状態を保つものとし、構造減衰は架構の  $T_{f1}$  に対して 2% となる剛性比例型とする。

ダンパーの配置は Y2 および Y3 通りに連層配置とする (図 5(b))。本論文は、履歴ダンパーを全層に配置したモデル HD30、粘性ダンパーを全層に配置したモデル VD30、下層に履歴ダンパー・上層に粘性ダンパーを配置し境界層を 25 層、20 層、15 層、10 層、5 層とした併用モデル 5 種 (それぞれ HD25, HD20, HD15, HD10, HD05), 下層に粘性ダンパー・上層に履歴ダンパーを配置し境界層を 25 層、20 層、15 層、10 層、5 層とした併用モデル 5 種 (それぞれ VD25, VD20, VD15, VD10, VD05),

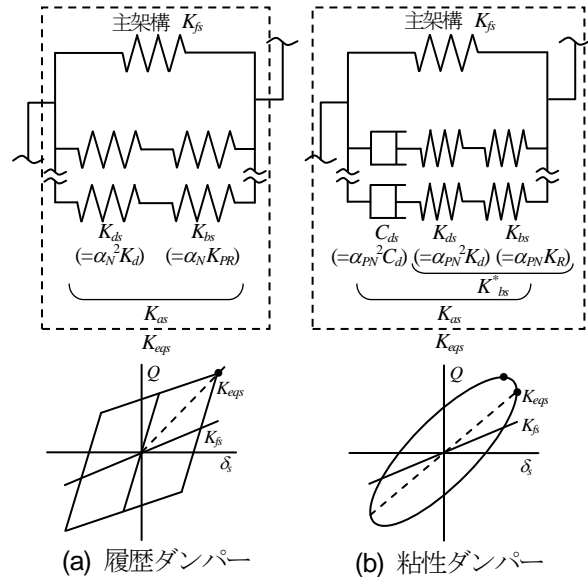


図 4 システムの履歴モデル

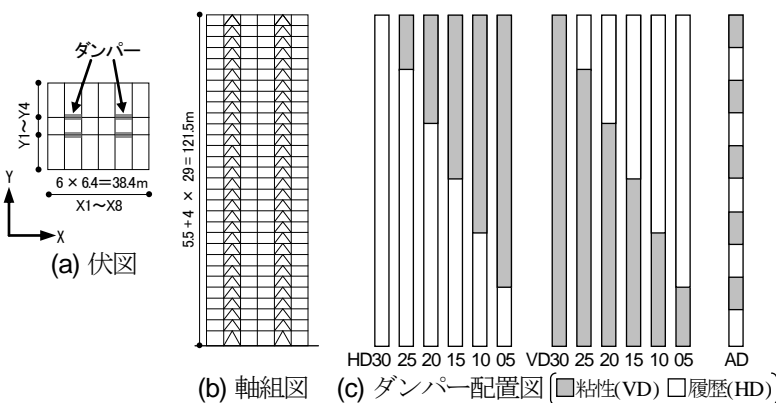


図 5 検討対象建物の伏図、軸組図、ダンパー配置図

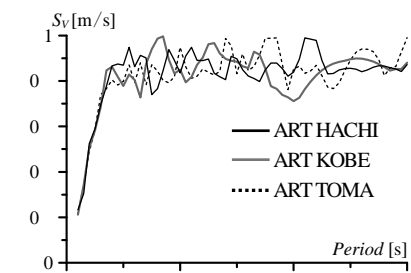


図 6 入力地震動の速度応答スペクトル ( $h=5\%$ )

履歴ダンパーと粘性ダンパーを3層毎に交互に配置したモデルADの計13種の配置を用いる(図5(c))。併用モデルの各層のダンパーはHD30とVD30のダンパーを組み合わせる。履歴ダンパーには、LY225材からなる座屈拘束型ブレースを用い、降伏せん断力係数 $\alpha_{d1}=0.025$ を採用する<sup>1)</sup>。粘性ダンパーは、線形粘性ダッシュポットと弾性バネを直列結合したモデルを用いる<sup>1)</sup>。

検討用入力地震動は、速度応答スペクトルを $S_V=0.8\text{m/s}$ ( $h=5\%$ )とした模擬波3波を用いる。模擬波の位相特性はHACHINOHE 1968 EW (ART HACHI), JMA KOBE 1995 NS (ART KOBE), TOMAKOMAI2003NS (ART TOMA)を採用する。図6に速度応答スペクトル $S_V$ ( $h=5\%$ )を示す。

### 3.2 $\alpha_{PN}$ および $K_{bs}$ の性状

各モデルの $\alpha_{PN}$ および $K_{bs}$ の高さ方向分布を図7に示す。 $\alpha_{PN}$ の算出には、 $\alpha_{d1}=0.025$ の時の初期剛性に相当する弾性バネを設置する。図7(a)より、 $\alpha_{PN}$ は履歴ダンパー設置層が多いほど低下することが確認できる。つまり、状態PNは、粘性ダンパー設置層における実効変形比の上限値を減少させる効果を持つことがわかる。図7(b)より、併用モデルにおける履歴ダンパー設置層の $K_{bs}$ は、全層にダンパーを配置したときに比べて増加し、併用モデルにおける粘性ダンパー設置層の $K_{bs}$ は全層にダンパーを配置したときに比べて減少すること確認できる。ダンパー量の増加に伴う実効変形比の減少は、 $K_{bs}$ が大きいくほど鈍くなることから<sup>8)</sup>、状態PRは履歴ダンパー設置層における実効変形比の減少を鈍く

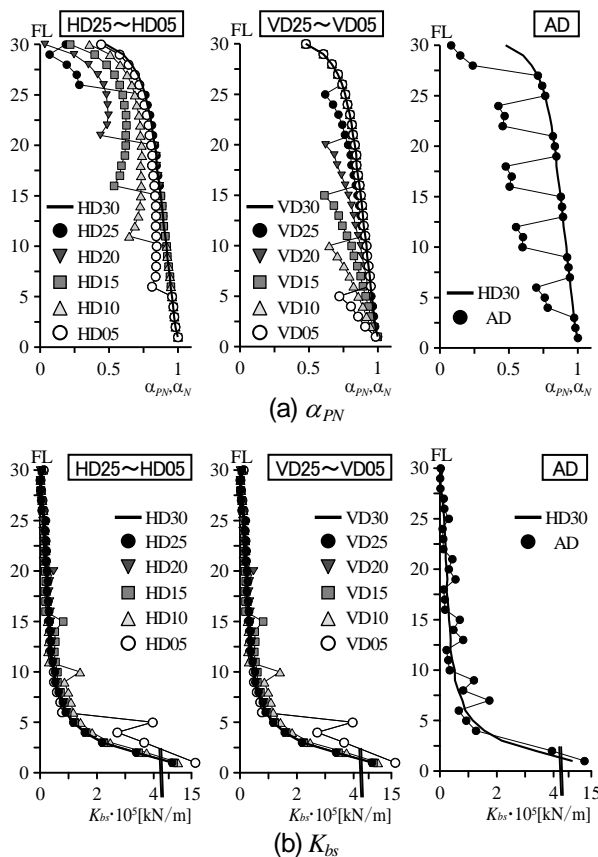


図7  $\alpha_{PN}$ および $K_{PR}$ の高さ方向分布の比較

する効果を持つことがわかる。

### 3.3 せん断モデルの作成手法の比較検討

ART HACHI 入力時のHD15, VD15 および AD における部材モデルとせん断モデルの時刻歴応答解析の比較を図8に示す。また、状態Nおよび状態Rのみを用いたモデルの応答(既往モデル), 状態PNおよび状態PRを用いたモデルの応答(本モデル)を重ねて示す。図8(a)の層間変形角 $R$ に着目すると、いずれのモデルにおいても、本モデルが部材モデルと概ね一致していることが確認できる。図8(b)のダンパーによるエネルギー吸収量 $w_d$ に着目すると、既往モデルは、いずれのモデルにおいても境界層付近で部材モデルの $w_d$ を再現できていない。一方、本モデルは境界層付近の $w_d$ が改善され、部材モデルの $w_d$ を精度良く再現している。層せん断力および応答加速度においても、本モデルが部材モデルを精度良く再現していることを確認している。ARTKOBEおよびARTTOMAを入力した場合においてもART HACHIを入力した場合と同様、本モデルは部材モデルの $R$ および $w_d$ を再現していることを確認している。以上より、骨組特性値に基づいて作成したせん断モデルが併用モデルの応答性状を再現できる。また、骨組特性値を把握することで併用モデルの特徴の理解に繋がる。

### 3.4 応答予測手法の比較検討

ART HACHI 入力時のHD15, VD15 および AD における予測値と部材モデルの時刻歴解析結果(応答値)の比較を図9に示す。応答低減係数 $D_i$ <sup>9,10)</sup>

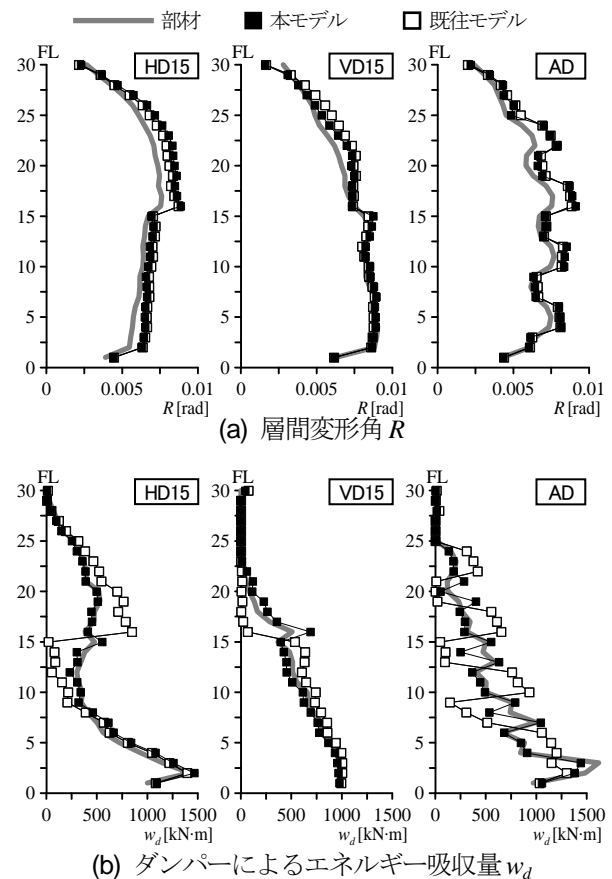


図8 高さ方向分布の比較 (ART HACHI)

における係数 $\beta$ は ART HACHI および ART TOMA で 75, ART KOBE で 25 を用いる。図 9(a)の層間変形角  $R$  に着目すると、粘性ダンパー設置層において予測値が応答値と誤差が見られるが、概ね一致していることが確認できる。他のモデルにおいても同様の精度であることを確認している。また、ART KOBE および ART TOMA を入力した場合においても ART HACHI を入力した場合と同様、予測値が応答値と一致していることを確認している。以上より、等価線形化法による応答予測手法が、併用モデルに対しても有効であることを確認した。

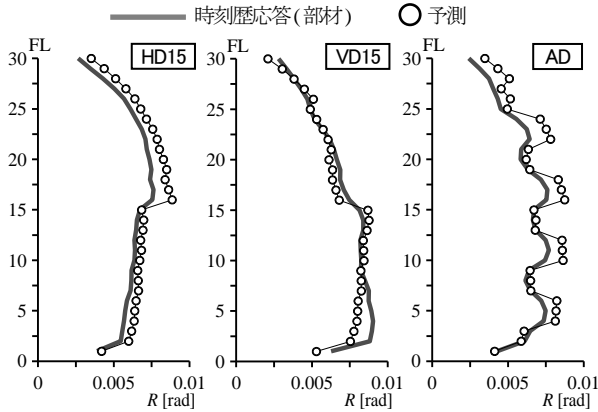


図 9 予測手法の比較検討  
(応答：層間変形角，入力：ART HACHI)

#### 4. 縮約 2 質点系による制振性能評価

3 節で等価線形化法による応答予測手法の有効であることを確認した。主架構に対する制振構造の応答低減は、周期比  $T_{eqs}/T_{fs}$  および減衰による低減率の比の積として表せるため、本節では応答予測手法の過程で得られる周期比  $T_{eqs}/T_{fs}$  および全体の等価減衰定数  $h_{eqs}$  を指標とした併用モデルの制振性能評価について示す。

本手法は、履歴ダンパー設置層と粘性ダンパー設置層の境界層  $b$  の影響を直接評価できるように、主架構を 2 質点系に縮約する。その際、縮約 2 質点系の各層の質量は、履歴ダンパー設置層の総質量と粘性ダンパー設置層の総質量とし、層剛性は検討建物と縮約 2 質点系の弾性 1 次固有周期が等しくなることを条件として決定する。

3 節で示した地上 30 階の超高層鋼構造建物を用いて、評価指標の傾向を捉える。HD15 において粘性ダンパーのダンパー量  $C_{ds}\omega_{fs}/K_{fs}$  ( $=0\sim 8$ ) と履歴ダンパーの塑性率  $\mu_{as}$  ( $=1\sim 8$ ) を変化させたときの  $h_{eqs}$  と  $T_{eqs}/T_{fs}$  の関係を図 10(a)に示す。また、下層に履歴ダンパーおよび上層に粘性ダンパーを設置したモデルにおいて境界層  $b$  ( $=1\sim 30$ ) を変化させたときの  $h_{eqs}$  と  $T_{eqs}/T_{fs}$  の関係を図 10(b)に示す。ここで、粘性ダンパーは  $C_{ds}/K_{bs}^*=4.5$ 、履歴ダンパーは  $K_{as}/K_{fs}=0.7$  とする。図 10(a)より、 $C_{ds}\omega_{fs}/K_{fs}$  が増加するほど  $h_{eqs}$  は増加し  $T_{eqs}/T_{fs}$  は減少する。また、 $\mu_{as}$  が大きくなると  $C_{ds}\omega_{fs}/K_{fs}$  が小さい範囲では  $h_{eqs}$  が増加するが、 $C_{ds}\omega_{fs}/K_{fs}$  が大きい範囲では  $h_{eqs}$  が減少する。図 10(b)より、 $b=4, 5$  層で  $h_{eqs}$  が極大値を示していることが確認できる。 $C_{ds}\omega_{fs}/K_{fs}$  が小さい範

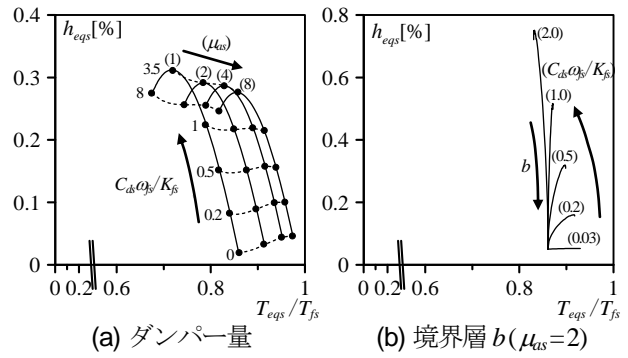


図 10  $h_{eqs}$  と  $T_{eqs}/T_{fs}$  の関係

囲では  $b$  が大きいほど (境界層が上層ほど)  $T_{eqs}/T_{fs}$  および  $h_{eqs}$  との両者が減少する。 $C_{ds}\omega_{fs}/K_{fs}$  が大きい範囲では  $b$  が大きいほど (境界層が上層ほど)  $T_{eqs}/T_{fs}$  が増加し  $h_{eqs}$  が減少する。以上より、本手法は、履歴ダンパーと粘性ダンパーのダンパー諸元の影響のみならず境界層の影響を直接評価できる。

#### 5. まとめ

履歴ダンパーと粘性ダンパーを直列連層配置した建物のせん断モデルの作成手法、等価線形化法による応答予測手法、縮約 2 質点系を用いた制振性能評価について示した。本手法を用いることで、時刻歴応答解析結果のより深い理解に繋がる。

#### 謝辞

本研究は、日建設計、オイレス工業、東京理科大学北村研究室による制振研究会の成果の一部を用いたものです。本研究を進めるにあたり、日建設計の石井正人氏、吉江慶祐氏、並びにオイレス工業の宮崎充氏、佐々木和彦氏、岩崎雄一氏には貴重なご助言・ご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 添田幸平, 他: 連層配置した履歴型ダンパーと粘性型ダンパーが超高層建物の制振効果に与える影響, 日本建築学会技術報告集, No.39, 2012.6 (掲載予定)
- 2) 北村春幸: 性能設計のための建築振動解析入門 (第 2 版), 彰国社, 2009.4
- 3) 笠井和彦, 他: 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
- 4) 石井正人, 他: 多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデルの提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 647 号, pp.103-112, 2010.1
- 5) 石井正人, 他: 粘弾性型制振部材付き架構のモデル化に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 531 号, pp.55-62, 2000.5
- 6) 添田幸平, 他: 履歴型・粘性型ダンパーを直列連層配置した鋼構造超高層建物の簡易モデル作成手法, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2012.3
- 7) 竹内徹, 他: ダンパーが不均等配置された多層パッシブ制振構造の応答予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 583 号, pp.115-122, 2004.9
- 8) 添田幸平, 他: 超高層建物における実効変形比に着目した制振性能評価 その 2 制振効果の評価指標の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.775-776, 2011.8
- 9) 笠井和彦, 他: 等価線形化法による一質点系弾塑性構造の最大応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, No.571, pp.53-62, 2003.9
- 10) 笠井和彦, 他: 弾塑性ダンパーの剛性・降伏力・塑性率の調節による制振構造の応答制御手法, 日本建築学会構造系論文集, No.595, pp.45-55, 2005.9