

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title	INFLUENCE OF THE CONTINUOUS ARRANGEMENT OF HYSTERETIC DAMPER AND VISCOUS DAMPER ON VIBRATION CONTROL EFFECT OF HIGH-RISE BUILDING
著者(和文)	添田幸平, 佐藤大樹, 北村春幸, 古谷慶, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一
Authors	Kohei Soeta, daiki sato, Haruyuki Kitamura, Mitsuru MIYAZAKI, Kazuhiko Sasaki
出典 / Citation	日本建築学会技術報告集, Vol. 18, No. 39, pp. 477-482
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 18, No. 39, pp. 477-482
発行日 / Pub. date	2012, 6
rights	日本建築学会
relation	isVersionOf: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/40019347408">http://ci.nii.ac.jp/naid/40019347408</a>

# 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

# INFLUENCE OF THE CONTINUOUS ARRANGEMENT OF HYSTERETIC DAMPER AND VISCOUS DAMPER ON VIBRATION CONTROL EFFECT OF HIGH-RISE BUILDING

添田幸平 —— \* 1      佐藤大樹 —— \* 2  
北村春幸 —— \* 3      石井正人 —— \* 4  
吉江慶祐 —— \* 4      宮崎 充 —— \* 5  
佐々木和彦 —— \* 5      岩崎雄一 —— \* 5

Kohei SOETA —— \* 1      Daiki SATO —— \* 2  
Haruyuki KITAMURA —— \* 3      Masato ISHII —— \* 4  
Keisuke YOSHIE —— \* 4      Mitsuru MIYAZAKI —— \* 5  
Kazuhiko SASAKI —— \* 5      Yuichi IWASAKI —— \* 5

キーワード:

超高層建物, 制振構造, 履歴ダンパー, 粘性ダンパー, 時刻歴応答解析

Keywords:

High-rise building, Seismic control structure, Hysteretic damper, Viscous damper, Dynamic response analysis

There are few researches in the combinations of dampers with different performances in vertical direction. The authors proposed the "combination-system" which is constructed of hysteretic dampers arranged in the lower stories of the building and viscous dampers arranged in the upper stories. This paper presents earthquake response characteristics of "combination-system" based on time-history analysis results. In addition, this paper describes the effect of the arrangement pattern of dampers and an amount of each damper to vibration control effect of building. This system can absorb the seismic energy compared with the one type of damper system.

## 1. はじめに

1995年の阪神大震災以降, 建築主の対地震安全性に対する意識の高揚により建物の制振ダンパーを組み込む件数が増加してきた<sup>1)</sup>。制振ダンパーは架構のせん断変形(以後, 実効変形 $\delta_e$ と称す)に対して有効に稼働するが, 曲げ変形が卓越する超高層建物では, 中層から上層にかけて実効変形を多く確保することができないため, ダンパーが有効に稼働しないことが知られている。

制振ダンパーは変位依存型の履歴ダンパーと速度依存型の粘性ダンパーの2つに大きく分類される。履歴ダンパーを単独で用いる建物は, 粘性ダンパーを単独で用いる建物に比べて変形制御能力が高いという特徴がある一方で, 剛性増大により応答加速度の増大を招いてしまう。また, ある入力レベルに対して最適なダンパー量が存在し, それ以上の制振効果が得られない。粘性ダンパーを単独で用いる建物はエネルギー吸収効率がよく, 減衰効果による応答加速度の低下が見込める。しかし, 履歴ダンパーを単独で用いる建物に比べて変形制御能力が低く, コストが高いという特徴がある。

2000年以降, 履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用する建物が増加してきたが<sup>2)</sup>, 併用する場合の研究は少なく(例えば<sup>3)-6)</sup>, 特に高さ方向に履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した研究は僅かである<sup>5), 6)</sup>。筆者らの一部は<sup>6)</sup>, 40階鋼構造建物を対象として, 下層に履歴ダンパー・上層に粘性ダンパーを併用する制振構造を提案し, 時刻歴応答解析から, 履歴ダンパーおよび粘性ダンパーをそれぞれ単独で用い

た場合に比べ上層のダンパー効率が改善され, 制振効果が向上することを確認している。しかし, 履歴ダンパーと粘性ダンパーの配置が切替わる層(以後, 境界層と称す)や履歴ダンパーの量と粘性ダンパーの量が制振効果に与える影響について明確にされていない。

本報では, 下層に履歴ダンパーを設置し, 上層に粘性ダンパーを配置したモデル(以後, 併用モデルと称す)の応答特性, ならびに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場合に比べダンパーの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示す。また, 境界層, 履歴ダンパーの量および粘性ダンパーの量が制振効果に与える影響を示す。

## 2. 解析概要およびダンパーの性能設計

### 2.1 建物概要および入力地震動

検討対象建物は地上30階, 高さ121.5mの超高層鋼構造建物とする。図1に示すように階高は1階のみが5.5m, 他の階は4mである。平面形状は基本スパンが長辺方向(X方向)では6.4m, 短辺方向(Y方向)では中央部で6m, その他で12.8mから構成された32m×38.4mの矩形であり, 各階同一とする。部材断面は標準せん断力係数 $C_0 = 0.2$ の設計用地震力に対して許容応力度設計を行い決定した。検討対象建物の柱および梁の部材断面を表1に示す。架構の弾性1次固有周期 $T_1$ は4.46secである。

解析はX方向を対象とし, 剛床を仮定した立体部材モデルで行う。

<sup>1)</sup> 東京理科大学大学院理工学研究科 大学院生  
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

<sup>2)</sup> 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

<sup>3)</sup> 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

<sup>4)</sup> ㈱日建設計構造設計部 博士(工学)

<sup>5)</sup> オイレス工業(株)

<sup>1)</sup> Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science

<sup>2)</sup> Assistant Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

<sup>3)</sup> Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

<sup>4)</sup> Associate, Structural Engineering Dept., Nikken Sekkei Ltd., Dr. Eng.

<sup>5)</sup> Oiles Corporation

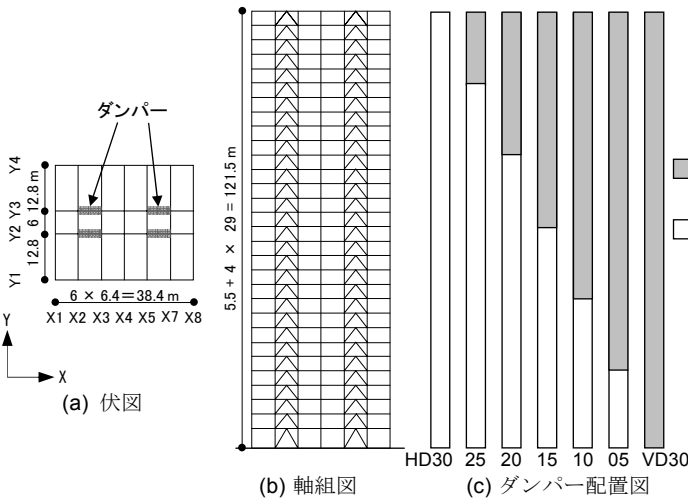


図1 検討対象建物の伏図，軸組図，ダンパー配置図

表1 部材断面一覧

内柱	□ 600 × 600 × 22	～	□ 600 × 600 × 50
外柱	□ 550 × 550 × 22	～	□ 550 × 550 × 50
大梁	H 600 × 200 × 12 × 19	～	H 600 × 250 × 12 × 25

各制振モデルにおけるダンパーの制振効果を確認するため、主架構は弾性とする。また、構造減衰は主架構の  $T_{f1}$  に対して 2% となる剛性比例型とする。

超高層建物の安全性を評価するための入力地震動として、告示波が用いられている。本報では、建物周期のばらつきに対する影響の少ない解放工学的基盤における告示波を用いることにし、その位相特性として、設計で用いられていることが多い HACHINOHE 1968 EW を採用する（以後、ART-HACHI）。図 2 に入力地震動の加速度時刻歴波形、図 3 に速度応答スペクトル  $S_v$  ( $h=5\%$ ) およびエネルギースペクトル  $V_E$  ( $h=10\%$ ) を示す。

## 2.2 ダンパー概要

図 1 (b) のようにダンパーの配置は Y2 および Y3 通りに連層配置とし、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 層および 5 層とした併用モデル 5 種（それぞれ HD25, HD20, HD15, HD10, HD05 と表記する）の計 7 種の配置を用いる（図 1 (c)）。併用モデルは、HD30 と VD30 の各ダンパーを組み合わせる。

履歴ダンパーには、座屈拘束型プレースを用いる。ダンパーは塑性化部と弾性部で構成され、部材長さ  $L_d$  に対して塑性化部の長さを  $L_d/3$  とし、塑性化部面積  $A_d$  に対して弾性部断面積を  $2A_d$  とする。また、塑性化部には LY225 材（降伏応力度 225 N/mm<sup>2</sup>）を用い、ダンパーの履歴性状は完全弾塑性型とする。各層のダンパーの降伏せん断力  $Q_{dyi}$  は、図 4 に示すように第 1 層のダンパー降伏せん断力  $Q_{dy1}$  を基準とし、地震層せん断力係数の高さ方向分布（ $A_i$  分布）に基づく設計用層せん断力分布をもとに 5 層毎の 6 段階とした。 $Q_{dy1}$  と第 1 層のダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_{dy1}$  の関係は次式で表される。

$$Q_{dy1} = \alpha_{dy1} \sum_{i=1}^{30} m_i g \quad (1)$$

ここで、 $m_i$ :  $i$  層の質量、 $g$ : 重力加速度である。 $\alpha_{dy1}$  は HD30 に ART-HACHI を入力した時の最大層間変形角が極小となる  $\alpha_{dy1}=0.025$

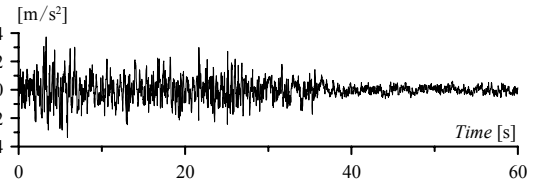


図2 入力地震動の加速度時刻歴波形

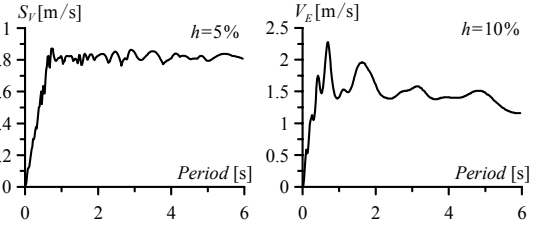


図3 入力地震動のスペクトル

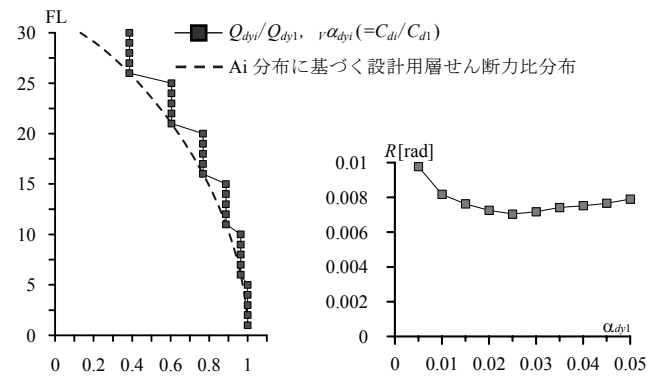


図4 ダンパーの耐力比分布と 図5  $\alpha_{dy1}$  と最大層間変形角の関係

粘性係数比分布

を採用する（図 5）。

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 Maxwell モデルで構成される。第 1 層のダッシュポットの粘性係数に対する  $i$  層のダッシュポットの粘性係数の比  $\nu\alpha_{dyi}$  ( $=C_{di}/C_{d1}$ ) は  $A_i$  分布に基づき 5 層毎の 6 段階とした（図 4）。各層の直列結合するバネ剛性  $K_{di}$  は、長周期建物用ダンパーとして  $K_{di}=4.5C_{di}$  を採用する<sup>7)</sup>。ここに、4.5 (1/s) は内部剛性係数である。本報では、ダンパーによるエネルギー吸収効率に着目し、HD30 と VD30 の入力エネルギーに対する各層のダンパーによるエネルギー吸収量の総和の比 ( $W_d/E$ ) が等しくなる第 1 層の粘性係数  $C_{d1}$  を決定した。今回、HD30 と VD30 両者の入力エネルギー  $E$  が等しいという仮定のもと、ダンパーによるエネルギー吸収量  $W_d$  が等しくなるような  $C_{d1}$  を、エネルギーの釣合に基づいて設計する。設計手順を以下に示す。

- 1) VD30 の粘性ダンパーが吸収すべきエネルギー吸収量  ${}_{VD30}W_d$ 、許容最大層間変形角  $R_i$  を設定する。今回、設計方針に基づき  ${}_{VD30}W_d$  は、 $\alpha_{dy1}=0.025$  の履歴ダンパーを設置した HD30 モデルにおけるダンパーによるエネルギー吸収量  ${}_{HD30}W_d$  と等しくする。各層の許容最大層間変形角は 1/120 とする。
- 2) ダンパーの実効変形の最大値  $\delta_i$  は、全体曲げ変形の影響を考慮するために、実効変形比  $\alpha_e$  と最大層間変形  $\delta$  を掛け合わせることで算出する。付録 A に示すように、粘性ダンパー設置時の実効変形比は  $C_d$  に依存するため、適切な実効変形比を設定できない。そこで、一般に VD30 の実効変形比は HD30 の実効変形比を上回るため<sup>6)</sup>、安全側である HD30 の応答値を用いる。

- 3) 1 サイクルで吸収できるエネルギー量  $e_{di}$  を次式から算出する。  
 その際、主架構の弾性 1 次円振動数  $\omega_1$  を用いる。

$$e_{di} = \pi \cdot \nu \cdot \alpha_{di} \cdot C_{d1} \cdot \omega_1 \cdot \delta_{di}^2 \quad (2)$$

- 4) 各層での等価繰返し数<sup>8)</sup>を  $n_{eqi}$  回とすると、 $C_{d1}$  は次式から求められる。

$$C_{d1} = \frac{\nu D_{30} W_d}{\sum_{i=1}^{30} n_{eqi} \cdot e_{di}} \quad (3)$$

$n_{eqi}$  は検討対象建物に対して ART-HACHI 入力時に、各層での平均値となる  $n_{eqi}=4.0$  を用いる。

1)~4) で得られた  $C_{d1}$  は 56015 kN・s/m であった。最終的には、 $\nu D_{30} W_d / \nu D_{30} E$  が  $HD_{30} W_d / HD_{30} E$  となるように応答解析を行い調整を行い、 $C_{d1}$  は 57876 kN・s/m となった。以後、 $C_{d1}=57876$  kN・s/m を用いる。

### 3. 併用モデルの応答特性

#### 3.1 高さ方向分布

図 6 に履歴ダンパーおよび粘性ダンパーを単独配置したモデルと併用モデルにおける各層の最大層間変形角  $R$ 、最大応答加速度  $A$ 、層せん断力  $Q$ 、ダンパーによるエネルギー吸収量  $w_d$ 、実効変形比  $\alpha_e$  および等価繰返し数  $n_{eq}$  を示す。図には主架構のみ（ダンパー非設置）の応答も併記している。ダンパー非設置時の  $\alpha_e$  は節点変位から算出した。 $i$  層の履歴ダンパーの等価繰返し数  $n_{eqi}$  と粘性ダンパーの等価繰返し数  $\nu n_{eqi}$  は次式で表される。

$$n_{eqi} = \frac{H W_{di}}{4 Q_{di} (H \delta_{di} - H \delta_{dyi})}, \quad \nu n_{eqi} = \frac{V W_{di}}{\pi \nu Q_{di} \nu \delta_{di}} \quad (4a,b)$$

ここで、 $Q_{di}$  : ダンパーの最大負担せん断力、 $\delta_{dyi}$  : ダンパーの降伏変形である。添え字  $H$  は履歴ダンパーを、 $V$  は粘性ダンパーを表す。

図 6(a) より、層間変形角に着目すると、VD30 に比べて HD30 の層間変形角が小さいことが確認できる。ダンパー非設置時では最大で 1/80、HD30 では 1/140 以内に収まっている。VD30 ではダンパーの設計通り概ね 1/120 程度となっている。併用モデルにおける、境界層付近および粘性ダンパー設置層では HD30 の応答を上回るが、履歴ダンパー設置層では HD30 の応答を下回る。

図 6(b) の応答加速度に着目すると、ダンパー非設置時に比べ VD30 は頂部で 30% 低減している。一方、HD30 は 20 層以下で応答加速度が大きく増大している。併用モデルでは 20 層以下において、HD30 ほど応答加速度は増大せず、21 層以上ではダンパー非設置時と比べても応答が低減している。また、境界層が下層のモデルほど上層の応答加速度が小さいことが確認できる。図 6(c) より、併用モデルにすることで、HD30 および VD30 よりも層せん断力が小さくなることが分かる。

図 6(d) のダンパーによるエネルギー吸収量に着目すると、HD30 では下層のダンパーが集中的に吸収し上層ではダンパーがエネルギーを吸収していないことが分かる。VD30 では下層から上層へ比例的にダンパーによるエネルギー吸収量が減少し、全層で大きな偏りのない吸収をしていることが確認できる。併用モデルでは、HD30 で見られたような上層のダンパーがエネルギーを吸収しない傾向が改善され、中層から上層で粘性ダンパーがエネルギーを吸収し、下層の負担を減少させている。境界層が下層に移るほど全層で均一に

エネルギーを吸収する傾向を示す。

図 6(e) の実効変形比は、ダンパーによるエネルギー吸収量の分布（図 6(d)）と同様の傾向を示している。HD30 は VD30 を下回り、特に上層で差が大きく、HD30 においては 0.5 以下を示している。併用配置にすることで、粘性ダンパー設置層である中・上層において実効変形比は改善されている。特に HD15、HD10 および HD05 においては VD30 を上回る。これは併用配置の大きな特徴と言える。

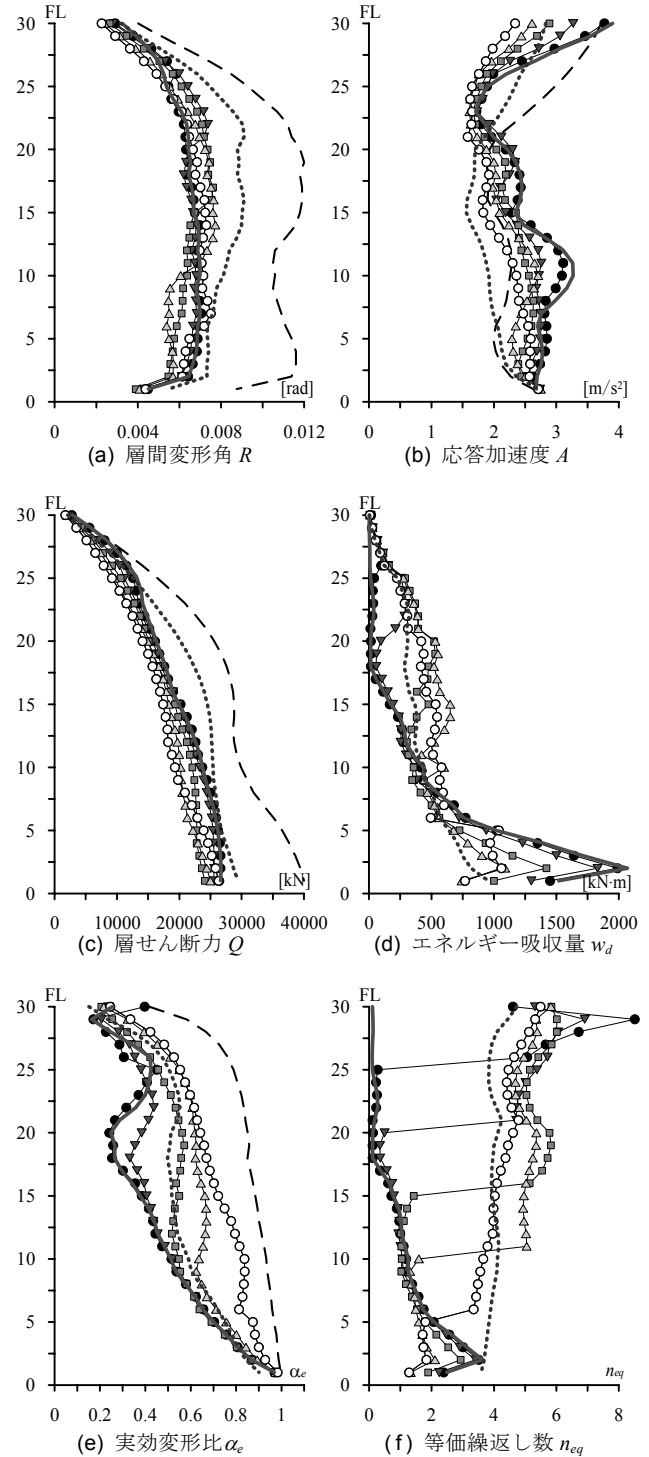


図 6 高さ方向分布 ( $\alpha_{dy1}=0.025$ )

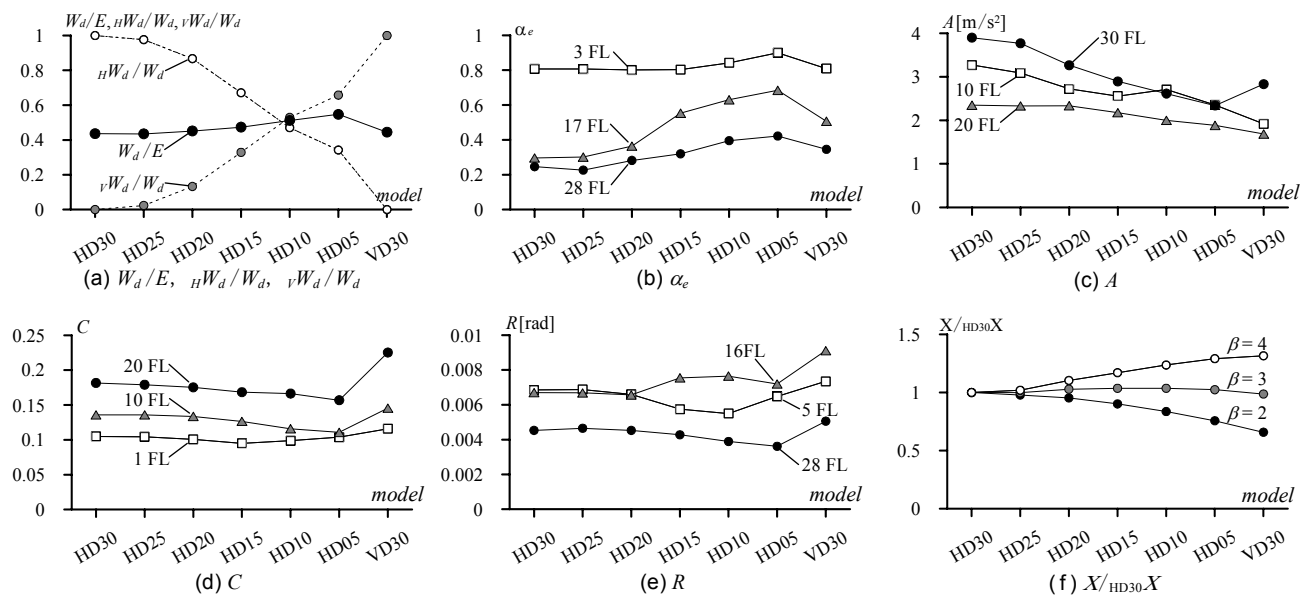


図7 境界層と応答の関係

(a) ダンパーによるエネルギー吸収率, (b) 実効変形比, (c) 応答加速度, (d) 層せん断力係数, (e) 層間変形角, (f) コスト比

層で0.8, 上層で0.1と上層ほど小さい。一方, VD30は各層でほぼ4.0を示している。併用モデルにおける $v_{eqi}$ はVD30よりも増加していることが確認できる。これは, 併用モデルの粘性ダンパーによるエネルギー吸収量 $v_{wi}$ がVD30に比べて大きくなり(図6(d)), さらに併用モデルにおける最大変形が小さな値となった(図6(a))ためである。

HD25およびHD20のように, 中・上層の $\alpha_e$ および $n_{eq}$ がHD30に比べ上昇しているにもかかわらず応答低減が小さい要因として, 上層は地震時のダンパーの負担せん断力が下層に比べて小さく, ダンパーによるエネルギー吸収能力は潜在的に小さいことが考えられる。

### 3.2 境界層と応答の関係

併用モデルにおける履歴ダンパーと粘性ダンパーの境界層が応答に与える影響を示す。図7に各モデルと応答の関係を示す。図7(a)には, 入力エネルギーに対する各層のダンパーによるエネルギー吸収量の総和の比 $W_d/E$ , 各層のダンパーによるエネルギー吸収量の総和に対する履歴ダンパーによるエネルギー吸収量の総和の比 ${}_H W_d/W_d$ , 各層のダンパーによるエネルギー吸収量の総和に対する粘性ダンパーによるエネルギー吸収量の総和の比 ${}_V W_d/W_d$ , 図7(b)~(e)には, 実効変形比 $\alpha_e$ , 応答加速度 $A$ , 層せん断力係数 $C$ , 層間変形角 $R$ を示す。また, 図7(f)には, HD30におけるダンパーコストの総和に対する各モデルのダンパーコストの総和の比 $X/{}_{HD30}X$ (コスト比)について示す。 $\alpha_e$ ,  $A$ ,  $C$ および $R$ においては上・中・下層に対して評価を行う。また, ダンパーのコストは各ダンパーの最大減衰力に対して履歴ダンパーの単価を減衰力あたり $p$ 円/kN, 粘性ダンパーの単価を減衰力あたり $\beta \cdot p$ 円/kNとして算出した。

図7(a)より,  $W_d/E$ は2.1節で述べた設定通りHD30とVD30の $W_d/E$ が等しいことが確認できる。併用モデルにすることでHD30およびVD30に比べて $W_d/E$ が増加し, 制振効果が向上することが確認できる。その傾向は, 境界層が下層であるほど $W_d/E$ が大きい。 ${}_H W_d/W_d$ ,  ${}_V W_d/W_d$ に着目すると, 境界層が下層に移るほど単調に増減し, HD10で ${}_H W_d/W_d$ と ${}_V W_d/W_d$ が等しくなるのが確認できる。上層の粘性ダンパーが多くエネルギーを吸収するためには境界層の

位置が重要となると考えられる。

図7(b)より, HD25の28FLでHD30に比べ $\alpha_e$ が低下しているが, その他はHD30に比べ $\alpha_e$ が増加し, ダンパー効率が改善されることが確認できる。特に中層(17FL)における増加傾向は顕著である。併用モデルによる制振効果の向上は実効変形比からも確認できる。

図7(c)の $A$ に着目すると, 併用配置にすることでHD30の $A$ に比べて小さく, 境界層が下層に移るほど単調減少しているのが確認できる。図7(d)の $C$ も同様で, 併用配置にすることでHD30に比べて応答は小さく, 1FLの $C$ ではHD15で極小値を示すことが確認できる。図7(e)の $R$ に着目すると, 下層(5FL)ではHD30よりも併用モデルの応答は小さいが, 粘性ダンパー設置層である上層(28FL)および中層(16FL)では併用モデルの応答がHD30に比べて大きくなるので注意が必要である。これは, 履歴ダンパー設置層に比べ粘性ダンパー設置層の層剛性が小さいためだと考えられる。

図7(f)の $X/{}_{HD30}X$ については, 一般的に履歴ダンパーの単価に比べ粘性ダンパーの単価が高いことから,  $\beta=2, 3, 4$ の3つについて検討する。 $\beta=3$ において,  $X/{}_{HD30}X$ は各モデルの間に大きな差は生じない。 $\beta=2$ および4において, 併用モデルの $X/{}_{HD30}X$ はHD30およびVD30の間に収まり,  $\beta=2$ では粘性ダンパー設置層が多いほどコストは安く,  $\beta=4$ では粘性ダンパー設置層が多いほどコストは高くなる。設計時には, クライテリアとコストによる制約を伴うが, 併用モデルはクライテリアおよびコストの両者を調整しやすくなるを考える。

## 4. ダンパー量と制振効果の関係

### 4.1 履歴ダンパー量と応答の関係

履歴ダンパー量を変化させたとき, 前節同様, 併用による制振効果の向上を示すかを確認する。履歴ダンパー量は $\alpha_{d1}=0.005\sim0.035$ とし, VD30の粘性ダンパー量は各 $\alpha_{d1}$ に対してHD30とVD30両者の $W_d/E$ が等しくなるように設定した。

図8に $\alpha_{d1}$ と応答の関係を示す。図8(a)より, 入力エネルギーに対する各層のダンパーによるエネルギー吸収量の総和の比 $W_d/E$ は,

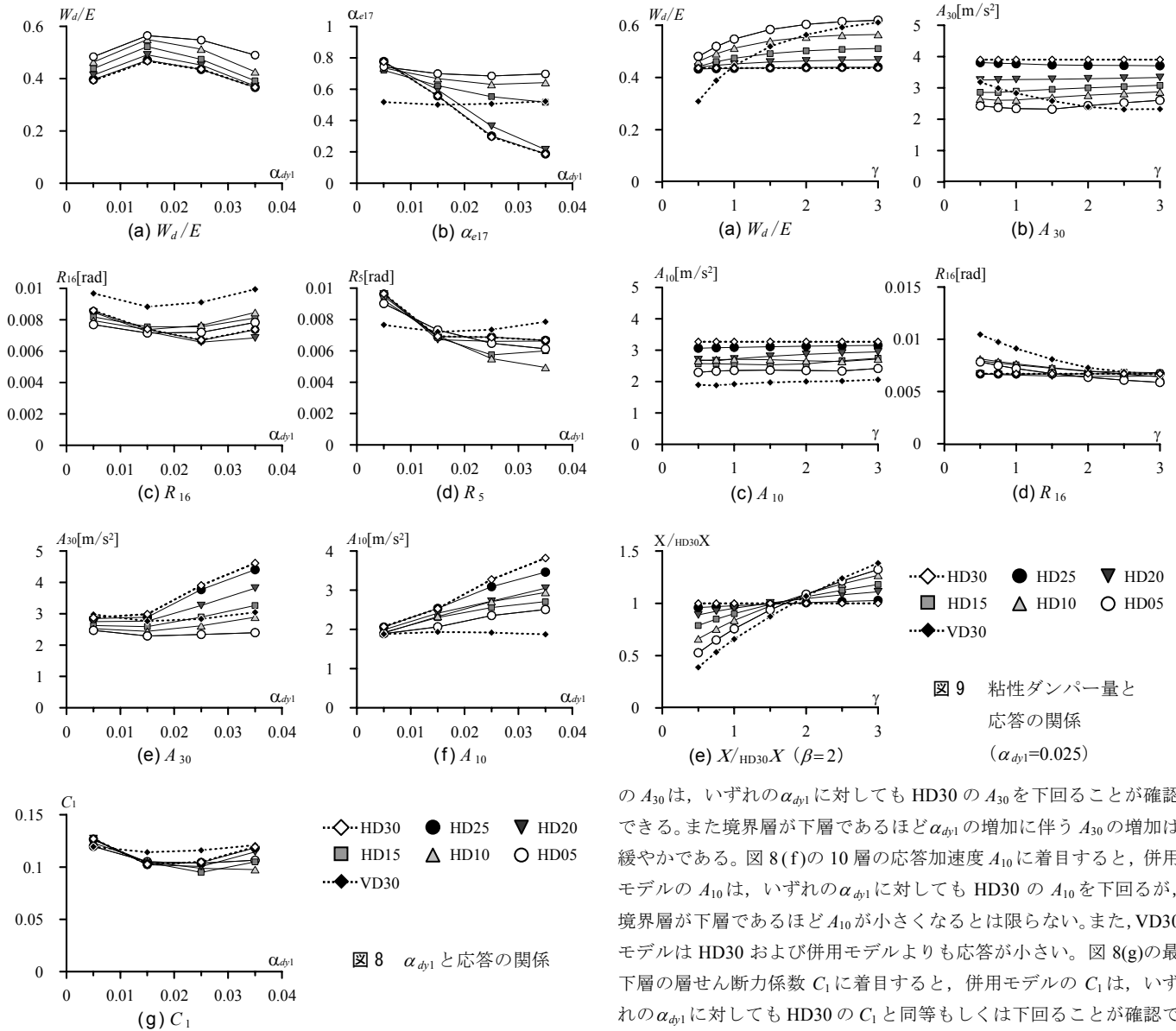


図8  $\alpha_{d1}$  と応答の関係

設定 (2.1 節) 通り HD30 と VD30 の  $W_d/E$  が等しいことが確認できる。併用モデルの  $W_d/E$  は、いずれの  $\alpha_{d1}$  に対してでも HD30 および VD30 の  $W_d/E$  以上となり、併用配置によりダンパーのエネルギー吸収効率が向上することが確認できる。

図 8(b) の 17 層の実効変形比  $\alpha_{e17}$  に着目すると、 $\alpha_{d1}=0.005$  では併用モデルと HD30 との差は小さいが、 $\alpha_{d1}$  が 0.015 以上で併用モデルの  $\alpha_{e17}$  は HD30 の  $\alpha_{e17}$  を上回り、併用配置によってダンパー効率が改善されることが確認できる。 $\alpha_e$  は履歴ダンパーの量が多いほど低下するが、塑性化の程度が大きいほど上昇する。ダンパー量が少ない  $\alpha_{d1}=0.005$  では、塑性化の程度が大きいため VD30 の  $\alpha_e$  と比べて HD30 の  $\alpha_e$  が上回り、併用配置にしてもダンパー効率は改善しなかったと考えられる。

図 8(c), (d) の 16 層および 5 層の層間変形角  $R_{16}$ ,  $R_5$  に着目すると、 $\alpha_{d1}=0.015$  までは  $R_{16}$  および  $R_5$  の両方で併用モデルと HD30 との差は小さく、 $\alpha_{d1}$  が 0.015 以上では併用モデルは HD30 に比べ  $R_{16}$  が増大し、 $R_5$  は減少する。VD30 と HD30 の  $W_d/E$  が等しいとき、VD30 は併用モデルと HD30 に比べて変形制御能力が劣ることが図 8 からわかる。図 8(e) の頂部の応答加速度  $A_{30}$  に着目すると、併用モデル

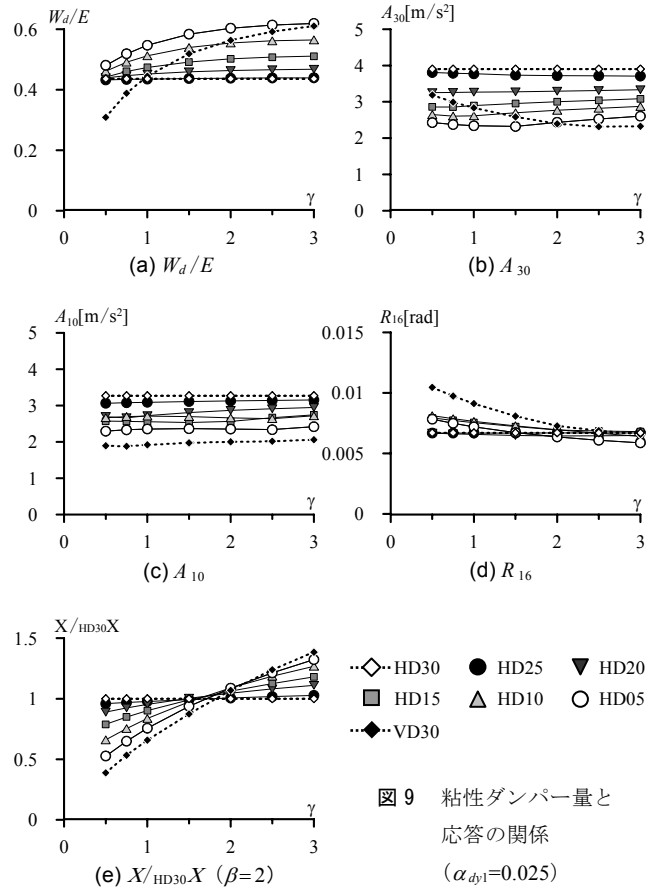


図9 粘性ダンパー量と応答の関係 ( $\alpha_{d1}=0.025$ )

の  $A_{30}$  は、いずれの  $\alpha_{d1}$  に対してでも HD30 の  $A_{30}$  を下回ることが確認できる。また境界層が下層であるほど  $\alpha_{d1}$  の増加に伴う  $A_{30}$  の増加は緩やかである。図 8(f) の 10 層の応答加速度  $A_{10}$  に着目すると、併用モデルの  $A_{10}$  は、いずれの  $\alpha_{d1}$  に対してでも HD30 の  $A_{10}$  を下回るが、境界層が下層であるほど  $A_{10}$  が小さくなるとは限らない。また、VD30 モデルは HD30 および併用モデルよりも応答が小さい。図 8(g) の最下層の層せん断力係数  $C_1$  に着目すると、併用モデルの  $C_1$  は、いずれの  $\alpha_{d1}$  に対してでも HD30 の  $C_1$  と同等もしくは下回ることが確認できる。また、 $\alpha_{d1}$  が大きいほど併用モデルと HD30 の差は大きい。

#### 4.2 粘性ダンパー量と応答の関係

本節では HD30 と VD30 両者の  $W_d/E$  が等しい条件を考慮せず、粘性ダンパー量を変化させたときに応答特性にどのような影響を与えるかを示す。履歴ダンパーの量は設定値 ( $\alpha_{d1}=0.025$ ) とし、粘性ダンパーの量は設定値の粘性係数  $C_{di}$  および直列結合するバネ剛性  $K_{di}$  を各層一律に 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 倍する。図 9 に粘性ダンパーの量を設定値に対して 0.5~3.0 倍に変化させたときの応答結果を示す。また、横軸に倍率  $\gamma$ 、縦軸に応答を示す。

図 9(a) より、併用モデルおよび VD30 の  $W_d/E$  はダンパー量が増加するほど単調に増加し、2.0 倍以上で収束傾向を示す。収束する値は境界層が下層であるほど大きい。

図 9(b), (c) の頂部の応答加速度  $A_{30}$  および 10 層の応答加速度  $A_{10}$  に着目すると、併用モデルはいずれのダンパー量においても HD30 を下回り、ダンパー量が増加してもほとんど変化は見られない。VD30 の  $A_{30}$  はダンパー量が増加するほど単調に減少し、2.0 倍以上で収束傾向を示すが、 $A_{10}$  はダンパー量が増加してもほとんど変化は見られない。また、VD30 の  $A_{10}$  は併用モデルよりも応答が小さくな

る。図 9(d)の 16 層の層間変形角  $R_{16}$  に着目すると、ダンパー量が増加するほど単調に減少し、粘性ダンパーを設置した層の層間変形角の増大を防ぐことができる。粘性ダンパー量を 3.0 倍に増加させても層間変形角は HD30 の場合と同程度である。粘性ダンパー量の増加に対する層間変形角の低減には極値を示す傾向が見られるため、層間変形角を HD30 よりも抑えることは困難であると思われる。

図 9(e)の HD30 のダンパーのコスト比  $X_{HD30}/X$  ( $\beta=2$ ) において、全てのモデルで粘性ダンパー量が増えるほど  $X_{HD30}/X$  は高くなり、設定値に対して約 2.0 倍で HD30 と等しくなる。粘性ダンパーの量を増やすことで、粘性ダンパー設置層の層間変形角の増大を防ぐことはできるが、コストが高くなることを伴ってしまう。

## 5. まとめ

地上 30 階の超高層鋼構造建物を対象に、下層に履歴ダンパーを設置し、上層に粘性ダンパーを配置したモデル（併用モデル）の応答特性を時刻歴応答解析より示した。また、履歴ダンパーと粘性ダンパーの配置が切替わる層（境界層）、履歴ダンパーと粘性ダンパーの量が、制振効果に与える影響について示した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 超高層制振建物は一般に中層から上層にかけてダンパーが有効に稼働しないが、併用モデルは粘性ダンパー設置層でダンパー効率が改善されるため、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。また、その傾向は境界層が下層であるほど大きい。
- (2) 併用モデルは頂部の応答加速度、層せん断力および下層の層間変形角に対して応答低減が大きく、履歴ダンパーの量が増加しても、履歴ダンパー単独に用いたときに比べ応答加速度の増大およびダンパー効率の減少が小さく、履歴ダンパー単独使用時の欠点が改善される。
- (3) 併用モデルに対して粘性ダンパーの量を増加すると、ダンパーによるエネルギー吸収量は増加し、粘性ダンパー設置層の最大層間変形角は減少するため、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。しかし、一定量以上で収束傾向を示し、それ以上の制振効果は得られない。

本報では、粘性ダンパーとして線形 Maxwell モデルを用いているが、速度に対してバイリニア特性を有する場合や速度のべき乗に比例する場合での検討は今後の課題とする。

## 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。

## 参考文献

- 1) 坂本光男：制震構造の設計 制震計画，建築技術，No.559，pp.112-113，1996.10
- 2) 北村春幸，北村佳久，伊藤優，坂本光男：適用建物調査に基づく日本の応答制御構造の分析・評価，日本建築学会技術報告集，No.18，pp.55-60，2003.12
- 3) 小野喜信，黄一華，和田章：履歴ダンパーと粘性ダンパーを組んだ高層建物の動的性質，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.629-630，1996.9
- 4) 小幡学，打越瑞昌，内田富久：混合制振構造の実施例，パッシブ制振構

造シンポジウム，pp.159-166，2000

- 5) 杉山満，森本修司，小泉学，河合広樹，竹内徹，市川康：履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した建物の設計，パッシブ制振構造シンポジウム，pp.151-158，2000
- 6) 渥美孝紘，北村春幸，石井正人，浦本弥樹：鋼構造超高層建物における履歴減衰型・粘性減衰型制振部材の高さ方向併用配置の提案（その 1-2），日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.763-766，2006.9
- 7) パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第 2 版，（社）日本免震構造会（JSSI），2005.9
- 8) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1997
- 9) 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
- 10) 石井正人，笠井和彦：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.103-112，2010.11
- 11) 添田幸平，佐藤大樹，北村春幸，古谷慶，石井正人，吉江慶祐，山崎充，佐々木和彦，岩崎雄一：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

## 付録 A 骨組特性値<sup>9,10</sup>を用いた線形粘性ダンパーの実効変形比の算出

筆者らは、時刻歴応答解析を行わずに骨組の静的解析のみから全層に弾性ブレースを設置した時の実効変形比の算出法を提案し、精度が良好であることを検証した<sup>11)</sup>。本節では、同様の方法を線形粘性ダンパーに対して適用し、その検証結果を示す。算出の手順を以下に示す。

- 1) 石井ら<sup>10)</sup>の手法より骨組特性値および擬似ブレース剛性を算出し、曲げ変形の影響を表現できるせん断モデルを作成する（図 A1）。骨組特性値および擬似ブレース剛性は主架構のみの弾性剛性モデル（状態  $N$ ）と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モデル（状態  $R$ ）の 2 ケースの静的解析結果から得られる。

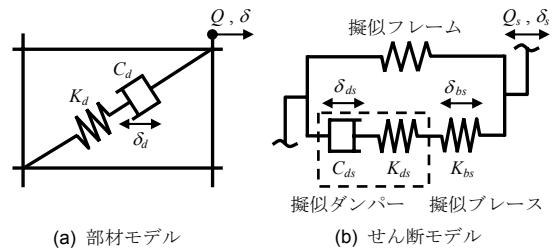


図 A1 部材モデルとせん断モデルの対応関係

- 2) せん断モデル（図 A1(b)）における円振動数  $\omega$  の定常振動時の実効変形比  $\alpha_{es}$  は次式で表される。

$$\alpha_{es} = \frac{\delta_d}{\delta} = \frac{\alpha_N \cdot \delta_{ds}}{\delta_s} = \frac{\alpha_N}{\sqrt{1 + (C_{ds} \cdot \omega / K_{bs}^*)^2}} \quad (A1)$$

$$C_{ds} = \alpha_N^2 \cdot C_d, \quad K_{ds} = \alpha_N^2 \cdot K_d, \quad K_{bs}^* = \frac{K_{bs} \cdot K_{ds}}{K_{bs} + K_{ds}} \quad (A2a,b,c)$$

ここで、 $\alpha_N$  および  $K_{bs}$  は状態  $N$ ・状態  $R$  の 2 ケースの静的解析結果から得られる骨組特性値および擬似ブレース剛性である。今回、 $\omega$  は主架構の弾性 1 次固有振動数  $\omega_1$  を採用する。

図 A2 に VD30 における  $\alpha_{es}$  の精度検証結果を示す。ダンパー量は設定値とする。入力地震動は ART-HACHI ( $S_r=0.8\text{m/s}$ ) である。図 A2 より、最下層および最上層において精度が劣るが、その他の層は 15% 以内の誤差に収まる。

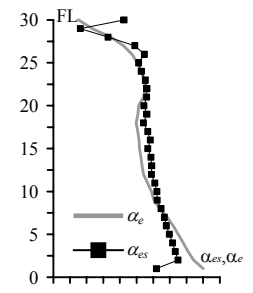


図 A2  $\alpha_{es}$  の精度検証結果

[2011 年 10 月 20 日原稿受理 2011 年 12 月 13 日採用決定]