

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	履歴ダンパーを有する超高層建物における実効変形比とダンパー塑性率の関係
Title(English)	RELATIONSHIP BETWEEN EFFECTIVE DAMPER DEFORMATION AND DAMPER DUCTILITY DEMAND FOR HIGH-RISE BUILDING WITH HYSTERETIC DAMPERS
著者(和文)	澤侑弥, 佐藤大樹, 戸張涼太, 吉永光寿, 安永隼平, 金城陽介
Authors(English)	Yuya Sawa, Daiki Sato, Ryota Tobari, Mitsutoshi Yoshinaga, Jumpei Yasunaga, Yosuke Kaneshiro
出典(和文)	日本建築学会技術報告集, Vol. 27, No. 65, pp. 154-159
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 27, No. 65, pp. 154-159
発行日 / Pub. date	2021, 2
権利情報	日本建築学会

# 履歴ダンパーを有する超高層建物における実効変形比とダンパー塑性率の関係

# RELATIONSHIP BETWEEN EFFECTIVE DAMPER DEFORMATION AND DAMPER DUCTILITY DEMAND FOR HIGH-RISE BUILDING WITH HYSTERETIC DAMPERS

澤 侑弥 — \* 1 佐藤大樹 — \* 2  
戸張涼太 — \* 3 吉永光寿 — \* 3  
安永隼平 — \* 4 金城陽介 — \* 5

Yuya SAWA — \* 1 Daiki SATO — \* 2  
Ryota TOBARI — \* 3 Mitsutoshi YOSHINAGA — \* 3  
Jumpei YASUNAGA — \* 4 Yosuke KANESHIRO — \* 5

キーワード：  
超高層建物, 制振構造, 履歴ダンパー, 実効変形比, 塑性率

Keywords:  
High-rise building, Passively controlled structure, Hysteretic damper, Effective damper deformation, Ductility demand

Recent studies predict that Nankai-Trough earthquake to be a huge one. As a mitigating measure, passive dampers are widely adopted to control structural vibrations of buildings. These devices work effectively against the inter-story shear deformation of the building frame. In contrast, they are less effective when building deformation is mainly characterized as flexural or bending deformation. It is, therefore, important to study the effective damper deformation in order to evaluate vibration control performance. This paper aims to clarify the relationship between the effective damper deformation and damper ductility demand when the damper works effectively.

## 1. はじめに

近年, 南海トラフ地震等の大地震の発生が予測されている。その対策として, 制振構造を取り入れる建物が増えてきている。制振構造は制振ダンパーの粘性減衰や塑性履歴エネルギーの消散により, 建物の振動エネルギーを軽減させ, 建物の振動および主架構の損傷を軽減させるものである<sup>1)</sup>。

層間に設置する制振ダンパーは一般にフレームの層間変形のうち, せん断変形に対してのみ有効であるため, 曲げ変形成分が大きくなるようなダンパーの設置状況(配置計画, 投入量)ではダンパーが有効に作用しない。そのため, 制振性能の評価には, フレームの層間変形に対するダンパーの水平変形成分の割合(以下, 実効変形比)の評価が重要になる。しかし, 実効変形比には, ダンパーの配置計画および投入量, 地震波のレベルなど様々な因子が存在する。部材構成モデルを用いた解析では詳細な検討が可能になる。一方で, 時刻歴応答では, せん断モデルを用いることも多くある。設計初期段階などのパラメトリックな解析を行う上では自由度の少ないせん断モデルを用いた検討が求められると言える<sup>2,3)</sup>。

実効変形比を考慮したせん断モデル化手法は, 主架構のみの弾性部材モデル(状態 N)および弾性部材モデルの付加系<sup>1)</sup>の設置箇所に関性が極端に高い弾性バネを挿入したモデル(状態 R)から得られる骨組特性値を用いることにより作成する手法(状態 N/R 法)が提案されている<sup>2,3)</sup>。古谷らは, 骨組特性値を用い, 30 層鉄骨構造建物において, 時刻歴応答解析を行うことなく, 有効な制振部材の配置計画および投入量の判断を行える制振性能評価指標を提案している<sup>4)</sup>。ま

た, ダンパーの設置状況の違いが制振性能に与える影響について耐震設計法に基づいた評価も行っている<sup>6)</sup>。戸張らは, 履歴ダンパーを有する中層から超高層のアスペクト比の異なる建物の応答低減効果について検討し, 文献 4)の制振性能評価を複数の建物にも適用しその有効性を確認している<sup>5)</sup>。

一方, 履歴ダンパーの設計や性能評価においては塑性率を用いる研究も多い<sup>1,7-10)</sup>。笠井らは, システム(フレームにダンパーを付加した状態)の塑性率を高めた設計において, 制振構造のせん断力と変位を同時に低減できると述べている<sup>1,8)</sup>。また, ダンパーの最大塑性率や制振構造の固有周期および地震波の継続時間はダンパーの累積塑性変形に大きな影響を与えることも指摘している<sup>9)</sup>。さらに, ダンパー剛性・降伏力・塑性率を調整することで, 理論的かつ合理的な設計ができることを示し, フレームとダンパーの剛性比および塑性率で変位低減率とせん断力または擬似加速度低減率をプロットした性能曲線を提案し, 制振効果の評価を行っている<sup>10)</sup>。

近年では巨大地震の発生に備え, 既往の設計や研究よりも大きな地震動での検討が求められている。さらに, 長周期地震動の対策として地域ごとに基盤促波を設計時に用いて検討を行うことがある<sup>11)</sup>。

本論文では, 履歴ダンパーが有効に作用する時(最適ダンパー量時)の実効変形比と塑性率の関係性を明らかにすることを目的とする。具体的には, 骨組特性値を用いた制振性能評価<sup>4,6)</sup>に塑性率を加味し検討を行うことで, 最適ダンパー量時の実効変形比と塑性率の関係性を述べる。実効変形比および塑性率に大きく影響を与える可能性のある地震波の特性やレベルおよびダンパー投入量をパラメータと

<sup>1)</sup> 東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生  
(〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

<sup>2)</sup> 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)

<sup>3)</sup> JFE シビル(株)

<sup>4)</sup> JFE スチール(株) 博士(工学)

<sup>5)</sup> JFE スチール(株)

<sup>1)</sup> Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

<sup>2)</sup> Assoc. Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

<sup>3)</sup> JFE Civil Engineering & Construction Corporation

<sup>4)</sup> JFE Steel Corporation, Dr. Eng.

<sup>5)</sup> JFE Steel Corporation

して、時刻歴応答解析をすることで検討を行う。なお、塑性率の評価においては、付加系の塑性率 $r$ で評価を行うことで、設計法提案に対し有効であるため、本論文では付加系塑性率を用いて評価、検討を行うこととする。

## 2. モデル概要

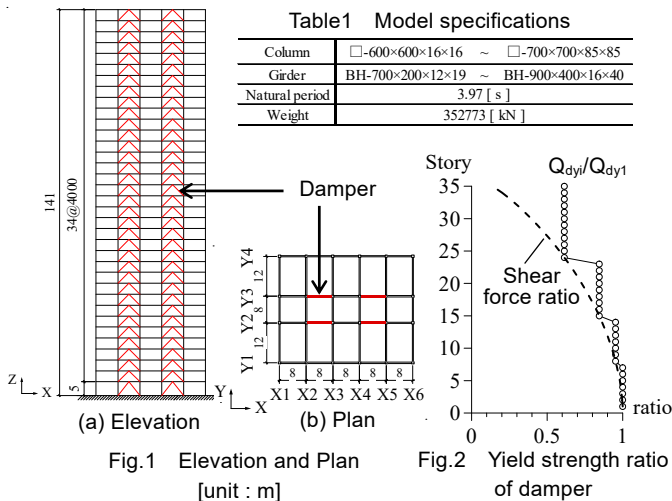
### 2.1 検討対象建物およびダンパーの概要

検討対象建物は35階建ての鉄骨構造建物とする<sup>5)</sup>。解析は構造計算プログラムであるRESP-Dを用いて行う。Fig.1(a)に検討建物の軸組図、(b)に基準階伏図、Table1に建物諸元を示す。主架構のみの1次固有周期は3.97sである。構造減衰は1次固有周期に対して、減衰定数 $h = 2\%$ となる初期剛性比例型とする。また、X方向のみ検討を行う。なお、本論文では制振構造の性状を明らかにするため、主架構は弾性として検討を行うこととする。

制振部材の高さ方向の配置はFig.1に示すように連層配置とする。制振部材は履歴型ダンパーとして座屈拘束ブレースを用いる。座屈拘束ブレース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 $L_d/3$ 、塑性化部断面積 $A_d$ に対して弾性部断面積 $2A_d$ とする。塑性化部にはLY225材を用い完全弾塑性とする。本論文では断面積を一定とした等価断面のダンパー（以降、ダンパー）としてモデル化する。各層のダンパー降伏層せん断力分布は、第1層のダンパー降伏層せん断力 $Q_{dy1}$ を基準とし、地震層せん断力係数の高さ方向分布（Ai分布）に基づく設計用層せん断力分布をもとに4段階とする（Fig.2）<sup>5)</sup>。 $Q_{dy1}$ と第1層のダンパー降伏層せん断力係数 $\alpha_{dy1}$ の関係は式(1)で表す。

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

ここで、 $N$ は層数、 $m_i$ は第 $i$ 層の質量、 $g$ は重力加速度を表す。なお、本論文では第1層のダンパー降伏層せん断力係数 $\alpha_{dy1}$ をダンパー量と呼び、 $\alpha_{dy1} = 0.005 \sim 0.030$ の計6種で検討を行う。



### 2.2 せん断モデル化手法の概要<sup>2,3)</sup>

以下に実効変形比を考慮したせん断モデル化手法を記す。本論文では制振構造の性能を明らかにするため、主架構バネ（擬似フレーム、Fig.4(b)にて後述）は弾性としてモデル化する。せん断モデルにおけるダンパーは、状態N/R解析（Fig.3）より得られる状態Nの実効変

形比 $\alpha_N$ 、擬似ブレース剛性 $K_{bs}$ および擬似ダンパー剛性 $K_{ds}$ の骨組特性値よりモデル化が行える<sup>2,3)</sup>。

状態N解析（Fig.3(a)）は、主架構のみの弾性部材モデルの各層にAi分布などの外力を作用させる解析である。状態N解析により、第 $i$ 層 $j$ 番目の制振部材設置箇所における相対変形の水平成分 $\delta_{dN(i,j)}$ の層間変位 $\delta_{Ni}$ に対する比 $\alpha_{N(i,j)}$ が算出できる。

$$\alpha_{N(i,j)} = \delta_{dN(i,j)} / \delta_{Ni} \quad (2)$$

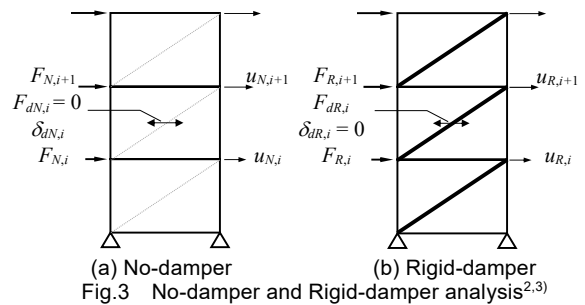
状態R解析（Fig.3(b)）は、主架構のみの弾性部材モデルの制振部材設置位置に剛性が極端に高い弾性バネを挿入することにより、その相対変形が限りなくゼロに近くなる状態を保ち、各層にAi分布などの外力を作用させる解析である。

擬似ブレース剛性 $K_{bs}$ は状態N/R解析より算出できる。状態Rにおける制振部材軸力の水平成分 $F_{dR(i,j)}$ と層間変位 $\delta_{Ri}$ で剛性 $K_{dR(i,j)}$ （式(3)）を各制振部材設置箇所について計算し、第 $i$ 層におけるダンパー総数を $N_{dj}$ とすると、擬似ブレース剛性 $K_{bs,i}$ を得られる（式(4)）。

$$K_{dR(i,j)} = F_{dR(i,j)} / \delta_{Ri}, \quad K_{bs,i} = \sum_{j=1}^{N_{dj}} \alpha_{N(i,j)} \times K_{dR(i,j)} \quad (3,4)$$

擬似ダンパー剛性 $K_{ds,i}$ は部材構成モデルのダンパー剛性水平成分 $K_{d(i,j)}$ と式(2)を用いて算出できる（式(5)）。

$$K_{ds,i} = \sum_{j=1}^{N_{dj}} (\alpha_{N(i,j)})^2 \times K_{d(i,j)} \quad (5)$$



各要素からなる骨組モデルの部材構成モデルおよび各層の要素を水平バネに模擬したせん断モデルの対応関係をFig.4に示す。Fig.4(a)に示す $F, \delta$ はフレームのせん断力および層間変形であり、 $\hat{K}_d, \hat{F}_d, \hat{\delta}_d$ はそれぞれ軸方向のダンパーの剛性、軸力、変形を示す。Fig.4(b)に示すせん断モデルは、擬似フレーム、擬似ダンパー、擬似ブレースで構成され、それぞれの剛性を $K_{fs}, K_{ds}, K_{bs}$ で表す。ここに示す擬似フレーム剛性 $K_{fs}$ はフレームのみの部材構成モデルの $F$ - $\delta$ 関係から算出している。付加系とは擬似ダンパーおよび擬似ブレースを直列に結合したものを差し、その剛性を $K_{as}$ と表す。

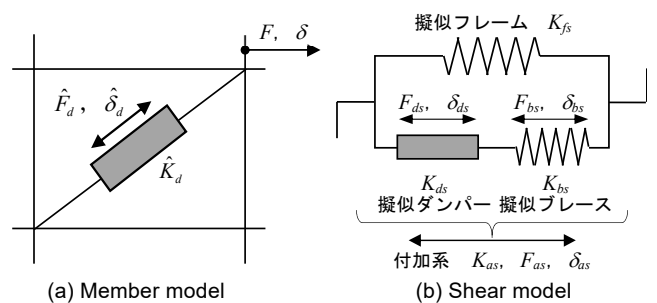


Fig.4 M-model and S-model

Fig.5(a)~(c)にそれぞれ $\alpha_N$ ,  $K_{bs}$ ,  $K_{ds}$ の高さ方向分布を示す。なお、本論文では左右対称な平面計画 (Fig.1(b)) であることから、 $\alpha_{N(i,j)}$ は平均化し $\alpha_{N_i}$ とする。Fig.5(c)の $K_{fs}$ は擬似フレーム剛性を示す。Fig.5(b),(c)より、低層部の $K_{bs}$ は $K_{ds}$ に対して非常に大きく、 $K_{bs}$ と $K_{ds}$ は直列の関係であることから、 $K_{ds}$ が支配的になることがわかる。しかし、上層になるに連れ、 $K_{bs}$ は小さくなり $K_{ds}$ との大小関係が逆転する。このことから、上層部では $K_{bs}$ の影響が大きくなり、層間変形に対する擬似ダンパーの変形の割合が小さくなるのがわかる。

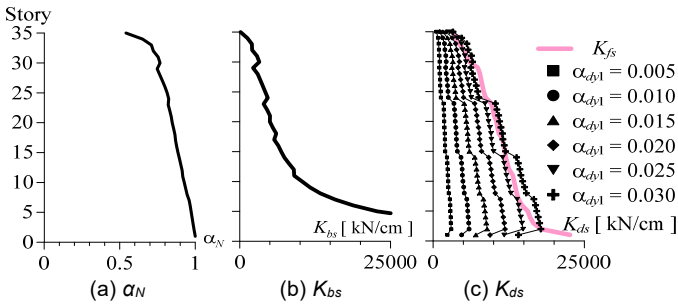


Fig.5 Frame parameters for control

### 3. 入力地震動の概要

本論文では、コーナー周期 $T_c=0.64$ s以降で擬似速度応答スペクトル $\rho S_v=80$ cm/sとなる模擬地震動で、位相特性としてHACHINOHE 1968 EWおよびJMA KOBE 1995 EWを採用する。以降、それぞれをART HACHI, ART KOBEと呼ぶ。また、基整促波であるOS1<sup>11)</sup>を用いることとする。本論文では、地震動の特性の違いが制振効果に及ぼす影響について検討するために長周期地震動としてART HACHIおよびOS1を、パルス性地震動としてART KOBEを選定した。Fig.6に3波の入力地震動加速度波形を示す。Fig.6に実効継続時間 $e_{t0}$ も示す。なお、 $e_{t0}$ は加速度の累積二乗和が5%~95%となる値としている<sup>12)</sup>。Fig.7(a)に減衰定数 $h=5\%$ の時の擬似速度応答スペクトル $\rho S_v$ , (b)に $h$

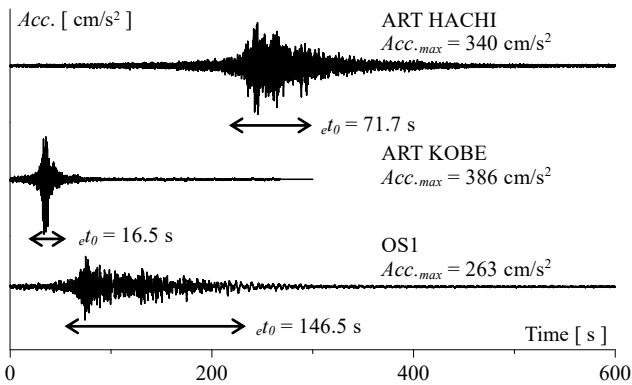


Fig.6 Acceleration time history

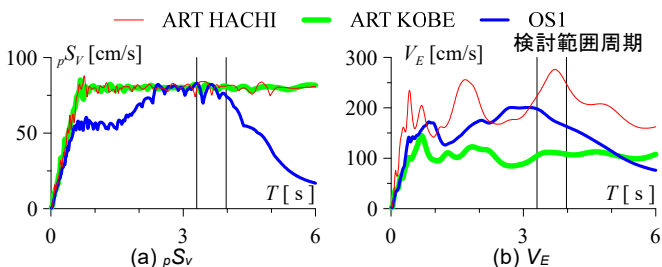


Fig.7 Earthquake spectra

= 10%のエネルギースペクトル $V_E$ を示す。図中の検討範囲周期は履歴ダンパーを設置した場合に、固有周期が変化する範囲を示したものである。ダンパー量の多いモデルほど、固有周期が短くなる。また、地震動レベルによる制振効果の違いを検討するために、それぞれの0.2~2.0倍波の計30波を入力地震動として時刻歴応答解析を行う。

### 4. 地震波が制振性能に与える影響

本章では、各地震波特性、レベルおよびダンパー量の違いが与える応答低減効果の違いを述べる。また、文献4,5)の骨組特性値を用いた制振性能評価を入力倍率を考慮して検討を行う。

#### 4.1 各地震波における応答低減効果

Fig.8(a)~(c)にせん断モデルにART HACHI, ART KOBE, OS1を入力した時の最大層間変形角 $R_{max}$ , 最大絶対加速度 $Acc_{max}$ , 第1層の層せん断力係数 $\alpha_1$ を示す。なお、骨組特性値を用いてせん断モデルの応答値の精度に関して、文献13)で示しているため、そちらを参照されたい。ただし、Fig.8に示す応答は0.4, 1.0, 2.0倍波のみとしている。各地震波の応答比較において、ART HACHI, ART KOBE, OS1の順に大きな応答を示すことが確認できる。Fig.8(a), (c)の層間変形角と第1層の層せん断力係数より、0.4倍波ではダンパー量を増加させても、主架構のみの $\alpha_{dy1}=0$ と応答があまり変わらないことが確認できる。ART HACHI, OS1の1.0倍波入力時以降においては、地震動レベルおよびダンパー量の増加に伴い、応答が低減もしくは横ばいとなる。ART KOBE入力時はある一定のダンパー量までは応答が低減するがそれ以降は応答が増大する。Fig.8(b)の絶対加速度において、ダンパー量の増加に伴い応答が増大することがわかる。地震動レベルによる制振効果への影響においては、小さな地震動レベルでは制振効果は発揮しないが、地震動が大きくなるにつれ制振効果が高まるのがわかる。以上より、制振効果は、地震波や地震動レベルにより異なることが確認できる。

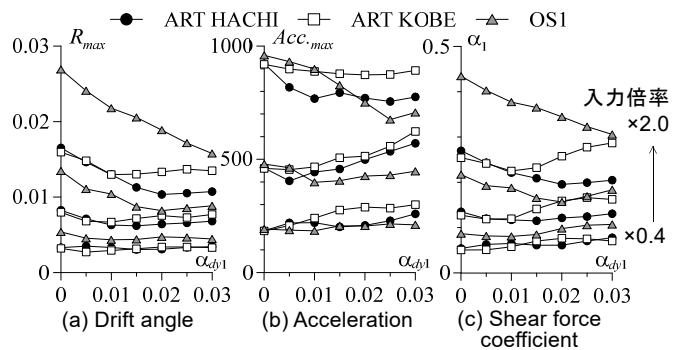


Fig.8 Maximum responses

#### 4.2 各地震波におけるエネルギー吸収率

Fig.9(a)~(c)にそれぞれART HACHI, ART KOBE, OS1入力時のエネルギー吸収率 $\Sigma W_{dp}/E$ (入力エネルギー $E$ に対するダンパーのエネルギー吸収量 $W_{dp}$ の比)を示す。なお、Fig.9に示すせん断モデルのエネルギー吸収率であるが、文献13)にて部材構成モデルとの比較を行っているため、そちらを参照されたい。Fig.9(a), (c)より、ART HACHI, OS1入力時はあるダンパー量までは $\Sigma W_{dp}/E$ は増加するが、それ以降では減少する傾向が見られた。Fig.9(b)よりART KOBE入力時も1.2倍波までは同様の傾向が見られたが、それ以降の入力倍率波形では

ダンパー量の増加に伴い、 $\Sigma W_{dp}/E$  も増加することが確認できる。以上より、エネルギー吸収率を見ると、地震波の特性、レベルごとにダンパーが効率よくエネルギー吸収を行うダンパー量が存在することがわかる。以降では、 $\Sigma W_{dp}/E$  が最大値を示すダンパー量を最適ダンパー量<sup>4,5)</sup>と定義し考察を行っていく。最適ダンパー量を Table2 に示す。最適ダンパー量は入力地震動レベルごとに異なり、入力倍率の増加に伴い大きくなる。しかし、0.2 倍波などの極端に小さな地震動、もしくは 2.0 倍波等の極端に大きな地震動だと本論文の検討ダンパー量の範囲外で最適ダンパー量となる可能性がある。

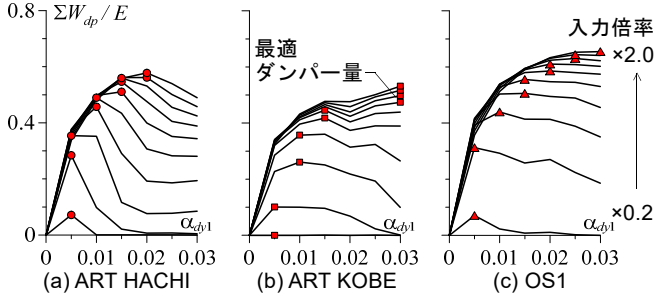


Fig.9 Damper energy absorption ratio

Table2 Optimal damper shear coefficient ( $\alpha_{dp1}$ )

WAVE	20%	40%	60%	80%	100%	120%	140%	160%	180%	200%
ART HACHI	0.005	0.005	0.005	0.010	0.010	0.015	0.015	0.015	0.020	0.020
ART KOBE	0.005	0.005	0.010	0.010	0.015	0.015	0.030	0.030	0.030	0.030
OS1	0.005	0.005	0.010	0.015	0.015	0.020	0.020	0.025	0.025	0.030

### 4.3 骨組特性値を用いた制振性能評価

文献 4,5)では、状態 N/R 解析より得られる実効変形比の上限値 $\alpha_N$ と、擬ダンパー弾性時の実効変形比（実効変形比の下限値） $\alpha_{es}$ を用いて制振性能評価を行っている。しかし、いずれも地震動レベルの検討はされていないため、本論文では各地震動レベルにおける実効変形比 $\alpha_e$ 、 $\alpha_N$ および $\alpha_{es}$ の関係性の検討を行う。以下に実効変形比 $\alpha_e$ および $\alpha_{es}$ の定義を記す。ただし、文献 4,5)に用いられている $\alpha_{es}$ には誤りがあったため、再定義を行う。

部材構成モデルのダンパーの軸変形、軸力、剛性の水平成分をそれぞれ $\delta_d$ 、 $F_d$ 、 $K_d$ とし、せん断モデルの擬ダンパー変形、軸力、剛性をそれぞれ $\delta_{ds}$ 、 $F_{ds}$ 、 $K_{ds}$ とする。部材構成モデルとせん断モデルの対応関係は式(6a-c)で表される。

$$\delta_{ds} = \delta_d / \alpha_N, \quad F_{ds} = \alpha_N \times F_d, \quad K_{ds} = \alpha_N^2 \times K_d \quad (6a-c)$$

部材構成モデルの実効変形比 $\alpha_{e,i}$ はダンパー最大変形の水平成分 $\delta_{d,max,i}$ 、フレームの最大層間変形 $\delta_{s,max,i}$ とすると、式(7a)で表すことができる。また、せん断モデルでは擬ダンパーの最大変形 $\delta_{ds,max,i}$ 、擬似フレームの最大変形 $\delta_{s,max,i}$ で $\alpha_{e,i}$ は式(6a)の対応式を用いることで式(7b)で表せられる。

$$\alpha_{e,i} = \delta_{d,max,i} / \delta_{s,max,i} \quad (7a)$$

$$\alpha_{e,i} = \alpha_{N,i} \times \delta_{ds,max,i} / \delta_{s,max,i} \quad (7b)$$

部材構成モデルの層間変形 $\delta_i$ は、状態 N/R 解析に基づくせん断モデルにおける層間変形 $\delta_{s,i}$  ( $= \delta_{ds,i} + \delta_{bs,i}$ )と同様である。 $\delta_{bs}$ は擬似ブレース変位を示す。式(6a-c)より実効変形比の下限値 $\alpha_{es,i}$ は式(8)で表すことができる。

$$\alpha_{es,i} = \frac{\delta_{d,i}}{\delta_i} = \frac{\alpha_{N,i} \times \delta_{ds,i}}{\delta_{ds,i} + \delta_{bs,i}} = \frac{\alpha_{N,i}}{1 + K_{ds,i}/K_{bs,i}} \quad (8)$$

Fig.10(a)~(c)にそれぞれ ART HACHI, ART KOBE, OS1 のせん断モデルの実効変形比 $\alpha_e$ 、実効変形比の上限 $\alpha_N$ および下限 $\alpha_{es}$ の平均値 ( $\bar{\alpha}_e$ ,  $\bar{\alpha}_N$ ,  $\bar{\alpha}_{es}$ ) の関係を示す。なお、1層から全体の 2/3 層 (23 層) までのダンパーで全体の 90%程度エネルギー吸収を行っているため (Fig.11, 後述)、全て 1~23 層で平均化する<sup>4,5)</sup>。図中の赤塗は最適ダンパー量時の $\bar{\alpha}_e$ を示す。Fig.10 の $\bar{\alpha}_{eM}$ は $\bar{\alpha}_N$ と $\bar{\alpha}_{es}$ の平均値を表す (式(9))。

$$\bar{\alpha}_{eM} = (\bar{\alpha}_N + \bar{\alpha}_{es}) / 2 \quad (9)$$

全てのケースにおいて、 $\bar{\alpha}_e$ は $\bar{\alpha}_N$ と $\bar{\alpha}_{es}$ の間に位置することが確認できる。地震動レベルの小さな波形では $\bar{\alpha}_e$ は $\bar{\alpha}_{es}$ に近い値を示し、地震動レベルの増加とともに $\bar{\alpha}_N$ に近づいていく。小さな地震動レベルでは、ダンパーがあまり有効に作用していないことがこの関係からも確認できる。文献 4,5)では、最適ダンパー量時に $\bar{\alpha}_e$ は $\bar{\alpha}_{eM}$ の近くに位置することが確認されている。入力地震動倍率を変えた場合においても同様の傾向が見られた。中でも、ART HACHI, ART KOBE の $\alpha_{dp1} = 0.005 \sim 0.015$ 、OS1 の $\alpha_{dp1} = 0.005 \sim 0.020$ ではその傾向が顕著に確認できる。しかし、入力地震動が極端に大きい場合は中間値よりも大きな値を示す。

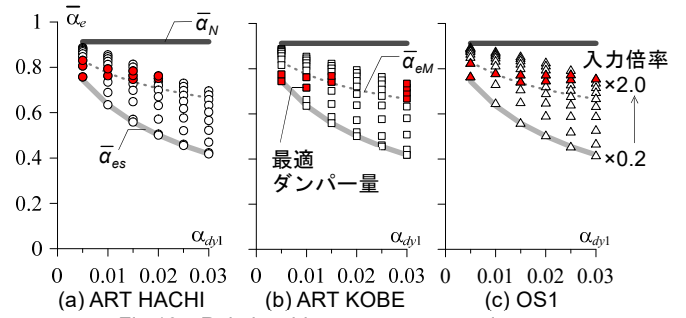


Fig.10 Relationship among  $\alpha_e$ ,  $\alpha_N$  and  $\alpha_{es}$

### 5. 実効変形比と付加系塑性率の関係

本章ではエネルギー吸収率 $\Sigma W_{dp}/E$ と付加系塑性率 $\mu_{as}$ の関係について考察する。さらに、実効変形比 $\alpha_e$ と付加系塑性率 $\mu_{as}$ の関係についても考察し、4.3 節の骨組特性値を用いた制振性能評価に $\mu_{as}$ を加味することで、最適ダンパー量時の $\alpha_e$ と $\mu_{as}$ の関係性を明らかにする。

#### 5.1 エネルギー吸収率と付加系塑性率の関係

本論文では付加系塑性率を用いて評価を行う。以下に、付加系塑性率 $\mu_{as}$ の算出方法を記す。第  $i$  層の付加系最大変位 $\delta_{as,max,i}$ 、降伏変位 $\delta_{asy,i}$ とすると、式(10)より付加系塑性率 $\mu_{as,i}$ を得る。ここで、第  $i$  層の付加系降伏変位 $\delta_{asy,i}$ を付加系剛性 $K_{as,i}$ と擬ダンパー降伏軸力 $F_{dsy,i}$ を用いて式(11)で表す。

$$\mu_{as,i} = \delta_{as,max,i} / \delta_{asy,i}, \quad \delta_{asy,i} = F_{dsy,i} / K_{as,i} \quad (10, 11)$$

Fig.11 にエネルギー吸収率 $W_{dp,i}/E$ の高さ方向分布、Fig.12 に付加系塑性率 $\mu_{as,i}$ の高さ方向分布を示す。(a)~(c)はそれぞれ ART HACHI, ART KOBE, OS1 を示す。なお、図中の赤塗は最適ダンパー量を表す。Fig.11 より、最適ダンパー量時は他のダンパー量と比べ 1 層~全体の 2/3 層程度までで平均的にエネルギー吸収を行っていることがわかる。また、Fig.12 の塑性率の高さ方向分布から、最適ダンパー量時の塑性率は他のダンパー量と比較して小さな値を示していることが確認できる。Fig.13 に ART HACHI, ART KOBE, OS1 入力時のエネル

ギー吸収率 $\Sigma W_{dp}/E$  (赤実線) と付加系塑性率 $\mu_{as}$  (プロット) の関係図を示す。横軸をダンパー量 $\alpha_{dy1}$ , 左縦軸を付加系塑性率 $\mu_{as}$ , 右縦軸をエネルギー吸収率 $\Sigma W_{dp}/E$  とする。なお, 図中に示す $\mu_{as}$ の平均値 $\bar{\mu}_{as}$  (黒実線) は上層部のダンパーがエネルギー吸収をほぼしないことから, 実効変形比と同様に, 1層~全体の2/3層(23層)までで平均化している。Fig.13 より全地震動において,  $\Sigma W_{dp}/E$  が最大値を示す時(即ち最適ダンパー量時),  $\bar{\mu}_{as}$  は概ね最小値を示す関係になっていることが確認できる。中でも, ART HACHI, OS1 入力時は顕著にその傾向が表れる。最適ダンパー量で $\Sigma W_{dp}/E$  が最大値の時,  $\bar{\mu}_{as}$  が最小値となる原因は, 等価減衰定数 $h_{eq}$  が関係していることが考えられる。筆者らは $\bar{\mu}_{as}$  と $h_{eq}$  の関係について確認しているが, 紙幅の都合

より別報にて報告する予定である。また, 最適ダンパー量時の $\mu_{as}$ は他のダンパー量と比べ, 最大値と最小値の差が小さいことも確認できる。これは全層にわたって擬似ダンパーが塑性化することで, ダンパーが効率的にエネルギー吸収を行っていることを意味している。

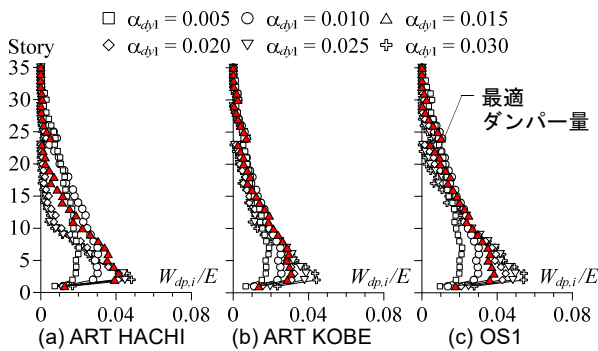


Fig.11 Damper energy absorption ratio (100% wave)

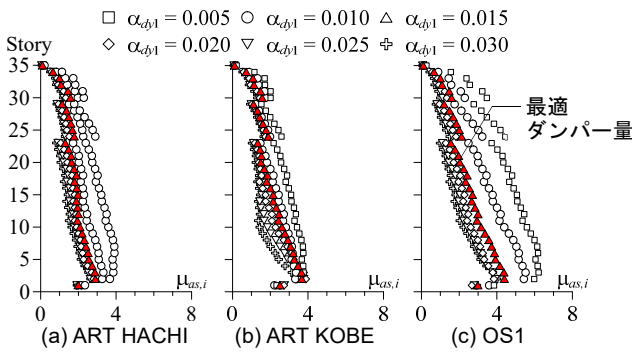


Fig.12 Ductility demand (100% wave)

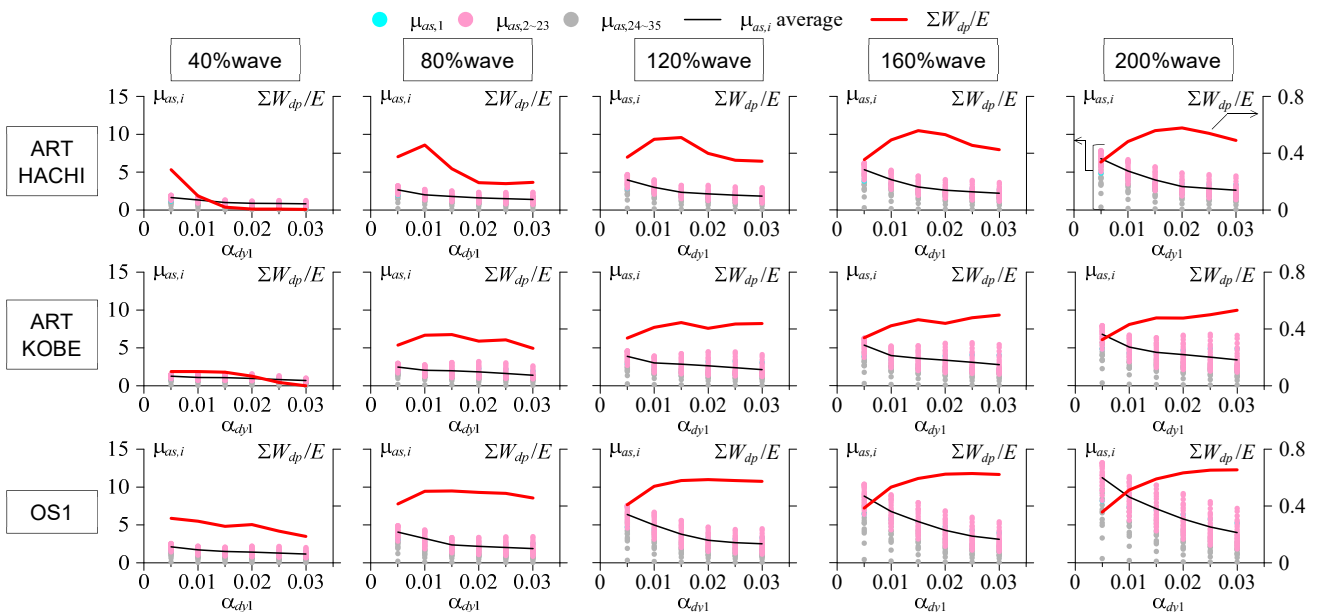


Fig.13 Ductility demand and damper energy absorption ratio vs. damper shear coefficient

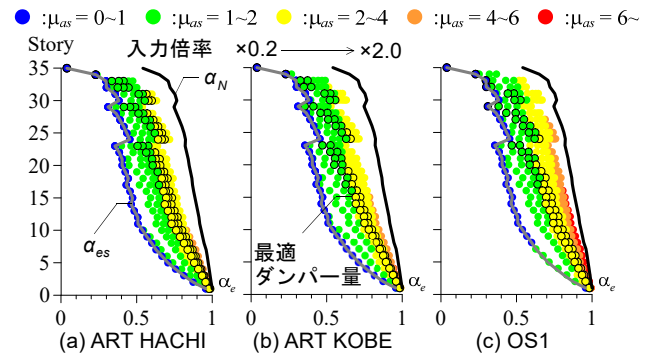


Fig.14 Relationship among  $\alpha_e$ ,  $\alpha_N$  and  $\alpha_{es}$  ( $\alpha_{dy1} = 0.015$ )

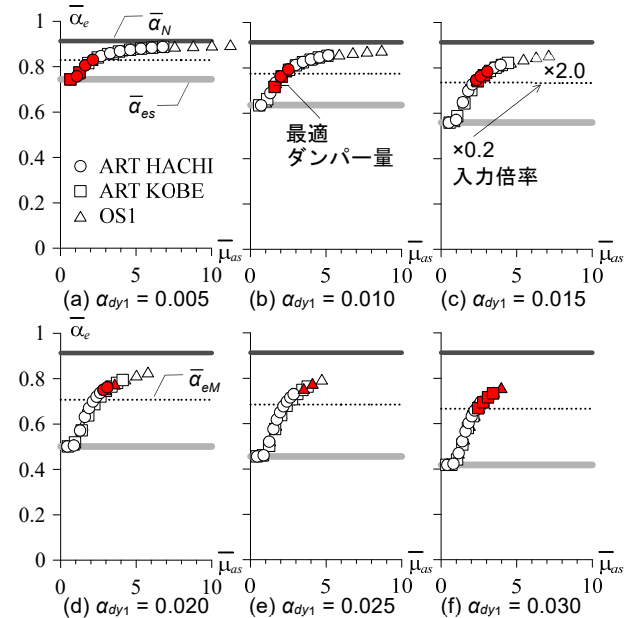


Fig.15 Relationship between  $\alpha_e$  and  $\mu_{as}$

## 5.2 実効変形比と付加系塑性率の関係

Fig.14 に 0.2~2.0 倍のダンパー量 $\alpha_{dy1} = 0.015$ における $\alpha_e$ と $\mu_{as}$ の高さ方向分布を示す。Fig.14 より $\alpha_e$ は、小さな地震動の場合は限りなく $\alpha_{es}$ に近い値を示すのに対し、地震動レベルの増加に伴い、 $\alpha_N$ に近づいていくことが確認できる。また、高さ方向においても、 $\alpha_e$ は全て $\alpha_N$ と $\alpha_{es}$ の間に位置することがわかる。最適ダンパー量が $\alpha_{dy1} = 0.015$ になる時(図中黒枠プロット)、概ね全ての層で $\mu_{as}$ は1~2を多く示していることが確認できる。Fig.15 にダンパー量毎の $\alpha_e$ の平均値 $\bar{\alpha}_e$ と $\mu_{as}$ の平均値 $\bar{\mu}_{as}$ の関係を示す。図に示す赤塗は最適ダンパー量時を表し、また、図中の破線は $\bar{\alpha}_{eM}$ (式(9))である。全てにおいて、地震動レベルの増加に伴い $\bar{\alpha}_e$ は $\bar{\alpha}_N$ に近づき、 $\bar{\mu}_{as}$ は大きな値になる。また、それぞれのダンパー量において $\bar{\alpha}_e$ と $\bar{\mu}_{as}$ は同一の曲線上に分布する傾向を示す。最適ダンパー量時における $\bar{\mu}_{as}$ はダンパー量毎に異なる値を示すことが確認できる。具体的には、最適ダンパー量が $\alpha_{dy1} = 0.005$ では $\bar{\mu}_{as} = 0.6 \sim 2.1$ 、 $\alpha_{dy1} = 0.010$ では $\bar{\mu}_{as} = 1.6 \sim 2.5$ 、 $\alpha_{dy1} = 0.015$ では $\bar{\mu}_{as} = 2.3 \sim 3.0$ 、 $\alpha_{dy1} = 0.020$ では $\bar{\mu}_{as} = 2.8 \sim 3.5$ 、 $\alpha_{dy1} = 0.025$ では $\bar{\mu}_{as} = 3.5 \sim 4.1$ 、 $\alpha_{dy1} = 0.030$ では $\bar{\mu}_{as} = 2.5 \sim 4.0$ を示した。入力地震動レベルにおける検討範囲で、最適ダンパー量が $\alpha_{dy1} = 0.005 \sim 0.025$ となる時はその傾向が顕著になる。以上より、地震波の特性に依存せず、最適ダンパー量時における実効変形比と付加系塑性率は一定の関係性にあることが確認できた。

## 6. おわりに

本論文では、最適ダンパー量時の実効変形比 $\alpha_e$ と付加系塑性率 $\mu_{as}$ の関係性を明らかにすることを目的として、 $\alpha_e$ と $\mu_{as}$ に大きく影響を与える可能性のある地震波の特性やレベルおよびダンパー投入量をパラメータとして、実効変形比を考慮したせん断モデルを用いて時刻歴応答解析をすることで検討を行った。以下に結果をまとめる。

- (1) 骨組特性値を用いた制振性能評価において、実効変形比 $\alpha_e$ は実効変形比の上限 $\alpha_N$ および下限 $\alpha_{es}$ の間に必ず位置する。このことから、 $\alpha_{es}$ の定義としての有用性を確認した。また、最適ダンパー量時の $\alpha_e$ は、地震動によらず概ね $\alpha_N$ と $\alpha_{es}$ の間に位置する。
- (2) エネルギー吸収率 $\Sigma W_{dp}/E$ と付加系塑性率 $\mu_{as}$ の関係性において、最適ダンパー量時の $\mu_{as}$ は他のダンパー量と比較して、小さい値を示し、かつ最大値と最小値の差が小さいことを確認した。また、最適ダンパー量時に、 $\bar{\mu}_{as}$ は最小値を示す傾向がある。
- (3) 実効変形比の平均値 $\bar{\alpha}_e$ と付加系塑性率の平均値 $\bar{\mu}_{as}$ は、地震波に依存せずダンパー量毎に同一の曲線上に分布する関係性を示した。また、最適ダンパー量時には $\bar{\mu}_{as}$ は各ダンパー量毎に異なる値になることを確認した。

今後は高さや形状の異なるモデルおよび配置計画でも検討を行い、同様の傾向となることを確認する。また、本論文で得られた知見を用いて制振構造の設計手法や性能評価手法を提案する予定である。

## 謝辞

本論文は JFE シビル株式会社、JFE スチール株式会社、東京工業大学佐藤研究室の成果を一部まとめたものです。ここに記して感謝の意を表します。本研究の一部は JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。

## 参考文献

- 1) 日本地震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル、第三版、2013.11
- 2) Kazuhiko Kasai, Keisuke Iwasaki: Reduced expression for various passive control systems and conversion to shear spring model, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.605, pp.37-46, 2006.7  
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
- 3) Masato Ishii, Kazuhiko Kasai: Shear spring model for time history analysis of multi-story passive controlled buildings, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol.75, No.647, pp.103-112, 2010.1  
石井正人, 笠井和彦: 多層制振構造の時刻歴応答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, Vol.75, No.647, pp.103-112, 2010.1
- 4) 古谷慶, 添田幸平, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一: 履歴ダンパーを有する超高層弾性架構の実効変形比に着目した制振性能評価, 構造工学論文集, Vol.58B, pp.197-207, 2012.3
- 5) 戸張涼太, 佐藤大樹, 古谷慶, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一: 骨組特性値を用いた履歴型ダンパーを有する建物の制振性能評価, 構造工学論文集, Vol.59B, pp.321-327, 2013.3
- 6) Kei Furuya, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Masato Ishii, Keisuke Yoshie, Mitsuru Miyazaki, Kazuhiko Sasaki, Yuichi Iwasaki: The vibration control performance evaluation method based on absorbed energy for elastic frame having hysteretic dampers, AIJ J. Technol. Des., Vol.20, No.44, pp.127-132, 2014.2  
古谷慶, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一: 履歴ダンパー付き弾性架構における吸収エネルギーに基づく制振性能評価手法, 日本建築学会技術報告集, Vol.20, No.44, pp.127-132, 2014.2
- 7) Koji Ogawa, Tomohisa Hirano: Ductility demanded of hysteretic dampers, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.558, pp.197-204, 2002.8  
小川厚治, 平野智久: 履歴型ダンパーの必要塑性変形性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.558, pp.197-204, 2002.8
- 8) Kazuhiko Kasai, Hiroshi Ito, Atsushi Watanabe: Peak response prediction rule for a SDOF elasto-plastic system based on equivalent linearization technique, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.571, pp.53-62, 2003.9  
笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚: 等価線形化手法による一質点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
- 9) Kazuhiko Kasai, Hiroshi Ito: Passive control design method based on turning of stiffness, yield strength, and ductility of elasto-plastic damper, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.595, pp.45-55, 2005.9  
笠井和彦, 伊藤浩資: 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
- 10) Hiroshi Ito, Kazuhiko Kasai: Evaluation method for cumulative plastic deformation of damper based on maximum deformation of elasto-plastically damped structure, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.607, pp.53-61, 2006.9  
伊藤浩資, 笠井和彦: 弾塑性ダンパーをもつ制振構造の最大変形に基づくダンパーの累積塑性変形評価, 日本建築学会構造系論文集, No.607, pp.53-61, 2006.9
- 11) 国土交通省住宅局建築指導課: 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について, 国住指第 1111 号, 2016.6
- 12) M. D. Trifunac and A. G. Brady: A Study of the Duration of Strong Earthquake Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.65, No.3, pp.581-626, 1975.6
- 13) 樹下亮佑, 澤侑弥, 佐藤大樹, 戸張涼太, 吉永光寿, 安永隼平, 金城陽介: 履歴ダンパーを有する制振建物の実効変形比に着目した性能評価 その1 部材構成モデルとせん断モデルの応答評価, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.925-926, 2020.9

[2020年6月3日原稿受理 2020年8月18日採用決定]