T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	履歴ダンパーを設置した超高層建物の最適ダンパー量時の実効変形比
Title(English)	EFFECTIVE DAMPER DEFORMATION RATIO OF OPTIMAL DAMPER SHEAR COEFFICIENT 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. 66, pp. 656-661
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 27, No. 66, pp. 656-661
発行日 / Pub. date	2021, 6
権利情報	日本建築学会

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

日本建築学会技術報告集　第 27 巻　第 66 号，656-661，2021 年 6 月
AIJ J. Technol. Des. Vol. 27, No.66, 656-661, Jun., 2021
DOI https://doi.org/10.3130/aijt.27.656

履歴ダンパーを設置した超高層建物の最適ダンパー量時の実効変形比

EFFECTIVE DAMPER DEFORMATION RATIO OF OPTIMAL DAMPER SHEAR COEFFICIENT 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：
超高層制振建物，履歴ダンパー，実効変形比，塑性率，
等価減衰定数

Keywords:
Passively controlled high-rise building, Hysteretic damper, Effective damper deformation ratio, Ductility demand, Equivalent damping ratio

The placement and number of passive dampers employed in building greatly affect the response reduction, thus, must be considered in designing. In the previous study considering only one damper layout plan and constant damper ductility demand, the effective damper deformation ratio of optimal shear coefficient to be the median value was confirmed. In this paper, several damper layout plans and different damper ductility are considered, and the effective damper deformation ratio of optimal shear coefficient and of maximum equivalent damping ratio in order to clarify the relationship between the effective damper deformation ratio and damper ductility demand are compared.

1．はじめに

大地震時の対策として，制振構造を採用する建物が近年増えている。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，建物の振動および主架構の損傷を低減させるものである [1)]。しかしながら，制振ダンパーの配置や投入量により応答低減効果は異なるため，配置及び投入量の検討が重要になる。

筆者らは，前報[注 1)]にて 35 層鉄骨構造建物における履歴ダンパー（以下，ダンパー）投入量および地震波のレベルが制振性能に与える影響を明らかにした。入力エネルギーに対するダンパーのエネルギー吸収量（エネルギー吸収率）が最大となるダンパー投入量を最適ダンパー量であると定義し，その時の付加系（2.2 節，後述）塑性率が概ね最小値になることを確認した。また，主架構の層間変形に対するダンパーの変形成分（実効変形比）と塑性率の関係はダンパー量毎に同一曲線上に分布することがわかった。さらに，最適ダンパー量時には実効変形比の上限と下限の概ね中間に位置し，付加系塑性率はある一定の値を示すことを確認した。しかし，その関係性はあくまで，検討範囲内の傾向であり，根拠となる裏付けが示されていない。よって，①ダンパー配置が 1 種類のみであること，②実効変形比と塑性率の関係における更なる考察の必要性など問題は多く残されている。

ダンパーの配置は制振性能に大きな影響を与えることが指摘されている [3)~5)]。古谷らは，ダンパーの配置が制振性能に与える影響を評価できる手法を提案し，ダンパーが建物の内側に配置されるほど，制振性能が高まることを指摘している [5)]。

等価減衰定数は各構造要素のエネルギー吸収から算出することから，ダンパーのエネルギー吸収量と密接な関係にあり，等価減衰定数を用いて応答を予測する手法も多く提案されている [6)~9)]。なお，等価減衰定数は，標準層せん断力係数 C_0 を変動させ，Ai 分布などの外力から評価できる。また，ダンパー変形は等価減衰定数に大きな影響を与えることから，等価減衰定数を算出することで，制振性能を評価できると推測できる。

本報では，注 1)で示した実効変形比とダンパー塑性率の関係を最適ダンパー量時の実効変形比と等価減衰定数が最大値を示す時の実効変形比の関係を比較することで明らかにすることを目的とする。

2．モデル概要

2.1 検討対象建物およびダンパーの概要

本報では，2.2 節に示すせん断モデルで解析を行うが，そのもととなる各骨組要素からなる部材構成モデルについて説明する。検討対象建物は 35 階建ての鉄骨構造建物とする [4)]。Fig.1 に検討建物の軸組図，基準階伏図を示す。主架構のみの 1 次固有周期は 3.97 s である。構造減衰は 1 次固有周期に対して，減衰定数 h_0 = 0.02 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，本報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。

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。ダンパー配置通りは Fig.1 に示す箇所に設置する。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。本報では断面積を一定とした等価断面の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

*1　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）
*2　東京工業大学未来産業技術研究所　准教授・博士（工学）
*3　JFE シビル㈱
*4　JFE スチール㈱　博士（工学）
*5　JFE スチール㈱

*1　Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology
*2　Assoc. Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
*3　JFE Civil Engineering & Construction Corporation
*4　JFE Steel Corporation, Dr. Eng.
*5　JFE Steel Corporation

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）[4]。Q_{dy1} と第 1 層のダンパー降伏層せん断力係数 α_{dy1} の関係を式(1)で表す。

$$Q_{dy1} = \alpha_{dy1} \sum_{i=1}^{N} m_i g \tag{1}$$

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，本報では第 1 層のダンパー降伏層せん断力係数 α_{dy1} をダンパー量と呼び，α_{dy1} = 0.005～0.030 の計 6 種で検討を行う。なお，α_{dy1} が大きくなるにつれ，比例的にダンパー剛性も大きくなる。検討するダンパー配置は Fig.1 に示す 3 形式とする。本報で対象とする建物のスパンが奇数であるため Inside，Outside は 1 層あたりのダンパー数は 8 本であるのに対し，Center は 4 本となる。そのため Center の 1 本あたりの断面積は Inside，Outside の 2 倍としている。Table1 にそれぞれの弾性 1 次固有周期を示す。Inside＜Center＜Outside の順に長くなり，ダンパー量の増加に伴いその差は大きくなる。

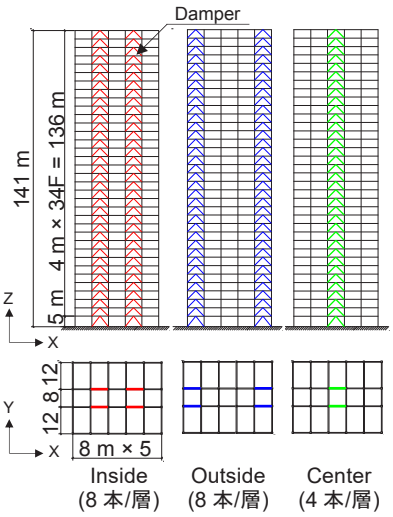


Fig.1　Elevation and Plan [unit : m]

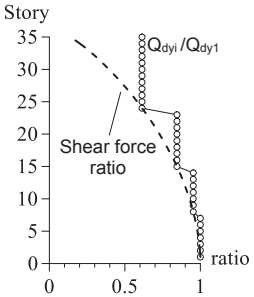


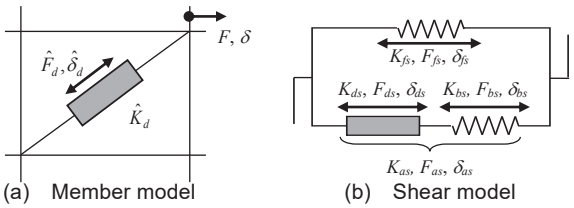
Fig.2　Yield strength ratio of damper

Table 1　Natural period

	T_1 [sec]		
α_{dy1}	Inside	Outside	Center
0.005	3.72	3.80	3.75
0.010	3.57	3.69	3.65
0.015	3.47	3.63	3.58
0.020	3.40	3.58	3.54
0.025	3.35	3.54	3.51
0.030	3.31	3.51	3.49

2. 2 せん断モデル化手法の概要 [2]

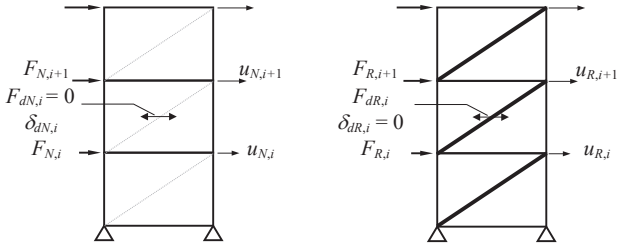
部材構成モデルおよび各層の要素を水平バネに模擬したせん断モデルの対応関係を Fig.3 に示す。Fig.3(a)に示す F，δ は主架構のせん断力および層間変形であり，$\hat{K}_d$，$\hat{F}_d$，$\hat{\delta}_d$ はそれぞれ軸方向のダンパー剛性，軸力，変形を示す。Fig.3(b)に示すせん断モデルは，擬似フレーム（下付き fs），擬似ダンパー（下付き ds），擬似ブレース（下付き bs）で構成され，それぞれの剛性を K_{fs}，K_{ds}，K_{bs} で表す。擬似フレーム剛性 K_{fs} は主架構のみの部材構成モデルの F-δ 関係から算出している。付加系（下付き as）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意味し，その剛性を K_{as} と表す。なお，付加系と擬似フレームを合わせてシステムと呼ぶ。



(a)　Member model　　(b)　Shear model

Fig.3　Member model and Shear model

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。本報では制振構造の性能を明らかにするため，擬似フレームは弾性としてモデル化する。せん断モデルの付加系は，状態 N/R 解析（Fig.4）よりモデル化が行える [2]。状態 N 解析（Fig.4(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 R 解析（Fig.4(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。



(a) No-damper　　(b) Rigid-damper

Fig.4　No-damper and Rigid-damper analysis[2]

状態 N の第 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 $\delta_{N,i}$ に対する比 $\alpha_{N,(i,j)}$ が算出できる（式(2)）。

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

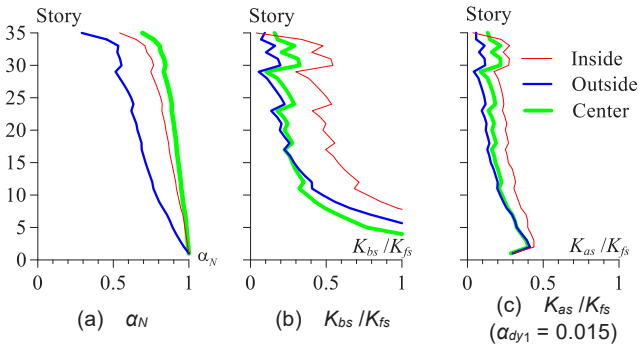
状態 R の付加系軸力水平成分 $F_{dR,(i,j)}$ と層間変位 $\delta_{R,i}$ より剛性 $K_{dR,(i,j)}$（式(3)）を付加系設置箇所について計算し，第 i 層におけるダンパー総数を N_{dj} とすると，擬似ブレース剛性 $K_{bs,i}$ を得られる（式(4)）。

$$K_{dR,(i,j)} = F_{dR,(i,j)} / \delta_{R,i}, \quad K_{bs,i} = \sum_{j=1}^{Ndj} \alpha_{N,(i,j)} K_{dR,(i,j)} \tag{3), (4}$$

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)）。なお，$K_{ds,i}$ と $K_{bs,i}$ は直列の関係であるため，付加系剛性 $K_{as,i}$ は式(6)で表せる。

$$K_{ds,i} = \sum_{j=1}^{Ndj} \alpha^2_{N,(i,j)} K_{d,(i,j)}, \quad K_{as,i} = \frac{K_{ds,i} \times K_{bs,i}}{K_{ds,i} + K_{bs,i}} \tag{5), (6}$$

Fig.5(a)～(c)に式(2)～(6)で算出した各ダンパー配置の骨組特性値を示す。なお，Fig.5(a)に示す状態 N の実効変形比は i 層の平均値とするため $\alpha_{N,i}$ と示し，Fig.5(b)，(c)は擬似フレーム剛性 K_{fs} で基準化している。Fig.5(a)より，α_N は Outside が全ての層で最も小さく，次いで Inside，Center の順に大きくなる。ダンパー設置箇所により生じる $\alpha_{N,i}$ の違いは主架構にせん断力が作用したとき，外側の柱が内側の柱よりも軸変形が大きく，建物全体の曲げ変形が卓越するため，設置箇所の層間変形に対するせん断変形の割合が小さくなる。また，Fig.5(b)より，K_{bs} は全ての配置において下層では K_{fs} に対して非常に大きい



(a)　α_N　　(b)　K_{bs}/K_{fs}　　(c)　K_{as}/K_{fs} (α_{dy1} = 0.015)

Fig.5　Frame parameters for control

値となる。下層から中層部にかけては Center < Outside < Inside の順に大きくなるが，それ以降の層では Outside < Center < Inside の順に切り替わる。最上層で，Inside は他のダンパー配置と比べ式(3)に示す F_{dR} が小さな値となるため，K_{bs} は最も小さな値を示した。Fig.5(c)の K_{as} で，α_{dy1} = 0.015 のみ示している。2 層までは全ての配置で K_{as} は概ね一致するが，それ以降の層では Outside < Center < Inside の順に大きな値を示す。$K_{as,i}$ が大きなダンパー配置であると，システム剛性が大きくなるため，Table1 に示すように Inside の T_1 が最も短くなる。

3．入力地震動の概要

本報では，減衰定数 h = 5%でコーナー周期 T_c = 0.64 s 以降に擬似速度応答スペクトル S_{pV} = 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 を用いる。本報では，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。なお，注 1)で示した関係性を明らかにするために，注 1)と同じ 3 波を用いる。Fig.6(a)に h = 5%の擬似速度応答スペクトル S_{pV}，(b)に h = 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，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 波をせん断モデルに入力し，時刻歴応答解析を行う。

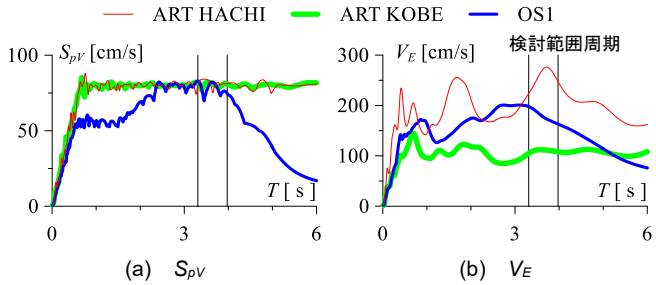


Fig.6 Earthquake spectra

4．地震動のレベルおよびダンパー配置が制振性能に与える影響

筆者らは前報[注 1)]で，ダンパー配置を Inside，ダンパー量と地震波および地震動レベルをパラメータとして制振性能に及ぼす影響を検討した。本章では前報に加え，ダンパー配置が制振性能に及ぼす影響を考察することを目的とする。

4.1 ダンパー配置毎の応答低減効果

Fig.7(a)～(c)に ART HACHI の 0.4，1.0，2.0 倍波入力時の各ダンパー配置の最大層間変形角 R_{max}，最大絶対加速度 $Acc._{max}$，1 層の層せん断力係数 α_1 を示す。(a)，(b)に示すそれぞれの最大値は全層での最大値を用いる。なお，本報ではせん断モデルを用いて時刻歴応答解析をしているが，部材構成モデルとの応答比較は文献 10)にて行っている。まず，各応答のダンパー量増加に伴う応答低減について考察を行う。Fig.7(a)より R_{max} において，小さな入力倍率ではダンパー量が増加しても主架構のみのモデル（α_{dy1} = 0）と概ね変わらないことが確認できる。しかし，入力倍率の大きい（1.0，2.0 倍）地震波では，ダンパー量の増加に伴い，応答値は α_{dy1} = 0 の応答に対して低減もしくは，あるダンパー量以降で横ばいとなる。また，Fig.7(c)の α_1 においても同様の傾向が見られる。Fig.7(b)の $Acc._{max}$ において，0.4，1.0 倍の入力時は α_{dy1} = 0 と概ね変わらない応答もしくはそれよりも大きな応答を示すことが確認できる。しかし，大きな入力倍率（2.0 倍）では α_{dy1} = 0 よりも小さな応答を示す。配置毎に比較を行うと，Fig.7(a)，(c)の R_{max}，α_1 より，応答値は Inside < Center < Outside の順であり，α_{dy1} = 0 に対する応答低減は Inside が最も優れている。一方で，Fig.7(b)の $Acc._{max}$ は Inside が最も大きな値を示した。なお，文献 3)，5)で扱っている検討建物は偶数スパンであることから配置形式によらず 1 層あたりのダンパー本数が同じとなり，ダンパー設置箇所が内側になるにつれ制振性能が向上すると述べられている。また，文献 4)では本建物と同じであるが，Center の検討はしていない。本建物において，ダンパーが最も内側に配置されているのは Center であるが，Center は Inside よりも応答低減効果が低い。これは，Fig.5(b)の K_{bs} が Inside よりも小さいことが原因と思われる。また，本報では紙幅の都合，ART HACHI のみ示しているが，長周期地震動の OS1 では同様の傾向を示すが，ART KOBE は R_{max}，α_1 において，あるダンパー量から応答が増大する傾向がある。

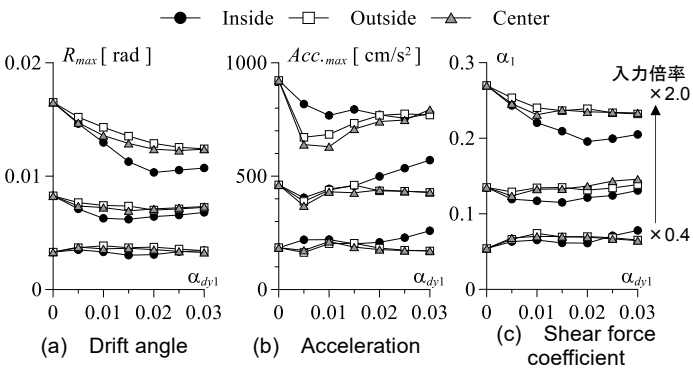


Fig.7 Maximum responses (ART HACHI)

4.2 配置形式によるエネルギー吸収率の違い

入力エネルギー E に対する各層のダンパーエネルギー吸収量の和 ΣW_{dp} の比（以下，エネルギー吸収率 $\Sigma W_{dp}/E$）を Fig.8 に示す。(a)～(c)はそれぞれ ART HACHI，ART KOBE，OS1 を示す。なお，Fig.8 も 0.4，1.0，2.0 倍波のみ示している。まず，地震波ごとに考察を行う。Fig.8(a)より長周期地震動である ART HACHI 入力時は，全ての入力倍率でダンパー量の増加に伴い $\Sigma W_{dp}/E$ は上昇し，ピークを迎えた後減少する傾向が確認できる。また，Fig.8(c)の OS1 入力時も同様である。Fig.8(b)よりパルス性地震動の ART KOBE 入力時は，小さい地震動レベルだと，ART HACHI，OS1 と同様の傾向を示す。しかし，1.0 倍波以降では，$\Sigma W_{dp}/E$ はある一定のダンパー量まで増加しそれ以降で横ばいとなる傾向がある。次いで，配置毎の考察を行う。$\Sigma W_{dp}/E$ の大小関係の順は概ね，Inside > Center > Outside となる。また，配置毎に $\Sigma W_{dp}/E$ が最大を示すダンパー量が異なる。例えば，ART HACHI の 1.0 倍波入力時は Inside，Center は α_{dy1} = 0.010 で最大値を示すのに対し Outside は α_{dy1} = 0.015 で最大値を示す。同じ地震動を入力しても制振性能の低いダンパー配置だと，エネルギー吸収量が小さくなることがわかる。各地震波を入力したとき，$\Sigma W_{dp}/E$ が大きくなるダンパー量では Fig.7 に示す応答も小さくなる傾向が見られる。以降，$\Sigma W_{dp}/E$ が最大となる時のダンパー量を最適ダンパー量と定義する。

本報の検討範囲内では Center の α_{dy1} = 0.030 が最適ダンパー量となる地震波は存在しなかった。なお，本報でのダンパー量範囲の都合上，極端に小さな地震動もしくは大きな地震動は検討範囲外で最適ダンパー量となる可能性もある。

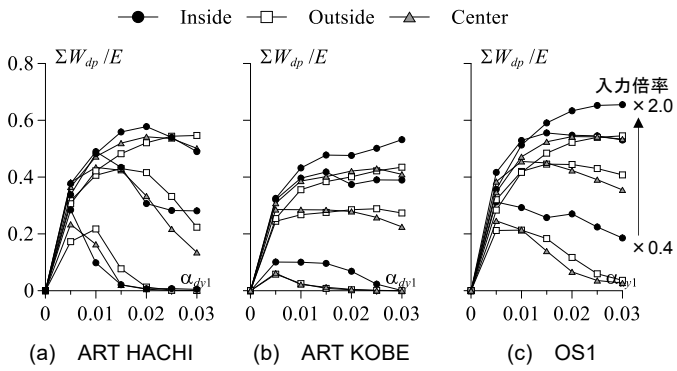


Fig.8 Damper energy absorption ratio

5．等価減衰定数を用いた検討

筆者らは前報[注 1)]にて，各地震波を入力した時の実効変形比の平均値 $\bar{\alpha}_e$ と付加系塑性率の平均値 $\bar{\mu}_{as}$ の分布はダンパー量毎に同一曲線上に分布し，また，最適ダンパー量時の実効変形比は実効変形比の中間値（5.2 節後述）に概ね位置することを確認した。なお，$\bar{\alpha}_e$ と $\bar{\mu}_{as}$ は 1 層～全体の 2/3 層までの平均を示す。本章では，前報の関係性を明らかにすることを目的として，等価減衰定数 h_{eq} を用いて検討を行う。なお，塑性率で検討を行う場合，付加系（Fig.3(b)前述）を用いることが多い[6)~8)]。本報でも付加系塑性率で検討を行う。

5.1 等価減衰定数と塑性率の関係

本節では，等価減衰定数 h_{eq} と付加系塑性率の平均値 $\bar{\mu}_{as}$ の関係を用いて考察を行う。なお，入力エネルギーに対する 1 層から i 層までのダンパーのエネルギー吸収量$\Sigma W_{dp,i}$ の比（累積エネルギー吸収率 $\Sigma W_{dp,i}/E$）で，全体の 2/3 層までで 90%程度占めているため，$\bar{\mu}_{as}$ は 1～全体の 2/3 層（23 層）までで平均化する[注 1)]。Fig.9 に擬似フレーム，付加系，システムの復元力特性を示す。

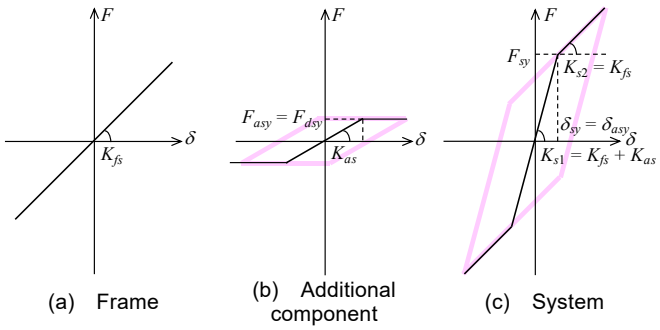


Fig.9 Restoring force characteristic

まず，以下に付加系塑性率μ_{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(7)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$\delta_{asy,i}$ は付加系剛性 $K_{as,i}$ と擬似ダンパー降伏軸力 $F_{dsy,i}$ を用いて式(8)で表される。

$$\mu_{as,i} = \delta_{as,\max,i} / \delta_{asy,i}\ ,\quad \delta_{asy,i} = F_{dsy,i} / K_{as,i} \qquad (7),\ (8)$$

次に等価減衰定数 h_{eq} の算出方法を記す。本報では， Ai 分布の外力を基に，標準層せん断力係数 C_0 を変動させることで外力レベルを変化させ，h_{eq} を算出する。ここでは，主架構のみの 1 次固有周期を用いて Ai 分布の外力を設定している。まず，各層のシステムの変位を求める。第 i 層のシステムの 1 次剛性 $K_{s1,i}$（$=K_{fs,i}+K_{as,i}$），2 次剛性 $K_{s2,i}$（$=K_{fs,i}$），降伏せん断力 $F_{sy,i}$，降伏変位$\delta_{sy,i}$（$=\delta_{asy,i}$）とすると Ai 分布により求めた層せん断力 Q_i が作用した時の変位$\delta'_{s,i}$ は式(9)より算出できる。

$$\delta'_{s,i} = \begin{cases} Q_i / K_{s1,i} & (Q_i < F_{sy,i}) \\ \left(Q_i - F_{sy,i} + K_{s2,i}\delta_{asy,i}\right) / K_{s2,i} & (F_{sy,i} \le Q_i) \end{cases} \qquad (9)$$

本報では等価減衰定数 h_{eq} を式(10)で評価する[1)]。ここで，h_0 は構造減衰を示し，第 i 層の減衰定数 h_i は式(11)より得られる。

$$h_{eq} = 0.8 \times \frac{\sum_{i=1}^{N} h_i W_i}{\sum_{i=1}^{N} W_i} + h_0\ ,\quad h_i = \frac{1}{4\pi}\frac{\Delta W_i}{W_i} \qquad (10),\ (11)$$

式(10)，(11)の W_i は最大ポテンシャルエネルギー，ΔW_i は 1 サイクル間の消費エネルギーを示す。それぞれ式(12)，(13)で算出できる。

$$W_i = Q_i \delta'_{s,i} / 2\ ,\quad \Delta W_i = 4 F_{dsy,i}\left(\delta'_{s,i} - \delta_{asy,i}\right) \qquad (12),\ (13)$$

Fig.7 で小さな応答を示すダンパー量は，Fig.8 のΣW_{dp} /E で他のダンパー量よりも大きな値を示したため，ダンパーのエネルギー吸収量は制振性能に大きな影響を及ぼす。式(10)～(13)に示すように h_{eq} はダンパーのエネルギー吸収量を基に算出しているため，制振性能を予測できる。Fig.10(a)～(f)に各ダンパー量における h_{eq} と $\bar{\mu}_{as}$ の関係を示す。なお，Fig.10 の $\bar{\mu}_{as}$ は式(9)の結果を用いている。全てのダンパー量および配置において，付加系が弾性状態では構造減衰の h_0 = 0.02 を示すが，塑性化すると徐々に h_{eq} は増加し等価減衰定数の最大値 $h_{eq,max}$ を示すと減少することが確認できる。ある付加系塑性率から減少に転じる原因は，荷重が増大すると，ΔW_i に対する W_i の比が減少するためである。配置毎の $h_{eq,max}$ を比較すると，全てのダンパー量で Inside > Center > Outside となり，これまでで確認した制振性能の順になっている。また，ダンパー量の増加に伴い $h_{eq,max}$ は増加し，$h_{eq,max}$ を示す時の $\bar{\mu}_{as}$ も僅かに大きな値となるが，全て $\bar{\mu}_{as}$ = 2 に近い値を示す。

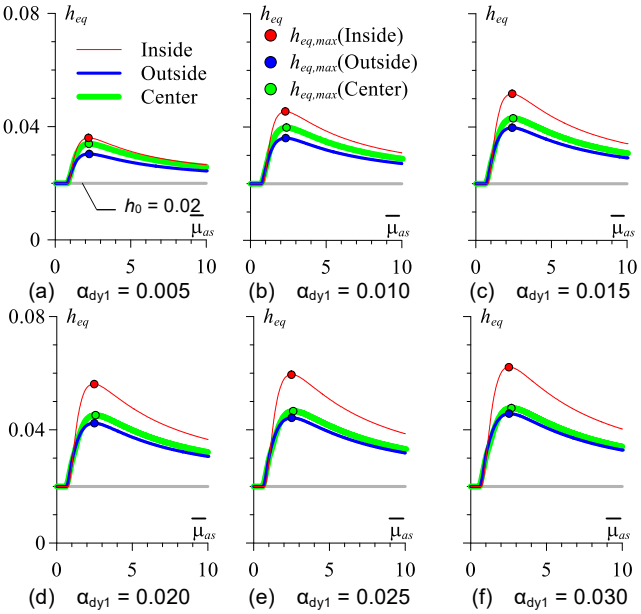


Fig.10 Equivalent damping ratio vs. ductility demand

5.2 最適ダンパー量時の実効変形比

部材構成モデルとせん断モデルの対応関係式を以下に示す。部材構成モデルのダンパー軸変形，軸力，剛性それぞれの水平成分をδ_d，F_d，K_dとする。また，せん断モデルの擬似ダンパー変形，軸力，剛性をそれぞれδ_{ds}，F_{ds}，K_{ds}とする。以上より，部材構成モデルとせん断モデルの対応関係式は式(14a-c)で表される。

$$\delta_{ds} = \delta_d / \alpha_N \ , \quad F_{ds} = \alpha_N F_d \ , \quad K_{ds} = \alpha^2{}_N K_d \qquad \text{(14a-c)}$$

せん断モデルにおける実効変形比$\alpha_{e,i}$は時刻歴応答解析結果の擬似ダンパーの最大変形$\delta_{ds,\max,i}$，擬似フレームの最大変形$\delta_{fs,\max,i}$と，式(14a)の関係を用いて，式(15)で表される。

$$\alpha_{e,i} = \alpha_{N,i}\, \delta_{ds,\max,i} / \delta_{fs,\max,i} \qquad (15)$$

また，せん断モデルにおける擬似ダンパーが弾性と仮定した実効変形比（以下，実効変形比の下限値）$\alpha_{es,i}$の定義を示す。部材構成モデルの層間変形δ_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$\delta_{fs,i}$（$=\delta_{ds,i}+\delta_{bs,i}$）と同様である。式(14a-c)より実効変形比の下限値$\alpha_{es,i}$は式(16)で表すことができる[注1)]。なお，$\kappa_{ds,i}=K_{ds,i}/K_{bs,i}$とする。

$$\alpha_{es,i} = \frac{\delta_{d,i}}{\delta_i} = \frac{\alpha_{N,i}\delta_{ds,i}}{\delta_{ds,i}+\delta_{bs,i}} = \frac{\alpha_{N,i}}{1+K_{ds,i}/K_{bs,i}} = \frac{\alpha_{N,i}}{1+\kappa_{ds,i}} \qquad (16)$$

実効変形比の中間値$\alpha_{eM,i}$を示す（式(17)）。

$$\alpha_{eM,i} = \frac{\alpha_{N,i}+\alpha_{es,i}}{2} = \frac{(2+\kappa_{ds,i})\alpha_{N,i}}{2+2\kappa_{ds,i}} \qquad (17)$$

$h_{eq,max}$時の実効変形比$\alpha_{eh,i}$は$h_{eq,max}$時の層間変形$\delta'_{s,i}$（式(9)）および擬似ダンパー変位$\delta'_{ds,i}$を用いて式(18)で表される。ここで，$\delta'_{ds,i}$は$F_{ds,i}$と$K_{bs,i}$を用いて式(19)で示す。

$$\alpha_{eh,i} = \alpha_{N,i}\, \delta'_{ds,i} / \delta'_{s,i} \ , \quad \delta'_{ds,i} = \delta'_{s,i} - F_{ds,i} / K_{bs,i} \qquad \text{(18), (19)}$$

Fig.11 に式(18)のα_{eh}の高さ方向分布（青実線）を示す。なお，図中に示す黒実線は式(2)のα_N，灰色実線は式(16)のα_{es}，ピンク点線は式(17)のα_{eM}を示す。また，図中のプロットは時刻歴応答解析から得られる各地震波の最適ダンパー量時におけるα_eである。なお，Center のα_{dy1} = 0.030 で最適ダンパー量となる地震波はなかった（4.2 節前述）ため，プロットが存在しない。α_{eh}とα_{eM}を比較すると，低層部から中層部にかけては概ね一致していることが確認できる。Inside ではダンパー量が増加しても概ねα_{eh}とα_{eM}は一致することが確認できる。Outside，Center ではα_{dy1} = 0.015 までは概ね一致するがそれ以降のダンパー量で差が出る。Inside に着目すると，最適ダンパー量時のα_eは，3 波で概ねα_{eh}とα_{eM}付近に分布している。Outside のα_eは，α_{eh}とα_{eM}付近に分布するものも多くあるが，Inside よりもα_{eh}とα_{eM}に対するα_eが存在する幅が広い。また，Center では Outside よりも顕著になる。これらのことを踏まえると，α_{eh}とα_{eM}に対するα_eが存在する幅は，α_Nおよびα_{es}に大きく関係すると推測できる。Center は 3 つのダンパー配置の中で最も大きなα_Nを示すが，α_{es}が小さいためα_Nとα_{es}の差が大きい。それに対して Inside はα_Nが大きくかつα_Nとα_{es}の差が小さい。そのため，特に Inside ではα_{eh}，α_{eM}，α_eの 3 つで近い値を示すと考えられる。なお，3 つのダンパー配置のα_{dy1} = 0.005 で最適ダンパー量時のα_eは下限値α_{es}とα_{eM}の間にプロットが多く存在する。これはダンパー量の検討範囲の下限であることから，小さな地震動で最適となる場合が多くなるためである。

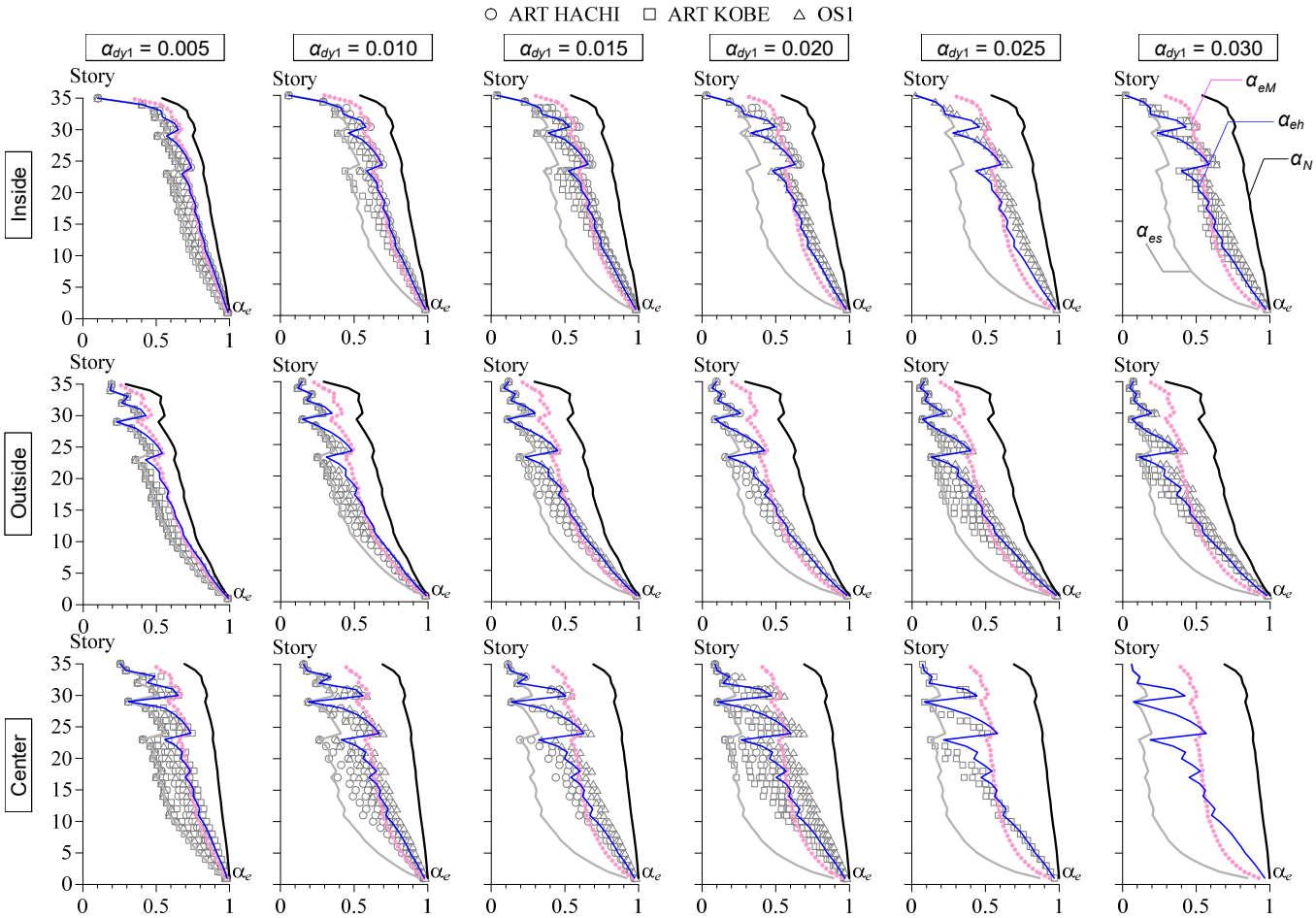


Fig.11 Effective damper deformation ratio of optimal damper shear coefficient

６．おわりに

本報では，前報[注 1)]で示した実効変形比と付加系塑性率の関係を明らかにすることを目的として検討を行った。以下に知見を記す。

(1) 各ダンパー配置における応答低減効果は, Inside > Center > Outside の順であった。一般的にダンパー配置通りが内側になるほど制振効果は高まるが [5)]，本報はスパンが奇数であるため，1 層あたりのダンパー数が異なり，最も内側配置の Center が 2 番目となる。

(2) 等価減衰定数 h_{eq} はある一定の付加系塑性率 $\bar{\mu}_{as}$ まで増加し，それ以降は減少する。ダンパー量の増加に伴い，h_{eq} の最大値も増加し，Inside > Center > Outside の順となり，制振性能の順と同様になる。h_{eq} を算出することでダンパー配置による制振性能の優劣を推測することができる。また，h_{eq} が最大となる時の $\bar{\mu}_{as}$ は 2 に近い値を示し，ダンパー量が増加してもあまり変わらない。

(3) h_{eq} が最大値を示す時の実効変形比 α_{eh} と実効変形比の中間値 α_{eM} は近い値を示し，Inside では顕著になる。また，実効変形比の上限 α_N が大きく，かつ α_N と実効変形比の下限 α_{es} の差が小さいダンパー配置では，最適ダンパー量時の実効変形比 α_e が α_{eh}，α_{eM} に近い値を示す。本報では Inside が特に当てはまる。したがって，文献 3，4)および注 1)で示されている最適ダンパー量時の α_e が α_{eM} と重なるのはこの関係が大きく起因していると推測できる。

本報で得られた知見を基に，新たな制振性能評価手法を，今後提案する予定である。

謝辞

本報は 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。本報の一部は JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム（JPMJOP1723）によるものです。

参考文献

1) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル，第三版，2013.11

2) 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

3) 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

4) 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

5) 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，吉江慶佑，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

6) 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

7) 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

8) 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

9) Masato Ishii, Akira Wada: Seismic response prediction for steel buildings with hysteretic dampers based on equivalent linearization technique, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol.73, No.632, pp.1735-1743, 2008.10
石井正人，和田章：履歴型ダンパーを設置した鋼構造建物の等価線形化法による地震応答予測，日本建築学会構造系論文集，Vol.73, No.632, pp.1735-1743, 2008.10

10) 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

注1) Yuya Sawa, Daiki Sato, Ryota Tobari, Mitsutoshi Yoshinaga, Jumpei Yasunaga, Yosuke Kaneshiro: Relationship between effective damper deformation and damper ductility demand for high-rise building with hysteretic dampers, AIJ J. Technol. Vol.27, No.65, pp.154-159, 2021.2
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超高層建物における実効変形比と塑性率の関係，日本建築学会技術報告集，Vol.27, No.65, pp.154-159, 2021.2

付録 A　実効変形比と付加系塑性率の関係

全層の擬似ダンパーが塑性化した時の実効変形比の予測値 $\alpha'_{es,i}$ を記す。文献 3)でも定義されているが，誤りがあるため再定義する。擬似ダンパーの降伏軸力 $F_{dsy,i}$，塑性率 $\mu_{ds,i}$，等価剛性 $K_{dseq,i}$ とする。ここで $K_{dseq,i}$ は，擬似ダンパーの塑性率が $\mu_{ds,i}$ である時を示し，$K_{dseq,i} = K_{ds,i} / \mu_{ds,i}$ となり，以上を用いて式(A1)で算出できる。

$$\alpha'_{es,i} = \frac{\alpha_{N,i} \times \delta_{dsy,i}}{\delta_{dsy,i} + \delta_{bs,i}} = \frac{\alpha_{N,i}}{1 + K_{dseq,i} / K_{bs,i}} = \frac{\alpha_{N,i} \times \mu_{ds,i}}{\mu_{ds,i} + \kappa_{ds,i}} \tag{A1}$$

式(A1)を変形して，式(A2)を得る。

$$\mu_{ds,i} = \frac{\alpha'_{es,i} \times \kappa_{ds,i}}{\alpha_{N,i} - \alpha'_{es,i}} \tag{A2}$$

ここで，本報で塑性率は付加系塑性率 $\mu_{as,i}$ で評価するため，$\mu_{as,i}$ と $\mu_{ds,i}$ の関係を式(A3)に示す。なお，付加系降伏変位 $\delta_{asy,i} = (K_{ds,i} / K_{as,i}) \times \delta_{dsy,i}$ で表される。

$$\mu_{as,i} = \frac{\delta_{bs,i} + \delta_{ds,i}}{\delta_{asy,i}} = \frac{K_{ds,i} + \mu_{ds,i} \times K_{bs,i}}{K_{bs,i} + K_{ds,i}} = \frac{\mu_{ds,i} + \kappa_{ds,i}}{1 + \kappa_{ds,i}} \tag{A3}$$

式(A3)の $\mu_{ds,i}$ に式(A2)を代入すると，$\alpha'_{es,i}$ と付加系塑性率 $\mu_{as,i}$ の関係は式(A4)で表される。

$$\alpha'_{es,i} = \frac{(\mu_{as,i} + \mu_{as,i}\kappa_{ds,i} - \kappa_{ds,i})\alpha_{N,i}}{\mu_{as,i} + \mu_{as,i}\kappa_{ds,i}} \tag{A4}$$

式(A4)より，付加系塑性時の実効変形比 $\alpha'_{es,i}$ は付加系塑性率 $\mu_{as,i}$ で表せられるため，注 1)で示した同一曲線になると推測できる。また，式(17)と比較すると，実効変形比の中間 $\alpha_{eM,i}$ は $\mu_{as,i} = 2$ の時の実効変形比であることも確認できる。

［2020 年 10 月 7 日原稿受理　2021 年 1 月 25 日採用決定］