

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制振建物における等価減衰定数を用いた制振性能評価 その1 応答低減率による評価
Title(English)	The vibration control performance evaluation based on equivalent damping ratio for high-rise building with hysteretic dampers Part1 Evaluation based on damping effect factor
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 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 285-288
Citation(English)	, , , pp. 285-288
発行日 / Pub. date	2021, 3

履歴ダンパーを有する超高層制振建物における等価減衰定数を用いた制振性能評価

その1 応答低減率による評価

構造—振動

正会員 ○ 澤 侑弥*¹正会員 佐藤大樹*²// 戸張涼太*³// 吉永光寿*³

制振構造 履歴ダンパー 超高層建物

// 安永隼平*⁴// 金城陽介*⁵

等価減衰定数 実効変形比 制振性能評価

1. はじめに

制振構造は制振ダンパーの塑性履歴エネルギーや粘性減衰の消散により、建物の振動および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低減させるものである¹⁾。しかしながら、制振ダンパーは、地震動のレベル毎に有効に作用するダンパー投入量・配置が存在することから、それらの決定にはパラメトリックな解析および検討が重要となる。

石井・笠井²⁾は状態 NR 解析により、層間変形に対する制振ダンパーの水平変形成分の比（以降、実効変形比）を考慮したせん断モデル化手法を提案している。文献 3), 4) では状態 NR 解析から得られる骨組特性値³⁾を用いた制振性能評価手法の提案を行い、複数の建物に適用できることを確認している。また、古谷ら⁵⁾はエネルギー法を用いた制振性能評価手法の提案を行い、レベル 2 相当の地震動レベルまでは、評価値と応答値が良好な関係を示すと述べている。しかし、極端に大きな地震動に対しては評価値と応答値に差が生じる。筆者らは文献 6) にて、実効変形比とダンパー塑性率の関係を明らかにしたが、時刻歴応答解析の応答値による関係を示しており、評価法の確立には至っていない。

そこで本報は、ダンパー配置およびダンパー投入量の優劣を評価する制振性能評価の提案を目的とする。その 1 では、履歴ダンパー（以降、ダンパー）を設置した制振建物を対象とし、時刻歴応答解析することなく、任意の外力が作用した時のダンパー配置およびダンパー投入量の優劣の評価を行う。具体的には、実効変形比を考慮したせん断モデルを用いて等価減衰定数を算出し、制振性能評価をする。また、評価の精度に関しては、時刻歴応答解析結果と比較することで確認を行う。その 2 では、骨組特性値から得られる実効変形比の中間とその時の等価減衰定数を用いて、ダンパー配置および投入量の優劣を評価する制振性能評価法を提案する。

2. モデル概要

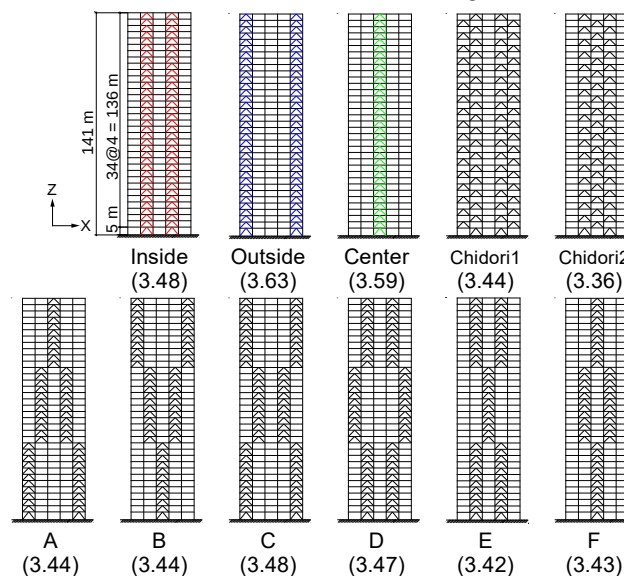
2.1 検討対象建物およびダンパー概要

検討対象建物は 35 層の鉄骨構造建物とする⁴⁾。Fig.1 に基準階伏図、Fig.2 に軸組図を示す。建物の総重量は 352,773kN、主架構のみの 1 次固有周期 T_1 は 3.97s であり、構造減衰は T_1 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、本報では X 方向のみ検討を行い、主架構は弾性状態を保つものとする。

ダンパーの高さ方向配置は Fig.2 に示す連層配置とする。履歴ダンパーとして座屈拘束ブレースを用い、部材長さ L_d に対して塑性化部長さ $L_d/3$ 、塑性化部断面積 A_d に対して弾性部断面積 $2A_d$ とし、塑性化部には LY225 材を用い完全弾塑性とする。各層のダンパー降伏層せん断力分布は、1 層のダンパー降伏層せん断力 Q_{dy1} を基準とし、 A_i 分布に基づく設計用層せん断力分布をもとに、8, 15, 24 層で切り替わ



Fig.1 Plan

Fig.2 Elevation (T_1 [s])

The vibration control performance evaluation based on equivalent damping ratio for high-rise building with hysteretic dampers
Part1 Evaluation based on damping effect factor

SAWA Yuya, SATO Daiki, TOBARI Ryota,
YOSHINAGA Mitsutoshi, YASUNAGA Jumpei,
KANESHIRO Yosuke

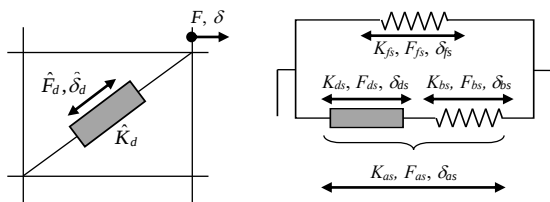
る4段階とする⁴⁾。式(1)に Q_{dy1} と1層のダンパー降伏層せん断力係数 α_{dy1} の関係を示す。

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

ここで、 N は層数、 m_i は i 層の質量、 g は重力加速度を示す。なお、本報では α_{dy1} をダンパー量と定義する。ダンパーはY2, Y3通りに配置する。ダンパー配置はFig.2に示す11通りとし、本建物モデルは奇数スパンであるため、Insideのようなダンパー配置の場合、1層あたりのダンパー数は8本であるのに対し、Centerの場合1層あたり4本となるため、1本あたりの断面積を2倍としている。以降、Inside, Outside, Centerを基準配置と呼び、Chidoril~Fはそれらの併用型配置と呼ぶ。なお、Fig.2に示す括弧内の値は、ダンパー配置を変えることで固有周期が変化するため、各ダンパー配置の $\alpha_{dy1} = 0.015$ における弾性1次固有周期 T_1 を示す。

2.2 せん断モデル化手法の概要²⁾

2.1節に示した各骨組要素からなるモデルを部材構成モデルと呼び、各要素を水平バネに置換したものをせん断モデルと呼ぶ。部材構成モデルと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 は主架構に作用するせん断力および層間変位を示し、 $\hat{K}_d$ 、 $\hat{F}_d$ 、 $\hat{\delta}_d$ はそれぞれ軸方向のダンパー剛性、軸力、変位を示す。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（ ds ）、擬似ブレース（ bs ）で構成され、各 K 、 F 、 δ はそれぞれ剛性、軸力、変位を示す。なお、擬似ダンパーと擬似ブレースを合わせて付加系（ as ）と呼び、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示す。せん断モデルの各バネ系は状態NR解析よりモデル化が行える。状態N解析は、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解析は、主架構のみの弾性部材モデルの制振部材設置箇所に剛性の極端に大きな弾性バネを挿入することで、その相対変位が限りなくゼロに近い状態を保ち、各層にAi分布などの外力を作用させる解析を示す。

状態Nの i 層 j 番目の制振部材設置箇所における相対変位 $\delta_{dN,(i,j)}$ の水平成分の層間変位 $\delta_{N,i}$ に対する比 $\alpha_{N,(i,j)}$ が算出できる（式(2)）。また、層せん断力 $Q_{N,i}$ と $\delta_{N,i}$ で状態Nの層剛性 $K_{N,i}$ が得られる（式(3)）。ここで、 $K_{N,i}$ は擬似フ

レーム剛性 $K_{fs,i}$ と同値である。

$$\alpha_{N,(i,j)} = \frac{\delta_{dN,(i,j)}}{\delta_{N,i}}, \quad K_{N,i} = K_{fs,i} = \frac{Q_{N,i}}{\delta_{N,i}} \quad (2),(3)$$

状態Rの弾性バネ軸力水平成分 $F_{dR,(i,j)}$ と層間変位 $\delta_{R,i}$ より、剛性 $K_{dR,(i,j)}$ を各制振部材設置箇所について計算し、 i 層におけるダンパー数 N_{dj} を用いて、擬似ブレース剛性 $K_{bs,i}$ が算出できる。

$$K_{dR,(i,j)} = \frac{F_{dR,(i,j)}}{\delta_{R,i}}, \quad K_{bs,i} = \sum_{j=1}^{N_{dj}} \alpha_{N,(i,j)} K_{dR,(i,j)} \quad (4),(5)$$

擬似ダンパー剛性 $K_{ds,i}$ は部材構成モデルにおけるダンパー剛性の水平成分 $K_{d,(i,j)}$ と $\alpha_{N,(i,j)}$ を用いて算出できる（式(6)）。また、擬似ダンパーと擬似ブレースは直列の関係であることから、付加系剛性 $K_{as,i}$ は式(7)で表される。

$$K_{ds,i} = \sum_{j=1}^{N_{dj}} \alpha_{N,(i,j)}^2 K_{d,(i,j)}, \quad K_{as,i} = \frac{K_{ds,i} K_{bs,i}}{K_{ds,i} + K_{bs,i}} \quad (6),(7)$$

3. 制振性能評価

3.1 骨組特性値による制振性能評価値

まず、部材構成モデルとせん断モデルの対応式を示す。部材構成モデルのダンパー軸変位、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位、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(8a-c)で表される。

$$\delta_{ds} = \delta_d / \alpha_N, \quad F_{ds} = \alpha_N F_d, \quad K_{ds} = \alpha^2_N K_d \quad (8a-c)$$

せん断モデルの擬似ダンパーが弾性時における実効変形比 $\alpha_{es,i}$ （以下、実効変形比の下限）の定義を示す。部材構成モデルの層間変位 δ_i は、せん断モデルにおける層間変位 $\delta_{s,i}$ （ $= \delta_{ds,i} + \delta_{bs,i}$ ）と同様である。式(8a-c)より実効変形比の下限値 $\alpha_{es,i}$ は式(9)で表すことができる⁶⁾。

$$\alpha_{es,i} = \frac{\delta_{d,i}}{\delta_i} = \frac{\alpha_{N,i} \delta_{ds,i}}{\delta_{ds,i} + \delta_{bs,i}} = \frac{\alpha_{N,i}}{1 + K_{ds,i} / K_{bs,i}} = \frac{\alpha_{N,i}}{1 + \kappa_{ds,i}} \quad (9)$$

ここで、 $\kappa_{ds,i} = K_{ds,i} / K_{bs,i}$ とする。

3.2 等価減衰定数 h_{eq} の算出

等価減衰定数 h_{eq} の算出方法を記す。本報その1では、 h_{eq} をAi分布の外力を基に算出し、主架構のみのモデル（以降、フレームモデル）の最大層間変形角 $R_{f,max}$ が1/300, 1/200, 1/100となる層せん断力 Q_i を用いる。Ai分布の周期は T_1 とする。まず、各層のシステムの変位を求める。 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 Q_i が作用した時の変位 $\delta_{s,i}$ は式(10)より算出できる。

$$\delta'_{s,i} = \begin{cases} Q_i / K_{s1,i} & (Q_i < F_{sy,i}) \\ (Q_i - F_{sy,i} + K_{s2,i} \delta_{asy,i}) / K_{s2,i} & (F_{sy,i} \leq Q_i) \end{cases} \quad (10)$$

本報その1では等価減衰定数 h_{eq} を式(11)で評価する。

$$h_{eq} = \sum_{i=1}^N h_i W_i / \sum_{i=1}^N W_i + h_0 \quad (11)$$

ここで、 h_0 は構造減衰を示し、 i 層の減衰定数 h_i は文献 7) を基に式(12)より得る。

$$h_i = \frac{2(1+K_{as,i}/K_{fs,i})}{\pi\mu_{s,i}} \ln \frac{\mu_{s,i} + K_{as,i}/K_{fs,i}}{(1+K_{as,i}/K_{fs,i})(\mu_{s,i})^{\frac{1}{1+K_{as,i}/K_{fs,i}}}} \quad (12)$$

式(11)の W_i は最大ポテンシャルエネルギーを示し、式(13)で算出できる。また、式(12)の $\mu_{s,i}$ はシステム塑性率を示し、式(14)で算出できる。なお、 $\mu_{s,i} \geq 1$ とする。

$$W_i = Q_i \delta'_{s,i} / 2, \quad \mu_{s,i} = \delta'_{s,i} / \delta_{sy,i} \quad (13), (14)$$

3.3 ダンパー量・配置による各評価値の違い

Fig.4 に各ダンパー配置の状態 N の実効変形比 α_N (以降、実効変形比の上限) の平均 $\bar{\alpha}_N$ 、実効変形比の下限 α_{es} の平均 $\bar{\alpha}_{es}$ 、 $R_{f,max} = 1/300, 1/200, 1/100$ の h_{eq} を示す。なお、平均化は 1~全体の 2/3 層までとする^{4),6)}。Fig.4 より、ダンパー配置によって $\bar{\alpha}_N$ および $\bar{\alpha}_{es}$ が異なることが確認できる。基準配置に着目すると、 $\bar{\alpha}_N$ に関しては Center > Inside > Outside となり、ダンパー配置が内側になるにつれ大きくなるのがわかる。しかし $\bar{\alpha}_{es}$ では、Inside > Outside > Center となる。この原因は、1 本あたりのダンパーの断面積が異なるためである (2.1 節前述)。併用型配置に着目すると、Chidori2 では $\bar{\alpha}_N$ および $\bar{\alpha}_{es}$ は他のダンパー配置と比較して大きな値を示すことがわかる。次いで h_{eq} について述べる。基準配置においては、いずれの外力でも Inside が最も大きく、Outside と Center の差はあまりない。 h_{eq} の大小関係に関して $\bar{\alpha}_N$ が大きな値を示し、かつ $\bar{\alpha}_N$ と $\bar{\alpha}_{es}$ の差が小さいダンパー配置だと大きな h_{eq} を示す傾向にある。併用型配置において、概ね基準配置よりも大きな h_{eq} を示し、かつ広い範囲のダンパー量で h_0 よりも大きな値を示す。併用型配置は基準配置と比較して $\bar{\alpha}_N$ と $\bar{\alpha}_{es}$ の差が小さく、いずれの外力でも大きな h_{eq} を示すことが確認できる。中でも Chidori2 は最も大きな h_{eq} を示す。

3.4 h_{eq} を用いた制振性能評価

本節では応答低減率 D_h ⁸⁾ を用いてダンパー配置およびダンパー量の優劣を評価する。式(15)に D_h の算出方法を示す。

$$D_h = \sqrt{(1+\alpha h_0)/(1+\alpha h_{eq})} \quad (15)$$

本報では $\alpha = 25$ として算出する⁸⁾。Fig.5(a)~(c) に $R_{f,max} = 1/300, 1/200, 1/100$ の時の D_h を示す。横軸はダンパー配置とする。なお、本評価においては $\alpha_{dy1} = 0.005 \sim 0.030$ までで検討を行う。Fig.5(a) より、全てのダンパー配置・量で $D_h = 1$ に近い値を示すことから、フレームモデルと応答に差がないと予測できる。Fig.5(b) より、概ね全てのダンパー配置で $\alpha_{dy1} = 0.010$ で小さな D_h を示す。しかし、Outside と Center は限りなく $D_h = 1$ に近い値を示すことからあまり応答低減はしないと推測できる。なお、Chidori2 の $\alpha_{dy1} = 0.015$ で D_h は最も小さな値を示した。

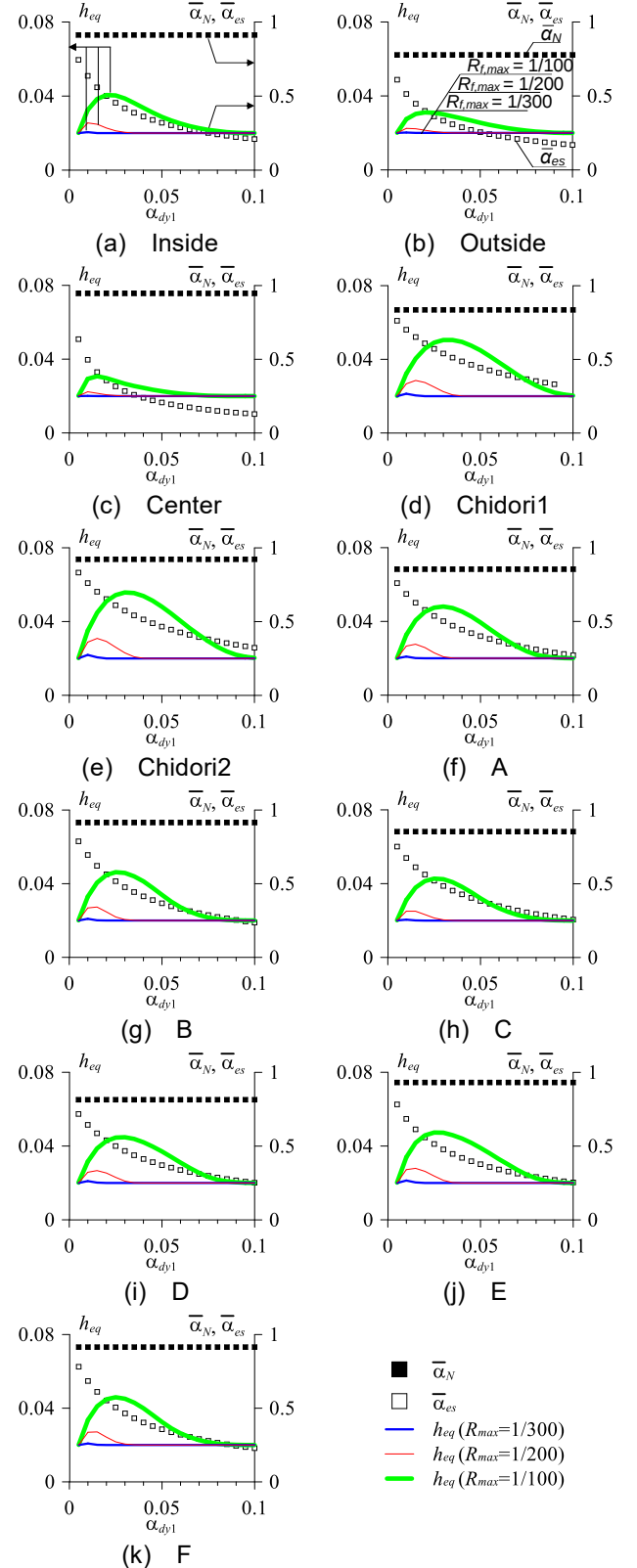


Fig.4 h_{eq} , $\bar{\alpha}_N$ and $\bar{\alpha}_{es}$ vs. α_{dy1}

Fig.5(c)では、全てのダンパー配置において $\alpha_{dy1} = 0.005$ で $D_h = 1$ を示す。Outside, Center 以外のダンパー配置で $\alpha_{dy1} = 0.020 \sim 0.030$ で小さな D_h を示すが $\alpha_{dy1} = 0.020$ 以降であまり差はない。いずれのダンパー配置でも $\alpha_{dy1} = 0.030$ 前後で D_h は収束すると考えられる。

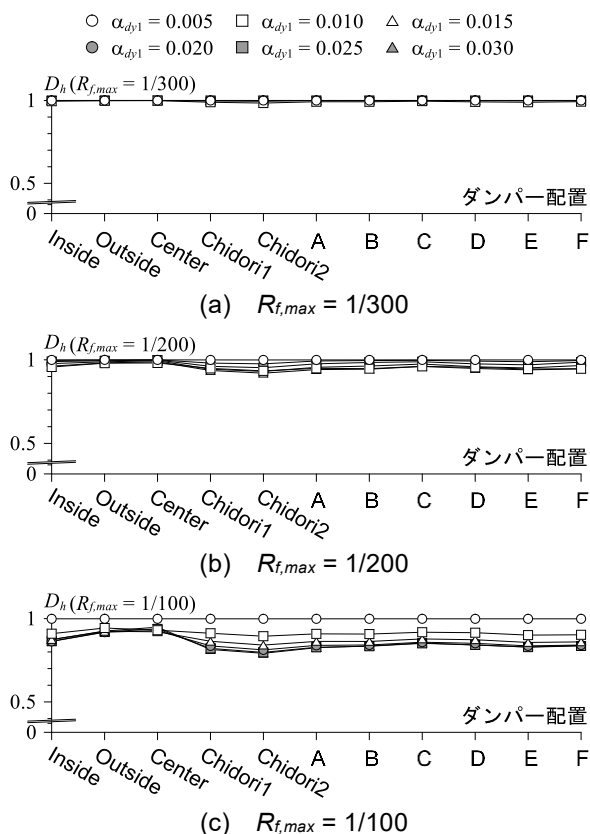


Fig.5 Vibration control performance evaluation by D_h

4. 時刻歴応答解析による比較

4.1 入力地震動概要

長周期領域で擬似速度応答スペクトル $S_{pV} = 80$ cm/s とする模擬地震動で、位相特性として HACHINOHE 1968 EW を用いる。以降 ART HACHI と呼ぶ。Fig.6(a)に構造減衰 $h = 5\%$ の S_{pV} , (b)に $h = 10\%$ のエネルギースペクトル V_E を示す。2.1 節でも前述したように、図中に示す検討固有周期範囲はダンパー配置・量を変えることで変化する固有周期を示す。なお、フレームモデルで、 $R_{f,max} = 1/300$, $1/200$, $1/100$ となるように入力地震動倍率を調整して、3.4 節と比較する。本建物においては、ART HACHI だと、0.4, 0.6, 1.2 倍波であった。

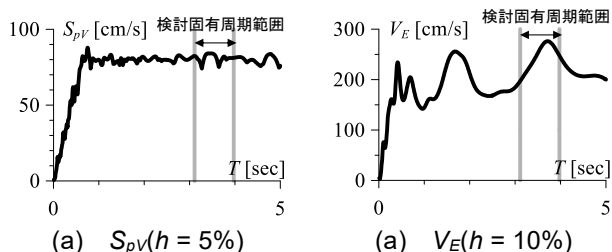


Fig.6 Earthquake spectra

4.2 時刻歴応答解析結果

本節では基準配置と併用型配置の Chidori2, A, E を対象として時刻歴応答解析を行う。Fig.7(a)~(c)に 0.4, 0.6, 1.2 倍波を入力した時の最大層間変形角 R_{max} を示す。Fig.7(a)より、0.4 倍波ではいずれのダンパー配置・量においてもフレームモデルとあまり差がなく、Fig.5(a)の評価と一致する。Fig.7(b)より、0.6 倍波では Outside と Center 以外は、 $\alpha_{dy1} = 0.010$, 0.015 で最も応答が低減し、Fig.5(b)における予測と概ね一致していることが確認できる。Fig.7(c)より、1.2 倍波において Outside と Center は $\alpha_{dy1} = 0.015$ までは応答が低減し、それ以降は横ばいとなる。それ以外は $\alpha_{dy1} = 0.015$, 0.020 以降で応答が増大する。Fig.5(c)における評価で $\alpha_{dy1} = 0.020 \sim 0.030$ で差はなかったため、概ね一致していると言える。Fig.5 のダンパー配置の評価において、Chidori2 が最も応答が低減するという評価に対して、Fig.7 で最も応答が低減するダンパー配置は Chidori2 であったため一致する。また、ダンパー量においてはいずれの外力でも Fig.5 の評価は安全側となることが確認できる。

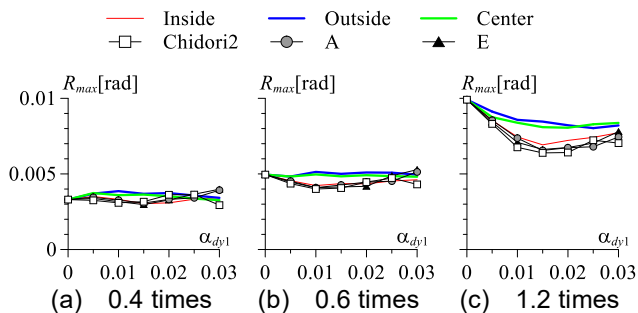


Fig.7 Maximum Drift angle

5. まとめ

本報では、履歴ダンパーを設置した制振建物を対象とし、時刻歴応答解析することなく、任意の外力が作用した時のダンパー投入量およびダンパー配置の制振効果における優劣を評価することを目的とした。

本評価と時刻歴応答解析結果の比較において、ダンパー配置の優劣関係においては良好な関係を示し、有効なダンパー配置を評価することができることを確認した。有効に作用するダンパー量においては外力によって差は生じるものの、安全側の評価であることが確認できた。

謝辞および参考文献はその 2 にまとめて記す。

*1 学生会員 東京工業大学 大学院生
 *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 シビル株式会社
 *4 JFE スチール株式会社 博士(工学)
 *5 JFE スチール株式会社

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology *1
 Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng. *2
 JFE Civil Engineering & Construction Corporation *3
 JFE Steel Corporation, Dr.Eng. *4
 JFE Steel Corporation *5