T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

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 2 骨組特性値と等価減衰定数による評価
Title(English)	The vibration control performance evaluation based on equivalent damping ratio for high-rise building with hysteretic dampers Part2 Evaluation based on frame parameters for control and equivalent damping ratio
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, Ⅰ, , pp. 289-292
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 289-292
発行日 / Pub. date	2021, 3

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

2020年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2021年3月

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2　骨組特性値と等価減衰定数による評価

構造ー振動

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
〃　安永隼平*4　　〃　金城陽介*5

制振構造　履歴ダンパー　超高層建物
等価減衰定数　実効変形比　制振性能評価

1. はじめに

本報その1では，Ai分布に基づく外力を基に等価減衰定数 h_{eq} を算出し，任意の外力が作用した時のダンパー配置とダンパー投入量の優劣を評価した。また，制振性能評価において，時刻歴応答解析結果と比較することで，その精度検証を行った。

筆者らは，文献6)にて，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ΣW_{dp}（以降，エネルギー吸収率$\Sigma W_{dp}/E$）が最大となるダンパー量を最適ダンパー量と定義し，最適ダンパー量時の実効変形比は骨組特性値から得られる実効変形比の中間と概ね一致することを確認している。また，実効変形比と付加系塑性率の関係性は，ダンパー量ごとに，同一曲線状に分布し，外力の特性ではなく，外力レベルに依存することを確認している。そのことから，実効変形比の中間を基に制振性能評価法を構築することが有効的であると考えられる。

以上より，本報その2では，その1と同じ建物モデルを用いて，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制振性能評価法の提案を行うことを目的とする。

2. 評価値の算出

2.1 実効変形比の中間および付加系塑性率の算出

実効変形比の中間$\alpha_{eM,i}$は，実効変形比の上限$\alpha_{N,i}$（本報その1の式(2)）と下限$\alpha_{es,i}$（本報その1の式(9)）より算出できる。

$$\alpha_{eM,i}=\frac{\alpha_{N,i}+\alpha_{es,i}}{2}=\frac{(2+\kappa_{ds,i})\alpha_{N,i}}{2+2\kappa_{ds,i}} \tag{1}$$

なお，$\kappa_{ds,i}=K_{ds,i}/K_{bs,i}$とする。

次に，擬似ダンパーが全層にわたって，一律に塑性化したと仮定した時の実効変形比の予測値$\alpha'_{es,i}$を示す。擬似ダンパーの塑性率を$\mu_{ds,i}$とし，その時の等価剛性を $K_{dseq,i}$ で表す。なお，擬似ダンパーが弾性時の剛性は $K_{ds,i}$ であり，$K_{dseq,i}=K_{ds,i}/\mu_{ds,i}$で表される。以上より，$\alpha'_{es,i}$は式(2)で表される。

$$\begin{aligned}\alpha'_{es,i}&=\frac{\alpha_{N,i}\times\delta_{dsy,i}}{\delta_{dsy,i}+\delta_{bs,i}}=\frac{F_{dsy,i}/K_{dseq,i}}{F_{dsy,i}/K_{dseq,i}+F_{dsy,i}/K_{bs,i}}\times\alpha_{N,i}\\&=\frac{\alpha_{N,i}}{1+K_{dseq,i}/K_{bs,i}}=\frac{\mu_{ds,i}\alpha_{N,i}}{\mu_{ds,i}+\kappa_{ds,i}}\end{aligned} \tag{2}$$

ここで，$F_{dsy,i}$，$\delta_{dsy,i}$，$\delta_{bs,i}$はそれぞれi層の擬似ダンパーの降伏軸力，擬似ダンパーの降伏変位，擬似ブレースの変位を示す。式(2)を整理し，式(3)を得る。また，式(3)の$\alpha'_{es,i}$に$\alpha_{eM,i}$を代入し式(4)を得る。

$$\mu_{ds,i}=\frac{\kappa_{ds,i}\alpha'_{es,i}}{\alpha_{N,i}-\alpha'_{es,i}}\ ,\quad \mu_{dsM,i}=\frac{\kappa_{ds,i}\alpha_{eM,i}}{\alpha_{N,i}-\alpha_{eM,i}} \tag{3),(4}$$

なお，式(4)に示す$\mu_{dsM,i}$は$\alpha_{eM,i}$時の塑性率であることを示す。次に本報では塑性率は付加系で評価するため，擬似ダンパー塑性率$\mu_{ds,i}$と付加系塑性率$\mu_{as,i}$の関係を示す(式(5))。なお，付加系降伏変位は$\delta_{asy,i}=(K_{ds,i}/K_{as,i})\times\delta_{dsy,i}$で表され，$K_{as,i}$は付加系剛性を示し，擬似ダンパー剛性 $K_{ds,i}$ と擬似ブレース剛性 $K_{bs,i}$ との関係はその1式(7)を参照されたい。

$$\begin{aligned}\mu_{as,i}&=\frac{\delta_{ds,i}+\delta_{bs,i}}{\delta_{asy,i}}=\frac{\mu_{ds,i}\delta_{dsy,i}+\delta_{bs,i}}{(K_{ds,i}/K_{as,i})\delta_{dsy,i}}\\&=\frac{\mu_{ds,i}F_{dsy,i}/K_{ds,i}+F_{dsy,i}/K_{bs,i}}{F_{dsy,i}/K_{as,i}}\\&=\frac{K_{ds,i}+\mu_{ds,i}K_{bs,i}}{K_{ds,i}+K_{bs,i}}=\frac{\mu_{ds,i}+\kappa_{ds,i}}{1+\kappa_{ds,i}}\end{aligned} \tag{5}$$

式(5)の$\mu_{ds,i}$に式(4)より得た$\mu_{dsM,i}$を代入すると，$\alpha_{eM,i}$時の付加系塑性率$\mu_{asM,i}$を得る（式(6)）。また，式(6)を整理すると式(7)となる。

$$\mu_{asM,i}=\frac{\kappa_{ds,i}\alpha_{N,i}}{(1+\kappa_{ds,i})(\alpha_{N,i}-\alpha_{eM,i})} \tag{6}$$

$$\alpha_{eM,i}=\frac{(\mu_{asM,i}+\mu_{asM,i}\kappa_{ds,i}-\kappa_{ds,i})\alpha_{N,i}}{\mu_{asM,i}+\mu_{asM,i}\kappa_{ds,i}} \tag{7}$$

The vibration control performance evaluation based on equivalent damping ratio for high-rise building with hysteretic dampers
Part2 Evaluation based on frame parameters for control and equivalent damping ratio

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

式(1)と式(7)を比較すると，$\alpha_{eM,i}$ は全層の $\mu_{asM,i}=2$ となる時の実効変形比であることが分かる。なお，本報の制振性能評価では，$\alpha_{eM,i}$ を平均化して用いる。$\alpha_{eM,i}$ の平均 $\overline{\alpha}_{eM}$ を式(8)に示す。

$$\overline{\alpha}_{eM}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\alpha_{eM,i} \tag{8}$$

全体の 2/3 層まででダンパーの累積エネルギー吸収率は 90%程度を占めているため，平均化は全体の 2/3 層までで行う [4),6)]。よって，$n=2N/3$ とする（N は層数）。

2.2 実効変形比の中間における等価減衰定数の算出

本報その 2 では，実効変形比の中間時における等価減衰定数 h_{eqM} を用いて評価するため，その算出法を以下に示す。まず，システムの変位仮定について記す。Fig.1 に本報で仮定する Inside の $\alpha_{dy1}=0.015$ における変位の高さ方向分布を示す。黒実線は各層の降伏変位 $\delta_{asy,i}$ を表し，ピンク太線は本報で用いるシステムの変位仮定を表す。変位仮定は，1～n 層までは付加系塑性率 $\mu_{as,i}=2$，それ以降の層では $u'_{s,i}=0$ としている。Fig.1 からわかるように，$\delta_{asy,i}$ は上層になるにつれ，$\delta_{asy,i}$ が大きくなるため全層で $\mu_{as,i}=2$ を仮定してしまうと全層の変位において過大評価する恐れがある。そのため，本報では Fig.1 に示す変位仮定とする。また，Fig.2 にエネルギー吸収量 $W_{dp,i}$ の高さ方向分布を示す。黒実線は全層で $\mu_{as,i}=2$ とした時のエネルギー吸収量 $W_{dp,i}$ を示し，ピンク太線は本報で仮定するシステムの変位の場合の $W_{dp,i}$ を表す。Fig.2 の全層で $\mu_{as,i}=2$ とした時のエネルギー吸収量 $W_{dp,i}$ を確認すると，上層での多くのエネルギー吸収を行う。しかしながら，時刻歴応答解析や静的増分解析での累積エネルギー吸収率では 1～n 層までで 90%を占める [4),6)]。そのため，本報でのシステム変位仮定を用いることで，エネルギー吸収量 $W_{dp,i}$ の過大評価を避けている。

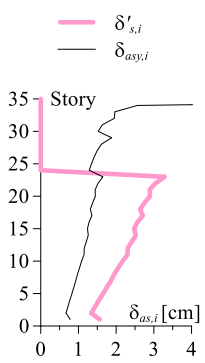

Fig.1　u's,i

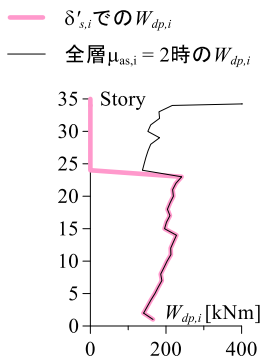

Fig.2　Wdp,i

$\alpha_{eM,i}$ 時における等価減衰定数 h_{eqM} を式(9)で評価する。

$$h_{eqM}=\sum_{i=1}^{n}h_iW_i\Big/\sum_{i=1}^{n}W_i+h_0 \tag{9}$$

なお，式(9)に示すように h_{eqM} は 1 から n 層までで評価する。式(9)に示す i 層の減衰 h_i は $\mu_{asM,i}$ を用いて文献 7)を基に式(10)で示す。

$$h_i=\frac{2(1+K_{as,i}/K_{fs,i})}{\pi\mu_{asM,i}}\ln\frac{\mu_{asM,i}+K_{as,i}/K_{fs,i}}{(1+K_{as,i}/K_{fs,i})(\mu_{asM,i})^{\frac{1}{1+K_{as,i}/K_{fs,i}}}} \tag{10}$$

なお，式(10)に示す最大ポテンシャルエネルギー W_i は $\mu_{asM,i}$ の時のシステム等価剛性 $K_{seq,i}$ $(=K_{s1,i}+K_{as,i}/\mu_{asM,i})$ を用いて式(11)より得られる。

$$W_i=K_{seq,i}\delta'^{\,2}_{s,i}/2 \tag{11}$$

なお，式(9)～(11)に示す i は $1\leq i\leq n$ とする。

3. 制振性能評価

3.1 $\overline{\alpha}_{eM}$ と h_{eqM} による制振性能評価

Fig.1 に各ダンパー配置の $\overline{\alpha}_{eM}$ と h_{eqM} の関係を示す。横軸は $\overline{\alpha}_{eM}$，縦軸は減衰定数 $h=10\%$ で基準化し，h_{eqM}/h としている。$h=10\%$ で基準化する理由として，制振構造は，一般的には構造減衰は 10%が最大であるため，制振構造全般に適用させるためである。各実線はダンパー配置を示しており，黒破線は同じダンパー量を繋いでいることを示す。また，図中に示すプロットはそれぞれ白三角：最大層間変形角 $R_{max}=1/200$，灰色四角：$R_{max}=1/150$，黒丸：$R_{max}=1/100$ を示す。各ダンパー配置において，ダンパー量の増加に伴い $\overline{\alpha}_{eM}$ は減少し，逆に h_{eqM}/h は増加することが確認できる。基本的に $\overline{\alpha}_{eM}$ が大きいダンパー配置ほど h_{eqM}/h は大きな値を示す傾向にある。本報その 1 に示した Fig.4 での傾向と一致する。Fig.3 から確認できるように Chidori2 がダンパー配置として最も優れていると予測できる。本報その 1 による評価（以降，評価 D_h）では，Outside や Center はダンパー量の増加や外力レベルの増大においても応答低減があまりなく，制振性能を発揮しにくいダンパー配置であった。本報その 2 における Outside，Center の評価は $R_{max}=1/100$ で他のダンパー配置と比較して小さな h_{eqM}/h であるため，評価 D_h と概ね良好な対応関

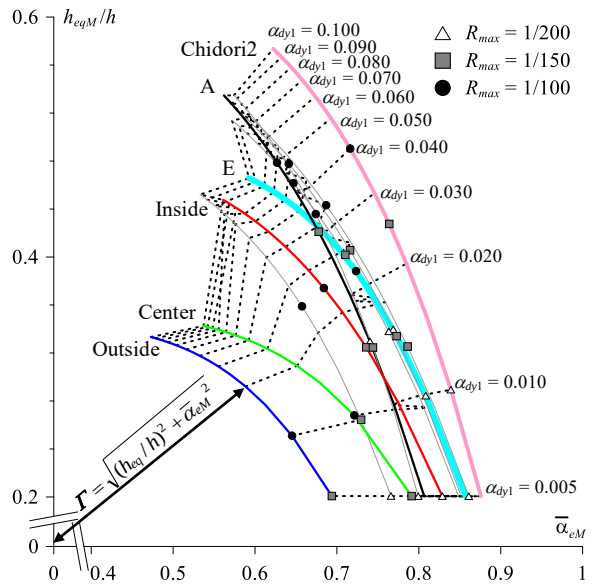

Fig.3　$\overline{\alpha}_{eM}$ vs. h_{eqM}

係であると言える。また，優れたダンパー配置の Chidori2 では R_{max} = 1/200 のような外力でもある程度の h_{eqM}/h（h_{eqM} ≒0.043）であり，R_{max} = 1/100 では大きな h_{eqM}/h（h_{eqM}≒0.049）を示している。このことから，等価減衰によるダンパー配置の優劣の関係性も評価 D_h と同様に評価することができている。次にダンパー配置毎の比較を述べる。Outside と Center に着目すると，各ダンパー量において h_{eqM} はほぼ同じ値を示しているのに対して，$\overline{\alpha}_{eM}$ では Center の方が大きな値を示していることが分かる。また，Inside と A に着目すると，α_{dy1} = 0.015 付近で交差していることが確認できる。A と E の α_{dy1} = 0.030 でも同様の現象が起きている。

3.2 評価式 Γ によるダンパー配置の優劣の評価

3.2.1 ダンパー量による制振性能評価値の違い

ダンパーは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に作用するため，大きな実効変形比を確保することが重要である。そのため，$\overline{\alpha}_{eM}$ は 1 に近いことが望ましい。また，本報その 1 でも示したように等価減衰定数 h_{eq} は大きいほどフレームモデルよりも応答を低減させることができるため，h_{eqM} も大きな値を示すことが望ましい。即ち，同じダンパー量でダンパー配置を比較する際には，Fig.1 における原点（0，0）からあるダンパー配置・量での（$\overline{\alpha}_{eM}$，h_{eqM}/h）までの距離が大きいと優れたダンパー配置であると評価することが可能である。以上のことから，ダンパー量毎の評価式を式(12)で定義する。

$$\Gamma = \sqrt{\overline{\alpha}_{eM}{}^2 + (h_{eqM}/h)^2} \qquad (12)$$

Fig.4 に式(12)より算出したダンパー量毎の制振性能評価を示す。Fig.4 より，Chidori1，Chidori2 および A に着目すると，ダンパー量増加に伴う Γ の変化がほぼないことが確認できる。Fig.3 を見るとそれら 3 つのダンパー配置は，ダンパー量の増加に伴う $\overline{\alpha}_{eM}$ の減少は他のダンパー配置比べて小さく，かつ，h_{eqM}/h の増加は大きい。反対に，Fig.4 で Outside や Center などは，ダンパー量の増加に伴い，Γ は減少する傾向が見られる。これら 2 つのダンパー配置は，ダンパー量増加による $\overline{\alpha}_{eM}$ の大幅な減少，かつ，h_{eqM}/h の増加が極めて小さいためである。したがって，ダンパー量の増加に伴うの変化の小さいダンパー配置は制振性能が高いと判断できる。また，本評価法では同一のダンパー量でも，評価 D_h よりも顕著にダンパー配置による違いが生じる。評価 D_h では，等価減衰定数 h_{eq} のみによる評価であったため，h_{eq} の大小関係が制振性能の優劣に直結した。そのため，評価 D_h では，A～F の併用型配置では，同一のダンパー量では差が生じていなかった。しかしながら，本評価法（Fig.3，4）は実効変形比の中間 $\overline{\alpha}_{eM}$ も考慮しているため，A～F の併用型配置で h_{eqM} の値はあまり変わらないが，$\overline{\alpha}_{eM}$ に差があるため，Γ の値で差が生じる。また，Outside と Center でも同様である。そのため，Fig.3 における Outside および Center の h_{eqM} で差があまりなかったが，$\overline{\alpha}_{eM}$ だと Center の方が Outside よりも大きいため，Γ は Center の方が大きいという結果になる。3.1 節で前述した Inside と A また，A と E が交差して順序関係が入れ替わることについて，Fig.4 でもそれを顕著に確認することができる。Inside と A では α_{dy1} = 0.015 までは Inside の方が僅かに大きな Γ を示しており，α_{dy1} = 0.020 で A の方が大きく，α_{dy1} = 0.025，0.030 でその傾向が顕著になる。したがって，本評価において，Inside と A は α_{dy1} = 0.015 までは Inside の方が優れたダンパー配置であるが，それ以降では A の方がより高い制振性能を発揮するという評価となる。

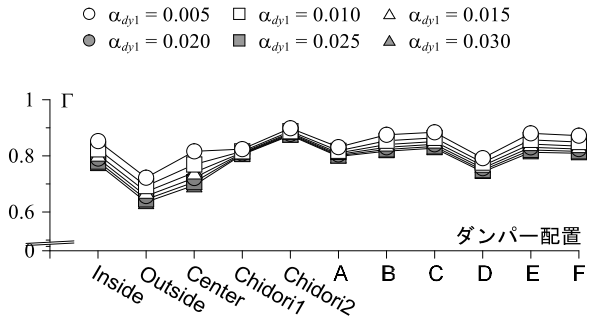

Fig.4　Vibration control performance evaluation focused on damper shear coefficient

Fig.5 にダンパー量と制振性能評価値の関係を示す。なお，図に示すダンパー配置は，Inside, Outside, Center, Chidori2, A，E とする。前述したようにダンパー配置として優れる Chidori2 はダンパー量の増加に関係なく Γ がほぼ一定の値となっていることが確認できる。それに対して，Outside や Center は少ないダンパー量（α_{dy1} = 0.005～0.020）における Γ の減少が大きい。Outside や Center は α_{dy1} = 0.040 以降で，Γ の変化があまりないことから，それ以上のダンパーを投入しても制振性能効果の向上は期待できないと推測できる。なお，Fig.5 でも Inside と A の Γ および A と E の Γ がそれぞれ α_{dy1} = 0.010，α_{dy1} = 0.050 付近で入れ替わるのが確認できる。

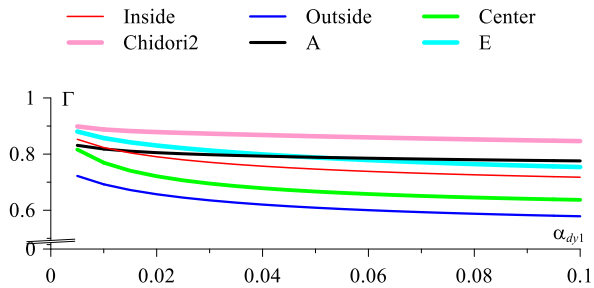

Fig.5　Γ vs. α_{dy1}

3.2.2 最大層間変形角による制振性能評価値の違い

次に，各最大層間変形角 R_{max} = 1/200，1/150，1/100 の時の制振性能評価を示す。Fig.6 は Fig.3 に示すそれぞれの最大層間変形角となる Γ を繋いでいるため，ダンパー配

置毎にダンパー量が異なる。例えば，R_{max} = 1/100 の Inside と Chidori2 を比較すると，Fig.1 より Inside はα_{dy1} = 0.025 であるのに対し，Chidori2 はα_{dy1} = 0.040 となっている。なお，R_{max} = 1/200 における Outside と Center は検討範囲外のダンパー量で R_{max} = 1/200 となるためプロットが存在しない。Fig.3 から，外力ごとに最適となる可能性の高いダンパー配置およびダンパー量を検討することが可能である。R_{max} = 1/200 では，ダンパー量は概ねα_{dy1} = 0.005，0.010 が多く存在する。中でも Chidori2 のα_{dy1} = 0.010 で最も大きなΓを示す。R_{max} = 1/150 においてダンパー量は概ねα_{dy1} = 0.015～0.025 が多く存在し，R_{max} = 1/200 と同様に Chidori2 で最も大きなΓ を示し，その時のダンパー量はα_{dy1} = 0.025 である。R_{max} = 1/100 においてダンパー量は概ねα_{dy1} = 0.025～0.040 を示す。また，R_{max} = 1/150 と同様に Chidori2 で最も大きなΓを示し，α_{dy1} = 0.040 であった。

以上より，本評価はダンパー量毎や，目標とする最大層間変形角に対して，最適となるダンパー配置および投入量を決定する指標として扱うことが出来る。

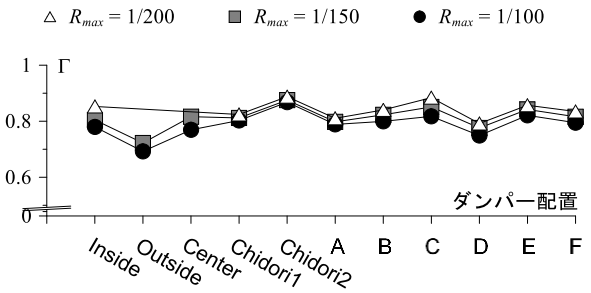

Fig.6 Vibration control performance evaluation focused on maximum drift angle

4. まとめ

本報その 1 での評価（評価 D_h）は，Ai 分布を基に最大層間変形角 R_{max} が 1/300，1/200，1/100 の時の等価減衰定数 h_{eq} から応答低減率 D_h を算出し，ダンパー配置の優劣を評価した。それに対して，本報その 2 では，骨組特性値から算出できる実効変形比の中間 $\overline{\alpha}_{eM}$ およびその時の等価減衰定数 h_{eqM} を用いて制振性能評価の提案を行った。以下に知見を示す。

(1) 実効変形比の中間 $\overline{\alpha}_{eM}$ と等価減衰定数 h_{eqM} の関係性において，$\overline{\alpha}_{eM}$ が大きなダンパー配置ほど h_{eqM} は大きな値を示す。そのため，評価 D_h での傾向と同様であることを確認した。

(2) 同一のダンパー量でダンパー配置の優劣を比較するには原点からあるプロットまでの距離で評価する，制振性能評価式の提案を行った。評価値の順序は概ね本報その 1 と同順であった。併用型配置では本報その 1 による評価（評価 D_h）と差が生じるが，$\overline{\alpha}_{eM}$ を考慮しているためである。

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共同研究の成果を一部まとめたものです。JFE スチール株式会社の植木卓也氏には本報を執筆する上で貴重なご意見を賜りました。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) 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) 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
6) 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ダンパー塑性率の関係，日本建築学会技術報告集，Vol.24，No.65，pp.154-159，2021.2
7) 竹内徹，市川康，中島英雄，笠井和彦：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，No.583，pp.115-122，2004.9
8) 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

*1 学生会員　東京工業大学　大学院生　Graduate Student, Tokyo Institute of Technology *1
*2 東京工業大学　未来産業技術研究所　准教授・博士（工学）　Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng. *2
*3 JFE シビル株式会社　JFE Civil Engineering & Construction Corporation *3
*4 JFE スチール株式会社　博士（工学）　JFE Steel Corporation, Dr.Eng. *4
*5 JFE スチール株式会社　JFE Steel Corporation *5