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)	主架構弾性時の履歴ダンパーの累積損傷分布における応答予測精度の検証
Title(English)	
著者(和文)	岩森貴寿, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太
Authors(English)	Takatoshi Iwamori, Daiki Sato, Toshiaki Sato, Haruyuki Kitamura, Michio Yamaguchi, Naoya WAKITA, Yuta WATANUKI
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, I , , pp. 533-536
Citation(English)	, I , , pp. 533-536
発行日 / Pub. date	2016, 3

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

2015年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2016年3月

主架構弾性時の履歴ダンパーの累積損傷分布における応答予測精度の検証

構造ー振動

正会員　○岩森貴寿[*1]　正会員　佐藤大樹[*2]
〃　佐藤利昭[*3]　〃　北村春幸[*4]
〃　山口路夫[*5]　〃　脇田直弥[*6]
〃　綿貫雄太[*6]

制振構造　応答予測式　履歴ダンパー
剛性分布　等価せん断型モデル　累積損傷分布

1. はじめに

耐震計算法として構造骨組のエネルギー吸収能力により，建物の耐震安全性を確保するエネルギーの釣合に基づく応答予測法 [1](以降，エネルギー法と呼ぶ)が規定されている。

制振構造において，主架構が弾性の場合でのエネルギー法は秋山 [1]により提案され，北村ら [2]により主架構が塑性化する場合にも対応できるような式に拡張された。また，北村らによって拡張された式は主架構とダンパーの剛性比が各層で等しい場合のみに適用できるものとなっており，栗林ら [3),4)]によって，主架構とダンパーの剛性比が各層で異なる場合にも適用できるように拡張された。しかし，北村ら [2),3),4)]の式では主架構が大きく塑性化する事を想定しているため，全層で主架構が塑性化する式になっており，主架構が弾性である場合と塑性化する場合が混在するような場合は考慮されていない。

本報では，この研究の初期段階として履歴ダンパーを有する制振構造の主架構弾性時での履歴ダンパーの累積損傷分布 $1/{}_d\gamma_{pi}$ を北村らによる式 [2]と剛性比が各層で異なる場合を考慮した栗林らの式 [3),4)]を用いて算出する。2 つの応答予測式を時刻歴応答解析の結果(以降，時刻歴結果と呼ぶ)と比較して予測精度の検証と本報で設定する剛性比による影響を確認することを目的とする。

2. 諸元の設定と解析概要

2.1 主架構とダンパーの諸元

本報では図 1 に示すように，主架構が弾性である場合についての復元力特性を考える。履歴ダンパー(以降，ダンパーと呼ぶ)の復元力特性は完全弾塑性型とする。本報では，主架構と履歴ダンパーを合わせたものを全体架構と呼ぶ。

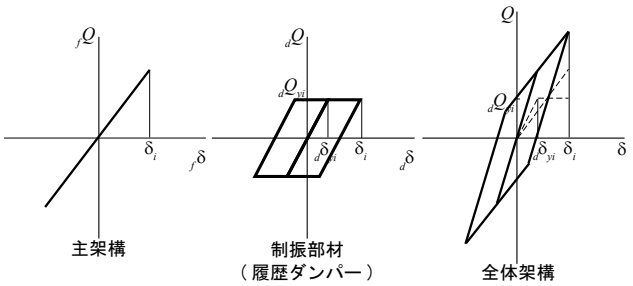


図 1　復元力特性

本報では文献 2), 5) を参考に固有周期が 1.0 s の 10 層の鋼構造建物の平均的な剛性･耐力分布を単純化した 10 質点系等価せん断型モデルを用いる [6)]。図 2 に本報における解析モデルの概要を示す。質量分布は等分布(9.8kN･s²/cm)，主架構の剛性分布は台形分布(最上層が最下層の 1/2)とする。主架構の初期剛性 ${}_fk_i$ は(1)式 [7)]で求められる。

$$ {}_fk_1 = \frac{{}_s\omega^2 \cdot m_1 \cdot {}_s\phi_1 + k_2({}_s\phi_2 - {}_s\phi_1)}{{}_s\phi_1} \tag{1a} $$

$$ {}_fk_i = \frac{{}_s\omega^2 \cdot m_i \cdot {}_s\phi_i + k_{i+1}({}_s\phi_{i+1} - {}_s\phi_i)}{{}_s\phi_i - {}_s\phi_{i-1}} \quad \{i = (N-1) \sim 2\} \tag{1b} $$

$$ {}_fk_N = \frac{{}_s\omega^2 \cdot m_N \cdot {}_s\phi_N}{{}_s\phi_N - {}_s\phi_{N-1}} \tag{1c} $$

ここで，${}_s\omega$: s 次の固有円振動数，${}_s\phi_i$: 第 i 層，s 次の固有モード，g : 重力加速度，N : 全層数である。このとき，固有円振動数および，固有モードは固有値解析を行い算出されるが，固有値解析を行うには剛性が必要となる。そのため，剛性分布が台形分布(最上層が最下層の 1/2)となる剛性を用いて，固有値解析を行い，1 次の固有モード ${}_1\phi_i$ を得る。${}_1\phi_i$ と ${}_1\omega$ ($= 2\pi\,{}_1f$: ${}_1f = 1$ Hz)を用いて(1)式から剛性を再度求める。構造減衰は主架構の 1 次固有周期 ${}_fT$=1.0 s に対して ${}_fh$ = 2 %となる剛性比例型とする。

ダンパーは，LY225 級の低降伏点鋼製の座屈拘束ブレースを階高 4.2m のスパン 6.4m にハの字 (角度 54°)で取り付けることを想定し，ダンパーの降伏層間変形 ${}_d\delta_{yi}$ は全層で一定値 ${}_d\delta_{yi}$ = 0.64 cm とする。降伏層せん断力 ${}_dQ_{yi}$ は図 3 に示すように第 1 層のダンパーの降伏層せん断力 ${}_dQ_{y1}$ を基準とし，秋山が提案する $\overline{\alpha}_i$ 分布 [1]に基づく最適分布をもとに 3 つのグループ(1～4 層，5～7 層，8～10 層)に分割した 3 段階分布とする。ダンパーの降伏層せん断力 ${}_dQ_{yi}$ は以下の式で求められる。

$$ {}_dQ_{yi} = {}_d\alpha_{yi} \cdot \sum_{j=i}^{N} m_j \cdot g \tag{2} $$

$$ {}_d\alpha_{yi} = {}_d\alpha_{y1} \cdot \overline{\alpha}_1 \quad (i = 1, 2, 3, 4) \tag{3a} $$

$$ {}_d\alpha_{yi} = {}_d\alpha_{y1} \cdot \overline{\alpha}_5 \quad (i = 5, 6, 7) \tag{3b} $$

$$ {}_d\alpha_{yi} = {}_d\alpha_{y1} \cdot \overline{\alpha}_8 \quad (i = 8, 9, 10) \tag{3c} $$

$x' > 0.2$ の場合

$$ \overline{\alpha}_i = 1 + 1.5927x' - 11.8519x'^2 + 42.5833x'^3 - 59.4827x'^4 + 30.1586x'^5 \tag{4a} $$

$x' < 0.2$ の場合

$$\overline{\alpha}_i = 1 + 0.5x' \tag{4b}$$

$$x' = \frac{i-1}{N} \tag{5}$$

ここで，${}_d\alpha_{yi}$：第 i 層のダンパーの降伏層せん断力係数である。ダンパーの初期剛性 ${}_dk_i$ は次式より求められる。

$${}_dk_i = {}_dQ_{yi} / {}_d\delta_{yi} \tag{6}$$

本報では ${}_d\alpha_{y1}$ をダンパー量と呼び，パラメータとして ${}_d\alpha_{y1} = 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.16, 0.20$ と設定する。なお，ダンパーへの変形伝達の障害となる取り付け部材や建物全体の曲げ変形の影響はないものと仮定し，各層の層間変形は全て履歴ダンパーの変形に寄与するものとする [3]。図 4 に主架構の初期剛性 ${}_fk_i$ に対するダンパーの初期剛性 ${}_dk_i$ の比 ${}_dk_i/{}_fk_i$ を高さ方向の分布で示す。本報で設定する剛性比の最大値は最小値の剛性比の約 1.4 倍の範囲である。

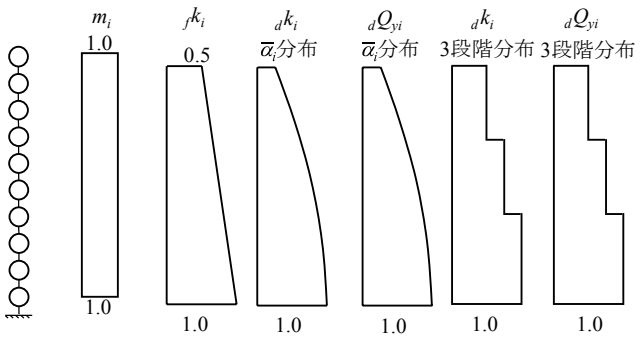


図 2　解析モデル

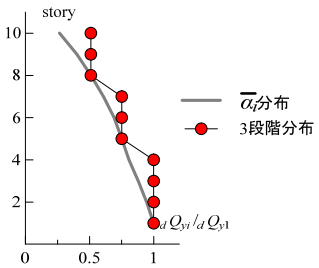


図 3　ダンパーの降伏せん断力分布

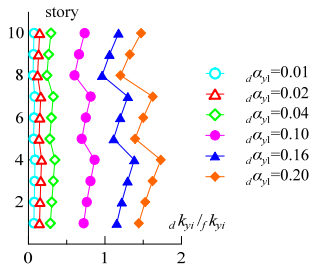
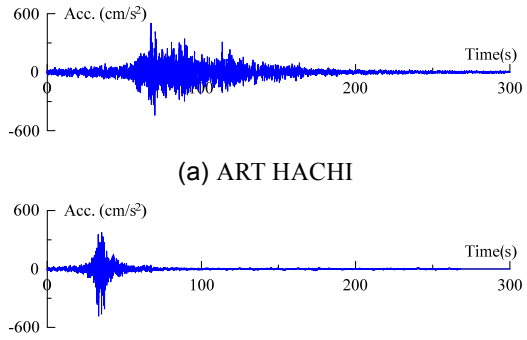


図 4　主架構とダンパーの剛性比分布

2.2　入力地震動の概要

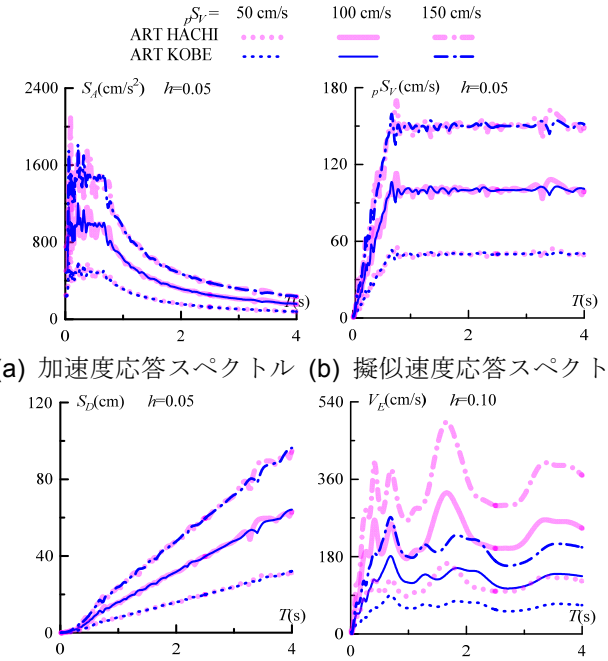
検討用地震動は，コーナー周期 $T_c = 0.64$ s 以降の領域で，擬似速度応答スペクトル ${}_pS_V = 50, 100, 150$ cm/s ($h = 5$ %)となる模擬地震動波形 ART HACHI(位相特性：HACHINOHE 1968 EW)と ART KOBE(位相特性：JMA KOBE 1995 NS)を用いる [3]。また，${}_pS_V = 50, 100, 150$ cm/s の地震動をそれぞれレベル 1，レベル 2，レベル 3 と位置付ける。レベル 2 の加速度波形(0～300 s)を図 5 に示す。ART HACHI では加振終了後の残留層間変形を評価できるように 505 s 以降を 0 cm/s² とし，合計で継続時間は 550 s とする。ART KOBE も ART HACHI と同様に加振終了後の残留層間変形を評価できるように 270 s 以降を 0 cm/s² とし，合計で継続時間は 300 s とする。両地震動ともに解析時間刻み $\Delta t = 0.01$ s とする。図 6 に加速度応答スペクトル S_A，擬似速度応答スペクトル ${}_pS_V$，変位応答スペクトル S_D およびエネルギースペクトル V_E (固有周期 $T = 0$～4 s)を示す。ART HACHI と ART KOBE を比較すると最大加速度は ART HACHI の方が大きく，エネルギースペクトルを見ると ART HACHI の方が約 1.8 倍大きい事がわかる。



(a) ART HACHI

(b) ART KOBE

図 5　入力加速度波形(レベル 2)



(a) 加速度応答スペクトル　(b) 擬似速度応答スペクトル

(c) 変位応答スペクトル　(d) エネルギースペクトル

図 6　応答スペクトルとエネルギースペクトル

3.　ダンパーの累積損傷分布の予測式

文献 1)のダンパーの損傷分散係数 ${}_d\gamma_i$ はダンパーが吸収する全累積塑性歪エネルギー ${}_dW_p$ に対する第 i 層におけるダンパーが吸収する累積塑性歪エネルギー ${}_dW_{pi}$ の比を用いて以下のように表せる。

$$\frac{1}{{}_d\gamma_{pi}} = \frac{{}_dW_{pi}}{\sum_{j=1}^{N} {}_dW_{pj}} \tag{7}$$

秋山による累積損傷分布の提案式[1]を以下に示す。

$$\frac{1}{{}_d\gamma_{pi}} = \frac{s_i \cdot {}_d p_i^{-{}_d n_i}}{\sum_{j=1}^{N} s_j \cdot {}_d p_j^{-{}_d n_i}} \tag{8}$$

ここで，

$${}_d p_i = \left(\frac{{}_d\alpha_{yi}}{{}_d\alpha_{y1}} \right) \Big/ \overline{\alpha}_i \tag{9}$$

$$s_i = \left(\sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot \overline{\alpha}_i^2 \cdot \left(\frac{{}_f k_1}{{}_f k_i} \right) \tag{10}$$

ダンパーの損傷集中指数 ${}_d n_i$ は主架構とダンパーの負担せん断力比 r_{qi} を用いて範囲分けした下式を採用する[2]。

$$\left.\begin{array}{ll} {}_d n_i = 12 & r_{qi} \le 0.33 \\ {}_d n_i = -2 + 8 \cdot r_{qi}^{-0.5} & 0.33 < r_{qi} \le 7.0 \\ {}_d n_i = 1 & r_{qi} > 7.0 \end{array}\right\} \tag{11}$$

ここで，

$$r_{qi} = \frac{{}_f Q_{i,\max}}{{}_d Q_y} \tag{12}$$

秋山による累積損傷分布の提案式[1](式(8))を主架構とダンパーの剛性比が各層で異なる場合にも適用できるように拡張した応答予測式を以下に示す[3),4)]。

$$\frac{1}{{}_d\gamma_{pi}} = \frac{{}_d s_i \cdot {}_d p_i^{-{}_d n_i}}{\sum_{j=1}^{N} {}_d s_j \cdot {}_d p_j^{-{}_d n_j}} \tag{13}$$

ここで，

$${}_d p_i = \left(\frac{{}_d\alpha_{yi}}{{}_d\alpha_{y1}} \right) \Big/ {}_d\overline{\alpha}_i \tag{14}$$

$${}_d s_i = \left(\sum_{j=i}^{N} \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot {}_d\overline{\alpha}_i^2 \cdot \left(\frac{{}_d k_i}{{}_d k_1} \right) \tag{15}$$

$${}_d\overline{\alpha}_i = \overline{\alpha}_i \cdot \frac{{}_d k_i / ({}_f k_i + {}_d k_i)}{{}_d k_1 / ({}_f k_1 + {}_d k_1)} \tag{16}$$

ダンパーの損傷集中指数 ${}_d n_i$ は式(11)を採用する[2]。ここで，式(13)は主架構とダンパーの初期剛性が各層で等しい場合，式(8)と一致する。本報では式(8)より得られた値を予測値 1 と呼び，式(13)より得られた値を予測値 2 と呼ぶことにする。

4. ダンパーの累積損傷分布の予測値と時刻歴結果

本章では時刻歴結果と 3 章で述べた予測値 1 と予測値 2 を比較して，式(11)の妥当性および，式(8)，(13)による予測精度の検討と剛性比による影響の確認を行う。

ここで，ダンパーの塑性化の程度を評価する指標として，入力エネルギー E に占めるダンパーが吸収する全累積塑性歪エネルギー ${}_d W_p$ の割合をダンパーのエネルギー分担率 ${}_d\alpha_p$ を式(17)で定義する[8]。

$${}_d\alpha_p = {}_d W_p / E \tag{17}$$

式(11)の妥当性および，式(8)，(13)による予測精度の検証が目的であるため，式(12)を算出する際に用いる主架構の最大層せん断力 ${}_f Q_{yi,\max}$ には，時刻歴結果を用いる。

4.1 高さ方向における予測値と時刻歴結果

ダンパーの累積損傷分布を図 8 に ART HACHI を入力した時刻歴結果，図 9 に ART KOBE を入力した時刻歴結果をそれぞれ予測値 1，予測値 2 とともに示す。図中にはダンパー量 ${}_d\alpha_{y1}$ およびダンパーのエネルギー分担率 ${}_d\alpha_p$ をともに示す。ART KOBE の方が ART HACHI よりダンパーのエネルギー分担率 ${}_d\alpha_p$ が大きいことがわかる。ダンパーのエネルギー分担率 ${}_d\alpha_p > 0.50$ ではダンパーの降伏せん断力分布が不連続となる第 5 層と第 8 層にエネルギーが集中する部分が現れることがわかる。剛性比の最大値は最小値の剛性比の約 1.4 倍の範囲では 2 つの応答予測式にあまり差が生じないことが確認できる。ART HACHI と ART KOBE どちらの場合でも同様の傾向が確認できる。

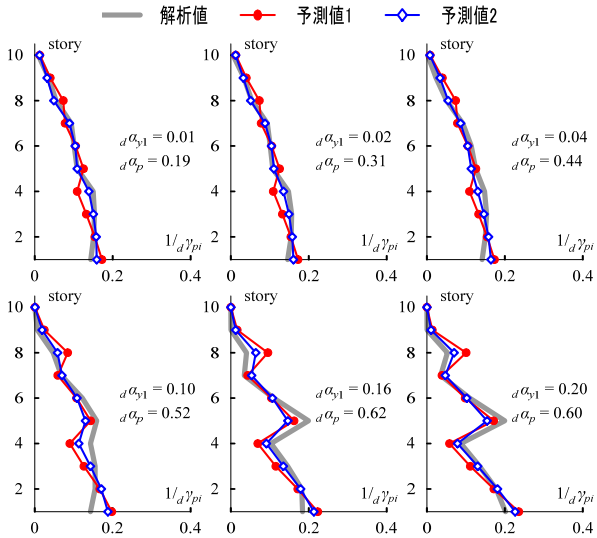


図 8 $1/{}_d\gamma_{pi}$ （ART HACHI レベル 2）

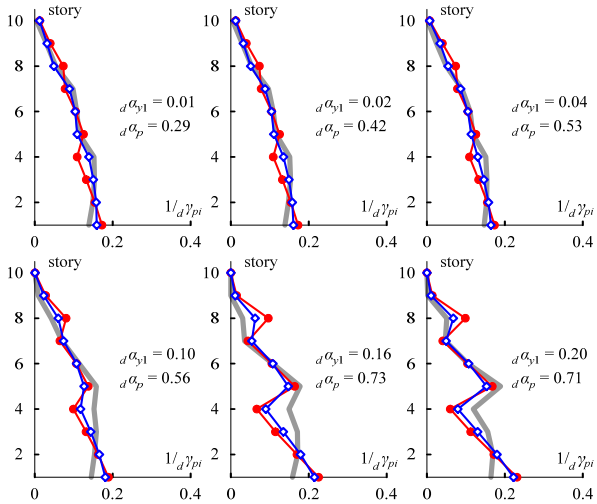


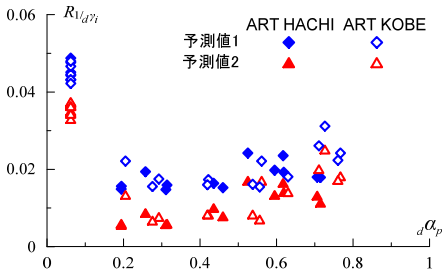
図 9 $1/{}_d\gamma_{pi}$ （ART KOBE レベル 2）

4.2　予測値と時刻歴結果の予測誤差

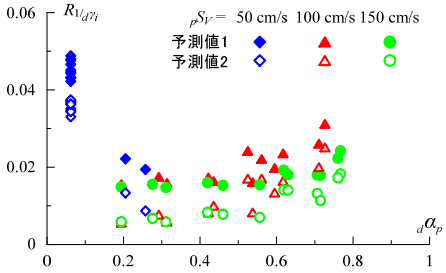
本節では累積損傷分布の予測精度を評価する指標として，$1/_d\gamma_{pi}$ の予測値$[1/_d\gamma_{pi}]_p$ と時刻歴結果$[1/_d\gamma_{pi}]_c$ の差の平均値を予測誤差 $R_{1/_d\gamma_{pi}}$ と呼び，以下の式で定義する [8]。

$$R_{1/_d\gamma_{pi}} = \sum_{i=1}^{N}\left|\left[1/_d\gamma_{pi}\right]_p - \left[1/_d\gamma_{pi}\right]_c\right| \Big/ N \qquad (18)$$

図 10 に，縦軸に予測誤差 $R_{1/_d\gamma_{pi}}$，横軸にダンパーのエネルギー分担率 $_d\alpha_p$ とし，計 72 ケース(=入力加速度波形：2 種類，入力レベル：3 種類，ダンパー量：6 種類，応答予測式：2 種類)の結果を示す。応答予測式に着目すると予測値 2 の方が予測値 1 よりも時刻歴結果との予測誤差 $R_{1/_d\gamma_{pi}}$ が小さいことがわかる。入力加速度波形においては ART HACHI と ART KOBE では予測値と時刻歴結果の予測誤差 $R_{1/_d\gamma_{pi}}$ に与える影響は変わらないことが確認できる。入力レベルに着目すると，入力レベル 1 の場合でダンパーのエネルギー分担率 $_d\alpha_p$ が 0.1 より小さい範囲では $R_{1/_d\gamma_{pi}}$ が大きくなることがわかる。これは $_d\alpha_p$ が小さいということは入力エネルギーに対し，ダンパーの累積塑性ひずみエネルギーが小さいことを意味する。つまり，全層でダンパーの累積損傷が小さく，ダンパーの累積損傷評価を行う必要が無く，予測精度が低下しても現実的には問題にならない。



(a) 予測値および入力加速度波形による影響



(b) 予測値および入力レベルによる影響

図 10　予測値と時刻歴応答解析との平均誤差

5.まとめ

本報では，履歴ダンパーを有する制振構造の主架構が弾性時での履歴ダンパーの累積損傷分布において 2 つの応答予測式 [1), 5), 7), 10)]を時刻歴結果と比較して予測精度の検討と剛性比による影響の確認を行った。以下に得られた知見を示す。

(1) ダンパーのエネルギー分担率 $_d\alpha_p > 0.50$ ではダンパーの降伏せん断力分布が不連続となる第 5 層と第 8 層にエネルギーが集中する部分が現れることがわかった。

(2) 入力した波形 ART HACHI と ART KOBE どちらの場合でも同様な傾向が確認できた。

(3) 剛性比の最大が最小の剛性比の約 1.4 倍の範囲では 2 つの応答予測式にあまり違いが見られなかったが、予測誤差 $R_{1/_d\gamma_{pi}}$ で確認すると予測値 2 の方が予測値 1 よりも時刻歴結果との誤差が小さいことが確認できた。

(4) 入力レベル 1 の場合でダンパーのエネルギー分担率 $_d\alpha_p$ が 0.1 より小さい範囲では $R_{1/_d\gamma_{pi}}$ が大きくなることがわかる。

謝辞

本研究は，新日鉄住金エンジニアリング株式会社，東京理科大学北村研究室，東京工業大学佐藤研究室によるエネルギー法研究会の成果の一部を用いたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 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 1999.11
2) 北村春幸, 財津和廉, 馬谷原伴恵: 主架構の塑性化を考慮した制振構造物のエネルギーの釣合に基づく応答評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 599 号, pp.71-78, 2006.1
3) 栗林晃司, 佐藤大樹, 北村春幸, 山口路夫, 西本晃治: 実効変形を考慮した履歴減衰型制振部材を有する鋼構造建物のエネルギーの釣合に基づく応答予測法, 日本建築学会構造系論文集,第 661 号, pp.543-552, 2011.3
4) 渋谷政斗, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太: ダンパーの損傷配分式の主架構とダンパーの剛性分布が異なる場合への拡張, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 773-774, 2015.9
5) 佐藤大輔, 北村春幸, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 山口路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太: 履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造のエネルギーの釣合に基づく応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第 699 号, pp.631-640, 2014.5
6) 岩森貴寿, 佐藤大樹: 主架構弾塑性変形時の剛性に着目した履歴ダンパーを有する制振構造の応答特性の分析, 日本地震工学会第 11 回年次大会梗概集, P2-12, 2015. 11
7) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響,日本建築学会構造系論文集, 第 635 号, pp.75-82, 2009.1
8) 池上昌志, 佐藤大樹, 吉江慶祐, 佐藤利昭, 北村春幸: エネルギーの釣合に基づく多層制振建物の弾塑性風応答における損傷評価その 2 スペクトルモーダル解析による最適せん断力係数分布予測と損傷予測, 日本建築学会関東支部研究報告集 85(I), pp. 245-248, 2015. 3

*1　東京工業大学　大学院生
*2　東京工業大学　准教授・博士（工学）
*3　東京理科大学　助教・博士（工学）
*4　東京理科大学　教授・博士（工学）
*5　新日鉄住金エンジニアリング株式会社　博士（工学）
*6　新日鉄住金エンジニアリング株式会社　修士（工学）