

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	質点数および固有周期の変動が累積損傷分布の予測精度に及ぼす影響の分析
Title(English)	
著者(和文)	岩森貴寿, 佐藤大樹, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太
Authors(English)	Takatoshi Iwamori, Daiki 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, , , pp. 265-268
Citation(English)	, , , pp. 265-268
発行日 / Pub. date	2017, 3

質点数および固有周期の変動が累積損傷分布の予測精度に及ぼす影響の分析

構造—振動

正会員 ○岩森貴寿^{*1}
〃 北村春幸^{*3}
〃 脇田直弥^{*5}

正会員 佐藤大樹^{*2}
〃 山口路夫^{*4}
〃 綿貫雄太^{*5}

制振構造 応答予測式 履歴ダンパー
質点数 固有周期 累積損傷分布

1. はじめに

耐震構造建物の設計手法の 1 つに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耐震計算法¹⁾(以降、エネルギー法と呼ぶ)が規定されている。

制振構造を設計する場合には、想定をはるかに超える地震動に対しては主架構が塑性化することを考慮する必要がある。さらに、長周期・長時間地震動やその余震によって、多数回の繰返しによるダンパーの累積疲労損傷を評価する必要がある^{2),3)}。エネルギー法による各層の累積疲労損傷を予測する累積損傷分布 $1/\gamma_{pi}$ の式は主架構が塑性化する場合への拡張は行われている⁴⁾。しかし、主架構が弾性的の場合と塑性化する場合を連続的に 1 つの式で累積損傷分布を予測することができず、その場合での予測精度に及ぼす影響について詳細に分析されている研究はわずかである⁵⁾。

そこで筆者らは、文献 5)で既往の累積損傷分布の式^{6),7)}で予測精度を定量的に検討するための評価法を提案し、評価法の妥当性について確認を行った。ただし、文献 5)では質点数および固有周期を変動させず、限られた条件の下で検討を行っている。本報では、質点数および固有周期を変動させた場合でも文献 5)と同様な知見が得られるか確認を行うことを目的とする。

2. 解析条件

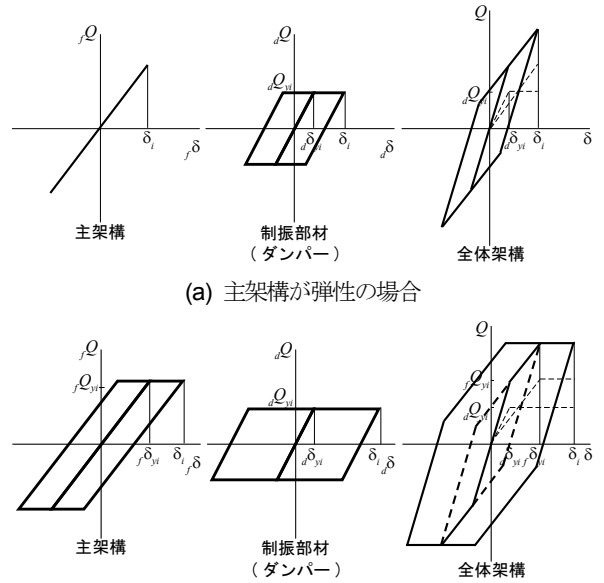
本報では主架構の弾性 1 次固有周期 f_1T を $f_1T = 0.5, 1.0, 2.0$ に設定する。 $f_1T = 0.5$ s は 5 層の鋼構造建物、 $f_1T = 1.0$ s は 10 層の鋼構造建物、 $f_1T = 2.0$ s は 20 層の鋼構造建物を想定した質点系等価せん断型モデルを用いる。質点数 N は 5, 10, 20 と設定し、表 1 に本報で用いる解析モデルの固有周期と質点数の組み合わせを○印で示す。

表 1 解析モデルの固有周期と質点数

		N		
		5	10	20
f_1T	0.5	○		
	1.0	○	○	
	2.0	○	○	○

2.1 主架構と履歴ダンパーの諸元

本報では図 1 に示すように、塑性化を考慮した主架構とダンパーの復元力特性は完全弾塑性型とする。本報では、



(a) 主架構が弾性的の場合

(b) 主架構が塑性化する場合

図 1 復元力特性

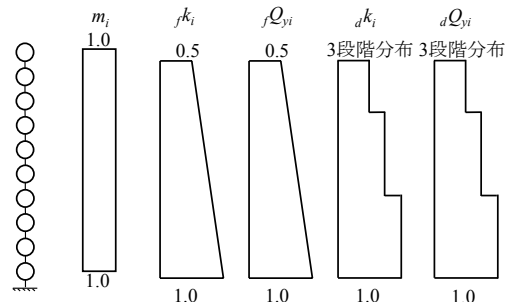


図 2 解析モデル概要 (10 質点系)

主架構とダンパーを合わせたものを全体架構と呼ぶこととする。図 2 に 10 質点系の場合における解析モデルの概要を示す⁵⁾。質量分布は等分布 (9.8 kN・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 $f_i k_i$ は式(1)で求められる⁸⁾。

$$f_i k_1 = \frac{s \omega^2 \cdot m_1 \cdot s \phi_1 + k_2 (s \phi_2 - s \phi_1)}{s \phi_1} \quad (1a)$$

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

$$f_i k_N = \frac{s \omega^2 \cdot m_N \cdot s \phi_N}{s \phi_N - s \phi_{N-1}} \quad (1c)$$

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

モードである。構造減衰は主架構の1次固有周期 f_1T に対して $f_h = 2\%$ となる剛性比例型とする。主架構の降伏せん断力分布も台形分布とする。降伏せん断力 fQ_{yi} は次式で求められる。

$$fQ_{y1} = f\alpha'_{y1} \cdot \sum_{j=1}^N m_j \cdot g, \quad fQ_{yi} = fQ_{y1} \cdot f\lambda_i \quad (2a,b)$$

ここで、 $f\lambda_i$ ：第1層の主架構の降伏せん断力に対する第 i 層の主架構の降伏せん断力の比である。第1層の主架構の降伏せん断力係数 $f\alpha'_{y1}$ を次式で定義する⁹⁾。

$$f\alpha'_{y1} = f\alpha_{y1} \quad (f_1T = 0.5 \text{ s の場合}) \quad (3a)$$

$$f\alpha'_{y1} = f\alpha_{y1} / f_1T \quad (f_1T = 1.0, 2.0 \text{ s の場合}) \quad (3b)$$

本報では $f\alpha_{y1} = 0.10, 0.20, 0.30, \infty$ に設定する。なお、 $f\alpha_{y1} = \infty$ は主架構が弾性であることを意味する。

ダンパーの降伏層せん断力 dQ_{yi} は第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 $\bar{\alpha}_i$ 分布¹⁾に基づく最適分布をもとに3つのグループに分割した3段階分布とする。 $\bar{\alpha}_i$ は $x' > 0.2$ の場合は次式で表される¹⁾。

$$\bar{\alpha}_i = 1 + 1.5927x' - 11.8519x'^2 + 42.5833x'^3 - 59.4827x'^4 + 30.1586x'^5 \quad (4a)$$

$x' < 0.2$ の場合、以下の式で求められる¹⁾。

$$\bar{\alpha}_i = 1 + 0.5x' \quad (4b)$$

ここで、

$$x' = \frac{i-1}{N} \quad (5)$$

5質点系の場合のダンパーの降伏層せん断力 dQ_{yi} は次式より算出する。

$$dQ_{yi} = d\alpha'_{y1} \cdot \bar{\alpha}_1 \cdot \sum_{j=1}^N m_j \cdot g \quad (i = 1, 2) \quad (6a)$$

$$dQ_{yi} = d\alpha'_{y1} \cdot \bar{\alpha}_3 \cdot \sum_{j=3}^N m_j \cdot g \quad (i = 3, 4) \quad (6b)$$

$$dQ_{yi} = d\alpha'_{y1} \cdot \bar{\alpha}_5 \cdot \sum_{j=5}^N m_j \cdot g \quad (i = 5) \quad (6c)$$

10質点系の場合の dQ_{yi} は次式より算出する。

$$dQ_{yi} = d\alpha'_{y1} \cdot \bar{\alpha}_1 \cdot \sum_{j=1}^N m_j \cdot g \quad (i = 1 \sim 4) \quad (7a)$$

$$dQ_{yi} = d\alpha'_{y1} \cdot \bar{\alpha}_5 \cdot \sum_{j=5}^N m_j \cdot g \quad (i = 5 \sim 8) \quad (7b)$$

$$dQ_{yi} = d\alpha'_{y1} \cdot \bar{\alpha}_9 \cdot \sum_{j=9}^N m_j \cdot g \quad (i = 9 \sim 10) \quad (7c)$$

20質点系の場合の dQ_{yi} は次式より算出する。

$$dQ_{yi} = d\alpha'_{y1} \cdot \bar{\alpha}_1 \cdot \sum_{j=1}^N m_j \cdot g \quad (i = 1 \sim 8) \quad (8a)$$

$$dQ_{yi} = d\alpha'_{y1} \cdot \bar{\alpha}_9 \cdot \sum_{j=9}^N m_j \cdot g \quad (i = 9 \sim 16) \quad (8b)$$

$$dQ_{yi} = d\alpha'_{y1} \cdot \bar{\alpha}_{17} \cdot \sum_{j=17}^N m_j \cdot g \quad (i = 17 \sim 20) \quad (8c)$$

ここで、第1層のダンパーの降伏層せん断力係数 $d\alpha'_{y1}$ を次式で定義する⁹⁾。

$$d\alpha'_{y1} = d\alpha_{y1} / f_1T \quad (9)$$

本報では $d\alpha_{y1}$ をダンパー量と呼び、パラメータとして $d\alpha_{y1} = 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.16, 0.20$ となる $d\alpha'_{y1}$ を設定する。

ダンパーの降伏層間変形 $d\delta_{yi}$ は全層で一定値 $d\delta_{yi} = 0.64 \text{ cm}$ とし¹⁰⁾、ダンパーの初期剛性 dki は次式より求められる。

$$dki = dQ_{yi} / d\delta_{yi} \quad (10)$$

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⁹⁾。

2.2 入力地震動概要

検討用地震動は、コーナー周期 $T_c = 0.64 \text{ s}$ 以降の領域で、擬似速度応答スペクトル $pSv = 50, 100, 150 \text{ cm/s}$ ($h = 5\%$)となる模擬地震動波形ART HACHI (位相特性：HACHINOHE 1968 EW)を用いる⁶⁾。本報では $pSv = 50, 100, 150 \text{ cm/s}$ の地震動をそれぞれレベル1、レベル2、レベル3と呼ぶ。レベル2の加速度波形(0~300 s)を図3に示す。ART HACHIは加振終了後の入力エネルギーを評価できるように505 s以降を 0 cm/s^2 とし、合計で継続時間は550 sとする。両地震動ともに解析時間刻み $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ とする。図4に加速度応答スペクトル S_a 、擬似速度応答スペクトル pSv 、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 $T = 0 \sim 3 \text{ s}$)を示す。

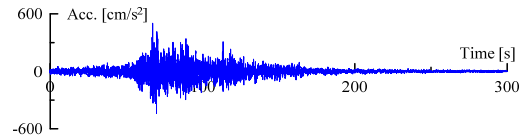


図3 入力地震動の加速度時刻歴波形(レベル2)

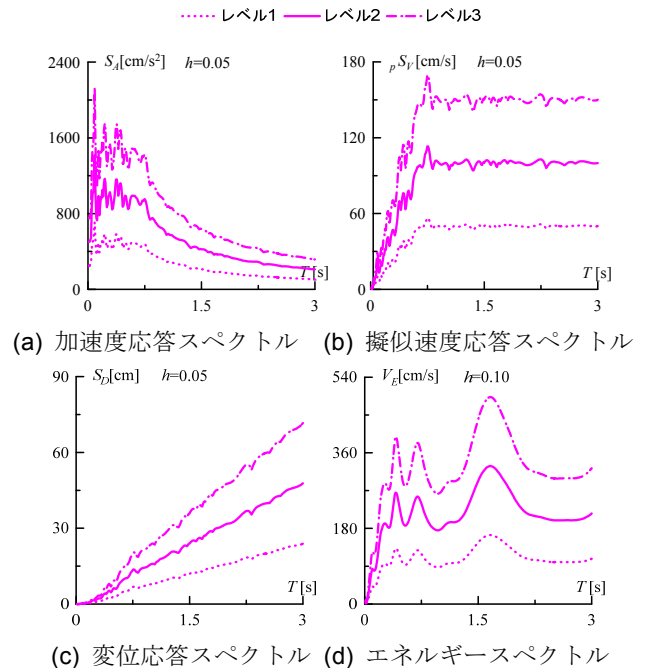


図4 応答スペクトルとエネルギースペクトル

3. 累積損傷分布の応答予測式

ダンパーの累積損傷分布 $1/d\gamma_{pi}$ 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。

$$\frac{1}{d\gamma_{pi}} = \frac{dW_{pi}}{\sum_{j=1}^N dW_{pj}} \quad (11)$$

秋山による累積損傷分布の応答予測式¹⁾は主架構とダンパーの剛性比が各層で等しい場合にのみ適用できる式となっており、これを文献5)、6)で主架構とダンパーの剛性比が各層で異なる場合でも適用できる式へと拡張された。文献5)、6)で拡張された式を以下に示す。

$$\frac{1}{d\gamma_{pi}} = \frac{dS_i \cdot dP_i^{-d n_i}}{\sum_{j=1}^N (dS_j \cdot dP_j^{-d n_j})} \quad (12)$$

ここで、

$$dP_i = \left(\frac{d\alpha_{yi}}{d\alpha_{y1}} \right) / d\bar{\alpha}_i \quad (13)$$

$$dS_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot d\bar{\alpha}_i^2 \cdot \left(\frac{dk_i}{dk_1} \right) \quad (14)$$

$$d\bar{\alpha}_i = \bar{\alpha}_i \cdot \frac{dk_i / (f k_i + dk_i)}{dk_1 / (f k_1 + dk_1)} \quad (15)$$

式(12)は主架構とダンパーの初期剛性が各層で等しくなる場合、秋山による累積損傷分布の提案式¹⁾と一致する。ダンパーの損傷集中指数 $d n_i$ は、北村らによって負担せん断力比 r_{qi} が大きい範囲を拡張された式(16)を採用する⁴⁾。

$$\left. \begin{aligned} d n_i &= 12 & r_{qi} &\leq 0.33 \\ d n_i &= -2 + 8 \cdot r_{qi}^{-0.5} & 0.33 < r_{qi} &\leq 7.0 \\ d n_i &= 1 & r_{qi} &> 7.0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$r_{qi} = \frac{f Q_{i,max}}{d Q_{i,max}} \quad (17)$$

本報では式(16)の妥当性および、式(12)による予測精度の検証が目的であるため、式(17)を算出する際の $f Q_{i,max}$ 、 $d Q_{i,max}$ は時刻歴応答解析の結果を用いる。文献4)とは異なり、主架構が塑性化する場合は $f Q_{yi,max}$ ではなく $f Q_{yi}$ を、ダンパーが降伏した場合には $d Q_{i,max}$ ではなく $d Q_{yi}$ を用いる。

4. 累積損傷分布の応答予測精度評価⁵⁾

文献5)では文献6)、7)にて拡張された応答予測式で、主架構が弾性的な場合と塑性化する場合を連続的に予測する際の応答予測精度について応答予測値 $[1/d\gamma_{pi}]_p$ (以降、予測値と呼ぶ) と時刻歴応答解析の結果から算出した累積損傷分布 $[1/d\gamma_{pi}]_c$ (以降、解析値と呼ぶ) を比較し、分析を行った。その際に文献11)の予測精度評価法をもとに、文献5)では予測値と解析値の差の絶対値が最大となる層の値をダンパーの最大誤差 dR_m として式(18)で定義している⁵⁾。

$$dR_m = \left| [1/d\gamma_{pi}]_p - [1/d\gamma_{pi}]_c \right|_{\max} \quad (18)$$

予測精度の影響を分析する上で dR_m が大きくなる要因として図5に示す累積損傷分布の一例のように最も損傷集中が大きい層の解析値 $[1/d\gamma_{pi}]_{c,max}$ (以降、最大損傷集中と呼ぶ。) より予測値が小さいことが確認できる。そこで、文献5)では計180ケース (= 入力地震動: 2種類, 入力レベル: 3種類, 主架構の降伏層せん断力係数 $f\alpha_{y1}$: 6種類, ダンパ

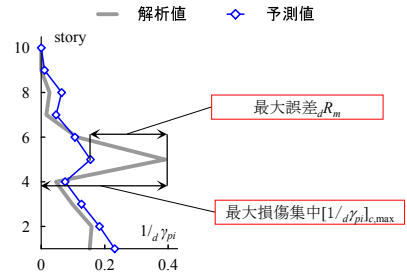


図5 予測精度の低い累積損傷分布

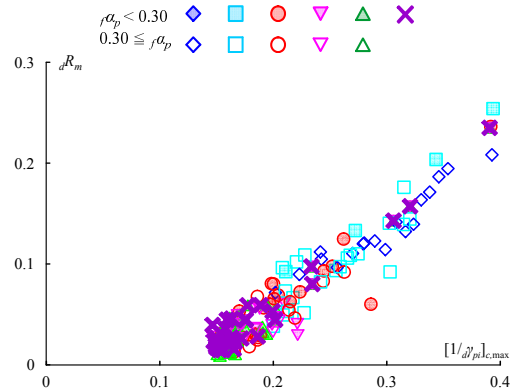


図6 最大損傷集中に対する最大誤差

一量 $d\alpha_{y1}$: 6種類, 除外したケース: 36ケース) の結果を用いて応答予測精度の評価を行った⁵⁾。図6に最大損傷集中 $[1/d\gamma_{pi}]_{c,max}$ に対する最大誤差 dR_m を示す。図6より $[1/d\gamma_{pi}]_{c,max}$ が大きくなるにつれて dR_m が大きくなることがわかった⁵⁾。

5. 質点数と固有周期が予測精度に及ぼす影響

本章では質点数と固有周期による予測精度に及ぼす影響についてそれぞれ分析を行う。解析モデルは計338ケース (= 質点数と固有周期の組み合わせ: 6種類, 入力レベル: 3種類, 主架構の降伏層せん断力係数 $f\alpha_{y1}$: 4種類, ダンパー量 $d\alpha_{y1}$: 6種類, 除外したケース: 94ケース) を用いてダンパーの累積損傷分布の予測精度を確認する。ここで、ダンパーのエネルギー分担率 $d\alpha_p$ ¹¹⁾を次式で表す。

$$d\alpha_p = dW_p / E \quad (19)$$

$d\alpha_p$ が 0.001 以下の場合には $d\alpha_p$ が 0 に限りなく近いため、予測精度が低下しても問題にならない¹¹⁾と判断し、本報では除外する。図7に本報で確認する全ケースの最大損傷集中 $[1/d\gamma_{pi}]_{c,max}$ に対する最大誤差 dR_m を示す。図7より、質点

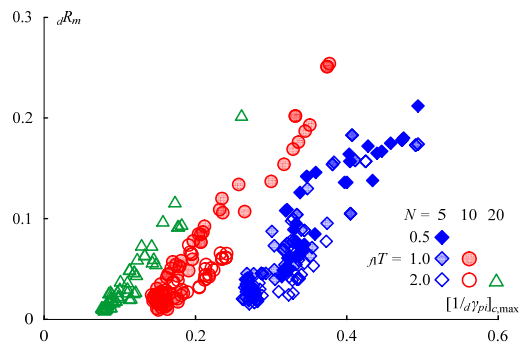


図7 最大誤差 (全ケース)

数が少なくなるにつれて $[1/d\gamma_{pi}]_{c,max}$ が大きくなる傾向が確認できるが、これは各質点間のエネルギー分担が質点数が少なくなるにつれて大きくなるためである。質点数毎に確認すると文献 5)と同様に $[1/d\gamma_{pi}]_{c,max}$ が大きくなるにつれて dR_m が大きくなる傾向が確認できる。

5.1 質点数の変動による予測精度への影響

図 8 に固有周期を $\rho_1 T = 2.0$ s に固定し、質点数を 5, 10, 20 と変動させた場合での最大誤差を示す。図 8 より、5 質点と 20 質点の場合では dR_m が 0.1 より大きいケースが多いことが確認できる。また、10 質点の場合では dR_m が 0.1 より大きいケースがないことが確認できる。質点数以外は同じ解析条件であるにもかかわらず、 dR_m の分布が変動することが確認できる。細かく分析すると、質点数が少ないほど予測精度が低くなる傾向があるが、稀に質点数が多い場合でも dR_m が大きくなることがわかった。以上より、質点数の変動が応答予測精度の低下に影響を与えることがわかる。

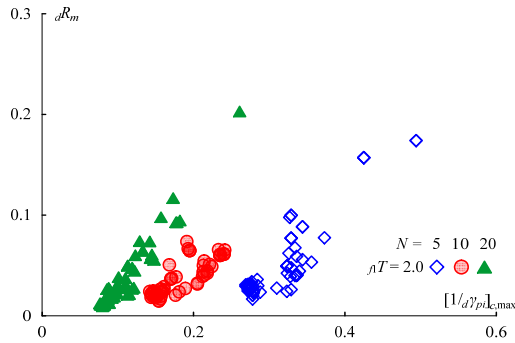


図 8 最大誤差 ($\rho_1 T = 2.0$ s)

5.2 固有周期の変動による予測精度への影響

図 9 に質点数を $N = 5$ に固定し、固有周期を $\rho_1 T = 0.5, 1.0, 2.0$ s と変動させた場合での最大誤差を示す。図 9 より、 $\rho_1 T$ が 0.5 s の解析ケースでは dR_m が 0.1 以上となるケースが多いことが確認できる。一方で、 $\rho_1 T = 2.0$ s の解析ケースでは dR_m が 0.1 以上となるケースが $\rho_1 T = 0.5$ s の場合と比較すると少ないことが確認できる。このことから、 $\rho_1 T$ が短くなるにつれて予測精度の低いケースが多くなる傾向であることがわかる。

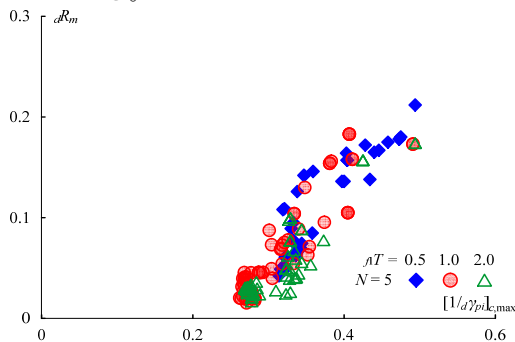


図 9 最大誤差 ($N = 5$)

6. まとめ

本報では、質点数および固有周期を変動させた場合でも

文献 5)と同様な知見が得られるか確認を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 質点数が少なくなるにつれて最大損傷集中が大きくなるが、文献 5)で得られた知見と同様に最大損傷集中が大きくなるにつれて最大誤差が大きくなる傾向が確認できた。
- (2) 質点数が少ないほど予測精度が低くなる傾向があるが、稀に質点数が多い場合でも予測精度が低くなることわかった。このことから、質点数の変動が応答予測精度の低下に影響を与えることがわかった。
- (3) 固有周期が短くなるにつれて予測精度が低いケースが多くなる傾向がわかった。

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) 長周期・長時間地震動と超高層建築物の対応策-専門家として知っておきたいこと，日本建築学会，2013.11
- 3) 佐藤大樹，長江拓也，大内隼人，島田侑，北村春幸，福山國夫，梶原浩一，井上貴仁，中島正愛，斉藤大樹，福和伸夫：長周期地震動を受ける超高層の鋼製ダンパーによる制振改修に関する E-ディフェンス振動台実験，日本建築学会構造系論文集，第 76 巻，第 667 号，pp.1639-1648，2011.9
- 4) 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
- 5) 岩森貴寿，佐藤大樹，北村春幸，山口路夫，脇田直弥，綿貫雄太：履歴ダンパーを有する制振構造における累積損傷分布の予測精度，構造工学論文集，Vol.63B，2017.3 掲載予定
- 6) 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築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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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築物の制振性能評価，構造工学論文集，Vol.59B，pp.321-327，2013.3
- 10) 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
- 11) 佐藤大樹，池上昌志，平井宏幸，吉江慶祐，佐藤利昭，北村春幸：履歴型ダンパーを有する超高層制振建築物の風応答時における累積損傷分布予測，日本建築学会構造系論文集，第 81 巻，第 728 号，pp.1635-1645，2016.10

*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 教授・博士 (工学)

*4 新日鉄住金エンジニアリング株式会社 博士 (工学)

*5 新日鉄住金エンジニアリング株式会社 修士 (工学)