

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	粘性ダンパーを使用した制振構造におけるダンパーのエネルギー分散係数の精度評価
Title(English)	
著者(和文)	有井季萌, 佐藤大樹, 松田頼征, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 山口慎吾, 綿貫雄太
Authors(English)	Daiki Sato, Yoriyuki MATSUDA, 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. 281-284
Citation(English)	, , , pp. 281-284
発行日 / Pub. date	2018, 3

粘性ダンパーを使用した制振構造におけるダンパーのエネルギー分散係数の精度評価

構造—振動

準会員 ○ 有井季萌^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*2} 正会員 松田頼征^{*1}
 " 北村春幸^{*1} " 山口路夫^{*3} " 脇田直弥^{*3}
 " 山口慎吾^{*3} " 綿貫雄太^{*3}

鋼構造建物 制振構造 エネルギーの釣合

粘性ダンパー 時刻歴解析

1 はじめに

近年、建物にダンパーを取り付けることで応答を制御する制振構造が多く適用され、その応答評価に関する研究も多く行われている。その一つに、エネルギーの釣合に基づく応答評価法¹⁾(以後、エネルギー法)があり、地震によるエネルギー入力と建物の有するエネルギー吸収能力の対比による評価から構造物の耐震性を合理的かつ的確に評価できる手法とされている²⁾。しかし、現行のエネルギー法告示で評価できるダンパーは性能が規定されている必要があるが、粘性ダンパーは対象外である³⁾。粘性ダンパー系は近年の採用件数が最も多く、主要なダンパーの一つであるといえ⁴⁾、粘性ダンパーを取り付けた建物の応答が評価出来れば、エネルギー法の適用範囲を拡張することができ有用であると考えられる。

原田らは⁵⁾粘性ダンパーを使用した制振構造のエネルギーに基づく応答予測法を提案し、粘性ダンパーのエネルギー分散係数⁶⁾の評価式を提案した。その際ダンパーは線形の粘性ダンパーのみで検討されており、既往研究における検討範囲内で高い予測精度を示した。さらに、北村ら⁶⁾は特定層の粘性係数を著しく低下させた場合での検討も行った。しかし、現在使用されている粘性ダンパーの多くは非線形ダッシュポットと取り付け部材を表すバネの Maxwell モデルで表される⁴⁾。

本報は、原田らが提案した線形ダッシュポットを有する粘性ダンパーを取り付けた建物の応答評価法を、非線形ダッシュポットを有する Maxwell モデルでモデル化した粘性ダンパーのものに展開し、時刻歴応答解析との比較によりエネルギー分散係数の予測精度及び適用範囲を検証する。さらに上下の層よりもダンパーのサイズが小さい層を設け、理想的なダンパー配置から外れた場合の予測精度を検討する。

2 検討モデル諸元及び入力地震動概要

2.1 検討対象建物

検討対象建物は 10 階建ての鋼構造建物とする。建物の軸組図と基準階伏図を図 1, 2 に示す。表 1 に使用部材断面を示す。ダンパーは伏図と軸組図の太線箇所を設置する。図 3 にダンパーモデルを示す。本報では、長辺方向を検討対象とする。

表 1 使用部材断面

外柱	□-500×500×16~□-500×500×32	
内柱	□-500×500×16~□-500×500×32	
梁	X方向	H-600×250×12×19~H-600×250×12×25
	Y方向	H-600×250×12×19~H-800×350×16×28

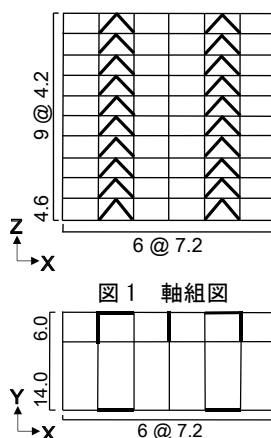


図 1 軸組図

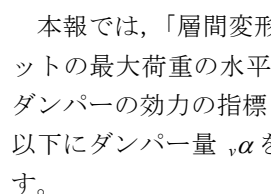


図 3 ダンパーモデル

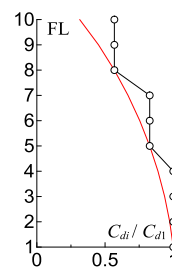


図 4 ダンパー量高さ方向分布

本報では、「層間変形角 R が 1/100 のときのダッシュポットの最大荷重の水平成分を建物総重量で除した値」をダンパーの効力の指標とし、以降ダンパー量 $v\alpha$ とする。以下にダンパー量 $v\alpha$ を用いた粘性係数 C_d の算出式を示す。

$$Q_{dmax1} = v\alpha \cdot W_f, \quad F_{dmax1} = \frac{Q_{dmax1}}{n \cdot \cos\theta} \quad (1),(2)$$

$$u_{dmax1} = \frac{\delta_{max1}}{\cos\theta} = \frac{R_1 \cdot H_1}{\cos\theta}, \quad {}_pK_{d1}'' = \frac{F_{dmax1}}{u_{dmax1}} \quad (3),(4)$$

$$C_{d1} = \frac{{}_pK_{d1}'' \cdot u_{dmax1}^{1-\alpha}}{\omega^\alpha} \quad (5)$$

ここで、 Q_{dmax1} : 第 1 層のダッシュポットの最大荷重の水平方向成分、 W_f : 建物総重量、 F_{dmax1} : 第 1 層のダッシュポットの最大荷重、 n : 1 層のダンパーの設置基数、 u_{dmax1} : 第 1 層でのダンパー 1 基あたりのダッシュポットの最大変形、 δ_{max1} : 第 1 層の最大層間変形、 R_{max1} : 第 1 層の最大層間変形角、 H_1 : 第 1 層の階高、 ${}_pK_{d1}''$: 第 1 層でのダンパー 1 基あたりのダッシュポットの擬似損失剛性、 ω : 建物の一次固有角振動数、 α : 速度に関する指数である。

本報では、ダンパー量 $v\alpha=0.01, 0.05, 0.10$ の 3 パターンを用いる。

ダンパー量の高さ方向分布設定は、第1層のダンパー量を基準として A_i 分布に基づいた設計用層せん断力比を乗じ、1, 5, 8層のダンパー量を決定する。1~4層, 5~7層, 8~10層はそれぞれ同様のダンパーを用いる。図4にダンパーの粘性係数比の高さ方向分布設定を示す。

2.2 入力地震動

解析に用いる入力地震動は、観測波 HACHINOHE 1968 EW, エネルギースペクトル $V_E = 100 \text{ cm/s}$ ($h=10\%$)一定とした位相特性 HACHINOHE 1968 EW (以後, ART HACHI), 観測波 El Centro 1940 NS (以後, El Centro), 観測波 JMA KOBE 1995 NS (以後, JMA KOBE) を使用した。図5に各入力地震動における加速度の時刻歴波形, 図6 擬似速度応答スペクトル, エネルギースペクトルを示す。ART HACHI は入力地震動のパラメータとして $V_E = 60, 120, 180, 240 \text{ (cm/s)}$ 一定とした4パターンを用いた。

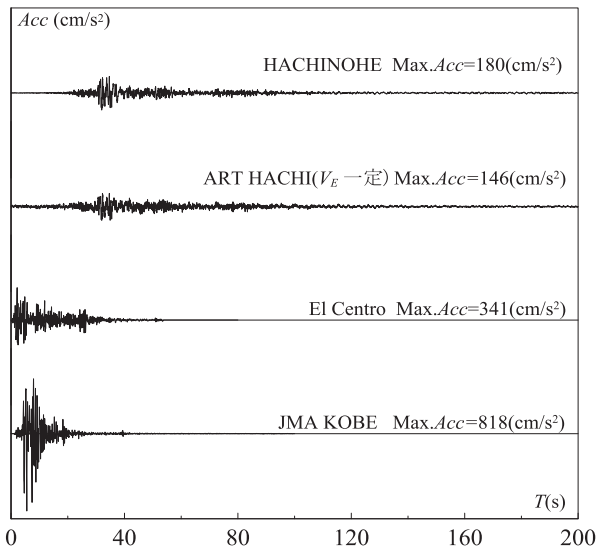


図5 入力地震動における加速度の時刻歴波形

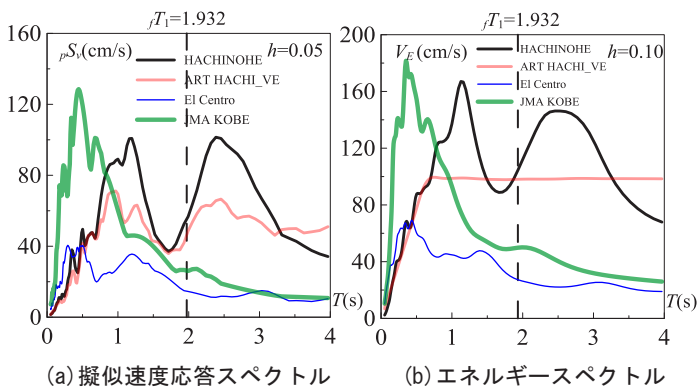


図6 入力地震動

3. エネルギー分散係数 $1/h\gamma_i$ の高さ方向分布における比較

3.1 エネルギー分散係数の算出方法

原田らは既往研究⁵⁾において粘性ダンパーを用いた制振構造におけるエネルギーの釣合に基づく応答予測法を

提案した。その際、保有水平耐力に寄与する構造特性係数 D_S を予測式によって得られる粘性ダンパーのエネルギー分散係数 $h\gamma_i$ によって表した。粘性ダンパーのエネルギー分散係数の逆数 $1/h\gamma_i$ の予測式は式(6)~(9)で表される。

$$\frac{1}{h\gamma_k} = \frac{hW_{dk}}{\sum_{i=1}^N hW_{di}} = \frac{s'_k \cdot h_k}{\sum_{i=1}^N s'_i \cdot h_i} \quad (6)$$

$$s'_i = \sum_{j=1}^N \left(\frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot r \cdot \bar{\alpha}_i^2 \cdot \left(\frac{f_k k_1}{f_k k_i} \right)^2, \quad h_i = \frac{C_{di} \cdot T}{4\pi M} \quad (7), (8)$$

$$r \cdot \bar{\alpha}_i = \begin{cases} 1 + 0.5x & (0 \leq x \leq 0.2) \\ 1 + 1.5927x - 11.8519x^2 + 42.5833x^3 \\ - 59.4827x^4 + 30.1586x^5 & (0.2 < x < 1) \end{cases} \quad (9)$$

ここで, $x = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{m_j}{M}$ (無次元化高さ)

本報では式(6)によって導かれる粘性ダンパーのエネルギー分散係数の逆数 $1/h\gamma_i$ の高さ方向分布の予測値と, 時刻歴応答解析による結果を比較することにより応答予測法における精度の検証をする。

3.2 ダンパーの取り付け部剛性 K_b を変化した場合

ダンパーの取り付け部剛性 K_b と粘性係数 C_d の間には以下の関係式がある。

$$K_b = \beta \cdot C_d \quad (10)$$

ここで, β : 粘性係数と取り付け部剛性に関する係数である。

本節では β の値を変えることにより K_b を変化させ, 直列ばね剛性が $1/h\gamma_i$ に与える影響を検討する。

K_b は $\beta=5.4, 7.2$ ³⁾とした値と K_b を十分剛とした3パターンで検討を行う。図7~10にエネルギー分散係数 $1/h\gamma_i$ の比較を入力地震動ごと示す。式(6)による予測値を太線で示し, $\beta=5.4, 7.2$ とした場合, K_b を十分剛とした場合の時刻歴応答解析による解析値をそれぞれ凡例に示す様にプロットする。なお, ART HACHI は $V_E=60, 120, 180, 240 \text{ (cm/s)}$ 一定としたものをそれぞれ検討したが, 入力レベルによって大きな変化が現れなかったため $V_E=120 \text{ (cm/s)}$ 一定としたものを代表として示す。

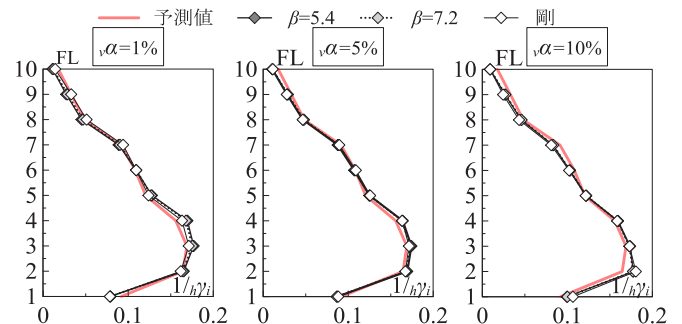


図7 入力地震動 ART HACHI ($V_E=120 \text{ (cm/s)}$ 一定)の時のエネルギー分散係数 $1/h\gamma_i$ の高さ方向分布の比較

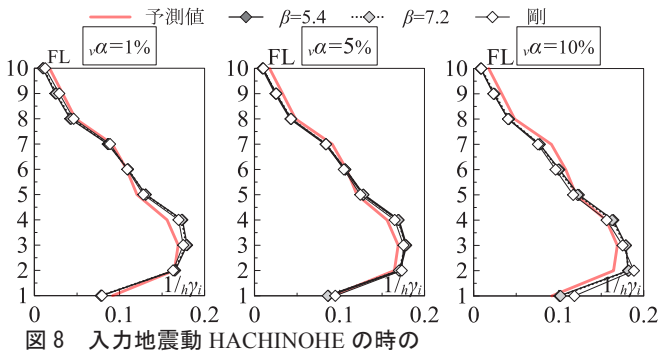


図8 入力地震動 HACHINOHE の時の
エネルギー分散係数 $1/h\gamma_i$ の高さ方向分布の比較

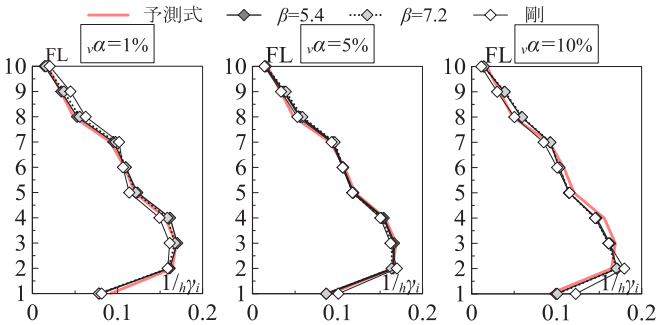


図9 入力地震動 El Centro の時の
エネルギー分散係数 $1/h\gamma_i$ の高さ方向分布の比較

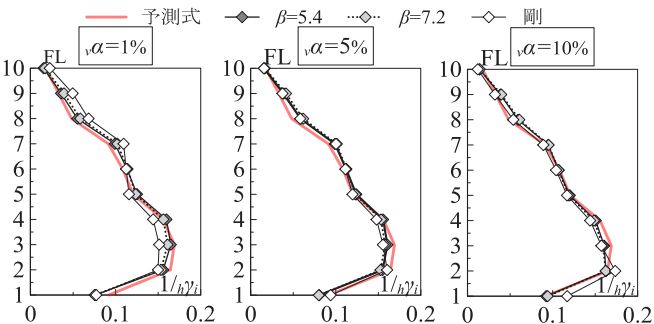


図10 入力地震動 JMA KOBE の時の
エネルギー分散係数 $1/h\gamma_i$ の高さ方向分布の比較

図7~10より、解析値は、 $\nu\alpha=1\%$ のとき第3層にエネルギー吸収が集中したが、 $\nu\alpha=10\%$ では第2層に集中し、 $\nu\alpha$ が大きくなるに従いより下層にエネルギー吸収が集中する傾向がある。予測式と解析結果との差異は $\beta=5.4$ の時10%以下、 $\beta=7.2$ の時11%以下、剛の時14%以下であり十分評価できる。予測値と応答解析による結果との対応に、直列ばねによる影響はほとんどないことが分かる。

3.3 速度に関する指数 α を変化した場合

原田らは、既往研究⁵⁾において式(5)で表される粘性ダンパーの粘性係数を $\alpha=1$ 、すなわち線形ダッシュポットとした検討を行った。本節では式(5)における速度に関する指数 α の値を変化させ、非線形の粘性係数をもつ粘性ダンパーを用いた場合の予測精度を検証する。

本報では、 $\alpha=1, 0.6$ についてそれぞれ検討する。図11~13に結果を示す。式(6)による予測値を太線で示し、各入力地震動の時刻歴応答解析による解析値をそれぞれ汎

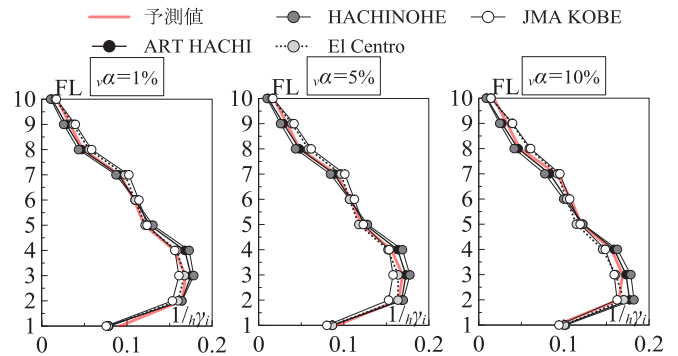


図11 $\alpha=1$ での
エネルギー分散係数 $1/h\gamma_i$ の高さ方向分布の比較

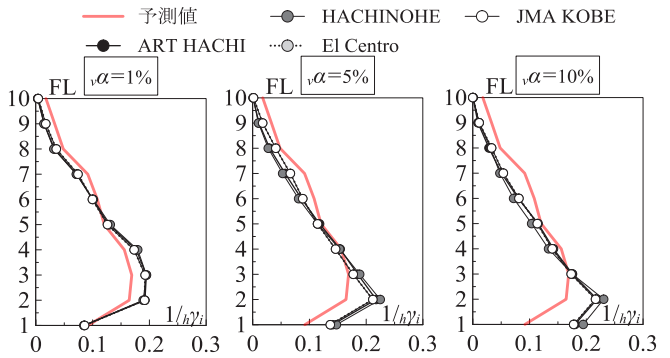


図12 $\alpha=0.6$ での
エネルギー分散係数 $1/h\gamma_i$ の高さ方向分布の比較

例に示す様にプロットする。なお、ART HACHIは3.2節の検討同様に $V_E=120(\text{cm/s})$ 一定としたものを代表として示す。図11, 12より、線形 $\alpha=1$ 、非線形 $\alpha=0.6$ の粘性係数を持つダンパーとともにダンパー量大きい時に予測値と解析値との対応が悪くなる傾向があることが分かる。 $\alpha=1$ の粘性ダンパーを使用した場合、吸収エネルギーが最も大きい層における予測式との差異は11%以下であり、全検討地震動で予測式は概ね解析結果と一致した。 $\alpha=0.6$ の粘性ダンパーを使用した場合、吸収エネルギーが最も大きい層における予測式との誤差は40%程度であり、全検討地震動において $\alpha=1$ の場合に比べ予測式から外れる。また、非線形の場合ではダンパー量大きい時下層にエネルギー吸収が集中する傾向がより顕著に表れた。

3.4 弱層を設定した場合

3.2節, 3.3節は図4に示す理想的なダンパー配置により検討を行った。本節では、ダンパー諸元が理想的なダンパー配置から外れた特定層(以後、最弱層)が存在する場合の式(6)の予測精度について検討する。最弱層含む場合における式(6)による予測値と時刻歴応答解析による値の比較を行う。最弱層 k に設置するダンパーの粘性係数は、図4の粘性係数を0.5倍した値とし、 $\alpha=1$ を対象とする。最弱層は第1層, 第3層, 第5層, 第8層の4パターンの設置箇所とする。図13に第 k 層が最弱層の時の粘性ダンパーの粘性係数比の高さ方向分布の設定を示す。

図14~17に第k層を弱層とした場合のエネルギー分散係数の比較を示す。ART HACHI は前節の検討同様に $V_E = 120(\text{cm/s})$ 一定としたものを代表として示す。

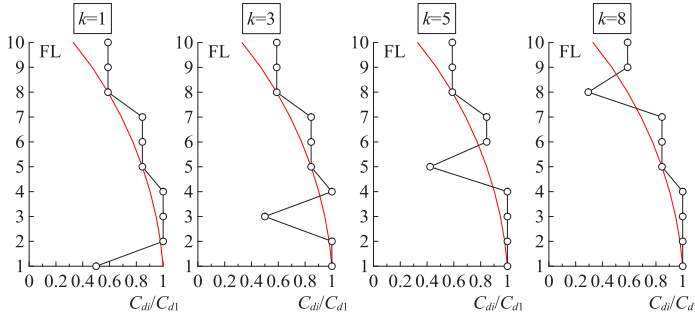


図13 最弱層k層を持つ粘性ダンパーの高さ方向設定

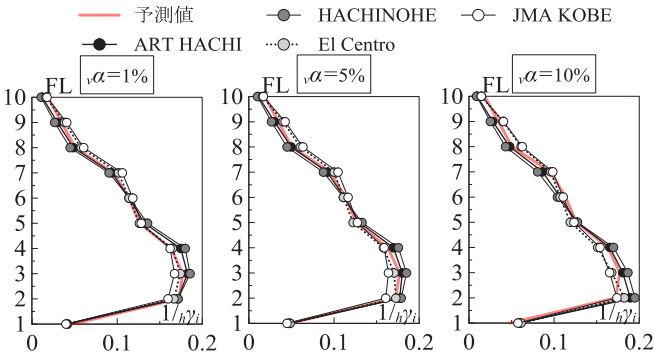


図14 第1層を弱層とした場合におけるエネルギー分散係数 $1/h_i \gamma_i$ の高さ方向分布の比較

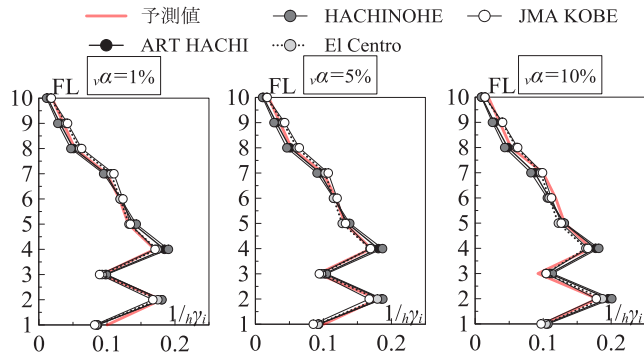


図15 第3層を弱層とした場合におけるエネルギー分散係数 $1/h_i \gamma_i$ の高さ方向分布の比較

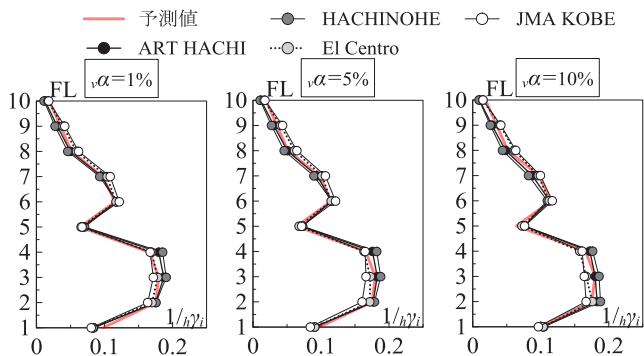


図16 第5層を弱層とした場合におけるエネルギー分散係数 $1/h_i \gamma_i$ の高さ方向分布の比較

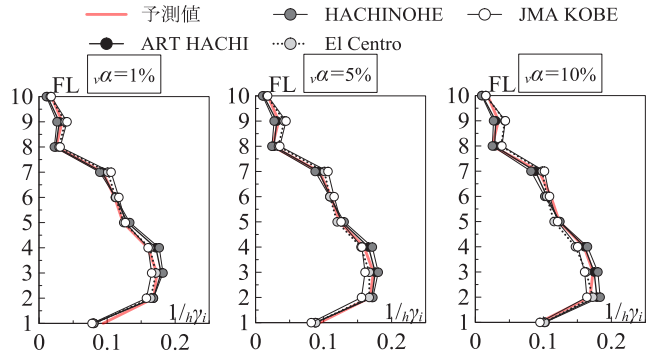


図17 第8層を弱層とした場合におけるエネルギー分散係数 $1/h_i \gamma_i$ の高さ方向分布の比較

図14~17より、 v_α が大きくなるに従い予測値と解析結果との対応が悪くなる傾向がある。弱層を設けた場合でも、吸収エネルギーが最も大きい層における予測式との誤差は $k=1$ の時13%以下、 $k=3$ の時12%以下、 $k=5$ の時8%以下、 $k=8$ の時9%以下であり、概ね予測式の結果と一致した。

4. まとめ

エネルギー法の適用範囲拡張を目的として原田らの提案した粘性ダンパーを用いた制振構造におけるエネルギーの釣合に基づく応答予測式で提案されているエネルギー分散係数の精度検証を行った。エネルギー分散係数 $h_i \gamma_i$ の予測値と時刻歴応答解析の値を比較し、応答予測式の妥当性を検証した。以下に得られた知見を示す。

- v_α が大きいほど予測精度が下がる傾向がある。
- 直列ばねによる影響はほとんどない。
- 非線形のダッシュポットをもつ粘性ダンパーを使用した場合、線形のダッシュポットをもつ粘性ダンパーより予測精度が下がる。
- 最弱層を設けた場合も概ね予測式による結果と一致する。

謝辞

本研究は、新日鉄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、謝意を表します。

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) 独立行政法人 建築研究所：鋼構造建築物へのエネルギー法活用マニュアル—平成17年度国土交通省告示第631号「エネルギーの釣合に基づく耐震計算法」に準拠して—，技報堂出版，2008.9
- 3) 日本免震構造協会：バッシブ制振構造設計・施工マニュアル2005.9
- 4) 日本 ERI 高層評定委員会：性能評価を踏まえた免震・制振構造の設計 pp.104-105, 2015.5
- 5) 原田幸博，秋山宏：エネルギー集中型柔剛混合骨組の耐震設計，日本建築学会構造系論文集，第472号 pp.57-66, 1995.6
- 6) 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

*1 東京理科大学理工学部建築学科 *2 東京工業大学
*3 新日鉄住金エンジニアリング株式会社