

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	地震動の違いが2次剛性の異なる制振構造の応答特性に及ぼす影響の分析
Title(English)	
著者(和文)	岩森貴寿, 佐藤大樹
Authors(English)	Takatoshi Iwamori, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 529-532
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 529-532
発行日 / Pub. date	2016, 3

地震動の違いが2次剛性の異なる制振構造の応答特性に及ぼす影響の分析

構造—振動

正会員 ○岩森貴寿^{*1}正会員 佐藤大樹^{*2}

制振構造 2次剛性 履歴ダンパー

応答特性 等価せん断型モデル 告示波

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。

これまで、制振構造では主架構が弾性に留まることを目標に設計されてきたが、想定を大きく超える地震動に対しては、制振構造においても主架構が塑性化することを考慮して設計を行う必要がある¹⁾。文献2)、3)では主架構の塑性化を考慮したエネルギーの釣合に基づく制振構造の設計法について提案している。しかし、文献2)、3)では主架構の復元力特性は塑性変形時の剛性を考えない完全弾塑性型としている。実際の建物では塑性変形時においても剛性を有している。筆者らは履歴ダンパーを設置した制振構造において、主架構の塑性変形時の剛性(以降、2次剛性と呼ぶ)をパラメータとして、10質点系等価せん断型モデルによる時刻歴応答解析を行い、2次剛性の違いが応答に及ぼす影響について分析を行った⁴⁾。ただし、その際に検討用地震動は1種類の告示波を用いた。

そこで、本報では、2種類の告示波を用いて、主架構が弾性である場合、完全弾塑性である場合と2次剛性を有する場合の応答特性をそれぞれ比較し、地震動の違いが主架構の2次剛性の異なる制振構造の応答に及ぼす影響について検討を行うことを目的とする。

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、主架構の復元力特性は2次剛性比 f_p を0~1.00の範囲で変動させた2次剛性 $f_p \cdot f_k$ とする。制振部材は履歴ダンパー(以降、ダンパーと呼ぶ)を

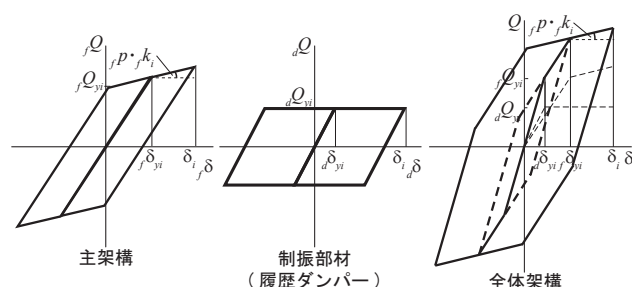


図1 復元力特性

対象として、復元力特性は2次剛性を有さない完全弾塑性型とする。本報では、主架構とダンパーを合わせたものを全体架構と呼ぶ。

図2に解析モデルの概要を示す。本報では文献3)、5)を参考に標準層せん断力係数 $C_0=0.2\sim0.3$ で許容応力度設計された固有周期が1.0s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⁴⁾。質量分布を等分布($9.8\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$)、主架構の剛性分布を台形分布(最上層が最下層の1/2)とする。主架構の剛性 f_k は(1)式⁶⁾で求められる。

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

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

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

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、 g : 重力加速度、 N : 全層数、 $f\alpha_{yi}$: 第 i 層の主架構の降伏層せん断力係数である。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 $1\omega (=2\pi \cdot 1f: 1f=1\text{Hz})$ 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 $1T=1.0\text{s}$ に対して $h=2\%$ となる剛性比例型とする。降伏層せん断力 fQ_{yi} を台形分布とする。降伏層せん断力 fQ_{yi} は(2)式で求められる。

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

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。

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 $d\delta_{yi} = 0.64\text{cm}$ とし、降伏層せん断力 dQ_{yi} と剛性 dki の高さ方向は秋山が提案する $\bar{\alpha}_i$ 分布¹⁾に基づく最適降伏層せん断力分布と一致するように設定した⁷⁾。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。

$$dQ_{yi} = d\alpha_{yi} \cdot \sum_{j=i}^N m_j \cdot g \quad (3)$$

$$d\alpha_{yi} = d\alpha_{y1} \cdot \bar{\alpha}_i \quad (4)$$

$x' > 0.2$ の場合

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

$x' < 0.2$ の場合

$$\bar{\alpha}_i = 1 + 0.5x' \quad (6)$$

$$x' = \frac{i-1}{N} \quad (7)$$

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 1 次剛性 $d k_i$ は次式より求められる。

$$d k_i = dQ_{yi} / d\delta_{yi} \quad (8)$$

本報では第 1 層のダンパーの降伏層せん断力係数 $d\alpha_{y1}$ 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。ここで、 $d\alpha_{y1}=0.00$ は履歴ダンパーがない主架構のみであることを意味する。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と仮定し、各層の層間変形は全てダンパーの変形に寄与するものとする⁸⁾。

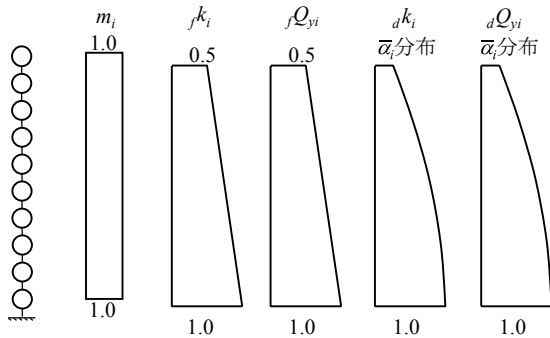


図 2 解析モデル

2.2 解析パラメータおよび入力地震動概要

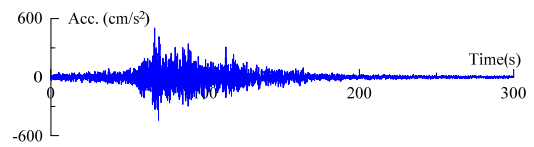
本報では表 1 に示すように、解析パラメータとして主架構の降伏層せん断力係数 $f\alpha_{y1}=0.1, 0.15, 0.2$ とする 3 つの基本モデルを作成し、文献 4) にて得られた結果から 3 つの 2 次剛性比 $f_p (=0.00 \sim 1.00)$ を設定する。ここで、 $f_p=0.00$ は 2 次剛性を有さない完全弾塑性型の復元力特性を意味し、 $f_p=1.00$ は主架構が塑性化しない弾性設定であることを意味する。本報では入力地震動の違いによる傾向を把握することを目的としているため、 $f\alpha_{y1}=0.10$ についてのみ述べる。

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 ${}_pS_V=100$ cm/s ($h=5\%$) とする模擬地震動波形 ART HACHI (位相特性：HACHINOHE 1968 EW) と ART KOBE (位相特性：JMA KOBE 1995 NS) を用いる⁸⁾。それぞれの加速度波形 (0~300 s) を図 3 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

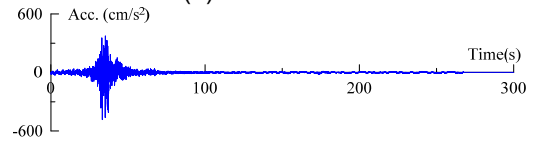
層間変形を評価できるように 270 s 以降を 0 cm/s² とし、合計で継続時間は 300 s とする。両地震動ともに解析時間刻み $\Delta t=0.01$ s とする。図 4 に加速度応答スペクトル S_A 、擬似速度応答スペクトル ${}_pS_V$ 、変位応答スペクトル S_D およびエネルギースペクトル V_E (固有周期 $T=0 \sim 4$ s) を示す。ART HACHI と ART KOBE を比較すると最大加速度は ART HACHI の方が大きく、エネルギースペクトルを見ると ART HACHI の方が約 1.8 倍大きい事がわかる。

表 1 解析パラメータ

主架構	$f\alpha_{y1}$	0.10, 0.15, 0.20
	f_p	0.00, 0.50, 1.00
ダンパー	$d\alpha_{y1}$	0.00, 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.16, 0.20

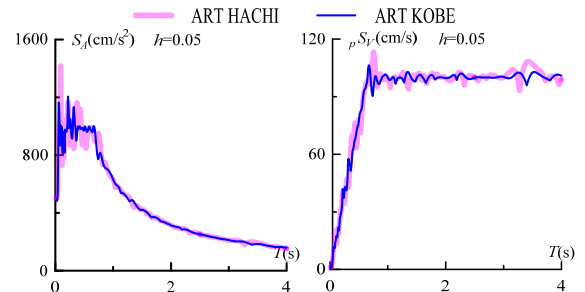


(a) ART HACHI

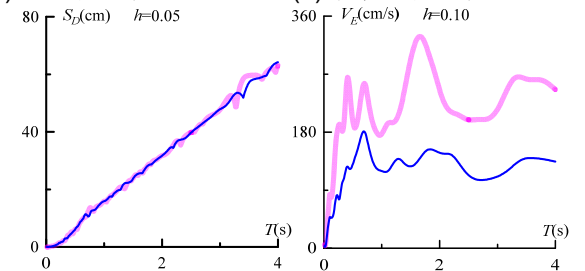


(b) ART KOBE

図 3 入力加速度波形



(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 4 応答スペクトルとエネルギースペクトル

3. 地震動と 2 次剛性の違いが応答特性に及ぼす影響

本章では、時刻歴応答解析を行った結果として、各層で算出される応答の最大値から、最も大きい応答が現れる層の応答値に着目して応答特性の検討を行う⁴⁾。

3.1 絶対加速度、相対速度、相対変位

図5にダンパー量 $d\alpha_{y1}$ に対する最大絶対加速度、最大相対速度、最大相対変位を、図6に $f_p = 0.00$ に対する $f_p = 0.50, 1.00$ の比率 β をそれぞれ示す。最大絶対加速度では両地震動ともに $f_p = 0.00$ と $f_p = 0.50$ の場合での値が概ね一致しており、地震動の違いと2次剛性による影響が小さい事が確認できる(図5)。 $f_p = 1.00$ の場合には ART HACHI は $d\alpha_{y1} = 0.10$ で最も応答が小さくなるが、ART KOBE は $d\alpha_{y1} = 0.16$ で最も応答が小さくなる事が確認できる(図5)。最大相対速度を見ると、両地震動ともに f_p による差異が大きい事より、2次剛性による影響が大きい事がわかる(図5)。地震動の違いに着目すると、両地震動ともに $f_p = 0.00, 0.50, 1.00$ の順に応答が大きくなる事がわかる(図6)。最大相対変位では両地震動ともにダンパー量が大きくなるにつれて応答が小さくなる事が確認できる(図5)。両地震動ともに $d\alpha_{y1} = 0.00 \sim 0.04$ の範囲で f_p による差異が大きく、 $d\alpha_{y1} = 0.10 \sim 0.20$ の範囲では f_p による差異が小さくなる事が確認できる(図6)。

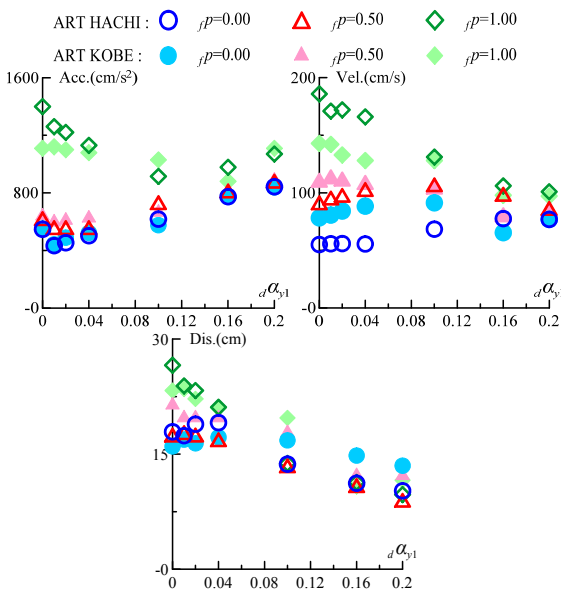


図5 絶対加速度、相対速度、相対変位

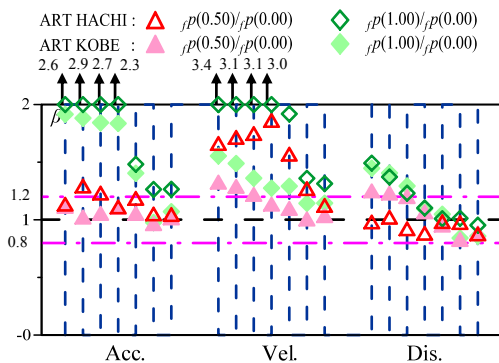


図6 f_p が及ぼす影響
(絶対加速度、相対速度、相対変位)
(左から $d\alpha_{y1} = 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.16, 0.20$)

3.2 層間変形、残留層間変形、せん断力係数

図7にダンパー量 $d\alpha_{y1}$ に対する最大層間変形、残留層間変形、第1層の全体架構の最大せん断力係数を、図8に $f_p = 0.00$ に対する $f_p = 0.50, 1.00$ の比率 β をそれぞれ示す。最大層間変形では $f_p = 0.00$ の場合で最も大きくなる事がわかる(図7)。 $d\alpha_{y1} = 0.00 \sim 0.04$ の範囲では $f_p = 0.50$ で最大層間変形が最も小さく、 $d\alpha_{y1} = 0.10 \sim 0.16$ の範囲では $f_p = 1.00$ で最大層間変形が小さくなる事がわかる(図7)。残留層間変形を見ると、 $f_p = 0.00$ の場合で層間変形角 $R = 1/200$ より大きくなる事が確認できる(図7)。 $f_p = 0.50$ の場合では $f_p = 0.00$ に対して残留層間変形が小さくなる事がわかる(図8)。 $f_p = 0.50$ の場合では2次剛性比が大きいため、塑性変形時にも2次剛性 $f_p \cdot f_k$ を有している事から地震終了後の層間変形が減少する量が多い事がわかる。第1層の全体架構の最大せん断力では、両地震動ともに同様な傾向を示している事が確認できる(図7)。2次剛性比の違いに着目すると、 $f_p = 0.00, 0.50, 1.00$ の順に大きくなる事がわかる(図7)。

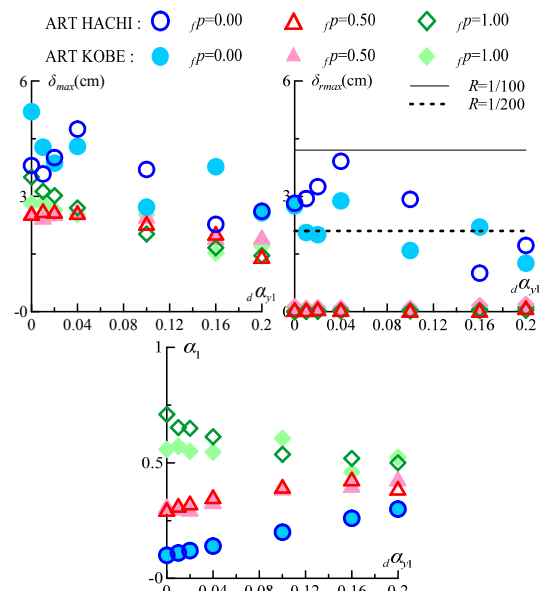


図7 層間変形、残留層間変形、せん断力係数

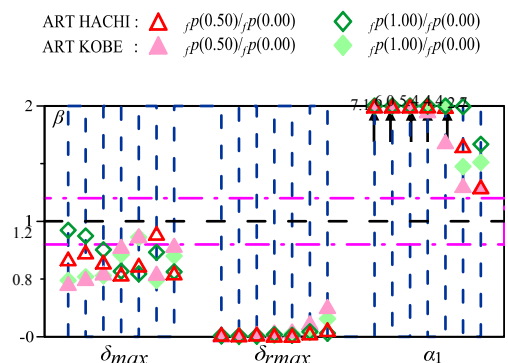


図8 f_p が及ぼす影響
(層間変形、残留層間変形、せん断力係数)
(左から $d\alpha_{y1} = 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.16, 0.20$)

3.3 入力エネルギーと各エネルギー吸収分担率

図9にダンパー量 $d\alpha_{y1}$ に対する地震終了時の入力エネルギー E 、入力エネルギー E に対する主架構の減衰によるエネルギー吸収分担率 fW_h/E 、入力エネルギー E に対する主架構の累積塑性ひずみエネルギー分担率 fW_p/E 、入力エネルギー E に対するダンパーの累積塑性ひずみエネルギー分担率 dW_p/E を示す。図10に $f_p = 0.00$ に対する $f_p = 0.50, 1.00$ の比率 β をそれぞれ示す。入力エネルギーではART HACHIの方がART KOBEよりも大きくなる事がわかる(図9)。これは図4で示したエネルギースペクトルからも同様な傾向が確認できる。 fW_h/E では入力エネルギーと同様にART HACHIの方がART KOBEよりも大きくなる事がわかる(図9)。両地震動ともに $f_p = 0.00, 0.50$ での fW_h/E が同様な傾向となることが確認できる(図9)。 fW_p/E でも両地震動ともに $f_p = 0.00, 0.50$ での fW_p/E が同様な傾向となることが確認できる(図9)。 dW_p/E ではART KOBEの方がダンパーの累積塑性ひずみエネルギー量が大きいことがわかる。両地震動ともに $f_p = 0.00, 0.50, 1.00$ の順に大き

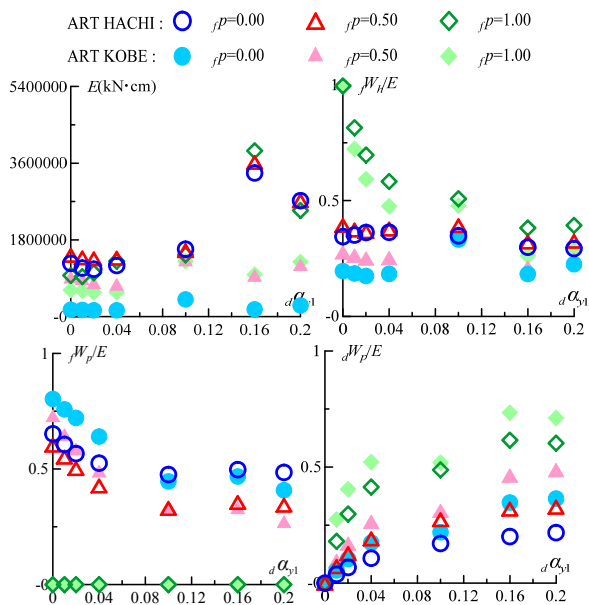


図9 入力エネルギー、 fW_h/E 、 fW_p/E 、 dW_p/E

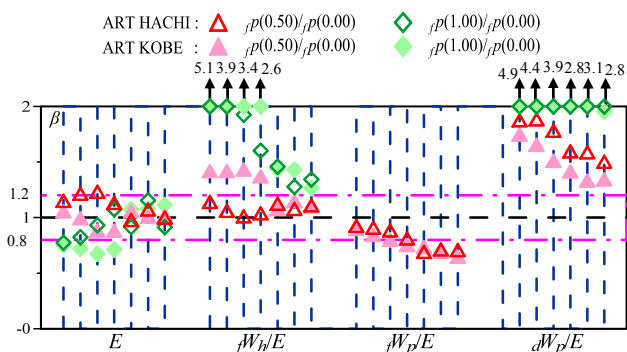


図10 f_p が及ぼす影響

(入力エネルギー、 fW_h/E 、 fW_p/E 、 dW_p/E)

(左から $d\alpha_{y1} = 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.16, 0.20$)

くなる事がわかる。両地震動ともにダンパー量 $d\alpha_{y1}$ が大きくなるにつれて dW_p が大きくなる事が確認できる(図9)。

4. まとめ

本報では、2種類の告示波を用いて、主架構が弾性である場合、完全弾塑性である場合および2次剛性を有する場合の応答特性をそれぞれ比較し、地震動の違いが主架構の2次剛性の異なる制振構造の応答に及ぼす影響について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 主架構が塑性する範囲($f_p = 0.00 \sim 0.50$)では最大絶対加速度、入力エネルギーおよび fW_p/E は2次剛性による影響が小さくなる事が確認できた。
- (2) fW_h/E では文献4)で得られた結果とは異なり、ART KOBEを入力した場合、2次剛性による影響が大きい事がわかった。
- (3) 層間変形、残留層間変形および入力エネルギーは地震動の違いによる影響が大きい事がわかった。

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) 長谷川隆, 西村功, 向井昭義, 石原直, 加村久哉: エネルギーの釣合に基づく履歴型ダンパー付鉄骨造骨組の地震応答予測, 日本建築学会構造系論文集, 第582号, pp.147-154, 2004.8
- 3) 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
- 4) 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
- 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) 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
- 7) 松澤祐介, 佐藤大樹, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 松蔭知明: 主架構の塑性化の程度を考慮したエネルギーの釣合に基づく第1層の応答評価法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013.8
- 8) 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

*1 東京工業大学 大学院性

*2 東京工業大学 准教授・博士(工学)