

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	粘性ダンパーの長時間繰り返しによる特性値低下を考慮した解析モデルの提案と地震応答評価
Title(English)	
著者(和文)	長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩
Authors(English)	Sho Nagayama, Daiki Sato, KAZUHIKO KASAI, Kazuhiro Matsuda
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 553-556
Citation(English)	, , , pp. 553-556
発行日 / Pub. date	2017, 3

粘性ダンパーの長時間繰り返しによる特性値低下を考慮した解析モデルの提案と地震応答評価

構造—振動

正会員 ○ 長山祥^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*2}
 // 笠井和彦^{*3} // 松田和浩^{*4}

制振構造 長周期地震動 粘性ダンパー
 エネルギー密度 評価手法

1. はじめに

近年、南海トラフ地震による長周期地震動が三大都市圏で発生することが予想されており、超高層建物などの周期が長い建物が大きく揺れることが懸念されている。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、超高層建物が共振することで10分以上揺れ続けたという報告がなされている¹⁾。

このような被害が想定される建物に対して制振構造は効果的であるが、長周期地震動の作用を受ける場合、長時間の繰り返しにより制振ダンパーの種類によっては性能が大きく低下する可能性がある。このことから筆者らは、代表的な4種の実大制振ダンパーに対して長時間の正弦波加振実験を行い、各ダンパーの動的特性の変化を明らかにし、簡易的な評価手法を示している²⁾。

本報では、粘性ダンパーを対象に特性値低下の傾向を考慮した解析モデルを作成する。また、特性値低下を簡易的に評価した式を用いた2種類の手法による応答解析の結果を比較し、本手法の有効性の確認を行う。

2. 粘性ダンパー正弦波加振実験条件

2.1 計測概要

対象とするダンパーは、E-ディフェンスにおける実大5層建物の震動台実験で用いられたダンパーから選出したものである³⁾。図1に粘性ダンパー側面図、表1に粘性ダンパー諸元、図2にセットアップ図を示す。ここに、 C_d は粘性係数、 α はべき乗指数である。ダンパー部の変形はストローク部上下左右4点で計測し、歪ゲージは、ブレース中央部と中央部から±100mmの位置全3断面($i=1\sim3$)に4枚ずつ添付する。ダンパーストローク u_d を式(1)、ダンパー力 F_d を式(2)より算出する。

$$u_d = \frac{\sum_{j=1}^{N_u} u_{d,j}}{4}, \quad F_d = \frac{\sum_{j=1}^{N_\varepsilon} \varepsilon_j}{4} EA \quad (1, 2)$$

ここに、 ε_j は計測位置での歪、 E はヤング係数(=206 GPa)、 A は歪計測位置における断面積である。なお、ダンパー力はブレース中心部における歪より算出を行っている。1サイクルごとの最大ダンパー力およびエネルギー吸

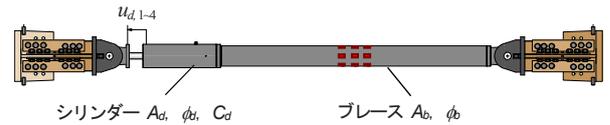


図1 粘性ダンパー側面図

表1 粘性ダンパー諸元

試験体	l (mm)	ダンパー				ブレース			F _{d,max} (kN)	
		l _d (mm)	A _d (mm ²)	φ _d (mm)	C _d 規格値	l _b (mm)	A _b (mm ²)	φ _b (mm)	u _{d,max} 15kine	u _{d,max} 30kine
D1-2F	3947	606	12880	184	98	2104	8320	159	658	856
D2-2F										
D3-2F	3849	689	28124	286	196	1542	15323	236	1316	1712

※ C_d の単位は kN/(mm/s)^α であり、α, K_d の規格値はそれぞれ 0.38, ∞ である。

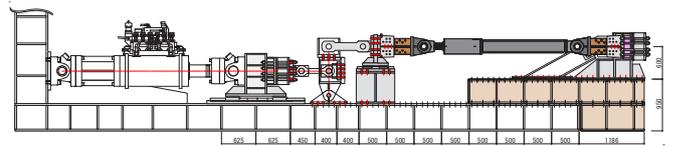


図2 粘性ダンパーセットアップ図

収量は式(3)、(4)より算出する。 n サイクルの最大ダンパー力 $F_d^{[n]}$ は、図3のように計測直後の1つ目の半波を除いた半波 $2n$ と半波 $2n+1$ の絶対値の平均値より算出している(ただし $n \geq 1$ とする)。また、エネルギー吸収量 $W_d^{[n]}$ は1サイクルごとの履歴の面積より算出している。ここに、 $hF_{d,max}$ は半波ごとの最大ダンパー力、 N_D は1サイクルのデータ数である。なお、 $()$ はステップ、 $\langle \rangle$ は半波、 $[\]$ はサイクルを意味する。

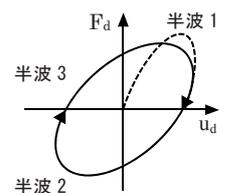


図3 半波の定義

$$F_d^{[n]} = \frac{|h F_{d,max}^{(2n)}| + |h F_{d,max}^{(2n+1)}|}{2} \quad (3)$$

$$W_d^{[n]} = \sum_{i=1}^{N_D} \frac{(F_d^{(i)} + F_d^{(i+1)}) \cdot (u_d^{(i+1)} - u_d^{(i)})}{2} \quad (4)$$

2.2 加振計画

前報より⁴⁾、新たに大容量の試験体(D3-2F)を用いた正弦波加振実験を追加で行った(V-10)。表2に加振パラメータを示す。それぞれの加振は、周期2~6s、振幅10~30mmの範囲内で行っている。

なお、速度依存型のダンパーである粘性ダンパーは、材料疲労の問題がなく繰り返し実験できるため、载荷後にダンパーの温度が初期温度に戻ったことを確認してから、ダンパーの損傷確認の载荷を行い、損傷が無いことを確認した後次に次の载荷を行っている。

表2 正弦波加振実験パラメータ

実験番号	周期 T (s)	振幅 u_d (mm)	加振時間 t_0 (s)	サイクル数	初期温度 θ_0 (°C)	試験体
V-1	4.0	20	600	150	10	D1-2F
V-2	4.0	20	1800	450	15	
V-3	4.0	20	3600	900	15	
V-4	4.0	20	10800	2700	13	
V-5	2.0	20	230	115	15	
V-6	4.0	10	1200	300	15	D2-2F
V-7	4.0	20	600	150	15	
V-8	4.0	30	400	100	15	
V-9	6.0	20	900	150	15	
V-10	4.0	20	1800	450	26	D3-2F

3. 粘性ダンパー特性値低下の傾向

3.1 エネルギー密度による評価

制振ダンパーを長周期地震動対策として用いる場合、最大値による評価だけでなく繰り返し変形を受けて吸収するエネルギー量の累積値による評価が重要となってくる。本報では、ダンパー特性値として最大ダンパー力に着目して検討を行う。図4(a)に累積エネルギー吸収量 ΣW_d に対する最大ダンパー力の低下率の変化を示す。同容量のダンパーを用いた V-1~V-9 では、周期・振幅によらず同様の低下の傾向を示した。これは、粘性体がエネルギーを吸収することでシリンダー内部の粘性体温度が上昇し、それに伴い特性値が低下するためと考えられる。しかし、容量の大きいダンパーを使用した V-10 では、他の結果 (V-1~V-9) と比較して低下の傾向が異なっていることが分かる。

そこで、異なるダンパー容量での統一的な評価を行うために、累積エネルギー吸収量を粘性ダンパーの容積 V_V で除したものを、エネルギー密度 Ω と呼び以下のように定義する。

$$\Omega = \frac{\Sigma W_d}{V_V} \quad (5)$$

ここで、 V_V は粘性ダンパー内に封入されている粘性体の容量である。エネルギー密度 Ω は、単位容積あたりで吸収した累積吸収エネルギーを意味し、粘性体による発熱と直接関連する値である。本報では簡便のために、ダンパー部の長さとの断面積より算出した粘性ダンパーの容積を、内部粘性量と仮定して検討を行った。エネルギー密度 Ω に対する最大ダンパー力の低下率の変化を図4(b)に示す。図4(b)より、粘性ダンパーにおいてエネルギー密度 Ω に対する最大ダンパー力の低下率の変化は、周期・振幅・ダンパー容量によらずおおむね同様の傾向を示した。この関係から、エネルギー密度 Ω を用いることで長時間

の繰り返しによる粘性ダンパーの特性値低下の傾向を簡易的に評価できると考える。ただし、封入されている粘性体の性質や大きく形状の異なるダンパーに対しては低下の傾向が変わると考えられる。しかし、その場合、長時間の加振実験を一回行うことで振幅や周期によらず長時間の繰り返し加振時におけるダンパーの特性低下を評価できるという利点を有する。

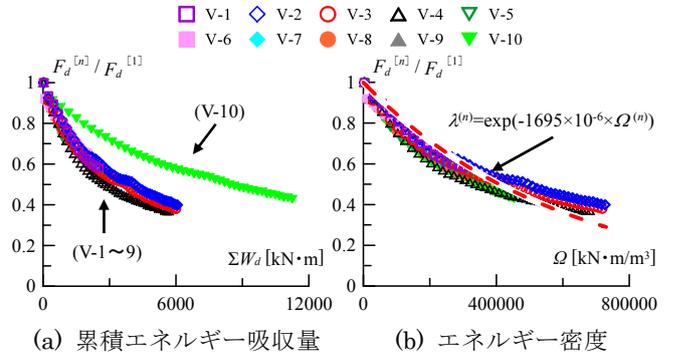


図4 最大ダンパー力の低下率の変化

3.2 特性値低下を考慮した解析モデル

3.1 節の結果より得られたエネルギー密度を用いて近似式を算出し、長時間繰り返しによる特性値低下を考慮した解析モデルを作成する。粘性ダンパーの基本特性式は、式(6)のように表される。

$$F_d^{(n)} = C_d^{(n)} \cdot \dot{u}_d^{\alpha(n)} \quad (6)$$

繰り返し効果を考慮した場合での n ステップにおける粘性係数 $C_d^{(n)}$ は式(7)より算出される。繰り返しによる粘性係数の低下率 λ はエネルギー密度 Ω を用いて式(8a, b)より求められる (図4(b)中破線)。

表3 α, C_d の近似式と値³⁾

	$\alpha = A_1 u_{d0}^{-A_2}$		$C_d^{(0)} = A_3 u_{d0}^{A_4}$ (kN/(s/mm) ^{α})	
	A_1	A_2	A_3	A_4
中容量	0.860	-0.205	24.1	0.319
大容量	0.806	-0.156	42.2	0.288

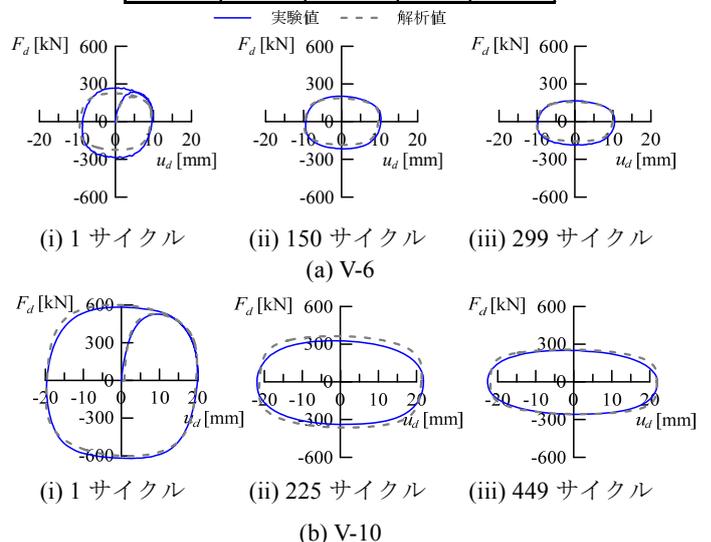


図5 実験値と解析値の比較

$$C_d^{(n)} = \lambda^{(n)} \cdot C_d^{(0)} \quad (7)$$

$$\lambda^{(n)} = \exp(-a_0 \cdot \Omega^{(n)}), \quad a_0 = 1.695 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{kN}] \quad (8a, b)$$

ここに、 $C_d^{(0)}$ は粘性係数の初期値、 a_0 は繰返しによる低下の程度を表す係数である。ここで、図5に実験結果(V-6, 10)と解析結果を比較したものの一例を示す。なお、解析に用いる粘性ダンパーの α, C_d 値は表3より算出を行っている³⁾。図5より特性値低下を考慮した解析モデルは比較的精度良く実験結果を再現できていることが分かる。

4. 時刻歴応答解析

4.1 建物モデル概要

本報で使用する建物モデルは、建物高さ81.7mの20層のせん断モデルである^{5, 6)}。主架構の1次固有周期 T_1 は2.69sである。構造減衰は、1次と2次でそれぞれ等価な1%のレーリ型減衰とする。なお、主架構は弾性として解析を行う。

4.2 入力地震動概要

入力地震動として、東海・東南海地震動を想定した東海地方の長周期地震動である三の丸波(SAN)⁷⁾、南海トラフ4連動地震(工学的地盤)⁸⁾を想定した津島波(AIC003)、堺波(OSK006) JMA名古屋波(E34)、大分波(OIT010)の計5波を採用する。図6(a)~(e)に入力地震動の加速度波形、図7(a), (b)に擬似速度応答スペクトル ρS_v ($h=5\%$)、エ

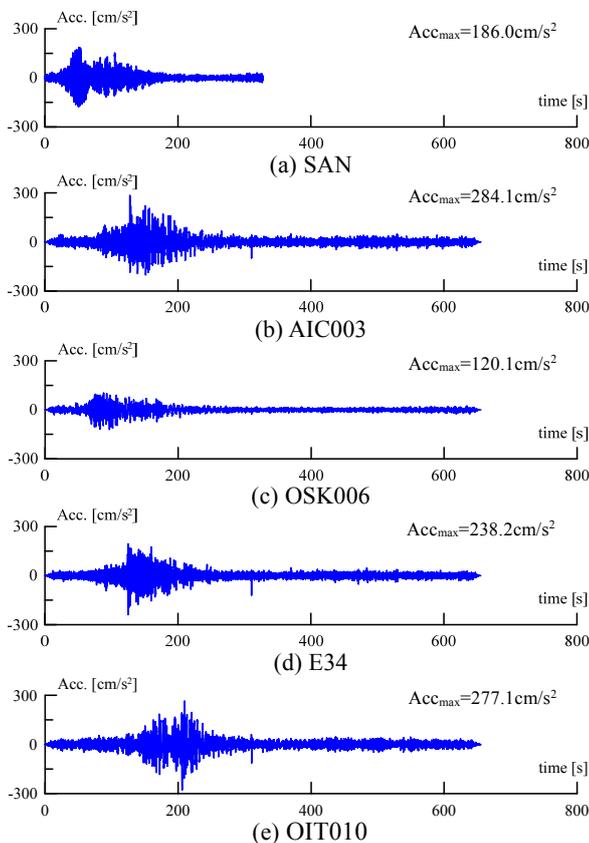


図6 加速度時刻歴

ネルギースペクトル V_E ($h=10\%$)をそれぞれ示す。主架構の1次固有周期である3秒付近に $\rho S_v, V_E$ のピークを有する地震動を採用している。

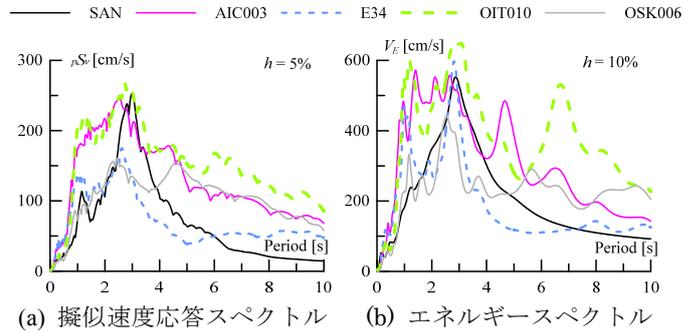


図7 地震動スペクトル

4.3 ダンパー配置

解析において対象とする粘性ダンパーは、長時間正弦波加振実験において用いたD2-2Fの値を使用している。なお4章で用いる粘性ダンパーの α, C_d 値は規格値(表1)を使用している。図8のようにダンパーと取付け部材は直列に繋がるため、内部剛性 K_d と取付け部材剛性 K_b をまとめて等価支持材剛性 K_b^* で表す(表4)³⁾。ダンパーの取付け角度は全層で30°に一定配置とし、取付け角度を考慮して粘性係数および等価支持材剛性を変換している⁹⁾。

図9に高さ方向における粘性ダンパーの粘性係数を示す。ここで、V100ではレベル2相当の地震動において層間変形角 $R=1/100$ 以内、V150では $1/150$ 以内に収まるように粘性ダンパーを配置している⁶⁾。なお、本報では建物の全体曲げ変形などによってダンパーの実効変形が低下する影響¹⁰⁾を無視して解析を行っている。

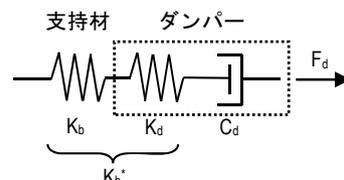


図8 粘性ダンパーと取付け部材からなる付加系

表4 等価支持材剛性³⁾

	K_d [kN/cm]	K_b [kN/cm]	K_b^* [kN/cm]
D2-2F	2663	2525	1296.1

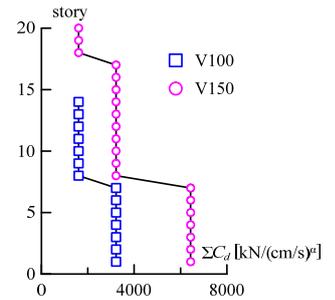


図9 粘性係数

4.4 時刻歴応答解析結果

本節では、高さ方向における最大応答分布として層間変形角、絶対加速度に着目し検討を行っていく。

はじめに、図10, 11に、特性値低下を考慮せず解析を行ったもの(${}_0V100, {}_0V150$)と、解析より得られた地震終了時におけるダンパーのエネルギー密度 Ω (式(5))から、実験結果(図4(b))を用いて特性値低下を評価し、粘性係数 $C_d^{(0)}$ を低下させ、再度解析を行ったもの(${}_sV100, {}_sV150$) (以降、簡易手法)の結果を示す¹¹⁾。図10より、 ${}_sV150$ が ${}_0V150$ に対して、SANでは1.4倍、AIC003, OIT010では

1.2 倍に増大していることが分かる。一方で、層間変形角が 1/100 以内に収まっている OSK006, E34 では、応答は大きく増大せずほぼ同様の結果となった。ダンパー量の少ない V100 と V150 を比較すると、入力エネルギーの大きい AIC003, OIT010 での著しい増加が見られる。また、図 11 より、絶対加速度においても同様の傾向が見られる。

次に、簡易手法に対して、式(6,7)の関係を用いて粘性係数をステップごとに低下させ解析を行ったもの（以降、精算手法）の結果を図 10, 11 に破線で示す。結果より、精算手法は考慮なしと簡易手法の間に位置することが確認さ

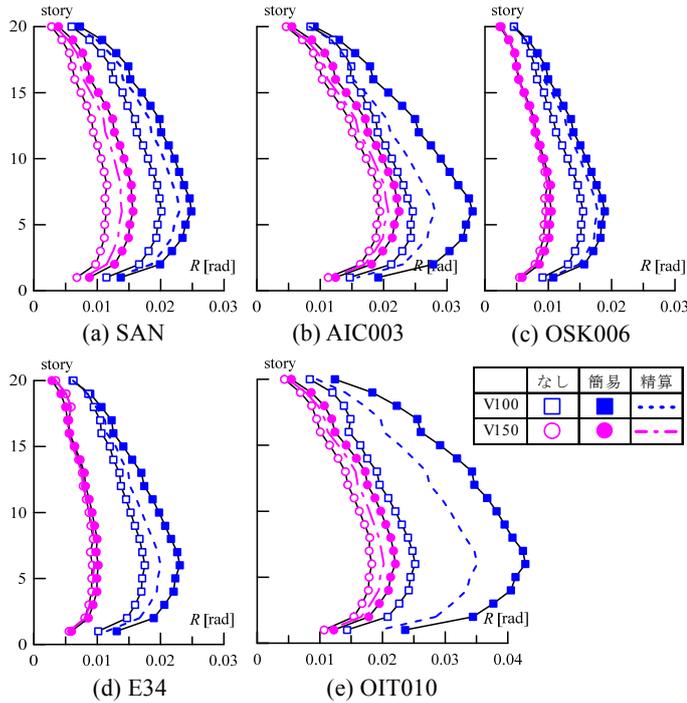


図 10 層間変形角

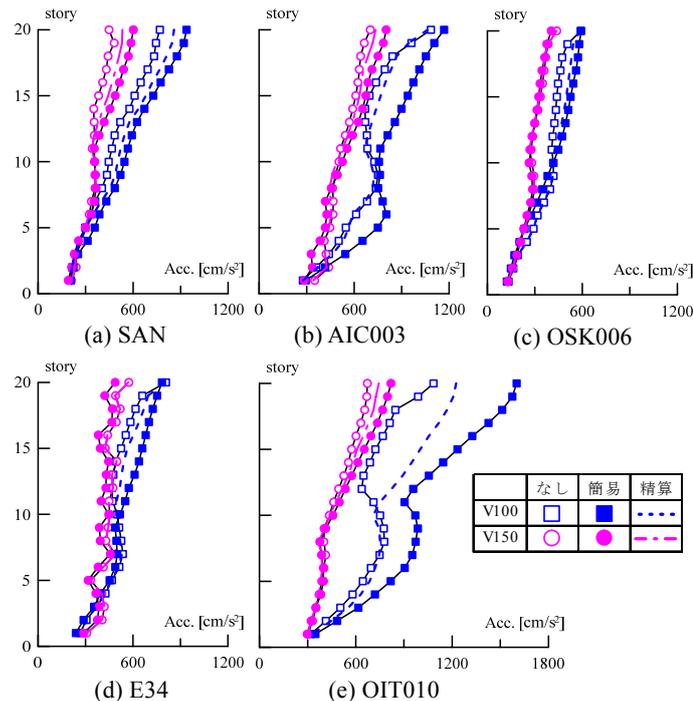


図 11 絶対加速度

れた。簡易手法は繰り返しによる特性値が変化する解析モデルが無い場合でも容易に評価が可能であるため有用であるが、地震動によっては過大評価になってしまう場合もある。一方で、精算手法はより経済的な設計を行うことが可能である。

5. まとめ

本報では、粘性ダンパーを対象に特性値低下の傾向を考慮した解析モデルを作成し、特性値低下を簡易的に評価した式を用いた 2 種類の手法による応答解析の結果の比較を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 粘性ダンパーの長時間加振実験より、エネルギー密度 Ω に対する最大ダンパー力の低下の傾向は、周期・振幅・ダンパー容量によらずおおむね同様の傾向を示し、簡易的に評価が可能である。
- (2) エネルギー密度を用いた近似式より、解析モデルを提案した。繰り返しによる特性値低下を表した解析モデルは、精度良く実験結果を再現できた。
- (3) 簡易手法、精算手法の 2 種類の手法を用いて時刻歴応答解析を行った。結果より、簡易手法は簡易的に繰り返しによる影響を考慮できるが、地震動によっては過大評価になってしまう。一方で、精算手法はより経済的な設計が可能である。

謝辞

本研究は、元東京工業大学笠井研究室の西島正人氏、山本英和氏の研究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) 長周期地震動と超高層建物の対策案－専門家として知っておきたいこと－、日本建築学会、2013.10
- 2) 笠井和彦、佐藤大樹、松田和浩、長山祥：長時間正弦波加振実験による 4 種の実大制振ダンパーの動的特性の変化および簡易評価手法の提案、構造工学論文集、Vol.63B、2017.3（掲載予定）
- 3) 笠井和彦、山際創、西島正人、馬場勇輝、伊藤浩資、引野剛、大木洋司：粘性ダンパーをもつ実大 5 層鉄骨建物の 3 次元震動台実験、日本建築学会構造系論文集、第 79 巻、第 695 号、pp.47-56、2014.1
- 4) 長山祥、佐藤大樹、笠井和彦、松田和浩：長周期・長時間地震動時における実大ダンパーの特性評価 その 14 種のダンパーの長時間正弦波加振実験による動的特性の推移、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.389-392、2016.3
- 5) 日本建築学会：鋼構造制振設計指針、第 1 版、2014.11
- 6) 中井亜里沙、長山祥、佐藤大樹、笠井和彦、松田和浩：長周期地震動時における粘性ダンパーを有する制振構造建物の簡易応答評価 その 1 建物モデル概要とダンパー配置計画、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.163-164、2016.8
- 7) 愛知県建築住宅センター：名古屋三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成（概要版）、(財)愛知県建築住宅センター耐震構造委員会設計入力地震動検討部会、pp.1-48、2004.6
- 8) 超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討－南海トラフ 4 連動地震による超高層・免震建物の応答解析－、建築研究資料 No.147、pp.1-336、2013.9
- 9) 日本免震構造協会(JSSI)：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル第 1 版、2003.10；第 2 版、2005.9；第 3 版、2013.11
- 10) 石井正人、笠井和彦：多層制振構造の時刻歴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、第 75 巻、第 647 号、pp.103-112、2010.1
- 11) 長山祥、佐藤大樹、笠井和彦、松田和浩：長周期地震動時における粘性ダンパーを有する制振構造建物の簡易応答評価 その 2 粘性ダンパーの動的特性の変化を考慮した応答評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.165-166、2016.8

*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 東京工業大学 教授・Ph.D.
 *4 東京工業大学 助教・博士（工学）