

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	長周期地震動時における粘性ダンパーの性能低下を考慮した制振構造建物の応答評価
Title(English)	RESPONSE EVALUATION OF PASSIVE CONTROL STRUCTURE WITH VISCOUS DAMPERS CONSIDERING ITS PERFORMANCE DECREMENT UNDER LONG-PERIOD GROUND MOTION
著者(和文)	佐藤大樹, 長山祥, 笠井和彦, 松田和浩
Authors(English)	Daiki Sato, Sho Nagayama, KAZUHIKO KASAI, Kazuhiro Matsuda
出典(和文)	日本建築学会技術報告集, Vol. 24, No. 56, pp. 59-62
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 24, No. 56, pp. 59-62
発行日 / Pub. date	2018, 2
権利情報	日本建築学会

長周期地震動時における粘性ダンパーの性能低下を考慮した制振構造建物の応答評価

RESPONSE EVALUATION OF PASSIVE CONTROL STRUCTURE WITH VISCOUS DAMPERS CONSIDERING ITS PERFORMANCE DECREMENT UNDER LONG-PERIOD GROUND MOTION

佐藤大樹 — * 1 長山 祥 — * 2
 笠井和彦 — * 3 松田和浩 — * 4

Daiki SATO — * 1 Sho NAGAYAMA — * 2
 Kazuhiko KASAI — * 3 Kazuhiro MATSUDA — * 4

キーワード：
 制振構造, 粘性ダンパー, 長周期地震動, 性能低下

Keywords:
 Passive control structure, Viscous damper, Long-period ground motion, Performance decrement

The purpose of this paper is to carry out a response evaluation of passive control structure with viscous dampers considering its performance decrement under long-period ground motion. An analytical model of the viscous damper that considered the performance decrement caused by long-period cyclic loading was proposed in this paper, and its accuracy was confirmed by comparing with test results. The time history response analysis using 20-storey model with the proposed viscous dampers was performed. It was verified that the response of the passive control structure with viscous dampers increases under some long-period ground motions.

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。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。本研究で対象とする粘性ダンパーは, 封入した粘性体の流動抵抗力をダンパー力として利用する流動抵抗式¹⁾であり, 振動時のエネルギーを粘性体の熱エネルギーに変換する際の温度上昇に伴いダンパーの特性が変化する。これらのことから, 長周期地震動時における粘性ダンパーの特性低下までを考慮した制振構造の設計が求められている。

そこで筆者等は, 流動抵抗式の実大粘性ダンパーを用いて長時間の正弦波加振実験を実施した²⁾。実験結果より, 累積吸収エネルギーを粘性体の容積で除したエネルギー密度で整理することで, 振動数, 振幅, 継続時間およびダンパーの容量によらず統一的に性能低下を表現できることを示した²⁾。本報では, エネルギー密度を用いて, 粘性ダンパーの長時間繰返しによる性能低下を考慮した, 長周期地震動に対する超高層建物の応答評価手法を示す。

2. 特性値低下を考慮した解析モデル

3種類の実大粘性ダンパー(表1)を用いて行った, 様々な条件における正弦波加振実験(表2)より得られた, 繰返しによる1サイクル毎のダンパー最大力の低下率の変化とエネルギー密度の関係を図

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)	
		I _d (mm)	A _d (mm ²)	φ _d (mm)	C _d 規格値	I _b (mm)	A _b (mm ²)	φ _b (mm)	u _{d, max} 15kine	u _{d, max} 30kine
		D1-2F D2-2F	3947	606	12880	184	98	2104	8320	159
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。

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	D2-2F
V-6	4.0	10	1200	300	15	
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のみ大容量, それ以外は中容量

1に示す²⁾。エネルギー密度Ω⁽ⁿ⁾は式(1)で定義され, 粘性体による発熱と直接関連する値である²⁾。

$$\Omega^{(n)} = \frac{\sum W_d^{(n)}}{V_r} \quad (1)$$

ここで, ΣW_d⁽ⁿ⁾はダンパーのnステップまでの累積エネルギー吸収量, V_r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²⁾。粘性ダンパーおよび実験の詳細については文献2)を参照されたい。

本稿は文献5), 7), 10), 11)に加筆・修正を加えたものである。

¹⁾ 東京工業大学科学技術創成研究院未来産業技術研究所 准教授・博士(工学) (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259)

²⁾ ㈱佐藤総合計画 修士(工学)(元東京工業大学 大学院生)

³⁾ 東京工業大学 特任教授・Ph.D.

⁴⁾ 名城大学建築学科 准教授・博士(工学)(元東京工業大学 助教)

¹⁾ Assoc. Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

²⁾ AXS Satow Inc., M. Eng.

³⁾ Prof., Tokyo Institute of Technology, Ph.D.

⁴⁾ Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Meijo Univ., Dr. Eng.

図1より、条件(周期, 振幅, 加振時間, 初期温度, ダンパー容量)に関わらず、エネルギー密度 Ω (式(1))で整理することで粘性ダンパーの最大力の低下を統一的に評価できることが分かる。なお、本報で用いる粘性ダンパーの履歴は、ほぼ矩形の形状(図2, 後述)を示すことから、ダンパーの最大力だけでなく、1サイクル当たりのエネルギー吸収量や損失係数 λ の低下率も、ほぼ同様の傾向となる。よって、以降それらをまとめてダンパーの特性値と呼ぶ事とする。

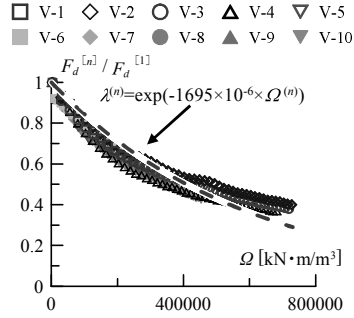


図1 ダンパー力の低下率

図1中の破線は、粘性係数 C_d の n ステップにおける低下率 $\lambda^{(n)}$ (式(2))を示している²⁾。図1より、 $\lambda^{(n)}$ は実験より得られた粘性ダンパーの特性値の低下と良く対応していることが分かる。

$$\lambda^{(n)} = \exp(-a_0 \cdot \Omega^{(n)}) \quad (2)$$

ここで、 a_0 はダンパーの規格によって異なる値をとる。しかし、図1からも分かるように、任意の振幅や振動数での長時間の加振実験を1回行うことで a_0 を評価できる²⁾。本報では、実験結果(図1)より得られた $1.695 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{kN}$ を用いる²⁾。

上記の実験結果を踏まえて、長時間繰り返しによる粘性ダンパーの特性値低下を考慮した解析モデルを提案する。粘性ダンパーをMaxwell体で表すと、ステップ n における粘性ダンパーの荷重 $F_d^{(n)}$

は、式(3)で表される。

$$F_d^{(n)} = C_d^{(n)} \cdot |\dot{u}_d^{(n)}|^{\alpha} \cdot \text{sgn}(\dot{u}_d^{(n)}) \quad (3)$$

ここで、 α はべき乗指数、 $\dot{u}_d^{(n)}$ は n ステップにおける粘性要素の速度である。繰返し効果を考慮した場合の n ステップにおける粘性係数 $C_d^{(n)}$ は、 $\lambda^{(n)}$ を用いて式(4)より算出される。

$$C_d^{(n)} = \lambda^{(n)} \cdot C_d^{(0)} \quad (4)$$

ここで、 $C_d^{(0)}$ は粘性係数の初期値である。

提案した粘性ダンパーの解析モデルに実験と同じ正弦波の強制変位を与えて、実験値と比較することで解析モデルの精度を検証する。図2に実験結果と解析結果を比較した履歴の一例(V-5~V-10, 表2)を示す。なお、解析に用いる粘性ダンパーの α および $C_d^{(0)}$ は表3の値³⁾を用いて算出した。ここで、表中の u_{d0} は変位振幅を意味する。図2より、繰返しによるダンパーの特性値低下を考慮した解析モデルは、1サイクル目で差は見られるものの、ダンパー特性が変化する傾向を精度良く再現できていることが確認できる。

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

3. 粘性ダンパーの性能低下を考慮した制振建物の時刻歴応答解析

3.1 建物モデルの概要

本報では、建物高さ81.7mの20層の鋼構造建物を対象とし⁴⁾、20

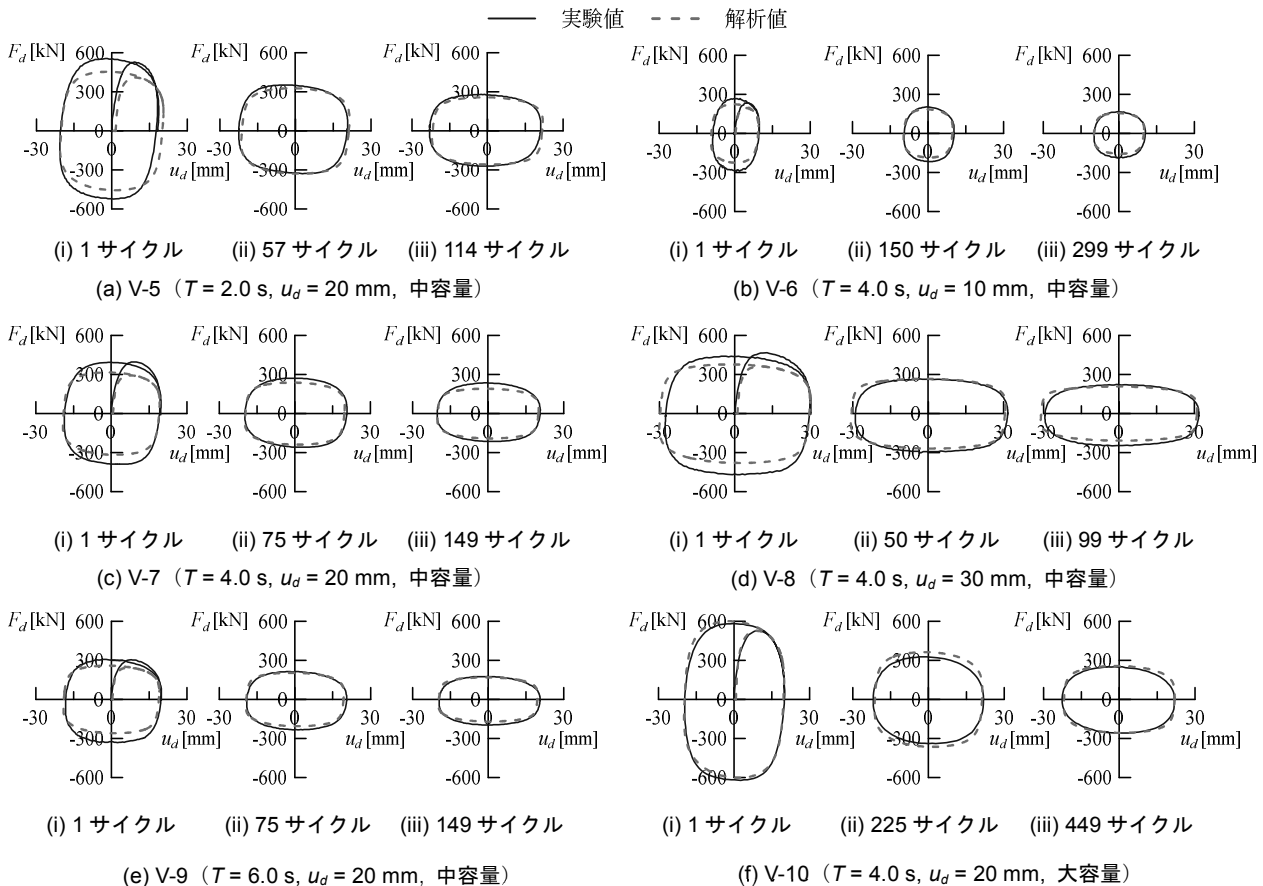
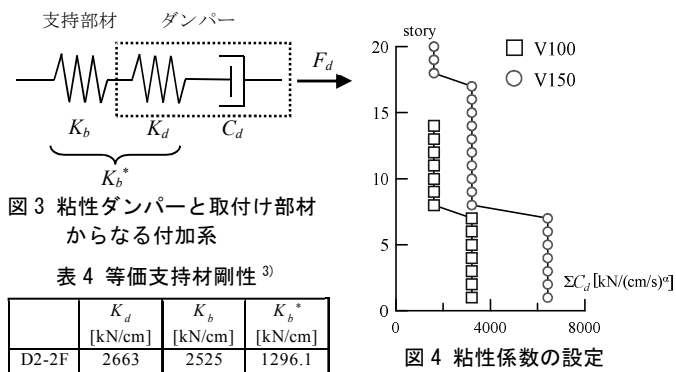


図2 実験値と解析値の比較

質点の等価せん断モデルを用いる。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1%となるレーリー型減衰とする。なお、主架構の弾性範囲を大きく超える応答となる場合があるが、繰返しによるダンパーの性能低下が建物応答に与える影響を評価することが本報の目的であるため、主架構を弾性として解析を行う。

3.2 ダンパー配置

制振建物の時刻歴応答解析において用いる粘性ダンパーは、長時間正弦波加振実験において用いた D2-2F (表1) とする。なお、以降で用いる粘性ダンパーの α および $C_d^{(0)}$ は、表3に示す値ではなく、規格値³⁾(表1)を使用している。本報では、図3のようにダンパーと支持部材は直列にモデル化し、内部剛性 K_d と支持部材剛性 K_b をまとめて等価支持材剛性 K_b^* で表す(表4)³⁾。図4に高さ方向における粘性ダンパーの粘性係数を示す。本報では2種類のダンパー配置を設定した。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⁵⁾。レベル2相当の地震動としてコーナー周期 $T_c = 0.64s$ 以降の領域で、速度応答スペクトル $S_v = 100cm/s$ ($h=5\%$)となる模擬地震動波形 ART HACHI(位相特性: HACHINOHE 1968 EW)を採用した。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⁶⁾を無視してダンパー量を設計した⁷⁾。

3.3 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期地震動である三の丸波 (SAN)⁸⁾、南海トラフ4連動地震(工学的地盤)⁹⁾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5(a),(b)に擬似速度応答スペクトル ρS_v ($h=5\%$)、エネルギースペクトル V_E ($h=10\%$)をそれぞれ示す。図より、主架構の1次固有周期(2.69s)付近に ρS_v 、 V_E のピークを有し、いずれもレベル2地震動 (ART HACHI) より大きい値を有する地震動であることが分かる。

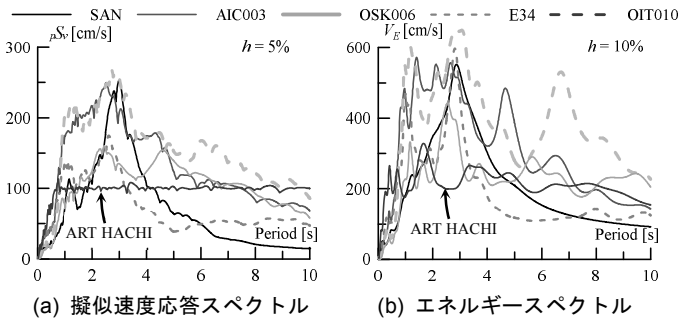
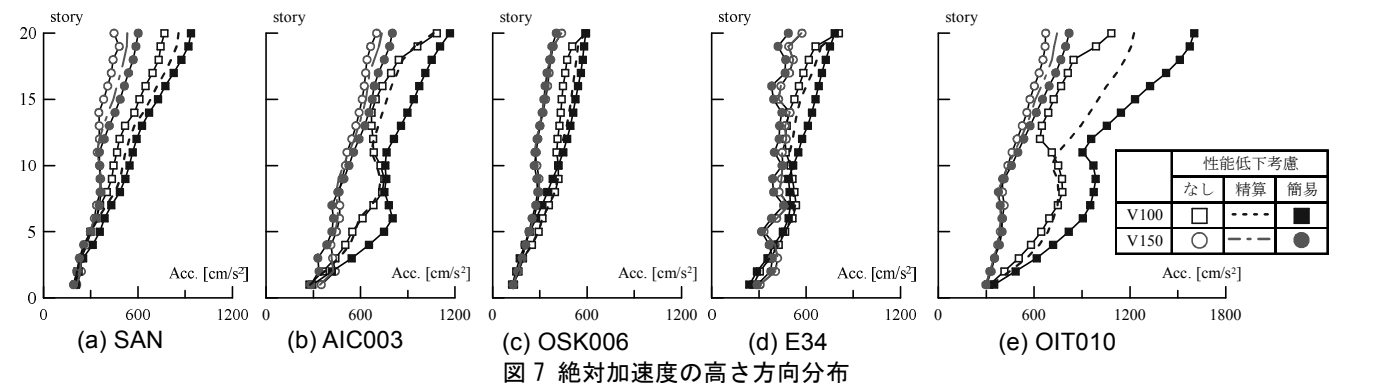
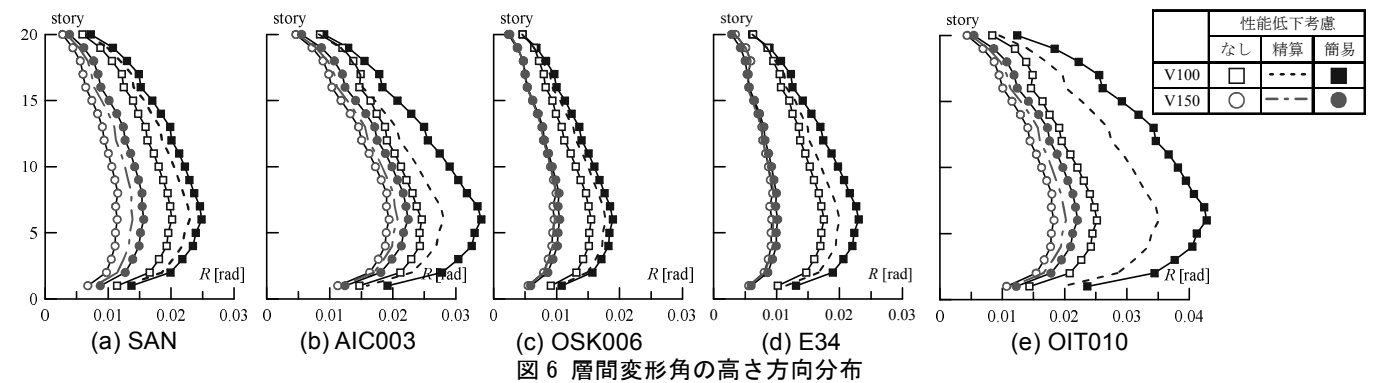


図5 地震動のスペクトル

3.4 時刻歴応答解析結果

図6, 7に時刻歴応答解析より得られた層間変形角および絶対加速度の最大値をそれぞれ示す。はじめに、V100およびV150のダンパー設定したモデルに対して、特性値低下を考慮せず粘性係数の初期値 $C_d^{(0)}$ のまま解析を行ったもの(以降、考慮なし)と、2章で示した繰返しによる効果を考慮し、粘性係数をステップごとに低下(付図A)させて解析を行った粘性ダンパーの解析モデル(以降、精算法)の結果(図6,7の破線)を比較する。図6より、V150のSAN, AIC003, OIT010において、繰返しによる粘性ダンパーの性能が低下すること



で、精算手法が考慮なしに比べて層間変形角が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、考慮なしと精算手法は同等の結果となった。なお、レベル 2 地震動として用いた ART HACHI では、地震動による建物への入力エネルギーが他の長周期地震動と比較して小さいため (図 5(b)), ダンパーの性能低下が殆ど起こらないことを確認している¹⁰⁾。ダンパー量の少ない V100 において簡易手法と考慮なしを比較すると、入力エネルギーの大きい AIC003, OIT010 での著しい応答の増加が見られる。図 7 の絶対加速度においても同様の傾向が見られる。ダンパー量が少ない場合、ダンパー 1 基当たりで吸収するエネルギーが多くなるためダンパーの性能低下が顕著となる。その場合、ダンパーの 1 サイクル当たりのエネルギー吸収性能も低下するため応答が増大する。少ないダンパー量で設計している制振構造では、長周期地震動時に応答が増大するため注意が必要である。

次に、考慮なしの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(1)) から、各層の粘性係数の低下率 λ (式(2)) を評価し (図 8), 粘性係数の初期値 $C_d^{(0)}$ を λ 倍低下させて、その値を初期値 (一定) として (付図 A), 再度時刻歴応答解析を行ったもの (以降、簡易手法) と精算手法を比較する。図 6, 7 より、層間変形角、絶対加速度ともに精算手法は考慮なしと簡易手法の間の応答となることが確認できる。簡易手法は、繰返しによる粘性ダンパーの特性値が変化する解析モデルが無い場合でも、その影響を考慮した応答評価が可能であるため有用であるが、応答が大きい場合に過大評価となる場合もある。一方で、精算手法はより詳細な設計を行うことが可能である。

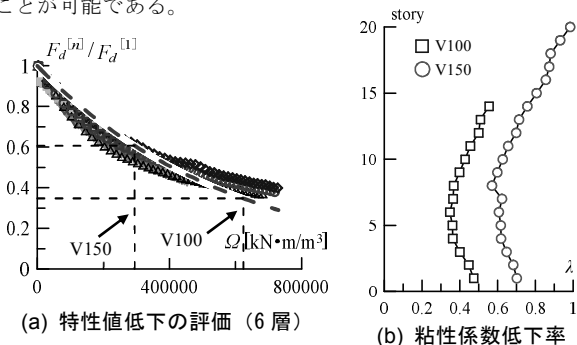


図 8 簡易手法による粘性係数の低下 (SAN 入力時)

4. まとめ

筆者等は、流動抵抗式の実大粘性ダンパーの長時間正弦波加振実験の結果から、粘性ダンパーの繰返しによる特性値の低下はダンパーの累積エネルギー吸収量を粘性体の容積で除したエネルギー密度

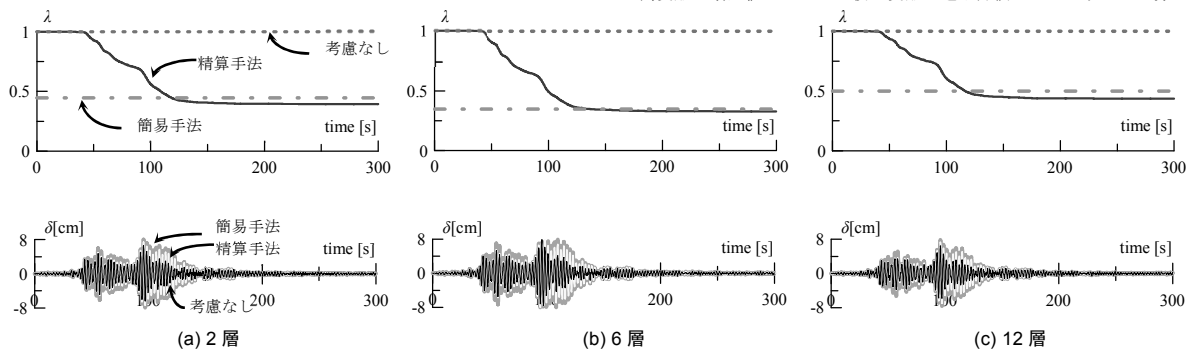
で統一的に評価できることを示した²⁾。そこで本報では、エネルギー密度を利用して粘性ダンパーの性能低下を考慮した解析モデルを提案し、実験結果を再現できることを示した。さらに、繰返しによる粘性ダンパーの性能低下を考慮しない場合の応答と提案した解析モデルによる応答 (精算手法) を比較した。少ないダンパー量で設計された制振構造は、長周期地震動を受けた際にダンパーの性能低下の影響を受けて応答が増大することが分かった。また、提案した解析モデルを用いずに、性能低下の影響を簡易的に考慮する手法 (簡易手法) を提案した。簡易手法は繰返しによるダンパーの性能低下を考慮した解析モデルが無い場合でも、性能低下を考慮した応答を評価できるが、応答が大きい場合には精算手法に比べて過大評価になる。一方で、精算手法はより詳細な設計を行うことが可能である。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル、第 3 版、2013.11
- 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, pp.275-283, 2017.3
- 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) 日本建築学会：鋼構造制振設計指針, 第 1 版, 2014.11
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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 4 20 質点モデルによる時刻歴応答解析結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.613-614, 2017.8
- 8) 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用入力地震動検討部会, pp.1-48, 2004.6
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 岡田亮佑, 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 3 長時間繰返しによる特性値低下を考慮した解析モデルの提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.611-612, 2017.8

付録 A

付図 A(a)~(c)に、V100 での SAN 入力時における、考慮なし、精算手法および簡易手法での粘性係数の低下率 λ (上段) と層間変形 δ (下段) を比較した結果を示す。結果より、精算手法における λ の時間変化に着目すると、層間変形が最大値を迎えた直後に急激に λ が低減していることが確認できる。粘性係数の低下率 λ の低下は、層間変形が最も大きい 6 層で大きく、上層になると層間変形も小さいため λ の低下も少ない。特性値低下を考慮していない場合では精算手法に比べて、層間変形の最大値およびその後の変形を過小評価してしまうことが分かる。



付図 A 粘性係数の低下率 (上段) と層間変形 (下段) の時刻歴 (V100, SAN 入力時)

[2017 年 6 月 6 日原稿受理 2017 年 7 月 31 日採用決定]