

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	粘性ダンパーの性能低下を考慮した簡易応答評価手法
Title(English)	
著者(和文)	岡田亮佑, 佐藤大樹
Authors(English)	Ryousuke Okada, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 285-288
Citation(English)	, , , pp. 285-288
発行日 / Pub. date	2018, 3

## 粘性ダンパーの性能低下を考慮した簡易応答評価手法

構造—振動

正会員 ○ 岡田亮佑<sup>\*1</sup>〃 佐藤大樹<sup>\*2</sup>

制振構造 粘性ダンパー 超高層建築物

長周期地震動 性能低下 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（関東、中京圏、大阪圏）等で発生することが予想されており、長周期地震動が固有周期の比較的長い超高層建築物などへ及ぼす影響が懸念されている。これに対し、国土交通省は2016年6月に、「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について（技術的助言、国住指第1111号）」を通知し、設計用長周期地震動として策定した基整促波を定めている<sup>1)</sup>。一方、本研究で対象とする粘性ダンパーは、温度依存性を持ち、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、ダンパーの性能が大きく低下する可能性がある<sup>2)</sup>。

これらのことから、基整促波におけるダンパーの性能低下までを考慮した制振構造の設計が求められる。

文献3)では、時々刻々と性能低下を考慮した解析モデルを用いた応答評価手法と、繰返しによる性能低下を考慮しない通常の粘性ダンパーモデルを用いた場合のエネルギー密度を利用した簡易な応答評価手法の2つの手法による解析・評価を行っている。簡易な応答評価手法では、繰返しによる性能低下を考慮した粘性ダンパーの解析モデルが無い場合でも容易にその影響を加味した応答を評価できるが、応答が大きい場合には過大評価となってしまう。そこで本報では、この簡易な応答評価手法をより精緻な評価が可能なものにするため、性能低下を考慮しない場合による時刻歴応答解析結果との平均値を用いた検討を行う。

## 2. 特性値低下を考慮した解析モデル

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<sup>4)</sup>。また、様々な条件における正弦波加振実験より得られた、エネルギー密度 $\Omega^{(n)}$ （後述）によるダンパー最大力の低下率の変化を図1に表す<sup>4)</sup>。

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<sup>2)</sup>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。

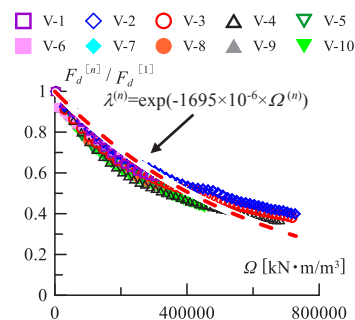


図1 ダンパー力の低下率

図1中の破線は式(1)に示した粘性係数の低下率 $\lambda^{(n)}$ を示しており、 $\lambda^{(n)}$ 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。

$$\lambda^{(n)} = \exp(-a_0 \cdot \Omega^{(n)}) \quad (1)$$

ここに、 $a_0$ はエネルギーの累積吸収による低下の程度を表す係数であり、同じ流動抵抗式の粘性ダンパーでも規格によっては異なる値をとる。本報では、実験結果より得られた $1.695 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{kN}$ <sup>4)</sup>を用いる。エネルギー密度 $\Omega^{(n)}$ は式(2)で定義され、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。

$$\Omega^{(n)} = \frac{\sum W_d^{(n)}}{V_V} \quad (2)$$

ここで、 $\sum W_d^{(n)}$ はダンパーの累積エネルギー吸収量、 $V_V$ 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。上記の実験結果を踏まえて、長時間繰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、任意の解析時間ステップ $n$ における粘性ダンパーの荷重 $F_d^{(n)}$ は、式(3)で表される<sup>5)</sup>。

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

ここで、 $\alpha$ 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での $n$ 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。

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

この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-6, V-10)<sup>5)</sup>を示す。なお、解析に用いる粘性ダンパーの  $\alpha$  および  $C_d^{(0)}$  は表1の値を用いて算出した。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、いずれの実験においても、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されている。<sup>3)</sup>

表1  $\alpha, C_d$  の近似式と値<sup>4)</sup>

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

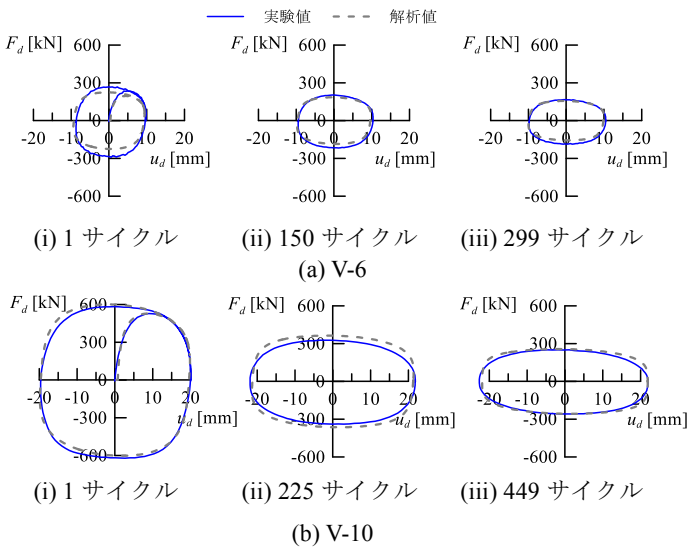


図2 実験値と解析値の比較

### 3. 制振建物の時刻歴応答解析

#### 3.1 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中京圏の長周期地震動である CH1, 中京圏の長周期地震動である大阪圏の長周期地震動である OS1<sup>1)</sup>を採用する。これら2波は、文献1)で基整促波として作成された地震動の中でも特に入力エネルギーの大きい地震動である。また、ダンパー設計用の入力地震動として、海溝型地震に分類される1968年の十勝沖地震における HACHINOHE EW 成分 (以下、この模擬波を ART HACHI と呼ぶ。)を用いる。図3に加速度波形、図4(a), (b)に擬似速度応答スペクトル  $\rho S_v$  ( $h = 5\%$ )、エネルギースペク

トル  $V_E$  ( $h = 10\%$ ) をそれぞれ示す。図3中には、最高加速度  $Acc_{max}$  とともに実効地震継続時間  $\epsilon t_0$ <sup>8)</sup>を併せて示す。図4より、主架構の1次固有周期  $T_f$  (2.69 s) 付近では、CH1, OS1ともにレベル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。

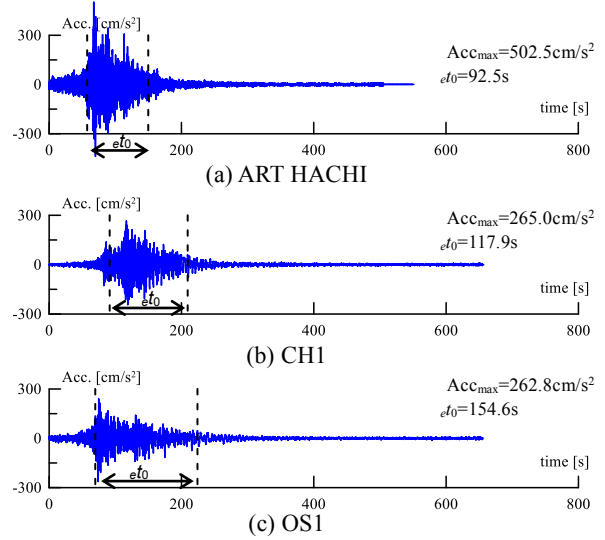


図3 加速度波形

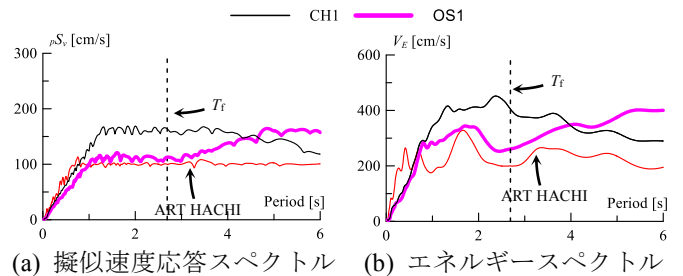


図4 地震動スペクトル

### 3.2 建物モデルの概要

本報では、建物高さ 81.7 m の 20 層の鋼構造建物を対象とし<sup>9)</sup>、20 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  $T_f$  は 2.69 s 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、粘性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。

### 3.3 ダンパー概要

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<sup>4)</sup>において用いた D2-2F の値 (表2) を使用している。なお、粘性ダンパーの  $\alpha, C_d$  値は規格値である 0.38, 98 [kN/(mm/s)<sup>n</sup>] を使用している。図5にダンパーと取付け部材からなる付加系を示す。

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 $\theta_0$ (°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	D3-2F
V-10	4.0	20	1800	450	26	

※D3-2Fのみ大容量、それ以外は中容量

図5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3)<sup>5)</sup>。ダンパーの取付け角度は全層で  $30^\circ$  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<sup>2)</sup>。

図6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相当の地震動であるART HACHI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<sup>10)</sup>。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<sup>11)</sup>を無視して解析を行っている。

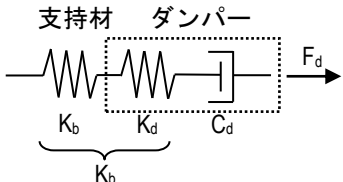


図5 粘性ダンパーと取付け部材からなる付加系

表3 等価支持材剛性<sup>5)</sup>

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

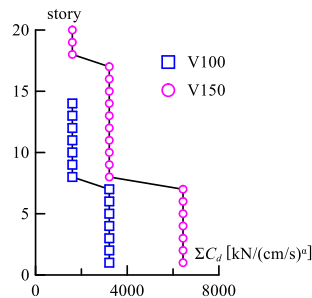


図6 粘性係数の設定

### 3. 4 長周期地震動を用いた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に着目し検討を行っていく。

はじめに、図7に特性値低下を考慮せず解析を行ったもの(性能低下考慮なし)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  $\Omega^{(n)}$  (式(2))から、実験結果(図1)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(以降、簡易手法)の結果を示す<sup>12)</sup>。図7より、V150において、簡易手法が性能低下考慮なしに対して、CH1では1.3倍、OS1では応答は大きく増大せずほぼ同様の結果となった。一方、ダンパー量の少ないV100においては、CH1では1.2倍、OS1では1.1倍に増大している。以上より、入力エネルギーのより大きいCH1において、性能低下考慮なしに対して簡易手法では著しい応答増加が見られることが分かる。

次に、簡易手法に対して、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7に破線で示す。結果より、精算手法は性能低下考慮なしと簡易手法の間に位置することが確認された。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。

	性能低下考慮		
	なし	精算	簡易
V100	□	⋯	■
V150	○	⋯	●

+ : ダンパーなし

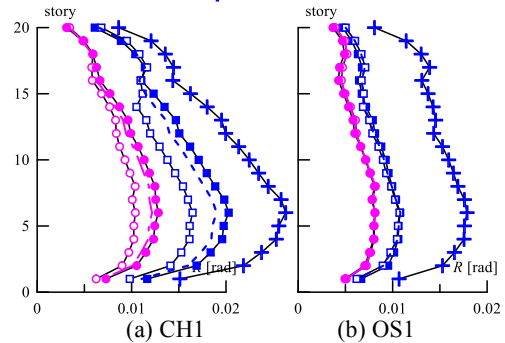


図7 層間変形角の高さ方向分布

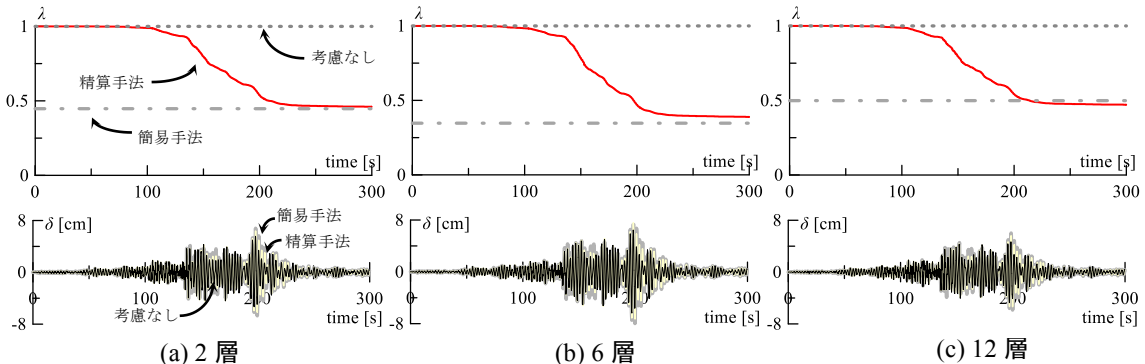


図8 粘性係数の低下率(上段)と層間変形(下段)の時刻歴(V100, CH1)

最後に、V100 での CH1 入力時における性能低下考慮なしと精算手法、簡易手法での層間変形 (2, 6, 12 層) を比較した結果と、粘性係数の低下率 $\lambda^{(n)}$ の時間変化を図 8 に示す。結果より、 $\lambda^{(n)}$ の時間変化 (図 8、上段) に着目すると、性能低下考慮なし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。簡易手法と精算手法を比較すると、2, 6, 12 層全てにおいて $\lambda^{(n)}$ の低下が少なくなっている。これは、特性値低下によって層間変形が大きくなっているためと考えられる。また、層間変形の時刻歴 (図 8、下段) に着目すると、簡易手法では精算手法に比べて全ステップにおいて応答が大きく、より安全側に評価できていることが分かる。これは簡易手法の粘性係数が、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  $\Omega^{(n)}$  を元に算出され、時々刻々と粘性係数を変化させている精算手法に比べ、より過大に特性値低下を考慮しているためである。

#### 4. 平均値による簡易手法の改善

簡易手法では、繰返しによる性能低下を考慮した粘性ダンパーの解析モデルが無い場合でも容易にその影響を加味した応答を評価できるが、応答が大きい場合には過大評価となってしまう。そこで、簡易手法をより精緻な設計手法とするため、性能低下を考慮しない場合による層間変形角結果と簡易手法による結果の平均値 (以下、 $R_M$  と呼ぶ。) をとる。図 9 に精算手法による層間変形角結果と、平均値  $R_M$  の高さ方向分布を示す。なお、図 7(b) より OS1 においては、ダンパーの性能低下による建物応答への影響がほとんど見られないため、CH1 の結果のみ示す。図 9 より、V100, V150 ともに 精算手法に対する平均値  $R_M$  がほぼ 0.9~1.1 倍程度であり、平均値  $R_M$  と精算手法でそれほど差がないことが分かった。しかし、平均値  $R_M$  による評価では、層によっては精算手法による評価より危険側 (平均値  $R_M \leq$  精算手法による層間変形角結果) となってしまう場合があることも確認された。

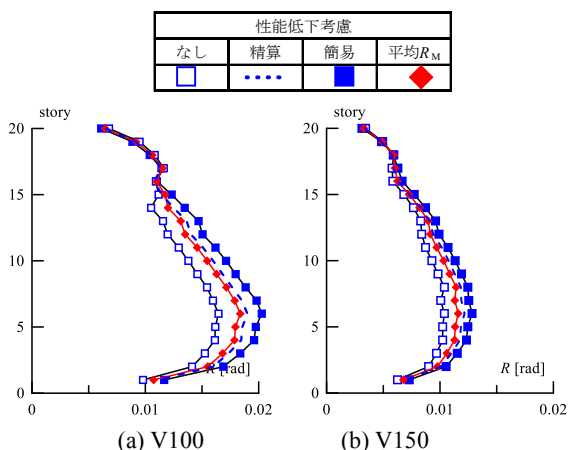


図 9  $R_M$  と  $R_A$  の高さ方向分布 (CH1)

#### 5. まとめ

本報では、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、提案した解析モデルによる応答 (精算手法) および、提案した解析モデルを用いずに、性能低下の影響を考慮した応答 (簡易手法) を比較した。少ないダンパー量で設計を行った制振構造は、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。

簡易手法は容易に繰返しによる性能低下の影響を加味した応答を評価することが可能であるが、応答が大きい場合には過大評価になる。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。そこで、簡易手法をより経済的な設計手法とするため、性能低下を考慮しない場合による層間変形角結果と簡易手法による結果の平均値を取って検討した。検討結果より、平均値による評価では、繰返しによる性能低下を考慮した粘性ダンパーの解析モデルが無い場合でも容易にその影響を加味した応答を評価でき、さらに精解値 (精算手法による結果) をおおよそ予測することが出来る。しかし、層によっては精解値より安全側に評価できるとはいえないことも確認された。今後は、入力地震波や建物モデル、ダンパー量等の条件を変え、平均値による評価の妥当性を考察していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 中川博人,海溝型巨大地震に対する設計用長周期地震動の作成に関する検討,第十二回日中建築構造技術交流会 神戸
- 2) 日本地震構造協会: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル, 第 3 版, 2013.11
- 3) 佐藤大樹, 長山祥, 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の性能低下を考慮した制振構造建物の応答評価, 日本建築学会大会技術報告集, 24(56), 59-62, 2018.2
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) Trifunac, M.D. and Brady, A.G.: A Study on Duration of Strong Earthquake Ground Motion., Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.65, No.3, pp.581-626, June 1975
- 9) 日本建築学会: 鋼構造制振設計指針, 第 1 版, 2014.11
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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 学生会員 東京工業大学 大学院生

\*2 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)