

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	粘性ダンパーにおいて置換正弦波の有効性に関する検討
Title(English)	Effectiveness of equivalent-sinusoidal wave method of viscous damper
著者(和文)	劉錫媛, 佐藤大樹, Alex Shegay
Authors(English)	Xiyuan Liu, Daiki Sato, Aleksey Vadimovich Shegay
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 297-300
Citation(English)	, , , pp. 297-300
発行日 / Pub. date	2022, 3

粘性ダンパーにおいて置換正弦波の有効性に関する検討

発表部門—細分類

正会員 ○ 劉錫媛^{*1}正会員 佐藤大樹^{*2}// Alex Shegay^{*3}

粘性ダンパー 1 置換正弦波 2 有効性 3

性能低下 4 長周期地震動 5

1.はじめに

正弦波加振実験による粘性ダンパーの性能低下を確認した。しかし、実際の地震波はランダム波である。そのようなランダム波によるダンパーの特性を把握したい場合、正弦波置換法が有効である。正弦波置換法^[1]とは、ランダム波に内在する様々なパラメータを、共通の振幅と振動数で表される正弦波に置換することで、様々なランダム波を用いることなく、正弦波のみでダンパーの特性を包括的に把握できる手法である。ランダム波による長時間の加振実験は、ランダム波の選定が困難であることで、アクチュエータの性能により、一般的に実験が難しい場合が多い。

また、ランダム波での結果は、ある地震波に対する特解であるため、その結果のみでダンパーの性能を評価するのは難しい。それに比べて、置換正弦波は、実験が非常に簡単であり、多数正弦波による実験結果を用いて、ランダム波振動時のダンパー特性が評価できる。しかし、粘性ダンパーでは正弦波置換法が有効であるかはまだ確認されていない。

本報の目的は、長周期地震動を受けた場合、ダンパーの変位波形に正弦波置換法を用いて置換正弦波を作成し、ランダム波と置換正弦波を用いて、加振実験を行い、正弦波置換法の有効性を確認する。そして、置換正弦波によるダンパーの性能特性を評価する。

2.粘性ダンパー

本報では、実験用粘性ダンパーに封入した粘性体の容量(size) V_V 、速度べき乗指数 α 、軸方向粘性係数 $\hat{C}_d$ は Table 1^[2]を使用している。Fig.1 にダンパーの解析モデルを示す^[3]。粘性ダンパーと取付け部材は直列に繋がるため、内部剛性 $\hat{K}_b$ と取付け部材剛性 $\hat{K}_d$ をまとめて等価支持材剛性 $\hat{K}_b^*$ で表す^[3]。ダンパーの基本特性式は、Eq.(1)のように表される^[3]。

Table 1 Parameter of viscous damper

Size	α	V_V [mm ³]	$\hat{C}_d$ [kN·(s/mm) ^{α}]	$\hat{K}_d$ [kN/cm]	$\hat{K}_b$ [kN/cm]	$\hat{K}_b^*$ [kN/cm]
MRI50	0.38	8.34×10^6	98	2663	2525	1296

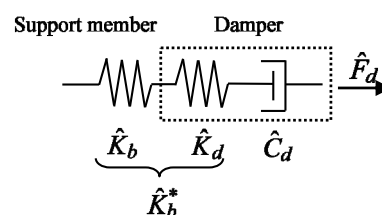


Fig.1 Damper and support member

$$\hat{F}_d^{(n)} = \hat{C}_d^{(n)} \cdot \left| \dot{u}_d^{(n)} \right|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{u}_d^{(n)}) \quad (1)$$

ここで、 n はステップ数である

粘性ダンパーは長時間繰返しによる、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、封入した粘性体の温度上昇とともにダンパーの特性が低下する。繰返し効果を考慮した場合での $\hat{C}_d^{(n)}$ は Eq.(2)より算出される

^[2]。長時間正弦波加振実験より、繰返しによる粘性係数の低下率 λ はダンパーの吸収エネルギー累積値を粘性体の容積 V_V で除したエネルギー密度 Ω で統一的に表現できる (Fig.2^[3])。

$$\hat{C}_d^{(n)} = \lambda^{(n)} \cdot \hat{C}_d^{(0)} \quad (2)$$

$$\lambda^{(n)} = \exp(-a_0 \cdot \Omega^{(n)}) \quad (3)$$

ここで、 $\hat{C}_d^{(0)}$ は軸方向の粘性係数の初期値である。また、 a_0 は繰返しによる低下の程度を表す係数であり、本報で a_0 は実験より得られた値 $1.695 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{kN}^{[3]}$ を用いる。

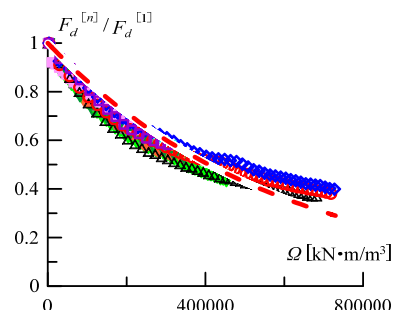


Fig.2 Relationship between decrease ratio and energy

Effectiveness of equivalent-sinusoidal wave method of viscous damper

Xiyuan LIU1, Daiki SATO2, Alex SHEGAY3

エネルギー密度 Ω は1本あたりダンパーのエネルギー吸収量を用いて、Eq.(4)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^[2]。

$$\Omega^{(n)} = \frac{w_d^{(n)}}{V_V} \quad (4)$$

3 実験概要および置換正弦波の作成

3.1 実験概要

本実験では、ダンパー長さ $l_d = 606\text{mm}$ 、断面積 $A_d = 12880\text{mm}^2$ 、ブレース長さ $l_b = 2864\text{mm}$ 、断面積 $A_b = 8320\text{mm}^2$ 、全体長さ $l = 4706\text{mm}$ の粘性ダンパーを試験体とする。Fig.3に本実験の試験体セットアップ図面、Fig.4に試験体セットアップ写真を示す。ダンパーの中に粘性体の温度を直接計測できないため、シリンダー表面の温度を計測する。熱電対の添付位置は、ピストンの左側位置を基準に+20mmとし($\theta 1$)、ストロークの中心位置を基準に $\pm 40\text{mm}$ 、 $\pm 80\text{mm}$ 、 $\pm 100\text{mm}$ とし($\theta 2 \sim \theta 7$)、ストロークの右側位置を基準に-20mm($\theta 8$)とし、ブレースの中心位置を基準に-200mm($\theta 9$) (载荷側を正)としている(9箇所)。 θr は室温のために添付した熱電対である。歪ゲージはブレースの中央部とその $\pm 100\text{mm}$ の位置(全3断面)の上下左右(4箇所)に添付した。ダンパーの変位・荷重・温度の計測の時間刻みは0.01sで加振開始から実験終了まで連続で測定した。なお、周辺の温度は $22 \pm 1^\circ\text{C}$ とする。

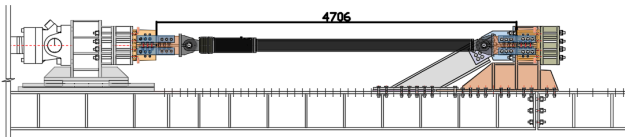


Fig.3 Setup of experiment



Fig.4 Picture of the setup of damper

3.2 ランダム波の選択

本報では、建物高さ81.7m、20層の部材モデルを使用する。主架構(X方向)の1次固有周期 T_f は2.29sである。減衰はレーリー型減衰とし、構造減衰(X方向)は1次と2次でそれぞれ1.5%、1.95%とする^[6]。主架構は弾性とする。

置換正弦波の有効性を検討するために、2種の長周期地震動OS1^[5]およびCH2^[5]を採用する。Fig.5(a)(b)に擬似速

度スペクトルおよびエネルギースペクトルを示す。また、アクチュエータの性能を考慮すると、加振できない場合もあるため、粘性ダンパーの設置は2種がある。Fig.6(a)にダンパー設置を示す。設置1、2に200本、168本のダンパーを設置する。

Fig.7(a)にダンパー設置1でOS1を受けた場合変位、(b)にダンパー設置2でCH2を受けた場合層間変形角を示す。Fig.7(a)より、6層に設置したダンパーの変位が大きい、アクチュエータが連続加振できないので、15層に設置したダンパーを実験に使用する(後、Case1と呼ぶ)。時刻解析より、ダンパーのエネルギー吸収量は約429kN・m、Eq.(3)で性能低下約8%である。Fig.7(b)より、Fig.7(a)と同様に、CH2を受けた場合、17層に設置したダンパーを実験に使用する(後、Case2と呼ぶ)。時刻解析より、ダンパーのエネルギー吸収量は約583kN・m、Eq.(3)で性能低下約12%である。

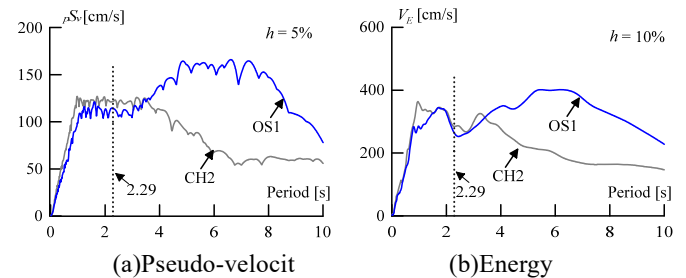


Fig.5 Response spectrum

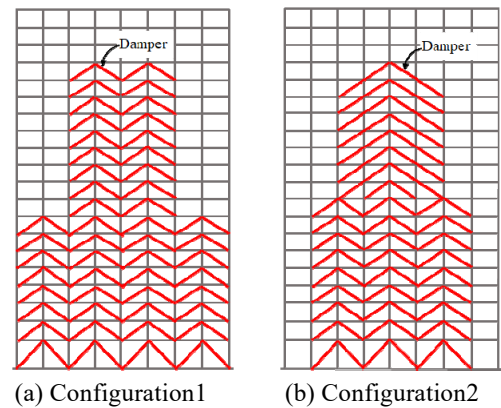


Fig.6 Configuration of damper

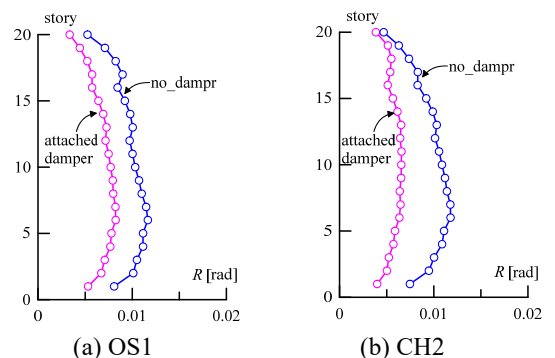


Fig.7 Story drift angle

3.2 置換正弦波の作成

ランダム波を正弦波に置換した場合の振幅 A_r および振動数 f_r はランダム振動時のダンパーの変位の実効継続時間 $e t_0$ (ダンパー変位波形の二乗累加値が全体の 5~95% となる時間) [4]における標準偏差 σ_d および繰返し数 N_0^+ (変位波形が 0 軸を正の傾きで超える回数) を用いて Eq.(5)よりそれぞれ求めることができる[1]。

$$A_r = \sqrt{2} \cdot \sigma_d \quad f_r = N_0^+ / e t_0 \quad (5a,b)$$

3.2.1 ランダム波のインプットとアウトプット

Fig.8(a)に Case1 で OS1[5]における時刻歴解析より得られたダンパーの変位, (b)にランダム波加振による計測したダンパー全体変位を示す。Fig.8 より, ダンパーの全体変位の最大値(12.80mm)は入力したランダム波(18.61mm)に比べて, 約 0.69 倍である。Fig.9 に Case2 で CH2[5](ランダム波)を受けた場合, ダンパーの変位および加振実験で出力したダンパー全体変位を示す。Fig.9 より, ダンパーの全体変位の最大値(14.67mm)は入力したランダム波(20.14mm)に比べて, 約 0.73 倍である。

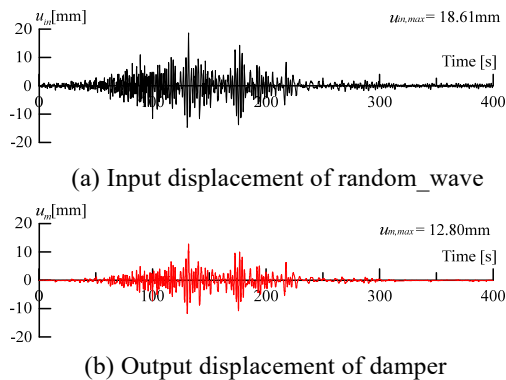


Fig.8 Compare of displacement of history and output(Case1)

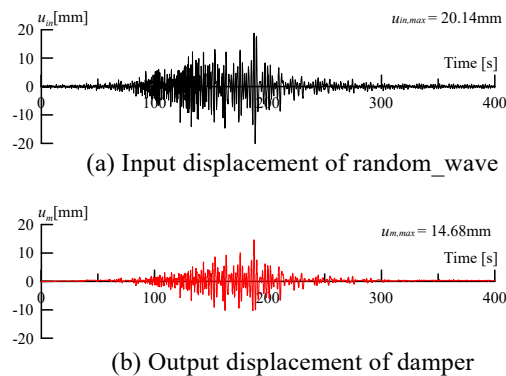


Fig.9 Compare of displacement of input and output(Case2)

3.2.2 正弦波の作成

計測したダンパーの全体変位を用いて, 置換正弦波を作成する。Fig.10 に OS1 におけるダンパーの変位波形を示す。(a)は OS1 (ランダム波) 加振より得られたダンパー全体の变位波形, (b)は倍率(1.4)で拡大した変位波形の置換正弦波を示す。Fig.11 に CH2 におけるダンパーの変位波形を示す。(a)は CH2 (ランダム波) 加振より得られ

た変位波形, (b)は倍率(1.4)で拡大した変位波形の置換正弦波を示す。

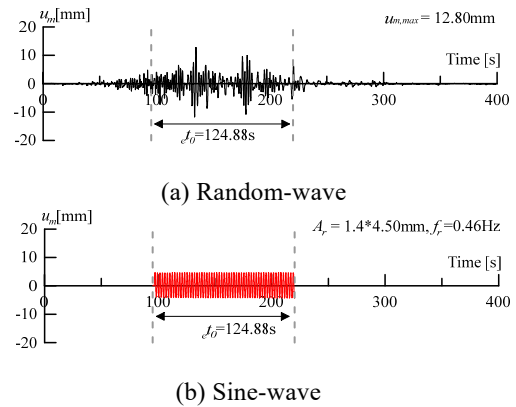


Fig.10 Compare of displacement (Case1)

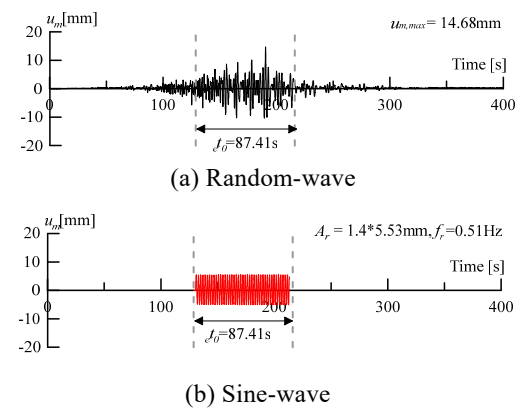


Fig.11 Compare of displacement (Case2)

4 置換正弦波有効性およびダンパーの性能評価

4.1 置換正弦波の有効性

Case1 では, ランダム波および置換正弦波加振する時, ダンパーの初期温度 θ_4 は 21.7°C である。Fig.12(a)に Case1 においてダンパーのエネルギー吸収量 w_d , (b)にダンパー温度 θ_4 の時刻歴を示す。Fig.12(a)より, ランダム波加振終了時の w_d は約 160kN·m, 置換正弦波で加振終了時($e t_0$)の w_d は約 159kN·m, エネルギー吸収量はほぼ一致していることが確認できる。Fig.12(b)より, ランダム波加振終了時($e t_0$)の温度は約 26.7°C, 正弦波の場合は約 25°C, 置換正弦波の方が小さいが, 誤差は 2°C 程度であり, ほぼ同様である。

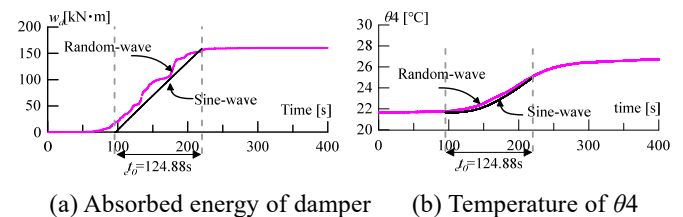
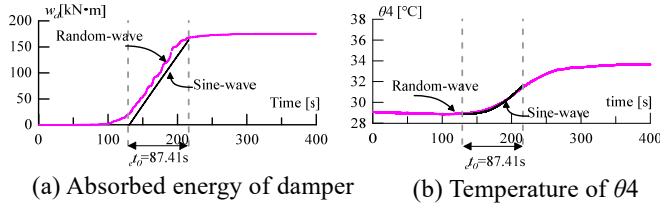


Fig.12 Compare of absorbed energy and temperature (Case1)

Case2 では、ランダム波および置換正弦波加振する時、ダンパーの初期温度温度(04)は 29.1℃である。Fig.13(a)に Case2 においてダンパーのエネルギー吸収量 w_d , (b)にダンパー温度 θ_4 の時刻歴を示す。Fig.13(a)ランダム波加振終了時の w_d は約 175kN・m, 置換正弦波で加振終了時(t_0)の w_d は約 164kN・m, エネルギー吸収量はほぼ一致していることが確認できる。正弦波の方が小さいが、誤差は約 7%ことであり、ほぼ一致していることが確認できる。Fig.13(b)より、ランダム波加振終了時(t_0)の温度は約 33.6℃, 正弦波の場合は約 31.6℃, 誤差は 2℃程度であり、加振終了時(t_0)の温度はほぼ同様である。



(a) Absorbed energy of damper (b) Temperature of 04
Fig.13 Compare of absorbed energy and temperature (Case2)

4.2 置換正弦波でダンパーの性能評価

4.1 節では、置換正弦波の有効性を確認した。しかし、ランダム波でダンパーの性能変化が難しいので、本節では、置換正弦波を用いて、ダンパーの性能変化を評価する。

1 サイクルごとのダンパー力およびエネルギー吸収量を Eq.(6)(7)により算出する。 n サイクルの最大ダンパー力 $F_d^{[n]}$ は、Fig.14 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 $2n+1$ の絶対値の平均より算出している。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。() はステップ、 $\diamond$ は半波、[] はサイクルを意味する。

$$F_d^{[n]} = \frac{|hF_{d,max}^{(2n)}| + |hF_{d,max}^{(2n+1)}|}{2} \quad (6)$$

$$w_d^{[n]} = \sum_{i=1}^{N_D} \frac{(F_d^{(i)} + F_d^{(i+1)}) \cdot (u_d^{(i+1)} - u_d^{(i)})}{2} \quad (7)$$

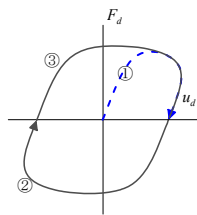


Fig.14 Half wave

Fig.15 に Case1 で置換正弦波を受けた場合、最初のサイクル、最後サイクルのループを示す。Fig.15 より、ダンパーの性能が低下していることがわかる。Fig.16 にダンパーの性能低下とサイクルの関係を示す。Fig.16 より、加振終了時、ダンパーの性能が約 15%低下していることが確認できる。置換正弦波でダンパーの性能低下が評価できる。

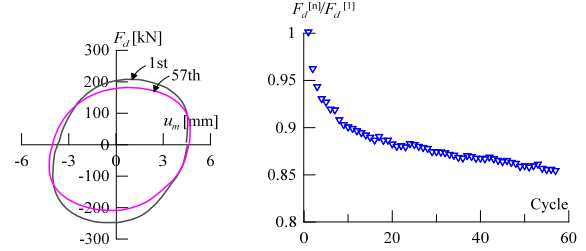


Fig.15 Loop (Case1) Fig.16 Decrease ratio (Case1)

Fig.17 に Case2 で置換正弦波を受けた場合、最初のサイクル、最後サイクルのループを示す。Fig.17 より、ダンパーの性能が低下していることがわかる。Fig.18 にダンパーの性能低下とサイクルの関係を示す。Fig.18 より、加振終了時、ダンパーの性能が約 13%低下していることが確認できる。Fig.16 と同様に、置換正弦波でダンパーの性能低下が評価できる。

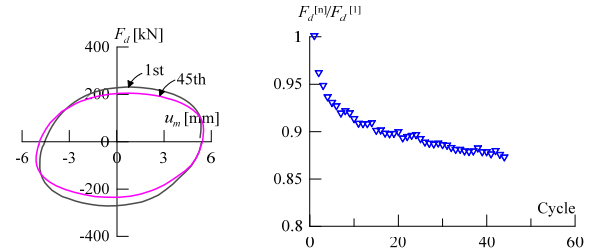


Fig.17 Loop (Case2) Fig.18 Decrease ratio(Case2)

5.まとめ

本報では、粘性ダンパーにおいて、置換正弦波の有効性を検討し、置換正弦波を用いて、ダンパーの性能が評価した。

実大粘性ダンパー加振実験において、ランダム波と置換正弦波によるダンパーのエネルギー吸収量およびダンパーの温度変化はほぼ一致しているため、正弦波置換法は有効であることが確認できた。置換正弦波を用いて、ダンパーの性能低下が評価できる。

参考文献

- [1] 佐藤大樹, 笠井和彦: 長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波による評価手法, 構造工学論文集, Vol.53B, pp.67-74, 2007.3
- [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] 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] Trifunac M.D. and Brady A.G.: A study of the Duration of Strong Earthquake Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.65, No.3, pp.581-626, 1975.6
- [5] 建築研究所: 長周期地震動対策に関する技術資料・データ公開特設ページ, <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html> (2017.6.30)
- [6] 日本建築学会: 鋼構造制振設計指針, 第 1 版, 2014.1

*1 東京工業大学大学院

*2 東京工業大学 准教授・博士(工学)

*3 東京工業大学 助教・Ph.D

*Graduate Student, Tokyo Institute of Technology *1

* Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng *2

* Assistant Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph.D *3