論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	長時間の風外力における実大粘弾性ダンパーの解析手法の提案，その1 E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その115
Title	
著者(和文)	佐藤大樹, 杉山暢方, 笠井和彦, 松田和浩
Authors	Daiki Sato, Nobumasa Sugiyama, KAZUHIKO KASAI, Kazuhiro Matsuda
出典 / Citation	日本建築学会大会学術講演梗概集, vol. B-2, , pp. 795-796
Citation(English)	, vol. B-2, , pp. 795-796
発行日 / Pub. date	2015, 9
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf:http://ci.nii.ac.jp/naid/110010005246

日本建築学会大会学術講演梗概集
（関東） 2015 年 9 月

長時間の風外力における実大粘弾性ダンパーの解析手法の提案- その 1
（E-ディフェンス鋼構造建物実験研究　その 115）

正会員　○佐藤大樹*1
同　　笠井和彦*2
同　　杉山暢方*3
同　　松田和浩*4

実大粘弾性ダンパー　風外力　長時間繰り返し載荷
解析モデル　熱の伝導･伝達　動的特性の変化

1. はじめに

粘弾性ダンパーは、振動時に吸収した振動エネルギーを熱に変換し、温度が上昇する。その温度上昇に伴い、ダンパーの抵抗力が低下する特性を有している（温度依存性）。また、風は継続時間が長いため、粘弾性ダンパーの温度上昇量は大きくなり、ダンパーへの影響が懸念される。以上のことから、長時間の風外力に対する粘弾性ダンパーの性能評価が求められている。

既往の研究では、熱伝導・伝達による放熱を再現できる解析モデルが提案されているが、複層の粘弾性ダンパーには適用できない [1]。そこで本研究では、複層の実大粘弾性ダンパー[2]を対象とした文献 3 の加振実験により得られたダンパーの温度上昇と動的特性の変化を再現できる解析手法を提案する。粘弾性ダンパーの動的特性は、温度、振動数、振幅による変化 [4]に加えて、繰り返し載荷による変化がある。そこで本報その 1 では、繰り返し載荷による変化を実験から明らかにし、そのモデル化について述べる。

2. 繰り返し載荷による動的特性の変化

本節では、長時間の繰り返し載荷による動的特性（貯蔵剛性 K'_d と損失係数 η_d）の変化に関する考察を行う。はじめに、風方向高減衰応答波(A-3H)および風直交方向低減衰応答波(C-3L)とダンパー特性の変化が等価となるように設定された 2 種類の置換正弦波 [5]載荷から得られた実験値 [3]と、文献 4 のモデルから得られた計算値を比較する。なお、A-3H の置換正弦波は振動数 0.142Hz、C-3L は 0.230Hz である。両実験とも振幅 5.66mm、周辺温度 θ_c は 28°C で一定となるよう行った。

本研究では、ダンパー長さ $L = 4024.5$mm, 層せん断面積 $A_s = 9.12\times10^5$mm^2, 粘弾性体の厚さ $t = 8$mm, 粘弾性体積層数 $n = 6$ の実大粘弾性ダンパーを研究対象としている。図 1 にこのダンパーを試験体とした加振実験 [3]におけるセットアップ図を示す。なお、本実験では温度がある程度鈍くなった時に載荷を止めている。実験の詳細については文献 3 を参照されたい。

K'_d は定常振動時における荷重-変形関係の履歴の傾きの最小二乗法から求め [5]、η_d は u_d, K'_d および 1 サイクル当たりのダンパーの吸収エネルギー W_d を用いて式(1)より求めている [6]。

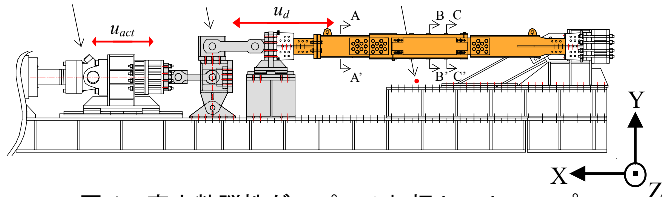

図 1　実大粘弾性ダンパーの加振セットアップ

$$\eta_d = \frac{W_d}{\pi K'_d \left(u_{d,max}\right)^2} \tag{1}$$

一方、動的特性の計算値は、本解析モデルに用いる分数微分構成則の定常解により式(2),(3)の様に表される [6]。

$$K'_d(\omega) = G\frac{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^{\alpha}\cos(\alpha\pi/2)}{1 + a2\omega^{2\alpha} + 2a\omega^{\alpha}\cos(\alpha\pi/2)}\cdot\frac{A_s}{d} \tag{2}$$

$$\eta_d(\omega) = \frac{(-a+b)\omega^{\alpha}\sin(\alpha\pi/2)}{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^{\alpha}\cos(\alpha\pi/2)} \tag{3}$$

ここで、a, b, α, G は粘弾性体の温度・振動数依存性を評価する係数である [4]。式(2)より、係数 b を大きくすると K'_d, η_d が大きくなり、係数 G は K'_d を比例的に増減させることが分かる。文献 4 のモデルでは、b と G を変えることにより非線形挙動を再現している。

図 2 に、累積エネルギー吸収密度における貯蔵剛性 K'_d および損失係数 η_d の比の推移をそれぞれ示す。なお、以降の図（その 2 も含む）では 3,000 秒毎に 400 秒間の計測を 3 回行い、その平均値を示している。実験値と計算値は添え字でそれぞれ exp, cal としており、3,000 秒毎の累積エネルギー吸収密度における動的特性の比をプロットしている。なお、計算値はプロットの時点における粘弾性体の温度、振動数、振幅の実験値を用いて式(2), (3)より算出している。

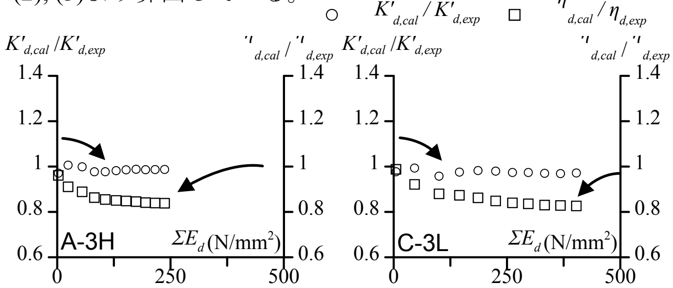

図 2　K'_d と η_d の比の推移

Proposed analysis Method of Full-Scall Viscoelastic Damper under Long-duration Wind Force, part1.

SATO Daiki, KASAI Kazuhiko, SUGIYAMA Nobumasa, MATSUDA Kazuhiro

図2より、累積エネルギー吸収密度の増加に伴い、貯蔵剛性は実験値と計算値で誤差は小さいが、計算値での損失係数は実験値より低くなることが分かる。計算値は温度、振動数、振幅による変化を考慮した値ではあるが、長時間の繰り返し載荷による影響を考慮していないことが原因であると考えられる。そのため、長時間の繰り返し載荷による損失係数の変化を再現する解析モデルの構築が必要である。なお、この損失係数の変化は永久的なものではなく、加振終了後において行われた性能確認試験（振幅 4.0mm, 振動数 1.0Hz）において、加振前の値に戻っている事が確認されている。

3. 損失係数の変化のモデル化

3.1 モデル化の精度

前節では繰り返し載荷による損失係数の変化について述べた。このような現象の再現を図るため、新たに λ_3, λ_4 を変数として次式のように設定する。

$$b^{\langle j\rangle} = b_{ref}\left(\lambda^{\langle j\rangle}\right)^{\alpha}\lambda_1^{\langle j\rangle}\lambda_3^{\langle j\rangle} \tag{4}$$

$$G^{\langle j\rangle} = G_{ref}\lambda_2^{\langle j\rangle}\lambda_4^{\langle j\rangle} \tag{5}$$

ここで、j はサイクル数を表す。また、b_{ref}, G_{ref} は基準温度での b, G の値、λ はシフトファクターを、λ_1, λ_2 はそれぞれ軟化の際に b, G を変化させるための変数 [4]を表す。η_d を変えるためには b を変化させることが必要であるが、式(2)からも分かるように同時に K'_d も変化してしまう。そのため、G に λ_4 を新たに加えることで K'_d の変化を抑えるようにしている。

図 3 に置換正弦波実験から最小二乗法により 1 サイクル毎に算出した λ_3, λ_4 の同定値を示す。

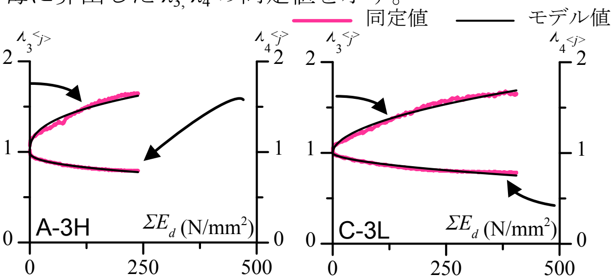

図 3　λ_3, λ_4 の設定

本研究では、同定値を式(6)が最小となるように Excel のソルバーを用いて算出した。

$$\sum_{j=1}^{N_{cyc}} R_{G',\eta,\theta_d}\left(\lambda_3^{\langle j\rangle},\lambda_4^{\langle j\rangle},\alpha_{CV}^{\langle j\rangle}\right)$$
$$=\sum_{j=1}^{N_{cyc}}\left[\left(G'^{\langle j\rangle}/G'^{\langle j\rangle}_{\mathrm{exp}}-1\right)^2+\left(\eta^{\langle j\rangle}/\eta^{\langle j\rangle}_{\mathrm{exp}}-1\right)^2+\left(\theta_d^{\langle j+1\rangle}/\theta_{d,\mathrm{exp}}^{\langle j+1\rangle}-1\right)^2\right] \tag{6}$$

ここで、N_{cyc} は同定を用いたサイクルの数を表す。図 3 より、累積エネルギー吸収密度 $\sum E_d$ の増加とともに、λ_3 は増加、λ_4 は減少することが分かる。λ_3, λ_4 は $\sum E_d$ の関数として表すことですべての実験値で概ね同じ値となる事が分かった。よって本研究では λ_3, λ_4 を式(7), (8)のようにモデル化した。

$$\lambda_3^{(n)} = C_5^{(n)}\left(\sum E_d^{(n)}\right)^{C_5'^{(n)}}+1 \tag{7}$$

$$\lambda_4^{(n)} = C_6^{(n)}\left(\sum E_d^{(n)}\right)^{C_6'^{(n)}}+1 \tag{8}$$

ここで、$\sum E_d^{(n)}$ は n ステップ時までのエネルギー吸収密度の累積値である。C_5 は置換振幅 A_r [5]に比例し、周辺温度 θ_c の 2 乗に反比例する傾向が確認できたため、実験値の対数近似により式(9)でモデル化した。

$$C_5^{(n)} = C_{51}\ln\left(A_r^{(n)}/\left(\theta_c^{(n)}\right)^2\right)+C_{52} \tag{9}$$

また、C'_5, C_6 の値は C_5 を用いて式(10), (11)より、C'_6 の値は C_6 を用いて式(12)より算出される。

$$C_5'^{(n)} = C_{53}\cdot\left(C_5^{(n)}\right)^{C_{54}} \tag{10}$$

$$C_6^{(n)} = C_{61}\cdot e^{C_{62}\cdot C_5^{(n)}} \tag{11}$$

$$C_6'^{(n)} = C_{63}\cdot\left(C_6^{(n)}\right)^{C_{64}} \tag{12}$$

C_{53}, C_{54}, C_{61}, C_{62}, C_{63}, C_{64} の値はそれぞれ 1.157×10^{-1}, -4.558×10^{-1}, -5.629×10^{-3}, 13.06, 4.428×10^{-2}, -5.414×10^{-1} とした。

図 3 に、実験値の $\sum E_d^{(n)}$, $A_r^{(n)}$, $\theta_c^{(n)}$ を用いて式(7)~(12)から求めた λ_3, λ_4 を実線で示す。図 3 より、A-3H, C-3L ともにモデル式は同定値を精度よく再現できていることが分かる。

3.2 ランダム波における計算方法

式(8)は置換振幅を代入する形としたが、本来ランダム波では予め振幅が分からない。本節では現ステップ n を用いて変位時刻歴から n ステップにおける置換振幅 $A_r^{(n)}$ は n ステップにおける u_d の標準偏差 $\sigma_u^{(n)}$ を用いて、次式で表される [5]。

$$A_r^{(n)} = \sqrt{2}\cdot\sigma_u^{(n)} \tag{13}$$

ここで、$\sigma_u^{(n)}$ は n ステップにおける u_d を用いて、次式より求められる。

$$\sigma_u^{(n)} = \sqrt{\frac{A^{(n-1)}}{n}-\left(\bar{u}_d^{(n)}\right)^2} \tag{14}$$

ここで、A は u_d の 2 乗和、$\bar{u}_d$ は u_d の平均値を表しており、次式にて算出される。

$$A^{(n)} = A^{(n-1)}+\left(u_d^{(n)}\right)^2 \tag{15}$$

$$\bar{u}_d^{(n)} = \frac{\bar{u}_d^{(n-1)}\cdot(n-1)+u_d^{(n)}}{n} \tag{16}$$

なお、$A^{(0)}=0$, $\bar{u}_d^{(0)}=0$ としている。式(13)~(16)を用いることで、ランダム波においても置換振幅を算出することが可能となる。

4. まとめ

その 1 では、長時間の繰り返し載荷による損失係数の変化を累積エネルギー吸収密度に比例するようにモデル化し、その精度を確認した。

参考文献はその 2 にまとめて示す。

*1 東京工業大学 建築物理研究センター 准教授 博士(工学)
*2 東京工業大学 建築物理研究センター 教授 Ph.D.
*3（株）フジタ（元東京工業大学大学院生）修士(工学)
*4 東京工業大学 建築物理研究センター 助教 博士(工学)

*1 Associate Professor, SERC, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
*2 Professor, SERC, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.
*3 FUJITA. (Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology), M. Eng.
*4 Assistant. Professor, SERC, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.