

高硬度ゴムダンパーの実験と解析モデル化手法

その2 高硬度ゴムダンパーの解析モデル化手法提案

正会員 ○西澤恵二*1 同 笠井和彦*2
同 大木洋司*3 同 田中克往*4
同 田中和宏*4 同 西本晃治*5
同 山崎久雄*6

高硬度ゴム 温度依存性 振幅依存性 振動数依存性

1. 序

同題その1では、高硬度ゴムの実験概要及び結果を示し、高硬度ゴムの特性を述べた。その2では、実験より得た、すべての依存性を考慮した高硬度ゴムダンパーの解析モデル化手法を提案する。

2. モデル構成

実験結果より、静的载荷では、履歴形状は紡錘型となり、履歴減衰となっており、一方、動的载荷では、大きな歪速度が与えられたことにより、履歴形状は静的载荷に比べ膨らみが大きくなり、粘性減衰が付加されていることがわかる(図1)。ここで、履歴減衰を有するのは、原材料が複雑に混じり合い、お互いに相互作用している結果であり、高硬度ゴムダンパーの特徴である。以上の結果を基に、高硬度ゴムダンパーの解析モデルは、図2に示す様な、履歴要素と粘性要素の並列体とし、応力 τ は、式1に示す様に、履歴要素の応力 τ_s と粘性要素の応力 τ_d の和で表される。

$$\tau = \tau_s + \tau_d \tag{1}$$

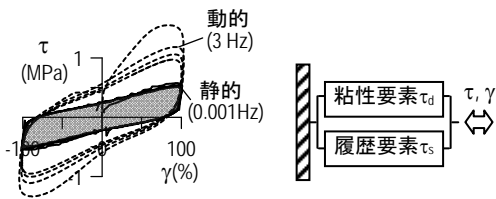


図1 実験結果(20°C)

図2 解析モデル構成

3. 履歴要素

3.1 履歴要素の基本関数

実験結果より、履歴要素の履歴形状は、紡錘型となることがわかった。そこで、履歴要素の基本関数は、紡錘型の履歴形状を再現する Menegotto-Pinto モデル¹⁾(式2, 図3)とする。

$$\tau_s = \tau_r + (\gamma - \gamma_r) \lambda_{\theta_s} \left[G_{s2} + (G_{s1} - G_{s2}) / \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma - \gamma_r}{\gamma_a - \gamma_r} \right)^R \right\}^{1/R} \right] \tag{2}$$

ここに、 (γ_r, τ_r) は歪反転後、現在の半サイクルが始まる点で既知とする。また、 (γ_a, τ_a) は傾き G_{s1} , G_{s2} を持つ2直線の交点座標を示す漸近線位置座標である。さらに、 R

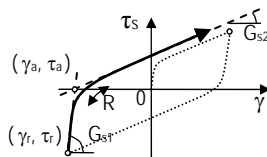


図3 履歴要素の基本関数の幾何学的意味

は履歴曲線の曲率を調整するものである。なお、 λ_{θ_s} は、温度依存性を考慮するものであり、次節で説明する。

ここで、 G_{s2} については、反転応力 $|\tau_r|$ との関係により、その値が変化し、また、漸増時と漸減時では、変化の仕方に、違いが見られるため、 G_{s2} は式3a, bに示す様に、漸増時(G_{s2}^+)と漸減時(G_{s2}^-)にわけて、 $|\tau_r|$ との関係によりその値を算出する。

$$G_{s2}^+ = a_1 |\tau_r|^2 + a_2 |\tau_r| + a_3, \quad G_{s2}^- = b_1 |\tau_r|^2 + b_2 |\tau_r| + b_3 \tag{3a, b}$$

3.2 履歴要素の温度依存性

式2中の λ_{θ_s} について説明する。本高硬度ゴムダンパーには温度依存性があり、各温度での実験結果は、履歴形状が異なっているが、それぞれの実験結果の応力を λ_{θ_s} で除して履歴を描くと図4a, bとなり、20°Cでの実験結果と履歴形状が等しくなる。ただし、 λ_{θ_s} と各温度との関係は、図4c, 式4で表され、基準温度 θ_{ref} (20°C)では1となる。ここで、 λ_{θ_s} を静的シフトファクターと呼び、 λ_{θ_s} を式2の様に、モデル

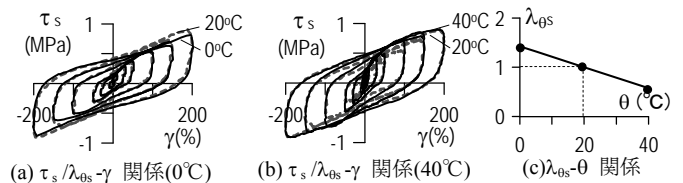


図4 静的シフトファクターを用いた応力-歪関係

に組み込むことにより温度依存性が考慮される。

$$\lambda_{\theta_s} = -0.02(\theta - \theta_{ref}) + 1 \tag{4}$$

4. 粘性要素

4.1 粘性要素の基本関数

図1の動的载荷から静的载荷の実験結果を引くと、図5の黒線となり、これが粘性要素である。図5より、粘性要素は、傾きを持った楕円に、さらに、応力を付加した様な履歴形状となっている。そこで、粘性要素は、楕円履歴を再現する粘弾性モデルと、応力を付加する非線形粘性モデルの並列体とする。ここで、粘弾性モデルは、式5aで示す分数微分構成則とし、履歴形状は図

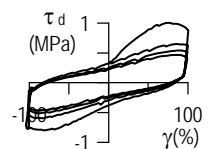


図5 粘性要素 (20°C, 100%, 3 Hz)

6a となる。また、非線形粘性モデルは式 6 で表され、履歴形状は図 6b となる。よって、粘性要素はこれらの和の式 7 となり、履歴形状は図 6c となる。

$$\tau_{d,ve} = G_d (\gamma + bD^\beta \gamma) \quad b = b_{ref} (\lambda_{ai} \lambda_{yd})^\beta \quad (5a, b)$$

$$\tau_{d,vs} = q_1 q_2 C_d (\lambda_{ai} \lambda_{yd} |\dot{\gamma}|)^\alpha \cdot \text{sgn}(\dot{\gamma}) \quad (6)$$

$$\tau_d = \tau_{d,vs} + \tau_{d,ve} \quad (7)$$

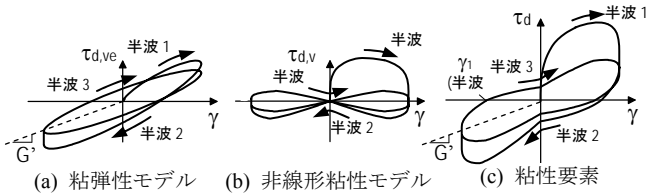


図 6 粘性要素の応力-歪曲線

ここで、 q_1 は経験歪により非線形粘性モデルの付加量を調整し、 q_2 は履歴にくびれを設ける働きがある。

4. 2 粘性要素の温度および振幅依存性

式 5b, 6 中の λ_{ai} , λ_{yd} について説明する。

式 5a の分数微分構成則において、円振動数 ω の定振幅正弦波を入力すると、以下の G' , η が得られる。

$$G' = G_d \left(1 + b\omega^\beta \cos\left(\frac{\pi}{2}\beta\right) \right), \quad \eta = \frac{b\omega^\beta \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta\right)}{1 + b\omega^\beta \cos\left(\frac{\pi}{2}\beta\right)} \quad (8a, b)$$

各温度、振動数、振幅における定振幅正弦波载荷の実験結果より、粘性要素の応力を算出し、その 2 サイクル目から G' を抽出し温度、振幅ごとにまとめると図 7a となる。図 7a より、各温度、振幅により、 G' の値に違いが見られる。しかし、各温度、振幅における曲線を横軸 ($\log f$) に沿って平行移動することにより、それらがほぼ一致する傾向が見られた。例として、20°C, 100%での材料値を近似した曲線を基準曲線とし、それに対して他温度、他振幅の曲線を平行移動した結果を図 7b に示す。この特性から、温度に起因する移動量を $\log \lambda_{ai}$ 、振幅に起因する移動量を $\log \lambda_{yd}$ とおくと、 $\log \lambda_{ai} + \log \lambda_{yd} + \log f = \log \lambda_{ai} \lambda_{yd} f$ となる。つまり、任意温度、任意振幅における振動数 f での材料値は、基準温度、基準振幅における振動数 $\lambda_{ai} \lambda_{yd} f$ における材料値に一致すると言える。ただし、 λ_{ai} と各温度との関係は図 8a, 式 9a で表され、 λ_{yd} と各振幅との関係は図 8b, 式 9b で表され、基準温度 θ_{ref} (20°C)、基準振幅 γ_{ref} (100%) では、それぞれ 1 となる。ここで、 λ_{ai} , λ_{yd} を動的シフトファクター、 $\lambda_{ai} \lambda_{yd} f = f_{eq}$ を等価振動数と呼び、 λ_{ai} , λ_{yd} により温度、

振幅依存性が考慮される。

$$\lambda_{ai} = \exp[15.4(\theta - \theta_{ref}) / (-195.9 + \theta - \theta_{ref})] \quad (9a)$$

$$\lambda_{yd} = \exp[-14.7(\gamma^* - \gamma_{ref}) / (6.2 + \gamma^* - \gamma_{ref})] \quad (9b)$$

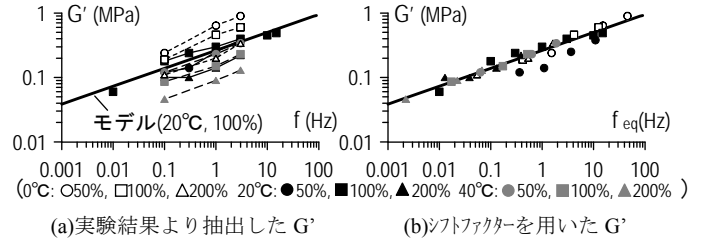


図 7 粘性要素の温度および振幅依存性

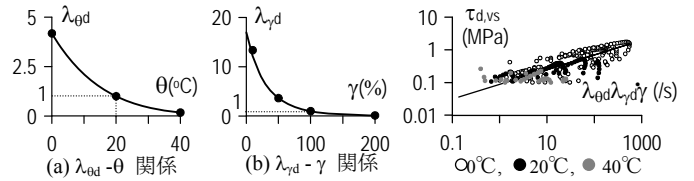


図 8 動的シフトファクターと温度、振幅関係

図 9 $\tau_{d,vs} - \lambda_{ai} \lambda_{yd} \gamma$ 関係

5. 精度検証

図 10 に定振幅载荷時、地震応答波载荷時の、実験結果と解析結果の比較を示す。両者共に、精度良く再現できていることがわかる。

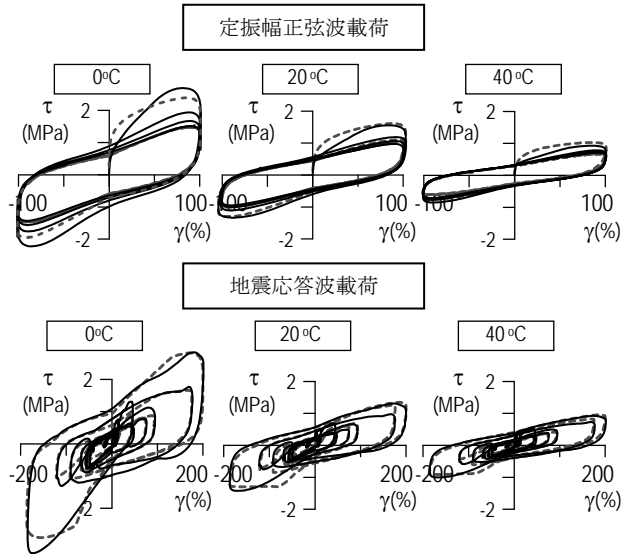


図 10 実験結果と解析結果の比較 (— 実験値 --- 解析値)

6. 結

高硬度ゴムダンパーの振幅、振動数、温度依存性を考慮した高精度な解析モデル化手法を提案した。

参考文献

- 1) 笠井和彦, 山崎久雄, 小澤秀允, 金子洋文, 貞末和史, 小野吉信: 繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル(その 7 解析モデルの改良), 日本建築学会大会梗概集, pp.907-908, 2008.9

*1 元 東京工業大学 大学院生 (現 北野建設株式会社)
 *2 東京工業大学 建築物理研究センター 教授・Ph. D.
 *3 東京工業大学都市地震工学センター 特任助教
 *4 住友ゴム工業(株) ハイブリット事業本部
 *5 新日鉄エンジニアリング(株) 建築・鋼構造事業部
 *6 ユニオンシステム(株) 振動解析プロダクト

*1 Grad. Student, Tokyo Institute of Technology.(Kitano Construction Corp.)
 *2 Professor, Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.
 *3 Assistant Prof., Center for Urban Earthquake Eng., Tokyo Institute of Technology
 *4 Hybrid Rubber Products Headquarters, Sumitomo Rubber Industries, Ltd.
 *5 Building Construction & Steel Structures Div., Nippon Steel Engineering
 *6 Dynamic Analysis Research Complex, Union System Inc.