

1 序

地震による建物の応答を軽減するための制振部材の1種として、変位のみによって履歴形状が求まる履歴減衰型の要素と、速度に依存して履歴形状が求まる粘性減衰型の要素の両面を併せもつたものがある。それらを、履歴減衰と粘性減衰を併せもつ制振ダンパーと呼ぶこととする。その代表的なものが、高硬度ゴムダンパーと座屈拘束ブレースの一部である。

高硬度ゴムダンパーは、天然ゴム系粘弾性体を高減衰化したもので、近年広く用いられ始めている。しかし、その力学的特性は、変形量や変形速度、さらに温度にも依存し、応力-歪関係が非線形挙動となり、その全ての依存性を考慮したモデルは数少ない。特に、温度依存性を考慮したモデルはほとんど見当たらない。

また、現在までに、多くの建築物に用いられてきた座屈拘束ブレースの一部についても、粘性減衰を有することが報告されているが、その粘性減衰をも考慮したモデルは存在しない。

そこで、本研究では、これら2つの履歴減衰と粘性減衰を併せもつ制振ダンパーの解析モデル化手法を提案する。また、履歴形状の異なる2つのダンパーに対し、履歴減衰と粘性減衰を併せもつという共通点に着目し、同一のモデル構成で、そのパラメータ値等を変更することにより、その履歴形状を再現することとする。

2 高硬度ゴムダンパーの荷重実験と結果

高硬度ゴムダンパーのせん断試験を実施した。その結果が図1であり、静的荷重では、履歴形状は紡錘型となり、履歴減衰となっており、一方、動的荷重では、履歴形状は静的荷重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分かる。以上より、高硬度ゴムダンパーの解析モデルは、履歴要素と粘性要素の並列体とし、応力 τ は、履歴要素の応力 τ_s と粘性要素の応力 τ_d の和とする(式1)。

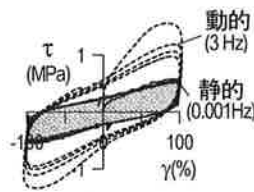


図1 実験結果(20°C)

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

3 高硬度ゴムダンパーの履歴要素

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(式2, 図2)とする。

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

また、本高硬度ゴムダンパーには温度依存性があるが、各温度での実験結果の応力を λ_{θ} で除して履歴を描くと図3a, 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} と各温度との関係は、式3で表

される。ここで、 λ_{θ} を静的シフトファクターと呼び、 λ_{θ} により温度依存性が考慮される。

$$\lambda_{\theta} = -0.02(\theta - \theta_{ref}) + 1 \tag{3}$$

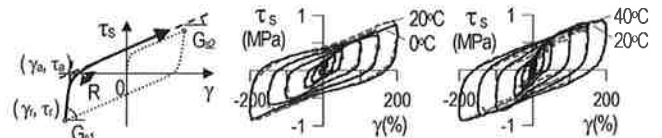


図2 履歴要素 図3a $\tau_s/\lambda_{\theta s}-\gamma$ 関係(0°C) 図3b $\tau_s/\lambda_{\theta s}-\gamma$ 関係(20°C) 図3c $\tau_s/\lambda_{\theta s}-\gamma$ 関係(40°C)

4 高硬度ゴムダンパーの粘性要素

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4とし、履歴形状は図4aとなる。また、非線形粘性モデルは式5とし、履歴形状は図4bとなる。よって、粘性要素はこれらの和の式6となり、履歴形状は図4cとなる。

$$\tau_{d,ve} = G_d (\gamma + bD^\beta \dot{\gamma}), \quad b = b_{ref} (\lambda_{\theta d} \lambda_{\gamma d})^\beta \tag{4a, b}$$

$$\tau_{d,vs} = q_1 q_2 C_d (\lambda_{\theta d} \lambda_{\gamma d} |\dot{\gamma}|)^\alpha \cdot \text{sgn}(\dot{\gamma}), \quad \tau_d = \tau_{d,vs} + \tau_{d,ve} \tag{5, 6}$$

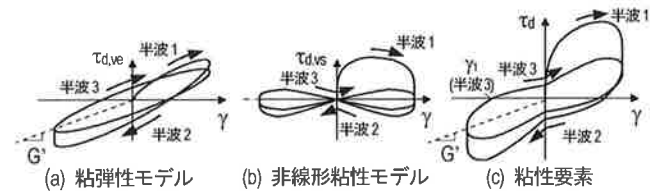


図4 粘性要素の応力-歪曲線

ここで、式4aの分数微分構成則において、円振動数 ω の正弦波を入力すると、以下の G' が得られる。

$$G' = G_d \left(1 + b\omega^\beta \cos\left(\frac{\pi}{2}\beta\right) \right) \tag{7}$$

ここで、実験結果より G' を抽出し温度、振幅ごとにまとめると図5aとなるが、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(図5b)。この特性から、温度に起因する移動量を $\log \lambda_{\theta d}$ 、振幅に起因する移動量を $\log \lambda_{\gamma d}$ とおくと、 $\log \lambda_{\theta d} + \log \lambda_{\gamma d} + \log f = \log \lambda_{\theta d} \lambda_{\gamma d} f$ 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 $\lambda_{\theta d} \lambda_{\gamma d} f$ における材料値に一致すると言える。ただし、 $\lambda_{\theta d}$ と各温度との関係は式8aで表され、 $\lambda_{\gamma d}$ と各振幅との関係は式8bで表さる。ここで、 $\lambda_{\theta d}$ 、 $\lambda_{\gamma d}$ を動的シフトファクターと呼び、 $\lambda_{\theta d}$ 、 $\lambda_{\gamma d}$ により温度、振幅両依存性が考慮される。

$$\lambda_{\theta d} = \exp[15.4(\theta - \theta_{ref}) / (-195.9 + \theta - \theta_{ref})] \tag{8a}$$

$$\lambda_{\gamma d} = \exp[-14.7(\gamma^* - \gamma_{ref}) / (6.2 + \gamma^* - \gamma_{ref})] \tag{8b}$$

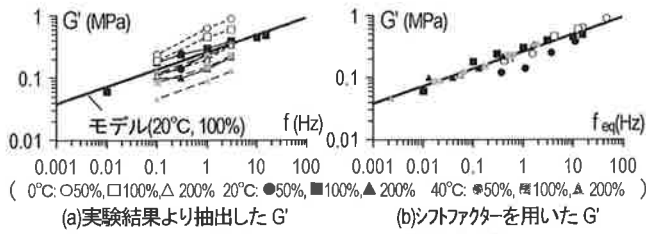


図5 粘性要素の温度および振幅依存性

5 高硬度ゴムダンパーの精度検証

図6に実験結果と解析結果の比較を示す。

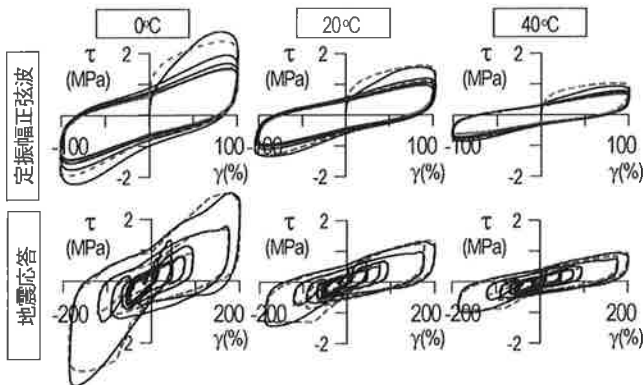


図6 実験結果と解析結果の比較 (— 実験値 --- 解析値)

6 座屈拘束ブレースの載荷実験と結果

図7に座屈拘束ブレースの実験結果の一例を示す。静的載荷では、履歴形状は紡錘型となり、履歴減衰となっている。一方、動的載荷では、履歴形状は、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。よって、座屈拘束ブレースの解析モデルも、履歴要素と粘性要素の並列体とする。また、座屈拘束ブレースの履歴要素は、鋼材の履歴要素によるもの、粘性要素は、鋼材の粘性要素によるもの、および、座屈拘束ブレース内の鋼材とモルタルとの間の充填材の粘性要素によるものである。

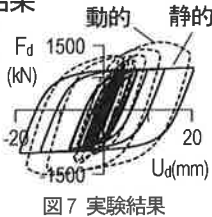


図7 実験結果

7 座屈拘束ブレースの履歴要素

座屈拘束ブレースの履歴要素は、鋼材の履歴要素によるものであり、これは、既往の研究で様々な解析モデルが提案されているが、本研究では、その中でも、解析精度の高い式9のM-Pモデル¹⁾を用いる。

$$\sigma_{st,s} = \sigma_r + (\varepsilon - \varepsilon_r) \left[E_a + (E - E_a) / \left\{ 1 + \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{\varepsilon_a - \varepsilon_r} \right)^R \right\}^{1/R} \right] \quad (9)$$

8 座屈拘束ブレースの粘性要素

まず、鋼材の粘性要素について説明する。鋼材の粘性要素についても、既往の研究²⁾でモデル化されているLY100と同様に、弾性バネを直列接続した非線形粘性モデルとする(式10a, b)。

$$\sigma_{st,d} = C_d |\dot{\varepsilon}_d|^\alpha \cdot \text{sgn}(\dot{\varepsilon}_d), \quad \varepsilon_d = \varepsilon - \sigma_{st,d} / E_b \quad (10a, b)$$

次に、充填材の粘性要素について説明する。充填材のせん断試験を実施した結果、履歴形状は、傾きを持った楕円となることが分かった。そこで、モデルは、粘弾性モデルの分数微分構成則とする(式11)。

$$\tau_{ub} = G_d (\gamma + bD^\beta \gamma) \quad (11)$$

ここで、実験結果より、 G' を抽出し、その結果を基に G_d , b , β を同定する。同定した結果、 b , β については、振幅によらず近い値が得られたので、 b , β を平均値で固定し、 G_d のみについて、再度、同定し直した。その結果、 G_d と振幅の関係は、式12のモデル曲線で近似可能であることが分かった。よって、式12により振幅依存性が考慮されることになる。

$$G_d = -1.78 \times 10^{-4} \ln(|\gamma|_{\max}) + 1.47 \times 10^{-3} \quad (12)$$

9 座屈拘束ブレースの荷重算出

座屈拘束ブレースの荷重 F_d は、鋼材の履歴要素での荷重を $F_{st,s}$ 、鋼材の粘性要素での荷重を $F_{st,d}$ 、充填材の粘性要素での荷重を F_{ub} とする式13で表される。

$$F_d = F_{st,s} + F_{st,d} + F_{ub} \quad (13)$$

ここで、 $F_{st,s}$, $F_{st,d}$ については、応力 $\sigma_{st,s}$, $\sigma_{st,d}$ に鋼材の断面積 A を乗ずることで算出できる(式14a, b)。一方、充填材の荷重については、座屈拘束ブレースに変形が与えられたとき、充填材に生じるせん断歪分布は、図8の縦縞のとなり、各領域での荷重は異なる値となる。そこで、充填材を図8のように4領域に分割し、荷重の計算を行う。また、充填材は、図8に示す様に、板厚方向と板幅方向にそれぞれ配置されており、また、それぞれの厚みが異なるため、同じ領域であっても、荷重が異なる。よって、充填材の荷重は、4つの領域での板厚方向と板幅方向の計8つの荷重の合計で算出される(式14c)。

$$F_{st,s} = A \cdot \sigma_{st,s}, F_{st,d} = A \cdot \sigma_{st,d}, F_{ub} = \sum_{i=1}^8 A_{s,i} \cdot \tau_{ub,i} \quad (14a, b, c)$$

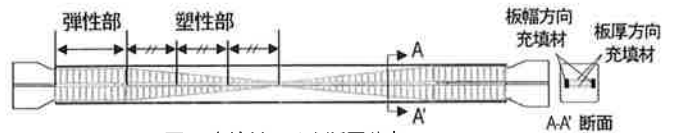


図8 充填材のせん断歪分布

10 座屈拘束ブレースの精度検証

図9に実験結果と解析結果の比較を示す。

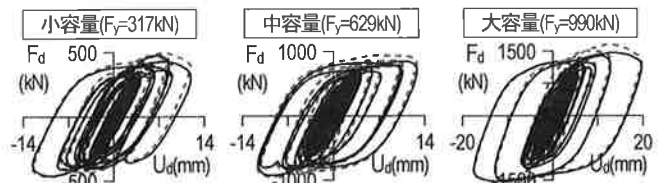


図9 実験結果と解析結果の比較 (— 実験値 --- 解析値)

11 結

履歴減衰と粘性減衰を併せもつ制振ダンパーの解析モデル化手法を提案した。

参考文献

- 1) 笠井ほか: 繰り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 日本建築学会大会学術講演梗概集、2008.7
- 2) 山崎ほか: 繰り返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル その8 歪速度、歪振幅依存性を考慮した極低降伏鋼LY100の応力歪関係 日本建築学会大会学術講演梗概集、2008.7