

# 木造軸組構法における制振構造の研究

- 粘弾性制振装置のモデル化に関する検討 -

木造住宅 制振構造 粘弾性ダンパー

正会員 佐藤昭<sup>\*1</sup> 同 真崎雄一<sup>\*2</sup>

同 井口道雄<sup>\*3</sup>

## 1. はじめに

既報<sup>1), 2), 3)</sup>では、木造住宅用に開発した粘弾性制振装置の性能を、擬似動的加振実験および振動台実験結果を基に報告した。本報はその続報で、本制振装置のモデル化を目的に実施した制振金物部分の要素実験結果について報告すると共に、実験結果に基づく粘弾性体内部の温度推定に関する検討と、その妥当性を擬似動的加振実験の結果より検証した結果について述べる。

## 2. 粘弾性制振装置の概要

本制振装置は、ダイヤモンド形状の筋違上下部頂点にアクリル系粘弾性体を内蔵した制振金物を配し、そのエネルギー吸収によって制振効果を発揮させる。図1に本制振装置の概要を示す。図に示す通り、本装置には、幅120mm、奥行き89mm、厚さ5mmの粘弾性体が2枚内蔵されていて、その可動変位は左右それぞれ15mmである。

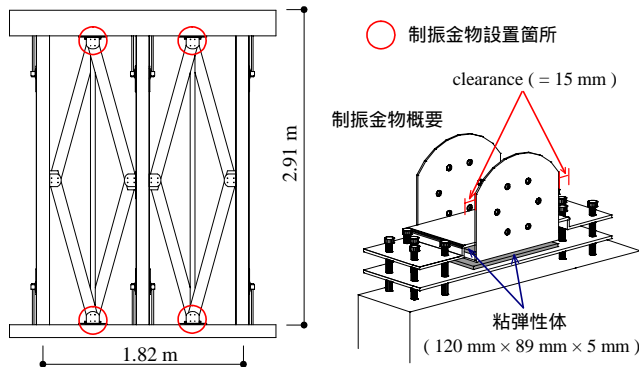


図1 粘弾性制振装置の概要図

## 3. 制振金物の要素実験

実験は繰り返し加振に対し、粘弾性体の温度変化に伴う履歴特性の変化を把握することを目的に実施された。実験の概要を図2に示す。

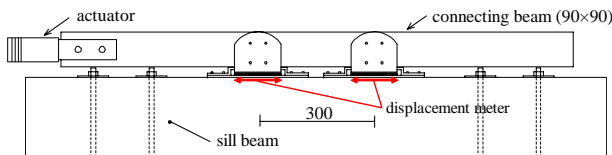


図2 制振金物の要素実験の概要

上図に示すように、試験体は土台に固定した2つの制振金物を横架材で連結したもので、その連結部材に高速アクチュエータを取り付け、擬似動的繰り返し加振を行った。

計測は、加振力と各制振金物の水平変位(以下の検討では両者の平均値を用いる)、粘弾性体内部に挿入した熱電対によって測定した温度の時間変化である。試験は、加振振動数と粘弾性体のせん断歪みをパラメータに、表1に示す組合せの試験を実施した。加振振動数1.0Hz、歪み50%の試験では、初期温度10と常温の異なる試験を実施した。参考として、結果を図3, 4に示す。なお各図には、左図に履歴曲線、右図に温度の時間変化が示してある。

表1 試験項目(加振振動数と粘弾性体せん断歪みの組合せ)

加振振動数 [Hz]	歪み [%]			
	50	100	200	300
0.1	-	-	-	-
0.3	-	-	-	-
1.0	-	-	-	-
3.0	-	-	-	-

- : 試験実施なし, : 常温から試験を開始, : 10 から試験を開始

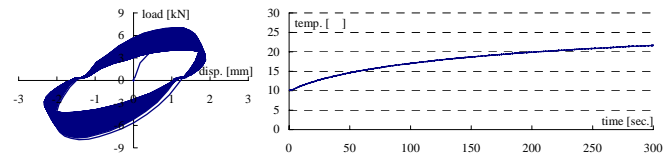


図3 要素実験の結果1 (1.0Hz, 50%, 初期温度: 10 )

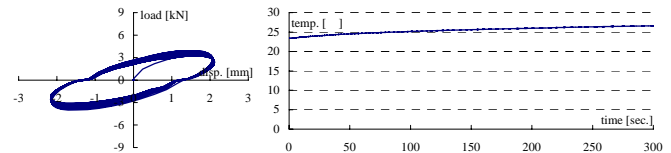


図4 要素実験の結果2 (1.0Hz, 50%, 初期温度: 23.5 )

## 4. 粘弾性体の履歴モデル

4.1 履歴モデルの概要 本研究で採用した粘弾性体の履歴モデルは、笠井らによる分数次微分モデル<sup>4), 5)</sup>で、その構成則は、せん断歪み $\gamma$ と応力 $\tau$ を用いて次式で表される。

$$\tau(t) + a D^\alpha \tau(t) = G [\gamma(t) + b D^\alpha \gamma(t)] \quad (1)$$

$$a = a_{ref} \lambda^\alpha, \quad b = b_{ref} \lambda^\alpha \quad (2)$$

$$\lambda = \exp \left[ -p_1 (\theta - \theta_{ref}) / (p_2 + \theta - \theta_{ref}) \right] \quad (3)$$

式(1), (2), (3)で、 $D^\alpha$ は分数次微分演算子、 $\alpha$ は分数微分の次数、 $\lambda$ は温度・振動数等価則を利用したシフトファクター、 $a_{ref}, b_{ref}, G, p_1, p_2$ は材料毎に決定されるパラメータである。

笠井らはこれら以外にも、軟化・硬化現象をモデルに組み込んでいるが、本実験ではそれらの履歴性状が観察されず、また後述する擬似動的加振実験の応答予測でも、それらを考慮しない場合の結果と試験結果がほぼ調和的であったため、本制振装置については、これらの式で表される線形領域の提案式のみを採用することにした。

4.2 温度推定に関する修正 本モデルを応答予測に用いるには、式(3)の温度 $\theta$ を時間経過に対し逐次推定する必要がある。笠井らはこの点について下式を提案している。

$$\theta(t) = \theta_0 + \int_0^{\gamma(t)} \tau d\gamma / s\rho \quad (4)$$

式(4)で、 $\theta_0$ は初期温度、 $s\rho$ は粘弾性体の比熱と密度の積を表し、右辺第2項で計算される時刻 $t$ までの履歴吸収エネルギー(以下、 $E_{VEM}(t)$ と記す)を $s\rho$ で除すことで温度の上昇分を求め、各時刻の温度を推定する。

しかしこの方法は、比較的短い継続時間を対象としていることから、時間経過に伴う粘弾性体周辺部への熱工

エネルギーの発散を考慮していないため、計算値と実験値に乖離が生じる。笠井らはこの点について別途詳細な検討を行い、精度の良い温度推定の方法を示しているが<sup>6)</sup>、本研究では Black らの研究<sup>7)</sup>を参考に、Newton's law of cooling に基づく、より単純な温度推定の方法を提案する。なお、本研究では継続時間 100sec までを検討の対象とする。

Newton's law of cooling は、任意の 2 物体の温度差がその温度差に比例する速度で変化することを示したものである。本研究ではこの考え方を基本に、次の状態方程式を用いて、温度の推定を行うことにした。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt}(E_{VEM}) - \kappa_1(T_1 - T_0) - \kappa_2(T_1 - T_2) \\ -\kappa_2(T_2 - T_1) - \kappa_3(T_2 - T_0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)で、 $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  はそれぞれ外気温（一定値）、粘弾性体温度、制振金物の鉄板部分の温度、 $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  はそれぞれの温度差に乗じる比例係数である。この方法の妥当性として、計算結果と実験値が最も良く対応した加振振動数 3.0Hz、歪み 200%試験時の温度の時間変化、および最も乖離した加振振動数 1.0Hz、歪み 50%試験時（初期温度 10 度の試験）の温度の時間変化を、試験結果と比較して図 5, 6 に示す。なお各図には、修正前（式(4)を用いた場合）の計算結果も同時に示してある。

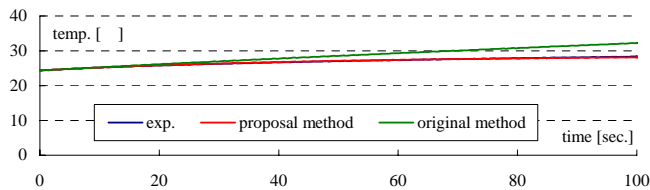


図 5 温度の推定結果 1 (3.0Hz, 200%, 初期温度：常温)

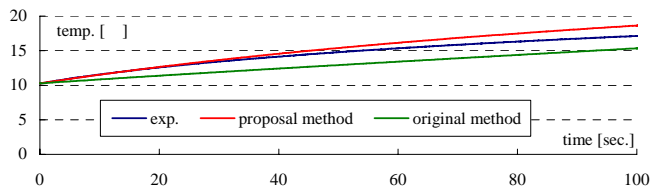


図 6 温度の推定結果 2 (1.0Hz, 50%, 初期温度：10)

図 5, 6 に示すように、提案法は修正前の方法に比して温度の推定精度が良い。図 6 で実験値と計算値に乖離が生じたのは、粘弾性体部を冷却して試験を開始した際に、金物部分が想定した温度より低温になっていたことが要因と推察される。他の結果も同様で、常温から開始した試験の計算結果は実験値とほぼ調和的であったが、10 開始の試験では乖離が生じた。一方、履歴特性については省略するが、温度の推定が適切であれば文献 4), 5) に示されている通り、分数次微分モデルで試験結果を再現できることが確認できた。なお以上の結果は、式(5)の比例係数を  $\kappa_1=7.5 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ ,  $\kappa_2=8.3 \times 10^{-3}$ ,  $\kappa_3=1.1 \times 10^{-3}$  とした結果である。

### 5. 擬似動的加振実験に基づく検討

これまでの検討により、制振金物の履歴特性が分数次微分モデルで適切に表現できるようになった。以下では、

本制振装置を組み込んだ軸組架構(図 1 左)に対する擬似動的加振実験の結果より、本制振装置のモデル化に関する検討を行う。ここでは力学的な釣り合いから、制振金物とダイヤモンド型筋かいが直列結合の関係にあると考え、制振装置全体が負担する荷重を入力として、粘弾性体部の水平変形量を推定した。計算結果と実験で計測した水平変形量を比較した結果を図 7 にまとめて示す。

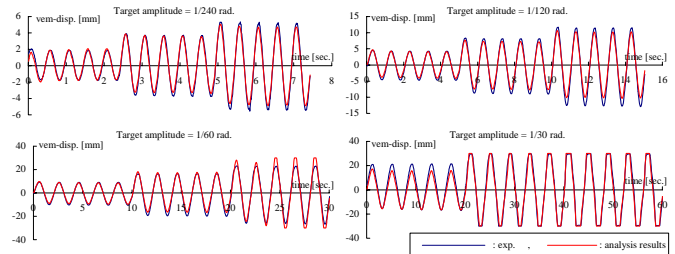


図 7 粘弾性体の水平変位の計算値と実験値の比較

図 7 より、以上の計算方法を用いて粘弾性体部の挙動を概ね推定できることが認められた。また、上記した本制振装置を直列結合とする考え方の妥当性も確認できた。

### 6. まとめ

本研究では、要素実験および擬似動的加振実験の結果に基づき、粘弾性制振装置の履歴モデルに関する検討を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 本制振装置の粘弾性体部の履歴特性は、分数次微分モデルで表現でき、継続時間 100sec までの温度の推定精度は、最大で約 3 の計算誤差の範囲に収まっている。
- 2) 擬似動的加振実験に基づく検討により、本制振装置は、粘弾性体の特性を表す分数次微分モデルとダイヤモンド型筋かいの特性を表す非線形ばねの直列結合によって表現できることが確認された。

- 謝辞 - 本研究は GVA 友の会関係各位の多大な協力のもとに実施された。また実験の実施にあたり、(株)住宅構造研究所より多くの便宜を戴いた。記して謝意を表します。

- 参考文献 -

- 1) 佐藤利昭他：木造軸組構法における制振構造の研究—木造用筋違い制振装置の制振性能評価—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), C1 (22044), PP87 ~ 88, 2005.9
- 2) 佐藤利昭他：木造軸組構法における制振構造の研究—実大試験結果に基づく構造要素特性の抽出—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), C1 (22154), PP307 ~ 308, 2006.9
- 3) 佐藤利昭他：振動台実験に基づく木造軸組構法用制振装置の性能評価, 日本建築学会技術報告集, 第 26 号, PP545~550, 2007. 12
- 4) 笠井和彦他：粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(その 1 線形領域における温度・振動数依存のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第 543 号, PP77 ~ 86, 2001. 5
- 5) 笠井和彦他：粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(その 2 温度上昇および歪・歪速度がもたらす非線形性のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, PP55 ~ 63, 2002. 11
- 6) 笠井和彦他：継続時間が長い外乱での温度上昇と熱伝導・伝達を考慮した粘弾性ダンパーの解析手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 599 号, PP61 ~ 69, 2006. 1
- 7) Black, C. J., Makris, N.: Viscous Heating of Fluid Dampers under Small and Large Amplitude Motions: Experimental Studies and Parametric Modeling, Journal of Engineering Mechanics, ASCE 133(5), PP566 ~ 577, 2007.

\*1: (有) MASA 建築構造設計室, 技術主任, 工修

\*2: (有) MASA 建築構造設計室, 代表取締役

\*3: 東京理科大学理工学部, 教授, 工博

Technological Chief, Masa Architectural Design Bureau, M. Eng. Director, Masa Architectural Design Bureau Prof., Tokyo University of Science Dr. Eng.