

【3.1.3 粘弾性ダンパーの検討】成果

粘弾性ダンパーを有する木造住宅の風応答を考慮した材料試験と応答の試算

下村祥一^{*1} 大熊武司^{*2}

(^{*1} 神奈川大学工学部助手, ^{*2} 神奈川大学工学部教授)

1 はじめに

木造住宅の耐震性向上という観点から、粘弾性ダンパーが利用され始めている。一般的に粘弾性体は温度依存性があり、台風のような長時間作用する動的外乱に対して温度が上昇し、設計上の性能が発揮されない恐れがある。多数回繰り返し加力実験は曾田等¹⁾などがあるが、研究の多くは地震を対象としており、風外乱に対する性能に言及したものはあまりない。本研究は、風外乱を受ける木造住宅を想定し、先ず長時間加力実験を行い粘弾性材料の力学的特性を把握する。次いで実験結果を踏まえて周波数解析法により風応答の試算を行う。なお、本研究の成果は文献²⁾に公表されている。

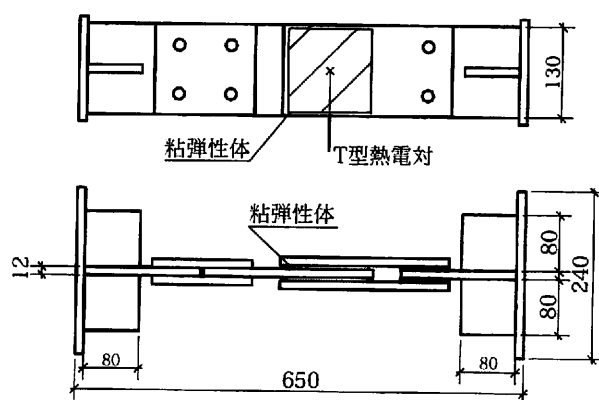


図1 試験体形状

2 粘弾性体の繰り返し加力実験

2.1 試験体および実験方法

粘弾性体に正弦波せん断ひずみを与える機構を対象とする。図1に試験体形状を示す。使用する粘弾性材料はアクリル系粘弾性体で、この材料は振動数依存性、温度依存性を有している。また、本研究の振幅の範囲内では剛性は振幅に依存せず、線形性を有している。表1に実験パラメータを示す。せん断面積は、120×120mmの2面せん断と85×85mmの2面せん断の2種類で、せん断厚さは5mmである。

加力は、正弦波による動的繰り返し加力とし、連続した10サイクル(短時間加力)と10,000サイクル(長時間加力)を行う。試験体は恒温室内に設置する。熱電対により粘弾性体温度と恒温室内の空気温度を計測する。粘弾性体の温度が所定温度で定常になったことを確認してから加力を行う。

2.2 実験データの整理

粘弾性体に正弦波せん断ひずみを与えると、せん断応力度 $\tau(t)$ は位相角 δ を持つ。せん断応力度は、 τ_0 をせん断応力度振幅、 γ_0 をせん断ひずみ振幅として貯蔵せん断弾性率 G' と損失せん断弾性率 G'' を用いて(1)式で表される。

表1 実験パラメータ

加力パターン	正弦波ひずみ振幅	
粘弾性体材料	アクリル系(住友3M社ISD111)	
粘弾性体形状	85×85×5mm、120×120×5mm	
サイクル数	10サイクル	10,000サイクル
初期温度	10, 20, 30°C	20°C
加力周波数	0.1, 0.3, 1, 2, 3Hz	0.1, 1, 3Hz
振幅	20, 50, 100%	20, 50, 100%

$$\begin{aligned}\tau(t) &= \tau_0 (\sin \omega t \cos \delta + \cos \omega t \sin \delta) \\ &= \gamma_0 (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t)\end{aligned}\quad (1)$$

実験で得られるせん断応力度の N 個の標本値 τ_m ($m = 0, 1, 3, \dots, N-1$) の有限フーリエ係数を求め、(1) 式と周波数の等しい項での係数比較より G' と G'' を求め、両者の比より損失係数 η を求める。粘弾性構成則には分数階微分による線形構成則³⁾を、温度振動数換算則には伊藤の簡略式⁴⁾をそれぞれ用い、短時間加力結果から (2-4) 式のパラメータ a , b , α , G を同定する。

$$G'(\omega) = G \frac{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a^2\omega^{2\alpha} + 2a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (2)$$

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

$$\log \alpha_T = -c(T - T_r) \quad (4)$$

ここに、 T : 対象温度, T_r : 基準温度である。

3 実験結果

3.1 短時間加力

図 2 に貯蔵弾性率と損失係数およびその分数階微分によるモデル曲線を示す。20°C のとき、 $a = 1.91 \times 10^{-5}$, $b = 2.84$, $\alpha = 0.556$, $G = 0.0344(\text{N/mm}^2)$ で、笠井等の実験結果³⁾とおおむね同じ結果である。基準温度 $T_r = 20^\circ\text{C}$ 、対象温度 $T = 10^\circ\text{C}$ としたとき、 $c = -0.1765$ である。

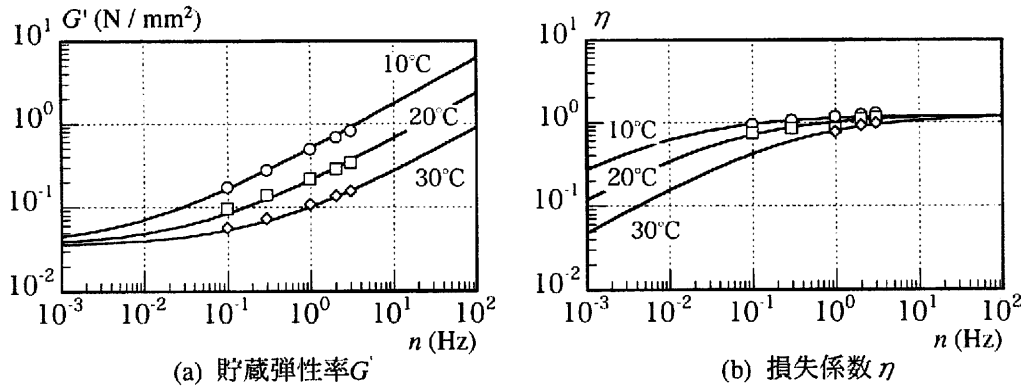


図 2 貯蔵弾性率と損失係数の実験結果とモデル曲線

3.2 長時間加力

図 3 に加力サイクル数に対する温度の変化と貯蔵弾性率の変化を示す。振動数 0.1Hz では 10,000 サイクル後も温度の上昇はほぼ見られない。1Hz, 3Hz では、温度、貯蔵弾性率は 1,000 サイクルまでに急激に変化して、その後、一定か緩やかに変化する。3Hz では振幅 100% の時の 10,000 サイクル後は 50 °C 弱まで温度が上昇する。なお、長時間加力においても安定した履歴ループを描き、材料の劣化に起因する力学特性の変化は見られなかった。

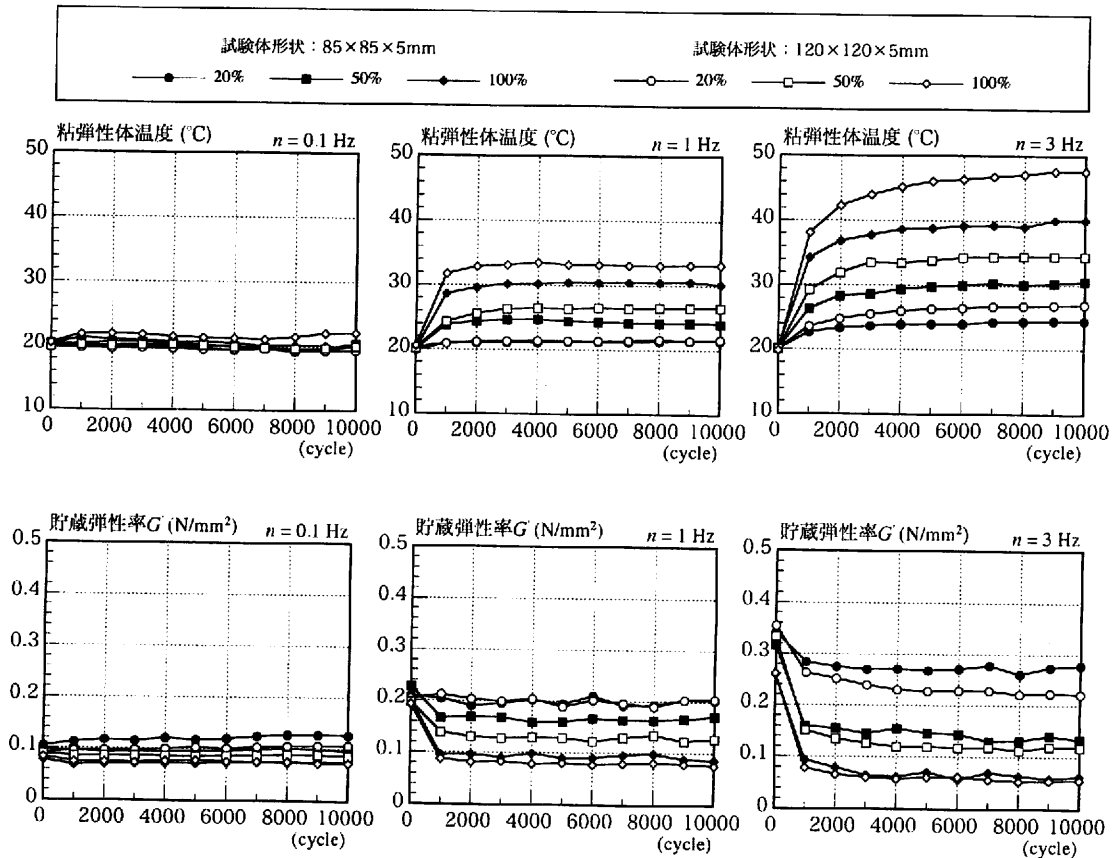


図3 長時間加力時の温度経時変化と貯蔵弾性率経時変化

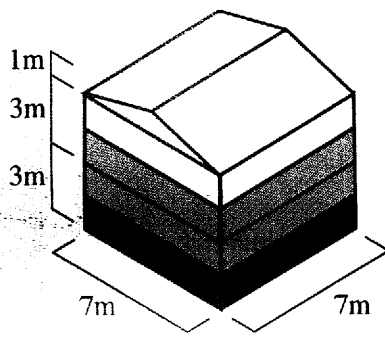
4 周波数応答解析法による風応答の試算

4.1 解析モデル

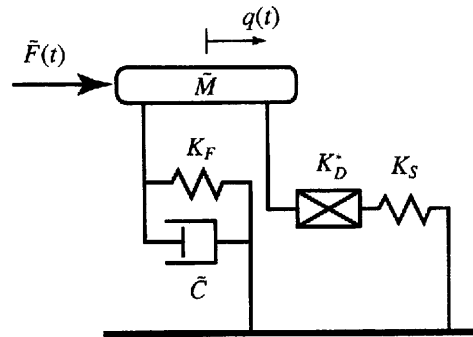
総2階建て木造住宅を想定し、「非制振建物」と粘弾性ダンパーを設置した「制振建物」を対象とする。対象建物の1次振動モードを頂部が1の直線とし、解析はモーダル1次を対象とする。図4に対象建築物と解析モデル（制振建物の場合）を示す。非制振建物のモーダル剛性 $\bar{K}$ すなわち主架構剛性 $\bar{K}_F$ は、再現期間50年の最大瞬間風速による風力で層間変形角1/150に達する剛性とする。このとき固有振動数は $n_0 = 1.96\text{Hz}$ である。制振建物のダンパー複素剛性は $K_D^* = K_D'(1 + i\eta)$ で、貯蔵剛性 K_D' と損失係数 η には3.1節で求めた構成則と温度振動数換算則を適用する。20°C、1.96Hzのときに $K_D'/K_F = 1/2$ とし、このときの系全体の剛性が非制振建物のモーダル剛性と等しくなるよう各要素の剛性を定める。ただし、 K_F に対する取り付け部材剛性 K_S の比を1とする。主架構の内部粘性減衰係数 $\bar{C}$ は剛性比例型とし、 $h_F = 4\%$ 減衰定数とする。

4.2 風力特性

モーダル風力 $\bar{F}$ は、風の性質は高さ方向に一様で、変動風力は準定常仮定に従いかつ風速の変動成分に比例すると仮定してシミュレートする。建設地の地表面粗度区分をIIIとし、乱れ強さ $I_u = 0.3$ 、乱れのスケール $L_x = 46\text{m}$ とする。平均風速は、再現期間1年、10年、50年を想定した16m/s、21m/s、26m/sとする⁵⁾。図5に、風速26m/sの場合の風力のパワースペクトル密度を示す。



(a) 対象建築物



(b) 解析モデル(制振建物の場合)

図4 対象建物と解析モデル

4.3 振動方程式

屋根部分（地上高さ 6m）のモーダル応答を $q(t)$ として、制振建物の時間領域での振動方程式は (5) 式となる。

$$\tilde{M}\ddot{q}(t) + \tilde{C}\dot{q}(t) + K_F(1 + k' + ik'') = \tilde{F}(t) \quad (5)$$

変位 $q(t)$ とモーダル風力 $\tilde{F}(t)$ をフーリエ変換により周波数領域で表す。また、(5) 式は、応答に関して線形であるとして (6) 式の周波数領域で表す。

$$K_F \left[1 - (n/n_0)^2 + k' + i \{ 2h_F(n/n_0) + k'' \} \right] q(n) = \tilde{F}(n) \quad (6)$$

4.4 解析方法

解析は、シミュレーションで得られたモーダル風力の時刻歴データをフーリエ変換し、(6) 式から $q(n)$ を求める。これを逆フーリエ変換することにより $q(t)$ を求める。解析時間は 1000 秒間で、応答の評価時間は風力の漸増時間（最初の 400 秒）を除いた 600 秒間とする。

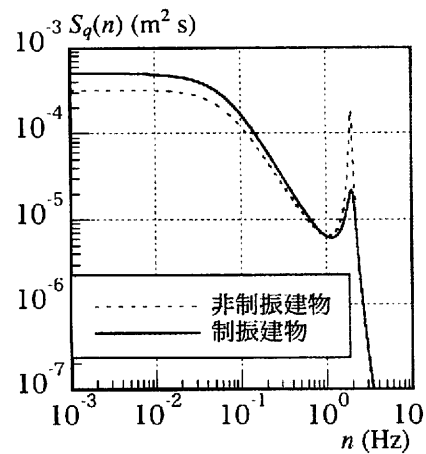
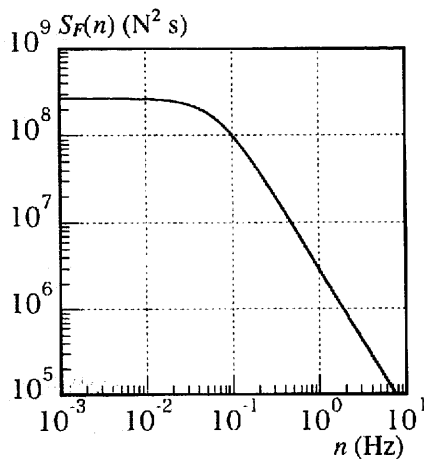


図5 再現期間 50 年の風力のパワースペクトル密度 図6 応答のパワースペクトル密度 (26m/s, 20°C)

4.5 解析結果

4.5.1 制振効果の検証

図6に平均風速 26m/s, 温度 20°C の場合の応答のパワースペクトル密度 $S_q(n)$ を示す。制振建物は非制振建物に比べ、低振動数成分の応答は大きくなり固有振動数成分は低減する。

図7に温度 20°C と 40°C の応答の最大値と標準偏差を示す。最大値、標準偏差ともに、20°C の場合、制振建物の応答は低減されるが、40°C の場合は制振建物の応答は増大する。図8に復元力特性を示す。温度が高くなると粘弾性体の剛性低下により系全体としての剛性も低下する。さらに履歴ループの面積が小さくなり減衰力が小さくなる。このことが、40°C の場合に非制振建物より制振建物の応答がおおきくなると思われる。

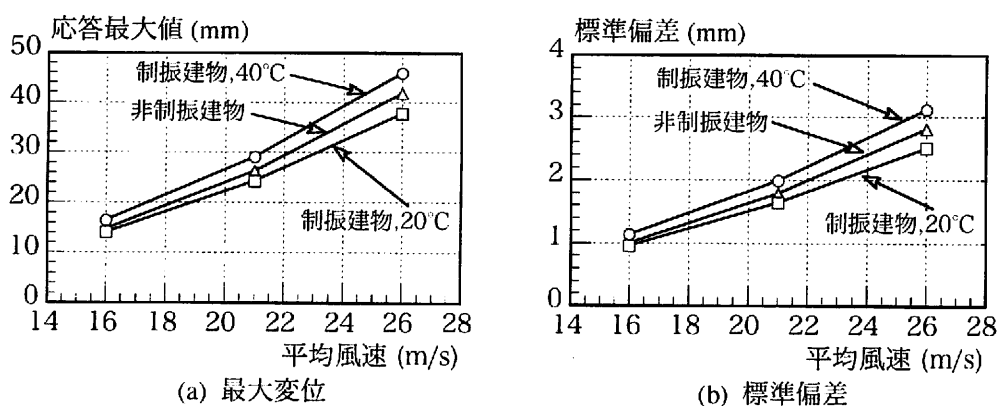


図7 応答の最大値と標準偏差

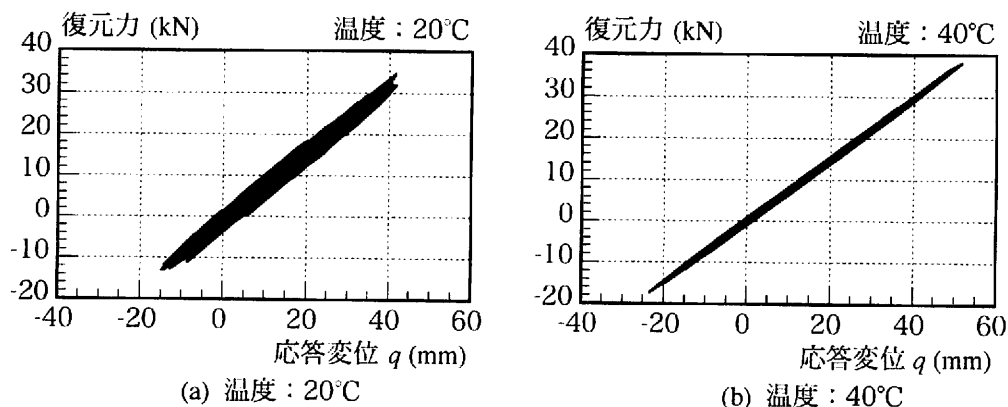


図8 復元力特性 (制振建物, 風速 26m/s)

4.5.2 長時間加力に対する制振効果の検証

図9に強風が60分間継続した場合の30分後と60分後の粘弾性体温度を条件として解析した結果を示す。粘弾性体温度は実験結果(図3)を参考におおよその値を求めた。30分以前の応答の変化に比べ、30分以後の応答の変化は小さい。

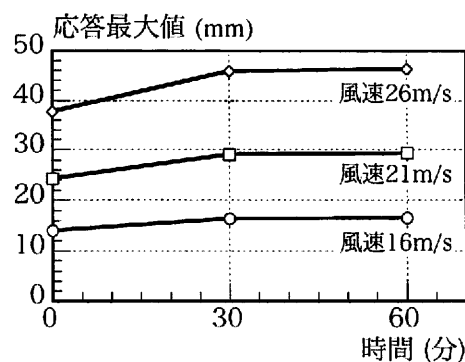


図9 長時間加力を考慮した応答の最大値

5 まとめ

粘弾性ダンパーの長時間加力実験を行い、粘弾性体の温度上昇量と剛性変化量を示した。また、木造住宅の風応答の試算を行い、その制振効果について検討した。得られた知見は以下の通りである。

1. 長時間加力に対して、歪み振幅の繰り返し数が最初の 1000 回程度までに粘弾性体の温度が上昇し、その後は温度が一定となるか緩やかに上昇する。
2. 本実験で行ったパラメータの範囲では、長時間歪み振幅を繰り返すことによる粘弾性体の材質劣化は見られなかった。
3. 粘弾性ダンパーは、常温である 20°C 程度より低温の範囲ではエネルギーを吸収し、制振効果を発揮する。しかし 40°C 程度では非制振建物より応答が大きくなる。
4. 長時間継続する強風を受ける場合、粘弾性体温度の上昇により、継続時間中に応答値は初期の値から増大する。

参考文献

- 1) 曾田他：繰返加力実験にもとづく粘弾性ダンパーの力学モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，第 457 号，pp.29-36，1994.3.
- 2) 下村，大熊：粘弾性ダンパーを有する木造住宅の風応答を考慮した材料試験と応答の試算，日本建築学会大会学術講演梗概集，2005.9.
- 3) 笠井他：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，日本建築学会構造系論文集，第 543 号，pp.77-86，2001.5.
- 4) 伊藤：粘弾性特性を有するエネルギー吸収材料を用いた建築耐震構造の地震応答特性に関する研究，東北大学学位論文，2000.4.
- 5) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，1993.