

高粘性液体ダンパーの復元力モデルの構築

吉田純司¹・杉山俊幸²・杉山淳之介³・服部博⁴

¹正会員 博士(工) 山梨大学助教授 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

²正会員 工学博士 山梨大学教授 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

³非会員 三晃金属工業(株) 大阪支店 工事技術サービスグループ (〒550-0001 大阪市西区土佐堀 1-4-8)

⁴学生会員 山梨大学 大学院 医学工学総合教育部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

1. はじめに

近年、地震荷重、風荷重および交通荷重の下での構造物の振動の低減を目的として、高いエネルギー吸収性能を有する粘弾性ダンパーを利用した耐震・制振構造が広く用いられている¹⁾。粘弾性ダンパーの一つである高粘性液体ダンパーは、耐候性、耐久性に優れた高粘性の液体高分子材料を利用した耐震・耐風デバイスであり、そのエネルギー吸収性能は、温度や載荷振動数に加え振幅に依存することが知られている。

耐震・制振構造において、粘弾性ダンパーは減衰効果を積極的に用いているため、構造物全体の挙動に大きく影響する。従って構造物の応答を精度よく予測するためには、広範な条件下に対応したダンパーの力学モデルの構築が必要となる。このことから、これまで粘弾性ダンパーの力学挙動の把握および復元力モデルの構築を中心として多くの研究が行われている。

伊藤ら²⁾は、既往の代表的な粘弾性モデルを取り上げ、実ダンパーに対する適用性を比較検討している。黄ら³⁾は、粘弾性を有する固体高分子材料を利用したダンパーを対象に広い温度・振動数の範囲で載荷実験を行い、比較的簡易なモデルを用いて実験結果の再現に成功している。また、笠井ら^{4), 5), 6)}は、様々な固体高分子材料を用いた粘弾性ダンパーを対象に体系的な載荷実験を行い、振動数・温度ならびに振幅依存性を含む分数次微分型の粘弾性モデルを提案している。

一方、液体高分子材料を用いたダンパーについては、下田⁷⁾により実用的な振動数範囲に対応した Maxwell 型の粘弾性モデルが提案されている。また、Makris ら^{8), 9)}は、微小振幅域を対象として広い振動数・温度条件に対応した分数次微分型および複素数

次微分型の Maxwell モデルを提案している。さらに、和氣ら¹⁰⁾および佐々木ら¹¹⁾は、高粘性流体の純せん断時での応力-ひずみ関係を対象に、温度・振動数・ひずみ依存性を含む 1 次元の高精度な粘弾性構成則を提案している。ただし、これらの研究では、流体の持つ粘弾性特性のみを対象とし、ダンパーが大変形する際の流体の移動に伴う復元力の低下や、流体と境界間に生じる滑りなどの影響は考慮していない。

本研究では、コロイド系アスファルトの高粘性流体を用いたダンパーを対象として、広い振動数・温度・振幅の範囲においてその復元力特性を把握し、ダンパーの挙動を精度よく再現する力学モデルの構築を目的とする。

具体的にはまず、高粘性液体ダンパーの動的載荷実験を行い、復元力特性の振動数・温度・振幅依存性を把握するとともに、粘弾性特性の抽出を行う。次に、微小振幅域での振動数・温度依存性を考慮した復元力モデルを提案する。最後に、提案した粘弾性モデルを拡張し、大振幅域での復元力の低下および境界とのすべりを導入した粘弾塑性ダメージモデルを構築する。

2. 載荷実験によるダンパーの動特性の把握

(1) 試験体

本載荷実験で用いたダンパーの試験体について図-1に示す。試験体の寸法は、後述する載荷装置の性能内で十分な大きさの変形と、測定可能な荷重範囲に収まるように縮小模型を用いている。具体的には、斜張橋ケーブルの制振用ダンパーの 1/3 程度、大型構造物用の耐震壁の 1/30 程度の大きさであり、図-1に示すように、内部の寸法が長さ 150mm、高さ 100mm、幅 10mm の直方体型容器に、底面から 80

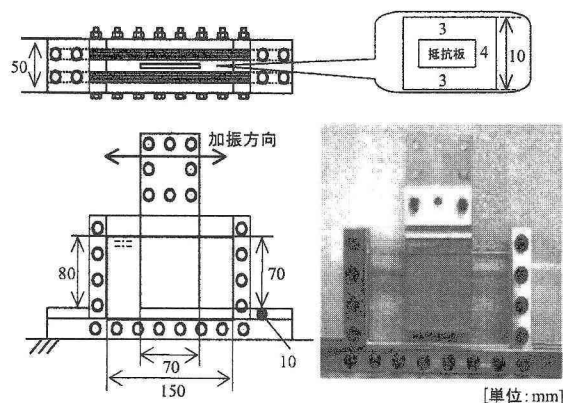


図-1 載荷実験に用いた高粘性液体ダンパーの試験体

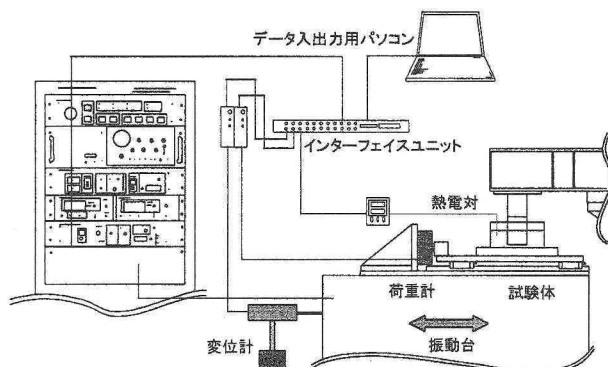


図-2 載荷装置および計測装置の概略

表-1 ダンパーの載荷実験における温度・振動数・振幅のパターン (○：実施，－：実施せず)

温度 [℃]	振幅 [mm]	振動数 [Hz]									
		0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	7
5	2	—	—	—	—	○	—	○	○	○	—
	10	—	—	—	—	○	—	○	—	—	—
10	2	—	—	○	—	○	—	○	○	○	○
	10	—	—	○	—	○	—	○	○	—	—
20	0.5	—	—	—	○	—	○	○	—	○	○
	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—
	10	—	—	○	—	○	—	○	○	—	—
	15	—	—	○	—	○	—	○	○	—	—
30	2	—	—	○	—	○	—	○	○	—	—
	10	—	—	○	—	○	—	○	○	—	—
40	2	—	—	○	—	○	—	○	○	—	—
	10	—	—	○	—	○	—	○	○	—	—

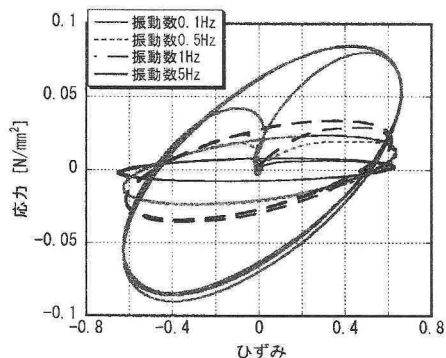


図-3 微小振幅(2mm)で振動数を変化させたときの復元力特性 (温度：20°C)

mm の位置まで粘性流体を注入している。また、容器中央部に幅 70mm、厚さ 4mm の抵抗板を、深さ 70mm の位置まで挿入し、この抵抗板と流体との間で生じる抵抗が、試験体の復元力となる構造になっている。なお、図-1 の写真が示すように試験体は、内部の流体の挙動が観察できるよう容器の側壁に透明なアクリル板を用い、かつ流体も透明なものを用いている。

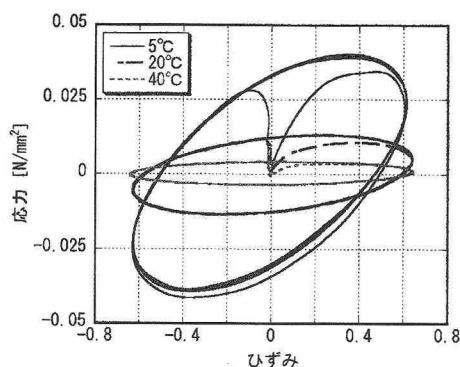
(2) 実験装置

本実験では、図-2 に示すように振動台上に試験体

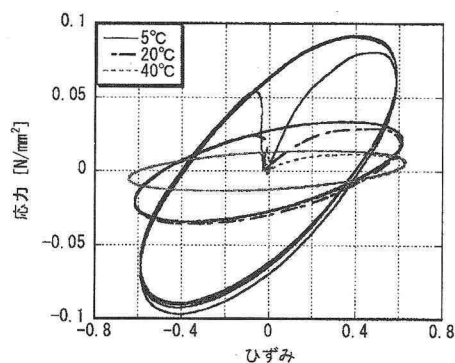
を設置し、試験体中心部に外部に固定された抵抗板を挿入して、水平 1 方向の加振を行った。実験では、試験体と抵抗板との間に生じる荷重と、変位に加え、熱伝対を用いて流体内部の温度を計測している。用いた振動台は、最大載荷振幅 25mm、最大加速度 2G、加振力 500 kN の性能を有する水平 1 方向の振動台であり、本研究では、外部からの変位制御により加振を行った。また、荷重については、最大荷重 20kN のロードセルにより計測している。

(3) 実験方法

対象としているダンパーの復元力特性は、温度、振動数、振幅に依存することから、実験ではこれらをパラメータとして体系的な載荷を行った。具体的には、初期温度を 5°C、10°C、20°C、30°C、40°C の 5 段階、振動数を 0.01Hz、0.02Hz、0.05Hz、0.1Hz、0.2Hz、0.5Hz、1Hz、2Hz、5Hz、7Hz の 10 段階、振幅を 0.5mm、1mm、2mm、5mm、10mm、15mm の 6 段階に分類し、そのうちの有意なもの 73 パターンを取り上げて正弦波変位による動的載荷を行った。実際に行った載荷パターンを表-1 に示す。なお、温度制御に関しては、ダンパーの自己発熱の影響により載荷過程を通して温度を一定に保つことは困難となる。このことから試験開始時の温度のみ



(a) 振動数 0.2Hz



(b) 振動数 1Hz

図-4 微小振幅域(2mm)で温度を変化させたときの復元力特性

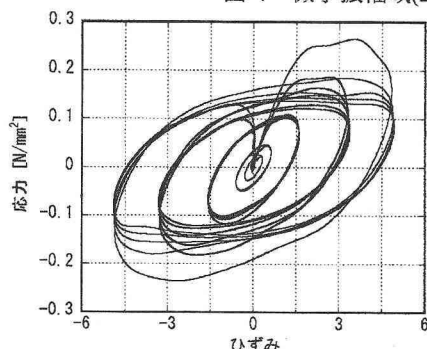


図-5 振幅を変化させたときの復元力特性 (温度: 20°C, 振動数: 1Hz)

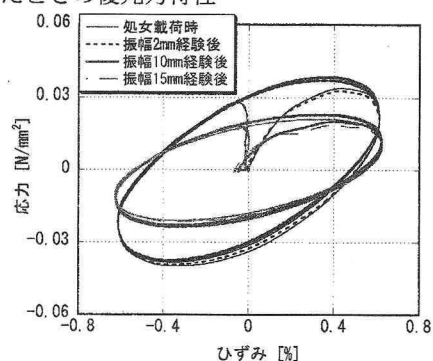


図-6 処女載荷時の復元力特性と大振幅経験後の復元力特性の比較

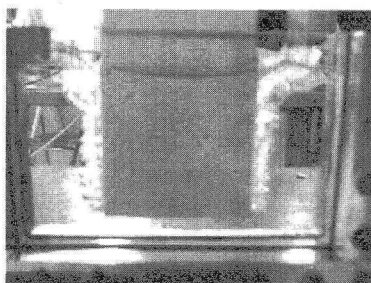


図-7 大振幅経験後に生じる抵抗板側面の空隙

を制御の対象とし温風器を用いて試験体内部まで温度が一定になった後、载荷を実施した。

本節以降に示す実験結果および解析モデルとの比較では、ダンパーの大きさの影響を考慮するために、変位を容器と抵抗板の間に生じた片隙間(3mm)で除した値を「ひずみ」、荷重を抵抗板の面積(4900mm²)で除した値を「応力」と呼び、変位、荷重に代わりこれらの値を用いることとする。

(4) 実験結果と考察

a) 振動数・温度依存性

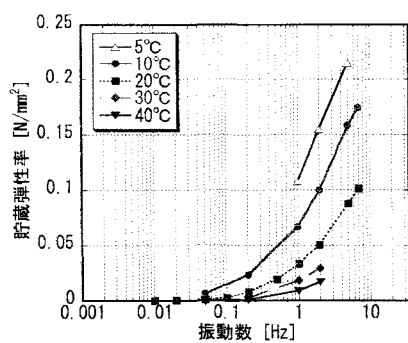
図-3は、20°Cの微小振幅域で振動数を変化させたときの復元力特性を表す。また、図-4は、微小振幅域で温度を変化させたときの復元力特性を表す。これらの結果から高振動数、低温度であるほど復元力が増加し、逆に低振動数、高温度であるほど復元力が減少している。この性質は、既往の研究における

固体ダンパーでの傾向^{2)~6)}と同一である。

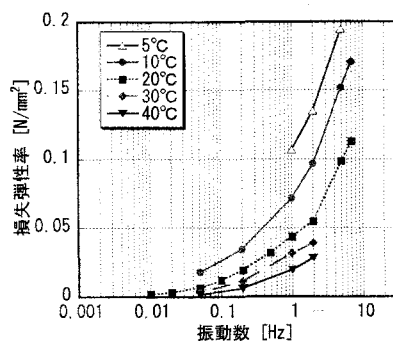
b) 振幅依存性

図-5は、20°Cで振幅を変化させたときの復元力特性を表す。図-5より、ひずみがある程度大きくなると、応力-ひずみ関係が楕円形状(線形粘弾性での性質)の履歴ループを描かなくなる。具体的には、ひずみが150%程度以上になると、弾塑性でいう降伏のような挙動が少しずつ現れ、ひずみの増加に伴い応力が低下してくる。推測の域を出ないが、この現象は、流体と境界との間で、すべりのような現象が生じているものと考えている。また、微小振幅域での応力-ひずみ関係と比較すると、繰り返しのサイクル数の増加に伴い、応力の顕著な低下が見られる。この劣化のような現象は、1つには繰り返し载荷の影響で流体が自己発熱し、温度が上昇したことに起因する。特に大振幅域においては、発熱量が大きいことから流体に有意な温度変化が生じ、その影響で応力が低下している。

もう一つの原因として、図-7に示すように大振幅経験時に生じる抵抗板側面での空隙が挙げられる。この現象は大振幅での処女载荷直後に顕著に現れることから、現象論的には応力-ひずみ関係が最大経験ひずみ依存性を有しているような挙動であると言える。図-6は、大振幅を経験した後に、それ以下の振幅の正弦波を与えたときの復元力特性を表している。図-6より、大振幅経験後に同じ振幅で载荷を行った



(a) 貯蔵弾性率 G'



(b) 損失弾性率 G''

図-8 微小振幅(2mm)における複数の温度条件下での振動数に対する貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G''

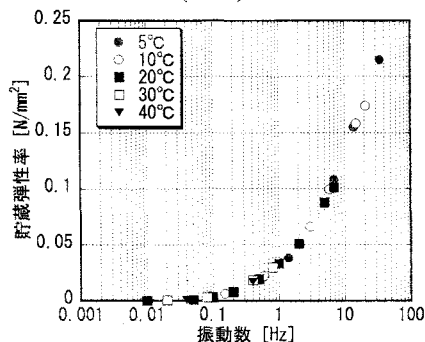


図-9 微小振幅(2mm)での貯蔵弾性率のマスター曲線

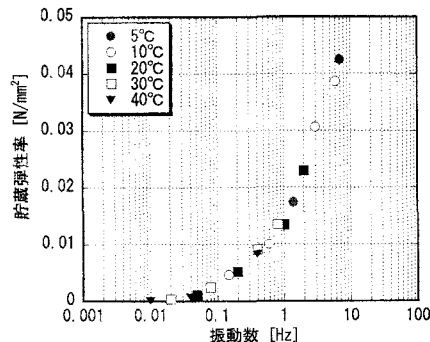


図-10 大振幅(10mm)での貯蔵弾性率のマスター曲線

表-2 マスター曲線を作るための平行移動量

平行移動量	温度				
	5 [°C]	10 [°C]	20 [°C]	30 [°C]	40 [°C]
$\log_{10} a_T$	7.0	3.0	1.0	0.40	0.20

場合には、その応力値が最大で 50%程度低下していることがわかる。このことから、特に大振幅を経験した後は、復元力特性がその最大経験ひずみに大きく依存することがわかる。

以上のように、ダンパーの挙動は、振動数・温度・振幅に加え、最大経験ひずみに依存するため、復元力のモデル化ではこれらの影響を導入していく。

3. 粘弾性特性の抽出

(1) 貯蔵弾性率と損失弾性率

得られた復元力特性より、代表的な粘弾性特性である貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G'' を抽出する。ここに貯蔵弾性率とは最大変形点での剛性を表し、また、損失弾性率とは履歴面積に関連した量で、両者は次式のように表される。

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0}, \quad G'' = \frac{S}{\pi \gamma_0^2} \quad (1a,b)$$

ここに γ_0 は正弦波での繰り返し载荷における振幅、 σ_0 は γ_0 における応力、 S は応力-ひずみ関係での 1 サイクル分の履歴面積である。

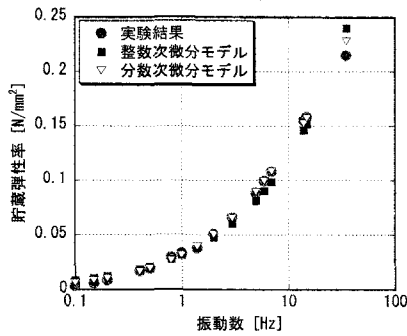
G' 、 G'' は、振動数と温度の変化に対し、粘弾性の特徴を表現する量であり¹²⁾、以下の温度・時間換

算則およびモデル化で用いる。一例として、図-8 に振幅 2mm での実験から得られる G' 、 G'' を示す。

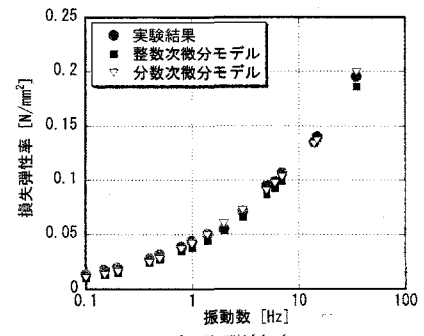
(2) 温度・時間換算則の導入

温度・時間換算則とは、温度に関する粘弾性特性と、時間に関する特性が互いに可換であるという法則である¹²⁾。この法則は、既往の粘弾性材料の実験結果から得られた経験則であるが、高分子材料では広く成立することが知られている。具体的には、振幅条件を固定し、様々な振動数と温度の条件で得られている G' 、 G'' について、横軸を振動数にとって、図示した場合の曲線は、平行移動すると一本の曲線になり、かつこの平行移動量が温度の関数として表せるというものである。

図-9 は、20°C を基準温度として固定し、図-8 (a) に示した 5 つの温度での貯蔵弾性率の曲線を横軸に $\log_{10} a_T$ だけ平行移動させたものである。また、図-10 は大振幅での実験において同様な操作を行った結果を示している。各温度での平行移動量 $\log_{10} a_T$ は、振幅の大きさ関係なく表-2 に示す値が得られた。このことから、一般に微小変形の範囲で成立することが知られている時間・温度換算則だが、対象としたダンパーの復元力については振幅の大きさに関わらず成立することがわかった。同様の結果が本ダンパーで用いている流体単独での材料試験結果でも示されている¹⁰⁾。図-9、図-10 に示した平行移動によりできる 1 本の曲線をマスター曲線と呼び、モデル化においてパラメータを同定する際に用いる。

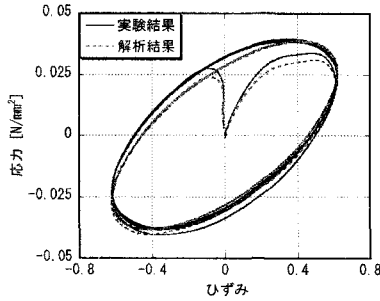


(a) 貯蔵弾性率

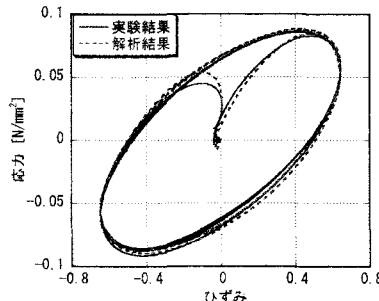


(b) 損失弾性率

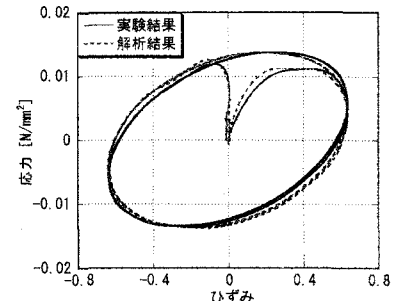
図-11 微小振幅(2mm)での貯蔵弾性率および損失弾性率と粘弾性モデルから算出した値との比較



(a) 温度 5°C, 振動数 0.2Hz



(b) 温度 20°C, 振動数 5Hz



(c) 温度 40°C, 振動数 1Hz

図-12 微小振幅(2mm)での復元力特性と、粘弾性モデルによる解析結果の比較

4. 微小振幅領域における復元力モデル

(1) 振動数・温度依存性を含む粘弾性モデル

微小振幅域での応力-ひずみ関係を再現する復元力モデルとして、2要素の分数次微分型 Maxwell モデルを用いる。分数次微分型の粘弾性モデルについての詳細は文献 2), 13) を参照されたい。ひずみ γ が与えられたとき、本モデルの応力 σ を求めるための具体的な式は、以下のように表すことができる。

$$\sigma = \sum_{i=1}^2 \sigma_i \quad (2a)$$

$$\sigma_i + \tau_i^{\alpha_i} \cdot \frac{d^{\alpha_i} \sigma_i}{dt^{\alpha_i}} = G_i \cdot \tau_i^{\alpha_i} \cdot \frac{d^{\alpha_i} \gamma}{dt^{\alpha_i}} \quad (2b)$$

$$\tau_i^{\alpha_i} = (\tau_i^{(0)} \cdot a_T)^{\alpha_i} \quad (2c)$$

$$\log_{10} a_T = -C_1 \frac{T - T_0}{C_2 + T - T_0} \quad (2d)$$

ここに T は温度である。また、 $\tau_i^{(0)}$ 、 G_i および α_i は、それぞれ各 Maxwell モデルでの応力緩和時間（基準温度 T_0 の）、剛性および微分の次数を表す正の実定数である。なお、式(2d)は、 C_1 、 C_2 をパラメータとし、マスター曲線を作成する際の平行移動量 a_T と温度 T との関係、すなわち粘性の温度依存を表す実験式(WLF 則と呼ばれる¹²⁾)であり、既往のダンパーの復元力モデルでも広く利用されている^{3)~6)}。

(2) パラメータの同定

上述した粘弾性モデルに含まれるパラメータ $\tau_i^{(0)}$ 、 G_i 、 α_i は、式(2)から得られる貯蔵弾性率および損

失弾性率と、図-9 に示したマスター曲線との差が最小となるよう遺伝的アルゴリズム¹⁴⁾を用いて同定した。また、 $T_0 = 20 [^{\circ}\text{C}]$ とし、 C_1 、 C_2 は、マスター曲線作成時の平行移動量と温度の関係が式(2d)と一致するよう決定した。図-11 は、実験で得られた貯蔵弾性率 G' 、損失弾性率 G'' と、同定したパラメータを用いたモデルでの値の比較である。図には、参考のため 2 要素の整数次微分型 Maxwell モデル ($\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ とした場合)を用いて、 G' 、 G'' を近似した結果も示している。図より、実験結果の再現性に関して、2つの粘弾性モデルは概ね同程度であるが、細かくみた場合、分数次微分型モデルの方が若干近似精度が高いといえる。以後のモデル化では一般性を保つために分数次微分モデルを用いて展開を進めるが、同様の議論は整数次微分モデルでも成立する。

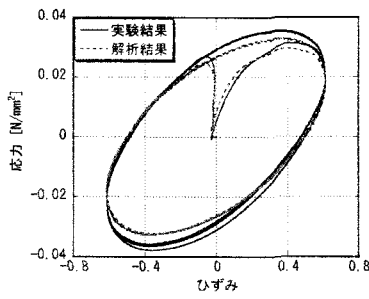
(3) 実験結果との比較

実験結果の復元力特性と比較したグラフを図-12 に示す。図より、提案した粘弾性モデルは、広い振動数・温度範囲における微小振幅域での実験結果を精度よく再現できることがわかる。

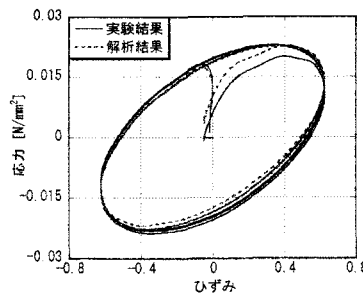
5. 大振幅領域における復元力モデル

(1) 最大経験ひずみ依存性のモデル化

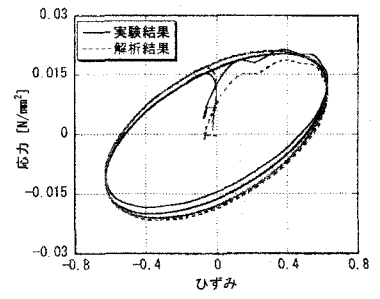
本研究では、ダンパーの復元力特性に見られた最大経験ひずみ依存性（抵抗板側面の流体が大移動することで空隙ができる現象）を、ダメージモデル¹⁵⁾



(a) 振幅 5mm(ひずみ 1.67)経験後



(c) 振幅 10mm(ひずみ 3.33)経験後



(c) 振幅 15mm(ひずみ 5.0)経験後

図-13 大振幅での载荷を経験後の復元力特性と粘弾性ダメージモデルによる解析結果の比較(温度:20℃, 振動数:1Hz)

により再現することを試みる。

a) 内部変数の導入

式(2)に示した2要素の Maxwell モデルにおいて、 i 番目 ($i=1,2$) の Maxwell モデルのダッシュポットに作用するひずみを $\gamma_i^{(d)}$ とし、

$$W_i = \frac{1}{2} G_i \gamma^2, \quad q_i = G_i \cdot \gamma_i^{(d)} \quad (3a,b)$$

などと置とくと、これらの量を用いて式(2)は以下のように書き直すことができる。

$$\sigma = \sum_{i=1}^2 \frac{\partial W_i}{\partial \gamma} - q_i \quad (4a)$$

$$q_i + \tau_i^{\alpha_i} \frac{d^{\alpha_i} q_i}{dt^{\alpha_i}} = \frac{\partial W_i}{\partial \gamma} \quad (4b)$$

$$\tau_i^{\alpha_i} = (\tau_i^{(0)} \cdot a_T)^{\alpha_i}, \quad \log_{10} a_T = -C_1 \frac{T - T_0}{C_2 + T - T_0} \quad (4c,d)$$

上式は、式(2)と数学的に完全に等価なモデルであり、上式で用いている q_i は、モデルの応力 σ を算出する上で必要となる内部変数である。 q_i は、物理的には、無限大のひずみ速度での応力 $\partial W_i / \partial \gamma$ と、有限のひずみ速度での応力との差を表しており余剰応力 (over-stress) などと呼ばれている¹⁵⁾。

b) 粘弾性ダメージモデル

次いで、式(4)で表される2要素の Maxwell モデルに最大経験ひずみに依存するダメージを導入する。文献¹⁵⁾に従い、無限大のひずみ速度での応力 $\partial W_i / \partial \gamma$ が過去に経験した最大ひずみに依存するようダメージ関数を導入すると、以下のような関係式を得る。

$$\sigma = \sum_{i=1}^2 \frac{\partial W_i}{\partial \gamma} - q_i \quad (5a)$$

$$q_i + \tau_i^{\alpha_i} \frac{d^{\alpha_i} q_i}{dt^{\alpha_i}} = \frac{\partial W_i}{\partial \gamma} \quad (5b)$$

$$W_i = g(\Xi) \cdot \frac{1}{2} G_i \gamma^2 \quad (5c)$$

$$\tau_i^{\alpha_i} = (\tau_i^{(0)} \cdot a_T)^{\alpha_i}, \quad \log_{10} a_T = -C_1 \frac{T - T_0}{C_2 + T - T_0} \quad (5d,e)$$

ただし、 t を現時刻として $\Xi(t)$ はダメージ指標であり、本研究では、以下のように過去に経験した最大

のひずみ量とする。

$$\Xi(t) = \max_{0 \leq s \leq t} |\gamma(s)| \quad (6)$$

また、 $g(\Xi)$ は上述したダメージ指標 Ξ を独立変数とするダメージ関数であり、ある程度の大きさ以上のひずみを経験後にダメージが急激に生じるような形関数を用いることを提案する。

$$g(\Xi) = 1 - b \cdot \frac{(\Xi/a)^n}{1 + (\Xi/a)^n} \quad (7)$$

ただし a , b , n は、それぞれダメージの進行率が最大となるひずみ、 $|\gamma| \rightarrow \infty$ でのダメージの割合、ダメージの進行率を制御するパラメータ、であり、 $0 < a$, $0 \leq b \leq 1$, $1 \leq n$ を満たす実定数である。

この粘弾性ダメージモデルでは、ダメージ関数のパラメータに適切な値を設定すると、微小振幅域ではダメージをほとんど受けず式(2)と同一の挙動を示し、振幅が大きくなるにつれてダメージ量が増加するもののある程度まで進行すると一定量のダメージに収束するようになる。従って微小振幅での実験結果から同定したパラメータ $\tau_i^{(0)}$, α_i , G_i ($i=1,2$) および C_1 , C_2 , T_0 はそのまま用いることができる。

c) パラメータの同定

上述した粘弾性ダメージモデルの新たなパラメータは、 $g(\Xi)$ に含まれる a , b , n である。 $g(\Xi)$ は、ダメージが無い場合の復元力に対する割合を表す関数であることから、大振幅経験後の復元力から得られる貯蔵弾性率と損失弾性率を、処女载荷時の微小振幅での復元力での値で基準化したデータを経験ひずみごとに作成し、それに合致するよう同定した。

d) 実験結果との比較

図-13 は、大振幅での载荷を経験後のダンパーの復元力特性と、上述した粘弾性ダメージモデルによる解析結果との比較の一例を示している。図より粘弾性ダメージモデルにより、実験結果を精度よく再現できていることがわかる。

(2) 振幅依存性のモデル化

a) 弾塑性モデルの導入

大ひずみ域では、流体・境界間の相対ひずみが一

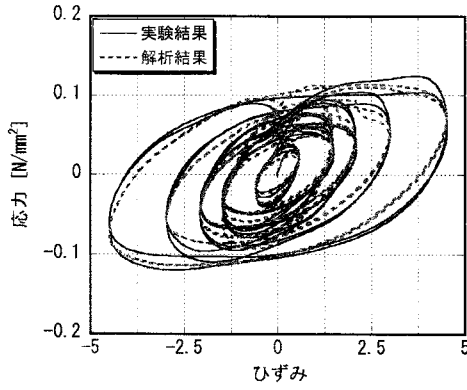


図-14 一連の振幅での実験結果と粘弾塑性ダメージモデルによる解析結果の比較(温度:20℃, 振動:1Hz)

定の値以上で滑りが生じると考え、その摩擦力を導入するため、式(5)における弾性部を弾塑性モデルに拡張する。具体的には、式(5)～(7)で表される粘弾性ダメージモデルにおいて Maxwell 要素の弾性部 $\partial W_i / \partial \gamma$ を多面型弾塑性モデル^{16), 17)}に置き換えると以下のような関係式を得る。

$$\sigma = \sum_{i=1}^2 \left(\delta_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial \gamma} + (1 - \delta_i) \cdot \bar{\sigma}_i \cdot z_i - q_i \right) \quad (8a)$$

$$q_i + \tau_i^{\alpha_i} \frac{d^{\alpha_i} q_i}{dt^{\alpha_i}} = \delta_i \cdot \frac{\partial W_i}{\partial \gamma} + (1 - \delta_i) \cdot \bar{\sigma}_i \cdot z_i \quad (8b)$$

$$W_i = g(\Xi) \cdot \frac{1}{2} G_i \gamma^2 \quad (8c)$$

$$\frac{dz_i}{dt} = A_i \frac{\dot{\sigma}_i^{(e)}}{\bar{\sigma}_i} - \left(\beta_i \left| \frac{\dot{\sigma}_i^{(e)}}{\bar{\sigma}_i} \right| \text{sgn}(z_i) + \xi_i \frac{\dot{\sigma}_i^{(e)}}{\bar{\sigma}_i} \right) |z_i|^{N_i} \quad (8d)$$

$$\sigma_i^{(e)} \equiv \frac{\partial W_i}{\partial \gamma}, \quad \dot{\sigma}_i^{(e)} = \frac{d\sigma_i^{(e)}}{dt} \quad (8e, f)$$

$$\tau_i^{\alpha_i} = (\tau_i^{(0)} \cdot a_T)^{\alpha_i}, \quad \log_{10} a_T = -C_1 \frac{T - T_0}{C_2 + T - T_0} \quad (8g, h)$$

$$g(\Xi) = 1 - b \cdot \frac{(\Xi/a)^n}{1 + (\Xi/a)^n}, \quad \Xi(t) = \max_{0 \leq s \leq t} |\gamma(s)| \quad (8i, j)$$

ここに z_i は弾塑性の履歴ループの形状を制御する内部変数であり、 A_i , β_i , ξ_i , N_i , δ_i , $\bar{\sigma}_i$ ($i=1, 2$) は新たに導入した弾塑性モデルのパラメータである。また、式(8e)の $d\sigma_i^{(e)} / dt$ は以下のように計算できる。

$$\frac{d\sigma_i^{(e)}}{dt} = G_i \left(\frac{dg(\Xi)}{d\Xi} \cdot \frac{d\Xi}{dt} \cdot \gamma + g(\Xi) \cdot \frac{d\gamma}{dt} \right) \quad (9)$$

ただし、

$$\frac{dg(\Xi)}{d\Xi} = \begin{cases} \frac{dg(\Xi)}{d\Xi} \cdot \frac{d\Xi}{d\gamma} \cdot \frac{d\gamma}{dt} & \text{if } \frac{d\Xi}{dt} > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

である。

ここで、採用した弾塑性モデルにおいてバイリニア型の弾塑性復元力を表現するためには、

$$A_i = 1, \quad \beta_i = 0.9, \quad \xi_i = 0.1 \quad (i=1, 2) \quad (11)$$

のようにおくことが提案されている¹⁸⁾ため、本研究でもこれらの値を採用する。また、弾塑性モデルの

融合割合、弾性域から塑性域への遷移の滑らかさ、および降伏ひずみが、各 Maxwell モデルで同一であると仮定し、それぞれの関連するパラメータを

$$\delta \equiv \delta_1 = \delta_2, \quad N \equiv N_1 = N_2, \quad \bar{\gamma} \equiv \frac{\bar{\sigma}_1}{G_1} = \frac{\bar{\sigma}_2}{G_2} \quad (12)$$

のように定める。

以上のような設定を用いると、最終的にモデルに導入される新たなパラメータは、 δ , N , $\bar{\gamma}$ の3つであり、いずれも正の実定数である。なお、式(8)で表される復元力モデルでは、ひずみが降伏ひずみ $\bar{\gamma}$ より小さい範囲では弾性となることから、 $\bar{\gamma}$ を適切に定めれば、微小振幅の範囲において粘弾性モデルとほぼ同一の挙動を示す。このことから、式(2)あるいは式(4)の粘弾性モデルに含まれるパラメータは、そのまま用いることができる。

b) パラメータの同定

上述した粘弾塑性ダメージモデルにおいて、大振幅域での挙動に関係するパラメータは、 δ , N , $\bar{\gamma}$ および a , b , n の計6個である。本研究では、いくつかの大振幅での繰り返し载荷と、その後の微小振幅での繰り返し载荷を一連に行う载荷実験を別途実施し、その結果を基に以下に示す E が最小となるよう実数値 $GA^{19)}$ によりパラメータを同定した。

$$E = \int_0^T [(\sigma^{(e)} - \sigma^{(c)}) \cdot \sigma^{(e)}]^2 dt \quad (13)$$

ただし $\sigma^{(e)}$ は実験での応力、 $\sigma^{(c)}$ はモデルから得られる応力、 T は载荷実験に要した時間である。

c) 実験結果との比較

図-14に、振動数 1Hz, 温度 20℃の条件下で、様々な振幅において繰り返し载荷を行った実験結果と、上述した粘弾塑性ダメージモデルによる解析結果との比較を示す。

図-14より、上述した粘弾塑性ダメージモデルは、大振幅域における応力の低下をよく再現できていることがわかる。ただし、一部実験結果との差異がみられ、今後、自己発熱による温度上昇の影響等を取り入れて改良し、高精度化を計るつもりである。また、他の様々な载荷パターンにおける実験結果との比較・検証も必要である。

6. まとめ

本研究では、高粘性液体ダンパーを対象として、体系的な载荷実験を行って復元力特性を詳細に把握し、その結果を精緻に再現する力学モデルの構築を目的とした。得られた知見を以下に示す。

- 1) 高粘性液体ダンパーの復元力特性は、温度・振動数・振幅・最大経験ひずみに大きく依存する。

特に温度・振動数の関係については、振幅の大きさによらず温度・時間換算則が成立する。

- 2) 微小振幅域を対象として、温度・振動数依存性を含むダンパーの粘弾性モデルを提案した。本モデルは、WLF 則を含む 2 要素の Maxwell モデルであり、実験結果を精度よく再現できることがわかった。
- 3) 粘弾性モデルにダメージ関数を導入した復元力モデルを提案し、ダンパーが示す最大経緯ひずみ依存性を再現することができた。
- 4) 粘弾性ダメージモデルと弾塑性モデルを融合し、振幅依存性を含む粘弾塑性ダメージモデルを提案した。本モデルは、ダンパーが示す振幅依存性を精度よく再現することが可能である。今後は本モデルの包括的な検証を行うとともに、自己発熱による温度上昇の影響を導入し、さらなる精度の向上を目指すつもりである。

なお、本研究で構築した粘弾性モデル、粘弾性ダメージモデル、粘弾塑性ダメージモデルは、順次拡張したモデルであり、拡張に伴い複雑で、パラメータ数の多いものになる。ただし、これらはいずれもその適用範囲内では精緻なものである。このことから実務においては目的・用途に応じモデルを使い分けることができる。

謝辞：本研究で用いたダンパーの設計・製作では、オイレス工業（株）の下田郁夫氏、横川英彰氏、沖村明彦氏および藤生重雄氏に多大なご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) David, G.J. 著 鈴木浩平 監訳：粘弾性ダンピング技術ハンドブック、丸善、2003。
- 2) 伊藤嘉朗、喜連川昭夫、浅野清昭、柴田明德：振動数依存性を有する粘弾性体の動的抵抗の時刻歴解析用モデル化手法、日本建築学会構造系論文集、第 525 号、pp.41-48、1999。
- 3) 黄一華、加藤敬史、和田章、岩田衛、竹内徹、大熊潔：振動数と温度に依存する粘弾性ダンパーの動力学モデル、日本建築学会構造系論文集、第 516 号、pp.91-96、1999。
- 4) 笠井和彦、寺元道彦、大熊潔、所健：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・振動数依存性のモデル化）、日本建築学会構造系論文集、No.543、pp.77-86、2001。
- 5) 笠井和彦、所健：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、No.561、pp.55-63、2002。
- 6) 笠井和彦、大木洋司、雨宮健吾、木村勝彦：イソブチレン・スチレン系のブロック共重合体からなる粘弾性材料の構成則、日本建築学会構造系論文集、No.569、pp.47-54、2003。
- 7) 下田郁夫：高粘性ダンパに関する研究（粘弾性モデル化と設計手法の提案）、日本機械学会論文集（C 編）、60 巻、570 号、1994。
- 8) Makris, N. and Constantinou, M.C.: Fractional-derivative Maxwell model for viscous damper, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.117 (9), pp.2708-2724, 1991。
- 9) Makris N. and Constantinou M.C.: Models of viscosity with complex-order derivatives, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.119 (7), pp.1453-1464, 1993。
- 10) 和氣知貴、笠井和彦、大木洋司、持丸昌己、沖村明彦、佐々木和彦：せん断型粘性体ダンパーの振動数・振幅・温度依存性を考慮したモデル化に関する研究 その 1：材料試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.75-76、2004。
- 11) 佐々木和彦、笠井和彦、大木洋司、持丸昌己、沖村明彦、和氣知貴：せん断型粘性体ダンパーの振動数・振幅・温度依存性を考慮したモデル化に関する研究 その 2：基礎履歴モデルの検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.77-78、2004。
- 12) 村上謙吉：レオロジー基礎論、産業図書、1991。
- 13) Podlubny, I.: *Fractional Differential Equations*, Mathematics in Science and Engineering Vol.198, Academic Press, 1999。
- 14) Sadiq, M.S. and Habib, Y. 白石洋一訳：組合せ最適化アルゴリズムの最新手法 基礎から工学応用まで、丸善、2002。
- 15) Simo J.C.: On a fully three-dimensional finite-strain viscoelastic damage model: formulation and computational aspect, *Computer methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.60, 1987。
- 16) Wen, Y.K.: Method for Random Vibration of Hysteretic Systems, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.102, No.EM2, pp.249-263, 1976。
- 17) 星谷勝、齊藤悦郎：建設技術者のためのデータ解析の応用-カルマンフィルタを中心として-、鹿島出版会、1991。
- 18) Constantinou, M.C. and Adname, M.A.: Dynamics of Soil-Base-Isolated-Structure Systems -Report4 Evaluation of two Models for Yielding Systems-, *Report to National Science Foundation*, State University of New York at Buffalo, 1987。
- 19) 樋口隆英、筒井茂義、山村雅幸：実数値 GA におけるシンプレクス交叉の提案、人工知能学会論文誌、Vol.16, No.1, pp.147-155, 2001。