

ER 流体を用いた振動減衰装置の履歴減衰特性に関する研究

Study on Hysteresis Damping Properties of Oscillation Damper using ER Fluid

山崎智之*・大島俊之**・三上修一***・藤村 浩****

Tomoyuki YAMAZAKI, Shuichi MIKAMI, Toshiyuki OSHIMA, Hiroshi FUJIMURA

*正会員 北見工業大学助手 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 1 6 5)

**フェロー会員 工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 1 6 5)

***正会員 博(工) 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 1 6 5)

**** (株)日本製鋼所 研究開発本部 技術研究所 (〒284-0033 千葉県四街道市鷹の台 1 丁目 3)

Oscillation damping system using ER fluid (Electro-Rheological Fluid) from which viscosity changes by applying voltage is analyzed by experiment and the hysteretic damping characteristics is analyzed as nonlinear dynamic problem in this paper. Modeling of the synthetic combination of damping material and damping mechanism was dealt with especially, and the approximation formula which express change of the damping characteristics by change of voltage, frequency, etc., was verified by the comparison with an experimental result.

Key Words : ER fluid, semi-active damper, hysteresis damping

1. はじめに

本論文では電圧によって粘性が変化する ER 流体 (Electro-Rheological Fluid) を用いた振動減衰装置を試作し、その履歴減衰特性を非線形力学問題として解析している。特に本論文の意義は減衰材料および減衰機構の総合的組合せからなるモデル化に着目して、電圧や振動数などの変化による減衰特性の変化を表現できる近似曲線として降伏せん断応力を 3 次多項式などに近似してモデル式を誘導し、これを実験結果との比較によって検証した点である。

近年大地震 (兵庫県南部地震、北海道釧路沖地震、等) による建造物の被害が数多く発生しているが、これらの被害に対して耐震技術だけでなく、今日では高減衰積層ゴムや鉛プラグ入り積層ゴムなどの免震装置の活用によって建造物の固有周期を長周期化して設計震度を低下させる免震設計が定着しつつある。また様々な形式の振動制御装置や減衰装置が考案されており制振、免震技術が発展しつつある。

振動制御方法としてはパッシブ制御およびアクティブ制御に大別される。TMD (Tuned Mass Damper) 等のパッシブな制振装置は建造物の動きによって制御力が発現するものであり、外的動力源、センサー、制御コンピュー

ターなどは必要としないが、大きな装置およびスペースが必要となる。また AMD (Active Mass Damper) 等のアクティブな制御装置は地震あるいは建造物の振動応答を測定し、それからフィードバックされる応答値に対し設定した制御力を与えるものである。この制御力は外的動力を作用させるものであり、電気力などの大きな動力源を必要としている。また制御装置や動力源が故障した場合には制御力を発現しないという欠点がある。

最近ではこれらパッシブおよびアクティブ制御両者の利点を併せ持ったセミアクティブな振動制御方法 (ハイブリット振動制御) が考案されている¹⁾。このセミアクティブな振動制御装置としては流体を利用したパッシブなダンパーを基に、地震動計測あるいは構造システムの応答によるフィードバック制御システムを用いてアクティブな制御を行えるものである。これは流体の粘性減衰をアクティブ制御により変化させることで制御力を調整できるという機械的特性を持つものである。さらにアクティブ制御装置の故障時には流体の粘性減衰によりダンパーがパッシブな減衰装置として作動し、建造物の安全性が確保される。

このような減衰装置に用いる材料としては ER 流体や MR 流体 (Magneto-Rheological Fluid) などのように電圧や磁場を可変入力することによって流体粘性を動的に変化させ、減衰性を高めるインテリジェントな減衰材料

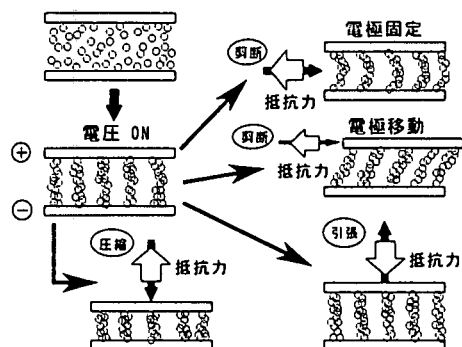


図-1 ER流体による力の発現機構

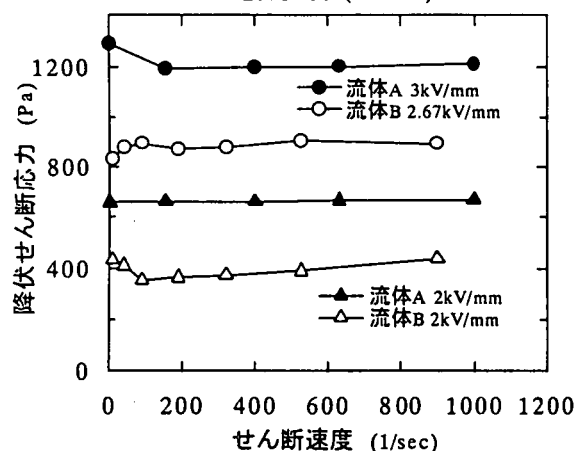
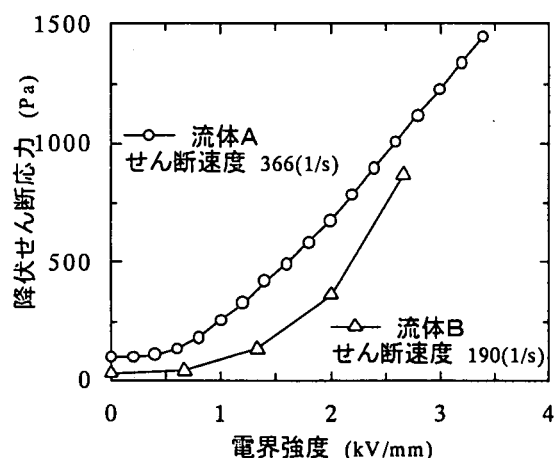


図-2 使用したER流体の特性

があげられる。

ER流体は電圧の印加によって見掛け上の粘度を数msecの短時間で変化できることから、電気-力変換機能性流体としての応用が期待されておりダンパー、バルブ、クラッチ等の機械要素への応用と同時に、制御システムなどへの応用が試みられるなど研究・開発が進められている²⁾。この流体を用いることにより電圧を印加したときにはアクティブな減衰装置として、電圧を印加していないときにはパッシブな減衰装置として振動を制御することが可能となる。このような減衰材料を応用することによって振動の減衰を高めるという方法は土木構造物においても有効な振動制御方法であると考えられる。

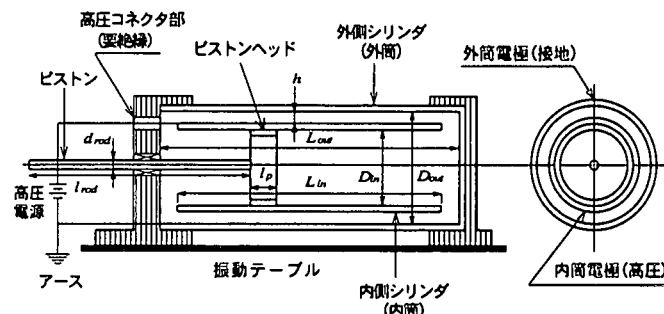
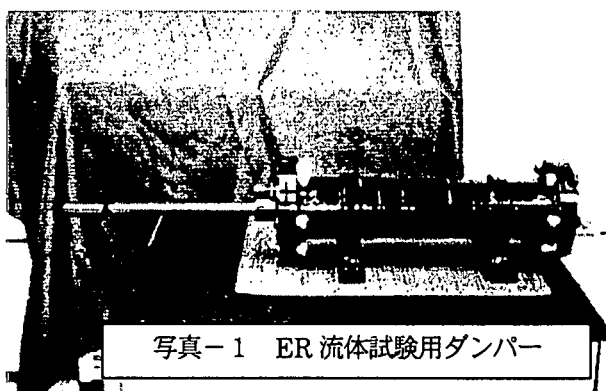


図-3 ダンパー概略



2. 実験に用いたER流体およびダンパー

ここでは本論文で行った実験に用いたER流体および実験用に製作したダンパーについて述べる。

2.1 ER流体 (Electro-Rheological Fluid)

現在ER流体は分散系と均一系に分類され、本研究で用いたものは分散系ER流体である。分散系ER流体は絶縁性の液体(シリコンオイルなどが代表的)に“分極”し易い物質の微粒子を分散させたものである。この分散系ER流体は電圧の印加がない場合、流体中の微粒子はランダムに分散しているが、電圧を印加した場合は微粒子同士がチェーン状の構造を形成して変形や流動に対し抵抗することになる。図-1に分散系ER流体の抵抗力発現機構を示す。これは電気-力変換機構で図-1に示すような3通りに大別され、電極が平行移動するせん断流れモード、電極間が変化するスクイーズ流れモード、電極を固定して電極間の流体を移動させる圧力流れモードと呼ばれている³⁾。

次に本研究に用いたER流体の特性について説明する。実験で使用したER流体は製作会社が異なる2種類の流体とした。これ以降本研究で使用した2種類のER流体を流体A、Bと呼ぶことにする。流体Aはシリコン系オイルと炭素質微粒子、流体Bはシリコン系オイルと無機・有機複合粒子(ER無機物、ポリマーコア)を混合した流体である。ER流体としての特性である流体の降伏せん断応力と電界強度およびせん断速度の関係を図-2に示す。これらは製作会社が公表しているグラフから読み取った値である。図-2から本研究に用いた流体の特性として以下のことが上げられる。降伏せん断応力と電界

強度との関係はせん断速度 366 (1/sec) と 190 (1/sec) におけるもので単純な比較にはならないが電界強度が増加すると流体の降伏せん断応力も増加するが、その増加傾向は流体の種類に依存し異なっている。降伏せん断応力とせん断速度の関係では多少変化はあるがほぼ一定の値を示している。また電圧に関しては数キロボルト (kV) という高電圧が必要となるが 3 kV/mm の電界において電流密度は約 15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度であり、電力量としてはそれほど大きくならない。ER 流体の応答性能としては一般的に数 msec 程度といわれている²⁾。

2. 2 試験用ダンパー

本実験で製作した ER 流体試験用ダンパーは写真-1 に示すような外観をしており、その概略を図-3 に示す。ダンパーの主構成要素は外側シリンダ (外筒電極、接地)、内側シリンダ (内筒電極、高圧)、ピストンヘッドおよびピストンロッドで、これらの寸法は以下に示す。

※外筒長さ $L_{out}=520\text{mm}$ 、内筒長さ $L_{in}=500\text{mm}$

外筒直径 $D_{out}=111\text{mm}$ 、内筒直径 $D_{in}=100\text{mm}$

電極間隔 $h=1.5\text{mm}$ 、ピストンヘッド直径 $D_p=99\text{mm}$

ピストンロッド直径 $d_{rod}=20\text{mm}$

ピストンロッド長さ $L_{rod}=465\text{mm}$

次にこの試験用ダンパーの機能について述べる。ダンパー内に ER 流体を満たし、内側シリンダに接する電極に高電圧をかけると外側シリンダと内側シリンダ間に高電圧の電界が生じ、ER 流体の粘性が変化する。またダンパーのピストン運動は流体の粘性から復元力が生じ、減衰力が得られる。したがって、この電極間における ER 流体の見掛けの粘性を調整することによりダンパーからの減衰力を調整、制御できる。ダンパーに震動計測や構造システムの振動応答などのセンサーからフィードバックされるデータを基に電圧を調整する制御回路を組み込めば、適切な振動制御力が得られ構造システムの減衰性を高めることができる。また常時あるいは制御回路故障時には流体自身の粘性によりパッシブな減衰効果が得られる振動減衰装置となる。

ただし、実用的には高電圧を用いることから周辺との絶縁処理やシリコン系のオイルを用いるためダンパーの密閉度を高くしなければならない。

3. ダンパーの履歴減衰力解析

3. 1 減衰力の計算

ER 流体試験用ダンパーの設計にあたって次のような条件を前提として計算を行った。

- ①電気-力変換機構は電極固定型の圧力流れモードとし²⁾、電極間の隙間は平行板隙間と見なす。
- ②ER 流体は電界の印加がない場合はニュートン流体、電界の印加がある場合にはビンガム流体と見なせる

分散系とする。

- ③流体は非圧縮性とし、減衰力はシリンダ室圧力降下による力とする。

次に減衰力を計算する基礎式を示す。

シリンダ内のピストン運動による圧力降下を ΔP として式(1)に示す。圧力降下はニュートン流体粘性による圧力降下成分 ΔP_0 と電界の誘起応力による圧力降下成分 ΔP_{ER} の和で表される³⁾。

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_{ER} \quad (1)$$

各圧力降下成分は式(2)、(3)のようになる。

$$\Delta P_0 = (12 \cdot \mu \cdot L_{in} / h^2) \cdot U \quad (2)$$

$$\Delta P_{ER} = (3 \cdot L_{in} / h) \cdot \tau_{ER} \quad (3)$$

ただし、 μ は ER 流体の基礎粘性 (電圧を印加しない通常の状態における粘性で製作会社の公表値を用いると流体 A は 0.11 (Pa·s)、流体 B は 0.16 (Pa·s))、 L_{in} は内側シリンダ長さ、 B はシリンダの周長 $B \approx \pi \cdot D_{in}$ ($h \ll D_{in}$)、 D_{in} は内側シリンダ内径、 h は電極間隔 (外側シリンダと内側シリンダの間隔)、 τ_{ER} は流体の降伏せん断応力、 U はピストン移動により生じる電極間の平均流速である。平均流速 U はピストンの平均移動速度を $\bar{v}_p$ 、ピストンヘッドの面積 $A_p = \pi \cdot D_{in}^2 / 4$ 、電極間の面積 $A_e \approx B \cdot h$ とすれば流量連続の式として式(4)で表される。

$$U = \frac{A_p}{A_e} \cdot \bar{v}_p \quad (4)$$

したがってダンパーより得られる減衰力 F は、負荷率 η を考慮すると式(5)となる。

$$\begin{aligned} F &= A_p \cdot \Delta P \cdot \eta \\ &= A_p \cdot \left[(12 \cdot \mu \cdot L_{in} / h^2) \cdot U + (3 \cdot L_{in} / h) \cdot \tau_{ER} \right] \cdot \eta \\ &= A_p \cdot (12 \cdot \mu \cdot L_{in} / h^2) \cdot U \cdot \eta + A_p \cdot (3 \cdot L_{in} / h) \cdot \tau_{ER} \cdot \eta \end{aligned} \quad (5)$$

一例として、流体 A を用いた場合で以下の試験条件における減衰力の計算結果を示す。

試験条件：振動数： $f = 1\text{Hz}$ 、ピストンストローク：

$2 \cdot x_{p0} = 40\text{mm}$ 、電界強度：電圧無負荷時 ($0\text{kV}/\text{mm}$) および電圧印可時 ($2\text{kV}/\text{mm}$)。ただし電圧印可時の圧力降下成分は ΔP_0 、 ΔP_{ER} は共に最大値とする。

その他の諸数値は下記に示す。ただし μ は制作会社の公表値、 τ_{ER} は図-4³⁾よりもとめた降伏せん断応力である。ただし、文献3)で使用されている流体と本研究で使用する流体では τ_{ER} の特性が異なるため、図-2におけるせん断速度に対する降伏せん断力を文献3)の流体と本研究の流体で比較し、その比率 (流体 A : 3.3 倍、流体 B : 2 倍) で図-4の圧力流れモードにおける降伏せん断力 τ_{ER} を係数倍したものをを用いた。またピストンヘッドの速度 $\bar{v}_p$ は周波数 1Hz、振幅 $\pm 20\text{mm}$ の sin 波における平均速度 0.08m/sec とした。

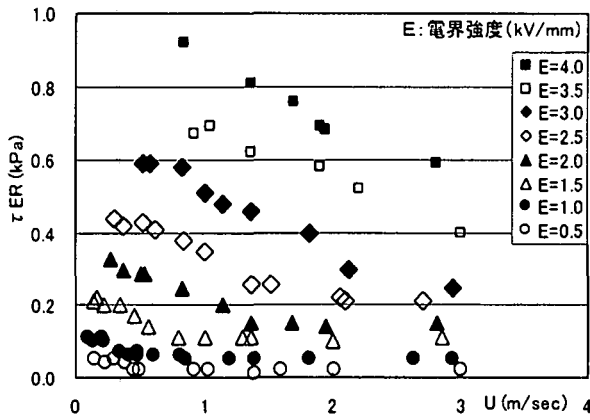


図-4 圧力流れモードにおける分散系ER流体のER効果(DC電場印加時)³⁾

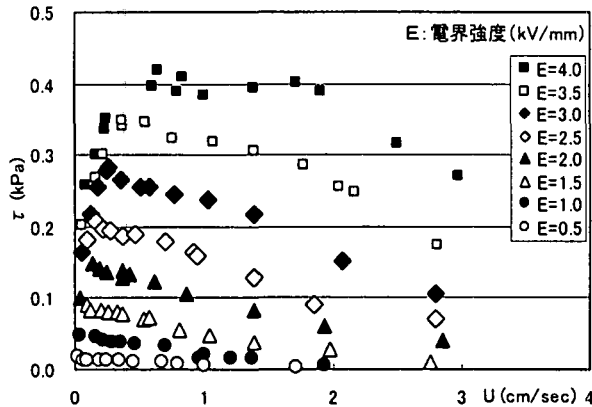


図-5 圧力流れモードにおける分散系ER流体のER効果(AC電場印加時)³⁾

$$A_p = 0.007854m^2, \mu = 0.11pa \cdot s, L_{in} = 0.5m, \\ B = 0.31416m, h = 0.0015m, \\ \tau_{ER} = 660Pa \text{ (at } E = 2kV/mm), \eta = 0.7$$

電圧無負荷時の減衰力(0kV/mm) $F = 2150N$

電圧印加時の減衰力(2kV/mm) $F = 5779N$

3. 2 履歴減衰力解析

履歴減衰力解析は試験用ダンパーを用いた振動実験から得られた荷重-変位履歴を解析により求めるため、図-4、5の関係をモデル式で近似して計算したものである。前項より試験用ダンパーの減衰力を計算する場合、式(1)および式(3)からわかるように電圧を印加したときの圧力降下成分 ΔP_{ER} は流体の降伏せん断応力 τ_{ER} の値によって決まる。本項ではこの τ_{ER} の特性を解析するとともに履歴解析に用いた近似モデル式について述べる。

圧力流れモードにおいて降伏せん断応力 τ_{ER} は電界強度 E の二乗に比例して増加しているが、流体の平均流速 U に対しても強い依存性を示し、さらに印加電圧が直流電圧(DC)か交流電圧(AC)にかによってもER流体の特性が異なることがわかる(図-4、図-5)³⁾。また τ_{ER} の特性は用いるダンパーの構造の違いによっても差が現れ、せん断流れモードと比較すると圧力流れモードでは τ_{ER} はより広い流速の範囲にわたって流速依存性を示すことが

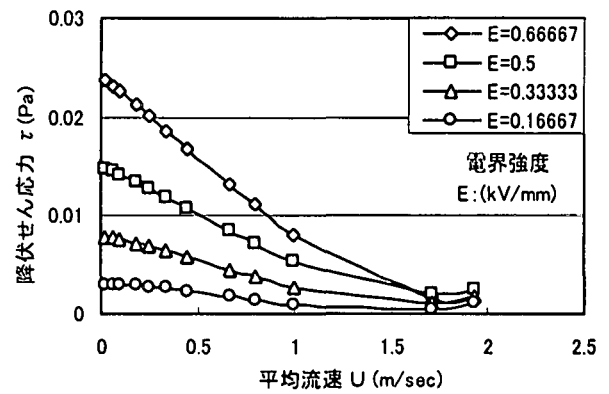


図-6 3次多項式による近似曲線

報告されている³⁾。このようにダンパーの設計に際しては各流れモードごとのER特性を把握する必要がある。

本解析では図-4、図-5の降伏せん断応力 τ_{ER} - 平均流速 U の関係から τ_{ER} のモデル式を求め、これを用いて式(5)より減衰力を計算する。一例として図-5から流体Bの解析に用いる τ_{ER} を求めるためグラフから各電界強度の近似曲線式を3次多項式として式(6)を求めた。

$$\tau_{ER} = aU^3 + bU^2 + cU + d \quad (6)$$

式(6)において U は平均流速、 a, b, c, d は3次多項式近似による係数である。また図-5にない電界強度の曲線式については求められた2曲線の係数 a, b, c, d を用いて、係数毎の比例配分により2曲線間の曲線の係数を求めた。この近似式により計算した近似曲線を図-6に示す。

また履歴減衰力を計算するとき用いる電極間の平均流速 U は流量連続の式から式(4)に代わって式(7)で表される。

$$U = \frac{A_p}{A_v} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

ただし、 A_p : ピストンヘッドの流体を押す面積
 A_v : 電極間の面積(内・外シリンダ間)

$\frac{dx}{dt}$: ピストンヘッドの速度

ピストンヘッドの速度は実験より得られたピストン先端での変位波形から0.01sec間隔で計算した平均速度を用いた。

同様な方法で流体Aの解析に用いる降伏せん断応力 τ_{ER} を図-4のグラフから5次多項式により近似した式から求め、この τ_{ER} を用いて式(5)より減衰力 F を計算する。

また流体Aでは実験式として実験結果から逆に式(5)より τ_{ER} を求め、この τ_{ER} と平均流速 U の値から τ_{ER} を求める関係式を双曲線関数式で近似し、近似式から計算した τ_{ER} を用いて減衰力 F を計算する。

以上の3種類の近似式から求められた τ_{ER} を使って計算した減衰力と4節で述べる試験用ダンパーを用いた振動実験から得られた減衰力の比較検討を5節で行う。

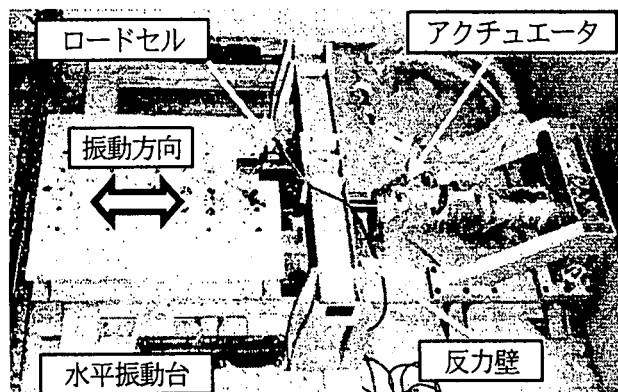


写真-2 水平振動台

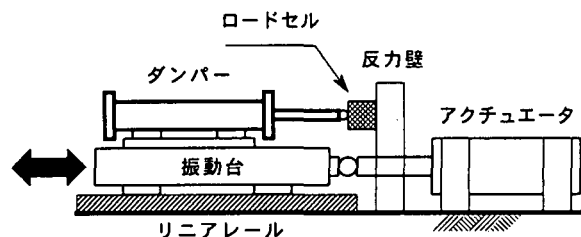


図-7 実験の概略図

4. ダンパーの振動実験による履歴減衰特性

4. 1 実験概要

実験では2. 2項で説明した ER 流体試験用ダンパーを写真-2に示す水平振動台に固定してダンパー自体を水平振動させ、ダンパー内のピストン先端に取り付けたロードセルによるダンパーの減衰力（復元力）と振動台に取り付けたダイヤルゲージによる水平変位を測定した。図-7に実験の概略図を示す。振動台の振動は sin 波振動とし、アクチュエータの制御装置に振動台のストロークおよび周波数を入力して振動させている。これについては次項で説明する。また流体Aは直流電源、流体Bは交流電源を用いた実験を行っている。交流電源を用いた理由は電圧の変化に対する減衰力の応答性を確認するためであるが、詳細な比較検討は今後の課題である。

4. 2 実験装置

実験に使用した材料、装置としては ER 流体、ER 流体試験用ダンパー、高圧電源、振動台、ロードセル、ひずみゲージ式変位変換器などである。ER 流体および ER 流体試験用ダンパーについては2章で述べたので、以下にはその他の使用機器について詳細を述べる。

・高圧電源

電源は前述したように直流および交流（DC、AC）の2種類とした。また電力量の関係上、直流電圧は4kVまで、交流電圧1kVまでの印加とした。実験における電圧の条件は以下のとおりである。

直流電源：0kV から4kV までを0.5kV 間隔で9種類
交流電圧：0kV から1kV までを0.25kV 間隔で5種類

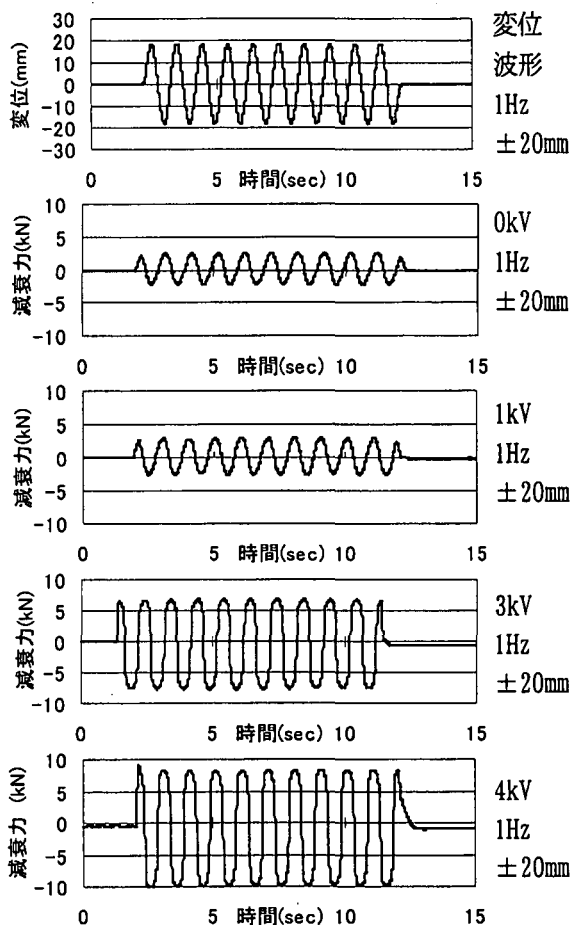


図-8 ダンパーの変位制御波形と減衰力波形

・振動台

振動台はリニアレール上に水平に置いた台にアクチュエータを取り付けたものを使用した（写真-2、図-7参照）。アクチュエータの性能は水平振幅が±100mm、最大負荷荷重は50kNである。今回行った実験における振動台の振幅は以下の6種類および振動周波数8種類をパラメータとした。

振幅：±2, 5, 10, 20, 30, 40 mm

周波数：0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0 Hz

ただし、アクチュエータの油圧、サーボバルブの性能上3.5Hzの周波数では振幅30, 40mmの変位は設定値に追従していなかった。

・ひずみゲージ式ロードセル

容量50tf、感量0.00125tf/ μ strain

・ひずみゲージ式変位計

容量100mm、感量0.03715mm/ μ strain

4. 3 実験結果

(1) 流体Aによる履歴減衰力（直流電圧）

図-8にER流体Aを用いて直流電圧を印加したときの振動実験における制御変位および振動時の荷重（減衰力）の一例を示す。図-8のデータは始めに周波数1Hz、振幅±20mm時の変位制御波形を示し、次に変位制御が1Hz、20mmであるときの各電圧（0, 1, 3, 4kV）における減衰力波形である。各電圧における最大減衰力（±最大

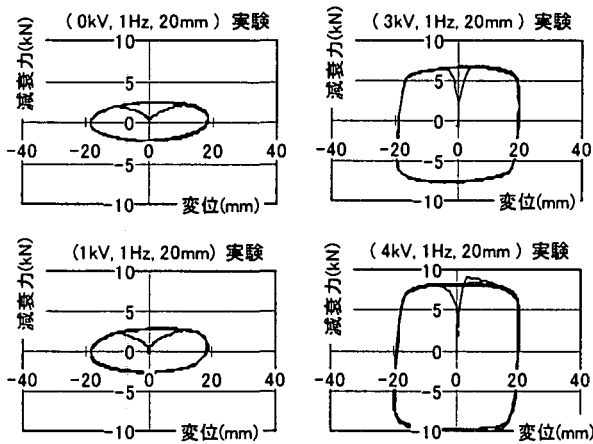
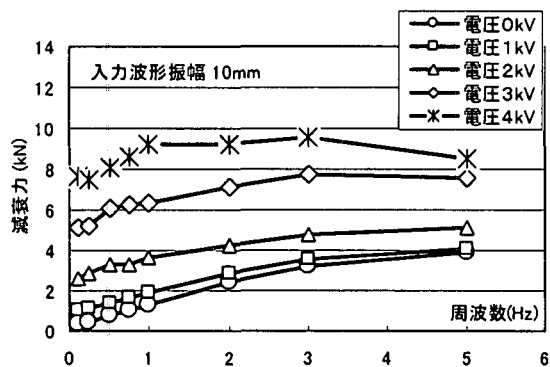
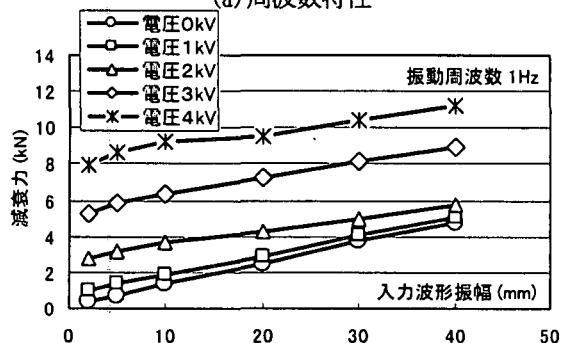


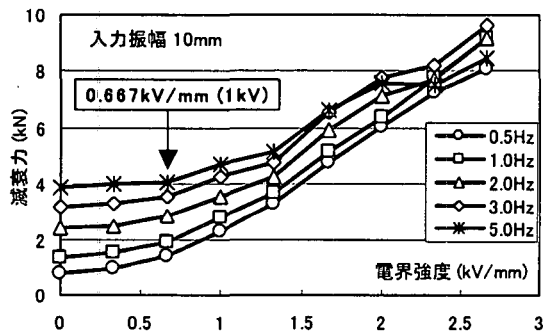
図-9 流体A 減衰力-変位履歴曲線



(a) 周波数特性



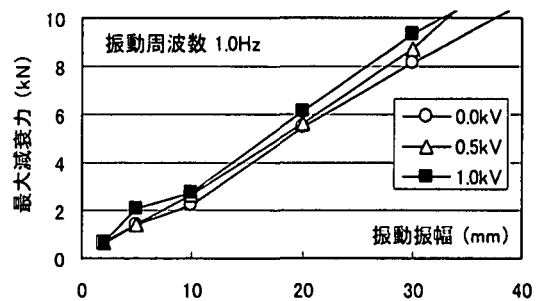
(b) 振幅特性



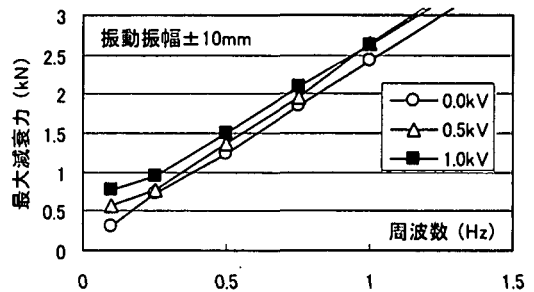
(c) 電界強度と最大減衰力の関係

図-10 流体Aを用いたダンパーの減衰特性

値の平均) は 2.50、2.90、7.23、9.54kN となり、電圧増加に伴い減衰力の増加が見られる。このデータでは特に 2kV 以降における減衰力の増加傾向が大きくなっている。図-9 は周波数 1.0Hz、振幅 ± 20 mm 時の各電圧における減衰力-変位履歴曲線で、縦軸に減衰力、横軸に変位を表したものである。このように低い周波数においても電



(a) 振幅特性



(b) 周波数特性

図-11 流体Bを用いたダンパーの減衰特性

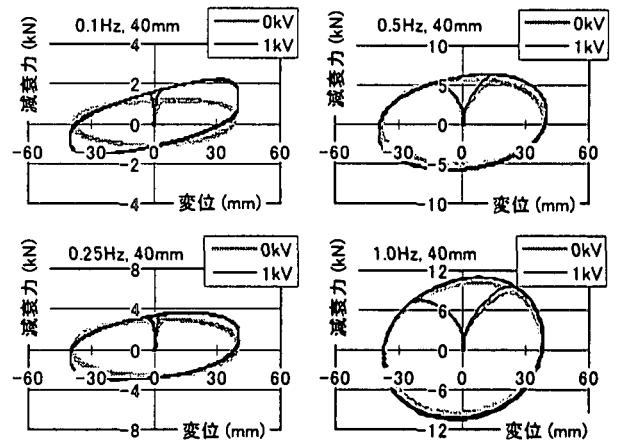


図-12 流体Bの減衰力-変位履歴曲線

圧を掛けることにより大きな減衰力を得ることができ、履歴吸収エネルギーが大きくなることがわかる。

図-10 は ER 流体ダンパーの減衰特性を表したもので、振幅 ± 10 mm における周波数特性 (図-10(a))、周波数 1Hz における振幅特性 (図-10(b)) および振幅 ± 10 mm における減衰力と電界強度の関係 (図-10(c)) をグラフ化したものである。周波数特性において電圧の変化に伴う減衰力の増加がみられ、各電圧ともに周波数の増加による減衰力の増加傾向はほぼ一定している。同様に振幅特性においても電圧変化による減衰力の増加が見られ、振幅の増加による減衰力の増加傾向はほぼ一定している。減衰力と電界強度の関係では電界強度が 0.667kV/mm (1kV) 以上において減衰力の増加傾向が大きくなることがわかった。ここで設計時に想定した減衰力の計算結果と比較する。モデル式の計算で電圧 0kV、ストローク 40mm (振幅 ± 20 mm)、周波数 1Hz の場合、減衰力 $F = 2.15$ kN となった。同じ条件の実験において変位 0 付近の減衰力 (最大減衰力) は +側で 2.51kN、-側で 2.28kN であり、

これを平均すると 2.395kN となり、モデル式の計算にほぼ近い結果が得られている。また電圧が 3kV（電界強度 2kV/mm）時ではモデル式の計算値は 5.78kN（降伏応力は図-2より求めた）であり、実験値 3kV, 1Hz, ± 20 mm における変位 0 付近の土平均値は 7.25kN であった。

(2) 流体Bによる履歴減衰力（交流電圧）

図-11はER流体Bを用いて交流電圧を印加したときの試験用ダンパーの特性を示すものである。図-11(a)は振動数 1Hz における各電圧 (0kV, 0.5kV, 1kV) および各振幅 (2, 5, 10, 20, 30mm) の最大減衰力をプロットしたもので振幅特性を示している。また図-11(b)は振幅 10mm における各電圧 (0kV, 0.5kV, 1kV) および各周波数 (0.1Hz, 0.25Hz, 0.5Hz, 0.75Hz, 1Hz) における減衰力をプロットしたもので振動数特性を示している。印加電圧が 1kV までと低いこともあり電圧による変化はあまり大きくはないが、電圧の増加に対して減衰力も増加している。また振幅および周波数の増加に対しても減衰力の増加がみられる。

図-12は振幅 40mm、周波数 0.1, 0.25, 0.5, 1Hz 時の減衰力-変位履歴曲線で、電圧 0kV と 1kV を比較したものである。電圧を印可しない場合、履歴曲線は正規な楕円形を描いているが、電圧を印可した場合右肩上がりとなり、ER流体の効果が見られる。これはピストンが最大変位に達するとき ER流体の効果最大になることを示しており、流体の圧力と関係がある。

5. 解析モデルと実験結果の比較

ここでは前述した3節の解析モデルと4節の実験結果の比較を行う。

5. 1 流体Aの解析モデルと実験結果の比較

図-13に流体A（直流電圧）を用いた時の解析モデルと実験結果を比較した減衰力-変位履歴曲線を示す。解析は図-4から5次多項式で近似して得られた τ_{ER} を式(5)に入れて計算した減衰力である。パラメータは周波数 1Hz、振幅 10mm、電圧が 0, 1, 2, 3kV である。図からわかるように 0kV および 1kV 時ではほぼ曲線は一致しているが、2kV, 3kV 時では変位が最大付近での減衰力の傾向が異なっている。これは図-4において電界強度が 1kV/mm 付近の曲線はほぼ一定の値になっているのに対し、2, 3kV/mm では低速度域で最大となり平均流速が早くなると τ_{ER} が減少し、一定値なる傾向にあるためである。そのためこのダンパーの変位が最大付近（流速が遅くなる時）での曲線の傾向に差が生じ、変位が 0 付近で近い値となっている。

いずれにしても全体的に解析モデルは実験結果をほぼ表現できている。

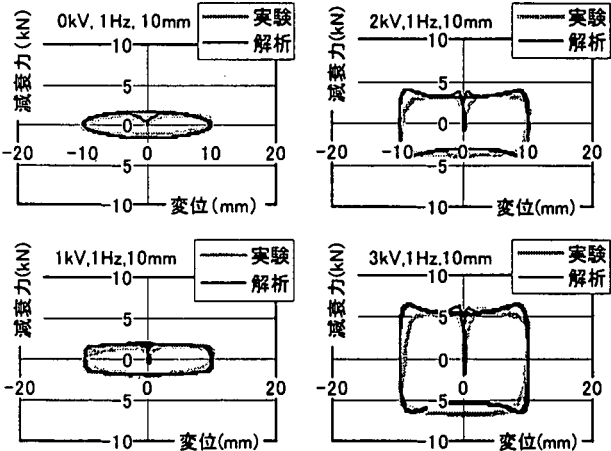


図-13 流体Aの実験と解析の比較-その1-
周波数 1Hz、振幅 10mm

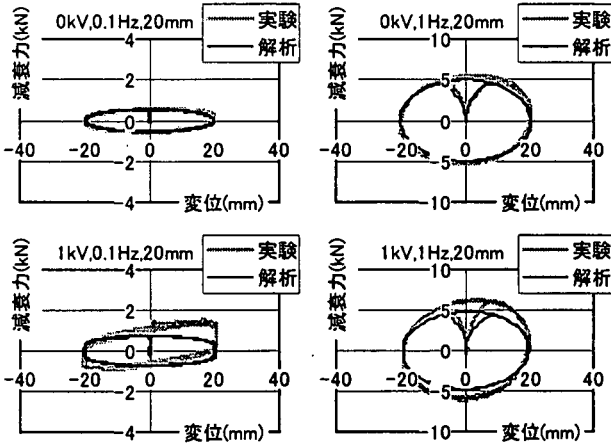


図-14 流体Bの実験と解析の比較
周波数 0.1, 1Hz、振幅 20mm

5. 2 流体Bの解析モデルと実験結果の比較

図-14に流体B（交流電圧）を用いた時の解析モデルと実験結果を比較した減衰力-変位履歴曲線を示す。この解析も5.1項同様、図-5から3次多項式で近似した近似式から求めた τ_{ER} を式(5)に入れて減衰力を計算したものである。

流体Bの実験値と解析値の比較においても流体A同様、電圧が 0kV の履歴曲線は 0.1Hz および 1Hz 共によく一致している。

次に電圧が 1kV の履歴曲線を比較をすると、実験値では4.3項(2)で述べたように右肩上がりの曲線となり減衰力の最大値も最大変位の方向にずれている、特に周波数の低い実験結果に顕著に現れている。これに対し解析結果では左右対称となり変位が 0 付近で最大値を示す。0.1Hz の解析結果において電圧が 0kV の場合と 1kV では最大値で約 0.49kN の差となっている。1Hz の場合全体の減衰力が高いため差がないように見えるが、この場合も 0.1Hz と同様最大値で 0.49kN 程度の差がある。

以上の結果より、周波数が低い場合、減衰力が小さいため解析モデルと実験結果に違いが見られるものの、全体的には解析モデルは実験結果をほぼ表現しているものと思われる。

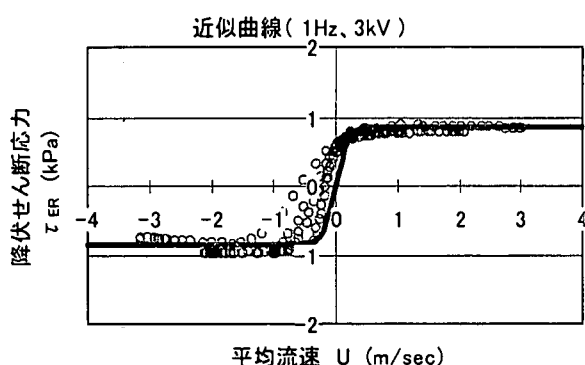


図-15 実験から求めた τ_{ER} 近似曲線

5. 3 実験結果の τ_{ER} 曲線を用いた解析の比較

ここでは実験から得られた降伏せん断力 τ_{ER} 曲線を用いて解析した結果と実験値の比較をする。

はじめに実験結果から求めた τ_{ER} 曲線について説明する。実験で測定された減衰力を式(5)に代入し、逆算により τ_{ER} 計算し、各平均流速 U と τ_{ER} の関係から τ_{ER} を求めるための関係式を双曲線関数近似により求めた。近似曲線を求めるための数値は実験中の1周期分の結果とし、プラス振幅およびマイナス振幅に分けて近似曲線式を求めた。また曲線の精度を高めるため振幅 $\pm 5, 10, 20\text{mm}$ の結果を合わせてグラフ化した。その一例として実験結果より求めた τ_{ER} のプロットと近似曲線のグラフを図-15に示す。これは1Hz, 3kV 時+側の近似曲線である。この図からわかるように本実験で使用したER 流体並びにダンパーの特性として平均流速 U が0付近で τ_{ER} は急激に変化し最大値を示す。またある流速以上ではほぼ一定の値(1Hz, 3kV 時では 0.4m/sec 以上で 0.85kPa)となる。図-4の近似曲線では平均流速が低速域で τ_{ER} が最大となるが、それから減少し、高速域になると一定となっている。この両者を比較すると τ_{ER} が最大値となりそこから減少する点にある。このため図-15の示す近似曲線には双曲線関数を当てはめた。またマイナス側の振幅による近似曲線もほぼプラス側と一緒に、この解析では同一の近似曲線を用いて解析する。この τ_{ER} を用いて式(5)より計算した減衰力と実験結果を比較したものが図-16の減衰力-変位履歴曲線である。この結果からは解析と実験の値がほぼ一致していることが分かる。ただし、実験結果では右側に傾く傾向にあるが、解析では真直なままとっている。

今回の解析と実験の比較で、実験の結果が右側に傾いた履歴減衰力曲線となり、解析結果では真っ直ぐな楕円形、矩形状の形となった。これは解析に用いた τ_{ER} が流速に対してほぼ一定の関係を持つ解析を行ったため(変位が+側と-側で同じ曲線式を用いた)、実験結果から推測するとピストンが最大変位に達する時と最大変位から戻る時で流速が同じでも τ_{ER} は異なっていると考えられる。以上のことからピストンの行き、戻りで流体自

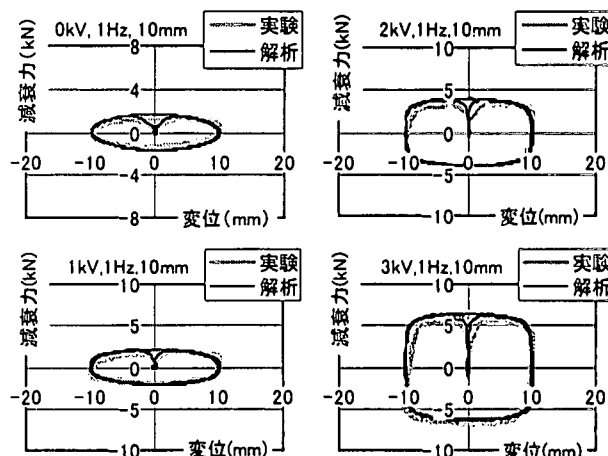


図-16 流体Aの実験と解析の比較-その2-

周波数 1Hz、振幅 10mm

体の圧力が変化し、降伏せん断力に影響していると考えられる。

6. 結論

本論文では電圧によって粘性を変化させることができるER 流体を用いた簡便な振動減衰装置を試作して、装置全体の振動特性を実験により計測するとともに、装置全体の履歴復元力特性を非線形力学問題としてモデル化する解析を実施して実験結果と比較検討した。全体的には本論文の解析モデルによって装置の減衰特性をほぼ表現できることが明らかになった。

解析および実験によって得られた結果を要約すると以下ようになる。

- 1) ER 流体を用いた減衰装置(ダンパー)の減衰力を正確に計算する場合、その流体並びに減衰装置の特性(降伏せん断力-平均流速関係)が個々に異なり、実験により求める必要がある。
- 2) 本装置ではER 流体は平均流速が高くなると降伏せん断力 τ_{ER} が一定になる傾向にあり、低速域での τ_{ER} は装置の構造に影響されと考えられる。
- 3) 設計時に流体は非圧縮性と仮定したが、ピストンの行き、戻りで流体自体の圧力が変化し、降伏せん断力 τ_{ER} に影響すると考えられる。

本論文の研究に対して御支援、御協力いただいた秋田大学学長徳田弘先生、藤倉ゴム小佐内氏、藤倉化成安斉氏に感謝申し上げます。また実験および解析に対しては北見工業大学大学院内田裕丈君の協力がありました。深く感謝の意を表します。

本研究は平成10年度および11年度の文部省科学研究補助金(研究代表者大島俊之)補助を受けて実施されたものです。

参考文献

- 1) Constantinou, M. C. and M. D. Symans, Experimental Testing and Analytical Modeling of Semi-Active

- Fluid Dampers for Seismic Protection, J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 8, 644-657, 1997
- 2) Onoda, J., Oh, H.-U., and Minesugi, K., Semiactive Vibration Suppression with Electro-rheological Fluid Dampers, AIAA Journal, Vol. 35, 1844-1852, 1997
- 3) 中野政身, ER 流体の応用 I (振動制御), メカトロニクス機器の電気粘性流体を用いた制御に関する研究分科会成果報告書, pp. 48-57, 日本機械学会, 1996
(2000 年 4 月 21 日受付)