

ER流体によるインテリジェント振動減衰装置の開発

北見工業大学 正員 山崎智之 北海学園大学 フェロー 当麻庄司
北見工業大学 フェロー 大島俊之 フェゾエンジニアリング 正員 杵元正信
北見工業大学 正員 三上修一 (株)日本製鋼所 藤村 浩

1. まえがき

今日高減衰積層ゴムや鉛プラグ入り免震装置などの活用によって構造物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り、また制振方法として従来のTMDなどのパッシブな制振方法とAMDなどのアクティブな制振方法による振動制御装置が開発されている。パッシブ制御装置は作動するのに外的動力源を必要とせず、構造物の動きによる制御力の発現を利用している。またアクティブ制御装置は構造物に制御力を与えるために電気の流れあるいは電気力の作用による大きな動力源を必要としており、制御力は地震あるいは構造物の応答を測定するセンサーからのフィードバックを基に発現する。しかし制御装置の故障時などに制御力を確保できないという欠点がある。近年ではパッシブとアクティブの折衷案的なバリエーションなセミアクティブ振動制御装置(Variable Damping System, VDS)が考案されている^{1),2)}。このセミアクティブ振動制御装置は従来の流体を利用したパッシブなダンパーを基に考案されており、流体の粘性減衰を地震動計測あるいは構造システムの応答を利用した履歴フィードバック制御システムにより変化させ振動を調整できるという機械的特性を有がある。さらにセミアクティブ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高減衰装置となり、ダンパーの安全性を確保している。

本研究ではこのセミアクティブ振動制御装置における粘性減衰を有する流体にER流体(Electro-Rheological Fluid)を使用した地震応答振動制御システムの開発を目指している³⁾。ER流体は電圧を可変入力することによって粘性を動的に制御し、システムの減衰性を高めるインテリジェントな減衰材料である。このような減衰材料を応用することによって制振効果を高める方法は将来の有効な制振方法と考えられる。本論文ではER流体を用いた制振システムを構築し、バリエーションな制振構造の機械的特性を実験的に確認し把握するため、ER流体試験用ダンパー製作して振動台を用いた振動実験について報告する。

2. 実験概要

実験はER流体試験用ダンパーを水平振動台に固定し、ダンパー自体を水平移動させて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り復元力を測定した(図-1)。振動はsin波振動10波とし、アクチュエータの制御装置に振動台のストロークと周波数を入力して振動させている。

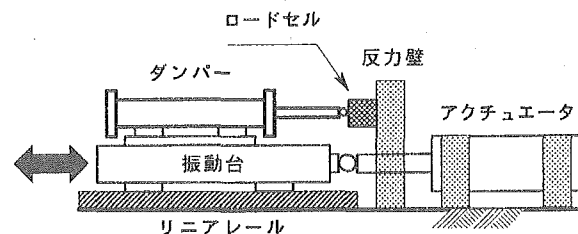


図-1 実験の概要

今回行った実験は振動台の振幅6種類(±0.2, 0.5, 1, 2, 3, 4cm)、振動周波数8種類(0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 5Hz)をパラメータとして、電圧を0~4kVの間を0.5kV間隔(9種類)で変化させて振動台の変位とロードセルの荷重を測定した。以後振幅、周波数、電圧の種類について記号を用いて表すこととし以下のようにする。振幅±0.2~4cmをA1~A6、周波数0.1~5HzをF1~F8、電圧0~4kVをV1~V9とする。

(1) 実験装置

実験に使用した装置としてはER流体、ER流体試験用ダンパー、振動台などである。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(図-1参照)。性能は水平振幅が±10cm、最大負荷荷重は50kNである。ER流体およびダンパーについては次に説明する。

(2) ER流体(Electro-Rheological Fluid)

ER流体は電界強度によりその流れ性質が変化し流体の見かけ粘度が増幅するものであり、特に電極に電圧をかけると電極間に挟まれた流体の粘性が短時間に変化するという特性を有している。これまで流体の粘性が電界強度によって変化する現象は古くから知られていたが、粘度の増加に対してはそれほど大きな効果はなかった。しかしこの流体中に微粒子を分散させた系ではその効果が非常に大きいことが示され、このような流体のことをER流体

または Electro-Rheological Fluid と呼ばれている。一般に ER 流体は電圧を印加していない状態ではニュートン流体としての特徴を有し、電圧を印加した後は降伏応力を持つビンガム流体としての特徴を有することになり、この降伏応力が電界強度により変化して見掛けの粘性抵抗が変化することになる。また ER 流体は大別すると均一系と分散系に分かれ、本実験で使用した ER 流体は(株)ブリヂストンで開発された ERF で分散系の流体を使用している。この ER 流体の特性は粘度が $0.11 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (25°C , 剪断速度 $366/\text{sec}$)、降伏応力 1100 Pa ($3 \text{ kV}/\text{mm}$, 25°C , 剪断速度 $366/\text{sec}$)、

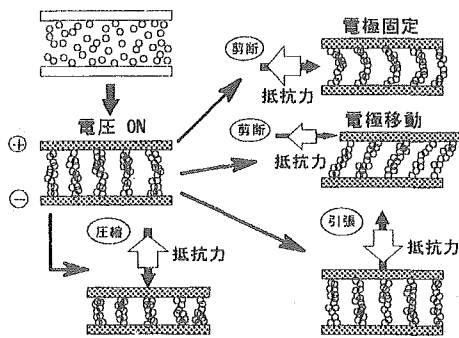


図-2 ER流体による力の発現機構

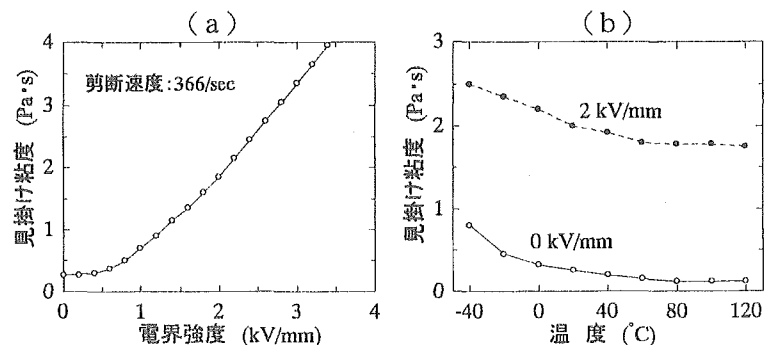


図-3 ER流体の特性

電流密度 $15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($3 \text{ kV}/\text{mm}$, 25°C , 剪断速度

$366/\text{sec}$)である。ER 流体の電圧負荷時における粘性の発現機構を図-2に、一般的特長を図-3(a)、(b)に示す。

(3) ER 流体ダンパー

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、その概念図を図-4に示す。ダンパーの主構成要素は外側シリンダ(外筒電極, 高圧)、内側シリンダ(内筒電極, 接地)、ピストンおよびピストンロッドで、これらの寸法は下記に示す。ダンパー(シリンダ)内に ER 流体を満たし、外筒電極に高電圧をかけると外シリンダと内シリンダ間の ER 流体の見掛け粘性が変化してピストン運動に復元力が働き減衰力を得る。この ER 流体試験用ダンパーの電気-力変換機構は電極固定型である圧力流れモードと呼ばれるもので、ダンパーのシリンダ電極間隙間は平行板隙間と見なしている。またダンパーに地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制御装置となる。

写真-1 ER流体試験用ダンパー

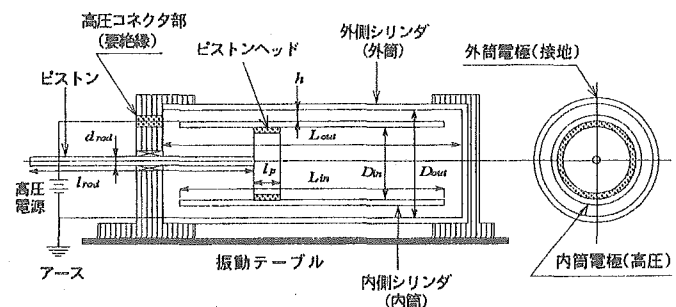


図-4 ダンパー概念図

※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 $h=1.5 \text{ mm}$, ピストン幅 $L_p=24 \text{ mm}$, ピストンロッド直径 $d_{rod}=20 \text{ mm}$, ピストンロッド長さ $L_{rod}=465 \text{ mm}$

3. 設計時における減衰力の計算

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、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。次に減衰力を計算した基礎式を示す。

圧力降下 ΔP は、ニュートン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、

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

となり、各々の圧力降下成分は次式のようになる。

$$\Delta P_0 = (12 \cdot \mu \cdot L_{in} / B \cdot h^3) \cdot Q, \quad \Delta P_{ER} = (3 \cdot L_{in} / h) \cdot \tau_{ER} \quad (2)$$

ここで、 μ はER流体の電界無負荷時における基礎的粘性、 L_{in} はダンパー内シリンダの長さ、 $B \equiv \pi \cdot D_{in} (h \ll D_{in})$ 、 D_{in} はダンパー内シリンダの内径、 h は電極間(外シリンダと内シリンダ)の間隔、 Q はピストンの平均流速 \bar{v}_p で決まる流量でピストンストロークを $2x_{p0}$ 、周波数を f 、ピストン面積 $A_p = \pi \cdot D_{in}^2 / 4$ とすれば $Q = A_p \cdot \bar{v}_p = A_p \cdot 4f \cdot x_{p0}$ 、 τ_{ER} は流体の降伏せん断応力である。したがってダンパーより得られる減衰力 F は、負荷率を考慮すると次式となる。

$$F = A_p \cdot \Delta P \cdot \eta = A_p \cdot \left[(12 \cdot \mu \cdot L_{in} / B \cdot h^3) \cdot A_p \cdot \bar{v}_p + (3 \cdot L_{in} / h) \cdot \tau_{ER} \right] \cdot \eta \quad (3)$$

$$= A_p^2 \cdot (12 \cdot \mu \cdot L_{in} / B \cdot h^3) \cdot 4f \cdot x_{p0} \cdot \eta + A_p \cdot (3 \cdot L_{in} / h) \cdot \tau_{ER} \cdot \eta$$

ただし、 η は負荷率である。

一例として、振動数 $f = 1\text{Hz}$ 、ピストンストローク $2 \cdot x_{p0} = 2\text{cm}$ で電界無負荷時および電界負荷時(3kV/mm)の計算結果について示す。その他の諸数値は次のとおりである。

$$A_p = 0.007854\text{m}^2, \mu = 0.11\text{pa} \cdot \text{s}, L_{in} = 0.5\text{m}, B = 0.31416\text{m}, h = 0.0015\text{m}, \tau_{ER} = 1100\text{Pa} \text{ (at } E = 3\text{kV/mm)}, \eta = 0.7$$

電界無負荷時 $F = 1075\text{N}$ 電界印加時(3kV/mm) $F = 7123\text{N}$

4. 振動実験の結果

図-5に電界無負荷時(0kV/mm)における振動変位および振動時の荷重(復元力)の一例を示す。実験データは振動数および振幅で区別できるので振動数 $0.25 \sim 5\text{Hz}$ をF1~F7とし、振幅 $\pm 1 \sim \pm 4\text{cm}$ をA1~A4としてデータ区別する。図-5のデータはF4A2(振動数 1Hz 、振幅 $\pm 2\text{cm}$)、F4A3(振動数 1Hz 、振幅 $\pm 3\text{cm}$)、F5A2(振動数 2Hz 、振幅 $\pm 2\text{cm}$)、F5A3(振動数 2Hz 、振幅 $\pm 3\text{cm}$)のときの振動変位波形と荷重波形である。変位データを見るとF4A2、F4A3、F5A2においてはアクチュエータの設定振幅変位が現れているが、F5A3では第2波以降の波が設定振幅 30mm より 5mm 以上少なくなっている。これはアクチュエータの性能(油圧源およびサーボバルブの性能)に限界があり、高振動数および長振幅ではアクチュエータの振動性能が追従していないためである。この現象はF6(振動数 3Hz)、F7(振動数 5Hz)データでも顕著に現れている。荷重データから見る最大復元力はF4A2で約 0.26tf 、F4A3では約 0.36tf 、

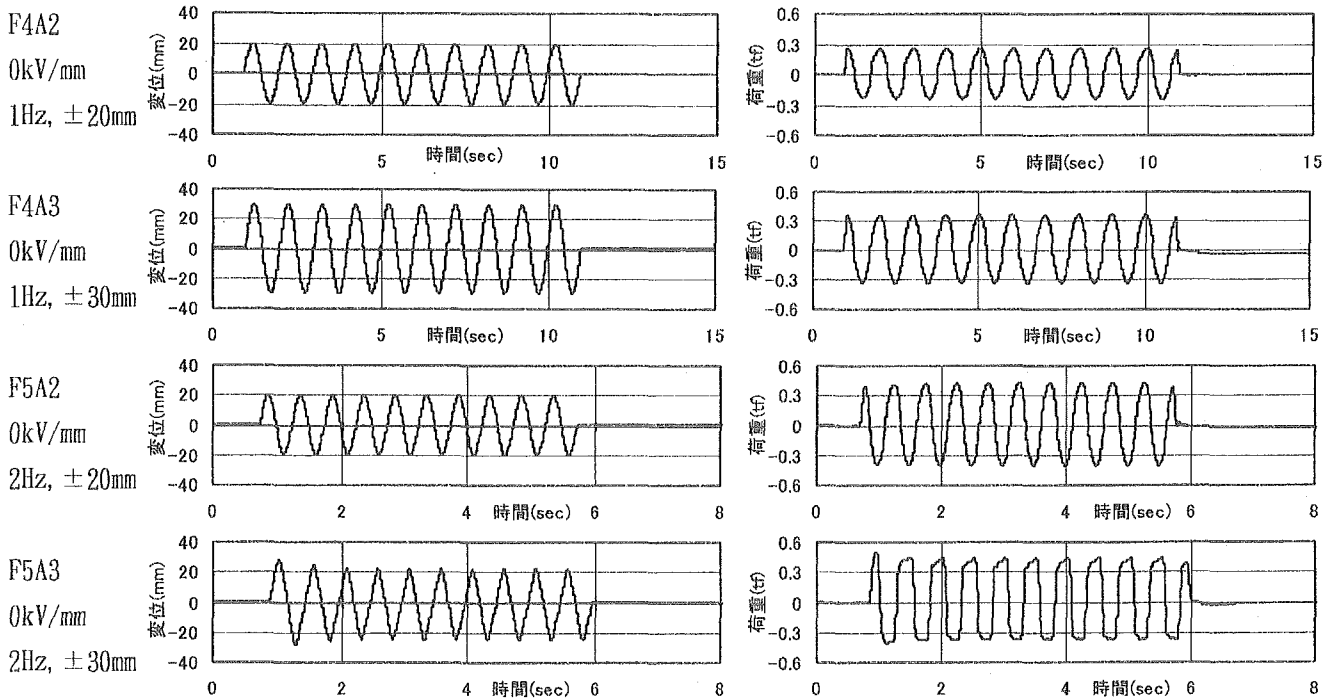


図-5 ダンパーの変位と復元力波形

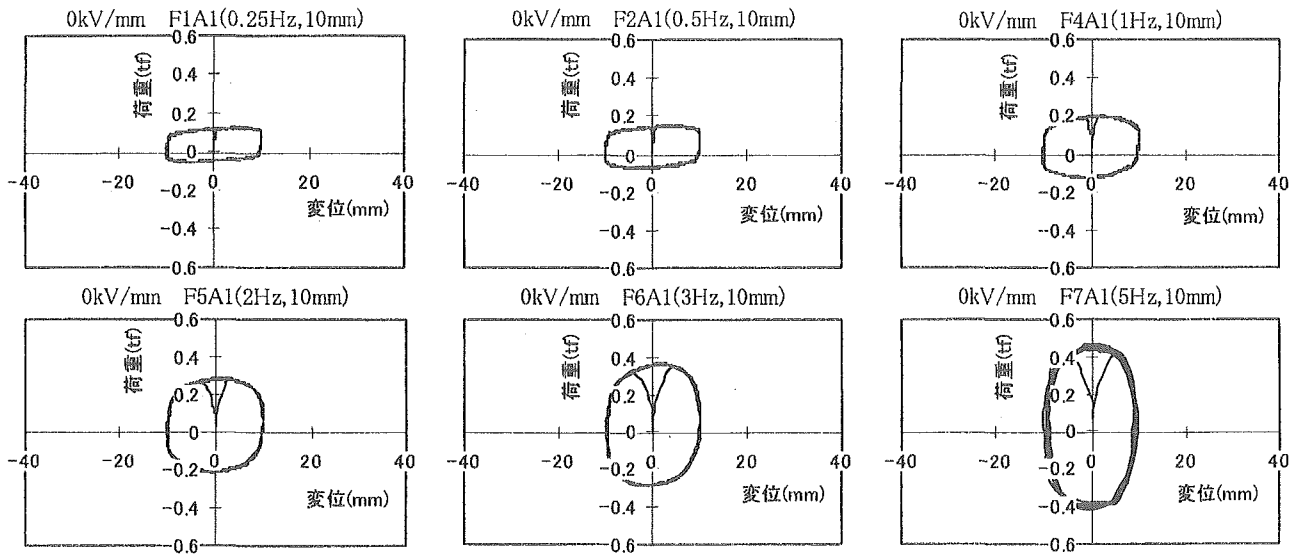


図-6 復元力-変位 履歴曲線

F5A2 では約 4.3tf となり復元力の増加が見られる。F5A3 では振幅の頂点で波形がつぶれた形となっているが復元力は約 4.9tf を示している。図-6 は復元力を縦軸に、振幅変位を横軸に表した復元力-変位履歴曲線で、図-7 は各データの復元力ピーク値を周波数毎に表したグラフである。図-7 から A1 (振幅 ±1cm) では 5Hz まで直線的に復元力が増加しているが、A2 (±2cm) は 2Hz まで、A3, A4 は 1Hz までしか直線的増加は見られない。これもアクチュエータの性能によるものである。ここで復元力を減衰力と見なし、設計時の計算結果と比較する。計算で電界無負荷時、ストローク 2cm (振幅 ±1cm)、周波数 1Hz の場合 $F = 1075\text{N}$ となったが、この計算の負荷率 0.7 を除き重量換算すると約 0.156tf となる。実験における F4A1 (1Hz, ±1cm) の最大復元力は+側で 0.204tf、-側で 0.124tf であり、これ平均すると 0.164tf となり、計算にほぼ近い結果が得られている。

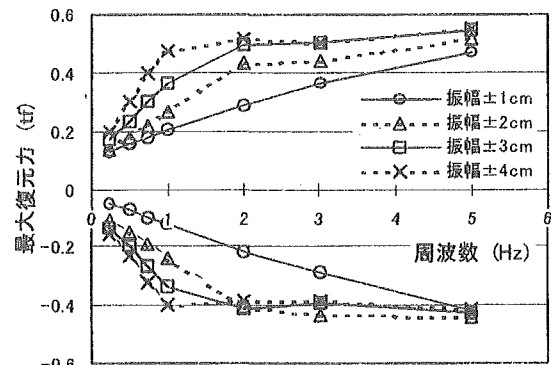


図-7 最大復元力

5. あとがき

ER流体を用いた制振、防振装置の開発は主に機械産業分野(自動車、工作機械 etc.)で行われてきた。最近では建築構造物の風振動や地震動の制振の適用が考えられている。橋梁においても地震動や交通振動に対する制振装置や免震装置として、あるいは斜張橋のケーブル振動の制御装置などとして開発が可能であると考えられる。また ER流体自体は開発途上の材料でありコストパフォーマンスや信頼性の向上が期待できると思われる。本研究ではER流体を用いた試験用ダンパーを製作し、その基礎的性能を実験的に検証を試みたが、今後制御装置を含めた制振装置の開発を検討する。

本研究の実験を行うにあたり北見工業大学土木開発工学科橋梁研究室上野智子さん、椎橋亜由美さんに御助力いただきました。ここに感謝の意を表します。また本研究の一部は平成9年度文部省科学研究費(代表大島俊之)の補助を受けて行われました。ここに感謝申し上げます。

[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 Electrorheological-Fluid Dampers, AIAA Journal, Vol.35, 1844-1852, 1997
- 3) 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, 日本機械学会, 1996