

(150) ER 流体を用いたバリアブルダンパーの開発

建設省土木研究所 正員○運上 茂樹
建設省近畿地方建設局 正員 向 秀毅

1. はじめに

ER 流体は、印加電圧に応じてその粘性を変化させることが可能な流体である。ER 流体の考え方は古くからあったが、近年信頼性及び実用性に優れた ER 流体が開発されるようになってきたことから、主に精密機械工学の分野で実用化されつつある^{1)~4)}。ER 流体は印加電圧に対する応答性が優れていること、また、バルブ等の複雑な機構が不要であり、構造を単純化できる等の利点を有するため、構造物の振動制御への応用が期待されている。著者らは、これまで構造物の振動性状に応じて減衰特性を変化させることが可能なバリアブルダンパー⁵⁾への ER 流体の適用性を検討してきた^{6), 7)}。本文では、開発した ER 流体を用いたシリンダー型及び回転型の 2 つのバリアブルダンパー (以下、ERVD と呼ぶ) を示すとともに、試作した ERVD の小型模型の動的載荷実験によりその動的特性及び実用性を検討した結果を報告する。

2. 開発した ERVD

著者らが開発した ERVD は、図 -1 に示すようなシリンダー型と回転型の 2 種類である。シリンダー型の ERVD は 1 号機として製作した。詳細は後述するが、1 号機の載荷実験結果によれば、ある程度載荷速度が大きくなると粘性抵抗による減衰力が卓越し、ER 効果による減衰力の変動範囲が小さくなるため、バリアブルダンパーとしては有効ではないことが明らかになった。このため、ER 効果による減衰力の変動範囲を大きくすることを目的として開発したのが回転型バリアブルダンパーである。回転型としたのは、ER 効果による減衰力を得るのに必要な面積を確保しやすいとともに、これと構造物を連結するアーム長を調整したり、回転軸を同一にして複数個連結する (図 -1(c)) ことにより、ダンパー単体の ER 効果による減衰力の変動範囲をさらに大きくすることが可能である等の発展性があるためである。

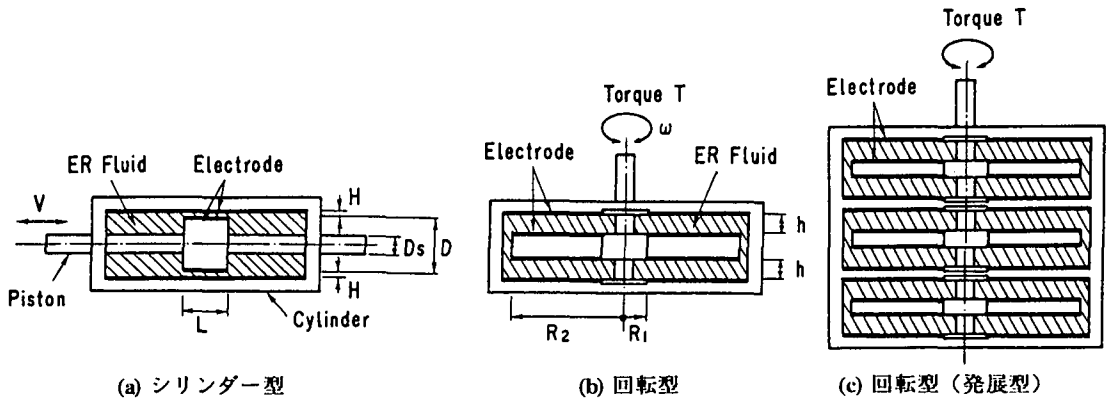


図 -1 開発した ERVD

3. ERVD による発生減衰力

(1) シリンダー型 ERVD

図 -1(a) に示したようなシリンダー型の ERVD により発生される減衰力 F は、次式に示すようにオリフィスを通過する粘性体の減衰力 (粘性減衰力) F_v 及び ER 効果による減衰力 F_E の和として表すことができる。

$$F = F_v + F_E \quad (1)$$

$$F_v = \frac{12 \cdot L \cdot A^2 \cdot \eta}{B \cdot H^3} v, \quad F_E = \frac{3 \cdot L \cdot A}{H} \tau_v(E) \quad (2)$$

ここで、A : ピストンの受圧面積 (m^2)、v : ピストンの速度 (m/sec)、L, B, H : 電極の長さ、幅、距離 (m)、 η : ER 流体の粘度、 $\tau_v(E)$: ER 効果により発生するせん断応力度 (Pa)、E : 印加電圧強度 (V/m)、である。 $\tau_v(E)$ が印加電圧に応じて変化させることが可能なせん断力である。粘性減衰力と ER 効果による減衰力の履歴曲線は、図 -2 のように表わすことができる。粘性減衰力は、ピストン速度に依存する減衰力であり、これはオリフィス幅を変化させて制御する。一方、ER 効果による減衰力は、載荷速度及び載荷変位に依存せず、印加電圧強度 E のみで制御することができる。ER 効果によるせん断応力度 $\tau_v(E)$ は、印加電圧強度の関数として一般に次式で表すことができる。

$$\tau_v(E) = \alpha \cdot E^\beta \quad (3)$$

ここで、 α 、 β は、ER 流体及び電極形状等に応じて与えられる定数である。

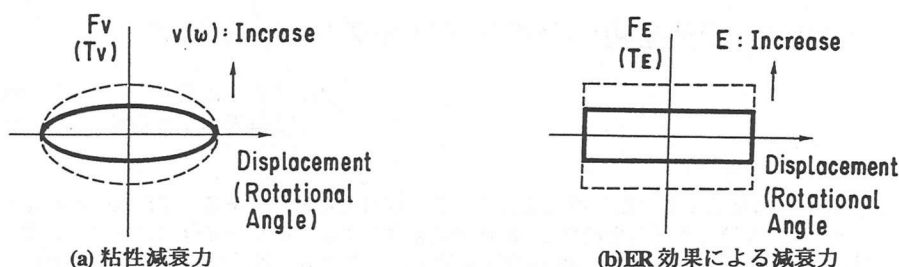


図-2 ERVD による発生減衰力

(2) 回転型 ERVD

同様に、図-1(b)に示した回転型 ERVD により発生される減衰トルク T は、次式に示すように粘性体の減衰トルク (粘性減衰トルク) T_v 及び ER 効果による減衰トルク T_E の和として表すことができる。

$$T = T_v + T_E \quad (4)$$

$$T_v = \frac{\pi \cdot \omega}{2h} \eta \cdot (R_2^4 - R_1^4) \quad (5)$$

$$T_E = R_m \cdot S \cdot \tau_y(E), \quad R_m = \frac{2(R_2^3 - R_1^3)}{3(R_2^2 - R_1^2)} \quad (6)$$

ここで、 ω : 角振動数 (1/sec)、 h : 電極間距離 (m)、 η : ER 流体の粘度、 R_1 、 R_2 : 回転板 (電極) の外半径及び内半径 (m)、 S : 電極面積 (m^2)、 $\tau_y(E)$: ER 効果により発生するせん断応力度 (Pa)、 E : 印加電圧強度 (V/m)、である。シリンダー型と同様に、粘性減衰トルクは、回転軸の回転速度 ω に依存する減衰トルクであり、これは ER 流体を挟む電極間距離により変化する。一方、ER 効果による減衰トルクは、印加電圧強度 E のみで制御される。

4. シリンダー型 ERVD の特性

(1) 小型模型の概要

写真-1に示すようなシリンダー型の小型モデルを開発試作した。ここには、後述する回転型も示している。ER 効果による減衰力は最大で 200N 程度、ピストンの最大ストロークは $\pm 40\text{mm}$ となるように設計した。ダンパーの全長は 521mm、オリフィス (電極) の長さ及び間隔は、それぞれ、134mm 及び 3mm とした。ピストンの受圧面積は $2,089\text{mm}^2$ である。ER 流体を封入する際のシール材としては、ゴムスリーブを用いた。ER 流体としては、シリコンオイルに炭素質粉末を混合したコロイド状液体 (㈱ブリヂストン製) とした。なお、使用した ER 流体の初期粘度は、 $0.13(\text{Pa}\cdot\text{s})$ 、 2kV/mm 時の τ_y は $670(\text{Pa})$ である。電極間に印加する電圧は、使用した高電圧電源の制約で $\text{DC}0 \sim 6\text{kV}$ とした。

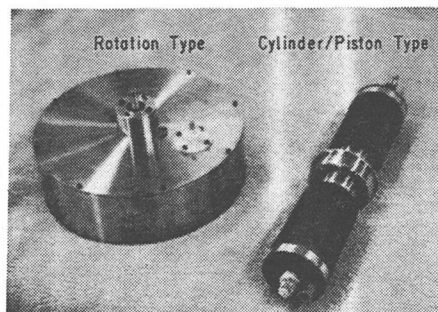


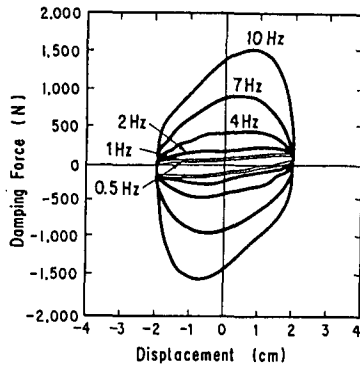
写真-1 開発試作した ERVD

(2) ERVD の動的特性

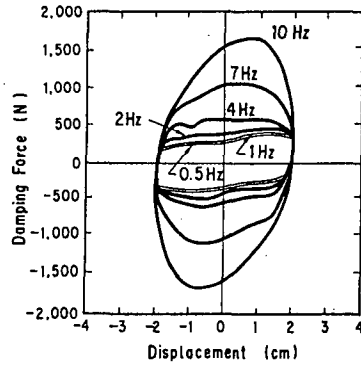
開発試作した ERVD の小型模型の動的荷重実験を行い、その動的特性を検討した。実験では、ピストンに加振負荷装置を取付け、ERVD に強制変位を与えた。図-3(a)は、負荷電圧を 0、すなわち、ER 効果を 0 とした場合の減衰力と変位の履歴曲線を示したものである。載荷変位は振幅 $\pm 20\text{mm}$ の正弦波とし、加振振動数を $0.5 \sim 10\text{Hz}$ に変化させた。これによれば、載荷速度が低い時にはほぼ矩形の摩擦型の履歴を示しており、ピストンの摩擦は約 100N である。載荷速度が速くなるに伴い減衰力は大きくなり、粘性減衰型の履歴を示すようになる。ただし、理想的には楕円形の履歴曲線にならないといけないが、実験ではピークの発生位置が遅れている。この原因は、ER 流体の圧縮性、あるいは、ER 流体のシール材として用いたゴムスリーブの変形性が関与していると考えられる。図-3(b)は、印加電圧を 6kV とした場合の履歴曲線を示したものである。図-3(a)と比較してみると、載荷速度が遅い場合の履歴曲線はほぼ矩形となり、ER 効果により減衰力が大きくなっていることがわかる。ただし、載荷速度が速くなると粘性減衰力が卓越するようになり、履歴曲線は楕円形に近づく。

図-4は、減衰力の印加電圧依存性を示したものである。これによれば、載荷振動数が 0.5Hz の場合には印加電圧により減衰力は $100\text{N} \sim 300\text{N}$ の範囲で変化させることが可能であるが、載荷速度が速くなると、前述のように粘性減衰力が卓越するようになるため、印加電圧による減衰力の変可範囲は狭くなる。

図-5は、実験値と上記の式 (1) による計算値を比較して示したものである。ここで、式 (3) に示したせん断応力度 τ_y の算定に用いる定数としては、実験から求めた $\alpha = 2.06 \times 10^{-4}$ 及び $\beta = 1.7$ を用いた。これによれば、実験値と計算値はよく一致している。



(a) 印加電圧 0kV



(b) 印加電圧 6kV

図-3 シリンダー型 ERVD の減衰力～変位の履歴曲線（载荷変位：±20mm）

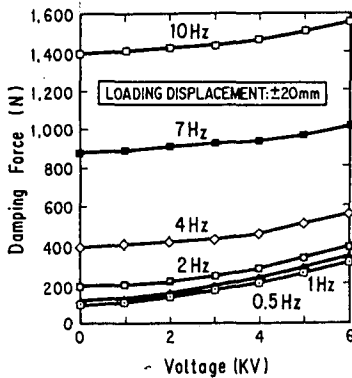


図-4 シリンダー型 ERVD の減衰力の印加電圧依存性（载荷変位：±20mm）

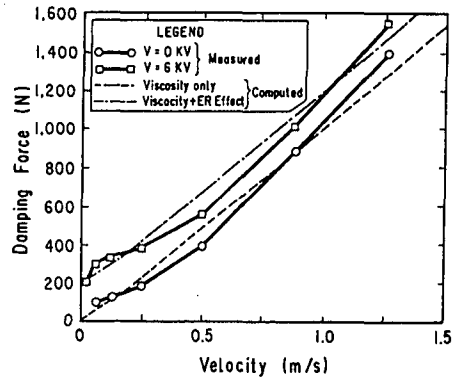


図-5 シリンダー型 ERVD の減衰力の計算値と実験値の比較（载荷変位：±20mm）

5. 回転型 ERVD の特性

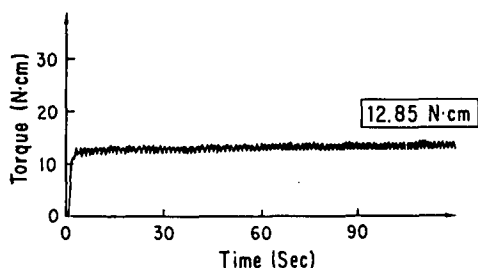
(1) 小型模型の概要

回転型 ERVD についても写真-1 に示したような小型モデルを開発試作した。設計では、ER 効果による減衰トルクは最大で $500\text{N}\cdot\text{cm}$ 程度となるようにした。ダンパーの大きさは、直径 234mm、厚さ 76mm とし、ER 流体に電圧を印加する電極板の外半径及び内半径は、それぞれ、9cm 及び 3.7cm とした。電極板の全面積は 422.9cm^2 、電極間距離は 2mm とした。ER 流体としては、上記のシリンダー型の ERVD に使用したのと同じの流体を用いた。なお、本 ER 流体の初期粘度は、 $0.15\text{Pa}\cdot\text{sec}$ 、 2kV/mm 時の τ_v は 660Pa である。電極間に印加する電圧としては、DC0 ～ 10kV とした。

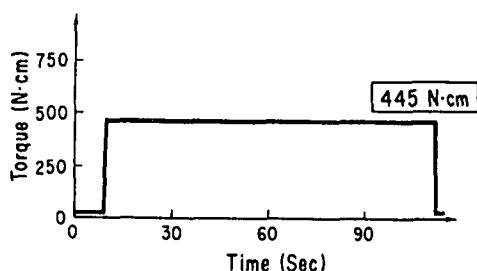
(2) 回転型 ERVD の動的特性

開発試作した ERVD の小型模型の動的载荷実験を行い、その動的特性を検討した。実験では、ERVD の回転軸に直流モーターを取り付け、モーターにより一定の回転を与えた。図-6 は、印加負荷電圧を 0kV 及び 6kV とした場合に ERVD による減衰トルクの発生状況を示したものである。ここでは、载荷回転数を 50rpm とした場合について示している。印加電圧が 0kV の場合の減衰トルクは $12.8\text{N}\cdot\text{cm}$ であり、これは粘性減衰トルクである。減衰トルクは、時間によらずほぼ一定に安定している。なお、一定のところでわずかに振動しているが、これは直流モーターと ERVD の中心軸の微少なずれによるものと考えられる。電圧を 6kV にすると、減衰トルクは $445\text{N}\cdot\text{cm}$ になり、この増加分が ER 効果による減衰トルクである。減衰トルクは時間によらずほぼ一定になっており、载荷に対する安定性はよい。図-7 は、このようにして求めた減衰トルクの回転数依存性を示したものであり、回転数に対してはほとんど依存せず、100rpm の回転数まではこれに依存する粘性減衰トルクが小さいことがわかる。

図-8 は、载荷回転数が 50rpm 及び 100rpm の場合の減衰トルクと印加電圧の関係を示したものである。ここには、上記の式 (3) による計算値も示している。ここで、式 (3) に示したせん断応力度の算定に用いる定数としては、実験から求めた $\alpha = 2.82 \times 10^{-3}$ 及び $\beta = 1.6$ を用いた。これによれば、減衰トルクは印加電圧に応じてほぼ放物線状に増加し、本模型では設計通り $500\text{N}\cdot\text{cm}$ までの範囲で減衰トルクを変化させることができる。また、粘性減衰トルクが相対的に小さいため载荷回転数の影響はほとんどなく、計算式とよく一致する。



(a) 印加電圧 0kV



(b) 印加電圧 6kV

図-6 回転型 ERVD による減衰トルク (回転数 50rpm)

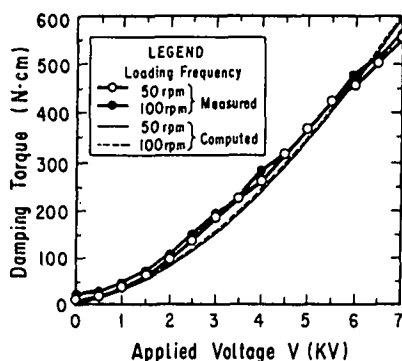
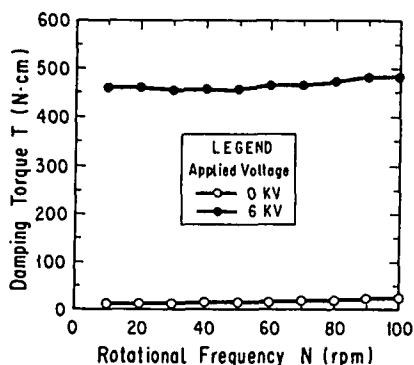


図-7 回転型 ERVD の減衰トルクの回転数依存性

図-8 回転型 ERVD の減衰トルクの印加電圧依存性

6. 結論

本文では、ER 流体を用いたバリアブルダンパーの実用可能性を検討するために、2 種類の ERVD の小型模型を開発試作し、模型単体の載荷実験によりその動的特性及び実用性を検討した。本検討結果をまとめると以下の通りとなる。

- 1) シリンダー型の ERVD の載荷実験によれば、載荷速度が低い時には ER 効果により履歴曲線の形状はほぼ矩形状となるが、載荷速度が速くなると粘性減衰力が卓越する楕円形の履歴曲線となり、ほぼ設計通りの特性を有している。しかしながら、載荷速度が速くなると、粘性減衰力が卓越するようになり印加電圧による減衰力の変換範囲は狭くなる。
- 2) 回転型の ERVD の載荷実験によれば、回転数が 100rpm までは、粘性減衰トルクが相対的に小さいので発生する減衰トルクは回転数の影響をほとんど受けない。本模型の減衰トルクは、設計通り 500N·cm までの範囲で変化させることができた。回転型構造とすることにより減衰力の変換範囲を大きくでき、バリアブルダンパーとして実用可能であることが明らかになった。

参考文献

- 1) Sasada, T., Kishi, T. and Kamijo, K. : Electro Viscous Effects of Polymer and Solid Particle Solutions, Proceedings of the Japan Society of Mechanical Engineers. Vol.41, No.342, 1975
- 2) Sasada, T., Kamijo, K. and Kishi, T. : Electro Viscous Effects of Uni-phase Liquid, Proceedings of the Japan Society of Mechanical Engineers. Vol.41, No.343, 1975
- 3) Ushijima, T., Takano, K. and Noguchi, T. : Rheological Characteristics of ER Fluids and their Application to Anti-Vibration Devices with Control Mechanism for Automobiles, SAE paper #881787, 1988
- 4) Duclos, T., G. : Design of Devices Using Electrorheological Fluids, SAE Technical Paper #881134, 1988
- 5) Kawashima, K. and Unjoh, S. : Seismic Response Control of Bridges by Variable Dampers, J. of Structural Engineering, Vol.120, No.9, ASCE, Sep. 1994
- 6) Kawashima, K., Unjoh, S., Suzuki, S. and Endoh, S. : Application of Electro-Rheological Fluid for Variable Damper, Proc. of the 3rd US-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges, Technical Report NCEER-94-0009, March 31, 1994
- 7) 川島一彦、運上茂樹、向秀毅 : ER 流体を用いたバリアブルダンパーの開発、土木学会第 49 回年次学術講演会、平成 6 年 9 月