ER ダンパの減衰力特性*
(区分的線形化減衰力特性の場合)伊藤 正 剛*¹, 前 森 健 一*²Damping Force Characteristics of Dampers Using Electrorheological Fluid
(In Case of Piecewise Linear Damping Forces)

Masatake ITOH and Ken-ichi MAEMORI

We propose to apply piecewise linear curves to express damping force characteristics of dampers using electrorheological (ER) fluid. The curves can express damping forces decreasing with increasing in piston speed of the dampers. In conventional dampers, their damping forces usually increase with increasing in its piston speed. In this report, we obtained piecewise linear damping forces of the ER dampers minimizing the maximum acceleration of the mass of a two mass system using an optimization method. The responses of the system with the optimum ER dampers were compared with those of the optimum ER dampers having damping forces expressed by cubic curves obtained in a previous paper.

Key Words: Optimum Design, Vibration Control, Damper, Transient Response, Electrorheological Fluid, Automobile

1. 緒 言

ER 流体(電気粘性流体)は, 電界を印加することにより見かけ上の粘性を変化させることのできる流体である。ER 流体は, 応答性のよさ, 電氣的信号を直接機械システムに取込むことが可能, などの性質からその応用にも期待が寄せられ, 近年注目を集めている^{(1)~(4)}。一方, パッシブサスペンション用の在来のダンパでは, 減衰力はピストン速度の増加とともに増加するという性質を示す⁽⁵⁾が, ER 流体を用いたダンパの場合, ピストン速度の増加に対し減少する部分を有する減衰力を設定することが可能である。そこで, 前報⁽⁶⁾では, ER 流体を用いたダンパの減衰力特性を, 三次曲線によって表すことを提案したが, その結果, ピストン速度の増加に対し一部減少する減衰力が最適であることがわかった。

本報では ER 流体を用いたダンパの減衰力特性を, 区分的線形化して表すことを提案し, 前報の結果と比較検討する。この区分的線形化減衰力を求めるにあ

っては最適化の手法を用いる。また, 二質点系の最大加速度および最大変位に及ぼす ER ダンパの減衰力の影響を明らかにする。なお, 本研究では電界を印加することによりビンガム流動⁽⁷⁾, すなわち流体に加わるずり応力がある一定値より弱い場合には固体のように振舞い, その値より大きい応力加わるとはじめて流動するような塑性性質を示す粒子分散系の ER 流体⁽⁸⁾を用いることを想定している。

2. 区分的線形化減衰力

ER ダンパ(図1)の減衰力を図2に示す区分的線形化減衰力 q を用いて

$$q = \begin{cases} f_0 = 0 & (\dot{x}_p = \dot{x}_{p,0} = 0) \\ (f_i - f_{i-1})(|\dot{x}_p| - \dot{x}_{p,i-1}) / (\dot{x}_{p,i} - \dot{x}_{p,i-1}) + f_{i-1} & (\dot{x}_{p,i-1} < |\dot{x}_p| \leq \dot{x}_{p,i}) \\ (f_I - f_{I-1})(|\dot{x}_p| - \dot{x}_{p,I-1}) / (\dot{x}_{p,I} - \dot{x}_{p,I-1}) + f_{I-1} & (|\dot{x}_p| \geq \dot{x}_{p,I}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表す。ここで $f_i (i=1, 2, \dots, I)$ は $|\dot{x}_p| = \dot{x}_{p,i}$ における減衰力の値である。ただし, 減衰力 f の存在領域は $f_{E,\max} + f_v$ と f_v に挟まれる部分に限定されるので

* 原稿受付 1998年1月20日。

*¹ 学生員, 神奈川大学大学院 (〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋3-27-1)。*² 正員, 神奈川大学工学部。

Fig. 1 Schematic of ER damper

Fig. 2 Damping force characteristics of ER dampers expressed by piecewise linear damping force

$$f = \begin{cases} q\dot{x}_p/|\dot{x}_p| & (|f_v| < q < |f_{E,\max} + f_v|) \\ f_v & (q \leq |f_v|) \\ f_{E,\max} + f_v & (q \geq |f_{E,\max} + f_v|) \end{cases} \quad \dots\dots (2)$$

とする。ここに

$$\left. \begin{aligned} f_{E,\max} &= C_E \tau_{y,\max} \dot{x}_p / |\dot{x}_p|, \quad f_v = C_V \dot{x}_p \\ C_E &= 3lA/h, \quad C_V = 12\mu lA^2/(bh^3) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (3)$$

ただし $f_{E,\max}$ は ER 効果⁽¹⁾ による減衰力の上限, f_v は流路の粘性による減衰力, $\tau_{y,\max}$, μ は ER 流体の降伏せん断応力, 粘性係数, l , b は電極の長さ, 幅, h は正負電極間のすきま, A はピストンの有効受圧面積, $\dot{x}_p$ はピストンの相対速度を表す。なお電界強度の関数である τ_y については

$$\tau_y = |f - f_v|/C_E \quad \dots\dots (4)$$

から求めればよい。

3. 最適設計法

ER ダンパを有する二自由度車両モデル(図 3)が, 突起を乗り越す場合について, 制約条件

$$g_j(S) \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, J) \quad \dots\dots (5)$$

Fig. 3 Vehicle model

のもとで, 目的関数 $|\dot{x}_2|_{\max}$ を最小化する設計変数

$$\left. \begin{aligned} S &= S(S_t, S_c) \\ S_t &= (f_{t,1}, f_{t,2}, \dots, f_{t,I})^T \quad \dots\dots\dots (6) \\ S_c &= (f_{c,1}, f_{c,2}, \dots, f_{c,I})^T \end{aligned} \right\}$$

を求める最適化問題を考える。ただし $f_{t,i}$, $f_{c,i}$ ($i=1, 2, \dots, I$) は, $|\dot{x}_{p,i}|$ における減衰力(図 2)であり, 添字の t および c は伸び側($\dot{x}_p \leq 0$)および縮み側($\dot{x}_p \geq 0$)を表す。最適化における制約条件式(5)は, 次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} |x_2|_{\max} - |x_2|_U &\leq 0 \\ f_{t,i} - |f_{E,\max} + f_v| &\leq 0 \\ f_{c,i} - (f_{E,\max} + f_v) &\leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, I) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (7)$$

ただし

$$\dot{x}_p = \dot{x}_1 - \dot{x}_2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで添字 U および $\max$ は, それぞれ上限, 最大値を表す。この制約条件付きの最適化問題を次の P_K を最小化する問題に変換する。

$$\left. \begin{aligned} P_K &= |\dot{x}_2|_{\max} + r_K \{g_j(S)\}^2 H\{-g_j(S)\} \quad (K=1, 2, \dots) \\ &\quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned} \right\}$$

ここで r_K は $r_{K+1} > r_K$ なる正数, H はヘビサイドの単位階段関数である。

4. 設計例

最大高さ $y_{\max}$, 長さ l_z のバーサイン突起を速度 $\dot{z}$ で乗り越す車両モデルを考える。変位 z における突起高さ y は

$$y = (y_{\max}/2) \{1 - \cos(2\pi z/l_z)\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

で表される。この諸元として, $y_{\max} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$, $l_z = 3.7 \text{ m}$ を与える。また, ER ダンパの諸元として, $C_E = 0.25 \text{ m}^2$, $\tau_{y,\max} = 4 \times 10^3 \text{ Pa}$, $C_V = 2.9 \times 10^3 \text{ Ns/m}$, 力学モデルの諸元として, $m_1 = 50 \text{ kg}$, $m_2 = 250 \text{ kg}$, $k_1 = 1.8 \times 10^5 \text{ N/m}$, $k_2 = 1.8 \times 10^4 \text{ N/m}$ を与える。

なお, 力学モデル(図 3)の運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= k_1(x_0 - x_1) - k_2(x_1 - x_2) - f \\ m_2 \ddot{x}_2 &= k_2(x_1 - x_2) + f \\ x_0 &= y, \quad z = \dot{z}t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここに $\dot{z}$ は力学モデルの前進速度, t は時間を表す.

$\dot{z} = 5.556 \text{ m/s} (= 20 \text{ km/h})$ において ER ダンパを最適化し, 設計変数 $S = (f_{c,1}, f_{c,2}, \dots, f_{c,l}, f_{t,1}, f_{t,2}, \dots, f_{t,l})^T$ の最適値 S_{opt} を求めた. この結果を図 4~20 に示す.

図 4 に, 区分数 $l=3$ の場合の最適区分的線形化減衰力特性図を示した. ただし, この場合の最適化計算におけるピストン速度は $|\dot{x}_{p,1}| = 0.01 \text{ m/s}$, $|\dot{x}_{p,2}| = 0.03 \text{ m/s}$, $|\dot{x}_{p,3}| = 0.06 \text{ m/s}$ である. 図 4 より, 最適区分的線形化減衰力特性 (Optimum) は, ピストン速度の増加に対し伸び側・縮み側とも一部減少する減衰力を有していることがわかる. これは前報で述べた三次曲線減衰力特性と同様の結果である. また, この最適区分的線形化減衰力特性 (Optimum) と比較対照するものとして, 従来のパッシブダンパのように, 減衰力 f が $|\dot{x}_p|$ の増加に対し常に増加する特性のダンパを考え, これ (Monotone increasing) を破線で示した. また, 電界印加が零の状態, すなわち粘性のみを考慮した減衰力特性 f_v を二点鎖線で示した.

図 5 は, ばね上質量変位について比較した結果であ

る. 電界印加が零 (Without electric field) のとき, 最大変位の値が最も大きいことがわかる. 最適減衰力特性 (Optimum) と単調増加特性 (Monotone increasing) とを比較した結果, 最大変位は, 前者のほうが後者に比べ約 2.8% 減少している. しかし両者とも変位の収束性が悪いのがわかる. これは, 電界印加時の減衰力が過度に強いためであると思われる. そこで最適減衰力を有するダンパにおいて, 路面突起を乗越した直後, すなわち変位 $z=4 \text{ m}$ 以降電界印加を零とし, 流体の粘性による減衰力のみを生じるもの [以降, 収束改善形 (Improved) と称する] を考え, 図 5 に一点鎖線で示したが, 著しくその収束性が改善されたことがわかる. また, 無電界印加時と比較した結果, 最大変位は最適区分的線形化減衰力特性の方が 13.4% 減少している.

図 6 は, ばね下質量変位を比較した結果である. 大きな差異は見られないが, 収束性は収束改善形 (Improved) において改善されていることがわかる.

図 7 は, ばね上質量の速度を比較した結果である. 最大速度に関しても, 電界印加が零 (Without electric field) のとき, 最も大きな値をとっている. また, 最適減衰力特性 (Optimum) のほうが単調増加特性 (Monotone increasing) よりも全体的に小さな値をとっていることがわかる. 収束性に関しては速度についても収

Fig. 4 Optimum damping force characteristics of ER damper

Fig. 5 Displacement of m_2

Fig. 6 Displacement of m_1

Fig. 7 Velocity of m_2

Fig. 8 Velocity of m_1 Fig. 10 Acceleration of m_1 Fig. 9 Acceleration of m_2

Fig. 11 Piston speed

束改善形(Improved)が優れていると言える。

図8は、ばね下質量の速度を比較した結果である。最適減衰力特性(Optimum)と単調増加特性(Monotone increasing)の場合、正の第1ピーク付近で比較的大きな速度変化が見られる。これは、ピストン速度の変化が滑らかでない(図11)ためである。収束性については、収束改善形(Improved)において改善されていることがわかる。

図9は、ばね上質量の加速度曲線について比較したものである。最大加速度に関しても、電界印加が零(Without electric field)のとき、最も大きな値をとっている。また、最適減衰力特性(Optimum)の最大加速度 $|\ddot{x}_2|_{\max}$ は単調増加特性(Monotone increasing)に比べ7.75%減少している。また、最適減衰力特性(Optimum)の曲線におけるピーク値は、 $|\ddot{x}_2|_{\max}=2.38 \text{ m/s}^2$ となっている。最適減衰力特性(Optimum)に見られる鋭いピークが減衰力の減少によって生じたものであることは、ピストン速度曲線(図11)と、減衰力特性(図4)などからほぼわかる。また、収束改善形(Improved)を用いることにより、加速度の収束性は改善されていることがわかる。

前述と同様のピークはばね下質量の加速度曲線(図10)にも見られる。また、加速度曲線の収束性に関してはこの場合も収束改善形(Improved)の効果が現れ

Fig. 12 Damping force

ている。

図11のピストン速度曲線から、無電界時の減衰力特性に比べ他の減衰力特性のピストン速度が低く押さえられていることがわかる。

図12に減衰力の変化を示す。最適減衰力特性は、最初のピーク3点とも、他の減衰力特性よりも小さな極値をとっている。収束性に関しては、この場合も収束改善形(Improved)の効果が顕著に現れている。

図13からERダンパが最初のピストン一行程で吸収したエネルギー量を求めることができる。図13より、最適減衰力特性(Optimum)のほうが単調増加特性(Monotone increasing)に比べ7.9%多くのエネルギーを最初の1行程で吸収していることがわかる。な

Fig. 13 Energy absorbed by damper

Fig. 14 Optimum damping force characteristics of ER damper ($I=3, 4, 5$) Fig. 15 Acceleration of m_2 ($I=3, 4, 5$)

お、最適減衰力特性(Optimum)の曲線には減少する減衰力特性によるピークが現れている。また、電界印加が零(Without electric field)のとき、最も多くのエネルギーを吸収しているが、ピストン変位は大幅に増大している。

図14～18は、最適区分的線形化減衰力特性を求めるにあたり、区分数 I を3, 4, 5と増加させていった場合について比較検討した結果である。

図14は、減衰力特性について比較した結果である。区分数に関係なく、ピストン速度の増加に対し一部減少する減衰力を有する特性が最適な結果として得られていることがわかる。

図15に、目的関数であるばね上質量加速度につい

Fig. 16 Piston speed ($I=3, 4, 5$) Fig. 17 Energy absorbed by damper ($I=3, 4, 5$) Fig. 18 Maximum acceleration and maximum displacement of m_2

て比較した結果を示す。区分数 I を増加させると、わずかなではあるが最大加速度の値が小さくなってきていることが読み取れる。区分数 I を増やすことで $z=2$ m 付近のピークがより平坦になるためと考えられる。

図16は、ピストン速度について比較した結果である。若干の違いはあるが、最適化に用いた点のピストン速度の違いおよび、区分数の違いがこの差をもたらしたものと思われる。

図17は、ERダンパが最初のピストン1行程で吸収したエネルギー量を比較した結果である。ピストン速度の増加に対し減少する減衰力を有するダンパに特有のピークがすべての場合について現れている。

図18は、ばね上質量最大加速度並びにばね上質量

Fig. 19 Comparison of optimum cubic curve damping force characteristics with optimum piecewise linear one

Fig. 20 Comparison of optimum cubic curve damping force with optimum piecewise linear one regarding acceleration of m_2

最大変位について比較した結果である。区分数 I を増すに従って最大加速度のみならず最大変位も減少することがわかる。区分的線形化減衰力特性の手法を用いた最適化が有効であったことが読み取れる。

図 19, 20 は、前報で述べた三次曲線減衰力特性と本報で述べた区分的線形化減衰力特性(区分数 $I=3$)の結果との比較である。図 19 からわかるように両者ともピストン速度の増加に対し一部減少する減衰力を有する特性が最適な減衰力特性として得られている。図 20 はばね上質量加速度について比較した結果である。両者ともピストン速度の増加に対し一部減少する減衰力を有するため、加速度曲線に一部鋭いピークが現れているなど、ほぼ同様な結果が得られていることがわかる。

5. 結 言

区分的線形化減衰力を有する ER ダンパを用いることにより、従来の単調増加特性をもつダンパや速度比

例特性を持つ粘性ダンパに比べ、ばね上(車体)質量の最大加速度および最大変位を低い値に抑制すると同時に振動の収束性を向上させることができた。これは、振動の状況に応じて電圧を加減し、減衰力を自由に切り替えられるという ER ダンパの特徴によるものである。自動車の乗り心地改善等、さまざまな振動抑制が必要とされる分野での応用が考えられる。

以下に得られた知見を要約する。

(1) 最大ピストン速度約 0.083 m/s 以下の計算例において得られた最適区分的線形化減衰力は、ピストン速度の増加に対し一部減少する減衰力を有するものであった。

(2) (1)の最適区分的線形化減衰力特性(区分数 $I=3$ の場合)において減衰力の減少する部分を増加する形に補正したものと、最適区分的線形化減衰力特性を比較した。その結果、前者に対し後者のばね上質量最大加速度は 7.8% 減少し、その最大変位は 2.8% 減少した。

(3) 最適区分的線形化減衰力特性について、区分数 I を 3, 4, 5 と増加させることによって、ばね上質量最大加速度ならびにばね上質量最大変位はわずかつ減少した。

(4) 最適減衰力特性を有する ER ダンパにおいて、振動途中で電界印加を零にすることにより、振動の収束性を改善することができた。

(5) 区分的線形化減衰力と前報で述べた三次曲線減衰力との比較においては、加速度・ばね上質量変位についてほぼ同じ結果が得られた。また、区分的線形化減衰力の区分数を増すことにより三次曲線減衰力に比べよりよい結果を得ることができた。

文 献

- (1) 森下信, 機誌, **96**-899(1993), 900-903.
- (2) Stanway, R., ほか 2 名, *Inst. Mech. Eng.*, No. 382/034(1989), 547-558.
- (3) Petek, N. K., *SAE Tech. Paper*, No 920275(1992), 67-72.
- (4) 前森健一・内藤久也, 機論, **62**-597, C(1995), 1726-1730.
- (5) 防振・緩衝装置図集分科会, 機械図集防振緩衝装置, 上, (1997), 92, 93, 日本機械学会.
- (6) 伊藤正剛・前森健一, 機論, **64**-619, C(1998), 767-771.
- (7) 滝本淳一・小山清人, *J. SICE*, **34**-9 (1995), 692-697.
- (8) 電気粘性流体とその応用に関する研究分科会, 電気粘性流体とその応用に関する研究分科会成果報告書, No. PSC 221(1994), 42-46, 日本機械学会.