1108 自動車用電磁ダンパの走行試験

Road Tests of Electromagnetic Damper for Automobiles

正 須田 義大 (東大) 正 椎葉 太一 (東大)
 檜尾 幸司 (東大) ○学 川元 康裕 (東大)
 近藤 卓宏 (カヤバ工業) 山形 英城 (カヤバ工業)

Yoshihiro SUDA, Taichi SHIIBA, Koji HIO, Yasuhiro KAWAMOTO, The University of Tokyo
 Takuhiro KONDO, Hideki YAMAGATA, Kayaba Industry Co., Ltd.

This paper presents road tests of electromagnetic damper for automobiles. The authors propose electromagnetic damper system for automobiles for improved ride comfort and compatibility between stability and isolation. The electromagnetic damper (EMD) uses DC motor as generator, so it can electronically control damping force. Former trial EMD had linear characteristics of damping force, but the authors developed power electronics circuit for EMD to have nonlinear damping force, and proved that the EMD system has suitable ability for automobile damper from experiments using new damper system. This time, we equipped electromagnetic dampers with an automobile, and did the road tests to make sure of its nonlinearization of damping force.

Key Words: Shock Absorber, Damping / Damper for Automobiles, Stability, Ride Comfort, Nonlinear Damping Force, Power Electronics

1. 結 言

自動車のサスペンションには、乗り心地を良くする機能と、走行時の操縦安定性を保持する機能が求められる。共振を除く周波数域で、振動絶縁性を上げ乗り心地を良くするには、減衰係数は小さい方がよい。しかし、減衰係数が小さいと共振時における振動伝達率は大きくなり、ばね下の追従性・接地性が失われ、操縦安定性は、保持できなくなってしまう。このような相反する要求を満たすために、通常のパッシブな自動車用ダンパの減衰力特性は、入力速度が小さい時は、減衰係数が大きく、入力速度が大きい時は、小さくなるような非線形性を有している。(図1)

これまでに、筆者等は、高性能・高効率化を実現するために、電気・電子化された振動制御デバイスを目指して、電磁ダンパを試作した⁽¹⁾。当初、電磁ダンパは、線形な減衰力特性を持つだけであったが、非線形な減衰力特性を持たせる回路を開発した。さらに、改良した新規電磁ダンパにより、自動車用ダンパとしての妥当性を確認した⁽²⁾。この非線形回路は、外部電源を必要とせず、非線形な減衰力特性を、きめ細かく電子的に調節することが可能である。

今回、新規電磁ダンパを実車両に搭載し、線形回路と非線形回路とを比較するために、突起乗り越しによる実車走行試験を行ったので、報告する。

まず、電磁ダンパの構造・動作原理、モデル化について述べ、その後、非線形回路について解説する。次に、突起乗り越しによる実車走行試験について述べ、実車走行試験結果でダンパの非線形特性が現れているかについて評価し、線形回路と非線形回路での実験結果を比較する。また、非線形回路の実験結果を、油圧加振機の試験結果と比較することで、再現性を確認する。

Fig.1 Properties of damper for automobiles

2. 電磁ダンパ

2.1. 構造と動作原理

電磁ダンパは、ボールねじ、遊星歯車、DC モータで構成されている。ストローク方向の直線運動を、ボールねじで回転方向へと変換し、遊星歯車により減速して、DC モータへトルクを伝達する。DC モータで発生する電磁力を、減衰力として利用することで、ダンパとして機能する。発生した電力で制御回路を駆動することができ、モータに接続する制御回路の抵抗値を変えることで、減衰係数の調整を行うことができる。オイルレスで環境負荷が小さく、電子回路上で減衰係数を変えることができるため、制御の高効率化を図ることができる。構造図を図2に、製作した電磁ダンパを図3に示す。

Fig.2 Concept of Electromagnetic Damper

Fig.3 Electromagnetic Damper

2.2. モデル化

以下電磁ダンパのモデル化を行い、減衰力の理論式を求める。ダンパのストローク速度が $\dot{z}$ [m/s] の時のモータの回転数 n [rps] を考える。ボールねじのリード l [m]、遊星歯車のギア比 α とすると、ストローク方向の単位速度 1 [m/s] は、モータの回転数に換算すると、 $\frac{\alpha}{l}$ [rps] となるので、 $n = \frac{\alpha}{l} \dot{z}$ [rps] と表される。電磁ダンパに搭載される DC モータの発生電圧定数 k_e [V/rps] とすると、DC モータで発生する誘導電圧 e [V] は、以下の式で表される。

$$e = k_e \times n = k_e \times \frac{\alpha}{l} \times \dot{z} \quad (1)$$

次に、回路を流れる電流 i [A]、DC モータのトルク定数 k_m [Nm/A] とすると、DC モータの発生トルク τ_m [Nm] は、 $\tau_m = k_m \times i$ となる。 τ_m は遊星歯車で α 倍され、ストローク方向に換算するには $\frac{2\pi}{l}$ 倍するとよいので、電磁ダンパに搭載される DC モータがストローク方向へ発生する力の大きさ f [N] は以下の式で表される。

$$f = \frac{2\pi}{l} \times \alpha \times \tau_m = \frac{2\pi}{l} \times \alpha \times k_m \times i \quad (2)$$

いま、DC モータには抵抗のみが接続されており、回路全体の抵抗値 (DC モータの内部抵抗を含む) を r とすると、ストローク速度 $\dot{z}$ に対して f は、 $e = i \times r$ と式 (1), (2) より、等価減衰係数 c_{em} [Ns/m] として

$$f = c_{em} \times \dot{z} \quad (3)$$

と表される。但し、

$$c_{em} = \frac{k_e \cdot k_m}{2\pi} \times \left(\frac{2\pi}{l} \times \alpha \right)^2 \times \frac{1}{r} \quad (4)$$

である。

従って、モータの発生する電磁力のみに着目した場合、電磁ダンパが発生する力は、減衰係数が式 (4) で表される線形

特性のダンパが発生する減衰力と等価であること、そして、接続抵抗により減衰係数が可変であることが分かる。

しかし、電磁ダンパは、内部に機械的な運動部分を有するので、電磁ダンパが発生する総合的な減衰力には、これらの機械的運動部分による影響も考慮する必要がある。そこで、DC モータ内部のロータの慣性モーメントを J_0 [kgm²]、ボールねじ軸の慣性モーメントを J_1 [kgm²]、クーロン摩擦の大きさを f_r [N] とし、電磁ダンパが発生する総合的な減衰力を f_d [N] とすると、これらの関係式は、

$$f_d = c_{em} \cdot \dot{z} + I \cdot \ddot{z} + \text{sgn}(\dot{z}) \cdot f_r \quad (5)$$

となる。但し、内部慣性モーメントのストローク方向への等価慣性質量 I [kg] は以下の式で表される。

$$I = J_0 \times \left(\frac{2\pi}{l} \times \alpha \right)^2 + J_1 \times \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \quad (6)$$

2.3. 非線形回路

式 (1)・(2) より、ストローク速度と電磁ダンパの発生電圧が比例し、DC モータがストローク方向に発生する力と回路電流が比例することが分かる。従って、ストローク速度-発生力の特性を、図 1 にするには、発生電圧-回路電流に図 1 と相似な非線形特性を与えれば良いことが分かる。

ここで、MOS-FET と可変シャントレギュレータ (内部基準電圧: V_{REF})、抵抗を用いて図 4(a) に示す電流制限回路を構築すると、この回路の電圧-電流特性は図 4(b) となる。

Fig.4 (a) Current restriction circuit
(b) Characteristics of Current restriction circuit

さらに、抵抗を可変抵抗に変更し、新たに可変抵抗を加えて、図 6 に示す可変電流制限回路を構築する。電圧-電流特性は図 7 のとなり、電流制限開始電圧・飽和電流値を 2 つの可変抵抗でそれぞれ独立に調整可能となる。

Fig.6 Variable Current restriction circuit

Fig.7 Characteristics of Variable Current restriction circuit

そこで、図 6 に示す可変電流制限回路を多数並列に接続して、図 8 の様な多段階可変電流制限回路を構成する。印加電圧は各回路で共通、電流値は各回路の電流値が重ね合わされるので、この回路の電圧 - 電流特性は図 9 となる。さらに、各折れ点は可変抵抗によりそれぞれ調整可能となる。

Fig.8 Multistage Variable Current restriction circuit

Fig.9 Characteristics of Multistage Variable Current restriction circuit

3. 走行試験

電磁ダンパを実車両に搭載し、走行試験を行った。これまで、減衰力特性の非線形化は、単体レベルでの試験においては確認されている。今回、車両レベルでの実験により、ダンパの減衰力特性の非線形化を確認する。

3.1. 試験方法

電磁ダンパを車両後部左右に取り付け、突起乗り越し試験を行った。突起条件は、高さ 18[mm]、幅 30[mm]とした(図 10)。電磁ダンパの車内から見た装着状態を、図 11 に示す。

非線形回路の設定による減衰力特性は、通常のオイルダンパと同等になるようにした。回路を駆動する電源は、電磁ダンパの DC モータが発生する電力を用いているため、外部電源を必要としない。試験においては、電磁ダンパの減衰力特性の条件は、以下の通りとした。

(1) 線形特性を持つ条件：linear

- (2) 通常のオイルダンパと同等の設定である非線形特性を持つ条件：nonlinear(normal)
- (3) (2) の特性より減衰力が大きくなるような非線形特性を持つ条件：nonlinear(hard)

以上の 3 条件において車速を変えて、走行試験を行った。

Fig.10 Shape of Road Face

Fig.11 Equipped Electromagnetic Damper

3.2. 試験結果

車速 20[km/s]における試験結果を、図 12、13 に示す。電磁ダンパの発生する減衰力は、式(5)から、内部の慣性質量によるストローク加速度に比例する項を持つ。そのため、加速度の異なる振動の入力により、減衰力が変化することになる。ここでは、回路に与えた非線形な減衰力速度特性の再現を見るために、式(5)で表される力ではなく、式(3)で表される DC モータの発生する減衰力で、ストローク速度に比例する力について見ることにする。式(3)の力を求めるにあたっては、式(2)より電流から換算した。図 12、13 は、ストローク速度の時系列データと、電流より求めた DC モータの減衰力の時系列データをもとに、リサージュ図形を描くことで求めた。図 12、13 とともに、縦軸正の方向がダンパの伸び側を示し、負の方向が圧縮側を示す。

3.2.1. 線形特性条件と非線形特性条件の比較

図 12 では、線形特性条件と非線形特性条件について、速度 - 減衰力の関係を示している。破線の線形特性条件に対し、実線の非線形特性条件は、伸び側で減衰力が大きく、圧縮側で減衰力が小さくなっている。非線形特性において減衰力を大きく設定した条件である下側のグラフでは、上のグラフに比べて、減衰力が大きくなっていることが確認できる。

Fig.12 Experimental results of linear and nonlinear condition

3.2.2. 非線形特性条件の加振試験との比較

図 13 では、油圧加振機における電磁ダンパ単体試験の結果とともに、非線形特性条件の結果について、速度-減衰力の関係を示してある。油圧加振機における試験結果は、最大ストローク速度 0.3[m/s]の正弦波で加振したため、 ± 0.3 [m/s]の範囲でのデータである。非線形特性の減衰力設定がどちらの条件でも、油圧加振機の結果と、よく一致しているのが確認できる。

Fig.13 Results by the shaker and road tests on nonlinear condition

以上、図 12、13 のグラフから、実車両走行試験においても、非線形回路による減衰力の非線形化が達成できていることが確認できる。

4. 結 論

本報告では、改良を施し、新規に開発した自動車用電磁ダンパを用いて、実車走行試験を行った。電磁ダンパには、外部電源を必要とせず、電子的に非線形減衰力特性の調整が行える非線形回路を使用した。実車走行試験により、電磁ダンパの減衰力特性の非線形化が、実車両においても達成されていることを確認した。

本報告では、実車走行試験のうち、電磁ダンパの特性評価結果を示したが、官能評価試験を含む総合的なダンパ評価を行っていく。

参考文献

- [1] 末松 啓吾, 須田 義大, 中野 公彦, 椎葉 太一: “自動車における電磁サスペンションの研究”, 自動車技術会 2000 年春季大会 学術講演会前刷集, No. 4-00, pp. 1-4
- [2] 檜尾 幸司, 須田 義大, 椎葉 太一, 近藤 卓宏, 山形 英城: “自動車用電磁ダンパにおける減衰力特性の非線形化に関する研究”, 自動車技術会 2002 年春季大会学術講演会前刷集, No. 38-02, pp. 5-10