306 非粘性流体の慣性を利用した振動低減装置

Vibration Suppression Device that Utilizes Inertia Mass of non-Newtonian Fluid

○正 松岡 太一 (明治大学) 正 砂子田 勝昭 (秋田大学)

Taichi MATSUOKA, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, 214-8571

Katsuaki SUNAKODA, Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-machi, Akita-city, Akita, 010-8502

Key Words : Damping, Damper, Vibration Control, Fluid Inertia Mass, Non-Newtonian Fluid, Dilatant Fluid

1. ま え が き

制振装置は復元力（ばね力）や減衰力、摩擦力などの抵抗力を発生させてエネルギーを吸収もしくは散逸させて振動を低減させている。これらに加え、慣性力を利用したものにメカニカルスナッパや流体ポンプ式慣性ダンパがある。これらの特長は、慣性力による反共振点を利用して、振動を低減または遮断させることである。これは装置が慣性接続質量（シリーズマス）として作用するためである。慣性接続質量は減衰がない場合、基礎部と振動絶縁対象物との間の相対運動することで、特定の周波数において入力外乱を完全に遮断し、さらにその周波数より高い領域においても応答が小さくすることができる。

著者らはこれまでに、その理論を導出し、ニュートン流体である水やオイルを用いた振動遮断装置⁽¹⁾⁻⁽³⁾のほか、擬塑性流体的な挙動を起こす機能性流体を用いた振動低減装置⁽⁴⁾⁽⁵⁾を開発し、その振動抑制効果を検証してきた。これらの慣性質量の大きさは、流体の密度およびバイパス管とシリンダの断面圧縮比に大きく依存している。また、機能性流体として磁気粘性流体（MR 流体）を用いた場合、外部磁場の強弱によって見かけの慣性質量を可変させることができることを確かめた。

一般的に、粒子径が比較的大きな粒子を高い濃度で含む懸濁液において、非常に高い圧力において外力を加えると見かけの粘度が増加して固まるが、静止しておくくと緩やかに流動することをダイラタンシー性と呼ぶ⁽⁶⁾。これは急激に外力を加えることによって粒子層が膨張して粒子間の空間が増すとその空間に液体が吸い込まれて懸濁液が流動しにくくなったり、一見乾燥したように見えるためである。このように、ひずみ速度が増すにつれて流体のせん断応力が硬化し、応力の増加と共に粘度が高くなるといった増粘現象をもつせん断速度粘稠化の非ニュートン流体をダイラタント流体と呼ぶ。

そこで本研究では、振動時に流体に高負荷が作用することで、減衰効果および慣性効果が大きくなるように、非粘性流体であるダイラタント流体を用い、その慣性力を利用した振動低減装置を提案した。装置を試作し、振動台によって抵抗力特性を測定した。また、その動的特性および周波数依存性を調べた。

2. 振 動 低 減 装 置 の 構 造

本研究で提案する振動低減装置の構造を図 1 に、設計仕様を表 1 に示す。本装置はシリンダ、ピストン、長いバイパス管から成る。本装置を振動対象物と基礎との間に取り付けた場合、振動によってバイパス管内の流体を高速に移動させることによって、相対加速度に比例した慣性力が生じる。この

慣性力は慣性接続質量として作用することで反共振振動数において振動を低減するものである。液漏れ防止のために各摺動部にシリコンゴム製 O リングを挿入した。バイパス管には圧力による変形を防止するためフッ素樹脂チューブを用いチューブ継手によってシリンダと締結されている。非粘性流体として比較的容易に作れるダイラタント流体（コーンスターチと水を重量比 1:1 で混合した懸濁液）を、シリンダおよびバイパス管内に封入してある。コーンスターチの平均粒径はおおよそ 15 μm とされる⁽⁶⁾。既報から流体慣性質量 m_s は次式となる⁽⁵⁾。

$$m_s = \rho \frac{\pi d^2 l}{4} \alpha^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 d はバイパス管直径、 l はバイパス管の全長、 ρ は流体の密度であり、 α は断面圧縮比として

$$\alpha = \frac{D_1^2 - D_2^2}{d^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

で定義され D_1 はシリンダ内径、 D_2 はピストンロッド外径である。流体慣性質量はバイパス管内の質量および断面圧縮比の二乗に比例することから、大きな慣性効果を得るにはバイパス管を細くて長いものにするか、密度の大きいものにするのが良い。

Fig. 1 Design diagram of the test vibration suppression device

Table 1 Design specification

Dimension	Cylinder diameter	D_1	40.0 mm
	Piston rod diameter	D_2	12.0 mm
	By-pass length	l	1.28 m
	By-pass pipe diameter	d	10 mm
	Compression ratio	α	14.56
	Volume of fluid		256 cm^3
	Stroke		50 mm
Dilatan t fluid	Series inertia mass	m_s	20 kg
	Equivalent density	ρ	0.95 g/cm^3
	Bulk density of cornstarch		0.80 g/cm^3
	Weight of water		150 g
	Weight of cornstarch		150 g

3. 抵抗力特性

振動低減装置の動的特性を把握するために、抵抗力測定実験を行った。装置の一端を振動台に取付け、一方はロードセルを介して固定壁に取付け、振動台に正弦波状変位を入力し、その時の荷重と変位を測定した。正弦波は振幅 15 mm で周波数を 0.5~3.0 Hz まで 0.5 Hz ずつ変えて六種類行った。実験結果を計算結果と併せて図 2 に示す。なお計算値は後述の実験値から同定したものである。

図 2 から、減衰力に加え、慣性力と摩擦力が組み合わさった特性を持つことがわかる。左肩上がりりの直線で示される等価慣性質量はおおよそ 20 kg 程度と推測でき、これは水の場合に比べて密度に比例して小さい。また、図中右下と左上に凹みがあるが、これは摺動部におけるスティックスリップと考えられる。

実験値の零変位（図の中央縦線）における荷重と加振周波数の関係を図 3 に示す。この結果から、初期摩擦力 f_0 を 80 N 程度と推定した。実験値を周波数の三次曲線で近似したものを実線で示し、その初期摩擦力を差し引いた荷重を破線で示す。原点から各振動数の破線における値までの傾きにより粘性減衰係数を算出した。その減衰係数は周波数が増すにつれて飽和に近い状態になることがわかる。図 2 から実験値と計算値が概ね一致していることがわかる。

既報において、流体に機能性流体を用いた場合、磁場の強弱によって慣性質量の大きさが変化した⁽⁴⁾。しかし、非ニュートン流体を用いた本装置の場合では、慣性質量の変化は見られなかった。ダイラタント流体は、圧力を加えると凝集する性質をもつとされ、バイパス管入口部において流速が速くなるために圧力が低い負圧の状態となって流体の特性が変化すると考えられたが、その傾向は見られなかった。

また、実験結果には現れていないが、経時変化として熱および沈殿による混合液の凝固が実験の早い段階で見られた。これは、せん断応力が大きくなることで、粒子の構想形成力を破壊してしまうためと考えられる。

4. ま と め

非粘性流体の慣性を利用した振動低減装置を開発し、抵抗力特性を測定した。主な結果は以下の通りである。

- (1) 抵抗力特性の実験結果から、本装置は減衰力、慣性力および摩擦力を併せもつことがわかる。
- (2) ダイラタント流体を用いた場合の慣性質量効果は比較的小さく、高負荷時における可変質量効果は現れない。
- (3) 減衰力は増粘性を表し、その減衰係数は速度の三乗に比例した曲線で近似できる。また、計算結果は概ね実験値と一致した。

今後、本装置を一自由度系に取り付けた場合の振動実験および解析を行う予定である。最後に、本研究の一部は科学研究費補助金（若手研究 B，22760165）による支援を受けたことを付記する。

参考文献

- (1) K. Sunakoda, T. Matsuoka, H. Iiyama, K. Shibata, Nobel Cut-off System for Vibration Control Using Water and/or Functional Fluids, Proc. 3rd International Conference on Structural Stability and Dynamics (2005-6), 6p.
- (2) 砂子田勝昭, 松岡太一, 飯山文也, 柴田和彦, 流体の質量効果を用いた振動遮断方法に関する研究, 日本機械学会 D&D2005, No. 319 (2005-8), 5p.

Fig. 2 Resisting force characteristics of the test device (○: experiment, —: calculation)

Fig. 3 Relation between frequency and damping force (●: force, —: approximation, △: damping coeff.)

- (3) K. Sunakoda, T. Matsuoka, Vibration Tests of a Cut-off System Using Water and Functional Fluids, ASME, PVP-ICPVT-2006 Seismic Engineering, No. 93532 (2006-7), 4p.
- (4) 松岡太一, 砂子田勝昭, 機能性流体の質量移動を利用したダンパの研究, 日本機械学会 D&D2009, No. 472 (2009-8), 6p.
- (5) 松岡太一, 砂子田勝昭, 流体の慣性質量を利用した振動低減装置, 日本機械学会論文集 C 編, 75 巻 759 号 (2009-11), pp. 2893-2898.
- (6) 粉体工学叢書第 4~7 巻, 粉体工学会編, 日刊工業新聞社.