

エネルギーに基づく新型摩擦ダンパの開発に関する基礎研究

Advanced Friction Damper Based on Energy

渡邊 鉄也^{1*}, 鞆田 顕章², 須田 峻一³, 田中 基八郎⁴
Tetsuya Watanabe¹, Akinori Tomoda², Syunichi Suda³, Kihachiro Tanaka⁴

¹ 埼玉大学 大学院 理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University
² 埼玉大学 大学院 理工学研究科 博士後期課程
Program in Science and Engineering, Saitama University
³ 埼玉大学 大学院 理工学研究科 博士前期課程
Program in Mechanical Engineering and Science, Saitama University
⁴ 埼玉大学 大学院 理工学研究科
Division of Mechanical Engineering and Science, Saitama University

Abstract

For the past several years, seismic isolation systems have been focused in the seismic design of industrial facilities. This paper deals with the response reduction effect by friction. Friction is expected to decrease the relative displacement by dissipating the vibration energy. The relative displacement between structure and support becomes larger at long period in the case of linear system. Therefore, the response reduction effect by friction should be utilized positively in the seismic design. However, the response magnification of acceleration is used in the seismic design. The acceleration becomes larger by stick and slip motion. Therefore, the response reduction effect by friction is evaluated from the viewpoint of energy. The ratio between elastic energy and input energy is utilized. In this paper, "Response Reduction Map" based on energy for long period friction system is suggested. This map shows the range that energy response ratio is less than the ratio of the linear system. The response reduction map without complex non-linear time history calculation can easily obtain the proper parameters, such as natural period or friction force. In this study, the response reduction map by the artificial earthquake wave calculated from the design spectrum is shown.

Next, the advanced friction damper is developed by using above energy based result. The friction part of the advanced friction damper is constructed by using MR fluid. The characteristics of the friction part are evaluated.

Key Words: Friction system, Response reduction map, Seismic design, Friction damper, MR fluid

1. 緒言

近年、兵庫県南部地震(1995)や新潟県中越地震(2004)などをはじめとする大規模な地震が多発しており、一般家屋もさることながら産業施設内構造物の被害も多く報告されている。産業施設内構造物は2次的な災害が懸念されるため、一般家屋とは異なる耐震設計基準が定められている。ここ数年、産業施設内構造物の耐震設計において、免震構造が注目されてきている。

* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保2-5-5
電話：048-858-9493 FAX：048-856-2577
Email：watanabe@mech.saitama-u.ac.jp

免震構造としては、積層ゴム、転がり支承、摩擦支承、ベアリング機構を利用したものなどがあり、系を長周期化することにより、地震荷重の伝達を低減させている。系が長周期化すると変位応答が増大するため、ガイドにより変位応答を強制的に拘束するか、ダンパ等の減衰装置を設置しなくてはならない。ダンパを設置した場合、減衰係数を大きくすると、共振振動数に変化することが懸念される。そこで、摩擦によるエネルギー散逸効果を利用すれば、共振振動数を変化させることなく応答を低減できると考えられる。筆者らは、これまでの研究[1]–[3]

において、摩擦のエネルギー散逸効果に注目して応答低減効果を明らかにしてきた。ここでは、加速度応答のみに注目していたが、本研究では、エネルギーに注目して摩擦による応答低減効果を評価する。摩擦系の応答計算は、1自由度非線形系であるため多大な時間を要する。そこで、摩擦系における応答低減マップを提案する。

これは、線形系よりエネルギーが低減される範囲を示したものであり、複雑な非線形応答計算をせずに応答低減効果の高いパラメータを推定することが可能である。

次に、MR流体を用いた摩擦ダンパを提案する。MR流体はビンガム性を有することから、荷重-変位曲線が矩形となり、クーロン摩擦と同様の扱いをすることが可能である。本研究では、ダンパの摩擦部のみを模擬した試験装置を作成し、MR流体の種類や回転速度による特性を評価し、新型摩擦ダンパの設計への基礎データを得る。

2. エネルギー方程式

2.1 α の定義

1自由度摩擦系の運動方程式は式(1)で表される。

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) + f \operatorname{sign}(\dot{x} - \dot{y}) = 0 \quad (1)$$

ここで、 m は質量、 c は減衰係数、 k はばね定数、 f は摩擦力、 x は質量の変位、 y は基礎の変位である。

また、 $\operatorname{sign}(x)$ は符号関数で、以下となる。

$$\operatorname{sign}(x) = \begin{cases} -1 & (x < 0) \\ 0 & (x = 0) \\ 1 & (x > 0) \end{cases} \quad (2)$$

次に、質量と基礎の相対変位を $z = x - y$ とすると、式(1)は下記のように変形される。

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz + f \operatorname{sign}(\dot{z}) = -m\ddot{y} \quad (3)$$

ここで、 $\frac{c}{m} = 2\zeta\omega$ 、 $\frac{k}{m} = \omega^2$ とすると、

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2 z + \frac{f}{m} \operatorname{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (4)$$

となる。

実機の摩擦系では、摩擦係数を変化させる、あるいは調整することは困難である。しかし、摩擦力は垂直抗力を変化させることで調整が可能であることから、本研究では摩擦力をパラメータとして用いることとする。入力加速度の最大値を $\ddot{y}_{\max} = A$ と表し、摩擦力と慣性力の比を式(5)のように α と定義する。

$$\alpha = \frac{f}{Am} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \alpha = 0 & : \text{線形系} \\ 0 < \alpha < 1 & : \text{摩擦系} \\ \alpha \geq 1 & : \text{非しゅう動} \end{cases}$$

α の値によって3種類の系に分類することができる。 $\alpha = 0$ の場合は摩擦力がゼロであるので、線形系である。 $0 < \alpha < 1$ では摩擦部でのしゅう動が生じる系である。 $\alpha \geq 1$ ではしゅう動は生じない。式(5)を式(4)に代入すると次のような式となる。

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2 z + A\alpha \operatorname{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (6)$$

数値計算では、 α を変化させて式(6)を積分して応答倍率を求める。

2.2 エネルギー応答倍率

エネルギーのつりあいの方程式は

$$\int_0^T \ddot{z} z dt + \int_0^T 2\zeta\omega \dot{z}^2 dt + \int_0^T \omega^2 z \dot{z} dt + \int_0^T A\alpha \operatorname{sign}(\dot{z}) \dot{z} dt = - \int_0^T \ddot{y} z dt \quad (7)$$

であり、左辺第1項は運動エネルギー、第2項は減衰により散逸されるエネルギー、第3項は弾性歪エネルギー、第4項は摩擦により散逸されるエネルギーであり、右辺は入力エネルギーである。左辺第1項と第3項の和は弾性振動エネルギーである[4]。ここで、最大弾性振動エネルギーを最大入力エネルギーで除した値を「エネルギー応答倍率 R_E 」とする。

$$R_E = \frac{\left(\int_0^T \ddot{z} z dt + \int_0^T \omega^2 z \dot{z} dt \right)_{\max}}{\left(- \int_0^T \ddot{y} z dt \right)_{\max}} \quad (8)$$

また、振動後（時間を T とする）に系に入力された全エネルギーを入力レベルの2乗で除した値を「入力エネルギー率 I_E 」とする。これにより、線

形系では入力レベルによる入力エネルギー率は一定値となる。

$$I_E = \frac{\int_0^T \ddot{y}^2 dt}{A^2} \quad (9)$$

3. 正弦3波応答

3.1 時刻歴応答

正弦3波とは固有周期の等しい3周期の正弦波であり、実地震波や設計用地震波の代わりに用いられることがある。図1は正弦3波と実地震波の加速度応答倍率を比較したものである。横軸は固有周期、縦軸は加速度応答倍率であり、絶対加速度応答を入力波の絶対加速度で除したものである。下記により算出する。

$$R_A = \frac{|\ddot{x}|_{\max}}{|\ddot{y}|_{\max}} \quad (10)$$

系の減衰比は0.05, $\alpha=0$ の線形系での応答倍率である。実地震波は、1964年新潟地震におけるNS方向地震波, 1968年十勝地震におけるNS方向地震波, 1995年兵庫県南部地震におけるJR鷹取駅NS方向地震波, 1940年Imperial Valley地震EI CentroにおけるNS方向地震波, 2004年新潟県中越地震小千谷におけるNS方向地震波(気象庁), 1952年Kern County地震のTaftにおけるN21E方向地震波である。正弦3波は固有周期によらず応答倍率が一定値となる。また, 応答倍率は図2のように正弦3波のほうが実地震波より高いので, 安全側になる。

図2は正弦3波応答の例として固有周期が2秒, 減衰比が0.05, α が0.3の場合の時刻歴応答である。(a)は絶対加速度, (b)は相対変位, (c)は摩擦部において散逸されるエネルギーである。(a), (b)に注目すると, 入力波が3周期であるため, 3周期以降の応答が減衰していることがわかる。また, スティックスリップの影響で絶対加速度の各周期における最大加速度付近において急激な変化が生じている。相対変位は最終的にゼロにはならず, 残留変位があることがわかる。

(c)のエネルギーに注目すると, 弾性振動エネル

ギは時刻歴応答と同様に3周期後から減衰している。また, 摩擦によるエネルギーのほうが減衰によるエネルギーより高い値を示しているが, これは減衰比や α により変動する。今回の減衰比0.05, $\alpha=0.3$ では摩擦によるエネルギーのほうが大きくなっている。入力エネルギーは摩擦エネルギー, 減衰エネルギー, 弾性振動エネルギーの和となっている。また, 入力加速度が3波であるため, 3周期以降は一定値となっている。

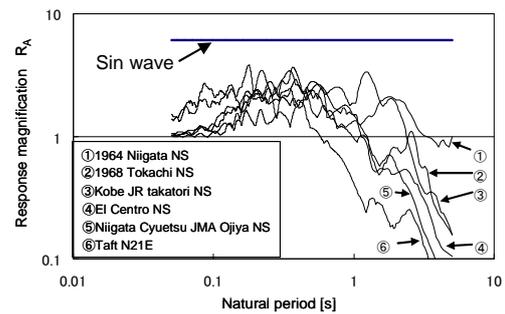
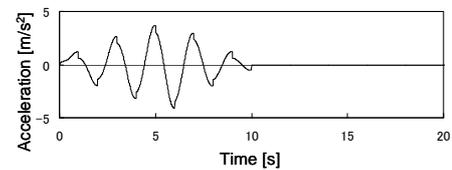
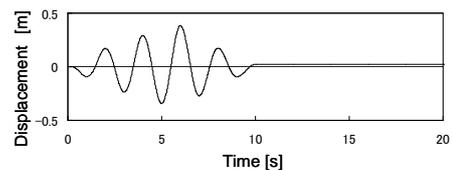


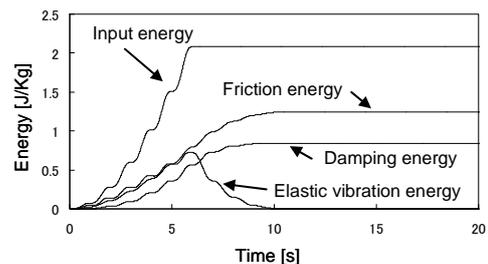
Fig.1 Response acceleration spectrum



(a) Time history of absolute acceleration



(b) Time history of relative displacement



(c) Time history of energy

Fig.2 Time history response

3.2 エネルギー応答倍率，入力エネルギー率

図3，図4，図5にそれぞれ，エネルギー応答倍率，入力エネルギー率，加速度応答倍率を示す。加速度応答倍率は最大絶対加速度応答を入力波の絶対加速度で除した値であり，式(10)により算出する。エネルギー応答倍率は固有周期によらず，図3の曲線となり， α の増加につれて減少している。入力エネルギー率は，固有周期が長く， α が小さいほど大きな値となっている。加速度応答倍率は固有周期によらず図5のような曲線となり， α の増加につれて減少している。

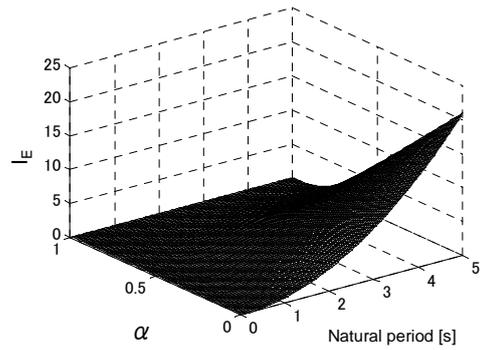


Fig.4 Input energy rate

3.3 応答倍率の比，入力エネルギー率の比

図6，図7にエネルギー応答倍率の比，および入力エネルギー率の比を示す。これらの図は線形系のエネルギー応答倍率および入力エネルギー率で無次元化したものであり， $\alpha=0$ の線形系が1となる。次式により算出した。

$$\text{エネルギー応答倍率の比} \quad RR_E = \frac{R_E}{R_E(\alpha=0)} \quad (11)$$

$$\text{入力エネルギー率の比} \quad RI_E = \frac{I_E}{I_E(\alpha=0)} \quad (12)$$

図6，図7は固有周期を0.05～5秒，系の減衰比を0.01，0.05，0.1に変化させたときの値をプロットしたものである。固有周期，減衰比によらず同様の曲線となっている。したがって，固有周期，減衰比などのパラメータによらず線形系に対する比を1つの図から推定することが可能となる。

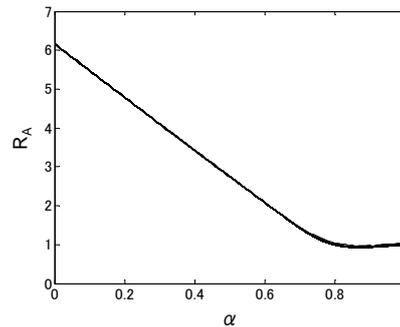


Fig.5 Response magnification

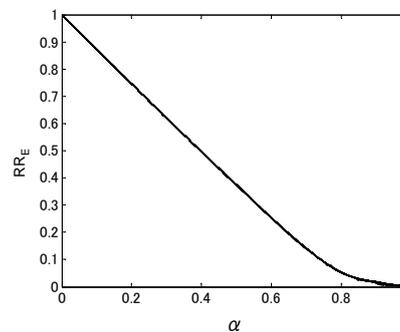


Fig.6 Ratio of response energy magnification

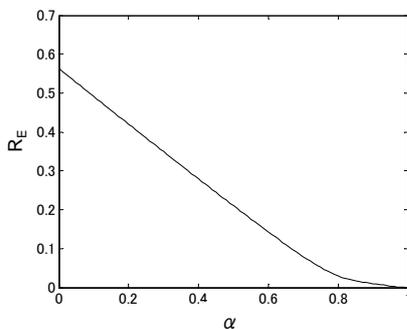


Fig.3 Response energy magnification

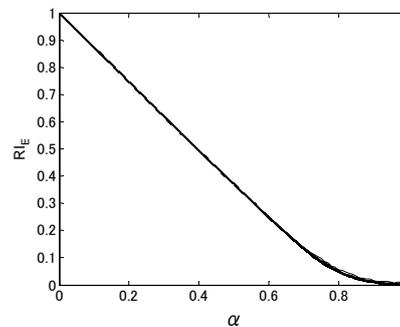


Fig.7 Ratio of input energy rate

4. 模擬地震波による応答低減マップ

4.1 模擬地震波作成方法

ここでは、高圧ガス施設等耐震設計指針の応答スペクトルに適合させた模擬地震波を用いる。模擬地震波作成のフローチャートを図8に示す[5]。また、図9に耐震設計指針の加速度応答スペクトルを示す[6]。図の縦軸は式(10)により求められる。図中のNo.1~No.4は第1種地盤~第4種地盤である。減衰比は0.05である。耐震設計指針の応答スペクトルは2秒以上の長周期において加速度が一定となっているが、実際の地震波の応答スペクトルを考慮し、本研究では速度一定として模擬地震波を作成した。長周期における応答スペクトルの扱いは現在検討されているが、まだ指針とはなっていない。図10に模擬地震波の一例を示す。最大加速度は $6m/s^2$ とした。また、図11に目標スペクトルと模擬地震波のスペクトルの比較を示す。適合させる周期は0.05~20秒とした。

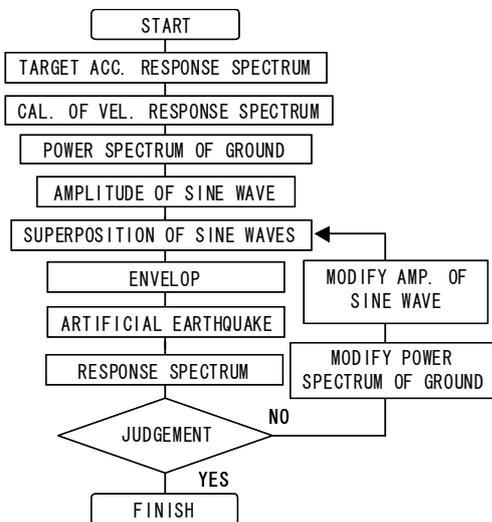


Fig.8 Flow chart of artificial earthquake generation

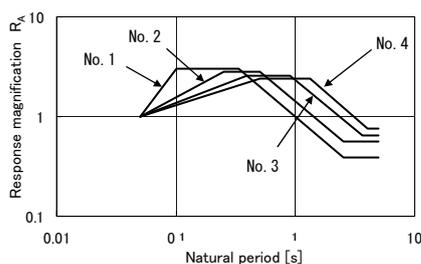


Fig.9 Design response spectrum

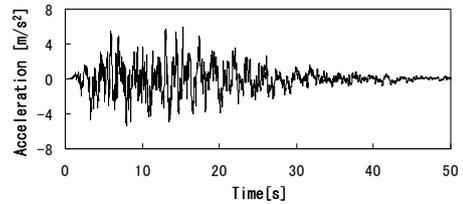


Fig.10 Artificial earthquake

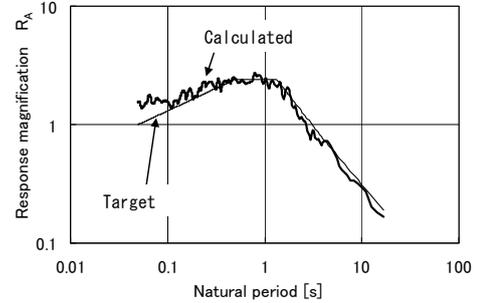


Fig.11 Comparison of spectrum

4.2 応答低減マップ

前節で作成した模擬地震波を用いて応答低減マップを作成する。図12~図15にそれぞれ第1種地盤から第4種地盤における模擬地震波を入力した場合の応答低減マップを示す。模擬地震波は各地盤に対して5波作成し、応答低減マップは5波すべてに対して「エネルギー応答倍率」、「入力エネルギー率」および「加速度応答倍率」が線形系より低減している場合を白色としている。黒色部分は線形系より大きな値となる場合である。横軸は系の固有周期、縦軸は α である。

図12~図15を比較すると、第1種地盤では入力波の卓越周期が短いため、励起される周期も短く、短周期での応答低減効果が高くなっている。第2種から第4種になるにつれて入力波の卓越周期が長くなるため、応答低減効果の高い範囲が長周期になっている。これは、系が励起されることにより、摩擦部におけるしゅう動量が増加し、エネルギー散逸効果が顕著になるためである。

α に注目すると、 α が0.35から0.4付近において応答低減効果の高い範囲が広いことがわかる。特に第4種地盤では固有周期が0.05から5秒において応答が低減していることがわかる。これは、摩擦により散逸されるエネルギーが高く

なる α の値が存在するためである。正弦 3 波の場合には $\alpha=0.3$ 付近であったが、模擬地震波の場合には $0.35\sim 0.4$ 付近であることがわかる。

以上のことから、摩擦系では入力波の卓越周期において系が励起されるため、摩擦によるエネルギー散逸効果が高く、応答は低減されている。また、広範囲の固有周期において応答低減効果が高い α の値が存在することがわかった。入力波によらず、 α を $0.35\sim 0.4$ にすれば、入力波の卓越周期では応答低減が期待できる。

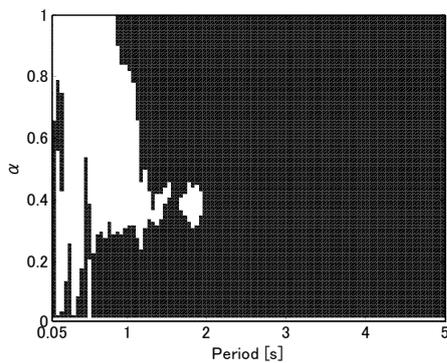


Fig.12 Response reduction map (No.1)

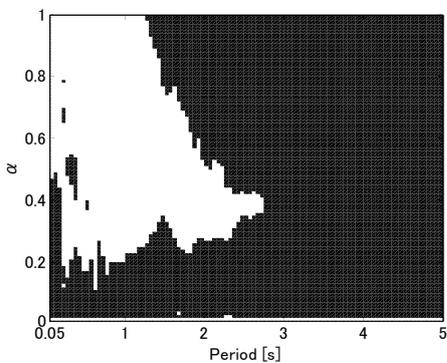


Fig.13 Response reduction map (No.2)

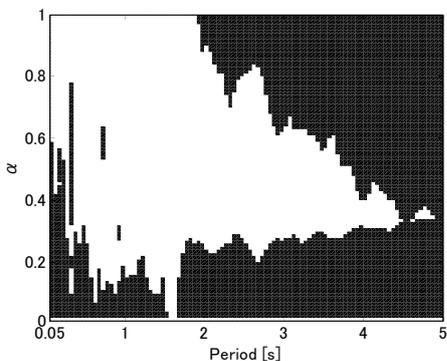


Fig.14 Response reduction map (No.3)

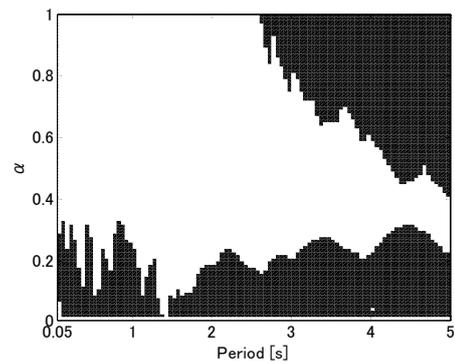


Fig.15 Response reduction map (No.4)

5. MR流体を用いた摩擦によるダンパの提案

5.1 MRダンパ

MR 流体は、シリコーン油や合成油などの分散剤中に粒子径 $1\sim 10\mu\text{m}$ 程度の強磁性粒子を分散させた磁気懸濁流体である。ビンガム特性を示し、磁場の強さを増すと降伏値が増大する。ビンガム特性とは、せん断応力がある値に達するまでは流動が生じないという特性をもつ。小さいせん断力では流動が起きず、ある応力から初めて変形が起こる。抵抗力が速度に依存しないため、クーロン摩擦力と同様に考えることができ、解析の上でモデル化が容易になるという利点がある。また、MR 流体を用いることで、磁界の強さを変化させることにより、見掛けの粘度が変化する。そのため、容易に減衰力を可変にできる。それにより、性能、信頼性、コストの面で優れている利点がある。

そこで、図 16 のような MR 流体を用いた摩擦系のダンパを提案する。このダンパは並進運動をボールねじを用いて回転運動に変換し、回転部に MR 流体を用いた摩擦部を設置するものである。ダンパの荷重は磁場を変化させることにより調整することができる。また、磁場の発生に電磁石を用いればセミアクティブ型のダンパとして利用できる。これは、配管など、使用温度が広範囲にわたっている場合、熱膨張緩和のために、小変位では低荷重とし、地震などの入力加わった場合の大変位では高荷重を実現することが可能である。

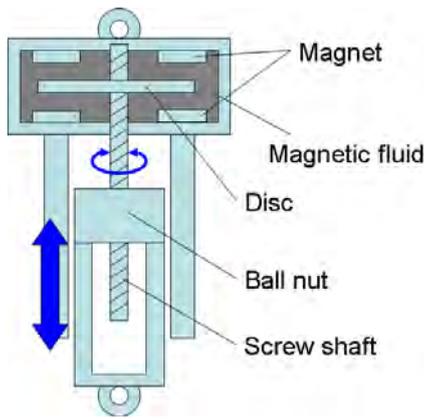


Fig.16 MR damper model

5.2 摩擦部簡易実験モデルによる評価

図 17 のように、摩擦ダンパの摩擦部のみを模擬した装置を作成した。この装置はモータでディスクを回転させ、MR 流体に磁場を与えたときのトルクを測定するものである。これにより、MR 流体の違いや、回転速度による減衰効果の特性を評価する。

MR 流体は、MRF-122EG, MRF- 132DG, MRF-140CG の 3 種類を使用し、磁場を与えたときと、磁場を与えなかったときでトルクを測定し、磁場による効果を調べた。図 18 は、磁場を与えたときの値と、磁場を与えなかったときの値の差を図にしたものである。図から回転速度によらずほぼ一定のトルクが得られることがわかる。MRF-140CG において、140-1, 140-2 と、140-3 で値に差があるが、これは、140-1, 140-2 において、長時間回転を与えたため、摩擦熱により流体の温度が変化し、特性が変化したためである。今回、目的しているのは、地震を対象とした減衰装置であるため、長時間の作動は生じないので、流体の温度の変化は無視できると考える。よって、ここでは 140-3 の結果を用いる。図 18 より、MRF- 122EG のとき、2~3mNm, MRF-132DG のとき、2~3mNm, MRF-140CG のとき、7~8mNm のほぼ一定のトルクが得られることがわかった。ここから回転速度によらず、一定のトルクを得ることがわかった。これにより MR 流体は、クーロン摩擦力と同じように利用できる。

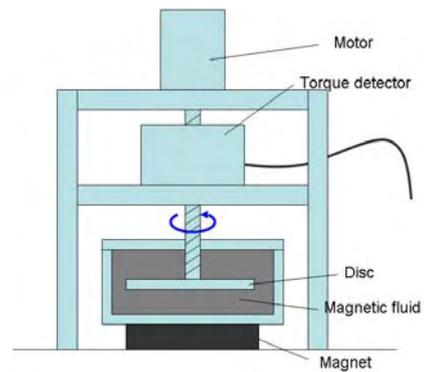


Fig.17 Experimental model

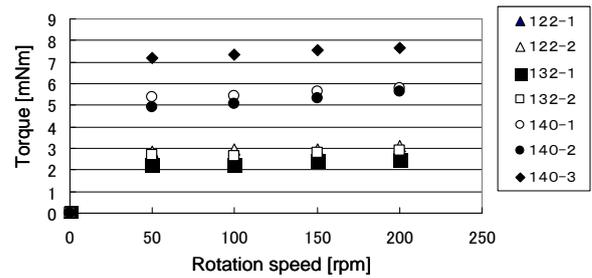


Fig.18 Torque and Rotational speed

次にこの結果を、前述の応答低減マップを用いた解析結果に反映させる。

軸のリードを 1, ボールねじの効率を n とすると、トルクと力は次式で得られる。

$$\text{トルク : } T = \frac{nFl}{2\pi} \quad (13)$$

$$\text{力 : } F = \frac{n2\pi T}{l} \quad (14)$$

Fl (並進エネルギー) = $2\pi T$ (回転エネルギー)と表すことができる。円盤にかかるトルクを T_d とし、回転部の慣性モーメントを I とする。また、ベアリング等の等価粘性減衰係数を C_B とすると、力は次式で表される。

$$F = \frac{2\pi n}{l}(I\ddot{\theta} + C_B\dot{\theta} + T_d) \quad (15)$$

1 自由度系に適用すると運動方程式は

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) + F = 0 \quad (16)$$

であるので、 $x - y = z$ とすると、

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz + F = -m\ddot{y} \quad (17)$$

のように表すことができる。式(15)を代入すると、次式のようになる。

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz + \frac{2\pi n}{l}(I\ddot{\theta} + C_b\dot{\theta} + T_d) = -m\ddot{y} \quad (18)$$

また, $z = \frac{l}{2\pi}\theta$ より

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz + \frac{2\pi n}{l}(I\frac{2\pi}{l}\ddot{z} + \frac{2\pi}{l}C_b\dot{z} + T_d) = -m\ddot{y} \quad (19)$$

変形すると,

$$(m + (\frac{2\pi}{l})^2 I)\ddot{z} + (c + (\frac{2\pi}{l})^2 nC_b)\dot{z} + kz + \frac{2\pi n}{l}T_d = -m\ddot{y} \quad (20)$$

ここで T_d は回転方向により正, 負になるので $T_d = T_d \text{sign}(\dot{z})$ とすると,

$$(m + (\frac{2\pi}{l})^2 I)\ddot{z} + (c + (\frac{2\pi}{l})^2 nC_b)\dot{z} + kz + \frac{2\pi n}{l}T_d \text{sign}(\dot{z}) = -m\ddot{y} \quad (21)$$

$m \gg I$ の場合, $c \gg C_b$ の場合, すなわち, ダンパを設置する構造物に対して, ダンパが小さい場合には, $I \cong 0, C_b \cong 0$ とすると,

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz + \frac{2\pi n}{l}T_d \text{sign}(\dot{z}) = -m\ddot{y} \quad (22)$$

ここで, $\frac{c}{m} = 2\zeta\omega$, $\frac{k}{m} = \omega^2$ とすると,

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2 z + \frac{2\pi n}{ml}T_d \text{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (23)$$

最大入力加速度を A とすると, $\alpha = \frac{2\pi n T_d}{Aml}$

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2 z + \alpha \text{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (24)$$

これは式(6)と同じになる. これにより, リード, ボールねじの効率, トルクの測定値から, α が決まり, 応答低減マップから, この減衰機の減衰効果を簡単に推定することができる. また, 逆に応答低減マップから, α を決定し, その α に必要なリードや, トルクの強さを選ぶことができる.

6. 結 言

本研究では, 最大弾性振動エネルギーを最大入力エネルギーで除した「エネルギー応答倍率」を用いて, 「エネルギー応答低減効果」を評価した. また, 系に入力された全エネルギーを入力レベルの2乗で除した「入力エネルギー率」を用いて「入力エ

ネルギー低減効果」を評価した. さらに, エネルギー応答倍率, 入力エネルギー率および加速度応答倍率が線形系より低減する範囲を示す, 「応答低減マップ」を提案した. まず, 正弦 3 波により, エネルギー応答の基本的な特性を把握した. 次に, 高圧ガス保安協会の耐震設計指針における応答倍率から逆算して求めた模擬地震波を用いて, 応答低減マップを示した. これにより, 複雑な非線形応答計算をせずに応答低減効果の高いパラメータを推定することが可能となり, 特に α が 0.35~0.4 が有効であることがわかった. ことから, エネルギーを考慮した摩擦系の耐震設計を行なう上での指針を示すことができた.

次に, MR 流体を用いた新しい摩擦ダンパを提案した. 磁場をかけた MR 流体中で円盤を回転させる簡易モデルを作成した. そして, トルクを測定し, MR 流体の特性を明らかにした. 本研究の条件では, 回転速度によらず, 一定のトルクが得られることを確認した. これにより, クーロン摩擦モデルを適用できることを示した. たまた, 摩擦ダンパの設計に関する基礎データを得ることができた.

参 考 文 献

- [1] 渡邊鉄也, 三森友彦, 鈴木浩平, 清水信行, 小川信行, 箕輪親宏: 摩擦サポートを有するプラント配管系の振動実験日本機械学会論文集 C 編, 58 巻, 552 号, pp.17-23, (1992).
- [2] 渡邊鉄也, 鈴木浩平, 摩擦系応答スペクトルを用いた配管系の等価減衰比推定法, 日本機械学会論文集 C 編, 66 巻, 642 号, pp.87-92 (2000).
- [3] 渡邊鉄也, 鞆田顕章, 田中基八郎, 長周期摩擦系における応答低減マップ, 日本機械学会論文集 C 編, 72 巻, 722 号 pp.151-156 (2006).
- [4] 秋山 宏, エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, (1999).
- [5] 日本機械学会, 振動工学におけるコンピュータアナリシス, (1990).
- [6] 高圧ガス保安協会, 高圧ガス設備等耐震設計指針, (1997).