摩擦による免震装置の相対変位低減に関する研究

Study on Isolation Device for Decrease of Displacement by Using Control of Friction

正 新谷 真功 (福井大)
学 田口 直矢 (福井大・学)

○学 服部 雄一 (福井大院)

Masanori SHINTANI, University of Fukui, 9-1, Bunkyo 3-Chome, Fukui-shi 910-8507, Fukui
Yuichi HATTORI, Graduate Student, University of Fukui
Naoya Taguchi, Undergraduate Student, University of Fukui

Key Words: Dynamics of Machinery, Seismic Motion, Random Vibration, Frictional Vibration

1. 緒言

免震構造は、構造物もしくは構造物内に設置される機器類を、地震動もしくは他の外乱より切り離す機構を設ける構造である。本研究では構造物基部に柔らかいばねを取り付け、水平方向の固有振動数を低くすることで応答加速度を低減させ、摩擦力により相対変位の低減を図っている。

提案した解析モデルによりシミュレーション解析を行った結果、応答加速度と相対変位を両方低減させる、最適な摩擦係数が存在することが分かった。また、この最適な摩擦係数と入力加速度の振幅との間に比例関係が得られた。さらに、最適な摩擦係数と相対変位の間にも比例関係が見られることが分かった。

本報告では、最適な摩擦係数と相対変位の関係から、摩擦係数を変化させることで応答加速度と相対変位の低減をシミュレーション解析により確認する。また、解析モデルと同じ条件となる実験装置を製作して、振動実験を行う。今回の実験では圧縮ばねの復元力を利用し、摩擦力を線形的に変化させて応答加速度と相対変位の低減を確認する。

2. 解析モデル

本研究で提案する解析モデルは、図1で示す様に、粘性減衰力の代わりに摩擦力が作用する場合の強制振動を考える。モデルは1質点系として、水平方向のみに地動加速度を入力した際、免震装置に滑りが生じない時(Phase1)と、生じる時(Phase2)に分け、以下の式となる。

i)Phase1: 免震装置に滑りが生じない時

$$\ddot{z} = a \quad \dot{x} = 0 \quad x = \text{const.} \quad (1)$$

ii)Phase2: 免震装置に滑りが生じる時

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + \frac{F_d}{m} = -a \quad F = \mu mg \cdot \text{sgn}(\dot{x}) \quad (2)$$

ここで、 $\text{sgn}(\dot{x})$ は速度の符号の反転を表す。

iii)切り替え条件: Phase1とPhase2との切り替え条件は、免震装置に加わる摩擦力と外力の大小関係から以下に示す式となる。

Phase1からPhase2への切り替え

$$|a + \omega_0^2 x| > \mu g \quad (3)$$

Phase2からPhase1への切り替え

$$|a + \omega_0^2 x| \leq \mu g \quad \dot{x} = 0 \quad x = \text{const.} \quad (4)$$

ただし、 m :装置の質量、 x :装置の相対変位、 $\dot{x}$:装置の相対速度、 $\ddot{x}$:装置の相対加速度、 $\ddot{z}$:装置の絶対加速度、 a :

入力加速度、 ω_0 :不減衰固有円振動数、 K :ばね定数、 μ :摩擦係数、 F :摩擦力、 g :重力加速度とする。

Fig.1 Analytical model

3. 摩擦係数の決定

3.1 最適な摩擦係数 摩擦力による相対変位の低減を確認するため、50Hzまではパワースペクトル密度が一定のランダム波(最大加速度 3.60m/s^2)を入力加速度として、摩擦係数を0.020から0.165まで0.005刻みの値を使用してシミュレーション解析を行った。図2は、応答加速度、相対変位の最大値と、摩擦係数の関係を示している。図2より、摩擦係数を大きくすることで相対変位が小さくなっていることが確認できるが、逆に応答加速度が大きくなることがわかる。しかし、摩擦係数0.060としたとき、最大加速度 0.63m/s^2 、最大変位 0.02m と、応答加速度、相対変位ともに低減している。このことから、応答加速度、変位の両方を低減させる最適な摩擦係数が存在すると考えられる。さらに、最大振幅が 0.10m/s^2 から 11.50m/s^2 までの20種類の定常ランダム波を用いて同様の解析を行った。

Fig.2 Response accelerations and displacements (Maximum acceleration 3.60m/s^2)

3.2 相対変位と最適な摩擦係数の関係 図3は、図2で得られた最適な摩擦係数を用いた時の最大相対変位を横軸に、最適な摩擦係数を縦軸とした時の関係を示している。図3から、相対変位が大きくなる入力加速度では最適な摩

摩擦係数が大きくなることが分かる。これらの結果から、最適な摩擦係数と相対変位の関係は直線的な傾向が得られると思われる。そこで、図 3 で示す直線の傾きと同様に摩擦力を線形的に変化させてシミュレーション解析を行った。

Fig.3 Relation between maximum displacement and coefficient of friction

4. シミュレーション解析

4.1 解析方法 免震装置に生じる相対変位によって摩擦力を変化させ、シミュレーション解析を行った。はじめに、図 3 で示す最小二乗法の結果から、相対変位を x 、最適な摩擦係数を μ_{oc} とし、次式が得られた。

$$\mu_{oc} = \alpha x + \beta \quad \alpha = 0.323 \quad \beta = 0.052 \quad (5)$$

式(5)を用いて相対変位により摩擦係数を変化させてシミュレーション解析を行う。ただし、固有振動数は地震波との共振を避けることが出来ると考えられる 0.25Hz を使用する。また、静止摩擦係数と動摩擦係数は同じ値とし、減衰は摩擦力によるもののみとする。

4.2 解析結果 実際の地震波を入力加速度として、前述の解析方法によりシミュレーション解析を行った。入力加速度として、JMA Kobe 波、Ojiya 波、Taft 波の 3 種類を使用する。図 4 に入力加速度である JMA Kobe 波形、これによる応答加速度、相対変位波形を示す。また、図 5 は JMA Kobe, Ojiya, Taft 波においての応答加速度の最大値、図 6 は相対変位の最大値を摩擦係数 0.001 に固定して解析を行った結果との比較を示している。これらの結果から、式(5)の関数を用いて摩擦係数を変化させることで、相対変位は大きく低減するが、応答加速度は多少大きくなる。しかし、入力加速度と比較すると 20%以下まで低減している。

Fig.4 Input and response acceleration and displacement waves of JMA Kobe wave

Fig.5 Relation between control of friction and non control

Fig.6 Relation between control of friction and non control

5. 実験

5.1 実験装置概要 解析モデルと同様な条件となる実験装置の製作を行い、実際の地震波を入力加振して、装置の応答加速度、相対変位波形を測定する。本実験装置では支承材として、リニアガイドを用い、復元材として引張ばねを用いる。ここで装置の固有振動数が 0.25Hz となる様な柔らかい引張ばねを使用することで、応答加速度の低減、また、減衰材として装置下部に摩擦面を設置して相対変位の低減を実現する。

5.2 摩擦面 減衰材として使用する摩擦面は図 7 で示す様に曲面、斜面、平面の 3 個の面によって構成されている。この摩擦面により、装置に生じる相対変位に応じて圧縮ばねを圧縮して、摩擦力が大きくなる。

Fig.7 Experimental model

5.3 実験装置のモデル化 以上の実験装置は、下述の式で表すことができる。また、装置に作用する摩擦力を測定した結果、摩擦面の摩擦係数は 0.146、リニアガイドに働く摩擦力 F_h は 6.37N となった。これらの値と、式(6)を用いてシミュレーション解析を行い、実験結果と比較する。

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x \pm \frac{k y \sin \theta \cos \theta}{m} \pm \frac{\mu k y \cos^2 \theta}{m} \pm \frac{F_h}{m} = -a \quad (6)$$

6. 結言

- (1) 相対変位が大きく生じる入力加速度の場合、最適な摩擦係数も大きくなるが示された。
- (2) 相対変位と最適な摩擦係数の関係は直線的な傾向を示す。
- (3) 免震装置に生じる相対変位に応じて摩擦力を変化させることで応答加速度と相対変位の両方ある程度まで低減できると思われる。