20706 上下免震装置用非線形ばね機構の研究

A Study on a Nonlinear Spring Mechanism for a Vertical Seismic Isolation Device

○学 若林信宏 (明治大院) 正 大亦絢一郎 (明治大)
学 田仲 理 (明治大)

Nobuhiro Wakabayashi, Meiji University 1-1-1 Higashimita, Tamaku, 214-8571 Kawasaki,
Kenichiro Ohmata, Meiji University Osamu Tanaka, Meiji University

In this report, the authors have developed a nonlinear spring mechanism for a vertical seismic isolation device. The nonlinear spring mechanism consists of a coil spring and constant force springs. The frequency and seismic responses of a vertical seismic isolation system using the nonlinear spring mechanism were measured using a shaking table. The experimental results were compared with the calculated results, and it was found that the nonlinear spring mechanism reduced seismic response acceleration by about 40 % compared with the input acceleration.

Key Words : Nonlinear Spring Mechanism, Vertical Seismic Isolation Device, Frequency Response, Seismic Response

1. 序論

美術工芸品や精密機器を地震による転倒から守るために、いくつかのタイプの水平免震装置が実用化されている。しかしながら、上下免震装置に関しては、過大静たわみの問題があるため、いくつかの提案^{(1)~(3)}を除いて簡単な機構のものは殆ど開発されていない。本研究では、上下免震装置における過大静たわみの問題を解決するために、コイルばねと定荷重ばねを組み合わせることにより、固有振動数を変えることなく静たわみを小さくできるバイリニア型非線形ばね機構を開発した。また、上記非線形ばね機構を用いた上下免震装置を試作し、その免震・防振効果を周波数応答実験と解析、および実地震波応答実験と解析によって検討した。

2. 非線形ばね機構の解析モデル

上下免震装置の解析モデルを Fig.1 に示す。搭載質量 m はばね、粘性ダンパおよびクーロン摩擦で支持されており、この一自由度系の運動方程式は式 (1) で与えられる。

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f(u) + \text{sign}(\dot{u})f_0 = -m\ddot{z} \quad (1)$$

ここで、振動範囲では $f(u) = ku$ である。ばねに質量を静かに載せたときの自然長からの静たわみ λ は

$$\lambda = gT_n^2 / 4\pi^2 \quad (2)$$

式 (2) より、固有周期 T_n を 2s とすれば、機器の重量に関わらず約 1 m の静たわみが必要となる。このため装置全体が大掛かりなものとなり実用的ではない。この問題を解決するために、本研究では Fig.2 に示すバイリニア型非線形特性を持つばね機構の開発を目的とした。Fig.2 において、重量 mg の機器をコイルばねのみで支持した場合は λ だけ静的にたわんだ位置 (O 点) を中心に矢印の範囲で振動するが、バイリニア型非線形ばねの場合は λ_1 だけ静的にたわんだ位置 (O_1) を中心に矢印の範囲で振動することになる。2 本の矢印の傾きはいずれもコイルばねのばね定数 k に等しいので、両方の場合の固有振動数は同じままで、静たわみのみを小さくすることができる。

Fig.1 Analytical model of the isolation device

3. 非線形ばね機構の構造と原理

Fig.2 に示したバイリニア型非線形ばね特性を得るために、本研究ではコイルばねと定荷重ばねを用いた。試作した実験装置の構造を Fig.3 に示す。本免震装置は、質量を搭載するテーブル板の両端を定荷重ばねで、中央付近をコイルばねで支持している。また、テーブル板と基礎板の間にリニアガイドを取付けることにより、テーブル板はガイド棒に沿って滑らかに上下に移動することができる。

Fig.2 Load-displacement curve

① Constant load spring ② Coil spring ③ Table board
④ LM shaft ⑤ Linear bush ⑥ Base board

Fig.3 Construction of the isolation device

4. 抵抗力測定実験

試作した免震装置のテーブル板を、ロードセルを介して反力壁に固定し、基礎板を振動台に取付け、コイルばねのみの場合と定荷重ばねを組み合わせた場合の1サイクルにおける抵抗力測定実験を行った。定荷重ばねには一定荷重 F_c が 33.3 N と 78.4 N のものを使用し、それぞれを Type A, Type B とする。測定した抵抗力履歴曲線を Fig.4 に示す。Fig.4 よりコイルばね単体のばね定数は約 160 N/m、テーブル板に同じ質量を搭載した場合、必要な静たわみを Type A で約 1/15, Type B で約 1/30 に低減できることがわかる。また、いずれの場合においても摩擦抵抗が生じているが、これはリニアブッシュとガイド棒の間の摩擦と考えられる。一般に免震装置は大きな減衰を必要としないので、この摩擦で十分であると考え、粘性ダンパは用いないことにした。

5. 周波数応答実験

試作した上下免震装置を永久磁石振動台に取付け、周波数 0~4 Hz の正弦波状変位を上下方向に入力し、振動台とテーブル板の絶対加速度を測定した。搭載質量は固有振動数が約 0.6 Hz になるように、テーブル板質量を含めて Type A で 17.5 kg, Type B で 25 kg とした。実験結果と計算結果を Fig.5 に示す。Fig.5 より、固有振動数は Type A で約 0.62 Hz, Type B で約 0.65 Hz になっており、免震効果を持つことが期待できる。固有振動数が 0.6 Hz よりやや大きくなっているのは、定荷重ばねにもわずかなではあるが変位と共に荷重が増加する傾向があるためである。

6. 実地震波応答実験

周波数応答実験と同じ実験装置を用い、Type A, B の場合について、最大加速度を 0.5, 1.0 m/s² に基準化した Imperial Valley 地震 (1940) El Centro UD 成分および兵庫県南部地震 (1995) JMA Kobe UD 成分を上下方向に入力し、振動台とテーブル板の絶対加速度と相対変位を測定した。1.0 m/s² に基準化した El Centro UD 成分ならびに JMA Kobe UD 成分入力時における応答波形の実験結果と計算結果を Fig.6 に示す。また二つの地震波における応答加速度の最大値をまとめて Table 1 に示す。Fig.6 と Table 1 よりわかるように、入力加速度が 0.5 m/s² の場合、静止摩擦力の影響によりテーブル板が十分に動かなかったために、Type A, B ともに二つの地震波において、絶対加速度を約 9/10 にしか低減することができなかった。入力加速度が 1.0 m/s² の場合は、二つの地震波において、Type A では絶対加速度を約 3/4 に、Type B では絶対加速度を約 3/5 にそれぞれ低減することができた。また、計算結果は実験結果と似た傾向を示しており、計算の妥当性が確かめられた。

Fig.4 Resisting force characteristics of the isolation device

Fig.5 Frequency responses

(a) El Centro UD (1.0m/s²)

(b) JMA Kobe UD (1.0m/s²)

Fig.6 Seismic response waves (Type B)

Table 1 Maximum responses of the isolation table

		El Centro UD				JMA Kobe UD			
		Acceleration [m/s ²]		Acceleration [m/s ²]		Acceleration [m/s ²]		Acceleration [m/s ²]	
		0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1
Type A	Input								
	Exp.								
	Cal.								
Type B	Input								
	Exp.								
	Cal.								

参考文献

- (1) 藤田隆史・他 4 名, 機論, 56-526, C(1990), 1377-1380
- (2) 城山洋一・他 3 名, 日本機械学会 D&D 2000 CD-ROM 論文集, No.604 (2000), 1-5
- (3) 上田誠治・他 3 名, 日本機械学会 D&S '05 講演論文集, 542-545