

等価線形化手法を用いたすべり型免震構造の地震応答解析手法について

熊本高等専門学校 正員 瀧田 邦彦
防衛省 佐々木宗志

1. はじめに

建造物の地震被害軽減を図る免震工法には様々な対策工法が開発されており、1995年の阪神・淡路大震災以降、一般住宅や橋梁などの建造物に実用化されている。すべり型免震構造はそのような免震対策の1つで、低摩擦のすべり材が平滑な面を滑ることにより、上部構造への地震力伝達を減少し、上部構造の振動低減を図るものである¹⁾。本研究は、不規則地震波が入力する場合の、すべり型免震構造の地震応答解析を行い、その応答特性を明らかにすることを目的とする。

2. 解析手法

解析手法として、摩擦力-変位の非線形関係を等価線形化により線形問題に置き換えて解析する方法を用いる²⁾。図1は、すべり型免震構造の1自由度系解析モデルである。質量Mの剛体(建造物)が平面(接触面)上ですべるときの運動方程式は、摩擦力 T_F と慣性力のつり合いにより、次式で表される。

$$M\ddot{v} = T_F \tag{1}$$

入力変位 w 、剛体変位 v 、すべり変位 u の関係は、

$$u = w - v \tag{2}$$

となる。図2のクーロン摩擦を仮定すると、

$$T_F = \begin{cases} -T_0; \dot{u} < 0 \\ T_0; \dot{u} > 0 \end{cases} \tag{3}$$

ここで、次式のように、すべり変位を $\xi = U_0 \cos(\omega t - \Phi)$ 、(ω =円振動数、 Φ =位相差)、等価ばね係数、粘性係数をそれぞれ k_e 、 c_e として、摩擦力 T_F とすべり変位、速度との線形関係を仮定する。

$$T_F = k_e \xi + c_e \dot{\xi} \tag{4}$$

式(3)と(4)の平均2乗誤差が最小となるように近似すると、次式が得られる、

$$T_F = \frac{4T_0}{\pi\omega U_0} \dot{u} \tag{5}$$

式(5)と(2)を式(1)に用いて、建造物変位およびすべり変位が求められる。このとき、すべり発生時の限界加速度は、 $A_{cr} = T_0/M$ で表される。

3. 数値計算結果と考察

図3は入力地震波の一例で、1940年 Imperial Valley 地震のエルセントロ記録であり、最大加速度 3.0m/s^2 、時間ステップ 0.01 秒としている。すべり発生時の限界加速度を重力加速度で除したものが摩擦係数であり、こ

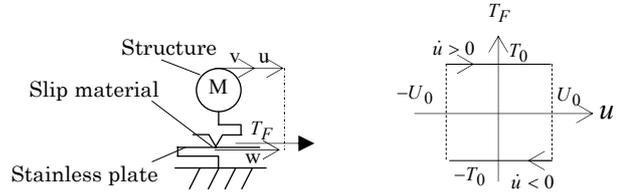


図1 解析モデル

図2 摩擦力-変位の関係

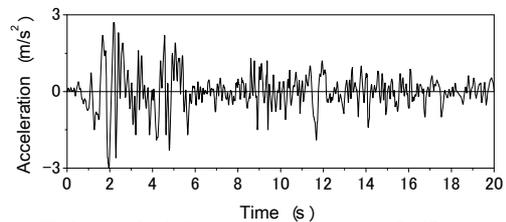


図3 入力地震波 (エルセントロ記録)

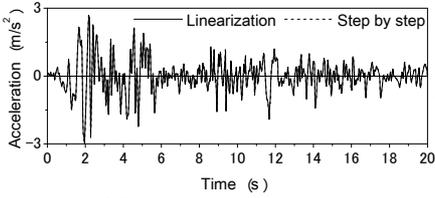
こでは種々の摩擦係数を設定して応答解析を行った。

図4, 5, 6はエルセントロ記録入力に対する建造物の、それぞれ加速度、速度、変位の時刻歴応答であり、各図の(a), (b), (c)は摩擦係数がそれぞれ1.0, 0.1, 0.01の場合を、また各図とも実線、点線はそれぞれ等価線形化、直接積分による結果を示している。これらの図より、摩擦係数が0.1, 0.01の場合、接触面ですべりが生じて加速度、速度、変位ともに応答が低下しており、すべり型免震構造による建造物応答の低減効果が示されている。等価線形化による応答と直接積分による応答を比較すると、波形は大きく異なるものの応答値は比較的対応しており、等価線形化手法を用いた免震構造の応答評価は概ね妥当といえる。図7, 8は、入力地震波に対する応答の比をとり低減比として摩擦係数に対して図示したもので、それぞれ、最大応答およびRMS応答の低減比を表している。両図とも(a), (b), (c)はそれぞれ加速度、速度、変位の応答低減を、また■, □印はそれぞれ等価線形化、直接積分による方法の結果を示している。ここでは、エルセントロ記録を含めて9個の入力地震波による応答結果を平均している。摩擦係数に対する応答低減の傾向にはある一定の関係が示されており、また2つの解析手法による結果はほぼ対応することがわかる。さらに図9, 10は、応答低減比と摩擦係数との関係を入力地震波の卓越周期に対して図示したもので、卓越周期1.0~1.5秒でわずかながら低減しやすい傾向が示されている。

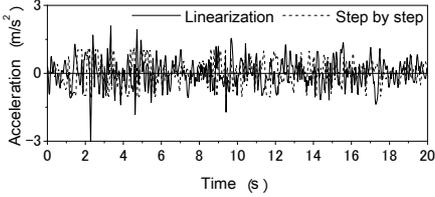
4. まとめ

すべり型免震構造の地震応答について、等価線形化による方法と直接積分による方法を用いて数値解析を行った結果、免震構造における、構造物応答の低減効果など、地震応答特性を明らかにした。

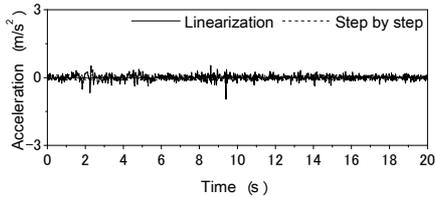
参考文献 1)高濱・川口：転がり系およびすべり系免震支承の地震応答推定手法に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第74巻，第635号，pp.41～45，2009. 2) 淵田・佐々木・黒瀬：すべり型免震構造の地震応答解析について，土木構造・材料論文集，第31号，pp.53～60，2015.



(a) Coefficient of friction 1.0

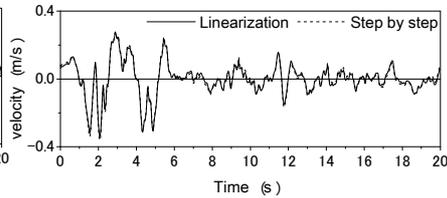


(b) Coefficient of friction 0.1

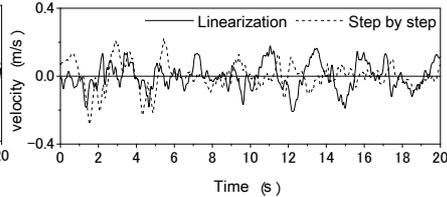


(c) Coefficient of friction 0.01

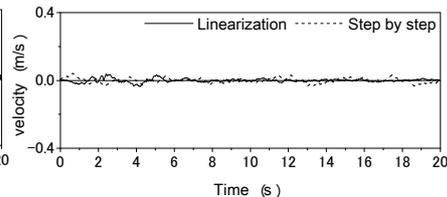
図4 加速度の時刻歴応答



(a) Coefficient of friction 1.0

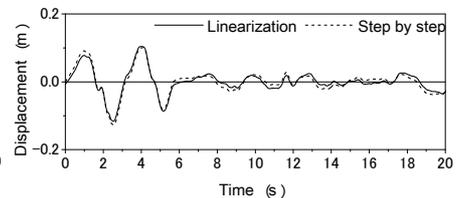


(b) Coefficient of friction 0.1

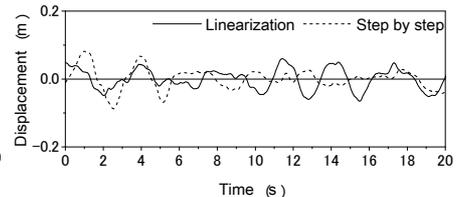


(c) Coefficient of friction 0.01

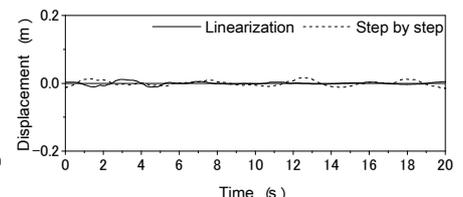
図5 速度の時刻歴応答



(a) Coefficient of friction 1.0

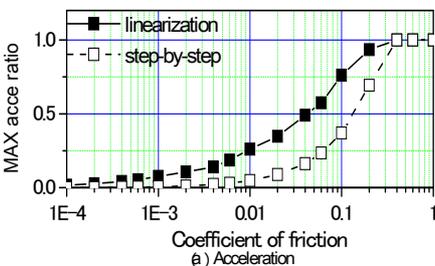


(b) Coefficient of friction 0.1

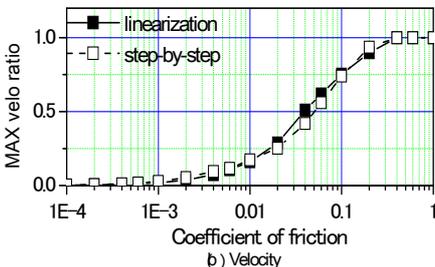


(c) Coefficient of friction 0.01

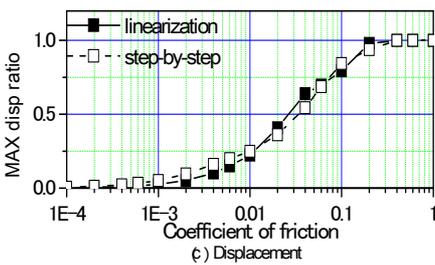
図6 変位の時刻歴応答



(a) Acceleration

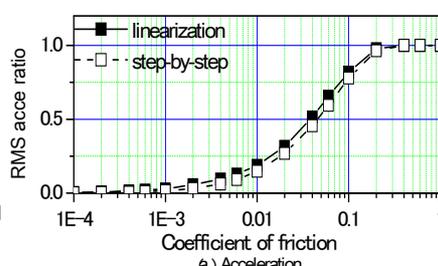


(b) Velocity

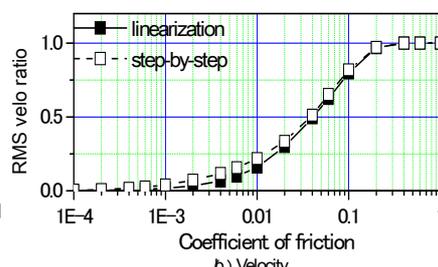


(c) Displacement

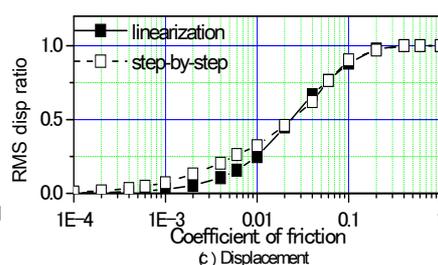
図7 最大応答の低減比(平均値)



(a) Acceleration



(b) Velocity



(c) Displacement

図8 RMS 応答の低減比(平均値)

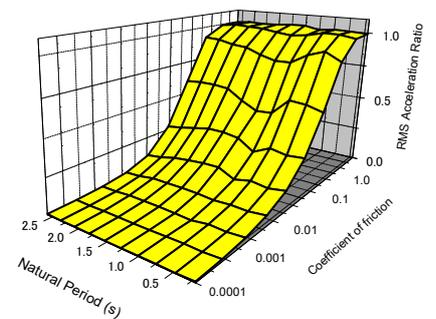


図9 卓越周期に対する加速度応答の低減比

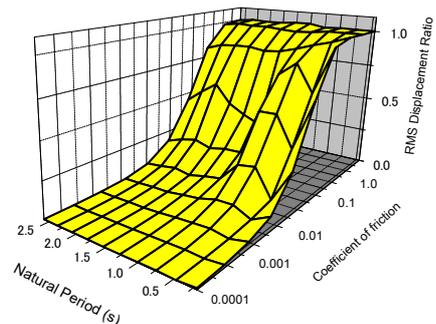


図10 卓越周期に対する変位応答の低減比