

## 摩擦機構を有する免震構造の実用的な解析法とモデル化に関する一考察

## —その1 単体モデルによるパラメタリック解析—

正会員	山崎 久雄 <sup>*1</sup>
同	○ 大原 和之 <sup>*2</sup>
同	中郡 一雄 <sup>*3</sup>
同	中村 秀司 <sup>*4</sup>

免震構造	摩擦機構	地震応答解析
HHT- $\alpha$ 法	モデル化	

## 1. はじめに

減衰機能を併せ持つ免震支承には様々な種類があり、摩擦や滑り機構（以下、摩擦機構という）で減衰性能を発揮するタイプもそれに含まれる。免震構造の応答評価には主として地震応答解析が用いられるが、その時間積分には Newmark- $\beta$ 法が多用されていると思われる。免震層に摩擦機構を含むようなモデルを解析すると、特に応答加速度において摩擦固着時に関わらず入力加速度以上の、また固着時と滑動時との移行の瞬間に高いピークの高振動モード（以下、不要な高振動モードという）が現れることがある。これは積分時間間隔を極めて細かく設定すれば回避できることが多いが、逆に解析効率を低下させることになる。

一方、解析精度を保ちつつ数値減衰効果で不要な高振動モードが抑制できる解法として HHT- $\alpha$ 法<sup>1)</sup>が知られている。

本報および次報で、摩擦機構を有する免震構造の実用的な解析をめざし、HHT- $\alpha$ 法や粘性モデルを用いることによる不要な高振動モードの抑制効果を確認する。本報は固着時（剛体）と摩擦機構単体モデルのパラメタリック解析を、次報で建物モデルによる比較検討を行う。

2. HHT- $\alpha$ 法

HHT- $\alpha$ 法は次式で表される<sup>1)</sup>。

$$M a_{n+1} + (1+\alpha) C v_{n+1} - \alpha C v_n + (1+\alpha) K d_{n+1} - \alpha K d_n = -M a_{G,n+1} \quad (1a)$$

$$v_{n+1} = v_n + \Delta t(1-\gamma)a_n + \Delta t\gamma a_{n+1} \quad (1b)$$

$$d_{n+1} = d_n + \Delta t v_n + \Delta t^2(1/2-\beta)a_n + \Delta t^2\beta a_{n+1} \quad (1c)$$

$$\gamma = 1/2 - \alpha, \quad \beta = 1/4(1-\alpha)^2, \quad \alpha = 0 \sim -1/3 \quad (1d,e,f)$$

ここに、 $M, C, K$ =質量、減衰係数、剛性、 $a, v, d$ =加速度、速度、変位、 $a_G$ =入力加速度、 $\Delta t$ =時間間隔である。本検討では $\alpha = -1/3$ とする。なお、式(1)より HHT- $\alpha$ 法は $\alpha = 0$ のとき Newmark- $\beta$ 法( $\beta = 1/4$ )に一致する。

## 3. 摩擦固着時（剛体モデル）の応答

まず摩擦固着時（剛体）の応答を確認する。固着時の応答加速度は理想的には入力加速度に一致する。検討モデルは質量  $M=1$  とし、固有周期  $T=0.01s$  となる剛性  $K=\omega^2$ 、または粘性  $C=\omega$  を与える ( $\omega=2\pi/T$ ,  $v=\omega u$  として  $C=K/\omega$ )。入力波は JMA KOBE NS、内部粘性減衰 ( $C$  以外) は非減衰とした。

図 2.1 は剛性  $K=\omega^2$  を与え、Newmark- $\beta$ 法で解析した応答加速度の時刻歴で、積分時間間隔を  $\Delta t=0.002, 0.001s$  とした結果である。 $\Delta t=0.002s$  では 10s 以後に不要な高振動モードが現れているが、 $\Delta t=0.001s$  と細かくすればそれが抑制できた。

図 2.2 は同じく  $K=\omega^2$  を与え、HHT- $\alpha$ 法で解析した結果である。HHT- $\alpha$ 法では  $\Delta t=0.01s$  と、粗い積分時間間隔でも不要な高振動モードが抑制できた。

一方、図 2.3 は粘性  $C=\omega$  を与え、Newmark- $\beta$ 法で解析した結果である。この場合も  $\Delta t=0.01s$  で抑制できた。

固着時の特性を剛性で与える場合、Newmark- $\beta$ 法では  $\Delta t$  を十分細かくする必要があるが、HHT- $\alpha$ 法では比較的粗い  $\Delta t$  でも理想的な応答として求まった。また粘性で与える場合は、Newmark- $\beta$ 法でも比較的粗い  $\Delta t$  で良好な結果が得られた。

## 4. 摩擦機構単体モデルの応答

次に前述の摩擦固着（剛体）モデルに対して摩擦係数  $\mu=0.2$  を与えた単純な Bi-Linear モデルを考える。ここでも固着時の特性に固有周期  $T_0=0.01s$  となる剛性  $K_0=\omega_0^2$  または粘性  $C_0=\omega_0$  を与える（添え字 0 は固着時の特性を表す）。これ以外の解析条件は前述と同じである。

$K_0=\omega_0^2$  および  $C_0=\omega_0$  を与えたモデル模式図を図 3.1 に示す。

図 3.2 は固着時の特性を  $K_0=\omega_0^2$  で与え、Newmark- $\beta$ 法で解析した応答加速度で、 $\Delta t=0.005, 0.002, 0.001s$  とした結果である。 $\Delta t=0.002s$  は  $0.005s$  に対し改善されているが、所々に不要な高振動モードが現れている。 $\Delta t=0.001s$  では良好となる。

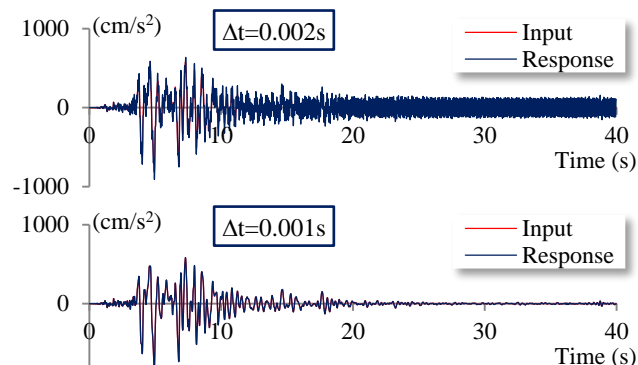


図 2.1  $K=\omega^2$  による剛性モデル・Newmark- $\beta$ 法

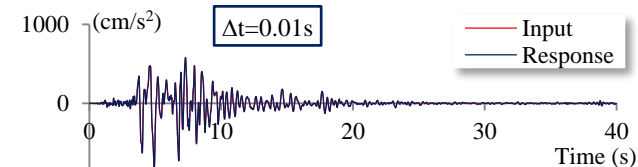


図 2.2  $K=\omega^2$  による剛性モデル・HHT- $\alpha$ 法

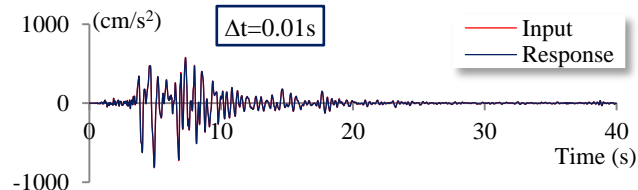


図 2.3  $C=\omega$  による粘性モデル・Newmark- $\beta$ 法

図 3.3 は同じく  $K_0=\omega_0^2$  を与え、HHT- $\alpha$ 法で $\Delta t=0.01$ ,  $0.005s$ とした結果である。 $\Delta t=0.01s$ では不要の高振動モードがやや残っているが $\Delta t=0.005s$ では改善される。

図 3.4 は固着時の特性を  $C_0=\omega_0$  で与え、Newmark- $\beta$ 法で $\Delta t=0.005$ ,  $0.002s$ とした結果である。 $\Delta t=0.005s$ では不要の高振動モードが完全に除去されないが $\Delta t=0.002s$ で良好となる。

図 3.5 は同じく  $C_0=\omega_0$  で与え、HHT- $\alpha$ 法で $\Delta t=0.01$ ,  $0.005s$ とした結果である。 $\Delta t=0.01s$ でも良好であるが、 $\Delta t=0.005s$ ではほぼ完全に不要の高振動モードが除去できている。

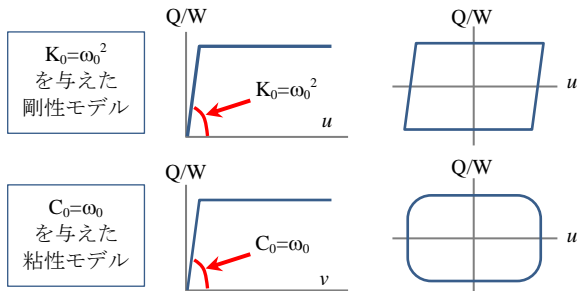


図 3.1 摩擦モデルの模式図 ( $K_0, C_0$  は  $M=1$  の場合)

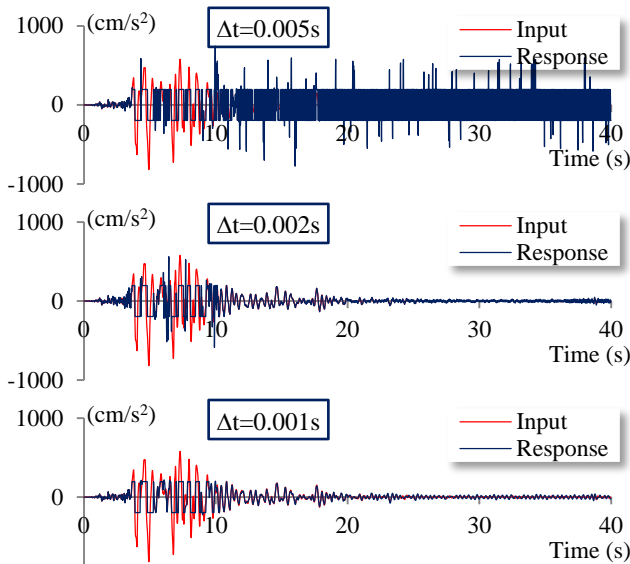


図 3.2  $K_0=\omega_0^2$  による剛性モデル・Newmark- $\beta$ 法

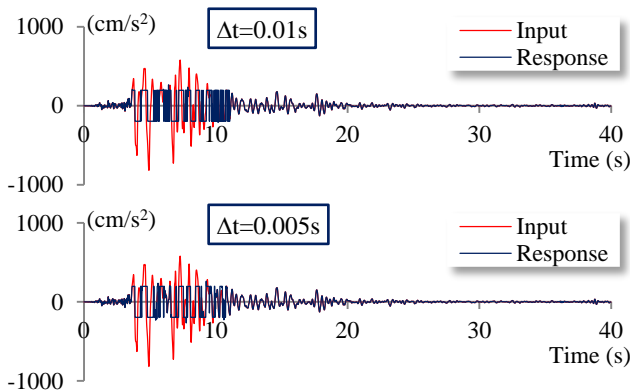


図 3.3  $K_0=\omega_0^2$  による剛性モデル・HHT- $\alpha$ 法

一方、すべてのケースの荷重-変位関係についてはいずれもほぼ同等の結果を得た。図 3.6 に、不要の高振動モードが最も現れた図 3.2 の $\Delta t=0.005s$ と良好な結果のひとつである図 3.5 の $\Delta t=0.005s$ での結果を示す。

## 5. まとめ

摩擦機構の固着時の特性を大きな剛性または粘性で与えた場合の積分時間間隔 $\Delta t$ と積分法 (Newmark- $\beta$ 法と HHT- $\alpha$ 法) に着目した単体モデルのパラメトリック解析を行った。固着時を剛性で模擬した場合、Newmark- $\beta$ 法に対し HHT- $\alpha$ 法による不要の高振動モードの抑制効果が確認できた。また粘性で模擬した場合でも同様の効果はあるものの Newmark- $\beta$ 法でも比較的粗い $\Delta t$ で良好な結果が得られることを確認した。

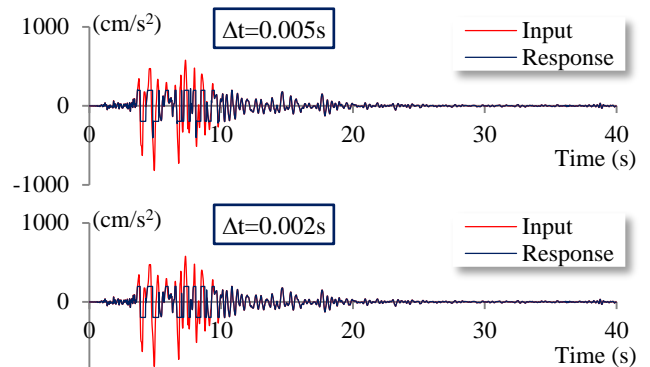


図 3.4  $C_0=\omega_0$  による粘性モデル・Newmark- $\beta$ 法

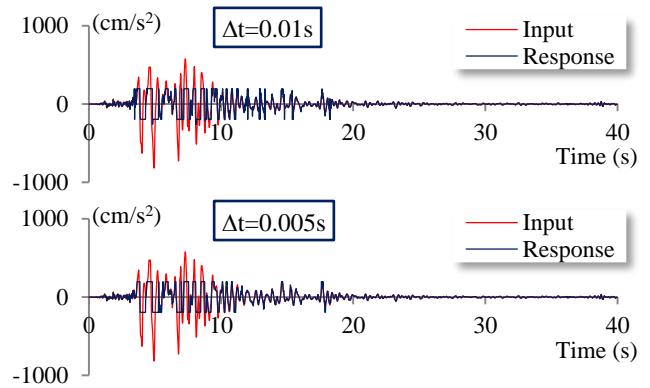


図 3.5  $C_0=\omega_0$  による粘性モデル・HHT- $\alpha$ 法

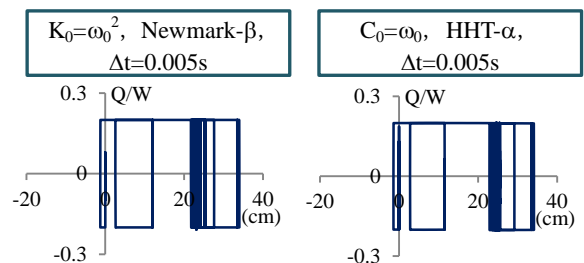


図 3.6 荷重-変位関係

## 参考文献

- 1) Hans M.Hilber, Thomas J.R.Hughes and Robert L.Taylor : Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.5, 1977

\*1 ユニオンシステム(株)  
\*2 (株)建築構造研究所  
\*3 (有) NCU 一級建築士事務所  
\*4 新日鉄住金エンジニアリング(株)

\*1 UNION SYSTEM INC  
\*2 Building Structure Institute  
\*3 NCU Structural Design, Inc  
\*4 Nippon Steel & Sumikin Engineering Co.,Ltd