

免震層を有する構造物の動的応答解析

徳山高専 学生会員 ○山根 誠司

徳山高専 正会員 重松 恒美

徳山高専 正会員 原 隆

徳山高専 正会員 田村 隆弘

1. 序論 ノースリッジ地震(1994.1.17)や、阪神・淡路大震災(1995.1.17)では、建物の損壊・倒壊、家具の転倒などによるものも含めて人的被害が多数発生した。そういった中で、免震構造の建物は、建物本体・収容物ともに被害を受けず、その安全性・有効性が実証され、社会的な認知も高まってきた。震災後、免震装置を有する土木建築構造物が多数建設されている。その方式の一つに、スリップ方式がある。これは、基礎と上部構造が固定しないので、摩擦面が伝達しうる最大摩擦力を超える地震力が作用すると、構造物は摩擦板上を滑り出し、それ以上の力が作用しないというものである。しかし、このような摩擦系の振動は、非線形振動であり、純理論による解析は困難である。そこで本研究では、スリップ方式の免震装置を備えた構造物の1質点系モデルの、時刻歴応答解析を、ニューマークβ法に基づく数値計算により行い、その応答特性を分析する。そして、その手法を多質点系構造物に適用し、その動的応答解析をおこなうことを目的とする。

2. 1質点系モデルの応答解析 図-1に、スリップ方式の免震構造物を、1質点系モデル化したものを示す。図-1は、質点 m に動的な外力 $p(t)$ が作用するときの変位 $v(t)$ 、そのときの減衰の要素として摩擦力、ダンパーによる減衰力、弾性バネによる復元力、これらを模式的に表したものである。

f : 摩擦係数 m : 質量
 c : 減衰係数 $p(t)$: 動的な外力
 k : バネ剛性 $v(t)$: 変位

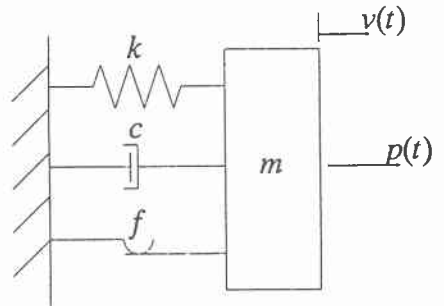


図-1. 1質点系の減衰運動モデル

時間 $t + \Delta t$ における質点に関する、力のつり合い式は、

$$m\ddot{v}(t + \Delta t) + c\dot{v}(t + \Delta t) + kv(t + \Delta t) + \text{sgn } f(t + \Delta t) = p(t + \Delta t) \quad (1)$$

式(1)は、非線形であるが、速度の正負に対応する2つの線形方程式に分けることができる。その処理は、数値計算の過程で導入することにする。つぎに、ニューマークβ法により得た、速度と変位の式を示す。

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \dot{v}(t)\Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\ddot{v}(t)\Delta t^2 + \beta\ddot{v}(t + \Delta t)\Delta t^2 \quad (2)$$

$$\dot{v}(t + \Delta t) = \dot{v}(t) + \frac{\ddot{v}(t) + \ddot{v}(t + \Delta t)}{2}\Delta t \quad (3)$$

これらの式に簡単な操作を加えて書きかえる。

$$\ddot{v}(t + \Delta t) = \frac{2\{\dot{v}(t + \Delta t) - \dot{v}(t)\}}{\Delta t} - \ddot{v}(t) \quad (4)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + (1 - 2\beta)\dot{v}(t)\Delta t + 2\beta\dot{v}(t + \Delta t)\Delta t + \left(\frac{1}{2} - 2\beta\right)\ddot{v}(t)\Delta t^2 \quad (5)$$

一般的には、このステップで、変位の式を求める手法が多く用いられる。しかし、摩擦ベクトルには、速度

ベクトルが影響することを考慮し、計算時に処理がしやすいように、次に示す式(6)を導出し、採用した。
式(1)に、式(4)、(5)を代入して整理すると、

$$h\dot{v}(t+\Delta t) + f(t+\Delta t) = p(t+\Delta t) - i\ddot{v}(t) - j\dot{v}(t) - kv(t) \quad (6)$$

$$h = \frac{2m}{\Delta t} + c + 2\beta k\Delta t \quad i = \left(\frac{1}{2} - 2\beta\right)k\Delta t^2 - m \quad j = (1 - 2\beta)k\Delta t - \frac{2m}{\Delta t}$$

式(6)は、速度と摩擦が未知数なのでこのままでは計算できない。

そこで、計算の過程で、左辺 $h\dot{v}(t+\Delta t) + f(t+\Delta t) = R$ という置き換えを行う。最大摩擦力を $f_{\max}$ とすると、速度方向と摩擦力の作用方向との関係上 $R \leq f_{\max}$ は、成立しないので速度を0とし、未知数である静止摩擦力を計算する。また、 $R > f_{\max}$ の場合は、運動中の物体には一定の動摩擦以上は作用しないので摩擦力として動摩擦を与えて未知数である速度を計算する。

3. 数値計算結果 図-1の系について、応答解析を行う。具体的な数値は質量が $m = 20(\text{kg})$ 、減衰定数が $c = 0.4(\text{kN} \cdot \text{sec}/\text{cm})$ 、バネ剛性を $k = 9.8(\text{kN}/\text{cm})$ とし、摩擦を有するものには、摩擦力 $f = 1.2(\text{kN})$ をあたえた。

(1) 変位応答

先に述べた条件の構造系に、荷重を負荷した後に、除荷して自由減衰させたときの変位応答を求めた。得られた結果を図-2に示す。計算結果から、摩擦を含む系は摩擦を含まない系に比べて、振動の周期が長くなり、振幅が小さくなるのがわかる。

(2) 加速度応答倍率

前述したものと特性をかえずに、正弦波荷重をかけ、周期 T を変化させて、動的外力に対する最大加速度応答を求め、図-3に示すような加速度応答スペクトルを得た。正弦波外力は、

$$p(t) = p_0 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t \text{ で表される。}$$

摩擦を有するものと、そうでないものについて、加速度応答倍率を求めた結果、摩擦を有するものは、そうでないものと比べて加速度応答倍率が小さいことが分かる。また、摩擦を入れると、応答が最大になるときの周期が長くなることも分かる。

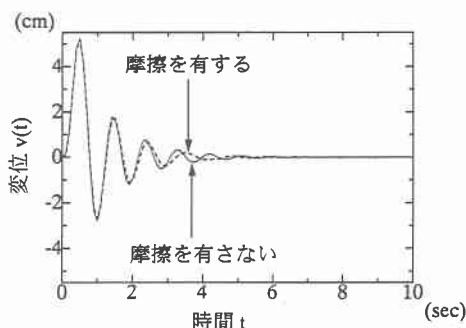


図-2. 変位応答

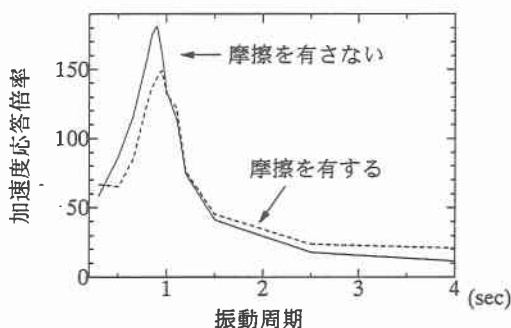


図-3. 加速度応答スペクトル

4. 結論 スリップ方式の免震装置を有する構造物を1質点モデル化し、摩擦を有さない系を想定し比較の対象として解析を行った結果、固有周期の伸長、振幅の抑制、加速度応答の減少などスリップ方式における摩擦の有効性が確認できた。また、摩擦系のような非線形解析に対する数値計算の有効性が把握できた。

【参考文献】 1) CLOUGH PENZIEN: DYNAMICS OF STRUCTURES, McGraw-Hill, 1993, 2) 山本 利弘 藤谷 義信: 摩擦要素を含む構造物の非線形振動解析について, 広島大学工学部研究報告 43, 2, pp.183 - 192,