

木造免震住宅の実大振動実験

その8 時刻歴応答解析

正会員○皆川隆之\*1 正会員 三宅辰哉\*2  
正会員 高橋武宏\*3 正会員 吉井邦章\*3  
関 瓦\*4 正会員 坂本 功\*5

1. はじめに

本報(その8)および次報(その9)では、本振動実験の試験体に対応する振動モデルを用いた応答解析に基づく考察を行う。本試験体のような滑り系免震建物では、滑り支承の摩擦力はその移動方向に生じるため、特定の軸上で観察される摩擦力はその移動方向に影響を受ける。したがって直交するXY軸上における摩擦力は相互に独立でなく、応答解析上この点に留意する必要がある。

本報では応答解析方法を述べるとともに解析値と実験値の適合性について検討する。

2. 解析方法

本試験体の上部架構を剛体とみなし、免震層にX,Y方向と振じれ(θ)方向の3自由度を持つ1質点系にモデル化して線形加速度法により時刻歴応答解析を行う。変位x, y, θは次の増分型振動方程式に支配される。

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \ddot{x} \\ \Delta \ddot{y} \\ \Delta \ddot{\theta} \end{bmatrix} + [K] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \ddot{x}_0 \\ \Delta \ddot{y}_0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots (1)$$

上式においてmは質量、Iは慣性モーメントであり、Δを付した変数はすべて応答解析jステップとj+1ステップ間の増分であることを表す。ẍ<sub>0</sub>, ÿ<sub>0</sub>はX,Y方向の入力加速度である。質点の重量mgと重量慣性モーメントI<sub>g</sub>および重心は構成材の公称重量に基づいて設定する。[K]は次のように表される。

$$[K] = \begin{bmatrix} \sum_i k_{xij} & 0 & \sum_i k_{xij} l_{yi} \\ 0 & \sum_i k_{yij} & -\sum_i k_{yij} l_{xi} \\ \sum_i k_{xij} l_{yi} & -\sum_i k_{yij} l_{xi} & \sum_i k_{xij} l_{yi}^2 + \sum_i k_{yij} l_{xi}^2 \end{bmatrix} \dots (2)$$

ここで、k<sub>xij</sub>, k<sub>yij</sub>はi番目の免震装置のjステップとj+1ステップ間における接線剛性であり、l<sub>xi</sub>, l<sub>yi</sub>は重心を原点とした免震装置の座標である。

免震装置の復元力特性は「その2」で評価されている。積層ゴム支承では割線剛性および半サイクルの吸収エネルギーと変位振幅Δの関係が図2.2(a),(b)のように得られている。割線剛性のΔへの依存性は低いので本解析では積層ゴム支承の水平剛性は一定とし図2.2(a)中のK̂<sub>r</sub>と

する。吸収エネルギーは粘性減衰により考慮する。粘性減衰係数cは積層ゴム支承Aで0.00136、Bで0.0020とする。滑り支承については摩擦係数μの速度依存性を図2.2(c)中の近似関数により考慮する。ただしμは0.03を下回らないものとする

応答解析jステップの応答変位をx<sub>j</sub>, y<sub>j</sub>, θ<sub>j</sub>とし、次ステップの予測変位x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, θ<sub>p</sub>を次のように求める。

$$\left. \begin{aligned} x_p &= x_j + \dot{x}_j dt + \frac{\ddot{x}_j}{2} dt^2 \\ y_p &= y_j + \dot{y}_j dt + \frac{\ddot{y}_j}{2} dt^2 \\ \theta_p &= \theta_j + \dot{\theta}_j dt + \frac{\ddot{\theta}_j}{2} dt^2 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここで、dt：解析上の刻み時間

上式は次ステップの応答変位を表すテーラー展開式の未知数を含む右辺第4項以降を微小であるとして無視したものであり、精解値ではないが後に解析値を実験値と比較することで精度が検証される。このとき次ステップにおける各免震装置位置の変位は下式となり、

$$X_{ip} = x_p + l_{yi} \theta_p \quad Y_{ip} = y_p - l_{xi} \theta_p \dots (4)$$

原点からの距離D<sub>ip</sub>、jステップと次ステップ間の移動距離D<sub>ip</sub>とそのX,Y方向成分X<sub>ip</sub>, Y<sub>ip</sub>は次のようになる。

$$D_{ip} = \sqrt{X_{ip}^2 + Y_{ip}^2} \dots (5)$$

$$\bar{D}_{ip} = \sqrt{(X_{ij} - X_{ip})^2 + (Y_{ij} - Y_{ip})^2} \dots (6)$$

$$\bar{X}_{ip} = X_{ip} - X_{ij} \quad \bar{Y}_{ip} = Y_{ip} - Y_{ij} \dots (7)$$

次ステップにおけるX,Y方向復元力f<sub>xip</sub>, f<sub>yip</sub>は次のように求める。積層ゴム支承では、

$$f_{xip} = \left\{ \hat{K}_r D_{ip} + c \cdot \frac{D_{ip} - D_{ij}}{dt} \right\} \frac{X_{ip}}{D_{ip}} \dots (8)$$

$$f_{yip} = \left\{ \hat{K}_r D_{ip} + c \cdot \frac{D_{ip} - D_{ij}}{dt} \right\} \frac{Y_{ip}}{D_{ip}} \dots (9)$$

滑り支承では上下応答は入力に等しいとして、

$$f_{xip} = \mu_d W_{si} \left( 1 + \frac{\ddot{z}_0}{g} \right) \cdot \frac{\bar{X}_{ip}}{\bar{D}_{ip}} \dots (10)$$

$$f_{yip} = \mu_d W_{si} \left( 1 + \frac{\ddot{z}_0}{g} \right) \cdot \frac{\bar{Y}_{ip}}{\bar{D}_{ip}} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $\mu_d = 0.0048 \ln V + 0.0336$

$$V = \bar{D}_{ip} / dt$$

$\ddot{z}_0$  : 上下(Z)方向入力加速度

$g$  : 重力加速度

$j$ ステップと次ステップ間の復元力の接線剛性はX,Y方向について次のように設定する。

$$k_{xij} = \frac{f_{xip} - f_{xij}}{\bar{X}_{ip}} \quad k_{yij} = \frac{f_{yip} - f_{yij}}{\bar{Y}_{ip}} \dots\dots\dots (12)$$

3. 解析結果

前項の方法により入力波を振動台上で計測された加速度波として時刻歴応答解析を行う。ただし、前項の方法では変位の方向が反転する際に接線剛性が極めて大きくなる場合があり、解析の発散を防ぐために(12)式による接線剛性に200tf/cmの上限值を設けた。また解析の時間刻み  $dt$  は1/200secとした。

免震層の層せん断力-層間変位曲線および変位平面履歴曲線について解析値と実験値を比較して図8.1に示す。

応答履歴の全体形状、最大応答変位およびその発生方向はほぼ一致している。また第1,2,4,6期の加振を対象として、応答主軸方向の最大応答変位について実験値に対する解析値の比率、主軸角について実験値に対する解析値の差を求め、それらを母集団として統計処理を行ったところ、最大応答変位では平均値が0.993、標準偏差が0.107、主軸角では平均値が-0.4°、標準偏差が8.31°であった。1質点系にモデル化するなどの単純化を行ったが応答変位については解析値は実験値に良く一致している。ただし層せん断力については実験値は解析値と比べ短周期の変動が大きい。この理由として鉄骨土台を振動台から持ち出したことによる上下動応答の増大、および上部架構の転倒モーメントによる滑り支承の摩擦力の変動が考えられる。しかし、それにもかかわらず水平方向変位については解析値と実験値はほぼ一致しており、この点からも本試験体のような滑り系免震構造の水平方向応答変位については上下動の影響は極めて小さいと言える。

参考文献

- 1) 柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版，1981.6

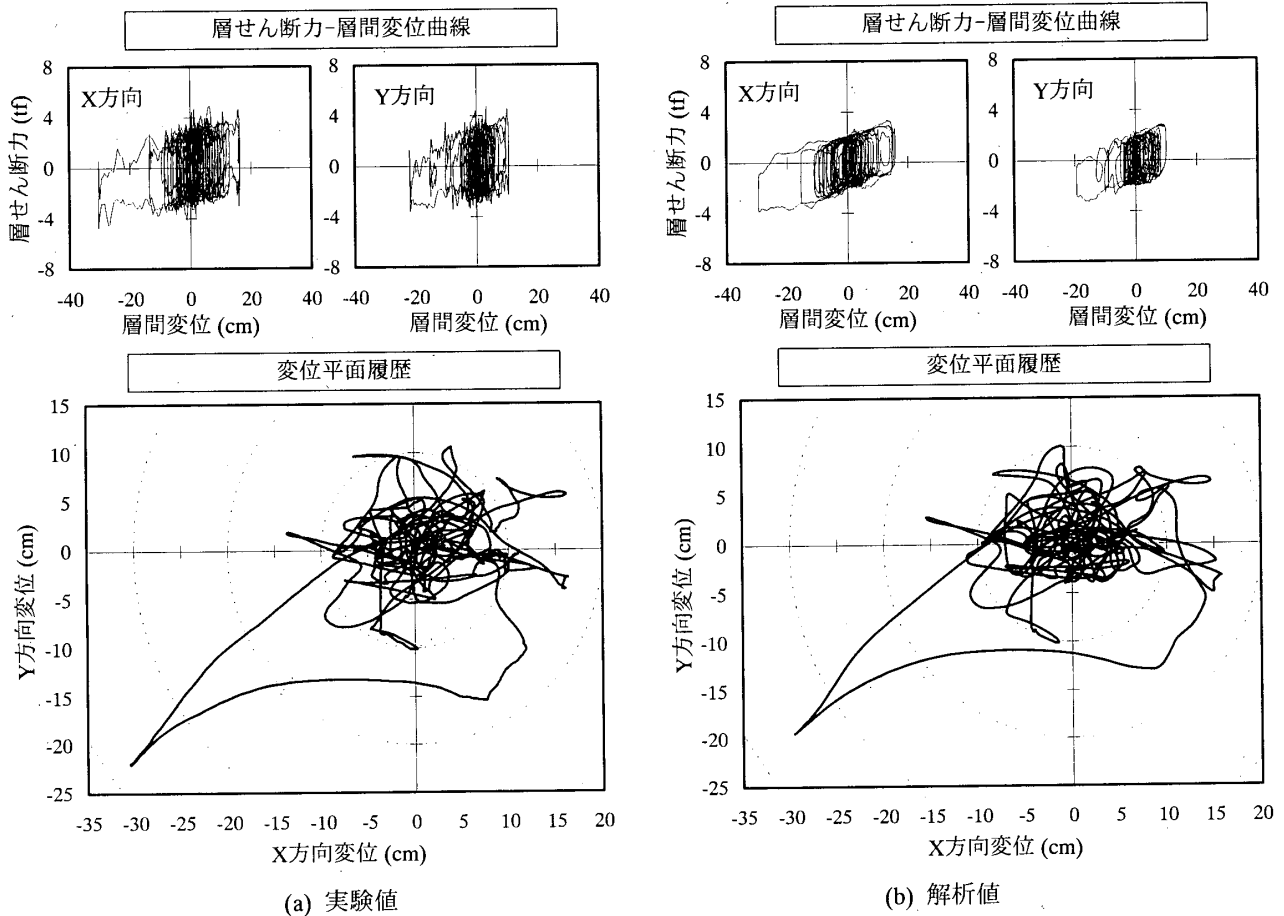


図 8.1 実験値と解析値の比較

\*1 (株)日本システム設計 Nihon System Sekkei Co.

\*4 (株)ブリヂストン・工博 Bridgestone Co., Dr. Eng.

\*2 (株)日本システム設計・工博 Nihon System Sekkei Co., Dr. Eng.

\*5 東京大学 教授・工博 Prof., The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

\*3 (株)一条工務店 Ichijo Housing Company Co., Ltd.