

京都大学工学研究科 正会員 五十嵐 晃  
 京都大学工学研究科 フェロー 家村 浩和  
 京都大学大学院 学生員 ○豊岡 亮洋

1. はじめに

実物大構造物を用いた動的応答の検証実験のためには、補助質量の慣性力を利用した加振機を用いて構造物を加振する必要があるが、より正確な応答再現のためには、適切な加振機への入力进行を定める必要がある。

本研究では、モード解析に基づき、振動モード特性を考慮した形で応答を再現するための加振機への入力の作成手法の検討、およびその誤差の解析を行った。

2. 解析モデル

応答を再現する構造物のモデルとしては、3 自由度の単独フレーム構造、および図 1 のような、5 層フレームと 3 層フレームをジョイントダンパーで接続した 2 棟連結構造物の 2 つを想定した。加振機は、3 層フレームには屋上階 (3F)、5 層フレームには 4 階に設置してある場合を想定した。この 2 棟連結構造物は、京都大学宇治構内で構築・整備中の実大実験施設をモデル化したものである。

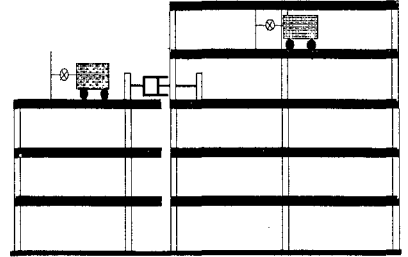


図 1 実験システムのモデル図

3. 加振機入力の作成手法

まず 3 層の単独フレーム構造物について考える。いま Rayleigh 減衰を仮定すれば、運動方程式は、各次振動モードに関する非連成な 3 個の微分方程式に分解できる。地震入力時の  $i$  次モードの運動方程式は、 $i$  次モード変位を  $\bar{q}_i$ 、固有振動数を  $\omega_i$ 、減衰定数を  $h_i$  とすれば

$$\ddot{\bar{q}}_i + 2h_i\omega_i\dot{\bar{q}}_i + \omega_i^2\bar{q}_i = -\phi_i^T[M]\{1\}\ddot{z} \quad (i=1,2,3) \dots (1)$$

となる。また、加振機加振時の運動方程式は、 $i$  次モード変位を  $\hat{q}_i$ 、加振機に入力する加速度を  $\ddot{y}$ 、 $i$  次モードマトリクスの 3 階部分の成分を  ${}_3\phi_i$ 、加振機の補助質量を  $m_D$  とすれば

$$\ddot{\hat{q}}_i + 2h_i\omega_i\dot{\hat{q}}_i + \omega_i^2\hat{q}_i = -{}_3\phi_i m_D \ddot{y} \quad (i=1,2,3) \dots (2)$$

となる。ただし、 $\Phi$  は正規化されている。ここで、(1)、(2) 式について、すべての  $i$  について右辺項を等しくするように  $\ddot{y}$  を決めることはできないので、近似的に次のように考える。

両辺を Fourier 変換すれば入力地震動と加振機入力の Fourier 変換をそれぞれ  $\ddot{Z}(i\omega)$ 、 $\ddot{Y}(i\omega)$  とするとき、

$$\bar{Q}_i(\omega) = \frac{-\phi_i^T[M]\{1\}\ddot{Z}(i\omega)}{(\omega_i^2 - \omega^2) + 2h_i\omega\omega_i} \dots (3)$$

$$\hat{Q}_i(\omega) = \frac{-{}_3\phi_i m_D \ddot{Y}(i\omega)}{(\omega_i^2 - \omega^2) + 2h_i\omega\omega_i} \dots (4)$$

となる。(3) 式から、地震入力の場合の  $i$  次のモード変位は、周波数領域においては  $i$  次固有振動数付近が特に卓越していることから、 $i$  次モードの応答を再現するには近似的に  $i$  次の共振数付近での応答を再現すればよいことが分かる。そこで、(1) の入力地震加速度  $\ddot{z}$  に対して  $i$  次固有振動数近傍のみを通すフィルタを周波数領域で作用させ、(1)、(2) の

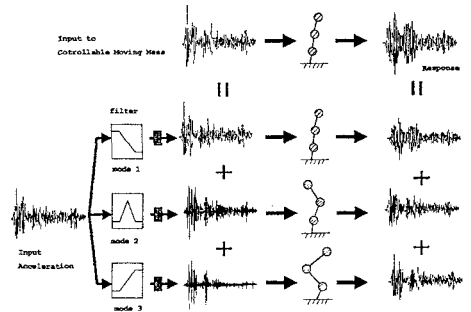


図 2 加振機入力作成手順の概念図

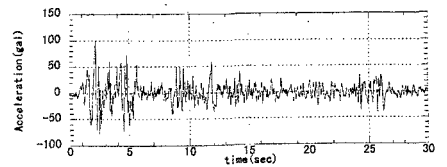


図 3 再現すべき地震動 (El Centoro NS)

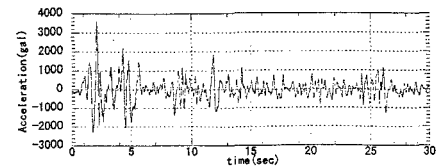


図 4 加振機に入力する加速度

右辺同士を等置することにより、 $i$  次の応答を再現するための加振機入力を得た。実際の応答は各モード応答の線形和で表されることから、 $i$  次モード再現用の加振機入力を  $i=1\sim 3$  まで足しあわせることにより、応答再現のための加振機入力を得られる。これら一連の手順の概念を図 2 に示す。この手法により計算した、3 層構造に El Centro 波 (最大 100gal・図 3) が作用した時の 3 層構造物の応答を再現するための加振機入力とは図 4 のようになる。この加振機入力時の応答を Newmark  $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) で計算し、地震時入力時の応答値との比較を行った。図 5 に、3 層屋上部の質点の相対変位応答の比較を示す。5 層-3 層連結構造については、ジョイントダンパーがモード形状に及ぼす影響は無視できると仮定して、5 層のみ、3 層のみの独立な状態での応答を再現するための加振機入力を別々に作成し、それを同時に入れることで全体の応答を再現することとした。

#### 4. 誤差の検討

3 層の独立構造、および 5 層-3 層連結構造それぞれについて、地震動入力時の応答値を目標値として、加振機加振により再現された応答値に含まれる誤差の検討を行った。2 棟連結構造については、本来は複素固有値解析によりモード形状を求めておく必要があるが、計算の簡略化のため減衰付加による影響を無視できると仮定し、各棟それぞれ独立な状態でのモードマトリクスを用いてモード解析を行った。これには、本研究は実際の実験への適用をめざしているため、誤差の上限評価をする狙いがある。誤差のピークの発生する時刻は、El Centro 波のピークに対応する時刻に発生しており、最大応答の再現という観点から見れば、検討の余地が残されている。この傾向は、2 棟連結構造でも同様に見られる。これに対応する相対誤差について、目標値に対する誤差の割合を、それぞれの応答ベクトルのノルムの比により全体系として評価することで、誤差の占める割合を見たところ、3 層構造、2 棟連結構造いずれについても、相対変位、相対速度、相対加速度の順に誤差の占める割合が増大する傾向が見られた。図 6 に、2 棟連結構造についての誤差の推移を示す。また、誤差に占める各モードの割合を調べたところ、3 層構造、2 棟連結構造のいずれについても、1 次モードの誤差がかなり卓越しており、2 棟連結構造においては、ジョイントダンパーの粘性係数を増加させた場合においてもその傾向にはほとんど変化が見られなかった。さらに、実験への適用を考えて、2 棟連結構造についてベースシアの評価を、連結部の粘性係数を変化させながら行った。図 7 は 5 層フレーム、3 層フレームのベースシアの推移であるが、2 者は同様な増減傾向を示しており、これまでの仮定によっても、ベースシアの変化の傾向を十分再現できるものと考えられる。

#### 5. 結論

構造物の応答のモードの周波数特性を考慮した形で加振機入力を作成することにより、応答の規模についてはかなり正確に地震時挙動を再現することができた。ただし、位相特性の再現や連結構造物の減衰付加時のより正確なモード形状の把握などについては必要に応じて検討の必要がある。

#### 参考文献

- 1) 鈴木祥之・玉木利裕・山本雅史他、鋼構造実大試験架構を用いたアクティブ制震実験システム、日本建築学会近畿支部研究発表会、1997

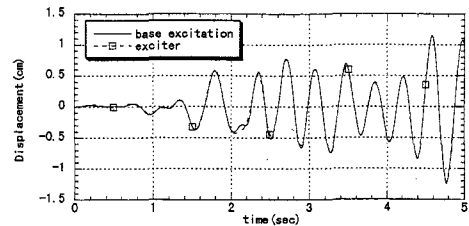


図 5 3 層 3F 相対変位応答の比較

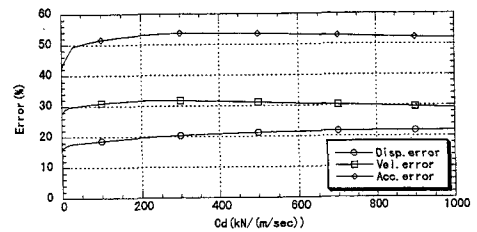


図 6 2 棟連結構造の再現応答の相対誤差の推移

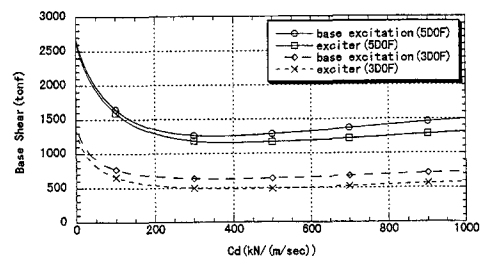


図 7 各フレームのベースシアの推移