

名古屋大学大学院 学生会員 ○伊 澤 二 朗

石 川 鼎 正 会員 本 田 芳 宏

名古屋大学工学部 正 会員 田 辺 忠 顕

1. はじめに

近年、大型の重要施設がRC構造物として作製される趨勢にあるが、その設計は動的な応答解析に基づいて行われる場合が殆どと思われる。その場合に、RC構造物の部材断面形状からIM、C、Kの各振動係数マトリックスを導き、適当な履歴法則を仮定して行うのが通常となっている。しかし構造物が複雑な場合、また振動が多方向である場合には、これらの履歴法則、あるいはKマトリックスの変化が十分に解明されているとはいえない。

そこで本研究では、最近の振動パラメータ同定手法を応用し、3方向に振動をうけてひびわれの発生した構造物の振動波形から固有ベクトルを同定し、振動パラメータを推定することを試みた。またその際、実験はランダム起振実験を行い、その実験データを正弦起振実験データに変換するという手法を用いて、その有効性についても検討を行った。このようにして得られた固有ベクトルと、部材断面から得られる固有ベクトルとを比較してその差異の原因が究明されれば、よりよい振動モデルが得られることとなり、振動解析の精度が向上すると考えられる。

2. 固有ベクトルの同定理論

一般の粘性振動は次式である。

$$\begin{bmatrix} 0 & M \\ M & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、M、C、Kは質量、減衰、剛性の各係数マトリックス、fは外力ベクトルである。

(1)式の複素固有値問題を考え、固有ベクトルの直交性を導入することにより(1)式の定常正弦起振の場合の解は $f = F \exp(i\omega t)$ $x = X \exp(i\omega t)$ として次式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \sum_{r=1}^N \left[\frac{\{U_r\}^T \{F\} \{U_r\} (-\omega^2)}{Q_r(i\omega - P_r)} + \frac{\{\bar{U}_r\}^T \{F\} \{U_r\} (-\omega^2)}{\bar{Q}_r(i\omega - \bar{P}_r)} \right] = \sum_{r=1}^N \left[\frac{\{V_r\} (-\omega^2)}{i\omega - P_r} + \frac{\{\bar{V}_r\} (-\omega^2)}{i\omega - \bar{P}_r} \right] \quad (2)$$

ここに、 ω は起振円振動数、 P_r 、 $\bar{P}_r$ は複素固有値、 $\{U_r\}$ 、 $\{\bar{U}_r\}$ は、複素固有ベクトル、 Q_r 、 $\bar{Q}_r$ はスカラー量である。

(2)式における $\{V_r\}$ 、 $\{\bar{V}_r\}$ は、応答解を回帰曲線とし、定常正弦起振に対する系の複素応答値との差を誤差とみなし、各観測点個別に最小自乗法を適用することにより決定する。上述の計算の結果 $\{V_r\}$ が決定され一方、仮定により $\{F\}$ は既知である。更に(2)式における $Q_r=1$ を満足するように $\{U_r\}$ を決定することにより、J個の測点におけるN次までの複素固有ベクトルが決定される。

3. ランダム起振実験とデータの変換

実験に使用した供試体は図1に示すとおり高さ110cm、幅80cmの正方形型2層立体ラーメンである。柱は4本とも7×7cmの同形

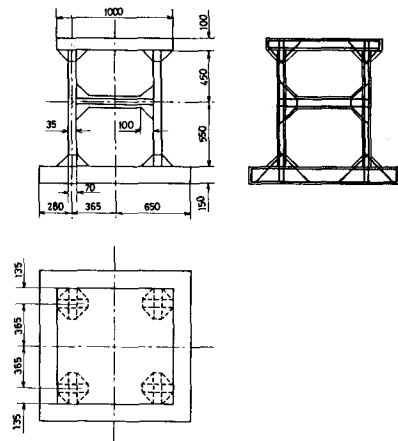


図1 供試体図

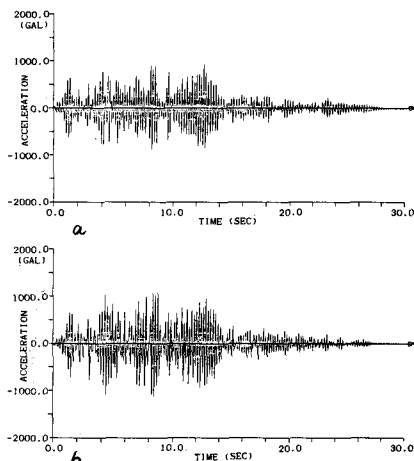


図2 振動方向応答加速度波形

中層ばりはI型断面を有する。実験時には、供試体天端スラブに片側 950 kg、反対側 550 kg と偏心をかけたウェイトを載荷した。供試体を終局振動破壊実験装置上に設置し、入力地震波として使用した名古屋近辺の地盤を考慮した模擬地震波の最大加速度を、適当な大きさに拡大、縮小して入力した。測定としては供試体天端スラブ中央の振動方向、振動直角方向、及び回転方向の加速度とした。図 2 a、図 3 a、図 4 a に振動方向、振動直角方向、回転方向の応答加速度波形を示す。更に 2 節で示した定常正弦起振の式に適合させるため、入力地震波データ、応答加速度データをフーリエ変換し、以下の処理をほどこすことで、ランダム起振実験データを近似的に、定常正弦起振実験データに変換した。

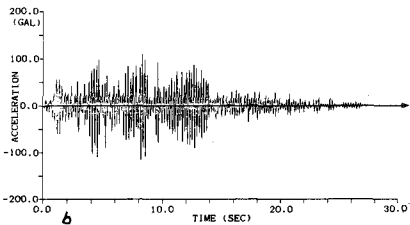
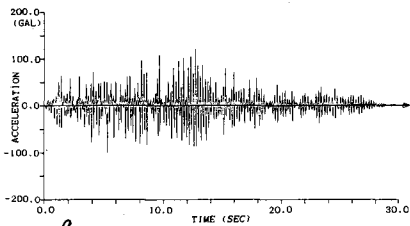


図 3 振動直角方向応答加速度波形

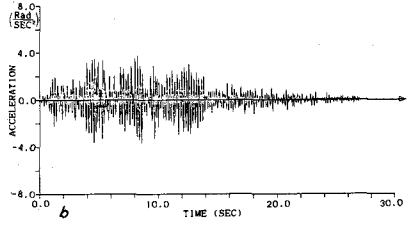
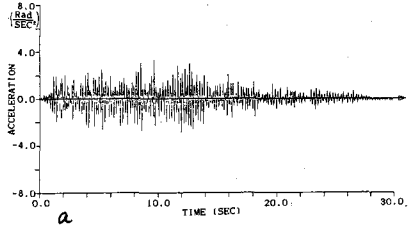


図 4 回転方向応答加速度波形

振幅応答については次式を適用する。

$$Amp = S_2 / S_0 \quad (3)$$

ここに、 S_0 、 S_2 は起振加速度、応答加速度のフーリエスペクトル値、 Amp は応答倍率である。

位相応答については次式を適用する。

$$\phi = \phi_2 - \phi_0 \quad (4)$$

ここに、 ϕ_0 、 ϕ_2 は起振加速度、応答加速度の位相角である。

(3) (4) 式によりランダム起振実験データを近似的に大きさ 1 の定常正弦起振をかけたとした場合の応答加速度に変換して取り扱う。

4. 解析結果と実験結果との比較

固有ベクトルの同定手法を用いて求めた、本実験についての計算例を表 1 に示す。得られた固有ベクトルが複素型になるということは、本供試体の減衰マトリックスが、Rayleigh-Type でないことを示している。次に表 1 に示した固有ベクトルを用い、振動解析を行った結果を図 2 b、図 3 b、図 4

b に示す。振動方向の応答加速度についてみると、実測値と解析値が非常によく一致しており、得られた固有ベクトルが妥当であることを示していると思われる。振動直角方向、回転方向の応答加速度については、実測値と解析値との間に多少の差異はみられるが、断面形状に基づいて行った解析に比べ、はるかによい対応を示している。

5. まとめ

以上の結果から、RC 構造物の耐震性の検討の上で、ランダム起振実験による固有ベクトルの同定が、複雑な 3 次元応答に対してもある程度可能であり、振動モデルの構築に有用な情報を与えることが明らかとなった。

なお、今後、各破壊段階で同定された線形系としての固有ベクトルをいかにして、実現象として非線形応答へ結びつけていくか検討を行いたいと考えている。

表 1 モード同定手法による固有ベクトルの計算例

固有振動数(Hz)	1 次		2 次	
	5.2		7.0	
固有方向	real	imag	real	imag
有ク振動方向	0.55×10^{-1}	0.10	0.22×10^{-1}	-0.76×10^{-1}
ト振動直角方向	-0.85×10^{-2}	0.29×10^{-2}	-0.38×10^{-2}	-0.19×10^{-3}
ル回転方向	-0.28×10^{-3}	0.63×10^{-4}	-0.64×10^{-4}	-0.26×10^{-4}

3 次	
7.9	
real	imag
0.18×10^{-1}	-0.25×10^{-1}
-0.93×10^{-3}	-0.13×10^{-1}
-0.70×10^{-3}	-0.24×10^{-3}