

若築建設 正会員 酒井久和
 京都大学 正会員 澤田純男
 京都大学 フェロー 土岐憲三

1. はじめに

阪神・淡路大震災により幾多の土木構造物が甚大な損傷を受け、これらの構造物の被災原因を究明する目的で地震応答シミュレーションが盛んに行われている。地盤を含む構造物系の地震応答解析を行う場合、基盤における入力地震動が必要となるが、一般にこの基盤入力地震動は地表あるいは地盤内の地震観測記録から周波数領域での重複反射理論に基づく方法で推定されている。この場合、地盤の非線形性は等価線形化手法により近似されるが、非線形性が強く現れる強震時や軟弱地盤を対象とした系に対しては近似による誤差が大きくなることが懸念される。そこで、筆者らは時間領域における基盤入力地震動の推定手法を考案したが^{1)他}、本研究ではさらにこの計算法に改良を加え、考察を行う。

2. 計算方法

2.1 運動方程式の定式化

任意の点 k の絶対応答加速度成分 \ddot{y}_k が測定されている場合の運動方程式は次式で与えられる^{1)他}。

$$[M']\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} - \{Q\} = -[M]\{i\}\ddot{y}_k \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリクス、 $\{Q\}$ は非線形復元力の線形項との調整外力ベクトル、 $\{x\}$ は相対変位ベクトル、 $\{i\}$ は成分が全て1であるベクトルである。また、 \cdot は時間に関する微分を意味し、 $[M']$ は次式で与えられる。

$$M'_{ij} = M_{ij} - \sum_{l=1}^N M_{il}\delta_{lk} \quad (2)$$

ただし、 M'_{ij} 、 M_{ij} は $[M']$ 、 $[M]$ の i 行 j 列成分、 δ_{lk} はKroneckerのデルタ、 N は自由度の数である。

2.2 運動方程式の逐次積分方法

運動方程式の逐次積分する際の時間積分法はNewmarkの β 法を用いる。また、これまでの研究では逐次積分を時間軸の負の方向に行ってきたが、この場合、系の振動後の状態量が全て要求されること

から、本研究では時間軸の正の方向へ時間積分を行う。Newmarkの β 法では応答加速度、速度、変位間に以下の関係が仮定される。

$$\dot{x}_i^{n+1} = \dot{x}_i^n + (1-\gamma)\Delta t\ddot{x}_i^n + \gamma\Delta t\dot{x}_i^n \quad (3)$$

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \Delta t\dot{x}_i^n + \frac{1}{2}\Delta t^2\ddot{x}_i^n + \beta\Delta t^2(\ddot{x}_i^{n+1} - \ddot{x}_i^n) \quad (4)$$

ただし、 Δt は計算時間間隔、応答値の上付き、下付きの添字はそれぞれ計算ステップ数、質点を表す。本研究では以下、 $\Delta t = 1/1,000$ 、 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 2.0$ として計算を行う。

2.3 計算誤差による解の補正

Fig.1に示す5自由度非線形モデルにFig.2の加速度を入射した場合の質点1での絶対応答加速度をFig.3に示す。Fig.3を観測波として上記の手法で入力地震動の推定を行った。Fig.4, 5にそれぞれ入射波の推定波形、各質点の応答加速度の厳密解と推定値との誤差の時刻歴分布を示す。

Fig.5より、応答加速度の推定値には全質点にほぼ同値の計算誤差が発生していることが判る。また、計算時間間隔をある程度短く設定すると任意の質点におけるステップ間の相対応答加速度の差は小さく、その応答差も各質点で異なるはずである。これらの理由から式-5の評価関数を最小にする計算誤差 α^{n+1} を求め、式-1から求まる \ddot{x}_i^{n+1} に加えることで高周波ノイズを抑制することが可能になる。

$$J = \sum_i^N \sum_j^N M_{ij}(\ddot{x}_i^{n+1} + \alpha^{n+1} - \ddot{x}_i^n)^2 + \rho \sum_i^N \sum_j^N M_{ij}(\alpha^{n+1})^2 \quad (5)$$

ただし、各質点の応答値の重み係数として質量マトリクスを用いている。ここに、 α の上付きの数字はステップ数、 \ddot{x}_i^n は n ステップにおける相対応答加速度の推定値で式-1, 5の計算値 \ddot{x}_i^n と α^n の和であることを意味し、解の補正を行う前の \ddot{x}_i^n と区別する。また、 ρ は正の定数で誤差値の抑制の程度に関する

重み係数を表し、本研究の解析例では1を採用する。

3. 解析モデルおよび結果

解析手法を検証するために数値解析を実施する。解析は計算誤差による補正がない場合と同様に Fig.1 のモデルで Fig.3 の観測波を基にして入射波の同定を行う。同定された入射波を Fig.6 に示す。

この解析例の場合、0.2秒付近で質点5と基盤との間のバネの応力-ひずみ曲線が初めて折り返す。Fig.4 に示す前述の補正を行わない計算法では、これ以前の入射波の推定は高精度で行えているが、応力-ひずみ曲線の折り返し付近で、高周波ノイズが発生し推定精度を失っている。しかし、計算誤差による補正を行う計算法では、Fig.6 に示すように高周波のノイズは発生するものの、すぐに推定精度が回復し、その他の時刻においては精度良い近似が行えて

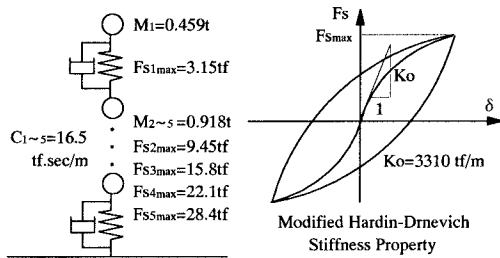


Fig.1 Nonlinear 5DOF Model

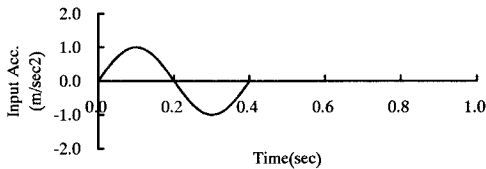


Fig.2 Input Acceleration

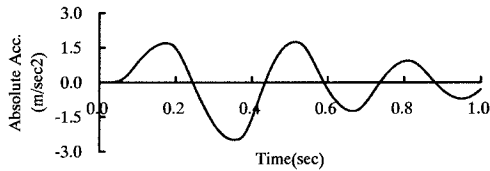


Fig.3 Absolute Response Acceleration (Mass 1)

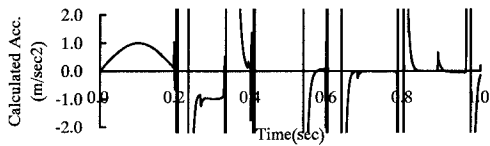


Fig.4 Calculated Input Acceleration (Non-control)

いる。

参考のため、Fig.7 の多自由度線形モデルに Fig.2 の加速度を入射した場合の推定結果を Fig.8, 9 に示す。ただし、Fig.9 のモデルの場合、式-4 の β が 2.0 では推定波形に高周波ノイズがかなり発生するため、 $\beta = 7.0$ で計算を行っている。

参考文献

- 1) 酒井久和・澤田純男・土岐憲三：時間領域における基盤入力地震動の推定，土木学会第50回年次学術講演会概要集，1-B, pp.1284-1285, 1995.9.

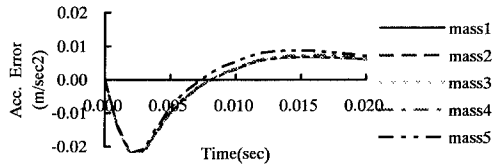


Fig.5 Error of Response Accelerations

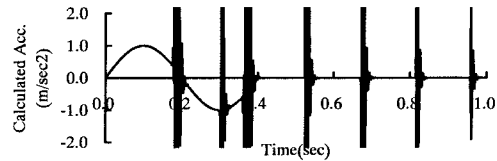


Fig.6 Calculated Input Acceleration (Control)

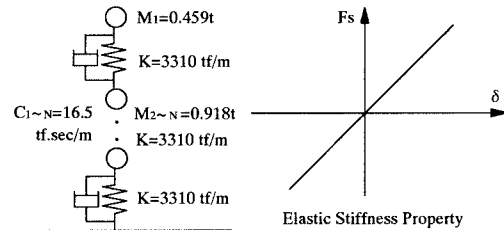


Fig.7 Linear MDOF Model

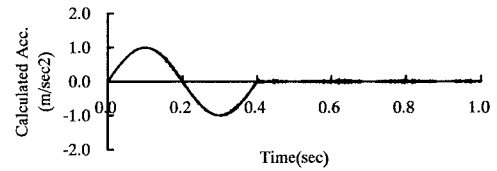


Fig.8 Calculated Input Acceleration (6DOF)

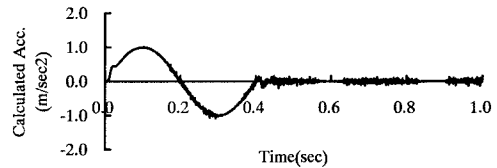


Fig.9 Calculated Input Acceleration (8DOF)