

時間領域における基盤入力地震動の推定

若築建設(株) 正会員 酒井久和
 京都大学 正会員 澤田純男
 京都大学 正会員 土岐憲三

1. はじめに

地表あるいは地盤内における地震観測記録から入力地震動を推定する場合、一般に、プログラム“SHAKE”に代表されるような周波数領域での重複反射理論に基づく方法が採用されている。しかし、周波数領域における解析では地盤の非線形性を等価線形化モデルにより近似するため、地盤の非線形性が強く現れる強震時において入力地震動の高精度の推定は不可能である。そこで、本研究では、運動方程式を時間領域において積分することによって基盤入力地震動の推定を行う手法を考案した。

2. 運動方程式の定式化

復元力が非線形である系の運動方程式は次式で与えられる。

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

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、 $\{i\}$ はその成分が全て1であるベクトル、 $\ddot{z}$ は基盤入力加速度である。また、 $\cdot$ は時間に関する微分を意味する。

いま、ある絶対応答加速度成分 $\ddot{y}_k$ が測定されている場合、 $\ddot{y}_k = \ddot{x}_k + \ddot{z}$ より、式(1)は次式のように書き換えられる。

$$[M']\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} - \{Q\} = -[M]\{i\}\ddot{y}_k \quad (2)$$

ここで、 $[M']$ は次式で与えられる。

$$M'_{ij} = M_{ij} - \sum_{k=1}^N M_{ik} \delta_{jk} \quad (3)$$

ただし、 δ_{jk} はKroneckerのデルタ、 N は自由度の数である。例えば、集中3質点系(質量 m_1 、 m_2 、 m_3)で $\ddot{y}_1$ が観測されている場合には、次のようになる。

$$[M'] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -m_2 & m_2 & 0 \\ -m_3 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

3. 運動方程式の逐次積分方法

本研究では状態方程式を逐次積分する際の時間積分法はNewmarkの β 法を用いた。通常、逐次積分は時

間軸の正の方向に行う。しかし、本手法では、逐次積分を時間軸の負の方向へ行うため、応答ベクトルは $n+1$ ステップ目が既知で、 n ステップ目が未知となる。そこで、通常のNewmarkの β 法の加速度、速度、変位間の関係式を n ステップ目の速度、変位ベクトルについて書き直すと次式ようになる。

$$\{\dot{x}\}_n = \{\dot{x}\}_{n+1} - (1-\gamma)\Delta t\{\ddot{x}\}_n - \gamma\Delta t\{\ddot{x}\}_{n+1} \quad (4)$$

$$\{x\}_n = \{x\}_{n+1} - \Delta t\{\dot{x}\}_{n+1} + \left(\frac{1}{2} - \gamma + \beta\right)\Delta t^2\{\ddot{x}\}_n + (\gamma - \beta)\Delta t^2\{\ddot{x}\}_{n+1} \quad (5)$$

ただし、 Δt は計算時間間隔、各ベクトル下付きの添字は計算ステップ数で Δt との積は時刻を表す。

上式を n ステップ目における式(2)に代入し、未知ベクトル $\{\ddot{x}\}_n$ を求め、これを式(4)、(5)に代入し、 n ステップ目の応答ベクトルを確定する。以降、同様の方法で逐次計算を行う。

4. 解析モデルおよび結果

解析は式(4)、(5)の γ 、 β をパラメータ化して行った。4種類の解析モデル、復元力特性、入射波質点(3自由度線形モデルでは最上部)の観測波、逆解析により求められた入射波の推定波形をFig. 1からFig. 4に示す。

5. 考察

Fig. 1からFig. 4より、本逆解析手法はパラメータ $\gamma=0$ 、 $\beta=1/2$ or $1/4$ の場合に解の安定性が良いことが判る。また、非減衰線形モデルに対しては、1自由度(Fig. 1.5)の場合は高精度に、3自由度に不規則波(E1 Centro-NS)を入射した場合(Fig. 2.5)でも、高周波成分が多少混入しているが精度良く推定できる。しかし、その他のモデルに対しては入射波の概形は推定できているものの、減衰を有する系(Fig. 3.5)では計算誤差が時間軸の負の方向に増幅し、非線形モデル(Fig. 4.5)では剛性変化時点に高周波のノイズが発生している。

今後、この手法を基に実用的な逆解析手法を確立したいと考える。

