

拡張カルマンフィルターによる成層地盤構造の同定

和歌山工業高等専門学校 正 員 辻原 治

1. はじめに 地表地震動特性は、地表付近の地盤構造の影響を大きく受けるため、地震時の表層地盤震動特性を明らかにすることは震害を予測する上できわめて重要である。本研究では、地盤震動記録から、表層地盤を多質点系でモデル化したときの系定数を、拡張カルマンフィルターのアルゴリズム¹⁾により同定した。

2. 拡張カルマンフィルターによる線形多自由度系の系定数の同定

図-1に示すせん断型線形多自由度系において、質点*i*の変位、速度をそれぞれ d_i 、 v_i とすれば、質点*i*の運動方程式は次式で表される。

$$\dot{d}_i = v_i \quad (1)$$

$$\ddot{v}_i = [-m_i \ddot{\phi} - \{ -c_i v_{i-1} + (c_i + c_{i+1}) v_i - c_{i+1} v_{i+1} \} - \{ k_i d_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) d_i - k_{i+1} d_{i+1} \}] / m_i \quad (2)$$

ただし、 m 、 c 、 k はそれぞれ質点の質量、質点間の減衰係数およびばね定数である。また、 $\ddot{\phi}$ は入力加速度である。状態変数として、変位、速度と、同定すべき減衰係数およびばね定数を選べば（質点の質量および入力加速度は既知とする）、状態方程式は式(3)で表される。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{cases} = \begin{cases} x_2 \\ f(\mathbf{m}, \ddot{\phi}, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{x}_4) \\ 0 \\ 0 \end{cases} \quad \{y\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \{x\} + \{w\} \quad (3) \quad (4)$$

ただし、 $\mathbf{x}_1 = \{d_1, \dots, d_n\}^T$ 、 $\mathbf{x}_2 = \{v_1, \dots, v_n\}^T$ 、 $\mathbf{x}_3 = \{c_1, \dots, c_n\}^T$ 、 $\mathbf{x}_4 = \{k_1, \dots, k_n\}^T$ である。また、観測方程式は、例えば各質点で変位記録が得られているものとすれば、式(4)のようになる。なお、拡張カルマンフィルターアルゴリズムにおける状態予測ルーチンにはルンゲクッタ法を用いた。

3. 表層地盤構造の同定

ここでは、東京大学生産技術研究所千葉実験所構内で得られている地盤震動の鉛直アレー観測記録を用いて、当該地盤における地表面下20mまでの構造を推定する。図-2には、地震計の埋設深さと、P S 検層等で予め推定されている地盤構造を示す。地震計は地表より深さ1m, 5m, 10m, 20mに埋設されている²⁾。

解析モデルは図-3に示す5質点系とし、質点1、質点3および質点4での観測波形と入力加速度（GL-20m）が利用可能とした。ただし、質点での観測波形は、GL-20mに対する相対速度波形とし、記録を積分して求めた。

表-1には解析に用いた地震記録の諸元を示す。ここで用いた地震観測記録は、GL-20mにおける最大加速度が10gal以下と比較的小さなものである。次に解析結果を示す。図-4には、紙面の関係で、SE1の記録を用いた場

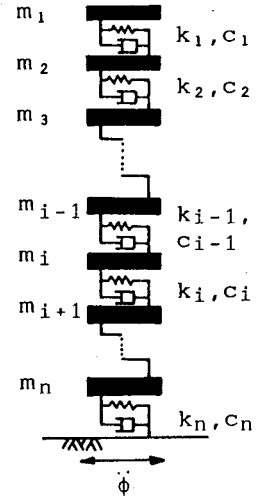


図-1 多質点系モデル

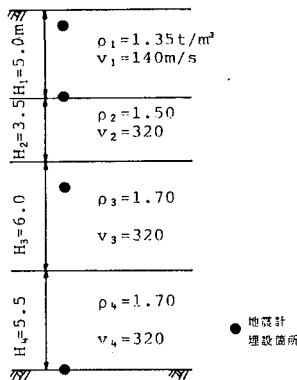


図-2 地震計埋設箇所

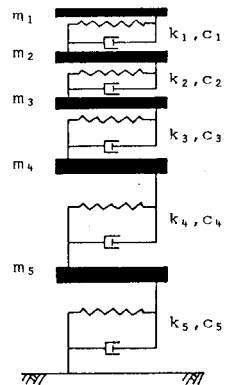


図-3 解析モデル

合のみ、観測波形と同定されたモデルの速度応答波形を示す。両波形には一部振幅に違いがみられるが、モデルの応答波形は記録波形をかなり良く再現していると思われる。表-2には、モデルの系定数の初期値と各観測記録から得られた推定値、さらに比較のためPS検層等の結果²⁾から式(5)により求めたばね定数の値を示す。

$$k_i = \rho_i v_i^2 / H_i g \quad (5) \quad ; i=1, 2, \dots, 5 \quad ; g \text{は重力加速度}$$

ばね定数については、使用した記録によらず近似した推定値が得られており、PS検層から求めた値にもよく対応している。一方、減衰係数については、使用記録によって推定値は異なっており、地盤を連続体としてモデル化したときの周波数領域でのQ値同定の場合³⁾と同様、拡張カルマンフィルターを用いた時間領域の解析でも、減衰項を精度良く推定することができなかった。この理由の一つとして、粘性減衰を仮定した解析モデルを用いたことによる実現象との相違が考えられる。

4. おわりに 鉛直アレー観測記録を用いて、表層地盤を多質点系で置換したときの系定数を拡張カルマンフィルターにより同定した。その結果、系の剛性については信頼できる推定値が

表-1 観測地震の諸元

地震名	マグニチュード	震源深さ [km]	震央距離 [km]
SE1	7.3	388	374
SE2	5.0	79	57
SE3	6.8	415	635

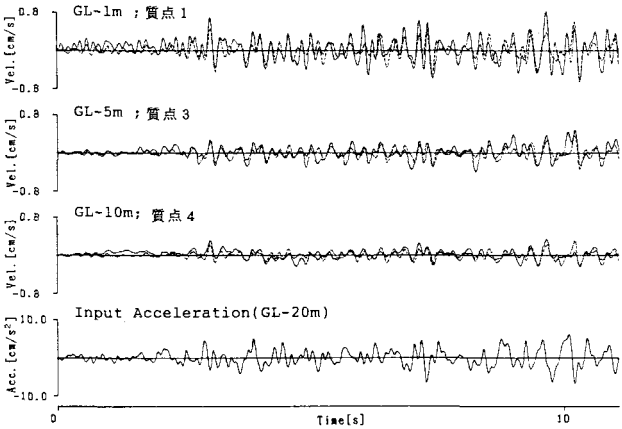


図-4 記録波形(実線)とモデル応答波形(破線)の比較

表-2 同定結果

初 期 値		同 定 結 果								PS検層等 からの 推定値
		SE 1		SE 2		SE 3				
i	m_i [kg・ s ² /cm]	k_i [kg/cm]	c_i [kg・s/cm]	k_i [kg/cm]	c_i [kg・s/cm]	k_i [kg/cm]	c_i [kg・s/cm]	k_i [kg/cm]	c_i [kg・s/cm]	k_i [kg/cm]
1	1.7	9000	20	12179	85	10389	98	10686	78	10800
2	3.4	9000	20	9538	60	10828	62	10927	150	10800
3	4.4	40000	100	41297	192	41634	141	42238	167	44781
4	7.9	25000	100	30645	299	30361	228	30630	373	29605
5	10.0	25000	100	34105	325	31989	315	31683	515	32296

得られたが、減衰項の推定はうまくいかなかった。なお、本報告で示した3観測記録の他に、同観測地点で得られているいくつかの記録を用いて同様の解析を行ったところ、減衰係数が負の値になるなど解が発散してしまうケースもあった。

謝辞 東京大学生産技術研究所・片山恒雄教授ならびに京都大学工学部・杉戸真太助手には地震観測記録を提供していただいた。また、徳島大学工学部・沢田勉助教授には研究を進めるにあたり終始ご指導をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) Jazwinski, A. H.; Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic press, 1970
2) 佐藤・片山; 地震動と地盤ひずみの観測, 生研研究35巻, 9号, 1983
3) 辻原; 地震時地盤の振動特性値の推定に関する一考察, 土木学会第44回年次学術講演会概要集, 1989