

I - B 80 観測値を用いた地震動の時空間構造の実時間同定

中部電力（株） 正会員 横洲弘武  
 京都大学防災研究所 正会員 佐藤忠信

**1.概要**

大地震の発生時には対応策をとるために当該地震の状況を早急に把握することが要求される。そのためにも地震発生と同時にリアルタイムで任意地点における地震動を推定できることが望まれている。こうした点を考慮し、本研究では広大なエリア内における限られた観測地震記録から場を規定する相互相関関数を算出し、未観測点における地震動の推定を試みる。また再現される地震動の精度を向上させるため、初期に与えられる時空間場を観測値を用いて実時間で修正する手法を提案する。

**2.逐次型地震動の推定理論**

対象領域内における時空間場が与えられるとその領域内での任意地点における地震動を推定することは可能である。ここでは地震動の定常性を仮定しており、地震動を多次元自己回帰過程で、時空間場を離散化された状態方程式の形で表現する。そしてカルマンフィルタのアルゴリズムを用いることにより未観測点における地震動を現時刻以前の時刻歴の線形和により逐次推定するものである。カルマンフィルタを用いる際、地震動を逐次に推定するために必要な自己回帰係数は場を規定する相互相関関数から確定的に与えられる。またこの手法では、観測点で観測された現時刻以前の時刻歴から未観測点における地震動を逐次的に推定することができる。

**3.正準変量解析法 (Canonical Variate Analysis)**

正準変量解析法は、従来のシステム同定手法とは異なった解析順序を行う所に特徴がある。従来法はまず入出力データからその応答の伝達関数モデルを求める手法であり、対象物に対し運動方程式等の自然科学法則等を当てはめることによりモデルを決定した後外乱に対する応答値や系を支配するパラメータなどの状態量を推定するものである。言い換えると解析を行う前にモデルの設定が不可欠である。それに対し正準変量解析法は最初に与えられる入出力データから状態量を直接決定できる手法でありモデルの設定などによる応答値の制約などの影響をうけない手法である。この手法は赤池の確率実現の理論に応用された後、予測モデルやモデルの低次元化などの様々な問題に応用されている。ここではそのうち Larimore によって確立された応用結果をもとに同定問題を CVA の立場から考慮し、推定を行う。以下に同定手法について簡単に述べる。

まずあらかじめ与えられている過去、未来の情報を表す2つの時系列  $p(t), f(t)$  についてこれらの共分散行列の推定値を計算式 (1) のようにおく。 $\hat{\Sigma}_p, \hat{\Sigma}_f$  の固有値、固有ベクトルを用いて式 (2) の SVD を計算する。そして式 (3) のようにおくと、メモリー関数が式 (4) のように表せる。このメモリー関数は未来を予測するために必要なデータを宿約したものであり、時刻  $t$  における状態量を表す。これをシステムの状態方程式に当てはめて LS 法を用いると伝達関数モデルを求めることができる。

$$\hat{\Sigma}_{pp} = 1/N \sum_t p(t)p^T(t), \hat{\Sigma}_{ff} = 1/N \sum_t f(t)f^T(t),$$

$$\hat{\Sigma}_p = 1/N \sum_t f(t)p^T(t), \hat{\Sigma}_f = 1/N \sum_t p(t)f^T(t) \quad (1)$$

$$\hat{\Sigma}_{pp}^{-1/2} \hat{\Sigma}_{ff} \hat{\Sigma}_{pp}^{-1/2} = USV^T \quad (2)$$

$$\xi = U \hat{\Sigma}_{pp}^{-1/2}, \zeta = U \hat{\Sigma}_{ff}^{-1/2} \quad (3)$$

$$\mu(t) = x(t) = [I_n \quad 0] \xi p(t) \quad (4)$$

特異値分解法、カルマンフィルター、相互相関関数

京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 地震災害研究部門耐震基礎分野 0774-38-4071

4.時空間場の修正

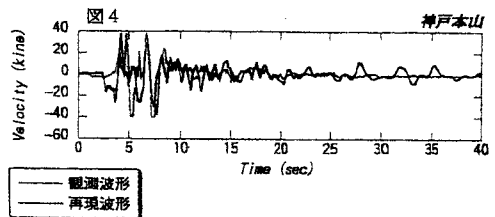
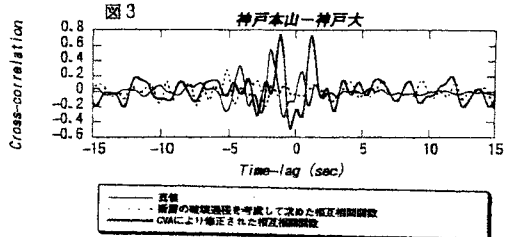
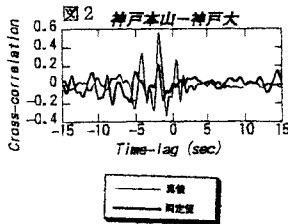
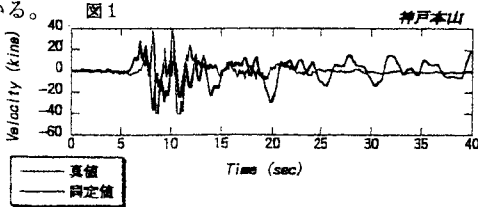
初期に与えられる相互相関関数を  $\rho'(t)$  として、これを観測値を用いることにより修正することを考える。観測値から与えられる相互相関関数の真値を  $\rho(t)$  とする。そして状態量として式 (5) で示されるように時空間場を用いる。これらの相関性最大化を CVA の理論を用いることにより行う。

$$S_{ij}(t) = \begin{pmatrix} \rho'_{ij}(t) \\ \rho_{ij}(t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

5.解析方法および解析結果

関西地震観測研究協議会で扱っている観測地点の中から 10 地点選び、この内部を対象領域とする。地震動は兵庫県南部地震の速度観測記録 (N-S) を用い時間刻みは 0.01 秒とする。まず地震発生時に未観測点における地震動の時刻歴波形の推定を行い再現波形と観測から与えられる真の地震動の比較を行う。未観測点としてここでは神戸本山を用いるが、観測条件の違いにより推定波形の精度が異なると予想される。そこで再現性の変化を調べるため、ここでは観測点の数が 9 点の場合と 3 点の場合の 2 ケースを考える。ただし観測点としては未観測点から近傍の地点を用い、地震動推定の際に必要な初期の時空間場は断層の破壊過程を考慮して与えることにする。さらに再現波形の精度を向上させるため初期の時空間場を観測値を用い、CVA の理論を適用させることにより修正を試みる。そして修正後の時空間場から再現される地震動と修正前の地震動のそれぞれに対して観測波形との比較を行い本修正アルゴリズムの有効性を検証する。ただしここでは CVA の計算に必要な共分散のウィンドウ幅として 100 という値を用いた。

図 1 に逐次型地震動を用いて再現された神戸本山における地震動 (3 点観測) を示す。またその時の観測 - 未観測点間の相互相関関数 (3 点観測) を図 2 に示す。図 1 を見ると波形の一致は見られず、図 2 に示されるように観測 - 未観測点間において時空間場の歪みが生じていることが原因といえる。次に CVA の理論を用いて図 2 に示す相互相関関数の修正を行った。それを図 3 に示す。この図を見ると観測波形により時空間場が改善されているのが確認できる。最後に修正された時空間場を用いて再現された時刻歴波形が図 4 である。図 1 と図 4 の比較からも分かるように地震動の再現性が向上しており本手法の有効性が示されている。



6.結論

以上から、断層の破壊過程を考慮することにより広がりをもつ平面内に時空間場を与えることができ、またそれを用いて未観測点における地震動をリアルタイムで逐次的に与えることができた。また観測値を用いることにより初期に仮想的に与えられる時空間場の修正を行うことができた。しかし地震動の再現性は全体的に見て悪く、この原因としては簡単な震源断層モデルにより与えられた初期の時空間場に問題があると考えられる。今後の課題としては初期の時空間場を新たに算出する手法の開発および共分散マトリックスのウィンドウ幅の縮小化などがあげられる。