

# 位相特性に着目した断層近傍地震動の内挿法

京都大学工学研究科 学生員 ○川西智浩  
 京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信  
 (財)鉄道総合技術研究所 正員 室野剛隆

## 1. はじめに

地震時の被害を最小限に食い止めるためのシステムの開発には、限りある観測記録から観測が行われていない地点における地震動の推定が不可欠である。ここでは、台湾集集地震(1999)の観測波形の群遅延時間を用いて未観測点の群遅延時間を内挿し、内挿された群遅延時間に基づいて未観測点の地震動を合成する方法について述べるとともに、例題によってその精度を検証する。

## 2. 位相特性のモデル化

時々刻々周期特性が変化する時系列  $f(t)$  の特性を捉えるのに、ウェーブレット変換<sup>1)</sup>がよく用いられる。台湾集集地震における観測記録  $f(t)$  をウェーブレット変換したとき、 $j$  次の成分波  $f_j(t)$  における群遅延時間の平均値  $\mu_{tgr}^{(j)}$  および標準偏差  $\sigma_{tgr}^{(j)}$  は、以下の回帰式によりモデル化される<sup>2)</sup>。

$$\mu_{tgr}^{(j)} = \alpha_1^{(j)} \times R^{\beta_1^{(j)}} \times \left(\frac{\xi}{L}\right)^{\gamma_1^{(j)}} \times \left(\frac{L-\xi}{L}\right)^{\kappa_1^{(j)}}, \quad \sigma_{tgr}^{(j)} = \alpha_2^{(j)} \times R^{\beta_2^{(j)}} \times \left(\frac{\xi}{L}\right)^{\gamma_2^{(j)}} \times \left(\frac{L-\xi}{L}\right)^{\kappa_2^{(j)}} \dots (1)$$

ここで、 $R$  は震央距離、 $\xi$  はディレクティブティーを表す距離、 $L$  は断層長さであり、また  $\alpha^{(j)}$ 、 $\beta^{(j)}$ 、 $\gamma^{(j)}$ 、 $\kappa^{(j)}$  は、 $j$  次の回帰係数である。同様に、地震動のパワー  $\lambda_j$  も以下の回帰式によりモデル化される<sup>2)</sup>。

$$\log \lambda^{(j)} = \alpha_3^{(j)} + \beta_3^{(j)}(D_s - R) - \log(D_s - R) \dots (2)$$

ここで、 $D_s$  は断層までの最短距離を表す。

## 3. 地震動の群遅延時間に関する空間相関の定義

観測点  $X_p$  (震央距離  $R_p$ , ディレクティブティーを表す距離  $\xi_p$ ) における、 $j$  次の地震波  $f_j(t)$  の群遅延時間の平均値  $\mu_{tgr}^{(j)}$  と標準偏差  $\sigma_{tgr}^{(j)}$  は式(1)で与えられるので、この値を観測点  $X_p$  における角振動数  $\omega_s$  での群遅延時間の平均値および群遅延時間として用いる。

$$\mu_{tgr}^{(j)}(X_p, \omega_s) = \mu_{tgr}^{(j)}(R_p, \xi_p), \quad \sigma_{tgr}^{(j)}(X_p, \omega_s) = \sigma_{tgr}^{(j)}(R_p, \xi_p) \dots (3)$$

次に、群遅延時間の空間相関を表すために、任意の2地点  $X_p$ 、 $X_q$  の共分散を以下のように定義する。

$$M_{pq}^{(j)} = \sigma_{tgr}^{(j)}(X_p, \omega_s) \sigma_{tgr}^{(j)}(X_q, \omega_s) \exp(-\eta_{pq}^{(j)} \cdot \Delta_{pq}) \dots (4)$$

ここで  $\eta_{pq}^{(j)}$  は2点間の相関の強度を表すパラメータであり、経験的に決められる定数である。また  $\Delta_{pq}$  は2地点  $X_p$ 、 $X_q$  間の距離を表す。

## 4. 未観測点の地震動予測

観測点と非観測点の合計が  $n$  点からなる系を考える。 $j$  次の群遅延時間から構成される  $n$  次のベクトルは次式のように表される。

$$Z^{(j)} = \{t_{gr}^{(j)}(X_1, \omega_s), t_{gr}^{(j)}(X_2, \omega_s), \dots, t_{gr}^{(j)}(X_n, \omega_s)\}^T \dots (5)$$

ここで  $t_{gr}^{(j)}(X_p, \omega_s)$  はある地点  $X_p$  における、角振動数  $\omega_s$  での群遅延時間を示している。 $Z^{(j)}$  の平均行列  $\bar{Z}^{(j)}$  と共分散行列  $M^{(j)}$  は次式のように表される。

$$\bar{Z}^{(j)} = \{\mu_{tgr}^{(j)}(X_1, \omega_s), \mu_{tgr}^{(j)}(X_2, \omega_s), \dots, \mu_{tgr}^{(j)}(X_n, \omega_s)\}^T, \quad M^{(j)} = [M_{pq}^{(j)}(X_p, X_q, \omega_s)] \dots (6)$$

いま、観測されている地震動記録の総数が  $l$  ( $l < n$ ) であるとする。このとき、 $j$  次の群遅延時間からなる観測ベクトル  $y^{(j)}$  は  $l$  個のデータを用いて、次式で定義される。

$$y^{(j)} = \{t_{gr}^{(j)}(X_1, \omega_s), t_{gr}^{(j)}(X_2, \omega_s), \dots, t_{gr}^{(j)}(X_l, \omega_s)\}^T \dots (7)$$

キーワード: ウェーブレット変換、位相スペクトル、群遅延時間、地震動合成  
 連絡先: 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 Tel 0774-38-4069/ Fax 0774-38-4070

式 (5) と式 (7) より、次の観測方程式が成立する。

$$y^{(j)} = HZ^{(j)} \quad H = [I \ 0] \dots\dots\dots (8)$$

群遅延時間の最確値を決定するために、本研究ではカルマンフィルターを用いる。最確値  $\hat{Z}^{(j)}$  とその共分散行列  $\hat{M}^{(j)}$  は、式 (6) から次式のように表される。

$$\hat{Z}^{(j)} = \bar{Z}^{(j)} + K^{(j)}(y^{(j)} - H\bar{Z}^{(j)}), \quad \hat{M}^{(j)} = M^{(j)} - K^{(j)}HM^{(j)} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $K^{(j)}$  は角振動数  $\omega_s$  でのカルマンゲインであり、

$$K^{(j)} = M^{(j)}H(HM^{(j)}H^T)^{-1} \dots\dots\dots (10)$$

と定義できる。行列  $M^{(j)}$  を観測点と未観測点の部分に分けると、

$$M^{(j)} = \begin{bmatrix} M_{l,l}^{(j)} & M_{l,n-l}^{(j)} \\ M_{n-l,l}^{(j)} & M_{n-l,n-l}^{(j)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

となる。式 (8) で与えられた  $H$  と式 (11) を式 (9) と式 (10) に代入すると、 $K^{(j)}$ 、 $\hat{M}^{(j)}$  はそれぞれ

$$K^{(j)} = \begin{bmatrix} I \\ (M_{l,n-l}^{(j)})^T(M_{l,l}^{(j)})^{-1} \end{bmatrix}, \quad \hat{M}^{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M_{n-l,n-l}^{(j)} - (M_{l,n-l}^{(j)})^T(M_{l,l}^{(j)})^{-1}M_{l,n-l}^{(j)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

となる。式 (12) を式 (9) に代入すると、群遅延時間の最確値は次式で表される。

$$\hat{Z}^{(j)} = \begin{Bmatrix} \hat{Z}_l^{(j)} \\ \hat{Z}_{n-l}^{(j)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} y^{(j)} \\ \bar{Z}_{n-l}^{(j)} + (M_{l,n-l}^{(j)})^T(M_{l,l}^{(j)})^{-1}(y^{(j)} - H\bar{Z}_l^{(j)}) \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

式 (13) で与えられる群遅延時間の最確値に誤差のサンプルを加えることにより、未観測点での群遅延時間のサンプルが決まるので、離散的な  $m(m > 2^j - 1)$  個の振動数において、式 (5) から式 (13) までの計算を行って未観測点における群遅延時間のサンプルを  $m$  個決め、これを積分すると位相スペクトルを求めることができる。地震動のパワーを式 (2) によって与えると、位相スペクトルから地震動を合成することができる<sup>3)</sup>。

一例として、図-1 における 4 地点 (●) の観測記録を用いて CHY029 地点 (▲) の地震動を内挿した波形を、CHY029 地点の観測波とともに図-2 に示す。さらに、それぞれの波形の加速度応答スペクトルを図-3 に示す。未観測点から遠い CHY080 地点の波形を用いた場合 (CASE3) よりも、未観測点に近い観測点の波形のみを用いた場合 (CASE1,2) の方が観測波の特性をより良く捉えている。

参考文献

- 1) 佐々木文夫・前田達哉・山田道夫: ウェーブレット変換を用いた時系列データの解析, 構造工学論文集, Vol.38B, pp9-20, 1992.
- 2) 佐藤忠信・室野剛隆・西村昭彦: 観測波を用いた地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, No.640/I-50, pp.119-130, 2000.
- 3) 佐藤忠信・室野剛隆: 地震動の位相情報のみを用いた地震動のシミュレーション, 土木学会論文集, No.675/I-55, 2001.

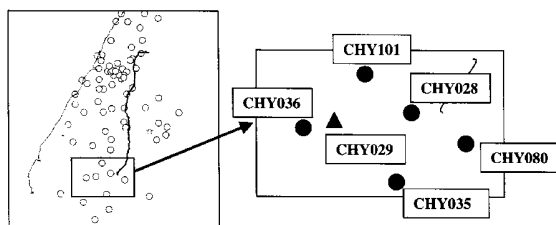


図-1 観測点と CHY029 地点の位置関係

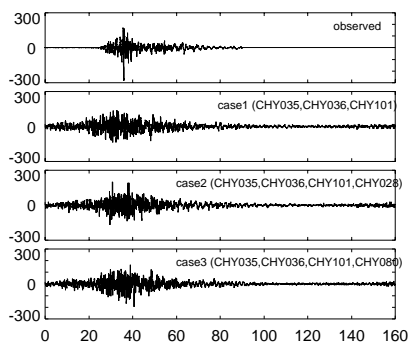


図-2 CHY029 地点のシミュレーション波

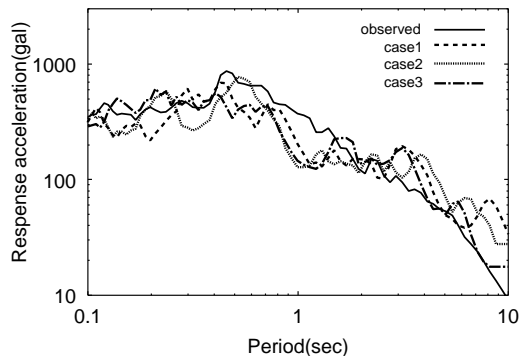


図-3 加速度応答スペクトルの比較 (減衰定数 5%)