

位相特性に着目した地震動の内挿法

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

ウェーブレット変換と群遅延時間の概念を用いて、地震動を合成する方法を提案する。本報告ではまず、位相スペクトルから地震動を合成する方法を示す。次に、観測点の群遅延時間から未観測点の群遅延時間を内挿し、これを用いて地震動を合成する方法について述べる。

2. 位相スペクトルから地震動を合成

ある時刻歴波形 $f(t)$ を考える。この波形をウェーブレット変換¹⁾すると、

$$f(t) = \sum_{j=1}^M \sum_{k=0}^{N-1} a_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t), \quad \psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \dots\dots\dots (1)$$

と表せる。ここに、 $N = 2^j$ である。 $\psi(t)$ はアナライジングウェーブレットであり、その構成法として、Meyer²⁾ によるものを用いた。時刻歴波形の j 次成分 $f_j(t)$ のみを対象とすると、次式のようになる。

$$f_j(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t) \dots\dots\dots (2)$$

ここでは、位相特性が与えられるとき、その情報から波形を合成する方法を示す。位相スペクトル $\phi_j(\omega)$ が与えられているとき、ウェーブレット係数 $a_{j,k}$ を用いて時刻歴波形の位相スペクトルを表現することにより、次式が得られる。

$$\sum_{k=0}^{N-1} \{\cos(\omega t_{j,k}) \cdot \beta_j(\omega) + \sin(\omega t_{j,k})\} \cdot a_{j,k} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$\beta_j(\omega) = \tan(\phi_j(\omega) + \frac{\omega T}{2^{j+1}}), \quad t_{j,k} = \frac{Tk}{2^j} \dots\dots\dots (4)$$

であり、また T は継続時間である。これを離散的に与えられた m 個の振動数で考え、

$$\gamma_{jk}(\omega_i) = \beta_j(\omega_i) \cdot \cos(\omega_i t_{j,k}) + \sin(\omega_i t_{j,k}) \quad (k = 0, 1, \dots, 2^j - 1, i = 1, 2, \dots, m) \dots\dots\dots (5)$$

とすると、式 (3) は以下のような連立方程式で表される。

$$\begin{bmatrix} \gamma_{j0}(\omega_1) & \gamma_{j1}(\omega_1) & \cdots & \gamma_{jN-1}(\omega_1) \\ \gamma_{j0}(\omega_2) & \gamma_{j1}(\omega_2) & \cdots & \gamma_{jN-1}(\omega_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{j0}(\omega_m) & \gamma_{j1}(\omega_m) & \cdots & \gamma_{jN-1}(\omega_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{j,0} \\ a_{j,1} \\ \vdots \\ a_{j,N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

式 (6) において $a_{j,0} = 1.0$ とおくと、 $a_{j,0}$ に対する $a_{j,k}$ の比 $\bar{a}_{j,k}$ が得られる。

$a_{j,0}$ の値は、パワーの概念を用いて以下の式で決定することができる。

$$a_{j,0} = \lambda_j / \sqrt{2\pi \sum_{k=0}^{N-1} \bar{a}_{j,k}^2} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 λ_j は地震動のパワーの平方根を表す。これにより $a_{j,k}$ が決定され、式 (2) より $f_j(t)$ が求められ、これを各 j についてたしあわせると地震動が合成できる。

ここでは例として、マグニチュードを 8、震央距離を $\Delta = 50(km)$ 、 $\Delta = 100(km)$ 、 $\Delta = 200(km)$ とした場合の地震動を合成する。位相スペクトル $\phi_j(\omega)$ は、佐藤ら³⁾ の回帰式を用いて各 j ごとの群遅延時間の平均 μ_{tgr}^j と標準偏差 σ_{tgr}^j を与え、正規分布 $N(\mu_{tgr}^j, \sigma_{tgr}^j)$ に従う乱数を発生させて決定した $t_{gr}^j(\omega)$ を積分して与え

る。この時に得られる加速度波形を図-1 に示す。震央距離とともに最大距離が低減し、波形の重心的な位置も遅れている。ただし、主要動以外の部分の振幅が比較的大きい傾向がある。

3. 未観測点の地震動予測

観測点においては地震動の群遅延時間が既知となるので、この値とカルマンフィルターを用いた条件付き内挿法⁴⁾を利用すれば、未観測点の群遅延時間を内挿することができる。これを積分して位相スペクトルを求め、式(6)を解くと、未観測点の地震動を内挿することができる。

一例として、図-2 のような場合を考える。(A)~(H)を観測点、(I)を未観測点とする。マグニチュードは8とする。(A)~(D)の観測点の波形を用いて(I)点の波形を内挿した波形と(E)~(H)の観測点の波形を用いて(I)点の波形を内挿した波形を、(I)点を観測点として2.の方法で(I)点の波形を合成した波形とともに図-3 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-4 に示す。未観測点に近い観測点の波形を用いて内挿した合成波の方が観測波の特性をより良く捉えている。

4. おわりに

位相特性を用いて地震動を合成する方法と観測点の波形から未観測点の波形を合成する方法を提案した。今回は未観測点の波形を合成する際に用いる観測点の波形として、回帰式を用いて模擬した地震波を用いたが、今後、実地震波を用いて未観測点の地震動を合成し、その精度を検証する予定である。

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) Meyer,Y.:Orthonormal Wavelets, in Wavelets, Springer, pp.21-27,1989.
- 3) 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.
- 4) Tadanobu Sato,Hirofumi Imabayashi: Real Time Conditional Simulation of Earthquake Ground Motion, Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Vol.1, No.1, pp.27-38, September, 1999.

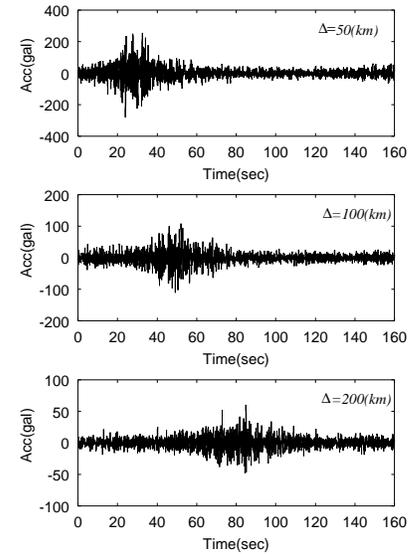


図-1 2.の方法で合成した波形

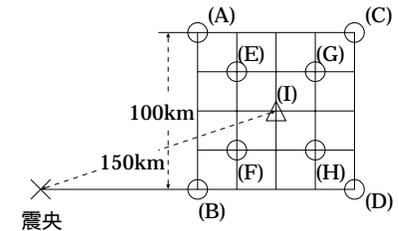
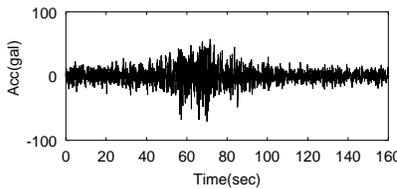
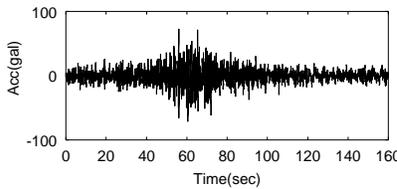


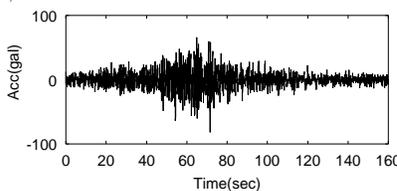
図-2 想定した観測点、未観測点、震央の位置と震央距離



回帰式を用いて合成した地震動



(A)~(D)の4点の波形を用いて合成した地震動



(E)~(H)の4点の波形を用いて合成した地震動

図-3 (I)点のシミュレーション波

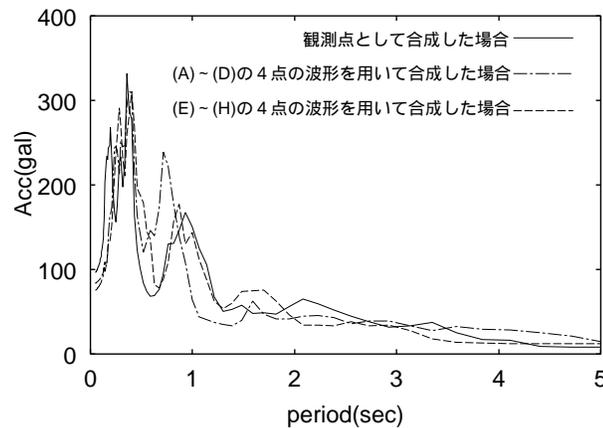


図-4 加速度応答スペクトルの比較 (減衰定数5%)