

I-428 確率波理論を用いた時空間特性を有する非定常地震動のシミュレーション

鳥取大学 正会員 白木 渡・松保重之

鳥取大学 学生員 ○田 浩・西谷高広

1. まえがき 確率論的手法を用いて長大構造物の地震応答解析を行う時、構造物の各支点には、互いに相関を有する不規則地震動入力を作作用させる必要がある。したがって、多地点入力の適切な確率過程をいかにモデル化するかが重要な課題となる。本研究では、地震動の時空間特性を規定する離散的な時空間確率場の共分散マトリックスを分解することにより、定常地震波をシミュレートする手法を展開した。さらに、この手法にtime window 手法¹⁾を適用することにより、現実的な非定常地震波を推定する手法を提案する。そして、数値計算を行い、本手法に基づけば、従来の手法に比較しより少ない標本関数で、しかも、より小さな共分散マトリックスの次元で、所要の地震動をシミュレートできることを示す。

2. 定常地震波の推定 地震波は、波形の変形を考慮した時空間関数と考えられる。離散化された確率場を、図-1に示す。その共分散マトリックスは、式(1)のように定義される。ここに、各要素 C_{ij} は、 i, j 波形の各要素間の相互相関関数を用いて得られたサブマトリックスである²⁾。変形しながら伝播する波動の相互相関関数は、従来の研究³⁾に基づき、一地点で観測されたデータを用いて、式(2)のように想定する。式中、 a_n, b_n : フーリエ係数 ω_n : 角振動数 x_0 : 空間間隔 τ : 時間間隔 c : 見かけ速度 α : 波形の変形定数である。この共分散マトリックスを分解して得られた固有値マトリックス Λ と式(3)を満足する固有ベクトル Φ を使って、地震動 X が式(4)のように得られる。ここに、 Z は相関性を有する不規則関数であり、式(5)で与えられる。ここに、 j : サンプル番号、 N_s : アンサンブルの数、 ω_k と Δt : Z に対する角振動数と間隔、 ψ_k : $0 \sim 2\pi$ の範囲で互いに独立な一様乱数。これらの式に基づき、地震動 $X_s(j)$ が式(6)のように求められる。ここに、 M は式(7)を満足するように定めた定数であり、その結果、アンサンブルの数を減少することができる。なお、 Φ は式(3)を満足するので、式(4)の Z の代わりに観測データを用いて計算すれば、一地点で観測記録を満足する波形が得られる。

3. 非定常地震波の推定 実際の地震波は、非定常確率場であると考えられることができるが、ある小さい時間領域(time windowと呼ばれる)では、その波形を定常過程としてモデル化することができる¹⁾。本研究では、まず、観測加速度記録の相関時間を計算して、この相関時間によって観測記録をいくつかのtime windows に分け、各window内の過程を定常過程としてモデル化した。したがって、非定常地震波形は、その各windowでシミュレートされた定常過程を継ぎ合わせることによって得ることができる。本研究では、式(8)の重み付き線型結合和の関係を用いて、各window $[-n_v, n_v]$ での過程をなめらかに継ぎ合わせる。この時、空間領域では、定常性を保つ様に配慮した。式(8)において、 $X^i(t_j)$ と $X^{i+1}(t_j)$ は、隣接のwindowでの推定値で、 $w(j)$ は重み関数であり、 $w(n_v)=1$ 、 $w(-n_v)=0$ である。

4. 数値計算例および考察 観測波形としては、中国唐山地震の余震(1976年11月15日、 $M=6.9$)として観測された南北方向の加速度波形($A_{max}=145.80$ gal)を使用した⁴⁾。波動のみかけ伝播速度は $c=3000$ m/sec、変形定数は $\alpha=0.2 \times 2\pi$ とし仮定した。シミュレートする時空間確率場(図-1)は、地点間の距離800mで、時間間隔0.02秒とした。あるwindowでシミュレートした定常波形を図-2に示す。同図(a)は原記録波形である、図(b)において $x=0$ の場合は、観測波形と一致した波形である。想定した相互相関関数を図-3に示す。100個の時空間波形の相互相関関数のアンサンブル平均を図-4に示す。この結果から、

$$C_{xx} = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m1} & \dots & C_{mn} \end{bmatrix} \quad (1) \quad \Phi_x^T \Phi_x = I \quad (3)$$

$$X = \Phi_x \cdot Z \quad (4)$$

$$R_{XT}(x_0, \tau) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (a_n^2 + b_n^2) \exp\{-\alpha |\omega_n| |x_0| / (2\pi c)\} \cdot \cos\{\omega_n(\tau - x_0/c)\} \quad (2)$$

$$Z_i(j) = \sqrt{2} \sqrt{\lambda_i} / N_s \sum_{p=1}^{N_s} \cos(\omega_k j \Delta t + \psi_k) \quad (5)$$

($i=1, 2, \dots, mn$), ($j=1, 2, \dots, N_s$), $k=(p-1)mn+i$)

$$X_s(j) \approx \sqrt{2} \sum_{i=1}^M \sum_{p=1}^{N_s} \phi_{si} \sqrt{\frac{\lambda_i}{N_s}} \cos(\omega_k j \Delta t + \psi_k) \quad (6)$$

$$(s=1, 2, \dots, mn), \quad \sqrt{\lambda_M+1} < \sqrt{\lambda_1}, M < mn \quad (7)$$

$$X(t_j) = w(j) X^i(t_j) + (1-w(j)) X^{i+1}(t_j), -n_v \leq j \leq n_v \quad (8)$$

両者が一致していることが確認できる。原記録波形及び推定した非定常波形を図-5に示す。推定した波形の最大値及び発生時刻を原記録のそれと比較すると、より近似を示していることがわかる。これらの自己相関関数とパワースペクトルを求めたものを図-6に示す。

5. あとがき 提案した方法を用いて、一地点の実地震波形からその周辺地域の地震動波形の推定を行った。推定した地震波形の相互相関関数のアンサンブル平均は、想定した相互相関関数にそれぞれ一致していることが分った。また、推定した非定常地震動アンサンブルの内に、あるサンプルの統計特性が原記録とよく一致することを確認した。

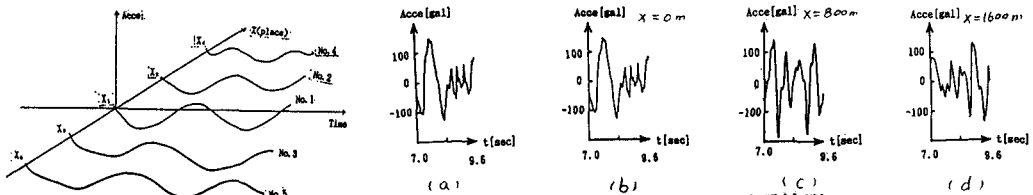


図-2 定常地震波形

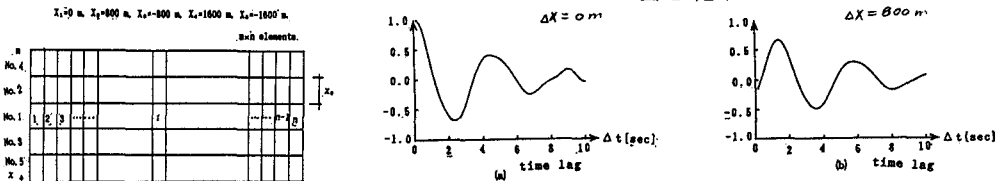
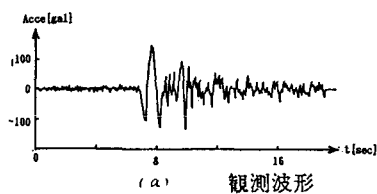


図-3 想定した相互相関関数

図-1 時空間確率場



(a) 観測波形

(b) $X = 800 \text{ m}$

(c) $X = 1600 \text{ m}$

図-5 非定常地震波形

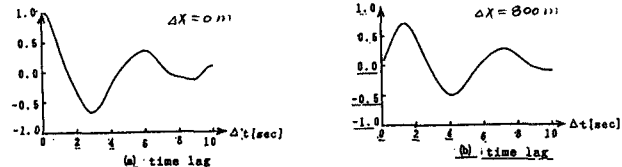
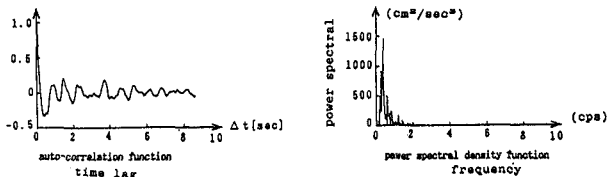


図-4 相互相関関数のアンサンブル平均



(a) 観測記録

(b) 推定した波形

図-6 波形の自己相関関数とパワースペクトル

参考文献: 1) E.H.Vanmark, G.A.Fenton: Conditioned ..., J. Structural Safety. (10), 1991. 2) Yamazaki, Shinozuka: Simulation of ..., J. Eng. Mechanics, Vol. 116, No. 2, 1990. 3) 川上, 小野: 一地点..., 土木学会論文集, No. 441/I-18, 1992. 4) 劉恢先: 唐山大地震震害, 中国地震出版社, 1985.