確率場のシミュレーション手法を用いた地震波形の時空間分布予測

鳥取大学工学部　正会員　白木　渡　松保重之
鳥取大学工学部　学生員○西谷高広　田　浩

1．まえがき　我国においては、地震動に対して、安全な構造物を設計施工することは、大変重要な問題である。近年、盛んに建設されるようになった長大構造物を対象に、確率論的手法を用いて動的地震応答解析，耐震設計を行う場合、入力地震動としては、構造物の各支点に互いに相関を有する地震動が作用する事を考えなければならない。そこで、多点入力の適切な確率過程モデルを作成することが重要となる。

本研究では、地震動を波動の伝播に伴う波形の変形を考慮した時空間の関数として取り扱うために、地震動の空間・時間分布特性を離散的な２次元確率場の共分散マトリックスで表わす。そして、この共分散マトリックスのモーダル分解を用いた確率場のシミュレーション手法[1]を拡張することにより、定常地震波形をシミュレートする手法を展開した。さらに、time window 法[2]を用いて、より現実的な非定常時空間地震波形を推定する手法を提案した。

2．地震動の空間・時間分布特性　確率論的手法を用いて、地震動の空間・時間分布特性を表わすのに、以下の２つの条件を満足するものと仮定した[3]。

1)時空間地震動の時間に関する自己相関関数は、観測波形の自己相関関数に一致する。
2)時空間地震動の相互相関関数は、観測波形の自己相関関数と、従来の研究に基づく地震動のみかけの伝播速度，波形の変形の程度とから想定する。

以上の仮定条件を用い、時空間波形の確率特性を想定すると、相互相関関数は、式(1) となる[1]。

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

ここで、a_n, b_n：観測波形をフーリエ展開したフーリエ係数 ；ω_n：角振動数 ；x_0：空間間隔 ；τ：時間間隔 ；c：みかけの伝播速度 ；α：波形の変形定数

3．定常地震波形の推定　地震波形は、波形の変形を考慮した時空間関数として考えられる。時間・空間座標系において、定常・一様で、平均値０の時空間波形を、互いに相関を有する m·n個の一様なガウスランダム変数の集合として、$X=\{X_1X_2\cdots X_i\cdots X_{m\cdot n}\}^T$, $i=(l-1)\cdot n+k$, (l=1,··,m:空間位置，k=1,··,n: 時間位置）と表わし、図－１に示す。その共分散マトリックスは、式(2) のように定義される[1]。

$$C=E[\{X-E[X]\}\cdot\{X-E[X]\}^T] \qquad (2)$$

ここで、各要素C_{ij}は，X_i とX_j の時間間隔と空間間隔より、式(1) で与えられる。この共分散マトリックスを式(3) により、モーダル分解して得られた固有値マトリックスΛと固有ベクトルΦを使って、Xは、式(4) で与えられる。

$$C\cdot\Phi=\Phi\cdot\Lambda \quad , \quad \Phi^T\cdot\Phi=I \qquad (3)$$

$$X=\Phi\cdot Z \qquad (4)$$

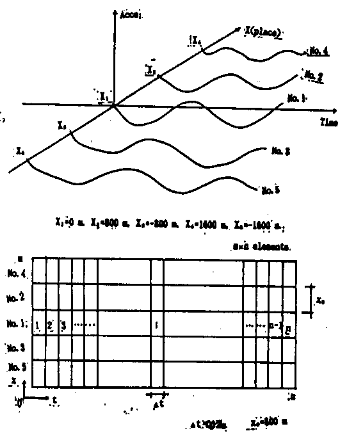


図-1　時空間確率場

ここで、Zは、共分散マトリックスとして、Λを持つ平均値０の互いに独立なガウスランダム変数の集合である。以上の様に、ベクトルZを発生させる事により、定常時空間地震波形を推定する事ができる。

4．非定常地震波形の推定　実際の地震波形は、非定常確率過程として、取り扱う場合が多いが、ある小さい時間領域(time window) 内では、定常と仮定する事ができる[2]。本研究では、まず観測波形の相関時間を計算し、この相関時間によって観測波形を幾つかのtime windowsに分け、各window内では定常である

と仮定する。そして、2．で提案した手法を用いて、各windowでの定常波形を得る事ができる。これらの各windowで得られた波形を用いて、各windowの結合点近傍$[-n_v, n_v]$の領域で、式(5) を用いることにより、隣接する２つのwindowの波形を結合することができる。

$$X(t_j)=w(j)X^{i}(t_j)+\{1-w(j)\}X^{i+1}(t_j) \quad , \quad (-n_v \leqq j \leqq n_v) \qquad (5)$$

ここで、X^{i} とX^{i+1} は、隣接するwindowで得られた定常波形で、w(j)は、重み関数であり、$w(n_v)=1$, $w(-n_v)=0$となる。以上のことより、非定常地震波形の推定を行う事ができる。

5．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)で観測された南北方向に伝播する地震加速度波形(図－２)を用いた。また、みかけの伝播速度をC=3000m/s, 変形定数を$\alpha=0.2\times2\pi$とした場合を想定した。シミュレートする時空間確率場(図-1)は、空間間隔が800m, 時間間隔が0.02秒である。以上の条件を用いて、シミュレーションを行いその結果として、想定した相互相関関数を図－３に、 100回シミュレートした時空間地震波形の相互相関関数の平均を図－４に示す。また、あるwindowで推定した定常時空間地震波形の１つのサンプルを図－５に示し、図－５の波形を用いて得られた、非定常時空間地震波形を。図－６に示す。

図-2　観測波形

以上の事から、本研究で提案した方法を用いて、推定した時空間地震波形から得られた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一致する。推定した地震波形の１つのサンプルの確率特性は、想定したものに、うまく近似できている事が、確認できた。これは、地震波形を離散的な時空間確率場と仮定したことによる性質である。また、推定した波形の最大値及び、発生時刻を観測波形と比較することにより、近似的にではあるが、実波形のそれと相等することがわかった。

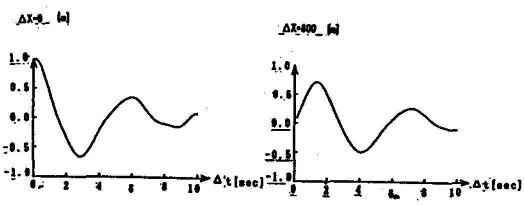


図-3　想定した相互相関間数

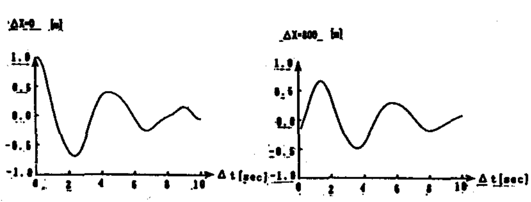
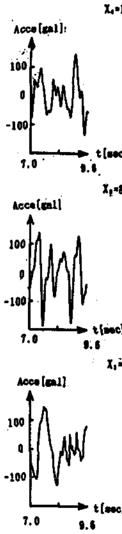


図-4　相互相関間数のアンサンブル平均



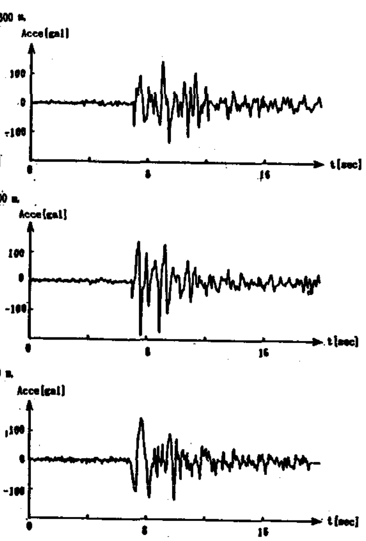


図-5　定常地震波形　　図-6　非定常地震波形

参考文献　1)F.Yamazaki,M.Shinozuka:Simulation of Stochastic Field by Statistical Preconditioning ,J.Engi.Mechanics,Vol.116,No.2,1990 2)E.H.Vanmaruku,G.A.Fenton:Conditined Simulation of Local Fields of eathquake Ground Motion,J.Structure Safety.(10),1991 3)川上,小野:一地点での観測記録を用いた時空間地震波形のシミュレーション,土木学会論文集,No.441/I-18,1987.10.