第I部門　　　　　　　　非均質確率場における地震動の条件付シミュレーション

京都大学防災研究所　正　員　土岐憲三
京都大学防災研究所　正　員　佐藤忠信
山口大学工学部　　　正　員　清野純史
京都大学大学院　　　学生員　○今林浩史

1. 概説　ガス、水道管等の地中管路、トンネル、パイプラインのようにその展開距離が地震波の波長に比して長い構造物では、これら構造物各部への入力地震動は異なってくる場合が生ずる。特に不整形な地盤ではその影響は無視できない。本研究では、空間的に非定常な複数の波形が得られた場合、それらの波形をもとにして観測点においては観測波形と一致する時空間波形のシミュレーション手法を提案する。

2. 推定誤差分散最小規範に基づく時空間波形推定法　ここでは、クリッギング手法を時空間波形を推定する問題に適用する。時空間波形を位置 d と時刻 t の2次元空間に分布する物理量とする。時空間上の位置ベクトルを $\mathbf{x}$ とし、クリッギングにおいて内挿を行う標本場 $Z(\mathbf{x})$ が、確定値として与えられるトレンド成分 $m(\mathbf{x})$ とランダム成分 $W(\mathbf{x})$ の線形和として表現できると仮定する[1),2)]。

$$Z(\mathbf{x}) = m(\mathbf{x}) + W(\mathbf{x}) \tag{1}$$

$\mathbf{x}_\alpha : \alpha = \{1, 2, \cdots, n_\alpha\}$ は確率過程 $Z_\alpha(\mathbf{x}_\alpha)$ が既知測定量となる地点からなり、それに対して $\mathbf{x}_\beta : \beta = \{1, 2, \cdots, n_\beta\}$ は $Z_\beta(\mathbf{x}_\beta)$ が未知の地点からなる。推定量 $\hat{Z}_\beta(\mathbf{x}_\beta)$ は標本値 $Z_\alpha(\mathbf{x}_\alpha)$ の線形和として次のように表されると仮定する。

$$\hat{Z}_\beta(\mathbf{x}_\beta) = \sum_{\alpha=1}^{n_\alpha} \lambda_{\alpha\beta} Z_\alpha(\mathbf{x}_\alpha) = \{Z_\alpha\}^T\{\lambda\} \tag{2}$$

推定量 $\hat{Z}_\beta(\mathbf{x}_\beta)$ の不偏性

$$\sum_{\alpha=1}^{n_\alpha} \lambda_{\alpha\beta} = 1 \tag{3}$$

$$m(\mathbf{x}_\beta) = \sum_{\alpha=1}^{n_\alpha} \lambda_{\alpha\beta} m(\mathbf{x}_\alpha) \tag{4}$$

と推定誤差分散

$$\sigma_E^2(\mathbf{x}_\beta) = E[\{Z_\beta(\mathbf{x}_\beta) - \hat{Z}_\beta(\mathbf{x}_\beta)\}^2] \tag{5}$$

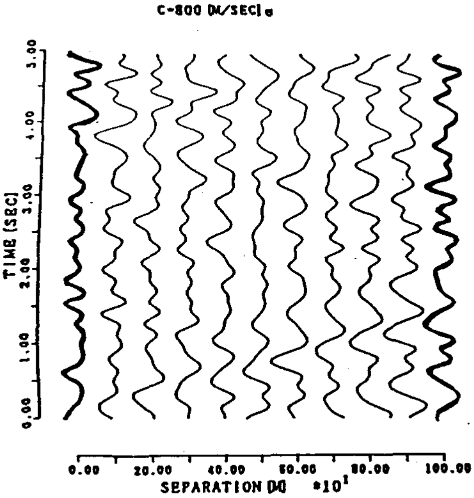

図1　クリッギングにより求められた波形

が最小となる、2つの条件を満たすように重み係数 $\lambda_{\alpha\beta}$ を決定し、未知点の推定量 $\hat{Z}_\beta(\mathbf{x}_\beta)$ を求める。図1は上述の手法にしたがって、両端2点の波形を既知とし、クリッギング手法を用いて推定した空間的に定常な波形の例である。

3. 条件付き確率場のシミュレーション　確率場を規定する相互相関関数は想定したクロススペクトルを逆フーリエ変換して

$$R_{XT}(x_0, \tau) = \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} S_{XT}(x_0, \omega) \cdot e^{i\omega\tau}\ d\omega \tag{6}$$

により求める[3)]。図2に(6)式より求められた確率場に規定される相互相関関数を示す。この確率場に規定される相互相関関数を満足する波形 $S(\mathbf{x})$ をシミュレートする。2. と同様の手法で点 $\mathbf{x}$ における最適推定値 $\hat{S}(\mathbf{x})$ を求めて、

$$C(\mathbf{x}) = \hat{Z}(\mathbf{x}) + \{S(\mathbf{x}) - \hat{S}(\mathbf{x})\} \tag{7}$$

Kenzo Toki, Tadanobu Sato, Jyunji Kiyono, Hirofumi Imabayashi

とおくことにより、与えられた確率場の特性を満足するシミュレーション波形が得られる[4]。すなわち、推定値 $C(\mathbf{x})$ に関する共分散関数を求めれば、確率場に規定される相互相関関数と一致することになる。図3に条件付きシュミレーション手法によって求められた波形の相互相関のアンサンブル平均を示す。

4. 不整形地盤上における応答波形のシミュレーション　不整形地盤では、境界面の不規則性によって波の局所的な回折、散乱、反射、屈折が生じるため、地表面での地震動は時間的、空間的に大きく変動する。ここでは、この空間的に非定常な部分をトレンド波に集約させ、残りの部分に3.の均質場の条件付シミュレーション手法を適用して解析を行う。図4のように観測波形のフーリエスペクトルが得られたとする。各観測点において、観測波からトレンド波を除いた波形相互の自己相関関数の差が最小となるようにトレンド波を決定した。ただし、トレンド波形の各振動数成分は、観測波1と他の観測点の波形との相互相関関数のピークの値から求まる時間だけ一様にずれるものとして位相を与えている。図5は両端の2点において観測波が得られたときのシュミレーション波形の一例である。

5. まとめ　クリッギング手法と条件付確率場のシュミレーション手法を結合させることによって、確率場に規定される相互相関関数を満足する波形を推定することができる。空間的に非定常な波形が得られたときに、空間的に定常な波形については条件付シミュレーション手法を用いて未測定点における波形をシミュレートし、非定常な波形をトレンド成分として加えることで、非均質な空間における推定を行った。これにより、非均質な確率場での条件付シミュレーションが可能となった。

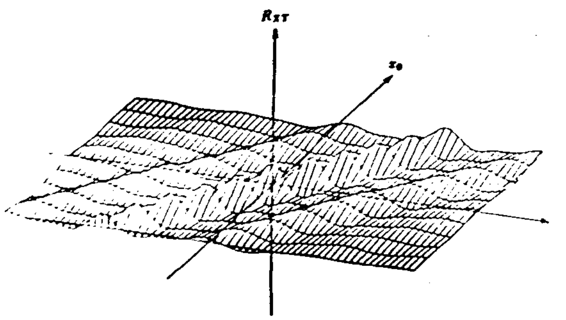

図2　確率場に規定される相互相関関数

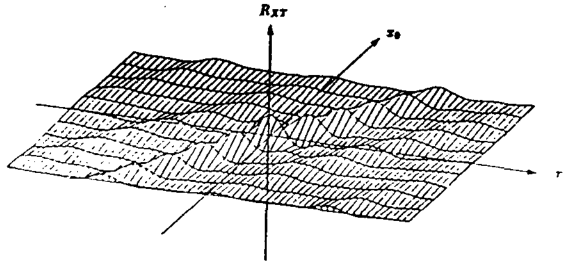

図3　条件付きシミュレーションの相互相関関数のアンサンブル平均

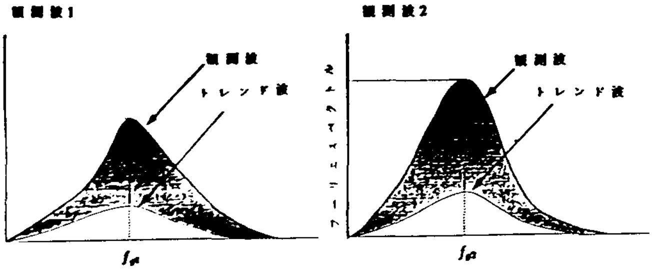

図4　観測波とトレンド波のフーリエスペクトル

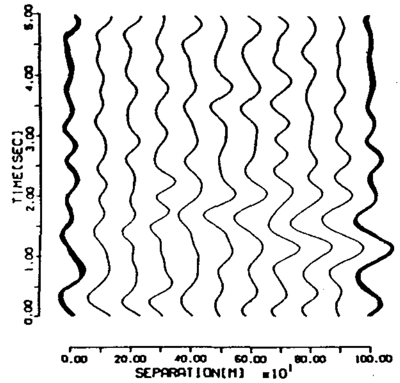

図5　不整形地盤上での条件付きシミュレーションの一例

参考文献　1) 土岐憲三・佐藤忠信・清野純史・水谷治弘:不整形地盤上の地震動の時空間波形のシミュレーション, 第11回自然災害学会学術講演会, pp22-23,1992 2) 土岐憲三・佐藤忠信・清野純史:不整形地盤上における地震動の時間, 空間分布特性, 第20回地震工学研究発表会,pp157-160,1989 3) 川上英二:一地点の観測記録を含む地震波形の時空間関数のシミュレーション, 土木学会論文集 No.410 I-12,pp435-443,1989 4) 星谷勝:確率場の条件付シミュレーションに関する考察, 土木学会第47回年次学術講演会,1992