

地盤の地震危険度分布の推定

山本欣弥¹・大野春雄²・星谷 勝³

¹正会員 工修 攻玉社工科短期大学助教授 土木工学科 (〒141 品川区西五反田 5-14-2)

²フェロー 工博 攻玉社工科短期大学教授 土木工学科 (〒141 品川区西五反田 5-14-2)

³正会員 Ph.D 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科 (〒158 世田谷区玉堤 1-28-1)

上水道、都市ガス等のライフラインネットワークを構成する地下埋設管の地震による被害予測を行うために、地盤の地震に対する強度あるいは危険度の分布をとらえることは重要である。地盤に関するデータを対象地区すべてにわたり詳細に調査することは、時間や費用の面からみてもあまり実用的ではないため、有限個の調査データから未調査地点でのデータを推定することが行われる。本研究では、物理量の空間分布の推定だけでなく、物理量がある一定の値を超過して現れる確率の分布を Solow の提案した Indicator Kriging を用いて推定する。例題として、ポートアイランドの地盤変位データを用いて、観測データからバリオグラムを求め、垂直方向の変位が+30(cm)以上となる確率の分布を求めている。

Key Words : hazard distribution map, Indicator Kriging, variogram, intrinsic random field, ground vertical displacement

1. はじめに

地震時の地盤振動や液状化等による地盤被害は、ライフラインの構成要素である地下埋設管に重大な被害を与える場合がある。地震によるライフラインの被害予測を行うためには、地震時に地盤が地下埋設管にどのような被害をもたらすかをとらえることは重要である。地盤の各種物理データと地下埋設管の被害発生率との関係について、多くの研究が行われている。地盤の地震危険度(液状化危険度等)を、地形・地質や過去の液状化履歴を考慮したり、必要に応じて土質試験を行った結果から推定し、過去の地震被害データと比較検討して被害発生率を推定することが行われている。しかし、ライフラインが布設されている範囲すべてを詳細に調査することは、時間や費用等より困難な場合が多い。そこで、データの得られない部分については、過去の地震被害データや、有限個の試験データより推定したサンプル

実現値を用いている。

有限個の観測値が得られたとき、未観測点でのサンプル実現値を推定する手法として、代表的なものに Kriging⁴⁾⁵⁾がある。また、著者の一人が提案した条件付きシミュレーション理論⁶⁾を用いることにより、未観測点でのサンプル実現値をシミュレートすることが可能である。しかし、サンプル実現値の推定を行わないで、有限個の観測値より、地盤の地震危険度(液状化危険度等)の分布(いわゆる、ハザードマップ)を直接的に求めることができれば、非常に便利であり、効率がよい。

信頼性工学では、ある現象が危険事象を超過しない確率を「信頼性」と定義している。これより、本研究では、ハザードマップは、地盤の持つ特性がある危険事象を超過する確率の分布であると定義する。この超過確率の分布は、Solow²⁾の Indicator Kriging を用いて推定することができる。

本研究では、Solow の Indicator Kriging によるハザ

ードマップ作成の数値計算例として、1995年兵庫県南部地震でのポートアイランドの垂直地盤変位データ³⁾を用い、垂直変位量 +30(cm)以上を危険事象であると仮定して、その超過確率(インディケータ)の分布を計算する。

2. ポートアイランドの垂直地盤変位データ

地盤の垂直変位量の分布 $Z(x)$: x =ベクトル座標を、平均場および共分散関数は未知であるが、場の性質を表すバリオグラムは観測データから推定可能な、Intrinsic Random Field¹⁾と仮定する。未知の平均場は、座標関数を用いて表すことができるものと仮定し、式(2a)のように表す。

$$E[Z(x)] = \sum_{j=1}^p \beta_j f_j(x) \quad (2a)$$

さらに、 $Z(x)$ を式(2a)の平均場とそのまわりの変動を表す $W(x)$ の和として式(2b)で表現する。このとき自動的に $E[W(x)] = 0$ となる。

$$Z(x) = \sum_{j=1}^p \beta_j f_j(x) + W(x) \quad (2b)$$

ここで、 β_j ; 未知係数, $f_j(x)$; 座標関数

(1) 平均場の推定

n 個 ($n=623$) のサンプル実現値 ($Z(x_i); i=1 \sim n$) より、重回帰分析法⁷⁾を用いて平均場の推定をおこなう。サンプル実現値と式(2a)の平均場の残差平方和(式(2c))を最小にする未知係数を推定する。また、式(2d)に、推定した平均場を示す。

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^n \{Z(x_i) - \sum_{j=1}^p \beta_j f_j(x_i)\}^2 \quad (2c)$$

$$E[Z(x)] = -29.436 + 0.02890x - 0.04074y \quad (2d)$$

(2) バリオグラムの推定

図-1にサンプル実現値より推定したバリオグラムを示す。観測値より求めた離散型バリオグラム(Raw Variogram)を最小自乗法を用いて連続型バリオグラ

ム(Continuous Variogram)にフィッティングした。連続型バリオグラムは、指数モデルを用いた(式(2e))。

$$\gamma(d) = 2977.8 \left[1.0 - \exp\left(-\frac{d}{182}\right) \right] \quad (2e)$$

ここで、 d ; 2点間の距離, $\gamma(d)$; 距離 d に関するバリオグラム

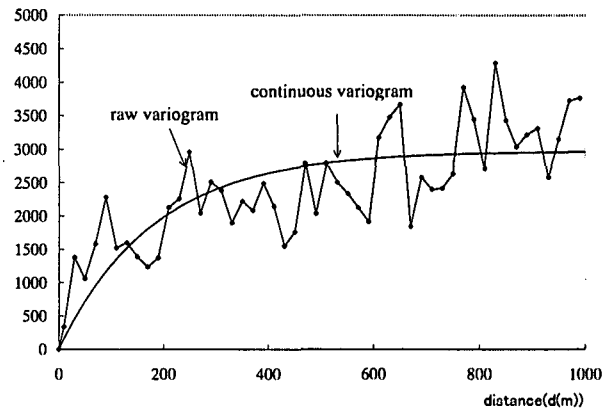


図-1 バリオグラム

3. Solow²⁾ の Indicator Kriging

ベクトル座標 x における垂直変位量を $Z(x)$ とするとき、インディケータ $I(Z(x))$ は式(3e)で定義される。

$$I(Z(x)) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z(x) \geq h \\ 0 & \text{if } Z(x) < h \end{cases} \quad (3a)$$

ここで、 $h=30(\text{cm})$ とする。

このとき、 $Z(x)$ が、 $h=30(\text{cm})$ 以上となる確率は、 $\Pr(I(Z(x))=1) = p_1(x)$ で与えられる。 n 箇所の観測点でサンプルのインディケータが得られたとき、未観測点 x_r でのインディケータ $I(Z(x_r))$ が1となる条件付確率は、式(3b)で得られる。

$$\begin{aligned} \Pr[I(Z(x_r))=1 | I(Z(x_i))=j_i, i=1 \sim n] \\ = E[I(Z(x_r))=1 | I(Z(x_i))=j_i, i=1 \sim n] \end{aligned} \quad (3b)$$

ここで、 j は、1または0の値をとる。

式(3b)は、未観測点 x_r でのインディケータ $I(Z(x_r))$ が 1 となる確率は、 n 個の観測点でサンプルが得られたときの条件付平均値で与えられることを示している。したがって、未観測点 x_r において、地盤の垂直変位量が 30 (cm) 以上となる確率を求めるには、Kriging 手法を用いて、未観測点 x_r でのインディケータの最適推定値を求めればよい。未観測点 x_r でのインディケータの最適推定値 $\hat{I}(Z(x_r))$ は、次式で与えられる。

$$\hat{I}(Z(x_r)) = w_r + \sum_{i=1}^n w_i I(Z(x_i)) \quad (3c)$$

ここで、 w_r ; 未知係数, w_i ; 未知係数 ($i=1 \sim n$)

w_r および w_i を線形不偏最小誤差推定より求めると式(3d)を得る。

$$\mathbf{W} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{k} \quad (3d)$$

ただし、 \mathbf{W} は、式(3e)で与えられる。

$$\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad (3e)$$

また、 \mathbf{K} および \mathbf{k} は式(3f)、式(3g)でそれぞれ与えられる。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} C_I(d_{11}) & C_I(d_{21}) & \dots & C_I(d_{n1}) \\ C_I(d_{12}) & C_I(d_{22}) & \dots & C_I(d_{n2}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_I(d_{1n}) & C_I(d_{2n}) & \dots & C_I(d_{nn}) \end{bmatrix} \quad (3f)$$

$$\mathbf{k} = [C_I(d_{r1}), C_I(d_{r2}), \dots, C_I(d_{rn})] \quad (3g)$$

ここで、 $C_I(d_{ij})$ は $I(Z(x_i))$ と $I(Z(x_j))$ の共分散関数、 d_{ij} は座標 x_i と x_j の距離である。

共分散関数は、サンプル実現値より推定したパリオグラム (式(2e)) より求める。 w_r および $\hat{I}(Z(x_r))$ は、式(3h)、式(3i)でそれぞれ求められる。

$$w_r = p_1(x_r) - \sum_{j=1}^n w_j p_1(x_j) \quad (3h)$$

$$\hat{I}(Z(x_r)) = p_1(x_r) + \sum_{j=1}^n w_j [I(Z(x_j)) - p_1(x_j)] \quad (3i)$$

4. 数値計算例

数値計算例として、データ数が多いため、1995 年兵庫県南部地震でのポートアイランドの垂直地盤変位データ³⁾を用いた。観測点での座標を求めるため、ポートアイランドの地図上に、x-y 座標を設定した (NS 方向を y 軸、EW 方向を x 軸)。未観測点の座標配置は、x 軸方向、y 軸方向ともに 25 (m) 間隔とした。また、観測点の外側 (外挿部分) には、未観測点を配置しなかった。

未観測点で地盤の垂直変位が 30 (cm) 以上となる確率を計算した。図-2, 3に、それぞれ超過確率 p が 0.8 以上の領域と、0.9 以上の領域を示した。

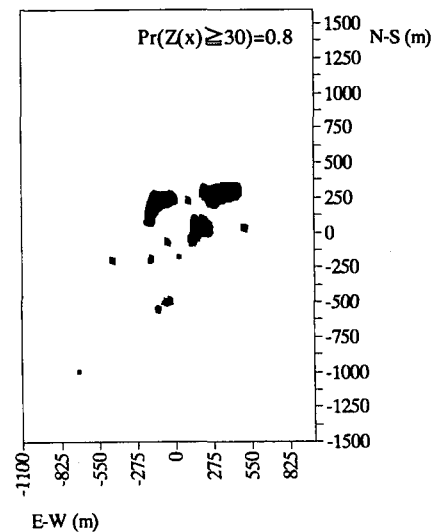


図-1 Indicator Distribution ($h=30(\text{cm}), p_1 \geq 0.8$)

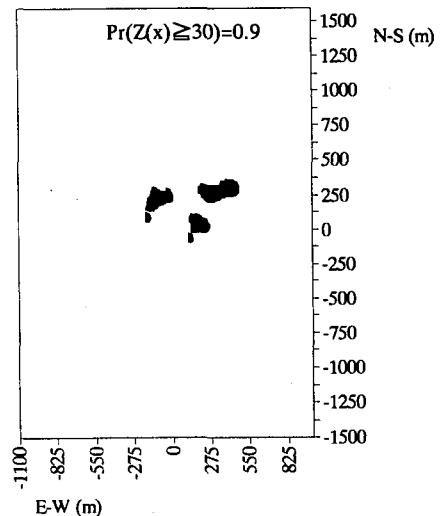


図-2 Indicator Distribution ($h=30(\text{cm}), p_1 \geq 0.9$)

それぞれの図中で、黒く示されている部分が超過確率の高い、つまり危険度が高い領域である。図-2で示された危険領域は、超過確率が大きい部分を示しているため、図-1よりも狭くなっている。

ポートアイランドでは、地盤沈下を起こした範囲と変位量が隆起した部分に比べて大きかったため、ハザードマップで示された危険領域は狭くなっている。

5. まとめ

Indicator Kriging を用いて、ハザードマップの作成を試みた。数値計算例として、比較的観測点が多いため、1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドでの地盤の垂直変位データを用いた。地盤の垂直変位が +30(cm)以上となる場合を危険事象と仮定した。

まず、地盤の垂直変位の分布を、Intrinsic Random Field であると仮定し、観測データより、平均場と確率場の性質を表すバリオグラムを推定した。これらを用いて、未観測点でのインディケータの最適推定値を求めた。危険事象の超過確率の分布 ($p \geq 0.8$ および $p \geq 0.9$) をハザードマップとして求めた。

最後に、今回求めたハザードマップは、あくまで数値計算例であり、この結果を用いて地中埋設管の被害予測を行うものではないことを付記する。

参考文献

- 1) Yamamoto, K. and Hoshiya, M.: Application of Conditional Stochastic Field to Mapping of Ground Vertical Displacement, Proceeding of the Sixth Japan-U.S. Workshop on Earthquake Registration Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, pp.153-162, 1996
- 2) Solow, A.: Mapping by Simple Indicator Kriging, Mathematical Geology, Vol.18 No.3, pp.335-352, 1986
- 3) 濱田政則, 磯山龍二, 若松加寿江: 1995年兵庫県南部地震液状化・地盤変位及び地盤条件, (財)地震予知総合研究振興会, 1995, 5
- 4) Delhomme, J.P.: Kriging in the Hydrosciences, Advances in Water Resources, Vol.1 No.5, pp.251-266, 1978
- 5) Bastin, G. and Gevers, M.: Identification and Optimal Estimation of Random Fields from Scattered Point-wise Data, Automatica, Vol.21 No.2, pp.139-155, 1985
- 6) Hoshiya, M.: Kriging and Conditional Simulation of Gaussian Field, Journal of Engineering Mechanics, Vol.121 No.2, pp.181-186, 1995
- 7) H-S. Ang, A. and H. Tang, W.: 土木建築のための確率・統計の基礎, 伊藤学, 亀田弘行訳, 丸善株式会社, 1977