

### (33) 地盤定数の空間分布を考慮した液状化領域の推定法

金沢大学工学部 宮島昌克, 金沢大学工学部 北浦 勝  
西日本旅客鉄道 河出和己

#### 1. はじめに

地盤の液状化を予測するための指標としては、ボーリングデータを基に算出した液状化安全率 $F_L$ 値、またはこれを深さ方向に積分して算出する液状化指数 $P_L$ 値<sup>1)</sup>などがある。しかし、これらの指標はいずれもボーリング調査の行なわれたある1点における液状化危険度を評価したものに過ぎない。しかも、ボーリング調査は経済的要因によってその数が制約されるのが現状である。液状化現象は空間的に生じるものであり、その領域を把握することが対策を施す上で重要となる場合が多い。そこで本研究では、確率論に基づいて地盤定数の空間分布を考慮することにより、ボーリングの行なわれていない地点の液状化危険度を推定する方法を提案する。本文は、液状化指数 $P_L$ 値の平面的分布を確率論的に評価することにより、その地域の地盤液状化予測図を作成することを目的としている。

#### 2. 推定方法

ボーリングデータに基づいて得られた $P_L$ 値を基に、ボーリング点の存在しない任意地点の $P_L$ 値を推定する方法としては、多次元ガウス分布を用いる方法<sup>2)</sup>や、形状補間関数を用いる方法<sup>3)</sup>、Kriging法<sup>4)</sup>などがある。本文では、既存点が少ないときにも有効であると考えられるKriging法を用いる。

Kriging法とは、不偏推定と最小2乗分散推定を基にした線形補間法であり、推定値のみならず推定誤差をも評価することができる。ここでは、推定誤差がガウス分布に従うと仮定してこれを液状化発生確率の評価に取り込む。Kriging法において、空間分布量 $P_L$ 値の空間的相関の度合を定量的に表現するセミバイオグラムを、本論では以下の楕円を用いた関数で仮定する。

$$\gamma_i(a_i, k_i) = a_i \{1 - \exp(-k_i)\} \quad \dots (1)$$

$$k_i(\Delta x, \Delta y | b_{x,i}, b_{y,i}, \theta_i) = \left\{ (\Delta x \cdot \sin \theta_i + \Delta y \cdot \cos \theta_i) / b_{x,i} \right\}^2 + \left\{ (\Delta x \cdot \cos \theta_i + \Delta y \cdot \sin \theta_i) / b_{y,i} \right\}^2 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (2)$$

ここに、 $\Delta x$ ,  $\Delta y$ : デカルト座標系における2地点間の相対距離,  $a_i$ ,  $b_{x,i}$ ,  $b_{y,i}$ : セミバイオグラムパラメタ,  $\theta_i$ : 地形パラメタである。パラメタ設定の簡易のため、ここでは均一地盤を想定し、セミバイオグラムを各既存点で一定とした。なお、非均質地盤においてはこれらのパラメタを別々に設定する必要がある。

さらに、推定精度の向上を目的として以下の操作を行った<sup>5)</sup>。

- (a) 観測地点( $n$ 地点)からある一つの地点を取り除く。
- (b) 取り除いた地点以外のすべての地点( $n-1$ 地点)のデータを用いて、取り除いた地点の分布量の推定を本推定方法により行ない、期待値(推定値)  $z_i$  と標準偏差(推定誤差)  $\sigma_i$  を算出する。
- (c) 上記の方法をすべての地点( $n$ 地点)について計算し、次式を求める。

$$\alpha_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - z_i) \cong 0 \quad \dots (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\hat{z}_i - z_i}{\sigma_i} \right)^2 \cong 1 \quad \dots (4)$$

ここに、 $z_i$ ：推定値、 $\hat{z}_i$ ：観測値である。

(d) この2つの目的関数が、上記の値を最も満たすように、推定方法に用いるパラメータを決定する。ここでは、次式によつた。

$$\beta = r_1 \cdot \alpha_1^2 + r_2 \cdot (\alpha_2 - 1)^2 \rightarrow \text{minimum} \quad \dots (5)$$

ここに、 $r_1$ 、 $r_2$ ：それぞれの要素に対する重み（本論では、 $r_1=r_2$ と仮定する）である。上式を満たすとき、対象地域の最適パラメータであるとする。

つぎに、液状化発生の程度を表わす性能関数を以下のように定義し、液状化発生確率を求める。本論で用いる液状化発生確率とは、ある大きさの地震動が生じたという条件における確率、すなわち条件付き確率であり、地震動の大きさは確定値としている。以下は地表面最大加速度がH(gal)の場合におけるものとした。

$$\begin{aligned} M = R - S > 0 & \quad \text{：液状化しない} \\ & \leq 0 \quad \text{：液状化する} \end{aligned} \quad \dots (6)$$

ここで、 $M$ ：液状化発生の程度を表わす性能関数

$R$ ：経験的限界 $P_L$ 値の確率密度関数

$S$ ：推定 $P_L$ 値の確率密度関数

$R$ は、今まで生じた地震の液状化調査を基にした岩崎らの研究<sup>1)</sup>を参考にして、以下のように設定した。

$$R = N(17.1, 9.6) \quad \dots (7)$$

$R$ 、 $S$ が統計的に独立であり、かつ正規確率分布に従うとすると液状化発生確率は以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} P_L(H) &= \text{Prob.}(M \leq 0 | H) = \int_{-\infty}^0 f_M(m | H) dm \\ &= 1 - \phi \left( \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \right) \end{aligned} \quad \dots (8)$$

ここで、 $f_M$ ：正規分布に従う確率密度関数、 $\phi(\cdot)$ ：正規確率分布関数である。

### 3. 推定結果

金沢市の北部に位置する粟崎地域を解析対象地域とした。この地域は日本海に面し、1891年濃尾地震において液状化の発生したことが知られており、地震時における液状化発生の危険性およびそれに伴う被害が懸念されている。推定対象地域を図1に示す。この図には、この地域で行われたボーリング位置13点が記されている。

図2～4は、地表面加速度が140galにおける $P_L$ 値の推定値、 $P_L$ 値の推定誤差、液状化発生確率を鳥瞰図として表示したものである。図2より、右上から右下に向かって推定値が滑らかに推移する様子が分かるが、これは空間分布を線形補間によって求めていることによる。図3は推定誤差を表しているが、既存点においては観測値を推定値としているので、推定誤差はゼロとなっている。一方、既存点から大きく離れたところにおいては推定誤差は大きな値を示している（図中右上）。図4は、推定値、推定誤差と経験的限界 $P_L$ 値を用いて式(8)より求めた液状化発生確率を表したものである。同図によれば、液状化発生確率は推定値と似たような空間分布となっており、右上から右下へ滑らかに液状化発生確率が小さくなっていることが確認できる。

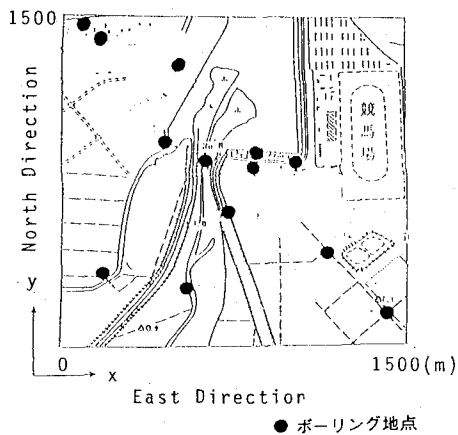


図1 解析対象地域とボーリング地点

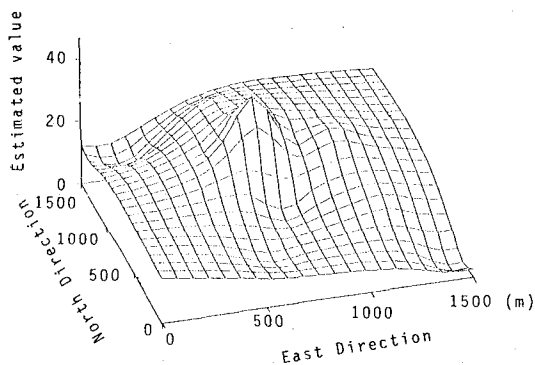


図2  $P_1$ 値の推定値の分布

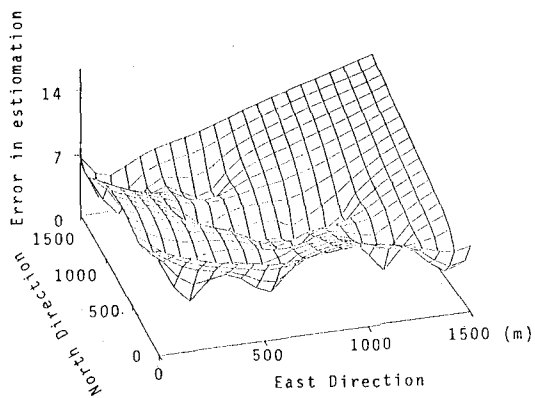


図3  $P_1$ 値の推定誤差の分布

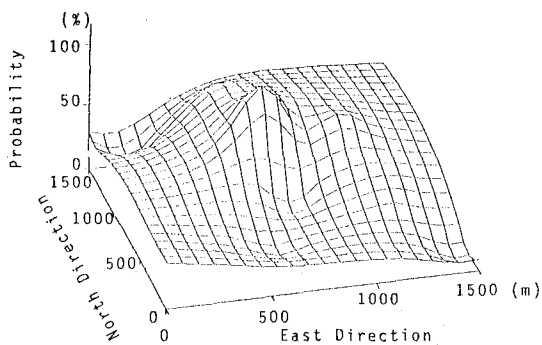


図4 液状化発生確率の分布

対象地域における地表面最大加速度100gal~200galにおける推定結果を図5~10に示す。液状化発生確率が60%以上の所をハッチング表示した。ただし、180gal以上では地域全体が液状化発生確率60%以上となるのでハッチング表示していない。100galの場合は中央のみで液状化発生確率が多少大きくなっているが、地表面最大加速度が増加するに伴って徐々に液状化領域が拡大していき、160galの場合には地域全体に液状化領域が広がるのがこれらの図よりわかる。

#### 4. おわりに

地盤定数の空間分布特性を確率論を用いて評価することによって、その地域のマクロ的な地盤液状化予測図を作成することができた。この予測図により、ボーリング調査をしていない地点の液状化に対する危険性を評価できる、パイプラインなどの線状の構造物の液状化対策を、合理的に立案することができるものと期待される。今後は、実際に起きた液状化の領域の明らかな地域を対象に解析を行い、推定精度の検定を行う予定である。

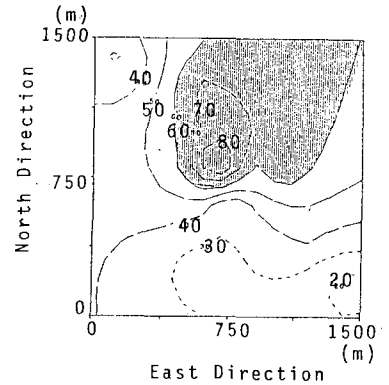
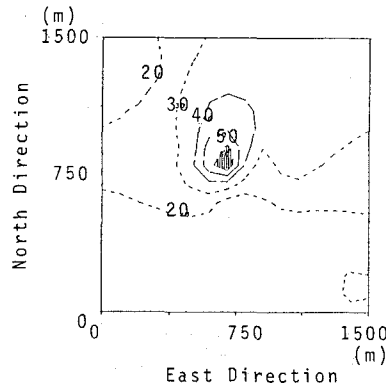
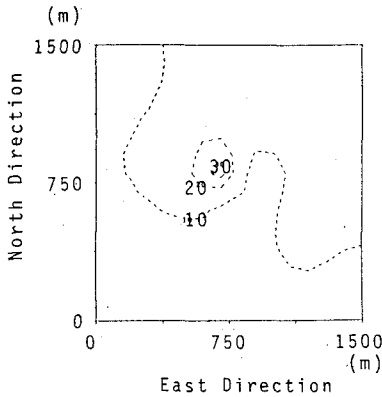


図5 液状化発生確率の分布 (100gal) 図6 液状化発生確率の分布 (120gal) 図7 液状化発生確率の分布 (140gal)

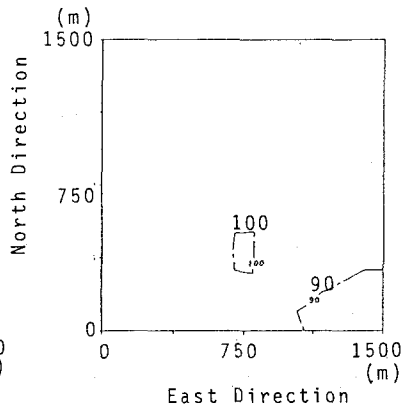
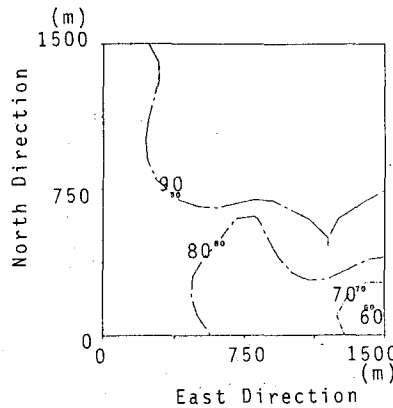
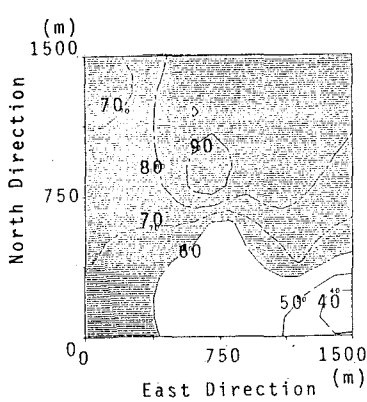


図8 液状化発生確率の分布 (160gal) 図9 液状化発生確率の分布 (180gal) 図10 液状化発生確率の分布 (200gal)

#### 参考文献

- 1) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進：地震時地盤液状化の程度の予測について，土と基礎，Vol.28, No.4, pp.23-29, 1980.
- 2) 河出和己・北浦 勝・宮島昌克：地盤物性値の空間分布を考慮した液状化予測，土木学会第47回年次学術講演概要集，第3部，pp.208-209, 1992.
- 3) 吉田雅穂・宮島昌克・北浦 勝：形状補間関数による液状化危険度分布の推定法，土木学会中部支部平成4年度研究発表会講演概要集，pp.373-374, 1993.
- 4) 大西有三・田中誠・大澤英昭：不均質地盤内の地盤定数の推定に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.457, pp.51-58, 1992.
- 5) 宝 馨・岡 明夫・浅井 学：豪雨極値の地域総合化へのKrigingの適用と地形効果の導入，土木学会中部支部平成3年度研究発表会講演概要集，pp.139~140, 1992.