III-84　地盤物性値の空間分布を考慮した液状化予測

金沢大学大学院　学生員　河出和己
金沢大学工学部　正会員　北浦　勝
金沢大学工学部　正会員　宮島昌克

１．はじめに

地盤の液状化を予測するための 地盤物性値としては，地盤ボーリング調査データを基に算定した液状化安全率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値等がある．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，ボーリング調査データは経済的要因によって数に制約があるのが現状である．そこで本研究では，ボーリングの行なわれていない地点の液状化危険度を，確率論に基づいた空間分布を考慮することによって，推定する方法を提案する．

本研究は，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，その地域のマクロ的な地盤液状化予測図を作成することを目的としている．

２．確率場における擬似定常性の評価

ある対象地域から得られたデータを確率論的に評価しようとする場合，工学的に一様な性質を持つと見なし得る地域を対象にする必要がある。すなわち，擬似的に定常性を仮定することにより，データの不足を補うことができたり， また，解析的煩雑さを解消することができる．そこで，ボーリング調査データを用いて，地盤物性値から見て 擬似的に定常と考えられる地盤を定量的に評価することを試みた．２地点間のボーリング調査データの相関性を 評価する指標として次式を考える．

$$U_{ij}=\frac{1/D\cdot\int_0^D|x_i(z)-x_j(z)|dz}{(\overline{x_i}+\overline{x_j})/2}\times 100 \qquad (1)$$

ここで， $\overline{x}=\int_0^D x(z)dz$， x：地盤物性値， D：対象地盤深度， z：深度である．

地盤の液状化に注目する場合には， 地盤物性値xとしてN値，F_L値，地盤液状化抵抗強度等を， 対象地盤深度Dとして20mを考える必要がある．この指標Uは，単位深さ方向における ２地点間の地盤物性値の偏差を２地点間の地盤物性値の平均で除することにより，２地点間の平均偏差率を示すものである． 対象地域にn本のボーリングが存在すると， そのn本から２本抽出する組み合わせ${}_nC_2$組にこの指標を適用する．この組合せにおいて，平均偏差率がある値より大きい場合にはその地点は 擬似定常性を満足しない地点として推定対象より削除する．逆に言えば，これらの近傍では地層形成段階で 何らかの不連続性を生じている地点とも推察され，詳細な再調査が必要な地点と考えられる．

３．多次元ガウス分布を用いた空間分布の推定

まず，対象とする地域には，すべての場所に無関係に，ある一定の確率によってその物性値の事象が生起するものとする．すなわち， 対象地域に生じる事象を定常確率過程と仮定する．ここでは，この存在確率密度を以下のガウスで表現できると仮定した．

$$p(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{(x-\overline{x})^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (2)$$

ここで， $\overline{x}$：地盤物性値の平均値，σ：地盤物性値の標準偏差を表わす．

地盤物性値の空間分布を推定する上で，２地点間の相関特性を表わす指標がさらに必要となる． ここでは，２地点間の相関特性は以下の自己相関関数によって表現できると仮定している．

$$r(\Delta x,\Delta y)=\exp\left(-\{(\Delta x/h_x)^k+(\Delta y/h_y)^k\}^l\right) \qquad (3)$$

ここで， $\Delta x, \Delta y$：直交座標形における相対距離， k, l, h_x, h_y：対象地域における特性値である．

次に， 以上の存在確率密度，２地点間の相関特性を用いて，空間分布を推定する手法を述べる．標本点$\xi_1, \xi_2, \cdots, \xi_n$は， ガウス型確率変数であると仮定すると，確率変数$\xi_1, \xi_2, \cdots, \xi_n$の結合ガウス分布の密度は，以下のように表わされる．

$$p(x_1, x_2, \cdots, x_n)=\frac{1}{(2\pi)^{n/2}|R|}\exp\left(-\sum_{i,j=1}^{n}b_{ij}(x_i-a_i)(x_j-a_j)\right) \qquad (4)$$

ここで， a：平均値，R：相関行列，b：相関行列の逆マトリックスである．

次に，ガウス型確率変数$\xi_0,\xi_1,\cdots,\xi_n$を考え$\xi_1,\xi_2,\cdots,\xi_n$を定めたときの，ξ_0の条件付き確率分布を求める．$\xi_1=x_1,\xi_2=x_2,\cdots,\xi_n=x_n$と定めたとき，$\xi_0$の条件付き確率密度は，

$$p(x|x_1,\cdots,x_n)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{(x-\overline{x_0})^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (5)$$

ここで，ガウス分布の平均値と分散は以下の様に表わされる．

$$\overline{x_0}=E(\xi_0|x_1,\cdots,x_n)=\int_{-\infty}^{\infty} x\,p_0(x|x_1,\cdots,x_n)\,dx$$

$$=a_0+\sum_{k=1}^{n} c_k(x_k-a_k) \qquad (6)$$

$$\sigma_0^2=E\left(\xi_0-a_0-\sum_{k=1}^{n} c_k(x_k-a_k)\right)^2 \qquad (7)$$

ここで

$$\sum_{k=1}^{n} R_{ij}c_k=R_{0j},\qquad j=1,n \qquad (8)$$

をみたす．

ここでは，存在確率密度を一定と仮定したので，$a_0=a_1=\cdots=a_n$ ，$\sigma_0=\sigma_1=\cdots=\sigma_n$ とする。

本解析では既存のボーリング調査データを基に，対象地域に生じる事象は，ある存在確率密度を有するものと仮定し，また，ある地点の地盤物性値における分布関数を，その地点と既存のボーリング地点との幾何学的関係により，条件付き確率密度として推測する．本研究では，以上述べた空間分布を考慮した推定法を用いて，実際地盤における液状化予測を行なう．

4．対象地域と，その地域の地盤特性

本研究で推定する対象地域は，金沢市の北東に位置する粟崎地域とした．この地域は日本海に面し，日頃より，地震時における液状化発生の危険性が懸念されている地域である．液状化予測には地盤液状化指数P_L値を用いた．このP_L値の算定においては，この地域の地表面最大加速度が200galとなる地震を想定した．

式(2)におけるガウス分布に従うとしたこの地域のP_L値の存在確率密度を表-1に示す．ここでは，危険率5%のχ^2検定によりガウス分布と仮定できる．式(3)で近似する自己相関関数は，この地域の比較的密にボーリング調査が行なわれた地点より，表-2のように決定した．

5．推定結果

一般に，P_L値が15以上で液状化する可能性が非常に大きいことが指摘されている．したがってP_L値が15以上の確率を，式(4)～(8)に示す条件付き確率密度を用いて以下のように算出した．

$$P(x>15)=\int_{15}^{\infty} p(x|x_1,\cdots,x_n)\,dx=1-\Phi\left(\frac{15-\overline{x_0}}{\sigma_0}\right) \qquad (9)$$

ここで，$\Phi(\cdot)$：標準ガウス分布関数，$\overline{x_0}$：条件付き平均値，σ_0：条件付き標準偏差を表わす．

この地域におけるP_L値が15より大きい確率の空間分布の一例を図-1に示す．ここでの面積1km^{2}の中に，ボーリング調査データが6地点存在し，これより算定したP_L値を基本データとして，他の地点を推定した結果である．

6．おわりに

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，ボーリングをしていない点の液状化に対する危険性を 評価できるだけでなく，パイプラインなどの線的構造物，あるいは地域全体の液状化に対する耐震安全性を，合理的かつ包括的に評価することができるものと期待される．

表-1　P_L値の統計的性質（粟崎地域）

データ数 n	平均 $\overline{x}$	標準偏差 σ	変動係数 cov
56	12.6	6.62	0.525

表-2　自己相関関数のパラメータ

k	l	h_x	h_y
2	1	240	280

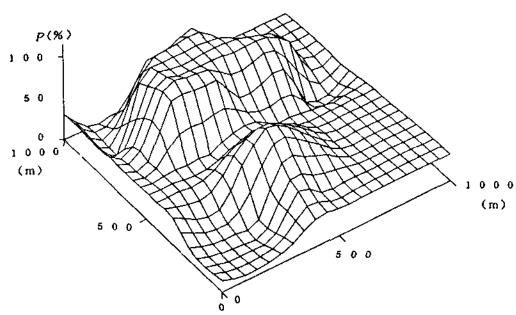

図-1　P_Lが15以上における確率の空間分布