

確率的感度解析による最適追加調査位置の決定法

岡山大学環境生命科学研究科 正会員 ○西村伸一・柴田俊文・珠玖隆行
岡山大学環境生命科学研究科 非会員 今出和成

1. はじめに 液状化対策を行うにあたって、設計上はFL法が用いられ(日本道路協会, 2012)、実績も多い。本研究でも、このFL法に基づいた液状化解析を行うが、多次元的な検討を行うところが特色である。手順として、対象地域のボーリング調査結果から、標準貫入試験による N 値および細粒分含有率 F_c の統計モデルを作成し、この結果に基づいて、地質統計学手法の一つである条件付シミュレーション¹⁾を実施する。南海トラフ地震を対象とし、その発生確率から地震ハザード曲線を作成し、これと地盤定数の変動性を考慮して、今後50年における液状化の発生確率を求める。さらに、本研究の目的として、最適な追加調査位置の設定方法を提案する。提案法は確率論に立脚しており、地盤情報の不確定性を考慮した手法であるのが特色である。

2. 液状化率の計算方法 液状化安全率 F_L は、液状化強度比 R と繰り返しせん断応力比 L の比によって得られるが、水平座標 x, y と深度 z 、地盤の N 値、細粒分含有率 F_c (%)、地表面最大加速度、 $\alpha_{\max}$ の関数として、式(1)に示すように与えられる。

$$F_L = F_L(x, y, z, N, F_c, \alpha_{\max}) = R(x, y, z, N, F) / L(z, \alpha_{\max}) \quad (1) \quad P_f(x, y, z, \alpha_{\max}) = G(F_L(x, y, z, \alpha_{\max}; N, F_c)) \quad (2)$$

液状化安全率と液状化確率の関係が岩崎ら²⁾によって求められており、この関係を図-1に与える。ここでは、岩崎らのデータに従い、式(2)の関数 G によって液状化確率 P_f を計算する。確率変数(N および F_c)の変動性を考慮して、液状化確率の期待値 P_{JE} が計算される。ここで、 P_{JE} は空間上の各点ごとに、 $\alpha_{\max}$ の関数として得られる。

$$P_{JE}(x, y, z, \alpha_{\max}) = E[G(F_L(x, y, z, \alpha_{\max}; N, F_c))] \quad (3) \quad P_{JE50}(x, y, z) = - \int_0^\infty \frac{dH(\alpha_{\max})}{d\alpha_{\max}} \cdot P_{JE}(x, y, z, \alpha_{\max}) d\alpha_{\max} \quad (4)$$

地震による損傷を検討する場合、その発生確率を考慮する必要がある。50年ハザード曲線と、式(3)によって評価されるフラジリティ曲線から、解析対象地点の50年液状化確率を式(4)として求めることができる。ここで、 P_{JE50} : 今後50年の液状化確率、 $\alpha_{\max}$: 地表面最大加速度、 H : 今後50年の地震の発生確率に対応したハザード関数、 $P_{JE}(x, y, z, \alpha_{\max})$: フラジリティ関数(任意点、任意の加速度に対する液状化確率)。さらに、空間的に積分された平均液状化確率を式(5)に定義する。

$$\bar{P}_{JE50} = \frac{1}{L_x L_y} \int_{L_y} \int_{L_x} \frac{\int_0^{20} P_{JE50}(x, y, z) (10 - 0.5z) dz}{\int_0^{20} (10 - 0.5z) dz} dx dy \quad (5) \quad \bar{P}_{JE}(\alpha_{\max}) = \frac{1}{L_x L_y} \int_{L_y} \int_{L_x} \frac{\int_0^{20} P_{JE}(x, y, z, \alpha_{\max}) (10 - 0.5z) dz}{\int_0^{20} (10 - 0.5z) dz} dx dy \quad (6)$$

ここで、 L_x, L_y : x 方向、 y 方向の検討範囲である。また、式(5)は、深度20mで液状化の可能性が無くなり、地表面に近いほど液状化の重みが付くように設定している。また、式(3)に関しても、空間平均が式(6)として定義される。

3. 追加ボーリングの確率的感度解析 追加ボーリング調査を計画する場合の効率的にボーリング位置を決定するフローを次の様に提案する。Step 1: 追加調査位置の代替案を複数設定する。ここで、代替案数を NA と定義する; Step 2: 既存ボーリング調査結果から同定されている N および F_c の統計モデルに従い、条件付シミュレーションを用いて、仮想調査位置におけるサンプル値($N''_b, F_c''_b, b=1, \dots, NS$)を複数セット得る。ここで、 N'', F_c'' は、シミュレーションによって得た N および F_c のデータセット、 NS はデータセット数を表す; Step 3: N'', F_c'' を仮想的追加調査結果とし、条件付シミュレーションを実施し、

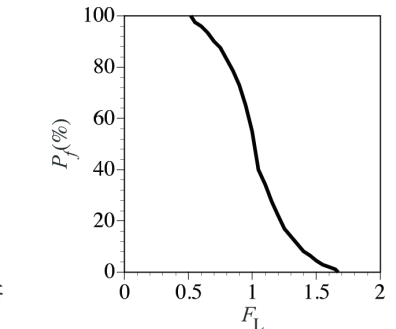


図-1 FL値と液状化確率の関係

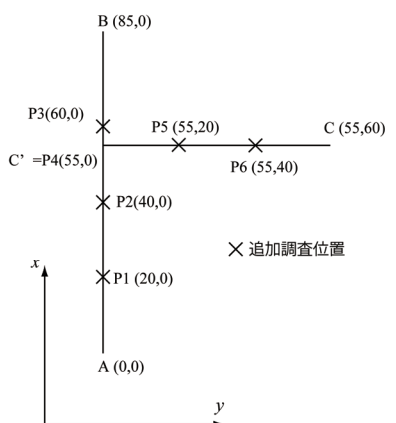


図-2 解析対象サイト平面図 既存ボーリング位置(A,B,C)と追加候補調査位置(P1~P6)

式 (5) によって得られる平均液化化確率を求め、これを $\bar{P}_{FE50}|\mathbf{N}^l, \mathbf{F}_c^l$ $l=1,2,...,NS$ と定義する；Step 4: NS 個の $\bar{P}_{FE50}|\mathbf{N}^l, \mathbf{F}_c^l$ $l=1,2,...,NS$ の標準偏差 σ_{pf} を得る；Step 5: Step 1～Step 4を代替案数繰返し、個々の代替案に対して、標準偏差を求め、 $\sigma_{pf,a}$ $a=1,...,NA$ と定義する；Step 6: NA 個の代替案の中から、最大の $\sigma_{pf,a}$ に対応した案を最適代替案とする。

4. 解析対象地域の概要 解析対象領域にはボーリング孔が3箇所含まれており、このデータを基に2断面（A-B、C-C'）解析の対象とする。この地下水面が存在する深度1.3m～11m深までの砂層を液化化解析の対象とする。図-2は、平面図で、既存ボーリング点は（A,B,C）、検討する追加ボーリング位置をP1～P6で表している。

5. 土質定数の統計モデル ボーリング調査結果に基づいて、 N 値と細粒分含有率 F_c の統計モデルが調査結果から以下のように求められた。ただし、定数のばらつきの大きさを考慮して、それぞれ、非負が保証される $\log N$ および $\log F_c$ についてモデル化を行った。結果を表-1に示す。

6. 地震ハザードとフラジリティ 図-3には、J-SHIS（防災科学技術研究所）の情報に基づく、対象地点での南海トラフ地震50年ハザード曲線を示している。図面の横軸は、地表面の最大加速度を、縦軸は確率を表している。なお、J-SHISでは、工学的基盤におけるハザードが得られるが、ここでは、地表面の値として増幅させている。図-3には、C-C'断面における液化化によるフラジリティ

曲線も表記している。これによると、500Gal程度

の地震で、液化化確率はほぼ100%になることが分かる。なお、A-B断面に関しても解析を実施し、ほぼ同様の結果を得ている。

7. 液化化確率分布 式（4）は、空間の任意の点の液化化確率を与えるため、この解析結果を空間に展開し、C-C'断面で液化化確率分布を求めた結果を図-4に示す。深度2m～8mでは、液化化確率は60%以上でかなり高い値となっている。C-C'断面では図面右端での深度3m～8m付近で、確率が高く、ほぼ100%に近い部分も存在する。

8. 最適追加ボーリング位置の検討 解析では、仮想計測結果をP1～P6（ $NA=6$ ）に与えて液化化確率を算定する。ここで、繰返し回数は、 $NS=10$ である。6点に関して、液化化確率の標準偏差を求めた結果を表-2にまとめている。結果によると、P1～P3は、A-B断面に関するもの、P4～P6はC-C'断面に関するものである。P6における標準偏差が最大となっている。つまり、この点が、追加調査の最適点である。これは、図-4より、P6からC点までの区間に、液化化確率が大きな箇所が存在するためである。一方、A-B断面では、P3が最適点である。

9. まとめ 条件付きシミュレーション法利用して、地盤物性の不確定性を考慮した最適追加候補調査位置の決定方法（確率的感度解析）を示した。この方法によって、液化化確率に感度の高い調査位置の決定を簡便に行うことができることを実証できた。

謝辞： 本研究を進めるに当たって、中国地方整備局岡山国道事務所にはご配慮を頂いた。記して謝意を表する。

引用文献 1) Deutsch, C. V. and Journel, A. G. (1992): GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide, New York and Oxford: Oxford University Press. 2) Iwasaki, T., Arakawa, A. and Tokida, K. (1982): Simplified procedure for assessing soil liquefaction during earthquakes, Proc. of Soil Dynamics & Earthquake Engineering Conference, 925-939.

表-1 土質定数の統計モデル

パラメータ	$\log N$	$\log F_c$
平均値関数	$m = 0.3812 - 0.0011x + 0.0004y + 0.0804z$	$m = 1.2832 - 0.0003x - 0.0004y + 0.0096z$
共分散関数	$C_{ij} = 0.5 \cdot (0.2772)^2 \exp \left\{ - \left(\frac{x_i - x_j}{10} \right)^2 - \left(\frac{y_i - y_j}{10} \right)^2 - \left(\frac{z_i - z_j}{0.79} \right)^2 \right\} \quad (i \neq j)$	$C_{ij} = 0.5 \cdot (0.2543)^2 \exp \left\{ - \left(\frac{x_i - x_j}{10} \right)^2 - \left(\frac{y_i - y_j}{10} \right)^2 - \left(\frac{z_i - z_j}{0.78} \right)^2 \right\} \quad (i \neq j)$
	$C_{ii} = (0.2772)^2 \quad (i = j)$	$C_{ii} = (0.2543)^2 \quad (i = j)$

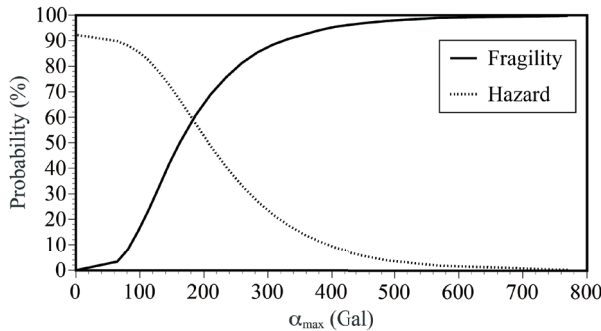


図-3 地震ハザードフラジリティ（C-C'断面）

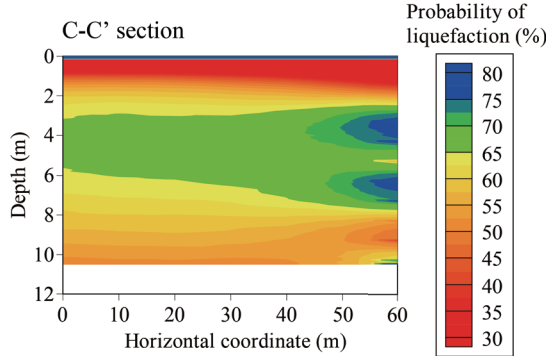


図-4 今後50年の液化化確率分布

表-2 液化化確率の標準偏差

Point No.	x	y	S.D.
P1	20	0	4.077
P2	40	0	3.275
P3	60	0	4.101
P4	55	0	3.894
P5	55	20	6.171
P6	55	40	6.888

S.D.: 標準偏差