

# 条件付きシミュレーションを用いた感度解析による最適追加調査位置の評価法 Evaluation method for the optimal location of additional site investigation based on sensitivity analysis with use of conditional simulation

○今出 和成\*, 西村 伸一\*, 柴田 俊文\*, 珠玖 隆行\*

○Kazunari Imaide, Shin-ichi Nishimura, Toshifumi Shibata, Takayuki Shuku

**1. はじめに** 液状化対策の検討では、FL法が一般的に用いられる。本研究では、FL法を用いた多次元な液状化解析を実施した。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、地質統計手法の一つである条件付きシミュレーション<sup>1)</sup>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評価法を提案する。提案法は確率論に立脚しており、地盤定数の不確定性を考慮している点が特色である。

**2. 液状化確率の計算** 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、 $a_{max}$ の関数として、式(1)に示すように与えられる。Fig.1に岩崎ら<sup>2)</sup>が求めた液状化安全率と液状化確率の関係を示している。式(2)によって液状化確率 $P_f$ を計算する。50年ハザード曲線 $H$ と、フラジリティ曲線を表す式(3)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。さらに、空間的に積分された空間平均液状化確率を式(5)に定義する。ここで、 $L_x, L_y$ は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。

**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( $N^l, F_c^l, l=1, \dots, NS$ )を複数セット得る。ここで、 $N^l, F_c^l$ は、シ

Table1 各計算式  
Equations

$F_L = F_L(x, y, z, N, F_c, a_{max}) = \frac{R(x, y, z, N, F_c)}{L(z, a_{max})}$	(1)
$P_f(x, y, z, a_{max}) = G(F_L(x, y, z, a_{max}; N, F_c))$	(2)
$P_{fE}(x, y, z, a_{max}) = E[G(F_L(x, y, z, a_{max}; N, F_c))]$	(3)
$P_{fE50}(x, y, z) = -\int_0^\infty \frac{dH(a_{max})}{da_{max}} \cdot P_{fE}(x, y, z, a_{max}) da_{max}$	(4)
$\bar{P}_{fE50} = \frac{1}{L_x L_y} \int_{L_x} \int_{L_y} \int_0^{20} \frac{P_{fE50}(x, y, z)(10-0.5z) dz}{\int_0^{20} (10-0.5z) dz} dx dy$	(5)

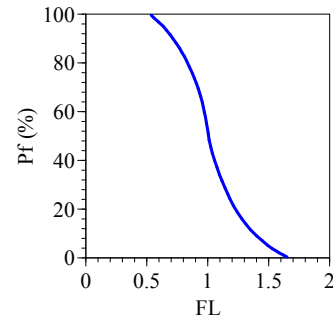


Fig.1  $F_L$ と液状化確率 $P_f$ の関係  
Relationship between  $F_L$  and  $P_f$

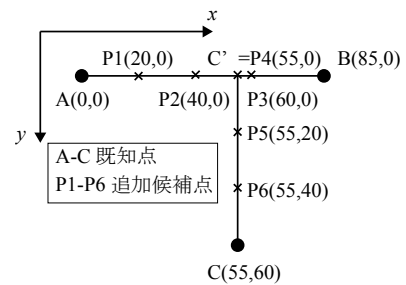


Fig.2 解析地点の平面図  
Plan view of the site of analysis

\*岡山大学大学院環境生命科学研究科 Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University  
キーワード：信頼性設計，液状化確率，最適調査位置

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:  $N^*$ ,  $F_c^*$  を仮想追加調査結果とし, 条件付シミュレーションを実施し, 式(5) によって得られる平均液状化確率を求め, これを  $P_{FE50}|N^*, F_c^* | l = 1, 2, \dots, NS$  と定義する; Step 4:  $NS$  個の  $P_{FE50}|N^*, F_c^* | l = 1, 2, \dots, NS$  の標準偏差  $s_{pf}$  を得る; Step 5: Step 1~Step 4 を代替案数繰り返す, 代替案毎に標準偏差を求め,  $s_{pf,a} a = 1, \dots, NA$  と定義する; Step 6:  $NA$  個の代替案の中から, 最大の  $s_{pf,a}$  に対応した案を最適代替案とする.

**4. 解析対象の概要** Fig.2 には, 解析対象領域の平面図を示している. 既知点は(A,B,C), 検討する追加候補位置を P1~P6 で表している. 2 断面 (A-B, C-C') について, 地下水面が存在する深度 1.3m~11m 深までの砂層を液状化解析の対象とする.

**5. 液状化確率分布** 式(4)より, A-B, C-C' 断面で液状化確率分布を求めた結果を Fig.3(a), (b)に示す. Fig.3(a)の深度 2m~5m では, 液状化確率が 65%以上と値が高い. 特に, 左端では深度 2m~8m 程度まで, 確率が 60%以上となる広がり確認された. また, Fig.3(b)の深度 2m~8m では, 液状化確率は 60%以上と値が高い. 特に, 右端の深度 3m~8m 付近で, 確率が高く, 100%に近い部分も存在する.

**6. 最適追加ボーリング位置の評価** 解析では, 仮想計測結果を P1~P6( $NA=6$ )に与えて液状化確率を算定する. ここで, 繰り返し回数は,  $NS=10$  である. Table.3 に 6 点に関して, 液状化確率の標準偏差をまとめている. このうち, 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.

C-C' 断面では, P6 が追加調査の最適点 (標準偏差が最大) である. これは, Fig.3 より, P6 から C 点までの区間に, 液状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.

**7. まとめ** 条件付きシミュレーションを利用して, 地盤物性の不確定性を考慮した最適追加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, 液状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.

**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.

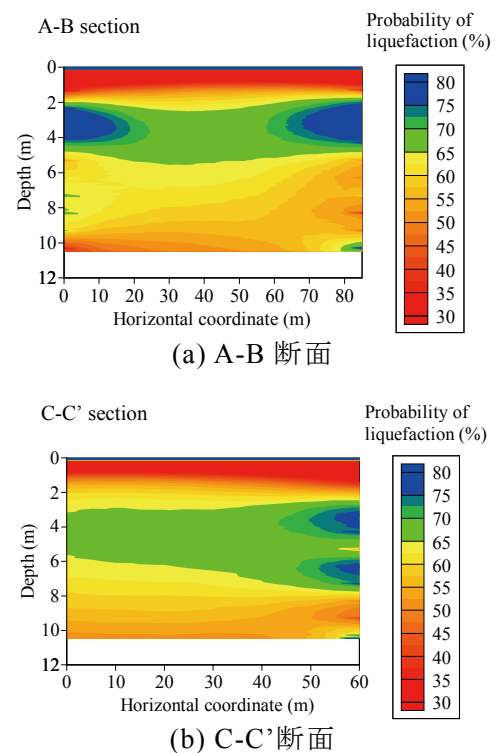


Fig.3 今後 50 年の液状化確率分布  
Spatial distribution of liquefaction probability over the next 50 years

Table.3 液状化確率の標準偏差  
Standard deviation of liquefaction probability

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