

確率的感度解析による最適追加調査位置の決定法

Determination Procedure for Optimum Location of Additional Investigation
by Probabilistic Sensitivity Analysis

今出和成 Kazunari IMAIDE ((株)三祐コンサルタンツ)
西村伸一 Shin-ichi NISHIMURA (岡山大学大学院環境生命科学研究科)

本研究では、液状化確率を効率的に評価するために、最適な追加調査の位置を決定する方法を提案する。提案する方法では、特に、既往の調査結果がすでに存在している場合に、追加で実施する調査の位置を決定する方法を示している。また、調査位置の決定には、液状化確率の感度解析および地質統計学手法の一つである条件付きシミュレーション法を用いた。提案法を実際の建設現場のデータに適用し、実用的に活用しうる手法であることを確認した。

キーワード：信頼性設計，液状化確率，最適追加調査位置，確率感度解析，統計モデル
(IGC: C-09, E-08, E-13)

1. はじめに

構造物の設計において種々の不確実性を定量的に考慮し、より合理的な事業を実施するため、信頼性設計法への移行が様々な分野で進められている^{1), 2), 3)}。特に地盤の物性値はサイト毎に大きなばらつきを持ち、同一のサイトを対象とする場合にも同様に不均質である⁴⁾。そのため、地盤を対象に合理的な設計を行うためには、地盤内部の不均質さを把握するための地盤調査を、適切に実施することが求められる。

近い将来に発生が懸念される南海トラフ地震に備えて液状化対策を行うにあたり、精度の高い解析が求められることは言うまでも無いが、多次元的広範囲の検討も重要である。そのため、多次元的広範囲での検討が数多くなされている^{5), 6), 7), 8)}。広範囲の解析は、解析負荷が大きくなるため、設計上は F_L 法⁹⁾が用いられ、実績も多い。本研究では、この F_L 法に基づいた液状化解析を行うが、多次元の面的な検討を行うところが特色である。このタスクのために、ここでは、地質統計学シミュレーション¹⁰⁾を行っている。ボーリングによる調査では、各土質定数の点における値を知ることができる。実際には、面的な空間的に連続した情報を知りたいが、このためには、点で得られているデータを空間的に補間する必要がある。地質統計学シミュレーションは、この補間の役割を担うものである。この補間は、データの空間分布情報に基づいて理論的に行われ、シミュレーション結果として各定数の推定値が得られるだけでなく、推定値の変動の幅(不確実性)も同時に得られる。

本研究の目的は、最適な追加調査位置の設定方法を提案することである。提案法は確率論に立脚しており、地盤情報の不確実性を考慮した手法である。確率論を用い

た、最適調査位置の決定方法としては、情報量の価値¹¹⁾を用いた研究が一般的である。吉田ら¹²⁾は、液状化危険度を対象として最適な追加ボーリング数および最適位置を情報量の価値とクリッキングに基づいて決定する方法を提案している。また、Yang et al.¹³⁾は、確率有限要素法と地質統計学シミュレーション法を用いて、斜面の安定計算を対象としてコーン貫入試験(CPT)の最適な調査位置および最適な本数を決定する方法を示している。最適本数を考察するには、追加調査費用と調査を追加しない場合のリスクに基づいて、情報量の価値を決定する必要がある。一方で、簡便さを重視して既存の調査地点が存在し、追加できるボーリング数が既知である場合に、最適な追加調査位置を決定する方法を示す点が本研究の特徴である。

手順として、まず、既存ボーリング結果から、 N 値および細粒分含有率 F_c の統計モデルを作成し、そのモデルに基づいて、地質統計学シミュレーションの一つである、条件付きシミュレーションを実施した。次に、条件付きシミュレーション結果を F_L 法に適用することにより、液状化確率を算定した。さらに、任意地点における条件付きシミュレーション結果を、その地点での仮想的な調査結果(仮想サンプル)と仮定し、仮想サンプルを液状化解析に用いるデータに加えた場合の液状化確率の感度解析を行い、最適な追加調査位置を決定した。

2. F_L 法に基づいた液状化確率の算定法

本研究の対象地区が設計されていた時の基準であり、実績も多いと考えられる平成24年版の道路橋示法書の方法を採用して以下を検討した。 F_L 法では、まず、地盤

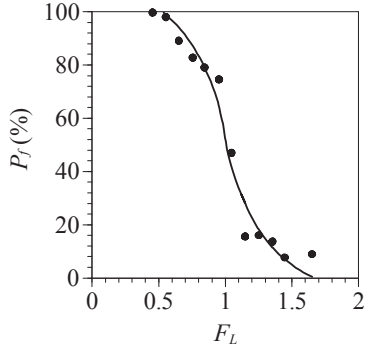


図-1 液状化安全率 F_L と液状化確率 P_f の関係 (Iwasaki et al. ¹⁴)に加筆)

内のある深さの動的せん断強度比 (せん断応力で表した液状化強度と有効拘束圧の比) R を, N 値や粒度分布から求める. 次に, その土に地震時に加わる地震時せん断応力比 L を地表最大加速度などから推定して, 両者の比をとって液状化安全率 F_L を式(1)で求める.

$$F_L = \frac{R}{L} \quad (1)$$

ここに, F_L : 液状化安全率, R : 動的せん断強度比, L : 地震時せん断応力比.

以下に F_L 算出のための式を示す.

$$L = \frac{\gamma_d \alpha_{\max} \sigma_v}{g \cdot \sigma'_v} \quad (2)$$

$$\gamma_d = 1 - 0.015z \quad (3)$$

$$\sigma_v = \gamma_{s1} \cdot h_w + \gamma_{s2}(z - h_w) \quad (4)$$

$$\sigma'_v = \gamma'_{s1} \cdot h_w + \gamma'_{s2}(z - h_w) \quad (5)$$

ここで,

γ_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

α_{\max} : 地表面最大加速度(m/s²)

g : 重力加速度(m/s²)

h_w : 地下水面の深度(m)

γ_{s1} : 湿潤単体積重量(kN/m³)

γ_{s2} : 飽和単体積重量(kN/m³)

γ'_{s2} : 水中単体積重量(kN/m³)

σ_v : 地表面からの深さ z (m)における全上載圧(kN/m²)

σ'_v : 地表面からの深さ z (m)における有効上載圧(kN/m²)

動的せん断強度比 R は, 式(6)により算出する.

$$R = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_a}/1.7 & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a}/1.7 + 1.6 \times 10^{-6}(N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases} \quad (6)$$

・砂質土の場合

$$\left. \begin{aligned} N_a &= c_1 \cdot N_1 + c_2 \\ N_1 &= 170N / (\sigma'_{vb} + 70) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$c_1 = \begin{cases} 1.0 & (0\% \leq F_c < 10\%) \\ (F_c + 40) / 50 & (10\% \leq F_c < 60\%) \\ F_c / 20 - 1 & (60\% \leq F_c) \end{cases} \quad (8)$$

$$c_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq F_c < 10\%) \\ (F_c - 10) / 18 & (10\% \leq F_c) \end{cases} \quad (9)$$

ここに, R : 動的せん断応力比

N : 標準貫入試験から得られる N 値

N_1 : 有効上載圧 100kN/m² 相当に換算した N 値

N_a : 粒度の影響を考慮した補正 N 値

σ'_{vb} : 標準貫入試験を行ったときの地表面からの深さにおける有効上載圧(kN/m²)

c_1, c_2 : 細粒分含有率による N 値の補正係数

F_c : 細粒分含有率(%) (粒径 75 μ m以下の土粒子の通過質量百分率)

液状化安全率 F_L と液状化確率 P_f の関係が Iwasaki et al. ¹⁴)によって求められており, この関係を図-1 に与える. また, Hsein et al. ¹⁵)も別の関係式を示している. ここでは, Iwasaki et al. ¹⁴)のデータに従い, 次式の関数 G によって液状化確率 P_f を計算する.

$$P_f(x, y, z, \alpha_{\max}) = G(F_L(x, y, z, \alpha_{\max}; N, F_c)) \quad (10)$$

関数 G は, 図-1 に示されるが, 数値データとして与えられる. 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_{fE} が計算される. なお, N および F_c の変動性は, 3 章で解説する条件付きシミュレーションで与えるものとする. 次式より, P_{fE} は, 空間上の各点ごとに, α_{\max} の関数として得られる.

$$P_{fE}(x, y, z, \alpha_{\max}) = E[G(F_L(x, y, z, \alpha_{\max}; N, F_c))] \quad (11)$$

3. 条件付きシミュレーション法

まず, 地盤定数を代表する変数を s とし, これが空間座標 $\mathbf{u}=(x, y, z)$ の関数であるとする. 一般に, s は次式で与えられ, 平均値関数 $m(\mathbf{u})$ と確率成分 $\sigma(\mathbf{u}) \cdot U(\mathbf{u})$ の線形結合で表されると仮定される.

$$s(\mathbf{u}) = m(\mathbf{u}) + \sigma(\mathbf{u}) \cdot U(\mathbf{u}) \quad (12)$$

ここで, $\sigma(\mathbf{u})$ は, 標準偏差関数, $U(\mathbf{u})$ は, 基準化された確率変数である.

点としての情報として得られている地盤定数の値を補間するための手法として, 地質統計学手法の一つであるクリッキング¹⁰)が良く用いられる. 点 a における地盤パラメータのサンプル値を α とし ξ_a が得られているとき, 任意の位置における基準化されたパラメータ値 (平均 0, 標準偏差 1 の正規確率変数) U^* は, 次式で定義される.

$$U^* = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} U_{\alpha} \quad (13)$$

ここで, λ_{α} は, 座標をパラメータとする補間係数であり, $\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1$ を満足する. また, n は, 補間のために用いるサンプル点数である. 上式から明らかなように, クリッキングにおいては, 他の一般的な補間法と同様, 空間中の任意の点における値が, サンプル値の線形和で与えられることになる. ただし, λ_{α} が, パラメータ値の空間的な相関性に基づいて決定されるのが, クリッキングの特色である. 式(13)を用いるためには λ_{α} を適切に決定す

必要があるが、以下ではその方法を簡単に示している。

途中の式の展開をここでは省略するが (Journal and Huijbregts¹⁰)を参照, 真の確率過程 $U(x, y, z)$ と補間値 $U^*(x, y, z)$ の二乗残差の期待値は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_k^2(x, y, z) &= E\left[|U(x, y, z) - U^*(x, y, z)|^2\right] \\ &= \sigma_U^2 - 2 \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C_U(x, y, z; x_{\alpha}, y_{\alpha}, z_{\alpha}) \\ &\quad + \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C_U(x_{\alpha}, y_{\alpha}, z_{\alpha}; x_{\beta}, y_{\beta}, z_{\beta}) \end{aligned} \quad (14)$$

変数 λ_{α} は, $\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1$ なる拘束条件下で, $\sigma_k^2(x, y, z)$ を最小化するように決定される。また, σ_U^2 は, 確率過程 $U(x, y, z)$ の分散を表しており, ここでは, 定義により $\sigma_U^2 = 1$ である。また, C_U は共分散関数である。

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_{\alpha}} \left\{ E\left[|U(x, y, z) - U^*(x, y, z)|^2\right] - 2\kappa \left(\sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} - 1\right) \right\} = 0 \quad (15)$$

これから, 次の連立一次方程式が得られ, これを解くことによって係数 λ_{α} を求めることができる。

$$\begin{aligned} \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C_U(x_{\alpha}, y_{\alpha}, z_{\alpha}; x_{\beta}, y_{\beta}, z_{\beta}) - \kappa &= C_U(x_{\alpha}, y_{\alpha}, z_{\alpha}; x, y, z) \\ \forall \alpha &= 1, 2, \dots, n \\ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} &= 1 \end{aligned} \quad (16)$$

ここで, κ はラグランジュ定数である。上式から明らかなように, 係数 λ_{α} は, 任意の空間座標 (x, y, z) の変数として求められる。クリッキングによる補間では, サンプル点において補間値とサンプル値が一致する。

クリッキングでは分散 $\sigma_k^2(x, y, z)$ が最小となるように一つの平均的な補間関数が定義されるが, 本来, 分散はサンプリング点以外では 0 ではないので, パラメータの補間値は変動性を有することになる。そこで, その変動性を考慮するために, 多くのリアライゼーション(実現値)を生成して複数回のシミュレーション実施する方法が, 条件付きシミュレーション法である。本研究ではこの解析法を採用しており, 解析コード SGSIM¹⁶)を用いている。本手法によって得られる実現値は, サンプルデータが存在する点で条件付けられることになる。確率変数 $U(x, y, z)$ の一つの実現値は, 乱数によって次式によって与えられる。

$$U_c^{(l)}(x, y, z) = U^*(x, y, z) + U^{(l)}(x, y, z) - U^*(x, y, z) \quad (17)$$

ここで, $U_c^{(l)}(x, y, z)$ は, l 番目の条件付き実現値, $U^*(x, y, z)$ はクリッキング推定値, $U^{(l)}(x, y, z)$ は, l 番目の条件なし実現値, $U^*(x, y, z)$ は, l 番目のデータサンプル点の値を用いたクリッキング推定値である。式(17)の右辺第 1 項はクリッキングによる推定値で, 第 2 項と第 3 項の差が, クリッキングによる推定誤差を表しており, 条件付きシミュレーションでは正規乱数として加えられることになる。乱数によって作成された実現値, $U_c^{(l)}(x, y, z)$ は, 最終的に式(12)の U に代入され, 地盤パラメータの実現値 s が

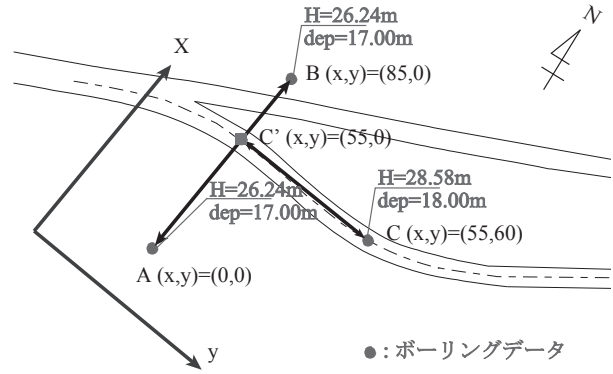


図-2 解析対象地盤の平面図

生成される。本研究の場合は, N および F_c の空間分布の推定に本手法が適用されている。

4. 液状化に対する fragility と地震ハザードを考慮した液状化確率

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 fragility 曲線から式(18)により, 解析対象地点の 50 年液状化確率を求めることができる。

$$P_{JE50}(x, y, z) = - \int_0^{\alpha_{\max}} \frac{dH(\alpha_{\max})}{d\alpha_{\max}} P_{JE}(x, y, z, \alpha_{\max}) d\alpha_{\max} \quad (18)$$

ここで, P_{JE50} : 今後 50 年の液状化確率, α_{\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} : fragility 関数 (任意点, 任意の加速度に対する液状化確率)

地震ハザード関数とは, 地震の大きさ (加速度の大きさ) に対応した発生確率を連ねた曲線を意味する。この具体的な形については 6 章で示す。fragility 関数 P_{JE} は, 式(11)で定義される空間点における液状化確率である。

式(18)は, 空間的な液状化確率を表すが, 意思決定には使いにくい。そこで, 次式によって空間的に積分された, 空間平均液状化確率を式(19)に定義する。

$$\bar{P}_{JE50} = \frac{1}{L_x L_y} \int_{L_x}^{L_x} \int_{L_y}^{L_y} \frac{\int_0^{20} P_{JE50}(x, y, z)(10-0.5z) dz}{\int_0^{20} (10-0.5z) dz} dx dy \quad (19)$$

ここで, L_x, L_y : x 方向, y 方向の検討範囲である。また, 式(19)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おり, いわゆる P_L 法¹⁷⁾に準拠している。また, 式(11)に関しても, 空間平均を式(20)として定義する。

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

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	$C_{ij} = 0.5 \cdot (0.2772)^2 \exp \left\{ - \left(\frac{x_i - x_j}{10} \right)^2 - \left(\frac{y_i - y_j}{10} \right)^2 - \left(\frac{z_i - z_j}{0.79} \right)^2 \right\} \quad (i \neq j)$ $C_{ij} = (0.2772)^2 \quad (i = j)$	$C_{ij} = 0.5 \cdot (0.2543)^2 \exp \left\{ - \left(\frac{x_i - x_j}{10} \right)^2 - \left(\frac{y_i - y_j}{10} \right)^2 - \left(\frac{z_i - z_j}{0.78} \right)^2 \right\} \quad (i \neq j)$ $C_{ij} = (0.2543)^2 \quad (i = j)$

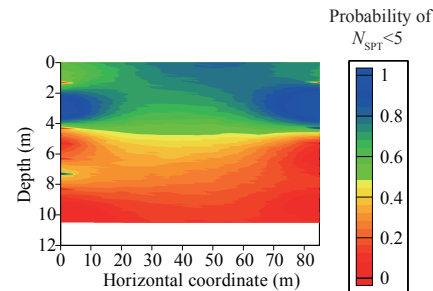
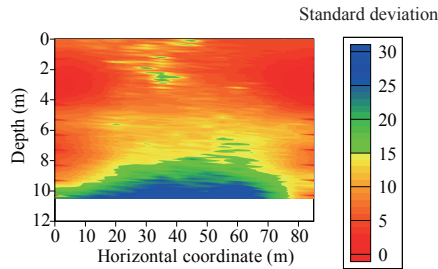
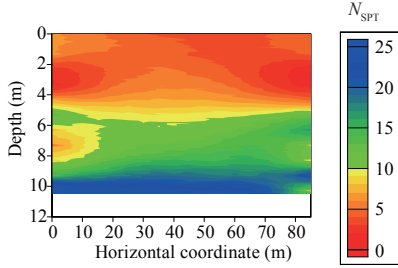


図-3 N 値の空間分布 (A-B 断面)

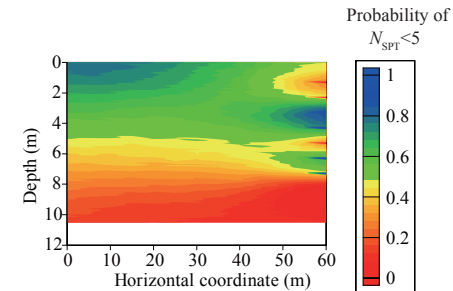
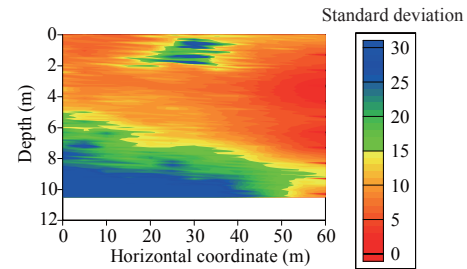
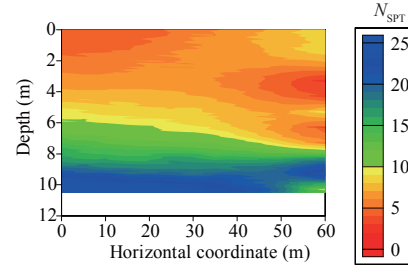


図-4 N 値の空間分布 (C-C'断面)

5. 追加ボーリングの確率的感度解析

ここでは、追加ボーリング調査を計画する場合に、効率的にボーリング位置を決定する方法を、確率論的に検討する。具体的には、次のフローを提案する。

- 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:従前のボーリング調査結果から推定される N および F_c の統計モデルに従い、条件付きシミュレーションを用いて、追加調査位置における仮想サンプル値 ($N^*_l, F_c^*_l, l=1, \dots, NS$) 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: $N^*_l, F_c^*_l$ を仮想サンプルとし、条件付きシミュレーションを実施し、式(19)によって得られる空間平均液状化確率を求め、これを $\bar{P}_{j50} | N^*_l, F_c^*_l, l=1, 2, \dots, NS$ と定義する。
- Step 4: NS 個の $\bar{P}_{j50} | N^*_l, F_c^*_l, l=1, \dots, NS$ の標準偏差 σ_{PF} を得る。

Step 5:Step 1~Step 4 を代替案数繰り返す、個々の代替案に対して、標準偏差を求め、 $\sigma_{PF, a}, a=1, \dots, NA$ と定義する。

Step 6: NA 個の代替案の中から、最大の $\sigma_{PF, a}$ に対応した案を、最適代替案とする。

この方法では、仮想サンプルを複数乱数に基づいて用意した場合、感度が高いと乱数のばらつきが反映され、結果である液状化確率のばらつきが大きくなることに基づき、最適な追加調査位置を決定している。

6. 事例解析

6.1 現地の概要

解析対象地盤の平面図を図-2 に示す。解析対象領域には既往ボーリング孔が3箇所含まれており、このデータを基に2断面 (A-B, C-C') を解析の対象とする。また、11m深までの砂層を液状化解析の対象としており、この2断面 (A-B, C-C') に追加のボーリング調査を行う場合

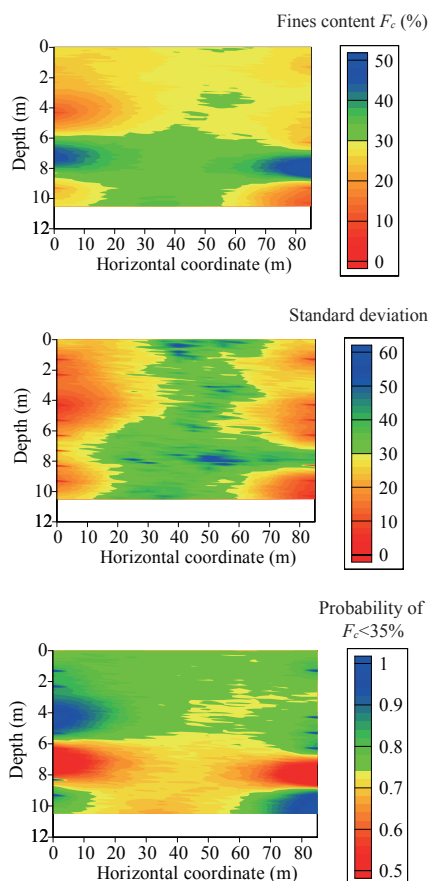


図-5 細粒分含有率の空間分布 (A-B断面)

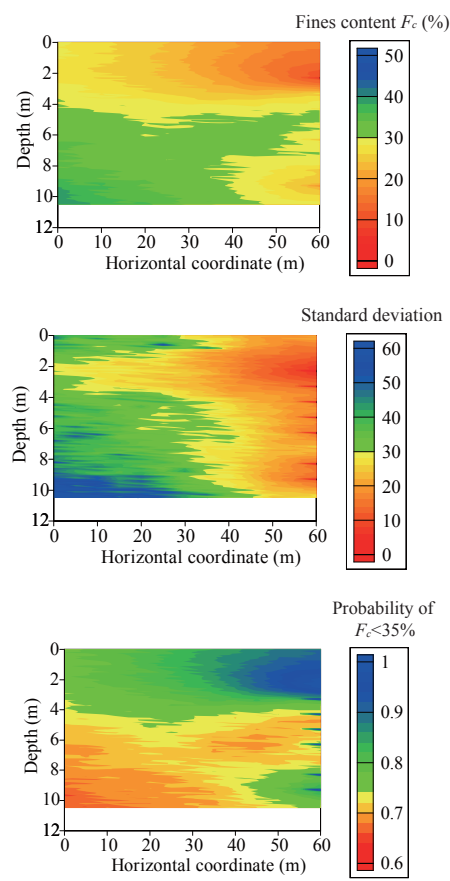


図-6 細粒分含有率の空間分布 (C-C'断面)

の最適位置を検討する。

6.2 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 の統計モデルが表-1のように求められた。統計モデル化の手順はNishimura and Shimizu¹⁸⁾に述べられているため、ここでは詳細を割愛している。ただし、定数のばらつきを考慮して、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。

共分散関数については、指数関数と仮定してモデル化した。また、物性値の空間的な相関性の強さを表現するパラメータである相関距離は、 $l_x=l_y=10.0$ m、 $l_z=0.79$ m ($\log N$)、 $l_z=0.78$ m ($\log F_c$)とした。ここで、 l_x 、 l_y 、 l_z はそれぞれ、x、yおよびz方向の相関距離である。深度方向の相関距離については正確に求まっているが、水平方向については、ボーリング位置間隔が最短でも65m以上離れており、相関距離を求めるには大きすぎるため確信度が低い。適切な値を得るためには、5m間隔以下の試験間隔が必要であることが示されている^{19),20)}。ここでは、西村²¹⁾を参考として過去の実績から見ても常識的な値と考えられる10mを水平方向の相関距離とした。

6.3 条件付きシミュレーションによるN値と細粒分含有率の空間分布推定

表-1で示した統計モデルにしたがって、条件付きシミュ

レーションを2000回繰り返して実施し、N値と細粒分含有率 F_c の空間分布を求めた結果を図-3~6に示す。図-3は、A-B断面におけるN値の結果で、上から、期待値、標準偏差、 $N < 5$ となる確率を示している。当然、地表面に近いほどN値の期待値は小さくなっている。標準偏差は、ボーリング孔の存在する、 $x=0$ mおよび80m付近で小さくなる。これは、ボーリング孔に近いほど、値の確信度が高いということを表現したものである。 $N < 5$ の確率は、この2つの要因に影響されるため、図面の上部の左右端で、この確率が大きくなる傾向が明らかである。図-4は、C-C'断面で同様の検討を行ったものである。この断面では、 $y=60$ mにボーリング孔が存在し、この付近の標準偏差が小さい。期待値としては、図面左上と、右の深度3m付近を中心にN値が小さくなっている。 $N < 5$ の確率も、この2カ所で鮮明に高いが、 $y=60$ m付近は、情報の確信度が高いため、確率値の大小の減り張りが強く出ている。

図-5は、A-B断面における F_c の分布を示す。図は上から、期待値、標準偏差、 $F_c < 35\%$ の確率を示している。期待値の図によると、深度6.5m~8.5m付近で F_c が大きくなっている。標準偏差は、N値と同様、ボーリング孔の存在する $x=0$ mおよび80m付近で小さくなる。これに呼応して、 $F_c < 35\%$ の確率は、図の両端で、値の大小の減り張りのある分布となっている。図-6は、C-C'断面で、 F_c について同様の検討を行ったものである。図の右端、

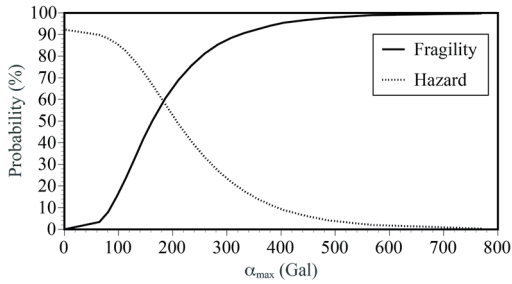
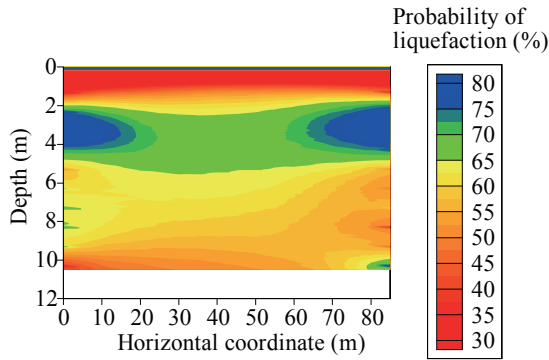
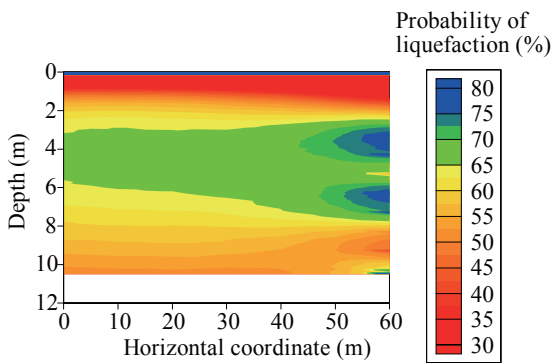


図-7 地震ハザードフラジリティ (C-C'断面)



(a) A-B 断面



(b) C-C'断面

図-8 今後 50 年の液状化確率 P_{FE50} 分布

* Horizontal coordinate は、A-B 断面では x 軸、
C-C'断面では y 軸に対応する

$y=60\text{m}$ 付近の上部で標準偏差は小さくなっている。期待値は、標準偏差が小さい部分で低くなっているため、 $F_c < 35\%$ の確率も、これに呼応して、図面右上部で小さくなっている。

6.4 地震ハザードとフラジリティ

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。図-7 には、J-SHIS²²⁾の情報に基づく、対象地点での南海トラフ地震に対する今後 50 年間の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、地盤物性値を考慮した有限要素解析の工学的基盤に地震波を入力し地表面加速度として増幅させた。

なお、図-7 は C-C'断面における液状化によるフラジリ

表-2 液状化確率の標準偏差

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

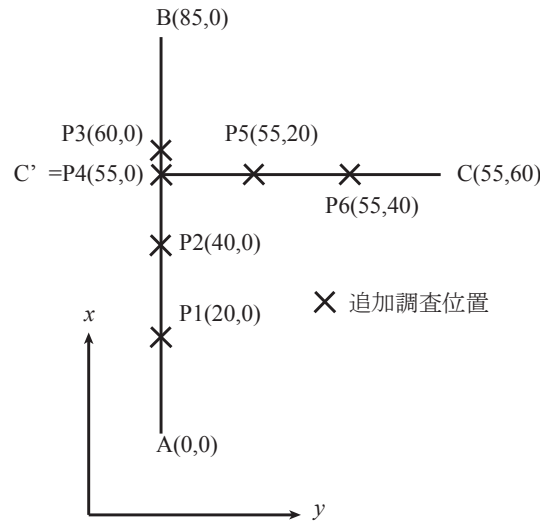


図-9 既存ボーリング位置 (A, B, C) と追加調査位置 (P1~P6)

ティ曲線を表している。すなわち、地表面最大加速度 α_{\max} と式(20)で与える液状化確率 $\bar{P}_{FE}(\alpha_{\max})$ との関係を示している。これによると、500Gal 程度の地震で、液状化確率はほぼ 100%になることが分かる。また、A-B 断面に関してもフラジリティ曲線を作成し、ほぼ同様の結果となることを確認している。

6.5 液状化確率分布

式(18)は、空間の任意の点の液状化確率を与えるため、この解析結果を空間に展開し、A-B 断面と C-C'断面で液状化確率分布を求めた結果を図-8 に示す。どちらの断面でも、深度 2m~8m では、液状化確率は 60%以上でかなり高い値となっている。なお、図-8 (a) の A-B 断面では、図の両端の深度 2m~4m 付近、図-8 (b) の C-C'断面では図面右端での深度 3m~8m 付近で、液状化確率が高く、ほぼ 100%に近い部分が確認された。

6.6 最適追加ボーリング位置の検討

5章で示した方法を、対象地盤に適用する。図-9 は、図-2 をまとめ直したものであり、追加調査を検討する位置を示している。既存ボーリング点は(A, B, C)、追加調査位置を P1~P6 で表している。このうち P1~P3 は A-B 断面、一方で P4~P6 は、C-C'断面に存在している。既存ボーリングにおける N 値と細粒分含有率 F_c の結果を

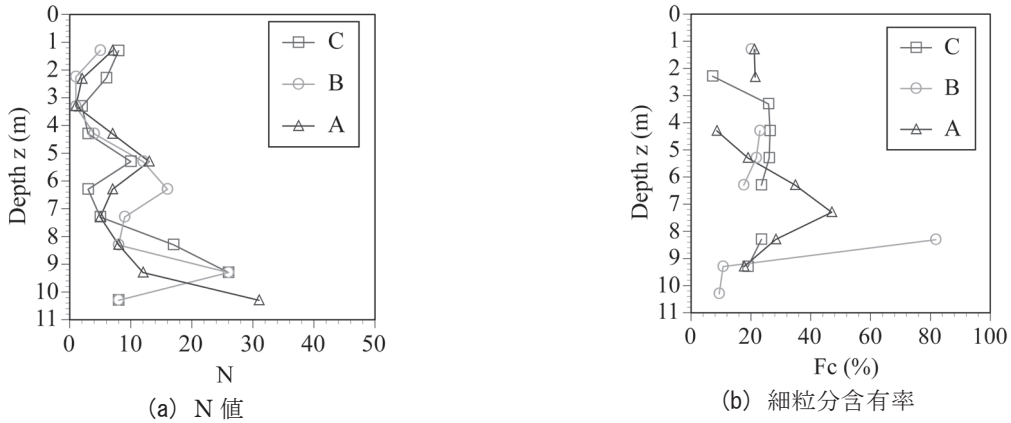


図-10 既存ボーリングにおける計測結果

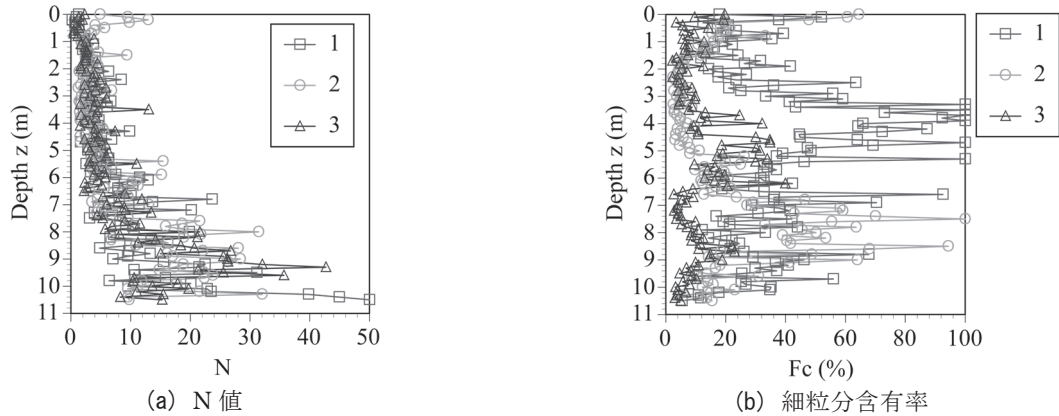


図-11 シミュレーションにより作成された仮想サンプルの例 (P6に対応, シミュレーション3回分)

図-10 に示す. さらに, シミュレーションによって生成されるP6における仮想サンプルを図-11に例示している.

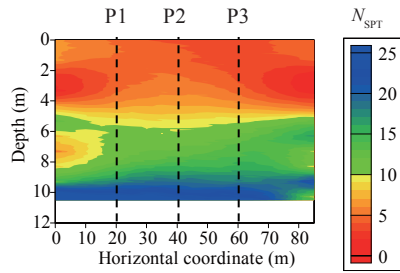
対象地盤での最適追加調査位置の検討では, 仮想サンプルを P1~P6 (NA=6)に与えて液状化確率の感度を確認した. 検討では各追加調査位置で 10 回分サンプルを与えているが, 図-11 には例として 3 回分の結果を示す. N 値に関しては既存ボーリング結果と類似しているが, F_c は 6m 以浅において, 図-10(b)の調査結果と比べて大きな値となっている. 実際のデータと仮想サンプルに差異が生じる理由として, 乱数を用いて仮想サンプルを作成するため, まれなケースとして図-10(b)「1」の様な実現値が発生していると考えられる. これが, 全シミュレーション 2000 回の中で, 希なケースであることは, 図-6(c)のから確認される. このような, 乱数数列が生成される原因は, 図-10(b)のボーリング B で確認された深度 8.5m のデータの存在と考えられ, ボーリング数が少ないため, 統計モデルの中で, 仮想的に高細粒分含有率の層が生成されたと考えられる.

また, 前述のように既存ボーリングデータ数が少ないことが F_c のばらつきの一因の一つと考えられるが, 図-5,

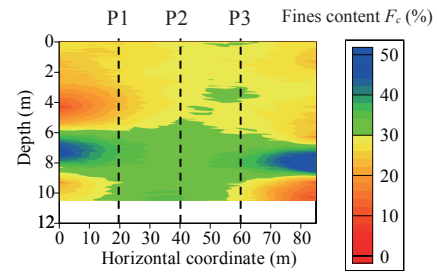
図-6 に示すように, 期待値の分布は常識的な範囲であることを確認している.

6 点に関して, 液状化確率の標準偏差 σ_{F_c} を求めた結果を表-2 にまとめている. これらの結果のうち, P1~P3 は A-B 断面に関するもので, 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ことから, この事例においては, P6 が追加調査の最適点であった. これは, 図-8 (b)で確認されるように, 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 が最適点となった.

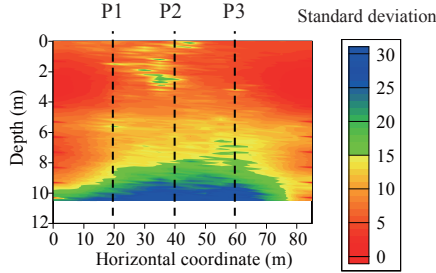
加えて, 図-3~図-6 に追加調査位置を追記してまとめた直した図を図-12, 図-13 に示す. A-B 断面での最適点である P3 において, 図-12(a)より, 深度 4m 以浅の N 値の期待値が P1 及び P2 と比べてやや小さく, 図-12(b)より, 深度 4m 以浅の標準偏差は, P1 及び P2 と比べてやや小さくなっている. 加えて, 図-13(a)より, P3 では深度 4m 辺りで F_c が 40%程度となる部分があり, P1 及び P2 と比べてやや大きく, 図-13(b)より, 深度 4m 辺りの標準偏差は, P3 がやや大きくなっている.



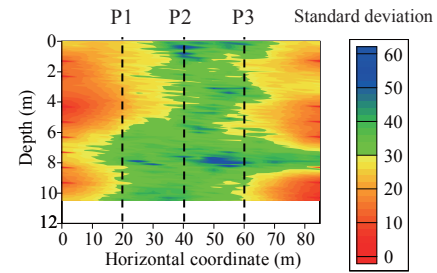
(a) N 値の期待値 (A-B 断面)



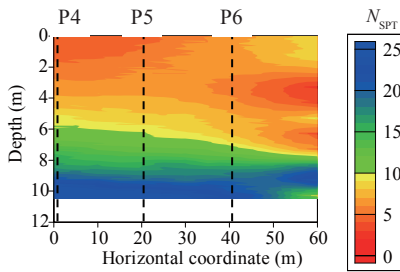
(a) 細粒分含有率の期待値 (A-B 断面)



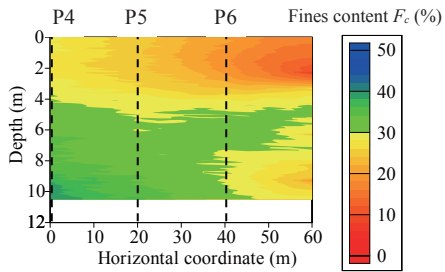
(b) 標準偏差 (A-B 断面)



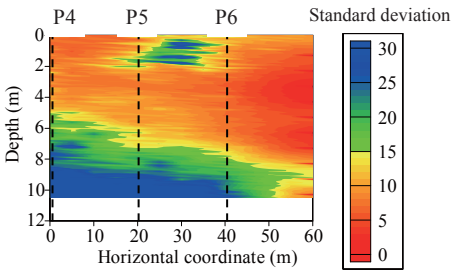
(b) 標準偏差 (A-B 断面)



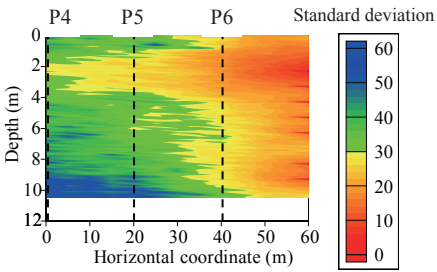
(c) N 値の期待値 (C-C'断面)



(c) 細粒分含有率の期待値 (C-C'断面)



(d) 標準偏差 (C-C'断面)



(d) 標準偏差 (C-C'断面)

図-12 N 値の空間分布と追加調査位置の関係

図-13 細粒分含有率の空間分布と追加調査位置の関係

一方、追加調査の最適点と判断された C-C'断面の P6 について、図-12(c)より、N 値の期待値が 10 以下となる範囲が P4 及び P5 と比べてやや広く、図-12(d)より、標準偏差が 15 以下となる範囲が P4 及び P5 と比べてやや広い。加えて、図-13(c)より、P3 では F_c が 30 以下となる範囲が広く、深度 4m 以浅では F_c が 20 以下となる範囲も広がっている。また、図-13(d)より、P6 は P4 及び P5 と比べて全体的に 10 程度標準偏差が小さい。

以上、図-12、図-13 で確認された結果から、N 値や F_c の大きさと標準偏差の大きさはやや相関しており、液化確率の標準偏差が大きくなる調査点は、N 値及び F_c の値や標準偏差が相対的に小さい地点であることが確認された。よって、液化確率が大きい地点であり、なおかつ小さい標準偏差を持つ地点が追加調査の最適点とし

て選定されたと考えられる。

7. まとめ

- (1) ボーリング結果に基づいて、N 値と細粒分含有率 F_c の統計モデルを決定した。
- (2) 決定した統計モデルを利用して、N および F_c の値を、条件付きシミュレーションに基づいて内挿補間した。この方法によって、ボーリング孔付近では、より標準偏差が小さくなるように、つまり確信度が高くなるような値が補間されることが確認できた。
- (3) 解析対象地域における地震ハザード曲線を求め、地表面最大加速度を変化させて、フラジリティ曲線を

得た。これによって、今後 50 年における対象地域の液状化確率の空間分布を求めることができた。また、液状化確率 $P_{FE}(x,y,z)$ の空間的な平均値 \bar{P}_E を求めることによって、解析対象とした地盤全体のフラジリティを得ることができた。

- (4) 条件付きシミュレーション法に基づき、地盤物性の空間的な不確定性を考慮して、既存の調査地点が存在し、追加できるボーリング数が既知である場合に、簡便に最適な追加調査位置を決定する方法を示すことができた。
- (5) 本検討では既存ボーリング数が限られていたことから、統計モデル作成における各定数の統計的推定誤差の考慮や調査結果に基づく提案手法の妥当性の検討については今後の検討課題である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H02577 の助成を受けて実施されたものである。記して謝意を表す。また、現地調査の実施に当たっては、中国地方整備局岡山国道事務所にはご配慮を頂いた。ここに厚く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会：構造工学シリーズ 28 信頼性設計法に基づく土木構造物の性能照査ガイドライン，土木学会，136p.，2018.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，196p.，2017.
- 3) Phoon, K.K., Retief, J. V.: Reliability of Geotechnical Structures in ISO2394, 248p., 2016.
- 4) Fenton, G.A., Griffiths, V.D.: Risk assessment in geotechnical engineering, 480p., 2008.
- 5) 西村伸一，清水英良：条件付きシミュレーションによる液状化対策工の信頼性設計，農業農村工学会論文集，Vol.79, pp.329-337, 2011.
- 6) 大竹雄，本城勇介，平松佑一，吉田郁政，佐古俊介，中山修，長野拓朗：震災履歴を有する河川堤防 20km における地盤調査地点を考慮した液状化危険度解析とその有効性検証，地盤工学ジャーナル，Vol.9, pp.203-217, 2014.
- 7) Vivek, B., Raychowdhury, P.: Probabilistic and spatial liquefaction analysis using CPT data: A case study for Alameda County site. Nat. Hazards, Vol.71, pp.1715-1732, 2014.
- 8) Jinguuji, M., Toprak, S.: A case study of liquefaction risk analysis based on the thickness and depth of the liquefaction layer using CPT and electric resistivity data in the Hinode area, Itako City, Ibaraki Prefecture, Japan. Explor. Geophys, Vol.48, pp. 28-36, 2017.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，302p.，2012
- 10) Journel, A.G., Huijbregts, C.J. : Mining geostatistics, 612p., 1978.
- 11) Ang, A. H.-S. and Tang, H.W.: Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Vol.2, Decision, Risk, and Reliability, 574p., 1984.
- 12) 吉田郁政，大竹雄，本城勇介：情報の価値 Value of Information に基づく最適な観測点位置および箇所数の評価方法，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol.71, pp.1-13, 2015.
- 13) Yang, R., Huang, J., Griffiths, D. V, Meng, J., Fenton, G.A.: Optimal geotechnical site investigations for slope design, Comput. Geotech. Vol.114, 103111, 2019.
- 14) Iwasaki, T., Arakawa, T., Tokida, K.: Simplified Procedures for Assessing Soil Liquefaction During Earthquakes. Soil Dyn. Earthq. Eng, Vol.3, pp.49-58, 1984.
- 15) Hsein, J.C., Tao, J., D., A.R.: Assessing Probability-based Methods for Liquefaction Potential Evaluation. J. Geotech. Geoenvironmental Eng, Vol.128, pp.580-589, 2002.
- 16) Deutsch, C. V, Journel, A.G.: Geostatistical Software Library and User's Guide, 369p., 1992.
- 17) 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, pp.23-29, 1980.
- 18) Nishimura, S., Shimizu, H.: Reliability-based design of ground improvement for liquefaction mitigation. Struct. Saf, Vol.30, pp.200-216, 2008.
- 19) Nishimura, S., Shuku, T., Shibata, T.: Reliability-based design of earth-fill dams to mitigate damage due to severe earthquakes. Georisk Assess. Manag. Risk Eng. Syst. Geohazards, Vol.10, pp.83-90, 2016.
- 20) 今出和成，西村伸一，柴田俊文，珠玖隆行：粒度異なる材料が混合されたため池堤体におけるコーン貫入抵抗の空間分布評価，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol.74, pp.213-224, 2018.
- 21) 西村伸一：土構造物の地震時における許容変形と性能設計に関する研究委員会報告 (4.4 章)，土構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム発表論文集，pp.121-126, 2007.
- 22) 防災科学技術研究所：J-SHIS (確率論的地震動予測地図)，<http://www.j-shis.bosai.go.jp>，(参照 2021.6.8).

(2021 年 6 月 14 日 受付)