

## 液状化判定に含まれる諸条件の不確実性の影響評価

中央大学大学院 学生会員 ○岩崎 俊 中央大学 正会員 佐藤 尚次

## 1. はじめに

現在、日本では大規模な地震の発生が予期されており、各所で液状化危険度を把握することの重要性は高い。特に、影響を大きく受ける市民にとって、液状化マップなどの液状化危険度を示す情報は、居住地や液状化対策の要否を検討する際の手がかりとなる。

しかし、液状化マップ作成時に用いられる液状化危険度評価には、地盤定数等の条件のばらつきや、液状化層を正確にとらえる困難さ、地下水位の時間的変動性など、液状化の有無に影響する不確実な要素が含まれている。

そこで本研究は、250m 四方の地盤において、液状化判定に含まれる諸条件のばらつきを評価し、それが判定精度に与える影響について明らかにする。

## 2. 研究手法

諸条件の不確実性について評価するため、液状化の判定計算でモンテカルロシミュレーション（以後 MCS と呼称）を行う。液状化判定には、道路橋示方書・同解説V耐震設計編<sup>1)</sup>で定義されている液状化抵抗率 $F_L$ を基に、岩崎ら<sup>2)</sup>により提案された液状化指数 $P_L$ を算出する手法を用いる。対象地盤における、本手法の判定計算に含まれる各要素の不確実性を確率分布によりモデル化し、算出された $P_L$ 値をヒストグラムで図示することで、判定結果がどの程度ばらつくかを確認する。さらに、Cornell の信頼性指標と等価性のあるレベル超過確率計算により、諸条件のばらつきが大きさが液状化危険度評価に及ぼす影響について考察する。

対象とする地盤は、図-1 に示す横浜市磯子区の埋立地 250m×250m の区域である。

## 2-1 液状化指数

地盤深さ $z(m)$ における液状化抵抗率 $F_L$ は以下の式で定義される。

$$F_L = R/L \quad (1)$$

式中の $R$ は動的せん断強度比、 $L$ は地震時せん断応力比である。

動的せん断強度比 $R$ を算出する式は以下である。

$$R = c_w \cdot R_L \quad (2)$$

ここで、 $c_w$ は地震動特性による補正係数、 $R_L$ は繰返し三軸強度比である。

地震時せん断応力比 $L$ を算出する式は以下である。

$$L = r_d \cdot K_{hgl} \cdot \sigma_v / \sigma'_v \quad (3)$$

ここで、 $r_d$ は地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数、 $K_{hgl}$ は液状化の判定に用いる地盤面の設計水平震度、 $\sigma_v$ は地表面からの深さ $z$ における全上載圧[kN/m<sup>2</sup>]、 $\sigma'_v$ は地表面からの深さ $z$ における有効上載圧[kN/m<sup>2</sup>]である。 $K_{hgl}$ はレベル1地震動の0.15とする。

次に、液状化指数 $P_L$ は、式(1)で算出した各深度の $F_L$ 値



図-1 対象区域の位置（横浜市磯子区）

を、深さ方向に重みづけして足し合わせることで算出する。

$$P_L = \int_0^{10} F \cdot (10 - 0.5z) dz \quad (4)$$

ただし、

$$\begin{cases} F = 1 - F_L & (F < 1.0) \\ F = 0 & (F \geq 1.0) \end{cases}$$

である。なお、式(4)の積分範囲は本来 0~20m であるが、得られた地盤データの関係上、0~10m としている。

また、 $F_L$ 値を $z$ の連続関数で表すことは事実上不可能なため、式(2)の計算を以下の式により近似的に行う。

$$P_L = \sum F_i \cdot (10 - 0.5z_i) \cdot \Delta z \quad (5)$$

ここで、 $F_i$ は地表面からの深さ $z_i[m]$ における $F_L$ 値で、微小区間 $\Delta z$ は 1m としている。

## 2-2 諸条件の不確実性の評価

250m 四方の範囲で地盤の液状化の可能性を議論する場合、 $N$  値や細粒分含有率などが区域内の地点ごとに異なることが推察される。このような、判定計算に含まれる諸条件のばらつきを、表-1 のような確率分布で仮定して表現する。なお、地下水位以外の項目については、深度ごとに確率分布のパラメータを推定して分布形状を決定する。ただし、西村ら<sup>3)</sup>によると、土質定数間の相関性は無視できないとされているため、MCS の際は相関性を考慮した乱数をさせる。

地下水位に関しては、降雨状況や季節のような、時間的要因によっても値が異なることが推察される。その

キーワード 液状化判定, 不確実性, 信頼性, モンテカルロシミュレーション,  $P_L$  値

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 Tel03-3817-1816 Fax03-3817-1803

ため、空間的ばらつきに加えて、時間的ばらつきも考慮してモデル化する。

### 2-3 レベル超過確率計算

Cornell の 2 次モーメント法信頼性理論では、作用効果  $S$ 、耐力  $R$  に対し、 $S$  を  $N(\mu_S, \sigma_S)$ 、 $R$  を  $N(\mu_R, \sigma_R)$  とすると、限界状態超過確率は、

$$P_f = \text{Prob.}[R \leq S] = \Phi(-\beta) \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (7)$$

で与えられる。ここに、式中の  $\Phi$  は累積標準正規分布関数である。

ここで、 $S$  と  $R$  の設計値を  $S^*$ 、 $R^*$  とし、 $S^*$  の超過確率を  $e_S$ 、 $R^*$  の非超過確率を  $e_R$  ( $e_S, e_R \ll 1$ ) とすると、式(7)の右辺は、

$$\begin{aligned} \beta &= -\frac{\Phi^{-1}(e_R)\sigma_R - \Phi^{-1}(e_S)\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \\ &= -\frac{\Phi^{-1}(e_R)\sigma_R/\sigma_S - \Phi^{-1}(e_S)}{\sqrt{(\sigma_R/\sigma_S)^2 + 1}} \end{aligned} \quad (8)$$

となることが容易に導かれる。

本研究では、与えられた地震の条件から求められる  $P_L$  を  $S$  と考える。 $S^*$  と  $R^*$  は、 $P_L$  値を用いた液状化判定において、一般的に液状化発生の閾値とされる 5 とした。 $R$  については、 $P_L$  の値による液状化の基準が示されているものの、文献 2) を参考にすると、安全側に寄せたものとなっていることがいえる。そこで本研究では、 $e_R$  及び  $\sigma_R$  について、いくつかの仮定した数値で考え、 $\sigma_R/\sigma_S$  をパラメトリックに変化させて  $P_f$  の推定値を算出することで、 $S$  及び  $R$  のばらつきが  $P_f$  に与える影響を確認する。

### 3. 解析結果

図-2 は、10000 回の MCS により得られた  $P_L$  値のヒストグラムで、表-2 は算出された  $P_L$  値を液状化の判定区分ごとに集計したものである。この表から、250m 四方の区域では、判定計算に含まれる諸条件のばらつきに起因し、区域内でも場所によって液状化の危険性が異なる可能性が見て取れる。また、得られた  $P_L$  値に対して Q-Q プロットを適用した結果、正規分布への適合度が高いことが分かった。

信頼性理論に基づく限界状態超過確率の計算結果を図-3 に示す。これより、 $S$  に比べて  $R$  のばらつきが極めて小さい場合は約 0.5 に、極めて大きい場合は  $e_R$  に漸近していくことが分かった。このことから、抵抗強度  $R$  の情報が不確かで  $\sigma_R$  が大きくなってしまう場合でも、ある程度のところで確率が収束することから、信頼性が確保されるといえる。

### 4. おわりに

本研究では、横浜市磯子区の埋め立て地盤を対象として、MCS により液状化判定のばらつきを評価した。さらに、Cornell の 2 次モーメント法信頼性理論の適用により、対称地盤のレベル 1 地震動による液状化危険度の推定を行った。

また、紙面の都合上割愛しているが、液状化が発生する限界の地震加速度も算出したため、当日示したい。

表-1 諸条件の確率分布の設定

項目	確率分布
N 値	対数正規分布
単位体積重量	正規分布
細粒分含有率	対数正規分布
地下水位	正規分布

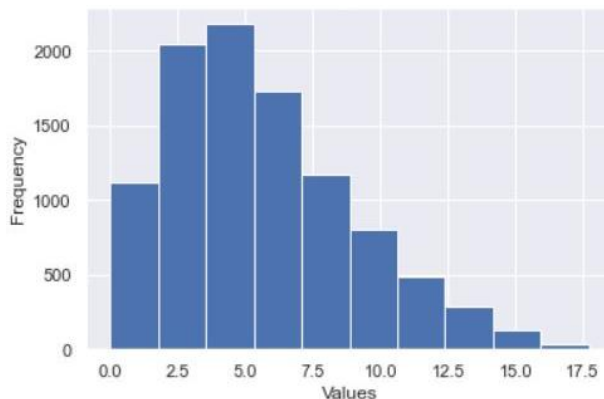


図-2 算出された  $P_L$  値のヒストグラム

表-2 液状化危険度の割合

$P_L$ 値の範囲	液状化危険度	割合
$P_L = 0$	かなり低い	0.54%
$0 < P_L \leq 5$	低い	49.3%
$5 < P_L \leq 15$	高い	49.2%
$15 < P_L$	かなり高い	0.96%

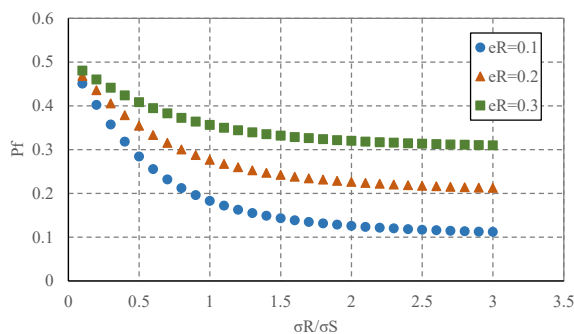


図-3 限界状態超過確率の変化

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp.161-169，2017
- 2) 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，pp.23-29，1980
- 3) 西村伸一，藤井弘章，島田清，清水英良，西川克彦：土質定数の変動性および地震の統計的性質を考慮した干拓堤防の液状化確率，土木学会第 50 回年次学術講演会，pp.590-591，1995