

モンテカルロ法を用いた液状化判定のばらつきの評価

中央大学 学生会員 ○岩崎 俊 中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震の発生により、広範な地域に大規模な液状化被害がもたらされたことは記憶に新しい。今後も大地震の発生が予想されており、各所において液状化危険度を把握することの重要性は高い。特に液状化の影響を大きく受ける市民にとって、ハザードマップなどの液状化の被害予測情報は、居住地や対策の有無などを検討する際の有用な指針となる。

現在、広域の液状化危険度を求める際に主流となっている液状化判定法は、動的せん断強度比 R と地震時せん断応力比 L を基に液状化に対する抵抗率 F_L 値を算出する FL 法と、 F_L 値を深さ方向に重みづけして足し合わせた P_L 値から液状化危険度を判定する PL 法である。しかしこの手法では、土質定数が本来有している空間的なばらつきや地下水位の変動性といった、不確実性のある要素を考慮できない。これに加え、1 地点のボーリングデータが 50m あるいは 250m メッシュの代表値として扱われることも、判定の信頼性を揺るがす要因となりうる。

そこで、本研究では各定数のばらつきを考慮に入れた場合に、上記の液状化判定法がどの程度の信頼性を有しているかを明らかにする。

2. 研究手法

信頼性を評価するにあたり、乱数を用いた数値計算の方法であるモンテカルロシミュレーションを行う。これにより P_L 値を算出してヒストグラムを作成し、各土質定数のばらつきが PL 法による液状化判定結果にどのような影響を与えるのかを評価する。シミュレーションの流れを図-1 に示す。

対象とする地盤は、農林水産省の土地改良事業設計指針「耐震設計」(案)¹⁾にて公開されている液状化判定例のものである。

3. パラメータ設定

ばらつきとして評価するのは N 値と単位体積重量であり、これらを確率変数として扱う。平均値は対象地盤の各層における値とする。標準偏差について、 N 値は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²⁾より 18.9 とし、単位体積重量は同ガイドラインにて砂質土の記載がなかったため、細粒度について算出された 1.575 を仮に用いた。

PL 法の前段階にあたる FL 法による計算過程は、道路橋示方書・同解説V耐震設計編³⁾を基にする。

F_L 値は以下の式により算出する。

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

ここで、 R は動的せん断強度比、 L は地震時せん断応力比である。また各深度での F_L 値を深さ方向に重みづけして足し合わせることで P_L 値が算出される。



図-1 シミュレーションのフロー

$$P_L = \int_0^{10} (1 - F_L)(10 - 0.5x)dx \quad (2)$$

ここで、 x は地表面からの深さ[m]である。式(2)に関して、一般的には 20m までの積分値となっているが、現段階では震度 10m までの計算となっている。

以下の節にて F_L 値算出にあたり S (作用効果)となる L 、 R (抵抗強度)となる R の算出方法を述べる。

3-1 S側の設定

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、 σ_v は地表面からの深さ x における全上載圧[kN/m²]、 σ'_v は地表面からの深さ x における有効上載圧[kN/m²]である。また、 K_{hgl} は農林水産省の計算例に従い、0.30 とする。

3-2 R側の設定

動的せん断強度比 R を算出する式は以下である。

$$R = c_w \cdot R_L \quad (4)$$

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。また繰返し三軸強度比 R_L は次式で算出する。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5} & (N_a \geq 14) \end{cases} \quad (5)$$

N_a は粒度の影響を考慮した補正 N 値である。今回扱うのは砂質土であるため、この粒度の影響を考慮した補正 N 値 N_a を次式によって算出する。

$$N_a = c_{FC}(N_1 + 2.47) - 2.47 \quad (6)$$

c_{FC} は細粒分含有率による N 値の補正係数、 N_1 は有効上載圧100 kN/m²相当に換算した N 値であり、これら

は次式により求められる。

$$N_1 = 170 \cdot N / (\sigma'_{vb} + 70) \tag{7}$$

$$c_{FC} = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 20)/30 & (10\% \leq FC < 40\%) \\ (FC - 16)/12 & (40\% \leq FC) \end{cases} \tag{8}$$

N は標準貫入試験から得られる N 値, FC は細粒分含有率[%], σ'_{vb} は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]である。

4. シミュレーション結果

1000 回のモンテカルロシミュレーションを行って得られた P_L 値のばらつきの範囲を表-1 に示す。各定数のばらつきを考慮せずに計算した場合の P_L 値は 36 であり, 約 4 割は同じ範囲内に収まるが, かなりばらつきが出ていることが分かる。液状化の判定区分を基準範囲を分けると表-2 のようになる。今回はかなり危険な地盤条件なため判定にばらつきが出なかったが, 各定数のばらつきを考慮せずに計算した P_L 値が 0 から 15, またはその付近にあるケースでは, 各定数のばらつきが判定結果に大いに影響を与えることが推測される。

次に, 得られた P_L 値に対して, Q-Q プロットによりあてはまる確率分布を検討した。図-2 は正規分布, 図-3 は対数正規分布の Q-Q プロットである。この結果から, 概ね正規分布に当てはまると推定される。

算出された P_L 値の平均値, 標準偏差はそれぞれ 32.5, 7.93 であり, これをパラメータとした確率密度関数とシミュレーション結果のヒストグラムとを重ね合わせたものを図-4 に示す。シミュレーションにより算出された P_L 値の平均値が, 各定数を確定値として算出した場合の P_L 値を下回る結果となった。

5. おわりに

本研究では, 農林水産省の液状化判定例を対象として, モンテカルロシミュレーションにより液状化判定の信頼性を評価した。今回は P_L 値を計算する範囲が震度 10m までとなっているが, 今後は 20m まで広げる。

現時点では N 値以外のパラメータのばらつきは具体的な検討を行っていない。今後はパラメータを増やしつつ, 関連データを収集し, 物理的な意味を持ったばらつきを与えて解析を進める。また, 西村ら⁴⁾により土質定数の空間的相関特性は無視できないことが示されている。そのため, 土質定数間の相関性を考慮したばらつき評価の方法も検討する。さらに, 地下水位変動に関するデータも収集し, 地下水位の不確実性も取り入れ, 最終的には, 微地形の違いによる液状化判定の信頼性の違いを評価し, 微地形区分毎に判定のばらつきの検証と比較を行う予定である。

参考文献

1) 農林水産省 農村振興局: 土地改良事業設計指針「耐震設計」(案), pp.243-267, 2015
2) 土木学会: 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, pp.B-1-B-66, 2018
3) 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
4) 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

表-1 ばらつく範囲の割合

P_L 値の範囲	割合
$P_L \leq 11$	0.4%
$11 < P_L \leq 21$	6.9%
$21 < P_L \leq 31$	35.1%
$31 < P_L \leq 41$	43.5%
$41 < P_L \leq 51$	13.2%
$51 < P_L$	0.9%

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	0.0%
$0 < P_L \leq 5$	低い	0.0%
$5 < P_L \leq 15$	高い	1.8%
$15 < P_L$	かなり高い	98.2%

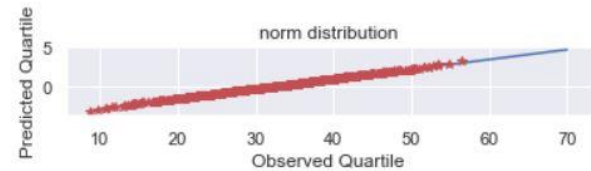


図-2 Q-Q プロット(正規分布)

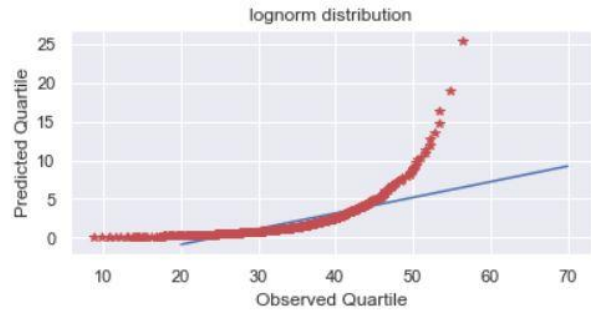


図-3 Q-Q プロット(対数正規分布)

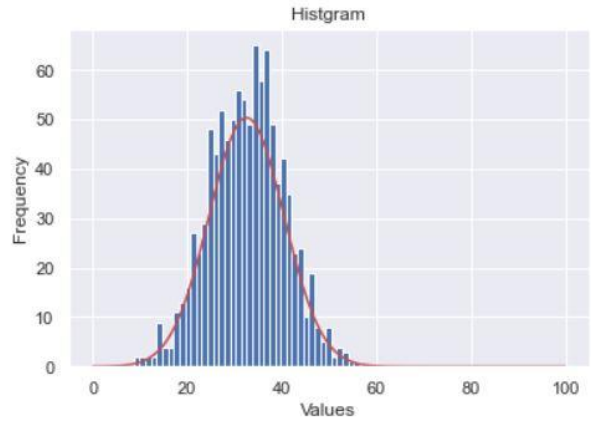


図-4 正規分布のあてはめ