

サンドコンパクションパイル工法の液状化対策としての 信頼性評価に関する一考察 (その1)

株式会社巽設計コンサルタント 正会員 ○有清 睦
広島工業大学 名誉会員 中山 隆弘

1. はじめに

これまで、地震時における砂地盤の液状化に関して、地盤の強度や地震力のばらつき（ここでは不確実性）を評価した解析はほとんどなされていない。そこで、筆者らは信頼性設計に基づき液状化を確率により評価することを提案^{1), 2), 3), 4)}してきた。西村らも、地盤の密度増大により液状化対策を行うサンドコンパクションパイル工法（以後SCP工法）を用いた地盤の信頼性設計法を提案⁵⁾しているものの、N値や地盤物性値（細粒分含有率、粒度等）のばらつき、地盤改良後に増加するN値の不確実性に関しては、文献6) データを基にしたものにとどまっており、改良後の杭間のN値が増加する要因、すなわち現地盤の間隙が減少し、密度が増加（相対密度の増加）するなど、地盤の物性値の変化に関するばらつきまでは考慮していない。

また、改良後の地盤のN値にも当然不確実性が考えられるが、文献6)では、改良後の地盤の液状化の評価ではそのことが考慮されていない。

そこで、以下では信頼性設計の手法によって地盤の物性値の変化を確率的に評価し、改良された地盤の液状化の可能性を液状化確率によって定量的に示す方法を提案する。因みに、地震力については、西村らのように地震の発生頻度に基づくものでなく、地震応答解析を行ってその不確実性を考慮している⁸⁾。

2. SCP工法の設計

SCP工法による改良地盤の設計はCの方法⁶⁾によった。Cの方法では、まず式(1)あるいは式(2)によって定義される砂杭の体積から改良率を決定し増加N値 N_1 を求める。具体的には以下の通りである⁷⁾。

$$a_s = A_s/x^2 \quad (\text{正方形配置}) \quad (1)$$

$$a_s = \frac{2A_s}{\sqrt{3}}x^2 \quad (\text{正三角形配置}) \quad (2)$$

STEP1: 細粒分含有率 F_c から e_{max} 、 e_{min} を求める。

$$e_{max} = 0.02F_c + 1.0 \quad (3)$$

$$e_{min} = 0.008F_c + 0.6 \quad (4)$$

STEP2: 現地盤N値 N_0 および有効上載圧から相対密度 D_{r0} および e_0 を求める。

$$D_{r0} = 21\sqrt{N_0/(0.7 + \sigma'_v/98)} \quad (5)$$

$$e_0 = e_{max} - 0.01D_{r0}(e_{max} - e_{min}) \quad (6)$$

キーワード サンドコンパクションパイル工法, 液状化, ばらつき, 信頼性設計

連絡先 〒743-0023 山口県光市光ケ丘5番1号 株式会社 巽設計コンサルタント

TEL 0833-72-0112

STEP3:改良率 a_s を式(1)あるいは式(2)で仮定して改良後の間隙比 e_1 と相対密度 D_{r1} を求める。

$$e_1 = e_0 - a_s(1 + e_0) \quad (7)$$

$$D_{r1} = 100 (e_{max} - e_1) / (e_{max} - e_{min}) \quad (8)$$

STEP4:細粒分含有率による増加N値に対する低減率 β' を求める。

$$\beta' = 1.05 - 0.51 \log F_c \quad (9)$$

STEP5:低減率が掛かっていない改良後N値 N_1' を求める。

$$N_1' = \left(\frac{D_{r1}}{21} \right)^2 \times (0.7 + \sigma_v' / 98) \quad (10)$$

STEP6:低減率を考慮した増加N値 N_1 を求める。

$$N_1 = (N_1' - N_0) \beta' + N_0 \quad (11)$$

式中、 A_s : 砂杭の断面積 (m^2)、 x : 砂杭の配置間隔 (m)、 F_c : 細粒分含有率 (%)、 e_0 : 現地盤間隙比、 e_1 : 改良後間隙比、 β' : 細粒分による増加N値に対する低減率、 N_0 : 改良前N値、 N_1 改良後N値、 D_{r0} : 改良前相対密度 (%)、 D_{r1} : 改良後相対密度 (%)、 σ_v' : 拘束圧 (有効重量) (kN/m^2) である。

もし、式(11)で計算される N_1 が目標値にならない場合は再度改良率を増減させて、目標値が得られるまで、STEP1 から STEP6 を繰り返せばいい。

3. 増加N値 N_1 の確率的評価

施工現場では対策後の杭間の地盤のN値を測定し、N値が増加していることを確認する。測定されるN値がばらついていることは報告されている⁶⁾が、前述のようにこの原因を示すことはされていない。そこで、ここではその要因として増加N値 N_1 を計算するためのパラメータである間隙比と細粒分含有率の関係、相対密度、増加N値に対する低減係数および現地盤のN値の不確実性であると考えて、そのことを考慮して信頼性解析を行うことにした。なお、現地盤のN値の不確実性は周辺地盤の調査結果によって考慮する。

(1) 最大間隙比と最小間隙の確率的評価

図-1⁶⁾ は細粒分含有率と間隙比の関係を表したものである。この図のデータを読み取り最大間隙比と実測の最大間隙比の関係を表したものが図-2 である。この図から最大間隙比の関係式を表すと式 (12) となる。式中の*は確率評価したことを表し推定式と区別するものである。また、 ε は正規確率変数である。同様に、図-3 は最小間隙比と実測の最小間隙比の関係を表したもので、式 (13) のように表すことにする。

$$e_{max}^* = 0.823e_{max} + 0.161 + \varepsilon_{e_{max}} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{e_{max}} (0.0, 0.119)$$

$$e_{min}^* = 0.759e_{min} + 0.177 + \varepsilon_{e_{min}} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{e_{min}} (0.0, 0.085)$$

(2) 相対密度の確率的評価

相対密度に関しては、これまでに用いてきた関係⁴⁾を用いた。なお、シミュレーションにおいては相対密度がマイナスの値となることがあるが、当然ながらその場合はそのシミュレーション結果は無視している。

$$D_r^* = 0.762D_r + 19.378 + \varepsilon_{D_r} \quad (D_r^* > 0) \quad (14)$$

$$\varepsilon_{D_r}(-3.419, 15.186)$$

(3) 増加N値に対する低減率 β' の確率的評価

低減率 β' は、細粒分が多い場合にN値を過大評価しないように導入される。図-4は細粒分含有率と β との関係⁴⁾を表したものである。

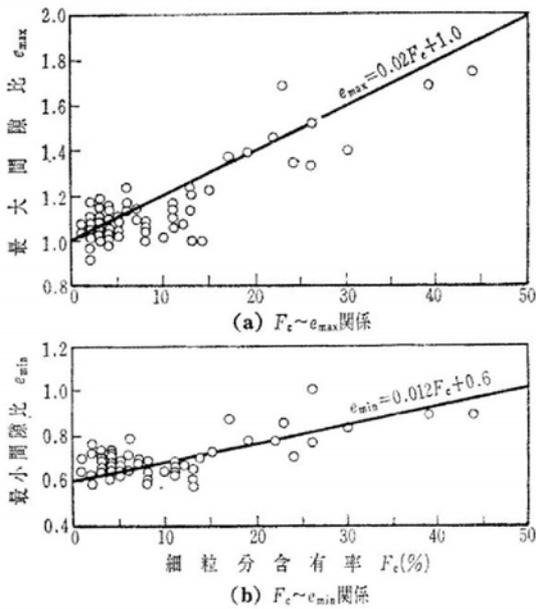


図-1 $F_c \sim e_{max}$ および $F_c \sim e_{min}$ の関係
(平間の図に一部加筆)

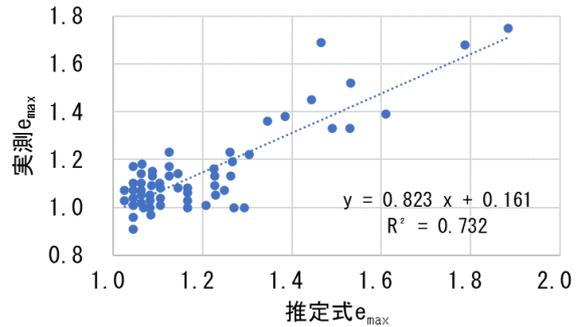


図-2 推定式 e_{max} および実測 e_{max} の関係

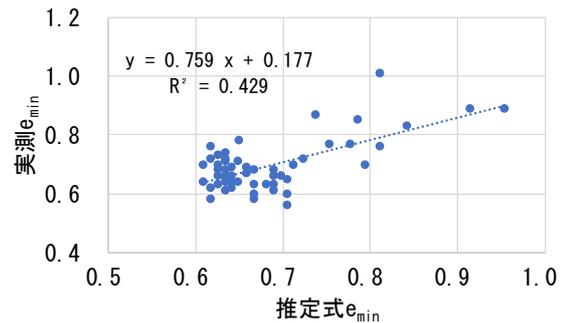


図-3 推定式 e_{min} および実測 e_{min} の関係

図-5はこの図を基に推定式 β 低減率 β の関係を表したものである。式(5)は図-5の関係を表したものである。

$$\beta'^* = 1.005\beta' + 0.001 + \varepsilon_{\beta'}$$

$$\varepsilon_{\beta'}(0.0, 0.185) \quad (15)$$

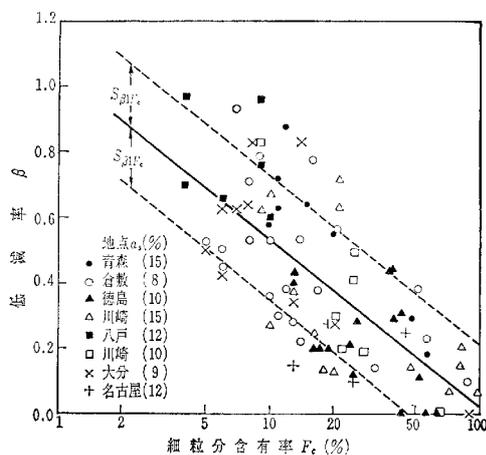


図-4 細粒分含有率と低減率の関係

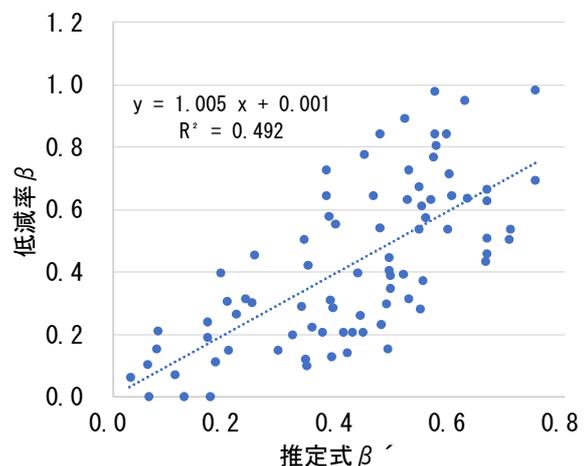


図-5 推定式 β' と低減率 β の関係

4. おわりに

紙面の都合で、ここでは、SCP工法（今回はCの方法）によって改良された地盤の信頼性設計の解析を行うために必要な地盤物性値の状態の変化を表すパラメータの設定方法を示すだけに留まった。改良後の地盤の増加N値の結果やその液状化確率の低減結果については（その2）で示すことにする。

参考文献

- 1) 有清睦・中山隆弘：地盤の液状化判定に対する信頼性工学的考察、第63回土木学会中国支部研究発表会概要集、Ⅲ-49、平成23年5月
- 2) 有清睦・中山隆弘：信頼性理論による地盤液状化判定に関する一考察、第64回土木学会中国支部研究発表会概要集、Ⅲ-45、平成24年6月
- 3) 有清睦・中山隆弘：信頼性理論による液状化解析、液状化確率と過剰間隙水圧についての一考察、第65回土木学会中国支部研究発表会概要集、Ⅲ-40、平成25年5月
- 4) 有清睦・中山隆弘：信頼性理論を用いた地震時に発生する過剰間隙水圧の消散に伴う地盤沈下量の予測手法の一考察、第68回土木学会中国支部研究発表会概要集、Ⅲ-28、平成28年5月
- 5) 西村伸一、清水英良、藤井弘章、島田清：液状化対策地盤に関する信頼性設計、土木学会論文集 No. 603、Ⅲ-44、pp101-111、1998. 9.
- 6) 水野恭男、末松直幹、奥山一典：細粒分を含む砂質地盤におけるサンドコンパクションパイル工法の設計法、土と基礎 Vol. 35、No. 5、pp. 21-26、1987
- 7) 大成建設株式会社 土木本部土木設計部編：考え方がよくわかる設計実務、耐震設計の基本、インデックス出版、pp. 185-192、2009. 11.
- 8) 有清睦・中山隆弘：サンドコンパクションパイル工法の液状化対策としての信頼性評価に関する一考察（その2）、第72回土木学会中国支部研究発表会投稿中、令和2年6月