

液状化強度に不均質性を有する砂地盤の支持力解析

九州大学大学院 学生会員○忽那 惇 九州大学大学院 フェロー 善 功企
九州大学大学院 正会員 陳 光斉 九州大学大学院 正会員 笠間 清伸

1. 背景および目的

液状化対策を目的として固化改良した地盤では、改良条件や地盤物性の不均質性などが原因で、せん断剛性や液状化強度に空間的な不均質性が存在する。このように地盤諸係数に不均質性がある場合、地震時に局所的な液状化やせん断破壊が生じる可能性があり、地盤の支持力、破壊モードおよび液状化流動などに影響すると予想される。本文では、液状化強度の空間的な不均質性をランダム理論場で表現し、数値極限解析を用いたモンテカルロ・シミュレーションによって、液状化強度に不均質性を有する砂地盤の支持力解析を行った。

2. 解析概要

本文では、地盤の支持力を数値解析的に求める手法として、数値極限解析(NLA¹⁾, Numerical Limit Analyses)を用いた。本解析で使った解析メッシュ図と境界条件を図-1に示す。また、解析ケースを表-1に、解析フロー図を図-2に示す。液状化に起因した各要素でのせん断強度の低下を考慮するため、水平加速度により上昇した間隙水圧を Δu とすると、地盤要素のせん断強度 τ_f は、以下の式で表せる。

$$\tau_f = (\sigma' - \Delta u) \tan \phi' = \sigma' \left(1 - \frac{\Delta u}{\sigma'}\right) \tan \phi' \quad (1)$$

上式の過剰間隙水圧比は、共同溝設計指針で用いられる次式を用いて、液状化安全率 F_L から間接的に評価した。

$$\frac{\Delta u}{\sigma'} = (F_L)^{-7} \quad (2)$$

液状化安全率 $F_L (=R/L)$ は、液状化に対する地盤の安全性を表す指標である。ここで、 R : 液状化強度比、 L : 繰返しせん断応力比である。一般に、 $F_L < 1$ の時に地盤が液状化すると判断される。解析では、地表面最大加速度 α_{max} と、液状化強度比 R の統計値を入力定数として、間接的に F_L の不均質性を表現した。その後、各要素の F_L の値から式(1)と(2)を用いてせん断強度を計算し、数値極限解析を用いて地盤の支持力を計算した。図-1には、今回用いた手法で計算した F_L の分布の一例を示す。要素の色が濃い箇所ほど F_L 値が小さく、不均質性を有する液状化地盤が表現されている。なお、モンテカルロ・イタレーションは、支持力係数 N_γ の平均値が $\pm 3\%$ の精度で推定できるまで行った。詳しい解析手法は、参考文献 2)に示す。

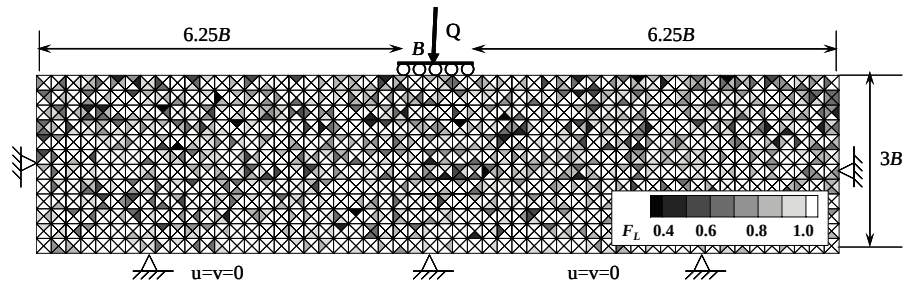


図-1 解析メッシュ図と境界条件($\mu_{FL}=1.30$, $COV_{FL}=0.4$, $\alpha_{max}=200\text{gal}$)

表-1 解析ケース

粘着性 c	kPa	0
内部摩擦角 ϕ	°	30
単位体積重量 γ	kN/m ³	18.5
有効単位体積重量 γ'	kN/m ³	8.5
地表面最大加速度 α_{max}	gal	50, 100, 150, 200
平均液状化強度比 μ_R		0.5
F_L の変動係数 COV_{FL}		0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4
自己相関係数 ρ_{FL}	m	RANDOM
荷重の傾斜角 β	°	0

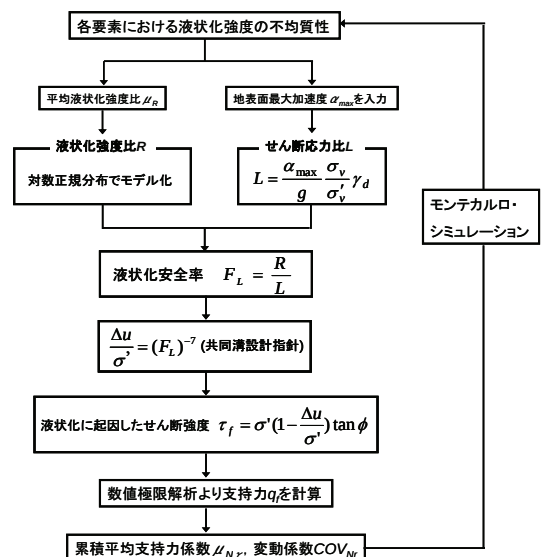


図-2 解析フロー図

3. 解析結果および考察

図-3 に、平均液状化安全率 $\mu_{FL}=2.60$ およびその変動係数 $COV_{FL}=0.4$ における、モンテカルロ・シミュレーションより得られた支持力係数 N_γ のヒストグラムを示す。分布型の適合度検定 (χ^2 検定) より、3%の有意水準で正規分布に適合した。図中には、統計値から推定した正規分布を示した。今回の解析ケースのように μ_{FL} が 2.60 と 1.0 よりも大きければ、従来の液状化判定によると、液状化せず地盤は安全であると判断される。しかしながら、 F_L の不均質性が大きいと、局所的な液状化に起因して支持力の低減が生じることを示唆する。

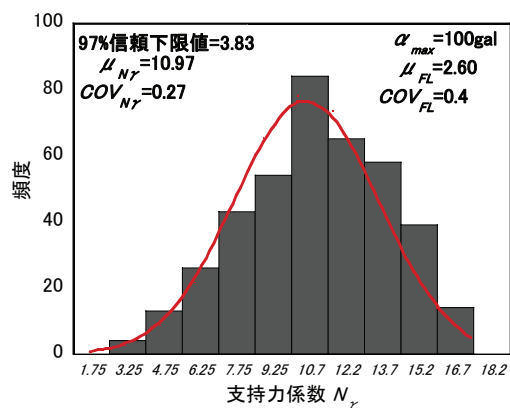


図-3 正規分布とヒストグラム

($\alpha_{max}=100gal$, $COV_{FL}=0.4$)

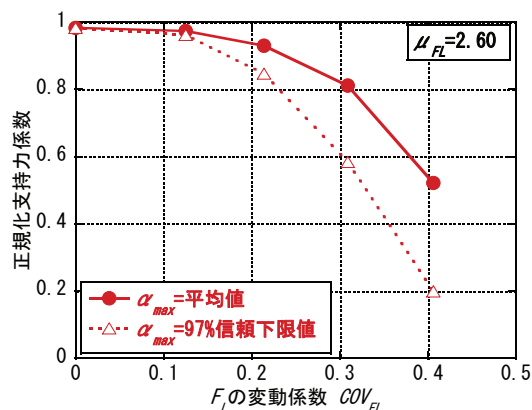


図-4 正規化支持力係数と COV_{FL} の関係

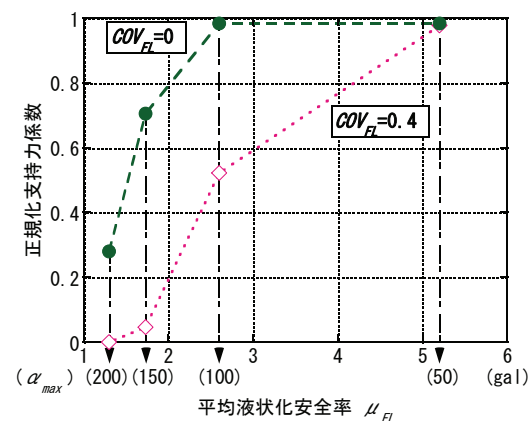


図-5 正規化支持力係数と α_{max} の関係

4. まとめ

本文では、液状化強度をランダム理論場で表現し、数値極限解析を用いたモンテカルロ・シミュレーションによって、液状化強度に不均質性を有する砂地盤の支持力解析を行った。本文で得られた結論を、以下に示す。(1)従来の液状化判定では安全と判定される地盤でも、液状化強度の不均質性が大きいと、局所的な液状化に起因して支持力の低減が生じる。(2)液状化強度の不均質性を考慮した地盤の支持力係数は、3%の有意水準で正規分布に適合する。(3)支持力係数は、液状化安全率 F_L の変動係数 COV_{FL} が 0.2 以上で顕著に低減し、支持力係数の変動係数は増加する。(4)不均質性が大きい COV_{FL} が 0.4 の条件での地盤の支持力係数は、平均液状化安全率 μ_{FL} が 1.0 から 2.0 の間で、平常時の支持力係数の 20%程度になる。

<参考文献> 1) Sloan, S.W. & Kkeeman, P.W.: UPPER BOUND LIMIT ANALYSIS USING DISCONTINUOUS VELOCITY FIELDS. Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 127, pp.293-314, 1995. 2) 忽那惇, 善功企, 陳光齊, 笠間清伸: 局所的液状化を考慮した砂地盤の支持力解析, 第8回地盤改良シンポジウム論文集, pp237-240. 2008.