### 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 学生会員〇忽那 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(NLA<sup>1)</sup>、Numerical Limit Analyses)を用いた.本解析で使用し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、

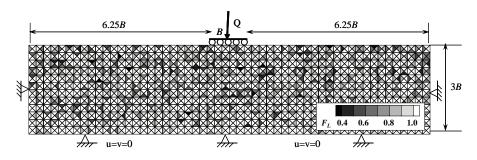


図-1 解析メッシュ図と境界条件( $\mu_{FL}$ =1.30,  $COV_{FL}$ =0.4,  $\alpha_{max}$ =200gal)

荷重の傾斜角β

水平加速度により上昇した間隙水圧を  $\Delta u$  とすると、地盤要素のせん断強度  $\tau_f$ は、以下の式で表せる.

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

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.

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

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 $\alpha_{max}$ 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 $N_y$ 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.

 粘着力c
 kPa
 0

 内部摩擦角φ
 °
 30

 単位体積重量γ
 kN/m³
 18.5

表-1 解析ケース

有効単位体積重量 $\gamma'$  kN/m³ 8.5 地表面最大加速度  $\alpha_{\rm max}$  gal 50, 100, 150, 200 平均液状化強度比 $\mu_R$  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  $\alpha_{FL}$  m RANDOM

0

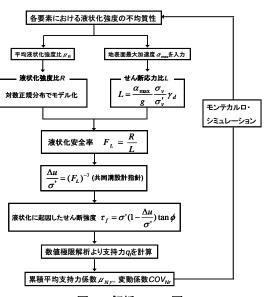


図-2 解析フロー図

## 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  $N_{\nu}$ のヒストグラムを示す.分布型の適合度検定 ( $\chi^2$ 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  $\mu_{FL}$ 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-4 に、 $\mu_{FL}$ =2.60 における正規化支持力係数と  $COV_{FL}$ の関係を示す.ここで,正規化支持力係数とは,各ケースでの支持力係数 $N_{\nu}$ を,平常時( $\alpha_{max}$ =0, $COV_{FL}$ =0)の $N_{\nu}$ で除して正規化した値である.なお,図中には,平均支持力係数 $\mu_{N_{\nu}}$ およびその統計値から推定した 97%信頼下限値による正規化支持力係数を示す.正規化支持力係数は, $COV_{FL}$ が大きくなるほど低減し,特に, $COV_{FL}$ =0.2 以上で顕著であった.また,平均値と 97%信頼下限値で計算した正規化支持力係数の差も, $COV_{FL}$ の増加とともに大きくなった.

図-5 に, $COV_{FL}$ =0 と 0.4 における正規化支持力係数と平均液状化安全率の関係を示す.なお,横軸には,平均液状化安全率に対応する地表面最大加速度の値も示している. $COV_{FL}$ =0 の正規化支持力係数が, $\mu_{FL}$  が 3.0 以下で低減するのは,地盤の液状化に起因するものではなく,地盤に作用する水平加速度の影響である.液状化安全率の不均質性を考慮した場合には,水平加速度と局所的な液状化の両者に起因して,支持力が低減するため,平均液状化強度が比較的大きくても支持力低減が生じる結果となった.特に, $\mu_{FL}$  が 1.0 から 2.0 の間で,支持力は 20%程度になった.今回の解析では,変動係数が 0.4 と大きく,またランダム性の高い自己相関係数を仮定したため,局所的な液状化の影響が顕著に出たと考えられる.

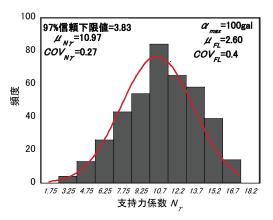


図-3 正規分布とヒストグラム

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

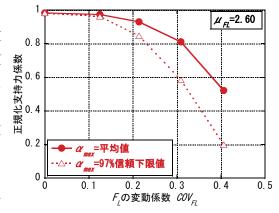


図-4 正規化支持力係数と COVmの関係

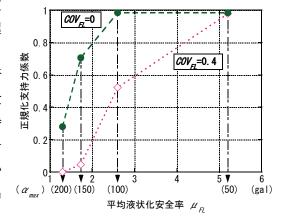


図-5 正規化支持力係数と a<sub>max</sub> の関係

### 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  $\mu_{FL}$ 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 FIELDES. Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 127, pp.293-314, 1995. 2) 忽那惇,善功企,陳光斉,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.