

局所的な液状化に起因した砂地盤の支持力低減の評価

九州大学大学院 学生会員○忽那 惇 九州大学大学院 フェロー会員 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

自然に堆積した地盤では、堆積環境や地殻変動などの要因によって、地盤特性に空間的なばらつきを有することが知られている。例えば、砂地盤の液状化強度に空間的なばらつき存在がする場合には、地震時において液状化強度の小さい箇所が先に液状化してしまう可能性がある。この時、液状化強度のばらつきの程度が大きい地盤では液状化に局所性が存在することとなり、地震時における砂地盤の支持力や、破壊モードの決定に影響すると予想される。そこで本研究では、地盤の局所的な液状化を想定して、液状化強度の空間的なばらつき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り、液状化の局所性を考慮した地震時における支持力解析を行った。その結果を用いて、液状化強度や液状化部の割合、変動の程度が支持力係数および破壊モードに与える影響について、確率統計的に考察した。

2. 内容

2.1. 解析概要

本研究では、地盤の支持力を数値解析的に求める手法として、上界(Upper Bound)数値極限解析(Numerical Limit Analyses, NLA)¹⁾を用いた。上界数値極限解析は、地盤を剛塑性体と仮定し、有限要素法と同様に各メッシュの節点の変数を離散化した後、上界定理を利用して、変形を受けたさいの地盤の内部消散仕事²⁾が最小となる変数を線形計画法で求める解析手法である。

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。地盤中央に基礎を設置し、はり要素として導入した。この基礎幅 B を基準に、地盤の深度を $2B$ 、幅を左右にそれぞれ $6.25B$ とした。また、メッシュの寸法は $0.25B \times 0.25B$ とし、図に示すようにその正方形メッシュ内部を4分割して三角形要素で表現した。

各要素で、強度の空間的なばらつきを表現するために、液状化強度比 R を対数正規分布でモデル化し、平均液状化強度 μ_R と変動係数 COV_R を与え、乱数を用いて液状化指数 $F_L (=R/L)$ を計算した。ここで、せん断応力比 $L = \frac{\alpha_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \gamma_d$ より求めた。図-1には、 $\mu_R=0.3$ 、 $COV_R=0.4$ 、地表面最大加速度 $\alpha_{max}=100gal$ のときの計算

結果を示す。要素の色が濃い箇所ほど液状化指数 F_L 値が小さく、局所的な液状化が表現されている。 F_L と間隙水圧 (Δu) の上昇による強度低下を表現するため、共同

溝設計指針をもとに $\frac{\Delta u}{\sigma'_v} = (F_L)^{-7}$ として F_L の大きさに応じ

た各要素の強度の低減をモデル化した。

表-1に、解析ケースを示す。解析結果より、内部摩擦角 ϕ による支持力係数 N_γ を算出した。 N_γ の算出法は、数値極限解析によって得られた極限支持力 q_f を用いて、Terzaghi の式²⁾より求めた。また、地表面最大化速度 α_{max} を設定し、

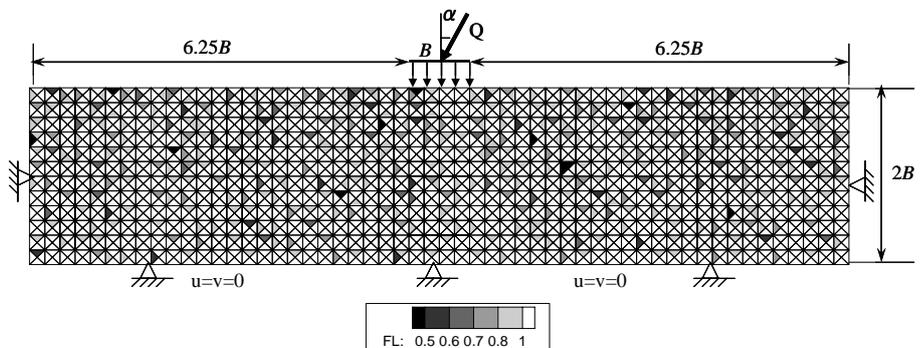


図-1 解析メッシュ図と境界条件($\mu_R=0.3$, $COV_R=0.4$, $\alpha_{max}=100gal$)

表-1 解析ケースと解析条件

地表面最大加速度 $\alpha_{max}(gal)$	100
粘着力 c (kPa)	0
内部摩擦角 ϕ (°)	30
単位体積重量 γ (kN/m ³)	18.5
水中単位体積重量 γ' (kN/m ³)	8.5
平均液状化強度比 μ_R	0.3, 0.4, 0.5
R の変動係数 COV_R	0.1, 0.2, 0.3, 0.4

R の平均値 μ_R と変動係数 COV_R を変化させて、各ケースでモンテカルロ・シミュレーションを 100 回ずつ行った。

2.2. 解析結果および考察

液状化強度のばらつきによる支持力の低減を評価するために、図-2 に、支持力低減率と R の変動係数 COV_R の関係を示す。ここで、支持力低減率は、得られた支持力係数を、平常時 ($\alpha_{max}=0, COV_R=0$) の支持力係数で除して正規化した値である。支持力低減率が 100% に達した時、支持力が 0 になることを表す。 R の変動係数が一定の時、 R が小さいほど低減率は大きくなる。低減の程度は R によって大きく異なるが、実地盤における変動係数が 0.2~0.4 であることを考慮すると、 R の変動係数が低減率に与える影響は大きいと考えられる。

次に、支持力低減率と液状化強度比 R の関係を図-3 に示す。ここで支持力低減率は、100 回の平均値を用いて計算した。 R が一定のとき、変動係数が大きいほど低減率は大きくなる。本研究では、地表面最大加速度を $\alpha_{max}=100gal$ に固定して解析を行ったが、 α_{max} の増加によってさらに大きく低減率が増加すると考えられる。

本文では、要素ごとに F_L 値を算出し、 $F_L < 1$ の要素は液状化したと判断し、液状化した要素が地盤全体に占める割合を液状化率 $K(\%)$ として表した。ここでも液状化率は、100 回の平均値を用いた。

図-4 に、支持力低減率と液状化率 K の関係を示す。液状化率 0% の付近で低減率が増加しているのは、水平加速度による支持力の低減分である。液状化率が 5% までの支持力低減率の増加が激しく、10% 以上の増加量は小さい。また、同じ液状化率で比較すると、平均液状化強度が小さいほど支持力低減率は大きくなる。

3. まとめ

本文で得られた結論を、以下に示す。

- (1) 液状化強度比 R の変動係数 COV_R が一定の時、 R が小さいほど低減率は大きくなる。低減の程度は、 R によって大きく異なるが、実地盤における変動係数が 0.2~0.4 であることを考慮すると、 R の変動係数が低減率に与える影響は大きいと考えられる。
- (2) 支持力低減率と液状化強度比 R の関係において、 R が一定のとき、変動係数が大きいほど低減率は大きくなる。今後、地表面最大化速度 α_{max} の増加によってさらに大きく低減率が増加すると考えられる。
- (3) 支持力低減率と液状化率 K の関係において、液状化率が 5% までの支持力低減率の増加が激しく、10% 以上の増加量は小さい。また、同じ液状化率で比較すると、平均液状化強度が小さいほど支持力低減率は大きくなる。

<参考文献>

1) Sloan, S.W. & Kkeeman, P.W. (1995): "UPPER BOUND LIMIT ANALYSIS USING DISCONTINUOUS VELOCITY FIELDS." Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 127, 293-314. 2) Terzaghi, K., Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, 1943.

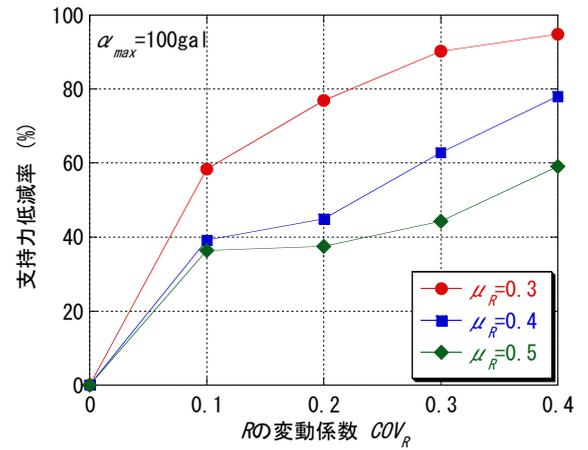


図-2 支持力低減率と R の変動係数の関係

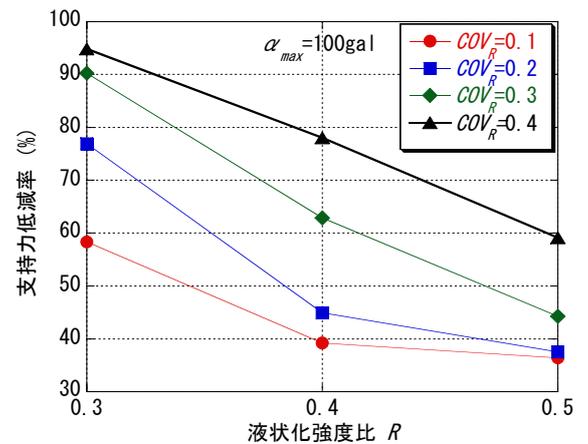


図-3 支持力低減率と液状化強度比 R の関係

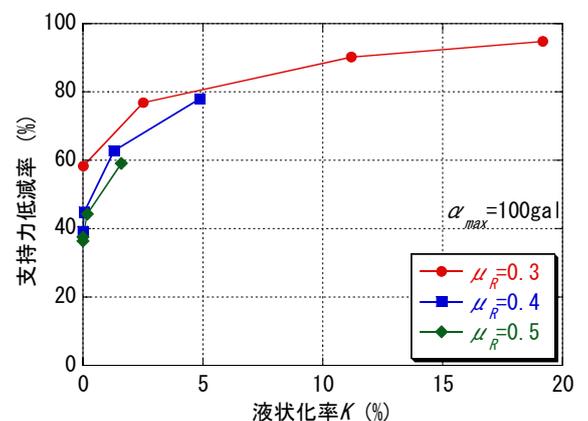


図-4 支持力低減率と液状化率 K の関係