

極限解析による液状化地盤の支持力特性

九州大学工学部 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

液状化対策された固化処理地盤では、実際には様々な要因によって液状化強度にばらつきが生じていることが報告されている。このような空間的ばらつきは、地震時に地盤の支持力や破壊モードの決定に影響することが予想され、地盤のばらつきを考慮した液状化時の支持力特性の評価が求められている。本研究では、このばらつきをランダム場理論で表現し、数値極限解析を使ったモンテカルロ・シミュレーションによりばらつきを考慮した液状化地盤における支持力解析を行った。

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、数値極限解析 (Numerical Limit Analyses, NLA)¹⁾を用いた。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

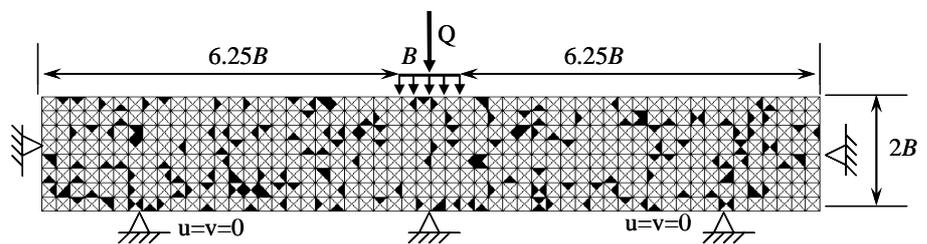


図-1 解析メッシュ図と境界条件(液状化率 10%，液状化部を黒で表示)

シユ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、最小となる時の変数を線形計画法によって求める解析手法である。数値極限解析のメリットは、1)支持力は、上界数値極限解析から得られる上限値を上回ることはない、2)線形計画法により、自動的に最適な破壊モードを計算する、3)粘土地盤の支持力を±5%の精度で計算できる²⁾、4)解析に必要な定数が、せん断強度のみであることなどがある。

本解析で使用した解析メッシュ図(液状化率 10%)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は4分割して三角形要素を考えた。要素数は1,728、節点数は5,184となった。

表-1に解析条件を示す。ばらつきを有する地盤を表現するため、液状化しない要素(改良部)と液状化する要素(液状化部)の2つにモデル化し、改良部の内部摩擦角 $\gamma_1=30^\circ$ 、液状化部で $\gamma_2=0.0^\circ$ と設定した。液状化部の決定では、モンテカルロ・シミュレーションにより要素をランダムに選定し、100回解析を行った。水平震度は $k_h=0$ に固定し、液状化した状態での支持力係数 N を求めた。

2.2. 解析結果および考察

図-2は、液状化率 10%における支持力係数のヒストグラムと、統計値から推定した対数正規分布グラフを示す。5%の危険率で χ^2 検定を行った結果、分布は対数正規分布で適合した。

表-1 液状化地盤の解析ケース

c (kPa)	0
(kN/m^3)	10
γ_1 ($^\circ$)	30
γ_2 ($^\circ$)	0
水平震度 k_h	0
液状化率 (%)	5, 10, 15, 20, 25, 30

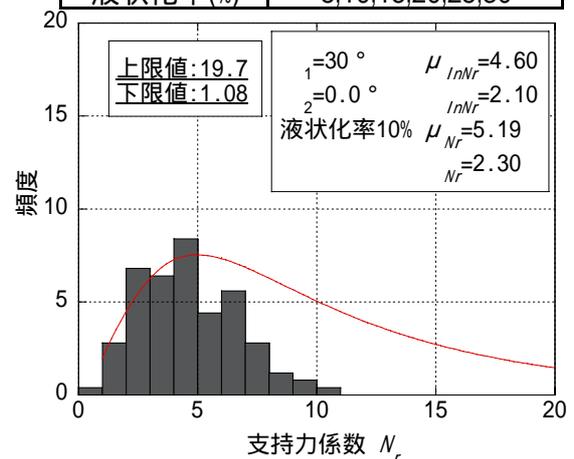


図-2 対数正規分布とヒストグラム(液状化率 10%)

液状化時の解析例として、**図-1**の砂質地盤における液状化率 10% ($k_h = 0$) の場合の変形図と、塑性領域および節点のベクトル図を**図-3**に、それぞれ示す。均一地盤に比べて、すべり線が明確に形成されないまま、わずかな変形量で破壊に達した。**図-3**のケースによる支持力係数は、 $N = 5.24$ で、ほぼ平均値である。

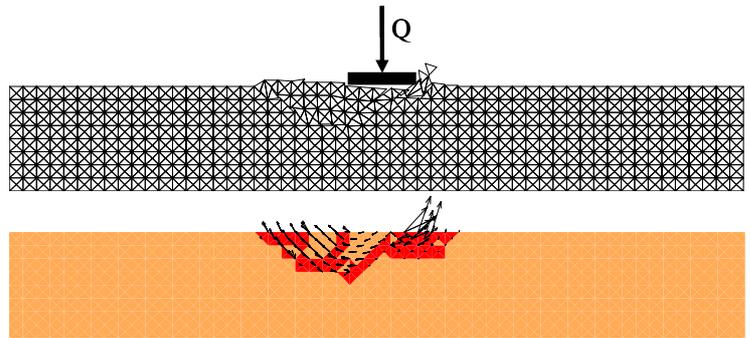


図-3 変形図と塑性領域およびベクトル図($k_h = 0$, 液状化率 10%)

液状化率 10%において、最も支持力係数が大きくなったメッシュ図を**図-4**に、その時の変形図と塑性領域およびベクトル図を**図-5**に示す。このとき、 $N = 11.0$ であった。両者とも、液状化部はメッシュ全体に散らばっており、基礎直下の液状化部の要素数も同じである。さらに、地盤表面での破壊の様子もほぼ同様な変形をしているが、塑性領域の面積が大きく異なる。これより、液状化率が等しく、地盤表面での破壊の程度が同じ程度であっても、支持力が大きく異なり、地盤内部での塑性化の程度にも大きな差が生じることが推測される。この違いは液状化部の要素の位置関係が原因と考えられるが、支持力との相関性については今後検討する必要があると思われる。

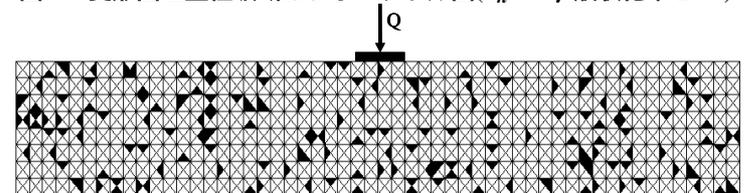


図-4 メッシュ図(液状化率 10%)

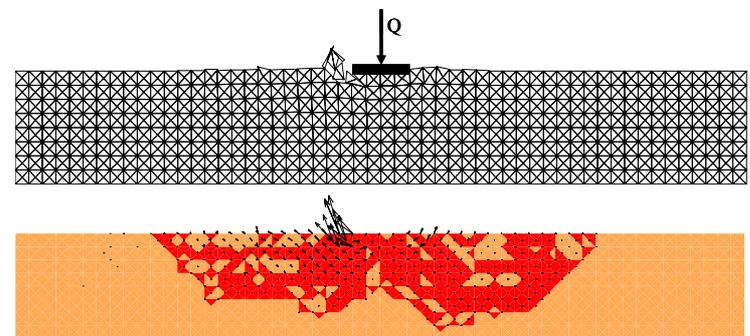


図-5 変形図と塑性領域およびベクトル図($k_h = 0$, 液状化率 10%)

N の低減率と液状化率の関係を**図-6**に示す。図中には、支持力低減率の平均値、95%上限・下限値を示した。平均値に着目すると、液状化率が 5%増加するごとに、支持力係数の低減率はおよそ 2 倍に増加した。液状化率が 30%の時、支持力低減率は 98.6%となることから、液状化が 30%に達すると、支持力はほとんどなくなると考えられる。

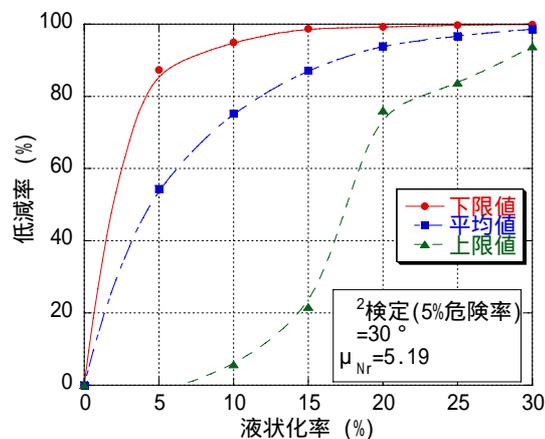


図-6 N の低減率と液状化率の関係

3. まとめ

本文により得られた結論をまとめると以下のようになる。(1)液状化を考慮し、部分的に地盤強度を減少させた地盤では、明確なすべり線を持たずに少ない変形量で破壊に至る。(2)液状化の程度が等しい地盤であっても、支持力や塑性領域の結果は大きく異なる。(3)地盤の 5%が液状化すると、支持力はおおよそ 1/2 になる。

<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) Ukritchon, B., Whittle, A. J., & Sloan, S.W. (1998). "UNDRAINED LIMIT ANALYSIS FOR COMBINED LOADING OF STRIP FOOTING ON CLAY." ASCE J. Geotech. and Geoenviron. Eng., 124(3), 265-276