液状化による地盤沈下に着目した構造物の被害率曲線の提案

九州大学大学院　学生会員　○稲富　祐太郎　正会員　笠間　清伸　正会員　陳　光斉

1. はじめに

地盤の液状化対策の一つとして，事前混合処理工法のように地盤内に固化材を加えることで強度を向上させる工法がある．しかし，このような対策地盤には固化材の混合の不均一性や対象地盤の土質の不均質性が要因となり，強度に空間的不均質性が生じる問題がある．このような問題により，地震時に地盤内に局所的な液状化が生じると予想される．そこで本文では，数値極限解析を用いて，空間的不均質性を有する液状化地盤の支持力を解析し，地震保険の沈下量に着目した被害判定に従って，液状化地盤上にある構造物の被害率曲線の提案を行った．

2. 解析概要

本文では，液状化に起因した液状化の被害の程度を評価するために，日下部らの研究 [1] を参考に液状化による地盤沈下量$\Delta S / S$を**式(1)**より算出した．

$$\frac{\Delta S}{S}=\frac{S'-S}{S}=\frac{K_i q_f'(1-q/q_f)}{K_i' q_f(q_f'/q_f-q/q_f)}-1 \qquad (1)$$

ここで，S は地盤沈下量，q は構造物の重量，q_fは平常時における地盤の極限支持力，K_i は初期地盤反力係数であり，各記号にダッシュをつけたものが液状化時のものである．

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上界（下界）数値極限解を用いた [2]．**図-1** に解析フローを示す．また，**図-2** と**表-2** に，解析メッシュ図と解析条件を示す．

各要素に作用する繰返しせん断応力比 L は，道路橋示方書をもとに地表面最大加速度 α_{max} を用いて算出した．液状化に起因した地盤のせん断強度 τ_f の低減を表現するため，地震により上昇した間隙水圧Δu を，共同溝設計指針で示された**式(2)**より決定した．

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

最後に，得られたせん断強度 τ_f を入力値として，地盤の極限支持力 q_f を解析し，液状化による支持力低減率 μ を**式(3)**により算出した．

$$\text{支持力低減率 } \mu = 100 - \frac{\text{地震・液状化時の支持力}}{\text{平常時の鉛直支持力}} \times 100 \qquad (3)$$

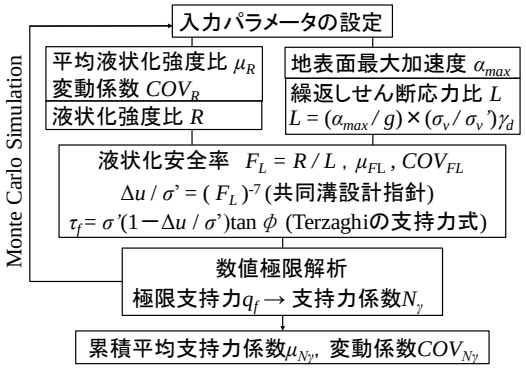

図-1　解析フロー

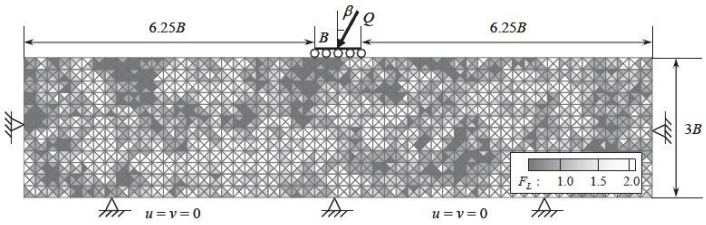

図-2　解析地盤

表-1　解析条件

平均液状化強度	μ_R	kPa	50
	COV_R		0.2～1.0
自己相関距離	Θ	M	Random
粘着力	c		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
最大地表面加速度	α	Gal	100～300

ここで，**式(1)** の q_f / q_f'は，液状化による支持力低減率μに等しく，q_f/q は設計時における構造物の支持力安全率 F_{Si} に相当する．最終的に，算出した支持力低減率 μ をもとに**式(4)**より液状化による地盤沈下量を算出し，液状化による地盤沈下量に着目した被害率曲線を作成した．

$$\frac{\Delta S}{S_a}=\frac{Ki(1-\mu)(1-1/F_{Si})}{K_i'(1-\mu-1/F_{Si})}-1 \qquad (4)$$

3. 解析結果

図-3 に局所的な液状化による支持力低減率を示す．図中には，均一地盤の場合の結果も示す．均一地盤において，平均液状化安全率 F_L = 1.73 で支持力低減率 μ が増加し始めるのに対し，局所的な液状化を考慮すると平均液状化安全率 F_L = 2.73 で増加した．これは，変動係数 COV_R の増加に伴い，地盤内に強度の小さい領域が増加するため，その領域で局所的な液状化が発生し支持力を低減させるためであると考えられる．

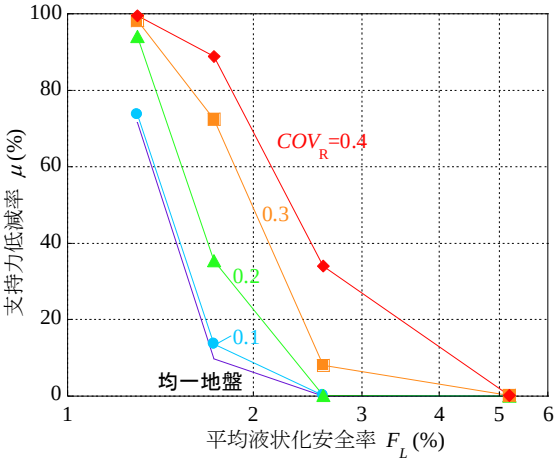

図-3 局所的な液状化による支持力低減

図-4 に液状化による地盤沈下$\Delta S/S$より算出した沈下量 S の結果を示す．本文では，地盤平均強度を 200kPa および構造物の初期許容沈下量 S_a を 5cm と仮定した．設計時支持力安全率 F_{si} が増加するほど，液状化による沈下量 S は抑えられた．地震保険の基準では，液状化による構造物の全壊は 30cm 以上とされており，地盤の平均強度 qu が 200kPa かつ支持力安全率 F_{Si} ≧ 2.5 であれば，全壊は回避できることが分かる．

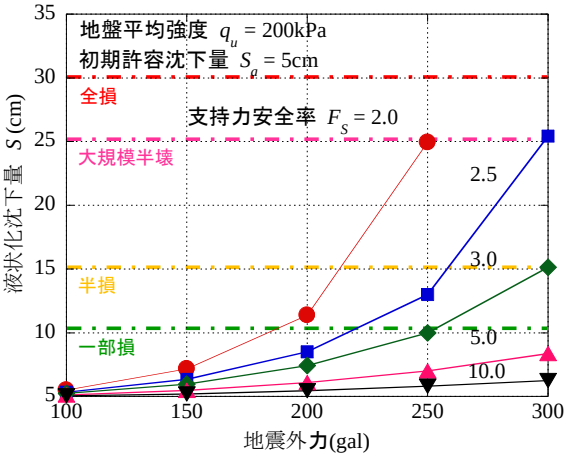

図-4 局所的な液状化による沈下量

図-5 に地震保険の基準より算出した被害率より作成した被害率曲線を示す．プロット点は算出した被害率 K を示す．本文では，液状化の被害率 K は正規分布に従うものとした．それぞれの曲線の条件（平均μ，標準偏差σ）を図内に示す．支持力安全率が大きくなるほど，被害率 K は減少した．地震保険では，一般に全損，大規模半壊，半壊，一部損壊と 4 段階で被害率が評価されるが，この被害率曲線により，被害率 K の詳細な定量的評価が可能となった．

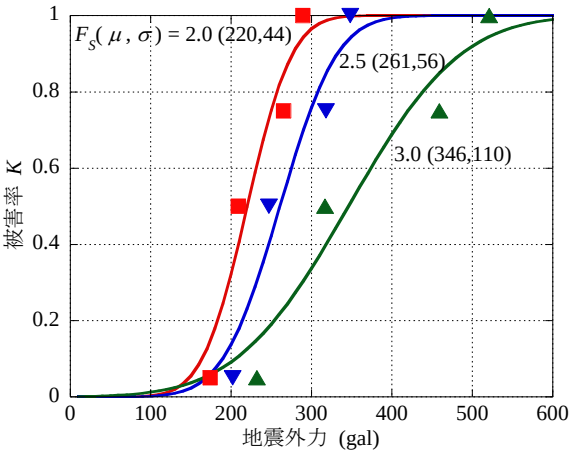

図-5 液状化被害率曲線

4. 結論

本文では不均質性地盤の局所的液状化に起因して生じる地盤沈下に着目した被害率曲線を提案した．得られた結論を以下に示す．

1) 地盤の支持力低減率に着目し，局所的な液状化による沈下量を算出した． 地盤平均強度が 200kPa の場合，初期許容沈下量が 5cm の構造物は，支持力安全率を 2.5 以上に設定することで液状化による全壊は免れる．
2) 地震保険の基準をもとに，地盤沈下に着目した被害率曲線を作成した．従来の被害率の定義は，全損，大規模半壊，半壊，一部損壊と 4 段階で設定されているが，この被害率曲線により，被害率の詳細な定量的評価を可能とした．

<参考文献>

1) 日下部治，河合伸由：上向き浸透流による基礎の支持力低下と沈下，土と基礎，37-6，pp57-62，1989
2) 笠間清伸，善功企，陳光斎，久米英輝：確率数値極限解析を用いた固化処理地盤の地震時支持力特性，第 9 回地盤改良シンポジウム論文集，pp345-350，2010.