

地盤物性に不均質性を有する固化処理地盤の液状化リスク分析

九州大学大学院 学生会員○片岡 範夫 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. はじめに

地盤の液状化対策の一つに、事前混合処理のように地盤内に固化材を混合することで、液状化強度を向上させる工法が開発されている。しかし、様々な要因により、せん断弾性係数などの地盤定数に空間的な不均質性が生じることが報告されている。このような地盤定数の空間的な不均質性に起因して、地震時に局所的な液状化やせん断破壊が生じ、地盤の支持力や破壊モードに影響すると予想される。本文では、固化処理地盤を対象に、地盤物性の不均質性を考慮した非線形地震応答解析によるモンテカルロ・シミュレーションをもとに、地盤内の液状化確率の算定を行った。さらに、局所的な液状化に起因する固化処理地盤の支持力低減に着目したリスク分析を行った。

2. 信頼性理論に基づいた液状化確率の算出

地盤の非線形地震応答解析には、2次元有限要素法に基づく地震応答解析プログラム *FLIP*¹⁾ を使用した。地盤物性の空間的な不均質性が応答におよぼす影響の検討領域として、高さ 20m、幅 20m、要素サイズ 1.0m×1.0m の地盤を作成した。**表-1** に、解析条件を示す。入力地震加速度は、福岡西方沖地震において建設技術研究所九州支店で観測された南北方向の加速度波形を用いた。ただし、最大入力加速度 α_{max} を 100, 150, 200, 250 および 300gal と振幅調整した。

地盤内の液状化発生を考察するために、応答値を用いて液状化安全率 F_L を算出した。ここで、液状化安全率とは、地盤の液状化発生の有無を判断する指標であり、 $F_L < 1.0$ のときに液状化すると判断される。また、地盤物性の不均質性に起因した局所的な液状化を評価するために、液状化安全率を用いて地盤の液状化発生の空間割合 $P_\alpha[F_L < 1.0]$ (本文では、液状化率と呼ぶ) を算出した。詳細な算出手法は、既往の研究²⁾ を参考にして頂きたい。

3. 解析結果

本文では、一軸圧縮強さの平均値 100kPa、強度の自己相関距離が非常に小さい地盤、つまり正規乱数のみで要素の強度を表現した条件での解析結果を報告する。

図-1 に、液状化安全率 F_L の空間分布の一例を示す。色の濃い箇所ほど、液状化安全率が小さい値を表し、例に挙げた地盤では、地表面付近で、局所的な液状化が発生する可能性を示した。

図-2 に、最大入力加速度と液状化率の関係を示す。最大入力加速度 α_{max} の増加によって、液状化率は増加した。同時に、一軸圧縮強度の変動係数 COV_{qu} に大きく影響された。ここで、 $COV_{qu} = 0$ は、地盤物性の不均質性を考慮しない均質地盤を意味する。 $\alpha_{max} = 200\text{gal}$ のとき、均質地盤では、液状化の可

表-1 解析条件

一軸圧縮強さ	μ_{qu}	kPa	50, 100, 200
	COV_{qu}		0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
自己相関距離	θ	m	random, 2, 5, 10
ポアソン比	ν		0.33
密度	ρ	t/m ³	1.89
減衰定数	h		0.15
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

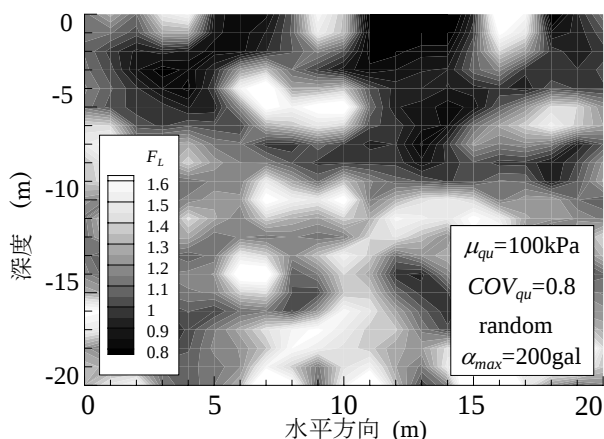


図-1 液状化安全率の空間分布の一例

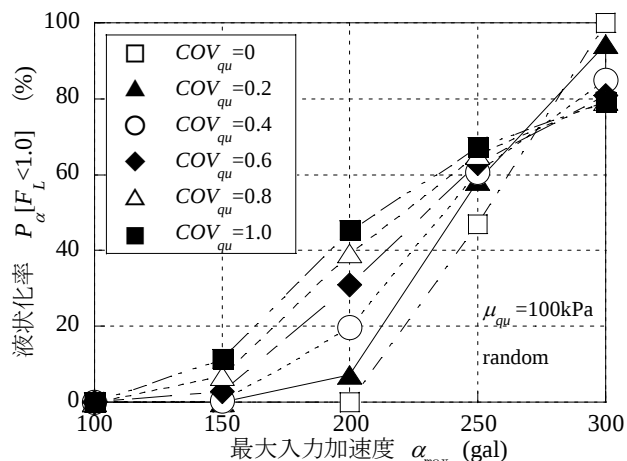


図-2 最大入力加速度と液状化率の関係

能性はほとんどないが、不均質性の非常に大きな地盤では、地盤全体の45%が液状化する可能性が存在した。

4. 液状化リスク分析

図-3に、液状化リスク分析のフローを示す。不均質性を考慮した地盤の地震応答解析から得た液状化率 P_α を用いて、固化処理地盤の液状化リスク分析を行なった。本文で定義するリスク R (年間の損失期待値)は、被害形態 i の年間における発生確率 P_i 、損失の大きさ C_i とし、 $R = \sum P_i \cdot C_i$ と定義する。 P_i と C_i は、それぞれ確率分析と被害分析から求められる。

地震の不確実性や地域特性を評価するために、石川ら³⁾が提案した福岡と東京の地震ハザード曲線を用いた。地震ハザード曲線とは、縦軸に年間に地震が発生する確率を、横軸に地震加速度を取った曲線である。

被害分析は、局所的な液状化に起因する地盤の支持力低減に着目し、上部構造物が全壊したときの最大被害額 C_0 を基準にして被害率 K を乗じることで被害額を評価することを試みた。被害率 K は、共同研究者が行った局所的な液状化に起因する地盤の支持力低減に関する研究成果⁴⁾を利用した。

図-4に、液状化率と被害率 K の関係を示す。ここで、被害率 K とは、平常時の支持力係数 N_{y0} に対する地震時の支持力係数 N_y の差を、 N_{y0} で正規化した支持力低減率である。液状化率が増加するほど、急激に被害率 K は増加し、液状化率10%以上では、被害率 K はほぼ100%に達した。この結果から、わずかな液状化が地盤の支持力に大きな影響を与えることがわかる。

図-5に、一軸圧縮強さの変動係数と、液状化リスク分析から得た年間液状化リスクの関係を示す。ここで、年間液状化リスクとは、1年間に期待される総損失額を意味する。一軸圧縮強さの変動係数が大きいほど、年間液状化リスクは増加し、その増加率は東京の方が顕著であった。また、東京は、福岡に比べて約6倍の年間液状化リスクが存在した。

5. まとめ

固化処理地盤を対象に、地盤物性の不均質性を考慮した非線形地震応答解析を用いて、確率統計的に液状化を評価した。さらに、液状化リスク分析を行い、固化処理地盤の安定性を評価した。得られた結論を以下に示す。1) 入力最大加速度の増大とともに、液状化率も大きく評価された。また、一軸圧縮強さの変動係数が大きくなると、同一の入力最大加速度に対する液状化率が高くなった。2) 液状化に起因する被害率は、液状化率が10%以下で急激に増加した。3) 一軸圧縮強さの変動係数が高いほど、年間液状化リスクは高くなった。また、東京は福岡に比べて、約6倍の年間液状化リスクが存在した。〈参考文献〉1) Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T., (1990): Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report The Port And Harbour Research Institute, Vol.29, No.4. 2) 片岡範夫, 善功企, 陳光斉, 笠間清伸, (2009): “空間的不均質性を有する固化処理地盤に関する二次元有限要素解析”, 第44回地盤工学研究発表会, pp.1599-1600. 3) 石川裕, (1998): “確率論的想定地震と低頻度巨大外力評価への応用に関する研究”, 京都大学学位論文. 4) 忽那惇, 善功企, 陳光斉, 笠間清伸, (2008): “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, pp.237-240.

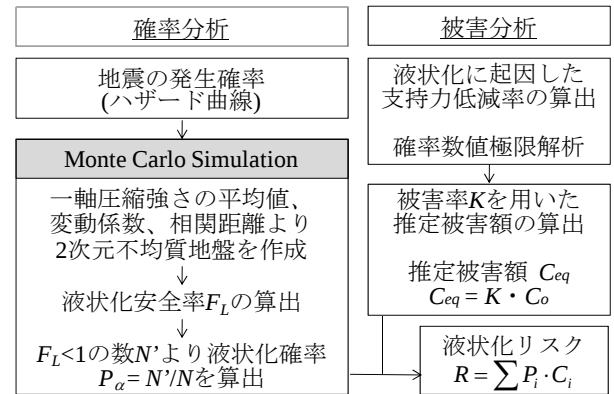


図-3 液状化リスク分析フロー

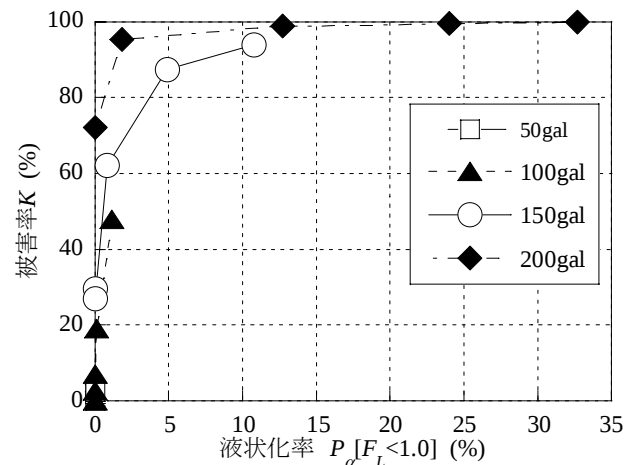


図-4 液状化ポテンシャルの空間分布

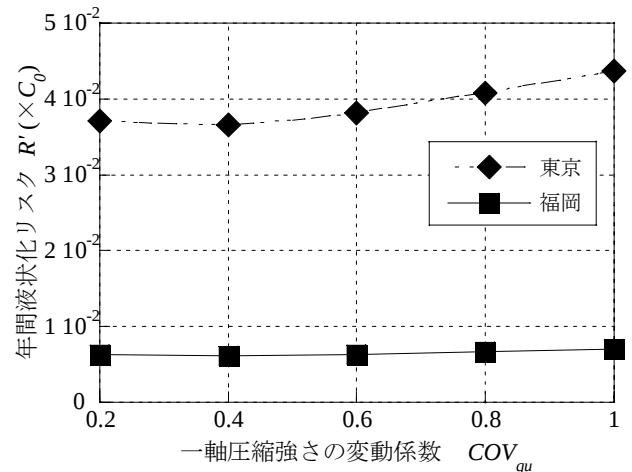


図-5 液状化ポテンシャルの深度分布