

空間的不均質性を考慮した地盤の液状化に関する二次元有限要素解析

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、せん断弾性係数や液状化強度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不均質性に起因して、地震時において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、鉛直方向に地盤定数の空間的不均質性をもつ液状化対策地盤を、二次元有限要素法によりモデル化し、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、確率統計的に液状化を評価した。

2. 解析概要

図-1 に、解析に用いた二次元有限要素モデルを示す。土の応力-ひずみとして、双曲線モデルを組み合わせたマルチスプリング¹⁾を用いた。地盤の中央の高さ 20m、幅 20m 区間を、地盤定数の空間的ばらつきが応答におよぼす影響の検討領域とした。また、x軸とz軸の原点を図中に示す。表-1 に、解析条件を示す。固化処理土の一軸圧縮強さに与える影響要因は、固化材の種類や量、養成条件や混合の程度などが知られており、実地盤の一軸圧縮強さの変動係数は、0.14～0.99 と報告されている²⁾。また、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、最大入力地震加速度を、100, 200, 300, 400 および 500gal と振幅調整した。

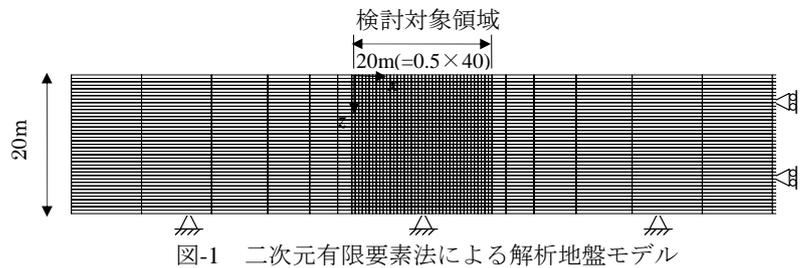


図-1 二次元有限要素法による解析地盤モデル

表-1 解析条件

一軸圧縮強度	μ_{qu}	kPa	25, 50, 100, 200
	COV_{qu}		0.2, 0.4, 0.6, 0.8
鉛直自己相関距離 LL		m	0.001
ポワソン比 ν			0.33
密度 ρ		t/m ³	1.89
減衰定数 h			0.25
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

本文では、液状化安全率 F_L を地盤の液状化を判定する指標として用い、液状化安全率 F_L の評価に必要な入力定数は固化処理地盤の一軸圧縮強さの統計値から計算した。液状化安全率は、液状化に対する地盤要素の安全性を表す指標であり、 $F_L = R/L$ で与えられる。ここで、 R は地盤要素が有する繰返しせん断強度比であり、事前混合処理工法技術マニュアル³⁾より求めた q_u と R の関係式(1)より算出した。

$$R = 0.0025 \cdot q_u + 0.24 \quad (1)$$

各要素に作用する繰返しせん断応力比 L を評価するために、各要素のせん断波速度 V_s を地盤の一軸圧縮強さ q_u との関係式(2)から計算し、地震応答解析を行った。解析結果から得られた各要素における応答加速度の最大値 α_{max} より式(3)で算出した⁴⁾。

$$V_s = 10^{2.26} \cdot (q_u)^{0.21} \quad (2); \quad L = \frac{\alpha_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (3)$$

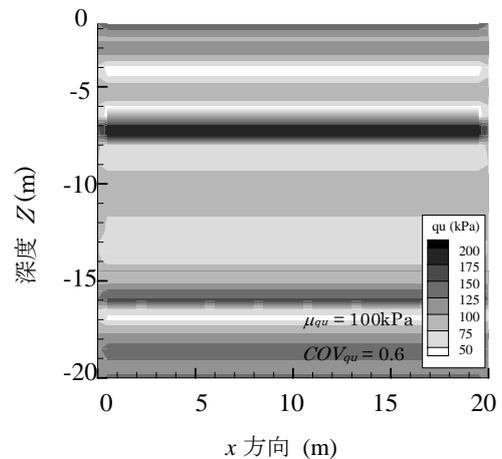


図-2 検討領域における一軸圧縮強さの空間分布の一例($\mu_{qu} = 100\text{kPa}$, $COV_{qu} = 0.6$)

図-2 に、検討領域における一軸圧縮強さの空間分布の一例を示す。ここで、一軸圧縮強さ $\mu_{qu} = 100\text{kPa}$, $COV_{qu} = 0.6$ とし、乱数を用いてランダムな地盤を作成した。鉛直方向に不均質な地盤が表現でき、深度が 5m および 16m 付近

に強度の弱部が層状に存在する。モンテカルロ・シミュレーションを500回行うことにより、液状化が発生する空間割合 $P_r[F_L < 1.0]$ (本文中では、液状化ポテンシャルと呼ぶ)を算出した。特に、本文中では、一軸圧縮強度 $\mu_{qu} = 100\text{kPa}$ 、変動係数 $COV_{qu} = 0.4$ および 0.6 、入力地震加速度 $ACC = 200\text{gal}$ の解析結果を用いて、考察する。

3. ばらつきを考慮した地盤での液状化ポテンシャル

図-3に、液状化安全率 F_L の深度分布を示す。ここで、図中には、 F_L の平均値(図中ではAVEと表記)、 F_L が取り得る範囲を平均値±標準偏差(AVE±S.D.と表記)として示す。平均値－標準偏差で、 F_L の値が1.0となる深度を比較すると、 $COV_{qu} = 0.4$ では $Z = 8\text{m}$ 、 $COV_{qu} = 0.6$ では $Z = 14.5\text{m}$ であり、 COV_{qu} が大きいほど深度方向に液状化の危険性が増す可能性が示唆される。

図-4に、検討領域における液状化ポテンシャルの空間分布を示す。液状化ポテンシャルは、地表面付近が最も大きく、深度とともに減少した。また、一軸圧縮強度の不均質性を、鉛直方向のみ考慮したため、水平方向にはほぼ一定であった。ここで、 $COV_{qu} = 0.6$ で、一部の水平方向に不均質性が見られるのは、大きな変動係数により、極端に強度の弱い層が存在し、その層が側面の境界面の影響を受けたためであると考えられる。

図-5に、液状化ポテンシャルの深度分布を示す。図-4に示した空間分布を、深度ごとに平均化した値である。変動係数 COV_{qu} と比較すれば、液状化ポテンシャルは、地表面付近では約50%とほぼ同値であったが、深度とともに地盤のばらつきの影響を受け、液状化ポテンシャルに最大15%の差が存在した。

4. まとめ

固化処理地盤における地盤定数の不均質性を考慮し、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、液状化ポテンシャルを算出した。結論をまとめると以下ようになる。1) 一軸圧縮強さの変動係数の大きさにより、液状化安全率が $F_L < 1.0$ となる深度が深くなり、深度方向に液状化の危険性が広がった。2) 液状化ポテンシャルの空間分布は、水平方向にはほぼ一定に層状に変化し、地表面付近で最大となった。3) 一軸圧縮強さ100kPa、入力地震加速度200galにおいて、変動係数 COV_{qu} が0.4と0.6の地盤を比較すれば、液状化ポテンシャルは地表面付近でほぼ同値であったが、深度5m以深で最大15%の差が存在した。このように、地盤定数の空間的ばらつきを考慮した確率統計的な液状化予測手法を利用することで、今後は固化処理地盤の信頼性評価を行う予定である。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) Kasama, K., Zen, K & Whittle J. A. (2006): "Effects of spatial variability of cement-treated soils on undrained bearing capacity," Proc. Numerical Modeling of Construction Processes in Geotechnical Engineering for urban Environment, pp.305-313. 3) (財)沿岸開発技術研究センター編 (1999): 事前混合処理工法技術マニュアル, pp.144. 4) 笠間清伸, 善功企, 陳光奇, (2007): "固化処理砂地盤の材料定数のばらつきを考慮した液状化ポテンシャル", 土木学会地震工学論文集, Vol.29.

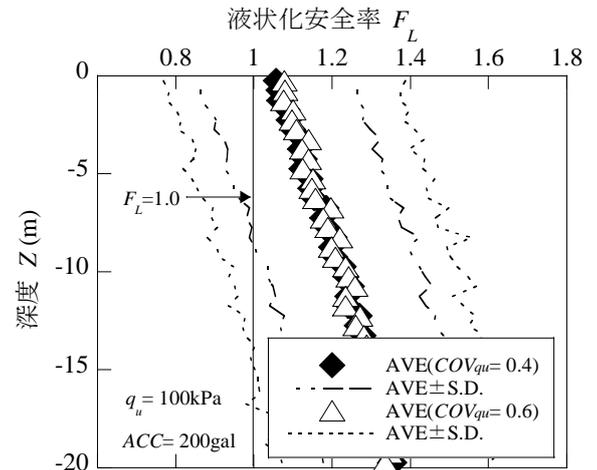


図-3 液状化安全率の深度分布

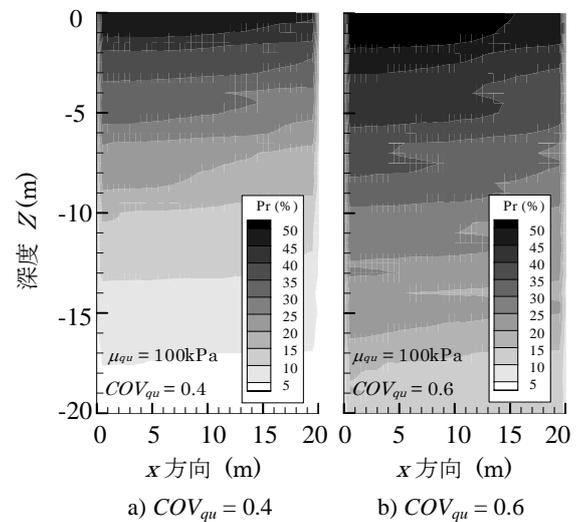


図-4 液状化ポテンシャルの空間分布

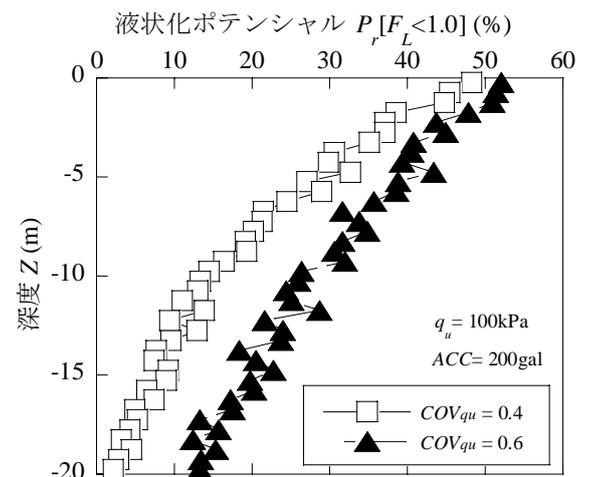


図-5 液状化ポテンシャルの深度分布