

令和 4 年 5 月 12 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04351

研究課題名（和文）統計的推定誤差と空間的ばらつきを考慮したセメント改良地盤の強度評価

研究課題名（英文）Evaluation of overall strength of cement-treated soil column considering statistical uncertainty and spatial variability

研究代表者

並河 努（Namikawa, Tsutomu）

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：50455151

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、統計的推定誤差と空間的ばらつきを同時に考慮した条件で、セメント改良地盤の全体強度を評価できる手法を構築し、セメント改良地盤の品質管理におけるコアサンプルの数と全体強度評価精度の関係を明らかにした。セメント改良地盤よりコアサンプルされた供試体の強度の統計量の誤差を推定にはベイズ推論に基づくMCMC法を適用し、サンプルサイズに応じた強度の統計量を定量的に推定する手法を構築した。ベイズ推論に基づくMCMC法により評価されたセメント改良土の強度の統計量を用いて、強度のばらつきを有する実大セメント改良柱モデルを多数生成し、生成したモデルを用いたRFEM解析手法の構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

統計的不確実性と空間的ばらつきを同時に評価できるRFEM解析手法を構築した。本手法を用いて実大セメント改良柱の一軸圧縮強度を評価することにより、サンプルサイズである供試体数と、供試体強度から推定されるセメント改良柱の全体強度の関係が明らかになる。これまで、強度確認におけるサンプルサイズの決定に対し合理的な判断が難しかったが、本研究で得られた成果より、セメント改良地盤工法の品質検査過程における事後検査でのコア供試体数と検査精度の関係が明確になり、供試体数に応じた強度確認が合理的に可能となった。

研究成果の概要（英文）：This study presented a probabilistic analysis framework to evaluate the overall strength of a cement-treated soil column considering the statistical uncertainty and spatial variability of the core strength. A Bayesian inference analysis and an FEM analysis incorporating with the random field theory are combined in a Monte Carlo framework to simultaneously consider the statistical uncertainty and spatial variability. The statistical uncertainty of the core strength is evaluated by the Bayesian inference approach, where the probability distribution of the statistical parameters is inferred from the observation data. The inferred statistical parameters of the strength are used for generating random field realizations and the FEM analysis is conducted on the generated realizations. The simulation results provide the influence of the sample size on the evaluation of the overall strength of a cement-treated soil column.

研究分野：地盤工学

キーワード：セメント改良地盤 強度 統計的不確実性 空間的ばらつき ベイズ推論 FEM解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地盤の力学特性を評価するために、原位置でのサンプリング等を実施するが、採取供試体の数や調査地点数といったサンプルサイズにより物理量の平均や標準偏差といった統計量を推定する際に生じる不確実性が変化する。サンプルサイズに起因する不確実性は統計的推定誤差と呼ばれ、実地盤からモデル地盤を設定する際に生じる。

サンプルサイズが統計量の予測に与える影響は、統計学の手法を用いることにより定量的に評価できる。例えば、データが互いに独立で正規分布に従う場合、サンプル平均は  $t$  分布に、サンプル分散は  $\chi^2$  乗分布に従う。地盤から採取された土の強度などのようにデータに相関関係が存在する場合の統計量を評価する手法としてはベイズ推論に基づくマルコフ連鎖モンテカルロシミュレーション (MCMC 法) の適用が考えられる。

一方、地盤全体の挙動を評価するためには、サンプリングされた供試体個々の挙動と地盤全体の関係を明らかにする必要がある。空間的ばらつきを有する地盤の全体挙動を評価できる手法として、モンテカルロシミュレーションと FEM 解析を組合せた Random Finite Element Method (RFEM) が近年用いられるようになってきている。RFEM 解析を用いることにより、空間的ばらつきの不確実性を考慮したモデル地盤を用いた設計が可能となる。研究代表者は深層混合処理工法により構築されるセメント改良柱の力学挙動を RFEM 解析により明らかにしてきたが、地盤工学分野において統計的推定誤差を考慮した RFEM 解析の実施例はない。統計的推定誤差と空間的ばらつきを同時に考慮した地盤挙動評価法を構築できれば、両不確実性を合理的に評価することできると考えられる。そして、セメント地盤改良工法においては、品質検査時における最適なサンプルサイズの決定が可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、統計的推定誤差と空間的ばらつきを同時に考慮した条件で、セメント改良地盤の全体強度を評価できる手法を構築し、セメント改良地盤の品質管理におけるコアサンプルの数と全体強度評価精度の関係を明らかにすることである。

### 3. 研究の方法

セメント改良地盤は原位置地盤とセメントを攪拌混合することにより構築されるため、強度に大きなばらつきが生じ、そのばらつきには自己相関性が存在することが知られている。このため、セメント改良地盤よりコアサンプルされた供試体の強度の統計量 (平均、分散、自己相関距離) の誤差を推定するには、自己相関特性を有する確率変数の統計量推定手法を構築する必要がある。本研究では、ベイズ推論に基づく MCMC 法によりサンプルサイズに応じた強度の統計量を定量的に推定する手法を構築した。セメント改良地盤の強度が自己相関を有する多次元正規分布に従うと仮定し、その統計量をベイズ推論で評価した。各統計量の条件付事後確率密度関数から MCMC 法により各統計量の確率標本を発生させ、平均、分散、自己相関距離の確率分布を推定した。

MCMC 法により推定されたセメント改良地盤強度の統計量にもとづき、強度の空間的ばらつきを有するセメント改良柱モデルを多数生成し、RFEM 解析を実施した。本研究では、強度の平均、分散、自己相関距離が変動する条件で、実大セメント改良柱のモデルを多数生成し、RFEM 解析より実大セメント改良柱の一軸圧縮強さのばらつき等を明らかにした。

RFEM 解析より得られた実大セメント改良柱の一軸圧縮強さより、サンプルサイズである供

試体数と、供試体強度から推定されるセメント改良柱の全体強度の関係が得られた。この関係より、供試体数が全体強度推定の不確実性に与える影響を明らかにした。本研究の結果より、セメント改良地盤工法の事後品質検査過程でのコア供試体数と検査精度の関係を明確にすることができた。

#### 4．研究成果

統計的不確実性と空間的ばらつきを同時に評価できる解析手法を構築した。本手法を用いて実大セメント改良柱の一軸圧縮強さを評価することにより、サンプルサイズである供試体数と、供試体強度から推定されるセメント改良柱の全体強度の関係が明らかになった。これまで、強度確認におけるサンプルサイズの決定に対し合理的な判断が難しかったが、本研究で得られた成果より、セメント改良地盤工法の品質検査過程でのコア供試体数と検査精度の関係が明確になり、供試体数に応じた強度確認が合理的に可能となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T, Namikawa	4. 巻 45
2. 論文標題 Probabilistic analysis of overall strength of a cement-treated soil column considering statistical uncertainty and spatial variability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics	6. 最初と最後の頁 794-814
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/nag.3182	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Namikawa	4. 巻 125
2. 論文標題 Finite Element Analysis for Deep Mixing Column Considering Statistical Uncertainty	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 968-975
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-64514-4_106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tutomu Namikawa	4. 巻 59
2. 論文標題 Evaluation of statistical uncertainty of cement-treated soil strength using Bayesian approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 1228-1240
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sandf.2019.04.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 並河 努	4. 巻 1
2. 論文標題 セメント改良体強度評価における統計的不確実性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第13回地盤改良シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 185-190
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsutomu Namikawa	4. 巻 59
2. 論文標題 Influence of statistical sample size on evaluation of overall strength of cement-treated soil column	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Canadian Geotechnical Journal	6. 最初と最後の頁 74-86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1139/cgj-2020-0640	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Tsutomu Namikawa
2. 発表標題 Statistical uncertainty on assessment of spatial liquefaction resistance
3. 学会等名 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsutomu Namikawa
2. 発表標題 Markov chain Monte Carlo method to estimate statistical parameters of cement-treated soil strength
3. 学会等名 International Conference on Case Histories & Soil Properties (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 並河 努
2. 発表標題 統計的不確実性と空間的ばらつきを考慮したセメント改良柱強度の評価
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------