様式Ｃ－１９

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成　25 年　5 月　28 日現在

機関番号：32619
研究種目：基盤研究(c)
研究期間：2010～2012
課題番号：22560505

研究課題名（和文）　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法に関する研究

研究課題名（英文）　Evaluation of the overall strength of cement-treated soil ground with spatial variability

研究代表者
並河　努（NAMIKAWA TSUTOMU）
芝浦工業大学・工学部・准教授
研究者番号：50455151

研究成果の概要（和文）：空間的に強度のばらつきを有するセメント改良柱の全体強度を評価する手法を開発することを目的に、室内試験と FEM 解析を実施した。室内試験では、ばらつきを有する供試体を用いて主に一軸圧縮試験を実施した。試験を模擬した FEM 解析を実施し、試験結果と解析結果を比較することにより FEM 解析の妥当性を確認した。実大スケールの改良柱を模擬した FEM 解析を実施した。解析結果より、自己相関特性が全体強度に与える影響が明らかとなった。そして、解析に基づき自己相関距離と実大改良柱の破壊確率の評価を行った。

研究成果の概要（英文）：Laboratory tests and finite element analyses were conducted to develop the design procedure for evaluating the overall strength of a cement-treated column where strength varies spatially. Unconfined compression tests were mainly carried out for the sample consisting of different strength parts. The comparison between the laboratory and numerical results indicates that the finite element method used in this study can describe the behavior of the cement-treated sample consisting of different strength parts. The finite element analyses are conducted to evaluate the behavior of a full scale column where strength varies spatially. The numerical results suggest that the autocorrelation distance affects significantly the overall strength of the full scale column. The probability of failure of the full scale column for a compression load is calculated from the numerical results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2010 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総　計	3,3000,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学
科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学
キーワード：土質力学

１．研究開始当初の背景

深層混合処理工法によるセメント地盤改良工法は、土木建築構造物の基礎、掘削時の土留め壁、液状化対策等に幅広く用いられるようになってきている。深層混合処理工法では地盤とセメントスラリーを原位置で攪拌混合するため、構築されるセメント改良地盤の強度にはばらつきが生じることが知られている。セメント改良土は脆性材料と考えられるため、改良地盤全体の破壊挙動は平均強

度のみならず強度のばらつきの特性にも大きな影響を受けると考えられる。現行設計法では、改良地盤のばらつきはコアサンプリングされた供試体を用いた一軸圧縮強さ（コア強度）のばらつきを設計基準強度に考慮することにより、強度のばらつきが設計に反映されている。コア強度を正規分布と仮定し、次式により設計基準強度 F_cを設定している。

$$F_c = \overline{q}_{uf} - m\sigma \quad (1)$$

ここで、$\overline{q_{uf}}$、σはそれぞれコア強度の平均、標準偏差で、m（= 1.3）は係数である。このように現行設計法においても強度のばらつきは考慮されているが、ばらつきを反映する指標としては強度の標準偏差のみ用いられている。しかしながら、実際のセメント改良地盤の強度には、空間自己相関特性が存在することが知られている。

このため､設計において空間自己特性が全体強度に与える影響を考慮すべきであるが、自己相関を有するコア強度と全体強度に関する研究はなく、強度の空間的なばらつきを有するセメント改良地盤の破壊挙動を評価することが要求されていた。

２．研究の目的

強度の空間的なばらつきを有するセメント改良地盤の破壊挙動を評価する解析手法を確立し、その解析手法を用いて強度の自己相関特性がばらつきを有するセメント改良柱の全体強度に与える影響を調べる。得られた解析結果を用いて、設計で有用となるセメント改良柱の破壊確率に関する知見を得ることが目的である。

３．研究の方法

(1) 強度のばらつきを有する供試体を用いた室内試験の実施

室内において人工的に強度の空間分布を有するセメント改良体を作成し、一軸圧縮試験及び一軸引張試験を実施する。供試体作成では仕切り壁によりいくつかの区画に分割されたモールドを用いる。分割された区画に異なる水セメント比のセメント改良土を入れ、最後に仕切り壁を取り除き、強度の空間分布を有する供試体を作成する。各区画へのセメント改良土の配置を変更することにより、空間分布特性を変えた供試体を作成することができる。試験での強度配置を図１に示す。4 ケースの強度配置の供試体を用いて試験を実施した。各ケースとも供試体を構成する要素の強度の平均は等しい。また、均質な供試体を用いた試験も実施した。

変位制御で試験を実施し､通常計測される載荷荷重と載荷部の変位に加え、供試体の局所変位を局所変位計（LDT）により計測する。

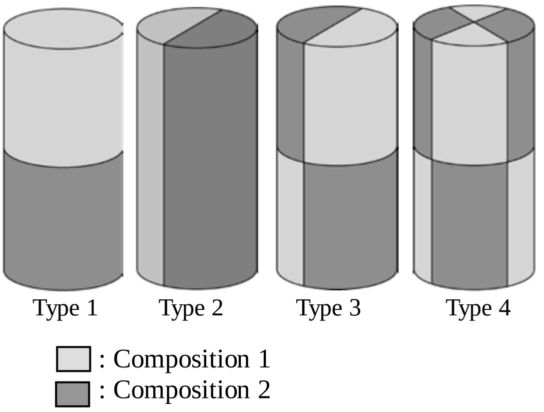

図１　試験に用いた供試体

(2) 室内試験の FEM 解析の実施

強度の空間分布を有する供試体を用いた一軸圧縮試験をシミュレートした FEM 解析を実施する。解析では研究代表者らが開発した弾塑性モデルを用いる。本弾塑性モデルはセメント改良土のピーク応力後のひずみ軟化挙動を表現することができるため、ばらつきを有する供試体内に局所的な部分破壊が発生した後の挙動も再現することが可能である。試験結果と解析結果を比較することにより、強度のばらつきを有するセメント改良土の力学挙動に対する FEM 解析の再現性を検証する。

(3) FEM 解析による強度のばらつきを有する実大改良柱の力学強度の評価

モンテカルロ法により作成された模擬供試体を用いて、強度のばらつきを有する実大改良柱の圧縮挙動と引張挙動をシミュレートした FEM 解析を実施する。圧縮挙動を調べるために用いた解析メッシュを図 2 に示す。強度のばらつきおよび空間自己相関距離が圧縮強度及び引張強度の平均値及び標準偏差に与える影響を調べる。得られた解析結果に基づき、設計で有用となるセメント改良柱の破壊確率に関する考察を行う。

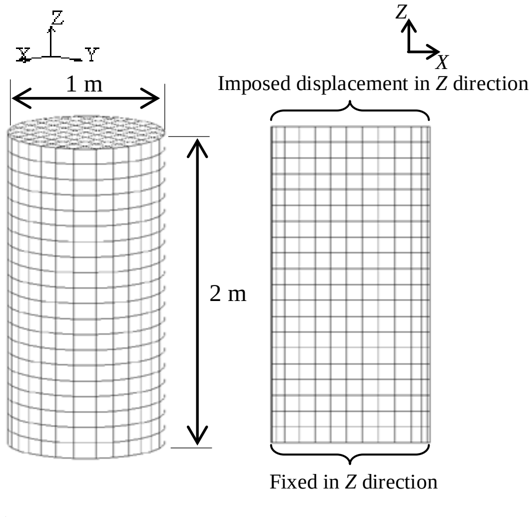

図２　FEM メッシュ

４．研究成果

(1) 強度のばらつきを有する供試体を用いた室内試験結果

図 1 に示す各供試体の一軸圧縮試験における応力－ひずみ関係の一例を図 3 に示す。図には配合 1、2 の均質な供試体の応力－ひずみ関係も併せて示している。各タイプの応力－ひずみ関係は、均質な供試体の応力－ひずみ関係の間に位置しているが、それぞれ異なる結果となっている。

試験における応力－ひずみ関係より得られた一軸圧縮強さ q_u を図 4 に示す。各タイプにより q_u の値が異なっていることがわかる。Type1 は弱部（配合 1）に近い値となっており、Type2 は弱部（配合 1）と強部（配合 2）の平均的な値となっている。これらのことより、供試体を構成する各部分の平均強度が同じでも、その配置により全体強度が異なることが明らかとなった。

(2) 強度のばらつきを有する供試体を用いた室内試験の FEM 解析

一軸圧縮試験より得られた応力－ひずみ関係と FEM 解析のシミュレーション結果の一例（Type4）を図 5 に示す。FEM 解析は試験における応力－ひずみ関係をほぼ再現できていることがわかる。

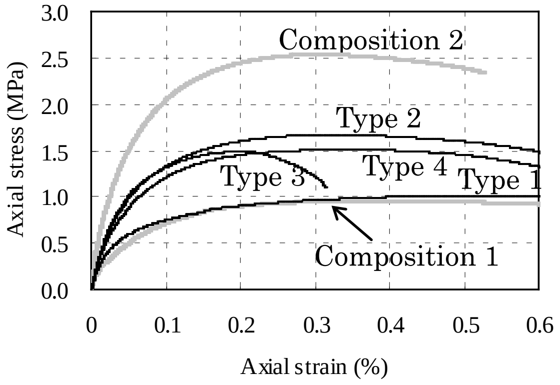

図 3　一軸圧縮試験結果　応力－ひずみ関係

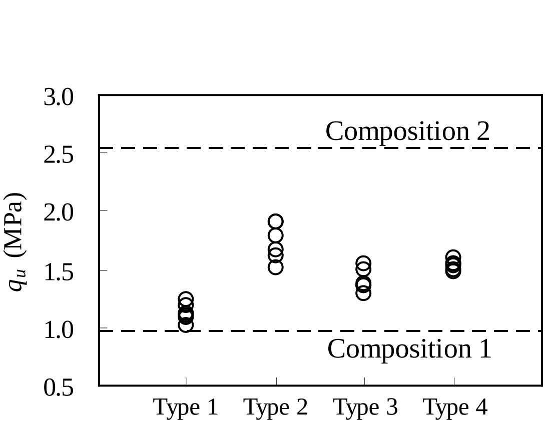

図 4　一軸圧縮試験結果　一軸圧縮強さ q_u

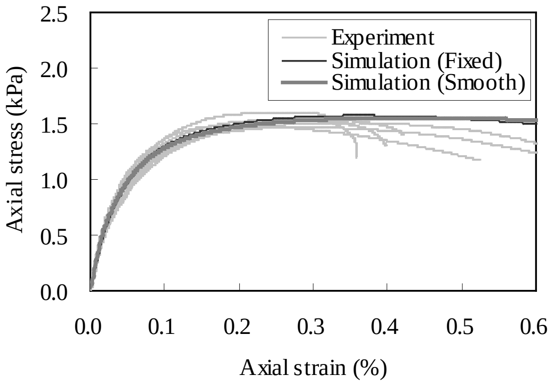

図 5　試験結果と解析結果の比較
応力－ひずみ関係（Type 4）

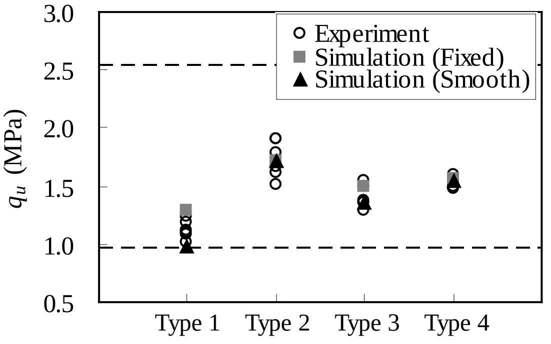

図 6　試験結果と解析結果の比較
一軸圧縮強さ q_u

一軸圧縮強さ q_u における試験結果と解析結果の比較を図 6 に示す。試験結果において q_u のばらつきが見られるが、解析結果はそのばらつきの範囲内に収まっている。これらの結果より用いた解析手法は空間的にばらつきを有するセメント改良土の力学挙動を表現できることが明らかとなった。

(3) FEM 解析による実大改良柱の強度評価

モンテカルロシミュレーションによる実大改良柱の一軸圧縮強さ Q_u の結果を図 7 に示す。図は 100 回のシミュレーション結果を示している。Q_u は自己相関距離 θ_{qu} により大きく影響を受けることがわかる。Q_u のばらつきは θ_{qu} に伴い大きくなっている。また、全ての θ_{qu} において、Q_u の大半は要素の平均強度 μ_{qu} より小さくなっている。これはセメント改良土が脆性材料で、その全体強度は弱部の強度に依存すると考えられるためである。

モンテカルロシミュレーションより得られた Q_u の平均と標準偏差を図 8、図 9 に示す。平均、標準偏差とも自己相関距離に依存していることがわかる。Q_u の平均は θ_{qu} = 0.5 m で最小となる。また、Q_u の標準偏差は θ_{qu} にともない大きくなっている。このことは、θ_{qu} が増加すると、Q_u のばらつきは大きくなるこ

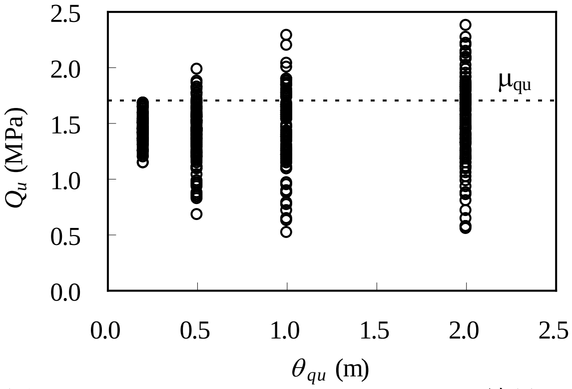

図 7 モンテカルロシミュレーション結果 実大改良柱の一軸圧縮強さ Q_u

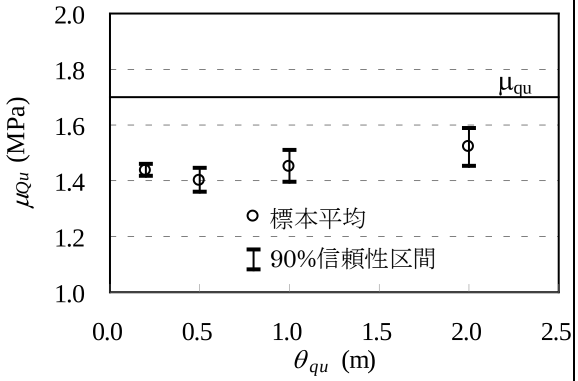

図 8 モンテカルロシミュレーション結果 実大改良柱の一軸圧縮強さ Q_u の平均

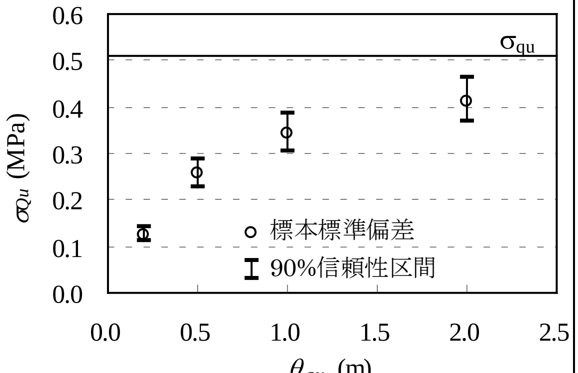

図 9 モンテカルロシミュレーション結果 実大改良柱の一軸圧縮強さ Q_u の標準偏差

とを示唆している。

Q_u が正規分布と仮定すると、モンテカルロシミュレーションより得られる Q_u の平均値と標準偏差より実大改良柱の破壊確率 p_f を計算することができる。破壊確率が p_f =10%と p_f =1%に相当する全体強度を図 10 に示す。各破壊確率に対応する Q_u は θ_{qu} に影響を受けることがわかる。θ_{qu} にともない Q_u のばらつきは大きくなるので、各破壊確率に対応する Q_u は θ_{qu} にともな小さくなる傾向にある。図 10 に示すような各破壊確率に対応する Q_u を用いれば、要求される破壊確率に対応したコア強度の平均（要素強度の平均）μ_{qu} を設定することが可能となる。

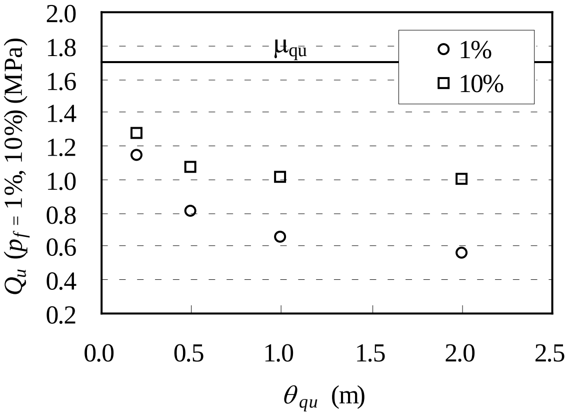

図 10 破壊確率（p_f = 1%、10%）に対応する全体強度 Q_u（p_f = 1%）、Q_u（p_f = 10%）

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 5 件）

① Namikawa T., Koseki J., Effects of spatial correlation on the compression behavior of a cement-treated column. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 査読有, Vol.139, No.8, 2013, (printed).

② Namikawa T., Numerical study of compression behavior of cement-treated columns with strength fields following normal and lognormal distribution. *Ground Improvement and Ground Control*, 査読有, Vol.2, 2012, 1193-1200. DOI:10.3850/978-981-07-3560-9_05-0505

③ 並河努, コア強度分布が与えられた条件でのセメント改良柱の圧縮挙動の評価. 第 10 回地盤改良シンポジウム論文集, 査読有, No.10, 2012, 347-352.

④ 並河努, 強度の確率分布がセメント改良柱の一軸圧縮強さに与える影響. 土木学会論集 C, 査読有, Vol.68, No.4, 2012, 695-706. http://dx.doi.org/10.2208/jscejge.68.695

⑤ 並河努, ばらつきを有するセメント改良コラムの一軸圧縮強度の統計的特徴. 第 9 回地盤改良シンポジウム論文集, 査読有, No.9, 2010, 259-264.

〔学会発表〕（計 8 件）

① Namikawa T., Hiyama S., Nakashima Y., Unconfined compression behavior of cement-treated soil sample consisting of different strength parts. *The 2nd International Conference on Geotechnics for sustainable Development*, Hanoi, Vietnam, 2013.11.28 (accepted).

② 檜山将太, 並河努, 谷中祐人, 草薙裕樹, セメント改良土の直接一軸引張試験, 土木学会第 68 回年次学術講演会,東京, 2013.9.4 (発表予定).

③ Namikawa T., Characterization of strength variability of cement-treated soil column. *Proceedings of the 4th Central Asian Geotechnical Symposium*, Samarkand, Uzbekistan, 2012.9.22, 172-177.

④ 並河努, FEM 解析による強度のばらつきを有するセメント改良土の一軸圧縮試験のシミュレーション. 土木学会第67回年次学術講演会, 名古屋, Ⅲ-231, 2012.9.6, 461-462.

⑤ 檜山将太, 並河努, 強度のばらつきを有するセメント改良土の一軸圧縮試験. 土木学会第 67 回年次学術講演会, 名古屋, Ⅲ-230, 2012.9.6, 459-460.

⑥ 並河努, 強度の確率分布の違いが改良柱の圧縮挙動に与える影響の評価. 第47回地盤工学研究発表会講演集, 八戸,2012.7.16, 294-295.

⑦ Namikawa T., Numerical Study of Bending Strength of Cement-treated Column with Spatial Variability. *Proceedings of the International Conference on Advances in Geotechnical Engineering*, Perth, Australia, 2011.11.8, 579-586.

⑧ Namikawa T., Numerical study of compression and tension behaviors of cement-treated column with spatial variability. *14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Hong Kong, 2011.5.24, CD-ROM.

６．研究組織

(1)研究代表者
並河 努（Tsutomu Namikawa）
芝浦工業大学・工学部・ 准教授
研究者番号：50455151

(2)連携研究者
古関　潤一（Junichi Koseki）
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号：30272511