異なる強度から構成されたセメント改良供試体の一軸圧縮挙動[†]

並河 努* 中島 雄一郎**

Unconfined Compression Behavior of Cement-Treated Sample Composed of Various Strength Parts

by

Tsutomu NAMIKAWA* and Yuichiro NAKASHIMA**

It is well known that strength of cement-treated soil column by deep mixing method varies greatly, even at a single column, owing to the variability of in situ soil properties, the variability of mixing effectiveness and other factors. Such variability of strength should affect the overall behavior of the cement-treated soil column. This study presents the investigation on strength of cement-treated soil samples composed of various strength parts. Unconfined compression tests were conducted to reveal the strength of cement-treated soil with spatial variability. Cement-treated samples composed of two different strength parts were prepared in the tests. The experimental results showed that the strengths of the composite sample do not correspond to the mean strength of the composing parts. The different distribution of the composition causes the different unconfined compression behavior of the cement-treated soil samples, even though the mean strength of the parts composing the sample is the same. Moreover, finite element analysis was conducted to valid that the numerical analysis can describe the behavior of the composite samples. The simulation results agreed reasonably with the experimental results, indicating that the finite element analysis used in this study can appropriately describe the strength of the cement-treated soils composed of various strength parts.

Key words:

Cement-treated soil, Strength, Variability, Laboratory test, Finite element analysis

1 緒 言

深層混合処理工法により構築されるセメント改良体内には強度のばらつきが存在するため、そのばらつきが改良体の力学挙動に与える影響を明らかにすることが同工法の合理的な設計法を構築する上で重要な課題となっている。著者はセメント改良体を対象とした FEM 解析によるモンテカルロシミュレーションを実施し (Fig. 1 参照)、強度の空間的ばらつきが改良体全体強度に与える影響を明らかにしてきた^{1,2)}。しかしながら、強度分布が改良体の全体強度に与える影響を調べることを目的とした試験はこれまで実施されてこなかった。

FEM 解析によるモンテカルロシミュレーションにおいて、要素サイズに対する強度の設定が重要となる。Fenton and Vanmarcke (1991)はある要素サイズにおける確率場のサンプル生成方法として、Local Average Subdivision 法を提案した³⁾。Local Average Subdivision 法では、要素サイズが変化しても要素強度の平均値は変わらず、要素サイズが大きくなるに従い要素強度の標準偏差が小さくなる。本手法は FEM 解析によるモンテカルロシミュレーションに広く用いられているが、セメント改良土のようにピーク応力後においてひずみ軟化挙動を示す材料強度に対し

要素サイズが変化しても平均値が変わらない同手法を適用できるかは未解明である。

本研究では、強度が異なる部分で構成されるセメント改良供試体の力学挙動を調べることを目的とし、セメント改良供試体の一軸圧縮試験と FEM 解析によるシミュレーション解析を実施した。一軸圧縮試験では、異なる配合で構成される供試体を作製し、強度の配置が全体強度に与える影響を調べた。また、試験結果とシミュレーション解析結果を比較し、FEM 解析の妥当性を検証した。

Fig. 1 Sample of cement-treated soil column for random finite element analysis¹⁾. The darker regions indicate stronger parts.

[†] 原稿受理 平成29年5月17日 Received May17,2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 芝浦工業大学 工学部 土木工学科 〒135-8548 東京都江東区

Department of Civil Engineering, Shibaura Inst. of Tech., Koto-ku, Tokyo 135-8548.

** 元芝浦工業大学 工学部 土木工学科 〒135-8548 東京都江東区

Formerly, Department of Civil Engineering, Shibaura Inst. of Tech., Koto-ku, Tokyo 135-8548.

2 一軸圧縮試験

異なる強度より構成される供試体を室内にて作製し一軸圧縮試験を行い、異なる強度の空間的な配置が応力ひずみ関係や強度に与える影響を調べた。本試験での供試体の配合を Table 1 に示す。豊浦砂、カオリン、ポルトランドセメント、水を用いて供試体を作製した。Table 1 に示す材料を攪拌混合した後、振動を与えながら円筒モールドに充填し、湿潤状態で 7 日養生後試験を実施した。供試体の寸法は直径 50mm、高さ 100mm である。配合 1、配合 2 の一軸圧縮強さ q_u はそれぞれ 1.0MPa、2.5MPa 程度である。

異なる強度から構成される供試体の配合分布を Fig. 2 に示す。Table 1 に示す 2 種類の配合の空間的配置を変えた供試体となっている。攪拌混合した材料を仕切り壁を設けた円筒モールドに充填し、充填後仕切り壁を引き抜くことにより供試体を作成した。各ケースとも供試体を構成する部分の q_u の平均は両配合の平均値である 1.75MPa である。各ケースとも 5 供試体に対し試験を実施した。一軸圧縮試験において、供試体端部を石こうでキャッピングした。載荷速度は 0.04mm/min とし、荷重はロードセルで、変位は外部変位計と局所変位計 (LDT) を用いて計測した。

一軸圧縮試験より得られた応力ひずみ関係の例を Fig. 3 に示す。ここで、ひずみは LDT の変位より算出している。均質な供試体の配合 1、配合 2 の間に、各ケースの供試体の結果が位置していることがわかる。また、各供試体とも構成する部分の q_u の平均は同じであるが、配合 1 と配合 2 の配置により応力ひずみ関係が異なっていることがわかる。

各ケースの一軸圧縮試験より得られた最大応力 σ_{max} を強度として Fig. 4 に示す。上下の強度が異なる TYPE1 では、強度の低い配合 1 の部分に供試体の挙動が支配されており、 σ_{max} は配合 1 の強度に近い結果となっている。左右の強度が異なる TYPE2 では、載荷荷重が配合 1 と配合 2 の两部分に分配されるため、 σ_{max} は配合 1 と配合 2 の平均に近い結果となっている。TYPE3 の σ_{max} は、TYPE1 と TYPE2 の σ_{max} の中間的な値となっており、TYPE4 の σ_{max} は TYPE3 の σ_{max} よりやや大きな値となっている。各ケースとも供試体を構成する部分の q_u の平均は配合 1 と配合 2 の q_u の平均であるが、その配置により一軸圧縮試験より得られる σ_{max} は異なることを試験結果は示している。

Table 1 Mixing properties of cement-treated soils.

Composition	Sand	Kaolin	Cement	Water
1	69.3%	5.0%	7.0%	18.7%
2	66.0%	4.8%	10.5%	18.7%

Fig. 2 Samples comprising of the two different parts

Fig. 3 Typical stress-strain relationships.

Fig. 4 Unconfined compressive strength of samples comprising of two different strength parts.

3 一軸圧縮試験のシミュレーション解析概要

一軸圧縮試験を FEM 解析でシミュレートした。本研究では、構成式として著者らが開発した弾塑性モデルを用いた⁴⁾。本弾塑性モデルはセメント改良土の引張からせん断に至る変形破壊挙動を適切に表現できるモデルとなっている。汎用 FEM 解析ソフト DIANA に本弾塑性モデルをユーザーサブルーチンとして組み込み解析を実施した。非線形解析における繰返し計算では初期剛性法を用いた。解析に用いたメッシュ図を Fig. 5 に示す。供試体周面以外の要素は 1 辺 5mm の立方体となっている。試験において供試体端部にキャッピングを施したため、供試体端部の

境界条件は固定に近い条件と考えられるが, 供試体を固定した条件 (Fixed) と摩擦無の条件 (Free) の 2 種類の境界条件で解析を実施した。

解析で用いた材料定数を Table 2 に示す。均質な供試体の一軸圧縮試験より得られた応力ひずみ関係においてひずみレベル 10^{-4} 程度の初期剛性より弾性係数 E を決定した。せん断抵抗角 ϕ は既往の研究⁴⁾より 30 度とし, 各配合の q_u より粘着力 c を定めた。引張強度 T_f と破壊エネルギー G_f は q_u に比例すると仮定し, 既往の研究⁴⁾で得られた値より算定した。ひずみ硬化に関するパラメータ e_y は均質な供試体の応力ひずみ関係より決定した。ポアソン比 ν , ひずみ硬化に関するパラメータ α , せん断破壊後の軟化パラメータ e_r , せん断破壊後のダイレイタンス係数 D_c , せん断帯の幅 t_{s0} は既往の研究⁴⁾で得られた値を用いた。特性長さ l_c は立方体要素の一辺の長さとした。

Fig. 5 FEM mesh

Table 2 Material parameters in FEM.

Parameter	Comp. 1	Comp. 2
Elastic modulus E (MPa)	2250	3960
Poisson's ratio ν	0.167	0.167
Friction angle ϕ (degree)	30	30
Cohesion c (MPa)	0.276	0.734
Tensile strength T_f (MPa)	0.215	0.572
Hardening parameter α	1.05	1.05
Hardening parameter e_y	0.00015	0.00015
Fracture energy G_f (N/m)	5.1	13.5
Softening parameter e_r	0.4	0.4
Dilatancy coefficient D_c	-0.4	-0.4
Localization size t_{s0}	0.6	0.6
Characteristics length l_c	5	5

4 一軸圧縮試験のシミュレーション解析結果

均質な供試体の一軸圧縮試験を解析した結果を Fig. 6, Fig. 7 に示す。両配合とも解析で得られた応力ひずみ関係は試験結果を適切に表現している。また, 均質な供試体のシミュレーションにおいて端部境界条件が解析結果に与える影響は小さいことがわかる。

各ケースにおける試験と解析の応力ひずみ関係の比較を Fig. 8~Fig. 11 に示す。上下の強度が異なる TYPE1 において, 供試体端部の境界条件により, 解析結果が異なる結果となっている。摩擦無条件に比較し固定条件の方が, 端部の拘束効果によりピーク強度が大きくなっており, 端部拘束条件が解析結果に与える影響が大きいことがわかる。TYPE1 では, 供試体上半分の配合 1 の部分のみで破壊が生じることより, 端部拘束の影響が大きくなったと推測される。また, 本ケースでの試験結果は解析結果の間に位置していることがわかる。左右の強度が異なる TYPE2 では, 端部の拘束条件が解析結果に与える影響が小さくなっている。そして, 解析結果は試験結果の平均的な結果となっていることがわかる。TYPE3 では, TYPE1 と同様に供試体端部の境界条件により, 解析結果が異なる結果となっている。そして, 試験結果は両解析結果の間に位置していることがわかる。試験結果と解析結果の

Fig. 6 Stress-strain relationships for Composition 1

Fig. 7 Stress-strain relationships for Composition 2

比較において、最大応力時のひずみの大きさに違いが見られる。TYPE3 では対角に配置された弱部を通る斜め方向に単一のせん断破壊面が形成されるため、破壊の進行が速く最大応力時のひずみが小さくなると考えられる。FEM 解析では Fig. 5 に示すようにメッシュ分割されており、斜め方向に面状の破壊面が形成されることを表現することが難しい。このためを、試験結果より最大応力時のひずみが大きくなったと考えられる。TYPE4 では、端部の拘束条件が解析結果に与える影響が小さく、解析結果は試験結果とほぼ同じ結果となっている。

TYPE1、TYPE2、TYPE4 において FEM 解析と試験での応力ひずみ関係は概ね一致した。TYPE3 において最大応力時のひずみに両者の違いが見られたが、前述したようにこの違いは FEM 解析におけるメッシュ分割に原因があると考えられる。

各ケースにおける最大応力 $\sigma_{\max}$ (強度) における試験結果と解析結果の比較を Fig. 12 に示す。前述したように、各ケースとも供試体を構成する部分の q_u の平均は配合 1 と配合 2 の平均 (1.75MPa) であるが、その配置により一軸圧縮試験より得られる $\sigma_{\max}$ は異なっている。解析結果は試験結果とほぼ一致しており、強度分布の差異が $\sigma_{\max}$ に与える違いを解析結果は表現できていることがわかる。

供試体端部の境界条件が $\sigma_{\max}$ に与える影響は各ケースにより異なるが、各ケースとも $\sigma_{\max}$ は固定した条件 (Fixed) が摩擦無の条件 (Free) より大きな値となった。

Fig. 8 Stress-strain relationships for TYPE1

Fig. 9 Stress-strain relationships for TYPE2

Fig. 10 Stress-strain relationships for TYPE3

Fig. 11 Stress-strain relationships for TYPE4

Fig. 12 Comparison between experimental and simulation results in terms of strength.

試験結果は両条件の解析結果の間にほぼ位置しており、このことはキャッピングを実施しているが試験での供試体端部境界は完全な固定条件でないことを示唆している。

5 結 言

ばらつきを有するセメント改良体の挙動を調べるため、異なる強度から構成されるセメント改良供試体の一軸圧縮試験を実施した。平均強度は同じとし、強度の配置を変えた 4 種類の供試体を用いた試験を実施したが、試験により得られる最大応力 (強度) は強度配置により異なる結果となった。このことは、ばらつきを有するセメント改良土の強度は、構成部分の平均強度で表すことができないことを示唆している。

FEM 解析の精度検証を目的に、一軸圧縮試験を対象としたシミュレーション解析を実施した。最大応力（強度）において試験結果と解析結果は概ね一致しており、著者らが提案している弾塑性モデルを用いた FEM 解析は、ばらつきを有するセメント改良体の強度を適切に表現できることが示された。

参 考 文 献

- 1) T. Namikawa and J. Koseki, “Effect of spatial correlation on the compression behavior of a cement-treated column”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE Vol.139, No.8, pp.1346-1359 (2013).
- 2) T. Namikawa, “Conditional probabilistic analysis of cement-treated soil column strength”, *International Journal of Geomechanics*, ASCE, Vol.16, No.1, 0415021 (2016).
- 3) G. A. Fenton and E.H. Vanmarcke, “Simulation of random fields via local average subdivision”, *Journal of Engineering Mechanics* ASCE, Vol.116, No.8, pp.1733-1749 (1990).
- 4) T. Namikawa and S. Mihira, “Elasto-plastic model for cement-treated sand”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.31, No.1, pp.71-107 (2007).