

微生物改良体に与えたせん断履歴とその回復に関する検討

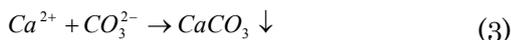
東京大学大学院 工学系研究科 学生会員 ○細尾 誠
 東京大学生産技術研究所 正会員 桑野玲子

1. はじめに

新しい地盤改良技術として、微生物機能を利用した方法が注目されている。地盤固化に尿素分解を適応するため、*Bacillus pasteurii* を用いた方法が報告されている¹⁾。本研究では、*Bacillus pasteurii* と固化を促進するためのカルシウム源、尿素、微生物の栄養源を含むグラウトを用い、炭酸カルシウムの析出による砂供試体の固化、および固化した砂供試体にせん断による損傷を与えた場合の潜在的な修復性について三軸圧縮試験を用いて検討を行った。

2. 尿素分解微生物による地盤固化のメカニズム

地盤固化に有効な微生物として *Bacillus pasteurii* (以下 *pasteurii* と称す。) を使用した。*pasteurii* は、尿素をアンモニアと二酸化炭素に分解するウレアーゼを持ち、間隙水中のカルシウムイオンと二酸化炭素の反応から炭酸カルシウム (CaCO₃) を析出する。炭酸カルシウムが土粒子同士を結ぶことで地盤が固化する。反応式を以下に示す。



3. 試験の概要

直径 5cm×高さ 10.5cm の三軸供試体は乾燥豊浦砂を空中落下させ、相対密度 75%を目標に作製した。脱気した純水で飽和した供試体を 50kPa の等方応力状態に維持し、供試体の下部から液体培養した *pasteurii*, 100cc を最初に浸透させた。次に予備検討^{2),3)} で有効性を確認した固化促進グラウト(表 1) 100cc を注入した。その後は剛性の変化を確認しながら計 4 回、100cc ずつ固化促進グラウトのみの注入を行って固化を試みた。4 回目の固化促進グラウト注入から約 12 時間後、三軸圧縮試験により 1 回目のせん断を行い、供試体に損傷を与えた。その後等方応力状態まで軸力を除荷し、約 24 時間養生した。養生終了後に 2 回目のせん断、除荷を行い、約 12 時間養生した。養生後、3 回目のせん断、除荷を行い強度の回復が起きないことを確認したところで、固化促進グラウトを注入して強度の回復を試み、グラウトの再注入による強度や剛性の回復、および実験開始時に供試体内に注入した *pasteurii* がもたらす潜在的な修復性の持続性についても検討した。試験中には、滲出した固化促進グラウトのカルシウムイオン濃度を測定と、等方応力状態下にてひずみ振幅 0.001%の繰り返し載荷を行い、微小ひずみ剛性 (ヤング率) の変化を測定した。

表 1 固化促進グラウトの組成

試薬	重量 (g/L)
ニュートリエントプロ	3
尿素	30
塩化カルシウム	70
塩化アンモニウム	10
炭酸水素ナトリウム	2

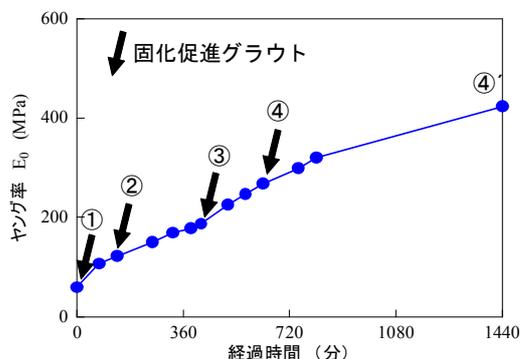


図 1 供試体固化過程のヤング率の推移

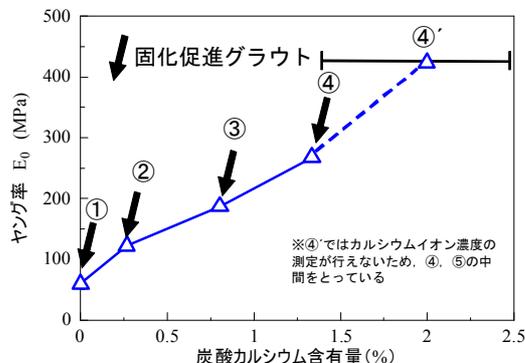


図 2 ヤング率と炭酸カルシウム含有量の関係

キーワード 微生物機能,尿素,炭酸カルシウム

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 TEL 03-5452-6845

4. 結果および考察

供試体の固化過程におけるヤング率の推移を図1に示す. 固化促進グラウトの注入毎に剛性は増加しているが, 反応するには2~4時間では不十分であり, 少なくとも10時間程度は効果が持続している事が分かる. 供試体から滲出するグラウト内のカルシウムイオン濃度の測定値から, カルシウムイオンの消費量, さらに炭酸カルシウム析出量を推定し, 供試体内の炭酸カルシウム含有量とヤング率の関係を図2にプロットした. 十分な反応時間がなくても炭酸カルシウムは析出しており, それに応じてヤング率が上昇していることがわかる. 図3に軸差応力と軸ひずみの関係を示す. 1回目のせん断では最大軸差応力は $q=350\text{kPa}$ 程度を示した. $q=300\text{kPa}$ 程度に低下するまでせん断を続けたところで等方応力状態($\sigma_a=\sigma_r=50\text{kPa}$)まで除荷し, そのまま24時間養生を行った. 次に2度目のせん断を行ったところ, $q=500\text{kPa}$ 程度までの上昇が確認された. せん断前最後の固化促進グラウト注入から12時間後に最初のせん断を行っており, 供試体間隙水に残ったカルシウムイオンの効果が発揮されたと考えられる. 2度目のせん断では $q=350\text{kPa}$ 程度に低下したところで等方応力状態まで除荷し, さらに12時間養生した. 3度目のせん断では強度の回復が起きないことが確認された. この事から強度増加を起こす様な固化促進グラウトの反応は36時間程度で終了している事が推察される. 3回目のせん断および除荷終了後, 固化促進グラウトを再注入した. 約30時間養生した後にせん断を行ったところ最大軸差応力が $q=500\text{kPa}$ まで上昇した. 図4に最大軸差応力と炭酸カルシウム含有量の関係を示す. 固化促進グラウトの注入により供試体内へ炭酸カルシウム析出が析出すると強度の回復が期待できることが確認された. 図6にヤング率と炭酸カルシウム含有量の関係を示す. 固化促進グラウトの注入によりヤング率が増加している. また, せん断後に剛性が回復する時も供試体を固化させる過程とほぼ同様の傾きで剛性が上昇していることが分かる.

5. まとめ

今回行った試験における供試体の強度およびせん断による損傷レベルでは, 固化促進グラウトの再注入により強度および剛性が損傷前よりも上昇することが確認された. 供試体間隙水に残存したカルシウムイオンによる強度上昇の効果があり, カルシウムイオンが供給される状況では, 自己修復能力があることが推察される.

参考文献:

1) Jason T. DeJong, Fritzges, M.B. and Nüsslein, K. : Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.132, No.11, pp.1381-1392, 2006
 2) 細尾 誠, 桑野 玲子:微生物機能を用いた地盤固化のシリジ試験による基礎検討, 第45 回地盤工学研究発表会, 平成22 年度発表講演集, pp.1971-1972, 2010
 3) 細尾 誠, 桑野 玲子:尿素分解菌を用いた地盤固化の栄養塩注入方法に関する実験的検討, 第65 回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-485, 2010

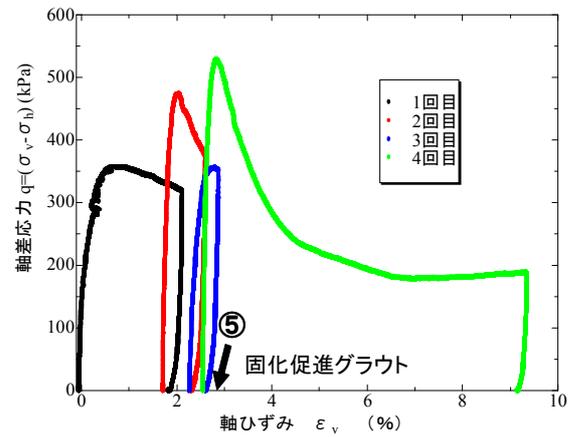


図3 軸差応力と軸ひずみの関係

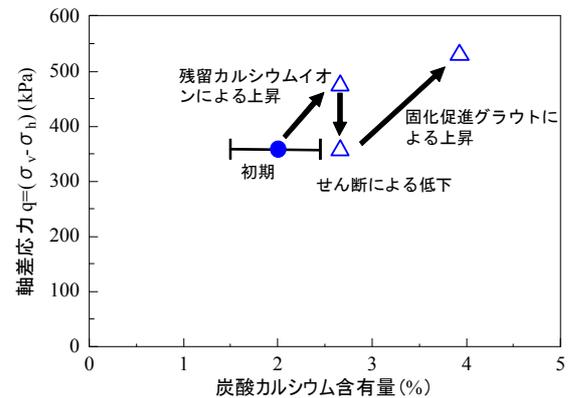


図4 最大軸差応力と炭酸カルシウム含有量の関係

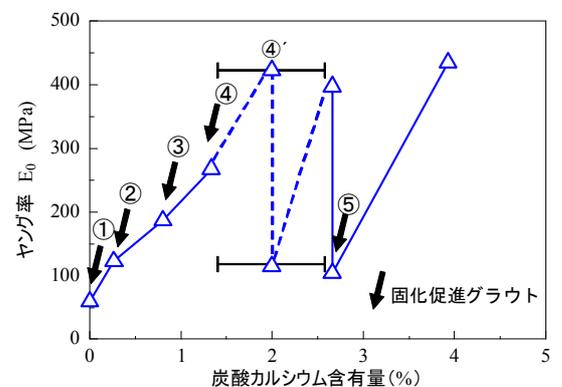


図5 ヤング率と炭酸カルシウム含有量の関係