

1. はじめに

軟弱地盤が多く分布する我が国にとって、インフラストラクチャーの整備の際の軟弱地盤改良技術は必要不可欠なものであり、多種多様な技術が考案・開発されている。生物による無機鉱物の生成（バイオミネラリゼーション）による地盤の強度増加技術はその中の一つである。バイオミネラリゼーションによる地盤改良は主に砂地盤を対象としている^{1,2)}が、本研究は粘性土を対象とし、微生物の中でも特に尿素分解菌に注目した。まずナタ豆由来の尿素分解菌を用い、尿素分解作用による炭酸カルシウムの析出の促進について調べた。次に炭酸カルシウムの析出によって見込まれる有明粘土の強度増加について実験的に検討した。

2. 微生物の培養と炭酸カルシウムの析出

本研究では、微生物として白ナタ豆由来の尿素分解菌を使用した。図-1 の概念図に示すように、尿素分解菌中のウレアーゼ酵素が作用することにより、尿素（CO(NH₂)₂）を媒体に NH₄⁺と CO₃²⁻が生成される。したがって尿素分解菌の繁殖状況は、NH₄⁺濃度の測定によって間接的に確認することができる。

図-2 に CO(NH₂)₂ 1mol/l と白ナタ豆粉末 1.0g/l を混合した場合の NH₄⁺濃度の経時変化を示す³⁾。尿素分解菌の代謝・繁殖活動は、約 3 週間程度は活性化したが、以降は尿素量の減少等によって減少したことを示している。

炭酸カルシウム (CaCO₃) の析出促進効果を確認するために、尿素分解菌を培養した溶液（以降はバクテリア溶液と呼ぶ）（500ml）を 2 週間養生後、塩化カルシウム (CaCl₂) を混合しさらに 3 週間養生した。養生後、容器内に析出した CaCO₃ の質量を計測した。結果をまとめたものを表-1 に示す。表中の①の 1.0mol-0.5g は、CO(NH₂)₂・CaCl₂ 濃度 1.0mol/l、白ナタ豆粉末 0.5g/l を意味する。②～⑤中の符号は同じルールで作成し、数字の違いは濃度の違いを表している。析出量は CaCl₂・CO(NH₂)₂ の濃度が高く、白ナタ豆粉末が多い①と②の方が多い。析出率は CaCl₂・CO(NH₂)₂ の濃度が低く、白ナタ豆粉末が少ない⑤がもっとも多い。

析出率については、市販されている尿素分解菌によるものとほぼ同等であることが確認できた⁴⁾。比較のために白ナタ豆粉末を加えない溶液についても実験を行ったが、CaCO₃ は析出しなかった。経済性と地盤改良の効果の観点から、②の条件が良いと考えられる。

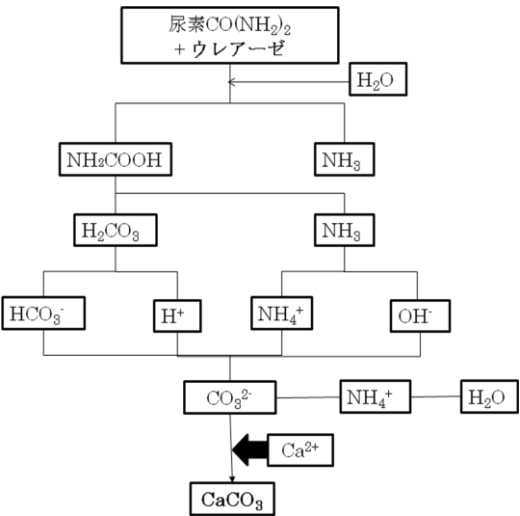


図-1 尿素分解菌による炭酸カルシウム析出のメカニズム

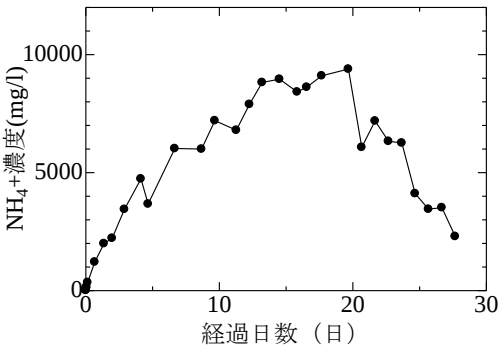


図-2 1mol-1g 溶液の NH₄⁺濃度変化

表-1 炭酸カルシウムの析出量および析出率

	① 1mol-0.5g	② 0.5mol-0.5g	③ 0.5mol-0.25g	④ 0.5mol-0.125g	⑤ 0.25mol-0.125g
析出量 (g)	7.7	8.65	4.98	3.62	5.3
析出率 (%)	15.4	34.6	19.9	14.5	42.4

3. 粘性土のせん断強さにおよぼす微生物の影響

3.1 バクテリア溶液の養生期間がおよぼす影響

尿素分解菌の作用により生成される CaCO_3 が、粘性土の強度増加におよぼす影響を実験的に検討した。用いた粘性土は、六角川河口付近から採取したもので、初期含水比は 145%、液性限界 115%、塑性限界 50% である。前述したバクテリア溶液を作製して一定期間養生した後、 CaCl_2 とともに含水比が 200% になるように粘性土に混入し、3 日・7 日・14 日養生し、ベーンせん断試験を実施した。なお、溶液混入後の供試体間隙水中の濃度は、混入した養生溶液の約 1/4 になる。ベーンせん断試験結果を図-3 に示す。全ての養生期間において、 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ と尿素分解菌を混合したものの強度が高くなった。また、 $\text{CaCl}_2 \cdot \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ・白ナタ豆粉末の濃度が高い供試体の強度はより高い結果となった。養生期間の違いで比較すると、1mol-0.5g では 7 日養生のものが 3 日・2 週間養生のものより強度が高く、0.5mol-0.25g の場合、3 日養生したものの強度が高くなった。

3.2 バクテリア溶液の濃度の影響

前節 3.1 と同様の方法で作製した幾つかの濃度のバクテ

リア溶液を粘性土の含水比が 200% になるように混合したものを 3 週間養生した後、ベーンせん断試験を行った。試験結果を図-4 に示す。図-4 より、ケース E (1.0mol-1.0g) のせん断強さ (su) がもっとも高いことがわかる。 $\text{CaCl}_2 \cdot \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ の濃度 1.0mol の場合、白ナタ豆粉末の量を増加した場合 (ケース D) も減少させた場合 (ケース C と F) でも、su 値は低下した。また、白ナタ豆粉末の添加量を 0.5g/l にして、 $\text{CaCl}_2 \cdot \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ の濃度を 1~3mol/l と増加させた場合、濃度の増加にともなって su 値は逆に低くなった。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下の様である。

- 1) 白ナタ豆由来の尿素分解菌は、 Ca^{2+} と $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ が存在する溶液中での CaCO_3 の析出に十分な促進効果があり、 CaCO_3 の析出率は、市販されている尿素分解菌と同等の値が得られた。
- 2) 作製したバクテリア溶液と粘性土を混合すると、ベーンせん断強さ (su) は増加した。最も大きな強度増加がみられたのは $\text{CaCl}_2 \cdot \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 1.0mol/l-白ナタ豆粉末 1.0g/l を混合したケース (溶液混入後の供試体間隙水中の濃度は、混入した養生溶液の約 1/4 になる) である。

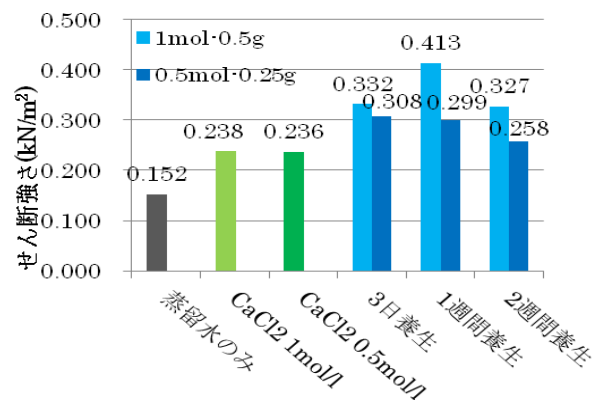


図-3 せん断強さにおける尿素分解菌の有無および溶液養生期間の影響

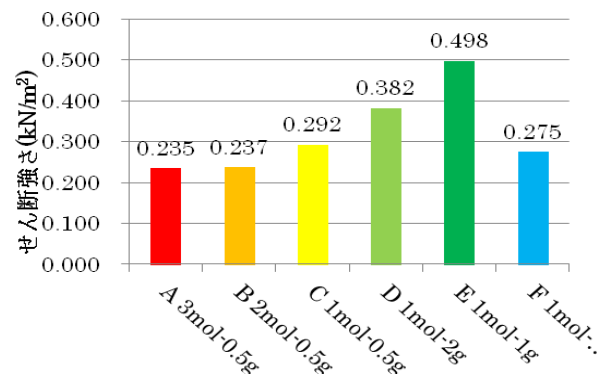


図-4 バクテリア溶液の濃度別せん断強さ

謝辞：平成 24 年度 (独) 日本学術振興会・科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究 (一般)・課題番号 24656288 による助成を受けて実施した。また試験に際しては齋藤昭則技術職員に多大なご協力をいただいた。記して感謝します。

参考文献(1) Mitchell, J. K. and Santamarina, J. C.: Biological Considerations in Geotechnical Engineering, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Eng., 131(10), pp.1222-1233, 2005. (2) 寺島麗、島田俊介、小山忠雄、川崎了：微生物代謝により固化するシリカ系地盤注入材バイオグラウトの基礎的研究、土木学会論文集 C、Vol.65、No.1、pp.120-130、2009. (3) 西澤和政、石灰・セメント系改良粘性土の強度における微生物の影響に関する基礎的な検討、佐賀大学都市工学科卒業論文、2013. (4) 稲垣由紀子、佐々木哲也、川崎了：微生物の種類による土の固化効果の違いに関する実験的検討、土木学会第 68 回年次学術講演会 CD-ROM, 2013.