

生体触媒型グラウト材注入工法の開発

Development of Grouting Method Utilizing Enzyme Mediated Calcite Precipitation

愛媛大学大学院理工学研究科 准教授 安原 英明

(研究計画ないし研究手法の概略)

本研究では、生体触媒であるウレアーゼの尿素加水分解機能を利用した炭酸カルシウム結晶析出による地盤固化効果の検討を行った。ドラム缶内に直径560 mm、高さ600 mmの砂層地盤を作製し、濃度調整したグラウト材の注入試験を実施した（以下、ドラム缶試験と称す）。ドラム缶試験に使用した砂は、山形飯豊珪砂6号であり、最大間隙比、最小間隙比、比重はそれぞれ、0.716、0.577、2.643である。ドラム缶試験では、尿素-塩化カルシウム溶液濃度1.0 mol/L、ウレアーゼ溶液濃度15.0 g/Lを使用して注入試験を行った。また、同濃度のグラウト材を複数回注入することで、注入回数と地盤固化の程度（炭酸カルシウム析出量と間隙率の変化）を評価した。さらに、グラウト材を注入する際には、グラウト材の注入状況を確認するため、緑色食紅（0.15 g/L）を混合した溶液を使用した。本研究で使用する注入溶液は、尿素・塩化カルシウム・ウレアーゼの混合溶液で、このグラウト材を地盤内に注入することで炭酸カルシウムが析出し、地盤を固化する。炭酸カルシウムの析出は、下式で表される。



ここで、式(1)中にある「Urease」は、尿素加水分解を促進させる触媒効果（ウレアーゼ）を表している。この手法では、アンモニウムイオンの発生により溶液がアルカリ性となる。炭酸カルシウムの析出はアルカリ性側で発生しやすいことが知られており、副産物のアンモニウムイオン生成が、炭酸イオン生成による溶液の酸性化を防ぐ緩衝材となる利点を有している。ドラム缶試験で実施した試験条件を下記に示す。

表-1 ドラム缶試験の試験条件

Test name	Green dye [g/L]	Urea & CaCl ₂ [mol/L]	Urease [g/L]	Inj. Volume [L]
D1	0.15	1.0	15	30
D2	0.15	1.0	15	60

以下に、ドラム缶試験の試験手順を示す。

- ① 直径560 mm、高さ850 mmのドラム缶の下端部に、二酸化炭素および水を注入するためのチューブを設置する。これは、グラウト注入前に砂地盤を水で飽和させるために設けている。その後、ドラム缶内部に2本の水抜き塩ビ管を設置する。その後、ドラム缶底部に層厚100 mmの碎石層を敷き詰める。これは、間隙水およびグラウト材の排水層となる。
- ② 空中落下により砂を降らせ、直径560 mm、高さ100 mmの砂供試体を相対密度 $Dr = 50\%$ となるように突き固める。3層の砂層を作製し、計300 mmにした後、グラウト用の注入口および注入チューブを設置する。その後、同様の手順で、高さ100 mmの砂層を3層作製する。
- ③ 再び、層厚50 mmの碎石層を敷設し、その上部を層厚50 mmのモルタルで蓋をする。これは、グラウト注入に伴う地盤のボイリング・パイピングを防ぐためである。
- ④ 砂地盤作製後に、二酸化炭素をドラム缶底部より大気圧条件で92 L注入する。これは、砂地盤の間隙体積の1.5倍に相当する。なお、注入した二酸化炭素濃度は、試験結果に影響を及ぼさない程度の濃度である。二酸化炭素注入後、同量の水92 Lを同じチューブを用いてドラム缶底部より注入する。この作業により、砂地盤内を水で飽和することが可能となる。
- ⑤ 濃度調整したグラウト材を砂地盤中央部に設置された注入口より注入する。すべての実験条件で、注入流量は1.0 L/minで30分注入し、計30 Lを注入する。このとき、グラウト材は、濃度調整した尿素・塩化カルシウム溶液とウレアーゼ溶液の2液を注入開始直前に混合することで作製する。複数回グラウト材を注入する場合は、前回注入終了後、2時間後に再注入を行う。
- ⑥ グラウト注入24時間後にドラム缶底部に穴を開け、間隙中の水およびグラウト材を排水させる。間隙水を十分排水させた後、ドラム缶側部を切り開け、グラウト材の分布状況、地盤固化の程度を観察する。その後、サンプリング用の塩ビ管を中心部から外側に3本突き刺し、砂試料を採取する。採取した砂試料は、サンプリングチューブ1本につき、深さ方向に6供試体、3本で計18供試体である。採取した18供試体は、アシッドリーチングにより炭酸カルシウム析出量を評価する。

ドラム缶試験の外観を以下に示す。



図-1 ドラム缶試験の外観

(実験調査によって得られた新しい知見)

ドラム缶試験で得られた改良供試体の外観を以下に示す。一回注入，二回注入試験共に，想定の改良体を作製することができた。



図-2 ドラム缶試験で得られた改良体の外観（一回注入（左），二回注入（右））

一回注入試験および二回注入試験の改良体から一軸圧縮試験用の供試体（直径50mm，高さ100mm）をそれぞれ1体および3体作製した。これらの供試体を用いて実施した一軸圧縮試験結果を以下に示す。

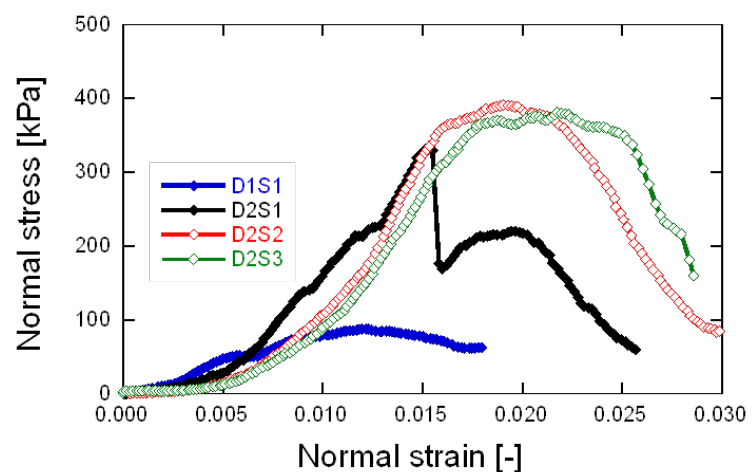


図-3 ドラム缶試験で得られた改良体の一軸圧縮試験結果

一回注入試験の改良体を用いて作製した供試体で得られた一軸圧縮強さは，100kPa程度で，二回注入試験の場合は，350～400kPa程度の強度が得られた。得られた強度は，液状化対策には十分な強度であると考えられ，本工法の有用性を示すことができた。つぎに，改良体内部の炭酸カルシウム析出量を評価した結果を示す。改良体から水平および鉛直方向に試料を採取し，採取した試料に含まれている炭酸カルシウム析出量を，アシッドリーチング（参考文

献1) を参照) を用いて評価した。また、炭酸カルシウム析出を考慮した移流・拡散方程式を算出するTOUGHREACT (参考文献2) を参照) を用いて、ドラム缶試験をシミュレーションし、改良体内部の炭酸カルシウム析出量を評価した。実験結果と解析結果の比較図を以下に示す。

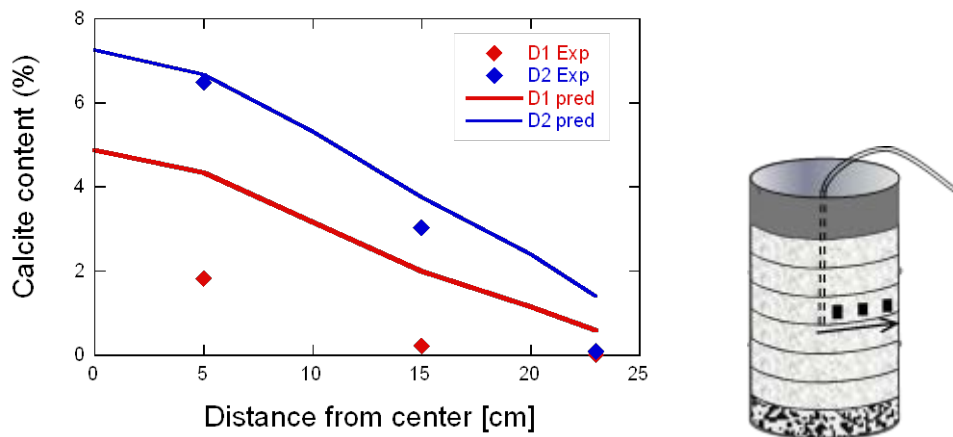


図-4 ドラム缶試験で得られた改良体の炭酸カルシウム析出量分布 (水平方向)

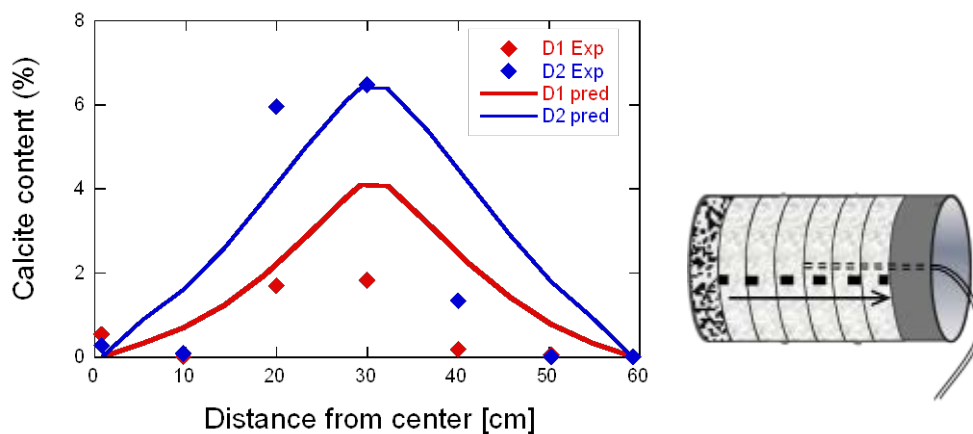


図-5 ドラム缶試験で得られた改良体の炭酸カルシウム析出量分布 (鉛直方向)

図-4より、炭酸カルシウム析出量は、注入口から離れるに従ってその量が低下していることがわかる。また、解析結果は、概ね実験結果を再現しており、解析モデルの妥当性を示す結果となった。また、図-4は、鉛直方向の炭酸カルシウム析出量分布を示しているが、ドラム缶底部から注入口に近づくにつれて析出量が多くなる傾向が得られている。実験結果および解析結果共に同様の結果が得られている。

本研究では、尿素・ウレアーゼ・塩化カルシウムの一体混合溶液をドラム缶内部の砂供試体に注入することにより、改良体の固化状態を検証した。作製された改良体は概ね想定通りの大きさであり、得られた強度も十分液状化対策に資する結果となった。また、炭酸カルシウム析出を模擬できる数値解析を実施したところ、実験結果を定量的に再現できており、用いたシミュレータの有用性を示すことができた。今後は、様々な境界条件で注入試験を実施

し、本手法の精度を高めることが重要課題であると考え。本研究では、改良体直径が約50cm程度であり、実際の現場適用を考えた場合、1～2m程度の改良体を作製する必要があり、本手法の高度化が不可欠である。

【参考文献】

- 1) Yahuhara, H., Neupane, D., Hayashi, K., Okamura, M. (2012) “Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation”, *Soils and Foundations*, 52(3), 539–549.
- 2) Xu, T., Sonnenthal, E., Spycher, N., and Pruess, K. (2004) “TOUGHREACT: A Simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media” Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory University of California, Berkeley, CA 94720, USA.

(発 表 論 文)

- ① D. Neupane, H. Yasuhara & N. Kinoshita, Evaluation of enzyme mediated calcite grouting as a possible soil improvement technique, The 14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Kyoto, Japan (Submitted).