

炭酸カルシウム析出時の飽和度の違いが液状化強度特性に及ぼす影響

液状化 繰返し三軸試験 薬液注入

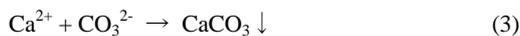
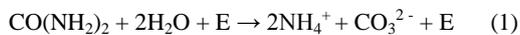
愛媛大学 学生会員 ○小阪 佳平
愛媛大学大学院 国際会員 岡村 未対

1. はじめに

土の力学特性の改善を目的とし、微生物代謝を利用して炭酸カルシウム結晶を析出させる研究が行われている¹⁾²⁾。その実用化に向けた課題の一つに材料コストがあり、少ない材料及び析出量でより効果的に強度を増加することが求められている。飽和土に薬液を注入すると、土粒子表面にまんべんなく炭酸カルシウムが析出するが、土の強度増加に寄与するのは土粒子同士の接触点において析出する炭酸カルシウムだけである。そこで、飽和度が低くなると、間隙水が粒子間の接続部に集中することを利用し、例えば地盤への空気注入等によって脱水した状態で炭酸カルシウムを析出させれば、少ない析出量でも粒子の接続部に結晶が集中することによって強度の増加が期待できる。本研究では、飽和度の異なる供試体に炭酸カルシウムを析出させ、飽和度と析出量の違いが液状化強度特性に及ぼす影響を繰返し三軸試験より調べた。

2. 実験方法

本研究では、以下の化学反応式に着目した。



ウレアーゼは尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)を加水分解し、溶液中に炭酸イオン(CO_3^{2-})を供給する生体触媒(E)である(式(1))。炭酸カルシウム(CaCO_3)は、カルシウムイオン(Ca^{2+})と炭酸イオンが結合し析出する(式(3))。ウレアーゼは、触媒であるため、反応過程において量の増減は生じない。

試験条件を表1に示す。析出率、すなわち析出する炭酸カルシウムの質量と砂の乾燥質量の比を0.3%または0.6%とし、上記化学反応による析出時の供試体飽和度を40%または70%に調整した。混合する尿素と塩化カルシウムのモル濃度、および尿素と塩化カルシウムが全て上記反応を起こした場合に析出する炭酸カルシウムのモル濃度の比は1:1:1である。

供試体は次のように作製した。まず、表2に示す1層分の量の豊浦砂とウレアーゼ溶液および尿素・塩化カルシウム溶液をビニール袋の中で5分間よく混ぜ合わせ、プラスチックモールド($\phi 5\text{cm} \times \text{H}10\text{cm}$)の中で、Wet Tampingにより相対密度50%になるよう締固めた。これを5層分繰返し高さ10cmまで作製した後、拘束圧鉛直圧力50kPaの下で化学反応が終了するのに十分な時間(2~3日間)養生した。養生後、プラスチックモールドから供試体を抜き出して三軸試験機に設置し、三軸試験機内で供試体に 400cm^3 の純水を通水させ飽和させた。

有効拘束圧50kPaで等方圧密した後、 10^{-5} 程度の軸ひずみを4回与えてせん断剛性を計測し、続いて非排水繰返し載荷試験を行った。試験終了後、試料を 110°C で炉乾燥し、供試体の上、中、下部(プラスチックモールドの底部から順)から20gずつ採取した試料に塩酸を加えて炭酸カルシウムを溶解し、析出量を計測した。

表2 1層あたりの配合量

豊浦砂		58.5g	
Sr=40%		Sr=70%	
析出なし	析出あり	析出なし	析出あり
水 7.1g	ウレアーゼ溶液 3.61g	水 12.36g	ウレアーゼ溶液 6.23g
	尿素・塩カル溶液 3.61g		尿素・塩カル溶液 6.23g

表1 試験条件

飽和度 Sr (%)	析出率 P (%)	ウレアーゼ濃度 (g/L)	尿素・塩カル溶液濃度 (mol/L)
40	0	0	0
70		0	0
40	0.6	10	0.5
70		2	0.29
40	0.3	2	0.25

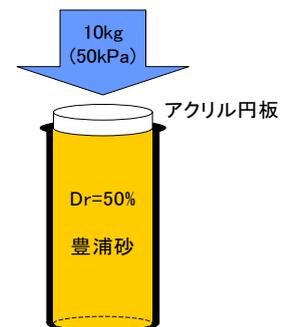


図1 養生中の供試体

3. 繰返し三軸試験結果

図2にせん断ひずみとせん断剛性の関係を示す。まず析出量の違いでは析出なしから析出率0.3%に増加してもせん断剛性の増加はほとんど見られないが、析出率を0.6%まで増加すると大幅にせん断剛性が増加した。また、析出率0.6%

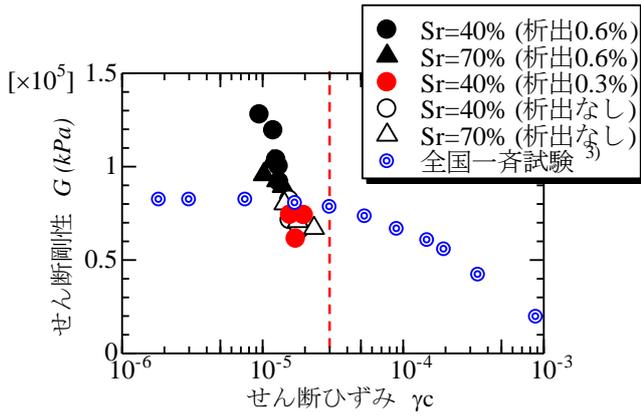


図 2 セン断剛性

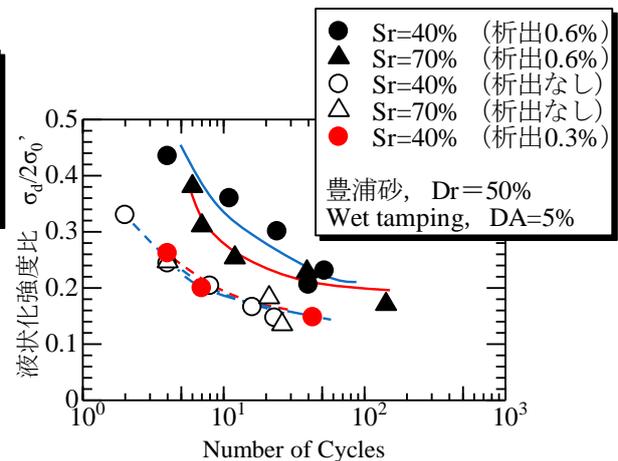


図 3 液状化強度曲線

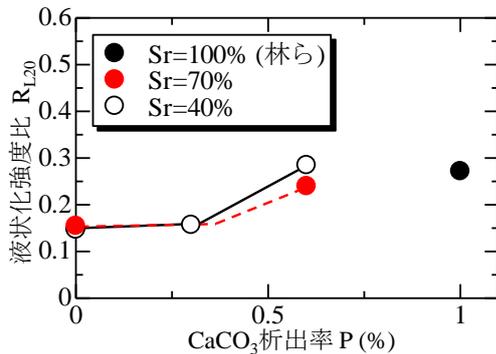


図 4 液状化強度比と析出率

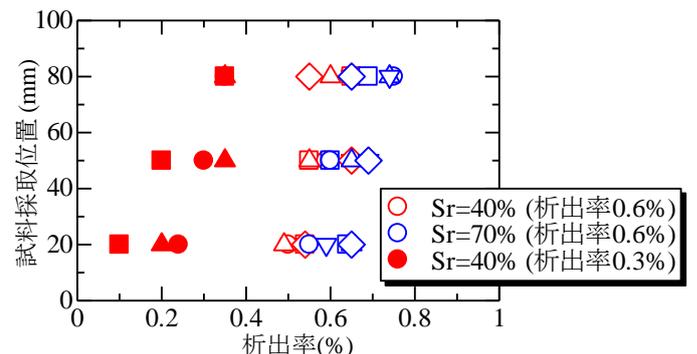


図 2 炭酸カルシウム析出量

のケースでは、析出時の飽和度が Sr=40% と低い方が、せん断剛性がより増加した。

図 3 に液状化強度曲線を示す。析出なしから析出率 0.3% に増加しても液状化強度の向上は見られないが、析出率を 0.6% に増やすと液状化強度が増加した。また、析出率 0.6% のケースでは、析出時の飽和度が Sr=40% と低いほうが液状化強度の向上が見られた。この傾向は、せん断剛性に及ぼす飽和度と析出率の関係と同様のものである。

図 4 に液状化強度比と炭酸カルシウム析出率の関係を示す。図中には、林ら(2010)が飽和状態(Sr=100%)で同様に炭酸カルシウムを析出させた供試体の液状化試験結果も示してある。これと比べ、析出時の飽和度を低下させることにより、本研究では約半分の析出量で同じ強度を得ることができた。

4. 炭酸カルシウム析出量の測定

図 5 に各供試体の炭酸カルシウム析出率の測定結果を示す。どの供試体も上部の析出率が多くなっている。これは、供試体作製時の締固めによってプラスチックモールドの底部に溶液が移動したことが原因だと考えられる。また、データのばらつきの原因として採取する量が 20g と少ないことが考えられる。しかし、0.3%の供試体の 1 本を除いて析出率の平均値は目標析出率に近い値となった。本研究の溶液濃度やウレアーゼ濃度は、予め砂のない試験管内での席試験結果に基づき決めたものである。豊浦砂供試体中でも 100% 反応が生じたことがわかる。

5. まとめ

本研究では炭酸カルシウム析出時の飽和度を変化させ、繰返し三軸試験を行った。その結果、析出率 0.6% では飽和度を低くすることによってせん断剛性および液状化強度比の改良効果が確認できた。また、Sr=40% では Sr=100% の半分の炭酸カルシウム析出量で同じ液状化強度を与えることができた。析出時の脱水状態が、粒子の接続部に結晶が集中し少ない析出量でも液状化強度が増加したと考えられる。しかし、析出率 0.3% ではせん断剛性および液状化強度の向上は見られなかった。今後は、実験ケースを増やし、SEM-EDX による目視確認によって詳細な検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 林ら：炭酸カルシウム結晶析出による砂の液状化特性の改善効果，土木学会論文集 C, Vol.66, No.1, pp31-42, 2010.
- 2) QABANY.et al. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils, Geotechnique 63, pp331-339.2013.
- 3) 土の動的変形定数試験方法基準委員会 1994 年：室内繰返し載荷試験による豊浦砂の変形特性に関する全国一斉試験の実施と試験結果の解析，土と基礎，42-11.