

微生物機能を用いた砂の固化プロセスの改良による固化改善効果

九州大学 正会員 ○中野 晶子
静岡理工科大学 正会員 中澤 博志

1. 研究背景と目的

微生物機能を利用した炭酸カルシウム生成による砂の固化技術の研究は、国内外において既に数多くの研究報告がある。またその中でも、尿素の加水分解反応を利用し炭酸カルシウム CaCO_3 を析出させる手法が多い。この場合、反応過程に尿素の加水分解酵素であるウレアーゼを持つ微生物を添加することで尿素の加水分解を促進し CaCO_3 を結晶化させる。ただし、既往の研究の多くは微生物バンクから購入した外来菌種を採用していること、固化溶液を繰り返し土中に通水する手法を取るなどがコストや作業効率、環境影響の面で課題とされてきた（稲垣，2014）。一方、本研究では現場の砂から分離培養したウレアーゼ陽性菌と独自に調整した固化剤を用い、効率的に土中で CaCO_3 を結晶化する反応プロセスを考案した。これにより、一回の施用で砂の固化効果を大幅に向上させることに成功した。そこで本研究では、静岡県浜松市の中田島砂丘で採取した砂（以下「中田島砂」という。）に対し本固化技術を適用し、固化による砂の力学特性の変化を評価した。静岡県浜松市は 2020 年に海岸線に沿って東西に約 17.5 km の大規模な防潮堤を完成させた。その一部は中田島砂丘内にも建設され、景観や生態系への配慮として堤体法面や堤頂を砂で被覆する構造が採用された。しかし、強風や高潮の影響により表面の侵食が進み、構造内部のコンクリートが剥き出しになる箇所も発生しており、法面の補修工事や飛砂防止策が求められている。本研究では、この中田島砂丘の防潮堤法面保護対策の一手段として本手法の適用可能性を今後検討していく予定である。

2. 試料と方法

本固化技術による中田島砂の固化効果を評価するために、無処理と固化後の砂供試体に対して、圧密排水三軸圧縮試験（CD 試験，JGS 0524-2009）を行い、排水せん断特性を評価した。中田島砂は、静岡県浜松土木事務所の協力の下、中田島砂丘内の防潮堤の堤体海側で採取し、水洗して塩分を除去後、風乾したものをを用いた。表 1 に中田島砂の物理性を示す。無処理の供試体は、モールド内に密着させたゴムスリーブに砂を空中落下法で所定の密度に詰めて作成した。モールドを着けたまま供試体を三軸装置のペDESTAL 上に固定し、2.5 kPa の水頭差で供試体下部から脱気水を通水した。供試体に -15 kPa 程度の負圧をかけてモールドを取り外し、三軸セル内を水で満たした後、負圧をセル圧に置き換えた。固化供試体は、独自に調整した固化剤と砂をモールドに詰め、37℃ 恒温インキュベータ内で 2 日間静置後、モールドから供試体を取り外し、余剰の塩類を水洗、脱気水を十分に通水して作成した。固化供試体は自立するほどに固化したため、ゴムスリーブで覆い負圧をかけずに三軸セル内に設置した。供試体形状は、いずれも直径約 50 mm、高さ約 100 mm の円柱とした。試験条件は、飽和砂供試体（ $B \geq 0.95$ ）に対し、初期有効拘束圧 = 30, 50, 100 kPa の 3 条件とした。三軸セルに設置した供試体を両面排水で等方圧密した後、ひずみ速度約 0.1%/min で軸圧縮を行い、軸圧縮力をロードセルで、排水量を差圧計でそれぞれ計測した。

表 1 中田島砂の物理性			
土粒子密度	ρ_s	g/cm ³	2.741
砂分		%	96.9
シルト分		%	0.1
粘土分		%	3.0
平均粒径	D_{50}	mm	0.409
最大間隙比	$e_{\max}$		0.863
最小間隙比	$e_{\min}$		0.519

3. 結果と考察

本試験結果から固化による砂の力学特性の変化が様々な視点から考察可能であるが、本報告では特に固化処理によって微小軸ひずみ領域で現れる最大軸差応力（主応力差）に着目した。図 1 に有効拘束圧 50 kPa にお

キーワード 砂，固化，微生物，炭酸カルシウム，ウレアーゼ
連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744
九州大学大学院農学研究院 生産環境科学講座土環境学分野 TEL 092-802-4621

ける，無処理と固化後の供試体の主応力差・体積ひずみ－軸ひずみ（0—3%）の測定結果をそれぞれ示す．図上の凡例には，供試体の初期相対密度 Dr も併記した．いずれの固化供試体も，一般的な砂供試体とは異なり，相対密度 Dr にかかわらず軸ひずみ 1%以下の微小ひずみで主応力差が急増し，その後減少する傾向が見られた（図 1 (a)）．足立・岡（1992）は，砂のせん断過程において，ひずみが比較的小さい間は粘着力やセメンテーションなどによる成分が支配的であるが，ひずみが増大するに従い摩擦による強度の発現が卓越すると述べているように，この急激な応力変化は炭酸カルシウムによる固化（＝セメンテーション）が寄与しているといえる．一方，せん断に伴う体積変形は，無処理・固化に関わらず Dr に影響をうけ，せん断初期にわずかに収縮傾向を示した後，ひずみ軟化に伴い $Dr=21\%$ 以下の緩詰では体積収縮， $Dr=34\%$ 以上の中位の密度では体積膨張する傾向が見られた（図 1 (b)）．

図 2 に最大主応力差 q_{max} と初期有効拘束圧 σ_c' の比となる軸差応力比 q_{max}/σ_c' と Dr の関係を示す． $\sigma_c'=50$ kPa の結果で比較すると， Dr と q_{max} には正の相関がみられ，緩詰の供試体でも固化による強度の改善が見られた． $Dr=30$ — 56% で比較すると，いずれの固化供試体も無処理に比べて応力比が 1.6—3.0 倍増加し，有効拘束圧が小さいほど応力比が高くなる傾向にあることから，初期拘束圧が炭酸カルシウムの結晶析出による固化効果に影響する可能性が示唆された．

3D デジタルマイクロスコープ（RH-2000, HiROX）を用いて湿潤状態の固化供試体の内部構造を観察すると，砂粒子に対して 1/10（約 $50\mu\text{m}$ ）程度の微小な結晶が，鎖状に連なって砂粒子間に析出することで土粒子が固結する様子が観察された（図 3）．このように本手法を用いた砂の固化には，粒子間に働くミクロスケールでの結合が寄与するといえ，試験時のひずみ速度や拘束圧が強度評価に影響する可能性がある．

4. まとめ

中田島砂丘で採取した沿岸砂を用い，本研究で改良した砂の固化プロセスを採用して固化した砂供試体の排水せん断特性を評価した．その結果，主応力差最大時の軸差応力比が固化前の 1.6—3.0 倍に増加した．

謝辞：本研究は JSPS 科研費 18KK0427 の助成を受けたものです．

参考文献：稲垣（2014）微生物代謝により固化した砂の強度向上と液状化対策に関する実験的研究，北海道大学博士論文．足立・岡（1992）軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式，土木学会論文集 445, 9-16．

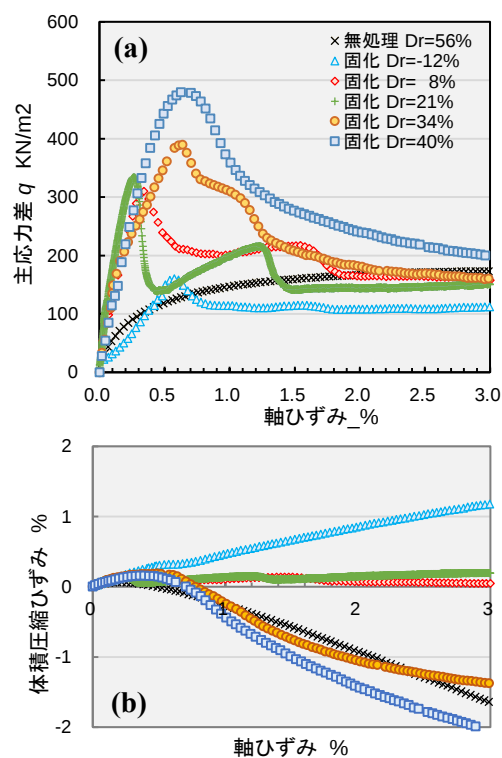


図 1 中田島砂の CD 試験（有効拘束圧 50kPa）
主応力差・体積ひずみと軸ひずみの関係
《初期相対密度による比較》

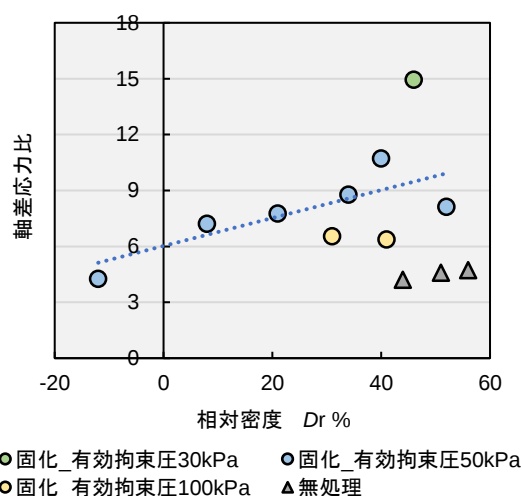


図 2 主応力差最大時の軸差応力比 q_{max}/σ_c' と
初期相対密度の関係



図 3 固化処理後に砂粒子間に析出した炭酸カルシウムの結晶（×200 倍）