

尿素分解菌を用いた地盤固化に関する 実験的研究

八重樫 彩^{1*}・檀上 堯²・川崎 了³

¹北海道大学大学院 工学院環境循環システム専攻（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目）

²応用地質株式会社 エネルギー事業部（元 北海道大学大学院 工学院）（〒336-0015 埼玉県さいたま市南区太田窪2-2-19）

³北海道大学大学院 工学院環境循環システム部門（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目）

*E-mail: green_677@eis.hokudai.ac.jp

潮間帯に形成される石灰質岩であるビーチロックは天然材料から構成されているため、環境にやさしく自己修復能力が期待される。ビーチロックを模擬した人工岩盤は、世界中で問題となっている海岸侵食の新対策として期待される。本研究では、炭酸カルシウムの析出が期待できる高いウレアーゼ活性能力を有する尿素分解菌を用いて、ビーチロックをモデルとした砂供試体を作製した。また、カルシウム源の配合、供試体に用いる砂の種類、尿素添加濃度が供試体の一軸圧縮強さ（UCS）に及ぼす影響について調べた。全ケースのうち、尿素添加量が0.5 mol/Lの供試体が約4 MPaという最も高いUCSを示した。尿素添加量が増加すると、供試体内に析出する炭酸カルシウム量が増加し、高強度の供試体が得られたと考えられる。

Key Words : beachrock, sand specimen, calcium carbonate, ureolytic bacteria, unconfined compressive strength

1. 諸言

近年、国内外で海岸侵食が問題となっている¹⁾。この問題に対しては、海浜形状を保つために、離岸堤、人工リーフ、ヘッドランド等の漂砂抑制施設を整備したり、海岸を保全するために養浜あるいはサンドバイパスによって不足する漂砂を補給するといった対策がある。漂砂抑制施設では、長大な砂浜において連続的に構造物を配置する必要があることから、整備するためには多大な費用と長期的な期間を要する。また、養浜は継続的な実施が必要であり、長期にわたる安定した財源と良質で安価な養浜材料が必要不可欠である²⁾。

一方、わが国では高度経済成長期に構築した社会資本施設の老朽化が進んでおり、2014年度国土交通白書³⁾によると、建設後50年以上が経過する港湾岸壁施設の割合は、2013年度では約8%であるが、2033年度には約58%にまで増加し、老朽化する港湾岸壁施設の割合が加速度的に大きくなる見込みである。しかし、財政難を抱える現代の日本の社会経済状況の中で、老朽化した港湾岸壁施設に対する修復・補強費用を公共事業費から十分に捻出させることができない可能性がある。したがって、現存する経済的な港湾岸壁施設の修復・補強の方法が課

題となっている。

そこで、筆者らは、新たな港湾岸壁施設の修復・補強の対策として、低コストかつ低環境負荷であるビーチロック（写真-1 参照）を模擬した人工岩盤の開発を目指している。地学事典⁴⁾によると、ビーチロックとは「砂浜の潮間帯に生ずる非常に新しい固結した石灰質岩。（中略）セメント物質は石灰質・鉄分、被セメント物質は粒度・質に関係なくあらゆるものを含む。熱帯・亜熱帯の海岸にみられ、日本近海では南西諸島にみられる。」と定義されている。ビーチロックを模擬した人工岩盤では、自然の生物的・化学的作用により劣化によるひび割



写真-1 ビーチロックの例（沖縄県宮古島）

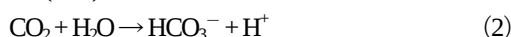
れや強度の低下を防ぐことが期待される。

以上より、本稿ではビーチロックを模擬した人工岩盤の前段階として、ビーチロックの形成要因の一つと考えられている微生物を利用して砂供試体の作製を試みたので、その結果について報告する。

2. 試験方法

(1) 使用した尿素分解菌

試験には、尿素を分解する酵素であるウレアーゼの高い活性を有する *Pararhodobacter* sp. を用いた。*Pararhodobacter* sp. は沖縄県名護市のビーチロック付近から採取した土壌から分離した尿素分解菌であるため、培養には ZoBell2216E 培地⁵⁾を用いた。この尿素分解菌には、以下のような反応で CaCO_3 を砂粒子間に析出させ、砂を固化させる効果が期待できる。



(2) 準備から開封まで

本稿では、シリンジ内部の砂を CaCO_3 で固化させて砂供試体を作製する試験を、シリンジ固化試験（写真-2）と呼ぶことにする。110℃の恒温槽内で後述する2種類の砂を2日以上滅菌させ、シリンジ内に3層に分けて加えた。砂を1層加えるごとに20回突き固め、砂表面に滅菌した葉さじで3本の溝を入れ、各層間の馴染みをよくした。シリンジ下端の排出口にシリコンチューブを取り付け、同チューブの先端をピンチコックで閉め、供試体を静かに30℃の恒温槽へ移動させた。

予め使用する菌を ZoBell2216E 培養液に添加し、72時間および80 rpm で振とう培養させたものを砂供試体に加えた。培養液の量は、砂供試体の空隙を十分に飽和する量とした。次に、固化溶液（表-1）を供試体内部に行き渡らせるため、滅菌用の45μm フィルターを取り付けたシリンジに固化溶液を入れ、砂供試体に注入した。その後、シリンジ下部に取り付けてあるチューブから、培養液および固化溶液の混合液を排出させた。シリンジ内の下端部に不織布を敷き、固化溶液の注入・排出時における供試体の砂の流出を防いだ。試験開始から13日目までは、24時間ごとに固化溶液の注入・排出を行った。

試験終了後、シリンジにカッターで切り込みを入れた後に、シリンジから固化した砂供試体を取り出した。

(3) 測定

a) pH, Ca^{2+} 濃度測定

試験期間内において、尿素分解菌の代謝活動により砂の固化が進行しているかを確認するため、排出液中の Ca^{2+} 濃度と pH の経時変化を試験3, 6, 9, 12日目に測定した。

b) 針貫入試験

試験終了後、供試体の一軸圧縮強さを測るために針貫入試験を行った。針貫入試験には、軟岩ペネトロ計（丸東製作所製、SH-70）を用いた。針貫入試験とは、本試験を実施し求めた針貫入勾配から一軸圧縮強さ（以下、UCS）を推定するための試験である。本装置の取扱説明書⁶⁾に記載されている回帰式 $\log_{10} y = 0.978 \log_{10} x + 2.621$ （相関係数：0.941, x: 針貫入勾配, y: 推定 UCS）を用いて、推定 UCS を求めた。測定部位は、供試体上端からの距離が約1 cm、3 cm、5 cm の位置とした。

(4) 実験条件

固化溶液に含まれる尿素量（以下、尿素量と記す）、カルシウム源の混合割合、供試体を使用する砂の種類を変化させたシリンジ固化試験を実施し、供試体の一軸圧縮強さに与える影響を調べた。

固化溶液に含まれる尿素量は、標準配合である 0.3 mol/L から 0.4 mol/L, 0.5 mol/L へと変化させた⁷⁾。

固化溶液に含まれるカルシウム源として、 CaCl_2 と $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ca}$ の2種類を使用し、それらの混合割合を変化させた。以下では、カルシウム源における CaCl_2 の割合を CaCl_2 添加率という。今回のシリンジ固化試験では、 CaCl_2 添加率を 0, 50, 100 % と変化させた。なお、すべての試験ケースにおける固化溶液の CaCl_2 と $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ca}$ のモル濃度の合計は、前記した標準配合に合わせて 0.3 mol/L とした。

供試体に用いる砂の種類は、サンゴ砂と三河珪砂6号の2種類であった。各砂の粒度分布を図-1に示す。

また、シリンジ固化試験の各実験ケースを表-2にまとめて示す。



写真-2 シリンジ固化試験の様子

表-1 固化溶液の標準組成

Nutrient broth	3.00 g/L
NH ₄ Cl	10.00 g/L
NaHCO ₃	2.12 g/L
Urea, Co(NH ₂) ₂	18.02 g/L = 0.3 mol/L
CaCl ₂	33.3 g/L

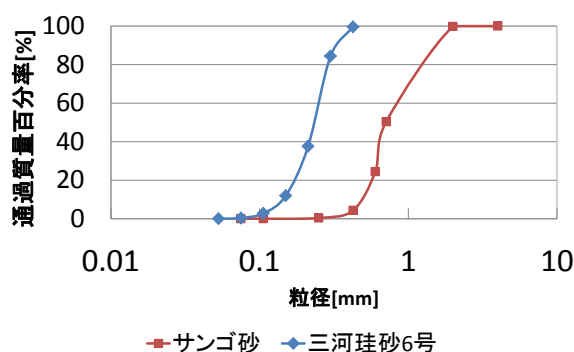


図-1 各砂の粒度分布

表-2 シリンジ固化試験の各実験ケース

	尿素量	CaCl ₂ 添加率	砂の種類
Case 1	0.3 mol/L	100 %	サンゴ砂
Case 2	0.4 mol/L		
Case 3	0.5 mol/L		
Case 4	0.3 mol/L	0 %	三河珪砂6号
Case 5		50 %	
Case 6		0 %	
Case 7		50 %	
Case 8		100 %	

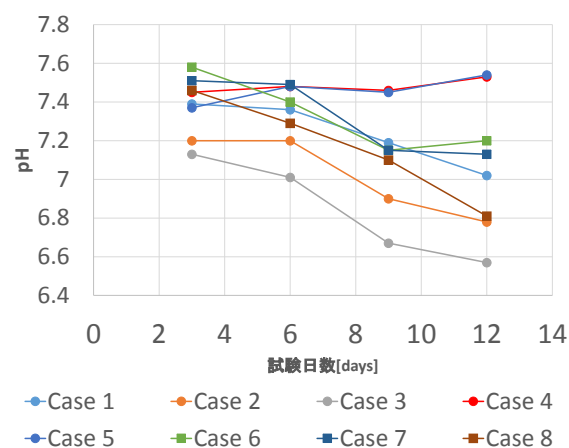
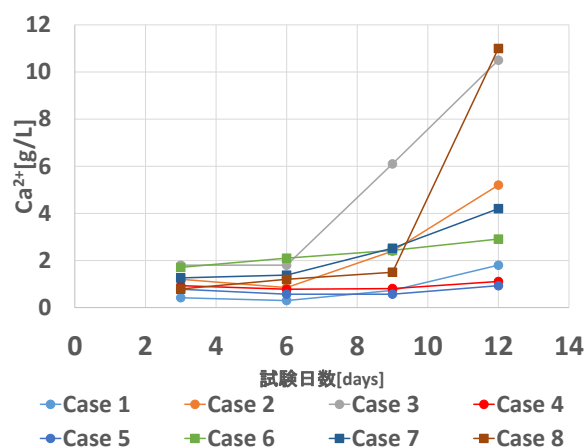


図-2 排出液の pH の経時変化

図-3 排出液の Ca²⁺濃度の経時変化

3. 試験結果・考察

(1) pH, Ca²⁺濃度測定

排出液のpHの経時変化を図-2に示す。尿素分解菌のウレアーゼの働きが活発になると、ウレアーゼ活性により排出液のpH上昇が見られるのが一般的である。しかし、図-2からわかるように、Case 4とCase 5以外の他の試験ケースでは、試験の経過に伴ってpHの値が低下していく傾向にある。これは、供試体内に存在する尿素分解菌が死滅あるいは尿素分解菌のウレアーゼ活性が低下したことに原因があると考えられる。

次に、排出液のCa²⁺濃度の経時変化を図-3に示す。同図より、排出液中のCa²⁺濃度が低いほど砂供試体内でのCaCO₃析出量が多く、砂の固化が進行していると推定することができる。また、試験日数の経過に伴って、排出液のCa²⁺濃度は増加する傾向にある。この結果からも、試験の経過に伴って供試体内に存在する尿素分解菌が死

滅あるいは尿素分解菌のウレアーゼ活性が低下したことによって、砂供試体内でのCaCO₃析出量が減少したと推測できる。

(2) 針貫入試験

砂供試体における尿素量と推定UCS平均値の関係を図-4に示す。なお、推定UCS平均値とは、針貫入試験による砂供試体上部、中部、下部の推定UCS値の平均値である。

尿素量が0.4 mol/L, 0.5 mol/Lの場合は、推定UCSの平均値が3 MPaを超え、尿素量が0.3 mol/Lの場合よりも大きくなった。この結果により、シリンジ固化試験の場合は固化溶液に含まれる尿素量が多いほど砂の固化の程度が増し、砂供試体の一軸圧縮強さが大きくなった可能性がある。

砂供試体におけるCaCl₂添加率と推定UCS平均値の関係を図-5に示す。同じCaCl₂添加率の試験ケース同士で比べると、どの添加率においても珪砂の供試体に比べ、

サンゴ砂の供試体の方が推定UCSの平均値が大きく、最大でおおよそ2倍の差となっている。珪砂6号とサンゴ砂の供試体の一軸圧縮強さに差が出た理由としては、珪砂6号の供試体に比べて、サンゴ砂の供試体では供試体内の空隙が多いため、空隙に存在する菌量がより多かったり、菌が供試体全体へ均等に行きわたりやすかったりすることや、砂粒子表面の形状による CaCO_3 の付着のしやすさの違いなどが考えられるが、詳細については今後の検討課題とする。また、同図より、両砂の CaCl_2 添加率が50 %のケースは、他の同種類の砂のケースに比べ、1.4～2.2倍程度推定UCSの平均値が大きい。 CaCl_2 添加率50 %の場合には、 CaCO_3 とは別のカルシウム析出物が析出している、あるいは CaCO_3 の析出量が他のケースに比べて多い、などの可能性が考えられる。全試験ケースで最も推定UCSの平均値が大きかったのは、尿素量0.5 mol/LのCase 3であった。この結果より、尿素量、カルシウム源の混合割合、供試体を使用する砂の種類、の3つのパラメータのうち、尿素量が砂供試体の推定UCSの平均値を増加させるのに最も効果的であると考えられる。

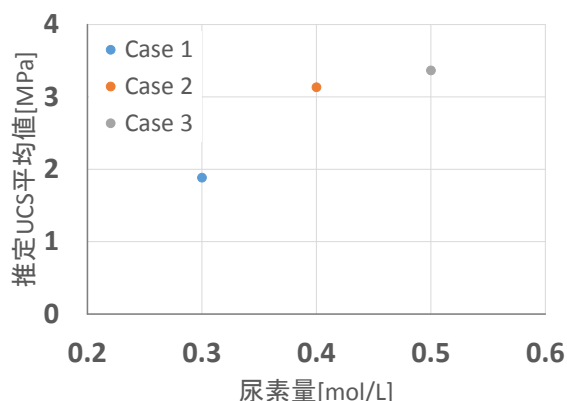


図-4 砂供試体における尿素量と推定 UCS 平均値の関係

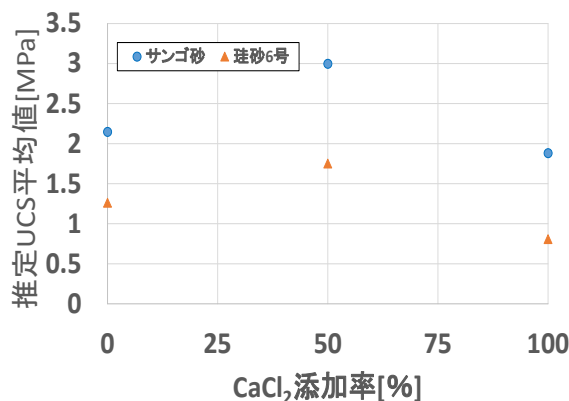


図-5 CaCl_2 添加率と推定 UCS 平均値の関係

5. 結言

①固化溶液に含まれる尿素量、②カルシウム源の混合割合、③供試体を使用する砂の種類、の3つのパラメータが、砂供試体の一軸圧縮強さに与える影響について検討したシリンジ固化試験の結果は、以下のようにまとめられる。

尿素量が0.4 mol/L、0.5 mol/Lの場合は、尿素量が0.3 mol/Lの場合よりも供試体における推定UCS平均値が大きくなった。このことから、尿素量が多いほど砂の固化の程度が増し、砂供試体の一軸圧縮強さが大きくなる可能性が考えられる。 CaCl_2 添加率と砂の種類に着目すると、同じ CaCl_2 添加率の試験ケース同士では、どの CaCl_2 添加率においてもサンゴ砂のケースの方が珪砂の試験ケースよりも供試体における推定UCS平均値が高かった。全試験ケースでの供試体の推定UCSの平均値の比較より、3つのパラメータの中では、尿素量が砂供試体の推定UCSの平均値を向上させるのに最も効果的であると考えられる。

今後の研究課題としては、ビーチロックを模擬した人工岩盤の作製を目指すためには、尿素量と CaCl_2 添加率を同時に変化させるといった固化試験を実施し、さらなる供試体の一軸圧縮強さの増加を実現する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 宇多高明：日本の海岸浸食，山海堂，東京，p.442，1997.
- 2) 鳥居謙一：最近の海岸浸食対策の動向，水工学に関する夏期研修会講義集，土木学会，東京，38，pp.B-4-1-B-4-16，2002.
- 3) 国土交通省：平成 26 年度国土交通白書，第 1 部，第 1 章，p.28，2014.
- 4) 地学団体研究会：新版地学辞典，平凡社，pp.1083-1084，2000.
- 5) 石田祐三郎，杉田治男：増補・改訂版 海洋アセスメントのための微生物実験法，恒星社厚生閣，pp.47-48，2006.
- 6) 株式会社丸東製作所：軟岩ペネトロ計 SH-70 取扱説明書，p.4.
- 7) 島崎傑：Pararhodobacter sp.を用いたサンゴ砂固化試験に関する実験的研究，北海道大学大学院工学院環境循環システム専攻平成 26 年度修士論文，pp.74-84，2015.

EXPERIMENTAL STUDY ON GROUND SOLIDIFICATION USING UREOLYTIC BACTERIA

Aya YAEGASHI, Takashi DANJO and Satoru KAWASAKI

Beachrocks are expected to prevent coastal erosion occurred around the world. Therefore, artificial sandstone specimens modeled on beachrocks were produced by using ureolytic bacteria that induced CaCO_3 precipitation. The effects of amount of urea, differences in calcium sources and types of sands used for the specimens on unconfined compressive strengths (USC) of the specimens were examined by conducting syringe solidification tests. As a result of the test, the specimen using 0.5 M urea showed the maximum for average of UCS estimated by needle penetration test among all the testing cases. Therefore, it is expected that the most effective parameter to increase UCS is amount of urea in 3 parameters.