

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360207

研究課題名(和文) 沿岸域の社会基盤施設を対象とした微生物による維持管理・更新技術に関する研究

研究課題名(英文) Research about the maintenance and replacement technique for the infrastructure by using microbes for the littoral region

研究代表者

畠 俊郎 (Hata, Toshiro)

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：30435424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,300,000円、(間接経費) 3,390,000円

研究成果の概要(和文)：沿岸域における社会基盤施設を対象とし、微生物機能の活用により強度増進・遮水性向上および自己修復効果を得る新しい維持管理・機能更新技術について検討を行った。国内外でのビーチロックを対象とした現地調査と、人工ビーチロック形成試験から以下の結果が得られた。1) ビーチロックのセメント物質としてカルシウム、マグネシウム、シリカおよび鉄が期待できる。2) 海域由来の *Sporosarcina aquimarina* を用いることで、砂地盤の強度増進効果と液状化被害抑制が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new management method for construction and maintenance technology based on microbial functions was developed. This method can be used to improve soil strength and in-situ water insulation control. This new method was applied and analyzed in a field survey using beachrock from Japan and Sri Lanka. Further, laboratory tests using artificial beachrock formation were carried out. Two main results arose from this study. First, it was found that calcium, magnesium, silica, and iron are acceptable as cement substances of beachrock. Further, calcite was found to be the most effective cement substance of beachrock originating from Kumejima Island, Japan, and Sri Lanka. Second, it was found that the bacterium *Sporosarcina aquimarina*, which is isolated from marine zones, is effective in improving soil strength and increasing soil liquefaction strength.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：微生物 地盤改良 炭酸カルシウム 液状化対策 MCP

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に大量に整備・備蓄された社会資本の維持管理・機能更新が大きな社会的問題となっている。加えて、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により沿岸域の社会基盤施設を対象とした防災機能の強化が求められている。このような背景のもと、従来よりも低コストかつ低環境負荷であるとともに、重要な観光資源である沿岸域の景観にも配慮可能な新しい社会基盤施設の維持管理技術に取り組むこととした。本研究では、数十年という短期間で砂浜の海砂が天然プロセスにより固化する「ビーチロック」に着目した。ビーチロックは国内複数個所で確認されていることから、形成期間を工学的手法の応用により短期化することにより、港湾岸壁や海面処分場に代表される沿岸域の社会基盤施設を対象とした新しい維持管理・機能更新技術の実用化が期待される。

2. 研究の目的

本研究では、第一段階として国内でビーチロックの形成が報告されている個所を対象とし、生成プロセスおよびセメント物質を明らかにすることとした。あわせて、東日本大震災で被災した河川堤防の一部で天然プロセスにより山砂が固化することで崩壊を免れた事例についても調査を実施し、力学特性、期待される微生物機能を明らかにすることで一般的な手法として実用化することを目的とした。国内において、ビーチロックおよびビーチロック類似物が確認されている個所を写真-1 に示す。



写真-1 代表的なビーチロック分布図

また、ビーチロックの形成は海外でも確認されている。スマトラ島沖地震による津波により大きな被害を受けたスリランカ(Galle)周辺でリーフの保護にビーチロックが寄与した事例が報告されている。このリーフの保護に寄与したと考えられているビーチロックを写真-2 に示す。そのため、第 2 段階として国内および国外で形成されたビーチロックの物理・化学特性および力学特性を明らかにすることを目的とした検討を実施することとした。

最後に、主に陸域で検討が進められているウレアーゼ産出微生物を用いた炭酸カルシ

ウム析出促進技術の沿岸域への応用を目的とし、海域(韓国 仁川周辺)で単離された微生物を用いた液状化強度の増進効果について検討することとした。



写真-2 スリランカのビーチロック

3. 研究の方法

3.1 国内調査

国内でビーチロックの形成が報告されている 1) 沖縄県久米島, 2) 石川県輪島市, 3) 千葉県館山市に加え、天然プロセスで山砂の固化が認められた 5) 宮城県亘理町, の計 4 か所で現地調査を実施することとした。現地調査では、a) ポータブル XRF を用いた元素組成比較, b) ビーチロック片を対象とした針貫入試験を実施することとし、微生物の関与が強く示唆された場所について c) 微生物群集構造解析を実施することとした。なお、ビーチロックの形成箇所としてはこの他に長崎県長崎市脇岬で報告されているが、県指定天然記念物であるため調査外とした。

3.2 海外調査

国内でのビーチロック調査を踏まえ、ビーチロックが津波由来の災害被害抑制に寄与したと考えられるスリランカを対象とした現地調査を実施することとした。海外現地調査項目としては、3.1 と同じとした。

なお、現地での蛍光 X 線分析には Bruker S1 Turbo SDLE (ブルカー社製) を用いることとした。また、針貫入試験では容量 500N のロードセルを用い、ひずみ速度は毎分 1% の圧縮ひずみが生じる割合とした。微生物群集構造解析は 16SrDNA の V3 領域を対象とした PCR-DGGE 解析を実施することとし、D-code (Bio-RAD 社製) を用いた。

3.3 人工ビーチロック形成試験

日本海側の北限と考えられている石川県輪島市曾々木海岸で採取した海砂と、韓国仁川周辺の海域から単離されたウレアーゼ産出微生物である *Sporosarcina aquimarina* を用いた人工ビーチロック形成試験を実施することとした。なお、比較対象として陸域由来で検討が進められている微生物 (*Bacillus pasteurii*) についても同様の試験を実施することとした。力学特性の改善効果として、3

軸試験(CD試験)と繰り返し3軸圧縮試験を実施し、強度増進効果および液状化被害の抑制効果を明らかにすることとした。

4. 研究成果

4.1 国内調査結果

沖縄県久米島、石川県輪島市及び千葉県館山市で確認されているビーチロックを対象としたポータブルXRFによる元素組成測定結果を図-1, 2 および 3 にそれぞれ示す。なお、図中には周辺の海砂そのものを対象とした測定結果もあわせて示した。

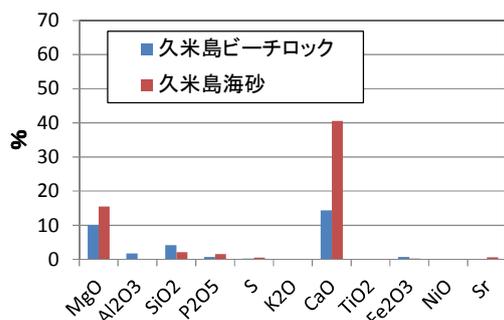


図-1 久米島ビーチロックの元素組成

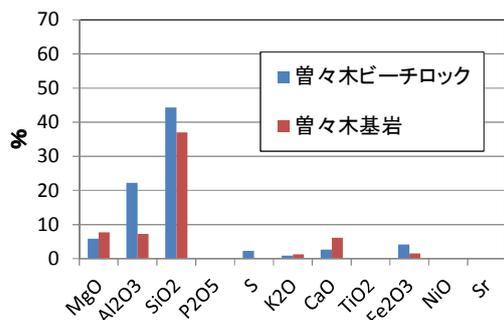


図-2 石川県輪島市曾々木海岸ビーチロックの元素組成

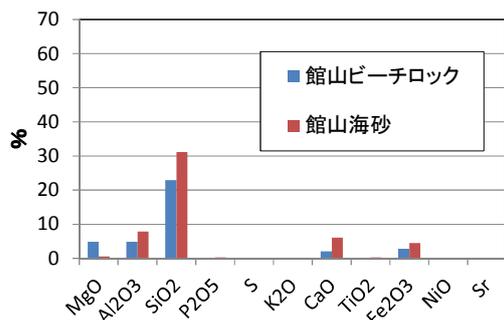


図-3 館山ビーチロックの元素組成

解析の結果から、久米島についてはマグネシウム、カルシウムが、曾々木海岸および館山についてはアルミニウム、シリカ、カルシウムおよび鉄がセメント物質として作用している可能性が明らかとなった。

次に、ビーチロックの力学特性把握を目的とした検討を実施することとした。本来であればコアサンプルを対象とした1軸圧縮試験などを実施すべきではあるが、貴重な観光資源となり得るビーチロックへの影響を最小限にとどめる観点から砂浜で採取したビー

チロック片を対象とした針貫入試験を実施することとした。結果を図-4 に示す。

久米島で採取したマグネシウム・カルシウムがセメント物質として考えられるビーチロックについて深さ 2mm 程度で最も高い貫入抵抗を示す結果となった。

アルミニウム、シリカ、カルシウムおよび鉄がセメント物質として考えられる輪島市および館山市で採取したビーチロックについては深度とともに徐々に貫入抵抗が増加する傾向を示し、顕著なピークを認めることができなかった。以上より、久米島とその他の場所では異なる力学特性を持つと考えられる。

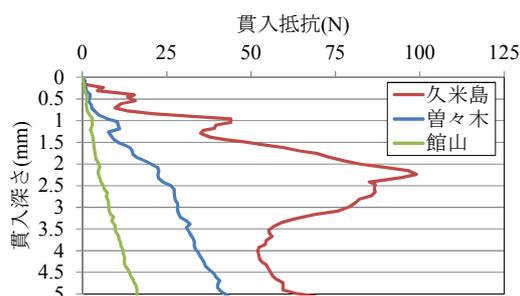


図-4 針貫入試験結果

4.2 海外調査結果

スマトラ沖地震由来の津波からリーフを保護したスリランカの海岸を対象としたポータブル XRF による元素測定結果を図-5 に、ビーチロック片を対象とした針貫入試験の結果を図-6 にそれぞれ示す。なお、元素組成については周辺の海砂そのものを対象とした測定結果を、針貫入試験結果では久米島ビーチロックの結果もあわせて示した。

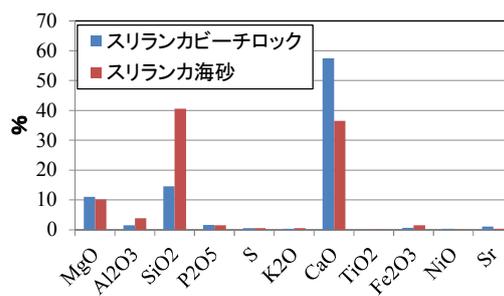


図-5 スリランカビーチロックの元素組成

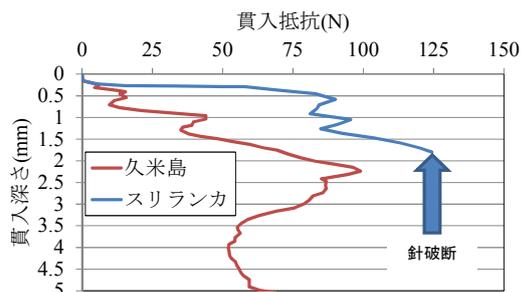


図-6 針貫入試験結果

元素組成分析の結果から、スリランカ(Galle)周辺のビーチロックはマグネシウム、シリカおよびカルシウムがセメント物質として作用している可能性が明らかとなった。

また、針貫入試験では貫入深さ 2mm 程度(貫入抵抗 125N 程度)で針が破断して測定不能となった。以上より、スリランカで形成されたビーチロックは国内 3 か所で確認されているものよりも高強度である可能性が明らかとなった。

4.3 人工ビーチロック形成試験結果

久米島および石川県輪島市で採取したビーチロック片から尿素の加水分解により発生する炭酸ガスを利用した炭酸カルシウム析出促進への寄与が期待されるウレアーゼ産出微生物を対象としたスクリーニングを実施した。その結果、久米島については、*Bacillus fusiformis* 近縁、輪島市については *Acinetobacter calcoaceticus* 近縁のウレアーゼ産出菌を得ることができた。しかしながら、いずれの微生物も陸域で検討が進められている *Bacillus pasteurii* と比較して尿素の加水分解速度が 1/40 程度と遅いことが明らかとなった。そのため、菌株分譲機関のデータベースを対象に海域由来のウレアーゼ産出微生物について調査を行った。その結果、韓国仁川の海域で単離された *Sporosarcina aquimarina* が微生物固化に適用可能であることが明らかとなった。

以上の結果を踏まえ、日本海を挟んだ対岸でビーチロックの形成が認められている輪島市で採取した海砂と、*Sporosarcina aquimarina* の組み合わせで人工ビーチロック形成試験を実施することとした。

表-1 輪島海砂物性一覧

項目	測定値	項目	測定値
$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.691	D50(mm)	0.52
e_{max}	0.74	Uc	2.1
e_{min}	0.64		



図-7 人工ビーチロック形成試験手順

輪島海砂の物性値一覧を表-1に、人工ビーチロック形成試験手順を図-7に試験条件を表-2にそれぞれ示す。なお、強度増進効果の検証を目的とした試験では、*Bacillus pasteurii* についても同様の試験を行い比較することとした。また、尿素および塩化カルシウムの濃度は 0.3mol/L 濃度とし、*Sporosarcina Aquimarina* の尿素加水分解速度にあわせて 24 時間に 1 回の添加頻度とした。

強度増進効果を目的として実施した 3 軸試験(CD 試験)の結果を図-8に、液状化強度増進効果の評価を目的として実施した繰返し 3 軸試験の結果を図-9にそれぞれ示す。

表-2 人工ビーチロック形成試験条件一覧

微生物種	<i>S.aquimarina</i>
尿素および塩化カルシウム濃度	0.3(mol/L)
栄養塩類	Nutrient Broth NH ₄ Cl NaHCO ₃
溶媒	人工海水(pH=8.3)
試験条件	20°C×湿度 50%
試験砂種および Dr	曾々木海砂 Dr=50%
目標 CaCO ₃ 析出率	1~9(%)

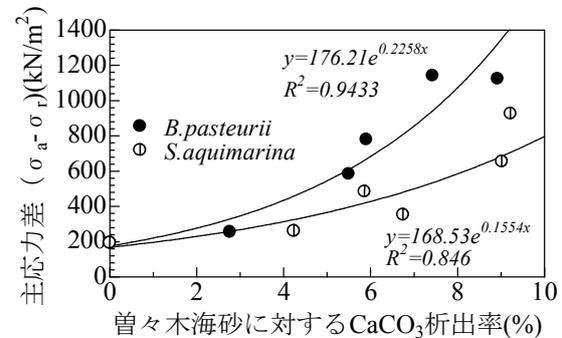


図-8 CaCO₃析出率と圧縮強さの関係

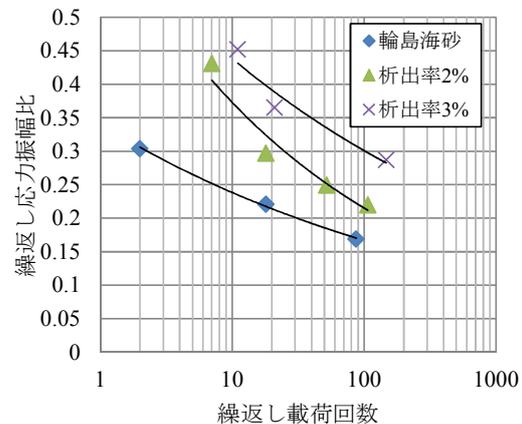


図-9 CaCO₃析出率と繰返し応力振幅比の関係

CD試験の結果から、海域由来のウレアーゼ産出菌である *Sporosarcina aquimarina* を用いた場合には、陸域で検討が進められている *Bacillus pasteurii* と比較して同じ炭酸カルシウム析出率であっても強度増進効果が低くなる傾向が認められた。しかしながら、繰返し3軸試験の結果では砂重量に対して炭酸カルシウムを3%程度析出させることで十分な液状化被害抑制効果が期待できることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① 梶俊郎, 横山珠美, 阿部廣史: 尿素加水分解速度に基づく微生物固化技術の沿岸域への適用性評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.4, pp.505-515, 2013
- ② Ryosuke KUBO, Satoru KAWASAKI, Kouichi SUZUKI, Shinji YAMAGUCHI and Toshiro HATA: Geological Exploration of Beachrock through Geophysical Surveying on Yagaji Island, Okinawa, Japan, Materials Transactions, Materials Transactions, Vol.55 No.02, pp.342-350, 2014
- ④ 鈴木浩一, 川崎了, 久保良介, 山口伸治, 梶俊郎: 電気探査・表面波探査によるビーチロックの地下構造—沖縄県名護市屋我地島沿岸地点での適用例—, 物理探査, 第66巻, 第4号, pp.277-285, 2013
- ⑤ Yoshihisa Miyata and Toshiro Hata: ICT-Based remediation with knowledge information management for contaminated groundwater, Geotechnical and Geological Engineering, Online ISSN 1573-1529, 2012.
- ⑥ 梶俊郎, 佐藤厚子, 川崎了, 阿部廣史: 高有機質土(泥炭)由来の土壤微生物による炭酸カルシウム析出技術に関する実験的研究, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.68, No.1, pp.31-40, 2012

[学会発表] (計 件)

- ① 壇上堯, 川崎了, 梶俊郎: ビーチロックの物理・力学特性, 第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 公益社団法人土木学会, pp.89-94, 2012.
- ② 藤澤優香, 梶俊郎: 沿岸域を対象とした微生物機能による護岸構造物築造に関する研究, 平成24年度土木学会中部支部研究発表会, CD-ROM, 論文番号Ⅲ-10, 2013
- ③ 横山珠美, 梶俊郎: 沿岸域由来のウレアーゼ生産菌による海砂の強度増進効果に関する検討, 平成24年度土木学会中部支部研究発表会, CD-ROM, 論文番号Ⅲ-11, 2013
- ④ 荒井啓祐, 梶俊郎: 微生物機能によるビーチロックの生成促進に関する研究, 平成23年度土木学会中部支部研究発表会, CD-ROM, 論文番号Ⅲ-032, 2012
- ⑤ 山崎寛史, 梶俊郎: 泥炭由来の土壤微生物

物を用いた新しい地盤改良技術の適用性に関する室内実験, 平成23年度土木学会中部支部研究発表会, CD-ROM, 論文番号Ⅲ-033, 2012

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶 俊郎 (HATA, Toshiro)
富山県立大学大学院環境工学専攻・准教授
研究者番号: 30435424

(2) 研究分担者

川崎 了 (KAWASAKI, Satoru)
北海道大学大学院工学研究院・教授
研究者番号: 00304022

(3) 連携研究者

菊池 喜昭 (KIKUCHI, Yoshiaki)
東京理科大学理工学研究科・教授
研究者番号: 40371760

森川嘉之 (MORIKAWA, Yoshiyuki)
港湾空港技術研究所・チームリーダー
研究者番号: 10450777

水谷崇亮 (MIZUTANI, Takaaki)
港湾空港技術研究所・チームリーダー
研究者番号: 70371763

金田一広 (KANEDA, Kazuhiro)
竹中工務店 技術研究所・研究主任
研究者番号: 30314040