

令和元年6月10日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06456

研究課題名（和文）海水作用を受けるコンクリートの局所劣化機構の解明

研究課題名（英文）Study on mechanism of local damage formation of concrete subjected to seawater attack

研究代表者

山路 徹（Yamaji, Toru）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・領域長

研究者番号：10371767

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は海水作用を受けるコンクリートの局所劣化（海水劣化）のメカニズムを検討し、その予測手法や試験法の検討を行った。まず、海水劣化のメカニズムとして、日射による温度変化および乾湿による空隙水の濃度変化によって、主にエトリンガイトの溶解・析出による体積変化が生じる可能性が示され、これが海水劣化を生じさせる原因の一つであると推定された。また、その予測手法として、S浸透深さおよびMg浸透深さを予測する手法を提案した。さらに、促進試験法として、細径のセメントペースト試験体での海水乾湿繰り返し試験を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はこれまで着目されていなかったコンクリートの海水劣化に着目し、そのメカニズムを明らかにした点で学術的意義が高いと考える。また、海水劣化の予測法を提案したことで劣化予測が可能になり、また促進試験の活用により各種材料の海水劣化抵抗性を評価することが可能になり、コンクリート構造物の長寿命化等に貢献できる点は社会的にも意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the mechanism of damage of concrete due to seawater attack. Also, the prediction method as well as accelerated testing method were investigated. As the result, the cause of seawater deterioration may be repetition of dissolution and precipitation of ettringite accompanying change of temperature and concentration of pore water. For prediction, simplified model for S penetration depth and Mg penetration depth was developed. Finally, wetting and drying test using seawater for cement paste with small diameter was proposed for accelerated test.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 海水 劣化 ひび割れ 耐久性

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

海洋環境に位置するコンクリート構造物では、耐久性が大きな問題となっている。近年では鉄筋腐食が問題となり、国内外で精力的にコンクリート中への劣化因子の浸透や内部の鉄筋腐食に関する研究が盛んに行われている。方、海水には様々なイオンが含まれ、海水に接したコンクリート表面の脆弱化やひび割れの発生などの海水劣化を生じる場合がある。しかしながら、このような劣化に着目した研究はほとんどなされておらず、そのメカニズムは明らかにされていない。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究は海水作用を受けるコンクリートの局所劣化（海水劣化）のメカニズムを解明するとともに、その劣化対策および周辺技術を開発することを目的として、以下の3点を実施する。

- (1) 海水の作用によるコンクリートの海水劣化機構とその対策の検討
- (2) コンクリートの海水劣化に対する予測モデルの構築
- (3) コンクリートの海水劣化に対する促進試験法の開発

### 3. 研究の方法

上記の目的に対して、以下の検討を行った。

- (1) 海水の作用によるコンクリートの海水劣化機構とその対策の検討

コンクリートの海水劣化に対して、暴露試験体の調査を基に、海水劣化が発生したコンクリートの特徴を抽出し、SEM/EDS を用いて分析した。また、海水劣化の発生条件を基に熱力学的相平衡計算を行い、そのメカニズムを検討した。また、推定されたメカニズムを基に、コンクリートの海水劣化対策を検討した。

- (2) コンクリートの海水劣化に対する予測モデルの構築

上記(1)で推定したコンクリートの海水劣化メカニズムを念頭に、実構造物や暴露試験体における各元素の分布を電子線マイクロアナライザ（EPMA）で評価し、海水による長期的な劣化傾向を評価し、それを基にコンクリートの海水劣化に対する簡易予測モデルを構築した。

- (3) コンクリートの海水劣化に対する促進試験法の開発

コンクリートの海水劣化に対する促進試験として、ペンシル型（13×L180mm）のセメントペーストで海水乾湿繰返し試験を行うことを考案し、その実験を行った。また、海水劣化が生じることを確認するため、比較として水中養生のセメントペーストも作成した。

### 4. 研究成果

本研究の主な成果を以下に示す。

- (1) 海水の作用によるコンクリートの海水劣化機構とその対策の検討

海水劣化の発生条件を把握するため、まず異なる海洋環境の条件のコンクリートを調査し、海水劣化が発生・進行する条件を整理した。その結果、主に飛沫帯で海水劣化が生じやすいこと、また程度の差はあるものの、コンクリートの使用材料にかかわらず海水劣化が発生していると考えられた。さらに、コンクリートのW/Cが高い場合に海水劣化が発生しやすいことが確認された。

数種類の供試体に対して、SEM/EDS で分析を行ったところ、コンクリート表層に無数の微細ひび割れが発生し、そのひび割れの多くをエトリンサイト（Et）やブルーサイト（Br）が埋めている状況が確認された（図-1）。分析結果や発生条件を考慮して、飛沫帯における乾湿繰返しと日射による高温作用が海水劣化に影響しているものと推察された。

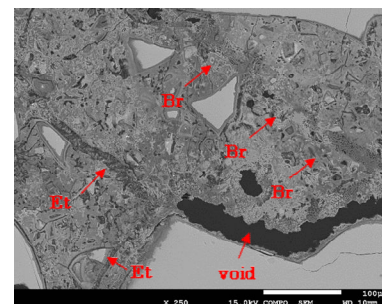


図-1 表層の劣化状況

分析結果から得られた知見を基に、熱力学的相平衡計算を用いて、海水劣化のメカニズムを検討した。解析に用いるセメントの種類は、普通ポルトランドセメント(N)、早強セメント(H)、高炉セメント(BB)の3種類とした。W/Cは50%とし、練混ぜ水は純水とした。また、海水の浸透による組成変化とそれに伴う体積変化を再現するため、セメント100gおよび純水50gに対し、海水を1~10000mlまで加えた解析を行った。また日射や海水飛沫による温度および海水濃度の変化を表現するため、海水温を20と仮定し、日射によりコンクリート表層の到達する最高温度を60と設定した。また、日射によって表層の海水が濃縮することを想定し、試行的に海水の濃度を4倍としたケースも計算した。図-2にNの計算結果を示す。海水量3000ml

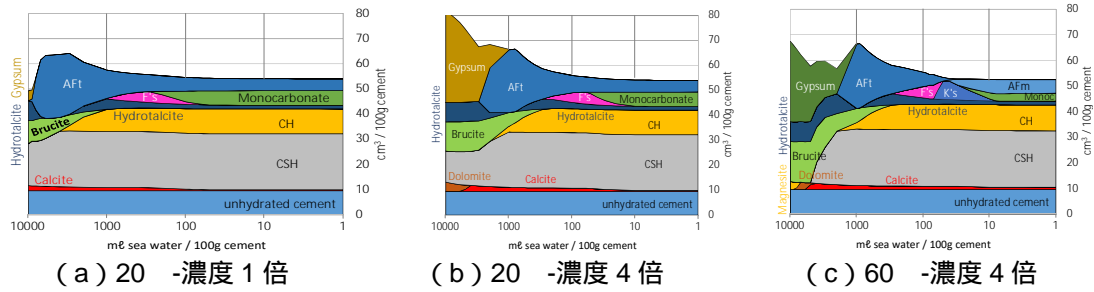


図-2 熱力学的相平衡計算結果

まで、主にエトリンガイトの生成によって体積が増加した。

また、温度および海水のイオン濃度を上昇させることによって、エトリンガイトによる体積増加のピークが現れる海水量は減少した。なお、NとHの水和物はほぼ同じ構成となったのに対し、BBはそれらと大きく異なる構成となった。

以上の結果から、日射による温度変化および乾湿による空隙水の濃度変化によって、主にエトリンガイトの溶解・析出による体積変化が生じる可能性が示され、これが海水劣化を生じさせる原因の一つであると推定された。

対策として、飛沫帯における温度上昇を抑制することが考えられた。例えば日射を受けにくくするように、またコンクリートの海水劣化発生条件から、飛沫帯におけるコンクリートのW/Cを低下させることも対策の一つになり得ると考えられた。

(2) コンクリートの海水劣化に対する予測モデルの構築

実構造物や暴露試験体における各元素の分布を電子線マイクロアナライザ (EPMA) で評価し、それらの特徴を図-3のように取りまとめた。海水劣化の原因がエトリンガイトの生成である可能性を考慮すると、コンクリートの海水劣化は主にSの浸透深さで評価できる可能性がある。

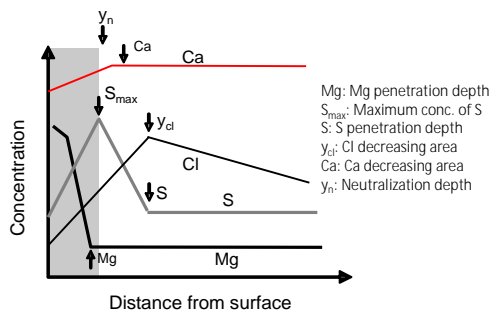


図-3 コンクリート中での各元素分布の特徴

そこでSの浸透深さを予測するため、簡易的な方法を検討した。ここでは、Clの濃度が最大となる深さ (y<sub>cl</sub>) に対する中性化深さ、S浸透深さ、Ca溶脱深さの関係を評価した。

疎の結果、S浸透深さはy<sub>cl</sub>と概ね同等の深さであることがわかった。このことから、y<sub>cl</sub>を予測することで海水劣化が生じた領域を評価できる可能性があることがわかった。また、コンクリートの微小硬度が低下する領域はMg浸透深さと相関があり、これを中性化深さの予測式と同様、t則で予測できることがわかった。

図-3 コンクリート中での各元素分布の特徴

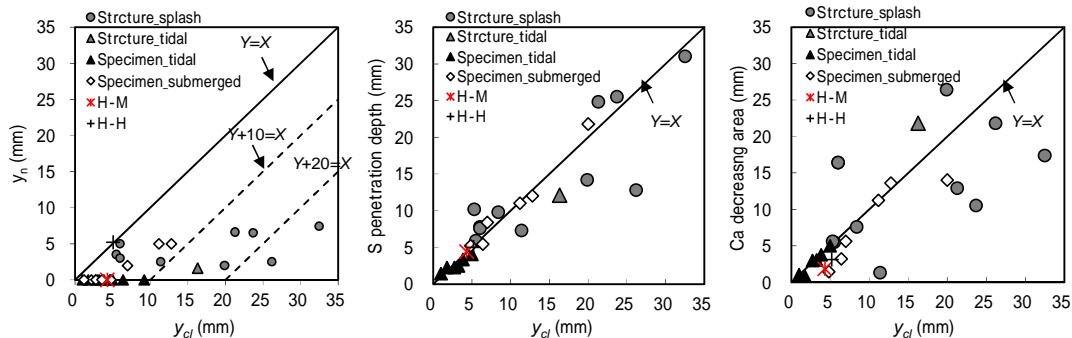


図-4 Cl最大深さと中性化深さ、S浸透深さ、Ca溶脱深さの関係

(3) コンクリートの海水劣化に対する促進試験法の開発

局所的な海水劣化による膨張現象を再現するため、細径のペンシル型セメントペーストを作製し、その試験体に対して海水の乾湿繰返し試験を実施し、膨張率を測定することで、コンクリートの海水劣化に対する促進試験法を考案した。作製したセメントペースト試験体の膨張率の経時変化を図-5に示す。海水の乾湿繰返しを実施することで、半年程度で0.1%を超える膨張を示すことがわかった。これにより、本試験法を用いることで、海水劣化を半年程度で再現できることがわかった。なお、半年を超えた段階ではひび割れや変形が顕著となり(図-6)、折損する試験体も生じた。したがって、長期的な実験を行うためには太径の試験体の方が適切である可能性があるが、この点については今後の課題と考えている。

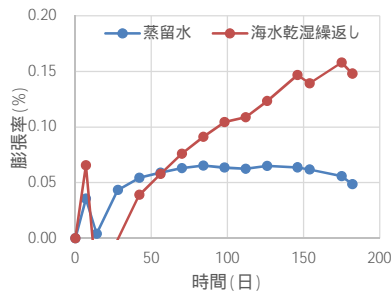


図-5 膨張率の経時変化

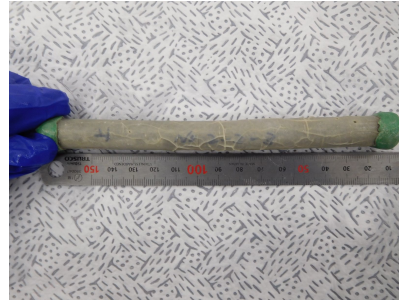


図-6 試験体の変形

以上の結果を総括し、本研究の取りまとめを行うとともに、今後の課題を整理した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- (1) K. Yonamine, T. Yamaji and Y. Kawabata: A study on local cracking of concrete subjected to seawater, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference of Asian Concrete Federation, pp. 587-594, 2018, 査読無
- (2) T. Yamaji, K. Yonamine and Y. Kawabata: Long-term behavior of various elements in concrete under marine environments, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Concrete and Structures for Next Generation, pp. 205-212, 2018, 査読無
- (3) 山路徹, 与那嶺一秀, 川端雄一郎: サンゴ骨材を用いたコンクリートの施工性および耐久性に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol. 71, pp.394-401, 2017, 査読有
- (4) 与那嶺一秀, 山路徹, 川端雄一郎: 海水作用を受けるコンクリートの局所的劣化に関する一考察, セメント・コンクリート論文集, Vol. 71, pp.425-431, 2017, 査読有
- (5) 山路徹: 熱帯(サバナ気候)環境下において長期間暴露されたサンゴ骨材を用いたコンクリートの諸特性, コンクリート工学, Vol.7, pp.570-577, 2017, 査読無

〔学会発表〕(計1件)

- (1) 与那嶺一秀, 山路徹, 審良善和: 長期海洋暴露試験に基づく高炉スラグ微粉末の置換率を変化させたコンクリートの塩分浸透性に関する検討, 第44回土木学会関東支部技術研究発表会, 2017

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 川端雄一郎

ローマ字氏名: Yuichiro Kawabata

研究協力者氏名: 小川彰一

ローマ字氏名: Shoichi Ogawa

研究協力者氏名: 吉田夏樹

ローマ字氏名: Natsuki Yoshida

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。