

令和 2 年 5 月 8 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04933

研究課題名（和文）自己治癒補修効果と鉄筋腐食抵抗性による評価方法に関する研究

研究課題名（英文）Effect of self-healing in concrete and an assessment technique based on corrosion resistance

研究代表者

河合 慶有 (Kawaai, Keiyu)

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・准教授

研究者番号：90725631

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、枯草菌を練り混ぜたコンクリート供試体を対象として、溶存酸素の低減による腐食抑制効果について検討を行った。乾湿繰り返しによる腐食試験の結果、カソード反応の抑制効果、ミクロ・マクロセル電流密度の低減が確認された。特に、材齢91日までに電気化学的に算出したカソード反応における酸素透過の低下が鉄筋腐食抑制に寄与していることを明らかにした。また、これらの腐食抑制効果が得られるためには、水分の存在が必須であり自律治癒効果が高まる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、コンクリート中の溶存酸素を低減させることで鉄筋腐食を抑制できる可能性が示された。本研究成果は、コンクリート中の溶存酸素濃度が電気化学的特性（鉄筋腐食、自然電位、分極特性）に与える影響に関する知見を整理した点において、学術的な価値があると判断される。また、本研究で示された新しい補修（自己治癒補修）の可能性は、インフラ構造物の長寿命化と維持管理業務の効率化を進める上で、広く利用される可能性があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study reports on the enhancement of corrosion resistance owing to reduction of dissolved oxygen associated with microbial activity in pores formed in hardened concrete. When mixed in concrete, corrosion current density with respect to microcell and macrocell corrosion is clearly decreased after exposed to wet and dry cycles using tap water containing NaCl 3%. This could be explained by the fact that oxygen permeability is decreased owing to reduced availability of dissolved oxygen determined by cathodic polarization properties. This led to lowered half-cell potentials which indicates the possibility of reduced oxygen concentrations in pore solution in hardened concrete. In addition, the beneficial effect on the corrosion resistance is clearer in the case of specimens tested under saturated conditions.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：自己治癒 鉄筋腐食抵抗性 好気性微生物 カソード反応 酸素透過 マクロセル腐食 自然電位 ひび割れ補修

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリートのひび割れは水分移動を含めた腐食因子の侵入経路となること、鋼材腐食が発生した場合、不均一な塩分分布などに起因するマクロセル腐食を助長するため、耐久性低下の原因となる。微生物の代謝活性を積極的に利用し、ひび割れ部における鋼材の保護性能を高める補修方法の開発には、ひび割れ閉塞状況の観察のみならず電気化学的計測や物質移動の観点から定量的に評価することが肝要である。特に、鉄筋腐食抵抗性とひび割れ閉塞効果の連関について、塩分浸透および酸素透過性(物質移動)、電気抵抗率や電気化学的計測(全腐食速度、カソード分極、自然電位)を用いて定量的に評価した研究は少ない。

2. 研究の目的

本研究では、アルギン酸 - 微生物からなるバイオ補修材あるいは練混ぜ水の一部として微生物を混練りする方法を用いて、ひび割れを自律的に修復しコンクリートの鋼材保護性能を向上させる補修方法の適用可能性について把握することを目的としている。特に、2017~2019年度における研究目的は以下の2点についてである。

- (1)ひび割れ閉塞および溶存酸素濃度低減と鉄筋腐食抵抗性
- (2)グラウト材またはセメント硬化体中に埋設された微生物(練混ぜ、カプセル)を用いた自律治癒作用によるひび割れ閉塞可能性

3. 研究の方法

- (1)微生物を練り混ぜたモルタル供試体を対象として、ACインピーダンス法、カソード分極試験、自然電位法、電気抵抗率を用いて鉄筋腐食抵抗性を定量的に評価する。
- (2)ひび割れ閉塞効果の検討では、水分の移動を含めた腐食因子の侵入に対する抵抗性を評価するための透水試験や毛管浸潤試験の条件を検討するとともに、乾湿作用に対するひび割れ補修効果の持続性を検討する。

4. 研究成果

(1)枯草菌を練り混ぜたモルタル供試体を対象として、好気呼吸を利用して細孔溶液中の溶存酸素濃度を低減させることで鉄筋腐食(ミクロセル・マクロセル腐食)の進行を抑制できることを明らかにした。なお、24時間後までに水道水中の溶存酸素濃度が10%程度まで低減したことを確認して、練り混ぜ水の一部を置換して供試体を作製した。特に、曲げひび割れにより局所的にマクロセル腐食が進行しがちな環境下において、図1に示すように曲げひび割れ部の生じたマクロセル電流の著しい低減が確認された。さらに図2に示すように材齢91日までのカソード分極曲線から算出した酸素透過速度に基づき、埋設鉄筋へのカソード反応(酸素透過)が抑制されていることがわかった。本研究成果は、コンクリート中の酸素を積極的に低減し、カソード反応における酸素透過を抑制し防食する補修技術の開発を進めるための貴重な知見を提供するものである。

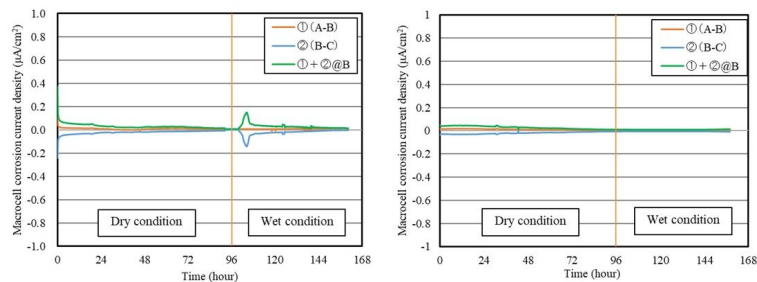


図1 曲げひび割れ部におけるマクロセル電流密度(菌入り+塩分有無)

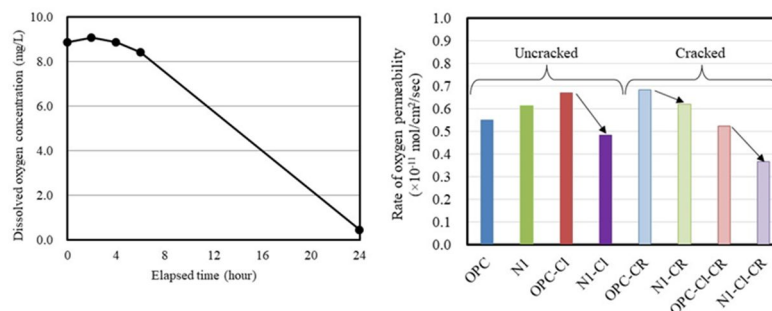


図2 枯草菌による溶存酸素低減と酸素透過の抑制効果

(2)アルギン酸を用いたカプセル材の作製方法を提案した。また、ゲル被膜に微生物と栄養源を混入したカプセルを用いて、ゲル被膜内外に炭酸カルシウム（約 10 μ m）が析出する状況を FE-SEM 観察により明らかにした（図 3）。なお、析出試験ではアルカリ緩衝溶液を用いて pH を 9 程度に調整した溶液中にカプセルを添加し、カルシウムイオン及び pH の経時変化を測定することにより、炭酸カルシウムの析出状況を把握している。また、溶液中の溶存酸素濃度の変動を測定することで微生物の代謝活性を評価できる可能性を示唆する結果が得られている。さらに、カプセル材を埋設したモルタル供試体を対象として、透水試験を実施し透水量が一定程度低下することを示した（図 4）。

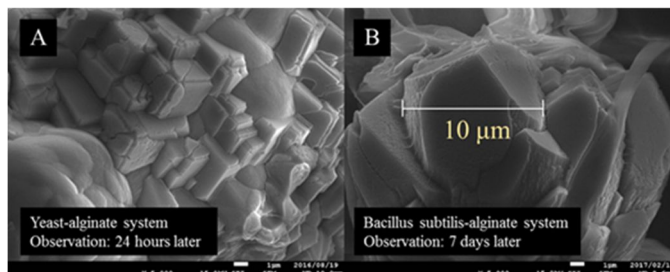


図 3 カプセル内外に析出した炭酸カルシウムの結晶

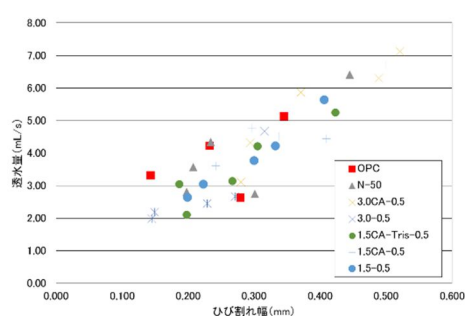


図 4 カプセル材を埋設したモルタル供試体（ひび割れ有）の透水試験結果

(3)アルギン酸に微生物を練り混ぜたグラウト材を用いて 0.2~0.4mm 程度のひび割れを閉塞し、止水効果が飛躍的に向上することを透水試験により確認した。特に、図 5 に示すように乾湿作用によりゲル被膜内に炭酸カルシウムが析出することで透水圧に対する抵抗力が向上することが明らかとなった。また、ゲル被膜によるひび割れ近傍に水分が保持されることで自律治癒補修効果が高まることが示唆された。

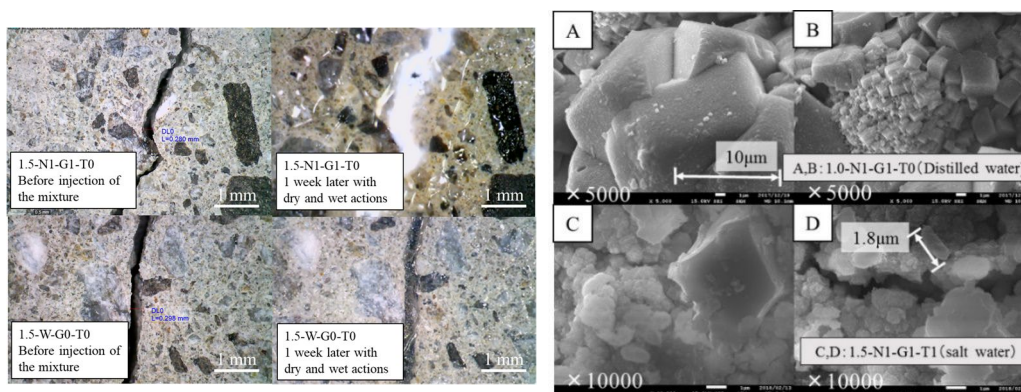


図 5 アルギン酸グラウト材によるひび割れ補修と炭酸カルシウムの析出状況

< 引用文献 >

K. Kawaai, T. Nishida, A. Saito, I. Ujike and S. Fujioka, Corrosion resistance of steel bars in mortar mixtures mixed with organic matter, microbial or other, Cement and Concrete Research, 2019.

K.Kawaai, H.Okuno and I.Ujike, Alginate capsules encapsulating aerobic and anaerobic microorganism for repairing cracks in concrete, 6th International Conference on Self-Healing Materials, 2017.

K. KAWAAI, T. NISHIDA, and A. SAITO, CALCITE-ALGINATE BIO-COMPOSITE FORMATION IN ALGINATE GEL FILMS FOR SELF-HEALING CONCRETE APPLICATION, The 2nd International Symposium on Concrete and Structure for Next Generation, 2017.

M. Ide and K. Kawaaai and I. Ujike, ALGINATE-BACILLUS SUBTILIS BASED REPAIR MATERIALS FOR SEALING CRACKS IN CONCRETE, International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Kawaai, T. Nishida, A. Saito, I. Ujike and S. Fujioka	4. 巻 124
2. 論文標題 Corrosion resistance of steel bars in mortar mixtures mixed with organic matter, microbial or other	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cement and Concrete Research	6. 最初と最後の頁 105822
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cemconres.2019.105822	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 K. Kawaai, I. Ujike, S. Fujioka, T. Nishida and A. Saito
2. 発表標題 CATHODIC POLARIZATION PROPERTIES OF STEEL BARS IN CONCRETE MIXED WITH AEROBIC MICROORGANISM OF BACILLUS SUBTILIS
3. 学会等名 Final Conference of RILEM TC 253-MCI（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K.Kawaai, H.Okuno and I.Ujike
2. 発表標題 Alginate capsules encapsulating aerobic and anaerobic microorganism for repairing cracks in concrete
3. 学会等名 6th International Conference on Self-Healing Materials（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. KAWAAI, T. NISHIDA, and A. SAITO
2. 発表標題 CALCITE-ALGINATE BIO-COMPOSITE FORMATION IN ALGINATE GEL FILMS FOR SELF-HEALING CONCRETE APPLICATION
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on Concrete and Structure for Next Generation（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 奥野 宙, 河合 慶有, 氏家 勲
2. 発表標題 枯草菌の代謝を用いたカプセル中の炭酸カルシウム析出過程の検討
3. 学会等名 土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Ide and K. Kawaai and I. Ujike
2. 発表標題 ALGINATE-BACILLUS SUBTILIS BASED REPAIR MATERIALS FOR SEALING CRACKS IN CONCRETE
3. 学会等名 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Sugitani, K. Kawaai and I. Ujike
2. 発表標題 Effect of oxygen permeability on corrosion properties in mortar specimens mixed with bacillus subtilis
3. 学会等名 Concrete Solutions 2019, (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 分担	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 446
3. 書名 自己修復材料、自己組織化、形状記憶材料の開発と応用事例	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----