

令和元年6月14日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14711

研究課題名(和文)急速ひずみ電極試験法を用いた鉄筋腐食メカニズムの解明と新加速試験への応用

研究課題名(英文)Elucidation of Corrosion Mechanism of Steel Rebar in Concrete Using Rapid Straining Electrode Test and Development of a New Accelerated Corrosion Test

研究代表者

土井 康太郎(Doi, Kotaro)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・独立研究者

研究者番号：80772889

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、コンクリート中鉄筋の腐食を加速させる因子として応力と酸素に着目し、それぞれが鉄筋腐食に及ぼす影響について検討した。その結果、応力が付与される環境では、応力のない環境と比較してコンクリート中の塩化物イオンがより少なくても局部腐食が発生し、塩化物イオン量が多いほど応力付与後に生じる再不働態化(酸化保護皮膜の自己修復)が遅くなることが明らかとなった。また、コンクリート中の溶存酸素量が多くなるほど鉄筋表面の酸素還元反応が促進され、腐食進行が促進されることも明らかとなった。この知見をもとに、新しい腐食加速試験法である高酸素腐食促進試験法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

老朽化が深刻な問題となっているコンクリート構造物の劣化の主要因は鉄筋腐食である。これまで、鉄筋腐食に関して様々な研究がなされてきた。しかし、コンクリートが必ず晒される応力および酸素に関して、これらが腐食に及ぼす影響はほとんど明らかにされていない。本研究の成果は、これまで明らかにされてこなかった応力および酸素の影響を解明しただけでなく、これからのコンクリート構造物の建直しや建設の際の基準を考える一助となる社会的意義の大きな研究である。

研究成果の概要(英文)：In this study, the effects of stress and oxygen on corrosion behavior of steel rebar in concrete were investigated.

It was revealed that the localized corrosion on steel rebar in concrete can occur easily under tensile stress compared to that under no tensile stress when the concrete contains Cl⁻. In addition, the repassivation of steel rebar under tensile stress in concrete was hindered as the amount of Cl⁻ in the concrete increases.

It was also revealed that the oxygen reduction reaction on the steel rebar surface is enhanced and the corrosion progress is enhanced as the amount of dissolved oxygen in concrete increases. Based on this finding, we have developed the hyperbaric-oxygen accelerated corrosion test which is a new accelerated corrosion test method.

研究分野：腐食

キーワード：腐食 コンクリート 鉄筋 不働態皮膜破壊 再不働態化 酸素還元 腐食加速試験

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

1. 研究開始当初の背景

コンクリート中の鉄筋腐食の要因として、塩化物イオンや二酸化炭素などの化学的要因が一般的に挙げられる。しかし、腐食は鉄筋表面の不働態皮膜が力学負荷により破壊されることでも生じる。すなわち、コンクリート内部鉄筋の腐食は化学的要素のみならず力学的要素にも影響を受ける。しかし、力学要因による腐食のメカニズムはこれまで全く明らかにされていない。また、鉄筋が腐食する際、酸化反応である鉄の溶解と還元反応である酸素還元が同時に生じるが、コンクリート内の酸素量が還元反応ひいては腐食反応全体に及ぼす影響もこれまで明らかにされてこなかった。そこで本研究では、鉄筋に付与される応力およびコンクリート中の溶存酸素に着目し、これらの要素が鉄筋の腐食に及ぼす影響について検討した。

2. 研究の目的

これまでのコンクリート中鉄筋の腐食に関する研究は、応力のかからない環境での腐食挙動を調査することで行われてきた。これらの研究結果から、腐食の起点は Cl^- および CO_2 によるものと報告されているが、我々の過去の研究では、常に荷重が加わる環境では材料変形により不働態皮膜が破壊され、露出した新生面において局部腐食が開始することが明らかになっている。コンクリートも高速道路や橋梁において車両により常に荷重が加えられているため、実際の不働態皮膜破壊には、 Cl^- や CO_2 などの化学的要因と、繰返し応力などの力学的要因の複合環境が影響を及ぼしていると考えられる。また、化学的要因の中でも、腐食反応を律速していると考えられている溶存酸素が、鉄筋の腐食に及ぼす影響に関してはほとんど明らかにされていない。そこで本研究では、1) 急速ひずみ電極試験および2) 高圧酸素ガス環境における腐食試験を行うことにより、応力と酸素がコンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす影響を検討することを目的とした。

3. 研究の方法

1) 急速ひずみ電極試験法を用いた応力が腐食に及ぼす影響の検討

急速ひずみ試験法について簡単な説明を行う。本試験法は引張試験と電気化学測定システムを融合させたものである。引張試験機に設置した引張試験片のゲージ部を試験溶液で満たした電気化学セルで覆い、試験片変形時の電気信号を測定できるようになっている。金属材料に引張荷重を付与すると、不働態皮膜が破壊され新生面上で金属イオン溶出が生じる。この際、金属イオン溶出は検出される電流値の増加となって現れる。その後すぐさま酸化皮膜の自己再生(再不働態化)が生じるため、金属イオン溶出は抑制され電流値は減衰する。このように急速ひずみ電極試験法は、金属材料に荷重が加えられた際の不働態皮膜の破壊と新生面上での溶解、再不働態化を電流変化として計測し、解析を行う手法である。

本研究では、試料に鉄筋の材料としてよく用いられる SD345 を引張試験片に加工し使用した。溶液にコンクリート内部を模擬した飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液を用い、この溶液中に $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]=0, 0.5, 5.0$ となるように NaCl を添加した。溶液中に浸漬させた引張試験片を自然電位で定電位分極し、3%の塑性変形を付与した際の金属溶解と再不働態化挙動をアノード電流の増減として計測した。

2) 高圧酸素ガス環境における腐食試験

試料は純度 99.5% の鉄板とした。この鉄板を $5 \times 5 \text{ mm}^2$ に切断した後、片面を SiC 耐水研磨紙で #800 まで研磨して試料面とした。この試料をかぶり 5 mm でモルタル中に埋設した。モルタル作製時には 0 M もしくは 1.03 M の NaCl 溶液を練り混ぜ水として使用した。作製したモルタル試験体を加圧チャンパー内に設置し、大気開放(0.02 MPa)から 2.1 MPa までの加圧酸素を供給する腐食試験を行った。また、加圧酸素供給時の鉄試料表面における還元反応を検討するため、動電位カソード分極試験を行った。

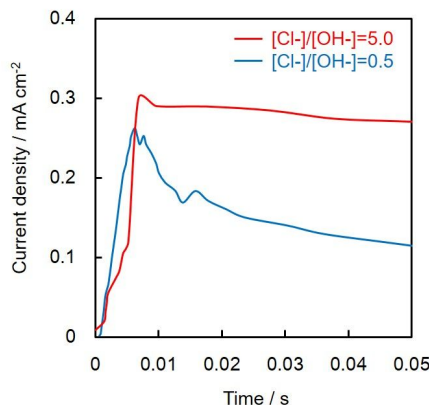


図1 飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中で応力を付与した SD345 鋼の電流挙動

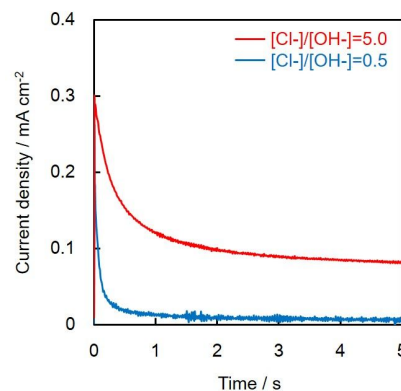


図2 飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中で応力を付与した SD345 鋼の電流減衰挙動

4. 研究成果

1) 急速ひずみ電極試験法を用いた応力が腐食に及ぼす影響の検討

図1に $[Cl^-]/[OH^-]=0.5$ および $[Cl^-]/[OH^-]=5.0$ とした溶液中で3%の塑性変形を付与した際のSD345鋼の電流挙動を示す。いずれの試料においても変形開始直後に電流の急激な増加が認められた。これは鉄筋表面の不働態皮膜が塑性変形により破壊され、露出した新生面から金属溶解が生じたためである。この金属溶解は腐食の起点を意味しており、応力付与時に鉄筋の腐食が生じることが明らかとなった。電流は増加した後、ただちに減衰を始めた。これは新生面上で再不働態化(不働態皮膜の自己再生)が生じたためであり、徐々に腐食が抑制されていく様子が観察できる。図2にそれぞれの試料の再不働態化時における電流の減衰挙動を示す。溶液中の塩化物イオン量により再不働態化速度は異なり、塩化物イオン量が多いほど再不働態化が遅い、すなわち、より多量の金属溶解が生じることがわかった。このことは、多量の塩化物イオンが侵入したコンクリート中においては、塩化物イオンと応力の相乗作用により腐食が促進され、応力のない環境と比較して激しい腐食が生じることを示唆している。

2) 高圧酸素ガス環境における腐食試験

図3に大気開放(0.02 MPa)から2.1 MPaまでの加圧酸素を供給し14日間の腐食試験を行った鉄試料の表面写真を示す。 $[Cl^-]=0$ Mの練り混ぜ水を使用した試料ではいずれの酸素圧においても腐食はほとんど認められなかった。一方、 $[Cl^-]=2.06$ Mの練り混ぜ水を使用した試料では供給酸素圧を増加させることで腐食は促進され、試料表面には鉄さびが生成した。塩化物イオン

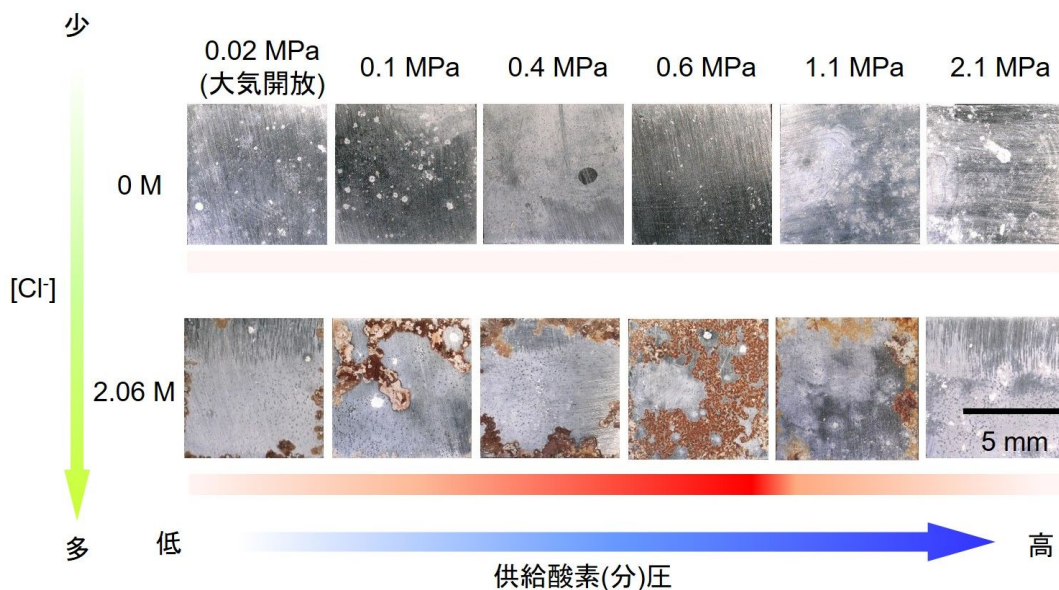


図3 加圧酸素ガス環境で腐食試験したモルタル埋設鉄試料の外観写真

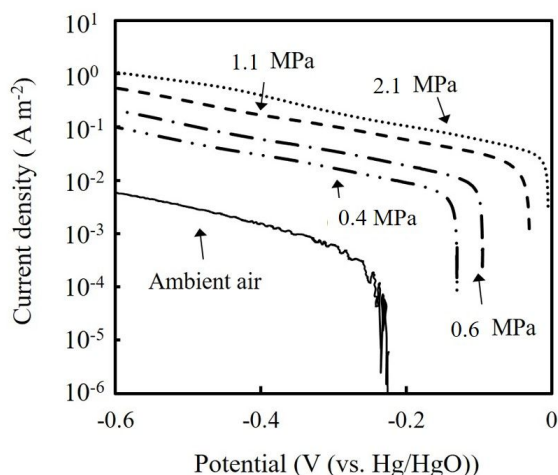


図4 加圧酸素ガスを供給したモルタル中鉄試料のカソード分極曲線

を加えることにより不働態皮膜が破壊され、酸素加圧により鉄表面の酸素還元が促進された結果、鉄試料の腐食が促進されたと考えられる。しかし、ある酸素供給圧を境に腐食は再び抑制された。動電位カソード分極断面観察の結果から、酸素圧 2.1 MPa までは酸素圧に比例して鉄試料表面上での酸素還元反応は促進されたため(図 4) 供給酸素圧が高い際の腐食の抑制は酸素還元の抑制によるものではなく、鉄表面の不働態皮膜の成長による酸化反応の抑制であると考えられる。これらの結果から、コンクリート中鉄筋腐食に対する酸素の役割は、発生した腐食の進展を促進するものであることが明らかとなった。さらに本研究では、得られた知見をもとに高圧酸素を供給することで鉄試料の腐食進展を促進させる新しい腐食加速試験法(高酸素腐食促進試験法)を開発した。本試験法では従来の腐食加速試験法で行う酸化反応の促進ばかりでなく、酸素供給による還元反応の促進を行うため、腐食反応全体が底上げされており、従来の腐食試験法の課題であった実環境における腐食の再現(実環境で生成する鉄さびと同様の鉄さびの生成)を可能とした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- (1) Kotaro Doi, Sachiko Hiromoto, Hideki Katayama and Eiji Akiyama, Effects of Oxygen Pressure and Chloride Ion Concentration on Corrosion of Iron in Mortar Exposed to Pressurized Humid Oxygen Gas, Journal of the Electrochemical Society, 165(9), pp. C582-C589 (2018). [DOI: 10.1149/2.1421809jes] [査読あり]
- (2) Kotaro Doi, Sachiko Hiromoto and Eiji Akiyama, Hyperbaric-Oxygen Accelerated Corrosion Test for Iron in Cement Paste and Mortar, Materials Transactions, 59(6), pp. 927-934 (2018). [https://doi.org/10.2320/matertrans.M2018029] [査読あり]
- (3) 土井康太郎、山田摩耶、星芳直、四反田功、片山英樹、板垣昌幸: 塩化物イオンを含んだコンクリート模擬溶液中における SD345 鋼材の耐食性, 土木学会論文集 E2, (材料・コンクリート構造), 74(1), pp. 1-9 (2018). [https://doi.org/10.2208/jscejmcs.74.1] [査読あり]
- (4) 土井康太郎、廣本祥子、秋山英二: セメントペーストおよびモルタル内部の鉄の高酸素腐食促進試験, 日本金属学会誌, 82(1), pp. 1-7 (2018). [https://doi.org/10.2320/jinstmet.J2017030] [査読あり]
- (5) 土井康太郎、廣本祥子、秋山英二: 電気化学的不働態皮膜破壊と加圧酸素ガス供給によるモルタル埋設鉄の加速腐食、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集, 18, pp. 1016-1-1016-6 (2018). [査読あり]

〔学会発表〕(計 15 件)

- (1) DOI Kotaro, HIROMOTO Sachiko, AKIYAMA Eiji: Steel Corrosion Enhancement in Mortar by Supplying Pressurized Oxygen Gas, 18th Asian Pacific Corrosion Control Conference (2018)
- (2) 土井康太郎、廣本祥子、秋山英二: 加圧酸素ガス供給によるモルタル埋設鉄筋の腐食加速第 65 回材料と環境討論会 (2018)
- (3) DOI Kotaro, HIROMOTO Sachiko, AKIYAMA Eiji: Accelerated Corrosion of Reinforcing Steel in Mortar by Supplying Pressured Oxygen Gas, EUROCORR2018 (2018).

他 12 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

https://samurai.nims.go.jp/profiles/doi_kotaro

6. 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者 なし

※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。