

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02218

研究課題名(和文)鉄筋の発錆条件の理論的整理に基づくRC構造物の予防保全型維持管理の実現

研究課題名(英文)Preventive maintenance management of RC structures based on corrosion onset conditions of steel bars

研究代表者

加藤 佳孝(KATO, YOSHITAKA)

東京理科大学・理工学部土木工学科・教授

研究者番号：80272516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート中の鉄筋の発錆条件を整理し、鉄筋の発錆時期の推定方法を構築することを目的として実施した。研究成果として、発錆条件に与える塩化物イオン濃度と酸素濃度の関係を実験的に取得した。発錆後の腐食速度は、鉄筋表面のセメント硬化体中の飽水度が60～80%程度で最大になることも明らかとした。さらに、セメント硬化体が乾燥すると、鉄筋の腐食が進行するためには、外部から液体の水の作用が必要不可欠であることも明らかとした。すなわち、セメント硬化体の乾燥状態を把握することが極めて重要であるとの結論に至り、気象情報とコンクリートの特性値から、実構造物のコンクリートの乾燥程度を予測できる可能性を見いだした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、セメント硬化体中の鉄筋について、発錆条件および腐食速度に与える影響を精密な実験に基づいて定量的に整理したことにある。この結果、腐食リスクのあるRC構造物の維持管理においては、コンクリートの乾燥状態と、液体としての水の作用に着目することが極めて重要であることを明らかにした。また、申請時の計画では想定できなかったために研究期間内では完遂できなかったが、バルク法に着目し、気象情報とコンクリートの特性値から、実構造物のコンクリートの乾燥程度を予測できる可能性を見いだした。今後、この方法を発展させることで、実構造物の維持管理において活用できる技術になりえると考えている。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to organize the conditions for corrosion of steel bars embedded in concrete and to develop a method for estimating the corrosion onset time of steel bars. As research results, the relationship between the chloride ion concentration and oxygen concentration on the corrosion condition was experimentally obtained. It was also found that the corrosion rate of steel reached a maximum when the water saturation of pore in hardened cement composites at surface of the steel was 60-80%. Furthermore, it was found that the action of external liquid water is indispensable for the corrosion of the steel bars to progress when the hardened cement composites is dry. The study concluded that it is extremely important to understand the drying condition of hardened cement composites, and that it is possible to predict the degree of drying of concrete in actual structures based on meteorological information and concrete properties.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：鉄筋腐食 コンクリート 飽水度

1. 研究開始当初の背景

インフラ施設の主要な構造物である鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物は、高 pH (12.5～13.5) であるコンクリート中に鉄筋が存在しているため、不動態皮膜の影響により酸素と水が供給されても腐食しにくい状態にあるが、鉄筋表面の pH 低下や塩化物イオン（以下、Cl）の存在によって不動態皮膜が破壊されると鉄筋の腐食速度が増大する。ただし、腐食速度が増大する閾値については、設計上の基準値は定められているものの、未だ不明な点が多く存在する。例えば、港湾の RC 構造物の場合、設計上の鉄筋の腐食発生条件は、鉄筋表面の Cl 濃度=2.0(kg/m³)と定められているが、実構造物の調査では 10(kg/m³)でも殆ど発錆していない例もある。これでは、構造物の維持管理として実施する点検でサンプルを採取し Cl 濃度を測定したところで、将来、鉄筋が腐食するのか、しないのか、判断できない。

RC 構造物の維持管理では、対策費用抑制の観点から鉄筋の腐食発生前に対策すること（以下、予防保全型維持管理）が重要であるにもかかわらず、鉄筋の腐食発生条件の定量的な整理がなされないまま、Cl 浸透などのコンクリートに関する研究に注力されている状況にある。

2. 研究の目的

以上のことから、本研究では、RC 構造物の鉄筋の腐食発生条件の定量的な整理に基づいて劣化の進行を把握することを目的とした。本研究の成果により、維持管理費の抑制のために必要不可欠な RC 構造物の予防保全型維持管理の実現に貢献できると考えている。

3. 研究の方法

(1) 腐食発生条件の理論的整理

申請者らの試験方法（図-1 参照）を活用し、コンクリートの細孔溶液中および海水中に存在する主要なイオン種、酸素濃度を考慮し、鉄筋の腐食が発生する Cl 濃度を実験的に求めた。

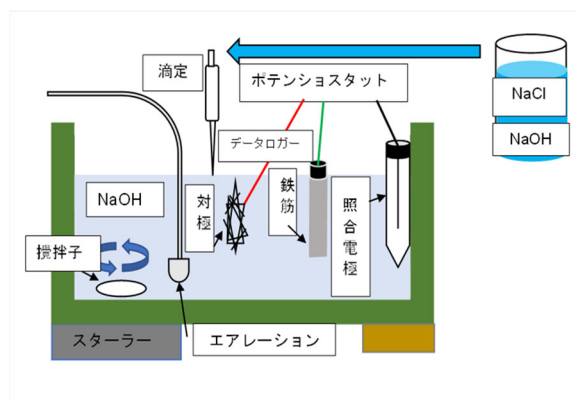


図-1 腐食発生 Cl 濃度を測定する実験系のイメージ

なお、後述する(1)の成果から、研究当初は鉄筋表面のイオン組成に着目していたが、酸素濃度（水分状態）が重要であることが明らかとなり、鉄筋表面の水分状態を推定する検討に変更した。

(2) 水分状態が鉄の腐食速度に与える影響

セメント硬化体中に埋め込んだ鉄に対して、炭酸ガスの影響の有無（pH の変化）、鉄筋表面の飽水度が鉄筋の腐食速度に与える影響を実験的に整理した。

(3) 気象条件がセメント硬化体の水分移動に与える影響

後述する(2)の成果から、セメント硬化体の飽水度が鉄筋の腐食速度に影響することが明らかとなった。そこで、実構造物で鉄筋の表面の飽水度を推定する手法について検討した。室内試験で、湿度条件を一定に保った環境下でセメント硬化体中の湿度と飽水度を測定することで、セメント硬化体中の飽水度と環境条件の影響を整理した。

4. 研究成果

(1) 腐食発生条件の理論的整理

図-2 に最終的に得られた成果を示す。縦軸が腐食発生の Cl 濃度を示している。申請者らが既往の研究で整理してきたように、鉄の電位の減少に伴い腐食発生の Cl 濃度は増加する結果が得られている（図中の電位制御）。さらに、セメント硬化体中で鉄の電位を低下させる要因のうち、

酸素濃度が最も顕著な影響を示したため、図-2 にはその結果をあわせて示した。図中の数値は酸素濃度を示しており、酸素濃度制御については、酸素濃度を変化させた結果として得られる鉄の電位を用いて図化している。図から、酸素濃度の低下に伴い鉄の電位も低下しており、酸素濃度 0.209%までは、電位制御と大凡同様な傾向を示すが、さらに酸素濃度が低下して鉄の電位が低下すると、急激に鉄の腐食発生 CI 濃度も低下していることがわかる。ここで、この図からもわかるが、別途、酸素濃度と鉄の電位の関係を実験的に得たところ（図-3 参照）、酸素濃度の低下に伴い急激に鉄の電位が低下していることが確認でき、おそらく、ある一定の酸素濃度を下回ると、鉄表面の不動態皮膜層が非常に薄くなっていると推察される。その結果として、図-2 で得られたように、鉄の腐食発生 CI 濃度も急激に低下していると考えられた。

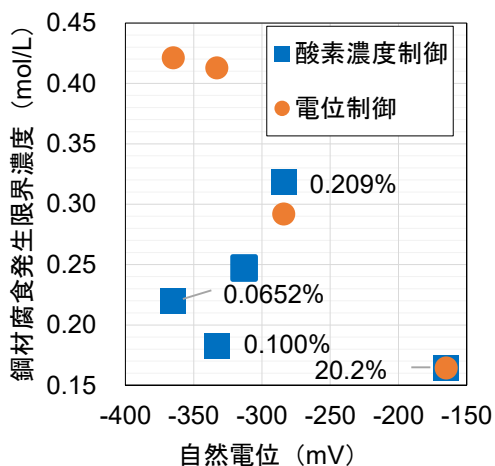


図-2 腐食発生条件の結果の一例

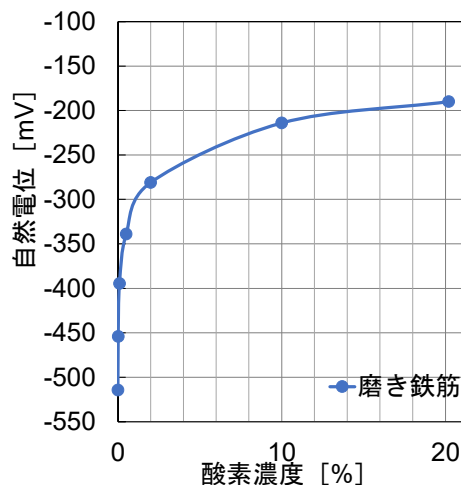


図-3 酸素濃度と鉄の電位の関係

(2) 水分状態が鉄の腐食速度に与える影響

図-4 にセメント硬化体の内部湿度と腐食減量の測定結果を示す。図は、56 日間の暴露後の測定結果であり、腐食減量が最大であった「中性化-乾燥」の 95%の結果で正規化している。なお、吸湿は、相対湿度 66%の環境下で平衡状態にした試験体をそれぞれの湿度環境下に暴露した条件を意味し、乾燥は、飽水状態にした試験体をそれぞれの湿度環境下に暴露した条件を意味している。図から明らかなように、セメント硬化体が中性化していなければ、どのような水分環境下であっても腐食減量は殆ど測定できない。一方で、中性化させたセメント硬化体では、セメント硬化体の湿度が同じであっても、乾燥過程と吸湿過程では、腐食減量が大きく異なることがわかる。

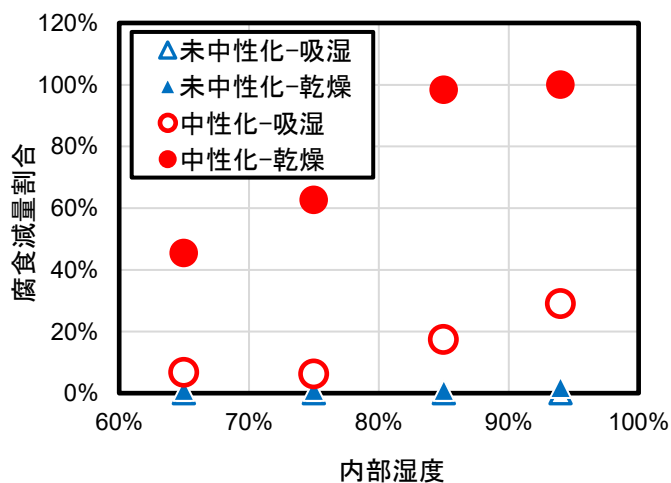


図-4 セメント硬化体の内部湿度と腐食減量の関係

そこで、質量変化から求めたセメント硬化体の飽水度を用いて、上記のデータを再整理した（図-5 参照）。図から明らかなように、セメント硬化体の飽水度と腐食速度には、一定の関係を見いだすことができ、飽水度 60~80%で最大になるような結果を得た。

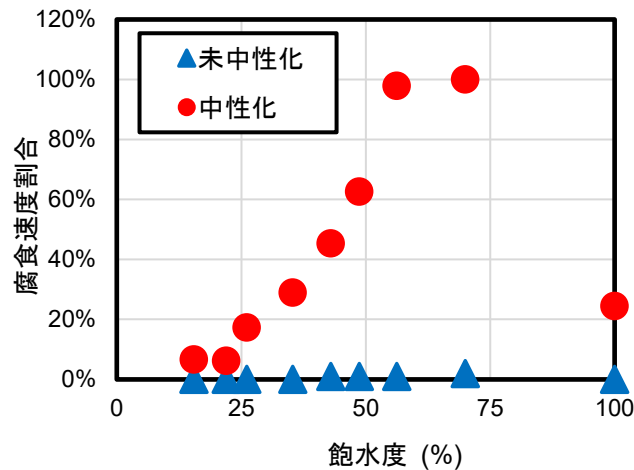


図-5 セメント硬化体の飽水度と腐食速度の関係

(3) 気象条件がセメント硬化体の水分移動に与える影響

(2)の成果に基づき、セメント硬化体の飽水度が 60～80%になる条件について検討した結果を図-6 に示す。(a)と(b)については、白抜きのマークが内部湿度を、塗りつぶしたマークが飽水度を示している。図から明らかなように、一度乾燥したセメント硬化体に対して高湿度で吸湿しても飽水度は 40%程度にしか増加せず(図-6(a) 吸湿過程参照)、セメント硬化体中の飽水度が 60～80%になるためには、液体の水が構造物に供給されることが必要であることがわかる。

図-6(c)より、吸水を受ける前のセメント硬化体の飽水度の状態によって、飽水度 60～80%になるまでの挙動が異なることがわかる。特に、初期の条件が湿度環境 65%、75%の場合は、吸水と共に飽水度は増加するものの飽水度 40%を超えたあたりで増加傾向は停滞し、内部湿度が 80%を超えたあたりから、再び飽水度が増加することが確認できる。

一般に実構造物中のコンクリートの飽水度、内部湿度を把握することは難しいが、飽水度 60～80%になるためには、液体の水の供給が必要であることと、セメント硬化体の吸水速度はセメント硬化体が乾燥しているほど大きくなることを考慮すると、環境条件がセメント硬化体の乾燥に与える影響を把握することがポイントとなる。

そこで、気象情報から蒸発量を推定できるバルク法の活用を想定し検討を進めた。なお、バルク法で蒸発量を推定するためには、蒸発効率が必要となるが、この数値を実構造物の測定結果から推定できれば、実環境下での適用が可能になる。そこで、非破壊で構造物の水分状態の測定が可能な近赤外分光センサーの吸光度に着目した。すなわち、気象条件と近赤外分光センサーの測定結果から、コンクリートの蒸発量を推定する方法の可能性について検討した。図-7 に蒸発効率と吸光度の測定結果を示す。図中 B50 は高炉セメント B 種を、N は普通ポルトランドセメントを示す。検討が少なく、今後も検討を進める必要はあるが、ある程度の精度で、近赤外分光センサーの測定結果から蒸発効率を推定し、気象条件をインプット情報としてバルク法により、コンクリートの蒸発量を推定できる可能性を見いだすことができた。

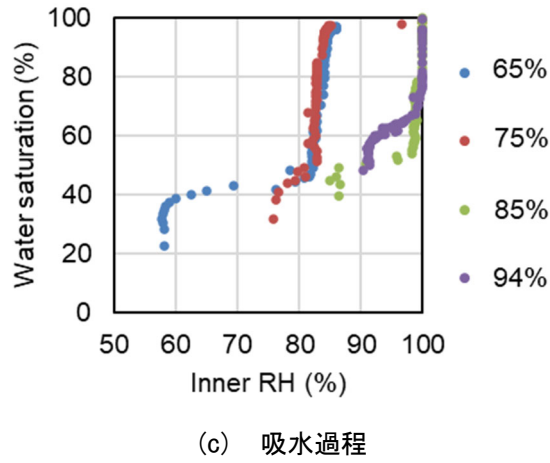
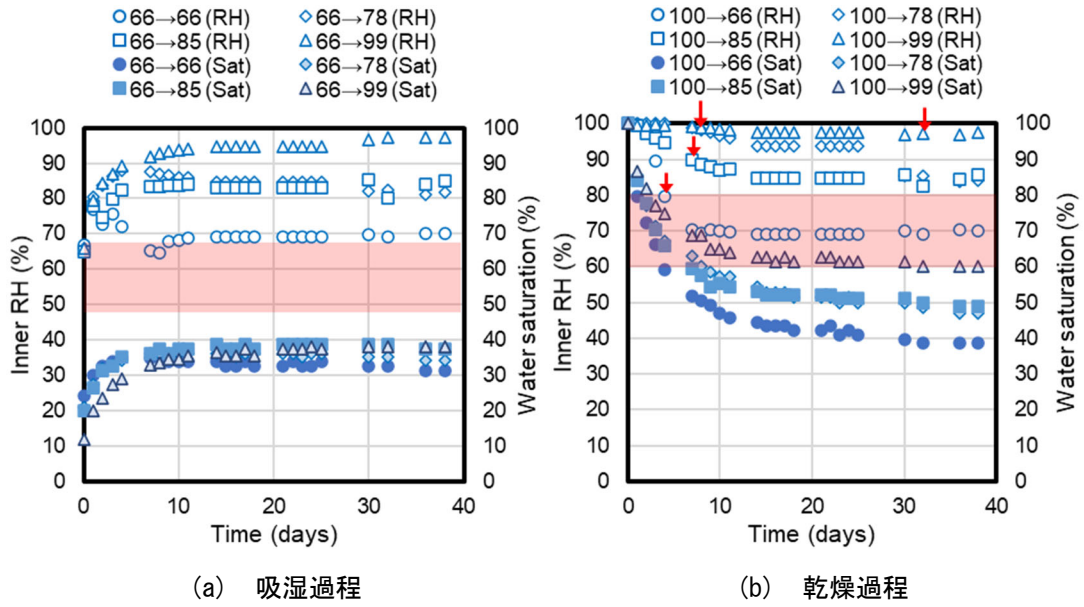


図-6 セメント硬化体中の湿度および飽水度の変化

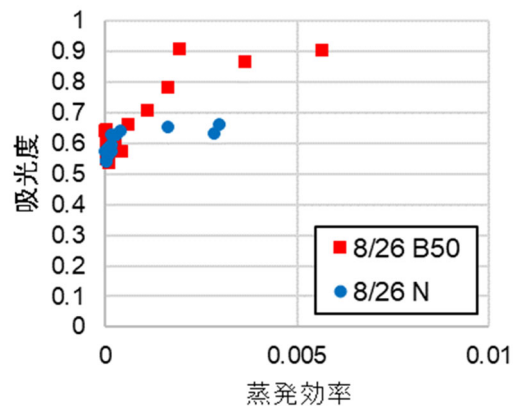


図-7 蒸発効率と吸光度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 伊代田岳史, 後藤誠史, 中村絢也	4. 巻 887
2. 論文標題 セメント硬化体の炭酸化機構の解明 - 自然環境と促進環境の違い -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート	6. 最初と最後の頁 39, 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 橋本永手, 加藤佳孝	4. 巻 59
2. 論文標題 不動態皮膜の生成・破壊に関する既往のモデルと実験観測結果	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学	6. 最初と最後の頁 275, 282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 高橋駿人, 加藤佳孝, 加藤絵万
2. 発表標題 異なる試験方法から得られた塩化物イオンの拡散係数に関する基礎研究
3. 学会等名 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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江 俊顔, 橋本永手, 加藤佳孝
2. 発表標題 塩化物イオン濃度と鉄筋電位が高pH環境下にある鉄筋の皮膜破壊誘導時間に与える影響
3. 学会等名 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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hayato Takahashi, Momoko Saito, Yoshitaka Kato
2. 発表標題 FUNDAMENTAL STUDY ON MOISTURE CONDITIONS IN CONCRETE
3. 学会等名 ConMat'20 6th International Conference on Construction Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshikatsu Kou, Nagate Hashimoto, Yoshitaka Kato
2. 発表標題 A BASIC STUDY ON THE CHLORIDE THRESHOLD VALUE FOR CORROSION OF STEEL BAR IN CONCRETE
3. 学会等名 ConMat'20 6th International Conference on Construction Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澁谷亜香里, 荒木萌, 伊代田岳史
2. 発表標題 高炉スラグ微粉末を用いた硬化体が形成する空隙と水分浸透性状の関係
3. 学会等名 第74回セメント技術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤慎也, 荒木昭俊, 伊代田岳史
2. 発表標題 膨張材とカルシウムアルミネート系混和材を併用したコンクリートの材料的特性と塩化物イオンの浸透挙動
3. 学会等名 コンクリート工学年次論文集第42巻
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nagate Hashimoto
2. 発表標題 FORMULATION OF PASSIVATION FILM BREAKDOWN CONDITION OF STEEL BAR IN HIGH pH AQUEOUS SOLUTION BY COORDINATION CHEMISTRY
3. 学会等名 THE ANNUAL EVENT FOR CORROSION EXPERTS EUROCORR2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ema KATO
2. 発表標題 Development of an Evaluation Method for Corrosion Prevention Effect in Petrolatum Lining System
3. 学会等名 THE ANNUAL EVENT FOR CORROSION EXPERTS EUROCORR2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木 萌
2. 発表標題 各種セメント硬化体が形成する空隙構造と水分浸透性状の関係
3. 学会等名 第47回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 絢也
2. 発表標題 養生終了時の空隙構造と水和物量に立脚した中性化速度係数推定手法の一考察
3. 学会等名 第47回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎 幹太
2. 発表標題 電気泳動試験による塩化物イオン固定化能力を有するコンクリートの遮塩性能評価の一考察
3. 学会等名 第47回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junya Nakamura
2. 発表標題 Carbonation Characteristics of Hardened Cements with Different Chemical Composition
3. 学会等名 The 14th SEATUC Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	伊代田 岳史 (IYODA TAKESHI) (20549349)	芝浦工業大学・工学部・教授 (32619)	
研究分担者	加藤 絵万 (KATO EMA) (90371765)	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・グループ長 (82627)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------