

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04307

研究課題名（和文）塩害を受けるコンクリート中鉄筋の腐食に関する電気化学的特性の定量的把握

研究課題名（英文）Quantitative understanding of electrochemical properties of rebar corrosion in concrete structures due to chloride attack

研究代表者

審良 善和（Akira, Yoshikazu）

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：60639376

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化は鉄筋の腐食が問題になる。ただし、構造物の設置される環境や使用されるコンクリートの品質などにより劣化の進行は異なる。これは、鉄筋表面の環境の変化が、鉄筋腐食の進行速度に影響すると考えられるためである。この研究では、塩害の程度を評価するために塩化物イオン濃度の影響を、設置環境の違いを評価するために酸素濃度や水分の影響を電気化学的な計測により把握した。その結果、鉄筋腐食の開始および腐食開始以降の腐食の速度を把握することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インフラ施設の老朽化問題は、持続可能社会構築のためには解決が急がれる重要な課題である。特に、塩害によるコンクリート構造物の腐食は深刻な問題であり、効率的な維持管理を行うためには、劣化の進行予測を高精度化する必要がある。

本研究により、異なる環境に建設された鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食の進行速度をある程度評価することができた。これを用いることで予測精度が向上するため、インフラ施設の長寿命化に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Corrosion of rebars is a severe problem for deterioration of RC structures due to chloride attack. The progress of deterioration differs depending on the environment in which the structure is constructed, and the quality of concrete used. Because corrosion of rebars is considered to progress at a different corrosion rate due to changes in the environment on the rebar surface.

In this study, the effects of chloride ion concentration and the effects of oxygen concentration and water content were grasped by electrochemical measurements. As a result, it was possible to evaluate the corrosion rate of rebars at each environment.

研究分野：維持管理工学

キーワード：維持管理 コンクリート構造物 鉄筋腐食 塩害 腐食速度

### 1. 研究開始当初の背景

塩害環境下におけるコンクリート中鉄筋の腐食は耐久性を著しく低下させる要因の一つである。現行の設計では腐食発生までを耐久性上の限界値と捉え、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性によって照査されている。しかしながら、実構造物の維持管理では、予防保全的な維持管理を推進する動きはあるものの、目視や簡便な点検(打音など)によって個々の施設の健全度を評価せざるを得ないのが現状であると推察される。したがって、より戦略的、効率的な維持管理を達成させるためには、潜伏期および進展期の劣化予測が極めて重要となる。

一方、コンクリート中の腐食に関する研究は、腐食発生限界塩化物イオン濃度や長期暴露試験等による腐食量に関する研究によって多くの知見が得られているものの、経年的な腐食挙動や構造物が置かれる外部環境の違いによる腐食挙動に関する定量的な把握までは至っていないのが現状であると考えられる。これは、コンクリート中鉄筋の腐食は、コンクリートの配合、酸素の供給状況、コンクリートの含水状態、鉄筋位置の塩化物イオン濃度、かぶり、温度などの要因によって変化すると考えられるため、それぞれの要因を考慮した腐食速度の定量化が非常に困難なためである。

### 2. 研究の目的

一般に、溶液中の腐食は酸素の拡散に律速すると考えられる。このため、鉄筋表面の腐食環境を定量的に評価すれば、ある程度の予測は可能になると予想される。しかしながら、高アルカリ性環境となるコンクリート中の鉄筋は不動態化し、腐食に対する抵抗性が高い。このことから、アノードとカソードが変化する混合支配型の腐食挙動を定量的に把握する必要がある。また、コンクリートは非常に複雑な細密構造によって成り立つため、溶液中の電気化学的挙動とは異なる可能性が高い。そこで、腐食に関して様々な条件下にあるコンクリートに埋設された鉄筋に対して電気化学的な計測を行うことで、種々の環境下における鋼材腐食の電気化学的挙動を正確に把握し、これらの現象を鋼材腐食の経年的な劣化現象として整理することを目的として検討を行う。

### 3. 研究の方法

コンクリート中の鉄筋の腐食の電気化学的挙動は、コンクリートの品質や設置される環境により酸素の拡散速度が定まりカソード分極挙動が決定すると考えられる。一方で、鉄筋位置のpHや塩化物イオン濃度により不動態の状態または活性な状態を評価することが可能でアノード分極挙動が決定すると考えられる。本研究では、様々な設置環境下およびコンクリート品質下にある鉄筋に対して、カソード分極挙動としてターフェル勾配と酸素拡散限界を電気化学的に評価し、アノード分極挙動として不動態維持電流密度と孔食電位およびターフェル勾配を電気化学的に評価することで、これらを整理し、設計または劣化予測に用いることができる腐食モデルを構築できる。様々な要因によって変化する腐食速度であるが、今回は、コンクリートの品質、鉄筋表面の塩化物イオン濃度および含水率に着目し、整理することとした。本研究では、下記について検討した。

#### (1) 腐食試験装置によるアノード分極挙動の評価

真空グローブボックスを用いてボックス内の環境を任意に操作することで、コンクリート中鉄筋表面の腐食環境を調整できる装置(以下、腐食試験装置)を作製した。これを用いて、塩化物イオン濃度の異なるモルタル中鉄筋のアノード分極特性について調査した。

実験に用いた供試体のモルタル配合を表-1に、供試体の形状を図-1に示す。セメントに普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに、モルタル中の塩化物イオン量(Cl<sup>-</sup>)がコンクリート換算で0、1、2、4、6、8、10(kg/m<sup>3</sup>)となるように練混ぜ時に外割で添加した。鉄筋は試験面が中央50mmの範囲となるように両端部をエポキシ樹脂で被覆した。

#### (2) 屋外暴露による分極挙動および腐食速度の評価

表-2に示すように、コンクリートの品質としてセメントの種類および水セメント比(W/C)、塩化物イオン量として内在塩化物イオン量を変化させた供試体を作製した。また、含水率の影響を評価するために、設置環境を変化させた状態での鉄筋の電気化学的挙動を定量的に計測することとした。

実験に用いたコンクリートの配合を表-2に、供試体概要図を図-2に示す。配合はセメント種類によらず単位水量を一定とし、目標スランプ10cm、空気量4%となるように混和剤を調整した。供試体寸法は

表-1 モルタルの配合

| W/C (%) | S/C  | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |
|---------|------|-------------------------|------|-----|
|         |      | W                       | S    | C   |
| 50      | 2.19 | 297                     | 1305 | 595 |

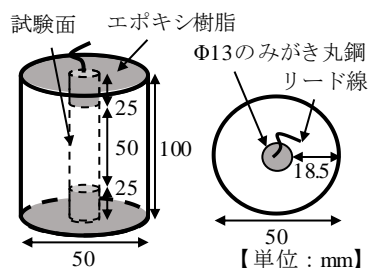


図-1 供試体

表-2 試験要因

|   |                        |
|---|------------------------|
| コンクリートの品質                                 |                        |
| セメント                                      | OPC、BB                 |
| W/C (%)                                   | 40、50、60               |
| 含水率                                       |                        |
| 暴露環境                                      | 海水中、干満帯、海上大気中、屋上、軒下、土中 |
| 塩化物イオン量                                   |                        |
| 内在 Cl <sup>-</sup> 量 (kg/m <sup>3</sup> ) | 0、2、5、10               |

表-2 コンクリートの配合

| セメント | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |            |         |
|------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|------|------------|---------|
|      |         |         | W                        | C   | S   | G    | 高性能 AE (%) | AE剤 (%) |
| OPC  | 40      | 43      | 175                      | 438 | 736 | 969  | 0.40       | 0.25    |
|      | 50      | 44      | 175                      | 350 | 786 | 993  | 0.20       | 0.30    |
|      | 60      | 45      | 175                      | 292 | 826 | 1002 | 0.20       | 0.30    |
| BB   | 40      | 43      | 175                      | 438 | 731 | 961  | 0.40       | 0.35    |
|      | 50      | 44      | 175                      | 350 | 781 | 987  | 0.20       | 0.35    |
|      | 60      | 45      | 175                      | 292 | 822 | 997  | 0.10       | 0.50    |

φ100mm×200mm の円柱供試体とし、供試体側面からかぶりが 42mm となるように断面中央にリード線を取り付けた φ16mm×150mm のみがき丸鋼を埋設した。なお、鉄筋の電気化学的測定対象を供試体高さ方向中央部の 100mm の範囲とするために、供試体上面から 50mm までの範囲を予めエポキシ樹脂で被覆し防錆・絶縁処理を行った。また、外部からの腐食因子の侵入を遮断するために供試体上下面をエポキシ樹脂で被覆した。

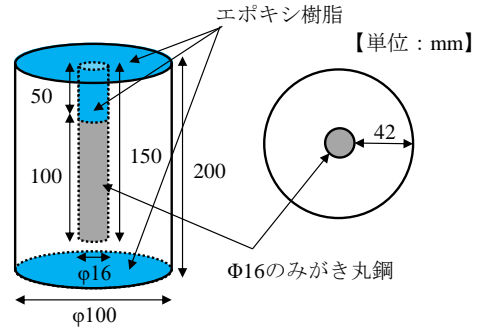


図-2 供試体概要図

測定項目としては、電位をモニタリングし、環境が一定となった条件下で直線分極試験を実施することとした。

上記の計測結果を整理し、アノード分極挙動では、塩化物イオン濃度と孔食電位の関係、設置環境が異なる場合のターフェル勾配を定量評価した。また、カソード分極挙動に関しては、各環境下におけるコンクリート品質の変化に伴うターフェル勾配および酸素拡散限界を定量評価した。

以上の検討から、コンクリートの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を設定することで、鉄筋位置の塩化物イオン濃度を評価することが可能になるため、経時的な腐食速度変化を推定することが可能になると考えられる。

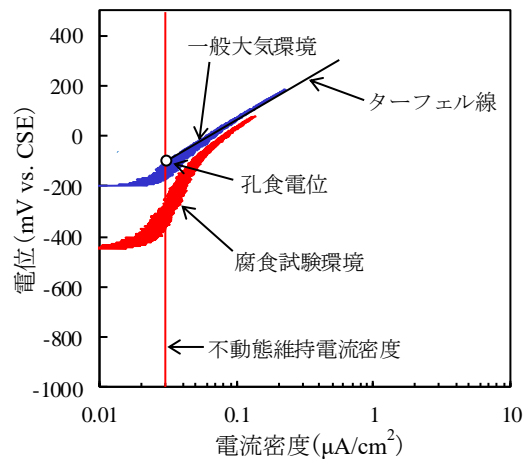


図-3 アノード分極曲線

#### 4. 研究成果

##### (1) 腐食試験装置によるアノード分極挙動の評価

図-3 に、一般大気環境および腐食試験環境におけるアノード分極曲線について、一例として Cl<sup>-</sup>濃度が 0kg/m<sup>3</sup> の結果を示す。腐食試験装置で鋼材表面の環境を調整することで、電位が卑な位置から分極が開始された。その挙動は、わずかな電流密度で電位が増加した後に、大きく電流密度が増加した。これから、電流密度の小さな領域が不動態領域であると考えられる。その後、アノード溶解が起こる領域（ターフェル領域）が描かれた。一般大気環境の分極曲線と比較すると、ターフェル領域の分極曲線がほぼ一致しているため、任意に操作した腐食試験環境の結果は一般環境と同等のアノード分極挙動が評価できることを確認した。

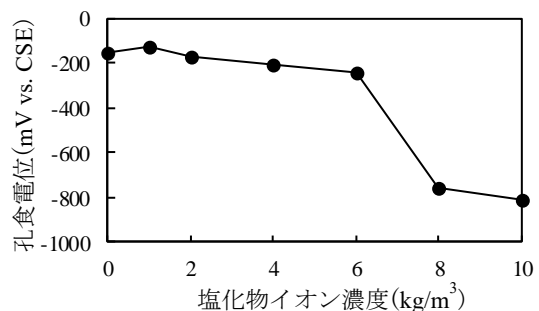


図-4 Cl<sup>-</sup>濃度と孔食電位の関係

ここで、不動態領域で測定される微弱な電流が不動態維持電流密度であり、実験結果から、不動態維持電流密度は 30 nA/cm<sup>2</sup> 程度であると考えられる。また、不動態のアノード曲線とターフェル領域の接線であるターフェル線との交点の電位が孔食電位であり、本試験によって推定できることを確認した。なお、孔食電位とは、不動態が破壊し、鉄の溶解が始まる電位である。

図-4 に Cl<sup>-</sup>濃度と孔食電位の関係を示す。Cl<sup>-</sup>濃度が 0kg/m<sup>3</sup> における不動態維持電流密度 30nA/cm<sup>2</sup> を基準とし、ターフェル線との交点の電位を孔食電位として整理した。なお、8、10 kg/m<sup>3</sup> については、アノード反応は鉄の溶解反応であるため、ターフェル勾配は一定であると考え、分

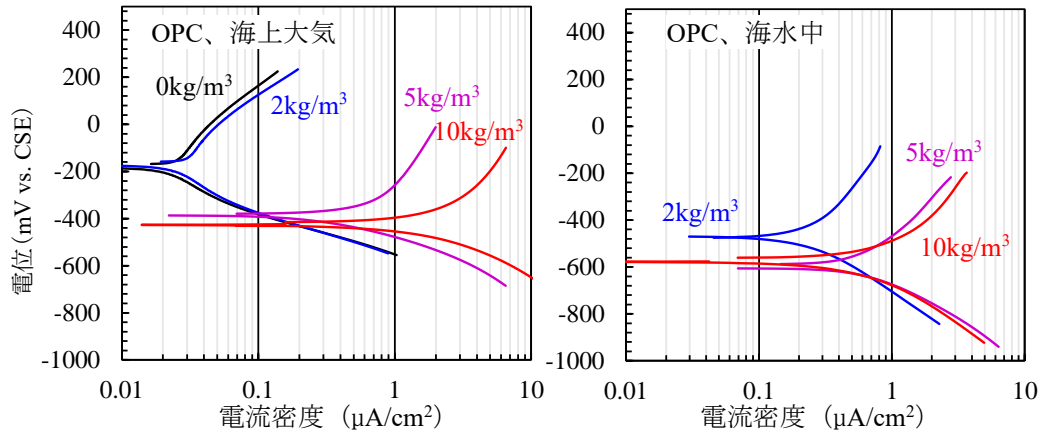


図-5 分極曲線

極曲線との接線から求めた。孔食電位は、 $\text{Cl}^-$ 濃度の増加に伴い卑化する傾向が認められ、特に、 $\text{Cl}^-$ 濃度が  $6\sim 8\text{ kg/m}^3$  において、その傾向が顕著になる結果となった。おそらく不安定な不動態が限界に達し、不動態が広範囲に破壊したためであると考えられる。

(2) 屋外暴露による分極挙動および腐食速度の評価

図-5に海上大気中、干満帯および海水中に暴露した供試体の鉄筋の分極曲線の内、海上大気中および海水中に暴露した OPC の結果を一例として示す。アノード分極挙動に関して、いずれのセメントおよび環境においても、 $\text{Cl}^-$ 濃度が高くなるにつれて電流密度の大きい方向に移動することが分かる。これは、(1)で得られた結果と一致する。ただし、不動態が形成されていると考えられるのは、海上大気中の  $\text{Cl}^-$ 濃度が  $0, 2\text{ kg/m}^3$  の場合のみであり、それ以外は、いずれも活性域にあると予想される。これは、不動態皮膜は酸化鉄(さび)の一種であり、高含水状態となる干満帯や海水中では酸素の供給が非常に小さくなるため、安定した不動態が形成されないためであると推察される。セメントの違いについては、普通ポルトランドセメント

(OPC)のアノード分極曲線に比べて高炉セメント B種 (BB)のアノード分極曲線は電流密度の小さい位置にあり、BBはアノード分極しにくい状態になると予想される。一般に、混合セメントはベースのセメント量が減少するため、腐食に対しては抵抗性が低くなると考えられているが、今回の結果では反対の傾向を示した。これは、BBを使用することで、鋼材表面の構造が緻密になることで、アノード反応を抑制したためであると予想される。

図-6に、不動態維持電流密度を  $30\text{ nA/cm}^2$  と仮定した場合の孔食電位と  $\text{Cl}^-$ 濃度の関係を示す。いずれのセメント、環境においても、 $\text{Cl}^-$ 濃度が高くなるにつれて孔食電位は低下する傾向を示した。ただし、海上大気中の鉄筋の孔食電位が高く、干満帯および海水中は卑な電位になった。これは、鋼材表面の水分量および酸素の影響が大きく、低濃度の  $\text{Cl}^-$ 濃度であっても十分な不動態が形成されていないためであると考えられる。この結果からは、干満帯および海水中のコンクリート中鉄筋は、OPCで海上大気中の  $\text{Cl}^-$ 濃度が  $4\text{ kg/m}^3$  程度の状態、BBで  $6\text{ kg/m}^3$  程度の状態にあり、腐食環境としては活性になると思われる。セメントの種類で比較すると、OPCに比べBBの方が、全体的に貴な位置にあり、不動態を維持する能力はBBの方が高いと考えられる。また、OPCに関しては、 $\text{Cl}^-$ 濃度が  $2\sim 5\text{ kg/m}^3$  の範囲において、孔食電位が急激に低下しており、腐食発生限界塩化物イオン量と考えられる約  $2\text{ kg/m}^3$  を境界に急激に不動態が劣化するものと推察される。一方で、BBに関しては、急激な変化点はなく、 $\text{Cl}^-$ 濃度の上昇とともに不動態皮膜が徐々に劣化すると考えられる。

カソード分極曲線に関しては、図-5より、セメントの種類や設置環境によって異なるが、 $\text{Cl}^-$ 濃度の違いにはあまり影響されず概ね同じ位置にあると予想できる。環境毎のカソード分極曲

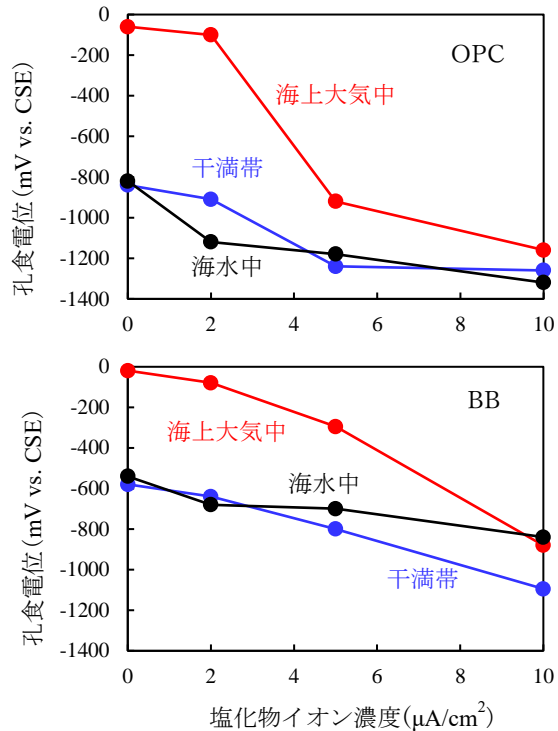


図-6 孔食電位と  $\text{Cl}^-$ 濃度の関係

線を図-7 に示す。セメントの種類に関わらず、干満帯および海水中の分極曲線は海上大気中に比べ電流密度が小さい側に位置する結果となった。これは、高含水状態であるため酸素の供給が減少し、カソード分極抵抗が増大したためであると考えられる。このことから、干満帯および海水中の鉄筋は腐食に対する抵抗性が高いと考えられる。

図-8 に暴露した供試体から鉄筋と取り出し、実際の腐食減量を測定して求めた腐食速度と鉄筋位置の  $\text{Cl}^-$  濃度の関係を示す。なお、図中には CEB で提案されている腐食速度の評価値をあわせて示す。この結果、塩化物イオン濃度が高くなるにつれて腐食速度は大きくなる傾向を示した。また、環境による腐食速度の差が大きいことが分かる。ただし、 $\text{Cl}^-$  濃度が  $5\text{kg/m}^3$  以下の腐食速度は、いずれの環境も極めて遅い（不活性）と判定できる腐食速度であり、極わずかな腐食であった。環境別にみると、海上大気中のみ大きな腐食速度を示し、干満帯および海水中の腐食速度は概ね同程度で非常に小さいことが分かる。これは、前述のとおり貧酸素化による効果であると考えられる。いずれにしても、今回の検討結果では、酸素と水の供給がある大気中の環境下で鉄筋周辺の  $\text{Cl}^-$  濃度が  $5\text{kg/m}^3$  以上の場合に腐食速度が急激に上昇すると考えられる。それ以外の酸素の供給が低減される環境下であれば腐食速度は小さくなると考えられる。

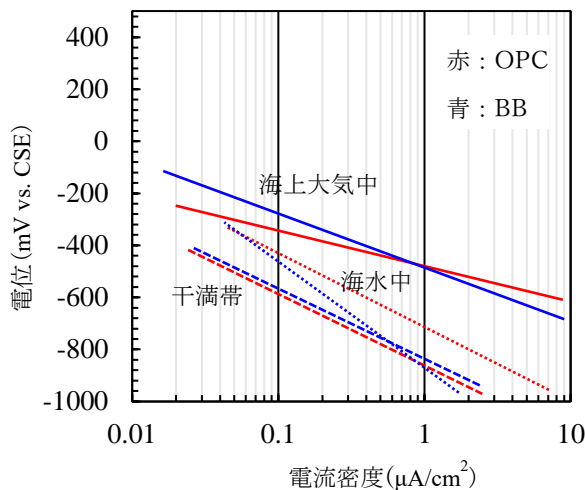


図-7 考えられるカソード分極曲線

### (3) まとめ

本研究では、コンクリート中の鋼材の腐食に関して、種々の環境下における鋼材腐食の電気化学的挙動を正確に把握し、これらの現象を鋼材腐食の経年的な劣化現象として整理することを目的に検討を実施した。

- ① OPC モルタル (W/C50%) 中铁筋のアノード分極特性について評価した結果、不動態維持電流密度は  $30\text{ nA/cm}^2$  程度、ターフェル勾配は  $310\text{ mV/decade}$  程度となる。また、孔食電位は、 $\text{Cl}^-$  濃度の増加に伴い卑化し、 $\text{Cl}^-$  濃度が  $6\sim 8\text{ kg/m}^3$  程度で不動態皮膜は急激に破壊に至る。
- ② コンクリート中のアノード分極特性について、OPC の場合は、 $\text{Cl}^-$  濃度が  $2\sim 5\text{ kg/m}^3$  の範囲において孔食電位が急激に低下する。一方、BB に関しては、急激な変化点はなく、 $\text{Cl}^-$  濃度の上昇とともに不動態皮膜が徐々に劣化すると考えられる。
- ③ コンクリート中のカソード分極特性について、セメントの種類に関わらず、干満帯および海水中の分極曲線は海上大気中に比べ電流密度が小さい側に位置することになる。これは、高含水状態であるため酸素の供給が減少し、カソード分極抵抗が増大したためであると考えられる。このことから、干満帯および海水中の鉄筋は腐食に対する抵抗性が高いと考えられる。
- ④ 海洋環境におけるコンクリート中铁筋の同一  $\text{Cl}^-$  濃度の腐食速度は、海上大気中のみ大きな腐食速度を示し、干満帯および海水中の腐食速度は概ね同程度で非常に小さい。これは、鋼材表面の貧酸素化による効果であると考えられる。

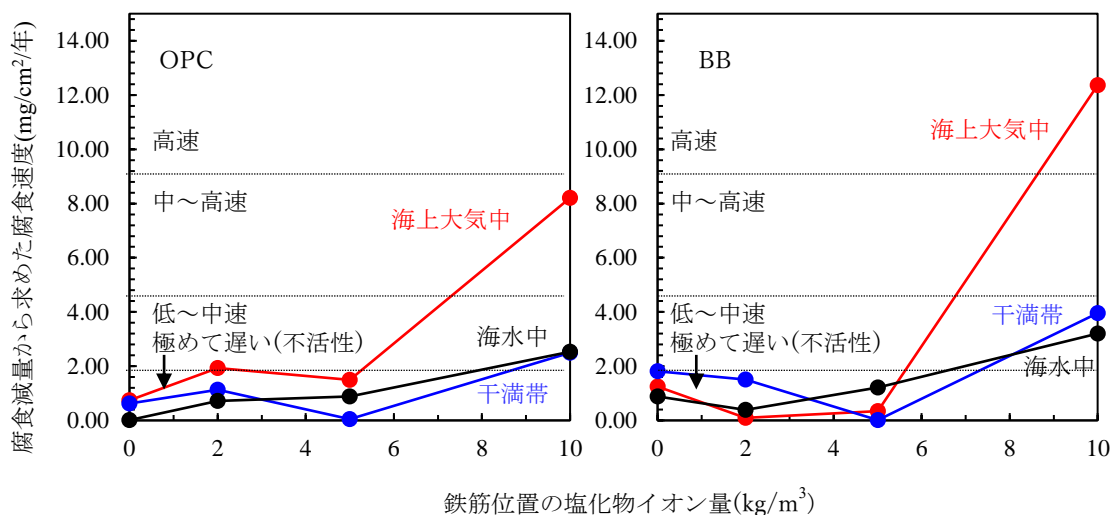


図-8 解体調査により得られた腐食減量から求めた腐食速度と  $\text{Cl}^-$  濃度との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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<br>辻田美帆, 審良善和, 武若耕司, 山口明伸                | 4. 巻<br>1             |
| 2. 論文標題<br>コンクリート中鉄筋の分極特性を考慮した電気防食設計に関する一考察     | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関するシンポジウム論文集 | 6. 最初と最後の頁<br>316-321 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし                   | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>辻田美帆, 審良善和, 武若耕司, 山口明伸             |
| 2. 発表標題<br>コンクリート中鉄筋の分極特性を考慮した電気防食設計に関する一考察   |
| 3. 学会等名<br>電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関するシンポジウム |
| 4. 発表年<br>2018年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>矢野智大, 審良善和, 武若耕司, 山口明伸, 小池賢太郎, 川畑雅樹, 阿久根航 |
| 2. 発表標題<br>コンクリート中鉄筋のアノード分極特性に関する実験的検討               |
| 3. 学会等名<br>令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会                  |
| 4. 発表年<br>2020年                                      |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

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

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|