

平成19年度（財）港湾空港建設技術サービス センター研究開発助成報告書

助成番号：平成20年1月29日付 第07—5号

研究開発項目：（番号）⑧公共施設の維持・管理 に関するもの

既設栈橋上部工の定量的な塩害劣化 予測手法および入力パラメータの 設定方法に関する研究

平成21年4月30日

東京工業大学 理工学研究科 国際開発専攻教授

大即信明

目次

| | |
|-------------------------------------------|----|
| 1. 研究背景 | 1 |
| 2. モンテカルロ法による棧橋上部工の塩害劣化予測手法の概要および課題 | 3 |
| 2.1 潜伏期に対する予測手法の概要および課題 | 3 |
| 2.2 進展期に対する予測手法の概要および課題 | 4 |
| 2.3 加速期以降に対する予測手法の概要および課題 | 5 |
| 4. シリーズ1：棧橋上部工内の空間的な腐食環境に関する検討（曝露実験） | 5 |
| 4.1 はじめに | 5 |
| 4.2 実験概要 | 6 |
| 4.3 各環境に曝露した試験体中の塩化物イオン浸透分布 | 7 |
| 4.3 曝露環境や空間的な位置の違いが表面塩化物イオン濃度や拡散係数に与える影響 | 7 |
| 4.4 フリーデル氏塩の生成量と全塩化物イオン濃度の関係 | 8 |
| 4.4 シリーズ1における結果のまとめ | 8 |
| 5. シリーズ2：腐食発生限界塩化物イオン濃度および鉄筋の腐食速度に関する検討 | 9 |
| 5.1 はじめに | 9 |
| 5.2 実構造物の塩害劣化調査 | 9 |
| (1) 調査対象としたドルフィンの概要 | 9 |
| (2) 調査項目 | 9 |
| (3) 調査結果 | 11 |
| 5.3 室内試験 | 13 |
| (1) 試験概要 | 13 |
| (2) 全塩化物イオン濃度と腐食速度の関係式の提案 | 15 |
| (3) 腐食発生限界塩化物イオン濃度の不確定性に関する検討（腐食発生確率図の提案） | 16 |
| (4) 鉄筋の腐食速度式構築に向けた検討 | 19 |
| 5.4 シリーズ2における結果のまとめ | 21 |
| 6. 本研究における成果のまとめ | 22 |

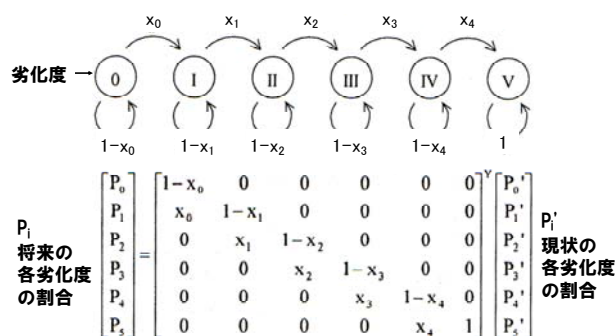
1. 研究背景

厳しい海洋環境下に曝される港湾 RC 構造物は塩害が問題となることが多く、特に栈橋上部工はその劣化進行が速い¹⁾ことから、供用開始早期からの予防保全対策の実施の重要性が強く認識されている^{2), 3), 4)}。しかし、実際の栈橋では、**写真 1-1** に示すように、立地条件や使用状況さらには部材ごとの相対的な位置関係、かぶりやコンクリートの品質などの施工要因に含まれる不確定性によって、部材ごとに変状の現れ方やその発生時期が大きく異なる。そのため、定量的な劣化予測や予防保全対策の実施時期の設定、さらには部材ごとの最適な工法の割当てなどの維持管理計画の立案を複雑かつ困難なものにさせている。このことから、栈橋上部工の部材ごとの塩害劣化による腐食環境の評価や、経済的かつ効果的な対策を行うための判断材料（例えば、劣化予測手法の確立など）の整備が急務と考えられている。



写真 1-1 建設後 20 年経過した栈橋上部工の損傷状況の例

上記を受け、2008 年には港湾施設の維持管理の手引きとして「港湾の施設の維持管理技術マニュアル⁵⁾」が刊行され、構造物の定期的な点検診断、その結果に基づく劣化予測、構造物の維持管理レベルに応じた総合的な評価、さらには適切な時期における対策の実施に対する考え方が示された。そのマニュアルの中には、実際の栈橋上部工の各部材に時々刻々見られる外観上の変状を予測する手法として、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測手法が紹介されている。これは（独）港湾空港技術研究所より提案されたもので、**図 1-1** に示すように、「外観目視に基づく劣化度が次の劣化度に移行する確率」と「劣化度がその状態に留まる確率」を用いて、劣化度の進行を予測するものであり、遷移確率に関するデータが十分に蓄積されると非常に信頼性の高い実用的な予測手法になりうると考えられる。しかし、「劣化度」の判定が調査員の主観的かつ定性的な評価によるものであること、対象構造物または



ある時期に構造物の調査を実施し、ある劣化状態に至った部材数の割合を把握し、その割合から劣化度の遷移確率（個々の劣化要因の不確定性は遷移確率に包含される）を設定して、構造物の劣化状態の推移を予測する。

図 1-1 栈橋劣化に対するマルコフ連鎖図と遷移確率⁶⁾

類似構造物の劣化度データから遷移確率が設定されるため、異なる条件（環境や構造）となる場合には適切な遷移確率の設定が個々の構造物で必要となることなどの課題も残されている。

これに対して、我々は、塩害劣化に関連する各種要因の不確定性を考慮したモンテカルロ法に基づく劣化予測手法を考案し^{7), 8)}、その予測結果とマルコフ連鎖モデルによる結果を比較検証することによって、栈橋上部工の劣化進行予測をより信頼性の高いものにするための検討を行ってきた。なお、考案したモンテカルロ法の概要および課題について2章で詳述するが、この手法では潜伏期、進展期、加速期に分けて劣化予測計算が行われる。その適用にあたっては、次に示す項目に対する各パラメータに対する平均値や標準偏差の設定方法、さらにはコンクリート中の鉄筋の腐食速度などの基本式の構築が現状課題となっている。

- ① 表面塩化物イオン濃度に関する平均値や標準偏差の設定のためのデータ収集方法
- ② 腐食発生限界塩化物イオン濃度の平均値やばらつきの評価方法
- ③ 腐食ひび割れ発生前におけるコンクリート中の鉄筋の平均的な腐食速度式の構築およびばらつきの評価方法
- ④ 腐食ひび割れが発生するときの鉄筋腐食減量の設定方法
- ⑤ 腐食ひび割れ発生後の鉄筋の平均的な断面減少速度とそのばらつきの評価方法

しかし、上記①～⑤の課題全てが克服されないと、モンテカルロ法による予測手法が実務に適用できないというわけではない。例えば、予防保全的な維持管理計画の立案で、腐食ひび割れ発生を許容しないレベルを維持管理に要求する場合においては、栈橋上部工の塩害劣化がさほど進行していない早期段階においてモンテカルロ法による劣化予測を行い、コンクリート部材に腐食ひび割れが発生するまでの期間までの予測が、ある程度の精度で推定できれば良いことになる。また、腐食ひび割れ発生後の劣化状態まで許容する維持管理計画となる場合には、変状が外観に現れない進展期までの劣化状態をモンテカルロ法により予測し、変状が見られた後からは定期的な目視調査結果を直接評価するマルコフ連鎖モデルによる方法を用いるなど、両者の組合せ対応が、より現実的かつ信頼性の高い予測となりうるものと考えられる。つまり、当面は、モンテカルロ法による塩害劣化予測手法を実践的なツールとするために、上記課題のうち、①～④の潜伏期、進展期に関わる課題を克服することが先決であると考えられる。

そこで本研究では、上記を勘案して、鉄筋腐食によるひび割れが発生する前までの段階（進展期以前）までの情報整理に重点をおき、次の2シリーズについて検討した。

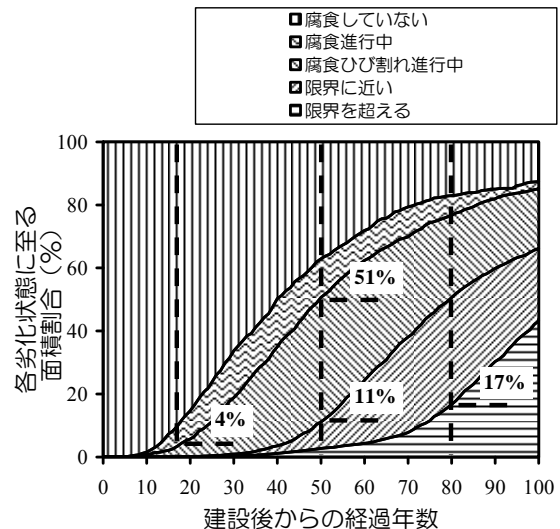


図 1-2 モンテカルロ法による劣化予測結果（例）⁹⁾

シリーズ1：棧橋上部工内の空間的な腐食環境に関する検討（曝露実験）

横須賀市にある棧橋上部工下の空間を利用して、海水面からの距離や棧橋法線からの距離を変化させた位置にコンクリート試験体を曝露し、干満帯、飛沫帯、海上大気中に位置するコンクリート部材中への塩化物イオンの浸透状況やフリーデル氏塩の生成状況の違いを比較した。また、各位置における表面塩化物イオン濃度から、棧橋上部工内の空間的な腐食環境について調査した。

シリーズ2：腐食発生限界塩化物イオン濃度および腐食発生前の鉄筋の腐食速度に関する検討

（実構造物調査および室内実験）

供用開始から26年以上経過したドルフィンコンクリートにて塩害劣化調査を実施し、鉄筋位置の塩化物イオン濃度がコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす影響について分析した。

さらに、種々の条件（鉄筋径、かぶり、水セメント比、セメント種類〔高炉セメントB種・普通ポルトランドセメント〕、環境温度・湿度、含有塩化物イオン量）を変化させた鉄筋コンクリート試験体を作製し、自然電位および腐食速度の測定を行うことで、腐食発生限界塩化物イオン濃度や腐食速度の不確定性に関する情報を収集し、高炉セメントB種、普通ポルトランドセメントごとの腐食発生確率図や平均的な腐食速度式を検討した。

2. モンテカルロ法による棧橋上部工の塩害劣化予測手法の概要および課題

鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化の進行は潜伏期、進展期、加速期、劣化期に大別して説明されることが多い。検討中のモンテカルロ法における塩害劣化予測手法においても、各劣化過程に応じた次節以降に示す手順により計算を進めるコンセプトとなっている。

2.1 潜伏期に対する予測手法の概要および課題

潜伏期は「鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度を上回るまでの過程」と定義される。そこで、本手法においても、潜伏期の劣化進行は、鉄筋位置における塩化物イオン濃度の経時変化は式(2-1)に示すフィックの拡散方程式の解を用いることとしている。

$$C(d,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{d}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) + C_i \quad (2-1)$$

ここに、 $C(d,t)$ ：かぶり d (cm)、時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 C_0 ：表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 D ：塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 C_i ：初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m^3) を表す。

このとき、実構造物における既往の調査データによれば、式(2-1)に考慮される表面塩化物イオン濃度 (C_0)、塩化物イオンの拡散係数 (D)、かぶり (d) は、図 2-1 に示すように正規分布に従うことが示されている⁹⁾。そこで本手法では、これを反映して、各パラメータの不確定性を表 2-1 に示すように表現し、各パラメータに

表 2-1 式(1)中の各パラメータのばらつき

| | |
|------------|-------------------------------------------------------|
| 表面塩化物イオン濃度 | $C_0 = C_{0ave} + \sigma_{C_0} \times dz(C_0)$ |
| 見かけの拡散係数 | $\log_e D = \log_e [D_{ave} + \sigma_D \times dz(D)]$ |
| 初期塩化物イオン濃度 | $C_i = C_{iave} + \sigma_{C_i} \times dz(C_i)$ |
| かぶり | $d = d_{ave} + \sigma_d \times dz(d)$ |

ここに、

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| C_{0ave} | ：表面塩化物イオン濃度の平均値 (kg/m^3) |
| σ_{C_0} | ：表面塩化物イオン濃度の標準偏差 (kg/m^3) |
| D_{ave} | ：見かけの拡散係数の平均値 ($\text{cm}^2/\text{年}$) |
| σ_D | ：見かけの拡散係数の標準偏差 ($\text{cm}^2/\text{年}$) |
| C_{iave} | ：初期塩化物イオン濃度の平均値 (kg/m^3) |
| σ_{C_i} | ：初期塩化物イオン濃度の標準偏差 (kg/m^3) |
| d | ：かぶりの平均値 (mm) |
| σ_d | ：かぶりの標準偏差 (mm) |
| $dz(C_0)$, $dz(D)$, $dz(C_i)$, $dz(d)$ | ：各パラメータの正規乱数 |

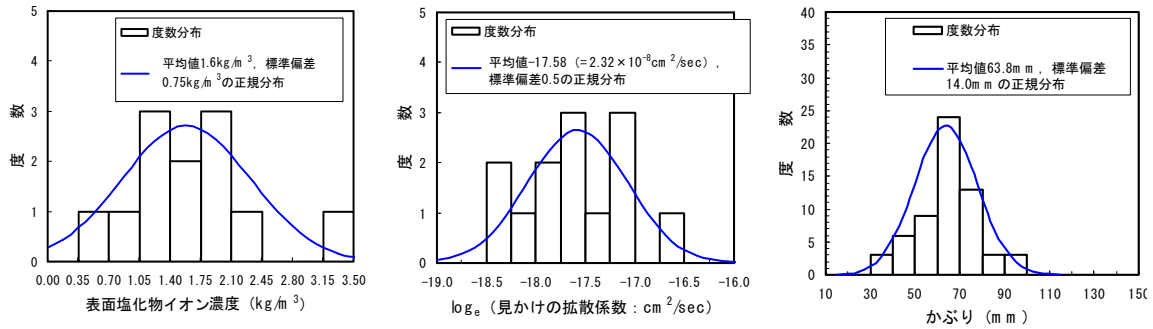


図 2-1 既往の橋樑調査事例¹⁰⁾

対して独立の（異なる）正規乱数を複数個（現状は 1000 個）発生させて、式(2-1)による計算を 1000 ケース行うことで、任意の経過年数に対する鉄筋位置の塩化物イオン濃度のばらつきを計算する流れとなっている。

しかし、表面塩化物イオン濃度や見かけの拡散係数、かぶりなどの平均値や標準偏差の設定においては、予測対象の橋樑上部工から複数のコアを採取する必要がある、調査コスト面から制約を受けてしまうといった課題がある（かぶりについては RC レーダーなどの非破壊試験により複数データの収集は可能であり、一部はつり調査を行うことで非破壊試験結果の検証もできるため、比較的信頼性の高いデータ収集が可能と考えられる）。そのため、モンテカルロ法による予測では、限られたサンプルデータから橋樑全体の表面塩化物イオン濃度や塩化物イオンの見かけの拡散係数の平均値や標準偏差を評価できる方法が必要となる。つまり、既存の橋樑上部工の劣化調査を通じて、**構造形式や立地条件を考慮した橋樑上部工内の空間的な腐食環境を推定する手法の確立**、さらには**サンプリング位置やその数の考え方に関する情報収集が必要である（課題①）**。

また、潜伏期終了を示す腐食発生限界塩化物イオン濃度については、既往の文献^{11)~14)}では 1.0~2.5kg/m³と幅が広く、コンセンサスの得られた値は存在しない。そのため、本手法においては、**腐食発生限界塩化物イオン濃度の不確定性を考慮するための情報収集も課題として挙げられる（課題②）**。

2.2 進展期に対する予測手法の概要および課題

鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度を上回ると、その時点から鉄筋の腐食速度が増大する。一般的には、塩害による鉄筋腐食は、塩化物イオン濃度、かぶり、鉄筋径、配合、温度、湿度など様々な要因に支配されることが知られており、これまでに幾つかの鉄筋の腐食速度式が提案されている^{15), 16)}。また近年では、西田らによって環境温度が鉄筋の腐食速度に大きく影響することが指摘されている¹⁷⁾。

なお、現状におけるモンテカルロ法による進展期の予測では、上記の要因を全て包括する意味で、腐食速度を図 2-2 に示すように正規分布に従うものと仮定し、平均的な速度で腐食が進行するもの (+2σ, +3σ)、小さな速度で進行するもの (-2σ, -3σ) の 5 段階に分け、それぞれの発生確率に応じた重み付けをして、腐食速度の不確定性を表現して

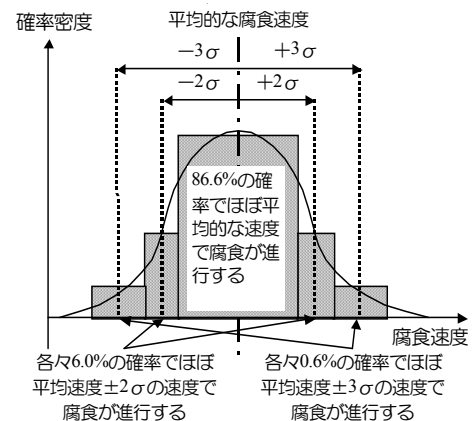


図 2-2 腐食速度のばらつきの考え方

いる。

しかし、平均的な腐食速度式や標準偏差に関する情報が不十分であるため、既往の研究成果^{例えば 18), 19)}を参考にしながら、平均的な腐食速度式やそのばらつきを選定している状況にある(課題③)。

一方、潜伏期と同様、進展期終了を定義する腐食ひび割れ発生限界腐食量の不確定性も本予測手法に反映させる必要があるが、現状の予測では横関らの提案する $20\text{mg}/\text{cm}^2$ 一定とする方法²⁰⁾やかぶりと鉄筋径の影響を考慮する方法⁵⁾を用いているが、これに関する情報についても今後収集していく必要があると考えられる。

2.3 加速期以降に対する予測手法の概要および課題

本予測手法では、腐食ひび割れ発生後の鉄筋の断面減少率を式(2-2)にて計算している²¹⁾。

$$V_{reduction} = \frac{4ac}{\phi\gamma_{Fe}} e^{\frac{a}{c}t} \quad (2-2)$$

ここに、 $V_{reduction}$ ：断面減少率(%)、 γ_{Fe} ：鉄筋の単位体積重量($=7.85\text{mg}/\text{mm}^3$)、 a ：腐食量とひび割れ幅を関連づける係数($=1.5\text{mg}/\text{mm}^2$ と仮定)、 c ：腐食による初期のひび割れ幅($=0.05\text{mm}$ と仮定)、 ϕ ：鉄筋径、 a ：腐食速度とひび割れ幅を関連付ける係数($=0.22\text{mg}/\text{mm}^3/\text{年}$ と仮定)、 t ：腐食ひび割れ発生後からの年数を表す。

なお、本予測手法では、式(2-2)に示す鉄筋の断面減少速度の不確定性についても考慮するため、断面減少速度が図2-3に示す正規分布に従うものと仮定し、平均的な速度で断面減少するもの、それよりも大きな速度で減少するもの(+ 2.5σ)、小さな速度で減少するもの(- 2.5σ)の3段階に分けて計算し、それぞれの発生確率に応じた重み付けを行って断面減少率のばらつきを表現している。しかし、鉄筋の断面減少速度についても標準偏差に関する十分な情報がないことが課題と考えられる。

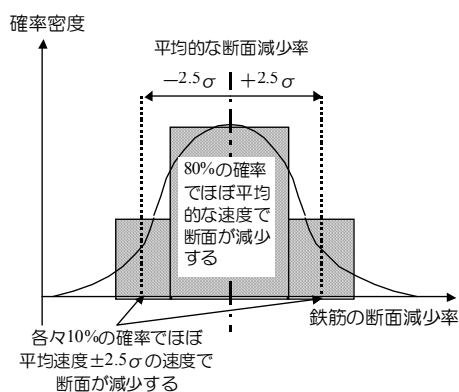


図 2-3 断面減少率のばらつきの考え方

4. シリーズ1：棧橋上部工内の空間的な腐食環境に関する検討(曝露実験)

4.1 はじめに

これまで構造形式などが異なる4つの棧橋上部工から広範囲に塩化物イオン測定用コアを採取して分析し、その結果から、棧橋上部工の各部材の設置標高と海水面の距離が大きくなるほど表面塩化物イオン濃度は小さくなる傾向にあり、両者の関係にはほぼ直線関係があることを示した。また、防舷材取付用の棧橋上部工前面の前垂れの有無や、棧橋背後の護岸の有無などの構造形式の違い、着船位置などの供用条件などによって、棧橋上部工内の各部材における表面塩化物イオン濃度が影響されることも示した^{22), 23)}。

本シリーズでは、表面塩化物イオン濃度の空間的な分布状況の把握と併せて、同配合のコンクリートであっても、干満帯、飛沫帯、海上大気中などの環境ごとに乾湿や塩化物イオン供給の程度が異なるため、塩分浸透性状が異なっていることも考えられたことから、横須賀市にある棧橋上部工下において海水面からの距離や棧橋法線からの距離を変化させた位置にコンクリート試験体を約2年間曝露

し、空間的な位置の違いが塩化物イオンの浸透状況及びフリーデル氏塩の生成状況に及ぼす影響を検討した。

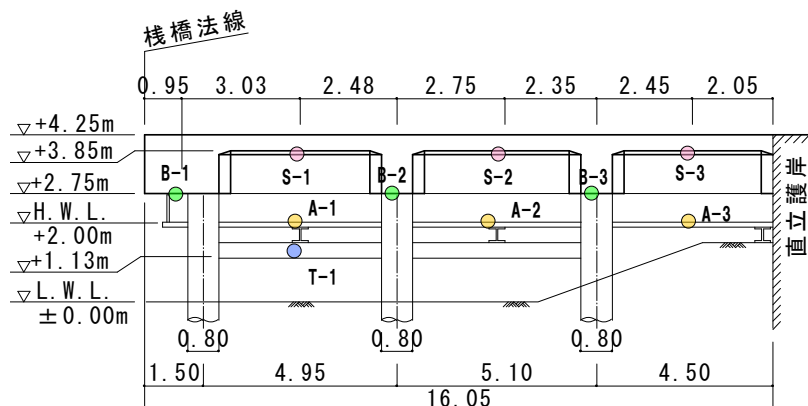
4.2 実験概要

曝露試験体は直径 10cm、高さ 10cm の円柱とし、曝露面以外の面を全てエポキシ樹脂により被覆したものとした。また、使用セメントは高炉セメント B 種 (JIS R 5211 に適合) で、表 4-1 に示すコンクリート配合とした。各試験体の曝露位置を図 4-1 に示すが、波は栈橋法線に対してほぼ直角に進入する条件であった。また、試験体は 2 年後に回収し、試験体中の全塩化物イオン濃度分布は曝露面から深さ方向に 10mm 間隔にスライスしたコンクリート片を粉末状にし、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法 (案)」に準拠して求めた。またフリーデル氏塩は、全塩化物イオン濃度と同じ試料に内部標準物質として $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ を質量比で 10% 添加し、XRD 内部標準法により分析した。検討に用いた回折ピークはフリーデル氏塩で $2\theta = 11.3^\circ$ 、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ で $2\theta = 52.5^\circ$ とした²⁴⁾。

表 4-1 曝露供試体配合

| W/C (%) | s/a (%) | SL (cm) | Air (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|---------|---------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|------|--------|
| | | | | W | C | S | G | AE 減水剤 |
| 55.8 | 43.7 | 12 | 4.5 | 164 | 294 | 788 | 1056 | 2.94 |

※高炉セメント B 種 (スラグ混入率 40~45%) ※AE 減水剤を使用



- ※図中の記号の頭文字 S は海上大気中を表し、空気中に含まれた塩化物イオンのみが飛来する環境 (海水は直接作用せず、コンクリート表面は乾燥状態)
- ※図中の記号の頭文字 B は飛沫帯を表し、砕波により粒径の大きな海水が稀に飛沫する環境 (一週間に数回程度)
- ※図中の記号の頭文字 A は干満帯上部を表し、ほぼ H.W.L. に位置し、年間に数回、高潮などで海水に浸漬する環境 (海水が飛沫する頻度は多い)
- ※図中の記号の頭文字 T は干満帯を表し、一日のうち半分の期間が海水に浸漬される環境

図 4-1 試験体の曝露位置



(a) 海上大気中 (床版)



(b) 飛沫帯 (梁下)・干満帯 H.W.L. (足場上)



(c) 干満帯 M.W.L.

写真 4-1 曝露状況

4.3 各環境に曝露した試験体中の塩化物イオン浸透分布

図 4-2 に、曝露環境ごとの深さ方向の全塩化物イオン濃度分布を示す。なお、本検討では各位置に曝露した 9 体のうち 2 体ずつの試験体を回収し、その 2 個の結果を平均して整理した。また、図中には各結果に対してフィックの拡散方程式の解により近似した線も付記した。

これによると、海上大気中では栈橋法線からの距離の違いによらず分布はほぼ同じであった。

飛沫帯では、海側 (B-1)、陸側 (B-3)、中央 (B-2) の順で表層付近 (0~10mm) の全塩化物イオン濃度が大きくなった。

干満帯の H.W.L.付近では、海側 (A-1) で表層付近の全塩化物イオン濃度が若干大きかったが、陸側 (A-2) と中央 (A-3) ではほぼ同じであった。

それに対し、干満帯 M.W.L.付近 (T-1) では、表層付近の全塩化物イオン濃度は H.W.L.付近の A-2、A-3 と同じであったが、深さ 10mm 以上において全塩化物イオン濃度が大きく、内部深くまで塩化物イオンが浸透している状況が伺えた。

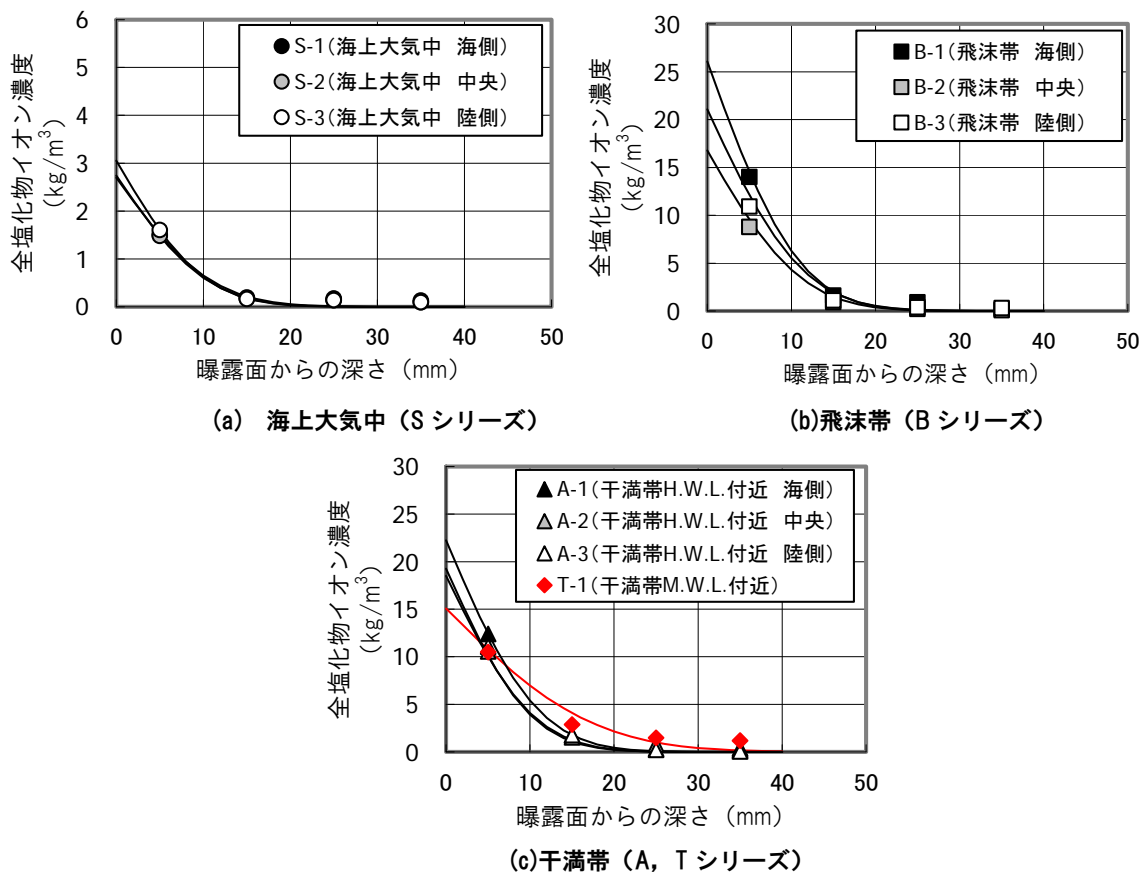


図 4-2 各試験体における深さ方向の塩化物イオン濃度分布

4.3 曝露環境や空間的な位置の違いが表面塩化物イオン濃度や拡散係数に与える影響

図 4-3 に、表面塩化物イオン濃度、塩化物イオンの見かけの拡散係数と栈橋法線からの距離の関係を示す。これによると、海上大気中の表面塩化物イオン濃度は他の環境の値より小さく、これまでの調査結果^{22), 23)}と同様、海水面からの距離による影響が見られた。しかし、栈橋法線からの距離 (奥行き) による影響は見られなかった。一方、飛沫帯及び干満帯 H.W.L.付近では、海側 (B-1, A-1) 及び陸側 (B-3) にて表面塩化物イオン濃度が大きく、栈橋上部工下に進入する波の砕波や背面護岸からの跳ね返り、海底地盤の形状の影響によって各部位への海水飛沫の程度が異なっている状況が伺えた。

また、塩化物イオンの見かけ拡散係数を見ると、海上大気中、飛沫帯、干満帯 H.W.L.付近の拡散係

数はほぼ同じ値であったが、干満帯 M.W.L.付近 (T-1) のみ大きくなっていった。この理由として、海水の浸漬時間が長い T-1 ではコンクリート中の含水率は高い状態にあるため、塩化物イオンが浸透しやすいが、他の環境におけるコンクリート中の含水率はそれより小さいため、内部まで塩化物イオンが拡散しにくく、表層付近に濃縮されたことが考えられる。

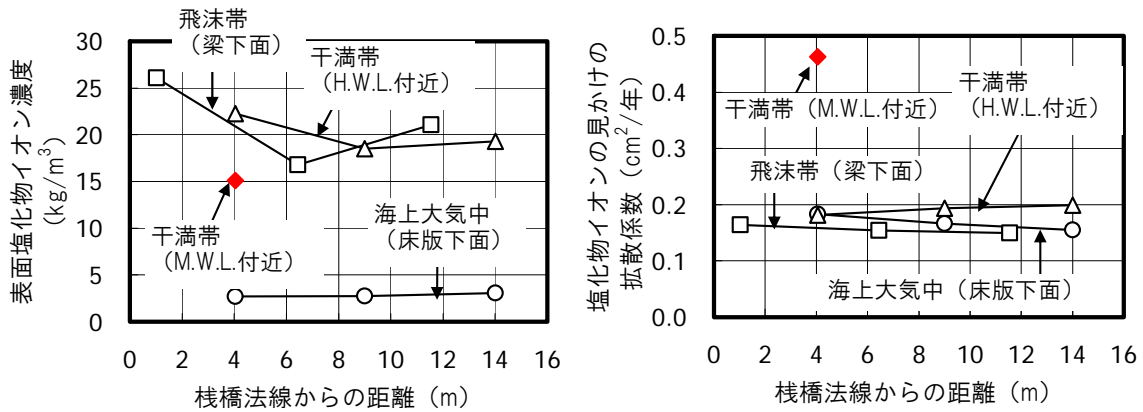


図 4-3 表面塩化物イオン濃度、塩化物イオンの拡散係数と棧橋法線からの距離の関係

4.4 フリーデル氏塩の生成量と全塩化物イオン濃度の関係

表層 0~10cm における全塩化物イオン濃度とフリーデル氏塩のピーク強度比の関係を図 4-4 に示す。

これによると、全塩化物イオン濃度の増加に伴ってフリーデル氏塩のピーク強度比も増加し、同程度の全塩化物イオン濃度で比較すると、干満帯 M.W.L.においてフリーデル氏塩が若干多く生成される傾向が見られた。佐藤ら²⁵⁾によると、種々のイオンの相互作用によって生じる浸透と水和相からのイオンの溶出には関連性があることが示されている。本検討の結果からも、各環境における外部イオンの浸透程度の違いがフリーデル氏塩の生成に影響している可能性が見られた。

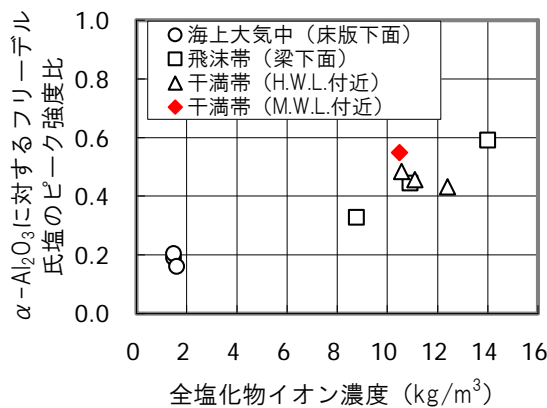


図 4-4 フリーデル氏塩の生成量と全塩化物イオン濃度の関係

4.4 シリーズ 1 における結果のまとめ

棧橋上部工下の空間を利用した曝露試験を通じて、次の知見が得られた。

- (1) 飛沫帯及び干満帯 H.W.L.付近では、着船側、護岸側の部位にて、表面塩化物イオン濃度が大きくなるのがわかった。これは、波の碎波や背面護岸からの跳ね返り、海底地盤の形状の影響が原因と考えられる。
- (2) M.W.L.付近の干満帯にあるコンクリートでは、他の環境に比べて塩化物イオンの見かけの拡散係数が大きくなるのがわかった。

- (3) 全塩化物イオン濃度の増加に応じてフリーデル氏塩の生成量は増加するが、イオンの浸透程度の違いにより、干満帯では飛沫帯・海上大気中よりもフリーデル氏塩の生成量が若干多くなる状況が確認された。

5. シリーズ2：腐食発生限界塩化物イオン濃度および鉄筋の腐食速度に関する検討

5.1 はじめに

本シリーズでは、供用開始から26年以上経過したドルフィンコンクリートにて塩害劣化調査を実施し、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が内部鉄筋の腐食に及ぼす影響について分析した結果をまず説明する。

次に、上記の実構造物調査の結果の検証を目的として室内試験を実施し、塩化物イオン濃度、かぶり、水セメント比、セメント種類を変えた複数体の鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋の自然電位や腐食速度を非破壊試験にて測定し、さらに約1または2年後に鉄筋をはつり出し、腐食面積率、腐食減量を測定することで、腐食発生限界塩化物イオン濃度や鉄筋の腐食速度について検討する。

5.2 実構造物の塩害劣化調査

(1) 調査対象としたドルフィンの概要

調査した構造物は、調査時点において建設後26年以上経過した表5-1に示す7つのドルフィンコンクリートであり、いずれも東京湾内の同じ地点に建設されたものである。また、調査したドルフィンは、陸地護岸から数十m～数百m離れた位置に立地している。

なお、ドルフィンコンクリートは、海上に鋼管杭等で支持される点で栈橋上部工と類似しているが、栈橋上部工ほど広範な面積を有しないこと、護岸などが隣接することはほとんどないことから、塩化物イオンの供給量が同一構造物内の部位によって大きく異なるケースは少なく、波向きや波高などの波浪条件や設置標高に支配されるケースが多い。また、栈橋上部工に比べてかぶりも大きく、表-1に示すように飛沫帯や干満帯付近に設置されることで腐食に必要な酸素の供給も少ないため、塩害の進行は比較的緩やかと考えられている。ドルフィンコンクリートの損傷は、塩害の他に、波力や漂流物による衝突によるものが多いのも特徴として挙げられる。

表 5-1 調査ドルフィンの概要

| 名称 | 建設年 | 調査時の経過年数 | H.W.L と調査位置までの距離(m) | |
|----|------|----------|---------------------|-------------|
| | | | 底面 | 側面 |
| A | 1971 | 33 | 0.0 | +0.50～+2.50 |
| B | 1971 | 33 | 0.0 | +0.50～+2.50 |
| C | 1971 | 35 | 0.5 | 測定せず |
| D | 1972 | 36 | 0.0 | 0.3 |
| E | 1972 | 36 | 3.0 | 測定せず |
| F | 1972 | 36 | 3.0 | 測定せず |
| G | 1982 | 26 | 1.0 | 1.4 |

(2) 調査項目

調査は各々のドルフィンコンクリートの底面および側面にて行った。なお、構造物ごとに調査箇所数は異なるが、7構造物の調査箇所数の合計は43であり、各箇所では、外側および内側鉄筋の2本に対し、表5-2に示す項目を調査した。以下に、各項目の測定方法を示す。

表 5-2 調査項目

| 調査内容 | 測定項目 | 測定方法 |
|------------|-----------------------|---------------------------|
| はつり調査 | 鉄筋の断面減少率, かぶり, 腐食グレード | ノギスによる測定 (精度0.01mm) または目視 |
| 塩化物イオン量 | 鉄筋位置の塩化物イオン濃度 | コア採取 (φ50mm) JCI-SC4 |
| 鉄筋の腐食速度 | 分極抵抗 | 二重対極センサーによる交流インピーダンス法 |
| コンクリートの飽水率 | 飽水率 | コア採取 (φ100mm) JCI-DD5 |

(a) 鉄筋の断面減少率

鉄筋の断面減少率は、内側鉄筋の裏側までをはつた後、鉄筋のふしでない部分、いわゆる「谷」をノギスにて測定し、「谷」における最小の直径とそれに直交方向の直径の平均値を実測径として、式(5-1)により算出した。

$$A_{red} = (A - A_0) / A_0 \times 100 \quad (5-1)$$

ここに、 A_{red} : 鉄筋の断面減少率 (%), A : 実測径から計算した鉄筋の断面積 (mm^2), A_0 : 基準鉄筋径から計算した鉄筋の断面積 (mm^2) を表す。なお、基準鉄筋径 (腐食が生じていない健全な鉄筋径) は、後述の腐食グレード I と健全であった鉄筋の実測径の平均値を用いた。

(b) 鉄筋のかぶり

鉄筋のかぶりはノギスにより、コンクリート表面から鉄筋のふしに相当する距離を測定した。

(c) 鉄筋の腐食グレード

腐食グレードは、表 5-3 に基づき目視にて判定した。

表 5-3 腐食グレードの判定基準²⁶⁾

| 腐食グレード | 鋼材の状態 |
|--------|------------------------------------------------------------|
| I | 黒皮の状態, またはさびは生じているが全体的に薄い緻密なさびであり, コンクリート面にさびが付着していることはない。 |
| II | 部分的に浮きさびがあるが, 小面積の斑点状である。 |
| III | 断面欠損は目視観察では認められないが, 鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。 |
| IV | 断面欠損が生じている。 |

(d) 塩化物イオン量

塩化物イオン量は、コア (φ 50mm×L150mm) を採取し、表面から 2cm ごとにスライスして、スライスした各試料中に含まれる全塩化物イオン量を JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法 (硝酸銀滴定法)」²⁷⁾ に準じて測定した。

(e) 鉄筋の腐食速度

鉄筋の腐食速度は、鉄筋の分極抵抗 (二重対極センサーを用いた交流インピーダンス法) を測定し、その分極抵抗から算出した値とした。

(f) コンクリートの飽水率

コンクリート中の飽水率は φ 100mm×L100mm のコアを採取し、JCI-DD5「酸素の拡散係数試験方法 (案)」²⁷⁾ に準拠して測定した。なお、飽水率は式(5-2)により求めた。

$$H = (W - W_d) / (W_s - W_d) \times 100 \quad (5-2)$$

ここに、 H : 飽水率 (%), W : コア採取時の試料の重量 (kg), W_d : 105°C で一定重量まで炉乾燥させた後の試料の絶乾重量 (kg), W_s : 48 時間吸水させた後の試料の飽和重量 (kg) を表す。

(3) 調査結果

(a) 鉄筋の断面減少率，鉄筋位置の全塩化物イオン濃度，腐食グレードとかぶりの関係

図 5-1 に、鉄筋の断面減少率とかぶりの関係を示す。なお図中では、構造物ごとに調査時点における供用年数が異なるため、経過年数 33～36 年のグループと 26 年のグループに区別した。この図によると、かぶりは 50～190mm の範囲に幅広く分布しているが、これはかぶりの異なる外側と内側鉄筋の結果を同じグラフに示したことで、また設計かぶり（外側鉄筋で 100mm）に対して全体的に大きめに配筋されていたことによるとと思われる。また、かぶりが 70mm 以下の 3 箇所において、鉄筋の断面減少率が大きいものが確認された（図中、○△□で示したものがそれに該当し、図 5-2～5-5 においても、これら 3 点に相当するものを明示した）。

図 5-2 に、鉄筋位置の全塩化物イオン濃度とかぶりの関係を示す。これによると、鉄筋位置の塩化物イオン濃度はかぶりが小さくなるほど大きくなる傾向が見られた。また、経過年数 33～36 年のものは 26 年のものに比べて、同じかぶりであっても塩化物イオン濃度が大きくなっており、経過年数の増加にしたがって塩化物イオンの浸透が進行している様子が伺えた。

図 5-3 に、鉄筋の腐食グレードとかぶりの関係を示す。これによれば、鉄筋の断面欠損が生じたグレードⅣが、かぶり 50～100mm の範囲で 6 本確認された。なお、図 5-1 では断面減少が生じていたものが 3 本であったのに対し、目視による腐食グレードⅣが 6 本となった理由は、ノギスでは測定できなかった局所的な腐食が目視により確認されたものも図 5-3 に含まれているためである。また、かぶり 80mm 以上と大きかった箇所でも、浮きさび程度のグレードⅡ，Ⅲが確認された。ドルフィンコンクリートは海水面付近での施工となるため、鉄筋組立、型枠設置の時点にて軽微なさびが発生し、その状態でコンクリートが打ち込まれた可能性が考えられる。これを勘案すると、港湾 RC 構造物中の鉄筋の腐食グレードを評価する上では、グレードⅡ，Ⅲの腐食が塩害によるものかの見極めが難しいものと考えられる。

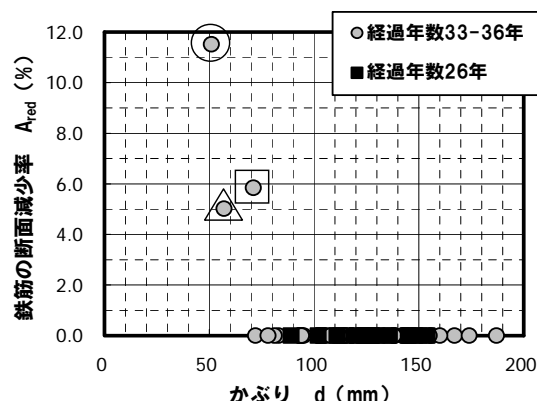


図 5-1 鉄筋の断面減少率とかぶりの関係

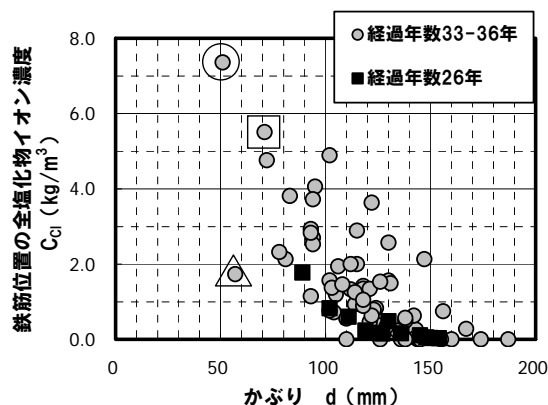


図 5-2 鉄筋位置の全塩化物イオン濃度とかぶりの関係

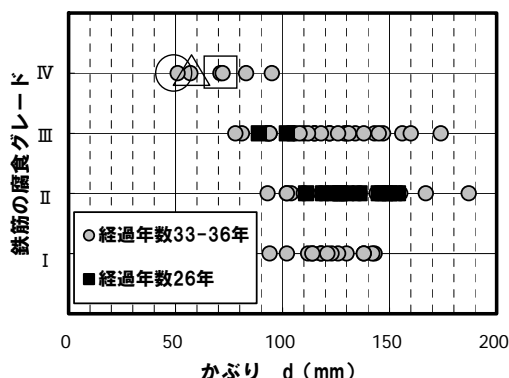


図 5-3 鉄筋の腐食グレードとかぶりの関係

(b) 鉄筋の断面減少率，腐食速度と鉄筋位置の塩化物イオン濃度の関係

図 5-4 に，鉄筋の断面減少率と鉄筋位置の全塩化物イオン濃度の関係を示す。この結果によると，鉄筋の断面減少率の大きかった 3 本における鉄筋位置の全塩化物イオン濃度は約 2.0kg/m^3 以上であった。

図 5-5 に，鉄筋の腐食速度と鉄筋位置の全塩化物イオン濃度の関係を示す。同図には，CEB による腐食速度の判定基準²⁸⁾も付記した。この結果によると，鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 2.0kg/m^3 より大きくなると，腐食速度が大きくなり，「低～中程度の腐食速度」に相当するものが見られた。これと図 5-4 の結果と照合すると，調査ドルフィンでの腐食発生限界塩化物イオン濃度は概ね 2.0kg/m^3 程度と考えられ，港湾の施設の技術上の基準・同解説¹³⁾の推奨値と一致する結果となった。

なお，鉄筋の断面減少率の大きかった 3 本の鉄筋の腐食速度が小さく計測されているが，これは著しい腐食により鉄筋周辺にひび割れ等が発生し，その影響で分極抵抗が正しく測定できなかったためと考えられる。

(c) コンクリートの飽水率

飽水率は，酸素の移動し易さやそれに伴う腐食速度に関する定性的な評価に利用できる。例えば，解析的に検討された事例によると，飽水率が 80%以上となると腐食開始からひび割れ発生までの時間が急激に大きくなり，腐食速度が大幅に小さくなるとされている²⁹⁾。

今回の調査ドルフィンにおける鉄筋位置付近のコンクリート中の飽水率は 75～90%であり，これと先の知見を照合すると，調査ドルフィンでのコンクリート中の鉄筋は著しい腐食環境ではなかったと考えられる。このことは，図 5-4 にて示したように， 2.0kg/m^3 を上回る塩化物イオン濃度が鉄筋に達していても，断面減少が見られないものが多数あった事実を裏付けていると考えられる。

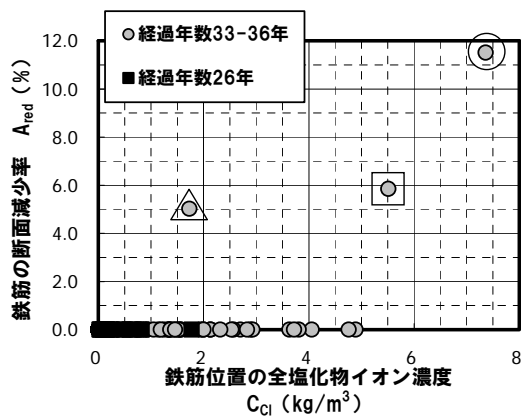


図 5-4 鉄筋の断面減少率と鉄筋位置の全塩化物イオン濃度の関係

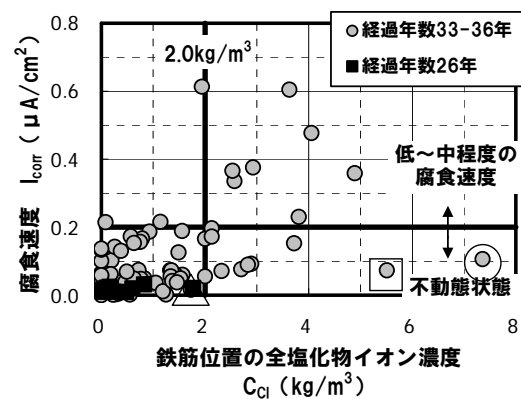


図 5-5 鉄筋の腐食速度と鉄筋位置の全塩化物イオン濃度の関係

(d) 実構造物調査から得られた知見

建設後 26 年以上経過したドルフィンでのコンクリートの調査結果によれば，図 5-4 では鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 2.0kg/m^3 付近 (Δ 印) で断面減少を伴うものが見られ， 5.0kg/m^3 以上の鉄筋 (\circ ， \square 印) では断面減少率が著しく大きかった。また，図 5-5 では鉄筋位置の塩化物イオン濃度 $2.0\sim 4.0\text{kg/m}^3$ の範囲では「不動態状態」と「低～中程度の腐食速度」が混在し， 4.0kg/m^3 以上で全て「低～中程度の腐食速度」に分布していた。

このことから，コンクリート中の飽水率が 75～90%程度の場合は，鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は 2.0kg/m^3 付近に存在し， 4.0kg/m^3 を上回ると著しい腐食が進行していることがわかった。

5.3 室内試験

(1) 試験概要

一般に、塩害劣化による鉄筋の腐食速度は、塩化物イオン濃度、かぶり、鉄筋径、配合、温度、湿度など様々な要因に支配されることが指摘されている。また、腐食発生限界塩化物イオン濃度についても、鉄筋の腐食速度と同様、上記の要因の影響が複雑に関与していることが考えられる。

そこで本節では、2章で述べた塩害劣化予測に必要な腐食発生限界塩化物イオン濃度の設定方法および鉄筋の平均的な腐食速度式の確立を目的に実施した室内試験の結果を示す。なお、本検討では、ひび割れ開始初期はマイクロセル腐食が卓越するものと考え、マイクロセル腐食速度から腐食発生限界塩化物イオン濃度や腐食速度の不確定性を議論することとした。

(a) 試験体概要

本検討では、図5-6に示すように、長さ10cmの異形鉄筋を所定のかぶり位置に3本ずつ配置し、鉄筋の両端部に測定用のステンレス端子を取り付けたコンクリート試験体を用いた。また、コンクリート配合を表5-4に示すが、表5-5に示す所定量の塩化物イオンがコンクリート中に混入されるように、塩化ナトリウムを十分に溶解させた練混ぜ水を用いてコンクリートを製造した。

表 5-4 コンクリート配合

| セメント種類 | W/C(%) | 単位量(kg/m ³) | | | | |
|--------|--------|-------------------------|-----|-----|------|------|
| | | W | C | S | G | Ad |
| BB | 55 | 164 | 294 | 788 | 1056 | 2.94 |
| | 45 | 173 | 406 | 734 | 1053 | 3.53 |
| N | 55 | 164 | 294 | 792 | 1061 | 2.94 |

※BB：高炉セメントB種（スラグ混入率40～45%）密度3.04g/cm³

※N：普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm³

※AE減水剤標準形I種を使用

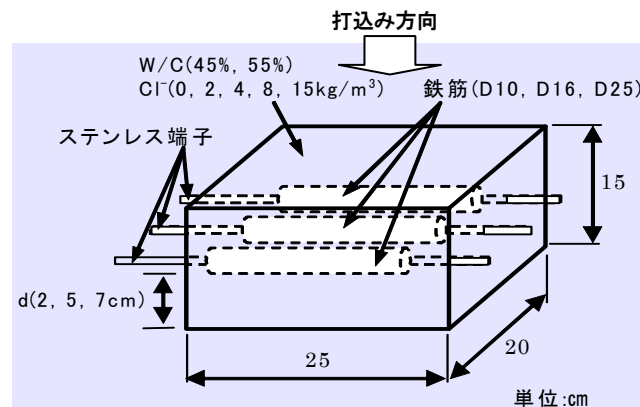


図 5-6 供試体概要

(b) 検討ケース

検討ケースを表5-5に示す。なお前節で述べた調査ドルフィンの使用セメントが不明であったため、室内試験では高炉セメントB種（以下、BBと称する）と普通ポルトランドセメント（以下、Nと称する）を使用したケースについて検討した。

BBを用いたケースでは、BB-2（W/C=55%、D16、d=5cm、環境温度20℃・相対湿度80%一定）を基本ケースとして、BB-1、3ではかぶり（d=2, 7cm）、BB-4、5では鉄筋径（D10, D25）、BB-6では水セメント比（W/C=45%）を変化させた。なお、BB-1～6は温度20℃、相対湿度80%の環境に曝露し、打設3ヵ月後及び約1年後に測定を行った。また、BB-7-1～BB-7-5では環境温度、相対湿度の影響を

検討するため、温度 20℃、相対湿度 80%の環境で 28 日間養生した後、所定の温度、湿度を設定した環境試験器内に供試体をそれぞれ 2 週間ずつ曝露してから測定を行った。一方、N を用いたケースでは BB と同様、N-2 (W/C=55%, D16, d=5cm, 環境温度 20℃・相対湿度 80%一定) を基本ケースとして他のケースを設定した。また、N-1～5 は温度 20℃、相対湿度 80%の環境に曝露し、打設 3 ヶ月後に測定を行った。

表 5-5 検討ケース

| ケース名 | W/C (%) | 鉄筋径 | かぶり (cm) | 曝露環境 | 塩化物イオン濃度 (kg/m ³) | 供試体の数 ^{注)} | 鉄筋数 |
|--------|---------|-----|----------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----|
| BB-1 | 55 | D16 | 2 | 20℃ 80%RH 一定 | 各ケースに対して 0, 2, 4, 8, 15 の 5 種類 | 15 | 45 |
| BB-2 | 55 | D16 | 5 | | | 15 | 45 |
| BB-3 | 55 | D16 | 7 | | | 15 | 45 |
| BB-4 | 55 | D10 | 5 | | | 15 | 45 |
| BB-5 | 55 | D25 | 5 | | | 15 | 45 |
| BB-6 | 45 | D16 | 5 | | | 3 | 9 |
| BB-7-1 | 55 | D16 | 2 | ① 10, 20, 30℃の 3 種類 (95%RH 一定) ② 95, 80, 60, 40%RH の 4 種類 (20□一定) | 各ケースに対して 2, 4, 8 の 3 種類 | 3 | 9 |
| BB-7-2 | 55 | D16 | 5 | | | 3 | 9 |
| BB-7-3 | 55 | D16 | 7 | | | 3 | 9 |
| BB-7-4 | 55 | D10 | 5 | | | 3 | 9 |
| BB-7-5 | 55 | D25 | 5 | | | 3 | 9 |
| N-1 | 55 | D16 | 2 | 20℃ 80%RH 一定 | 各ケースに対して 0.0, 1.0, 2.4, 4.8, 7.2 の 5 種類 ※N-2 のみ上記に 2.0, 4.0, 8.0 の 3 種類を追加 | 5 | 15 |
| N-2 | 55 | D16 | 5 | | | 8 | 24 |
| N-3 | 55 | D16 | 7 | | | 5 | 15 |
| N-4 | 55 | D10 | 5 | | | 5 | 15 |
| N-5 | 55 | D25 | 5 | | | 5 | 15 |

注) BB-1～5 : 塩化物イオン濃度の 5 種類×各 3 体
 BB-6, 7-1～7-5 : 塩化物イオン濃度の 3 種類×各 1 体
 N-1, N-3～N-5 : 塩化物イオン濃度の 5 種類×各 1 体
 N-2 : 塩化物イオン濃度の 8 種類×各 1 体

(c) 計測項目

BB, N を使用したケースとも、試験体製作から 3 ヶ月後、約 1 年後に鉄筋の自然電位および腐食速度を測定した。なお、鉄筋の自然電位は硫酸銅照合電極を用いて測定し、腐食速度は式(5-3)に示す交流インピーダンス法による分極抵抗から求めた腐食速度を測定した。

$$I_{corr} = \frac{0.026(V)}{R_p} \quad (5-3)$$

ここに、 I_{corr} : 鉄筋の腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p : 分極抵抗 ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)。

また、BB を使用したケースでは試験体製作から 2 年後に鉄筋を取り出して鉄筋の腐食面積率、腐食減量を測定し、N を使用したケースでは 1 年後に鉄筋の腐食面積率、腐食減量を測定した。鉄筋の腐食面積率および腐食減量は「JCI-SC1 コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」²⁷⁾ に準じて測定した。なお、BB と N を使用したケースで鉄筋を取り出した材齢が異なるため、式(5-4)に示す腐食速度 (JCI-SC1 では腐食度と定義されているが、本稿では腐食速度と称する) を算出し、BB と N の腐食速度の相違を考察した。

$$I = \frac{W_0 - W}{A \times t} \quad (5-4)$$

ここに、 I : 鉄筋の腐食速度 ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$), W_0 : 試験前の鉄筋の質量 (mg), W : 腐食生成物除去後の鉄筋の質量 (mg), A : 鉄筋の表面積 (cm^2), t : コンクリート打込み後からの試験年数を表す。

(2) 全塩化物イオン濃度と腐食速度の関係式の提案

(a) 非破壊（交流インピーダンス法）により測定された腐食速度

図 5-7 に、全塩化物イオン濃度と交流インピーダンス法により測定された腐食速度の関係を示す。なお、図中(a)に示すように、横軸をセメント質量に対する全塩化物イオン濃度として表記したところ、BB-2 (W/C=55%), BB-6 (W/C=45%) における腐食速度はほぼ同一直線上プロットされたので、本図では全て横軸をセメント質量表記の全塩化物イオン濃度として整理した。

この結果、各々の鉄筋の腐食速度は全塩化物イオン濃度が大きくなるほどばらつきが大きくなる傾向が見られるが、同じ塩化物イオン濃度における腐食速度の平均値を結ぶと、全ケースにおいて両者は直線関係にあることが確認された。また、 C_{Cl} が腐食限界塩化物イオン濃度に相当する 0.5~1.2% (本実験では 1.5~4.0kg/m³ に相当) 以上を境に I_{corr} が増加し始める結果となった。

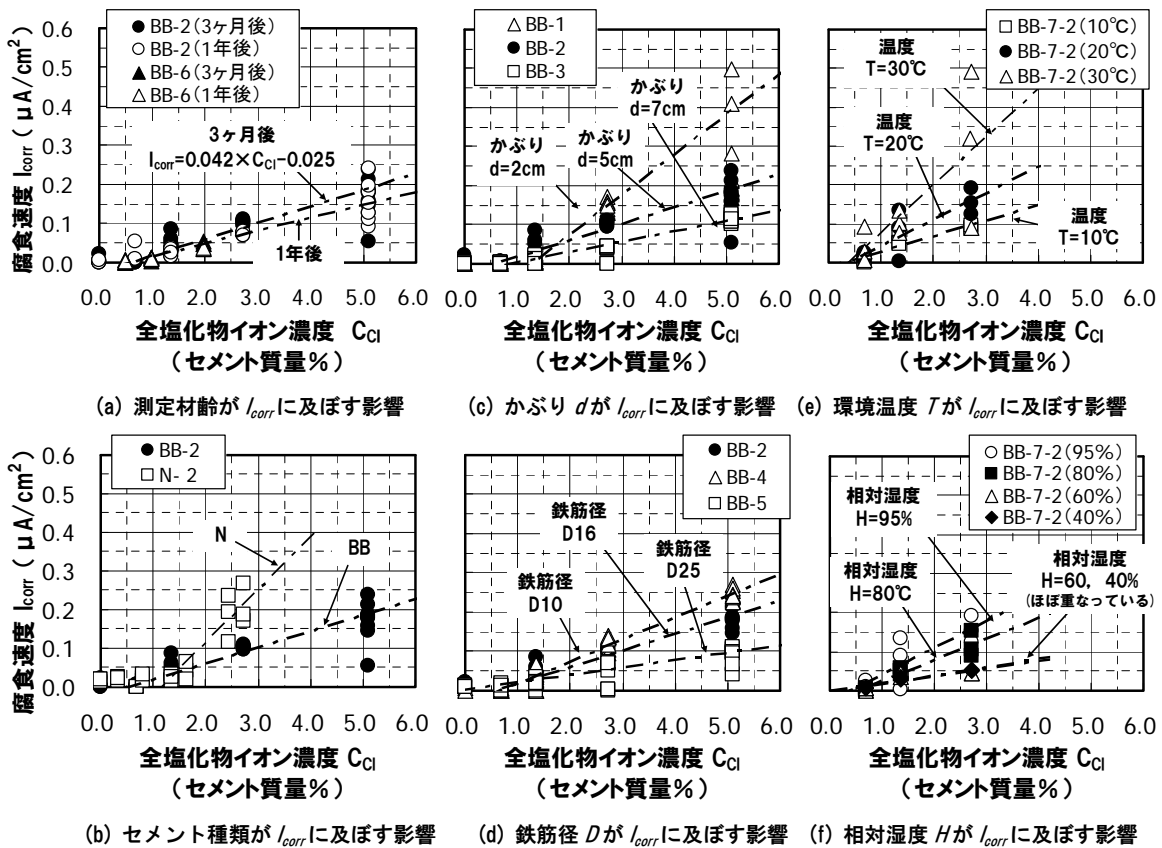


図 5-7 全塩化物イオン濃度と交流インピーダンス法により測定した腐食速度の関係

(b) 非破壊（交流インピーダンス法）により測定された腐食速度

図 5-8 に、所定の曝露終了後に取り出した鉄筋の腐食減量から求めた腐食速度と全塩化物イオン濃度の関係を示す。

これによれば、腐食速度の平均値は全塩化物イオン濃度の増加に伴って大きくなる傾向が確認されたが、今回の試験では BB, N のケースとも、かぶりは腐食速度の平均値にさほど影響しない結果であった。また、BB のケースでは全塩化物イオン濃度が 1.4% (4.0kg/m³), N では 0.7% (2.0kg/m³) の辺りから腐食速度が大きくなり、ばらつきも大きくなる傾向が見られた。

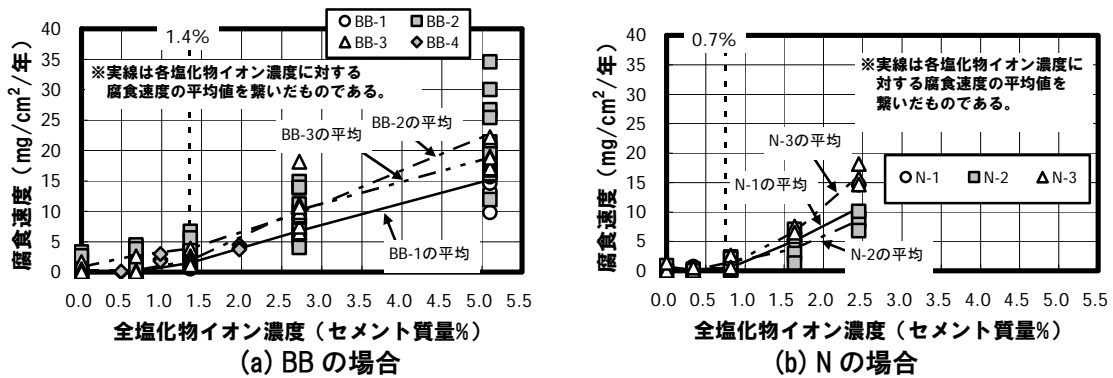


図 5-8 全塩化物イオン濃度と腐食減量から算出した腐食速度の関係

(c) 非破壊（交流インピーダンス法）により測定された腐食速度

(a), (b) の結果から、平均的な腐食速度 I_{corr} は概ね式(5-5)にて表現できそうである。

以降では、この式に基づいて、腐食発生限界塩化物イオン濃度および腐食速度式に関する考察を進めることとする。

$$I_{corr} = a \cdot (C_{Cl} - C_{Lim}) \quad (5-5)$$

ここに、 I_{corr} : 平均的な腐食速度 ($\mu A/cm^2$), C_{Cl} : 鉄筋位置での全塩化物イオン濃度 (セメント質量%), C_{lim} : 腐食発生限界塩化物イオン濃度 (セメント質量%), a : $(C_{Cl} - C_{lim})$ と I_{corr} の直線勾配を表す。

(3) 腐食発生限界塩化物イオン濃度の不確定性に関する検討（腐食発生確率図の提案）

(a) 鉄筋の腐食面積率と全塩化物イオン濃度の関係

図 5-9 に、定の曝露終了後に取り出した鉄筋の腐食面積率と全塩化物イオン濃度の関係を示す。これによると、BB, N のケースとも、セメント質量に対する全塩化物イオン濃度が 0.7% ($2.0kg/m^3$) より大きくなると腐食面積率が増加する傾向が見られた。

写真 5-1 に、BB-2 の全塩化物イオン濃度 $4.0kg/m^3$ および $8.0kg/m^3$ の鉄筋の腐食状況を示す。これによれば、全塩化物イオン濃度 1.3% ($4.0kg/m^3$) の場合、打込み方向に対して鉄筋下側にのみ腐食が見られたが、2.7% ($8.0kg/m^3$) 以上の場合では鉄筋全周に腐食が見られた。浮島らは、ブリーディングにより生成される水平鉄筋周りの境界層の厚さが鉄筋腐食に影響することを示唆している³⁰。これを勘案すると、今回の結果には、塩化物イオン濃度とブリーディングによる複合的な影響が含まれていると考えることができる。

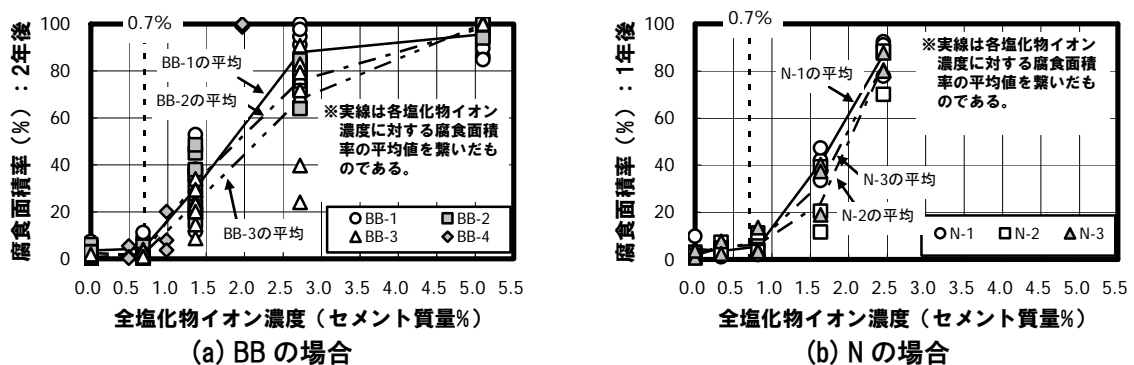


図 5-9 腐食面積率と全塩化物イオン濃度の関係



(a) 全塩化物イオン濃度 1.4%(4.0kg/m³)

(b) 全塩化物イオン濃度 2.7%(8.0kg/m³)

写真 5-1 鉄筋の腐食状況例 (BB-2: 写真上は図-6 における打設面を表す)

(b) 自然電位と腐食速度の関係

図 5-10 に、測定した全ケースのデータを用いて、鉄筋の自然電位と交流インピーダンス法から求めた腐食速度の関係を BB と N に分けて整理した。この結果、今回の室内試験では、BB, N とも自然電位と腐食速度の関係は自然電位が-200mV (vs CSE) より貴であると腐食速度はほぼ 0 となっており、それより卑になると腐食速度が増加している傾向が読める。このことから、本検討では腐食が開始するときの自然電位は-200mV (vs CSE) と設定できそうである。

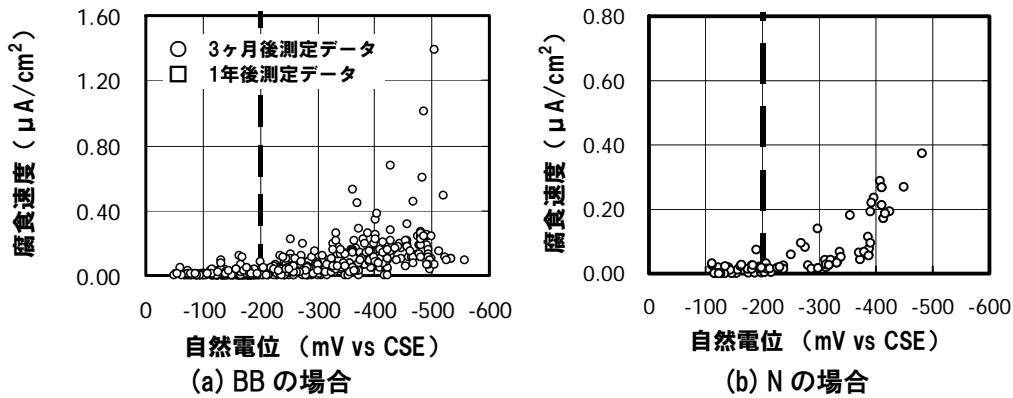


図 5-10 自然電位と腐食速度の関係

(c) 腐食発生限界塩化物イオン濃度の不確定性に関する考察

鉄筋の自然電位を縦軸に、全塩化物イオン濃度を横軸にプロットした結果を図 5-11 に示す。これによると、BB, N のケースとも、全塩化物イオン濃度が 0.7% (2.0kg/m³) 以上になって自然電位が卑な方向にシフトしており、この結果からも鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は 2.0kg/m³ 付近と推測される。

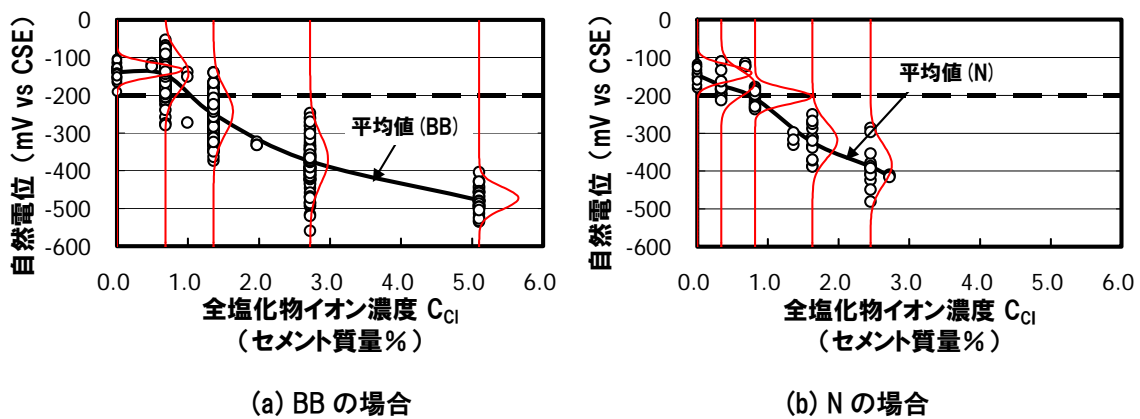


図 5-11 自然電位と全塩化物イオン濃度の関係

次に、(b)の結果を受けて、鉄筋腐食が開始すると思われた自然電位-200mV (vs CSE) より卑な鉄筋の出現確率を算出するために、各塩化物イオン濃度に対する測定値のばらつきを正規分布と仮定したときの確率密度曲線を計算した。なお、使用した確率密度曲線は母集団の平均値が t 分布、標準偏差が

χ^2 分布に従うとし、信頼度を各々50%として推定した。この分布を用いて、自然電位-200mV (vs CSE) を下回る確率を計算した結果が図 5-12 になる。

BB の腐食発生確率図によると、全塩化物イオン濃度が 0.4% (一般的な港湾構造物の W/C=55%, C=300kg/m³に換算すると 1.2kg/m³) のときに腐食発生確率が上昇し始め、腐食発生確率が 50%となるのは 1.0% (3.0kg/m³) となった。

一方、N では、全塩化物イオン濃度 0.4% (1.2kg/m³) で腐食発生確率が 20%, 0.7% (2.1kg/m³) で 50%となり、N を用いたコンクリートは、BB を用いたコンクリートより少ない塩化物イオン濃度で腐食発生確率が高まることが表されている。

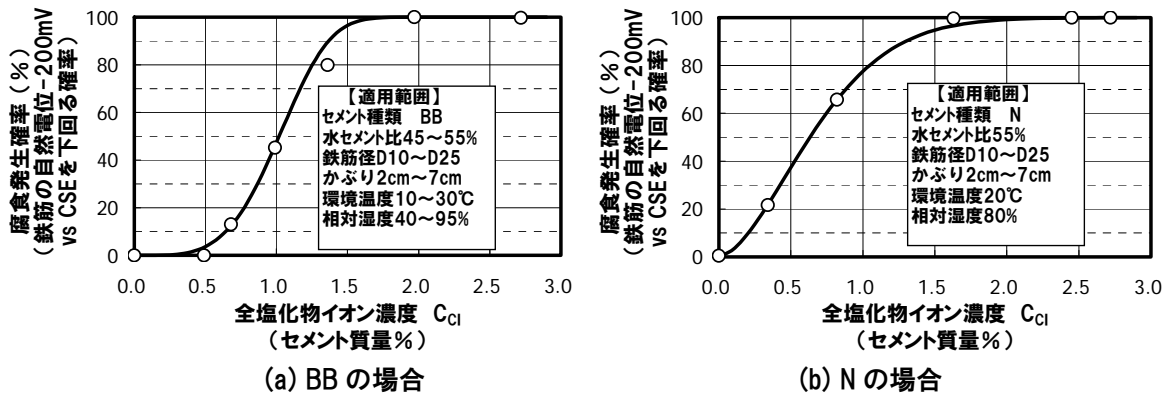


図 5-12 全塩化物イオン濃度と腐食発生確率の関係

N と BB の腐食確率図の違いは、横軸を全塩化物イオン濃度で整理したことによると考えられ、BB におけるスラグ混入による塩化物イオンの固定化の影響が見られているものと考えられる。

そこで、塩化物イオンの固定化の違いを比較するために、鉄筋を取り出した後のコンクリートを用いてフリーデル氏塩の生成量を比較した (図 5-13 参照)。なお、フリーデル氏塩は全塩化物イオン濃度と同じ試料に内部標準物質として α -Al₂O₃ を質量比で 10%添加し、XRD 内部標準法により分析した。検討に用いた回折ピークはフリーデル氏塩で $2\theta=11.3^\circ$, α -Al₂O₃ で $2\theta=52.5^\circ$ である²⁴⁾。

この結果を見ると、BB のほうが N よりもフリーデル氏塩の生成量が多いことがわかり、図 5-12 に示した BB と N の場合の腐食発生確率図に違いが見られた理由として妥当な結果になっていると思われる。また、図 5-13 では、BB、N とともに全塩化物イオン濃度が 0.7%以上になると、全塩化物イオン濃度が大きくなってもフリーデル氏塩の生成量が増加する傾向は見られず、BB ではピーク強度比 0.8 程度、N では 0.55 程度で頭打ちされている状況も見られる。図 5-12 では、腐食発生確率が 50%となる全塩化物イオン濃度が BB では 1.0%、N では 0.7%であったことと、BB に対する N におけるフリーデル氏塩のピーク強度比が $0.55 / 0.85 = 0.69$ であったことを勘案すると、図 5-12 の腐食発生確率図はある程度の信頼性を有した結果になっているものと思われる。

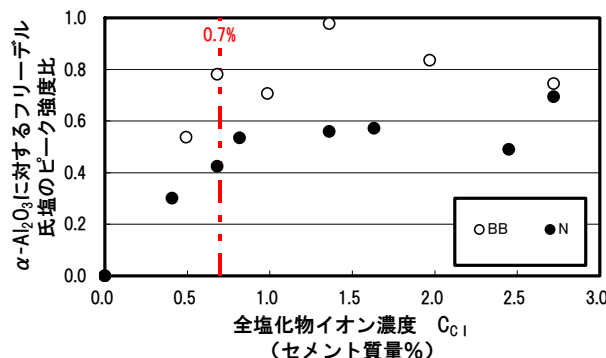


図 5-13 BB と N におけるフリーデル氏塩の生成量の比較

(4) 鉄筋の腐食速度式構築に向けた検討

(a) 種々の条件が腐食速度式の勾配 a に及ぼす影響に関する分析

鉄筋径 $D16$ ，環境温度 $T=20^\circ\text{C}$ ，相対湿度 $H=80\%$ の条件を固定したときの，各セメント種類に対するかぶり d と勾配 a の関係を図 5-14 に示す。

この結果によると，かぶり d と勾配 a の間には式(5-6)に示す関係が見られ，環境温度 T ，相対湿度 H ，鉄筋径 D が同じであれば，かぶり d の違いによらず，N と BB の傾き a の比率（式(5-6)中では A_1 の両者の比）は約 2.75（ $=0.434 / 0.158$ ）であった。

次に，かぶり $d=5\text{cm}$ ，環境温度 $T=20^\circ\text{C}$ ，相対湿度 $H=80\%$ の条件を固定したときの，各セメントにおける鉄筋径 D と勾配 a の関係を図 5-15 に示す。この結果，鉄筋径 D と勾配 a には式(5-7)に示す関係があり，本実験の範囲では，環境温度 T ，相対湿度 H ，かぶり d を固定条件としたときは，鉄筋径 D の違いによらず N と BB の傾き a の比率（式(5-7)中の A_2 の比）は約 3.5（ $=0.384 / 0.110$ ）であった。

$$a = A_1 \times e^{-0.236d} \quad (5-6)$$

$$a = A_2 \times e^{-0.065D} \quad (5-7)$$

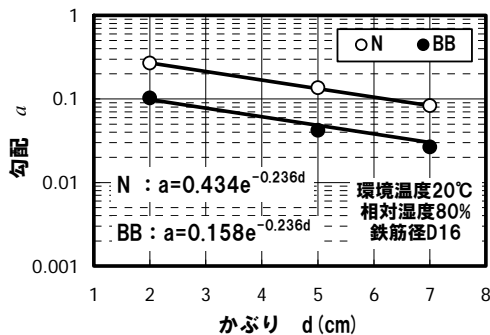


図 5-14 かぶり d と勾配 a の関係

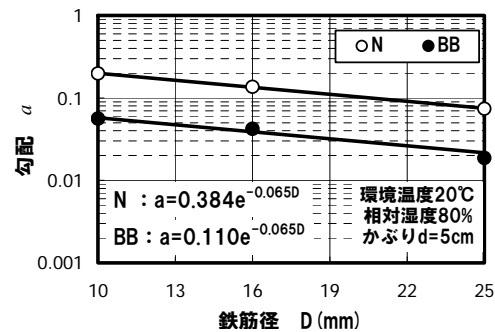


図 5-15 鉄筋径 D と勾配 a の関係

以上のことから，環境条件（環境温度や環境湿度など）が同等である場合，セメント種類の違いのみを考慮する方法としては，BB と N の式(5-14)および式(5-15)中の係数 A_1 ， A_2 の比によって評価できるものと考えられた。

図 5-16 に，鉄筋径 $D16$ ，環境温度 $T=20^\circ\text{C}$ ，BB 使用の条件を固定したときの，各かぶり d に対する相対湿度 H と勾配 a の関係を示す。この結果によると，相対湿度 H が大きくなるほど勾配 a は大きくなるが，相対湿度 60% と 40% では勾配 a の値はほぼ同じになった。これは鉄筋腐食が酸素と水の供給量に影響するため，相対湿度 60% 以下の状態で既にカソード反応に必要な水分が不足していた可能性が考えられる（ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ のコンクリート供試体を同環境下で曝露し飽水率を測定した結果，相対湿度 60% のときで 50%，相対湿度 40% で 35% であった）。

一方，かぶり $d=5\text{cm}$ ，環境温度 $T=20^\circ\text{C}$ ，BB 使用の条件を固定したときの，各鉄筋径 D に対する相対湿度 H と勾配 a の関係を見ると，図 5-16 と同様の傾向が確認された。

以上から，環境温度 T ，セメント種類 BB が固定条件の場合，相対湿度 H と勾配 a の関係は係数 A_3 を用いて式(5-8)のように表現できることが分かった。

$$a = A_3 \times e^{-0.031H} \quad \text{ただし, } H \geq 60\% \quad (5-8)$$

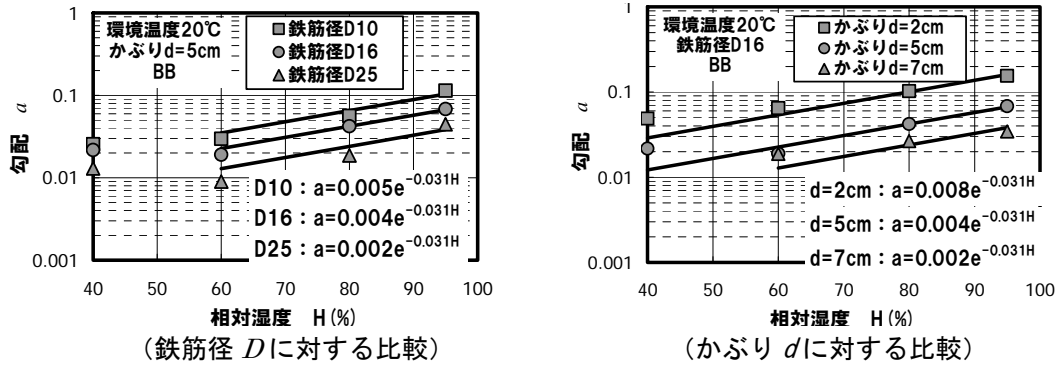


図 5-16 相対湿度 H と勾配 a の関係

図 5-17 に、かぶり $d=5\text{cm}$ 、相対湿度 $H=95\%$ 、BB 使用の条件を固定したときの、各鉄筋径 D に対する環境温度 T と勾配 a の関係を示す。この結果によれば、式(5-9)に示すように、かぶり d 、環境温度 T 、BB 使用が固定条件のときの勾配 a は鉄筋径 D に影響する係数 A_4 を用いて環境温度 T に対する指数関数として近似できた。

一方、図 5-18 に、鉄筋径 D16、相対湿度 $H=95\%$ 、BB 使用の条件を固定したときの、環境温度 T を変化させたときのかぶり d と勾配 a の関係を示す。かぶり $d=2\text{cm}$ 、 5cm においては、勾配 a を環境温度 T に対する指数関数として近似できたが、かぶり $d=7\text{cm}$ においては環境温度 T が変化しても勾配 a は影響を受けず、環境温度 T が勾配 a に及ぼす影響の程度はかぶり d に依存することが分かった。

なお本実験では、環境試験器内の温度設定を行って約 30 分～1 時間後には設定温度を維持できていたこと、コンクリートの熱拡散を考慮してもかぶり $d=7\text{cm}$ であれば、曝露 2 週間で鉄筋周囲のコンクリート温度は外部温度に平衡していたと考えられる。環境温度 T の影響については再検討の必要があるが、かぶりが大きく外気からの酸素や水分供給が少ない状態で温度変化を受けると、カソード反応に何らかの影響が現れる可能性が考えられた。

$$a = A_4 \times e^{0.056T} \quad (5-9)$$

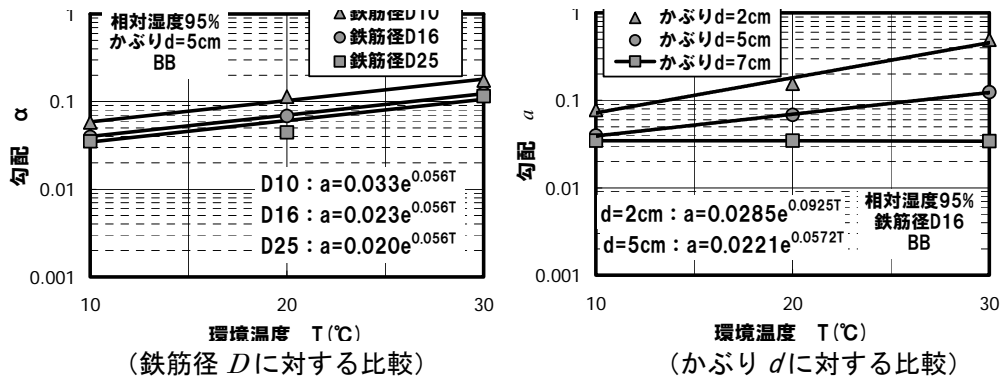


図 5-17 環境温度 T と勾配 a の関係

(b) 種々の条件を考慮した腐食速度式の構築 (案)

(a)における検討結果を総括すると、本実験の範囲では種々の条件を考慮した平均的なマイクロセル腐食速度式は式(5-10)のように表現できる。ただし、上述したように環境温度 T の考慮方法については本式では考慮できていないため、今後、環境温度 T の考慮方法について検討していく必要がある。

$$a = e^{-0.236d - 0.065D + 0.031H - 0.26} \times K \times a_0 \quad (5-10)$$

ここに、 D ：鉄筋径(mm)， d ：かぶり(cm)， H ：相対湿度(%)， κ ：セメント種類の補正係数 (N と BB の傾き a の比率 3.1 (2.75 と 3.5 の平均値))， a_0 ：腐食速度の基準勾配 (鉄筋径 $D16$ ，かぶり $d=5\text{cm}$ ，環境温度 $T=20^\circ\text{C}$ ，相対湿度 $H=80\%$ ， $a_0 (=0.042)$) を表す。

(c) 腐食速度の不確定性に関する考察

かぶり，鉄筋径，水セメント比，塩化物イオン濃度，環境温度の全ての条件が同一である鉄筋に分類して，それらの中での腐食速度の平均値と標準偏差，変動係数の関係を図 5-18 に整理した。

まず，腐食速度の平均値と標準偏差との関係を見ると，腐食速度の平均値が大きいほど標準偏差は大きくなるのが分かる。一方，変動係数との関係を見ると，変動係数は腐食速度の平均値と相関はなさそうであり，変動係数を大きく見積もっても 2 程度，平均的な変動係数は概ね 0.5～1.0 程度に多く分布していた。ただし，この結果は条件が十分に管理された室内実験によるものであり，実際の構造物における腐食速度の変動係数はこれよりも大きいことが予想される。今後，腐食速度の変動係数については詳細に検討する必要があると考えられる。

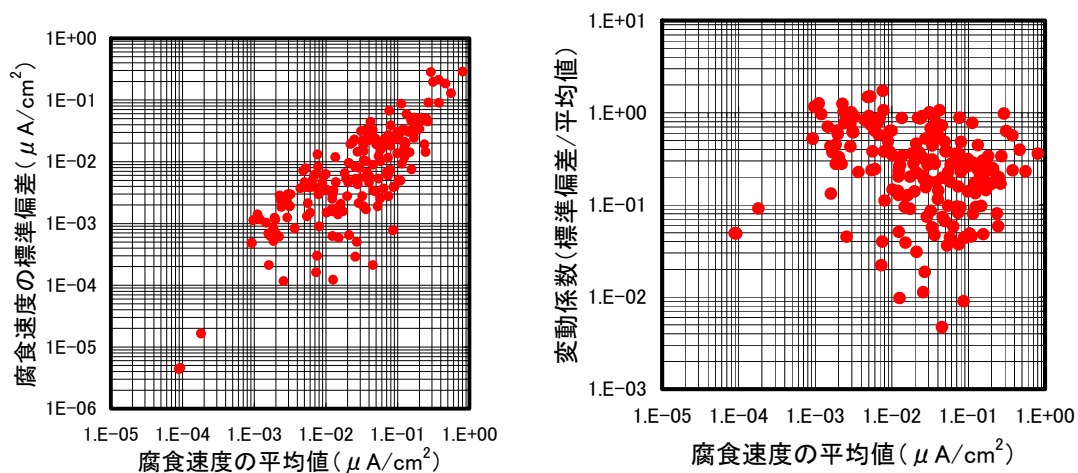


図 5-18 腐食速度の平均値と標準偏差，変動係数の関係

5.4 シリーズ 2 における結果のまとめ

【腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する結果】

- (1) 建設後 26 年以上経過したドルフィンのコンクリートの調査結果から，鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ 付近に存在することがわかった。
- (2) 塩化物イオン濃度，かぶり，水セメント比，セメント種類を変えた鉄筋コンクリート試験体による室内試験によっても，鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ 程度であること，全塩化物イオン濃度が $4.0\text{kg}/\text{m}^3$ を超えると鉄筋の腐食速度が急激に大きくなることを確認した。
- (3) 室内試験におけるコンクリート中の鉄筋の自然電位の測定結果から，高炉セメント B 種および普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート中の鉄筋の腐食発生確率図を提案した。

【鉄筋の腐食速度に関する結果】

- (4) 高炉セメント B 種を使用し，鉄筋径 $D16$ ，かぶり $d=5\text{cm}$ ，環境温度 $T=20^\circ\text{C}$ ，相対湿度 $H=80\%$ の条件における全塩化物イオン濃度と腐食速度の関係式から，種々の条件を考慮できる平均的なマイクロセル腐食速度式を提案した。ただし，環境温度に対する補正については，今後検討する余地が残されている。

- (5) 本実験の範囲では、腐食速度の測定値の標準偏差は腐食速度の平均値に比例して大きくなり、変動係数としては概ね 0.5～1.0 の範囲にあることが分かった。ただし、実際の構造物における腐食速度の変動係数はこれよりも大きいことが予想されるため、今後実構造物または実環境に曝露した試験体によって腐食速度の不確定性に関する情報を収集・整理していく必要がある。

6. 本研究における成果のまとめ

本研究では、シリーズ1：棧橋上部工内の空間的な腐食環境と、シリーズ2：腐食発生限界塩化物イオン濃度および腐食発生前の鉄筋の腐食速度に関する実験を行い、次の成果が得られた。

【棧橋上部工内の空間的な腐食環境に関する成果】

横須賀市の棧橋上部工下の空間を利用して、空間的な位置の違いが塩化物イオンの浸透状況及びフリーデル氏塩の生成状況に及ぼす影響を検討した。

その結果、棧橋上部工下に進入する波の碎波や背面護岸からの跳ね返り、海底地盤の形状の影響によって各部位への海水飛沫の程度の違いにより、飛沫帯及び干満帯 H.W.L.付近では、着船側、護岸側の部位にて表面塩化物イオン濃度が大きくなることがわかった。また、M.W.L.付近の干満帯にあるコンクリートでは、他の環境に比べて塩化物イオンの見かけの拡散係数が大きくなることもわかった。さらに、イオンの浸透程度の違いにより、干満帯では飛沫帯・海上大気中より、フリーデル氏塩の生成量が若干多くなる状況が確認された。

【腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する成果】

建設後 26 年以上経過したドルフィンのコンクリートの調査結果、塩化物イオン濃度、かぶり、水セメント比、セメント種類を変えた鉄筋コンクリート試験体による室内試験から、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は 2.0kg/m^3 付近に存在し、全塩化物イオン濃度が 4.0kg/m^3 を超えると鉄筋の腐食速度が大きくなることを確認した。また、室内試験における自然電位の測定結果から、高炉セメント B 種および普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート中の鉄筋の腐食発生確率図を提案した。

【鉄筋の腐食速度に関する成果】

高炉セメント B 種使用、鉄筋径 D16、かぶり $d=5\text{cm}$ 、環境温度 $T=20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $H=80\%$ の条件における全塩化物イオン濃度と腐食速度の関係式を基本として、種々の条件を考慮できる平均的なマイクロセル腐食速度式を構築した。ただし、環境温度に対する補正については、今後検討の余地が残されている。

また、本実験の範囲では、腐食速度の測定値の標準偏差は腐食速度の平均値に比例して大きくなり、変動係数としては概ね 0.5～1.0 の範囲にあることが分かった。ただし、実際の構造物における腐食速度の変動係数はこれよりも大きいことが予想されるため、今後実構造物または実環境に曝露した試験体によって腐食速度の不確定性を整理していく必要があると考えられた。

【参考文献】

- 1) 福手勤，濱田秀則，大即信明：棧橋コンクリート上部工の劣化実体に関する詳細調査，セメント技術大会講演集，vol.43，pp.644-649，1989
- 2) 小牟禮建一，濱田秀則，横田弘，山路徹：塩害を受ける棧橋上部工のマルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測に基づく LCC 算定に関する考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，2004
- 3) (財)東京港埠頭公社：土木施設維持管理マニュアル，2004.6

- 4) 横田弘, 山内浩, 加藤絵乃, 岩波光保: 既設栈橋のライフサイクルシナリオに関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1114, 2005.12
- 5) (財) 沿岸技術研究センター: 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, 2008.10
- 6) 小牟禮建一, 濱田秀則, 横田弘, 山路徹: RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, 港湾空港技術研究所報告, 第41巻, 第1号, pp.13-22, 2004
- 7) 網野貴彦, 羽瀨貴士, 川島仁, 守分敦郎: 塩害劣化を受けた実栈橋の劣化推移と各種要因の不確定性を考慮した劣化予測との比較検討, 日本材料学会・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, pp.253-258, 2005.10
- 8) 網野貴彦・川島仁・羽瀨貴士: 栈橋上部工の塩害劣化要因の不確定性を考慮した劣化進行予測および将来価値評価システムの開発, 電力土木技術協会, 電力土木, No.338, pp. - , 2008.11
- 9) 網野貴彦, 守分敦郎, 羽瀨貴士, 一野武史: 栈橋上部工の塩害劣化予測から将来的な施設の価値評価を行う方法に関する一検討, 日本コンクリート工学協会, コンクリート構造物のアセットマネジメントに関するシンポジウム論文集, pp.327-322, 2006.12
- 10) 守分敦郎, 長滝重義, 大即信明, 関博, 福手勤: 塩害を受けた栈橋に対する表面処理工法の設計法に関する検討, 土木学会論文集, No.534, VI-30, pp.109-123, 1996.3
- 11) (社) 土木学会: 2007年制定 コンクリート標準示方書 設計編, p.119, 2007.12
- 12) (財) 東京港埠頭公社: 栈橋劣化調査・補修マニュアル, p.32, 2004.6
- 13) (社) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, p.489, 2007.7
- 14) (財) 土木研究センター: 建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発(土木構造物に関する研究成果), p.67, 1989.5
- 15) 森永繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学学位論文, 1986
- 16) 仁杉ら: 鉄道土木構造物の耐久性, 山海堂, 2002.7
- 17) 西田孝弘, 大即信明, Melito A. Baccay: 鋼材腐食による鉄筋コンクリートの劣化の温度依存性に関するアレニウス則に基づく検討, 材料と環境 2006 講演概要集, pp. 363-366, 2006.05
- 18) 守分敦郎: 鉄筋コンクリート栈橋上部工の塩害に対する耐久性評価と維持管理に関する研究, 東亜建設工業(株) 技術研究所材料・構造研究室論文集, 第4集(その2), 1996.5
- 19) 堤知明ら: 塩害劣化に関する影響要因の実データに基づく定量評価, 土木学会論文集, No.544/V-32, pp.33-41, 1996.8
- 20) 横関康祐ら: 腐食ひび割れ発生期間に関する解析的検討, 第49回年次学術講演会, 第V部, V-276, pp.552-553, 1994.9
- 21) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, pp.7-12, 1998.10
- 22) 網野貴彦・羽瀨貴士・守分敦郎: 構造条件や波浪条件の違いが栈橋上部工内の空間的な腐食環境に及ぼす影響, 日本材料学会, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第7巻, pp.225-230, 2007.11
- 23) Takahiko Amino, Nobuaki Otsuki, Atsurou Moriwake, Takashi Habuchi: THE INFLUENCE OF DIFFERENCE OF STRUCTURAL AND WAVE CONDITIONS ON SPATIAL CORROSION ENVIRONMENT IN THE SUPERSTRUCTURE OF A JETTY, 33rd Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, Singapore, August 25-27, 2008, pp.115-120
- 24) 石田哲也ほか: ポルトランドセメント及び混和材を使用したモルタルの塩素固定化特性, 土木学会論文集, Vol.63 No.1, pp.14-26, 2007
- 25) 佐藤道生ほか: 海洋コンクリート構造物中を移動する各種イオンの挙動解析とモデル化の提案, コンクリート構造物の長期長性能照査支援モデルに関するシンポジウム, pp.293-300, 2004.10
- 26) (財) 国土開発技術研究センター建築物耐久性向上技術普及委員会: 建築物の耐久性向上技術リーズ 建築構造編 I 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術, 技報堂出版, p.43, 1986.6
- 27) (社) 日本コンクリート工学協会: JCI 規準集(1977~2002年度), 2004.4
- 28) (社) コンクリート工学協会: コンクリート診断技術'07 [基礎編], p.167, 2007.1
- 29) 関博ほか: コンクリート中鉄筋における腐食速度の解析に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.381-386, 1987
- 30) 浮島文香, 大即信明, 西田孝弘, 宋ヨウ: RC 部材中の塩化物イオンと水平鉄筋周りの境界層がコンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす影響, 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, 第6巻, pp.294-304, 2006.10

(以上)