

論文 ドルフィンコンクリートにおける鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食進行に与える影響に関する一検討

網野 貴彦^{*1}・大即 信明^{*2}・斎藤 豪^{*3}・羽瀧 貴士^{*4}

要旨: 本稿では、港湾RC構造物の塩害劣化の実態把握を目的として、供用 26 年以上経過したドルフィンコンクリートにて調査を行い、かぶりや鉄筋位置の塩化物イオン濃度が鉄筋腐食に及ぼす影響を分析した。また室内試験として、塩化物イオン濃度、かぶり、水セメント比、セメントの種類を変えた鉄筋コンクリート試験体を作製し、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度と腐食速度について検討した。その結果、ドルフィンコンクリートにおける鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は概ね 2.0kg/m³程度であり、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 4.0kg/m³を超えると、かぶりの大小によらず腐食速度が大きくなることがわかった。

キーワード: ドルフィン、塩害、腐食発生限界塩化物イオン濃度、腐食速度、かぶり

1. はじめに

厳しい海洋環境下に曝される港湾RC構造物は塩害劣化の進行が速いため、供用早期からの予防保全対策の実施が重要視されている。しかし、実構造物での劣化進行の速さは部位ごとに多種多様であるため、効果的な対策工法の割当てや適切な実施時期の設定を難しいとされている。そこで、2008 年には「港湾の施設の維持管理技術マニュアル¹⁾」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、さらには適切な対策の実施時期に対する考え方が示された。

一方、塩害に関しては多くの研究が進められており、鉄筋腐食に関わる主要因として、鉄筋位置での塩化物イオン濃度、かぶり、配合などが考えられている^{2), 3)}。また、近年では構造物を環境的な要因(温度など)も主要因として指摘されている⁴⁾。

そこで本稿では、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。また、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、鉄筋の自然電位を測定し、約 1 または 2 年後に鉄筋をはつり出し、腐食面積率、腐食減量を測定した結果を示す。

2. 実構造物の塩害劣化調査

2.1 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-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。

2.2 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

表-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

*1 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (東京工業大学 理工学研究科 博士課程 2 年) 修(工) (正会員)

*2 東京工業大学 理工学研究科 国際開発工学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 東京工業大学 理工学研究科 国際開発工学専攻 助教 博(工) (正会員)

*4 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループリーダー 博(工) (正会員)

表-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

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-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。

(1) 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(1)により算出した。

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

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。

(2) 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。

(3) 鉄筋の腐食グレード

腐食グレードは、表-3⁵⁾に基づき目視にて判定した。

(4) 塩化物イオン量

塩化物イオン量は、コア (φ50mm×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)」⁶⁾ に準じて測定した。

(5) 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。

(6) コンクリートの飽水率

コンクリート中の飽水率は φ100mm×L100mm のコアを採取し、JCI-DD5「酸素の拡散係数試験方法 (案)」⁶⁾ に準拠して測定した。なお、飽水率は式(2) により求めた。

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

表-3 腐食グレードの判定基準⁵⁾

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。

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。

2.3 調査結果

(1) 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-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、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-2~5 においても、これら 3 点に相当するものを明示した)。

図-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

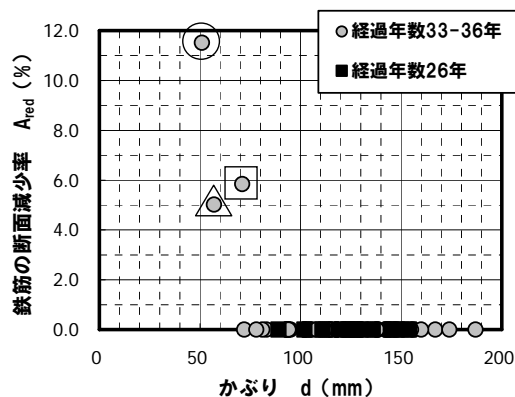


図-1 鉄筋の断面減少率とかぶりの関係

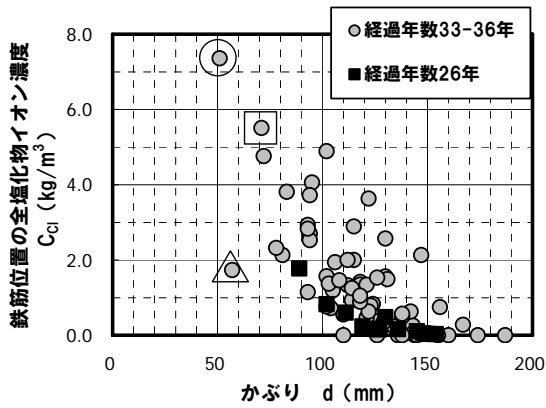


図-2 鉄筋位置の全塩化物イオン濃度とかぶりの関係

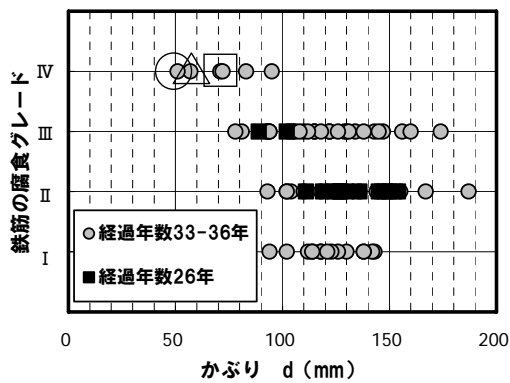


図-3 鉄筋の腐食グレードとかぶりの関係

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-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-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-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。

(2) 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-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

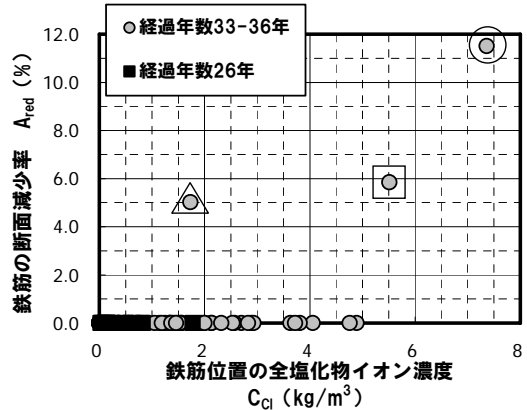


図-4 鉄筋の断面減少率と鉄筋位置の全塩化物イオン濃度の関係

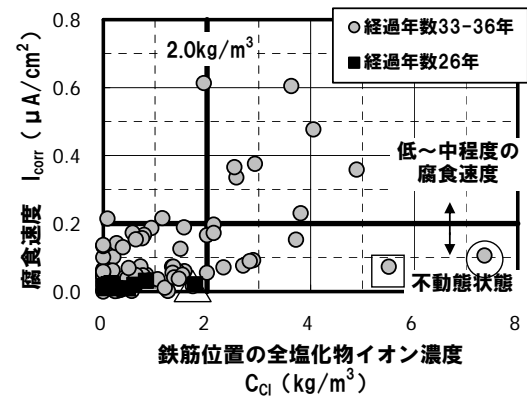


図-5 鉄筋の腐食速度と鉄筋位置の全塩化物イオン濃度の関係

オン濃度は約 2.0kg/m³以上であった。

図-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⁷⁾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/m³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-4の結果と照合すると、調査ドルフィンの腐食発生限界塩化物イオン濃度は概ね 2.0kg/m³程度と考えられ、港湾の施設の技術上の基準・同解説⁸⁾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。

(3) 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⁹⁾。

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-4にて示したように、2.0kg/m³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。

3. 室内試験

3.1 試験概要

本章では、2章の調査における使用セメント等の情報が不明であったため、腐食発生限界塩化物イオン濃度や腐食速度に関する調査結果の検証を目的として実施した室内試験の結果について述べる。

(1) 試験体概要

本検討では、図-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-4に示すが、表-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。

(2) 検討ケース

検討ケースを表-5に示す。なお、2章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)を基本として、BB-1, 3ではかぶり(d=2, 7cm)を、BB-4

表-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

では水セメント比(W/C=45%)を変化させた。一方、Nを用いたケースではW/C=55%, D16の条件を固定して、かぶり(d=2, 5, 7cm)を変化させた。また、試験体は全て温度20°C, 相対湿度80%の環境に曝露した。なお、φ10×20cmのコンクリート供試体を同環境下で曝露して飽水率を測定したところ、飽水率は70%であった。

(3) 計測項目

BBを使用したケースでは、鉄筋の自然電位を試験体製作から3ヵ月後、約1年後、約2年後に測定し、2年後に鉄筋を取り出して鉄筋の腐食面積率、腐食減量を測定した。また、Nを使用したケースでは、自然電位を3ヵ月後、約1年後に測定し、1年後に鉄筋の腐食面積率、腐食減量を測定した。

また、鉄筋の自然電位は硫酸銅照合電極を用いて測定し、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」⁶⁾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(3)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。

$$I = \frac{W_0 - W}{A \times t} \quad (3)$$

ここに、I: 鉄筋の腐食速度 (mg/cm²/年), W₀: 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 (cm²), t: コンクリート打込み後からの試験年数を表す。

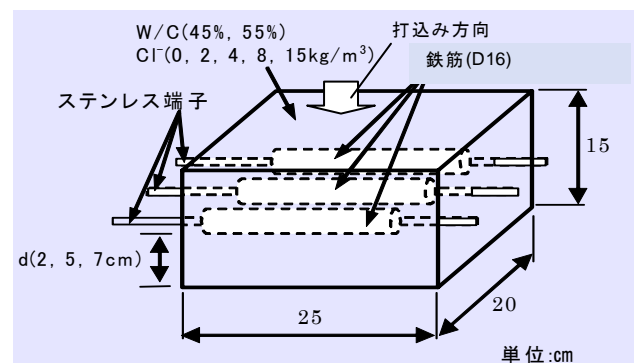


図-6 供試体概要

表-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°C 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			5			15	45
BB-3			7			15	45
BB-4	45		5		2, 4, 8の3種類	3	9
N-1	55		2		各ケースに対して 0.0, 1.0, 2.4, 4.8, 7.2 の5種類	5	15
N-2			5			5	15
N-3		7	5			15	

注) BB-1~3: 塩化物イオン濃度の5種類×各3体, BB-4: 塩化物イオン濃度の3種類×各1体

N-1~3: 塩化物イオン濃度の5種類×各1体

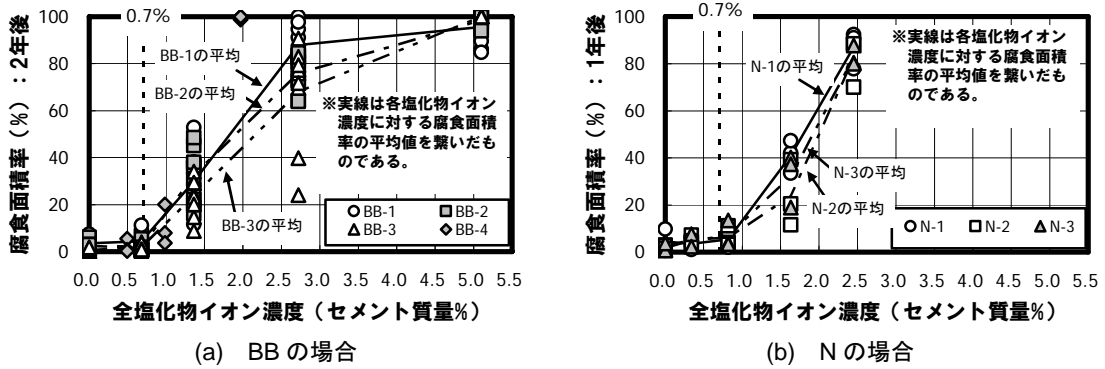


図-7 腐食面積率と全塩化物イオン濃度の関係



(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-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)

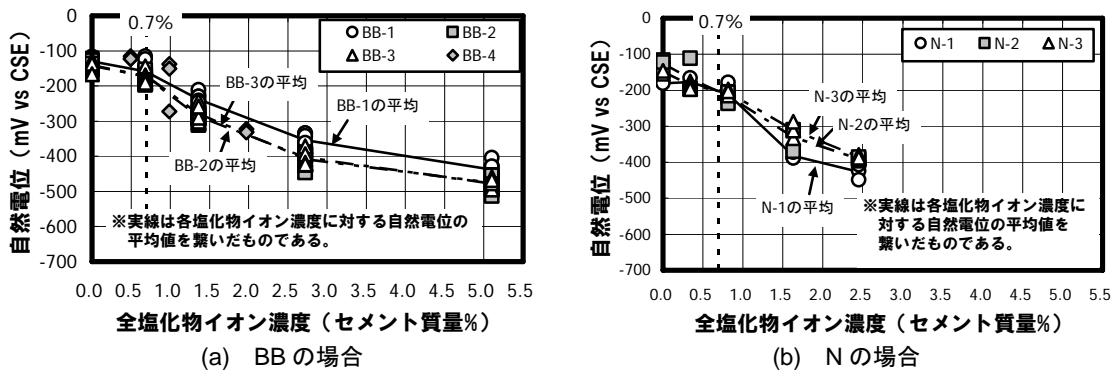


図-8 自然電位と全塩化物イオン濃度の関係 (3 カ月後の測定結果)

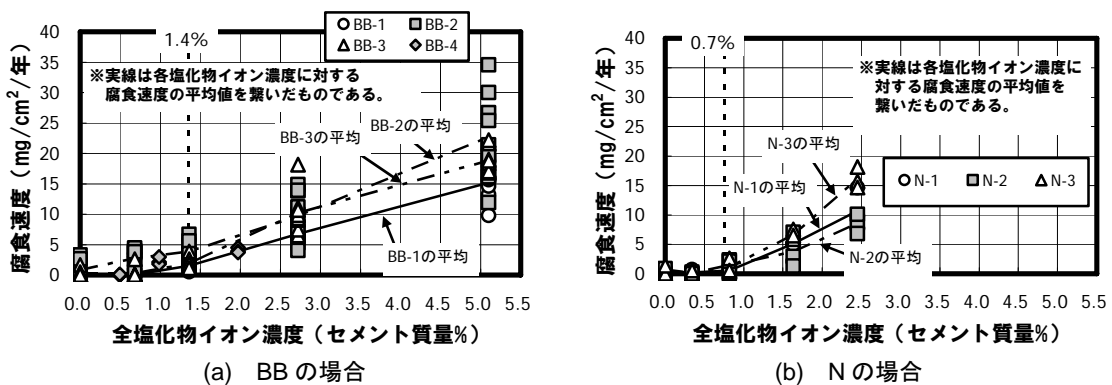


図-9 腐食速度と全塩化物イオン濃度の関係

3.2 試験結果

(1) 腐食面積率と全塩化物イオン濃度の関係

図-7 に、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/m³) 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-1 に、BB-2 の全塩化物イオン濃度 4.0kg/m³ および 8.0kg/m³ 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/m³) の場合、打込み方向に対して鉄筋下側のみ腐食が見られたが、2.7% (8.0kg/m³) 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¹⁰⁾。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ものと考えられる。

(2) 自然電位と全塩化物イオン濃度の関係

図-8 に、3 ヶ月後の鉄筋の自然電位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、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、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は2.0kg/m³付近であったことが推測される。

(3) 腐食速度と全塩化物イオン濃度の関係

図-9 に、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。

4. 実構造物の調査と室内試験の結果に基づく考察

本章では、実構造物の調査と室内試験の結果を比較し、腐食発生限界塩化物イオン濃度や鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食速度に及ぼす影響に関して考察する。

まず図-4 では、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が2.0kg/m³付近(△印)で断面減少を伴うものが見られ、5.0kg/m³以上の鉄筋(○, □印)では断面減少率が著しく大きかった。これは、図-7 に示した室内試験において、腐食面積率が塩化物イオン濃度0.7% (2.0kg/m³) から急激に大きくなった結果と一致していた。

一方、図-5 では鉄筋位置の塩化物イオン濃度2.0~4.0kg/m³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/m³以上で全て「低~中程度の腐食速度」に分布していた。これは、図-9 にて、Nで塩化物イオン濃度2.0kg/m³以上、BBで4.0kg/m³以上から腐食速度が大きくなった結果とほぼ一致していた。

なお、調査ドルフィンのコングリート中の飽水率は75~90%、室内試験では70%であり、室内試験のほうが腐食は進行しやすい環境と考えられたが、今回の結果の範囲では、上記のとおり、飽水率の多少の違いは鉄筋の腐食開始やその進行に影響する塩化物イオン濃度の値にさほど影響していなかったようである。このことから、比較的飽水率が大きいと考えられる港湾RC構造物の維持管理においては、表面保護工や電気化学的補修工法などの早期対策の実施により鉄筋位置の塩化物イオン濃度を2.0~4.0kg/m³程度以下に抑制することで、著しい腐

食進行を避けられる可能性があるものと考えられる。

5. まとめ

本検討において得られた知見を以下に示す。

- (1) 建設後26年以上経過したドルフィンのコングリートの調査結果によれば、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は2.0kg/m³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グ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2.0kg/m³程度であること、全塩化物イオン濃度が4.0kg/m³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。
- (3) 既設のドルフィンのコングリートを長期供用する場合、著しい塩害劣化の予防として、供用期間内の鉄筋位置の塩化物イオン濃度を4.0kg/m³程度以下に抑制する早期対策の実施が重要であると考えられた。

参考文献

- 1) (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
- 2) 森永繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コング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
- 3) 仁杉ら：鉄道土木構造物の耐久性，山海堂，2002.7
- 4) 西田孝弘，大即信明，Melito A. Baccay：鋼材腐食による鉄筋コング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
- 5) (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シリーズ建築構造編Ⅰ 鉄筋コングリート造建築物の耐久性向上技術，技報堂出版，p.43，1986.6
- 6) (社)日本コングリート工学協会：JCI 規準集 (1977~2002年度)，2004.4
- 7) (社)コングリート工学協会：コングリート診断技術'07 [基礎編]，p.167，2007.1
- 8) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.488，2008.7
- 9) 関博ほか：コングリート中鉄筋における腐食速度の解析に関する一考察，コングリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，pp.381-386，1987
- 10) 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グリート中鉄筋の腐食に及ぼす影響，コング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