

論文 種々の条件を変化させたコンクリート中の鉄筋の腐食速度及び腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する検討

網野 貴彦^{*1}・羽瀧 貴士^{*2}・守分 敦郎^{*3}

要旨：コンクリート中の鉄筋腐食は鉄筋位置での塩化物イオン濃度、かぶり、鉄筋径、環境温度、相対湿度（コンクリート中の飽水率）、配合、セメント種類など様々な要因に影響する。そのため、塩害劣化に対する将来予測には、現地条件を考慮できる実用的な鉄筋腐食速度式の構築や腐食発生限界塩化物イオン濃度の設定方法の考え方が重要になる。本稿では、上記の条件を変えた複数のコンクリート供試体を作製し、鉄筋の自然電位、腐食速度を測定した。また、各種条件が腐食速度に及ぼす影響を考察し、さらに全塩化物イオン濃度と鉄筋の腐食発生確率について検討した。

キーワード：腐食速度、腐食発生限界塩化物イオン濃度、腐食発生確率、塩害、劣化予測

1. はじめに

一般に、塩害劣化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^{1), 2)}。しかし、これらの式には環境条件（温度や湿度）が考慮されておらず、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³⁾。

一方、塩害劣化の潜伏期における予測手法は既に確立され、各機関の指針^{4), 5), 6)}にその具体が示されている。しかし、腐食発生限界塩化物イオン濃度の推奨値は機関ごとに異なり^{1), 2), 3)}、鉄筋の腐食速度と同様、上記の要因の影響と、実構造物におけるコンクリート品質、かぶりの施工誤差、立地環境などの不確実性が重なって、それらの評価を難しくさせている。

それに対し、近年の維持管理に対するニーズは高まっており、筆者らはこれまでに栈橋上部工の塩害劣化を対象とした各種劣化要因の不確実性を考慮した劣化予測手法の開発を進めてきた⁷⁾。この予測手法の詳細は割愛するが、本手法においては腐食発生限界塩化物イオン濃度の設定方法や進展期以降の腐食速度式の選定が課題として残されていた。

そこで、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及び鉄筋の平均的な腐食速度式の確立を目的として、塩化物イオン濃度、かぶり、鉄筋径、配合、セメント種類を変えた鉄筋コンクリート供試体を複数体作製し、温度や湿度条件を変えた環境に曝露し、鉄筋の自然電位や腐食速度を測定した。本稿では、その結果に基づき、各種条件が鉄筋の腐食速度に及ぼす

影響や全塩化物イオン濃度に対する鉄筋の腐食発生確率について検討した結果を述べる。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本検討では、図-1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供試体を用いた。コンクリート配合を表-1に示す。なお、本検討では所定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打設した。

表-1 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

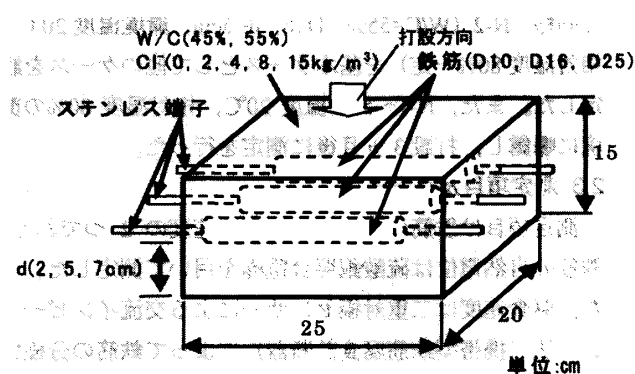


図-1 供試体概要

*1 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 修（工）（正会員）

*2 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 博（工）（正会員）

*3 東亜建設工業（株） 土木本部エンジニアリング事業部 シビルリニューアル事業室 博（工）（正会員）

表-2 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	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-7-1	55	D16	2			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

2.2 検討ケース

検討ケースを表-2 に示す。高炉セメント B 種(以下, BB と称する)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 ヶ月後及び約 1 年後に測定を行った。また, BB-7-1～BB-7-5 の供試体では環境温度, 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, 普通ポルトランドセメント(以下, N と称する)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。

2.3 測定項目及び方法

測定項目は鉄筋の自然電位と腐食速度の 2 つである。鉄筋の自然電位は硫酸銅照合電極を用いて測定した。また, 腐食速度は二重対極センサーによる交流インピーダンス法(携帯型鉄筋腐食診断器)によって鉄筋の分極抵抗を測定し, その分極抵抗から腐食速度を算出した。

3. 全塩化物イオン濃度と腐食速度の関係

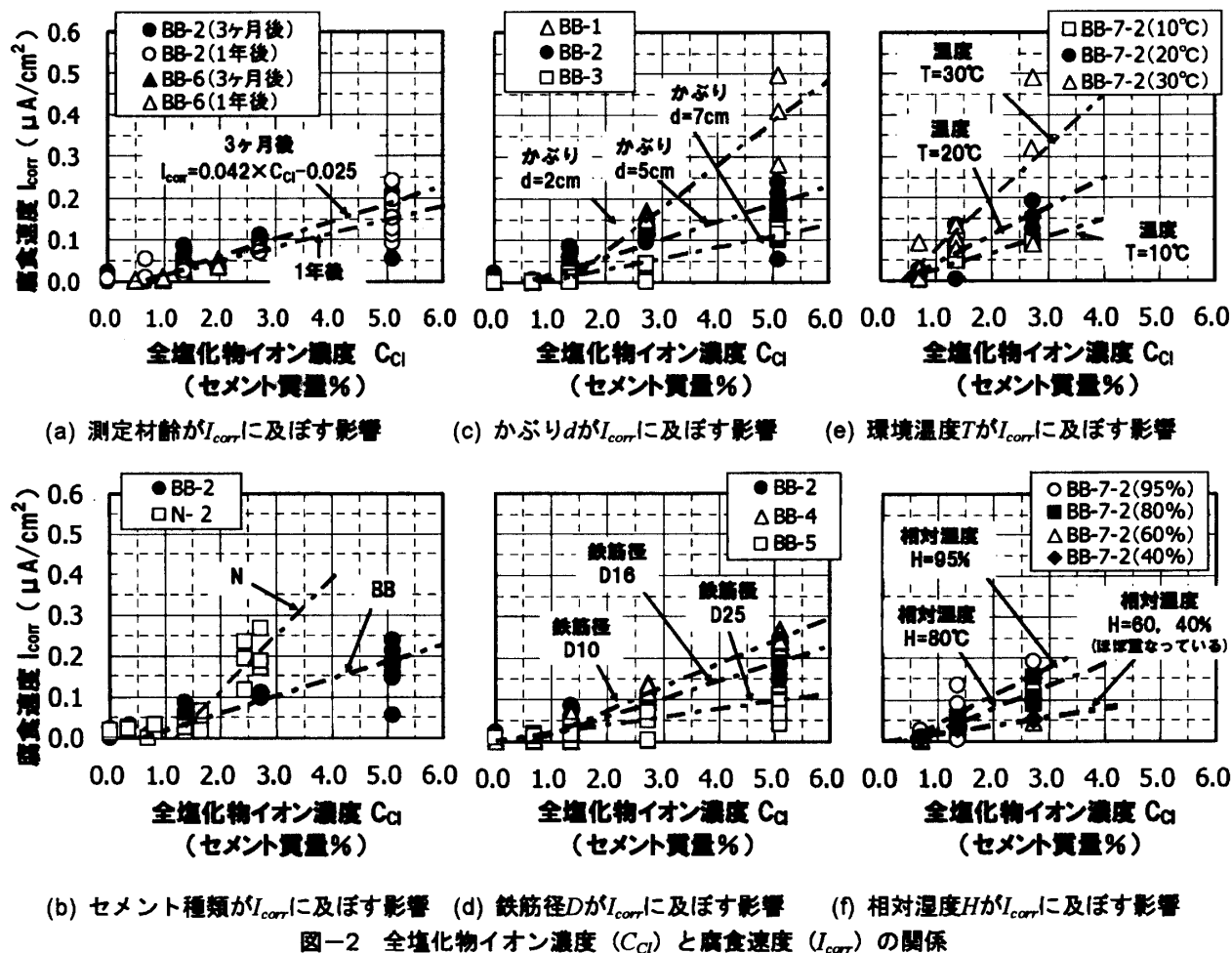
図-2 に全塩化物イオン濃度と腐食速度の関係を示す。なお, 図中(a)に示すように, 横軸をセメント質量に対す

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。そこで本検討では, 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。

まず, 図中(a)～(f)を見ると, 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(以下, C_{Cl} と称する)における腐食速度の平均値(以下, I_{corr} と称する)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(以下, C_{lim} と称する)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が得られた。そこで本検討では, 平均的な腐食速度 I_{corr} を式(1)にて表現することとした。ここに,

$$I_{corr} = a \cdot (C_{Cl} - C_{lim}) \quad (1)$$

次に, 図-2(a)における測定材齢の影響を見ると, 材齢 1 年後に測定した勾配 a は材齢 3 ヶ月後に測定したものより若干小さくなった。しかし, 各鉄筋の測定値のばらつきから判断すると, 3 ヶ月後と 1 年後によって, 勾配 a はほとんど変化していないものと考えられる。ただし, 今後さらに長期材齢となったときの勾配 a の変化については検討する必要があるものと思われる。



続いて、図-2(b)の結果を見ると、BB より N の方が勾配 a は大きくなり、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。

最後に、図-2(c)~(f)の結果については、かぶり、鉄筋径が小さいほど、環境温度、相対湿度が大きいほど腐食速度が大きくなり、既往の研究成果^{1), 2), 3)}と同様、これらの要因が腐食速度に影響することが分かった。

4. 種々の条件が腐食速度に及ぼす影響

4.1 かぶり、径、セメント種類が勾配 a に及ぼす影響

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、各セメントにおけるかぶり d と勾配 a の関係を図-3に整理した。この結果を見ると、かぶり d と勾配 a の間には式(2)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(2)中では A_1 の両者の比）は約2.75 ($=0.434/0.158$)であった。

$$a = A_1 \times e^{-0.236d} \quad (2)$$

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-4に示す。この結果、鉄筋径 D と勾

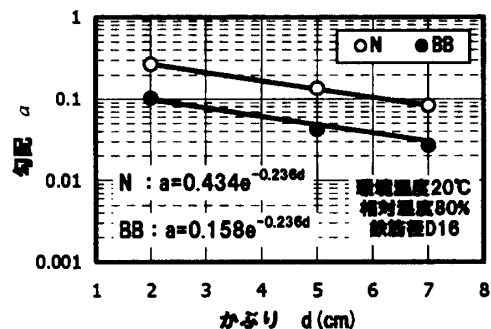


図-3 かぶり d と勾配 a の関係
 (セメント種類BBとNの比較)

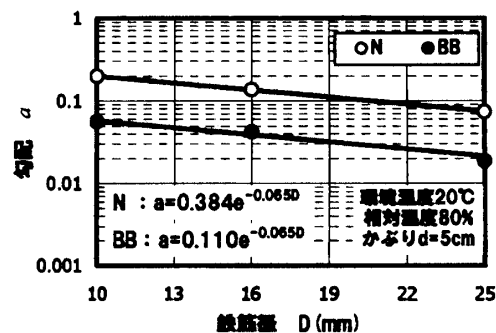


図-4 鉄筋径 D と勾配 a の関係
 (セメント種類BBとNの比較)

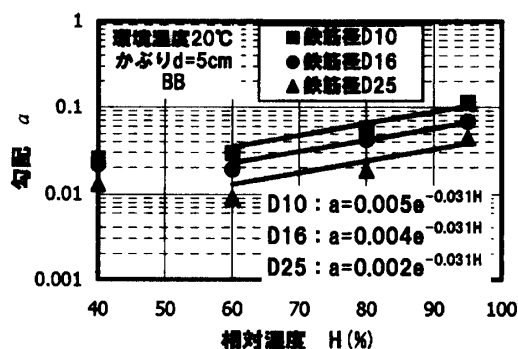


図-5 相対湿度 H と勾配 a の関係
(かぶり d に対する比較)

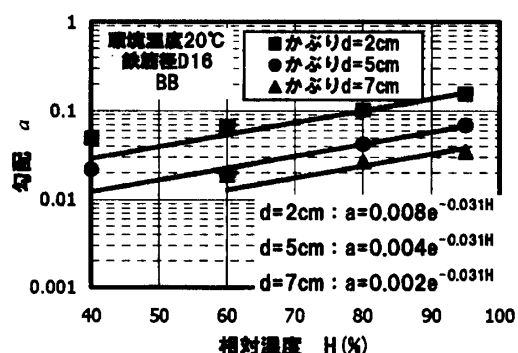


図-6 相対湿度 H と鉄筋径 D と勾配 a の関係
(鉄筋径 D に対する比較)

配 a には式(3)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(3)中の A_2 の比)は約 3.5 ($=0.384/0.110$) であった。

$$a = A_2 \times e^{-0.065D} \quad (3)$$

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(2)および(3)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る。

4.2 相対湿度 H が勾配 a に及ぼす影響

図-5 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、図-6 にかぶり $d=5\text{cm}$ 、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 の関係を示す。この結果によれば、図-

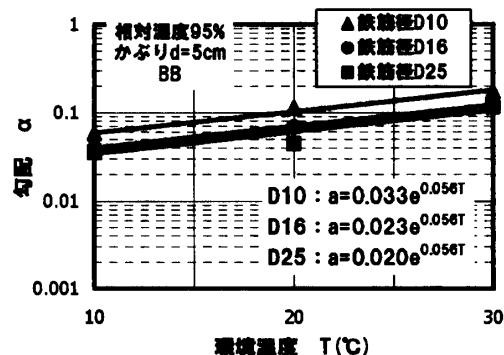


図-7 環境温度 T と勾配 a の関係
(鉄筋径 D による比較)

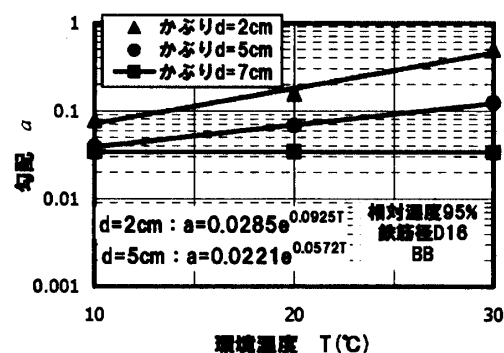


図-8 環境温度 T と勾配 a の関係
(かぶり d による比較)

5 と同様の傾向が確認された。

以上の結果から、環境温度 T 、セメント種類 BB が固定条件のときの、相対湿度 H と勾配 a の関係は、かぶり d や鉄筋径 D に影響する係数 A_3 を用いて式(4)のように表現できることが分かった。

$$a = A_3 \times e^{-0.031H} \quad \text{ただし, } H \geq 60\% \quad (4)$$

4.3 環境温度 T が勾配 a に及ぼす影響

図-7 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)に示すように、かぶり d 、環境湿度 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。

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

一方、図-8 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。この場合、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るが、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 は全く影響を受けていないことが分かった。このことは、環境温度 T が勾配 a に及ぼす影響の程度はかぶり d に依存することを示してい

る。なお本実験では、コンクリートの熱拡散を考慮しても、かぶり $d=7\text{cm}$ 程度であれば、今回設定した曝露2週間で鉄筋周囲のコンクリートおよび鉄筋の温度は外部温度に平衡していたと考えられ、環境試験器内の温度設定を行って約30分～1時間後からは設定温度を維持できていたことも確認できている。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、コンクリート中の酸素量や水分量も変化するため、カソード反応に何らかの影響が現れた可能性も考えられる。

4.4 種々の条件を考慮したマイクロセル腐食速度式の検討

4.1～4.3の検討結果より、鉄筋径 D 、かぶり d 、相対湿度 H 、セメント種類の違いを考慮した平均的なマイクロセル腐食速度式を検討した。なお、上述したように環境温度 T の考慮方法については不十分なため、今回の検討では環境温度 T の影響は加味しない方向で検討した。

腐食速度式の検討にあたっては、本実験にて基本ケースとしたBB-2（鉄筋径D16、かぶり $d=5\text{cm}$ 、環境温度 $T=20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $H=80\%$ 、セメント種類BB）の勾配 a を基準勾配 a_0 ($=0.042$) とする（図-2(a)参照）。

次に、式(6)に示すように、各種条件に対する補正関数 $f_1 \sim f_3$ を、基準勾配 a_0 に乗じることによって、今回の実験条件内の勾配 a を推定できる式を検討した。なお、式(6)中の κ はセメント種類の補正係数を表すが、本検討では、4.1で述べたNとBBの傾き a の比率3.1(2.75と3.5の平均値)を用いることとした。

$$a = f_1(d) \times f_2(D) \times f_3(H) \times \kappa \times a_0 \quad (6)$$

式(2)～式(5)に示した各種条件の関数形を基本ケースの条件に併せて修正したものを式(7)に示す。

$$a = e^{-0.236d - 0.065D + 0.031H - 0.26} \times \kappa \times a_0 \quad (7)$$

この式により計算された傾き a を横軸に、測定から得られた傾き a を縦軸にプロットした結果を図-9に示す。その結果、式(7)により今回の実験条件を再現できており、式(7)の適用により環境温度 T を除くパラメータを考慮できるようになった。今後は環境温度 T の評価方法について詳細に検討する予定である。

5. 全塩化物イオン濃度と腐食発生確率に関する検討

5.1 自然電位と腐食速度の関係

図-10に測定した全データを用いて、鉄筋の自然電位と腐食速度の関係をBBとNに分けて整理した。この結果によると、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となっている。このことから、本検討では腐食が開始されるとき自然電位を-200mV (vs CSE) と設定した。

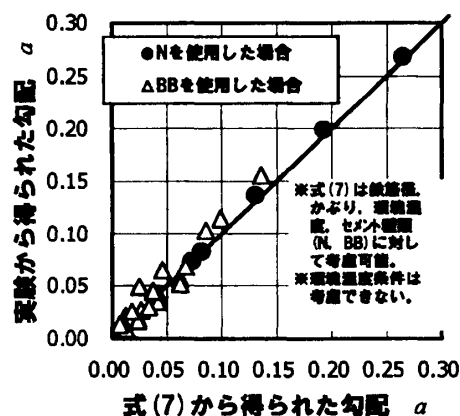


図-9 実験から得られた勾配 a と式(7)により計算された勾配 a の関係

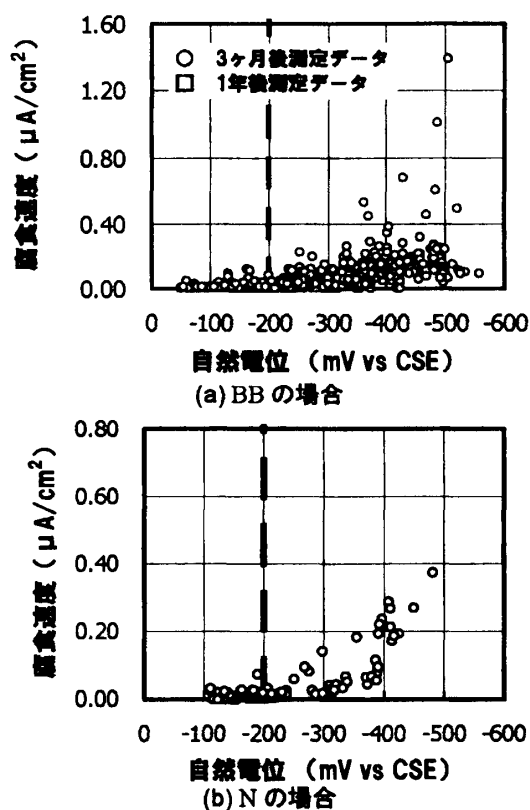
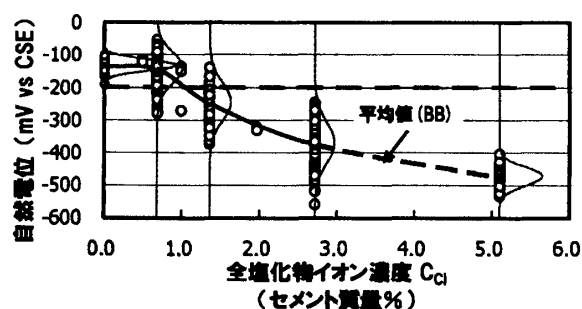


図-10 自然電位と腐食速度の関係

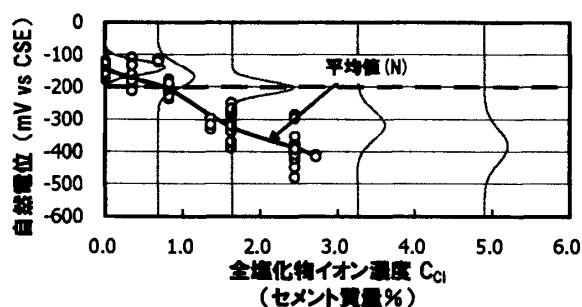
5.2 鉄筋の腐食発生確率図の提案

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-11に示す。このとき、自然電位-200mV (vs CSE) より卑な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分布、標準偏差が χ^2 分布に従うとし、信頼度を50%として推定したものである。この分布を用いて、自然電位-200mV (vs CSE) を下回る確率の計算結果が図-12である。

BBの腐食発生確率図によると、全塩化物イオン濃度



(a) BB の場合



(b) N の場合

図-11 自然電位と全塩化物イオン濃度の関係

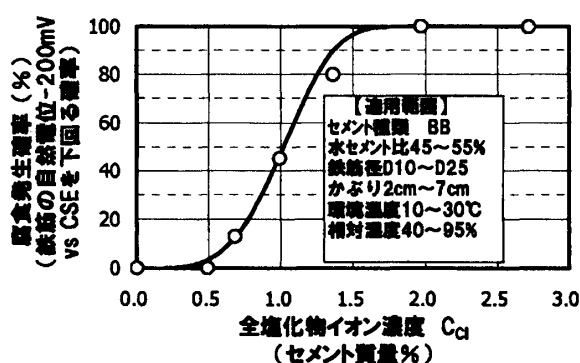
0.4% (一般的な港湾構造物のW/C=55%, $C=300\text{kg/m}^3$ に換算すると 1.2kg/m^3) のときに腐食発生確率が上昇し始め、腐食発生確率が50%となるのは1.0% (3.0kg/m^3) と推定された。一方、Nにおける腐食発生確率図によれば全塩化物イオン濃度0.4% (1.2kg/m^3) で腐食発生確率が20%, 0.7% (2.1kg/m^3) で50%となり、BBを用いたコンクリートより少ない塩化物イオン濃度で腐食発生確率が高まることが考慮できている。なお、今後は腐食発生確率図を用いて、 C_{lim} の不確実性も考慮できる塩害劣化予測手法の開発を進めていく予定である。

6. まとめ

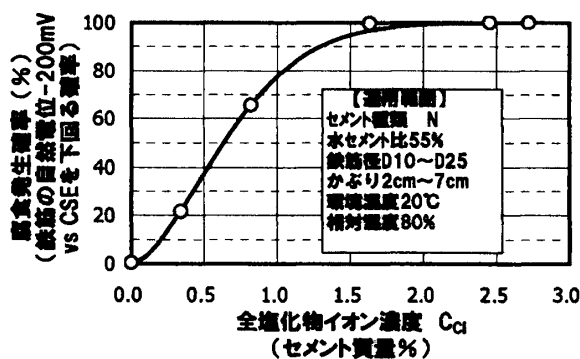
本検討において得られた知見を以下に示す。

- (1) 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の考え方を検討した。ただし、環境温度に対する補正について今後検討する余地が残された。
- (2) かぶり、鉄筋径、塩化物イオン濃度、水セメント比、環境温度を変化させたときの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。

現在、本検討と同様の試験体を実際の栈橋上部工下に曝露しており、現地条件における腐食速度に関するデータを収集中である。今後は曝露試験の測定結果も併せて、本検討における腐食速度式の構築や腐食発生確率図の



(a) BB の場合



(b) N の場合

図-12 全塩化物イオン濃度と腐食発生確率の関係

精度向上を図るとともに、マクロセル腐食に関する情報を盛り込むことを考えている。また、栈橋上部工の塩害劣化予測手法の確立を目指し、LCC 評価やアセットマネジメントの有効なツールとして整備する予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 仁杉ら：鉄道土木構造物の耐久性，山海堂，2002.7
- 3) 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
- 4) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書 維持管理編，p.24，2002.3
- 5) (財) 東京港埠頭公社：大井埠頭栈橋劣化調査・補修マニュアル，p.32，2004.6
- 6) (財) 土木研究センター：コンクリートの耐久性向上技術の開発，p.67，1989.5
- 7) 網野貴彦，羽瀧貴士，川島仁，守分教郎：塩害劣化を受けた実栈橋の劣化推移と各種要因の不確実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