干満帯に10年間暴露されたRC供試体の鉄筋腐食とその腐食診断結果との関係

（独）港湾空港技術研究所 ○ 正会員 審良善和　三菱マテリアル（株） 正会員 石中正人
（社）セメント協会 正会員 島崎 泰　（社）セメント協会 正会員 泉尾英文

1．はじめに

各種セメントを用いたRC供試体を作製し、海洋環境下となる干満帯に10年間暴露した。ここでは、鉄筋腐食と自然電位や分極抵抗などの電気化学的腐食診断結果との関係について報告する。

2．実験概要

2.1 供試体の概要

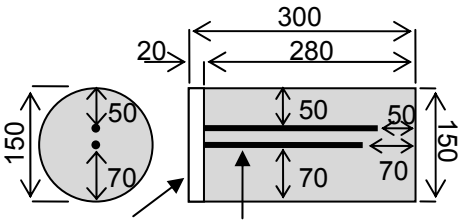
セメントとして、**表-1** に示す合計 10 種類のポルトランドセメントまたは混合セメントを用いた。その他の材料は、細骨材として静岡県菊川市産の陸砂、粗骨材として東京都青梅市産の砕石（2005）、混和剤として標準型 AE 減水剤を用いた。コンクリートの水結合材比は、いずれのセメントを用いた場合も 50%とした。目標スランプは 8cm、目標空気量は 4.5%である。供試体は材齢 28 日まで封かん養生した後、10 年間の暴露試験に供した。

表-1 セメントの種類

種類	記号	成分･構成等
普通ポルトランドセメント	NC	
中庸熱ポルトランドセメント	MC	C_2S=34%
低熱ポルトランドセメント	LC	C_2S=54%
NC ベース BFS 混合セメント	NBB	NC:BFS=5:5
MC ベース BFS 混合セメント	MBB	MC:BFS=5:5
LC ベース BFS 混合セメント	LBB	LC:BFS=5:5
NC ベース FAⅡ種混合セメント	FC	NC:FAⅡ=7:3
NC ベース FAⅢ種混合セメント	FCN	NC:FAⅢ=7:3
NC ベース LS 混合セメント	LP	NC:LS=7:3
NC ベース FA 混合高炉セメント	NBF	NC:BFS:FA =2.5:5:2.5

BFS:高炉ｽﾗｸﾞ微粉末，FA:ﾌﾗｲｱｯｼｭ，LS:石灰石微粉末

供試体の形状および鉄筋の配筋を**図-1** に示す。供試体の形状はφ15×30cm の円柱とし、片側端部をアクリル板で防食した鉄筋をかぶり 5cm および 7cm として埋設した。いずれの鉄筋にも電気化学測定用のリード線を配線した。



（単位：mm）

図-1 供試体の形状

2.2 試験方法

暴露試験は、神奈川県横須賀市の自然海水を使用した屋外暴露試験施設（循環水槽）の干満帯（自然海水浸漬 4 時間と屋外乾燥 8 時間の乾湿繰返し）で実施した。自然電位は、参照電極に海水銀塩化銀電極を用いて測定した。分極抵抗は、交流インピーダンス法によって測定した。測定周波数は，10Hz および 20mHz の 2 種類とし，電圧 10mV を印加した。なお、得られた分極抵抗値から式(1)を用いて、腐食電流密度を算出した。

$$I_{corr} = K \cdot (1/R_p) \quad (1)$$

ここで、I_{corr} は腐食電流密度（A/cm^2）、R_p は分極抵抗（Ω･cm^2）、K は定数（V）である。なお、定数 K は 0.026V とした。また、アノード分極曲線を掃引速度 1mV/sec で変化させて測定し、不動態の状態を**表-2** に示す不動態グレード[2)]を用いて確認した。

表-2 不動態グレードの判定方法[2)]

	電流密度の範囲 (En+0.2V<E<+0.6V (vs. SCE))	不動態の状態
0	電流密度が一度でも 100μA/cm^2 を越えるもの	全く不動態がない
1	電流密度が 10～100μA/cm^2 にあるもの	不完全であるが､若干は不動態がある
2	電流密度が一度でも 10μA/cm^2 を越え、かつ、グレイド 1 または 3 に含まれないもの	
3	電流密度が 1～10μA/cm^2 にあるもの	
4	電流密度が一度でも 1μA/cm^2 を越え、かつ、グレイド 1、2 および 3 に含まれないもの	
5	電流密度が 1μA/cm^2 を越えないもの	非常に良好な不動態がある

3． 結果および考察

図-2 にアノード分極曲線から得られた不動態グレードと鉄筋位置の塩化物イオン濃度および鉄筋腐食減量との関係を示す。鉄筋位置の塩化物イオン濃度が大きくなるにつれて不動態グレードは低下する傾向

キーワード：自然電位、分極抵抗、不動態グレード、塩害、鉄筋腐食
連絡先 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 TEL 046-844-5059 FAX 046-844-0255

を示した。ただし、混合セメント系のコンクリートの場合、塩化物イオンが殆ど浸透していない状況においても不動態グレードが変化した。ポルトランドセメント系の塩化物イオン濃度の下限値から破線を引いた場合、混合セメント系のコンクリートの塩化物イオン濃度は、明らかに線より低い。したがって、ポルトランドセメント系のコンクリートとは異なる不動態状態を示す可能性が考えられる。ただし、鉄筋腐食減量との関係において、混合セメント系の不動態グレード 4 および 3 の腐食は同程度で、それよりグレードが低下した場合、腐食が増加する傾向を示した。このことから、おそらく不動態グレード 3 以降に顕著な腐食が生じると推察される。

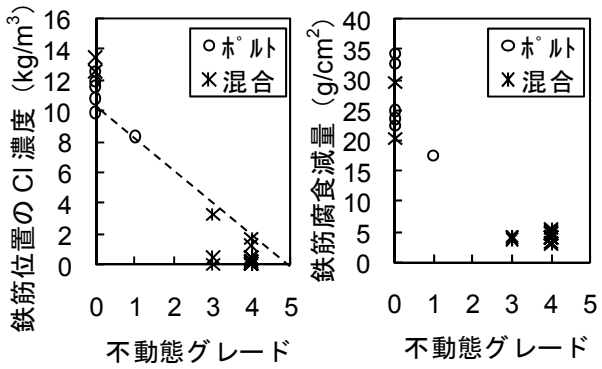


図-2 不動態グレードと鉄筋位置の塩化物イオン濃度および鉄筋腐食減量との関係

図-3 に自然電位および分極抵抗から求めた腐食速度と鉄筋の腐食減量との関係を示す。自然電位は、-400mV vs. SCE より卑な電位で著しい腐食が認められ、腐食電流密度は 1μA/cm^2 以上で著しい腐食が認められた。よって、干満帯などの高含水環境では、ASTM C 876 などで示される腐食判断基準値と若干異なることが予想される。

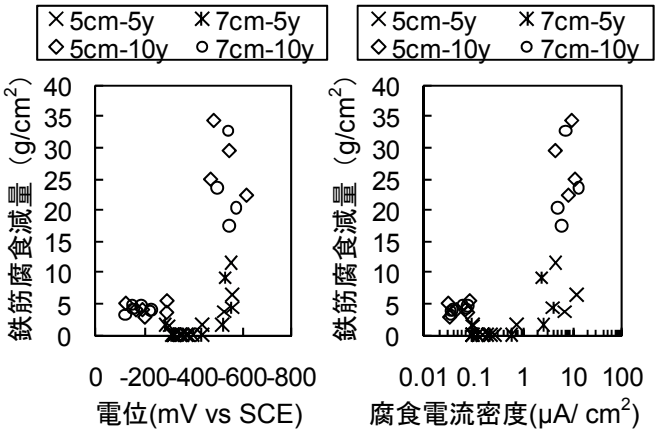


図-3 自然電位および分極抵抗から求めた腐食速度と鉄筋の腐食減量との関係

図-4 には、経時的に測定した分極抵抗の結果から推定した鉄筋の腐食減量と実測値との相関を示す。この結果、ある程度ばらつきはあるが、線形的な相関が得られたものの、推定値の方が大きな値を示した。**図-5** に腐食速度の実測値と分極抵抗の逆数の関係を示す。なお、腐食速度の実測値は暴露 5 年および 10 年の腐食減量の結果を参考に腐食速度は一定であると仮定して算出した．ここで，回帰直線の傾きが式(1)で示す定数 K となる。それぞれの結果はある程度の相関が得られ、本実験からえられる K 値は 0.0014V となり、0.026V より明らかに低い。よって、干満帯などに高含水状態のコンクリート構造物においては、定数 K は小さく設定する必要があると考えられた。

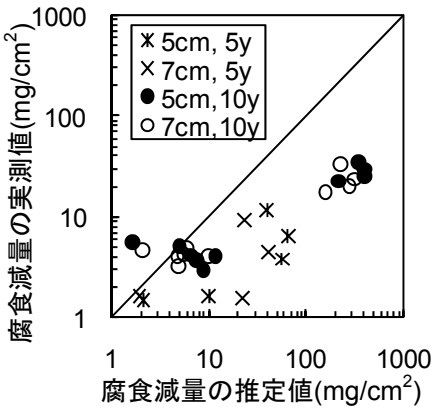


図-4 腐食速度の実測値と分極抵抗から求めた推定値の相関

4．まとめ

海洋環境下である干満帯に 10 年間暴露した供試体の鉄筋腐食診断結果と鉄筋腐食の関係について検討した。その結果、一般的な大気中の診断結果と若干異なることが明らかとなった。

【謝辞】本成果は、（社）セメント協会と（独）港湾空港技術研究所との共同研究「各種低発熱セメントを用いたコンクリートの海洋環境下での鉄筋の腐食に関する研究」の成果の一部である。関係各位には深く感謝の意を表します。

【参考文献】(1)セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-49,海砂の塩化物イオン含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究，1999.3
(2)大即信明：コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究、港湾技術研究所報告，第 24 巻，第 3 号，pp.194-196，1985

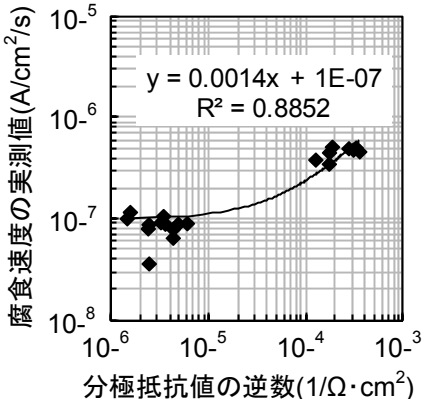


図-5 腐食速度の実測値と分極抵抗の逆数の関係