

海洋環境下に暴露したコンクリート中の鉄筋の腐食状態

(株) 国土開発センター 正会員 笹谷輝彦
 金沢大学工学部 正会員 鳥居和之
 金沢大学工学部 正会員 川村満紀

1. まえがき

コンクリート中の鉄筋は塩化物イオンがある限界値以上存在すると不動態皮膜が破壊され、それ以後の鉄筋腐食の進行過程では外部からの水と酸素の供給が律速となることが知られている。従って、鉄筋腐食を防止するためには十分なかぶりを確保するとともにかぶりコンクリートを密実なものにすることが基本となる。一般に、鉱物質混和材（フライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびシリカフューム）を使用したコンクリートは、ポゾラン反応の過程での緻密な内部組織の形成により塩化物イオンなどの腐食因子のコンクリートへの拡散、透過を大きく低減できることが確認されているが、初期養生が十分でない場合にはセメントの水和反応およびポゾラン反応が抑制されるためにかぶりコンクリートの表面組織が多孔質化し、逆に腐食因子の拡散・透過性が増大することも懸念される¹⁾²⁾。

本研究では、海洋環境下における各種コンクリートの鉄筋腐食に対する防食性能を調べるために、鉄筋を埋設したコンクリート供試体を石川県の海岸に約5年間暴露し、コンクリート中の鉄筋の腐食性状に及ぼす配合および養生条件の影響について検討を行った。

2. 実験概要

本実験に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。鉄筋埋設コンクリート供試体は100×100×400mmの角柱であり、鉄筋（φ10mmのみがき鋼棒）をかぶり厚さ25mmの位置に配置し、環境の影響を受ける1面以外の5面はすべてアクリル系塗料で塗装した。コンクリートの初期養生条件は水中養生7日+気中養生21日（略号A、水中養生7日後に温度20℃、湿度60%の屋内に放置）および水中養生28日（略号W、温度20℃の水中に浸漬）の2種類である。コンクリートは初期養生終了後、石川県松任市徳光海岸の突堤に暴露し、その間自然電位および分極抵抗の測定を定期的に行うことにより鉄筋の腐食状況をモニタリングするとともに、暴露5年の時点で鉄筋埋設コンクリート供試体を解体し、鉄筋の腐食減量および腐食面積率を測定した。また、コンクリート中の塩化物イオン濃度の分布をJCI-SCSに従って求めるとともに、コンクリート供試体の割裂断面に1%のフェノールフタレイン溶液を噴霧し、中性化深さを測定した。

表-1 各種コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)			スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	混和材		
OPC45	4.5	3.6	13.5	300		2.0	4.5
OPC55	5.5	3.8	16.5	300		8.5	5.5
OPC65	6.5	4.0	19.5	300		18.0	5.7
FA55	5.5	3.8	16.5	210	90	15.5	5.5
BS55	5.5	3.8	16.5	150	150	12.5	5.2
SF55	5.5	3.8	16.5	270	30	2.0	5.6

3. 実験結果および考察

3-1 自然電位 図-1および2に各種コンクリートの自然電位の経時変化を示す。普通セメントコンクリートでは、水/セメント比4.5%のものは長期間に渡って自然電位が200mV前後に保持されており、自然電位の卑変は生じていない。しかし水/セメント比5.5%および6.5%のものは暴露開始1年後から徐々に卑側に移行し、とくに水/セメント比6.5%のものは暴露2年にてクラスR (ASTMC-876の評価基準、腐食が90%以上の確率で生じている) に達している。全体の傾向として、普通セメントコンクリートでは水/セメント比が小さいものほど、また水中養生期間の長いものほど自然電位が貴側にある。一方、鉱物質混和材を使用したコンクリートでは、同一水/セメント比の普通セメントコンクリートと比較して、暴露開始直後は卑側の値を示すが、暴露1年以後は貴側に移行する傾向がある。暴露5年の段階ではシリカフュームコンクリート(-200~-220mV)、フライアッシュコンクリート(-150~-250mV)、高炉スラグ微粉末コンクリート(-250~-300mV)の順番で卑側の値を示す。自然電位の計測結果からは、鉱物質混和材を使用したコンクリートの鉄筋腐食の傾向は明確には認められない。

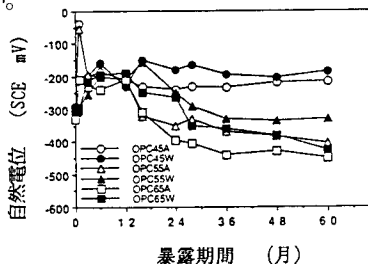


図-1 自然電位の経時変化 (普通セメントコンクリート)

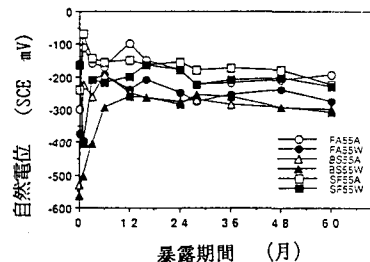


図-2 自然電位の経時変化 (鉱物質混和材を使用したコンクリート)

3-2 鉄筋の腐食状況

表-2に各種コンクリートの鉄筋の腐食減量および腐食面積率を示す。鉄筋の腐食の程度には関係なくいずれのコンクリート供試体にも鉄筋の腐食によると思われるひびわれの発生は観察されなかった。これはかぶり(25mm)の鉄筋径(10mm)に対する比が2.5と大きいことによるものである。鉄筋の腐食状況の観察より、普通セメントコンクリートでは水/セメント比5.5%(A), 6.5%(A,W)において腐食が確認された。また普通セメントコンクリートでは初期水中養生期間が短いもの(A)ほど断面欠損をとまなう腐食(孔食)が顕著であった。一方、鉱物質混和材を使用したコンクリートでは、高炉スラグ微粉末コンクリートのみ鉄筋の腐食の発生が認められた。高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートにおける鉄筋腐食の発生理由は現段階では必ずしも明確ではないが、高炉スラグ微粉末コンクリートでは暴露開始後に自然電位が大きく卑側に移行し、かつ1/分極抵抗も一時的に大きくなることから判断すると、鉄筋の不動態皮膜の形成が十分でなかった可能性もある。このことに関連して、高炉スラグ微粉末に含まれる硫黄分の存在、鉄筋近傍における水酸化カルシウムの保護層の消失が高炉スラグ微粉末コンクリート中の鉄筋の不動態皮膜の形成およびその安定性にどのような影響を及ぼしているかについてさらに検討する必要があるものと思われる³⁾。

表-2 鉄筋の腐食面積率および腐食減量

	腐食面積率 (%)	腐食減量 (%)	腐食状況
OPC45A	—	0.54	腐食なし
OPC45W	—	0.60	腐食なし
OPC55A	26.9	1.15	局部的腐食
OPC55W	—	0.56	腐食なし
OPC65A	24.6	2.10	全面的腐食
OPC65W	41.4	1.96	全面的腐食
FA55A	—	0.30	腐食なし
FA55W	—	0.33	腐食なし
BS55A	10.7	0.81	局部的腐食
BS55W	15.3	0.37	局部的腐食
SF55A	—	0.69	腐食なし
SF55W	—	0.34	腐食なし

3-3 塩化物イオンの浸透状況

図-3および4に各種コンクリートの塩化物イオンの浸透状況を示す。普通セメントコンクリートでは、水/セメント比による塩化物イオンの浸透状況の相違が明確に現れており、実際に腐食が観察された水/セメント比5.5%(A)および6.5%(A,W)のものは、鉄筋の埋設位置(25~50mm)における塩化物イオン量(コンクリート重量に対するパーセンテージ)は0.1%以上であり、腐食発生の限界値とされているCl⁻1.2kg/m³を大きく越えていた。それに対して、鉱物質混和材を使用したコンクリートでは、表面部(0~25mm)の塩化物イオン量は普通セメントコンクリートと同程度または多少大きくなる傾向にあるが、それより内部への塩化物イオンの浸透は大きく抑制されていた。

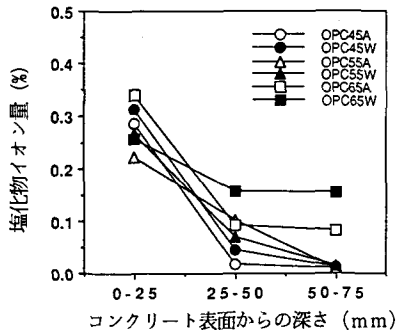


図-3 塩化物イオン浸透量 (普通セメントコンクリート)

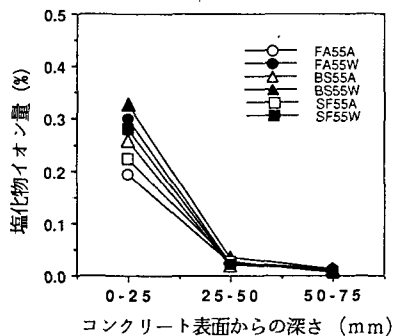


図-4 塩化物イオン浸透量 (鉱物質混和材を使用したコンクリート)

4. 結論

海洋環境下に5年間暴露したコンクリート中の鉄筋の電気化学的測定より、普通セメントコンクリートでは、自然電位と分極抵抗の測定結果は実際の鉄筋腐食状況ともよく対応しており、電気化学的モニタリングは鉄筋の腐食状況を推定するのに有効な手段となることが明らかになった。しかし、鉱物質混和材を使用したコンクリートでは、自然電位と1/分極抵抗との対応が必ずしも一致しないこともあり、電気化学的モニタリングの結果のみで鉄筋の腐食状況を推定することは困難であった。

(参考文献)

- 1) Torii, K and Kawamura, M, "Pore Structure and Chloride Permeability of Concrete Containing Fly Ash, Blast-fumace Slag and Silica Fume", Proc. of 4th Int'l Conf on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. Vol. 1, pp. 135-150, 1992.
- 2) Torii, K, and Kawamura, M, "Chloride Corrosion of SteelBars in Concretes Containing Various Mineral Admixtures", Blended Cement in Construction, Elsevier Applied Science, pp. 416-428, 1991
- 3) Macphee, D. E. and Cao, H. T., "Theoretical Description of Impact of Blastfumace Slag (BSF) on Steel Passivation in Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol.45, No. 162, pp. 63-69, 1993