

海洋環境下に長期間暴露したシラスコンクリートの塩分浸透性状
および耐久性評価手法に関する実験的検討

鹿児島大学大学院 学生会員 ◦前園 祐也 鹿児島大学大学院 正会員 武若 耕司
鹿児島大学大学院 学生会員 壽 祐太郎 鹿児島大学大学院 正会員 山口 明伸

1.はじめに

実際の塩害環境下において、コンクリート構造物の効率的な維持管理を行うためには、塩化物イオンの浸透状況、鉄筋腐食速度および、ひび割れの進展状況を的確に把握する必要がある。一方で、著者らは、近年のコンクリート用細骨材の資源不足問題への対応として、細骨材にシラスを使用したシラスコンクリートの研究を進めており、海洋環境下での耐久性を検討するための長期間の海洋暴露実験を実施している。そこで本論文では、干満帯に5年間暴露を行った小型供試体の塩分浸透性調査の結果と、6.5年間暴露した大型 RC 部材の干満帯部分における外観観察や腐食発生速度の結果を基に、塩害環境下でのコンクリート構造物の耐久性評価手法について実験的検討を行った。

2.実験概要

小型供試体と大型供試体の要因と水準を表-1 に示す。使用したセメントは普通ポルトランドセメント（以下 OPC）および高炉セメント B 種（以下 BB）であり、細骨材にはシラスあるいは普通砂を用いた。水セメント比(以下、W/C)は、小型供試体は W/C40、50、60%の3水準、大型供試体については W/C50%で一定とした。なお、各種小型供試体は作製後、材齢 28 日まで湿空養生を行った後、材齢 4 ヶ月～6 ヶ月で鹿児島市谷山港に設けた海上大気中、干満帯および海中部に暴露を行い、定期的に調査を行った。小型供試体のうち塩分浸透性試験に用いた供試体は塩分の浸透を一方に限定するため試験面以外をエポキシ被覆した 15×15×15cm の立方体供試体である。暴露開始から所定の暴露期間ごとに供試体を引き上げ、JCI - SC4 に準拠して塩化物イオン量を測定した。その後、Fick の拡散係数の解にフィッティングさせて見掛けの塩化物イオン拡散係数を求めた。大型 RC 供試体について供試体概要を図-1 に示す。供試体上面から 90cm、370cm 位置が H.W.L および L.W.L の位置になっている。断面は 25cm×30cm で、供試体長さを 4.6m とすることで 1 つの供試体で海中部から海上大気中まで海洋環境が連続している状況となっている。供試体内には D19 鉄筋をかぶり 2、3、4、5cm の位置にそれぞれ配筋し、さらに、鉄筋の腐食状況を定期的にモニタリングするため、海中部、干満帯および海上大気中に対応する位置に照合電極を埋設した。また、暴露開始から 1.5 年ごとに供試体を引上げ、外観観察を行うほか、鉄筋腐食速度を非破壊的に調べるため、交流インピータンス法による分極抵抗の測定を、海上大気中、干満帯、海中部（上面からそれぞれ 45cm、225cm、405cm）および、腐食ひび割れが生じている位置で実施した。

表-1 要因と水準

要因	細骨材	セメント	水セメント比
小型供試体	普通砂 シラス	普通ポルトランドセメント (OPC)	40
		高炉セメント B 種 (BB)	50
			60
大型供試体			50

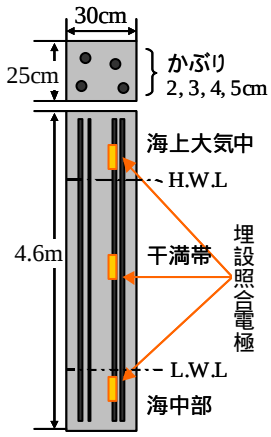


図 - 1 供試体概要

3.結果および考察

各暴露期間の塩化物イオン分布状況から算出した、見掛けの塩化物イオン拡散係数と表面塩化物イオン濃度を経時的に表した結果を図-2、図-3 に示す。なお、比較用に、土木学会示方書で示されている OPC および BB コンクリートの値も併せて示す。塩化物イオン拡散係数はいずれの供試体においても暴露年数の増加に伴って減少する傾向が見られた。また、示方書の値と比較してみると普通砂 OPC においては暴露 3 年時で示方書の値に近似するのに対して、BB およびシラスコンクリートでは、暴露 1 年以降は示方書に示されている式より求めた BB コンクリートの値よりも小さくなり、特にシラスコンクリートでその低下が著しかった。一方、表面塩化物イオン濃度について、示方書の値と比較してみると、普通砂 OPC に関しては暴露年数の増加に伴い示方書の値に近づくのに対して、シラスコンクリートは暴露年

数の増加に伴って示方書の値より著しく大きくなる結果を示した。

一方、図-4 には、暴露 6.5 年目における、大型供試体の干満帯、海中部、腐食ひび割れ部それぞれの位置における鉄筋の分極抵抗の測定結果を示した。いずれの環境下においてもシラス OPC の腐食速度が普通砂 OPC の値よりも小さく、概ね 1/4 程度となることが確認された。

図-2 および図-3 に示した見掛けの塩化物イオン拡散係数および表面塩化物イオン濃度が、示方書の値と大きく異なったことから腐食発生時期の予測年数にどの程度の差異が生じるか、Fick の拡散方程式を使用し、かぶり 2cm 位置において、腐食発生限界塩化物イオン濃度である 1.2kg/m^3 に達するまでの期間で比較した。その結果が図-5 に示した潜伏期である。普通砂 OPC における拡散係数の実測値を用いて算出した結果は 0.4 年となり、示方書に示された式から求めた 0.5 年とほぼ同程度の結果となった。また、シラス OPC の実測値を用いて算出した結果は 4.6 年と示方書や普通砂 OPC の値を用いて算出した結果より、腐食発生時期が遅くなる結果となった。また、図-5 に示す進展期は、長期寿命予測プログラムを用い、普通砂 OPC コンクリート中で鉄筋腐食が開始し、腐食ひび割れが発生するまでの期間を算出した結果を基準とした。予測に用いた式は腐食速度を求める式(1)とひび割れ発生限界腐食量を求める式(2)である²⁾。

$$q = 195 \cdot d \cdot \frac{1}{\sqrt{c}} \cdot 0.092 \exp \left\{ (0.0423 \cdot W / C - 1.5091) \text{Cl}^- \right\} \quad (1)$$

$$y = 10 \frac{c}{d} \quad (2)$$

ここに、 q ：腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$)、 d ：鉄筋直径(mm)、 c ：かぶり厚さ(mm)、 W/C ：水セメント比(%)、 Cl^- ：塩化物イオン量、 y ：ひび割れ発生限界腐食量である。図-4 の大型供試体の分極抵抗測定結果より、シラス OPC 中の鉄筋腐食速度は普通砂 OPC の約 1/4 であったことから、(2)式により算出した普通砂 OPC 中での腐食速度の 1/4 を、シラス OPC 中の鉄筋の腐食ひび割れ発生までの腐食速度と仮定した。図-5 に進展期として示したように、(2)式から算出した腐食ひび割れ発生限界の腐食量である $10.52\text{g}/\text{cm}^2$ を上回るまでの期間は、普通砂 OPC で 0.6 年、シラス OPC で 2.4 年となり、シラス OPC の方が腐食ひび割れ発生時期が大幅に延長されることが予測される。

4. 結論

本論文では、塩害環境下におけるシラスコンクリートの耐久性を検証するとともに、このコンクリートの塩害劣化に対する耐久性評価手法について検討を行った。その結果、潜伏期、進展期、いずれの劣化過程においてもシラスコンクリートは普通砂コンクリートに比べ高い耐久性を持つことが確認された。また、シラスコンクリートのような遮塩性の高いコンクリートの場合は、拡散係数が経時的に変化することを考慮した耐久性手法を用いる必要があることを明らかとした。

参考文献：1) 壽祐太郎：塩害環境下におけるシラスコンクリートの耐久性評価に関する基礎的研究。鹿児島大学大学院修士論文 2011 年度

2) コンクリート構造物の長期性能シミュレーションプログラム LECCA2 理論解説書、日本コンクリート工学協会、2010

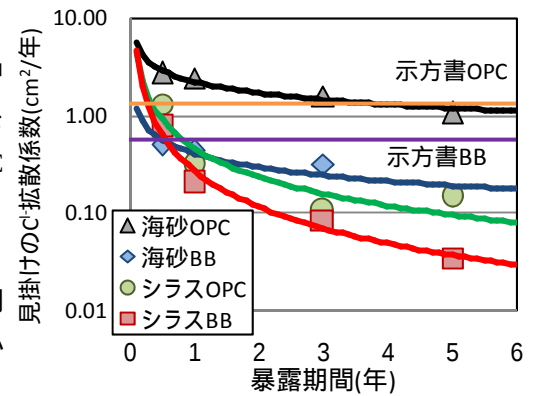


図-2 見掛けの塩化物イオン拡散係数

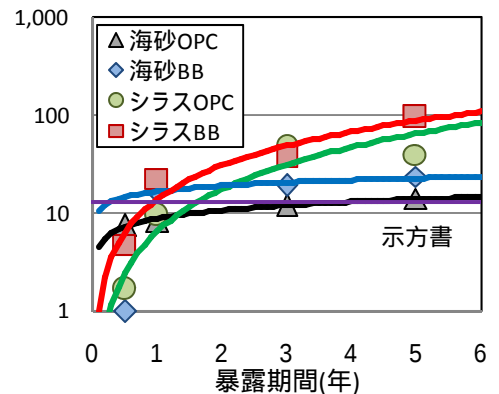


図-3 表面塩化物イオン濃度

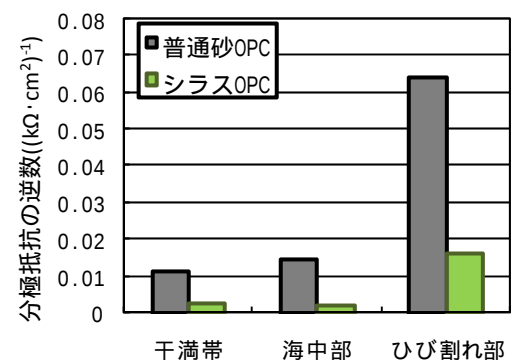


図-4 分極抵抗

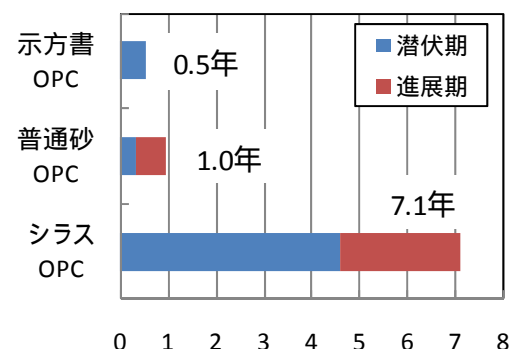


図-5 劣化時期