

論文 シラスコンクリートを用いた RC 部材の海洋環境下における耐久性

佐藤 裕考^{*1}・武若 耕司^{*2}・前田 聡^{*3}・中崎 豪士^{*4}

要旨：コンクリート用細骨材の資源不足問題への対応として、著者らは、細骨材にシラスを使用したコンクリート、いわゆるシラスコンクリートの研究を行っている。現在、このシラスコンクリートを用いた大型 RC 供試体を海洋環境に暴露しており、本論文では、この供試体の暴露後 1.5 年までの調査結果について示す。その結果、シラスコンクリートは細骨材に海砂を使用したコンクリート、いわゆる海砂コンクリートに比べて、塩分浸透の抵抗性に優れていることがわかった。

キーワード：シラスコンクリート、塩害、大型 RC 供試体、自然電位、モニタリング

1. はじめに

既往の塩害に関する研究から、鉄筋コンクリート部材が海中部、干満帯あるいは飛沫帯のそれぞれ単独の条件下にある場合の塩化物イオン浸透状況やこれに伴う内部鉄筋の腐食性については、ある程度の知見が得られている。しかし、実際の海洋構造物では、海中部から干満帯、飛沫帯と連続している場合も多く、この場合には各環境におけるコンクリートや内部鉄筋の状況の相違が相互に影響していることも予想される。

一方、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、著者らは、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、これまでに温泉環境の深礎杭形式の橋脚基礎への使用実績もある。また、実験室内における塩化物イオン浸透試験などによって、シラスコンクリートが、通常のコンクリートと比較して優れた塩化物イオン浸透抑制効果のあることを確認している¹⁾。今回、著者らは、実構造物を模した全長 4.6m の大型 RC 供試体をシラスコンクリートで作製し、これを平成 17 年 3 月末に、実際の海洋環境下の海中から干満帯、飛沫帯へ至る位置に設置した。そして、この供試体を平成 18 年 9 月末（暴露後 1.5 年時）に引き上げ、定期調査を実施した。本論文は、供試体を暴露してから

1.5 年間にわたってモニターした鉄筋腐食状況やコンクリート中の塩化物イオン浸透状況の結果、ならびに、引き上げ調査で得られた結果をとりまとめ、シラスコンクリートの海洋環境下における耐久性について検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

大型 RC 供試体に用いたコンクリートの水セメント比は 50% と一定とし、セメントには普通ポルトランドセメント（以下、OPC と称す）と海洋コンクリートに一般的に用いられる高炉セメント B 種（高炉スラグを 40~45% 含有、以下、BB と称す）の 2 種類を使用した。ここで、表記方法の一例として、OPC 使用のシラスコンクリ

表 - 1 使用材料および各種物性

使用材料	材料の各種物性
細骨材	鹿児島県横川町産シラス(表乾密度:2.15 g/m ³ , 吸水率:7.59%, 粗粒率:1.75)
	鹿児島県鹿児島市海砂(表乾密度:2.48 g/m ³ , 吸水率:3.03%, 粗粒率:2.47)
セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/m ³)
	高炉セメントB種(密度:3.04g/m ³)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤(密度:1.1g/m ³)
	AE減水剤標準型 種(密度:1.08g/m ³)
粗骨材	鹿児島県鹿児島市産砕石(Gmax:20mm, 表乾密度:2.64g/m ³ , 吸水率:1.03%)

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科教授 工博 (正会員)

*3 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科研究員 博(工) (正会員)

*4 鹿児島大学 工学部 海洋土木工学科

表 - 2 コンクリート配合

呼名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						空気量 (%)	スランプ (cm)
			W	C	S		G	混和剤		
					海砂	シラス				
OPCシラス	50	34.5	202	404	-	464	1085	0.70%	4.6	8.0
BBシラス		34.5	199	398	-	464	1085	0.70%	4.7	9.0
OPC海砂		41.6	174	348	692	-	1034	0.85%	3.9	10.0
BB海砂		41.5	172	344	689	-	1035	0.85%	4.9	11.5

ートのことを OPC シラスのように表記する。以後すべてこのような表記方法で示す。細骨材にはシラスの他、比較用として海砂を用いた。また、混和剤は、シラスコンクリートにはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を、海砂コンクリートには AE 減水剤を使用した。なお、使用した材料の物性を表 - 1

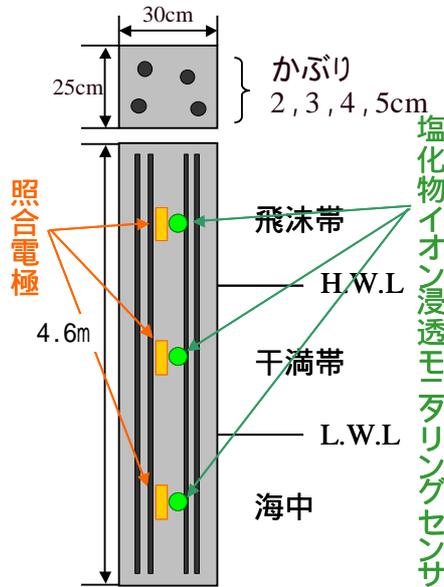


図 - 1 大型 RC 供試体概要図

に示す。供試体は、これらセメントと細骨材を組み合わせた 4 種類のコンクリートで 1 体ずつ、計 4 体作製した。使用コンクリートの配合を表 - 2 に示す。いずれのコンクリートも、スランブを $10 \pm 2\text{cm}$, 空気量を $4.5 \pm 1.0\%$ として作製した。

2.2 供試体概要

大型 RC 供試体の概要を図 - 1 に示す。供試体の形状は、断面 $25 \times 30\text{cm}$ で、長さは 4.6m あり、一つの供試体で海中部から飛沫帯までの海洋環境をカバーできる形状となっている。供試体内には、合計 4 本の 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非破壊的かつ連続的にモニタリングするための照合電極を、海中、干満帯および飛沫帯の位置に埋設した。さらに、図 - 2 に示すような供試体内への塩化物イオンの浸透状況をモニタリングするために開発したセンサも埋設した。このセンサは、ポリマーセメントモルタルで作られた円筒状の本体と、この本体側面にリング状に設けられた 4 箇所の溝（深さ、幅ともに約

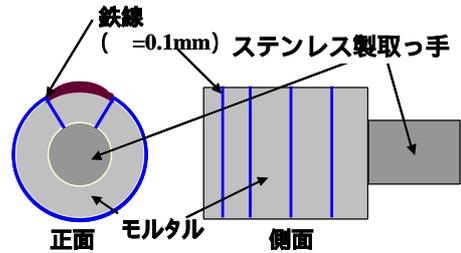


図 - 2 塩化物イオン浸透モニタリングセンサ概要



図 - 3 供試体暴露状況



図 - 4 引き上げ調査の状況

0.15cm)の中に巻き付けられた 0.1mm 径の極細鉄線、およびステンレス製の取っ手から構成されている。また、各極細鉄線の両端はそれぞれリード線とつながっており、鉄線の情報を外部計測器で読み取ることが可能である。このセンサ本体の端面をコンクリート表面に合わすことにより、リング状鉄線のかぶり $5, 15, 30, 45\text{mm}$ となり、外部から浸透する塩化物イオンがそれぞれのかぶり位置で鉄の腐食発生限界量を超えると各鉄線の腐食が始まることになる。鉄線が腐食するとその電気抵抗も増加するため、各鉄線の電気抵抗の変化を読み取ることにより、どの深さまで鉄の腐食発生限界量を超える塩化物イオンが蓄積しているかをモニターできる仕組みとなっている²⁾。

また、供試体は図 - 3 に示すように、鹿児島市谷山港の岸壁に 4 体とも垂直に設置し、暴露開始から 2~3 ヶ月おきに鉄筋の自然電位および塩化物浸透センサの鉄線抵抗（電位測定で判断）を測定している。また、定期的に供試体を引き上げ（図 - 4 参照）、海洋付着生物量、目視によるひび割れ観察、鉄筋自然電位および塩化物イオン濃度を調査することにしており、暴露開始から 1.5 年が経過した時点で最初の調査を行った。

2.3 試験方法

コンクリートの力学的特性として、大型 RC 供試体と同じコンクリートで作製し、飛沫帯、干満帯および海中にそれぞれ暴露した 10cm の円柱供試体を用い圧縮強度を測定した。海洋付着生物量については、供試体引き上げ直後に表面の生物を除去し、その湿重量を測定した。付着生物除去後の供試体においては、目視によりひび割れなどの外観調査を行うとともに、「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法（案）（JSCE-G573-2003）」³⁾ に準じ、各海洋環境区分に位置する部分を 20mm のドリルで深さ 50mm まで削孔し、深さ間隔 10mm ごとにサンプリングしたコンクリート微粉末を用いて塩化物イオンの測定を行った。また、鉄筋の腐食状況については、埋設した照合電極で、暴露開始から定期的に鉄筋電位の測定を行うとともに、引き上げ調査時には供試体側面において 10cm 間隔で各鉄筋の電位分布を測定した。

3. 結果および考察

3.1 力学的特性

力学的特性の一例とし、干満帯において暴露後 1.5 年を経過したコンクリートの圧縮強度の経時変化を図 - 5 に示す。シラスコンクリートの圧縮強度は、海洋暴露する前の材齢 28 日では海砂コンクリートとほぼ同等であるが、海洋暴露 1.5 年後には海砂コンクリートを明らかに上回っていた。このようなシラスコンクリートの長期強度の特徴には、シラスのポゾラン反応が寄与していると考えられ、海洋環境においても長期

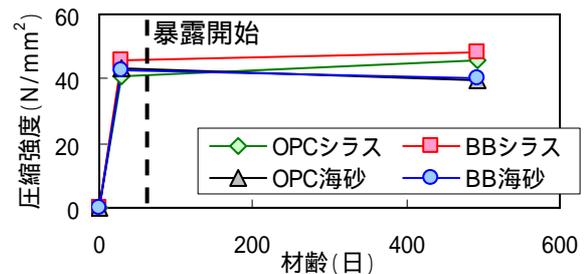


図 - 5 圧縮強度の経時変化（干満帯）

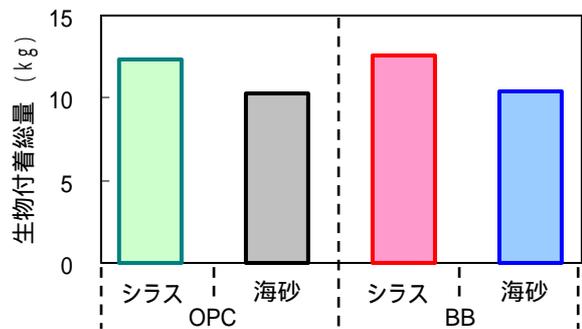


図 - 6 付着生物量

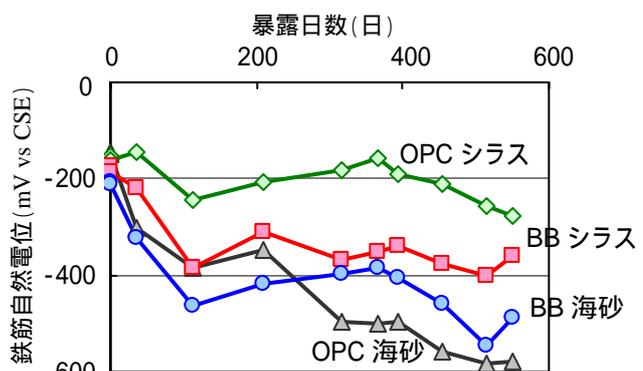


図 - 7 鉄筋（かぶり 2cm）自然電位の経時変化

品質の向上が期待できるものと考えられた。⁴⁾

3.2 海洋付着生物の付着状況

いずれの供試体も、干満帯および海中部のコンクリート表面には、海洋生物が付着しており、フジツボ類や藻類が全体の 90% 程度を占めていた。1.5 年の暴露期間中に供試体が付着した生物の湿重量を図 - 6 に示す。これより、シラスコンクリートの方が、海砂コンクリートより 2 割程度多く生物が付着していたことがわかる。

3.3 鉄筋の腐食性の検討

暴露後、埋設照合電極で定期的に測定した鉄筋自然電位の一例として、かぶり 2cm の鉄筋における干満帯位置での測定結果を図 - 7 に示す。コンクリート如何に関わらず、暴露前は同程度の鉄筋電位を示していたが、暴露直後より、OPC シラスを除くいずれのコンクリート中の鉄筋に

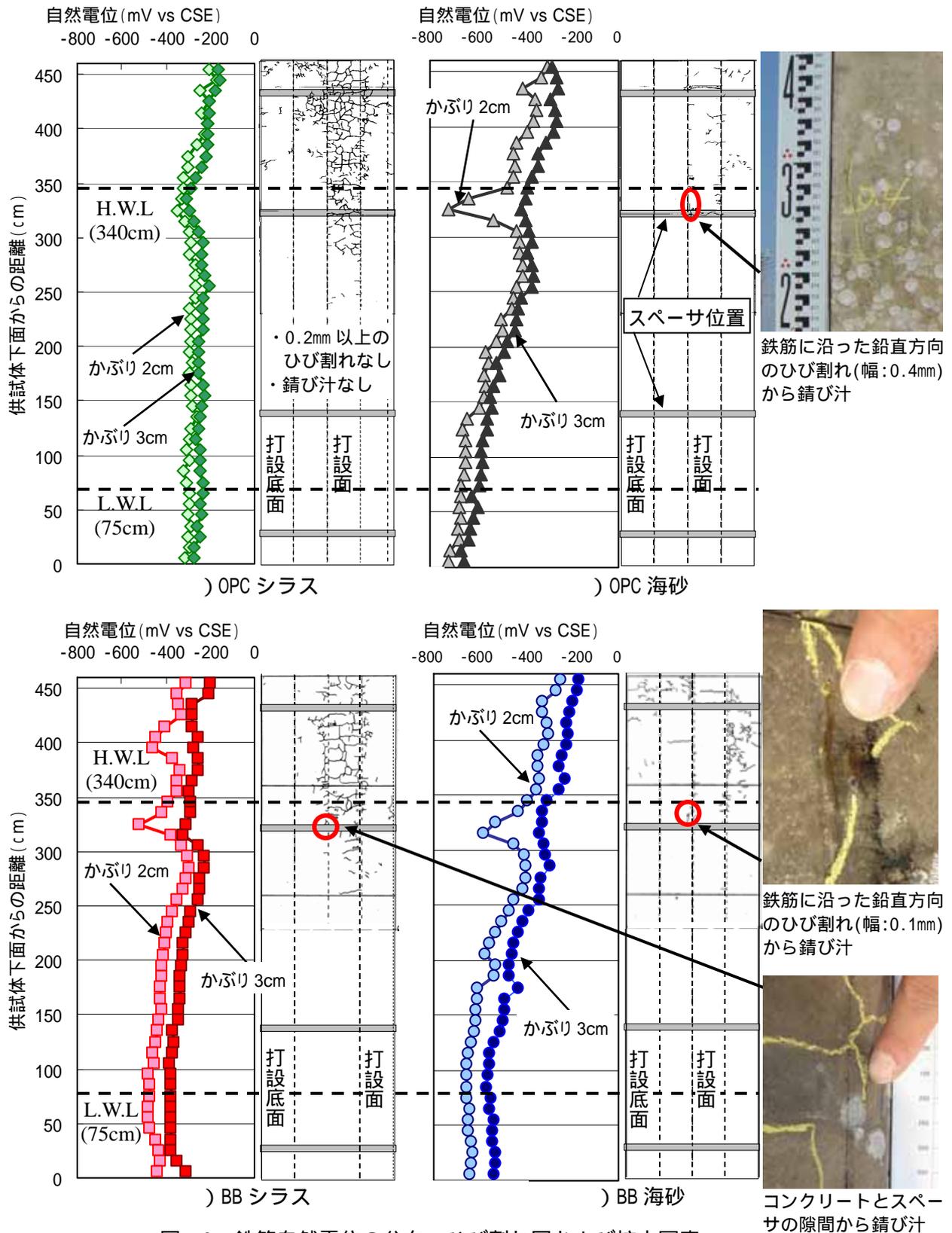


図 - 8 鉄筋自然電位の分布，ひび割れ図および拡大写真

においても電位の急激な低下傾向を示した。特に、海砂コンクリートではセメントの種類のかかわらず、ASTM の腐食判定基準において 90%以上の腐食可能性を示す -350mV vs CSE 以下に電位が低下する状況が確認された。

次に、暴露材齢 1.5 年時における引き上げ調査を行った際の供試体表面の目視観察によるひび割れ状況および劣化箇所の状況調査結果ならびに、表面から測定したかぶり 2cm, 3cm の鉄筋電位の自然電位分布を取りまとめて図 - 8 に示

す。まず、自然電位分布の全体的な傾向として、シラスコンクリートはセメントの種類に関わらず、飛沫帯に位置する上端部と海中に位置する下端部の間の鉄筋電位差が大きいものでも150mV程度であったのに対し、海砂コンクリートの場合、その電位差は400mVにも達していた。この傾向は、かぶり2cmや3cmの場合だけでなく、かぶり4cmや5cmの鉄筋においても同様であり、このことは、シラスコンクリートが海砂コンクリートに比べ、飛沫帯から海中にかけて連続する鉄筋にマクロセル腐食が形成されにくい傾向にあることを示唆している。

また、OPCシラス以外では、H.W.L.近傍の供試体下面からの距離320cm付近において、かぶり2cmの鉄筋で急激な電位低下が生じている箇所が確認された。さらに、鉄筋電位が急激に低下したコンクリートの表面では、OPC海砂の場合、幅が0.4mmもの鉄筋に沿った鉛直方向のひび割れが見られ、BB海砂では鉄筋に沿った鉛直方向のひび割れ(幅:0.1mm)や錆び汁などの劣化現象がそれぞれ確認された。一方、シラスコンクリートでもBB使用ではコンクリートとスペーサの隙間から錆び汁が認められたが、OPC使用の場合には鉄筋腐食によると考えられる劣化は認められなかった。

なお、シラスコンクリートの表面には、上記のような鉄筋腐食に起因するものと明らかに異なる微細なひび割れが、特に飛沫帯部のコンクリート打設面を中心として、海砂コンクリートに比べ多く確認された。これについては、暴露前に、乾燥や自己収縮によるものと考えられるひび割れを一部で確認しており、この若材齢時に生じた表層部のひび割れが、乾燥を受ける飛沫部で伸展した可能性が高い。ただし、これらの微細なひび割れは、いずれも幅0.05mm以下であり、これに端を発するような鉄筋腐食や腐食ひび割れは見られず、現在までのところ、海洋環境下において、シラスコンクリートは高い鉄筋防食性を有しているようであった。

3.4 コンクリート中の塩化物イオン濃度

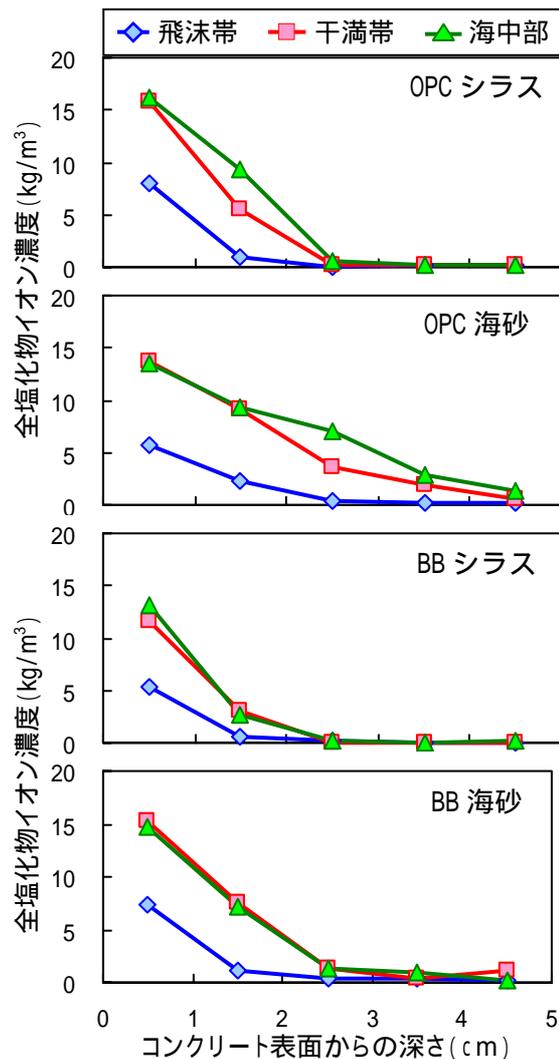


図 - 9 全塩化物イオン濃度

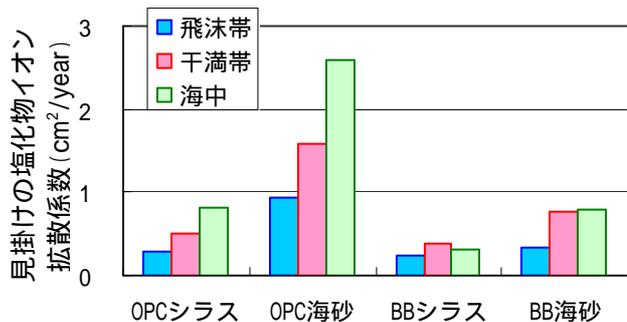


図 - 10 見掛けの塩化物イオン拡散係数

引き上げ調査時にドリル法によって採取した粉末試料から測定したコンクリート中の全塩化物イオン濃度を図 - 9 に示す。なお、JSCE-G573-2003では、粉末試料から測定した塩化物イオン濃度を粉末試料中の骨材量で補正する方法も示されているが、図中の結果ではこの補正は行っていないため、全塩化物イオン濃度絶対値については必ずしも正確な値を示しているとはいえない可能性もある。それでもこの結

果から，干満帯や海中に位置する海砂コンクリート中には，セメントに OPC を使用した場合で表面から 4cm の深さまで，セメントに BB を使用した場合でも表面から 3cm の深さまで塩化物イオンが浸透していたのに対し，シラスコンクリート中へは，いずれのセメントを用いた場合でも，表面から 2cm 程度の深さの浸透に留まり，その量も全体的に海砂コンクリートに比べ少ない傾向にあった。

一方，図 - 10 には，全塩化物イオン濃度分布から JSCE-G503-2003 に基づいて算出した見掛けの塩化物イオン拡散係数（以下，拡散係数と称す）を示す。暴露環境の如何に係わらず，シラスコンクリートの拡散係数は海砂コンクリートと比較して，OPC 使用の場合に 1/3 程度になり，BB 使用の場合に 1/2 程度になるようであった。これは，シラスのポゾラン反応によってコンクリート内部組織が緻密化したためと考えられる。なお，今回の結果では，コンクリートの種類に係わらず，おおむね，海中，干満帯，飛沫帯に位置するコンクリートの順位に拡散係数が小さくなる傾向が認められた。これは，塩化物イオンの供給状況やコンクリート中の含水状態によって，コンクリート中への塩化物イオンの浸透現象が異なっていることを示唆している。

表 - 3 に暴露開始から定期的に測定してきた塩化物イオンモニタリングセンサの結果を示す。BBシラスの場合のように，最深部の鉄線破断が先に生じていると解釈されるなど今後センサに改良の余地がある。だが全体的には，海砂コンクリートに比べシラスコンクリートが塩化物イオンの浸透が遅い傾向にあると解釈できることや，図 - 9 に示す塩化物イオン分布において，暴露 1.5 年時に少なくとも塩化物イオンが $2\text{kg}/\text{m}^3$ 程度浸透した深さ位置では，鉄線は全て破断している状況にあるなど，本システムのある程度の有効性も確認できた。

4. まとめ

海洋環境下に暴露し 1.5 年が経過したシラス

表 - 3 リング状鉄線の破断を確認した時の暴露材齢（飛沫帯）

コンクリート種類	鉄線深さ（mm）			
	5	15	30	45
OPCシラス	11ヶ月	11ヶ月	12ヶ月	*
OPC海砂	12ヶ月	12ヶ月	12ヶ月	13ヶ月
BBシラス	12ヶ月	*	*	12ヶ月
BB海砂	11ヶ月	11ヶ月	*	17ヶ月

注）表中の*印は暴露 18 ヶ月経過後も破断を確認していないことを示す

コンクリート使用大型 RC 供試体のモニタリングおよび引き上げ調査から，以下の知見を得た。

（1）RC 部材が飛沫帯から海中部まで連続して設置されている状況では，各環境区分でコンクリートの状況が異なり，鉄筋に極めて大きなマクロ腐食セルが形成される可能性が高い。

（2）シラスコンクリートは，通常のコンクリートに比べて，シラスのポゾラン反応によるコンクリートの長期強度の増進や塩化物イオンの浸透抑制効果を有するとともに，内部鉄筋にマクロセル腐食が形成されにくい状況を作り，構造物の塩分浸透抵抗性を高めることが期待できる。

謝辞

本研究は，鹿児島大学と国土交通省鹿児島港湾空港工事事務所との共同研究である。関係者各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 武若耕司：シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状，コンクリート工学 Vol.42 ,No.3 , pp38-47 , 2004
- 2) 武若耕司，山本悟：コンクリート中の塩化物浸透過程非破壊モニタリングシステムの開発研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.23 ,No.1 , 2001
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 55，コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と基準化が望まれる試験方法の動向，2003
- 4) 鹿児島県：【2005 年制定】シラスを細骨材として用いるコンクリートの設計施工マニュアル（案），2006