

論文 干満帯に長期暴露した供試体によるシラスコンクリートの耐久性評価

里山 永光*1・武若 耕司*2・山口 明伸*3・審良 善和*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、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が行われている。著者らは、このシラスコンクリートを用いた供試体を作製し、実海洋環境下での長期暴露実験を行っている。本論文では、暴露開始から10年経過した供試体の解体調査を行い、塩分浸透状況や鋼材の腐食状況の測定を行った。その結果、シラスコンクリートは細骨材に普通砂を使用したコンクリートに比べて、塩分浸透の抵抗性に優れ、腐食の進行を抑制できることが明らかとなった。

キーワード：シラスコンクリート、長期暴露、塩害

1. はじめに

かつての高度経済成長期における建設ラッシュに伴い、コンクリート用の天然資源の枯渇化が深刻になっている。特に、九州で一般的に使用されている海砂に関しては、環境保護の観点からその確保が年々困難になりつつある。この問題に対して、著者らは、南九州の広範囲に堆積する火山性堆積物の一種であるシラスをコンクリート用細骨材として使用するための検討を進めており、シラスを細骨材として使用することで、シラスのボゾラン反応によりコンクリートが緻密化し、塩化物イオンを始めとする有害物質の内部浸透を抑制する効果があることを明らかにしている^{1)~3)}。

また、我が国は四方を海に囲まれており塩化物イオンの侵入によって内部鋼材が腐食する塩害の進行が懸念される。実際の海洋環境下においてコンクリート構造物の合理的な維持管理を行うためには、海洋環境下の代表的劣化である塩害の主要因である塩化物イオンの浸透状況を的確に把握すると同時に鉄筋の腐食時期を明確に知る必要がある。しかし、実際の海洋環境は海中部、干満帯および海上大気中と環境が異なっており、それぞれの環境で塩分の浸透状況や鉄筋の腐食時期も異なる。そこで著者らは、海上大気中、干満帯および海中部で長期暴露実験を実施し、塩化物イオンの浸透性や鉄筋腐食や腐食ひび割れの進展などについて、継続的に検討を行った。本論文ではその中でも干満帯に着目し、暴露10年までの調査結果に基づきコンクリートの見かけの拡散係数と表面塩化物イオンの相互関係とその時間依存性、ならびに鉄筋腐食塩化物イオン濃度に与える材料の影響について検討し、シラスコンクリートの耐久性の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体配合

本研究で暴露を行ったコンクリートの使用材料を表-1、供試体配合を表-2にそれぞれ示す。セメントには普通ポルトランドセメント（以下、OPCと称す）および高炉セメント（以下、BBと称す）を使用し、粗骨材には鹿児島県鹿児島市産砕石を、細骨材に鹿児島県横川町産シラス（以下、シラスと称す）または鹿児島県産海砂（以下、普通砂と称す）を用いた。また、混和剤として、普通砂コンクリートにはセメント量に対してAE減水剤を、シラスコンクリートには全粉体としてセメント量とシラスの75 μ m以下の微粒分量に対してポリカルボン酸系高性能AE減水剤を用いた。いずれも助剤として空気量の調整のためAE剤を用いた。コンクリートの

表-1 使用材料および配合

使用材料	材料の各種物性
セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm ³)
	高炉セメントB種(密度:3.04g/cm ³)
細骨材	鹿児島県横川町産シラス(表乾密度:2.15g/cm ³ , 吸水率:7.59%, 微粒分量:25.39%)
	鹿児島県鹿児島市海砂 (表乾密度:2.48g/cm ³ , 吸水率:3.03%)
粗骨材	鹿児島県鹿児島市産砕石 (Gmax:20mm, 表乾密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:1.03%)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤(密度:1.1g/cm ³)
	AE減水剤標準型(I種)(密度:1.08g/cm ³)

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻（学生会員）

*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科 教授 工学博士（正会員）

*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科 教授 博士(工学)（正会員）

*4 鹿児島大学大学院 理工学研究科 准教授 博士(工学)（正会員）

表-2 供試体配合

セメント の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S		G	AE 減水剤	高性能 AE 減水剤	AE 助剤		
					海砂	シラス						
普通砂 OPC	40	41.5	175	438	660	-	994	0.30%	-	0.0020%	11.0	3.4
	50	42.5	176	352	703	-	1017	0.28%	-	0.0015%	9.0	4.6
	60	44.0	182	303	738	-	1004	0.28%	-	0.0009%	10.5	4.6
普通砂 BB	40	41.0	171	428	654	-	1006	0.28%	-	0.0028%	8.0	3.1
	50	42.0	173	346	696	-	1027	0.24%	-	0.0015%	12.0	3.6
	60	44.0	180	300	738	-	1004	0.25%	-	0.0017%	12.0	4.1
シラス OPC	40	32.0	212	530	-	408	1036	-	0.75%	0.0008%	10.0	4.4
	50	34.0	212	424	-	458	1064	-	0.75%	0.0010%	10.5	4.3
	60	35.0	212	353	-	489	1087	-	0.75%	0.0012%	10.0	5.3
シラス BB	40	31.5	205	513	-	406	1055	-	0.75%	0.0012%	11.0	4.3
	50	34.0	204	408	-	465	1079	-	0.75%	0.0012%	9.5	4.0
	60	35.5	207	345	-	499	1085	-	0.80%	0.0010%	10.0	4.8

水セメント比（以下、=W/C）は40，50，60%の3水準である。

2.2 供試体概要

今回，解体調査を行った供試体の形状を図-1，図-2に示す。塩化物イオン量測定用には15×15×15cmの立方体供試体を用い，試験面以外をエポキシ樹脂で被覆し塩化物イオンの浸透面を一面に限定したものを作製した。鉄筋の腐食状況を確認する供試体には，10×10×40cmの角柱供試体を用いD10鉄筋をかぶり2cm，3cmとして位置に埋設したものを作製した。曝露試験は，写真-1に示すような鹿児島湾の谷山港内にある曝露試験施設の干満帯位置に供試体を設置し行った。

2.3 曝露供試体の調査方法

塩化物イオンの測定に関しては図-1に示す供試体の中央部からφ5cmのコアを抜き出した後，所定の深さごとに5.5cm位置まで切断後，JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し測定した。

鉄筋の腐食状況に関しては鉄筋の腐食面積率と腐食量を求めることで評価を行った。腐食面積率に関しては，図-2も示す供試体の両端のエポキシ樹脂被膜部分を除

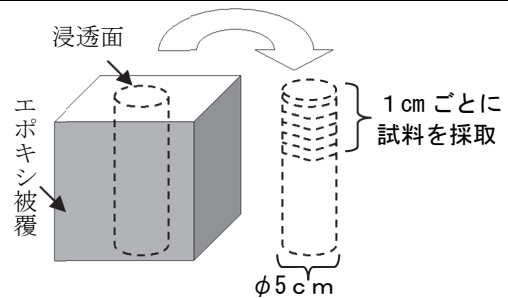


図-1 塩分浸透試験用供試体

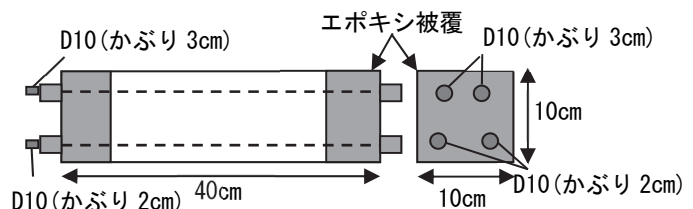


図-2 鉄筋腐食性試験供試体



写真-1 海洋曝露場

く約 30cm の鉄筋の腐食部分の面積を鉄筋表面積で除することで求めた。腐食量に関しては鉄筋を濃度 10% のクエン酸 2 アンモニウム溶液に浸漬し腐食部分を取り除き、浸せき前後の質量差を鉄筋の表面積で除した値を腐食量(mg/cm²)とした。

3. 結果および考察

3.1 全塩化物イオン量分布

図-3 に暴露を 10 年行った供試体の全塩化物イオン量を左から W/C=40, 50, 60% の順に示す。なお、供試体の取り違いにより W/C=40% のシラス BB と W/C=50% の普通砂 OPC、シラス BB に関しては測定を行っていない。シラス OPC はいずれの W/C においても深さ 3cm 以深への塩化物イオンの浸透がほとんど見られず、普通砂を用いた供試体と比較しても塩分浸透抑制効果が高いことが確認できる。また、シラスコンクリートは表面付近の塩分濃度が普通砂コンクリートより高いことからシラスのポゾラン反応でコンクリート組織がより緻密化され、塩化物イオンがコンクリート内部まで浸透せず、実質的には、シラスコンクリートではその表層部で塩分の浸透がほぼ止まっている状況が示唆された。さらに、W/C=60% のシラス BB では暴露 10 年が経過した供試体においても塩化物イオンの浸透が深さ 1cm 位置でしか確認できず全供試体の中で最も塩分の浸透を抑制している結果となった。

3.2 見かけの拡散係数と表面塩分濃度

図-4 に暴露 3, 5, 10 年時の見かけの拡散係数と W/C の関係を配合ごとにまとめたものを示す。また、その時の表面塩化物イオン濃度を図-5 に示す。なお、

見かけの拡散係数および、塩化物イオン濃度分布は式

(1) のフィックの拡散方程式の解をフィッティングすることにより算出した。また同時に普通セメント、高炉

セメントを用いた場合の拡散係数を式(2), (3)に示すコンクリート標準示方書⁴⁾に記載されている提案式から算出した結果も合わせて示す。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \quad (1)$$

$$\log_{10} D_{ap} = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (2)$$

$$\log_{10} D_{ap} = 3.2(W/C) - 2.4 \quad (3)$$

ここに、 $C(x,t)$:深さ x (cm)、暴露開始時からの時刻 t (年)における塩化物イオン量(kg/m³)、 C_0 :表面における塩化物イオン量(kg/m³)、 D_{ap} :塩化物イオンの見かけの拡散係数、 erf :誤差関数とする。

普通砂 OPC、普通砂 BB は土木学会提案式と同様または幾分大きな値を示しているが、暴露 10 年時においてシラスコンクリートは土木学会提案式の値より小さな値となった。さらに、シラスコンクリートはいずれの W/C においても同程度の拡散係数であることから、W/C に関わらず高い遮塩性を有していることが確認された。これは、今回の配合では W/C が増加するにつれてシラスの質量が増加していたため、W/C が高い配合の方がよりポゾラン反応を起こし緻密化していることが考えられる。そのため、今後シラスの反応性と遮塩性についても検討を行っていく予定である。また表面塩化物イオン量に関しては暴露期間が長期になるにつれて普通砂コンクリート、シラスコンクリートいずれも配合によるばらつきが少なくなっていることが確認できる。

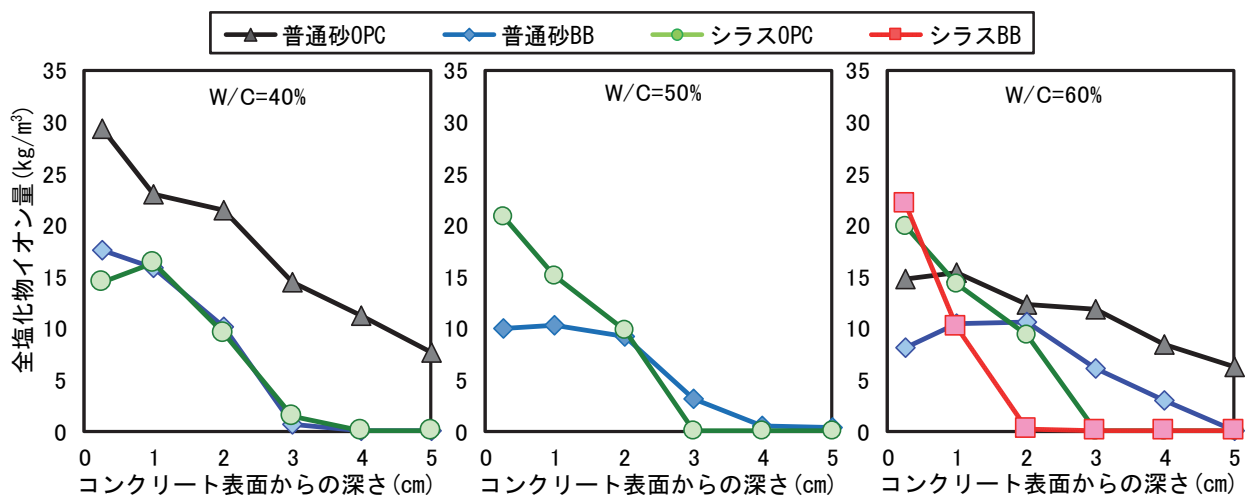


図-3 全塩化物イオン量分布

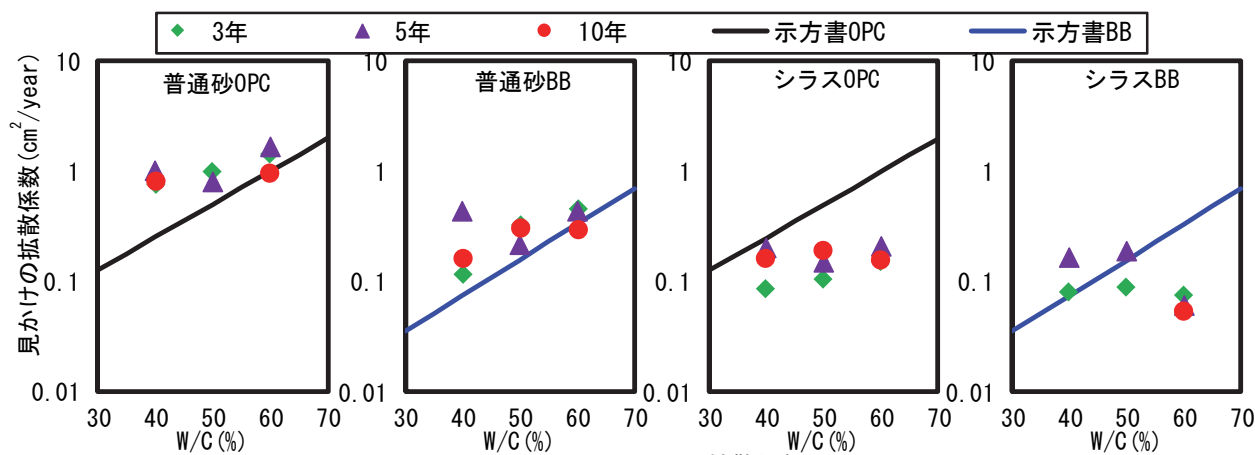


図-4 見かけの拡散係数

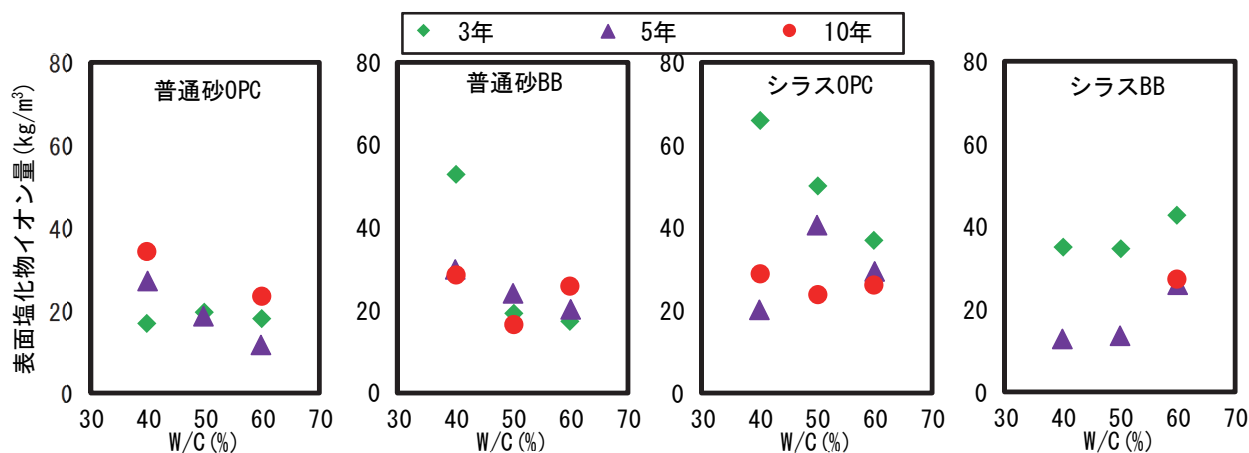


図-5 表面塩化物イオン濃度

3.3 鉄筋腐食状況

暴露 10 年までの鉄筋の腐食状況の経時変化の一例としてかぶり 2cm 位置の腐食面積率を図-6 に、腐食量を図-7 に示す。なおかぶり 3cm 位置においてもかぶり 2cm 位置と同様な傾向を示したため、今回は 2cm の鉄筋のみの結果を示す。いずれの結果も解体を行った供試体によって多少ばらつきはあるもののシラスコンクリートは普通砂コンクリートと比較しても高い防食性を示していることが分かる。特に、 $\text{W/C}=60\%$ の結果に着目すると普通砂コンクリートの腐食が大幅に進行しているのに対しシラスコンクリートはいずれも点錆程度であり、シラスコンクリートは W/C に関わらず高い耐久性を有していることが再確認された。

4. 塩害劣化予測

一般に、塩害による構造物の劣化過程は潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分けられる。そこで今回得られた見かけの拡散係数や腐食速度の結果を基に、シラスコンクリートの加速期までに要する期間について予測を行った。なお、今回の劣化予測では $\text{W/C}=50\%$ のかぶり 2cm の結果を用い、かぶり 7cm 位置に D16 鉄筋を埋設した構

造物を想定して行った。

4.1 潜伏期

今回の暴露 10 年の結果から求められた見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量からコンクリート標準示方書⁴⁾に記載されている腐食発生塩化物イオン量 ($\text{OPC}=1.9\text{kg}/\text{m}^3$, $\text{BB}=1.8\text{kg}/\text{m}^3$) に達する期間を式(1)のフィックの拡散方程式を用いて算出した。なお、供試体の紛失により測定が行えなかった供試体に関しては暴露 5 年時の結果を用いた。表-3 に使用データ及び算出結果を示す。算出結果からシラスコンクリートは塩化物イオンの浸透を抑制することで潜伏期を OPC では約 3.5 倍、BB では約 1.5 倍に延長していることが確認された。

4.2 進展期

進展期の予測には暴露 10 年までの鉄筋自然電位から腐食開始時期を推定し、暴露 10 年時までの腐食量の経時変化の結果を線形近似することで求めた近似線の傾きを腐食速度とした。図-8 にかぶり 2cm 位置の鉄筋自然電位の経時変化を示す。腐食開始時期に関して黒の点線で示す腐食判定基準値の -350mV を下回った時期を腐食開始時期とした。なおシラス BB に関しては暴露 5 年時に腐食判定基準値の -350mV を下回っているがその後

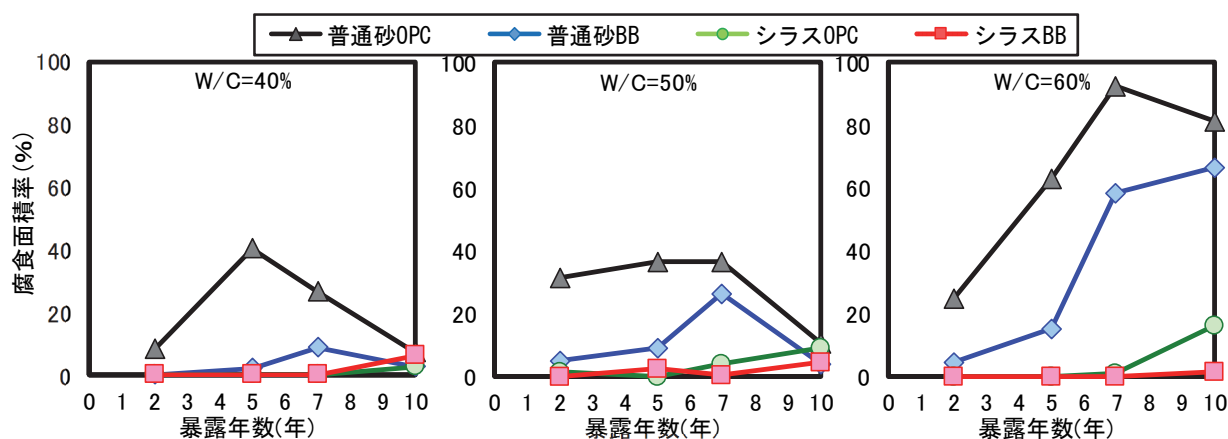


図-6 鉄筋腐食面積率(かぶり 2cm)

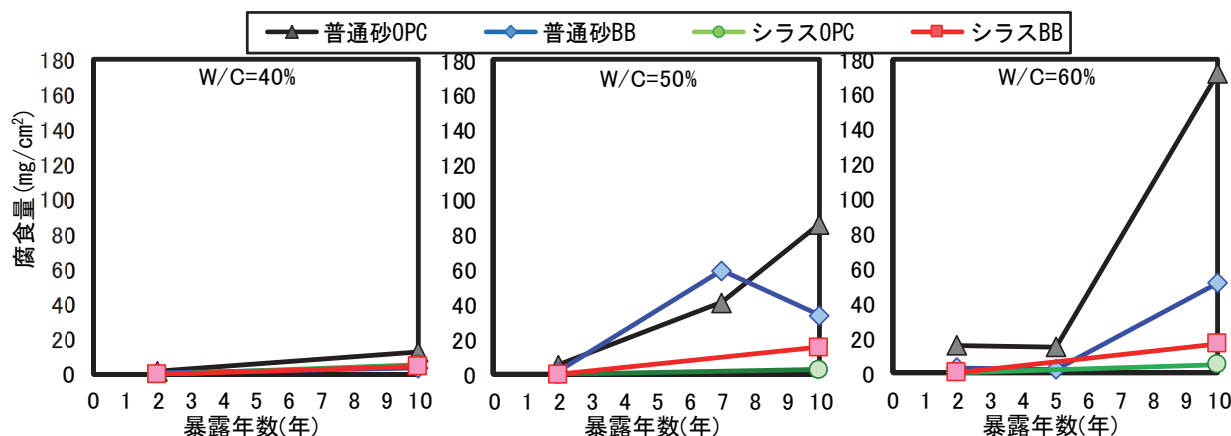


図-7 鉄筋腐食量(かぶり 2cm)

貴な値に移行していることや暴露 5 年時の塩分浸透状況から腐食は発生していないと判断した。次に、先ほど

求めた腐食開始時期と暴露 10 年時の腐食量の経時変化の結果を近似線と近似線の傾きをあわせて図-9 に示す。それぞれ、腐食速度は普通砂 OPC、普通砂 BB、シラス BB の順で 9.18, 7.71, 6.76(mg/cm²/year)となった。シラス OPC に関しては暴露 10 年経過した供試体でも腐食量が少なく腐食速度を算出することが出来なかったため進展期の予測は行わなかった。

$$y = 10 \times (c/d) \quad (3)$$

$$t = y/v \quad (4)$$

ここに y : ひび割れ発生限界腐食量(mg/cm²), d : 鉄筋直径(mm), c : かぶり厚さ, t : ひび割れ発生時期(year), v : 腐食速度(mg/cm²/year)とする

式(3)⁹⁾, (4)を用いて鉄筋が腐食を開始してからひび割れ発生までの期間を算出した。その使用データ及び算出結

果を表-4 に示す。腐食速度は使用材料の違いによる差はほとんど見られず進展期間も同程度の値となった。そ

表-3 使用データ及び算出結果(潜伏期間)

供試体配合	D(cm²/year)	C₀(kg/m³)	潜伏期間(年)
普通砂 OPC	0.79	18.42	11.56
普通砂 BB	0.31	16.48	31.15
シラス OPC	0.19	23.66	41.92
シラス BB	0.19	13.64	55.82

表-4 使用データ及び算出結果(進展期)

供試体配合	y (mg/cm²)	腐食開始時期 (年)	腐食速度 (mg/cm²/year)	進展期間 (年)
普通砂 OPC	44.03	1.40	9.18	4.80
普通砂 BB		3.20	7.71	5.71
シラス OPC		8.10	0.84	6.51
シラス BB		8.20	6.76	

のため今回検討を行っていないシラス OPC においても進展期間は同程度であることが考えられる。

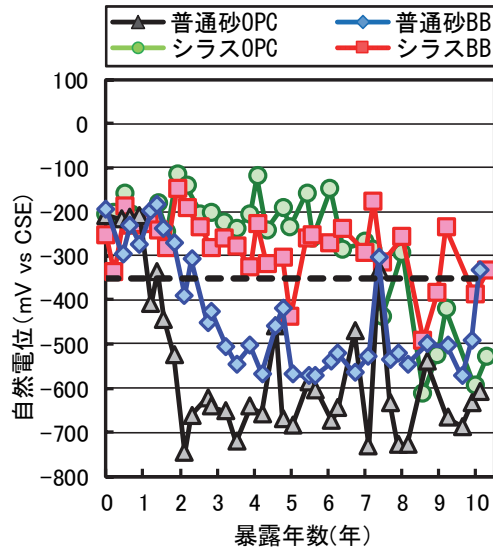


図-8 筋自然電位

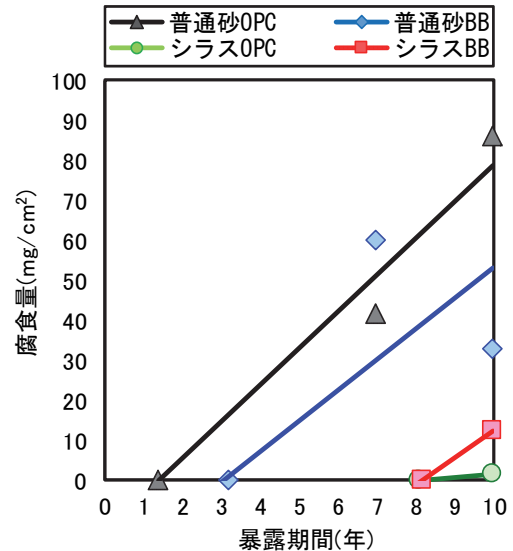


図-9 腐食量の経時変化

4.3 ひび割れ発生年数の予測

図-10 にこれまでに算出した結果から海洋環境下における潜伏期と進展期を合わせたひび割れ発生までの期間を示す。普通砂コンクリートとシラスコンクリートを比較すると OPC では進展期までを約 3.6 倍、BB では加速期までを約 1.7 倍まで延長していることが確認された。また、シラス OPC が他の配合と進展期間が同程度とすると、シラスコンクリートは海洋環境下において約 50 年供用可能であることが示唆された。

5. まとめ

海洋環境下における 10 年の暴露試験の結果より以下の結論が得られた。

- (1) シラスコンクリートは高炉セメントを使用したコンクリートより高い遮塩性を有している。
- (2) シラスコンクリートは W/C に関わらず高い遮塩性を有しており、暴露 10 年経過した場合でも塩分は 3cm 位深まで浸透していない。
- (3) シラスコンクリートは暴露 10 年経過後も鉄筋腐食は点錆程度であり高い防食性を有していることが確認された。
- (4) 腐食発生時期及び腐食量の経時変化から算出した腐食速度は、いずれの配合においても同程度であった。
- (5) ひび割れ発生までの期間を予測した結果では OPC では進展期までを約 3.6 倍、BB では加速期までを約 1.7 倍まで延長を延長していることが確認された。

謝辞

本研究は、国土交通省九州地方整備局鹿児島港湾空工事事務所の委託により実施している研究の一部であり関係者各位に謝意を表する。

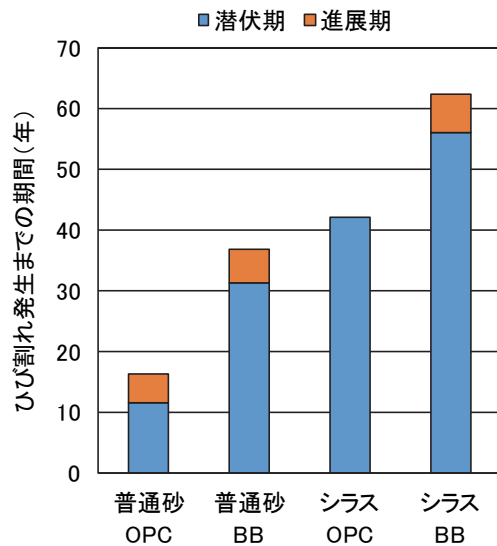


図-10 ひび割れ発生までの期間

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，pp.38-47，2004
- 2) 壽祐太郎ほか：長期モニタリングによる海洋コンクリート構造物の塩害耐久性評価，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，第 11 巻，pp.135-140，2011.10
- 3) 佐藤裕考ほか：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，コンクリート工学年次論文集 Vol.29，No.1，pp.1089-1094，2007
- 4) 2013 年制定 コンクリート標準示方書維持管理編 [維持管理編：劣化現象・機構別] 6 章塩害 pp171-175
- 5) 国土交通省港湾局 監修 独立行政法人港湾空港技術研究所 編著：港湾の施設の維持管理マニュアル，財団法人 港湾技術センター，P207，平成 19 年 10 月