

論文 海水で練り混ぜたシラスおよび普通コンクリートの腐食特性

猿渡 幸子*1・審良 善和*2・山口 明伸*3・外園 真大*4

要旨： 離島をはじめとする真水の確保が厳しい地域ではコンクリートの練混ぜ水を確保することが困難であることから、練混ぜ水に海水を用いることが望まれている。しかし、鉄筋を埋設したコンクリートでは塩害による腐食の恐れがあるため、その実用にはほとんど至っていない。そこで、本研究では、細骨材に海砂と耐久性向上の期待できるシラスを用いた海水練りコンクリートを作製し、異なる環境に設置した場合の腐食特性を明らかにすることを目的に実験的な検討を行った。その結果、普通砂とシラスにおいては環境の違いによって腐食性が変わり、塩害環境でのシラスコンクリートの優位性が示唆された。

キーワード： 海水練りコンクリート、鉄筋腐食、シラスコンクリート

1. はじめに

近年、離島や災害復旧工事などの真水の確保が難しい地域では、コンクリートの練混ぜ水を供給することが困難であるという問題がある。その対策として、練混ぜ水に海水を用いることが望まれている。ただし、海水を練混ぜ水として用いたコンクリート（以下、海水練りコンクリート）は無筋コンクリートにおいては消泡ブロックや護岸など幅広く適用されている。通常の真水を使用した場合と比較して圧縮強度と水密性が向上し、特に、若材齢においてその効果が卓越していることが知られている¹⁾。一方で、コンクリート中に鉄筋を埋設した鉄筋コンクリートの場合には塩害による鉄筋腐食の恐れがある。実際、現在の国内外の基準では、鉄筋コンクリート構造物への海水利用は鋼材腐食を防止する観点から認められていない。

本研究では、小型の供試体を作製し、異なる環境に設置した海水練りコンクリート中鉄筋の腐食特性を明らかにすることを目的に実験的な検討を行った。なお、検討では、細骨材として海砂を用いた普通コンクリートに加え、既往の研究よりポゾラン活性を有し優れた塩害抵抗性が期待できるシラス²⁾を用いたシラスコンクリートについても実験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-1 に海水練りコンクリートの配合を示す。セメントとして普通ポルトランドセメント（OPC）を、細骨材として普通砂（海砂）およびシラス（横川産）を、粗骨材として碎石を、練混ぜ水として海水（鹿児島湾内）を使用した。**表-2** に使用材料の物性を示す。また、練混ぜ水に使用した海水のイオン組成を**表-3** に示す。水セメント比（W/C）は 50%とし、目標スランプ値を 10±2.5cm、目標空気量を 4±1.5%となるように混和剤を用いて調整した。ここで、シラスは普通砂より単位水量が多くなるため、海水練りとした場合、初期塩化物イオン量はシラスが 3.0kg/m³、普通砂が 2.7kg/m³とシラスの方が多くなる。

暴露試験用供試体の形状を**図-1** に示す。100×100×100mm の角柱供試体とした。供試体中央に黒皮を除去したφ16×100mm の丸鋼をかぶり 42mm となるように設置し、鉄筋の中央部 50mm が試験面となるように鉄筋両端および供試体上下面をエポキシ樹脂で被覆した。なお、供試体は、打込み方向の違いによる影響も検討するため、鉄筋に対して打込み面が垂直になる方向（横打ち）と平行になる方向（縦打ち）の 2 方向で打ち込んだ。養生は材齢 28 日まで封かんで養生した。供試体数は各水準 9 体とした。

表-1 コンクリート配合

供試体 種類	細骨材 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (g/m ³)	高性能AE 減水剤 (g/m ³)	AE剤 (g/m ³)	消泡剤 (g/m ³)
				W	C	S	G				
普通砂	海砂	50	44	175	350	759	993	3150			28.00
シラス	シラス		35	198	396	497	1088		4750	3.96	

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科 工学専攻 海洋土木工学プログラム (学生会員)

*2 鹿児島大学 学術研究院 理工学域工学系 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 鹿児島大学 学術研究院 理工学域工学系 教授 博士 (工学) (正会員)

*4 鹿児島大学 工学部 先進工学科 海洋土木工学プログラム

2.2 暴露試験

暴露環境は、鹿児島県鹿児島市谷山の海洋暴露試験施設の干満帯と海上大気中および室内（20℃，RH60％）の3環境とした。暴露期間は32か月である。暴露状況を写真－1に示す。

2.3 測定項目

暴露期間中は全供試体で定期的に外観目視観察、自然電位の測定を実施し、無作為に抽出した各水準2体ずつにおいて直線分極試験を行った。直線分極試験は、電位制御として、掃引速度を20mV/minで自然電位から300mV程度分極させた。暴露3，11，32か月後に供試体の解体調査を無作為に抽出した各水準1体ずつ行った。鉄筋を供試体から取り出し、鉄筋の腐食面積を測定することで腐食面積率を算出した。また、腐食の原因を特定するため、JISA 1154に準拠し、鉄筋周囲の塩化物イオン量を確認した。測定範囲は鉄筋中央部50mmの周囲5mmの位置とし、全塩化物イオン量を測定した。また、鉄筋とコンクリートの界面の状態を確認するため、供試体を鉄筋断面方向に切断し、鉄筋周辺の形状測定をレーザー顕微鏡により行った。なお、供試体は各水準あたり無作為に3体抜き出した。コンクリートの品質を確認するために、供試体のコンクリート全体を対象として、細孔溶液のpHの測定、細孔量の測定も行った。細孔溶液のpHの測定は溶出法により行った。方法は、コンクリート試験片を150μm以下に粉砕した粉末試料を用い、固液質量比1:100で蒸留水と混合したものを1時間攪拌し、20℃の室内で24時間静置した上澄み液を用いて、pH測定器により測定した。また、細孔量の測定は、暴露32か月において測定を行い、水銀圧入式ポロシメータにより測定にした。供試体は温度60℃の炉乾燥機に24時間以上乾燥させ、その後、真空デシケータに48時間以上静置させた乾燥試料を用いて測定した。

3. 結果および考察

3.1 暴露試験中の自然電位および腐食速度

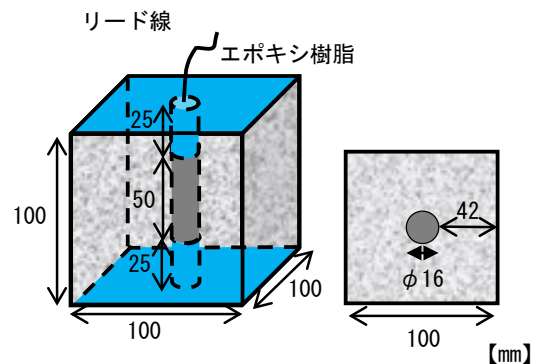
図－2に自然電位結果の経時変化を示す。図中には、ASTM C 876の自然電位法による腐食判定基準である-200mV vs.CSEと-350mV vs.CSEを併せて示す。海上大気中、室内の自然電位は、-200mV vs.CSEより貴な「90%以上の確率で腐食なし」の範囲で概ね一定の値を示した。海上大気中の電位は細骨材の種類により差が見られ、シラスの方が100mV程度貴な電位になる傾向を示した。一方、室内では、打込み方向の違いによる電位の差が認められ、普通砂、シラスどちらも横打ちが暴露32か月時点80mV程度で貴な電位を示した。これは、室内の場合は乾燥の影響を受け、一方で、海上大気中の場合は、乾燥の影響と気象および海象の影響を受けて若干水の影響

表－2 使用材料の物性

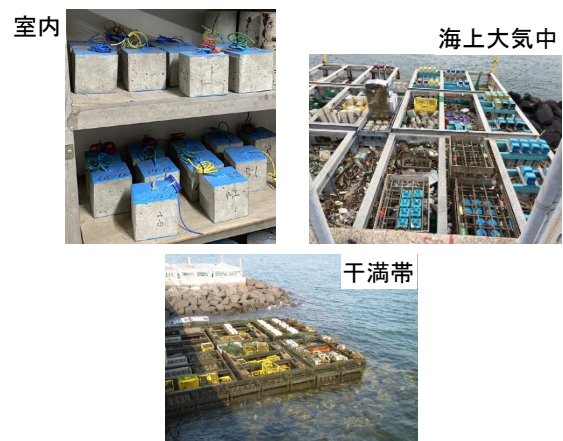
	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	F.M.値
OPC	3.15		
海砂	2.56	1.80	2.55
シラス	2.23	8.10	1.53
碎石	2.63	1.89	6.63

表－3 海水のイオン組成

	単位量 (mg/L)				
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻
普通砂	9797	328	1094	425	15500
シラス	9521	322	1068	310	15029



図－1 供試体形状



写真－1 暴露状況

を受ける環境にあったと予想される。いずれも鋼材表面の腐食環境の変化が電位に影響したと推察される。

干満帯の自然電位では、全ての供試体において卑化する傾向を示している。シラスに比べて普通砂の自然電位の方が卑側にあり、また、細骨材の種類ごとにも横打ちが貴側になる傾向を示した。干満帯は海水の供給が最も大きい環境になるため、塩化物イオンの浸透および水分の影響を受けていると予想される。なお、いずれの供試体も12か月以降は自然電位が卑な「90%以上の確率で腐食あり」の範囲となっている。

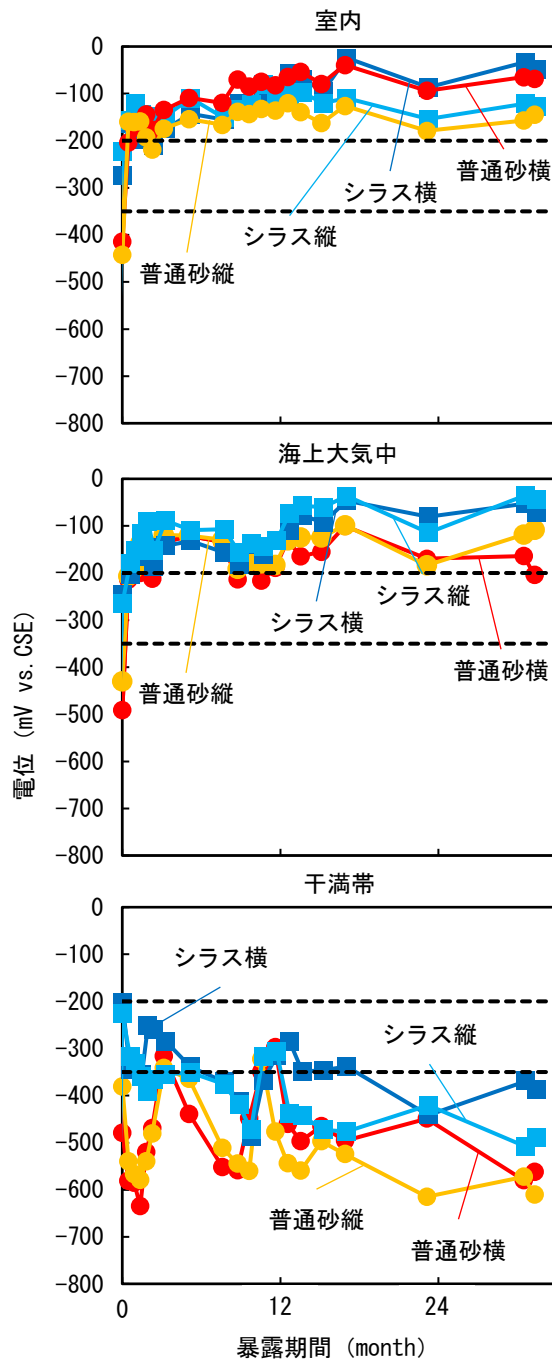


図-2 自然電位測定の結果

図-3 に直線分極試験の結果より求めた腐食速度の経時変化を示す。図中には CEB 基準による判定も併せて示す。暴露環境の違いでは、干満帯の腐食速度が最も大きく、室内が最も小さくなった。海上大気中および室内の腐食速度は暴露期間全体を通じて $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下で推移しており、「不活性もしくは極めて低速」の範囲にある。したがって、海上大気中および室内にある海水練りコンクリートは骨材および打込み方向の違いに関わらず工学的には腐食に対する抵抗性は高いと推察される。一方で、干満帯に暴露した供試体については、普通砂、横打ちの供試体において暴露期間全体を通じ、その他の供試体に

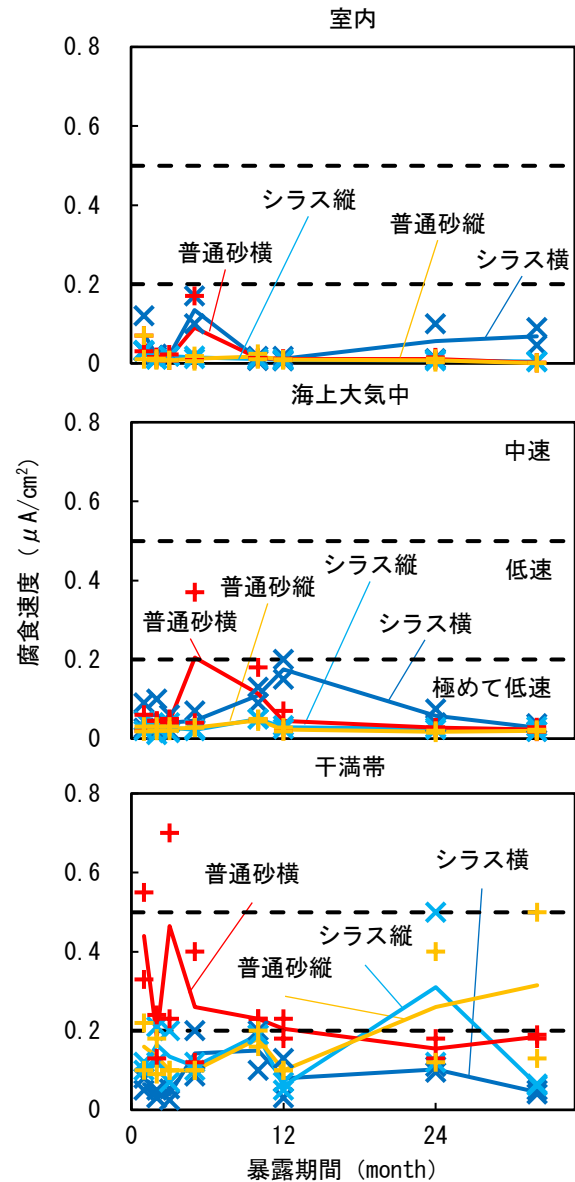


図-3 直線分極試験の結果

比べ大きな腐食速度を示した。供試体ごとにみると、シラスは概ね一定の腐食速度で推移しているものの、普通砂は同程度が増加する傾向にあった。

3.2 鉄筋周囲の全塩化物イオン量

図-4 に鉄筋周りの塩化物イオン量の経時変化を示す。細骨材の違いに関わらず、海上大気中、室内においては暴露開始時から鉄筋周囲の塩化物イオン量は概ね一定の値を示した。これは外部からの塩化物イオンの浸透がほとんどなく、鉄筋位置までの浸透は見られなかったためである。干満帯では、シラスの全塩化物イオン量は暴露開始時からほとんど変化していないことが分かる。一方で、普通砂は時間の経過とともに全塩化物イオン量が増加し、32 か月時点で $6\text{kg}/\text{m}^3$ 以上の全塩化物イオン量となった。これは、普通砂の場合は海水の影響を受けてコンクリート表面より塩化物イオンが鉄筋位置まで浸透したため、鉄筋周囲の塩化物イオン量が増加したと考えら

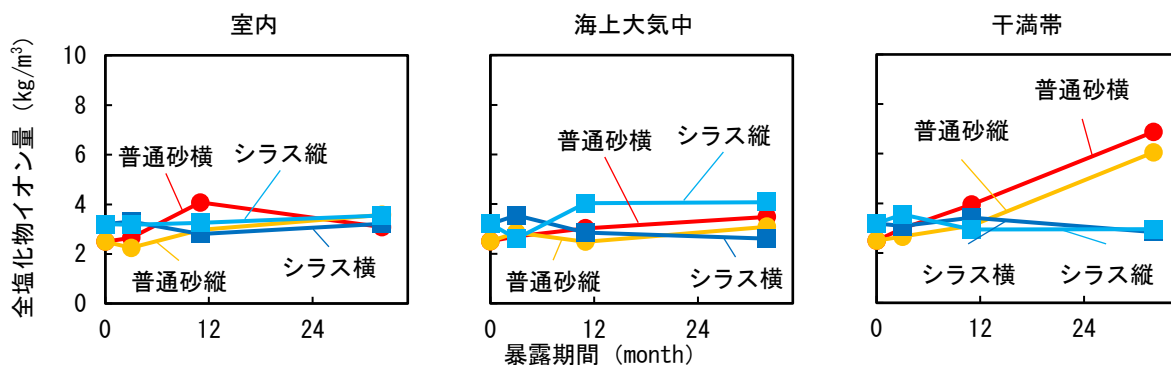


図-4 鉄筋周りの全塩化物イオン量の経時変化

れる。シラスコンクリートの場合には、水分の供給に伴ってシラスのポゾラン反応が進行しコンクリート内部の緻密化により遮塩性が向上したため、現時点においては鉄筋周囲まで塩化物イオンが到達していないと考えられる。このことから、海水練りシラスコンクリートの場合は、初期塩化物イオン量が若干増加するが、海洋環境下での利用を考えた場合には供用以降の塩分浸透抑制効果により塩害に対する耐久性は普通砂に比べて高くなると予想される。

3.3 鉄筋腐食

図-5 に鉄筋の腐食面積率の経時変化を示す。結果は横打ちの結果のみであり、縦打ちの供試体には腐食が確認されなかったため示していない。また、写真-2 に暴露 11 か月および 32 か月の横打ち供試体の鉄筋の腐食発生状況を示す。

横打ちの供試体のうち、干満帯では普通砂に、海上大気中では普通砂およびシラスに、室内ではシラスに腐食が確認された。いずれの鉄筋の腐食も打込み面を上面とした場合、下面側に腐食が集中していることが分かる。また、写真より、11 か月時の腐食程度と 32 か月後の腐食程度を見比べると、定量的な判断に至っていないが、赤錆が多くなっているため錆が進行している様子もうかがえる。そのため、直線分極試験により算出された腐食

速度は小さな値を示していたものの腐食が停止することなく徐々に進行しているものと推察される。腐食面積率の経時変化では、海上大気中に暴露した供試体は経時的なばらつきが大きくなる傾向を示した。このばらつきは、供試体の個体差によるものと推察されるため、打込み時のコンクリートの品質が影響を与えていると予想される。

供試体ごとの腐食の傾向は、水の供給がある環境下で普通砂の腐食が進行し、一方、乾燥しやすい環境下でシラスの腐食が進行する傾向が認められる。シラスに関しては、コンクリート内部が乾燥することにより酸素の侵

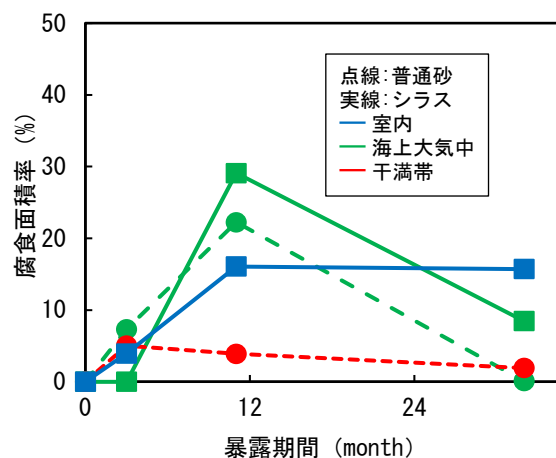


図-5 腐食面積率の経時変化

枠内は腐食が確認された鉄筋

11か月	室内		海上大気中		干満帯	
	普通砂	シラス	普通砂	シラス	普通砂	シラス
上面						
下面						
32か月	室内		海上大気中		干満帯	
	普通砂	シラス	普通砂	シラス	普通砂	シラス
上面						
下面						

写真-2 横打ち供試体の鉄筋の腐食発生状況

入を容易にしたことが原因であると考えられる。また、シラスの方が普通砂よりも吸水率が大きく、その違いから、本来、細骨材としてのシラス自体が持つ水分量が多いことが腐食に影響を及ぼしたとも考えられる。

3.4 鉄筋腐食原因に関する考察

普通砂とシラスの細孔溶液中の pH を確認することで腐食性について検討するため、コンクリート内部の pH を測定した。結果を図-6 に示す。いずれも pH12 程度と低い値が得られたが、傾向として普通砂に比べシラスの pH は小さくなる傾向にあった。これは、ポズラン反応による水酸化カルシウムの消失の影響が考えられる。シラスの初期塩化物イオン量の方が普通砂よりも大きかったこととあわせると、シラスは腐食しやすい環境になっていると予想される。また、暴露環境の違いでは、普通砂は概ね同程度の pH であったものの、シラスは海上大気中、室内が同程度、干満帯が小さい結果となった。普通砂よりもシラスの単位セメント量が多いことを考えると、供試体作製当初から比べると、pH が小さくなっていると考えることができ、干満帯においては特に、ポズラン反応が促進しているといえる。

直線分極試験の結果の一例として、縦打ち供試体の直線分極曲線を図-7 に示す。細骨材、暴露環境の違いに関わらず腐食速度は小さな位置にあるものの、分極曲線から例のような一定の腐食電流密度となる電位の範囲が存在せず、十分な不動態は確認されなかった。このことから、海水を練混ぜ水に用いた影響はあると考えられる。

次に、コンクリートの細孔構造について、図-8 に細骨材の違いによる細孔径分布を示す。細骨材の種類に限らず、室内が最も大きく、干満帯が最も小さい。シラスの方がその差は大きく、これは水分の供給に伴って水和反応およびポズラン反応が促進されたことで、コンクリート内部が緻密化したと考えられる。コンクリートの耐久性に影響すると考えられる毛細管空隙径を 40～200nm とし、普通砂と比較すると、室内は多孔化傾向にあり、海上大気中は同程度、干満帯は緻密化傾向にあり、全く水分の供給のない場所でのシラスコンクリートの利用は品質の低下を招く可能性が高いと考えられる。一方、海上大気中は普通砂とシラスで概ね同程度であり、物質透過抵抗性は同等の品質にあると推察される。また、干満帯では、シラスの方が普通砂に比べ細孔容積は小さく、ゲル空隙が大きくなる傾向にあった。これは、ポズランによる効果であり、物質透過抵抗性は向上しているものと推察される。

このような条件下で、横打ち供試体の鉄筋下面に腐食が確認されたことは施工の影響が考えられる。そこで、鉄筋周辺の形状分析を行った。結果を図-9 に示す。ここでは、各水準における結果を示す。打込み方向の違い

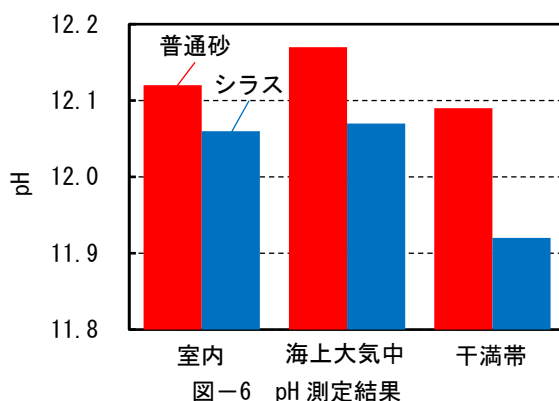


図-6 pH 測定結果

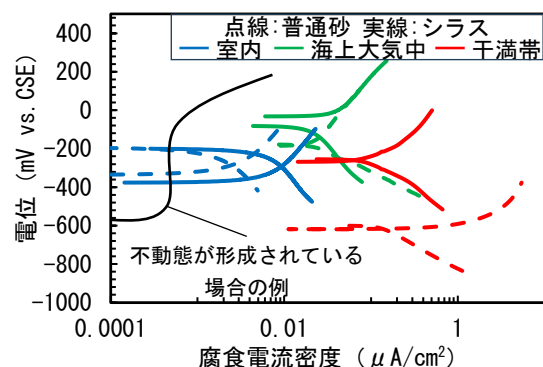


図-7 縦打ち供試体の直線分極試験結果

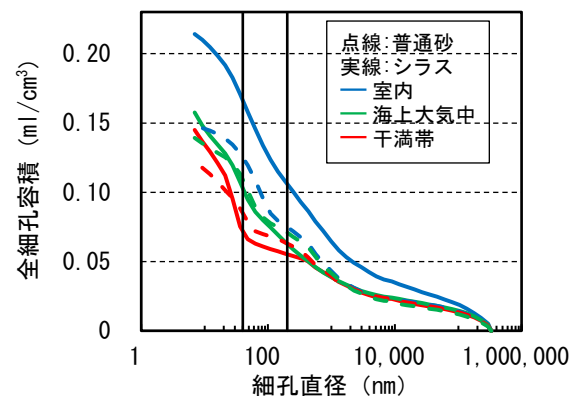


図-8 全細孔容積結果

では、横打ちは鉄筋周りに空隙が存在し、コンクリートによって品質にばらつきがあるのに対して、縦打ちは鉄筋周りの空隙はほとんど確認できず、品質もほとんど同様であった。縦打ちで腐食がなかったのは鉄筋周りの空隙の存在がみられなかったことも一因であると考えられる。横打ちに関しては、鉄筋下面に空隙が存在していることが分かる。普通砂の鉄筋周りにはおよそ半周にわたりブリーディングによる空隙が形成されているのに対して、シラスはブリーディングによる空隙はなく、練混ぜ時に連行される気泡が鉄筋下面に残存している程度であった。これは、ほとんどブリーディングが生じないシラスコンクリートの特徴³⁾でもある。腐食面積率の結果において供試体によってばらつきがあるのは鉄筋周りの空隙による品質のばらつきが大きいことが原因であると考

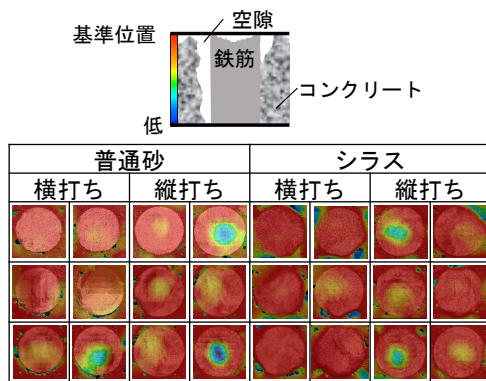


図-9 鉄筋周辺の形状分析

えられる。

上記の検討結果について、電気化学的解釈から考察する。図-10 に直線分極試験から推定した内部分極曲線を用いた電位と腐食電流密度の関係を示す。カソード分極挙動は酸素拡散が支配的になると予想される。結果をみると、シラスおよび普通砂ともにカソード分極曲線は縦打ちと横打ちで同程度かまたは横打ちが貴側にシフトする傾向にある。また、普通砂に比べてシラスのカソード分極曲線は貴側にシフトする傾向にある。このことから、コンクリートの種類としてはシラスが、また、打込み方向では横打ちの方が酸素拡散速度が大きい傾向になると考えられる。これは、細孔径の結果およびブリーディングの結果と整合する。一方、アノード分極挙動では、室内ではシラスと普通砂が同程度で、海上大気および干満帯はシラスの分極抵抗が大きくなる傾向にある。アノード分極挙動は塩化物イオン濃度が支配的となると考えられるため、鉄筋周囲の塩化物イオン量の結果と整合し、塩化物イオン量が増加すると傾きは小さくなる。これらの結果から、シラスの酸素透過性は普通砂に比べて同程度か高くなるものの、塩化物イオン浸透抵抗性が高くなることで、腐食の進行を抑制していると考えられる。海水練りコンクリートは島嶼または沿岸域での利用が考えられるため、塩害雰囲気での構造物の長期供用を考えた場合にはシラスの方が耐久性が高くなる可能性が高い。なお、打込み方向の違いによる腐食性については、明らかに水平鉄筋下面のブリーディングの影響を受けるため、施工には締固めをしっかりとするなどして十分な注意が必要と考えられる。

4. まとめ

本研究では、細骨材に海砂、シラスをそれぞれ用いた海水練りコンクリートを異なる3環境に暴露し、腐食特性を把握するために検討を行った。

シラスコンクリートは、外来塩分が影響する屋外環境に対しては、長期的にみると、塩化物イオンの浸透も考慮すると高い耐久性が得られた。ただし、乾燥しやすい

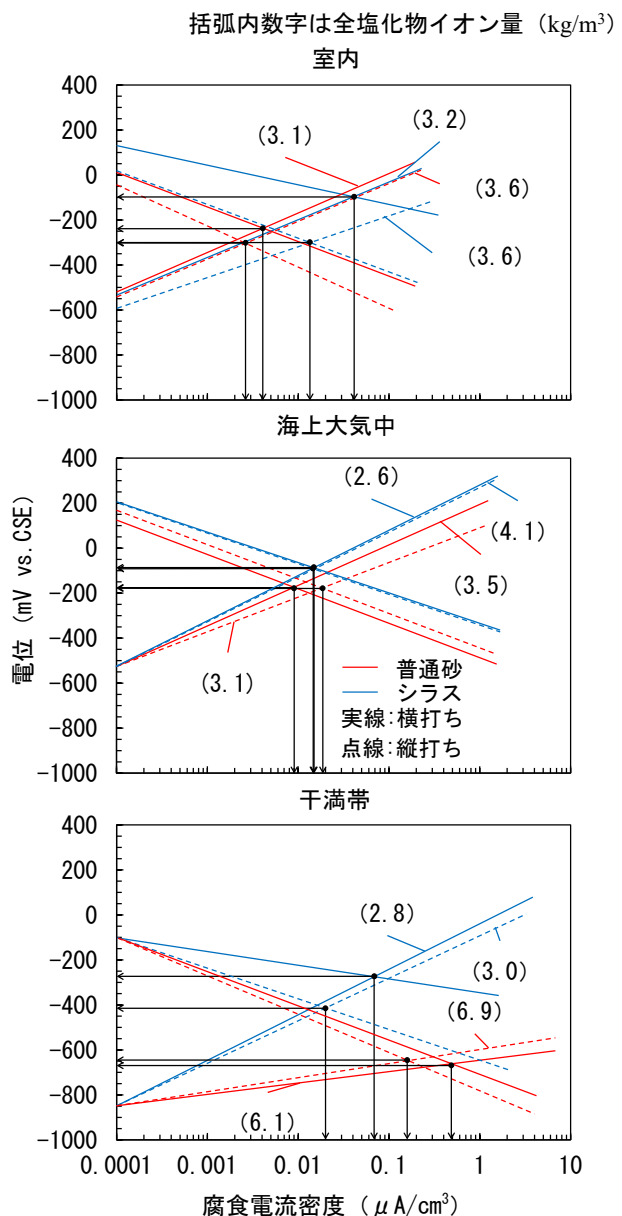


図-10 電位と腐食電流密度の関係

環境では、酸素の侵入を容易にし、ポズラン反応によるpHの低下と含水状況の違いにより腐食が進行する傾向にあるため留意が必要である。

参考文献

- 1) 福手 勤, 濱田秀則, 山本邦夫: 海洋環境に20年間暴露されたコンクリートの耐久性に関する研究, 土木学会論文集, No.442, V-16, pp.43-52, 1992.2
- 2) 鹿児島県土木部: 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), pp.25-45, 2006
- 3) 松元慎吾: 粒度調整した砕砂を用いたコンクリートのフレッシュ特性について, 土木学会西部支部, pp.673-674, 2021