

論文 温泉環境下に曝露したシラスコンクリート中の劣化モニタリングに関する実験的検討

森高 康行*1・武若 耕司*2・山口 明伸*3・多々良 勇貴*4

要旨：鹿児島県で現在建設中の丸尾の滝橋橋脚基礎部にはシラスコンクリートが適用されている。また、この地盤は温泉地特有の腐食環境下であるため、劣化状況をモニタリングするための照合電極および腐食センサが埋設されている。本研究では、この特殊環境下で得られたデータを適切に評価するための基準を作成することを目的として、供試体を2年間温泉環境へ曝露し、検討した。その結果、自然電位法では、鉄筋自然電位が卑変しても実際の鉄筋には大きな腐食は認められず、一般環境と異なる判定基準が必要であること。また、腐食センサでは、温泉成分の浸透深さをモニタリングすることが可能であること等が明らかとなった。

キーワード：温泉環境、シラスコンクリート、自然電位法、埋設型腐食センサ、モニタリング

1. はじめに

温泉環境下のコンクリート構造物は、温泉中に含まれる硫酸イオンに代表される有害成分や高温などの影響により、化学的侵食に分類される劣化が生じる。著者らはこれまでに、シラスを細骨材として使用したシラスコンクリートは、このような硫酸塩、高温環境において、良好な耐久性を有していることを確認^{1),2)}しており、現在、鹿児島県霧島市牧園町丸尾地区に建設中である丸尾の滝橋橋脚基礎部にはこのコンクリートが使用されている。

しかし、この橋脚基礎部の地盤は、温泉地特有の酸性土壌であり、130℃にも達する高い地熱も確認されている腐食環境下である。そのため、本橋脚基礎部には、シラスコンクリートの使用と併せて、長期的維持管理を目的として、鉄筋の腐食傾向を自然電位法によりモニタリングするための鉛照合電極および、温泉中におけるコンクリートの腐食因子の浸透深さをモニタリングするための腐食センサがそれぞれ埋設されている。ただし、これらのモニタリング手法については、海洋環境等で有効に適用できることはすでに確認されているものの、今回のような特殊な温泉・高温環境下での適用例が無いため、そこで得られた結果を塩害などの劣化判定で用いられている基準で評価できるかは、定かでない。

そこで、本研究では、モニタリング装置の測定精度の確認および得られたデータによる劣化評価基準を作成することを目的として、丸尾の滝橋が建設されている霧島温泉郷において、橋脚基礎部のコンクリートとその地盤環境を模擬した2年間の曝露実験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

作製したコンクリート供試体は、水セメント比を50%とし、丸尾の滝橋橋脚基礎部に使用されている鹿児島県横川町産シラス(密度2.2g/cm³)を細骨材として用いたシラスコンクリートおよび、一般的に使用される鹿児島県産海砂(密度2.55g/cm³)を用いた海砂コンクリートの2種類とした。表-1にシラスの化学組成を示す。シラスコンクリートでは、セメントとして低熱セメント(密度3.22g/cm³)、混和剤としてポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用し、海砂コンクリートでは、高炉セメントB種(置換率50%,密度3.05g/cm³)ならびにAE減水剤を使用した。いずれのコンクリートも、スランプ値10±2cm、空気量4.5±0.5%を目標として表-2に示した配合により作製した。

表-1 シラス(横川町産)の化学組成

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	lg.Loss
67.7%	0.24%	14.20%	2.47%	0.06%	0.71%	2.58%	3.96%	3.73%	0.03%	1.93%

表-2 供試体配合

コンクリートの種類	W/C (%)	セメント	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				水	セメント	シラス	海砂	粗骨材			
シラスコンクリート	50	低熱	34	195	390	478	—	1105	0.8	10	3.6
海砂コンクリート	50	高炉B種	41	168	336	—	707	1045	0.15	10.5	4.5

*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 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 准教授 博(工) (正会員)

*4 鹿児島大学大学院 理工学研究科 海洋土木工学専攻 (非会員)

2.2 供試体概要

図 - 1 に示す 200×200×250mm の鉄筋入り供試体には、黒皮付き異形鉄筋 (D13) およびみがき丸鋼 (13) をそれぞれ 2 本ずつ、かぶり 20, 50mm で配筋し、モニタリングのため供試体中央に鉛照合電極を埋設している。

図 - 2 に示す 200×200×250mm の腐食センサを埋設したコンクリート供試体は、次節で述べる腐食センサ表面をコンクリート表面にあわせて埋設した。

その他に、圧縮強度試験用として 100×200mm の円柱供試体、および EPMA 面分析により温泉成分の浸透を検討するための 100×100×200mm の角柱供試体の計 4 種類の供試体を作製した。供試体は脱型後、28 日間水中養生を行った後、曝露実験に供した。

2.3 腐食センサの概要

(1) 腐食センサの形状

腐食センサの形状を図 - 3 に示す。ポリマーセメントモルタルで作られた円筒形の本体の側面に、リング状に鉄線 (0.1mm) をそれぞれ端部から 5, 15, 30, 45mm の位置に巻き付けており、センサ本体中央部にステンレス製取手が取付けてある。鉄線の両端はそれぞれリード線とつながっており、両端の電位差をデータロガーにより測定する。

(2) 腐食センサの原理

本腐食センサは、図 - 2 に示した通り、腐食センサの端部とコンクリート表面をあわせて設置することにより、コンクリート表面から浸透した腐食物質が鉄線位置に到達すると鉄線が腐食して破断することで、その腐食物質の浸透深さが分かる仕組みとなっている。すなわち、鉄線両端の電位差をモニタし、その値が 0mV を維持している間は、鉄線は破断しておらず健全であるが、腐食が開始すると極細鉄線は直ちに破断するため、電位差が計測されて、その情報を把握することになる。なお、この腐食センサの塩害環境における塩化物イオン浸透に対する測定精度については既に確認されている³⁾。

2.4 実験方法

(1) 使用した温泉水

曝露実験に使用した温泉水には、霧島硫黄谷にあるホテルの硫黄泉を使用した。源泉の主な成分を表 - 3 に示す。この硫黄泉は、硫酸イオンを多量に含み、pH が 2.9 と強酸性であるため、硫酸イオンの浸入による内部鉄筋の腐食および強酸性によるコンクリートへの侵食が予想される。

(2) 実験方法

上述の温泉水を用いて、写真 - 1 に示す水槽内に各種供試体を全浸せきさせた状態で曝露を行った。また、

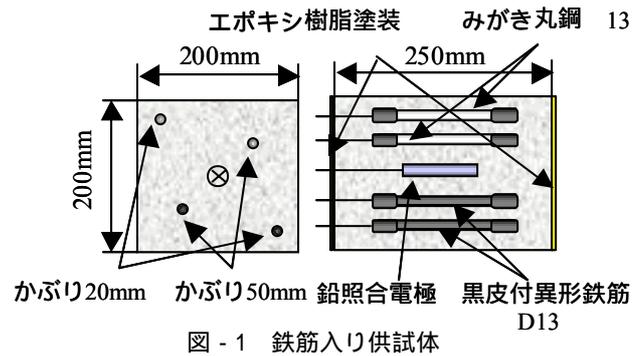


図 - 1 鉄筋入り供試体

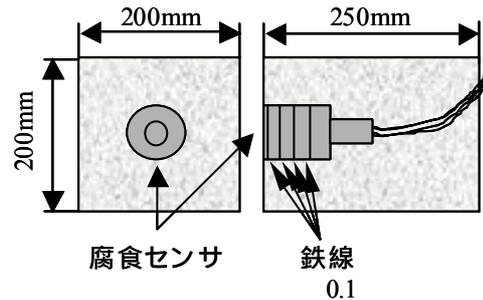


図 - 2 腐食センサ供試体

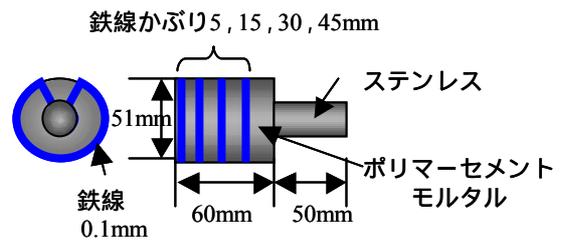


図 - 3 腐食センサ形状

表 - 3 霧島硫黄泉中の成分およびpH

温泉水pH	2.9
温泉中成分	含有量 (mg/kg)
硫酸イオン (SO ₄ ²⁻)	206.9
硫酸水素イオン (HSO ₄ ⁻)	8.8
塩化物イオン (Cl ⁻)	66.1
遊離硫化水素 (H ₂ S)	2
遊離二酸化炭素 (CO ₂)	65.1



写真 - 1 霧島曝露場

曝露温度は 20, 40, 80 の 3 水準とし, ヒーターを用いてそれぞれの温度にコントロールした, ただし, 腐食センサ供試体においては, 80 環境のみの曝露とした。なお, 温泉水は 2 週間毎に全て交換した。モニタリングデータは自動計測し, データロガーを用いて 1 時間毎にデータを収集した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

曝露 2 年を経過した円柱供試体の外観を観察したところ, コンクリート種類, 曝露温度の如何にかかわらず, 表面のセメントペーストの溶脱などはみられなかった。

曝露前 (材齢 79 日), 曝露 450 日および 2 年経過時において, 圧縮強度試験を行った。その結果を図 - 4 に示す。曝露 450 日経過時点では, いずれの供試体においても曝露前より圧縮強度の増加がみられたが, 曝露温度が上がるにつれ, 圧縮強度は低下する傾向がみられた。また, シラスコンクリートの方がどの温度環境においてもより強度増加が大きい傾向となった。曝露 2 年経過時では, 海砂コンクリートにおいては, 曝露温度が高くなるにつれ, 圧縮強度は顕著に低下する傾向がみられ, 80 環境では, 曝露前の強度を下回る結果であった。この強度低下の原因としては, 表面劣化がみられない点や後述する温泉成分の浸透深さからも, シラスとの違いは明確でなく原因については今後の検討課題である。一方, 曝露温度に関わらず, シラスコンクリートでは, 曝露 450 日に比べ, 若干強度低下が確認できるが, 温度環境による大きな強度低下はみられなかった。

3.2 腐食センサによる温泉成分浸透モニタリング

腐食センサによるモニタリング結果を図 - 5 に示す。シラスコンクリートでは, 4 本の鉄線全てにおいて, 鉄線電位, すなわち鉄線の両端の電位差は 0mV を示し, 鉄線が腐食破断しておらず, 最もかぶりの浅い 5mm 位置においても, 鉄線を破断させる温泉成分中の腐食因子の浸透はみられない結果であった。一方, 海砂コンクリートでは, 曝露 708 日経過時において, 5mm 位置の鉄線電位に初めて僅かながら電位の変動がみられ, 鉄線の破断が起こり, 温泉成分中の腐食因子がその位置まで浸透したことを予想させる結果が得られた。以上より, シラスコンクリートにおいては, 温泉成分の劣化因子浸透深さは表面 5mm 以下, 海砂コンクリートでは, 5mm 程度と判断された。なお, シラスおよび海砂コンクリート表面劣化性状は, 写真 - 2 に示すように, 僅かな表面のセメントペーストの溶脱がみられる状況であった。

3.3 EPMA 面分析による温泉成分浸透深さ

腐食センサによるモニタリングの精度を確認するため, 角柱供試体を用いて, EPMA による面分析を行い,

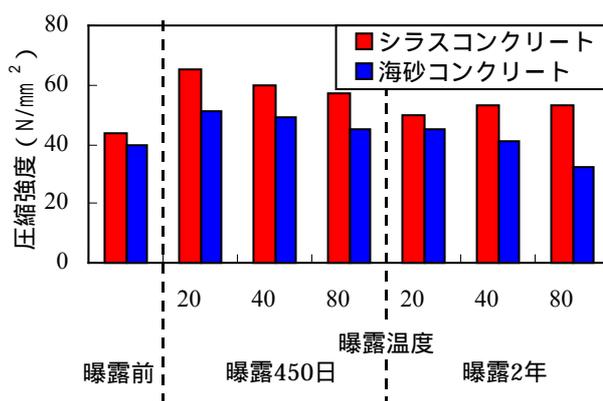


図 - 4 圧縮強度試験結果

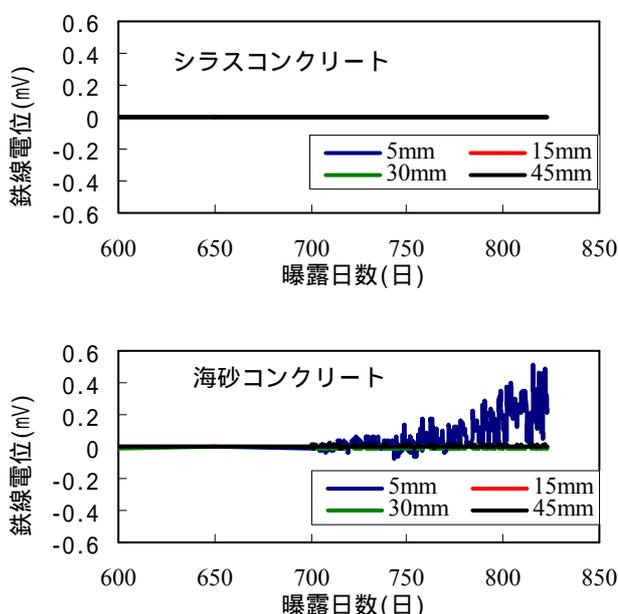
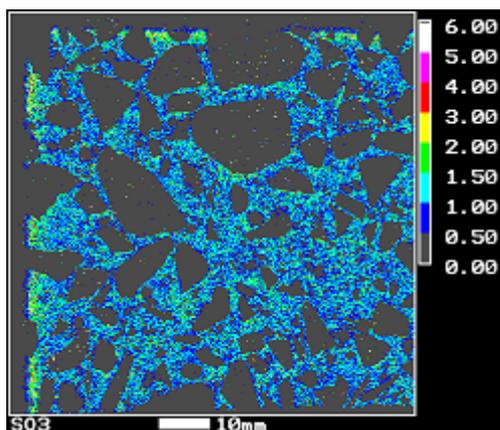


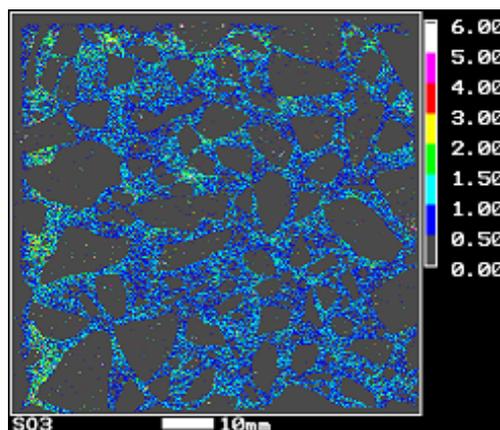
図 - 5 腐食センサによるモニタリング結果



写真 - 2 腐食センサ供試体外観



80 環境シラスコンクリート



80 環境海砂コンクリート

図 - 6 EPMAによる面分析結果（曝露2年）

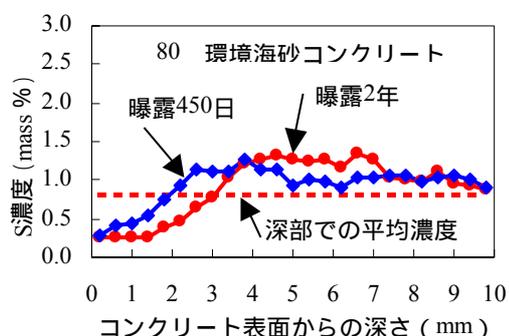
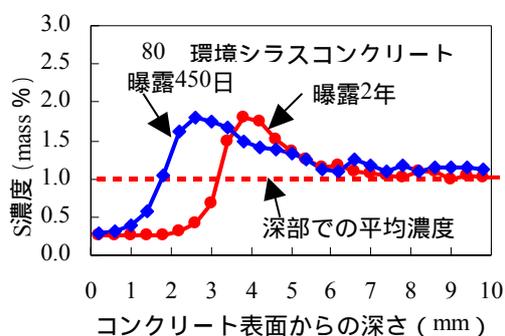


図 - 7 硫黄 (S) の深さごとの濃度

コンクリート断面の元素濃度を調べた。測定面として、角柱供試体をカットし、それをさらに80×80mmの大きさにしてEPMAによる面分析を行った。試験を行ったのは、曝露450日、2年経過した20、40、80環境のシラスおよび海砂コンクリート供試体である。一例として、80環境のシラスおよび海砂コンクリート中の硫黄(S)の濃度分布結果を図-6に示す。図中の上面および左側面がコンクリート表面となっている。また、これらの面分析結果より、80環境に450日および2年間曝露したコンクリート中の硫黄の濃度分布曲線を求めた結果を図-7に示す。シラスコンクリートでは、曝露450日においては、表面より深さ3mm程度で最も高い濃度を示し、5mm位置程度まで、コンクリート深部よりも高い濃度を示していた。曝露2年になると、表面から4mm位置で最も高い濃度を示し、時間経過とともにより内部に浸透したことが確認できるが、表面5mmよりも深部には、未だ硫黄はほとんど浸透していない状況であった。一方、海砂コンクリートでは、シラスコンクリートのような明確な濃度のピークは認められないものの、曝露450日時点で約3~4.5mm、曝露2年で約4~7mmの範囲において濃度の増加が認められ、広い範囲でより深くまで硫黄が浸透していることが確認された。なお、両コンクリート中の硫黄の浸透速度について比較すると、シラスコンク

リートにおいては、曝露450日から2年にかけて、約1mm浸透深さが大きくなっているのに対し、海砂コンクリートでは、約2mm大きくなっているようであり、浸透速度に違いが確認できる。また、曝露温度が異なる20、40環境の供試体では、80環境に比べ、硫黄の浸透深さは小さくなっており、曝露温度が高くなるにつれ、コンクリート種類に関わらず、浸透深さは大きくなる傾向がみられた。また、いずれのコンクリート表面部分において、硫黄濃度が低くなっているのは、カルシウム濃度でも同様の傾向がみられ、硫黄の浸透により、カルシウムと反応が生じ、成分が溶出したからと考えられる。

腐食センサによるモニタリング結果とEPMA面分析結果を比較してみると、海砂コンクリートにおいては、表面より7mm位置まで硫黄が浸透しており、表面より5mm位置の鉄線が破断した腐食センサとの結果と一致する。シラスコンクリートにおいては、表面より5mm位置に硫黄が浸透しているとEPMAによる面分析から確認できるが、曝露450日から2年の間に表面より5mm以降の深さでは、ほとんど濃度が変わっていないことから、表面5mm位置付近までは未だほとんど硫黄は浸透しておらず、したがって、腐食センサ5mm位置の鉄線の破断には至らなかったと考えられる。

これらの結果から、腐食センサによる温泉成分の浸透

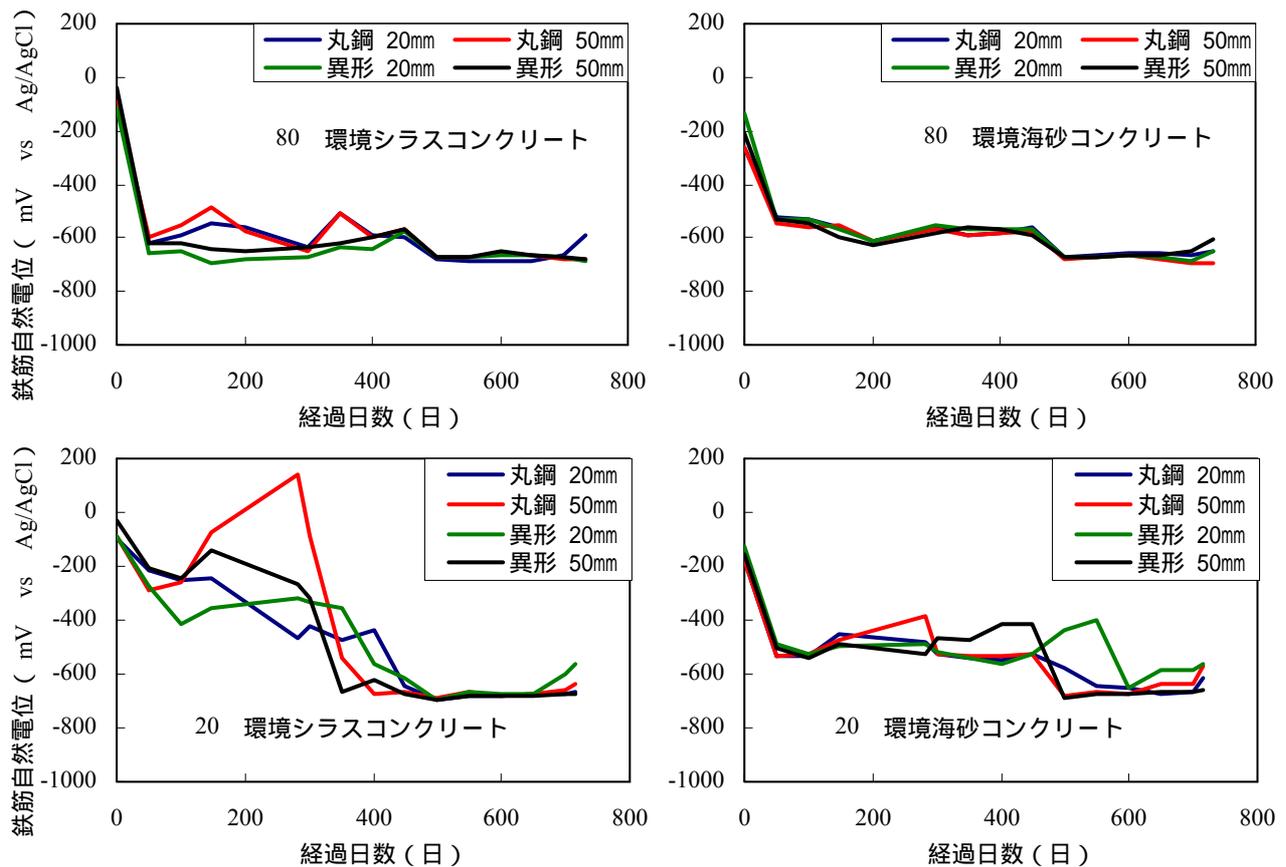


図 - 8 鉄筋自然電位

モニタリングが可能であることが確認できたことから、このセンサによるモニタリングを継続することで、鉄筋位置までの腐食因子の浸透予測がある程度可能であると考えられる。なお、コンクリート表面の侵食深さについては、実際の侵食深さが未だ僅かであったことから、今回の検討では、侵食深さとモニタリング結果とを関連付けて検討することができなかつたため、今後さらに曝露を継続し、腐食センサのモニタリング結果から予測可能かを検討する必要がある。

3.4 自然電位法による鉄筋腐食性状モニタリング

鉄筋の腐食傾向を間接的にモニタリングするため、鉛照合電極を用いて測定した結果の例として、20 および 80 環境中の供試体の鉄筋自然電位の経時変化を図 - 8 に示した。80 環境での供試体では、シラスおよび海砂コンクリートともに、曝露直後より鉄筋自然電位は急激に卑変し、 -700 (mV vs Ag/AgCl) 前後で推移していた。これに比べて、20 環境の供試体では、80 環境の供試体に比べ、浸せき初期では比較的高い鉄筋自然電位を示していたが、海砂コンクリートは曝露数日でその電位は、ASTM C 846 の腐食判定基準で 90% 以上の確率で腐食が発生したと判断される電位 (飽和 Ag/AgCl 換算では -230 mV に相当) を下回り、腐食領域を示す結果となった。また、シラスコンクリートでも曝露 50 日前後で同様

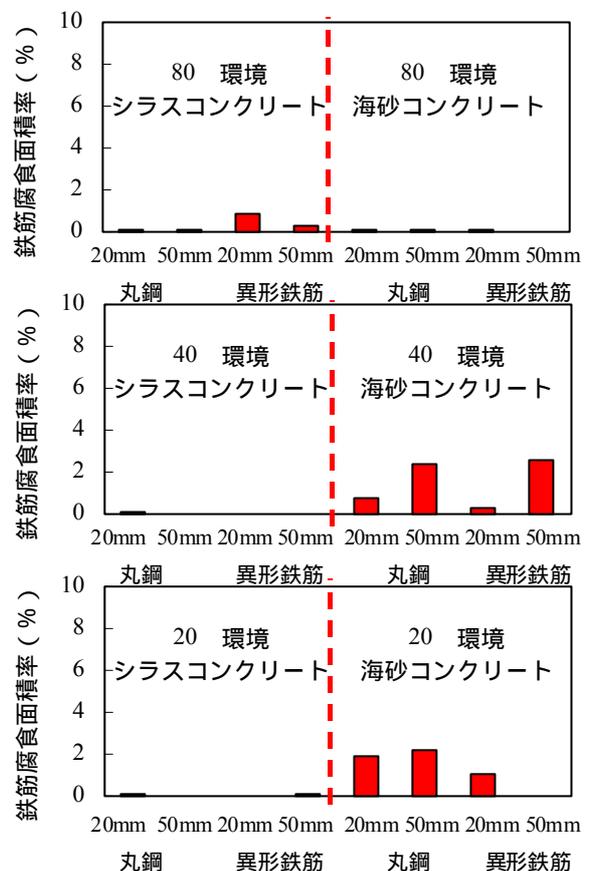


図 - 9 鉄筋腐食面積率

に腐食発生と判定される結果となった。さらに、曝露 2 年終了時点ではいずれの電位も 80 環境の鉄筋自然電位と同程度にまで低下した。

曝露 2 年経過後、供試体の解体調査を行い、鉄筋の腐食状況を確認した結果のうち、図 - 9 に鉄筋腐食面積率を示す。この結果、80 環境の供試体においては、いずれのコンクリート中の鉄筋にも肉眼で僅かに確認できる程度の微小な点錆は認められたが、腐食が著しく進行している状況はみられなかった(写真 - 3(A)参照)。また、20 および 40 環境においては、海砂コンクリート供試体中の鉄筋で微量の腐食が確認された(写真 - 3(B)参照)、シラスコンクリートについては、一部の鉄筋に点錆は 1~2 か所認められる程度で、目視では腐食が全く確認できない鉄筋もあった。

これらの鉄筋腐食状況を上記の自然電位の結果と比較すると、例えば、20 環境の供試体の場合のように、自然電位の変化の状況から、海砂コンクリートよりもシラスコンクリートの方が腐食発生までの時間は長く、その分だけ腐食は進行していないと予想でき、そのことは定性的には図 - 9 の腐食結果にも表れていた。ただし、実際の腐食状況は、電位の大きな卑変が継続していることによって予想されるような大きな腐食にまでは至っていない。また、80 環境の供試体には、コンクリートの種類に関わらず、曝露当初から 2 年間にわたって卑変が継続しており、酷い腐食状況も予想されたが、実際の腐食は僅かであった。ASTM の腐食判定基準は一般的な塩害環境下での基準であり、本実験のように供試体が全浸せき状態で酸素が欠乏している環境や化学的侵食で鋼材腐食が起きるような環境での適用については定かではなく、また、塩害等による場合に比べその検討事例も皆無であることから、評価基準が確立していない⁴⁾。少なくとも今回の結果は、本研究の対象とする環境において、鉄筋自然電位の測定結果を従来の腐食判定方法に当てはめて行うことは難しいことを示している。

なお、解体した際にフェノールフタレインにより中性化深さも確認したが、全ての供試体において中性化深さは 1mm 程度と僅かであり、コンクリート表面の劣化も 40 と 80 環境のシラスおよび海砂コンクリート供試体の一部にペースト部の溶脱が僅かにみられる程度であった。また、先に示した EPMA による面分析より、温泉成分中の鉄筋腐食因子は未だ鉄筋位置にまでは到達していないと考えられた。このように中性化や腐食因子が鉄筋位置まで到達していないにも関わらず、今回の実験において僅かながら鉄筋腐食が生じていた理由については、現在のところ明確でなく、この点についても今後の検討課題である。



(A) 80 環境シラスコンクリート (丸鋼かぶり20mm)



(B) 20 環境海砂コンクリート (丸鋼かぶり50mm)

写真 - 3 内部鉄筋表面

4 結論

高温温泉水中に全浸せきさせた状態のコンクリートの劣化状況ならびに、その劣化のモニタリング手法に関する実験的検討を行った結果、以下のことを確認した。

- (1) 本実験で使用した腐食センサを用いることによって、温泉成分に起因する鉄筋腐食因子の浸透深さをモニタリングすることが可能である。
- (2) 高温温泉環境にさらされたコンクリート中の鋼材腐食状況を自然電位法によりモニタリングする場合には、ASTM 基準などの塩害に対して一般に用いられる腐食判定基準によって腐食発生状況を判定することは難しく、新たな判定基準を作成する必要がある。
- (3) 圧縮強度、温泉成分の劣化因子浸透深さおよび鉄筋の腐食状況より、シラスコンクリートは温泉環境下において、一般的に用いられる海砂コンクリートより高い耐久性および劣化因子の浸透抑制効果をもつことが確認できた。

謝辞

本研究は長大(株)と実施した共同研究の一部である。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 奥地栄祐, 武若耕司, 清川秀樹, 中尾好幸: 高温環境下へのシラスコンクリートの適用に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.681-686, 2004.7
- 2) 西山理子, 武若耕司, 佐伯貢, 山口明伸: シラスと普通砂を混合使用したコンクリートの諸性質に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.125-130, 2006.7
- 3) 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
- 4) 土木学会編: コンクリート標準示方書[維持管理編], 2007.3