

周囲環境の影響を考慮した後施工型腐食環境検知センサの応答に関する検討

日本工営(株) 正会員 ○岡本 萌, 中野 雅章, 高地 透, 松山 公年
前田建設工業(株) 正会員 米田 大樹
(株)コムスエンジニアリング 正会員 土屋 智史

1. はじめに

既設構造物に腐食環境検知センサ（以後、センサ）を後施工して、鉄筋の腐食環境をモニタリングする際には、センサ周囲にモルタル等が充填されるため、センサが周辺の腐食環境を短時間では検知できないことが懸念される。そこで本研究ではセンサを後施工した小規模供試体を用いて塩害促進実験及び EPMA 分析による塩分浸透分析を行い、塩化物イオンの移動状況及びセンサによる腐食環境検知結果との整合性を確認した。さらにセメント系複合材料の微細構造と物質平衡・移動をモデル化した熱力学連成解析システム（以後、DuCOM¹）を用いた数値解析を行い、センサによる腐食検知結果や EPMA 分析との整合性を確認した。

2. 実験概要と結果

小規模供試体（写真-1）では、センサ設置時の充填厚の大小（約 11mm および約 25mm）を考慮した。同供試体は著者らの過年度の研究で用いたものの一部を切り出したものであり、電位差滴定法によれば、センサ周辺で 3.6～7.4kg/m³ 程度の塩化物イオンが存在していた。それぞれの充填厚に対して、図-1 の実験環境条件（ケース 1～4）を設定し、センサによる腐食環境の検知を行った（計 4 供試体）。なお、センサは腐食センサ（日本防蝕工業(株)製）を用いた。ケース 2（充填厚 11mm+乾湿繰り返し養生）の供試体のみでセンサ設置後約 80 日以降に表層から 15mm のセンサの抵抗値が大きくなり、周辺が腐食環境にある可能性が検知された（図-2）。その他のケースでは、センサの測定結果に大きな変化が見られなかった。すなわち、ケース 1, 3, 4 においては塩害の促進環境にありながら、300 日程度が経過しても充填材の介在により周辺の腐食環境をセンサが検知できなかった。そこで、内部の塩分浸透状況を確認すべく、EPMA 分析を行い、さらに DuCOM による塩分浸透解析を実施した。

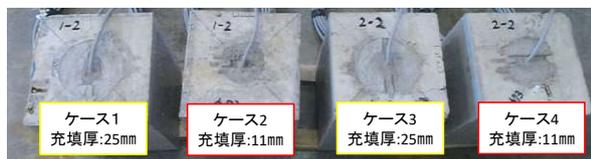


写真-1 供試体

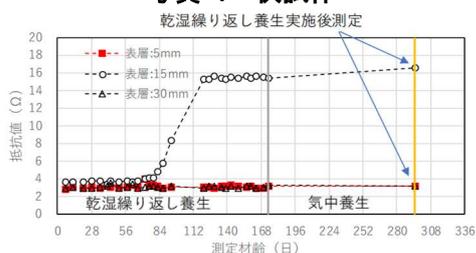


図-2 腐食センサ測定結果 (ケース2)

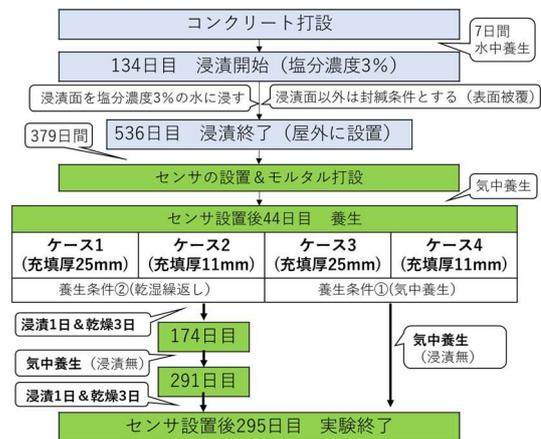


図-1 実験環境条件

3. 解析的検討

3.1 EPMA 分析

図-3 にケース 2 の EPMA 分析の結果を示す。センサの抵抗値に大きな変化があった範囲 5 の区間で塩化物イオン量は 1.51kg/m³ となり、腐食が開始する基準とされている 1.2kg/m³ に達していた。塩化物イオン量に関するセンサの検知閾値は 1.0～2.4kg/m³ とされているため、センサによる検知結果と EPMA 分析の結果とは整合している。センサが腐食環境を検知しなかったその他のケースでは、EPMA 分析においてセンサ検知閾値を下回る塩化物イオン量 (1.0kg/m³ 以下) となり、同様に実験と整合していると言える結果となった。

キーワード 塩害, 腐食, センサ, 熱力学連成解析システム

連絡先 〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304 日本工営(株)中央研究所 TEL029-871-2032

3.2 材料-構造連成解析 (DuCOM)

DuCOM による解析では実験のイベントを再現することを基本とした。ただし、相対湿度は実験時の平均値を採用した。図-4 で DuCOM によるケース 2 の解析結果を示す。モルタル部からセンサ検出部であるセンサモルタル部へ塩化物イオンが浸透していることがわかる。モルタル部とセンサモルタル部の境界では黄色の $1.0 \sim 1.2 \text{ kg/m}^3$ を示しており、この結果はセンサが検知可能な塩分量と整合している。また、供試体表面より表層 15mm 付近の塩分量が多くなっており、この結果は EPMA 分析結果とも整合している。これは DuCOM の解析では水分移動に伴う塩化物イオンの移動や細孔空隙内での固定化についても扱っており、拡散のみならず移流や表面付近の蒸発等複合要因の影響が考慮されているためと考えられる。

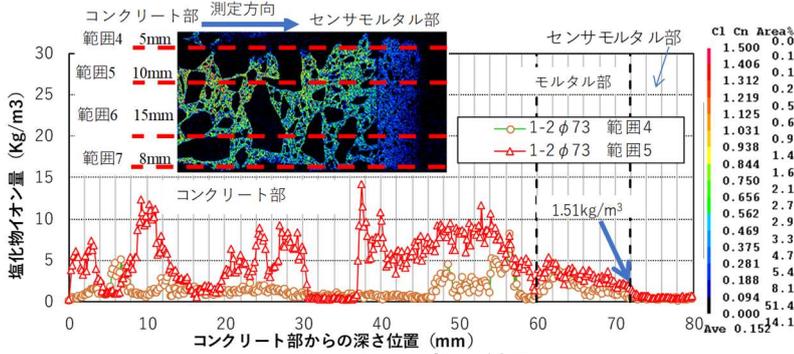


図-3 EPMA 分析の結果

表-1 感度分析条件と結果

ケース	充填厚	養生環境	周辺塩分量	充填材W/C	周辺温度	所要検知日数
ケース5	11mm	養生条件②	3% NaCl	75.0 %	21.2°C	157日
ケース6	11mm	養生条件②	3% NaCl	60.0 %	21.2°C	208日
ケース7	11mm	養生条件②	15% NaCl	70.5 %	21.2°C	2日
ケース8	11mm	浸漬1日乾燥3日	3% NaCl	70.5 %	21.2°C	157日
ケース9	11mm	浸漬1日乾燥1日	3% NaCl	70.5 %	21.2°C	95日
ケース10	11mm	養生条件②	3% NaCl	70.5 %	40.0°C	233日

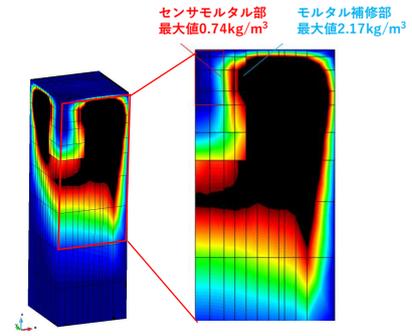


図-4 DuCOM による解析結果

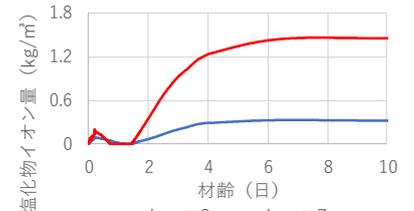


図-5 周辺塩分濃度による影響

DuCOM により塩分浸透挙動が再現可能であることが分かったため、数値解析を用いて、その他の影響因子に関する感度分析を実施した (表-1)。なお、数値解析における積分点とセンサ部の位置を考慮し、上記の試験再現ケースに基づき、解析上でのセンサ反応閾値は 0.6 kg/m^3 とした。最も影響が大きかったのは、ケース 7 の周辺塩分濃度であり、図-5 に示すようにセンサ設置後数日で検知する結果となった。また、充填材の W/C が高く、乾湿のサイクルが短いほうが、センサが腐食環境を検知するのに要する時間は早かった (表-1)。ただし、いずれも 100 日から 200 日程度を要することが分かった。

4. まとめ

本研究による試験結果から、ケース 2 のみが測定材齢約 80 日でセンサの抵抗値に変化が現れた。また、試験後の EPMA 分析結果から得られた塩化物イオン量はセンサの検知状況と整合していた。このことから、後施工で腐食環境を検知するセンサを設置する場合には、腐食環境の進行が十分に浅いと推測される潜伏期に設置されるべきであると考えられる。また、DuCOM による解析では、センサ設置時に介在する充填材の影響を概ね再現することができた。既に内在する塩分が認められる場合は、塩分の浸透状況やセンサの検知閾値をあらかじめ適切にモデル化し、解析しておくことで、合理的なモニタリング計画の策定に用いることができる可能性を示した。

謝辞

本研究は、モニタリングシステム技術研究組合 (RAIMS) が実施した研究であり、内閣府の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一環として国土交通省が実施する「社会インフラへのモニタリングシステム技術の活用推進に関する技術研究開発」委託事業研究の成果である。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-scale modeling of concrete performance –integrated material and structural mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.2, pp.91-126, 2003.