

論文 ひび割れ部での塩水浸透に関する実験的研究

田中 和幸^{*1}・矢田 一也^{*2}・石田 剛朗^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨：本研究では、塩分を含む降雨-乾燥の繰返しを受けるコンクリートのひび割れ部断面内での電極間の抵抗を直接的に測定することにより水分移動状況を、またひび割れ周辺の塩化物濃度分布を測定することにより塩化物イオン浸透状況の経年的変化を実験的に検討した。また普通ポルトランドセメント及び高炉セメント B 種を用いてセメントの相違による影響もあわせて検討した。

キーワード：ひび割れ, 高炉セメント B 種, 乾湿繰返し, 電気抵抗, 塩化物イオン

1. はじめに

沿岸域にあるコンクリート構造物では風, 台風などにより運ばれる塩化物による鉄筋腐食が大きな問題となっている。一方, 鉄筋コンクリート(RC) 構造物はひび割れ発生を認めており, 塩化物浸透に及ぼすひび割れの影響評価は極めて重要である。土木学会¹⁾ではひび割れを考慮した見かけの拡散係数による方法を提示している。この方法はひび割れの影響を非ひび割れ部のそれと平均的に扱う考え方であり, コンクリートが緻密である場合やかぶりが大きい場合には必ずしも適した方法とはいえない。

そこで本研究では, 連続鉄筋コンクリート舗装(CRCP)のようなコンクリートが緻密でかぶりが大きい構造物を想定し, 0.3mm 程度のひび割れを有する RC 供試体を塩化物を含む降雨と乾燥の乾湿繰返し環境下に曝すことにより, ひび割れ部の水分状況及び塩化物浸透状況を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

セメントには, 普通ポルトランドセメント(密度: 3.16kg/cm³, 比表面積: 3280cm²/g)及び高炉セメント B 種(密度: 3.04kg/cm³, 比表面積: 3910cm²/g)を用いた。後者はグリーン商品としてその使用が推進されており, 塩化物抵抗性も高いことが知られているが, 自己収縮が大きい可能性があり, ひび割れ部での腐食抵抗性が明らかにされていないため, 普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較するために用いた。骨材には粗骨材として賀茂郡黒瀬町産砕石(最大寸法: 40mm, 表乾密度: 2.62, 吸水率: 0.35%, 粗粒率: 7.20)を, 細骨材として賀茂郡黒瀬町産細砂(表乾密度: 2.58, 吸水率: 1.57%, 粗粒率: 2.94)をそれぞれ用いた。混和剤にはリグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩を主成分とする AE 減水剤をセメント質量の 1% 使用した。コンクリートの配合を表-1 に示す。

表-1 コンクリートの配合

コンクリートの種類	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				
						W	C	S	G	AE
普通	40	6.5	4.5	40	40.0	168	420	676	1030	C*1%
高炉	40	6.5	4.5	39.5	38.4	167	423	643	1048	C*1%

AE: AE 減水剤

*1 広島大学 大学院工学研究科博士課程前期 (正会員)

*2 大成建設(株) 北信越支店浄土寺川ダム作業所 工修 (正会員)

*3 広島大学 大学院工学研究科助手 工修 (正会員)

*4 広島大学 大学院工学研究科教授 工博 (正会員)

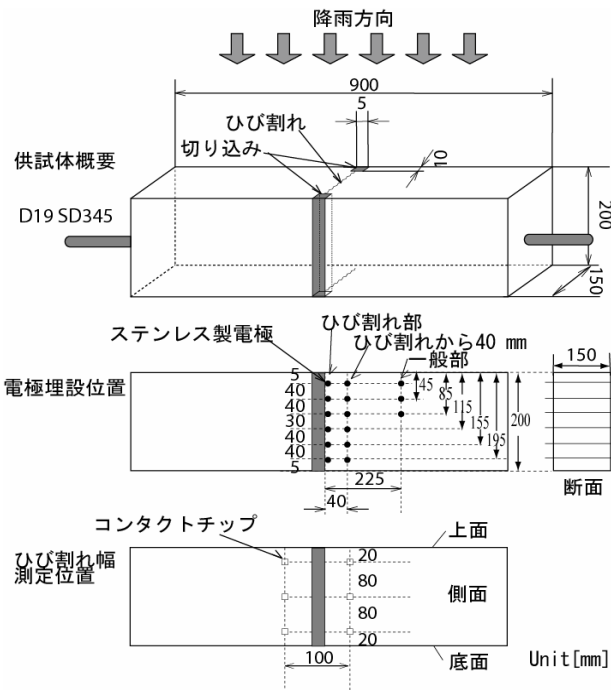


図-1 供試体概要

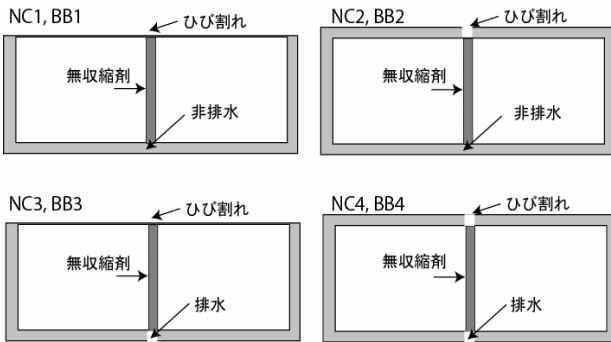


図-2 シール条件

2.2 供試体の詳細

本研究で用いた供試体の形状、寸法を図-1に示す。供試体は150×200×900mmの角柱供試体とし、断面図心にD19SD345の異形鉄筋を配置した。供試体中心部には奥行き10mm、幅5mmの切り込みを予め設けて、この位置にひび割れを誘発できるようにした。電気抵抗の測定により水分移動状況を把握するための供試体にはひび割れ部、ひび割れから40mm及びひび割れから225mm（以下、ひび割れの影響が無視し得ると考えられるため一般部と呼ぶ）の断面にステンレス製電極棒（φ:2mm）を埋設した（図-1）。図中に示す距離は全て電極の中央位置での距離である。電気抵抗測定値は既往の研究²⁾に従っ

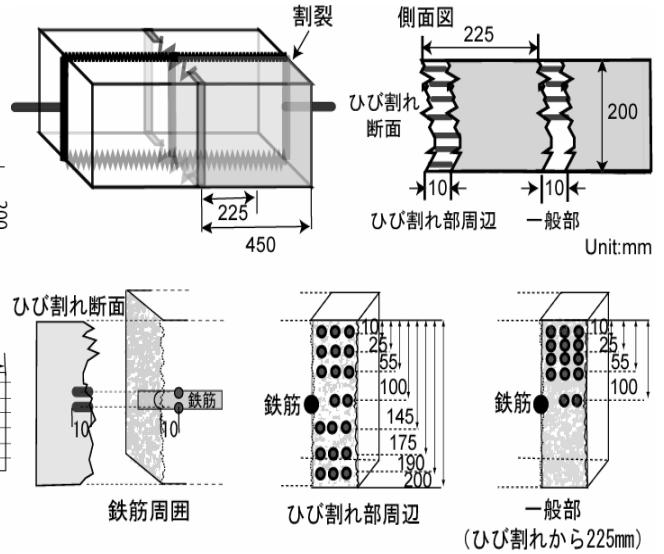


図-3 サンプルング箇所

て20℃換算に温度補正を行い、また電極間の距離は30mm及び40mmの2種類があるため、その影響を排除する目的で得られた測定値を電極間の距離で除した。すべての供試体は打ち込み後7日間の湿潤養生をし、その後室内気中暴露を55日間行い、さらに飽和状態での電気抵抗を測定するために8日間の水浸漬を行った。

ひび割れ導入は室内気中暴露中に行い、長手方向中央断面に曲げによりひび割れを導入した後、両端部鉄筋を両引きした。両引き時、鉄筋応力が平均約231N/mm²、ひび割れ幅が断面内で平均約0.3mmになったところで切り込み部にセメント系無収縮剤を埋め込み、無収縮剤が硬化したのを確認した後に除荷した。その残留値は0.3mm程度であり、除荷による戻りはわずかであった。ひび割れ幅の測定にはJIS A 1129に規定されるコンタクトゲージ法を用い、その測定位置は図-1に示す通りである。

水分及び塩化物侵入に及ぼすひび割れの影響を把握するために、図-2に示すように供試体には4種類のシーリングを施した。すなわち、底面のひび割れ部がシールによって閉塞しているものと開口しているものの2種類、さらにひび割れの影響を抽出するために上面ひび割れ部を除く上面にシールしたものとしていないものの2種類、計4種類である。

2.3 乾湿繰返し環境

台風等の風雨または降雨に曝されるひび割れ部を想定し、鉄筋腐食を促進させる過程における水分移動及び塩化物浸透状況を把握するため、温度 40℃、湿度 95%以上及び NaCl を 3%含む降雨環境(降雨量約 55mm/hr)に 24 時間、温度 40℃、湿度 60%の雰囲気にて 6 日間の暴露を 1 サイクルとする乾湿繰返し環境に供試体を曝した。温度に関しては腐食促進の目的で 40℃に設定した。これに先立ち、飽水状態にある供試体の電気抵抗の初期値を計測するために、20℃の水中に 8 日間浸漬し、その後温度 40℃、湿度 60%に 7 日間曝した。上記の実験はこれに続いて実施した。

2.4 塩化物の濃度分布と経時変化

45 サイクル及び 95 サイクル終了後に、ひび割れ部周辺及び一般部の 2 断面において全塩化物濃度を JCI-SC5³⁾ に従って測定した。測定した上面からの深さは図-3 に示す通りで、分析試料のサンプリングはドリル法を用いた。分析試料に含まれる骨材については、分析試料を硝酸で溶解した後に残留した骨材量を求め補正した。本研究では、水和度 100%及び 105℃炉乾燥後のセメントゲルの 25%が結合水及び層間水であると

仮定⁴⁾し、セメント中に含まれる塩化物濃度を算出した。ひび割れ部表面に付着した塩分は試験前にエタノールで除去した⁵⁾。

またひび割れ断面からコンクリート内部への塩化物イオン浸透状況を把握するために、95 サイクル終了後の供試体より 79×77×20mm のひび割れ断面を含めた試料を切断し、分析試料として研磨・炭素蒸着して EPMA による塩化物イオン濃度の面分析を行った⁶⁾。分析試料の切断箇所を図-4 に示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 降雨-乾燥期間の電気抵抗の変化

7 日間の暴露乾燥後、上述した乾湿繰返し環境に供試体を曝した。図-5 に普通コンクリートの

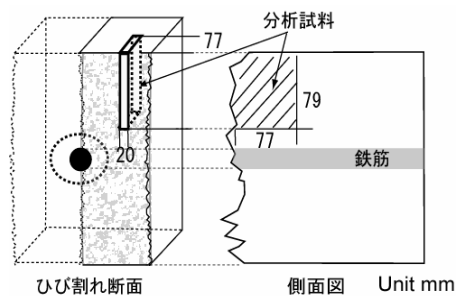


図-4 EPMA 分析用サンプル位置

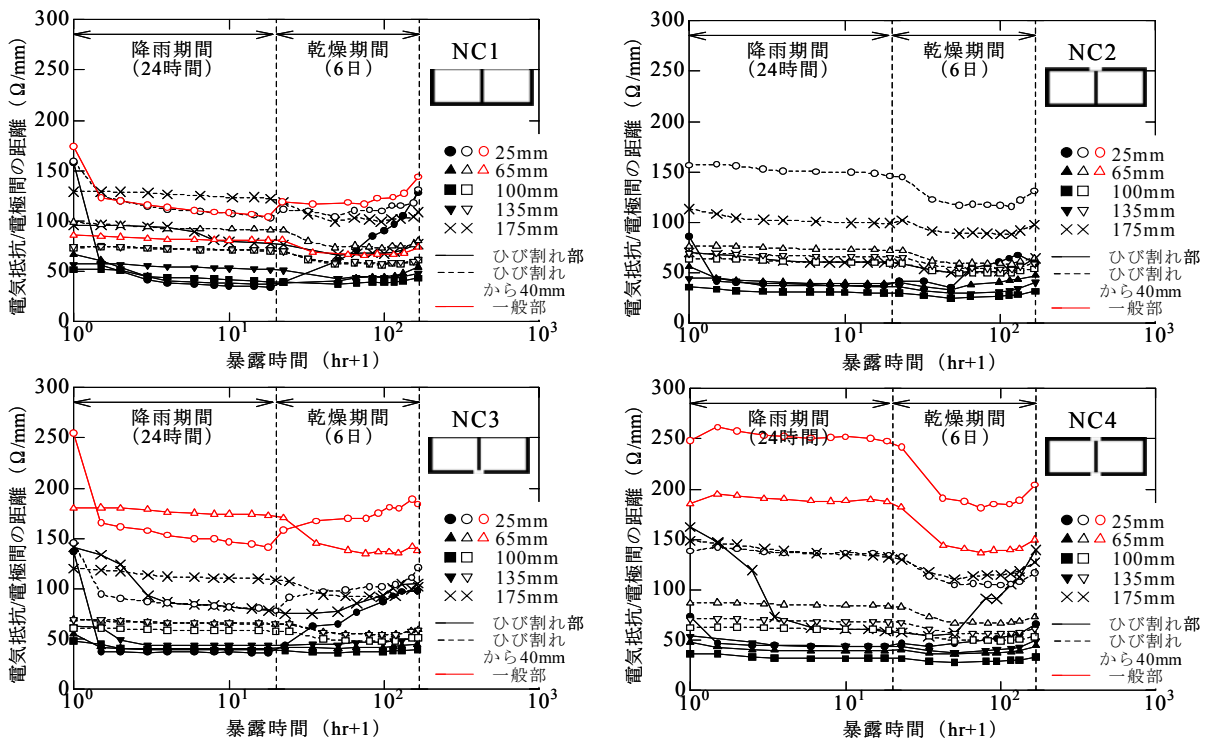


図-5 ひび割れ部、ひび割れから 40mm 及び一般部での電気抵抗 (NC : 131 サイクル目)

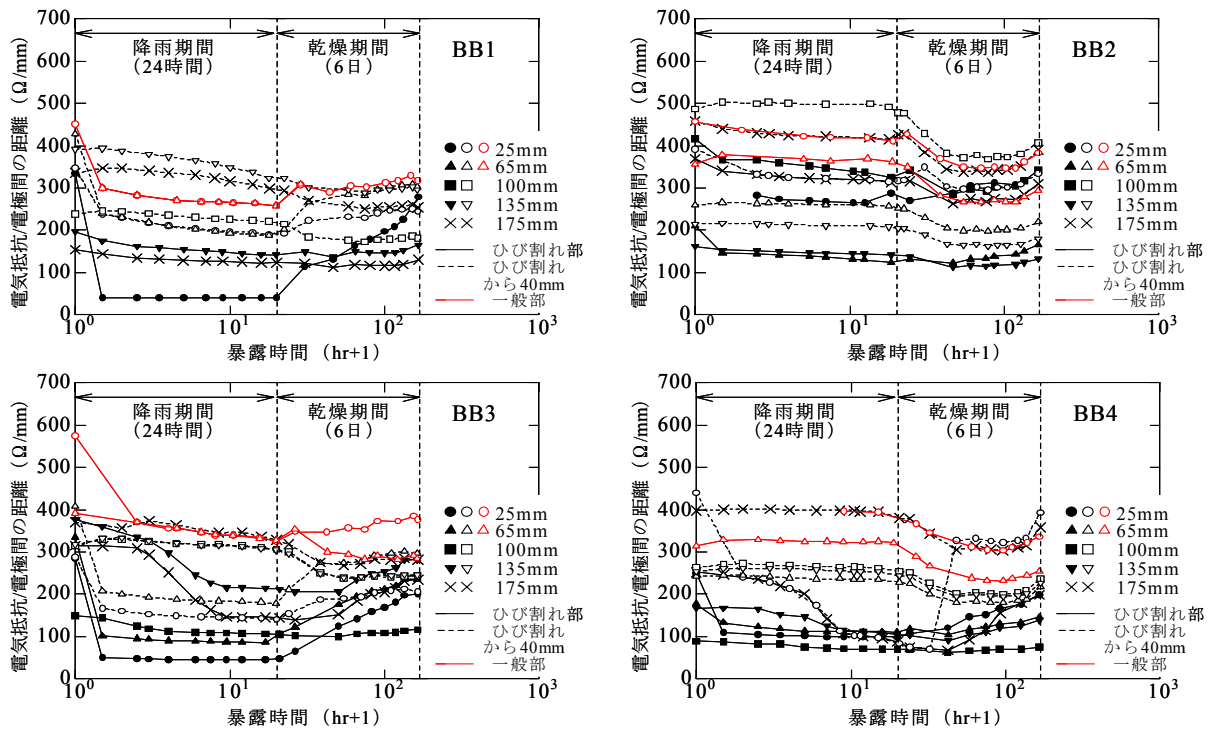


図-6 ひび割れ部、ひび割れから40mm及び一般部での電気抵抗 (BB: 131 サイクル目)

131 サイクル目の電気抵抗変化を示す。凡例における線種はひび割れ部、ひび割れから40mm、一般部を示しており、プロットは上面からの距離を示している。

図より全体的傾向としては、一般部、ひび割れから40mm、ひび割れ部の順に電気抵抗は小さくなることが確認された。ひび割れ部の上面側の抵抗は降雨開始後、瞬時に低下しており、この時上面シール無し (NC1, NC3) が有り (NC2, NC4) よりも変化が大きかった。ひび割れ部の下面側の抵抗は下面閉塞ではその変化が小さかったが、下面開口の場合は上面シールの有無によらず、降雨数時間後に抵抗が低下することから水分供給が認められた。これは降雨時には湿度が95%以上と高いことから、多湿の影響により下面側のひび割れ部が徐々に湿潤状態へと変化していることが考えられる。従って、上面側の抵抗の変化は降雨の影響であり、下面側の抵抗の変化は多湿によるものと考えられる。また、ひび割れ中段部の電気抵抗の変化が小さいことから、降雨による電気抵抗変化がほとんどないほど多湿になっているものと考えられる。これは鉄筋下面のブリーディング、内部ひび割れ、

さらにはひび割れ導入時に生じる破壊進行領域の微細ひび割れ⁷⁾の保水によるものと思われる。

図-6に高炉コンクリートの131サイクル目の電気抵抗変化を示す。図より降雨時はひび割れ部に浸した水分およびひび割れ部からコンクリート内部へと浸透した水分により、普通コンクリート同様に電気抵抗が小さくなっているが、乾燥時はひび割れ部から乾燥が開始し、次にひび割れ部周辺も徐々に乾燥し始めることから、電極周辺の水分状態が不連続の状態となり、コンクリートの細孔構造がより緻密な高炉コンクリートの方が普通コンクリートに比べ抵抗値が大きな値を示していると考えられる。つまり、高炉コンクリートの方が降雨時と乾燥時の抵抗値の変化が大きい。ひび割れ部の下面側の抵抗は普通コンクリートと同様に下面開口の場合、上面シールの有無によらず、降雨数時間後に低下し水分供給が認められ、その上、135mmの位置でも同様の傾向が見られた。高炉コンクリートが普通コンクリートと比べ上面と下面の降雨時の抵抗変化が大きいことを考えると、高炉コンクリートは普通コンクリートよりもコンクリートが密実であるためひび割れ断面からコンク

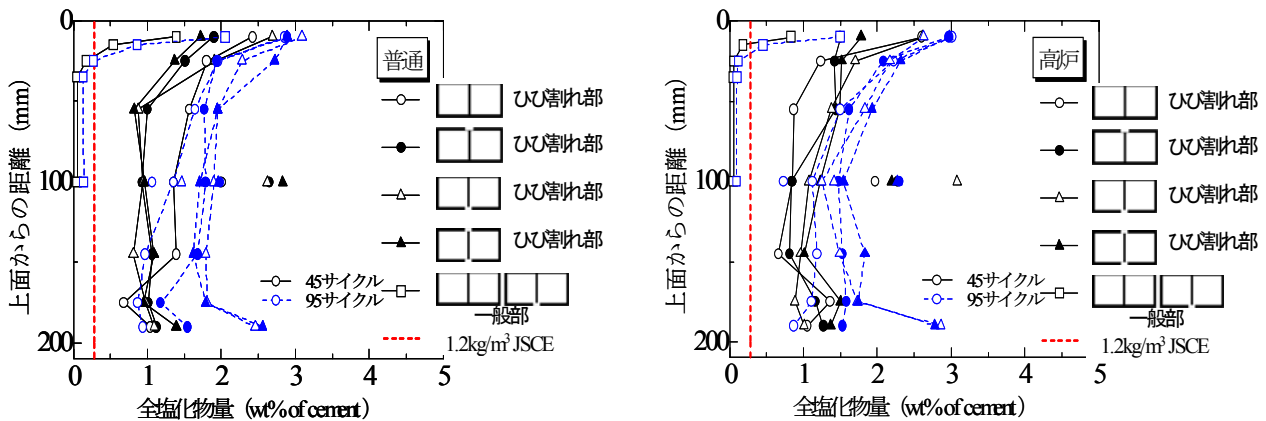


図-7 45 サイクル及び 95 サイクルでのセメント毎の塩化物濃度分布

リート内部への吸水が少なくなり、ひび割れ部の水分が多くなるためと考えられる。普通コンクリート及び高炉コンクリートの上面シール無し (NC1, NC3) の一般部では、ともに上面側の電気抵抗が瞬時に低下し水分供給が認められるものの、65mm の位置での電気抵抗変化がほとんど無く、降雨・乾燥の影響を受けていないことがわかる。

3.2 塩化物浸透状況

(1) ひび割れ部周辺及び一般部における全塩化物濃度

45 サイクル⁸⁾ 及び 95 サイクル終了後に、ひび割れ部周辺及び一般部において全塩化物濃度を JCI-SC5³⁾ に従って測定した。図-7 にセメント毎の経時変化を示す。図よりサイクルが進むにつれ普通コンクリート、高炉コンクリートともに深さ方向全域で塩分濃度が高くなっており、特に下面開口供試体の下面側 (上面からの距離 190mm) で濃度増加が顕著に現れている。下面開口の場合、上面シール及びセメントの種類に関わらず多湿の影響により電気抵抗が低下し水分供給が認められた。またその変化は大きいことから降雨・乾燥による乾湿繰返しによる塩分濃縮が顕著であると解釈でき、塩化物濃度増加につながったと思われる。また、95 サイクルでの塩化物濃度は高炉コンクリートの方が普通コンクリートよりも若干小さく、本研究の範囲ではひび割れ部においても高炉セメントの塩化物浸透抵抗性が大きい結果が得られた。

普通コンクリート及び高炉コンクリートともにそれぞれの供試体において、上面からの距離が 55mm~145mm の位置の塩化物濃度はほぼ等しい値を示している。この時、各供試体のそれらの塩化物濃度は、暴露したサイクル数によらず上面から 5mm の塩化物濃度の 50%~60% 程度の値を示していることが確認された。従って、本研究の範囲では 55mm よりも大きい程度のかぶり厚さであれば塩化物濃度浸透性に対するひび割れの影響は同程度であることがわかった。

一般部の塩化物濃度は普通コンクリート、高炉コンクリートともに上面部で増加しているが上面から 25mm 以上離れている濃度に大きな変化はなかった。3.1 の議論により一般部の上面部の電気抵抗は降雨・乾燥において急激な変化が見られ塩水供給が確認されるものの、65mm の位置ではほとんど変化が無く、塩水供給が微量であるため上面から 25mm 以上離れた位置では濃度増加がほとんど見られなかったと思われる。

(2) ひび割れ断面からコンクリート内部への塩化物浸透状況

95 サイクル終了後の上面シール無し、また上面シール有りの供試体 (普通セメント) における EPMA 分析の結果を図-8 にそれぞれ示す。図の左端がひび割れ断面、上端が暴露面に相当する。図より、上面シールなしでは上部に全体的に塩化物イオンが浸透しているものの、上面シールなしでは上部においてもひび割れ断面に沿ってほぼ並行に塩化物イオンが浸透しており、

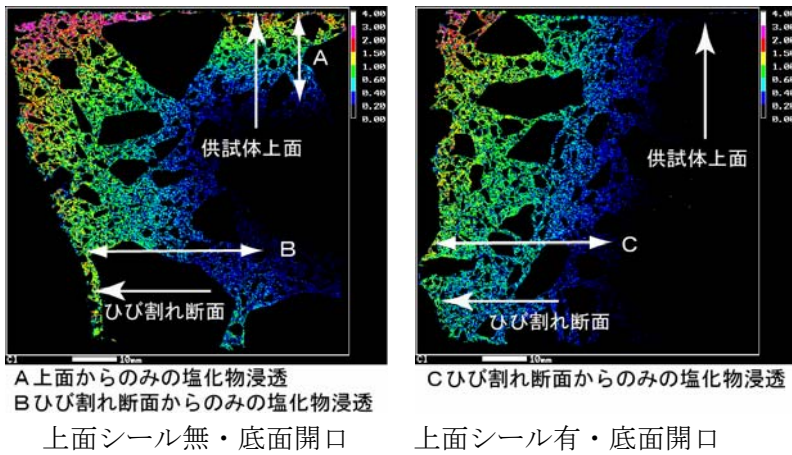


図-8 EPMA 分析の結果（普通セメント）

上面シールの条件の相違がはっきりと見てとれる。ここで、上面シール無しの上面からのみの塩化物浸透 (A) とひび割れ断面からのみ塩化物浸透 (B) を比較した場合、若干ひび割れ断面からの塩化物浸透の方が奥まで浸透していると見られる。同様に、上面シール無しと上面シール有りのひび割れ断面からの塩化物浸透 (B と C) を比較してみると、上面シールの有無に関わらずあまり違いは見られなかった。これに関して、それぞれの塩化物が供給される部分(すなわち A に関しては上面、B・C に関してはひび割れ断面)においては、上面の方 (A) がひび割れ断面 (B および C) よりも塩化物濃度が高いことが図-7 からもわかるが、それでもひび割れ断面からの塩化物浸透が卓越していることが見てとれる。これは、供試体上面がひび割れ断面よりも乾湿繰り返しの影響を受けやすいなど水分状態が影響しているとも考えられるが、本研究の範囲内では明確な解答は得られなかった。

4. 結論

- 1) 全体的に降雨、乾燥による電気抵抗の変化は普通コンクリートよりも高炉コンクリートの方が敏感であることがわかった。
- 2) 降雨開始後、ひび割れ部の上面側の電気抵抗は降雨の影響を受け瞬時に減少しているものの、下面側の電気抵抗は多湿の影響により徐々に減少しているものと考えられる。

- 3) ひび割れ部においても高炉セメントの塩化物浸透抵抗性が大きい結果が得られた。
- 4) 上面から 55mm までの範囲は塩化物濃度が大きいものの、55mm~145mm の位置の塩化物濃度はほぼ等しい値を示した。

謝辞：本研究を行うにあたり、太平洋セメント 山田一夫にご協力いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：土木学会コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002
- 2) 田中良樹ほか：硬化コンクリートの比抵抗と含水率の関係，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.55，pp.532-533，2000
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準（案），1987
- 4) セメント・コンクリート研究会 水委員会：セメント・コンクリート中の水の挙動，1993
- 5) 竹上浩史ほか：高炉スラグ微粉末を混入したセメント硬化体中の塩化物移動・平衡則，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.633-638，2002
- 6) 森 大介ほか：コンクリート中の塩化物イオン濃度プロファイル測定への EPMA の適用，Vol.26，No.1，pp.867-872，2004
- 7) 後藤幸正ほか：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.294，pp.85-100，1980
- 8) 矢田一也ほか：ひび割れ部での水分移動に基づくコンクリートへの塩化物浸透について，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.879-884，2004