

# 論文 コンクリート水路に施工された無機系補修材の中性化とその要因

森 充広\*1・浅野 勇\*2・川邊翔平\*3・川上昭彦\*4

**要旨:** コンクリート開水路の平滑性改善, 劣化因子の遮断を目的として施工された 2 種類の無機系表面被覆材の中性化を小口径コアにより調査した。側壁気中と底版の中性化深さをそれぞれ測定した結果, いずれの無機系表面被覆材においても, 側壁気中よりも常時水中にある底版において中性化が約 5 倍進行していた。別途底版から採取した無機系表面被覆材を EPMA により分析した結果, いずれも表層のカルシウム, 硫黄濃度が低下していた。これらのことから, 底版で見られた中性化は, 溶脱に起因すると考えられた。

**キーワード:** 農業用水路, ポリマーセメントモルタル, 中性化, EPMA, 溶脱

## 1. はじめに

全国には, 末端受益面積 100ha 以上を有する基幹農業用水路が約 50,000km, 小規模なものまで合わせると地球 10 周分に相当する農業用の用排水路が整備されている。戦後から高度経済成長期にかけて建設されたコンクリート水路は, 建設後数十年を経過し, 中性化による鉄筋腐食, 摩耗による断面減少や, 粗度の低下, 漏水, 通水性低下などの機能低下が顕在化しつつあり, 順次, 補修・補強・更新が進められている。

既設コンクリート水路の構造が健全である場合には, 旧躯体を活かし, 摩耗した水路表面の平滑性改善や, 劣化因子の遮断を目的とした補修が行われている。その中でも, 水路表面にポリマーセメントモルタル (以下, PCM) などの無機系表面被覆材を塗布する表面被覆工法が主流となっている。実際の施工では, 水路内面に PCM を吹き付けた後, 表面を左官職人がコテで平滑に仕上げている方法が一般的である。コンクリート水路を対象とした補修では, 側壁部分に 5~10mm, 底版部分では 10~15mm 程度の厚さで PCM を打設することが多い。

コンクリート材料の耐久性を現地曝露試験によって評価した事例や, 新しい補修材料の耐久性を促進試験によって評価した事例は, これまでに数多く報告されている。しかし, 水と接触するコンクリート水路において長期間曝露された補修材料の劣化状況に関しては, 例えば, 寒冷地に 6 年間曝露された FRPM 板と緩衝材を用いた表面被覆工法の耐久性を調査した事例<sup>1)</sup>, 施工後最長 6 年間を経過した PCM の中性化, 表面粗さ, 付着強度, 表層透気係数などの追跡調査を行った事例<sup>2)</sup>, 現地施工された各種水路補修の変状とその要因について考察した事例<sup>3)</sup>などがあるものの, 未だ十分な知見が得られていない。これは, コンクリート水路を対象とした補修・補強など

のストックマネジメントの取組みが本格的に開始されたのが 2007 年からであり, まだそれほど年数が経過していないこと, また, 補修後のモニタリング調査がほとんど行われていないこと, などがその要因と考えられる。

このような背景から, 本研究では, コンクリート開水路に試験的に施工され, 長期間供用された 2 種類の PCM を対象として, 中性化の進行状況を調査した。さらに, 中性化の原因を明らかにするために, 供試体の表面部分を EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) により分析し, コンクリート水路に補修された PCM の側壁および底版における中性化の原因について考察した。

## 2. 研究の方法

### 2.1 調査対象としたコンクリート水路の概要

現地調査の対象は, 建設後 50 年以上を経過して, 現在も農業用水の供給が行われている香川県のコンクリート水路である。水路は, 天端部分の幅が 1.9m, 高さが 0.8m のもたれ擁壁タイプである。水路は, 北東から南西に向かって直線的に流下しているため, 右岸側は日射が当たりやすく, 逆に左岸側は日陰になる時間が多い。この水路は, 非かんがい期には通水は停止されているが, 周辺の民家の雑排水や地区内の排水などが流入する影響で, 非かんがい期においても, 水深 10cm 程度の水が流れている。

この水路では, 2004 年頃から様々なコンクリート水路補修工法の PR 施工が不定期に行われてきており, 2014 年までに約 30 工法が展示されていた。しかし, 国営事業による全面的な補修が決定したため, 2014 年 11 月に全工法撤去された。本調査は, これらの補修工法の撤去にあたり, 現地で曝露されてきた PCM の劣化状況を調査したものである。

\*1 農研機構 農村工学研究所 主任研究員 農博 (正会員)

\*2 農研機構 農村工学研究所 上席研究員 農博 (正会員)

\*3 農研機構 農村工学研究所 研究員 工博

\*4 農研機構 農村工学研究所 主任研究員

## 2.2 調査項目

### (1) 調査の目的

農林水産省では、2013年に「コンクリート開水路の補修補強マニュアル」(以下、補修補強マニュアル)を制定し、補修材料に求められる性能を確保するための試験方法や品質規格値の案を規定している<sup>4)</sup>。この中で、コンクリート水路に対して施工されるPCMに対しては、中性化抑止性、耐候性、付着性、耐摩耗性、一体化性、寸法安定性、耐凍害性、ひび割れ追従性が要求性能として示されている。本研究では、これらのうち中性化抑止性に着目して、現地で長期間曝露された2種類のPCMの中性化深さのデータを収集し、コンクリート水路という環境条件において、中性化に対する抵抗性を明らかにすることを主な目的とした。また、得られた中性化深さのデータから、補修補強マニュアルで定められているPCMの中性化抑止性の品質規格値の案(20年間での中性化深さ5mm以下)と比較することによって、調査した2種類のPCMの長期耐久性を照査した。

### (2) 調査の概要

調査は、2013年12月に行った。調査した2種類の工法(以下、A、B工法)は、現在もコンクリート水路の表面被覆工法として適用されている代表的なPCMである。ただし、その具体的な配合については、公表されていない。A工法は、旧コンクリート水路表面を洗浄後、水打ちして湿らせた状態でそのまま練り混ぜた材料を施工する。B工法は、洗浄後、エポキシ系のプライマーを塗り、その後練り混ぜた材料を施工する。調査時点の供用年数と、現地施工時の設計施工厚を表-1に示す。調査時点において、供用年数は両工法とも8年以上である。

### (3) 調査対象部位

調査では、常時気中となる水路側壁と、常時水面下にある底版を対象として中性化深さの測定を行い、部位による中性化深さの相違について検討した。調査した水路の状況およびA、B工法における小口径コア採取位置を図-1に示す。側壁は、用水の影響を受けない常時気中にある部分を対象とした。A工法は、左岸側壁3、底版8、B工法は、左岸側壁1、右岸側壁2、底版1個所の小口径コアを採取した。

## 2.3 中性化測定方法

中性化測定の概要を図-2に示す。中性化の測定は、小口径コアを割裂して実施した。まず、現地でφ25mmの小口径コアを採取した。採取した小口径コアを実験室に持ち帰り、PCMを含む先端部分をコンクリートカッターで長さ20mm程度にカットした後(図-2(a))、圧縮試験装置により割裂し、その表面にフェノールフタレインを散布して中性化深さを求めた。小口径コアのフェノールフタレイン計測においては、割裂面が乾燥し、変色域が

安定した翌日に測定した。中性化がほとんど進行していなかったため、ノギスによる計測では誤差が大きいと判断し、画像処理により平均的な中性化深さを求めた(図-2(b))。発色後の画像をデジタルカメラで撮影し、画像処理ソフトを用いて小口径コアの割裂断面両側の2.5mm区間を除いた中心部20mmの範囲で発色面積を画像処理ソフト上で求め、これを基線長20mmで除して平均中性化深さとした。

## 2.4 EPMA分析

フェノールフタレインにより中性化深さを求めた結果、PCMの中性化深さは、側壁気中よりも底版において進行していることが明らかとなった。その原因を明らかにするために、2014年11月の全工法撤去時に現場から300mm×300mm、厚さ50mm程度の平板状の供試体を採取し、再度中性化深さの測定を行うとともに、EPMAによる面分析を行った。これらの分析は、供試体採取から1年後の2015年10月に実施した。また、比較のため、2013年12月に採取しておいたB工法側壁気中のコアについても、同様にEPMA測定を行った。

まず、底版から採取した平板供試体のEPMA分析に先立ち、供試体を図-3に示すように300mm×300mmの中

表-1 調査対象の無機系表面被覆材の概要

工法	調査時点までの 供用年数(年)	設計施工厚 (mm)
A工法	8.0	側壁6 底版10
B工法	8.6	10

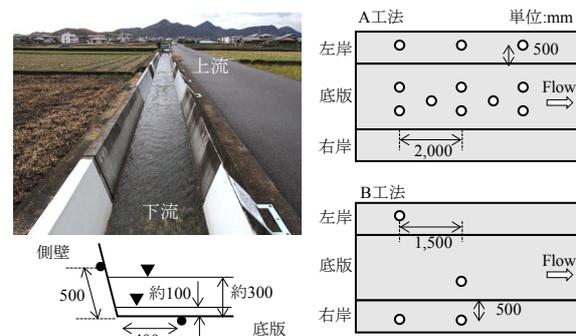


図-1 調査したコンクリート水路と調査位置

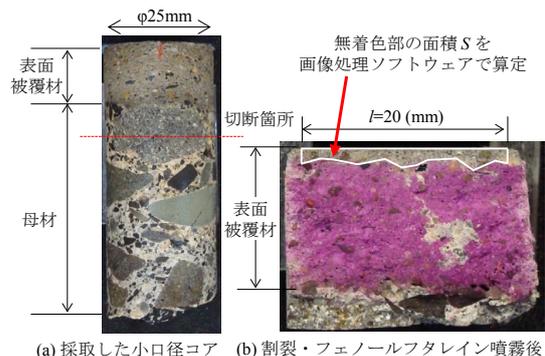


図-2 小口径コアによる中性化測定法の概要

中央部で切断し、その断面において中性化深さを計測した。次に、その対面の中央付近において長さ 80mm 角の供試体を切り出し、PCM を含む上部 30×30mm の範囲で EPMA 分析を行った。EPMA による測定条件は、ビームサイズ 40 μm、ステップサイズを 40×40 μm とした。濃度への換算方法には、濃度が明らかな標準試料の EPMA のカウント数を基準として、EPMA 測定で得られたカウント数から濃度を逆算する比例法を用いた。測定対象元素は、過去に行われているコンクリート水路の EPMA 分析の結果<sup>5)</sup>を参考に、カルシウム (以下 Ca)、硫黄 (以下 S)、炭素 (以下 C)、マグネシウム (以下 Mg) とした。

### 3. 調査結果

#### 3.1 各部位の中性化深さ

2 種類の PCM の中性化深さを部位ごとに表記した結果を図-4 に示す。棒グラフおよび数値は、各工法の中性化深さの平均値、エラーバーは標準誤差を表示している。また、調査点数 n は、図中に示すとおりである。

A 工法、B 工法とも、中性化深さは表面から最大 3mm 程度 (A 工法底版) であり、顕著な中性化は認められなかった。B 工法側壁の中性化深さは、左岸 0.34mm、右岸平均 0.23mm で、日陰となる左岸側がやや大きかった。しかし、いずれの工法も、側壁よりも底版において中性化が進行しており、側壁の中性化深さに対する底版の中性化深さは、A 工法で 6.3 倍、B 工法で 4.4 倍、2 工法の平均で 5.3 倍であった。

側壁気中部の PCM は摩耗作用を受けていないため、中性化深さは真値と見なせる。一方、底版の PCM は摩耗作用を受けるため、著しく摩耗した場合には、中性化深さは見かけの値となる。しかし、本地区よりも水路規模が大きく、流量も多い他地区で実施されている B 工法の摩耗量計測結果によると、摩耗量は平均 0.1mm/年であり、次第に低減する傾向がみられる<sup>9)</sup>こと、後述する底版供試体の表面に細骨材の露出等がみられず、平滑であったことから、中性化深さはほぼ真値と判断した。

#### 3.2 中性化深さの予測

屋外曝露されたポリマーセメントモルタルの中性化深さは、 $\sqrt{t}$  則で表されるという報告<sup>7)</sup>に基づき、今回得られた調査結果を  $\sqrt{t}$  則により近似し、中性化速度係数を算定するとともに、施工 20 年後の中性化深さを予測した。結果を図-5 に示す。側壁の最大値 (A 工法 0.48mm/8 年)、底版の最大値 (A 工法 3.03mm/8 年) から求められる中性化速度係数は、それぞれ 0.168mm/√年、1.071mm/√年であった。この値から予測される 20 年後の中性化深さは、側壁 0.75mm、底版 4.79mm となり、いずれも補修補強マニュアルで規定された 20 年で 5mm 以下という品質規格値の案を満足する結果となった。ただ

し、常に水面下となる底版の中性化が  $\sqrt{t}$  則で予測できるかどうかについては、検証が必要である。

#### 3.3 底版供試体の中性化試験結果

切断した断面におけるフェノールフタレイン散布後の底版供試体の着色状況を図-6 に示す。PCM の設計施工厚は底版 10mm であったが、A、B 工法いずれも 15~

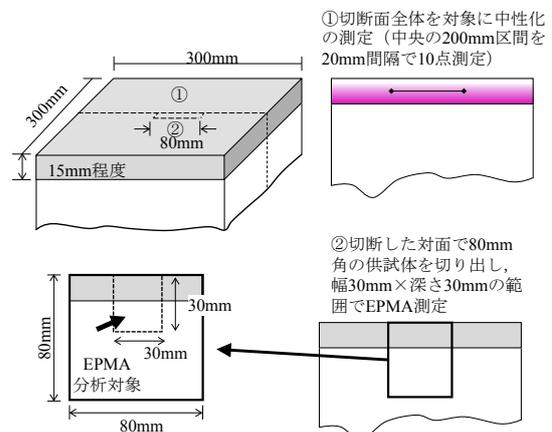


図-3 底版から採取した平板供試体の分析方法

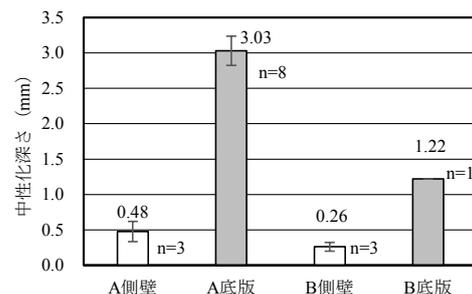


図-4 各工法の中性化深さ

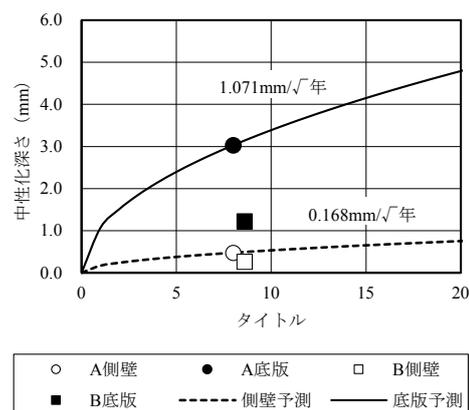


図-5 中性化深さ実測値からの予測

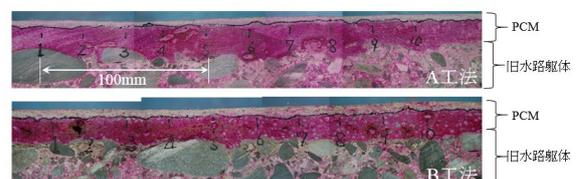


図-6 各工法の中性化深さ

20mmの厚さで施工されていた。A工法での中性化深さは、平均2.6mm(最大3.2mm)、B工法での中性化深さは、平均4.1mm(最大5.0mm)となった。小口径コアにおいて計測した中性化深さと比較すると、A工法ではほぼ同様の中性化深さとなったが、B工法では小口径コアの中性化1.22mmに比べ、3.4倍大きい値となった。この原因のひとつに、着色状況の判定方法の相違が挙げられる。図-6をみると、A工法に比べ、B工法では、濃い赤紫色の呈色範囲の表面側に、薄く淡桃色の着色領域が見られる。この領域を中性化領域と見るか否かにより、わずかに差が見られたと考えられる。淡桃色の着色領域は、フェノールフタレイン噴霧後には無着色に見えた。しかし、時間の経過とともに徐々に図-6のように着色する。平板供試体の中性化深さの特定に際しては、フェノールフタレイン噴霧直後にマーキングしたため、淡桃1色の範囲を中性化領域と判断したのに対し、小口径コア法では、1日経過後に中性化深さの判定をしたため、この範囲を未中性化領域と判断した結果、相違が生じた可能性がある。

測定上の差に加え、図-6から、いずれの工法においてもPCMについては、場所による中性化進行にばらつきがあったことも考えられる。10個所で計測した中性化深さのばらつきを示す変動係数は、A工法で0.142、B工法で0.166と、若干B工法のばらつきが大きかった。

### 3.4 EPMA 結果

A工法底版、B工法底版、B工法側壁気中のEPMAの結果を図-7～図-9に示す。縦軸は、通水表面からの深さを示し、濃度は、各画像の色調で示している。濃度の閾値は、右側のカラーバーに示す重量%濃度であり、暖色系は濃度が高く、白色は赤色を超えた濃度であることを示している。以下、それぞれの元素に着目して、結果を示す。

#### (1) Mg 濃度分布の特徴

A工法底版表層に高濃度のMgが確認された。B工法では、ごく表層に薄く、また、旧コンクリートとPCMとの境界面にも高濃度のMgが確認された。A工法底版での浸透深さは約2.4mmであり、中性化深さの平均値2.6mmとほぼ同じであった。B工法底版の旧コンクリートとPCMとの境界に見られる高濃度のMgは、最大約3.7mmの厚さがあるが、これは、PCM内部ではなく、旧コンクリート表面に蓄積している。

MgがPCM全体に確認されないこと、側壁気中に見られないこと、を勘案すると、Mgは、水路を流れる水から供給され、水と接触している面から徐々に浸透、蓄積したものと想定される。B工法の旧コンクリートに見られたMgは、補修前の洗浄で十分除去しきれないまま残されたものと思われる。

#### (2) C 濃度分布の特徴

Cは、A、B工法底版表層部にやや高濃度の個所が見られた。A工法では、この部分は、Mgの分布、すなわち中性化深さとほぼ一致した。

B工法では、側壁気中と底版とも、旧コンクリート躯体との境界面にも高濃度のCが認められた。さらに、側壁気中では、境界面からわずかに表層よりの部分にも直線上にCが分布していた。B工法で確認されたこれら表層以外のC濃度分布は、PCM施工時に塗布したエポキ

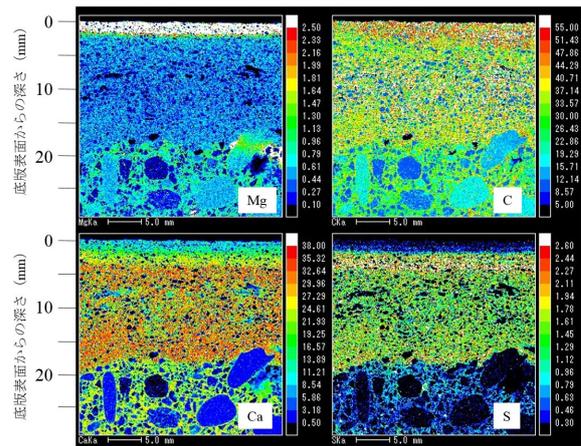


図-7 A工法底版のEPMA分析結果

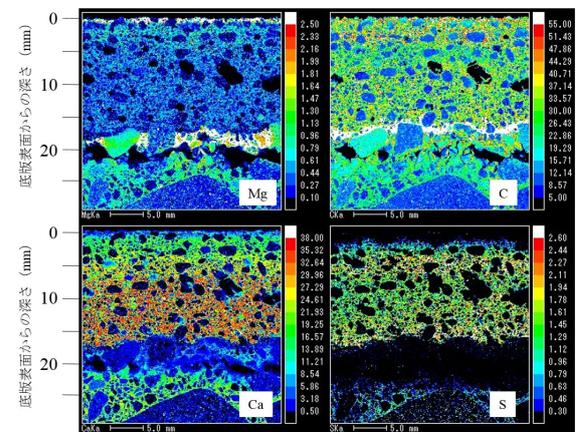


図-8 B工法底版のEPMA分析結果

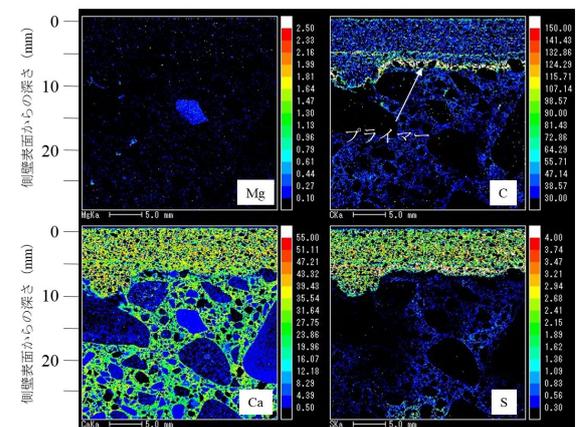


図-9 B工法側壁気中のEPMA分析結果

シ系のプライマーである。気中部については、一度素地調整を行ってから、再度プライマーを塗布したため、二層構造のC濃度分布になったと推測される。

### (3) Ca 濃度分布の特徴

Ca濃度は、A、B工法底版表層から次第に濃度が低下している傾向がみられた。いずれも表層部分のCa濃度が低く、表層から深部に向かうにつれて徐々に濃度が高くなり、ある一定の深さを超えるとほぼ一定値になる、という分布が見られた。A、B工法を比較すると、B工法でこの傾向が顕著に見られた。一方、B工法側壁気中では、このようなCaの濃度分布が見られなかった。

### (4) S 濃度分布の特徴

底版A、B工法の表層部分のSは、ほとんど消失していた。表層から深部に向かうにつれて徐々に濃度が高くなり、この傾向は、Ca濃度分布と類似していた。しかし、Ca濃度分布と異なり、Sの場合には、ある特定の深さに濃縮されていた。B工法側壁気中では、このような濃度分布は認められなかった。

## 4. 考察

### 4.1 PCM の中性化要因

以下では、本分析結果から得られたPCMの中性化の要因を部位別に考察する。

#### (1) 側壁気中

小口径コアのフェノールフタレイン呈色反応から、側壁気中の中性化深さは、A、B工法ともごく表層部分にとどまっていた。また、B工法のみではあるが、EPMA分析結果、PCM内部での特異な元素分布は見られず、プライマー部分を除けば、C濃度が高い箇所は、ごく表層部のみであった。常時気中に存在していたという環境条件を考慮すると、側壁気中は、二酸化炭素による炭酸화가主であったと判断した。

#### (2) 底版

今回の調査結果では、PCMの中性化は気中よりも常時水中にある底版が進行していた。水中部においてコンクリートの中性化が進行する事例は、水道施設においても報告されている<sup>8)</sup>。横軸を底版表面からの深さ、縦軸を各元素濃度としたときの元素濃度プロファイルを図-10に示す。水と接触する通水面側でCaやS濃度の低下が見られていることから、底版における中性化は、PCM中のCaの溶脱が主たる原因と推測された。Caの溶脱は、まずは細孔溶液中からCa(OH)<sub>2</sub>が水に溶け出し、最終的にはC-S-Hの分解に至る。C-S-Hの分解が進むと、細孔構造が粗となり、組織の強度が低下する。A、B工法底版の反射電子像を図-11に示す。定量的な分析によって確認できていないが、溶脱していない箇所と比較すると、溶脱した表層付近の構造が粗になっている状況が確認さ

れた。

今回見られたMgの蓄積の原因は特定できていないが、組織構造が粗となったCa溶脱層に、本地区における用水あるいは雑排水に含まれるMg(例えば肥料、土壤改良材等に含まれるMgなど)が浸透し、化合物を形成したものと想定している。竹村ら(1995)は、模擬海水中に浸漬したコンクリートと水との接触面に、ブルーサイト(Mg(OH)<sub>2</sub>)、その奥にアラレ石(CaCO<sub>3</sub>)などが形成されたことを確認している<sup>9)</sup>。また、取違ら(2007)も、海洋環境下に20年間暴露された供試体のEPMA分析から、同様の現象を確認している<sup>10)</sup>。しかし、取違らの結果では、フェノールフタレインによる中性化が見られていない。今回の場合は、接触水が海水でないこと、中性化が進行していたことから、表層に蓄積したMgは、これらの物質とは異なっていると考えられる。今後、粉末X線回折などの分析により、明らかにしていきたい。

コンクリート中のSについては、中性化が進行すると、中性化領域のやや奥側に濃縮するという報告<sup>11)</sup>があり、今回のPCMのSの濃縮現象も、本報告と同様のメカニズムに基づくものと推測される。

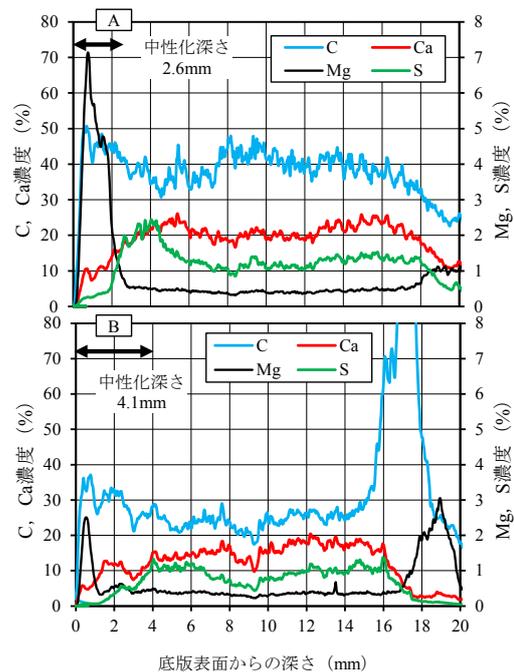


図-10 底版PCMの元素濃度プロファイル

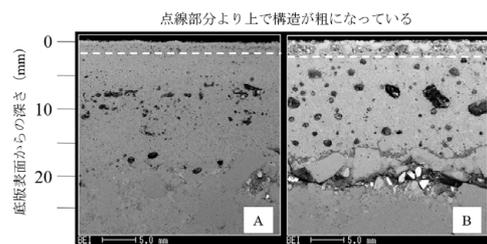


図-11 底版PCM反射電子画像

なお、図-10の濃度プロファイルは、EPMAの定量分析結果を深さ単位で単純平均したものであり、骨材のデータの影響が含まれている。このため、大きめの骨材が少ないA工法の濃度プロファイルはB工法に比べるとCaの溶脱、Sの濃縮などの状況がより明瞭に表現されている。

#### 4.2 コンクリート水路補修に用いるPCMの中性化に対する耐久性評価

コンクリート水路では、気中部よりも水中部において、溶脱による中性化が進行する可能性があることが明らかとなった。現在、PCMの中性化抑止性は、JIS A 1151に基づく促進中性化試験により評価されているが、溶脱に関しては、促進中性化試験では評価できない。また、水路では、溶脱、脆弱化したPCMの表面が摩耗作用を受け、逐次進行する危険性がある。一方、水中では酸素濃度が低く、中性化しても鋼材腐食の速度は小さい。農業用水路特有の環境である水中部における中性化の進行と耐久性評価については、さらなるデータの蓄積と、設計の考え方の整理が必要である。

#### 5. まとめ

本研究では、農業用水路環境下における2種類のPCMの劣化状況を調査し、中性化深さに関する知見をまとめた。結果は、以下のとおりである。

- (1) 8年間以上、農業用水路環境下に曝露された2種類のPCMの劣化状況を調査した結果、いずれも常時水と接触する底版の方が、側壁気中よりも約5倍中性化が進行していた。気中でのPCMの中性化速度係数は、 $0.168\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ であり、補修補強マニュアルに記載されている品質規格値(20年間で5mm以内)を十分満足していた。
- (2) 底版に施工されたPCMをEPMAにより分析した結果、PCM表面のCa濃度が低下していることが明らかとなった。底版で中性化が進行している一因は、Ca溶脱に伴う中性化であると考えられた。
- (3) 溶脱した底版のPCM表層には、Mgの蓄積、中性化層の奥側へのSの濃縮などの現象が見られた。一方、側壁気中のPCM表層には、これらの現象は発生していなかった。

これらの調査結果は、あくまで調査地区における一事例であるため、今後は、調査事例を増やし、農業用水路環境下における補修材料の要求性能や耐久性照査方法を検討したい。

謝辞：本調査にあたり、中国四国農政局関係者各位および水路を管轄している土地改良区の皆様からの多大なるご協力を頂きました。また、渡嘉敷勝氏(農研機構農村

工学研究所)、西原正彦氏(現環境省)には、現地における小口径コアの採取、実験室における中性化測定等の作業にご尽力頂きました。保全技術(株)宇野祐一氏からは、EPMA分析結果の解釈に関して有益な意見を頂きました。記してお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 佐藤 智, 石神暁郎, 金田敏和: FRPM板と緩衝材を用いた表面被覆工法の寒冷地での耐久性およびコンクリート開水路に対する凍結融解作用抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1675-1680, 2013.7
- 2) 長谷川雄基, 谷村 成, 田中基博, 高橋慶吉, 佐藤周之: 無機系表面被覆材による開水路補修工事の追跡調査と性能評価, 農業農村工学会誌, Vol.82, No.7, pp.23-26, 2014.7
- 3) 森 充広, 奥野倫太郎, 森 丈久, 渡嘉敷 勝, 中矢哲郎: 水路補修工法の性能評価に関する考察, 農工研技報, 210, pp.203-225, 2010.3
- 4) 農林水産省: 農業水利施設の補修補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案), 入手先<[http://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/kaisuiro\\_manual/h251029.html](http://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/kaisuiro_manual/h251029.html)>
- 5) 森 充広, 渡嘉敷 勝, 山崎大輔, 加藤智丈: 長期供用された農業用水路のコンクリート通水表面の変質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.919-924, 2009.7
- 6) 浅野 勇, 川上昭彦, 渡嘉敷 勝, 森 充広, 川邊翔平: 無機系被覆工の摩耗進行モニタリング, 農業農村工学会講演要旨集, pp.692-693, 2015.9
- 7) 大濱嘉彦, 出村克宣: ポリマーセメントモルタルの中性化に対する抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.9, No.1, pp.531-536, 1987.7
- 8) 眞嶋光保, 野田純嗣, 木原義孝, 宮本浩治: 水道施設におけるコンクリートの劣化現象, 材料, Vol.40, No.456, pp.29-35, 1991.9
- 9) 竹村友之, 横本誠一, 藤原 愛, 勝山邦久: 模擬海水中でのコンクリートの劣化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, 1993.6
- 10) 取違 剛, 渡邊賢三, 横関康祐, 大即信明: 長期間暴露されたコンクリートの化学的侵食に関するマルチイオン解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.813-818, 2007.7
- 11) 小林一輔, 白木亮司, 河合研至: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.2, pp.69-82, 1990.7