論文 カルシウム溶脱したモルタルと補修材料との付着強度に関する考察

森 充広*1・渡嘉敷 勝*2・森 丈久*3・中矢 哲郎*4

要旨:長期間供用され、カルシウム溶脱により表層部分が脆弱化したコンクリートと補修材料との付着強度特性を評価するために、電気化学的促進試験により強制的にカルシウムを溶脱させたモルタル供試体にポリマーセメントモルタルを施工し、その付着強度を求めた。その結果、カルシウム溶脱層の存在が付着強度を低下させること、またカルシウム溶脱層へのプライマー塗布が付着強度低下を抑制することを明らかにした。キーワード:カルシウム溶脱、電気化学的促進試験、農業用水路、付着強度、ポリマーセメントモルタル

1. はじめに

農業用水路等の農業水利施設を構成するコンクリートは、長期間流水に曝される環境にある。このため、農業用コンクリート水路の通水表面では、セメント硬化体を構成するカルシウム(以下、Ca)が溶脱していることが報告されている「1,2)。コンクリートからCaが溶脱すると、ビッカース硬度が低下³⁾したり、透水係数が増大⁴⁾したりすることが知られている。また、最近では、Caが溶脱したコンクリートは、耐摩耗性が低下する⁵⁾ことも明らかになってきており、Ca溶脱に伴ってコンクリートとしての物性が変化していると考えられる。

近年、劣化した農業水利施設を対象として、その性能を長期間保持するための理念である「ストックマネジメント」が提唱され、既存施設の機能を長寿命化させる試みがなされている。摩耗が著しく進行し、農業用水路表面の凹凸によって粗度係数が低下した農業用コンクリート水路に対しては、平滑性回復のためのポリマーセメントモルタルによる断面修復工法、劣化因子の浸透防止のための表面被覆工法、補強対策も含めたパネル工法などの補修・補強技術が適用され、基幹的な農業水利施設の機能回復が図られている。これらの補修・補強工法は、いずれも旧コンクリート躯体が健全であることを前提とし、それに新しい補修材料を一体化させることによって機能回復を図るものである。

旧コンクリート躯体と補修材料との一体化の程度を 測る目安として、現在、付着強度が施工管理指標とされ ている。しかし、新しいコンクリート面に対しては十分 な付着強度を有する補修材料を農業用コンクリート水 路に適用した場合、十分な付着強度が発揮されないこと が報告されている。また、付着試験を行ったときの破断 面は、補修材料そのものや接着界面ではなく、コンクリ ート母材で破壊することが多いことから、その要因のひ とつとして、農業用コンクリート水路の表層にある、脆弱化した Ca 溶脱層の影響が無視できないと考えられる。

本研究は、Caが溶脱したモルタル供試体を人為的に作製し、補修材料との付着強度に与える影響を明らかにすることを目的としている。本論では、まず、Ca溶脱供試体を作製する方法を検討し、実際の農業用コンクリート水路で見られる Ca溶脱状況と比較し、Ca溶脱促進試験としての適用性を評価した。次に、このモルタル供試体を基板としてその表面にポリマーセメントモルタルを施工し、付着強度を計測することによって、Ca溶脱が補修材料の付着強度に与える影響を評価した。また、ポリマーセメントモルタルによる農業用コンクリート水路の断面補修において、Ca溶脱層の付着強度低下に対するプライマーの効果が十分明らかにされていないことから、プライマーの有無による付着強度の差を検証することにした。

2. 試験方法

2.1 適用した Ca 促進試験方法

Ca の促進溶脱試験方法には、①浸漬法、②通水法、③ 電気化学的促進方法、などがあり、いずれも長所、短所がある。農業用水路等のコンクリート水路の溶脱状況を再現するためには、ブロック試料を浸漬する方法や、イオン交換水を高圧で浸透させ、各種イオンを溶脱させる通水法が、溶脱のメカニズムに対応する方法として適切と考えられる。渡邉らは、通水法に分類される透過セル法で実施した Ca 溶脱試験の劣化形態は、実構造物で想定される Ca 移動律速機構を大きく損なわないと報告している。。しかし、これらの方法は、Ca を溶脱させた供試体ができるまでに数ヶ月を要する。本研究では、Ca が溶脱した材料の付着強度特性に焦点を当てていることから、比較的短時間で Ca 溶脱が可能な電気化学的促

^{*1 (}独) 農研機構 農村工学研究所 施設工学研究領域 主任研究員 農博 (正会員)

^{*2 (}独) 農研機構 農村工学研究所 施設工学研究領域 主任研究員 農博 (正会員)

^{*3 (}独)農研機構 農村工学研究所 施設工学研究領域 上席研究員 農博 (正会員)

^{*4 (}独)農研機構 総合企画調整部 研究戦略チーム 主任研究員 農博

進方法を採用した。電気化学的促進方法を利用した事例では、斉藤らなどが行った事例が報告されており、電気化学的促進方法によって Ca 溶脱させた供試体の性状は、拡散現象のみで Ca を溶脱した場合に類似しているが、ケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) の変質がやや促進される ⁷ことを示している。

2.2 本研究における Ca 促進溶脱試験の概要

(1) 予備実験

土木学会規準「JSCE-G 571-2007 電気泳動によるコン クリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法 (案)」に準拠した試験装置に、70mm×70mm×20mm の モルタルをエポキシ樹脂で円柱状に固めた供試体を取 り付け、直流電圧を作用させた。試験装置の概要を図ー 1に示す。モルタルは、土木学会規準「JSCE-K 511-2007 表面被覆材の耐候性試験方法 (案)」に記載された表面 被覆材の付着強度を確認するためのモルタル板(市販品) であり,配合は,JIS R 5201 に準拠して水セメント比 W/C =50%, 砂セメント比 S/C=3 のものを用いた。図-1 の 陽極側, 陰極側ともイオン交換水を満たし, 30V の電圧 で28日間および60日間電圧を作用させた。イオン交換 水内で電圧降下が生じ難いと仮定すると,電圧勾配は, 15V/cmとなる。試験中は、1週間に1回を目処としてイ オン交換水を全交換した。なお、電流は最大 1A まで通 電できるように設定し、電流量を適時点検することによ って、陽極側と陰極側との電気的短絡の有無を確認した。 さらに、電圧を30Vとした場合の結果を踏まえ、電圧を 60V, 通電日数を40日間とした場合についても同様の実 験を行った。

(2) 改良型試験装置による Ca 溶脱試験

2.2(1)に上述した試験装置では、多くの供試体を同時 に促進溶脱させることが困難であることから, 同様の仕 組みで数多くの Ca 溶脱供試体を作成することを目的と して、図-2に示す Ca 溶脱促進試験装置を試作した。装 置は、水槽、水槽内に供試体を設置するための仕切り板、 その両側のステンレス電極および定電圧装置から構成 される。仕切り板には、3 行×3 列の 9 箇所の貫通孔 (72mm×72mm) があり、その中にモルタル (70mm× 70mm×20mm)をはめ込み、イオン交換水が直接移動し ないように、その各モルタル供試体の周辺を非導電性の シリコーンで固定した。モルタルは、型枠面が Ca 溶脱 面となるように設置し、配合は W/C=50%, S/C=3 の市販 のモルタルおよび W/C=40, 50, 60%, S/C=3 のモルタル とした。その後、水槽内をイオン交換水で満たし、ステ ンレス電極間に定電圧を作用させた。予備実験の結果を 参考に、電極間に 60V の直流電圧を作用させて Ca の溶 脱を促進させた。

2.3 付着強度供試体の作製

Ca を溶脱させたモルタルを作製後、そのモルタルの補修材料との付着強度を求めるための供試体を以下の手順で作製した。なお、既設コンクリート躯体と補修材料との一体化性能を確認するために、現場では、主に建研式付着強度試験が活用されている。この装置は、補修工事現場等における付着強度の管理には適しているものの、今回使用した 70mm×70mm×20mm のモルタル板に補修材施工した供試体を試験する場合には、供試体が小さく、試験が困難であり、不適である。そこで、「JIS A 6909建築用仕上塗材」や、「JSCE-K 531-1999 表面被覆材の付着強さ試験方法」に記述されている引張用鋼鉄治具を用い、引張試験装置によって付着強度を求めた(図-3)。

まず、Ca 促進溶脱させた 70mm×70mm のモルタルの表面の中央部に 40mm×40mm の正方形を描き、その辺に沿って、ハンドカッターで約 5mm の溝状の切り込みを入れる。次に、切り込みを入れた内側 40mm×40mmの範囲にプライマーを塗布し、その上に、市販のポリマーセメントモルタルを 40mm×40mm×厚さ 10mm で施

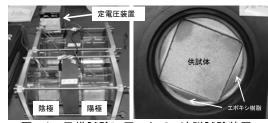


図-1 予備試験に用いた Ca 溶脱試験装置

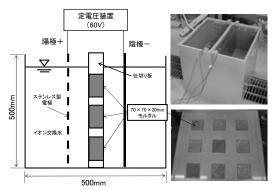


図-2 改良型溶脱試験装置

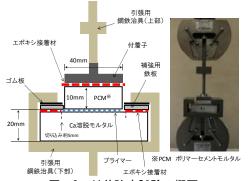


図-3 付着強度試験の概要

工する。このとき、プライマーの効果を確認するため、プライマーを塗布したものと、無処理のものを作製した。Ca溶脱モルタルをそのまま引張用鋼鉄治具を用いて付着強度試験を行ったとき、Ca溶脱モルタルに曲げが作用し、モルタルが破壊することがあった。このため、Ca溶脱モルタルの剛性を高める目的で、Ca溶脱モルタルの周辺に、中央部の42mm×42mmをくり抜いた厚さ1mmの鉄板をエポキシ接着材で貼り付けた。

最後に、ポリマーセメントモルタルの上面にエポキシ接着剤で付着子を固定して引張用鋼鉄治具に挿入し、付着子に連結したネジを上側に引っ張ることで、付着強度を求めた。付着試験は、5mm/min の速度制御で試験を実施した。補修材料の表面平滑性の仕上がり具合が試験結果に影響を与えるのを防ぐため、鉄板と引張用鋼鉄治具との隙間には、ゴム板を挟み込んで偏心の影響を極力少なくした。

3. Ca 促進溶脱試験結果

3.1 予備実験

電気化学的促進方法による Ca 溶脱試験については、いくつかの報告があるものの、作用させる電圧や、日数については、試行錯誤的に決定されている。本研究においても、まず、Ca 溶脱の状況を確認するため、電圧を作用させる期間と強さを変えた予備実験を行った。また、Ca 溶脱深さの計測は、電子線マイクロアナライザー(Electron Probe Micro Analyzer、以降 EPMA)による面分析によって行った。EPMA の分析条件は表-1 に示すとおりである。また、Ca 濃度は、標準試料の分析結果に基づいて、Ca が CaO の形態で存在した場合の濃度を比例法によって求めた。

(1) 作用日数による Ca 溶脱深さの相違

30Vの直流電圧を 28 日間作用させたときの Ca 溶脱状況を図-4 に,60 日間作用させたときの Ca 溶脱状況を図-5 に示す。図中、Ca 濃度が大きいほど白色~暖色系、小さいほど寒色系~黒で濃度を示している。Ca 溶脱深さは、Ca 濃度分布をカラーバーで示したときの表面付近のCa 濃度と、均一と思われる供試体内部の Ca 濃度との差が明瞭に区分できる境界部分までの供試体表面からの深さを計測した。なお、図-4 と図-5 で、カラーバーのスケールが異なっている。

図-4に示されるように、28日間の電圧作用時間での Ca 溶脱深さは表層から約 1mm であった。しかし、電圧を30V一定とし、電圧作用期間を60日に増やした結果、Ca 溶脱深さは約1.7mm であり、28日間電圧を作用させた場合と比較すると、直流電圧を長期間作用させた分、表面から奥側に Ca 溶脱深さが進行した。しかし、試験期間が長期に渡ったため、陽極側にも不均一な Ca 溶脱

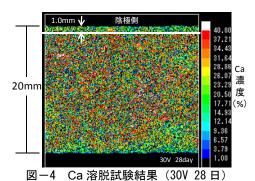
が見られ、30Vの直流電圧では、実際の農業用コンクリート水路に見られる5mm以上のCa溶脱深さ8)を確保できないと判断した。

(2) 作用電圧による Ca 溶脱深さの相違

3.1(1)の結果を受け、さらに深部まで Ca 溶脱を促進させるため、作用電圧を 2 倍の 60V とし、電圧作用期間を 40 日とした。結果を図-6 に示す。Ca 溶脱深さは表面から約 3.6mm にまで進行した。以上の結果、電気化学的促進方法によって形成できる Ca 溶脱深さは、電極間に作用させる電圧が高いほど、また電圧を作用させる時間が長いほど深くなることが明らかとなった。この結果は、

表-1 EPMAによる測定条件

測定装置	島津製作所製 EPMA-1600	
測定方式	波長分散型分光法	
加速電圧	15kV	
照射電流	300nA	
プローブ径	100μm	
単位測定時間	30ms	
分析点の移動	125μm	
蒸着材料	炭素	



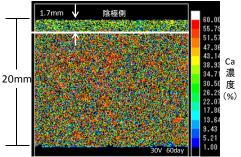


図-5 Ca 溶脱試験結果 (30V60 日)

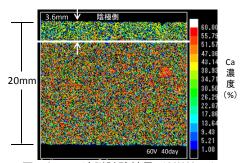


図-6 Ca 溶脱試験結果(60V40 日)

既往の研究でも確認されており⁹, これらと矛盾しない 結果であった。

3.2 改良型 Ca 溶脱試験方法の結果

(1) 供試体設置位置による Ca 溶脱深さの差

Ca 溶脱供試体を数多く作製するため、図-2 に示した 改良型 Ca 溶脱促進装置を用い、予備試験の結果を受け、60V の定電圧を 40 日間作用させた。9 個の試験体を同時に促進溶脱させるため、試験体の設置位置によっては、水圧などの影響により、Ca 溶脱深さにばらつきが発生する可能性があった。そこで、まず、W/C=50%、S/C=3のモルタル板(市販品)を用いた予備試験を行い、40 日間 60V の電圧を作用させた後、上段、中段、下段からそれぞれ 1 供試体を採取し、EPMA による Ca 溶脱深さを比較した。その結果、Ca 溶脱深さは上段 5.9mm、中段6.2mm、下段5.7mmであり、設置位置による明瞭な差異は認められなかった。このため、水槽内部ではモルタルの設置位置によらずほぼ均一に Ca が溶脱すると判断した。

(2) 水セメント比による Ca 溶脱深さの差

セメントペーストの強度や水密性は、W/Cによって影響を受ける。このため、Ca溶脱に対する抵抗性は、W/Cによって変化することが予測される。電気化学的促進方法による Ca溶脱深さが、W/Cによって異なるかどうかを確認するため、S/C=3で一定とし、W/Cを40、50、60%に調整して作製したモルタル供試体について、図-2の装置により Ca溶脱試験を実施した。そのEPMA画像を図-7に示す。図-7は、図中上の写真に示すように、電気化学的方法により Caを促進溶脱させたモルタル板の中央部約 20mm幅の部分を分析した結果である。W/C=40、50、60%の供試体のCa溶脱深さは、それぞれ表面から7.6mm、8.1mm、11.8mmとなり、W/C=60%のモルタル供試体では、他のW/C=40%や、50%の供試体と比べて著しくCa溶脱深さが深くなった。

3.3 電気化学的促進方法による Ca 以外の元素挙動

図-8 に、改良型によって電圧 60V、40 日間作用させたときの硫黄 (以降 S) の濃度分布を示す。図中、S 濃度が大きいほど白色〜暖色系、小さいほど寒色系〜黒で濃度を示している。EPMA の結果、Ca が溶脱した陰極側で、S 濃度が低下するとともに、促進溶脱の影響を受けていない Ca 溶脱フロント付近に、高濃度の S が存在していることが明らかとなった。この濃縮深さは、W/C=40、50%ではほぼ同様の値 7.5mm、7.8mm であったが、W/C=60%のものでは、11.6mm にも達した。また、この深さは、Ca 溶脱深さとほぼ一致していることが分かった。

現地の農業用水路のコンクリートからコアを採取して EPMA による元素分析を行った結果においても、Ca

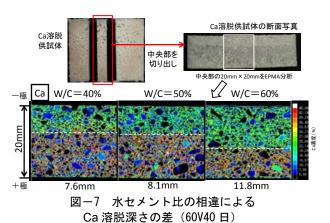
の溶脱以外にSの特定領域への濃縮が報告されている 2 。 電気化学的促進方法においても, 同様に Ca が溶脱した 範囲と, S 濃度が低下した深さがほぼ同等であること, また Ca が溶脱した領域の境界付近に, S が高濃度で存在 することが確認された。S の濃縮について, 電気化学的 促進方法において使用した水はイオン交換水であり、外 部からの S が混入したとは考えにくい。このため、高濃 度のSは、モルタル中に含まれるS成分(エトリンガイ ド, モノサルフェートなど)が, Caの溶脱に伴って硫酸 イオンに分解し、内部に移動して濃縮したものであると 想定できる。これまでに、炭酸化に伴うSの濃縮現象が 知られている 10)。本結果も、Ca の溶脱に伴って、カル シウム水和物から水酸基がとれ、中性化することにより、 Sの移動・拡散・濃縮現象が発生していると考えられる。 陰極側のイオン交換水の pH が通電後, 次第にアルカリ 性に移行したこととも関連していると考えられる。

Ca 溶脱状況とSの濃縮状況から,今回促進溶脱で得られた供試体は、ほぼ実際の農業用コンクリート水路の表層劣化状況を再現していると判断した。

4. 付着強度試験結果

4.1 Ca 未溶脱のモルタルに関する試験結果

ポリマーセメントモルタルの付着強度特性の把握に 先立ち、実験に用いたモルタル供試体自体の破壊強度を 測定するため、市販の 70mm×70mm×20mm のモルタル 板に付着試験用治具(40mm×40mm)をエポキシ樹脂で 直接接着し、モルタルの破壊強度を調べた。なお、上述



した「JIS A 6909 建築用仕上塗材」や、「JSCE-K 531-1999 表面被覆材の付着強さ試験方法」では、1,500~2,000N/minで荷重速度での試験を規定している。しかし、供試体の端面精度のばらつきのため、試験開始直後に反力板が片当たりし、治具や供試体が破損する可能性があったことから、今回は試験開始直後に急激に荷重が作用しないように、一定変位(5mm/min)による試験を行った。Ca 未溶脱の3 供試体の直接引張破壊試験の結果を表-2 に示す。3 供試体は、いずれもモルタル内部で破壊し、その強度は平均2.77N/mm²であった。

4.2 Ca 溶脱モルタルに施工したポリマーセメントモル タルの付着強度特性

前項 3.に示した方法で作製した Ca 溶脱モルタルに対し、その表面にポリマーセメントモルタル(アクリル樹脂系)を施工した後、付着試験を実施した。なお、ポリマーセメントモルタルの施工に際し、旧躯体の Ca 溶脱深さの影響,脆弱度合いによる差を見るため、W/C が 40、50、60%の Ca 溶脱供試体に施工した。4.1 に示した Ca 未溶脱の直接付着強度との比較を図ー9 に示す。試験体の数は各 2 個で、図ー9 はこの平均値を示している。

全体的には、未溶脱のモルタル供試体の直接付着試験の値と比較して、著しく付着強度が低下した。なお、W/C40%の試験において、1回目:ポリマーセメントモルタルと Ca溶脱モルタルの界面、2回目:ポリマーセメントモルトモルタルと付着子の界面、のいずれも接着不良により、母材破壊に至らず、付着界面で剥離した。このため、実際はここで得られた $1.2N/mm^2$ よりも大きい値を示すと推測される。 $\mathbf{2} - \mathbf{7}$ に示した Ca の溶脱状況やS の濃縮状況を考慮すると、W/C = 40%の付着強度は、ほぼW/C = 50%の Ca 溶脱モルタルと同程度と推測される。

4.3 プライマーの有無による影響

次に、Ca溶脱した市販のモルタル板にポリマーセメントモルタルを施工する際、指定されたプライマーを行わず施工した場合の付着強度を計測した。付着強度試験の結果を図-10に示す。供試体は3体であり、図-10は3供試体の付着強度の平均値を示している。W/C=40、50、60%のものは、比較のために図-9と同じ結果を掲載している。プライマーを施さない場合には、すべての試験でCa溶脱モルタルとポリマーセメントモルタルとの境界面で界面剥離した(図-11)。また、そのときの付着強度は、プライマーを施した場合よりも著しく低下し、土木学会規準で表面被覆材の品質規格とされている1.0N/mm²を満足しない結果となった。

プライマーが果たしている役割を確認するため、W/C =40%の試験で付着子との界面で剥離した供試体を用い、その断面を EPMA で分析した。プライマーの主成分である炭素の濃度分布を図-12 に示す。プライマー部分

の炭素濃度が高く、白色部分として検出されている。拡大して EPMA 結果を観察すると、プライマーは境界部分のみならず、Ca が溶脱して脆弱化したモルタルに浸透していること、脆弱化してもろくなったモルタル表面の欠けた窪みに入り込んで固化し、物理的なアンカー効果を発揮していること、補修材料であるポリマーセメントモルタルにも含浸している様子が確認された。このことから、農業用コンクリート水路のように、Ca が溶脱して脆

表-2 Ca 未溶脱モルタル板の直接付着強度

	供試体 No	付着強度 (N/mm²)	破壊状況
	1	2.97	母材破壊
	2	2.97	母材破壊
•	3	2.35	母材破壊

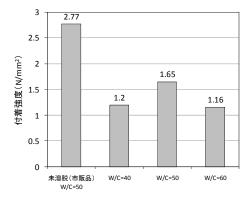


図-9 Ca 溶脱したモルタルの W/C と付着強度 (溶脱の有無の比較)

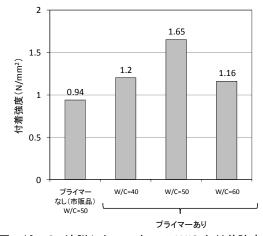


図-10 Ca 溶脱したモルタルの W/C と付着強度 (プライマーの有無の比較)

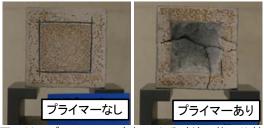


図-11 プライマーの有無による破壊形態の比較

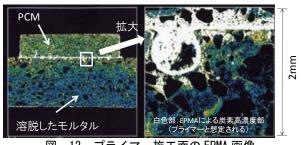


図-12 プライマー施工面の EPMA 画像

弱化したコンクリート面に新たに補修材料を施工する際には、プライマーを施工することにより、付着強度の 改善を図ることが可能であることが示された。

5. おわりに

本研究では、Ca溶脱によるコンクリート表面の脆弱化を模擬したモルタル供試体を電気化学的促進方法によって作製し、Ca溶脱状況の確認および付着強度特性の把握を試みた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) イオン交換水で満たした容器内にモルタルを浸漬し、両極に直流電圧を作用させる Ca 促進溶脱試験を行った結果、作用させる直流電圧が高いほど、また電圧をかける日数が多いほど、Ca 溶脱はより内部まで進行した。
- (2) 水密性等, モルタルの品質に関連の高い W/C を 40, 50, 60%に変えたモルタルを作製し, 電気的促進方法により Ca の溶脱状況を EPMA で分析した結果, W/C が大きくなると Ca 溶脱深さも大きくなった。
- (3) 電気化学的促進方法により Ca を促進溶脱したモルタルの EPMA 分析の結果, Ca の溶脱に加え, S の濃縮現象も見られた。これは, 実際の農業用水路から採取したコンクリートコアの分析結果でも見られている現象であった。
- (4) Ca が溶脱したモルタルに施工したポリマーセメント モルタルの付着強度試験を行った結果、溶脱が進行 したモルタルの付着強度は、直接モルタルに付着子 を取り付けて試験を行った場合と比較して 1N/mm² 以上低下した。
- (5) Ca 溶脱したモルタルとポリマーセメントモルタルと付着強度は、プライマーを施工すると付着強度が改善される可能性がある。これは、EPMA の結果、脆弱化した Ca 溶脱部分へのプライマーの含浸、物理的アンカー効果などによると考えられた。

なお、今回は、市販のモルタルと W/C をコントロールしたモルタルの結果が混在しているため、今後、これらを統一して試験を実施し、結果を再確認する必要がある。さらに、どのくらいの水圧で Ca 溶脱したコンクリート表面を洗浄すれば補修材料の付着強度に影響しな

い深さまで脆弱部を除去できるのかを検証することが 課題である。

また、Ca が溶脱した表層部分は、補修材料との接着だけでなく、耐凍害性など、耐久性への影響も懸念されることから、Ca 溶脱後の供試体の乾湿繰り返し、凍結融解などの耐久性試験を通して、耐久性の確認を行う予定である。

参考文献

- 石神暁郎,森充広,渡嘉敷勝,増川晋:農業用水路 コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に 関する検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.27, No.1, pp.805-810, 2005.7
- 2) 森充広,渡嘉敷勝,山﨑大輔,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
- 3) 安田和弘,渡邉賢三,大野俊夫,横関康祐:約60 年経過したダムコンクリートの溶出挙動評価,土木 学会第56回年次学術講演会,pp.570-571,2001.10
- 4) 出口朗, 増田良一, 斉藤裕司:水和生成物中の Ca がほとんど溶脱下モルタルの透水係数, 土木学会第 55 回年次学術講演会, pp.302-303, 2000.9
- 5) 渡嘉敷勝, 森充広, 中矢哲郎, 森丈久: カルシウム 溶脱したペースト硬化体の耐摩耗性, コンクリート 工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.719-724, 2010.7
- 6) 渡邉賢三,横関康祐,小関喜久夫,大門正機:水中へのセメント系材料のカルシウム溶出に関する実験的評価,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.21,No.2,pp.967-972,1999.6
- 7) 斉藤裕司, 田島孝敏, 中根淳: 拡散と電気化学的促進手法によるモルタルの Ca 溶出に伴う変質試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1009-1014, 1997.6
- 8) 長期間供用されたコンクリート水路の劣化の評価 法: http://nkk.naro.affrc.go.jp/library/publication/seika/ seikajyoho/2009/1 37.pdf
- 9) 斉藤裕司,中根淳,辻幸和,藤原愛:材料と配合の相違が電気化学的促進方法によるモルタルの変質性状に及ぼす影響,土木学会論文集,No.564, V-35,pp.155-168,1997.5
- 10) 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,第1巻,第2号,pp.69-82,1990.7