論文 寒冷地のコンクリート開水路における表面保護工法適用後の補修効 果の検証

西田 真弓*1·石神 暁郎*2·緒方 英彦*3

要旨:寒冷地に位置する農業用のコンクリート開水路では、凍害劣化を対象とし、劣化要因である水分の侵入抑制を期待できる表面保護工法の適用が進められている。しかし、表面保護工法適用後のモニタリングでは、その耐久性は目視等の外観にて判断することが多く、母材コンクリートの健全性の評価や、再補修の適正時期の見極めは困難となっている。本研究では、寒冷地において表面保護工法施工後10年が経過した、供用中のコンクリート開水路の補修効果の検証を行った。その結果、表面保護工法の種別による母材コンクリートへの影響は大きく、母材コンクリートの健全性や含水状態を把握することの重要性が示された。 キーワード:コンクリート開水路、表面保護工法、補修効果、凍害、含水率、凍結融解試験

1. はじめに

寒冷地に位置するコンクリート開水路では、凍害劣化 を対象とした補修が進められており、この補修では、劣 化要因である水分の侵入抑制を期待できる表面保護工法 が適用される場合が多い。表面保護工法は、補修後の新 たな水分の侵入を抑制し、母材コンクリートを保護する ことで、施設としての耐久性を維持しなければならず、 表面保護工法により補修されたコンクリート開水路は、 供用開始時の性能に回復されなければならない¹⁾。

しかし,農業用のコンクリート開水路は,側壁の背面 が土中に置かれることが多いという設置環境から,内面 以外に表面保護工法を施すことが困難であり,凍害劣化 を対象とした表面保護工法は,主としてコンクリート開 水路の内面のみに施工されることが多い。そのため,背 面からの水分の侵入を抑制することはできず,母材コン クリートは,コンクリート開水路内からの水分(灌漑期 間)だけではなく,天端や背面からの降雨や地下水の供 給による影響も避けられない。

近年,過去に表面保護工法が施工されたコンクリー ト開水路において,剥がれ・ひび割れ等の変状(写真-1参照)が確認されている。表面保護工法適用後のモニ タリング調査では,表面保護工法の耐久性は,外観目視 等により調査されることが多い。そのため,母材コンク リートへの水分の侵入抑制効果の有無は,表面保護工法 の外観の変状から得られる情報により,推測せざるを得 ない¹⁾。その結果,補修後の維持管理を考えた場合,表 面保護工法に劣化等の変状が生じた時点での,母材コン クリートの健全性に関する評価や,再補修の適正時期の 見極めは困難な状態にある。

これに対して筆者らは、補修効果の有効性やその持続 性を検証するためのモニタリング調査手法,ならびにそ れらの性能を判定指標とした表面保護工法の評価に関す る検討を行っている。過年度に行った調査では、寒冷地 において表面保護工法が施工されて10年が経過した、供 用中のコンクリート開水路を対象に、表面保護工法の種 別による含水率の調査を試行した結果、コンクリート開 水路の設置環境や表面保護工法の種別により、母材コン クリート内部の含水率に違いが生じることがわかった²⁾。

そこで本研究では、この含水率調査を行った同位置か ら採取したコアの凍結融解試験を行い、表面保護工法の 種別による凍結融解試験サイクル数毎の相対動弾性係数 の推移、および内面からの深さ毎の含水率と超音波伝播 速度の推移から、寒冷地のコンクリート開水路における 表面保護工法適用後の補修効果の検証を行った。



ひび割れ 剥がれ 写真-1 表面保護工法の変状

2.表面保護工法適用後の補修効果の検証方法 2.1対象施設の概要

対象施設は、図-1に示す北海道上川地方に位置する 農業用のコンクリート開水路であるK幹線用水路、C幹 線用水路である。対象施設の概要を表-1に示す。供用 期間は,K幹線用水路は47年,C幹線用水路は50年で、 構造形式は、いずれもRC現場打ちフリューム水路であ る。表面保護工法断面図を図-2に、対象施設の状況を 写真-2に示す。K幹線用水路では、無機系被覆工法

*1 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水利基盤チーム 研究員 修士(農学) (正会員) *2 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水利基盤チーム 主任研究員 博士(農学) (正会員) *3 鳥取大学 農学部 生命環境農学科 教授 博士(農学) (正会員)



K-IO, 有機系被覆工法 K-OR, 母材コンクリートと表面 被覆材である FRPM 板の間に緩衝材を使用したパネル工 法 K-PA が適用され,補修後の経過年数は13年である。 C 幹線用水路では,表面含浸工法 C-IM,無機系被覆工法 C-IO が適用され,経過年数は10年である。本研究では, これに無補修の K-N, C-N を加えて検証を行った。K 幹 線用水路は,内幅 6.0m,内高 2.0m,側壁の部材厚は200 ~250mm である。C 幹線用水路は,内幅 2.0m,内高 1.5m, 側壁の部材厚は200mm である。

2.2 検証方法の概要

本研究では、現地における表面保護工法の種別による 含水率の違いが、以後の耐凍害性に及ぼす影響について 検証するため、含水率調査と凍結融解試験を実施した。 現地にて含水率調査を行い、これと同位置で各2本コア を採取し、1本は炉乾法による含水率測定、1本は凍結融 解試験に供した。コア採取はJIS A 1107 に準拠して行っ ている。コアの採取位置は、各コンクリート開水路の凍 結融解の程度が著しい、南側の日当たり面である水路右 岸側の気中部(最多頻度水位の上側)及び水中部(最多 頻度水位の下側)とし、表面保護工法の浮きや剥離など 外観上の変状が軽微な箇所を選定した(図-3参照)。

(1) 含水率調査

表面保護工法適用後の母材コンクリートにおいて,現 地で実施する微破壊調査手法である電気抵抗式水分測定 法と,採取したコアを用いた炉乾法により,含水率を測 定した。図-4に調査概要図を示す。電気抵抗式水分測 定法は,電気抵抗式水分計(K社製 HI-800型)を用い, コア採取箇所の左右いずれか一方から水平方向 30mmの 位置に,φ6mmの孔を30mm間隔で2つ設け,内面から



の深さ10,30,50,70,90,110,130mmの計7点の孔 間において測定した。炉乾法では、内面からの深さ0~ 140mmの範囲を20mm間隔で計7試料に切断し、JISA 1476に準拠して炉乾燥前後の質量より含水率を求めた。

(2) 凍結融解試験

既往の研究 3), 4), 5)では, 凍結融解試験を促進劣化試験 として活用し、以後の劣化予測や耐久性評価を行ってい る。本研究では、実施されている表面保護工法適用後の 種別による耐久性評価を行うため、現地より採取したコ ア (ϕ 100×200~250mm) を用いて, JIS A 1148 に準拠 し、凍結融解試験を実施した。実暴露環境での水分の侵 入を想定し、コアへの水分供給は、コンクリート開水路 の内面と背面のみとするため,表面保護工法を含めた側 面をエポキシ樹脂によりシールした(写真-3参照)。ま た、採取したコアの形状は円柱形のため、供試体容器は 角柱形ではなく円柱形のものを用いた。凍結融解温度の 管理については、 φ100×400mm の管理用供試体中心部 の温度によって行った。1 つの供試体容器に入るコアの 高さは,400mmを目安としてコアを配置した。以上の条 件により凍結融解試験を行った結果,図-5に示す凍結 融解温度の履歴は、最高温度 5±2℃及び最低温度 -18±2℃の範囲内で推移し、凍結融解1サイクルに要す る時間は,3時間以上,4時間以内に収まっていた。また、 凍結融解試験の終了は, 遮水性を有する表面保護工法を 施工したコアを対象としているため、900 サイクル終了 時とした。ただし、各凍結融解試験サイクル終了時、供 試体の劣化の進行に伴い、シールのひび割れや崩壊等に より供試体容器に供試体が収まらなくなった段階で試験 終了とした。

JIS A 1148 による凍結融解試験では、一次共鳴振動数 が測定項目とされている。しかし、凍結融解試験実施後、 一次共鳴振動数を測定するには、供用中のコンクリート 開水路から採取したコアにより、この試験を行うことは 難しく、凍結融解試験サイクル数が増加するに伴い、よ り正確な測定が困難となる。そこで本研究では、既往の 研究。のにおいて、超音波伝播速度による動弾性係数の結 果が活用されていることから、超音波法(透過法)を実 施し、超音波伝播速度とこれをもとに相対動弾性係数を 算出し、判定指標とした。また、超音波法(透過法)に より、コンクリート開水路内面からの深さ毎の含水率と、 同範囲の深さ毎の超音波伝播速度の測定が可能となった。

超音波法(透過法)では、凍結融解試験の各サイクル 終了後,超音波試験機 (P 社製 TICO 型)を用いて、深 さ方向に 10mm 間隔で、発・受端子の距離が直径に相当 するよう伝播速度を測定した(図-6参照)。表面保護工 法の種別によるコア全体の評価は、式(1)により、各々 の測点の伝播距離(端子間距離(mm))の合計 ΣL(mm)



写真-3 コアシール状況(例:K-IO)



と超音波伝播時間の合計 ΣT (μsec)を用いて平均となる超音波伝播速度 V ($mm/\mu sec$)を算出し評価に用いた。

 $\mathbf{V} = \Sigma \, \mathbf{L} / \, \Sigma \, \mathbf{T} \tag{1}$

次に,所定凍結融解サイクル数経過後の超音波伝播速 度V(m/s)から,式(2)により動弾性係数Ed (GPa) を算出し,式(3)により相対動弾性係数を算出した。 Edn は凍結融解サイクル数 n サイクル後の動弾性係数, Edo は凍結融解試験開始時の動弾性係数である。

$$E_d$$
=4.0387V²-14.438V+20.708 (2)
相対動弾性係数(%)= $E_{dn}/E_{d0} \times 100$ (3)

3. 表面保護工法適用後の補修効果の検証結果

表面保護工法適用後の補修効果を検証するため、判定 指標として、母材コンクリートにおける物性の低下を相 対動弾性係数および超音波伝播速度によって検証した。 また、劣化要因である水分の侵入抑制について、コンク リート開水路からの水分の影響を受けやすい、内面から の深さ0~140mmにおける含水率とあわせて検証を行っ た。そこで、凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係、 コンクリート開水路の内面からの深さ0~140mmにおけ る含水率と凍結融解サイクル毎の超音波伝播速度の関係 から,表面保護工法の種別による母材コンクリートへの 影響を確認した。

3.1 表面保護工法の種別による相対動弾性係数の推移

図-7に、表面保護工法の種別による相対動弾性係数の推移を示す。凍結融解試験終了サイクル数は、K 幹線 用水路では最大756サイクル、C 幹線用水路では最大648 サイクルで試験終了となった。

K 幹線用水路, C 幹線用水路ともに, 凍結融解サイク ル数が増加するに伴い, 表面保護工法を施したコアも含 めて全て, 相対動弾性係数は減少する傾向となった。ま た, 気中部と水中部の結果を比較すると, 全ての表面保 護工法において, 気中部の相対動弾性係数の減少が速か った。なお, これら気中部, 水中部の減少傾向に大きな 違いがあるのは IO であった。写真-4に 162 サイクル 終了後の K-IO-気中, K-OR-気中のコア状況を示す。この 時点で K-IO-気中は, 表面被覆材にスケーリングやひび 割れが生じている。これは, 無機系被覆工法である IO は, 吸水しやすく, 凍結融解作用に対し劣化が生じやす いためであると考えられる。

K-IO-水中は, 試験開始後 100 サイクルまで相対動弾性 係数が増加する。これは, 表面保護工法の遮水性が, 試 験に伴う凍結融解作用により失われ, 母材コンクリート が吸水したことで, 超音波伝播速度が上昇したためであ ると推測される。K-N-気中, K-N-水中, K-IO-気中では, 凍結融解試験開始後から 200 サイクルにかけて, 相対動



◆K-PA-気中

弾性係数が減少する。これに反して、K-OR-気中、K-OR-水中、K-PA-気中、K-PA-水中は、600 サイクルにかけて 徐々に相対動弾性係数が減少する。また、K-OR-気中、 K-OR-水中、K-PA-気中、K-PA-水中は、K-Nと比較して、 相対動弾性係数の減少が緩やかである。このことから、 表面保護工法により、母材コンクリートへの遮水性が発 揮されていたことがわかる。また、凍結融解試験終了サ イクル数が 600 サイクルに達しているため、表面保護工 法により母材コンクリートが遮水性を有することで、凍 結融解作用による劣化が抑制されていることがわかった。

K-IO-水中と同様に, C-IO-気中, C-IO-水中は, 100 サ イクル前後まで相対動弾性係数が増加し, その後, 減少 に転じる結果となった。また, C-IM-気中, C-IM-水中, C-N-気中, C-N-水中は, 凍結融解試験開始後から相対動 弾性係数が減少する。この結果から, C-IM はこの時点に おいて,表面保護工法としての遮水性を有していないこ とがわかった。また, C-N-気中, C-N-水中よりも, C-IM-気中の相対動弾性係数の減少が進んでいることから,表 面保護工法の適用による,母材コンクリートの耐凍害性 の低下の影響が示唆される。

3.2 内面からの深さ毎の含水率と超音波伝播速度の推移

図-8に、気中部の内面からの深さ0~140mmにおけ る、表面保護工法の深さ毎の含水率と超音波伝播速度の 推移(気中部)を示す。図中の含水率は、現地で電気抵 抗式水分測定法により測定した結果、および炉乾法によ り算出した結果である。K-PAの内面からの深さ10mm の含水率については、表面被覆材等のため測定が困難で あった。超音波伝播速度の測定結果のうち、K-OR、K-PA、 K-IOの内面からの深さ5、15mmの測定値は、断面修復 材と母材コンクリートからなる値となっている。本研究 で用いたコアの試験開始時点の超音波伝播速度は、3800 ~4500m/secに収まっていた。

表面被覆材である内面からの深さ 5,15mm において, K-OR では 648 サイクルまで, K-PA では試験終了となる



図-7 表面保護工法の種別による相対動弾性係数の推移



756 サイクルまで、超音波伝播速度の低下がないことか ら,表面被覆材の劣化は生じにくいことがわかった。し かし、その母材コンクリートの超音波伝播速度は、一様 に内面からの深さ 140mm に至るまで、低下しているこ とがわかる。これは、K-OR、K-PAの表面保護工法の遮 水性により、コアから水分が排出されることがなく、背 面から供給された水分がコアの内部に滞留し、母材コン クリート全体の劣化に影響していると推測される。また、 コンクリート開水路の内面に限った表面保護工法の対策 では、K-OR、K-PAのように、背面からの水分供給を回 避できず, 遮水することで, 母材コンクリートの劣化を 助長し、かつ表面から不可視部である母材コンクリート の劣化状況の確認を困難にする可能性があることがわか った。一方, K-N や K-IO は表面保護工法の遮水性の低 下により、内面から水分が供給され劣化が進むことで、 試験の継続ができなかった。このため, K-IO, K-N では, 内面からの深さ0~100mmの範囲で超音波伝播速度の低 下が生じている。また、内面からの深さ100~140mmの 範囲では、324 サイクル終了時点まで、超音波伝播速度 の大きな低下は見られなかった。

C-IM, C-IO, C-N では、内面からの深さ0~100mmに おいて,超音波伝播速度の低下が進んでいる。C-IM では、 216 サイクルで、内面からの深さ0~140mmの全ての測 点において低下している。C-IO では、378 サイクルで超 音波伝播速度が低下し始めるまで、内面からの深さ 140mm 付近での超音波伝播速度の低下は見られなかっ た。一方、C-N については、432 サイクルまで凍結融解 サイクル数が増加しても、内面からの深さ 140mm 付近 での超音波伝播速度の低下は見られなかった。このこと からも、C 幹線用水路では、表面保護工法を施工するこ とで母材コンクリートの耐凍害性の低下に影響を与える と考えられる。

また,各表面保護工法における内面からの深さ毎の含 水率と超音波伝播速度について,含水率の変動に超音波 伝播速度が多少影響されている測点はあったものの,明 確な関係性は得られなかった。ただし,コア採取時点で, 高含水率の表面保護工法では,凍結融解試験を行った結 果,凍結融解試験終了サイクル数が少なくなり,早期に 劣化状態になっていることから,母材コンクリートの含 水率の大小は,劣化に影響があると推察される。

4. まとめ

本研究では、寒冷地において表面保護工法施工後 10 年が経過した供用中のコンクリート開水路において、表 面保護工法適用後の補修効果の検証を行った。現地にて 含水率調査を行い、併せてコンクリート開水路の側壁よ り採取したコアを用いた凍結融解試験を行った。その結 果,以下の知見を得た。

- 凍結融解試験では、相対動弾性係数は表面保護工法施 工の有無によらず減少傾向を示した。また、気中部と 水中部を比較すると、気中部の減少が速かった。
- 2) 表面保護工法を適用することで、遮水性が付与され、 母材コンクリートの劣化が抑制される場合と、反対に 劣化が助長される場合があることが分かった。
- 3)含水率調査により得られた内面からの深さ毎の含水率と、凍結融解試験により得られた深さ毎の超音波伝播速度との間には明確な関係性は見られなかったが、コア採取時点で既に高含水率であった表面保護工法では、早期に劣化する可能性があることが推察された。本研究において得られた結果からは、表面保護工法の

種別による母材コンクリートへの影響は大きく,母材コ ンクリートの健全性や含水状態を把握することの重要性 が示された。このことから,コンクリート開水路の補修 にあたっては,設置環境,補修対象構造物の現状等を鑑 み,実施することが望ましい。また,施設の再補修等を 検討する場合は,表面保護工法に外観の変状が確認でき た時点で,既に相対動弾性係数は大きく低下している可 能性があるため,表面保護工法の変状だけでなく,母材 コンクリートの健全性や含水状態を把握することが重要 であると考えられる。

参考文献

- 農林水産省農業振興局整備部設計課:農業水利施設の長寿命化のための手引き, pp.2-13~14, pp.6-1~
 6-6, 2015.11
- 2) 西田真弓,石神暁郎,山田章,緒方英彦:寒冷地における表面保護工法適用後のコンクリート開水路 側壁の含水率,農業農村工学会大会講演会講演要旨 集,pp.572-573,2018.8
- (1) 熊谷守晃,星俊彦,佐伯昇,太田利隆:50年経過したコンクリートの物理,化学的特性と耐久性,土木学会論文集,No.686/VI-52, pp.41-54, 2001.9
- 小野寺康浩,秀島好昭,高谷智文,奥井宏,館野健 悦,田鹿秀則:表面塗覆装した経年水路コンクリートの凍結融解耐久性試験,第 50 回農業土木学会北 海道支部研究発表会講演集,pp.80-83, 2001.10
- 5) 佐藤英隆:金山ダムにおける堤体コンクリート表面 の劣化予測, Docon Report, Vol.201, pp.12-17, 2016.12
- 緒方英彦,高田龍一,服部九二雄:コンクリート製 開水路の非凍結期の供用環境が凍害に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1159-1164, 2009.7