

論文 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

佐藤 智*1・石神 暁郎*2・金田 敏和*3

要旨：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ことから、補修により背面を保護することが困難である。このため、補修後も背面からの水分浸透があり凍結融解作用を受ける可能性がある。本研究では FRPM 板と緩衝材による表面被覆工法の寒冷地での耐久性評価を行うとともに表面被覆の有無によるコンクリート開水路に対する凍結融解作用抑制効果の評価した。本工法は寒冷地で必要な耐久性有しており、また、緩衝材の断熱作用によって水路躯体コンクリートの凍結融解回数は 1/10 以下に抑えられることがわかった。この結果は補修後のコンクリート開水路の劣化予測手法の検討に活用できる。

キーワード：寒冷地、コンクリート開水路、FRPM 板、緩衝材、補修、表面被覆工法、凍結融解回数

1. はじめに

劣化したコンクリート構造物の補修技術の 1 つに表面被覆工法がある。表面被覆工法はコンクリート内部への水や酸素、二酸化炭素などの劣化因子の浸入やコンクリートの剥落を抑制あるいは防止し、コンクリート構造物の長寿命化を図る目的で使用される。コンクリート構造物の寒冷地特有の劣化要因として凍害が挙げられる。寒冷地におけるコンクリート構造物の補修では、凍害の進行を防止することが重要な目的となる。そのためには水分の浸入を防ぐことと温度変化を緩和させることが求められる。

農業水利施設であるコンクリート開水路では、側壁の背面が土中に置かれることが多く、表面被覆工法で背面を保護することが困難である。このことから側壁背面からの水分の浸透を遮断することができない。また、コンクリート開水路の側壁の部材厚は最大でも 25cm 程度と薄いことから、外気温の変化や日射の影響による温度変化が部材全体に生じる。コンクリート開水路の凍害は側壁内部にも表面と平行方向のひび割れとして発生することがある¹⁾。その原因としては側壁内部の飽水度が高いことと表面からの温度変化によって凍結時の膨張圧が部材厚の方向に生じることによると推察されている¹⁾。

このような劣化環境におかれるコンクリート開水路においては、補修後も部材の温度変化が大きいと凍結融解作用を受け、凍害が進行する可能性がある。コンクリート開水路の長寿命化を図るためには部材の温度変化を緩和させることが有効であると考えられる。

本研究では、寒冷地の農業用コンクリート開水路における現地試験施工等により、FRPM 板と緩衝材を用いた表面被覆工法の耐久性を評価するとともに表面被覆の有無によるコンクリート表面の凍結融解回数の違いを把握

することで凍結融解作用を抑制する効果を評価した。

2. 現地試験施工の概要

2.1 試験箇所

試験施工箇所は、北海道北部の上川郡剣淵町内に位置する農業用コンクリート開水路の東西方向に流れる区間とした。これは、日射の影響を受けやすい南面と受けにくい北面での側壁表面温度の比較を行うためである。当該区間は昭和 47 年度に国営事業で造成された、幅 6.0m、高さ 2.0m のフルーム水路である。試験施工は 2006 年 11 月～12 月に行い、施工延長は 9m である。現地試験施工箇所を図-1 に示す。この地域は、1 月の平均気温の平年値が -8.7℃、年最深積雪の平年値が 102cm であり²⁾、北海道内でも比較的寒冷で多雪な条件下にある。



図-1 現地試験施工位置図

2.2 表面被覆工法の概要

本研究で用いた表面被覆工法は、FRPM 板を表面被覆材とし、水路躯体コンクリートと FRPM 板の間に緩衝材を使用した工法である（以降、FRPM 板表面被覆工法と称する。）。本工法の施工断面のイメージを図-2 に示す。FRPM 板は表面および裏面に FRP 層、中間層に樹脂モルタル層を有するサンドイッチ構造である（写真-1）。FRP は強化プラスチックと呼ばれ、熱硬化性樹脂を高強度のガラス繊維で強化したものである。樹脂モルタルは、骨

*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ水利基盤チーム主任研究員 (正会員)

*2 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ水利基盤チーム研究員 博士(農学) (正会員)

*3 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ水利基盤チーム研究員

材を熱硬化性樹脂で硬化させたものである。FRPM 板の板厚は 10mm で、表裏の FRP 層は 1mm、中間の樹脂モルタル層は 8mm である。FRPM 板の熱伝導率は 0.58～0.70W/m・K である。緩衝材は水路躯体コンクリートと FRPM 板との隙間に浸入した水分が結氷することで生じる膨張力を吸収する目的で用いた。緩衝材には厚さ 10mm の 15 倍発泡ポリエチレンを使用した(写真-2)。15 倍発泡ポリエチレンの熱伝導率は 0.0461 W/m・K である。施工後の状況を写真-3 に示す。施工方法ははじめに水路躯体表面の汚れを洗浄した後、FRPM 板(最大成型寸法 1m×2m)と緩衝材を芯棒打込み式の金属拡張アンカー(材質:SUS304)で水路躯体に固定した。施工端部およびFRPM板の継ぎ目にはウレタン系のシーリング材を使用した。

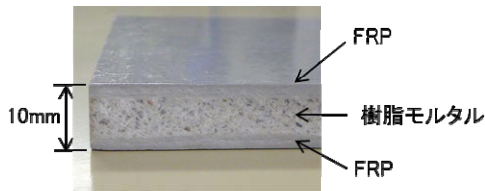


写真-1 FRPM 板の構造

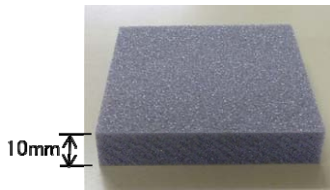


写真-2 緩衝材 (15 倍発泡ポリエチレン)

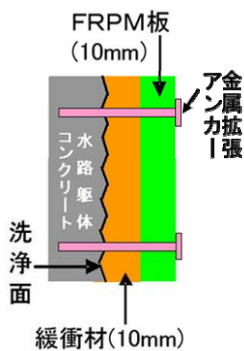


図-2 施工断面図



写真-3 施工後の状況 (灌漑期間 1 回終了時)

2.3 施工後の観測

(1) 目視調査

目視調査は融雪後の通水前と落水後の年 2 回、側壁および底版における FRPM 板の損傷、アンカーの抜け落ち等の変状の有無に着目して行った。

(2) 側壁温度測定

a) 目的

側壁温度の測定位置と目的は、表-1 に示すとおりである。側壁の温度を測定した主な目的は、表面被覆材で補修された水路躯体コンクリートが 1 年間に受ける凍結融解回数を算出するためである。この結果は寒冷地における表面被覆工法で補修された水路の耐用年数の推定に用いる予定である。

表-1 側壁の温度測定位置と目的

測定位置	FRPM板表面被覆工法	無補修
表面温度(t_1)	・ t_2 、 t_3 との比較により、FRPM 板や緩衝材による温度変化緩和効果を見るため	・表面被覆した水路躯体コンクリートとの凍結融解回数の比較を行うため
FRPM板と緩衝材の接着部温度(t_2)	・ t_1 との比較により、FRPM 板による温度変化緩和効果を見るため	-
水路躯体と緩衝材の接着部温度(t_3)	・FRPM板と緩衝材で表面被覆した水路躯体コンクリートの凍結融解回数の算出のため ・緩衝材の凍結融解回数の算出のため	-

b) 測定方法

現地試験施工区間における側壁温度の測定方法の概要は、表-2 に示すとおりである。また、温度センサーの設置位置を図-3 に示す。温度の測定は、FRPM 板表面 t_1 および無補修水路躯体の表面 t_1 、FRPM 板と緩衝材の接着部 t_2 、緩衝材と水路躯体の接着部 t_3 に温度センサーを設置して行った。温度センサーは熱電対 (T 型) を使用し、透明なシリコンシーラントで固定した。測定位置は南面(右岸)では側壁天端から 100cm 下、北面(左岸)では側壁天端から 20cm 下とした。設置位置が異なるのは、南面は積雪の影響を受けづらい側壁の中間部での凍結融解回数を比較するため、北面は雪底の張り出しによる積雪の影響を受けやすい側壁の上部での凍結融解回数を比較するためである。

測定値の記録はデータロガー(製品名:D1 歪み 32P1, ログ電子(株))による自記記録で行った。

表-2 側壁温度測定方法の概要

測定区間	側壁の向き	測定位置	測定間隔	温度センサーの種類
FRPM板表面被覆工法	南	FRPM板表面(天端から100cm下)	2時間	熱電対
		FRPM板と緩衝材の接着部(天端から100cm下)		
		緩衝材と水路躯体の接着部(天端から100cm下)		
	北	FRPM板表面(天端から20cm下)		
		FRPM板と緩衝材の接着部(天端から20cm下)		
		緩衝材と水路躯体の接着部(天端から20cm下)		
無補修	南	水路躯体表面(天端から100cm下)	2時間	熱電対
	北	水路躯体表面(天端から20cm下)		

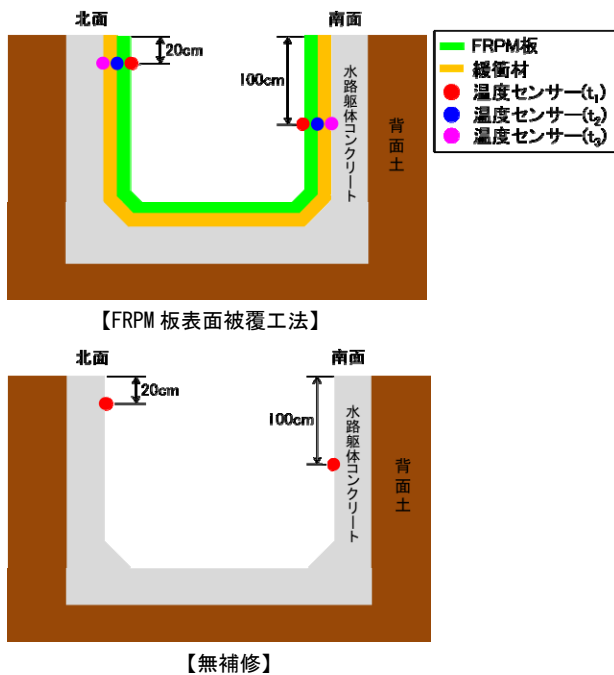


図-3 温度センサー設置位置

2.4 凍結融解回数算出のための凍結・融解温度の考え方

凍結融解回数の算出条件は、評価を行う目的毎に設定した。1つは水路躯体コンクリートに与える凍結融解作用の影響を検討する場合、もう1つは緩衝材に存在する水分の凍結融解による性能変化の影響を検討する場合である。

前者では、コンクリートの最低温度が何℃以下になると凍結融解による劣化(凍害)を生じるかが問題となる。田畑ら³⁾は、コンクリート供試体を用いた試験をもとに、-5℃以下となる凍結融解の繰返して凍害を受け始めると報告している。このため、本試験では一旦-5℃以下となっていたものが0℃を超えたときに凍結融解が1回生じたものと仮定した。

後者の場合は、緩衝材と水路躯体コンクリートの接着部の水分が凍結する回数とした。接着部の水分は水路躯体コンクリートの側から浸透し接着部および緩衝材内で滞留することを想定している。図-4に水路躯体側壁における背面からの水分浸透のイメージを示す。なお、冬期は側壁表面から寒気が侵入し、水路躯体コンクリートの背面は日中も氷点下となっている。このため、背面土から水路躯体コンクリートや緩衝材への水分浸透はほとんど無いと考えられる。この図は背面土が凍結していない時期の状況を示したものである。緩衝材と水路躯体コンクリートの接着部および緩衝材内に浸透した水分については不純物の混入による凝固点降下を想定し、一旦-1℃以下となっていたものが0℃を超えたときに凍結融解が1回生じたものと仮定した。

すなわち、両方で凍結融解回数算定に用いる温度測定位置は同じであり、回数算定の温度条件が異なる。

なお、本研究では2009年から2012年の各年の11月1

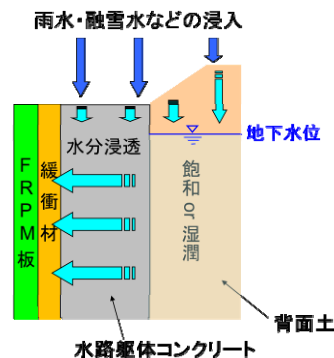


図-4 水路躯体背面から表面被覆材への水分浸透イメージ

日から4月30日までの温度測定結果を用いた。

2.5 試験施工区間近傍の気象概要

測定期間における試験施工区間近傍(約8km南)の和寒観測所のアメダスデータを表-3に示す。12月から3月の日平均気温の月平均値は2009年~2010年は1月、2月が平年値よりも高く、2010年~2011年は12月、2月が平年よりも高く、2011年~2012年は1月から3月まで平年値よりも低かった。また、最深積雪は2010年、2011年は平年値よりも少なく、2012年は平年値よりも多かった。測定した3年間では2009年~2010年、2010年~2011年は暖冬傾向、2011年~2012年は寒冬であった。

表-3 和寒観測所での気象の概況²⁾

		単位:℃			
		12月	1月	2月	3月
日平均気温	2009-2010年	-6.2	-6.1	-6.9	-3.3
	2010-2011年	-3.0	-9.0	-5.5	-3.0
	2011-2012年	-6.7	-10.7	-10.2	-4.8
	平年値	-4.8	-8.7	-8.2	-3.0
		単位:cm			
		12月	1月	2月	3月
最深積雪	2009-2010年	64	83	94	83
	2010-2011年	28	59	66	61
	2011-2012年	44	89	115	108
	平年値	67	87	102	97

3. 緩衝材の凍結融解試験

FRPM板表面被覆工法では、FRPM板については凍結融解抵抗性を有することが確認されている⁴⁾。しかし、緩衝材については凍結融解抵抗性の検証は行われていない。緩衝材は既設水路とFRPM板の隙間に進入する水分が凍結することで起こる膨張圧を緩和するために用いている。このことから、凍結融解を受けた時の緩衝材の変形に対する復元性の変化を確認するため、凍結融解前後の圧縮残留ひずみを測定した。併せて、緩衝材の重量測定を行い、吸水率を算出した。

3.1 試験材料

試験材料は、試験施工で使用したものと同一、15倍発泡ポリエチレンを使用し、試験片は長さ50mm×50mm、厚さ10mmとした。

3.2 試験方法

(1) 試験片の前処理

試験片の前処理模式図を図-5に示す。試験片(緩衝材)は、スチール製の容器の中に水が浸るように設置し、実施工を模擬し、緩衝材の上にFRPM板(t=10mm)を載せた。

試験片は20℃の水中に24時間浸漬したものを凍結融解0サイクルとした。凍結融解処理は、試験槽内の温度を-20℃から+20℃になるように設定し、温度保持時間を30分として、1サイクルに要する時間は3時間として行った。1サイクル当たりの時間は、予備試験で緩衝材が確実に凍結融解することを確認した上で決定した。

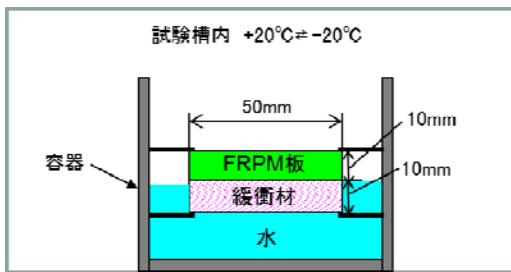


図-5 試験片の前処理模式図

(2) 圧縮残留ひずみ試験

JIS K 6400-4:2004「4.圧縮残留ひずみ試験」(B法)に準拠して行った。試験片は前処理をした後に厚さを測定してから、平板の上に載せ、一軸圧縮試験機にて試験片の厚さの50%に圧縮した。圧縮は室温(+20℃程度)で72時間行った。

圧縮残留ひずみ(Cs)は、圧縮終了後同じ環境で30分間回復させた後、次の式によって算出した。

$$C_s = \frac{d_0 - d_r}{d_0} \times 100$$

Cs: 圧縮残留ひずみ

d₀: 始めの試験片の厚さ (mm)

d_r: 試験後の試験片の厚さ (mm)

圧縮残留ひずみの測定は、凍結融解0サイクルおよび50, 100, 300, 500サイクル後に、それぞれ試験片5個ずつを使用して行った。測定値は試験片5個の中央値とした。

4. 結果と考察

4.1 側壁表面の温度変化

FRPM板表面と補修内面における冬期間の南面の温度変化例を図-6に示す。FRPM板表面の温度変化と

FRPM板と緩衝材の接着部の温度変化にほとんど差がない。一方、緩衝材と水路躯体コンクリートの接着部の温度変化はFRPM板表面と比較して大きく緩和されている。このことから、緩衝材は断熱効果が高いことがわかった。

冬期間の試験施工区間の状況を写真-4に示す。南面は日射を受けており、雪庇があまり発達していないのに対して、北面では日射を受けず、雪庇が大きく発達している。

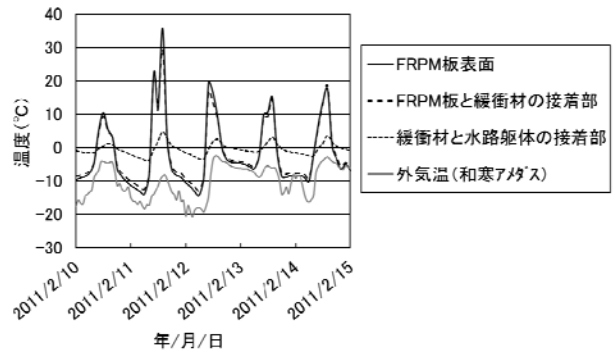


図-6 冬期間の南面における温度変化



写真-4 冬期間の試験施工区間の状況

4.2 目視調査

試験施工から約6年経過後における外観(写真-5)からは、南面、北面ともにFRPM板に変状は見られず、アンカーの抜け落ちもなく良好な状態を保っている。



写真-5 FRPM板の施工6年後の状況(南面)

4.3 表面被覆の有無による水路躯体コンクリートの凍結融解回数の違い

FRPM 板表面被覆工法で補修した水路躯体コンクリートと無補修の水路躯体コンクリートの凍結融解回数を算出した結果を図-7 に示す。南面では無補修のコンクリート水路躯体は3年間の平均で43回程度凍結融解作用を受けるのに対し、FRPM 板表面被覆工法で補修したコンクリート水路躯体は3年間の平均で4回であり、凍結融解作用を1/10以下に抑える効果を持つことがわかった。北面では日射の影響をほとんど受けないことから、無補修でも凍結融解回数は南面の約1/3となる。FRPM 板表面被覆工法で補修した場合は年1回であり、凍結融解作用はほとんど受けないことがわかった。ここで2011年11月～2012年4月の凍結融解回数が南面で他の年より多くなっている。これは、この年の12月～3月の日平均気温が平年値より約2℃低く寒冷だったため、夜間に側壁の温度が-5℃よりも低下する日が多かったことが原因である。南面では夜間に温度が低下しても日中は日射の影響で側壁の温度が0℃以上となることで凍結融解回数が多かった。北面の無補修表面で2011年11月～2012年4月の凍結融解回数が少ないのは、積雪が多く側壁が雪庇に覆われたためと考えられる。このことから、寒冷な年は日射を受ける南面で凍結融解作用が進行しやすいといえる。凍結融解回数算出の結果、FRPM 板表面被覆工法では水路躯体コンクリートの凍結融解作用を大きく減少させる効果を有することがわかった。これは、4.2で説明したように発泡ポリエチレン製の緩衝材の断熱効果が高いことによるものである。

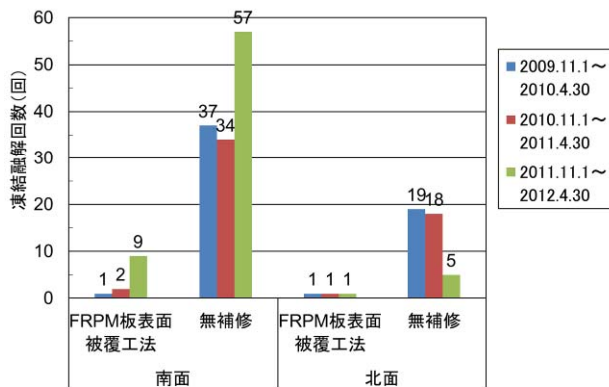


図-7 FRPM 板で補修した場合と無補修の場合のコンクリート水路躯体の凍結融解回数

4.4 緩衝材が受ける凍結融解回数

緩衝材が受ける凍結融解回数を図-8 に示す。3年間の平均は南面で45回程度、北面で13回程度であった。北面で2011年11月～2012年4月の凍結融解回数が少なかったのは、積雪が多かったため温度が低い状態で雪庇

に覆われたことにより、0℃以下の期間が長かったことが原因と考えられる。

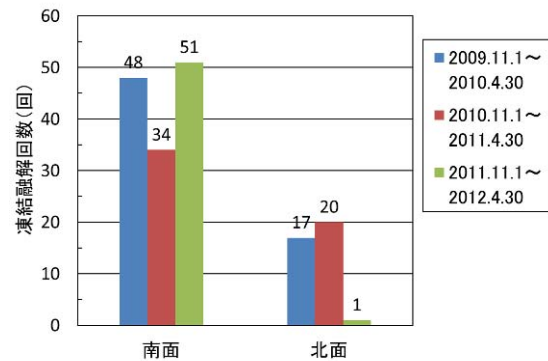


図-8 緩衝材の凍結融解回数

4.5 凍結融解作用を受けた緩衝材の性能

図-9 に凍結融解試験の温度履歴を、図-10 に凍結融解500サイクルまでの緩衝材の圧縮残留ひずみを示す。試験の結果、緩衝材の圧縮残留ひずみは凍結融解0サイクルと500サイクル後ではともに30%程度でほとんど差が無く、緩衝材の性能低下は生じていないといえる。なお、4.4の結果から、緩衝材が1年間に受ける凍結融解回数は南面で45回程度であり、これを500サイクルに当てはめると約11年に該当することから、10年以上は施工時と同等の復元性が保たれるものと考えられる。また、吸水率は500サイクル後でも0.015g/cm³と僅かであり、

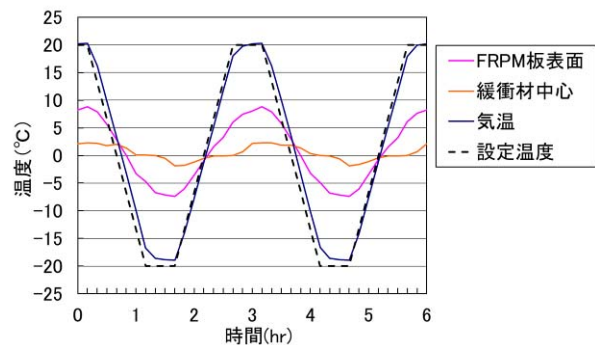


図-9 試験槽内および試験片の温度履歴

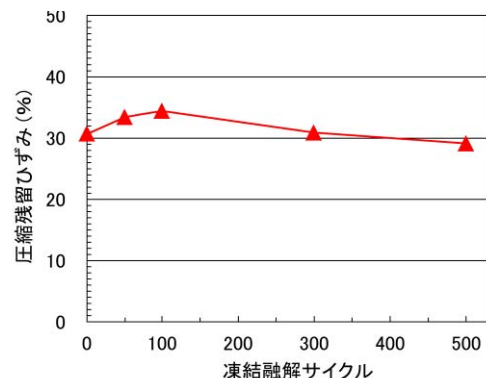


図-10 凍結融解作用と緩衝材の圧縮残留ひずみの関係

アンカーを引き抜く程の凍上力は働かないと考えられる(図-11)。

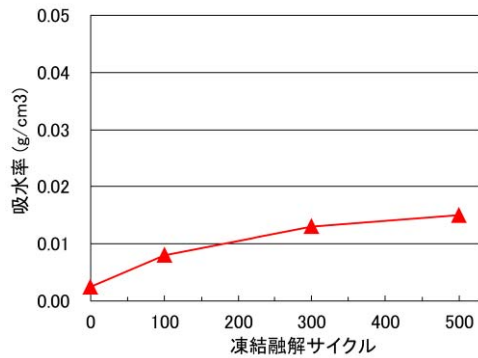


図-11 凍結融解作用と緩衝材の吸水率の関係

5. まとめ

本研究ではFRPM板と緩衝材を用いた表面被覆工法の耐久性について現地試験施工での評価と室内試験で緩衝材の性能評価を行った。また、表面被覆されたコンクリート開水路が受ける凍結融解作用の緩和効果について報告した。研究結果から得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 積雪寒冷地における現地試験施工での目視調査の結果、施工6年後においてFRPM板と緩衝材を用いた表面被覆工法に変状は見られなかった。
- (2) FRPM板と緩衝材を用いた表面被覆工法によって、コンクリート開水路が受ける凍結融解作用は1/10以下となる。
- (3) 緩衝材は室内試験による凍結融解前と凍結融解500サイクル後の圧縮残留ひずみに大きな差はなく、少なくとも10年以上は施工時と同等の復元性が保たれると考

えられた。

6. おわりに

本研究で使用したFRPM板と緩衝材を用いた表面被覆工法は(独)土木研究所寒地土木研究所と(株)栗本鐵工所との共同研究により開発したものである。本工法は、特許第4576636号を取得している。

本研究の結果は、補修後のコンクリート開水路の劣化予測手法の検討に活用できる。

今後は水路躯体コンクリートを用いて表面被覆工法によるコンクリートの凍結融解作用抑制効果を評価する必要がある。

謝辞

現地試験施工の実施にあたり、国土交通省北海道開発局ならびに関係土地改良区にご協力を頂いた。関係者の皆様に対し、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 緒方英彦, 鈴木哲也, 山崎大輔, 濱幸雄: 壁状構造物であるコンクリート製開水路の側壁内部の凍害劣化, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.833-838, 2010.7
- 2) <http://www.jma.go.jp/jp/amedas/> (気象庁アメダスデータ(和寒)より抜粋)
- 3) 田畑雅幸・洪悦郎・鎌田英治: コンクリートの耐凍害性におよぼす環境要因の影響, セメント技術年報, Vol.37, pp.349-352, 1983
- 4) 農業用水路クイックパネル工法研究会: クイックパネル工法技術資料, p.11, 2009.11