

研究成果報告書

研究開発課題名	高炉スラグ系材料及び機械化施工による超高耐久性断面修復・表面被覆技術の開発
研究総括者	株式会社 南組 南 真樹
研究開発組合	・株式会社 南組 ・日鉄セメント株式会社
試験研究機関	・国立研究開発法人 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 ・国立大学法人 鳥取大学 ・国立大学法人 室蘭工業大学

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景及び目的

我が国において国営土地改良事業などにより造成された基幹的農業水利施設は、ダムや取水堰などが約 7 千箇所、農業用排水路は約 5 万 km に及んでいる。それら基幹的農業水利施設の多くでは老朽化が進行しており、前者ではその約 5 割が、後者では約 4 割が耐用年数を超過している状況にある。土地改良長期計画（平成 28 年 8 月）では、これら農業水利施設の機能を将来に渡って安定的に発揮させるため、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図る戦略的な保全管理が求められている。

農業水利施設の主要な建設材料であるコンクリートは、時間の経過とともに劣化が進行する。特に、北海道や東北を始めとする全国の寒冷地では、農業に身近な存在である水が劣化因子となる凍害が発生する。凍害は、コンクリート内部の水が凍結温度に達し、氷へと変化する際の体積膨張と、その融解の繰返しにより生じる劣化現象である。その初期には微細ひび割れを生じ、スケーリング、骨材の露出・剥落、あるいは内部ひび割れ、層状ひび割れへと進展し、弾性係数の低下を生じさせ、ひいては強度低下を生じさせる。最終的には躯体の断面欠損や鉄筋の露出・腐食を生じて、構造体としての耐荷力や剛性を低下させる（写真-1）。国内に存在する用排水路の内、寒冷地にあるものは約 4 割に当たる。寒冷地に位置する施設において適時・適切な保全管理を行うためには、コンクリートの凍害に着目することが必要不可欠であり、凍害を生じたコンクリートを如何に診断・評価し、施設の長寿命化へと繋げていくのが喫緊の課題となっている。



断面欠損を生じた開水路の側壁



浮き・剥離を生じた頭首工の堰柱

写真-1 農業水利施設におけるコンクリートの凍害劣化の事例

農業農村整備に関する技術開発計画（平成 29 年 4 月）では、地域特性に応じた技術開発の必要性が示されている。

近年、これら凍害を生じた農業水利施設に対して、長寿命化を目的とした補修・補強が行われている。この補修・補強では、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）（平成 25 年 10 月，平成 27 年 4 月改正）に記載されている各品質規格に適合する材料が選定され、その中でも寒冷地における個別的な性能である耐凍害性を満足する材料が適用される場合が多い。しかしながら、施工後早期にひび割れや浮き・剥離といった変状を生じることも多く、恒久的な長寿命化対策にはなり得ていないのが現状である（写真-2）。この要因には、材料上の要因として

「材料自体の耐久性が十分ではないこと」、施工上の要因として「材料が予定していた硬化物になっていないこと」が挙げられる。著しい凍害環境下に置かれている農業水利施設において、長寿命化とライフサイクルコストの低減を図るためには、これら材料上および施工上の課題を解決・克服すること、即ち、より高耐久性を有する材料と施工品質の確保・向上が図られる施工方法からなる新たな補修・補強技術を開発することが必要となる。



開水路で発生した無機系被覆材のひび割れ

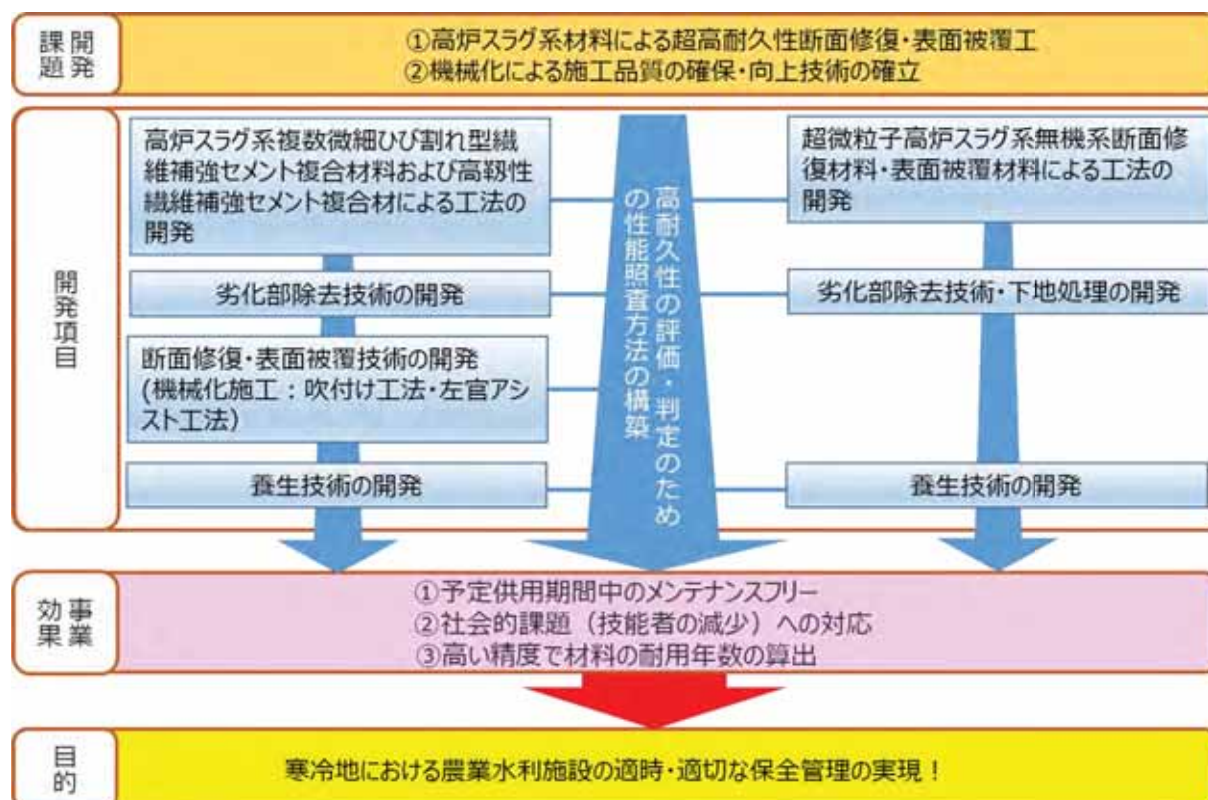


ゲート施設で発生した無機系被覆材のひび割れ

写真-2 農業水利施設における補修材の早期劣化の事例

そこで本研究開発事業（以下、本事業という）では、凍結融解作用に対して高耐久性を有する高炉スラグ系材料を用いた補修・補強工法と、多種多様な形状を有する農業水利施設においても施工品質の確保・向上が図られる機械化施工技術から構成される、超高耐久性断面修復・表面被覆技術を開発することを目的とする。本技術は、凍結融解作用に対して十分な耐久性が実証されている高炉スラグ系材料を用いた断面修復工法および表面被覆工法の開発・適用を前提として、機械化施工技術である劣化部除去技術（ウォータージェット工法など）による既設躯体における劣化範囲の確実な除去、断面修復・表面被覆技術（吹付け工法，左官アシスト工法など）による施工時の品質の確保・向上を図るものである。本技術の開発に当たり、以下の 2 つの課題を設定した。

開発課題	開発項目
1) 高炉スラグ系材料による超高耐久性断面修復・表面被覆工法の開発	①超高耐久性断面修復工法，表面被覆工法の開発
	②高耐久性の評価・判定のための性能照査方法の構築
2) 機械化による施工品質の確保・向上技術の確立	①劣化部除去技術の開発（ウォータージェット工法など）
	②断面修復・表面被覆技術の開発（吹付け工法，左官アシスト工法など）
	③養生技術の開発



研究開発アプローチ図

1. 2 事業の内容及び実施方法

本事業では、寒冷地における農業水利施設を対象とした超高耐久性断面修復・表面被覆技術を開発し、その設計および施工方法を確立するために以下の内容にて研究開発を進めてきた。これは、高品質である材料を用いて補修・補強をしたにも関わらず再劣化し補修の補修という事象が発生していることに着目し、材料の特性と補修する既存コンクリート（母材）との付着が規格通りになっていないための事象と考え、「材料・下地処理（劣化した母材の健全性確保）・施工（従来・機械化）・養生」までの一貫した施工品質による超高耐久性の補修技術を構築し本来の補修材料の品質を確保することで、長期供用期間を実現させることを目標としている。

1) 高炉スラグ系材料による超高耐久性断面修復・表面被覆工法の開発

溶鉱炉で鉄鉄時の副産物として発生する高炉スラグは、ポルトランドセメントの水和に際して遊離する水酸化カルシウムを刺激材として硬化（潜在水硬性）し、緻密な組織を形成する性質から、強度増進に優れ、水密性、塩分浸透抑制効果及び化学抵抗性が高く、凍結融解作用に対しても高耐久性を示し寒冷地において優れた性能を発揮するセメント原料である。さらに副産物を有効利用することで自然環境保全に寄与することができる。

一方、材料の高炉スラグの種類や配合が養生環境により材料品質に大きく影響する場合があります。材料特性に即した養生方法が重要となる。

本事業では、寒冷地での農業水利施設の長寿命化を目的の一つとしているため高炉スラグを配合した材料と工法の相乗効果を狙った施工方法の開発と、施工後の長寿命化に適う品質照査方法を構築する。

① 超高耐久性断面修復工法，表面被覆工法の開発

a) 高炉スラグ系複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料および高靱性繊維補強セメント複合材料による工法

無機系被覆工法では，主にポリマーセメントモルタルを用いて施工する。特にひび割れ追従性の観点で靱性系材料が設計段階で選択されることもあるが，実際の水路で施工された場合，施工後の局所的な膨れが変状として報告されている例がある。予定供用期間中のメンテナンスフリーを実現するには，このような変状を起こさない工法が必須となる。本事業では，実際の水路表面の凹凸を考慮した付着性を評価し，靱性系材料に多く見られる施工後の局所的な膨れといった変状を抑え，予定供用期間中に補修効果が安定して持続する工法を開発する。

b) 超微粒子高炉スラグ系無機系断面修復材料・表面被覆材料による工法

断面修復工・表面被覆工において，耐凍害性のほか優れた品質を有した修復材で施工した場合でも，既設コンクリートの品質低下・下地処理不良・不十分な養生が原因とされる修復材の再劣化が報告されている。本事業では「既設コンクリートの改質」「修復材の品質を阻害しない下地処理方法」「修復材の緻密性に寄与する養生方法」に着目し再劣化を抑制する効果がある工法を開発する。

② 高耐久性の評価・判定のための性能評価方法の構築

本事業において開発する断面修復工法，表面被覆工法が高耐久性を有するか否かを評価・判定するため方法として，判定指標を補修・補強後の材料の耐用年数とする性能照査方法を構築・提案する。

2) 機械化による施工品質の確保・向上技術の確立

断面修復工法，表面被覆工法の施工時の品質の確保・向上に加えて，工期の短縮効果が期待できる機械化施工技術である劣化部除去技術，断面修復・表面被覆技術を開発し，同時に，断面修復材および表面被覆材の硬化・養生技術を開発する。

① 劣化部除去技術の開発（ウォータージェット工法など）

劣化部除去は補修後のひび割れや浮き・剥離等の変状の発現を抑え，予定供用期間中の補修効果の持続に強く影響を与える。しかしながら，劣化部除去後の躯体表面は凹凸状になるものの，凹凸の高低差（不陸）の程度はコンクリート母材の劣化程度や，母材コンクリートに使用されている骨材の種類などにより大きく異なる。劣化部分の残存を低減することを前提に，表面被覆材および断面修復材の材料自体の付着性能が最大限発揮され，変状を誘発しないコンクリート母材の凹凸状態を確保できる劣化部除去技術を開発する。また，表面被覆厚の十分な耐久性確保の観点から，レーザーなどの高精度測定機器を使用することにより水路表面の適切な凹凸調整厚（不陸調整厚）の算出が可能となり，修復材の品質の補完を目的とした不陸測定方法を開発する。

② 断面修復・表面被覆技術の開発（吹付け工法，左官アシスト工法など）

無機系被覆工法は，左官鋺による「左官工法」と圧縮空気で材料を吹き付ける「吹付工法」の 2 つに大別される。開水路の表面被覆工法においては，吹付工法がよく用いられているが，従来の吹付方法では，施工品質は作業者の個々の技量や経験に因るものが多く，熟練度や個人差による施工ムラが目立っており補修後の早期劣化の要因とも考えられている。既に顕在化している「熟練技能者の減少」と今後の熟練技能者増加が難しい現状を考慮すると施工の機械化を検討せざるを得ない。これらの背景から，人力作業による従来の吹付工法よりも施工品質に優れた機械化施工を開発する。

③ 養生技術の開発

ポリマーセメントモルタルの養生は基本的にコンクリートの養生方法に準拠しているのが実状である。しかしながら，通常のコンクリート打設と比較して，打設厚（被覆厚・断面修復厚）が薄くなると既設コンクリートの温度が修復材に及ぼす影響が大きくなり，通常の養生方法を適用することに疑問を感じる。また，一般的に非かんがい期は低温期，冬季間に集中しており，気中温度に比べ既設コンクリート温度は，温度上昇が鈍く修復材の初期強度発現に及ぼす影響が大きく，付着力の低下にも繋がっていると考えられる。従って施工前後の養生による材料品質の低下の抑制を目的として水利施設に適した養生技術を開発する。

3) 試験施工

1) および 2) の項目を寒冷地に位置する複数の現地施設で試験施工することで，現場適用に際する技術的課題を明らかにする。

試験施工の位置付けは「実用化に向けての問題点を検証するための試験的な施工」とする。

4) 実証試験

1) および 2) の項目の有効性および経済性を評価するため，北海道内の現地施設で実証試験を行う。

実証試験の位置付けは「試験施工で得られた問題点や知見を改善し反映させた工法完成確認試験」とする。

5) 機能監視

1) および 2) の中長期的な有効性および効果を確認するため，実証試験を実施した現地施設において 2 年間の機能監視を行う。本事業で開発する超高耐久性断面修復・表面被覆技術は，寒冷地における農業水利施設を主たる対象としているため，冬期における監視を複数年行うことが望ましい。そのため，機能監視期間として 2 年間（令和 3 年～令和 4 年）を設ける。

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点

開発項目	技術的問題点	対応
1)① a) 高炉スラグ系複 数微細ひび割れ型繊 維補強セメント複合 材料および高靱性繊 維補強セメント複合 材料による工法	『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)(平成25年10月,平成27年4 月改正)』では,付着強度を6項目の 条件により照査される。しかしなが ら,これらの付着強度は凹凸が無い条 件下で評価されており,下地処理後の 凹凸が存在する実環境の条件が考慮さ れていない。	実際の水路表面の凹凸を考慮した付着 性を評価し,靱性系材料に多くみられ る施工後の局所的な膨れといった変状 を抑え,予定供用期間中に補修効果が 安定して持続する工法を開発する。
b) 超微粒子高炉ス ラグ系無機系断面修 復材料・表面被覆材 料による工法	既設コンクリートを改質する場合は表 面強度が不十分であることが前提とな り,表面強度の健全度評価方法が必要 となる。さらに修復材の品質を阻害し ない下地処理工法の開発においても修 復材の品質判定方法が必要となる。緻 密性に寄与する養生方法の開発につい ても同様で,従来の手法を応用し,一 貫性のある評価・判定方法を構築す ることを目的とするが評価・判定方法 の開発に当たっては表面強度が不十分 な状態の既設コンクリートなど実環 境の再現が必要とされ,再現手法の構 築も課題となる。	既設コンクリートの評価・判定,下地 処理工法,養生方法については従来 の各種判定・分析・解析方法を応用 し,取り扱いを含めて簡易で現場負担 を軽減できるような方法を開発する。 また,従来の手法の問題点や改善点を 提示する。
② 劣化部除去技術 の開発に対する問題 点	下地処理後の形状は,洗浄水压だけ でなく噴射ノズル口の形状や躯体表 面までの距離,洗浄時間などによっ ても異なり,表面被覆材および断面 修復材との付着性が異なる。躯体表 面の凹凸については,現状考慮され ておらず,表面被覆厚についても, 材料の食い込み・吹付ロス・不陸 (凹凸)調整厚の3点が混在してい るのが実状であり,適切な設計上の 施工厚が確保できていない可能性 がある。	予定供用期間中のメンテナンスフ リーを実現させるための要素である 「設計上の施工厚」および「下地 処理後の凹凸」を確実にする施工 管理手法を確立し,健全な既設 躯体の露出とともに,材料の付 着性能を引き出す適切な下地 処理技術を検証し開発する。

③ 機械化施工の開発 に対する問題点 (適用範囲の拡大)	現状の機械化施工では水路側壁の直線部しか適用できず，曲面部や底版部の施工に対する機械化には至っていない。施工品質確保の観点からも機械化施工の適用範囲を広げる必要がある。	水路側壁の曲面部や底版部での機械化施工には，現状の左官アシスト工法の機械を改造改良する必要がある。改造改良にあたっては作業効率への影響も踏まえて検討する必要があるため，試運転による検証を繰り返して改造改良し開発する。
④ 養生技術の開発 に対する問題点	実際の施工現場では，コンクリート標準示方書で謳われている「5℃以上の環境温度」の確保の為に給熱養生を実施しているが，開水路内では暖気は上部分に溜まりやすいといった空気の動きを考慮すると底版での5℃以上確保は極めて難しい状況にある。また，コンクリート標準示方書に基づく養生方法では，既設コンクリート自体の温度が考慮されておらず，被覆材や断面修復材の施工時に急激な温度変化による材料の硬化不良を招く恐れがある。	開水路内の環境温度を5℃以上確保する際に底版部へも暖気が循環するような工夫はもとより，施工前の給熱養生により既設コンクリートも予め温めておくことが必要となる。また，表面被覆および断面修復施工後に皮膜養生材などを用いて表面の急激な乾燥を防ぐといった技術も併用して適切な養生技術を考案する。

1. 4 事業の実施体制

(1) 事業実施主体

- ① 株式会社 南 組
- ② 日鉄セメント株式会社

(2) 試験研究機関の名称

- ① 国立研究開発法人 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
- ② 国立大学法人 鳥取大学 農学部
- ③ 国立大学法人 室蘭工業大学 大学院 工学研究科

(3) 役割分担

研究開発の項目	事業実施主体 (新技術研究開発組合)		試験研究機関		
	(株)南 組	日鉄 セメント(株)	寒地土木 研究所	鳥取大学	室蘭工業 大学
1) 高炉スラグ系材料による超高耐久性断面修復・表面被覆工法の開発	◎	◎	◎	◎	◎
2) 機械化による施工品質の確保・向上技術の確立	◎	○	○	○	○
3) 試験施工	◎	◎	○	○	○
4) 実証試験	◎	◎	○	○	○
5) 機能監視	○	○	◎	○	○

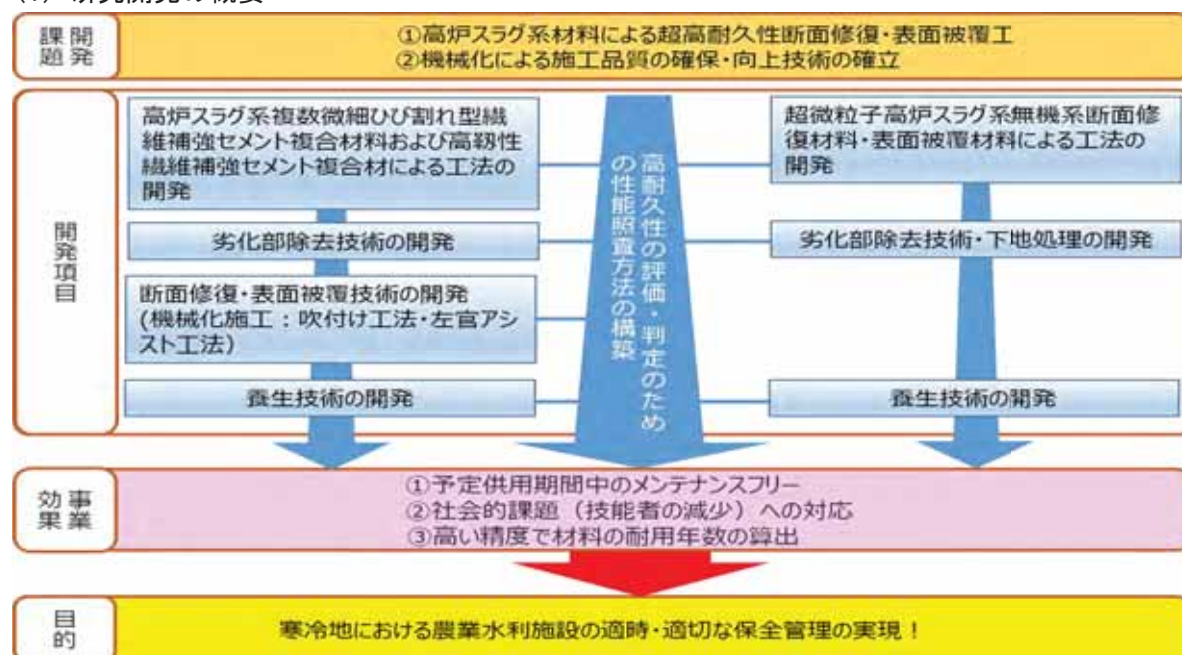
1. 5 事業の年度計画と実績

研究開発の項目	平成 30 年度		令和元年度		令和 2 年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
1) 高炉スラグ系材料による超高耐久性断面修復・表面被覆工法の開発						
2) 機械化による施工品質の確保・向上技術の確立						
3) 試験施工						
4) 実証試験						
5) 機能監視 (令和 2～令和 4 年度に実施予定)						

注) は計画, は実績, 点線は試験施工のモニタリング。

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

(1) 研究開発の概要



(2) 結果

開発項目/材料	HPFRCC	PCM
超高耐久性断面修復工法・表面被覆工法の開発	実環境での付着力向上	- 母材引張強度の向上 - 一体性の向上 - 耐凍害性の向上
劣化部除去技術の開発・下地処理の開発	劣化部除去技術の開発 ・母材コンクリート劣化部に対して洗浄水圧の違いによる除去比較試験を実施し、 適切に除去出来る洗浄水圧を確認 ・劣化部除去後にレーザー式凹凸測定機を用いてコンクリート下地の凹凸形状を確認し、材料品質を確実に確保できる『施工厚』と凹凸差を調整する『不陸調整厚』を確認 ・底版部は、母材表面近傍の 脆弱層を確実に除去するためウォータージェット工法を採用	下地処理の開発 母材コンクリートの表層を補強するための適切な 表面改質材と接着用プライマーによる母材コンクリートと修復材の一体性の向上を確認
断面修復・表面被覆技術の開発 (機械化施工：吹付け工法・左官アシスト工法)	水路曲面部および底版部の 施工機械を開発	
養生技術の開発	- 母材表面温度を重視した給熱養生の仕組みを開発 - 被膜養生剤の効果を確認	被膜養生剤の種類や塗布方法による、修復材の水分逸散の抑制効果を確認

(3) 課題等

2. 1 成果の内容により、各開発項目で課題等が顕在化され対応した。

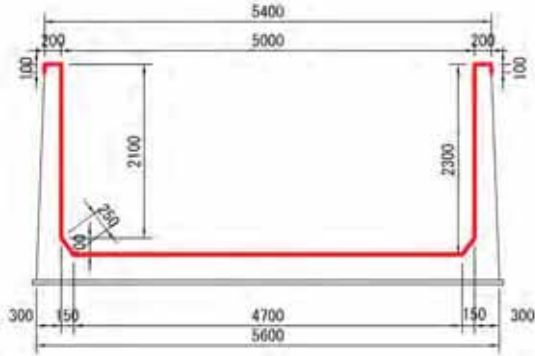
② 高耐久性の評価・判定のための性能評価方法の構築 以下 (3) 試験施工 2 事業の成果

2. 1 成果の内容で詳細報告とします。

1. 7 実証試験（現場摘要）の概要，結果，課題等

概要：試験施工で得られた問題点や知見を改善し反映させた工法完成確認試験（図-1）

图-1

施工場所	北海道滝川市江部乙町 空知幹線用水路
管理者	空知土地改良区
築造	平成 11 年(1999 年) 供用年数 20 年
水路構造	RC 現場打ちフリューム
形状・寸法	
施工位置状況	上流から直線部 2 バレル, 曲線部 1 バレル計 3 バレル, R 側側壁が南東向きとなっている。
現地視察状況	現地視察を令和元年 10 月 29 日に実施した。 側壁・底版の状況が本実証試験施工の目的である, 現地試験施工で得られた問題点や知見を改善し反映させた工法確認完成確認試験に適していると判断し候補地とした。  
施工者	株式会社 南 組 , 日鉄セメント株式会社
施工期間	23 日間(施工後養生期間含まず)
施工延長	L=36.0m , 曲線部 1 バレル両岸側壁・底版, 直線部 3 バレル両岸側壁・底版

(2) 実証試験施工前・施工完了写真（写真-1～4）



写真-1
施工前（撮影方向 上流→下流）



写真-2
施工前（撮影方向 下流→上流）



写真-3
施工後（撮影方向 上流→下流）



写真-4
施工後（撮影方向 下流→上流）

結果：これまでの平成 30 年，令和元年度の試験 2 か所の試験施工による課題を再度検証し改善した結果の完成された施工方法として実施し，補修施工場所における劣化部除去技術，機械化による断面修復・表面被覆技術の開発，養生技術の開発について詳細な内容については 2 事業の成果，2. 1 成果の内容を参照

1. 8 機能監視の概要、結果、課題等

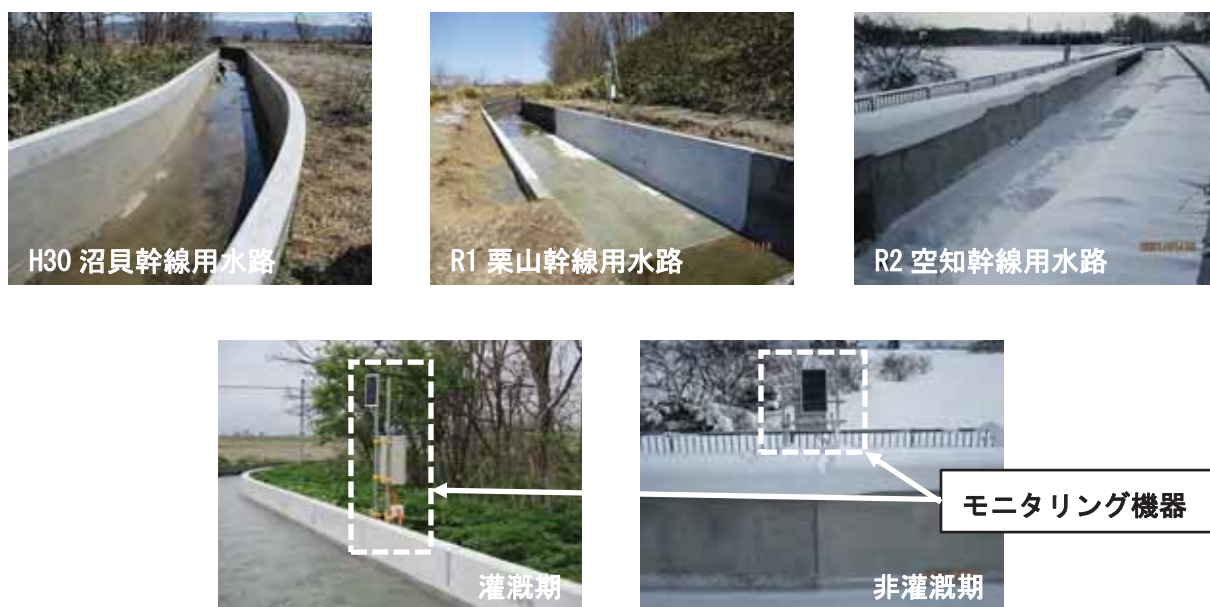
概要：2. 1 (3) ①平成 30 年度美唄市沼貝幹線用水路，②令和元年度栗山町栗山幹線用水路の 2 か所で実施した試験施工および 2. 1 (3) ②令和 2 年度滝川市空知幹線用水路の中長期的な有効性および効果を確認するため，試験施工および実証試験を実施した現地施設において 2 年間の機能監視を行う。本事業で開発する超高耐久性断面修復・表面被覆技術は，寒冷地における農業水利施設を主たる対象としているため，冬期における監視を複数年行うことが望ましい。そのため，機能監視期間として 2 年間（令和 3 年度～令和 4 年度）を設ける。

本事業において開発する断面修復・表面被覆技術は，主に凍害に対してこれまでに実現し得なかった水準の耐久性を獲得することを目的とした技術であり，積雪寒冷地に位置する農業水利施設において予定供用期間中のメンテナンスフリーを目指した工法の実現を究極の目的としている。凍害は，コンクリート中に含まれる水分の凍結融解，即ち水分の侵入を前提として，温度の低下と上昇の繰返しにより発生する劣化である。そのため，対象とする施設のどの部位に，どの時期に，どのような温度変化が生じたのかを追跡することが，その耐久性を知る上で極めて重要であると考えられる。そこで本事業では，試験施工を実施した 2 地点および実証試験を実施した 1 地点において，熱電対およびデータロガーを用いた温度の連続計測を行うことにより，モニタリングならびに機能監視を行うこととした。

結果：

a) 機能監視の方法

機能監視は，現地水路に常設するモニタリング機器により行った。モニタリング機器は，熱電対およびデータロガーから構成され，連続計測され取得されたデータはデータロガーを介して大容量コンパクトフラッシュに保存される。現地水路での電源は，現地に設置する太陽光パネルにより供給される。現地水路およびモニタリング機器の概況を図－4 に示す。



図－4 現地水路およびモニタリング機器の概況

熱電対の設置位置（断面図）は、2. 1（1）②の図－4，図－5，図－6のとおりである。

b) 機能監視の結果

これまでに取得したデータは、先述した2. 1（1）②の図－11，図－12，図－13のとおりである。美唄市沼貝幹線用水路では平成30年11月22日より、栗山町栗山幹線用水路では令和元年11月12日より、滝川市空知幹線用水路では令和2年12月1日より、それぞれモニタリングを開始している。

2 事業の成果

2. 1 成果の内容

(1) 高炉スラグ系材料による超高耐久性断面修復・表面被覆工法の開発

① 超高耐久性断面修復工法, 表面被覆工法の開発 (HPFRCC)

- a) 高炉スラグ系複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料および高靱性繊維補強セメント複合材料による工法

1. 室内試験における付着強度の確認と実環境での検証 (給熱養生無し)

室内試験における修復材の低温条件での付着性能を測定した。ここで使用した修復材はプライマーを必要としないため、下地処理条件として予め湿潤面を作り出すだけで修復材打設を行った。結果は材齢 7 日時点ですでに基準値を十分満足する数値が得られた。(表-(1)-1)

表-(1)-1

供試体作成日 2018/7/20

材料	養生温度	付着強度 (N/mm ²)		備考
	(°C)	σ_7	σ_{28}	
エフモル	5	2.28	2.51	

※付着強度 破断面は、母材引破壊 下地条件: サンダーによる目粗し

実環境として給熱養生をしない条件 (従来工法) で付着強さの発現状況を確認した。実施時期は 11 月初旬で、実施場所における例年の気温推移 (日平均気温として 5°C 以上) を考慮すると、降雪や給熱のための養生囲いは必要がないと判断ができる時期であった。測定値は室内試験の数値と比較すると総じて低い傾向を示している。(表-(1)-2) また、左岸水中部において 1 箇所が判定基準値 1.0N/mm² を満たしていなかったため、長期確認のため再試験を 3 月 8 日 (施工後 121 日後) に実施した結果、以下の数値にて判定基準値を満足したことを確認した。(表-(1)-3) しかしながら施工後 121 日経過しても室内試験における材齢 28 日の数値よりも低い値を示していた。

表-(1)-2

試験名: 表面被覆後付着力試験(σ_{28})

試験日: H30.12.6

総平均値 1.42N/mm²

材料	部位	側壁位置 治具No.	L			左岸平均値	R			右岸平均値
			1	2	3	N=3	1	2	3	N=3
エフモル	気中部	破壊位置	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部		被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	
		付着力 (N/mm ²)	1.51	1.71	2.04	1.75	1.64	2.06	1.38	1.70
	水中部	破壊位置	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部		被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	
		付着力 (N/mm ²)	1.09	1.16	0.56	0.94	1.16	1.11	1.59	1.29

表-(1)-3

試験名: 表面被覆後付着力試験(σ_{121})

試験日: H31.3.8

総平均値 1.79N/mm²

材料	部位	側壁位置 治具No.	L			左岸平均値	R			右岸平均値
			1	2	3	N=3	1	2	3	N=3
エフモル	気中部	破壊位置	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部		被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	
		付着力 (N/mm ²)	1.63	1.67	1.57	1.62	2.67	2.51	1.96	2.38
	水中部	破壊位置	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部		被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	
		付着力 (N/mm ²)	1.39	1.64	1.63	1.56	1.33	1.74	1.81	1.63

2. 実環境における給熱養生有りでの付着強さの確認

給熱養生を用いた条件で付着強さの発現状況を確認した。給熱養生無しの条件で得た材齢 28 日の付着強さと比較すると、概ね高い数値が得られた。(表-(1)-4)。これは、給熱養生により施工箇所が温められることで母材コンクリート表面の温度が上がり、練り上がった修復材との温度差が小さくなったことが要因の 1 つであると推察される。これらのことから、給熱養生を用いて修復材の練り上がり母材コンクリート表面の温度差を可能な限り小さくすることで、現場での付着強さを室内試験に近づけられる可能性が分かった。

表-(1)-4

R元年度 栗山幹線水路試験施工付着強度試験結果

試験名: 表面被覆後付着力試験($\sigma 28$)

試験日: 2020/1/8(側壁)

材料	部位	側壁位置 治具No.	L			左岸平均値 N=3	R			右岸平均値 N=3
			1	2	3		1	2	3	
エフモル	気中部	破壊位置	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部		被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	
		付着力(N/mm ²)	1.60	1.76	1.63	1.66	1.66	2.13	1.80	1.86
	水中部	破壊位置	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部		被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	
		付着力(N/mm ²)	1.60	1.51	1.54	1.55	1.93	1.94	1.94	1.93

3. 母材コンクリートの表面温度と修復材の練り上がり温度との温度差に着目した検証

実環境において検証した結果を以下に示す。(表-(1)-5~7)

なお、底版部はウォータージェットを用いて母材表面近傍の脆弱層を確実に除去しており、付着力試験においても被覆接着部で破断している傾向があることから、修復材は母材コンクリートが現在有している健全部に接着しているものと考えられる。

表-(1)-5

母材表面および修復材練り上がり温度

部位	母材表面	練り上がり温度
側壁上部	12.1°C	17.0°C
側壁下部	8.4°C	
底版	6.7°C	

表-(1)-6

R2年度 空知幹線水路実証試験付着強度試験結果

試験名: 表面被覆後付着力試験($\sigma 42$)

試験日: 2020/12/26(側壁)

施工開始日: 11/11

施工完了日: 11/17 給熱養生期間11/7~11/24まで(18日間)施工完了後7日間

総平均値 2.07N/mm²

材料	部位	側壁位置 治具No.	L			左岸平均値 N=3	R			右岸平均値 N=3
			1	2	3		1	2	3	
エフモル	気中部	破壊位置	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部		被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	
		付着力(N/mm ²)	2.03	2.09	2.06	2.05	2.08	2.01	2.21	2.10
	水中部	破壊位置	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部		被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	
		付着力(N/mm ²)	2.16	2.03	1.88	2.02	2.11	2.24	1.93	2.09

※現場環境の都合上材齢 42 日で測定

表-(1)-7

R2年度 空知幹線水路実証試験付着強度試験結果

試験名: 断面修復後付着力試験($\sigma 13$)

試験日: 2020/11/30(底版)

施工開始日: 11/11

施工完了日: 11/17 給熱養生期間11/7~11/24まで(18日間)施工完了後7日間

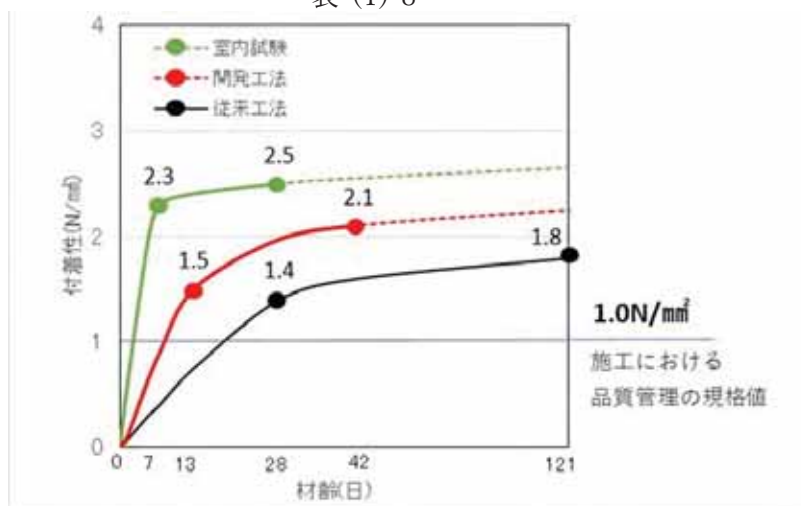
材料	部位	側壁位置 治具No.	底版			平均値 N=3
			1	2	3	
エフモル	底版	破壊位置	母材	被覆接着部	被覆接着部	
		付着力(N/mm ²)	1.68	1.27	1.55	1.50

※現場環境の都合上材齢 13 日で測定

これまでの検証結果から、給熱養生を用いてコンクリート母材温度を上げ、修復材の練り上がり温度の温度差を可能な限り小さくすることで現場での付着強さを室内試験値に近づけられ、従来工法と比較して約 40%（材齢 28 日を基準）向上できる可能性を確認できた。

（表-(1)-8）

表-(1)-8



4. 断面修復での一体化性の評価

底版については凍害による劣化が著しい場合、修復厚が 50～80mm 程度に及ぶことがある。修復厚が 20mm を大きく超えてしまう断面修復になると単軸引張試験では適切に付着性を評価することができないことがある。（コア採取による測定では、採取時に修復材と母材との界面にせん断荷重が働くものと推察される）（表-(1)-9）。そこで、薄層施工となる表面被覆の付着性ではなく、母材コンクリートとの一体化を評価する手法として「機械インピーダンス法」による検証を実施した。

機械インピーダンス試験を 20cm 四方メッシュで実施した結果を示す。（表-(1)-10）

なお、材齢は 131 日である。

表-(1)-9

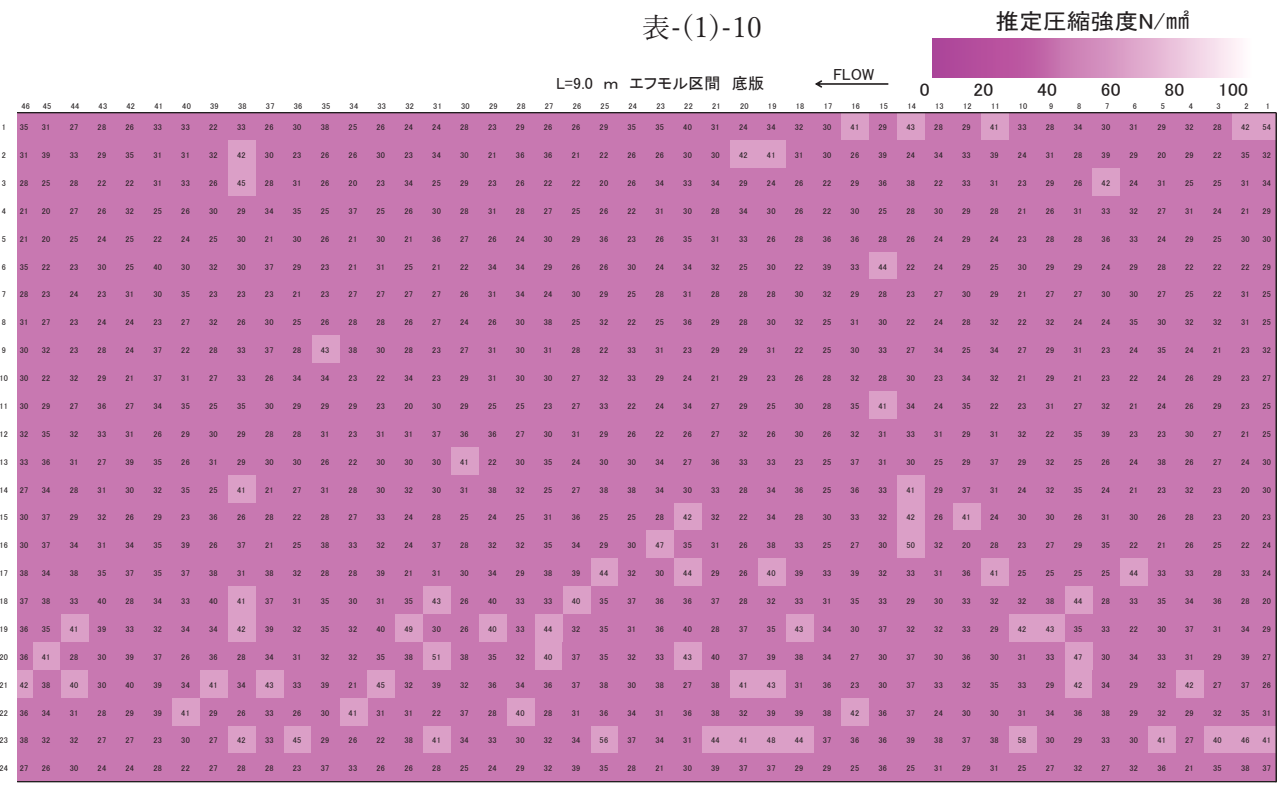
R元年度 栗山幹線水路試験施工付着強度試験結果

試験名： 断面修復後付着力試験(σ28)

試験日： 2020/1/7(底版)

材料	部位	側壁位置 治具No.	底版						
			1	2	3	4	5	6	7
エフモル	底版	破壊位置	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部	被覆接着部
		付着力(N/mm²)	0.57	0.32	0.15	0.36	0.18	0.27	0.31

1.0N/mm²以下



また、現場養生の試験体を用いて低温環境下での圧縮強度を測定した結果を示す。(表-(1)-11)

表-(1)-11 側壁供試体作成日 2019/12/5
底版供試体作成日 2019/12/6

圧縮強度 (N/mm^2)			
側壁			底版
$\sigma 4$	$\sigma 5$	$\sigma 35$	$\sigma 34$
22.7	24.5	41.7	44.9

一体化の評価結果

機械インピーダンス法と併せて打音検査も実施し浮き・剥離等の変状は確認されなかった。これらのことから、断面修復による母材コンクリートとの一体化を評価する手法として「機械インピーダンス法」は有効性が高いと判断する。

b) 超微粒子高炉スラグ系無機系断面修復材料・表面被覆材料による工法（PCM）

概要：「既設コンクリートの改質」「修復材の品質を阻害しない下地処理方法」「修復材の緻密性に寄与する養生方法」に着目し再劣化を抑制する効果がある工法を開発する。

ここでは農業水利施設の補修・補強に関するマニュアル【開水路補修編】（案）の品質規格を適合している「超微粒子高炉スラグ系高耐久性ポリマーセメントモルタル」を使用して超高耐久性断面修復・表面被覆工法の開発に取り組んだ。現場環境においても超高耐久性（耐凍害性の向上）を実現するため、既設コンクリートの改質、修復材の品質を阻害しない下地処理方法、修復材の緻密性に寄与する養生方法の3つの課題に着目し、各種実験を行った。また、これらの室内試験結果を基に実証試験で現場での適用性について検討した。

1. 課題1 既設コンクリートの表面改質

既設コンクリートの劣化部が残存することによる修復材の再劣化を防止するため、表面改質剤による既設コンクリートの表面改質効果について検討を行った。改質効果の確認は、模擬劣化コンクリート（評価用コンクリート）を作成し評価を行った。

1). 評価用コンクリートの作成方法

評価用コンクリートの配合を表1に示す。凍害を受けたコンクリートを再現するため、評価用コンクリートを作成した。表1に示す配合のコンクリート（寸法10×10×40cm）を、20℃水中で材齢28日間以上養生を行った後に、JIS A 1148の水中凍結融解試験で相対動弾性係数80%程度（およそ150サイクル）になるように調整した。次に、15MPaの高圧水で表層の劣化部を除去し、48時間20℃、60%RHの条件で静置したものを評価用コンクリートとした。使用した凍結融解試験機を写真1に、高圧洗浄機を写真2に、洗浄状況を写真3に、評価用コンクリートの作成状況を写真4に示す。

表1 評価用コンクリートの配合

セメントの種類	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)				スランプ(cm)	空気量(%)
			W	C	S	G		
普通ポルト	60	50	170	283	963	954	12.0	2.0



写真1 凍結融解試験機



写真2 高圧洗浄機



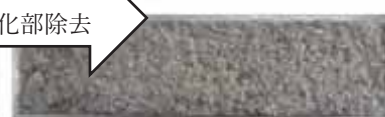
写真3 洗浄状況



a) 水中養生後状況



b) 凍結融解試験後状況



c) 評価用コンクリート（高圧洗）

写真4 評価用コンクリートの作成状況

2). 表面改質剤使用材

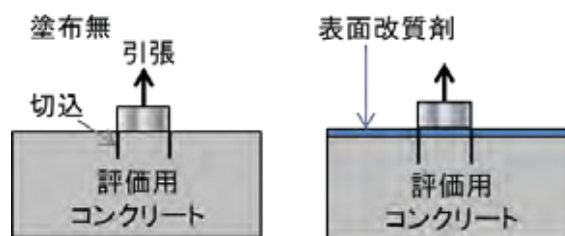
使用した表面改質剤の種類と塗布量を表 2 に示す。

表 2 表面改質剤の種類と塗布量

表面改質剤/接着プライマー/被膜養生剤 種類	有効成分	標準塗布量
A	コロイダルシリカ	30%
B	有機・無機複合型ポリマー	30%
C	アクリル系共重合物	40%
D	アクリル酸エステル	40%
		200 g/m ² (原液)
		100 g/m ² ×2回(原液)
		300 g/m ² (原液)
		120 g/m ² (3倍液)

3). 試験方法

引張強度試験の概要図を図 1 に示す。評価用コンクリートに各種表面改質剤をメーカー推奨の標準塗布量を塗布し、20℃、60%RH の条件で 24 時間養生後に直径 5 cm の治具を貼り付け引張強度を測定した。



a) 塗布無

b) 表面改質剤

図 1 引張強度試験概要図

4). 既設コンクリートの表面改質結果と評価

引張強度試験結果を表 3 に、表面改質剤の種類が引張強度に及ぼす影響を図 2 に示す。図 2 より表面改質剤塗布無に比べ C、D は引張強度が向上したものの、A、B については顕著な表面改質効果はみられなかった。表面改質効果として、塗布無に比べ C は 28%、D は 38% 引張強度の向上が確認でき、表面改質剤 D が最も表面改質効果がみられた。以上の結果から表面改質剤は D を使用することとした。

表 3 引張強度試験結果

付着強度 (N/mm ²)	改質剤種類				
	塗布無	A	B	C	D
1	1.07	1.01	0.65	1.60	1.82
2	1.34	1.36	1.10	1.36	1.66
3	1.25	1.22	0.99	1.67	1.55
最小値	1.07	1.01	0.65	1.36	1.55
最大値	1.34	1.36	1.10	1.67	1.82
平均	1.22	1.20	0.91	1.54	1.68

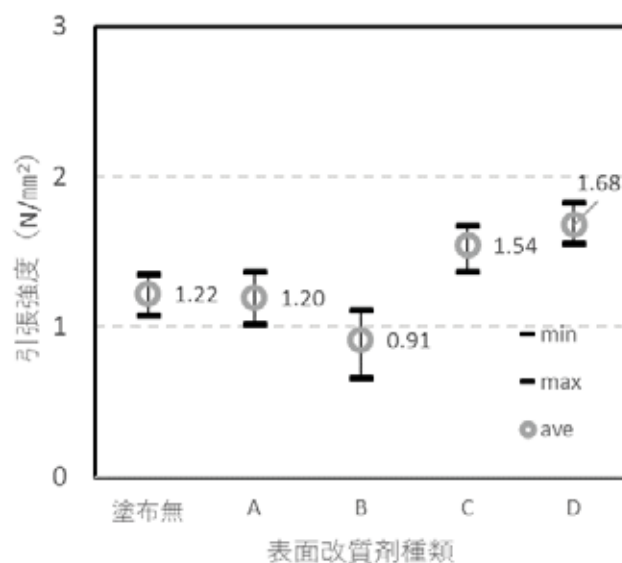


図 2 表面改質剤の種類が引張強度に及ぼす影響

2. 課題 2 修復材の品質を阻害しない下地処理方法

修復材の早期の浮き剥離を防止するため、接着プライマーの種類による付着強度を評価し、既設コンクリートと修復材の一体性の向上を図った。一体性の評価は、表 1 に示した評価用コンクリートと修復材の付着強度から一体性の評価を行った。

2-1 接着プライマーによる一体性の向上

1). 接着プライマー使用材料

接着プライマーは、表 2 にした表面改質剤と同様のものを使用して評価した。

2). 試験方法

付着強度試験の概要図を図 3 に、修復材塗布前後の状況を写真 5 に示す。表 1 に示した評価用コンクリートに、各種接着プライマーをメーカー推奨の標準塗布量を塗布し 24 時間後に、修復材を 10 mm 塗布した。養生は 7 日間 20°C、60%RH の条件とした。養生終了後、直径 5 cm の治具を貼り付け、付着強度を測定し一体性の評価を行った。

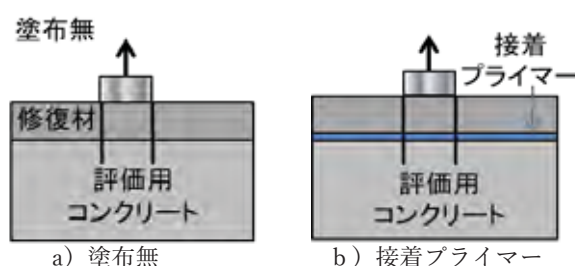


図 3 付着強度試験概要図



写真 5 修復材塗布前後の状況

3). 試験結果と接着プライマーの評価

付着強度試験結果を表 4 に、接着プライマーが付着強度に及ぼす影響を図 4 に示す。図 4 から、接着プライマー塗布無に比べ C、D は付着強度が向上したものの、A、B については顕著な一体性向上効果は見られなかった。付着強度は、塗布無に比べ C は 33%、D は 40% 付着強度の向上が確認でき、接着プライマー D が最も一体性の向上が認められた。以上の結果から接着プライマー D を使用することとした。

表 4 付着強度試験結果

付着強度 (N/mm ²)	接着プライマー種類				
	塗布無	A	B	C	D
1	1.12	1.02	0.63	1.49	1.92
2	1.35	1.34	0.99	1.73	1.77
3	1.30	1.21	0.77	1.79	1.63
最小値	1.12	1.02	0.63	1.49	1.63
最大値	1.35	1.34	0.99	1.79	1.92
平均	1.26	1.19	0.80	1.67	1.77

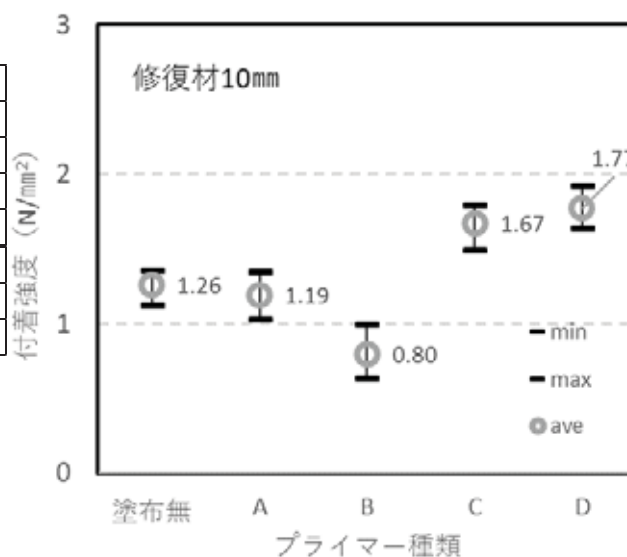


図 4 接着プライマーが付着強度に及ぼす影響

2-2. 表面改質剤と接着プライマーの併用効果

1) 試験方法

付着強度試験の概要図を図 5 に示す。図 5 に示すように、下地処理は、塗布無、接着プライマーDのみ、表面改質剤 D と接着プライマーD 併用の 3 項目について検討した。その上に、修復材を 10 mm 塗布し、修復材塗布後の養生は、7 日間 20°C60%RH の条件として付着強度を測定した。接着プライマーのみの塗布方法は、接着プライマー塗布 3 時間経過後に修復材を塗布した。表面改質剤と接着プライマー併用時の塗布方法は、表面改質剤塗布 3 時間経過後に、接着プライマーを塗りその後 3 時間経過後に修復材を塗布した。

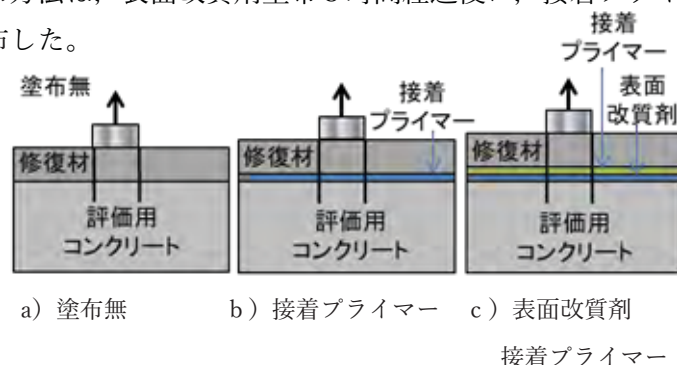


図 5 付着強度試験概要図

2) 表面改質剤と接着プライマーの併用効果

表面改質剤と接着プライマーが付着強度に及ぼす影響を図 6 に示す。

図 6 より、塗布無に比べ、表面改質剤を塗布することにより付着強度は 43% 向上し、表面改質剤と接着プライマーを併用することにより、69% 付着強度が向上する。併用することにより、表面改質剤による既設コンクリートの表面改質効果と接着プライマーの既設コンクリートと修復材の接着強度向上により、さらに一体性を向上することができる。

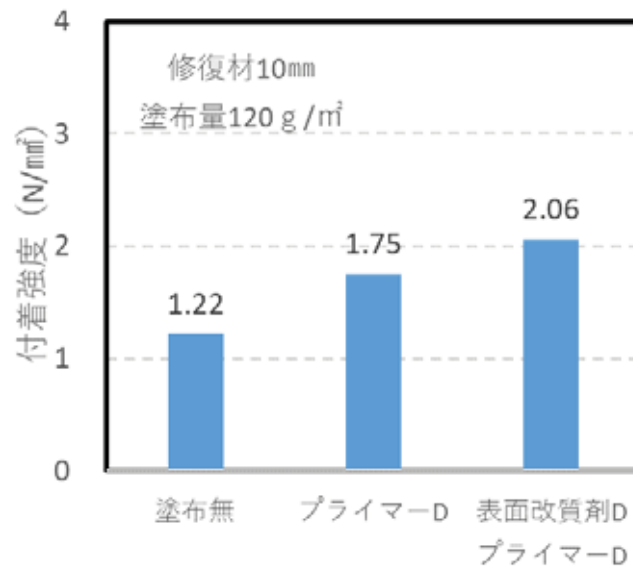


図6 表面改質剤と接着プライマーが付着強度に及ぼす影響

3. 課題3 修復材の緻密性に寄与する養生方法

材料本来の性能を発揮させるため、養生条件の違いによる修復材の緻密性と耐凍害性の関係を明らかにし、被膜養生剤による養生方法の検討を行った。

3-1 トレント法による緻密性の評価と耐凍害性

1) 試験方法

修復材の養生条件の違いによる緻密性を評価するため、含水率を測定しトレント試験を行った。トレント試験状況を写真6に示す。養生は温度10℃、20℃、材齢7日、28日、気中、水中条件とした。

気中条件については、10℃、70%RH、20℃、60%RHで養生を行った。この供試体について、凍結融解試験を実施し、耐久性指数を求めた。耐久性指数はJIS A 1148の凍結融解試験結果より式1を用いて算出した。



a) 含水率測定状況



b) トレント測定状況

写真6 トレント試験状況

$$DF = \frac{P \times N}{M} \quad \dots \text{式1}$$

ここに、

DF : 耐久性指数
 P : Nサイクルのときの相対動弾性係数(%)
 N : 相対動弾性係数が60%になるサイクル数、又は300サイクルのいずれか小さいもの
 M : 300サイクル

2 透気係数と耐久性指数の関係

養生条件の違いが透気係数に及ぼす影響を図 7 に、養生条件の違いが耐久性指数に及ぼす影響を図 8 に、透気係数と耐久性指数の関係を図 9 に示す。図 7 より、透気係数の結果から気中（乾燥）条件より水中条件の方がより緻密な硬化体を形成した。また、温度が高くなるにつれ、材齢期間が長くなるほど、緻密性は向上することが分かった。これらの養生条件で凍結融解試験を実施し、耐久性指数を求めた結果、図 8 より養生条件の違いで気中条件と水中条件での耐久性指数の差が顕著にみられた。図 9 より耐久性指数と透気係数の関係には相関が見られ、トレント法により現場で簡易的に耐凍害性を評価できる可能性を見出した。

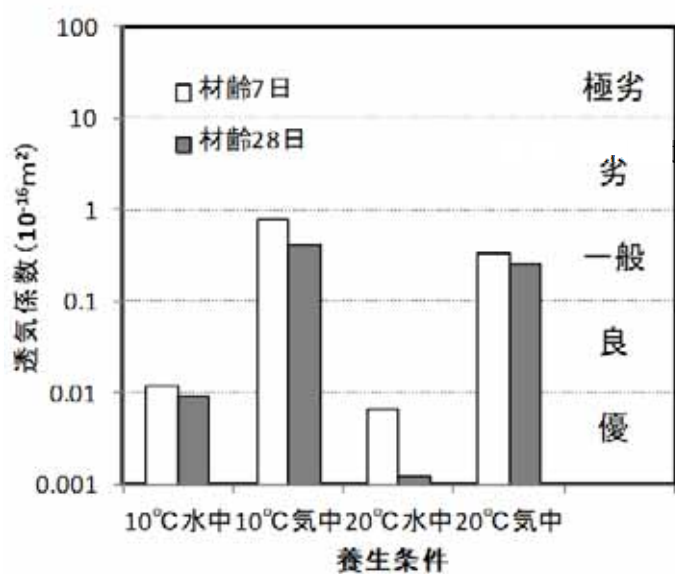


図 7 養生条件の違いが透気係数に及ぼす影響

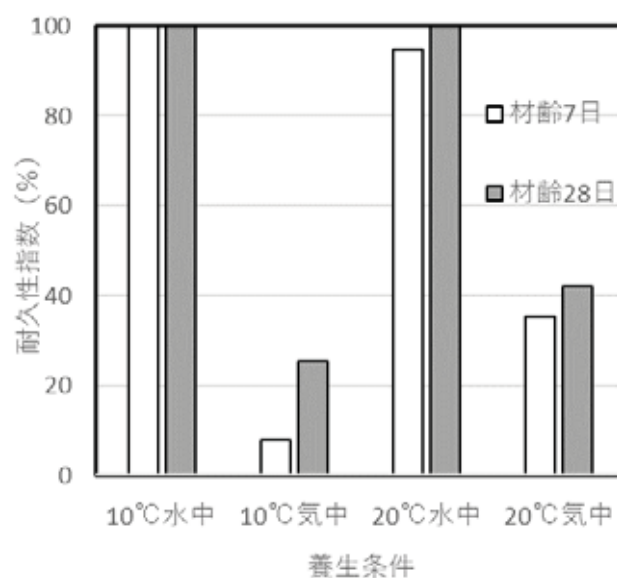


図 8 養生条件の違いが耐久性指数に及ぼす影響

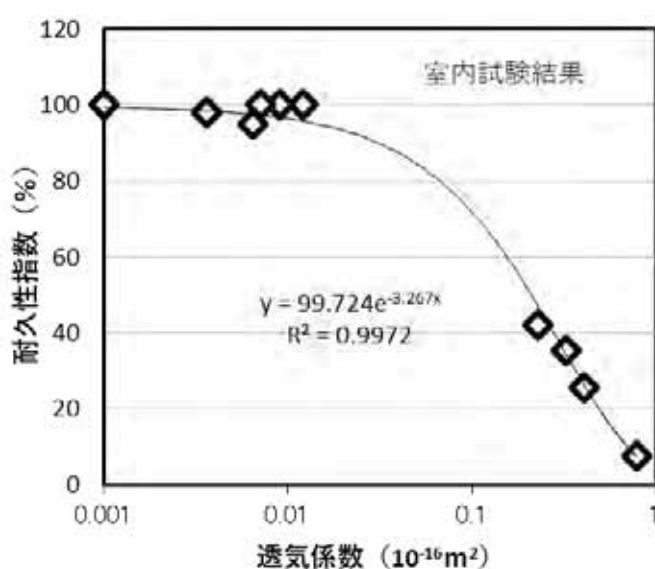


図 9 透気係数と耐久性指数の関係

3-2 被膜養生剤の種類が水分保持率と耐凍害性に与える影響

1) 被膜養生剤使用材料

被膜養生剤は、表 2 に示す表面改質剤と同様のものを使用した。

2) 試験方法

①修復材の水分保持率

25×20×1 cmの容器の中に修復材を 10 mm成形した後に、表 2 に示した被膜養生剤を塗り、質量を計り初期質量とした。その後 7 日間 20℃、60%の条件で養生を行った後、再度質量を測定して初期質量から減少した量から水分の蒸発量を算出し水分保持率を求めた。水分の蒸発量は、被膜養生剤の塗布量をメーカー標準使用量としたため、被膜養生剤中の持ち込み水分量も補正して算出した。

塗布量は、メーカー標準使用量の他、被膜養生剤 D のみ 3 倍希釈であるため 2 回塗布の水準も追加した。

②耐凍害性

10×10×40 cmの型枠に修復材を成形した後に、7 日間 20℃、60%RH の条件で養生を行った。その後、凍結融解試験を行い耐凍害性の評価を行った。

3) 水分保持率と耐凍害性の関係

被膜養生剤が水分保持率に及ぼす影響を図 10 に、被膜養生剤が耐凍害性に及ぼす影響を図 11 に、水分保持率と相対動弾性係数の関係を図 12 に示す。図 10 より、塗布無と比べどの被膜養生剤も修復材の水分を保持できることが確認できた。また、図 11 より、塗布無と比べ被膜養生剤で水分を保持することにより、耐凍害性が向上することがわかった。図 12 に示した修復材の水分保持率と相対動弾性係数の結果から、水分保持率が高い程、耐凍害性が向上することが分かった。養生条件の違いが透気係数に与える影響の結果と同様に、乾燥条件よりも、修復材の水分を保持させることにより緻密な硬化体を形成し耐凍害性が向上することが分かった。

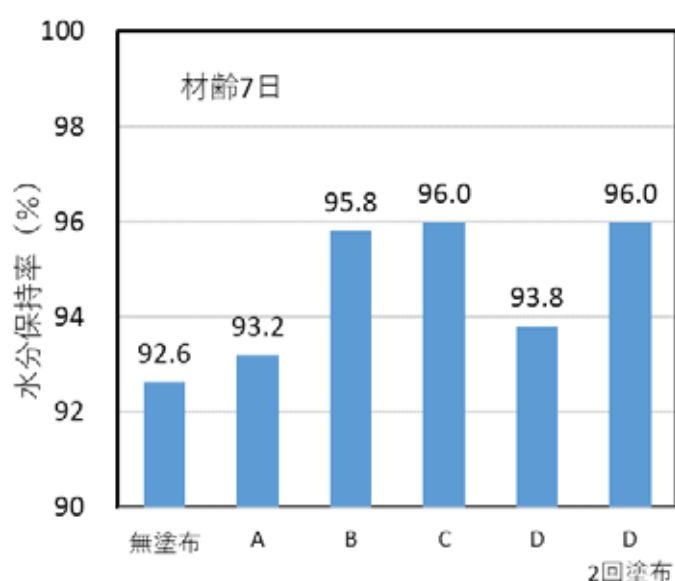


図 10 被膜養生剤が水分保持率に及ぼす影響

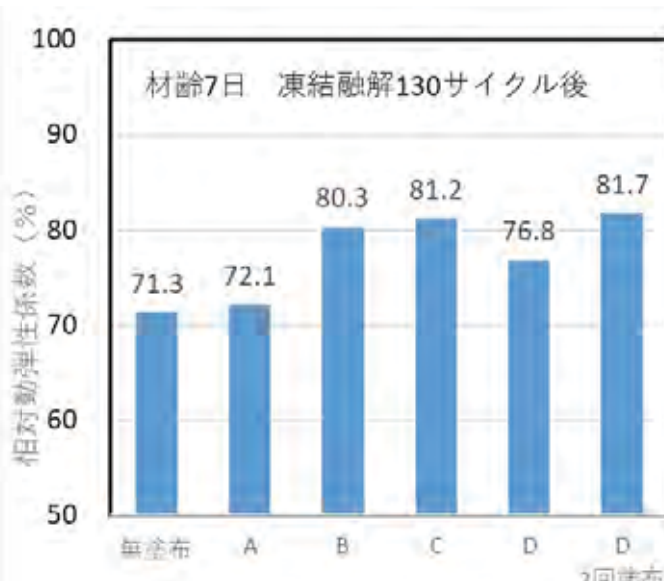


図 11 被膜養生剤が耐凍害性に及ぼす影響

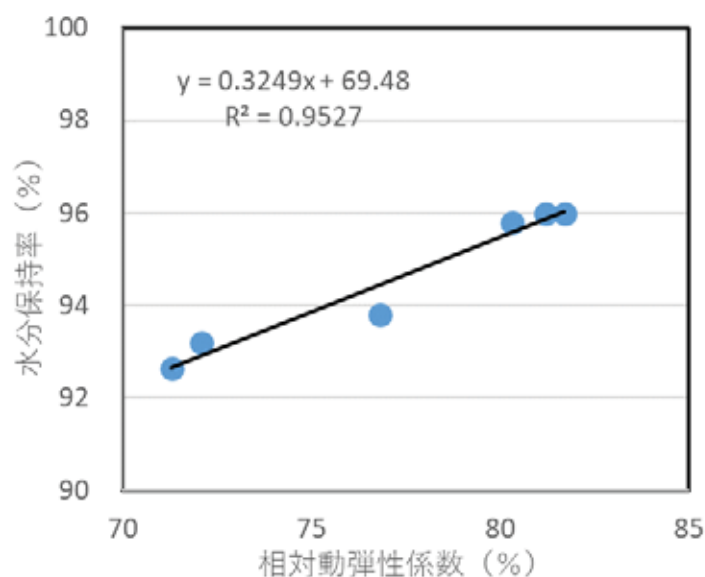


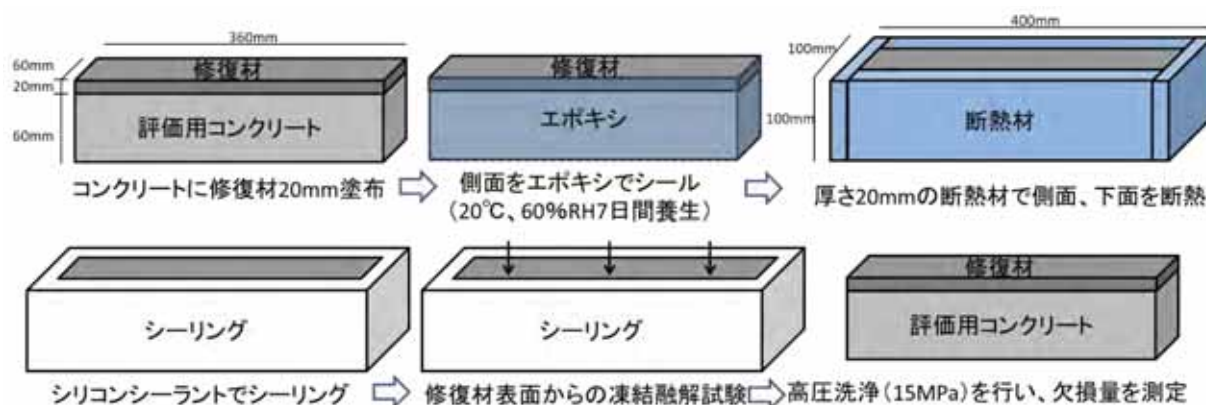
図 12 水分保持率と耐凍害性の関係

4. 室内試験結果の検証

課題 1～3 で行った試験結果から、表面改質剤，接着プライマー，被膜養生剤を使用した新工法の耐凍害性について検証を行った。

1) 試験方法

一面水中凍結融解試験方法を図 13 に示す。表 1 で示した評価用コンクリート（寸法 6×6×36 cm）に被膜養生剤 D と接着プライマー D を塗り，修復材を 20 mm 塗布し，被膜養生剤 D を 2 回塗布した。その後，20℃，60%RH で 7 日間養生後，一面から凍結融解作用がかかるよう成形面以外の 5 面を断熱材で覆いシーリングを行った。凍結融解試験 300 サイクル後に高圧洗浄で劣化部を除去し欠損深さを測定した。



2) 新工法の耐凍害性の評価

従来工法と新工法の欠損深さの測定結果を図 14 に示す。図 14 から，従来工法の平均欠損深さは 4.2 mm，新工法は 2.5 mm となり，欠損深さから耐凍害性は 68% 向上した。新工法において耐凍害性の向上が認められ，約 1.7 倍の長超寿命化が可能となった。

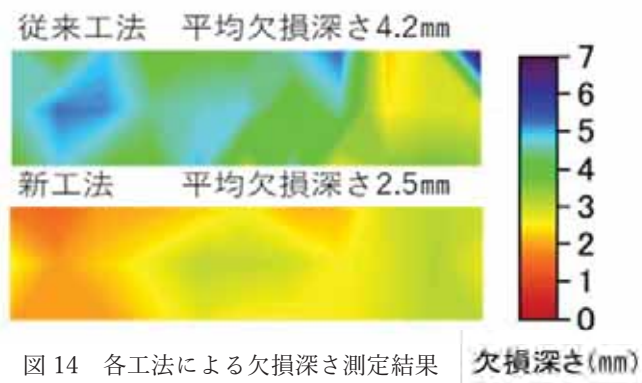


図 14 各工法による欠損深さ測定結果

4. 超微粒子高炉スラグ系無機系断面修復材料・表面被覆材料による工法について

4-1 新工法について

超微粒子高炉スラグ系断面修復・表面被覆工法イメージ図を図 15 に示す。この工法は、既設コンクリートに表面改質剤と接着プライマーを塗り、修復材を施工した後に被膜養生剤を 2 回塗布する工法である。これまでの試験結果から、既設コンクリートの表面改質と、既設コンクリートと修復材の一体性の向上及び被膜養生剤による修復材の緻密性の向上が図られることで、早期の再劣化を防止及び、耐凍害性の向上が期待できる。

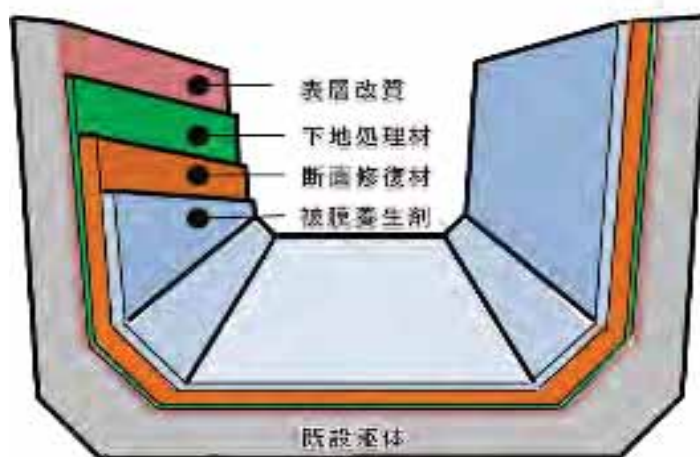


図 15 超微粒子高炉スラグ系断面修復・表面被覆工法イメージ

4-2 実証試験（現場における新工法の適用性確認）

実証試験では、引張強度による既設コンクリートの表面改質効果、接着プライマーによる一体性、耐久性について適用性を確認した。

1) 確認試験項目

- ① 表面改質効果・・・表面改質剤塗布後の引張強度
- ② 一体性・・・修復後の接着強度
- ③ 耐久性・・・トレント試験結果から耐久性指数を算出

2) 試験方法

実証試験で行った新工法の工程を写真7に示す。新工法での施工は写真7に示す通り、高圧洗浄後に改質剤、接着プライマーを塗布し、修復後に被膜養生剤を2回塗布した。その後、5℃～10℃程度で7日間養生を行った。

- ① 表面改質効果の確認は、表面改質剤塗布後、24時間養生後に引張強度を測定した。
- ② 一体性の確認は、修復後5℃～10℃程度で7日間養生を行った後に付着強度を測定した。
- ③ 耐久性の確認は、修復後5℃～10℃程度で7日間養生を行った後に被膜養生剤の膜をグラインダーで除去した後、トレント試験を行い透気係数から耐久性指数を算出した。



3) 表面改質効果と一体性の評価

実証試験で行った洗浄後、表面改質後の引張強度試験と修復後の付着強度試験結果を表5～7、図16～17に示す。表、図中の洗浄後は、既設コンクリートの高圧洗浄後の引張強度を、改質後は、表面改質剤塗布後の引張強度を、修復後は修復材を塗布後の付着強度を示す。図16～17より側壁部、底版部共に、洗浄後と比べ改質後は引張・付着強度が増加しており、洗浄前で最低付着強度1N/mm²に近い箇所でも20%程度増加していることから、表面改質効果が認められた。また、修復後についても改質剤と接着プライマーの併用により一体性の向上が確認できた。現場における新工法での実証試験においても室内試験と同様に、表面改質効果は側壁で20%程度、底版で35%の増加が認められた。また、既設コンクリートと修復材の一体性についても、側壁で33%、底版で47%の増加が認められた。

表5 洗浄後の引張・付着強度

付着強度 (N/mm ²)	測定部位				底版
	L側側壁		R側側壁		
	気中部	水中部	気中部	水中部	
1	2.99	3.65	3.30	3.40	1.69
2	3.23	3.23	2.86	3.39	1.03
3	4.09	3.29	2.66	3.48	1.43
4	2.24	1.53	2.00	2.98	1.01
5	1.83	3.98	2.19	2.99	1.18
6	1.90	1.44	2.50	3.18	1.11
最小値	1.44				1.01
最大値	4.09				1.69
平均	2.85				1.24

表6 改質後の引張・付着強度

付着強度 (N/mm ²)	測定部位				底版
	L側側壁		R側側壁		
	気中部	水中部	気中部	水中部	
1	3.73	3.22	3.12	3.46	1.83
2	3.87	4.3	2.99	3.82	1.98
3	4.08	3.01	3.98	4.23	2.16
4	2.46	2.89	3.04	3.42	1.26
5	3.61	3.15	2.24	3.85	1.37
6	3.82	2.85	2.35	2.43	1.42
最小値	2.24				1.26
最大値	4.30				2.16
平均	3.33				1.67

表 7 修復後の引張・付着強度

付着強度 (N/mm ²)	測定部位				底版
	L側側壁		R側側壁		
	気中部	水中部	気中部	水中部	
1	2.83	3.77	4.18	4.11	1.92
2	3.00	3.54	4.39	4.14	2.33
3	3.15	4.51	3.60	4.71	1.98
4	3.99	4.60	3.07	3.18	1.41
5	4.00	4.27	2.76	4.61	1.71
6	4.16	2.90	3.60	3.98	1.6
最小値	2.76				1.41
最大値	4.71				2.33
平均	3.79				1.83

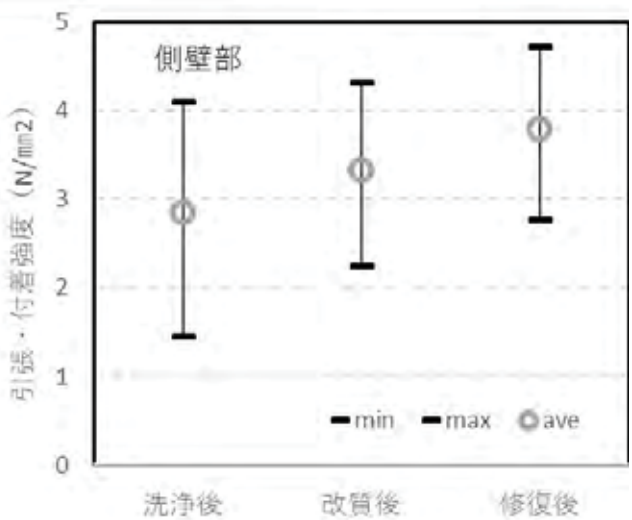


図 16 実証試験側壁部の引張・付着試験結果

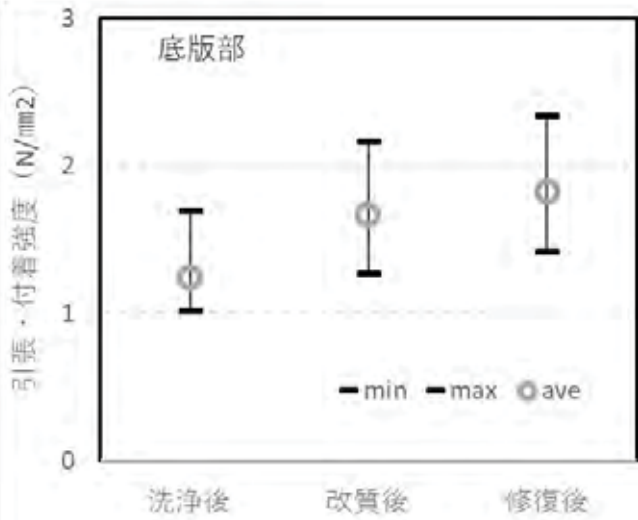


図 17 実証試験底版部の引張・付着試験結果

3) 修復材の緻密性の確認結果

現場で測定した透気係数から算出した耐久性指数と室内試験結果を表 8 に示す。図 9 の室内試験結果の透気係数と耐久性指数の関係から、透気係数を求めることで材料の性能を判断した。実証試験では、修復材を塗布して 5℃～10℃程度で 7 日間気中養生を行った。表 8 より、透気係数は室内試験 10℃気中 7 日間養生に比べ、実証試験は非常に小さな値を示し、高い耐久性指数を示した。新工法で施工を行いトレントで修復材の評価をした結果、修復材は緻密であり高い耐凍害性が得られている。現場においても修復材の性能が確保されていることが確認できた。

表 8 透気係数から算出した耐久性指数

測定部位	実証試験			室内試験
	側壁		底版	10℃気中養生
	気中部	水中部		
含水率 (%)	4.5	4.6	4.8	4.5
透気係数 (10 ⁻¹⁶ m ²)	0.0328	0.0403	0.0315	0.79
耐久性指数 (%)	89.6	87.4	90.0	7.8

4) 現場における新工法の適用性

実証試験の結果から、表面改質剤による、既設コンクリートの表層強度の向上、表面改質剤と接着プライマーの併用により、母材と修復材の付着性能（一体性）の向上が確認できた。また、被膜養生剤を塗布して養生を行い、トレント試験の結果から緻密性を確保することができ、耐凍害性が向上した。

実証試験での新工法の施工において、実現場環境でも、早期の再劣化を防止できる耐凍害性の高い超高耐久性断面修復・表面被覆工法の確立ができた。

② 高耐久性の評価・判定のための性能評価方法の構築

概要：本事業において開発する断面修復工法，表面被覆工法が高耐久性を有するか否かを評価・判定するため方法として，判定指標を補修・補強後の材料の耐用年数とする性能照査方法を構築・提案する。

農林水産省が発刊する「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)」¹⁾では，無機系材料の耐凍害性の照査は JIS A 1148（コンクリートの凍結融解試験方法）の A 法（水中凍結融解試験方法）により行い，その品質規格値は凍結融解 300 サイクルでの相対動弾性係数 85%以上とされている。そこで本事業では，先ず，HPFRCC および PCM の水中凍結融解試験を行い，次に，気候因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測手法である「ASTM 相当サイクル数」²⁾を用いて，両材料の試験施工ならびに実証試験を実施した地点毎の耐用年数を試算した。

結果：

a) 耐凍害性の評価

耐凍害性の評価は，凍結融解試験により行った。凍結融解試験は，「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)」¹⁾において無機系材料の耐凍害性の照査は JIS A 1148 の A 法（水中凍結融解試験方法）により行うことが規定されていることから，これに準拠して行うこととした。

凍結融解試験では，凍結融解 50 サイクル毎にたわみ振動の一次共鳴振動数を測定し，凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数 f_n (Hz) および凍結融解 0 サイクルにおけるたわみ振動 f_0 (Hz) の一次共鳴振動数から，凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数 P_n (%) を式 (1) により求めた。

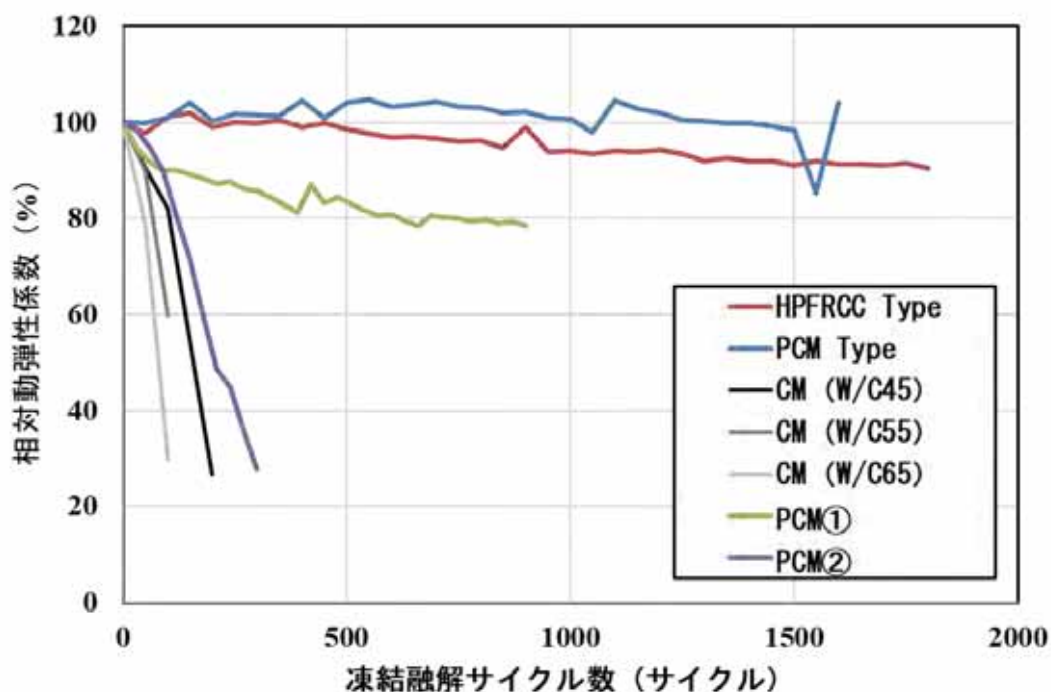
$$P_n = (f_n^2 / f_0^2) \times 100 \quad \dots \dots \dots (1)$$

なお，試験の終了は，たわみ振動の一次共鳴振動数の測定が困難になった場合，もしくは相対動弾性係数が 90%に到達した場合の，いずれかのサイクル数とした。

凍結融解試験結果を図－1 に示す。図中では，比較のため，試製セメントモルタル (CM) および市販ポリマーセメントモルタル (PCM) の試験結果³⁾を併せて示している。

HPFRCC は，1,800 サイクル経過後に相対動弾性係数は 90%に到達した。一方，PCM は，HPFRCC に比べ総じて高めに推移したが，1,600 サイクル経過後に試験体の一部が破損し，たわみ振動の一次共鳴振動数の測定が困難になったため，その時点で試験を終了した。

本結果からは，HPFRCC，PCM とともに，凍結融解サイクル数は 1,500 サイクルを超え，超高耐久性を有していることが分かる。



図－１ 凍結融解試験結果

b) 凍害劣化の予測（耐用年数の試算）

凍害劣化の予測，即ち耐用年数の試算は，「ASTM 相当サイクル数」²⁾を用いて，PCM および HPFRCC の試験施工を実施した地点（美唄（沼貝幹線用水路），栗山（栗山幹線用水路））毎，ならびに実証試験を実施した地点（空知（空知幹線用水路））の耐用年数を試算することとした。

ASTM 相当サイクル数は，ある地域の気象条件下で，コンクリートが１年間に受ける凍結融解作用を，ASTM C-666 A 法（JIS A 1148 A 法の基礎である試験方法）の標準条件の凍結最低温度である-18℃を基準とした ASTM 相当サイクル数として表す実験式（2）により算出し，耐用年数を推定する方法である⁴⁾。

$$\begin{aligned}
 Cy_{\text{ASTM-SP}} &= C \times F \times \sum (-ts/18) \beta \\
 &= C \times F \times R_{\text{sp}} \\
 &= C \times F \times s \times p \times Ra_{90} \quad \dots \dots \dots (2)
 \end{aligned}$$

ここに，

$Cy_{\text{ASTM-SP}}$ ：ASTM 相当サイクル数（回／年）

β ：定数

ts ：凍結最低温度（℃）

Ra_{90} ：気温による ASTM 相当サイクル数（回／年）

C ：養生条件に関する係数

F：凍結融解条件に関する係数

s：日射条件に関する係数

p：劣化過程係数

C および F はそれぞれ構造物の条件を表す係数（部材係数）であり、C は凍結融解作用を受けるまで、即ち夏期の乾燥の影響を表し、F は凍結融解時のコンクリート周囲の水分状態を表すものである。これらの係数は ASTM C-666 法 A 法による試験体データから重回帰分析により定量化されたものである。一方、s は日射条件（方位）を表す係数であり、また、p は劣化過程を表す係数であり「劣化の兆候」および「明確な劣化」はそれぞれ相対動弾性係数が 90 および 60% の状態に相当し、全国 26 地点の気象データから回帰分析により定量化されたものである。ASTM 相当サイクル数算定式の諸係数を表－1 に示す⁴⁾。

表－1 ASTM 相当サイクル数算定式の諸係数⁴⁾

ASTM 相当サイクル数算定式			凍害劣化の過程	
$C_{yASTM-SP} = C \times F \times s \times p \times Ra_{90}$			劣化の兆候	明確な劣化
劣化過程係数 p			1.00	1.64
部 材 係 数	日射条件 s	北面	1.00	1.00
		水平・南面	1.45	1.45
	養生・乾燥条件 C	水中	1.00	1.00
		気中	0.66	1.41
		20℃乾燥	0.26	0.80
		30℃乾燥	0.14	0.45
	凍結融解条件 F	水中凍結水中融解	1.00	1.00
		気中凍結水中融解	0.21	0.23

本事業において凍害劣化の予測、即ち耐用年数の試算の対象とする HPFRCC および PCM は、図－1 に示す通り、凍害を発生してもその劣化は軽微であり、凍害劣化の過程においては「明確な劣化」は生じず「劣化の兆候」に留まることが予想される。また、部材係数において、日射条件は水路の部材の面する方位により「北面」または「水平・南面」を、養生・乾燥条件は「気中」を、凍結融解条件は「気中凍結水中融解」をそれぞれ選択することが妥当であると考えられる。このことから、以後の試算では、劣化過程係数 p は 1.00 を、日射条件 s は 1.00 または 1.45 を、養生・乾燥条件 C は 0.66 を、凍結融解条件 F は 0.21 をそれぞれ用いることとした（表中の太字部分）。

ここで、既往の研究結果²⁾からは、上記の気温による ASTM 相当サイクル数 Ra_{90} は「地域係数」との相関性があることが明らかになっており、この地域係数から算出することができる。地域係数 T は式（3）により算出され、ASTM 相当サイクル数 Ra_{90} は式（4）により算出される。

$$T = -t_{a \min} (1 - D_f / D_w) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$Ra_{90} = 4.2 T - 5.4 \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、

$t_{a \min}$: 日最低気温の年間極値 (°C)

D_w : 凍結融解総日数 (日)

D_f : 凍結持続日数 (日)

本事業では、たわみ振動の一次共鳴振動数の測定が困難になったサイクル数または相対動弾性係数が 90% に到達したサイクル数を耐用年数に到達するサイクル数 N_{90} (回) とし、式 (5) および (6) により ASTM 相当サイクル数 $Cy_{ASTM-S90}$ (回/年) および耐用年数 X_{90} (年) を算出した。

$$Cy_{ASTM-S90} = C \times F \times s \times p \times Ra_{90} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$X_{90} = N_{90} / Cy_{ASTM-S90} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、図－1 より、HPFRCC においては 1,800 サイクル経過後に、PCM においては 1,600 サイクル経過後に、それぞれ試験を終了している。そこで、本事業における「たわみ振動の一次共鳴振動数の測定が困難になったサイクル数または相対動弾性係数が 90% に到達したサイクル数を耐用年数に到達するサイクル数 N_{90} (回)」は一律「1, 600 (回)」として、地点毎の耐用年数を試算することとした。

c) 耐用年数の試算の手順 (Step 1, Step 2)

本事業では、耐用年数の試算は Step 1 および Step 2 の 2 段階の手順にて行った。

Step 1 では、気象庁のホームページにおいて提供されるアメダスデータ⁵⁾を用いて、試験施工を実施した地点（美唄（沼貝幹線用水路）、栗山（栗山幹線用水路））毎、ならびに実証試験を実施した地点（空知（空知幹線用水路））の耐用年数を試算することとした。美唄（沼貝幹線用水路）における耐用年数は「観測点：美唄」の、栗山（栗山幹線用水路）における耐用年数は「観測点：長沼」の、空知（空知幹線用水路）における耐用年数は「観測点：滝川」のデータを用いることとした。

Step 2 では、現地水路における機能監視結果（現地温度データ）を用いて、Step 1 と同様に試験施工を実施した地点（美唄（沼貝幹線用水路）、栗山（栗山幹線用水路））毎の耐用年数を試算することとし、耐用年数の試算精度の向上を図った。

耐用年数の試算の手順のイメージを図－2 に示す。

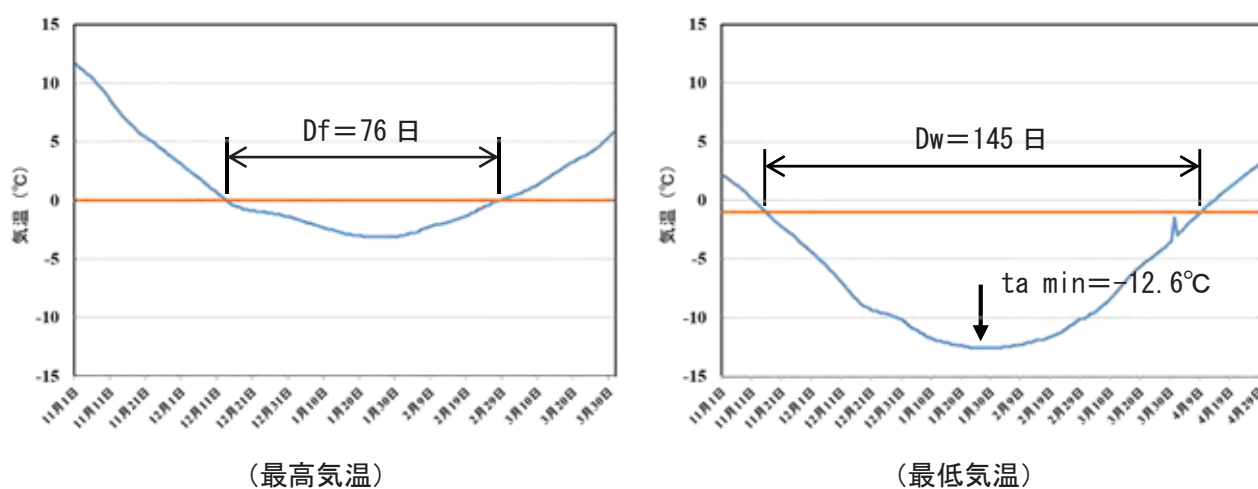


図－２ 耐用年数の試算の手順のイメージ
(機能監視結果 (現地温度データ) を用いた試算精度の向上)

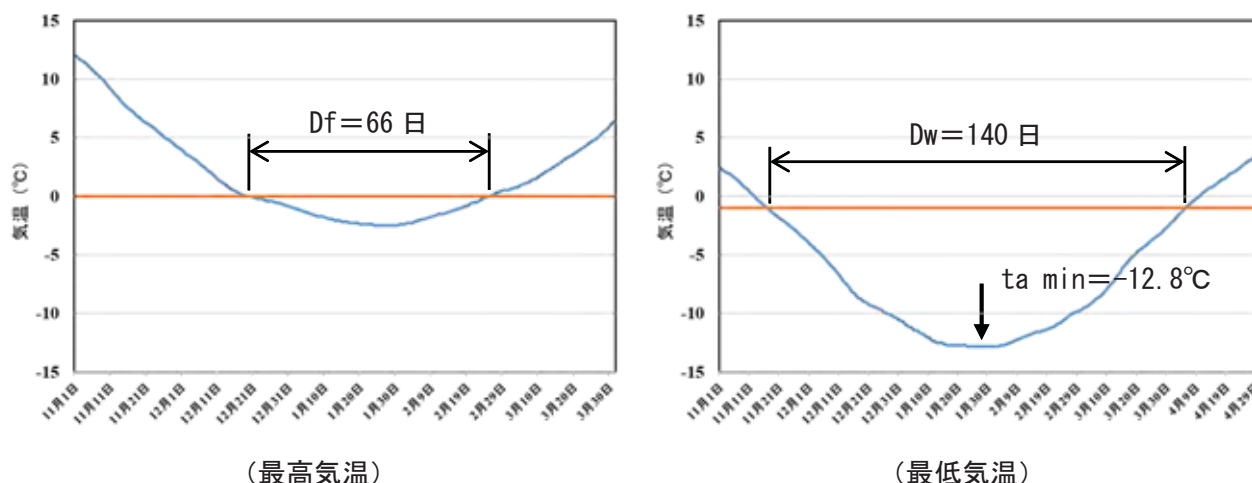
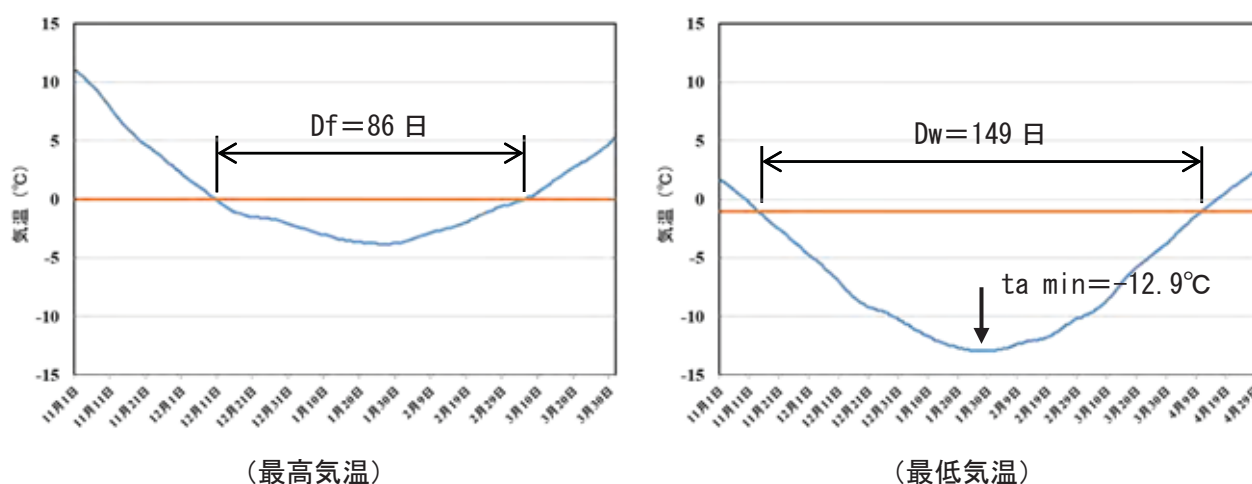
d) Step 1 (気象庁アメダスデータを用いた耐用年数の試算)

美唄、長沼、滝川の各観測点の 1981～2010 年における日毎の平均気温 (左：最高気温, 右：最低気温) を図－３ (図－３ (１)～(３)) に示す⁵⁾。

なお、図中には日最低気温の年間極値 ($t_{a \min}$ (°C)), 凍結融解総日数 (D_w (日)), ならびに凍結持続日数 (D_f (日)) を併せて示している。



図－３ (１) 美唄の 1981～2010 年における日毎の平均気温⁵⁾

図－3（２） 長沼の 1981～2010 年における日毎の平均気温⁵⁾図－3（３） 滝川の 1981～2010 年における日毎の平均気温⁵⁾

美唄（沼貝幹線用水路）、栗山（栗山幹線用水路）、空知（空知幹線用水路）における地域係数 T 、気温による ASTM 相当サイクル数 R_{a90} （回／年）、ASTM 相当サイクル数 $C_{yASTM-S90}$ （回／年）、耐用年数 X_{90} （年）の算出結果を表－2 に示す。

美唄（沼貝幹線用水路）では 402 年、栗山（栗山幹線用水路）では 346 年、空知（空知幹線用水路）では 455 年とそれぞれ算出され、「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）」¹⁾において耐用年数とされている「20 年」を大きく上回る結果となった。

今回得られた結果からは、HPFRCC、PCM とともに、極めて優れた耐凍害性を有しており、凍結融解の作用によっては性能低下を生じない水準に到達していることが伺える。今後は、現地水路に適用された HPFRCC および PCM のモニタリングを継続実施し、得られた結果との比較により試算結果の妥当性を検証するとともに、付着性や耐摩耗性を指標とした検証も併せて行う予定である。

表ー2 地域係数 T ，気温による ASTM 相当サイクル数 Ra_{90} (回/年)，ASTM 相当サイクル数 $Cy_{ASTM-S90}$ (回/年)，耐用年数 X_{90} (年) の算出結果

試験施工・実証試験 実施地点	美唄 (沼貝幹線用水路)	栗山 (栗山幹線用水路)	空知 (空知幹線用水路)
$t_{a \min}$ (°C)	-12.6	-12.8	-12.9
D_w (日)	145	140	149
D_f (日)	76	66	86
地域係数 T	6.0	6.8	5.5
Ra_{90} (回/年)	19.78	23.02	17.51
$Cy_{ASTM-S90}$ (回/年)	3.98	4.63	3.52
N_{90} (回)	1, 600		
X_{90} (年)	402	346	455

参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室：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)，2015.
- 2) 浜幸雄・松村光太郎・田畑雅幸・富坂崇・鎌田英治：気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測，日本建築学会構造系論文集，64 巻，523 号，pp.9-16，1999.
- 3) 石神暁郎・田場一矢・中村和正：コンクリート開水路補修における無機系表面被覆材の凍害劣化予測，平成 28 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，2016.
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書，p.39，2008.
- 5) 気象庁 (参照日：2020/8/1)：過去の気象データ検索，<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>.

e) Step 2 (現地温度データを用いた耐用年数の試算)

1) 測定方法および耐用年数の試算方法

実証試験後の開水路では，モニタリングのためにコンクリート躯体に温度センサ（熱電対）を設置し，躯体の温度を測定している。測定は，1 計測を 1 時間毎の自動計測である。Step2 では，耐用年数の試算精度の向上を図るため，現地温度データを用いて耐用年数の試算を行った。沼貝幹線用水路，栗山幹線用水路および空知幹線用水路の温度センサの設置位置を図ー4，図ー5，図ー6に示す。測定は，沼貝幹線用水路では，気中部（最多頻度水位より上側）の表面被覆材表面，表面から 10mm，深さ 50mm，水中部（最多頻度水位より下側）の深さ 10mm，深さ 50mm の 5 箇所/工法を設置した。栗山幹線用水路および空知幹線用水路では，気中部（最多頻度水位より上側）の表面被覆材表面，深さ 10mm，深さ 50mm，水中部（最多頻度水位より下側）の深さ 10mm，深さ 50mm と底部（左岸側，中央，右岸側）の深