

## 17.1 農業水利施設の構造機能の安定性と耐久性向上技術の開発

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：水利基盤チーム

研究担当者：中村和正、小野寺康浩、佐藤 智、  
須藤勇二、川辺明子、金田敏和

### 【要旨】

老朽化した水利施設の機能診断方法に関する研究では、頭首工を構成する各施設の劣化状況や冬期間を含めた周年の部材温度環境、および凍害が発生しているコンクリート開水路の部材温度や水分変動、水路周辺部における積雪・融雪状況などを調査した。その結果、積雪寒冷地域の農業水利施設（ここでは、頭首工、コンクリート開水路）の機能診断を行ううえで、部材温度の変動、凍結融解回数などの構造物の部位ごとの特徴に配慮した診断調査と評価を行う必要があることがわかった。また、コンクリート開水路については、部材の内部に劣化が生じている場合も想定されることから、その機能診断では、部材の表面部の診断に加え、部材の内部の劣化状況を把握する必要がある。これらの調査結果から、積雪寒冷地域に特有の作用外力等（凍害、凍上力、雪庇による荷重等）に配慮した技術ガイドブックである「積雪寒冷地の農業水利施設の機能診断手法に関する技術資料」等を作成した。

コンクリート開水路の表面補修工法の開発に関しては、タイプの異なる 3 種類（樹脂系、セメントモルタル系、パネル系）の表面被覆材を用いた補修工法に対し、①補修後初期段階での変状の有無の検証、および②長期的な耐久性の検証の 2 つの視点で評価を行った。初期段階での変状については、各補修工法ともに通水期間を 4 期ずつ経過した時点では目立ったものはなく、良好な結果となった。とくに、コストの低減をねらいとして劣化部を除去した面に断面修復を行わずに樹脂系を塗布した工法で表面被覆材の付着性が良いことがわかった。なお、この工法では補修表面に凹凸が残るが、水理実験による粗度係数はコンクリート開水路として十分許容できる範囲であった。長期的な耐久性の検証については、樹脂系およびセメントモルタル系を用いて、寒冷地の施工時および供用後の条件を想定した環境における付着強さの室内試験を行ったところ、概ね良好な結果であった。また、パネル系では緩衝材の断熱効果によって、補修された水路のコンクリートが受ける凍結融解作用が抑えられること、緩衝材には発泡ポリエチレンが最も適していることがわかった。これらの成果を盛り込んで、寒冷地の技術者向けの技術ガイドである「積雪寒冷地のコンクリート開水路の補修に関する技術資料」を作成した。

頭首工の表面補修工法の開発では、補修材料を塗布した供試体による暴露試験を行った。この試験は寒冷地の頭首工の気中部がおかれている劣化条件を考慮し、頭首工施設の部材方位面および天端面を模倣して行った。また、補修材料を塗布した供試体を用いて、気中条件と水中条件の他に、河川水位の変動部を模擬した条件設定で温冷繰返し試験を行った。その結果、暴露試験では、セメントモルタルの厚塗りタイプの補修材料で細かいひび割れが確認された。温冷繰返しの 1,000 サイクル後において、気中部では変状が軽微であったが、水中部では補修材料によっては微細ひびわれが発生した。また、水面の変動範囲に相当する喫水部では、補修材料によってはスケーリングが生じることがわかった。これらの調査結果から、寒冷地の頭首工の補修を行う場合の技術ガイドブックとして「積雪寒冷地の頭首工の補修に関する技術資料」を作成した。

泥炭等の特殊土壌地帯における管水路の経済的設計技術に関しては、ジオグリッドによる埋設管の浮上抑制および沈下抑制の機構解明のために土槽実験等を行った。浮上抑制機構に関しては、有効上載荷重が、ジオグリッドを用いない場合に比べて、管頂高さでジオグリッドを結合する標準的な断面では約 2 割増、管頂高さのジオグリッドがない断面では約 1 割増することがわかった。また、沈下抑制機構に関しては、ジオグリッドのみを施工する断面に比べ、ジオグリッド上に基床材を施工する断面の方が管の沈下抑制により効果があることがわかった。これらの成果から「泥炭性軟弱地盤のパイプラインにおける土木シート利用検討の要点」をとりまとめた。

キーワード：頭首工、コンクリート開水路、機能診断、積雪寒冷地、表面被覆補修工法、泥炭、埋設管、ジオグリッド、浮上抑制、沈下抑制

## 1. はじめに

北海道内に築造されている水利施設のなかには、建設から数10年を経過し老朽化が著しくなっているものも多くなっている。老朽化が進行している道内の水利施設の機能回復を補修・改修で行う場合、積雪寒冷地域に特有の過酷な気象環境への配慮が重要である。すなわち、対象とする施設の経年劣化の履歴、劣化部位の特徴、劣化の原因を把握し、これらと積雪寒冷環境との関連を明らかにすることが必要である。また、補修・改修技術の適用性の検証にあたっては、施工時や供用開始後におかれる積雪寒冷環境を反映させた評価がなされる必要がある。

道内老朽水利施設の構造物機能診断方法の研究に関しては、平成18年度から老朽化した水利施設の劣化状況調査(頭首工)および表面温度観測と老朽頭首工の補修後の状況調査を行っており、平成20年度もこれを継続した。平成21年度からは、凍害劣化状況調査(コンクリート開水路)および水路側壁内部の温度と水分の観測を行った。

コンクリート開水路の補修工法の開発に関しては、タイプの異なる3種の工法を用いて、現地試験施工箇所での観測・調査と寒冷地の施工時および供用後の条件を想定した室内試験を行い、補修後初期段階での変状の有無の検証と長期的な耐久性の検証の2つの視点で評価を行った。

頭首工の補修工法の開発に関しては、補修材を塗布した供試体を屋外に暴露し、目視観察およびひずみ等の計測を行った。また、頭首工の補修では気中部と水中部が施工の対象となるため、試験水槽内に供試体を設置して気中、水中および水位の変動部の各条件において温冷の繰返しを与えて耐久性の検証を行った。

さらに、特殊土壌地帯における管水路の経済的設計技術に関しては、管水路の浮上および不等沈下の抑制を目的としてジオグリッドを用いた場合の浮上抵抗力を土槽実験等により検討した。

## 2. 積雪寒冷地における農業水利施設の構造機能の評価診断方法の提案

### 2.1 目的

北海道内に築造されている水利施設の場合、老朽化の大きな要因として、流水、石礫などによる磨耗や損傷に加え、寒冷地特有の凍結融解の繰返し作用による劣化などの影響がある。このことから、平成20年度までに、寒冷環境下で長年供用されてきた頭首工にみられる経年劣化の傾向を調査した。また、農業水利施設のコンクリート表面温度などの調査を行い、凍結融解の作用頻度を把握し、劣化予測や残

存寿命を推定するための基礎データとした。

機能診断方法については、これまでは部材表面部の劣化形態と発生範囲を記録する方法が一般的であった。しかし、最近のコンクリート開水路における調査結果<sup>1,2)</sup>によると、部材表面部に凍害劣化ひび割れが生じていない状態でも、内部で凍害劣化が進行している場合があると報告されている。このため、寒冷地のコンクリート開水路では、部材内部の凍害劣化も想定した診断技術の確立が必要と考えられる。

そこで、平成21年度からコンクリート開水路の凍害発生パターンや凍害発生部への融雪水の供給状況などの調査を行った。また、凍害発生箇所の環境条件と凍害の進行過程を解明する目的で、側壁内部の温度および水分の観測を行った。

## 2.2 調査方法の概要

### 2.2.1 劣化状況調査

#### (1) 老朽頭首工

平成18年度に道内2箇所の老朽頭首工を主な対象として劣化状況の調査を開始した。平成19年度以降は、積雪量の多寡や地域性を考慮して、調査箇所を追加した。

#### (2) 老朽コンクリート開水路

平成21年度に、凍害が発生しているコンクリート開水路を対象にして劣化状況を調査した。調査では、凍害の劣化形態と発生部位を落水後の秋から冬にかけて調査し、冬から春にかけて凍害発生部周辺の積雪および融雪状況を調査した。

### 2.2.2 水利施設のコンクリートの温度・水分観測

#### (1) 水利施設の表面温度観測

積雪寒冷地の農業水利施設に対する劣化予測や各種の補修・改修技術の適用性評価を行うためには、現場での凍結融解の有無や作用頻度を把握する必要がある。

コンクリート構造物ではその面の向いている方位や周囲の地形によって、その部位が受ける凍結融解作用に差がみられる。それゆえ、表面温度の観測は劣化状況調査を実施している頭首工および道内の老朽コンクリート用水路で温度環境の異なる部位ごとに行った。

#### (2) 水路側壁の内部温度・水分観測

開水路の凍害発生箇所の環境条件と凍害の進行過程を解明するため、平成21年度の冬期から、昭和49年度に施工された掘り込み形式の現場打ちフルーム水路区間で、凍害を受けている側壁の劣化状況と凍害発生部周辺の積雪状況の観察を行うとともに、側壁の温度および水分の観測を開始した<sup>3)</sup>。

観測位置は、図-1に示すように、左岸側壁においては気中部と水中部の2箇所とし、右岸側壁では気

中部の1箇所とした。観測箇所の凍害劣化状況および積雪状況は、後述する2.3.1の(2)の「両岸の側壁背面が土中に埋まっている区間」と同様である。

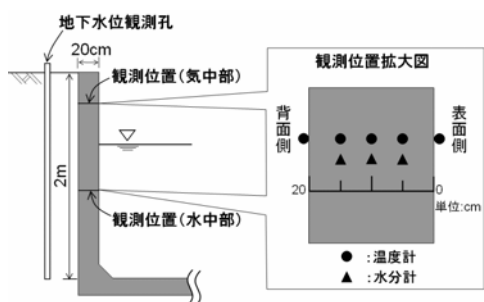


図-1 観測機器の設置概要

## 2.3 結果および考察

### 2.3.1 水利施設の劣化状況

#### (1) 寒冷地の老朽頭首工の経年劣化の傾向

頭首工を構成する施設には水平部を有するものが多く、気中部では堰柱部や床版などの水平部付近や側部のうち、雨水や融雪水が停滞、通過するような箇所、局所的に凍害ひび割れが発生している事例がみられた(写真-1)。

水中部ではモルタル分の摩耗、表面部の粗骨材の流失なども生じていた。

また、気中部と水中部の境界付近で水面直上部が凍結している場合、水位の上昇によって凍結部が一旦融解し、水位低下により再度凍結する。この部分では、このような凍結融解によっても、部材表面部の欠損が生じていた。



写真-1 堰柱部の凍害ひび割れ

#### (2) コンクリート開水路の凍害発生箇所と積雪状況の関係<sup>4)</sup>

調査対象は、両岸の側壁背面が土中に埋まっている区間(以下、埋設区間と称する)と、片岸の側壁上部が露出している区間(以下、一部露出区間と称する)である。両区間において目視により凍害が確認された部位を図-2に示す。埋設区間の側壁では、左岸(南西面)の天端付近にスケーリングが、気中部(灌漑期水位より上部)および目地付近に多数のひ

び割れが発生している。右岸(北東面)には目視では凍害劣化はない。一部露出区間の側壁では、左岸(西面)の天端付近にスケーリングが、気中部および目地付近に多数のひび割れが発生している。側壁の上部が露出している右岸には、天端付近にスケーリングが、また側壁背面(西面)には微細なひび割れが発生している。

埋設区間と一部露出区間の積雪形状は図-2に示すとおりである。埋設区間の凍害が認められた左岸側壁は、雪底の発達が小さく、冬期間を通して気中部の壁面が露出し、融雪が進む3月には天端が露出している。一方、右岸側壁は12月以降雪底が徐々に発達し2月に最大となり、天端付近は冬期間を通して雪で覆われている。一部露出区間は、左岸は天端および側壁の大部分が露出しており、右岸は天端から左岸ハンチに達する雪の吹き溜まりが形成され、内面は雪で覆われている。また、右岸の天端付近は冠雪する時期と、気温上昇時に雪が解け露出する時期があった。

また、埋設区間の左岸内面では積雪期でも日中にはひび割れ箇所から水が浸み出している状況がみられた(写真-2)。

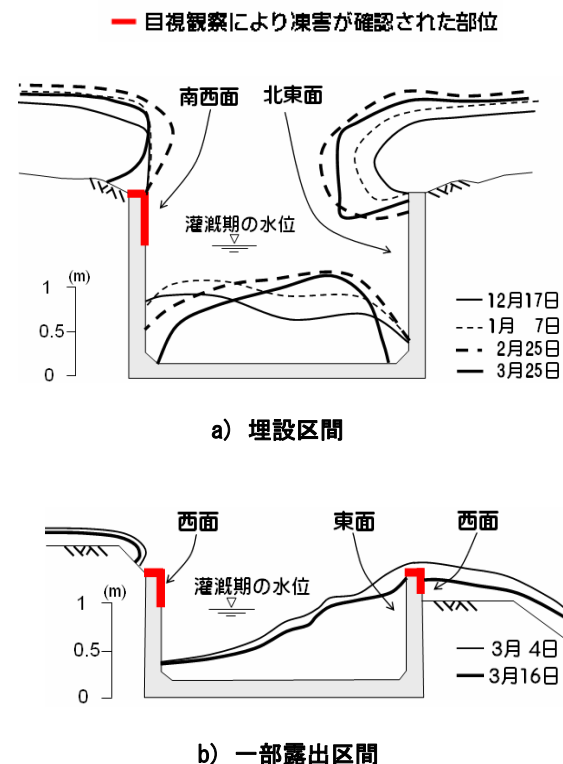


図-2 凍害劣化部位と積雪形状



(2010年3月24日, 15:00)

写真-2 凍害ひび割れ箇所からの水の浸み出し

目視観察による凍害劣化の程度を比較すると、①埋設区間左岸（南西面）>②一部露出区間左岸（西面）>③一部露出区間右岸背面（西面）>④一部露出区間右岸内面（東面）>⑤埋設区間右岸（北東面）となった。①、②では融雪の進行時に多量の水分供給と日射による日々の凍結融解が併行して生じている。これに対して、③では露出した時点以降に積雪と融雪が繰り返され凍結融解が生じるものの、水分供給が減少するため、①、②に比べて凍害劣化の程度が低いと考えられる。⑤については、融雪とともに水分が供給されているはずであるが、温度変化が小さいため凍害の程度が極めて低かったと推察された。なお、左岸側壁背面で観測している地下水位は、積雪期、融雪期を通して壁高の1/3以下であった。それゆえこの区間では、写真-2のような側壁上部への水分供給源として地下水は考えにくく、側壁背後の融雪水が地表面あるいは側壁背後の地盤を通して供給されていると推察される。

### 2.3.2 水利施設のコンクリートの温度・水分観測

#### (1) 表面温度と凍結融解回数

平成20年1月上旬の1週間における頭首工の南面、北面の表面温度と外気温の温度変化を図-3に示す。

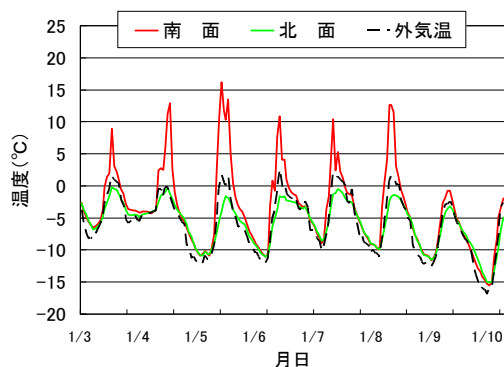


図-3 冬期における頭首工の表面温度と外気温の変化

冬期間の表面温度観測の結果は、補修を行う場合の耐久性評価の試験条件の設定に用いることができる。また、凍結融解回数の試算結果は機能診断における劣化予測や残存寿命の推定において方位面の差を考慮するためのデータとすることができる。

A頭首工（少雪地域）、B頭首工（多雪地域）での平成18年度冬期の1年あたりの凍結融解回数を算出した結果を図-4に示す。凍結融解回数の算出にあたっては、コンクリートの供試体に対して凍結温度を $-5^{\circ}\text{C}$ とした場合、耐久性指数が大きく低下すると示されている文献<sup>5,6)</sup>があることから、コンクリートは、その表面温度が $-5^{\circ}\text{C}$ 以下になると凍結、 $0^{\circ}\text{C}$ を超えると融解するものとした。凍結融解回数の解析期間については11月1日から4月30日とした。

凍結融解回数は、A、B頭首工ともに南面で1年に60~70回程度と最も多く、日射の差によって各方位面での回数に差が生じている。また、A、B頭首工で天端面の凍結融解回数に30回程度の差がみられるが、これはB頭首工では天端面が積雪で覆われていた期間が長く、その間の温度変化が小さかったためと考えられる<sup>7)</sup>。このように、積雪の多少によってもコンクリートがさらされる凍結融解環境は異なる。

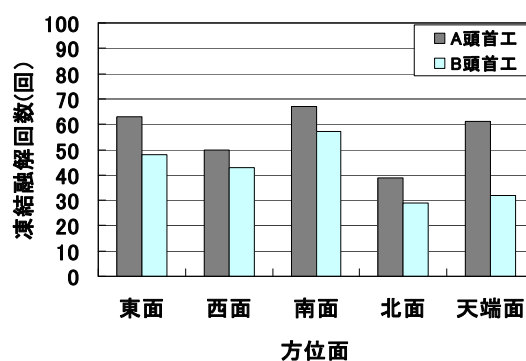


図-4 各壁面における凍結融解回数

道央にあるコンクリート開水路の側壁における平成18年度と平成19年度の凍結融解回数を図-5に示す。両年度ともに、側壁の上部と下部の凍結融解回数には差がみられる。

側壁上部では凍結融解回数が年間30~40回あるのに対し、側壁下部では半分程度の年間約15回であり、また、年度の違いによる回数の変化も上部より小さい。これは下部では積雪で覆われ温度変化が抑制されることが影響していると考えられる。

側壁の上下での凍結融解回数の違いは、側壁の高さによって異なると考えられる。上記の回数は比較的規模の大きい側壁高2.6mの水路での事例である。

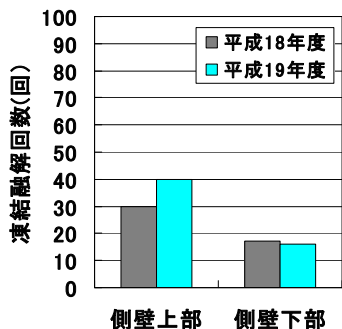


図-5 用水路の側壁における凍結融解回数

今回の凍結融解回数の試算結果では、同じ南面においても、頭首工とコンクリート開水路では凍結融解回数が異なる結果となった。頭首工は河川内に築造される構造物なので日射や風などの影響を受け温度変動が大きくなる。一方、コンクリート開水路は現地盤掘込式の水路形式のため、頭首工よりも日射や風の影響を受けにくい環境にある。これらの要因が、今回比較した頭首工と用水路の凍結融解回数に差が生じる一因となっていると考えられる。

**(2) 水路側壁の内部温度・水分**

平成22年3月2日における側壁部材の表面および内部の温度変化を図-6に示す。図-1に示したように、側壁の部材厚は20cmである。左岸（南西面）は日中に温度変化が大きく生じており、部材内部まで凍結と融解が生じる温度環境におかれている。右岸（北東面）では温度変化は小さく、部材表層付近を除いて0℃以下で推移しており、凍結融解が生じにくい温度環境におかれている。このように、左岸と右岸では側壁の温度環境に大きな違いがあり、左岸では右岸に比較し、より部材の内部まで凍結融解作用が及ぶ環境にあることがわかった。

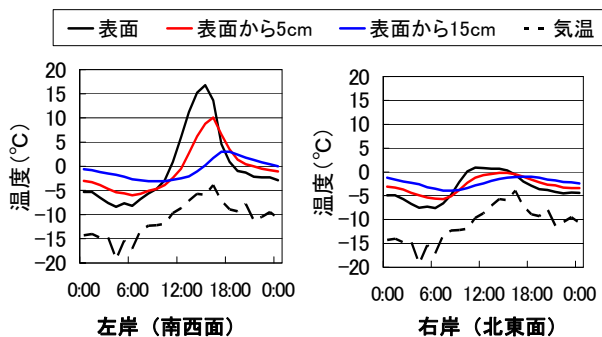


図-6 側壁部材の表面および内部の温度変化

平成22年3月1日から7月31日までの観測区間の左右岸側壁の表面から深さ10cmにおける水分センサーの計測電圧の割合を同じ深さのコンクリート温度および気温と併せて図-7に示す。水分センサーの計測電圧の割合とは、センサーを設置した孔内にモルタルを充填した後の各センサーの最大出力電圧値を100%とした場合の、各計測時の出力電圧の比率であり、水分の相対値を表すものである。

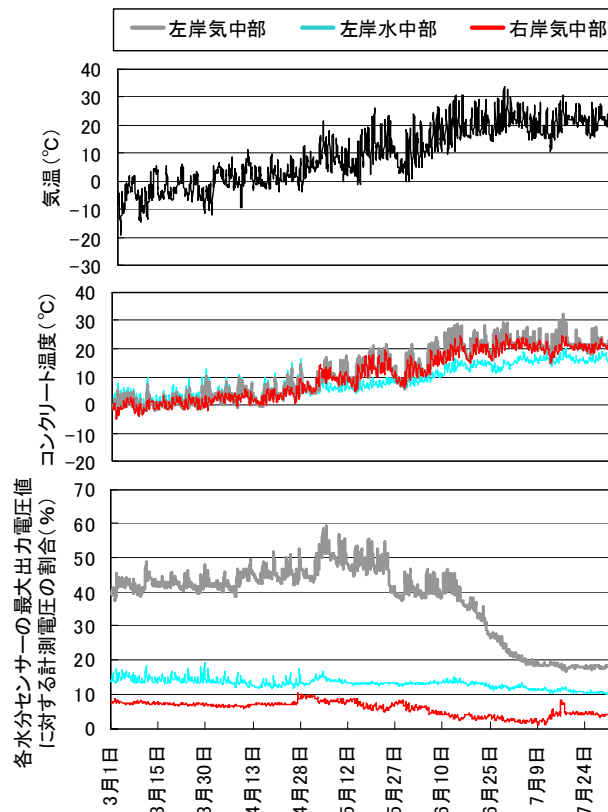


図-7 観測箇所の気温および水路側壁内部（深さ10cm）の水分センサーの計測電圧の割合、温度

凍害が見られる左岸気中部では、図-6と同様に、融雪が進行する3月上旬から3月下旬にかけての温度変化が右岸気中部に比較して大きく、断面の中心部において0℃をまたぐ温度変化が生じていた。

左岸気中部では、3月上旬から5月上旬までコンクリート内部で水分は緩やかに増加していき、5月上旬以降に水分は減少していく傾向がみられた。同断面の表面から深さ5cm、15cmでも、4月下旬から5月上旬以降に水分が減少する傾向がみられており、融雪終了後には3点全ての深さで水分の減少が生じていた。これに比べて、左岸水中部および右岸気中部では水分の変化は小さく、左岸水中部では4月下旬以降の水路への通水の影響はほとんどみられなかった。



以上のように、側壁内部の水分の観測により、凍害が発生している左岸気中部では、凍害が見られない部位とは異なり、側壁断面全体での季節的な水分の変化が生じる傾向があることがわかった。

また、凍害劣化区間の冬期間の観察や側壁内部温度の観測から、凍害が生じている左岸側壁気中部では融雪水による多量の水分供給と断面内部まで及ぶ凍結融解作用が併行して生じる環境であることがわかった。

寒冷地のコンクリート開水路の機能診断では、部材表面部の劣化状況に加え、部材内部への凍害劣化深さも把握する必要があることが示唆された。

## 2. 4 農業水利施設の寒冷地機能診断手法の作成

本研究で得られた成果を盛り込んで寒冷地の技術者向けの技術ガイドである、コンクリート開水路および頭首工のコンクリート施設における「積雪寒冷地の農業水利施設の機能診断手法に関する技術資料」等を取りまとめた。

## 2. 5 小括

老朽化した農業水利施設を対象に、凍結融解作用等による経年劣化状況の調査を行うとともに、コンクリート表面温度観測によって得られたデータを基に凍結融解回数の算定を行った。

老朽化した農業水利施設を対象に凍結融解作用等による経年劣化状況の調査を行った結果、頭首工の凍害による劣化は、雨水や融雪水の停滞箇所や移動経路など湿潤条件におかれやすい部位で生じていた。

凍害が生じているコンクリート開水路において凍害発生部の積雪状況を観察した結果、コンクリート開水路の凍害発生には部位ごとの積雪状況が関与していた。

また、コンクリート表面温度観測によって得られたデータを基に凍結融解回数の算定を行ったところ、頭首工の凍結融解の1年間あたりの作用頻度は南面側で最も多く1年に60～70回程度、天端面では積雪の少ない地域で約60回、多い地域で約30回であった。コンクリート開水路では側壁が冬期間も露出している部位で年間30～40回の凍結融解が作用していた。冬期間の表面温度観測の結果は、補修を行う場合の耐久性評価の試験条件の設定に用いるとともに、凍結融解回数の算出により劣化予測や残存寿命を推定するデータとすることができる。

水路側壁の内部温度観測の結果から、寒冷地のコンクリート開水路の機能診断では、躯体表面部の観察に加え、内部の劣化状況を把握する必要があることが示唆された。コンクリート開水路の凍害が発生している部位では、凍害が見られない部位と比べ、

部材内部まで凍結と融解が生じる温度環境におかれるとともに、側壁断面全体での季節的な水分の変化が生じる傾向があることがわかった。

## 3. 老朽化したコンクリート開水路の寒冷地型の補修・改修技術の開発

### 3. 1 目的

コンクリート開水路は、他のコンクリート構造物と比べて、部材厚が薄いことや湿潤な環境におかれることで、劣化が進みやすい点が特徴的である。さらに積雪寒冷地においては、冬期の過酷な温度環境に曝されているために老朽化の進行が速いと考えられる。このような劣化に対して、維持管理費を抑制しながら施設を長期にわたって供用するためには、寒冷地に適用できる補修工法が必要となる。主な補修工法としては表面被覆工法があるが、積雪寒冷地への適用技術が十分に確立されているとはいえない。そのため、寒冷地で適用可能な補修・改修技術が必要である。

そこで、寒冷地型の補修工法を開発する目的で、北海道北部の老朽コンクリート開水路において3種類の表面被覆材を用いた補修工法の試験施工を行った。この試験施工では、落水後の秋から冬にかけての寒冷気象条件下における施工性の検証、および供用後のモニタリングにより補修後の初期段階での変状の有無を検証した。

また、各補修工法の長期的な耐久性を推定するために、寒冷地の冬期の施工時および供用後の条件を想定した室内試験を行うとともに、補修後のコンクリート開水路の水利機能を検証する目的で、水利模型実験による粗度係数の測定を行った。

さらに、道外寒冷地(岩手県)での補修事例についての情報収集・現地調査を行うとともに、北海道内においてはストックマネジメントの取り組みの一環として実施されたコンクリート開水路補修の設計・施工事例について情報収集を行った。

### 3. 2 研究対象とした工法

本研究で対象としたのは、コンクリート構造物の耐久性の向上や劣化の進行を抑制する補修工法である表面被覆工法とした。使用した材料は、府県で施工実績があるものとして、ウレタン樹脂系材料(以下、樹脂系と称する)、セメントモルタル系材料(以下、セメント系と称する)、FRPMパネル(以下、パネル系と称する)の計3種類とした。各補修工法の施工断面の概要を図-8に示す。

各補修工法の適用にあたっては、寒冷地での施工性に配慮した。すなわち、セメント系では低温下でも付着強度が早期に発現する低温速硬型のセメント

を使用した。樹脂系では速硬化タイプの吹付けウレタン樹脂を用いた。パネル系では躯体コンクリートと FRPM パネルとの隙間に浸入した水分が結氷することによる膨張力を吸収する目的で、躯体コンクリートと FRPM パネルとの間に緩衝材を用いるなどの工夫を行った。

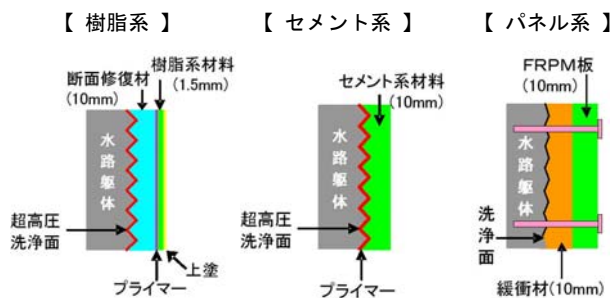


図-8 各補修工法の施工断面

なお、樹脂系は、図-8 のように超高压洗浄面による劣化部除去後の凹凸部を断面修復材で平滑に仕上げた後から表面被覆材を施工した区間と断面修復を行わず劣化部除去後の凹凸部をそのままにして表面被覆材を施工した区間を設けた。これは経済的な施工を目指して行われたものである。

### 3. 3 補修後初期段階での変状の有無の検証

#### 3.3.1 方法

##### (1) 表面被覆材による補修工法の試験施工

平成 18 年 11 月から 12 月にかけて 3.2 で述べた 3 種類の表面被覆材を用いた試験施工を行い、積雪寒冷地におけるそれぞれの適用性について現地検証を実施した。試験地は、北海道北部に位置する高さ 2 m×幅 6m の断面を有する供用中のフルーム水路である。観測機器の配置を図-9 に、冬期間の試験施工区間の状況を写真-3 に示す。セメント系とパネル系はコンクリート躯体の表面にのみ施工を行い、樹脂系は目地を止水処理したうえで、目地とコンクリート躯体の表面を併せて施工を行った。

##### (2) 温度およびひずみ

各補修工法について、水路側壁表面部、水路側壁背面部、水路躯体と補修材の境界部の温度と、水路側壁表面の鉛直線上に発生するひずみを 2 時間毎の自動観測で計測した。

##### (3) 目視調査

各補修工法について、平成 19 年から平成 22 年までの灌漑期間の前後にひび割れ、ふくれ、はがれ等の有無を目視で調査した(写真-4)。

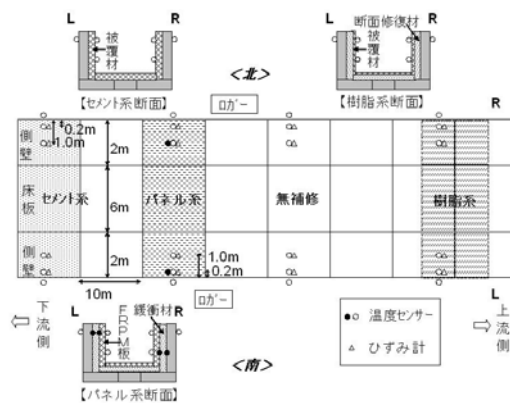


図-9 観測機器の配置



写真-3 試験施工区間における冬期の観測状況

#### (4) 試験施工区間での付着強さ

付着強さの測定は、樹脂系とセメント系の補修区間を対象とした。測定時期は灌漑期間の前後とし、測定位置は灌漑期水位より上と下の 2 箇所の側壁兩岸(南面、北面)とした。測定方法は JSCE-K 531-1999 「6. 表面被覆材の付着強さ試験方法」(建研式付着力試験)とした。



写真-4 落水後の目視調査状況

#### (5) 磨耗量

磨耗量は、セメント系の補修面に対して頭部が数 mm 出るように打ち込んだアンカーの先端と補修面の距離を測定し、その経時変化によって求めた。測定は毎年の灌漑期間終了後に行い、灌漑期間を 1 回

経た後のアンカー長を基準として磨耗量を算出した。測定位置は灌漑期水位の上下2箇所の側壁兩岸（南面、北面）とした。

### (6) 緩衝材の含水比

パネル系はアンカーを躯体コンクリートに打ち込むことで固定する方式であることから、緩衝材の凍結による膨張圧がアンカーの引き抜き強度の最大荷重以上となる危険性がある。このため、緩衝材の含水比を灌漑期2回、冬期間2回を経過した時点で測定した。緩衝材はEPS（ビーズ法ポリスチレンフォーム）、PE（発泡ポリエチレン）、EPT（エチレンプロピレンゴム）の3種類とした。

### 3.3.2 結果および考察

#### (1) 表面温度および発生ひずみ等の観測

平成20年度冬期のセメント系（南面）の側壁の補修表面温度と背面温度の測定結果を図-10に示す。側壁表面温度の変化は、各補修工法とも日射の影響により南面側で大きく、真冬日が続く期間でも0℃をはさむ温度変化を繰り返していた。写真-5は南面における冬期間の水路側壁の様子である。冬期間でも日射による融雪水が供給され、表面被覆材が凍結融解作用を起こしうる環境である。

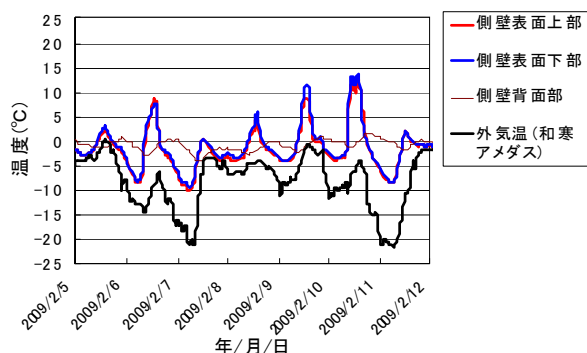


図-10 南面における温度経過(セメント系の例)



写真-5 南面における冬期間の水路側壁  
(セメント系補修区間)

次に、温度観測結果から整理した平成20年度冬期における樹脂系とセメント系の補修表面、およびパネル系の緩衝材と水路躯体コンクリートとの間にお

ける凍結融解回数を図-11に示す。この回数は-5℃で凍結、0℃で融解が生じるものとして求めた。

凍結融解回数は、南面ではセメント系が約30回、樹脂系が約20回、北面ではセメント系、樹脂系ともに約15回であった<sup>3)</sup>。また、パネル系の水路躯体コンクリートの凍結融解回数は少なく、これは緩衝材の断熱効果によるものである<sup>3)</sup>。なお、樹脂系、セメント系の1回の凍結時毎の最低温度の平均値は南面、北面ともに-7℃前後であった。

また、高温に対する表面被覆材の耐久性評価の試験条件設定に使用する目的で、夏期の補修表面温度の測定も行っている。

平成20年の通水期間中における側壁気中部の最高温度は、南面ではパネル系が42℃、セメント系が37℃、樹脂系が32℃程度であった。北面では各材料とも大きな差が無く最高で25℃程度であった。側壁水中部は真夏でも20℃前後であった。

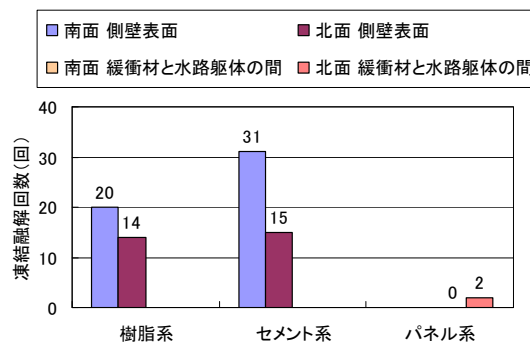


図-11 平成20年度冬期の凍結融解回数

なお、発生ひずみは表面被覆材の初期欠陥の原因を検証することを目的に測定を行ったが、後述のとおり、現時点まで各表面被覆材に目立った変状は発生していないため、ここではデータは示さない。

#### (2) 樹脂系の変状の有無

##### ① 目視調査<sup>3)</sup>

- 平成19年～平成21年（半年～3年経過後）

ひび割れ、浮き、剥離等の目立った変状は見られず概ね良好な状態にある。なお、目地にも被覆材を施工したことにより、目地の止水が不完全なところで水分浸透により断面修復部の剥離が生じたが、水路躯体に施工した被覆材まで剥離を起こさせるものではなかった。なお、剥離部分については再補修済みである。

- 平成22年（3年半および4年経過後）

底版の目地およびその周辺で浮き（一部でひび割れ）が見られた。水路躯体部分には目立った変状は見られなかった。



この結果、施工後4年の時点では水路躯体部分で変状はなく良好な状態を保っていることが確認できた。なお、目地部分はセメント系、パネル系と同じく、縁切りを行うとともに、必要に応じ、目地専用の補修工法を組み合わせることも考えられる。

### ②試験施工区間での付着強さ<sup>3)</sup>

樹脂系の試験施工区間で測定した付着強さを図-12に示す。この図の付着強さは断面修復を行わずに表面被覆材を施工した区間の値である。劣化部除去後の凹凸部を断面修復材で平滑に仕上げから表面被覆材を施工した区間よりも、断面修復を行わず劣化部除去後の凹凸部をそのままにして表面被覆材を施工した区間の方が付着強さが大きい傾向がみられた。

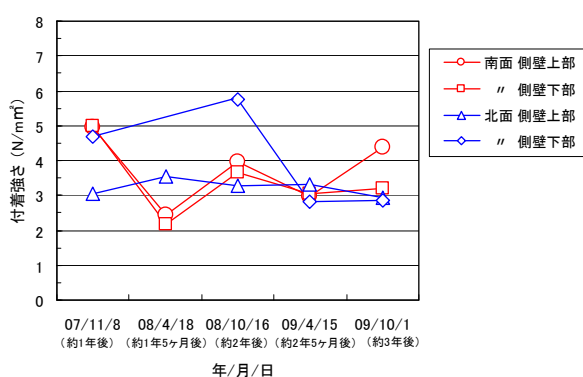


図-12 試験施工区間での付着強さ  
(樹脂系断面修復無しの場合)

表面被覆材に必要とされる付着強さは、工法や被覆材のタイプにより異なるものの、一般に $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 程度が多い。樹脂系では断面修復を行わない場合は $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ を大きく上回っている。表面に凹凸が残ることにより粗度係数がやや大きいことの問題がない場合には、経済的でもあることから、優位な工法であると考えられる。断面修復を行った場合の付着強さは、測定時期によるバラツキがみられたが $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 前後となっていた。剥離面は断面修復材を2層に分けて施工した境界部分であったことから、補修前の躯体コンクリートに断面欠損等の構造的な問題があり、断面修復材の施工を必要とする場合には、施工を慎重に行う必要があると考えられる。

### (3) セメント系の変状の有無

#### ①目視調査<sup>3)</sup>

- 平成19年～平成21年(半年～3年経過後)  
ひび割れ、浮き、剥離等の目立った変状は見られず、概ね良好な状態であった。
- 平成22年(3年半および4年経過後)  
南面側壁上部に微細なひび割れが見られた。これは表面的なもので、補修内部にまで達している

ものではなかった。他には、浮き、剥離等の目立った変状は見られなかった。

この結果、施工後4年の時点で大きな変状はなく良好な状態を保っていることが確認できた。

#### ②試験施工区間での付着強さ<sup>3)</sup>

セメント系では付着強さの測定値は $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 前後であった。しかし、付着強さ試験では付着境界面付近の躯体コンクリートで剥離が起こっていたことから、表面被覆材の付着強さは測定値以上であると考えられる。

#### ③摩耗量<sup>3)</sup>

灌漑期間を1回経た後のアンカー長を基準にした通水4回目までの磨耗量の推移を図-13に示す。通水4回終了後の時点で、流水のある側壁下部で南面、北面ともに $0.4\text{mm}$ 、常に気中にある側壁上部で $0.3\text{mm}$ であることから、被覆材の厚さ $10\text{mm}$ に対して小さい値だったが、磨耗自体は進行する傾向にあるため、今後も観察を継続していく必要がある<sup>3)</sup>。

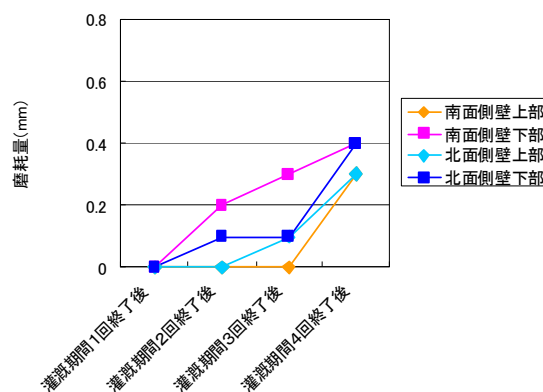


図-13 灌漑期間1回終了後を基準としたセメント系の磨耗量

### (4) パネル系の変状の有無

#### ①目視調査<sup>3)</sup>

- 平成19年～平成21年(半年～3年経過後)  
FRPM板は変状が見られず、アンカーも抜け落ち等はなく、良好な状態を保っていた。
- 平成22年(3年半および4年経過後)  
緩衝材EPT区間の底版の高さが他の緩衝材を用いた区間よりやや低くなっていた。他にはとくに変状は見られなかった。この原因は、EPTが他の材料に比べ変形しやすい材料であるため、水圧、積雪荷重による圧縮量が他の緩衝材より大きいことと経年変化により復元力が弱まってきたことによるものと考えられる<sup>3)</sup>。  
この結果、施工後4年の時点で大きな変状はなく良好な状態を保っていることが確認できた。

②緩衝材の含水比<sup>3)</sup>

天端から下への距離毎に測定した緩衝材の含水比を図-14に示す。EPSは灌漑期(普通期)水位より下の部位で含水比が高くなっており、PEとEPTは全体的に含水比が小さいことがわかった。EPSは水分を多く含むことから、他の材料に比べて凍結融解作用の影響を受けやすい状況にあることが示唆された。

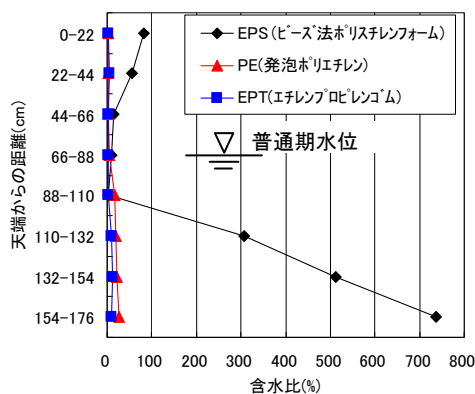


図-14 天端からの距離毎の緩衝材の含水比

3. 4 長期的な耐久性の検証

3.4.1 方法

(1) 低温での養生や凍結融解を受けた表面被覆材の付着強さ

寒冷地における表面被覆工法の施工時期は、灌漑期間終了後の秋から冬の期間となる。それゆえ、補修後に補修表面が低温に曝されるため、このような条件でも補修部の耐久性に優れる施工方法を確認する必要がある。そこで、積雪寒冷地の施工時および供用後の条件等を想定し、低温下での養生および凍結融解作用の繰り返し後の表面被覆材の付着強さを測定した。付着強さ測定用の供試体は、モルタル基板(縦 70mm×横 70mm×高さ 50mm)に樹脂系は 1.5mm 厚、セメント系は 10mm 厚で被覆材を塗布したものを用いた。本試験の処理条件を表-1 に示す。

表-1 低温での養生や凍結融解を受けた表面被覆材の付着強さ試験における処理条件

| 基板の処理条件 | 供試体の養生条件             | 凍結融解処理条件                                 |
|---------|----------------------|--|
| 無処理     | ① 5°Cで5日、0°Cで23日低温養生 | 水中凍結・水中融解<br>3時間/1サイクル<br>-18°C凍結・-5°C融解 |
|         | ② 5°Cで28日低温養生        |  |
|         | ③ 20°Cで28日養生         |  |

供試体の養生は気中養生とし、①5°Cで5日、0°Cで23日低温養生(現場施工で短期間の給熱養生後に曝露を想定したケース)、②5°Cで28日低温養生(現場施工で長期間の給熱養生を想定したケース)、およ

び比較対照として③20°Cで28日養生(室内での標準的な養生を想定したケース)の計3ケースで行った。

養生後に JIS A 1148-2001 に準拠し、水中にて凍結融解の繰り返しを与えた。凍結融解過程では、被覆面のみから水分が侵入するよう、供試体の側面、底面をブチルゴムで覆った。

付着強さの測定は、JSCE-K 531-1999「6. 表面被覆材の付着強さ試験方法」で、凍結融解 0(養生後)、50、100、300 サイクル後に行った。

なお、本試験の 300 サイクルは、3. 3. 2(1)の結果から樹脂系では約 15 年、セメント系では約 10 年間に受ける凍結融解作用と想定した。

(2) 付着面の水分が凍結融解作用を受けた表面被覆材の付着強さ

(1)で述べたように表面被覆材の施工時期が秋から冬の期間となることから、補修対象となる水路躯体コンクリートの表面に浸透した水分が補修時に乾燥しづらい環境となる。このため、水路躯体コンクリート表面が施工時に湿潤状態になることや補修後の凍結融解作用により付着強さが低下することが想定される。このような条件が表面被覆材の付着強さに与える影響を以下のように検討した。本試験の処理条件を表-2 に示す。

表-2 付着面の水分が凍結融解作用を受けた表面被覆材の付着強さ試験における処理条件

| 基板の処理条件          | 供試体の養生条件 | 凍結融解処理条件                                |
|------------------|----------|---|
| 表面水分7.5%~8.0%に調整 | 5°Cで5日養生 | 気中凍結・気中融解<br>3時間/1サイクル<br>-8°C凍結・-5°C融解 |

コンクリートの表面含水率は、有機系の表面被覆材を適用する場合は 8%以下とするのが一般的とされている<sup>11)</sup>ことから、付着強さ測定用の供試体は、モルタル基板(縦 70mm×横 70mm×高さ 50mm)を表面水分 7.5%~8.0%に調整した。樹脂系は 1.5mm 厚で被覆材を塗布したもの(以下、樹脂系断面修復無しと称する)と断面修復モルタル 10mm 塗布した上に 1.5mm 厚で表面被覆材を塗布したもの(以下、樹脂系断面修復有り)と称する)を、セメント系は 10mm 厚で表面被覆材を塗布したものを用いた。表面被覆材塗布後には恒温室内で 5°C、5 日間の養生を行った。

養生後は気中にて凍結融解の繰り返しを与えた。凍結融解の 1 サイクルは、供試体表面温度が凍結過程は+5°Cから-8°C、融解過程は-8°Cから+5°Cとなるように設定し、温度保持はさせず、1 サイクルに要する時間は 3 時間とした。なお、凍結融解の温度設定にあたり、最低温度は 3. 3. 2(1)で説明した凍結最低

温度とし、最高温度は JIS A 1148-2001 の融解温度を参考とした。凍結融解過程では、供試体の側面および底面をブチルゴムで覆い、基板の水分が蒸発しないようにした。また、温度変化が被覆面のみから与えられるよう、供試体を断熱材 (XPS) の容器にはめ込み、被覆面のみ開放した状態にて恒温器内で温度変化を与えた。

付着強さの測定は、(1)と同じ方法で、凍結融解 0(養生後)、100、200、300 サイクル後に行った。

### (3) 凍結融解を受けた緩衝材の圧縮残留ひずみ

パネル系補修材料のうち、FRPM 板については、メーカーにより凍結融解抵抗性に関する試験が行われているが、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 板と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和らげるために用いていることから、凍結融解の履歴を受けた時の緩衝材の性能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。

試験材料は、試験施工で使用したものと同じ、EPS (ビーズ法ポリスチレンフォーム)、PE (発泡ポリエチレン)、EPT (エチレンプロピレンゴム) の 3 種類を使用し、それぞれの試験片は長さ 50mm×50mm、厚さ 10mm とした。

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。また、凍結融解の有無による影響を検証するため、凍結融解と同じ期間、+20℃の水中に浸漬させた処理も併せて行った。

圧縮残留ひずみ試験は、凍結融解処理等を行った試験片に対し、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( $C_s$ )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。

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

ここに、 $C_s$  : 圧縮残留ひずみ

$d_0$  : 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 個の平均値とした。

### 3.4.2 結果および考察

#### (1) 樹脂系の耐久性

##### ① 低温での養生や凍結融解を受けた表面被覆材の付着強さ<sup>8), 9), 10)</sup>

樹脂系表面被覆材の養生後の付着強さを表-3に示す。3ケースの養生後の付着強さを比較すると、標準的な養生の場合と比べ、低温で養生した2ケースで付着強さが小さかった。しかし、いずれの条件でも一般に必要なとされる1.0N/mm<sup>2</sup>程度を上回る値であった。

表-3 樹脂系の養生後の付着強さ

| 材料  | 養生条件         | 付着強さ(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----|--------------|--------------------------|
| 樹脂系 | 5℃,5日+0℃,23日 | 3.51                     |
|     | 5℃,28日       | 3.50                     |
|     | 20℃,28日      | 4.22                     |

凍結融解後の付着強さは樹脂系では300サイクル後でも十分な値を保っていた。本試験は補修表面から水分を供給させたものである。樹脂系の被覆材が凍結融解の影響を受けにくかったのは、透水性が低い材料のため、被覆材表面側からの水分浸透が少なかったためと考えられた。なお、養生温度による違いは明確でなかった。

これらの結果から、本試験範囲内の低温での養生条件では付着強さの低下は小さいことから、実施工上も 5 日間程度の給熱養生で十分な付着強さが得られることが確認できた。また、冬期間の南面のように日射による融雪水が供給され凍結融解作用を起こしうる環境でも、樹脂系では 15 年程度は十分な付着強さを得られることがわかった。より長期的な耐久性の検証は、後継課題で実施する予定である。

##### ② 付着面の水分が凍結融解作用を受けた表面被覆材の付着強さ

図-15 は、凍結融解 300 サイクルまでの樹脂系表面被覆材の付着強さの変化である。

樹脂系では凍結融解 300 サイクル後でも付着強さの低下はほとんど見られず、1.0N/mm<sup>2</sup>以上の付着強さを有していた。

このことから、本試験条件での表面水分で施工しても少なくとも 15 年程度は十分な付着強さが得られることが確認できた。より長期的な耐久性の検証については、後継課題で実施する予定である。

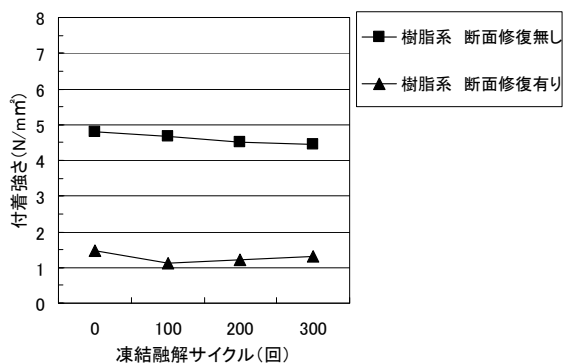


図-15 表面水分 7.5%~8.0%の基板に塗布した樹脂系の凍結融解前後の付着強さ

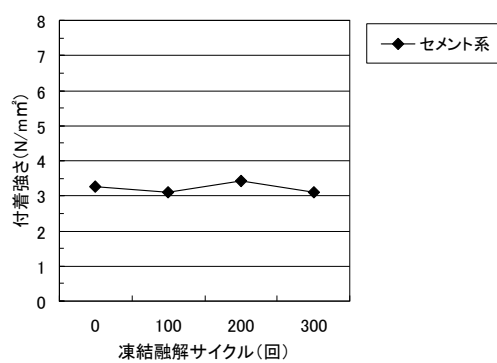


図-16 表面水分 7.5%~8.0%の基板に塗布したセメント系の凍結融解前後の付着強さ

**(2) セメント系の耐久性**

**① 低温での養生や凍結融解を受けた表面被覆材の付着強さ**

セメント系表面被覆材の養生後の付着強さを表-4に示す。樹脂系と同じく、低温での養生で付着強さの低下がみられたが、いずれの条件でも一般に必要なとされる1.0N/mm<sup>2</sup>程度を上回る値であった。

表-4 セメント系の養生後の付着強さ

| 材料    | 養生条件           | 付着強さ(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-------|----------------|--------------------------|
| セメント系 | 5°C,5日+0°C,23日 | 1.99                     |
|       | 5°C,28日        | 1.36                     |
|       | 20°C,28日       | 2.59                     |

凍結融解の繰り返しでは、図は示さないが、100サイクル以降で付着強さが 1.0N/mm<sup>2</sup>を下回った。これはセメント系の材料が表面からの水分浸透によって凍結融解作用を受けたためと考えられた。

これらの結果から、本試験範囲内の低温での養生条件では付着強さの低下は小さいことから、実施工上も5日間程度の給熱養生で十分な付着強さが得られることが確認できた。一方、冬期間に常に水分が供給される環境では取り扱いを慎重にする必要があることが示唆された。

**② 付着面の水分が凍結融解作用を受けた表面被覆材の付着強さ**

図-16は、凍結融解300サイクルまでのセメント系表面被覆材の付着強さの変化である。

セメント系では凍結融解300サイクル後も付着強さの低下はほとんど見られず、1.0N/mm<sup>2</sup>以上の付着強さを有していた。

このことから、本試験で与えた表面水分条件で施工した場合でも、補修表面に水分が供給されない場合には、少なくとも10年程度は十分な付着強さが得

られることが確認できた。より長期的な耐久性の検証は、後継課題で実施する予定である。

**(3) パネル系の耐久性**

図-17に凍結融解500サイクルまでの3種類の緩衝材の圧縮残留ひずみを示す。圧縮残留ひずみは値が大きいくほど、初期の厚さに対する減少率が高いことを意味する。試験の結果、EPSが最も圧縮残留ひずみが大きく、圧縮後に復元しづらいことが示された。凍結融解による圧縮残留ひずみの値の変化は明確ではなかった。

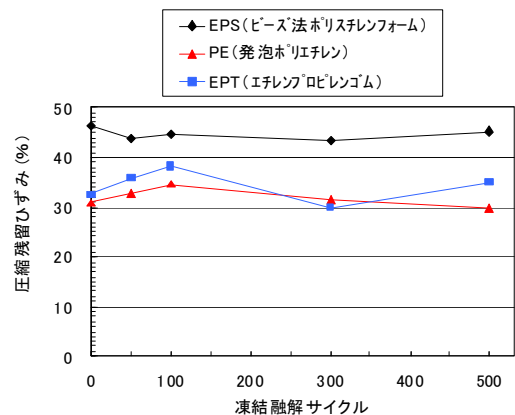


図-17 凍結融解サイクルに伴う緩衝材の圧縮残留ひずみ

図-18は凍結融解を500サイクル受けた後およびそれと同じ期間(62.5日)での20°C水中浸漬後における3種類の緩衝材の圧縮残留ひずみである。この図からEPTが他の材料に比べて、凍結融解作用により圧縮残留ひずみの増加量が多いことがわかる。すなわち、EPSとPEは凍結融解による増加率が5%程度であるのに対し、EPTは増加率が約25%となっていた。この結果は、EPTでは凍結融解作用の影響で圧縮後の復元力が低下しやすいことを示唆している。

3種類の緩衝材の中では、凍結融解後も圧縮後の



復元力が保たれる PE が最も適した緩衝材であると考えられた。

また、3.3.2(1)から、パネル系で補修された躯体コンクリートは凍結融解をほとんど受けないことから、パネル系での補修により躯体コンクリートの凍害劣化が抑えられることがわかった。

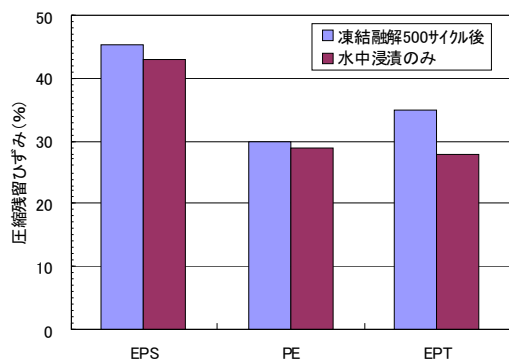


図-18 凍結融解サイクルの有無による緩衝材の圧縮残留ひずみ

### 3.5 水理性能の検証

#### 3.5.1 方法

3.3.2(2)で付着強さが大きい工法と述べた、劣化部を除去した凹凸面にウレタン樹脂を塗布した工法(写真-6)での粗度係数を水理模型実験により測定した。併せて、流水により磨耗した水路および超高压洗浄後の表面に凹凸のある水路の粗度係数も測定した。



写真-6 劣化部除去面にウレタン樹脂を塗布した水路

本試験では、北海道の中央部に位置する幹線水路の改修時に、老朽化したL型ブロックを使用して側壁および底版の磨耗部分と超高压洗浄した部分から型を取り、幅0.4m、0.6m、1.0mのフルーム水路を製作した。超高压洗浄部分から製作した水路は粗度係数測定後にウレタン樹脂を塗布してから、再度粗

度係数を測定とした。

粗度係数は、流速、流量が一定の2点間(L=10m)の水深を観測することで求めた。流速は実際のコンクリート開水路の実態から、1.5m/s程度以下とし、それぞれの幅の水路で流速を変えて測定を行った。

#### 3.5.2 結果および考察

図-19は流速と粗度係数の関係を表したものである。

超高压洗浄した水路の粗度係数はやや大きい傾向であったが、その上にウレタン樹脂を塗布した水路では粗度係数が低下し、磨耗した水路と同等かそれ以下となった。また、設計基準に示される粗度係数の標準値である0.012~0.016<sup>12)</sup>の範囲にあった。それゆえ、樹脂系補修工法で断面修復を行わず、表面に凹凸のある状態であっても水理的に大きな問題は生じないと考えられ、実用的な工法であるといえる。

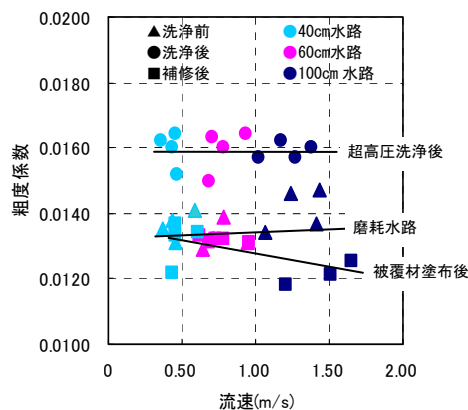


図-19 流速と粗度係数の関係

### 3.6 補修事例調査

積雪寒冷地のコンクリート開水路の補修事例として、岩手県で実施したPR施工区間の補修後の状況について、現地調査を行っており(写真-7)、補修材料毎にみられた変状の特徴等について整理した。詳細は文献13)にとりまとめた。



写真-7 現地調査状況

また、北海道内でも農業水利施設のストックマネジメントの取り組みの一環として、平成21年度には

事業現場においてコンクリート開水路の補修工法の試験施工が行われた<sup>3)</sup>。事業現場で試験施工に採用されている補修工法は、セメント系、樹脂系、パネル系など補修工法の種類は多岐にわたっている。多種の補修工法が実施される現状を踏まえ、今後は、寒冷地で施工する各補修工法に応じた施工管理基準値と、補修後のモニタリング項目と基準値を整理する必要がある。

### 3.7 コンクリート開水路の寒冷地補修技術資料の作成

本研究で得られた成果を用いて寒冷地の技術者向けの技術ガイドである「積雪寒冷地のコンクリート開水路の補修に関する技術資料」をとりまとめた。

### 3.8 小括

老朽化したコンクリート開水路の積雪寒冷地における補修工法の適用技術確立のための試験施工を実施し、補修後の変状調査および補修表面温度の連続観測や目視調査、付着強さ試験、磨耗量の測定を継続するとともに寒冷地の施工時および供用後の条件を想定した室内試験を行った。

各補修区間の表面温度等のデータから算出した凍結融解回数は、南面ではセメント系が約30回、樹脂系が約20回、北面ではセメント系、樹脂系ともに約15回であった。また、パネル系で補修された躯体コンクリートは凍結融解をほとんど起こさないことがわかった。

補修後初期段階の変状に関しては、試験施工区間で冬期間と灌漑期間を4期ずつ経過した時点では、各補修工法とも概ね良好に経過している。付着強さは樹脂系、セメント系ともに概ね良好であり、とくに樹脂系の表面被覆材を劣化部除去面に直接塗布した場合には付着強さが大きいことがわかった。パネル系ではPEおよびEPTは供用後も含水比が低く、凍結融解作用を受けにくい状態であった。

長期的な耐久性に関しては、樹脂系では低温で養生したことによる付着強さの大きな低下はみられず、補修表面からの水分供給された場合や躯体コンクリートの水分が施工限度近くで施工した場合でも、最低15年程度は十分な付着強さが得られると考えられる。セメント系では低温で養生したことによる付着強さの大きな低下はみられず、補修表面に水分が供給されない条件では、最低10年程度は十分な付着強さが得られると考えられる。パネル系では緩衝材の断熱効果によって、補修された躯体コンクリートが受ける凍結融解作用が抑えられること、室内試験での評価により、凍結融解後も圧縮後の復元力が保たれるPEが緩衝材に最も適していると考えられることがわかった。

今後はライフサイクルコストを比較するため、さらに長期間の耐久性を検証する試験が必要と考えられる。

水理性能の検証に関しては、付着性に優れるが補修表面に凹凸が残る工法での粗度係数の測定を行った。水理模型実験の結果、粗度係数は設計基準の標準値内に収まることが示され、劣化部除去面に直接ウレタン樹脂を塗布する工法でも水理的に大きな問題生じないと考えられ、実用的な工法であることがわかった。

## 4. 老朽化した頭首工の寒冷地型補修技術の開発

### 4.1 目的

北海道内には、農業用水を河川から取水するための施設として頭首工が多数築造されており、その中には建設から数10年経過し、老朽化が著しいものもみられる。道内の頭首工では、老朽化を進行させる大きな要因として、積雪寒冷地特有の凍結融解の繰返し作用などがある。また、施設本体に作用する大きな温度変化も劣化の要因となる。そこで、積雪寒冷地における頭首工の補修工法を検討するにあたり、各種補修技術の適用性評価のため、各種の表面被覆材を塗布した供試体を作成し暴露試験を行った。

また、頭首工の補修では気中部と水中部が対象となるため、補修工法の検討では気中部に加え水中部を想定した試験も必要と考えられる。このため、補修材料を塗布した供試体を試験水槽内に設置し、気中および水中条件下において温冷の繰返しを与えて耐久性の検証を行った。

### 4.2 方法

暴露試験では、表面被覆材〔セメント系2種類(厚さ10mmの厚塗りタイプ、厚さ2mmの薄塗りタイプ)、樹脂系1種類(厚さ1.5mm)〕の塗布面(7cm×7cm)を気中部にて各方位および上に向けて設置し、塗布面に生じるひずみの計測、塗布面の経過観察を行った。

また、断面修復材〔セメント系1種類(厚さ10mm)〕、表面保護材〔セメント系2種類(厚さ10mmの高靱性セメント厚塗りタイプ、厚さ2mmの薄塗りタイプ)〕の塗布面(7cm×7cm)を試験水槽内で気中・水中条件にて温冷の繰返しを与え、塗布面の経過観察や温冷繰返し後の付着力を検証した。温冷繰返し試験では、気中条件と水中条件の他に、水位変動を与えた喫水条件を設定した。温冷の温度設定は、1サイクルの温度変化パターンを-20~+20℃とし、繰返し回数は1000回とした。

### 4. 3 結果および考察

暴露試験での樹脂系被覆材による補修供試体の表面部における発生ひずみと表面温度の変化を図-20に示す。図は、真冬日における観測結果であるが、南向きに設置した供試体は日射の影響により表面温度が10℃程度まで上昇しており、補修面の発生ひずみも大きく変動していた。一方、北向きに設置した供試体については、最高温度が0℃を下回り、発生ひずみの変動は小さかった<sup>14)</sup>。

試験開始から約3年経過後までの観察の結果では、セメント系の厚塗りタイプの塗布面で一冬経過後に細かいひび割れが確認されたが、その後のひび割れの大きな進展はみられなかった。また、セメント系の薄塗りタイプ、樹脂系の塗布面では目立った変化はみられなかった。暴露試験で観測した補修供試体表面部のひずみは、各方位面で発生量や変動傾向に差異がみられた。また、真冬日のような低温下においても引張と圧縮のひずみが生じており、補修材の施工厚によってもひずみ量に違いがみられた。

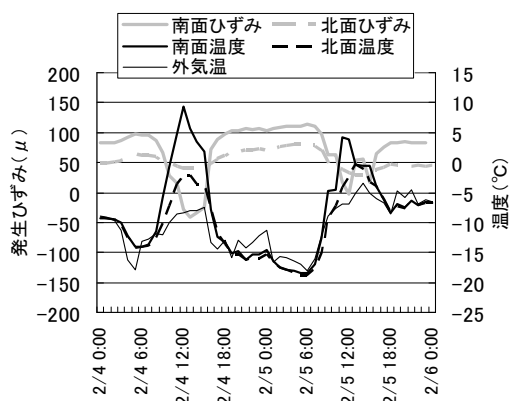


図-20 冬期における補修表面の発生ひずみ  
(樹脂系補修材による補修供試体の例)

温冷繰返し試験の1000サイクル時点の結果概要は次のとおりである。気中部では変状が少ないものの、水中部では断面修復材は不規則な紋様をもつ微細ひびわれが発生した。供試体を設置している試験水槽の水面の変動範囲にあたる喫水部では、断面修復材を施工厚10mmで塗布した供試体では最大スケールリング深さ0.4mm程度の変状が生じたが、表面保護材を施工厚2mmで塗布した供試体は健全な状態を保持していた(写真-8)。

上記の試験の結果から、気中部および喫水部については、断面修復材を施工した後に薄層の表面保護材を上塗り施工することで、寒冷条件下でも比較的長期にわたる耐久性が確保されることがわかった。

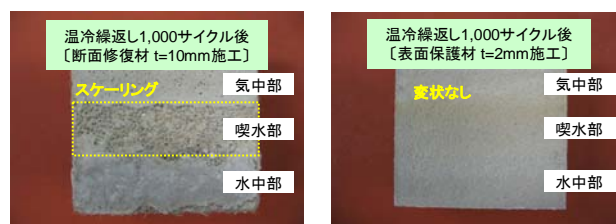


写真-8 温冷繰返し1000サイクル後における喫水部に配置した補修供試体の表面(縦7cm×横7cm)の状況

### 4. 4 頭首工の寒冷地補修技術資料の作成

本研究で得られた成果を用いて寒冷地の技術者向けの技術ガイドである「積雪寒冷地の頭首工の補修に関する技術資料」を作成した。

### 4. 5 小括

各種補修工法の積雪寒冷地における適用性評価のため、補修供試体の暴露試験と試験水槽内での温冷繰返し試験を行った。

暴露試験では、被覆材の塗布面は、真冬日でも南面では大きな温度変化による発生ひずみが顕著であった。約3年経過後までの観察結果では、セメント系の厚塗りタイプの材料で細かいひび割れがみられたが、その後のひび割れの大きな進展はみられなかった。それ以外の材料ではとくに変化はみられなかった。

温冷繰返し試験では、気中部では変状が少ないものの、水中部では断面修復材によっては不規則な紋様をもつ微細ひびわれが発生した。また、水面の変動範囲にあたる喫水部では、スケールリングが生じた材料と健全な状態を保持した材料があった。

積雪寒冷地における補修工法の選定では、現地で曝される環境要因を考慮した適用性の検証が必要と考えられる。

## 5. 特殊土地帯における管水路の経済的設計技術の開発

### 5. 1 目的

北海道の低平地において農業用水のパイプラインを建設する場合、広範に分布する泥炭地盤を通過することが多い。このような地域は地下水位が高く、融雪期や大雨の際には地表面付近まで上昇する。泥炭等の軟弱地盤では、地下水位の上昇と管の空虚が重なると発生する管の浮上対策とともに、地盤の高圧縮性、低強度に起因した管の不同沈下への対策が必要となる。

このような背景から、泥炭地盤でも自由支承で建

設可能な可とう性のパイプライン埋設工法として、平成8年頃から泥炭等の発生土を母材とした固化改良土を管周囲に巻き立て、管の浮上と不同沈下を抑制する工法が用いられるようになった。その後、管基礎工法の低コスト化として、管の上半分の土塊をジオグリッドで覆い浮上抑制を図り管基床部のみ固化改良土を用いる工法を経て、平成16年頃からは管基床部にジオグリッドを使用して不同沈下の抑制を図る埋設工法の普及が進んでいる。

このように、固化改良土からジオグリッドを使用する経済的な埋設工法に変遷する中で、泥炭等の軟弱地盤におけるジオグリッドを用いた埋設断面の浮上抑制、沈下抑制については次のような課題があった。

ジオグリッドを用いた浮上抑制工法は、砂質土や礫質土を使用した場合については詳細な研究が実施されているが、泥炭のような高圧縮性土については未解明な部分が多い。そこで、土槽実験を実施し、高圧縮性土を用いた場合の同工法の浮上抵抗力の評価を行った。

また、ジオグリッドを用いた不同沈下抑制の効果についても調査データは少ない。このことから、土槽実験を実施し、載荷試験を行うことにより、ジオグリッドの不同沈下抑制効果の検証を行った。

## 5. 2 方法

### 5.2.1 浮上対策の模型断面と測定項目の概要

浮上対策の土槽実験は、図-21に示すような断面で行った。土槽の奥行きは1,000mmで、中央部に配置したVM管（長さ980mm）を2本のシャフトに固定して引き上げる仕様である。断面はA（管頂高さでジオグリッドを結合する標準的なタイプ）、B（管頂高さのジオグリッドがないタイプ）、C（ジオグリッドがないタイプ）の3種類を設定した。地盤試料には模擬土を使用し、所定の乾燥密度（ $0.70\text{g/cm}^3$ ）で仕上がり厚10cmの層を10層盛立てて土槽内地盤を作製した。

地盤作製後に地表面高さまで注水し、最大浮上変位量150mmまで $0.1\text{mm/min}$ で管を引き上げ、浮上変位量と管にかかる荷重を計測した。また、土槽正面から30分間隔で定点写真撮影を行い、画像解析を行った。

また、地盤の強度特性を調べるために、一面せん断試験を行った。せん断箱は $15 \times 15 \times$ 高さ6.5cmで、せん断速度 $0.1\text{mm/min}$ 、最大せん断変位20mm、圧密応力は3種類（0.87、1.74、2.61kPa）と設定した。試料の成層方向は水平方向に対して $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ の4種類で、後者3つは凍結後に整形して作製した。いずれの試験も飽和排水条件である。

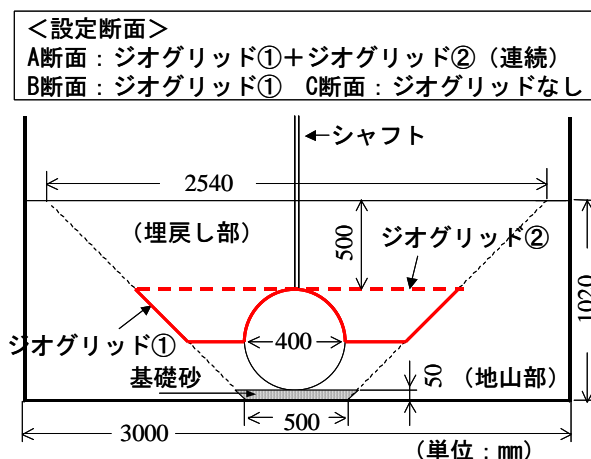


図-21 浮上対策模型断面図

### 5.2.2 沈下抑制対策の模型断面と測定項目の概要

ジオグリッドによる沈下抑制対策の検討断面を決定するために、管路沈下時の状況を管路の縦断方向の断面と横断方向の断面で比較すると図-22のとおりとなる。沈下量を一定とすれば、ジオグリッドの縦断方向のひずみは（沈下量）／（縦断延長）となり、横断方向のひずみは（沈下量）／（横断延長）となる。ここで（縦断延長） $\gg$ （横断延長）であることから、横断方向のひずみの方が大きくなる。そのため、実験断面は、管路の横断方向の断面を想定する。

また、ジオグリッドに生じるひずみの分布は、管とジオグリッドの間に基床材を施工することにより、変化することが考えられる。すなわち、図-23に示すように、上載荷重を管が受けた場合、基床なしの断面では、管直下のジオグリッドに荷重が集中するのに対し、基床材ありの断面では、基床材によりジオグリッドの水平部および斜面部に荷重が分散されるため、基床材なしの断面では管直下のジオグリッド周辺のみひずみが発生し、基床材ありの断面ではジオグリッドの水平部および斜面部の広い範囲にひずみが発生することが考えられる。

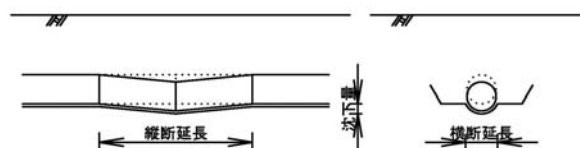


図-22 検討断面の概念図



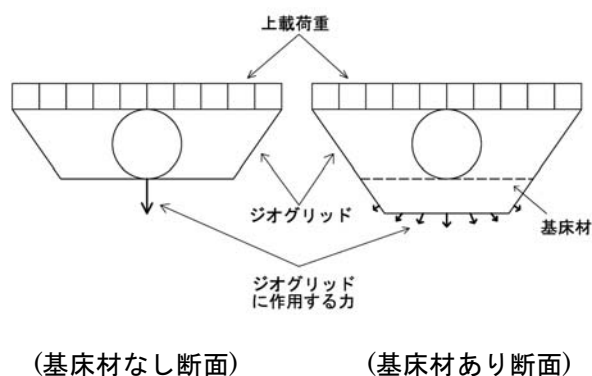


図-23 基床材による荷重分散の仮説

上記を踏まえ、沈下抑制対策の土槽実験は、図-24に示すような断面で行った。土槽の奥行きは1,500mmで、載荷板（幅1,800mm、奥行き1,300mm）を降下させて上載荷重を加える仕様である。断面はD（基床材無しで管の直下にジオグリッドを敷設したタイプ）、E（管とジオグリッドの間に基床材を配置したタイプ）の2種類を設定した。地盤試料には、管水路工事の現地発生土を使用し、埋戻部には最大粒径19mmの砕石を使用した。なお地盤試料の締固め密度は、最大乾燥密度の80%（約1.07g/cm<sup>3</sup>）とし、同じ試料を用いてジオグリッドの配置を変更した2断面で載荷試験を行った。

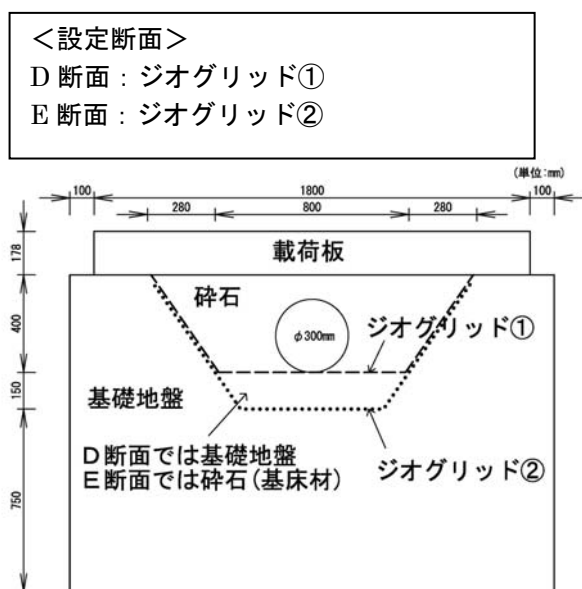


図-24 沈下対策模型断面図

これらの断面に対して、上面側から載荷板を0.1mm/minの速度で鉛直方向に降下させ、約4kN/m<sup>2</sup>刻みで上載荷重を増加させた。実験では、目標値ま

で荷重を増加させた後は、上載荷重が安定するまで載荷板の鉛直方向の位置を固定した。このような載荷条件下で、管横断方向のジオグリッドのひずみ、地盤の変位量等を測定した。

### 5.3 結果と考察

#### 5.3.1 浮上抑制効果

土槽実験での管上地盤の緩い拘束状況に符合するためには、一面せん断試験においてせん断箱の拘束に影響されない程度までせん断箱の隙間（以下、sと表す）を大きくする必要が考えられる。図-25に成層方向0°の一面せん断試験結果を示す。せん断変位10mm程度まではsに依らず概ね同じ応力-変位関係が得られたので、この領域での近似曲線を以後の評価に用いた。成層方向90°ではsに依らない応力-変位関係を得ることができなかったが、せん断応力とsの対数との間に直線関係が認められた（図-26）。

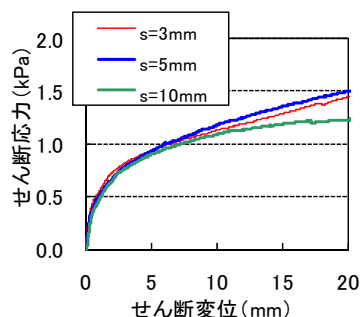


図-25 一面せん断試験結果(0°)

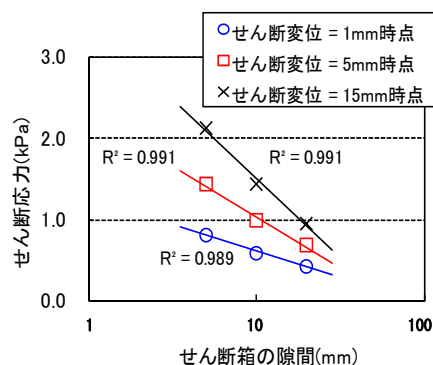


図-26 せん断箱の隙間の影響(90°)

写真-9は、C断面の管引き上げ終了時の状況である。図中に示すような内側（実線）と外側（点線）、その中央部（一点鎖線）、の3種類のスベリ面を設定し、管にかかる荷重の評価を試みたのが図-24である。計算値は、画像解析から得た地盤内変位と一面せん断試験結果から算出したせん断抵抗力に各スベ

り面内部の土塊重量を加えたものである（詳細は文献<sup>15)</sup>参照）。各  $s$  におけるせん断応力は、図-25 と図-26 から得た近似曲線を用いて算出した。中央と外側スベリ面の場合は実験初期から一貫して管にかかる荷重を過大に評価していることから、浮上抵抗力の評価には内側スベリ面を採用するのが妥当と考えられた。

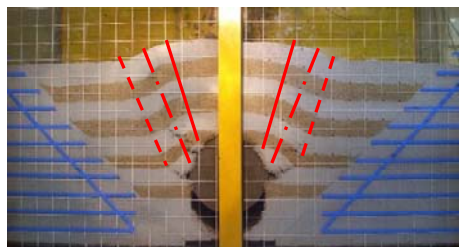


写真9 試験終了時の状況(C断面)

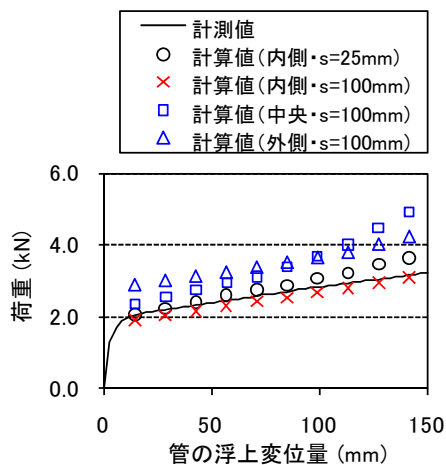


図27 荷重と浮上変位量の関係(C断面)

図-28 に各断面での管にかかる補正計測荷重（内側スベリ面内部における水面高さより上部への地盤の隆起による有効上載荷重の増加分を計測荷重から差し引いた値）と浮上変位量との関係を示す。C断面において補正計測荷重がほぼ一定に達した時点の変位量を管上方の地盤の力学的安定性を保持するための変位量（図中の  $d_b$ ）と見なすこととした。

図-29 はA、B両断面における補正計測荷重とC断面における補正計測荷重の比を示したものである。管の浮上変位量によってその値は変化するが、 $d_b$  ではA断面は1.20、B断面は1.10となる。すなわち、ジオグリッドの有効上載荷重増加割合は、A断面ではジオグリッドがない断面の荷重の2割程度、B断面では1割程度を見込むことができるといえる。

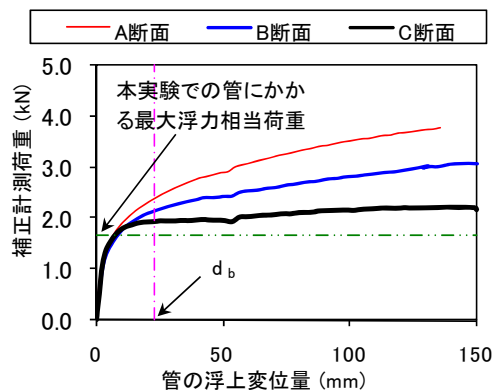


図28 荷重履歴

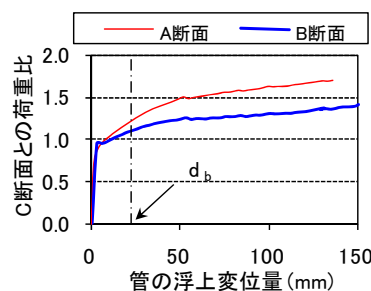


図29 C断面との補正計測荷重履歴比履歴

### 5.3.2 沈下抑制効果

上載荷重の増加過程におけるジオグリッドの発生ひずみの変化を図-30 に示す。基床材を施工せずジオグリッドのみを施工したD断面では、上載荷重の増加に伴うジオグリッドの発生ひずみは小さく、ジオグリッドと基床材を組み合わせたE断面では、上載荷重の増加とともにジオグリッドの水平部、斜面部に引張ひずみが増加する傾向が認められる。

このような、上載荷重増加に伴う管体沈下過程におけるジオグリッドのひずみ発生状況からみて、D断面は沈下抑制効果が低いが、E断面は基床材による荷重分散効果とジオグリッドの引張力によって沈下抑制効果が発揮されるものと考えられる。

次に、上載荷重が約  $17 \text{ kN/m}^2$  の段階でのジオグリッドに発生したひずみ分布を図-31 に示す。D断面では、管直下付近に若干の引張ひずみが発生している領域がみられるが、ジオグリッドの水平部では管から離れるにしたがい引張ひずみが減少し、圧縮ひずみに移行している。また、ジオグリッドの斜面部は全て圧縮ひずみが発生しており、ジオグリッドの端部に近づくほどその値は大きくなる傾向にある。

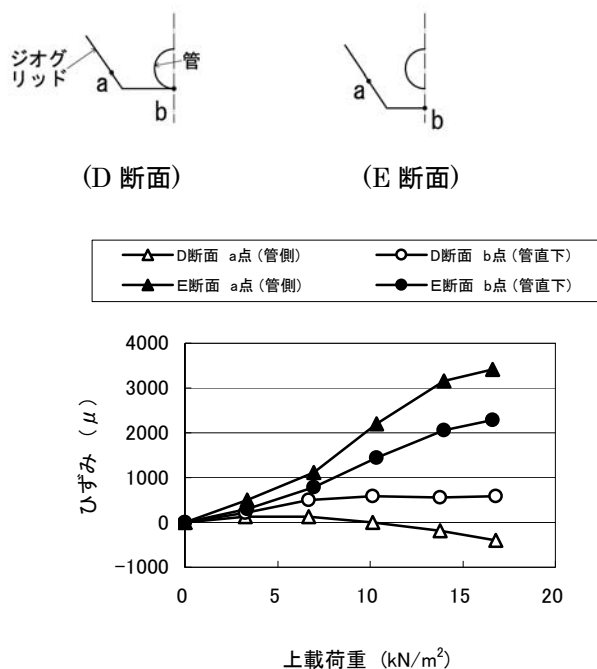
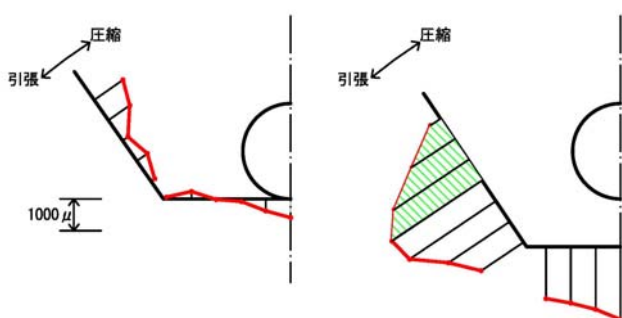


図-30 上載荷重とジオグリッドに発生するひずみ

一方、E断面ではジオグリッドの水平部、斜面部ともに全て引張ひずみが発生しており、水平部では管直下で最大の引張ひずみが発生し、管から離れるにしたがい引張ひずみが減少している。また、斜面部では、管底高さ付近で最大の引張ひずみが発生している。

このことから、ジオグリッドを敷設したパイプラインでは、基床材施工の有無によりジオグリッドに発生するひずみには差があり、基床材を施工した断面の方が、基床材を施工しない断面に比べてジオグリッドには大きな引張ひずみが発生することがわかる。



(D断面での 16.8 kN/m²時) (E断面での 16.6 kN/m²時)

図-31 D・E断面のひずみ発生状況図

図-32 のようにジオグリッドの微小要素を考えると、その左右端に作用する引張力(引張ひずみに比例)の差が、土から作用する摩擦力であると考えられる。すなわち、図-31 の着色部に相当するジオグリッドでは、ジオグリッドを斜め上に支持する摩擦力が作用していると考えられる。

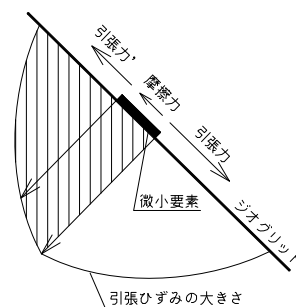


図-32 ジオグリッドの微小要素に作用する力

#### 5. 4 泥炭性軟弱地盤における管水路の設計・施工に関する技術資料の作成

本研究で得られた成果から「泥炭性軟弱地盤のパイプラインにおける土木シート利用検討の要点」を作成した。

#### 5. 5 小括

泥炭等の高圧縮性土における埋設管の浮上抑制機構の解明を目的として高圧縮性模擬土を使用して土槽実験を行った結果、ジオグリッドの有効上載荷重増加割合は、管頂高さでジオグリッドを結合する標準的なタイプの断面ではジオグリッドがない断面の荷重の2割程度を見込むことができ、管頂高さのジオグリッドがないタイプの断面では1割程度を見込むことができることがわかった。

また、ジオグリッドを不同沈下対策に用いる場合には、管とジオグリッドの間に基床材を設けることにより不同沈下抑制効果がより大きく発揮されることがわかった。

これらの知見は、ジオグリッドを用いた経済的な管路の断面設計に活用することができる。

#### 6. まとめ

この研究では、北海道の寒冷な条件を反映させた農業水利施設の構造機能評価診断方法、および老朽化した農業水利施設の補修・改修技術の開発に取り組み、次のような成果を得た。

老朽化した水利施設の機能診断方法に関する研究では、北海道内の老朽頭首工の劣化状況調査および

冬期間に頭首工おかれる温度環境の計測を行った。調査の結果、雨水や融雪水の停滞箇所や移動経路など湿潤条件におかれやすい部位で凍害による劣化が生じていた。

凍害が生じているコンクリート開水路において凍害発生部の積雪状況を観察した結果、コンクリート開水路の凍害発生には部位ごとの積雪状況が関与していた。

また、頭首工の凍結融解の1年間あたりの作用頻度は南面側で最も多く1年に60~70回程度、天端面では積雪の少ない地域で約60回、多い地域で約30回であった。開水路では側壁が冬期間も露出している部位で年間30~40回の凍結融解が作用していた。表面温度観測結果は補修材の耐久性評価試験の条件設定に用いることができ、凍結融解回数の試算結果は機能診断における劣化予測や残存寿命の推定に方位面の差を考慮するためのデータに用いることができる。

凍害を生じているコンクリート開水路側壁の内部温度・水分の観測の結果、側壁は部材内部まで凍結融解が及ぶ温度環境におかれていること、凍害の生じている部分では、側壁深さ方向全体で季節的な水分の変化が生じる傾向があることが確認された。これまでの成果および既往の技術・知見を用いて、コンクリート開水路および頭首工のコンクリート施設を対象とした「積雪寒冷地の農業水利施設の機能診断手法に関する技術資料」等を取りまとめた。今後は、寒冷地のコンクリート開水路の機能診断において、部材表面部の観察に加え、内部の劣化状況を把握する診断方法を開発する必要がある。

コンクリート開水路の表面補修工法の開発に関しては、ウレタン樹脂、セメントモルタル、FRPMパネルの計3種類の素材を対象にして、補修後初期段階での変状の有無の検証と長期的な耐久性の検証の2つの視点で評価を行った。初期段階の変状については、各材料とも施工後4年を経過した時点では目立ったものはなく、良好な状態を維持している。とくにコストの低減をねらいとして劣化部除去面に断面修復を行わずにウレタン樹脂を塗布した工法で最も表面被覆材の付着性が良いことがわかった。なお、この工法では補修表面に凹凸が残るが、水理実験による粗度係数はコンクリート開水路として十分許容できる範囲であった。長期的な耐久性の検証に関しては、ウレタン樹脂系材料では低温で養生したことによる付着強さの大きな低下はみられず、補修表面からの水分供給された場合や躯体コンクリートの水分が施工限度近くで施工した場合でも、最低15年程度は十分な付着強さが得られると考えられた。セメ

ントモルタル系材料では低温で養生したことによる付着強さの大きな低下はみられず、補修表面に水分が供給されない条件では、最低10年程度は十分な付着強さが得られると考えられた。ともに概ね良好な結果であった。FRPMパネルでは緩衝材の断熱効果によって、補修された躯体コンクリートが受ける凍結融解作用が抑えられることがわかった。パネル系の緩衝材としては、供用後の含水比が低く凍結融解作用を受けづらいと考えられることや、目視調査による変状がないこと、凍結融解後も圧縮後の復元力が保たれることから、PEが最も適していると考えられた。本研究で得られた成果と既往の技術・知見を用いて、「積雪寒冷地のコンクリート開水路の補修に関する技術資料」を取りまとめた。

頭首工の表面補修工法の開発に関しては、各種補修工法の積雪寒冷地における適用性評価のため、補修供試体の暴露試験を行った。被覆材の塗布面は、真冬日でも南面では大きな温度変化による発生ひずみが顕著であった。約1年経過後までの観察結果では、細かいひび割れがみられたものがあつたが、その後のひび割れの進展はみられなかった。また、頭首工の補修は気中部と水中部が対象となるため、試験水槽内において気中・水中条件下にて補修供試体に温冷繰返しを与え耐久性の検証を行った。積雪寒冷地における補修工法の選定では、現地で曝される環境要因を考慮した適用性の検証が必要と考えられる。本研究で得られた成果と既往の技術・知見を用いて、「頭首工のコンクリート施設における寒冷地補修技術に関する資料」を取りまとめた。

さらに、特殊土地帯における管水路の経済的設計技術に関しては、高圧縮性土中の浅埋設工法の埋設管浮上防止機構、および不同沈下抑制機構の解明のために土槽実験等を行った。その結果、ジオグリッドの有効上載荷重増加割合は、管頂高さでジオグリッドを結合する標準的なタイプの断面では、ジオグリッドがない断面の荷重の2割程度、管頂高さのジオグリッドがないタイプの断面では1割程度を見込むことができることがわかった。また、ジオグリッドを不同沈下対策に用いる場合には、管とジオグリッドの間に基床材を設けることにより不同沈下抑制効果はより発揮されることがわかった。これらの成果から「泥炭性軟弱地盤のパイプラインにおける土木シート利用検討の要点」を取りまとめた。

## 参考文献

- 1) 緒方英彦・高田龍一・鈴木哲也・山崎大輔・佐藤周之・服部九二雄:超音波法によるコンクリート製開水路の凍害診断に関する研究、平成21年度農業農村工学会



- 大会講演会、pp. 518-519、2009
- 2) 緒方英彦・高田龍一・野中資博・服部九二雄：RC開水路の凍害、農業農村工学会誌、第76巻、第9号、pp. 31-34、2008
  - 3) 北海道開発局農業水産部・函館開発建設部・旭川開発建設部・土木研究所寒地土木研究所：寒冷地における用水路の劣化と保全、第54回北海道開発技術研究発表会（指定課題）、2011
  - 4) 金田敏和・小野寺康浩・佐藤智・中村和正・緒方英彦：コンクリート開水路の凍害劣化と積雪状況、平成22年度農業農村工学会大会講演会、pp. 410-411、2010
  - 5) 長谷川寿夫・藤原忠司：凍害、技報堂出版、p. 41、1988
  - 6) 鎌田英治：凍結融解抵抗性（耐凍害性）、コンクリート工学、Vol. 22、No. 3、pp. 38-46、1984
  - 7) 横木淳一・小野寺康浩・佐藤智・中村和正：積雪寒冷地における水利施設の表面温度と凍結融解回数、第52回北海道開発技術研究発表会、2009
  - 8) 佐藤智・横木淳一・小野寺康浩・中村和正・嘉指成詞・原直洋・秋山譲治：低温での養生や凍結融解を受けた表面被覆材の付着強さーウレタン樹脂系表面被覆材の事例一、寒地土木研究所月報、第673号、pp. 12-18、2009
  - 9) 佐藤智・横木淳一・小野寺康浩・嘉指成詞・秋山譲治：寒冷条件下でのウレタン樹脂系表面被覆材の付着強さ、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第9巻、pp. 69-74、2009
  - 10) 佐藤智・横木淳一・中村和正・小野寺康浩：低温養生および凍結融解作用が表面被覆後の付着強さに与える影響、第57回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集、pp. 26-29、2008
  - 11) 土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質に関する技術の現状、コンクリート技術シリーズ58、p80、2004
  - 12) 農林水産省農村振興局：土地改良事業計画設計基準設計「水路工」基準書 技術書、p. 156、2001
  - 13) 佐藤智：農業水利施設の補修技術および補修後の変状、技術協第79号、pp. 10-13、2008
  - 14) 横木淳一・小野寺康浩・佐藤智・中村和正：積雪寒冷地における頭首工の表面温度環境、寒地技術論文集 Vol. 24、pp. 206-209
  - 15) 佐藤大輔・田頭秀和・中村和正：泥炭の力学特性を模擬した実験用試料の作製の一例、寒地土木研究所月報、第637号、pp. 44-47、2006