

# 論文 農業用コンクリート水路における表面被覆材の凍結融解試験方法に関する検討

石神 暁郎<sup>\*1</sup>・佐藤 智<sup>\*2</sup>・金田 敏和<sup>\*3</sup>・中村 和正<sup>\*4</sup>

**要旨**：積雪寒冷地における農業用コンクリート水路では、近年、凍害などにより低下した性能の回復・向上を目的とした表面被覆材の開発・適用が進められている。表面被覆材の耐久性に関しては、コンクリートの耐凍害性を評価する種々の凍結融解試験方法を活用して評価する機会が多く、その性能評価方法については十分に確立されていないという現状にある。本研究では、農業用コンクリート水路にみられる凍害および表面被覆材の変状の発生状況について調査を行い、施工後の表面被覆材が受ける劣化外力を再現することを目的とした、表面被覆材の付着耐久性を評価する凍結融解試験方法に関する検討を行った。

**キーワード**：農業用コンクリート水路、凍害、表面被覆材、付着耐久性、凍結融解試験

## 1. はじめに

近年、農業用コンクリート水路では、種々の劣化要因により低下した性能の回復・向上を目的とした補修材料の開発・適用が行われている。その中で積雪寒冷地では、特にコンクリート開水路の側壁の凍害とそれに起因する水路施設としての性能低下を対象とした表面被覆材の開発・適用が進められている<sup>1)</sup>。

表面被覆材などの補修材料の適用に際しては、補修材料に期待される効果と要求性能を明確にした上で、適切な試験方法により性能評価を行うことが肝要となる。一般に、凍害を対象とした表面被覆材の要求性能には、凍結融解抵抗性、防水性(遮水性)、一体性などが挙げられ、表面被覆材は標準化・規定化された各試験方法を用いて試験・評価されている<sup>2)</sup>。しかし、既往の試験方法は、道路施設や鉄道施設などのコンクリート構造物を対象として標準化・規定化されたものが多く、必ずしも農業水利施設である農業用コンクリート水路の実情にそぐわない場合がある。このため、道路施設や鉄道施設で適用されている試験方法により評価された補修材料が農業用コンクリート水路にそのまま施され、結果、施工後早期に変状を生じる事例も散見されている。

凍害を対象とした表面被覆材の耐久性に関しては、コンクリートの耐凍害性を評価する手法として規定されている種々の凍結融解試験方法を活用して評価する機会が多い。JIS A 1148、RILEM CDF 試験といった既往の試験方法が適用されており、コンクリートの凍結融解抵抗性と比較することにより、その耐久性を評価している。しかしながら、こうした既往の試験方法はあくまでコンクリートの性能を評価する試験方法であり、農業用コンク

リート水路の表面被覆材を評価する場合には留意が必要である。例えば、表面被覆材を JIS A 1148 により評価する場合、試験は表面被覆材により全面が被覆されたコンクリート試験体を用いて行われる。表面被覆材の防水性が高ければコンクリート試験体内に水分は取り込まれず、凍結融解作用は発生しない。これに対して実構造物では、躯体表面以外に表面被覆材を施すことは難しいため、躯体背面から内部への水分の侵入を完全に防止することはできず、よって凍結融解作用自体は抑止されない。従って、コンクリートに凍結融解作用が発生した場合の表面被覆材の耐久性に関しては評価できていないことになる。このように、凍害を対象とした農業用コンクリート水路の表面被覆材の耐久性に関する性能評価方法については、十分に確立されていないという現状にある。

そこで本研究では、先ず、積雪寒冷地における農業用コンクリート水路にみられる凍害および表面被覆材の変状の発生状況について調査し、施工後の表面被覆材が受ける劣化外力について考察した。そして、それら劣化外力を再現することを目的とした、表面被覆材の付着耐久性を評価する凍結融解試験方法に関する検討を行った。

## 2. 農業用コンクリート水路の凍害と表面被覆材の変状

### 2.1 凍害の発生状況の調査

農業用コンクリート水路に特有の凍害の発生形態の一つに、コンクリート開水路の側壁内部にみられる層状ひび割れが挙げられる。層状ひび割れは、側壁の部材厚の方向に、躯体表面と平行に発生する層状のひび割れである。コンクリート開水路では、凍害が発生する凍結期は非灌漑期に当たり、気中部はもとより水中部であって

\*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研究員 博士(農学) (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主任研究員 (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

\*4 (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上席研究員 博士(農学)

も凍結融解作用を受ける。側壁における温度変化は、気中部、水中部の如何を問わず面的に生じるため、面的に内部に伝わることになる。その結果、部材厚の方向に温度変化とそれに伴う凍結による膨張圧が生じて、層状にひび割れが発生する<sup>3)</sup>。コンクリート開水路の側壁の凍害および層状ひび割れの発生状況を図-1に示す。



図-1 コンクリート開水路の側壁の凍害および層状ひび割れの発生状況

本調査では、凍害により表面に変状を生じたコンクリート開水路の側壁において、コア採取により層状ひび割れの発生状況を確認するとともに、ひび割れ発生によるコンクリートの変質を定量的に把握することを目的とした、超音波法(透過法)による超音波伝播速度の測定を行った。

表-1 調査対象の概要

水路名	構造形式	建設年度
H 幹線用水路 a 区間	RC 現場製作 L 型ブロック	昭和 41 年
H 幹線用水路 b 区間	RC 現場製作 L 型ブロック	昭和 43 年

(1) 調査対象の概要および調査方法

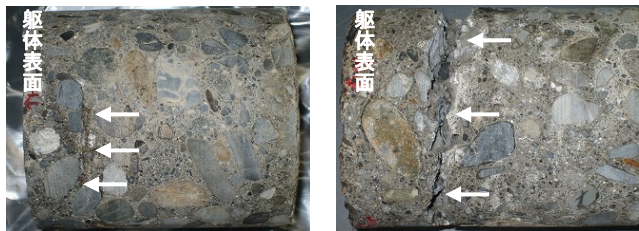
調査対象の概要を表-1に示す。H 幹線用水路は、北海道に位置する建設後 40 年以上が経過した基幹水利施設である。調査対象とした a 区間, b 区間ともに、構造形式は RC 現場製作 L 型ブロック水路であり、側壁の背面は左右岸ともに土中に埋もれている。調査箇所は、凍害による表面の変状が著しい、躯体表面が南側に面した右岸側壁の気中部とした。a 区間および b 区間の全体の状況を図-2に示す。



(a 区間) (b 区間)

図-2 調査対象の全体の状況

調査では、まず、採取したコアの側面の外観目視観察を行い、ひび割れの発生状況を確認した。次に、コアの直径方向において、躯体表面からの深さ毎に、超音波伝播速度の測定を行った。超音波伝播速度は、超音波試験機(プロセク社製 TICO 型)を用いて測定した。コアの直径は 100 mm、測定周波数は 54 kHz である。



(a 区間) (b 区間)

図-3 採取したコアの側面の状況

(2) 調査結果および考察

採取したコアの側面の状況を図-3に、超音波伝播速度測定結果を図-4に示す。a 区間のコアでは、総じて一体性は保たれていたものの、深さ 25 mm 付近において層状に発生する微細ひび割れが確認された。超音波伝播速度測定結果においても、深さ 25 mm 付近において伝播速度の低下が確認され、ひび割れ発生によるコンクリートの変質が層状に生じている可能性が示唆された。一方、b 区間のコアでは、深さ 30 mm 付近において幅 5 mm に及ぶ層状ひび割れが確認され、一体性は保たれていなかった。また、超音波伝播速度は、この部分では測定することはできなかった。

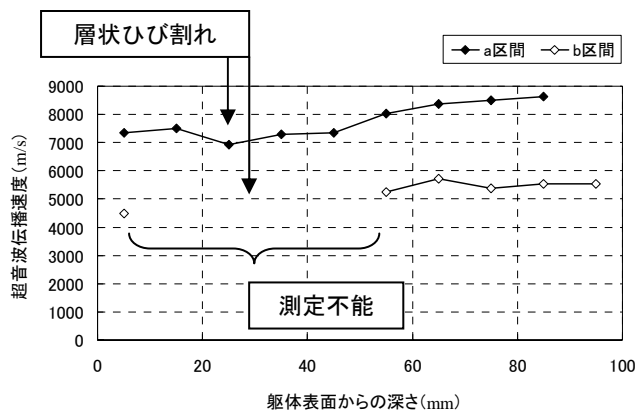


図-4 採取したコアの超音波伝播速度測定結果

以上の結果から、凍害により表面に変状を生じたコンクリート開水路の側壁では、ひび割れあるいはコンクリートの変質が層状に発生することが確認された。

2.2 凍害による表面はく離と表面被覆材の変状

凍害による表面はく離の発生状況の事例を図-5に、表面被覆材の変状の発生状況の事例を図-6に示す。コンクリート開水路の側壁の躯体表面付近において層状ひび割れが発生した場合、変状の発生形態としては表面は

く離として確認されることが考えられる。一方、躯体表面に表面被覆材が施されている場合、こうした表面はく離を発生させる劣化外力は、表面被覆材の付着性を低下

させる要因になることが考えられる。コンクリート開水路の側壁では、躯体表面以外、例えば躯体背面において表面被覆材などを施すことは難しいため、躯体内部への水分の侵入を完全に防止することはできず、よって躯体の凍結融解作用自体は抑止できない。躯体に凍結融解作用が発生した場合の表面被覆材の耐久性、特に躯体と表面被覆材との界面付近において凍結融解作用が発生した場合の付着性の低下が懸念され、こうした付着性の低下に対する抵抗性、即ち凍結融解作用に対する付着耐久性を評価できる試験方法の開発が必要であると判断される。

### 3. 表面被覆材の凍結融解試験方法の開発

施工後の表面被覆材が受ける劣化外力を再現することを目的とした、表面被覆材の付着耐久性を評価する凍結融解試験方法に関する検討を行った。ここでは、先ず、凍結融解試験方法の具備すべき条件について整理した。次に、整理した条件を基に試験装置の開発を試みた。そして、開発した試験装置の劣化促進能力を確認するため、各種補修材料を用いた試験を行った。

#### 3.1 凍結融解試験方法の具備すべき条件

表面被覆材の凍結融解作用に対する抵抗性に関しては、上述のように、JIS A 1148、RILEM CDF 試験といったコンクリートの耐凍害性を評価する手法として規定されている既往の凍結融解試験方法を活用して評価する機会が多い。また、JIS A 6909「建築用仕上塗材」7.10に規定される温冷繰返し試験を適用する場合もある<sup>2)</sup>。しかし、こうした試験方法はあくまでコンクリートや建築用材料の性能を評価する試験方法であり、必ずしも農業用コンクリート水路の表面被覆材が受ける劣化外力を再現できていない。即ち、躯体背面から吸収された水分の凍結融解作用による付着性の低下に対する抵抗性については、十分に評価できないことが考えられる。

こうした既往の試験方法における課題を解決するため、凍結融解試験方法の開発に際し、a) 水分は試験体の背面側から吸収させること、b) 試験体の表面側の気温と背面側の水温との間に差を設けられること、c) 試験体の背面側からの吸水に際しては水圧を作用させられること、などを条件とした。

#### 3.2 凍結融解試験装置の開発

開発した試験装置（以下、背面吸水式凍結融解試験装置と呼ぶ）は、表面被覆材を施したモルタル試験体の背面側から水分を吸収させ、表面側において温度変化を生じさせることにより、モルタル試験体と表面被覆材との界面付近に凍結融解作用を発生させる試験装置である。

背面吸水式凍結融解試験装置による試験状況の事例を図-7に、本装置による試験方法の概要を図-8に示す。本装置は、気温および湿度の制御が可能な気槽部と、



表面はく離の事例

はく落に進展した事例

図-5 凍害による表面はく離の発生状況



有機系被覆材の付着性低下

無機系被覆材の付着性低下

図-6 表面被覆材の変状の発生状況

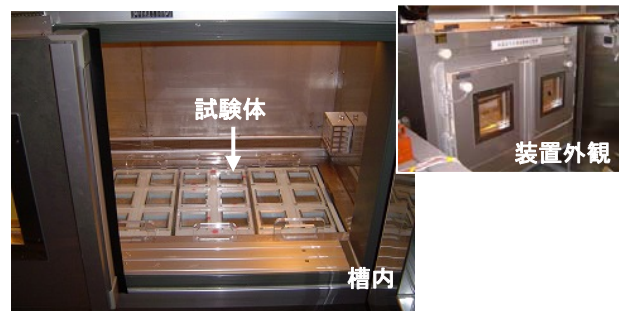


図-7 背面吸水式凍結融解試験装置による試験状況

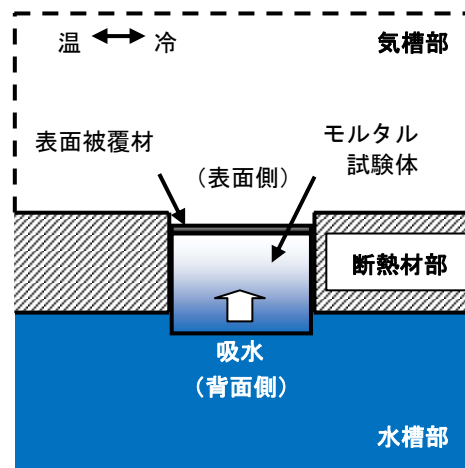


図-8 試験方法の概要

水温の制御が可能な水槽部から構成され、両槽部は断熱材部により分断される。試験体は、断熱材部に、表面被覆材塗布面を気槽部側に向けて設置する。これにより、水槽部側から、即ち試験体の背面側から水分を吸収させることが可能となり、また、気槽部と水槽部との間に温度差を設けることにより、試験体の表面側の気温と背面側の水温との間に差を設けることができる。試験体は、最大30体を同時に設置することができる<sup>4)</sup>。

### 3.3 背面吸水式凍結融解試験装置の劣化促進能力の確認

#### (1) 使用材料および試験体作製方法

試験に用いたモルタル試験体の配合は、JIS R 5201 に規定されるモルタルの配合に準拠し、水セメント比  $W/C=50\%$ 、砂セメント比  $S/C=3.0$  とした。また、凍結融解試験期間中の極度の脆弱化を防止するため、AE 剤をセメント量に対し  $0.01\%$  加え、空気量を  $5.4\%$  とした。試験体の寸法は、縦  $70\text{ mm}$ ×横  $70\text{ mm}$ ×厚さ  $50\text{ mm}$  である。モルタル打設後、7 日間経過後に脱型し、気中で 6 月間の養生を行った。養生期間経過後、試験体の表面をグラインダーにて下地処理し、各補修材料を塗布した。各材料の所定養生期間経過後、凍結融解試験を行った。

試験に用いた補修材料の種別および塗布厚（塗布量）を表-2 に示す。補修材料は、モルタルに対する付着性を発現する機構が異なる 4 種類を選定した。

#### (2) 試験方法

凍結融解試験では、モルタル試験体内に水分を十分に吸収させるため、前工程として水中浸漬を行った。浸漬時間は、コンクリートの毛管浸透性に関する既往の研究論文<sup>5)</sup>を参考に、 $20^\circ\text{C}$  で 7 日間とした。水中浸漬終了後、試験体を背面吸水式凍結融解試験装置の断熱材部に設置し、凍結融解試験を行った。試験条件は、JIS A 1148 および RILEM CDF 試験を参考に、気槽部の温度は最高温度  $20^\circ\text{C}$ 、最低温度  $-20^\circ\text{C}$ 、1 サイクル当たりの所要時間は 3 時間 ( $20^\circ\text{C} \times 0.5$  時間  $\rightarrow 20 \sim -20^\circ\text{C} \times 1.0$  時間  $\rightarrow -20^\circ\text{C} \times 0.5$  時間  $\rightarrow -20 \sim 20^\circ\text{C} \times 1.0$  時間) とし、水槽部の温度は  $2^\circ\text{C}$  とした。表面被覆材（塗布厚  $1\text{ mm}$ ）を用いた予備試験における任意の試験時間（2 サイクル分）の槽内および試験体の温度履歴を図-9 に示す。試験サイクル数は、300 サイクルとした。また、試験に際しては、比較のため、補修材料を塗布しない試験体（無塗布試験体 B）の試験を併せて行った。なお、試験体数は各 3 体とした。本装置の劣化促進能力の判定に際する測定項目は、補修材料およびモルタル試験体における外観変化、吸水率、表面水分率、相対動弾性係数、ならびに付着強さとした。

吸水率 ( $W_a\%$ ) の算出では、JSCE-K 571「表面含浸材の試験方法(案)」6.4 吸水率試験の算出方法<sup>2)</sup>を参考に、凍結融解試験開始後の吸水率を測定することとした。試験開始時の試験体質量 ( $W_{a0}\text{ g}$ ) および試験開始時から所定試験サイクル数経過後の試験体質量 ( $W_{ai}\text{ g}$ ) より、式(1)により算出した。

$$W_a = (W_{ai} - W_{a0}) / W_{a0} \times 100 \quad (1)$$

表面水分率は、高周波容量式表面水分計（ケット科学研究所社製 HI-520 型）を用いて測定した。

相対動弾性係数の算出では、コンクリートの超音波伝播速度と動弾性係数との関係について調べた既往の研究論文<sup>6),7)</sup>を参考に、凍結融解試験開始後の相対動弾性係

表-2 試験に用いた補修材料の種別および塗布厚

記号	種別 (使用材料)	塗布厚 (塗布量)
PU	有機系表面被覆材 (柔軟型ポリウレタン樹脂系)	$150\ \mu\text{m}$
SM	無機系断面修復材 (無収縮モルタル)	$10\text{ mm}$
Silane	シラン系表面含浸材	$200\text{ g/m}^2$
Silicate	けい酸塩系表面含浸材	$250\text{ g/m}^2$

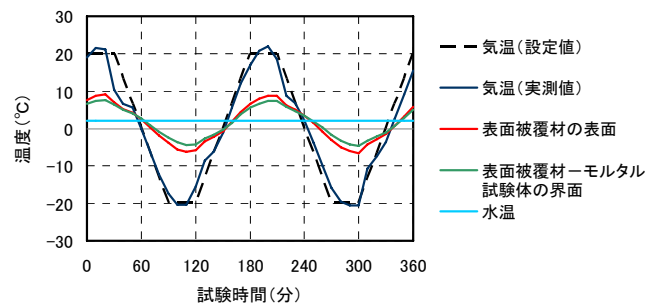


図-9 槽内および試験体の温度履歴

数を測定した。所定サイクル数経過後の超音波伝播速度 ( $V\text{ m/s}$ ) より、式(2)により動弾性係数 ( $E_d\text{ GPa}$ ) を算出し、式(3)により相対動弾性係数を算出した。超音波伝播速度は、超音波試験機（プロセック社製 TICO 型）を用いて測定した。

$$E_d = 4.0387 V^2 - 14.438 V + 20.708 \quad (2)$$

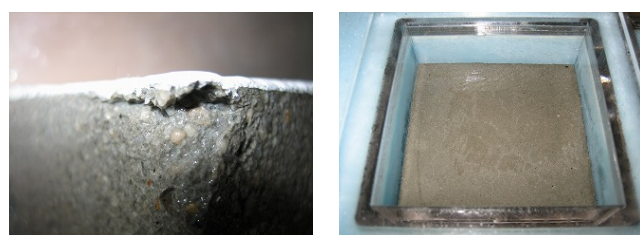
$$\text{相対動弾性係数}(\%) = E_{dn} / E_{d0} \times 100 \quad (3)$$

付着強さは、JSCE-K 531「表面被覆材の付着強さ試験方法(案)」を参考に、試験サイクル数 300 サイクル後の試験体を用いて測定した。試験時の最大荷重 ( $T\text{ N}$ ) より、式(4)により算出した。

$$\text{付着強さ}(\text{N/mm}^2) = T / 1600 \quad (4)$$

#### (3) 試験結果および考察

補修材料およびモルタル試験体における外観変化について、試験サイクル数 202 サイクル後の有機系表面被覆材塗布試験体 PU および無機系断面修復材塗布試験体 SM の状況を図-10 に示す。PU では、界面付近のモルタル試験体の脆弱化と、それに伴う表面被覆材のはく離が確認された。また、SM では、断面修復材表面において



有機系表面被覆材 PU

のはく離

無機系断面修復材 SM

の微細ひび割れ

図-10 試験サイクル数 202 サイクル後の状況

微細ひび割れの発生が確認された。300 サイクル後の状況からは、PU の表面被覆材のはく離および SM の断面修復材の微細ひび割れの進展は確認されたものの、その他の材料において新たな変状の発生は確認されなかった。

吸水率および表面水分率について、試験サイクル数と吸水率との関係を図-11 に、試験サイクル数と表面水分率との関係を図-12 に示す。なお、比較のため、凍結融解試験期間中に継続して室温にて水中浸漬を行った試験体（水中浸漬試験体 N）の試験結果を併記する。いずれの試験体においても、吸水率、表面水分率ともに顕著な変化はみられなかったが、補修材料間には差異がみられた。吸水率では、水中浸漬試験体 N および PU の各試験値は、試験サイクル数の増加とともに緩やかな上昇傾向を示したが、無塗布試験体 B、SM、シラン系表面含浸材塗布試験体 Silane、けい酸塩系表面含浸材塗布試験体 Silicate の各試験値は、試験開始時の値に比べほとんど変化はなかった。これは、凍結時における試験体表面からの水分の逸散が影響したものと考えられる。PU では、試験体表面から水分を逸散させることができないため、N と同様の上昇傾向を示したと推定される。表面水分率では、Silane の試験値が他の試験値に比べ小さい値となった。これは、シラン系表面含浸材が有する撥水効果によるものと考えられる。即ち、Silane では、試験体表面付近に水分を保持することができないため、小さい値になったと推定される。吸水率と表面水分率との関係を図-13 に示す。N と同程度以上に吸水率が高く保持される PU、表面水分率が高く保持される Silicate および SM では、凍結時に試験体表面付近に水分が保持される可能性が高いが、Silane では、凍結時に水分が十分に保持されず、凍結に伴う膨張圧が生じ難い可能性が考えられる。シラン系表面含浸材の凍結融解抵抗性を評価する場合には、試験体の背面側から水圧を作用させるなど、水分を保持させる対策が必要であると考えられる。

相対動弾性係数について、試験サイクル数と相対動弾性係数との関係を図-14 に示す。いずれの試験体においても、相対動弾性係数に顕著な変化はみられなかった。本試験で作製したモルタル試験体には、試験期間中の極度の脆弱化を防止するため、AE 剤を加えている。このため耐凍害性が向上し、モルタル試験体自体の劣化は最小限に抑えられたものと考えられる。外観変化では、補修材料およびモルタル試験体において変状が確認されていることから、モルタル試験体内では緩和された凍結に伴う膨張圧は、補修材料との界面付近や試験体表面においては緩和されることなく、劣化外力として作用したものと推定される。

付着強さについて、試験結果を図-15 に、試験後の状況を図-16 に示す。なお、比較のため、凍結融解試験期

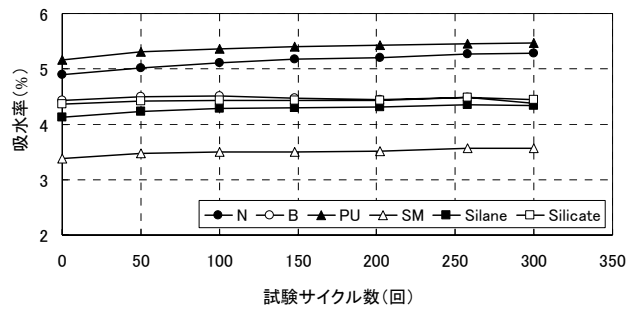


図-11 試験サイクル数と吸水率との関係

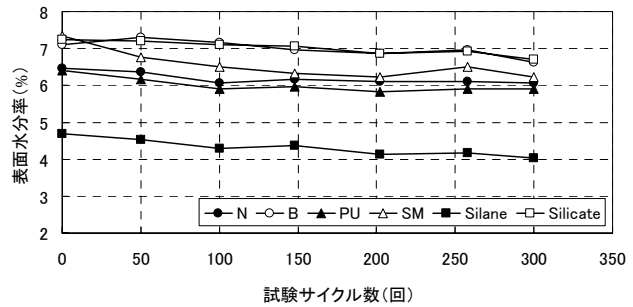


図-12 試験サイクル数と表面水分率との関係

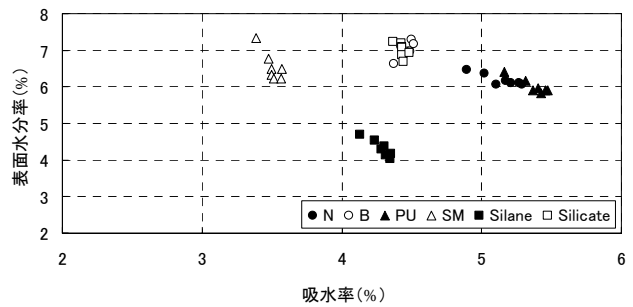


図-13 吸水率と表面水分率との関係

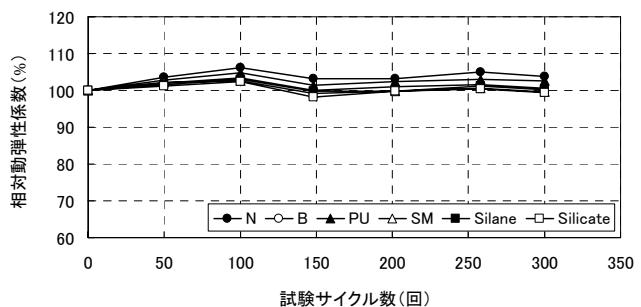


図-14 試験サイクル数と相対動弾性係数との関係

間に継続して室温にて気中に放置した試験体（気中放置試験体 R）の試験結果を併記する。試験後の主な破断状態は、気中放置試験体 R、N、B、PU、Silane、Silicate においてはモルタル試験体内の破断、SM においてはモルタル試験体との界面付近における無機系断面修復材内の破断であった。試験値は総じて大きい値となったが、補修材料間には差異がみられた。R や N に比べ、B の試験値は小さい値となり、凍結融解作用による影響が確認された。また、この傾向は、PU においてより顕著にみられた。モルタル試験体と有機系表面被覆材との界面付近において、凍結融解作用によるモルタルの脆弱化が促

進されたためと考えられる。一方、SM, Silane, Silicateの試験値は、いずれもNやBに比べ大きい値となった。SMでは、試験後の主な破断状態が無機系断面修復材内の破断となり、断面修復材における凍結融解作用が大きくなったことが考えられた。SMの塗布厚は10mmと他の試験体に比べ大きく、凍結時においてもモルタル試験体にまで凍結深が及ばなかった可能性も考えられた。Silaneでは凍結時の水分の不足が、Silicateではモルタル試験体に対する強度の増進効果が影響したものと推定された。なお、試験後の状況からは、凍結融解試験を行ったモルタル試験体の破断面において水分の浸潤がみられ、試験時における試験体内への水分の吸収が確認された。

#### 4. まとめ

本研究の結果から、以下の結論を得た。

- (1) 積雪寒冷地における農業用コンクリート水路にみられる凍害および表面被覆材の変状の発生状況の調査結果から、凍害により表面に変状を生じたコンクリート開水路の側壁では、ひび割れあるいはコンクリートの変質が層状に発生することが確認された。また、こうした変状を発生させる劣化外力は、表面被覆材の付着性を低下させる要因になることが考えられた。
- (2) 開発した表面被覆材の凍結融解試験方法は、有機系表面被覆材のはく離や無機系断面修復材の微細ひび割れを再現できることが分かった。
- (3) 本試験方法では、吸水率、表面水分率および付着強さにおいて補修材料間に差異がみられることが分かった。
- (4) 本試験方法は、有機系表面被覆材の付着強さを低下させることが分かった。
- (5) 本試験方法では、試験体表面付近に水分を保持できないシラン系表面含浸材や、比較的大きな塗布厚を有する無機系断面修復材に対しては、十分な劣化促進効果が得られない可能性があることが分かった。

今後は、農業用コンクリート水路において適用実績を有する表面被覆材の試験・評価を行い、本試験方法の劣化促進能力を確認するとともに、最適な試験条件を確認することが重要であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 例えば、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

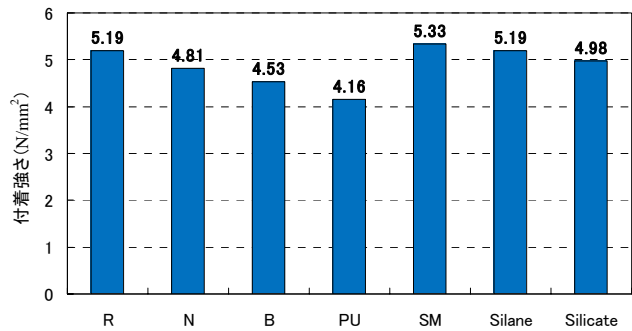


図-15 付着強さ試験結果

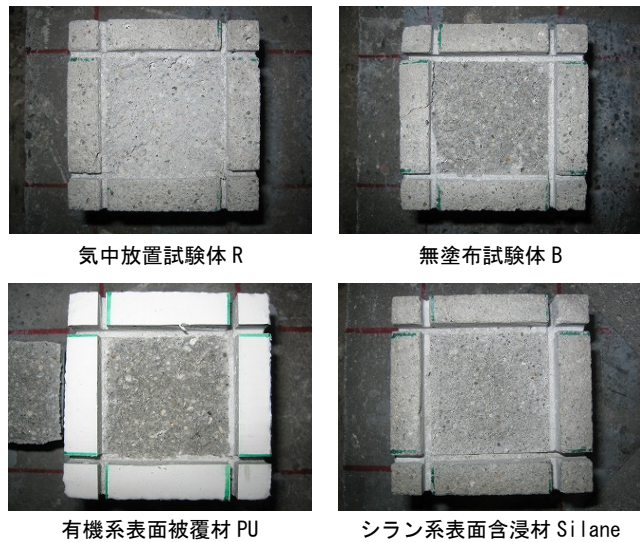


図-16 付着強さ試験後の状況

- 2) 土木学会: 表面保護工法 設計施工指針(案), コンクリートライブラリー119, pp.1-54, pp.55-67, [工種別マニュアル編] pp.1-141, 2005.4
- 3) 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
- 4) 佐藤 智, 石神暁郎, 金田敏和, 中村和正: コンクリート開水路の凍害補修工法の性能評価法に関する一考察, 第60回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集, pp.30-33, 2011.10
- 5) 越川茂雄, 荻原能男: コンクリートの毛管浸透試験方法に関する研究, 土木学会論文集, 第426号, V-14, pp.183-191, 1991.2
- 6) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博: 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002.6
- 7) 緒方英彦, 野中資博, 藤原貴央, 高田龍一, 服部九二雄: 超音波法によるコンクリート製水路の凍害診断, コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集, pp.63-70, 2006.12