

論文 コンクリート開水路における表面保護工法の凍結融解試験方法

石神 暁郎*1・佐藤 智*2・中村 和正*3

要旨: 近年, 積雪寒冷地における農業用コンクリート開水路では, 凍害などにより低下した性能の回復・向上を目的とした種々の表面保護工法の開発・適用が進められているが, その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, これまでに開発を進めてき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おいて, 試験体背面側からの給水条件を改良することによる劣化促進能力の向上を試みた。その結果, 試験体背面側から水圧を作用させた状態で凍結融解を作用させることで, 表面被覆工法に加え, 表面含浸工法や断面修復工法に対してもその付着強さを低下させることができることが分かった。

キーワード: コンクリート開水路, 表面保護工法, 付着耐久性, 凍結融解試験, 吸水試験, 水圧試験

1. はじめに

積雪寒冷地に位置する農業用コンクリート開水路では, 凍害などによるコンクリートの劣化とそれに起因する水路施設としての性能低下が問題となっている。これに対して, 近年, 低下した性能の回復・向上を目的とした種々の表面保護工法の開発・適用が進められている。コンクリート開水路に適用される表面保護工法としては, 有機系および無機系の各表面被覆工法に加え, 表面含浸工法や断面修復工法が適用される場合もある¹⁾。

凍害を対象とした表面保護工法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, 例えば JIS A 1148 や RILEM CIF 試験などの既往の試験方法を活用して評価するケースが多い。こうした試験方法は, 各表面保護工法を構成する材料自体を評価する手法としては有効であるものの, 表面保護工法が施工されたコンクリート躯体に凍結融解が作用した場合の材料の耐久性, 特に付着強さに対する耐久性 (以下, 付着耐久性と呼ぶ) については評価し難いという課題を有している。

これに対して筆者らは, これまでに, 施工後の表面被覆材が受ける劣化外力, 即ち凍結融解の作用による変状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進めてきた。これまでの検討の結果, 開発した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, また, 有機系表面被覆材の付着強さを低下させることができる一方で, 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²⁾。

そこで本研究では, 最初に, 表面保護工法に対して十分な劣化促進効果を得ることを目的として, 1 サイクル

当たりの所要時間を延長した部分浸漬条件下における凍結融解試験を行った。次に, 1 サイクル当たりの所要時間を短縮した部分浸漬条件下における凍結融解試験を行った。さらに, 試験体背面側から水圧を作用させた状態での凍結融解試験を行い, 各凍結融解試験の特性と試験に供した表面保護工法の付着耐久性について考察を行った。

2. 凍結融解試験方法の検討

2.1 表面保護工法に作用する凍結融解

コンクリート開水路に施工された表面保護工法には, 凍結融解の作用によるものと推定される様々な変状がみられる。その中で代表的な変状としては, 表面被覆工法のはく離, 断面修復工法のはく離および微細ひび割れが挙げられる。断面修復工法の中には表面含浸工法を併用する工法も存在するが, こうした工法であってもはく離やひび割れを生じる場合がある (図-1 参照)。

特に積雪寒冷地に位置するコンクリート開水路では, 灌漑期において水路内の流水に曝されるだけでなく, 非灌漑期においても融雪水などに曝されることが考えられ, コンクリート躯体は常に高い含水状態に保持されていることが予想される (図-2 参照)。このため, その撥水効果により表面付近の水分を低減させる表面含浸工法や,



表面被覆工法のはく離

断面修復工法のひび割れ

図-1 表面保護工法に作用する凍結融解による変状

*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上席研究員 博士 (農学)

その大きな塗布厚により凍結深をコンクリート躯体にまで到達させ難くする断面修復工法であっても、凍結融解の作用とそれに伴う変状の発生は避けられないことが考えられる。

2.2 凍結融解試験方法の検討

これまでの検討において開発した、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（以下、背面吸水凍結融解試験と呼ぶ）の概要を図-3に示す。本試験は、図中に示す背面吸水式凍結融解試験装置を用いて行う。本装置は、表面被覆材を塗布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を作用させる試験装置である。本試験は、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、また、有機系表面被覆材の付着強さを低下させることができるものの、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場合がある²⁾。

本研究では、まず、凍結融解の作用時に試験体内に水分を十分に保持させ、表面保護工法に対して十分な劣化促進効果を得ることを目的として、1 サイクル当たりの所要時間を 24 時間とした部分浸漬条件下における凍結融解試験（以下、部分浸漬凍結融解試験 (24h/c) と呼ぶ）を行った。次に、1 サイクル当たりの所要時間を 3 時間とした部分浸漬条件下における凍結融解試験（以下、部分浸漬凍結融解試験 (3h/c) と呼ぶ）を行い、最後に、試験体背面側から水圧を作用させた状態での凍結融解試験（以下、背面水圧凍結融解試験と呼ぶ）を行った。

(1) 部分浸漬凍結融解試験 (24h/c)

部分浸漬凍結融解試験は、部分浸漬法による吸水試験³⁾を行いつつ、気槽部において温度変化を生じさせる試験方法である。試験方法の概要を図-4に示す。

部分浸漬凍結融解試験 (24h/c) は、1 サイクル当たりの所要時間を延長することで、試験体内において高い含水状態を保持することができ、また、現場条件に最も近い条件を再現することが期待できる。本研究では、その他の試験方法における試験結果との比較を行うため、本試験を行った。試験条件は、RILEM CIF 試験および ASTM C672 を参考に、気槽部の温度を最高温度 20℃、最低温度 -20℃、1 サイクル当たりの所要時間を 24 時間 (-20℃ × 16 時間 → 20℃ × 8 時間) とし、試験サイクル数を 300 サイクルとした。

(2) 部分浸漬凍結融解試験 (3h/c)

部分浸漬凍結融解試験 (3h/c) は、部分浸漬凍結融解試験において 1 サイクル当たりの所要時間を短縮した試



融雪水に曝される開水路 融雪水に曝される被覆工法
図-2 積雪寒冷地に位置するコンクリート開水路の非灌漑期の状況

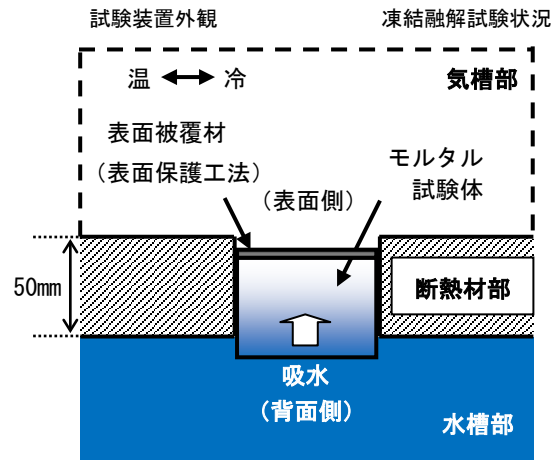


図-3 背面吸水凍結融解試験の概要²⁾

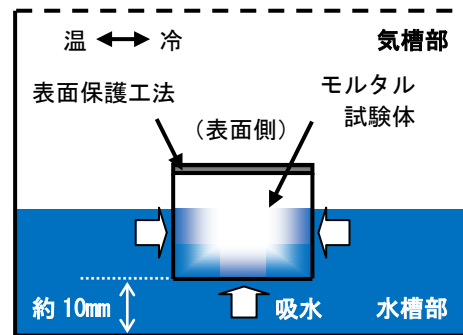


図-4 部分浸漬凍結融解試験の概要

験方法である。試験条件は、RILEM CIF 試験および JIS A 1148 を参考に、気槽部の温度を最高温度 20℃、最低温度 -20℃、1 サイクル当たりの所要時間を 3 時間 (20℃ × 0.5 時間 → 20℃ ~ -20℃ × 1.0 時間 → -20℃ × 0.5 時間 → -20℃ ~ 20℃ × 1.0 時間) とし、試験サイクル数を 300 サイクルとした。

(3) 背面水圧凍結融解試験

背面水圧凍結融解試験は、試験体を耐圧容器内に設置

し、試験体の背面側および側面側から水圧を作用させる水圧試験を行いつつ、気槽部において温度変化を生じさせる試験方法である。試験方法の概要を図-5に示す。試験条件は、部分浸漬凍結融解試験(3h/c)と同様に、RILEM CIF試験およびJIS A 1148を参考にして、気槽部の温度を最高温度20℃、最低温度-20℃、1サイクル当たりの所要時間を3時間(20℃×0.5時間 → 20℃～-20℃×1.0時間 → -20℃×0.5時間 → -20℃～20℃×1.0時間)とし、試験サイクル数を300サイクルとした。作用させる水圧は、背面土中の地下水水位と水路底盤面との水頭差を2mとした場合に作用する圧力が0.02MPaであることから、0.02MPaとした。

3. 実験概要

3.1 使用材料

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。セメントの種類は、普通ポルトランドセメントである。また、凍結融解試験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%添加し、空気量を5.4%に調整した。試験体の寸法は、縦70mm×横70mm×厚さ50mm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、各表面保護工法を施した。

試験に供した表面保護工法の種別および塗布厚(塗布量)を表-1に示す。表面保護工法は、いずれも市販されている材料を用い、塗布厚(塗布量)は各カタログに記載されている標準値としている。1m²当たりの標準値から試験体1体当たりの塗布量を算出し、塗布を行った。表面保護工法は、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。有機系被覆工法PUは、コンクリート開水路に限らず、凍害を対象とした工法として一般的に用いられているものである。断面修復工法SMは、モルタル注入工法などで用いられる無収縮モルタルを用いるものである。主に予防保全対策に用いられる表面含浸工法からは、シラン系表面含浸工法Silaneおよびけい酸塩系表面含浸工法Silicateの2種類を選定した。シラン系表面含浸工法では撥水効果が期待できる工法を、けい酸塩系表面含浸工法では塗布面において強度の増進効果が期待できる工法を選定している。試験体数は、試験方法毎に各3体とした。なお、Silicateでは背面水圧凍結融解試験は行っていない。

3.2 試験方法

各凍結融解試験に際しては、モルタル試験体内に水分を保持させ易くするため、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

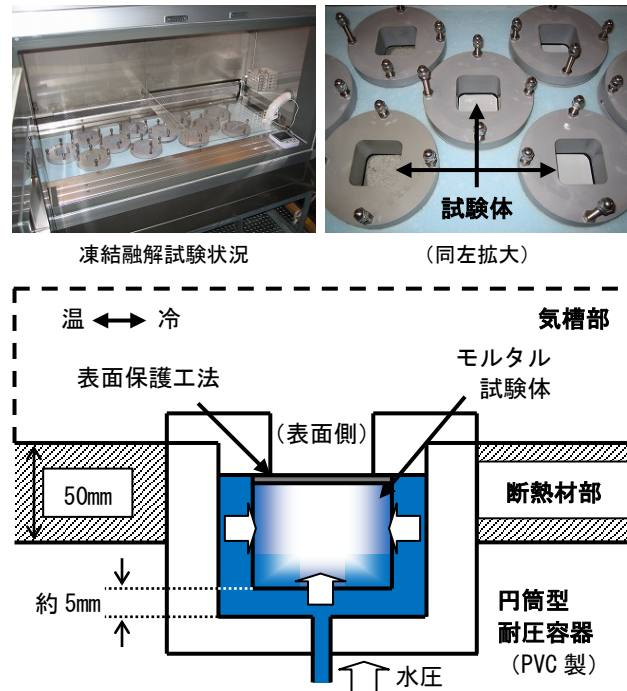


図-5 背面水圧凍結融解試験の概要

表-1 試験に供した表面保護工法の種別・塗布厚

記号	種別 (使用材料)	塗布厚 (塗布量)
PU	有機系被覆工法 (柔軟型ポリウレタン樹脂系)	150 μm
SM	断面修復工法 (無収縮モルタル)	10 mm
Silane	シラン系表面含浸工法	200 g/m ²
Silicate	けい酸塩系表面含浸工法	250 g/m ²

往の研究結果⁴⁾を参考に、20℃で7日間とした。水中浸漬終了後、前述の試験条件にて各凍結融解試験を行った。各試験における任意の試験時間(1または2サイクル分)の槽内および試験体表面の温度履歴を図-6に示す。部分浸漬凍結融解試験(24h/c)では、凍結行程において水槽内の水がほぼ全て凍結した。なお、各試験に際しては、比較のため、表面保護工法を塗布していない試験体(無塗布試験体B)の試験を併せて行った。

凍結融解試験に際しての測定項目は、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を参考に、凍結融解試験開始後の吸水率を測定した。試験開始時の試験体質量(W_{a0}g)および試験開始時から所定サイクル数経過後の試験体質量(W_{ai}g)より、式(1)を用いて算出した。

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

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、試験体表面において測

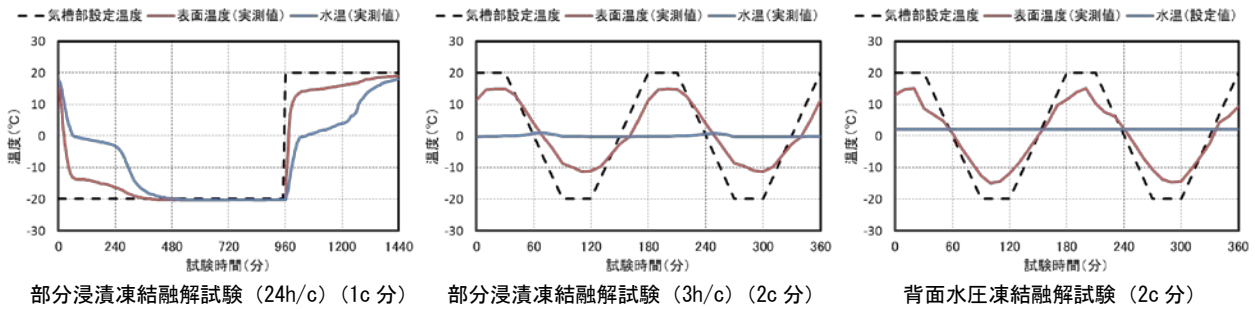


図-6 槽内および試験体表面の温度履歴

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結果^{5), 6)}を参考に、凍結融解試験開始後の相対動弾性係数を測定した。所定サイクル数経過後の超音波伝播速度 (V m/s) から、式(2)により動弾性係数 (E_d GPa) を算出し、式(3)により相対動弾性係数を算出した。 E_{dn} は試験サイクル数 n サイクル後の動弾性係数、 E_{d0} は試験開始時の動弾性係数である。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、発・受振子を試験体側面中央に配置して、透過法により測定した。

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

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

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 N) から、式(4)により算出した。

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

4. 実験結果および考察

各凍結融解試験における試験サイクル数と吸水率との関係を図-7~10に、表面水分率との関係を図-11~14に、相対動弾性係数との関係を図-15~18に、付着強さの試験結果を図-19に示す。図-7, 11, 15は、筆者らが過年度において取得した試験結果であり、比較対象として示すものである。図中のNは、背面吸水凍結融解試験期間 (約 900 時間) 中に継続して室温にて水中浸漬を行った試験体の試験結果である。また、図-19においても過年度の試験結果を併記している²⁾。

4.1 凍結融解試験方法の特性

吸水率は、試験期間中に凍結融解の作用に寄与する水分が保持されるか否かを確認することを目的として測定している。いずれの凍結融解試験においても顕著な変化はみられなかったが、背面吸水凍結融解試験においてPUのみにみられていた緩やかな上昇傾向が、背面水圧凍結融解試験では全ての試験体でみられるようになった。凍結時における試験体表面からの水分の逸散の影響による含水状態の低下が、水圧の作用により解消されたためと考えられる。水分を逸散させることができないPUの上

昇傾向は保持される一方で、試験体表面付近に水分を保持させることが難しかった Silane においても明確な上昇傾向がみられるようになった。一方、部分浸漬凍結融解試験 (24h/c) では、試験サイクル数 164 サイクル以後、低下傾向がみられた。これは、含水状態の低下によるものではなく、試験体自体の質量の減少が影響したためと

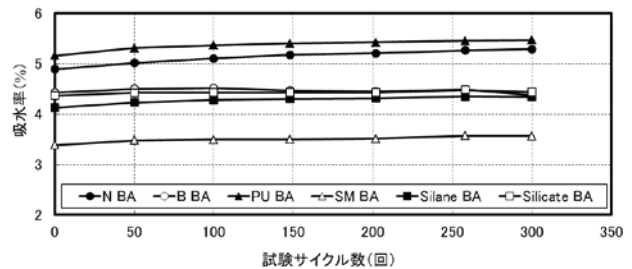


図-7 背面吸水凍結融解試験 吸水率²⁾

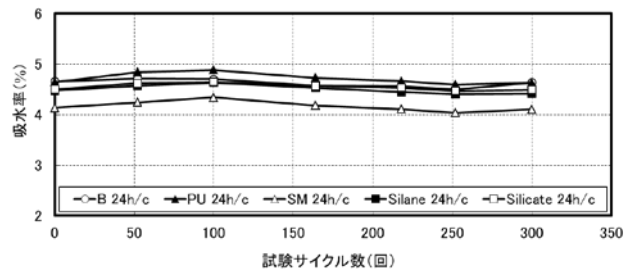


図-8 部分浸漬凍結融解試験 (24h/c) 吸水率

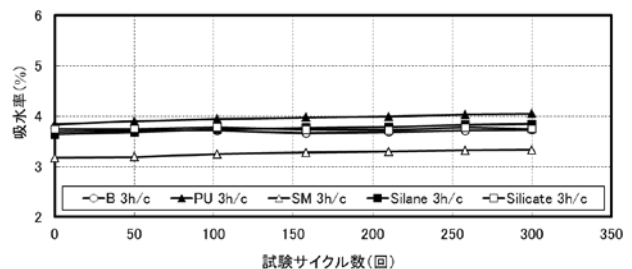


図-9 部分浸漬凍結融解試験 (3h/c) 吸水率

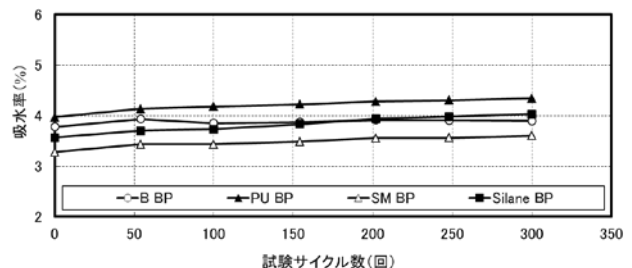


図-10 背面水圧凍結融解試験 吸水率

考えられる。表面保護工法との界面付近においてモルタル試験体のスケーリングが確認されており、このため低下傾向を示すようになったと推定される。

表面水分率は、試験体の中でより表面に近い部分に水分が保持されているか否かを確認することを目的として測定している。背面吸水凍結融解試験においてほぼ全ての試験体でみられていた低下傾向が、特に部分浸漬凍結融解試験（3h/c）、背面水圧凍結融解試験においてみられなくなった。Silane においても、試験値は他の試験体に比べ小さいものの、試験体表面付近に一定の水分が保持されるようになったと考えられる。

相対動弾性係数は、いずれの凍結融解試験においても顕著な変化はみられなかったが、背面水圧凍結融解試験において若干の上昇がみられた。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 剤を添加しており、このためモルタル試験体の劣化は最小限に抑えられていることが考えられるが、その状況下で含水状態が上昇することにより、試験値も上昇したものと推定される。外観上スケーリングが確認される部分浸漬凍結融解試験（24h/c）においても低下傾向はみられておらず、本試験において相対動弾性係数を判定指標とすることは難しいものと考えられる。

付着強さは、各表面保護工法の付着強さ、即ち試験体の表面付近の引張強さを低下させるか否かを確認することを目的として測定している。試験後の主な破断状態は、B、PU、Silane、Silicate ではモルタル試験体内の破断、SM ではモルタル試験体との界面付近における断面修復材内の破断であった。いずれの凍結融解試験においても、背面吸水凍結融解試験では難しかった、Silane や SM の付着強さ、表面付近の引張強さを低下させることができ

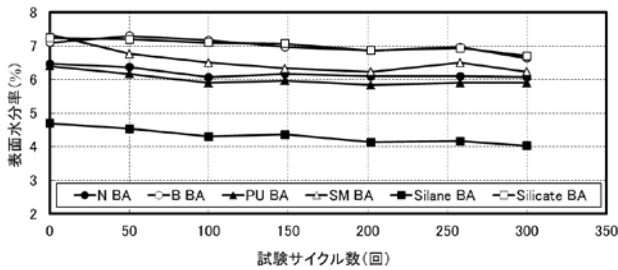


図-11 背面吸水凍結融解試験 表面水分率²⁾

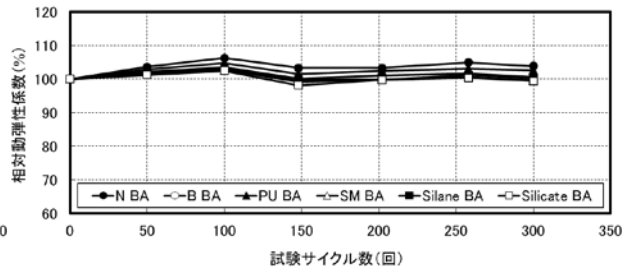


図-15 背面吸水凍結融解試験 相対動弾性係数²⁾

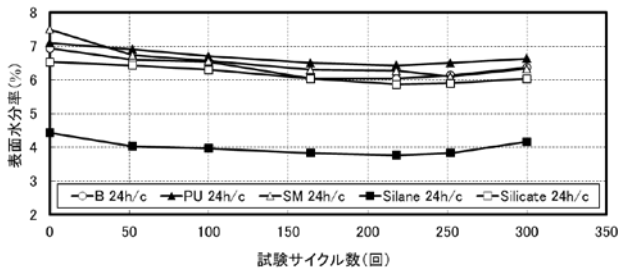


図-12 部分浸漬凍結融解試験（24h/c）表面水分率

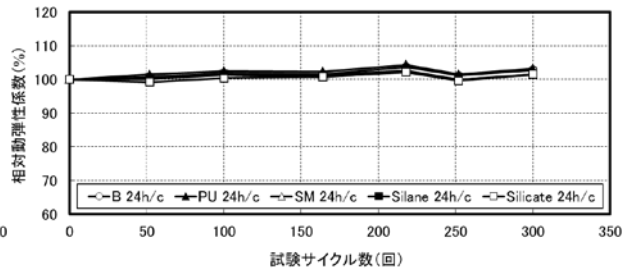


図-16 部分浸漬凍結融解試験（24h/c）相対動弾性係数

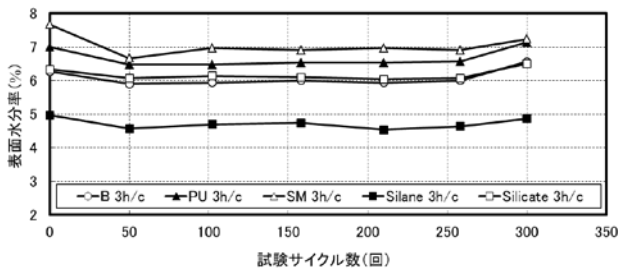


図-13 部分浸漬凍結融解試験（3h/c）表面水分率

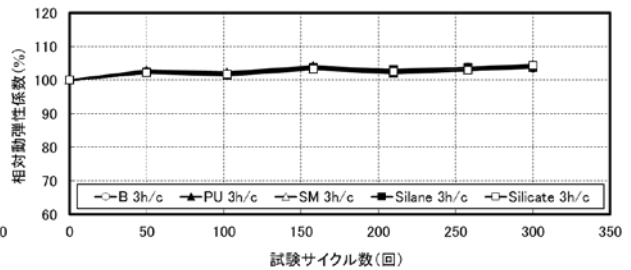


図-17 部分浸漬凍結融解試験（3h/c）相対動弾性係数

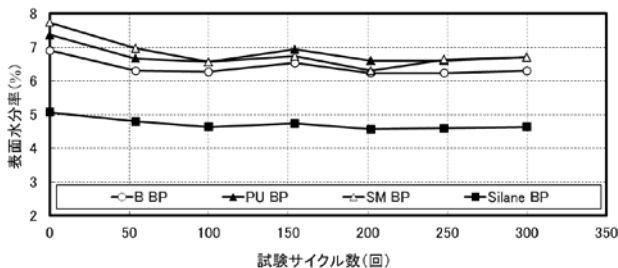


図-14 背面水圧凍結融解試験 表面水分率

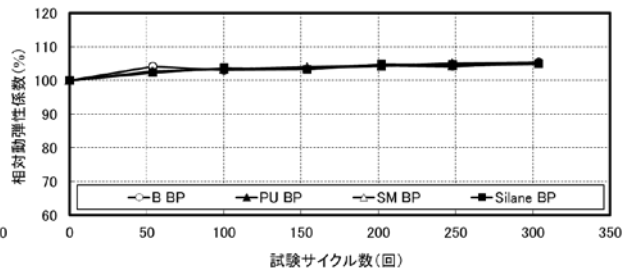


図-18 背面水圧凍結融解試験 相対動弾性係数

ることが分かった。背面吸水凍結融解試験において挙げられていた、試験体表面付近における水分の保持や、表面保護工法とモルタル試験体との界面付近における凍結融解の作用といった課題が解決されたものと考えられる。

部分浸漬凍結融解試験(24h/c)は、前述のように、現場条件に最も近い条件を再現できるという利点がある。被着対象であるモルタル試験体内の含水状態を高く保持できる、表面保護工法を構成する材料の養生促進効果も再現できるという長所を持つ一方で、試験期間が長期に及ぶため性能評価手法としては適用し難いという短所を併せ持つ。背面水圧凍結融解試験は、所要の劣化促進能力を有しており、また、試験期間も短期であるため優れた性能評価手法といえる。しかし、圧力容器など専用機器を必要とするため、汎用化を図る上で課題を有する。これは背面吸水凍結融解試験にもいえることである。今後は、こうした課題の解決を念頭に置いた試験方法の開発が必要であると考えられる。

4.2 表面含浸工法および断面修復工法の付着耐久性

本研究の試験結果および過年度に取得した試験結果²⁾からは、総じて高い試験値が得られた付着強さの試験結果からも明らかのように、凍結融解の作用のみをもって表面含浸工法や断面修復工法の付着強さ、即ち試験体の表面付近の引張強さを著しく低下させることは難しいことが分かった。表面含浸工法ではその撥水効果により凍結融解が作用し易い表面付近の水分を低減させることができ、断面修復工法ではその塗布厚により凍結深を躯体にまで到達させ難くすることが期待できる。

一方で、積雪寒冷地に位置するコンクリート開水路に施工されたこれらの工法に、はく離などの付着強さや表面付近の引張強さの低下に起因する特有の変状が発生しているのもまた事実である。今後は、これら変状の発生原因を解明するとともに、水路内の流水に曝されることによる化学的な変質を伴う摩耗現象⁷⁾など、他の劣化外力との複合劣化も含めた試験方法の開発も必要であると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究の結果から、以下の結論を得た。

- (1) 部分浸漬凍結融解試験(24h/c)は、モルタル試験体内の含水状態を高く保持でき、表面含浸工法や断面修復工法の付着強さを低下させることができることが分かった。
- (2) 背面水圧凍結融解試験は、試験体背面側から水圧を作用させた状態で凍結融解を作用させることで、表面含浸工法や断面修復工法の付着強さを低下させることができることが分かった。

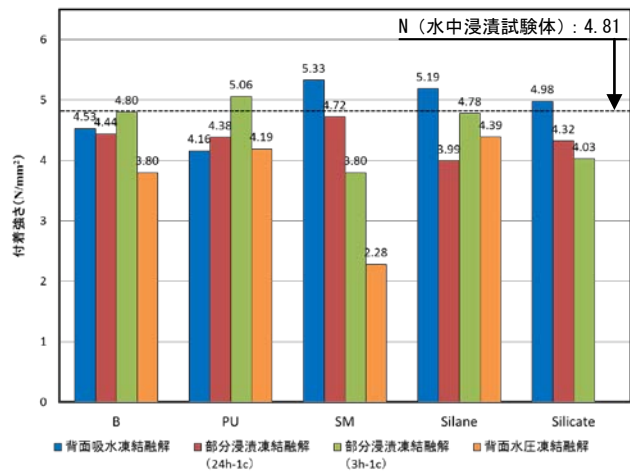


図-19 付着強さ試験結果

今後は、汎用化を図ることを念頭に置いた専用機器を必要としない試験方法の開発、他の劣化外力との複合劣化も含めた試験方法の開発が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、稲葉健司、國見圭嗣：コンクリート開水路の凍害対策工法の施工事例、第61回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集、pp.24-29、2012.10
- 2) 石神暁郎、佐藤 智、金田敏和、中村和正：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.1、pp.1648-1653、2012.7
- 3) 笠井芳夫編：コンクリート総覧、技術書院、pp.442-452、1998.6
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 石神暁郎、森 充広、渡嘉敷勝、増川 晋：農業用水路コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.805-810、2005.6