論文　脆弱部を改善した補修箇所の凍害環境下での耐久性に関する検討

宇野　剛志[*1]・内藤　勲[*2]・横田　弘[*3]

要旨：積雪寒冷地でのコンクリート構造物の断面修復では，断面修復材が母材コンクリートとの界面から早期に剥離する再劣化事例が散見される。再劣化の一因は脆弱部の残存と考えられるが，その改善策は確立されていない。本研究では，断面修復前の母材コンクリートに残存する脆弱部を表面改質材あるいは表面強化材を用いて改善して再劣化を防止することを目的に，改善前後のスケーリング量，超音波伝播速度，透水係数，内部観察を計測して改善部の耐凍害性の検討を行った。その結果，脆弱部の改善によって内部のひび割れが抑制され，凍結融解後も再劣化の発生を抑制できることを確認した。

キーワード：断面修復工法，再劣化，表面改質材，表面強化材，凍結融解試験

1. はじめに

厳しい環境下に置かれたコンクリート構造物には設計時の想定を超えて劣化が進行する事例が散見され，このような場合には適切な補修，補強等の対策を施す必要がある。補修対策の一つである断面修復工法は，母材コンクリートの劣化箇所を劣化因子ごと除去し，断面修復材を用いて原形断面に復元する工法で，コンクリートに大きな損傷が見られる場合等に有効な補修方法である。しかし，積雪寒冷地での断面修復では，施工後に断面修復材の剥離や浮き等が生じる事例が散見される[1)2)]。このような損傷は，はつり不足による劣化部の残存や，はつり作業によって生じた微細ひび割れ等の脆弱部が弱点となって凍害劣化が内側から進行し，母材コンクリートと断面修復材との一体化を阻害したことに起因すると考えられる[3)]。しかし，劣化の範囲や深さは一様ではなく，これらを厳密に特定する技術は未だ確立されていないことから，実際のはつり作業において，はつり表面の脆弱部を排除しきれない場合があると考えられる。

この問題に対して著者らは，はつり後の母材コンクリートに生じた脆弱部を改善する手法[4)]の有効性を実験的に検討し，脆弱部改善によるコンクリート界面の一体性評価を行ってきた[5)]。本研究は，凍害劣化により生じた脆弱部を模擬した供試体に表面改質材および表面強化材（以下，改質材および強化材）を塗布し，改善された部分の凍結融解試験前後における耐久性について検討し，考察するものである。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

凍害劣化により生じた脆弱部を模擬した供試体は次のように作製した。JIS R 5210 に規定される普通ポルトランドセメント，小樽市見晴産の粗骨材（密度 2.68g/cm^3）と苫小牧産の細骨材（密度 2.69g/cm^3）を用いて，**表－1** に示す配合のコンクリートにより，100mm×100mm×400mm の角柱供試体を作製した。なお，凍害劣化が生じやすいように AE 剤を使用しない配合とした。これを材齢 28 日まで水中養生し，半分に切断して 100mm×100mm×200mm の角柱供試体に加工した。改質材あるいは強化材を塗布する 1 面（以下，試験面）において，**図－1** に示すように，深さ 20mm の部分を凍害劣化させるようにした。試験面は型枠底面として試験面から凍害劣化を進行させるため，他の 5 面にはエポキシ樹脂系の接着剤による保護コーティングを施した。ただし，側面は試験面から深さ 20mm を残してコーティングした。この供試体に対し，RILEM 提案の CDF 試験[6)]に準拠して凍結融解試験（以下，CDF 試験）を実施した。試験水には濃度 3% の NaCl 水溶液（以下，塩水）を用いた。供試体の試験面

表－1　コンクリートの配合

W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m^3)				空気量(%) ※AE剤なし
		W	C	S	G	
55	45	165	300	875	1062	設計値：2

表－2　改質材および強化材の性質と塗布量

名前	改質材A	改質材B	強化材C	強化材D
主成分	けい酸リチウム	けい酸ナトリウム	エポキシ樹脂	
硬化システム	固化型	反応型	湿気硬化型	反応固化型
粘度 (mPa/s)	10以下	-	150±100 (23℃)	300±200 (20℃)
曲げ強さ (N/mm^2)	-	-	2.6	70以上
実際の塗布量 (g/m^2)	400	400	300	300

*1 北海道大学大学院　工学院北方圏環境政策工学専攻　修士課程　(学生会員)
*2 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所　耐寒材料チーム　主任研究員　(正会員)
*3 北海道大学大学院　工学研究院北方圏環境政策工学部門　教授　(フェロー会員)

から深さ 5mm を水中に浸漬し，1 週間吸水させた後，CDF 試験を 14 サイクル（1 日 2 サイクル）実施して試験面を凍害劣化させた劣化供試体を作製した。

2.2 表面改質材と表面強化材の種類と性質

本研究では，2 種類の改質材と 2 種類の強化材を使用した。改質材は材料自体の乾燥により固化が進行してコンクリート内部を緻密化する固化型けい酸塩系含浸材，およびコンクリート中の水酸化カルシウムとの化学反応により固化する反応型けい酸塩系含浸材の 2 種類とした。強化材は有機系の含浸系塗布材とした。**表－2** にこれらの種類と主な諸元を示す。改質材 A は，主成分がけい酸リチウムの固化型けい酸塩系含浸材，改質材 B は，主成分がけい酸ナトリウムの反応型けい酸塩系含浸材である。強化材 C は，主成分をエポキシ樹脂とする一液型の湿気硬化型含浸系塗布材であり，強化材 D は強化材 C と同様にエポキシ樹脂を主成分とした主剤と硬化剤の二液混合による反応硬化型含浸系塗布材である。両者の性能の相違点は，強化材 D の方が強化材 C よりも粘度が若干高く，硬化後の曲げ強さが非常に大きいことである。

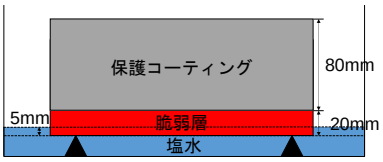
2.3 改質材および強化材の塗布方法

改質材および強化材の塗布は，**図－2** に示すように，試験面を横向きにして側面にした状態で刷毛を用いて行った。なお，供試体への塗布は，CDF 試験で劣化させた試験面を超音波洗浄し，20℃の恒温室で 7 日間自然乾燥させた後に行った。側面に塗布した理由は，断面修復材の再劣化により剥離・落下する被害が想定される補修面が実構造物の側面および下面や天井面に多い状況を模擬するためである。実際の塗布量は，改質材および強化材それぞれの標準塗布量に準じた量とした。改質材および強化材を塗布後，塗布面を側面としたままで供試体をビニールで覆い，20℃の恒温室で 14 日間養生した。

2.4 再 CDF 試験および試験ケース

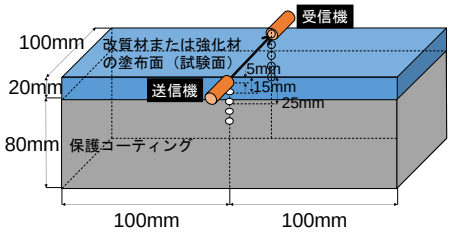
塗布養生後の供試体に再度凍結融解作用を与えて再劣化を生じさせる目的で，**図－1** に示す塗布前の CDF 試験と同様に母材コンクリートの試験面から 5mm までを塩水に浸漬させ，7 日間静置した後，再び CDF 試験を 14 サイクル（1 日 2 サイクル）実施した（以下，再 CDF 試験）。

試験ケースは，無塗布（N）の供試体 N-00，N-01，N-02，改質材 A を塗布した供試体 A-01，A-02，改質材 B を塗布した供試体 B-01，B-02，強化材 C を塗布した供試体 C-01，C-02，強化材 D を塗布した供試体 D-01，D-02 とした。ここで，劣化させなかったものを 00，劣化後に改質材あるいは強化材を塗布したもの（N については塗布を行っていない）を 01，再 CDF 試験後のものを 02 と表記した。なお，各実験ケースの供試体の数はそれぞれ 1 体ずつとした。

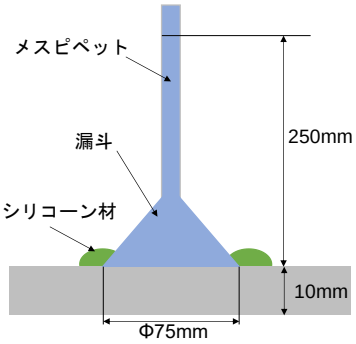


図－1　CDF 試験および再 CDF 試験

図－2　改質材および強化材の塗布の様子



図－3　超音波伝播速度の測定方法



図－4　透水試験の方法

2.5 評価試験の方法

(1) スケーリング量の測定

スケーリング抵抗性を評価するため，スケーリング量の測定を行った。測定方法は，試験面より剥落したスケーリング片を採取してイオン交換水で洗浄後，100±5℃の乾燥機で 24 時間乾燥させてスケーリング片の乾燥質量を測定した。その乾燥質量を試験面積で除し，単位面積あたりのスケーリング量（g/cm^2）に換算した。測定は CDF 試験後および再 CDF 試験後のそれぞれで実施した。

(2) 超音波伝播速度の計測

母材コンクリートの劣化状況を評価する方法として，既往の研究[7)8)]を参考に，**図－3** に示すような超音波透過法を用いて超音波伝播速度の計測を行った。測点は母材コンクリートの試験面から深さ方向に 5～45mm の範囲で，10mm 毎の 5 測点とした。なお，25mm 以深の測定

は，保護コーティングを介して行った。計測は，CDF 試験後，改質材あるいは強化材の塗布後，再 CDF 試験後に行い，分子に改質材あるいは強化材の塗布後の値を，分母に CDF 試験後の値をとったものを改善比，分子に再 CDF 試験後の値を，分母に CDF 試験後の値をとったものを再劣化比として算出した。なお，CDF 試験後および再 CDF 試験後の計測は，CDF 試験終了後に 20℃の恒温室で 12 時間自然乾燥した後に行い，改質材あるいは強化材の塗布後の計測は前述した養生日数経過後に行った。

(3) 透水係数の測定

凍結融解前後における改善部の緻密性を評価するため，**図－4** に示すように JIS A 6909 透水試験 B 法に準じて初期と 24 時間後の水頭高さとの差から透水係数を算出した。なお，透水係数の測定に当たっては，断面が 80mm×100mm，厚さが 10mm となるよう，試験面より深さ 0～10mm，15～25mm，30～40mm のそれぞれの深さにおける透水係数を測定した。深さが連続していないのは加工の際に使用するコンクリートカッターの刃厚により 5mm 程度の欠損が生じたためである。

(4) 脆弱部の改善状況の内部観察確認

凍害劣化により生じた脆弱部のひび割れを対象に，改質材あるいは強化材の浸透・改善状況を確認するため，走査型電子顕微鏡（以下，SEM）を用いて試験面から 5，15，25，35mm の深さにおける供試体内部の観察を行った。なお，試験片は供試体試験面の中央付近で採取し，観察に際して試料室内は完全に真空状態にせず，低真空状態にして行った。

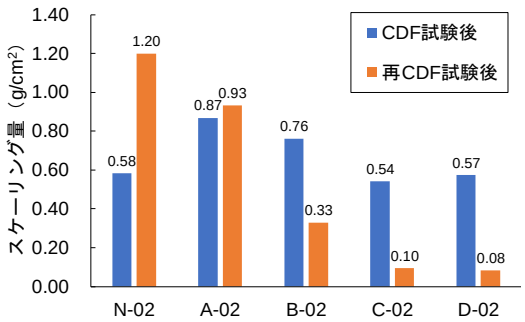
3. 試験結果

3.1 脆弱部の改善によるスケーリング量の変化

図－5 に各供試体の CDF 試験後に生じたスケーリング量および再 CDF 試験後の新たに生じたスケーリング量を示す。無塗布の供試体 N-02 においては，再 CDF 試験後におけるスケーリング量が CDF 試験後と比較して約 2.05 倍となった。

改質材を塗布した供試体において，改質材 A を塗布した供試体 A-02 では再 CDF 試験後におけるスケーリング量が CDF 試験後の約 1.07 倍，改質材 B を塗布した供試体 B-02 では 0.43 倍の結果となった。けい酸塩系改質材に関する既往の研究では，塗布供試体が無塗布供試体よりも凍結融解作用によるスケーリングが促進するとの報告がある [9)10)]．今回，A-02 ではその傾向が見られたが，B-02 ではスケーリング量が減少したことから，改質材 B により脆弱部が改善されたことでスケーリングの抑制に寄与した可能性が考えられる。

一方，強化材を塗布した供試体 C-02 および D-02 におけるスケーリング量は，CDF 試験後と再 CDF 試験後と



図－5　スケーリング量の変化

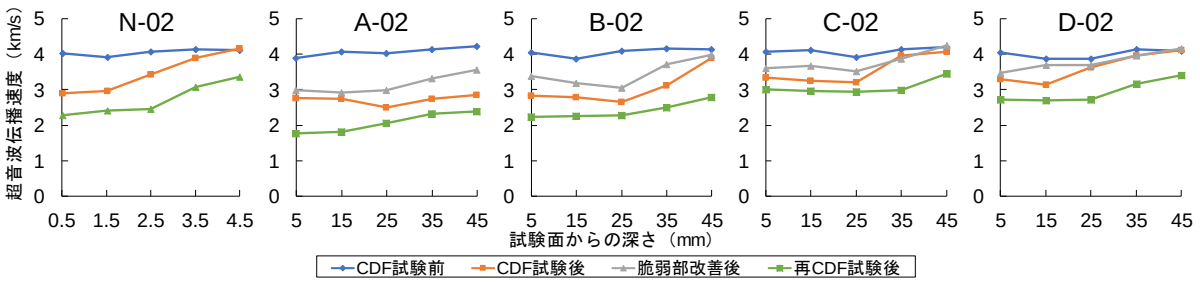
比較して強化材 C は約 0.18 倍，強化材 D では約 0.14 倍となった。このことから，強化材の塗布によってスケーリングは大幅に抑制することができたと言える。

3.2 超音波伝播速度による改善深さの評価

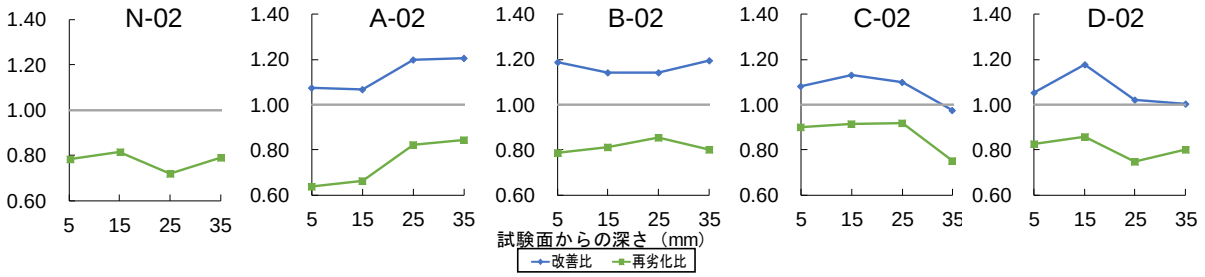
図－6 に各供試体の CDF 試験前後，改善後，および再 CDF 後の超音波伝播速度（以下，速度）の変化を示す。CDF 試験前の健全なコンクリートにおける速度は約 4km/s であり，CDF 試験後は劣化により試験面付近では 3km/s 前後に低下している。A-02 を除いて深さ方向に徐々に速度が上昇しているのは，試験面から劣化が進行していることを表している。したがって，試験面から深さ 35～45mm 程度まで劣化が進行したと推測される。なお，A-02 では試験面から深さ 45mm 付近においても速度が 3km/程度であることから，他の供試体よりも CDF 試験後の劣化深さが大きかったと考えられる。塗布後はそれぞれの供試体で CDF 試験後よりも速度が上昇しているため，塗布によって劣化した脆弱部を改善できていると考えられるが，劣化前の健全なコンクリートの速度までは上昇していない。また，すべての供試体で再 CDF 試験後は CDF 試験後よりも速度が低下した。

図－7 に改善比と再劣化比を示す。改善比は CDF 試験後と塗布後の速度比であるため，改善比が 1.00 よりも大きいほど塗布材が浸透して改善されたと考える。B-02 では試験面から 35mm 付近まで，C-02 では試験面から 25mm まで，D-02 では試験面から 15mm までにおいて，改善比が 1.00 以上となっていることから，改質材あるいは強化材の塗布により，劣化した脆弱層を改善できていると言える。A-02 は試験面付近の改善比が低く，深さ 25～45mm の改善比が大きくなっている。これは，試験面付近では塗布後に改質材が下に流れて浸透量が結果的に少なくなったが，塗布時に深い位置まで浸透した改質材は内部に留まったことが原因であると推測する。

次に再劣化比は，CDF 試験後と再 CDF 試験後の速度比であり，再劣化比が 1.00 を下回ると再劣化が生じていることを表す。無塗布の N-02 では試験面から深さ方向に一様に再劣化比が 0.80 程度まで低下していることから，測定した深さ 45mm 程度までは再劣化が進行したと



図－6　超音波伝播速度の測定結果



図－7　改善比と再劣化比と劣化比

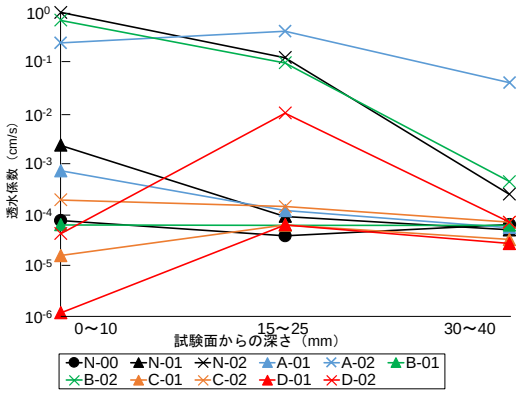
言える。塗布供試体の再劣化比は無塗布供試体の 0.80 よりも上回っている。なお，A-02 では改善比が 1.00 以上となった試験面から深さ 25～45mm では N-02 の再劣化比を上回っているが，試験面から 15mm までの深さでは N-02 の再劣化比を下回っている。これは前述したように，試験面付近の改質材が下に流れて浸透量が減少し，脆弱部の改善が不十分となったためと考えられる。なお，すべての塗布供試体の再劣化比は，試験面から深さ方向に改善比とほぼ同じ傾向を示していることから，脆弱部の改善が母材コンクリートの耐凍害性を向上させたと言える。

以上の結果より，改質材および強化材を浸透させることで脆弱部を改善し，母材コンクリートの耐凍害性を向上できることを確認した。しかし，今回の試験条件においては，脆弱部を健全なコンクリートの状態まで改善できていないため，再 CDF 試験後に再劣化の程度が大きくなったと思われる。

3.3 透水係数の変化

図－8 に各供試体のそれぞれの深さにおける透水係数を示す。透水係数が小さいほど空隙が少なく緻密化されていることを表す。無塗布の供試体において，N の透水係数の平均は 6.00×10^{-5}cm/s であった。N-01 においては透水係数が深さ方向に減少しており，劣化が試験面から内部にかけて進行していることがわかる。N-02 においては N-01 よりも透水係数が大きく増加していることから，さらに空隙等が多くなり劣化の程度が大きくなったと推測できる。

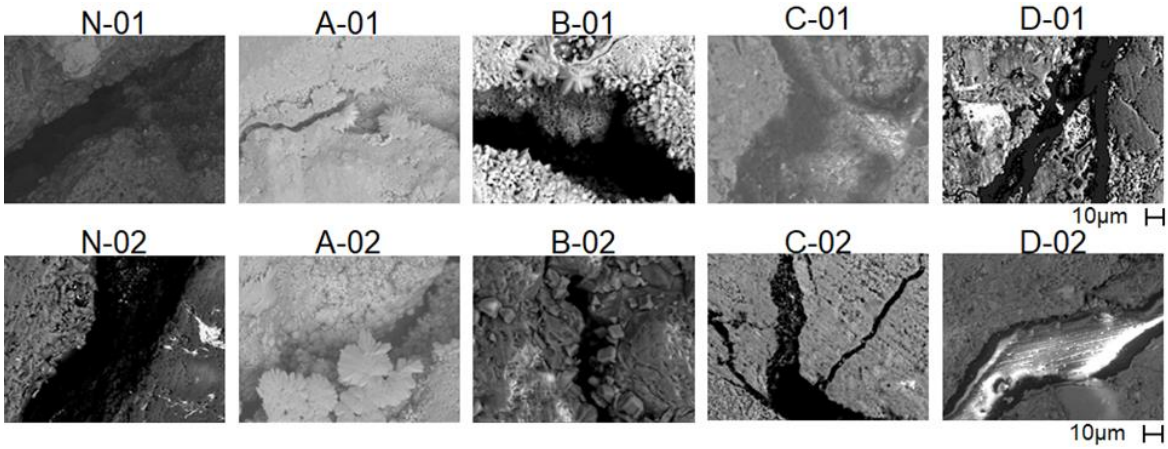
A-01 では，N-01 と同様に試験面に近いほど透水係数が増加する傾向が見られた。A-02 では深さ 15～25mm の



図－8　透水係数の測定結果

透水係数が N-02 と比較して減少しているが，既往の研究では，改質材を塗布した場合に剥離量が増加するメカニズムの理由が改善された層と改善されていない層の境界での凍結水量の変化が大きいとの指摘[11]があることから，改質材 A では表層の改善比が低い層と内部の改善比の高い層との境界で再劣化が大きく進行したと考えられる。

B-01 では，劣化していない N-00 と試験面から深さ 40mm まで同程度の透水係数であることから，脆弱部の改善が試験面付近だけでなく内部にも及んでいることが伺える。これは超音波測定での改善比の結果とも一致する。ここで再 CDF 試験後の B-02 では，試験面付近の透水係数が大きく増加するが，深さ 15～25mm では透水係数が減少している。これは反応型である改質材 B が，再 CDF 試験によって新たなひび割れが生じた際に未反応分が内部に浸透し脆弱部を改善したことによるものと考えられる。ただし，今回の試験条件では改質材 A と同様に脆弱部の改善が不十分であり，再劣化が大きく生じる



図－9　SEM による内部観察写真

結果となった。なお，今回の結果において，改質材 A の方が改質材 B よりも若干劣る結果となったが，改質材 A が試験面付近で下に流れてしまった影響と，改質材 B の再反応による改善効果があることを考慮すると，反応型の改質材 B は固化型の改質材 A よりも耐凍害性が向上する可能性があると考えられる。

C-01 では深さ 0～10mm の透水係数が N-00 の透水係数を下回っている。C-02 では N-02 と比較して，深さ 0～10mm および 15～25mm での透水係数が大きく減少している。これらの深さは超音波伝播速度の測定結果で改善が確認された深さであり，強化材 C によって脆弱部が大きく改善されたことで再 CDF 試験後においても内部の緻密性を確保できたと考えられる。ゆえに，強化材 C により脆弱部を改善することにより，耐凍害性は大きく向上すると言える。

D-01 においては，深さ 0～10mm の透水係数が本実験における最小の値であり，遮水効果が一番大きい結果となった。D-02 でも深さ 0～10mm における透水係数が N の透水係数を下回っているため，再 CDF 試験後でも改善効果は残っている。しかし，深さ 15～25mm の透水係数が大きく増加しており，強化材 C の再 CDF 試験後の傾向とは異なっている。これは深さ 0～15mm 程度までは脆弱部を強固に改善できているが，深さ 15mm 以深には硬化速度が速いためにさほど浸透しなかったと考えられ，改善が不十分となってしまった残存脆弱部から劣化が進行したと推測される。しかし，強化材 D は脆弱部を強固に改善することができるため下地強化としての効果は大きく，脆弱部への浸透が確実にできれば耐凍害性を大きく向上することが期待できると考える。

3.4 凍結融解試験前後の SEM による内部観察

表－3 に各地点における生成物の有無を観察した結果を示す。また，生成物が多く充填していると思われる浸透深さにおける写真を**図－9** に示す。改質材 A，改質材 B および強化材 C を塗布した供試体は試験面から深さ

表－3　SEM による生成物の有無

供試体名＼深さ	5mm	15mm	25mm	35mm
N-01	×	×	×	×
N-02				
A-01	○	○	○	×
A-02				
B-01	○	○	○	×
B-02				
C-01	○	○	○	×
C-02				
D-01	○	○	×	×
D-02				

※○：生成物有，×生成物無

25mm 付近，強化材 D を塗布した供試体は試験面から深さ 15mm 付近である。なお，無塗布の供試体は，超音波測定および透水試験の結果から，試験面から内部にかけて劣化が進む傾向が見られたことから N-01，N-02 ともに試験面から深さ 15mm 付近である。無塗布の供試体において，N-01 ではひび割れの 2 点間距離は約 21μm，N-02 では N-01 と同様の深さにおいて約 39μm であり，再劣化後には大きなひび割れが存在している。

A-01 では約 33μm のひび割れが約 22μm まで減少，A-02 では A-01 と同様の深さにおいて約 60μm のひび割れが約 30μm まで減少していることを確認した。また，B-01 では約 33μm のひび割れが約 28μm まで減少し，B-02 では B-01 と同様の深さにおいて約 40μm のひび割れが約 10μm まで減少している。これらは改質材の塗布により脆弱部が改善されたためと思われる。しかし，今回の SEM による内部観察結果において，深さ 25mm 付近のひび割れは十分に閉塞されていないことが確認された。この理由として，塗布量が足りない，もしくは側面塗布により塗布材が流下して十分に浸透されなかったと考えられる。このような浸透状態を SEM による詳細な内部観察によって確認することができたことから，改質材の側面塗布による脆弱部の改善深さは概ね 25mm 程度であると言える。なお，改質材 B では，再劣化後のひび割れ幅が大きく減少しているため，改質材 B の性質である未反

応分が進行したひび割れに反応したと推測される。このことから, 改質材 B は改質材 A よりも凍害劣化の進行を抑制できると考えられる。

一方，C-01 および C-02 では，試験面から深さ 15mm 付近において改善後の凍結融解試験前後においてひび割れがほぼ完全に閉塞して脆弱部を緻密化していること，深さ 25mm 付近においてはひび割れに強化材が浸透しているが完全に閉塞するには至っていないことが確認できた。これは超音波伝播速度における改善深さの結果とほぼ一致しており，強化材 C は試験面付近のひび割れをほぼ閉塞することで凍害劣化の進行を大きく抑制できると考えられる。また，D-01 および D-02 において試験面から深さ 15mm 付近まで生成物がひび割れを閉塞していることが確認できた。これは強化材 C と同様に超音波伝播速度の結果から改善が見られた深さと同様である。このことから，強化材 D についても試験面付近のひび割れをほぼ閉塞することで凍害劣化の進行を抑制したと言える。

4. まとめ

断面修復における母材コンクリートの下地面の改善対策において，改善部の凍結融解作用前後におけるスケーリング量，超音波伝播速度，透水係数，および SEM による内部観察から，過去の実験で確認した断面修復部と改善部の凍害環境下における耐久性の向上結果 [12] に対して，より詳細に改善部の考察を行った。その結果，改質材あるいは強化材によって脆弱部を改善することで，母材コンクリートの耐凍害性を向上させることが可能であることを確認した。一方，塗布量や改善比によって補修個所の耐久性が影響を受けることも確認できた。以下にその知見を示す。

1) けい酸塩系の改質材は，脆弱部の改善が可能であるが側面塗布での改善効果が期待できる深さは 25mm 程度である。また，改質材の反応メカニズムによって改善後の凍結融解作用に対する耐久性は異なり，反応型は脆弱部の改善後も未反応分が新たな劣化の改善が期待できるため，固化型よりも耐凍害性が向上できる。
2) エポキシ系の強化材は，脆弱部の改善が可能であり，改善後の遮水効果も大きく耐凍害性の向上が期待できる。側面塗布での強化材の浸透深さおよび改善効果が期待できる深さは 15～25mm 程度であり，強化材の粘性によって深さが異なる。

脆弱部を改質材および強化材によって改善することで劣化したコンクリートの耐久性向上が確認できたことを受け，今後，断面修復後の耐久性実験や実環境に近い暴露試験などから補修後の長期的な耐久性およびライフサイクルコストの観点から評価を行う予定である。

参考文献

1) コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル(案) : 土木研究所資料, 第 4343 号, V 不具合事例集, 2016.8
2) 凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書(案) : 寒地土木研究所，参考資料 8，樋門の凍害劣化事例集，2016.1
3) 内藤勲，島多昭典，渡邊尚宏：積雪寒冷地の樋門コンクリートの凍害劣化補修に関する研究，第 57 回北海道開発技術研究発表会，2013
4) けい酸塩系含浸コンクリート保護材工法＋断面修復工法，農業水利施設の長寿命化・環境配慮工法－エバープロロング工法－，ARIC 情報，115 号，pp. 26-31，農業農村整備情報センター，2014
5) 宇野剛志，内藤勲，横田弘，上松瀬慈：断面修復工法における母材コンクリート脆弱部の性能改善に関する検討，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 17 巻，pp. 35-40，2017
6) Setzer, M. J., Fagerlund, G. and Janssen, D. J.: CDF Test – Test method for the freeze-thaw resistance of concrete – tests with sodium chloride solution, Materials and Structures, Vol. 29, pp. 523-528, Nov. 1996
7) 林田宏，田口史雄，遠藤裕丈，草間祥吾：超音波伝播速度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する基礎的研究, 寒地土木研究所月報, No. 656, pp. 10-15，2008
8) 山下英俊，堺孝司，佐伯昇：超音波伝播速度を用いた凍害深さの推定，コンクリート工学論文集，第 7 巻，第 2 号，1996
9) 鈴木好幸，谷本文由，新大軌，濱幸雄：コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす表面改質材および被覆材の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.31，No.1，pp.1153-1158，2009
10) 遠藤裕丈，田口史雄，小尾稔，林大介，坂田昇：撥水材を塗布したコンクリートのスケーリング抵抗性に関する基礎的研究，コンクリートの表面被覆および表面改質に関するシンポジウム論文集, pp19-22, 2004
11) 谷本文，岸本嘉彦，新大軌，濱幸雄：表面改質材を塗布したコンクリートの凍結融解作用による剥離促進メカニズムに関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1853-1858，2010
12) 宇野剛志，内藤勲，横田弘：コンクリート界面の脆弱部を改善した断面修復部の耐久性に関する実験的研究，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 18 巻，pp. 415-420，2018