寒冷地仕様トンネル覆工補修材の適用性試験報告

黒木　一博[1]・海野　篤[2]・清野　義人[3]・賀内　悠生[4]・野村　貢[5]

[1]正会員　昭和電工株式会社　研究開発部（〒105-8518 東京都港区芝大門 1-13-9）
E-mail: kuroki.kunihiro.xhmiu@showadenko.com

[2]昭和電工株式会社　融合製品開発研究所　伊勢崎ユニット（〒372-0818 群馬県伊勢崎市富塚町 1019）
E-mail: umino.atsushi.xhopj@showadenko.com

[3]株式会社建設技術研究所　東京本社（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町 3-21-1）
E-mail: yt-seino@ctie.co.jp

[4]株式会社建設技術研究所　東京本社（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町 3-21-1）
E-mail：yuk-kauchi@ctie.co.jp

[5]正会員　株式会社建設技術研究所　東京本社（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町 3-21-1）
E-mail：nomura@ctie.co.jp

寒冷地環境にある橋梁補修などで現地試験実績を積んできた材料を用いて，冬季の道路トンネル補修に適用しその性能を確認するとともに，作業効率を計測し，アセットマネジメントの視点から緊急補修の妥当性を確認した．今回適用した材料は，寒冷環境においても十分な作業性を有し，かつ従来から行われている給熱養生を実施せずとも短時間で開放可能であることを確認した．今後引き続き耐久性評価を行っていくが，本材料のような性能を有する補修材を適合することが可能になれば，緊急補修による安全性と利便性確保，および工程短縮による補修コスト低減も期待できる．

Key Words: *concrete,cold weather specification,tunnel,section repair material,clack injection material*

1. はじめに

2012 年 2 月に発生した中央自動車道笹子トンネルの天井板落下事故をひとつの契機に，適切な維持管理活動を継続的に実施することにより維持管理費の費用最適化を図ることが可能になるとのアセットマネジメントの考え方 [1]に基づき，すべての社会資本を点検し，補修や更新を確実に行っていく仕組み作り [2]が急速に進められ，すべての道路施設について 5 年以内の点検が義務付けられた．これにより適切な維持管理活動の継続的な実施による道路トンネルの不具合箇所抽出が行われるとともに，点検の判定結果によっては今後，緊急補修が必要なケースが増えていくと想定されている．しかしながら，これまで北海道などの寒冷地では，道路トンネル覆工の緊急補修を行う場合，氷点下 20℃に達するような極寒環境下で施工可能な覆工補修材料がないため，温暖養生などの措置が不可欠であるとされ，そのため補修費の増大や交通規制の長期化などの問題を生じることから，実質的に冬季の緊急補修は困難とされてきた．

道路管理者が道路施設の使用限界性能を意識しつつ，利用者便益に配慮した管理を行うには，厳冬期などの時期を選ばず緊急補修が可能で，かつ社会的影響を過大としない規制期間で道路の通行を維持する方法論が必要である．その方法として，規制期間を短縮するとともに，直接費用の低減を図ることを可能とする，寒冷環境下でも施工可能な覆工補修材料の実用化が強く求められていた．

近年，そのような極寒環境下での施工と早期解放が可能となる材料の開発が進み，厳しい施工環境での緊急補修実施の可能性が高まってきた．しかし，そのような新材料を用い，必要な性能を満たす補修を実施するには，その材料について十分な室内試験とともに現地試験施工により実証的に施工性，品質を検証することが重要であるが，これまでにトンネルにおいてそのような取組みが行われたことはなかった．本文はこ

のような点を問題意識として，筆者らがこれまで室内および橋梁補修などで現地試験実績を積んできた材料について，現在は供用していない寒冷地の廃道に存在するトンネルの一部を借用し試験施工として冬季の補修実験により性能確認を行った結果について報告するものである．

2. 適用材料

(1) 材料開発の着目点

コンクリート構造物の補修には，**表-1** に示すような工法や材料が用いられる．これらの補修材料は多くの実績や特徴があるが，基本的に 5℃以上の環境下で施工することを前提としているため，寒冷地における冬季施工では，給熱養生やそれに伴う施工期間の長期化が避けられない状況であった．筆者らは，これらの材料では今後増えてくると予想される寒冷地における給熱養生なしでの緊急補修への適用は困難であると考え，耐水性や耐食性に優れ，かつ低温環境下における速硬化性に優れたビニルエステル樹脂に着目した．

ビニルエステル樹脂とはエポキシ（メタ）アクリレート樹脂とも呼ばれ，一般にエポキシ樹脂のようなグリシジル基を有する化合物と(メタ)アクリル酸のような不飽和一塩基酸とを付加重合させ，スチレンモノマー等の不飽和単量体に溶解させた変性エポキシ樹脂の一種である．**図-1** に代表的なビニルエステル樹脂の構造と特長を示す．ビニルエステル樹脂は低粘度であり，また（メタ）アクリル酸に由来する末端二重結合のアクリル基は高反応性であることから，あらゆる温度において短時間で硬化させることが可能である．また過酸化による硬化が可能であるが，紫外線や電子線といったエネルギー線による硬化も可能といった特徴を有する [3]．

筆者らは最も汎用的な補修工法である断面修復工とひび割れ注入工に対し，ビニルエステル樹脂の優れた特徴を維持しつつ，かつ.寒冷地における緊急補修に適用できる補修材料を検討した．

(2) 寒冷地向け断面修復工用補修材料（CR-1000）

CR-1000 はビニルエステル樹脂と過酸化物系硬化剤，珪砂系骨材を混合して使用する．混合比は重量比で 100：400：5 である．この配合で作成した寒冷地向け断面修復材の特性を**表-2** に示す．この結果から，5℃環境下で十分な作業時間を有し，かつ短時間で硬化することがわかった．また 5℃環境下で作成した試験体の各種物性も，表中に示す各項目について実用に質する性能を有することがわかった．

図-2 に-5～-25℃で打設した CR-1000 の養生温度と時間による強度発現性を示す．この図からわかるように，本来であれば給熱養生が必要な環境下でも硬化が進行し，-25℃雰囲気下 2 時間でも，表-2 に示す 5℃打設時圧縮強度とほぼ同等の強度が得られている．

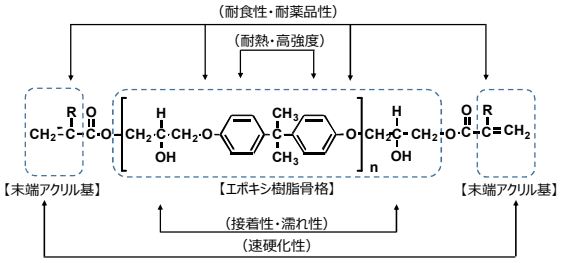

図-1 代表的なビニルエステル樹脂の構造と特長

表-2 寒冷地向け断面修復材特性（5℃打設）

項目		単位	CR-1000
5℃作業性	作業時間 1)	Min	50<
	硬化時間 1)	H	4>
物性	熱膨張性 2)	$\times 10^{-5}$/℃	3>
	圧縮強度 3)	MPa	40<
耐久性	温冷繰返試験 4)	—	Pass
	凍結融解試験 5)	—	Pass
付着性	初期 6)	—	母材破断
	温冷繰返試験後 6)	—	母材破断

1) 自社法　2) JIS K 6911　3) JIS R 5201　4) JIS A 6909

5) JIS A 1148 A 法　6) JSCE-K561

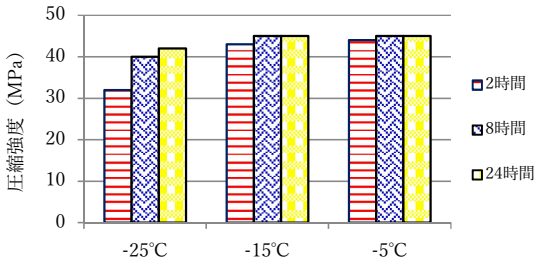

図-2 寒冷地向け断面修復材の圧縮強度発現性

表-1 補修材料と特長，および主用途

補修材料	特長	主用途
無収縮剤モルタル	低収縮性，安価	断面修復工，ひび割れ注入工
ポリマーセメント	接着性，防水性，低乾燥収縮性	断面修復工，ひび割れ注入工，表面被覆工
エポキシ樹脂	接着性，高強度	断面修復工，ひび割れ注入工
アクリル樹脂	速硬化性、低温硬化性	断面修復工，ひび割れ注入工，表面被覆工，剥落防止工
ポリウレタン樹脂	低摩耗性，防水性	表面被覆工，床版防水工，剥落防止工

(3) 寒冷地向けひび割れ注入材（CR-1500）

CR-1500 系はビニルエステル樹脂と過酸化物系硬化剤を混合して使用する．混合比は重量比で 100：5 である．**表-3** に，筆者らが検討した 3 種類のひび割れ注入材料の（株）高速道路総合技術研究所が構造物施工管理要領に規定する「ひび割れ注入工法用エポキシ樹脂系ひび割れ注入材」の品質規格 [4]に準じた特性を示す．ここで，作業性は 5℃環境下における結果，物性は 5℃雰囲気下で作成し，5℃雰囲気で 2 週間養生した試験体の規格である．**図-3** には，筆者らが実施した本材料の 5℃および-10℃低温環境下における 24 時間後の接着強度発現結果を示す．本図が示すように，比較対象とした標準的なエポキシ樹脂は 5℃雰囲気下で品質規格（**表-3**）に規定する接着強度(6N/mm^2)を発現していないが，寒冷地向けひび割れ注入材は，低温環境化にもかかわらずすべての材料が軟質・硬質を問わず 24 時間以内に強度発現することを確認した．なおエポキシ樹脂の-10℃雰囲気での評価は，本条件では粘性増加により注入が不可能であったことから実施していない．

(4) 適用性評価

筆者らが検討した寒冷地向け断面修復材およびひび割れ注入材の実用性を確認するため，福島県南会津郡の橋梁での試験施工を実施した．試験施工を行った橋梁は 1969 年 3 月に供用された全長約 11m の PC 単純床版橋である．試験施工に適用した橋梁を**写真-1** に示す．本橋梁の定期点検結果では，緊急を要する損傷はなかったが，一部で健全度ランク 4 に該当するはく離や鉄筋露出が見られていた．そこで今回はこの中から，断面修復工として主桁下面 2 か所，ひび割れ注入工として主桁側面 5 か所で試験施工を行った．なおひび割れ注入工は，今後のひび割れ進展の可能性が低いことが想定されたことから，注入材には CR-1500-1 を使用した．作業環境および作業手順を**表-4** に示す．

試験施工を行った結果，0℃以下という環境にもかかわらず，断面修復材，ひび割れ注入材ともに，良好な作業性を有することを確認した．また吸熱養生実施せずとも 4 時間程度で硬化することを確認した．

以上のことから，本来の目的であるトンネルでの試験施工を実施することとした．

表-4　作業環境および作業手順

施工期間	2018年1月23～24日（準備工～完了検査）
施工環境	気温：-5～0℃　　天気：雪
施工内容	（1）断面修復工 【適用箇所】主桁下面 剥離・鉄筋露出部（損傷4）、ジャンカ部（損傷3） 300×200×15mm 2か所 【施工手順】 1） コンクリート表面の劣化部除去 2） 露出鉄筋の防錆処理 3） 硬化剤を計量し，CR-1000に混合する 4） CR-1000をコンクリート表面に塗布（下地処理） 5） 硬化剤を添加したCR-1000に骨材を混合する 6） 修復箇所に打設（左官塗り） 7） 硬化を確認して終了
	（2）ひび割れ注入工 【適用箇所】主桁側面 幅0.2～0.25mm，長さ約80cm 5ヶ所（損傷3） 【施工手順】 1） コンクリート表面の異物除去 2） シール材塗布し，約20cm間隔で座金設置 3） 硬化剤を計量し，CR-1500-1に混合する 4） シリンジでCR-1500-1を吸い上げ，座金にセットして注入開始．注入完了まで継続 5） 硬化後シリンジ，シール材を除去し完了

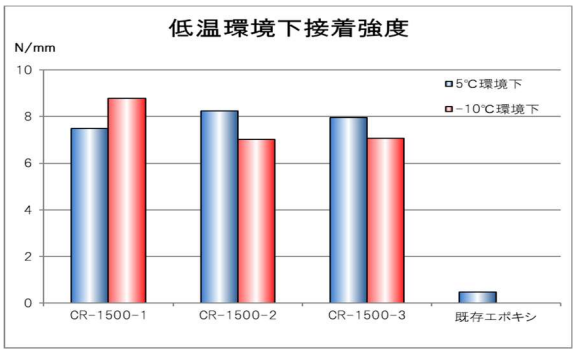

図-3　寒冷地向けひび割れ注入材の接着強度発現

写真-1　実用性評価に供した橋梁

表-3　寒冷地向けひび割れ注入材特性（5℃作成）

項目		単位	規格（25℃）	CR-1500-1	CR-1500-2	CR-1500-3
5℃作業性	粘度	mPa・s	1000＜	150～350	150～350	200～400
	可使時間	分	30＞	40<	40<	40<
物性	収縮率	%	3>	3>	3>	3>
	伸び率	%	1種　－ 3種　100<	50<	10>	100<
	モルタル付着強さ	N/mm^2	6<	8<	8<	6<
	付着耐久性保持率	%	60<	70<	60<	70<

3. 試験施工概要

(1) 対象トンネルの概要

表-5 に試験施工を実施したトンネルの概要を示す．本トンネルは，1972 年代に矢板工法により建設された 2 車線道路トンネルである．本トンネルでは，トンネル内の一部区間において外力による変状が卓越し交通支障となったため新道トンネルが建設された．これにより 2014 年に道路としての供用は終了し，現在まで資産保全措置のみ継続実施されている．本トンネルでは供用廃止までに定期点検が実施されたが，トンネル覆工には一部区間の外力変状とともに，厳しい環境によると思われる覆工コンクリートの損傷や劣化，漏水が各所で確認されている．

(2) 試験施工箇所の選定

表-6 に今回の試験施工で適用した材料の諸元を示す．本材料は断面修復工およびひび割れ注入工への適用を前提とする材料であること，また試験環境を考慮し，**表-7** に示す 4 個所を選定した．ここでスパン No.とは，施工時のアーチコンクリート打設区分により，坑口より通し番号を与えた管理番号である．

表-5 試験施工実施トンネル詳細

躯体	廃道トンネル（全長約 1 900m）
供用期間	昭和 52 年～平成 26 年
損傷	路肩・縁石の変状、内部変状の伴う漏水

表-6 試験施工適用材料詳

適用用途	断面修復工	ひび割れ注入工
適用材料	CR-1000	CR-1500-1
NETIS	KT-160146-A	KT-170019-A
施工方法	左官工法	低圧注入工法
適用環境	施工温度：10℃以下 下地状態：乾燥 修復深さ：20mm以下	施工温度　：10℃以下 下地状態　：乾燥 ひび割れ幅：0.5mm以下
評価	一般工法との経済比較 目視点検（初期･経時） 付着試験（初期･経時）	一般工法との経済比較 目視点検（初期･経時） コア抜きによる目視点検

表-7 試験施工箇所状況

スパン No.	損傷	寸法
S100	ジャンカ	300mm×300mm×30mm
S102	ジャンカ	400mm×200mm×5mm
	ひび割れ	幅：0.3～0.8mm
S103	ひび割れ	幅：0.3～0.5mm

表-8 試験施工環境

施工時間	2019 年 3 月 13 日　午前 9 時半～午後 4 時 （3 月 14 日は施工後評価と機材撤去）
坑内温度	0～1°C
躯体温度	2～3°C

4. 試験施工状況

試験施工の施工環境(**表-8**)および実施した打断面修復工，ひび割れ注入工の工程を示す(**図-5**)．**表-7** に示すように，断面修復工 2 か所，ひび割れ注入工 2 か所を 1 日で実施する工程で行った．**表-8** に施工状況詳細を示す．

(1) 断面修復工（S100，S102）

断面修復工はジャンカやうき，はく離の叩き落とし後の面的な修復を意図した補修工法である．作業手順は S100，S102 ともに，**表-4** の断面修復工と同様に行った．なお，本トンネルには鉄筋露出部がみられなかったことから，鉄筋の防錆処理は行っていない．また S100 については深さが 30mm 程度であったことから，約 15mm 打設後に再度打継ぎを行った．S102 は施工後に接着試験用冶具を張り付けた．施工を行った結果，材料の粘着性が低く若干作業しにくいといった課題も見られたが，打設自体は予定時間内に完了した．また施工 2 時間後に指

写真-2 S100 下地処理

写真-3 S100 断面修復工

写真-4 S100 断面修復完

写真-5 S102 接着冶具設置

工程	作業内容		3月13日 AM	3月13日 PM	3月14日 AM
事前工	資材搬入		▼		
	機材設置		▼		
断面修復工	断面修復(S100)	ハツリ作業	▼		
		下地処理		▼	
		断面修復1層		▼	
		断面修復2層		▼	
		評価			▼
	断面修復(S102)	ハツリ作業	▼		
		下地処理		▼	
		断面修復		▼	
		接着冶具設置		▼	
		評価			▼
ひび割れ注入工	ひび割れ注入(S102)	下地処理	▼		
		シール材塗布	▼		
		座金設置	▼		
		注入		▼－▼	
		シール材撤去			▼
		評価			▼
	ひび割れ注入(S103)	下地処理	▼		
		シール材塗布	▼		
		座金設置	▼		
		注入		▼－▼	
		シール材撤去			▼
		コア抜き･評価			▼
機材撤収	養生撤去、廃棄物処理				▼
開放	－				▼

図-5 試験施工工程

触で確認したところ，S100，S102 ともに強度発現していることを確認できた．**写真-2** から**写真-4** に施工時の状況を示す．

(2) ひび割れ注入工（S102，S103）

ひび割れ注入工は，ひび割れに液状の接着剤を浸透させ固結させることによりひび割れの一体化を図る補修工法である．注入材を浸透させる方法にはいくつかあるが，本試験施工では，シリンジ（注射器）を使用する低圧注入工法を採用し，施工手順は断面修復工と同じく，**表-4** のひび割れ注入工と同様に行った．なお S102，S103 ともに施工高さは 1 800mm 以下とした．

注入作業は，S102 については CR-1500-1 を 2kg 注入した．なお S102 注入後の状況を**写真-6** に示すが，写真の丸印の箇所は相当量注入しても注入圧が上昇せず，ひび割れが貫通していることにより樹脂の覆工背面への漏出懸念されたため，上記数量注入後に注入終了とした．

S103 については，注入材が硬化していないにもかかわらず注入圧上昇と注入ストップとなったことから，十分に注入できたと判断し，終了した．注入材である CR-1500-1 は 400g 使用した．**写真-7, 8** に施工状況と施工結果を示す．

写真-6　S102 注入終了

写真-7　S103 注入終了

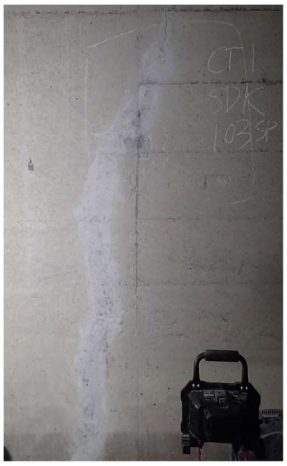

写真-8　S103 施工完了

5. 評価

アセットマネジメントの視点では，インフラ構造物の維持や補修，更新は，社会的費用も含めたライフサイクル費用の視点も含めて考える必要がある．このことから施工直後の機能発現はもちろんのこと，施工実施に伴う直接費用低減効果や長期供用性も把握しなければならない．そこで今回の評価では施工直後の性能と補修箇所の経過観察，および直接費用の低減傾向も把握することとした．

(1) 断面修復工

施工終了 18 時間後に S100，S102 の検査を実施した．外観上は 2 か所とも目視で割れや浮き，硬化不良といった不具合は確認できなかったが，打音検査を行ったところ，S100 については打設面端部に浮きの可能性が確認された．**写真-9** の赤枠内が，打音異常が確認された箇所である．浮きの原因は、作業性不良による補修材と下地、または補修材打ち継ぎ層間の密着不良と考えられる．

写真-10，**写真-11** に S102 における補修材打設後の付着強度試験結果を示す。S102 は接着面が平坦であったため**写真-11** に示すように，部分的に躯体と断面修復材の界面剥離が認められるが，JSCE-K561「コンクリート構造物用断面修復材の試験方法(案)」にも示されている付着強度 1.5kN/mm2 を大幅に超える 4.1N/mm^2 の接着力が得られた．写真-12 に示す．

(2) ひび割れ注入工

施工終了 18 時間後に S102，S103 の外観検査を実施した．特にひび割れ界面でのはく離等異常は見られなかった．ひび割れへの注入深度を確認するため，コア抜きを実施した．コアは路面から高さ約 700mm と約 1 300mm の 2 か所から採取した。採取したコアに対する注入深さを

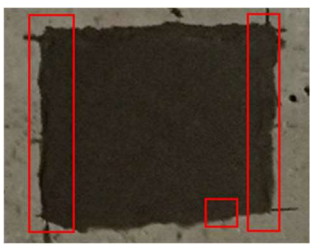

写真-9　S100

写真-10　S102 接着試験前

写真-11　S102 接着試験後

写真-12　S102 接着試験後

確認したところ，200mm 以上の深さまで注入できていることを確認した．また注入ひび割れ幅に対しても確認を行ったところ，0.08mm のひび割れに対しても注入できていることを確認した．**写真-13** から**写真-18** に示す．

(3) 経過観察

約 3 か月後の 2019 年 5 月 16 日に，経過観察として試験施工箇所の状況を確認した．トンネル内結露による躯体の湿潤化等は見られたが，それに伴うひび割れと注入材の層間剥離や漏水の発生，断面修復箇所において推測された浮きの進展は確認できなかった．**写真-19**，**写真-20** に 3 か月経過後の断面修復箇所の外観を示す．今後経過観察を継続して実施する。

(4) 直接費用低減傾向

本施工は 0℃付近の施工であること、また夜間は更に気温が低下するという施工環境の関係から，試験施工期間中に施工完了と評価ができない可能性があった。このことから今回の環境で従来の給熱養生を必須とする工法（以下，従来工法とする）を適用した場合の施工日数を推定した．本施工結果と推定結果の比較を**表-9** 示す．従来工法は給熱養生や仮囲いを行うための機材搬入や，補

写真-13　S102 施工後

写真-14　S103 コア抜き

写真-15 コア（高さ 1 300mm）

写真-16 コア（高さ 1 300mm）

写真-17 コア（高さ 700mm）

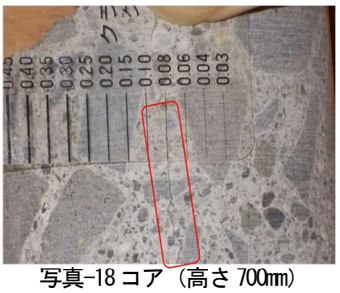

写真-18 コア（高さ 700mm）

写真-19 S100（3 か月後）

写真-20　S103（3 か月後）

表-9　日数比較

工程	内容	施工日数	
		本検討	従来工法
事前準備工	機材搬入・養生準備	1	1
仮設工	仮囲い（吸熱養生）		7
施工前採暖養生工	ヒーターによる養生		
注入前処理工	下地処理、シール材塗布		
ひび割れ注入工	施工		
施工後採暖養生工	ヒーターによる養生		
注入後処理工	座金、シール材、仮囲撤去	1	1
後片付け			
合計（日）		2	9

修材料が強度発現するまで継続的な給熱養生が必要であり，本検討で適用した工法に比べて 4.5 倍の日数がかかることが推定された．施工日数は労務費に直接反映されることから，労務費も 20%程度に抑制できると考えられる．また従来工法で冬季に施工を行う場合，施工期間中のジェットファン等の給熱養生のための仮説費用も必要になるが，本工法は不要であるため，その費用も削減できる．

以上のことから，従来工法に比べて 80%程度の直接費低減が期待できる．更には施工期間を短縮することによって，施工期間中に生じる交通閉鎖に伴う利便性低下期間や，場合によってはそれによって生じる間接的な経済的損失も低減することが期待できる．今後実施工を実施することによって，精度の高い経済性比較を行っていく．

6. まとめ

今回検討した試験施工結果をまとめると**表-10** のようになる．道路施設の使用限界を意識した管理を行うには，時期を選ばず緊急補修が可能で，かつ社会的影響を過大としない規制期間で道路の通行を維持する方法論が必要である。そのためには施工時期によっては施工実施に伴って発生する直接費の増大抑制および規制期間短縮が必要であり、特に寒冷環境下で短期間に施工可能な覆工補修材料の実用化が必要であることは先に述べた．今回の試験施工で適用した覆工補修材は規制期間短縮に有効であり，その物性も実用レベルであると考えられる．加えてそれにともなう直接費用低減効果も期待できる．

今後継続的に試験施工箇所の観察を確認を行うとともに，アセットマネジメントの視点から緊急補修の妥当性を確認していく．

表-10 まとめ

断面修復材工	・寒冷環境において施工可能 ・短時間で実用的な強度発現可能
ひび割れ注入工	・寒冷環境における施工可能 ・深度 200mm 以上，ひび割れ幅 0.1mm 以下にも注入可能

謝辞：本研究遂行にあたり，試験施工箇所のご提供およびご尽力いただきました国土交通省　北海道開発局，国立研究開発法人　土木研究所　寒地土木研究所，北海道土木技術会　トンネル研究委員会関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

1) 小林潔司：アセットマネジメント研究のフロンティア，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.11-13，2003.
2) 国土交通省社会資本整備審議会　道路分科会；道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，2014.
3) ビニルエステル樹脂研究会：ビニルエステル樹脂，pp1-20，化学工業日報社，1993.
4) 構造物施工管理要領：（株）高速道路総合技術研究所，pp.29，2017.

（2019.8.9 受付）

APPLICATION TEST REPORT OF COLD AREA SPECIFICATION REPAIR MATERIAL FOR TUNNEL LINING

Kunihiro KUROKI, Atsushi UMINO,Yoshihito SEINO,Yuki KAUCHI and Mitsugu NOMURA

Concrete repair materials, which had been successfully applied to the bridge repair in the cold environment, were applied to the road tunnel repair during winter season and their performance was studied.It was observed that the applied repair materials have favorable workability in the cold environment and the applied sections can be released in a short time without conducting the conventional heat absorption curing.If repair materials such as those tested in this study are adopted to tunnel lining repair, it is well expected that the improved safety and convenience can be obtained by the emergency repair and the reduced repair cost can be achieved by the shortened work process.

.