

都市鉄道のカルバートンネルを対象とした断面修復工法の開発

Development of Cross-Section Repair Method for Culvert Tunnels of Metropolitan Railways

平間 昭信^{*1}
Akinobu Hirama

川端 康夫^{*2}
Yasuo Kawabata

天野 和人^{*3}
Kazuhito Amano

伊藤 徹也^{*4}
Tetsuya Ito

【要旨】

高度成長期を経て、これまで多量に建設されたコンクリート構造物の合理的な維持管理が必要となっており、近年においては地下鉄などの鉄道トンネルでのコンクリート劣化が問題となっている。鉄道トンネルの断面修復工事では、電車が止まっている夜間での工事であることから、施工終了から供用までの時間が短い。このことから、断面修復材には良好な強度発現とともに、確実な施工が求められる。このような背景を受け、橋梁床版下面などに展開している湿式断面修復工法「TDRショット工法」に対して、材齢初期における断面修復材の強度発現性状を改善し、鉄道トンネルの補修に適用する開発を着手した。本報告は、鉄道トンネルの補修に求められる性能に対して、室内実験やフィールド実験を行い、強度特性、耐久性および施工性を検討した内容について取り纏めたものである。開発した断面修復工法では、急硬材および硬化促進剤などを適切に組み合わせることにより、コテ仕上げ可能時間 15 分を確保しつつ、材齢 3 時間で 5N/mm² を超える圧縮強度を得られることを確認できた。

【キーワード】 断面修復工法 鉄道トンネル 吹付け 硬化促進剤 急硬材

1. はじめに

高度成長期を経て、これまで多量に建設されたコンクリート構造物の合理的な維持管理が必要となっている。地下鉄などの鉄道トンネルもその一つであり、近年、都市鉄道のカルバートンネルにおけるコンクリート劣化が問題となっている。カルバートンネルの維持管理や補修は、電車が止まっている夜間での作業であり、作業終了から供用までの時間が短い。このことから、補修に用いられる材料には、列車通過時の風圧、負圧や振動の影響を受けない早期の強度発現性と、かつ平滑な仕上げができる施工性が求められる¹⁾。このような条件を満足する補修方法として、我々は鉄道高架などで適用しているポリマー混和剤を含まないプレミックスモルタルに硬化促進剤を混合させて吹き付ける断面修復工法「TDRショット工法」²⁾をベースとした開発を進めてきた³⁾。

本報告では、活線下の鉄道トンネルの補修への適用を目指し、室内実験および施工で用いる施工システムでのフィールド実験を行い、鉄道高架などで適用している断面修復工法に対して急硬材などを添加し、材齢初期の強度発現性状（圧縮強度、付着強度）を改善した結果について報告する。また、確実な施工を行うための品質管理

方法として、型枠採取による付着試験方法、および、仕上げ可能時間を判断するための貫入試験方法を検討した結果についても報告する。



写真-1 都市トンネル坑内での補修工事の状況

2. 都市鉄道のカルバートンネル適用における断面修復工法の課題および開発目標

2.1 断面修復工法の課題

都市鉄道の維持管理では、深夜 24 時以降の最終列車が

通過後に起電停止を行い、さらに早朝5時前の始発電車が通過するまでには作業の段取りも含め、全ての作業を完了させなければならない。このため、実質の作業は2～3時間と短く、さらには、作業完了後直ちに列車が通過する厳しい環境である。特に、カルバートンネルの天端および側壁の補修では、重力に反した条件での施工であることから、断面修復工法に求められる要求性能は、従来の断面修復工法に比べて、より高い強度発現性が求められる。そこで、我々は都市鉄道のカルバートンネルを対象とした断面修復工法の開発における課題を整理した。

(1) トンネル内での列車交差時、離反時の風圧

列車通過時の圧力の変化については、飯田らの実験・解析的研究⁴⁾で示されている。ここでは、新幹線のトンネル内で列車が交差し、さらに離反する際の壁面に作用する圧力変化が示されており、前者の場合は+10kPa、後者の場合で-10kPaとされている。この圧力は、列車の通過速度が速くなれば大きくなり、トンネル断面内に占める列車の面積が大きくなれば大きくなる。ここで示されている圧力がトンネル壁面に瞬時に作用することを想定した強度発現性が必要となる。

(2) 短時間での補修厚さの確保

劣化したコンクリートの断面修復は、鉄筋の背面までコンクリートを除去するのが標準であり、一般的な補修厚さは80～100mmになる。標準的に用いられているポリマーセメントモルタルは、主に材料の粘性によって施工厚さを確保することから、一度の吹付け厚さでは約30mm程度の増厚が限界であり、時間をおいて何層かに分けて、所定の施工厚さを確保する方法で行われている。鉄道トンネルの場合、施工時間が2～3時間と限られるため、通常のポリマーセメントモルタルでは、作業時間内に仕上がり面まで施工することが難しい状況である。



写真-2 側壁部の劣化コンクリート撤去状況

(3) 列車風による施工直後の断面修復材の乾燥

鉄道トンネル内は橋梁下面などでの施工とは異なり、

施工直後の養生が行えない状況である。これは、シート養生の場合には列車運行の阻害要因となり、また、塗布養生材については、時間的制約下、施工直後はモルタル表面が湿っている段階では施工が行えないからである。施工直後より、断面修復材は表面から水分が蒸発する。水分の蒸発が大きいとモルタルの収縮が大きくなったり、表面の組織が粗くなったりすることで、圧縮強度、付着強度、中性化抵抗性などの性能が低下し、ひび割れ、浮きの発生要因となる。伊藤らの研究⁵⁾では、列車通過時の風を受けるところではシート養生した場合の3倍以上の水分の蒸発があり、また、材齢1日で全体水分蒸発量の88%近くが蒸発するとの報告がある。

2.2 断面修復工法の開発目標

都市鉄道のカルバートンネル適用における断面修復工法の課題を解決する方法として、これまでに鉄道高架、道路橋梁やトンネルなどで20,000m²以上の実績を有するポリマー混和剤を含まないプレミックスモルタルに硬化促進剤を混合させて吹き付ける断面修復工法「TDRショット工法」をベースとした開発を行うこととした。

以下に、開発目標を示す。

(1) ポンプ圧送性

ポンプ圧送性を確保するために、フレッシュモルタルの性状として、テーブルフロー180±20mmを60分保持とする。

(2) コテ仕上げ性

鉄道高架などで行っている仕上げ吹付けは行わないこととし、1層仕上げで美観性を確保する。仕上げの可能な時間としては15分を確保する。

(3) 強度発現性

現在の「TDRショット工法」の2倍の強度発現性を目標とする。具体的には、一般的な断面修復材の要求性能である材齢28日での付着強度1N/mm²を材齢24時間で満足し、かつ、材齢6時間における付着強度0.6N/mm²を満足する強度発現性を目標とした。

また、開発する工法は、初期の強度発現を特徴とすることから、確実な施工を実施するために、以下の二つの評価方法を検討することとした。

①コテ仕上げ可能時間の評価方法

②初期材齢における付着強度の評価方法

2.3 ベースとした断面修復工法の概要

ベースとした断面修復工法は、セメントおよび細骨材を主成分としたプレミックスタイプの無機系特殊モルタルを現場にて練り混ぜて吹き付ける断面修復工法である。図-1に示すように、ポンプ圧送されたモルタルに、ノズル近傍にて圧縮空気をを用いて硬化促進剤をミスト化してモルタルと混合して補修面に吹き付けを行う。硬化促

進剤の効果により、モルタルが瞬時に可塑化することで、**写真-3**のように1回の吹付けで、壁面方向で施工厚さ100mm以上を確保することが可能となった。

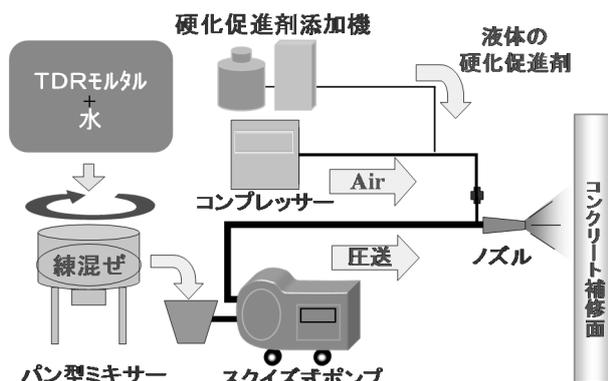


図-1 施工システム概要図

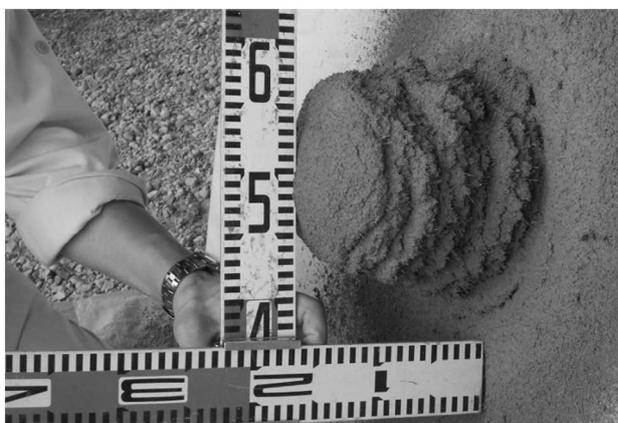


写真-3 吹付けモルタルの厚付け状況

3. 室内実験、フィールド実験での検討

3.1 検討概要

(1) 使用材料

室内実験、フィールド実験での使用した材料を表-1に示す。材齢初期の強度発現性を向上するために急硬材を用い、これに伴う流動性、コテ仕上げなどのハンドリングタイムを確保するために凝結遅延剤を使用した。

表-1 使用材料

材料の種類	成分・性質	
プレミックス (P)	セメント	普通ポルトランドセメント
	細骨材	乾燥石灰石、密度2.66g/cm ³ 、Max1.2mm
	混和材料	収縮低減剤、膨張材、流動化剤、ビニロン繊維
硬化促進剤	水溶性アルミニウム塩 (液体)	
急硬材	セメント鉍物系 (粉体)	
凝結遅延剤	オキシカルボン酸塩系 (粉体)	

(2) 実験要因と実験水準

吹付けモルタルの配合を表-2に示す。実験は、表に示す急硬材、遅延剤、硬化促進剤の添加率を実験要因および実験水準として検討を行った。

表-2 吹付けモルタルの配合

急硬材 添加率	遅延剤 添加率	硬化促進剤 添加率	単位量(kg/m ³)	
			水	P
1~3%	0.3~1%	0.5~2%	250	1925

(3) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3に示す。また、室内実験では、Φ100×200mmの中央部に熱電対を設置し、試験体を打ち込んだ後に、発泡スチロール容器(40×40×40cm)に入れモルタル温度を測定を行った。

表-3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
フロー試験	JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」に準拠。
凝結試験	JSCE-D 102 「吹付けコンクリート (モルタル) 用急結剤品質規格 (案)」に準拠。試験体採取は型枠に直接吹付けによる採取した。
圧縮強度試験	

(4) 新たな評価の検討

①コテ仕上げ可能時間の評価方法

施工時におけるコテ仕上げ可能時間の評価方法として、**写真-4**に示す山中式土壌硬度計の貫入量による検討を実施した。



写真-4 山中式土壌硬度計

②極初期における付着強度試験

極初期における付着強度試験は、**図-2**に示すように、付着試験用器具を取り付けたモルタル版に吹き付け、所定の材齢で吹付け面の裏面より建研式付着試験機を用いて実施した。この試験方法では、従来の試験方法のようにカッターなどを用いてスリットを入れる必要がないため、モルタル強度が小さい材齢初期においても、試験体に影響を及ぼすことなく、付着強度が評価できる。

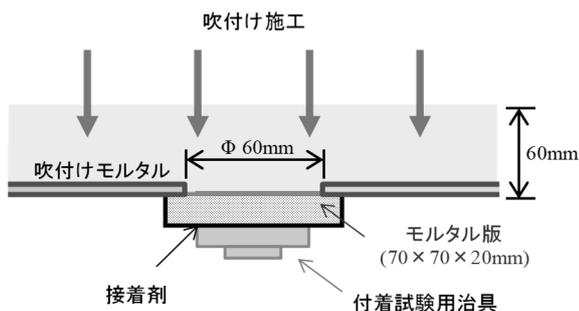


図-2 付着試験方法概要図

3.2 室内実験における検討結果

室内実験では、急硬材、遅延剤および硬化促進剤の種類、添加率を実験水準として、凝結試験および簡易断熱によるモルタル温度の測定を行い、各要因の凝結性状を確認した。室内実験の結果より、フィールド実験における検討配合の選定を実施した。

(1) フロー保持性

練り上がり温度 20°C および 30°C での硬化促進剤を混和しないモルタルのフロー経時変化図を図-3に示す。図に示すように、練り上がり温度に応じて遅延剤添加率を調整することにより、いずれの練り上がり温度とも、練上がりから 60 分の時点で 20mm 程度のフロー低下であり、目標とした 60 分程度の流動性保持時間を有することを確認した。

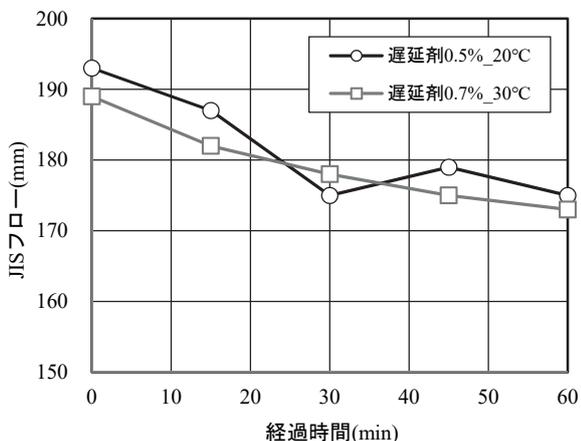


図-3 モルタルフローの経時変化：急硬材_P×2.5%

(2) 凝結性状

急硬材添加率 2.5% における遅延剤、硬化促進剤の添加率が凝結に及ぼす影響を確認した結果を図-4に示す。図に示すように、遅延剤 0.3%・硬化促進剤 1% のケースは、10 分経過した時点では貫入抵抗値が 8N/mm² を超える高い凝結性状である。これまでの実績において、コテ仕上げが可能な貫入抵抗値は、始発である 3.5Nmm² 程度であり、遅延剤 0.3%・硬化促進剤 1% のケースでは、コ

テ仕上げが困難であると判断された。凝結を遅らせる方法としては、遅延剤および硬化促進剤の添加率の調整がある。ここでは遅延剤を 0.3% から 0.5% に変更することによって、目安とした 15 分での貫入抵抗値 3.5N/mm² に近い値となっている。なお、硬化促進剤を 1.0% から 0.5% に変更したケースについては、凝結は大きく遅れて、貫入抵抗値 3.5N/mm² を得るためには 20 分以上を要する結果であった。

図-5には、環境温度を 30°C とした場合の凝結試験結果を示す。同一の配合では、環境温度が 30°C と高くなることによって、凝結は早くなり、12 分において貫入抵抗値 3.5N/mm² に近い値となっており、コテ仕上げが困難となると考えられる。そのため、遅延剤添加率を増加させた結果、遅延剤を 0.6% とすることで 30°C でも 20°C のケースと同様な凝結性状が得られた。このことから、コテ押さえ可能時間 15 分が確保できると判断された。

以上、環境温度などによる凝結性状の変化に対しては、遅延剤添加率を調整することにより、目標とするコテ押さえ可能時間 15 分を確保でき、以降、同等な凝結性状を得られることを確認した。

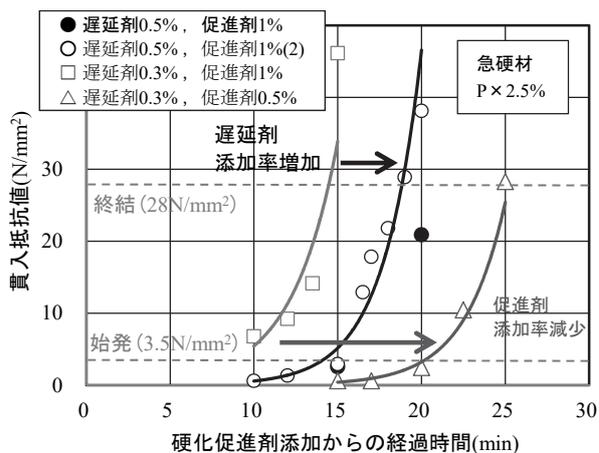


図-4 凝結試験結果：添加剤の影響

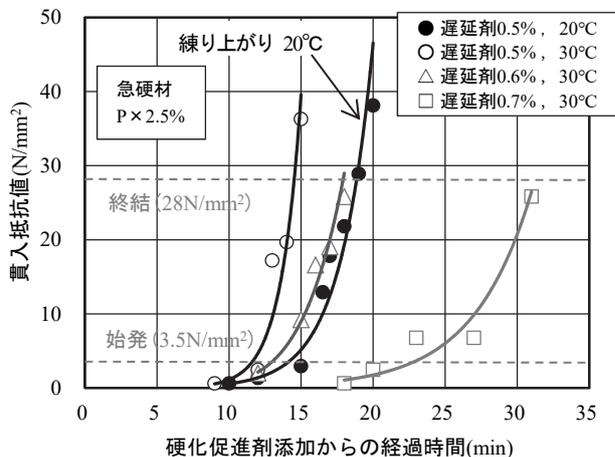


図-5 凝結試験結果：環境温度の影響

3.3 フィールド実験における検討結果

フィールド実験は、実施工で使用する吹付けシステムを用いて検討を実施した。吹付け条件としては、モルタル吐出量 0.3~0.35m³/hr, 吹付けエア量 0.8m³/sec で実施した。材料温度を管理し、練り上がりのモルタル温度は 20℃を目標として実験を行った。

(1) 強度発現性状

フィールド試験での圧縮強度試験を図-6に示す。図に示すように、材齢 3 時間で 8N/mm², 材齢 6 時間で 10N/mm², 材齢 24 時間では 27N/mm²と、現在の硬化促進剤を混合させて吹き付ける断面修復工法の 2 倍程度となり、当初の開発目標ラインを十分に満足する強度発現性を得ることができた。写真-5に示すように、コテ仕上げ可能時間が 15 分を有しつつ、吹付け 30 分後ではハンマーで叩いてもハンマーの跡が残らない状況であり、極めて良好な強度発現性を有していることを確認した。

このようにモルタルの強度が早期に出現することで、列車風による施工直後の乾燥の影響を受けにくくなると考えられる。また、早期に吹付けモルタル表面が乾いた状態となることから、吹付け後 60 分程度経過した時点で塗膜養生剤の塗布も可能であり、収縮ひび割れを低減できると考えられる。

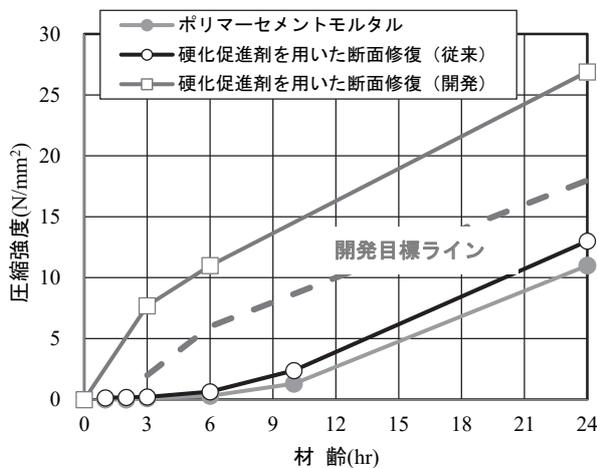


図-6 圧縮強度試験結果



写真-5 吹付け 30 分後の硬化状況

(2) コテ仕上げ可能時間の評価方法

凝結が開始した状態で無理にコテ仕上げを行うことにより、部材に損傷を与える可能性がある。このことから、コテ仕上げ可能時間を簡易に評価する方法として、山中式土壌硬度計による貫入値試験について検討を実施した。その結果を図-7に示す。

図に示すように、材齢とともに、測定値である硬度指数目盛は増加する傾向であり、凝結性状を評価していることがわかる。これまでに得られている結果において、貫入試験で得られる硬度指数目盛 25mm 以下がコテ仕上げ可能な状態であった。

また、この評価試験方法は、吹付け後の早い段階において、原位置における強度発現性を管理する方法とすることも可能である。

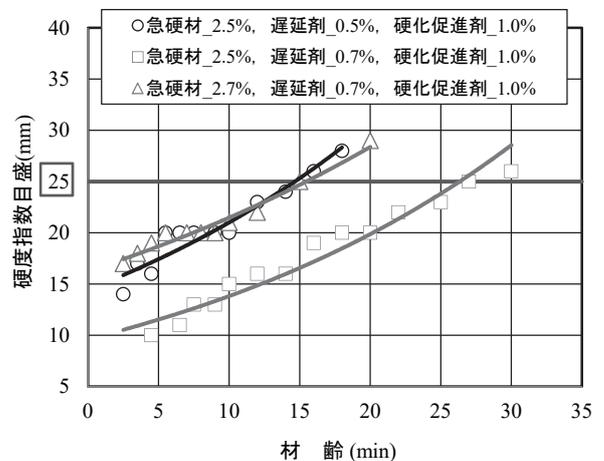


図-7 山中式土壌硬度計による貫入試験結果

(3) 極初期における付着強度の評価方法

圧縮強度と今回考案した方法で得られた付着強度との関係を図-8に示す。

両者の関係には高い相関 ($R^2=0.94$) が認められた、付着強度は圧縮強度の概ね 1/10 程度であった。

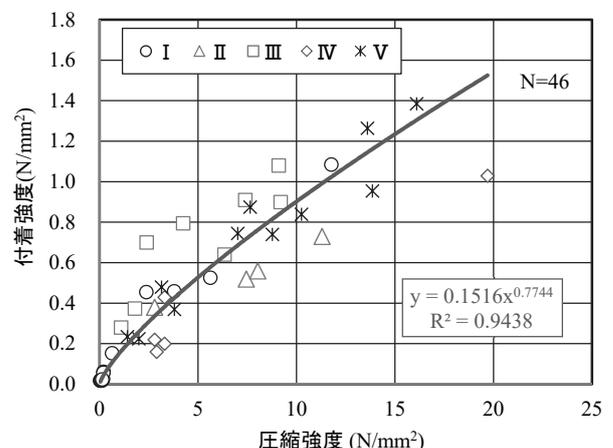


図-8 圧縮強度と付着強度の関係

(4) 耐久性

フィールド試験において採取した試験体について、耐久性試験を実施した。検討した試験項目と、その結果を表-4に示す。

表に示すように、ポリマーセメントモルタルによる断面修復材に求められる耐久性を満足している性能を有することを確認した。

表-4 試験項目および試験方法

評価項目	試験結果	目標値	試験方法	
吸水率 (%)	7.7	-	JISA 1171	
透水量 (g)	0.1	-	JISA 6916	
長さ変化率 (%)	-0.044	-0.05 以下	JISA 1171	
熱膨張ひずみ ($\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)	1.50	2 以下	JCI(14)	
中性化深さ (mm)	養生剤なし	-	JISA 1171	
	養生剤あり			1
塩化物イオン浸透深さ (mm)	9	9	JISA 1171	
相対動弾性係数 (%)	96	80 以上	JISA 1171	
付着強度 (N/mm ²)	湿潤時	1.5 以上	NEXCO 断面修復材試験方法	
	耐アルカリ性			3.6
	温冷繰り返し			1.9

4. おわりに

都市鉄道のカルバートンネル適用における断面修復工法の課題を整理し、当社が展開を進めている断面修復工法「TDRショット工法」をベースとした開発を進めてきた。これまでに、室内試験およびフィールド実験を行い、開発課題である強度発現性、施工性および耐久性などの性能を満足することを確認した。課題であった強度発現性、ハンドリングタイムの確保については、急硬材および硬化促進剤を適切に組み合わせることにより、目標とした材齢 6 時間で 0.6N/mm² を超える付着強度を得られることを確認でき、遅延剤添加率を調整することにより、コテ仕上げなどのハンドリングタイムを確保することが可能であることも確認した。

Summary The rational maintenance of the large number of concrete structures built during Japan's period of high economic growth is becoming necessary, and the concrete degradation of railway tunnels such as subway tunnels has become an issue. As cross-section repair of railway tunnels can take place only at night when train service stops, the time period from repair work completion to service start is short. Thus, cross-sectional repair materials must provide good strength development and reliable workability. This report describes laboratory and field experiments for the application of a cross-sectional repair method that sprays freshly mixed mortar to which curing accelerator has been added for the repair of railway tunnels, and reports the recorded improvement in strength development of the cross-section repair material at early ages. Through the appropriate combination of quick hardening material and curing accelerator, the developed cross-section repair method secures trowel finishing time of 15 minutes, and compressive strength exceeding 5 N/mm² after 3 hours was recorded.

Key Words: cross-section repair method, railway tunnel, spraying, curing accelerator, quick hardening material

これらの結果を受け、技術研究所での施工実験や、橋梁床版下面などでの試験施工を行い、より確実な施工を実施するための検討を完了し、都市鉄道のカルバートンネルの実現場を計画している。その結果については、工事報告などで報告させていただく予定である。

なお、本工法は、厚付け施工性、強度発現性に他にはない優位性を有している。鉄道に限らず、例えば、橋梁基礎の干満帯のように、従来補修が難しい箇所への対応や緊急補修が必要とされる場合など、多様なニーズへの対応が考えられる。今後は、施工実績を増やすとともに、施工システムの改善を踏まえ、さらなる断面修復工法としての信頼性向上を図る所存である。

謝辞: 本工法は、阪急電鉄株式会社、阪急阪神レールウェイ・テクノロジー株式会社と共同開発した工法である。本工法の開発に際して、ご協力いただいた関係各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 平田隆祥, 成田久, 瀬筒新弥, 早川健司: ポリマーセメントモルタルを用いた湿式吹付け断面修復材の5年間追跡調査結果, 土木学会第64回年次学術講演会, VI部門, pp.789-790, 2009.
- 2) 川端康夫, 松尾勝弥, 名倉政雄, 平間昭信, 寺村悟, 荒木昭俊: 新しい断面修復用吹付け工法の開発, 土木学会 土木建設技術シンポジウム 2004 論文集, pp.311-312, 2004.
- 3) 平間昭信, 福井賢一郎, 川端康夫, 山岸隆典: 都市鉄道のカルバートンネルを対象とした断面修復工法の開発と展開, コンクリート工学, Vol.54, No.2, pp.149-155, 2016.
- 4) 飯田雅宣, 前田達夫: トンネル内圧力変動シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.4, No.7, 1990.
- 5) 伊藤正憲, 魚本健人: 風環境下における吹付け補修材料の評価, コンクリート工学年次論文集, 第27巻, pp.1609-1614, 2005.