

報告

## 自己治癒材断面修復材料を用いた地下鉄トンネルにおける新たな漏水補修対策の検討

亀井 啓太\*1, 安 台浩\*2, 橋本 達朗\*3, 小椋 紀彦\*3, 岸 利治\*4

### New Water Leakage Repair Method using Self-Healing Materials for Subway Tunnels

Keita KAMEI\*1, Tae-Ho AHN \*2, Tatsuro HASHIMOTO \*3, Norihiko OGURA \*3 and Toshiharu KISHI \*4

**要旨**：東京地下鉄株式会社(以下、「東京メトロ」)では、これまで自己治癒材料を活用した漏水補修を積極的に実施してきた。昨年度は、第一段階として、東京メトロでの通常の漏水補修方法である、薬液注入とVカット工法での導入を目指し、東京大学生産技術研究所で開発が進められてきたひび割れ自己治癒補修材料を、従来使用されてきた漏水補修材料である急結材と止水材に混入し、東京メトロ環境下での有効性を確認した。そこで、今年度は最終段階として、新たに断面修復材料にも自己治癒機能を付加した材料開発を行い、室内試験および現地試験施工からその有効性を検討した。

**キーワード**：漏水補修，自己治癒，止水材料，断面修復材，地下鉄トンネル

#### 1. はじめに

東京地下鉄株式会社(以下、「東京メトロ」)では、これまで東京大学生産技術研究所で開発が進められてきたひび割れ自己治癒材料を用いた新規補修材料の開発を積極的に実施してきた。昨年度は、第一段階として、東京メトロでの通常の漏水補修方法である、薬液注入とVカット工法での導入を目指し、従来使用されてきた漏水補修材料である急結材と止水材に混入した新たな補修材料を開発し、自己治癒機能を有する補修材料が東京地下鉄特有の常時ひび割れ部より漏水が生じ、作業時間が1日2時間程度と非常に短い環境(以降、東京メトロ環境下)において有効であることを確認した<sup>1)</sup>。

そこで、今年度は最終段階として、新たに自己治癒機能を有する2種類の断面修復材料の開発を行い、室内試験および現地試験施工からその有効性を検討した。断面修復材料は止水工の中で使用される量が最も多いため、補修断面部にひび割れ自己治癒成分を最も多く混和することができ、再びひび割れが発生した後の補修効果が期待でき、長期的な耐久性を担保することが出来ると考えた。

#### 2. 検討概要

##### 2.1 ひび割れ自己治癒材料の成分

今回使用した自己治癒材料はCSA系膨張材、ジオ

マテリアル、炭酸基系化学添加材を使用している。

CSA系膨張材は、水和反応によりエトリンガイト( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$ )を積極的に生成させて膨張を付与する材料であり、ひび割れ部において膨張することでひび割れ内部を閉塞させることを期待している。また、ジオマテリアルは、地盤材料の総称であり、今回の検討では粘土系材料を使用した。

ジオマテリアルは水分を瞬時に吸収し何倍にも膨潤する特徴を有しており、ひび割れ部を閉塞させる結晶の生成に必要な水分の確保および、ひび割れ部の通水速度の低減効果を期待している。

炭酸基系化学添加材は、ひび割れ部において結晶性水和物を積極的に生成させるために使用した。

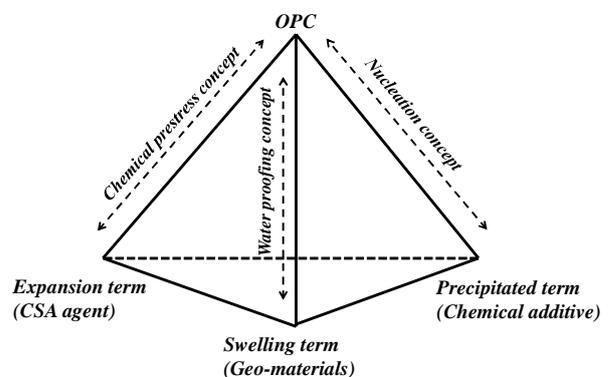


図-1 ひび割れ自己治癒材料の設計概念<sup>2)</sup>

\*1 東京地下鉄株式会社 工務部 土木課

\*2 株式会社 SERIC JAPAN

\*3 株式会社 CORE 技術研究所

\*4 東京大学生産技術研究所 教授

表-1 断面修復材料の概要

断面修復材料	タイプ	密度(g/cm <sup>3</sup> )	W/P(%)	備考
自己治癒 - M	繊維入り自己治癒モルタル	2.07	20%	PP 繊維
自己治癒 - ML	軽量型繊維入り自己治癒モルタル	1.62	35%	
従来品	超軽量繊維入り PCM	1.30	30%	現行使用

表-2 室内試験項目一覧

試験項目	引用規格	メトロ規格
硬化時間試験	JIS R 5201	—
圧縮・曲げ強度試験	JIS R 5201	有り
接着力試験	建研式	有り
塩水浸せき試験	JSCE-K 572	—
促進中性化試験	JIS A 1153	—
通水試験	—	—

図-1にひび割れ自己治癒技術の材料設計概念を示す<sup>2)</sup>。主原料の普通ポルトランドセメントに対して、それぞれの材料が担う機能を示している。

### 2.2 自己治癒機能を有する断面修復材料の開発

今回開発した断面修復材料は主に普通モルタルタイプと上床版などの上向きでの施工を考慮した軽量タイプの2種類を開発した。どちらの材料も繊維(PP繊維，密度 0.90g/cm<sup>3</sup>，φ48μm，繊維長 10mm)を混入することで、ひび割れ幅の低減および分散効果、ひび割れ間に露出した繊維部へ自己治癒材料により生成された結晶が析出することによるひび割れ閉塞効果を期待している。

### 3. 室内試験

東京メトロ環境下で断面修復材料を使用するにあたり補修材料は時間の制約上、施工後から初電通過

に影響がなく、かつ補修後は長期的な耐久性を有することが望まれる。

そこで、今回新たに開発した2種類の断面修復材料に対して早期強度発現性、物質移動抵抗性、自己治癒性(再びひび割れに対する止水性能)に着眼し土木学会や他機関での試験に基づいて各種性能の確認を行った。

新たに開発した断面修復材料の概要を表-1に、各種試験の一覧を表-2に示す。

#### 3.1 各種試験概要

##### (1) 硬化時間

JIS R 5201 (3) 凝結試験に準拠して断面修復材料の硬化時間の測定を行った。

##### (2) 圧縮・曲げ強度試験

JIS R 5201 (5) 強さ試験に準拠して断面修復材料の圧縮強度および曲げ強度の測定を行った。

各試験材齢は打込み後 1, 3 時間, 1, 7, 14, 28 日で実施した。

##### (3) 接着力試験

建研式接着力試験を実施した。

各試験材齢は打込み後 1, 7, 28 日で実施した。

##### (4) 塩水浸せき試験

JSCE-G 572 に従い、濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液に浸せきさせ、試験 28 日後、割裂し割裂面に硝酸銀溶液(0.1mol/l)を噴霧して、塩分の浸透深さを測定した。

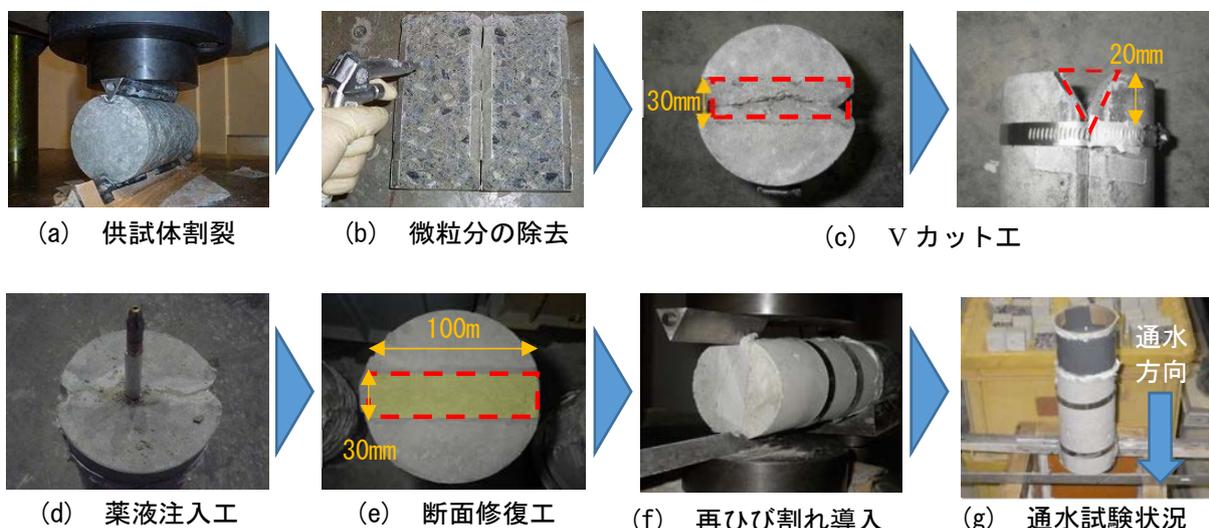


図-2 通水試験実施状況

表-3 通水試験の組合せ一覧

比較項目	工法	区分	止水材	急結材	水膨張性ゴム	断面修復材料
断面修復材料の比較	断面修復材	自己治癒 - M	×	×	×	○
		自己治癒 - ML	×	×	×	○
		従来品	×	×	×	○
止水工法での比較	止水工法①	自己治癒 - M	○※1	○	×	○
	止水工法②	自己治癒 - ML	○※1	○	×	○
	従来工法	従来工法	○※2	○	○	○

※1:自己治癒型無機系止水材 ※2:有機系止水材

(5) 促進中性化試験

JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法(温度 20±2°C, 湿度 60±5%, CO<sub>2</sub> 濃度 5±0.2%)に従って実施し試験 28 日後, 試験後割裂し割裂面にフェノールフタレイン 1%溶液を噴霧して中性化深さを測定した。

(6) 通水試験

各補修材料による再びび割れに対する止水性を評価するために通水試験を行った。

通水試験はひび割れを模擬した供試体に対して 1 度各種補修材料を用いて補修を施した後, 再度割裂し 0.2mm のひび割れを導入し, 再漏水を生じさせた供試体に対して通水試験を実施し, 通水量の継時的な変化から評価を行ったものである。

供試体はφ100×200mm の円柱供試体を作製し, 割裂後断面部に残った微粒分は高圧縮空気を吹き付けて取り除き(図-2(a, b)), 7 日間水中養生を行うことで, セメント分の再水和による内部の閉塞効果の発生を抑制してから使用した。養生後, 内部に 0.2mm 幅のスペーサーを挿入しひび割れを模擬した供試体を作製し各種補修を行った。

断面修復材料の比較を行った供試体はひび割れ部に V カットを施し, その部分(縦 30mm, 横 100mm, 深さ 20mm)に断面修復材を充填したものである。

次に, 止水工法での比較を行った供試体はひび割れ部から削孔し注入パイプを取付け, ひび割れ内部に止水材料を注入し, メトロの止水工法に沿って急結材, 断面修復材料を用いて補修を再現した(図-2(d, e))。

再びび割れの導入は補修後 7 日間の通水試験を実施し補修部から漏水が無いことを確認してから導入した。なお, 再びび割れの導入は, 初期の割裂引張強度の 50~80%程度の荷重で再載荷し, その載荷と除荷を 10 回程度繰り返すことで, 意図的に季節変動によるひび割れ幅の変動についても模擬することとした。繰返し載荷によって補修箇所を導入したひび割れ部に 0.2mm のスペーサーを挿入することで

表-4 硬化時間測定結果一覧

工法	自己治癒 - M	自己治癒 - ML	従来品
硬化時間	4h30m	1h30m	2h15m

ひび割れの幅を固定した(図-2(f)). 再びび割れ導入後の通水試験は各供試体上面に, φ100×100mm の塩ビ管を設置し管内に注水し, 供試体下面からの漏水量を 1, 3, 5, 7, 14, 28 日後に計測した(図-2(g)).

既往の知見として生駒ら<sup>3)</sup>はひび割れ内の通水量抑制に与える影響として, 供給水に含まれる気泡が影響していることを明らかにしている。

そこで本試験では供給水に脱気水を用いることで気泡による通水量の抑制効果を予め排除した。

通水試験に使用した材料と工法の組み合わせを表-3 に示す。

3.2 室内試験結果

室内試験の結果を下記に示す。

(1) 硬化時間

硬化時間の測定結果(表-4)より, 自己治癒-ML は従来品と比較して硬化時間が 1h30m と早い結果となったが, 自己治癒-M は 4h30m と遅く今後改良が必要である。

(2) 圧縮・曲げ強度試験

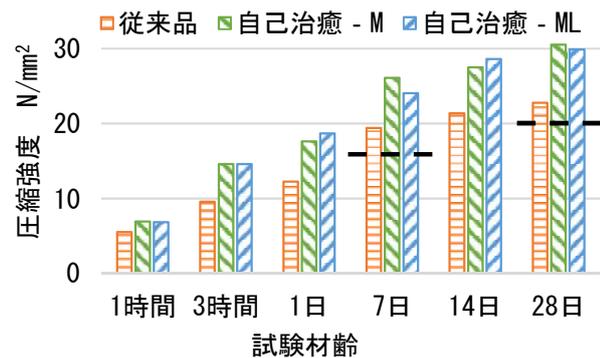
各種強度試験の結果(図-3(a), (b))より, 今回検討を行った自己治癒-M, -MLは破線で示した東京メトロで規定されている基準を全て満たす結果となった。

また, 初期の強度は従来品と同程度であるが28日での強度は従来品と比較して1.4倍程度高くなる傾向を示しており長期的な強度を有していることを確認した。

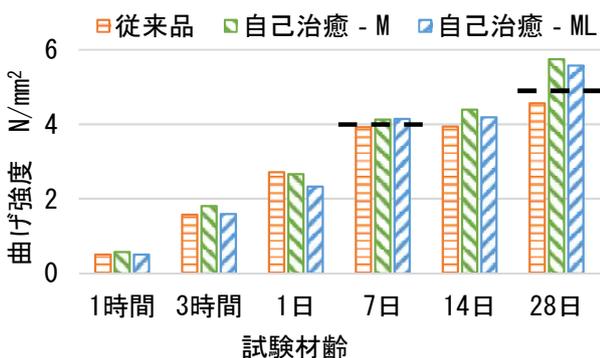
(3) 接着力試験

図-3(c)より, 接着力も圧縮・曲げ試験結果と同様に東京メトロで規定されている基準を全て満たす結果となった。

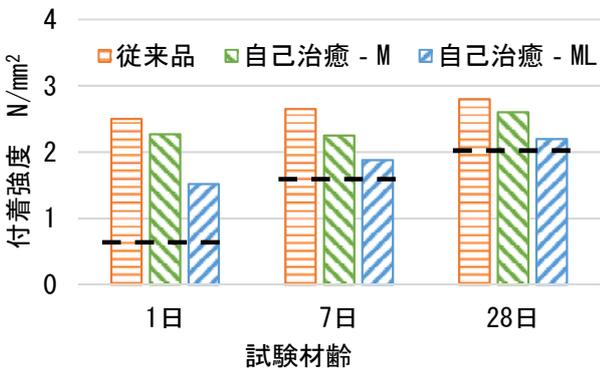
(4) 塩水浸せき試験



(a) 圧縮強度試験結果



(b) 曲げ強度試験結果



(c) 接着力試験結果

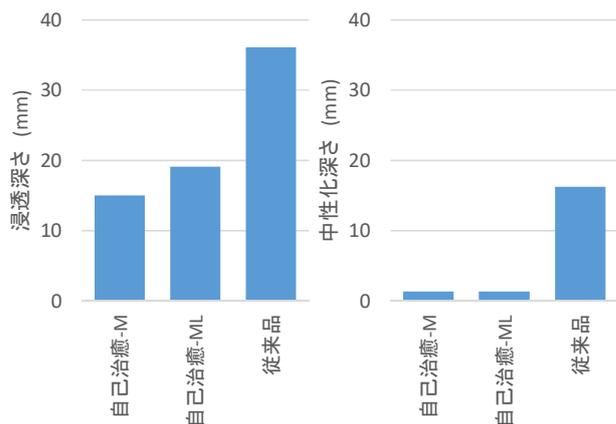
--- 東京メトロ基準

図-3 各種強度試験結果

図-4(a)より，塩水浸せき試験の結果より従来品と比較して自己治癒-M, -MLの塩分浸透深さは50%程度低く従来品と比べ高い遮塩性を有していることを確認した。従来品は密度を小さくするために空気連行性が高く，内部に多数の気泡を含むため劣化因子が侵入しやすいと考えられる。

(5) 促進中性化試験

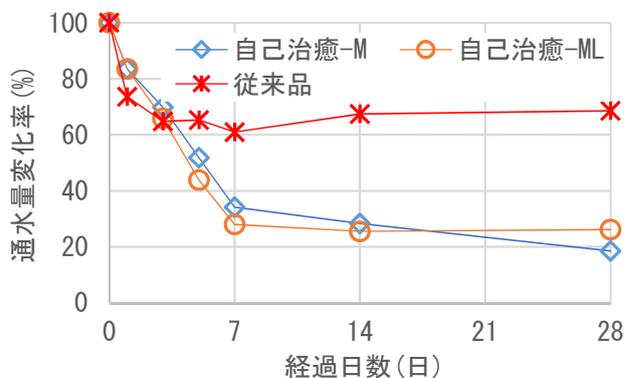
図-4(b)より，中性化深さに関しては1/10程度と小さく従来品と比べて高い物質移動抵抗性を有しているのを確認した。



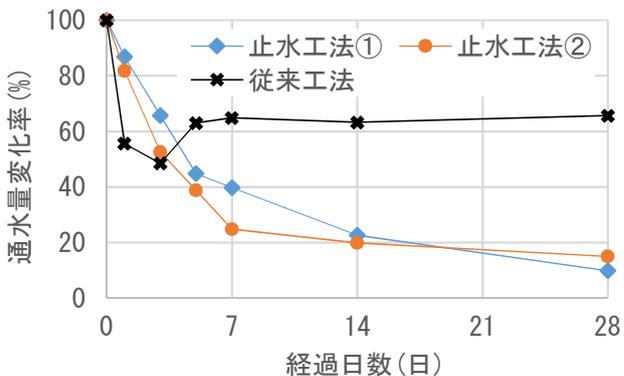
(a) 塩分浸透深さ

(b) 中性化深さ

図-4 物質移動抵抗性試験結果



(a) 断面修復材料比較



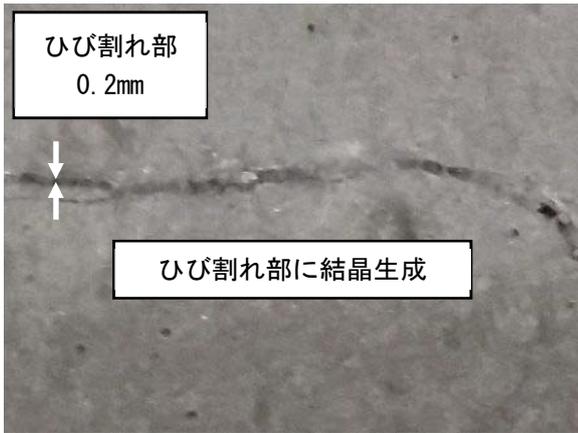
(b) 止水工法比較

図-5 通水試験結果

(6) 通水試験

通水試験の結果を図-5に示す。

まず，断面修復材料単体での比較より試験5日目より両者に差が生じ始め自己治癒-M, -MLにおいては漏水量の継時的な低減が確認できたが，従来品では漏水量の低減が止まりそれ以降も変化は見られなかった。最終的には自己治癒-M, -MLにおいて試験28日目で約75%程度通水量変化率が低下しているの



自己治癒-ML  
図-6 ひび割れ閉塞状況

が確認でき自己治癒材料による再ひび割れに対する抵抗性を確認した。

次に、止水工法での比較では試験開始初期では止水工法①，②よりも従来工法の方が漏水量の低減効果が認められた。これは水膨張性ゴムや未水和分の有機系止水材料が影響した可能性が考えられる。その後、試験 5 日目以降では断面修復材料の試験結果と同様に従来工法では漏水量の低減が止まりそれ以降も変化は見られなかった。

また、止水工法①，②では経過日数とともに徐々に漏水量は低減していき試験 28 日では通水量変化率が約 80%程度低減しているのが確認でき、従来工法と比較しても 50%程度低くなる結果となった。以上より、供給水に脱気水を用いることでより厳しい条件で試験を実施したが自己治癒機能を有する断面修復材料を使用した、止水工法①および止水工法②は再ひび割れに対する抵抗性を有していることを確認した。

通水試験の結果より自己治癒材料断面修復材料および止水工法では再ひび割れに対する高い止水性を有しているのを確認した。

また、試験後にひび割れ部を確認したところひび割れに沿って結晶が生成しているのが確認できた(図-6)。ひび割れ内部に繊維があることにより結晶の生成が促進されていると考えられる。

#### 4. 現地試験施工

室内試験の結果を受けて実現場での使用性を確認するために現地試験施工を実施し、施工後のモニタリングを行うことで評価を行った。

東京メトロにおける補修工事は、電車の運行終了後から初が通過するまでの約 2 時間の間で日々の作業を完了する必要がある、各工程での仕上げが十分に行えず補修部に初期欠陥を残す可能性が高く、こ

表-5 試験施工一覧

施工方法		止水材	急結材	水膨張性ゴム	断面修復材
自己治癒型	止水工 A	従来品 ウレタン系	自己治癒性能 添加型	無し	自己治癒-M
	止水工 B	従来品 ウレタン系		無し	自己治癒-ML

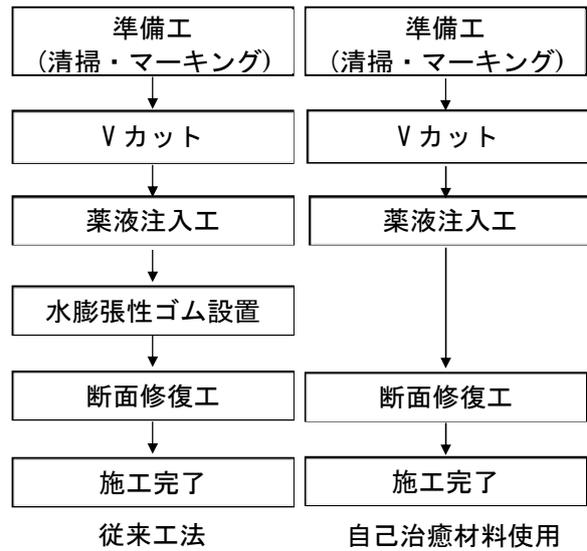


図-7 試験施工フロー

れらの初期欠陥が再漏水の主な原因と考えられる。

そこで、初期欠陥の有無を確認するために施工直後から 1, 7, 14 日目でのモニタリングおよび、季節変動による長期的な耐久性の確認を 1~5 年程度観察することとした(長期的なモニタリングは現在実施中)。

#### 4.1 試験施工概要

試験施工はトンネル側壁部に生じた長さ約 4m、ひび割れ幅は最大で約 1.5mm、常時ひび割れ部より漏水が生じている未補修箇所を対象とした。今回実施した止水工法は急結材、断面修復材を自己治癒材型の補修材料に置換した 2 工法(止水工 AB)を実施した。本来自己治癒材料による効果を最大限に発揮するために止水材料にも自己治癒型を使用することが望まれたが今回対象としたひび割れ部は常時漏水が生じており硬化までに時間を要する無機系材料では漏水によって押し流されてしまう可能性があったため瞬時に止水ができるウレタン系の有機系材料(従来品)を使用することとした。

図-7 に試験施工フローを示す。従来の東京メトロの漏水補修工では薬液注入手後に再漏水に対する抵抗性を高めるため、水膨張性ゴムをひび割れに沿って設置するのが標準工法である。そこで、自己治癒

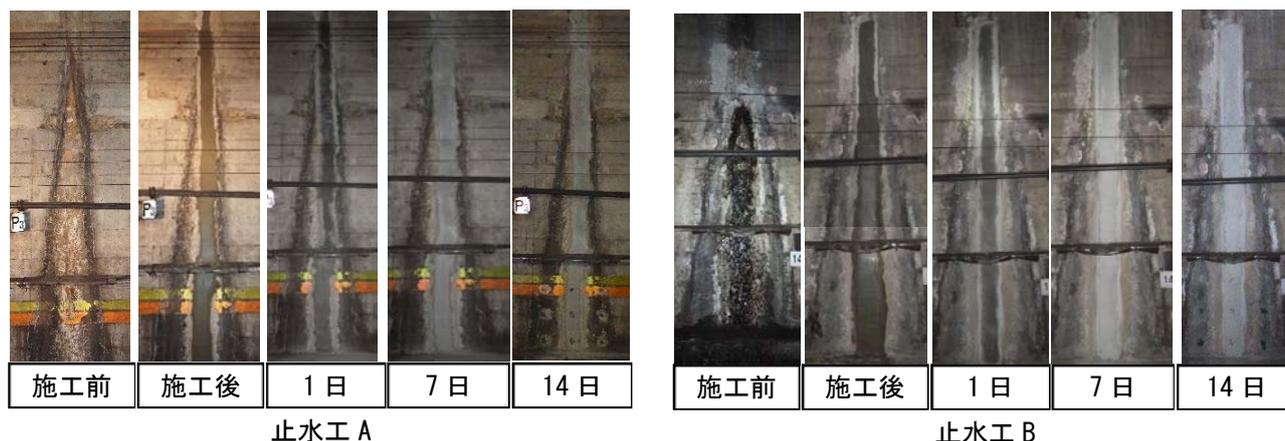


図-8 試験施工結果

材料型では，従来使用してきた水膨張性ゴムの役割を自己治癒性能で置き換えられると考え，水膨張性ゴムの使用の有無を1つのパラメータとした．水膨張性ゴムの設置工程を省略することにより全体の工程を短縮できる可能性がある．表-5に今回実施した検討工法の詳細を示す．

#### 4.2 現地試験施工結果

試験施工の結果を図-8に示す．自己治癒材料を使用した止水工 A，Bにおいて，工程通り作業を完了することができ，現場で問題なく使用できることを確認した．

#### 4.3 モニタリング結果

試験施工後から目視によるモニタリングを実施した．モニタリング間隔は施工直後から1，7，14日目に実施した．どちらの工法においても再漏水等の変状が生じていないことから施工不良等の初期欠陥は生じておらず，自己治癒材料はメトロ環境下においても問題なく使用できていることが確認できた．

今回実施したモニタリング期間では施工性や初期の不具合等の確認が出来たので，今後は季節変動によるひび割れ部の伸縮等の環境変化に対する長期的な耐久性の評価および，各工法による差異や自己治癒材料の有無による止水効果の評価を行っていく予定である．

### 5. まとめ

新たに開発した断面修復材料自己治癒-M，自己治癒-MLにおいて室内試験および現地試験施工を実施した結果を以下に整理する．

(1) 自己治癒材料を用いた断面修復材料はメトロの規定する強度基準を満たしており従来品と比較し

ても早期強度発現性および長期強度においても十分な強度を有していることを確認した．

- (2) 物質移動抵抗性試験の結果より従来品より高い物質移動抵抗性を有していることを確認した．
- (3) 通水試験の結果より自己治癒材料を用いた断面修復材料は再びひび割れに対する高い治癒性能を有していることを確認した．
- (4) 現地試験施工の結果より自己治癒材料に置換した止水工法は実現場においても問題なく施工ができることを確認した．

以上より，今回検討を行った断面修復材料は東京メトロ環境下において有効であることを確認した．

今後モニタリングを継続することで各材料における性能，長期的な耐久性の評価を行っていく予定である．

#### 参考文献

- 1) 諸橋由治，安台浩，橋本達朗，小椋紀彦，岸利治：地下鉄トンネルにおける自己治癒材料を用いた新たな漏水補修，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材料，第15巻，pp.149-154，2015.11.
- 2) Tae-Ho Ahn et al.: Crack Self-Healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixture, ACT, Vol.8, No.2, pp.171-186, Jun. 2010
- 3) 生駒勇人，岸利治：自己治癒現象に関わるコンクリートのひび割れ初期通水量の急速抑制メカニズムの解明，コンクリート工学年次論文集，第36巻，pp.1648-1653，2014.