

自己治癒材を用いた地下街での 止水対策の検討

小椋 紀彦¹・大森 高樹²

¹ 正会員 株式会社 CORE 技術研究所 技術部 (〒111-0053 東京都台東区浅草橋 3-8-5 VORT 浅草橋 8F)
E-mail: ogura.nori@coreit.co.jp

² 正会員 株式会社日建設シビル エンジニアリング部門 CM 防災部 (〒112-0004 東京都文京区後楽 1-4-27)
E-mail: oomorita@nikken.jp

近年の異常気象や局所的な集中豪雨等により, 地下構造物における維持管理で, 漏水対策が大きな問題となっている。特に天井部や側壁部の地山と接している箇所の漏水は地下水の変動に大きく左右される。これまでの漏水補修は, 漏水を瞬時に止めるため有機系材料が多く用いられている。しかしながら, 有機系材料は硬化後の自己収縮が大きいことや季節の温度変化による躯体の収縮に伴う材料の追従性が不足することにより, 一度補修した箇所からの再漏水も多く, 新たな止水材料, 止水工法の開発が求められている。そこで, 最近注目されている「自己治癒材料」を用いて地下構造物の環境下でのひび割れ漏水部の補修施工を実施し, その効果を検証した。経過観察の結果, 一定の止水効果を発揮し地下構造物環境下での今後の適用の可能性を確認した。

Key Words: *Underground shopping street, Crack, Water leakage repair, Self-healing material*

1. 地下街のおかれている現状

我が国には地下街として国土交通省に登録されている地下街が79箇所ある(表-1)。これら地下街の多くは, 高度経済成長期に道路や駅前広場の基盤整備とあわせ, 公共用通路等と店舗の一体的な空間として整備されたものである。特に主要なターミナル駅周辺の地下街は, 交通機能が密接につながって便利な都市施設であることから, 現在でも多くの利用者が訪れ多目的に利用している。このように多くの地下街は, 歩行者ネットワークの形成, 地上の道路交通の錯綜軽減, 地上の都市景観の向上, など都市施設として重要な役割を果たしている。

一方で, 地下街が整備されてきてからかなりの年数が経過してきた。築40年以上となる地下街数は約8割に達しようとしている(図-1)。その結果, 地下に造られた施設でも老朽化の進行は避けることができない状況となっていて, 天井部・側壁部・階段部の地山(土中)と接している箇所の漏水発生とその処置は地下街にとって共通の問題となっている。地下街というコンクリート構造物の健全性を長い間維持し, 安全性を長い間担保していくためには, 構造物を構成するコンクリートや鉄筋自体の強度低減を極力避けるようにしていくことが重要で

ある。地山(土中)からの水の侵入は, 地下街そのものの強度低減を引き起こす主な要因の一つとなりうるため, 健全度や安全性評価をするための調査は設計側の立場からも大切なことである。

地下構造物の設計という観点から, 地下街が大規模な地震を直接受けた事例は, 1995年(H7)1月の阪神・淡路大震災における神戸三宮地下街が震度7以上の分布域に位置し特に大きな地震動を受けたため, よく被災事例として挙げられる。この地震で都市部の地下施設も大きな被害が出たことを受けて地下街の耐震設計が見直された(耐震基準の変更)。

昨今, 社会インフラの老朽化対策や選択と集中を図りながらの継続的な維持管理, そして, 近年の大規模災害(地震や風水害)への早急な対応が求められている。2012年(H24)12月, 山梨県大月市笹子町の中央自動車道上り線笹子トンネルで天井板のコンクリート板が落下し, 走行中の車複数台が巻き込まれて9名が死亡した事故をきっかけに社会インフラの老朽化が改めてクローズアップされた。翌年2013年(H25)に全国に登録されている地下街について国土交通省都市局で実態調査が行われ, 2014年(H26)4月に地下街安全避難対策ガイドライン(以下, ガイドライン)が策定され, この年度より

表-1 地下街一覧（国土交通省都市局管轄の79箇所）

都市名	地下街名または施設名称	都市名	地下街名または施設名称
札幌市	大通り地下街(オーロラタウン)	名古屋市	伏見地下街
札幌市	札幌駅前通地下街(ポルタウン)	名古屋市	サカエチカ
札幌市	札幌駅南口広場地下街(アピア)	名古屋市	セントラルパーク地下街
盛岡市	めんこい横町	名古屋市	地下鉄栄北地下街(森の地下街)
千代田区	Echika fit 東京	名古屋市	地下鉄金山地下街
港区	新橋駅東口地下街(ウイング新橋)	名古屋市	大曽根駅前地下集客施設(OZ garden)
港区	Echika 表参道	京都市	京都駅北口広場地下街(ポルタ)
中央区	八重洲地下街	京都市	御池地下街(ゼスト御池)
中央区	Echika fit 銀座	大阪市	ホワイティ梅田
台東区	浅草地下街	大阪市	ドーゾマ地下センター
新宿区	新宿駅東口地下街(ルミネエスト)	大阪市	中之島地下街
新宿区	新宿駅西口地下街(小田急エース)	大阪市	なんばウォーク
新宿区	新宿歌舞伎町地下街(新宿サブナード)	大阪市	NAMBA なんなん
新宿区	京王新宿名店街(京王モール)	大阪市	あべちか
新宿区	京王モールアネックス	大阪市	大阪駅前ダイヤモンド地下街(ディアモール大阪)
渋谷区	渋谷地下街	大阪市	長堀地下街(クリスタ長堀)
豊島区	池袋東口地下街(池袋ショッピングパーク)	大阪市	京阪中之島線渡辺橋駅
豊島区	池袋西口地下街(池袋東武ホープセンター)	大阪市	京阪中之島線大江橋駅
豊島区	Echika 池袋	大阪市	ekimo 天王寺
武蔵野市	吉祥寺駅地下街(アトレ)	大阪市	ekimo なんば
武蔵野市	吉祥寺駅地下街(京王電鉄)	大阪市	ekimo 梅田
川崎市	川崎駅東口広場(アゼリア)	豊中市	千里中央地下街(東)
横浜市	横浜駅東口地下街(ポルタ)	豊中市	千里中央地下街(西)
横浜市	横浜駅西口地下街(ジョイナス)	神戸市	さんちか
横浜市	横浜中央地下街(マリナード)	神戸市	メロコウベ
横浜市	新相鉄ビルDブロック	神戸市	デュオこうべ山の手
横浜市	桜木町ゴールデンセンター	神戸市	デュオこうべ浜の手
小田原市	小田原地下街施設	神戸市	阪神元町有楽名店街
新潟市	西堀ローサ	神戸市	M-KITCHEN
高岡市	高岡駅前地下街	姫路市	グランフェスタ
蒲郡市	蒲郡北駅前地下街	岡山市	岡山一番街
名古屋市	新幹線地下街エスカ	岡山市	ベスカ岡山
名古屋市	ゲートウォーク	岡山市	中之町地下街
名古屋市	ユニモール	広島市	広島紙屋町地下街(シャレオ)
名古屋市	大名古屋ビル地下街(ダイナード)	松山市	松山市駅前地下街
名古屋市	地下鉄名駅地下街(メイチカ)	福岡市	天神地下街
名古屋市	名古屋地下街(サンロード)	福岡市	博多駅地下街
名古屋市	名古屋近鉄ビル地下街	福岡市	博多駅地下街(ステーションビル)
名古屋市	新名フード地下街	福岡市	博多駅新地下街
名古屋市	ミヤコ地下街		

(箇所数)

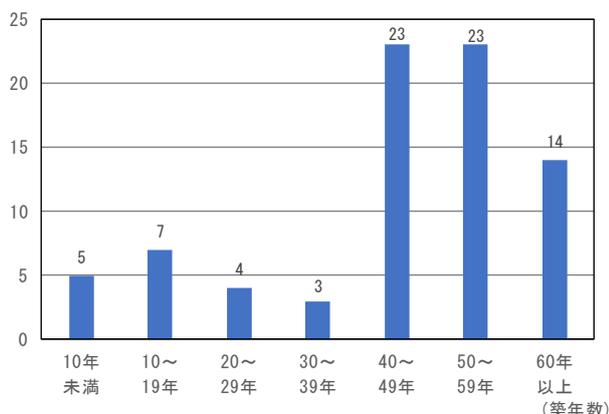


図-1 築年数別地下街数（79箇所）

地方自治体の協調補助事業として地下街防災推進事業が開始された（補助適用の第1号は川崎アゼリア地下街）。このガイドラインは、地下街が有する都市機能を継続

的に確保していくために、地下空間の安全性確保に向けた躯体の耐震診断・補強の方法および非構造部材の点検要領や避難計画検討方法等の技術的助言がまとめられたものである。しかしながらこのガイドラインでは、地下街の躯体コンクリートの漏水対策方法を特に記載していない。すなわち、現時点で漏水対策は、地下街管理者が日々の維持管理において実施する行為であるとして補助事業の対象となっていない、基本的に自己負担である。そのため、老朽化による漏水対応が多い地下街では、維持管理費用の中でも漏水対策費用が多くかかり大きな課題となっていることは明らかである。

地上の構造物のように地下街は、その多くが道路の下にあるため、簡単に造り直すことができない。また、最近の環境配慮から道路舗装自体が浸透性舗装に変わる、道路下の埋設物更新工事が多いなど、土中にある地下街に影響を及ぼし、直接水が侵入してくる度合いが高くな

った場所もあることを聞いていて、今まで以上に漏水発生
の度合いが高まっていることが確認できている。

2. 自己治癒材料

(1) 自己治癒材料の概要

今回使用した自己治癒材料は CSA 系膨張剤，ジオマ
テリアル，炭酸基系化学添加剤を使用している（図-2）。

CSA 系膨張剤は，水和反応によりエトリンガイト
（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ）を積極的に生成させて
膨張を付与する材料であり，一般的に収縮補償やケミカル
プレストレス導入の目的で使用されている。

ジオマテリアルは，砂・粘土・岩などの自然界で堆
積・形成された地盤材料の総称であり，今回の検討では
粘度系材料を用いており漏水の流速を低減する目的で使
用されている。

炭酸基系化学添加剤においてはひび割れ部において結
晶性水和物を生成するために用いられている。

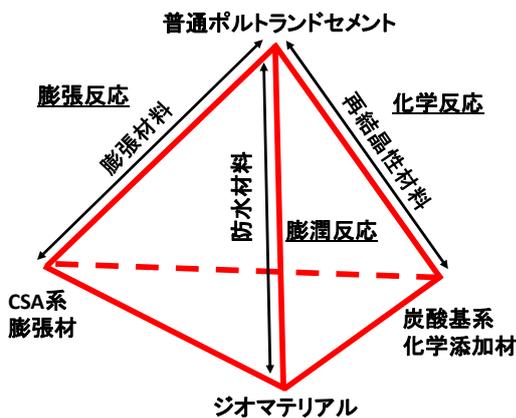


図-2 自己治癒材料の設計概念^{1) 2)}

(2) 既存補修材料との比較

これまでの漏水補修材料は，漏水を瞬時に止めるため
有機系材料（樹脂などの化学物質材料）が多く用いられ
ている。しかしながら，有機系材料は硬化後の自己収縮
が大きいことや化学反応が生じる時間は瞬間的で中長期

的な耐久性は有していないというデメリットがある。一
方，無機系材料（セメントや鉱物などを利用した材料）
は瞬間的な止水性は有していないものの，耐久性は中長
期的であることが知られている。自己治癒補修材料は，
この無機系材料を主とし，さらに自己修復機能を付加し
たもので耐久性をより向上させたものである。表-2に既
存漏水補修材と自己治癒補修材の比較表を示す。

(3) 自己治癒補修材料の効果確認試験

自己治癒補修材料の止水性能を評価するため，既往の
研究³⁾⁴⁾⁵⁾より漏水状況下でのひび割れの自己治癒機能を
確認するための通水試験を実施した。通水試験とは，供
試体に通水を行い，通水量の継時的な変化から止水性を
評価するものである。本試験では，自己治癒無収縮グラ
ウトと通常無収縮グラウトの比較を行った。

試験には，φ100×200mmの円柱供試体を用い，硬化
後に割裂した。割裂後，割裂面に残った微粉分を圧縮
空気を吹き付けて取り除き，厚さ0.2mmのテフロンシー
トを割裂面に配置した状態で挟み込みバンドで固定した。
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0，1，3，5，7，14，
28日後に計測した（図-3）。通水試験では，0日目の通
水量を基準とし，所定の経過日数での通水量の変化を比
較することで止水性を評価した。

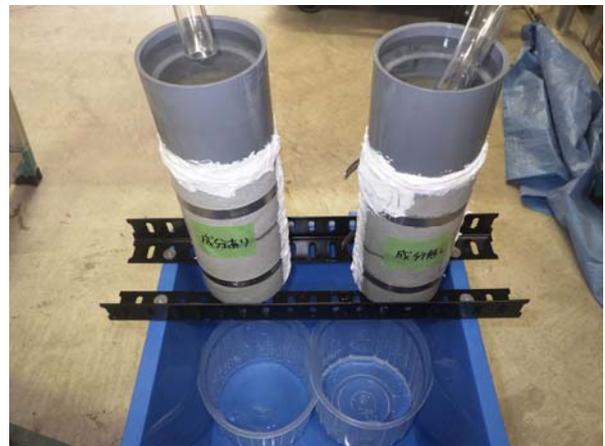


図-3 通水試験状況

表-2 既存漏水補修材料と自己治癒補修材料の比較表

	製品種類	適用場所	耐久性	備考及び試用期間
既存材料	有機系ひび割れ 注入製品 (エポキシ系)	乾式亀裂	概ね数年	・エポキシが劣化して再びひび割れが発生 ・濡れている部分では使用できない
	有機系ひび割れ 注入製品 (撥水ウレタン系)	湿式亀裂	概ね数年	・瞬間的な止水性能はある ・材料が時間とともに収縮し再漏水が発 生するケースが多い
自己 治癒 材料	無機系ひび割れ 自己治癒補修材 (モルタル，ペースト， 液体反応剤)	乾式亀裂 湿式亀裂	概ね数十年	・セメントコンクリートとの一体性が高 い ・補修材料がひび割れの自己治癒性能を 有しており，耐久性が向上

試験の結果、試験開始3日目までは両材料ともに通水量の低下が確認されたが、5日目以降では無収縮グラウトでは通水量の低下がほとんど確認できないが、自己治癒無収縮グラウトでは持続的に通水量の低下が確認でき、試験28日目の段階では0日目の通水量と比較して20%程度にまで低下し、自己治癒効果が確認された(図4)。

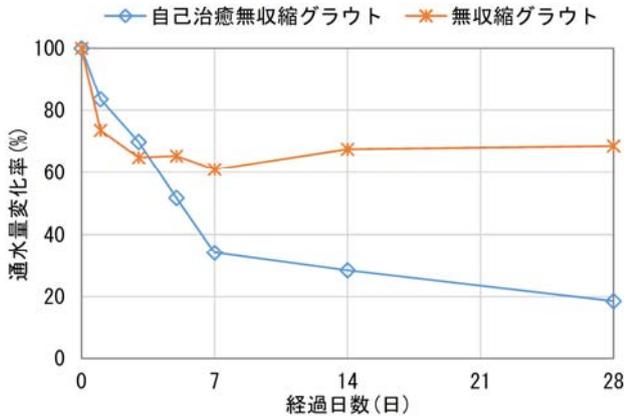


図4 通水試験結果

(4) 自己治癒補修材料を用いた漏水補修方法

自己治癒補修材料を用いた漏水補修方法は、これまでの施工実績⁶⁾を踏まえて、図-5に示す施工を基本とした。施工は、ひび割れ部に沿って垂直にφ10~20mm程度、深さ30mm程度、間隔を50mmでドリル削孔し、削孔内部に自己治癒材料(ペースト)を充填する。その後、ひび割れ部を中心に、幅150mm程度に自己治癒材料(モルタル)を表面に塗布して仕上げとした。なお、削孔時において鉄筋などに接触した場合は、その場所を外し、斜めによる削孔などを採用することとした。

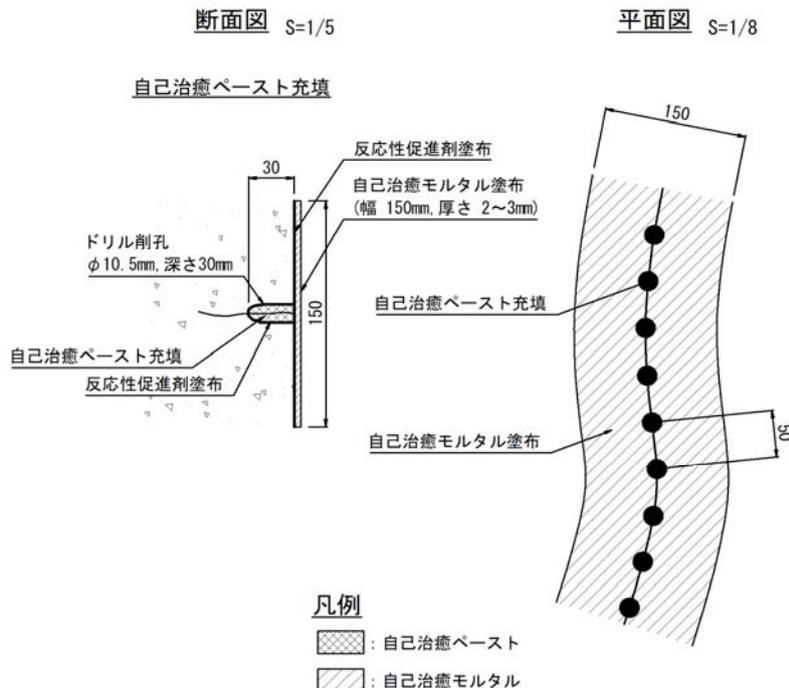


図-5 自己治癒補修材料による施工案

また、施工箇所において、漏水や微細なひび割れが多数認められる場合は、自己治癒材料の補修前(充填前)に無機系ひび割れ注入材料による止水工を行ってから実施することとした。

3. 地下街での自己治癒補修試験施工

(1) 地下街駐車場の天井部

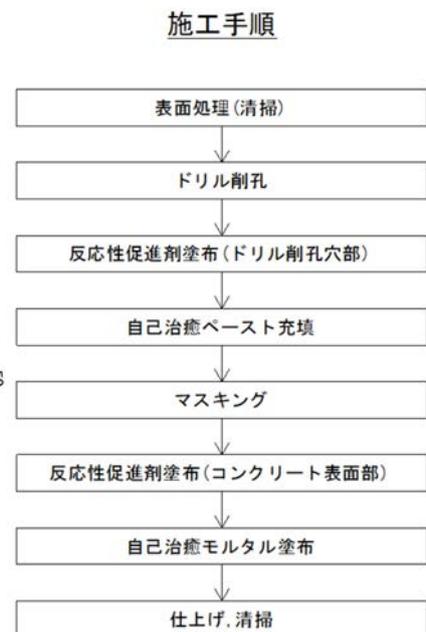
地下街駐車場の天井部で漏水が生じている箇所について、自己治癒補修材料による漏水補修を実施した。施工前から施工後6か月までの外観状況を図-6に示す。

当該箇所では、既に表面被覆材が施工されていた。これらの箇所をケレンすると、コンクリートに付着した錆汁とともにかぶり不足の鉄筋が何本か露出した。漏水は、これらかぶり不足の鉄筋に沿った形で水滲みが認められており、遊離石灰や鉄筋腐食による膨張が生じていた。また漏水も顕著であったため、無機系ひび割れ注入材料による止水工も併用して実施した。自己治癒材料を含有したセメントペーストを削孔穴に充填した段階で止水はできたが、さらに仕上げとして、表面に自己治癒材料を含有したモルタルを塗布して完成とした。

完成直後から経過観察を始めており、6ヶ月経過後においても再漏水は生じていなかった。表面に白い析出物が広範囲に認められており自己治癒生成物が確認された。

(2) 地下街管理施設内の天井部

地下街管理施設内の天井部で漏水が生じている箇所について、自己治癒補修材料による漏水補修を実施した。施工前から施工後6か月までの外観状況を図-7に示す。



試験施工箇所では、ひび割れが枝分かれをしており、目視で確認できるひび割れすべてを補修対象とした。

当該箇所では仕上げ用の塗膜材が施工されていた。ケレン後には、顕著なひび割れが露出した。最大ひび割れ幅は 3mm 程度有していた。隅角部付近で漏水が生じていたが、その他の箇所では漏水の発生はなかった。削孔はひび割れ直上に実施し、自己治癒補修材であるセメントペーストを充填、その後モルタルを塗布し仕上げとした。

1ヶ月後の経過観察で、削孔穴付近で白い自己治癒生成物が認められたが、施工後直後とほとんど変化はなかった。6ヶ月経過後においても再漏水は生じず良好な状態であった。

(3) 階段地上排気塔内の側壁部

階段地上排気塔内の側壁部分で生じている漏水に対し、自己治癒補修材料による漏水補修を実施した。施工前から施工後1ヶ月までの外観状況を図-8に示す。

漏水は構造物の隅角部（打継ぎ）より生じており、最大ひび割れ幅は3～5mm程度有していた。表層部の一部は締め固め不足による脆弱箇所も認められたため、止水および自己治癒材料の充填はなるべくコンクリート内部でできるように通常より削孔深さを2cm程度深く削孔した。削孔は隅角部に対して斜め方向に実施し、自己治癒補修材であるセメントペーストを充填、その後モルタルを塗布し仕上げとした。

1ヶ月後の経過観察では水が滲んでいる状況であった

が施工前のように滴ってはならず、白い自己治癒生成物が生じていることから、今後止水するものと考えられる。

(4) 今後の経過観察

施工後、目視による経過観察を実施したが、施工後1～6ヶ月を経過しても再漏水などの変状は生じておらず良好な状態を保っていた。しかし、今回の経過観察は短期間での評価であり、季節の温度変化による躯体の収縮等の影響が加味されていないことから、それぞれ異なる立地条件や部位に着眼し、比較検討を行いながら、今後中長期的に経過観察を実施していく予定である。

4. これからの維持管理について

これからは社会インフラを長期的な観点で維持管理していくことは避けて通れない。今回は既設構造物の補修に対し、自己治癒材料を用いることで持続可能な対策を試みた。一方、施設の新設や改修においても維持管理しやすい構造物を設計し造っていく必要がある。

このように、今までとは違う観点で社会インフラを再生しつつ利用していく時代に入っている。また、施設を日々管理する関係者側は、膨大な時間と人件費を投じて維持管理していく必要があり、この状況は終わることがない。したがって、このような状況下で得られる膨大な情報を如何にうまく活用していくか、施設の更新に役立てるか、という新しい発想が施設管理者側にも必要であると考えられる。



図6 地下街駐車場天井部での試験施工結果



施工箇所全景



施工前



ケレン後



漏水補修施工直後



施工後1ヶ月



施工後6か月

図-7 地下街管理施設天井部での試験施工結果



施工箇所全景



正面 施工箇所全景



正面 漏水補修施工直後



左面 施工箇所全景



左面 漏水補修施工直後



左面 施工後1ヶ月



右面 施工箇所全景



右面 漏水補修施工直後



右面 施工後1ヶ月

図-8 地階段地上排気塔内の側壁部

漏水対策という膨大な情報を一元管理していく手法をいつ誰が行うかが非常に大切であり、補修工事を決定したタイミングで効率的・効果的なデータ取得と膨大なデータ管理を効率的に実施していく、AI手法等を利用していく方法へと施設管理等も柔軟に変化させていくことが、今まさに求められている。

5. まとめ

本検討で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 地下構造物における維持管理で、漏水対策が大きな問題となっており、新たな止水材料、止水工法の開発が求められる中、「自己治癒材料」を用いてひび割れ漏水部の補修施工を実施し、その効果を検証した。
- 2) 経過観察の結果、一定の止水効果を発揮し地下構造物環境下での止水性能は良好であった。
- 3) 自己治癒型の漏水補修材料は今後新たな漏水補修材料として適用できる可能性を有していることが分かった。今後さらに経過観察を実施し、更なる検討を重ねていく予定である。

謝辞：本試験の実施にあたり、地下街管理者である(株)エスカと(株)セントラルパーク様に多大なるご協力を頂いた。ここに記して関係各位に深甚な謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) Tae-Ho Ahn et al.: Crack Self-Healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixture, ACT, Vol.8, No.2, pp.171-186, 2010.06
- 2) 森田卓, 戸部良太, 安台浩, 岸利治: ひび割れ自己治癒組成物を用いた漏水防止対策に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32.No.1, pp.1571-1582, 2010.7
- 3) 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, 第15巻, pp.149-154, 2015.11.
- 4) 亀井啓太, 安台浩, 橋本達朗, 小椋紀彦, 岸利治: 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, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第16巻, 2016.11
- 5) 村上哲哉, 鈴木拓, 安台浩, 橋本達朗, 小椋紀彦, 岸利治: 自己治癒材料を用いた新たな箱型トンネル漏水補修工法の検討その2, 土木学会第71回年次講演会, V-551, 2016
- 6) Chien-wen Huang, Tae-Ho Ahn, Jun-Hui Park, Yuuji Konishi, Norihiko Ogura, Hiroshi Nishi, Koichiro Sato, Ryo Ishikawa and Toshiharu Kishi: The Estimation of the Self-healing Repair Technology for Cracked Underground Structures on the Urban Highway System, *Proceedings of fib Symposium 2017 Maastricht*, pp.250-258, 2017.06
- 7) 角田隆太, 新田裕樹, 大塚努, 小椋紀彦, 小西雄治, 篠原秀明: 地下鉄トンネルにおける自己治癒材料を用いた漏水補修箇所の健全性調査, VI-289, 土木学会第73回年次学術講演会, 2018.08

EVALUATION OF WATER STOPPING MEASURES USING SELF-HEALING MATERIALS IN AN UNDERGROUND STOPPING CENTER

Norihiko OGURA and Takaki OOMORI

Recently, due to abnormal weather conditions, such as localized heavy rains, countermeasures against water leakage have become a major problem in the field of maintenance of underground structures. It is observed that groundwater movements are particularly strong in ceiling and wall parts of underground structures, which are directly in contact with bedrock.

In conventional water leakage repair, organic-based materials are often used to instantly stop a water leakage. However, this kind of materials are generally unsuitable from the viewpoint of medium- and long-term durability due to the fact that organic-based materials show large shrinkage after hardening and that chemical reaction occurs instantaneously. As the result, because of seasonal temperature fluctuations, shrinkage of concrete of a repaired structure and aging deterioration of organic-based water stopping materials, there are many cases of repeated leakage from repaired place. To address this problem and effectively carry out medium- and long-term maintenance new materials and methods for water stopping must be developed.

In the presented study of application of self-healing repair material for crack and the water leakage repair of underground structures was evaluated. As the result of observation of application of the material for underground structures' repair were confirmed.