

報告 ひび割れ自己治癒材料を用いた新たな地下鉄トンネル漏水補修材料の検討

橋本 達朗^{*1}, 村上 哲哉^{*2}, 安 台浩^{*3}

要旨：東京地下鉄株式会社（以下、「東京メトロ」）が管理する地下鉄トンネルは、河川等と交差する箇所も多く常時ひび割れ部より漏水が生じる箇所もあり、東京メトロではトンネルの長寿命化対策の一つとして毎年漏水対策を実施している。しかし、季節の温度変化による躯体の収縮や有機系材料の経年劣化により、再漏水が生じる場合も多く長期的な安定性を有する補修材料の開発が求められる。そこで、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、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、急結材料、地下鉄トンネル

1. はじめに

東京メトロでは、現在営業キロ約 195km のうち、約 85%がトンネル区間である。その中には供用開始から 80 年以上経過した区間もある。トンネル区間の多くは河川等と交差する箇所も多く常時ひび割れ部より漏水が生じる箇所もある。また、地下水に含まれる塩分により漏水近傍部に塩害が生じる可能性がありトンネルの長寿命化のため維持管理の面では特にトンネル内への漏水補修対策が重要な課題となっている。現在東京メトロでは毎年多額の費用をかけて漏水対策を実施しているが、季節の温度変化による躯体の収縮や有機系材料の経年劣化により、再漏水が生じる場合も多く長期的な安定性を有する補修材料の開発が求められる（図-1、図-2）。そこで、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、室内試験、現地試験施工およびその後のモニタリングについて報告するとともに、その有効性を検討した。



図-1 トンネル漏水部

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 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) を積極的に生成させて膨張を付与する材料であり、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するために使用した。

図-3にひび割れ自己治癒技術の材料設計概念を示す¹⁾²⁾。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。



図-2 再漏水箇所

*1 (株)CORE 技術研究所 技術部 (正会員)

*2 東京地下鉄 (株) 鉄道本部 工務部 土木課

*3 (株)SERIC JAPAN

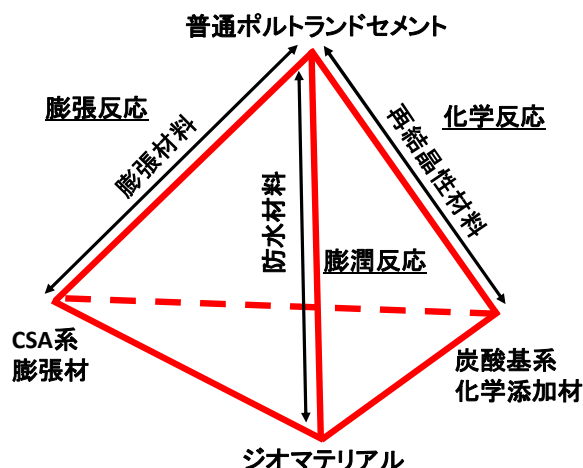


図-3 ひび割れ自己治癒材料の設計概念^{1),2)}

2.2 ひび割れ自己治癒材料の開発

自己治癒補修材料に伴う開発は、ひび割れ充填材料を中心に進められてきており、橋梁の張出下面や漏水量の少ないところでは補修成果が認められている^{3),4),5)}。しかしながら、地下鉄トンネル内に生じる漏水は地下水位の関係で常時流れる箇所もあり、ひび割れ部には高い水圧がかかる場合もあるため、これまでの充填材料ではなく、更に漏水補修材料として特化した開発が求められた。東京メトロでは薬液注入とVカット工法を併用した漏水補修工を基本としている。そのため、止水材や急結材が果たす補修効果の役割が非常に大きい。そこで、これら止水材と急結材に自己治癒機能を付加することで、特に再漏水に対する抵抗性の持続効果を期待できると考え検討を行った。今回開発した急結材料は超速硬型の材料に対して20%、止水材料は既往の無機系材料に対して約45%自己治癒材料に置換した材料構成になっている。

3. 室内試験

東京メトロ環境下において、自己治癒性能を混入した急結材と止水材の漏水補修材料が、実現場においても適用可能かを判断するため、従来東京メトロで使用してい

る漏水補修材料と各種諸性能を比較検討した。

3.1 各種試験概要

東京メトロ内での漏水補修工事は終車から始発までの短時間で施工を完了する必要があるため、試験項目は作業時間が短い東京メトロ特有の環境下での使用を考慮して、主に各材料の硬化時間や強度に着目し設定した。表-1に各種試験項目および引用規格を示す。

(1) 硬化時間

JIS R 5201 (3) 凝結試験に準拠して急結材の硬化時間の測定を行った。

(2) ビッカース硬さ試験

急結材は硬化が早く、 $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ などの供試体を作製することが困難であったため、小型の試験片で強度が推定できるビッカース硬さ試験を採用した。

試験は圧子（対面角 136° のダイヤモンド正四角錐）に試験力 $F \text{ (N)}$ を加えて計測対象物にこれを押し込み、圧子を取り除いた際にできる永久変形のくぼみの対角線長さ $d \text{ (mm)}$ から接触面積 $S \text{ (mm}^2\text{)}$ を算出し、式(1)を用いてビッカース硬さ $[HV]$ を算出した。セメント系材料は不均一であるため無作為に5箇所選択して試験を実施し平均値を用いることとした。測定状況を図-4に示す。

このビッカース硬さと圧縮強度には相関関係⁶⁾があり、計測した HV 値から圧縮強度 $\sigma \text{ (N/mm}^2\text{)}$ を式(2)を用い



図-4 ビッカース硬度試験状況

表-1 室内試験項目一覧

材料	試験項目	試験方法	引用規格	東京メトロ基準		備考
急結材 W/C=30%	硬化時間	硬化時間試験	JIS R 5201	基準無し		-
	圧縮強度 (N/mm ²)	ビッカース硬さ試験	JIS Z 2244	7日 28日	16以上 20以上	-
	再びひび割れに対する止水性	通水試験	-	基準無し		従来品と比較
止水材	ゲルタイム	ゲルタイム試験	ASTM 4402	基準無し		-
	コンシステンシー	フロー試験	JHS 414	45秒以内		JHS 基準
	再びひび割れに対する止水性	通水試験	-	基準無し		従来品と比較

て算出し従来品と比較した。

各供試体作製時の水セメント比は一律 30%とし、保存期間中は封緘養生とした。ビッカース硬さ試験の測定は打設後材齢 7, 28 日にそれぞれ実施した。

$$HV = k \frac{F}{S} = 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

$$\sigma = 1.626 HV \quad (2)$$

(3) ゲルタイム試験

ASTM 4402 に準拠して、ゲルタイムを測定した。粘度測定のために回転粘度計(図-5)を使用し、粘度測定範囲を 0~6 mPa, 回転数を 0.01~200rpm とし 5 分間回転させ、約 30 秒単位でのトルクの変化から測定した。

(4) フロー試験

規定の P 漏斗(図-6)に規定量の止水材料を入れその材料が漏斗下面の流出管から流出が最初に途切れるまでの流下時間を計測した。フロー試験は JHS414 (JSCE-F-521-1999) に準拠して実施した。

(5) 通水試験

各補修材料による再ひ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 1 度急結材料、止水材料を用いて種補修を施した供試体に対して、再度割裂しひび割れを導入し再漏水を生じさせた供試体を使用し、通水量の継続的な変化から評価を行ったものである。



図-5 ゲルタイム測定状況



図-6 フロー試験状況

供試体は $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体を作製し、割裂後断面部に残った微粒分を高圧縮空気を吹き付けて取り除き、7 日間水中養生を行うことで、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。

急結材による補修ではひび割れ部に V カットを施しその部分に急結材を塗布した。次に、止水材の場合はひび割れ部から削孔し注入パイプを取付け止水材料をひび割れ内部に注入し補修を実施した(図-7)。また、比較用に無補修のケースも実施した。

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、再びひび割れを導入し、通水試験を実施した。なお、再びひび割れの導入は、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、意図的にひび割れ幅の変動についても模擬することとした。再びひび割れ導入後の通水試験は各供試体上面に、 $\phi 100 \times 100$ mm 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-8)。

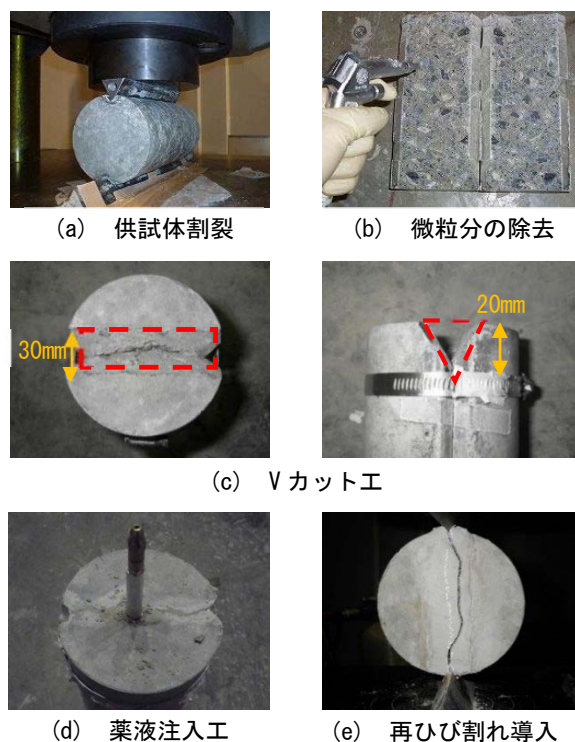


図-7 通水試験用供試体作製状況



図-8 通水試験状況

3.2 室内試験結果

(1) 急結材

自己治癒材料を含んだ急結材は、表－2 に示すように硬化時間が 1 分程度と従来品と比較して非常に硬化が早く速硬性を有していた。

ビッカース硬度と圧縮強度の関係から圧縮強度を算出したところ、従来品の方が強度は高い傾向を示したが、自己治癒型でも 7 日で 24N/mm²、28 日で 31N/mm² とメトロ環境下での適用基準値（7 日 16N/mm² 以上、28 日 20N/mm² 以上）の 1.5 倍以上を有していた。

(2) 止水材

ゲルタイム試験の結果（表－3）より、自己治癒型は従来品と同程度の粘性を有していることを確認した。また、いずれの止水材においてもフロー値の結果は JHS 基準に対して 1/3 程度と短く流動性が高いことを確認した。

(3) 再びび割れに対する止水性能

再びび割れに対する止水性能の評価は、再びび割れ導入後からの漏水量の変化した割合（以降、通水量変化と記す）で評価を行った。通水量変化率は再びび割れを導入した際に計測した漏水量を 100% とし、経過日数で最初の漏水量からの変化（増減）を表した。

再びび割れ導入後の通水試験の結果を、図－9 に示す。

急結材の比較結果では、自己治癒材料型の急結材は通水試験 28 日目において、初期通水量から 50% 低減しているのを確認した。また、従来品では試験 28 日ではほとんど通水量の低減は認められなかった。今回開発した急結材料は速硬性が求められるため急結成分を多く含有する必要がある自己治癒材料の置換率が 20% と低め（通常 30～50%）に設定してあるが今後自己治癒成分の置換率を高くすることでさらに通水量を低減することができ、

再びび割れに対する抵抗性を高めることができると考えられる。

また、止水材の比較結果では、自己治癒材料型の止水材は試験後から通水量が低減しており、7 日目では通水量が 0 まで低下する結果となった。これはひび割れ内部に止水材が注入されているため、自己治癒成分が効果的に働いたと考えられる。従来の止水材においては、試験 28 日目で通水量の低減は認められなかった。

自己治癒材料を混入した止水材および急結材においては、材齢が経過するにつれて、無補修および従来品の材料と比較して、再びび割れ発生後に高い止水効果を有することを確認した。

4. 現地試験施工

4.1 試験施工概要

現地試験施工は、箱型トンネル側壁部に生じたひび割れを対象とした。ひび割れ幅は最大で約 1.0mm、長さ約 4m、漏水量は滲み出し程度ではあるが、常時ひび割れ部より漏水が発生している未補修箇所を対象とした。

今回実施した試験施工では、主に急結材、止水材を自己治癒材料に置換したものと施工時に使用する水膨張性ゴムの有無をパラメータとした。

止水工 1 は急結材料に自己治癒材料を添加し止水材料には従来のウレタン系材料を使用したものであり止水工 2 は急結材と止水材に自己治癒材料を添加した自己治癒型、止水工 3、4 は急結材、止水材と断面修復材に従来材料を用いた従来型とした。

また、東京メトロの漏水補修工では、薬液注入工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である。そこで、止水

表－2 急結材料試験結果一覧

試験項目		材齢	従来品 無機系	自己治癒型 無機系	東京メトロ基準
ビッカース硬さ 試験	圧縮強度 (N/mm ²)	7 日	41	24	16 以上
		28 日	41	31	20 以上
硬化時間測定	硬化時間 (分)	-	6 分 程度	1 分 程度	基準 無し

表－3 止水材料試験結果一覧

試験項目		従来品		自己治癒型 無機系	東京メトロ基準	他機関基準 JHS 基準
		有機系	無機系			
ゲルタイム 試験	ゲルタイム (秒)	30	15	30	無し	無し
フロー試験	流下時間 (秒)	15.68	9.54	14.98	無し	45 秒以内

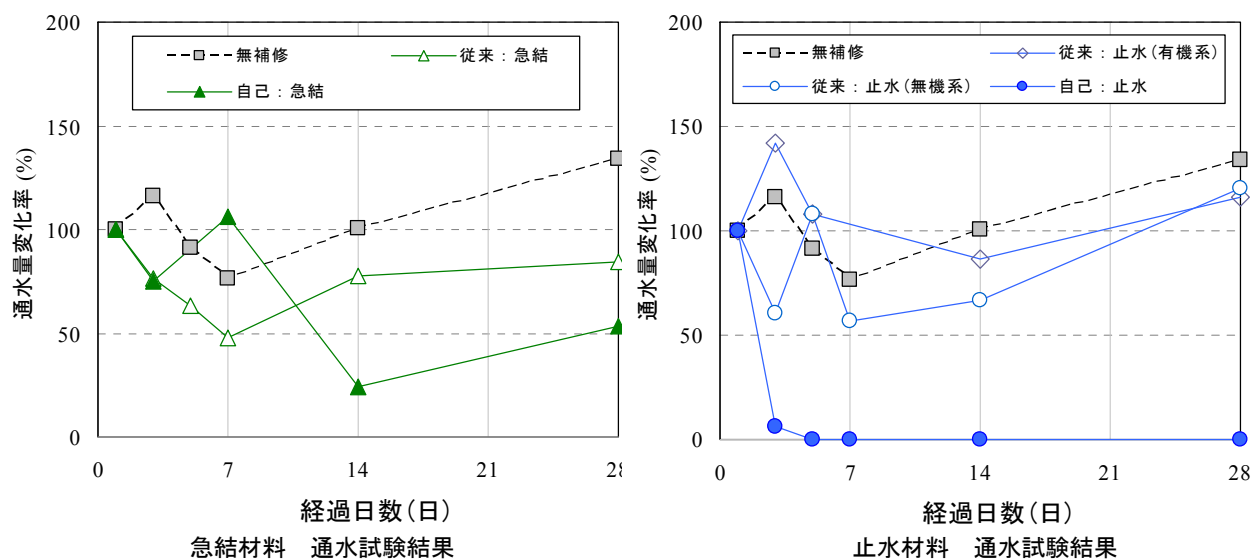


図-9 通水試験結果

表-4 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 1	従来品 ウレタン系	自己治癒入り 無機系	無し	従来品 PCM
	止水工 2	自己治癒入り 無機系	自己治癒入り 無機系	無し	従来品 PCM
従来型	止水工 3	従来品 ウレタン系	従来品 無機系	有り	従来品 PCM
	止水工 4	従来品 ウレタン系	従来品 無機系	無し	従来品 PCM

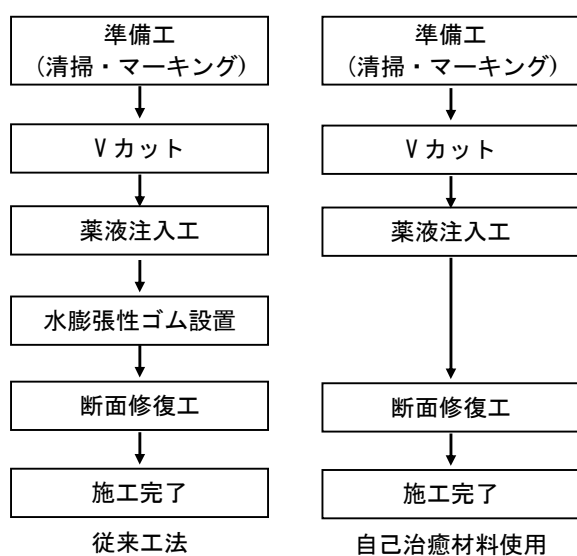


図-10 試験施工フロー

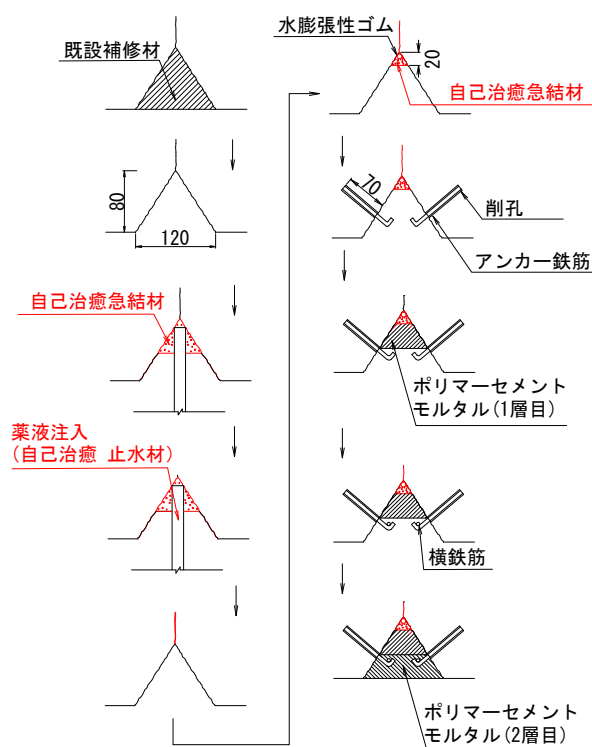


図-11 フロー試験状況

工 1, 2 では, これら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て, 表-4 に示す各検討工法の詳細を決定した。本試験施工フローを, 図-10 に, V

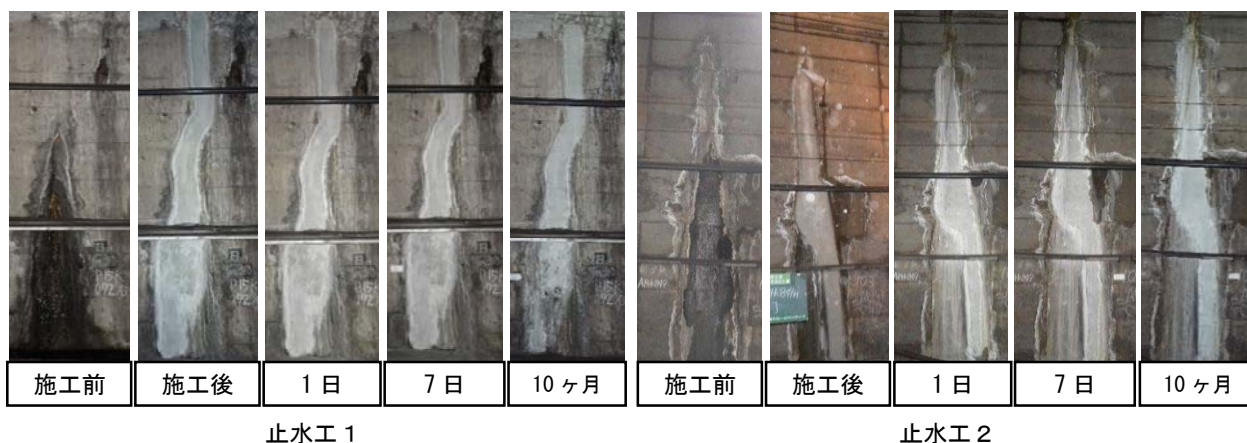


図-12 モニタリング結果

カット工法による標準施工図を図-11 示す。

4.2 現地試験施工結果

試験施工の結果を図-12 に示す。自己治癒材料を使用した止水工 1, 2 において、工程通り作業を完了することができ、また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

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、1 日、7 日、14 日と短期間で行った後、季節の温度変化による躯体の収縮を 1 度経験した 10 ヶ月後において実施した。

止水工 1, 2 において施工後 10 ヶ月が経過した状態においても再漏水は生じておらず、表面部は乾燥した状態であり非常に良好な状態を保っていた。また、従来型である止水工法 3, 4 においても同様に再漏水等の劣化は確認されなかった。

今回試験施工を実施した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、各材料における長期的な安定性を評価するために、今後もモニタリングを継続的に実施し検討を行っていく予定である。

5. まとめ

- (1) 室内試験結果より、今回検討に使用した自己治癒機能を付加した急結材料は、硬化時間が 1 分程度と超速硬性能を有しており、漏水過多な場所での使用には適しているが、今後様々な条件での使用を考慮すると従来材料のように、現場での漏水量などを考慮して硬化時間等を選択できるような改良が必要である。
- (2) 通水試験の結果より、自己治癒材料を混入した止水材および急結材は、材齢が経過するにつれて、再びひび割れ発生後に高い止水効果を有することを確認した。
- (3) 現地試験施工より、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。今後モニタリングを継続して実施し、更なる検討を重ねていく予定である。

謝辞

今回実施した室内試験は東京大学生産技術研究所岸研究室で実施したものであり、岸利治教授、同研究室には多大なる協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) A. Hosoda et al.: "Self-Healing properties with various crack widths under continuous water leakage", 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2008), Cape Town, South Africa, Nov. 24-26, 2008)
- 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) 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
- 4) 橋本達朗, 安台浩, 岸利治, 伊代田岳史: 無機系材料を用いたひび割れ自己治癒技術の応用によるひび割れ漏水補修に関する研究, 第 38 回土木学会関東支部技術研究発表会, V-27, CD-ROM, 2011.3
- 5) 安台浩, 橋本達朗, 森田卓, 岸利治, 松田芳範: ひび割れ自己治癒技術を応用した無機系補修材料に関する研究, 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 11 巻, 2011.11
- 6) (株)太平洋コンサルタント, 鹿島建設(株): セメント系材料の水理・力学特性の変遷に関する研究, 核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書, JNC TJ8400 2002-028, 2002.2