

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686064

研究課題名(和文) ひび割れ自己治癒特性を有する新たな無機系ひび割れ補修材の開発

研究課題名(英文) Development of advanced inorganic crack repair materials with crack self-healing capabilities

研究代表者

安 台浩 (AHN, TAE-HO)

東京大学・生産技術研究所・特任准教授

研究者番号：20520191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,500,000円、(間接経費) 6,450,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、コンクリートのひび割れ自己治癒に効果があると期待される組成物に着目し、そのセメント化学反応機構をひび割れ補修材に応用することで、コンクリート構造物の長期的な信頼性を向上させることを目的としている。地下トンネル構造物のひび割れ補修方法及び橋梁床板のひび割れ補修方法を検討した。無機系補修材料にひび割れ追従性を付与することができれば、ひび割れ追従性と長期信頼性を兼ね備えた新たな補修工法になり得ると考えた。本研究で検討した補修方法は塗布工法、充填工法、充填・塗布工法3種類である。さらに、大量の漏水がある地下鉄の構造物で止水性能とひび割れ自己治癒性能を同時に発現する材料の開発研究を進行した。

研究成果の概要(英文)：In this study, innovative repair methods based on crack self-healing technologies using cementitious materials were suggested in order to prevent water leakage in civil infrastructure such as slab, tunnel and water-retaining structure. Especially, this study aims to develop new inorganic repair materials as needed to follow the crack and its repair methods. Crack repair methods such as Coating Method (CM), Drilling & Filling Method (DFM) and Coating and DF Method (CDFM) for the practical industrial application were examined in comparison with normal crack repair method without self-healing capability. From these results, it was confirmed that the sealing effects of water leakage through the penetrating cracks from field tests could be improved by cementitious composite materials with self-healing capability.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学、土木材料、施工、建設マネジメント

キーワード：ひび割れ 自己治癒 無機系材料 ひび割れ補修 止水性能 漏水補修 鉄道高架橋 地下構造物

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物に発生するひび割れは、コンクリートの中性化を促進させ、鋼材腐食による耐久性の低下を引き起こし、漏水の発生、水密性、気密性および美観性の低下等の原因となる。特に大規模な地下コンクリート構造物の場合には、漏水対策としてシートを用いた防水工が施されるが、水は欠陥部に容易に回るため、完全な防水を実現することは極めて困難である。このような背景の下、近年、ひび割れが生じたとしてもコンクリート自体に漏水防止性能を回復する機能を付与することを目指した、ひび割れ自己治癒コンクリートの開発に関する研究が増加している。1997年より、東京大学生産技術研究所岸研究室は、ひび割れが発生してもコンクリート自らがひび割れを自己治癒する技術の開発に先駆的に取り組んできた。ひび割れ自己治癒の機構は複数存在するが、2005年から本人が研究した自己治癒技術において、材齢200日という水和反応がほぼ収束した長期材齢においてひび割れが発生しても、その後の水の供給により、僅か3日程度で急速にひび割れが自己治癒する画期的な系の開発にも成功している。実用化された場合、配合などによって異なるが、通常のコンクリートと比較して、価格は3割～7割程度増加するものと考えられる。先んじて平成21年～22年度には若手研究Bを基盤として歴代構造物の漏水現象調査を実施した。その結果、新しいひび割れ自己治癒組成物の開発が一部完了し、現在これを応用したひび割れ自己治癒補修材料を開発中である。

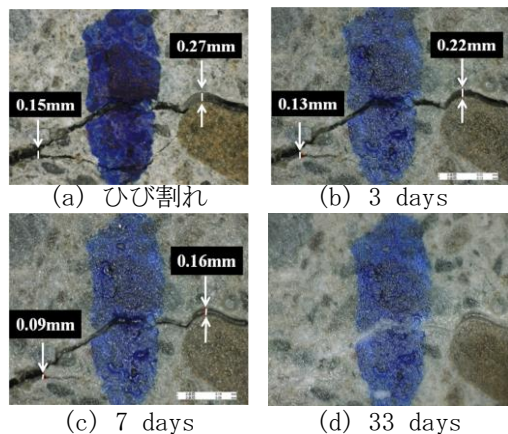


図-1 ひび割れ自己治癒コンクリート

### 2. 研究の目的

本研究では、現在提案されている多くのひび割れ補修方法のうち、コンクリートのひび割れ自己治癒に効果があると期待される組成物に着目し、そのセメント化学反応機構をひび割れ補修材に応用することで、コンクリート構造物の長期的な信頼性を向上させることを目的としている。具体的には、ひび割れ自己治癒コンクリートの反応メカニズム(膨張性、膨潤性、結晶性)を基礎とし、コンクリートの補修材からひび割れ部位に自己治癒

水和物を生成させて治癒するメカニズムに基づき、簡単な補修により、自発的にひび割れを治癒する機能を付与する手法の確立を主たる目的として研究を進める。また、ひび割れ部位に生成された水和物の化学的特性を検討するため、化学分析を実施する。このように開発された材料に対して、最終的には性能評価実験および実際のコンクリート構造物への適用評価実験を行う。

#### (1) 地下トンネル構造物のひび割れ補修方法

本研究では、新規および既設トンネル構造物を対象として、ひび割れ自己治癒技術をより効率的に漏水対策に適用するための新たな工法に関する基礎的な検討を行う。新規のトンネル工事への適用については、NATM工法を対象として、自己治癒組成物を含有した吹き付けコンクリートを使用することを想定した(図-2(a))。また、既存トンネルの漏水補修工事への適用については、ひび割れ部に適当な間隔で削孔を行い、自己治癒成分を含む無機系補修材を充填する方法を検討した(図-2(b))。以上の2つの方法により、吹き付け部ないし充填部から、外的ないし後天的にひび割れ部位に自己治癒水和物を生成させる方法とその効果について検討を行う。

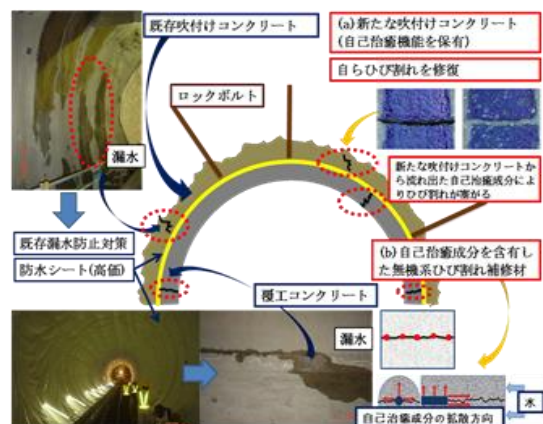


図-2 ひび割れ自己治癒材料のトンネル適用イメージ (a) 自己治癒組成物を含有した吹き付けコンクリート (b) 自己治癒組成物を含有した無機系ひび割れ補修材

#### (2) 橋梁床板のひび割れ補修方法

本研究では、橋梁床板の構造物を対象として、ひび割れ自己治癒技術をより効率的に漏水対策に適用するための新たな工法に関する基礎的な検討を行う。

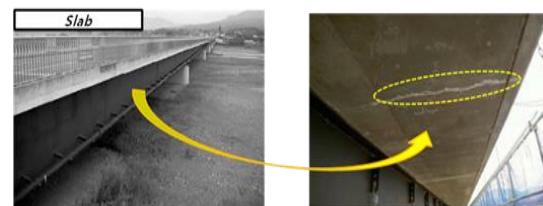


図-3 橋梁床板へのひび割れ自己治癒材料適用の検討

### 3. 研究の方法

#### (1) 平成 23 年度

##### ①ひび割れ自己治癒技術を応用した無機系ひび割れ補修材料に関する研究

##### ②橋梁床板のひび割れ補修方法

##### ③地下トンネル構造物のひび割れ補修方法

#### (2) 平成 24 年度

##### ④高性能無機系ひび割れ注入材を用いた漏水ひび割れ補修及び現場適用に関する研究

橋梁や床板などに生じているひび割れの補修方法については、補修・補強指針やマニュアルが制定されており、多くの構造物の補修に適用されている。一方、地下トンネルや送・排水設備などの構造物における湧水を伴うようなひび割れの補修材料・工法については、多くの場合現場対応であり、指針やマニュアルが制定されていないのが実情である。これらの構造物の補修では、補修時の構造物の損傷度、湧水量、補修方法、施工の適切さなどにより補修効果が大きく異なることから、補修を施しても再劣化が生じやすいことも懸念される。そこで、止水材料の開発と施工した場合の止水効果ならびに耐久性を考慮した止水材注入実験を行い、これらの性能を確認した実験結果と実現場適用結果を報告する。

#### (3) 平成 25 年度

##### ⑤自己治癒補修材料を用いた地下鉄トンネルの漏水補修工法・材料の検討

東京地下鉄株式会社(以下、「東京メトロ」)は、現在 9 路線、約 195km の構造物を維持管理しており、そのうち約 80%がトンネル構造物である。トンネル区間の多くは都心に位置しており、トンネルが河川・運河・埋立地の下、もしくは近接している箇所が 75 区間存在している。この 75 区間のうち 49 区間が箱型トンネル(開削工法および潜函工法)、29 区間がシールドトンネルを含む区間である(両方を含むが 3 区間)。

一部の区間で、トンネル内への漏水が顕在化(図-4(a))しており東京メトロでは、毎年多くの費用をかけて止水対策を実施している。しかし、一度補修した箇所からの再漏水(図-4(b))も多く、長期的に維持管理を実施していくに当たり新たな止水材料、止水工法の開発が急務であると考えられる。そこで、ひび割れ自己治癒材料をメトロ環境に適用できないかと考え、実現場においてひび割れ漏水止水試験施工を実施した。



(a) 新規漏水箇所 (b) 再漏水箇所  
図-4 漏水状況

### 4. 研究成果

#### ④高性能無機系ひび割れ注入材を用いた漏水ひび割れ補修及び現場適用に関する研究

実験に使用した無機系ひび割れ止水材はコンクリート構造物の耐久性を考慮して超微粒子高炉スラグセメントを使用した。

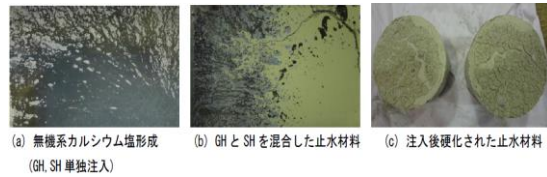


図-5 0.2mm の謀議ひび割れに注入された止水材料の状況

また混和材GH、高反応促進材SH、2種類の高性能止水材を使用して実験を行った。図-5は0.2mmのひび割れ部での無機系止水材の状況を示す。

注入実験に用いた試験体は、図-6に示すような150×200×1800mmの矩形梁のコンクリートを用いた。かぶりが30mmの位置にd25のエポキシ樹脂塗装鉄筋を2本配置したものであり、30年前に疲労実験に供した試験体を屋外暴露したものである。このコンクリート梁に発生しているひび割れは、曲げ載荷試験により発生させたものであるが、ひび割れ幅は底面側で5mm程度であるが、コンクリート梁の高さ方向の中心では0.2~0.5mm程度である。注入実験に際しては、コンクリート内部のひび割れが粉塵などにより閉塞されている可能性があることから注入前にひび割れに沿ってコンプレッサーにより高圧水洗浄を行った。漏水実験に用いた試験体は図-7(a)と(b)に示す桁形試験体(外部寸法0.9m×0.75m×h1.0m、溜水部内寸法0.5m×0.5m×h0.8m、桁壁厚0.1~0.2m、有筋)を作製した。



図-6 試験体の形状と注入プラグ取り付け

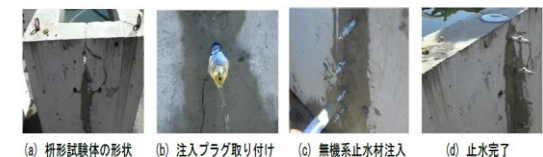


図-7 漏水桁形試験体の止水状況

注入実験に使用した注入材はGH、SHならび高炉スラグセメントの3種混合した材料である。図-5(c)に示すように注入後無機系止水材は元コンクリートと一体になる可能性が高く、ひび割れ部の接着強度および耐久性を上昇させる可能性もある。図-6(c)と(d)は注入完了後7日目にひび割れ部位をコア採取して止水材の注入を確認した結果である。

0.2mm以上のひび割れには多量の止水材が注入されていることを目視でも観察することができる。0.2mm以下の微細ひび割れは以後SEM-EDS観察を通じて報告する予定である。図-19は注入実験を基礎にして最適な高性能無機系止水材の配合比を選定し、実漏水状況を想定した桁形試験体の止水実験を実施した。その結果コンクリート壁が10cm以下の環境でも貫通ひび割れ部位に止水材の注入と同時に漏水が止水されることを確認することができた。図-20は本研究を基礎として2013年度3月に行った、地下下水道バルブ室での適用事例である。12L/分の漏水場所を一次的に止水することが確認された。さらに、図-8(d)に示すようにひび割れ自己治癒材料を止水後塗布して完全に漏水を補修する新たな補修方法を開発することができた。



(a) 12L/分の漏水場所 (b) 注入プラグ取り付け (c) 無機系止水材注入 (d) 自己治癒材料塗布

図-8 実地下下水道管のバルブ室での漏水適用事例(12L/分の漏水状況での止水を確認)

### ⑤自己治癒補修材料を用いた地下鉄トンネルの漏水補修工法・材料の検討

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( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ )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・岩などの自然界に堆積・形成された地盤材料の総称であり、今回の検討では粘土系材料を使用した。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生成するために使用した。

今回の試験施工では漏水量によって3種類の工法を採用した。工法は漏水量の多少によって決定した。各補修方法を表-1に示す。

表-1 各種止水工法

分類	止水工法①	止水工法②	止水工法③
漏水量	小	中	大
方法	<p>ドリル削孔し内部に自己治癒材料を充填、表面にも塗布</p>	<p>パタン①に無機系ひび割れ止水材を注入</p>	<p>パタン②の自己治癒モルタルを省略した施工法</p>



(1) 止水工法①

止水工法①は、ひび割れ部に沿って垂直にφ15mm程度、深さ30mm程度、間隔を30~50mmでドリル削孔し、削孔内部に自己治癒材料を用いた補修材料を充填していき、最後にひび割れ部を中心に、幅150mm程度に自己治癒材料を表面に塗布するものとした。

### (2) 止水工法②

止水工法②は、止水工法①に無機系ひび割れ止水材を注入して行うものとした。

### (3) 止水工法③

止水工法③は、止水工法②のドリル削孔により削孔内部に充填する自己治癒材料を省略して行うものとした。

現在開発された自己治癒材料のみを使用した止水工法①では、ひび割れからの漏水が軽減するのが確認できたため、漏水量の少ない箇所では自己治癒材料のみでも止水効果が期待できると考えられる。

無機系ひび割れ止水材+現在開発された自己治癒材料を併用した止水工法②、③では、大量(140/分)の漏水量を止水する効果があることを確認できた。しかし、水圧による注入不良及び材料分離の問題が一部確認されて、注入工法及び材料の改善が必要であることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① D.J. Kim, S.H. Kang, T.H. Ahn, “Mechanical Characterization of High-Performance Steel-Fiber Reinforced Cement Concrete Composites with Self-Healing Effect”, Materials, 査読有, No.7, 2014, pp. 508-526
- ② 小出貴夫, 岸利治, 安台造, “細骨材をコアとした自己治癒材料造粒物を用いたモルタルの基礎的研究” セメントコンクリート論文集, 査読有, No. 66, 2013, pp. 243-250
- ③ 小出貴夫, 岸利治, 安台造, “造粒したひび割れ自己治癒材料および高炉スラグ細骨材を用いた自己治癒コンクリートに関する基礎的研究” 日本コンクリート工学年次論文集, 査読有, No. 34(1), 2012, pp. 1408-1413

[学会発表] (計10件)

- ① 村上哲哉, 大泉政彦, 諸橋由治, 安台造, 岸利治, “自己治癒補修材料を用いた地下鉄トンネルの漏水補修工法・材料の検討” 日本土木学会 第69回年次学術講演会, 2014年09月10日~2014年09月12日大阪大学豊中キャンパス

- ② Vu Viet Hung, Toshiharu Kishi, Tae-Ho Ahn, “Performance of crack self-healing concrete by development of semi-capsulation technique for functional effective ingredients” International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia 2013, 2013年10月09日～2013年10月11日 Hilton Hotel Hanoi & NUCE Campus, VietNum
- ③ H. IKOMA, T.H. Ahn, T. Kishi, “VERIFICATION OF SELF-HEALING MECHANISM IN OPC INCORPORATING CARBONATE” The Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13) 2013年09月11日～2013年09月13日 Sapporo, Hokkaido University
- ④ 生駒勇人, 安台浩, 岸利治, “普通ポルトランドセメントにおける自己治癒性能の経時的変化の検証” 日本土木学会 第68回年次学術講演会, 2013年09月04日～2013年09月06日, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス
- ⑤ 安台浩, 鈴木輝彦, 星野富夫, 岸利治, “高性能無機系ひび割れ注入材を用いた漏水 ひび割れ補修及び現場適用に関する研究” 日本土木学会 第68回年次学術講演会 第68回年次学術講演会, 2013年09月04日～2013年09月06日 日本大学生産工学部津田沼キャンパス
- ⑥ Vu Viet Hung, Toshiharu Kishi, Tae Ho Ahn, “Development of Self-healing granules having semi-capsulation effect by using cement compound, chemical/mineral admixtures & its watertight performance through crack” The International Conference on Self Healing Materials (ICSHM2013), 2013年06月16日～2013年06月20日 Ghent (Belgium)
- ⑦ 関下和真, 安台浩, “コンクリート構造物に対するひび割れ自己治癒技術を用いた新たな補修材に関する基礎研究” 土木学会関東支部, 2013年03月14日～2013年03月15日 宇都宮大学陽東キャンパス
- ⑧ T.H. Ahn, T. Kamada, T. Kishi, T. Koide, “Development of Innovative Crack Repair Methods based on Application of Crack Self-healing Technologies” 自己治癒コンクリート技術国際会議(招待講演), 2012年12月05日～2012年12月06日 韓国建設技術研究院, Korea
- ⑨ Toshiharu Kishi, Vu Viet Hung, Tae-Ho Ahn, “DEVELOPMENT OF CRACK SELF-HEALING CONCRETE AND BARRIER FUNCTION OF CONCRETE COVER” 自己治癒コンクリート技術国際会議(招待講演), 2012年12月05日～2012年12月06日 韓国建設技術研究院, Korea
- ⑩ 小出貴夫, 岸利治, 安台浩, “細骨材を

核とした自己治癒材料造粒物を用いたモデル” 第66回セメント技術大会, 2012年05月29日～2012年05月31日, ホテルメトロポリタン, 池袋

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

- ①名称：高性能無機系ひび割れ注入材を用いた漏水ひび割れ止水材料及びその止水工法  
 発明者：安台浩, 岸利治, 株式会社エコバンク, 李国祥, 鈴木輝彦  
 権利者：東京大学  
 種類：特許  
 番号：2013-181642  
 出願年月日：2013年09月02日  
 国内外の別：外国

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安台浩 (AHN TAEHO)  
 東京大学・生産技術研究所・特任准教授  
 研究者番号：20520191

### (2) 連携研究者

岸利治 (KISHI TOSHIHARU)  
 東京大学・生産技術研究所・教授  
 研究者番号：90251339