

機関番号： 12601
 研究種目： 若手研究 (B)
 研究期間： 2009~2010
 課題番号： 21760343
 研究課題名 (和文) 歴代構造物の漏水自然治癒現象の分析を通じた
 新しいひび割れ自己治癒技術の開発
 研究課題名 (英文) Development of new crack self-healing technology based on the
 investigation of natural healing phenomena in historical structure
 研究代表者 安 台浩 (AHN Tae-Ho)
 東京大学・生産技術研究所・助教
 研究者番号： 20520191

研究成果の概要 (和文) : 現在, 様々なひび割れ自己治癒メカニズムが提案されているが, 本研究では, 鉱物混和材料による化学作用を利用した自己治癒に着目し, この機能をコンクリートに付与させることで, 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. 1 次年度には, まず歴代土木構造物の漏水状況とそういう構造物で一部ひび割れが自己治癒されるようになる現象を検討して, その治癒メカニズムの究明と生成物の化学分析を行った. また 2 次年度には, このようなひび割れの自己治癒に効果があると推定される組成物によるセメント化学作用を利用した自己治癒に着目し, この機能をひび割れ補修材に付与させることで, 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行った. 具体的には, 自己治癒コンクリートの既往の研究を参考にして, 新規建設トンネル現場、既存トンネル漏水補修工事への自己治癒コンクリートの適用を基礎検討行った. 想定する工法は, 新設構造物を対象として, 自己治癒組成物を含む吹付けコンクリートを施工することにより構造物全体のひび割れを治癒させる方法と, 既設構造物を対象として, ひび割れ部に適当な間隔で削孔を行い, そこに自己治癒成分を含む補修材を充填することにより周辺のひび割れを治癒させる方法であり, 両工法を模擬した室内簡易通水試験により検討した. 検討の結果, 系全体ではなく一部分に自己治癒組成物を含有する場合でも, 止水性能の旧復が認められ, 自己治癒メカニズムに基づく効率的な漏水抑制対策の可能性が示唆された.

研究成果の概要 (英文) : In this research, the self-healing phenomenon and secondary phases of newly-formed products based on concrete structures were investigated in historical structures. Moreover, in order to understand the precipitation conditions of calcium salts in the cracks, morphology, and the shape and size of re-hydration products in the old concrete, microscopy and SEM (EDS) analyses were conducted. And then, new repair methods based on crack self-healing technologies using cementitious materials were suggested in order to prevent water leakage in civil infrastructures.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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、鉱物混和材料、無機化学促進剤、漏水補修工事、止水性能、漏水抑制対策

1. 研究開始当初の背景

社会基盤施設形成を担うコンクリート構造物のひび割れを減少させることの社会的ニーズは極めて大きい。世界的に見ると米国では既設構造物の橋梁などのひび割れによる不具合の対応（撤去）に、今後 20 年間で直接費として 1800 億ドルの費用が必要であると推定されており、補修補強対応の間接費を含めるとその 10 倍程度の費用が必要との報告がある。また、ヨーロッパでは、英国の場合、現在建設分野の総支出の 45%が維持保全関係で使用されているという実情があり、オランダの場合、政府統計によれば年間の土木分野支出の 30%が構造物のモニタリング、検査、維持管理および補修に使用されていると報告されている。また、日本の場合、新幹線のみを対象としても、安全性を確保した列車の運行のために、橋梁およびトンネルの補修費用に 1 兆円以上の費用が想定されている。このような背景の下、最近各国の土木建設分野において、維持補修の効果を減らすことなくその費用をいかに削減するかが大きな課題となっている。そして、発注者の考え方は、既存のスタンスである [Design & construct: 構造物の寿命に対する施工者の責任は限定的である] とするものから、[Design, Construct and Maintenance: 施工者は構造物の寿命に対する責任とモニタリング、維持および補修に対して責任を持つ] とするスタンスに移行しつつある。したがって、維持管理フェーズでの人件費等の支出を大幅に削減できる可能性を有するひび割れ自己治癒コンクリートの実用化には、大きな関心が寄せられている。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ので、完全な防水を実現することは極めて困難である。

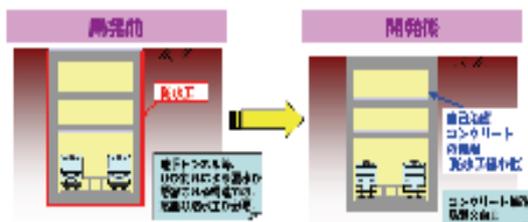


図-1 地下コンクリート構造物での自己治癒コンクリート概念

このような背景の下、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持たせることを目指した研究が開始された(図-1 参照)。

一方、東京大学 生産技術研究所 岸研究室は、1997 年より、コンクリートに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。ひび割れを自己治癒し得る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は材齢 200 日という水和反応がほぼ収束した長期材齢で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。実用化した場合の価格は、配合などによって異なるが、通常のコンクリートに比べて 3 割~7 割程度高くなるものと考えられる。ただし、自己治癒コンクリートの採用で構造物の品質や耐久性が向上し、シート防水が不要となれば、トータルでのコストダウンが可能である。

2. 研究の目的

現在、様々なひび割れ自己治癒メカニズムが提案されているが、本研究では、鉱物混和材料による化学作用を利用した自己治癒に着目し、この機能をコンクリートに付与させることで、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。特に実用化のために費用減少面を積極的に考慮して、鉱物質系混和材料以外に無機化学促進剤を使って、ひび割れ部位に化学的安全性が高い 2 次生成物が生成される研究を進行する。このような研究を進行するためには、まず歴代土木構造物の漏水状況とそういう構造物で一部ひび割れが自己治癒されるようになる現象を検討して、その治癒メカニズムの究明と生成物の化学分析を行う。次に、この結果を基に環境適応性が優れて化学的安全性が高い新しい自己治癒材料の開発を行う。このような材料はより親環境的であり、類似自然環境でも簡単に治癒できる可能性を提供できることと判断される。

3. 研究の方法

本研究では、歴代構造物の自然現象（ナチュラルアナログ）の調査を行い、新たなひび割れ自己治癒機構の開発を主たる目的とすると共に、既に開発している複数の自己治癒機構を基幹技術として実用化・展開・応用を図る研究として、以下の具体的な内容に取り組む。

(1) 平成21年度

①歴代構造物の漏水現象および自己治癒現象調査

日本にある一部歴代構造物の漏水現象を検討して漏水部位に生成される2次生成物と自己治癒の関係を究明して、新しい自己治癒化学組成物を検討する。また既に開発された自己治癒組成物の長期安全性評価のために様々な環境条件下での自己治癒現象を検討する。

もう少し具体的には、採取したサンプルの精密な化学分析を通じて、2次生成物の組成物質を検討して、分析された組成物を基に様々な環境条件下でひび割れ部位に2次生成物を促進させることができる無機化学物を検討する。このような無機化学促進剤は既存の大規模ダムなどの工事に使う中庸熱セメントあるいは低発熱セメントにも簡単に添加することで漏水部位にカルシウムイオンの湧出を促進させて、2次生成物を生成することができるように助ける材料として、既存開発された無機鉱物系自己治癒組成物と違った治癒メカニズムを持つことができることと考えている。

化学分析は次の通り進行する。

- ① X線粉末回折法(XRD)：2次生成物の結晶構造を通じて、物質を推定
- ② フーリに変換赤外分光光度計(FT-IR)：2次生成物の分子が赤外線波長を吸収または透過することによって化合物を分析
- ③光学顕微鏡(Optical Microscopy)：2次生成物の表面および内部の外形検討、ひび割れ幅の測定と2次生成物の精密な確認
- ④電子顕微鏡(SEM-EDS)：2次生成物の結晶構造分析および化学元素分析
- ⑤熱分析-示差熱熱重量分析(TG-DTA)：未知物質の熱重量変化を通じて物質特性分析

(2) 平成22年度

②無機化学促進剤を利用した新しい自己治癒

セメント組成物の開発

歴代構造物の2次生成物分析を通じて得た結果を利用して、中庸熱または低発熱セメントでひび割れ部位にイオン湧出を促進させることができる無機化学物を製造して検討する。1次的には施工性と2次的にはひび割れ自己治癒性能を検討する。ひび割れ自己治癒性能はpH、温度、湿度など色々環境条件下での自己治癒現象を確認するのが主目的にする。

③ひび割れ閉塞物質の長期安定性・信頼性の検討

新しい自己治癒セメント組成物と炭酸カルシウム以外の生成物を利用する最近考案した系について、長期に亘る水中経過観察と理論的側面の検討により、ひび割れ部析出物の長期安定性と信頼性の検討を行う。

④ひび割れ自己治癒技術のひび割れ注入止水剤への応用

自己治癒技術をひび割れ注入剤に適用し、既設構造物を対象として、ひび割れ幅が変動しても、自己治癒効果により、止水機能を長期に亘って担保できる無機系のひび割れ注入防止剤の開発を目指す。

4. 研究成果

(1)歴代構造物の漏水現象および自己治癒現象調査

一例として、1950年代に建設された黒部ダムにおける内部トンネルひび割れに自然的に多くの2次生成物が生成されたことを確認することができる(図-2参照)。したがって、現場調査を通じて、このような化学組成物の生成メカニズム分析することで、より簡単に類似自然環境でひび割れが自己治癒されることが期待できる材料を開発できると判断される。



図-2 黒部ダムの内部トンネルに生成した2次生成物

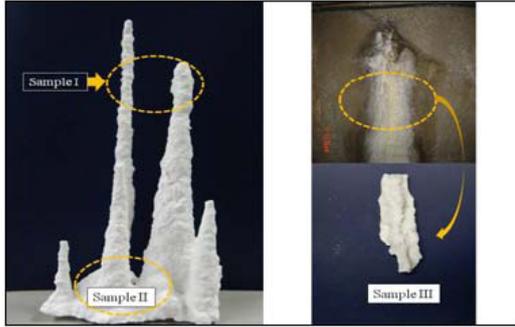


図-3 トンネルに生成した 2 次生成物

図-3は黒部ダムにおけるコンクリートのひび割れ部位に生成された 2 次生成物を示す。各々 3 部位でサンプルを選択して 図-4 で示しするように FT-IR 分析を行った。試薬と比較して現場で採取したサンプルの場合は organic substrate(Calcium Aluminate, Calcium Borate)を中心に結晶が生成されることが確認された。すなわち、このような organic substrate の種類によって、炭酸カルシウムの破壊抵抗強度は変化されることができると考えている。

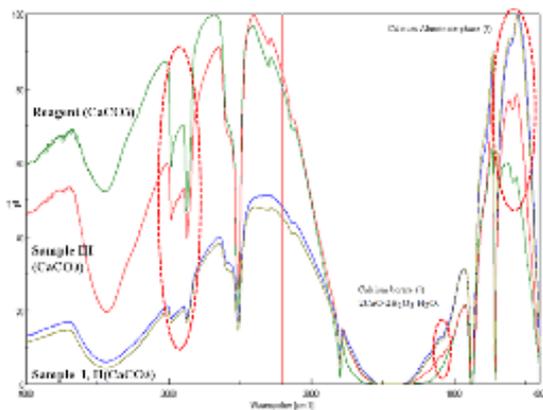


図-4 様々な有機物質の存在下で CaCO_3 の FT-IR 分析

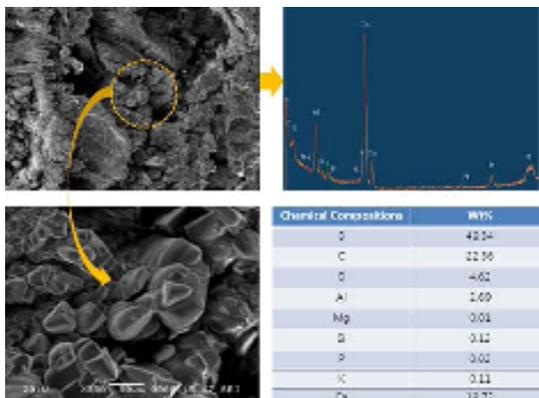


図-5 Organic substrate を基礎にして生成された自然炭酸カルシウム

図-5は SEM-EDS 分析によって、自然炭酸カルシウムの化学分析と粒子表面を分析した結果である。実際に organic substrate の Al, B イオンの存在することが確認できた。

これによると、セメント系材料を利用した自己治癒コンクリートの開発のためには上述のような治癒メカニズムを有することが重要であり、特に長期耐久性を評価する上で、生成された水和物の正確な水和相と化学的耐久性の検討を行うことが望ましいと考えられる。

(2) 無機化学促進剤を利用した新しい自己治癒セメント組成物の開発

歴代構造物の漏水現象による結晶生成物の検討から、ひび割れの自己治癒に効果があることと推定される組成を有する物質を作製した。幾つかの試製物質の試行の結果、セメント組成に Na_2CO_3 , Li_2CO_3 , MgCO_3 など少量の触媒を含んだ場合において、ひび割れ部に最も多く結晶が生成されることが確認された。

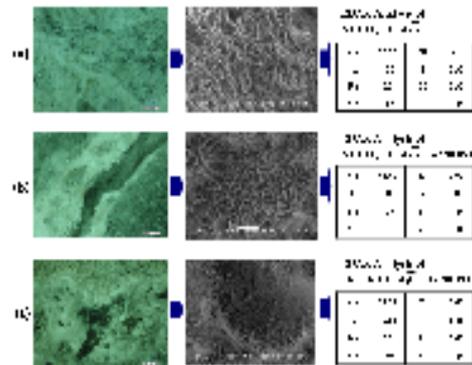


図-6 結晶生成物によるひび割れ自己治癒の効果

また図-6において、本試製物質によるコンクリートのひび割れ部位において白色の結晶を生成してひび割れの閉塞が確認でき、また骨材間においても多量の結晶が生成することによってひび割れの緻密化が確認できたこのような析出物はSEM-EDS分析によって、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、針状結晶、板状結晶のような形態で存在することが確認できた。特に針状結晶と板状結晶の場合はひび割れを治癒する基本メカニズムとして、次のような過程を通じて水和物が生成すると考えることができる。

(3) ひび割れ自己治癒技術のひび割れ注入止水剤への応用

本研究では、トンネルや地下構造物を対象として、プレミックス型ではない無機系ひび割

れ自己治癒材料の適用可能性について基礎的検討を行った。既存トンネルの漏水補修工事への適用を想定し、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提案した。この補修材から自己治癒成分が拡散すると考え、後天的にひび割れ部に自己治癒水和物を生成させ、その効果の確認を目的として検討を行った(図-7参照)。

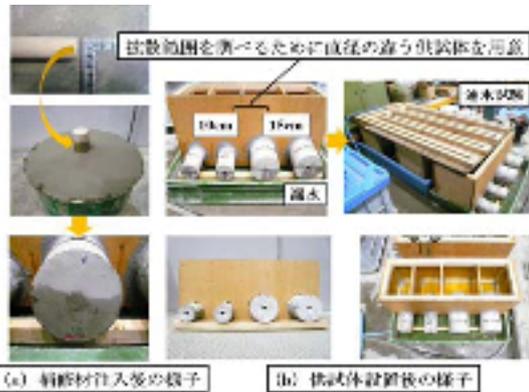


図-7 自己治癒成分を有する補修材の通水試験

図-8,9 上図に無機系補修材によるひび割れ自己治癒補修材を使用した通水試験の結果を示す。また、初期値のばらつきを考慮するため、図-8,9 下図に止水率によって評価を行った図を示す。ここで止水率とは、測定時の通水時間を初期値の通水時間で除した値であり、それをを用いて検討を行った。また、図-10に通水試験終了後の供試体の様子を示す。補修材なしの供試体A は継続的に漏水が発生したが、補修材ありの供試体B の場合、 $\phi 100\text{mm}$ については図-8下図より約7 日間で完全な止水が確認された。しかし、 $\phi 150\text{mm}$ については図-9 下図より、完全に止水は確認されなかった。このことより、供試体の寸法により、補修材の成分が拡散しづらいと考えられる。また、図-10より供試体Bの場合、表面に白い析出物が確認できた。供試体Cについては、補修材が表面から飛び出る程度に膨脹していた。しかし、図-8,9下図からも分かるように止水性能は比較的高い。供試体Dについては、図-10より表面もきれいであり、28日経過後止水性能が他に比べて高いことが確認できた。DはOPCの配合量が多いことから、ひび割れ部位に生成された物質の化学的安定性も高いと考えられる。また、OPCの量が多いということは経済的でもあり、Bと比べても表面がきれいであるという点で優れている。そして、断面の違いによる拡散の影響も小さいことから、Dの配合が最も実用的であると考えられる。

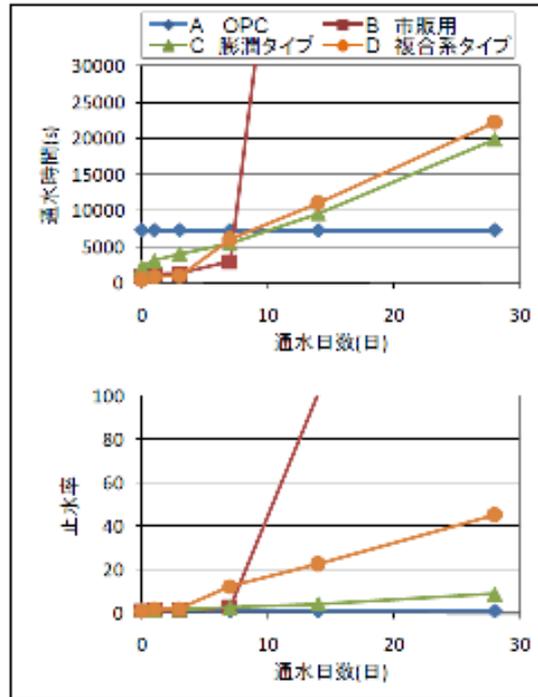


図-8 補修材の止水効果 ($\phi 100\text{mm}$ 供試体)
(上図：測定結果 下図：止水率評価)

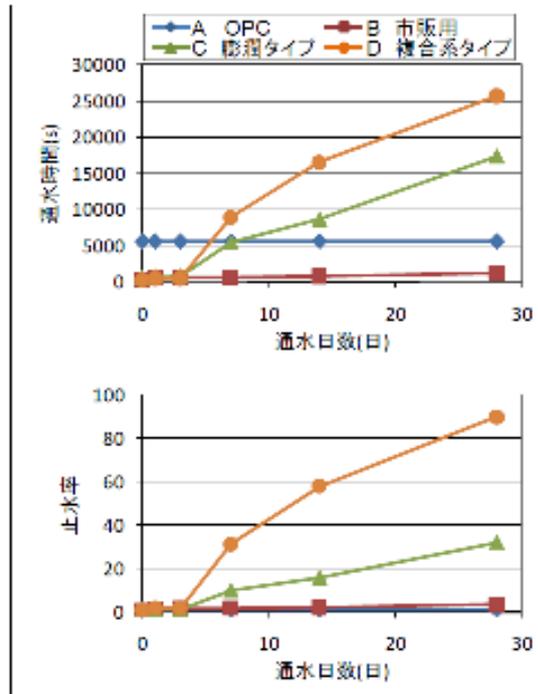


図-9 補修材の止水効果 ($\phi 150\text{mm}$ 供試体)
(上図：測定結果 下図：止水率評価)

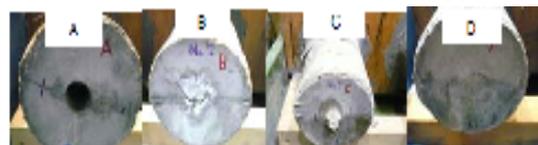


図-10 通水試験終了後の様子 ($\phi 100\text{mm}$ 供試体)

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 6 件)

- ①森田卓, 小出貴夫, 安台浩, 岸利治, “無機系ひび割れ自己治癒組成物を造粒混和したコンクリートの漏水抑制効果に関する基礎的検討” 日本コンクリート工学年次論文集 (JCI), 査読有, (2011) [掲載決定]
- ②小出貴夫, 岸利治, 安台浩, 森田卓, “コンクリートのひび割れ自己治癒材料の造粒技術に関する基礎的研究” 日本コンクリート工学年次論文集 (JCI), 査読有, (2011) [掲載決定]
- ③安台浩, 森田卓, 戸部良太, 岸利治, “無機系ひび割れ自己治癒組成物を用いた効率的な漏水抑制対策に関する検討” セメント・コンクリート論文集, 査読有, No. 64, 2010, pp. 477~484
- ④T. H. Ahn, T. Kishi, “Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites incorporating Various Mineral Admixtures”, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, 8(2), 2010 pp. 171~186 [英文] **Award**
- ⑤T. H. Ahn, T. Kishi, “Design of self-healing concrete based on various mineral admixtures” 日本コンクリート工学年次論文集 (JCI), 査読有, Vol. 32(1), 2010, pp. 1583~1588 [英文]
- ⑥森田卓, 安台浩, 戸部良太, 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” 日本コンクリート工学年次論文集 (JCI), 査読有, Vol. 32(1), 2010, pp. 1577~1582

[学会発表] (計 12 件)

- ①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, 法政大学市ヶ谷田町校舎, 3月10日-11日, (2011)
- ②T. H. Ahn, M. Morita, T. Kishi “New Repair Methods for Civil Infrastructures based on Crack Self-Healing Technologies”, The 4th ACF (Asian Concrete Federation) International Conference, Taipei, Taiwan, Nov. 27-Dec. 2 (2010)
- ③T. H. Ahn, T. Kishi, “Development of Crack Self-Healing Concrete in Japan: A study on Its Mechanism and Behavior in

Cracked Concrete”, Korea Concrete Institute (KCI), Chuncheon, Gwang-won do, Korea, Nov. 5-6, (2010)

- ④T. H. Ahn, M. Henry, Y. Kato, T. Kishi, “Interaction Between Degradation and Self-Healing Behavior in High Strength Mortar Exposed to High Temperatures (up to 500°C)”, 9th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA 2010), Kobe, Japan, Oct. 13-14, (2010)
- ⑤M. Morita, T. H. Ahn, R. Tobe, T. Kishi, “Feasibility Study of New Repair Methods for Underground Civil Infrastructures based on Crack Self-Healing Technologies” 9th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA 2010), Kobe, Japan, Oct. 13-14, (2010)
- ⑥T. H. Ahn, T. Kishi, “Interaction between Self-Healing Phenomena in Old Concrete Structures (Dam Structure) and Precipitated Calcium Carbonate” 日本土木学会 第65回年次学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 9月1日-3日, (2010) [英文]
- ⑦T. H. Ahn, T. Kishi, “Effect of Various Carbonates on the Crack Self-Healing Behavior of Cementitious Materials”, 第64回セメント技術大会講演要旨, ホテルメトロポリタン, 5月25日-27日, (2010) [英文]
- ⑧安台浩, 戸部良太, 森田卓, 岸利治, “無機系ひび割れ補修材を用いた漏水防止効果に関する基礎研究”, 第64回セメント技術大会講演要旨, ホテルメトロポリタン, 5月25日-27日, pp. 158~159, (2010) (学生受賞: 森田卓) **Award**
- ⑨T. H. Ahn, T. Kishi, “Investigation of Self-Healing Phenomena in 'Old' Concrete Structures and Historical Masonry Mortars”, Proceedings of the 32nd Annual International Conference on Cement Microscopy, New Orleans, LA, USA, Mar. 28-31, (2010)
- ⑩T. H. Ahn, T. Kishi, “Design of Crack Self-healing on Concrete Structures” Proceedings of 8th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA 2009), Incheon, Korea, October 15-16, (2009) **Award**
- ⑪T. H. Ahn, T. Kishi, “New method as the

self-healing design to repair cracks in cracked concrete”, 4th International Conference on Construction Materials : Performance, Innovations and Structural Implications, Nagoya, Japan, Aug. 24-26, (2009)

- ⑫ T.H. Ahn, T. Kishi, “Crack Healing Behavior of Cementitious Materials incorporating Geo-Materials” 2nd International Conference on self-healing materials 2009 , Chicago, USA, June 28-July 1, (2009)

[その他]

ホームページ等

<http://wdnsword.iis.u-tokyo.ac.jp/ahn/top.html>

受賞

- ① 2010 年度 Three outstanding papers 選定
-- Selection of the ACT Advisory and Editorial Board, T.H. Ahn, T. Kishi, “Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites incorporating Various Mineral Admixtures”, Journal of Advanced Concrete Technology, 8(2), pp. 171~186 (2010) [査読(有)] [英文]
- ② “無機系ひび割れ補修材を用いた漏水防止効果に関する基礎研究”, 第 64 回セメント技術大会講演要旨, ホテルメトロポリタン, 5 月 25 日-27 日, pp.158~159, (2010) (学生受賞: 優秀論文講演 : 森田卓)
- ③ 2009 年 10 月 15 日から 16 日までの 2 日間に亘り 韓 国 の 仁 川 で 開 催 さ れ た 8th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA 2009) 国際会議で “Excellent Young Researcher Award” を受賞 (Paper title : Design of crack self-healing on concrete structures)
- ④ 2009 年 6 月 5 日 財団法人 前田記念工学振興財団から 山田一字賞を受賞 (博士論文 : ジオマテリアルを含有した自己治癒コンクリートの開発に関する研究 : ひび割れを有するコンクリートでの自己治癒メカニズムとその挙動)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安 台浩 (AHN Tae-Ho)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号 : 2 0 5 2 0 1 9 1

(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 : 9 0 2 5 1 3 3 9