

自己治癒コンクリートにおける微生物の繁殖性および ひび割れの自己治癒効果に関する検討

STUDY ON BLEEDING PERFORMANCE OF BACTERIA AND CRACK HEALING PERFORMANCE OF MORTAR FOR SELF-HEALING CONCRETE

大橋 英紀^{*1}, 本田 亮^{*2}, 守屋 健一^{*1}, 田中 徹^{*1}, 川崎 浩長^{*3}, Sanjay PAREEK^{*4}
Hideki OHASHI, Ryo HONDA, Kenichi MORIYA, Tooru TANAKA, Hironaga KAWASAKI and Sanjay PAREEK

In this paper, various experimental studies on self-healing concrete containing bacteria were conducted for the purpose of closing cracks in concrete and restoring watertightness. First, to grasp the reproductive potential of the bacteria depending on the environmental pH conditions, the bacteria were cultured at pH 10, 11, and 12, and absorbance was measured using a UV-visible-near-infrared spectrophotometer. Next, the water flow test was conducted to verify the crack self-healing performance of mortar containing bacteria. The following results were obtained.

1. The absorbance measurements in the culture test showed that a decrease in environmental pH below 11 is important for the activity of bacteria, in addition to the supply of water, oxygen, and nutrients.
2. Based on the results of the water permeability test, it is considered that the amount of bacteria added to the mortar should be 5.0 kg/m³ or more to be effective.

Keywords : Self-Healing, Crack, Bacteria, Cultivation, Water Flow Test
自己治癒, ひび割れ, 微生物, 培養, 通水試験

1. はじめに

コンクリート構造物は、発生したひび割れから浸入する水分や塩化物イオンなどの劣化因子により耐久性が低下する場合がある。例えば、塩化物イオンにより、コンクリート内部の鉄筋が腐食・膨張し、コンクリート構造物の劣化が進行する。構造物の耐久性を向上させるためには、このような有害なひび割れを補修するなどの対策が必要である。コンクリート構造物のひび割れ補修方法に関しては、様々な検討や研究・開発が進められており、中でも自己治癒コンクリートが注目されている。

筆者らは、特定の微生物の働きによりひび割れを閉塞するコンクリート、すなわち自己治癒コンクリート^{2),3),4),5),6),7)}について、実構造物への適用を目的に検討を行っている^{8),9),10)}。これにより、供用後にひび割れ補修が困難となるトンネルなどの地下構造物に対し、ひび割れ補修が不要となり、構造物の耐用年数を延長することができると考えられる。

本稿では、自己治癒コンクリートにおける微生物の繁殖性およびひび割れの自己治癒効果を把握することを目的に、各種検討を行った。

ひび割れの閉塞が効率よく行われると考えられる条件、すなわち微生物の活動や繁殖性が最大となる条件を把握するために、pH 条件を変えて微生物を培養、吸光度を測定し、微生物の活動条件の把握を行った。また、微生物を添加したモルタルを用いて通水試験を実施し、ひび割れの自己治癒効果に関する検討を行った。



写真1 微生物および栄養分の混合物 (HAA)

2. 自己治癒の仕組み

2.1 本研究に用いた微生物

本研究では、好気性かつ好アルカリ性である枯草菌の一種 (Bacillus 属の一種) である微生物とその栄養分 (ポリ乳酸) の混合物 (以下、HAA) を用いた。

写真1に本研究に用いた HAA を示す。

HAA 中の微生物は、活性化前は休眠状態であり、極めて高い耐久性を持つ球形の細胞である。この微生物は、休眠状態で最大約 200 年間生存することが可能であると証明されており、大きさは直径 0.8~1.0μm である。また、コンクリート内部のような pH が 12~13 の強アルカリ性環境下や環境温度が 0~80℃においても生存が可能であることが分かっている。

*1 戸田建設株式会社 技術研究所 修士 (工学)

*2 戸田建設株式会社 技術研究所

*3 日本大学大学院 工学研究科 修士 (工学)

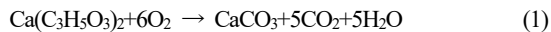
*4 日本大学 工学部教授 博士 (工学)

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.
Technology Research Institute, TODA CORPORATION
Graduate School of Engineering, Nihon University, M.Eng.
Professor, College of Engineering, Nihon University, Dr.Eng.

2.2 ひび割れ治癒の仕組み

HAA はアルカリ性環境下において、水と酸素が供給されることにより、炭酸カルシウムを生成し、ひび割れを治癒する。以下に、HAA を添加したコンクリートのひび割れ治癒の仕組み²⁾を示す。

- 1) コンクリート練混ぜ時に、所定量の HAA を添加する。
- 2) HAA に含まれるポリ乳酸が加水分解により微生物の栄養分である乳酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$) へ変化する。
- 3) コンクリートにひび割れが発生すると、ひび割れ部分に存在する微生物へ水分と酸素が供給される。水分供給によりひび割れ部分の間隙溶液の pH が低下し、微生物が活動を開始する。
- 4) 微生物が乳酸カルシウムを炭酸カルシウム (CaCO_3)、二酸化炭素 (CO_2) および水 (H_2O) に分解する。式(1)に微生物による乳酸カルシウムの分解の化学反応式を示す。



- 5) 生成された炭酸カルシウムによりコンクリートのひび割れが閉塞する。
- 6) ひび割れが閉塞すると水分と酸素の供給が遮断されるため、微生物は再び休眠状態に入る。

コンクリートにひび割れが発生する度に 3) ～6) の過程を経て、ひび割れを治癒する。

3. 培養試験

3.1 試験概要

HAA に含まれる微生物は、コンクリート内部の強アルカリ性環境下においては活動しない。コンクリートにひび割れが発生し水分が供給され微生物の周囲の pH が低下することにより、微生物は活動を開始するとされている²⁾。

微生物の活動・繁殖条件を把握するために、HAA の pH を変化させた培養試験を行った。

3.2 使用材料

微生物の培養には、菌類や細胞の培養に広く用いられる LB 培地を使用した。LB 培地の組成は、1L 当たりトリプトン 10.00g、塩化ナトリウム 10.00g、イーストエキス粉末 5.00g、りん酸水素二ナトリウム 1.42g、りん酸二水素ナトリウム 1.56g であり、水酸化ナトリウム水溶液を用いて所定の pH に調整した。

3.3 試験方法

以下に培養試験の手順を示す。

写真 2 に中型恒温振とう培養機、写真 3 に吸光度の測定に用いた紫外可視近赤外分光光度計を示す。

- 1) フラスコに LB 培地 55mL と HAA0.02g を入れ試験体とする。中型恒温振とう培養機を用いて、LB 培地中の酸素濃度が飽和となる回転数で振とう培養する。
- 2) 微生物が繁殖し、炭酸カルシウムを排出することにより試験体が白濁する。定期的に紫外可視近赤外分光光度計により、吸光度を測定することにより繁殖性を評価する。

ひび割れにおける微生物周囲の pH を、pH=10, 11, 12 と想定し、3 種類の LB 培地を作製した。試験体はそれぞれ 3 本ずつ用意し、結果は各吸光度の平均値とした。

3.4 試験結果

図 1 に時間と吸光度の関係を示す。

LB 培地の pH が、pH=10 および pH=11 の場合、吸光度は 24 時間後まで上昇し、その後定常状態となった。一方、pH=12 においては栄養分、酸素、水分の供給が十分であるにも関わらず、吸光度はほとんど変化しなかったことから、微生物は繁殖しないと示唆された。このことから、強アルカリ性環境であるコンクリート中では微生物は活動せず、ひび割れが発生し pH が低下した後に微生物の繁殖が開始すると考えられる。

図 2～図 4 に pH=10～pH=12 の環境下の試験体中の微生物を顕微鏡 (×1000) にて撮影した様子を示す。pH=10 および pH=11 では、微生物の活動が視認できた一方、pH=12 においては、確認されなかった。



写真2 中型恒温振とう培養機



写真3 紫外可視近赤外分光光度計

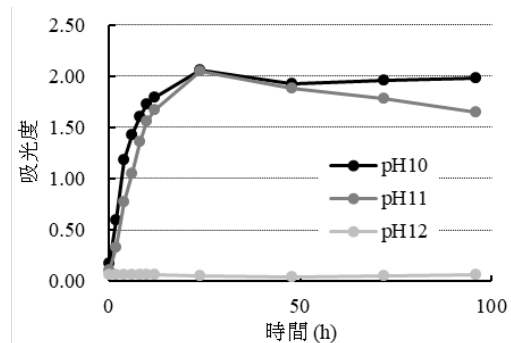


図1 時間と吸光度の関係

4. 通水試験

4.1 試験概要

コンクリート中のひび割れ閉塞効果を把握するために、基礎研究としてモルタルを用いて通水試験を実施した。

表 1 に試験概要を示す。

本試験において、微生物に水分と酸素が十分に供給されるよう、水中養生と気中養生を交互に繰り返し、10 週間試験を実施した。また、気中養生時の温度は微生物の活動が活発となる 37℃とした。

4.2 使用材料および配合

表 2 にモルタルの使用材料、表 3 にモルタルの配合を示す。

本試験に用いたモルタルは、水セメント比 50%，細骨材セメント比 3.0（質量比）とした。HAA の添加量は、外割で 1m³ 当り 0, 2.5, 5.0, 10.0kg とした。モルタルの練混ぜは 20L 練りのモルタルミキサを使用し、セメント、細骨材、HAA の投入後、空練りを 3 分間行い、練混ぜ水投入後に機械練り 2 分間、練り返し 1 分間、機械練り 1 分間行った。

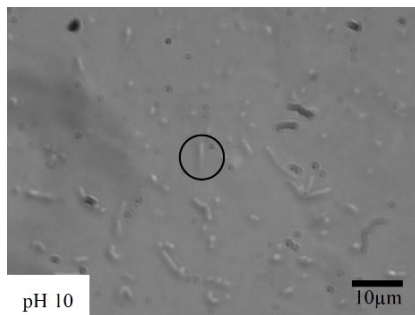


図 2 pH=10 のサンプル中の微生物（×1000）

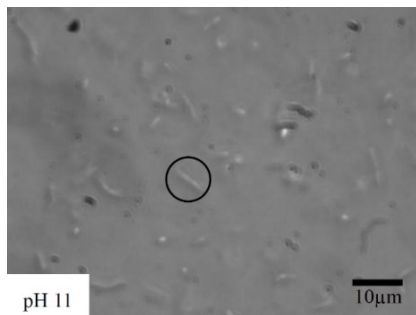


図 3 pH=11 のサンプル中の微生物（×1000）

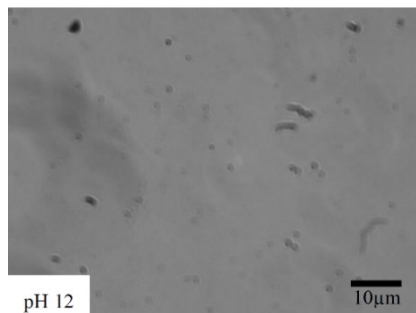


図 4 pH=12 のサンプル中の微生物（×1000）

4.3 試験方法

図 5 に通水試験に用いる試験体作製方法の概要を、図 6 に通水試験に用いた試験体を示す。

試験体数は導入するひび割れの幅のばらつきを考慮し 1 水準当たり 8 体とした。

試験体は、φ50×50mm とし、打設後 20℃、90%(RH)にて湿空養生を 2 日行い、脱型した。脱型後 28 日まで標準水中養生を行い、その後、20℃、50%(RH)にて 7 日間気中養生を行った。気中養生期間中に下記の通水試験用試験体の作製を行った。

表 1 試験概要

試験名	概要
通水試験	試験体寸法：φ50×50mm 工程：湿空養生 2 日，標準水中養生 26 日， 気中養生 7 日後に試験開始 試験サイクル：試験 1 日， 標準水中養生 3 日， 気中養生 3 日 試験間隔：7 日ごとに実施 試験時間：3 分 測定項目：ひび割れ部分からの通水量の変化

表 2 モルタルの使用材料

分類	概要
セメント	普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm ³
水	郡山市上水道水
細骨材	5 号珪砂，絶乾密度 2.62g/cm ³
混和材	HAA（微生物，ポリ乳酸）

表 3 モルタルの配合

No.	配合名	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			HAA(外割) (kg/m ³)
			W	C	S	
1	HAA0.0	50	243	486	1458	0.0
2	HAA2.5					2.5
3	HAA5.0					5.0
4	HAA10.0					10.0

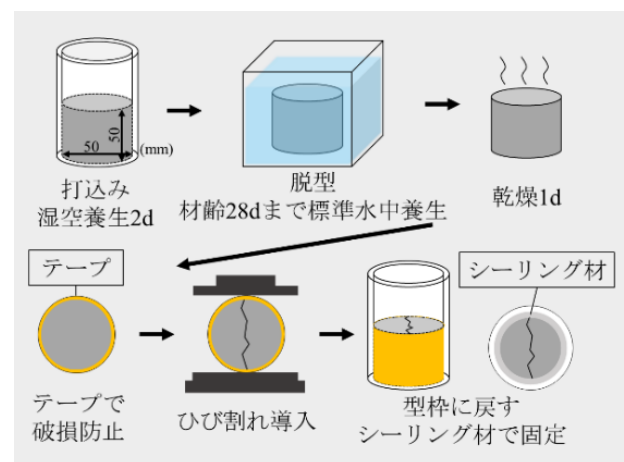


図 5 通水試験に用いる試験体作製方法の概要

通水試験用試験体の作製方法を以下に示す。

- 1) 標準水中養生後、試験体を 20℃、50%(RH)に 1 日静置し、表乾状態とした。ひび割れ導入時の試験体破損を防ぐため、試験体側面をテープで養生した。
- 2) 全自動圧縮試験機を用いて、JIS A 1113(コンクリートの割裂引張強度試験方法)を参考として試験体を割裂し、ひび割れを導入した。
- 3) $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ のプラスチック製型枠に試験体を入れ、側面や底面の隙間をシーリング材で充填し、20℃、50%(RH)に 1 日静置した。

通水試験開始前に試験体下面のひび割れ幅を 3 点測定した。

図 7 に平均ひび割れ幅の分布を配合ごとに示す。

平均ひび割れ幅は 0.05~0.23mm の間に分布した。HAA0 における 0.23mm のひび割れを除けばどの水準においても、平均ひび割れ幅に大きな偏りは見られなかった。

図 8 に通水試験の状況を示す。

通水試験は、気中養生終了後に開始した。試験は、通水試験 1 日、標準水中養生 3 日、気中養生 [37℃、90% (RH)] 3 日を 1 サイクルとし、14 サイクル (14 週間) 実施した。通水試験の方法を以下に示す。

- ・毎試験開始直前に、試験体上面に注水し、シーリング材による閉塞箇所について漏水がないことを確認した。
- ・試験体はスタンドを用いて鉛直に固定し、その下に水受け、電子てんびんを設置した。
- ・測定は、型枠が満水となるよう、試験体上面に約 100mL の上水道水を注水した。
- ・試験時間を 3 分とし、3 分後、試験体上面からひび割れを通じて下面より滴下した水量 (通水量) を記録した。
- ・ひび割れ治癒の進行により水の滴下が確認されなくなった試験体については、注水してから 3 分後、試験体下部が水でにじむかについての確認を行った。

4.4 試験結果

表 4 に HAA を添加したモルタルのフレッシュ性状を示す。

いずれの添加量においても、HAA を添加することによるモルタルのフローおよび空気量への影響は小さかった。

図 9 に 1 週目の通水量に対する各週の通水量の割合を平均したものを通水率として、試験サイクル (週) の経過に伴う通水量の変化を示す。

試験開始 14 週後における通水率は HAA0.0 で 11.0%、HAA2.5 で 0.4%、HAA5.0 と HAA10.0 は 0% となった。

HAA の添加量の多少やひび割れ幅の大小に関わらず、経時とともに通水量の減少が確認できた。HAA0、HAA2.5 では試験開始 14 週後においても水の滴下が確認された。一方、HAA5.0、HAA10.0 では試験開始 6 週後ですべての試験体において、ひび割れ面からの水の滴下が確認されなかった。これにより、HAA を 5.0kg/m³ 以上添加することがひび割れを治癒するのに効果的であると推察された。

なお、HAA0 の通水量の減少については、モルタル中の未水和セメントの反応により炭酸カルシウムが生成し、ひび割れが閉塞した

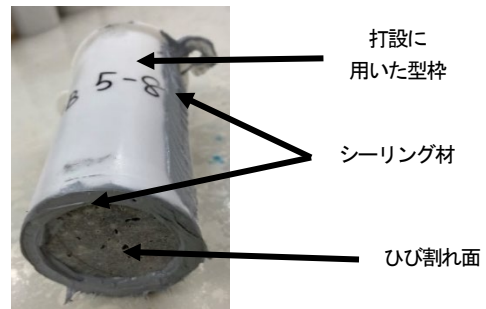


図 6 通水試験に用いた試験体

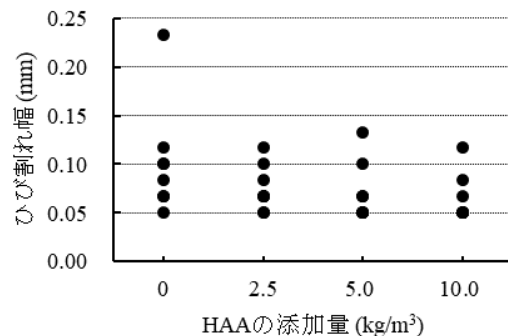


図 7 平均ひび割れ幅の分布

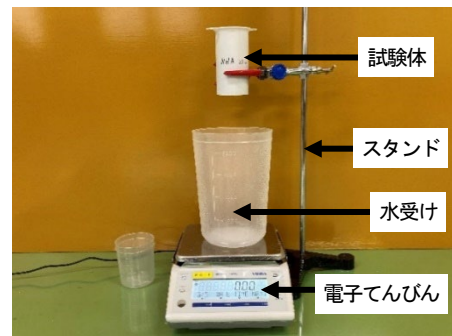


図 8 通水試験状況

表 4 フレッシュ性状

配合	フロー (mm)	空気量 (%)
HAA 0	128	8.2
HAA 2.5	137	8.4
HAA 5.0	138	6.5
HAA 10.0	138	7.8

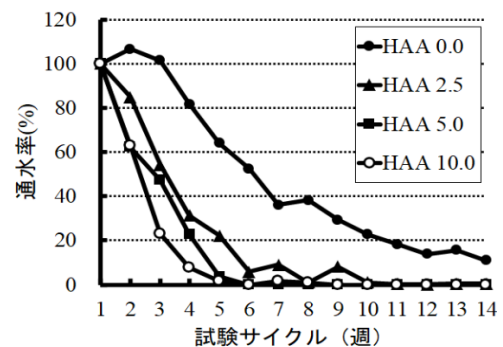


図 9 通水率

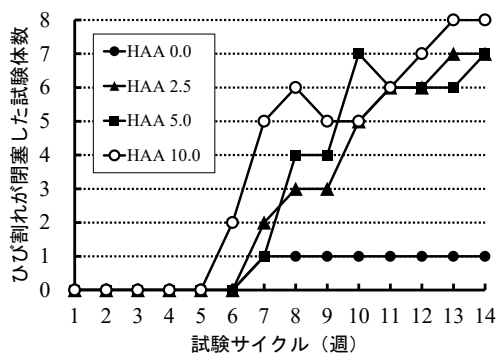
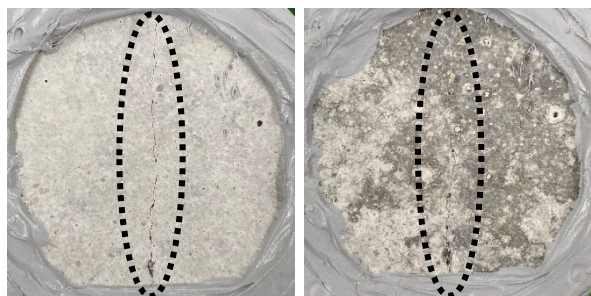
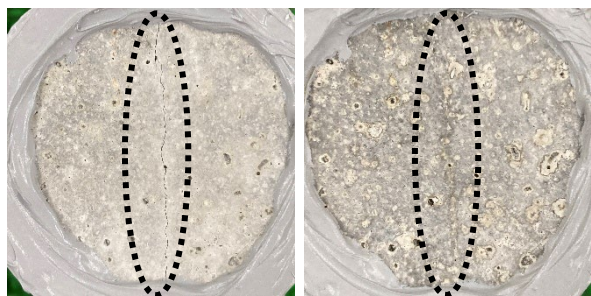


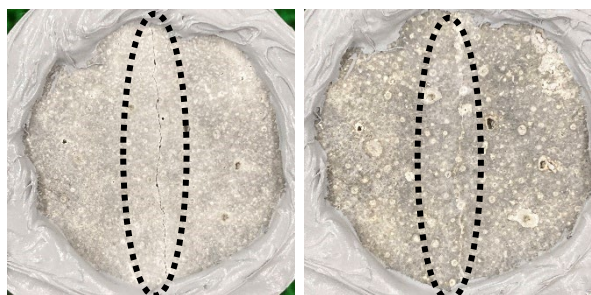
図 10 ひび割れが閉塞した試験体数



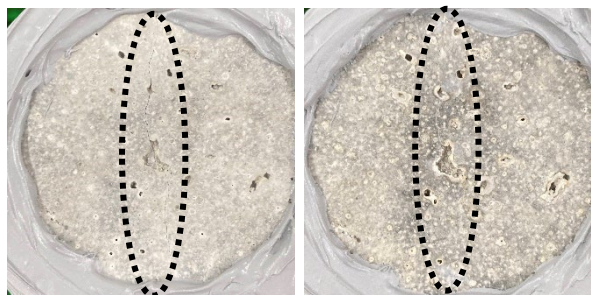
HAA 0



HAA 2.5



HAA 5.0



HAA 10.0

図 11 配合ごとの1週(左)と10週(右)の比較

と考えられる。

図 10 にひび割れが完全に閉塞した試験体数について確認した結果を示す。

注水3分後においても試験体下面から水がにじみ出なかった試験体を、ひび割れが完全に閉塞した試験体と定義した。

HAA10.0 は試験開始 6 週後にひび割れが完全に閉塞した試験体を確認され始め、試験開始 13 週後にすべての試験体のひび割れ閉塞が確認できた。HAA0.0, HAA2.5, HAA5.0 は、試験開始 7 週後からひび割れが完全に閉塞した試験体を確認され始めたが、試験開始後 14 週の時点においても、ひび割れが閉塞しない試験体を確認された。

図 11 に各水準の試験開始 1 週と 10 週での試験体下面のひび割れの様子を示す。

HAA を添加した試験体ではひび割れ部分に白色の生成物が確認された。これは微生物による乳酸カルシウムの分解によって生じた炭酸カルシウムであると考えられる。

5. まとめ

微生物を用いた自己治癒コンクリートの基礎的検討として実施した培養試験および通水試験によって得られた知見を以下に示す。

- 1) アルカリ性環境であるコンクリート中では微生物は活動せず、ひび割れが発生し pH=10~11 程度に pH が低下した後、微生物の活動・繁殖が開始する。
- 2) モルタルに HAA を添加することにより、添加量の多少やひび割れ幅の大小に関わらず時間の経過とともに通水量は減少することが確認できた。
- 3) HAA の添加により、モルタルのひび割れ自己治癒性能は向上することが確認できた。
- 4) ひび割れを治癒させるためには、 5.0kg/m^3 以上の HAA を添加することで効果的に治癒できると推察された。

今後、コンクリートを用いた通水試験を実施して、ひび割れ閉塞効果の確認を行っていく。また、自己治癒コンクリートの構造物への適用に向け、微生物の活動に必要な各種条件等の解明や、コンクリートのひび割れ閉塞に最適な温度条件や通水条件などの把握を進めていく。

謝辞

研究を実施するにあたり、デルフト工科大学のヘンク・ヨンカース准教授にご協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会報告書, JCI-TC075B, 2008
- 2) Henk M Jonkers: Self-healing Concrete: A Biological Approach, Self-healing Materials (An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science), Springer Series in Materials Science, pp.195-204, 2007
- 3) Henk M Jonkers, Erik Schlangen: A Two Component Bacteria-based Self-healing Concrete, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II, pp.215-220, 2008
- 4) Henk M Jonkers, Arjin Thijssen, Gerard Muyzer, Oguzhan Copuroglu, Erik Schlangen: Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, Ecological Engineering, pp. 230-235, 2010

- 5) Virginie Wiktor, Henk M Jonkers: Quantification of Crack-healing in Novel Bacteria-based Self-healing Concrete, Cement and Concrete Composites, Vol. 33, Issue7, pp. 763-770, 2011
- 6) Klaas van Breugel: SELF-HEALING MATERIAL CONCEPTS AS SOLUTION FOR AGING INFRASTRUCTURE, 37th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURE, 2012
- 7) Eirini Tziviloglou, Zichao Pan, Henk M Jonkers, Erik Schlangen: Bio-based Self-healing Mortar: An experimental and numerical Study, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 15, pp. 536-543, 2017
- 8) 大橋英紀, 川崎浩長, Henk JONKERS , Sanjay PAREEK : 微生物を利用した自己治癒コンクリートのひび割れ閉塞工法に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1282-1287, 2020
- 9) 川崎浩長, 大橋英紀, Henk JONKERS , Sanjay PAREEK : 微生物を利用した自己治癒コンクリートの最適な調合に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.947-952, 2021
- 10) 大橋英紀, 守屋健一, 奥村正樹, 田中徹, Sanjay PAREEK, Henk JONKERS : 土木学会: 微生物を用いた自己治癒コンクリートの最適な配合に関する実験的検討, 土木学会第 76 回年次学術講演会, V-137, 2021
- 11) 劉宏涛: バクテリアを活用した自己治癒コンクリート技術, コンクリート工学, Vol.59, No.11, pp.933-937, 2021.11