

論文 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

大橋 英紀*1・川崎 浩長*2・Henk JONKERS*3・Sanjay PAREEK*4

要旨：コンクリート構造物の耐久性を向上させるためには、有害なひび割れを補修するなどの対策が必要である。本研究は、コンクリートに発生したひび割れに対して、特定の微生物の働きによってひび割れを閉塞させる効果の把握を目的として実験的検討を行った。特定の微生物を添加したモルタルを用いて、角柱供試体および円柱供試体を作製し、曲げ強さ試験方法および割裂引張試験方法によりひび割れを発生させ、通水試験を行った。試験の結果、モルタルに特定の微生物を添加することにより、ひび割れから流出する水量の減少やひび割れの一部を閉塞できることを確認できた。

キーワード：自己治癒、ひび割れ、微生物、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等の劣化因子により耐久性が低下する場合がある。構造物の耐久性を向上させるためには、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、中でも自己治癒コンクリートが注目されている。

例えば、日本コンクリート工学会における「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」(2007～2008)により報告書¹⁾が作成されている。本報告書においては、自己治癒／修復は従来の人間の手による補修や補強の作業を必要とせず、コンクリート内部に予め用意されている機構によって、水密性など少なくとも1つ以上の機能回復が行われる事象全体と定義されている。また、自己治癒／修復は自然治癒、自律治癒、自動修復の3つに分類することができ、自己治癒は自然治癒および、自律治癒が内包されている。自然治癒とは、材料設計などに特別な配慮を講じずとも、例えば水分などが存在する環境下でコンクリートのひび割れが自然に閉塞する現象である。自律治癒とは、水分などが存在する環境下でコンクリートのひび割れを閉塞、またはそれを促進させることを期待し、適切な混和材の使用などの材料設計を行ったコンクリートにおいて、その機構によってひび割れが閉塞する現象である。この2つを包括した自己治癒は、混和材や混和剤等の添加の有無に関わらず、コンクリートの組織自体が持つ機構・能力によって、ひび割れが閉塞する現象全体のことである。

また、既存の研究や開発には高炉スラグを用いる研究

2),3),4),5), フライアッシュを用いる研究^{6),7),8),9)}, 低水セメント比の膨張コンクリートを用いる研究^{10),11)}, クリンカーを用いる研究^{12),13)}などがある。

筆者らは、特定の微生物を添加した自己治癒コンクリート^{14),15),16),17),18),19)}について、微生物の働きによりひび割れを自己治癒する工法の実構造物への適用を視野にいたした検討を行っている。これにより、トンネルや地下構造物などの供用後のひび割れ補修が困難な構造物に対し、補修作業が不要となり、構造物の耐用年数を延長することができる。本研究ではその基礎研究として、微生物を添加したモルタルを用いたひび割れ閉塞効果を把握することを目的に基礎的な実験を行った。

2. 自己治癒のメカニズム

2.1 本研究に用いた微生物

本研究において用いた微生物は、好気性かつ好アルカリ性の微生物である枯草菌 (*Bacillus* 属の一種) の一種である。これに乳酸カルシウムを混合し練混ぜ、生分解性プラスチックで被覆し、固化したものである(写真-1)。



写真-1 本研究に用いた微生物

*1 戸田建設(株) 技術開発センター 工修 (正会員)

*2 日本大学 工学部建築学科 (学生会員)

*3 Associate Professor, Ph.D., Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, The Netherlands

*4 日本大学 工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

この微生物は、芽胞を形成しており、生分解性プラスチックで被覆されているため、コンクリート練混ぜ時の摩擦や水等から保護されており、休眠状態となっている。密度は1.0~1.5g/cm³程度である。微生物の芽胞は、植物の種子に類似した極めて高い耐久性をもつ球形の細胞であり、温度などの環境条件が悪くなると微生物が形成するものである。また、本微生物の芽胞は、最大約200年間生存することが可能であることが証明されており、この芽胞の大きさは直径0.8~1.0μmである¹⁴⁾。さらに、コンクリート中などのpH=12~13の強アルカリ環境下にて生存可能であり、0~80℃の温度に耐えられることが判明している。

2.2 ひび割れ閉塞のメカニズム

以下に、本微生物によるコンクリートのひび割れ閉塞のメカニズム^{14),16)}を示す。

- (1) コンクリート製造時に、本微生物を任意の量を添加し練混ぜる。
- (2) コンクリート硬化後、本微生物を被覆している生分解性プラスチックがセメント水和物である水酸化カルシウムにより徐々に脆くなる。
- (3) ひび割れ発生によりひび割れ面に存在する本微生物に酸素および水が供給され、本微生物が活性化する。
- (4) 本微生物は、乳酸カルシウム (Ca(C₃H₅O₃)₂) を分解する。その結果、炭酸カルシウム (CaCO₃)、二酸化炭素 (CO₂) および水 (H₂O) を排出する。

$$\text{Ca(C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2 + 6\text{O}_2 \xrightarrow{\text{本微生物による分解}} \text{CaCO}_3 + 5\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O} \quad (1)$$
- (5) 生成された炭酸カルシウムにより、コンクリート中のひび割れが閉塞する。
- (6) ひび割れ閉塞後、水・酸素・二酸化炭素の供給が遮断されるため、微生物は再度芽胞を形成し、休眠する。再度ひび割れが発生し、水・酸素・二酸化炭素が供給されると微生物は活性化し、ひび割れを閉塞する。

3. 試験概要

3.1 試験概要

本微生物の活性化のためには、水・酸素の供給が必要不可欠である。本試験は、水・酸素が十分に供給される環境を想定し、微生物の活性化によるひび割れ閉塞が発生しやすい状況を模擬して試験を行った。

表-1 に試験項目を示す。

本微生物を添加したモルタル用いて円柱供試体および角柱供試体を作製し、ひび割れ幅の大小を考慮し、通水試験【その1】および【その2】を行った。

通水試験【その1】は円柱供試体を用いた。供試体上面から底面へと貫通したひび割れに対して、供試体上面へかかる水圧（水頭差）を一定とした場合の、供試体下

面から流下する水量を計測した。

通水試験【その2】は角柱供試体を用い、曲げ強度試験方法により発生させたひび割れからの漏水の有無を確認することで、ひび割れ閉塞の評価を行った。

3.2 使用材料および配合

表-2 に本試験に用いたモルタルの使用材料、表-3 に配合を示す。

モルタルの配合はW/C=55%とし、本微生物はモルタル1m³当り0.0、2.5、5.0、7.5kg外割で添加した。

モルタルは200練りのモルタルミキサを使用し、セメント、細骨材、本微生物を投入後、空練りを1分間行い、練混ぜ水投入後に機械練り2分間、練返し1分間、機械練り1分間を行い排出した。

表-3 より、空気量および圧縮強度は、本微生物の添加量を変化させても大きな変化は見られなかった。

3.3 試験方法

(1) 通水試験【その1】

通水試験【その1】は参考文献¹²⁾を参考に実施した。

表-1 試験項目

試験項目	規格等	詳細
通水試験 (その1)	—	供試体寸法：φ50×100mm 湿空養生2日、標準水中養生28日、7日気中養生後開始 試験材齢：0週、1週、2週、3週、4週、5週 ひび割れの通水量の変化率を測定
通水試験 (その2)	—	供試体寸法：40mm×40mm×150mm 湿空養生2日、標準水中養生28日、7日気中養生後開始 試験材齢：0週、1週、2週、3週、4週、5週 ひび割れからの漏水の有無を確認し、その供試体数量を測定

表-2 使用材料

分類 (記号)	使用材料	詳細
水 (W)	上水道水	郡山市上水道水
セメント (C)	普通ポルトランド	密度 3.16g/cm ³
細骨材 (S)	5号硅砂	絶乾密度 2.62g/cm ³
混和材 (Ba)	微生物	枯草菌の一種

表-3 配合

No.	W/C (%)	単体量 (kg/m ³)			Ba (外割) (kg/m ³)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
		W	C	S			
1	55	281	511	1415	0.0	7.2	21.1
2.5					7.2	21.2	
5.0					7.5	21.3	
7.5					6.0	24.6	

写真-2に通水試験【その1】供試体の概要を示す。試験体は、割裂引張強度試験方法（JIS A 1113）に準拠し、円柱供試体にひび割れを導入した（写真-3）。その後、側面をプチルテープおよびシリコン樹脂で塞ぎ、供試体中央部をステンレスバンドで固定し、上面に塩ビ管を接続した。

写真-4に試験状況を示す。試験体上面の塩ビ管に、水頭差50mm一定となるよう水を滞留させ、余分な水は排出した。本試験では、試験体上面より一定の水圧で水道水を流下させたときに、ひび割れを通り試験体底面へと通水する1分当りの水量を測定した。

試験体は打設後28日まで水中養生を行い、7日間気中養生した。気中養生中に試験体を作製し、養生終了後、通水試験を開始した。試験サイクルは、微生物に十分な水分と酸素を供給するため、水中養生（20℃）3日、気中養生（35℃、40%Rh）3日、試験1日とした。また、本試験はひび割れ幅の制御が困難であるため、1水準当りの試験体数はひび割れ幅のばらつきを考慮し15本とした。

図-1にひび割れ幅の分布を示す。ひび割れ幅は通水試験【その1】開始直前に、試験体底面の3点をクラッ

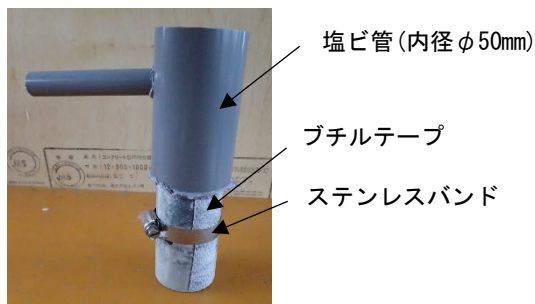


写真-2 通水試験【その1】供試体概要



写真-3 通水試験【その1】ひび割れ導入状況

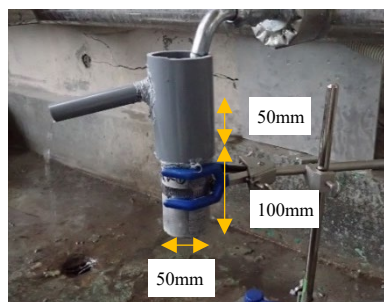


写真-4 通水試験【その1】試験状況

クスケールで測定した値の平均である。ひび割れ測定は底面のみしか行うことができず、また、ひび割れ導入時の底面部の欠け等もあったため、ばらつきが大きい結果となった。

(2) 通水試験【その2】

図-2に供試体概要を示す。通水試験【その2】では、40mm×40mm×150mmの角柱供試体の中央にφ6mmの円管状の孔を導入した。円管状の孔は、φ6mmの鋼材に剥離剤を塗布し、所定の位置に配置し、モルタル硬化後に引抜くことで作製した。本試験の供試体の養生方法は、通水試験【その1】と同一とした。

角柱供試体は、セメントの物理試験方法（JIS R 5201）中の曲げ強さ試験に準拠し亀裂を発生させ、供試体亀裂発生箇所の四隅をアルミテープにより固定することで、ひび割れ幅を保持した。なお、供試体数量は通水試験【その1】同様、ひび割れ幅の制御が困難であり、ひび割れ幅のばらつきを考慮し、1水準当り15本とした。

図-3にひび割れ幅の分布を示す。ひび割れ幅は、曲げ強さ試験方法の供試体側面に発生したひび割れの中央をクラックスケールにて測定した。本試験においては、ひび割れ閉塞の有無を早期に確認するため、0.2mm以下の微小なひび割れを対象とした。また、通水試験【その2】においては、対象とするひび割れ幅が小さく、試験実施中にひび割れ部が破断すると元の幅に戻すことは困難なことから、完全に破断した供試体は除外した。

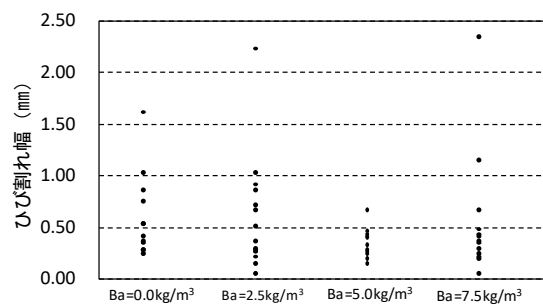


図-1 通水試験【その1】供試体のひび割れ幅分布

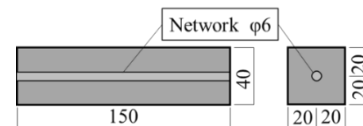


図-2 通水試験【その2】供試体概要

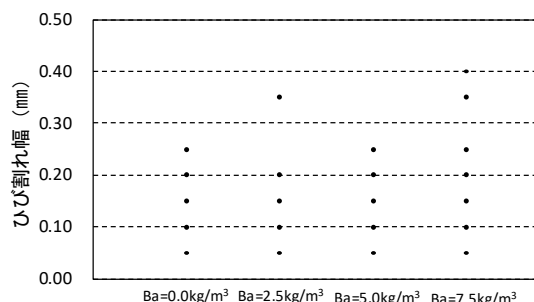


図-3 通水試験【その2】供試体のひび割れ幅分布

写真-5 に通水試験【その2】の状況を示す。円管状の孔の片端部をアルミテープで閉塞し、シリコン樹脂でコーティングした。閉塞面を下面とし、上面より水道水を流入した。本試験においては、ネットワークに流入する試験開始時の水量を 50ml とし、ひび割れからの漏水の有無を確認し、その数量を測定した。

4. 試験結果

4.1 通水試験【その1】

図-4 に全供試体の通水量変化率の平均を示す。試験開始 5 週間後の通水量変化の標準偏差は、微生物の添加量が 0.0, 2.5, 5.0, 7.5 kg/m³ の場合にそれぞれ 31.9, 21.5, 12.5, 17.8%であった。

同一の微生物を用いた既往の試験^{15),16)}では、4 週で試験を終了していたが、早期にひび割れ閉塞の有無の確認をするため、微生物を添加した試験体の通水量が前週と変化がみられなくなった試験開始後 5 週間で終了した。

試験開始 1 週間後、すべての供試体で通水量の変化は見られなかった。ひび割れ発生初期においては、微生物の活動が緩やかであり、ひび割れ閉塞がほとんど行われていないためであると考えられる。

試験開始 2 週間後、微生物を添加した供試体の通水量が大きく低下していることが確認できた。微生物が活発に活動し、炭酸カルシウムを生成しているためと考えられる。

試験開始 3 週間以降は、通水量の変化は緩やかになった。

試験開始後 5 週間の通水量は、すべての供試体において養生前 (0 週) と比較して減少した。試験開始 5 週間後、微生物を添加していない供試体の通水量は、養生前と比較して 18.1%減少した。通水量は微生物を 2.5, 5.0, 7.5kg/m³ 添加することで、それぞれ 38.3, 43.7, 39.3%減少した。

本試験は 5 週間で終了し、微生物の添加によるひび割れ閉塞の効果を確認することができた。

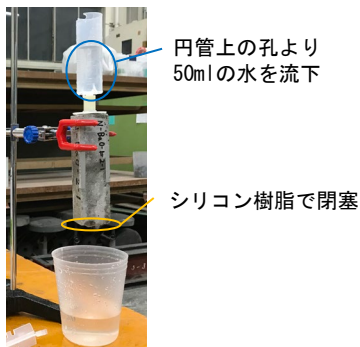


写真-5 通水試験【その2】状況

全供試体の養生前 (0 週) における最大値 945.0 ml/分、最小値 2.6 ml/分、平均値 89.2 ml/分であり、100ml/分を基準として試験結果を分類した。表-4 に試験体分布を示す。

図-5 に、全供試体のうち養生前 (0 週) の通水量が 100ml/分以上となった供試体の試験結果を示す。これは、ひび割れからの通水量が多い場合、生成された炭酸カルシウムが流出しやすくなるため、ひび割れ閉塞に影響が出ると考えられたためである。通水量の変化率は全体平均と比較して小さくなったが、微生物によるひび割れ閉塞の傾向を確認することができた。

図-6 に、全供試体のうち養生前 (0 週) の通水量が

表-4 試験体分布

微生物添加量	Ba=0.0 (kg/m ³)	Ba=2.5 (kg/m ³)	Ba=5.0 (kg/m ³)	Ba=7.5 (kg/m ³)
初期通水量				
100ml/分以上	3	2	2	2
100ml/分未満	12	13	13	13

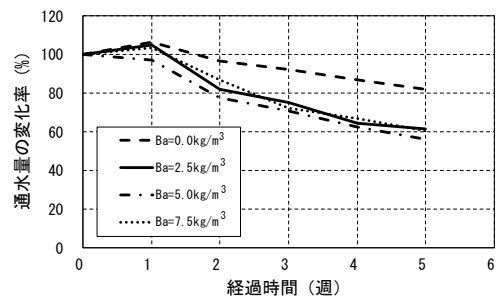


図-4 通水試験【その1】結果 (全体平均)

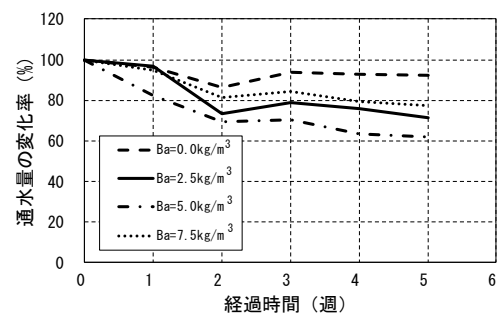


図-5 通水試験【その1】結果 (通水量 100ml/分以上)

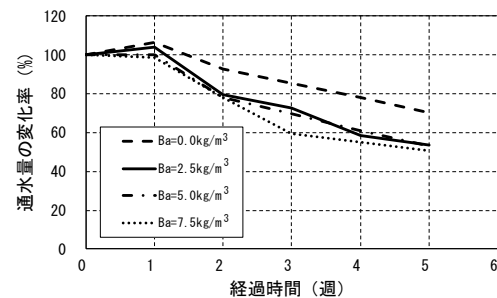


図-6 通水試験【その1】結果 (通水量 100ml/分未満)

100ml/分未満である供試体の試験結果を示す。通水量の変化率は、全体平均の傾向と同様であった。

また、写真-6 に試験開始 5 週間後の供試体下面の様子を示す。微生物を添加した供試体では、ひび割れ発生部に白色の生成物を確認することができた。これは前述した微生物による乳酸カルシウムの分解によって生成したものである可能性がある。

これらの結果より、微生物添加量の差による通水量の変化は確認できなかったが、微生物添加の有無による通水量の差を確認することができた。微生物を添加していない供試体は、モルタル自体の持つ自然治癒により通水量が減少したと考えられる。また、初期の通水量の多少に関わらず、微生物をモルタルに添加することにより、ひび割れ閉塞が行われていることが確認できた。

4.2 通水試験【その 2】

図-7 に通水試験【その 2】において、ひび割れからの漏水が確認できなかった供試体の割合を示す。

0 週の時点で漏水を確認できない、ひび割れ幅が 0.05mm 以下の十分に小さい試験体もあった。また、試験開始後 5 週では全ての試験体の閉塞は確認できなかったが、試験期間を延長することにより全ての試験体が閉塞

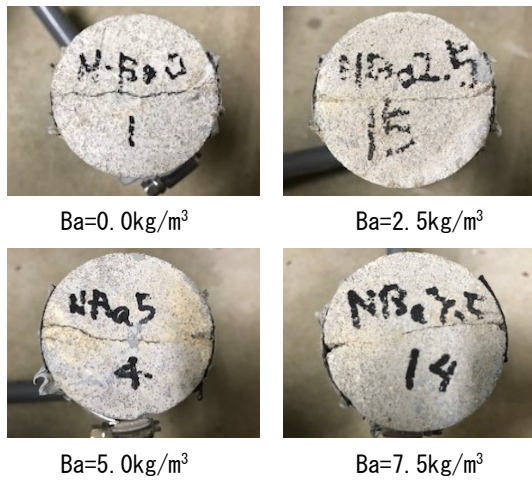


写真-6 通水試験【その 1】供試体

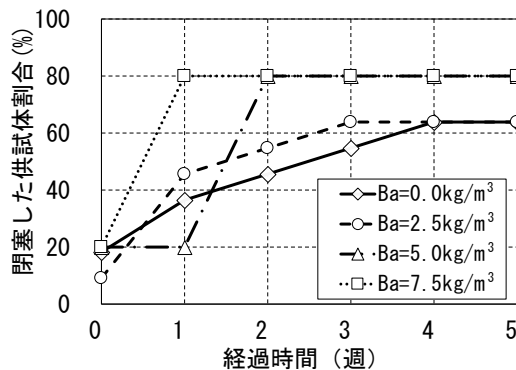


図-7 通水試験【その 2】における閉塞した供試体割合

すると考えられる。

通水試験【その 1】同様に、試験期間が長くなるほどひび割れが閉塞する割合が増加する傾向が見られた。また、微生物の添加量が増加するほど、ひび割れ閉塞までの期間が短くなる傾向が確認できた。これは、通水試験【その 1】のひび割れ幅と比較し、通水試験【その 2】のひび割れ幅が小さい傾向があるため、ひび割れ閉塞の経時変化が顕著に表れたためと考えられる。

5. まとめ

モルタルに特定の微生物を添加することによるひび割れ閉塞効果を把握するために行った、各種試験により得られた知見を以下に示す。

- (1)ひび割れを流下する通水量は微生物を添加することにより、減少する傾向が見られた
- (2)微生物の添加量を変化させることによる、ひび割れ閉塞効果への影響は小さいことを確認した。
- (3)初期ひび割れからの通水量の多少に関わらず、微生物添加によるひび割れ閉塞の傾向を確認することができた。
- (4)微生物の添加量が増加するほど、ひび割れ閉塞までに必要な養生期間が短くなる傾向が見られた。

今後、コンクリート構造物への実適用を視野に入れて、微生物を添加したコンクリートのひび割れ閉塞効果の定量的な把握や、中性化・凍害・塩害等の耐久性把握のために各種試験を実施する予定である。

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) 松下博通, 近田孝夫, 前田悦孝, 川崎英司: 高炉スラグ含有コンクリートの微細ひび割れの閉塞に関する研究, セメント・コンクリート工学論文集, No.52, pp.638-643, 1998
- 3) 松下博通, 陶佳宏, 清崎里恵: 初期ひび割れを導入したモルタルの強度回復特性, コンクリート工学論文集, Vol.14, No.1, pp.57-65, 2003
- 4) 清崎里恵, 松下博通, 陶佳宏: 強さ 32.5 クラスのセメントを用いたモルタルにおける初期ひび割れの強度回復特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.605-610, 2003
- 5) 内藤哉吉, 松下博通, 鶴田浩章, 佐川康貴: 初期ひび割れ導入モルタルの自己修復特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.627-632, 2004
- 6) 自己修復コンクリートの開発, 北海道立北方建築総合研究所, 調査研究報告書, 2007

- 7) 藤原佑美, 濱幸雄, 山城洋一, 齋藤敏樹: フライアッシュを用いたコンクリートの耐凍害性と自己修復効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.873-877, 2008
- 8) 村井洋公, 濱幸雄, 谷口円, 桂修: フライアッシュを混入した AE コンクリートの自己修復効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1195-1200, 2009
- 9) 自己修復コンクリートの実用化, 北海道立北方建築総合研究所, 調査研究報告書, 2009
- 10) 下村哲雄, 細田暁, 岸利治: 低水粉体比の膨張コンクリートのひび割れ自己修復機能, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.661-666, 2007
- 11) 山田啓介, 細田暁, 在田浩之, 岸利治: 膨張剤を用いたコンクリートのひび割れ自己治癒効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.261-266, 2008
- 12) 根本 雅俊, 藤原 浩巳, 丸岡正知, 小早川 真: クリンカー骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの基本性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.351-356, 2016
- 13) 稲田晴香, 宮本慎太郎, 皆川浩, 久田真: 材齢1年までのセメントクリンカー骨材を用いたモルタルの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.88-86, 2016
- 14) 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
- 15) Henk M Jonkers, Erik Schlangen: A Two Component Bacteria-based Self-healing Concrete, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II, pp.215-220, 2008
- 16) Henk M Jonkers, Arjin Thijssen, Gerard Muyzer, Oguzhan Copurogle, Erik Schlangen: Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, Ecological Engineering, pp. 230-235, 2010
- 17) 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
- 18) Klaas van Breugel: SELF-HEALING MATERIAL CONCEPTS AS SOLUTION FOR AGING INFRASTRUCTURE, 37th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURE, 2012
- 19) 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