

論文 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

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

要旨：コンクリートのひび割れ補修方法に関して様々な研究が行われている。その中で筆者らは、微生物の働きによるひび割れ閉塞効果の検討を行っている。本研究では、特定の微生物を添加したモルタルを用いて通水試験を行った。試験の結果、微生物を含む粒を 5.0kg/m^3 以上添加した供試体のひび割れからの水の滴下が 5 週間で確認されなくなった。また、モルタルのひび割れを完全に閉塞するためには微生物を含む粒の添加が 5.0kg/m^3 以上必要であることも示された。コンクリートに添加するにあたっては 5.0kg/m^3 以上が望ましいと考えられる。

キーワード：自己治癒、ひび割れ、微生物、長寿命化、メンテナンスフリー、通水試験

1. はじめに

高度経済成長期に大量に建設されたコンクリート構造物やグレーインフラの老朽化への対応が叫ばれて久しい。構造物に対する考え方は高度経済成長期に浸透したスクラップ&ビルドから、2000年に発表された『地球環境・建築憲章』の取り組みの一つとして『長寿命』が挙げられているように長寿命化へと遷移しつつある。すなわち、建設後老朽化したら解体し新たに建設するという姿勢から、現存する構造物を補修等により長持ちさせたり新たに建設する際には長期間の供用を前提としたりするようになったのである。

コンクリート構造物の耐久性の向上や長寿命化を達成するためにはひび割れへの対策が欠かせない。特に RC 構造物のひび割れは微小のものであっても本構造物の万病の元となり得る。水密性の低下による塩害や凍害、鉄筋の腐食等どれも対策が必須のものばかりである。

平成 25 年 6 月には、第 2 次安倍内閣が国内の成長戦略として『日本再興戦略 -JAPAN is BACK-』を閣議決定した。本戦略内『戦略市場創造プラン』では『インフラ長寿命化基本計画』が策定され新素材の開発が促された。『平成 26 年度から、関係省庁が連携し、自己修復材料等のインフラ長寿命化に貢献する新材料の研究開発を推進する。』、『現場での試行等により、信頼性・経済性が実証できた新素材については、順次、インフラへの導入促進を図る。』というものである。また、自己修復材料等の新材料に関する世界市場規模を 2030 年までに 30 兆円まで拡大する方針が掲げられ、インフラ長寿命化の要求はますます高まっている。

現在、自己修復材料について、高炉スラグ微粉末を用

いる研究^{3),4),5),6)}、セメントクリンカーを用いる研究^{7),8)}、フライアッシュを用いる研究^{9),10),11),12)}、低水セメント比の膨張コンクリートを用いる研究^{13),14)}等様々な研究・開発が行われている。しかしながら、それらの技術の採用については実環境下での検討が不十分であったり、適用可能条件が限定的であったりする等課題が多く、実用化にはより多くの時間が必要であるというのが現状である。

そこで筆者らは、微生物の活動によりコンクリートのひび割れを治癒する仕組みの実構造物への適用を目指し、微生物を利用した自己治癒コンクリート^{15),16)}の検討を行っている。ひび割れの治癒が自動化され、人の手の届かない箇所の補修も可能になる。これにより、インフラの長寿命化だけでなくメンテナンスフリー化も期待され、国内だけでも数十万箇所に及ぶインフラの点検・補修に要する時間とコストの削減、作業時の危険性の排除、建設業就業者不足の問題解決への寄与ができる。

これまでには、微生物を添加することによりひび割れから滴下する水量が減少したこと、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あるがその差は極めて小さいこと等を確認している。本研究では、微生物を利用した自己治癒コンクリートの最適な調合の決定をするために、微生物の添加量によるひび割れの閉塞効果の違いを明らかにすることを目的として実験的検討を行った。その基礎研究として、微生物を添加したモルタルを用いて通水試験を行った。

2. 自己治癒の仕組み

2.1 本研究に用いた微生物

本研究に用いた微生物は好気性かつ好アルカリ性で

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 戸田建設(株) 技術開発センター 工修 (正会員)

*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)

ある枯草菌の一種（Bacillus 属の一種）である。これを微生物の栄養分に変化するポリ乳酸と混合したものをを用いた。密度は $1.0\sim 1.5\text{g/cm}^3$ である。

写真－1 に本研究に用いた微生物を含む粒（以下，HA）を示す。

この微生物は，活性化前は休眠状態であり芽胞を形成している。微生物の芽胞は温度等の環境条件の悪化によって形成され，極めて高い耐久性を持つ球形の細胞であり，植物の種子に類似している。本微生物が形成する芽胞は最大約 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，大きさは直径 $0.8\sim 1.0\mu\text{m}$ である¹⁵⁾。コンクリート中等の pH 12~13 の強アルカリ環境の下でも生存が可能で， $0\sim 80^\circ\text{C}$ の温度にも耐えられることが分かっている。この芽胞は混合したポリ乳酸によってコンクリート練混ぜ時の摩擦等から保護されている。



写真－1 本研究に用いた微生物を含む粒

2.2 ひび割れ閉塞の仕組み

以下に，HA を添加したコンクリートのひび割れ閉塞の仕組み¹⁴⁾を示す。

- (1) コンクリート練混ぜ時に所定の量の HA を添加する。
- (2) 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となり，HA が脆くなる。
- (3) コンクリートのひび割れ発生によりひび割れ部分に存在する微生物に水分と酸素が供給され，微生物が活性化する。
- (4) 微生物が乳酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$) を分解する。その結果，炭酸カルシウム (CaCO_3)，二酸化炭素 (CO_2) 及び水 (H_2O) を排出する。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中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，微生物は芽胞を形成し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 (1) ～ (6) の過程を経てひび割れが閉塞する。

3. 試験概要

3.1 試験概要

微生物の活性化のためには水分と酸素の供給が必要である。そのため本試験は，水分と酸素が十分にひび割れ部分に供給されて微生物によるひび割れ閉塞がなされやすい環境を模擬して試験を実施した。

表－1 に試験項目を示す。

HA を添加したモルタルを用いて円柱供試体を作製し，通水試験を行った。特定の水量をひび割れ面に流し込むことにより供試体上面にかかる水圧（水頭差）を同じくし，供試体上面から下面へと貫通したひび割れを通り，下面より滴下する水量（通水量）を測定した。

表－1 試験項目

試験名	概要
通水試験	供試体寸法：φ50×50mm 工程：湿空養生 2 日， 標準水中養生 26 日， 気中養生 7 日， 試験開始 1 週：試験 1 日，標準水中養生 3 日， 気中養生 3 日として試験実施 試験材齢：1 週，2 週，3 週，4 週， 5 週，6 週，7 週 測定項目：ひび割れ部分からの 通水量の変化

3.2 使用材料及び調査

表－2 に本試験に用いたモルタルの使用材料，表－3 に調査をそれぞれ示す。

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 号珪砂	絶乾密度 2.62g/cm^3
混和材(HA)	微生物，ポリ乳酸	枯草菌の一種

モルタルの調査は W/C=50% とし，HA はモルタル 1m^3 当たり 0.0，2.5，5.0，10.0kg を外割で添加した。

モルタルは 20L 練りのモルタルミキサを使用した。セメント、細骨材、HA の投入後、空練りを 1 分間行い、練混ぜ水投入後に機械練り 2 分間、練り返し 1 分間、機械練り 1 分間を行い排出した。

表-3 調合

水準	調合名	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			HA (kg/m ³) (外割)
			W	C	S	
1	HA 0	50	225	450	1350	0.0
2	HA 2.5					2.5
3	HA 5.0					5.0
4	HA 10					10.0

3.3 試験方法

写真-2 に通水試験に用いた供試体の概要を示す。

φ50×50mm の円柱供試体を作製した。φ50×100mm のプラスチック製の型枠に供試体の高さが 50mm となるように打込んだ。供試体数は導入するひび割れの幅のばらつきを考慮し 1 調合当り 6 体とした。打込み後 20℃、90%(RH)にて湿空養生を 2 日間行い脱型した。打込みに用いた型枠は通水試験に用いる供試体を作製するため側面を剥がさずに、側面のくぼみ 4 本のうち 1 本にカッターナイフを用いて亀裂を入れ、下面の金属板と一緒に押し出して脱型を行った。その後、材齢 28 日まで標準水中養生を行った。次の 20℃、50%(RH)にて行った 7 日間の気中養生期間中に、以下に示す通水試験に用いる供試体の作製を行った。図-1 にその概要を示す。標準水中養生後、表乾状態にして供試体側面にテープを貼りやすくするために 20℃、50%(RH)に 1 日置いた。ひび割れ導入時の供試体の破損を防ぐために透明の梱包用テープを供試体側面に 1 周巻いた。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)によって供試体を割裂しひび割れとした。その様子を写真-3 に示す。その後、打込み用いた型枠に割裂した供試体を打込みと同じ向きで戻した。亀裂を入れた一辺と、供試体下面と型枠下面の境界線をシーリング材で閉塞してひび割れ部分以外からの漏水を防止した。シーリング材を十分に乾燥させるために 20℃、50%(RH)に 1 日置いた。気中養生 7 日目すなわち通水試験開始の前日に、供試体下面のひび割れ部分の中央一点をクラックスケールで測定した。梱包用テープで供試体を巻いたことにより既往の研究¹⁶⁾で確認された割裂時のひび割れ部分の欠けがなく、目視により同じ供試体中でひび割れ幅が一定であることを確認したため測定は一点のみとした。供試体上面については型枠に戻す前に測定を行うと戻した際にひび割れ幅に影響が出る恐れがあったため、また戻した後は

供試体上面が型枠の高さ方向の中央に位置するので測定が困難であったため行わなかった。供試体下面については型枠底面部分に位置し、上面と比較して滑らかであり測定に適していたことからひび割れ幅を測定した。

7 日間の気中養生終了後、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試験 1 日、標準水中養生 3 日、気中養生[37℃、90%(RH)] 3 日を 1 週とした。写真-4 に試験の状況を示す。供試体をスタンドにより鉛直に設置し、その下に水受け、電子てんびんを設置した。毎試験開始直前に、後述する試験時に使用する水量と同じ量の水を供試体上面に流し込んだ。これにより先述の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。必要があればシーリング材にて再度閉塞した。試験時間は 3 分とし、計測開始とともに供試体上面に約 100mL の水を流し込んだ。通水量の変化をより明確にするため、型枠に一度に流し込める最大の水量を用いた。式(2)に最大の水量の算出式を示す。3 分後、供試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。

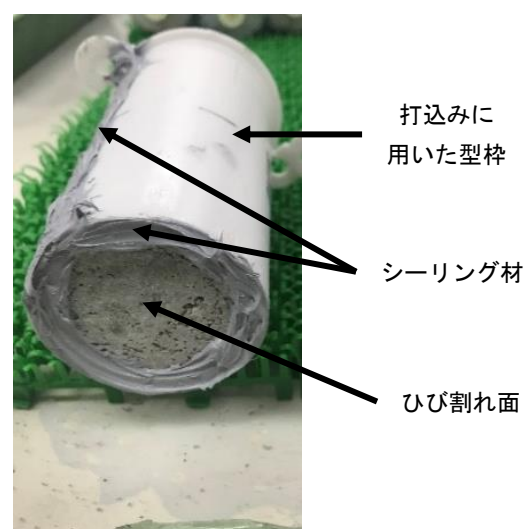


写真-2 通水試験に用いる供試体の概要

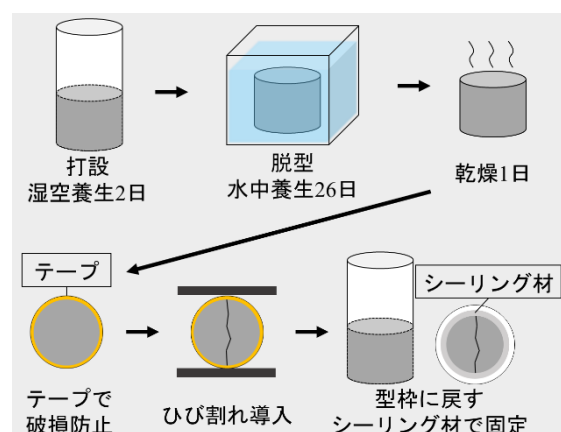


図-1 通水試験に用いる供試体作製方法の概要

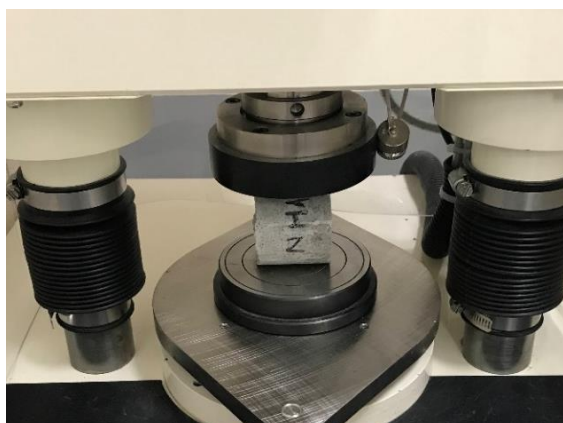


写真-3 供試体へのひび割れ導入状況

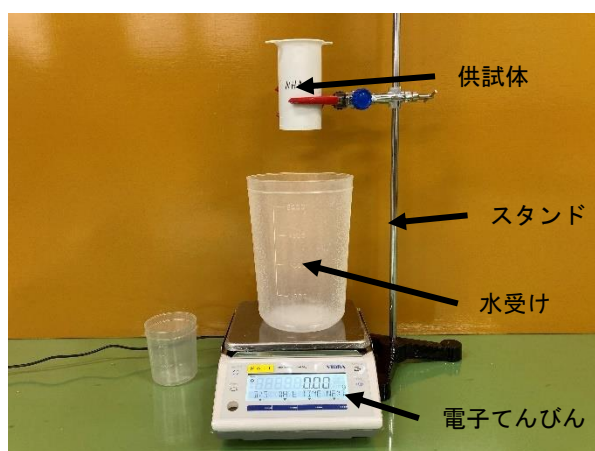


写真-4 通水試験状況

$$25\text{mm} \times 25\text{mm} \times \pi \times 50\text{mm} \div 100\text{mL} \quad (2)$$

4. 試験結果

図-2 に調査ごとのひび割れ幅の分布を示す。

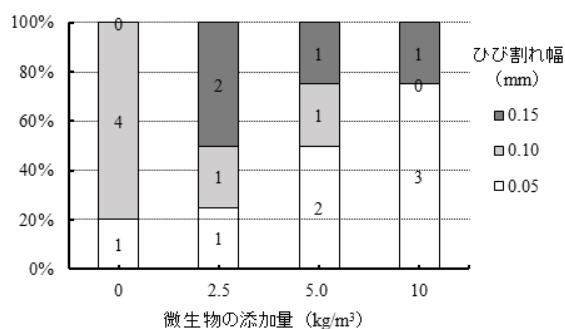


図-2 ひび割れ幅の分布

1 週目の通水試験の時点で導入したひび割れ幅が小さいことから試験時間中に水受けに滴下せずに計測が不能となった供試体が散見された。そのため、それらを試験対象から除外し HA 0 が 5 体、HA 2.5 が 4 体、HA 5.0 が 4

体、HA 10 が 4 体の計 17 体の供試体を用いて通水試験を行った。クラックスケールは 0.05mm を最小とし、以降 0.05mm 刻みで計測が可能である。ひび割れ幅は 0.05mm~0.15mm の間に分布した。どの調査においても、また全体的にもひび割れ幅に大きな偏りはなく試験が可能であると判断した。

図-3 に 1 週目の通水量とひび割れ幅との関係を示す。

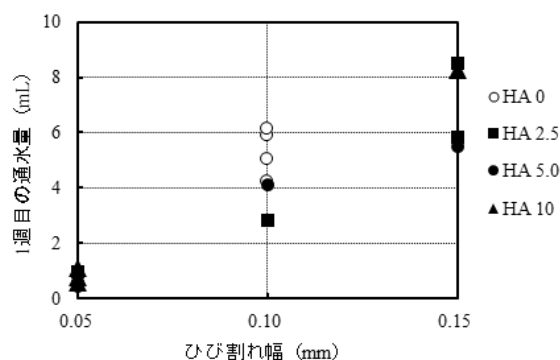


図-3 1 週目の通水量とひび割れ幅

ひび割れ幅が大きくなるほど通水量が増加することが確認できた。

図-4 に、試験サイクルの増加に伴う、調査ごとの通水量の変化を、1 週目の通水量に対する割合を用いて示す。

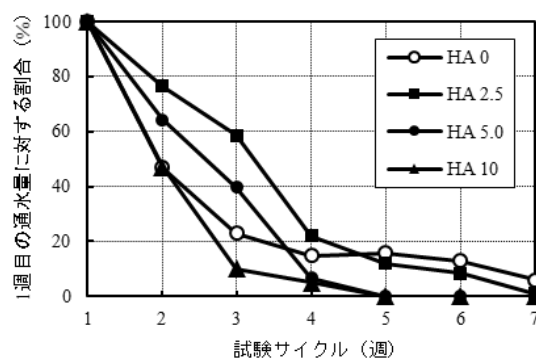


図-4 通水量の変化

どの調査においても、またひび割れ幅の大小に関わらず通水量の減少が確認された。

同一の微生物を用いた既往の研究では 4 週まで試験を行っていた。本研究において 4 週まででは、他の調査と比較して HA 2.5 の供試体の通水量の減少が一番小さかった。これは HA の添加量が不十分であったことに加え、各調査の平均ひび割れ幅が HA 0 で 0.090mm、HA 2.5 で 0.113mm、HA 5.0 で 0.088mm、HA 10 で 0.075mm と HA 2.5 の供試体の平均ひび割れ幅が大きく、ひび割れの治癒

により長い期間が必要であるためと考えられる。

5 週の時点で HA 5.0, HA 10 のすべての供試体でひび割れ面からの水の滴下が確認されなくなった。HA 0, HA 2.5 と比較して HA 5.0, HA 10 の供試体は HA の添加量がひび割れを閉塞するのに十分であったからと考えられる。HA 5.0 と HA 10 とでは他の調合と比較して閉塞に要する期間の長さに大きな違いはないことが分かった。

5 週から 7 週にかけて、HA 5.0, HA 10 のすべての供試体でひび割れ面からの水の滴下が確認されなかったことから 7 週で試験を終了した。7 週の時点での各調合の 1 週目の通水量に対する 7 週目の通水量の割合は HA 0 で 6.0%, HA 2.5 で 0.95%, HA 5.0 で 0%, HA 10 で 0% となった。

さらに、試験時間中に供試体上面に流し込んだ水がひび割れを通して供試体下面より滲出するかどうかの確認も行った。その結果を図-5 に示す。

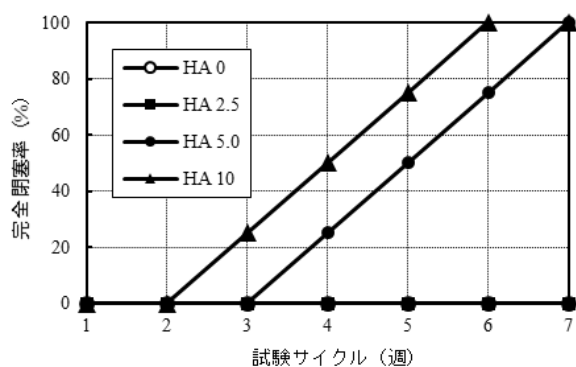


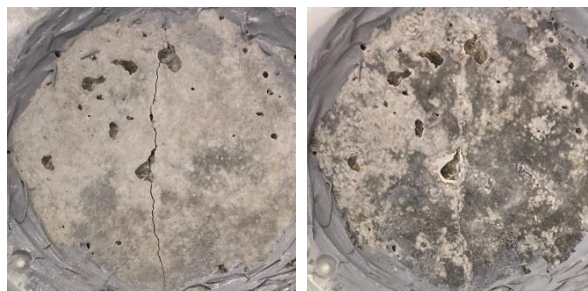
図-5 完全閉塞率

各調合の供試体のうち供試体下面から水の滴下も滲出も確認されなかった供試体をひび割れが完全に閉塞して水密性が回復したものとした。その割合を完全閉塞率として週数の経過に伴う変化を確認した。

HA 10 は 3 週目に、HA 5.0 は 4 週目にひび割れが完全に閉塞した供試体を確認され始めた。また、HA 10 は 6 週目に、HA 5.0 は 7 週目に完全閉塞率が 100% に達した。これについても、HA 5.0 と HA 10 とでは他の調合と比較して閉塞に要する期間の長さに大きな違いはないことが分かった。

HA 2.5 については、HA の添加量が不十分であったことに加えて他の調合と比べてひび割れ幅が大きいことから、完全閉塞に至るまでにはより長い期間が必要になると考えられる。HA 0 の供試体については本試験期間内ではひび割れが完全に閉塞した供試体が 1 体も確認されなかった。このことから、モルタルのひび割れを完全に閉塞して水密性を回復するためには、 5.0kg/m^3 以上の HA の添加が必要になることが分かった。

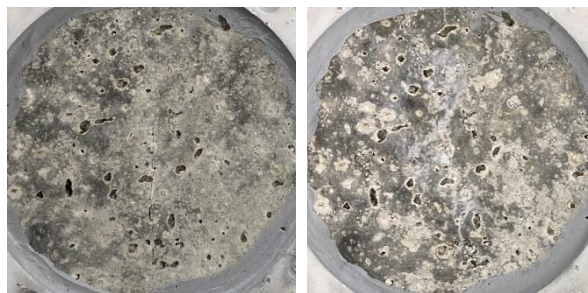
写真-5 に、各調合の 1 週と 7 週時点での供試体下面のひび割れの様子を示す。



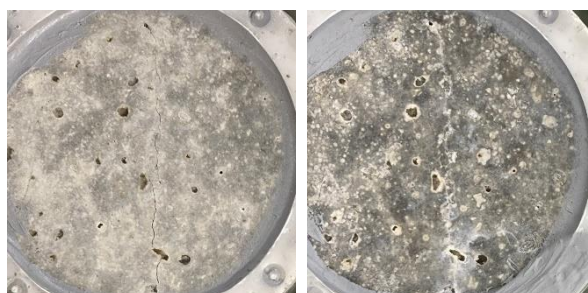
HA 0



HA 2.5



HA 5.0



HA 10

写真-5 調合ごとの 1 週 (左) と 7 週 (右) の比較

HA を添加した供試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じた炭酸カルシウムであると考えられる。

以上のことから本試験においては、HA の添加の有無によってだけでなく、 5.0kg/m^3 を限度として HA の添加

量を増やすことによっても通水量の減少に違いが生じることが確認できた。HA を添加していない供試体の通水量の減少については、モルタル自体の持つ自然治癒効果によるものだと考えられる。

5. まとめ

微生物を利用した自己治癒コンクリートの最適な割合の決定を目的として、モルタルに特定の微生物を添加することによって行った通水試験により得られた知見を以下に示す。

- (1) HA を添加することにより、添加しない場合と比較してひび割れから滴下する水量がより減少した。
- (2) HA を添加した場合でも、ひび割れ幅の大小に関わらずひび割れから滴下する水量が減少した。
- (3) 5.0kg/m^3 を限度として HA をより多く添加することにより、ひび割れの閉塞効果が増大した。よって、コストを考慮すればモルタルにおける最適な HA の添加量は 5.0kg/m^3 である。
- (4) モルタルのひび割れを完全に閉塞させるためには HA の添加が 5.0kg/m^3 以上必要である。

コンクリート構造物のひび割れ補修においては、より早くひび割れを完全に閉塞して水密性を回復することが重要である。本研究の結果より、コンクリートに HA を添加するにあたっては 5.0kg/m^3 以上とすることで早期のひび割れの完全閉塞が期待される。今後はこれをもとに、コンクリート構造物への適用を見据え、微生物を利用したコンクリートのひび割れ閉塞効果の検討や塩害、凍害、中性化等の各種耐久性の検討を行う。

参考文献

- 1) 地球環境・建築憲章 運用指針 : <http://news-sv.aij.or.jp/kensho/sisin.pdf> (閲覧日:2021 年 1 月 7 日)
- 2) 日本再興戦略 -JAPAN is BACK- : https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/saikou_jpn.pdf (閲覧日:2021 年 1 月 7 日)
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 内藤哉良, 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
- 7) 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及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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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