

論文 水路の長寿命化を目指したバクテリアによるひび割れ自己治癒モルタルに関する基礎的検討及び試験適用

川崎 浩長*1・Sanjay PAREEK*2

要旨：本研究では、水路の長寿命化を目指して安積疎水水路に上塗り補修したモルタルについて強度特性及びひび割れ自己治癒性能を検討した。その結果、モルタルにバクテリア含有混和材を添加した場合でもセメント混和用ポリマーディスページョンの添加により曲げ・圧縮強さの向上が見られ、長期強度も増進した。また、通水試験によりひび割れの自己治癒が確認できた。水路の補修箇所については初期ひび割れの吸水が停止していることから自己治癒が確認でき、今後発生するひび割れの自己治癒も期待できる。

キーワード：水路、長寿命化、バクテリア、ひび割れ、自己治癒、ポリマー

1. はじめに

バクテリアを用いたひび割れ自己治癒コンクリートについて、バクテリアがコンクリートのひび割れを治癒するためには栄養分や空気（酸素）の他に水分の供給が重要となる。これまでは、水分の十分な供給を確保した環境でバクテリアを添加したモルタルのひび割れ自己治癒性能を検討する通水試験を行い、バクテリアを含有する混和材（以下、HA）をモルタルに 5.0kg/m^3 以上添加することでひび割れからの水の滲出が停止することを確認した¹⁾。また、コンクリートに水分が供給されやすい環境としてトンネルに着目し、バクテリアが急結剤に曝された場合でも十分に増殖することが確認できた²⁾。このことからコンクリートの吹付け試験により試験体を作製して通水試験を行い、吹付けコンクリートにもバクテリアによるひび割れ自己治癒機能を付与できることを確認した³⁾。

本研究では、水路に用いられるコンクリートに対してバクテリアによるひび割れ自己治癒機能を付与することを目指す基礎的な検討を実施した。水路の通水によりコンクリートのひび割れに水分が供給されやすく、バクテリアが活性化し、より効率的なひび割れ自己治癒がなされると考えたからである。水路としては、日本三大疎水のひとつである安積疎水の水路の一部（2か所）を選定し用いた。本疎水は1882年に完成して以来、約140年にわたって供用されてきた。そのため経年劣化が激しく、**図-1**に示す安積疎水水路の側面の劣化状況のように骨材が顕著に露出している。さらに、叩くと容易にコンクリート片が剥落したり、ひび割れからの漏水によりその周辺に浸水被害が発生したりするとの報告も受けた。以上のことから、今後も猪苗代湖から郡山市周辺地域に用水を供給する重要な役割を担う本疎水は、水路の補修及び長寿命化が必要であると考え、HAによるひび割れ自



図-1 安積疎水水路の側面の劣化状況

己治癒機能を付与する試みを実施した。

本稿では、HAを添加したモルタルによる水路の一部への上塗り補修において、使用したモルタルに関する基礎的検討と補修箇所の初期ひび割れ等の自己治癒状況の経過観察を実施した結果について述べる。

2. 自己治癒の仕組み

2.1 本研究に用いたバクテリア

図-2に本研究に用いたHAを示す。この混和材はバクテリアの芽胞とバクテリアの栄養分である乳酸カルシウムに変化するポリ乳酸を直接混合したものであり、密度は $1.0\sim 1.5\text{g/cm}^3$ である。このバクテリア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）であり、活性化前は休眠状態で芽胞を形成している。バクテリア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、コンクリート内部の $\text{pH } 12\sim 13$ の強アルカリ環境下でも生存が可能である。

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 修士（工学）（学生会員）

*2 日本大学 工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）



図-2 本研究に用いた HA

2.2 ひび割れ自己治癒の仕組み

以下に HA を添加したコンクリートのひび割れ自己治癒の仕組みを示す。

- (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細菌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細菌への水分と酸素の供給や、水分供給によるひび割れ部分の水分の pH の低下により細菌が活動を開始する。
- (4) 細菌が乳酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$) 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)に細菌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、細菌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 (3) ~ (6) の過程を経てひび割れが治癒する。

3. 実験概要

3.1 試験方法の概要

表-1 に試験概要を示す。本研究では水路を補修した現場練りモルタルで作製した試験体の所定の材齢での強度特性を評価する曲げ強さ及び圧縮強さ試験とひび割れ自己治癒性能を評価する通水試験、水路の補修箇所のひび割れ自己治癒状況を確認する経過観察を実施した。バ

表-1 試験概要

分類	試験名	概要
室内	通水試験	試験体寸法：φ50×50mm 工程：湿空養生 2d, 脱型, 水中養生 5d, 気中養生 21d, 通水試験体組立て 7d, 試験開始
		1 週：試験 1d, 水中養生 3d, 気中養生 3d の計 7d 試験間隔：20 週まで毎週 測定時間：3min 測定項目：ひび割れからの 通水量の変化
現場	経過観察	曲げ強さ 及び 圧縮強さ 試験
		試験体寸法：40×40×160mm 規格：JIS A 1171 材齢：7, 28, 182d
現場	経過観察	方法：水路補修箇所を 月に一度写真撮影

クテリアの活動のためには水分と酸素の供給が必要である。そのため通水試験は、水分と酸素が十分にひび割れ部分に供給されて細菌によるひび割れ治癒がなされやすい環境 (37°C, 高湿度や水中) を用意して試験を実施した。

曲げ強さ及び圧縮強さ試験は、HA の他に強度発現性や既設の水路との接着性を高めるためセメント混和用ポリマーディスパージョン (以下、ポリマー) を添加したことから、JIS A 1171 (ポリマーセメントモルタルの試験方法) に従い実施した。

経過観察については水路の補修箇所を一定の長さに分け、分割した箇所ごとに月に一度の写真撮影を実施した。最初の施工箇所では水路の側面及び底版を、2 か所目においては底版を補修した。

3.2 使用材料及び調合

表-2 に本モルタルの使用材料を、表-3 にその調合をそれぞれ示す。一般的に珪砂はセメント硬化体との結合性に優れていることから、強度発現性に期待し最初の施工箇所にて珪砂を用いた調合 (以下、SS) を使用した。しかしながら流動性が高く、特に水路側面における施工において初期ひび割れが多数確認されたことから 2 か所目では川砂を用いた調合 (以下、RS) を使用した。両方の調合について、ポリマーセメント比を 10% とし、HA の

表-2 使用材料

分類(記号)	概要
水(W)	郡山市上水道水
セメント(C)	普通, 密度 3.16g/cm ³
珪砂(SS)	5号珪砂, 密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 0.30%, F.M. 2.21
	密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 2.03%, F.M. 2.44
細骨材(S)	
川砂(RS)	
混和材(剤)	HA バクテリア含有混和材
	スチレン/アクリル酸
	P エステル共重合体水性 エマルジョン

表-3 調合

種類	W/C (%)	S/C	P/C (%)	HA (kg/m ³)
SS	30	2	10	7.5
RS	40	3		

添加量はポリマーの添加がバクテリアの活動に悪影響を及ぼす可能性を考慮しモルタル 1m³ 当り 5.0kg 以上である 7.5kg とした。

3.3 試験方法

(1) 打込み及び養生方法

図-3 に通水試験に用いた試験体作製方法の概要, 図-4 に通水試験に用いた試験体の概要を示す。現場練りモルタルを φ50×100mm のプラスチック製の型枠に高さ 50mm まで打込んだ。試験体数は導入するひび割れ幅のばらつきやポリマー添加に伴う強度向上により, 破壊の程度が高くなることからひび割れ導入時の試験体の破損可能性の増大を考慮し 1 調合当り 10 体とした。強さ試験に用いた試験体とともに打込み, 型枠上面を食品包装用ラップフィルムで覆い養生を 2d 行い, 実験室へ持ち帰って脱型を行った。打込みに用いた型枠は通水試験体の作製にも用いるため側面を剥がさずに, 側面のくぼみ 4 か所のうち 1 か所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 7d まで水中養生 (20°C) を行い, 材齢 28d まで気中養生 [20°C, 60% (RH)] を行った。

(2) 通水試験に用いる試験体の組立て方法

次に 20°C, 60% (RH) にて通水試験に用いる試験体の作製を 7d 以内に行った。28d 経過後, 試験体を表乾状態にしてひび割れ導入時の試験体の破損を防ぐための透明の梱包用テープを試験体側面に貼りやすくするために,

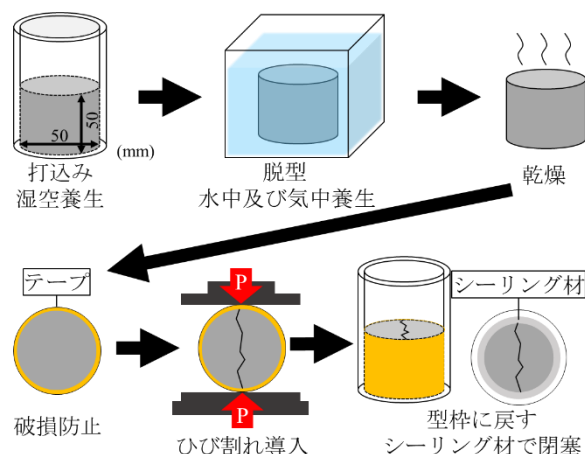


図-3 通水試験に用いた試験体作製方法の概要

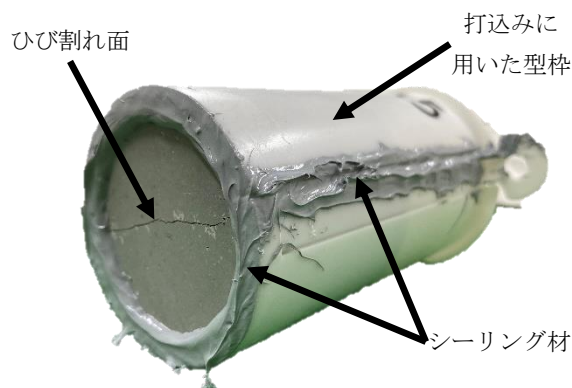


図-4 通水試験に用いた試験体の概要

20°C, 50% (RH) に 1d 置いた。本研究に用いたモルタルは既往の研究と比べて強度が高く, 試験体が破損する可能性も高いと考え梱包用テープを試験体側面全体に 2 周巻いた。次に全自動圧縮試験機を用いて JISA 1113 (コンクリートの割裂引張強度試験方法) を参考に試験体を割裂しひび割れとした。試験体の両底面にひび割れの発生を確認次第荷重を終了した。打込み面ではない方の試験体底面に導入したひび割れを図-5 に示す。その後, 試験体のひび割れ幅の変動を防止するため打込みに用いた型枠に割裂した試験体を打込み時と同じ向きで戻した。型枠の亀裂を入れた 1 か所と, 試験体下面と型枠下面の境界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°C, 50% (RH) に 1d 置いた。

(3) ひび割れ幅の測定方法

通水試験開始の前日に, 最小単位 0.05mm のクラックスケールを用いて試験体下面のひび割れ幅を等間隔に 3 点測定し平均値を算出した。試験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。試験体上面



図-5 導入したひび割れ

表-4 フレッシュ性状

調合	フロー (mm)	空気量 (%)
HA5.0	138	6.5
SS	161	7.0
RS	126	7.6

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が変動する恐れがあったため、また戻した後は試験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。

(4) 通水試験方法

通水試験は試験 1d, 水中養生 (20°C) 3d, 気中養生 [37°C, 90% (RH)] 3d の計 7d を 1 週とし, 20 週間毎週実施した。図-6 に通水試験の状況を示す。試験体をスタンドにより鉛直に固定し, その下に水受けと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量の水を試験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。測定時間は 3min とし, 測定開始とともに試験体上面に約 100mL の上水道水を流し込んだ。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) 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。3min 後, 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同様に水を流し込んでから 3min 後, 通水量の記録の代わりにひび割れから水が滲出するかどうかの確認を行った。

曲げ強さ及び圧縮強さ試験, 経過観察については 3.1

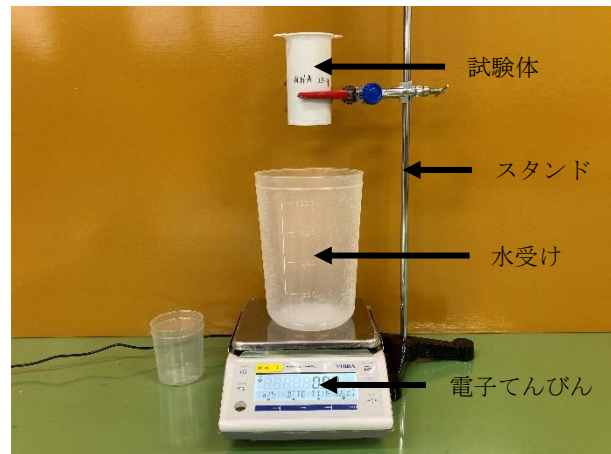


図-6 通水試験の状況

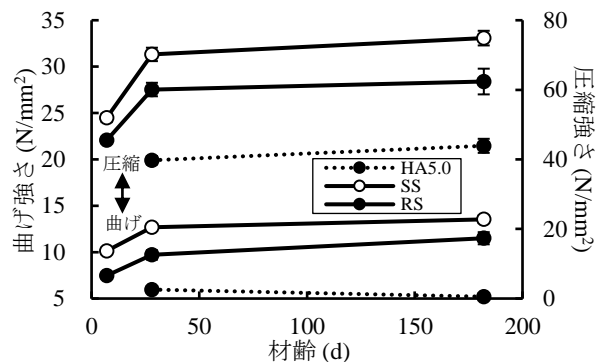


図-7 曲げ強さ及び圧縮強さ試験の結果

試験方法の概要で述べたとおりである。

4. 試験結果

以降はポリマーの添加の有無や HA の添加量に関して, 既往の研究⁹⁾におけるポリマーを添加しておらず同様の HA を 5.0kg/m³ 添加したモルタル試験体 (以下, HA5.0) と比較することにより考察を述べる。

4.1 室内試験結果

(1) フロー及び空気量測定結果

表-4 にモルタルのフレッシュ性状を示す。ポリマーの添加及び HA の添加量増加による変化は小さかった。

(2) 曲げ強さ及び圧縮強さ試験結果

図-7 に曲げ強さ及び圧縮強さ試験の結果を示す。HA を添加したモルタルにおいてもポリマーを添加することで曲げ強さと圧縮強さの両方が向上し, 長期にわたる増進も確認できた。また, 珪砂を用いた方が川砂よりも強度が高い傾向であった。SS の強度が一番高く, 次いで RS, HA5.0 となった。

(3) ひび割れ導入及び通水試験結果

図-8 に平均ひび割れ幅の分布を調合ごとに示す。ひび割れ幅は SS が一番大きく, 次いで RS, HA5.0 となっ

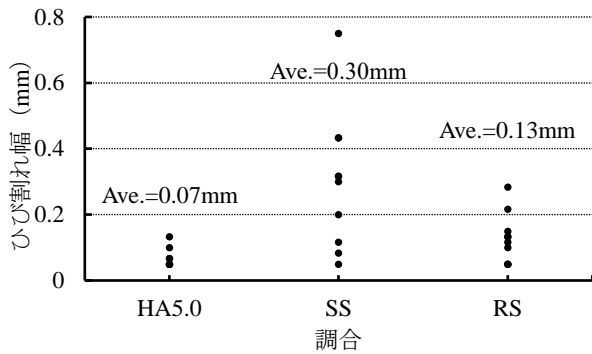


図-8 平均ひび割れ幅の分布

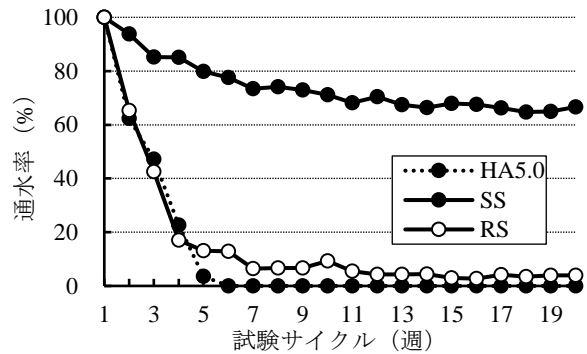


図-9 通水率の変化

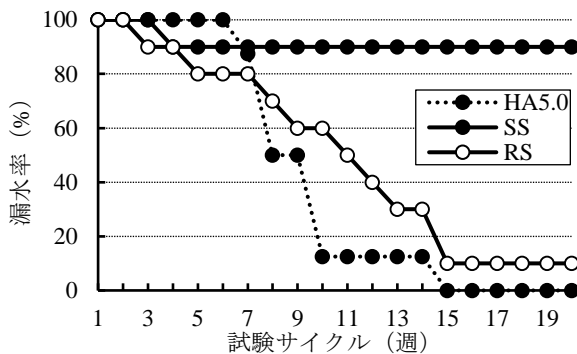


図-10 漏水率の変化

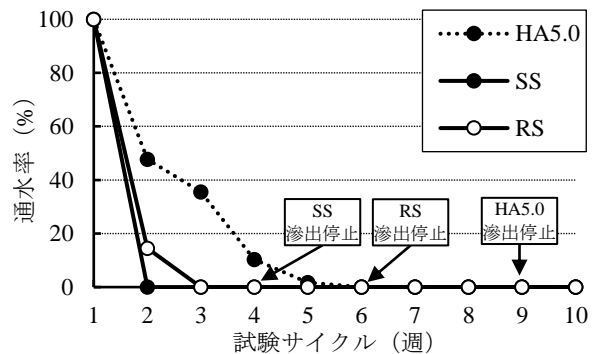


図-11 平均ひび割れ幅 0.05mm の試験体の通水率の変化と滲出停止に要した週数

たことからひび割れ自己治癒に要する期間は同様の順で長くなると推測した。

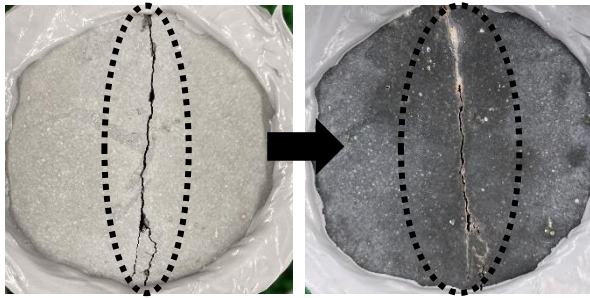
図-9 に通水率の変化を示す。1 週目の通水量に対する各週の割合を調合ごとに平均したものを通水率として、試験サイクル (週) の増加に伴う変化を確認した。通水率の減少はどの調合においても確認できた。RS と HA5.0 の通水率の減少の傾向が 4 週までは類似した。これはバクテリアが排出する炭酸カルシウム等によりある一定まではひび割れの閉塞を進行させることができるからであると考えられるが、以降の通水率はひび割れ幅の大小が影響したとみられる経過をたどった。HA5.0 では 6 週ですべての試験体において通水率が 0 になった。ひび割れ自己治癒に要する期間が HA5.0 において最も短く、RS、SS と次ぐ結果となった。11 週以降は SS、RS ともに通水率に大きな変化はなかった。特に測定時間内に試験管上部に流し込んだ水を通水し切った試験体はすべて SS であったことから通水試験結果に及ぼすひび割れ幅の影響が大きいことを確認した。より高い強度の試験体を扱う場合においてもひび割れ幅を小さく抑えることが課題となった。

図-10 に漏水率の変化を示す。試験体上面に流し込んだ水がひび割れを通して試験体下面より滴下するかどうかに関わらず、滲出するかどうかの確認を行った結果である。調合ごとの試験体のうち滲出が確認された割合を漏水率として、試験サイクル (週) の増加に伴う変化を

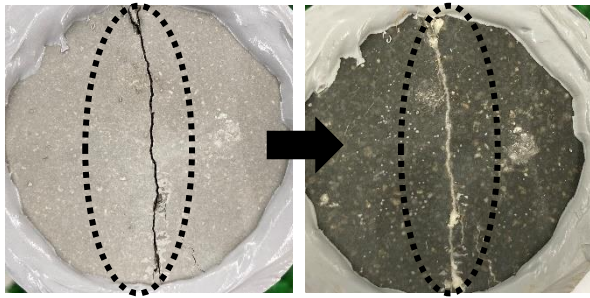
確認した。試験体下面の水の滲出が停止した試験体をひび割れが完全に治癒して水密性が回復したと見なした。結果は通水率の変化に類似しひび割れ幅に左右された。

そこで、各調合に共通して存在する平均ひび割れ幅 0.05mm の試験体を抽出して、通水率の変化とひび割れの水の滲出が確認されなくなった週数を比較した。図-11 に平均ひび割れ幅 0.05mm の試験体の通水率の変化と滲出停止に要した週数を示す。なお、対象となる試験体が HA5.0 には 4 体、SS には 1 体、RS には 2 体存在しており、試験体が複数ある場合には平均値を用いた。通水率については HA5.0 で 6 週、SS で 2 週、RS では 3 週で 0 になった。滲出停止も同順であった。これは SS の単位ポリマー量が RS に対して約 1.4 倍であり、ポリマーが未水和セメント粒子を覆うためポリマーの添加量が増加するほどモルタル内の未水和セメントの量が増加し、モルタル本来の自己治癒性能が向上する⁴⁾ことによるものと考えられる。幅 0.05mm の微細ひび割れについては HA を添加したモルタルにおいてもポリマーを添加することでひび割れ自己治癒性能が向上することが確認できた。

図-12 に調合ごとの 1 週と 10 週時点での試験体下面のひび割れの様子を比較を示す。SS ではひび割れ幅が大きいので、バクテリアが排出した炭酸カルシウムとみられる白色の生成物が部分的に確認できた。RS ではひび割れ全体にわたって同様のものが確認できた。



SS



RS

図-12 調合ごとの1週(左)と10週(右)時点での試験体下面のひび割れの様子と比較

4.2 現場適用試験結果

(1) 経過観察結果

図-13にSSを用いた安積疎水水路の側面補修箇所のひび割れの様子を示す。施工から3週かつ通水開始から1d後(左)と施工から16週かつ通水開始から13週後(右)を比較している。通水開始直後にはひび割れの吸水がはっきりと分かるが13週後には吸水の様子はなく、細菌が排出した炭酸カルシウムと考えられるものがひび割れに沿って発生していることが確認できる。このことから今後発生するひび割れの自己治癒も期待できる。周辺の黄ばみは炭酸カルシウムのほか、図中に示した最高水位から水中に含まれる泥等の汚れであると考えられる。SS及びRSを用いた水路底版の補修については水中であるため写真からの確認は困難であるが初期ひび割れの自己治癒を目視で確認している。

5. まとめ

本研究では、水路に用いられるコンクリートに対して細菌によるひび割れ自己治癒機能を付与することを目指し、HAを添加したモルタルによる水路の一部への上塗り補修を行った。使用したモルタルに関して室内試験として曲げ及び圧縮強さ試験、現場適用試験として経過観察を実施したことにより得られた主な知見を以下に示す。

- (1) HAを添加した場合でもポリマーを添加することによりモルタルの曲げ強さと圧縮強さの両方が向上し、

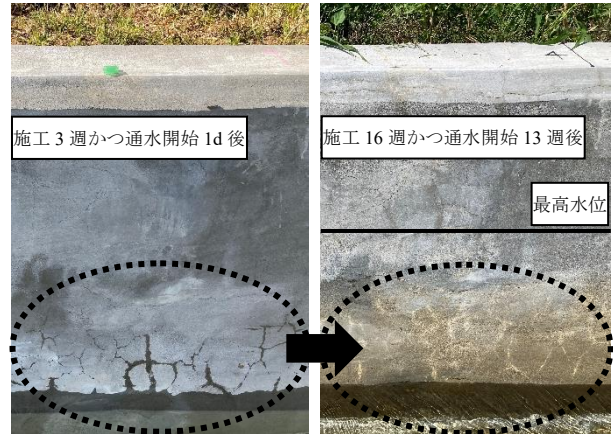


図-13 SSを用いた安積疎水水路の側面補修箇所のひび割れの様子

長期にわたる増進も確認できた。

- (2) 微細ひび割れにおいて、HAを添加した場合でもポリマーを添加することによってひび割れ自己治癒性能が向上した。
- (3) 水路補修箇所のひび割れの様子から細菌によるひび割れ自己治癒の進行を確認し、今後発生するひび割れの自己治癒も期待できる。

今後はより高い強度の試験体についてもひび割れ幅を小さく抑えて通水試験を行う手法を検討し、より詳細な評価の実施を目指す。また、経過観察を継続するとともに安積疎水を中心として水路に用いるコンクリートに細菌によるひび割れ自己治癒機能を付与するための検討を実施していく。

参考文献

- 1) 川崎浩長, Sanjay PAREEK, 大橋英紀, 春木満: バクテリアを含む改良型の粒を用いたpH条件による繁殖性と添加量によるモルタルのひび割れ治癒性能の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1126-1131, 2022
- 2) 川崎浩長, 大橋英紀, 春木満, Sanjay PAREEK: 吹付けコンクリートへのひび割れ自己治癒機能の付与を目的とした細菌の増殖性に及ぼす急結剤添加の影響の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1036-1041, 2023
- 3) 大橋英紀, 守屋健一, 田中徹, パリークサンジェイ: 自己治癒材を添加した吹付けコンクリートの基礎物性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1030-1035, 2023
- 4) Abd_Elmoaty M. Abd_Elmoaty: Self-healing of polymer modified concrete, Alexandria Engineering Journal, 50, pp.171-178, 2011