

論文 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

大橋 英紀*1・守屋 健一*1・田中 徹*2・Sanjay PAREEK*3

要旨：本検討では微生物を添加した自己治癒コンクリートに酸性液体急結剤と粉体助剤を併用した液体系急結剤または粉体系急結剤を添加した吹付けコンクリートの急結性状および強度発現性を確認した。また、微生物の自己治癒効果を確認するため吹付け試験で作製した試験体を用いて通水試験を行った。その結果、急結剤の影響は見られず、常時通水で養生を行った試験体については、吹付けコンクリートに微生物を添加することで、ひび割れの自己治癒効果を付与できることを確認した。

キーワード：自己治癒, 微生物, 吹付けコンクリート, ひび割れ, 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となる。

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。筆者らは、特定の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^{1)・2)}。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、構造物の耐用年数の延長も期待できる。

また、吹付けコンクリートは、NATM 工法におけるトンネルの一次覆工として、多くのトンネル工事現場で施工されている³⁾。覆工コンクリートがある場合には、吹付けコンクリートが覆工コンクリートによって完全に覆われることから、使用性能、第三者影響度に関する性能、美観・景観および耐久性能については、性能として要求されない。一方、覆工コンクリートがない場合は、吹付けコンクリートが坑内環境に曝されることから、それらの性能は要求されることになるが、検討された事例は少ない⁴⁾。

本研究では、微生物を含有した自己治癒材を添加したコンクリートに急結剤を添加した吹付けコンクリートの急結性状と強度発現性を把握するため、各種試験を実施した。急結剤は、酸性液体急結剤と粉体助剤を併用した液体系急結剤または一般的に用いられている粉体系急結剤を使用した。また、模擬トンネルを用いた吹付け試験を行い、作成した試験体を用いて、通水試験により自己治癒効果についての確認を行った。

2. 試験の概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

(1) 自己治癒材

本研究では、微生物に生分解性プラスチックであるポリ乳酸を均一に混合した自己治癒材 (HA) を使用した (写真-1)。自己治癒材は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いる。

本研究で用いた微生物⁵⁾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。本微生物は、芽胞を形成しており休眠状態となっている。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り、微生物が活動できなくなると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 0.8~1.0 μm である。さらに、コンクリート中など、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。



写真-1 自己治癒材 (HA)

*1 戸田建設 (株) 技術研究所 社会基盤再生部 修士 (工学) (正会員)

*2 戸田建設 (株) 技術研究所 修士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

表－１ 使用材料

材料	記号	種類	品質・主成分
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度=3.15g/cm ³ ，比表面積=3310cm ² /g
細骨材	S	新潟県姫川産砕砂	表乾密度=2.61g/cm ³ ，吸水率=2.00%，粗粒率=2.76
粗骨材	G	新潟県姫川産砕石，最大寸法 15mm	表乾密度=2.66g/cm ³ ，吸水率=1.11%
混和剤	Ad	高性能減水剤	ポリエチレングリコール系高分子化合物
液体系急結剤	L	酸性液体急結剤	アルミニウム塩
		カルシウムアルミネート系粉体助剤	カルシウムアルミネート系
粉体系急結剤	P	カルシウムアルミネート系粉体急結剤	カルシウムアルミネート系
自己治癒材	HA	-	微生物（枯草菌の一種），ポリ乳酸，粒径 2mm 以下

表－２ コンクリートの配合

記号	急結剤	スランプ (cm)	W/C (%)	単用量 (kg/m ³)					HA (kg/m ³)
				W	C	S	G	Ad	
L1	L	20±2	50.0	200	400	1089	683	4.0	—
L2								4.0	5.0
P1	P	15±2	60.0	216	360	1049	718	—	—
P2								—	5.0

以下に，HA 中の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⁵⁾を示す。HA 中のポリ乳酸は，コンクリート中で加水分解により微生物の栄養分である乳酸カルシウム（Ca(C₃H₅O₃)₂）へ変化する。

- 1) 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。水分の供給によりひび割れ部分の間隙溶液の pH が 10~11 程度⁶⁾に低下すると微生物は活動を開始する。
- 2) 微生物が乳酸カルシウム（Ca(C₃H₅O₃)₂）を分解し，炭酸カルシウム（CaCO₃），二酸化炭素（CO₂）および水（H₂O）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。



- 3) 生成された炭酸カルシウムにより，コンクリートに発生したひび割れが閉塞する。
 - 4) 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 2)～5) の過程を経て，ひび割れを閉塞する。

(2) コンクリートの配合

表－１に試験に用いた使用材料，表－２に吹付けコンクリートの配合を示す。

急結剤は，酸性液体急結剤（C×8%）と粉体助剤（C×4%）を併用した液体系急結剤および，一般に用いられている粉体系急結剤（C×9%）を用いた。

吹付けコンクリートのベースコンクリートは，液体系急結剤の場合，セメント量を 400kg/m³とし，細骨材率を 62%とした。また，粉体系急結剤の場合は，セメント量は 360kg/m³とし細骨材率は 60%とした。なお，セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。目標スラン

プは，液体系急結剤の場合は 20±2cm とし，粉体系急結剤の場合は 15±2cm とした。

HA を添加したコンクリートの配合は，HA を添加していないコンクリートと同一とし，既往の研究結果²⁾より，外割で 5.0 kg/m³添加した。

2.2 試験項目および試験方法

表－３に試験項目および試験方法を示す。

モルタル試験は，室内で急結性状を把握するため凝結試験（以下，プロクター貫入抵抗試験）を行った。また，コンクリート試験は模擬トンネルを用いて吹付け試験を行い，プルアウト試験，吹付け前のベースコンクリートおよび吹付けコンクリートの圧縮強度試験および自己治癒効果を確認するため通水試験を実施した。

2.3 モルタル試験

モルタル試験は表－２に示すコンクリートの配合から粗骨材を抜いた配合とし，環境温度 20℃の試験室で実施した。

モルタルの練混ぜ方法はモルタルミキサを用いて細骨材，セメントを投入して 10 秒間攪拌し，所定量の混和剤および水を添加した後，1 分間高速攪拌した。なお，HA はセメントと同時に投入した。また，練り上がったモルタルに所定量の急結剤を添加して 10 秒間高速攪拌した。プロクター貫入抵抗試験は表－３に示す試験方法で行い，練混ぜ後，型枠に詰め込み，成形した供試体を用いて実施した。

2.4 吹付け試験

(1) 試験概要

表－４に吹付け試験に用いた設備および条件を示す。

吹付け前のベースコンクリートはプラントで製造し，フレッシュ試験を行った後，表－４に示す一般に用いら

表－３ 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法
モルタル試験	凝結試験 (ブロッカー貫入抵抗)	試験方法：JSCE-D 102 を参考に湿式練りで実施 試験条件：環境温度=20℃
コンクリート試験	フレッシュ性状	スランプ：JIS A 1101 に準拠 空気量：JIS A 1128 に準拠 コンクリート温度：JIS A 1156 に準拠
	圧縮強度 (ベースコンクリート)	供試体作製：JIS A 1132 に準拠 強度試験：JIS A 1108 に準拠 供試体寸法：φ100mm×h200mm (3 本/材齢) 測定材齢：28 日 (標準養生：20℃水中)
	プルアウト(初期強度)	試験体作製：JSCE-F 561 に準拠し、プルアウト試験用皿に吹付けて作製 プルアウト試験：JSCE-G 561 に準拠 (試験材齢：3 時間，24 時間) 養生条件：材齢 3 時間は現場養生，24 時間は温度 20℃，湿度 80%養生
	圧縮強度 (吹付けコンクリート)	試験体作製：JSCE-F 561 に準拠し、パネル型枠に吹付けて作製 コア強度：JIS A 1107 に準拠 コア寸法：φ50mm×h100mm (3 本/材齢) 測定材齢：28 日 養生条件：吹付け後室温で約 3 日間気中養生し、コアを採取後材齢まで標準養生
	自己治癒性能確認 (通水試験)	試験体作製：JSCE-F 561 に準拠し、パネル型枠に吹付けて作製 《コア採取》 供試体寸法：φ100mm×h200mm (4 本/水準) ※コア箱は 500mm×500mm×300mm とし、底板を除く 《通水試験》 Case1：温度 20℃，湿度 60% Case2：温度 20℃，湿度 90% Case3：温度 20℃，常時通水 (図－2 参照)

れるコンクリートポンプ、吹付けロボットおよび急結剤添加装置を用いて、コンクリートの吐出量を 10m³/hr 一定となるように吹付け、プルアウト試験体および圧縮強度試験体を採取し、試験を行った。

(2) 圧縮強度試験

写真－2 に強度試験用のコア用型枠とプルアウト試験用型枠を示す。

試験は吹付け前のベースコンクリートの圧縮強度および吹付けコンクリートの圧縮強度について確認した。

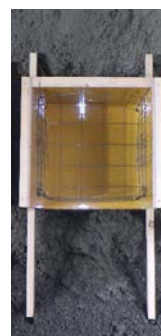
吹付け前のベースコンクリートの圧縮強度は、フレッシュ試験時に採取し、標準養生を行い材齢 28 日で試験を行った。

吹付けコンクリートの圧縮強度はプルアウト試験およびコア強度試験とし、表－3 に示す JSCE-F 561 の吹付けコンクリートの圧縮強度試験用供試体の作り方に基づいて写真－2 に示すプルアウト試験用型枠およびコア用型枠 (サイズ：500×500×300mm) を用いて試験体を作製した。

プルアウト試験はプルアウト試験用ジャッキを用いて、JSCE-G 561 の引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度試験方法に準拠し、材齢 3 時間および 24 時間で実施した。また、コア強度試験は、作製した供試体から吹付け面に対し垂直に材齢 3 日で φ50×h100mm のコア供試体を採取 (3 本/材齢) し、材齢 28 日で圧縮強度試験を行った。

表－４ 吹付け試験に用いた設備および条件

種類	能力・条件
模擬トンネル	内空幅=5.2m 高さ=4.4m 延長=20m
コンクリートポンプ	理論吐出量=5～25m ³ /hr
吹付けロボット	ブーム長=3000mm 最大吹付け高さ=7900mm 最大吹付け幅=10190mm
コンクリート吐出量	10m ³ /hr
粉体急結剤添加装置	粉体急結剤添加装置
液体急結剤添加装置	液体ポンプ



写真－2 コア型枠およびプルアウト試験用型枠

(3) 自己治癒性能確認試験

表－5 に通水試験の概要を示す。また、図－1 に通水試験用試験体の作製方法、図－2 に常時通水用架台図、図－3 に通水試験方法を示す。

通水試験用試験体は、コア箱にコンクリートを高さ

300mm まで吹付け、3 日間気中養生の後、コア供試体（φ100×200mm）を採取し、材齢 28 日まで封かん養生を行った。コア供試体は、上面付近や下面付近の HA のばらつきを防ぐため、中央部で採取した。その後、塩ビパイプにコア供試体を入れ、圧縮試験機で割裂することにより、ひび割れを導入した。側面や底面の隙間をシーリング材で閉塞し、気中養生（20℃、60%RH）で試験開始まで 28 日間養生を行った。

自己治癒性能確認試験は、環境温度 20℃湿度 60%（Case1）、環境温度 20℃湿度 90%（Case2）、および、環境温度 20℃常時通水（Case3）の 3 水準で試験体を養生し、試験体にあらかじめ導入したひび割れへの通水量の変化で評価を行った。なお、Case3 の常時通水については、1 時間ごとに上面より給水を行い、ひび割れ面が乾燥しないよう養生した。

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 水準当り 4 体とした。平均ひび割れ幅は、試験体上面の各 3 点を測定し、その平均値とした。

図－4 および図－5 に試験体のひび割れ幅と初期通水速度の関係を示す。

平均ひび割れ幅は 0.27～0.78mm に分布した。また、配合や Case ごとの平均ひび割れ幅に偏りは見られなかった。また、初期通水速度と平均ひび割れ幅、最大ひび割れ幅は概ね比例関係となった。

通水試験の流れを以下に示す。

- ・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。
- ・毎試験開始直前に、10～15 分程度、試験体上面に注水することにより、コンクリート表面に水分を吸収させるとともに、ひび割れ以外からの漏水がないことを確認した。
- ・測定は、試験体上面に約 1700mL の上水道水を注水し、開始した。試験時間は 3 分とした。
- ・3 分経過後、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、同様に水を注水してから 3 分後、通水量の記録とともに、試験体下部が水でにじむかについて、確認を行った。

3. 実験結果

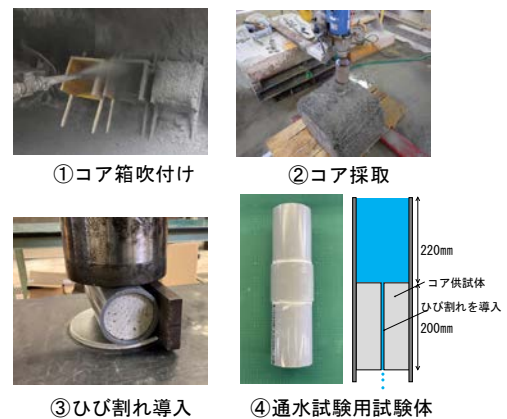
3.1 モルタル試験

図－6 に経過時間と貫入抵抗値の関係を示す。

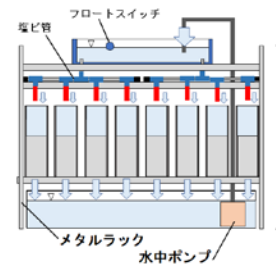
モルタルの急結性状は、液体系急結剤と比較して粉体系急結剤の方が終結（貫入抵抗値 28.0N/mm²）までの時間が早く、急結剤の種類の影響が大きく、HA を添加しても影響がないことを確認した。

表－5 通水試験概要

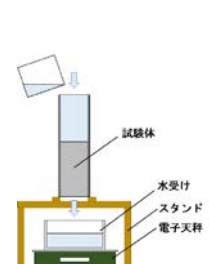
試験名	概要
通水試験	試験体寸法：φ100×200mm 工程：気中養生 3 日、コア削孔 封かん養生 25 日、 気中養生 28 日後に通水試験開始 試験間隔：7 日ごとに実施 試験時間：3 分 測定項目：ひび割れ部分からの通水量の変化を測定



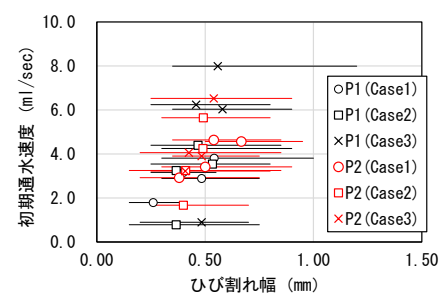
図－1 通水試験用試験体の作製方法



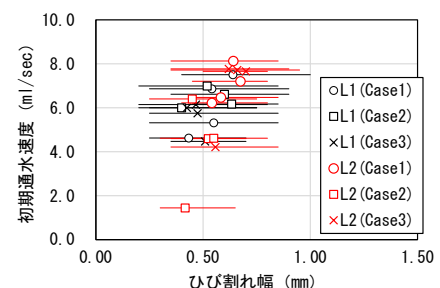
図－2 常時通水用架台図



図－3 通水試験方法



図－4 ひび割れ幅と初期通水速度の関係（P1，P2）



図－5 ひび割れ幅と初期通水速度の関係（L1，L2）

3.2 コンクリートを用いた吹付け試験

(1) コンクリートのフレッシュ性状

表－6 にフレッシュ試験結果を示す。

吹付け前のベースコンクリートのフレッシュ性状は、液体系急結剤配合の場合、スランプ 18.0～22.0cm、空気量 3.5～4.7%であり、粉体系急結剤配合の場合、スランプ 15.0～13.5cm、空気量 2.4～3.6%であった。

(2) 強度発現性

図－7 にプルアウト試験による換算強度、図－8 に吹付け前のベースコンクリートと吹付けコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。

プルアウト試験による換算強度は 3 時間では 2.7～2.8N/mm²、24 時間で 11.3～14.2N/mm²であり、配合による差は小さく 24 時間で 10N/mm²以上となり、ベースコンクリートに HA を添加しても所要の強度が得られることを確認した。

コア供試体による吹付けコンクリートの圧縮強度は材齢 28 日で 36.6～39.6N/mm²であり配合による差は小さかった。一方、吹付け前のベースコンクリートの材齢 28 日圧縮強度は、液体系急結剤配合の場合、L1 は 45.4N/mm²、L2 は 43.2N/mm²、粉体系急結剤配合の場合、P1 は 36.3N/mm²、P2 は 37.5N/mm² となり、急結剤の種類による吹付けコンクリートとベースコンクリートの圧縮強度比が配合によって差が大きくなった。これは、液体系急結剤には水も含まれており、モルタルの水セメント比が上昇するため、急結剤の影響が大きくなったと考えられる。

(3) 自己治癒効果

図－9 に平均通水速度の結果を、図－10 に通水量の平均減少率を示す。

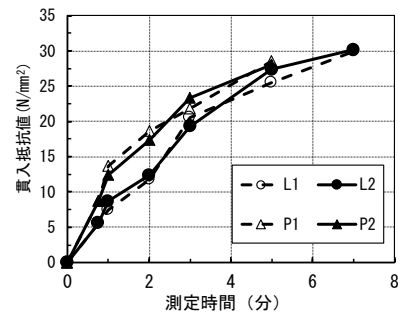
Case1 の場合、試験経過 6W においても、HA の有無や急結剤の種類による通水速度の変化は見られなかった。

Case2 の場合、試験開始 1W で通水速度が微増する試験体を確認された。これは、0W の試験でひび割れ表面に存在する微粒分が流出したためと考えられる。その後は、Case1 同様に、通水速度の変化は確認されなかった。

Case3 の場合、試験開始 1W で通水速度が減少する結果となった。L1、P1、P2 においては、試験開始 1W で通水量が大きく減少し、その後の変化は見られなかった。

L1、L2 はセメント量が多いため、L1 では未水和のセメントとの反応が大きくなり、試験開始 1W で 0.463ml/sec と大きく通水速度が遅くなった可能性がある。L2 においては、2W 以降も通水量の減少が見られた。L1 が試験開始 1W で通水速度が遅くなったため純粋な比較はできないが、これは HA によるひび割れ閉塞効果と考えられる。

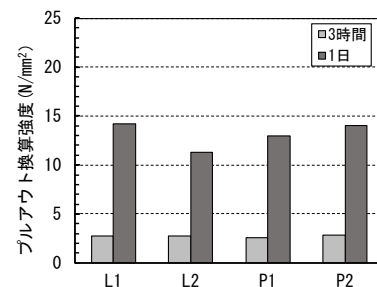
Case3 については、試験終了時にひび割れから水の滴



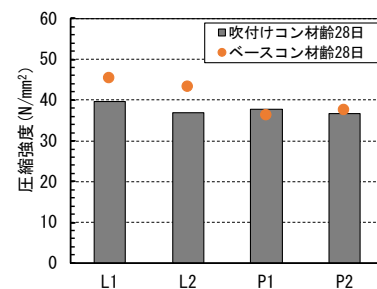
図－6 経過時間と貫入抵抗値の関係

表－6 フレッシュ性状

配合	フレッシュ性状		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)
L1	18.0	3.5	12
L2	22.0	4.7	11
P1	15.0	2.4	11
P2	13.5	3.6	11



図－7 プルアウトによる換算強度

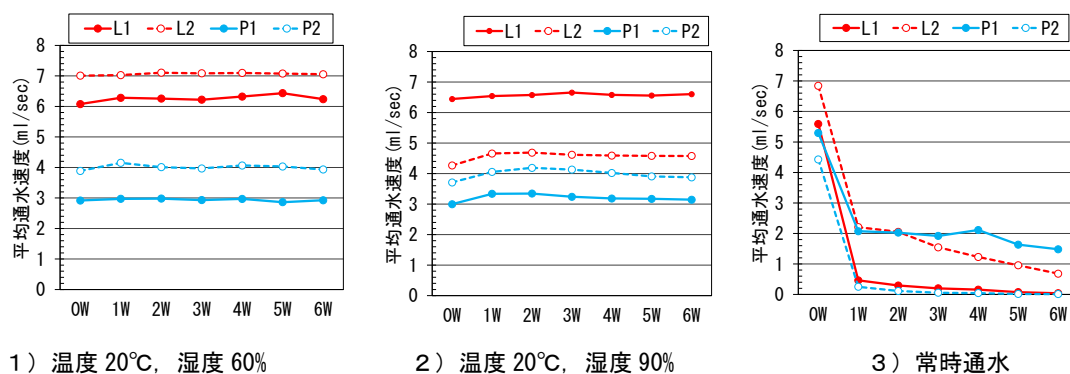


図－8 吹付け前のベースコンクリートと吹付けコンクリートの圧縮強度

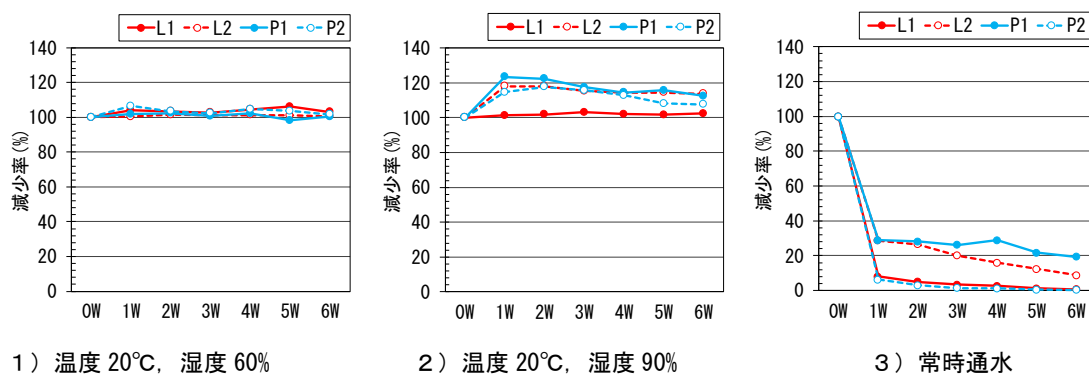
下がなくなった試験体も確認できたが、試験体下部からの水のにじみが確認された。また、試験体下部には、炭酸カルシウムの析出が確認できた。

4. まとめ

本研究では自己治癒材 (HA) を添加したコンクリートに酸性液体急結剤と粉体助剤を併用した液体系急結剤または一般的に用いられている粉体系急結剤を添加した吹付けコンクリートの急結性状と強度発現性を把握し、模擬トンネルを用いた吹付け試験で作製した試験体を用いて自己治癒効果について確認した。



図－9 通水試験結果（平均通水速度）



図－10 通水試験結果（通水量の平均減少率）

本試験の範囲内において得られた知見を以下に示す。

- (1) 急結性状は、液体系急結剤と比較して粉体系急結剤の方が終結までの時間が早く、急結剤の種類の影響が大きく、HA を添加しても影響がないことを確認した。
- (2) プルアウト試験による換算強度は、配合による差は小さく 24 時間で 10N/mm² 以上となり、ベースコンクリートに HA を添加しても所要の強度が得られることを確認した。
- (3) コア供試体による吹付けコンクリートの圧縮強度は、配合による差は小さかった。
- (4) HA の自己治癒性能は、湿度 60%および湿度 90%では通水量の減少はなく常時通水のみ通水量が減少し、環境条件の影響が大きいことが確認された。
- (5) 吹付けコンクリートにおいても、微生物を配合することで、通常のコンクリート同様に自己治癒効果が確認された。

以上の結果より、常時湧水が発生している場合、吹付けコンクリートに微生物を添加することで、コンクリートのひび割れに対して自己治癒効果を付与できる可能性を確認できた。今後も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自己治癒コンクリートについて継続して研究したいと考えている。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー121「吹付けコンクリート指針（案）」，2005
- 4) 森田卓，戸部良太，安台浩，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，Vol.32，No.1，pp.1577-1582，2010
- 5) 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 100, pp.195-204, 2007
- 6) 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