

論文 微生物によるコンクリートのひび割れ修復に関する実験的研究

爨 堯*1・睦好 宏史*2・房 捷*3・川名 梨香子*4

要旨: コンクリートのひび割れの補修について、近年では微生物を用いた斬新的な補修法が提案されている。本研究では、微生物系補修材の実用化を目的として、食品発酵用のイースト菌、土壤に多く存在する好アルカリのバチルス菌をそれぞれ用いて補修材を調製し、モルタルに生じた貫通ひび割れ、および ASR 促進試験で発生したひび割れに対して補修を試みた。その結果、いずれの供試体においても、補修後ひび割れ中に炭酸カルシウムの析出が確認でき、補修前と比べ透水速度と吸水量が顕著に低下したことが明らかとなった。また、バチルス菌を用いた場合、イースト菌と比べ ASR ひび割れの補修効果が高いことが明らかとなった。

キーワード: イースト菌, バチルス菌, ひび割れ補修, アルカリ骨材反応, 透水試験, 吸水試験

1. はじめに

コンクリートは引張強度や伸び能力が小さいため、載荷、初期水和熱、乾燥収縮等様々な原因でひび割れが発生する。設計上許容ひび割れ幅を許容しているが、ひび割れは水分、二酸化炭素、有害イオン等の侵入を加速させるため、許容ひび割れ幅内でもコンクリート構造物の長期耐久性に影響を及ぼす可能性がある。従来のひび割れ補修工法としては、エポキシ樹脂、ポリマーセメント等の補修材の注入・充填、塗膜弾性防水材によるひび割れの被覆が多く行われている。しかしながら、環境や供用条件により、修復面におけるひび割れの再発生、もしくは被覆層の劣化が起き、構造物の供用期間にわたって数回の補修作業を繰り返す可能性があり、また粘性が高い補修材を使用した場合の充填不足、施工中の補修材流出による環境負荷など問題点が挙げられる。

一方、近年では微生物を用いた斬新的な補修工法が提案されている。この手法では、微生物の代謝産物である二酸化炭素とひび割れ中のカルシウムイオンが反応し、生成された炭酸カルシウム析出物によってひび割れを塞ぐものである。カルシウムイオン源としては、セメント水和物である水酸化カルシウムから溶出したカルシウムイオンが利用できるとともに、外部より微生物を含めた補修材としての添加も可能である。微生物のサイズが非常に小さいため、微細かつ屈曲度が高いひび割れにおいても析出物の充填効果の発揮が考えられる。なお、無害な微生物の使用による環境負荷の低減に加え、修復された部分に微生物が生き続ければ、ひび割れの再発生時に再び塞ぐことという潜在的な利点がある。

既往の研究の多くでは、土壤に普遍的に存在する好アルカリのバチルス菌をコンクリートの製造段階に直接混入したり、マイクロカプセルに封入して混入し、その後

ひび割れが発生した後、バチルス菌によるひび割れ修復効果が検証できた事が報告されている¹⁾⁴⁾。一方、コンクリートにすでに発生したひび割れの補修を目的として、食品発酵用のイースト菌を用いた補修用グラウトの開発が報告されている⁵⁾⁶⁾。しかしながら、これまでの研究ではひび割れを外的作用により導入したコンクリート供試体を対象としたものがほとんどであり、塩害、アルカリ骨材反応 (ASR)、硫酸塩侵食などのように化学反応を伴うひび割れに対する修復効果は未だに明らかになっていない。微生物の活性は環境と密接に関連しているため、本修復工法を実用化するためには、上述したような特定の劣化環境に近い条件での補修効果の検討が不可欠と考えられる。

本研究では、日本各地で被害が顕著化している ASR によるひび割れを対象として、微生物を使用した補修材の補修効果について実験的検討を行った。まず、既往の研究例を参考にして、短期間で活性化可能なイースト菌、アルカリ環境に耐えるバチルス菌をそれぞれ用いて補修材を調製した。その後、割裂ひび割れを有するモルタル供試体の修復試験を行い、各々の修復効果を比較した。さらに、ASR 促進試験によって発生したひび割れ供試体 (以下、ASR 供試体) における修復効果の検証を試みた。

2. 微生物を用いたひび割れ補修材の調製

イースト菌は糖類を分解してエネルギーを獲得する。本実験では、既往の研究⁵⁾⁶⁾で修復効果が報告されているイースト菌補修材を参考に、市販のパン発酵用ドライイーストを使用し、二糖類のスクロース (C₁₂H₂₂O₁₁) を栄養源、酢酸カルシウムをカルシウム源として用い補修材を調製した。pH の急速な低下を防止するため、トリス緩衝液を補修材に混入した。スクロースは酵素によって

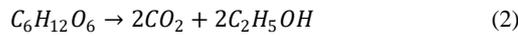
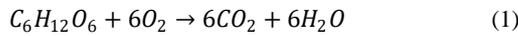
*1 埼玉大学 大学院理工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

*2 埼玉大学 大学院理工学研究科教授 工博 (正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科博士課程

*4 埼玉大学 大学院理工学研究科修士課程

加水分解され、グルコースとフルクトース（いずれも分子式は $C_6H_{12}O_6$ ）になる。通性嫌気性生物であるイースト菌は、酸素が存在する場合に $C_6H_{12}O_6$ を完全分解して二酸化炭素と水を放出し（式(1)）、酸素が存在しない場合に発酵により二酸化炭素とエタノール（ C_2H_5OH ）を生成する（式(2)）。



一方、バチルス菌補修材は、微生物による地盤改良の研究例⁷⁾を参考に、*Sporosarcina pasteurii* という1種類のバチルス菌を使用した。*Sporosarcina pasteurii* は尿素を栄養源として利用でき、代謝作用により尿素を分解して二酸化炭素とアンモニウム（ NH_4^+ ）を生成する（式(3)）。本実験のバチルス菌原液は、バチルス菌を含む培地にペプトン、肉エキス、炭酸水素ナトリウム、炭酸ナトリウム、水を加えて調製し、 $30^\circ C$ に設定した培養器に入れ、48時間で培養を行った。バチルス菌補修材は、使用直前に原液に尿素粉末と酢酸カルシウム粉末を入れて調製した。



写真-1 に2種類の補修材を示す。色はイースト菌補修材が白、バチルス菌補修材が黄色であり、いずれも半透明かつ粘度が低い液体である。補修材の配合は、後述の補修実験で説明する。



写真-1 微生物を用いた補修材
(左) イースト菌; (右) バチルス菌

3. 人工ひび割れを導入した供試体の修復実験

3.1 実験概要

(1) 実験供試体およびひび割れの導入

本実験では、早強ポルトランドセメントと川砂を使用し、直径 50 mm、高さ 70 mm の円柱、および $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ の角柱モルタル供試体をそれぞれ作製した。水セメント比は 0.5、細骨材体積がモルタル中に占める比率は 50% とした。打設より 1 日後脱型し、7 日間水中養生し、その後ひび割れを導入した。円柱供試体はひび割れ幅をコントロールするため、予め直径 0.8 mm の結束線を内部に入れ、幅 0.1 mm~0.5 mm のひび割れを割裂載荷により導入した（図-1）。ひび割れ幅は、クラックゲージを用いて測定した。角柱供試体は曲げ載荷により2部分に分け、破断面を突き合わせて間に 0.5 mm のスペース

を設置することで貫通ひび割れを模擬した（図-2）。スペースが変化しないように、供試体の側面に接着剤を塗って固定した。

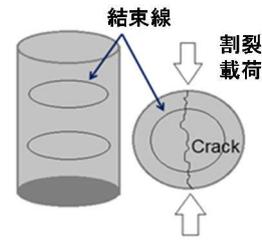


図-1 割裂載荷で導入したひび割れ

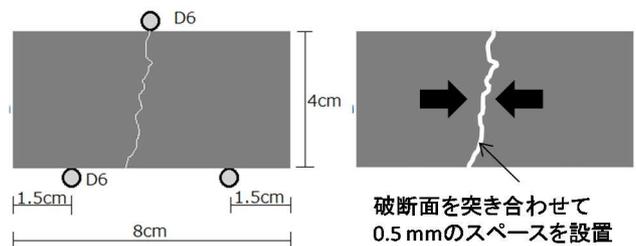


図-2 曲げ載荷で導入したひび割れ

(2) 円柱供試体の補修および透水試験

円柱供試体に対して補修実験を行った。析出した炭酸カルシウムによるひび割れの修復効果を評価するため、補修前後に透水試験を行なった。まずは、割裂ひび割れを導入した供試体の側面をエポキシ樹脂で封緘し、プラスチック漏斗を接着剤で上面の縁部に接着し、チューブで水槽に接続して 0.95m の水位を保つことで透水試験を実施した（図-3）。流量が安定した後、単位時間あたりの透水量、いわゆる透水速度 k_1 (m^3/s) を求めた。

透水試験後に補修作業を行った。10 ml の補修材を注射器で供試体の上面からひび割れ間に注入し、1 日に 1 回の頻度で 2 週間行った。補修期間において $20^\circ C$ の環境温度を保っていた。配合について、微生物、栄養源、カルシウム源の割合を考慮の上で、イースト菌、バチルス菌にそれぞれ 2 つの配合条件を設定した。表-1 にそれらの補修材の配合を示す。2 週間の補修作業後、再び透水試験を行って透水速度 k_2 (m^3/s) を測定した。

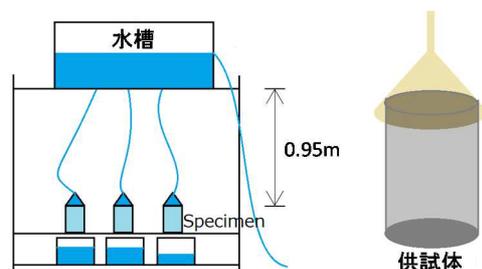


図-3 透水試験

表-1 円柱供試体に用いた補修材の配合

グループ	微生物の種類と混入量	栄養源, カルシウム源など
i	イースト菌 3.0 g/L	スクロース 34.2 g/L, トリス 6.0 g/L, 酢酸カルシウム 8.8 g/L
ii	イースト菌 6.0 g/L	
iii	バチルス菌 (原液)	尿素 3.0 g/L, 酢酸カルシウム 8.8 g/L
iv		尿素 4.5 g/L, 酢酸カルシウム 13.2 g/L

(3) 角柱供試体の補修および吸水試験

角柱供試体に対して補修実験を行い、修復効果を吸水試験によって評価した。曲げひび割れを導入した供試体は側面と底面をエポキシ樹脂で封緘し、上面に 1 cm のプールを作製した(図-4)。その後、10 ml の補修材を 1 日に 1 回の頻度でプールに入れることを 2 週間続けた。表-2 に補修材の配合を示す。微生物の活発さが温度の影響を受けるため、補修期間の環境温度は 20℃および 30℃と設定した。また、比較のため、同一モルタル配合でひび割れを導入し、補修しない供試体 (E)、ひび割れを導入しない供試体 (F) も用いた。

補修作業後、供試体の上面に残留した補修材を洗い、比較用の供試体とともに乾燥炉に入れ、50℃の恒温環境下で 3 日間乾燥した。その後、すべて供試体を上下逆にして 20℃一定の水中に浸漬し、エポキシ樹脂で封緘していない底面から 5 mm の水位を保ち吸水試験を行い、吸水量を測定した(図-4)。単位面積あたりの吸水量は下記の式で求めた。

$$i = \frac{m_1 - m_0}{A \cdot \sigma} \quad (4)$$

ここに i : 単位面積あたりの吸水量(mm)

m_1 : 吸水中の供試体重量(g)

m_0 : 乾燥された供試体の重量(g)

A : 吸水面の面積(mm²)

σ : 水の密度(g/mm³)

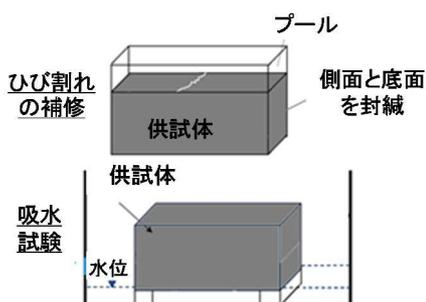


図-4 ひび割れの補修と吸水試験

表-2 角柱供試体に用いた補修材の配合と環境温度

グループ	微生物と栄養源、カルシウム源の種類と混入量	補修際の環境温度
A	イースト菌 3.0 g/L スクロース 34.2 g/L, トリス 6.0 g/L, 酢酸カルシウム 8.8 g/L	20℃
B		30℃
C	バチルス菌 (原液) 尿素 4.5 g/L 酢酸カルシウム 13.2 g/L	20℃
D		30℃
E	ひび割れ有, 補修無	
F	ひび割れ無, 補修無	

3.2 実験結果及び考察

(1) 透水試験

各ひび割れ幅における透水試験結果を図-5 に示す。すべての供試体においては、補修後の透水速度が修復前より大幅に低下する傾向が見られた。さらに、ひび割れ幅が小さくなるとともに、透水速度の低下がより著しくなり、高い修復度を示すことが明らかとなった。特に、ひび割れ幅が 0.3 mm 以下の場合、補修後一部の供試体は透水速度がゼロになり、ひび割れがほぼ閉鎖したことを示している。透水試験後、すべての供試体のひび割れ面を目視で観察し、ひび割れ面には炭酸カルシウムと思われる白い結晶を確認した(写真-2)。

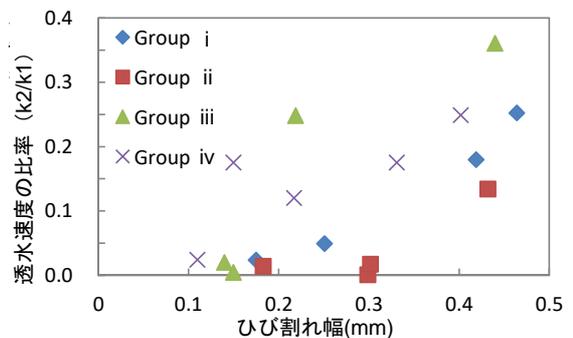


図-5 透水試験結果



写真-2 ひび割れ表面に析出した白い結晶

イースト菌を用いた供試体は、同ひび割れ幅のバチルス菌供試体と比べ、透水速度の低下がより著しくなり、

より高い修復効果が得られた。その理由として、パン発酵用イースト菌は活性化度が高く、短期間に大量の二酸化炭素を排出することが挙げられる。本実験では1日に1回補修材を注入したため、イースト菌の長所が発揮できたと考えられている。なお、グループ i に比べ、グループ ii の透水速度の低下がさらに顕著になった。十分な栄養源とカルシウム源が存在すれば、イースト菌の濃度が高いほど、二酸化炭素の排出と炭酸カルシウムの生成量が多いと考えられる。一方、同バチルス菌において、尿素とカルシウム濃度が高いグループ iv は、グループ iii と比べ透水速度の低下が著しかった。その理由として、グループ iii は栄養源が足りなくバチルス菌の活性が十分に発揮せず、栄養源を増やしたグループ iv はバチルス菌の活性化を促進したと考えている。

(2) 吸水試験

吸水試験結果を図-6 に示す。補修された供試体は、いずれも補修なしの供試体より吸水量が大幅に減少したことが明らかとなった。しかしながら、ひび割れなしの供試体(F)と比較して、修復された供試体の吸水率も低くなっていた。写真-3 に、補修前後に顕微鏡で撮ったひび割れおよびその周辺の画像を示す。観察によれば、炭酸カルシウムの析出によるひび割れの閉鎖に加え、供試体の表層も若干白くなったと見られた。すなわち、本実験の含浸方法において、ひび割れの充填だけでなく、補修材が供試体の表層にある程度浸透し、表層モルタルの空隙に結晶が析出して表層を緻密化させることによってモルタル全体の水密性が向上したと考えられる。

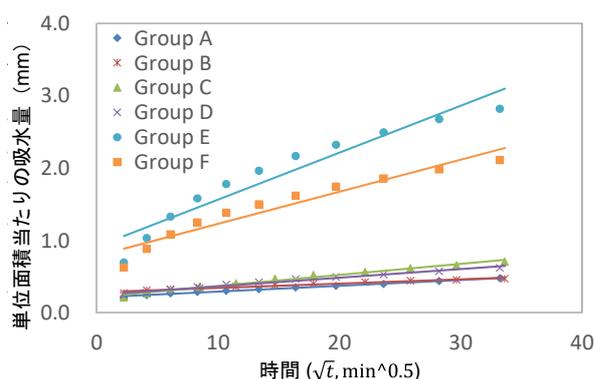


図-6 吸水試験結果

なお、イースト菌の場合(グループ A, B)は、バチルス菌(グループ C, D)と比べて吸水量が小さくなり、透水試験と同様に、短期間においてイースト菌による補修効果がより著しくなることが明らかとなった。耐アルカリ性が高いバチルス菌はイースト菌よりコンクリート中に長く生存できるため、長期的な補修効果について今後

詳細に検討することが必要である。一方、いずれの微生物において、20℃と30℃における吸水率は大きな差は見られない。従って、20℃～30℃の範囲に環境温度が微生物の活性度に及ぼす影響は小さいといえる。

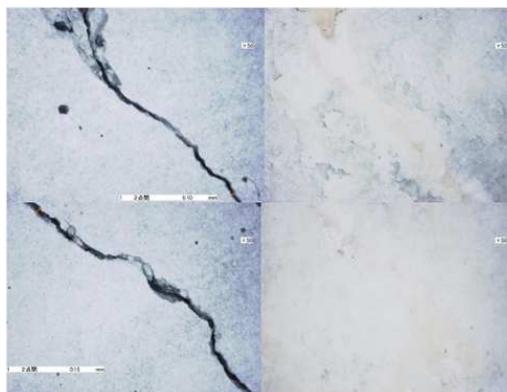


写真-3 ひび割れの補修効果
(左) 補修前; (右) 補修後

4. ASR 供試体の修復実験

4.1 実験概要

(1) ASR 促進試験

本実験では、アルカリ反応性骨材を粉砕し得られた砂を用い、早強ポルトランドセメントと混合してモルタル供試体を作製した。供試体は40 mm×40 mm×160 mmの角柱体であり、水セメント比は0.5、細骨材体積がモルタル中に占める比率は50%とし、ASR反応を促進するために25.5 kg/m³のNaClを混和した。促進試験はASTM C 1260⁸⁾に準じて、脱型後温度80℃、濃度1.0 mol/LのNaOH溶液に浸漬して実施した。浸漬期間に供試体の長さをレーザー変位計で定期的に測った。浸漬から10日後、平均膨張率が約1.2%となり、供試体の表面に亀甲状のひび割れが目視で確認できた(写真-4)。



写真-4 ASRによるひび割れ

(2) ASR ひび割れの補修および吸水試験

ASR促進試験から10日後、供試体の表面に残った補修材を水道水で洗浄し、水を拭き除いた。コンクリートカッターで真ん中より切断し、得られた2つの40 mm×40 mm×80 mmの角柱は、前述の角柱と同様に、側面と底面をエポキシ樹脂で封緘し、上面にプールを作製した。

10 ml の補修材を 1 日に 1 回の頻度でプールに入れて、2 週間補修を行った。表-3 に補修材の配合を示す。比較のために、ASR ひび割れを導入しかつ修復を行っていない供試体も作製した (グループ(4))。修復は 20°C の恒温恒湿室で行った。

表-3 ASR 供試体に用いた補修材

グループ	微生物の種類と混入量	栄養源, カルシウム源など
(1)	イースト菌 3.0 g/L	スクロース 34.2 g/L, トリス 6.0 g/L, 酢酸カルシウム 8.8 g/L
(2)	バチルス菌 (原液)	尿素 3.0 g/L 酢酸カルシウム 8.8 g/L
(3)		尿素 4.5 g/L 酢酸カルシウム 13.2 g/L
(4)	ひび割れを導入しかつ修復を行っていない	

4.2 実験結果及び考察

図-7 に ASR 供試体の吸水試験結果を示す。補修無の供試体(4)は、図-6 のグループ E より吸水率が低い。これは、ASR 促進試験で発生したひび割れが供試体を貫通せず、曲げ載荷で導入した貫通ひび割れと比べ、吸水率に与える影響が小さいと考えられる。また、補修無の供試体と比べ、すべてのグループにおいて、吸水量が小さくなったことが認められる。顕微鏡での観察によれば、修復後の供試体には炭酸カルシウムと思われる白い結晶の析出によりひび割れが閉じ、表面のモルタルにも白い生成物が見られた (写真-5)。従って、吸水率の低下は前述の人工ひび割れ供試体と同様に、ひび割れとモルタル表面に炭酸カルシウムと思われる白い結晶が析出することによって生じたものである。

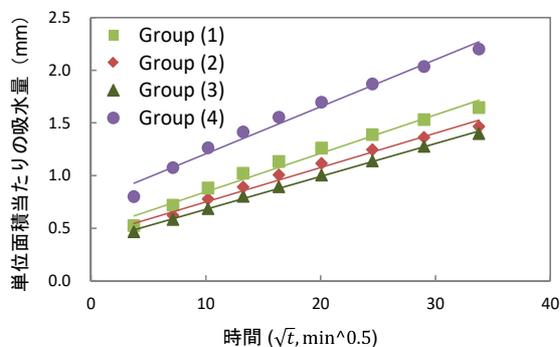


図-7 ASR 供試体の吸水試験結果

一方、18 時間 ($\sqrt{t} \approx 33$) 後の吸水量によれば、人工ひび割れ供試体の場合、修復後の供試体は、吸水量が未修

復の場合の 1/3 以下になった。これに比べ、ASR 供試体の場合、補修した供試体は吸水量が未補修の 2/3 となり、補修効果が若干低いことが分かった。その理由については、ASR 供試体の pH が高いことが考えられる。ASR 供試体は 1.0 mol/L の NaOH 溶液に 10 日間養生を行ったため、内部の pH が普通のモルタルより高くなった。補修期間中にアルカリイオンが補修材に拡散し、イースト菌、バチルス菌の生存・増殖を阻害することは一因であるとされる。また、2 種類の菌の補修効果によれば、吸水量はグループ(1), (2), (3)の順で小さくなり、バチルス菌補修材を用いた供試体は吸水率が低く、人工ひび割れの吸水試験結果と異なる傾向である。これは、バチルス菌は耐アルカリ性が高く、ASR 環境に受ける影響がイースト菌より小さいことが要因として挙げられる。なお、グループ(3)はグループ(2)と比べ、吸水率が低くなる傾向が見られた。これは、栄養源とカルシウム源の濃度が高いことが、バチルス菌の増殖と炭酸カルシウムの析出に有利であると考えられる。

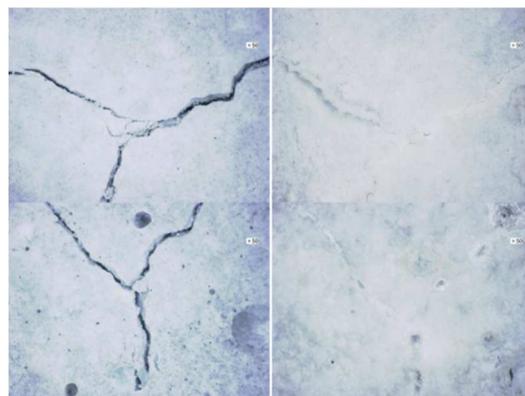


写真-5 ASR ひび割れの補修効果
(左) 補修前; (右) 補修後

5. 結論

本研究では、微生物系コンクリートひび割れ補修材の開発および既設構造物への実用化を目的に、イースト菌、バチルス菌をそれぞれ用い、栄養源とカルシウム源を混入することで補修材を調製し、外的作用により一本の貫通ひび割れを導入した供試体、ASR 促進試験で亀甲状のひび割れを導入した供試体を対象として注入・表面含浸で補修を行った。補修効果について、補修前後に透水試験と吸水試験の実施、および顕微鏡で析出した結晶物の観察によって評価した。以下に本研究で得られた結論を述べる。

- (1) いずれの補修材において、補修後ひび割れ中に白い生成物の析出が確認できた。
- (2) 人工ひび割れを導入した供試体は、いずれの補修材においても補修後に透水速度、吸水量が大幅に低下

した。また、ひび割れ幅が小さいほど透水速度の低下が著しくなった。イースト菌を用いた補修は、バチルス菌と比べ透水速度の低下がより顕著になった。

- (3) 補修した ASR 供試体は、補修無の供試体に対して吸水量が 60%-70%程度となった。載荷でひび割れを導入した場合と比べ吸水量の低下率が小さく、高アルカリ環境が微生物の生存・増殖に若干阻害する可能性があることを示唆している。一方、バチルス菌を用いた場合はイースト菌に比べ吸水量が低く、耐アルカリ性のバチルス菌は環境に受ける影響が少ないと考えられる。
- (4) 含浸で補修した供試体は、ひび割れの無い供試体と比べ吸水量がさらに低下した。その要因として、ひび割れの補修のみではなく、補修材の浸透によって炭酸カルシウムがセメントペーストの空隙に析出し、表層モルタルが緻密化することによるものである。

謝辞

本研究は科学研究費補助金（基盤（B）15H04029、代表：睦好宏史）により行ったものである。研究行うに当たって、前田建設工業（株）の三島徹也氏より支援を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O. and Schlangen, E.: Application of Bacteria as Self-healing

Agent for the Development of Sustainable Concrete, Ecological Engineering, Vol.36, pp.230-235, 2010

- 2) Jonkers, H. M.: Bacteria-based Self-healing Concrete, Heron, Vol. 56, pp.1-12, 2011
- 3) Wang, J. Y., Soens, H., Verstraete, W. and Belie, N. D.: Self-healing Concrete by Use of Microencapsulated Bacterial Spores, Cement and Concrete Research, Vol.56, pp. 139-152, 2014
- 4) Luo, M., Qian, C. and Li, R.: Factors Affecting Crack Repairing Capacity of Bacteria-based Self-healing Concrete, Construction and Building Materials, Vol.87, pp.1-7, 2015
- 5) 松下ゆかり, 岡崎慎一郎, 安原英明, 氏家勲: 微生物代謝を利用したコンクリートのひび割れ補修工法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1589-1594, 2010
- 6) 久保郁貴, 矢野元智也, 氏家勲, 河合慶有: 微生物を利用した補修工法における多析出可能な配合の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1948-1953, 2014
- 7) 稲垣由紀子, 塚本将康, 森啓年, 中島進, 佐々木哲也, 川崎了: 微生物代謝による液状化対策に関する動的遠心模型実験, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.2, pp.157-167, 2011
- 8) ASTM C1260-14: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014