

論文 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

松下 ゆかり^{*1}・岡崎 慎一郎^{*2}・安原 英明^{*3}・氏家 勲^{*4}

要旨: 本論文は、自然界に存在する微生物の代謝過程に生成する物質を利用した革新的な補修方法を提案し、その適用性を検討したものである。グラウトに用いる微生物および栄養源の選定においては、砂にグラウトを注入し、固化させた供試体の一軸強度を指標として強度の最も高い供試体、つまり補修の効果の一番著しいグラウトを採用した。コンクリート中の亀裂部において、採用したグラウトを注入したところ、炭酸カルシウムの析出が確認され、補修部位の透水試験において、透水性が著しく低下したことが確認された

キーワード: バイオグラウト, 補修, 微生物代謝, 透水試験

1. はじめに

社会基盤施設形成を担うコンクリート構造物の、ひび割れ補修に関する社会的ニーズは極めて大きい。現行のひび割れ補修工法は、ゴムチューブを用いた注入工法が一般的である。しかし、本工法の問題点として、

- チューブの設置作業に手間を要する
- 粘度が高い充填剤を用いるためひび割れ深部にまで充填しない
- 充填剤が無機材料のため、施工中の充填剤流出が環境負荷に影響が大きいなどの問題点が挙げられる。

現在、ひび割れの修復方法として、無機材料の充填のほか、東京大学・JR 東日本によって開発された自己治癒コンクリート¹⁾²⁾があるが、自己治癒機能を付与させるためには、コンクリートの練り混ぜ時に本機能が発揮されるための混和材料を添加する必要があるため、既設コンクリートへの適用は不可能である。本研究では、これらの問題点を解決すべく、革新的な補修方法の提案および、その適用性について検討する。

川崎ら³⁾は微生物代謝を利用したグラウト(以下、バイオグラウト)の、地盤改良への適用を試みている。グラウ

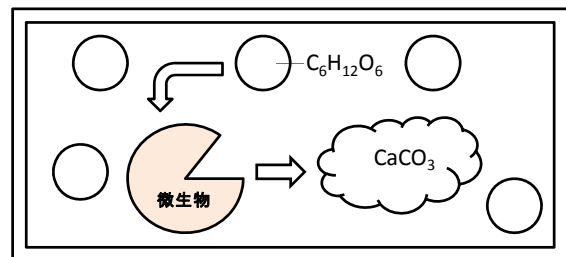
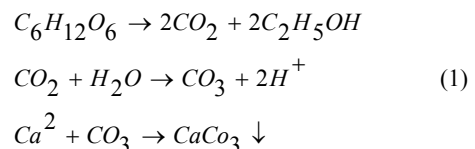


図-1 本工法のイメージ

トにはイースト菌(写真-1)を主成分とし、その有機栄養源であるグルコース、カルシウム源である硝酸カルシウムのほか、pH8.0 緩衝溶液を用いている。本工法は次式(1)に従う微生物代謝によって生成された炭酸カルシウムにより地盤を固化させることを期待している(図-1)。



このグラウトの砂地盤への適用の結果、地盤の透水性能が1オーダー以上低することが確認されている。バイオグラウトによる析出物は炭酸カルシウムであり、セメント系材料の主成分と相違ないため、コンクリートのひび割れ部への適用を考えた場合、析出物がセメントペーストに与える化学的影響はないと思われる。以上の検討より、バイオグラウトは、コンクリートの亀裂部の補修に適していると考えられる。本研究では、グラウトによる亀裂部の閉塞を目的とし、様々な菌種、栄養源、カルシウム源よりコンクリートのひび割れ補修に適したバイオグラウトの開発を目的とし、グラウトの析出物の物理化学分析を実施するとともに、補修の効果については、ひび割れ部の透水試験によってその適用性を検証した。

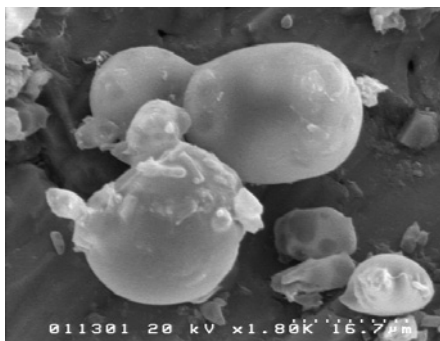


写真-1 イースト菌の画像

*1 愛媛大学 工学部環境建設工学科 (正会員)
 *2 愛媛大学大学院 理工学研究科 助教 博(工) (正会員)
 *3 愛媛大学大学院 理工学研究科 准教授 博(工)
 *4 愛媛大学大学院 理工学研究科 教授 博(工) (正会員)

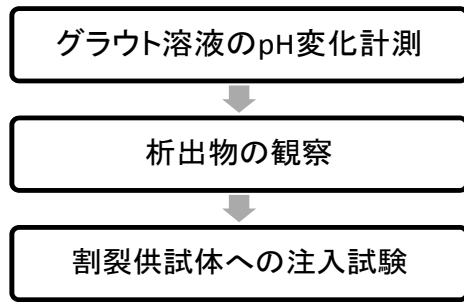


図-2 予備実験のフロー

2. 既往の文献に基づく予備実験

2.1 既往の文献に基づく予備実験の概要

はじめに、既往の文献³⁾に示された配合のバイオグラウトの有する、ひび割れ部の補修性能を確認する。この作業を、後に行う本実験に対する予備実験に位置づける。予備実験のフローを図-2に示す。バイオグラウトにおいては生物化学反応による炭酸カルシウム生成を目的としているが、炭酸イオンが生成すると溶液が酸性となる。酸性中においては炭酸カルシウムの結晶は溶解するため、グラウトのpH変化に留意する必要がある。はじめに、グラウト溶液のpHの経時変化を計測し、その後、グラウトによる析出物の観察を行った。その後、ひび割れを導入した割裂供試体への注入試験を実施した。

2.2 予備試験におけるグラウトの配合

既往の文献¹⁾を参考に、表-1に示す配合でグラウトを作成した。

グラウトの菌種はイースト菌であり、市販のドライイーストを上記の分量だけ混入した。また菌の栄養源としてスクロースを用い、カルシウム源として酢酸カルシウムを採用した。ここで、スクロースを先に混入することにより、イースト菌に二酸化炭素を排出させ、その二酸化炭素と酢酸カルシウムを反応させるため、スクロースを先に混入する必要があった。また、炭酸カルシウムの析出反応に伴うpHの減少はイースト菌の活動を抑制することから、pH低下に対する緩衝剤としてトリス緩衝溶液（以降、緩衝溶液と記す）をグラウトに用いた。その後、グラウトが100mlになるよう蒸留水を注いだ。はじめに、経過時間とpH変化を確認する。ビーカーに作成したグラウトを、16日経過までのpH変化をデジタルpHメーターによって測定した。図-3にその結果を示す。

pHは16日経過後、9.50pHから8.33pHと1.17pH低下している事がわかる。pHの変化よりスクロースが分解され、水素イオン H^+ が排出され、pHが低下しているもの

表-1 グラウトの配合

$(CH_3COO)_2Ca$	ドライイースト	トリス緩衝溶液	スクロース
1mol/L	0.05g/L	1mol/L	0.01mol/L

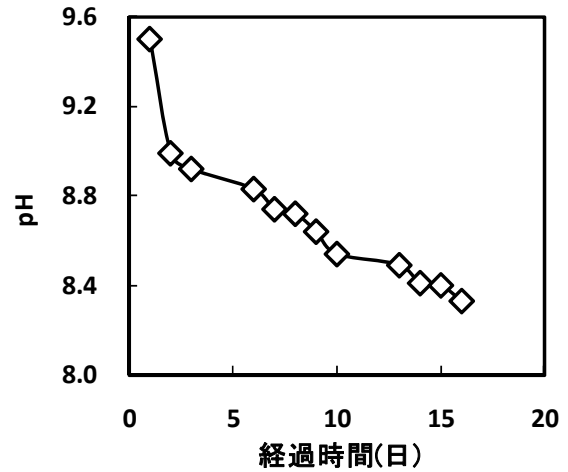


図-3 グラウトのpH変化

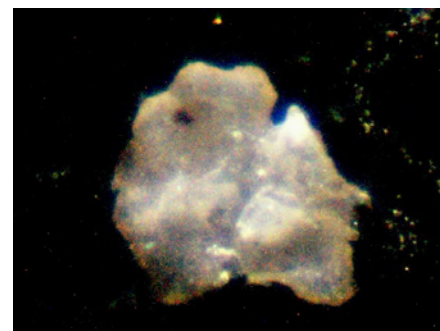


写真-2 結晶の顕微鏡写真（倍率300倍）

の、緩衝溶液によってその低減が抑制されている。

2.3 析出物の化学分析

析出物を物理化学分析するために、吸水材としての再骨材5g（表乾密度 $2.6g/cm^3$ のコンクリート用砕砂A）をシャーレーに入れたのち、グラウトを1日につき1度注入（5ml前後）し、供試体の底面までグラウトが流出したことを確認した。その後16日経過までのシャーレー内を観察した。

注入開始から1週間経過後にはじめて、細骨材に白い結晶が確認された。その直後、引き続きグラウトを注入しても、その結晶は溶ける事なく残っていたため、溶解度の高い酢酸カルシウムが再結晶したものがシャーレー内に析出したのではなく、不溶性の結晶である炭酸カルシウムが析出していると判断された。顕微鏡によって観察された結晶を写真-2に示す。半透明の炭酸カルシウムの結晶と思われるものが確認できる。なお、バイオグラウトによって算出された析出物の、詳細な化学分析は後に実施した本実験において行っている。

2.4 割裂供試体へのグラウトの注入

$\phi=50mm$ 、高さ50mm、ひび割れ幅約1.3mmのコンクリート供試体に、側面からの一軸圧縮による割裂ひび割れを導入したものを対象として、ひび割れに結晶が出来るまで2.2項で作成したグラウトを注入し続け、金属製のバット上に、ひび割れ部が上面になるように供試体を

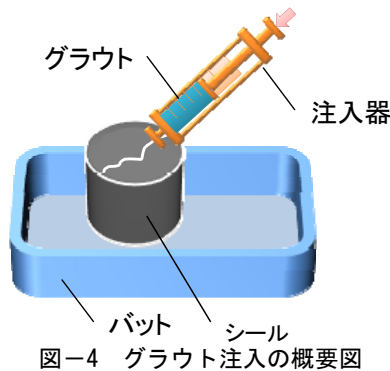


図-4 グラウト注入の概要図

静置させた。その後、1日に1度(2ml 前後)注入器を用いて注入する作業を、1週間行った。なお、グラウトはほぼ液状水と同様な粘度であったため、従来のグラウト注入に必要な、注入器のひび割れ部への固定作業は不要であり、注入が容易であった。1週間の注入の結果、供試体底面部の亀裂部に結晶が確認された。微生物代謝による補修前と補修後の写真を写真-3に示す。補修後のひび割れ部に白い結晶の析出が確認される。析出物を採取し、水中に浸漬させたところ、溶けなかったという事実から炭酸カルシウムの可能性が高い。また析出した結晶は、粗骨材の周辺部にしか見られず、セメントマトリックス部周辺には結晶の析出が確認されなかった。その要因としては、ひび割れ内部において、グラウトの局所的な濃度が高くなるが考えられる。ひび割れ幅は表層部においては粗骨材周辺部とセメントマトリックス部で相違はほとんど見られなかったが、粗骨材周辺部分の方がひび割れ深部に向かう程ひび割れ幅が小さくなっていったようである。グラウトは液状水に性質が近いので、ひび割れ幅が小さいほどメニスカスを形成しやすく、グラウトがその場にとどまりやすい。グラウト中の微生物の代謝においては、グラウトが液状であることが必要であるために、液状としてとどまりやすかった粗骨材周りに、結晶の析出が集中したものと思われる。また、粗骨材の方がセメントマトリックスよりも吸水性が高かったことも、その一因であったと思われる。以上の結果より、既往の配合によるグラウトでは、コンクリートのひび割れ補修への適用は極めて限定的であることが確認され、より補修効果の大きなグラウトの配合を検討する必要があることが示唆された。

3. 種々の配合によるグラウトの補修の可能性

3.1 概要

地盤分野での既往の配合に示された配合では、ひび割れのような比較的大きな空間においては補修効果が見られなかった。したがって、バイオグラウトをひび割れ補修に用いるには、より補修効果の大きい配合をみいだ

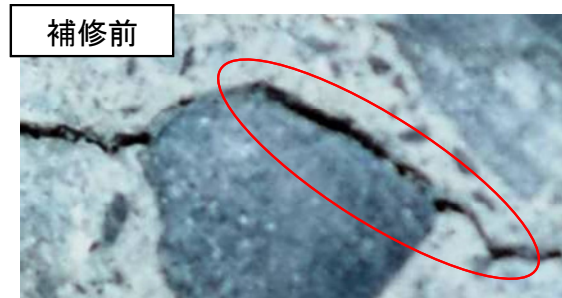


写真-3 補修前後の亀裂部拡大写真

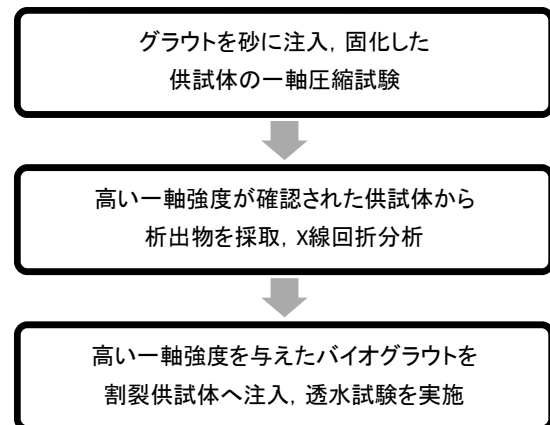


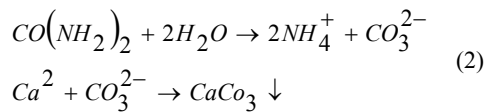
図-5 本実験遂行のフロー

す必要があります。そのためには数多くの実験ケースを実施しなければならない。検討する析出物によるひび割れの閉塞効果に関して、ひび割れ幅を指標として計測するには、目視などが一般的ではあるが定量評価が難しい。またひび割れ部分の透水試験は定量評価が可能ではあるが、もっとも補修効果の高い配合を見いだすためには、数多くの実験ケースに対して莫大な手間を要する。

そこで本研究においては、砂を対象にグラウトを注入し、固化したものの一軸強度を補修の効果の指標とし、最も一軸強度の高くすることのできたグラウトに対して、割裂供試体への注入を実施する。それと同時に、固化した供試体から析出物を採取し、X線回折分析を実施した。なお、一軸圧縮試験はコンクリートに対する通常の圧縮試験と同様、万能試験機を用いて圧縮力を加え、強度のピーク値を測定値とした。本実験遂行のフローを図-5に示す。

3.2 配合条件

菌種は、既往の配合と同様のイースト菌のほか、尿素を分解して炭酸イオンを代謝生成する納豆菌を選出した。なお、納豆菌の尿素分解反応は以下のようである。



上記の式より、納豆菌では水素イオンは生じないため、溶液の pH は変動しない。納豆菌は好気性細菌のため、注入溶液にあらかじめ空気を含ませる必要がある。

また、カルシウム源は酢酸カルシウム・水酸化カルシウム・塩化カルシウムの 3 種類から検討する事にした。栄養源は、イースト菌の場合ではスクロースを、納豆菌の場合では尿素を用いた。なお、ここでは一軸強度試験を目的とした実験であるため、供試体の自立を補助するために、微量のセメントを混ぜた供試体も作成した。以下に試験条件を列記する。

【試験条件(イースト菌)】

AA: イースト菌+酢酸カルシウム+スクロース+セメント(あり, なし), AB: イースト菌+水酸化カルシウム+

スクロース+セメント(あり, なし), AC: イースト菌+塩化カルシウム+スクロース+セメント(あり, なし)+緩衝溶液(あり, なし)

なお、イースト菌 0.05g/L, スクロース 0.05mol/L, カルシウム源の酢酸カルシウム・塩化カルシウムにおいては、0.1mol/L, 0.05mol/L の 2 種類とし、水酸化カルシウムは溶解度が小さいことからグラウトが飽和状態になるまでの分量を使用した。

イースト菌+塩化カルシウムの場合、二酸化炭素の生成に伴い、pH が低下して溶液が酸性になる。炭酸カルシウムは酸性中では溶解するため、ここでは予備実験と同様に pH9.0 に設定した緩衝溶液を 0.1mol/l 用いた。

【試験条件(納豆菌)】

BA: 納豆菌+酢酸カルシウム+尿素+セメント(あり, なし), BB: 納豆菌+水酸化カルシウム+尿素+セメント(あり, なし), BC: 納豆菌+塩化カルシウム+尿素+セメント(あり, なし)

表-2 珪砂 7 号の成分表

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO
94.0以上	2.5以上	1.0以下	0.2以下	0.2以下

表-3 配合表と圧縮強度結果

ケース名	菌種	Ca源	栄養源	セメント	緩衝溶液	強度(MPa)
AA-0.10c	イースト菌	酢酸Ca 0.10mol/L	スクロース	あり	/	0.67
AA-0.05c		酢酸Ca 0.05mol/L				0.60
AB-c		水酸化Ca飽和		なし		0.021
AA-0.10		酢酸Ca 0.10mol/L				0
AA-0.05		酢酸Ca 0.05mol/L		0.11		
AB		水酸化Ca飽和		0		
AC-0.10c		塩化Ca 0.10mol/L		あり		0.017
AC-0.05c		塩化Ca 0.05mol/L				0
AC-0.10		塩化Ca 0.10mol/L		なし		1.59
AC-0.05		塩化Ca 0.05mol/L				0
AC-0.10c		塩化Ca 0.10mol/L		あり		0.02
AC-0.05c		塩化Ca 0.05mol/L				0
AC-0.10		塩化Ca 0.10mol/L		なし		0
AC-0.05		塩化Ca 0.05mol/L				0
BA-0.10c	納豆菌	酢酸Ca 0.10mol/L	尿素	あり	/	0.041
BA-0.05c		酢酸Ca 0.05mol/L				0
BC-0.10c		塩化Ca 0.10mol/L		なし		0.11
BC-0.05c		塩化Ca 0.05mol/L				0.087
BB-c		水酸化Ca飽和		0.11		
BA-0.10		酢酸Ca 0.10mol/L		0.11		
BA-0.05		酢酸Ca 0.05mol/L		0.045		
BC-0.10		塩化Ca 0.10mol/L		0.47		
BC-0.05		塩化Ca 0.05mol/L		0.12		
BB		水酸化Ca飽和		0.014		

なお、納豆菌 0.05g/L, 尿素 0.6g/L, セメント 1g/L, カルシウム源はイースト菌同様の配合とした。上記の試験条件で、全 24 ケースの試験を実施した。

3.3 供試体の作製方法

供試体の作製は、次のような手順で実施した。蒸発皿に、グラウトの配合に必要な各々の分量の試料を取り分けたのち、カルシウム源以外の試料をビーカーに入れ、蒸留水を加えて試料を溶解させる。その後、カルシウム源を、その溶解を確認しながら加え、50ml の溶液になるように、グラウトを混ぜながらビーカーに蒸留水を入れる(図-6)。バットに 300g の砂(珪砂 7 号)を入れ、バット内で溶液を砂に含ませる。表-2 に珪砂 7 号の成分表を示す。最後に、φ=50mm, 高さ 100mm であるプラスチックモールド(以降、モールドと記す)に砂を 3 層に分けて突き固める。以上の工程で試料の打設を行った。次に供試体の養生方法について述べる。試料である砂を入れたモールドを、25℃に設定されたインキュベータで一週間養生した。そののち、一軸圧縮試験にかけるため、脱型し、110℃に設定された恒温乾燥炉内で 3 日保管し、供試体試料内の水分を蒸発させた。

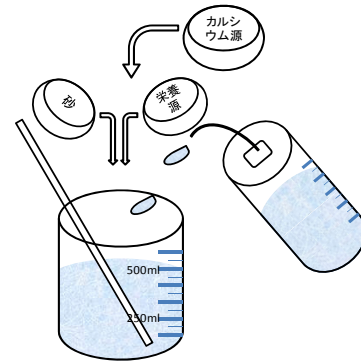


図-6 グラウト作製の概要図

3.4 一軸圧縮試験結果と提案するグラウトの配合

一軸圧縮試験には、油圧式万能試験機を使用した。なお、脱型時に強度が著しく低いために崩れ、一軸圧縮試験が行えなかった供試体については、強度を 0 とした。また、供試体が炉乾中に焦げ、一軸強度が著しく高くなったものも存在したので、この供試体の強度は実験値として採用しなかった。なお、焦げた原因としては、スクロースの溶け残りにより焦げてしまったと考えられる。

一軸強度試験結果とケース名を表-3 に示す。なお、ケース名 XY-Zc において、X: 菌の種類(A: イースト菌, B: 納豆菌), Y: カルシウム源(A: 酢酸カルシウム, B: 水酸化カルシウム, C: 塩化カルシウム), Z: カルシウム源の濃度, c: セメントの有無(無しの場合, c は表記せず)とする。

例えば, AA-0.01c (イースト菌+酢酸カルシウム+カル

シウム源 0.10mol/L+セメント有り) ということである。

イースト菌を用いた場合、酢酸カルシウムとセメントを組み合わせたケース、塩化カルシウムとセメントなしのケースについて強度が高く、また納豆菌を用いた場合、塩化カルシウムとセメントなしのケースについて高い強度が得られた。また、1.59MPa と、最も高い強度を示したケース AC-0.10c について、圧縮試験後に砂粒子の周囲に析出した結晶を採取し、X 線回折分析を行った。その結果を図-7 に示す。Calcite の存在を示す 40° 付近に、ピークが確認されたことから、析出物が炭酸カルシウムであることが断定された。

以上の一軸強度の高い 3 種類について、補修効果の高いグラウトとみなし、透水試験によるひび割れ閉塞効果の実証を行うこととした。以下にその配合を再び示す。

【配合】

配合ア: AC-0.10(イースト菌+塩化カルシウム 0.10mol/l +スクロース)+緩衝溶液

配合イ: BB-0.1 (納豆菌+水酸化カルシウム 0.10mol/l+尿素)

配合ウ: AA-0.05 (イースト菌+酢酸カルシウム 0.05mol/l +スクロース)

なお、酢酸カルシウムの場合、0.10mol/L の方が高い強度を示しているが、この供試体は炉乾燥中に焦げたため、この強度は実験値として採用しなかった。したがって、

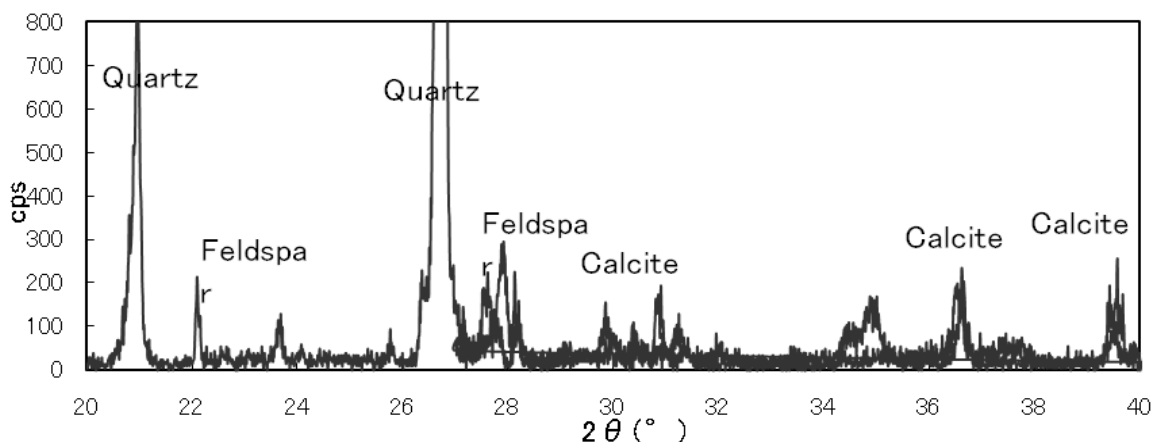


図-7 X 線回折分析結果

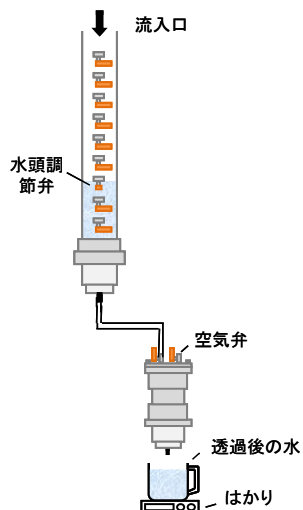


図-8 透水試験装置概略図

酢酸カルシウムでは 0.05mol/L をグラウトに用いた。また、グラウトの効果を検証するためセメントは含めないものとする。

3.5 透水試験によるグラウトの補修効果の実証

透水試験によるひび割れ閉塞効果の実証を行うこととした。ここで用いる透水試験装置とは、図-8 に示すような定水位透水試験を行う試験器を指す。50cm の水頭に設定したカラム管より供給される液状水が、セル内に設置された供試体上面のひび割れを透過し、単位時間あたりの液状水透過量をこの装置によって計測することができる。設定したコンクリートの亀裂幅においては、一軸圧縮による割裂ののち、再び亀裂面同士を向かい合わせた中から、ひび割れ幅がおよそ 0.2mm のものを選び、透水試験に供した。透水試験を行った後に、3 つの供試体に、それぞれのグラウトを注入する。注入では注射器を使い、グラウトの注入量は供試体下面に水分が出て来るまで注入した。また、保管は 20℃ に設定した恒温室で保管した。イースト菌の場合、20℃～50℃ で活発に働くことが報告されており、実際の外気環境下で活用できることを想定し、20℃ の恒温室で保管した。1 週間の間 1 日に 1 度 (5ml 程度) 注入し続けた頃に供試体上面、または下面に析出物が見られたので、再度透水試験を行う事にした。透水試験結果を図-9 に示す。なお、グラフの縦軸には補修前の短時間あたりの透水流量を 1 とした場合における、補修後の透水量を示している。

グラウト注入前後での透水量は配合ア、イにおいては大きく減少していたが、配合ウにおいては透水量が 26% の減少のみとなった。この原因として、グラウト注入の際、コンクリート表面に水酸化カルシウムの溶け残りがあり、析出物が流出したことに起因すると思われる。なお配合ア、イについては約 5 分間の透水中、析出物の流出は見られなかった。また、3 パターンともひび割れ内

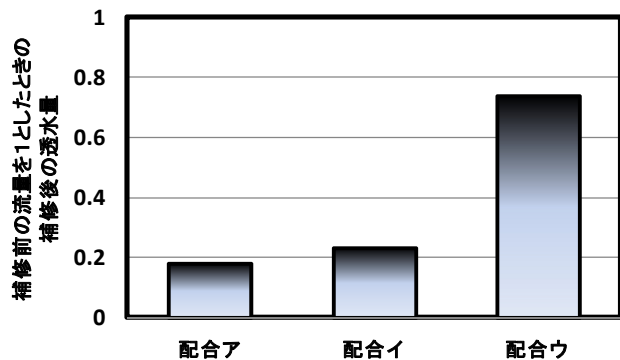


図-9 透水試験結果

部全体が補修されていたのではなく、骨材の大きな部分とひび割れ幅が小さい部分だけ補修されていた。前述のとおり、炭酸カルシウムの析出にはグラウトが液状水として留まる必要があるため、より幅の大きなひび割れ部の補修のためには、グラウトの粘度を高め、グラウトの滞留時間を上げるなどの改良が必要であることが示唆された。また今後は、実際の構造物の供用状態を模擬するために、ムーブメントの作用による析出物の定着に関する検討が必要である。

4. 結論

イースト菌または納豆菌を含有するバイオグラウトのひび割れ補修への適用性を検討した。バイオグラウトによる補修効果の効率的な検証として、砂にバイオグラウトを注入し固化させた供試体の一軸圧縮強度試験を実施した。その結果、適切な分量のカルシウム源と栄養源を配合した場合において、砂の固化および強度発現が認められるとともに、ひび割れへの適用においては、析出物による亀裂部の閉塞が確認され、透水性の低下を確認することができた。

謝辞

本研究の遂行にあたり、愛媛大学大学院生 林和幸氏、杉本知弘氏に、貴重なご示唆およびご協力を頂きました。ここに深い謝意を示します。

参考文献

- 1) http://www.nedo.go.jp/informations/press/200908_1/seika.pdf
- 2) 安台浩, 鈴木章子, 高岡秀明, 岸利治: 自己治癒コンクリートのセメント系再結晶化にける種々の炭酸塩と触媒反応の効果, 平成 19 年度土木学会年次学術講演会概要集, 5-252, CD-R, 2007.9
- 3) 川崎了ほか: 微生物の代謝活動により固化する新しいグラウトに関する基礎的研究, 応用地質, Vol.47, No.1, pp.2-12, 2006.4