

バクテリアを活用した自己治癒コンクリートの国内展開

大橋 未来

自己治癒コンクリートは、CO₂排出量が多いコンクリート業界に革新をもたらす画期的な技術である。バクテリアの代謝活動によって発生したクラックを自己修復する仕組みを持ち、構造物の長寿命化とメンテナンスコストの削減に貢献する。日本では、自己治癒コンクリートの量産化が進み、国内での導入事例も増加している。さらに、国土交通省や経済産業省などからも評価を受け、道路や公共工事など幅広い分野で採用が進んでいる。しかし、これだけでは2050年のカーボンニュートラル目標の達成には至らず、産官学連携による取り組みが今後も重要である。

キーワード：ひび割れ, バクテリア, 炭酸カルシウム, 自己治癒, 長寿命化, サステナビリティ

1. はじめに

コンクリート及びコンクリート構造物は、過去より人々の生活を支える基盤として、人類の文明の進化にも重要な役割を果たしてきた。また、その主要な構成材料である石灰石や砂、砂利などの大量入手のしやすさから、世界では水に次いで2番目に使用されるほど、人類にとっては必要不可欠なマテリアルと言っても過言ではない。

一方で、コンクリートの製造時に大量のCO₂を排出することは、コンクリート業界にとって大きな課題ともなっている。コンクリートを構成する重要な材料であるセメントは石灰石を焼成して製造する過程で大量のCO₂を排出し、セメント1トンを製造するごとに0.8トンのCO₂を排出すると言われるほど、環境負荷の高い材料であることは明らかである。

このコンクリート業界から排出される大量のCO₂が地球温暖化の一因ともなっていることは紛れもない事実であり、国内外において脱炭素化に向けた潮流が激しさを増す中、我々もコンクリートにおける脱炭素化に貢献することが出来る新たなソリューションの開発を行い、実装することが強く求められている。

近年はコンクリートメーカーや建設業者の研究開発部門や、大学などの教育機関が中心に脱炭素に貢献する様々なコンクリートソリューションが開発されている。

そのなかでも、自己治癒コンクリートは、コンクリートにあらかじめ用意されているシステムによって、人

間が自らに発生した傷を治癒させるようにバクテリアの代謝活動を利用してコンクリートのクラックを修復することで、構造物の維持管理を簡素化し、ライフサイクルコストの削減を実現させることを可能とする。それと同時に構造物の長寿命化を実現し、解体と再生産時に発生する大量のCO₂の排出を削減することが可能となる画期的なテクノロジーである。

本稿では、コンクリートの脱炭素化ソリューションのひとつとして、この自己治癒コンクリートのメカニズムや国内での採用事例、そしてこのテクノロジーを活用したコンクリート業界における脱炭素運動について紹介する。

2. 自己治癒コンクリートの概要

バクテリアの代謝活動を応用したこの自己治癒コンクリート技術は、2010年にオランダ・デルフト工科大学のヘンドリック M. ヨンカース博士が率いる研究チームによって開発され、2015年に欧州特許庁による欧州発明家賞や、2020年にはオランダ Cobouw2020 イノベーションアワードにノミネートされる形で評価を受けた。当社は2016年よりオランダ研究チームとの交流を開始し、産業ベースでこの技術を普及させるための量産化技術について共同で研究を継続し、2020年11月に世界で初めて「自己治癒コンクリート Basilisk」として日本国内における量産を開始した。

そもそも、コンクリートには、乾燥収縮やセメントの水和熱などをはじめとした様々な原因によるひび割

れが発生し、このひび割れの発生は避けることができない宿命とも言えるだろう。このようなひび割れが発生すると、そこから水分や酸素やCO₂、有害イオンなどが混入し、内部の鉄筋を腐食させることで構造物の耐久性を著しく低下させてしまう。その対策としてこの技術は、コンクリートに発生した初期段階のひび割れを絶えず修復していくことでコンクリート構造物の長寿命化を実現させることが出来る。ここからは自己治癒コンクリートのメカニズムを解説する。

自己治癒コンクリートの材料に含まれるバクテリア(Bacillus 属、枯草菌と同じ種類)は、耐アルカリ性で乾燥状態においては孢子として休眠状態となる。

孢子上のバクテリアは、コンクリート製造時にバクテリアの養分となるポリ乳酸(生分解性プラスチック)とともに自己治癒材として投入される(写真-1)。ポリ乳酸は、生コンクリート内の高いアルカリと練り混ぜ水によって加水分解されることで乳酸カルシウムに変化し、バクテリアとともに生コンクリート全体に分散される。

コンクリートの硬化後にひび割れが発生すると、そこから雨水や酸素が侵入し、ひび割れ表面のコンクリートのpHが下がる。この水分と酸素の侵入、そしてpHの低下という3つの条件によってコンクリート内部で休眠状態であったバクテリアは活動を開始し、周囲に存在する乳酸カルシウムを摂取し代謝活動によりクラック内部に炭酸カルシウムを排出することでクラックを埋めていく。バクテリアは代謝活動時に少量の水とCO₂を排出するが、ひび割れ周辺の未水和のセメントと水分が反応することで水酸化カルシウムを生成し、更にCO₂と反応することで炭酸カルシウムを作る。この炭酸カルシウムが蓄積されることでひび割れが閉塞すると、水分と酸素の供給が停止されるため、バクテリアは再び休眠状態となり、次のひび割れの発生に備えるのである(図-1、写真-2)。



写真-1 自己治癒材

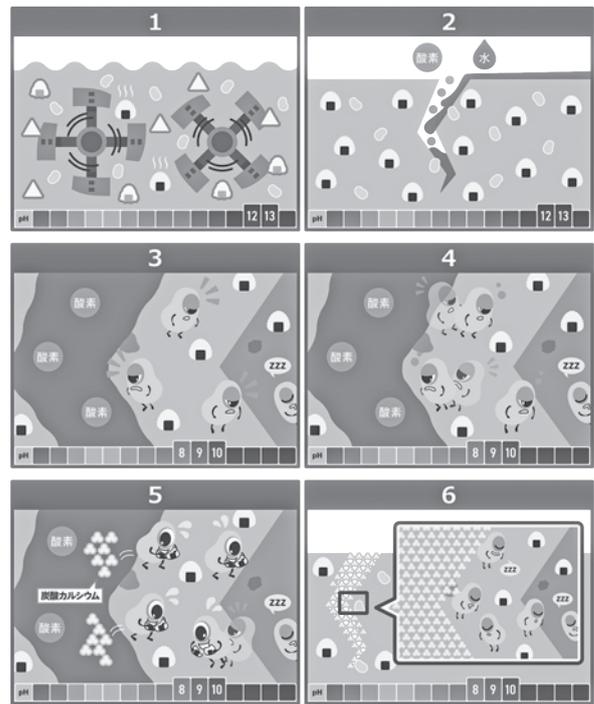


図-1 自己治癒メカニズム

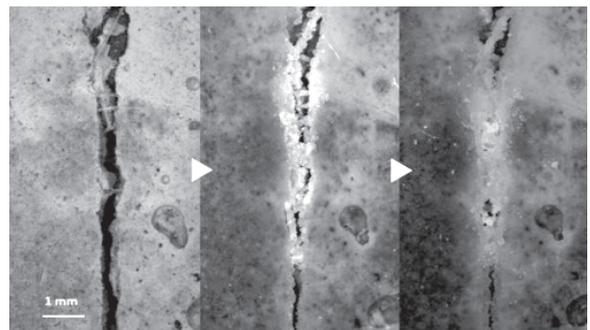
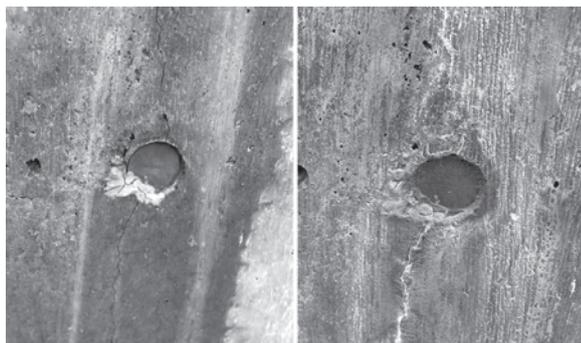


写真-2 水中養生における自己治癒の様子

なお、バクテリアは代謝活動を行うと同時に、酸素を取り込むことでおよそ20分に一度の速さで分裂をすることが確認されている。この分裂を4~5回繰り返すと、最初に分裂を行ったバクテリアは死滅するが、他のバクテリアの養分となる。また、このバクテリアは休眠状態でおおよそ200年生存することが可能とされている。

この自己治癒技術によってひび割れが修復されることと修復にかかる期間を測定させるための実証実験を、当社の大型製品の養生用水槽を用いて実施した。この水槽は建設時よりクラックの修復を長期暴露試験として行う目的により、あえて漏水対策等をせず、クラックの発生をしやすい状況にした。建設時から半年後に水を張ったところ、全体に発生したおよそ20本のクラックより大量の漏水があったが、その後約2週間ですべての漏水が停止した(写真-3)。クラックを埋めている部分は白色の物質が目視で確認できるほ

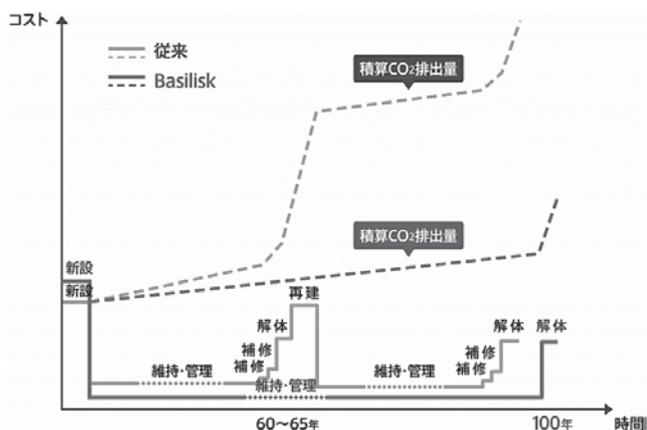


写真一 養生用水槽による暴露試験の様子

ど発生しており、この物質の成分を分析したところ、細菌の代謝活動により排出された炭酸カルシウムであることも確認された。

このようにして自己治癒材が含まれたコンクリート構造物は、わずかな傷を人体が自ら治し続けるように、細菌の活動可能な環境さえ整えば常に初期段階のひび割れを治し続けることが出来る「自己治癒コンクリート」となる。

この細菌の代謝活動によってコンクリート表面の小さなひび割れを修復し続けることが出来るので、コンクリート内部の鉄筋の腐食の原因となるようなコンクリート表面のひび割れの進行や水や有害イオンなどの劣化因子の侵入を防ぎ続ける事を可能とする。本技術は導入において特別な設備を必要とせず、 1m^3 あたりに自己治癒材を5kg投入するだけで自己治癒コンクリートの製造を可能とするが、材料費としてある程度のインシヤルコストは発生する。しかし、コンクリート構造物を長寿命化させることにより、メンテナンスの軽減や、コンクリート構造物の長寿命化によって作り変えて発生するコストを削減させることから、ライフサイクルコスト（LCC）が下がる可能性を十分期待することが出来る（図一2）。

図一 2 コンクリートの長寿命化によるライフサイクルコストとCO₂排出量のイメージ

また、本技術によって構造物の寿命を大幅に延長させることによって、従来の作っては壊すというスクラップ・アンド・ビルド型のビジネスモデルからは脱却し、コンクリートの使用量を戦略的に低減させることや、ひび割れのリスク低減によりかぶりの厚さの低減が見込まれる。

これらのことから、本技術を普及させていくことで、インフラメンテナンスの担い手の減少や脱炭素社会の実現といった、大きな課題の解決への貢献が期待される。

3. 国内での自己治癒コンクリートの展開

この自己治癒コンクリートは、コンクリート 1m^3 あたりに自己治癒材5kgを添加することで製造することが出来るため、プラントに特別な設備を高額の費用をかけて導入することや、特別な配合計算を行う必要がないというメリットがある。

当社では2020年11月の量産化開始の翌年1月には、この自己治癒コンクリートなどを始めとしたコンクリートにおける脱炭素技術を、希望する同業他社に包括的に技術移転し、コンクリート分野の脱炭素を全国的な活動として加速させるためのプログラム「aNET ZERO イニシアティブ」を提唱した。

2024年2月現在、このプログラムに参加するプレキャストメーカーは50社となり、コンクリート分野の脱炭素を加速させるために自己治癒コンクリートを始めとした脱炭素に貢献するコンクリート技術の導入と普及を進めている。また、自己治癒コンクリートの試験練りを行った生コンプラントは全国で70プラントを超え、日本全国での自己治癒コンクリートの供給体制の整備が加速している。

4. 採用事例と国内における評価

自己治癒コンクリートの採用事例は当社だけではなく、「aNET ZERO イニシアティブ」に参加するプレキャストコンクリートメーカーにおいても導入事例が次々と発表されている。

自己治癒材の中に含まれる細菌が水と酸素によって活動を開始するという特徴から、雨水や用水などで水分が十分に供給されることが期待できる農業や河川分野の治水工事や、道路分野で生コン・プレキャスト関わらず多く採用されてきた。

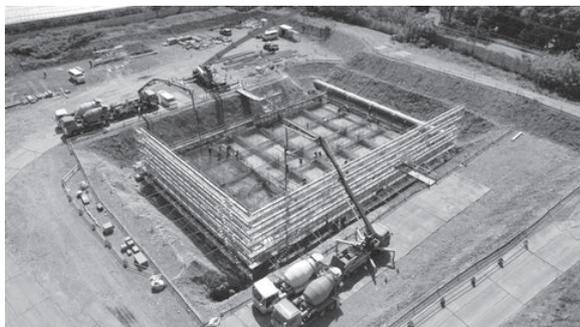
大規模な採用事例では、2021年に札幌市内で札幌市水道局発注の大型池状構造物にBasilisk仕様の生コ

ンクリートが採用（写真—4）。また、2023年には宮崎県において九州地方整備局発注の地域高規格道路でBasilisk仕様のボックスカルバートが採用されるなど（写真—5）、バクテリアの代謝機能によって期待されるコンクリートのメンテナンス軽減が評価を受けて公共工事での採用も広がっている。

2022年8月には「Basilisk HA 自己治癒コンクリート」として国土交通省の新技术情報提供システムNETISに登録されたほか、国内の表彰については、2023年1月に経済産業省、国土交通省、厚生労働省、文部科学省が連携し、ものづくりの第一線で活躍する技術などを表彰する「ものづくり日本大賞」の「優秀賞」を受賞した。

また、2023年9月には国土交通省より、2050年カーボンニュートラルに向けた道路分野の取り組みについての中間取りまとめとして、政府目標である2030年度における温室効果ガスを2013年度から46%削減、2050年カーボンニュートラルの実現のために、大きく4つの分類に分けた対応策が必要であるとした中で、「道路のライフサイクル全体の低炭素化」を掲げた。これは道路の計画・建設・管理の各段階においてCO₂排出量の削減を目指したもので、具体的な項目として「道路インフラの長寿命化」が含まれている。

同省発表内の資料において、「道路橋や舗装等につ



写真—4 大型池状構造物（北海道）



写真—5 地域高規格道路（宮崎県）※提供（株）ヤマウ

いて、予防保全の観点から計画的・集中的に長寿命化を図り、インフラの更新頻度を減らすことでCO₂排出量の削減を目指す」とあるが、この考え方は自己治癒コンクリートによって可能となるメンテナンスコストとCO₂排出量削減の考え方と同じものであり、自己治癒コンクリートによる長寿命化というアプローチが今後脱炭素に大きく貢献できる手立ての一つとして確立されることを強く期待出来るだろう。

5. 今後の展望

本稿で紹介したバクテリアの代謝機能を活用した自己治癒コンクリートテクノロジーは、人々の生活に必要な不可欠な建設資材であるコンクリートが持つ、原材料の調達を含めたサプライチェーンにおいて大量のCO₂を排出することや、宿命的にひび割れの発生をほぼ避けることが出来ないという大きな課題の解決に貢献できる画期的なマテリアルである。

この技術は先述の国土交通省が掲げた方針や近年のメディアへの露出によって脱炭素に貢献するテクノロジーであるという認識が広まりつつあるが、この自己治癒技術によって削減できるCO₂排出量は、長寿命化しなかった場合に発生する建替え時に発生するCO₂排出量だけであり、この技術だけでは政府の目標とする2050年カーボンニュートラルの実現まではほど遠いのが現状である。

これからも、産業界が行政や教育機関などと産官学民連携を通じてカーボンニュートラルひいてはカーボンネガティブに資するような技術を開発し、業界全体で普及を進めるような取り組みが必要だと考える。

JICMA

《参考文献》

- ・ 劉 宏涛, 世界初, 自己治癒コンクリートの大量製造, 建設機械施工, vol.74, no.3, p.62-66, 2022年2月
- ・ 酒井 亨, バクテリアを活用した自己治癒コンクリート技術, コンクリート工学, vol.59, no.11, p.933-937, 2021年11月
- ・ 国土交通省 道路局, “2050年カーボンニュートラルに向け、道路分野の取組を加速します～カーボンニュートラル推進戦略 中間とりまとめの公表～”, 国土交通省, 2023. https://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_001698.html, (参照 2024-02-19)

【筆者紹介】

大橋 未来（おおはし みき）
會澤高圧コンクリート(株)
未来開発本部

