

サステナブルな社会を実現するためのコンクリート 構造物に関する有効な維持管理技術

1. はじめに

道路・鉄道の橋梁やトンネルなどの社会基盤構造物は市民社会を支える重要なものであり、健全な社会を保つためには、丈夫で長持ちするコンクリート構造物が必要である。しかし、コンクリート構造物は、供用期間中に種々の因子によって耐久性や耐荷性能を含む各種性能の低下が引き起こされ、早期劣化や老朽化等が顕在化しており、使用者や周辺の人々の安全性が危惧される事態をまねいている。コンクリート構造物の健全性を保ち長寿命化を計り、持続可能なサステナブルな社会を実現するためには、適切な維持管理が必要不可欠である。維持管理とは、「構造物の供用期間において、構造物の性能を所要の水準以上に保持するための全ての行為」と定義されており¹⁾、近年、その重要性および急務性が認識されている。1960年代の高度経済成長期から現在に至るまで数多く建設された日本のコンクリート構造物に対して、今まさに維持管理を含む適切な措置・対応が望まれている。

そのような時代の中で、「丈夫で、美しく、長持ち」するコンクリート構造物によりサステナブルな社会を実現するために、2013年7月「株式会社CORE技術研究所」を設立した。社名のCOREは技術の「核」という言葉そのものの意味とともに、融合：Composite、組織化：Organize、研究・調査：Research、工学・技術：Engineeringを表現している。弊社では、維持管理にかかわる点検、詳細調査、劣化・損傷の分析、性能の評価、補修・補強設計、数値解析、施工計画といったさまざまな分野の技術を融合させ、総合的な建設コンサルティングサービスを展開している。また、持続可能な開発目標（SDGs）のNo.9【産業と技術革新の基礎をつくろう】、No.11【住み続けられるまちづくりを】に積極的に取り組み、最新・最適な技術を提供し社会貢献に寄与する。

本稿では、弊社が取組んでいるコンクリート構造物の維持管理に関するいくつかの最新の技術について紹介を

行うものである。

PCグラウト調査：日本の橋梁種別の約40%はPC（プレストレストコンクリート）構造である²⁾。PC構造は本来耐久性に優れているはずであるが、早期に特有の劣化が生じる事例が多々あり、その維持管理は大きな課題となっている。近年、ポストテンション方式（以下、ポストテンと称す）PC構造物のグラウト充填不足に伴うPC鋼材の腐食や破断が顕在化しており、構造物の耐荷力はもとより周辺の安全対策が急務となっている。非破壊検査技術を用いたPCグラウト充填度調査とその総合的な診断に関する技術を紹介する。

トモグラフィ調査：コンクリート構造物の劣化は、近接目視により表面に顕在化しているものは判定が可能であるが、内部に存在する欠陥やコンクリートの品質を評価することはできない。様々な材料内部の品質を評価する手法として、物質内を伝搬する波を解析し、2次元、3次元的に可視化するトモグラフィ調査技術がある。現在、実際の現場で使用しているトモグラフィ調査と最新の取組みについて詳述する。

橋梁点検に関する効率化技術：橋梁の点検は、技術者による近接目視が基本とされており、点検調書の作成も人力で行うため、決して作業効率が良いとは言えない。当然、橋梁点検のコスト削減を含め根本的な改善が望まれている。近年、近接目視と同等の評価・判定が可能な高性能のドローンを用いる試みがなされており、また、ウェアラブルカメラの活用によりリアルタイムで点検現場と調書の作成を行う拠点との情報共有が可能となる。ここでは、橋梁点検をより効率的にする取組みを紹介する。

設計および解析技術：現在、高度経済成長期に大量に建設された橋梁の損傷・劣化が顕在化し、各方面で補修・補強および架替等の大規模修繕が活発に行われている。プレキャストPC床版への取替え、予想以上に劣化が進行したPC桁に対する調査、診断および設計等、PC構造に関する対応が逼迫している。特筆すべきいくつかの事例を紹介する。

自己治癒材料：コンクリート構造物に生じるひび割れが問題となる場合は非常に多い。コンクリート構造物に発生したひび割れを調査・診断したうえで、さらに対策

が必要となれば維持管理コストは増大することになる。近年、コンクリート構造物に発生するひび割れを抑制することにより、維持管理費を大幅削減できる可能性を有する自己治癒材料に大きな関心が寄せられている。ここでは、弊社が取組んでいる自己治癒材料およびその適用事例について述べる。

(中略)

2. 調査技術

2.1 PC グラウト調査

近年の橋梁点検から、一般に建設時期が古いPC橋ほど経年の影響を受け、健全度が劣る傾向が示されている。また、PC橋の黎明期ではPCグラウト技術（品質管理、施工機器、グラウト材料、シースの空隙率など）が未熟であったことから、完全にPCグラウトが充填されていない可能性がある指摘されている^{3),4)}。PCグラウトの充填不足があると、凍結防止剤散布による塩害環境下などでは、PC橋上面から塩化物や水などの劣化因子がPCケーブル内に侵入し、PC鋼材の腐食を加速させ、さらに破断に至ると、PC橋の耐荷性能を著しく低下させることになる。

弊社で実施しているPCグラウト充填度調査のうち、最も多い構造形式と調査方法は、ポステンT桁橋のインパクトエコー法であり、年間250径間程度を実施している。インパクトエコー法は、入力付近における波形の周波数スペクトルのピーク位置からコンクリート内部の空洞状況を定性的に推定する方法であり、結果の判定に経験と専門性が必要となる。また、1箇所あたり2～3点程度を波形収録するため、1径間（例：4～8主桁、5ケーブル/桁、起終点2箇所）では、約150～250点になり、データ収録、解析、判定、整理に多くの労力が必要となっている。そのため、現在、弊社ではPCグラウト充填度評価のためのデータベース化と人工知能（AI）を用いた判定システム化への取組みを行っている。

2.2 トモグラフィ調査

コンクリートに限らず、材料内部の品質を評価する方法として、物質内を伝わる波の伝搬しやすさを2次元、3次元的に評価するトモグラフィ技術がある⁶⁾。コンクリート分野では、センサの配置や弾性波の入力方法等によ

(中略)



写真-1 PCケーブルに沿ったひび割れ

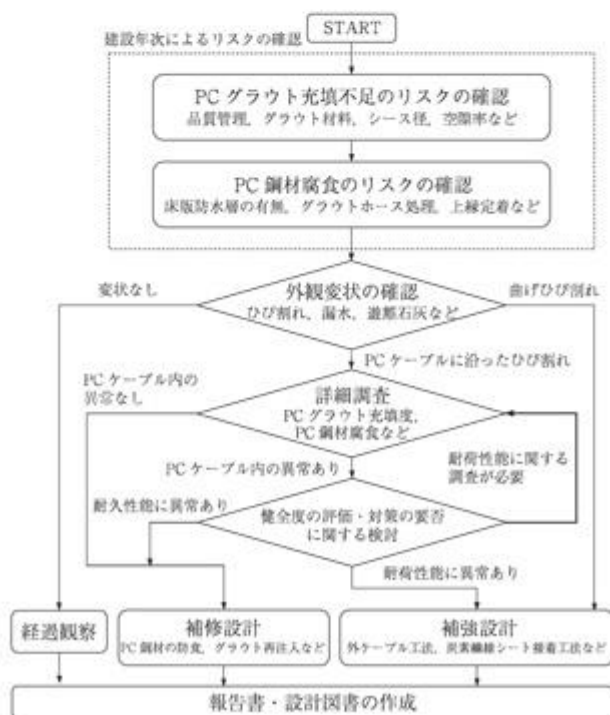


図-1 PCグラウト充填度調査と対策のフロー

て、3つに大別される。図-2に3つの分類を示す。

(中略)

(中略)

写真-2に示すコンクリートの変状は、新設橋梁において打ち込んだコンクリートの締固め不足から生じた豆板であるが、危惧されたのは変状の生じている範囲(深さ)である。目視調査では、ノギスを用いて30mm程度まで変状が生じていると推測されていた。

(中略)

表面波トモグラフィ法の結果を図-4に示す。H1300×W1200m×D100mmの範囲に対して、異なる鋼球径で取得した表面波の伝搬速度を加算平均し、3次元で示した。評価は、健全箇所での表面波の伝搬速度を基準にし、伝搬速度の低下を相対比で示している。中央下部付近で、深さ100mmの深さまで速度の低下した範囲が広がっているのが確認できる。

近年、橋梁を始めダム等の大型コンクリート構造物においても、損傷の規模や分布、過去に行った補修の効果検証を全体的にかつ、定量的に評価したいとのニーズが高まっている。定量的な評価を資することで、施設の長寿命化に伴う効果的な維持管理計画の策定に寄与できる。弾性波を利用したトモグラフィ法は、その礎となる可能性を備えている。

2.3 橋梁点検に関する効率化技術

弊社では、労働環境の改善と生産性向上を目指し、既往技術に情報通信技術を付加することで、橋梁点検に関する作業の効率化に取り組んでいる。

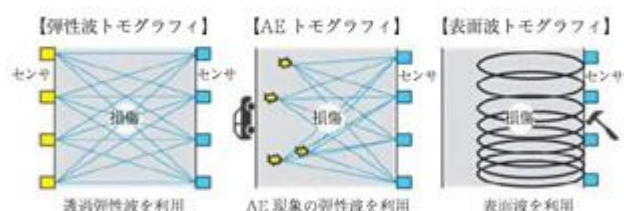


図-2 トモグラフィ手法の分類

(中略)



写真-2 変状とセンサの配置状況

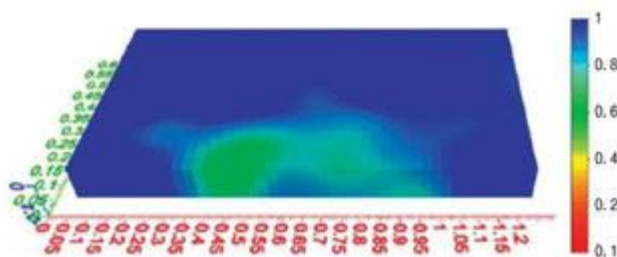


図-4 表面波トモグラフィの結果

(中略)

(1) ドローンの活用

写真-3、写真-4にドローン撮影状況と操作画面を示す。点検用ドローンは幅223mm×長さ273mmと小型で、自動障害物回避性能(構造物への接近距離)が500mmの機体を使用している。小型で障害物を自動回避する機能があるため、橋梁の狭隘な部位や部材と部材の接合付近であっても安全かつ効率的に撮影ができる。

(2) ウェアラブルカメラの活用による遠隔臨場

調査・設計計画時の現地踏査において遠隔臨場を活用している。写真-5に示すようにウェアラブルカメラを装着した社員が現地に赴き、事務所の熟練技術者や関係者とオンライン会議を実施している。

(中略)

(中略)



写真-3 ドローン撮影状況

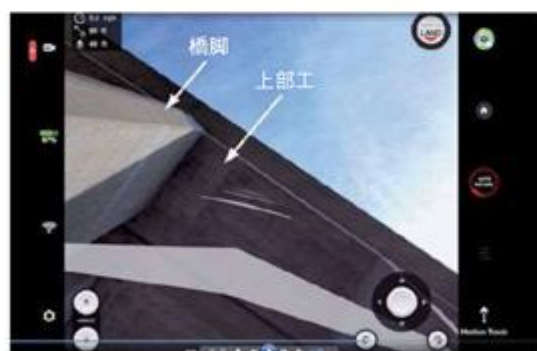


写真-4 操作画面(タブレット画面)



写真-5 ウェアラブルカメラを活用した遠隔臨場

3. 設計および解析技術

3.1 高速道路の大規模更新・大規模修繕

RC床版(鉄筋コンクリート床版)の劣化状態は、大型車両の交通量や環境条件、塩害やASR(アルカリシリカ反応)などの複合的要因によって異なっている。従って、床版取替えでは疲労耐久性が高く、環境劣化因子の侵入を抑止したPC床版への取替えが進められている。ここでは大規模更新における床版取替えと大規模修繕に関する設計の現状について紹介する。

床版取替えにおけるPC床版の設計は、幅員や荷重条件、橋軸方向の構造形式(RC構造もしくはPC構造)、床版と主桁を合成構造にするかなどの条件を決定する。次に、排水樹、スタッド、床版架設用治具、PC鋼材、鉄筋などが干渉しないか細部の取合いを確認する。さらに既設の主桁や下部工等へ影響を与えないように、床版の総重量を既存重量以下に抑えている。施工面での配慮として、PC床版や壁高欄は工場で作成するプレキャスト製品を採用し、現地での作業を極力少なくなるように工期短縮や品質の向上を図っている。

大規模修繕に関する設計は、構造物を劣化させる原因である水の侵入の抑止に配慮している。例えば、床版防水に高機能防水、鋼床版の剛性向上を目的に鋼繊維補強コンクリート舗装、主桁の耐荷力向上として外ケーブル

補強などを提案し、既設構造物の耐久性能、耐荷性能向上に関する設計を実施している。

(中略)

3.3 長期時間依存解析

張出し施工による有ヒンジラーメン橋において、ヒンジ部が下方に垂れ下がるという特徴的な変状が顕著になってきている。これらの原因として、長期のクリープたわみや乾燥収縮差が主な原因となっていることが多い。これらの解析として、コンクリート標準示方書に記載されているファイバーモデルによる垂れ下がり再現や応力状態の解析を行っている。また、ファイバーモデルより詳細に現象を把握したい場合は、図-5に示す非線形3次元FEM解析により解析を行っている。

3.4 特殊な構造形式の橋梁への対応

特殊な橋梁への対応として、桁の端部と橋台を鋼棒で接

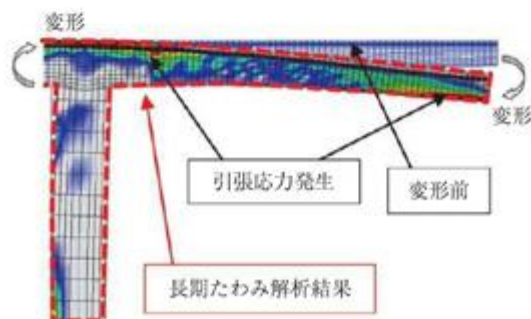


図-5 非線形3次元FEM長期たわみ解析イメージ図

続し、支間中央をヒンジとしてスパンを確保したダブルックバンド形式の橋梁についても調査や解析を行っている。本構造は、アンバランスな張出し施工であるため、張出し長が短い側の主桁を鉛直鋼棒にて下部工に縫い付けることで負反力に対抗している。これらの鉛直鋼棒の現地調査や橋梁全体の復元解析、対策の検討を行っている(図-6)。

4. 自己治癒材料

4.1 無機系自己治癒材料

弊社が取組んでいる自己治癒材料は、無機系の自己治癒材料であり、水分などが存在する環境下でコンクリートのひび割れを閉塞、あるいは、それを促進させることを期待し、適切な混和材の使用などの材料設計を行った自律治癒として定義される材料である。図-7に無機系自己材料によるひび割れ閉塞状況を示す。

4.2 無機系自己治癒製品

弊社は、東京大学生産技術研究所から発足したベンチャー企業と共同で、①自己治癒機能型 高流動無収縮グラウト(プレミックスタイプ)、②自己治癒機能型 高性能収縮低減剤、③ひび割れ自己治癒補修材の製品を開発した。なお、①は国土交通省が整備する新技術情報提供システム(NETIS)への登録を済ませている。



図-6 ダブルックバンド構造形式概念図

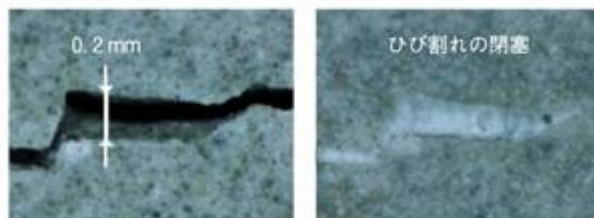


図-7 ひび割れ閉塞状況(拡大)

(中略)

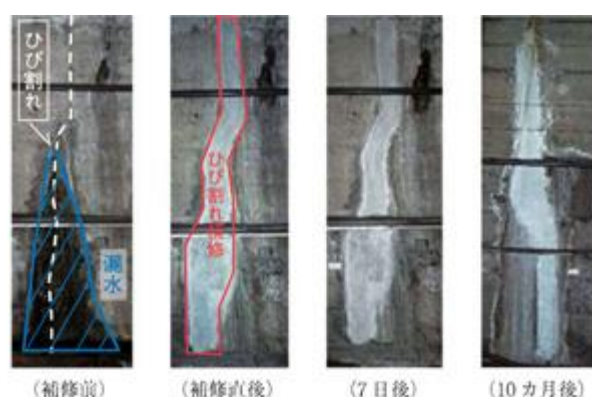


図-9 自己治癒材料によるひび割れ補修¹⁰⁾



図-10 自己治癒材料の使用事例（スノーシェッド）

表-1 無機系自己治癒材料の施工事例

製 品	①	②	③
適用事例	橋梁沓座 機械設備基礎	橋梁地覆 法面吹付	橋梁床版 地下駐車場

4.3 無機系自己治癒製品の施工事例

図-9 にひび割れ自己治癒補修材を使用したトンネル覆工コンクリートのひび割れ補修事例を示す。補修前、補修直後、補修後7日経過後および補修後10カ月経過後の状態であり、施工後10カ月が経過した状態においても、変状や漏水は確認されなかった。図-10 に、スノーシェッド補修工事における沓座モルタル打設に自己治癒機能型高流動無収縮グラウトを使用した事例を示す。また、このほかの無機系自己治癒製品の施工事例を表-1 に示す。

（中略）

5. おわりに

今後、コンクリート橋を含む社会基盤構造物の老朽化がさらに進み維持管理の重要性が増してくることは間違

いない。そのため、維持管理に掛かる費用は社会全体に重くのしかかってくる。従って、コンクリート橋を含めインフラの維持管理はさらなる省人化とコスト縮減が強く求められる。そういった観点から、維持管理分野における人工知能 AI の適用に関する研究が進められている。しかし、コンクリートの劣化診断は依然として専門家の経験と知識が必要であり、本格的な AI 時代の到来にはもう少しばかり時間が必要であろう。AI 時代にこそ人間の知恵が必要であり、その重要性が増していく。維持管理分野に AI をいかに適用し、どう動かすのかを調整するのは私たち人間が担わなければならない。

2020 年新型コロナウイルス禍により社会が大きな転換期を迎えた。今後、さらなる動乱の波にもまれることや、天災が降りかかることが予見されていることもあり、いまより厳しい状況下に置かれる可能性は否定できない。しかし、困難な状況下においてもサステナブルな社会を実現していく必要がある。創業時から掲げている弊社の使命は、コンクリート構造物に代表される社会基盤構造物に対して適切で有効な診断を行い、最適な解決策を提案することである。今後、弊社の培ってきた技術力を世の中に広め、技術開発・革新を強く推進していくことにより、社会に貢献する所存である。