

トンネルの診断支援システム構築に向けた取り組み

小泉 悠・菊地浩貴・日下 敦

1. はじめに

我が国の道路トンネルは、令和3年3月時点で約1.1万箇所存在する。建設後50年を経過したトンネルの割合は現在約23%であるが、10年後には37%へと増加し、老朽化の進行が懸念される。また、約1.1万箇所のうち、都道府県や市区町村といった地方公共団体が管理するトンネルは約0.8万箇所と約7割を占めている¹⁾。国内の人口減少に伴い、今後、特に地方公共団体で維持管理業務に従事する技術者の質・量の不足が大きな問題となると考えられ、技術面での支援が求められている。このような実態のもと、道路政策ビジョン「2040年、道路の景色が変わる」では「新技術の導入により効率化・高度化された予防保全型メンテナンスにより、道路ネットワークが持続的に機能する」ことを政策の方向性として示している。

国立研究開発法人土木研究所（以下「土研」という。）では、これらの社会的要請に対応する研究に取り組んできた。令和4年度より始動する土研の第5期中長期の研究開発プログラムにて、トンネル分野では、AI（人工知能）等も活用し、診断支援システムの構築を核としたトンネルの維持管理の高度化に関する研究に取り組んでいく。本稿ではその概要について紹介する。

2. トンネルの維持管理の現状と課題

平成25（2013）年、道路の維持・修繕に関わる道路法第42条が改正され、トンネル等は5年に1回の頻度を基本として点検を行うこと、健全性の診断結果を分類すること、点検及び診断と措置の結果を記録することが定められた。また、トンネルの定期点検を行うための具体的な方法等を示した要領として、道路トンネル定期点検要領が平成26年に策定され、平成31年に改定された。平成26年度より開始された定期点検は、現在、2巡目の後半に差し掛かっているところである。



写真-1 道路トンネルの定期点検の実施状況

点検は、近接目視を基本としつつ、必要に応じて打音検査や触診も行われ、写真-1に示すように交通規制下での高所作業等、厳しい作業条件下で行われる。今後は点検の精度向上とともに作業効率の向上が求められる。

診断は、まず、ひび割れ等の変状が外力または材質劣化のいずれに起因するものかを正しく判定することが重要と考えられる。しかしながら、ここで誤った判断がなされることで変状対策が遅れ、通行規制等に至る事例も散見される。診断精度の向上や診断技術の継承、AI等も活用した支援と省力化が求められる。

3. トンネルの維持管理の高度化に向けたこれまでの取り組み

3.1 概要

前章で示したトンネルの維持管理の課題に対応すべく、研究及び技術開発が産官学で進められている。本章では、土研での取り組みを中心にその概要を示す。いずれも次章で詳述する「診断支援システムを核としたメンテナンスサイクルの将来像」を支える研究テーマである。

3.2 設計・施工時データの維持管理への引継ぎ

土研では、各地方整備局等と連携し、トンネル工事完了時に切羽観察簿や設計・実施支保パターン、地山変位計測結果等の施工時データを収集し、分析を進めている。過年度において、筆者らは、施工時データと維持管理段階における外力性変状

等との相関を分析した²⁾。ここでは2009年より供用が開始された2車線道路トンネルを例に、分析の結果を図-1に示す。同図にて、施工時に観察記録された切羽評価点や計測変位に着目すると、坑口からの距離1,000m付近を境に地山性状が急激に軟質化していたことが分かる。これに伴い支保パターンも、当初設計のCⅡに対し、実際にはDⅠ～DⅡといったより規模の大きなものへと変更されたが、それでも1,000m以降で支保変状が多発していた状況が把握できる。そして、維持管理段階での定期点検に基づく対策区分の判定結果であるが、材質劣化に起因する変状が1,000m以前でも不規則に発生しているのに対し、外力性変状及び漏水は、上述した地質の急変後に多発していることが認められた。このような分析結果から、維持管理段階で変状等の診断を行う上で施工時のデータを活用することの重要性を示し、引き継ぐべきデータの種別を提案した。

3.3 変状原因の推定チャート

土研では、維持管理段階にある道路トンネルで発生した様々な種別の変状を分析し、模型実験や数値解析によって変状メカニズムの解明を進めてきた。それらの知見に基づき、覆工で発生するひび割れの方法と発生位置・形態から、

変状の発生原因を推定できるチャートを提示した³⁾。紙面の都合上、原図を加工し一部抜粋した

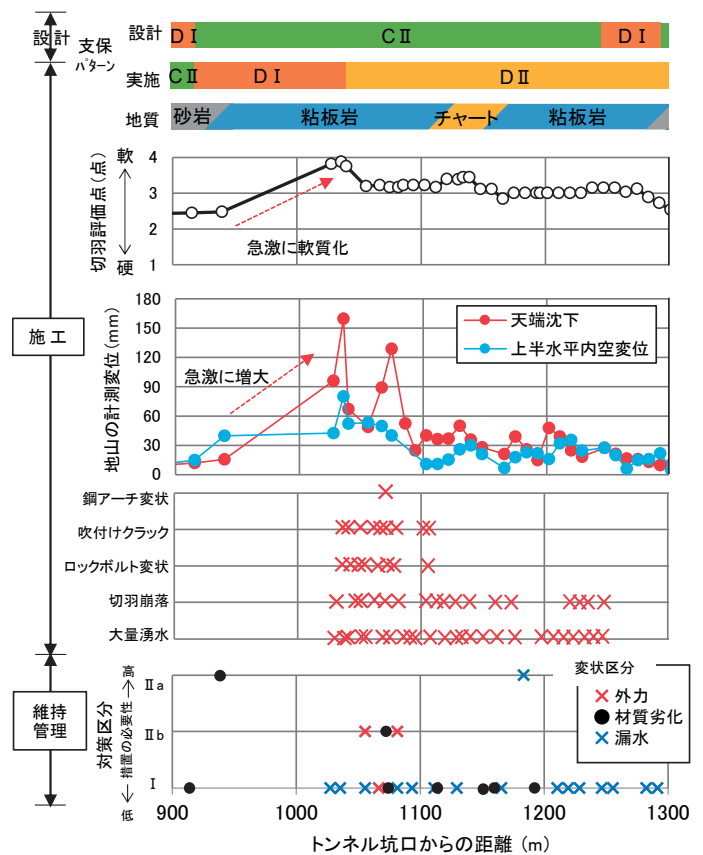


図-1 設計・施工時データと維持管理段階の変状との相関に関する分析結果の一例²⁾を加工

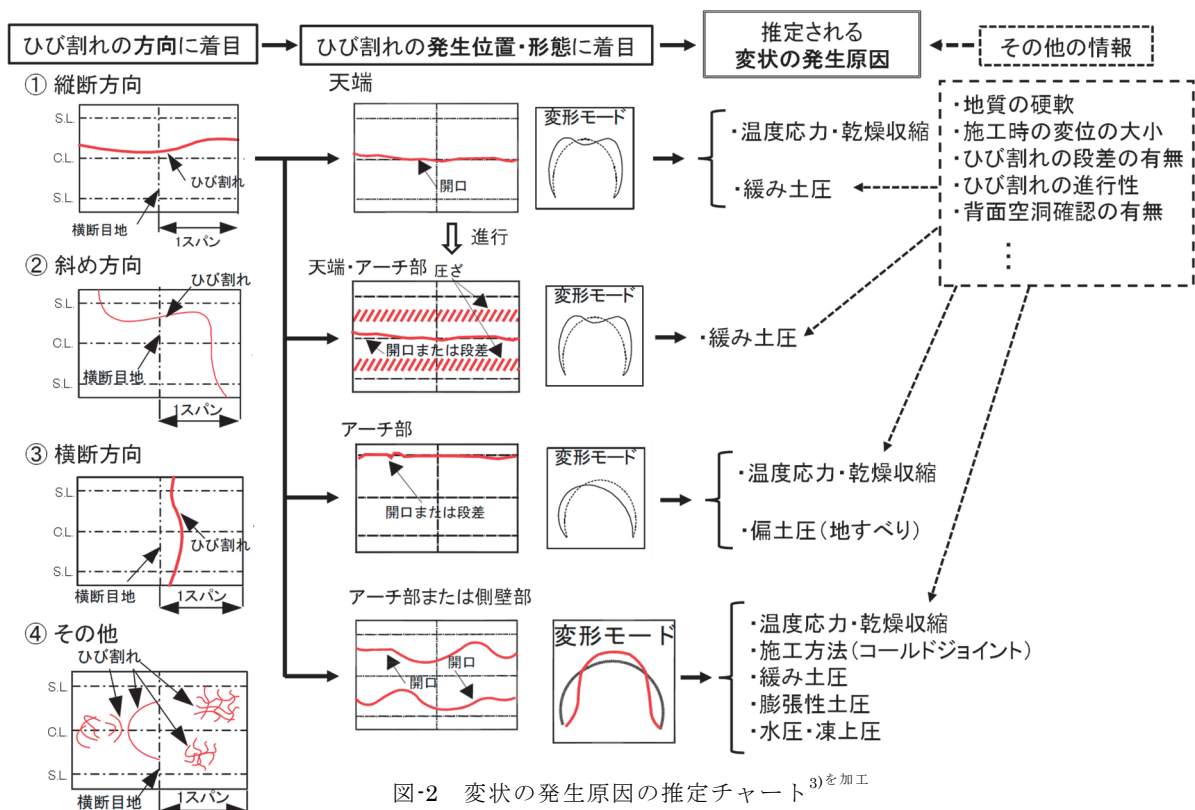


図-2 変状の発生原因の推定チャート³⁾を加工

チャートを図-2に示す。本チャートの活用手順であるが、点検により確認したひび割れに対し、はじめにその方向を判定し、次にその発生位置・形態を判定することで変状の発生原因が推定できる。ただし、これだけでは複数の変状原因の候補が列挙されることとなるため、同図中に例示されるその他の情報を加味することで、変状原因がより高い確度で推定できる。その他の情報の一部は、前節で紹介した設計・施工時データに他ならず、前節同様、設計・施工時データを維持管理段階へと引き継ぐことの重要性が示されていると言える。

3.4 点検支援技術とその検証

国土交通省では、定期点検への新技術の積極的な活用を図るため、点検に活用可能な技術について、その性能値等を取りまとめた「点検支援技術性能カタログ」を策定し、拡充を進めている⁴⁾。令和3年10月に公開されたカタログでは、トンネルに関して画像計測や非破壊検査等、計37の技術が掲載されている。

土研でも、民間会社と共同で、赤外線カメラを搭載した車両により覆工壁面の温度を迅速かつ広範囲に計測し、うきを検出する技術等の開発に取り組んできた。実際のトンネルの覆工を対象に実施した試験計測結果の一例を図-3に示す。同図は、覆工全体の可視画像及び熱画像から、横断目地部を抜粋したものである。定期点検要領⁵⁾において、同部位はひび割れ等が目地とつながりブロック化しやすかったり、型枠解体時の衝撃等や温度伸縮等に伴う応力集中でひび割れ、うき・はく離が発生することがあり、点検で特に注意すべき部位の一つとされている。図-3より、可視画像からは当該目地部のうきの有無を判断することは難しい。一方、熱画像において健全部より 0.2°C 以上低温となる範囲を抽出した結果、 0.4°C 程度低温を示す三日月状の部位が検出された。うきであると推定された当該部位は、その直後に実施された近接目視及び打音探査により、打音異常を伴ううき・はく離と確認された。

4. トンネルの診断支援システムの構築に向けた今後の方針

4.1 メンテナンスサイクルの将来像

前章で示した取組みを、今後さらに拡充し、診断を核として統合していく必要があると考えてい

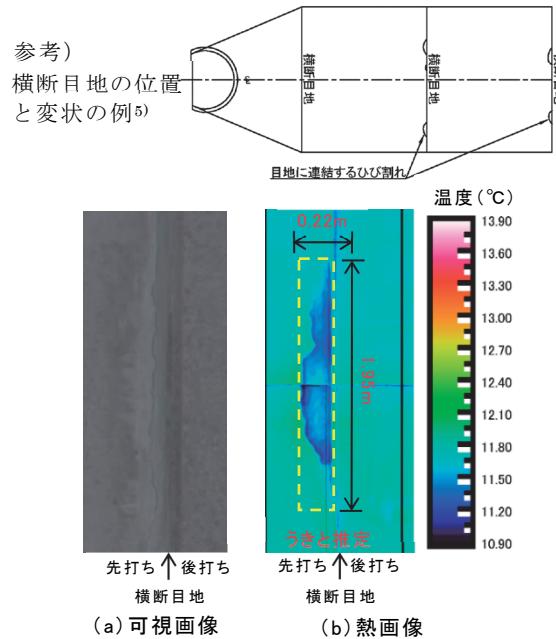


図-3 覆工のうきの検出を目的とした点検支援技術の試験施工結果の一例

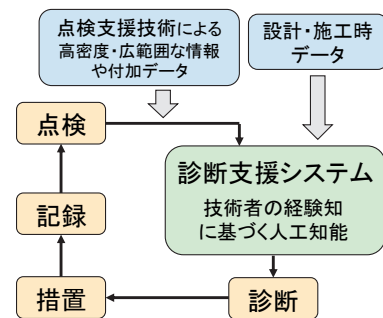


図-4 メンテナンスサイクルの将来像の一例

る。また、診断に関しては、トンネルの設計・施工・維持管理に携わってきた技術者の経験知をAIに組み込むことで、診断支援システムの開発を目指している。一般的なメンテナンスサイクルに診断支援システムを加えた、今後目標とするメンテナンスサイクルの将来像の一例を図-4に示す。前章の3.2～3.4を踏まえ、各項目について今後の取り組み方針を以降に示す。

4.2 設計・施工時データの維持管理への引継ぎ

設計・施工時データの維持管理段階への引継ぎは、現状、実務ベースで確実になされているとは言いがたい。一方、3.2及び3.3で示したように、特に施工時の切羽観察や計測等により得られる情報は、維持管理段階での変状の原因推定や、重点的な点検範囲の絞込みに有効活用できるものと考えられる。3.2で示したような分析事例を増やして継続的に発信することで、施策面に反映されるよう努める所存である。また、国土交通省の社会資

本整備審議会の道路技術小委員会⁶⁾にて、トンネル分野における維持管理に必要なデータの項目について議論が進められており、関係機関とも連携し、設計・施工時データを簡易に蓄積できるプラットフォームについても検討する予定である。さらに昨今は、施工時、切羽前方へのノンコアボーリング等により、トンネル縦断方向の穿孔エネルギーを取得する調査もよく実施される。穿孔エネルギーは地山の硬軟を連続的かつ客観的に表す指標となり得ると考えており、このようなデジタルデータの活用にも取り組んでいく所存である。

4.3 診断支援システムの構築

図-4でも示した通り、診断はメンテナンスサイクルの核と考えられる。トンネル診断に携わってきたベテラン技術者の経験知をヒアリングして、それらを組み込んだAIを開発する。そして、地方公共団体をはじめ、広範囲に活用される診断支援システムの構築を目指す。ただし、診断自体とその結果に基づく必要な措置等の最終判断は、道路管理者自身がなすべきものであり、構築するシステムの条件として、診断の過程（アルゴリズム）が明示的である必要があると考えている。そのような観点から、3.3で概説した変状原因の推定のためのチャート等を参考に、専門家の経験知をルールベースのシステムへと移植するエキスパートシステムの構築を第一案として考えている。エキスパートシステムは、医療分野等で開発と適用が進められたことのあるAIの一形態である。診断における推論の過程は多層のフローチャートとして記述され、ブラックボックスとはならない。一方、例えば、ひび割れの方が容易に区分できなかったり、知識をルール化した際、相互に矛盾が生じるといった課題にも直面し得ると考えられる。必要に応じて、昨今注目を集めている機械学習や統計学的手法も取り入れていく予定である。

4.4 点検支援技術とその活用

今後も引き続き、関係機関と連携し、民間各社が提案する多種多様な点検支援技術について適用性を検討した上で活用を進めていく。点検支援技術により、例えば覆工の変形量や背面の状態など、近接目視等の従来の点検方法では得られない付加データも取得できると期待され、これらを診断へと活用する方針である。

5. まとめ

以上、道路トンネルの維持管理に関連して、土研で進めてきた研究の概要と、令和4年度から始動する新たなプログラムにおける研究開発の方針を示した。設計・施工時データと維持管理段階における変状との相関分析や診断支援システムの構築、点検支援技術とその活用等の取組みにより、道路ネットワークの長寿命化等、我が国の道路政策ビジョンの実現に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局：道路メンテナンス年報、pp.72～73、2021
- 2) 日下敦、菊地浩貴、佐々木亨、長谷川慶彦：維持管理を考慮したトンネル構造に関する研究、令和2年度 研究開発プログラム報告書、14p、2021
- 3) 真下英人、砂金伸治、石村利明、坂本昇、笹田俊之：道路トンネルの変状に関する研究報告書 一 判定・診断の考え方と変状事例一、土木研究所資料、第4360号、2017
- 4) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ、2021
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/>
- 5) 国土交通省 道路局 国道・技術課：道路トンネル定期点検要領 平成31年3月、p.15、2019
- 6) 国土交通省：第12回道路技術小委員会 配布資料3 道路メンテナンスを支える技術について（中間報告）、p.13～18、2020

小泉 悠



土木研究所道路技術研究グループ
トンネルチーム 主任研究員
KOIZUMI Yu

菊地浩貴



土木研究所道路技術研究グループ
トンネルチーム 研究員
KIKUCHI Koki

日下 敦



土木研究所道路技術研究グループ
トンネルチーム 上席研究員
KUSAKA Atsushi