

道路トンネルの点検及び診断にかかる 新技術の活用及び選定方法について

田中 直子¹・増田 寛四郎²

¹近畿地方整備局 近畿道路メンテナンスセンター 技術課 (〒573-0094大阪府枚方市南中振 3-2-3)

²近畿地方整備局 企画部 技術調査課 (〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44) .

道路トンネル定期点検は、近接目視によることが基本であるが、点検の効率化、高度化を目的として点検支援技術の積極的採用に取り組んでいる。点検支援技術を採用する際には「新技術利用のガイドライン（案）」に基づくものであるが、「点検支援技術性能カタログ」などの技術を採用すべきか慎重に対応することが重要となる。本報告では、活用した技術の精度と判定、診断の目安を整理し選定の際の参考とすることを目的としたものである。

キーワード 道路トンネル定期点検、点検支援技術

1. はじめに

道路構造物の定期点検において新技術を活用するための指針として「新技術利用のガイドライン（案）」¹が示され、使用する技術のプロセスや留意点等がまとめられている。使用の判断をするにあたり現場条件や対象の構造等を把握し、技術の特性、および仕様を勘案することになり、近畿道路メンテナンスセンターでは「点検支援技術性能カタログ」に掲載された技術を参考に使用する技術の選定を行っており、積極的採用に取り組んでいる。

新技術は、現場作業の効率化に伴うコスト削減や機械化による作業員の安全性向上およびデジタル化に伴う品質確保等、あらゆる場面で従来方法との優位性が図られると考えられるが、使用に当たっては近接目視と同等の診断ができるかと判断する必要があり、対象構造物の置かれている環境が違う等の理由により、技術選定においては慎重な対応となっている現状がある。

当センターでは新技術の積極的採用をおこなっていることは上記に述べたが、道路トンネルにおいて使用した新技術採用のプロセス等を報告するとともに、必要となる着眼点や課題の整理方法、他施設管理者の今後の指標となる事項の報告を行うものである。

表-1 変状種類及び変状区分との関係²

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき、はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

割れやうき・はく離等の変状をスケッチと写真により記録し、対策区分を判定し、トンネルの健全性の診断を行っている。また、打音検査によりうき・はく離が確認された場合には叩き落としなどの応急措置を講じることとなる。

対策区分の判定は、表-1 に示す変状種類を変状区分に区別して実施することとなる。変状区分とは、トンネルに発生した変状種類に対する対策の考え方や変状の発生要因を意味している。例えば、ひび割れは、トンネル周辺地山からの外力による場合とコンクリートの温度膨張、収縮等による材質劣化による場合が考えられるが、専門技術者はひび割れの発生方向やパターンから変状原因を推定し、外力であれば、外力による判定の目安を用いて対策区分の判定を行うこととなる。

2. 道路トンネル定期点検の概要と課題

道路トンネル定期点検は、近接目視を基本として、必要に応じて打音検査や触診等を併用して実施するものである。近接目視、打音検査等の状態の把握により、ひび

3. 点検支援技術の概要

(1) 点検支援技術の開発と導入の背景

従来のトンネル点検手法は、交通規制を必要とし、専門技術者が徒歩や高所作業車を用いて実施した結果を点

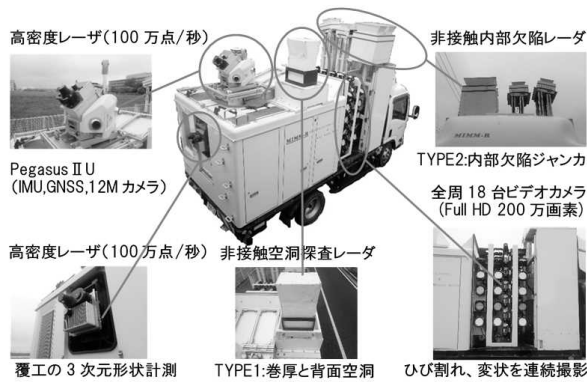


図-1 点検支援技術機器の例³⁾

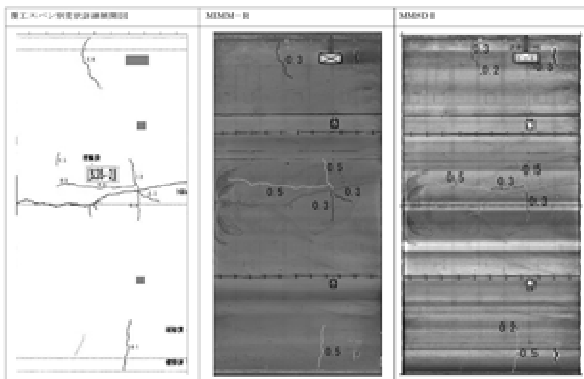


図-2 画像計測技術による出力の例⁴⁾

検表及び変状記録図に記録するというものである。個人の技量差により評価のばらつきが発生する可能性や、変状の見落とし等のヒューマンエラーの恐れも想定される。

また、交通規制はトンネル利用者に大きな負担をかけると同時に、渋滞等による交通事故の誘発も起こしかねない。この問題を解決するべく、トンネル点検の支援技術として新技術が開発され、活用されるようになった。

一方、道路トンネル点検要領は、2019年3月に改訂され、近接目視と打音検査に対する新技術導入の考え方が示された。

要領によると、所要の品質として自らの近接目視によるときと同等の対策区分ができるのであれば、その他の方法で状態を把握することが可能となった。

また、2020年6月には、国土交通省より点検支援技術性能カタログ(案)³⁾ (以下「性能カタログ」と記載)がとりまとめられ、定期点検で点検支援技術の活用を検討する場合、性能カタログに掲載された技術を参考にすることが可能となった。また、今後の技術開発の進展に応じ、性能カタログに掲載した技術は適宜見直しを行う予定となっている。性能カタログでは、画像計測技術、非破壊検査技術、計測・モニタリング技術、データ通信技術が掲載されている。以下にこれらの技術の概要を示す。

(2) 画像計測技術

画像計測技術は、車両に搭載したCCDカメラやラインセンサーカメラ等と照明設備によりトンネル覆工コンク

リート表面を撮影し、変状を客観的に捉える技術である。撮影した画像にもとづき、ひび割れや漏水等の変状をAIや画像解析技術を用いて抽出し、健全性診断の基本となる変状展開図を作成するものである。性能カタログに掲載されている技術では、0.2mm程度のひび割れが認識できる精度を有している。従来の点検で作成されていたスケッチによる変状展開図と比較して客観的な情報を得ることができ、また、変状の見落とし防止に寄与できるものと考えられる。

(3) 非破壊検査技術

非破壊検査技術は、画像計測技術では把握できないトンネル覆工内部のうき・はく離や巻厚、覆工背面空洞などの変状を高出力レーザやレーダ、音響等を用いて検知する技術である。また、非破壊検査技術にはレーザースキャナーを用いたトンネル断面形状計測の技術も含まれている。

性能カタログに掲載されている非破壊検査技術の開発目的は多様であり、打音異常を数値化し客観的に評価するものや現地における打音検査の効率化を目的として内部欠陥等の異常範囲をスクリーニングする技術などがある。

(4) 計測・モニタリング技術

計測・モニタリング技術では、主に附属物の脱落検知やレーザースキャナーによるトンネル断面形状計測技術がある。道路トンネル点検における計測・モニタリング技術は照明や内装板等の附属物の脱落や変形に着目した計測技術が掲載されている。

(5) データ収集・通信技術

データ収集・通信技術は、IPカメラやひずみ変位測定器等のデータを無線または有線でパソコンやスマートフォンに伝送する技術が掲載されている。

4. 点検支援技術による支援内容

新都市社会融合創造研究会「トンネル点検支援技術の高度化研究プロジェクト」⁴⁾において、点検支援技術のユースケースと対応技術について検討されている。

トンネル点検における点検支援技術の活用において、考えられるユースケースは、前述の表-1に示すとおり、道路トンネル定期点検要領における「変状の種類」が挙げられる。変状の種類は6ケースあり、変状の区分として、「外力」「材質劣化」「漏水」との関係で整理される。変状の種類として、①圧ざ、ひび割れ、②うき、はく離、③変形、移動、沈下、④鋼材腐食、⑤巻厚の不足または減少、背面空洞、⑥漏水等に対して、画像計測、レーザ計測、レーダ探査による点検支援の可能性と従来点検の

近接目視、打音検査の要否について検討結果を表-2に示す。

表-2 点検支援技術のユースケースと対応技術 ⁴⁾に一部修正加筆

変状の判定項目		使用する技術分類	技術分野	適用性
①圧ざ・ひび割れ (外力)	外力性判定	計測・モニタリング	レーザ計測	◎
	ひび割れ幅、長さ、進行性、ひび割れ密度	画像計測	画像計測	○
	微細ひび割れ	画像計測	画像計測	△
	遊離石灰・漏水	画像計測	画像計測	△
②うき・はく離 (材質劣化)	うき・はく離	非破壊検査 計測・モニタリング	非接触レーダ探査 レーザ計測	△ △
	ひび割れ閉合、材質劣化	画像計測	画像計測	○～△
	ジャンカ、はく離、かけ	画像計測	画像計測	△
	変色、劣化、漏水	画像計測	画像計測	△
③変形、移動、沈下	変形速度	計測・モニタリング	レーザ計測	◎
④鋼材腐食、鉄筋腐食	腐食面積	画像計測	画像計測	○
	断面欠損	非破壊検査	内部欠陥レーダ	△
⑤巻厚不足、背面空洞	覆工巻厚	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
	圧縮強度	—	—	×
	背面空洞深さ	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
⑥漏水	漏水、遊離石灰、つらら、側水	画像計測	画像計測	○
	漏水量の判定	—	—	×
	滞水、土砂流出、凍結	画像計測	画像計測	△
⑦附属物	異常の有無	画像計測	画像計測	△

※1：◎：高機能化，○：代替，△：補完，×：現状の技術では代替・補完が難しい

表-3 点検支援技術の計測精度と判定、診断の目安の関係 ⁴⁾に一部修正加筆

変状種類	要素	計測精度	対策区分の判定・健全性の診断における目安	診断時の留意事項
①圧ざ・ひび割れ	幅	【矢板工法】ひび割れ幅1.0mmを検出(状態の把握における対策区分の判定可能)	ひび割れ幅3.0mm程度(目安例/0.3mm以上 ^{※1)} ⇒ひび割れ幅1.0mm程度	左記要素含め、ひび割れ密度、進行性(③参照)なども考慮する必要がある(はく落に繋がるものにも注意が必要)。また、左記要素に追加し、ひび割れ最小分解能:0.3~0.5mm、ひび割れ幅の検出:0.5mm刻みとする。
	長さ	ひび割れの長さ及び、進行の有無	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図(維持管理便覧/付属資料)のひび割れ形態が分かるレベル	
	位置	ひび割れの位置及び、ひび割れ状況(密集、外力性の有無)	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図(維持管理便覧/付属資料)の発生位置が分かるレベル	
	色識別	変色箇所、豆板、漏水箇所等のひび割れの有無	コンクリートに入ったひび割れが確認できるレベル(断面修復箇所、豆板などの材質劣化が確認できるレベル)	
②うき・はく離	大きさ	長さが0.05m以上の規模 ^{※2)} が分かるレベル(近接目視と同等と想定)	長さが0.05m以上の規模 ^{※2)} が分かるレベル(近接目視と同等と想定)	左記要素含め、うき・はく離に繋がる外力性ひび割れ(①参照)、変形・移動・沈下(③参照)に伴ううき・はく離などにも配慮する必要がある
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
③変形・移動・沈下	位置	ひび割れの位置(目地、コールドジョイント)及び、ひび割れ状況(密集、外力性の有無)	アーチ、側壁並びに横断目地・水平打ち継ぎ目・ひび割れ合いなどの見分けができるレベル	進行時期、停滞時期も存在する可能性が高いため、複数年での監視が必要
	変形・移動・沈下量	誤差2mm程度	1mm以上/年	
④鋼材腐食	位置	覆工、路面、歩道、監視員通路、監査廊など(坑門工は不可)	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図(維持管理便覧/付属資料)の発生位置が分かるレベル	山岳トンネルにあるひび割れ防止筋なのか、RC構造なのかに留意が必要
	色識別	鋼材腐食の色判別(鋼材の断面欠損やうき錆の100%検出は困難)	コンクリートと鋼材並びに鋼材腐食が分かるレベル	
⑤巻厚不足または減少、背面空洞	大きさ	(非接触レーダ探査)巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合には空洞100cm程度が確認できるレベル	巻厚30cm以上もしくは30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上が確認できるレベル	巻厚は設計巻厚と有効巻厚が必要で、巻厚不足は巻厚のみ、突発性崩壊は巻厚と背面空洞で判定することに留意が必要
	形状	(非接触レーダ探査)巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合には空洞100cm程度が確認できるレベル	巻厚30cm以上もしくは30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上が確認できるレベル	
	位置	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど(診断にはあまり影響ないと思われる)	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど(診断にはあまり影響ないと思われる)	
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
⑥漏水等による変状	強度 ^{※3)}	(コンクリート強度試験で確認)	コンクリート設計基準強度との対比ができるレベル	利用者への影響度合いで判定し、路面に発生する滞水状態についても留意が必要
	位置	噴出、流下、滴水の検出(にじみは、壁面の汚れなどの関係で100%検出は困難)	アーチ、側壁などの見分けができるレベル	
	色識別	漏水、遊離石灰、凍害(つらら、側水)の有無	にじみ、滴水、流下、噴出などの漏水と遊離石灰、つらら、側水などが見分けられるレベル	

※1) ひび割れ幅0.3mm以上(維持管理便覧/凡例より)

※2) 現場点検作業において、うきを変状展開図に記載する大きさであり、経験値に基づく規模

※3) 強度は支援技術以外での対応

道路トンネル定期点検における多くの変状種類で、代替や補完による点検支援が可能と判断される。特に変形・移動・沈下、鋼材腐食・鉄筋腐食、巻厚不足・背面

空洞の3項目については、目視などによる点検よりもさらに高機能化が図れる技術であると判断できる。ただし、各計測技術には、適用限界や一定の性能があるため、活

用にあたってはそれらに留意して適切に使用する必要がある。

画像計測やレーザ計測を取入れることで、多くの場合、目視が不要、または確認程度の実施で十分となる。しかし、うき・はく離の評価に対して打音検査を省略することは困難であると判断される。

点検においては、これらの計測技術を活用して省力化や効率化を図ると同時に、必要により目視点検や打音検査を併用した上で、診断を行うことが望ましい。

道路トンネル定期点検要領に則って状態把握および対策区分の判定を行うことを念頭に画像計測、レーザ計測、レーダ探査により6つの変状を調査・評価するための支援の可能性について評価を行った。それぞれ可否の特徴は存在するものの、すべての変状においてその適用性が確認された。

6. 点検支援技術の選定手法

(1) 点検支援技術の精度と判定、診断の目安との関係

画像計測、レーザ計測、レーダ探査技術等を活用し、従来点検に対してどこまでの支援ができるか、これまでの検証結果を踏まえ、外力性・材質劣化の判定、定期点検要領の判定目安、健全性診断への支援方法など点検要領に対する支援内容と支援レベル（補完・代替・高機能化）を整理した。

表-3 に計測精度に対し、道路トンネル定期点検要領で診断するための必要な目安値との関係について、道路トンネル定期点検要領等を参考に整理した結果を示す。

(2) 適用するトンネル条件

支援技術の適用効果が期待されるトンネルについて整理する。支援技術を適用することにより得られる情報には、画像情報や覆工表面の三次元点群座標のほか非破壊検査技術を活用することによる覆工の内部欠陥や空洞の情報があり、その多くは従来点検では得られないものである。トンネルの劣化が経年的進行であるとするならば、前回点検時のこれら情報と新規に取得した情報を比較し、多様な着目項目について経年変化を客観的に提示できる支援技術はすべてのトンネルに適用価値があるといえる。

一方で、支援技術には省力化、コスト削減の指向もあり、非常に短いトンネルや変状が極端に少ないトンネルにおいては、支援技術を投入することが省力化に繋がらない場合も生じる。

なお、トンネル覆工の変状進行速度はトンネル周辺地質の状況や積雪寒冷地や沿岸部などの環境条件により個々のトンネルで差が生じている。経年劣化している矢板工法によるトンネルだけでなく山岳トンネル工法（NATM）によるトンネルも同様の傾向がある。さほど経年劣化していないに関わらず変状が進行しているトン

表-4 点検コストと効率化⁴⁾

トンネル 点検 延長	トンネル変状 からの適用性	点検延長に伴う省 力化	摘 要
100m未満	小規模トンネルは低土被りで変状が発生しやすく適用性は高い	支援技術による省力化は期待できない	トンネル延長に関わらず、若経年で変状が進行している場合には、支援技術活用が推奨される
100～500m未満	同上	変状が少ない場合には支援技術による省力化が期待できる	
500m～1km未満	経年変化把握のため、支援技術の適用が推奨される	変状の多少に関わらず支援技術による省力化が期待できる	
1km以上	経年変化把握のため、支援技術の適用が推奨される	変状の多少に関わらず支援技術による省力化が期待でき適用性は高い	

ネルは、外力による作用を受けているか覆工コンクリートの材質劣化の可能性があり、将来的にひび割れの進行、うき・はく離の多発に繋がることから、経年変化を客観的に把握可能な支援技術の適用が強く推奨される。

(3) 点検コストと効率化

点検コスト削減や効率化の観点では当センターの発注業務の検討の結果、点検延長1km未満よりも1km以上に適用した場合の所要日数低減効果が大きいことが確認された。全国の道路トンネルの平均延長は約500mであり、500m～1km未満での適用性についても評価を加え、表-4に取りまとめた。

7. おわりに

本報告では、道路トンネル定期点検における点検支援技術の利用についてトンネルの変状種類毎に着目し選定方法を整理するとともに、適用するトンネル条件とコストおよび効率化について整理した。点検支援技術を活用する際の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省：新技術利用のガイドライン（案），2019. 2
- 2) 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，2019. 3
- 3) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ，2021. 10
- 4) 新都市社会融合創造研究会トンネル点検支援技術の高度化に関する研究プロジェクト：トンネル点検支援技術の高度化に関する研究成果報告書，2021. 3