

トンネル内面調査の 省人化・効率化に向けた実証試験

小林 志歩

独立行政法人水資源機構 総合技術センター 水路グループ

(〒338-0812 埼玉県さいたま市桜区神田936)

水路トンネル（山岳トンネル）は、経年劣化による不具合や地震による損壊が発生すると、復旧に多大な費用と時間を要するうえ、利水に大きな影響を与えることから、長期間の断水は許容できない。このため、事前に施設状態を調査・把握し、予防保全的な対策を実施することが課題である。こうした課題を解決するため、水路トンネルのひび割れや湧水、覆工背面空洞や覆工巻厚に関する調査の省人化・効率化に繋がると期待できる方法について情報を収集・選定し、実証試験を行ったところ、トンネル内径 $2R=3.0\text{m}$ 以上の場合や覆工背面空洞の有無のみを把握する概査において、有効な方法と考えられる結果が得られた。

キーワード 水路トンネル、調査の省人化・効率化、ひび割れ・湧水調査、
覆工背面空洞・覆工巻厚調査、AIによる画像解析

1. はじめに

水路トンネル（山岳トンネル）（以下、「トンネル」という）は、その多くが水路の最上流部に位置し、日常の維持管理に手間が掛かるほか、経年劣化による不具合や地震による損壊が発生すると、復旧に多大な費用と時間を要するうえ、利水に大きな影響を与える。このため、事前に施設の状態を調査・把握し、予防保全的な対策を実施することが課題であるが、通水確保のために長期間の断水は許容できないことから、調査の省人化・効率化が必要不可欠である。

水資源機構では、これまでトンネルの構造物本体の状態を調査・把握する方法（以下、「従来方法」という）として、人的な目視調査（以下、「目視調査」という）や2次元レーザー画像撮影（以下、「2次元レーザー」という）によるひび割れ・湧水調査、接触式電磁波レーダー探査（以下、「接触式レーダー」という）による覆工背面空洞・覆工巻厚調査を実施している。

しかし、目視調査は、調査員の力量や経験量によって調査結果に差異が生じるほか、手書きでの結果整理に多大な時間と労力が必要である。また、2次元レーザーは、撮影した画像が白黒で確認しづらく、接触式レーダーは、探査機を常に測定対象物に押し当てておく必要があり、専用の人員と繊細な作業が必要である。このような難点を解消し、調査を省人化・効率化するため、トンネルに

適用可能な調査方法の情報を収集・選定し、実証試験を行った。

2. 調査方法の情報収集・選定

新技術情報提供システム（NETIS）や各種専門誌等の幅広い文献から、トンネルに適用可能であり、人力による設置・移動を前提とした調査方法の情報を収集・選定した。^{1) 2) 3) 4)}

(1) ひび割れ・湧水調査

AIによる画像解析と組み合わせることで、調査員の力量等による調査結果の差異を解消し、調査結果をデジタル化することで、調査結果の整理が容易となり、調査の省人化・効率化に繋がると期待できる調査方法として、エリアカメラ画像撮影（以下、「エリアカメラ」という）及びラインセンサカメラ画像撮影（以下、「ラインセンサ」という）を選定した。また、覆工全体を3次元でスキャンし、その結果を点群データで記録することで、トンネルのモデル化、経年変化の定量的な比較が可能となる3次元レーザースキャニング（以下、「3次元レーザー」という）を選定した。

(2) 覆工背面空洞・覆工巻厚調査

探査機の押し当てが不要で、道路トンネルにおいて、走行しながら覆工背面空洞・覆工巻厚を迅速に探査することができる調査方法として実用化されており、水路トンネルにおいても通水しながら覆工背面空洞高さや覆工巻厚を測定することで、調査の省人化・効率化に繋がると期待できる調査方法として、非接触式電磁波レーダー探査（以下、「非接触式レーダー」という）を選定した。

3. 実証試験

(1) 実証試験の目的

これまで水資源機構では採用していないトンネル調査方法（以下、「比較方法」という）であるエリアカメラ、ラインセンサ、3次元レーザー、非接触式レーダーについて、従来方法の目視調査や2次元レーザー、接触式レーダーと比較し、調査の省人化・効率化に繋がるか確認することとした。

ただし、ひび割れ・湧水調査については、今回、比較対象とする従来方法を目視調査のみとし、目視調査より精度が劣る2次元レーザーは比較対象外とした。

なお、実証試験は、現在、大規模地震対策事業を実施中の豊川用水において、事業対象施設となっている東部幹線水路の高松トンネル（標準馬蹄形、延長 760m、内径 $2R=2.3m$ 、空水可能期間 1 か月）をフィールドとし、覆工に比較的多くのひび割れが確認されていたトンネル坑口部・中央部のそれぞれで実施した。

(2) 調査項目

調査項目は、「農業水利施設の機能保全の手引き【水路トンネル】（農林水産省2016年8月）」における調査項目の「ひび割れ」，「湧水」，「覆工背面空洞の有無」，「覆工巻厚」及び「覆工背面空洞の高さ」とした。

(3) 調査方法

a) ひび割れ・湧水調査

目視調査（従来方法）は、調査員がトンネル内を歩行しながら目視で変状（ひび割れ，変形，剥離剥落等）を確認し，コンベックスやクラックスケール等を用いて変状の測定を行い，その結果を写真やスケッチで記録する調査方法である。

エリアカメラ，ラインセンサ（比較方法）は，写真-1のように，カメラ又はセンサを取り付けた台車を調査員が手押しし，覆工全体の撮影を行い，その結果を画像で記録する調査方法である。

また，3次元レーザーは，写真-2のように，3D スキャナを取り付けた三脚を概ね 10m 置きに据え替えながら覆工全体のスキャンを行い，その結果を点群データで記録する調査方法である。

b) 覆工背面空洞・覆工巻厚調査

接触式レーダー（従来方法）は，レーダー探査機を取り付けた台車を調査員が手押しし，探査機を覆工に押し当てて（接触させて），天端の覆工背面空洞の高さ，覆工巻厚の測定を行い，その結果を波形データで記録する調査方法である。

非接触式レーダー（比較方法）は，写真-3のように，レーダー探査機を取り付けた台車を調査員が手押しし，探査機と覆工との間に離隔を取り（接触させず），天端の覆工背面空洞の高さ，覆工巻厚の測定を行い，その結果を波形データで記録する調査方法である。

なお，実証試験は，探査機と覆工との間の離隔を 0.5m と 1.0m の 2 ケースで実施した。

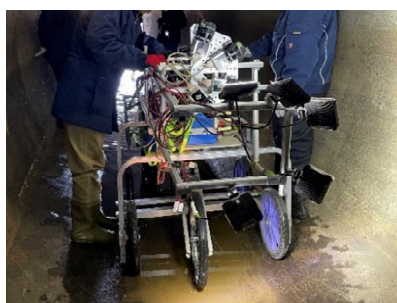


写真-1 ラインセンサを取り付けた台車



写真-2 3D スキャナ (3次元レーザー)



写真-3 非接触式レーダー探査機

(4) 調査結果

a) ひび割れ・湧水調査

ひび割れ・湧水調査の結果（一部区間の展開図及び点群モデル図）は図-1、図-2のとおりである。

目視調査（従来方法）では、試験区間全体で、最小幅0.1mm（水密性に影響を及ぼす幅0.15mmのひび割れを含む計測目標最小値）以上のひび割れを44本確認するとともに、トンネル内への湧水箇所（滲み程度）を21箇所確認した。

エリアカメラ、ラインセンサ（比較方法）では、双方とも試験区間全体で、AIによる画像解析により、ひび割れ数、湧水箇所数について、目視調査（従来方法）の約95%（平均）の検出率で確認できた。

また、3次元レーザー（比較方法）では、試験区間全体で、幅1.0mm以上の比較的大きなひび割れは確認できたが、目視調査（従来方法）で確認できた幅0.1mm以上1.0mm未満のひび割れ、湧水箇所は確認できなかった。

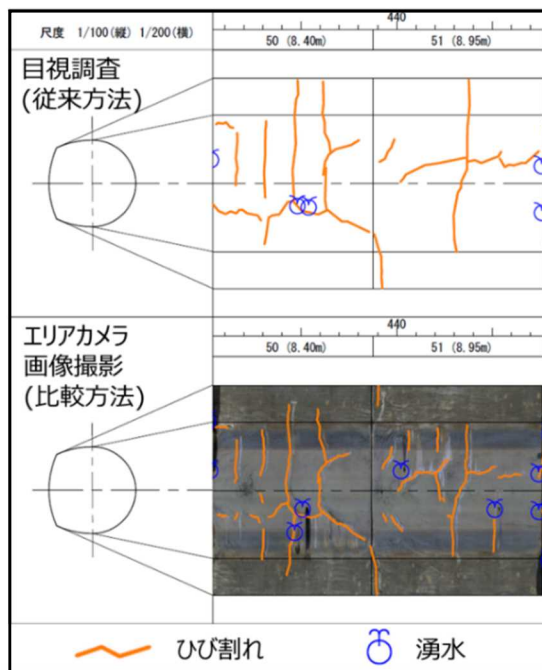


図-1 ひび割れ・湧水調査の結果（展開図）



図-2 ひび割れ・湧水調査の結果（点群モデル図）

b) 覆工背面空洞・覆工巻厚調査

覆工背面空洞・覆工巻厚調査の結果（一部区間の縦断面図）は図-3のとおりである。

接触式レーダー（従来方法）では、無筋区間で最高空洞高さ47cm、最大覆工巻厚53cm、最小覆工巻厚19cmであった。

非接触式レーダー（比較方法）では、覆工との間の離隔0.5mのケースにおいて、背面空洞の高さは測定できなかったが、縦断方向に2m以上連続する空洞の有無（位置）は確認できた。また、覆工巻厚については、接触式レーダー（従来方法）と同位置で最大覆工巻厚52cm、最小覆工巻厚23cmであり、接触式レーダー（従来方法）と約90%（平均）の一致率で測定できた。なお、覆工との間の離隔1.0mのケースでは、空洞の有無（位置）すら確認できなかった。

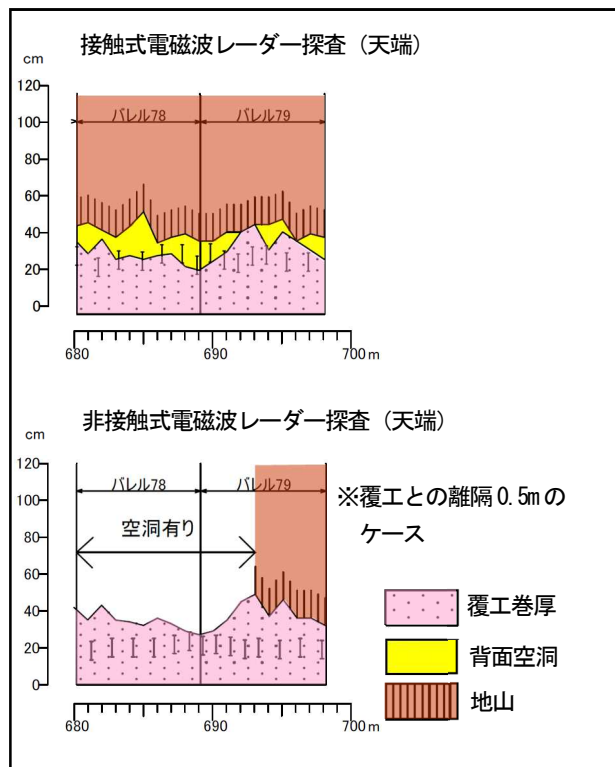


図-3 覆工背面空洞・覆工巻厚調査の結果（縦断面図）

(5) 調査費用

a) ひび割れ・湧水調査

調査に要した人数等を元に、目視調査（従来方法）の調査費用を 1.0 とした場合の調査費用の比率を整理（豊川用水の標準的な内径 2R=2.3m, 延長 1,000m のトンネルに換算）した結果は表-1 のとおりである。

太枠のエリアカメラ、ラインセンサ、3 次元レーザー（比較方法）は、目視調査（従来方法）に比べて現地調査人数は少ないものの、機械経費・技術料が高額なうえ、画像処理等に多くの人数が必要となることから、調査費用の比率が大きくなることが判った。ただし、現地調査については、目視調査（従来方法）に比べて大幅に省人化できることから、断水期間の短縮が可能となる。

b) 覆工背面空洞・覆工巻厚調査

調査に要した人数等を元に、接触式レーダー（従来方法）の調査費用を 1.0 とした場合の調査費用の比率を整理（豊川用水の標準的な内径 2R=2.3m, 延長 1,000m のトンネルに換算）した結果は表-2 のとおりである。

太枠の非接触式レーダー（比較方法）は、接触式レーダー（従来方法）に比べて現地調査人数は少ないものの、画像判読等に多くの人数が必要となることから、調査費用の比率が大きくなることが判った。ただし、現地調査については、接触式レーダー（従来方法）に比べて省人化できることから、断水期間の短縮が可能となる。

4. まとめ

(1) 適用性

実証試験を行ったエリアカメラ、非接触式レーダー等（比較方法）の適用性は表-3、表-4 のとおりである。

表-1 ひび割れ・湧水調査の調査費用の比率

調査方法	現地調査 (人)	機械経費 (円)	技術料 (円)	画像 処理等 (人)	調査費用 の比率
目視調査	13.3	38,000	—	9.0	1.0
エリアカメラ	1.0	55,000	650,000	15.0	1.4
ラインセンサ	1.0	132,000	650,000	15.0	1.5
3次元レーザー	1.7	703,000	1,400,000	20.0	3.3

表-2 覆工背面空洞・覆工巻厚調査の調査費用の比率

調査方法	現地調査 (人)	機械経費 (円)	技術料 (円)	画像判読等 (人)	調査費用 の比率
接触式 レーダー	2.0	88,000	-	10.0	1.0
非接触式 レーダー	1.5	89,000	-	22.0	2.1

エリアカメラ、ラインセンサ（比較方法）は、実証試験で「ひび割れ」，「湧水」を目視調査（従来方法）の約 95%の検出率で確認できたが、2 次元画像のため、「変形」，「剥離剥落」等は理論上確認できない。

3 次元レーザー（比較方法）は、実証試験では「ひび割れ」，「湧水」を確認できなかったが、変状を点群データ（3 次元）で記録できるため、理論上、「変形」，「剥離剥落」等は確認できる。

このため、これらの比較方法を目視調査（従来方法）に代わる調査方法として、単独で適用することは現実的ではない。しかしながら、これらの比較方法を適切に組み合わせることで、目視調査（従来方法）に代わる調査方法として適用が可能と考えられる。

また、非接触式レーダー（比較方法）（覆工との離隔 0.5m）は、実証試験で「覆工背面空洞の有無」，「覆工巻厚」を接触式レーダー（従来方法）と約 90%の一致率で測定できたが、「覆工背面空洞の高さ」は測定できなかった。

このため、接触式レーダー（従来方法）に代わる調査方法として適用することは現実的ではない。しかしながら、非接触式レーダー（比較方法）は、探査機をボート等に搭載して覆工との間の離隔 0.5m 以下を維持できれば、通水しながらの調査が可能となることから、覆工背面空洞の有無のみを把握する概査や長期間の断水が許容できない（トンネルを空水にできない）場合に、接触式レーダー（従来方法）に代わる調査方法として適用が可能と考えられる。

表-3 エリアカメラ等の適用性

調査項目	ひび 割れ	湧水	変形	剥離 剥落	鉄筋 露出	不同 沈下
目視調査	○	○	○	○	○	○
エリアカメラ	○	○	×	×	○	×
ラインセンサ	○	○	×	×	○	×
3次元レーザー	×※	×	○	○	○	○

太枠：実証試験項目，○：適用可，×：適用不可

※水密性に影響を及ぼす幅0.15mmのひび割れは測定不可（測定可は幅1.0mm以上）

表-4 非接触式レーダー（覆工との離隔0.5m）の適用性

調査項目	覆工背面空洞 の有無	覆工背面空洞 の高さ	覆工巻厚
接触式レーダー	○	○	○
非接触式レーダー	○	×	○

太枠：実証試験項目，○：適用可，×：適用不可

(2) 有効性

実証試験のフィールドとした豊川用水の高松トンネルよりも内径が大きい場合やひび割れ密度が多い場合には、目視調査（従来方法）では足場等が必要となるほか、クラックスケール等での測定、スケッチの時間が増大することとなる。

実証試験を踏まえて分析した結果、内径 $2R=3.0\text{m}$ 以上又はひび割れ密度 0.4m/m^2 以上になると、目視調査（従来方法）の人数が激増するのに対し、エリアカメラ、ラインセンサ（比較方法）の人数は殆ど変わらず、調査費用の比率が目視調査（従来方法）よりも小さくなる（逆転する）ことから、調査の省人化・効率化に繋がる有効な方法と考えられる。

(3) 将来性

人口減少や技術者の高齢化、人材不足や働き方改革等の社会的条件の変化を踏まえると、調査の生産性向上、調査方法の多様化が必要不可欠である。

AI 技術は日々進歩するとともに、汎用化も進んでいることから、今後、機械経費や技術料の低下、画像処理等の手間の軽減、AI による画像解析の教師データの蓄積が進めば、調査の省人化・効率化の可能性が益々高まるものと期待できる。

このため、水資源機構総合技術センターでは、全国に約 $1,000\text{km}$ の幹線水路を建設・管理している豊富な実績と実証フィールドを有する水資源機構の強みを活かし、最新技術の動向に注視しつつ、民間企業との共同研究等も視野に、引き続き、トンネル調査方法の開発・深化に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション 2023 年 6 月号
- 2) NETIS (KT-170093-A)
- 3) NETIS (KT-190037-VR)
- 4) 点検支援技術性能カタログ（橋梁・トンネル）2024 年 4 月 (TN020006-V0524)