

トンネル内面調査の省人化・効率化に向けた 実証試験

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	小林 志歩
人事部人財育成・採用戦略課課長補佐	上島菜美子
総合技術センター水路グループ長	井出 昌之
吉野川上流総合管理所副所長	鵜沢 勝英
豊川用水総合管理所調査設計課リーダー	秋元 大志

概要：

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被害等が発生した場合、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ため、長期間の断水は許容できないことから、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。そのため、水路トンネルにおけるひび割れ、覆工背面空洞・覆工巻厚に係る調査の省人化・効率化が期待できる調査方法の情報収集・選定を行い、豊川用水の高松トンネルをフィールドとして、実証試験を行った。

結果として、エリアカメラ画像等をAIで解析することにより、目視調査（従来方法）の約95%の精度でひび割れ等を確認できた。また、非接触式電磁波レーダー探査により、接触式電磁波レーダー探査（従来方法）の約90%の精度で覆工巻厚を測定できた。なお、調査費用は従来方法に比べ高くなるが、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の場合は、従来方法に代わる調査方法として適用可能であり、調査の省人化・効率化に繋がる有効な方法と考えられる。

更に、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、将来、調査の省人化・効率化の可能性が益々高まるものと期待される。

キーワード：水路トンネル、調査の省人化・効率化、ひび割れ調査、覆工背面空洞調査、AI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、大半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被害等が発生した場合には、復旧に多大な費用と時間を要するとともに利水に大きな影響を与える。このた

め、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必要となっているが、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、事前の調査にあたっての省人化・効率化が課題となっている。

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調査・覆工巻厚測定を実施している。

しかし、目視調査は、調査員の力量や経験量により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になる。また、2次元レーザーは、撮影した画像が白黒のため確認しづらく、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るため、専用の人員と繊細な作業が必要になる。これらの解消、調査の省人化・効率化に向けて、トンネルに適用可能な調査方法を情報収集・選定し、実証試験を行った。

2. 調査方法の情報収集・選定

NETIS並びに専門誌等の幅広い文献から、トンネルに適用可能な、人力での設置・移動が前提の調査方法を情報収集・選定した。^{1),2),3),4)}

2.1 ひび割れ調査の方法

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が解消でき、調査結果をデジタル化することで、調査の省人化・効率化が期待できる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、3次元の点群データを取得することで、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。

2.2 覆工背面空洞調査・覆工巻厚測定の方法

探査機の押し当て作業が不要で、調査の省人化・効率化が期待できるとともに、道路トンネルにおいて、走行しながら覆工背面空洞及び覆

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、通水状態の水路トンネル調査への活用や覆工背面空洞高さの測定への活用も期待できる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

3.1 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)として、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、従来方法である目視調査や2次元レーザー、接触式レーダーと比較し、調査の省人化・効率化が可能か確認することとした。

ただし、ひび割れ調査については、比較の対象とする従来方法を目視調査とし、目視調査より精度が劣る2次元レーザーは今回の比較対象外とした。

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高松トンネルをフィールドとし、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。

【高松トンネル】

トンネル延長：760m

内径：標準馬蹄形(2R=2.3m)

空水(調査)可能期間：1か月

3.2 ひび割れ調査

3.2.1 調査項目

「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 平成28年8月)」における調査項目の「ひび割れ」、「湧水」とした。

3.2.2 調査方法

(1) 目視調査(従来方法)

調査員がトンネル内を歩行しながら目視で変

状を確認し、コンベックスやクラックスケール等で変状の測定を行い、その結果を写真やスケッチで記録する。

(2) エリアカメラ、ラインセンサ (比較方法)

写真-1のように、エリアカメラ又はライン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。

(3) 3次元レーザー (比較方法)

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ニングを行い、その結果を点群データで記録する。



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)

3.2.3 調査結果

調査結果 (一部区間) の展開図及び点群モデル図を図-1、2に示す。

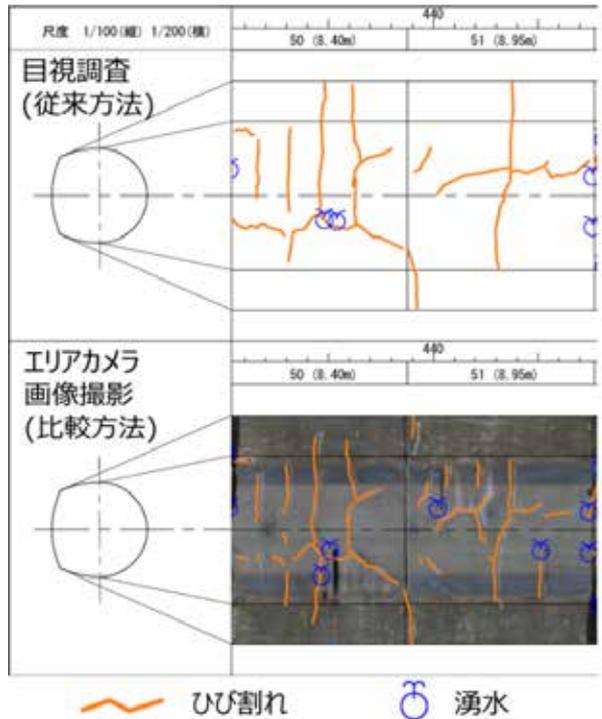


図-1 調査結果の展開図



図-2 調査結果の点群モデル図

(1) 目視調査 (従来方法)

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。

(2) エリアカメラ、ラインセンサ (比較方法)

エリアカメラ、ラインセンサ (比較方法) 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) の精度で確認できた。

(3) 3次元レーザー (比較方法)

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。

3.2.4 調査費用

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した結果を表-1に示す。

表-1 ひび割れ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

※豊川用水の標準的なトンネル (内空2.3m、延長1,000m) に換算して整理

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、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。

3.3 覆工背面空洞調査・覆工巻厚測定

3.3.1 調査項目

「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 平成28年8月)」における「覆工背面空洞の有無」、「覆工巻厚」並びに「覆工背面空洞の高さ」とした。

3.3.2 調査方法

(1) 接触式レーザー (従来方法)

レーザ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、覆工巻厚を測定し、その結果をデータで記録する。

(2) 非接触式レーザー (比較方法)

写真-3のように、レーザー探査機を取り付けた台車を調査員が手押しし、探査機と覆工を離隔させ (接触させず)、天端の覆工背面空洞の高さ、覆工巻厚を測定し、その結果をデータで記録する。なお、実証試験は、探査機と覆工の離隔を0.5mと1.0mの2ケースで実施した。



写真-3 非接触式レーザー探査機

3.3.3 調査結果

調査結果（一部区間）の縦断面図を図-3に示す。

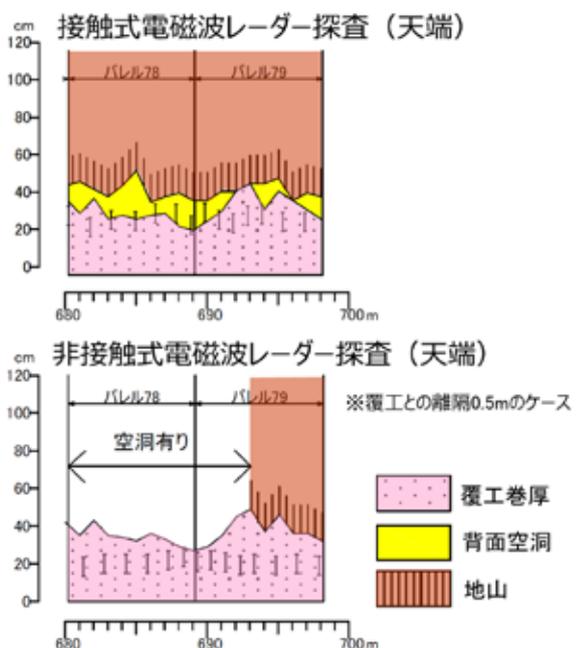


図-3 覆工背面空洞調査・覆工巻厚測定結果の縦断面図

(1) 接触式レーダー（従来方法）

測定結果は、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。

(2) 非接触式レーダー（比較方法）

覆工との離隔 0.5m のケースでは、覆工背面空洞調査において、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。覆工巻厚測定では、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）の約 90%（平均）の精度で測定できた。なお、覆工との離隔 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。

3.3.4 調査費用

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した結果を表-2に示す。

表-2 覆工背面空洞調査・覆工巻厚測定の調査費用の比率

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

※豊川用水の標準的なトンネル（内空 2.3m、延長 1,000m）に換算して整理

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、現地調査人数は少ないものの、画像判読等に多く的人数が必要となるため、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

4.1 適用性

実証試験したエリアカメラ、非接触式レーダー等（比較方法）の適用性を表-3、4に示す。

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）

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% の精度で確認できたが、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。

また、3次元レーザー（比較方法）は、3次元点群データを取得（3次元形状で把握）できるため、理論上、「変形」、「剥離剥落」等は確認できるが、実証試験で「ひび割れ」、「湧水」

を確認できなかった。

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できない。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することが可能と考えられる。

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

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）の約 90%の精度で確認できたが、「覆工背面空洞の高さ」は確認できなかった。

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できない。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、覆工との離隔 0.5m 以下を維持できれば、通水状態でも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。

4.2 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。

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^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）ではほとんど変わらず、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・効率化に繋がる方法として有効と考えられる。

4.3 将来性

人口減少や技術者の高齢化、人材不足及び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、調査方法の多様化は必要不可欠である。

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される。

このため、総合技術センターでは、全国に約 1,000km 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・深化を進めていく所存である。

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）令和 6 年 4 月 (TN020006 - V0524)