

ドローンレーダによるトンネル覆工背面空洞調査の試行

東日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○岡澤 亮太
東日本旅客鉄道株式会社 櫻井 勇也
株式会社ウォールナット 沖安 芳幸

1. 目的

トンネル覆工背面に空洞が生じると、偏圧等により覆工コンクリートにひび割れ・変形等の変状が発生するほか、地表部に陥没が発生する恐れがある。
本稿では、トンネル覆工背面の空洞箇所把握のための非破壊検査として、遠隔操作型地中レーダ（以下ドローンレーダと呼ぶ）による検査方法の検証結果について報告する。

2. 現状と課題

JR 信濃川発電所では現在、水路トンネルの覆工背面の空洞調査として、図-1 のような検査車両を用いた電磁波法（地中レーダ）による検査を実施している。現在の調査方法では次の課題がある。

- 1) 検査車両の搬入のための重機使用や検査用機器の組立設置等の検査作業以外のコストが大きい。
- 2) 高所作業による墜落等のリスクがある。
- 3) 検査人数が 4 人程度必要であるが、検査員以外の作業員が含まれており削減の余地がある。

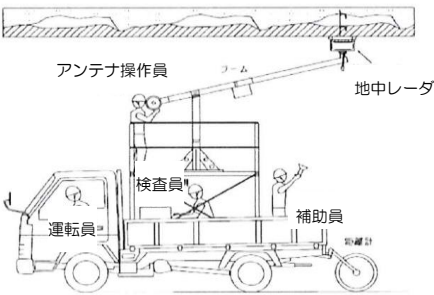


図-1 検査車両による調査方法

これらの課題に対し、作業の安定性の確保、効率化によるコストダウンを目的として、ドローンレーダ（図-2）による検査方法の検証を行うことにした。

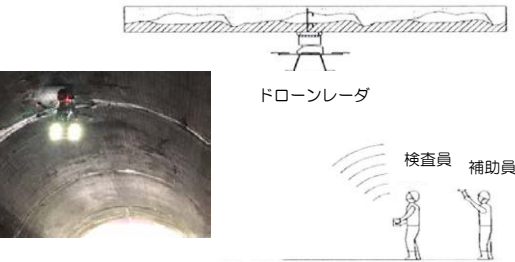
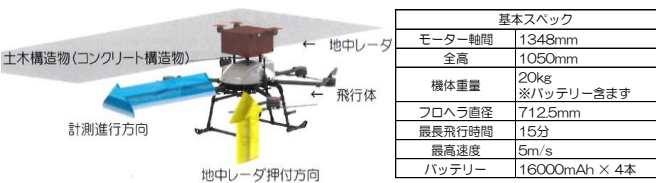


図-2 ドローンレーダによる調査方法

3. 検査方法・原理

図-2, 3 にドローンレーダによる検査イメージを示す。遠隔操作でドローンレーダのローラー部をトンネル天端に押し当て、時速 2km/h 程度で走行させながらアンテナ部から電磁波パルスを放射し反射波のデータを取得していく。



基本スペック	
モーター軸間	1348mm
全高	1050mm
機体重量	20kg ※バッテリー含まず
フロヘラ直径	712.5mm
最長飛行時間	15分
最高速度	5m/s
バッテリー	16000mAh × 4本

図-3 ドローンレーダによる検査イメージ

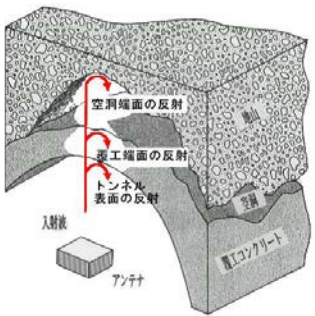


図-4 地中レーダやドローンレーダの空洞確認の原理

トンネル覆工背面に空洞が存在する場合、図-4 に示すように物性の異なる 3 つの層となり、電磁波パルスは各層境界で反射しアンテナ部にて受信される。反射波データの解析は、反射波の強度と極性を基礎に実施する。それらは物質の比誘電率によって決まり、次式を用いて計算される。

$$\rho = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

ρ : 反射係数（強度と極性情報を含む）
 ϵ_1 : 第 1 層目の比誘電率
 ϵ_2 : 第 2 層目の比誘電率

空洞や覆工の厚みについては、解析した反射波データを次式により較正して算出した。

$$\tau \text{ (mm)} = \frac{C L}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (mm)}$$

C : 計測器によって決まる定数
 L : 記録上の長さ (dot)
 ϵ_r : 物質の比誘電率
 τ : 実際の厚み (mm)

4. 対象トンネル

対象とした水路トンネルは径間高さ7.0mの馬蹄形断面のトンネル(図-5)であり、主な諸元を表-1に示す。矢板工法による施工であるため覆工背面に空洞が生じやすく、これまでも裏込注入等の対策を実施してきた。

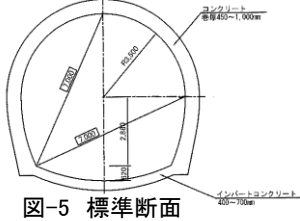


表-1 トンネル諸元

断面形状	標準馬蹄形
建設年	1969(昭和44)年
施工方法	矢板工法
トンネル延長	15k547m
径間高さ	7.0m

5. 従来方法との比較

(1) 作業効率・安全性の比較

表-2に、7kmの検査を行った際の比較表を示す。検査人数は従来と比較し半分に抑えることができた。また、作業日数も1日程度削減できた。これは、従来方法であれば車両搬入に伴うクレーン作業が必要であり、かつ検査架台の組立に時間を要していたのに対し、ドローンレーダは軽量のため人力による搬入が可能となり、機器の組立も短時間で完了できたためである。検査人数・日数を削減できたため、コストを7割程度に抑えることができた。安全性についても、クレーン作業や高所作業が無くなり墜落・挟まれといったリスクを抑えることができた。

表-2 従来方法とドローンレーダの比較

	従来方法	ドローンレーダ
検査人数	4名/日	2名/日
準備・撤去作業日数	2日/業務	1日/業務
検査日数	2日/7km	2日/7km
検査コスト比率 (従来方法を1とし、解析費用は除く)	1	0.7
安全に関する 主なリスク	・墜落(高所作業) ・挟まれ(狭所作業)	・歩行中の転倒

(2) 検査データの比較

1997(平成9)年の調査結果と今回2020(令和2)年の調査結果を比較した。図-6は、裏込注入未実施の区間における比較図である。両者を比較すると、同じような箇所でも空洞やモルタルの存在が確認できた。なお、両者で位置や厚さに若干の差異がある。これは、1997年時には、天端に設置されているグラウトパイプを避けるために、検査を天端より若干ずれた位置で行っているのに対し、ドローンレーダでは、地中レーダの性能が向上したため、グラウトパイプ等の障害物上を検査することが可能となり、測線位置がずれたことによるものと推定している。

図-7は1997年以降に裏込注入による対策を実施した区間における比較図である。裏込注入により空洞が充填された状況を確認することができた。

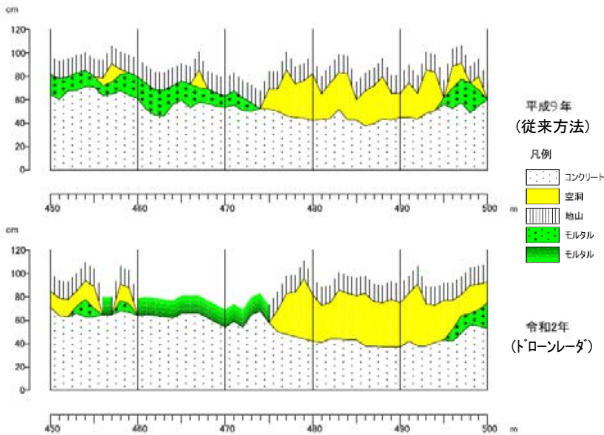


図-6 裏込注入未実施区間の調査結果比較

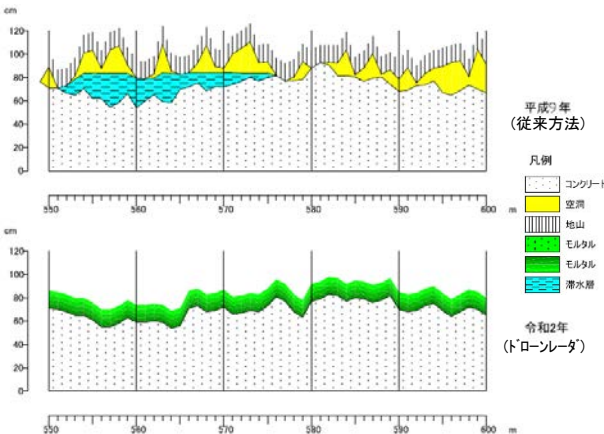


図-7 裏込注入対策済み区間の調査結果比較

6. まとめと今後の課題

トンネル覆工の空洞箇所把握のためドローンレーダを用いた検査方法を検証した結果、検査によって得られたデータからは、従来方法と同程度にトンネル覆工背面の状態を調査できることを確認した。また、従来方法よりも検査人数・日数を削減することができ、作業の安全性も向上させることができた。今後行っていく空洞調査や裏込注入の効果確認、地表部で変状が発生した場合の臨時調査等に活用していきたい。

今後の課題として以下の3点が挙げられる。改良等を検討し課題解決を図り、活用していきたいと考えている。

- ・アーチ部左右側線の検査方法を確立(現状では機材が壁面に干渉するため天端付近の測線のみ検査)
- ・ドローン飛行時間の延長(現状では0.5h程度でバッテリーを交換する必要があるため、機材の軽量化、大容量バッテリーの採用を検討)
- ・検査データ解析作業の更なる効率化(IoTによるデータ共有化、AIによるデータ自動解析を検討)

参考文献

- ・鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル, 2007.