

トンネルの覆工及び背面空洞調査における新技術活用の検証

中央復建コンサルタンツ(株) ○竹越祥継
中央復建コンサルタンツ(株) 栗山廣志
中央復建コンサルタンツ(株) 橋直毅
(NPO法人)トンネル工学研究会 朝倉俊弘
原子燃料工業(株) 磯部仁博

論文要旨

山岳トンネルは覆工巻厚の不足や背面空洞が形成されやすく、維持管理上の課題となっている。覆工巻厚の状態等を把握する方法の一つに、電磁波レーダ探査があるが、炭素繊維シート等で補修されている場合、電磁波が遮断されるため調査が困難である。そこで、デジタル打音検査(新技術)を用いることで調査が可能であるか、有効性を検証した。検証の結果、覆工巻厚の状態等の調査方法として有効な技術であることが確認できたことに加え、覆工コア試験との併用により弾性波速度を推定できたことから、巻厚が不足していた覆工と充填材の圧縮強度を推定できると考えられる。

キーワード：点検支援技術、非破壊検査、覆工背面調査、デジタル打音検査、コンクリート構造物診断

まえがき

山岳トンネルは、覆工巻厚の不足や背面空洞が形成されやすく、維持管理上の課題となっている。覆工巻厚の状態や背面空洞の有無を把握する方法の一つに、電磁波レーダ探査による非破壊検査がある。しかし、電磁波レーダ探査については、RC覆工区間や炭素繊維シートによる当て板工等が設置されている場合、電磁波が遮断されるため覆工巻厚や背面空洞等の確認が困難である。

上記のような既存のトンネルに対し、非破壊で調査する機会を得たため、「デジタル打音検査とデジタル目視点検の統合システム(背面空洞) / 点検支援技術性能カタログ(橋梁・トンネル) 令和4年9月」を用いた結果について報告する。

1. 対象トンネルの概要

調査対象トンネルは、建設後30年以上が経過したNATMにより施工されたトンネルで、延長は約80mである。トンネルの特徴を以下に示す。

- (1) 過去の定期点検において、坑口付近の覆工天端部に5mm幅の開口したひび割れが確認され、外力の作用が想定されたため、削孔調査等の詳細調査及び補強工事が実施されている。

- (2) 詳細調査では、覆工巻厚の不足及び背面空洞が確認され、空洞充填が施工されている。また、外力の作用を想定し、アラミド繊維シートによる覆工補強及び覆工の耐荷力向上として鋼製支保工による補強セントルが設置されている。

- (3) 補強工事後、10年程度が経過し、鋼製支保工の腐食が見られる。

上記のような、空洞充填や補強セントル等が施されたトンネルの覆工に対して、デジタル打音検査を試行し、覆工巻厚や背面空洞の状態を確認できるか、有効性を検証した。

2. 調査方法

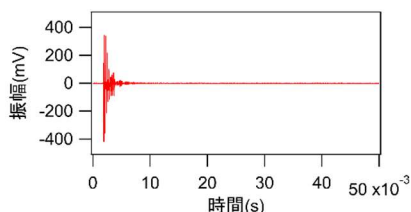
(1) 技術概要

デジタル打音検査は測定対象の振動特性に基づき、経年劣化等の構造物の状態を評価する。具体的には、写真1に示すようにハンマー打撃により発生した振動をAEセンサで捉え、得られた振動波形(図1(a))を高速フーリエ変換し、周波数分布(図1(b))を分析することで背面空洞の有無や覆工状態を評価する。

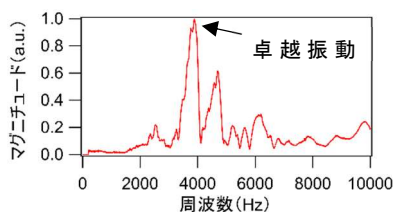


(a) 使用機器 (b) 打音検査状況

写真-1 デジタル打音検査機器や打音検査状況



(a) 覆工の振動波形グラフ



(b) 振動の周波数特性グラフ

図-1 ハンマー打撃による覆工の振動特性

デジタル打音検査から得られる卓越振動数 f (Hz)とコンクリートの弾性波速度 V (m/s)から、式(1)を用いて、覆工巻厚 D (m)を推定する。

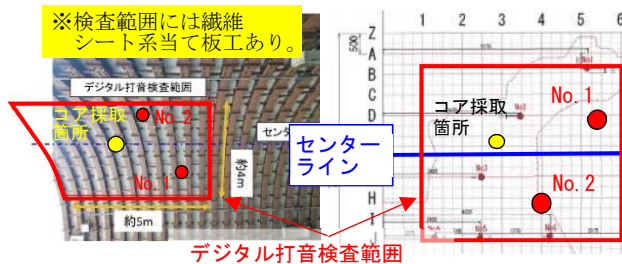
$$f = \frac{V}{2D} \cdots (1)$$

ここに、 f : 卓越振動数(Hz)、 V : 弾性波速度(m/s)、 D : 覆工巻厚(m) である。

(2) 調査手法

過去に覆工背面に空洞が確認され、空洞充填された範囲のうち、約 $5\text{m} \times 4\text{m}$ の範囲を対象として、横断方向 100mm ピッチとし、縦断方向は補強セントルの配置を考慮し、 500mm ピッチの間隔でデジタル打音検査による調査を行った(図2)。また、覆工コアを採取し、覆工と充填部の圧縮強度試験を実施した。

なお、本調査では、弾性波速度を仮定して覆工巻厚を推定する簡易的な評価を実施した。また、採取した覆工コアから覆工及び充填材の弾性波速度を評価し、過年度に削孔調査された No.1、No.2 の2箇所の充填状況の評価する詳細評価を実施した。



妥当性検証箇所 (No. 1、No. 2) 及びコア採取箇所

図-2 調査対象箇所の外観

3. 調査結果

(1) 覆工巻厚の確認

デジタル打音検査で得られた卓越振動数とコンクリートの一般的な弾性波速度 4000m/s を用いて、式(1)より覆工巻厚を推定した結果、設計巻厚(35cm)と概ね一致したことを確認した(図3)。弾性波速度を仮定することで、簡易的に覆工巻厚の推定が可能であることを確認した。

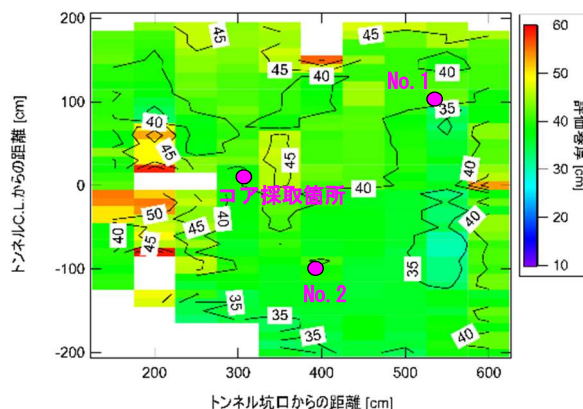


図-3 デジタル打音検査結果

(2) コンクリートの弾性波速度

覆工コアの圧縮強度から推定した覆工及び充填材の弾性波速度とデジタル打音検査で得られた卓越振動数及び採取した覆工コア長(覆工巻厚)より、式(1)から推定した弾性波速度を比較し、表1に整理した。その結果、それぞれの弾性波速度は概ね一致することを確認した。一般に弾性波速度は、コンクリートの圧縮強度と相関関係があることから、圧縮強度を推定できると考えられる。

表-1 圧縮強度試験結果及び弾性波速度の比較

該当部材	覆工コアの 圧縮強度 (N/mm^2)	弾性波速度(m/s)	
		覆工コア から算出	デジタル打音 検査結果
覆工	16.2	2,344	2,156
充填部	85.5	4,382	4,808

(3) 過年度に削孔調査された箇所の空洞充填の確認
デジタル打音検査で推定した弾性波速度(表 1)及び卓越振動数より、式(1)から推定した充填材厚さを算出し、過年度削孔調査結果の空洞幅と比較した。表 2 に示す通り、デジタル打音検査で推定した充填材厚さは、空洞幅とほぼ同等となり、空洞充填が適切に実施されていることを確認した。弾性波速度を設定することで、空洞充填の評価が可能であることを確認した。

表一 2 デジタル打音検査及びコア採取結果の比較

地点	過年度削孔調査結果		デジタル打音検査結果
	コア長さ [cm]	空洞幅 [cm]	充填部推定厚さ [cm]
No.1	21	10	9.5
No.2	15	12	11.1

4. 結論と今後の展望

以上の調査結果から、以下の結論を得た。

- (1) 覆工の弾性波速度を仮定することで、デジタル打音検査により得られた卓越振動数から覆工巻厚を簡易的に評価することが出来る。また、充填前後にデジタル打音検査を実施することで、充填材厚さの推定が可能であると考えられ、施工品質の検証にも利用可能な見通しを得た。
- (2) デジタル打音検査と覆工コア試験の併用により、容易に、覆工巻厚や充填材の厚さ及び弾性波速度を推定できたことから、巻厚が不足していた覆工と充填材の圧縮強度を推定できると考えられる。

デジタル打音検査は、覆工巻厚や背面空洞を調査する方法として有効な技術であることが確認できた。ただし、覆工と充填材が定着不良の場合、対象部材の振動特性が得られないため、調査が出来ないことが課題に挙げられる。

今後のトンネルの維持管理においては、補修・補強が施されたトンネルが増加する。これらのトンネルを適切に維持管理するためには、あらゆる条件下で調査点検が可能な技術が要求される。今後はその点に着目し、新技術の活用・試行を進めていきたい。

あ と が き

本検証を行うにあたり、学識経験者として終始多大なご指導を賜った、(NPO 法人)トンネル工学研究会 朝倉氏に深謝致します。並びに、本稿の作成及び調査や分析にあたり、終始適切な助言や丁寧な指導をして下さった原子燃料工業(株) 磯部氏や、当社の栗山氏、橘氏には細部に渡る協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 尾崎俊彦他:デジタル打音検査を用いたトンネル診断技術開発(2) 覆工コンクリートへの適用, 第76回 年次学術講演会, CS9-17, 2021
- 2) 林田宏他:超音波伝播速度測定による実コンクリート構造物の凍害深さ推定について, 寒地土木研究所月報, No.642 PP.2-8, 2006/11