

(38) 多チャンネル方式地下レーダー探査による既設トンネルの健全度評価の試み

応用地質株式会社 正会員 ○ 曾根 好徳

応用地質株式会社 正会員 前川 聡

An Attempt to Evaluate Soundness of Existing Tunnels By Multi-Channel Radar Detection

Yoshinori SONE OYO corporation

Satoshi MAEKAWA OYO corporation

Abstract

An importance has recently been attached to the evaluation of soundness and the investigation to grasp the geometrical conditions from the viewpoint of maintenance and management of existing tunnels.

The paper introduces a tunnel lining diagnosing truck, RAPIDAS, which has been developed for the purpose of rapid and efficient detection of thickness of concrete lining and the presence of void behind the lining and reports case study of investigation carried out by employing underground radar detection for the purpose of verifying the effectiveness of the system.

The major characteristic features of RAPIDAS are that four traverse lines can be simultaneously detected with underground radar antennas installed at the tips of four booms (1), that the tips of booms can detect the unevenness of lining wall, and the antennas and the wall can be kept at a constant spacing (2), that stable travelling at a constant speed of 1 to 2 km/h is possible for detection operation (3), and that an ultrasonic sensor enables to travel by keeping the truck in a constant distance from the wall of lining (4).

1. はじめに

千葉県富津の国道 127号小山野トンネルで平成2年2月に大規模な崩落事故が発生した。この崩落は覆工背面の空洞を主因とする複合的な原因によるものと考えられている。この事故を契機に、建設省では全国約6000のトンネルを対象に一斉点検を行い¹⁾、特に変状の著しいトンネルについては、直ちに詳細調査、対策工の検討などを実施した。また、同年10月には鉄道総合技術研究所から、トンネルの保守・管理についてのマニュアルが刊行された²⁾。

このように近年、既設トンネルの保守・管理の重要性が認識され、各方面で、トンネルの健全度評価を目的とするハード・ソフト両面での研究開発が進められている。

本論文では、地下レーダー探査により既設トンネル覆工厚さや覆工背面空洞の有無などを迅速かつ効率よく探査することを目的として開発したトンネル覆工診断車を紹介するとともに、その有効性を確認する目的で実施した調査事例を報告する。

2. 覆工背面の空洞調査

従来コンクリート構造物はメンテナンスフリーの構造物と考えられていたが、実際には経年的に老朽化し、その寿命は一般に70～100年であるといわれてる。図-1に示すように、コンクリート構造物の性能は、供用期間を経るとともに低下するが、適切に補修することにより、その供用年数を伸ばすことが可能で

ある³⁾。

このことはトンネル構造物についても同様である。特に在来工法によるトンネルの場合、施工上の理由により天端付近の覆工背面に空洞が存在し、かつ覆工厚が薄くなっている傾向がある。この傾向は、地質状況等により異なるが、覆工背面の空洞は、周辺地山を緩め地山の耐荷力を低下させ、覆工に作用する荷重の増大と覆工の変状を助長する。このため、トンネルの維持管理上、覆工厚さや覆工背面の空洞の有無及びその規模を把握することが重要となる。

覆工背面の空洞を最も確実に調査する方法は、覆工面からボーリングを行う方法である。しかし、ボーリングによる方法は、トンネル全体の覆工背面状況を把握するためには工期的・経済的に不利である。このため、全般的な覆工背面状況を把握する目的の場合には、ボーリングによる方法に加えて、非破壊的で迅速に広範囲を調査できる方法とを組合せた調査を行うのが得策である。

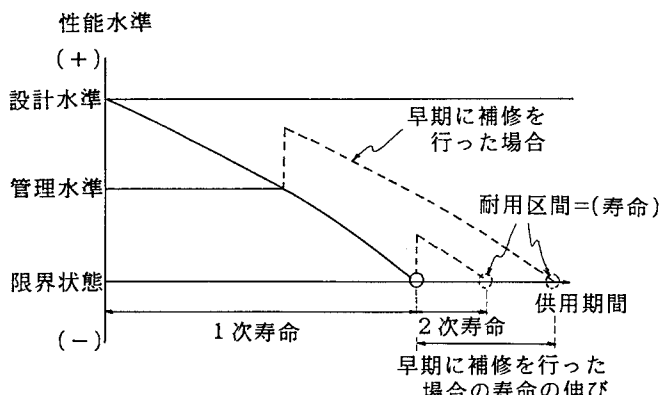


図-1 コンクリート構造物の性能水準と供用期間との関係

現在、覆工背面の状況を非破壊的に調べる方法としては、地下レーダー探査、打音検査、超音波探査、赤外線探査などが行われている^{4), 5), 6)}など。これらのうち地下レーダー探査は、トンネル覆工背面状況を知ううえで、探査精度や探査効率が比較的良好く、その場で出力された記録から覆工背面の状況を推定することができるなどの利点があるため広く実施されている。

3. トンネル覆工診断車の概要

トンネル覆工診断車は、既設トンネルにおいて片側規制で供用しながら覆工厚及び覆工背面空洞の位置・規模を測定するために開発した専用車である(図-2参照)。

その構成を大別すると、コントロール部、ブーム搭載部からなる。コントロール部には、地下レーダー探査装置、熱赤外線温度計、ブームのコントロール装置等が搭載されている。

ブーム搭載部には、5基の油圧ブームを装備した。ブーム先端に地下レーダーのアンテナを取り付けることができる。またブームには、測定方向の覆工表面に存在する段差や突起物を事前に感知するセンサーが取り付けられており、自動制御機構によりブームの伸縮が行える。

そのほか、覆工面の観察等を行うためのタワーリフトや壁面を部分的に清掃するためエアコンプレッサーを設けた。

トンネル覆工診断車の今回の開発における主な特徴を略記すると以下のとおりである。

- ①一般道路走向時はブームを折りたたむことにより普通車両として走向ができる。
- ②ブーム先端に取り付けた地下レーダーアンテナにより4測線を同時に探査することができること。
- ③ブーム先端部では覆工壁面の凹凸を感知でき、アンテナと壁面との間を一定間隔にできること。
- ④探査速度は、1～2 km/hでの定速安定走向が可能なこと。
- ⑤超音波センサーにより覆工壁面からの距離を一定に保ちつつ走行できること。

なお、本論文では、論じないがラピダスには熱赤外線温度計が搭載されており、覆工表面附近の剥離や空洞ヶ所のリモートセンシングも可能である。

地下レーダー装置には米国GSSI社(Geophysical Survey Systems Inc.)のSIR-10及びアンテナ

を使用した。SIR-10は一台で最大4チャンネルまでの同時測定が可能であるが、記録の質を確保するために、SIR-10を二式を装備し、一式あたり2台のアンテナを接続する方法を採用した。また、SIR-10ではレンジ、ゲイン、サンプリングレート、フィルター等の測定パラメータを広範囲に変化させることができ、覆工厚等の現場条件に応じた測定が可能である。

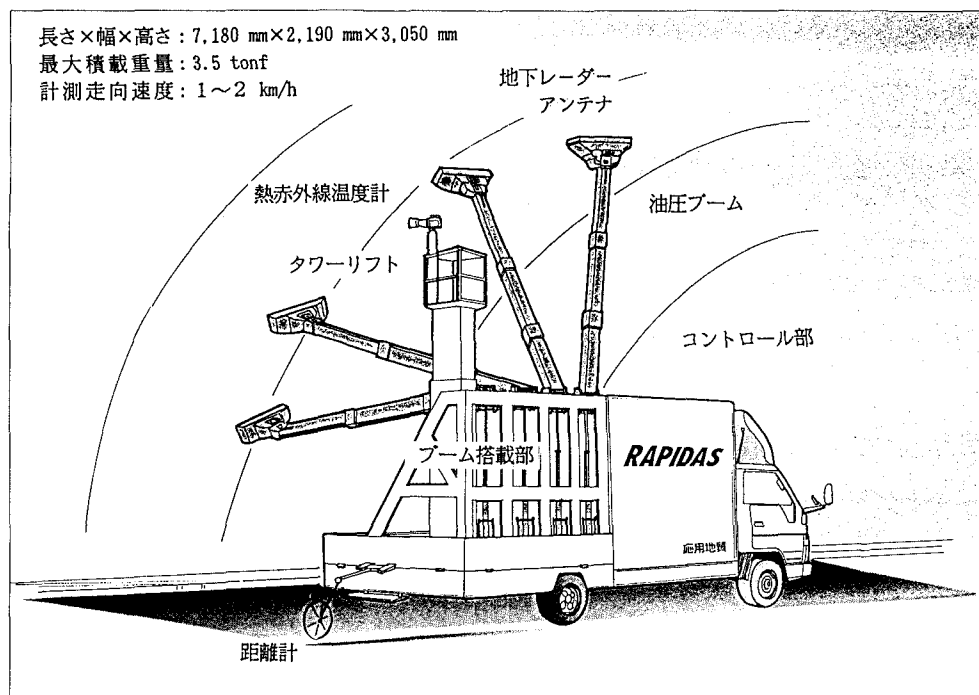


図-2 トンネル覆工診断車の外観図

4. 測定・解析事例

トンネル覆工厚及び覆工背面状況を推定・把握するうえでの地下レーダー探査の有効性を確認する目的で実施した試験結果を以下に示す。

図-3にモデル地盤でのコンクリート背面空洞探査例を示す。コンクリート厚は30cm、空洞は発泡スチロール製で、大きさが100cm×50cm、高さが10cmである。

覆工裏に空洞がある場合、覆工背面からの反射波は空洞上面からの反射波となる。覆工と地山が密着している場合と空洞がある場合とでは、図-3に示すように水平方向に位相が逆転する、あるいはコンクリートの誘電率が地山よりも小さい場合には、位相は逆転しないが振幅が大きくなる等の相違が生ずる。

図-3の(a)は測定記録にフィルター処理、振幅回復処理を行った解析結果であり、(b)はその波形表示記録である。空洞箇所では、最初に現れる反射波

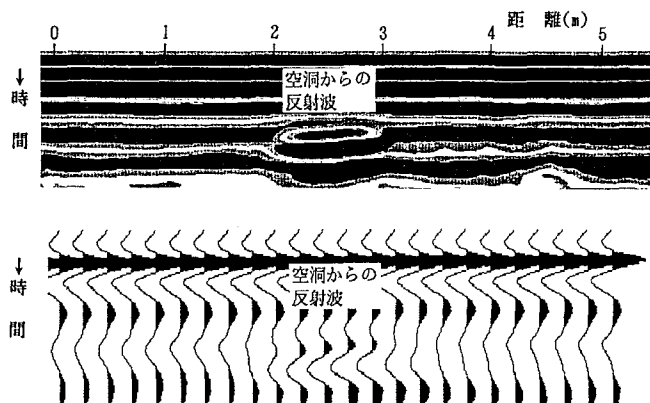


図-3 模擬空洞による基礎試験

の位相が周囲と逆転していることや振幅がやや大きくなっている特徴が見られる。この範囲は約1 m間であり、平面的な大きさは精度良く捉えられており、地下レーダー探査が空洞範囲を把握するうえで有効であることが確かめられた。

図-4に無支保で覆工が地山と密着している場合の覆工厚測定例を示す。図中、(a)は、生の測定記録であり、(b)は、表面からの反射波を背景除去処理した結果である。

一方、ワイドアングル測定により調べた、試験地点付近の覆工コンクリート中の電磁波伝搬速度は、約10.8 (cm/ns) であった。この結果に基づき、地下レーダー探査結果から覆工厚を求めた。図の中央付近でのボーリング調査によると覆工厚さは、30cmであった。地下レーダー探査では、32cmとなり探査結果と実測とがよく一致している。いくつかの事例について同様の検討を行った結果、地下レーダー探査による覆工厚の推定精度は、±10%程度であることが分かった。

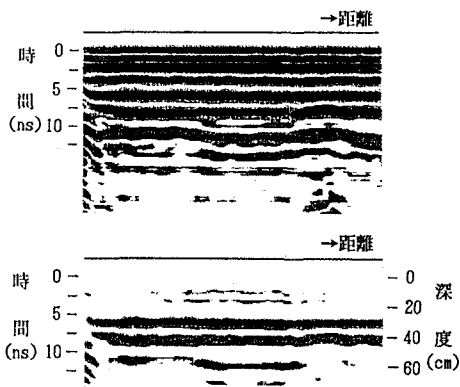


図-4 覆工厚に関する検討結果

図-5に支保工 (H-200) が1 mピッチで施工されているトンネルでの覆工厚、背面空洞の測定例を示す。図中、(a)はフィルタ処理、振幅回復処理及び表面からの反射波を背景除去した記録であり、(b)はさらにマイグレーション処理を施した結果である。(c)は両者から推定した最終的な解釈図である。

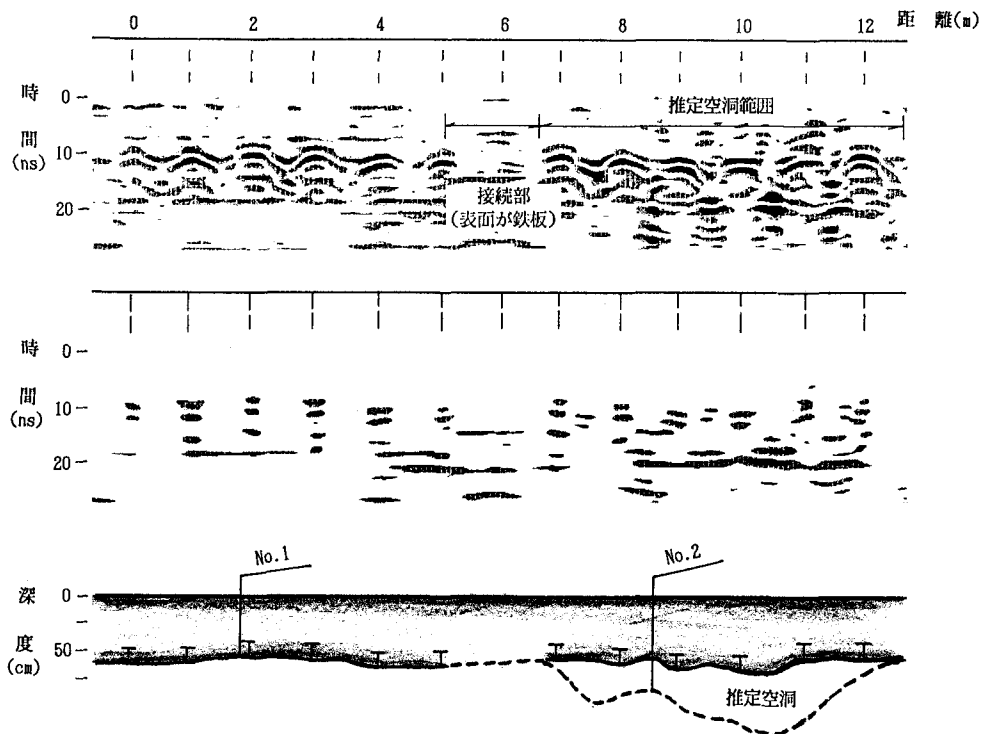


図-5 支保工のあるトンネルでの探査例

チェックボーリング結果によれば、覆工厚は±10%以下での誤差で一致した。また空洞に関しては範囲の推定を行ったのみであるが、推定のとおりNo. 1孔では検出されず、No. 2孔で検出（厚さ29cm）された。

なお、空洞の規模（奥行）は、チェックボーリング結果を参考に再解釈したものである。空洞の規模が電磁波波長に較べて大きく、空洞上面と下面からの反射波が分離して現れる場合には時間差の読み取りが可能となるので、空気中の電磁波伝搬速度を乗じることにより空洞厚が求まる。しかし、現実には空洞が小規模な場合が多く、上面と下面の反射波を分離することが困難であるため、空洞厚さを評価することが難しい。

一つの推定方法として、既往測定結果、モデル等を利用し、測定時と同一条件のいくつかの既知空洞からの反射波と測定で求めた波形記録との比較を行うことで空洞の厚さを推定する方法がある。ただし、この方法では十分な精度を確保できないことがある。

5. まとめ

トンネル覆工厚さ及び背面状況を把握する目的でトンネル覆工診断車『ラビダス』を用いた地下レーダー探査を実施した。

その結果、覆工厚の推定精度は概ね±10%程度であることがわかった。また、覆工背面の空洞の位置及び平面的な規模についても信頼性の高い評価のできる事が調べられた。ただし、空洞の厚さに関しては、空洞の規模が小さい場合には評価が困難となる。一般に、大部分が小規模の空洞なので、空洞厚を評価・推定できない例が多いものと思われる。

また、地下レーダー探査が困難あるいは不可能となる現場条件は、覆工背面、地山表面が起伏に富む場合や空洞中に地下水がある場合には、測定精度が低下する。覆工表面あるいは覆工中に鉄板のような導体が存在する所では測定不可能である。コンクリート中に鉄筋が埋設されている場合には、測定が困難あるいは不可能となる。覆工表面が起伏に富んでいたり、付帯設備等が密にある場合には、測定が不可能な場合もある。覆工表面からの漏水が著しい場合には測定が困難であったり不可能となる。などである。

今回開発したトンネル覆工診断車については、現状、操作に熟練を要するものの、4測線同時測定ができること。測定者が高所で作業する必要のないこと。片側規制で調査ができることなど。その有効性が確認された。

今後は、本システムに関しては、使用実績を挙げつつ、操作の簡略化の工夫など必要に応じて改良改善を行っていきたい。また、水路トンネル、鉄道トンネル等々の他のトンネル構造物への適用拡大に関する研究開発も必要になるものと考えている。

一方、ハード面の改良・改善に加えて、探査記録の波形処理や自動的にアノマリー箇所を抽出するなどの処理ソフトの開発を行い、解析の効率化図ると同時にデータの蓄積により評価・推定精度の向上と評価マニュアルの作成により個人差のない客観的判定が可能となるよう研究を進めていく所存である。

参考文献)

- 1) 猪熊明：道路トンネルの緊急点検と今後の維持管理，トンネルと地下，Vol. 21, No. 10, 1990. 10, pp35~40.
- 2) 鉄道総合研究所編集：トンネル補強・補修マニュアル，1990, 10.
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書，1992. 3.
- 4) 朝倉俊之他：老朽トンネルの調査と対策，地質と調査，No. 3, 1991. pp14~20.
- 5) 大島洋志他：鉄道における電磁波法による覆工の非破壊検査，トンネルと地下，Vol. 22, No. 3, 1991, pp39~44.
- 6) 五十嵐亨：地中探査レーダー，地質と調査，No. 1, 1988, pp41~47.