

時速 50 km でトンネル空洞探査

高速走行型非接触レーダーによるトンネル覆工巻厚・空洞探査を実現： MIMM-R（ミーム・アール）

安田 亨・山本 秀樹・北澤 隆一

走行型計測車両によるトンネル点検を目的として開発された MIMM に、レーダー探査機能を追加して多機能計測車両 MIMM-R を開発した。走行型非接触レーダー機能により、トンネル覆工の巻厚および背面空洞を迅速に探査することができる。探査深度は巻厚で変化し、40 cm ～ 80 cm 程度である。巻厚が薄く、しかも背面空洞があるという危険箇所を効率的に探査することを目的としており、打音検査を行うべき箇所を事前にスクリーニングすることができる。結果として、打音検査時の交通規制時間や交通障害を低減し、コスト縮減に寄与することが可能である。

キーワード：トンネル点検、非接触レーダー、走行型計測、空洞探査、巻厚探査

1. はじめに

道路トンネルや鉄道トンネルの維持管理の目的は、利用者被害を未然に防止し、安全な通行を確保することにある。一般にトンネルの維持管理は、点検、調査、対策の流れで実施されており、点検や診断で健全性を評価した上で効果的な対策を行うことで目的を達成する。多数のトンネルを効率よく効果的に対策を行うため、点検サイクルや調査、対策の要否、緊急度をトンネルの健全性や路線ネットワークの重要度、予算等から維持管理計画（長寿命化計画）を策定し戦略的に維持管理を進めることが重要となっている。

平成 26 年 6 月トンネル維持管理のあり方が見直され、道路トンネルにおいては、5 年に 1 回の間隔で点検を行うことが義務化された。トンネル点検は、近接目視で行うことが基本であるが、従来の点検技術においては、①スケッチによる変状の記録、②打音による点検者の主観による判定、③暗所で狭隘の作業であるなどの理由のため、安全性や客観性に乏しく、見落としの発生や変状の進行を適性に評価できないなどの課題が指摘されている。

上述した課題に対する解決策として、MMS（Mobile Mapping System）（共同開発者：三菱電機株）と MIS（Mobile Imaging System）（共同開発者：計測検査株）を搭載した走行型トンネル点検車「MIMM（ミーム）」を 2010 年に開発した。同時に国土交通省近畿地方整備局の産官学連携プロジェクト「新都市社会技術融合創造研究会：プロジェクトリーダー大西有

三京都大学名誉教授」にて、走行型計測技術によるトンネル健全性評価の実用化を検証し¹⁾、以降多数のトンネルにおいて実用レベルで活用されている。

この車両は、覆工壁面の連続画像計測やレーザー計測ができ、交通規制を必要とせず、高速走行しながら精度の良い、客観的な変状把握が可能である。

ただし、覆工巻厚や背面空洞の点検ができないという課題が残っていたため、2014 年 2 月にレーダー探査装置を搭載した車両を開発した（写真—1）。この車両を、MIMM-R（ミーム・アール）（以下「本計測車両」という）と名付け、車両天井部に設置した非接触型レーダーアンテナにより、覆工巻厚および背面空洞を高速走行しながら点検できる機能を追加した。レーダー探査により巻厚不足や背面空洞の有無を把握することが可能となり、健全度診断をする上で情報量

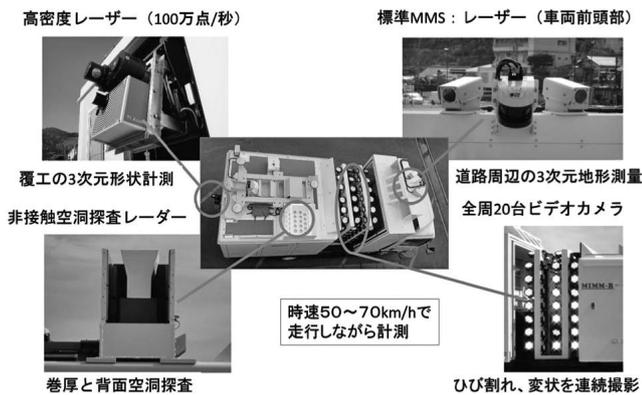


写真—1 本計測車両

が向上した。

2. 本計測車両の概要

本計測車両は、交通規制を必要とせず、高精度な地形測量、トンネルレーザー計測及び変形モード解析、トンネル画像計測及び損傷度評価、トンネルレーダー計測及び空洞の評価が可能である。これらを可能とするシステム、機能を図一1、2に示す。取得できる内容の詳細は以下の通りである。



図一1 本計測車両の計測システム



図一2 本計測車両の機能

(1) 高精度な地形測量

3次元点群データから、地図の基本となる道路および道路骨格データを縮尺1/500精度で作成することができ、公共測量作業規程が適用可能である。

(2) トンネルレーザー計測及び変形モード解析

100万点/秒の高精度レーザーキャナにより、高密度な点群データを取得することで、トンネル覆工の形状、覆工の変形（変形モード、目地・ひび割れの段差）、舗装の段差などを客観的に把握することが可能である。

(3) トンネル画像計測及び損傷度評価

速度50～70 km/hで走行しながら取得した壁面画像より、0.2 mm程度のひび割れを把握できる。客観的、正確な展開図が作成でき、変状進行性の把握や変状原因を継続して管理することができる。

(4) 地中レーダーによる覆工背面調査

走行型非接触レーダーにより、速度50～70 km/hで走行しながら、巻厚、背面空洞を探索できる。探索可能な深度は巻厚で変化し、40 cm～80 cm程度であり、図一3に示すように覆工が薄く、しかも空洞がある危険箇所を迅速に検出することを目的にしている。

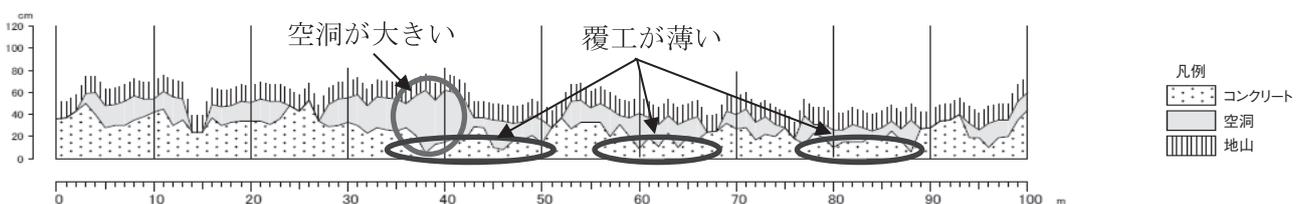
これらから得られた個々の結果を総合的に判断することで、トンネルに発生している異常原因を推定でき、着目点を事前に抽出し、詳細点検・補修計画の立案が可能となる。

3. レーダーの原理と接触型レーダー²⁾

地中レーダー法の探索原理は、層厚を測定するという観点において、電磁波が異なる物質の境界で反射するという物理的性質を用いた間接調査法である。

アンテナから放射された電磁波が地中に入射すると、物質（電気的性質）の異なる層境界で反射する。図一4に示すようなトンネルがあると、第1層目は覆工コンクリート、2層目は空洞、3層目は地山と、物質の異なる3つの層がある。電磁波は図一4に示すように、各層境界で反射し、再びアンテナに戻って受信される。

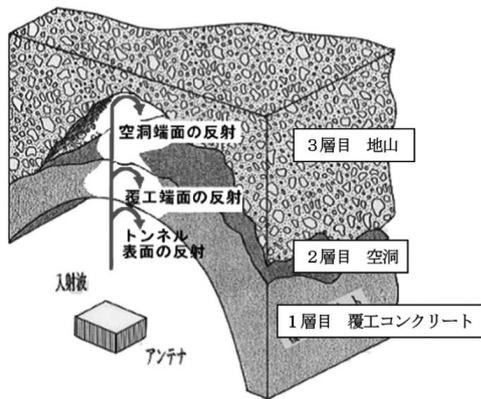
電磁波は、媒体中を伝搬するうちに、物質の減衰性



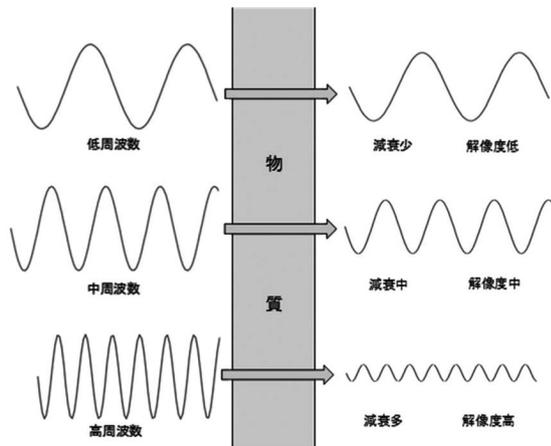
図一3 レーダー探索の目的

能によってエネルギーが吸収され、振幅が小さくなる。そのため、深部からの反射波は強度が十分に得られなくなり、レーダー記録上で認識できなくなるという一般的性質がある。

図一5に示すように、この減衰効果は周波数と深い相関があり、周波数が高い程大きく、低い程小さい。したがって、探査深度を大きくするには周波数を低くする必要がある。



図一4 電磁波の反射状況



図一5 周波数の違いによる性質イメージ図

その一方で、周波数が低いとアンテナの物理的な形状が大きくなり、分解能（解像度）が粗く、小さな構造が認識しにくくなる。つまり、高分解能を維持するためには周波数を高く保ち、探査深度を大きくするためには低周波数を使用しなければならないという相反する関係がある（表一1参照）。

このように、電磁波は周波数によってその性質が大きく変化することから、調査目的や調査対象によって適切な周波数を選択することになる。

これまででも地中内部を探索する技術として、電磁波レーダーを用いた探手法が広く用いられ、その探査原理から覆工背面の空洞や覆工厚さの確認に利用されている。しかし従来方式のレーダー探査では、アンテナと調査対象の壁面とを接触させる必要があり、トンネル内部には障害物も多いため、写真一2のように高所作業車等を用いて人力作業で行う必要があった。

また、接触型アンテナでは、アンテナを壁面に接触させることで、コンクリート片等が落下する危険があること、及び探査速度が遅いことから、交通規制を必

従来型レーダ(接触型レーダ)



写真一2 従来型レーダー計測状況

表一1 周波数と分解能

	高周波帯	中周波帯	低周波帯
周波数	1000MHz以上	900～300MHz	300MHz以下
探査深度 ※状態により異なる	～0.3m程度	～1.0m程度	～1.8m程度
鉄筋がある場合 ※周波数と鉄筋径による	100mm以上の間隔であれば探査可能	300mm程度の間隔であれば探査可能	500mm以上の間隔であれば探査可能
深度イメージ	浅い	深い	
分解能イメージ	細かい	荒い	

要とする。路面下空洞探査のように、平滑で障害物が無い状態では、接触方式のレーダーでも高速で探査することが可能である。しかし、高速でトンネルの覆工背面を探査するには、走行をしながらトンネル覆工表面にある標識、ジェットファン、諸設備などを柔軟にかかわせる機械的なシステムと、落下物による第三者被害を防ぐ機能を付加しなければならない。高速走行を行いながら、これらの装置の設置を設けることは非常に困難であった。そこで、以上の課題解決のためレーダーアンテナを非接触型に置き換えることにした。

4. 走行型非接触レーダーの開発

非接触レーダーをトンネル用に改良するにあたって、以下の2点に留意した。

(1) 非接触レーダーにより3m程度の離隔を確保

これまで非接触レーダーが使用されなかった理由は、取得データ解析の煩雑さ、探査深度不足などによるものであった。非接触レーダーは、探査対象までの離隔が大きくなると、電磁波の減衰・拡散により反射波のパターン解析が難しい状態である。図-6に示す電磁波の極性・反射係数を考慮した原理解析により、探査性能が低下する非接触レーダーの解析を解決した。表-2に主な物質の比誘電率の値を示す。

原理解析により、道路維持管理便覧に示す突発性の

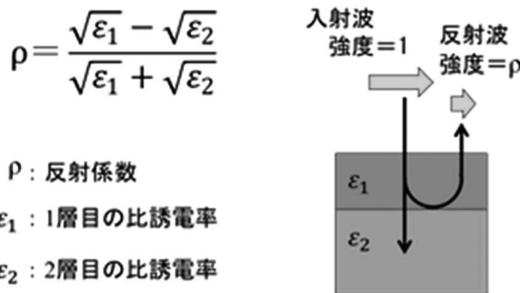


図-6 極性・反射係数の概念図

表-2 主な物質の比誘電率

材質	比誘電率			
真空、空気	1			
水	81			
岩	6			
砂	4	乾燥	5-8	標準 25 含水率25%
土	4	乾燥	10-20	標準 25 含水率25%
ローム	3	乾燥	20-40	標準 40 含水率50%
コンクリート	8-9	地上	10-12	トンネル覆工
アスコン	5	新設	6	劣化
金属	本来導電率を使って定義するが、比誘電率=∞とすると、反射係数は同一になる			

崩壊の目安である覆工巻厚 30 cm 未満、空洞厚 30 cm 以上の解析を行うことが可能となった。ただし、周波数特性により、覆工厚さ 50 cm 以深に関しての情報取得は困難である。

また接触型アンテナは電磁波の拡散問題のため、離隔を取れないという課題があった。図-7に示すアンテナ構造において、接触型であるポータアンテナは、指向性が無く感度が低いため対象に接触させる必要があるが、今回走行型非接触レーダーに採用したホーンアンテナは指向性が高く感度が高いため離隔を取ることができる。

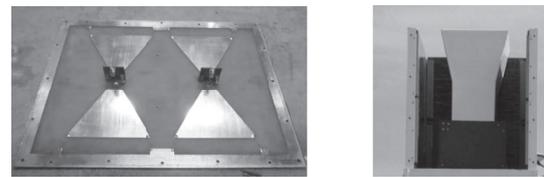


図-7 レーダーアンテナ構造

(2) 高速走行での探査を実現

一般的な地中レーダー装置は、高速でのデータ取得を前提に作られた装置ではない。よって、50 km/h 以上の速度で、接触型と同じ容量のデータを取得するには、コントローラーの改良を行う必要があった。電磁波は1秒間に30万 km もの距離を進む超高速の波であるため、図-8のようなサンプリング方式を使用して、データを取得している。

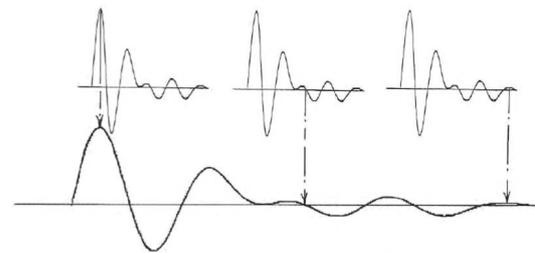


図-8 サンプリングの原理

電磁波の超高速に対応するため、1トレースを分割取得し、同じ形の1トレースを再構成させるサンプラーを用いている。トレース形状は nsec (ナノ秒) で変化する時間のオーダーではほとんど変わらないため、分解、再構築しても影響が生じない。サンプリング速度を高速化し、さらにアナログ・デジタル変換装置を高速化することにより、50 ~ 70 km/h の速度でのデータ取得が可能となった。

5. 実用性評価

実用性の判定は、過去に実施した接触型アンテナと削孔調査により妥当性を評価したトンネルに対して、50～70 km/h の速度で非接触レーダーでの取得を行い、その差異について分析・評価を行った。

図—9, 10 に示すサンプル 1, サンプル 2 とともに、A の記録は従来の接触型レーダー装置を使用して得られたデータであり、B の記録が今回開発した非接触型レーダーの記録である。それぞれのアンテナ特性が出ているが、ほぼ同等の結果が得られていることがわかる。

非接触型アンテナは、アンテナから覆工コンクリートまでの離隔が広いいため周囲の影響を受けやすく、細部に関しては接触型アンテナより緩やかな反射が得られている。次に、ボーリングによる実長との比較の結果、

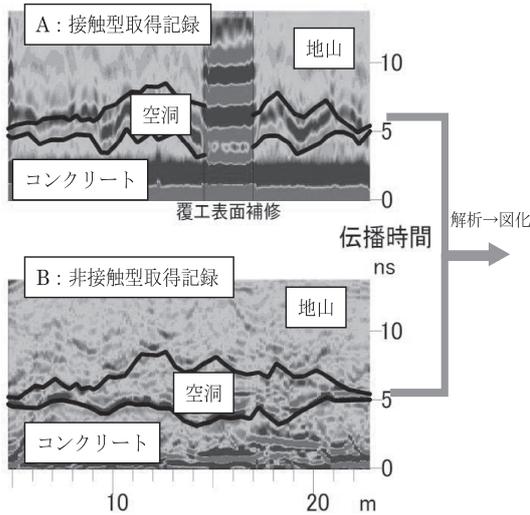
図—9, 10 右図に示すように、非常に高い相関がみられた。また図—11 に示すように、レーダー探査の解析で得られた結果と、ボーリング孔での実測値との比較を行ったところ、

コンクリート厚 ± 5 cm サプリングデータの約 90%
 空洞厚 ± 10 cm サプリングデータの約 80%
 という結果が得られた。

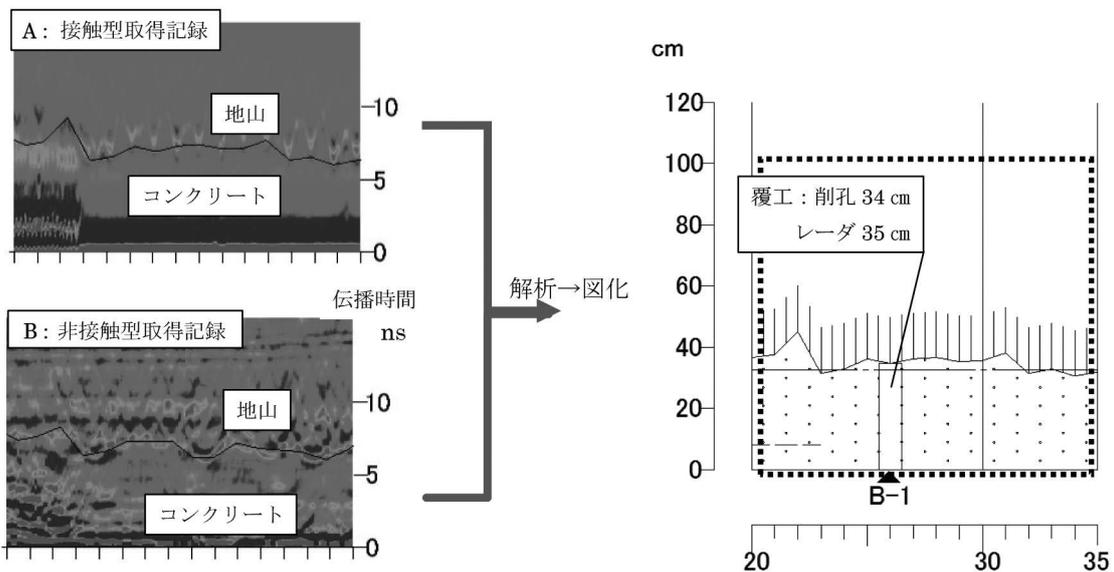
この結果によれば、表面に近い覆工コンクリート厚の方が良い精度となっているが、覆工で ± 5 cm が 90% 精度であれば十分に実用レベルと評価できる。

6. おわりに

本計測車両 MIMM-R に搭載した画像、レーザー、レーダー探査による計測結果を総合判断することにより、トンネル変状の効率的、客観的な診断が可能とな



図—9 取得記録比較と削孔との比較 サンプル 1



図—10 取得記録比較と削孔との比較 サンプル 2

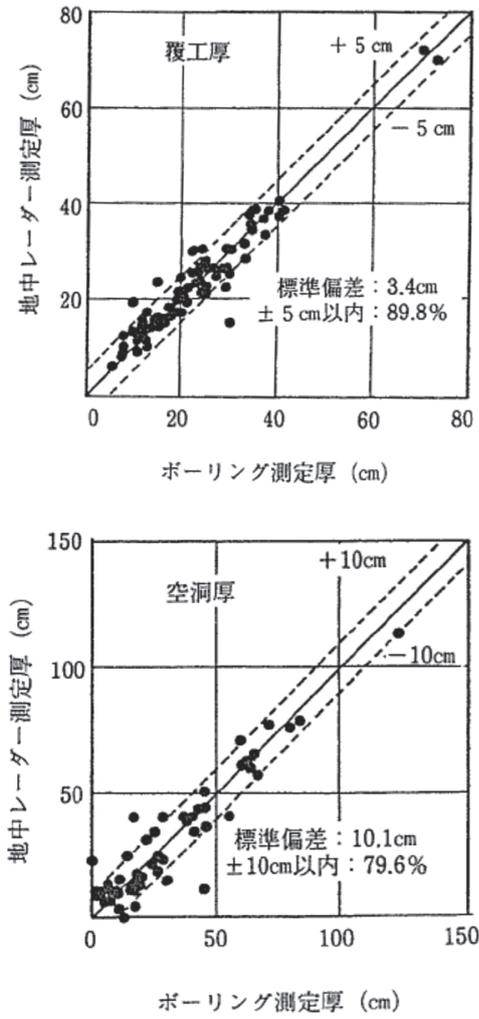


図-11 レーダー探査結果とボーリング孔の実測値との対比

る。特に、レーダー探査によって、巻厚が薄く空洞がある要注意箇所を迅速にスクリーニングする技術は、交通規制を必要とする打音検査に要する時間、コストを縮減できることから、合理的な点検手法といえる。しかし、現状では覆工巻厚・背面空洞は探査できる

ものの、覆工表面にひび割れ、漏水、劣化、段差などを伴わない「うき、ジャンカ、材質不良などの内部欠陥」については発見できないという課題が残されている。今後は、高速走行型非接触レーダーによる内部欠陥探査技術に取り組み、打音検査の補完技術の開発を進める計画である。さらに、複数レーダーによる面的な探査技術開発と3次元ビジュアル表示による欠陥箇所の見える化に取り組み、より効果的な点検手法の確立に向けて貢献していきたいと考えている。

JCMA

【参考文献】

- 1) 新都市社会技術融合創造研究会 道路トンネル健全性評価技術研究プロジェクト：走行型計測技術による道路トンネルの健全性評価の実用化研究 研究成果報告書, 2013.2
- 2) 稲垣正晴, 齋藤豊：電磁波による地中検査技術, 検査技術 (No.9), P5～8 (1997)

【筆者紹介】



安田 亨 (やすだ とおる)
パシフィックコンサルタンツ(株)
品質・技術統括センター
主席研究員



山本 秀樹 (やまもと ひでき)
パシフィックコンサルタンツ(株)
交通基盤事業本部 トンネル部
室長



北澤 隆一 (きたざわ りゅういち)
(株)ウォールナット 調査部
課長

