

走行型計測によるトンネル 覆工巻厚・空洞探査技術について

山本 秀樹¹・重田 佳幸²・小平 哲也³・安田 亨⁴・北澤 隆一⁵・成澤 行雄⁶

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ（株） トンネル部（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）
E-mail:hideki.yamamoto@tk.pacific.co.jp

²正会員 パシフィックコンサルタンツ（株） トンネル部（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）
E-mail:yoshiyuki.shigeta@tk.pacific.co.jp

³正会員 パシフィックコンサルタンツ（株） トンネル部（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）
E-mail:tetsuya.kodaira@tk.pacific.co.jp

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ（株） 品質・技術統括C（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）
E-mail: tooru.yasuda@os.pacific.co.jp

⁵（株）ウォールナット 調査部（〒190-0002 東京都立川市幸町1-19-13）
E-mail: kitazawa@walnut.co.jp

⁶（株）ウォールナット 調査部（〒190-0002 東京都立川市幸町1-19-13）
E-mail: narusawa@walnut.co.jp

走行型検査車両によるトンネル点検を目的として開発されたMIMMに，トンネル覆工巻厚・空洞探査が可能で非接触型レーダ探査機能を追加して多機能検査車両MIMM-Rを開発した．この走行型非接触レーダ探査装置は，50～70km/hで走行しながら，トンネル覆工の巻厚および背面空洞を探査することができる．本技術を用いることで，突発性崩壊の恐れがあるとされている覆工巻厚不足箇所や大規模な背面空洞箇所を，交通規制を行わずに調査することができるため，コスト削減に大きく寄与することが可能となる．

本論文は，従来技術である接触型レーダ探査結果と今回開発した非接触型レーダ探査結果を比較し，本技術の実用性を検証した結果を報告するものである．

Key Words : Tunnel inspection, Non-contact radar, Mobile survey technology,
Lining defects and cavity detection

1. はじめに

トンネル点検は近接目視で行うことが基本であるが，従来の点検技術は，①スケッチによる変状の記録，②点検者の主観による打音の判定，③暗所で狭隘の作業などの理由で，安全性や客観性が乏しいこと，また，見落としの発生や変状進行の適正評価ができないなどの課題が指摘されている．

上述の課題に対する解決策として，MMS（共同開発者：三菱電機(株)）とMIS（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．また同時に，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大西有三京都大学名誉教授」が，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⁾，その後多数のトンネルに対し実用レベルで活用されている．

この車両は交通規制を必要とせず，高速走行しながら覆工壁面の連続画像計測やレーザ計測を実施し，精度の良い客観的な変状把握が可能である（図-1）．

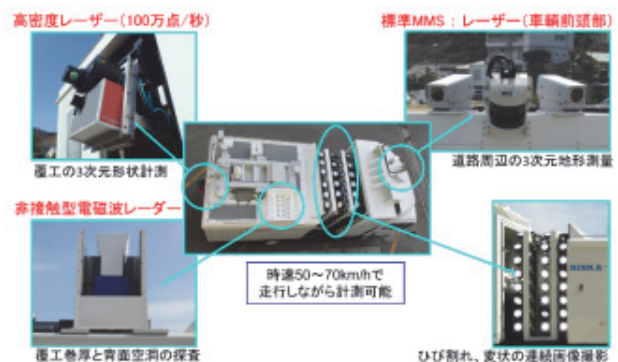


図-1 走行型計測車両MIMM-Rの計測システム

しかし、覆工巻厚や背面空洞の調査ができないという課題が残っていたため、2014年2月に走行型レーダ探査装置を、(株)ウォールナットの協力で開発した。

本稿は、非接触型地中レーダを用いた走行型計測によるトンネル覆工巻厚・空洞探査技術の開発と実用性検証結果について報告するものである。

2. 地中レーダ探査の原理と解析²⁾

(1) 地中レーダ探査（反射法）の原理

地中レーダ反射法は、電磁波が比誘電率の異なる物質の境界で反射する物理的性質を用いた間接調査法である。

地中レーダは、アンテナから放射されたパルスと呼ばれるごく短い電磁波が、地中や構造物中に入射したあと内部で反射され再びアンテナに戻って受信される装置である。放射された電磁波は層境界で100%反射するのではなく、比誘電率のコントラストに依存する割合で反射波と透過波に分かれてそれぞれ進行する。例えば第1層目は覆工コンクリート、第2層目は空洞、第3層目は地山というように、異なる3つの層で構成された構造を持つトンネルでは、図-2に示すようにパルス波は各層の境界で反射しそれぞれ再びアンテナに戻って受信される。

アンテナを移動させながら計測することにより、各距離における反射波列が順次取得され、連続的な地中レーダ記録が出力される（図-3）。この記録は、ほぼ各層厚変化を反映しているが、最終的に比誘電率を用いたデータ校正により実際の覆工厚、背面空洞厚が明らかになる。

(2) 解析の基本原則

地中レーダ記録の解析は、反射波の強度と極性を基礎に行う。反射波の強度と極性は、下式(1)で表されるように、物質の比誘電率によって決まる。

$$\rho = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

ρ : 反射強度（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

また、記録から判読された記録紙上の層厚は、下式(2)によって実際の層厚に変換される。

$$\tau = \frac{C \cdot L}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2)$$

τ : 実際の層厚

C : 計測器固有の定数

L : 記録紙上の層厚

ε_r : 物質の比誘電率（表-1）

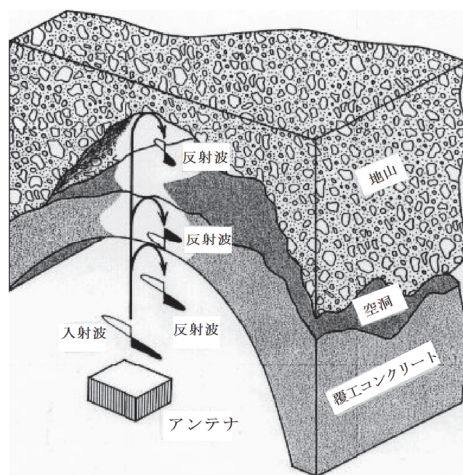


図-2 電磁波の反射状況

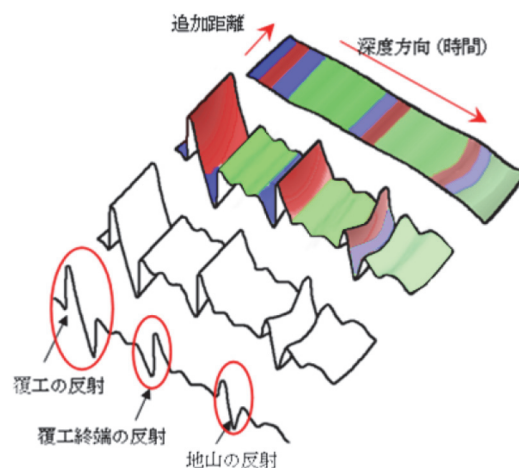
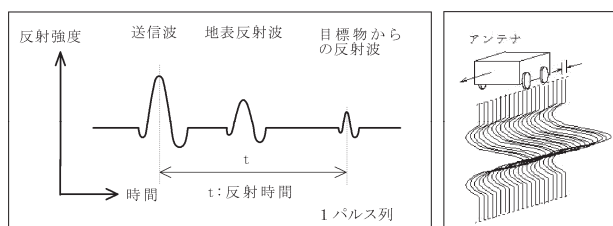


図-3 地中レーダ記録の概念図

表-1 物質毎の比誘電率

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			

3. 走行型レーダ装置の開発概要

(1) 従来型レーダの課題と解決方針

地中内部を探査する技術として、地中レーダは覆工厚

や覆工背面空洞の確認に広く利用されてきた。しかし、障害物の多いトンネル内部でアンテナを壁面に接触させた状態で測定する従来方式の地中レーダでは、写真-1のように高所作業車等を用い、交通規制の下で探査速度をかなり制限し、手動でアンテナ位置制御をする必要があった。路面下空洞探査のように平滑で障害物のない路面に対しては、従来から使用されてきた接触型レーダでも高速探査が可能である。しかし、トンネル内の探査で高速走行を実現するためには、障害となる標識、ジェットファン等の構造物を機械的に回避するシステムが必要であることと、第三者被害を防ぐための落下物防止機能も付加しなければならず、このようなシステムの開発は、機能とコスト両面において現実的ではない。

そこで、障害物回避の問題を解決するため、アンテナを非接触型に置き換えることとした。その結果、安定した高速走行を可能とする機能的な問題を解決した。しかし一方で、探査対象からアンテナまでの距離の増加による反射波強度の低下や、データ取込速度が高速走行に追従できないなどの性能的問題が生ずる。そこで、非接触型アンテナの採用を前提とし、新たに生じた性能的問題を解決すべく開発を進める方針とした。

(2) 非接触型レーダ専用アンテナの開発

地中放射効率の良好な接触型アンテナ（ボウタイ型）の代わりに、空中放射効率を向上させた非接触型アンテナ（ホーン型）を採用することで、表面から離れた状態で測定することができるようにした（図-4）³⁾。

一般に、ホーン型アンテナは放射エネルギーがボウタイ型より小さく、地表面反射による損失もあるため、受信される反射波強度は小さい。一方、ホーンの形状を調整することにより、指向性を増すことができるので、放射エネルギーの弱さを高指向性がもたらす拡散抑制効果によりある程度補うことができる。本開発では、実用可能な範囲で最大限高指向性を獲得することを目指して非接触型アンテナを開発した。

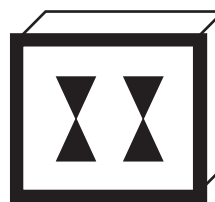
(3) 高速型計測用コントローラの開発

アンテナからの電磁波パルス放射は短時間に極めて高頻度で行われるため、全ての反射波を記録することができない。一般に地中レーダ装置では、反射波トレースを間引いて記録するサンプリング技術を用いる。図-5に示すように、アンテナに戻ってくる反射波トレースの一部を少しずつサンプリングし、最終的に時間的に引き延ばされたトレースを再形成し記録する。サンプリング時におけるアンテナ移動はほとんど無視できる程小さいため、トレース形状の変化はないものと考えてよい。

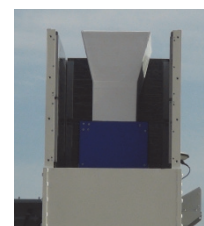
接触型レーダによる測定速度は通常遅いため、サンプリングレートは比較的大きく設定する。このため、再構



写真-1 従来型レーダ探査状況



接触型アンテナ



非接触型アンテナ

図-4 アンテナ構造

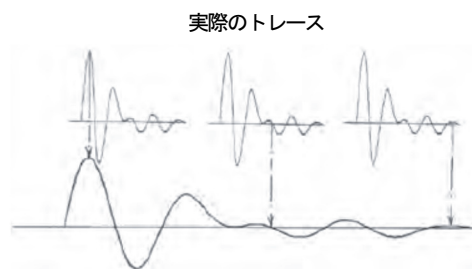


図-5 サンプルングの原理

成されるトレース長（時間）は長くなる。非接触型アンテナを使用する場合、高速走行を目指すためにはサンプリング速度をより速く設定し、より短時間でトレース再構成を行わなければならない。このようなサンプリング速度の高速化と、さらにアナログ・デジタル変換装置の高速化を加えたコントローラを開発することにより、50～70km/hの速度でのデータ取得が可能となった。

(4) 非接触型レーダ記録の解析

前述のように、非接触型レーダで取得したレーダ記録の欠点は、反射波強度が弱いことである。これは、探査深度が不足することとともに、判読の困難さが増大する原因となる。

このため、解析目標を限定し、道路維持管理便覧に示す突発性の崩壊の目安である覆工巻厚30cm未満、空洞厚30cm以上が解析可能となることを目標とした。

4. 実証試験

(1) 地中レーダの基本的性能

地中レーダ探査技術向上のためには、解析結果の検証が欠かせない。通常、レーダ測定実施後には削孔を行い、比較照合をする。これまで数多くのトンネルで行われてきた比較照合の結果を総合した結果を図-6、7に示す。

図-6は覆工コンクリート厚、図-7は背面空洞厚に関するレーダと削孔による測定値の相関を示したものである²⁾。図に示された傾向をまとめると、相関に関する基本的性能が確認される。

- ・ 覆工コンクリート厚の約90%が±5cmの範囲にある
- ・ 背面空洞厚の約80%が、±10cmの範囲にある

この基本的性能は、レーダ自身に内在するものではなく、対象物との関係によって決まるものである。例えば、道路のアスコン舗装厚測定の結果では、相関が±1cm程度というトンネルとは異なる結果を示している。トンネルの場合、道路舗装に比べ背面の凹凸変化が大きい（写真-2）。レーダ測定点と削孔点を完全に一致させることは現実的に困難であり、少しの位置ずれが、相関のずれとして現れるものと解釈できる。

ここで示されたトンネル調査における地中レーダ探査の基本的性能を念頭に置きつつ、接触型レーダと非接触型レーダの性能比較を行う実証試験を実施した。

(2) 実証試験結果（従来技術との比較検証）

22トンネル、総延長6 296mに対して、新たに開発した非接触型システムの実証試験を行った。同一トンネルにおいて、接触型レーダと非接触型レーダの双方を使用して測定を実施し、結果を比較し評価を行なった。

評価結果については既に概要が報告されている⁴⁾。本論文では、22トンネルから覆工厚の薄いトンネルの代表として1トンネル、厚いトンネルの代表として1トンネルを選択し、厚さの影響を念頭に置いた詳細な分析を行った。

a) 覆工コンクリート厚が薄い場合の実証試験結果

レーダ解析結果は、覆工コンクリート厚、背面空洞厚とも1m毎の厚さデータとして記録される。覆工コンクリート厚が比較的薄いトンネル（最大巻厚40cm、平均巻厚25cm）における接触型レーダと非接触型レーダによる解析結果の照合（図-8、9）を行った。各点における厚さの相関を見ると、覆工コンクリート厚の相関係数 $R=0.98$ 、背面空洞厚の相関係数 $R=0.97$ であり、高い相関が得られた（図-10）。

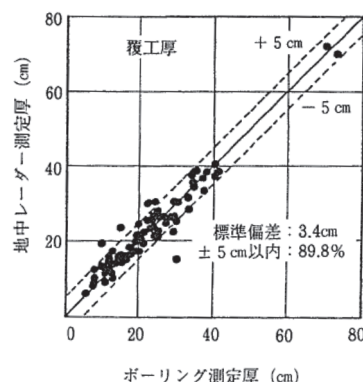


図-6 レーダ結果と削孔結果の相関（覆工コンクリート厚）

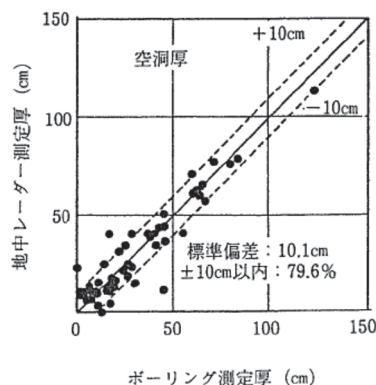


図-7 レーダ結果と削孔結果の相関（背面空洞厚）



写真-2 覆工背面空洞内の状況写真

b) 覆工コンクリート厚が厚い場合の実証試験結果

覆工コンクリート厚が厚いトンネル（最大巻厚45cm以上、平均巻厚41cm）における接触型レーダと非接触型レーダによる解析結果の照合（図-11、12）を行った。ここでは、覆工コンクリート厚の相関係数 $R=0.86$ 、背面空洞厚の相関係数 $R=0.90$ であり、薄い覆工厚の場合に比べて小さいが、同じく高い相関が得られた（図-13）。

全体傾向は、覆工が厚くなると相関は低下する。これは、非接触型レーダの探査限界深度に近くなり、覆工コンクリート厚、背面空洞厚ともに判読難易度が増加するためであると考えられる。注目すべきことは、背面空洞の厚さには言及せず、空洞存在有無の判定に限れば、非常に良好な一致を示していることである（図-14）。これは、空洞からの反射波が相対的に強いことと、有無の判定は空洞始端反射の確認だけで可能なことに起因する。

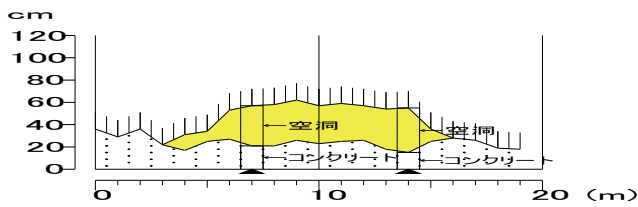


図-8 接触型レーダによる調査結果（覆工巻厚が薄い場合）

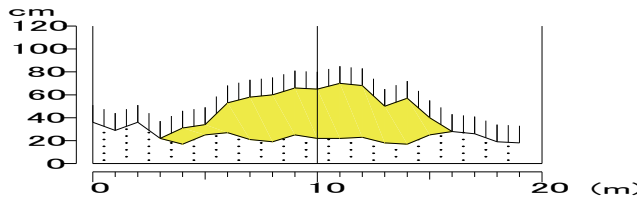


図-9 非接触型レーダによる調査結果（覆工巻厚が薄い場合）

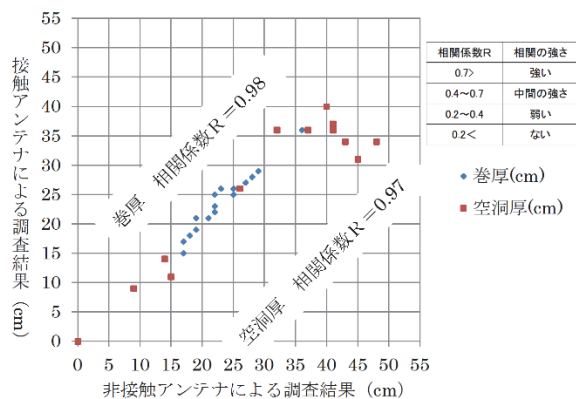


図-10 接触型と非接触型レーダによる調査結果の相関（覆工巻厚が薄い場合）

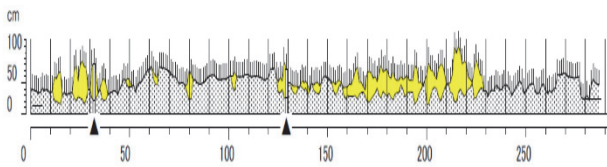


図-11 接触型レーダによる調査結果（覆工巻厚が厚い場合）

c) 実調査適用への展望

22トンネル全てに対する実証試験結果⁴⁾によれば、覆工コンクリート厚の相関係数 $R=0.77$ 、背面空洞厚の相関係数 $R=0.91$ であり、全体として良好な相関を示している。また、前述の詳細分析では、薄いトンネルにおいて特に高い相関を示している。

覆工巻厚の健全性（有効巻厚不足の判定）評価や、突発性崩壊の可能性評価の目標は、道路トンネル維持管理便覧によれば、覆工巻厚30cm未満が確認できること、また、背面空洞高さ30cm以上の有無判断ができることであり、これに対する非接触型レーダの探査性能は、本実証試験によって基本的に実証された。

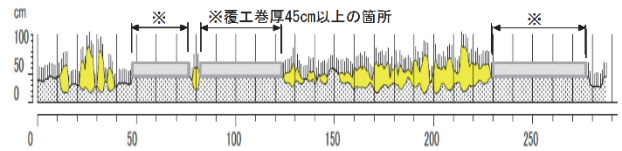


図-12 非接触型レーダによる調査結果（覆工巻厚が厚い場合）

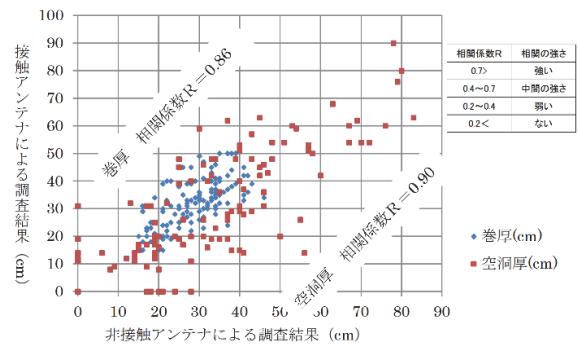


図-13 接触型と非接触型レーダによる調査結果の相関（覆工巻厚が厚い場合）

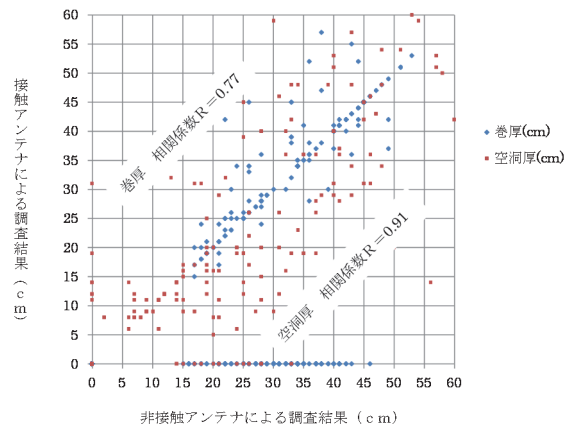


図-14 実証試験結果（検証結果全体の相関性）

5. 検出不能部分に対する分析結果とその対策

非接触型レーダでは、22トンネルのうち10トンネルの一部において適正データ検出不能となる範囲が発生した。

非接触型レーダは、探査対象までの離隔があるため、接触型レーダに比べ電磁波の拡散・減衰の影響が大きい。電磁波の照射領域をなるべく目標測線上に収斂させるよう指向性を高めているが、反射強度の高い金属製物体等が影響範囲内に入ると、金属からの強い反射により覆工背面からの反射が隠蔽されるという現象が現れる。これが検出不能の原因である。非接触型レーダの影響範囲模式図に照明の位置を記入したものを図-15に示す。影響大（赤×）に関しては、700mm×500mm程度の形状寸法の照明であり、影響小（青丸）に関しては、蛍光灯1本の照明であった。影響の程度は、照明自体の大きさに依存しており、トンネル延長方向に長く、幅の狭い蛍光灯照明は近距離にあっても殆ど影響を受けない。

さらに、金属製物体の大きさ以外にも配置間隔が影響

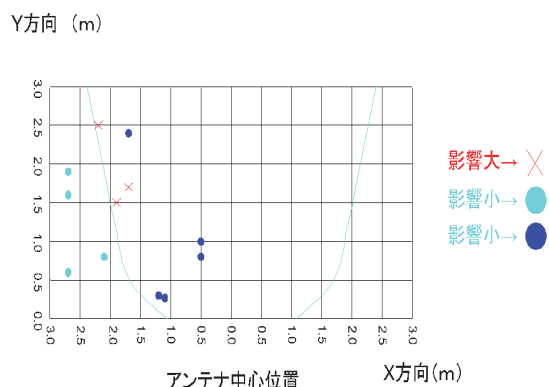


図-15 非接触型レーダーアンテナ影響範囲模式図

しており、照明等が少しでも影響範囲内に入ると検出不能になるわけではなく、坑口始終点の比較的照明が密に配置されている場所に関して影響のあることがわかった。

なお、MIMM-Rに搭載している非接触型レーダは、計測車両の鉛直上測線のみを計測する構造となっていたため、影響範囲内に金属物が入ると検出不能となってしまうが、アンテナを回転させることで、計測範囲を自由に設定できるよう、取り付け部の改良を加えた。

6. まとめ

今回実証試験を実施した22トンネルのうち、約半数の12トンネルの全延長において、従来技術である接触型レーダと新規技術である非接触型レーダによる探査を実施し、非接触型レーダの実用性が実証された。また、検出不能部分については、アンテナを傾倒させ、照明器具等による影響範囲外にシフトさせて計測を行うことによりデータ取得・解析を行うことが可能となった。

非接触型レーダを用いた走行型計測技術を開発したこ

とで、突発性崩壊の恐れがあるとされている覆工巻厚不足箇所や大規模な背面空洞箇所を、交通規制を行わずに調査することが可能となった。今回開発した技術は実用レベルにあり、すでに14トンネル（総延長12km）の調査実績、22トンネル（総延長6km）の検証実績がある。

なお、非接触型レーダの特性上、局所的巻厚不足箇所が覆工打設目地付近にある場合、レーダ探査範囲に照明灯具などがある場合、RC覆工構造で鉄筋が密に配置されている場合など、検出性能が低下するという状況を十分考慮し、適切に計測・解析結果を評価する必要がある。

7. 今後の課題

現在、内閣府による戦略的イノベーション創造プログラムでは、打音検査の補完技術として、より高性能な非接触型レーダーによる内部欠陥探査技術の開発を行っている。今後は、これら走行型計測を活用したトンネル点検・診断技術の開発・改良を進め、より効果的な点検手法の確立を目指す所存である。

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)、pp.5～8、1997
- 3) 安田亨、山本秀樹、北澤隆一：時速 50km でトンネル空洞探査、建設機械施工(Vol.66, No.12)、pp.51～56、2014
- 4) 山本秀樹、重田佳幸、小平哲也、安田亨、北澤隆一、名古屋淳：走行型計測によるトンネル覆工巻厚・空洞探査技術の開発、土木学会第 70 回年次学術講演会

TUNNEL LINING DEFLECTION SURVEY AND CAVITY DETECTION BY USING MOBILE SURVEY TECHNOLOGY

Hideki YAMAMOTO, Yoshiyuki SHIGETA, Tetsuya KODAIRA, Toru YASUDA
Ryuichi KITAZAWA and Yukio NARUSAWA

The multifunctional inspection vehicle "MIMM-R" was developed by integrating a noncontact type of GPR system to reveal tunnel lining thickness and cavity behind lining with the original inspection vehicle "MIMM", which had been developed for mobile tunnel inspection. The GPR system collects thickness data of lining and cavity while running at 50 to 70 km/h. This technology allows us to locate the lining with insufficient thickness and a large scale of cavity, at which sudden collapse might occur, without any traffic control. That may contribute much to cost cutback.

Through evaluation based on a conventional contact GPR this paper demonstrated that the newly developed noncontact GPR meets the required applicability.