# (14) ミリ波高速イメージングレーダーを用いた トンネル切羽モニタリング

岩城 英朗1・多田 浩幸1・能美 仁2

<sup>1</sup>正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17) E-mail: iwakih@shimz.co.jp, tada\_h@shimz.co.jp

<sup>2</sup>非会員 アルウェットテクノロジー株式会社 (〒181-0013 東京都三鷹市下連雀 3-2-24) E-mail: h-nohmi@altek.jp

山岳トンネル工事における肌落ち・落石等による死傷災害の防止対策のために、切羽の変状を面的かつ 非接触で捉えることが可能なミリ波高速イメージングレーダーの適用を検討している.

本論では、切羽の肌落ち・落石等の前兆を、削孔作業等に伴う切羽表面の微小な動きや振動数の変化と 考え、それらが同レーダーで捉える可能性を検証した.次に、切羽に対し同レーダーを適用する際に、レ ーダーで得られる計測値を、切羽に対して投影する座標変換における課題を示し、その対策として簡易的 な変換法を提案し実トンネルにおける計測実験を通じて検証した.

Key Words: tunnel face monitoring, safety assessment, millimeter wave, high speed imaging radar

## 1. はじめに

山岳トンネル工事における肌落ち・落石等による死傷 災害の防止対策が急務である.そのためには、切羽に対 して遠隔・非接触で、切羽のどの範囲で変状の徴候が発 生しているかを早期に検知できる計測手法の適用が有用 と考えられる.

遠隔・非接触で対象物の変状を捉えるためには、レー ザー光などの光波や波長が短い電波、すなわち電磁波を 計測対象に照射して対象物からの反射波を捉え、その往 復時間から対象物の変位を捉える手法(TOF法)に基づ くレーザー距離計などを用いる方法が考えられるが、こ れらは概ね、切羽のごく限られた箇所の計測に留まる. また、これらを切羽全域の計測、すなわち面的に行える よう拡張したレーザースキャナ或いは LiDAR などは、 サンプリング速度が比較的低く、既報<sup>D</sup>に示す通り、ド リルジャンボなどを用いた削孔作業に伴う切羽の振動を 捉えることは難しい.

そのため、対象物の振動を非接触で捉えるためには、 対象物に送信した光波を含む電磁波と、対象物からの反 射波の波長差、あるいは位相差から対象物の速度や位相 差を高速に捉える手法が有用であり、同手法を用いたレ ーザードップラ速度計(LDV)などの機器が既に開発され ている. この LDV を用いて上半らは斜面岩塊の崩落検知に向 けた検討を行っており、岩塊を模擬した試験体を用いた 実験では、LDV で計測した試験体表面の振動数が、試 験体が崩落する直前に、数百から数十 Hz まで低下する ことを示している<sup>2</sup>.

一方著者らは、対象物に波長が短い電波を照射し、その全ての範囲から反射、散乱する電波を同時に捉え解析 することで、対象物の微小な変位や振動を面的に捉える ことができる高速イメージングレーダーを用いれば、切 羽の変状の兆候が早期に検知できると考え、同レーダー を用いた切羽モニタリングの開発に取り組んできた。

まず,波長約 18mm(周波数約 17GHz)の電波を用い るレーダーを用いてトンネル切羽の計測を行い,小規模 な肌落ち現象を捉えることができる可能性を示すことが できた<sup>3)</sup>.しかし,同周波数帯を用いるレーダーは,受 信アンテナの全幅が 1~2m程度と大型になり,かつ複 数の物体を見分ける性能(空間分解能)が 0.5m 程度に 留まる課題があった.

そこで、本論では波長約 4mm の電波(周波数約 79GHz(ミリ波))を用いるミリ波高速イメージングレー ダーを新たに用い、その性能確認を行うと共に、トンネ ル切羽モニタリングへの適用可能性、すなわち切羽の微 小な変位あるいは振動数の変化を捉える可能性に対する 一連の検討結果を示す.

## 2. ミリ波高速イメージングレーダーの概要

トンネル切羽モニタリングへの適用を目指して開発したミリ波高速イメージングレーダーの外観および主要諸元を図-1 および表-1 に示す.

図-1 のレーダーの機器前面の送信アンテナから周波 数約79GHzの電波(ミリ波)を計測対象に送信(照射) し、それに伴い生じる対象物からの反射波(散乱波)を、 機器前面の複数の受信アンテナ(アンテナアレイ)で同 時に受信して各々のアンテナの受信信号を合成処理する ことにより、対象物からの散乱波の強さと位相差を画像 として(可視化)分布計測することができる.

## 3. ミリ波高速イメージングレーダーの基本試験

図-1 のレーダーを用いて切羽の肌落ちや落石の兆候 を捉えるためには、切羽削孔作業などに伴う切羽表面の 振動および微小な動き(変位)を面的に捉え、それらの 計測値の変化を早期に検知することが必要と考えられる.

そこでまず以下の基本試験を通じてレーダーの性能確 認を行い、その過程と計測結果などから、実トンネル切 羽に適用する際の課題抽出を行った.



図-1 ミリ波高速イメージングレーダー外観

表-1 ミリ波高速イメージングレーダー主要諸元

使用周波数带	79GHz 帯
アンテナ画角	(水平) ±17°
	(垂直) ±20°
観測距離	(最小)2m~(最大)100m
観測範囲(幅)	3. 7m
受信アンテナ全幅	0.11m(16素子)
距離分解能	0. 037m
方位分解能	1.95° (0.0034rad)
計測間隔	0.0005秒(最高)

## (1) 小型試験体を用いた微小変位および振動の計測

トンネル切羽の一部を想定した板状のコンクリート試験体(0.9m×0.9m)を、外部雑音などの影響を避けるために、電波無響室内にレーダーと約13mの離間で設置し、試験体に対し変位および打撃振動を加えた結果(計測値)を、併せて設置したLDVの計測値と比較した<sup>4</sup>.

本試験で用いたコンクリート試験体は、図-2 に示す ようなレーダー計測値(散乱波強度画像)では散乱波の 強度が高い赤色部として確認することができる.なお同 図の一画素のサイズは縦0.037m×横0.05mである.

試験体に対して約70mmの変位(押し出し)を加えた 結果,図-3の通りLDVの計測値との差が1mm未満であ り、レーダーによる計測値は妥当と考えられる.なお、 レーダーで得られる散乱波の位相差 $\phi$ から、変位*d*を求 めるためには、送信波の波長  $\lambda$  と以下の式(1)を用い、 波長を超える変位が生じた場合には位相差 $\phi$ に対して±  $\pi$ の補正を行うアンラップ処理<sup>5</sup>を用いている.

$$d = \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \tag{1}$$

図-4 は試験体の背面からハンマー打撃を与えた場合 の変位計測結果である. レーダーと LDV の変位計測値に 最大 0.2mm 程度の差が生じているが,各々の減衰振動周 期を求めたところ,ミリ波レーダーの計測値から求めた 周期 0.24秒に対して LDV の計測値から求めた周期が 0.22 秒と概ね等しい結果となった.





#### (2) 振動および微小変位の分布計測

次に、図−5 に示すように切羽を模擬したコンクリー ト吹きつけパネルを 48 枚配置した壁面試験体をトンネ ルを模擬した試験施設内に設置し、パネルの背面や枠部 に対して変位や振動を加え、約15m離れた位置に設置し たミリ波レーダーで試験体の変化を計測した<sup>9</sup>.

図-5 のパネル間の枠(位置 A, 位置 B) に対して背面 からハンマー打撃を与えた際のパネル 17(左側面), パネル 20(中央部), パネル 24(右側面)に相当する 点における微小変位の時刻歴変化を図-6に示す.この 結果,位置 A,位置 B からの打撃のいずれにおいても 各々のパネルで振動が検知できるが,位置 A の打撃にお いてはパネル 17の振幅が最も大きく,位置 B の打撃に おいては近接するパネル 20の振幅が最も大きい.これ は、レーダーが計測位置に沿って振動分布を計測できる 可能性を示している.また,これらの振幅の差から,振 動発生位置の大まかな推定も可能となると考えられる.

#### 4. トンネル切羽への適用

前章の基本試験の結果を踏まえて、図-1のレーダー を施工中のトンネル切羽近傍に設置し、削孔作業中の計 測を試行した.レーダーは切羽直近で作業中のドリルジ ャンボ等を避けトンネル左側壁部に三脚で設置し、切羽 との離間を約19mとり、受信アンテナ中心を切羽中央に 向けた.

#### (1) 切羽適用における課題

実トンネル切羽に対する計測で取得した散乱波強度画 像を図-7 に示す. 図-7 の縦軸は受信アンテナ中心から の距離(レンジ)を示し,横軸は受信アンテナ中心から の水平角を距離換算した値(アジマス)を表している. 同図から切羽直近で作業中のドリルジャンボなどからの 強い散乱波(赤色部分)を受信していることが確認でき るが,切羽の範囲の抽出は難しい.



図-7 のようなレーダー計測値, すなわちレーダー座 標系に基づくレーダー画像を, 直交座標系で表される切 羽面に投影するためには, 切羽とレーダーの相対位置お よび設置角度を用いた変換行列を求めて同行列を用いた 投影変換を行う方法が一般的であるが, 変換行列を求め

る手順は必ずしも簡便ではない.そこで、本論ではレー ダーと切羽の距離と設置角度を用いた簡易変換を示す. レーダーを切羽から距離Dの左側壁面の接した箇所に、 切羽中央(左右壁面からの距離aが等しい部分)に向け

切羽中央(左右壁面からの距離 a が等しい部分)に向け て設置し、レーダーの受信アンテナ中心と切羽中央を結 ぶ軸線長 Rに対する入射角  $\theta$  の余弦長(ベースライン長) を $D_b$ とすると、レーダー座標系(横軸 $A_z$ ,縦軸r)で表 される計測値は、以下の式(2),(3),(4)で切羽面の座標系 (横軸x,縦軸y)に投影変換できる.なお fは、レー ダー計測値(画像)のゆがみを補正するための関数(参 照関数)である.

$$x = \frac{D_b}{D} A_z \tag{2}$$

$$y = \sqrt{\left(\frac{r}{sf}\right)^2 - D^2 - \left(\frac{D_b}{D}A_z + a\right)^2} \tag{3}$$

$$sf = \sqrt{\frac{D^2 + \left(\frac{D_b}{D}A_z + a\right)^2}{D^2 + \left(\frac{D_b}{D}A_z + a\right)^2 + {A_z}^2}}$$
(4)

### (2) 切羽への適用結果

前節で示した簡易変換を用いると、切羽に投影したレ ーダー計測値(散乱波強度)は図-8のように表され、 計測を通じた天端付近の変位と卓越周波数の変化が図-9 にように容易に抽出できる.ドリルジャンボによる削孔 作業等でレーダーから切羽が不可視となる時間帯の影響 で、天端付近の変位が 0.2m以上の値を示しているが、 位相差から求めた卓越周波数は大きな変動はなく作業の 影響はほぼ見られない.

## 5. まとめ

トンネル切羽の肌落ち・落石等を早期に検知するため の計測法として、ミリ波高速イメージングレーダーを用 いる非接触計測手法の開発を行った.

板状コンクリート試験体を用いた単体試験から、レー ダーで取得した計測値の確からしさの検証を行い、分布 振動計測を通じて面的に拡がりを持つ対象における変位 振幅の違いから、振動発生位置の推定の可能性を示した.

さらにトンネル切羽への適用に際し、レーダー計測値 を切羽に投影する際の簡易な投影変換手法を示し、その 手法により切羽の作業位置および変状発生位置の大まか な推定を可能とした.

実際の切羽の計測では、ドリルジャンボの作業の影響 で、計測範囲の一部で散乱波強度および変位計測値に大 きな変化が認められるが、その一方で卓越周波数は概ね 一定の範囲で変動している.すなわち、切羽の変状、す なわち肌落ちや落石の兆候を作業に影響されずに早期に 捉えるためには、変位計測値と卓越周波数、さら散乱波 強度と位相振幅を含めた総合的な計測・解析が必要と考 えられる.

今後は実トンネル切羽に対して本レーダーを用いた計 測の蓄積,解析を通じて,切羽の肌落ち・落石等を早期 に検知するための指標および閾値の導出を行い,本手法 の有用性の提示と実用化を目指す予定である.



図-8 切羽に投影したレーダー計測値(散乱波強度)



#### 参考文献

- 岩城英朗, 鵜山尚大, 多田浩幸:光波を用いた非接触計測 に基づく切羽変位の面的計測に関する検討, 土木学会第 73回年次学術講演会, VI-051, pp. 101-102, 2018.
- 上半文昭,太田岳洋,石原朋和[他]:非接触振動計測による岩塊崩落危険度の定量評価手法の検討,鉄道総研報告,26(8),pp.47-52,2012.
- 3) 多田浩幸, 岩城英朗, 青野泰久[他]:高速イメージングレ ーダーによる切羽変位の面的計測に関する検討, 土木学 会第73回年次学術講演会, VI-050, pp. 99-100, 2018.
- 4) 岩城英朗,多田浩幸,青野泰久[他]:トンネル切羽モニタ リングに向けたミリ波高速イメージングレーダーの性能 確認,土木学会第74回年次学術講演会,CS9-22, pp. CS9-22, 2019.
- Oppenheim A. V., Schafer R. W. : Digital Signal Processing, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1975.
- 6) 岩城英朗,多田浩幸,能美仁:トンネル切羽モニタリングに向けたミリ波高速イメージングレーダーの面的振動計測性能の確認,土木学会第75回年次学術講演会,2020.