

ミリ波振動可視化レーダーによるトンネル切羽モニタリング
(その1) 計測システムの概要と現場における試験計測結果

清水建設（株） 正会員 ○岩城 英朗，正会員 西 琢郎，正会員 多田 浩幸
アルウェットテクノロジー（株） 正会員 能美 仁

1. はじめに

著者らは、山岳トンネル工事における切羽の肌落ち・崩落による死傷災害の防止対策として、非接触かつ面的な計測が出来る電波を用いたモニタリングシステムの開発に取り組んでいる。既報¹⁾²⁾³⁾では、このシステムで用いるミリ波振動可視化レーダーを開発し、その性能が従来のレーダーと比較し大幅に向上した結果を示した。本報では、このシステム（トンネル切羽モニタリングシステム）の概要と、実際のトンネル施工現場における試験適用結果を示す。

2. トンネル切羽モニタリングシステムの概要

本システムで用いるミリ波振動可視化レーダーは、トンネル切羽など面的に拡がりを持つ対象に対してミリ波（周波数 78[GHz]（波長 3.8[mm]）の電波）を照射し、その結果発生する計測対象からの反射波（散乱波）を、複数のアンテナ（アンテナアレイ）で同時に捉えるもので、この受信信号をリアルタイムで合成処理することで対象物の位置や動き（振動）を面的かつ高速で捉えることができる新たなレーダーである。この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。

このレーダーを用いるトンネル切羽モニタリングシステムは、レーダー本体に加えて、レーダーと切羽との距離および角度を面的に3D点群の形式で取得する3D-LiDAR、さらにこれらの機器を制御し計測結果を表示するためのタブレット端末で構成されている。レーダーは小型で三脚を用いて切羽近傍の路盤に設置でき、さらにシステムはバッテリー駆動できるため、AC電源の敷設は必ずしも要しないことから、現場での運用性が大きく向上している。

3. トンネル切羽モニタリングに適用する際の課題

このレーダーの基本性能の確認のために、外部雑音などの影響を避ける電波無響室内で小型パネル試験体を用いた変位および振動計測を行った結果、計測対象からの散乱波の強さ（散乱波強度）が十分に大きい場合0.1[mm]未満の変位計測精度が期待できることを確認した³⁾。

実際のトンネル切羽モニタリングにこのレーダーを適用する際にはまず、トンネル切羽からの散乱波がレーダーの計測精度に影響を及ぼさないよう十分に強く、さらにトンネル壁面や切羽近傍で稼働する建機の影響を受けないことを確認する必要がある。また、表-1の通りこのレーダーは、計測対象との距離に対しては4cm未満の高い分解能（距離分解能）を持つが、レーダー本体の高さ方向、すなわちレーダー前面の受信アンテナアレイと直交する方向の分解能は有しない。そのため、レーダーを路盤に設置する際に適切な上向き角（仰角）を設定して、切羽の高さ方向でレーダーとの距離が等しい点が複数存在することが無いように注意する必要がある。また、レーダーの計測範囲±15°に切羽の全幅が収まるよう、レーダーと切羽の距離を適切に確保する必要がある。例えば全幅10[m]の切羽全域を計測するために必要な距離は約17.4[m]である。



図-1 レーダー外観

表-1 レーダー主要諸元

使用周波数	78GHz 帯
計測範囲	±15°
受信アンテナ全幅	0.11m (16 素子)
距離分解能	0.038m
方位分解能	1.94°
計測間隔	0.001 秒(1KHz)

キーワード トンネル切羽，モニタリング，非接触計測，ミリ波，振動可視化レーダー

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設（株）技術研究所 TEL 03-3820-5504

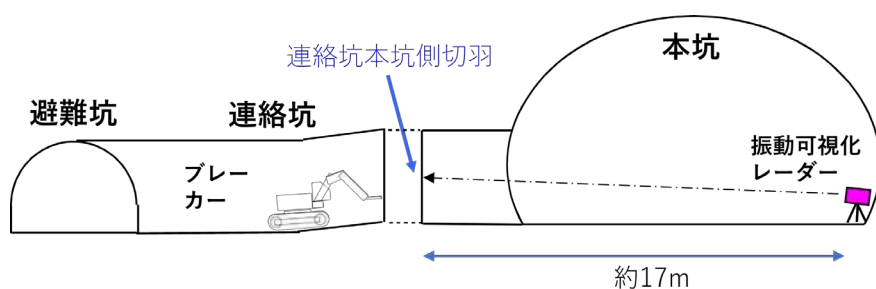


図-2 試験計測時のシステム設置概要（横断面図）

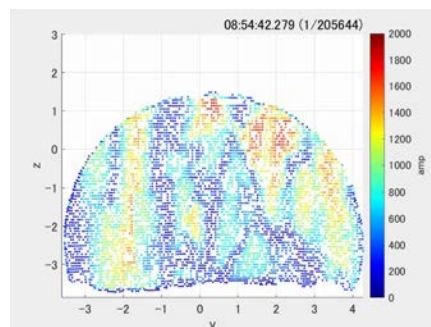


図-3 掘削開始前の切羽からの散乱波強度分布

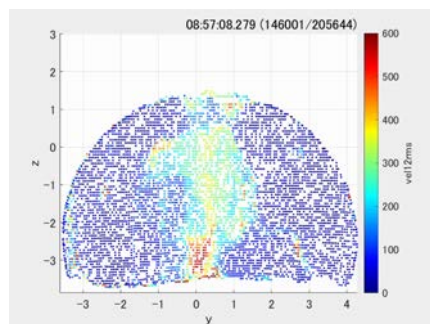


図-4 貫通時の切羽の速度分布

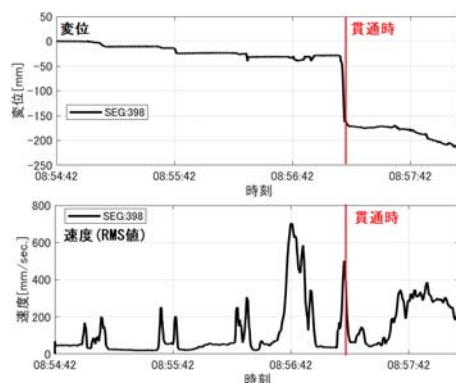


図-5 貫通部の計測結果



図-6 貫通後の切羽状況

4. 山岳トンネル工事における試験計測の概要と結果

前項までに示した成果および課題を踏まえて、実際の山岳トンネル工事（T トンネル施工現場）の避難坑と本坑を接続する連絡坑の切羽（高さ約5[m]、幅約7[m]）の貫通前後の変化を捉えるために、図-2のように切羽の正面にレーダーを設置して計測を行った。レーダーと切羽の距離は約17[m]であった。なお、掘削するブレイカーは切羽の背面で作業するため、レーダーと切羽の間に計測の支障となる大きな障害物は無く、掘削開始前の散乱波強度分布（図-3）から、切羽全域から十分な散乱波強度が得られていることが確認できる。

計測の結果、貫通時の切羽の速度分布は図-4に、貫通部の変位と速度（1秒間RMS値）は図-5のように得られた。掘削開始後から貫通部では目視での認識は難しい切羽の微小な変化（変位）が生じており、それに伴って比較的大きな速度変化が見られる。さらに貫通時、切羽で岩塊の崩落が生じる以前にも、急激な速度変化が生じている。

5. まとめ

ミリ波振動可視化レーダーを用いたトンネル切羽モニタリングシステムを、山岳トンネル工事における連絡坑貫通時に試適用した。この結果、切羽の微小な変化を10[m]以上離れた位置において0.1[mm]の精度で、高速に捉えることができることを確認した。さらに、貫通前後の計測値から、切羽に大きな変状が生じる貫通部周辺において、大きな速度変化を切羽の岩塊崩落以前に捉えることが出来た。これは、切羽の異常を早期に検出するための因子として非常に有望と考えられる。今後は、現場への適用試験等を通じて、このシステムが切羽における災害防止に寄与できるよう、早期の実用化に向け取り組む所存である。

参考文献

- 1) 岩城英朗ほか：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，2019.09
- 2) 岩城英朗ほか：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，2020.09
- 3) 岩城英朗ほか：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振動計測性能の向上，土木学会第77回年次学術講演会，2022.09