

GB-SARを用いたトンネル切羽計測システムの適用実験

安藤ハザマ 土木技術統括部 正会員○井ノ口拓郎 正会員 中谷匡志 正会員 山本浩之
名古屋支店土木部河津トンネル作業所 遠藤修一 平方宏朋
東北大学 佐藤源之

1. はじめに

施工中の山岳トンネルにおいては、切羽面からの落石は重篤な災害につながる可能性が高いため、確実な安全管理が求められる。そのため、切羽監視では、従来の目視観察に加え、変位計測による合理的な監視手法が必要と考えられる。

地上設置型合成開口レーダ（以下、GB-SAR）は、地上に設置したアンテナを移動させながら計測することで、小さなアンテナを用いて仮想的に大きな開口面を作り出し、観測範囲の変位を精度良く検知可能な技術である。本稿では、開発を進めている GB-SAR を用いたトンネル切羽監視システム¹⁾の概要と、トンネル現場で実施した適用実験について報告する。

2. システム概要

本システムは、アンテナユニットと制御用 PC から構成される。リアルタイム計測が求められる切羽監視のため、アンテナは、MIMO（Multiple Input Multiple Output）形式とした。本システムの MIMO アンテナは、送信 8 基、受信 16 基のアンテナ素子を直線的に配置し、送受信を電氣的に制御することで、アンテナを移動させて計測する形式に比べ、計測間隔を短縮した。また、アンテナの前面には保護カバーを装着し、防水防塵仕様とした。さらに、両端部にレーザを設置し、監視範囲のガイドとした。図-1 に計測概念図、写真-1 にアンテナユニット外観、表-1 にシステム諸元を示す。

システムにより計測される変位量は、計測毎の反射波の位相差から算出され、電波の性質上、算出限界は $\lambda/4$ 以内の位相差となる。本システムの算出限界は $\pm 3.1\text{mm}$ となるが、計測時間が 1 秒程度と短時間であることから、計測対象の変位が算出限界を超える場合に対しても概ね検知可能である。

3. 実験概要

実験は、国土交通省中部地方整備局発注の河津下田道路河津トンネル小鍋地区工事現場で実施した。本トンネルは NATM で建設される延長 487m（トンネル全長 1884m）の道路トンネルで、標準断面積は 94.7m^2 である。実験区間は、機械方式により掘削を行う TD.13~43m とし、合計 14 測点の切羽で計測を実施した。トンネルの地質は、新第三紀中新世の湯ヶ島層群安山岩を主体とし、実験区間の起点側坑口付近では、安山岩の貫入による変質強風化した湯ヶ島層群凝灰質砂岩が分布した。

検証は、切羽監視のための有効なシステム配置を検討することを目的とし、計測距離を 10m と 15m とした場合
キーワード：GB-SAR, 切羽計測, 切羽監視, 肌落ち

連絡先：〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目 1 番 20 号 TEL：03-6234-3670 FAX：03-6234-3704

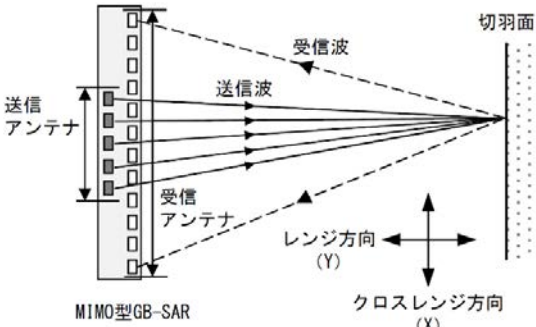


図-1 MIMO 型 GB-SAR 計測概念



写真-1 アンテナユニット外観

表-1 システム諸元

中心周波数	24GHz
波長 λ	12.4mm
差分の算出限界 $\lambda/4$	3.1mm
計測時間	1秒程度
アンテナユニット寸法	100×20×20cm 約 10kg

の計測結果を比較した。また、切羽面の任意の位置に変状を発生させるため、油圧ブレーカによる打撃を行い、打撃前後での切羽面の差分を算出した。なお、油圧ブレーカは、電波の視通を考慮し切羽の左側に配置した。実験は、安全確保のため、切羽面にコンクリート吹付けを行った状態で実施した。写真-2 に実験状況を示す。

4. 実験結果

実験結果の例として、TD.13m の切羽における変状発生後の変位分布図を図-2 に示す。図中、本システムで検知した変位量をカラーマップで可視化しており、赤系色で示される部分は、反射波の伝播距離が長くなったことを示す。また、白丸で示す範囲は大きな変状が発生した位置を示しており、実際の現象と一致した結果が得られているものと考えられる。

詳細な分析のため、検証範囲（図-2 参照）における平均変位量を図-3 に示す。図中、レーザ距離計による計測結果と目視観察により確認した落石発生時刻を合わせて示す。実験では、油圧ブレーカによる打撃後、変状発生範囲で3回の落石が発生した。落石はいずれも長辺 20cm 程度の吹付コンクリートを含む岩塊であった。

5. 考察

図-3 に示すように、本システムによる結果では、時間経過とともに、変位量の増加傾向を捉えており、切羽の変状を精度良く変状を検知できているものと考えられる。これに対し、レーザ距離計では、不明瞭な結果となっており、変状を見落としている可能性が考えられる。また、落石①および③の発生時刻では、急激な変位量増加が確認できるものの、落石②では比較的増加は小さい結果であった。これについては、本システムによる差分の算出限界を超える変位速度で変状が進行したことが原因として考えられる。

計測精度の検証として、落石に対して変状の進行を検知できた場合を○評価とし、検知できなかった場合を×評価とした。全実験区間における各計測距離の検証結果を表-2 に示す。計測距離 10m では、42 回の落石発生に対して 71.4%の変状を検知できたが、28.6%の見逃しがあった。一方、計測距離 15m では、検知率は 42.0%であり、計測距離が長くなることで、精度が低下したと考えられる。

6. おわりに

実際のトンネル現場において、GB-SAR を用いたトンネル切羽計測システムを適用し、変状検知精度の検証を行った。その結果、発生した落石に対して、計測距離 10m では7割程度の割合で検知可能であることを確認した。今後は、様々な現場での運用を進め、データを蓄積するとともに、システムの小型化等の改良を進める計画である。

参考文献 1)井ノ口ほか (2020)：合成開口レーダによるトンネル切羽計測の可視化手法の検討，令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会，VI-1006。



写真-2 実験状況

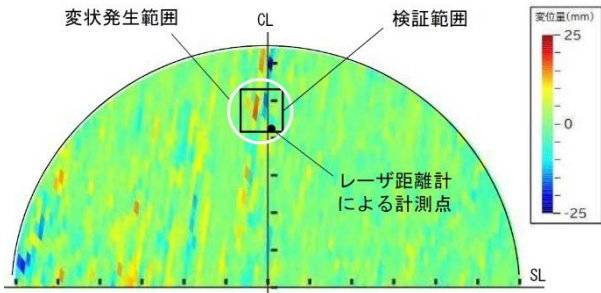


図-2 切羽の累積変位分布図

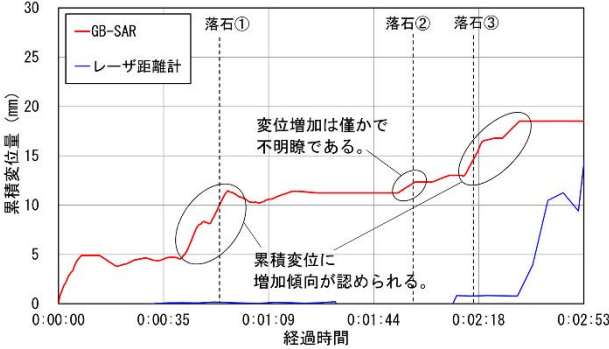


図-3 検証範囲の経時変化グラフ

表-2 落石に対する検証結果

計測距離	落石回数	検証結果 (データ数・%)			
		○		×	
10m	42	30	71.4%	12	28.6%
15m	50	21	42.0%	29	58.0%

変状の検知 ○：検知できている ×：検知できていない