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

清水建設(株)　正会員　○多田　浩幸，岩城　英朗，青野　泰久
アルウェットテクノロジー(株)　正会員　能美　仁，非会員　白井　郁夫，能美　陽

１．はじめに

山岳トンネル工事において，肌落ち・落石による死傷災害は，装薬，支保工建込などの作業員が切羽に近づかなければ出来ない作業中に多く発生している[1)]．このため，厚生労働省は「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」[2)]を策定した．肌落ちによる災害防止対策の一つとして切羽変位計測が挙げられる．著者らは，レーダー技術を用いて，切羽面の変位と振動を計測することにより，切羽作業中の地山の緩み・崩落を予知するシステムの開発に取り組んでいる．本報では，高速イメージングレーダーによる切羽変位の現場計測実験を行い，面的計測への適用性について検討したので報告する．

２．高速イメージングレーダーの概要

切羽変位計測に関して，これまで，レーザー距離計を用いた切羽面の変位計測と警報をセットにしたシステムの開発が行われている[3)]．レーザー距離計を用いる場合，１つの距離計で１点の変位を測るため，切羽全体の変位状況を把握するには多数の距離計が必要となる．一方，レーザースキャナを用いれば多点の距離計測を１度で行うことが可能であるが，計測対象物の表面の粗さやレーザーの照射角度の影響により，計測結果にばらつきが生じ[4)]，１㎜以下の微小な変位を計測することは，現状困難な状況にあると考えられる．

著者らは，観測対象物を面的に観測することが可能なイメージングレーダーに着目して，レーダー計測によって切羽面の変位と振動を同時に面的に計測するシステムの開発に取り組んでいる．レーダーは，電波を対象物に向けて発射し，その反射波を観測することにより，対象物の検出，距離および方向等を明らかにする装置である[5)]．イメージングレーダーは，レーダーを発展させて，反射波を相関処理等の特殊な処理を行うことで，観測対象物の面的な変位分布を高精度に計測することができる．本検討では，イメージングレーダーの一つであるアルウェットテクノジー社製の高速イメージングレーダー（振動可視化レーダー「VirA」）を使用した．本レーダー装置の外観を**図-1** に，本装置の仕様を**表-1** に示す．本レーダーは，橋梁，ビル等の大型構造物の振動計測に適用された実績があり，振動，変位を遠方から面的に計測することが可能である．

図-1 装置の外観

表-1 装置仕様

観測範囲	仰角：30 度 方位角：45 度
方位分解能	0.5 度
撮像速度	2000 回/秒 MAX
解析周波数	250Hz 以下
計測振動振幅	0.01mm 程度

３．　現場計測実験

３．１　実験方法　上記のレーダーをトンネル現場に持ち込み，切羽面の変位計測を行う現場計測実験を行った．実験は砂岩地山のトンネルで実施した．レーダーの計測配置を**図-2** に示す．切羽から約 15.5m 後方の左側壁に近づけてレーダーを設置し，電波が切羽の中央に向けて照射されるように，レーダー本体をやや上向きに傾斜させて設置した．計測は，切羽に施工機械が

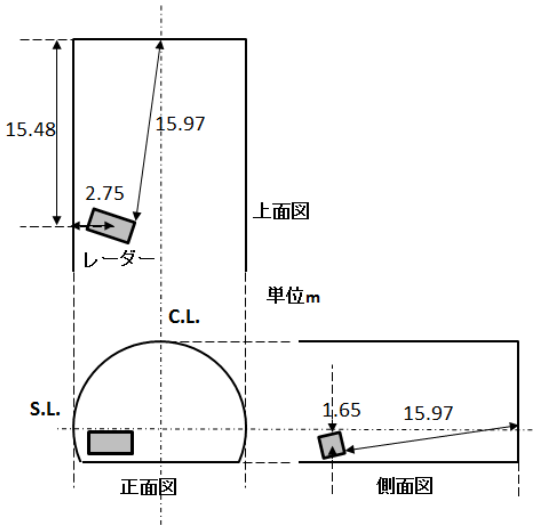

図-2 計測配置

キーワード　切羽，崩壊，変位，計測，レーダー
連絡先　〒135-8530　東京都江東区越中島 3-4-17　TEL 03-3820-8467　FAX 03-3643-7260

ない状態（計測 1）と，切羽で削孔作業等が行われている状態（計測 2）に分けて行った．

計測 1 では，鏡吹付け作業を行った後，ドリルジャンボ等の施工機械がない静穏な状態での計測を約 10 分間行った．計測 2 では，ドリルジャンボが切羽に接近して発破削孔作業が行われている時に約 10 分間計測を行った．本レーダーによる計測では，変位や振動および受信強度が得られる．これらの計測データは図-3 に示すような切羽面上の格子状に区切られた画素ごとに得られる．画素数は鉛直方向 5，水平方向 64 の計 320 画素で，そのうち切羽面内の 210 画素が観測対象となった．レーダー画像上の 1 画素の幅は 0.2m，高さは 0.5m である．

３．２　実験結果　計測結果の例として，切羽面内の観測対象画素のうち，削孔作業中に幅 30cm 弱の鏡吹付けコンクリートの塊が小剥落した箇所と何も変状が見られかった箇所の 2 箇所を抽出して変位ΔS の時刻歴を求めた．図-4～図-6 に，計測 1 における施工機械がない静穏な状態，計測 2 における削孔作業中のある時刻，計測 2 における鏡吹付けコンクリートの小剥落発生時の変位時刻歴を示す．変位量は切羽前方に動く方向を正，後方に動く方向を負とした．ジャンボ進入前の静穏な状態では，非変状部，小剥落部ともに変位量はほぼゼロであった．一方，削孔作業中は図-5 に示すように，非変状部，小剥落部とも 2mm 程度の変位の変動が切羽面に生じた．また，小剥落発生時，非変状部では大きな変位は生じていないが，小剥落部では 15mm 程度切羽が押し出しくる変位挙動が計測された．このように，観測対象面内の任意の位置において，同時に変位量を計測できることがわかった．

４．まとめ

高速イメージングレーダーをトンネル作業環境下での切羽変位計測に適用した．実験結果から，各作業状況に応じた切羽面の変位挙動を同時に面的に計測できることを確認した．今後は本レーダーを用いた切羽作業中の地山の緩み・崩落を予知するシステムとしての計測方法，計測データの処理方法，切羽崩壊予知の方法などの検討を進めていきたい．

参考文献：1) 吉川直孝，他：トンネル切羽の肌落ちによる死傷災害の調査分析と安定対策の検討,土木学会論文集 F6（安全問題）, Vol.67, No.2, I_125-I_130, 2011.　2) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン, 2016.　3) 寺島佳宏，他：多点同時変位計測による切羽安全監視システムの開発と不良地山における試験適用，トンネル工学報告集第 20 巻, pp.219-223, 2010.　4) 二瓶貴広，溝口知宏：高速 3D スキャナによるトンネル切羽の突発的変位のリアルタイム検出性能評価, 2017 年度精密工学会東北支部学術講演会，C02，2017.　5) 17GHz 帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討会：17GHz 帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討報告書, 2013.

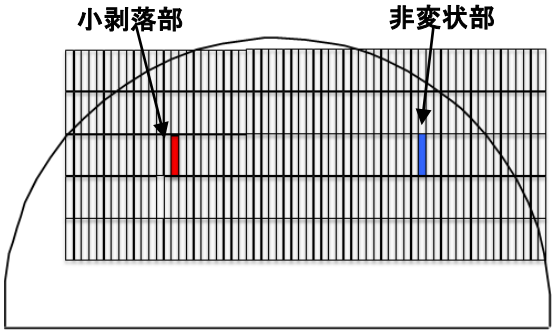

図-3 切羽面の計測結果抽出箇所

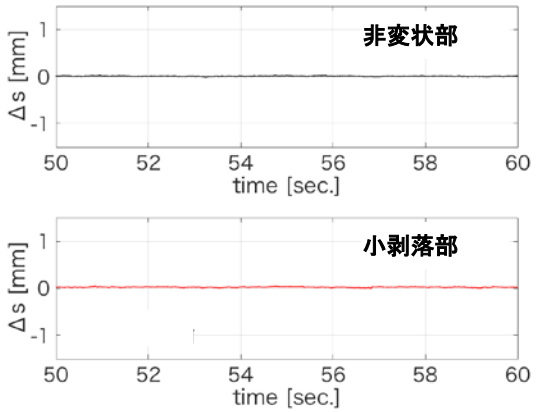

図-4　削孔前の変位時刻歴

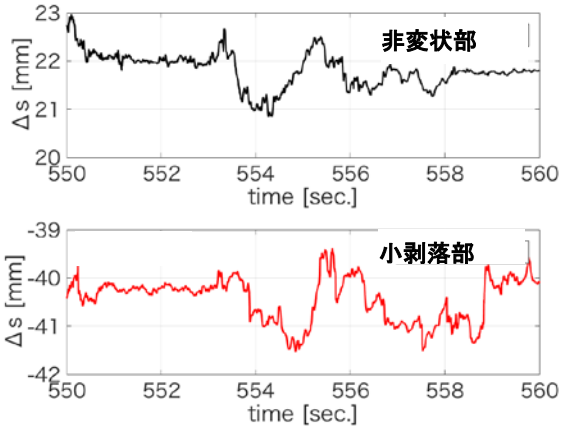

図-5　削孔中の変位時刻歴

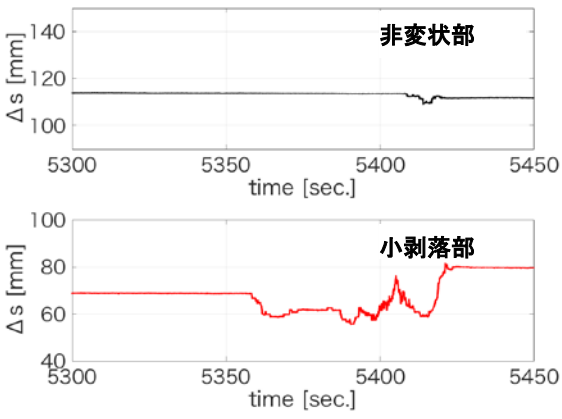

図-6　小剥落発生時の変位時刻歴