

高速 3D スキャナを用いた掘削形状モニタリングシステムの開発 Development of excavation shape monitoring system using high-speed 3D scanner

山本 悟*

山下 雅之**

Satoru Yamamoto

Masayuki Yamashita

石垣 純一**

岡 竜**

Junichi Ishigaki

Ryo Oka

要 約

山岳トンネル切羽でのあたり取りの際、作業員が切羽直下に立入り、目視にて整形が必要な箇所（以下、あたり箇所）を判断してレーザーポインタ等で指示を出していた。しかし、切羽は岩塊の抜け落ち（肌落ち）がひとたび発生すると、死傷災害につながる可能性が高い危険な場所である。そこで、重機に搭載した高速3D スキャナを用いて切羽の掘削形状の3次元データを取得し、設計断面と比較してあたり箇所を迅速に可視化することで、作業の安全性向上と効率化を図る技術「掘削形状モニタリングシステム」を開発した。本報告では、本技術の概要について述べるとともに、国土交通省の令和元年度「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」に採択され、実現場で検証した実績を紹介する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 掘削形状モニタリングシステムの概要
- § 3. 現場適用事例
- § 4. 現場適用で得られた課題
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

山岳トンネル掘削の最先端部である切羽においては、発破後に掘削設計断面線よりも内空側に残った地山を掘削する整形作業（以下、あたり取り）が行われている。これまで、あたり取りの際は作業員が切羽直下に立入り、目視にて整形が必要な箇所（以下、あたり箇所）を判断してレーザーポインタ等で重機オペレータに指示を出していた（図-1）。しかし、切羽は地山が露出しており、岩塊の抜け落ち（肌落ち）が発生すると、死傷災害につながる可能性が高い危険な場所である。このような背景から、あたり取りを行う建設機械（以下、ブレーカ）に搭載した高速3D スキャナ（以下、スキャナ）で切羽の掘削形状の3次元データを取得し、設計断面と比較してあたり箇所を迅速に可視化することで、作業の安全性向上



図-1 従来のあたり取り

と効率化を図る技術「切羽掘削形状モニタリングシステム」を開発した。本稿では、開発技術の概要を紹介するとともに、実現場で検証した実績を紹介する。

§ 2. 掘削形状モニタリングシステムの概要

発破・ずり出し完了後の切羽において、あたり取りを行うブレーカに搭載したスキャナで切羽の掘削形状を計測する。掘削形状の3次元データと設計断面を比較し、あたり箇所を重機キャビン内のモニタにヒートマップ表示させる。オペレータは表示を基にあたり取り作業を行うため、切羽に立入ること無くあたり取り作業を行うことができる。計測開始の指令から結果表示まで迅速である

* 技術研究所土木技術グループ

** 技術研究所

*** 西日本（支）内島トンネル（出）

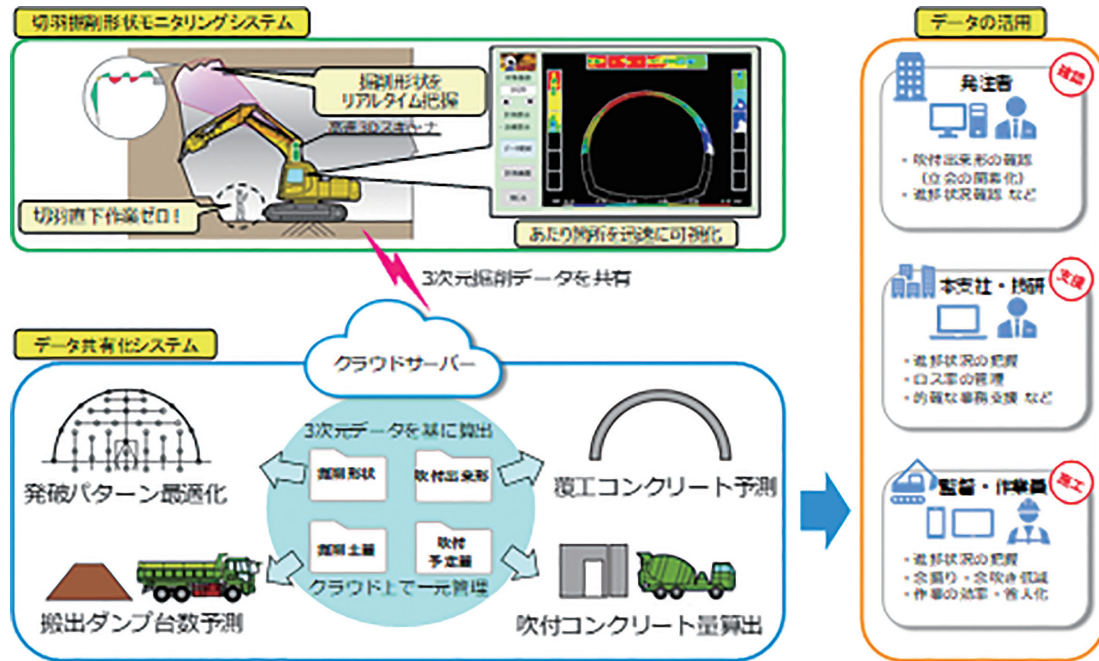


図-2 システム利用イメージ

ため、掘削サイクルに影響を与えることなく、効率的なトンネル作業を実現する。切羽にて得られた掘削形状の点群データおよび施工データはトンネル坑内ネットワークを経由してクラウドサーバ上に蓄積されるため、リアルタイムで作業進捗、予定吹付量、余掘り量等の各種データを発注者、職員・作業員、技術研究所などで共有することが可能である。図-2 にシステムの利用イメージを示すとともに、以下に本技術の特徴を述べる。

2-1 3D スキャナシステム

ブレイカには3D スキャナシステムが搭載されている。3D スキャナシステムはスキャナおよびこれを保護するための保護BOX、免振架台および傾きを検出する傾斜セ

ンサ、これらを制御するためのPCやシーケンサを内蔵した制御ボックス、システム操作用の運転席タブレットPC、無線LANアクセスポイントで構成されており(図-3)、システムの電源は重機バッテリーによって供給される。

切羽の計測や後述する特殊基準球の計測に使用するスキャナは図-4のような外観・寸法で、上部のスキャンヘッドを回転させながらレーザーを出力することで周囲を3次元スキャンできる。スキャンヘッドは最大回転速度15 rev/s、回転角加速度は100,000°/s²と非常に高速で動作し、図-5のように様々な動作パターンが可能のため、必要な範囲を必要な密度で素早く計測できる。さらに動作はすべてプログラミングが可能であるため、高度なリアルタイム処理システムを構築することができる。



図-3 システム現場運用状況

切羽での計測時は運転席タブレット PC から計測開始の指令を出し、計測データの計算やあたり箇所へのヒートマップ表示を行う（図-6）。

2-2 特殊基準球

ブレイカの後方 30 m~50 m の範囲に中心にプリズムを内蔵した特殊基準球を 3 個配置する（図-7）。これら特殊基準球のプリズムの中心位置はトンネル坑内に設置されたトータルステーション（以下、TS）で事前に測地座標系（水平直角座標系）における位置を計測しておく。一方、スキャナでは特殊基準球の球面側を計測し最小二乗法で中心座標を算出することで、スキャナのローカル座標系における特殊基準球の位置を取得できる。これらの位置の相関から測地座標系（水平直角座標系）とスキャナのローカル座標系の関係を算出し、スキャナの絶対座標系での位置と姿勢を求める。

2-3 システムネットワーク構成

図-9 に検証現場で構成した切羽掘削形状モニタリングシステムのネットワーク構成を示す。ブレイカ上の 3D スキャナシステムは切羽後方に配置した電源台車の無線 LAN アクセスポイントを経由して現場内ネットワークにアクセスし、切羽での計測が完了するたびに計測データを現場のサーバ PC に転送する。サーバ PC は 3D スキャナシステムから計測データが転送されてくるときにインターネットを介して専用のクラウドサーバにアクセスして、クラウドサーバ用に予定吹付量、余掘り量、掘削土量等の施工データを生成して自動的にアップロードを行う。クラウドサーバ上のデータベース（図-8）はウェブサイトとして発注者、現場事務所、職員・作業員、技術研究所などの端末から閲覧・ダウンロードが可能である。

切羽においては、余掘り量および切羽掘削形状から発破パターンの見直しを行うことで、次サイクルの余掘り量低減を図る。

また、バッチャープラントに設置したタブレット PC からクラウドデータベース上の予定吹付コンクリート量を閲覧し、現在の切羽で必要な吹付けコンクリートの適

切な量を製造するため、戻りコンを削減することが出来る。なお、当システムはブレイカ内で独立して稼働することもできるため、坑内ネットワークが構築されていない現場においても運用することが可能である。

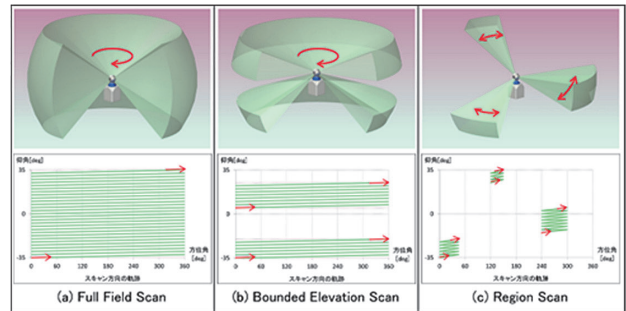


図-5 高速 3D スキャナの動作パターン

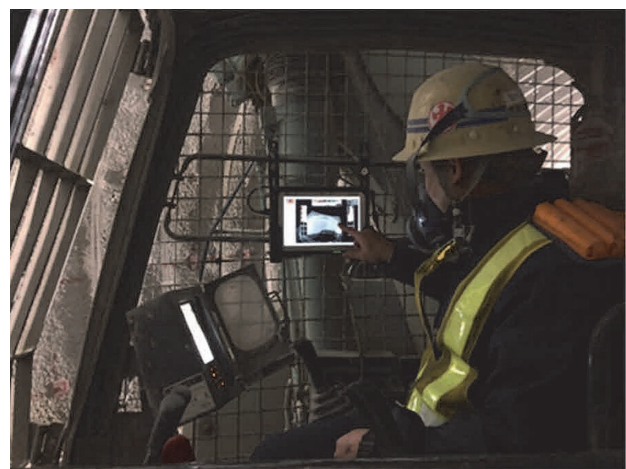


図-6 重機キャビン内操作状況

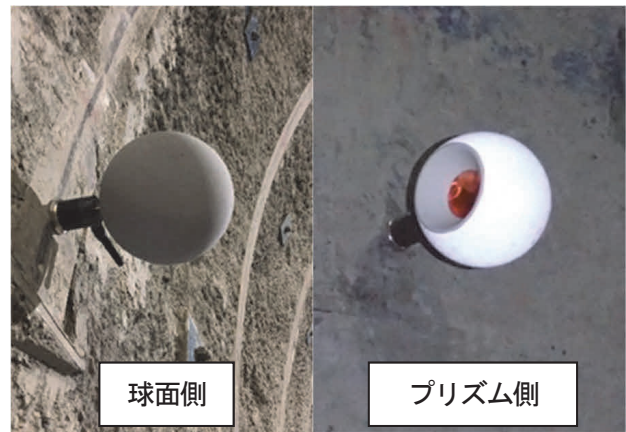


図-7 特殊基準球



図-4 高速 3D スキャナの外觀・寸法

「木原道路内蔵トンネル工事」施工現場における労働生産性の向上を図る技術の試行

最終更新日時 2020年02月10日 18:30

試行データ

| 基礎 | 施工日時 | 発破パターン | 上・下 | 設計吹付量 (m³) | 予定吹付量 (m³) | 余掘り量 (m³) | 掘削土量 (m³) | 掘削率 (%) | 掘削率 (%) | 掘削率 (%) | 掘削率 (%) | 掘削率 (%) | 掘削率 (%) | 掘削率 (%) | 掘削率 (%) | 掘削率 (%) | 掘削率 (%) | 掘削率 (%) |
|-----|------------------|---------|-----|------------|------------|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 042 | 2020/01/16 20:05 | D | 上 | 4,050 | 9,209 | 227.4 | 45,572 | 48,379 | 106,160 | 77,407 | 40.0 | 1,600 | ↓ | | | | | |
| 048 | 2020/01/16 02:58 | D | 上 | 4,050 | 7,410 | 183.0 | 45,572 | 50,152 | 110,051 | 80,244 | 40.0 | 1,600 | ↓ | | | | | |
| 044 | 2020/01/10 05:06 | D I-b-I | 上 | 2,406 | 3,463 | 143.9 | 43,059 | 47,736 | 110.9 | 76,378 | 40.0 | 1,600 | ↓ | | | | | |
| 041 | 2020/01/10 00:15 | D I-b-I | 上 | 2,406 | 5,807 | 241.4 | 43,059 | 45,431 | 105.5 | 72,690 | 40.0 | 1,600 | ↓ | | | | | |
| 042 | 2020/01/09 21:44 | D I-b-I | 上 | 2,406 | 4,860 | 202.0 | 43,059 | 54,724 | 127.1 | 87,558 | 40.0 | 1,600 | ↓ | | | | | |
| 041 | 2020/01/09 01:58 | D I-b-I | 上 | 2,406 | 4,280 | 177.9 | 43,059 | 53,332 | 123.9 | 85,331 | 40.0 | 1,600 | ↓ | | | | | |
| 040 | 2020/01/08 21:46 | D I-b-I | 上 | 2,406 | 4,746 | 197.2 | 43,059 | 54,449 | 126.5 | 87,118 | 40.0 | 1,600 | ↓ | | | | | |

ViewPLUS 西松建設 GM Engineering

図-8 クラウドデータ一覧表

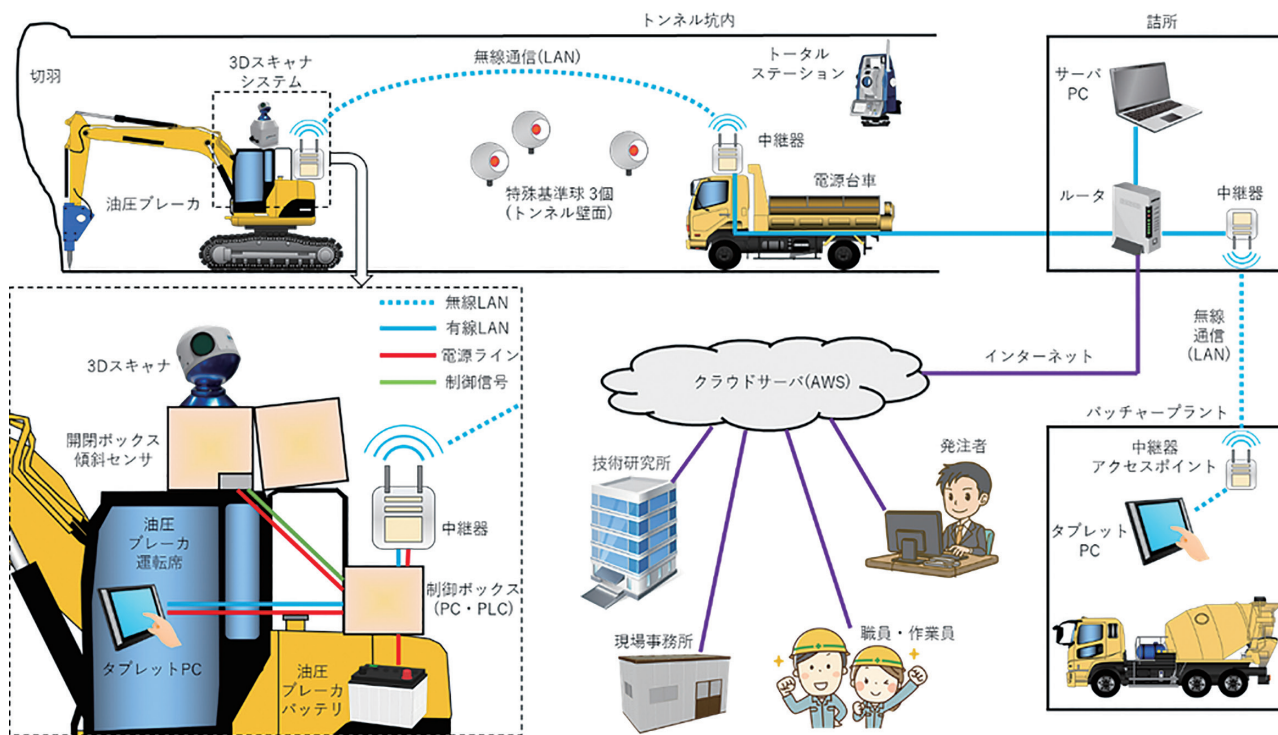


図-9 システムネットワーク構成

§ 3. 現場適用事例

3-1 適用トンネルの概要

本技術を適用した木原道路内島トンネル工事は、一般国道2号の交通・物流の円滑化および災害に対する代替性の確保のために計画されたL=3.8 kmの木原道路の一部であり、三原市木原町から奥野山町に至るL=986 mのトンネル工事である(表-1)。内島トンネルの地質は、硬質ではあるが、亀裂の発達した花崗斑岩を主体とする岩盤である。このような地質では発破掘削による掘削形状の制御が難しいため、正確かつ迅速な掘削形状の管理が要求されていた。

内島トンネルL=986 mのうち終点側の主にCⅡ-bパターン区間において、システムを導入して現場検証を行った。システム導入区間では硬質な花崗岩が広く分布していた。

3-2 適用成果

(1) 安全性の向上

トンネル切羽のあたり取りの際、これまでは作業員が切羽直下に立入り、目視にてあたり箇所を判断してレーザーポインタ等で指示を出していた。また、類似技術として三脚にて3Dスキャナを切羽に設置して掘削形状を計測してあたり箇所を可視化する技術がある。いずれも切羽直下作業であり、岩塊の抜け落ち(肌落ち)がひとたび発生すると、死傷災害につながる可能性が高い作業である。本技術では3Dスキャナをあたり取りを行う重機に搭載することで、作業員や監督職員が切羽直下に立入ることなく、重機運転席で安全にあたり箇所の確認お

表-1 適用現場(内島トンネル工事)概要

| | | |
|--------|-----------------------|----------|
| 工事名 | 木原道路内島トンネル工事 | |
| 発注者 | 中国地方整備局 福山河川国道事務所 | |
| 受注者 | 西松建設株式会社 | |
| 工事場所 | 三原市木原町～三原市奥野山町 | |
| 工期 | 2018年1月27日～2020年8月31日 | |
| 工事内容 | 工事延長 | L=1,050m |
| | 内島トンネル | L=986m |
| | トンネル(NATM) | |
| | トンネル工 発破掘削 | L=986m |
| | 覆工コンクリート・防水工 | L=986m |
| | インパート工 | L=385m |
| | 坑内付帯工 | 1式 |
| | 坑門工 | 1式 |
| | 掘削補助工 | 1式 |
| | 仮設工 | 1式 |
| 道路改良 | 1式 | |
| 落石防護柵工 | 1式 | |
| 橋台工 | 1式 | |

よびあたり取りを行うことが可能である。

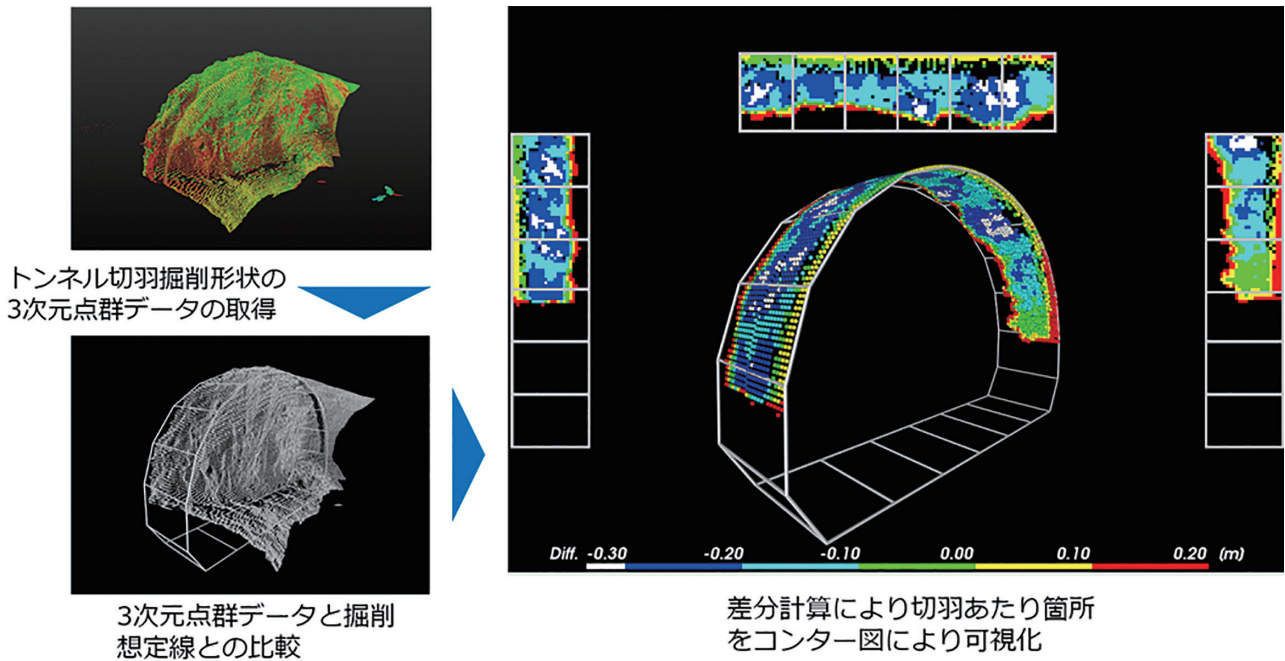
(2) あたり箇所の可視化

あたり箇所や必要吹付コンクリート量の判断はこれまで熟練作業員による目視確認による定性的なものであり、余掘りや余吹きが増加する傾向にあった。スキャナで切羽の掘削形状を計測し、3次元点群データとトンネル線形情報、設計断面情報を基に可視化することで、定量的にあたり箇所を把握することが可能である(図-10)。

あたり箇所を可視化するための手順を以下に示す。

【事前準備】：特殊基準球×3個の設置及びTSによる事前計測

- ① スキャナを搭載したブレーカを切羽に配置
- ② 運転席モニタでトンネル基数を選択して計測開始ボタンを押す
- ③ トンネル側壁の計測(低密度)によるトンネル軸



図一10 あたり箇所の可視化手順

方向の推定

- ④ 特殊基準球の探索計測（中密度）による反射輝度による基準球×3個の位置の推定
- ⑤ 特殊基準球の精密計測（高密度）による最小二乗法を用いた基準球中止位置の推定およびスキャナ本体の位置・姿勢の推定
- ⑥ 切羽掘削面を計測して3次元点群データを取得
- ⑦ 3次元点群データと掘削想定線を比較
- ⑧ 差分計算により切羽あたり箇所をヒートマップ表示

なお、②の計測開始のボタンを押すと、③～⑦までの一連の動作は自動的に制御される。

(3) 迅速な計測

表一2 に試行技術と従来方法である三脚による1回の計測に要する計測時間を示す。三脚方式がスキャナ設置作業から掘削形状を計測してブレーカと入れ替えるまでに約5分かかるのに対して、試行技術ではブレーカとの入替えを無くし、自己位置推定に約35秒、切羽の掘削形状の計測から結果の表示までに約15秒、合わせて50秒程度で計測を完了する。検証ではあたり取り完了までに平均して4回計測を繰り返していたため、従来方法と比較すると一切羽毎に約16分の時間短縮効果が得られた(表一3)。

(4) 余掘り・余吹き最小化

切羽で取得した3次元データをクラウド上で共有し、余掘りの状況から発破パターンの削孔位置や削孔角度を修正することで余掘り・余吹きの低減を目指した。余掘りについてはシステム導入前のデータが無かったため、システム導入後の月平均余掘り量から低減率を算出した。導入直後の1か月間の平均余掘り量が2.619 m³であったのに対して、2か月目の平均余掘り量は2.101 m³とな

表一2 1回の計測に要する計測時間の比較

| 坑内作業内容 | 【試行技術】 ブレーカ搭載 (sec) | 【従来方法】 三脚使用スキャン (sec) |
|--------------|------------------------|--------------------------|
| ①スキャナ設置作業 | 0 | 60 |
| ②スキャナの自己位置推定 | 35 | 60 |
| ③3Dスキャニング | | 60 |
| ④データ転送 | 15 | 30 |
| ⑤データ処理 | | 30 |
| ⑥ブレーカとの入替作業 | 0 | 60 |
| 計 | 50秒 | 300秒 (約5分) |

表一3 余掘り・あたり計測時間の比較

| | 【試行技術】 ブレーカ搭載 (sec) | 【従来方法】 三脚使用 (sec) |
|----------------|------------------------|----------------------|
| 余掘り・あたり計測 (平均) | 約4分 (50秒×4回) | 20分 (5分×4回) |

り、19.5%の低減効果が確認できた。余吹きについてはシステム導入前のC II -bパターンの余吹き率301.8%に対し、システム導入期間中のC II -bパターンの余吹き率は278.1%となり、23.7%低減することができた。

§ 4. 現場適用で得られた課題

(1) 制振架台の耐久性向上

スキャナは制振架台を介してブレーカのキャビン上に設置するが、キャビン上には非常に大きな振動および加速度が発生するため、制振架台がたびたび破損した。今後新たに現場適用する際には制振架台の素材、制振金具等を見直して耐久性を向上させる必要がある。

(2) 坑内無線通信機能の強化

切羽で取得した 3 次元データを専用クラウドで蓄積・閲覧するために坑内無線通信を使用するが、大型重機が多数使用されるトンネル坑内という特殊な環境下においては無線通信が安定しない場合が多々見られた。「Wi-Fi6」に対応した通信機器を使用するなどして、無線通信の安定性の確保が必要である。

(3) 計測精度の向上

3D スキャナシステムの計測精度については、検証の結果最大 50 mm 程度発生する可能性がある。これはスキャナ本体の計測誤差に加えて、自己位置推定の誤差が原因と考えられる。今後、特殊基準球の計測補正係数の見直しや、スキャナ個々の機器特性を考慮した補正を各現場ごとに実施することで精度の向上が見込まれる。

(4) 新しい技術への抵抗感の緩和

トンネル作業員は新しい技術に対して興味は示すが、得られた結果に対しては自身のこれまでの経験を優先してしまう。これは、新しい技術への理解を深めてもらうための粘り強い説明や、得られた結果の信頼性の向上が

必要である。

§5. まとめ

今回開発した技術は国土交通省の令和元年度「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」に採択され、実現場で検証して施工性およびその効果を確認することができた。今後も今回の検証で得られた課題を解決するとともに本技術の更なる改良を継続し、実現場への積極的な活用を進めていく予定である。

将来的には、重機の位置・姿勢および 3 次元データを基に重機の自律運転技術を確立し、トンネル切羽作業の無人化施工の一要素技術とすることを目指していく。

参考文献

- 1) 山本他：切羽掘削形状モニタリングシステムの開発、第 74 回土木学会年次学術講演会、VI-281, 2019