

トンネル切羽形状を迅速に計測できる 簡易3Dスキャナの開発とその適用事例

犬塚 隆明^{1*}・岩野 圭太¹・清水 清一郎¹・手塚 康成²

¹鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²鹿島建設株式会社 土木管理本部（〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11）

*E-mail: inuzukat@kajima.com

山岳トンネルの発破では、工期とコストに直結する発破掘削時の余掘りを低減させることが重要である。その際には、余掘り状況を迅速、かつ定量的に評価することが求められるが、既往の測量機では、迅速性に欠けるため、施工サイクルの中での運用には課題が残る。そこで、筆者らは、トンネル切羽形状を短時間で計測できる簡易3Dレーザスキャナと余掘りを数値化するソフトを開発し、現場へ適用した。その結果、施工サイクルへの影響を最小限にした運用が可能であることを確認した。また、切羽形状の計測結果を切羽で可視化し、設計断面内に残った地山の箇所を作業員に明示するアタリガイダンスシステムを開発した結果、必要以上のアタリ取り作業を防ぐことができ、サイクルタイムの短縮や吹付材料の低減に繋がった。

Key Words : tunnel, blast, 3D scanner, information construction, overbreak, scaling

1. はじめに

発破工法の山岳トンネルでは、発破、ズリ運搬、コンク作業、支保工設置のサイクルを繰り返しながら進行するため、発破掘削時の余掘りが次施工へ及ぼす影響は大きく、ひいてはトンネル工事全体のコスト増大や工期遅延に繋がる。従って、可能な限り発破掘削時の余掘りを低減させることが重要であり、近年では、削孔精度が確保できるコンピュータジャンボの導入により、余掘りを低減させる取り組みがなされている。このような取り組みに対して、余掘り状況を定量的な情報として取得し、評価する必要がある。しかしながら、通常のトンネル現場で使用される光波測量機や 3D レーザスキャナは、計測前のセットアップが必要な上に、測定に 30 分以上の時間を要するため、短時間での計測が求められる切羽においては実用的ではない。また、導入費が高価である点も課題として残る。そこで、筆者らは廉価な導入費（従来機の 10 分の 1 程度）でトンネル切羽形状を 3 分以内で計測できる簡易 3D レーザスキャナと余掘りを数値化する評価ソフトを開発した。これらをコンピュータジャンボが導入されている現場へ適用し、施工サイクルへの影響を最小限として運用できることを確認するとともにコンピュータジャンボの地山情報が反映される削孔データと余掘りの関連について評価を行ったので報告する。



写真-1 アタリ取り作業の状況

また、簡易 3D レーザスキャナの活用として、アタリ（設計断面内に残った地山）取り作業の効率化を図るアタリガイダンスシステムを開発した。アタリ取り作業は、設計の断面を確保するためにアタリ箇所をブレイカによって破碎し、整形する作業であり、その際、切羽監視人が長時間にわたり切羽近傍に立ち入り、目視の判断によってブレイカのオペレータへアタリ取り箇所の指示を行う（写真-1）。そのため、切羽監視人の安全性が懸念されるとともに、設計断面の目安がない環境下では、アタリ箇所の取り残しや必要以上の整形によるサイクルタイムや吹付材料のロスが懸念される。本システムは、簡易 3D レーザスキャナの定量的な情報を基にアタリ箇所をタブレット PC 上で判断できるシステムであるため、切

切羽監視人が切羽近傍に立ち入る必要はなく、また、必要な箇所のみのアタリ取り作業になるため、作業の効率化を図ることができる。本システムを現場適用した結果、切羽監視人の安全性向上とアタリ取り作業の効率化に有効なツールであることが確認できたので報告する。

2. 各技術開発の概要

(1) 簡易3Dレーザスキャナの開発

今回開発した簡易3Dレーザスキャナ¹⁾は、システム制御系統の集約化、計測手順の簡素化を図っており、ボタン1つで計測からデータ収録が完了できるため、短時間（3分以内）での計測を実現している。

本機は、写真-2に示すように位置を特定するプリズム、切羽を計測する汎用型の2次元レーザスキャナ（北陽電機製、UXM-30LXH）、操作を行う制御ボックス、電源を供給するバッテリーから構成され、計測データは、2次元レーザスキャナに測定架台の回転を付加することによって3次元情報として取得することができる（写真-3）。このように、汎用型の2次元レーザスキャナを応用することで導入コストを抑えている。また、従来機器とは異なり、計測対象にターゲットなどを設置する必要はなく、トータルステーションで本体の2点のプリズムを測定するだけで、3次元絶対座標の定量的な情報として取得できる（図-1）。本機は、切羽計測における最も重要な点である迅速性を重視しているため、計測精度は、距離15mに対して±10mm程度であり、A計測への適用には難しいが、発破形状を把握し、余掘りを評価するには十分な精度を確保している。

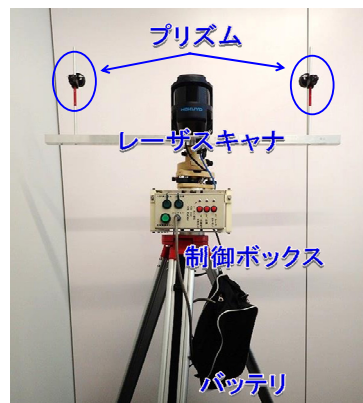


写真-2 簡易3Dスキャナの構成



写真-3 3次元計測の仕組み

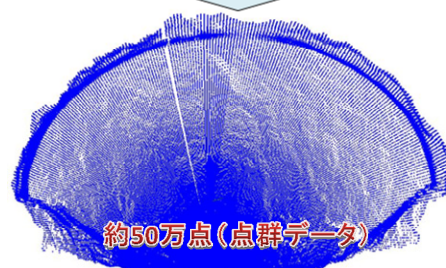


図-1 トンネル切羽の3次元計測の一例

(2) 余掘り評価ソフトの開発

余掘り評価ソフトは、簡易3Dレーザスキャナで計測したデータから余掘り状況を数値化するソフトである（図-2）。予め入力したトンネル線形、断面情報との計測データを絶対座標上で比較することで、余掘り量を算

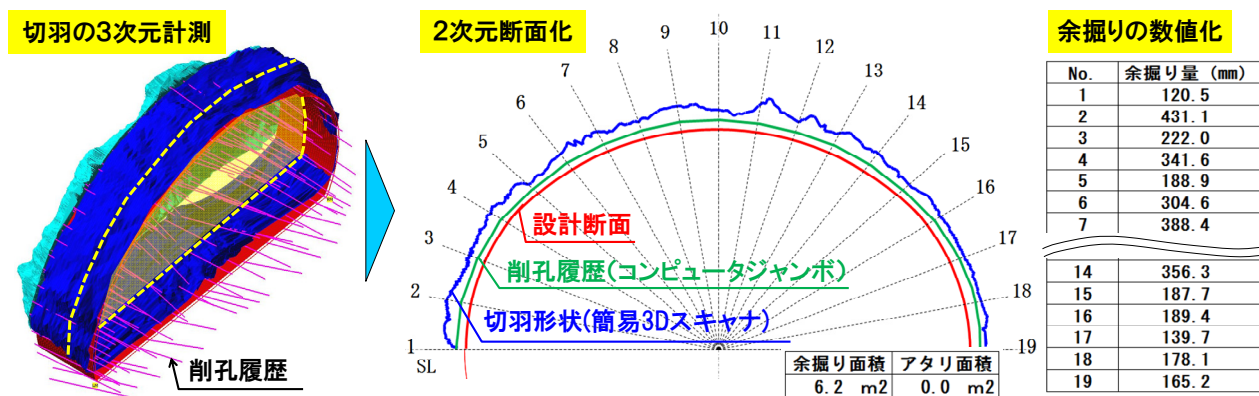


図-2 余掘り状況の数値化（余掘り評価ソフト）

出できる。本ソフトは、3次元計測データの任意の位置で断面表示することができ、余掘り状況を詳細に把握することが可能である。さらに、コンピュータジャンボなどを使用した場合に取得できる削孔の軌跡（削孔位置や角度の情報）を重ねて表示できるため、発破パターン（最外周孔の削孔位置や削孔角度）の良否の検討が可能である。

(3) アタリガイダンスシステムの開発

アタリガイダンスシステムは、簡易3Dレーザスキャナの計測データに基づいて定量的にアタリ箇所を判断できるシステムである。余掘り評価ソフトとの相違点は、計測結果をその場で確認できるように、演算処理に時間のかかる余掘り量の算出を省き、アタリや余掘りの位置を即座に表示できる点であり、施工サイクルの中でのフィードバックが可能である（図-3）。

ガイダンスの画面上では、切羽形状と設計断面を絶対座標上で、重ね合わせて表示しているため、余掘りとアタリ箇所がその場で判断できる仕組みになっている（図-4）。また、画面上のロックボルトの位置を目安にすることで、アタリ箇所を的確にブレーカのオペレータに指示することができる。さらに、鋼製支保工が必要な区間では、設計の建込位置まで掘削長を確保できているかを確認する事ができ、鋼製支保工の建込の判断も切羽で行うことができる（図-5）。

3. 適用事例

(1) 余掘り評価ソフト

現場適用した結果の一例を図-6に示す。これまで、把握することが難しかった余掘り状況が一目で分かる上、コンピュータジャンボの削孔履歴の情報を加えることで、削孔角度に起因する余掘り箇所を特長的でき、次発破では差角を控えるなどの修正をかけることができるため、発破を評価する有効なツールであることを確認した。また、データが蓄積されるにつれ、削孔軌跡以上に地山が掘削され、余掘りが増大する事象が見受けられた。この要因について、分析をおこなったので、4章にて述べる。

(2) アタリガイダンスシステム

アタリガイダンスシステムの運用性と導入効果を検証するため、現場へ試験的に適用した。運用においては、ズリ運搬の完了後に簡易3Dレーザスキャナで切羽形状の計測を行い、アタリ取り作業前にブレーカのオペレータにアタリの箇所を指示した。

本システムを適用した結果、計測から結果表示まで3分以内で完了でき、施工サイクルの中で運用できること

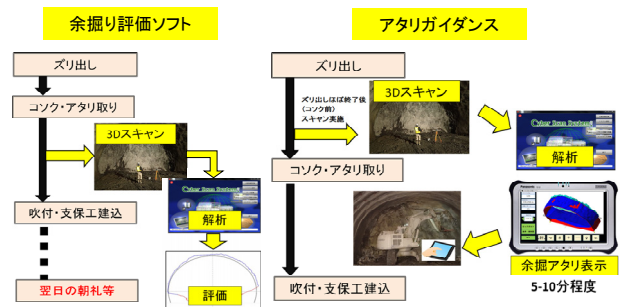


図-3 余掘り評価ソフトとアタリガイダンスの違い

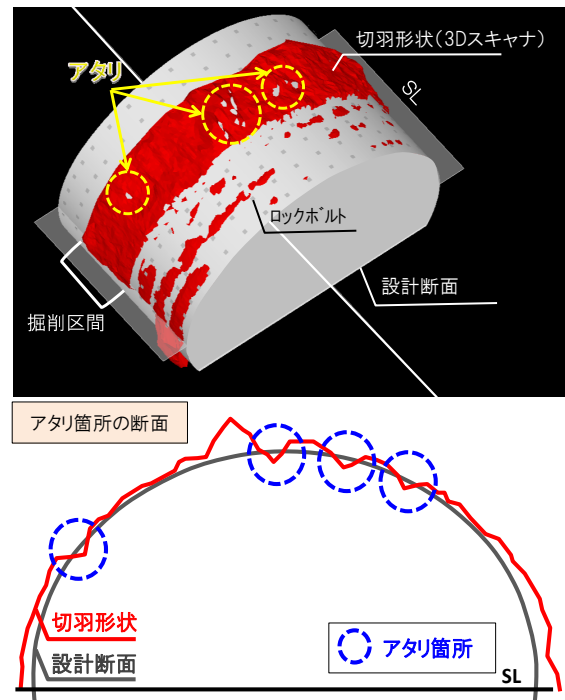


図-4 アタリガイダンスシステム

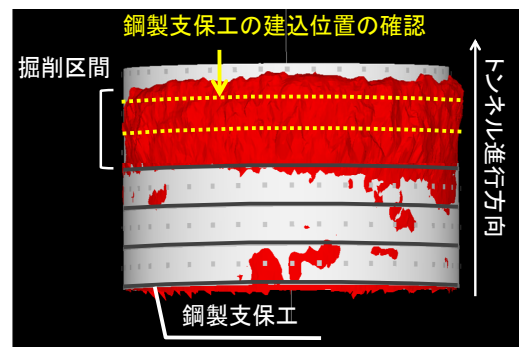


図-5 鋼製支保工の建込位置の判断

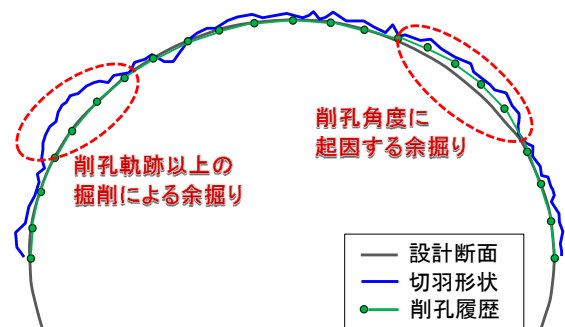


図-6 余掘り評価の一例

を確認した。本システムの導入効果については、これまで切羽監視人による目視観察でしか判断ができなかったアタリ箇所の有無を定量的なデータに基づいて判断した結果、無駄なアタリ取り作業を減らすことができ、作業時間を2/3に短縮、吹付コンクリートの消費量を15%低減することができた。また、切羽監視人が切羽近傍へ立ち入る必要がなくなったため、切羽監視人の安全性の向上に繋がった（写真-4）。



写真-4 アタリガイダンスの活用状況

4. 余掘りの要因分析

3章で述べた削孔軌跡以上の余掘りについて（図-7）、地山の割れ目性状や岩盤強度、最外周孔の薬量といった発破条件との関連性を整理した。余掘りと発破条件の関連性が明確になれば、発破条件から削孔軌跡以上の余掘り量を見越して、発破パターンを修正することで、設計断面に対する余掘り量を低減させることができ、発破掘削の合理化を図ることができると思う。

(1) 余掘りの検討指標

a) 岩盤強度

岩盤強度については、Atlas Copco社製のジャンボの削孔データから算出される岩の硬さの指標：Hardness²⁾を用いた。Hardnessは、岩盤の強度が反映される削孔速度を基本に、打撃圧などの打撃条件を加味した上で算出され、値が大きいと相対的に軟い地山であることを示す。

b) 爆薬量

カートリッジ式（紙包装品）の爆薬を使用しており、目視観察によって1孔ごとの正確な爆薬量を把握した。

c) 評価データの組合せ

図-8に各評価データの組合せを示す。各最外周孔の発破条件（Hardness、爆薬量）に対して、各孔の延長上に余掘り深さをとり、各データを対応させた。

d) 整理方法

余掘りのデータを取得した地山の切羽は、左上から右下方向への割れ目が卓越しており、余掘りに対する亀裂の影響を除くため、切羽を3分割（左切羽、天端、右切羽）して整理した（図-9）

(2) 余掘りの傾向分析の結果

a) Hardnessと余掘り の関係

Hardnessと余掘りのプロット図を図-10に示す。プロット図から、Hardnessと余掘りの正の相関関係が示されており、岩盤が軟くなれば余掘りが増大することが分かった。尚、両図中の白抜きプロットは、発破後の亀裂による抜け落ち（余掘りが60cm以上）、削孔時の孔曲がり（余掘りが0cm以下）と考えられるため、評価から除外

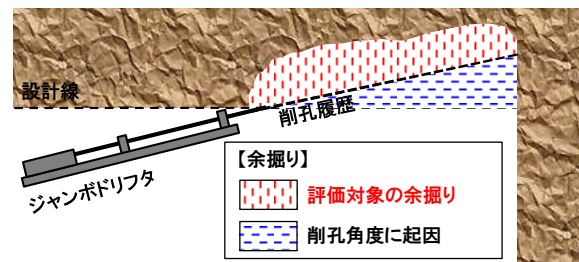


図-7 削孔軌跡以上の余掘りのイメージ図

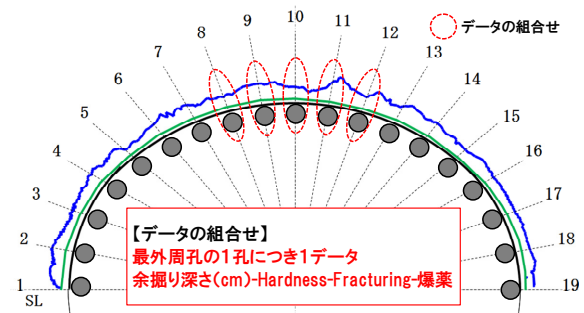


図-8 評価データの組合せ



図-9 データを取得した切羽の特徴

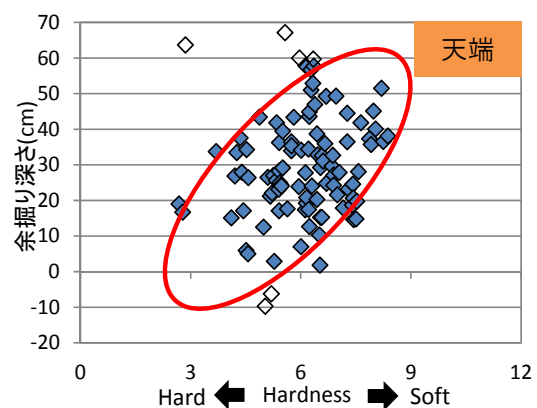


図-10 Hardnessと余掘りの関係

している。

b) 亀裂性状と余掘りの関係

左上から右下方向に割れ目が卓越した切羽では、切羽の右部分で割れ目の方向が壁面と平行になっており、その影響を受けて余掘りが増大していることが分かった（図-11）。実際の切羽において、割れ目の面に沿って破砕された跡を確認している（図-9）。

c) 爆薬と余掘りの関係

余掘りとHardnessのプロット図において、爆薬量を閾値としてプロットした図を図-12に示す。同じ岩盤強度において、爆薬量が多いほど余掘りが大きくなると考えられるが、実際のデータからは明瞭な傾向は得られなかった。これについては、雷管の起爆順序を考慮すると、最外周孔が起爆する際には、その内側の孔は既に起爆しており、自由面が形成されているため、最外周孔の爆薬エネルギーが岩盤側（余掘り）に使われず、自由面（内側）へ分散しているからと考えられる。

以上、今回、コンピュータジャンボが導入された現場で余掘りの要因分析をした結果、爆薬量は、余掘りへ与える影響が少なく、岩盤強度と割れ目の性状が余掘りに影響を及ぼすことが示された。

現状では、余掘りと岩盤強度の相関関係は、バラつきが大きく発破設計へのフィードバックが難しいが、余掘りと岩盤強度の关系到割れ目の性状を加味することで、相関関係のバラつきを小さくすることができれば、地山状況に応じて差角を調整するといったフィードバックが可能になり、余掘りをコントロール（低減）できると考える（図-13）。ただし、この要因は、現場ごと、岩種ごとに異なることが予想されるため、今後も引き続きデータ収集、分析を行っていく予定である。

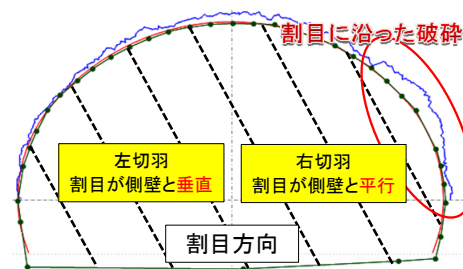


図-11 余掘りが割れ目に支配される一例

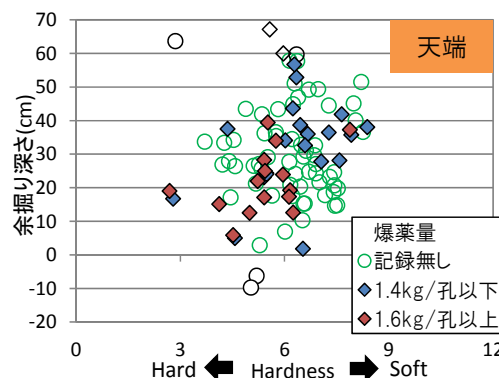


図-12 爆薬の影響の検討

た、アタリガイダンスシステムは、現場での運用性を確認するとともに作業時間の短縮、吹付材料の低減に効果的なシステムであることを確認した。

余掘り評価ソフトは、コンピュータジャンボの削孔履歴と併せて、余掘りを評価でき、発破パターンの修正を検討する上で、有効なツールであることを確認した。また、地山性状に起因する余掘りについて、岩盤強度、割れ目性状、爆薬との関係性を整理した結果、岩盤強度と割れ目の性状が余掘りに影響を及ぼすことが定量的に示された。

5. おわりに

発破掘削時の余掘りを迅速に評価することとコソク作業の効率化を目的として、トンネル切羽形状を迅速に計測できる簡易3Dレーザスキャナと余掘り評価ソフト、およびアタリガイダンスシステムを開発した。

簡易3Dスキャナは、迅速性が要求される切羽での計測において、3分以内の短時間での計測を実現した。ま

参考文献

- 1) 大塚隆明ほか：一体型簡易 3D スキャナと余掘り評価ソフトの開発、土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, pp.1435-1436, 2017
- 2) H. Schunnesson : Rock Characterisation Using Percussive Drilling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol.35, No.6, pp711-725, 1998

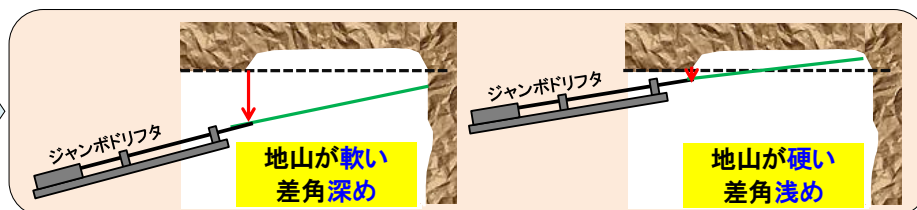
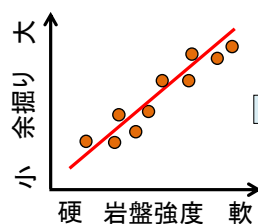


図-13 削孔角度の調整による余掘りのコントロール（低減）

NEW TUNNEL PROFILE MEASURING SYSTEM WITH A PROMPT 3D SCANNER AND UNDERBREAK GUIDANCE APPLICATION

Takaaki INUZUKA, Keita IWANO, Seiichiro SHIMIZU, Yasunari TEZUKA

In order to reduce the construction time and cost in tunnel excavation, it is quite important in blasting to control the overbreak. However, measuring the tunnel profile after blasting is allowed only in short time while an excavation procedure, conventional scanner couldn't meet our demand. Therefore, authors developed the new system that includes prompt 3D scanner and its related application software which can calculate overbreak. And also new guidance application which can quickly show the underbreak area to the worker is also developed. After the tunnel site trial, it was found that the system can lead to adjust the appropriate blasting pattern and reduce unnecessary scaling.