

熟練技能を必要としない余掘り低減技術の開発

清水建設株式会社 正会員 ○大坪 宏行
清水建設株式会社 正会員 荒井 匠 長尾 裕貴
清水建設株式会社 正会員 福田 毅 垣見 康介

1. はじめに

NATMは国内に導入されてはや40年以上が経過し、その間、機械の大型化や掘削工法、補助工法等の新技术の開発により進化を遂げてきた。しかし、山岳トンネルは地山(岩盤)が主要な施工材料であるため、その不均質性、不確実性から熟練技能労働者の経験や感覚に頼らざるを得ない側面は依然として残っている。そこで、本工事ではできるだけ客観的情報を収集・活用し、経験や勘に頼らない施工を目指し、山岳トンネル余掘り低減技術「差し角自動制御システム」の開発を行った。

この余掘り低減技術のコンセプトは、発破掘削において熟練技能に左右されない生産性向上を目指すものであり、設計断面を満足したうえで、できる限り余掘りの小さい断面を正確に形成することにある。これにより発生ずりが減少し、ずり出し時間、およびコンクリートの吹付け時間が短縮されるばかりでなく、掘削面が平滑になることで地山のゆるみ抑制にも効果がある。また、発破掘削に必要な削孔作業の過程で二次的に取得される削孔エネルギーを活用することで、従来地質技術者の技量に頼らざるを得ない切羽評価に対し、削孔エネルギーという指標を補完的に関連付けることでより客観的な切羽評価も可能とした。さらに、削孔エネルギーは、鏡全体で取得することができるため鏡の面的な情報となり、切羽の肌落ち災害防止のための安全指標としても活用できるため、切羽災害防止¹⁾にも貢献する技術である。

本システムの適用性を確認するために高取山トンネル西工事で実証試験を行ったので、その成果を報告する。

2. 工事概要と実証試験区間の地質

高取山トンネルは、秦野市と伊勢原市を結ぶ全長約3.9キロメートルの2車線道路双設トンネルである。内空断面積は約80m²、西側工区の延長は、上り線1,573m、下り線1,609mでいずれも2%の下り勾配となっている。

図-1に地質縦断図と実証試験区間を示す。本システムは主に発破地山である凝灰岩・凝灰角礫岩(大山累層)で試行を開始し、システムの調整等を図りながら進めてきた。

今回 STA. 46+79.1～STA. 46+65.4 までの14m区間を実証試験区間とし、本システムの効果を確認した。実証試験区間は、主に風化した凝灰角礫岩が分布しており、この区間のコア写真および切羽写真を図-2、図-3に示す。なお、切羽評価点は41～44点、地山等級はCⅡである。

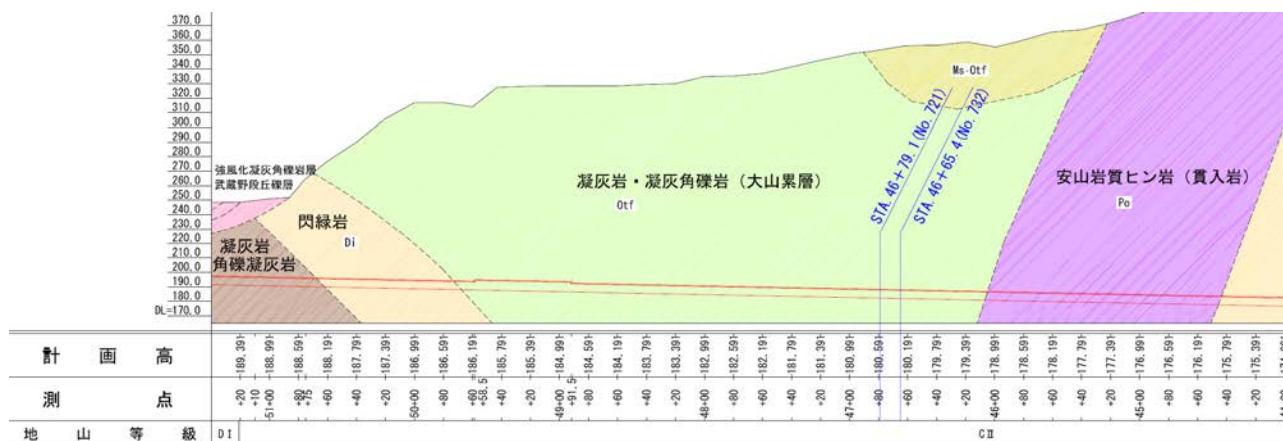
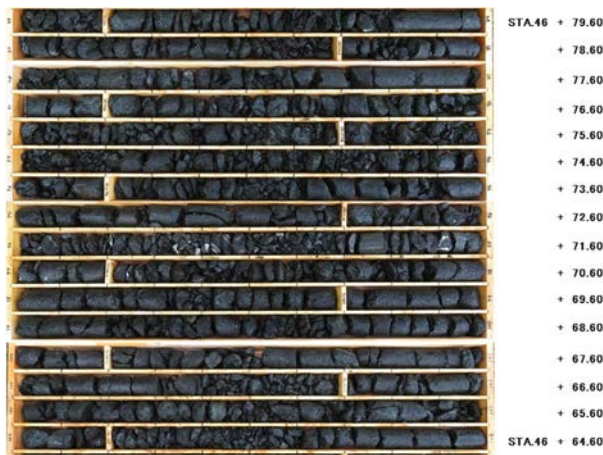


図-1 地質縦断図と実証試験区間（下り線）

キーワード：差し角，余掘り，切羽災害防止，削孔エネルギー，3D スキャン，

連絡先：〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設株式会社 地下空間統括部 TEL 03-3561-3891



(STA.46+79.1~STA.46+65.4)
図-2 実証試験区間のコア写真



(No.721, STA.46+79.1)
図-3 実証試験区間の切羽写真 (No. 721, STA. 46+79. 1)

3. 差し角自動制御システム

本報告では、できるだけ客観的情報を収集・活用し、経験や勘に頼らない施工を目指し、今後の熟練技能労働者不足の解消、安全・生産性・品質の向上の要請に応えるために山岳トンネル余掘り低減技術「差し角自動制御システム」の開発を行った。差し角自動制御システムの全体概要を図-4 に示す。本システムの主な特徴は、「熟練技能を必要としない余掘り低減技術」、「削孔エネルギーを活用した切羽災害防止技術」である。

(1) 熟練技能を必要としない余掘り量低減技術

著者らは、コンピュータジャンボを使ってあらかじめ決められた発破パターンに準じて正確な削孔を行ったとしても地山の不均質性や岩盤亀裂の影響等により余掘りの低減には限界があると考えている。その一端を示唆する知見も既報の論文^{2),3)}から得られている。

従来、このような地山の不均質性や岩盤亀裂の影響で余掘りを減らすには、経験を積んだ熟練の技能に頼らざるを得ない場合が多くあったが、次の手順を複数回繰り返すことで、段階的に余掘りを減らせる。

手順Ⅰ：発破パターンを作成し、コンピュータジャンボ操縦画面に表示（最初の発破パターンは、過去の経験や地山強度等を鑑みて設定）

手順Ⅱ：ジャンボオペレータは、発破パターンに準じて正確に切羽削孔を実施（この時、自動的に削孔エネルギーを算出、記録される）

手順Ⅲ：装薬・爆破・ずり出しの後、浮き石を除去し切羽周辺の安全を確認した上で、車載型 3D スキャナを切羽前に据えて掘削直後の切羽形状をスキャンする（3 分程度の作業）

手順Ⅳ：スキャン結果はその場で数値化、可視化され、余掘り／あたり量を確認（あたりがある場合には、その場であたりを除去する）

手順Ⅴ：あらかじめ設定した「余掘り－差し角補正值の関係」から差し角補正值を自動算出（補正值は地山性状に依存しない）

手順Ⅵ：補正值を次サイクルの発破パターンに反映し、発破パターンを自動作成（手順Ⅱへ）

(2) 削孔エネルギーを活用した切羽災害防止技術

前述の手順Ⅱに示すように、発破パターンに準じて切羽削孔を実施することで、図-5 に示すような削孔位置における深度方向の削孔エネルギー分布図を取得できる。図-5 は地山側から切羽を眺めた図である。

それぞれの削孔に対して鏡面から 0.5m 以深の削孔エネルギーデータのみを対象にエネルギー平均値を算出し、鏡面に投影したものが図-6 に示す削孔エネルギー分布図である。鏡面から比較的浅い部分は、前回の発破の影響や鏡吹付けコンクリートの影響で、本来の地山性状を捉えられないおそれがあるため壁面深度 0.5m より浅い範囲は評価対象から除外した。なお、図-6 は切羽削孔が終了した時点で自動的に出力される。

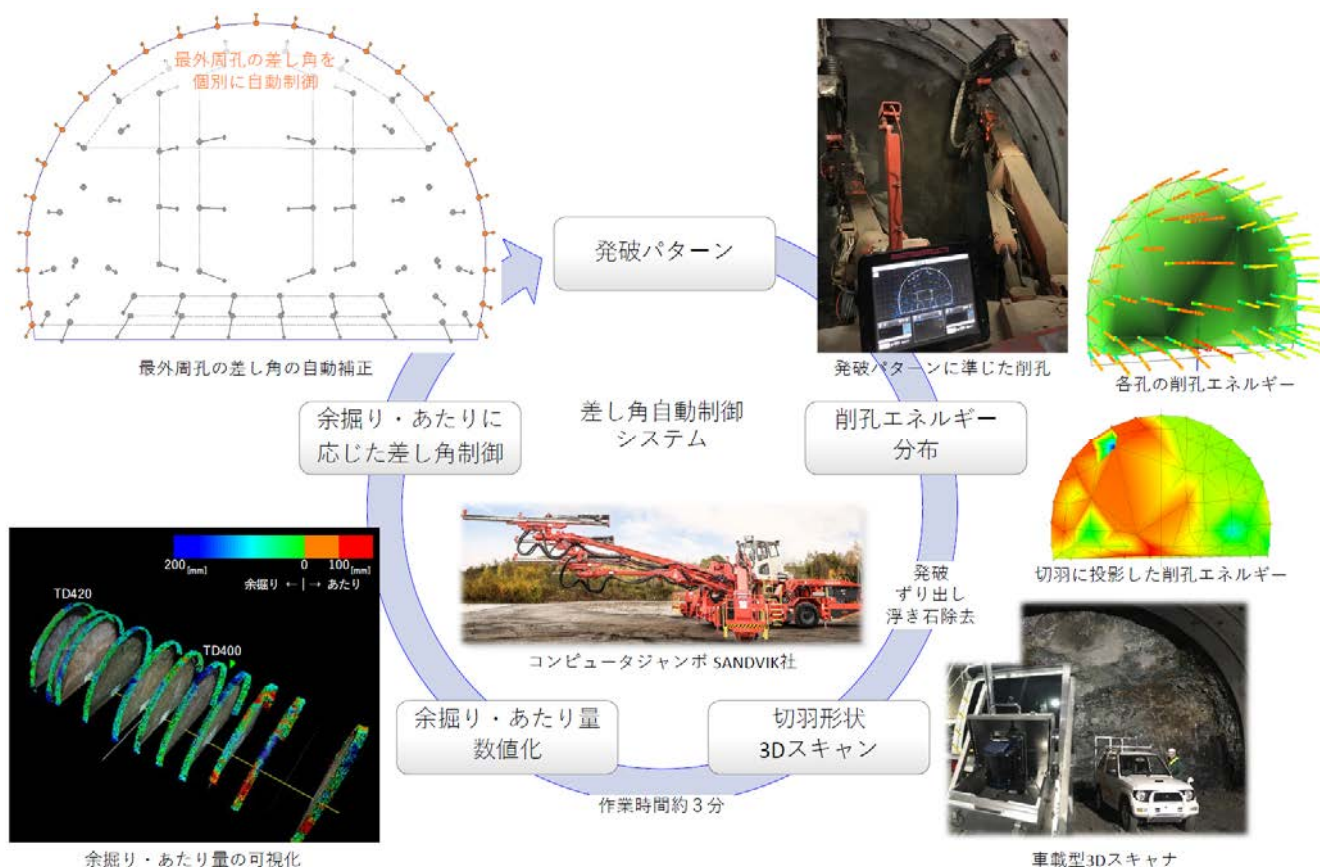


図-4 差し角自動制御システムの概要

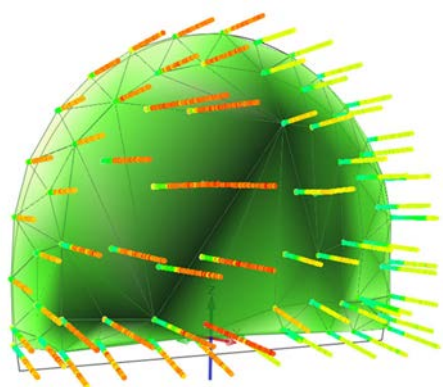


図-5 切羽削孔状況

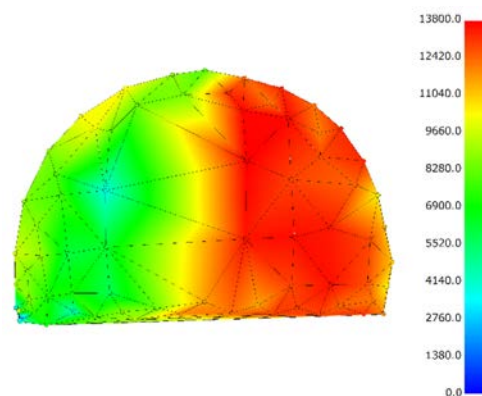


図-6 削孔終了時の削孔エネルギー分布

図-6 のように作図された切羽削孔エネルギー分布図は、切羽に分布する地山の性状を客観的に示すものであり、本システムではこれを「切羽安全指標」として位置付け、切羽災害防止に活用する。

活用方法を図-7、図-8 に示す。切羽安全指標は、削孔作業が完了し削孔エネルギー分布図を作図した後、ただちに切羽監視員、ジャンボオペレータ、JV 職員等、トンネル作業関係者すべてのスマートフォン、タブレット端末等に自動配信され、常に最新の切羽情報を共有しながら作業を進めている。図-8 は、切羽監視員が切羽安全指標を確認しながら切羽監視している状況である。



図-7 コンピュータジャンボ画面への配信

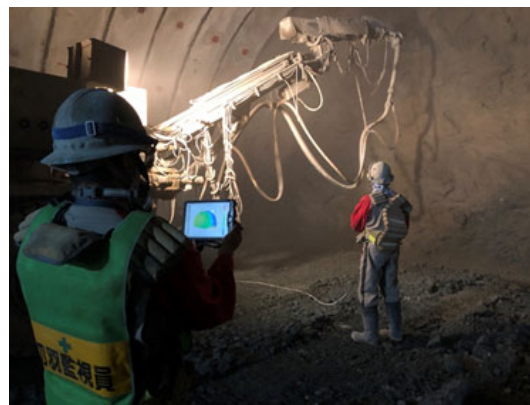


図-8 切羽監視員による切羽監視状況

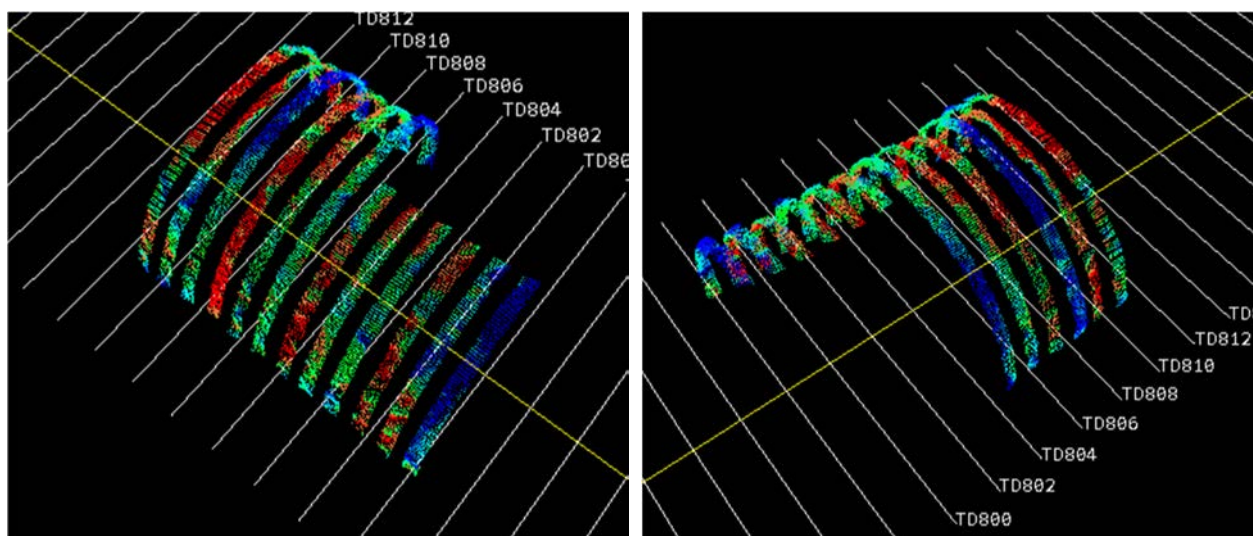
4. 差し角自動制御システム実証試験結果

本システムは、「熟練技能を必要としない余掘り低減技術」、「削孔エネルギーを活用した切羽災害防止技術」の2つの特徴を有している。このうち熟練技能を必要としない余掘り低減技術について、図-1に示すように実証試験区間（STA.46+79.1 No.721～STA.46+65.4 No.732）を設定し、本システムを運用することでどの程度の余掘りが低減できたのかを整理した。

図-9に実証試験区間の3次元スキャナ測定結果を示す。暖色系は「あたり」、寒色系は「余掘り」である。実証試験区間の延長 STA.46+79.1 No.721～STA.46+65.4 No.732 は、CIIパターンで1掘進長は1.2mである。1掘進長のうち手前0.5mは鋼製支保工の背面近傍でデータを取得できないため余掘り評価対象から除外している。そのため図-9のスキャナ測定結果は縦断方向に連続した点群データとはなっていない。図-10は、最大／平均余掘りの推移を示したものである。図-9、図-10を経時的にみると次のようなことが言える。

まず、No.721は、最初の発破パターン（過去の経験や地山強度等を鑑みて設定）により発破掘削した結果であり、最外周孔の差し角はすべて同じ角度で削孔している。最大余掘り67.0cm、平均余掘り30.2cmとなり、天端付近の余掘りが大きくなった。一方、左側壁部の余掘りは小さいことから、同じ削孔角度（差し角）でも地山の不均質性や岩盤亀裂の影響等によって、余掘り量が異なることを示唆している。

No.721～No.724の余掘り／あたりの結果を受けて最外周孔の差し角が個別に補正され、No.725ではあた



【左側壁部】

【右側壁部】

図-9 実証試験区間の3次元スキャナ測定結果

りが最も少なく、かつ余掘りが大きく低減されていることがわかる。最大余掘り 21.0cm，平均余掘り 6.6cm となり，最初の発破パターンの結果に比べて，最大余掘り約 69%低減，平均余掘り約 78%低減した。

No.726 では，最大余掘りおよび平均余掘りともに小さいものの，あたりの範囲が大きくなった。これは余掘りゼロを目指して差し角を制御している中で，差し角を内側へ補正したこと，および地山の不均質性や岩盤亀裂の影響等によるものと考えられる。

実証試験区間全体の傾向をみると，3 サイクルごとに最大，平均ともに余掘りの増減に周期性があることがわかる。すなわち，大きな余掘りが発生しても 2 度のサイクルを経験すれば余掘りに一定の低減効果があると言える。また同時に平滑な掘削面を形成している。このことから，本システムを数回運用すれば，確実に余掘りの低減効果を得ることができ，かつ掘削面の平滑化が行えると言える。また，実証試験区間全体の傾向をみても地山の不均質性や岩盤亀裂の影響等を受けても，余掘りは確実に低減していることがわかる。

以上より，実証試験では技能労働者に依存することなく平均余掘りを 10cm 未満まで低減させることができた。引続き，差し角データを蓄積することで地山性状に応じた差し角制御方法の見極めを行っていく。

図-11 は，実証試験区間の全削孔実績のうち，差し角の制御を行った最外周孔の差し角とその差し角で生じた余掘り体積の関係を統計処理したものである。差し角 6〜7° で最も削孔実績が多く 25 孔であったが，尖度が低い分布を呈しており，余掘りを小さくする明確な差し角を定義することは難しいことがわかった。これは地山の不均質性や岩盤亀裂の影響等により，特定の差し角では余掘りを低減できないことを意味している。また，差し角に対する余掘り体積の傾向は，ばらつきはあるものの，言うまでもなく差し角が大きくなれば余掘り体積は大きくなっている。削孔実績数としては，十分な数ではなく断定的な評価は難しいが，仮に概ね線形

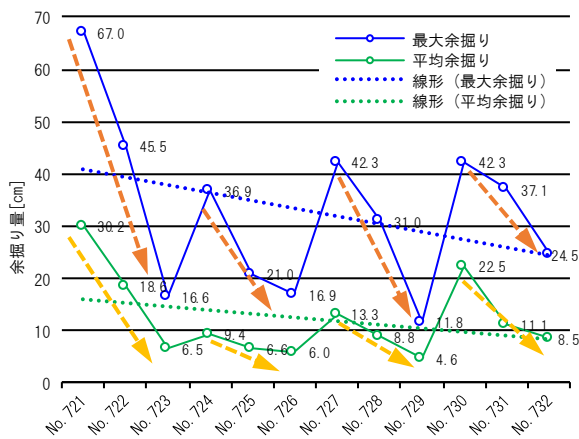


図-10 余掘り低減効果（凝灰岩・凝灰角礫岩）

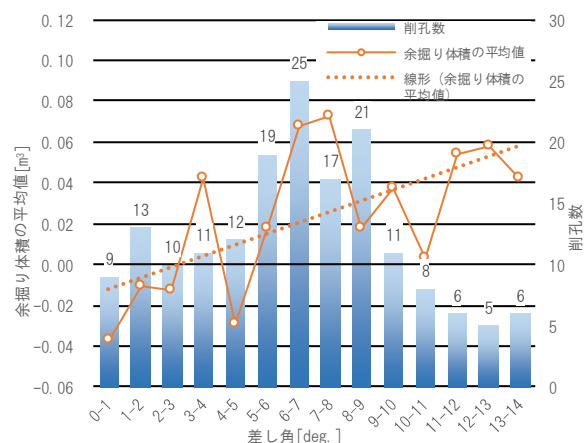


図-11 差し角と余掘り体積の関係（凝灰岩・凝灰角礫岩）

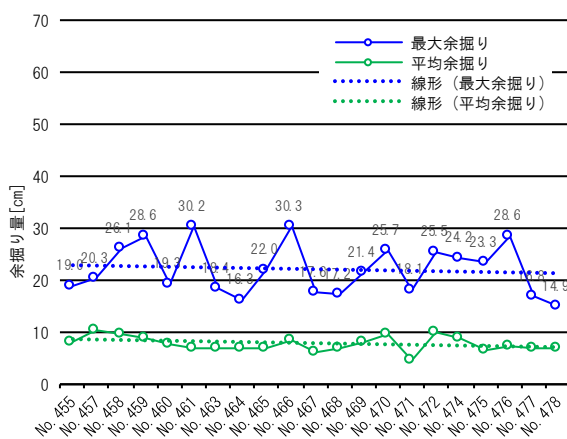


図-12 余掘り低減効果（礫岩）

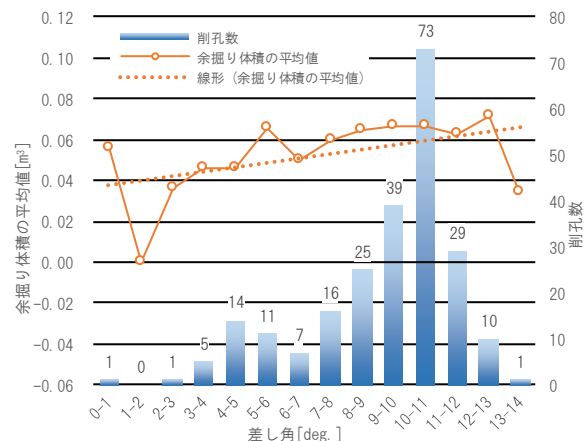


図-13 差し角と余掘り体積の関係（礫岩）

補間した傾向になるとすれば、差し角 2～4° 程度で余掘り体積がゼロになることがわかる。したがって、今後高取山トンネルと同様の地質（凝灰角礫岩層）の掘削をする場合には、差し角 2～4° 程度の差し角で発破パターンを計画することが合理的な掘削と言える。

凝灰角礫岩層との比較のため、高取山トンネル同様、新東名高速道路沿線の新設工事である川西工事（谷ヶ山トンネル）で差し角自動制御システムを適用した実績を図-12、図-13に示す。

図-12は、図-10と同様に掘削サイクルに対する最大余掘りと平均余掘りの変化を示したものである。図-10と比較すると、最大余掘り、平均余掘りともに大きな変動はないことがわかる。これは地山の性状を明瞭に表しており、亀裂性岩盤にみられるような局所的な抜け落ちや肌落ちなどがないためであると考えられる。

図-13は、図-11と同様に全削孔実績のうち、差し角の制御を行った最外周孔の差し角とその差し角で生じた余掘り体積の関係を統計処理したものである。図-11と異なり、差し角 10～11° の実績が突出しており、尖度が高い分布形状を呈している。図-12と図-13の結果から、礫岩では差し角を 10～11° にすることで余掘り平均を 10cm 未満に抑えられると言える。しかし、削孔実績としては十分とはいえず、更なるデータの蓄積が必要である。

5. まとめ

一般の機械化、自動化による省力化や施工方法自体の改善も含めた生産性の向上といった時代の要請を受け、本工事ではできるだけ客観的情報を収集・活用し、経験や勘に頼らない施工を目指し、今後の熟練技能労働者不足の解消、安全・生産性・品質の向上の要請に応えるために山岳トンネル余掘り低減技術「差し角自動制御システム」の開発を行った。本システムの特徴ごとに得られた知見を整理しまとめとする。

(1) 余掘り低減技術

差し角自動制御システムを複数回掘削サイクルの中で適用することによって、最大余掘りで約 69%の低減、平均余掘りで約 78%の低減を確認することができた。一方で、これらの数値は地山の性状（地山の不均質性や岩盤亀裂の影響等）によって変動することもわかった。余掘りの低減効果は地山性状によって異なるものの、今回の実証試験を通して、熟練技能労働者に依存することなく確実に余掘り量を低減できるシステムであることを実証した。

(2) 切羽災害防止技術

切羽削孔エネルギーは、切羽に分布する地山の性状を客観的に示すものであり、本システムではこれを「切羽安全指標」と位置付け、切羽災害防止に活用した。この指標が必ず安全を担保するものとは考えていないが、目視観察だけでは知り得ない直近の地山性状の情報を削孔作業完了後直ちに切羽監視員、切羽作業員等のトンネル関係者すべてに配信されることから、心理的な安心感を与えるものとして評価を得ることができた。

参考文献

- 1) 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について、平成 30 年 1 月 18 日改正 (<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000149309.html>)
- 2) 大川了，山邊恵太，荒井匠，大坪宏行，垣見康介，福田毅：差し角自動制御システムの適用による爆破掘削時の余掘り量低減効果，土木学会第 74 回年次学術講演会，VI-459，2019. 9.
- 3) 大川了，山邊恵太，大坪宏行，荒井匠，垣見康介，福田毅：ドリルジャンボの機械データを活用した新しい切羽評価点法の提案，土木学会第 74 回年次学術講演会，VI-460，2019. 9.