

# あらゆる地山に対応した熟練技能を必要としない 発破掘削技術の開発

## 差し角自動制御システム<ブラストマスタ<sup>®</sup>>

垣見 康介・福田 毅・松本 啓志

今般、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は、時代の要請でもあり積極的に取り組んでいく必要がある。本開発では、できるだけ客観的情報を収集・活用し、経験や感覚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、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。新東名高速道路高取山トンネル西工事において、本システムを適用し実証試験を行った結果、余掘りの低減を確認することができた。本システムの概要と特徴、および実証試験結果について紹介する。

キーワード：差し角自動制御システム（ブラストマスタ<sup>®</sup>）、余掘り、削孔エネルギー、安全性／生産性の向上、コンピュータジャンボ、3D スキャン

### 1. はじめに

NATMは国内に導入されて40年以上が経過し、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、不良地山の克服や大断面トンネルの施工に見られるように工法としての進化を遂げてきた。しかし、コンクリート等、品質・規格の一定した材料を使用する橋梁や躯体構造物に比べ、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。

今般、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は時代の要請であり、積極的に取り組んでいく必要がある。また、公共工事としての性格から、事業推進にあたっての透明性、客観性もあわせて向上していかなければならない。

このような背景を踏まえて、本論文ではできるだけ客観的情報を収集・活用し、経験や感覚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。

本開発のコンセプトは、爆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、爆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、鏡全体で取得されるため面的な情報となり、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、切羽災害防止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、その成果を紹介する。

### 2. 施工条件とコンピュータジャンボ

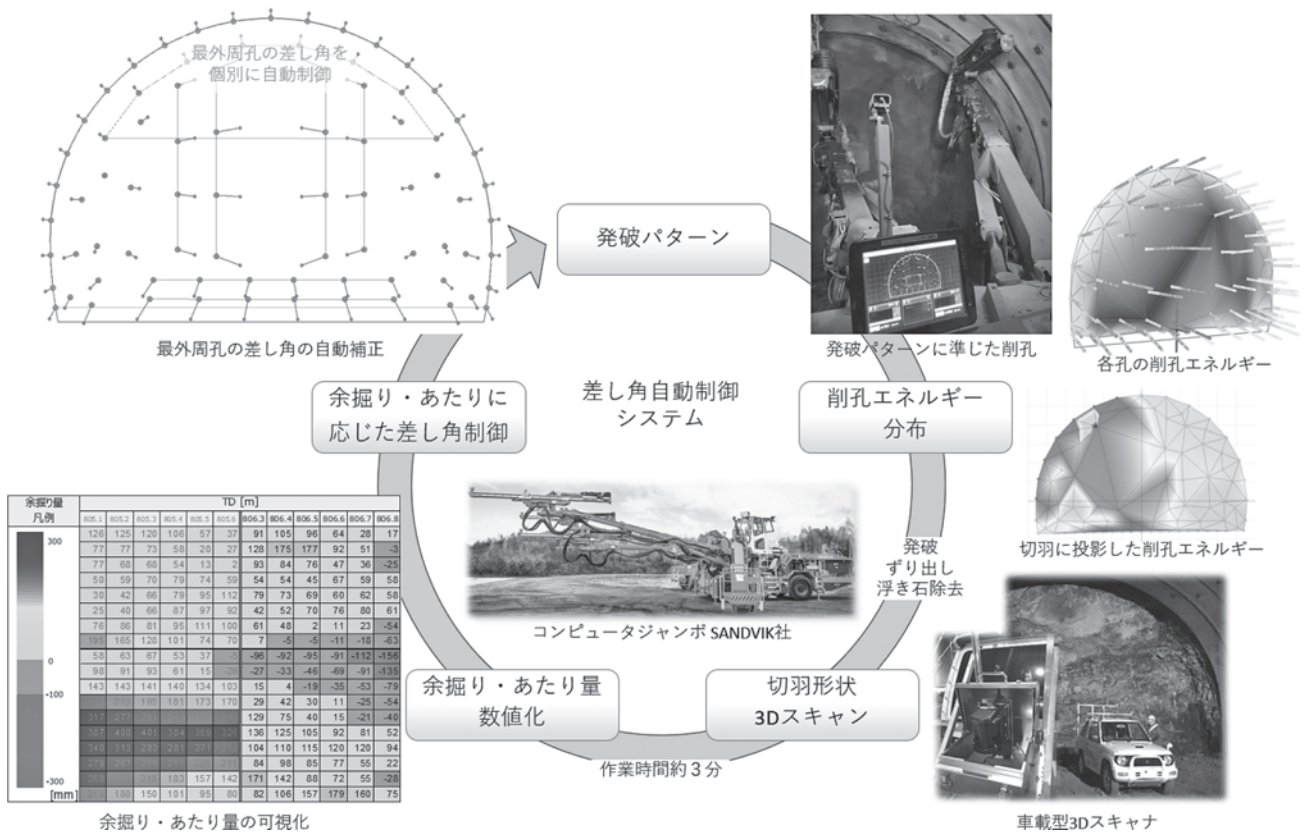
#### (1) 工事概要と地質状況

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80m<sup>2</sup>、西側工区のトンネル延長は、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





図一 2 差し角自動制御システムの概要

で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。

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、本システムはこの課題を解決できるシステムであり、余掘りを減らすメカニズム（手順）は、次のとおりである。

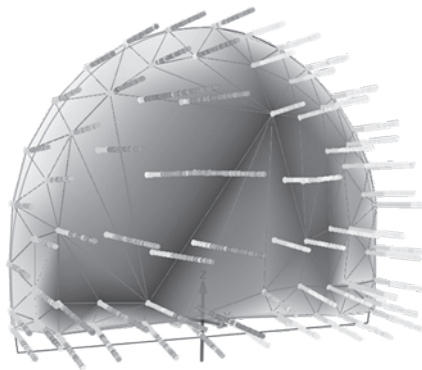
- 手順Ⅰ：発破パターンを作成しコンピュータジャンボ操縦画面に表示（最初の発破パターンは、過去の経験や地山強度等を鑑みて設定）
- 手順Ⅱ：ジャンボオペレータは、発破パターンに準じて正確に切羽削孔を実施（この時、自動的に削孔エネルギーが算出、記録される）
- 手順Ⅲ：装薬・爆破・ずり出しの後、浮き石を除去し切羽周辺の安全を確認した上で車載型3Dスキャナを切羽前に据え掘削直後の切羽形状をスキャンする（3分程度の作業）
- 手順Ⅳ：スキャン結果はその場で数値化、可視化され、余掘り／あたり量を確認（あたりがある場合には、その場であたりを除去する）
- 手順Ⅴ：あらかじめ設定した「余掘り－差し角補正値の関係」から差し角補正値を自動算出（補正値は地山性状に依存しない）

手順Ⅵ：補正値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）  
この手順を複数回繰り返すことで、段階的に余掘りを減らすことが可能となる。

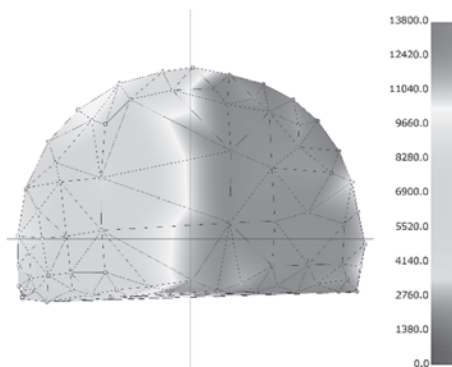
(2) 切羽災害防止技術

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、図一3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することができる。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一4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てい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、図一4は切羽削孔が終了した時点で自動的に出力される。

図一4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。活用方法を写真一3に示す。切羽安全指標は、削孔作業が完了



図一三 切羽削孔結果（地山側から切羽を臨む）



図一四 削孔終了時の削孔エネルギー分布



写真一三 切羽監視員による切羽監視状況

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、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。写真一三は、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。

### (3) 客観的切羽評価点法

一般に支保パターンを選定は、変位量、支保発生応力等、定量的な指標も加味するが、基本は切羽評価点法による方法である。しかし、切羽評価点法は地山性状のばらつきや不確実性を有することを理解した上で

地質的、かつ経験的な判断を必要とする。

そこで、本システムを運用する中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、従来技術者の技量に頼らざる得ない切羽評価法について、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ができるものと考え、本システムに導入した。具体的には、切羽評価点に関連する観察項目のうち支保の選定に大きな影響を与える項目「A. 圧縮強度」「B. 風化変質」「C. 割目の間隔」「D. 割れ目の状態」の評価区分とコンピュータジャンボから取得される削孔エネルギーの相関性を見出し、施工管理の省力化とより客観的な判断ができる切羽評価点法を提案した。

## 4. 差し角自動制御システム実証試験結果

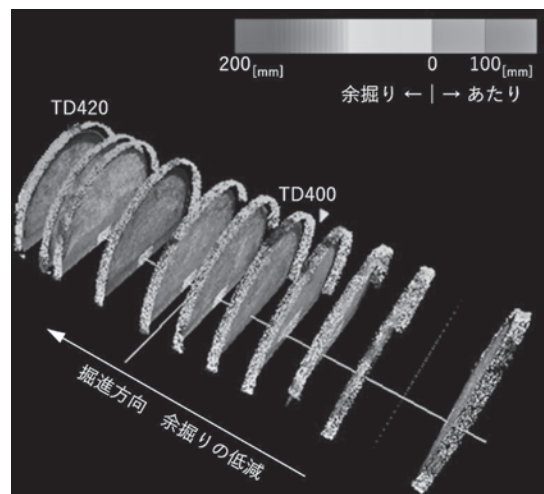
### (1) 余掘り低減効果の評価

図一五に本システムを連続運用した一例を示す。三次元点群データにより余掘り／あたりを定性的に示した図である。トンネル掘進にともない大きな余掘りは低減し、掘削断面が平滑化していることがわかる。

図一六は、凝灰角礫岩において本システムを運用した結果で、最大余掘り、平均余掘りをグラフ化したものである。

No.721 は最初の発破パターン（経験的に差し角を設定）により爆破掘削した結果である。最大余掘り 67.0 cm、平均余掘り 30.2 cm 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している。

No.721 ~ No.724 の余掘り／あたりの結果を受けて



図一五 3D スキャン結果



評価項目 A. 圧縮強度と評価項目 B. 風化変質については、ある程度データが集中しており、相関性のある傾向がみられる。評価項目 C. 割目間隔は、良好な地山が継続する削孔状態の継続性が高いほど標準偏差のばらつきが少なく、かつ小さくなっている。評価項目 D. 割目状態については、現状においては明確な相関性が認められず、今後のデータの蓄積と評価に努めていく必要がある。

## 5. おわりに

本論文ではできるだけ客観的情報を収集・活用し、経験や感覚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。本システムの実証で得られた知見を整理しまとめとする。

- 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。余掘りの低減効果は地山性状によって異なるものの、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。
- 切羽削孔エネルギーを「切羽安全指標」と位置付け、切羽災害防止に活用することで心理的な安心感

を与えるものとして評価を得た。

- コンピュータジャンボから二次的に取得できる削孔エネルギーを活用して新しい切羽評価点法の提案を行った。評価項目 A, B, C においては一定の相関性を確認することができた。一方で、評価項目 D においては、更なる削孔データの蓄積が必要であることもわかった。

JCMA

### [筆者紹介]



垣見 康介 (かきみ こうすけ)

清水建設㈱  
土木総本部 土木技術本部 地下空間統括部  
部長



福田 毅 (ふくだ つよし)

清水建設㈱  
土木総本部 土木技術本部 地下空間統括部  
課長



松本 啓志 (まつもと けいし)

サンドビック㈱ SMRT カンパニー  
カンパニープレジデント