

国道156号岐阜東B P 清水山トンネルにおける 全国初の「オートメーション化」施工について

河村 隼大¹

¹元 中部地方整備局 岐阜国道事務所 工務課 (〒500-8262 岐阜県岐阜市茜部本郷1丁目36-1)

¹現 中部地方整備局 北勢国道事務所 管理課 (〒519-0165 三重県亀山市野村4丁目3-25)

山岳トンネルの工事の発破掘削において、トンネル計画断面以上の余分の掘削は、搬出する土砂や吹付コンクリートの増量に直結する事から、その低減が山岳トンネルの施工管理で常に課題となる。「令和5年度 156号岐阜東B P 清水山トンネル工事」では、削孔作業時間を最小化し、余掘りを低減する「削孔自動設計システム」などを用いた事により、熟練技能に頼らない発破掘削を実現し余掘り低減効果を得られたためその結果を報告する。

キーワード 削孔自動設計システム、作業時間の縮小、余掘り低減

1. はじめに

(1) 清水山トンネル（仮称）の概要

国道156号岐阜東B Pは岐阜県羽島郡岐南町八剣から関市山田までを結ぶ、延長13.4kmの一般国道である。岐阜東B Pは岐阜の市街地を迂回する岐阜環状線の一部を構成し、国道156号現道の慢性的な交通渋滞の緩和、交通事故の減少・安全性向上、また、地域開発の支援を目的として計画された道路である。現在、3-1工区までは供用をしており、3-2工区（一部供用）にて道路改良工事、トンネル工事を行っている。

清水山トンネル（仮称）（以降、「本トンネル」という）は、起点側、岐阜県岐阜市岩田西から終点側、岐阜県岐阜市芥見海戸山に至る全長439mの山岳トンネルである。本トンネルの地質は、主に美濃帯堆積岩コンプレックスのチャートが分布しており終点側に局所的に泥岩、

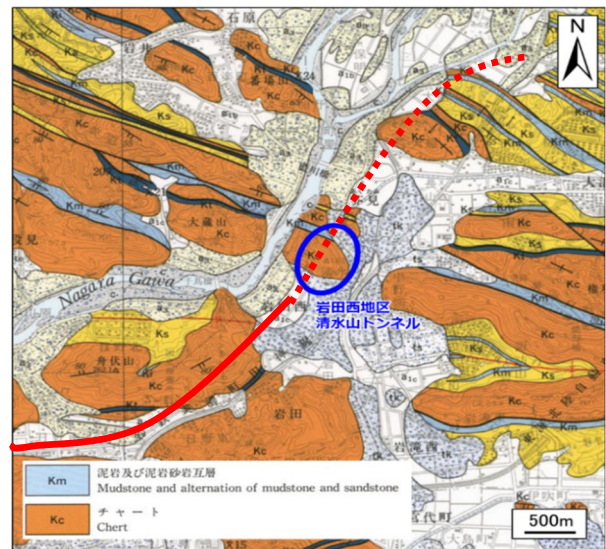


図-1 岐阜東B P周辺の地質平面図

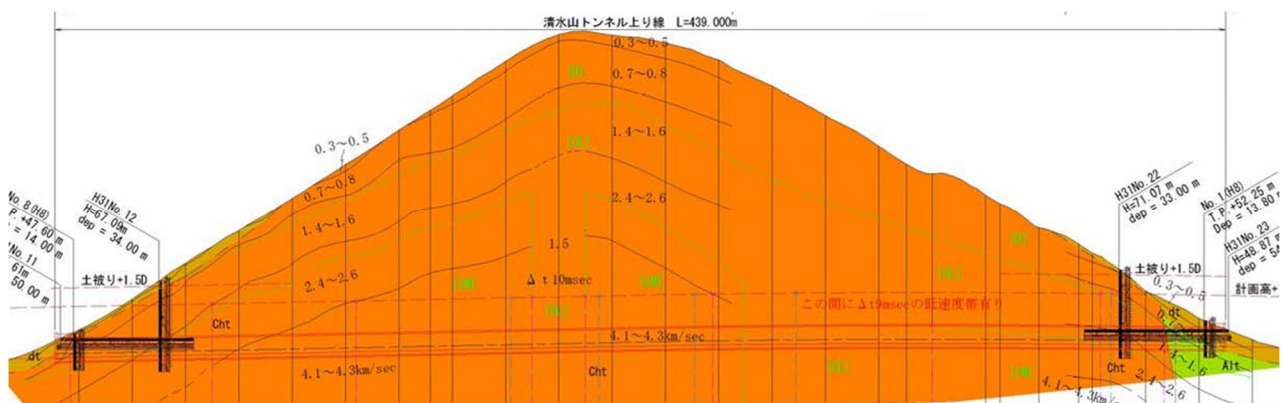


図-2 本トンネルの地質縦断面図

砂岩泥岩互層が分布している。チャートは比較的に堅硬な岩石であるが、割れ目が発達しており、変質作用を受けている箇所がある。

本トンネルは発破掘削を基本工法としており、令和7年3月より起点側より掘削し、令和8年3月に実貫通を迎えている。

(2) 自動化施工技術の導入について

NATMは国内に導入されては40年以上が経過し、その間、機械の大型化や掘削工法、補助工法等の新技術の開発により、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が、建設業全体の就業者数が減少しており、特にトンネル技能者の減少が顕著に表れている。また、技能者の内訳は55歳以上の割合が高く、高齢化が進んでいる（図-2）。トンネル工事は建設業の中でも、きつい、汚い、危険というイメージを持たれやすく、若者の入職が敬遠される傾向にある（図-3）。

このような背景から、国土交通省はi-Construction2.0およびインフラ分野のDXを推進し、山岳トンネル工事における自動施工技術の導入による省人化と生産性向上を目指している。特に、トンネル掘削サイクルの中でも「穿孔作業」は、熟練技能者の経験に頼る部分が極めて多く、災害リスクも高い切羽近傍での作業であるため、自動化の優先度が高いとされている。穿孔の自動化は、作業員の安全性を向上させるとともに、人手不足の解消、生産性の向上に大きく貢献する事が期待されている。

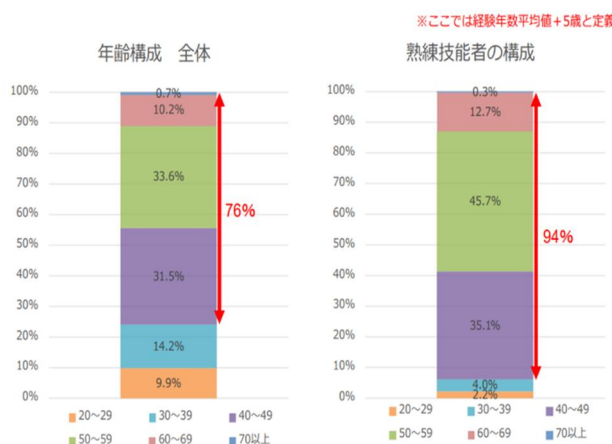


図-2 トンネル切羽作業員の年齢構成

日建連 山岳トンネル自動化専門部会所属会社の協力会社12社の作業員数

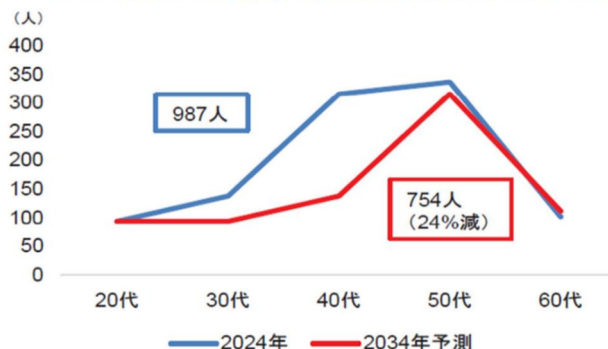


図-3 トンネル切羽作業員の年齢分布と10年後の予測

本稿では、これらの課題を解決するために開発された発破掘削用の削孔自動設計システム（以降、「削孔自動設計システム」という）を全国で初めて本トンネル工事に適用したので、その成果を報告する。具体的には、山岳トンネル工事における穿孔作業の現状と課題を明らかにし、穿孔作業の自動化が、熟練技能者不足の解消、労働災害リスクの低減、そして建設現場全体の生産性向上にどのように寄与するかを多角的に分析した結果を報告する。

2. 穿孔作業の現状と課題

従来の穿孔作業の手順を図-4に示す。穿孔作業の手順は、6つのステップから構成されている。これらのステップは、大きく2つの課題に大別でき、一つ目の課題は「熟練技術者の経験等に頼る作業」、二つ目の課題は「災害リスクが高い切羽近傍での作業」である。

これら二つの課題について、穿孔作業の手順を整理すると次のとおりである。

■ 課題①：熟練技術者の経験等に頼る作業

- ・発破計画作業
- ・削孔作業

■ 課題②：災害リスクが高い切羽近傍での作業

- ・切羽目視確認作業
- ・位置出し作業
- ・削孔長確認作業（装薬孔清掃作業）
- ・浮石確認作業

トンネル工事の施工フロー トンネル掘削（穿孔）



図-4 トンネル工事の施工フロー（穿孔）

3. 穿孔作業の全国初の実証施工

上記で述べたように穿孔作業は作業員の技量や経験がトンネルの安定性、サイクルタイムに大きく影響を及ぼす現状のため、機械化・自動化技術が特に求められている。ここでは、生産性向上のために本工事で全国初の現場適用をした、最適な発破パターンの自動設計と最適穿孔順序の自動設計を同時に実現する技術について述べる。

「削孔自動設計システム」は、4つの手順から構成されている。この手順を複数回繰り返す事で、余掘り量を低減する事が出来る。余掘り量が低減する事により、ずり搬出量を低減、吹付けコンクリート量の低減、CO2排出量の低減にも効果を与える事が出来る。なお、この一連の流れには、システムで最適な発破パターンを計算するため難しい設計、時間を要するデータ分析などは不要となる。「削孔自動設計システム」の各ステップについて説明する。

ステップ01では、「差し角の自動設計」、「発破パターンの自動設計」、および「シーケンスの自動設計」を行う。「差し角の自動設計」とは、余掘りを低減する事が出来る発破パターンの最外周孔の削孔角度を設計する事である。「発破パターンの自動設計」は、地山の特性に合わせて「孔と孔の距離」、「孔の数」、「削孔の角度」等を自動で設計する事である。つまり、切羽の削孔エネルギー分布を基に、1孔あたりの装薬量はすべて同じ条件で穿孔数、穿孔位置、穿孔間隔を独自のアルゴリズムを使って算定する。これにより最適な発破パターンが作成する事が出来る。「シーケンス自動設計」は、設計された発破パターンに対し、最短時間で削孔作業を完了する事が出来る削孔手順を自動で設計する事である。つまり、シーケンスの自動設計は、作成された最適な発破パターンを基にコンピュータジャンボのブーム同士が干渉しない条件でブーム移動が最小となるルートと施工業者独自のアルゴリズムから算定する。

ステップ02では、「シーケンスの修正設計」を行う。削孔中、予期しないトラブルで時間を要した場合、シーケンスを修正設計する。

発破、ずり出しを行った後、ステップ03では、3Dスキャナを使って余掘り量の分析を行う。

最後に、ステップ04では、最外周孔の差し角の修正設計を行う。

4. 技術の具体的な内容

差し角の自動設計は、余掘りを低減出来る差し角を自動で設計する事である。余掘りの概念を図-6に示す。本設計の特徴は、熟練技能を必要としないため安全に作業を進行する事が出来る。

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。

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、「削孔自動設計システム」はこの課題を解決出来るシステムであり、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

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ニングする（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

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）

この手順を複数回繰り返す事で、段階的に余掘りを減らす事が可能となる。



図-6 余掘りの概念

5. 現場実証による生産性向上の効果

ここでは、実際に本トンネルにて「削孔自動設計システム」を実証し得られた、余掘り量及び穿孔作業における生産性向上の効果について述べる。

本実証は、支保パターンD I-b（設計掘削断面積：53m²）の22m区間で実施し、切羽はチャート主体であった。余掘り量の推移を3次元スキャナにて結果を示す（図-7）。掘削が進むにつれて、特に天端部において寒色系の範囲が小さくなっており、余掘りが低減されている事が確認できた。また、図8に余掘り量の平均値をサイクルごとにプロットしたグラフを示す。地質の変化により

余掘りが増加する箇所があるが、差し角を毎サイクル修正する事で掘削ごとに段階的に余掘りが減少しており、10サイクルのトータルで69%の余掘り量低減効果が確認できた。

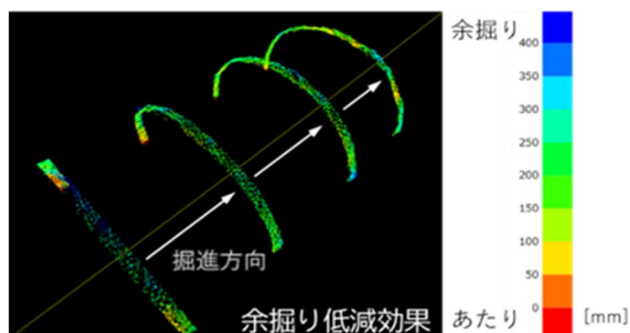


図-7 余掘り低減効果 (3Dスキャン)

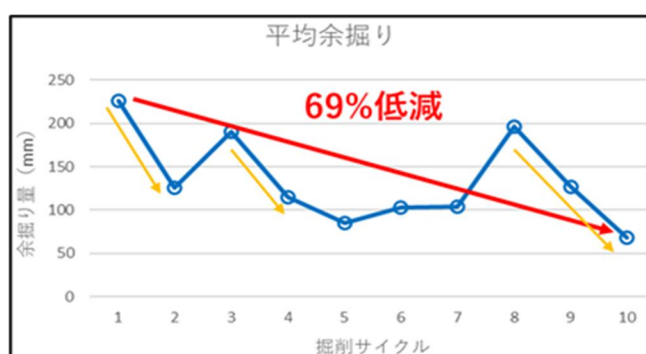


図-8 余掘り量低減推移

また、穿孔作業において、表-1のような生産性向上効果を確認できた。

発破計画：瞬時に発破パターンが自動作成されるため、作業人数は0人、作業時間も0分となった。②切羽目視確認作業：削孔自動設計システムにより切羽近傍での確認作業を低減した。③位置出し作業：作業が省略可能となるため、作業人数は0人、作業時間も0分となった。④削孔作業：作業人数をブーム操作者の2名で実施可能となった。また、地山の硬軟を考慮した発破パターンが作成されるため、孔数・孔間隔の最適化が図れ、作業員が作成する従来の発破パターンと比較して、孔数が1基あたり82箇所から73箇所に削減できた。孔数の削減とブームの干渉を防止した最適なシーケンスによるスムーズな削孔により、作業時間が27分で可能となった。⑤削孔長確認作業：全て孔の削孔長は自動的に記録・保存されるため、作業人数は0人、作業時間も0分となった。⑥浮石確認作業：削孔時の確認と併せて実施する事で占用作業時間を低減する事が出来た。

「穿孔作業」における、①発破計画～⑥浮石確認作業に至るまでの作業時間を標準歩掛りの62分から27分に短縮でき、約56%の作業時間短縮を実現できた。また、削孔作業に必要なオペレータ2名のみで発破計画～削孔長の確認作業を実施する事が可能となり、従来の3名から2名の省人化施工を実現できた。

作業手順	作業内容	作業人数(人)		作業時間(分)	
		従来	新技術	従来	新技術
①	発破計画	1	0	2	0
②	切羽目視確認	1	0	3	0
③	位置出し	3	0	5	0
④	穿孔	3	2(※)	42	27
⑤	穿孔長確認	1	0	5	0
⑥	浮石確認	1	1	5	0
全体	穿孔作業	3	2	62	27

表-1 穿孔作業の自動化施工の効果

6. まとめ

本システムを使用し、これまで熟練技能者に頼っていた発破計画や穿孔作業及び事故のリスクが高い切羽近傍での作業をオートメーション化した事により、安全かつ効率的なトンネル掘削が可能である事を確認した。余掘りを低減する事は、ずりの搬出量を低減、吹付けコンクリート量の低減、CO2排出量の低減など、多角的な効果が期待出来る事を確認した。

今後の展望として、建設業界ではトンネル工事に限らず、熟練技能者の経験や知恵によって支えられてきた一面もあり、若手技能者への技術継承が課題となっているが、本工事で実証した「ブラストマスタⅡ」のようにICTやAIを活用した技術が普及し、施工の効率化はもちろん、建設業界が抱える人手不足や技能継承といった問題も解決する技術を積極的に取り入れていく必要があると実感した。

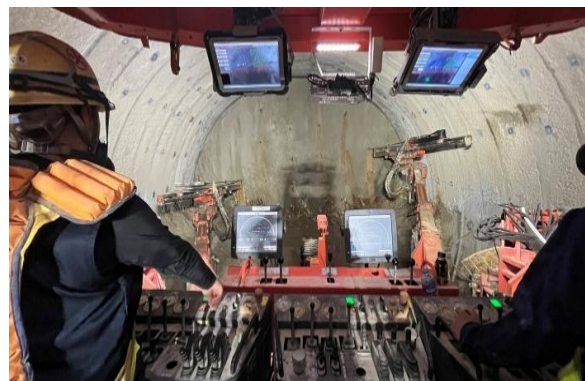


図-9 トンネル穿孔の様子

謝辞：本論文の作成にあたり、協力をいただいた清水建設株式会社をはじめ、各種助言をいただきました関係者の皆様に心からの感謝の意を表し本報告を終わります。

参考文献

- 1) 岐阜県美濃帯地域の5万分の1地質図幅（産業技術総合研究所地質調査総合センター）
- 2) 国土交通省：山岳トンネルの自動化施工等活用促進に向けた有識者会議，資料1～3，https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000154.html