

(仮称) 上曾トンネルにおけるNATM工法 ～フルオートドリルジャンボ導入による 発破掘削の最適化に向けた取り組み～

大科 憲人

茨城県 筑西土木事務所 道路整備課 (〒308-0841 茨城県筑西市二木成615番地)

近年のICT技術の発展により建設機械の自動化が進んでいる中、建設業界における将来の担い手不足の問題を背景として、現場の生産性向上に向けた取り組みが注目されている。本トンネルでは、発破掘削における爆薬装薬孔の削孔作業を自動化したフルオートドリルジャンボを導入することによる省人力化、及び作業員の経験値に依らない発破掘削を実現した。さらに、3次元測量により掘削断面を評価（見える化）することで、正確な位置に削孔する本建設機械の利点を最大限に活かし、余掘り量を低減させることにも成功した。本稿では、これらの発破掘削の最適化に向けた取り組み等について報告する。

キーワード トンネル, NATM, フルオートドリルジャンボ, ICT, 余掘り低減

1. はじめに

(仮称) 上曾トンネルは、茨城県石岡市と桜川市を結ぶ上曾峠（主要地方道石岡筑西線）の下を延長3,538m、最大土被り400mで貫く道路トンネルで、完成すると県内最長の道路トンネルとなる。施工は、石岡市と桜川市の両側から掘削し、本工区は桜川市側の約1.6km区間を施工している（図-1）。本トンネルの整備により、県西地域から茨城空港までを国道50号や国道125号を經由せずに、最短で結ぶ東西の基軸が形成されることから、県南・県西地域間の連携強化を図り、交流促進や地域振興に寄与することが期待されている。

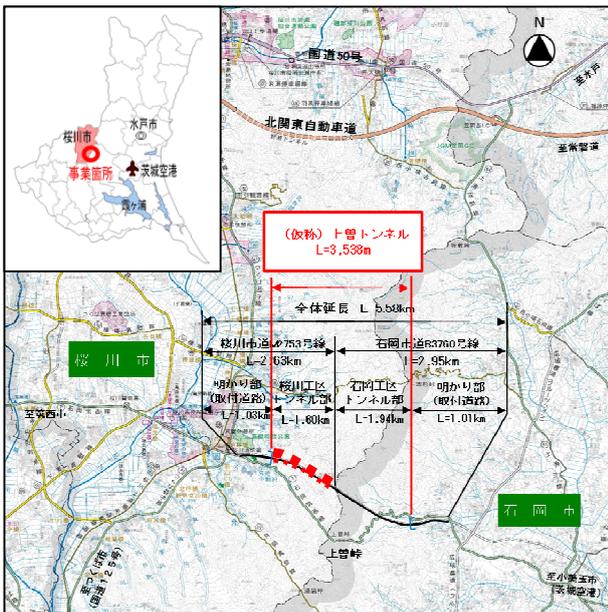


図-1 位置図

2. 工事概要

工事概要を表-1に示す。また、本トンネルの標準断面面図を図-2に示す。本トンネルを貫く区間の地質は、大部分が加波山花崗岩類から成り、風化の無い極めて堅硬な地山（図-3）であり、NATM工法（発破掘削方式）により施工している。

表-1 工事概要

工事名	(仮称) 上曾トンネル本體工事 (桜川工区)
受注者	大成・岡部・白田特定建設工事企業体
施工箇所	茨城県桜川市真壁町山尾
概要	掘削延長 : L=1,649m 覆工延長 : L=1,599m 内空断面積 : A=60.2㎡ (標準部) ~82.6㎡ (非常駐車体部) 幅員 : W=8.0/6.5m

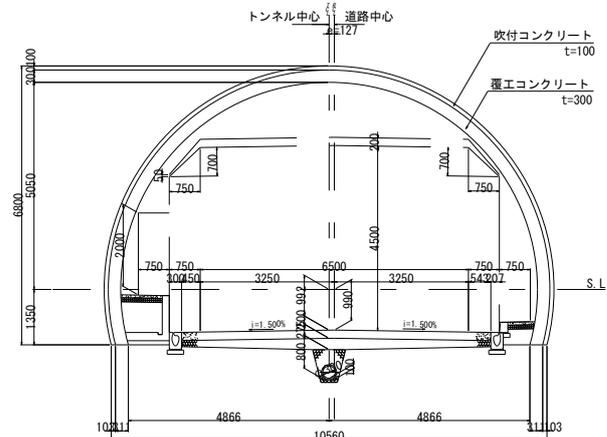


図-2 標準断面面図 (支保パターンCI)

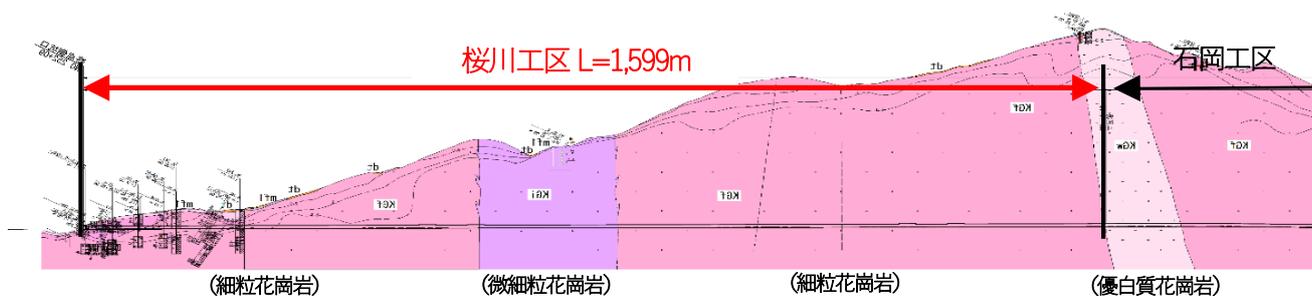


図-3 地質縦断面

3. 発破掘削における課題

(1) 熟練した土木技術の継承

発破掘削においては、爆薬を装填する装薬孔の削孔位置や角度が掘削断面の出来に直結するため、削孔作業はとても重要な要素である。そのため、地山の地質条件、風化具合、地下水、断層の有無等、常に変化する切羽面の状態を観察し、熟練作業員の経験値により、適切な削孔位置や角度を見極めて施工している。

近年の少子高齢化の影響は、建設業界でも深刻であり、将来の担い手不足が懸念される中、このような熟練した土木技術の継承が大きな課題となっている。

(2) 掘削断面の評価と余掘り量低減

トンネル掘削では、設計段階で予め余掘り（図-4）を見込んでおり、断面不足にならないよう少し大きく掘り上がるように見込んで施工している。しかし、余掘り量が多いほど、発破後により生じるズリ（発破掘削により生じる岩塊）の搬出量の増加や、その後に施工するコンクリート使用量の増に繋がるため、受注者としては、コスト削減をするために、余掘り量を極力抑えた掘削を目指している。

一方で、覆工コンクリートの巻厚不足が供用後に発覚するなどの施工不良の問題が生じる危険性もあるため、余掘り量を低減した理想の発破掘削を行うためには、覆工コンクリート打設後には見えなくなってしまう掘削断面を記録し、削孔位置と掘削断面の出来形との関係性を評価する必要がある。

しかし、発破掘削のサイクルタイムにおいて、発破前後に測量を毎回行うには、時間ロスが大きいと、工期が優先される工事現場では、掘削断面の評価を行い余掘り量の低減を目指すことが厳しい状況である。

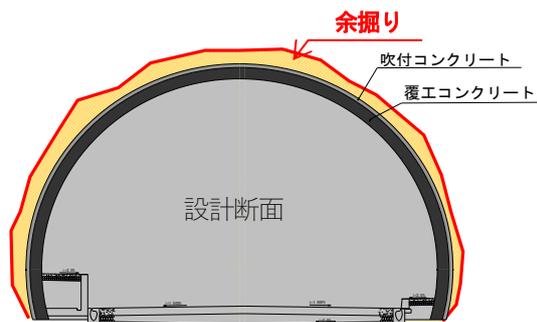


図-4 余掘りの概略図

4. 発破掘削の最適化に向けた取り組み

(1) 発破掘削の最適化について

これらの課題を踏まえて、発破掘削の最適化に向けたフロー案を図-5に示す。

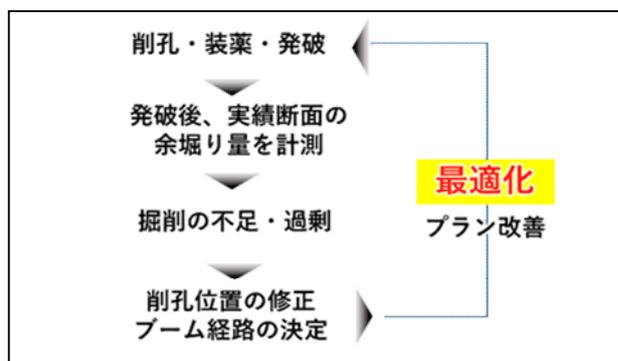


図-5 発破掘削の最適化フロー図

(2) フルオートドリルジャンボの導入

本現場では、発破掘削の最適化に向けて、フルオートドリルジャンボ（図-6）を導入した。

ドリルジャンボのブームは3本あり、通常は複数の作業員が手動でそれぞれのブーム操作を行うが、フルオートドリルジャンボは、予めCAD上で作成されたドリルプランに従って、切羽の削孔位置、削孔長、進入角度等を自動で正確に削孔してくれる。さらに、削孔工程時は1人のオペレーターにより、モニター操作、緊急停止等を一括で担うことができるため、削孔工程において大幅な省人化を図ることが出来る。

また、作業員の経験値、技術等によるばらつきが生じない事が本機械の最大のメリットであり、図面通りの正確な削孔を本機械が行ってくれることで、発破前の削孔位置の計測が不要となる。



図-6 本現場で使用したフルオートドリルジャンボ

(3) 掘削断面の評価（見える化）について

次に、発破後の掘削断面の評価（見える化）であるが、本現場では立体的に可視化できる3次元測量を取り入れた。近年の測量技術の発展に伴い、スキャニング速度が格段に向上している機器が普及している中、今回最も重要な事は、掘削のサイクルタイムに影響しない素早い測量を実施する手法である。

トンネル内は地下空間であるため、GPSが届かない空間であり、また、地上とは違いドローンを自由自在に飛ばす事が不可能である事から、座標計測はトラバース測量を前提として進める必要があったが、測量対象物である切羽面は日々進行し、発破による衝撃を考慮すると、測量機器を常時安定して固定しておける場所が無い場合、発破の度に機器の設置・計測・撤去をスムーズに短時間で行わなければならない。これらを解決するために本現場で取り入れた測量手法は次のとおりである。

まず、掘削断面を3Dスキャンするための測量機器は、最速でスキャニングできるレーザートラッカーを導入した。また、測量機器を三脚に据えるという固定概念を切り捨てて「車載型」に改良し、レーザートラッカーの据付位置をトラバース測量する時間を短縮するため、この車両の定位置となる様、プリズム4箇所をルーバー固定型とした（図-7）。

この結果、通常の3次元測量手法では18分程度見込まれていた測量を、本現場では4分での実施を可能とし、1サイクルあたり14分の大幅な時間短縮（約8割短縮）を実現した（図-8）。

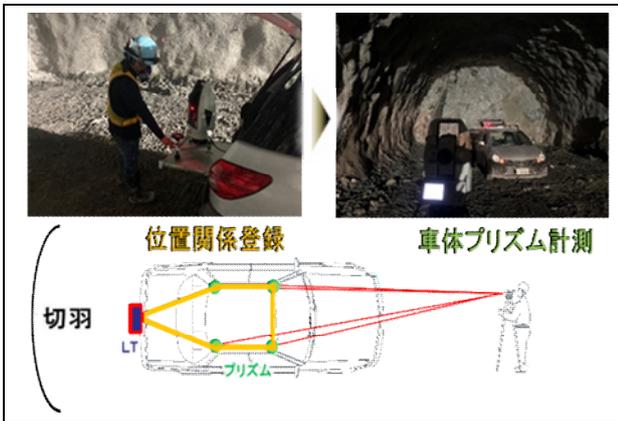


図-7 測量機器設置の工夫

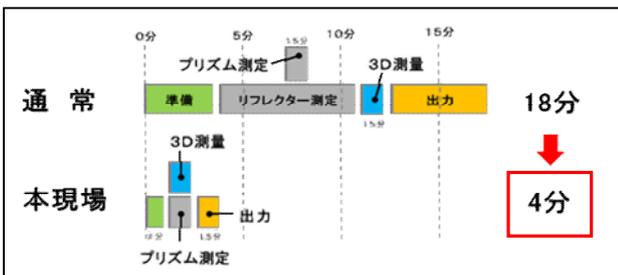


図-8 時間短縮効果（1サイクルあたり）

(4) 発破後の掘削断面の3次元データ

前述のように、測量時間を短縮することで、掘削工程を遅らせる事なく全断面において3次元データを計測することが可能である。3次元データをヒートマップ化し、掘削断面の実績を可視化した3次元データを図-9に示す。

暖色系が掘削不足で設計よりも内側に入っている箇所、寒色系が余掘りの部分を示している。この図においては、TD（トンネル延長）875m地点での平均余掘り量が、73.1mmであることが確認できる。この断面における支保パターンはCIであることから、設計の余掘り量は220mmであり、約7割の余掘りを低減できた事が数値として可視化できた。

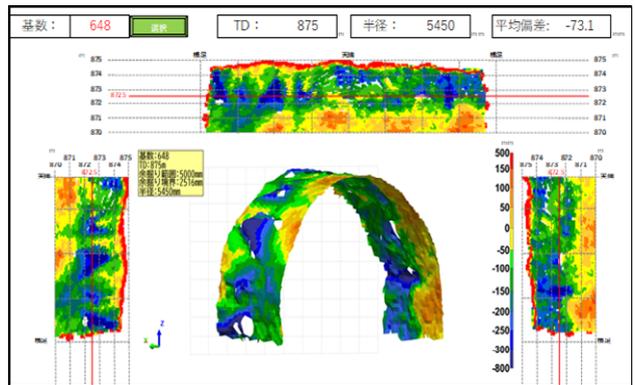


図-9 掘削断面の3D画像

本現場の発破毎の余掘り量の分布は図-10に示すとおりであった。

余掘り量は、50mm～100mmの間に収まるものが最も多く、平均余掘り量は、72.1mmという結果になった。

また、最大で余掘りが生じた断面でも、178.1mmであり、全体を通して余掘り量の抑制につながったことが確認出来、結果としてずりの搬出量や吹付・覆工コンクリート使用量の低減に繋がった。

なお、掘削断面での3次元化を可能とした事は、トンネルの施工管理を行う上で、不可視部分を可視化し、今後のトンネル工事の現場において、BIM/CIMモデルを推進する上でも、非常に有効な事例になると考える。

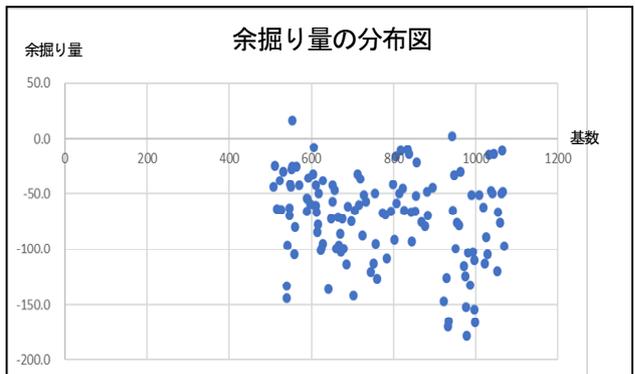


図-10 発破毎の余掘り量の分布図



図-11 発破掘削の最適化システムの構造

(5) 3D画像を活用した発破掘削の最適化について

掘削断面の3D画像の取得が全断面で可能となれば、それを同測点のドリルプランと重ね合わせることで、削孔位置と余掘り量の関係性を評価する事が可能となり、次の削孔位置に向けて修正を加えるなど、発破掘削の余掘り低減に向けた最適化システムの構築が可能となる。フルオートドリルジャンボと3D画像を活用した発破掘削の最適化システムの構造を図-11に示す。

フルオートドリルジャンボは、正確な位置に削孔するだけでなく、人の操作による削孔では、硬い、軟らかいという感覚的なものを、削孔時のドリル回転数、穿孔速度、抵抗値、使用水量など、削孔に関する詳細なデータを数値化して毎回記録している。これらのドリルデータと蓄積された3D画像データをコンピューター的人工知能(AIシステム)に学習させることで、完全に自動化した最適なドリルデータを作成することが可能となる。

また、詳細なドリルデータで地山の地質の変化を敏感に捉える事により、地質の変化点における発破掘削後の予期しない岩塊の崩落等による事故を未然に防ぐ事も可能と考える。

5. 成果

本現場における、フルオートドリルジャンボの主な導入効果は以下の3つである。

① 省人化

フルオートドリルジャンボの導入により、トンネルの掘削作業において、通常50% (3人→1.5人)の省人化を図ることができた。

本工事では、試験的な段階であったため、1.5人となったが、将来的には3人→1人まで削減が可能と考える。

② 余掘り量低減

全体を通して余掘り幅の平均が72mmまで削減でき、標準の余掘り幅と比較して約7割削減することが出来た。また、余掘り量低減により、掘削土の運搬量で約3,500m³、コンクリートの使用量で約7千トン削減出来た。

③ 環境負荷低減

運搬土量の低減は、10t ダンプ運搬で約900台の削減となり、CO₂排出の環境負荷を軽減した。また、生コンの使用量の削減により、建設資源の節約にも貢献することが出来た。

6. おわりに

現在、建設業界における高齢化、将来の担い手不足は大きな課題である。加えて、働き方改革による時間外労働の縮減や、週休2日の確保のため、建設現場における生産性向上の取り組みは必須であり、IT化やAI導入などで労働環境を改善させる事は、将来の担い手を確保するためにも大変重要である。

このような中、本現場のように発破掘削の最適化システムの実用化に向けて、フルオートドリルジャンボの導入、3次元測量の時短を可能とした取り組みなど、受注者の積極的な取り組みは高く評価することが出来る。発注者としても、一現場の取り組みとして終わらせずに、広く情報発信をしていく事が建設業界全体の持続的発展に寄与するものと考え、本工事の取り組み事例を本稿でまとめた。

特に掘削断面の3D画像データを全断面で得られる事が出来れば、覆工後の内空断面との差し引きで、覆工コンクリートの巻厚を3次元管理する事が可能となるため、今後の展開として期待することは、フルオートドリルジャンボのような自動化機械の導入により、山岳トンネル工事のICT施工を進めるとともに、BIM/CIMモデルの拡充に向けて、施工管理における3次元測量の標準化を進め、官民連携して容易に現場へ導入出来る環境を整える事が重要であると考え。

謝辞: 本稿を作成するにあたり、ご協力をいただいた大成・岡部・白田JV作業所長をはじめ、現場関係者の方々にこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) (一財)建設物価調査会:国土交通省土木工事標準積算基準書(河川・道路編)