

自動化とデータ分析に基づく生産性の高いトンネル発破掘削の実践

鹿島建設(株) 正会員 ○岩野圭太 手塚康成 三浦 悟

1. はじめに

昨今「熟練労働者不足」、「労働災害」、「低い生産性」への画期的な対応策として山岳トンネル施工の自動化の研究開発が進められているが、これらの目的を真に達成するためには、単に施工機械の自動化のみでなく、いかに自動化機械に効率的な作業を行わせるかが極めて重要である。つまり自動化機械に行わせる作業を分析・データ化し、有効な作業指示を与え、再び得た作業データから新たな改善点を明らかにし、継続的に生産性を向上する仕組みを整えることである。山岳トンネルの施工サイクルのうち特に発破（穿孔・装薬）はそれ以降の施工サイクルの成否を決める重要な位置づけであるものの、従前よりトンネル作業員の経験と技量に頼った施工が主であった。近年コンピュータジャンボの現場導入が進んできているものの、データに基づく合理的な発破を実施する仕組みが整えられているとは言い難い。そこで本報では自動化とそこで得られたデータに基づく合理的な発破設計により生産性の高い発破を実践する仕組みの構築とその運用について報告する。

2. トンネル発破の最適化サイクル

データに基づく合理的な設計により発破の最適化を実践するためには、①発破データ（穿孔や出来形など）をデジタルにて定量化し、②そのデータを一元化して見える化し適切な評価式のもとで結果を分析したのち、③その分析に基づいて穿孔・装薬計画の改善を図るというサイクルを担当者の発破経験に依らず確実に廻すことができる仕組みが必要となる（図-1）。このためこのサイクルを効率的に廻す重要なポイントは図-1の特に②において、発破良否を判断可能とするため発破結果（出来形）に影響を与える因子（地山/穿孔/装薬）を含む適切な評価式を確立すること、および地山性状の変化に伴う発破の出来形やその因子の傾向を捉え、次発破の改善の判断を可能とする発破の見える化を構築することの2点であると考えている。

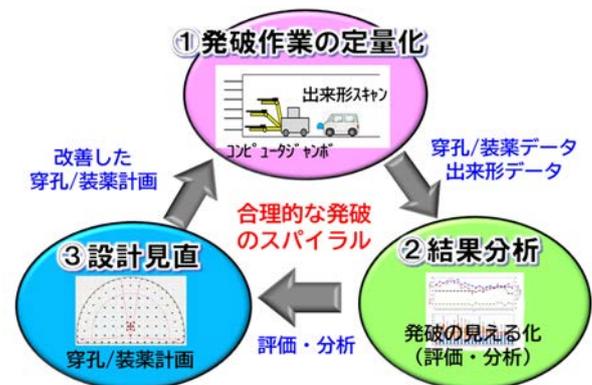


図-1 合理的な発破のサイクル

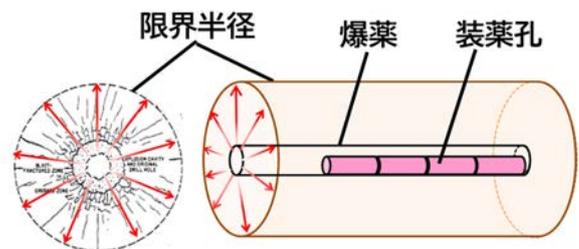


図-2 限界半径の概念

3. 合理的な発破評価式（限界半径式）の確立

発破の出来形に影響を及ぼす因子として岩盤条件（岩盤強度など）、穿孔条件（穿孔径・穿孔長など）、装薬条件（爆薬の爆速・孔薬量など）の3条件が挙げられる。これらの因子から発破孔1孔が持つ爆薬の破壊力と理論破壊領域（限界半径）（図-2）を求め、これを元に最適孔間隔を算定する評価式を構築した。この評価式は爆薬の爆轟圧力や空間デカップリング、孔壁岩盤への作用圧力など複数の理論式により構成される（図-3）。過去に鉱山坑道等の発破にてその妥当性が検証されており、今回はこれを山岳トンネルへの適用を図ったものである。発破の良否は、上記に列挙した因子のほかに、岩盤の割れ目やいわゆる“しわさ”

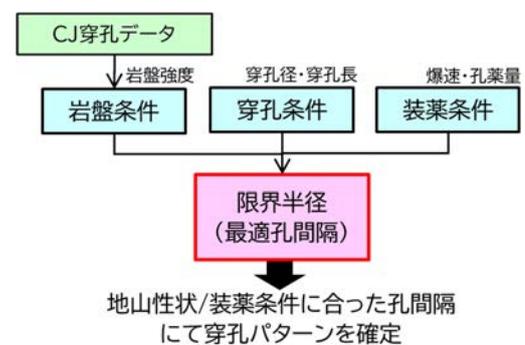


図-3 評価式のフロー

キーワード 山岳トンネル, 発破, 自動化, 最適化

連絡先 〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11 鹿島建設(株)機械部 TEL 03-5544-2409

など定量評価が容易でない指標も発破結果に影響を与えると考えられ、今後も継続的に評価式の見直しが必要であるものの、現時点で山岳トンネル発破に適用した場合でも、十分に妥当な最適孔間隔を算定すると考えている。また図-4に示すようにこの評価式によって各因子と最適孔間隔のノモグラムを事前に構築することも可能となる。

4. 発破の見える化の導入

合理的な発破のサイクルを廻していくためには、発破掘削の経験に依らず適切な評価式に基づき地山性状の変化に対応して適切な発破を実践できることが必要である。このため発破の条件とその結果を一元化し、発破良否を傾向として把握できるよう発破の見える化を構築した。この見える化ではコンピュータジャンボと出来形スキャナの運用およびそれらデジタルデータの自動収集を基本としているため、図-5に示すように発破後の掘削出来形について穿孔ラインの上下で区分した領域の評価が可能となる。同図の橙色で示される穿孔ライン以上の掘削分はいわゆる爆薬の威力で大きく掘削された部分であるが、このように区分することで無駄な余堀りが生じた場合、その要因分析が容易となり有効な対策を打つことできる。この発破の見える化を実際のトンネル現場にて運用した結果を図-6に示す。当初はコンピュータジャンボ

やスキャナによるデータ収集を実践しつつも、発破計画は従来通りトンネル作業員の経験に基づく発破を行っていたが、途中より発破見える化と評価式に基づく発破設計の改善を試みた。具体的には穿孔ラインを改善しつつ、地山性状の変化に対応して限界半径と実際の外周孔間隔の乖離を埋めるように孔薬量や孔間隔の調整を行った。これにより対策後は無駄な余堀りの低減をしながら、地山性状に合わせた合理的な設計に努め、対策前に比べ外周孔の穿孔数を約15%、薬量を約35%低減し、最終的に施工時間の短縮にもつながった。

5. おわりに

自動化の重要なポイントは、自動化機械にいかにも有効な作業指示を与えるかであるという考えのもと、発破についても影響因子を含む適切な評価式とその発破良否の傾向を捉える発破の見える化システムを構築し現場へ運用した。無駄な余堀りの低減のみならず地山に応じて合理的な穿孔・装薬の設計が可能となうえ、この仕組みは発破経験に依らず容易に対応でき、熟練作業員不足への対策にもつながると考えられる。現時点では孔薬量の調整は直接、トンネル作業員への指示に依らざるを得ないなどの課題も残るが、近い将来さらに自動化が進み、その課題が解消していくことにより、この合理的な発破の仕組みがより有効になると考えている。

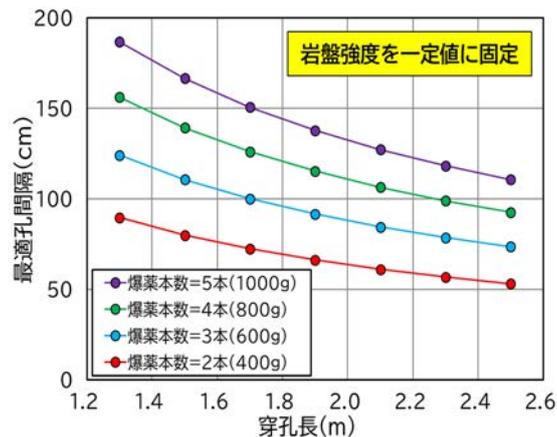


図-4 評価式に基づくノモグラム

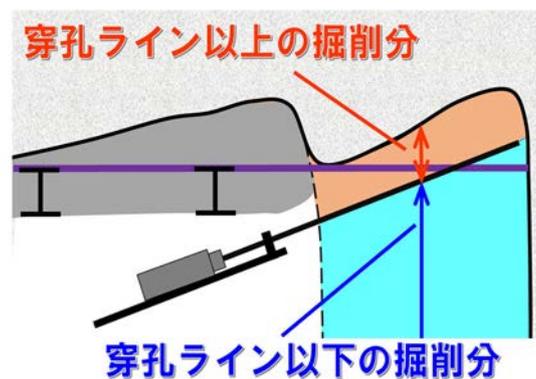


図-5 掘削領域の区分

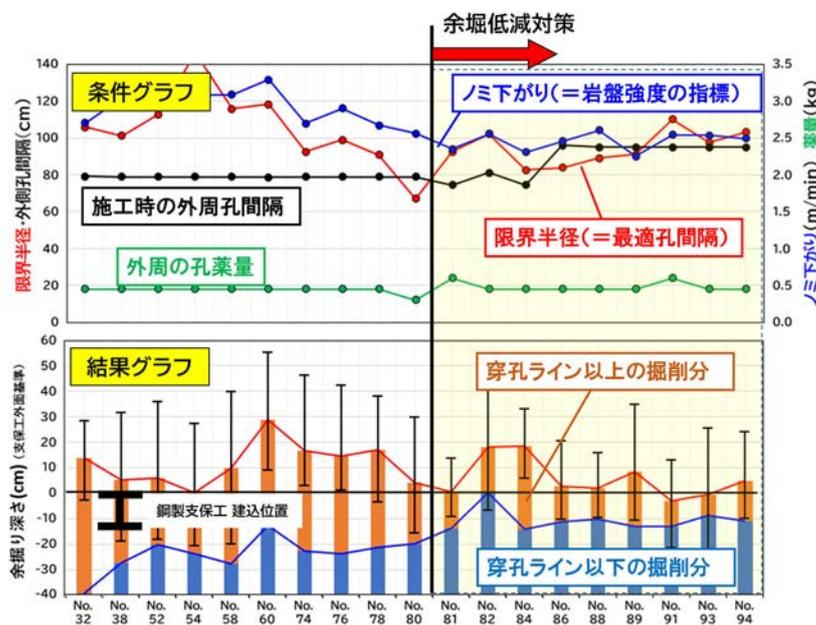


図-6 発破の見える化と無駄な余堀り低減の対策状況