

発破パターン自動適正化システムの現場実証試験について

Field verification of the automatic blasting pattern optimization system

キーワード
山岳トンネル，発破，発破パターン，
穿孔パターン，現場実証試験

大江 隆史*，加藤 謙吾*，瀬谷 正巳*，
中谷 幸一*，古川 哲男**

研 究 概 要

本報告は，山岳トンネル工事における発破掘削の生産性向上および省力化を目的に開発した「発破パターン自動適正化システム」の現場適用性について，実証試験を行い，その結果についてまとめたものである。実証試験は，徳島県の令和 4-6 年度桑野道路下大野トンネル工事で実施した。実証試験では，穿孔エネルギーデータの共有，発破パターン作成，発破掘削結果，発破掘削結果のフィードバックについて想定通り行えることを確認したが，その一方で計算に使用する穿孔エネルギーの平均化範囲および 3DLiDAR を用いた出来形確認をフィードバックする方法などについては課題が残った。

1 はじめに

近年，建設分野においては，少子高齢化による熟練技術者の減少や若年層の業界離れが深刻化しており，それに伴う労働力不足が顕著な課題となっている。この傾向は今後さらに加速すると予測される。このような現状を踏まえ，生産性の向上や労働環境の改善を目的として，ICT 機器を活用した情報化施工の推進が進められている。

山岳トンネル工事においては，発破掘削作業にフルオートコンピュータジャンボ（以下，全自動ジャンボ）が導入されるなど，情報化施工の取り組みが進展している。筆者らは，生産性の向上および省力化施工を目的として，全自動ジャンボを活用した「発破パターン自動適正化システム（以下，本システム）」の開発を進めている¹⁾。本報では，開発中の本システムについて，実際の現場における実証試験の結果を報告する。

2 工事概要

本検証は，国土交通省四国地方整備局が整備を進める阿南芸自動車道の一部である桑野道路における下大野トンネル工事において実施した。当該区間は，四国横断自動車道や高知東部自動車道と連携し，四国8の字ネットワークを形成する重要な役割を担っている。下大野トンネルの整備は，災害時の緊急輸送ルート確保の確保，地域間交通の円滑化，物流体制の強化など，徳島県南部地域の社会基盤の充実と地域活性化に大きく寄与するものである。

表－1にトンネル概要を，図－1に工事区間平面図を示す。

表－1 工事概要

工事名	令和4-6年度 桑野道路下大野トンネル工事
工事場所	（自）徳島県阿南市下大野町 （至）徳島県阿南市長生
工期	2023年1月6日～2026年3月31日
発注者	国土交通省 四国地方整備局
施工者	佐藤工業株式会社
工事内容	トンネル延長：L=718.6m, W=11.2m 内空断面積：88.9㎡



※地理院地図（国土地理院）を加工して作成
図－1 工事区間平面図

* 技術センター 土木研究部，** 大阪支店

3 現場実証試験

3.1 発破パターン自動適正化システムの概要

本システムは、図-2に示したサイクルにて発破パターンの適正化を行っている。

Plan(発破計画)

全自動ジャンボによって前回穿孔時に取得された穿孔データを基に、開発中の発破パターン自動適正化ソフトウェア（以下、本ソフトウェア）を用いて発破パターンを自動で作成する。作成した発破パターンは全自動ジャンボに転送される。穿孔データを基に発破パターンを自動適正化する手法に関しては、加藤らの「モンテカルロ法を用いた発破パターン最適化」に詳しい²⁾。

Do(穿孔・発破)

転送された発破パターンを全自動ジャンボ PC 上で選択し、実行することで計画された装薬孔を自動穿孔する。装薬孔に発破パターン通りの火薬を装薬し、発破する。

Check(発破出来形の確認)

発破後、目視での確認または3DLiDAR などを用いて、発破の出来形を確認する。

Act(結果のフィードバック)

使用した発破パターン、穿孔時に得られた穿孔データ、発破後の発破出来形データを分析することで、次の発破計画に反映を行う。

3.2 現場実証試験概要

本検証では、本ソフトウェアおよび3.1節で述べた PDCA サイクルが適切に機能しているかを確認するために、主に以下の点について確認を行った。

3.2.1 穿孔エネルギーデータの取得および発破パターンデータの作成

穿孔時に取得された穿孔データは、全自動ジャンボに搭載されている PC に自動保存される。現場職員は、トンネル坑内 Wi-Fi 回線を利用することにより、詰所または事務所から、全自動ジャンボ用 PC もしくは共有フォルダにアクセスすることでデータを取得することができる。まずは、穿孔データの取得が問題なく行えるかを確認する。次に、取得した穿孔データを解析し、進行方向の削孔エネルギーの変化、コンター図による穿孔データ分布、断面距離、穿孔順序等に問題がないことを確認する。そして、本ソフトウェア上の設定値である”トンネル断面”、”差し角”、”孔間隔”、”最大装薬量/1孔”、”許容穿孔数”、”抵抗線長”などを確認した後、発破パターンの作成を実行する。こうして作成された発破パターンの穿孔数、穿孔位置、総装薬量、穿孔順序などが問題ないか確認する。問題がなければ、全自動ジャンボ用データを作成し共有フォルダに保存する。作成された発破パターンに問題があった場合は、パラメータを必要に応じて調整し、発破パターンの作成を繰り返す。

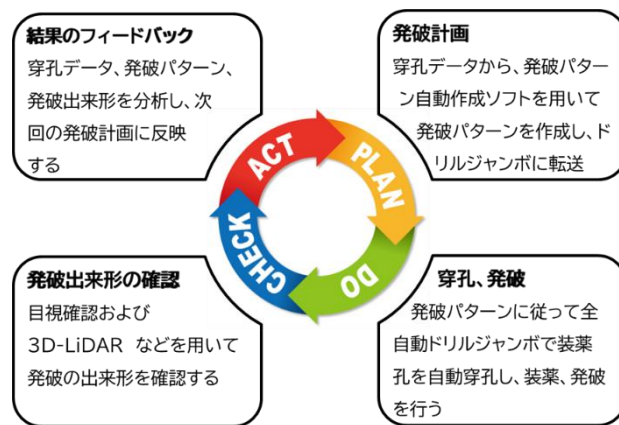


図-2 発破パターン自動適正化サイクル

3.2.2 全自動ジャンボ PC 上での発破パターンデータの読み込み

3.2.1節において作成し、共有フォルダに保存した発破パターンデータを全自動ジャンボ PC で読み込む。PC 上で表示される掘削断面、穿孔順序などが問題ないことを確認し、自動穿孔を実施する。

3.2.3 発破掘削結果の確認

発破後の切羽断面形状を3DLiDAR 等により測量し、設計通りの掘削が行われたか確認する。また、払い孔部のアタリの有無を確認し、本ソフトウェアを用いて作成した発破パターンの妥当性を評価する。

3.2.4 発破掘削結果の次回発破パターンへのフィードバック

3.2.2節で得られた穿孔データに基づき、本ソフトウェアを用いて作成した発破パターンに3.2.3節の結果を加え、穿孔位置、穿孔数、装薬量、および、孔間隔を修正、検討する。そして、修正した発破パターンを次回発破掘削に適用し、その発破掘削結果を確認する。

3.3 現場実証試験結果

3.3.1 発破掘削結果一覧

本検証は、前述した令和4-6年度桑野道路下大野トンネル工事において、支保パターン CII~DI 区間の発破掘削を対象に、3日間連続で実施した。対象とした発破数は合計6回であったが、現場サイクルの都合上、2回目と3回目については同一の発破パターンを用いて発破掘削を行った。

図-3に、”作成に使用した穿孔エネルギーのコンター図と作成された発破パターンを重ねた図”、”発破掘削後に撮影した切羽鏡面”、”3DLiDAR でスキャンした点群の切羽断面図”をそれぞれ示す。本検証においては、心抜き孔と外周孔の計算において、穿孔エネルギーに基づいた適正化を行っていないため、図-3の穿孔エネルギーの平均値は、心抜き孔と外周孔が担当する領域を除いた平均値となっている。

1回目は、これまで現場で用いていた発破パターンに基づき、各種パラメータを調整した。発破パターン作成に用いた前回発破掘削時の穿孔エネルギーの平均値は162.2J/cm³であり、それによって作成された発破パターンの穿孔数は136孔、総装薬量は123.6kg となった。発破パターンの詳細については、内側から3つ目の補助払い孔において、左右で穿孔数に違いがあることがわかる。左が5孔、右が6孔となっており、重ね合わせている穿孔エネルギー

の分布を見比べた場合、右側の穿孔エネルギー値が左側と比較して高くなっている。つまり、地山が左側よりも右側が硬くなっているため、その性状を反映したためである。

2,3回目は、1回目穿孔時に得られたデータより、穿孔エネルギーの平均値は123.9J/cm³と少し低い値となった。穿孔エネルギーの分布図からも確認できる通り、全体的に穿孔エネルギーが小さくなっている。また、発破パターン作成時に本ソフトウェアの設定値である抵抗線長を、1回目



【1回目】 穿孔エネルギー：平均値162.2J/cm³ (91.6~205.9J/cm³)，穿孔数：136孔，総装薬量：123.6kg



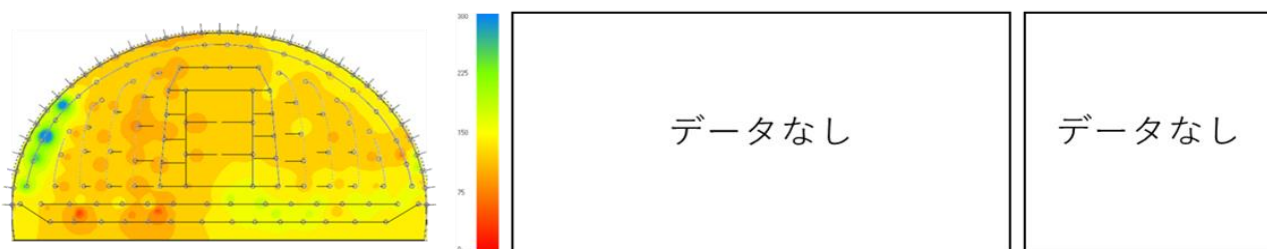
【2,3回目】 穿孔エネルギー：平均値123.9J/cm³ (20.4~233.4J/cm³)，穿孔数：136孔，総装薬量：106.0kg



【4回目】 穿孔エネルギー：平均値123.6J/cm³ (86.5~391.5J/cm³)，穿孔数：136孔，総装薬量：108.4kg



【5回目】 穿孔エネルギー：平均値125.8J/cm³ (31.6~165.6J/cm³)，穿孔数：129孔，総装薬量：103.2kg



【6回目】 穿孔エネルギー：平均値131.2J/cm³ (77.1~401.1J/cm³)，穿孔数：139孔，総装薬量：84.0kg

図-3 結果一覧(左:穿孔エネルギーと発破パターン図，
中:切羽鏡面写真，右:LiDAR による切羽スキャン)

作成時よりも短く設定したため、孔線1本あたりの穿孔数は減少したが、孔線の数が増加し、結果として穿孔数は変化しなかった。ただし、穿孔エネルギー分布を反映し、1回目よりも1孔あたりの装薬量を減少させる方向で適正化を行ったため、総装薬量自体は小さくなった。

4回目は、穿孔エネルギーの分布図より、左肩付近において穿孔エネルギーが大きくなったことがわかるが、その他の穿孔エネルギーが小さくなったことから、平均値としては2,3回目と大きな差は認められなかった。このことから、各種パラメータは変更せずに、穿孔エネルギーを基に作成した発破パターンを適用した。

5回目は、2~4回目までの穿孔エネルギー分布と比較して、顕著な差は見られなかったが、さらなる発破パターンの適正化を目指して、各種パラメータを調整し、新たな発破パターンを作成し、適用した。

6回目は、穿孔エネルギーの分布図より、左肩付近において穿孔エネルギーが大きくなり、平均値としても約5%の増加が認められた。これを踏まえて、各種パラメータを調整し、作成した発破パターンを適用した。なお、総装薬量が減少している要因は、支保工パターンが CII から DI に変化したことで、進行長を1.6m から1.4m に変更したためである。

図-3に示した切羽鏡面写真、3DLiDAR スキャンデータおよび現場での目視観察においては、1~4回目の発破において十分な発破効果が確認され、これまでの発破掘削時のアタリ取りに要した時間は同程度であった。これに対して、5回目の発破では切羽右隅の一部に掘削不良が発生し、これまでの発破掘削時に比べて、アタリ取りに時間を要した。これは、後述する穿孔エネルギーのフィードバックに問題があったことが原因と考えられる。

3.3.2 実証試験結果

3.2.1節の”穿孔エネルギーデータの取得および発破パターンデータの作成”については、詰所 PC から共有フォルダ上の穿孔データを取得できることを確認した。また、事務所にいる場合についても、詰所 PC にリモート接続することにより、取得可能であることを確認した。さらに、取得したデータを用いることで、新たな発破パターンを作成できることを確認した。データ取得から発破パターン作成までに要した時間はおよそ20分ほどであったが、これは現場や穿孔データの状況によって左右される。

3.2.2節の”全自動ジャンボ PC 上での発破パターンデータの読み込み”については、詰所および事務所から全自動ジャンボに搭載された PC へ送信できることを確認した。また、全自動ジャンボ上の PC 画面から送信されたデータが、問題なく読み込まれていることを目視によって確認した。

3.2.3節の”発破掘削結果の確認”については、コソク後に3DLiDAR を用いて詳細な切羽形状を計測できることが確認できた。

3.2.4節の”発破掘削結果の次回発破パターンへのフィードバック”については、本ソフトウェア上で穿孔エネ

ルギー分布を容易に確認できること、作成される発破パターンに穿孔エネルギー分布が反映されていることを確認した。一方、3DLiDAR を用いた計測結果については、余掘り量の算定などは行わずに切羽形状の確認に留まった。

3.3.3 実証データの分析

本ソフトウェアにおいて、取得した穿孔データの穿孔エネルギー分布を基に作成された発破パターンが、穿孔エネルギー値の大小に応じて結果が変化しているかの分析を行った。

式(1)、式(2)は、本ソフトウェアにおいて穿孔エネルギーに基づく孔あたりの装薬量の算出の際に用いられる。

$$C = q \times V \quad \dots (1)$$

$$V = S \times B \times L \quad \dots (2)$$

ここに、 C ：孔あたりの装薬量(kg)

V ：孔あたりの掘削担当体積(m³)

q ：単位体積当たりの必要装薬量(kg/m³)

S ：孔間隔(m)

B ：抵抗線長(m)

L ：進行長(m)

本ソフトウェアでは、モンテカルロ法を用いて発破パターンを作成し、穿孔エネルギーを基にその発破パターンが条件を満たすかの判定を繰り返し、条件を満たす発破パターンが最終的な結果として出力される²⁾。ゆえに、式(1)において、単位体積当たりの装薬量 q が穿孔エネルギーによって決定されるため、装薬量 C を調整するためには、掘削担当体積 V を調整することとなる。さらに、孔毎に装薬量 C が一定である場合、穿孔エネルギーによって単位体積当たりの装薬量 q が決定されるため、穿孔エネルギーと孔あたりの掘削担当体積 V は反比例の関係となる。

図-4に、本検証で用いた発破パターンにおける穿孔エネルギーと孔あたりの掘削担当体積との関係を示す。

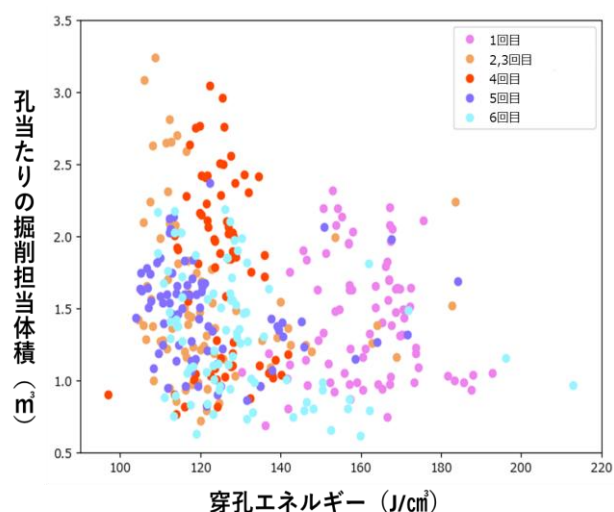


図-4 穿孔エネルギーと孔あたりの掘削担当体積の関係

図-4より、2~6回目においては、ばらつきはあるものの反比例の関係が認められた。1回目に関しては、それまで現場で用いていた発破パターンに基づいて、各種パラメータを調整したためであると考えられる。また、全体的なばらつきに関しては、本ソフトウェアがモンテカルロ法に基づいた発破パターンの作成を行っていることによる、ランダム性によって生じていると考えられる。そのため、発破パターン作成時のパラメータや条件を厳しく設定することで、ばらつきを抑えることができると考えられる。

4 課題

4.1 3DLiDAR 測量結果のフィードバック

本システムは、発破掘削結果を次回発破パターンに反映し、図-2に示した PDCA サイクルを回すことで発破パターンを適正化することを前提としている。たとえば、発破後の切羽を目視確認または3DLiDAR で測量し、大きな凹凸が確認された場合、その箇所の穿孔エネルギーデータを参照し、穿孔数・孔間隔・装薬量の調整に活かすことが想定される。しかし、現状では穿孔エネルギーデータの分布のみを用いて発破パターンを作成しており、測量結果の反映方法は未確立である。本報執筆時点において、3DLiDAR の計測結果の表示には、TREND POINT (3D 点群処理システム) を用いており、本システムと完全に分離しているため、点群データと穿孔エネルギー分布との比較や、設計断面と掘削断面との比較等が困難である。とくに、次回発破掘削までの時間が限られている場合、測量結果を十分に分析できず、反映できない可能性がある。このため、効果的なフィードバック方法には改善の余地が大きい。さらに、現状ではコソク終了後に3DLiDAR での計測となっているため、計測結果が純粋な発破の結果とは言えない。ゆえに、現場作業との兼ね合いにもなるが、コソク前に計測できることが望ましい。

4.2 穿孔エネルギーデータのフィードバック

発破パターンの作成には、先の穿孔時に取得された穿孔エネルギーデータを用いており、掘削対象切羽の地山性状を得られたデータから近似できることを前提としている。現状では、孔口から孔尻まで孔ごとに平均化した値を用いて、コンター図を作成して計算に使用しているが、より適切な方法として、発破掘削対象に近い孔尻付近の穿孔データを抽出し、計算に使用することが考えられる。たとえば、図-5に、孔口から孔尻までの平均値を用いた場合、および、孔尻に近い距離にあるデータのみを用いた場合の考え方の違いを示す。図-5の左に示すように、現状では取得した全穿孔エネルギーデータを発破パターン作成に用いているが、孔口と孔尻でエネルギー値に差が認められる。

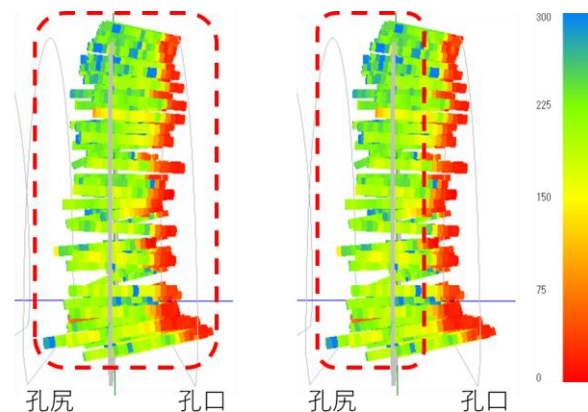


図-5 穿孔エネルギーの平均化範囲による違い

図-5 穿孔エネルギーの平均化範囲による違い

これは、先の発破の影響や穿孔する際のドリル速度の変化が要因と考えられる。その結果、全データ平均を用いると岩強度を過小評価する可能性がある。改善策として、図-5の右に示すように孔尻付近のデータのみを用いることで、より適切なフィードバックが可能となる。

5 おわりに

令和4-6年度桑野道路下大野トンネル工事において、支保パターン CII~DI 区間の発破掘削を対象に発破パターン自動適正化システムの現場実証試験を実施した。結果として、穿孔エネルギーデータの共有から発破掘削結果の確認のプロセスまで想定通りに行えることを確認できた。一方で、発破掘削結果のフィードバック方法については課題が残った。今後は、本現場実証試験の結果を踏まえ、ソフトウェアの更なる改良を行う予定である。

謝辞

本現場実証試験は、下大野トンネル作業所職員による全面的な協力のもと実施することができた。実証試験に協力いただいた現場職員をはじめ、本ソフトウェアの開発および改良にご尽力いただいたマック株式会社ならびに関係者各位に深く感謝する。

参考文献

- 1) 加藤謙吾, 瀬谷正巳, 大江隆史, 小野知義: フルオートコンピュータジャンボを用いた発破パターン自動適正化システムの開発, 佐藤工業技報, No.49, 2024
- 2) 加藤謙吾, 瀬谷正巳, 大江隆史, 小野知義: モンテカルロ法を用いた発破パターン最適化, 土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, VI-988, 2024.9
- 3) 加藤謙吾, 大江隆史, 瀬谷正巳: 自動最適化発破パターンソフトウェアの現場実証, 土木学会全国大会第 80 回年次学術講演会, III-186, 2025.9