

フルオートコンピュータジャンボを用いた発破掘削自動適正化システムの開発

Development of optimization system for blasting tunnel excavation using full-auto computing drill Jambo

キーワード

フルオートコンピュータジャンボ, 発破計画図, 自動化システム, 穿孔

加藤 謙吾*, 瀬谷 正巳*, 大江 隆史*,
小野 正義**

研究概要

近年のトンネル発破掘削では全自動穿孔可能なフルオートコンピュータジャンボ（以下、全自動ジャンボとする）が導入され、発破掘削のオートメーション化が進められている。本報では、全自動ジャンボを用いた発破パターンの自動適正化を行うシステムの概要について述べる。具体的には、発破計画、穿孔・装薬・掘削、掘削量の確認、および、発破掘削結果の分析までを行う山岳トンネル用の発破パターン自動作成システムについて述べる。

1 はじめに

建設分野において、生産性向上を目指して情報通信技術（以下、ICT：Information and Communication Technology）の活用が積極的に進められている。山岳トンネル建設における発破掘削についても、フルオートコンピュータジャンボ（以下、全自動ジャンボ）やドリルジャンボの多機能化、トンネル内の通信環境の向上など、新技術の普及が進んでおり、これらの技術活用による生産性向上が期待されている。とくに、全自動ジャンボを活用することで、作業員の経験に基づいて行われていた穿孔や掘削をコンピュータ制御によるものに置き換えることができ、発破掘削のさらなる自動化が見込まれている。

本報では、全自動ジャンボを用いた発破パターンの自動適正化システムの概要について述べる。本システムは主に、次の4つのフローから構成されている。①発破計画の作成およびデータ作成・転送、②穿孔と発破、③発破出来形の確認、④発破掘削結果のフィードバック。以下にそれぞれの詳細を述べる。

2 システムの概要

従来の山岳トンネルでの発破掘削では、支保パターンごとに発破計画図を準備し、その後作業員の経験に基づいて穿孔および掘削を行っていた。一方、近年の技術進歩により、ドリルジャンボは多機能化し、穿孔時における岩盤の硬軟を記録できるようになっている。これらの技術を組み合わせることで、装薬量や穿孔数などを最適化した発破計画図を作成し、効率的な発破掘削が可能になると考えられる。

また、作成した発破計画図を全自動ジャンボへ転送し、自動穿孔を行うことで、熟練技能者に依存しない穿孔が実現できると考えられる。

これらのアイデアをトンネル現場で実現するためには、穿孔データを解析し、掘削断面ごとの発破計画図を作成するソフトウェア、ドリルジャンボ専用のデータ作成、およびトンネル内外でドリルジャンボと通信できる環境などが必要となる。くわえて、発破掘削の出来形を確認するための測量方法や、穿孔データや余掘り量等の情報を発破計画にフィードバックする方法も重要となる。

図-1に、提案する発破パターンの自動適正化システムにおける、発破パターン自動作成から発破掘削結果のフィードバックのサイクルを示す。

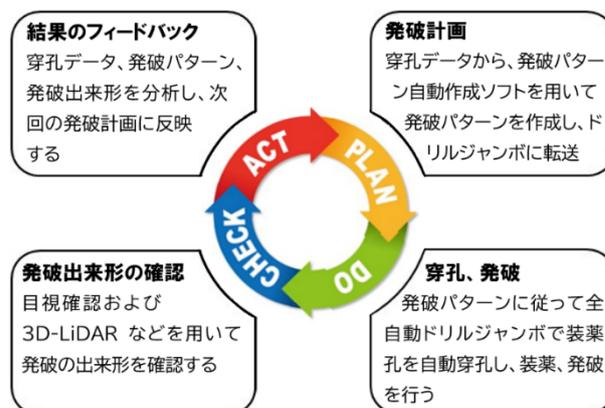


図-1 本システムにおける発破掘削のサイクル

* 技術センター 土木研究部 ** 札幌支店

2.1 発破計画図の作成およびデータ作成・転送

2.1.1 発破計画図の自動作成

発破計画図とは、発破掘削を行うために必要な情報を記載した計画図であり、穿孔の位置、穿孔数、差し角、装薬量などの穿孔および装薬に必要となる情報が記載される図面である。穿孔の位置や装薬量等の評価方法については、経験的に用いられている値を用いる方法や、掘削対象の岩の物理的性質（たとえば、圧縮強度、疎密波速度など）に基づき算定する方法などがある。本システムでは、穿孔時に得られた情報に基づく方法が最適な発破計画図の作成を可能にすると考え、掘削対象の岩の物理的性質に基づく方法を採用した。

孔当たりの装薬量は、次式に基づき決定できる。

$$C = q \cdot S \cdot B \cdot L \quad (1)$$

ここに、 C : 孔当たりの装薬量(kg/孔)

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)

これらのパラメータを評価する方法として、掘削断面を穿孔エネルギーの分布に応じて分割し、領域ごとに装薬量などを設定する方法、穿孔時のデータを AI で評価することにより装薬量等を設定する方法、モンテカルロ法を用いてパラメータを最適化する方法¹⁾などが提案されている。本システムでは、モンテカルロ法を用いて穿孔位置、穿孔数、装薬量等を自動決定する方法を採用した。決定方法の詳細については、加藤ら¹⁾に詳しい。

図-2に発破計画図の作成例を示す。この発破計画図は、①トンネル断面のジオメトリ、②孔線の作図、③孔間隔、抵抗線長、孔当たりの装薬量をソフトウェアに入力することで自動作成される。孔間隔、抵抗線長および、装薬量についてはソフトウェア使用者が任意に入力することができる。

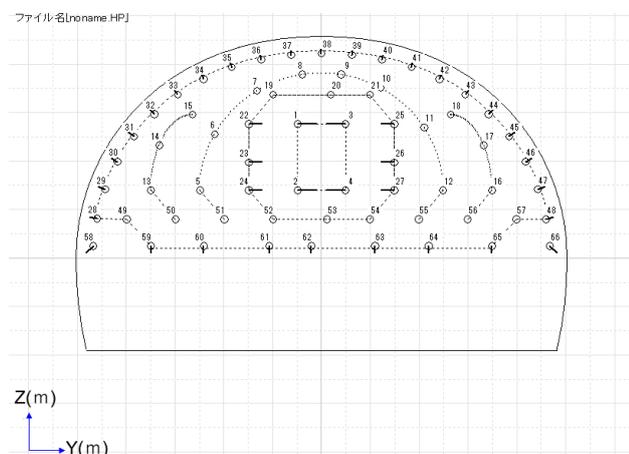


図-2 穿孔位置の作成例

2.1.2 データ作成・転送

発破計画図で作成した穿孔位置や穿孔数等の情報を全自動ジャンボが読み込むためには、専用のファイル構造形式でデータを出力し、転送する必要がある。本報の執筆時点では、全自動ジャンボ用データは XML ファイル形式で作成され、IREDES (International Rock Excavation Data Exchange Standard) のフォーマットに準拠している。穿孔に必要となる主なデータは以下の通りである。

- 穿孔順序
- 孔口および孔尻の x, y, z 座標
- ドリルのビット径
- ローラーアングル
- トンネル断面のジオメトリ

ドリルのビット径およびローラーアングルはジャンボの装備により決定される。また、トンネル断面のジオメトリは、標準断面図、支保パターンなどに基づいて決められる。そのため、主に穿孔順序および孔口、孔尻の座標を発破計画図ごとに更新・出力することになる。

図-3に、自動作成された発破計画図に基づき作成・出力した XML ファイルの例を示す。穿孔する孔ごとに、孔 ID、孔口および孔尻の x, y, z 座標、ドリルビット径、差し角等の情報を更新する。これらのデータは、上述した IREDES フォーマットに従って記述される。

全自動ジャンボ用に作成された XML データは、トンネル現場に設置された専用回線を通じて転送される。現場詰所あるいは現場事務所から、専用回線にアクセスすることにより全自動ジャンボへ XML データを転送する。本システムにおいては、XML データを全自動ジャンボ用の共有フォルダに保存し、データ作成時に転送される仕組みを採用している。全自動ジャンボの操作者は、ジャンボの画面に表示される更新された発破計画図を選択して使用する。

```
<Hole>
  <HoleId>1448</HoleId>
  <HoleName>63</HoleName>
  <StartPoint>
    <IR:PointX>4.121</IR:PointX>
    <IR:PointY>0.000</IR:PointY>
    <IR:PointZ>0.660</IR:PointZ>
  </StartPoint>
  <EndPoint>
    <IR:PointX>4.206</IR:PointX>
    <IR:PointY>1.100</IR:PointY>
    <IR:PointZ>0.550</IR:PointZ>
  </EndPoint>
  <TypeOfHole>Bottom</TypeOfHole>
  <DrillBitDia>45</DrillBitDia>
  <DrBitType>Others</DrBitType>
  <RollAngle>80.000</RollAngle>
  <MwdOn>0</MwdOn>
</Hole>
```

図-3 XML ファイルの出力例

2.2 穿孔・発破

2.2.1 穿孔

全自動ジャンボは、発破計画図に基づき掘削対象の岩盤を自動的に穿孔する。全自動ジャンボによる穿孔を実施するためには、まず、穿孔順序を決定する必要がある。全自動ジャンボには3本のブームが搭載されており、各ブームの穿孔の順序を指定する必要がある。これらのブームの穿孔の順序は、発破計画図作成時に決定される。

穿孔順序を決定する際の考慮事項は以下の通りである。

- 1) 各ブーム同士が穿孔時に重ならないようにする。
- 2) 各ブームの差し角が一定の範囲内であること。
- 3) 各ブームが行う穿孔の数をなるべく均等にする。

穿孔順序を入力後、全自動ジャンボ用の穿孔シミュレーションソフトウェアを使用して、各ブームの穿孔シミュレーションを行い、穿孔順序に問題がないかを検討する。エラーが表示された場合は、穿孔順序を変更し、再度シミュレーションを実施する。

図-4に穿孔順序の例を示す。各ブームは、指定された順番に従い穿孔を開始する。

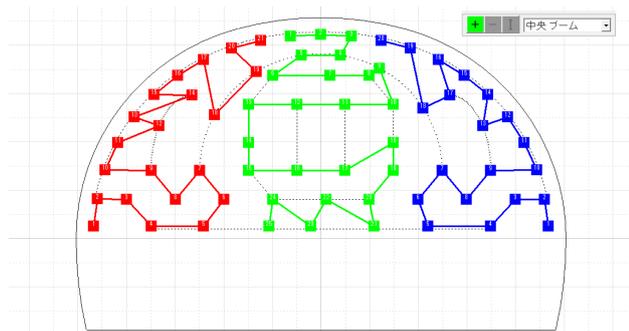


図-4 穿孔順序の作成例

2.2.2 装薬・発破

作成した発破計画図に基づき、装薬および発破を実施する。穿孔時には、ビットから穿孔水を噴射し、穿孔時に発生する細かな岩（くり紛）を排出するが、これらが孔内に残る場合があった。現在のシステムでは、装薬の機械化や自動化は想定しておらず、熟練技能者が装薬し、発破を実行することを前提としている。

2.3 発破出来形の確認

発破後の出来形の確認は、余掘り量、あたり量、発破掘削後の岩盤状態等の評価を行うために重要である。掘削断面形状を計測する方法として、LiDARや3Dスキャナ等を用いた三次元測量が利用されている。近年では、これらの機器をドローンに搭載し、無人で掘削断面の測量を行う方法が採用されている事例がある²⁾。

発破出来形を確認するための要件として、以下が挙げられる。

- 1) 掘削断面形状が明確に判断できること。
- 2) あたり量、余掘り量が正確に算定できること。

- 3) ドローン等を用いて測量する場合、トンネル坑内を安全に飛行し測量できること。

本報執筆時点においては、三次元測量機器を用いた発破出来形確認の自動化方法は検討段階にある。

2.4 結果のフィードバック

穿孔時に得られた穿孔エネルギーデータを用いて、掘削対象であった岩の物理的性質を評価する。単位体積当たりの装薬量の評価方法は、岩の強度等に基づく場合が多い。そのため、発破掘削を適切に行うためには、一軸圧縮強度等の岩の物理的性質の評価がより重要となる。この点、穿孔エネルギーに基づく一軸圧縮強度および疎密波速度の算定方法等が提案されており、下記式により推定される^{3,4)}。

$$\sigma_c = a \cdot (SE)^b \quad (2)$$

$$V_p = c \cdot SE + d \quad (3)$$

ここに、 σ_c ：一軸圧縮強度(MPa)

SE ：穿孔エネルギー(J/cm³)

V_p ：疎密波速度(km/s)

上記の式を用いることで掘削対象の岩の硬軟を評価し、次回の発破計画図の作成に利用する。

図-5に穿孔エネルギーの分布例を示す。図の赤色は岩の剛性・強度が小さい箇所、青色は大きい箇所を示す。一軸圧縮強度および疎密波速度の分布例を示す。

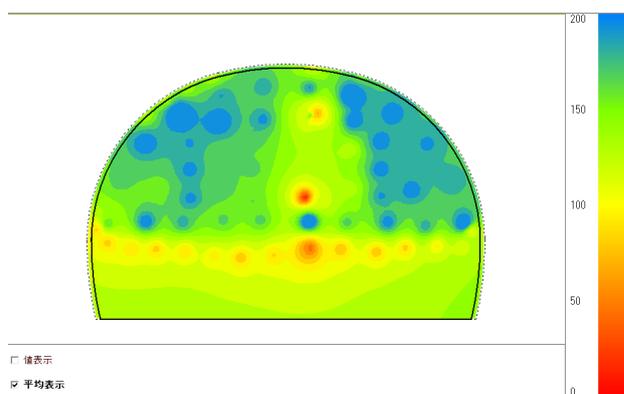


図-5 穿孔エネルギーの分布例

3 課題

本システムでは、発破計画図の作成から結果のフィードバックまでを下記に示すソフトウェア、機器を用いて行うことを想定している。

- ① 発破計画図作成（発破ソフトウェア）
- ② 穿孔（全自動ジャンボ）
- ③ 装薬・発破（熟練技能者）
- ④ 発破出来形の確認（3D測量等）
- ⑤ 結果のフィードバック（全自動ジャンボ、発破ソフ

トウェア)

これらのうち、①は開発中の発破ソフトウェアを使用することにより、自動作成が概ね可能となっている。②については全自動ジャンボにより可能である。③については、現状では熟練技能者が実行する。④については、作業員が坑内で測量機器を操作する必要があり、今後、自動計測方法を検討する必要がある。⑤については、穿孔時に取得するデータ転送および発破計画図へのフィードバックが自動で実行される。また、出来形のデータの転送および発破計画図へのフィードバック方法は検討段階にある。

4 おわりに

本報では、フルオートコンピュータジャンボを用いた発破自動適正化システムの概要を示した。本システムは、①発破計画図の自動作成、②穿孔と発破、③発破出来形の確認、④結果のフィードバックの4つのサイクルを回すことで山岳トンネルの発破掘削を最適化する。現在、全自動ジャンボ用の発破計画図の自動作成および XML データ並び

に穿孔データの転送を概ね自動で実行することができている。一方、三次元計測による発破出来形の確認方法およびその計測結果の自動転送方法、および発破計画図へのフィードバック方法については今後の課題である。

参考文献

- 1) 加藤, 瀬谷, 大江, 小野: モンテカルロ法を用いた発破パターン最適化, 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会, VI-998, 2024
- 2) 中林, 杉山, 本木: 自立飛行型ドローンとAIを活用したトンネル発破施工の最適化, 建設機械施工, Vol.71, No.7, 2019
- 3) 山下雅之, 石山宏二, 木村哲, 福井勝則, 大久保誠介: 長尺さく孔データと岩盤強度の関係に関する検討, 平成18年度土木学会全国大会第61回年次学術講演会, pp. 661-662, 2006
- 4) 白鳥, 犬塚, 宮嶋, 小林, 河本, 井上: 削孔検層と速度検層によるトンネル切羽前方の弾性波速度分布の予測, 平成28年度土木学会全国大会第71回年次学術講演会, VI-394, 2016