

# 山岳トンネル工事における 最適発破自動設計施工システムを開発 切羽を見える化し、発破設計と穿孔作業工程を自動化

井手 康夫

発破掘削による山岳トンネル工事では、設計断面に対して必要量以上に掘削する余掘りや、掘削が不十分なアタリを最小限に抑えることが、トンネルの安定性確保や効率的な施工には重要となる。従来、発破精度に影響する穿孔本数や位置、火薬の装薬量といった発破パターン設計は、熟練技能者が経験と感覚を頼りに行っていた。しかし、近年、熟練技能者不足が急速に進んでおり、データに基づく再現性のある設計手法の確立が求められている。本稿では、穿孔時に自動収集される穿孔エネルギー値を基に、自動で最適な発破パターンを設計し、設計された発破パターンに応じて自動で穿孔を行うことが可能な最適発破自動設計施工システムについて紹介する。

キーワード：山岳トンネル、発破掘削、フルオートコンピュータジャンボ、自動化

## 1. はじめに

山岳トンネル工事における発破掘削では、計画掘削線に対して必要量以上に掘削する余掘りや、掘削が不十分なアタリが発生する（図-1）。これらが増大した場合は、ずり出しやコソク、吹付けに要する時間や材料が増加するため、掘削サイクルタイムや建設コストが増加する。また、特に余掘りが大きくなった場合は、地山が損傷し、緩み領域が拡大するため、トンネルの品質や耐久性にも悪影響を及ぼす。そのため、発破掘削の精度を高め、これらを最小限に抑えることが重要である。発破掘削の精度を高めるためには、地山条件を適切に把握し、その条件に最適な発破パターン（穿孔本数、穿孔位置、装薬量）を設計する必要がある。従来、発破パターン設計は、熟練技能者が経験と感覚を頼りに行っていた。しかし、近年熟練技能者不足が急速に進んでおり、データに基づく再現性のある設計手法

確立が求められている。そこで、定量的な地山評価データをもとに、最適な発破パターンを自動的に設計する新たなシステムを開発した。評価データは、地山条件に大きく影響するパラメータの一つである岩盤強度と相関がある穿孔エネルギーを使用した。さらに、マシンコントロールシステムを搭載したフルオートコンピュータジャンボと連携させることで、岩盤データの取得から発破設計、穿孔に至る一連の作業を自動化し、シームレスな連携を実現した「最適発破自動設計施工システム」を構築した。本稿では、このシステムの概要と高速道路トンネル現場に実装した際の結果について報告する。

## 2. 最適発破自動設計施工システムの概要

最適発破自動設計施工システムによる施工フローを図-2に示す。⑤～⑦が発破パターン自動設計の工程で、①～④が自動穿孔の工程である。まず発破パターン自動設計の工程では、前サイクル穿孔時に穿孔エネルギー値を取得する。穿孔エネルギー値は、単位体積あたりの岩を穿孔するのに要する正味のエネルギー量である。この値は岩盤強度と相関があることが知られており、本システムでは、この値を解析して、切羽面における地山の硬軟の分布を可視化すると同時に発破パターンを自動設計し、ゾーン図として出力する。一方、自動穿孔の工程では、設計された発破パターンに対応するマシンコントロール（ドリルプラン、穿孔プラン、ドリフト設定）を自動選択し、施工を進める。以下に工程の詳細を示す。

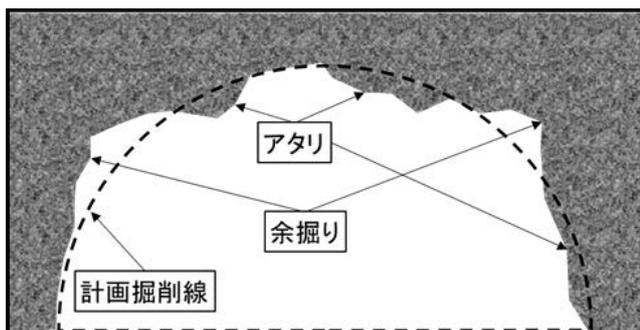
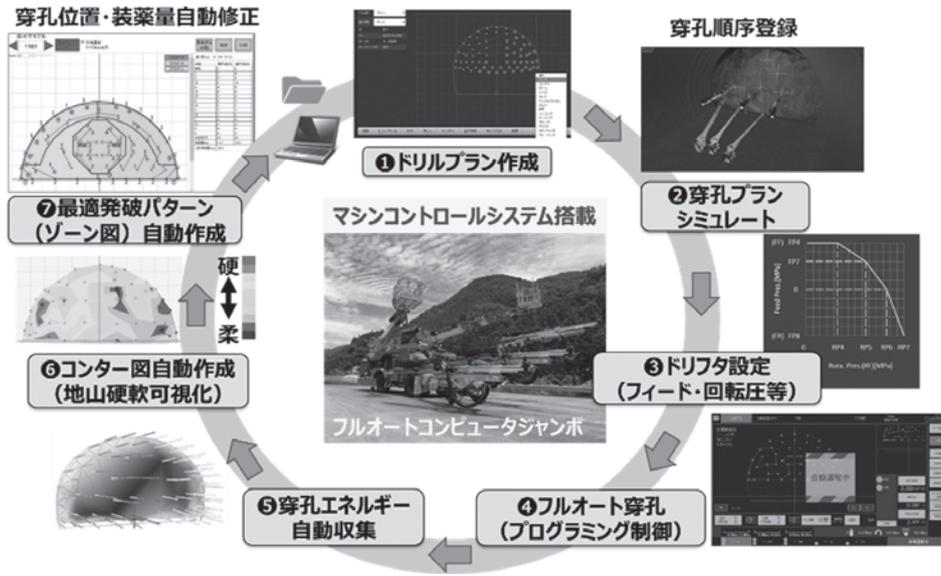


図-1 発破後のトンネル余掘りとアタリ形状



図一 最適発破自動設計施工のフロー

(1) ドリルプラン作成

線形データ，支保パターン図，発破パターンを入力し，位置合わせから穿孔までを連続して自動で行うブームモーションを計画する。

(2) 穿孔プランシミュレート

事前にフルオートコンピュータジャンボのブーム動線シミュレーションを行い，3ブームが相互干渉しないよう穿孔順序を設定する。

(3) ドリフト設定

ホールタイプごとに，地山状況の変化に応じて最適な穿孔が行える打撃圧やフィード圧制御などを設定する。

(4) フルオート穿孔

プログラミング制御可能なフルオートコンピュータジャンボを使用し，設定した穿孔プランに従って，3ブーム同士の干渉なく高精度に自動穿孔する。穿孔箇所の穿孔速度・穿孔長は，運転席モニターにリアルタイムに表示する（写真一1）。



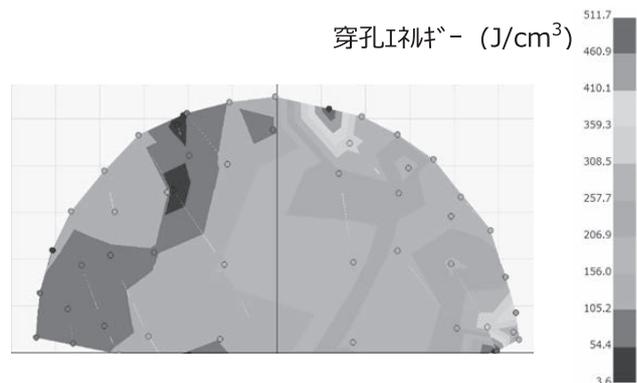
写真一 1 フルオート穿孔状況

(5) 穿孔エネルギー自動収集

装薬孔穿孔時にフルオートコンピュータジャンボの機能により全孔の穿孔エネルギーを自動収集し，データを保存する。

(6) コンター図自動作成

自動収集された穿孔エネルギー値をサイバー空間において解析することで，地山の硬軟（穿孔エネルギー値の大小）を判定したコンター図（図一3）を作成する。



図一 3 地山の硬軟を示すコンター図

(7) 最適発破パターン自動作成

最適な孔数と装薬量を定義した発破パターンを設計する。発破パターンは、切羽の不均質性を考慮するため、切羽面全体を分割して設計する。発破の良否に大きく左右する自由面形成を担う切羽中央部、発破掘削時の余掘り・アタリに最も影響を与える切羽の右肩部と左肩部、その他の右下と左下の領域の5つに分割する。各領域の地山の硬軟の判定結果から、その領域における最適な発破パターンをそれぞれ選択し、選択されたパターンを組み合わせることで、切羽全体の発破パターン図（ゾーン図）を設計する（図-4）。各領域の発破パターンは地山の硬軟に応じて3段階（領域

内の平均穿孔エネルギー値：150J/cm<sup>3</sup>以下を小、150J/cm<sup>3</sup>～300J/cm<sup>3</sup>を中、300J/cm<sup>3</sup>以上を大）で定義し（図-5）、岩級区分（CI, CII, DI）ごとにそれぞれ243通りの発破パターンから次施工に最適なものをリアルタイムに抽出し、決定する（図-6）。なお、設計された発破パターン図（ゾーン図）には、その発破パターンで使用する合計装薬量、親ダイ数、雷管の段数、各孔に装薬する増しダイ数を表示する（図-4）。コンター図とゾーン図は、解析が完了すると、自動で担当者のタブレットとPCに共有されるため、切羽観察における地山等級との対応で、地山の硬軟を区分する穿孔エネルギー値の閾値を見直すことで、より地山の変化を捉えた最適な発破パターンを設計できる。

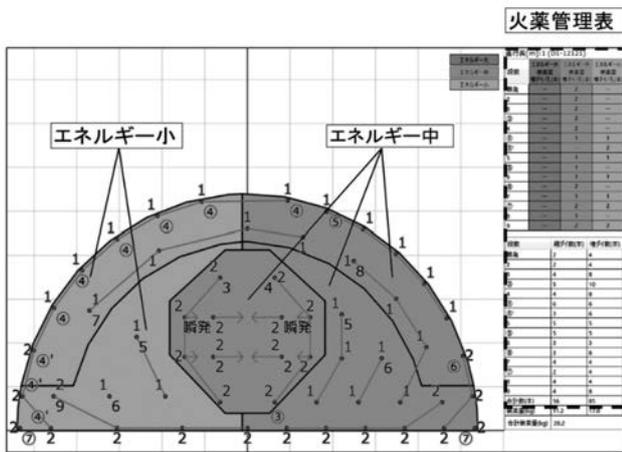


図-4 自動設計される最適な発破パターン図（ゾーン図）

(8) 新ドリルプラン作成

決定された発破パターンはフルオートコンピュータジャンボに自動転送され、新パターンに対応したドリルプランを適用することが可能である。

3. 現場適用と効果

(1) 適用事例

最適発破自動設計施工システムを東海北陸自動車道真木トンネル工事に適用した事例について述べる。東

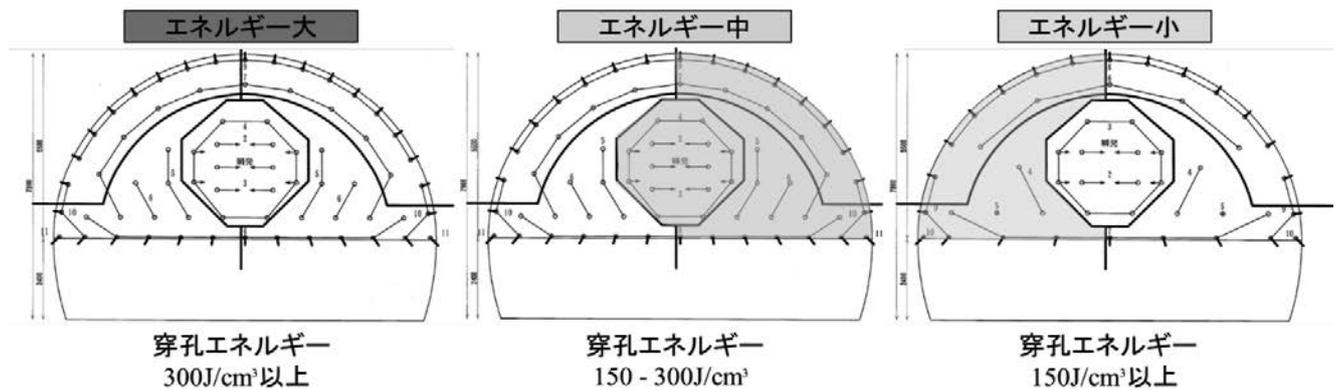


図-5 基準発破パターン（岩級区分がDIの場合の例）

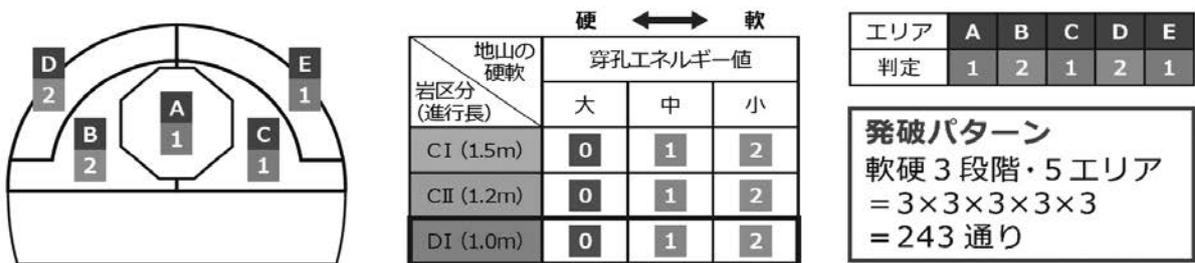
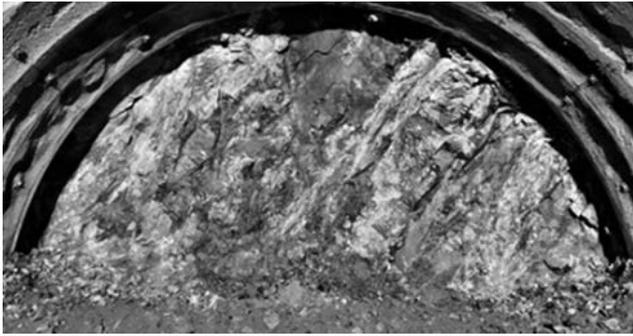
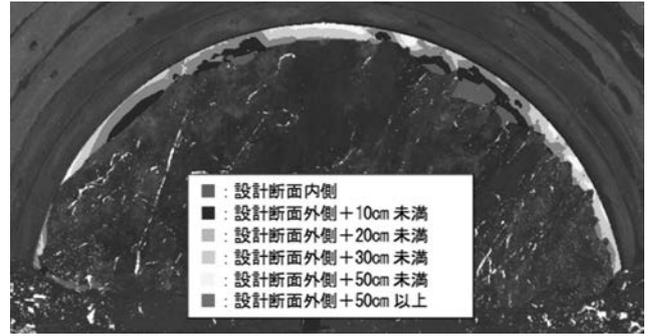


図-6 最適発破パターンの設計方法



写真一2 実証試験を実施した切羽



図一7 システム適用後の掘削出来形



写真一3 システムの適用状況 (装薬完了)

海北陸自動車道真木トンネルは富山県南砺市に位置し、トンネル延長1,578 m、掘削断面積77 m<sup>2</sup>の2車線高速道路の2期線トンネルである。適用効果を検証した切羽を写真一2に、本システム適用状況を写真一3に示す。切羽の地質は主に流紋岩が主体で、部分的に亀裂が卓越し、粘土が介在しており、支保パターンは、DIであった。

(2) 適用効果

真木トンネル工事での最適発破自動設計施工システムの適用効果を下記に示す。

(a) 掘削精度の向上

本システムの適用後に3次元レーザースキャナで計

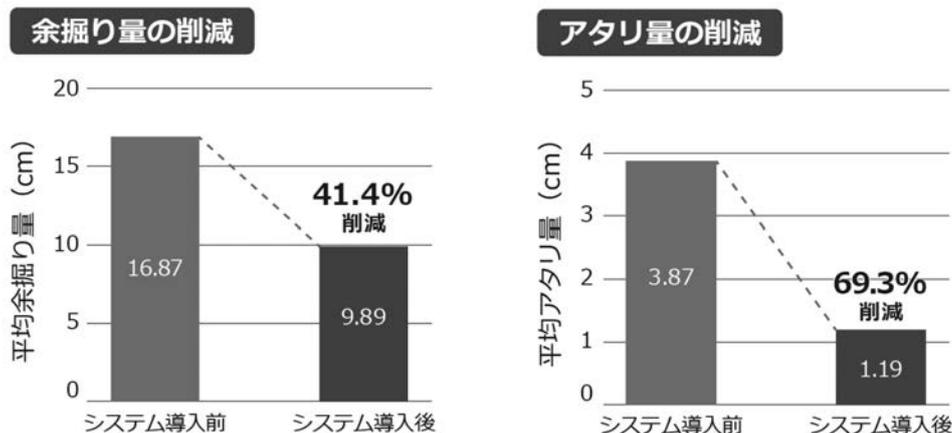
測した掘削出来形を図一7に示す。本システムの適用前の平均アタリ量は3.87 cm、余掘り量が16.87 cmであった一方で、適用後の平均アタリ量は1.19 cm、余掘り量は9.89 cmとなり、余掘り量が41.4%、アタリ量が69.3%削減でき、かつ平滑な掘削面を得ることができた(図一8)。火薬使用量の原単位は、システムの適用前が平均0.43 kg/m<sup>3</sup>に対し、適用後は0.40 kg/m<sup>3</sup>であり、7%削減した。

(b) サイクルタイム短縮効果

本システムの適用により掘削サイクルタイム短縮効果も確認できた。まず、自動で発破パターンが作成されるため、発破計画時間が不要となった。さらに、穿孔の自動化により、穿孔作業が効率化し、穿孔速度が向上したことで、穿孔時間を一般的な工法と比較して16%短縮((標準時間37分)→31分)が図れた。装薬時間も、装薬量の最適化により、一般的な工法と比較して23%短縮((標準時間30分)→23分)した。その結果サイクルタイムを約20%削減できた。

(c) 火薬取扱作業員の負担軽減効果

使用する各装薬孔の雷管の段数と増シダイ本数はシステムにより自動で計算・集計されタブレット上に共有されるため(写真一4)、火薬取扱作業員の作業負担が軽減できた。



図一8 適用効果 (余掘り量・アタリ量の削減)



写真ー4 発破パターン共有状況

#### 4. おわりに

山岳トンネルの発破掘削において、「最適発破自動設計施工システム」を現場適用し、岩盤データの取得

から発破設計、穿孔に至る一連の作業の自動施工を試行した。この結果、サイクルタイム・施工コストの削減とともに、トンネル掘削面の平滑化などトンネルの品質、耐久性の向上が見込めることが示された。今後は、実用化した本技術を複数の現場に展開し、山岳トンネルの共通技術として発展していくことを目指す。

JCMA

#### 《参考文献》

- 1) 邊見涼, 他: 最適発破自動設計施工システムによる発破掘削の高度化, 土木学会第78回年次学術講演会, VI-953, 2023.

#### 【筆者紹介】

井手 康夫 (いで やすお)  
清水建設㈱  
土木技術本部 イノベーション推進部  
部長

