

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

清水建設株式会社 正会員 ○邊見涼 井手康夫 垣見康介
古河ロックドリル株式会社 非会員 志澤俊哉
株式会社演算工房 非会員 伊藤文香
株式会社ジャペックス 非会員 高橋康博

1. はじめに

山岳トンネル掘削方法として多く適用される発破掘削では、発破の良否により、掘削した際のアタリ量や余掘り量が変化し、トンネルの安定性、サイクルタイム、コストに大きく影響を及ぼす。そのため、技能者は切羽や穿孔時の状況をもとに自身の経験や感覚を頼りに、穿孔本数や穿孔位置、装薬量など、地山性状に応じた発破パターンを設計する。しかし、熟練技能者の減少などの社会的背景から、今後は発破パターン設計においても客観的な情報を収集・活用し、機械化・自動化により発破掘削を高度化させ、生産性およびトンネルの安定性を向上させることが求められている。

著者らは、余掘り量低減システム「ブラストマスタ®」¹⁾を基本として、フルオートコンピュータジャンボにより自動収集される穿孔エネルギー値から自動で最適な発破パターンを設計する「最適発破自動設計施工システム」を開発した。本稿では、2車線高速道路トンネル現場において実施した実証試験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1に示す。本システムでは、あらかじめ登録された穿孔順序やドリフト設定に従って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する。発破パターンの設計にあたり、前サイクルの装薬孔穿孔時に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2）を作成し、同

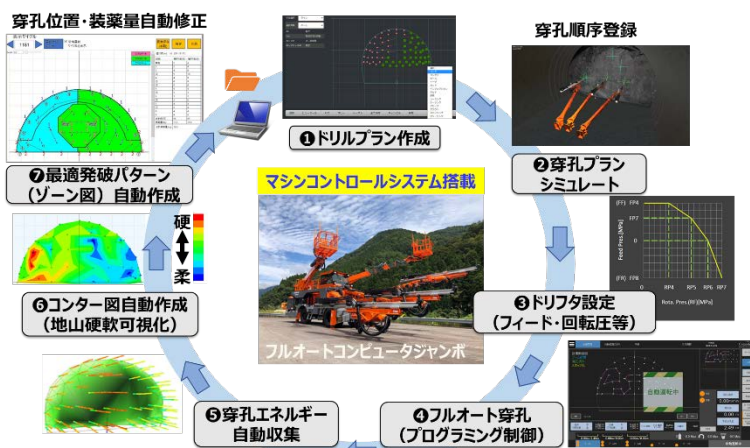


図1 最適発破自動設計施工システムによる施工フロー

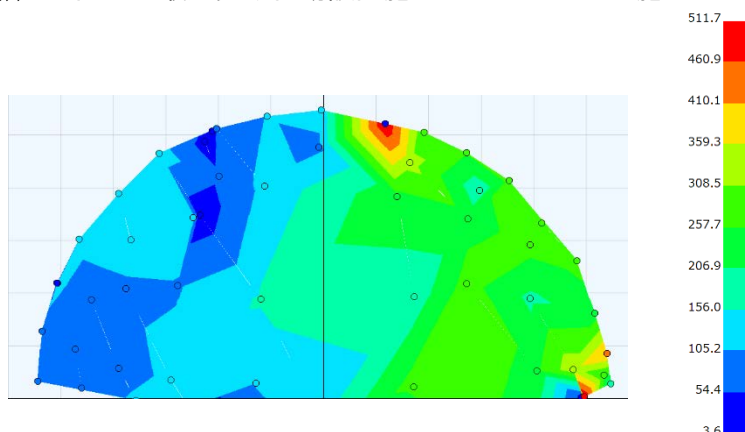


図2 地山の硬軟を示すコンター図

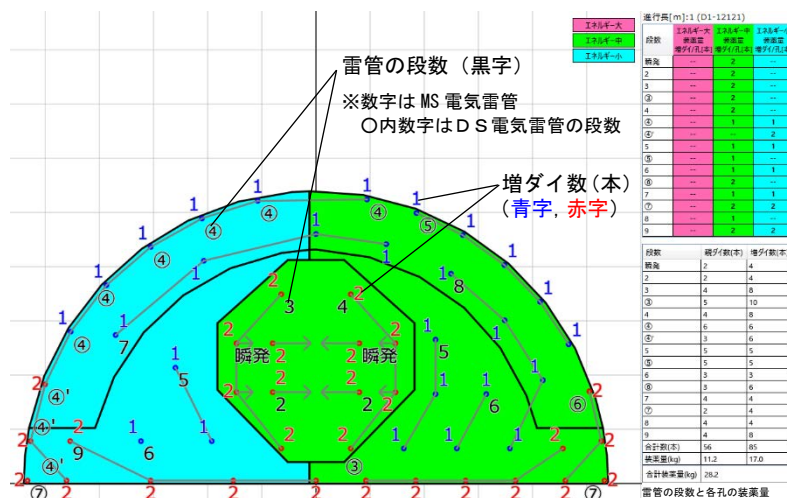


図3 自動設計される最適な発破パターン（ゾーン図）

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、機械化、自動化

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1 清水建設（株）地下空間統括部 TEL:03-3561-3887

時に最適な孔数と装薬量を定義した発破パターン（ゾーン図）を設計する（図3）。ゾーン図は切羽を5分割した領域からなり、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/cm³以下を小（水色）、150J/cm³～300J/cm³を中（黄緑色）、300J/cm³以上を大（ピンク色））で定義されており、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。決定された発破パターンは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が選択され、自動穿孔を行う。

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。また、ゾーン図には、使用する合計装薬量、親ダイ数、雷管の段数、各装薬孔の増ダイ数が表示されており、火薬取り扱い作業員の作業負担軽減やトンネル作業員の装薬作業の効率化、火薬管理の電子化に寄与できる。

3. 2車線高速道路トンネルへの適用効果

東海北陸自動車道 真木トンネル工事（L=1,578m）において最適発破自動設計施工システムの適用試験を実施した（図5、図6、図7）。システムの適用前後で3次元レーザースキャナにより発破直後の出来形をそれぞれ計測し、比較することで、適用効果について検証した。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、粘土が介在していた。岩級区分はDIであった。

地山の硬軟を考慮した発破パターン設計により、システム適用前の平均アタリ量は設計断面に対して3.87cm、余掘り量が16.87cmであった一方、適用後の平均アタリ量は1.19cm、余掘り量は9.89cmとなり、アタリ量が69.3%、余掘り量が41.4%削減でき、かつ平滑な掘削面を得ることができた。火薬使用量の原単位は、適用前が平均0.43kg/m³に対し、適用後は0.40kg/m³であり、7%削減された。

切羽では局所的に硬質な岩盤が出現することがあった。今後の発展として、穿孔エネルギー値が非常に高くなる箇所は装薬量を増やすなど、領域での地山の硬軟の評価に沿った発破パターンの設計に加え、局所的な硬軟部へも対応できる、より現場状況にそった発破パターンを作成できるシステムへの改良を進めている。

参考文献

- 1) Fukuda, T., Arai, T., Kakimi, K., & Matsumoto, K. (2020). Development of an Automated Angle Control System to Improve Safety and Productivity. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 37, pp. 134-138). IAARC Publications.

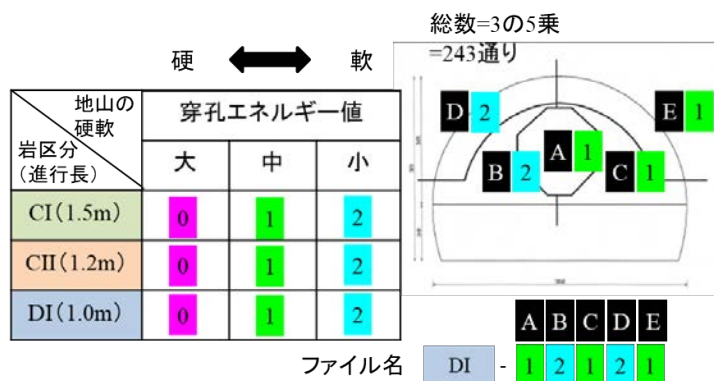


図4 発破パターンの設計方法



図5 実証試験を実施した切羽



図6 装薬完了状況

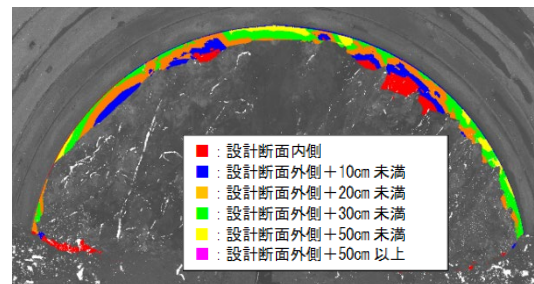


図7 出来形計測の結果