

18. 国内初導入した4ブームフルオートコンピュータジャンボによる 大断面トンネルの施工実績

—宮古盛岡横断道路 新区界トンネル工事, 国道45号 白井地区道路工事—

鹿島建設(株) ○ 三浦 孝
鹿島建設(株) 牟田口 茂

1. はじめに

硬岩地山を対象としたトンネル工事においては、ジャンボにより穿孔した孔に爆薬を装填し、岩盤を破碎する発破工法を採用する。この穿孔作業における穿孔位置・差角・孔尻深さ等は、発破効率に、ひいてはトンネル工事の生産性に多大な影響を及ぼす。しかし、従来、これらは主にオペレータの経験に基づいて設定され、その穿孔精度もまたオペレータの技量に依存している。これに対し、今回フルオートコンピュータジャンボを導入した2つの工事では、地山状況および発破後の切羽の形状測定結果に基づいて入力する穿孔プラン作成を、元請社員主導により実施した。

本稿では、大断面トンネルに4ブームフルオートコンピュータジャンボを導入し、積極的に活用した施工実績を報告する。

2. フルオートコンピュータジャンボについて

フルオートコンピュータジャンボ（アトラスコプロ社製 XE4C）には、コンピュータによるマシンコントロールシステム（RCS5）を搭載しており、穿孔プランに対する各ブームの穿孔範囲と穿孔順番を事前に登録することによって、コンピュータ制御のフルオート穿孔を可能としているため、専任オペレータ1名による穿孔作業を実現した。

2.1 期待される効果

今回の対象工事では、掘削工程を短縮するため、地山の良好な区間では1発破進行長を伸ばすことを計画した。

信頼性の高い発破を実現させるためには、確実な芯抜き発破（正確な孔間隔、孔深度、孔角度、孔尻位置）と、精度の高い払い発破（差角のブレによる過度の余堀の低減、発破による地山損傷の抑制）を必要とする。そこで、オペレータの熟練度に頼らず、フルオートコンピュータジャンボによる穿孔精度向上を期待した。

以下に期待される効果を示す。

- ① 穿孔をオペレータの技量に関係なく一定の精度により行うことができる。
- ② 穿孔圧力の適正な制御により孔曲がりを抑制し余堀量を適正に管理できる。
- ③ 穿孔データの自動収集機能により地山状況を可視化できる。
- ④ 施工人員を減らすことができる。

2.2 穿孔機の特徴

大断面トンネルの急速施工を行う場合、通常は3本の穿孔用ブームを有するドリルジャンボを2台並べて使用することが多く、その場合互いのブームを干渉し作業効率は悪くなることから、専任オペレータ1名による4ブームフルオートコンピュータジャンボを導入した（写真-1、写真-2）。



写真-1 4ブームフルオートコンピュータジャンボ (XE4C)



写真-2 マシンコントロールシステム

また本機は、最新鋭の高速穿孔用ドリフタとして 30kW 級削岩機(COP3038)を搭載している。表-1に削岩機の比較を示す。

表-1 削岩機の比較

項目	機種	
	ノーマル機	新型機
	COP 1838ME	COP3038
打撃出力, 最大, kW	18	30
重量, kg	170	165
ドリフタへの入力, 最大, kW	31	60
作動油圧, 最大, bar	230	200
流量, l/min	75 - 92	150 - 175
打撃周波数, Hz	60	102
1回当たりの打撃エネルギー, Nm	330	294

従来機(COP1838ME)と新型機(COP3038)を比較すると、COP1838MEは重量(kg)と1回当たりの打撃エネルギー(Nm)は大きいものの、流量(l/min)と打撃周波数(Hz)はCOP3038の方が大きい。これは、 $E=(mV^2)/2$ により、重量(m)は小さくても油量を上げて打撃周波数(打撃速度(V))を大きくすることにより、穿孔エネルギー(E)を大きくしていることを示している。

このことは、穿孔速度の比較によって確認することができる。メーカー資料から、ビット径φ51mm・石灰岩(160MPa)の場合、従来機COP1838MEの穿孔速度は4m/min(図-1)、新型機COP3038は6.4m/min(図-2)であり、約1.6倍の穿孔能力を有していることが分かる。

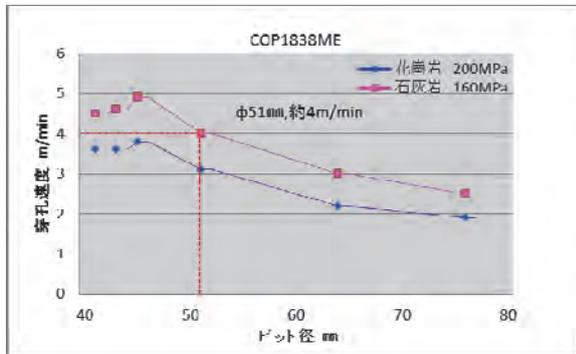


図-1 COP1838ME

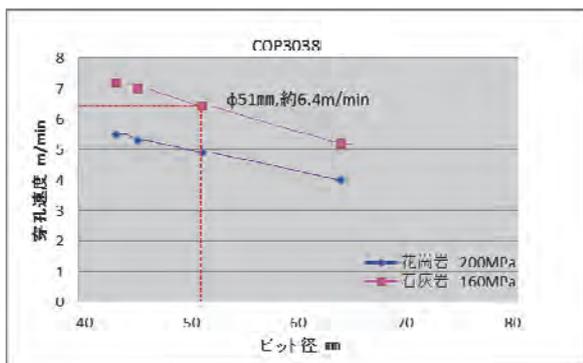


図-2 COP3038

2.3 活用事例

活用フローを図-3に示す。穿孔の基準とする切羽面(仮想切羽面)のトンネル延長と予定進行長、および穿孔プランを予め設定することで、発破プラン上の穿孔長と差角をコンピュータに計算させる。フルオート穿孔により全ての孔尻は揃い、外周孔も設計通りの差角によって穿孔される。そのため、穿孔精度は格段に向上するので、穿孔プランのまま掘削面の仕上がりに反映し易いことが特徴である。また、ロックボルト孔の穿孔に対する誘導機能を活用し、支保パターンの誘導画面に従って穿孔することによって、マーキングせずに所定の位置にロックボルトを打設できる。

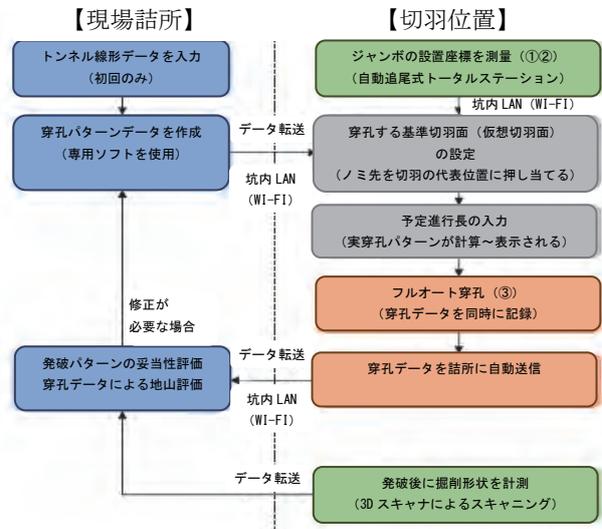


図-3 コンピュータジャンボの活用フロー

3. 導入実績

4 ブームフルオートコンピュータジャンボの導入により、①穿孔精度の向上(1発破進行率の向上)、②差角制御による余掘低減、③コンピュータジャンボによる地山評価、④施工人員の削減、の4点について効果を確認したので、以下に示す。

3.1 穿孔精度の向上(1発破進行率の向上)

(1) 1発破進行率の向上

3Dスキャナを用いて進行・余掘り状況を測定した。オペレータの経験による穿孔・発破結果を図-4に示す。また、フルオートコンピュータジャンボによる穿孔・発破結果を図-5に示す。

従来のオペレータの経験による穿孔・発破では、穿孔深度、孔尻位置は不安定であり発破進行率もばらついた。

フルオートコンピュータジャンボによる穿孔・発破では、穿孔深度、孔尻位置は揃い、平均穿孔長3.6mに対して平均進行長3.4m程度と安定し、発破効率も向上した。(C I 区間 95%)

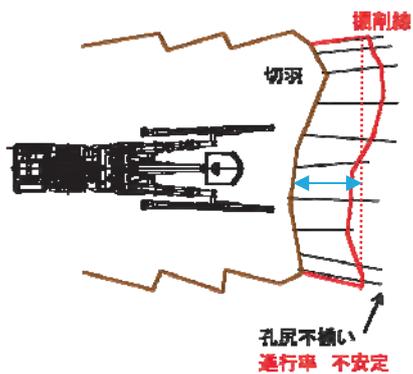


図-4 ノーマルジャンボを使用した場合の穿孔・発破

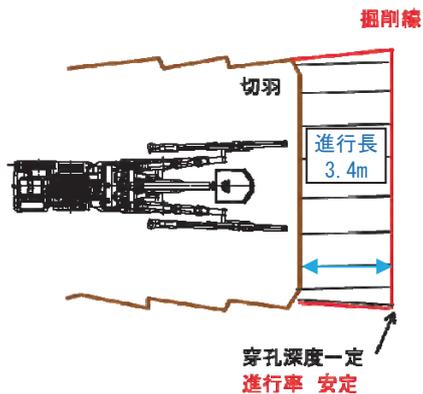


図-5 フルオートコンピュータジャンボ (XE4C) を使用した場合の穿孔・発破

(2) 穿孔データと3D計測データの連携

発破後の掘削形状を迅速かつ高精度に評価するため、発破ズリ出し後の形状を3Dスキャナによって測定した。据付けから撤収までの所要時間は約2分であり、施工サイクルを妨げることなく1名で計測可能であった(写真-3)。



写真-3 3Dスキャナによる切羽の形状測定状況

測定結果を3次的に表示できるので、穿孔プランの適否を評価することが可能となった。図-6にコンピュータジャンボの穿孔データと形状測定結果を組み合わせた穿孔プラン改善例を示す。

当初の穿孔プランでは、踏前中央部において起砕不良であることが発破後の形状測定結果から判明した。このことから、孔尻間隔を当初よりも狭く見直した結果、図-6右下図に示すとおり、踏前中央部は起砕良好となり改善された。

このようにフルオートコンピュータジャンボの

穿孔データと3D計測データを連携させることによって、より効率の良い穿孔プランを作成することを可能とした。

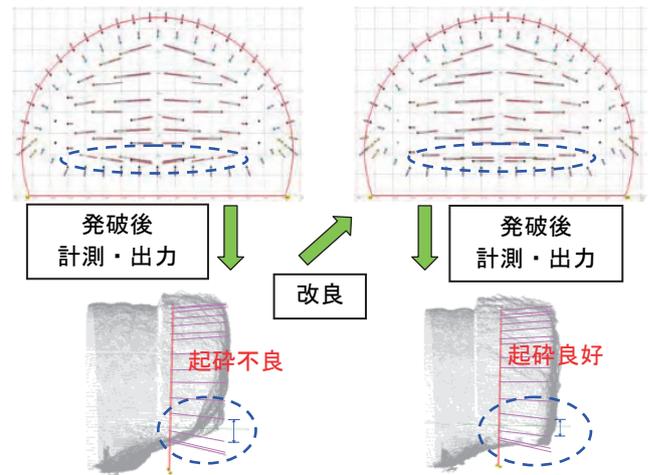


図-6 切羽形状測定による穿孔プラン改善例

3.2 差角制御による余堀低減

フルオートコンピュータジャンボの差角誘導機能による余堀低減効果について検証した。図-7に差角誘導機能無し、図-8に差角誘導機能有りの場合の3Dスキャナ測定結果を示す。双方の比較では余堀を40%程度低減したことが確認できる。しかしながら、地山の性質(部分的な硬軟、亀裂の入り方)は常に変化するため、穿孔プランは随時地山に合わせて修正を必要とする。そこで、最適な余堀管理を行うために、基準となる設計穿孔プランを作り、外周孔差角のみを変えた穿孔プランを用意し、前回発破の余堀状況から穿孔プランを適時選択することによって安定的に余堀低減できた。

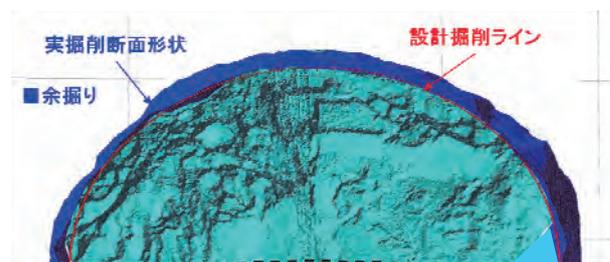


図-7 3Dスキャナ結果(差角誘導機能無し)

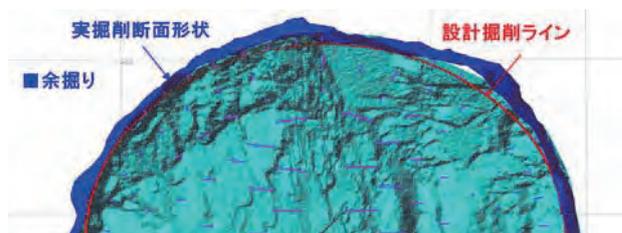


図-8 3Dスキャナ結果(差角誘導機能有り)

3.3 コンピュータジャンボによる地山評価

コンピュータジャンボは各種センサーを搭載し、穿孔中の回転・打撃・送り圧力といった穿孔に直接関係するパラメータの他に日時、速度、穿孔長、穿孔位置(開始位置、終了位置)座標、差角などといったデータを取得している。

図-9に穿孔実績データの1つである穿孔速度を視覚化したデータを示す。これは三次元的に回転操作することが可能であり、立体的に地山脆弱部を把握することができる。

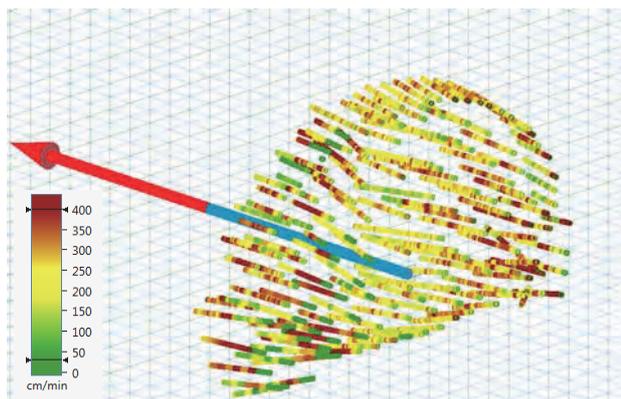


図-9 穿孔実績データ例(穿孔速度)

また、穿孔速度以外にも回転圧力や打撃圧力毎の表示も可能になっており、回転圧や水圧の変化を見ると硬さや亀裂性の有無といった評価ができる。図-10に硬さ(Hardness)、図-11に亀裂(Fracturing)を連続して並べた例を示す。

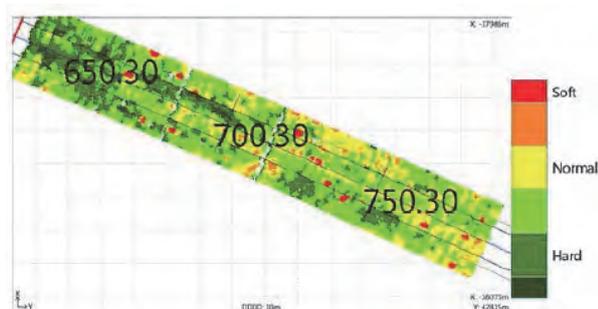


図-10 硬さ(Hardness)分布例

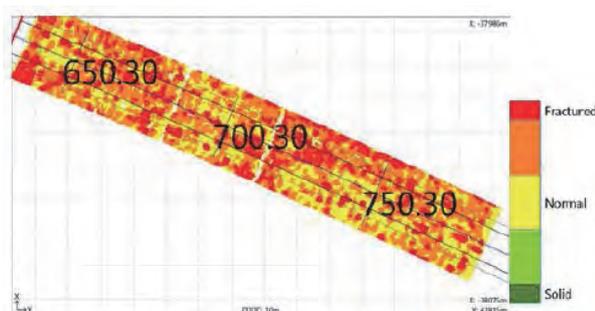


図-11 亀裂(Fracturing)分布例

図-10は穿孔速度を基本にして、穿孔深度が長くなったときの打撃エネルギーの損失による穿孔スピードの減少と打撃圧、フィード圧、回転速度の影響を計算に入れて、標準化された数値である。

図-11は亀裂や地山の硬軟の局所的変動を指標化したものであり、回転圧や水流の変動を考慮している。

穿孔実績データの活用の幅は非常に広く、切羽前方の地質予測や補助工法の選定根拠、肌落ち危険箇所の特特定等に活用した。

3.4 施工人員の削減

通常1台の3ブームジャンボに対し2~3名のオペレータを必要とするが、今回導入した4ブームフルオートコンピュータジャンボは、4ブームの穿孔作業を1名のオペレータによって可能とした。このため、3ブームジャンボを2台並べて使用する場合に比べ、大幅な施工人員の削減を達成した。

施工体制としては、専属オペレータ2名による、昼夜各1名によって穿孔作業を行った。また、メカニック1名を他の機械もメンテナンスしつつ常駐させて、専属オペレータ不在の際には、オペレータとしても従事した。

穿孔中の切羽作業員は換気・電気設備盛替や後方支援、次工程の段取りなどを行い、分業化により効率的に作業を進められた。

4. おわりに

今後の山岳トンネル工事は長距離化や不安定な地質、労働力の不足、一層の低コスト化、高速施工など、より難しい条件となることが予想される。

これらの状況の下、フルオートコンピュータジャンボの施工実績は、合理的な施工による生産性の向上や、地山評価技術を基にした安全性を向上させたことにより、山岳トンネル工事の施工技術発展に大いに寄与することを期待する。

参考文献

- 1) 赤石ら：「4ブームフルオートコンピュータジャンボによるICT施工例」, 土木学会第72回年次学術講演会, VI-717, 2017
- 2) 西川ら：「発破後の切羽の形状測定結果に基づく穿孔プランの改善」, 土木学会第72回年次学術講演会, VI-719, 2017