

コンピュータジャンボの機械データを用いた切羽評価手法の開発

T-iBlast® TUNNEL の開発

市来 孝志*¹・坂井 一雄*¹・山上 順民*¹

Keywords : mountain tunnel, face evaluation method, measurement while drilling, computer-assisted drilling jumbo, machine parameters
山岳トンネル, 切羽評価手法, 削孔検層, コンピュータジャンボ, 機械データ

1. はじめに

建設業界では人手不足の解消や労働環境改善の必要性から ICT の導入促進が進められている。インフラ分野においては、施工機械の自動化による生産性向上が課題であり、DX の推進が急務となっている。

山岳トンネル工事では、削孔時の施工機械としてフルオートコンピュータジャンボ（以下、CP ジャンボとする）が普及し、作業の自動化が進められている。

図-1 に CP ジャンボの特徴を示す。CP ジャンボでは、従来手動で操作を行っていた削孔作業を、搭載される削岩機で取得した各種機械データを用いて自動化できたことが、大きな特徴の一つである。一方、自動取得される機械データを使って、掘削面である切羽とその周辺地山の安定性を評価する手法の開発も進められてきている^{1),2),3)}。著者らは、切羽評価だけでなく、掘削実績も組み合わせて、ビッグデータとして蓄積し、機

械学習手法なども活用することができれば、将来、地山状況に応じた最適な削孔計画の自動化にも貢献できると考えている。しかし、この CP ジャンボによる切羽評価結果を多数データベースとして蓄積するためには、以下の問題があった。

- ・ 機械データを用いた切羽評価指標には、Hardness, SDR, 掘削体積比エネルギー等があり^{4),5),6)}、メーカー独自のものである（表-1）。算出方法や算出に必要な機械データが非公開なものがあり、メーカーごとの評価結果しか集積できていない
 - ・ 各メーカーが提示する評価指標は、切羽の岩盤の硬軟を定量的であるが相対的に評価する指標として理解される。しかし、岩盤強度に代表される岩盤物性との相関性は十分に明確化されているとは言い難い
 - ・ 削孔時の全深度における機械データが切羽状況を反映しているとは限らないため、メーカーごとに異なる削孔制御方法を考慮した上で、切羽評価が可能な機械データの範囲を抽出する必要がある⁷⁾
- そこで、著者らは、メーカーごとに異なる削孔制御方法を調査分析した上で、強度既知のモルタルを用い



図-1 CP ジャンボの特徴
Fig.1 The characteristics of CP-assisted jumbo machine

表-1 CP ジャンボメーカーごとの切羽評価指標と特徴
Table 1 Rock mass evaluation index and characteristics

メーカー	エビロック社	サンドビック社	古河ロックドリル社
CPジャンボ 代表機種	XE3C	DT1131i	J32RX-Hi
切羽 評価指標	・ Hardness ・ Fracturing	・ SDR (Sandvik Drilling Resistance) ・ Fracture indicator	掘削体積比エネルギー (削孔エネルギー)
特徴	・ メーカー独自の指標 ・ 算出方法はメーカー非公開	・ メーカー独自の指標 ・ 算出方法はメーカー非公開	・ 国内で一般的な指標 ・ 算出に必要な機械データの一部はメーカー非公開

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

た予備試験を実施した。その結果、CP ジャンボで均質な試験体を削孔する条件下では、削孔速度と圧縮強さが線形関係となることを確認できた。そこで、両者の関係式を使って、削孔速度を基準として岩盤強度を算出し、CP ジャンボメーカーによらず岩盤強度を推定できる切羽評価手法「T-iBlast TUNNEL」を開発した。本論文では、T-iBlast TUNNEL の開発時に実施した調査と試験について概説するとともに、実現場において評価手法の妥当性を検証した結果を示す。

2. 機械データと既往の切羽評価手法

本章では、CP ジャンボで得られる機械データについて概説する。そして、これらを用いた既往の切羽評価手法を説明する。その上で、課題を整理した。

2.1 機械データ

図-2 に示すように機械データは、削岩機作動時の圧力であるフィード圧 (FP: Feed Pressure)、打撃圧 (PP: Percussive Pressure)、ダンピング圧 (DP: Damping Pressure)、回転圧 (RP: Rotation Pressure)、回転速度 (RS: Rotation Speed)、削孔速度 (PR: Penetration Rate) ならびに削孔水の水压や水量である。削孔プロセスと機械データとの関係を以下に説明する⁸⁾。

- ・ 削岩機内のピストンが油圧で作動し、シャンクロッドを打撃することで打撃応力波が発生する。打撃応力波がロッドからビットへ到達し、岩盤を破碎する
- ・ 打撃圧は、シャンクロッドの打撃の際に加えられる圧力である
- ・ フィード圧は、ビット前面を岩盤に密着させ、打撃応力波のエネルギーを効率よく岩盤に伝えるために加えられる圧力である
- ・ 回転圧および回転速度は、一打撃ごとにビット先端のチップを新たな未破碎面に移動して、高い破碎効率を維持するためにシャンクロッドに加えられる回

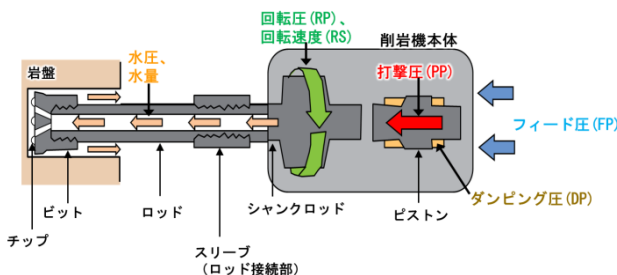


図-2 削岩機で取得可能な機械データ

Fig.2 Machine parameters obtained from rock drill

転圧力および速度である

- ・ ダンピング圧は、打撃する際に岩盤から受ける反発力を吸収するためピストンに加えられる圧力である
- これらの機械データは、もともと削岩機の耐久性を向上させるために制御に使われてきた。しかし、切羽状況を反映した値が得られるため、切羽評価指標として用いられるようになった。

2.2 既往の切羽評価手法

既往の機械データを用いた切羽評価手法では、掘削体積比エネルギーや削孔速度のほか、ダンピング圧に着目した評価指標や^{9), 10)}、岩盤の破碎性や粘土化の状態、あるいは亀裂頻度を把握する目的で回転圧に着目した評価指標^{11), 12)}を用いたものであった。このうち古河ロックドリル社の J32RX-Hi (表-1) で得られる掘削体積比エネルギーは、圧縮強さと同じ次元で表現されることから、CP ジャンボに限らず、調査ボーリングなどにおいても岩盤の硬軟を把握する評価指標として活用されている¹³⁾。一方、海外では、評価指標として算出式は明確にされていないが、削孔速度から求められたと考えられる Hardness を岩盤評価に用いた例がよく見られる^{2), 14), 15)}。そこで以下に、掘削体積比エネルギーと Hardness に代表される削孔速度を評価指標として用いた切羽評価手法について述べる。

2.2.1 掘削体積比エネルギー

掘削体積比エネルギー (SE: Specific Energy) は削孔エネルギー、破壊エネルギー係数とも呼ばれ^{1), 13)}、単位体積あたりの掘削に必要とするエネルギー量^{16), 17)}である。算出式を以下に示す^{1), 10)}。

$$SE = C \times (PE \times N) / (PR \times A) \quad (1)$$

$$PE = HP / HP_0 \times PE_0 \quad (2)$$

ここで、SE : 掘削体積比エネルギー (J / cm³)

C : エネルギー伝達係数

PE : 一打撃の打撃エネルギー (J)

N : 打撃数 (blow / min)

PR : 削孔速度 (cm / min)

A : 削孔断面積 (cm²)

HP : 打撃圧 (MPa)

HP₀ : 定格打撃圧 (MPa)

PE₀ : 定格打撃エネルギー (J)

式(1)および式(2)で示されるように、掘削体積比エネルギーは、機械データのうち削孔速度と打撃圧から求められる。エネルギー量の単位 J は、力 N と距離 m の

積で置き換えられることから、掘削体積比エネルギーは圧縮強さと同じ次元で表現される。掘削体積比エネルギーから岩盤強度を絶対値として求めるためには、両者の関係を把握する必要があった。

CP ジャンボで得た機械データから掘削体積比エネルギーを求める場合、古河ロックドリル社では機械データと併せてこれを自動で取得可能である。一方で、古河ロックドリル社以外の 2 社メーカーでは、機械データを式(1)および式(2)にあてはめて求める必要がある。しかし、上記の 2 社メーカーでは、定格打撃圧や定格打撃エネルギーが非公開であるため、機械データから掘削体積比エネルギーを算出し、これを切羽評価に用いることはできなかった。

2.2.2 削孔速度を用いた評価指標

CP ジャンボが普及する以前には、「探り削孔」により削孔時にビットが前進する速度、いわゆる「のみ下がり速度」として、削孔速度が簡易で定性的な評価方法の評価指標として用いられてきた¹⁸⁾。これを応用して、桑原ほか(2008)は、削孔速度から「正規化削孔速度比」を算出し、これを定量的な切羽評価に用いた。しかし、削孔速度に与えるフィード圧の影響を把握するため、異なる圧縮強さの試験体に対して、フィード圧を変えた試験を行う必要があった¹⁹⁾。

Schunnesson ほか(2012)では、削孔速度から Hardness を求め、これを切羽における岩盤の硬軟の評価に用いた¹⁵⁾。Hardness は無次元の評価指標であるが、岩盤の硬軟を相対的に評価できるとされ、エピロック社の XE3C では評価指標として採用されている(表-1)。市来ほか(2021)では、強度既知のモルタルを用いて、Hardness と一軸圧縮強さの線形関係、および Hardness と削孔速度との線形関係を把握した²⁰⁾。しかし、Hardness を削孔速度から求める式は、メーカーからも非公開であり、エピロック社以外の 2 社メーカーの CP ジャンボで得た削孔速度から、Hardness または岩盤強度を算出して、これを切羽評価に用いることができなかった。

2.3 課題のまとめ

3 社メーカーの CP ジャンボで得た機械データから、掘削体積比エネルギーあるいは削孔速度を用いた評価指標を算出し、メーカーによらず切羽評価結果を蓄積する目的では、以下に述べる 2 つの課題が生じる。

1 つ目の課題は、3 社メーカーの CP ジャンボで得られる切羽評価指標は、メーカー独自のものであり、他社メーカーで得た機械データから算出できないことである。前節 2.2 でも述べたように、掘削体積比エネルギー

を評価指標として用いる場合には、算出に必要な機械データがメーカーから非公開であった。また、Hardness は削孔速度から求めた評価指標であると考えられるが、その算出式を明らかにする必要があった。

2 つ目の課題は、掘削体積比エネルギーあるいは Hardness から岩盤強度の絶対値を求められないことである。岩盤強度の絶対値を求めるためには、別途、掘削体積比エネルギーあるいは Hardness と、岩盤強度との関係を把握する必要があった。

次章では、これら 2 つの課題に対応した上で、CP ジャンボメーカーによらず岩盤強度を絶対値として求め、これを蓄積することに特徴を有する T-iBlast TUNNEL について説明する。

3. T-iBlast TUNNEL の開発

T-iBlast TUNNEL では、どのメーカーの CP ジャンボでも得られる削孔速度に着目し、これを用いた評価指標を開発することとした。

T-iBlast TUNNEL は、図-3 に示す検討フローに沿って開発した。まず、3 社メーカーの削岩機の制御方法を調査し、機械データのうち、切羽評価に用いる範囲を整理した。次に、削孔速度と圧縮強さの関係を把握する目的で、強度既知のモルタルを削孔する予備試験を実施した。そして、予備試験で得た削孔速度と圧縮強さの関係を、掘削中のトンネル切羽で得た機械データに適用して削孔した岩盤の強度を推定した。その結果を、目視観察結果や試験結果と比較することで手法の妥当性について考察した。

3.1 CP ジャンボの制御方法

まず、3 社メーカーごとの CP ジャンボの制御方法を示す。次に、制御方法を考慮した上で、切羽評価に用いる範囲の機械データの選定方法を説明する。

3.1.1 XE3C (エピロック社)

図-4 に XE3C に搭載される削岩機 COP2238+の制御方

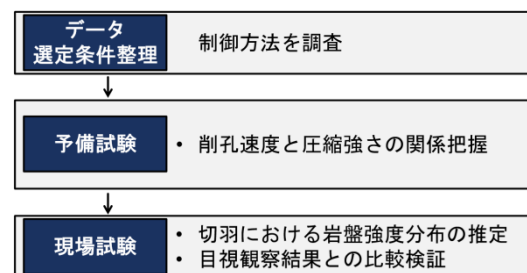


図-3 検討フロー

Fig.3 Workflow of consideration process

法の一例を示す。図では削孔開始から終了までの削孔長に対する打撃圧、回転圧、フィード圧の変化を模式的に示す。なお、通常、削孔は打撃圧、回転圧、フィード圧の低い初期削孔から、本削孔の段階へと移行するため、これらの段階を分けて表記した。

本削岩機 COP2238+では、回転圧を一定値に保持する制御のほかに 3 つの制御がある。制御①は、FPCI (Feed Pressure Control Impact pressure) と呼ばれ、フィード圧の上昇・下降に応じて打撃圧を上下させる制御である。このうち図中赤字で示す制御①は、フィード圧の下降に応じて打撃圧を下げる制御で、岩盤に接する力が弱い状態で強い打撃圧を加えることにより、削岩機内部を損傷させる空打ちを防止する。制御②は、RPCF (Rotation Pressure Control Feed pressure) と呼ばれ、削孔時の掘りくずによる孔詰まり等の影響で、回転圧が閾値を超えて上昇した時に、フィード圧を下げる制御である。孔壁の崩壊や押し出し等が原因で、孔内にてビットやロッドが拘束され回転不能となった状態をジャミングという。制御③は、ジャミング防止の制御 (アンチジャミング制御) である。粘土を含む箇所や軟質箇所を削孔した際、回転圧が閾値を超え上昇した場合に、削岩機を掘削面から後退させる (この時フィード圧は 0 となる)。

3.1.2 DT1131i (サンドビック社)

図-5 に DT1131i に搭載される削岩機 RD520 の制御方

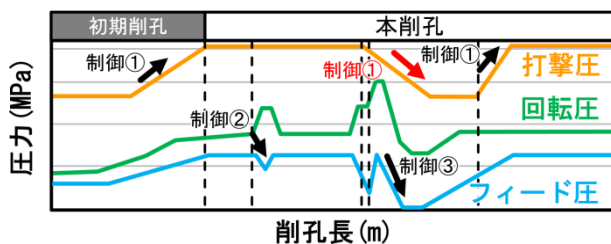


図-4 削岩機 COP2238+の制御方法
(エピロック社 XE3C)

Fig.4 Control characteristics of rock drill COP2238+ (XE3C)

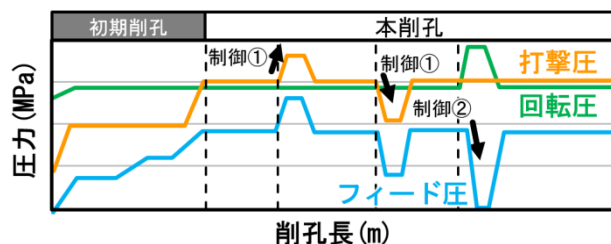


図-5 削岩機 RD520 の制御方法
(サンドビック社 DT1131i)

Fig.5 Control characteristics of rock drill RD520 (DT1131i)

法の一例を示す。本削岩機 RD520 では、打撃圧／フィード圧の比を一定値に保持する制御がある (制御①)。制御②は、エピロック社の制御③と同等のアンチジャミング制御であり、回転圧が閾値以上に上昇した場合に、削岩機を掘削面から後退させる。

3.1.3 J32RX-Hi (古河ロックドリル社)

図-6 に J32RX-Hi に搭載される削岩機 HD250 の制御方法の一例を示す。本削岩機 HD250 では、各圧力を一定値に保持する制御はない。しかし、3 種類の異なるアンチジャミング制御がある。制御①は、RF 制御 (回転圧-フィード圧連動制御、あるいは回転圧安定制御) と呼ばれる。この制御では、削孔時の掘りくずによる孔詰まり等の影響で回転圧が上昇し、閾値を超えるとフィード圧を下げる、または削岩機を掘削面から後退させる。制御②は、RP 制御 (回転圧-打撃圧連動制御) と呼ばれ、回転圧の上昇時に打撃圧を下げる制御である。制御③は、FP 制御 (フィード圧-打撃圧連動制御) と呼ばれ、空打ち防止のため、フィード圧の下降に応じて、打撃圧を下げる制御である。

3.2 データ選定方法

3 社メーカーの削岩機の制御方法を考慮して、打撃圧やフィード圧の圧力変化が少なく、削孔速度を用いて切羽評価が可能と考えられる範囲の機械データを選定して用いることとした。図-7 に機械データの選定範囲の一例を示す。

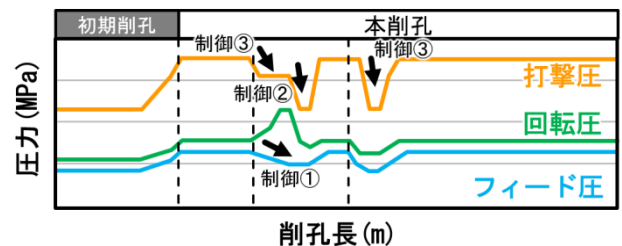


図-6 削岩機 HD250 の制御方法
(古河ロックドリル社 J32RX-Hi)

Fig.6 Control characteristics of rock drill HD250 (J32RX-Hi)

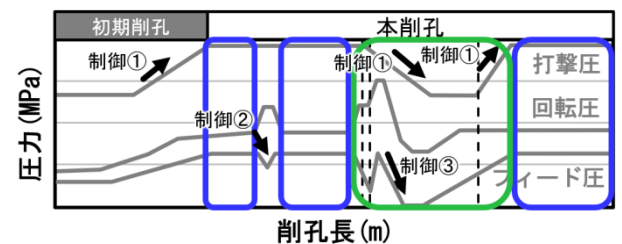


図-7 機械データの選定範囲の例

Fig.7 Example of selection range for machine parameters

初期削孔の段階では、本削孔の段階より低いフィード圧や打撃圧で削孔制御され、また、削孔速度も一定値で制御される。このため、切羽状況に応じた削孔速度が得られないと考えられるので、初期削孔の段階の機械データを除外し、本削孔の段階の機械データを選定することとした。

本削孔の段階では、明らかに軟質箇所等の不良地山が想定される、アンチジャミング制御が機能する範囲（XE3Cの制御③、DT1131iの制御②、J32RX-Hiの制御①～③）について、定量的な評価には使用できないが、「見なし軟質」として定性的に評価する範囲として選定した（図-7 緑枠範囲）。

アンチジャミング以外の制御が機能する範囲（XE3Cの制御②、DT1131iの制御①）については、削岩機内部の損傷を防ぐために打撃圧あるいはフィード圧等が制御され、切羽状況に応じた削孔速度が得られないと考えられる。このため、これらの制御が機能しない範囲の機械データを選定した（図-7 青枠範囲）。

3.3 予備試験

予備試験は、削孔速度と圧縮強さの関係を把握する目的で、写真-1 に示すように、圧縮強さの異なる 3～4 体のモルタルを対象としてメーカーごとに実施した。



写真-1 予備試験でのモルタル試験体の削孔状況
Photo 1 Mortar drilling situation in preliminary test

表-2 モルタル試験体の仕様と削孔条件
Table 2 Mortar specifications and drilling conditions

CPジャンボ		エピロック社 XE3C	サンドビック社 DT1131i	古河ロックドリル社 J32RX-Hi
モルタル 仕様	寸法 (m)	0.45×0.45×0.45	1×1×1	1×1×1
	圧縮強さ (N/mm ²)	20～60	30～70	25～45
削孔条件	削孔長 (m)	約0.45	約1.0	約1.0
	フィード圧 (MPa)	3.5～6	4～6	6.5～7.5
	打撃圧 (MPa)	13	11～16	14～16

表-2 にモルタル試験体の仕様と試験条件を示す。

前節で述べたデータ選定方法に従い、選定した範囲の機械データを評価に用いた。なお 2.2.2 で述べたように、削孔速度はフィード圧の変化の影響を受けると考えられたため、まず、フィード圧と削孔速度の関係について整理した。なお、予備試験の条件においては、フィード圧が削孔速度に影響しないことを確認した。圧縮強さごとの削孔速度は、平均値を用いて検討した。

3.3.1 XE3C（エピロック社）

図-8 に 37N/mm² と 58N/mm² のモルタルを削孔した時のフィード圧と削孔速度の関係を示す。フィード圧が 3.5～6MPa の範囲において、フィード圧と削孔速度の相関は認められなかった。また、37N/mm² の場合には、削孔速度の平均値は 3.08m/min であり、58N/mm² の場合には、削孔速度の平均値は 2.68m/min であった。両者の削孔速度を比較すると、圧縮強さの強い 58N/mm² の方が、削孔速度が遅い傾向が認められた。

3.3.2 DT1131i（サンドビック社）

図-9 に 31N/mm²、65N/mm² のモルタルを削孔した時のフィード圧と削孔速度の関係を示す。フィード圧が 4.9～6.0MPa の範囲において、フィード圧と削孔速度の相関は認められなかった。65N/mm² の場合には、削孔

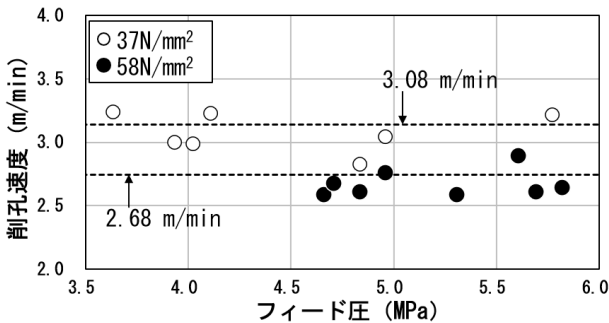


図-8 フィード圧と削孔速度の関係
（エピロック社 XE3C）
Fig.8 Relationship between FP and PR (XE3C)

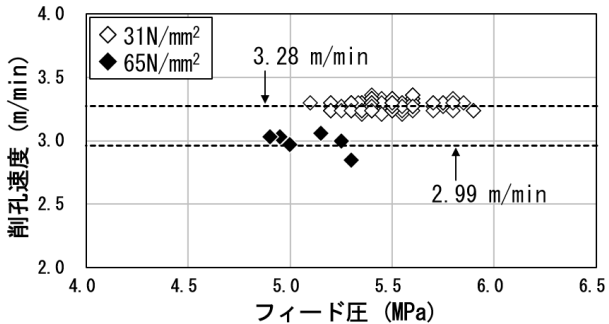


図-9 フィード圧と削孔速度の関係
（サンドビック社 DT1131i）
Fig.9 Relationship between FP and PR (DT1131i)

速度の平均値は 2.99m/min であった。一方で、 31N/mm^2 の場合には、削孔速度の平均値は 3.28m/min でありほぼ一定値であった。圧縮強さと削孔速度の関係について、圧縮強さの強い 65N/mm^2 の方が、 31N/mm^2 よりも削孔速度が遅くなる傾向であった。

3.3.3 J32RX-Hi (古河ロックドリル社)

図-10 に 28N/mm^2 、 44N/mm^2 のモルタルを削孔した時のフィード圧と削孔速度の関係を示す。フィード圧が $6.7\sim 7.3\text{MPa}$ の範囲において、フィード圧と削孔速度の相関は認められなかった。 28N/mm^2 の場合には、削孔速度の平均値は 3.01m/min であった。一方で、 44N/mm^2 の場合には削孔速度の平均値は 2.54m/min であった。両者の削孔速度を比較すると、圧縮強さの強い 44N/mm^2 の方が、削孔速度が遅い傾向が認められた。

3.4 削孔速度と圧縮強さの関係

図-11 に予備試験で得た削孔速度と圧縮強さの関係を示す。削孔速度は圧縮強さごとの平均値を求めた。3 社メーカーとも試験数が限定されるため、線形式からのばらつきはあるものの、傾向として削孔速度と圧縮強さは線形関係を認めることができる。ただし、3 社メー

カーごとに削孔速度に対する圧縮強さの変化（線形の傾き）は異なり、同じ圧縮強さに対する削孔速度の絶対値が異なることがわかった。これらの違いは、評価に適した条件の機械データから求めた値であり、削岩機の優劣を示すものではないと考えられる。なお、 $20\sim 60\text{N/mm}^2$ の強度範囲は、削孔速度と圧縮強さの試験結果が得られている範囲であり、この範囲で結果を内挿して関係式を求めた。これら削孔速度と圧縮強さの関係式を用いて、切羽で得た削孔速度から岩盤強度を推定した。なお、予備試験では、均質なモルタルの圧縮強さを推定したが、切羽削孔時には、岩盤中の亀裂等も包含した岩盤状況を反映した機械データが取得されることが考えられる。このため、T-iBlast TUNNEL によって推定される値は、ミクロな視点での岩石強度ではなく、マクロな岩盤強度として扱った。

4. 現場試験結果

現場試験では、前章の予備試験で得た削孔速度と圧縮強さの関係式を、掘削中のトンネル切羽で得た機械データに適用して岩盤強度を推定した。そして、切羽における目視観察結果と岩盤強度分布との比較検証を実施した。図-12 に XE3C、図-13 に DT1131i、図-14 に J32RX-Hi の CP ジャンボを用いた際のそれぞれ目視観察結果と岩盤強度分布を示す。図中凡例の閾値は、削孔速度と圧縮強さの試験結果が得られている $20\sim 60\text{N/mm}^2$ の強度範囲内の値とした。なお、岩盤強度コンター分布図の作成には、空間補間手法である逆距離加重法を用いた。

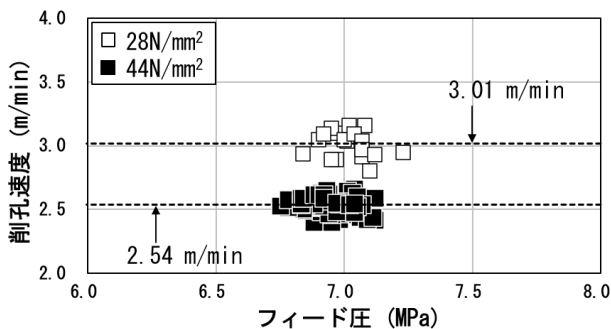


図-10 フィード圧と削孔速度の関係
(古河ロックドリル社 J32RX-Hi)

Fig.10 Relationship between FP and PR (XE3C)

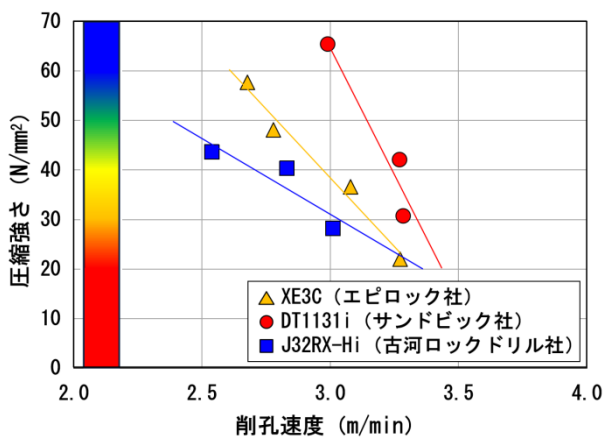


図-11 削孔速度と圧縮強さの関係

Fig.11 Relationship between PR and compressive strength

4.1 道路トンネル A (エピロック社 XE3C)

安山岩溶岩が分布する道路トンネル A にて、岩盤強度の評価を実施した。目視観察では、切羽の左側に軟質な安山岩溶岩が分布し、右側に硬質な安山岩溶岩（塊状）が分布した（図-12）。切羽近傍における前方探査ボーリングコアの一軸圧縮強さ試験により、安山岩溶岩（塊状）の圧縮強さとして 37N/mm^2 が得られていた。岩盤強度分布では、左側で概ね赤色の 20N/mm^2 以下、右側で黄色～青色の $40\sim 60\text{N/mm}^2$ と評価できた。岩盤強度分布は、目視観察結果による硬軟分布や既存試験結果の圧縮強さと整合した。

4.2 道路トンネル B (サンドビック社 DT1131i)

花崗閃緑岩が分布する道路トンネル B にて、岩盤強度の評価指標を用いて切羽評価を実施した。既存地質調査の一軸圧縮強さ試験結果により、花崗閃緑岩の圧

縮強さとして $50 \sim 150 \text{ N/mm}^2$ が得られていた。目視観察では、硬質な花崗閃緑岩が切羽全体に分布し、右側では亀裂間隔が狭く、左側よりも軟質であった（図-13）。岩盤強度分布では、図-11 の強度範囲を超えることが多く、切羽中での硬軟の違いの評価は難しかったものの、切羽全体にて青色の 60 N/mm^2 以上と評価できた。全体で 60 N/mm^2 以上の高い強度となる評価は、目視観察結果や既存試験結果の圧縮強さと概ね整合した。

硬質地山における岩盤強度の違いを把握できるか検討するため、予備試験で得た削孔速度と圧縮強さの線形関係を 100 N/mm^2 の高強度側へ外挿して、試行的に高強度範囲での岩盤強度分布を描画した（図-14）。この結果、切羽右側と中心で緑色の 60 N/mm^2 程度、これ以外では青色の 100 N/mm^2 以上の評価となり、岩盤強度の違いを区別できた。岩盤強度分布は、目視観察結果や既存の一軸圧縮強さ試験の圧縮強さと概ね整合した。今回は試験結果を外挿したが、今後 70 N/mm^2 を超える高強度のモルタルの削孔試験を実施し、強度範囲を拡大したいと考えている。

4.3 道路トンネル C（古河ロックドリル社 J32RX-Hi）

砂岩が分布する道路トンネル C にて、岩盤強度の評価を実施した。既存地質調査の一軸圧縮強さ試験結果より、砂岩の圧縮強さとして $50 \sim 200 \text{ N/mm}^2$ が想定された。目視観察では、硬質な砂岩が切羽全体に分布し、水平な亀裂に沿って一部褐色風化（点線箇所）を被っていた（図-15）。岩盤強度分布では、切羽全体において概ね青色の 60 N/mm^2 以上と評価でき、点線箇所を示す褐色風化部では、赤色～黄色の $20 \sim 40 \text{ N/mm}^2$ と評価できた。岩盤強度分布は、目視観察結果や既存試験結

果の圧縮強さと整合した。

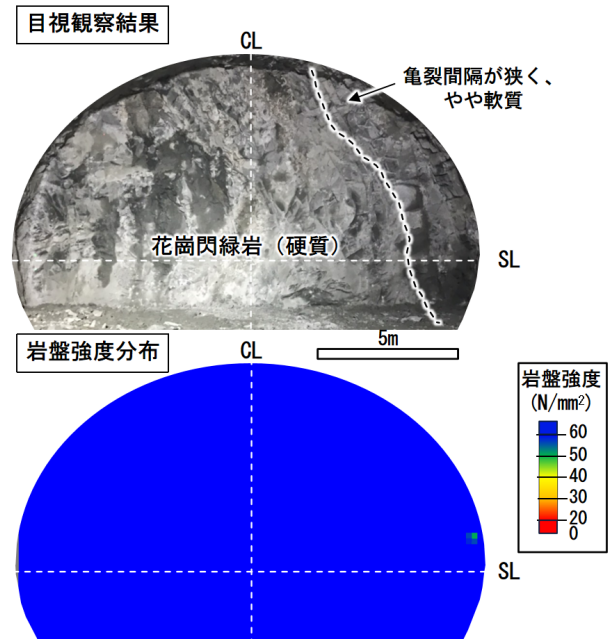


図-13 道路トンネル B（サンドビック社 DT1131i）の現場試験結果

Fig.13 Field test result using DT1131i machine parameters

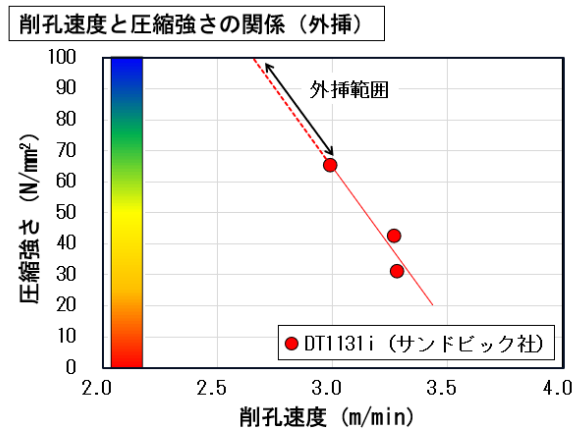


図-14 試行的に求めたサンドビック社 DT1131i の岩盤強度分布

Fig.14 Rock mass strength distribution of DT1131i (on trial basis)

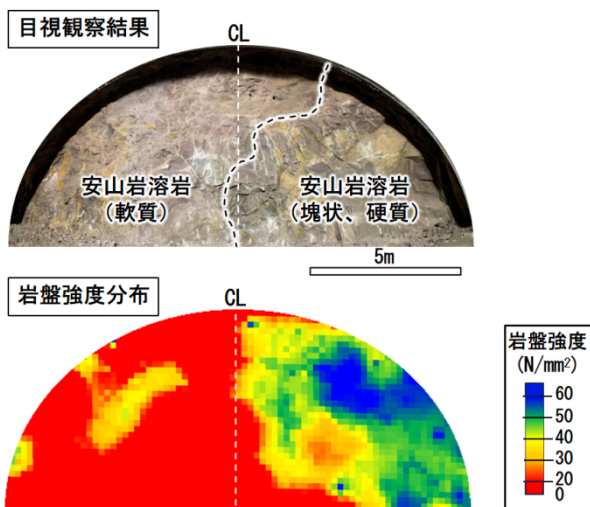


図-12 道路トンネル A（エピロック社 XE3C）の現場試験結果

Fig.12 Field test result using XE3C machine parameters

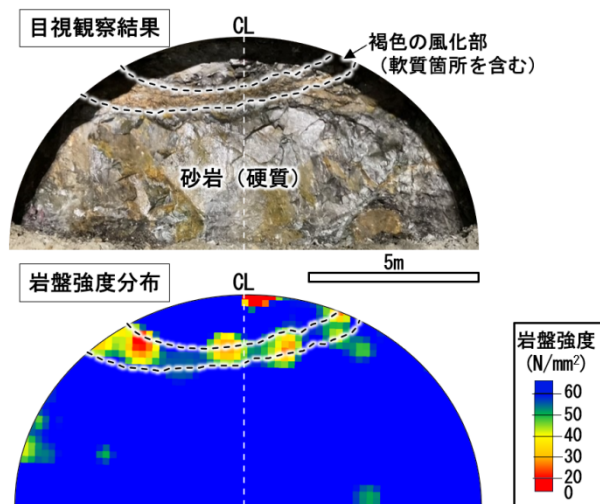


図-15 道路トンネル C (古河ロックドリル社 J32RX-Hi) の現場試験結果

Fig.15 Field test result using J32RX-Hi machine parameters

5. まとめ

CP ジャンボメーカー共通の評価指標を用いた切羽評価手法「T-iBlast TUNNEL」を開発するため、削岩機の制御方法を考慮した上で、強度既知の均質なモルタルを用いた削孔試験を行い、削孔速度と圧縮強さの線形関係を把握した。そして、両者の線形関係により推定した岩盤強度を共通の評価指標として採用した。掘削中のトンネル切羽の機械データを用いて、岩盤強度分布を推定し、目視観察結果等と比較することで T-iBlast TUNNEL の妥当性を把握した。

今後は CP ジャンボを配置した全国の山岳トンネル工事に本手法の導入を図り、掘削実績に基づく改良を行って、評価結果の信頼性向上に努めていく。現状では、特に予備試験で得た削孔速度と圧縮強さの関係について、切羽の岩盤の硬軟評価で求められる高強度側への強度範囲の拡大が必要と考えており、追加の削孔試験を実施していきたい。また、将来、地山状況に応じた最適な削孔計画の自動化のためには、孔ごとの機械データから、切羽における面的な岩盤強度分布を可視化する一連の機械データ処理の自動化が必要と考えており、これに取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 山下雅之, 山本悟, 三井善孝, 塚田純一: トンネル掘削時の削孔データを使用した3次元地山評価システムの開発, トンネル工学報告集, 第28巻, I-32, pp.1-6, 2018.
- 2) Schunnesson, H., Elsrud, R. and Rai, P.: Drill Monitoring for Ground Characterization in Tunnelling Operations. In: Proceedings of International Symposium on Mine Planning and

- Equipment Selection (MPES 2011). Almaty, Kazakhstan: National Center on Complex Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan; pp.731-744, 2011.
- 3) 桑原徹, 畑浩二, 稲川雄宣, 平川泰之: 変換解析システムによるノンコア削孔トンネル切羽前方予測技術, トンネル工学論文集, 第18巻, pp.1-10, 2008.
- 4) Epiroc: User Manual Underground Manager Version 1.47. Epiroc Rock Drills AB, No. 9852 3286 01, 2018.
- 5) Sandvik: iSURE® 8.1 software drill and blast intelligence, Brochure B2-1066:03ENG, 2021.
- 6) 古河ロックドリル: Full Auto Jumbo J32RX-Hi ROBOROCK, カタログ J32RX-Hi-J2303-F6, 2023.
- 7) 木村哲, 山下雅之, 西山哲, ぜい弱地山における穿孔探査法の適用, 材料, Vol.52, No.5, pp.494-499, 2003.
- 8) 羽柴公博, 福井勝則, 小泉匡弘: 打撃式油圧さく岩機による穿孔過程, Journal of MMIJ, Vol.133, No.9, pp.223-229, 2017.
- 9) 山下雅之, 石山宏二, 稲葉力, 早坂茂, 塚田純一: 油圧式削岩機のダンピング圧を利用した切羽前方探査法, トンネル工学研究論文・報告集, 第6巻, pp.107-112, 1996.
- 10) 塚本耕治, 小泉匡弘, 進士正人, 油圧式削岩機のダンピング圧力変動を利用した地山の圧縮強度予測, 材料, Vol.68, No.4, pp.366-373, 2019.
- 11) Schunnesson, H.: RQD Predictions Based on Drill Performance Parameters, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.11, No.3, pp.345-351, 1996.
- 12) 山田文孝, 山本信幸, 山下高俊, 山地宏志: 削孔検層システムを用いたトンネル全長にわたる地山評価, トンネル工学報告集, 第15巻, pp.121-128, 2005.
- 13) 宮嶋保幸, 岩熊真一, 戸邊勇人, 白鷺卓, 岩村武史, 白松久茂, 渥美博行: 支保パターン選定に寄与する地山評価技術の開発と適用実績, トンネル工学報告集, 第25巻, I-16, pp.1-9, 2015.
- 14) Van Eldert, J., Schunnesson, H., Saiang, D. and Funehag, J.: Improved filtering and normalizing of Measurement-While-Drilling (MWD) data in tunnel excavation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.103, pp.1-13, 2020.
- 15) Schunnesson, H., Pouloupoulos, V., Bastis, K., Pettersen, N. and Shetty, A. : Application of computerized drill jumbos at the Chenani-Nashri tunnelling site in Jammu-Kashmir, India. In: Proceedings of the Twenty first international Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES 2012). New Delhi, India; pp.716-726, 2012.
- 16) Teale, R.: The concept of specific energy in rock drilling, *Int. J. Rock, Mech. Min. Sci.*, Vol.2, pp.57-73, 1965.
- 17) 西松裕一: 掘削方法とその評価方法について, 日本鉱業会, 昭和47年度秋季大会分科講演会資料, pp.1-4, 1972.
- 18) 宮嶋保幸, 白鷺卓, 戸邊勇人, 山本拓治, 犬塚隆明, 松下智昭: コンピュータジャンボと画像解析を利用したトンネル周辺の地質評価技術, トンネル工学報告集, 第26巻, I-36, pp.1-6, 2016.
- 19) 稲川雄宣, 畑浩二, 桑原徹, 中岡健一: ノンコア削孔による切羽前方予測技術の基礎的研究—大型花崗岩供試体を利用した削孔実験—, トンネル工学報告集, 第16巻, pp.107-112, 2006.
- 20) 市来孝志, 山上順民, 宮本真吾, 文村賢一: コンピュータジャンボの削孔データを用いたトンネル切羽前方地山評価, 令和3年度土木学会全国大会, VI-451, 2021.