

端面掘削方式による岩盤溝切削機の作業能力と比エネルギー

The productivity and specific energy of a trench excavator for a rock mass due to an edge excavation system

室 達朗 *

Tatsuro MURO*

Abstract: The purpose of this paper is to increase the workability of a trench excavator for a hard rock mass due to the increment of a cutting capacity and the decrement of a specific cutting energy by means of the edge excavation system using a ripping disc cutter bit. The trench excavator of 490 kN weight mounted a cutting drum of 140 cm diameter having 24 conical bits and 6 ripping disc cutter bits. The productivity of the excavator was investigated for a hard rock mass of 278 MPa unconfined compression strength. As the results, it was observed that the cutting capacity and the specific cutting energy of the trench excavator increased to be 2.21 times and decreased to be less than 1/1.33 times that of the conventional cutting drum respectively.

Key Words : hard rock mass, trench excavator, disc cutter, edge excavation

1. はじめに

近年、岩盤の掘削工事においては、公共工事費の大幅な削減と既存の構造物や周辺環境に与える影響の低減が最優先課題となっている。油圧ブレーカなどの割岩工法は、施工能力が小さくまた騒音が原因で使用が限定されている。静的破砕剤は、施工能力だけでなくコスト面でも深刻な課題を残している。これらの問題を解決するために大型岩盤切削機^[1]が開発され、硬岩掘削工事に使用されてきた。この切削機械は履带式車両に搭載されており、走行中に機械本体中央下部に約 150 本のコンカルビットを装着した直径 1.4 m、長さ 3.5 m の円筒形ドラムを手前からすくい上げるアップカット方式によって回転させ、自重を反力にして連続的に岩盤を切削するものである。しかし、硬岩領域での切削能力^[2]が低下することや切削ビットの衝撃力による摩耗が顕著であるため寿命がきわめて短い^[3]などの問題がある。この切削能力を決定する切削抵抗は、岩石の強度だけでなく、岩盤のクラックや節理の分布性状に大きく支配されることはすでに明らかにされている^{[4], [5]}。そこで任意の間隔で人為的にクラックを強制的に入れ、岩盤の自由面を増やし、その後を大型岩盤切削機で掘削すると切削能力が一段と向上することを期待して、硬質岩盤であっても高い切削能力を発揮する岩盤溝切削機が開発された。この岩盤切削機^[6]は5 列 24 本のコンカルビットを直径 1.4 m の切削ドラムに配設したものであり、幅 0.15 m 程度で切削することができる。硬岩領域では、この溝切削機で溝を造成した後、大型岩盤切削

*愛媛大学名誉教授

*Emeritus Professor of Ehime University

原稿受理 平成 17 年 10 月 31 日

機で切削することにより飛躍的に切削能力が向上した。しかし、この岩盤溝切削機は大型岩盤切削機に比べてコンカルビット 1 本に大きな衝撃力が作用して、ビットの摩耗が大きな問題となっていた。これらの問題を解決するために考案された円盤型剥離破砕刃によって効率的に岩盤を破壊する硬質岩盤切削技術は、岩石の圧裂引張り破壊に関する力学的性質を利用した画期的な掘削方法である^{[7],[8],[9]}。従前の大型岩盤切削機や硬岩溝切削機などの掘削機構は 1 自由面の平面を掘削するものであり、そのメカニズムは岩盤を圧縮またはせん断破壊することによって掘削するものである。これに対して円盤型剥離破砕技術は岩盤に引張り破壊を誘発させるものである。一般に、岩石の引張り強度は圧縮強度の 10 分の 1 程度である。従って、円盤型剥離破砕技術により従来の技術よりも有効に岩盤を掘削することが可能となり、コスト面においても改善されると期待できる。従来、切削ドラムの形状は円錐型とし、最先端部に円盤型圧壊破砕刃を、斜部に多数の円盤型剥離破砕刃を装着する硬質岩盤溝切削機が考案された^[10]。この方法によると、全てのビットが圧壊切削していた従前の切削方法に比べて、斜部での剥離破砕を主とした切削が可能となり、掘削効率の上昇やビット摩耗の減少が期待できる。

本研究の目的は、円盤型剥離破砕刃による岩石の端面掘削方式を使用して、切削機の切削能力の向上、単位切削土量に対する切削エネルギーとして算定される比エネルギーの減少により、その作業能力を向上させることである。ここでは、自重 490 kN の岩盤溝切削機を試作機とし、5 列 24 本のコンカルビットとその両側に配置した各 3 個、計 6 個の円盤型剥離破砕刃を直径 140 cm の切削ドラムに配設し、岩石の一軸圧縮強度 27.8 kN/cm² からなる岩盤を対象として、その切削力、切削速度および作業能力について検討した。

2. 現場実験

2.1 岩盤溝切削機

図 1 に示すセンターカッターユニットに後述する切削ドラムを取り付けた岩盤溝切削機を用いて現場実験を行った。岩盤の性状は、後述するように、岩種は流紋岩質凝灰岩で、硬質岩盤に属している。写真 1 は、センターカッターユニットで切削実験を行った状況を示したものである。なお、同図および写真に示すように、センターカッターユニットは履带式車両の前面に取り付けられており、オペレータの座席位置が進行方向と反対となっている。試作ドラムの回転方向はアッパーカット方向にあり、履带式車両は後進する必要がある。実際上は、過酷な車両振動を避けるためにオペレータは履带式車両に搭乗するのではなく、リモートコントロールによって履带式車両を無線操縦するのである。

ここでは、図 2 に示す直径 1.40 m の切削ドラムを考案し、製作した。切削ドラムの外周部には衝撃力の発生を抑制するため計 24 本のコンカルビットを配設し、コンカルビット先端の円軌道半径を 0.70 m とした。このコンカルビットの両側には片側 3 枚、計 6 枚の円盤型剥離破砕刃を配設した。この剥離破砕刃の切削深さは 8.0 cm であり、切込み幅も 8.0 cm としている。この試作ドラムでは円盤型剥離破砕刃が 6 枚配置されているが、その内 3 枚は、右図の立面図においては切削ドラムの右側に、他の 3 枚は左側に設置されている。それぞれの剥離破砕刃の取り付けピッチである中心角は 120 度となっている。従って、剥離破砕刃が岩盤と接地する最大の中心角は、切削深さを 17.5 cm とした場合には、切削ドラムの下死点、中心および剥離破砕刃の地表との接点となす角度として 41.4 度となっており、剥離破砕刃が岩盤の切削面と接触しない時間帯が発生する。この間は切削抵抗がないので岩盤溝切削機が前進しようとして、次の剥離破砕刃が切削面に当たったときに衝撃力が発生する。この新しい切削ドラムをセンターカッターユニットに搭載して現場実験を行ったが、センターカッターの取り付け位置が重心よりかなり離れていたために岩盤溝切削機本体に大きな曲げモーメントを発生させ、さらに切削ドラムの回転トルク不足もあって、機械に異常な振動を与えたために掘削が困難となった。本来、円盤型剥離破砕刃は準静的な押し付け力によって岩盤を破砕するものであり、動的な衝撃力が発生する場合には適していない。この発生する衝撃力を軽減するには、同一軌跡上に円盤型剥離破砕

刃を数多く配置することである。そのためには、切削ドラムの直径を大きくするか、または剥離破碎刃の径を小さくするなどの大幅な構造上の改良を行う方法、または試作ドラムの形状寸法はこのままにして、岩盤溝切削機の重心部に配置して大きな曲げモーメントを発生させず、さらに大きな回転トルクを出力する岩盤溝切削機を使用する方法がある。ここでは、後者の方法を採用する方向で検討することとした。

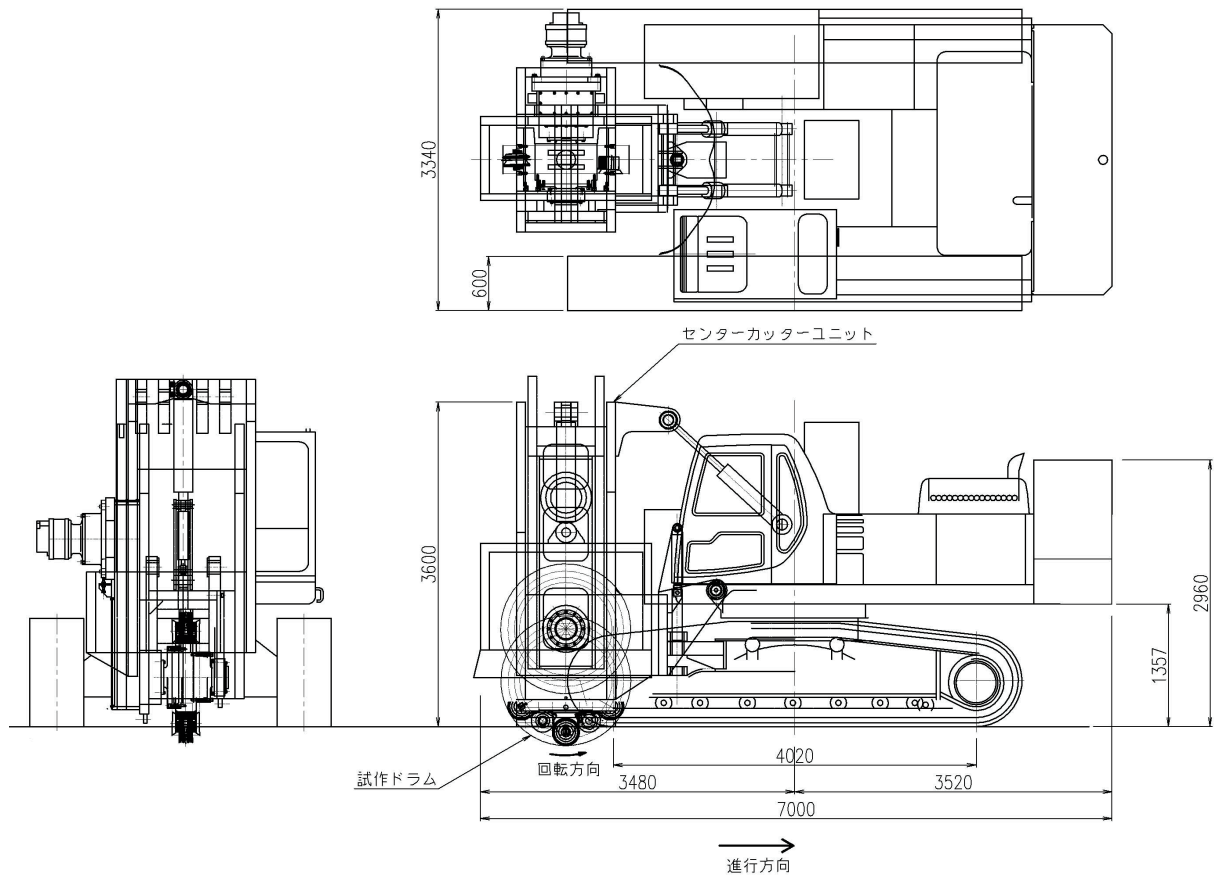


図1 センターカッターユニットに試作ドラムを装着した岩盤溝切削機



写真1 センターカッターユニットによる切削状況

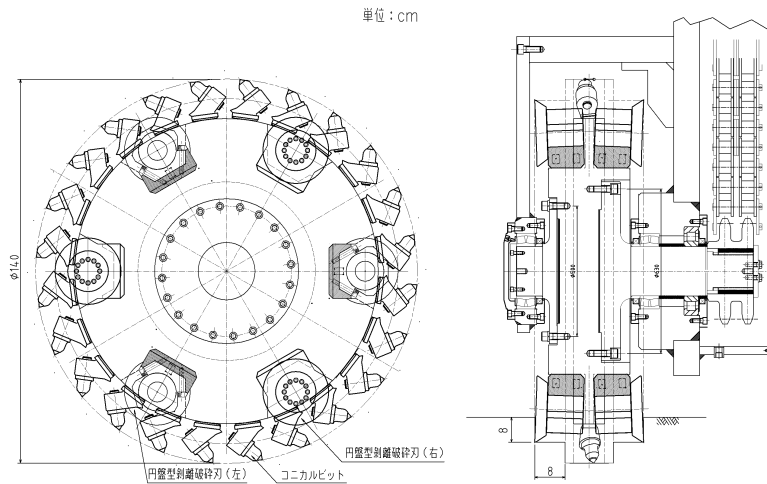


図2 コニカルビットと円盤型剥離破砕刃を配設した切削ドラム

2.2 岩盤特性

岩盤溝切削機に対する現場実験を実施するため、延長 15 m、幅員 10 m の実験ヤードを整備した。表土および風化した岩盤は前述した大型岩盤切削機 3500SM サーフィスマイナー^[1]を使用して除去し、新鮮な岩盤を露出させて平坦に整地した。写真 2 は整地された実験ヤードであり、切削された A、B および C 溝の位置を示したものである。

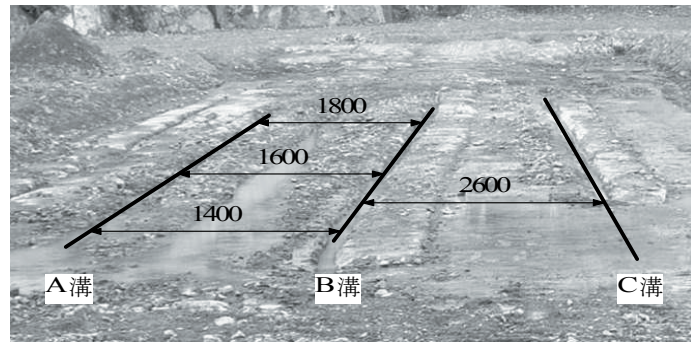


写真 2 実験ヤードにおける切削溝の位置図

岩種は流紋岩質凝灰岩であり、岩盤に多少の亀裂は存在するが、岩石自体の風化はあまり進行していない。表 1 は、この実験ヤードにおける岩盤の物理的特性を示したものである。岩石の一軸圧縮強度は 27.8 kN/cm^2 で、亀裂係数が 0.872 であるので硬質岩盤に属しており、切削刃の「摩耗に対する岩盤強度指数」^[1]は平均 23.2 kN/cm^2 で重摩耗領域に属している。

表 1 実験ヤードにおける岩盤の物理的特性

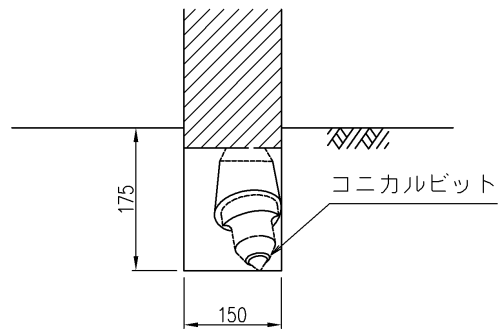
岩石名		流紋岩質凝灰岩
見かけ比重	G_n	2.623 ± 0.022
真比重	G_s	2.722 ± 0.035
自然含水比	W (%)	0.027 ± 0.008
吸水率	W' (%)	0.045 ± 0.001
一軸圧縮強度	S_c (kN/cm^2)	27.8 ± 10.5
圧裂引張強度	S_t (kN/cm^2)	1.59 ± 0.55
せん断強度	S_s (kN/cm^2)	3.66
ショア硬さ	H_s	110.0 ± 3.9
ロサンゼルスすり減り減量	U (%)	18.5
超音波伝播速度	V_1 (km/s)	5.580 ± 0.3
地山弾性波速度	V_2 (km/s)	2.0 ± 0.1
亀裂係数	C_r	0.872
鉱物組成 σ		
石英	(%)	41
長石	(%)	32
緑簾石	(%)	5
粘土鉱物	(%)	11
不透明鉱物 (鉄鉱石)	(%)	4
その他	(%)	7
摩耗に対する岩盤強度指数	σ_c (kN/cm^2)	23.27 ± 7.98

2.3 実験方法

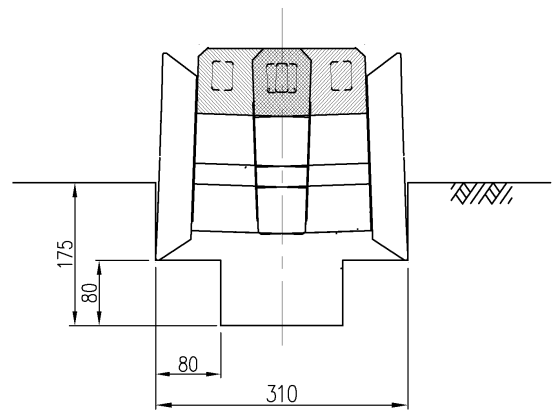
まず、コニカルビットと剥離破砕刃の切削性能を明確に分離することとし、それぞれの部位について切削現場実験を行った。すなわち、まず外周部に配設したコニカルビット 24 本を用いて溝切削実験を行い、所定の溝を形成してから全てのコニカルビットを取り外して計 6 枚

の円盤型剥離破砕刃のみを用いて岩盤の端面掘削実験を実施し、コニカルビットによる溝切削と円盤型剥離破砕刃による端面掘削との比較を行った。図3(a)(b)にその切削順序を示すように、まずコニカルビットによって深さ175 mm、幅150 mmの溝を切削し、つぎに円盤型剥離破砕刃による切込み幅を80 mm、切削位置を溝底より80 mm上部位にある切削深さ95 mmとして端面切削を行った。ここでは、コニカルビットによる溝切削を約10 mに渡って3レーン実施し、それぞれA溝、B溝およびC溝と命名した。次に、それぞれの溝の両端部を用いて円盤型剥離破砕刃のみによる岩盤の端面破碎実験を実施した。この場合、円盤型剥離破砕刃が岩盤に当たってから次の円盤型剥離破砕刃が当たるまでに時間がかかってしまうために、剥離破砕刃には大きな衝撃力が作用していた。時折、衝撃作用時に火花が見受けられた。

実験中の計測項目は、切削距離、切削時間、切削速度、および切削ドラムに作用するトルク変動であり、切削完了後には、1 mピッチで切削断面を計測し、平均断面法で掘削土量を算出した。この土量算定方法は、實際上、当該現場では雨がりの降水のために切削溝が冠水し、また岩石屑が飛散するなどして、全ての切削破片を回収することが不能となったため、止むを得ない方法であった。図4はコニカルビットによる溝切削とそれに後続する円盤型剥離破砕刃による端面切削後の代表的な断面形状例を示したものである。端面切削においては、円盤型剥離破砕刃の貫入により左右の剥離破砕刃の幅である310 mmをはるかに超えて岩盤が破碎されていた。また、観察によると円盤型剥離破砕刃の貫入位置から溝底に向かって岩盤は約45度に剥離されていた。これらは岩石の端面切削による剥離破砕の大きな特徴である。また、切削ずりの粒径は、端面切削のときの方が溝切削時よりはるかに大きく、握り拳程度の粒径であった。円盤型剥離破砕刃の切削深さは、多くの場合、目標である溝底より80 mm上の位置より浅くなっていた。これは、岩盤溝切削機の走行面の不陸によって切削溝の深さを一定にできなかったために、円盤型剥離破砕刃の貫入位置である切削深さを制御するのが困難であったためである。

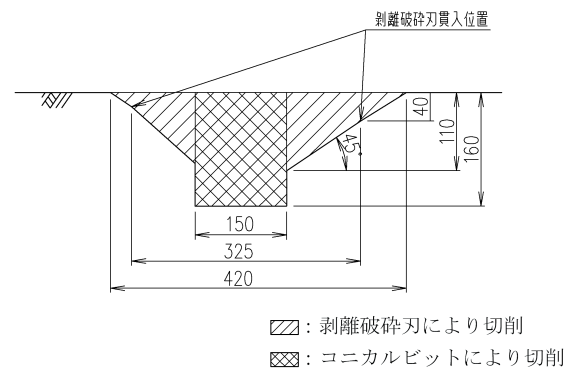


(a) コニカルビットによる溝切削



(b) 剥離破砕刃による端面切削

図3 コニカルビットと円盤型剥離破砕刃の切削順序



▨: 剥離破砕刃により切削
▩: コニカルビットにより切削

図4 コニカルビットおよび円盤型剥離破砕刃による切削断面形状例

3. 実験結果

3.1 切削能力

前述したA溝、B溝およびC溝について、コニカルビットによる溝切削を行い、その後切削された

溝にそって円盤型剥離破砕刃のみによる切削を実施し、それぞれの切削能力の比較を行った。

切削能力 Q (m^3/h) は、切削時間を t (h) とし、切削土量を V (m^3) とすると、次式で表すことができる。

$$Q = V/t \quad (1)$$

ここで、コニカルビットのみによって先行する溝切削は平面切削であり、その切削能力は、切削土量 V_p を切削時間 t_p で除したものととして V_p/t_p で与えられる。一方、溝切削終了後コニカルビットを取り外し円盤型剥離破砕刃を取り付け、形成された溝に沿って剥離破砕刃のみによる端面切削を実施する。その切削能力は、切削土量 V_E を切削時間 t_E で除したものととして V_E/t_E で与えられる。

図 5 は、当該コニカルビットによる溝切削と当該円盤型剥離破砕刃のみによる切削能力を各溝毎に比較したものである。コニカルビットによる溝切削では、その平均切削能力は $1.80 \text{ m}^3/\text{h}$ であった。図より明らかに、端面切削の掘削能力は溝切削の場合と比べて 1.16~1.62 倍、平均 1.46 倍であり、端面切削において十分効率的に切削が行われていることが明らかである。

3.2 比エネルギー

単位時間当たりの切削土量である切削能力 Q (m^3/h) で切削ドラムの回転動力 P (Nm/h) を除した値を比エネルギー E_s (Nm/m^3)^[12] とすると、次式が成立する。

$$\begin{aligned} E_s &= P/Q \\ &= 120\pi TN/Q \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 T は切削トルク (Nm)、 N は切削ドラムの回転数 (r.p.m.) である。

一般に、円盤型剥離破砕刃による端面切削は、コニカルビットによる溝切削と比較して、切削ドラムの回転動力は減少するとともに切削能力は増加すると推察することができる。

図 6(a)(b)(c) は、A 溝、B 溝および C 溝において、コニカルビットによる溝切削および円盤型剥離破砕刃のみによる端面切削における比エネルギーの大きさを比較し、切削位置毎にその変化を示したものである。コニカルビットによる溝切削における比エネルギーは A 溝で $(96.5 \pm 38.4) \times 10^6 \text{ Nm}/\text{m}^3$ 、B 溝で $(99.0 \pm 41.2) \times 10^6 \text{ Nm}/\text{m}^3$ 、C 溝で $(115.7 \pm 49.0) \times 10^6 \text{ Nm}/\text{m}^3$ と算定さ

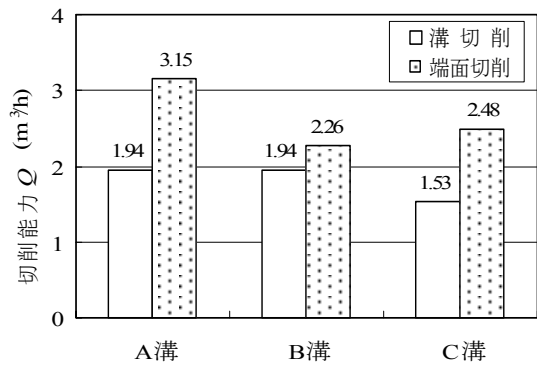
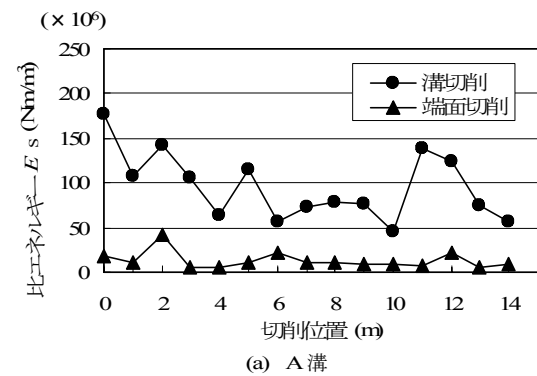
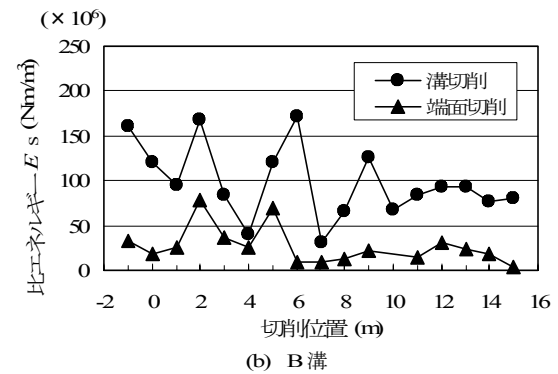


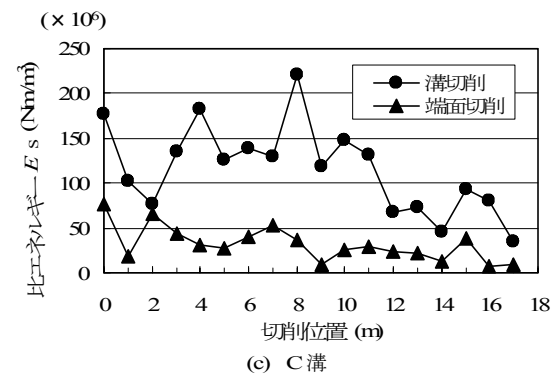
図 5 コニカルビットによる溝切削能力と円盤型剥離破砕刃のみによる端面切削能力との比較



(a) A 溝



(b) B 溝



(c) C 溝

図 6 コニカルビットによる溝切削と円盤型剥離破砕刃のみによる端面切削における比エネルギーの比較

れた．図より明らかに，切削位置によって岩盤の不均一性によるばらつきは見られるが端面切削時の比エネルギーは常に溝切削時の比エネルギーと比較して小さい値を取っている．ここで，端面切削時の比エネルギー E_{SE} に対する溝切削時の比エネルギー E_{SP} の比率 E_{SP}/E_{SE} の平均値は，A溝で8.9倍，B溝で5.8倍およびC溝で4.6倍であった．換言すれば，円盤型剥離破砕刃のみによる端面切削の比エネルギーはコンカルビットによる溝切削の比エネルギーの1/4.6～1/8.9となり，大幅に剥離破砕刃の切削効率が向上していることが明らかである．

図7はC溝での比エネルギー E_{SE} (Nm/m³) と円盤型剥離破砕刃の切削深さ Z (mm) の関係を示している．図より明らかに，ばらつきは見られるが， Z が深いほど比エネルギーは低下しており，次式が成立する．

$$E_{SE} = (-0.3597Z + 45.325) \times 10^6 \quad (R = 0.365) \quad (3)$$

4. 溝切削と端面切削を同時に行った場合の考察

前節に述べたコンカルビットによる溝切削と円盤型剥離破砕刃のみによる端面掘削における切削能力を勘案して，前図2に示した溝切削と端面切削を同時に行う切削ドラムについてその切削能力および比エネルギーについて考察し，評価することとする．

4.1 切削能力

前図4に示したある切削延長 L (m)における切削断面全体について，まずコンカルビットのみによる溝切削実験を行って，切削時間 t_p (h)，切削断面積 S_p (m²)，切削速度 v_p (m/h)，切削土量 V_p (m³)，切削能力 Q_p (m³/h)および回転動力 P_p (Nm/h)を計測した．その後，同じ溝切削断面に沿って円盤型剥離破砕刃のみによる端面切削実験を行って，切削時間 t_E (h)，切削断面積 S_E (m²)，切削速度 v_E (m/h)，切削土量 V_E (m³)，切削能力 Q_E (m³/h)および回転動力 P_E (Nm/h)を計測した．これらの現場実験計測結果より次式の関係が成立する

$$Q_p = S_p v_p = \frac{S_p L}{t_p} \quad (4)$$

$$Q_E = S_E v_E = \frac{S_E L}{t_E} \quad (5)$$

上式より，全体の切削断面積は

$$S_p + S_E = \frac{Q_p t_p + Q_E t_E}{L} \quad (6)$$

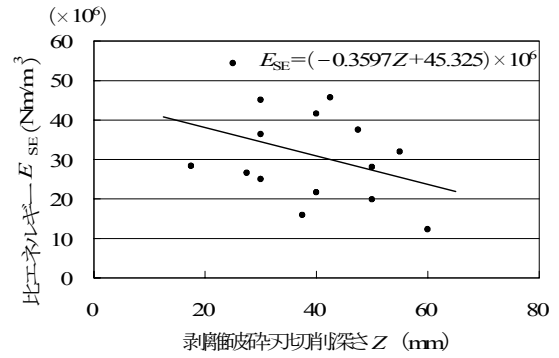


図7 円盤型剥離破砕刃の切削深さと比エネルギーの関係 (C溝)

となる。次に、同一の岩盤溝切削機でコニカルビットによる溝切削と円盤型剥離破碎刃による端面切削を同時に行った場合、溝切削および端面切削による切削断面積は、それぞれ $S_P(m^2)$ 、 $S_E(m^2)$ であり、回転動力を $P_T(Nm/h)$ 、切削速度を $v(m/h)$ とすると、

$$P_T = v(S_P E_{SP} + S_E E_{SE}) \quad (7)$$

$$v = \frac{P_T}{S_P E_{SP} + S_E E_{SE}} \quad (8)$$

として与えられる。ここに、 E_{SP} 、 E_{SE} は、それぞれ溝切削および端面切削における比エネルギーである。

従って、この場合の切削能力 $Q_T(m^3/h)$ は、次式のように誘導することができる。

$$\begin{aligned} Q_T &= v(S_P + S_E) \\ &= \frac{P_T(S_P + S_E)}{S_P E_{SP} + S_E E_{SE}} \\ &= \frac{P_T(Q_P t_P + Q_E t_E)/L}{(Q_P t_P E_{SP} + Q_E t_E E_{SE})/L} \\ &= \frac{P_T(V_P + V_E)}{P_P t_P + P_E t_E} \end{aligned} \quad (9)$$

まず、一例として、コニカルビットによる溝切削を C 溝において実施した結果について述べる。C 溝の切削延長 L は 18.0 m であり、切削時間 t_P は 830 秒 (=13.8 min=0.231 h) と与えられたので平均切削速度 v_P は 1.30 m/min となった。切削完了後 1 m ピッチで切削断面積を計測した。切削断面積の平均値 S_{PM} は 19,600 mm² であったので、切削土量 V_P は $L \times S_{PM} = 0.353 m^3$ と算定することができる。従って、溝切削による切削能力 Q_P は前式 (1) より 1.53 m³/h となり、回転動力 P_P は前式 (2) より $177.0 \times 10^6 Nm/h$ となる。

次に、溝切削完了後同一の切削レーン C 溝に沿って円盤型剥離破碎刃のみによる切削実験を実施した場合の切削時間、切削断面より得られる切削速度、切削土量と切削能力について算定する。平均切削速度 v_E は、切削延長 $L=18.0 m$ を切削時間 $t_E=348$ 秒 (=5.8 min=0.097 h) で除することによって 3.10 m/min と与えられた。同様に切削完了後 1 m ピッチで切削断面積を計測した結果、円盤型剥離破碎刃のみによる切削断面積の平均値 S_{EM} は 13,300 mm² であったので、切削土量 V_E は $L \times S_{EM} = 0.240 m^3$ と算定することができる。従って、端面切削による切削能力 Q_E は前式 (1) より 2.48 m³/h となり、回転動力 P_E は前式 (2) より $62.5 \times 10^6 Nm/h$ となる。

本現場実験において、同一の岩盤溝切削機でコニカルビットによる溝切削と円盤型剥離破碎刃による端面切削を同時に行った場合、回転動力を $P_T = P_P + P_E = 239.5 \times 10^6 (Nm/h)$ とし、上述した計測値を用いて、切削能力 Q_T は上式 (9) より 3.03 m³/h となり、従来のコニカルビットのみによる切削能力 $Q = 1.53 m^3/h$ と比較して 1.98 倍大きくなっている。また、切削速度 v は上式 (8) より 1.53 m/min と算定することができる。

しかし、前述したように、多くの場合、円盤型剥離破碎刃での端面切削時に計画通りの理論上の深さでは切削できなかった。そのため、当該切削実験を実施した場合の切削速度と切削深さの関係、および切削断面積と切削深さの関係より、コニカルビットと円盤型剥離破碎刃の段差で与えられる理論上の切削深さで切削したときの切削時間、切削土量と切削能力について評価する。今、地表面から溝底までの距離の平均値を D_m とする。円盤型剥離破碎刃の理論上の切削深さ Z_T は、前図 3 に示すよう

に溝底より 80 mm 上方の位置にあるので

$$Z_T = D_m - 80 \quad (10)$$

で与えられる。前述の C 溝を円盤型剥離破碎刃のみによって切削したとき、各測点における切削速度 v_E (m/min) と当該円盤型剥離破碎刃の地表面からの切削深さ Z (mm) との関係を整理すると図 8 で表現することができる。次式に示す両者の関係式より、切削深さの増加とともに負荷が増大し、切削速度は減少するようである。

$$v_E = -0.0224Z + 4.031 \quad (r = 0.385) \quad (11)$$

ここに、 r は相関係数である。

この場合、 $D_m = 137$ mm であったので、(5) 式より、 $Z_T = 57$ mm となり、(6) 式に代入すると、理論上の切削深さでの切削速度 v_{ET} は 2.75 m/min と算定される。

図 9 は、この場合の円盤型剥離破碎刃のみによる切削断面積 S_E (mm²) と切削深さ Z (mm) との関係を実測値に基づいて整理したものである。回帰分析した結果、次式が得られた。

$$S_E = 301.1Z \quad (r = 0.846) \quad (12)$$

上式に $Z_T = 57$ mm を代入すると、理論上の切削深さでの切削断面積 S_{ET} は 17,163 mm² と算定される。従って、円盤型剥離破碎刃のみが理論上の切削深さで当該岩盤を切削しているときの切削速度は $v_{ET} = 2.75$ m/min であるので、円盤型剥離破碎刃のみによる切削能力 Q'_E は $v_{ET} S_{ET} = 2.83$ m³/h となり、回転動力 P'_E は 71.3×10^6 Nm/h と算定される。C 溝の切削延長 L は 18.0 m であるので、円盤型剥離破碎刃のみによる端面切削時の切削土量 V'_E は、 $V'_E = S_{ET} L = 0.309$ (m³) と算定される。また、切削時間 t'_E は、 $t'_E = L/v_{ET} = 393$ (s) (=6.55 min=0.109 h) で与えられる。

本現場実験において、前図 2 に示すコンカルビットと円盤型剥離破碎刃を配設した切削ドラムを搭載した岩盤溝切削機の C 溝における切削能力 Q'_T は、回転動力を $P_T = P_p + P'_E = 248.3 \times 10^6$ (Nm/h) とし、次式で算定することができる。

$$Q'_T = \frac{P'_T (V_p + V'_E)}{P_p t_p + P'_E t'_E} \quad (13)$$

上式に所定の計測値を代入すると、 $Q'_T = 3.38$ m³/h となる。

なお、この場合の切削速度 v' は次式で算定することができる。

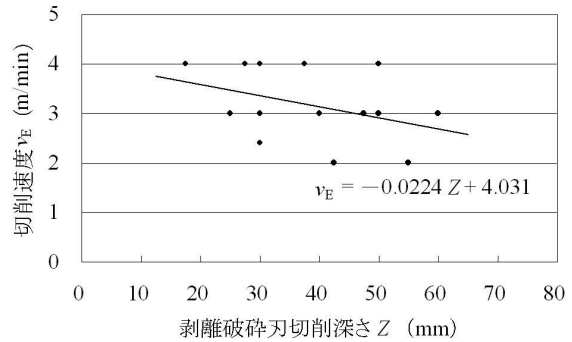


図 8 円盤型剥離破碎刃の切削速度と切削深さの関係 (C 溝)

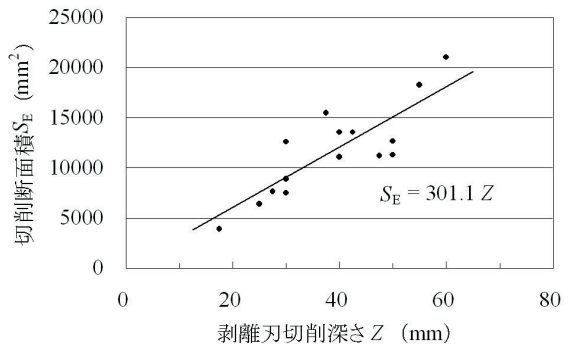


図 9 円盤型剥離破碎刃の切削断面積と切削深さの関係 (C 溝)

$$v' = \frac{P_T'}{S_p E_{SP} + S_E' E_{SE}} \quad (14)$$

ここで、円盤型剥離破砕刃による端面切削における比エネルギー E_{SE} は、前式 (3) に示すように、切削深さ Z の増加とともに減少する傾向がある。前述したように、理論上の切削深さ Z_T は 57 mm であるので、対応する比エネルギー E_{SE}' は、 $24.8 \times 10^6 \text{ Nm/m}^3$ である。従って、上述の計測値を代入すると、切削速度 v' は 1.54 m/min と算定される。

図 10 は、当該現場で測定したコンカルビットによる溝切削を行った場合の切削能力：溝切削 Q 、コンカルビットによる溝切削と円盤型剥離破砕刃による端面切削を行った場合の切削能力：溝切削+端面切削（推定値） Q_T 、およびコンカルビットと円盤型剥離破砕刃を配設した切削ドラムを搭載した岩盤溝切削機を使用するとした場合の切削能力：溝切削+端面切削（評価値） Q_T' をそれぞれC溝において比較したものである。図より明らかに、コンカルビットと円盤型剥離破砕刃を合体させた場合の切削能力：溝切削+端面切削（評価値） Q_T' は、従来のコンカルビットによる切削能力：溝切削 Q と比較して2.21倍大きくなっている。

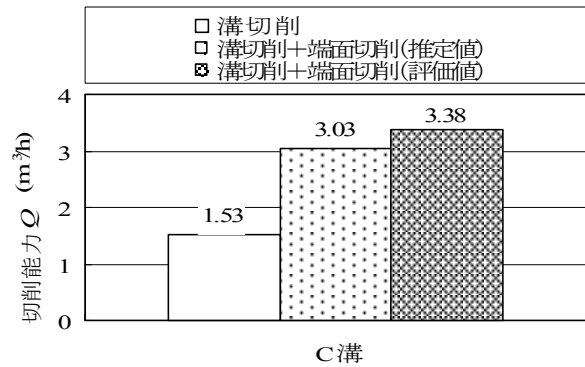


図 10 コンカルビットによる溝切削能力 Q 、および円盤型剥離破砕刃による端面切削を組合わせた溝切削+端面切削の切削能力の推定値 Q_T と評価値 Q_T' の比較

4.2 比エネルギー

本現場実験において、仮にコンカルビットによる溝切削と円盤型剥離破砕刃による端面切削が同時に作用したとする場合、すなわち溝切削+端面切削（推定値）における比エネルギー E_{ST} (Nm/m^3)は前式 (1) および (9) より、

$$\begin{aligned} E_{ST} &= \frac{P_T}{Q_T} \\ &= \frac{P_p t_p + P_E t_E}{V_p + V_E} \\ &= \frac{P_p t_p + P_E t_E}{Q_p t_p + Q_E t_E} \end{aligned} \quad (15)$$

として算定することができる。ここに、
ここに、

- t_p : コンカルビットによる溝切削時間 (h)
- t_E : 円盤型剥離破砕刃による端面切削時間(h)
- P_p : コンカルビットによる溝切削時の切削ドラム回転動力(Nm/h)
- P_E : 円盤型剥離破砕刃による端面切削時の切削ドラム回転動力(Nm/h)
- Q_p : コンカルビットによる溝切削時の切削能力(m^3/h)
- Q_E : 円盤型剥離破砕刃による端面切削時の切削能力(m^3/h)

である。

C溝における比エネルギー E_{ST} は、上式に所定の現場計測値を代入して $79.0 \times 10^6 \text{ Nm/m}^3$ と算定される。この値は本現場のA溝、B溝およびC溝におけるコニカルビットによる溝切削の平均比エネルギー $(97.8 \pm 43.1) \times 10^6 \text{ Nm/m}^3$ に対して1/1.24倍となる。

なお、本現場実験において、コニカルビットと円盤型剥離破砕刃を配設した切削ドラムを搭載した岩盤溝切削機によって、理論上の深さで切削可能とした場合の比エネルギー E_{ST}' は、次式によって算定することができる。

$$E_{ST}' = \frac{P_P t_P + P_E' t_E'}{Q_P t_P + Q_E t_E} \quad (16)$$

ここに、

t_E' : 円盤型剥離破砕刃による理論上の深さで端面切削を行った場合の切削時間(h)

P_E' : 円盤型剥離破砕刃による理論上の深さで端面切削を行った場合の切削ドラムの回転動力(Nm/h)

Q_E' : 円盤型剥離破砕刃による理論上の深さで端面切削を行った場合の切削能力(m^3/h)

である。従って、C溝における比エネルギーの評価値 E_{ST}' は、上式に所定の現場計測値を代入して、 $73.5 \times 10^6 \text{ Nm/m}^3$ と算定される。この値は、本現場におけるコニカルビットによる溝切削の平均比エネルギー $(97.8 \pm 43.1) \times 10^6 \text{ Nm/m}^3$ に対して1/1.33倍となっている。これは、溝切削と端面切削を同時に行った場合は溝切削単独と比較して切削効率が良いことを意味し、先端溝切削部にコニカルビットを装着すればより効率的に切削できることを意味している。

最後に、各切削方式についてビット種別毎に、コニカルビットを使用して溝切削を行った場合を1として、切削能力と比エネルギーの比率をまとめて表2に示す。

表2 コニカルビットによる溝切削に対する切削能力と比エネルギーの比率

切削方式	ビット種類	切削能力の比率	比エネルギーの比率
溝切削	コニカルビット	1	1
端面切削	円盤型剥離破砕刃	1.16 ~ 1.62	1/4.6 ~ 1/8.9
溝切削+端面切削	コニカルビット+円盤型剥離破砕刃 (推定値)	1.98	1/1.24
	コニカルビット+円盤型剥離破砕刃 (評価値)	2.21	1/1.33

5. まとめ

円盤型剥離破砕刃による岩石の端面掘削方式を使用して、岩盤溝切削機の切削能力の向上、比エネルギーの減少により、その作業能力を向上させるために、自重490 kNの岩盤溝切削機による現場実験を一軸圧縮強度 27.8 kN/cm^2 からなる岩盤を対象として実施し、その切削力、切削速度および作業能力について検討した。以下に得られた新しい知見を記す。

- (1) 岩盤におけるコニカルビットによる溝切削実験では、切削能力は $1.80 \pm 0.24 \text{ m}^3/\text{h}$ 、比エネルギーは $(97.8 \pm 43.1) \times 10^6 \text{ Nm/m}^3$ であった。これに対して、円盤型剥離破砕刃による端面切削はコニカルビットによる溝切削と比較して、切削能力、比エネルギー共に優れていた。すなわち、コニカルビットによる溝切削における切削能力および比エネルギーを共に1とすると、円盤型剥離破砕刃による端面切削の切削能力は1.16~1.62倍、比エネルギーは1/4.6~1/8.9倍となることが明らかとなった。
- (2) コニカルビットによる溝切削と円盤型剥離破砕刃による端面切削を同時に行った場合の切削能力はコニカルビットによる溝切削と比較して1.98倍、比エネルギーは1/1.24倍であり、両者を合体

させた場合の切削能力は 2.21 倍，比エネルギーは 1/1.33 倍と評価された。

- (3) 自重 490 kN の岩盤溝切削機に 5 列 24 本のコニカルビットとその両側に配置した各 3 個，計 6 個の円盤型剥離破砕刃を直径 140 cm の切削ドラムに配設し，岩石の一軸圧縮強度 27.8 kN/cm² からなる岩盤を対象として，その切削力，切削速度および作業能力について検討した結果，従来のコニカルビットによる溝切削機と比較して，切削能力は 121% 向上し，比エネルギーは 1/1.33 以下となり，高い作業効率を達成することができた。

謝辞：本報告は（独）科学技術振興機構平成 15 年度研究成果最適移転事業－成果プログラム－プログラム B：独創モデル化の支援を受けたものであることを記して謝意を表すとともに愛媛大学大学院元学生戒田幸子氏に実験等の御協力をいただいたことに感謝する。

6. 引用文献

- [1] 竹垣喜勝，古川忠彦，丸山健一：低騒音・低振動岩盤切削工法－大型岩盤切削機 3500M サーフェスマイナーの大規模岩盤掘削工事への適用－，建設機械，420，Vol.36，No.2，pp.46-50，2002.
- [2] 室達朗，竹垣喜勝，石川哲也：ポイントアタックビットによるモルタル供試体の衝撃切削能力に関する実験的考察，土木学会論文集，No.560/VI-34，pp.131-140，1997.
- [3] 室達朗，竹垣喜勝，丸山健一，藤元英樹：岩盤切削機の掘削能力とビット摩耗の寿命予測，土木学会論文集，No.492/VI-23，pp.127-136，1994.
- [4] 室達朗：層理岩盤に対するリップング作業時の掘削力特性，土木学会論文集，No.373/VI-5，pp.84-92，1986.
- [5] 室達朗：不連続性岩盤に対する機械化掘削性能の向上，土木学会論文集，No.376/III-6，pp.191-199，1986.
- [6] 古川忠彦：特願 2000-67584－岩盤の切削工法とその工法に用いる溝切削機，平成 12 年.
- [7] 室達朗：岩盤掘削・穿孔作業の合理化方策について，建設機械，464，Vol.39，No.10，pp.1-4，平成 15 年.
- [8] 室達朗，土屋清，河野幸一，若林優輔：ディスクカッタビットによるモルタル端面の定常掘削特性に関する実験的考察，土木学会論文集，No.687/III-56，pp.37-47，2001.
- [9] T.Muro and D.T.Tran：Edge excavation property of a disc cutter bit in new tunnel boring machine, *Today and Tomorrow of the Science and Technology Exchange between Ehime University - Japan and Ecole Central de Nantes - France, Proceeding of the 2nd EU-ECN Joint Seminar 2001*, Matsuyama, Japan, pp.183-190, 2002.
- [10] 室達朗，作原陽一，藤原一博，河野幸一：円盤型剥離破砕刃を用いた効率的な硬質岩盤溝切削機的设计開発，土木学会論文集，No.784，VI-66，pp.77-85，2005. 3.
- [11] S.Hata, T.Muro and Y.Kaneko：Estimation of life of rippertip due to wear, *Proc. of JSCE*, No.268, pp.119-127, 1977.
- [12] R.A.Snowdon, M.D.Ryley and J.Temporal, A study of disc cutting in selected British rocks, *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 19, pp.107-121, 1982.