—第94回渡辺賞受賞—
**岩盤切削機の石灰岩採掘現場への
 導入とその効果***

岡 本 泰 彦¹ 川 畑 雅 樹²
 正 代 知 幸³ 辻 本 康 平⁴

**Introduction of Rock Cutting Machine “2500SM” into
 Limestone Mining Site and Its Effect**

by Yasuhiko OKAMOTO^a, Masaki KAWAHATA^b,
 Tomoyuki SHOUDAI^c and Kouhei TSUJIMOTO^c

- a. OKUMURA Engineering Corporation. 1-11-18, Misaki, Minato-ku, Osaka-shi, Osaka, 552-0016, Japan (Corresponding author, E-mail: y.okamoto@okumuradbk.co.jp)
 b. OKUMURA Engineering Corporation. 6-1-3, Benten, Minato-ku, Osaka-shi, Osaka, 552-0007, Japan
 c. UBE Industries, LTD. 4768, Isa, Isa-cho, Mine-shi, Yamaguchi, 759-2222, Japan

Ube Industries' Isa Cement Factory introduced a rock cutting machine “2500SM” capable of continuous excavation by rotating a drum equipped with a cemented carbide bit from the viewpoint of effective recovery of limestone resources. Because it can excavate with low vibration and low noise, it can reduce the distance from the surrounding private houses that have been secured in consideration of the effect of blasting, and in order not to loosen the excavated surface, the bench angle of the excavated surface is steeply inclined and berm is minimized. It was because it was judged that the minable amount could be expanded by minimizing the berm.

In the early stages of the introduction, cutting bits were broken unexpectedly, and the frequency of replacement increased, resulting in a decrease in mining efficiency. In addition, the excavation slope using a rock cutting machine “2500SM” has a smoother surface and no large cracks. In addition, in the evaluation using methods of elastic wave exploration, ground penetrating radar and infrared camera, the slope of excavation is compared with that by blasting. It was confirmed that the soundness was high.

The effects of cutting bit improvements was evaluated, the expected excavation area, the soundness and safety of the rock slope, and the expansion of the minable amount that were expected when the rock cutting machine “2500SM” was introduced. In this paper, we report the evaluation results.

KEY WORDS: Rock Cutting Machine, 2500SM, Final Rock Slope, Minable Amount, Low Noise and Vibration, Proximity Construction

1. はじめに

石灰石鉱山での採掘作業は発破工法によるのが一般的である。宇部伊佐鉱山では、周辺に多数の民家が存在するという制約から、民家に近い上部切羽の採掘が遅れ、下部の主力採掘切羽が狭小になるという問題が顕在化しつつある。このことは長期的には鉱山全体の可採鉱量の減少に繋がるため、有効な対策を模索していた。

また、鉱山における残壁については、長期に渡る安定性が求められる。通常行われる階段掘削では、発破孔を段の高さよりも長く削孔し、法尻の下部まで破砕することで小段を平坦に仕上げやすくしている。この方法では、法面・法肩部に浮き石を生じさせ

やすく、落石の危険性がある。とくに最終残壁では、法面保安のためにモルタル吹付けや落石防護ネットの設置、法面変位の監視などが必要となってくるが、費用と手間の負担が大きく、全ての残壁に対して実施することは困難である。

こうした課題の解決策として、当鉱山では、石灰石鉱山の最終残壁の造成としては国内初となる、岩盤切削機を採用することとした。このため法面近傍での掘削を実施し、岩盤切削機の掘削能力や環境影響の評価、岩盤特性に合わせた切削ビットの改良、発破と機械掘削による残壁に対する健全性の比較と評価を行った。

2. 岩盤切削工法

2・1 工法の選定

民家に近接している箇所での騒音、振動、粉塵などの環境負荷が小さいこと、掘削能力が大きくトン当たりのコストができるだけ低く抑えられること、健全な残壁が形成できることなどを要件として検討した結果、岩盤切削工法を選定した。

これまでは割岩機を導入し、特に端縁部の掘削を行っていたが、露頭状態の岩石を破砕するのには適しているものの、本来の目的

*2020年1月27日受付 2020年6月4日受理 2020年9月「資源・素材2020(仙台)」(オンライン開催)にて講演予定

1. 正会員 奥村組土木興業株式会社 環境開発本部 技術部 技術マネジャー
 2. 奥村組土木興業株式会社 環境開発本部 特殊工事課長
 3. 宇部興産株式会社 建設資材カンパニー 生産・技術本部 鉱業部長
 4. 宇部興産株式会社 建設資材カンパニー 生産・技術本部 鉱業部 資源グループ

[著者連絡先] E-mail: y.okamoto@okumuradbk.co.jp

キーワード: 岩盤切削機, 2500SM, 残壁の安全性, 採鉱量の増加, 低騒音・低振動, 近接施工

Fig.1 Structure diagram of rock cutting machine "2500SM".

Fig.2 Work situation.

Fig.3 Drilling rotary drum and bit enlarged view.

Table 1 Specifications of rock cutting machine "2500SM".

Classification	Specification	
Size	Length/Width/Height	12.9 m / 3.71 m / 4.09 m
Gross Weight	When working	133 t
Cutting drum	Cutting width / maximum cutting depth	2.50 m / 0.35 m
	Diameter / Number of bits	1.4 m / 114 pieces
	Drum rotation speed	47 rpm
Engine	Name	Cummins QST30-1200 ps
	Displacement	30,500 cc
	Rated output	1,217 ps / 2,100 rpm
	Fuel tank capacity	2,750 liter
Driving performance	Work speed	0 ~ 25 m / min
	Running speed	0 ~ 3.9 km / h
	Uphill ability	20degrees (36%)
	Minimum turning radius	15 m

である民家に近い箇所を採掘するには掘削能力が低く、効果を発揮できなかった。ツインヘッドについても検討したが、騒音や粉塵の問題から適用は困難だと判断した。

2・2 岩盤切削機

岩盤切削機¹⁾ (2500SM : Surface Miner: ドラム幅 2500 mm) は、ビットを螺旋状に取り付けた掘削用回転ドラムを胴体中央部に配置し、切削機の自重を反力にして、切削ドラムをすくい上げるように回転させて (アップカット) 連続的に岩盤を掘削するものである (Fig. 1)。Fig. 2 に作業状況, Fig. 3 に掘削用回転ドラムおよび切削ビットを示す。仕様は Table 1 に示す

岩盤切削機的主要な特長は以下の 4 つである。

(1) 掘削能力が大きい 軟岩から硬岩領域までの掘削が可能である。岩盤等級ごとの掘削能力は、中硬岩 (地山弾性波速度: 2.0 ~ 2.9 km/sec) の場合 200 ~ 250 m³/日、硬岩 (地山弾性波速度: 2.9 ~ 4.2 km/sec) の場合 50 ~ 100 m³/日である。当該箇所の石灰石は、軟岩～中硬岩に該当する。

(2) 環境への影響が小さい 掘削時の騒音、振動が小さいため

民家に接近して作業ができる。また、ドラム部における散水 (毎分 50 l)、搭載している集塵機などによる粉塵の飛散防止が可能である。

(3) 岩砕の最大粒径が 100 ~ 150 mm 以下になる 岩砕の最大粒径は 100 ~ 150 mm 以下となるため、そのまま路床材として使用できる。また、ビットの本数や配置を変えることで最大粒径をコントロールすることも可能である。

(4) 掘削面の仕上がり精度が高く、平坦性が良い オペレータがレーザーレベル計のデータを確認しながら掘削深さや縦断勾配をコントロールするため、仕上がり面の高さ精度は設計値の±3 cm 以内となる。掘削面が平坦となり、現場の安全性が向上する。

3. 導入実績

3・1 掘削作業および掘削実績

2012 年度に岩盤切削機を導入した丸山鉱区 (Fig. 4) は、民家に近接している鉱区であり、最も近い箇所では 150 m 程度²⁾であった。そのため、発破規模を縮小することになり、採掘の遅れの回

Fig.4 Status of Ube Isa Mine.

Fig.5 Work cycle.

Fig.6 Slope after drilling (average gradient 60 degrees).

Table 2 Drilling results.

Year	Working days	Drilling amount (m ³ / t)	Number of bits	Bit usage (Number / t)	Number of breakage	Breakage ratio (%)
2012	120	15,162 / about 41,000	1,954	0.05	1,163	59.5
2013	112	14,461 / about 39,000	1,826	0.05	1,394	76.3
2014	110	16,585 / about 45,000	1,658	0.04	2	0.12
2015	167	19,531 / about 53,000	3,309	0.06	218	6.59
2016	211	19,794 / about 53,000	1,178	0.02	112	9.50
2017	210	22,828 / about 62,000	1,364	0.02	54	3.96
2018	185	21,152 / about 57,000	1,217	0.02	39	3.20

Table 3 Example of cycle time.

Work type	Idling	Drilling	Running	Inspection of bit	Break	Other	Total	Drilling amount	
								Daily drilling	Net drilling capacity
Time (h)	0.139	5.5	0.664	0.856	1.15	0.64	8.949	570 t / day	110 t / hour
%	1.55	61.46	7.42	9.57	12.85	7.15	100		

復が懸案であった。

Fig. 2 に示す岩盤切削機で掘削した岩石の集積、積込、運搬にはブルドーザ、バックホウ、ダンプトラックを使用する。Fig. 5 に作業サイクルを示す。掘削レーンの幅は 2.5 m である。1 レーン（長さは平均 100 m 程度）の採掘が終了したら後進走行し、隣のレーンに移って掘削を繰り返す。1 レーンの採掘サイクルの中でビットの点検・交換作業を行う。

3・2 掘削後の法面や基面の状況

掘削後の法面の状況を Fig. 6 に示す。階段状のきれいな掘削法面となっている。落石の心配がないので緩傾斜にする必要がなく、小段も最小幅で良い。掘削後の基面も平滑で、碎石を敷かなくても運搬道路として使用できる。

3・3 掘削能力

岩盤切削機による掘削を開始した 2012 年度からの掘削量を Table 2 に示す。掘削のサイクルタイム計測結果を Table 3 に示す。

Fig.7 Fig. Drilled rock conditions (same scale on left and right).

移動時間、ビット点検時間などを除いて掘削能力を算出すると、概ね 100 ~ 150 t/時間であった。移動時間、ビット交換時間などを考慮すると、掘削作業時間は約 5 時間/日であり、1 日あたりの掘削量は 500 ~ 750 t/日である。割岩機での掘削量が約 100 t/日であるから、それに比べると掘削能力は非常に高い。掘削能力に幅があるのは、岩盤の硬さや亀裂の影響である。表層部分は過去の発破 (1 ベンチ上のサブドリル部) の影響を受けて亀裂が多く、強度も低下しているが、深くなるにつれて固い石灰石の岩盤となる。Fig. 7 に示す掘削岩の状況を見ると、表層付近では粒度が比較的大きく、球形に近いものが多いのに対し、掘削深度が深くなり岩盤が固くなるとチップ状になって細粒化しており、上記のような岩盤の状態を反映した結果となっている。

3・4 騒音、振動、粉塵などの環境影響³⁾

掘削中の騒音・振動はともに低い値で³⁾、環境への影響は非常に小さい。特に振動値は、30 m 離れると 30 dB 程度となるため、民家に接近して掘削することも可能である。騒音については、30 m 離れると 78.2 dB となる。参考値であるが、小割機は 83 dB であった。また、粉塵に関しても、切削機本体に搭載しているバグフィルターによる濾過および掘削ドラムへの散水により、粉じんの発生を抑えている⁴⁾。掘削中の様子を示した Fig. 2 でも、粉塵の発生はみられない。

3・5 消耗品 (切削ビット)

コストに最も影響の大きい消耗品は切削ビットである。Table 2 に過去 7 年間のビット消費量 (交換本数/掘削土量) を示す。消費量は岩石中の鉱物や亀裂の状況などによって変動するが、7 年間の平均値は 0.04 本/t 程度であり、年度毎の変動幅は小さい。当鉱山での掘削開始当初はビットの折損が多発し、掘削岩に紛れ込んだビットの探索や交換作業に時間を要したことが掘削能力の低下の原因となっていたため、対策が必要であった。

4. 切削ビットの改良⁵⁾

岩盤切削機での掘削作業を行う過程で、石灰石の掘削作業には何ら問題ないことが確認できた。しかしながら前項で述べたように、ビットの折損が頻発した。

4・1 問題点

掘削岩を 1 次クラッシャーに投入するため、折損したビットが混入していると製品のコンタミや破砕設備の損傷などが発生する懸念があった。また、破損品の探索、ビット交換作業、アイドリングタイムの確保などによる掘削時間の減少といった問題も発生する。

4・2 ビット折損のメカニズム

通常は Fig. 8 に示すように、軸対象の磨耗が進行し (ビットが回転することによるセルフシャープニングの効果)、限界に至った時点でビットの交換を行う。しかしながら当鉱山での掘削作業においては、Fig. 9 に示すように、超硬チップが磨耗限界に至る

Fig.8 Bit standard wear process.

Fig.9 Bit breakage.

Fig.10 Bit breakage mechanism.

前にシャンクの部分が折損する事例が頻発した。

Fig. 10 に示すように、ビットには、岩盤からの反力として、切削面に沿った抵抗力 F と切削面に垂直な反力 R が作用する。石灰岩は粘り強い材料、 F の値が大きくなってビット軸に対して垂直に作用する荷重が増加したことが原因ではないかと考えている。折損したビットの大半は、卓越した磨耗面と破断面が Fig. 9 のような位置関係となっている。

4・3 各種ビットのテスト

ビット折損のメカニズムを考慮し、シャンクの硬度および径の

Table 4 List of used bits.

	Name	Bit diameter	Tip diameter	Shank hardness
Standard bit	WSM-25	38mm	25mm	HRC44-48
Hardness change	WSM-25 (Hardness change)	38mm	25mm	HRC38-42
Bit A	WSM1-17-77/42LR	42mm	17mm	HRC44-48
Bit B	WSM1-22-77/42LR	42mm	22mm	HRC44-48

Table 5 Test 2 result.

Used bits	Shank diameter / Tip diameter	Daily drilling (day)	Total drilling amount (m ³)	Drilling amount (m ³ / day)	Number of wear		Number of breakage
					All	Per 1 m ³	
Standard bit WSM-25	38 mm / 25 mm	11	1,454	132	154	0.106	133
Bit A WSM1-17-77/42LR	42 mm / 17 mm	11	1.888	172	232	0.123	1

Table 6 Test 3 result.

Used bits	Shank diameter / Tip diameter	Daily drilling (day)	Total drilling amount (m ³)	Drilling amount (m ³ /day)	Number of wear (number)		Number of breakage (number)
					All	Per 1m ³	
Bit A WSM1- 17-77/42LR	42mm/17mm	26	3,808	146	453	0.119	0
Bit B WSM- 22-77/42LR	42mm/22mm	31	5,339	172	214	0.04	1

変更の2つの観点から折損防止対策を検討した。その過程でビットを試作し、掘削を行って折損や掘削の状況を確認した。なお、岩盤の状態によって掘削条件が大きく変わるため、期間を定め、同一条件となるよう配慮して比較を行った。以下に、試作したビットの概要と掘削テストの結果を示す。Table 4 にテストに使用したビット仕様の一覧を示す。

(1) テスト1 (硬度の変更) 掘削開始当初に使用していた標準ビットは、想定した石灰石の圧縮強度から、シャンク硬度がHRC44-48のものを使用していたが、硬度は高いものの割れやすいという弱点があった。そこでシャンク硬度をHRC38-42に下げて靱性を増すことにしたが、大きな改善は見られなかった。

(2) テスト2 (シャンク径の変更) シャンク硬度は変えずにシャンク径を38 mmから42 mmに変更したビットA (WSM1-17-77/42LR: ϕ 42 mm, チップ径 17 mm) を使用して掘削を行った。ビットAはシャンク断面積が標準ビットの約20%増となり、曲げ剛性(断面2次モーメント)が約50%増となっている。

同一箇所での標準ビットと比較した結果、Table 5 に示すようにビットの折損本数が、標準ビットの133本に対して、掘削の全重量が多いにも関わらずビットAでは1本のみとなり、第一の目的は達成できた。

(3) テスト3 (チップ径の変更) 次にビットの損耗低減を新たな課題とした。そこで、シャンク径42 mm, チップ径を22 mmとしたビットB (WSM-22-77/42LR; ϕ 42 mm) で掘削を行った。その結果をTable 6 に示す。掘削1 m³あたりのビット損耗本数について、ビットAを基準に標準ビットとビットBを比較すると、テスト2では、標準ビット/ビットA = 0.106/0.123 = 0.862, テスト3では、ビットB/ビットA = 0.040/0.119 = 0.336 となり、ビットBが標準ビットの40%程度(≒ 0.336/0.862)になることが分かった。したがって2015年9月以降はビットBを使用している。

Table 2 に稼働を開始した2012年から7年間のビット使用量および折損本数の推移を示す。ビット形状を変更した2014年以降

は折損比率(折損本数/ビット本数)が大幅に低下しており、作業効率の向上にも大きく寄与している。

5. 残壁の健全性評価⁶⁾

5・1 対象残壁の概要 健全性評価のために3つの残壁を選定した。岩盤切削機のみで掘削した箇所を残壁1とし、7年前にプレスブリッティングを行って造成した残壁の表面を、今回の調査のために岩盤切削機で再掘削した箇所を残壁2とした。残壁3は今年度にプレスブリッティングによって造成した箇所である。

また、Fig. 11 ~ Fig. 13 は測線沿いの断面図で、写真測量によって構築した3次元モデルを基に作成した。図中の番号は弾性波探査で用いた加速度センサーを設置した測点を示す。

5・2 計測項目 岩盤切削機を使って整形した残壁は平滑で、健全性が高いと考えられる。確証を得るため、発破により整形した残壁と比較し、掘削エネルギーが残壁に与える損傷の影響を調査した。調査方法は、地盤評価で用いられることが多い「屈折法による弾性波探査」、「地中レーダ」とし、さらに物質表面の温度を把握できる「赤外線カメラ」による撮影を行った。

(1) 屈折法による弾性波探査 岩盤内を伝搬するP波速度の違いを利用して、はざとり法により損傷域の深度分布を評価した。Fig. 14 (a) のような速度型の振動センサーを用い、地面と平行に約1 m間隔で、直径10 mm程度、深さ5 cm程度の孔を開け、粘土を充填した後、ピンを押し込んで振動センサー(速度型)を固定した。測定の様子をFig. 14 (b) に示す。

(2) 地中レーダ 400 MHz帯域のアンテナを使用して、損傷域と健全部の境界の検出を試みた。境界部でレーダ波が反射すれば画像として反射領域が表示できる。残壁に沿って測定が可能になるように装置を作成し、2名で測定を行った。残壁2での測定の様子をFig. 15 (a) に示す。残壁3では、表面形状が滑らかでないため、Fig. 15 (b) に示すように、アンテナを抱えながら測定した。

(3) 赤外線カメラ 赤外線カメラは対象物の表面から放射され

Fig.11 Rock slope 1 Final Rock slope with rock cutting machine.

Fig.12 Rock slope 2 The final Rock slope smoothed with a rock cutting machine after press pre-splitting.

Fig.13 Rock slope 3 Final Rock slope by pre-splitting.

Fig.14 Implementation status of elastic wave exploration by refraction method.

Fig.15 State of measurement.

る熱エネルギー量を検出するものである。対象物の表面状態（色、角度）によって熱の反射率が異なるため、対象物に対して正面・右・左と撮影角度を変えた。撮影のタイミングは、熱の供給の多い昼頃に撮影した。撮影担当者は1名である。

5・3 計測結果

5・3・1 屈折法による弾性波探査

(1) 計測波形 残壁1, 残壁2, 残壁3における弾性波計測波形は、Fig. 16～Fig. 18のようであった。各測線で往復の計測を実施し

Fig.16 Measurement waveform of rock slope1.

Fig.17 Measurement waveform of rock slope2.

Fig.18 Measurement waveform of rock slope3.

Fig.19 Travel time curve of rock slope1.

Fig.20 Travel time curve of rock slope2.

Fig.21 Travel time curve of rock slope3.

Fig.22 Depth distribution of rock slope2.

ているので、各側線で波形図が2枚ある。図中、▽印はP波初動の位置を示している。また、残壁ごとに測線長が異なり、測線長が長くなるほど振幅が小さくなって判別が難しくなるので、最大値で正規化して表示している。

残壁1では往路、復路ともに単純な波形であり、減衰も速やかである。また、P波の初動に続くS波と考えられる主要動が線状に並んでいる。これらの特徴は岩盤表面が傷んでいないことを示唆している。屈折波が現れていないので、明瞭な損傷域がないと判断できる。

残壁2の岩盤表面は残壁1と遜色のない良好な状況であった。しかし、波形は残壁1と比較して相当に乱れている。発破による損傷の影響が残っている可能性が高い。

残壁3の表面は発破の影響で凹凸が大きい。波形も残壁2以上に乱れていて周期も長い。このことは残壁2の場合よりも岩盤の損傷が深部にまで及んでいることを示唆している。

(2) 走時曲線 Fig. 19～Fig. 21に、P波が観測点に到達するまでの時間と、振源から観測点までの距離の関係を描いた走時曲線を、残壁1、残壁2、残壁3の順に表示した。

残壁1の往路は走時がほぼ直線分布となっており、損傷域が認められない。表面部の値を代表する直接波の速度は4.22 km/sである。

残壁2では、発振点から往路で7.5 m、復路で5 m付近に走時

の折れ曲がりがある。P波速度は1層目が2.88 km/s、2層目が5.43 km/sである。1層目は明瞭な損傷域で、はざとり法で分析した結果によれば、その厚さは0.85～2.0 m (平均1.74 m)である (Fig. 22)。残壁2では、残壁3と同じ条件の法面の表層部分を岩盤切削機で0.7～0.8 m程度掘削して平滑に仕上げているため、掘削前の損傷域の厚さは2.5 m程度 (平均)ということになる。2層目のP波速度は残壁1よりも速く、発破の影響はないと考えてよい。この値が健全部の代表値とすると、残壁1では、応力開放による緩みが生じている可能性がある。

残壁3では、同様に発振点から往路で5 m、復路で3 m付近に折れ曲がりがある。P波速度は1層目1.27 km/s、2層目3.28 km/sである。1層目は明瞭な損傷域で、厚さは0.3～1.0 m (平均0.71 m)である (Fig. 23)。2層目は、P波速度が残壁1・2の健全部 (4.22 km/s、5.43 km/s) と比べて1～2 km/s遅い。この層は発破の影響を受けた遷移領域であろう。表面には大きな凹凸があり、測定された波形は最も乱れており、周期も長い。岩盤自体の損傷範囲が広く、深部にまで影響が及んでいることが推測できる。

5・3・2 地中レーダ 残壁1～3の地中レーダ解析結果を Fig. 25～Fig. 27に示す。図の横軸は測点0からの距離を示す (残壁2では測点0+1 mから表示)。縦軸は深度を示す。残壁1および残壁2については、表面の起伏が小さいので、表面形状を直線とした。残壁3については、表面形状を

Fig.23 Depth distribution of rock slope3.

Fig.24 Surface condition on rock slope1.

Fig.25 Results of underground radar survey of rock slope1.

Fig.26 Results of underground radar survey of rock slope2.

Fig.27 Results of underground radar survey of rock slope3.

黄色い実線で表した。電磁波の振幅の大きさを、小さい方から【黒】→【赤】→【黄】→【白】で色分けした。色の明るい部分は反射が強く、黒い部分は反射がないことを表している。

(1) 残壁 1 測点 1 から近い距離の深部に、反射の大きくなる斜めの境界が判別できる。測点 0 付近を撮った Fig. 24 では、測点 0 のマイナス側に「はさみ」が確認できるが、この「はさみ」が測点 0、測点 1 の背面側へ回りこんでいるため、反射の大きな境界が現れたと推測している（点線で囲った範囲）。測点 0 からの距離が大きくなるにしたがって、表面近くでは黒い領域が広がり、深度が大きくなっても明確な反射面がみられない。深度とともに徐々に反射の大きい領域は現れるが、その境界は判別できない。これらのことは損傷域が存在していないことを示唆している。

(2) 残壁 2 Fig. 26 の点線で囲った範囲に示すように、表面近

くから反射する領域が散在している。中間地点の 2 m 以深で反射の大きな領域が確認できるため、ガマ（岩石や鉱脈の中に生成している空洞）が存在している可能性がある。弾性波探査による健全部と損傷域の境界（平均深さ 1.738 m）と、地中レーダによる反射面との一致は部分的であった。

(3) 残壁 3 表面近くでは幅約 1 m の黒い領域（反射面があまり見られない）が表面とほぼ並行して存在しており、この領域は一樣な物質とみなせる。破碎によって岩石密度が低下し、密度差が減少したことで反射特性が弱まった結果であると考えている。弾性波探査による損傷度の強い領域と遷移領域の境界（深さ 0.713 m）と、地中レーダによる反射面（黄線からの深さ 0.8 m）が比較的良好に一致した。

プレスブリッティング工法 (Fig. 28) は、主発破部より先に外

Fig.28 Pre-splitting method.

周孔を発破して外周面にき裂を発生させ、主発破による影響を残壁から隔離するものである。近接する自由面に対して平行なき裂を生じさせるが、発破の影響が残壁深部にまで及ぶ可能性がある。

5・3・3 赤外線カメラ 法面の表層部分に亀裂や空洞があると断熱層として機能し、外部から供給される熱が遮断されて温度が高くなる。表層付近の含水比によっても温度分布は異なってくる。物体から放射する赤外線を検知する赤外線カメラを使えば、温度差が可視化できる。

発破面と機械掘削面を遠距離から同時に撮影し、表面温度分布を比較した (Fig. 29)。近接撮影と遠距離撮影を比較した場合、後者の方が、温度の局所的な違いが平準化されていて、全体的な表面温度の違いをより明瞭に判別できた。温度の高い方から、[白]→[赤]→[黄]→[緑]→[青]→[紫]で色分けした。

(1) 残壁 1 Fig. 30 に残壁 1 の赤外線カメラによる画像を示す。局所的な温度の高まりなどは見られず、全体的に温度変化は小さい。残壁表面で見られるき裂位置では温度が低くなっているが、き裂内に存在している水の気化熱による温度低下が原因である可能性が高い。赤外線カメラによる評価では、空洞は見つかっておらず、健全性は高いと考えている。

(2) 残壁 2 Fig. 31 に残壁 2 の赤外線カメラによる画像を示す。温度の高い領域 (図中、黒点線枠) が散在している。掘削跡が明瞭な範囲の温度分布は残壁 1 と類似している。近接目視の結果、

Fig.29 Example of comparison between blasting surface and machine drilling surface by long-distance photography.

Fig.30 Infrared image of rock slope1 (top: real image, bottom: temperature distribution by infrared).

Fig.31 Infrared image of rock slope2 (top: real image, bottom: temperature distribution by infrared).

Fig.32 Infrared image of rock slope3 (top: real image, bottom: temperature distribution by infrared).

Table 7 Summary of results.

Slope	Slope history	Slope situation
1	Machine drilling	No damage area is seen.
2	Machine drilling 7 years after pre-splitting	Average thickness of the current damage area is about 1.7 m. Thickness of the damage area after pre-splitting is assumed to be about 2.5m. Elastic wave velocity in the damage area is 2.88 km / s. Elastic wave velocity of the healthy part is 5.43 km / s. Speed ratio (damage area/healthy part) is 53%.
3	Pre-splitting	Average thickness of the damage area (high damage level) is about 0.7 m. Elastic wave velocity in the damage area is 1.27 km / s. Elastic wave velocity in the transition region is 3.28 km / s. Speed ratio (damage area/transition area) is 40%.

高温領域では、表面の凹凸の向きによって反射熱量に差があること、粘土層などの脆弱層が存在していることが確認できた。全体的には残壁の健全性は高いと考えている。

(3) 残壁3 Fig. 32に残壁3の赤外線カメラによる画像を示す。表面の起伏が大きく、それに合わせて温度変化も大きなものとなっており、残壁1、残壁2とは明らかに傾向が異なっている。現段階で、表面の起伏や気象条件による影響を完全に排除することは難しいが、今回のような複数の調査を繰り返すことで、評価の信頼性を高めることができると考えている。赤外線法は、広い範囲を効率的に調査できることに加え、その場で熱画像から異常個所の抽出ができるため、次段階の調査の必要性を判断したり、調査計画を作成したりするためのスクリーニングとして有用である。

5・3・4 総合評価

残壁1は、「測点0」に近い領域に「はさみ」が存在しているため、地中レーダの計測では傾斜した反射面が現れた。この領域の走時曲線は近似した直線からのばらつきが大きくなっている。これも「はさみ」の影響である可能性が高い。残壁2では、弾性波探査による健全部と損傷域の境界と、地中レーダによる反射面との一致は部分的であった。残壁3では、弾性波探査による損傷度の強い領域と遷移領域の境界が地中レーダによる反射面と比較的よく一致した。

残壁2と残壁3の結果から、プレスブリッティングによる掘削では表面から2.5m程度の範囲が損傷を受けていることが分かった。残壁2では、0.3～1mの範囲の損傷度合いが強く、発破直後は表面に数十cmの凹凸ができるため、水の浸透や凍結融解の影響を強く受ける。したがって、現在の状況は、経年変化によって当初よりも損傷領域が広がり、損傷度も進行している可能性がある。

Fig.33 Drilling shoulder with rock cutting machine.

これらの結果をまとめると Table 7 のようである。

6. ま と め

6・1 岩盤切削による機械掘削工法の評価

(1) 採掘領域の拡大 岩盤切削機による機械掘削工法を採用することで、これまで周辺民家に対する環境保全のために発破ができなかった箇所での採掘が可能になり、採掘限界ラインを最大で約10m民家側へ移動することができた。同時に、上・下部切羽の採掘バランスの改善への展望も開けてきた。

(2) 最終残壁の安全性向上 岩盤切削機で造成した掘削法面は非常に滑らかで安定したものとなっており、最終残壁の安全性が格段に向上している。また、岩盤切削機での掘削では、Fig. 33に示すように法肩の形状にも大きな乱れがない。発破による掘削では、前回発破のサブドリリング部の影響などにより法肩からの落石の危険性が常に付きまとうことを考えると、岩盤切削機は掘削法面の安全面での優位性が高い。

Fig.34 Final excavation concept.

(3) 可採鉱量の増加⁷⁾ Fig. 34 に終掘時の概念図を示す。岩盤切削機を導入することで、採掘限界ラインを民家側へ移動することや、最終残壁の平均傾斜をきつくすることが可能になり、可採鉱量の増加が期待できる。現状での最終残壁の平均傾斜は 50 度であるが、岩盤切削機を活用することで法面の安定性が向上するため、60 度程度に変更することが可能だと考えている。

当鉱山の採掘切羽はピット状を呈しているため、終掘レベルは最下部切羽での作業スペースが確保できるかどうかによって決まる。Fig. 34 に示すように、採掘限界ラインの移動および最終残壁の急傾斜化により、最下部切羽のスペースが拡大するため、終掘レベルを下げることも可能になる。それによる可採鉱量の増加は、丸山鉱区だけでも約 30 百万 t になる。鉱山の新規開発が環境保全面から困難となっている現状で、斜面崩落の危険性を減じつつ可採掘量を増やせることは、資源確保の観点からも効果が大きい。

(4) 運搬道路としての利用 岩盤切削機を導入した付帯効果として、掘削面が運搬道路として利用できることが挙げられる。Fig. 8 のように岩盤切削機での掘削面は平坦で強度の低下もないため、碎石などを敷かなくてもそのまま走行路になる。降雨などによる道路の痛みが少ないため、維持管理費用やダンプトラックの補修費用などの削減効果が期待できる。

6・2 残壁健全性から見た施工方法の評価 屈折法弾性波探査、地中レーダ、赤外線カメラによる結果を基に、残壁の健全性の違いから施工方法を評価した。プレスブリッティングによる残壁整形では、表面から最大 1 m 程度の深さまでは損傷を受けやすく、健全層に変わるのは 2.5 m 程度の深さからであることが分かった。

一方、岩盤切削機による残壁については、自然の空洞を除き、

き裂や緩みが少なく、健全性の高いことが分った。さらに掘削後の斜面が平滑になるため、雨水の浸透などによる劣化の進行も緩やかになる。発破と比較して、小さい破壊エネルギーで平滑な斜面を造ることができる岩盤切削機の優位性が明らかになった。

7. おわりに

調査した残壁は、施工後の経過期間が短いため、経年変化による劣化進展の有無や劣化速度などは不明である。数年後（例えば 5 年後、10 年後）に同様な調査を行って、残壁の健全性や岩盤切削機の有効性を更に詳しく調べるつもりである。また、岩種による損傷程度の違いについても調査を行って、岩盤切削機の特性をより明確にしたいと考えている。

謝辞 弾性波や地中レーダを使った掘削法面の調査にあたり、熊本大学の尾原 祐三 先生、吉永 徹 様、アールエステクノロジー株式会社の平田 篤夫 先生には多大なご指導を賜りました。厚くお礼申し上げます。

References

- 1) T.Shoudai, H.Ishida and M.Sankouda : "Introduction of rock cutting machine and its effect in Ube Isa mine" 75th Lime Mining Competition, (2016).
- 2) T.Shoudai, H.Ishida and M.Sankouda : "Introduction of rock cutting machine and its effect in Ube Isa mine" 75th Lime Mining Competition, (2016) .
- 3) Y.Takegaki, T.Furukawa and S.Kitamura: CIVIL ENGINEERING JOURNAL 42 (2) 2001, p.50-56.
- 4) K.Maruyama: Construction Machinery and Equipment, 47 (8) 2011, p.66-72
- 5) A.Fujimori, M.kawahata and K.Maruyama: Japana Society of Civil Engineers 2017 Annual Meeting [VI-513]
- 6) Y.Okamoto, H.Kuwamoto, T.Shoudai and K.Tsujimoto : Proc.MMIJ Annual Meeting (2018) , [1307-09-02].
- 7) T.Shoudai, H.Ishida and M.Sankouda : "Introduction of rock cutting machine and its effect in Ube Isa mine" 75th Lime Mining Competition, (2016).