Technical Report

絶壁端縁部の岩盤崩落抑止工と機械掘削処理*

藤野圭介¹Sudden Rock Fall Prevention Methods and Improved Machine Operations
for Excavation Above the Precipice at the Surface Quarry Operationby Keisuke FUJINO^aa. Minowa Mine, Mine Dept., Chichibu Taiheiyo Cement Co., Ltd
(Corresponding author: FAX 0494-22-5212)

Minowa Mine has been working in west area of Mt. Buko (1,304m above sea level) that is located in southeastern edge of the Chichibu Basin, the western part of Saitama Prefecture. Limestone is produced over 800,000ton a year for cement materials, aggregate materials and lime materials, etc here. Minowa Mine has three benches. One of them, Takeyama bench is situated in west corner of Mt. Buko. At the top bench of Mt. Buko, Minowa Mine, Ryoko Lime Industry Co., Ltd Une Mine and Buko Mining Co., Ltd Buko Mine have been operating in cooperation. It is very difficult to excavate Makuiwa, the huge precipice of north slope below Takeyama bench at the top bench. The excavation was started cautiously around the end of 2000 with setting up benches to prevent sudden falling rocks below the surface quarry. However, massive rock of about 3,000 meters cube, a part of Makuiwa came off and collapsed in April 2002. Moreover, fissure with fear of secondary collapse breaking out was found. Therefore we took preventive measures immediately against collapsing. Since then Makuiwa have been entirely excavated with the improved machine above the precipice with taking preventive measures against collapsing.

KEY WORDS: Sudden Rock Fall Prevention Methods, Improved Machine Operations

1. はじめに

三輪鉱山は、埼玉県西部の秩父盆地南東端に位置する武甲山（標高 1,304m）の西側エリアで操業しており、太平洋セメント（株）熊谷工場のセメント原料を主体に、骨材、石灰原料向等をあわせて年間 80 万 t 強の石灰石を生産している。現在 3 箇所のベンチで採掘を行っているが、本稿で報告する端縁部がある武山ベンチは、Fig. 1 に示すように三輪鉱山を含む 3 社 3 鉱山（秩父太平洋セメント（株）三輪鉱山、菱光石灰工業（株）宇根鉱山、武甲鉱業（株）武甲鉱山）で協調採掘を実施する、武甲山山頂ベンチの一角にある。

武甲山山頂ベンチ下の北側山麓斜面は全体的に急峻であるが、特に武山ベンチ下の北側斜面は、「幕岩」と称されるオーバーハング状の巨大な絶壁が存在し、端縁処理が非常に難しい箇所である。Table 1 に「幕岩」の処理経緯を示す。当該部については、下方に落石防護ベンチを設置した上で平成 12 年末頃より慎重に処理を進めていたが、平成 14 年 4 月に岩盤の一部が剥離し、約 3,000m³ の岩塊崩落が発生した。さらには 2 次崩壊の危険を孕む開口亀裂の存在が確認されたため、緊急措置的に崩落抑止工を施した後、都度追加の対策工を実施しながら、全面的に機械掘削による処理を進めている。

これらの岩盤崩落抑止対策及び、岩盤の計測・監視体制を含めた処理の方法についてとりまとめたので報告する。

* 2006 年 8 月 18 日受付 11 月 1 日受理
1. 秩父太平洋セメント（株）鉱山部 三輪鉱業所
[著者連絡先] FAX : 0494-22-5212
キーワード：岩盤崩落抑止工，機械掘削処理

Fig.1 General view of Minowa Mine.

2. 幕岩の岩盤剥離

2・1 発生状況

「幕岩」は、Fig. 2 に示すように武山ベンチから隣接の菱光石灰工業（株）宇根鉱山にかけての延長が約 100m、採掘前には高さが約 90m（1,050mL から 960mL）あったオーバーハング状の巨大な絶壁である。当該部端縁付近には東西方向の鉛直亀裂が初生的に存在することが確認されていたが、

Table 1 Operation progress after Makuiwa Collapse.

年 月	事 項	備 考
平成 12 年末頃	幕岩部の端縁処理着手	幕岩部 1050mL
平成 14 年 4 月	岩盤剥離発生 2 次崩落の危険を孕む亀裂 (2 次亀裂) 確認	幕岩部 1030mL
平成 14 年 7～11 月	岩盤崩落抑止アンカー打設工 (120t アンカー78 本、1030-1015mL)	
平成 14 年 12 月	規制発破の実施により、武山ベンチの採掘再開	
平成 15 年 8 月	幕岩部の機械掘削処理開始	
平成 16 年 3 月	2 次亀裂よりベンチ側に岩盤崩落の危険を孕む亀裂 (3 次亀裂) 確認、掘削処理を中断	幕岩部 1025mL
平成 16 年 4 月	追加アンカー打設工 (45t アンカー13 本、1015mL) 3D レーザースキャナーによる絶壁面の地形測量実施	
平成 16 年 10 月	アンカー打設部の機械掘削処理再開 (重機のラジコン化実施)	
平成 17 年 7 月・10 月	追加アンカー打設工 (45t アンカー26 本、1010mL)	幕岩部 1015mL

Fig.2 Face of collapsed Makuiwa.

Fig.3 Sketch of Makuiwa Collapse.

- ・亀裂面が密着していること
- ・斜面側からの対策工が著しく困難なこと
- ・岩盤崩落が起こったとしてもその規模は小さく、落石防護用に設置された 2 箇所のキャッチベンチで収まると予想されたこと

から、光波測距と目視による監視体制下で、振動抑制発破と大型ブレイカの組み合わせによる処理を平成 12 年末より始めていた。

岩盤剥離は平成 14 年 4 月、1030 - 1,020mL の端縁処理を進めている段階で発生した。崩壊量は約 3,000m³ (長さ 40m × 高さ 2m × 高さ 40m) と推定され、Fig. 3 に示すように崩落石の大部分は直下のキャッチベンチ (950mL, 880mL) に堆積したが、一部は

Fig.4 Vertical fissure of Makuiwa.

これを乗り越え、下流の沢部 (800mL 付近) にて止まった。

2・2 岩盤剥離の原因と 2 次崩落の危険性

岩盤の剥離は、幕岩壁面と平行な鉛直亀裂に沿って発生したものと推定され、当初は亀裂面の摩擦力、粘着力により滑落は免れていたものが、採掘による振動等の要因により抵抗力を失ったと考えられる。なお、崩落前日の亀裂部の目視確認では、崩壊前兆は認められていなかった。

岩盤剥離の発生後、直ちに採掘ベンチで剥離箇所周辺の調査を行った結果、Fig. 4 に示すように露出した剥離面の 4～5m 手前に、剥離面に平行な走向の鉛直開口亀裂の存在が確認された。亀裂はほぼ幕岩の幅全体にわたって連続しており、開口部は幅 15cm 以上の箇所もあって、着色水を投入すると剥離面からの流出が確認された。よって、大規模な 2 次岩盤剥離 (最大想定量約 17,000m³) の危険有りと判断し、直ちに武山ベンチの採掘は休止とし、下流の沢部の立入禁止措置を強化するとともに、伸縮計による当該亀裂部のモニタリングを開始した。これと並行し、当該部の 2 次剥離防止対策を至急検討することとなった。

2・3 対策工の必要性

アーチ状に残る岩塊の崩落 (2 次岩盤崩落) が発生した場合は、Fig. 5 に示すように以下のような状況が考えられた。

- ・2 次剥離により岩盤の支えがなくなり、西落ちの滑り面亀裂に沿ったさらに大規模な岩盤崩落を招く恐れがある。
- ・崩落石が大量に沢に溜まり、大雨時の土石流発生による住民への被害の危険が生じ、社会問題化する恐れがある。
- ・崩壊のメカニズムは異なるが、平成 4 年に第 5 ベンチ脇で大規模な地山崩壊が発生しており、武甲山全体の問題ととらえられかねない。
- ・一層危険な岩盤状態となり、対策工及び作業の安全性が益々取りづらくなる恐れがある。

以上のような点を鑑み、2 次岩盤剥離は絶対阻止するべく、至急対策を講じることとした。

3. 岩盤崩落抑止工

3・1 計画立案

対策工の計画立案に際しては、① 2 次剥離防止の確実性、② 作業の安全性、③ 工期と費用の 3 項目を考慮する必要があった。施工方法については、過去数回、三輪鉱山での岩盤安定化工事の実績がある施工業者と共に検討を行った。その結果、斜面側から行う施工は困難でリスクが高く、背面地山側 (ベンチ側) よりグランドアンカーを打設し、亀裂で分断される想定剥離岩塊を地山

Fig.5 Mechanism of secondary collapse at Makuiwa.

Table 2 Prevention methods summary.

項目	内容	施工
①亀裂充填	亀裂開口部をセメントミルクで充填し、不安定岩塊と地山を密着、雨水の浸入防止、アンカー引張力の地山への確実な伝達を図る。	外注
②トレンチ造成	アンカー打設の壁面、作業スペースを確保するため、ベンチにトレンチ（溝）を造成する。	自社
③アンカー打設	ベンチ側からグラウンドアンカーを打設、想定剥離岩塊と地山本体を緊張し、滑動を抑止する。	外注

Fig.6 Conceptual sketch of fissure filling up method.

と緊張する工法が最適との判断がなされた。

対策工は、Table 2 に示すようにアンカー打設工の他、付帯工事として亀裂面の劣化を防ぐため亀裂開口部の充填工事を計画した。またアンカー打設面の造成、整形を目的とした採掘ベンチ内トレンチ造成工事は、自社にて実施することとなった。

一刻も早く岩盤を安定化させるため、これらは緊急を要す工事ではあるが、一方では対策工自体の振動が与える影響を軽減する必要があること、また施工後の採掘作業による幕岩部の処理・アンカー撤去作業も行える状態にする必要があり、これらを考慮に入れた設計を行った。

3・2 亀裂充填工

水の浸入により亀裂面の劣化が進むのを防ぐため、アンカー打設に先行し、Fig. 6 に示すようにベンチ上から亀裂開口部にセメントミルクを注入して、これを充填する工事を実施した。

事前に亀裂部数箇所へ着色水を注入し、流出状況を確認した後、下記の施工手順にて実施した。

- ①試験的にセメントミルクを亀裂に注入、流出状況確認、流出までの時間を測定。
- ②セメントミルク+セメント急結剤溶液を注入、岩盤下部の亀裂先端を閉塞し、注入液の流出防止壁の構築。
- ③開口幅が大きい箇所は石灰石ズリを投入。
- ④セメントミルクを注入、注入口まで充填。

Fig.7 Trench development standard.

Table 3 Standard for trench development blasting.

装薬量 kg/段	ベンチ高 m	穿孔径 mm	抵抗 m	孔間 m	穿孔長 m	穿孔角 deg.	起砕量 t/孔	原単位 g/t	静的破砕剤 孔間隔
0.3	3.0	65	0.7	0.7	3.0	80	4.0	76	0.7m

しかしながら、急結剤の量を調整し亀裂先端部を閉塞する作業が思うようにはいかず、また一箇所閉塞ができても次に異なる箇所から流出するという状況がみられ、常に斜面を監視しながら試行錯誤で②～④の手順を繰り返す、という作業となった。

その結果、流出箇所が段々と上方へ移動し、都度その箇所を閉塞、最終的に注入口が閉塞する、ということを繰り返し、結果的には亀裂開口部の大部分を充填できたと考えられる。

施工量は以下の通りとなった。

- ・施工区間：亀裂走向方向 約 30m 区間
- ・注入量：セメントミルク 111.8m³、急結剤溶液 51.1m³、石灰石ズリ約 40m³

3・3 トレンチ造成工

Fig. 7 にトレンチ造成工の概要を示す。

3・3・1 工法の検討

アンカー打設面を造るためのトレンチ掘削作業に際しては、工期を急ぐ必要がありながらも、2次崩落を誘発しないためには岩盤に大きな振動を与えてはならないという制約があった。振動抑制のためには当初無発破による工法も検討したが、工期短縮及びコスト抑制のためには発破が不可欠であり、弱装薬による発破工法を採用した。

また、トレンチ壁面（アンカー打設面）の整形及び岩盤の縁切り（振動抑制）を目的として、事前に亀裂側（端縁側）の壁面にはPS発破の代わりに静的破砕剤を用いることとした。

3・3・2 発破規格

まず、発破振動推定式により、振動規制値に収まる装薬量を算出した。振動規制値は、過去に滑動を生じた武山ベンチ仮残壁の剥岩作業時に用いた値を採用し、単純に亀裂部からの水平距離に応じて装薬量を制限した。この装薬規制に基づき、試験を実施しながらTable 3に示す発破規格を定めた。雷管はノネルLPの1～60段を使用することとした。

- ・発破振動推定式： $V = 140 \times W^{3/4} \times R^{-2}$

V：振動速度 (kine, cm/s), W：装薬量 (kg/段),
R：震源からの距離 (m)

- ・発破振動規制値：0.36 cm/s

- ・亀裂部からトレンチ際までの最短距離：16m

- ・装薬規制：最小 0.3kg/段

- ・振動測定：振動レベル V (dB) = $20 \times \log V + 83$ により振動速度に換算

3・3・3 トレンチ掘削の施工

トレンチ造成工の様子を Fig. 8 に示す。

Fig.8 Trench development operation scene.

Fig.9 Rod anchor construction design.

Table 4 Organization of trench development operation.

作業員		原則 4 人（穿孔 1.5 人、積込運搬 1 人、装薬 1.5 人）
重機	穿孔	油圧カーブドリル×2 台
	掘出	2 m ³ バックホウ
	積込運搬	10.5 m ³ ホイールローダ
	小割	0.7 m ³ 油圧ショベル（ブレイカ）

トレンチは、アンカー工事用スペース確保、10.5m³ホイールローダ進入幅の確保、穿孔機の進入路確保を条件として必要最小限の掘削量とした。深さ 15 m のトレンチとするため、1 ベンチの高さ 3 m × 5 段で西から東へと展開とした。また作業員及び重機については、Table 4 に示すように通常採掘の人員、重機の中から充当した。

装薬規制で 1 発破あたりの起砕量はわずかであるため、1 日に最大 4 回の定刻発破を行い、工期短縮を図った。また、発破時には毎回、振動レベル計による亀裂付近での振動測定を実施するとともに、伸縮計のデータをその都度確認し岩盤への影響を監視した。

通常採掘との並行作業で人員も割けず、1 日何回もの定刻発破を行うということで、常に時間に追われる厳しい作業であり、かつ非常に狭いスペースの中での技術を要する作業であったが、穿孔、装薬、掘出・積込運搬の各作業を同時に効率よく進行させ、

Table 5 Rod anchor specification.

アンカー	1,200kN 仕様	削孔径 φ 135mm
緊張力	800kN	1,100kN
定着長	3m	4m
アンカー角度	10°	20°
打設ピッチ	2.8m	2.2m
アンカー本数	48 本	30 本
	計 78 本	
アンカー長	21～28m/本、総長 1850m	
計画安全率	1.1	

早出、残業、休日出勤対応という総力戦により、所定の 2 ヶ月で、ほぼ規格通りトレンチを完成、アンカー打設壁面を造成することができた。作業量の概要は以下の通りである。

- 掘削量：約 13,000m³
- 穿孔本数：発破孔 6,028 本、静的破砕削孔 183 本
- 発破回数：143 回
- 振動測定値：概ね 70dB (0.22 cm/s に相当) を下回っていた。

3・4 アンカー打設工

亀裂充填工、トレンチ造成が予定通り完了した後、直ちにアンカー打設工に着手した。

Fig.10 Picture of rod anchor construction.

Fig.11 Location of rod anchor against fissure at Makuiwa and sketch of machine.

施工箇所は、Fig. 9 のように、3 ブロック×各3 段で分けられる。上下方向では6 段(1～3 段目:中央ブロック、4～6 段目:東側及び西側ブロック) で分けられる。アンカーの配置は、斜面側にアーチ状に残る想定剥離岩塊を抑える形で決めた。また仕様は Table 5 の通り、アンカー打設工の様子を Fig. 10 に示す。

手順としては、トレンチの中側全体を一旦埋め戻し、削孔機用の足場を造成、削孔作業1 段分終了毎に鉤山重機を用いて盤下げを実施、というように、6 段分を上から1 段ずつ施工していく方式とした。

アンカー打設の施工手順を簡単にまとめると以下のようになる。

- ①削孔・グラウト工：削孔→アンカー tendon (PC 鋼) 挿入→定着部グラウト注入
- ②受圧板設置工：支持 H 鋼設置→型枠設置→コンクリート打設
- ③緊張・定着工：緊張試験→所定荷重で定着

早期の工事完成・岩盤安定化を目指し、削孔が終了と同時に盤下げをして削孔を継続、足場を組んだ受圧板設置作業、高所作業車を使つての緊張定着作業というように、可能な限り作業を同時進行させるよう工夫した。その結果、当初計画より若干早めの約2ヶ月半の工期で、全78本のアンカーを所定荷重で緊張定着し、岩盤崩落抑止工が完了した。

4. 規制発破による武山ベンチ採掘

アンカーの打設により、2 次剥離の危険がある岩盤は一応の安定化がなされたが、採掘作業の影響で、亀裂面の強度低下、アンカー定着部の強度低下が起こる恐れもある。よって武山ベンチの採掘再開にあたっては、振動抑制のため厳しい装薬規制のもとで発破を行うこととした。

振動規制は、安全をみてトレンチ造成のときと同程度とし、亀裂部で 0.36kine 以下という基準を設けた。単純に亀裂部からの水平距離に応じて装薬量を制限し、距離 10m で区切って各区間の最大装薬量を定め、それに従った発破を行うこととした。

Table 6 Comparison of rock crushing methods

項目	工法の概要	安全性	振動	経済性
ベンチ発破	2～3m ベンチで弱装薬発破	穿孔・装薬作業の足場が警戒亀裂を超える △	特に大 ××	処理ペース速い ◎
横向き穿孔	岩盤をスライス (1m 程度の厚み) するように、横向き穿孔、弱装薬で発破	警戒亀裂手前から穿孔・装薬可能 ○	大 ×	手間に対して効果小 施工に技術要する △
ブレーカ	バックホウ先端につけた大型ブレーカで破砕 (従来工法)	ロングアーム、ラジコン等の対応可能 ◎	中 △	確実に破砕 施工容易 ○
リッパ	ブルドーザのリッパでせん断破砕	掘削作業足場が警戒亀裂を超える ×	小 ○	軟岩では効果大 △
大型岩盤切削機	車体下部にあるドラム式切削機を油圧で回転、自重を反力として岩盤掘削	機械が高価、かつ大型すぎて当該作業環境では使用無理	—	—
無発破・静的破砕工法	硬質力のワイヤーで岩盤を鉛直・水平方向に切断、ロックボルトを用いて切断した岩塊を引出す。	若干の作業以外亀裂手前の足場で可能 ○	小 ○	施工手順複雑で手間設備高価 処理ペースはブレーカに比べて遅い ××
くさび式工法	穿孔してくさびの挿入、ドロップハンマによる打ち込み等により岩盤破砕	ロングアーム重機で穿孔・くさび挿入可能 ◎	小 ○	高価な重機導入必要 処理ペースはブレーカに比べて遅い ×
静的破砕剤	穿孔して膨張剤を装填、膨張作用により岩盤に亀裂を生じさせる	横向きであれば警戒亀裂手前から穿孔・装薬可能 ○	小 ○	破砕剤が高価 手間に対して効果小 ××
蒸気圧破砕剤	穿孔して金属酸化還元剤とミョウバンによる薬剤を装填、着火し、蒸気圧で岩盤を破砕	横向きであれば警戒亀裂手前から穿孔・装薬可能 ○	小 ○	破砕剤が高価 手間に対して効果小 ××
放電衝撃破砕工法	穿孔して電極棒を挿入、放電時の衝撃波で破砕	若干の作業以外亀裂手前の足場で可能 ○	小 ○	高価な機械導入必要 手間に対して効果小 ××

そのためベンチ展開は、通常の 10m ベンチで可能な箇所から、5m ベンチ、2m ベンチになる箇所等、非常に制約がある展開にならざるを得ないが、平成 14 年 11 月のアンカー工完了後すぐに採掘を再開して以後、現在に至るまで、継続して装薬規制を徹底している。ただし現在では、発破による岩盤変位がみられないこと、幕岩部の掘削処理が進み安全率が上昇していることから、振動規制値を 0.5kine に緩和している。

5. 幕岩部の機械掘削処理方法

5・1 当初の掘削処理方法

武山ベンチの採掘再開後、ベンチの進行に伴い環境が整ったため、平成 15 年 8 月にはいよいよアンカー打設を行った幕岩部の採掘に着手することとなった。アンカーを撤去しながら想定剥離岩塊を処理する作業であるため、細心の注意が必要である。そのため、

- ・振動抑制のため無発破での機械掘削処理を行う
- ・西落ちの滑り面亀裂を考慮し、東から西へ展開する
- ・極力抑止力を保持するためアンカーは1 段、1～2 本ずつ撤去する

Fig.12 Excavation procedure at Makiwa.

Fig.13 Picture of excavation at Makiwa.

を原則として、大型ブレーカによる機械掘削を主体とし、補助としてパワースプリッター、バックホウを用いた処理を始めた。

5・2 工法の再検討

5・2・1 警戒亀裂 当初確認された岩盤剝離の危険を孕む亀裂(2次亀裂)は、端縁側に近く、地表で明瞭に確認できるため、作業重機は崩落の危険がある2次亀裂より端縁側に足場を置かないことを安全の条件として、掘削処理は着実に進んでいた。しかし、作業進捗の過程で、Fig. 11に示すように2次亀裂よりベンチ側に同様の鉛直系開口亀裂(3次亀裂)が存在することが明らかになった。

3次亀裂については、位置関係や着色水を流したトレース試験の結果から推定すると、斜面まで直接連続している様子ではなく、2次亀裂に比べると危険性は低いものの、この亀裂より端縁側に足場を置くのは保安上のリスクが大きいと判断した。3次亀裂よりベンチ側に足場を置いた場合、油圧ショベルのリーチが届かず、端縁部の処理が不可能であるため、作業者の安全を第一に考え、処理方法を全面的に再検討することとした。

5・2・2 岩盤掘削工法の比較検討 作業者の安全性を強化する工法として、それまでのブレーカによる掘削方法、発破工法、その他静的破砕工法等、Table 6のような様々な工法を以下の観点から比較検討した。

- ・安全性：作業者が岩盤崩落に巻き込まれる危険性

Fig.14 3-D image of the precipice at Makiwa (by 3-D Laser Scanner).

Table 7 Fissure confirmation methods.

項 目	実 施
地表で亀裂目を掘り出す	いへんの都度実施、常に染料で地表に明示しておく
アンカー工削孔による内部の亀裂位置確認	アンカー打設工実施時
着色水によるトレース試験	開口部が表れた際実施して連続性を確認

…警戒亀裂(3次亀裂)より端縁側に作業足場を置かない工法が望ましい。

- ・岩盤崩落の危険性：岩盤に与える振動は小さい工法が望ましい。
- ・経済性：低コストで効率が良く、処理ペースの速い工法が望ましい。

検討の結果、上記の要素と現実的な作業性を考えると、これまでのブレーカ工法を継続するのが確実で最適との結論に至った。

5・2・3 ブレーカ掘削作業の安全性向上の検討 処理方法については、それまで通りブレーカ主体の掘削とし、その安全性を向上させるため、重機メーカーとも相談し、以下の改善項目について検討した。

- ・油圧ショベル現行機をロングアームに改造
- ・油圧ショベル現行機にラジコン機能を追加

※現行機：80t ブレーカ、45t バックホウ

その結果、ロングアームの油圧ショベルについては、ブレーカであると破砕力が低下する点がネックであり不採用とした。ラジコンについては実機での性能確認を行ったところ、

- ・操作に対する反応：タイムラグなし、運転席での操作と変わらず
- ・操作位置からの距離：作業箇所から十分離れた位置で運転可能
- ・運転席操作→ラジコン操作の切替：スイッチ1つで可

といった点が検証され、幕岩部の処理に適用できることが確認できたので、各メーカーへ依頼し、現行油圧ショベルのラジコン仕様への改造を実施した。

5・3 掘削処理手順

重機をラジコン仕様へ改造後、幕岩部の処理を再開するにあたって、以下の安全上の原則を取り決めた。

- ・2次亀裂を越えて端縁側には重機の足場を置かない
- ・3次亀裂を越えて端縁側に足場を置く場合は、重機はラジコン運転とする

また、上記原則に基づき、現在行っている処理手順は以下のようになる(Fig. 12)。基本的に、アンカー1段分の岩盤をある幅で端縁に向かってスライスしていく、という手順である。Fig. 13に施工状況の様子を示す。

- ①アンカーのヘッド部周辺を破砕して荷重を除去(アンカー2本分が基本)

Table 8 Makuiwa Monitoring equipment.

監視機器	内 容	数 量	警 報
伸縮計（電気式）	事務所パソコンで変位データ確認	1～2 台	無線機に自動で警報発令
伸縮計（チャート紙）	現場で変位データ確認	常時 2～3 台	現場の回転灯とブザーで表示
アンカー荷重計	現場でアンカー荷重の変動を確認	常時 1～2 箇所	—
光波測距	アリス'ム、ノンアリス'ム（岩盤）数点を自動観測	アリス'ム 2～3 点 ノンアリス'ム 8 点	—
監視カメラ	遠隔操作で斜面を撮影、モニターでリアルタイムの映像を監視	1 台 モニタ小屋設置	—

Fig.15 Transition of Makuiwa.

- ② 3 次亀裂手前の足場で届く範囲の岩盤掘削（有人運転）：主にブレーカ
- ③ 3 次亀裂奥に足場を置いての岩盤掘削（ラジコン運転）：ブレーカ
- ④ 端縁処理（ラジコン運転）：ブレーカ+バックホウのセット

6. 追加の岩盤崩落抑止工

岩盤の機械掘削処理を進めると同時にアンカーも撤去しており、想定剥離岩塊に対する抑止力を維持するためには、掘削部の下部で対策を加えることが必要である。そのため、ベンチ採掘と幕岩部処理の進捗のタイミングを見計らい、これまでに追加で 39 本のアンカー打設を実施した。φ90mm の孔で確実に施工できるよう 450kN アンカーを選択し、自社採掘係にて削孔作業を行っている。

7. 地形把握と亀裂位置の確認

幕岩部の掘削処理に際しては、絶壁部の形状を把握することが安全上及び技術的に重要であった。岩盤剥離発生当時実施できたのはノンプリズム測量だけであったが、その後、急斜面の測量に適した技術である 3D レーザースキャナを用いて、絶壁面の測量を行った。その結果、Fig. 14 に示すように斜面全体を 3 次元的にとらえて詳細な形状を把握し、これをイメージ化することができ、崩落抑止工と岩盤掘削処理の設計に非常に有効なデータを得ることが出来た。

また、問題となる亀裂の連続性や位置関係を把握することも非常に重要であり、3D レーザースキャナで把握した地形と都度行っている Table 7 の確認作業をあわせ、警戒亀裂（2 次亀裂、3 次亀裂）についてはかなりの部分が把握できている。

8. 岩盤計測・監視体制

幕岩の岩盤剥離発生当時から主要な監視機器は伸縮計であり、

Table 9 Excavation results at Makuiwa (from August 2003 to November 2005)

項 目	実績	備 考
処理量 (t)	77,000	機械掘削分
ブレーカ稼働時間 (hr)	1,245	ブレーカ
ブレーカ能率 (t/hr)	62	
全重機稼働時間 (hr)	1,953	ブレーカ+バックホウ+バースリッパ
全重機能率 (t/hr)	40	
月平均処理量 (t/月)	3,850	

期間:20ヶ月(3次亀裂確認後から重機のラジコン化まで7ヶ月間作業中断)

以後も継続してデータを収集しているが、一つの機器だけに頼ることなく、他の機器及び目視確認結果を総合的に解釈し、岩盤変位の兆候をつかむようにするため、何種類かのモニタリング手法を適宜追加してきた。

現在実行中の監視機器は、Table 8 の通りである。掘削処理作業を進めながらも、これらの機器は都度移設し、絶え間なく岩盤変位が監視できるよう努めている。また、もしも崩落の兆候を示す変位があった場合は作業者が迅速に退避できるよう、警報システムの整備も行っている。

9. 幕岩部処理の進捗状況

以上のように、岩盤の計測・監視を行いつつ、ベンチ採掘作業と並行し、適宜追加の対策工を実施しながら、幕岩部の機械掘削処理を進めている (Table 9)。崩落はもとより、ほとんど落石も発生させておらず、端縁処理作業もラジコン操作によって安全かつ確実に進捗している。

幕岩部の処理は今のところ計画通り進展しており、ブレーカを中心とした処理方法が確立されるとともに、作業スペースの拡大も推進できたので、今後はブレーカの増車を行い、処理の促進を図る予定である。

10. ま と め

幕岩部の採掘にあたり、残念ながら岩盤崩落が発生したが、その後の処理においては、今回報告したような対策工と処理手順により、2 次崩落を発生させることもなく、安全に作業を進捗させることができています。

崩落する危険のある岩塊の体積はかなり減ってきている (Fig. 15) もの、幕岩の壁は未だに高くそびえたっており、今後ともこれと同様に、岩盤崩落抑止工の施工と計測・監視体制下での機械掘削処理を繰り返しながら、幕岩部処理を着実に進めていきたい。