

最適化された穿孔と発破を目的 とした穿孔測定 (MWD) パラメーターの適用^{※)}

鷲見明彦^{※※)} (翻訳)

穿孔測定 (MWD) 調査データを穿孔と発破プロセスに使用することで、採石オペレーターはコスト低減効果で利益を上げ、また採石場での工程サイクルを減らすことができるという、ルービック・ゴーシュ氏 (Mr. Rubik Ghosh) のレポートを以下に紹介します。

鉱山および採石場では現場で堅岩を粉砕するために発破を行います。基本的に、発破の際に火薬から出るエネルギーは、巨大な岩を粉砕するのに活用できます。これにより、掘削と下流での破碎や選別のようなプロセスが効果的に実施できます。この発破プロセスの改善により、生産性の向上と、不必要な運転コストの最小化が可能となります。

鉱山および採石場において、採掘から粉砕プロセスの効率化は製品を製造する上で重要です。現時点では、穿孔と発破パラメーターの最適化により、粉砕の向上、関連コストの削減、下流での粉砕プロセスの簡略化という結果を得ることができました。しかしながら、これらのパラメーターにおける継続的な改善は、鉱山の粉砕プロセス全体をさらに最適化する上で重要です。

この改善達成途上では、穿孔および発破プロセスに関連するデータと、関連パラメーターの記録、収集とデータの解析が必要です。穿孔リグシステムにおける最新技術は向上しています。たとえば、アトラスコプコ社の穿孔測定 (MWD) は、これらのフィードバックパラメーターの記録が容易に可能です。穿孔測定データの解析により、周辺地質および岩石の特徴の理解がより可能となり、穿孔リグのような装置の活用が向上できると共に、二次的な破碎工程の必要性を減少させることができます。

背 景

採石場での穿孔と発破を最適化する方法には、様々なやり方があります。その中には、与えられた操作パラメーターに対する最小の単位当たりコストで鉱物を生産するやり方や、細粒分の最小化や、発破ダメージのコントロール、可採率と破碎サイズの最適化 (Scott, Kanchibotla and Morrell, 1999年) があります。穿孔と発破の最適化を達成する上で、個々の採石場での運転パラメーターを、先ず最初に決定する必要があります。これらのパラメーターは、運転コストや堆積岩の形状、岩石の特徴および望ましい製品サイズにより変動することがあります。

採石場での穿孔と発破の最適化において、鉱山コストを最適化する際の最も効果的な方法は、効率のよい発破を行い、理想的な破碎を実現することです。鉱山での運転は絶えず変化するために、穿孔と発破を最適にするのは困難です。地質や岩石の変化、および鉱山で使う設備が様々であることから、コストパラメーターは常に一定という事ではありません (Bellairs, 1998年)。そのために、穿孔測定 (MWD) からのフィードバックデータは運転パラメーターに影響を与える可能性が大いにあり、より重要となります。

研究の目的

この研究の第一の目的は、選択した採石場での穿孔測

※) Quarry, 2010, 8月号, p.p.16~p.p.22

※※) 正会員 宇部テクノエンジニア(株) 大宮サービスセンター 編集委員

定 (MWD) 調査データを分析することです。これを実現するために、穿孔リグで記録したデータをメモリーカードを使ってコンピュータに転送します。次に、アトラスコ社のROCマネジャー穿孔測定 (MWD) 判断ソフトウェアを用いて、データから硬度と裂け目を分析します。第二の目的は、採石場での穿孔と破碎作業を最適化することです。これは、現状の穿孔と発破作業を修正することで、潜在的なコスト削減策を見出すことが可能となります。

最新の研究

採石場での穿孔と発破の制限

大半の採石場が都市部エリア近くにあることから、穿孔と発破作業を管理する必要があります。採石場での発破に対して考慮すべき主な2点とは、大気超過圧力 (騒音) と振動です。多くの採石場は操業許可を得るにあたって、全ての発破を監視し、いかなる法令違反も報告することが求められています。環境保護庁 (EPA) による規制強化で、振動については5mm/s、大気超過圧力については115デシベルに制限されています (EPA, 2008年)。現場で特定状況により異なる規制事項を持つ採石場もあります。これらの制限を管理するために使用する技術には、電力率の削減や、時限制限、発破サイズの減少も含まれます。

露天掘り鉱山や採石場には様々な問題や要求が存在します。以下、一例を挙げます。

- ・労働力の減少
- ・より小規模で頻繁な発破
- ・環境に敏感な地域が近隣にある
- ・より複雑な発破デザインと起爆
- ・地質学および地質工学的制限に関する情報が少ない
- ・短期間のスケジューリングで日々の売りに劇的に影響を及ぼす
- ・長期間でのスケジューリングは意味を成さない

地質学的条件

全ての鉱山および採石場での操業において、採掘プロセスにおける岩盤の特質と、採掘中の岩石の挙動を理解することは、効率的な操業のために重要です (MEA,

2007年)。たとえば、ある特定の採石場では砂岩、シルト、玄武岩から成る岩石にはジェラシック期の砂岩を内包しています。

掘削リグの実績

採石場で使用するアトラスコ社のD9C消音スマートリグは、最高レベルの自動化されたリグとして位置付けられています。それは穿孔測定 (MWD) の使用により、岩石の特質に対応が可能だからです。また、この機器には穿孔ナビゲーションシステム (HNS) もあり、穿孔の質を向上させ、粉碎の質を高めることで潜在的な利益を増加させます。アトラスコ社によると、「穴偏差測定を含むこの2つの組み合わせにより、最適化された充填および発破プロセスにつながり、結果として採石場プロセス全体のコストが削減できます」。

掘削測定 (MWD) の研究

近年においては、穿孔測定 (MWD) 技術は岩石の特質を正確に判断する最前線にあり、また穿孔と発破技術者への大きな手助けとなっています。SeguiとHiggins氏は2002年に穿孔測定 (MWD) に関する重要な識見を提供しました。そこでは、スキャンラインや岩石テスト用の見本岩石収集のような作業の削減により、時間削減が可能だと述べられています。

図1は穿孔機による貫通後の岩盤のプルダウン力と貫通率を示しています。SeguiとHiggins氏はまた、穿孔能力と岩石との関係が定義可能なこと、さらに多くの予測不能な変動要素により、境界線と断層の存在が確認できることも証明しました。

穿孔測定 (MWD) システムでは、鉱山または採石場でのいかなる穿孔作業の前にキャリブレーションを測定する必要があります。これにより、穿孔測定 (MWD) パラメーターは現地の地上状況を考慮したセッティングが確保され、その結果、穿孔測定データが意味を持つこととなります。

いったんデータが収集されると、貫通率や振動圧、投入力、回転速度、破碎密度、硬度トルク、水圧のようなその他の掘削測定データが照合可能となります。

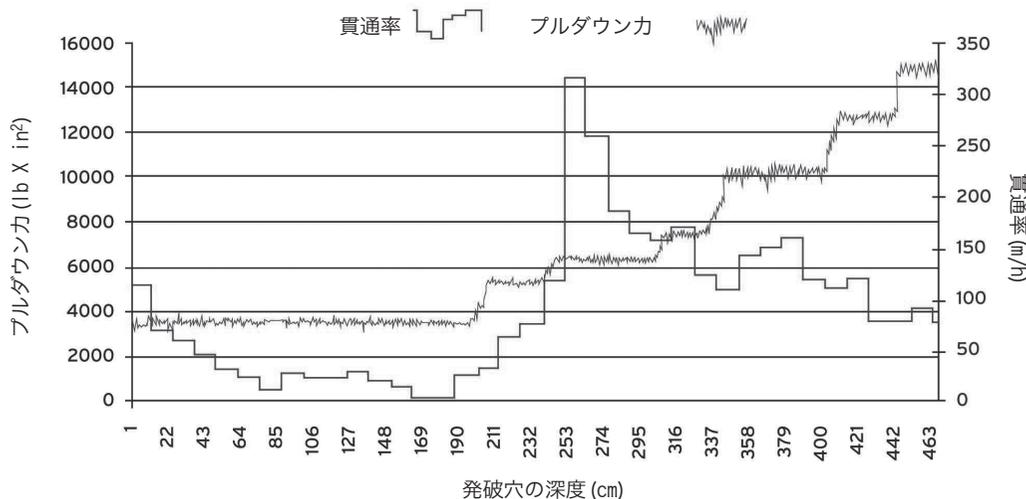


図1 貫通率vs掘削測定からのプルダウン力 (Segui and Higgins, 2002年)

穴の追跡

図2はOrica社のショットプラス-L モデリングソフトウェアで作成した穿孔穴の側面図レイアウトの一例を示します。黒い線は切羽面を表し、~~~~線は計画された穿孔穴、黒の破線は実際の穿孔穴を表します。

穴を追跡するプロセスは、ダウンザボールサーベイ (DTH) としても知られています。ここでは穴を染料で染めて、実際に掘削した穴の最終的な角度と深さを確認します。これは穴を追跡することで発破爆薬の調整を可能にし、火薬充填量が過不足しないよう確実にする上で重要なプロセスです。

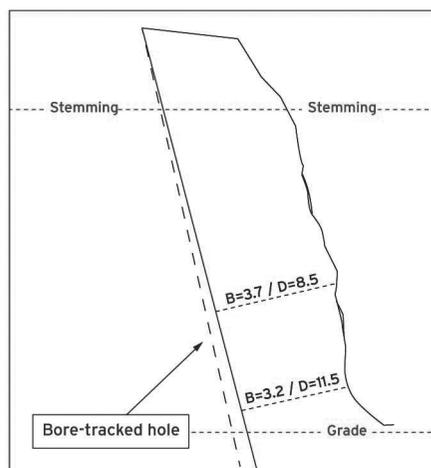


図2 発破穴の側面レイアウト例 (Adams, 2009年)

利益の可能性

20トン/分の穿孔、つまり1ドルのコスト上昇 (トン当たり5セントの穿孔コスト、つまり5セント/トン) を基準とし、MWDデータは結果としてより効率の良い破碎をもたらすことが可能です。つまり、結果として、正確な穿孔 (適切な長さパターン) を原石のタイプ・性質に合わせて行うことによって、破碎/撰別コストを低減させることができます。

加えて、穿孔工程で適切な穿孔サイクルによる作業を行うことにより、燃料の低減も可能となります。通常、破碎と撰別コストはトン当たり6ドルかかりますが、MWDのデータの有効利用により、0.05ドルの穿孔コス

ト増加で適切な発破設計を行うことにより、破碎と撰別コストを10%削減できるとすれば、0.6ドル/トンのコスト削減になり、採掘プロセスータルとしては0.55ドル/トンの削減となります (ロバートソン氏による)。

さらに、発破原石をクラッシャーへ運搬前的小割作業の削減により、コスト低減をはかることができます。

方法論

この研究は図3で示すように、コンピュータに基づく

穿孔測定による「最適化」の概念を展開しています。穿孔の事前調査はアトラスコプコ社のD9Cスマートリグを用いて行われます。穿孔測定データは記録され、コンピューターに転送されます。次に、Gercom社のSurpacモデリングソフトウェアを用いて、資源モデルが作られます。岩石地質学による補正後の初期の穿孔パターンはD9C搭載のソフトウェアに転送し、穿孔されます。次に穴の観測を行い、角度と偏差の変更を記録して、Orica社のショットプラスに新しい発破レイアウトを分析のために転送して、データを結びつけます。発破装置点火後、発破と規模測定に必要な写真を撮影して、WipWareのWipFrapに送信し、発破破碎を分析します。

発破用穿孔調査は2009年6月1～5日の間に、旧AVKO Mining社（現在のAusrocks社）が実施しました。アトラスコプコ社のD9Cサイレンススマートリグの穿孔測定能力が活用され、また油圧式トップハンマーを用いて直径89mmの穴が開けられました。記録のためにサイ

クロンからのサンプルは1メートルおきに集められ、岩石の種類、風化の程度、穴の中に水分が存在するかが地質学ログに注記されました。

全ての穿孔穴カラー位置はMGA94のZone55J座標システム内で10mm程度の正確さで調査が行われました。その際、手で持って操作できるGarmin 76S GPS装置を用いました。合計25個の穴（DHBQR1～DHBQR25まで）が開けられ、その合計長は486.5mでした。この中には前カラードリル穴DHBQR22の21mも含まれます。図4では穿孔調査穴の計画図が表記されています。

成 果

合計25個の調査穴の深さは平均で19.5m、玄武岩の厚み平均は14.5mでした。GercomのSurpacを用いて、表面が針金構造の玄武岩層は固形3次元モデルで作成しました。この玄武岩モデルは2.67BCMの容積を持つように決められており、年間20万トンの割合で採掘する場合、この採石場は少なくとも30年は資源が持つ計算になります。

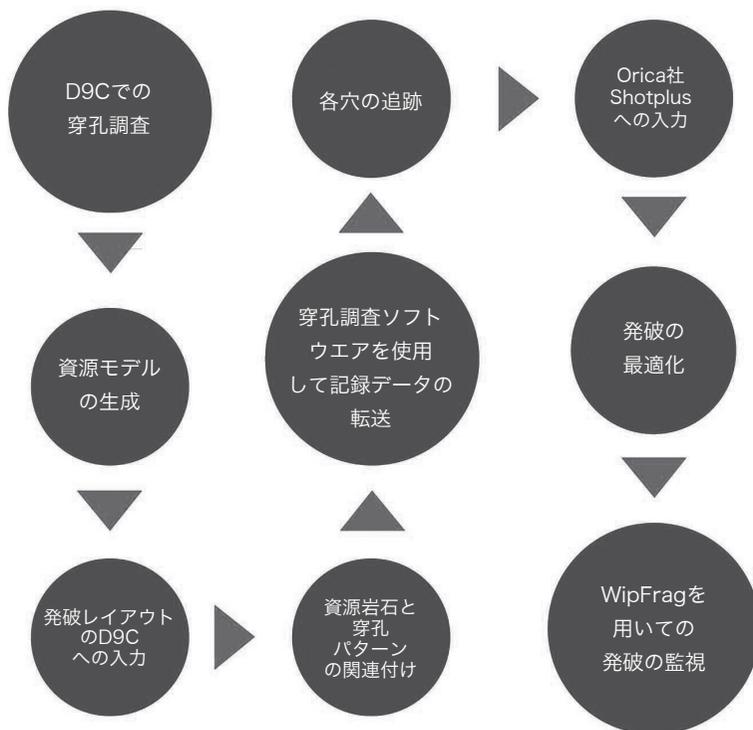


図3 コンピュータに基づく穿孔測定「最適化」コンセプト

す (Lowien, Ghosh and Robertson, 2009年)。

穿孔側面の調査の間、主要な断層または節理は確認されませんでした。主要な断層または節理が交差していなかったのは、調査穴が100m×100mの穿孔格子の範囲しか及ばなかったための可能性が高いです。穿孔調査研究のデータ収集と解釈が採石場で開始されると、水分地質学の調査も必要になります。調査穴内の水の存在は記録されましたが、現存する水面が採石場を一貫して横断していないことが証明されました。

AVKOと共同での実験発破が採石場で行われました。しかしながら、時間に制約のある研究の性質により、極めて中途半端な状態での限られた穿孔調査データしか入手できませんでした。

穿孔調査貫通率

図1は460.3mの穿孔に対する貫通率を示します。ここでは掘削調査データが記録されました。DHBQR3とDHBQR4の穴に対するデータは記録されませんでした、それはD9C上の掘削調査ソフトウェアの使用する準備ができていなかったからです。貫通率は岩の種類によって変動し、数値は予想通り地盤条件が硬質であるほど

に低くなります。

穿孔の大半は293mの硬質玄武岩で行われました。様々な地盤条件の下での荷重平均計算と総穿孔長 (m) から、平均瞬間穿孔貫通率は毎分1.05m、毎時換算で63mになりました。

アトラスコプコ社のROCマネジャーを用いて、穿孔と発破破碎の観点から採石場での瞬間穿孔率 (m/h) は次のように換算されます。

- ・硬質で新鮮な玄武岩:44.4m/h
- ・風化した玄武岩:69m/h
- ・中質の砂岩:84m/h
- ・硬質なシルト岩:90m/h
- ・中間のシルト岩:96m/h
- ・軟質なシルト岩:102m/h

しかしながら、これらの率は標本抽出や調整によるドリルロッドの交換や沼にはまる、その他の遅れを考慮していません。基準貫通率はロッドの引き抜きや標本抽出作業を含め18.2m/hとして計算されています。

これは瞬間平均貫通率の63m/hよりもずっと小さいですが、それは予想通りに先に述べた調整の遅れや、ロッドの交換、アキュムレーターの問題によります。しかしながら、採石場での通常生産では、アトラスコプコ社の

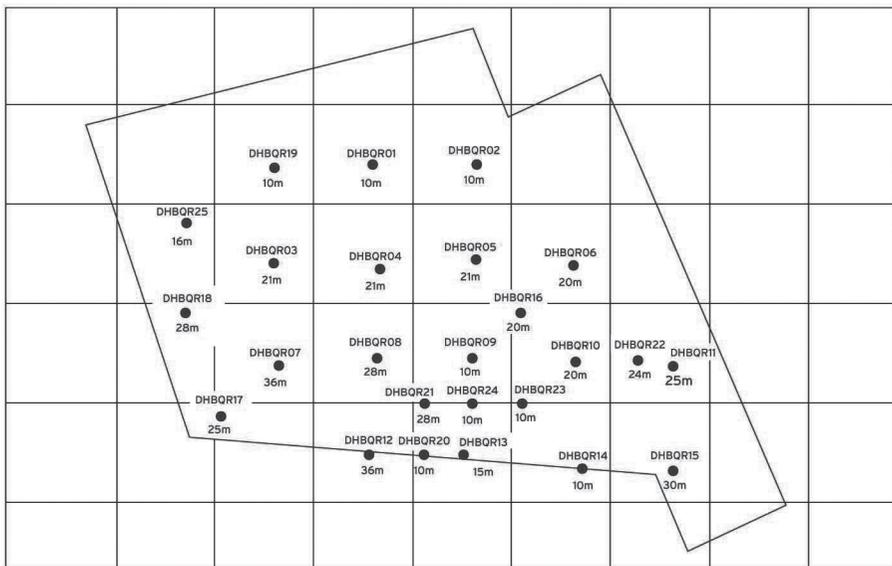


図4 掘削した穴の調査計画 (Lowien, Ghosh and Robertson, 2009年)

表1 掘削測定貫通率の概要

地盤の状態	平均貫通率	掘削深度(m)
硬質玄武岩	0.81	293
中質玄武岩	1	4
軟質玄武岩	1.38	42.3
風化玄武岩	1.4	1
中度砂岩	1.2	7.5
軟質砂岩	1.82	47
硬質シルト岩	0.78	10
中/硬質シルト岩	0.8	10
中度シルト岩	1.3	7
軟質シルト岩	1.59	38.5
	合計	460.3

D9Cは良好な地盤条件の下で1日11時間稼働の場合、1日240mの割合で穿孔が見込まれ、穿孔は荒れた地盤条件では1日160mの穿孔が見込まれます。

最新の穿孔と発破実績

穿孔と発破パターンがレイアウトされる前は、最新の穿孔と発破実績をOrica社の技術サービスから確認しなければなりませんでした (Normanton, 2009年)。

最新の穿孔と発破での実践内容は以下の通り

- ・Orica社の発破クルーが自由面と発破床を調査する面と床の特質を描くレーザースキャナーの使用を含む。
- ・Orica社の発破クルーが発破を行う前に全ての穴にマークをつける。
- ・パターン通りの穿孔をする。
- ・Orica社の発破クルーが穿孔追跡調査をする。角度偏差と実際の穿孔深度を実測する。
- ・偏差と実際の穿孔深度を考慮した発破設計を行う。
- ・発破を実施する。

採石工程における潜在的なコスト節減

穿孔穴の追跡調査、およびドリルリグへの搭載GPSシステムの調整を周期的に実施することで、潜在的なコスト低減の可能性があります。現状では、Orica社は穴の

追跡調査に1日当たり2500ドルを請求します。ROC Probe RP45のような穴偏差精査機の出現により、穿孔担当者による穴の追跡調査は容易になりました (アトラスコプコ社, 2003年)。また、データを直接ROCマネージャーシステムにダウンロードできるようになったので、エラーの可能性が少なくなり、穿孔データを回収するための共通プログラムの提供も可能となりました。鉱山技術者が穿孔測定データを判定できるので、地質学者が現地での滞在を余儀なくされていた長い時間の短縮が可能になりました。

分析

穿孔測定データの解釈

穿孔作業中、貫通率や穿孔深度、衝突圧、回転圧、減圧、投入圧のような穿孔パラメーターの監視が行われました。ROCマネージャーを使って相対硬度と破碎パラメーターを計算します。相対硬度は貫通率に基づいて標準化されます。その結果、穿孔深度の変動や衝突圧、投入圧の影響を受けません。一方、岩の密度に反映した形で、空洞や割れ目の存在を発見することができます。

採石場でのログの間隔は50cmに設定し、最初にROCマネージャーを使用する際、穿孔測定設定は現地でキャリブレーションする必要があります。穿孔測定データの量は非常に多いので、報告書では調査穿孔穴はDHBQR21 1つだけを分析する事とします。

図5は穴DHBQR21で観測された硬度と破碎を示します。穴の最初の2mは大部分が軟質の玄武岩です。次の7mは硬質もしくは中度の風化玄武岩です。破碎グラフの約12mあたりにある鋭い落ち込みから、水流の存在が想定できます。しかし、この表示が常に水流の存在を意味する訳ではなく、単なる地盤の変化を示すだけの場合もあります。従って穿孔計測調査の研究から、穿孔担当者と地質学者の記録に戻っての相関関係が昔も今も絶対的に重要です。

穿孔測定の実施の導入

穿孔と発破の請負業者はOrica Mining Service社に

DTHサービス支援を依頼し、採石場での試験発破の実施を決定しました。DTHサービスに含まれるのは製造、輸送と大量の火薬の穿孔穴への充填のみです。

基本的に、穴の追跡調査と穿孔測定の出現で、現行の穿孔と発破操作のステップ4と5をステップ3に組み入れることができました。パターンに沿って穿孔する時、穿孔穴の追跡調査と穿孔測定データの記録を同時に行うことが可能となりました。このデータは事務所に転送されて、発破設計の修正したデータを切羽に戻すことが可能となります。

穿孔穴の追跡調査は掘削担当が実施するため、わずかな人員だけしか必要でなくなります。結果として、相当な経費削減につながります。口径追跡装置にはそれなりのコストがかかりますが、ROC Probe RP45のような装置への投資は長い目で見れば、検討する価値は大いにあります。

結 論

今回の研究で調査穿孔と穿孔測定分析のコンピュータに基づく「最適化」が完全に行えることが分かりました。

穿孔測定データの分析により、穿孔測定データと穿孔担当の記録、地質学者のデータの間に相関関係があることがわかりました。これにより、岩石の種類の変化や、岩石硬度の変化に基づく断層や節理の存在が確認可能となりました。類似した機械的性質を持つ岩石は、穿孔測定データだけの識別が困難なので、穿孔測定データは関連性のある記録への補助として使う事が望ましいです。

今回の研究で、穿孔測定の実施と穿孔穴の追跡調査を現行操作に取り入れることは、採石場での処理サイクルのステップの削減に結びつくので有益だとも示しています。穿孔測定データの入手にトン当たり0.05ドルのコストがかかりますが、それがより効率的な破碎工程につながり、結果として採石プロセスでトン当たり0.55ドル節減できることも可能です。

研究結果として、岩石の種類や主要な断層、岩脈、地質構造に関する改良データは、直接破碎設計ソフトウェアパッケージ内の適切な3次元フォーマットに提供が可能で、これにより最適化された発破をする上で役立ちます。

研究の将来的な見通しは、調査の継続性によって左右

されます。これにはいくつか例を挙げると、利用可能なソフトウェア (SURPACのような設計、Orica社のショットプラスのような発破)、地質学的調査の実施、破碎監視の研究、発破設計修正の適切なインターフェースリンクの開発などを含んでいます。

研究の発表者Rubik Ghosh氏は鉱山技術者でQueensland大学の機械鉱山技術学部を卒業しています。彼の学部卒業時の論文は旧AVKO採石コンサルトグループ (現Ausrocks社) が支援しました。Rubik氏は現在西オーストラリアのRio Tinto鉄鉱社で穿孔と破碎技術者として活躍しています。

参考文献

- 1) Adams M. Orica's Shotplus Software License, 2009.
- 2) Atlas Copco. User guide ROC Manager Version 2.0, 2003
- 3) Atlas Copco. SmartRig Handbook [online], 2006.
<http://www.atlascopco.co.uk/ukus/news/productnews/smartrig.asp>
- 4) Bellairs P. Optimum drill and blast. Proceedings of the Annual Conference on Mining Cycle 1998. The Australasian Institute of Mining & Metallurgy, Melbourne, 1998
- 5) Environmental Protection Agency. Environmental Protection [online], 2008.
<http://www.epa.qld.gov.au/about-the-epa/legislation/environmental-protection>
- 6) Lowien T, Ghosh R, Robertson AC. Quarry Resource Evaluation and Mining Plan, 2009. (Quarry not identified.)
- 7) Mine Education Australia. Mining Geotechnical Engineering Learning Guide. Sydney, 2007.
- 8) Normanton K. Personal communication. Orica Australia Ltd, 2009.
- 9) Orica Mining Services, Shotplus Blast Designer [online], 2009.
<http://www.oricaminingservices.com/uploads/china/OR1468-ShotPlus.pdf>
- 10) Robertson AC. Personal communication. AVKO

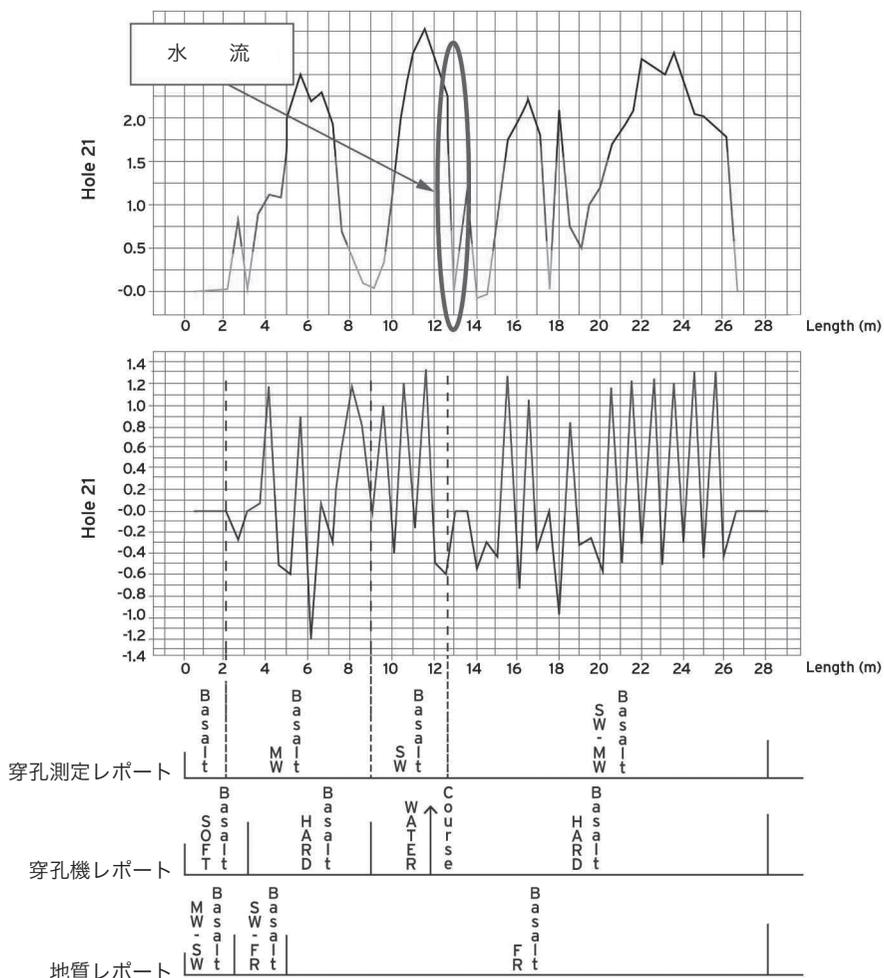


図5 DHBQR21の硬度と割れ目のグラフ

Mining Pty Ltd, 2009.

1999.

11) Scott A, Kanchibotla S, Morrell S. Blasting for mine to mill optimisation. Proceedings Explo 99: A Conference on Rock Breaking. The Australasian institute of Mining and Metallurgy, Melbourne,

12) Segui JB, Higgins M. Blast design using measurement while drilling parameters. Fragblast 6 (3-4) , 2002.