岩石破壊音による崩落予知に関する研究*

正会員 鈴木 俊 夫**

正会員 佐々木 和 郎***

正会員 広 田 豊 彦****

正会員 塩 原 善 一*****

Studies on the Prediction of Rock Failure by Counting Subaudible Noise of Rock

Toshio SUZUKI, Kazuro SASAKI, Toyohiko HIROTA and Zen-ichi SHIOHARA

Generally, any displacement or disturbance in the rock creates an impulse or rock noise and the count of this rock noise increase according to the increase of the stress of rock. Consequently, if the rock noise were measured continuously, the rock failure would be predicted. This is the basic principle of this method of predicting rock failure. This principle was found about 20 years ago, but this prediction method have not been applied in the field, yet.

In the beginning, we studied at the laboratory with several kinds of rock specimen on the following items:

1. wave form of the rock noise
2. frequency spectrum of rock noise
3. relation between rock noise rate and stress, then, we measured rock noise in the underground of some metal mines and the rate of occurrence of rock noise in the field were analysed.

Through these studies at laboratory and field, it was supposed that the rock failure would be predicted by counting the rock noise and an rock noise counter was developed.

1. 緒 言

一般に固体に荷重が加わる場合、その荷重が固体の破壊荷重近くなれば、ある種の音が発生することはよく知られていることである。岩石、石炭等の場合にもこれと同様な現象がみられ、この音は岩石の破壊間近になれば直接耳で聞くことも出来るが、ある種の装置を用いれば、この音は破壊に至るかなり前から発生していることがわかる。

この音の発生は、岩石強度と荷重とに関連があり、また岩石の種類によつて異なるが、この音の発生状況を観測することによつて、岩ハネ、岩盤の崩落等を予知しようという試みは、すでに1940年代に実施されたが¹⁾²⁾、当時は実用の段階には至らなかった。最近になつて、またこの方面の研究も進められているが、筆者等も岩石の破壊音を利用して崩落等を予知する方法は、計測法に改良

を加えるならば実用に供し得るものと考えて、岩石の破壊音の特性並びにその計測法について実験室において基礎的研究を進めるとともに、鉱山の現場において実測を行ない検討を行なつてきたが、実用の見通しが得られたので、その結果について報告する。

2. テストピースについての岩石破壊音

岩石に対する荷重が漸次増加し、ついにはこれが破壊に至る間、どのような音が、どのような状態で発生するかを知ることは、最も基本的な問題であるので、各種の岩石試料に対して圧縮荷重を加え、その時に発生する破壊音の特性について測定を行なつた。

2.1 測定装置並びに方法

測定装置のブロックダイアグラムを第1図に示す。すなわち、整形した円錐状あるいは角錐状の岩石試料に対して、一定速度にて荷重を漸増し、その際に発生する破壊音(微小振動)をピックアップにより電氣的出力に変換し、これを増幅後、オクターブフィルタにより各周波数に分け、エンベロープを通して電磁オシロあるいはペン書きオシロに記録する一方、必要に応じては、この音をテープレコーダに録音し、また、ブラウン管オシロに

* 昭和37年5月23日受理

日本鉱業会昭和33年度秋季大会および36年度春季大会にて発表

** 工博 資源技術試験所 第6部長

*** 工博 資源技術試験所 第6部第1課長

**** 資源技術試験所 第6部第1課 (現北海道支所)

***** 資源技術試験所 第6部第1課

第5図 破壊音の記録例（電磁オシロ）

定速度にて荷重を加え、その間に発生する音をオクターブフィルタにより各周波数成分に分け、電磁オシロに記録した一例を第5図に示した。これ等の記録結果（ペン

書きオシロを使用した場合もある）から、求めた荷重と破壊音の発生数との関係の数例を第6図に示した。なお、この場合、荷重はそのテストピースの破壊荷重に対するパーセンテージをもつてあらわし、破壊音は各周波数成分別に計数した。

これ等の結果をみるに、破壊音は各岩石とも概して高い周波数成分を含んでいる。また、破壊音の何れの周波数部分を対象にして考えても、概して、荷重の増大に応じて音の数は増大する傾向を示しているが、中でも、この傾向は、周波数の高い成分を対象とする場合に顕著にあらわれることが多い。なお、岩石の種類によっては、破壊音のどの周波数成分を対象にして考えても荷重と破壊音の発生数との関係が明確でないものがあるが（例えばある種の砂岩）、この種の岩石は、破壊音により崩落を予知するには不適当な岩種ということが出来るのではなかろうか。また、荷重の加えはじめにおいて、音の発生数が非常に多いものも見受けられるが、これはテストピースの端面の不平行、凹凸等にも原因があるものと考えられる。

第6図は乾燥したテストピースについての測定結果であるが、テストピースが湿潤なる場合には、その破壊音の周波数成分は、乾燥した場合とは異なるものと考えられる。第7図は、二三の湿潤試料について求めた破壊音の周波数分析の結果であるが、これを乾燥試料のそれと対比してみるならば、試料が湿潤なる場合には、乾燥している場合に比べて、概して高い周波数成分を含む破壊音が少なく、水分があたかも潤滑剤の役目をはたしてい

第6図 荷重と破壊音の関係（乾燥試料）

（周波数の区分は第6図と同じ）

第7図 荷重と破壊音の関係（湿潤試料）

るように見受けられる。この傾向は吸水性の大きな岩種について特に顕著にあらわれる傾向がある。

3. 現場における岩石破壊音の計測

実験室において岩石試料に加圧した場合、荷重の増加に応じて破壊音の増加が認められた。しかし、テストピースについての実験においては、その加圧速度が現場における地圧変化速度とは全く異なり、荷重方向も異なりまたテストピースと実際の岩盤とはその大きさが極端に異なる等、実験室と現場とでは条件が大きく相違するため、実験室の計測結果より直ちに現場における岩石の破壊音の発生状況を推測することは出来ない。しかし、実験室における実験結果から推測すると、ある地圧下に存在する岩盤中には、テストピースについて得られたと同様な岩石の破壊音の存在が認められるはずであるので実際に現場において破壊音の計測を行なった。

3.1 計測装置および計測方法

現場測定を行なうに当っては、岩石の破壊音自体は実験室で得られるものと同様と考えられるが、その発生頻度は不明であること、他の機械的あるいは電気的雑音の混入のおそれがあること、ピックアップの位置と計測位置とは時には相当距離がある等、実験室における測定とは計測条件も異なるので、計測法もその条件に適したものを選ばなければならない。本測定を実施するに当つては、これ等の条件を考慮する一方、破壊音に関する資料を、より多く求め、解析を容易にするために、ピックアップは岩盤に取付け、破壊音を増幅後、フィルタ、エンベロープを通してペン書きオシロに記録する方法を採用した。この測定様式はピックアップの部分を除いては、実験室における測定様式（第1図参照）と同様であり、装置も実験室のものをそのまま利用したが、ヘッドアンプのみは特に坑内使用に便なるように、トランジスタ式の小型、軽量のものを用いた。

すなわち、現場測定においては、ピックアップは坑内における取扱いに際しての破損を防止し、岩盤への固定、雑音防止等の必要上、ホルダ中におさめ、岩盤のボアホール中に固定することを原則とした。ホルダ中にピックアップをおさめたこのプローブの形は、外径40mm程度の先端が円錐状の円筒形であり、とくにボアホールの深部（孔口より数10m深部）にプローブを設置する場合には、孔口からその固定操作を行なうことの出来る特別に設計したプローブを使用した。なお、ピックアップとしてはチタン酸バリウム、ロッシェル塩などの圧電型と電磁型の両方を用いた。

プローブにより電気量に変換された破壊音は、ヘッドアンプにより増幅され（約80db）、フィルタにより坑内作業等に基づく雑音を除く一方、最もその岩石の破壊音

の特徴となる周波数成分を選び出す。なお、この場合、対象岩石の破壊音の周波数に関する特徴は、あらかじめテストピースについて実験室において測定しておき、この結果を参考にして選ぶべき周波数成分を定める。次に、この汨波された破壊音はエンベロープによりその振動波形が変えられ、ペン書きオシロに記録、計測される。この際、必要に応じては爾後における破壊音の解析に利用するために、破壊音はテープレコーダに録音した。

なお、プローブをボアホール内に固定した後は、ボアホールの口を粘土等で密閉してプローブが空気中の音を拾わないよう注意した。また、通常、プローブの位置と計測装置の位置とは数10m離れており、この間を接ぐケーブルが電気的雑音を拾うおそれがあるので、ヘッドアンプのみは出来るだけプローブに近く配置して電気的雑音が計測値に混入しないよう留意した。

第8図は、坑内における計測装置を示したものである。

（ヘッドアンプはプローブの側に置かれたため、この写真には見られない）

第8図 坑内に置かれた計測装置

3.2 測定結果

現場測定は、二三の金属鉱山において行なった。

3.2.1 発破後における岩石破壊音の変化：第9図はA鉱山の坑内において坑道側壁に対して発破をかけた場合（岩質：珪質角閃岩、装薬量：100g×1本）の発破後における音の発生数の時間的变化を示したものであるが、装薬量が少ないため、破壊音は10min 足らずで安定状態に入っている。第10図は、B鉱山の坑内、採掘跡周辺部において、装薬量100g×300本により、約30m³を起砕した時の岩石破壊音の発生と時間との関係を示したものである。なお、この岩石に対する破壊音の周波数分析をテストピースについて行なった結果を参考のために示すならば第11図のようである。この現場測定においては、破壊音は連続して10時間ペン書きオシロに記録し（周波数成分としては2,400～9,600c/sを選んだ）、これについて計数を行なったが、発生頻度は便宜上10min 当り

第9図 発破後における音の発生数の時間的変化 (A 鉱山)

第10図 発破後における音 (2,400~9,600c/s) の発生数の時間的変化 (B 鉱山)

(周波数の区分は第6図と同じ)
第11図 B 鉱山の岩石に対する荷重と破壊音の関係

のカウント数であらわした。第12図は、その記録例の一部を示したものである。この結果をみるに、発破の影響の大きいのは発破後1時間程度までであり、以後は漸減して8時間以上経過すれば、発破の影響は消え去り、この測定場所における地圧に起因した恒常的岩石破壊音——いわゆるバックグラウンドノイズ——とでも称すべき音が引続いて発生している。

第13図はC鉱山において行なった同様な測定結果(岩質:粘板岩、装薬量:100g×105本、起爆量:約8m³)を示したものであるが、この場合は破壊音の発生数が少なかった関係上、発生頻度をあらわすには1hr当りの

(同一プローブの音を2つに分けて記録, 上部 600~2,400c/s, 下部2,400~9,600c/s)

第12図 岩石破壊音の現場記録の一部

第13図 発破後における音(2000~8000c/s)の発生数の時間的変化 (C 鉱山)

カウント数をもつてした。この場合は、2時間目には既にバックグラウンドノイズのレベルに落着いている。

以上の測定結果をみるに、発破の規模、岩質等によって破壊音の絶対数(破壊音の絶対数は、計測装置の感度によっても大幅に異なる)は異なるとはいえ、何れの場合においても、発破直後においては破壊音の数は極めて多いが、これは急激に減少し、爾後は漸減する傾向を示している。これは平衡状態にあつた岩盤内応力の平衡が発破により破れ、発破直後においては不安定な状態を現出するが、この不平衡の大部分は急激に回復し、以後岩盤は安定状態に入るためと推測される。この過程は、地圧が漸増し遂には崩落に至る過程のあたかも逆の過程に

第14図 恒常的な岩石破壊音の発生状況

類似しており、発破後における時間と破壊音の関係を知ることにより、破壊音が漸増して崩落に至る過程を推測し得るものと考えられている²⁾³⁾。

3・2・2 測定位置による岩石破壊の変化：同一鉱山の同一岩種についても、地表からの深度、周囲の採掘状態等により、破壊音の恒常的発生状況は異なる。

第14図はB鉱山の鉱柱内において測定した岩石破壊音の発生頻度を示したものである。この鉱柱は、その内部に地圧の増大に伴う亀裂の発生をみるなど、ほとんど破壊に達しており、地圧も徐々にではあるが増加している状態にあった（地圧は、光弾性ガラスおよび地圧計により、その変化を、破壊音の計測後測定した結果、6カ月間に4~6kg/cm²増大していることが判明した）。この測定結果を第10図に示した測定結果と比較してみるに両測定において、その岩質は同様であり、また、測定感度、周波数成分は共に同様に選んだにもかかわらず、鉱柱内における破壊音の発生数は極めて多く、10min当り200~400カウント程度、時にはそれ以上の値を示しており、このカウント数は第10図に示した発破直後の最も不安定な状態のカウント数に匹敵している。

また、別途C鉱山の各レベルにおいて破壊音を計測した結果

地表からの深度	カウント数
-25m	~0.04カウント/hr
-30	~0.3
-45	~3
-90	~10

程度のカウント数を得た。この結果をみるに、深度が大なるほど、単位時間当りのカウント数は大になる傾向を示している。

単位時間当りの破壊音の発生数をもつて、ただちに地圧の大小を推測することは危険ではあるが、上記の実測例から考えて、岩質が同一である場合、感度、周波数成分を同一にしたカウント数(恒常的破壊音の数)の多少は、地圧の大小を推測する目

安となるのではなからうか？ この問題については、今後とも、地圧測定と並行して検討を進めてゆく予定である。

4. 考 察

実験室においては、テストピースに荷重を加え、岩石破壊音の振動波形、荷重と破壊音との関係について研究する一方、現場においては、発破後における時間と破壊音との関係、恒常的岩石破壊音の発生状況等について観測を行なった。その結果、岩盤中にも、その岩石のテストピースについて得られたと同様な周波数スペクトルを有する破壊音の存在が確認され、また、この破壊音の数は地圧あるいは岩盤の安定度に関連を有し、破壊音の発生頻度の変化を知るならば、崩落の予知も可能になるものとの見透しも得られたが、実際に現場において破壊音の計測を行なうに当つては、考慮すべき問題も多いので、計測法その他主なる問題点について検討を行なった。

4・1 各計測方式の比較

現段階において考えられる破壊音の計測方式を図示すれば第15図のようであり、各方式にはそれぞれ長短がある。

破壊音のピックアップ法について考えてみるに、空気を介してマイク等を通して計測する場合⁴⁾と、ピックアップ(プローブ)を直接岩盤に取付けるか、あるいは岩盤に固着させたスチールロッド等に取付け(水を介して音をピックアップする場合も考えられる)、これを増幅して計測する場合とがある。前者の空気を介する場合においては、破壊音の振動が岩盤中を通り空气中に伝播されるとき、岩盤と空気との界面における反射が強く、空气中に伝播される振動エネルギーは極めて小さく、したがって、この振動を対象として計測を行なう場合には増幅度を大幅に高めなければならない、また、この場合空气中の雑音の妨害も受け易い。これに反して、岩盤に直接ピックアップを取付ける場合は、岩盤中を伝わる破壊音の振動を直接感受するため、岩盤と空気の界面における振動エネルギーの減衰がなく、感度の点において極めて有

第15図 各種計測方式のブロックダイアグラム

利である。

計数法としては、破壊音の数ばかりではなく、出来得れば破壊音のエネルギー、周波数、発生間隔等をも計測し得ることが望ましい。計数方式としては、(1) 耳で聞いて数える方式、(2) 電磁式、電子管式あるいはモータ式計数装置等を用いる方式⁹⁾、(3) 電磁オシロ、ペン書きオシロ等による記録計数方式、等が考えられるが、これ等の中、上記の計測条件を満足するものとしては(3)の方式が考えられる。(1)の方式は簡単であり、また、雑音と破壊音の区別もある程度まではなし得るという長所はあるが、個人差がある、長時間測定が困難である等問題も多い。

4.2 計測上の主なる問題点

岩石の破壊音を計測することにより崩落を予知する方法を実際に適用するに当つては、いろいろ問題点もあるが、主なるもの二三について述べる。

1. 雑音：岩石の破壊音を計測するに当つては、何れの計測方式、装置を用いるにしても、岩石破壊音を他の雑音と混同することなく正確に計数しなければならない。

(1) 空間雑音 岩石破壊音の観測には極めて高度の増幅を行なう関係上、ピックアップが空気中の音を拾うこともあるので、プローブは空間に露出することなく、例えばプローブをボアホール中に固定し、ボアホールの口元を粘土等で塞いで音から遮蔽することが必要である。

(2) 電氣的雑音 坑内には多くの電気機器があり、また、多くの電線も敷設されている。また、一方岩盤中には、これ等の漏洩あるいは誘導に基ずく迷走電流も存在している。このような坑内において、ピックアップの位置から離れて計測を行なう場合には、一般にその間を接ぐケーブルが、電線や迷走電流の誘導を受けて電氣的雑音を拾い、岩石破壊音と混合して増幅器に送られ計測される。この雑音は、今回の現場測定においては、極めて破壊音に類似しており、耳で聞きわけることも、フィルタにより除去することも出来なかつた。しかし、これはピックアップにヘッドアンプを出来るだけ接近させること、究極においては増幅器の一部をピックアップとともにプループ中に収め、ケーブルを通る破壊音のレベルを雑音のレベルよりも極度に高めることにより解決された。このようなことを考えるならば、たとえ電氣的雑音の存在が確認されない場合でも、計測を正確に行なうためには、プループにはピックアップとともに増幅器を内蔵させることが望ましい。

(3) 機械的雑音 坑内作業に伴う振動は岩盤中を伝播してピックアップに到達し、岩石破壊音の計測を妨害するが、この雑音の除去にはフィルタの利用が有効であ

る。

一般的機械的雑音は、その発生源においては極めて広い周波数スペクトルを有しているが、これが岩盤中を伝播する間の減衰は、周波数によつて異なるので、ある距離離れた点においては、その周波数スペクトルも異なってくる。すなわち、機械的雑音が岩盤中を伝播する間において、岩盤自体があたかもフィルタの働きをなし、周波数の高いものほど大きく減衰するので、機械的雑音源からある距離離れた点には、比較的周波数の低い波しか到達しないことになる。したがつて、一般的には雑音源よりある距離離れば(この距離は雑音源の周波数スペクトル、振幅、岩盤の減衰率等によつて異なる)比較的高い周波数成分を多く含む岩石破壊音とは周波数の点において大きな差異が生ずるので、弁別は容易になり、低周波部をフィルタでカットすれば雑音の混入を防ぐことが出来る。しかし、音のエネルギーが強大に過ぎる場合は、たとえフィルタを使用しても、完全にこれを除くことは不可能であるので、この場合は、坑内作業を休止している時間あるいは日を選んで計測を行なうことが望ましい。

2. 計測感度：岩石破壊音の発生状態が同一であつても、計測感度が異なれば計数し得る破壊音の数は異なり感度が低ければ音の数は少なく数えられる。したがつてとくに崩落予知のために破壊音を計測する場合には、長期間にわたる破壊音の発生頻度の変化を知らねばならないので、計測装置の感度は、ピックアップをも含めて常に一定に保たねばならない。なお、ピックアップとしては圧電型と電磁型を使用したか、経年変化、耐湿性、温度特性等の点において、実用には電磁型のものが適すると思われる。

3. 計測時間：破壊音の計測を行なうに当つては、1回の計測時間および計測間隔を、破壊音の発生頻度の変化が正確に把握されるよう選ばねばならない。すなわち第13図および第14図の例にみられるように、恒常的破壊音の発生頻度は必ずしも一定したものではなく、したがつて、1回の計測時間を比較的短かく選ぶならば、その計数値は数倍あるいはそれ以上異なることも起り得るので、計測時間を定めるに当つては、この点充分注意しなければならない。今回の実測例のような連続計測は望ましいことではあるが、業務として計測を実施する場合には必ずしもその必要はなく、休憩時間、夜間あるいは休日等日時を定めて一定時間計測を行ない、その結果を記録しておけば充分であると考えられる。

5. 結 言

岩石破壊音を利用する崩落予知法の実用化を目して、岩石破壊音の特性、計測装置および計測法について実験

室的に検討を進めるとともに、破壊音について二三の鉱山で現場計測を行った。

その結果、プローブ、アンプ、フィルタ、エンベロープおよびペン書きオシロの組合せにより、正確に岩石破壊音を計測することが出来、坑内における岩石破壊音の発生状況も僅かな例ではあるが明らかとなった。この結果、岩石破壊音の専用計測装置も製作され(16図)、崩落予知対策として岩石破壊音の連続計測を開始した鉱山もある⁷⁾。しかし、本予知法により、どの程度崩落を予知し得るかについては、未だ実測例もなく、確認されていないので、今後は、地圧計測等と併せて広く現場計測を行ない、その予知の信頼性について検討を進めると共に計測装置についても改良を行ない、より簡易化するように研究を進めてゆき度いと思う。また、このような破壊音の計測法はソ連等で研究されているようにガス突出の予知等にも利用の途が考えられるので、この方面への応用についても検討を進める予定である。

本研究を実施するに当っては、前黒川工業技術院長の理解ある御援助を頂くとともに、現場測定を行なうに当っては、各鉱業所長をはじめ担当各位の理解ある御協力を賜わった。また、実験に際しては、当試験所第6部山門、戸辺両技官の協力を得た。ここに深甚なる謝意を表

右：プローブ、中：計測部、左：記録部

第16図 専用計測装置

する次第である。

参考文献

- 1) Leonard Obert: Use of Subaudible Noises for the Prediction of Rock Bursts, Part I, U. S. Bureau of Mines, R. I. 3555, Jan. 1941.
- 2) Leonard Obert and Wilbur Duvall: 同上, Part II, U. S. Bureau of Mines, R. I. 3634, July 1942.
- 3) Lloyd E. Antonides: How You Can Predict Rock Falls, E. M. J. Dec. 1955.
- 4) 田中・麻生：落盤予知に関する基礎的研究，早稲田大学理工学部鉱山学研究报告 第6巻 第68,69号(1958)。
- 5) 水田・鈴木：岩石の亀裂音に関する研究，日本鉱業会誌 77巻 882号(昭和36年12月)
- 6) 鈴木・佐々木・塩原：岩石の弾性波特性とその応用，日本鉱業会誌 74巻 837号(昭和33年3月)
- 7) 出村 収：音波による崩落予知対策，九州鉱山学会誌 30巻 1号(昭和37年1月)

“選鉱成績の表示法”に対する二つの寄書

日本鉱業会誌78巻890号32ページに紹介した K. K. MAJUMDAR 氏の“選鉱成績の表示法”と題する提案に対して、二つの意見が The Mining Magazine 誌(1962年2月号および5月号)に寄せられているので、ここに要約して見たい。

(1) H. N. HEPKER (Assistant Consulting Metallurgist, Anglo American Corporation of South Africa, Ltd.): 我々は(実収率%×選鉱比)という指数を長年使用している。その経験から見て、結論的には、この効率指数だけで成績の比

較を行なうことは危険である。相対的に見た精鉱品位と実収率の経済的重要性を定量的に加味することによつて得られる修正効率指数を用いるならば、特定の場合に対してのみではあるが、正しい評価が可能であろう。

(2) J. S. JACOBI (Director of Research, Cerro de Pasco Corp., Peru): MAJUMDAR 氏の効率式に対して HEPKER 氏が指摘した欠点をなくすために、私は修正 Diamond 指数

$$\eta\% = R_A + R_B - 100 \text{ または}$$

$$\eta = \left(\frac{f-t}{c-t} \right) \left(\frac{c}{f} - \frac{100-c}{100-f} \right)$$

R_A : 有価値成分の精鉱実収率%,
 R_B : 脈石の除去率%, f : フィード品位, c : 精鉱品位, t : 尾鉱品位を用いることを提案したい。

いずれにせよ、これらの物理的効率式によつて選鉱成績を完全に評価することは根本的に望み得ないが、日常の成績の比較は可能であろう。一方、経済的次元において総合的に成績を評価するためには、実収率対品位の座標系に等価値線を描いた操作図表を用いるとよい。

(井上外志雄)