

ベンチカット発破に起因する発破音の軽減方法について

佐々宏一, 菊岡栄次, 李 義雄, 伊藤一郎*

この論文は、ベンチカット発破の発破音の軽減法を発破音の発生機構から検討した結果を示したものである。

ベンチカット発破の場合の発破音は、爆薬衝撃によって岩盤内に発生した強力な応力波が、最小抵抗線近傍の岩盤表面から屈折して空中に出てくる波動である。この波動、すなわち音波の岩盤表面での音圧レベルの最高値は、ほぼ 165dB (ピーク) であって、この値は、岩盤表面に到達する応力波の応力最高値と密接な関係にあるから、良好な破砕が行なわれる発破を行なう限りにおいては、この音圧はほぼ一定となり、減少させることはできない。したがって、発破音を減少させるためには、上記の音圧の音波が投射される面音源の大きさを小さくせねばならない。面音源の大きさを $1/n$ とすれば、発破音の音圧レベルは $10\log_{10} n$ だけ減少する。

一方、多列の段発破を行なって、前列の発破によって岩盤から分離し、まだ落下していない破砕片によって、後列の発破による発破音を遮へいするという方法も発破音の軽減に有効である。今回の実験では、時差が 0.25 秒の2列発破の場合の第2列の爆発に起因する発破音の音圧レベルは、同一薬量の1列発破の場合に発生する発破音の音圧レベルより 10dB 低かった。

以上のことから、第1列を MS 発破とする多列発破が発破音の軽減に最も有効であることが明らかとなった。

1. 緒言

発破公害の中で発破騒音の占める比率は、近年、かなり大きくなってきたようである。そこで筆者らは、発破音の発生機構を明らかにし、それにもとづいて、発破音が減少する発破方法について考察し、検討を行ったのでその結果について報告する。

2. ベンチカット発破に起因する発破音の発生機構¹⁾

ベンチカット発破に起因する発破音は装薬の爆発によって岩盤内に発生した強力な応力波が最小抵抗線近傍のベンチ壁面から空中へ屈折して出てくる音波がその主体をなしている。この場合、最小抵抗線近傍のベンチ壁面から空中へ投射される発破音の音圧レベルはベンチ高さ、 15m 、最小抵抗線長 3.5m 、孔間隔 3.0m 、装薬孔径 75mm 、装薬量 50kg/孔 の ANFO 爆薬を用いる石灰石の操業ベンチカット発破の場合には、ほぼ 165dB (ピーク) であり、この音波が投射される面音源の大きさは、Fig. 1 に示すように垂直方向にはベンチ面から装薬上端までの長さ、水平方向には、ベンチ壁面への波動の入射角がほぼ 25° 以下である範囲、

したがって、Fig. 1 に示したように、最小抵抗線の長さ (W) と孔間隔 (S) とがほぼ等しい n 孔斉発破の場合には、近似的に $n \times S$ なる長さとなる、という結果が得られている。

一方、自由空間中に存在する短辺の長さ $a(\text{m})$ 、長辺の長さ $b(\text{m})$ なる矩形面音源から、音の強さのレベルが $IL_0(\text{dB})$ なる音波が空中へ投射されたときに、面音源の中心軸上で音源から距離 $x(\text{m})$ だけ離れた位置の音圧レベル (SPL) $x(\text{dB})$ は次式のように

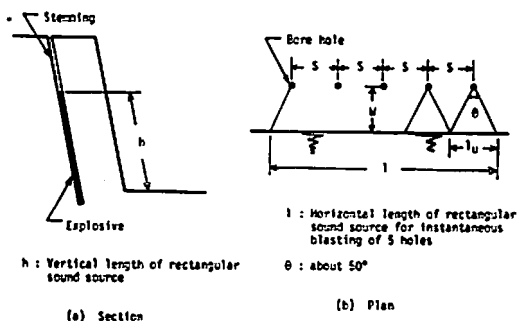


Fig. 1 Size of rectangular sound source where the sound having pressure level of 165dB (peak) is projected.

昭和52年10月5日受理

*京都大学工学部資源工学教室 〒606 京都市左京区吉田本町

なる³⁾。

$$(SPL)_x = IL_0 + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\pi} \sin^{-1} \frac{1}{\sqrt{1+X^2}} \frac{1}{\sqrt{1+(X/\xi)^2}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに $X = x/a$, $\xi = b/a$ 。

さらに、音圧レベル (SPL) は

$$SPL = 20 \log(P/P_0) \dots\dots\dots (2)$$

で示され、 P は音波の音圧、(単位は dyne/cm^2 または N/m^2)、 P_0 は基準音圧で $P_0 = 2 \times 10^{-4} \text{dyne/cm}^2 = 2 \times 10^{-3} \text{N/m}^2$ である。また、音の強さのレベル (IL) は次式で示される。

$$IL = 10 \log_{10}(I/I_0) \dots\dots\dots (3)$$

$$I = P^2/\rho_0 C_0 = \rho_0 C_0 v^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$I_0 = 10^{-12} (\text{W/m}^2)$$

ここに P は音圧、 v は音波内の粒子速度、 ρ_0 , C_0 は空気の密度および音速である。なお、通常の音波の場合には IL と SPL との間には (5) 式の関係が成立するので両者の値はほとんど等しい。

$$IL = SPL - 0.1 \dots\dots\dots (5)$$

さらに、Fig. 2 は (1) 式の関係を理解しやすいように ξ をパラメータとして X と (1) 式の第 2 項との関係を図示したものである。

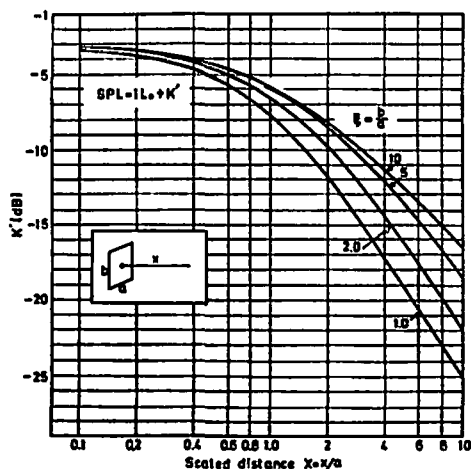


Fig. 2 Attenuation of sound pressure level with distance from rectangular sound source.

上記のように、ベンチカット発破に起因する発破音は最小抵抗線近傍のベンチ壁面から空中へ投射される音であるから、発生する音を小さくするためには IL_0 を小さくするか、それとも、面音源の大きさを小さくせねばならない。また一方、ベンチ壁面から空中へ投射された音を何らかの方法で遮へいすることによって、発破音を減少させる方法も考えられる。以下にこれらについて検討した結果を示す。

3. 発破音の軽減方法の検討

まず、 IL_0 について検討する。岩盤表面の任意の点 A から空中へ投射される音波の音圧 P_A とその点へ入射する岩盤内応力波の波動の進行方向の応力 σ_A との間には次の関係が存在している。

$$P_A = \frac{2\rho_0 C_0 \cos i}{\rho_0 C_0 \cos i + \rho C \cos j} \sigma_A \dots\dots\dots (6)$$

$$\sin j = \frac{C_0}{C} \sin i \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 ρ_0 , C_0 および ρ , C は空気および岩盤の密度と音波速度であり、 i は A 点への応力波の入射角である。ベンチカット発破のように長い円柱状装薬が爆轟した場合には、装薬の軸に直交する方向へ伝播する波動の応力値 σ と装薬軸からの距離 r との間には近似的に次式の関係が存在する³⁾。

$$\sigma = K(a/r)^{1.5} \dots\dots\dots (8)$$

ここに a は円柱状装薬の半径、 K は薬種と岩盤の性質とに關係する係数である。したがって、 IL_0 の値を規定する最小抵抗線とベンチ壁面との交点の位置へ入射する応力波の応力値 σ_B は、最小抵抗線長を W とすれば

$$\sigma_B = K(a/W)^{1.5} \dots\dots\dots (9)$$

となる。

一方、ベンチカット発破の装薬量 L は次式を用いて決められる。

$$L = \bar{C} W S H \dots\dots\dots (10)$$

ここに $\bar{C}$ は発破係数、 H はベンチ高さである。(10) 式は $S = \alpha W$ とおくと、

$$L = \bar{C} \alpha W^2 H \dots\dots\dots (11)$$

となる。さらに、装薬量 L は装薬長を βH とすると、

$$L = \rho_{(Exp)} \cdot \pi a^2 \beta H \dots\dots\dots (12)$$

となる。ここに $\rho_{(Exp)}$ は爆薬の密度である。したがって、(11), (12) 式より、

$$W = \sqrt{\frac{\rho_{(Exp)} \cdot \pi \cdot \beta}{\alpha \bar{C}}} a \dots\dots\dots (13)$$

なる関係が得られるから、結局、

$$\sigma_B = K \left(\frac{\alpha \bar{C}}{\rho_{(Exp)} \cdot \pi \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (14)$$

(14) 式の関係が得られる。(14) 式より σ_B 、したがって、 IL_0 の大きさは薬量には関係せず、適当な大きさの破砕片が得られるような発破を行うのであればほぼ一定となることがわかる。すでに実施した実験結果より、ANFO 爆薬を用いて石灰石を破壊する場合には、平坦特性の発破音の音圧レベル (ピーク) を問題にする

ときには、 $IL_0 = 165\text{dB}$ (ピーク)、実効値の音圧レベル (FAST) を問題とするときには $IL_0 = 153\text{dB}$ (FAST) となることが明らかとなっている⁹⁾。上記のように、 IL_0 の値はそれほど変えられないから、発破音を減少させるためには、面音源の大きさを小さくせねばならない。そのためには、Fig. 1 に示した各孔を段番号の異なる MS 雷管で起爆すれば、面音源の一边の長さを各孔を瞬発雷管を用いて斉発させた場合の $1/(\text{孔数})$ とすることが出来る。面音源の一边の長さが $1/n$ となれば、音圧のレベルは、(1) 式より、爆源からある程度離れば、

$$SPL(a \times b) - SPL(a \times b/n)$$

$$= SPL(a \times b) - SPL(a/n \times b) = 10 \log_{10} n \quad \cdots (5)$$

(5) 式に示すように $10 \log_{10} n (\text{dB})$ だけ小さくなる。この関係は音圧では $1/\sqrt{n}$ となることを示している。

(5) 式の関係を確かめるために、三菱鉱業セメント(株)東谷鉱山の石灰石採掘切羽において、5孔1列の斉発発破と5孔をMS1段～5段の雷管で起爆するMS発破とを実施し、ベンチ壁面から140mの地点で発破音を測定した。その結果、斉発発破の場合には5個のデータの平均値として 143.4dB (ピーク) という値が、また、MS発破の場合には3個のデータの平均値として 135dB (ピーク) という値が得られ、面音源の一边の長さが $1/5$ になると考えられるMS発破の方がほぼ 8dB 小さい音となった。この値は、 $10 \log_{10} 5 \approx 7(\text{dB})$ という計算値とよく一致している。このことは、このように各孔に段番号の異なるMS雷管を用いるMS発破を行うことによって、面音源の大きさを $1/(\text{孔数})$ としうるので、発破音を減少させることが確認できたことを示している。

なお、この関係は測定した発破音の波形からも理解することができる。すなわち、Fig. 3 は5孔斉発の場合の発破音の波形であり、Fig. 4 は5孔のMS発破のときの波形である。これらの図より、斉発発破の場合の発破音は単純なパルス的な波形をしているが、



Fig. 3 Blast noise for instantaneous blasting



Fig. 4 Blast noise for delay blasting with delay caps of MS-No.1-MS-No.5.

MS発破の場合の発破音にはMS発破の段間隔に相当する 25ms 間隔で5つのピークが見られる。これらのピークはそれぞれの爆破孔の爆発に対応していると考えられるから、Fig. 4 から圧力最高値が、最初に爆発した1本の爆破孔からの応力波によって生成した爆発音となっていることを理解することができる。なお、発破音の測定に用いた騒音計はBrüel & Kjær社のインパルス精密騒音計2209型である。

次に空中へ投射された発破音の遮へいについて検討する。ベンチカット発破に起因する発破音は、最小抵抗線近傍のベンチ壁面から空中へ出る音波であるから、多列発破を行えば、前列の発破で切り取られた破断面から、次の列の爆発に起因する発破音が空中へ投射されることになる。したがって、そのすぐ前に前列の発破により生成し、まだ落下していない破砕片があれば、それが遮音壁となり、後列の発破音はかなり減少する。このことに関しても、三菱鉱業セメント(株)東谷鉱山の石灰石採掘切羽において実験を実施した。発破音の測定は、第1列の5孔を瞬発雷管で斉発させ、第2列の4孔をDS2段の雷管を用いて 0.25 秒遅らせて起爆する発破について行った。

Fig. 5 は、ベンチ壁面に直交する方向に140m離れた地点で測定した発破音の波形を示したものである。Fig. 5 のb点以後に現われている圧力変化が第2列の爆発に起因する発破音であるから、その圧力 (135.6dB ピーク) は第1列の爆発に起因するもの (144.9dB ピーク) と対比すれば非常に小さくなっていることがわかる。

次にこの減衰の程度について検討する。まず、第1列の斉発発破を行ったときに生ずる最小抵抗線と自由面との交点の位置の最大変位速度を、振子と可変抵抗器とを用いて作った岩盤変位速度測定器を用いて測定したところ、 10m/S という値が得られた。したがって、第2列の爆発に起因する発破音が破断面から空中へ投射されるときには、Fig. 6 に示したように、第1列の発破による破砕片は破断面の前方ほぼ 2.5m の位置へ移動していることになる。

Fig. 7 に示すように、音源 S と受音点 P との間に遮音壁がある場合に、 P 点に到達する音の減衰量は、経路差 $\delta = A + B - d$ を音波の波長 (λ) の $1/4$ で除

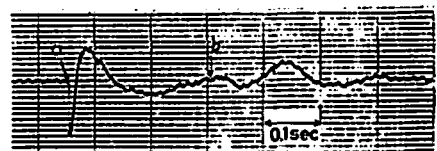


Fig. 5 Blast noise for multiple row blasting.

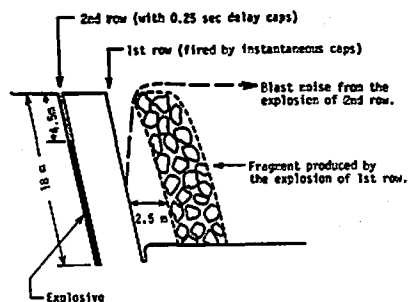


Fig. 6 Interception of blast noise by fragments.

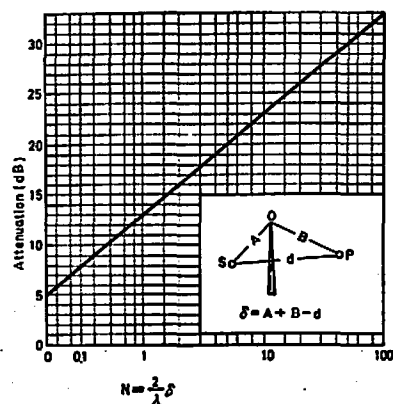


Fig. 7 Effect of interceptive wall on sound propagation.

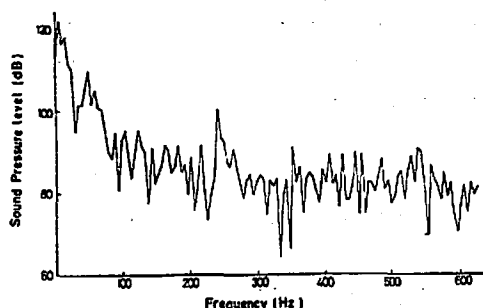


Fig. 8 Frequency spectrum for single row bench-cut blasting with delay caps of MS-No.1-MS-No.5.

した値 (N) を横軸にとって図示すると、Fig. 7 のようになる⁹⁾。Fig. 7 より、波長の短い波、すなわち、周波数の大きい波ほど減衰が大きいことがわかる。Fig. 8 は Fig. 4 に示した音波の周波数分析結果を示したものである。Fig. 8 より、この発破音の卓越周波数 (f_0) はほぼ 5Hz であることがわかる。

さらに、Fig. 6 より、この発破の場合の径路差 δ

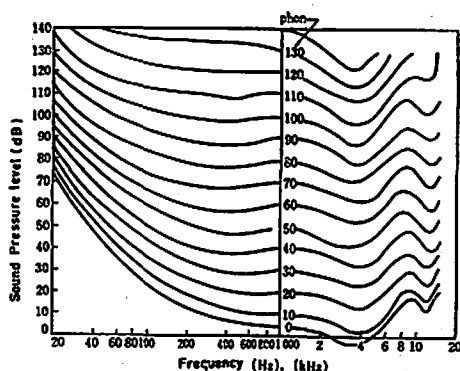


Fig. 9 Human response of sound

は、音が出てくる位置によって変わるが、平均的にみれば 10m 程度とみなすことができる。したがって、 $f_0 = 5\text{Hz}$ とすると $N = 0.3$ となるから、Fig. 7 より前列の破砕片による発破音の減衰量はほぼ 10dB になるという結果が得られる。これは上記の実測結果とよく一致している。

最後に感覚的大きさについて検討する。Fig. 9 は人間の等聴感曲線を示したものであるが、図より、人間は周波数の低い音、とくに、ほぼ 50Hz 以下の周波数の音に対してはかなり鈍感となることがわかる。したがって、周波数の低い音を出せば、たとえ音圧のレベルが同じであっても、その感覚的大きさは小さくなる。Fig. 3 に示した斉発発破の場合の音圧波形と Fig. 4 に示した MS 発破の場合のそれとを対比してみると、明らかに MS 発破の方が主要周波数が低いことが解り、さらに、Fig. 5 の第 2 列の爆発に起因する発破音の主要周波数は第 1 列のそれよりも低いことがわかる。したがって、人体感覚から考えても、MS 発破、および多列発破は有効である。

以上の検討結果より、発破音を小さくするためには、第 1 列は各孔を段番号の異なる雷管で起爆する MS 発破とし、第 2 列以降には前列の起爆時間からの遅れ時間が 0.25 秒程度以下である同一段の雷管を使用する多列発破が有効であることが明らかとなった。なお、発破音の軽減効果に関する上記の現場実験結果は、A. B. Andrews による実験結果¹⁰⁾ とほぼ一致している。

4. 結 言

ベンチカット発破に起因する発破音の発生機構に立脚し、第 1 列の爆発に起因する発破音を減少させるためには、面音源の大きさを小さくするのが最も有効であること、および、段間隔の短い多列発破をすれば、第 2 列以降の爆発音は前列の爆発によって破砕された破砕片によって遮音されるので、ほとんど無視で

きるほど小さくなることなどを示した。これらの結果は発破音公害の軽減に役立てうるものと考えられる。

最後に、発破騒音の軽減法に関する現場実験は、三菱鉱業セメント(株)東谷鉱山の協力を得て実施したものである。片山章鉱山長、細谷光一課長、および、直接実験を援助していただいた松坂総一郎氏に深く感謝する次第である。

また、この研究は、昭和50年度および51年度の文部省科学研究費(一般B)、および第7回(昭和52年度)火薬工業技術奨励会研究助成金の補助を受けて実施したものである。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 佐々宏一, 菊岡栄次, 李義雄, 伊藤一郎: 日本鉱業会誌, 94, 1054, 1978
- 2) 例えば, 現代音響学, 牧田康雄編著, オーム社, 1976, p. 234
- 3) 佐々宏一, 伊藤一郎, 奈良平俊彦: 工業火薬協会誌, 38, 2, pp. 91~97, 1977
- 4) 参考文献 1)
- 5) 例えば, 文献(2), p. 241
- 6) A. B. Andrews: Mining Congress Jour., pp. 20~25, May, 1975.

How can reduce a blast noise from bench-cut blasting

by Koichi Sassa, Eiji Kikuoka, Iun RI, Ichiro Ito

A few possible methods to reduce blast noise are discussed based on the emissive mechanism of blast noise. The blast noise caused by bench-cut blasting is ascribed to the refraction wave of the strong stress wave in rock at the bench surface near the burden. The pressure level of the sound at the free face near the burden is about 165 dB (peak), and it can not be reduced to get good fragmentation. Reduction of the area of sound source is effective to reduce the blast noise, and it is concluded that the pressure level of blast noise is decreased to $10 \log_{10} n$ when the area is reduced to $1/n$. On the other hand, the interception of the blast noise by the fragments produced by the explosion of the first row is also very effective. In this study, decrease of 10 dB was obtained when the charges in the second row were fired with 0.25 sec delay caps.

As shown above, both the reduction of the area of sound source by using delay caps for firing the first row and the adoption of multiple row blasting are very effective to reduce the blast noise.

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida Honmachi Sakyo-ku, Kyoto)