

Table 1 Condition in blasting Experiment

No.	Explosives	Weight (g)	Initiation method
1	S-1	400	Indirect
2	S-1	400	Direct
3	Shiraume	400	Indirect
4	Shiraume	400	Direct
5	Shiraume	300	Direct
6	Shiraume	300	Indirect
7	S-1	300	Direct
8	S-1	300	Indirect
9	Shiraume	600	Direct
10	Shiraume	600	Indirect
11	S-1	600	Indirect
12	S-1	600	Direct

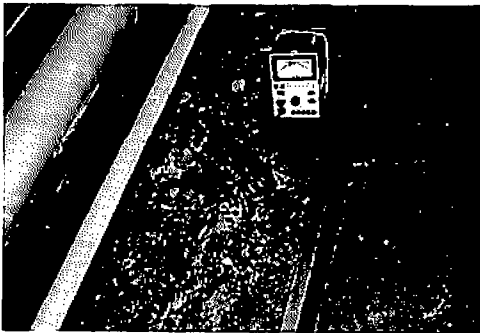


Fig. 3 Measured point B in the inclined shaft

2.2 発破実験

実験は、Table 1に示すように、正起爆法と逆起爆法で、それぞれ6回づつ爆薬の種類と装薬量を変えて計12回の実験を行った。

実験で使用した爆薬は、炭鉱用の400gクラスの検定起爆である白梅ダイナマイトと含水爆薬S-1の2種類である。また、装薬量としては、300g、400g、600gの3種類の薬量で実験した。

2.3 実験データ解析法

測定した振動波形からパワースペクトラムを求めるには、時間軸上のデータ $g(t)$ を周波数軸上の関数 $G(f)$ に変換する必要がある。このため、測定データ $g(t)$ のフーリエ変換を行う。

フーリエ変換を行う基本式は、次式を用いる⁵⁾。

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

パワースペクトラムは(1)式をより

$$1G(f)^2 = G(f) \overline{G(f)} \quad (2)$$

(1)と(2)の基本式を利用して、振動波形をデジタル的

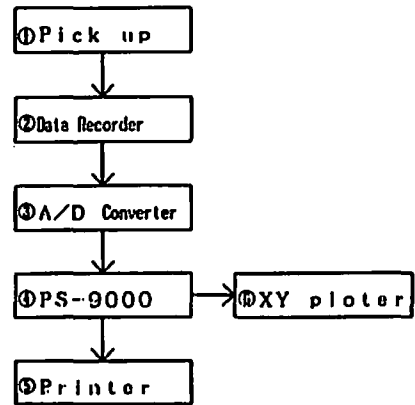


Fig. 4 Flow chart of experiment

に高速フーリエ変換を行うための解析プログラムを製作し、パワースペクトラムを求める⁶⁾⁷⁾。

今回の実験でのA/D変換のサンプリングレートは、20KHZの高速度でサンプリングし、岩盤衝撃振動の周波数領域を十分にカバーできるように配慮した⁸⁾。

Fig. 4には、振動波形解析の流れを示している。①→②までは、坑内での実験の流れで、③→⑤及び⑥は、坑外の実験室での解析処理の流れである。

2.4 解析結果

パワースペクトラム解析結果から正起爆法と逆起爆法比較してみると、両者の間に大きな差は認められなかった。このことから、同じ種類の爆薬で装薬量が同じ場合には、岩盤に加えられるエネルギー量がほぼ同じ程度のもので推定できる。また、装薬量が同じで白梅ダイナマイトと含水爆薬を比較してみると、含水爆薬のほうが高い値を示す。

実験5(白梅ダイナマイト300g、正起爆法)と実験6(白梅ダイナマイト300g、逆起爆法)の測点Aの解析

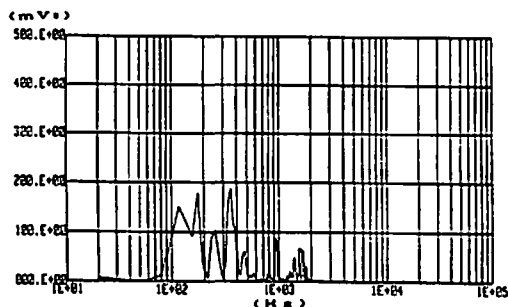


Fig. 5 Power-spectrum analysis of measured point A in experiment No.5

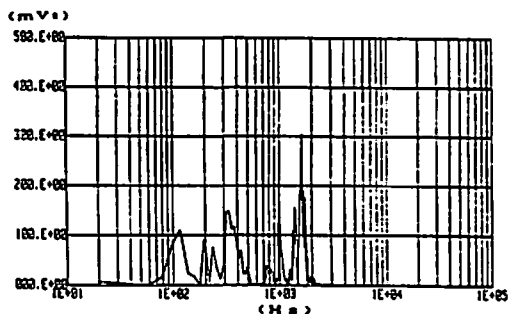


Fig. 6 Power-spectrum analysis of measured point A in experiment No.6

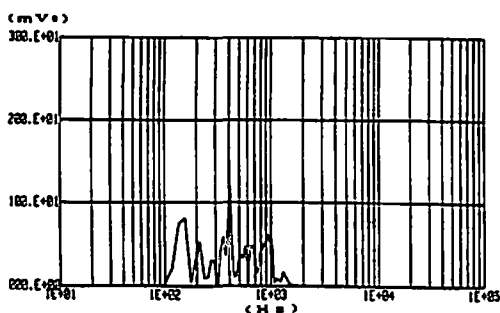


Fig. 7 Power-spectrum analysis of measured point B in experiment No.6

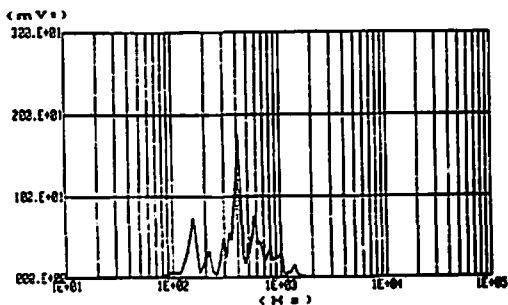


Fig. 8 Power-spectrum analysis of measured point B in experiment No.8

結果をFig. 5とFig. 6に示す。また、実験6と実験8(含爆薬300g、逆起爆法)の測点Bの解析結果をFig. 7とFig. 8に示す。

2.5 検 討

パワースペクトラム解析結果から、岩盤に加えらるエネルギー量が起爆法の相違によらず、ほぼ同程度のものであることから、岩盤の破壊に使われるエネルギー量も、ほぼ等しいものと思われる。つまり、起爆法の相違による発破効果の差は、エネルギー量的には、ほとんどないものと思われる。

3. 有限要素法による発破効果の検討

3.1 数値計算法

有限要素法は、岩盤や構造物の破壊をシミュレーションする一つの手法として広く用いられている。今回の研究では、この有限要素法を用いて、起爆法の相違で岩盤がどのように破壊していくかのシミュレーション計算を行ったので、その解析結果を報告する。

数値解析は、二次元モデルの応力ひずみ状態で考えている。時間に関する数値積分法は、爆破衝撃波の動的問題に適合しているNewmarkの手法を用いている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

変位を U 、加えられる外力を P 、質量を M とすると、単位時間において、次式が成立する。

$$\ddot{U} = (P - R) / M \quad (3)$$

これを上記のNewmarkの積分手法により、時間 tn における速度及び変位は、次式で表わされる。

$$U_{n+1} = U_n + \dot{U}_n \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \ddot{U}_n \Delta t^2 + \beta \ddot{U}_{n+1} \Delta t^2 \quad (4)$$

$$\dot{U}_{n+1} = \dot{U}_n (1 - \gamma) + \gamma \ddot{U}_{n+1} \Delta t \quad (5)$$

U_n 、 \dot{U}_n 、 \ddot{U}_n は、それぞれ第 n ステップにおける変位、速度、加速度を表し、 β と γ は積分定数で、 Δt は、第 n ステップと第 $n+1$ ステップの時間間隔である。今回の解析では、 $\beta=0.2$ 、 $\gamma=0.7$ としている。

計算手法は、まず最初に時間間隔の終りに、各点の質量の加速度の値を仮定し、次に変位および加速度を計算する。そして、求めた変位に対して、その構造物をたわんだ形状に保つのに必要な抵抗力 R を計算する。

次に、この計算した抵抗力 R と加えられる外力とから、そのときの加速度を計算する。計算した結果の加速度と、最初に定義した加速度を比較して、その差が1%以内であれば計算を終わり、1%より大きければ新しい加速度を仮定して、1%以内になるまで計算を繰り返す。

3.2 入 力

入力波形は、Fig. 9に示すように、爆薬衝撃波を近似する三角波とし、ピーク値までの立上がりの時間を

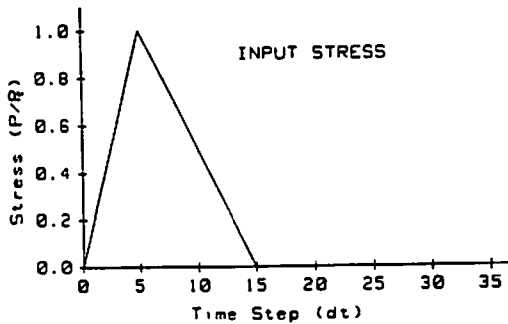


Fig. 9 Input of triangle stress

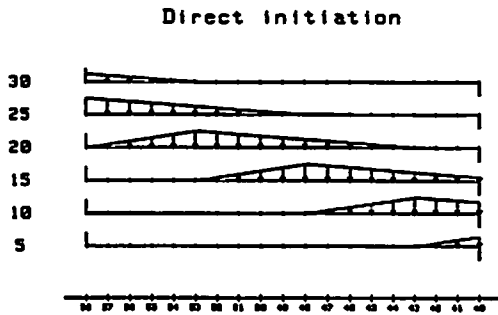


Fig. 10 Input stress of Direct Initiation Method

5Δtとし、減衰までには立上りの時間の2倍の時間10Δtとし、これ以後は0とする入力波を定義する。

起爆法の相違による入力波形は、孔口部から入力していく正起爆法と孔底部から入力してくる逆起爆法の2種類で行った。Fig. 10には、正起爆法における入力の状態を示したもので、逆起爆法の場合にはこの入力法と左右が、反対となる。

なお、入力波において、今回の解析ではガス圧の影響は考慮していない。

3.3 破壊条件

破壊の発生条件は、応力波の伝搬にともない破壊が進行し、引張応力によりクラックが発生すると仮定して解析した。すなわち、岩盤の引張強度を σ_t とすると要素の引張応力が σ_t 以上になると破壊が発生し、クラックが発生すると仮定する。そして、クラックが発生した要素は、引張応力方向の弾性定数を0に置き換える。

3.4 解析モデル

解析モデルは、Fig. 11に示すように、掘進坑道の切羽において、心抜き用の空孔をもつバーンカットを対象として解析した。この図で数値解析の対象としたのは、点線と自由面で囲まれた部分で、427個の接点で三角要素756個に分割して解析した。

3.5 解析結果

3.5.1 正起爆法による解析結果

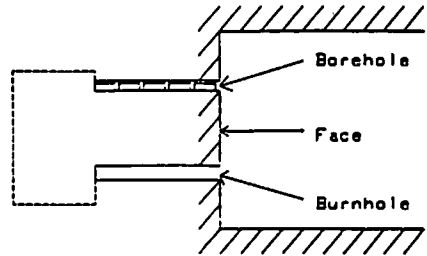


Fig. 11 Analysis model of burn cut blasting in the advancing drift

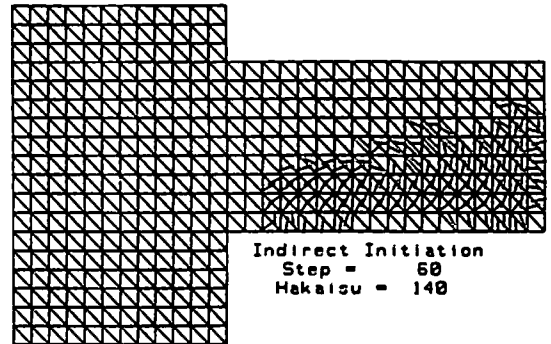


Fig. 12 Numerical fracture patterns of Direct Initiation Method

正起爆法による解析結果から、入力波形が孔口の切羽面から孔底に進行することで、最初に孔口付近での入力の段階で、孔底部で引張破壊が発生する。次に、切羽面付近で破壊領域が発生する。応力波の入力が、孔口から孔底部へと進行するにつれて、破壊領域も切羽付近から、深部へと発達していく。そして、孔底よりも深部でも破壊領域が表われる。つまり、破壊領域が孔底部より深部から切羽面までの広い範囲で分散して、発生することが判明した。

正起爆法での最終的な解析結果をFig. 12に示す。

3.5.2 逆起爆法による解析結果

逆起爆法による解析結果では、入力波形が孔底部から孔口に進行することにより、最初に孔底部の入力で、空孔の孔底部付近で破壊領域が発生する。次に、入力波が孔口へと進行していくに従って、破壊領域も切羽面まで発達していく。このため、孔底部より深部では破壊が発生せず、切羽面付近で大きな破壊領域が集中的に発生する。つまり、孔底部から切羽面までの間で破壊が起こり、特に切羽付近に集中して破壊が発生することが判明した。

逆起爆法での最終的な解析結果をFig. 13に示す。

3.6 発破効果の検討

有限要素法を用いた解析結果から、起爆法の相違による発破効果を検討してみると、最終的な収束段階で

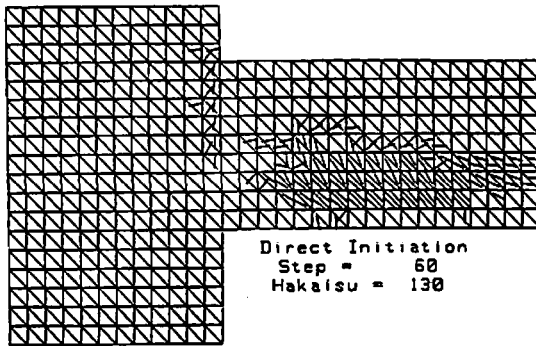


Fig. 13 Numerical fracture patterns of Indirect Initiation Method

の要素の破壊数では、逆起爆法が正起爆法より1割弱ほど多く、また、正起爆法で発生する破壊領域で孔底部より深部のは、切羽付近の破壊領域とは、つながりがなく、十分に破壊されたとは判定しにくい。

このため、これらの解析結果から、逆起爆法が正起爆法に比べて発破効果がよいものと思われる。つまり、逆起爆法では、応力波が自由面に向かって進行することで、爆薬のもつ破壊のエネルギーが、破壊しやすい切羽付近に集中することで、有効的に使用されるものと思われる。

これに対して、正起爆法では、応力波が自由面とは逆方向に進行することで、切羽の深部まで破壊のエネルギーが分散し、表面に表われる発破効果がよくないものと思われる。

また、発破後の切羽面の状態が、正起爆法より逆起爆法が、良好であるのは、この解析結果とも一致する傾向にある。

4. 結 論

発破時に発生する岩盤衝撃振動を測定し、その振動波形の周波数解析結果と、有限要素法を用いた岩盤破壊のシミュレーション計算結果から、起爆法の相違による発破効果について検討してみた。その結論として、以下のことが判明した。

- (1) 岩盤衝撃振動のパワースペクトラム解析結果から、岩盤に加えられる全体的なエネルギー量は、

起爆法に関係なく、ほぼ等しい。

- (2) 有限要素法による解析結果から、逆起爆法が正起爆法に比べて、発破効果がよい。

以上の2つの解析結果から、まとめると、逆起爆法が、正起爆法に比べると爆薬のもつエネルギーを、有効的に破壊に用いているものと思われる。

謝 辞

本研究で使用した有限要素法の解析プログラム作製については、山口大学工学部の中川浩二教授に多大な御指導を受けた。ここに、謝意を表わす。

文 献

- 1) 清正 稔：採鉱と保安, Vol.30, No.6 pp292~301 (1984)
- 2) 古閑 豊, 井清武弘, 田代 襄：工業火薬協会誌, Vol.46, No.6, pp384~391(1985)
- 3) 田中 誠, 手島利之, 古閑 豊, 井上邦三, 和田良馬, 松隈太郎, 井清武弘, 田代 襄：採鉱と保安, Vol.31, No.11, pp568~574(1985)
- 4) 古閑 豊, 手島利之, 田中 誠, 緒方雄二, 井上邦三, 和田良馬, 松隈太郎, 井清武弘, 清正 稔：工業火薬協会誌, Vol.47, No.5, pp278~286 (1986)
- 5) A.バボリス：応用フーリエ積分, オーム社
- 6) 城戸健一：FFTアナライザー活用マニュアル I, II, 日本能率協会
- 7) 安居院 猛, 中嶋正之：FFTの使い方, 秋葉出版
- 8) 社団法人日本トンネル技術協会編, トンネル工事の発破振動および騒音対策に関する調査研究報告所
- 9) Newmark, N. M. : Proc, ASCE, EM3, pp67~94, (1959)
- 10) 中川浩二, 坂本 佐, 山本頭一郎：材料, Vol.29 No.322, pp736~741 (1980)
- 11) 橋本堅一, 工藤洋三, 山本頭一郎, 中川浩二：「徳山工業高等専門学校研究紀要」 pp109~114(1982)

Discussion on Blasting Effect of Difference between Direct and Indirect Initiation

by Yuji OGATA*, Makoto TANAKA*, Toshiyuki TESHIMA*,
Yutaka KOGA* and Takehiro ISEI*

The blast vibrations have been measured to know the difference in blasting effect between direct and indirect initiation method, and analyzed the power-spectrums of those vibrations. And the simulation analysis of the blasting effect have been conducted using a finite element method. Conclusions are briefly summarized as follows:

(1) From the observation and the analyzed results of the blast vibrations, it is showed that the total energies given to the rock body from both the direct initiation and indirect initiation are roughly same.

(2) In the simulation analysis of blasting effect using a finite element method, however, it is shown that the indirect initiation have larger blasting effect than the direct initiation.

(3) As the conclusion of those results, the indirect initiation uses the energy of explosives itself effectively for its blasting more than the direct initiation.

(*Coal Mine Safety Research Center, Kyushu, National Research Institute for
Pollution and Resources
1142 Nishinogo, Usui-Cho, Kaho-gun, Fukuoka Pref., 820-5, Japan)
