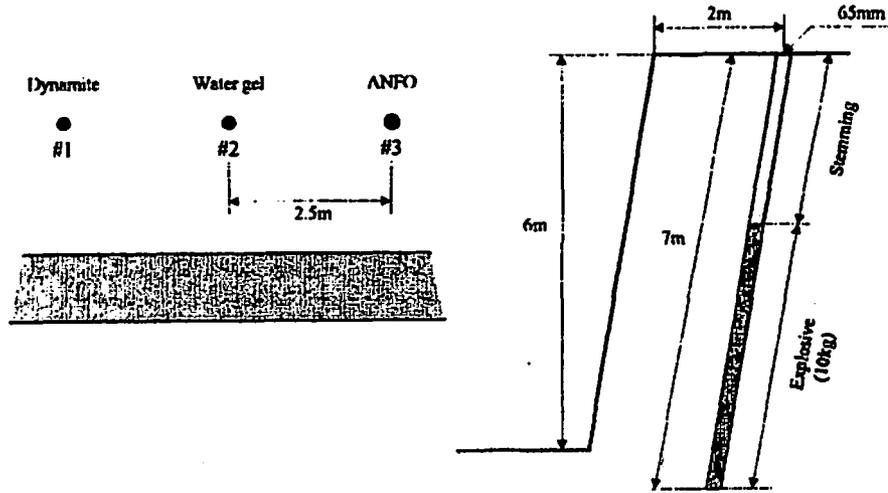


Table 1 Characteristics of blasting design

Type of explosive	Dynamite	Water gel	ANFO
Explosive diameter (mm ϕ)	50	50	65
Explosive density (kg/m ³)	1,300~1,400	1,200~1,300	800~900
Weight strength	0.94	0.89	0.84
Detonation velocity (m/s)	5,500~6,500	5,000~5,500	2,500~3,500

Bench (a)



Drop cut (b)

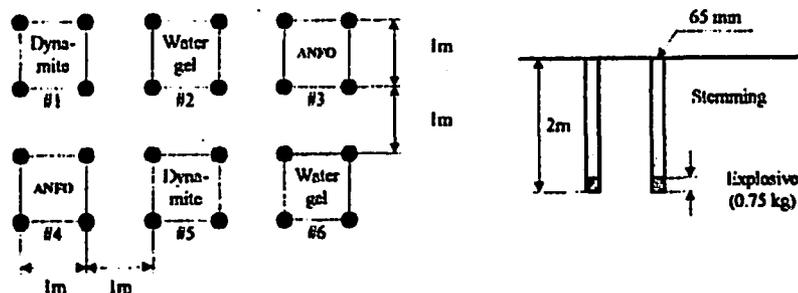


Fig. 1 Blasting patterns for explosive type variation experiment

安山岩であった。発破地点から10~20m離れた領域で測定した地山縦波弾性波速度は約2,500~3,800m/sであった。

爆薬種類が震源スペクトルに与える影響については、爆薬種類を変えたベンチ高さ6mのベンチ発破(a)とさく孔長2mの盤下げ発破(b)の2種類を実施し、その変位速度を切羽近傍にて測定し、発破方法毎に爆薬種類の変化による震源スペクトルの変化を観察することにより行った。採用した爆薬は、前報¹⁾において採用したものと同一で、ダイナマイト(旭化成工業(株)製 3桐)、含水爆薬(旭化成工業(株)製 サンベックス-100A)、ANFO爆薬(旭化成工業(株)製)の3種類である。各爆薬の主要性能をTable 1に、発破パ

ターンをFig. 1に示す。

ベンチ発破(a)では、3孔の装薬孔を使用し、各孔に装薬する爆薬を変えた。盤下げ発破(b)では、装薬孔4孔を1単位として斉発し、Fig. 1のように、6単位に対して装薬する爆薬を変えた6段発起爆を行った。なお、盤下げ発破(b)の単位毎の起爆には斉発の起爆秒時ばらつき標準偏差が70 μ s以下の電子遅延式雷管(旭化成工業(株)製 EDD)を使用し、各単位内での起爆ばらつきによる波動干渉が発生しないよう考慮した。実験は何れも2回づつ実施した。

続いて、発破規模の変化による震源スペクトルへの影響の観察は、Fig. 1に示した実験において、ベンチ発破(a)と盤下げ発破(b)の結果を同一の爆薬毎に比

Table 2 Main specification of vibration measuring instrument

Name of instrument	Type	Manufacturer	Main specification
Geophone	GSC-11D	OYO-Geospace	Frequency range ; 4.5~500 Hz
DC amplifier	6L-02	NEC Sanei	Frequency range ; DC~100 kHz Gain ; 1/10~1000
Data recorder	MR-30	TEAC	Frequency range ; DC~10 kHz
Oscillograph	RT-2108	NEC Sanei	Sampling frequency range ; 5 μ s~200ms

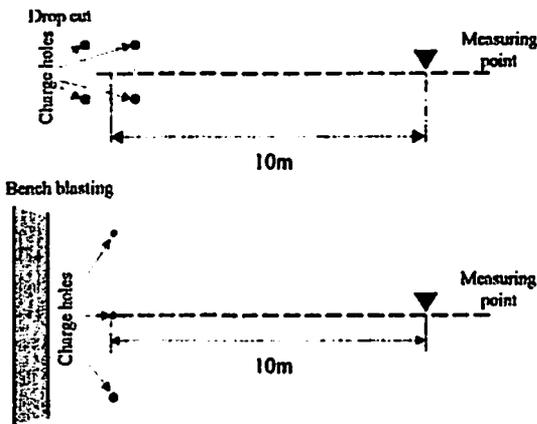


Fig. 2 Arrangement of vibration measuring equipment

較することにより行った。

測定は、動電型の速度型検出器を用いて変位速度波形を測定した。測定距離は何れの場合においても装薬中心位置より約10mの位置で実施した。使用機器の主要性能をTable 2, 測定位置関係の概略をFig. 2に示す。

本実験のうち、盤下げ発破(b)では4孔斉発を用いているので、破密には各装薬孔から測定点までの距離が異なる。従って、斉発を行う4孔と測定点の位置関係によっては波動干渉が発生し、震源スペクトルが変化する可能性がある。そこで、干渉の影響が無視できるものであるかについての検討を次の通り事前に行った。今回の測定において斉発する各装薬孔と測定点との最大距離差は、1mで、地山縦波伝播速度が約2,500~3,800m/sであることからすると、測定点への波動到達時間で最大0.4msの差が生じる。この時間差によって波動干渉が発生する周波数は、1250Hzであり、今回測定対象としている500Hz以下の周波数帯に対して大きな影響はないものと判断した。

2.2 測定結果の解析と考察

発破に伴う発破振動スペクトルの推定方法は、平田等^{2, 3)}によって提案されており、これによれば、観測地点で観測された発破振動スペクトル $F(\omega)$ は、震源

の特性を示す震源スペクトル $S(\omega)$ と、震源から観測地点までの波動伝播特性を示す $D(\omega)$ 、及び観測点周囲の局所的な地盤構造特性を示す $A(\omega)$ の積として(1)式のように表現できるとしている。

$$F(\omega) = S(\omega) D(\omega) A(\omega) \quad (1)$$

Fig. 2に示したとおり、発破点から約10m離れた測定点で測定された、爆薬種類および発破規模を変化させた場合の変位速度波形のスペクトルは、(1)式における $F(\omega)$ に当たり、求めたい震源スペクトル $S(\omega)$ に、震源から10mの波動伝播による伝播減衰特性 $D(\omega)$ と、観測点周囲の局所的な地盤構造特性 $A(\omega)$ が掛け合わされたものと考えられる。なお、本採石場の地盤状況で $A(\omega)$ として考えられるのは、自由境界面での反射によって振幅が2倍となること程度である。また、実験を行った採石場は、発破場所から測定点まで平坦でほぼ均一な岩盤が分布していると考えられ、一般的に $A(\omega)$ として考慮しておかなければならない、多層構造による重複反射や、発破切羽、観測点周辺等での特異な反射などが起こる可能性は極めて少ないものと考えられる。

そこで、測定された変位速度スペクトルより、(2)式に従って、震源スペクトル $S(\omega)$ を推定した。

$$S(\omega) = \frac{F(\omega)}{D(\omega)A(\omega)}$$

$$D(\omega) = \frac{\exp\left(\frac{-\omega r}{2V_p Q}\right)}{r^n}, \quad A(\omega) = 2 \quad (2)$$

ここで、 r : 波動伝播距離、 n : 幾何学的距離拡散指数、 V_p : 縦波弾性波伝播速度、 Q : Q値である。なお、変位速度スペクトルを求めるために用いた変位速度波形の時間幅は、どれも約40msである。

震源における入力変位がインパルスもしくはインパルス応答関数で与えられる場合、変位速度波形の初動パルス幅 τ_p と入力変位速度波形のパルス幅 τ_{p0} 、変位速度波形の初動パルス最大振幅までの時間 t_1 ならびに

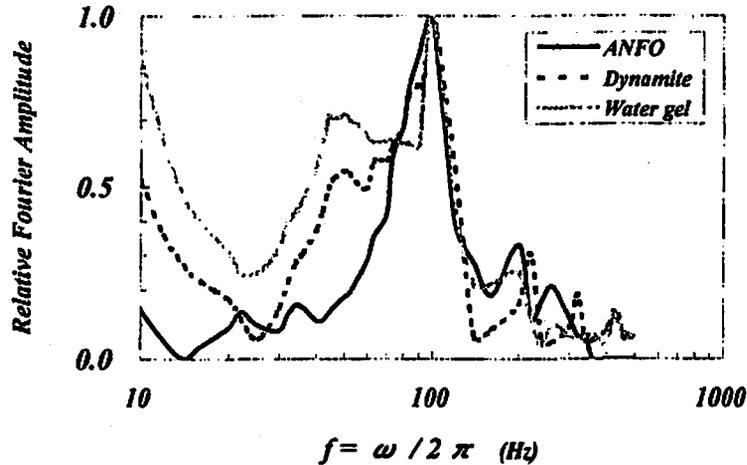


Fig.3 Estimated source spectrums for bench blasting

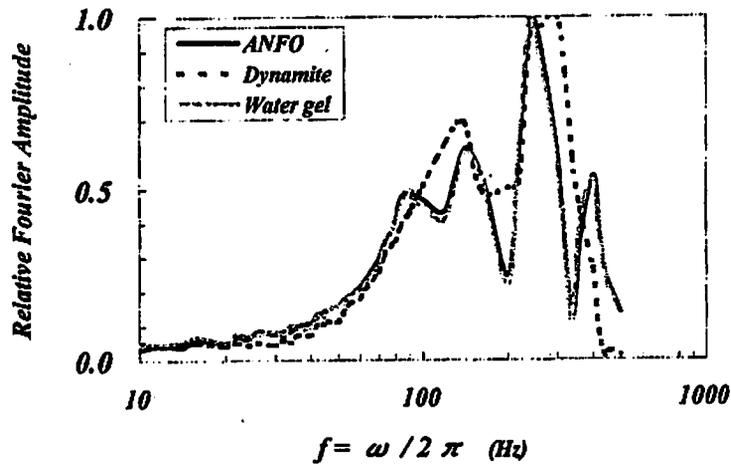


Fig.4 Estimated source spectrums for drop cut

Q値の間には(3)式の成立することが平田等⁴⁾によって導かれている。

$$\tau_p = \tau_{p0} + \frac{0.79 t_d}{Q} \quad (Q \geq 5) \quad (3)$$

そこで、発破点より10~50m範囲で測定された発破に伴う距離毎の変位速度波形を(3)式にて解析しQ値を求めたところ、9~11の値が得られた。なお、解析した波形の初動パルス幅は、1から2ms程度であった。そこで本報では、以後Q値は一律10として解析を行った。また、縦波弾性波速度 V_p は、2500m/sとした。

ベンチ発破(a)に関して求められた震源スペクトルの一例をFig.3、盤下げ発破(b)に関して求められた震源スペクトルの一例をFig.4に示す。

各々の発破形態毎に推定された爆薬の変化による震源スペクトルの変化を見ると、ベンチ発破(a)では、ANFO、ダイナマイト、含水爆薬の何れも100Hz付近

にピークを示しており、爆薬の変化による震源スペクトルの変化は明瞭に見られない。また、盤下げ発破(b)においても、ANFO、ダイナマイト、含水爆薬の何れも250Hz付近にピークを示しており、ベンチ発破(a)同様に爆薬の変化による震源スペクトルの変化は見られない。筆者らは、前報¹⁾において、発破設計がほぼ同一である場合には爆薬種類を変えてもその変化は震源スペクトルに殆ど影響しないことを理論的に導いたが、本実験でも同様の傾向が確認できた。

続いて、発破規模の変化による震源スペクトルの変化について考察する。震源スペクトルの卓越周波数 ω_0 は引張破壊圏半径 a と地山の横波弾性波速度 V_s より(4)式で与えられ、また、この引張破壊圏半径 a と発破の破砕体積 V_f にはおおよそ $a \propto V_f$ なる関係⁵⁾が成立することが過去の研究により明らかになっており、さらに筆者らは前報¹⁾において、震源スペクトルを決定する引張破壊圏半径 a は、破砕体積と等価な球体の半径 a' に比例すると考えて、(5)式を提案し、 k を1と

して理論的考察を行っている。

$$\omega_0 = \frac{2Vs}{a} \quad (4)$$

$$a = ka' = k^3 \sqrt{\frac{3Vf}{4\pi}} \quad (5)$$

推定された震源スペクトルの卓越周波数は、ベンチ発破(a)において約100Hz、盤下げ発破(b)において約250Hzで、発破規模の大きなベンチ発破(a)でより低い卓越周波数が推定されている。この結果は、上記の考え方に合致するものである。また、ベンチ発破(a)と盤下げ発破(b)ではその卓越周波数に2.5倍の差が観察され、(4)式に従えば、引張破壊圏半径 a で2.5倍の差があったことと等価である。さらに(5)式によれば、引張破壊圏半径の差は、破砕体積では、引張破壊圏半径における差の3乗の差があることになるので、 $(2.5)^3 = 15.6$ 倍の差が破砕体積においてあったものと推定できる。ベンチ発破(a)の震源スペクトルを決定する引張破壊圏半径と相関があると考えられる計画破砕体積は一孔当たりの 30m^3 と考えられるが、盤下げ発破(b)の震源スペクトルを決定する引張破壊圏半径と相関があると考えられる計画破砕体積は、一孔当たりとすれば 2m^3 、斉発された4孔とすれば 8m^3 であり、前者の場合には15倍の破砕体積差、後者の場合には3.75倍の破砕体積差となる。従って、観測された値は、盤下げ発破の震源スペクトルを決定する引張破壊圏半径が一孔当たりの破砕体積とした場合に近い

ものであることがわかる。しかしながら、本実験結果のみでは、判断に十分なデータとはいえない。多孔斉発の場合にその震源スペクトルを決定する破砕体積が全斉発孔数に起因するものなのか、発破の最小単位である単孔に起因するものなのか、あるいはその中間なのかは、波動干渉を利用する振動制御において、波動発生並びに干渉の最小単位を決定し、制御方法を設計する上で重要な問題である。そこで、本問題点については別途実験を実施することとした。検討の詳細は次章にて述べる。

3. 震源スペクトルを決定する破砕体積に関する実験

3.1 実験の概要

2章において、発破規模の変化が震源スペクトルを変化させることについてはほぼ明確にすることが出来たが、多孔斉発の場合にその震源スペクトルを決定する破砕体積が何に起因するものと考えべきかについては十分な考察が出来るだけのデータを得ることが出来なかった。そこで、2章に示した採石場で、震源スペクトルを決定する破砕体積に関して Fig. 5 及び Fig. 6 に示す実験を行った。Fig. 5 に示した実験は、一孔当たりの薬量を一定として、斉発孔数を変えることにより発破規模を変化させたベンチ発破(c)と盤下げ発破(d)で、ベンチ発破(c)の斉発孔数は1孔、2孔、3孔の3種類、盤下げ発破(d)のそれは3孔、6孔、9孔の3種類である。なお、爆薬は含水爆薬(旭化成工業(株)製 サンベックス100A)を使用した。また、段発には斉発の起爆秒時ばらつきが標準偏差で $70\mu\text{s}$ 以

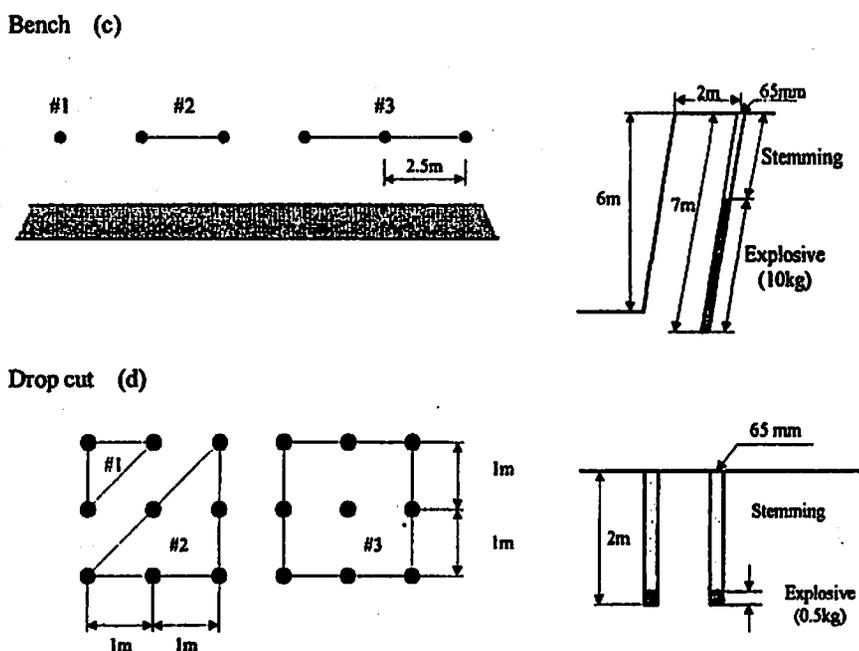


Fig. 5 Blasting patterns for number of holes per delay variation experiment

Drop cut (e)

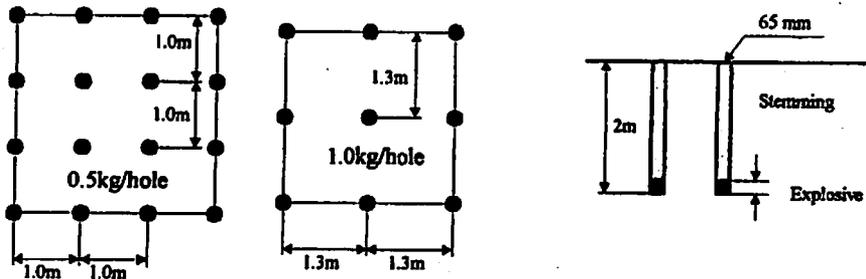


Fig. 6 Blasting patterns for charge weight per hole variation experiment

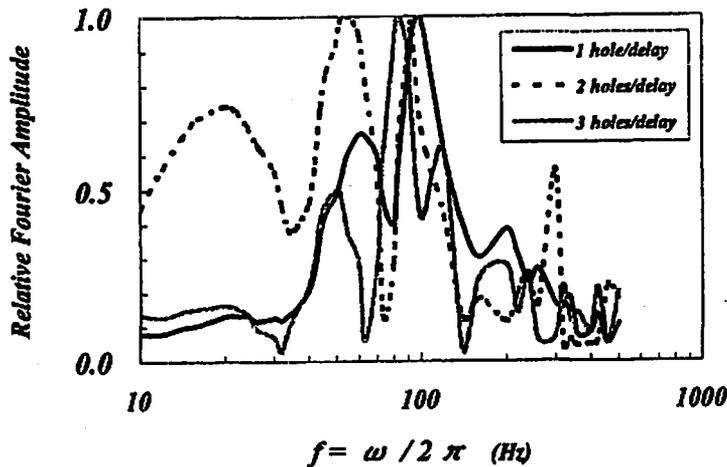


Fig. 7 Estimated source spectrums against variation of number of holes per delay in bench blasting

下の電子遅延式雷管(旭化成工業(株)製 EDD)を使用した。実験場所及び岩盤状況ならびに測定機器・測定方法は2.1で述べたものと同一である。続いて、Fig. 6の実験は、1孔当たりの薬量は変化させるが、全斉発孔数当たりの破碎体積はほぼ一定として設計した盤下げ発破(e)である。設定した1孔薬量は、0.5、1.0 kgの2種類であるが、各々の斉発孔数は、16孔、8孔のため、斉発薬量は何れも8 kgで同一となる。

震源スペクトルを決定する破碎体積が全斉発孔数分の破碎体積であれば、(c)、(d)の実験においてスペクトルに変化が見られ、(e)の実験では変化が見られないと予想される。逆に、1孔分の破碎体積により決定されるのであれば、(c)、(d)の実験においてはスペクトルに変化が見られず、(e)の実験で変化が見られるはずである。

測定距離は、盤下げ発破の斉発孔数変化実験のみ装薬中心から10m、ベンチ発破の斉発孔数変化実験並びに盤下げ発破の一孔薬量変化実験の場合は装薬中心から20mとした。なお、ベンチ発破の際の測定位置は、Fig. 2に示した概略図と同じように、ベンチの背面方向である。

3.2 解析結果及び考察

3.2.1 震源スペクトルを決定する破碎体積について

Fig. 5及びFig. 6に示した発破パターンから測定された変位速度波形のスペクトルを、2.2に示したものと同様の方法で、10mあるいは20mの波動伝播による伝播減衰特性 $D(\omega)$ と観測点周囲の局所的地盤構造特性 $A(\omega)$ を(2)式に従って補正し、震源スペクトル $S(\omega)$ を推定した。なお、Q値は10、 V_p は2500m/sとした。ベンチ発破(c)より求められた斉発孔数変化に対する震源スペクトル変化例をFig. 7、盤下げ発破(d)より求められた斉発孔数変化に対する震源スペクトル変化例をFig. 8、盤下げ発破(e)より求められた一孔薬量変化に対する震源スペクトル変化例をFig. 9に示す。

まず、ベンチ発破において斉発孔数を1孔から3孔まで変化させた実験結果であるが、Fig. 7に示されるとおり、各発破の卓越周波数は1孔斉発の時が97Hz、2孔斉発の時が90Hz、3孔斉発の時が83Hzを示した。斉発孔数が増加するに従って卓越周波数が低くなる傾向は認められる。しかしながら、卓越周波数を決定する引張破壊圏半径が斉発孔数分の破碎体積と比例

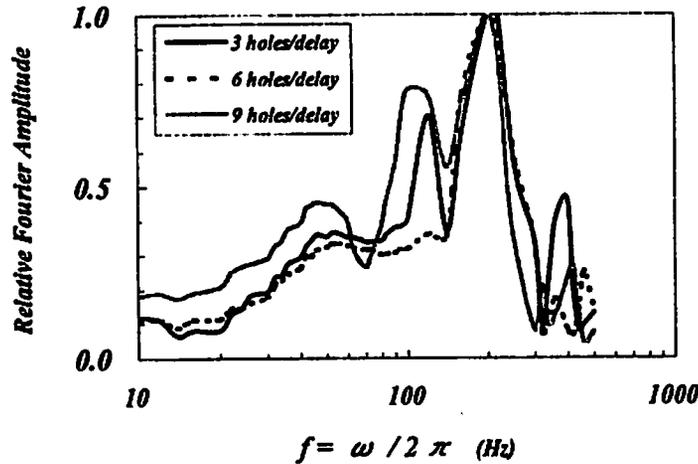


Fig. 8 Estimated source spectrums against variation of number of holes per delay in drop cut

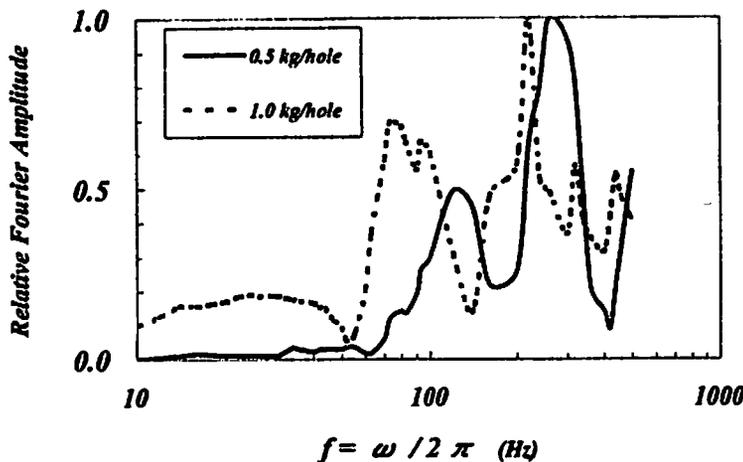


Fig. 9 Estimated source spectrums against variation of charge weight per hole in drop cut

関係にあれば、2孔斉発並びに3孔斉発の場合には、その卓越周波数は1孔斉発に比較して $1/2^{1/3}=0.794$ および $1/3^{1/3}=0.693$ になるものと考えられるが、得られた変化は、1孔斉発に比較して2孔斉発で0.928、3孔斉発で0.856であり、前記ほどの変化は認められなかった。

次に、盤下げ発破で斉発孔数を3孔から9孔まで変化させた実験結果を示したFig. 8では斉発孔数に関係なく卓越周波数一定の傾向がさらに明確に示されており、何れの斉発孔数においても卓越周波数は205Hzを示した。

続いて、全斉発孔数当の破砕体積は変化させずに、斉発孔数を変えて、一孔当の受け持ち破砕体積を変化させた実験結果を示したFig. 9であるが、1孔当の装薬量が増加するに従ってその卓越周波数が260Hzから220Hzへと低くなっている。16孔斉発のパターンでは一孔当たりの破砕体積は 2m^3 、9孔斉発のパターンで

は一孔当たりの破砕体積は 3.4m^3 で、その破砕体積には1.7倍の差が見られる。測定された卓越周波数の差異は1.18倍であり、この変化を引き起こす破砕体積に換算すれば3乗となるので、破砕体積差で $(1.18)^3=1.65$ 倍となり、一孔当たりの破砕体積差にほぼ一致する。

これらの結果より、震源スペクトルの卓越周波数を決定する引張破壊圏半径は、発破の最小単位である一孔当の破砕体積とより強い相関が認められる。また、このことは、多孔斉発時の波動は単孔毎の波動が重ね合わされたものであるとの考え方の裏付けにもなるものである。なお、波動重ね合わせの線形性については、3.2.3にて検討する。

3.2.2 破砕体積と引張破壊圏半径の関係について

3.2.1では、引張破壊圏半径 a により決定される震源スペクトルの卓越周波数について、これに関係する破砕体積 Vf が一孔当に起因する破砕体積であること

Table 3 Results of k-factor calculation

Blasting condition		Dominant frequency (Hz)	Radius of tensile fracture zone (m), a	Equivalent radius of sphere (m), a' **	k=a/a'
Charge (kg/hole)	V ₀ * (m ³)				
Drop cut					
0.50	2	260	1.59	0.78	2.04
0.75	2	250	1.66	0.78	2.13
1.00	3.4	220	1.88	0.93	2.02
Bench blasting					
10.00	30	100	4.14	1.93	2.15

*V₀; Fracture volume calculated from blasting design.

$$** a' = \sqrt[3]{\frac{3V_0}{4\pi}}$$

を明らかにした。ここでは、(5)式に示した震源スペクトルを決定する引張破壊圏半径 a と発破諸元上の破砕体積と等価な球体の半径 a' を関係づける比例定数 k について、以上の実験結果より具体的な考察を試みる。Table 3は、実施した発破諸元(単孔の発破諸元)、測定結果から求められた震源スペクトルの卓越周波数と引張破壊圏半径 a (見かけ震源半径)並びに発破設計上の破砕体積と等価な球体の半径 a' 及び見かけ震源半径 a の比、すなわち(5)式における比例定数 k を示したものである。なお、発破設計上の体積は、ベンチ発破の場合、ベンチ高さ h と孔間隔 b 及び抵抗線の積、盤下げ発破の場合、孔長 L と孔間隔 b の2乗の積により算出した。また、見かけ震源半径を求めるための横波弾性波速度 V_s は、縦波弾性波速度 V_p を2500m/s、動ポアソン比 ν を0.3、比重 ρ を2600kg/m³と仮定し、(6)式の関係より算出し、1300m/sを得た。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (6)$$

算出された k は、盤下げ発破で2.02から2.13、ベンチ発破で2.15であった。震源スペクトルを決定する見かけ震源半径 a は、完全な起砕領域だけでなく、発破点付近の損傷領域も含まれるものと考えられるので、完全な起砕領域のみを算出する発破設計上の破砕体積に等価な球体の半径 a' よりは大きくなるものと考えられるが、得られた結果は、この考え方に合致するものとなった。また、今回実施した実験の範囲内では、 k は発破規模に関わらずほぼ一定の値が得られており、(5)式による発破設計上の破砕体積と見かけ震源半径との関連づけは、妥当なものと考えられる。

3.2.3 波動重ね合わせの線形性について

3.2.1において、震源スペクトルを決定するのは発破の最小単位である一孔当たりの破砕体積であるとの考察が得られた。従って、同一規格の装薬孔を複数斉発した場合には、その影響は波形の振幅に現れると推定できる。すなわち同一規格の装薬孔を複数孔で斉発することは、単発波形の重ね合わせによって表現されることを意味している。

従来、発破振動速度振幅 V と斉発薬量 W 及び波動伝播距離 d には、(6)式が成立し⁶⁾、斉発薬量あるいは斉発孔数による波動の重ね合わせの非線形性を示す α は2/3から3/4の範囲をとるとされている。

$$V = KW^\alpha d^\beta \quad (6)$$

なお、 K は、発破方法、岩質などによって定まる定数である。

しかしながら、(6)式の W の指数を算出するために用いられた発破条件は同一規格の単孔を複数斉発させる場合だけでなく、一孔薬量を増加させるような場合も含まれている。そこで、純粋な波動の重ね合わせと考えることのできる、同一規格の単孔を複数斉発させる場合のみに絞って、重ね合わせの線形性を検証してみた。

Fig.10は、Fig.5に示したベンチ発破(c)において、斉発孔数を1, 2, 3孔の3段階に変化させた場合に、斉発孔数1孔時に発生した変位速度振幅最大値に対して、斉発孔数2及び3孔時の変位速度振幅最大値が何倍になったかを示したものである。なお、測定範囲は、20mから300mの範囲内である。また、図内の直線は直線回帰により求めた回帰式である。波動の重

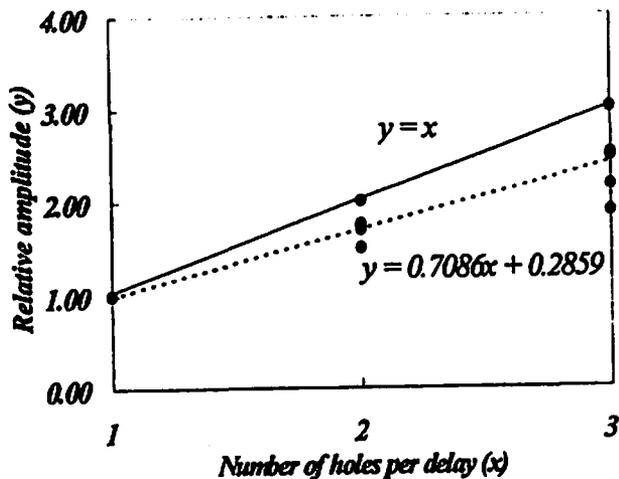


Fig. 10 Relationship between relative amplitude and number of holes per delay in bench blasting

ね合わせが完全な線形であれば、孔数 X と、斉発孔数1の時の変位速度最大振幅に対する斉発孔数 X の時の変位速度最大振幅の倍率 Y は、 $Y=X$ の関係を示すが、結果は $Y \approx 0.7X$ で線形性は認められたが、完全ではなかった。この原因としては、3.2.1にて示したとおり、多孔斉発は、厳密には一孔毎の振動の完全な重ね合わせではないこと、各装薬孔と測定点の位置関係による伝播の差異、波動干渉が全く無視できるわけではないこと、また、本論文中では検討していないが、各装薬孔から発生する波動の振幅は起砕状況の影響を受けて必ずしも一定でないことなどが考えられる。

4. 結 言

波動干渉を利用した発破振動の制御工法を開発するにあたり、その干渉の基本単位となる単発発破の変動特性を把握するため、周波数領域でのスペクトル推定法を用いることにより、爆薬の種類、発破の規模、発破対象岩盤の岩質、波動伝播媒体の伝播特性の単発発破への影響を前報において理論的に考察したが、本報では、前報にて導いた考察に関して、ベンチ発破と盤下げ発破を用いた発破実験を採石場で実施し、震源スペクトルの変化特性と震源スペクトルを決定する破砕体積について実験的検証を行った。

得られた結果を以下にまとめる。

(1) 同一発破諸元の発破では、爆薬種類のみの変化は震源スペクトルに変化を与えないこと、また、発破規模の変化は震源スペクトルに変化を与えるこ

とが実験的に検証された。

- (2) 震源スペクトルを決定する破砕体積は、発破を構成する最小単位である一孔当たりの破砕体積と強い相関関係が認められる。従って、震源スペクトルを変化させる発破規模の変化とは、斉発孔数の変化ではなく、一孔当装薬量あるいは一孔当破砕体積の変化である。
- (3) 震源スペクトルを決定する見かけ震源半径は、一孔当たりの破砕体積と等価な体積を持つ球体の半径と比例関係にあり、その値は発破方法に関わらず約2を示す。
- (4) 震源スペクトルは一孔当装薬量あるいは一孔当破砕体積によって決定され、多孔斉発の影響はその振幅に現れるものと考えられる。すなわち、単孔波形を最小単位とした重ね合わせの原理が発破においても成立するものと考えられる。また、今回の実験結果では、発破における波動の重ね合わせは線形性を示すものの、完全ではなく、孔数(震源数)増加の約70%が振幅増加に寄与するとの結果が得られた。

文 献

- 1) 山本雅昭, 野田英宏, 金子勝比古: 波動干渉を利用した発破振動の制御方法に関する一考察, 火薬学会誌, Vol. 59, No. 5, pp. 221~230(1998)
- 2) Hirata, A., Kaneko, K. and Ohmi, M.: Blasting vibration in jointed rock, Proceedings of International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienna, pp. 763~770(1990)
- 3) 国松他: SH波重複反射法による地層構造を考慮した発破振動の予測手法, 資源と素材, Vol. 113, No. 2, pp. 95~pp. 99(1997)
- 4) 金子勝比古, 中村直昭, 平田篤夫, 大見美智人: 伝播波形初動形状によるQ値評価法(I)—理論的考察—, 物理探査, 第42巻, 第4号, pp. 235~pp. 244(1989)
- 5) Kasahara, K.: The nature of seismic origins as inferred from seismological and geodetic observations (I), Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 35, pp. 473~532(1957)
- 6) 例えば, 伊藤一郎, 村田勉, 清水達英: 日本鉱業会誌, Vol. 69, No. 782, pp. 5~9(1953)

Experimental study on blast vibration control method, which is based upon wave interference (Ⅱ)

by Masaaki YAMAMOTO*, Hidehiro NODA* and Katsuhiko KANEKO**

The reproduction accuracy of single hole and simultaneous multiple holes shot waves that is important to reduce blast vibration by means of wave interference was examined by full scale blasting tests.

Type of explosive and scale of blasting were changed in these experiments. Scale of blasting was changed by means of changing the charge amount per hole and the initiation hole numbers per delay. We also examined the factor which relate to the radius of tensile fracture zone that decides the characteristics of source spectrum. Furthermore, we examined the linearity of superposition in case of blasting wave. Results were summarized as follows:

- (1) Type of explosive does not effect strongly to the change of source spectrum when these blasts are done intended to achieve the same excavation volume.
- (2) Scale of blasting effects on the change of source spectrum.
- (3) The excavation volume per single hole has a strong relation with the radius of tensile fracture zone that decides the characteristics of source spectrum.
- (4) Superposition of blasting waves roughly conforms to the rule of linearity.

(*Explosives R&D Center, Asahi Chemical Industry Co., Ltd., 2-1, Kinshi 3-chome, Sumida-ku, Tokyo, 130-6591, JAPAN

**Division of Environment and Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Nishi 8-chome, Kita 13-jyò, Kita-ku, Sapporo-city, Hokkaido, 060-8628 JAPAN)