# 爆薬の諸特性が岩石破壊効果に及ぼす影響

## 黒川孝一\*,橋本賢二\*,田渕雅春\*

爆薬の諸特性のうち、いずれの特性がどの程度,岩石破壊効果に影響を及ぼしているかを検 討するため、特定の特性値のみを広範囲に変化させ、その他の特性値をほぼ一定にコントロー ルしたエマルション爆薬を用い、コンクリート供試体の小割発破を実施し、破砕片の粒度分布 及び破砕断面積を測定,評価した。

その結果, 粒度分布はパブルエネルギー及び爆速の増加に伴って破砕片の数が増加し,小さ い破砕片となり,その影響度合いはパブルエネルギーの方が爆速より大きいことが判明した。 又,破砕断面積もパブルエネルギー及び爆速に相関しており,衝撃波エネルギーには相関関係 がないことが判明した。さらに,重回帰分析の結果,その影響度合いはパブルエネルギーが爆 速の3倍の寄与度であった。

-261-

#### 1. 緒 言

爆破による岩石破壊について、従来からその破壊理 論は爆薬爆発時におけるいずれの現象を重視するかに よっていくつかの理論が提唱されている。例えば、爆 発によって岩盤内に発生した衝撃波の作用(爆薬の特 性値としては爆速、猛度、衝撃波エネルギー等で代表 される)として、自由面におけるHopkinson効果によ る引張応力を重視して提唱されたショック波発破説 爆薬によって発生した高圧高温の多量の生成ガスの仕 事効果(爆薬の特性値としては弾道振子値、弾道臼砲 値、パブルエネルギー等で代表される)を重視して提 唱された引張主応力破壞説<sup>2) 3)</sup> がある。しかし、一般 的には爆破による岩石の破壊現象は、まず衝撃作用に よって岩盤に亀裂破損が生じ、引き続いてガス圧の作 用によってこれらがさらに助長され、全体として岩石 が破壊されると考えられている?。もちろん、岩石破 慶に影響を及ぼす要因としては爆薬の特性値や薬量ば かりでなく、発破の形態、すなわち爆源と自由面の位 置関係や岩石の性質によっても大きく異なることはい うまでもない。

岩石破壊効果と使用する爆薬の関係では、従来、発 破係数の一要素として爆薬威力係数があり、それぞれ の経験や理論をもとに、いくつかの係数が提唱されて いる<sup>51</sup> が、爆薬の各々の特性値を制御して検討した例 は見られない。

1992年7月7日受理	<u>1</u>		
*日本油脂株式会社	愛知事業所	武豊工場	
〒470-23 愛知県知多	6郡武豊町字北	と小松谷61番地の	1
TEL 0569-72-0916	FAX 0569	-73-7376	

Kõgyō Kayaku, Vol. 53, No. 5, 1992

著者らは先に、爆薬の諸特性のうち特性値のみを広 範囲に変化させ、その他の特性値はほぼ一定にコント ロールした爆薬を用い爆薬の諸特性が地盤振動あるい は発破音に及ぼす影響について検討した<sup>6078</sup>。今回、 同様の爆薬を用い発破の形態としてコンクリート供試 体の小割発破を実施し、爆薬の諸特性のうち、いずれ の特性がどの程度岩石破壊効果に影響しているかにつ いて検討した。

- 2. 実験方法
- 2.1 試料爆薬

試料爆薬の特性値をTable 1に示す。試料爆薬Aは アルミニウムの添加量を変化させてパブルエネルギー を1.95MJ/kgから4.38MJ/kgの広範囲に変化させ、衝 撃波エネルギーと爆速は比較的変化が少ないエマルシ 』ン爆薬である。試料爆薬A-1は基準のエマルショ

Table	1	Performances	of	sam	ple	exc	olosives
-------	---	--------------	----	-----	-----	-----	----------

Sample Explosives	Detonation Velocity ¢25mm (km/s)	Bubble Energy (MJ/kg)	Shock Wave Energy (MJ/kg)
A-1	3.39	1.95	0.80
A-2	3.36	2.62	0.95
A-3	3.24	3.66	1.15
A-4	2.36	4.38	1.09
B – 1	1.63	2.00	0.82
B-2	2.36	2.05	0.76
B-3	3.39	1.95	0.80
B-4	5.10	1.68	0.78
С	2.73	2.40	0.76



Fig. 1 Schematic diagram of secondary blasting of concrete block

ン爆薬であり、アルミニウムは含まれていない。試料 爆薬Bは気泡保持剤の粒径及び添加量を変化させて爆 速を1630m/sから5100m/sの広範囲に変化させ、衝撃 波エネルギーはほぼ一定であり、バブルエネルギーは 比較的変化が少ないエマルション爆薬である。なお、 試料爆薬B-3はA-1と同一の爆薬である。試料爆 薬Cはダイナマイト系の爆薬である。ただし、Table 1に示した爆速は25mm¢、薬長200mmの紙筒包装、開放 状態で測定した値である。

#### 2.2 発破方法

発破はFig.1に示したように1mの立方体のコンク リート供試体に穿孔径25mmは、長さ50mの装薬孔を設 け、孔底部に試料爆薬を装填した。砂でタンピングし、 飛石の飛散防止のためスーパーブラスティングシート で防護して起爆した。コンクリート供試体は密度2.39 g/cd, 圧縮強度380kgf/cdである。装薬量は予備実験 を実施した結果、基準のエマルション爆薬の場合に2 ~4分割される程度の薬量として30gに設定した。こ れは一般的な小割発破の薬量計算式(L=CD<sup>2</sup>)にお いて発破係数C=0.003g/cdである。又、発破係数の 変化による破壊効果を比較するため、試料爆薬A-1 についてのみ45g及び60gの装薬量でも実施した。

#### 2.3 破壊効果の評価方法

一般に、内部装薬による小割発破では、岩石にやっ と亀裂が入る程度の薬量の場合には岩石はその亀裂に より2個に分離するが、薬量を増加させると順次破砕 片の数が増加する現象が見られる<sup>9</sup>。又、爆薬のもつ エネルギーの評価方法の一つとして破砕片の粒度分布 特性及び表面積が有効であると考えられている<sup>10</sup>。 そこで、今回、爆薬の特性による破壊効果を評価す るため、発破後のコンクリート供試体の破砕片の大き さと個数を測定し破砕粒度分布を解析した。又、破砕 片の破砕された部分の断面積を測定し、解析した。

#### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 破砕状況

代表的な爆薬によるコンクリート供試体の破砕状況 の写真をFig.2に示す。Fig.2 (a), (b)は試料爆薬A においてバブルエネルギーが最小(A-1)と最大(A - 4), Fig.2 (c), (d)は試料爆薬Bにおいて爆速が 最小(B-1)と最大(B-4), Fig.2 (e), (f)は 比較のために示したものであり, Fig.2 (e)は試料爆 薬C, Fig.2 (f)は試料爆薬A-1の薬量を2倍にし たものである。

#### 3.2 破砕粒度

Fig.3に各試料爆薬によるコンクリート供試体の破砕粒度分布を示す。Fig.3の粒度分布図の横軸は破砕片の体積(v)をV=(1/2) "で表わした場合の指数である。n=lin=0.5~1.5(V=0.707~0.354 m)の範囲の破砕片の重量%であり、ほぼ2等分された程度の破砕片の範囲の破砕片の重量%であり、ほぼ2等分された程度の破砕片の範囲量%であり、ほぼ4等分された程度の破砕片の総重量を示し、原次2"等分された程度の破砕片の総重量を示している。又、n=7 はn=6.5~7.5(V=0.011~0.006 m)ではなく酸細片を含めたn=6.5以上(V=0.011 m以下)の破砕片の総重量である。破壊効果が大きい程破砕片の数が増加し、小さい破砕片となり、粒度分布は右側に移行するといえる。なお、ヒストグラムの区切りは、個々の



(a) Sample explosive A-1



(b) Sample explosive A-4



(c) Sample explosive B-1



(d) Sample explosive B-4



(e) Sample explosive C



(f) Sample explosive A - 1(60 g)

Fig. 2 The photograph of fragments of concrete block by blasting

破砕片の重量である。又、破砕粒度分布から平均粒度 体積(Pv)を求め、あわせてFig.3に示した。Fig.3か ら明らかなように、試料爆薬Aではパブルエネルギー の増加に伴い、粒度分布は顕次小さい方に移行し、平 均粒度体積も0.371㎡から0.088㎡に小さくなっている。 試料爆薬Bでは粒度分布、平均粒度体積B-1~B-3はほぼ3分割で大差なく、最も爆速の高いB-4が わずかに粒度分布が小さい方に移行し、平均粒度体積 も小さくなっている。試料爆薬A-1の薬量を増加し たものは、45gでは試料爆薬A-2の粒度分布に、60 gでは試料爆薬A-4の粒度分布に酷似している。

試料爆薬A-1,60gと試料爆薬A-4,30gのバ ブルエネルギーはほぼ同等のエネルギーであり、両者 の粒度分布及びFig.2に示した写真の破砕状況も同程 度であることから、破壊効果はバブルエネルギーに強 い相関が見られることがわかる。

3.3 破砕断面積

Fig.4に試料爆薬A、Cのパブルエネルギーと破砕

Kögyö Kayaku, Vol. 53, No. 5, 1992



Fig. 3 The result of size distribution of fragments

-- 264 --

工薬火薬



Fig. 4 Correlation between surface area and bubble energy for sample explosives A and C

断面積の関係を示す。Fig.4から明らかなように破砕 断面積はパブルエネルギーの増加に伴って増加する傾 向が示された。その増加量は、例えばバブルエネルギー が0.059MJ(1.95MJ/kg)から0.131MJ(4.38MJ/kg) に2.2倍増加した場合、破砕断面積は1.71 ゴから4.71 ㎡に2.7倍増加している。

次に、Fig.5に試料爆薬Bの爆速と破砕断面積の関 係を示す。爆速の増加に伴って破砕断面積はFig.4の 増加量ほど大きくないものの増加する傾向が示された。 その増加量は例えば爆速が1.63km/sから5.10km/sに3.1 倍増加した場合。破砕断面積は1.53㎡から2.43㎡に1. 6倍増加している。

Fig.4およびFig.5に示した相関は試料爆薬A.B. Cを区別し、それぞれの試料爆薬の変化の大きな特性 についてのみ考察したものである。次に, 試料爆薬A, B. Cを総合して爆薬の各々の特性値が破壊効果の指 標の1つである破砕断面積にどの程度寄与しているか を考察するため、重回帰分析による多変量解析を行な



Fig. 5 Correlation between surface area and detonation velocity for sample explosives B

った<sup>11</sup>。目的変数を破砕断面積とし、説明変数は爆薬 の特性値として爆速 (Dv), バブルエネルギー (Eb), 衝撃波エネルギー (Es)とした。重回帰式の推定は破 砕断面積がこれら3特性に制御され直線的に増加する ものと仮定し、一次回帰式を算出した。分析結果を Table2に示す。実験回数が各1回であり、入力デー タの有効性がやや欠けるものの、Table2の結果から、 爆速とパブルエネルギーが破砕断面積に寄与しており, その影響度合いはEb:Dv=10:3である。又、衝撃波 エネルギーはほとんど寄与していないといえる。

従来から、爆薬の爆轟に伴い岩盤内に発生する衝撃 圧は近似的に爆薬の爆轟圧に比例し、さらに爆薬の爆 直圧は爆速の2乗に比例するため、衝撃圧は爆速と強 い関係があると考えられている12)。従って、破砕断面 積が爆速に相関するのであれば、衝撃波エネルギーに も相関することが予想された。しかしながら、水中爆 発エネルギーとして測定される衝撃波エネルギーは、 爆速が大幅に変化しても測定誤差の範囲内でほぼ一定

Predictor variables	Partial regression coefficient	Standard partial regression coefficient	t value
Dv	0.32	0.32	2.85*
Eb	40.63	1.02	3.89*
Es	-13.97	-0.06	-0.22

Table 2 Multiple regression analysis

Variance ratio:28.05\*\*

Multiple correction coefficient adjusted for the degree of freedom: 0.959

であり、衝撃波エネルギーは爆速とは相関関係がみら れない<sup>13)</sup> ことを考えあわせると、岩盤内に発生する 衝撃圧と水中爆発エネルギーとして測定される衝撃波 エネルギーは異なったものであり、破砕断面積が爆速 に相関し衝撃波エネルギーには相関しないという今回 得られた知見は妥当であると考えられる。

### 4. 結 論

爆薬の諸特性が岩石の破壊効果に及ぼす影響を検討 するため、主にバブルエネルギーと爆速を広範囲に変 化させ、その他の特性値をほぼ一定にコントロールし た爆薬を用い、一考察としてコンクリート供試体の小 割発破を実施し、破砕片の粒度と破砕断面積を評価し た。

その結果、破砕断面積はバブルエネルギー及び爆速 に相関しており、衝撃波エネルギーには相関関係が見 られないことが判明した。重回帰分析の結果、その影 響度合いはバブルエネルギーが爆速の3倍の寄与度で あった。

又, 破砕片の粒度分布はバブルエネルギー及び爆速 の増加に伴って破砕片の数が増加し、小さい破砕片と なることが判明した。粒度に及ぼす影響度合いについ てもバブルエネルギーの方が爆速より大きかった。 本報告は、発破の形態が薬量数10gの小規模なコンク リート供試体の小割発破により得られた知見であり、 今後さらに操業規模の1.2.3自由面の岩掘削発破についても検討する必要がある。

## 文 献

- 1) 日野熊雄, 工業火薬, 15 (4), 233 (1954)
- 2) 村田勉,田中一三,工菜火菜,15(4),294(1954)
- 3) 村田勉,田中一三,工業火薬,16(1),32(1955)
- 4) 例えば伊藤一郎, 工業火薬, 29 (4), 266 (1968)
- 5) 例えば「新発破ハンドブック」, P23 (1989), 山 海堂
- 6) 黒川孝一,橋本賢二,川村実,加藤幸夫,工業火 薬,52(1),35(1991)
- 7) 黒川孝一, 橋本賢二, 川村実, 加藤幸夫, 工業火 薬, 53 (2), 90 (1992)
- 8) 黑川孝一, 橋本賢二, 加藤幸夫, 工菜火菜, 53(2), 98 (1992)
- 9) 例えば川上純、飯星茂、西田佑、中川造二、岩盤 力学に関するシンボジウム湖漬為文集,22,196 (1990)
- 10) 大塚一雄, 宮陽宏, 佐藤博, 佐藤勇, 岩井肇, 日 本鉱業会誌, 97 (7), 521 (1981)
- 11) 奥野忠一他,「多変量解析法」,(1989),日科技連
- 12) 「新発破ハッドブック」, P405 (1989), 山海堂
- 13)加藤幸夫,服部勝英,鳥居彰夫,工業火薬秋季研 究発表会要旨P53 (1989)

# The experimental study on the effect of performances of explosives on rock fracture

## Koichi KUROKAWA\*, Kenji HASHIMOTO\*, Masaharu TABUCHI\*

It is well not known the correlation between rock fracture and performances of explosives; for example, shock wave energy, bubble energy, detonation velocity and ballistic mortar value etc.,

We used two types of sample explosives. One is an aluminized emulsion explosives whose bubble energy is varied from 1.95 to 4.38 MJ/kg and other performances are maintained nearly constant. The other is an emulsion explosives with microballoons of different size whose detonation velocity is varied from 1630 to 5100 m/s and other performances are maintained nearly constant. We made experiments on secondary blasting of cubic concrete blocks whose volume are 1m<sup>3</sup>. In order to evaluate the degree of rock fracture, we measured a surface area and a size distribution of fragments caused by blasting of each sample explosives whose charging weight are 30g.

It is shown that rock fracture has the strong correlation with bubble energy and detonation velocity. The surface area increases proportionally with the increase of bubble energy and detonation velocity. For example, the surface area is increased from 1.71 to 4.71m<sup>2</sup> when bubble energy is increased from 1.95 to 4.36 MJ/kg. The surface area is increased from 1.53 to 2.43 m<sup>2</sup> when detonation velocity is increased from 1630 to 5100 m/s. Average particle size which is calculated from the size distribution is decreased with the increase of bubble energy and detonation velocity. Rock fracture has no correlation with shock wave energy.

As a result of multiple regression analysis, it is shown that the degree of effect of bubble energy is about three times greater than that of detonation velocity, and shock wave energy does not affect rock fracture.

(\*Explosives and Blasting Research Group, Taketoyo Plant, Aichi Works, NOF CORPORATION

61—1 Kitakomatsudani Taketoyo-cho Chita-gun Aichi-ken 470—23, Japan)