爆破に関する現場試験結果の考察*

米 倉 亮 三** 石 田 英 彦***

On the Field Test of Rock Blasting

by

Ryozo YONEKURA and Hidehiko ISHIDA

(Bulldozer Koji Co., Ltd., Tokyo)

There seem to be three types of failures as essential factors when rock is blasted. We have conducted observation of the actual bench and coyote blasting in the field in order to study the differences of blasting effect caused by these types of explosives and drilling patterns.

These three types of failures take place almost at the same time. Generally speaking, however, only one out of these three appears prominently on most occasions.

In other words, it has been observed quite often that shear type failure causes the highest percentage of blasting action. Accordingly, when bench blasting is designed, it is recommended in most cases to keep the hole as deep as possible in the field circumstances. Thus, it is expected that the lower part of the bench is to be blasted by the shock effect and the upper part by the sliding effect.

There remains slight difference in the charged volume, however, due to the particular circumstances of the field. In general, the conventional application of Livingston formulae can be recommended in most cases.

(Received May 31, 1968)

1 緒 言

発破による岩石破壊の機構は、ショックによる引張破壊であることが明らかにされている。しかし、実技上の岩石発破の現象についてさらに詳しく観察すると、岩石の種類、穿孔配置（あるいは装薬条件）、爆薬の種類等によっては、破壊の様式が少し違って現われるようである。

たとえば、岩盤中に一定の爆薬量を少しずつ深く装薬して爆発させてみると、ある一定の深さで岩盤の破砕量が最大となり、それ以上の深さでは、また少なくなつてついにはほとんど岩盤を破砕できなくなる。われわれは、このような手続き—クレーター試験—を経て、採石場や山岳地帯の道路造成等の工事における発破設計に必要な資料を得ている場合がある。ここで、このようなクレーター試験に際してこの発破現象をよく観察してみると、次のような岩石の破壊型式を伴うことが指摘されている。

- (a) 衝撃(ショック)型の破壊 (Shock type failure)
- (b) せん断型の破壊 (Shear type failure)
- (c) 粘性低下型の破壊 (Viscous damping failure)

したがって、比較的大きな規模の岩石発破においてもこのような、三つの型の破壊が生じているものと思わ

れる。

この論文では、われわれがすでに石材採取を目的として実施した試験発破の結果について、これらの破壊型式が、実操業における発破設計上どのように影響するものであるかを問題点として検討してみようと思う。

2 試験発破の方法とその結果

今回の試験発破においては、ほぼ一定の条件の岩盤を対象として、装薬条件と規模効果がまったく異なるような発破法を選ぶこととした。すなわち、垂直穿孔によるベンチカット式発破と坑室式発破とを試験発破の対象とした。このように異なる発破諸元のもとでは、同一の岩石でもその発破による破壊現象は違って現われるはずである。

発破効果は岩石の性状と岩盤の力学的特性に負うところが多い。たとえば、岩石の強度は岩石の種類によって異なり、爆砕（便宜上ここでは地山の岩石を大量に掘削するための一次発破をいう）するのに必要な力は岩石の強度に影響するから、岩石が新鮮でかたいものほど経験的に発破法も簡単なものではなくなる。そこで、今回の試験現場の岩石の性状を調べてみたところ、見掛け比重は約 2.6~2.7、圧縮強度は 220~840 kg/cm² の砂岩であつて、その弾性波速度 (V_r) は 2000~3000 m/sec であつた。この程度の性状の岩石では、経験的にいえば発破に際してあまりむずかしい問題は起こらない。ほかに岩盤の力学的特性として地

* 原稿受理 昭和43年5月31日

** 正会員 ブルドーザー工事(株) 東京都中央区八丁堀

*** ブルドーザー工事(株) 東京都中央区八丁堀

質分離面を調べてみたところ、卓越する三つの分離面 (K_a , K_b , K_c) が比較的小さな間隔で互いに交差していることがわかり、その分離面の傾斜は 30° あるいは $70\sim 75^\circ$ であった。これらの分離面で囲まれた岩石は、ある一定の粒径をもった単一の岩塊であり、岩盤はこれらの単位岩塊の集合体であるといってもさしつかえないであろう。ただ、この地質分離面は、完全に分離してある幅をもっているものから、比較的ち密で一見して分離面かどうかわからないものまであった。このように地質分離面に支配されている岩盤に大きな力をゆっくり加えた場合には、まず第一に最も結合力の弱い分離面から次々に破壊される（あるいはすべりを生ずる）であろう。このような破壊のもとでは、岩盤中に潜在する単位の岩塊が遊離していくものと考えられる。これとは逆に、大きな力を瞬時にかけるとすれば、最小単位の岩塊そのものが破壊するかもしれない。

このように、岩盤の力学的特性は、発破の際に生ずる力に対してときには大きな影響をもつかもしれないし、また岩石を石材として採取する場合には、そのこわれ方にも大きな影響を及ぼすかもしれないので、岩盤の掘削に際しては岩盤の調査をあらかじめ充分しておく必要がある。

さて、本題にもどって、今回の試験発破においてもそれに先だって種々の調査を行なったが、ここではそれらの結果のうち単位岩塊の粒径のみを Table IV にあわせて掲げておき、発破によりどの程度岩石が破壊されるかのめやすとした。

試験発破の設計にあたっては、Fig. 1 のベンチカットと、Fig. 2 の坑室式発破の諸元を決定するため

Fig. 1. Summary of bench blasting (Vertical holes).

に、Fig. 3 に示すようなクレーター試験を実施した。クレーター試験の結果は、Fig. 4 にその一例を示したように、クレーターパラメータと装薬深さとの関係から最適装薬深さを求める方法によって処理し、このようにして得られた各試験発破の場所でのクレーター

Fig. 2. Summary of coyote blasting.

Fig. 3. Summary of crater tests.

Fig. 4. Example of crater parameter and charge depth (Location 3-B, 4-B)

Table I. Summary of crater tests.

	1-B, 2-B, 1-C	3-B, 4-B
Strain energy factor ($E=d/\sqrt[3]{W}$)	3.83	2.80
Optimum charge depth ($d_0/\sqrt[3]{W}$)	$\left[\frac{d_0}{d_0} = 0.36 \right]$	0.80
Remarks	$\theta = 106^\circ$	

Table II. Blast design criteria in the test field.

Bench	Coyote
$H=8.0$ (m)	$\frac{H}{B}=1.5$
$B=2.5$ (m)	$B=10.5$ (m)
$L_0=4.7$ (m)	$W=427.5$ or 450 (kg)
$L=8.8$ (m)	
$J=0.8$ (m)	
$W=10.5$ or 11.25 (kg)	
$Q=2.09$ (kg/m ³)	
Explosive Akatsuki-ammon dy.	Explosive Shiki-ammon dy.

試験の結果をそれぞれ Table I の各欄に示した。このようにして試験発破の諸元を決定するわけであるが、ただ今回の場合の試験発破の諸元は 1-B・2-B・1-C 地点で行なったクレーター試験から、Livingston のクレーター理論とその展開式²⁾を使って計算により得られた Table II を準用することとし、他の地点で実施したクレーター試験については、単に試験発破に対

して設定した諸元をチェックする程度にとどめた。したがって、実際の試験発破は Table II の諸元を基準として、これよりできるだけ大きな規模の諸元で実施するようにした。その結果は Fig. 5~7 に示すとおりで、さらにその結果をとりまとめて Table III に示した、Fig. 5~7 は、破碎岩のたい積状況と発破孔の後背のクレスト部分の破壊——バックブレイク——を示したものである。ただし、Fig. 7 に示す坑室式発破においてはバックブレイクとはいわない。Fig. 5 の 2-B 断面のクレスト部が欠けたようになっているが、これは 1-B のバックブレイクの跡を示すもので、そ

Fig. 6. Bench blasting program (II).

Fig. 7. Coyote blasting and contour line.

Fig. 5. Bench blasting program (I) (Sediment of rock broken).

Table III. Blast comparison chart (Drilling and blasting program).

	Bench blasting				Coyote blasting	
No.	1-B	2-B	3-B	4-B	1-C	
B (m)	3 00	2 50	2 40	2.50	B (m)	10 5
H (m)	8.60	8.50	11.0	11.3	H (m)	14.7
$\phi=2a$ (mm)	75	75	75	75	H_s (m)	18.6
S (m)	2.70	2.40	2.50	2 50	α	16°
L (m)	8 00	9 00	11.8	11 7	Chamber (m)	0 95×1.02×1.38 (Single chamber)
L_c (m)	5.00	5.79	6.20	7.44	W (m)	405
T (m)	3.00	3.21	5.40	4.26	Explosive	Shiki-ammon dy.
J (m)	0.40	0.50	0.80	0.40	V (Rock broken m ³)	2 224
W (Weight of charge, kg)	11.25	10.50	11.25	13.50	Q (kg/m ³)	0.182
Explosive	Akatsuki-ammon dy., Cartridge	No.3 Kiri-ammonium nitrate dy., Cartridge	Akatsuki-ammon dy., Cartridge	Akatsuki-ammon dy., Cartridge		
Yield= $B \times S \times H$ (m ³)	69.7	51.0	66 0	70.6		
Q (Loading ratio, kg/m ³)	0.161	0.206	0 170	0 191		
V_e/V_r	1.78	2.35	2.35		1.78	

Table IV. Summary of rock broken.

	Rock broken			Rock in situ
	50% size d_{50} (mm)	Mean size d_m (mm)	(%)	Mean size d_m (mm)
1-B	190	323	69	500
2-B	160	261	68	500
3-B	160	225	62	410
4-B	160	225	62	410
1-C	400	590	65	650

この配は 75° であった。Fig. 7 の破断こう配も同様にほぼ 75° (=90°- α°) であった。

Table III は、各試験発破の平均値を示す発破孔 1 本あたりの諸元を表わしたものである。その最下段には、爆薬の爆速 (V_e , m/sec) と岩石中の弾性波速度 (V_r , m/s) との比——速度比 (K_p)——を示した。これは爆薬と岩石との結合関係を数値化したもので、この値は、発破により生ずる岩盤内の応力とある程度関係づけるものである。

Fig. 8 は破碎岩の粒度分布を示したもので、また、破碎岩の平均粒径 (d_m) と中央粒径 (d_{50} すなわち 50 %径) およびすでに述べたように、地質調査の結果得られた岩塊の平均粒径の値をあわせて Table IV に示した。

3 試験発破の成果

前節で述べた試験発破の結果から、岩石破壊の型式に関係のある発破現象を整理して以下にあげてみよう。

3・1 クレーター試験と試験発破との関係

クレーター試験で生成したクレーターの破断角 θ は、Table I に示されているとおり 106° であった。これは坑室式発破の破断角 α と 106°-90°=16° で示される対応関係を示しており、また、崩壊切羽跡のこう配すなわち破断こう配 74° (=90°-16°) にも一致している。この破断こう配は、前節で指摘したとおり、地質分離面 Kb , Kc の傾斜角 β と一致している。また、ベンチカット式発破のバックブレイクのこう配もほぼ 74° に近い値を示している。以上の結果から、クレーター試験発破と坑室式発破においてみられた破壊およびベンチカット式発破におけるカラーからクレスト部にかけての破壊 (Fig. 4) には、発破現象に伴う共通の要素——破断こう配と地質分離面の β 角との関係——が含まれていると考えてよいであろう。

3・2 破碎効果と最小抵抗線との関係

発破対象となる岩石の条件が一定のもとでは、発破諸元を変えると、一般に、その破碎岩の粒度分布が変

Fig. 8. Particle-size accumulation curve.

わる。この場合、発破諸元を変えることによって破碎岩が細粒化した場合には、破碎効果(または発破効果)がよいといわれる。さて、Fig. 8 および Table III ならびにIVをみると、最小抵抗線の小さい発破諸元のもとでは、破碎効果がよく、反対に坑室式大発破のような大きな最小抵抗線のもとでは破碎効果が悪いという結果が得られている。Table IV について、破碎岩の粒径と岩盤の単位岩塊の平均粒径とを比較してみると、発破の規模——最小抵抗線——が大きいほど、両者の平均粒径が近い値を示している。言い替えれば、最小抵抗線が大きいものほど、発破の際の爆力は地質分離面に沿った破壊に消費されることになるが、最小抵抗線が小さくなるにつれて破碎効果は良好となり、このような際の爆力は単位岩塊の破壊に有効に費されていると考えてよいであろう。

3・3 破碎岩の押出しと破碎岩のたい積との関係

ベンチカット式発破では、破碎岩のたい積が比較的ゆるやかであり、坑室式発破のたい積状態は切羽跡にこう着した状態を示している。したがって前者のベンチカット式発破では比較的押出しがよく、後者の坑室式発破では押出しが悪いといえる。このように押出しについて検討する場合には、すべり破壊を伴う発破現象とともに重力の影響をも考える必要がある。すなわち、押し出しのよい場合には重力に影響される割合が少なく、逆に押し出しの悪い場合には重力に大きく影響されていると考えられる。

3・4 限界孔長について

発破による岩石の破碎が均一であるためには、岩石中に発生する応力が均一であることが望ましい。ベンチカット式発破では一般に垂直穿孔あるいは傾斜穿孔を行ない装薬を施すが、このような場合の破壊現象を考える場合には、使用する爆薬の爆速と応力波の伝搬速度との関係および発破諸元によって推定される予定破碎域の形を考慮する必要がある。ここで、応力波の伝搬速度は岩盤中の弾性波速度に比例するとすれば、起爆点の位置にもよるが、速度比($K_0 = V_0/V_p$)が1に近いものほど、岩盤中には不均一な応力が発生することになる。

このように、発破により生ずる応力のバランスが悪ければ、岩石を破壊する有効な力は減殺されるから、特に、装薬長に対応する込物長の大きいベンチカット式発破では、岩盤の弱線に沿って不十分な破壊を生ずることになるものと考えられる。この不十分な破壊とはつまりすべり破壊を意味するものであるが、このような破壊を起こさせないためにはある一定の限界孔長(または限界込物長)が考えられる。Ash and pearseによれば、 $K_0 = 1.78$ の場合には限界孔長比 ($K'_H = H'/B$ 、ただし、 H' は限界孔長、 B は最小抵抗線の長

さ)は3.5の値となると示しているから、 $B = 2.50\text{m}$ の場合には $H' = 8.2\text{m}$ となる。したがって、今回われわれの行なった3-B、4-Bのベンチカット式発破においては、穴込めの部分はほとんどすべり破壊を起こしていたものと考えられる。

4 考 察

この節では、前節を受けて、破壊の型式を定める要因について主として考えてみる。

さて、ベンチカット式発破における穴込め部の破壊については、3・1項に述べた考察からは2-B、3-Bの二つのベンチ発破のそれが、また3・4項に述べた考察からは3-B、4-Bの二つのベンチ発破のそれがすべり破壊であることがわかる。すべり破壊そのものがせん断型の破壊現象であるとするれば、せん断型の破壊現象は単にクレーター試験における破壊のみに限らず、実技上の発破においてもみられる現象であるといえることができる。ここで2-Bのベンチ発破における孔長は3・4項に述べた限界孔長以内にあって論理上矛盾するようであるが、2節および3・1節に述べたように、発破による破壊が岩盤の力学的性状により強く支配されるような岩盤では局所的にすべり破壊が生ずるものと考えれば理解することができる。すなわち、すべり破壊そのものが局所的であることから、発破現象全体からみれば、せん断型の破壊はむしろ副次的なものと考えることができる。

細粒化した破碎岩が得られるような発破諸元のもとでは、最小抵抗線が比較的小さく、爆力がきわめて強いことを示している。このような発破では、衝撃型の破壊が発破現象全体にわたって支配的であると考えれば、坑室式大発破の場合にはせん断型の破壊が発破現象全体を支配していることが3節の各項に述べた考察の結果から考えられる(おもに3・2項)。

すべての発破現象には、破碎岩の押出しのよし悪しと、ときにはすべり破壊を伴うこともあるから、3・3項に述べたように重力の影響を無視できるか否かが発破による破壊が衝撃型かせん断型かを決定する一つの指標となる。

5 結 言

岩石発破における破壊の型式は、すでに述べたとおり、クレーター試験の結果にのみならず実技上の発破現象にも当然付随して現われてくるものである。このような発破による破壊現象を実技上にいかしていくためには、なお多くの資料を集めなければその方法を明らかにすることはできないが、今後の問題として本試験発破においても気づいた点としては、比爆薬量(Q kg/m^3)とせん断型破壊との関係であろう。たとえば、ベンチカット式発破においては装薬長と込物長との比がどの程度であれば限界なのか、また、これらと破碎

岩の粒径との関係等を加味して吟味することができればおもしろい問題になるかもしれない。なお最後に、試験発破の設計にあたっては Livingston のクレーター理論が実用上充分利用できることをつけ加えておく。

参 考 文 献

- 1) Selleck, D. J., Mining Research, **1** (1962) Pergamon

Press.

- 2) たとえば Weber, K. J., The Moose Mountain Drilling and Blasting Program, Rock Meckanics (1963) Pergamon Press.
- 3) Ash and Pearse, Velocity, Hole Depth Related to Blasting Result, Mining Engineering, Sept., Society of Mining Engineers, p.71 (1962).