

## 露天掘り鉱山における発破規格及び岩盤状態が起砕物の飛翔挙動に与える影響

高橋, 良堯

九州大学大学院工学府地球資源システム工学部門 : 博士後期課程

山口, 耕太郎

九州大学大学院工学府地球資源システム工学部門 : 修士課程

笹岡, 孝司

九州大学大学院工学府地球資源システム工学部門 : 准教授

濱中, 晃弘

九州大学大学院工学府地球資源システム工学部門 : 助教

他

<https://hdl.handle.net/2324/4355065>

---

出版情報 : Journal of MMIJ. 135 (10), pp.94-100, 2019-10-31. 資源・素材学会  
バージョン :  
権利関係 : (C) 2019 The Mining and Materials Processing Institute of Japan



露天掘り鉱山における発破規格及び岩盤状態が  
起砕物の飛翔挙動に与える影響\*高橋 良 堯<sup>1</sup> 山口 耕 太 郎<sup>2</sup> 笹 岡 孝 司<sup>3</sup> 濱 中 晃 弘<sup>4</sup>  
島 田 英 樹<sup>5</sup> 一ノ瀬 政 友<sup>6</sup> 久 保 田 士 郎<sup>7</sup> 佐 分 利 禎<sup>8</sup>The Effect of Blasting Design and Rock Mass Conditions on Flight Behavior of Rock  
Fragmentation in Surface Miningby Yoshiaki TAKAHASHI<sup>a\*</sup>, Kotaro YAMAGUCHI<sup>a</sup>, Takashi SASAOKA<sup>a</sup>, Akihiro HAMANAKA<sup>a</sup>,  
Hideki SHIMADA<sup>a</sup>, Masatomo ICHINOSE<sup>b</sup>, Shiro KUBOTA<sup>c</sup> and Tei SABURI<sup>c</sup>

- a. Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395 (\*Corresponding author, E-mail: takahashi13r@gmail.com)
- b. Center of Urban Infrastructure, Environment and Resources, 4-2-5 Watanabe St., Chuou-ku, Fukuoka, 810-0004
- c. Research Center for Explosion Safety, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16-1 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 309-8569

Rock blasting is one of the most common techniques for rock breakage in the open-pit mining excavation. On the other hand, the application of the technique has been restricted by law since it may cause a serious impact on surrounding environment, such as flyrock, ground vibration and noise. According to the statistics, more than 70% of accidents relating to the usage of explosives is flyrock. This accident may cause serious damage to buildings, human beings, and objects in the surrounding area. However, a detailed guideline for prevention of flyrock has not been developed yet. From these points of views, a series of field experiments was conducted and initial velocity and flying direction of fragmented rock were discussed by considering blasting standard and rock mass conditions such as strength, fractures/cracks and joints. The result shows that powder factor and burden have strong influence on the initial velocity of fragmented rock. Not only blasting designs but also rock mass conditions, cracks/joints strongly effect on the initial velocity. In addition, it was also made clear that the existence of fractures/cracks/joints in the blasting face have an obvious impact on the direction of fragmented rock.

**KEY WORDS:** Opencut Mining, Rock Blasting, Flyrock, Control Blasting, Crack Condition

## 1. 緒 言

露天掘り鉱山の採掘において、火薬類を用いる発破は作業性や経済性の点から極めて重要な作業工程である。しかし、発破は火薬類の使用が法令で厳しく制限されていることに加えて、飛石・振動・騒音といった災害を引き起こす可能性を有しており、この場合は周辺環境に与える影響が極めて大きい<sup>1)</sup>。したがって、これら災害の発生を抑制しつつ効率の良い発破を行うことは、鉱

山操業の安定的な持続性に必要不可欠である。日本国内における露天掘り鉱山は、国土の狭さ故に民家等に隣接することも多く、特に飛石の発生には十分な注意を要する。

飛石とは、火薬類の起爆に伴い発生するガス圧により想定される距離以上に飛翔する起砕物のことであり<sup>2)</sup>、統計によれば<sup>3)</sup>、飛石は火薬類の使用における事故の約7割を占めている。すなわち、国内では平成17年5月の鉱山保安法改正以降、平成27年9月までの約10年間で31件の飛石発生が報告されており、内35%が鉱山周辺の民家や工場といった鉱区外での被害であり、鉱山採掘において未だ解決されない課題の一つである<sup>4)</sup>。この飛石が発破に伴う振動や騒音といったその他の諸問題と大きく異なるのは、一旦発生すると周辺住民や構造物に直接的な被害をもたらす可能性が高いため、飛石の発生が予測される場合には、使用する火薬量を減らす等の対策を講じ、飛石の発生防止に努めなければならない。このように、発破を行う上で飛石の発生を制御することは保安の観点のみならず、生産の観点からも非常に重大な問題の一つであると言える<sup>5)</sup>。したがって、今後国内外の露天掘り鉱山の安全かつ持続可能な採掘を行う上で、飛石の制御技術を確立することは重要かつ喫緊の課題であると考えられる。

飛石に関しては、これまでに起砕物の飛翔挙動に関する検討<sup>6, 7)</sup>や飛翔距離の予測に関する検討<sup>8-10)</sup>など、飛石の発生抑制技術の確立を目的とした多くの研究・検討が行われているが、飛石の発生メカニズムやその原因について系統的かつ定量的な研究例は

\*2018年5月1日受付 2019年5月21日受理

資源・素材学会平成26年度春季大会にて一部発表

1. 学生会員 九州大学大学院博士後期課程 工学府地球資源システム工学専攻  
現：産業技術総合研究所 安全科学研究部門 爆発利用・産業保安研究グループ

2. 学生会員 九州大学大学院修士課程 工学府地球資源システム工学専攻  
現：MM Nagata Coal Tech 株式会社 資源開発エンジニアリング事業部

3. 正会員 博士(工学) 九州大学大学院准教授 工学研究院地球資源システム工学部門

4. 正会員 博士(工学) 九州大学大学院助教 工学研究院地球資源システム工学部門

5. 正会員 博士(工学) 九州大学大学院教授 工学研究院地球資源システム工学部門

6. 正会員 工博 都市基盤・環境・資源センター

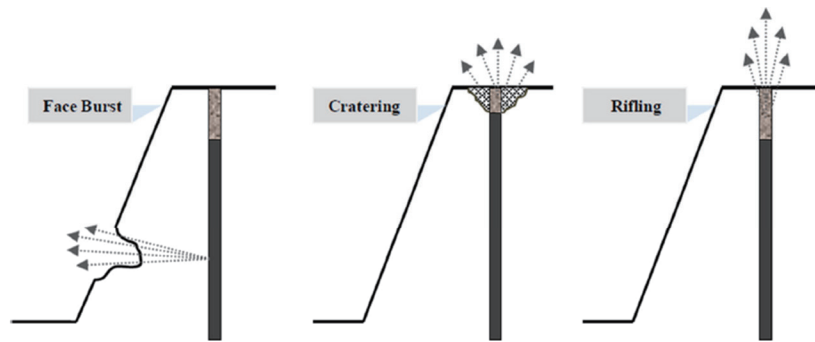
7. 正会員 博士(工学) 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 爆発利用・産業保安研究グループ

8. 博士(工学) 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 爆発利用・産業保安研究グループ

[著者連絡先] FAX: 092-802-3368 (九大・工・地球資源)

E-mail: takahashi13r@gmail.com

キーワード：露天掘り鉱山、ベンチ発破、制御発破、飛石、飛翔方向、岩盤内節理、発破規格

Fig.1 Classification of flyrock<sup>11)</sup>.

少ない。緒方らは、鉱山での実規模発破試験の結果、飛石発生要因として最小抵抗線長が重要であり最小抵抗線長が小さいほど飛石が発生しやすくなることを示しているものの、岩盤強度や亀裂状態の影響については考慮していない<sup>11)</sup>。また、上述の飛石予測に関する検討では、Artificial Neural Network (ANN) を用いた予測モデル確立に際し、岩盤評点法である Rock Mass Rating (RMR) 等をパラメータとして用いているが<sup>8-10)</sup>、岩盤の先に亀裂や発破対象となる岩盤を構成する岩石の強度がどの程度、起砕物の飛翔特性に影響を与えているのか検討したものではなく、未だ飛石の発生の原因の解明やその制御技術が確立しているとは言えない。さらに、国内における飛石の要因の 57 % が、岩質の把握が不十分であったためと報告されており<sup>4)</sup>、岩盤状態が起砕物の飛翔挙動に及ぼす影響を解明することは、飛石の制御ならびに予測に向け喫緊の課題である。したがって、発破により発生する起砕物の飛翔挙動を検討し、特に経験的に起砕物の挙動に大きな影響を与えるとされている発破規格の変更や岩盤状態の相違が、それらにどのような影響を与えるのか定量的に評価することは極めて重要であると考えられる。

そこで本研究では、発破により発生する起砕物の飛翔挙動に関する基礎的知見を得ることを主目的とし、現在操業中の露天掘り鉱山にて発破試験を実施し、この結果を基に種々検討した。すなわち、本研究では、後述の吹き出し飛石に着目し、薬量や最小抵抗線長といった発破規格、岩盤内に卓越する亀裂や岩石強度等の岩盤状態が、起砕物の初速度や飛翔方向に及ぼす影響についての検討を試みた。

## 2. 飛石の分類と発生機構に関する既往の知見

飛石は発生原因別に Fig. 1 に示す 3 種類に分類されている<sup>12)</sup>。まず、吹き出し飛石 (Face burst) は、装薬孔が切羽の挟み層や断層といった大きな弱面部と交差あるいは隣接する場合、火薬類の起爆により発生する高圧ガスがそれらの弱面部を通過し噴出するために発生する。また、穿孔の際の孔曲がりの発生あるいは前回の発破の影響により部分的に最小抵抗線長が小さくなるのが原因となる場合もある。次に、クレーター型飛石 (Cratering) は、込め物の周辺で前回の発破の影響を受けて岩盤に亀裂等の弱面が形成されたため、火薬類の起爆により発生した高圧ガスがその弱面に侵入し、大気中にガスが吹き出す際に発破孔周辺にクレーターを形成する。この飛石は込め物長が不十分な場合や多列発破の際の列間の起爆秒時差が短い場合に発生し易い。最後に、鉄砲飛石 (Rifling) は、込め物による填塞が不十分な場合、火薬類の起爆に伴い発生した高圧ガスが発破孔内の弱面部を通過して吹き上がることで込め物も吹き出し、時として孔口周辺の岩石が噴出するために発生する。場合によっては致命的な飛散物となることがある。

Table 1 Prediction equations for each type of flyrock.

Type of flyrock	Equation
Face blasting	$L_{max} = \frac{k^2}{g} \left( \frac{\sqrt{m}}{B} \right)^{2.6}$
Cratering	$L_{max} = \frac{k^2}{g} \left( \frac{\sqrt{m}}{SH} \right)^{2.6}$
Rifling	$L_{max} = \frac{k^2}{g} \left( \frac{\sqrt{m}}{SH} \right)^{2.6} \sin 2\theta_0$

Table 1 に示すように、飛石発生原因別に起砕物の飛翔距離の各予測式が提案されている<sup>13)</sup>。ここで、 $L_{max}$  は最大飛翔距離 (m)、 $m$  は最小抵抗線長 1m あたりの火薬量 (kg/m)、 $B$  は最小抵抗線長 (m)、 $SH$  は込め物長 (m)、 $\theta$  は穿孔角、 $g$  は重力加速度 ( $m/s^2$ )、 $k$  は岩盤状態を表す定数である。以上の飛石の発生原因による分類および各予測式からも解るように、飛石の発生には岩盤内の亀裂や強度等の岩盤状態、また装薬量や最小抵抗線長、込め物長といった各種発破規格が大きな影響を与えていると考えられる。これら 3 種の飛石のうち、吹き出し飛石は、岩盤内に存在する亀裂や挟み層といった発破を行う切羽の岩盤状態の影響を大きく受けることから、岩盤内に存在する亀裂や挟み層の影響を考慮していない既存の予測式では、吹き出し型の飛石の予測は困難であり、岩盤内に存在する亀裂を考慮した予測式や制御手法が必要である。

## 3. 現場試験

### 3・1 現場概要及び発破

鹿児島県薩摩半島南部に位置している含金珪酸塩鉱を生産する露天掘り鉱山の岩戸鉱山内のベンチ切羽において発破試験を行った。本鉱山は、岩石の一軸圧縮強度が  $149 \pm 59 \text{ MPa}$  (各試験切羽から採取した 3 本の岩石コアの一軸圧縮強度の平均 ± 標準偏差) と比較的硬い岩盤を有しており、目視可能な亀裂および破砕帯が比較的少ないという特徴を有している。今回試験を行った切羽では挟み層といった地質学的な不均一性は認められなかった。

Table 2 に今回の試験における発破規格を示す。本発破試験では、岩戸鉱山の標準発破規格をもとに、8 ~ 10 孔の横一列の単列発破を実施し、前述のように起砕物の飛翔挙動に大きな影響を与えていると考えられる最小抵抗線長、装薬量および込め物長を変更し、各パラメータが起砕物の飛翔挙動に及ぼす影響について検討した。また、本鉱山では ANFO 爆薬を使用し、全ての発破で孔長 (装薬長さ + 込め物長) は一定であり、起爆位置は装薬の中心部である。込め物として、砂を用いている。本鉱山では、通常 MS 雷管を用いた段発破を行っているが、起爆秒時差や、起爆順序を制御し、起砕物の飛翔方向を制御することが経験的に

Table 2 Standard blasting design in Iwado mine.

Spacing (m)	1.5
Burden (m)	1.5-3.0
Borehole diameter (mm)	76
Bench height (m)	10
Bench angle (°)	80
Drilling angle (°)	80
Drilling length (m)	11
The number of blast hole	8-12
Powder factor (kg/t)	0.12-0.237
Delay time (ms)	0

われている<sup>14)</sup>。そこで、起爆秒時差による起砕物の飛翔方向への影響を省くため、本試験発破では瞬発電気雷管を用いた起爆秒時差を設けない斉発発破を行った。

### 3・2 試験切羽の岩盤状態の評価方法

前章で述べたように、岩盤内に存在する亀裂が飛石の発生の一因となることが経験的に知られている<sup>4)</sup>。そこで、岩盤内に存在する亀裂の数評価するため、まず発破前の切羽法面をデジタルカメラで写真撮影し、得られた画像データをもとに画像中の陰影から切羽法面に露出した不連続面を抽出した。抽出後、現場での目視の観察から、明らかに重機による引っかきによるものと思われる不連続面は取り除いた。続いて、切羽法面に1 m間隔で発破孔左端から右端まで計10本の測線を設定し、抽出した不連続面と測線の交点の合計数を求めた。次に、各側線の切羽法面の上端から下端までの長さの総和から、側線1 mあたりに含まれる不連続面の平均数を求めた。なお、Fig. 2にこれらの一例を示す。この数値を亀裂密度 (cracks/m) と定義して岩盤の亀裂状態を示す指標とした<sup>16)</sup>。また同時に、切羽に卓越する最も長い節理の走向および傾斜をクリノメータで計測した。さらに、試験発破後の各切羽の起砕物群から人頭大の岩石試料をそれぞれ採取し、各種力学試験に供し、得られた岩石の力学的物性値が起砕物の飛翔挙動に及ぼす影響について検討した。なお、採取した岩石試料は発破による損傷を受けているため、得られた値が見かけ上、低い可能性もある。

### 3・3 起砕物の飛翔挙動の計測

起砕物の飛翔の様子を観察するため、発破前に切羽法面にペンキを塗布し、起爆直後からの切羽面の動的挙動を高速度カメラおよび常速度カメラで撮影し、撮影した画像をもとに起砕物の飛翔特性の把握を行った。ここで、高速度カメラにはVision Research社製 Phantom V7.3を用い、法面に対して平行となる様に設置し、撮影速度1,000 fps (駒間隔1 ms) で撮影を行なった。また、切羽の正面方向に常速度カメラを設置して起砕物の飛翔方向を求めた。Fig. 3にこれらカメラの配置図を示す。

起砕物の飛翔距離は、その初速度および飛翔角度に依存するため、各種発破規格や岩盤状態がこれらの要因に及ぼす影響を把握する必要がある。そこで、高速度カメラで得られた画像をもとに起砕物の飛翔速度を評価した。発破前に切羽面近傍に設置した2 mのスケールを基準に、起砕物が法面に対し垂直をなす鉛直平面方向の移動する距離を起爆後0 msから50 ms毎に映像解析して求めた。映像解析で得られた起爆後400 msまでの8区間における速度をそれぞれ算出し、その平均速度を算出して起砕物の初速度と定義した。Fig. 4に高速度カメラにより得られた画像の解析画面の一例を示す。なお本試験では、粉塵や起砕物群から分離し、初速度映像解析が可能であった起砕物片数が、最も少ない試験切

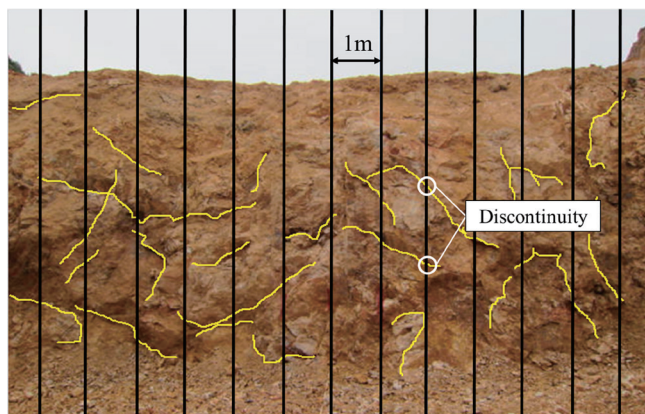


Fig.2 Evaluation method for crack density on the surface of rock mass.

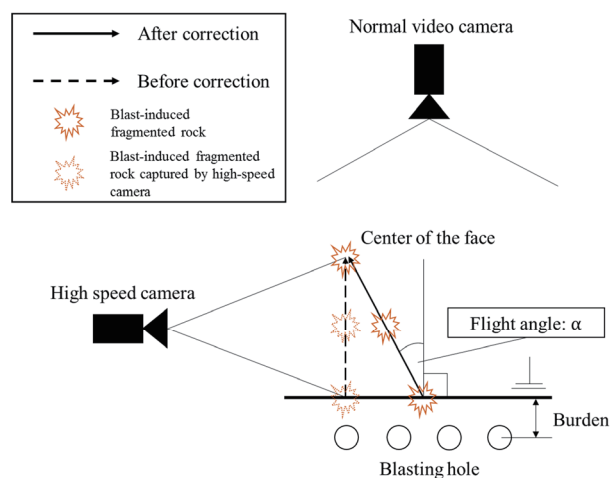


Fig.3 Outline of arrangement of cameras and flight angle of blast-induced fragmented rock.

羽で12個であったため、一切羽当たり計12個の起砕物の初速度を算出し、そのうち最も初速度が大きかった起砕物を最大初速度として検討に用いた。

さらに、初速度ともに起砕物の自由面に平行をなす水平面方向の飛翔方向 (以下、水平飛翔方向) についても検討するため、同時に切羽正面に設置した常速度カメラにより得られた画像から、起砕物の水平飛翔方向を求めた。この水平飛翔方向は、前掲 Fig. 3に示すように、切羽面中心線と最も飛翔した起砕物を結んだ線と、切羽法面がなす角  $\alpha$  ( $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ) として定義した。なお、この飛翔方向をもとに起砕物が切羽に対して垂直な方向に飛翔しなかった場合には起砕物の初速度の補正を行った。

## 4. 結果および考察

### 4・1 起砕物の初速度

#### 4・1・1 発破規格の相違が起砕物の最大初速度に与える影響

発破規格および岩盤状態が起砕物の最大初速度に及ぼす影響について検討を行った。まず、各最小抵抗線長における火薬原単位と最大初速度の関係を Fig. 5に示す。なお、火薬原単位は単位起砕石重量 (t) あたりの火薬量 (kg) である。この図から、起砕物の飛翔に寄与するエネルギーが増大するため、火薬原単位の増加に伴って起砕物の最大初速度が増加する傾向が認められるものの、バラつきが非常に大きく、相関性は非常に薄いことが分かる。また、Fig. 6に本試験における最小抵抗線長と最大初速度の関係を示す。最小抵抗線長が1.5 m, 2.0 m, 2.5 m以上の場合における



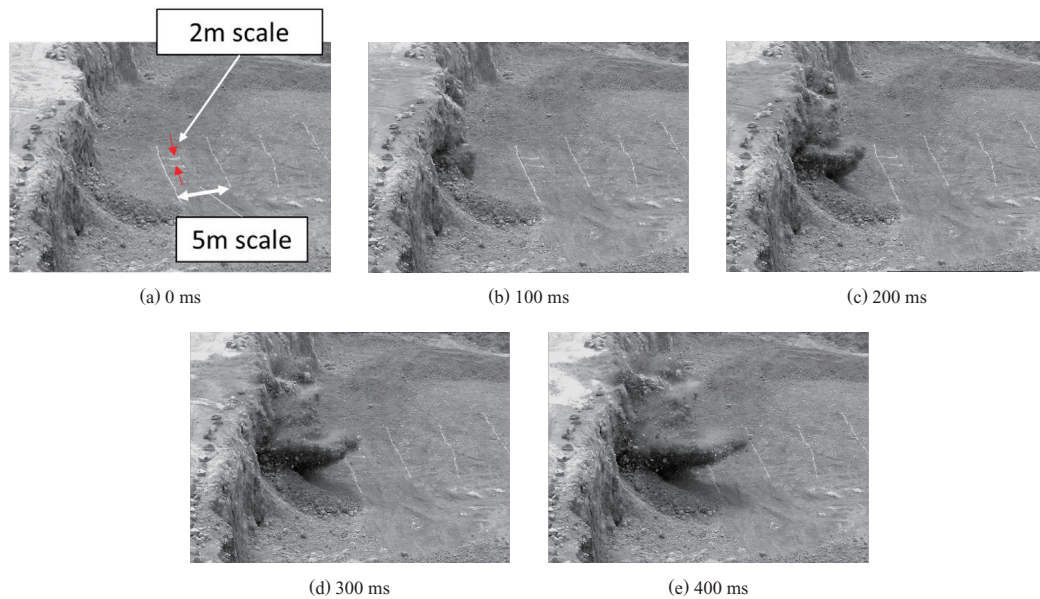


Fig.4 Example of a series of images taken by high-speed camera.

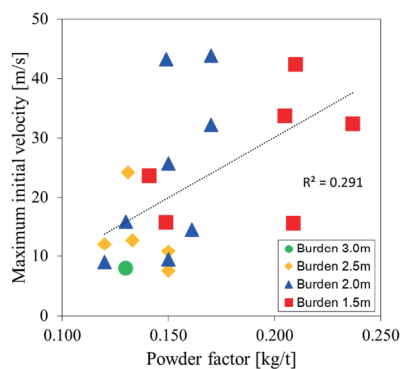


Fig.5 The relationship between powder factor and maximum initial velocity of blast-induced fragmented rock.

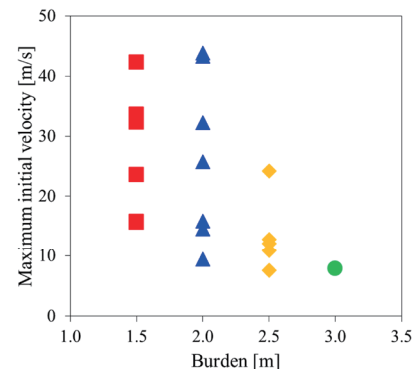


Fig.6 The relationship between burden and maximum initial velocity of blast-induced fragmented rock.

平均最大初速度はそれぞれ、27.2 m/s、24.2 m/s、12.6 m/s であり、これらの結果から、最小抵抗線長が小さいほど最大初速度が大きくなる傾向が認められ、最小抵抗線長が起砕物の最大初速度に及ぼす影響が大きいことが分かる。これは、最小抵抗線長が小さいほど自由面までの距離が小さくなるため、発破によるエネルギーがより自由面へと伝わりやすくなることで、飛翔へと寄与するエネルギーが増大するためと考えられる。緒方ら<sup>11)</sup>の報告では、最小抵抗線長が約 1.3 m ～ 4.5 m における発破実験において、最小抵抗線長が約 1.3 m ～ 2.0 m にかけて、最小抵抗線長の増加に伴い、初速度は小さくなり、以降初速度がほぼ一定になることを示している。試験実施現場が異なるため、単純な比較はできないものの、平均を見れば本試験の結果と定性的には一致していると考ええる。

一方、火薬原単位および最小抵抗線長が同程度であるにもかかわらず、計測された最大初速度に顕著な差が認められる。たとえば、最小抵抗線長が 2.0 m の場合、計測された初速度のパラつきが非常に大きく、計測された最も大きな初速度は、最小抵抗線長が 1.5 m の場合の初速度の最大値よりも大きい。すなわち、緒方らの報告や 2 章で示した予測式に基づけば、最小抵抗線長を適切に制御することで初速度の制御が可能であることを示唆しているが、本試験結果が示す結果とは矛盾している。本試験では、瞬発

雷管を用いた斉発発破を実施したが、この雷管の固有の秒時誤差が起砕物の飛距離に影響を及ぼすことが知られており<sup>11)</sup>、この初速度のパラつきの一因として考えられる。さらに、起砕物の最大初速度には火薬原単位および最小抵抗線長や起爆秒時誤差といった発破規格に加え、他の要因として、その影響が経験的に知られている切羽の岩盤状態が大きな影響を及ぼしているためと推察される。つまり、飛石の制御や発生予測に向け、現状提案されている手法や予測式では不十分であり、発破規格のみならず、岩盤状態の影響を評価し考慮することは極めて重要であると考えられる。そこで次項では、岩盤内に存在する亀裂の数や岩石強度が起砕物の飛翔挙動に及ぼす影響について検討を行った。

**4・1・2 岩盤状態が起砕物の最大初速度に及ぼす影響** まず、岩盤の亀裂密度について検討する。発破によるエネルギーは、岩盤内に存在する亀裂や空隙の進展・拡大や、新たな亀裂の発生に寄与するため<sup>17)</sup>、亀裂の卓越した岩盤では岩石の破壊に消費されるエネルギーが減少すると考えられる。そのため、亀裂の多い切羽では飛翔へ寄与するエネルギーが増大して最大初速度は増大すると予測される。Fig. 7 に、各最小抵抗線長での岩盤内の亀裂密度と最大初速度の関係を示す。同図から、亀裂密度の増加に伴って最大初速度が増大するという大凡の傾向は見えて取れると思われるが、相関が認められるとは言い難い。そこで、発破規格の影響

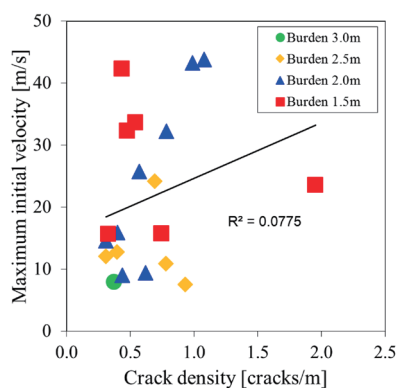


Fig.7 The relationship between crack density and maximum initial velocity of blast-induced fragmented rock.

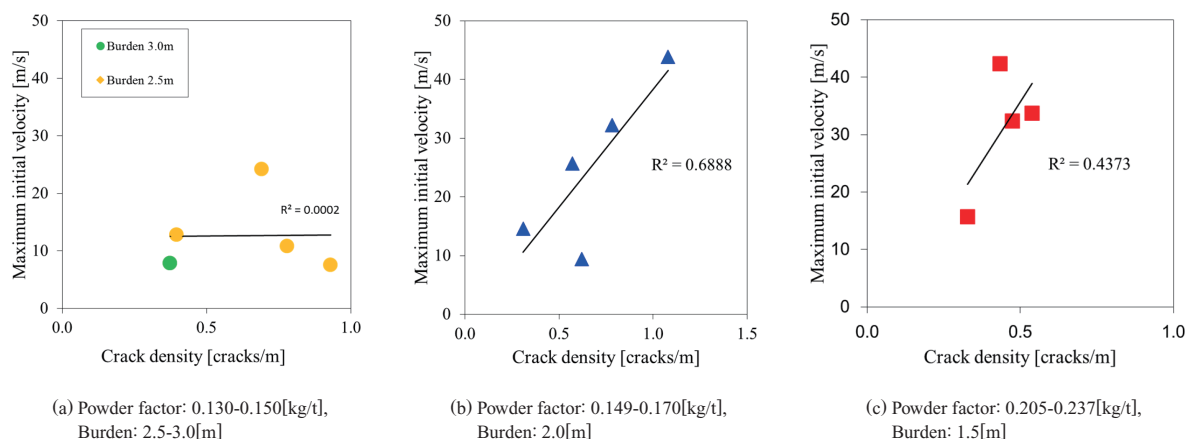


Fig.8 The relationship between crack density and maximum initial velocity of blast-induced fragmented rock in each burden.

を取り除くため、火薬原単位および最小抵抗線長が同程度の場合に分けて整理したのが Fig. 8 (a), (b), (c) である。同図 (b) 及び (c) から、すなわち最小抵抗線長が 2.0 m および 1.5 m の場合においては、岩盤内の亀裂密度と起砕物の最大初速度の間に相関関係が認められる。一方で、同図 (a) に見るように、最小抵抗線長が 2.5 m 以上となると両者の相関は確認できない。村田らが実施した一自由面発破の二次元数値シミュレーションの結果によれば岩石のような物質では発破により爆源近傍以外を除き圧縮主応力の接線方向に作用する引張応力で破断される、すなわち方向としては、圧縮主応力方向に亀裂が入ると主張している。さらに、村田らは発破により発生した圧縮主応力は発破孔から放射状に伝播し、爆源から離れるに従いその方向は次第にずれていき、自由面に対し平行な方向に曲がっていくことを示している<sup>18,19)</sup>。この数値シミュレーションでは先在する亀裂や不連続面を考慮していないため、本試験結果と単純な比較はできないものの、最小抵抗線長をある一定以上にすることで、圧縮主応力の方向が自由面に対して平行となり、自由面近傍の状態の影響が低減される可能性が考えられる。今後更なる検証が必要となるものの、最小抵抗線長をある一定以上に大きくすることで、自由面近傍と亀裂状態の影響を低減し、初速度を制御し得ることが示唆された。

次に、岩盤の力学的物性値について検討する。上述のように、爆源近傍以外を除き、発破による岩石の破壊は引張破壊の影響も大きいため、Fig. 9 に各最小抵抗線長での圧裂引張強度と起砕物の最大初速度の関係を示す。同図から、最大初速度は圧裂引張強度の増大に伴って減少するという大凡の傾向は認められるが、その相関性は明瞭では無い。そこで前述の亀裂密度の場合と同様

に、発破規格の影響を取り除いて、火薬原単位および最小抵抗線長が同程度の場合に分けて整理すると、Fig. 10 (a), (b), (c) に示すようになる。これらの図を見ると、同図 (c) ではある程度の相関性が認められるが、同図 (a) 及び (b) では、圧裂引張強度と起砕物の最大初速度の間に相関性は薄く、本試験の結果からは圧裂引張強度が起砕物の最大初速度に大きな影響を与えているとは言い難い。

以上の検討から、平均値を見れば、従来の研究で示されているように、飛石の最大初速度は最小抵抗線長に依存し、最小抵抗線長が小さいほど、初速度が大きくなる傾向が確認できた。一方で、起砕物の初速度は最小抵抗線長に従うものの、バラつきも大きく、その要因として、起爆秒時誤差による影響は排除できないものの、これまで経験的に知られていた岩盤状態、特に、岩盤の亀裂状態も、発破後の起砕物の飛翔挙動に大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。例えば最小抵抗線長が 2m の場合において、亀裂密度が 0.31 cracks/m から 1.08 cracks/m に上昇することで、初速度がおおよそ 3.5 倍となるなど、亀裂が起砕物の初速度に及ぼす影響について定量的に示すことができた。

このことから、飛石の発生を抑制するためには、発破前に切羽法面の凹凸や岩盤内の亀裂状態を調査し、部分的に亀裂が卓越している場所や凹部が確認できた場合、最小抵抗線長を大きく取る、あるいは部分的に装薬量を減らす等の対策を講じることで飛石の発生を抑制できると考えられる。

#### 4・2 起砕物の飛翔方向

飛石の制御を考える上で、飛翔距離のみならずその飛翔する方向を考慮することは極めて重要である。通常、発破孔列は切羽面

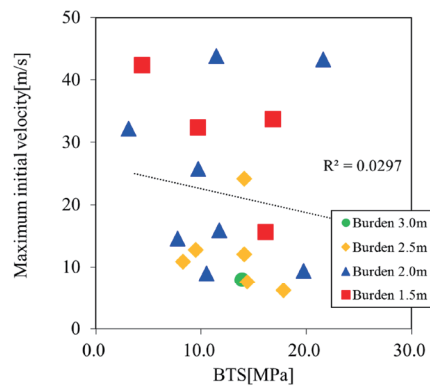


Fig.9 The relationship between BTS and maximum initial velocity of blast-induced fragmented rock.

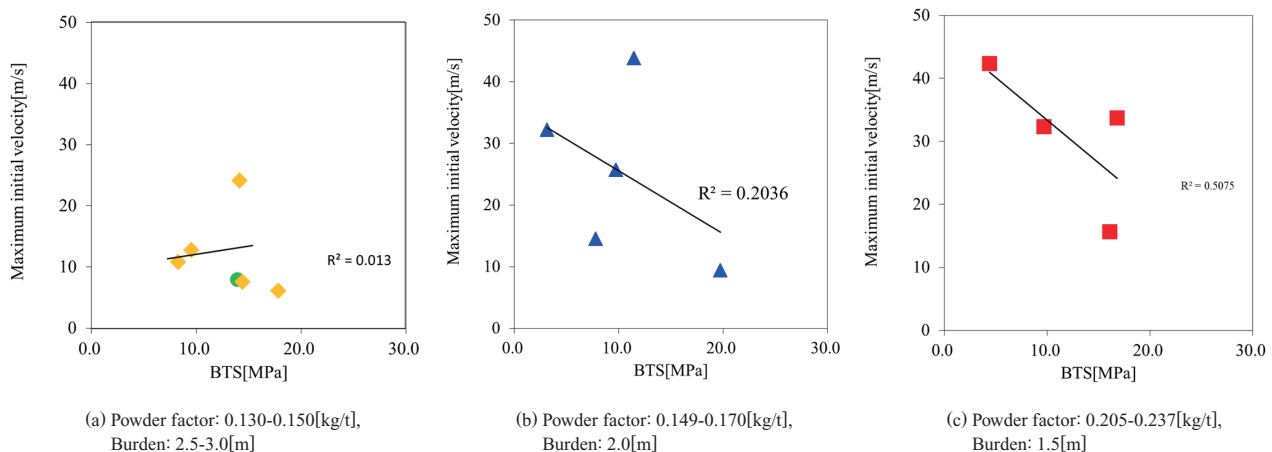


Fig.10 The relationship between BTS and maximum initial velocity of of blast-induced fragmented rock in each burden.

に対して平行に削孔する。また、本発破試験では起爆秒時差を設けない斉発破を行ったため、起砕物は切羽法面に対して垂直に飛翔すると推測された。しかし本試験では、Fig. 11に示すように、切羽毎に起砕物が飛翔する方向が大きく異なるケースが認められた。この飛翔方向の相違は、最小抵抗線長や火薬原単位といった発破規格が同じ場合にも現れたため、その違いによるものではなく、切羽の岩盤状態の相違に依るものであると考えられる。そこで、試験前に測定を行った切羽写真から抽出した最も長い不連続面の走向と飛翔方向を比較することで、岩盤状態が起砕物の飛翔方向に与える影響について検討した。

Fig. 12に検討に用いた各パラメータの概念図を示す。ここで、 $\beta$ は節理のベンチフロア面の切羽面に対する方位角 ( $|\beta| < 90^\circ$ ) であり、 $\alpha$ は切羽法面に対する垂線からの飛翔方向のずれ角である。この $\alpha$ と $\beta$ との関係をFig. 13に示す。同図から、全体的に両者の関係は良くないが、節理の方位角 $\beta$ が比較的浅い角度や $90^\circ$ に近い場合、節理は飛翔方向へと大きく影響を与えず、法面の影響を強く受けるため、切羽正面方向に飛翔しやすい傾向が、節理の方位角 $\beta$ がより深い角度の場合、節理の影響を受けて、切羽正面方向に飛翔し難くなるような傾向が見て取れる。飛翔方向の歪度が $-0.002$ と歪度の絶対値が $0.5$ 以下であったため、飛翔方向が正規分布に従うと仮定し、節理の走向が浅い場合・ $90^\circ$ に近い場合 ( $0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ ,  $60^\circ < \beta \leq 90^\circ$ ) と深い場合 ( $30^\circ < \beta \leq 60^\circ$ ) の二つに分類し、更なる検討を行ってみた。

平均値および標準偏差をもとに算出した確率密度分布をFig. 14に示す。同図から、節理が比較的浅い角度で存在する場合、飛翔方向のずれ角 $\alpha$ が $30^\circ$ 以下と切羽に対してほぼ正面方向に飛翔す

る確率が約86%と極めて高く、一方で節理が深い角度で存在する場合、ずれ角 $\alpha$ が $30^\circ$ 以上と切羽法面に対して正面方向から外れて飛翔する確率が約47%と高くなることが分かる。以上の検討から、節理方向が $0^\circ$ あるいは $90^\circ$ に近い場合にはばらつきは小さく、切羽の正面方向に飛翔しやすく、一方でそれ以外の場合にはばらつきが非常に大きく様々な方向に飛翔する可能性を有していると言える。つまり、節理が方位角 $30^\circ \sim 60^\circ$ と深い角度で存在する場合には、起砕物は切羽正面方向からずれて飛翔する可能性が高くなるため、発破の際の注意点の一つとなると思われる。切羽内の岩石強度のばらつきなど他の要因も飛翔方向へと影響を及ぼしている可能性もあり、今後更なる正確な飛翔方向の予測に向け更なる検討が必要であると考えられる。

## 5. 結 言

本研究では、飛石の発生抑制方法の確立に向けた基礎的知見を得るため、実操業中の露天掘り鉱山での発破試験を実施し、可能な範囲で発破規格を種々変更して検討した。得られた結果の概要を以下に記す。

①最小抵抗線長が2.5 mの場合を除き火薬原単位の増加に伴い、起砕物の最大初速度が大きくなる。また、最小抵抗線長が小さくなるほど、発破による火薬のエネルギーが自由面(法面)まで伝わりやすくなるため、起砕物の初速度が大きくなる傾向がある。さらに、発破規格のみならず、岩盤状態も飛翔挙動に大きな影響を及ぼしており、発破規格が同程度の場合、切羽の岩盤内の存在亀裂が多いほど起砕物の初速度が大きくなるものの、最小抵抗線長がある一定以上になると表面亀裂の影響を受



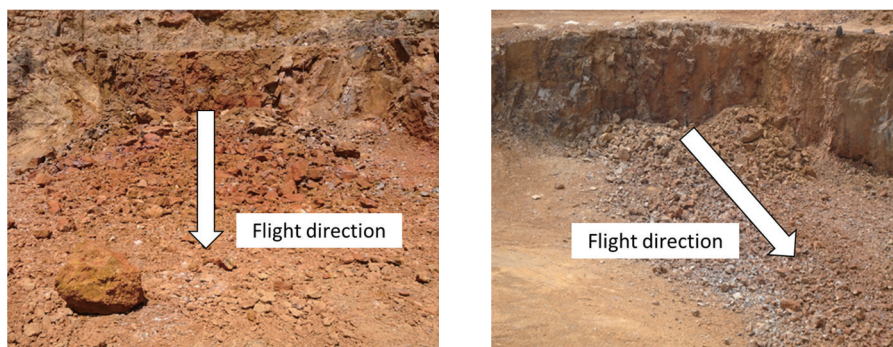


Fig.11 The variation of flight directions in the simultaneous blasting.

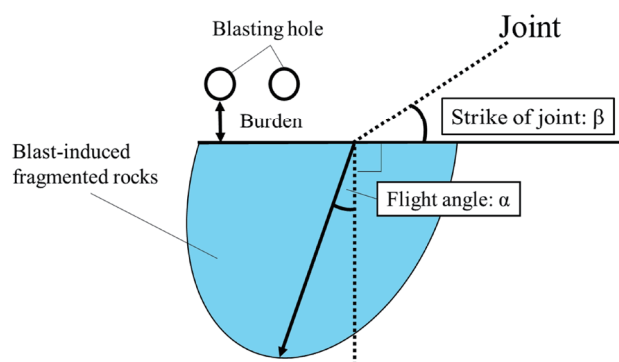


Fig.12 Illustration of each parameter for discussion of flight angle of blast-induced fragmented rock.

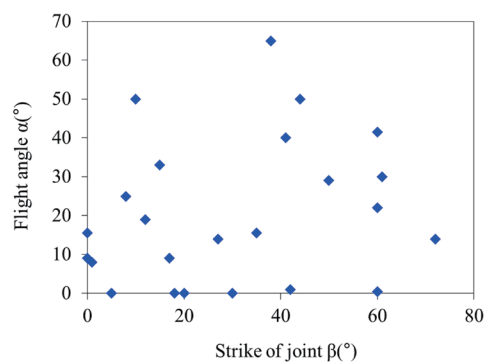


Fig.13 The relationship between strike of joint and flight angle of blast-induced fragmented rock.

けづらくなる可能性が示唆された。また、本試験において明瞭な圧裂引張強度の影響は確認できなかった。

②起砕物の飛翔方向は、岩盤内に存在する節理の方向に大きな影響を受ける。すなわち、切羽面との方位角が  $0^\circ$  または  $90^\circ$  に近い場合、切羽法面の影響を強く受けて切羽に対して正面方向に飛翔し易くなる。一方、節理の方位角が  $30^\circ$  程度以上と切羽面に対し節理が比較的深い角度で存在している場合には、切羽正面以外の様々な方向へ飛翔する可能性が高くなる。

**謝辞** 本現場試験に際し、現場の提供とともに種々手厚いご援助頂きました春日鉱山(株)の関係各位に御礼申し上げます。

## References

- 1) H. Shimada et al.: Journal of MMIJ **112** (2006), 573–581. (in Japanese)
- 2) IME: Glossary of commercial explosives industry terms: Safety Library Publication No. 12, Washington, DC. (1997), p.16.
- 3) Shadanhoujin Kayaku Gakkai Happa Senmon Bukai :*Genbagijyutsusha no Tamenno Happakougaku Handobukku*, (Kyouritsu Shuppan Kabushiki Gaisha, Tokyo, 2001), p.465
- 4) Kyushu Industrial Safety and Inspection Department: Countermeasure for flyrock induced by blasting, available at <http://www.safety-kyushu.meti.go.jp/kouzan/shiryou/H28toukatsusya/H28shiryou03.pdf> (in Japanese)
- 5) A. K. Raina et al.: Current Science **108** (2015), 660–665.
- 6) S. Stojadinovic et al.: Rock Mech. Rock Eng. **48** (2011), 68–73.
- 7) S. Stojadinovic et al.: Rock Mech. Rock Eng. **62** (2013), 5383–5396.
- 8) M. Monjizi et al.: Arab J. Geosci. **5** (2012), 441–448.
- 9) D. J. Armaghani et al.: Arab J. Geosci. **7** (2014), 5383–5396.
- 10) E. T. Mohamad et al.: EJGE. **18** (2013), 365–374.
- 11) Y. Ogata et al.: Sigen-to-Sozai **116** (2000), 617–622. (in Japanese)
- 12) A.J. Richards et al.: Terrock Consulting Engineers Report. **37** (2005).
- 13) T. N. Little: EXPLO conference, Wollongong, NSW. (2007), pp.35–43.
- 14) NATIONAL PARK SERVICEHANDBOOK for the Transportation, and Use of Explosives [https://www.nps.gov/parkhistory/online\\_books/nps/explosives/](https://www.nps.gov/parkhistory/online_books/nps/explosives/)
- 15) Shadanhoujin Kayaku Gakkai Happa Senmon Bukai :*Genbagijyutsusha no Tamenno Happakougaku Handobukku*, (Kyouritsu Shuppan Kabushiki Gaisha, Tokyo, 2001), p.90.
- 16) Y. Takahashi et al.: Proc. of the 8th International Symposium on Earth Science and Technology, Fukuoka Japan, (2015), pp.20–27.
- 17) C.Feng et al.: EJGE (2014), pp.4221–27.
- 18) T.Murata et al.:Journal of IES, **15**, 4 (1954), 294.
- 19) T.Murata et al.:Journal of IES, **16**, 1 (1955), 32.

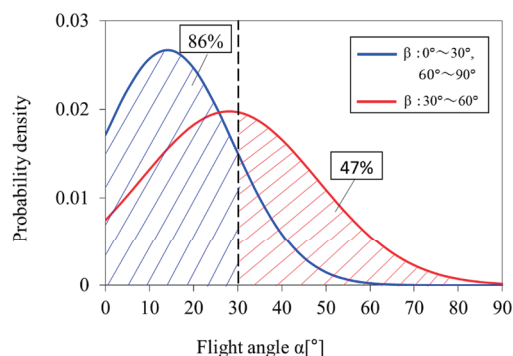


Fig.14 The probability density of flight angle of of blast-induced fragmented rock.