石灰石鉱山における発破振動および 起砕物の粒度に関する二、三の考察*

島田 英樹¹ 松井 紀久男² 一ノ瀬 政友³ 笹岡 孝司⁴
久保田 士郎⁵ Ganda M. SIMANGUNSONG⁶ 緒方 雄二⁷

Study on Effect of Blast Vibration on Size of Fragmentation at Limestone Quarry

by Hideki SHIMADA^{a*}, Kikuo MATSUI^a, Masatomo ICHINOSE^a,
Takashi SASAKA^a, Shiro KUBOTA^b,
Ganda M. SIMANGUNSONG^b and Yuji OGATA^b

- a. Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395 (* Corresponding author: E-mail shimada@mine.kyushu-u.ac.jp)
b. Research Center for Explosion Safety, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16-1 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8569

The research was mainly performed to check whether or not the blast burden influence vibration magnitude. This is associated with the necessity to reconsider blasting design in order to reduce vibration to the acceptable levels. Blast vibration monitoring of three scenarios of burden were managed in limestone quarry. The vibration monitoring results are found in good agreement with what had been found by other researchers in terms of duration, amplitude, and frequency. Vibration waveforms typically last for 50 to 100 milliseconds. The peak amplitudes decrease according to additional distance. Frequencies decrease with increasing distance. The weight scaling law between the PPV and scaled distance revealed three relationships for three different scenarios of burden, which obviously indicate that blast burden influences vibration magnitude. The highest vibration magnitudes are produced by the biggest blast burden. Otherwise the lowest levels of vibration magnitude are produced by the smallest blast burden. Parallel with the main idea, which were mainly performed to check the influence of the blast burden to vibration magnitude, investigation was extended to measure fragmentation of the blasted rocks. Fragmentation measurement was achieved using the analysis of scaled photograph taken from a muckpile. Using software known as Split Engineering, the blasted rocks resulted from three scenarios of blast burden were simply calculated and presented in size distribution curve. The average fragment size increases exponentially with increasing blast burden.

KEY WORDS: Limestone Quarry, Opencut Mine, Blast Vibration, Fragmentation, Size Distribution

1. はじめに

火薬類を用いる発破という作業は、鉱山や土木の分野で重要な技術として古くから利用されてきた。最近では都市部の構造物解体にも適用が試みられるようになり、改めてその有用性が認識されつつある。しかしながら発破は、法令によって火薬類の利用や使用が制限されることをはじめ、振動・騒音・飛石など、他の工法

よりも周辺環境に悪影響を及ぼす可能性が高いことが挙げられる。また、火薬類に対する危険な印象から、その使用が心情的に嫌われることもある。

本研究は、石灰石鉱山現場において起砕物の粒径や発破振動を計測し、発破の安全や周辺環境への影響の低減を確保しつつ、発破をより効率的に利用するための基礎的知見を得ようとしたものである。すなわち、まずボアホールカメラを用いた亀裂観察および画像処理による粒度分布解析を行い、その結果をもとに亀裂の発破効果に及ぼす種々の影響について検討した。次に、振動・騒音・飛石の中でも比較的、広範囲に影響を及ぼす発破振動に着目し、発破振動の現場実測を行い、この実測結果をもとに発破振動の解析等の種々の検討を行った。

2. 岩盤の状態と起砕物の粒度

2・1 起砕物の粒度

発破により生じる起砕物の粒径は、発破規格のみならず、岩盤の状態、すなわち岩盤の強度や岩盤内亀裂に依存する¹⁾。石灰石鉱山の移行石灰石には岩盤内亀裂が卓越しているため、これによ

* 2006年7月14日受付 10月25日受理

1. 普通会员 博士(工学) 九州大学大学院助教授 工学研究院地球資源システム工学部門
2. 普通会员 工博 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
3. 普通会员 工博 九州大学大学院助手 工学研究院地球資源システム工学部門
4. 普通会员 博士(工学) 九州大学大学院助手 工学研究院地球資源システム工学部門
5. 普通会员 博士(工学) 産業技術総合研究所 爆発安全センター
6. 博士(工学) 産業技術総合研究所 爆発安全センター
7. 普通会员 博士(工学) 産業技術総合研究所 爆発安全センター
【著者連絡先】FAX: 092-802-3332 (九大・工・地球資源)
E-mail: shimada@mine.kyushu-u.ac.jp

キーワード: 石灰石鉱山, 露天掘り鉱山, 発破振動, 起砕物, 粒度

Table 1 Blasting design at F limestone quarry.

Face	A	B	C
Orientation of face	N50~60° E	S	S30° E
Bench height	10m	15m	13m
Bench face angle	70°	70°	70°
Spacing	4.0m	3.8m	4.0m
Burden	4.1m	3.6m	4.2m
Diameter of blast hole	110mm	90mm	110mm
Length of blast hole	11.0m	17.0m	14.5m
Charge length	5.5m	6.0m	7.5m
Charge quantity	45kg	36kg	58kg
Powder factor	91.7g/t	77.5g/t	92.2g/t
Height of cross-drilled hole	2.0m	1.0m	1.5m
Direction of cross-drilled hole	S60° W	N	N30° W
Diameter of cross-drilled hole	95mm	105mm	95mm
Length of cross-drilled hole	12.0m	17.0m	17.0m
Angle of cross-drilled hole	2~5°	3°	2°

Table 2 Mechanical and physical properties.

Face	A	B	C
Density($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	2.69	2.70	2.69
P-wave velocity(km/s)	4.29	4.21	3.76
Shore hardness(-)	45.0	43.9	37.9
RIHN(-)	37.6	39.0	5.4
UCS(MPa)	94.1	91.6	72.8
BTS(MPa)	6.58	7.41	3.36
Young's modulus(GPa)	14.51	12.04	10.56

Fig.1 Illustration of the borehole camera observations.

Fig.2 Example of crack opening after blasting.

る発破効果の影響が顕著に認められる。さらに、採掘ベンチは断続的あるいは連続的に発破振動が作用するため、発破に伴い生ずる二次的亀裂の影響も無視できないと考えられる。したがって、発破対象岩盤の亀裂状態を正確に把握することは、発破作業を効率的に行う上でも重要である²⁾。また、現場で起砕物の粒径や粒度分布を予測することができれば、採鉱計画の効率化、最適化に寄与することができると思われる。

2・2 調査項目および調査方法

調査を行った現場は、福岡県中部に位置する露天掘り石灰石鉱山であるF鉱山内A～Cの3切羽である。A切羽はF鉱山内の山頂部に位置し、粘土などの介在物が卓越している。B切羽は少量の粘土が介在し、発破による起砕物が細かいのが特徴である。C切羽は3切羽の中で最も石灰石の品位がよく、切羽面の白色度が極めて高い。Table 1に各切羽における発破規格を示す。

本調査では、まずこの調査のために切羽法尻から切羽奥部へ削孔されたボアホール（以下、横孔と呼ぶ）および発破孔において、ボアホールカメラにより発破前の岩盤内亀裂を観察した。この観察で得られた画像データを用いて、岩盤内亀裂数および方向を求めた。また、発破後の起砕物をデジタルカメラで撮影し、その画像をもとに粒度分布解析ソフト Split-Desktop により粒度分布を求めた³⁾。さらに、起砕物が取り除かれた後に横孔の観察を再度行い、発破前後の岩盤内亀裂の数量の変化を求めた。Fig. 1に本調査工程の概要を示す。

次に、岩盤の状態が発破前後の岩盤内亀裂や起砕物の粒度分布

にどのような影響を及ぼすのかについて検討するために、各切羽の起砕物から人頭大の試料を採取した。これらの試料から直径25mm、高さ50mmの供試体を作製し、一軸圧縮試験、衝撃破砕(RIHN)試験⁴⁾および各種物理試験を行った。同様に、直径25mm、高さ25mmの供試体を作製し圧裂引張試験を行った。Table 2に3切羽における物理的および力学的特性値を示す。

2・3 発破による岩盤内亀裂への影響

Fig. 2に代表的な発破前後の亀裂の状態を示す。この図は、発破前後における同一箇所での亀裂状態を示しており、発破前に存在していなかった亀裂が、発破後には発破孔の周囲に同心円状に新たな亀裂が観察されている。しかし、本現場では、この図のように発破による新たな亀裂の発生はほとんど認められなかったが、いくつかの岩盤内亀裂が発破後に開口および進展する現象が観察された。Table 3には、発破後の各切羽の横孔観察結果から、開口した亀裂数を横孔の孔口からの距離で示している。A切羽では発破により横孔内の壁面が崩壊したため観察ができなかったが、この表から、自由面に近い方ほど開口した亀裂数が多いことが分かる。この観察結果を考察すると、Fig. 3に模式的に示すように、B、C切羽とも切羽面に対して平行方向に卓越する亀裂が発破後に開口していたことから、この現象は発破により地山応力が開放されたことに起因していると判断される。なお、発破孔の最小抵抗線は約4m程度であるため、発破孔と横孔の位置関係に影響される亀裂の進展はほとんどないと考えられる。

Table 3 Relation between the distance from the borehole surface and the numbers of open crack.

Face	A	B	C
0 ~ 1 m	—	5	5
1 ~ 2 m	—	1	0
2 ~ 3 m	—	0	3
3 m ~	—	0	0
Total	—	6	8

Fig.3 Illustration of crack opening.

Table 4 Average crack space and crack density at each face.

Face	A	B	C
Average crack space(cm)	48.3	22.4	45.2
Crack density (1/m)	2.07	4.47	2.21

Fig.4 Size distributions of the muckpile at each face.

2・4 各種特性値と起砕物の粒度分布の関係

Table 4 に発破孔の観察から得られた各切羽の平均亀裂間隔および亀裂頻度を、Fig. 4 には粒度分布解析から求めた各切羽の起砕物の粒径加積曲線を示す。なお、A 切羽では深度 10m まで、B および C 切羽では 14m までの深度まで観察し、隣接する亀裂間隔の平均値を求めた。また、1m あたり存在する亀裂数を亀裂頻度とした。さらに Table 5 には、Fig. 4 の粒径加積曲線から求めた通過百分率の 50% に対応する粒径 Xp_{50} (以下、50% 径と呼ぶ) を各切羽起砕物の代表粒径として示す。

平均亀裂間隔と 50% 径の関係を Fig. 5 に示す。この図より、両者の間には相関関係が認められ、岩盤内亀裂の亀裂間隔や亀裂頻度が発破後の起砕物の粒径に影響を与えていることが判る。また、Fig. 6 (a) ~ (d) には、一軸圧縮強度、圧裂引張強度、岩石衝撃硬度数 (RIHN)⁴⁾ および単位薬量と 50% 径の関係を示す。一般に、発破による起砕物の粒度は発破規格や岩盤の各種特性値にも依存していることは明白であるが⁵⁾、これらの図からは各種特性値と 50% 径の間には明瞭な相関関係が認められない。この結果の一因としては、岩盤の物理的および力学的特性値に大きな相違がないこと、さらには測定データ数の不足に依ると思われる。

そこで、岩盤内亀裂状態のみが起砕物の粒径に影響を及ぼすと仮定して再考する。孔口から孔奥に向かって亀裂を観察し、孔口

Table 5 Representative particle size at 50% of the grain size accumulation curve, Xp_{50} .

Face	A	B	C
Xp_{50} (cm)	41.8	19.8	32.0

Fig.5 Relation between average crack space and the representative particle size, Xp_{50} .

と最初の亀裂 (1 番目) 間の距離を X_1 、1 番目の亀裂と 2 番目の亀裂間の距離を X_2 、 $n-1$ 番目の亀裂と n 番目の亀裂間の距離を X_n とする。岩盤内の亀裂間隔によって一意的に起砕物が起砕されるならば、起砕物は n 個発生し、各粒径は X_n の球状となると仮定する。また、岩盤の密度が一定であるとする、各粒子の重量百分率、すなわち通過百分率は $(X_n / L) \times 100$ となる。ただし、 L は発破孔の長さである。このように算出して得られた各切羽の粒径加積曲線を Fig. 7 に、50% 径 Xb_{50} を Table 6 に示す。これらの図表より、B 切羽から発生する起砕物の粒径は他に比べて小さいことが示唆され、前述の粒度分布解析結果とも一致する。

このような仮定の下で得られた粒度分布は、既に岩盤の状態を反映していると思われるため、これと実際に得られた粒度分布の差が大きいほど、発破による影響が大きく作用していると推察できる。そこで、今述べた 50% 径 Xb_{50} と前述の粒度分布解析により得られた 50% 径 Xp_{50} との差 $Xb_{50} - Xp_{50}$ を Table 7 に示す。また同表には、各切羽における発破規格の代表的な値である単位薬量 (Powder factor) や一軸圧縮強度、圧裂引張強度、岩石衝撃硬度数 (RIHN) を示す。先述したように、力学的特性値 (一軸圧縮強度、圧裂引張強度、RIHN) および単位薬量と 50% 径の間にはほとんど相関関係が認められなかった。しかし、平均亀裂間隔の影響を取り除いて力学的特性値の類似した A、B 切羽の $Xb_{50} - Xp_{50}$ と単位薬量を比較すると、単位薬量が多いほど $Xb_{50} - Xp_{50}$ が大きくなる傾向が認められる。一方、平均亀裂間隔の影響を取り除いて単位薬量の類似した A、C 切羽の $Xb_{50} - Xp_{50}$ と力学的特性値を比較すると、力学的特性値が小さい、すなわち脆弱な岩盤ほど $Xb_{50} - Xp_{50}$ が大きくなる傾向にあることが分かる。

以上のことから、発破による起砕物の粒度は、岩盤内亀裂の影響を除去すると、発破規格や岩盤の各種特性値に依存することは明らかであり、現場での経験とも一致する。したがって、起砕物の粒度をより確実に推定する場合には、岩盤内の亀裂状態を定量的に把握することが重要であることが分かる。

3. 発破振動測定

3・1 発破振動

爆薬が発破孔内で爆破されると、発破孔内で高圧力状態が発生

(a) Unconfined compressive strength versus Xp_{50} . (b) Tensile strength versus Xp_{50} . (c) RIHN versus Xp_{50} . (d) Powder factor versus Xp_{50} .Fig.6 Relation between mechanical properties, RIHN, powder and representative particle size, Xp_{50} .

Fig.7 XSize distributions of the muckpile at each face.

Table 6 Representative particle size at 50% of the grain size accumulation curve, Xb_{50} .

Face	A	B	C
Xb_{50} (cm)	60.1	34.5	63.2

Table 7 The values of $Xb_{50} - Xp_{50}$, powder factors and mechanical properties.

Face	A	B	C
$Xb_{50} - Xp_{50}$ (cm)	18.4	14.7	32.1
Powder factor(g/t)	91.7	77.5	92.2
UCS(MPa)	94.1	91.6	72.8
BTS(MPa)	6.6	7.4	3.4
RIHN(-)	37.6	39.0	5.5

して周辺岩盤へ応力波が伝播し、この応力波により周辺岩盤や構造物が振動する⁶⁾。この発破振動は、火薬装薬量、最小抵抗線、点火の遅延時間等を変化させることにより制御することができる。すなわち、装薬量を大きくすると振動は当然大きくなり、最小抵抗線を大きくするとエネルギーが自由面で解放し難くなるために振動は大きくなる。また、遅延時間を小さくすれば振動は大きくなる。したがって、これらの発破規格値と発破振動の関係を定量的に把握することができれば、発破振動の低減や起砕物の粒度の

制御等について、より深く検討することができると考えられる。

しかし、操業現場においては現場計測では、これら発破規格値を自由に変更することは現実には困難であるため、今回の発破振動計測は、最小抵抗線のみを可能な範囲内において変化させて行い、また同時に粒度分布測定を行った。そしてまず、発破振動ならびに起砕物の粒度に及ぼす最小抵抗線の影響について検討し、次に、これらの結果を基に発破孔から計測点までの距離と単位薬量を関数とした振動予測式を求め、種々の検討を行った。

3・2 測定場所および測定方法

測定場所は、前章で述べた現場と同様、福岡県中部に位置するF鉱山のB切羽であり、この測定現場の石灰石の各種特性値は前掲Table2に示すようである。

また、現場計測を実施した時点の切羽の発破規格は、ベンチ高さが約10m、孔間隔が3.8m、最小抵抗線が3.6m、発破孔が90mm、孔間隔3.8m、延時秒時差0.5sであり、爆薬はANFO爆薬を、雷管は瞬発電気雷管、DS電気雷管(3段、5段、7段、9段)を使用していた。

発破振動計測には3軸の加速度計を使用した。加速度センサーは、TEAC電子計測株式会社製707Zで、測定限界値： $\pm 15G$ ($1[G]=9.80665[m/s^2]$)、周波数応答：3～5,000Hzである。応答信号は100mV/Gで、アンプで10、100倍の増幅が可能である。また、同社製SA-611、SA-610、SA-6のアンプを使用した。さらにTEAC電子計測株式会社製データレコーダDR-5000WBで得られたデータを記録し、日置電機(株)製デジタルハイコーダ8855で500kHz以下のローパスフィルタを介し、A/D変換して波形を解析した。

Fig. 8に本測定の概要図を示す。振動計測点は、ベンチ中央からベンチの起砕面に対して垂直となる方向に、発破孔列から25m、98m、140m離れた地点とし、それぞれセンサー G_1 、 G_2 および G_3 を設置した。この際、最小抵抗線は3.7m、4.2mおよび4.7mに変化させ、それぞれ2回ずつ測定を行った。ただし、孔間隔は約4.0m一定になるように発破孔は削孔された。なお、3軸の加

Fig.8 Layout of blast vibration test.

Fig.9 Relation between scaled distance and each direction component of vibration acceleration.

速度の方向は、切羽面に平行方向をX方向、切羽面に直交する方向をY方向、地表から奥部に向かってZ方向とした。また、起砕産物の粒度分布測定は前章で述べた手法を用いた。すなわち、起砕物をデジタルカメラで撮影してSplit-Desktopにより起砕物の粒度分布を求めた³⁾。

4. 発破振動の測定結果及び考察

4・1 発破振動に及ぼす最小抵抗線の影響

本報では、最小抵抗線の変化に伴う発破振動への影響について検討するために、伊藤により提案された最大振動速度と振動推定式で一般的に用いられる換算距離： $W^{2/3} \cdot R^{-2}$ をもとに、得られた結果をまとめた^{7,8)}。ただし、 W は装薬量、 R は発破孔からの距離である。なお、周波数を一定とすれば、速度と加速度の間には一次相関が認められるため、最大振動加速度と換算距離の間にも類似した関係が得られる。また、装薬量はほぼ一定の値を取るデータのみを用いたが、これは装薬量をほぼ一定の値とすれば、換算距離は発破孔からの距離のみに従うこと意味している。

Fig. 9 (a) ~ (c) は、それぞれ換算距離： $W^{2/3} \cdot R^{-2}$ とX、YおよびZ方向の最大振動加速度（以下、PPA (m/s²) : Peak Particle Acceleration)の関係を3つの最小抵抗線（3.7、4.2および4.7m）別に表示したものである。先述のように、最小抵抗線が小さい場合に比して最小抵抗線が大きい場合は、エネルギーが自由面で解放され難くなり、発破振動は大きくなると考えられる。したがって、理想的には最小抵抗線が大きくなるとともに最大振動加速度が大きくなるという結果が得られるはずである。しかし、これらの図に見られるように、最大振動加速度への影響は明瞭には認められず、今回測定を行った最小抵抗線の変動幅では、発破振動への影響を考慮する必要はないと判断できる。このことから、発破規格を決定する際、今回程度の最小抵抗線変動幅内では、周辺環境の構造物への振動の影響を考慮せずに操業コストに重点をおき、望まれる破碎産物の粒度のみを考慮して最小抵抗線を変化させてよいことが示唆される。

4・2 起砕物の粒度に及ぼす最小抵抗線の影響

石灰石鉱山では、一般に起砕物の粒度はできる限り最終製品の粒度に近い方が好ましい。この粒度の発破制御方法についてこれまで様々な研究が行われてきているが、未だに十分な技術確立はなされておらず、試行錯誤の上で現場毎に最善策を見いだしているのが現状であろう。前項の結果から、最小抵抗線を3.7mから4.7m程度の範囲内で変化させても発破振動には影響はないと判断されたので、周辺環境への発破振動の影響を考慮せずに、この問題を解決する試みとして、起砕物の粒度に及ぼす最小抵抗線の影響について検討した。

Fig. 10 に、測定を実施した6回の発破による起砕物の粒度分

Fig.10 Size distribution of fragmented rocks.

布を最小抵抗線別に示す。なお、図中の「理想」の粒度分布は、F鉱山の破碎設備を考慮して経験的に求められているものである。この図から、最小抵抗線が3.7mの場合の起砕物が最も小さく、最小抵抗線が4.7mの場合の起砕物が最も大きく破碎されていることが分かる。

起砕物の平均粒径と岩盤に与える火薬エネルギーの間には、(1)式の関係があるとKuznetsovは言及している⁹⁾。

$$X = A(K)^{-0.8} Q_e^{1/6} \left(\frac{115}{E} \right)^{19/30} \dots\dots\dots (1)$$

ここにXは平均粒径、Aは岩石の硬度によって決定される岩石係数、Kは火薬原単位、 Q_e は一孔あたりの装薬量、Eは使用する火薬の威力に關係するパラメータである。今回の測定は同一切羽で実施したため、Aはほぼ一定の値を取り、また一孔あたりの装薬量はすべてANFO爆薬を約40kg使用したということから Q_e およびEもほぼ一定の値を取る。したがって(1)式の関係から、平均粒径は火薬原単位のみ依存すると考えられ、孔間隔および火薬量がほぼ一定値であるため、最小抵抗線が大きいほど平均粒径が大きくなり、実測結果と一致する。

次に、この粒度分布から得られる重量基準80%径： X_{p80} (cm)をTable 8に示す。この重量基準80%径を採用した理由は、F鉱山では破碎産物全体の8割がグリズリーバーやクラッシャー等の破碎設備を通過できれば、プラント操業に支障が出ないとされているためであり、その粒径は約60cmである。Fig. 10の各粒度分布から判断すると、F鉱山で理想的な粒度分布が得られる最適な最小抵抗線は4.2mから4.7mの間と言える。また、最小抵抗線が4.2mより大きくなると、60cmを超える大塊の起砕物が多く存在するようになり、破碎プラントの操業に支障を来す可能性が生

Table 8 Representative particle size at 80% of the grain size accumulation curve, X_{p80} .

Burden	3.7m	4.2m	4.7m
$X_{p80}(\text{cm})$	20, 26	32, 36	40.5, 59

じる。

Fig. 11 に Table 8 の X_{p80} と単位薬量の関係を示す。この図から両者の関係を求めると (2) 式が導出される。なお、 t は単位薬量 (kg/m^3) である。

$$X_{p80} = 5,350e^{-13t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

この関係式から、希望する重量基準 80% 径に対応する単位薬量が得られることから、最小抵抗線等の発破規格の決定に資することができると思われる。

4・3 振動速度による検討

発破振動が及ぼす構造物への影響について検討する場合、構造物への影響と振動速度の間に相関があるとされていることから、構造物への振動許容値としては一般的に最大振動速度が用いられる。しかし一方では、プラント等の計測機器等で用いられる振動許容値には最大振動加速度で規定されている場合が多い。このように、対象物によって採用される振動許容値は最大振動速度あるいは最大振動加速度と異なるため、それに応じた振動許容値を選定する必要がある。

前述のように、伊藤らは最小抵抗線の変化に伴う発破振動への影響について検討するために振動速度を適用し種々の成果を報告しており⁷⁾、露天掘り石炭鉱山における発破振動に関する検討でも、同様に最大振動速度が適用される例が多く認められる⁶⁾。そこで、本報においても振動速度を用いて検討を行うが、速度計による計測では近距離での高周波振動測定には適していないため、計測には加速度計を用いた。そこで本節では、まず振動加速度を用いて測定データの検討を行う。

4・3・1 振動加速度 まず本項では、測定データである振動加速度についての結果を述べる。Fig. 12 (a) ~ (c) に、発破孔から 25m, 98m, 140m 地点における発破後の経過時間と振動加速度の関係の一例を示す。この発破には発破孔が 14 孔あり、これらの図から 14 個の波形を見て取ることができる。これは発破の延時秒時差が約 500ms であったため、各発破孔から発生する応力波が干渉を起こさず、それぞれが独立していたことに依る。一般に、DS 雷管での遅延発破の場合は波動干渉が発生せず各発破による振動が測定され、MS 雷管での遅延発破の場合は波動干渉が起こり、全ての発破孔から発生する振動が重なり合って測定される。この結果より、F 鉱山では波動干渉における振動低減効

Fig.11 Relation between powder factor and representative particle size, X_{p80} .

果を考慮せずに、各発破孔の振動を管理して周辺環境への影響を考慮できると考えられる。

次に、各発破孔から得られた振動加速度波形のピーク値、すなわち最大振動加速度 (以下、 PPA (m/s^2): Peak Particle Acceleration) (PPA_X , PPA_Y , PPA_Z , それぞれ X , Y , Z 方向) と、この振動加速度ピーク値と一般に良い相関関係があるといわれている換算距離; $W^{2/3} \cdot R^{-2}$ の関係を Fig. 13 (a) ~ (c) に示す。ここで、 W : 装薬量 (kg) R : 発破孔からの距離 (m) である。この図より、換算距離が大きくなると、3 方向すべての最大振動加速度; PPA は大きくなる傾向にあることが分かる。そこで、前述のように今回の現場試験では最小抵抗線を変えたが、発破振動に最小抵抗線の影響が認められなかったため最小抵抗線の違いは考慮せず、この図の関係から各方向成分の最大振動加速度予測式を最小二乗法で導出すると下式のようになる。

$$(X \text{ 方向}) \quad PPA_X = 195.27 \times W^{2/3} \times R^{-2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$(Y \text{ 方向}) \quad PPA_Y = 196.46 \times W^{2/3} \times R^{-2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$(Z \text{ 方向}) \quad PPA_Z = 196.75 \times W^{2/3} \times R^{-2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

これらの式より、最大振動加速度を適用した場合、方向の相違による差がほとんど顕れないことが分かる。また、この Fig. 13 (a) ~ (c) より、換算距離; $W^{2/3} \cdot R^{-2}$ が 0.003 以上、すなわち発破孔からの距離が近い場合 (装薬量はほぼ一定の値をとることによる) において、最大加速度が大きくばらつく傾向があることが判る。これは、発破孔から測点までの距離が近い場合は、以前の発破の影響が岩盤が受けている可能性がある他に、前掲 Fig. 8 より近距離の場合には、発破孔と振動計の角度の関係が大きく変化していることに起因していると考えられる。また、山本ら¹⁰⁾によると、ベンチ発破による発破振動は距離の増大とともに卓越周波数が低下し、ある程度遠方では発破条件に関わらずほぼ一定の卓

Fig.12 Blast vibration waveform (acceleration).

Fig.13 Relation between scaled distance and each direction component of peak particle acceleration.

Fig.14 Relation between scaled distance and each direction component of peak particle acceleration.

Fig.15 A typical blast vibration waveform (acceleration).

Fig.16 A typical blast vibration waveform (velocity).

越周波数になることを示していると報告しており、この結果の妥当性が伺える。

以上のような意味から、発破孔から遠い地点、すなわち、換算距離； $W^{2/3} \cdot R^{-2}$ が 0.003 以下のデータを用いて振動予測式を求める。この設定は、発破振動が周辺環境に及ぼす影響を検討する上で、発破孔近傍の振動よりも遠点の振動を把握することがより重要であることから妥当であると考え。なお、ここで今回の測定結果では、パラツキが小さくなる換算距離、すなわち 0.003 以下の場合、装薬量が 40kg 程度とすると約 60m 以上に相当すると考えられる。Fig. 14 (a) ~ (c) は前掲 Fig. 13 (a) ~ (c) の換算距離 0.003 以下を再掲したものである。これらの図の関係を最小二乗近似すれば以下の振動加速度予測式が得られる。

$$(X \text{ 方向}) \quad PPA_X = 704.59 \times W^{2/3} \times R^{-2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$(Y \text{ 方向}) \quad PPA_Y = 491.03 \times W^{2/3} \times R^{-2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$(Z \text{ 方向}) \quad PPA_Z = 485.96 \times W^{2/3} \times R^{-2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

4・3・2 振動速度 前述のように、露天掘り石灰石鉱山における発破振動に関する検討では、最大振動速度が適用される場合が多いことから本項では、振動速度の結果について述べる。振

動速度は振動加速度を積分することにより求められるが、前述のように、F 鉱山の発破は各発破孔の延時秒時差が 500ms の DS 雷管を用いており、各発破孔から発生した応力波が他の発破孔で発生した応力波と干渉せずに伝播しているため、各発破の振動加速度波形を積分して容易に速度波形を得ることができる。その一例として、Fig. 15 に現場実測で得られた加速度波形を、Fig. 16 に Fig. 15 を積分して得られた速度波形を示す。また、Fig. 17 (a) ~ (c) には速度波形のピーク値、すなわち最大振動速度（以下、PPV (mm/s) : Peak Particle Velocity) (PPV_X , PPV_Y , PPV_Z はそれぞれ X, Y, Z 方向) と換算距離； $W^{2/3} \cdot R^{-2}$ の関係をそれぞれ示す。なお、これらの図は前項で述べた理由から、発破孔から遠点の場合のみの各方向成分の PPV と換算距離の関係を示している。これらの図の関係を最小二乗近似すれば各成分の PPV 振動予測式 (9) ~ (11) が得られる。

$$PPV_X = 4072 \times W^{2/3} \times R^{-2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$PPV_Y = 2838 \times W^{2/3} \times R^{-2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$PPV_Z = 2809 \times W^{2/3} \times R^{-2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

各成分の最大速度が同時に計測されたと仮定すると、PPV は、

Fig.17 Relation between scaled distance and the peak particle velocity.

Fig.18 Relation between scaled distance by cubic root square and the peak particle velocity.

$$PPV = \sqrt{PPV_X^2 + PPV_Y^2 + PPV_Z^2}$$

で表されるため、最大振動速度と換算距離の関係は Fig. 17 (d) で示され、この図から (12) 式の PPV 予測式が得られる。

$$PPV = 5185 \times W^{2/3} \times R^{-2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

4・4 振動予測式の検討

発破振動は、火薬類の特性、薬量、起爆方法、てん塞状態と爆薬の密閉状態、自由面の数、距離、地質条件等の多くの要因に複雑に影響されるため、これら全ての条件に適用できる発破振動の普遍的な関係式を求めることは困難である。このため、発破振動の予測式は現場ごとに経験的に求める必要がある。

そこで、試験を行った現場に適用する関係式を求めるために、立方根則²⁾； $R/W^{1/3}$ を用いて最大振動速度； PPV の予測を行う。Fig. 18 (a) ～ (d) には、立方根則と X 、 Y 、 Z 方向および合成 PPV

の関係をそれぞれ示す。これらの図より、最小二乗近似を用いて X 、 Y 、 Z 方向および合成 PPV の振動速度予測式を算出すると下式のようなになる。なお、本現場における総薬量 W は 15.0 ～ 45.0kg、発破孔から計測点までの距離 R は 25 ～ 140m である。

$$PPV_X = 1.017 \times 10^6 \times \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-3.716} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$PPV_Y = 1.583 \times 10^6 \times \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-3.995} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$PPV_Z = 1.043 \times 10^5 \times \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-3.090} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$PPV = 6.102 \times 10^6 \times \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-4.095} \quad \dots\dots\dots (16)$$

Fig.19 Relation between the distance from the blasting hole and amount of explosive (limitation of $PPV=10\text{mm/s}$).

Fig.20 Relation between the distance from the blasting hole and amount of explosive (limitation of $PPV=0.3\text{mm/s}$).

ここで、構造物にダメージを与え始める振動許容値は 10mm/s 、多くの人々が振動を感じて苦情が発生すると言われている振動許容値は 0.3mm/s であるとされているので⁷⁾、本現場にこれらの振動許容値を適用し、得られた振動予測の(16)式を用いると、発破孔からの距離； R (m) と制限薬量； W (kg) の関係はそれぞれ Fig. 19 および Fig. 20 のように得られる。両図の関係を用いることにより、発破孔からある距離離れた点において PPV を 10mm/s 、 0.3mm/s 以内に制御するための制限薬量を求めることができる。例えば、本計測現場では装薬量が 40kg 程度であったため、発破孔から 114m 地点までは周辺構造物へのダメージがなく、発破孔から 287m 地点までは周辺の人々への被害がないことが予測される。今回測定を行った F 鉱山の B 切羽から民家までは 400m ほど離れていることから、周辺環境への影響を考える上で発破振動のみを考えると、装薬量を 94kg まで増やしても振動被害は起こらないことが予想される。

以上のことから、発破による周辺環境への影響について検討する際には、まず試験発破を行って現場毎の振動予測式を求める必要があることが分かる。また、現場毎に振動予測式を算出することにより、前述のような手法により装薬量の決定し、周辺環境への影響を制御することができるとと思われる。

5. ま と め

本研究では、操業現場をお借りしての現場計測であったため、発破規格等の条件を種々変更することができず、広範囲な検討が不十分であると思われるが、得られた結果をまとめると以下のようである。

- 1) 起砕物の粒度をより確実に推定する場合には、発破規格や岩盤の各種特性値はもとより、岩盤内の亀裂状態をも定量的に評価する必要がある。
- 2) 最小抵抗線の変化幅が比較的小さい場合には、その変化によ

る発破振動への影響は小さいため、鉱山の操業コストに重点をおき、望まれる破碎産物の粒度のみによって最小抵抗線を変化させることができる。

- 3) 測定振動値と換算距離の関係は、発破孔からの距離が近い場合には大きくバラツキ、発破孔からの距離が遠い場合は比較的良い相関を持つことが分かった。また、今回の現場計測では、発破孔から 60m 程度以遠でデータのバラツキが小さくなった。
- 4) 上述 3) の結果を踏まえて、遠点における振動加速度予測式および振動速度予測式を求めた。両予測式に大きな差異は見られないため後者の予測式を示すと、

$$PPV = 6.102 \times 10^6 \times \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-4.095}$$

である。ここに、 PPV ；最大振動速度 (mm/s)、 W ；装薬量 (kg)、 R ；発破孔からの距離 (m) である。この式を適用することにより、任意の地点で許容される最大振動速度を満足する装薬量の規定が可能となる。

謝辞 本研究を遂行には石灰石鉱業協会研究奨励金より援助を頂いたことを付記し、感謝の意を表する。また、現場の提供とともに種々のご援助を頂いた F 鉱山の関係各位にお礼を申し上げます。

References

- 1) Matsui, K. et al.: Journal of Limestone, **330** (2004), 57-61.
- 2) Dowding, C.H.: Blast Vibration Monitoring and Control, NJ07632, (1985).
- 3) Shiraishi, N. et al.: Proc. MMJ Annual Meeting (2004), Vol. I, pp. 15-16.
- 4) Shimada, H. et al.: Shigen-to-Shozai (Journal of MMJ), **108** (1992), 402-406
- 5) Brent, G.F. and G.E. Smith: Fragblast5 (1996), 103-112.
- 6) Japan Explosive Society: Handbook of Blast Engineering (2001).
- 7) Japan Tunnelling Association: Report of Blast Vibration and Noise (1977).
- 8) Mogi G.: Science and Technology of Energetic Materials, **65** (2) (2004) 48-53.
- 9) Persson P.A. et al.: Rock Blasting and Explosives Engineering (1994).
- 10) Yamamoto M. et al.: Science and Technology of Energetic Materials, **59** (5) (2004), 221-230.