報告

Technical Report

ベンチダウンに対応した発破振動低減への取り組み*

成澤 健二郎¹ 梶谷 啓介²

The Progressive Action for Mitigating the Blast Vibration Suited to Condition of Slicing the Deposit Down at Shuhou Mine to the Local Residents

by Kenjiro NARISAWA^{a*} and Keisuke KAJITANI^a

a. Shuhou Mining Co., Ltd (* Corresponding author: E-mail knarisawa@shuhou-mining.com)

As slicing the deposit down, the problems of blast vibration to the local residents have grown in most surface mining. Previous and general actions for vibration control can be used on a limited scale, and have adverse effect on the mining productivity.

For one of efficient solutions, we have developed the new ANFO based on continuously measurement data and computed form of blast vibration in populated areas, and that has the potential advantages of mitigating vibration and keeping productivity. The inner rim presplit blast of the mining area is another solution for the first time in limestone mines and quarries of this country. Those solutions provided 22% mitigated blast vibration results and can help stability and productivity of the mining.

KEY WORDS: Shuhou Mine, Limestone, Blast Vibration, ANFO, Presplit

1. はじめに

鉱山を操業する上で、ベンチダウンに伴う周辺民家における発破による地盤振動の増大は、避けて通れない問題である。そのため、小孔径化や低ベンチ化、デッキチャージの利用により、1unit当りの装薬量を少なくする、また雷管による起爆秒時差の調整等により振動抑制に取り組むことが一般的である。

秋芳鉱山では、従来より民家までの距離に応じて1unit当りの装薬量の規制を行い振動抑制に努めてきたが、最近のベンチダウンの進行に伴い、小孔径及びデッキチャージ発破の比率が増大し、一発破当りの起砕量の減少、装薬作業の負担増等により採掘効率の低下を来した。

今回これらを解消するため、振動対策用ANFOの開発並びに人工弱面による発破による地盤振動の低減を試み、一定の成果が得られたため報告する。

2. 背景

秋芳鉱山は開鉱以来40年が経過した。現在まで延べ2億4千万t以上の石灰石を採掘し、その間採掘区域も、第一鉱画、第二鉱画と移ってきた。現在は第三鉱画の開発を開始しており、2008年より出鉱開始予定である。

現在採掘中の第二鉱画は、採掘レベルが220mまで低下しており、民家までの最短距離は約400mまで接近、発破振動対策

が必要なレベルに達している。第一鉱画採掘中から、地元の協力を得て周辺民家近傍の定点に振動レベル計を設置し、発破による地盤振動の測定を継続実施しているが、ここ数年でその値も大きくなり自主規制値である振動レベル55dB前後を推移するようになっている。周辺民家の方々と定期的に会合を行い、発破振動のデータを公表するなど、頻繁に意見交換を行っている。

Fig. 1およびTable 1に現在採掘中の切羽図と発破振動データ例を示す。切羽内には東西方向に大きな断層が存在し、この断層面を境にして発破による地盤振動は大きく異なる。発破によって励起された波動が断層面を通過する区域では、この波動が断層面により減衰され発破による地盤振動は小さくなる。一方断層面を通過しない区域は発破による地盤振動が大きくなる。断層面を通過しない区域を発破振動警戒区域と定め、常に発破振動に対して注意を払っている。現在、周辺民家近傍2点にて、発破による地盤振動(dB)、低周波振動(dB)を毎日測定し、そのデータをフィー

Fig.1 Plan view of the Shuhou open pit mining area.

* 2006年9月19日受付 11月13日受理 平成18年5月30日 第65回石灰石鉱業大会において一部発表

1. 秋芳鉱業(株) アンホ製造所火薬生産課 課長

2. 秋芳鉱業(株) 生産部採鉱課

【著者連絡先】FAX: 0837-65-2763

E-mail: knarisawa@shuhou-mining.com

キーワード: 秋芳鉱山, 石灰石, 発破振動, ANFO, 人工弱面

Table 1 Typical blast vibration data measured in populated area.

月/日	時間	天候	順	A点		B点		ベンチ	場所	発破方向	点火方向	発破内容										備考
				振動 (dB)	低周波距離 (m)	振動 (dB)	低周波距離 (m)					雷管数	薬量 (kg)	合計 1unit	原単位 (g/t)	穿孔機	コナク 種類	火薬 LH	振動 平成	デッキ		
1/11	15:10	晴れ	1	37.5	100.1	620	—	83.7	1,230	250	410.440	S	0-30	0-317.5	—	XL	0.17	H			修正 小割	
			2	53.4	103.3	730	32.8	92.0	1,370	220	256.287	SE	E⇒W	16-0	2240-0	140	108.8	SP-2	25	H		
			3	47.7	97.3	500	28.3	90.3	1,120	265	265	S	W⇒E	6-0	283-0	24	92.1	HCR-2	17	L		○
1/12	15:10	晴れ	1	53.1	98.5	550	36.9	97.3	1,170	265	442	W	N⇒S	0-38	0-1052.5	—	—	HCR-1	0	H		修正
			2	46.6	95.1	730	32.9	88.1	1,380	220	285.286	SW	—	16-0	2240-0	140	108.8	SP-2	25	H		
1/13	12:05	曇り雨	1	48.0	101.9	860	32.2	100.0	1,500	220	72.104	E	N⇒S	20-0	2661.5-0	133	109.3	SP-1	17	H		PSB
			2	45.5	94.2	920	32.4	87.4	1,580	235	72	E	—	0-(15)	195	13	—	XL	0	H		

Table 2 Specifications for the new developed and conventional ANFO.

	比重	爆速
通常品	0.75	約 3,000m/s
振動対策用	0.65～0.66	約 2,500m/s

ドバックすることにより場所毎の発破規格を決めている。

3. 振動対策用 ANFO の開発

3・1 振動対策用 ANFO の製造

秋芳鉱山では 2001 年 7 月より鉱山での ANFO 製造を開始し、現在までに累計約 5,000t 製造している。2002 年より発破振動対策用 ANFO の製造の検討に入り、2003 年から製造を開始した。振動対策用は、低比重・低爆速とし、1unit 当りの装薬量の減少及び爆速低下による振動低減を目的としている。その新規開発は、材料の選定から実際の製造、消費に至るまで試行錯誤の連続であり困難を極めたが、ANFO を自社製造・消費できる強みを生かすことができた。製造する ANFO の爆速は JIS で定義されている 2,500 m/s 以上が必須条件 (2006 年 2 月に改正され、現在は参考値 1,500m/s) である。発破振動低減のために、その爆速の下限値を狙った振動対策用 ANFO は、製造技術の難しさとともに発破起砕効果の悪化が懸念された。そこで、製造の当日あるいは翌日に現場で消費し、発破状況を確認、各種データをもとに発破担当者と緊密な情報交換を行い、直ちにフィードバックすることを繰り返し行なった。結果、約半年後、ついに振動低減と起砕効果がバランスした製品を完成させることができた。これは、まさに自社で開発、製造した ANFO を自社で消費でき、自社の現場に適した製品を造ることができるという当社ならではの利点を最大限に生かすことにより実現できたものである。Table 2 に通常品と振動対策用 ANFO の比重、爆速を示す。

3・2 振動対策用 ANFO の使用及び効果

Fig. 2 は 通常品 ANFO と振動対策用 ANFO を使用した発破について、発破場所から民家近傍の測定点までの距離 (m) と振動レベル (dB) の関係を表したものである。データは双方の ANFO とも 1unit 当りの薬量が同量であり、また岩盤の状況等の他要因をできるだけ避けるために、発破振動警戒区域内で挟雑岩を含まない場所で、かつ同一ベンチレベルのものを使用した。

Fig.2 に示すとおり、データに多少のバラツキはあるものの振動レベルは、振動対策用の ANFO の方が通常品に比べ低い値を示していることが分かる。このことは、同一装薬量であることから、火薬の種類の違い、即ち爆速が減少したことによる効果と思われる。一方、比重の違いによる効果については、同じ装薬量とした場合に比重の違いから、通常品の方が振動対策用より約 1 割装薬量が増すため、結果は明らかである。

Fig.2 Mitigation results of blast vibration for using the new developed ANFO.

振動対策用 ANFO がどの程度効果があるかを明らかにするため、2003 年度 1 年間の発破振動データをもとに発破振動の関係式を用いて数値解析を試みた。

発破振動を表す数値として、一般には変位速度 V (cm/s, kine) が用いられる。変位速度 V と 1unit 当りの装薬量 W (kg)、爆源からの距離 D (m) との間には一般に、 $V = K \times W^m \times D^n$ の関係があるとされている¹⁾。K は発破条件や岩盤特性によって変化する係数である。火薬メーカーから提案されている m, n の値は各社異なるが、 $m = 0.5 \sim 1.0$, $n = -1.5 \sim -2.0$ の値とされている。まず、この式をもとにして通常品 ANFO のデータから最小二乗法を用い発破振動の関係式を算出した。データはできるだけ岩盤状況等の要因に左右されないよう、発破振動警戒区域で挟雑岩を含まない場所のものを使用し、またベンチレベルも同一とした。振動レベル VL から変位速度 V への変換は、変位速度と振動レベルの関係式 $VL = 20\log V + 91$ を用いた¹⁾。

計算結果から通常品 ANFO の発破振動の関係式は、

$$V = 915 \times W^{0.426} \times D^{-1.96} \dots\dots\dots (1)$$

が得られた。火薬メーカー各社が提唱している関係式と比べると、1unit 当りの装薬量の乗数が若干低く、当鉱山では変位速度の値は装薬量よりも距離による影響が大きいと言える。

振動対策用 ANFO を使用した場合は、発破による地盤振動が減少するため (1) の関係式の K 値 (915) が減少することとなる。そこで、同時期、同場所での振動対策用 ANFO を使用した発破振動データを用い、(1) 式から K 値を求めた (Fig. 3)。その結果の関係式は、

$$V = 855 \times W^{0.426} \times D^{-1.96} \dots\dots\dots (2)$$

となり、K 値は 915 から 855 へ減少した。つまり、変位速度の値が約 7% 減少したこととなる。これは、1unit 当りの装薬量が同量である場合の減少を表す。

一方、比重の違いによる効果を加えて考えると、通常品 ANFO

Fig.3 Local site blast vibration factor "K" for using the new developed ANFO.

Table 3 Test presplit blast design in the open pit for mitigating blast vibration.

施工面積	243 m ² (13.5m × 18m)
孔数	10 孔
孔間隔	1.5m
孔径	95mm
せん孔角度	90°
装薬量	15kg/孔 (振動対策用 ANFO)

と振動対策用 ANFO が同一の装薬長での比較をすればよい。同一装薬長の場合、通常品が振動対策用の約 1.1 倍を要するため、通常品の変位速度の値は (1) 式から

$$V = 915 \times (1.1 \times W)^{0.426} \times D^{-1.96} \dots \dots \dots (3)$$

と表せる。これを (2) 式と比較すると、 $855 \times W^{0.426} / 915 \times (1.1 \times W)^{0.426}$ より、約 10% の振動低減効果があることとなる。

前述した断層面を通過しない発破振動警戒区域では、この振動対策用 ANFO を使用することとし、現在では、ANFO 全使用量の 30% ~ 40% を占めている。

4. 人工弱面による発破振動低減

現在採掘している第二鉱面切羽内には、東西方向に一本の大きな断層が走っている。この断層面を境にして、周辺民家へ与える発破による地盤振動の大きさは極端に異なることが分かっている。これは、断層面が発破によって励起された波動を減衰させ、地盤振動を確実に減少させる効果があることの証であり、言い換えれば、岩盤中に人工的に弱面を設けることにより、発破による地盤振動を大幅に減少させることができると言える。

実際、発破振動低減のため、人工弱面を作り発破振動低減を実現している例がある²⁾。当鉱山でも人工弱面を施工することにより、発破による地盤振動を低減させることができると考えた。

4・1 切羽内試験

まず、試験的に切羽内に人工弱面を施工し、施工前後にて発破による地盤振動がどの程度減少するかを確認した。人工弱面は PSB 発破と同様の方法で施工した。場所については旧採掘箇所の第一鉱面を利用した。Table 3 に施工規格、Fig. 4 に施工場所の位置を示す。測定した振動データは人工弱面の効果の及ぶ範囲内のものを使用し、また断層による影響のない範囲のものとした (Fig.4 斜線部)。

(1) 試験結果検証

試験により得られた振動データを、発破振動の関係式 $V = K \times W^m \times D^n$ を用い、最小二乗法により計算した。その結果、人

Fig.4 Plan view of test presplit blast.

Fig.5 Local site blast vibration factor "K" of test presplit blast.

工弱面施工前は、 $m = 0.914$ 、 $n = -1.88$ 、 $K = 43.5$ となり、 $V = 43.5 \times W^{0.914} \times D^{-1.88}$ の関係式を得た。先に計算した関係式とは異なる式となったが、これは、今回の測定場所と発破場所との間には粘板岩層が存在し、発破によって励起された波動が伝播する岩盤状況が異なること、また測定点の岩盤状況の違いによることが原因と考えられる。

人工弱面施工後は、人工弱面によりこの波動が減衰し K 値 (43.5) が減少すると予想される。施工後、上記の関係式を用い、振動データから K 値を算出すると K 値は 21.2 まで減少し、人工弱面により確かに発破による地盤振動が減少することが分かった (Fig. 5)。その減少幅は 50% 以上に及び、非常に大きな効果があることが分かった。

(2) 人工弱面施工

試験結果を受け、人工弱面により発破による地盤振動が確実に減少することが確かめられたため、実際に人工弱面を施工することとした。施工場所の選定として、人工弱面により発破によって励起された波動が減衰するのに最も効果があるのは、発破場所と近隣民家間で近隣民家等の近傍か、あるいは発破場所の近傍へ施工するかのどちらかが確実な方法と考えられる。しかしながら、近隣民家の近傍の施工は困難であり、一方、発破場所の近傍では、発破場所が日々変化するため多大な施工距離が必要となる。これらを考慮して、近隣民家からある程度離れた範囲でかつ、発破によって励起された波動が伝播する場所を選定、鉱山内の落石防止のために設置したトレンチ内に施工することを決めた。施工長さは、Fig. 6 に示すとおり発破振動の影響の大きい範囲をカバーできるように設定し、深さは試験時と同様、確実に施工するため、当社所有穿孔機で安定した穿孔長が得られる 18m とした。Table 4 に施工規格、Fig.6、Fig. 7 に施工場所を示す。

(3) 結果検証

2005 年 2 月に人工弱面の施工を実施し、その後約 1 年間の発

Fig.6 Plan view of the inner rim presplit blast.

Table 4 The inner rim presplit blast design for mitigating blast vibration.

施工面積	1,890 m ² (105m × 18m)
孔数	59 孔
孔間隔	1.5m
孔径	95mm
せん孔角度	80°
装薬量	4kg/孔 (含水爆薬)

Fig.7 Section view of the inner rim presplit blast.

破振動データを用い、施工前のデータと比較した。発破振動の関係式は前述の(2)の式を用い、施工後の発破振動データは施工前と条件が同等のものとした。計算結果を Fig. 8 に示す。

結果、K 値は 855 から 712 へ減少し、約 17% の振動低減効果が得られた。先に実施した試験では約 50% の低減効果があったが、それに比べると効果は少ない。これは、今回施工した人工弱面の位置が測定点、発破場所から離れているため、発破によって励起された波動の全てが人工弱面を通過していない、回折波・反射波の影響を受けている、人工弱面の深さが不十分であること等が考えられる。今後も発破振動データから、更に有効な施工方法を検討していく予定である。

5. 操業への効果

振動対策用 ANFO の活用と人工弱面の施工により発破振動低減効果が得られたことにより操業へのメリットも大きなものとなった。

例えば、対策前に大孔径 (孔径 131mm) の穿孔機で穿孔可能である範囲は、Fig. 9 に示すとおり測定点から約 640 m の距離以上の区域であった。この距離以内では小孔径 (105mm, 95mm) の穿孔機にて穿孔しなくてはならなかった。対策後この距離は 80m 減少し、約 560m の範囲まで狭めることができた。1 ベンチ当たりの採掘量に換算すると約 800 千 t 分となる。穿孔能力は大孔径 (2,000t/h) に対し小孔径 (500t/h) では 1/4 にもなる。つまり、小孔

Fig.8 Local site blast vibration factor "K" after the inner rim presplit blast.

Fig.9 Plan view of expanded area using 131mm diameter blast holes after the inner rim presplit blast.

径の穿孔機にて、この約 800 千 t 分の採掘を行なうには、1600 時間 (約 1 年) を要するが、大孔径では 400 時間で済む。単純計算で 0.75 人工/年の削減効果がある。

また、小孔径の穿孔機では 5 千 ~ 10 千 t 規模の発破となるが、大孔径では 15 千 t 以上の発破が可能であり、大型積込機の切羽移動時間の短縮や、装薬手間の軽減の効果があり、採掘効率の向上につながっている。

6. ま と め

発破振動データから当鉱山の発破振動関係式を求め、振動対策用 ANFO の活用と人工弱面の施工により周辺民家への発破振動低減策を試みた。

その結果を以下にまとめる。

- ① 当鉱山では、最小二乗法により求めた発破振動の関係式は、装薬量の乗数が若干低く、距離による影響の方がより大きい。
- ② 振動対策用 ANFO の使用による爆速低下効果により約 7% の振動低減効果があり、比重の効果も含めると約 10% の低減効果が確認できた。
- ③ 人工弱面の施工による発破によって励起された波動の減衰により、約 17% の振動低減効果を得た。
- ④ 人工弱面は、現場試験時に比べ実際の施工時の効果が少なかった。人工弱面の効果を最大限発揮させるには、測定点 (近隣民家) または発破場所の近傍に施工することが望ましいと思われる。
- ⑤ 人工弱面の深さは、回折波・反射波を考慮してより深い方が確実な効果が得られると思われる。
- ⑥ 振動低減効果により、操業上、穿孔機的能力減を抑えることができ、大型積込機の切羽間移動時間や装薬時間等の短

縮につながった。

今後も採掘によりベンチレベルは更に低下する。それに伴い、発破による地盤振動は増大し、更なる対策が必要となってくる。今回、振動対策用 ANFO 及び人工弱面施工により振動低減を実現できたが、更なる効果を発揮させるため、もう一步踏み込んだ ANFO の開発検討並びに人工弱面の施工方法を再度検討する予定である。更に、低周波振動の対策にも取り組み、今後も鉱山周辺

の方々より協調した鉱山操業を実施していきたい。

References

- 1) Japan explosives industry association : Annahappa konnahappa happajireisyuu, (2002), pp1-3.
- 2) Takeshi Sakamoto : EXPLOSION, **14**(2004), 2-8