

飛石の予測

(不可解な現象から科学へ)^{※)}著者：Mr. John Butchart氏^{※※)}鷲見明彦^{※※※)}(翻訳)

発破を計画する時、飛石が発破行程の中で最も予測しにくい現象です。ジョン・バッチャート氏 (Mr. John Butchart) はここで、飛石の飛ぶ方向と推奨する退避ゾーンについての予測モデルについて説明します。



写真1 フリントストーン・マイニング・サービス社は都会での発破や繊細な地域での発破のために、発破マットを輸入しました。

飛石は常に予測しづらいものです。ある日は通常の飛石であっても、次の日はシャワーのように飛び散ることがあります。飛石と退避ゾーンの予測は昔から暗闇での芸術と称され、水晶玉を覗き込みながら不可思議な方法で、おそらくこうなるのであろうと予測していました。

過去20年の間に、飛石予想と退避ゾーンは非科学的な予測から、科学的な予測モデルに変化してきました。この科学的なアプローチは、2006年⁽¹⁾のクアリー誌11月号で議論されましたが、今回最新の傾向を再度科学的に掘り下げる時期に来ています。

今日では、さまざまな予測モデルが提案されています。ほとんどのモデルが、飛石の弾道理論に基づいています。

飛石の弾道モデル

1994年⁽²⁾にワークマン氏とカルダー氏によって提唱された弾道モデルは、以下の通りです。

$$L = V_0^2 \times \sin 2\theta / g \quad \dots (1)$$

ここで；

L = 飛石の水平方向の飛ぶ距離 単位はm

V₀ = 発射速度 単位はm/s

θ = 水平に対する発射角度 単位は° (度)

g = 重力加速度 (一定) 単位はm.s⁻²

この公式では、引張り力 (ドラッグ) は無視していません。このドラッグは、通常発破時、一般的に発射速度の予測範囲に含まれているからです。このドラッグは速度が超音速に達すると大きな要素になりますが、これをモデル化することは、発破後の原石の不均一なサイズのため、定数化する事は難しい事です。

※) Quarry. 2012. 2月号. p.p.14 ~ p.p.18

※※) ジョン・バッチャート氏 (Mr. John Butchart) フリントストーン・マイニングサービス社のテクニカルディレクター

※※※) 特別正会員 宇部興産機械(株)大宮サービスセンター 編集委員

正弦関数が最も大きいのは、角度が 90° ($\sin 2\theta = 1.0$) ですので、飛石が最も飛ぶ角度は、角度 θ が 45° の発射角度の時です。

$$L_{\text{Max}} = V_0^2/g \quad \dots\dots (2)$$

ここで；

L_{Max} = 飛石の水平方向の飛ぶ最長距離 単位はm

この式は、飛石の発射位置と到達位置の標高差は無視されています。したがって、標高差がある場合はその標高差を $+/-H$ (標高差) する必要があります。

つまり；

$$L_{\text{Max}} = V_0^2/g +/-H \quad \dots\dots (3)$$

ここで；

H = 飛石の発射位置と到達位置の標高差 単位はm

この式は、直線方向の 45° 角度の弾道であると仮定していますので、計算精度には問題がありますが、大きなエラーになるような物ではなく近似値として単純式であり、且つ有効です。

ワークマン氏とカルダー氏 (1994年)⁽²⁾ は、発射速度の計算法についても以下を推奨しています。このモデルは、層厚の縮尺比 (スケールドバーデン) の方法を使っています；

$$V_0 = K \times (m^{0.5}/B)^{1.3} \quad \dots\dots (4)$$

ここで；

K は、現場 (岩質) によって決まる定数 (経験値)

m = 発破穿孔穴の1メートル当りの火薬の充填量単位はkg

B = 層厚もしくは、穿孔深さ単位はm

$M^{0.5}/B$ = は層厚の縮尺比 (スケールドバーデン) と呼ばれる指数です。

テルロックの飛石モデル

ビクトリア州エルサムにあるテルロックエンジニアリング社のリチャード氏とムーア氏 (1994年)⁽³⁾ は、上述の公式 (2) と (4) を合体したテルロックの飛石モデル作りしました；

$$L_{\text{Max}} = (K^2/g) \times (m^{0.5}/B)^{2.6} \quad \dots\dots (5)$$

この式は、標高差を無視していますので、以下のように修正できます；

$$L_{\text{Max}} = (K^2/g) \times (m^{0.5}/B)^{2.6} +/-H \quad \dots\dots (6)$$

リチャード氏とムーア氏は、指数 K は発破ごとに変わるが、通常の岩石であれば、一般的に27mを超える事はありません。したがって、この27mを数値として使用すれば、上述の (K^2/g) は、定数74.39となり、上述 (6) 式は；

$$L_{\text{Max}} = 74.39 \times (m^{0.5}/B)^{2.6} +/-H \quad \dots\dots (7)$$

この式は、あくまで定数 K を27と仮定したものです。これはあくまで推定の為の出発点で、この定数は現場定数である事を忘れてはならず、各現場において個別の測定経験を積重ね決めなければいけません。テルロックの飛石モデルの後半部分は退避ゾーンについての説明になります。テルロックは、機器の安全ゾーンは、上述 L_{Max} の2倍の半径の外。人間の安全ゾーンは L_{Max} の4倍の半径の外としています。基本的に機器の安全ゾーンより人間の安全ゾーンの方がより重要であるので、ここでは人間の安全ゾーンについてに集中します。テルロックの飛石モデルは、2006年にこのQUARRY誌で紹介されています。

パソコンのスプレッドシートを利用し、式 (7) のデータを89mmの穿孔穴で火薬の充填量を $1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の条件で表やグラフに変換する事は簡単に行えます。

上述の表1をグラフ変換したものは、図3のグラフとなります。

穿孔穴と負荷の関係

表1から伺えるように、穿孔穴の深さに対する穿孔穴の径の比が40以下になると、飛石の飛行距離は急激に早くなります。この数字の掌握は、都会や近郊での発破が必要な場合目安として役に立つ数字です。この発破径比40の場合、表1より平坦の場所で150mの退避距離が必要となります。

オーストラリア規格AS2187.2の“火薬の保存と使用”では、火薬の使用について、穿孔穴の深さは、少なくとも穿孔穴径の25倍を推奨していますが、これは表1から、半径500mの退避距離が必要と言うこととなります。AS2187.2の規格はあくまでも目安で最小の数字とし、実際は現場の状況に合わせて判断されなければなりません。上述の発破径比40のルールは、表2の通り、発破穴の径の大きさに関わらず150mの退避半径のルールが適応されます。

表1 飛石表-89mmの穿孔穴で1m当り7.5kgのチャージでの退避半径。高低差は無い物としています。

Burden thickness / stemming depth	Ratio of blasthole diameters	Maximum likely flyrock travel	Recommended clearance radius
1.8	20.2	221.5	886
2.0	22.5	168.4	674
2.2	24.7	131.5	526
2.4	27.0	104.8	419
2.6	29.2	85.1	341
2.8	31.5	70.2	281
3.0	33.7	58.7	235
3.2	36.0	49.6	199
3.4	38.2	42.4	170
3.6	40.4	36.5	146
3.8	42.7	31.7	127
4.0	44.9	27.8	111
4.2	47.2	24.5	98
4.4	49.4	21.7	87
4.6	51.7	19.3	77
4.8	53.9	17.3	69

表2をグラフ化したものが、図1になります。

いくつかの参考文献によると、穿孔深さは穿孔径の最低でも20倍必要であると記されています。これは、穿孔穴の深さに対し穿孔穴がガスで十分満たされ、効果的は発破が行われるのに最低の必要量として表されていました。つまり、飛石についての推奨退避についての考慮は、なされていませんでした。表2に示されている通り、この発破径比20では、半径900mの退避半径が必要になり、鉱山ではしばしば行われていますが、碎石ではめったに行われない非現実的な退避半径です。

発破マットによる追加対策

穿孔穴の発破径比40ルールを厳格に適用しようとする

表2 退避半径における穿孔径と深さ比の関係。発破穴へのチャージは1cm³当り1.2gとしています。高低差は無い物としています。

Burden thickness or stemming depth (metres)	76mm blastholes		89mm blastholes		102mm blastholes	
	Hole ratio	Clearance radius	Hole ratio	Clearance radius	Hole ratio	Clearance radius
1.5	19.7	928.6	16.9	1423.4	14.7	2015.3
2.0	26.3	439.6	22.5	673.7	19.6	953.9
2.5	32.9	246.1	28.1	377.1	24.5	534.0
3.0	39.5	153.2	33.7	234.8	29.4	332.4
3.5	46.1	102.6	39.3	157.2	34.3	222.6
4.0	52.6	72.5	44.9	111.1	39.2	157.3
4.5	59.2	53.4	50.6	81.8	44.1	115.8
5.0	65.8	40.6	56.2	62.2	49.0	88.1

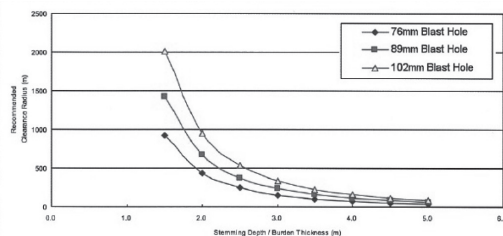


図1 グラフは、穿孔孔径ごとの、発破穴の深さと推奨退避半径の関係を示しています。

と、穴系に対しかなりの深い穴を掘る必要が生じ、二次的に穿孔コストが肥大化します。この事を防ぐ為、時として発破マットを2次保護材として使用することがあります。発破マットには、ロープの編み形・スチールワイヤーの編み形・ラバーコンベヤベルト・鉄板・編みみタイヤなど様々な種類があります。

オーストラリアのフロントストーングループ社が供給している発破マットは、使用済みダンプを押し伸ばした鋼線入りのゴムマットタイプです。この鋼線入りゴムマットタイプはおおよそ60kg/m²で、サイズは6m×3mまでとなっています。代表的なマットの重量は、400kg～

表3 退避距離における発破マットの効果。

Burden thickness or stemming depth (metres)	89mm holes with emulsion @ 7.5 kg/m charge			Equiv- alent stemming	Re-vised Clearance
	Hole ratio	Clearance radius	Layers of blast mats		
2.0	22.5	673.7	1	2.75	294.4
2.5	28.1	377.1	1	3.25	190.7
3.0	33.7	234.8	1	3.75	131.4
3.5	39.3	157.2	1	4.25	94.9
4.0	44.9	111.1	1	4.75	71.1
2.0	22.5	673.7	2	3.50	157.2
2.5	28.1	377.1	2	4.00	111.1
3.0	33.7	234.8	2	4.50	81.8
3.5	39.3	157.2	2	5.00	62.2
4.0	44.9	111.1	2	5.50	48.6

1.200kgです。

発破マットの効果を計る為、穿孔穴の深さの対比で考え、1層の発破マットでどの位穿孔穴を浅く出来るかを見て行けば便利です。

フリントストーングループ社はこの効果予測は、保守的にやるべきである事を推奨しています。つまり、平米あたりのマットの単位重量を80で割ってそれを穿孔穴の深さの相当にする事を推奨しています。例えば、マットの単位重量が60kg/m²の場合、穿孔穴の相当深さは60/80 = 0.75m (750mm) となります。この穿孔穴の深



写真2 プラストマットは、スチール入り使用済みタイヤなどから出来ています。

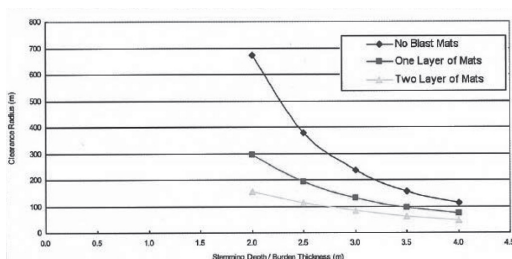
写真3 一般的な発破マットの重量は、1m²当たり60kgです。

図2 グラフは発破マットを使用した場合の退避距離の減少の傾向。

さによって、推奨される退避距離が分かります。

表3の数値をグラフ化したものが、図2に示されています。

同じような表が、異なる穿孔孔径でも作ることが出来ます。発破マットは、オーストラリア規格で推奨退避距離を減らす事を認めていますし、悲劇的で好ましくない事故を減らせる可能性があります。

最後の注意事項として、これらの計算式は飛石の最悪のケースで算出したものです。飛石は非常に不確実なも

ので、200mの飛石予測で、発破ごとに常に200m飛石するという事ではありません。

最悪のケースは、岩石の欠陥部分や前回の発破の影響で出来る接管部と穿孔穴が交差した部分が出来たときなどに起こります。

観察をしながら、徐々に穿孔穴深さを少なくして行く事が簡単な方法です。

この事は、かなりの発破経験から成り立つ方法で、酷い発破結果がでた時、この計算が正しいと分かる筈です。たった1つの穿孔穴に問題があり、最悪の飛石が発生し、悲劇的な事故が起る可能性があるだけでなく、碎石の認可が取り消されたり、発破のライセンスが失効したり、会社の保険証券が失われる可能性があります。

飛石の予測技術は存在しており、我々は皆それを使うべきです。

科学的な事に頼らず、感覚的な判断にならない様に得られる知識を活用しましょう。

参考文献：

1. Richards AB, Moore AJ. Effective strategies for controlling flyrock. In Quarry 14 (11) , November 2006:26-27.
2. Workman JL, Calder PN. Flyrock prediction and control in surface mine blasting. In:Proc.20th ISEE Conf. on Explosive and Blasting Technique, Austin Texas USA, 1994.
3. Richards AB, Moore AJ. Flyrock control - By chance or design. In: Proc.30th ISEE Conf. on explosives and Blasting Technique, New Orleans Louisiana USA, 2004.