



ベンチ発破における飛石の飛翔性に関する実験的研究

緒方雄二*, 和田有司*, 勝山邦久*, 三宅淳巳**

小川輝繁**, 西田 佑***

発破で発生する災害の7割が飛石に起因することから、発破災害を防止するには、飛石の発生特性および飛翔性を解明することが重要である。本研究では、碎石場のベンチを利用して、最小抵抗線・装薬量・爆薬比等の発破条件を変えた実規模発破実験を実施し、飛石の飛翔性について実験的に検討した。高速度ビデオによる計測結果から発生した飛石は、放物線状に飛翔するが、飛石の飛翔速度および飛翔距離には最小抵抗線の距離が重要な要因になることが明らかになった。また、数値シミュレーション方法として、不連続変形法を適用し、発破による破壊現象を含んで発生する飛石に適用できることを示した。

1. まえがき

爆薬のエネルギーを利用して岩盤および構造物等を破壊する発破作業は、鉱山・土木分野では重要な作業である。また、発破作業はトンネルボーリングマシン等の重機を用いる掘削作業と比較しても、掘削経費の節減・工期の短縮等の利点も多い。最近では、都市部の再開発等で老朽化したビル等の構造物の解体に爆薬を利用する爆破解体が注目されている。しかし、発破に伴って発生する振動・騒音・飛石の問題から都市中心部や近郊での発破作業が制限されているのが現状である。特に、飛石は周辺住民や建物に直接被害を与えるため、所定の距離以上に飛翔する飛石の発生を防止しなければならない。

近年は、含水爆薬や耐静電気雷管等の開発により、より安全な発破作業が可能となり、作業者の保安教育も定期的に実施されているが、発破に起因する災害が

なくなっていないのが現状である。また、火薬類の消費中に発生した事故の7割以上が飛石によることが報告されている¹⁾。しかし、飛石の発生機構および飛翔性等について研究された事例は極めて少ない^{2,3)}。このため、発破災害を防止し安全な発破作業を実施するためには、発破で発生する飛石の飛翔性を解明し、飛石の発生を防止および制御することが重要になる。

本研究では、発破で発生する飛石の飛翔性を解明するために、ベンチ発破で発生する飛石について、装薬量・最小抵抗線・爆薬比等の発破条件を変えた実規模発破実験を実施し、発生する飛石について検討した。発生する飛石の計測は、高速度ビデオを用いて、画像データから飛石の飛翔軌道および飛翔速度等を解析した。また、ベンチ発破で発生する飛石の数値シミュレーション法として、不連続変形法(以下DDAと略記する: Discontinuous Deformation Analysis)を適用し、発破により破壊されて発生する飛石および飛翔性を検討した。さらに、この数値シミュレーション結果と実規模発破実験の計測結果を比較検討したので報告する。

2. 実験方法

2.1 発破条件

実験では、現在稼働中の碎石場のベンチ(高さ5m)を用いて、装薬量・最小抵抗線・爆薬比を換えて7種類の実規模発破実験を実施した。爆薬比は、碎石量(W×D×5m)を装薬量(kg)で割った値である。実験の発破条件をTable 1に示す。実験では1回の発破で4カ所の発破孔(穿孔径φ65mm)に爆薬を装填して、全て6号瞬発電気雷管で同時に起爆した。発破孔は等

1998年6月30日受理

*工業技術院資源環境技術総合研究所
〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8564

FAX 0298-58-8558

E-mail yujioga@nire.go.jp

**横浜国立大学工学部

〒240-0067 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

TEL 045-339-3993

FAX 045-339-4011

*** (株)カコー

〒101-0037 千代田区神田西福田町4-1

メディクスビル

TEL 03-3255-7770

FAX 03-3255-7780

Table 1 Blasting conditions

| Number | Quantity of explosives | The burden | Coefficient of blasting |
|--------|------------------------|------------|-------------------------|
| 1 | 7.60kg | 221 mm | 0.22 |
| 2 | 8.20kg | 206mm | 0.28 |
| 3 | 8.60kg | 184mm | 0.36 |
| 4 | 9.10kg | 199mm | 0.40 |
| 5 | 8.60kg | 451 mm | 0.25 |
| 6 | 8.60kg | 155 mm | 0.29 |
| 7 | 8.60kg | 131 mm | 0.27 |

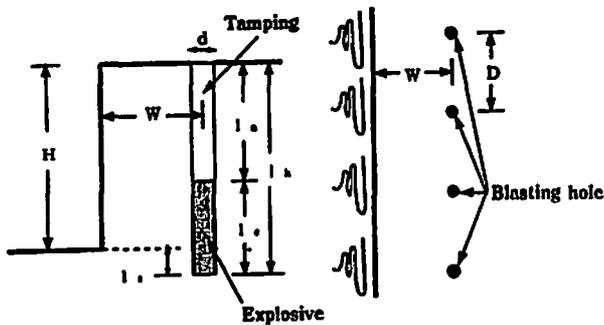


Fig. 1 Blasting pattern

間隔で穿孔し、それぞれの孔の最小抵抗線は同じとする。また、発破で使った爆薬は、親ダイとして含水爆薬(φ30mm, 100g)を用いてANFO爆薬を発破孔にバルクチャージし、込め物をして発破した。実験での装薬および発破の配置概略をFig. 1 (W : 最小抵抗線, D : 孔間隔, l : 穿孔長, l_c : 装薬長)に示す。実験ではNo. 3を基準として、装薬量と最小抵抗線の相違が飛石の飛翔性に及ぼす影響を検討した。なお、実験では飛石の発生を前提としているため、通常の爆薬比と比べると高い値になっている。

2.2 飛石の計測および解析方法

ベンチ前面から放出される飛石の計測には、高速度ビデオおよび通常ビデオを用いて観察した。計測用のビデオは、計測結果から飛石の飛翔状態および飛翔速度を計算するため、飛石が放出される方向に垂直な位置に設置した。計測で使った高速度ビデオは、nac社製のHSV-1000(撮影速度: 500または1,000駒/秒, 撮影時間: 最大14分)を用いて、撮影速度500駒/秒(駒間隔2ms)で計測した。飛石の解析には、高速度ビデオのデータを用いた。高速度ビデオの画像データの処理方法としては、画像データを解析用のコンピューターに取り込みデジタル変換し、時間毎に発生した主な飛石の座標を読みとる。この座標データからベンチ発破で発生した主な飛石の飛翔軌道および飛翔

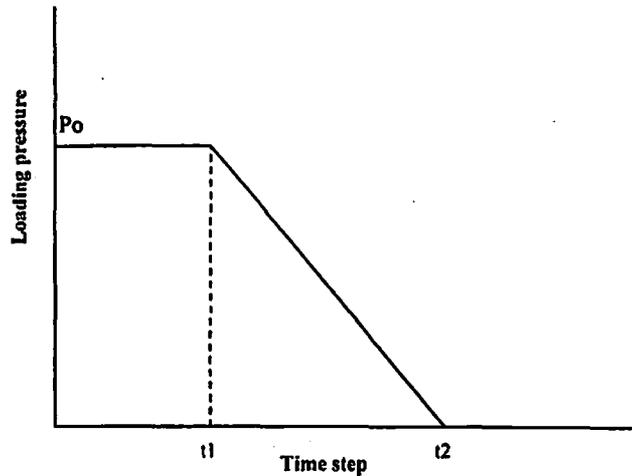


Fig. 2 Function model of pressure loading

速度の計測する。飛翔軌道については、飛石が放物線状に飛翔すると想定して数値データに最小二乗法を適用して計算する。また、飛石の最大到達距離の推定では、最小二乗法で計算した飛翔推定軌道からベンチ底部に到達する時の距離とする。

3. 数値シミュレーション方法

飛石の数値シミュレーションに適用したDDAは、不連続体の解析を目的として、1984年のG. H. ShiとR. E. Goodmanにより提案された解析手法で、トンネル・ダム・斜面等の安定性解析や岩盤空洞の支保設計等に利用されている。この解析手法は、未知数として変位を用い、有限要素法の構造解析と同様に、平衡式を組み立て、連立方程式の係数マトリックスにおいて、剛性・質量・荷重によるサブマトリックスの重ね合わせを行い、得られた変位に関する連立方程式を解き、時間ステップ毎の各要素の変位を求める^{4,5)}。要素ブロック間の接触・分離は、接触面に垂直な法線方向バネと平行なせん断バネが設定されている。この方法は個々のブロックに対して変位・変形・ひずみが計算でき、更にブロック相互の分離・接触・滑りが可能である。また、分離したブロックについては運動方程

式がそのまま適用することができる。さらに、荷重条件および境界条件も任意に設定することができる。このため、発破による破壊現象を含んで、分離して飛翔する飛石の飛翔状態についての数値解析には十分に適用できると思われる。筆者等は、既にこの解析方法を

発破解体時における構造物の倒壊シミュレーション等に適用している^{6~8)}。

今回の数値解析では、ベンチ発破の水平面上を解析モデルとしてDDA解析を適用する。解析モデルは、4カ所の発破点を有する平面モデルとし、要素には重



(1) Before blasting



(2) 100ms after blasting



(3) 200ms after blasting



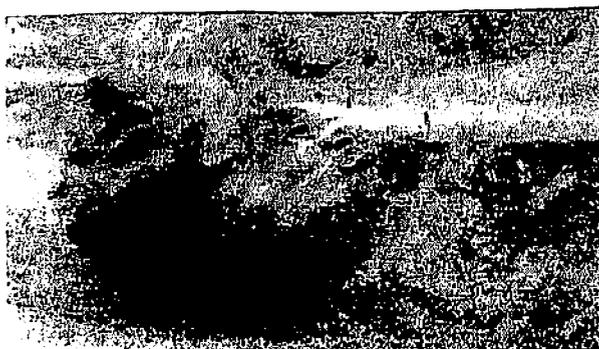
(4) 300ms after blasting



(5) 400ms after blasting



(6) 500ms after blasting



(7) 600ms after blasting



(8) 700ms after blasting

Fig. 3 Photography of high-speed camera in bench blasting

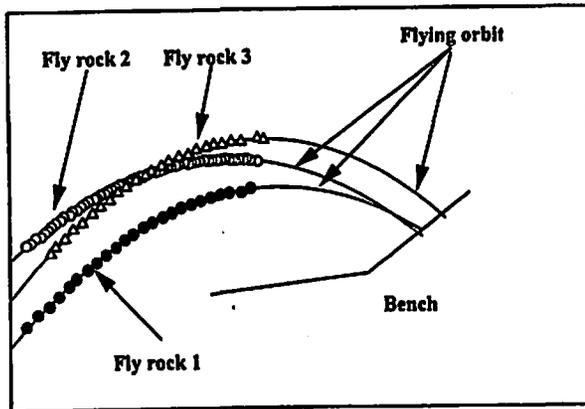


Fig. 4 Analyze results of fly rock in No.2 test blasting

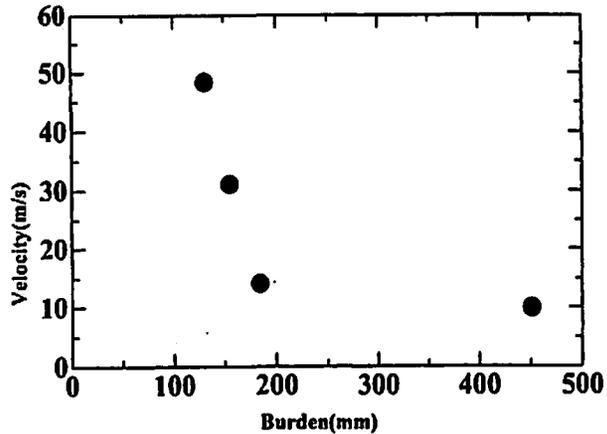


Fig. 5 Relation between velocity and the burden

力加速度が作用しない状態で解析した。また、材料の物性値は、実験現場の砕石場と同じ岩質の砂岩を想定し、ヤング率16GPa、ポアソン比0.16、単位体積重量21.0kN/m³とした。荷重入力は、モデル内の4カ所の発破点で節点を共用する4つの要素内部の放射方向(1カ所で4点の荷重入力)に入力することで発破点とする。解析で入力する荷重は、ガス圧による影響が大きいことを考慮して、 $t=0$ から $t=t_1$ までを一定の最大荷重とし、 $t=t_1$ から減少し $t=t_2$ で0になる入力条件を想定した。今回の解析では、 $t_1=20$ ms、 $t_2=50$ msで入力した。入力荷重の条件をFig. 2に示す。解析モデルは、装薬量が同じ発破実験(No. 3, 5, 6, 7)を対象として、発破孔での入力荷重の条件を同じとすることで、最小抵抗線の異なる4つのモデルを想定して解析した。これにより、最小抵抗線による飛石の飛翔速度の相違について検討した。

4. 実験および解析結果の検討

4.1 高速度ビデオによる解析結果

高速度ビデオによる観察結果の一例をFig. 3に示す。高速度ビデオによる観測結果から爆薬の起爆後にベンチの前方の自由面が盛り上がり、粉塵と同時に飛石を含んだ破砕物が放出されるが、放爆面付近では特

定の飛石は確認できない。この破砕物の大部分は、ベンチ底部に堆積する。この破砕物の中から時間が経過すると特定の飛石が粉塵および破砕物から分離し、飛翔する様子が観測できた。しかし、高速度ビデオによる観測結果からは、飛石がベンチのどの部分から発生したのかは特定できなかった。分離した飛石の位置および時間を高速度ビデオによる画像データから解析した結果の一例をFig. 4に示す。Fig. 4の記号(O, ●, △)は、時間毎の飛石の位置を示す。解析結果から粉塵および破砕物から分離した飛石は、既に膨脹ガスによる加速と空気抵抗による減衰をほとんど受けておらず、水平方向には一定速度で飛翔する。また、垂直方向へは重力加速度の影響を受けて、最小二乗法による解析から放物線状に飛翔することを示した。Fig. 4に示す実線は、最小二乗法による推定飛翔軌道を示す。この推定飛翔軌道から飛石がベンチから発生したことが判る。解析した飛石の水平方向の飛翔速度と飛翔軌道の解析結果から推定される最大飛翔距離をTable 2に示す。最大飛翔距離は、ベンチの底辺の高さに飛石が達した時のベンチからの水平距離を示す。

装薬量が一定の場合の飛石の飛翔速度と最小抵抗線との関係をFig. 5に示す。解析結果から今回の発破条件

Table 2

| Number | Velocity of fly rock | The maximum flying distance | Velocity of fly rock by DDA |
|--------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 9.8m/s | 15.2m | |
| 2 | 10.5m/s | 19.7m | |
| 3 | 14.1m/s | 25.1m | 11.8m/s |
| 4 | 16.8m/s | 23.8m | |
| 5 | 9.9m/s | 8.8m | 10.2m/s |
| 6 | 31.1m/s | 60.9m | 28.4m/s |
| 7 | 48.8m/s | 119.3m | 48.4m/s |

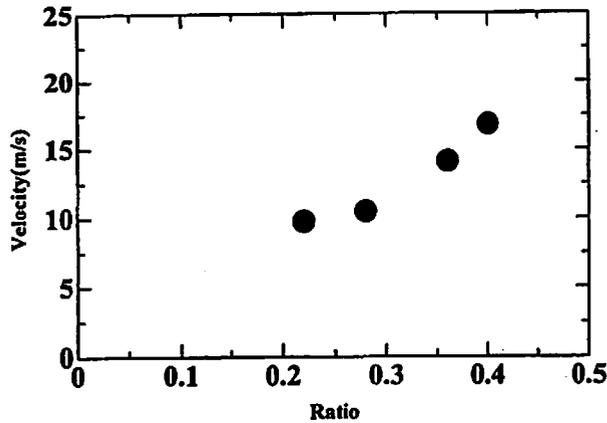


Fig. 6 Relation between velocity and power factor

では、最小抵抗線が2m以下になると飛石の飛翔速度が急激に増加することを示す。また、推定される飛石の飛翔距離も大きくなる。実験結果から最小抵抗線が小さい場合には、飛翔速度が大きく遠方へ飛翔する飛石が発生する可能性が大きくなり、発破災害の要因に

なることが推定できる。さらに、爆薬比と飛石の飛翔速度の関係をFig. 6に示す。爆薬比が増加すると発生する飛石の飛翔速度も増加することを示す。しかし、飛石の飛翔速度は、最小抵抗線の相違と比較して急激に速くならない。飛石の飛翔速度に与える要因としては、最小抵抗線が重要になる。このため、飛石による発破災害を防止するには、発破設計で最小抵抗線の距離を十分に考慮する必要があると思われる。

4.2 DDAによる解析結果

DDAによる数値シミュレーションの結果の一例をFig. 7に示す。また、DDAによる解析結果から放出される要素の最大速度をTable 2に示す。解析結果からまず最初に荷重入力点付近の要素が分離し、装薬線上に分離面が形成される。次に、内部の要素が自由面方向に移動し、自由面の最小抵抗線付近の要素が移動し最初に放出される。最小抵抗線付近の要素は、荷重入力終了後も完全に分離するまで加速する。要素の前方への移動速度は、自由面付近の要素が最大となる。以上の解析結果から、DDAは発破による破壊現象を

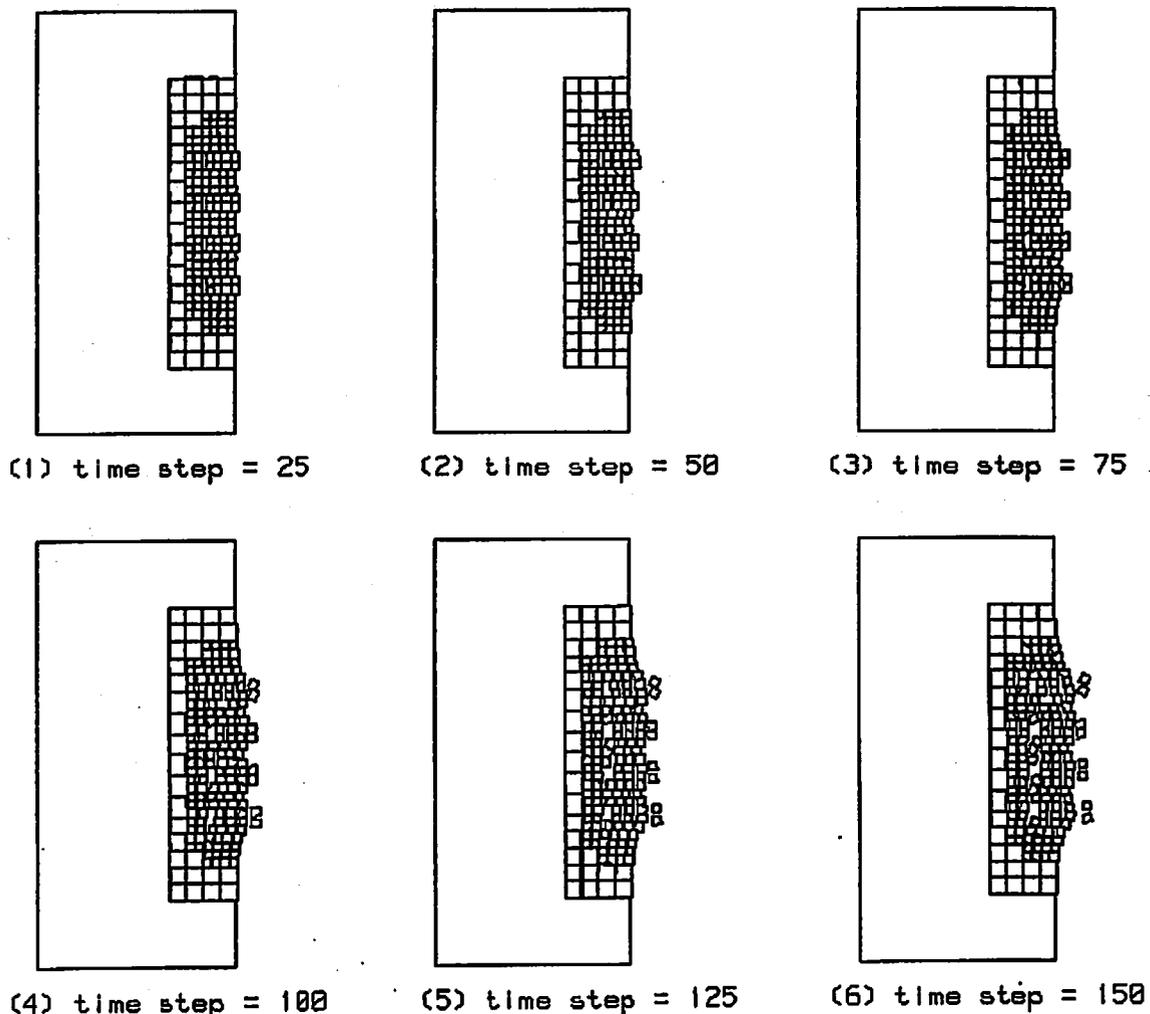


Fig. 7 Results of numerical simulation by DDA method

含んだ飛石の数値シミュレーションに適用できることを示した。

4.3 実験結果とDDAによる解析結果の比較

実規模の発破実験とDDAによる数値解析結果を比較すると、発生する飛石の飛翔速度は同じ程度になる。また、実験結果では、爆薬の爆轟で発生する爆轟生成ガスと破砕物および粉塵の影響によりベンチで発生する飛石を特定することはできなかったが、DDAによる数値シミュレーションでは、自由面付近で発生する飛石が最も高速度で飛翔することを示す。このため、実際の発破でも自由面付近から発生する飛石が最大飛翔速度に達することが予測できる。また、特定の飛石が分離して飛翔するまで、放出される破砕物と爆轟生成ガスにより加速されていると思われる。

5. まとめ

発破で発生する飛石の飛翔性を検討するために、装薬量・最小抵抗線・爆薬比等は発破条件を変えて実規模発破実験とDDAを適用した数値シミュレーションを実施し、以下の知見が得られた。

- (1) 高速度ビデオによる計測結果から粉塵および破砕物から分離した飛石は、既に膨張ガスによる加速と空気抵抗による減衰を受けておらず、水平方向には一定速度で飛翔する。また、飛石の垂直方向へは重力加速度の影響を受けて、放物線状に飛翔することを示した。
- (2) 飛石の飛翔速度は、今回の発破条件では最小抵抗線が2m以下になると飛石の飛翔速度が急激に増加することを示した。また、推定される飛石の飛翔距離も大きくなる。これらの実験結果から最小抵抗線が小さい場合には、飛翔速度が大きくなり、遠方へ飛翔する飛石が発生する可能性が大きくなり、発破災害の要因になることが推定できる。
- (3) DDAによる解析結果から要素の移動速度は、自由

面付近の要素が最大となり、実規模の発破実験で計測された飛石の飛翔速度と同じ程度になる。また、発破による破壊現象を含んだ飛石の数値シミュレーションに適用できることを示した。

- (4) 実験結果とDDAによる解析結果を比較すると、実際の発破でも自由面付近から発生する飛石が最大飛翔速度に達することが予測できる。また、特定の飛石が分離して飛翔するまで、放出される破砕物と爆轟生成ガスにより加速されていると思われる。

謝 辞

今回の現場実験に際して、多大なご協力を頂いた有恒鉱業株式会社および同社金沢鉱業所の関係各位に感謝の意を表します。また、発破実験にご協力頂いた関係者各位に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 保安教本シリーズ23「火薬類による事故の再発防止」, (社)全国火薬類保安協会(1997)
- 2) 山口梅太郎, 工業火薬, Vol. 37, No. 6, (1976)
- 3) 緒方雄二, 山口梅太郎, 勝山邦久, 橋爪清, 佐藤孝幸, 大坪信武, 和田有司, 工業火薬, Vol. 54, No. 6, (1993)
- 4) 大西有三, 佐々木猛, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (1992)
- 5) G. H. Shi and R. E. Goodman, Proc. 25th U. S. Symposium on rock mechanics, (1984)
- 6) 馬貴臣, 三宅淳巳, 小川輝繁, 和田有司, 緒方雄二, 勝山邦久, 火薬学会誌, Vol. 56, No. 1 (1995)
- 7) 緒方雄二, 和田有司, 勝山邦久, 西田佑, 星野雅一, 長野正幸, 火薬学会誌, Vol. 58, No. 3 (1997)
- 8) Y. Ogata, Y. Wada, K. Katsuyama and N. Nishida, 23rd International Conference of explosives and blasting technique (1997)

Experiment study and numerical simulation of fly rock caused in bench blasting

by Yuji OGATA*, Yuji WADA*, Kunihisa KATSUYAMA*
Atsumi MIYAKE**, Terushige OGAWA**
and Tasuku Nishida***

Some test blasting were carried out to study the flying characteristics of rock mass caused in bench blasting. The quantity of explosives was increased from 7.6kg to 9.1 kg and the burden was changed from 131 mm to 451 mm. The effect of condition for the characteristics of fly rock were considered. The fly rocks were observed using the high-speed video to study the flying characteristics of the rock mass caused in the bench blasting. Numerical simulation of fly rock which observed in these test blasting was carried out using DDA method. The results of full scale test blasting to study the flying characteristics of fly rock and numerical simulation using DDA method are briefly summarized as follows;

1. It was clear that fly rock was flying in the constant velocity at the blast direction and trajectory in the area of a few meter away from blast surface.
2. The Minimum burden was one of the most important factor to decide the velocity and distance of fly rock.
3. It is clear that the DDA method can be applied to simulation of fly rock including the break of rock. The Maximum velocity of element block was same to results of test blasting.
4. The fly rock caused near the free face will be shown the Maximum flying velocity compared with the experiment and numerical simulation.

(*Department of Safety Engineering, National Institute for Resources and Environment (NIRE), AIST, MITI, 16-3 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569, Japan

**Department of Safety Engineering, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogay-ku, Yokohoma 240-0067, Japan

***Kacoh Co Ltd, Medix Building, 4-1 Kanda-nishi-fukudacho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0037, Japan)