



定向発破ロックフィルダム設計の弾道理論法に関する研究

馬 貴臣* 錢 瑞五** 霍 永基**

定向発破ロックフィルダム工法の設計計算の一手法である弾道理論法に関して検討し、複数分散連続装薬の場合の岩石の飛翔速度の計算方法を提案した。さらに、この計算方法を過去の施工例に適用して検証を行うとともに、この方法でのエネルギー有効利用率の数値範囲値を明確にした。

1. 緒 言

定向発破ロックフィルダム（以下定向発破ダム）工法は、河川の片側または両側を同時に坑道式発破を行い、破砕した岩石を発破の力で河川の中央まで飛ばし、積み上げるによりダムを建造する工法である。Fig. 1に定向発破ダム設計の断面概念図を示す。

定向発破ダム工法に関する研究は旧ソ連において1950年代初頭から¹⁾、中国では1950年代後半から²⁾行われている。この工法に用いた装薬形式はほとんど集中装薬であった。発破後の岩石の位置の計算方法は体積平衡法と弾道理論法とに大別される。体積平衡法³⁾はクレーター中の岩石を幾つかの固まりに分割して、川の中央に積み上げるようにする計算方法で、その位置は経験をもとにしており、比較的簡単に行える計算方法である。そのため、体積平衡法は1950年代から1970年代まで実際に利用されていた。弾道理論法（詳細は後述する）は弾道理論と経験をもとにしており、複雑な計算方法となっている。そのため、この計算方法が実際の定向発破ダム工法に利用された例は少ない。

1980年代から工事施工技術の向上に伴い、複数分散連続装薬の装薬形式が実際に利用されるようになった。定向発破ダム工法の設計には高い精度が要求され、規模も大きくなったため、理論的な計算による設計が必要となった。しかし、体積平衡法は理論的背景がなく、

精密さに欠けるという短所を持っている。そこで、エネルギー保存則に従った弾道理論法を用いることが検討されるようになった。また、コンピュータの発達及び普及により、複雑な計算が容易に行えるようになったため、弾道理論法を用いることが可能になった⁴⁾。

本論文では単一集中装薬の弾道理論をもとにして、複数分散連続装薬の場合の飛石速度の計算方法を提案し、さらに、この方法を過去の施工例に適用し検証を行った。

2. 計算方法

2.1 弾道理論法

弾道理論法⁵⁾とはクレーター中の岩石を微小ブロックに分け、各微小ブロックの岩石を弾道軌跡に沿って河川の中央まで飛ばし、岩石の積み上がる高さを計算する方法である。

2.1.1 基本仮定

1950年代の初めに旧ソ連のPokrovskiiは単一集中装薬の計算モデル¹⁾を提案した。これが弾道理論法の基礎となっている。その基本仮定を以下に示す。

- 1) 爆薬の爆轟と岩石の破砕は瞬時に起こる。
- 2) Fig. 2が単一集中装薬のクレーター断面である。クレーター内部は均質とし、これを四角錐体の微小ブロックに分割し、爆発時には個々の微小ブロックがクレーターよりそれぞれの軸方向に投げ出されるものとする。微小ブロックの間に摩擦力は作用しない。
- 3) 各微小ブロックは弾道軌跡に沿って飛ぶ。それらの初速度 v_{0i} は四角錐体の軸長 R_i の3乗に反比例することが実験的に求められている。

$$v_{0i} = \frac{A}{R_i^3} \quad (1)$$

1994年12月5日受理

*横浜国立大学工学部物質工学科
〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156
TEL 045-335-1451 (Ext. 2887)
FAX 045-334-2320

**水利水電科学研究所抗震防護研究所
〒100044 中国北京市車公莊西路20号
TEL +86-1-8415522
FAX +86-1-8411174

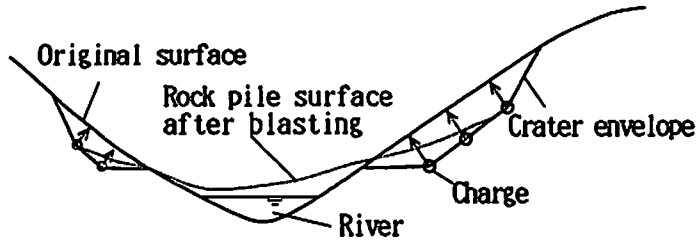


Fig. 1 Conceptual diagram of a directed blasting dam design

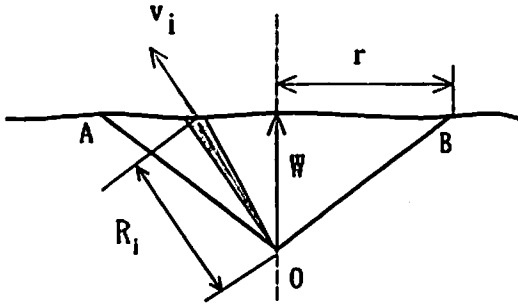


Fig. 2 Cross section of a crater in the case of single charge

ここで、 A は速度係数 $[m^4 \cdot s^{-1}]$ である。

4) 投げ出された岩石の受けた総エネルギーは爆薬のエネルギーの有効部分と等しくなる。

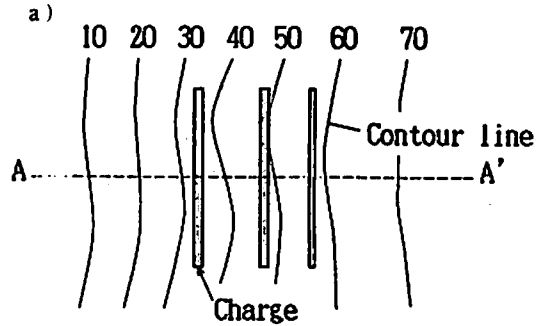
$$\xi \mu q = \sum_i \frac{1}{2} m_i v_{oi}^2 \quad (2)$$

ここで、 ξ : エネルギー有効利用係数 [-], μ : 単位重量の爆薬の爆発エネルギー $[K/kg]$, q : 装薬量 $[kg]$, m_i : 微小ブロック i の質量 $[kg]$ である。また、エネルギー有効利用係数は爆薬の放出する爆発エネルギー中、岩石に初速度を与えるために利用されるエネルギーの割合である。

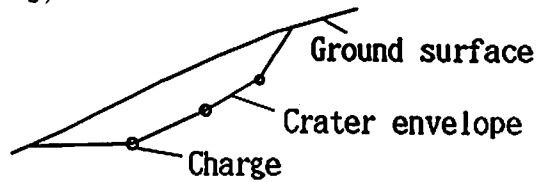
2.1.2 複数分散連続装薬発破の飛石速度の計算仮定

複数分散連続装薬⁶⁾ (Plural Dispersive Columnar Charge, Fig. 3) の場合は単一集中または分散集中装薬⁷⁾ (Plural Dispersive Globular Charge, Fig. 4) と比べて爆発時に、エネルギーを比較的均一に岩石に与えるため、エネルギー有効利用係数を高くすることができる。また、複数分散連続装薬での発破では岩石の破砕効果がよいという特徴がある⁶⁾。

複数分散連続装薬での飛石の初速度について2次元で解析する場合に以下のように仮定する。Fig. 5は3カ所の複数分散連続装薬で発破する際のクレーター断面である。



b)



Unit: m

Fig. 3 Conceptual diagram of charge location in case of Plural Dispersive Columnar Charge (PDCC)

a) : Plane figure
b) : Cross section of A-A'

- 1) 爆薬 q_i の単発発破時の飛石の速度係数を A_i とする。2次元の場合、微小ブロックの初速度は三角形の軸長の2乗に反比例する。これは実験より検証されている⁸⁾。
- 2) 斉発発破時の速度係数を A_i' とする。 A_i' は A_i に比例すると仮定すれば、以下の式が成り立つ。

$$\frac{A_1'}{A_1} = \frac{A_2'}{A_2} = \frac{A_3'}{A_3} = k \quad (3)$$

ここで、 k : 比例定数 [-], A_i : 爆薬 q_i の単発発破時の飛石の速度係数 $[m^4 \cdot s^{-1}]$, A_i' : 斉発発破時の爆薬 q_i による飛石の速度係数 $[m^4 \cdot s^{-1}]$ である。

- 3) Fig. 5中の W_1 と W_3 の間にある部分を長方形の形状に、 W_1 の左側及び W_3 の右側をそれぞれ

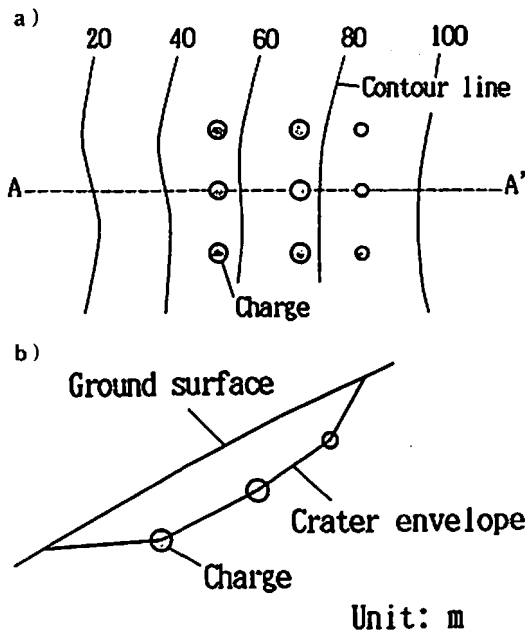


Fig. 4 Conceptual diagram of charge location in case of Plural Dispersive Globular Chage (PDGC)
 a) : Plane figure
 b) : Cross section of A-A'

q_1, q_2 を頂点とする一定の微小角度を取って三角形の微小ブロックに分割する。微小ブロック j の岩石は速度 v_j で飛び出すと仮定し、 v_j は各爆薬により与えられる速度ベクトルの和と考える。

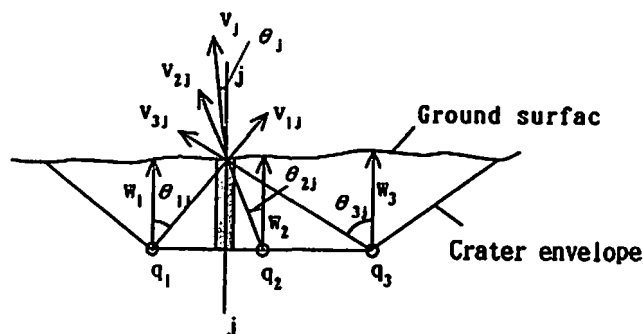


Fig. 5 Conceptual diagram of the calculation of flying locus in the case of three columnar charge

W_1, W_2, W_3 : Burdens [m]
 q_1, q_2, q_3 : Charges [kg]
 v_{1j}, v_{2j}, v_{3j} : Speed components of minute area unit j that charge $q_i (i=1\sim 3)$ produce on it [m/s]
 v_j : Speed of minute area unit j [m/s]
 θ_{ij} : Degree of v_{ij} and vertical axis [°]
 θ_j : Degree of v_j and vertical axis [°]

$$\vec{v}_j = \sum_{i=1}^3 \vec{v}_{ij} \quad (4)$$

4) 各爆薬が各微小ブロックに作用する速度 v_{ij} は各爆薬の中心からその微小ブロックの地面中心点までの距離 R_{ij} の 2 乗に反比例すると仮定する。

$$v_{ij} = \frac{A_i'}{R_{ij}^2} \quad (5)$$

ここで、 R_{ij} : 爆薬 q_i の中心から微小ブロック j の地面中心点までの距離 [m] である。

5) それぞれの微小ブロックが得たエネルギーの和は爆薬の有効エネルギーと等しくなる。

$$\sum_j \mu \zeta_i q_i = \sum_j \frac{1}{2} m_j v_j^2 \quad (6)$$

ここで、 ζ_i : 爆薬 q_i のエネルギー有効利用係数 [-], μ : 単位重量の爆薬のエネルギー [J/kg], q_i : 複数分散連続装薬 i の単位長さの薬量 [kg], m_j : 微小ブロックの岩石 j の質量 [kg], v_j : 微小ブロックの岩石の初速度 [m/s] である。

2.1.3 数学モデル

以下に 3 ケ所装薬の複数分散連続装薬の場合を例にして、数学モデルを導く。

(1) 爆薬 q_i の単発発破時の飛石の速度係数 A_i' を計算する。Fig. 6は 3 ケ所の爆薬の場合のクレーター断面図である。単発時、爆薬 q_1 のクレーターは ao_1b , q_2 のものは $cozd$, q_3 のものは $eoef$ である。それぞれを爆薬を中心とする一定の微小角度で三角形の微小ブロックに分割する。

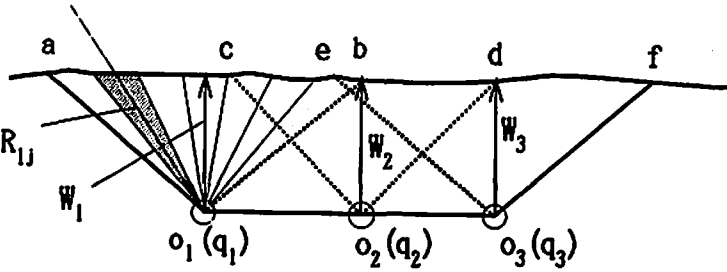


Fig. 6 Cross section of a in the case of three charges

- a) 2.1.2の仮定1)により, 単発発破時, 爆薬 q_i による微小ブロック j の初速度

$$v_{ij} = \frac{A_i}{R_{ij}^2} \quad (7)$$

ここで, A_i : 爆薬 q_i の単発発破時の速度係数 [$\text{cd} \cdot \text{s}^{-1}$], R_{ij} : 爆薬 q_i の単発時の微小ブロック j の軸長 [m] である。

- b) 2.1.1の基本仮定4)により,

$$\mu \xi q_i = \sum_j \frac{1}{2} m_j v_{ij}^2 \quad (8)$$

式 (7), (8) により, A_i を計算することができる。

$$A_i = \sqrt{\frac{2 \mu \xi q_i}{\sum_j \frac{1}{R_{ij}^2} m_j}} \quad (9)$$

- (2) 2.1.2の仮定2)により, 式 (3) を書き直し, 下式になる。

$$\begin{aligned} A_1' &= A_1 k \\ A_2' &= A_2 k \\ A_3' &= A_3 k \end{aligned} \quad (10)$$

- (3) 斉発発破における微小ブロック j の岩石の初速度を計算する。爆薬 i が微小ブロック j に作用してあたえる速度は (5), (10) 式による。

$$v_{ij} = \frac{A_i k}{R_{ij}^2} \quad (11)$$

微小ブロック j の岩石の初速度は式 (4), (11) による。

$$v_j = k \sqrt{B_j^2 + C_j^2} \quad (12)$$

$$\theta_j = \tan^{-1} \frac{B_j}{C_j}$$

式中:

$$B_j = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i}{R_{ij}^2} \cos \theta_{ij}$$

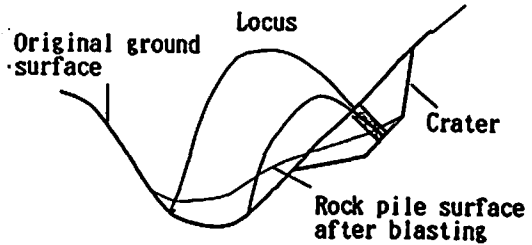


Fig. 7 Cross section of two-dimensional calculation

$$C_j = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i}{R_{ij}^2} \sin \theta_{ij}$$

式 (12) を式 (6) に代入し, 比例係数 k が計算できる。

$$k = \sqrt{\frac{2 \mu \sum_i \xi q_i}{\sum_j m_j (B_j^2 + C_j^2)}} \quad (13)$$

係数 k を式 (12) に代入し, 微小ブロックの初速度 v_j の大きさと方向が計算できる。

2.2 2次元断面計算

Fig. 7は, 2次元断面計算概念図であり, クレーター中の岩石が放物線を描いて飛ぶと仮定する。1つの微小ブロックは, 地表面の中心点と爆薬中心を結んだ線の上の中心点が2つの放物線を描く。破碎された岩石はこの2つの放物線の範囲内で飛翔すると仮定すると, 落下地点の範囲が求められる。この落下地点の範囲の長さを計算し, 1つの微小ブロックあたりの岩石の積み上がる高さが計算できる。そして, 各微小ブロックの岩石の積み上がる高さの和が, 発破により岩石が積み上がる高さとなる。

岩石が飛翔する時, 岩石は空気抵抗を受けるため, 実際の飛翔距離は理論値より短い。飛石の粒径と形状を主な因子として, 空気抵抗を考慮した微分方程式により飛翔距離を求めることが可能である。しかし, 従来の定向発破では, 飛翔初速度が35m/s以下であり, 空気抵抗を考慮した場合と無視した場合は, 飛翔距離の差が3~5%である。そのため, 今回のモデルでは

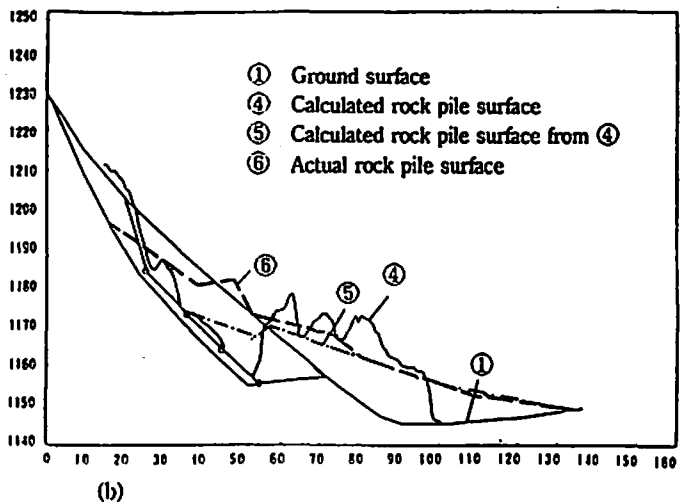
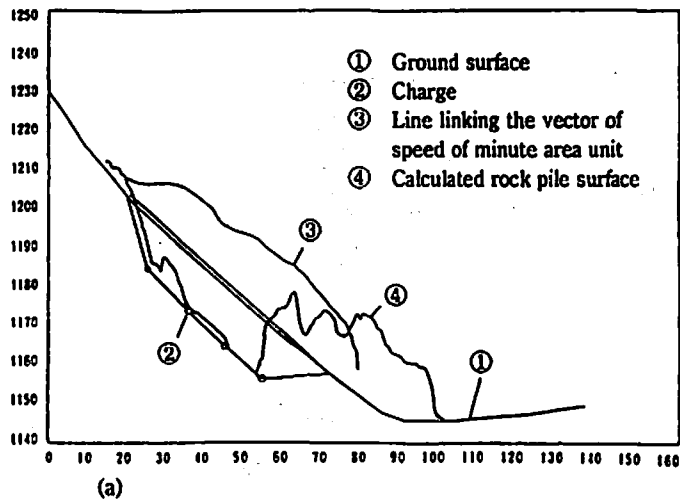


Fig. 8 Comparison of calculated and actual rock pile surface after blasting at JIN DUI CHENG project

飛石に与える空気の影響を無視して計算を行った。

3. エネルギー有効利用係数の検討及び考察

本研究で開発したソフトを用い、過去の3つの施工例^{7) 9) 10)}について計算を行った。Fig. 8はその1つ、1986年に実施した中国の金堆城 (JIN DUI CHENG) における定向発破の結果⁹⁾と2次元断面の計算結果を比較したものである。計算結果の検討には飛ばす岩石量、パイルの形状等を用い、本研究で提案した計算方法を考察した。

Fig. 8 (a)の曲線③は本研究の計算方法により計算した微小ブロックの初速度のベクトルを結んだ線である。発破時、クレーター範囲の地面の動いた距離は、発破時の岩石の初速度と正比例するから、曲線③は発破直後のクレーター範囲の地面の形状を表現すると考えている。

Fig. 8 (a) と (b) の曲線④は本研究の計算方法に

よる岩石のパイルの形状である。Fig. 8 (b)の曲線⑤は、岩石が地面に積みあがる時の岩石の安息角(実際の工事例により18%~23%)まで、崩壊または滑ることを考えて、曲線④より計算して得た線である。また、Fig. 8 (a)の曲線⑥は実際のパイルの形状である。計算により得たパイルの形状は実際のものと比べて、良好な一致を示している。

さらに、計算により得られた飛翔した岩石量はクレーター内部の全岩石量の49.8%である。これも実際の量(49.2%)に近い値となった。

エネルギー有効利用率はこの計算方法で最も重要な係数である。定向発破ダムの設計中ではできるだけ多くの爆薬のエネルギーを岩石を飛翔させるために利用することが望ましい。近年、この係数の数値範囲について多くの議論があり、5%~30%とされている¹¹⁾。

Table 1に中国におけるこれまでの3つの施工例の

Table 1 Results of back-calculation for three projects

project	range of the burdens (m)	charge (t)	form of the charge	effective rate of the energy (%)
Jinduicheng 金堆城	12.8~17.8	66	PDGC and PDCC	7~9
Nanshui 南水	14.5~40.0	1394	Plural Dispersive Globular Charge (PDGC)	10~18
Shunchang 順昌	16.8~24.6	1718	Plural Dispersive Columnar Charge (PDCC)	13~18

計算結果を示す。それぞれの施工例について、実際の岩石のバールの形状と合うように、2次元断面の計算を繰り返して、爆薬のエネルギー有効利用係数を求めたところ、この係数の数値範囲は7~18%となった。さらに、最小抵抗線の増大および装薬形式の改善に伴って、有効利用エネルギーが高まることが分かった。

4. まとめ

弾道理論法は定向発破ダム設計計算方法の一つである。この計算方法はエネルギー保存則と質量保存則に従っており、理論根拠の上に合理性がある。また、実際の施工例に対してこの方法を適用し検証した。しかし、本研究の計算方法とCADシステムは2次元断面での計算方法であり、実際の発破では岩石が3次元の方向に飛ばされる。そのため、今後3次元での計算方法の開発を行う必要がある。

謝 辞

本論文作成にあたり貴重な御助言と御協力をいただきました横浜国立大学工学部小川御繁教授、三宅淳巳助手及び小川研究室の方々、資源環境技術総合研究所安全工学部破壊研究室勝山邦久室長、緒方雄二氏、和田有司氏に感謝致します。

文 献

- 1) 「大爆破文集」編写組、「大爆破文集」第一集、中国科学技術情報所 (1960)

- 2) 霍永基, 定向発破筑壩設計計算方法研究, 水利学报 (中国), No.3 (1964)
- 3) 馮叔瑜編, 「爆破工程」, 中国铁道出版社 (1980)
- 4) Yongji HUO, Ruiwu QIAN, Guichen MA, "Research on computer-Aided Design (CAD) system for engineering blasting", Proc. Int'l Conf. Engineering Blasting Technique, Beijing, 122~129 (1991)
- 5) 霍永基, 錢璐五, 馬貴臣, 定向発破拋擲堆積計算(弾道理論法), 定向発破筑壩專題討論會論文集, 中国力学学会爆破專業委員会 (1987)
- 6) 史家培, 複數爆薬の斜面発破, 中国建材建設總公司 (1986)
- 7) 馬乃耀, 霍永基, 南水水電定向発破筑壩觀測設計技術總結, 中国広東省水利水電觀測設計院 (1963)
- 8) 史家培, 周家模, 平面薬包定向拋擲爆破爆薬計算浅析 (1987)
- 9) 水利水電科学研究院抗震防護所, 金堆城定向発破工程觀測報告 (1987)
- 10) 中国建材建設總公司, 福建順昌水泥場洋姑山石灰石鉸削頂大爆破設計 (1985)
- 11) 馬貴臣, 定向発破筑壩計算機輔助設計研究, 中国水利水電科学研究院 (1988)

**Study on the method of trajectory theory of the directed blasting
rock fill dam design**

Guichen MA*, Ruiwu QIAN and Yongji HUO****

In this paper, the method of trajectory theory for the directed blasting rock fill dam design was studied, and the calculational method of flying-rock in the case of plural dispersive columnar charge was proposed. Further, this method was verified by comparing the calculated results, including several engineering considerations, with actual rock pile geometries of chinese dam constructions. Also the range of effective rate of blasting energy was cleared.

(*Department of Safety Engineering, Yokohama National University,
156 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240, Japan

**Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research (IWHR),
No. 20 West Chegongzhuang Road, P. O. Box 366, Beijing, China)
