

(5) B.W.E.の掘削性判定指標に関する研究

JOSECO(株)*

沢田 雄二

三菱鉱業セメント(株)

明永 邦太

三菱鉱業セメント(株)

八木 真之助

三菱重工業(株)

伊藤 和逸

三菱重工業(株)

正会員 ○大石 善啓

1. まえがき

B.W.E. (Bucket Wheel Excavator)はその名の通り、ホイールの円周に数個のバケットを有し、ホイールの回転により連続的にバケット掘削を行う大量土工機械である。このB.W.E.を、オイルシェール・プロジェクトの様に採掘コストが大きなウエイトを占める現場に導入する際には、その適用性、生産性について事前に十分な検討を行う必要がある。B.W.E.による岩石の掘削性を判定する指標としては、従来より比掘削抵抗値(K値)が用いられているが、このK値は実際にはB.W.E.の稼働実績等から算出された便宜的な指標であり、岩石物性値との関係等についても十分な検討がなされていない。

本研究では、まず4種類の強度のモルタル疑似岩に対して、平歯の円弧掘削によるK値測定実験を実施しK値と岩石物性値との関係を検討した。さらにB.W.E.のオイルシェール鉱床への適用性を判定するため、オイルシェール類似岩に対するK値測定実験を行い、K値に及ぼす岩目の影響の評価を行った。またB.W.E.バケットを用いた同類似岩の掘削実験を行い、実機B.W.E.に対するK値評価法を検討した。以上の結果、B.W.E.の掘削性が簡単な地山物性値の調査によって概略判定できることが明らかにされ、その評価式を得た。

なお、本研究は石油公団の委託により、JOSECOが実施した“昭和58年度オイルシェール開発技術等研究”の一環として行われたものである。

2. 実験内容

2.1 実験装置及び実験方法

図-1に実験装置を示す。すなわち40tfクラスの油圧ショベルのフロント部に、図-2に示すK値測定用平歯、B.W.E.バケット要素モデルの各ツールを取付け、ブーム・アーム・ピン廻りにアームを回転させ、B.W.E.の掘削パターンを模擬した。

K値測定用平歯は歯幅5～26.6cmの5種類であり、B.W.E.バケット要素モデルは、標準的なB.W.E.であるSRS-400型のバケット要素を用いた。

掘削厚さはショベル機体の前進量によって設定し、掘削後の実掘削厚さを測量した。なお、図-1のとおりの歯先回転円の半径方向の切込み厚さを t とした。掘削中に歯先に作用する掘削抵抗力は、3成分ロードセル、また歯先回転角は、アームシリンダに取付けた変位計にて計測し、 A/D 変換後種々の解析処理を行った。

* Japan Oil Shale Engineering Co.

(日本オイルシェールエンジニアリング(株))

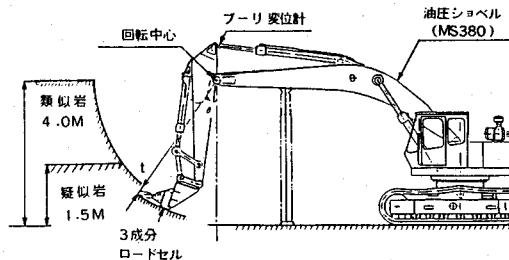


図-1 実験方法

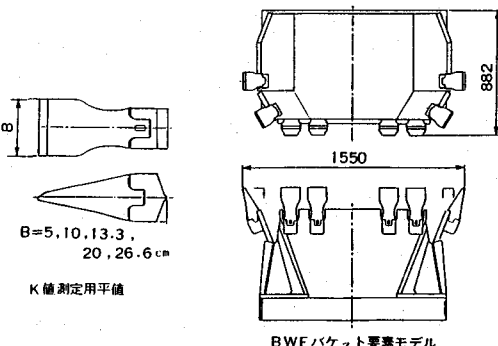


図-2 K値測定用平歯及び

B.W.E.バケット要素モデル

2.2 掘削対象

表-1は本研究で掘削対象としたモルタル疑似岩及びオイルシェール類似岩の主要物性値である。まず岩目等の存在しない4種類の強度のモルタル疑似岩について、K値測定実験を実施し、岩石の強度物性値と比掘削抵抗K値との関係を検討した。次に岩石の掘削性に及ぼす岩目等の影響を検討するため、オイルシェールに類似した天然堆積岩（泥岩）について、類似岩K値測定実験及びB.W.E.バケット要素掘削実験を行った。

2.3 データ評価法

図-3は掘削抵抗力の接線成分Fと掘削厚さtの関係を模式的に示すものである。同図より、円弧掘削時の掘削力特性について下記の事が判る。

- (1)掘削過程において、掘削抵抗力Fは掘削厚さtの増加にはば比例して増加する。
- (2)最大掘削抵抗力 F_0 は、各ケースとも供試体上表面に至る手前で現われる。

以上の結果から、最大掘削抵抗力 F_0 、その時の掘削厚さ t_0 を各ケースの代表データとして採用し、以降これらを用いて評価を行った。

表-1 疑似岩・類似岩物性値

岩種	圧縮強度 Sc (kgf/cm ²)	引張強度 ST (kgf/cm ²)	ポインツロー ド指標 (kgf/cm ²)	弾性波 速度 コア/地山 (km/s)
疑似岩	30	37	5.9	3.0
	60	59	9.9	4.2
	100	102	15.5	5.2
	150	131	18.6	5.6
類似岩	A層	221	22.5	7.7
	B層	204	23.4	7.4

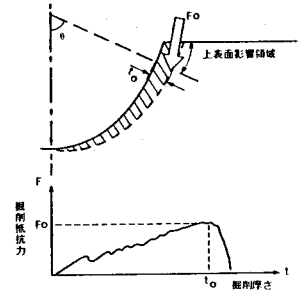


図-3 掘削抵抗力発生状況

3. 疑似岩K値測定実験

3.1 K値評価法

一般に、比掘削抵抗 K 値には、掘削線長 $L=B+t$ (B :掘削幅, t :掘削厚さ)当りの掘削力すなわち F/L とする K_L 値と、掘削断面積 $A=B \cdot t$ 当りの掘削力 F/A とする K_A 値がある。図-4は、圧縮強度 $Sc=37, 102\text{kgf/cm}^2$ における F_0/A と A の関係、図-5は F_0/L と L の関係を示すものである。両図より、 F_0/A と掘削断面積 A の間には双曲線関係が認められるが、 F_0/L と掘削線長 L の間には有意な傾向は認めがたい。従って、掘削線長で評価した F_0/L 値よりも、掘削断面積で評価した F_0/A 値の方が、岩石の掘削性を判定する指標として有意義であると判断される。

図-4の関係は次式で表現される。

$$F_0/A = \alpha + \beta/A \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \text{-----} \quad (3.1)$$

式(3.1)は、掘削抵抗力和掘削断面積が線形関係にあることを意味する。すなわち図-6に示すとおり

$$F_0 = \alpha A + \beta \quad (\text{kgf}) \quad \text{-----} \quad (3.2)$$

なる一次式が各疑似岩について成立する。

ここで、式(3.2)の係数 α, β の物理的意味は次のとおりと考えられる。^{1), 2)}

α : 掘削抵抗力和掘削断面積を関係づける比例係数であり、岩の破壊強度に関連する。

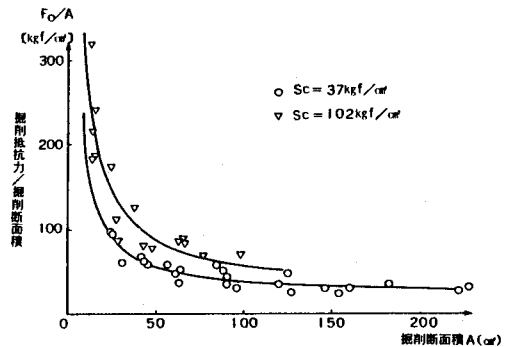


図-4 F_0/A と A との関係

(疑似岩K値測定テスト)

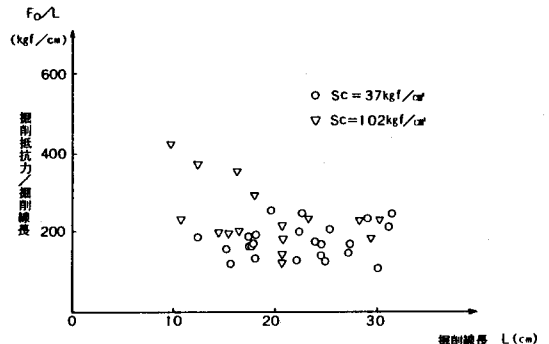


図-5 F_0/L と L との関係

(疑似岩K値測定テスト)

β : 掘削断面積に依存しない項であり、平歯と岩との摩擦抵抗力等に関わる。

以上のことから、掘削に対する岩石の破壊強度を評価する上で物理的に重要な意味をもつのは、掘削抵抗力と掘削断面積を関係づける比例項 α であると考えられる。 $F_0/A-A$ 関係において、比掘削抵抗 F_0/A は掘削断面積 A によって変化するが、 A が大きい領域では、 $F_0/A=\alpha$ なる漸近線に収斂する。このときの比掘削抵抗を $K_A^*=\alpha$ と表わし、岩石の掘削性を判定する指標として定義する。

3.2 K_A^* 値と岩石物性値との関係

図-7 に各疑似岩における K_A^* 値と圧縮強度 S_c との関係を示す。同図より、 K_A^* 値と S_c の間には次のとおり比例関係が成立する。

$$K_A^* = C_c \cdot S_c \quad (3.3)$$

式(3.3)は脆性度等によって対応付けることによって、圧縮強度以外の他の物性値、すなわち引張強度やポイントロード指標等についても成立するものである。以降この比例定数 C_c を岩石物性係数とよび、岩質と掘削性を対応付ける量として定義する。

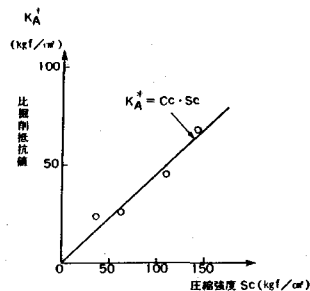


図-7 比掘削抵抗 K_A^* と圧縮強度 S_c との関係

4. 類似岩 K 値測定及びバケット掘削実験

4.1 K 値評価法

図-8 は F_0 と A との関係を示すものである。図より類似岩においても掘削抵抗力と掘削断面積との線形関係は明らかに成立しており、コアサンプル圧縮強度 $S_c=221$ (kgf/cm²) の類似岩の K_A^* 値は20程度である。ところが、これは圧縮強度 $S_c=37$ (kgf/cm²) の疑似岩の K_A^* 値よりも低いものである。これは、均質で岩目のない疑似岩に対して、類似岩中には無数のjoint, crackが存在し、これらの影響により K_A^* 値が低下したものと推察される。従って、コア、サンプルの強度物性値 S_c , S_t 等のみでは岩盤の被掘削性は判定し得ず、岩盤の風化、節理等の岩目状態を定量化し、これを加味することによって岩盤としての被掘削性すなわち K_A^* 値を判定する必要がある。ここでは、岩盤の岩目等の発達状態を示す指標として、岩目係数 $f = (\text{岩盤の弾性波速度} / \text{コア・サンプルの弾性波速度})^2$ を定め、この岩目係数を用いて、岩目等の影響を考慮した岩盤としての圧縮強度(準岩盤強度 S_c')を次のとおり求めた。⁴⁾

$$S_c' = f \cdot S_c \quad (4.1)$$

表-2 は上の考えに基づいて求めた疑似岩及び類似岩の岩石物性値である。同表より、疑似岩、類似岩における岩石物性係数 C_c は、それぞれほぼ同程度の値である。従って式(3.3)の関係は準岩盤強度を導入することによって、岩目等の存在する実岩盤についても成立することが確認された。

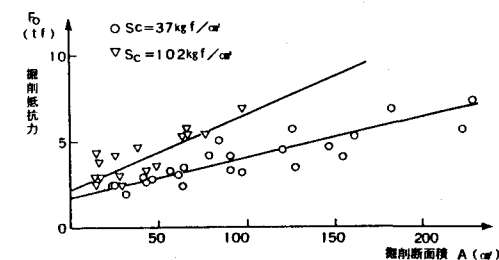


図-6 F_0 と A との関係(疑似岩 K 値測定テスト)

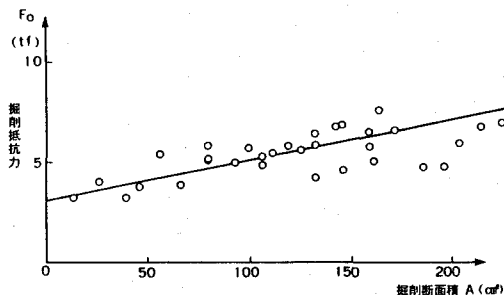


図-8 F_0 と A との関係(類似岩 K 値測定テスト)

表-2 岩目等を考慮した岩盤の強度物性値

岩種	岩目係数 f	コアサンプル 圧縮強度 S_c (kgf/cm ²)	準岩盤 強度 S_c' (kgf/cm ²)	比掘削抵抗 K_A^* (kgf/cm ²)	岩石物性 係数 C_c
疑似岩 ($S_c=102$ kgf/cm ²)	1.0	102	102	43.9	4.3
類似岩 (A層)	0.27	221	60	20.1	3.4

4.2 B.W.E.バケット掘削実験結果

図-9は F_0 と A の関係を示すものである。図中に示した直線は類似岩 K 値測定テスト結果により定めた回帰式である。バケット掘削による実測値は多少バラつくが、 F_0 と A との間に線形関係が認められる。また K 値測定結果より算定した直線式より下方に分布しているが、これは下記の理由によるものと考えられる。

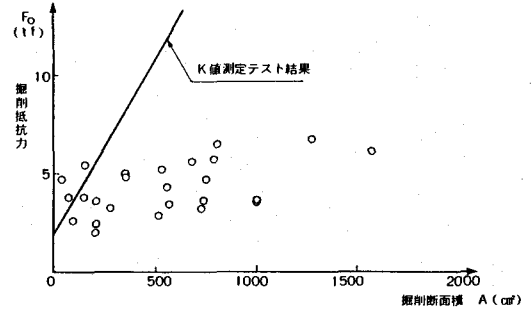


図-9 F_0 と A との関係

(類似岩 BWEバケット掘削テスト)

(1) 平歯が側面に掘削歯をもたないのに対し、B.W.E.バケットではバケット側面のツースによって側面掘削を行うため、掘削断面積当りの掘削抵抗力が減少した。

(2) バケット・ツース間の岩盤が破碎される等、複数のツースの相互作用によって、掘削断面積が増大し、かつ掘削抵抗力が低下した。

(3) 掘削断面積の大きいB.W.E.バケット掘削の方が、より広い岩目間隔の影響を受けるため、掘削断面積当りの掘削抵抗力が低下した。

以上の理由から、 K 値測定結果により求めた K_A^* 値を実際のB.W.E.バケットに適用する場合には、バケット条件(ツース配置、本数等)、岩盤条件(岩目間隔、節理方向等)を考慮し、 $K_A(BWE) = f_B \cdot K_A^*$ なるバケット、岩盤両側から定まる係数 f_B (バケット係数)を求める必要がある。ここに $K_A(BWE)$ 値こそ一般にいわれるB.W.E.の比掘削抵抗値に他ならない。

5. 結 論

4種類の強度のモルタル疑似岩及び岩目の存在するオイルシェール類似岩について、 K 値定実験及びB.W.E.バケット掘削実験を行った。得られた成果を以下に列記する。

- (1) 掘削抵抗力 F_0 と掘削断面積 A との間には、 $F_0 = \alpha \cdot A + \beta$ なる線形関係が成立し、岩石の掘削に対する破壊強度に直接関係するのは、 F_0-A 関係式の比例係数 α である。従って、岩石の掘削性を判定する指標としては、掘削断面積が大きい領域での比掘削抵抗値である $K_A^* = \alpha$ (kg f/cm²)が有効である。
- (2) 岩盤の掘削には、岩盤中に存在する岩目の影響が大である。そこで、岩目係数をコア・サンプルの強度物性値に乘じて、岩目の影響を考慮した岩盤としての強度を評価する必要がある。
- (3) K_A^* 値と準岩盤強度(岩目係数×コアサンプル圧縮強度)との間には比例関係が成立し、その比例定数は岩種に応じて定まる定数(岩石物性係数)である。
- (4) 平歯掘削テストにより求められた K_A^* 値とB.W.E.バケット掘削テストによる $K_A(BWE)$ 値はバケットのツース形状、配置と岩目間隔、方向との適合性により定まるバケット係数 f_B によって関係づけられる。
- (5) 以上より、岩盤をB.W.E.で掘削する場合の比掘削抵抗 $K_A(BWE)$ は、コア・サンプルの強度物性値、地山の弾性波速度等の簡単な地山調査によって判定でき、その評価式は次のとおりである。

$$K_A(BWE) = (\text{バケット係数}) \cdot (\text{岩石物性係数}) \cdot (\text{岩目係数}) \cdot (\text{コア・サンプル強度})$$

(参考文献)

- 1) Y.Nishimatsu: "The Mechanics of Rock Cutting" Int. J. Rock Mech. Vol.9
- 2) 鈴木, 西松: "岩石およびセメントモルタルの掘削抵抗について(第2報)" Vol.84, No.967(1968)
- 3) 池田, 小林, 桜井: "岩目の岩石強度に及ぼす影響" 物理探鉱, Vol.25, No.5 (1972)
- 4) 池田: "土木機械に適應した岩盤分類" 建設機械, Vol.9, No.2 (1973)

(5) A STUDY ON EXCAVATABILITY INDEX FOR B.W.E.

by

Yuuji Sawada*

Kunita Akenaga, Shinnosuke Yagi**

Kazuitsu Ito, Yoshihiro Ooishi***

- Abstract -

To judge the excavatability of Bucket Wheel Excavator (B.W.E.), the index of the specific cutting resistance (K value) is used. But, the definition and measuring method of the K value have not yet been established, and its relation to the rock properties is also unclear.

Therefore, firstly we have examined the relation between the K value and the rock properties by the K value measurement experiments on the mortar imitation rock.

Next, to judge the applicability of B.W.E. to oilshale ore deposit, we have studied the effect of fractures upon the K value by the experiments on the mudstone similar to oilshale.

Furthermore, we have made excavation experiments using a B.W.E. bucket in order to study the evaluation method of the K value for an actual B.W.E.

As a result, we have experimentally confirmed that we can judge the excavatability of B.W.E. by obtaining fundamental rock properties by in-situ test.

* Japan Oil Shale Engineering Co.

** Mitsubishi Mining & Cement Co., Ltd.

*** Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.