

5. B.W.E.掘削性能の予測方法について

大林組 羽生田吉也・斎藤二郎
後藤真三男・木村 薫

1. ま え が き

バケットホイールエキスカベータ（以下、B.W.E.と略す）が、1934年にドイツで褐炭の露天掘用に開発されて以来、半世紀近くになる¹⁾。日本の土木業界が初めてB.W.E.を採用したのは、1965年で、シンガポールのベドック丘陵の土取および海岸埋立工事であった（埋立土量；約2065万 m^3 、工期；4年²⁾）。国内での最近の土木工事における採用例には、鹿島港土砂運搬工事、浅間山開発工事、京急釜利谷開発工事（写真-1）などがあり、B.W.E.の特長とする連続掘削による大量土砂の処理、および低公害性が脚光を浴びた。

さて、他の掘削機械に較べると、B.W.E.の掘削能力は極めて大きく、対象土量も数百万 m^3 以上に及ぶ膨大な工事例が多い。従って、掘削性能を正確に予測して、工事計画に反映することは、かなり重要な事柄となる。本報は、B.W.E.の設計諸元から、その掘削性能を理論的に予測する方法を導き、実機であるC-500, $R_s \frac{150}{0.5} \times 10.5$ （以下、T-150と略す）の2機種への予測例を挙げて、本方法の妥当性を検討した。

2. 予 測 方 法

掘削性能を考える上で、対象機種の形状および機構と土の性状とを関係づけるパラメータが必要である。ここでは、ホイールドラム上に装着される各バケットおよび中間カッタの単位刃先長に作用する掘削抵抗力K値（ kg/cm ）を用いる³⁾。

また、与えられた掘削条件下で、短時間に大量の土砂を掘削しようとする機械の操作方法を見つけ、これを最適制御方法と称して⁵⁾、これに則した掘削をおこなった場合に得られる、ホイールブーム1旋回に着目した単位時間当りの平均地山掘削量 Q_0 をもって掘削性能を表わす。この他、以下の仮定を設けて予測をおこなう。

- イ) ホイールブーム旋回用の原動機容量は、負荷に較べて充分ある。
- ロ) 土量変化率 S_f は、掘削方法、K値によって変ることがない。
- ハ) バケット容積 V_b (m^3) を越えて、積込まない。



写真-1 京急釜利谷土取工事とB.W.E.

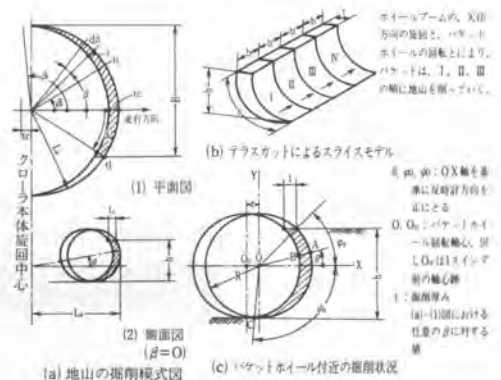


図-1 掘削方法の説明図

ニ) ホイールドラム回転用の原動機容量 N_0 を上廻る掘削は、不可能とする。また、土砂の持上げ動力は省略できるものとする。

ホ) ホイールブームの1旋回をするのに要す時間を掘削時間として、クローラ前進時間などを加算しない。

2.1 掘削抵抗力と原動機容量 N_0 との関係 K値の定義から、掘削時に地山へ接して、まさに切削に関与している刃先長の延長 L_c (m)と掘削抵抗力 P_u (kg)との関係は、次式で表わされる。

$$P_u = 100 \cdot K \cdot L_c = 100 \cdot K (X \cdot b + f_s \cdot t) \quad (\text{kg}) \quad (1)$$

但し、 X は地山に食込んでいるカッタ数、 f_s はバケットファクタ⁴⁾である。 b, t について図-1(b)参照。一方、ホイールドラムの周速を V_s (m/sec)とすると、 N_0 (KW)は式(2)を満足する。

$$N_0 \geq P_u \cdot V_s / 102 = K \cdot V_s (X \cdot b + f_s \cdot t) / 1.02 \quad (\text{KW}) \quad (2)$$

また、ホイールドラム周囲に取付けた n 個のバケットが毎分 M 回の排土をおこなない、かつ、カッタ先端における水平方向への旋回速度 V_r (m/min)なる掘削状態において、 V_s, b は、それぞれ、式(3)、(4)で与えられる。

$$V_s = \pi \cdot D \cdot M / (60 \times n) \quad (\text{m/sec}) \quad (3)$$

$$b = (\text{カッタ間隔}) / V_s \cdot V_r = V_r / (e \cdot M) \quad (\text{m}) \quad (4)$$

従って、式(3)、(4)を(2)式に代入すると(5)式を得る。

$$N_0 \geq \pi \cdot D \cdot K (X \cdot V_r / e + f_s \cdot M \cdot t) / (1.02 \times 60 n) \quad (\text{KW}) \quad (5)$$

なお、 e については、写真-2のように中間カッタ付のB.W.E.について $e=1$ 、中間カッタのないもの $e=1$ とする。

2.2 バケットファクタ f_s と X 地山の高さを h (m)、バケットホイール径を D (m)とすると、図-1における φ_0, ψ_0 は、次のようになる。

$$\varphi_0 = \sin^{-1} (2h/D - 1) \quad (\text{rad}) \quad (6)$$

$$\psi_0 = \sin^{-1} (-t/D) - \pi/2 \approx \pi/2 \quad (\text{rad}) \quad (7)$$

さらに、次式へ φ_0, ψ_0 を代入して X' を求めて小数点以下を切り捨てると、 X が求まる。

$$X' = | \psi_0 - \varphi_0 | \cdot e \cdot n / (2\pi) + 1 \quad (8)$$

次に、 φ_0, ψ_0, X を式(9)に代入して、 θ_i を求め、さらに(10)式より、 f_s を求める。

$$\theta_i = -2\pi i / (e \cdot n) + \varphi_0 > \psi_0 \quad (\text{rad}) \quad (9)$$

$$f_s = 1 + \sum_{i=1}^{X-1} \cos \theta_i \quad (10)$$

但し、 $1 \leq i \leq X-1$ 以上の結果、 f_s および X は、 h/D の関数となる。



写真-2 B.W.E. C-500

項目	C 500	T 150
理論掘削能力(ルーズ) m^3/h	2,100/1,860/1,620	720/540
実掘削能力(地山) m^3/h	1,450~850	—
掘削高さ (m)	10	10.5
掘削低さ (m)	-0.6	-0.5
1個あたりの容量 m^3	0.5	0.15
ホイールにつく数	10	8
ホイール外径(バケット軸) (m)	7.8	4.4
1分間の排土回数	70/62/54	80/60
旋回半径 (m)	11	13
旋回範囲 (度)	360	360
付排土アーム旋回範囲 (度)	180	210
旋回速度 (m/min)	6~30	6~25*
旋回方式	(*) 半自動	—
ベルトコンベヤ幅 (mm)	1,400	1,000
ベルトコンベヤ速度 (m/min)	210	210
旋回長さ (m)	20	22
旋回範囲 (度)	180	210
旋回速度 (m/min)	12	—
ベルトコンベヤ幅 (mm)	1,400	1,000
ベルトコンベヤ速度 (m/min)	210	210
上下張高さ (m)	9.75/3.5	—
中心間距離 (m)	6.8	5.2
幅 (m)	2.25	1.3
長さ (m)	7.9	7.5
平均接地圧 kg/cm^2	0.94	1.00
走行速度 (m/min)	7.4	0~6
登坂角度	1:10	1:10
ホイール駆動用電動機 kw	360±45	110/75
変速機構	親子モーター	—
総電圧容量 kw	860	325

*DCワードレオナード *筆者推定

表-1 B.W.E.C-500, T-150諸元

2.3. 掘削土量 掘削対象となる地山の幅を B (m) とすれば、ホイールブーム 1 旋回によって掘削される地山体積 V_0 は、 t_c をクローラ前進量 (m) として、次式のようになる。

$$V_0 = t_c \cdot h \cdot B \quad (m^3) \quad (11)$$

さらに、この旋回に要する時間を Σ (τ_j) (min) とすると、1 旋回当りの平均地山掘削量 Q_0 は、式 (11) で求められる。

$$Q_0 = 60 t_c \cdot h \cdot B / \Sigma (\tau_j) \quad (m^3/hr) \quad (12)$$

Q_0 に対して、ホイールブームの旋回角度 β 、旋回速度の変化と共に、刻々と変化する値 Q_1 がある。

$$Q_1 = 60 V_r \cdot h \cdot t_c \cos \beta = 60 t \cdot h \cdot V_r \quad (m^3/min) \quad (13)$$

また、土量変化率 S_f の状態で掘削している際、バケット容積 V_b (m^3) を越える掘削をしないものと仮定したので、 Q_1 は次の不等式を満足しなければならない。

$$Q_1 \leq 60 M \cdot V_b / S_f \quad (m^3/hr) \quad (14)$$

2.4 最適制御方法 すでに誘導した式 (5)、および (13) と (14) 式の組合せによって旋回速度 V_r と掘削厚み t との関係は、次式 (15)、(16) のように表わされる。

$$V_r \leq -A_0 \cdot t + B_0 \quad (m/min) \quad ; \quad A_0 = f_s \cdot e \cdot M / X, \quad B_0 = 61.2 N_0 \cdot e \cdot n / (\pi \cdot D \cdot K \cdot X) \quad (15)$$

$$V_r \cdot t \leq M \cdot V_b / (S_f \cdot h) \quad (m^3/min) \quad (16)$$

ホイールブームが 1 旋回する間に、短時間に大量の土を掘削する為には、旋回速度を可能な範囲で高くする必要があり、この際、掘削厚み t との関係で式 (15)、(16) によって V_r に制限が加えられる。ホイールブームの旋回およびドラムの回転の増減速型式を、さらに、この条件に考慮することによって、最適制御方法が明らかになる。これに従って、設定された条件 ($D, e, n, N_0, V_b, S_f, B, M; t_c, h/D, K$) について、ホイールブームが 1 旋回するのに必要な時間を求め、式 (12) から 1 旋回当りの地山掘削量 Q_0 を得ることができる。

図-2 に示した例では、後述の C-500, T-150 のように、 V_r, M の有段変速型についての最適制御方法を、 V_r-t 座標で説明している。

3. 予測例

B, W, E, C-500 および T-150 に本方法を適用した結果、それぞれ図-3, -4 の掘削性能曲線が得られた。これら 2 つの機種仕様は、表-1 のごとくである。用いた数値は、次の通りである。

イ) C-500 旋回速度 V_r を作業半径 L_R (m) で除して、旋回角速度 ω_{rj} (rad/min) として用いる。

$(D, e, n, N_0, V_b, S_f, B, M) = (7.8m, 2, 10, 360KW, 0.5m^3, 1.3, 15m, 64)$, $(\omega_{r1}, \omega_{r2}, \omega_{r3}, \omega_{r4}, \omega_{r5}) = (0.492, 0.713, 1.018, 1.323, 1.668)$

ロ) T-150 C-500 と類似タイプであるが、小型。

$(D, e, n, N_0, V_b, S_f, B, M) = (4.4m, 2, 8, 110KW, 0.15m^3, 1.3, 13m, 72)$, $(\omega_{r1}, \omega_{r2}, \omega_{r3}, \omega_{r4}, \omega_{r5}) = (0.308, 0.554, 0.800, 1.046, 1.292)$

各機について、旋回時間の内に、速度切換に要する時間あるいはクローラの前進時間を全く含めない。

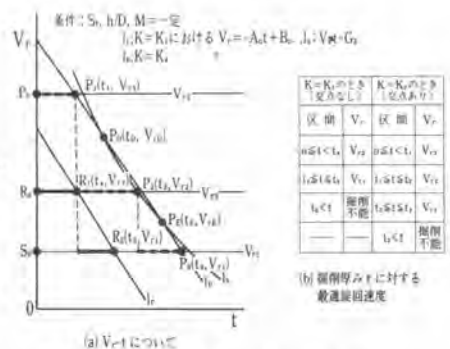


図-2 最適な制御方法の例

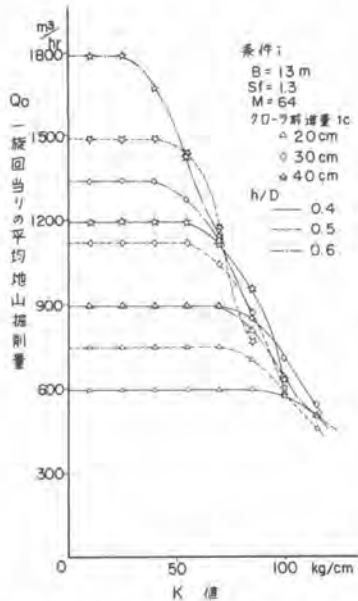


図-3 C-500の性能特性

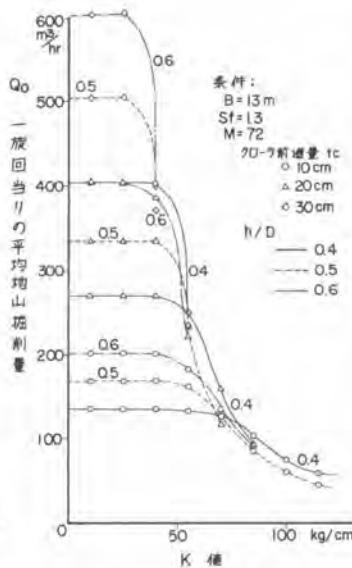


図-4 T-150の性能特性

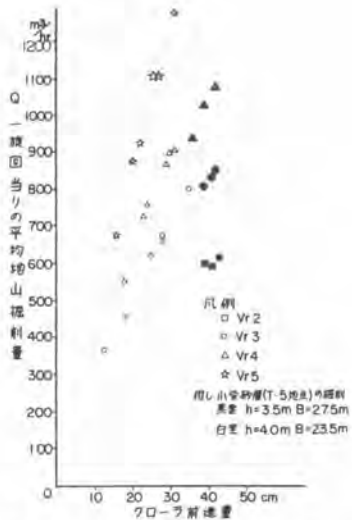


図-5 C-500の掘削実績

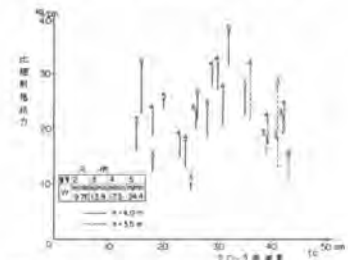


図-6 C-500のK値実測例

4. 実績調査と考察

B.W.E.C-500について、一巡回当りの平均地山掘削量 Q を調べまたホイール回転用の電動機への入力(KW)を計測してホイールドラム出力から、比掘削抵抗力(=K値)を換算した(図-5,図-6参照)。掘削対象土は、第三紀鮮新世に属する小柴砂層で、貝殻をかなり含有し、 $q_u > 10 \text{ kg/cm}^2$ である。また、シルト分からなる極めて硬い白色の薄層が挟在している。このため、電力のピークから算出したK値にバラツキが見られるが、ほぼ $K = 20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ で、少なくとも 40 kg/cm^2 以下であり、図-3から判断しても、K値が、掘削性能に影響する程の土質ではない。むしろ、地山の掘削幅 B が解析例より広く、 $K < 40 \text{ kg/cm}^2$ における B の最適値 2.56 m に近いこと、土量変化率 $S_f \approx 1.1$ と小さかったことにより、実績値が図-3の性能を上まわったものと推察される。この他、調査対象工事では、地山 1 m^2 を掘削し、さらに約 7 km の輸送をするのに、 $1 \sim 2 \text{ kWh}$ のエネルギーを要することがわかった。

5. 結語

C-500について予測した性能は、調査結果でも満足されるものであった。今後、簡便な試験方法により、あらかじめK値を推定する方法を開発していく必要がある。また、ドロップカット方式についての理論、土砂の積込動力を考慮した本方法も検討していく所存である。さいごに、実績で見られたように、B.W.E.工法は“省エネルギー”に則したもので、今後とも多くの採用が予想される。

参考文献

- 1) 青藤：バケットホイールエクスカベータの応用と問題点，日本機械学会第287回講習会教材，(1968)，pp. 27～36
- 2) 福任，後藤：シンガポール沿岸埋立工事，築工技術 Vol. 1, No. 4, (1968, 9), pp. 65～67
- 3) 和田：B.W.E.における掘削と運搬の力学，建設機械，Vol. 10, (1974)，pp. 89～99
- 4) 宇野：B.W.E. C-500型による掘削実験，コンストラクション，Vol. 10, No. 5, (1972)，pp. 15～22
- 5) 羽生田：バケットホイールエクスカベータの掘削性能について(その1)，大林建設研究所報，(1979)，pp. 111～115