ばら物用連続式荷役機械の動特性*

(第 2 報, 側面掘削時の掘削抵抗)

小林 和 宏^{*1}, 阿部 雅二朗^{*2}, 伊 藤 廣^{*2}

Dynamic Behavior of Continuous Bulk Handling Equipment (2nd Report, Digging Resistance in Side Cutting)

Kazuhiro KOBAYASHI, Masajiro ABE and Hiroshi ITO

For the design of continuous bulk handling equipment, it is important to estimate the digging resistance exactly especially in side cutting. In this report, the digging resistance of ore in side cutting has been studied from experiments using a full-scale testing machine. Then, both front digging resistance and lateral digging resistance were examined. The main conclusions obtained are as follows: (1) The front digging resistance is a function of the bulldozing area. (2) The lateral digging resistance is a function of the bulldozing area and side slip angle of the bucket. (3) Although the ratio of the lateral digging resistance to the front digging resistance for each average value is about 0.4, the ratio for each maximum value reaches about 0.7. These results should be considered in designing continuous bulk handling equipment.

Key Words: Dynamics of Machinery, Modelling, Materials Handling Equipment, Bulk Handling, Continuous Handling, Dynamic Behavior, Digging Resistance, Side Cutting, Bucket Path

1. 緒 言

ばら物用連続式荷役機械は、荷役効率が高く、自動化、環境対策が容易であり、石炭火力発電所等の専用岸壁で用いられている。著者らは、代表的なばら物用連続式荷役機械であるバケットエレベータ形連続式アンローダについて動特性を解明し、その成果をもとに機体の制御方法や構造部の最適設計に対する指針を示すことを目的とした研究を行っている^{(1)~(3)}。

バケットエレベータ形連続式アンローダの掘削方式には、正面掘削方式と側面掘削方式⁽⁴⁾がある。現在では、大形船に対して安定した荷役が行えることから、側面掘削方式が主流である。側面掘削中のバケットには、バケット進行方向とその上下方向に掘削抵抗が作用する。アンローダ設計時は、前者のバケット進行方向の掘削抵抗がバケットチェーン駆動力を決定するために特に重要となる。この掘削抵抗は、バケットチェーン走行方向に作用する正面掘削抵抗とそれに垂直な方向に作用する側面掘削抵抗に分けて検討される。こ

のような掘削抵抗に関する情報は、ばら物用連続式荷役機械の掘削装置を設計する際に不可欠であるが、実験による研究結果⁽⁵⁾⁽⁶⁾がいくつか報告されているにすぎない。また、これらの実験では実用上重要な側面掘削方式による実験結果は含まれておらず、連続式荷役機械の設計資料として十分ではない。

そこで、本論文では実機の設計時に有用な側面掘削時の掘削抵抗を明らかにするため、実機スケールの装置を設計、製作して行った鉄鉱石の側面掘削実験の結果を、掘削抵抗とバケット移動経路の關係に注目し考察する。

2. 実 験

2・1 掘削物および実験装置 掘削物には、代表的なばら物である鉄鉱石の粉鉱を用いた。図 1 にはその累積粒度分布を示す。約 50%が直径 0.25 mm 以下である。平均密度 $\bar{\rho}$ は $2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、内部摩擦角 μ は 40° であった。

図 2 には、実験で用いた実機スケールのバケットエレベータ形掘削試験装置の概観を示す。表 1 には本装置のおもな仕様を示す。図 2 において、 r はバケット旋回半径で、装置旋回中心から注目しているバケット前縁までの距離を意味する。 L_D は掘削部長さで前端

* 原稿受付 1996 年 9 月 5 日。

^{*1} 正員, 住友重機械工業(株) (〒792 新居浜市惣開町 5-2)。

^{*2} 正員, 長岡技術科学大学工学部 (〒940-21 長岡市上富岡町 1603-1)。

スプロケットと後端スプロケットの中心間距離である。 ℓ_d は前端スプロケット中心から注目しているバケット前縁までの距離、 L_p はバケット間隔、 H はばら物山高さである。この装置は、旋回フレーム、掘削フレーム、スプロケット、バケットチェーンおよび支柱から構成され、支柱以外の部分が、実機におけるバケットエレベータの掘削部分に相当する。掘削フレーム下に台形状にばら物を積み上げ、バケットチェーンの駆動動作と旋回フレームの旋回動作の組合せにより側面掘削する。バケットチェーンの駆動および旋回フレームの旋回は、交流モータで行われる。

図3には、バケットのほか掘削抵抗測定用にバケットとチェーンの間に設けたブラケットの詳細形状等を

示す。表2はバケットの寸法諸元である。バケットはブラケットを介して4本の支持ピンでチェーンと結合されている。バケットに作用する掘削抵抗は、図3の下部に示すようにひずみゲージをブラケットに貼付し、正面掘削抵抗と側面掘削抵抗に分けて測定される。各掘削抵抗の正方向は、図3に示す矢印方向とした。ブラケットに取付けたひずみゲージからの信号は、バケットの移動に応じて信号ケーブルを移動させることが難しいため、FM テレメータを介して記録し、A/D 変換後解析される。

2・2 側面掘削時のバケット移動経路 掘削抵抗の考察に際して、バケットの移動経路が重要であるので、実験装置の補足説明として側面掘削時のバケット移動経路について述べる。バケットチェーンによる側面掘削は複数のバケットにより行われる。側面掘削時において、ある一つのバケットが掘削する領域の形状は図4中に示す密なハッチングを施した湾曲したくさび形となる。この領域を以後、掘削領域と呼ぶ。図4中の h_d および b_d はそれぞれ掘削深さと掘削幅を表す。

Table 1 Main specifications of testing machine

Item		Value
Handling capacity	t/h	1000
Chain speed	$\dot{x}_c$ m/s	0.8
Slewing speed	$\dot{\theta}$ rad/s	0.008
Digging length	L_D m	8.0
Bucket pitch	L_P m	1.0

Fig. 1 Cumulative diameter distribution of ore used for experiment

Fig. 2 Testing machine

Table 2 Dimensional specifications of bucket

Item		Value
Inner volume	V_B m ³	0.16
Width	b m	0.82
Depth	d m	0.55
Front rake angle	α_f rad	0.24
Lateral rake angle	α_s rad	0.45

Fig. 3 Bucket and bracket

Fig. 4 Digging space of one bucket

Fig. 5 Path of one bucket

図5は一つのバケットに注目し、チェーン速度 $\dot{x}_c$ と装置旋回角速度 $\dot{\theta}$ を一定とした条件下での掘削中のバケット移動経路を示したものである。バケット移動経路は、バケット前縁線とバケット中心線の交点の移動経路としている。図5で $t=t_0$ はバケット前縁線が前端スプロケット中心直下を通過する時刻である。 $t=t_2$ はバケット前縁線が後端スプロケット中心直下を通過する時刻である。バケットは①～⑤の順に移動する。このようなバケット移動経路を表すために図5中に示すように横滑り角 β_s を定義すると、 β_s は次式によって求められる。

$$\tan \beta_s = \frac{r \dot{\theta}}{\dot{x}_c} \quad (1)$$

ここで、 r はバケット旋回半径である。図4に示した掘削幅 b_D は、式(1)より得られる β_s を用いて次式から求められる。

$$b_D = L_P \tan \beta_s \quad (2)$$

ここで、 L_P はバケット間隔である。

2.3 実験方法および条件 掘削する鉄鉱石を、パワーショベルを用いて掘削フレーム下に高さ約1～2mの台形上に積み上げた。掘削実験を行う前に、あらかじめ数回掘削を行い鉄鉱石山形状を整えた。掘

(a) Three kinds of state of a bucket

(b) Time history

Fig. 6 Example of time history of front digging resistance

削深さ h_D は、実機の運転状態を考慮して150～350 mmの範囲とし、旋回フレームを起伏させて調整した。 h_D は、注目しているバケットの掘削終了直後に試験装置を停止し、バケットによる掘削によって生成された面の高さと、掘削前の鉄鉱石山高さの差から確認した。チェーン速度 $\dot{x}_c$ 、装置旋回角速度 $\dot{\theta}$ は実機の運転状態およびバケットの仕様からそれぞれ0.8 m/s、0.008 rad/sとした。 $\dot{x}_c$ 、 $\dot{\theta}$ の目標値に対する変動幅はそれぞれ±数%以内であった。掘削実験は h_D を変えて20回行った。

3. 実験結果および考察

3.1 正面掘削抵抗 図6(b)に正面掘削抵抗 F_{Df} の時間変動の代表的な測定結果を示す。図6(a)にはこの測定結果を得たときにおける時間とバケットの位置および状態の関係を示す。 F_{Df} はバケットが前端スプロケット中心直下と後端スプロケット中心直下の間にある $t=0 \sim 10$ 秒における F_{Df} の最大値で無次元化している。なお、実機設計時には、この間バケットが掘削状態にあると想定されている。横軸の時刻はバケット前縁線が前端スプロケット中心直下にある $t_D=0$ の時刻を $t=0$ 秒としている。

F_{Dr} の値は、 $t=0\sim$ 約2秒の間、チェーンとスプロケットのかみあいによって発生する振動の影響を受けて変動する。 $t=$ 約2～約9秒の間、 F_{Dr} は掘削の進行を表す時間の進行に伴って増加する。 $t=$ 約9～約12秒の間、バケットは後端スプロケット回りにもち上げられ、バケットの状態は掘削状態から旋回フレームに沿って移動するもち上げ状態に遷移する。このとき、測定用ブラケットに作用する力は掘削抵抗からバケット自重とバケット内の掘削物重量による力となる。このようなバケット状態の遷移中は、バケット自重、バケット内の掘削物重量による力、掘削抵抗が不規則に作用し F_{Dr} の測定値は大きく変動する。 $t=$ 約12秒でバケットは掘削物から完全に離脱し、もち上げ状態となる。

図6(b)では便宜上 $t=0\sim 15$ 秒の測定値を F_{Dr} としている。しかし、以後の測定データの解析は、バケットがスプロケットとチェーンのかみあいによる振動の影響等を受けない外乱のない掘削状態にあるとみなせる図6における $t=2\sim 9$ 秒に相当する時間領域の測定データを基に行う。

図7には、ある一つのバケットによる鉄鉱石の掘削状況観察結果の模式図を示す。図4に示した掘削領域内の鉄鉱石は掘削され、一部はバケット内部に入り充てんされるが、残りはバケット刃先前方に滞積する。バケットが前述したような外乱のない掘削状態にあるとき、バケット内に充てんされる鉄鉱石は、全体として図7に示すような高さ h_D 、幅 b_D 、奥行き d のほぼ直方体形状となる。 A_B は、バケット内に充てんされた鉄鉱石がバケット刃先前方に滞積する鉄鉱石山と接する面である押し退け面の面積を表す。図7中の鉄鉱石前縁線とは、バケット刃先前方に滞積した鉄鉱石山に外接する曲面と、注目しているバケットより先行し

たバケットの掘削によって形成された平面との交線である。

図8は、バケット内に鉄鉱石が充てんされるようすを観察し明らかになった図7に示した鉄鉱石前縁線の移動するようすを示したものである。バケット内に入る鉄鉱石は、装置旋回方向のバケット側板側から順に充てんされていく。バケット内に充てんされた鉄鉱石、バケット刃先前方に滞積する鉄鉱石いずれの量もバケットの移動とともに増加する。ただし、バケット内に充てんされた鉄鉱石の体積がバケット定格容積に達する満載状態になると両者ともほぼ一定量となった。

ばら物用連続式荷役機械のバケットは、図2に示した $\ell_D=L_D$ で満載状態なるように設計されている。また、掘削状況の観察結果から、鉄鉱石は図7のような近似形状で充てんされる。したがって、掘削開始時におけるバケット内が空載状態である $\ell_D=0$ から満載状態に至る $\ell_D=L_D$ まで、 A_B は次式によって求められる。

$$A_B = \frac{1}{d} \eta_B h_D \int_0^{\ell_D} b_D d\ell_D \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 η_B は充てん効率であり、掘削された鉄鉱石の内バケット内に充てんされる鉄鉱石の体積割合である。本報では、実験時の観察の結果、バケット内に充てんされる鉄鉱石の体積とバケット刃先前方に滞積している鉄鉱石の体積がほぼ等しかったことから $\eta_B=0.5$ で一定として扱う。掘削幅 b_D は式(2)より得られる。掘削深さ h_D は2・3節に示したような測定結果より、奥行き d はバケット形状よりそれぞれ定まる一定値である。

図9は、掘削中のバケットに作用する各種抵抗の水平分力図である。バケットを沿直上方より見ている。掘削中のバケットには、(a)押し退け面に押されて掘削領域内部が滑ることによって生じる切削抵抗 F_c 、(b)バケット刃先前方に滞積した鉄鉱石を押し出すと

Fig. 7 Approximated outer shape of ore filled into a bucket

Fig. 8 Movement of the front line of ore being bulldozed

Fig. 9 Resistances acting on a bucket in digging

き、滞積した鉄鉱石山と直前のバケットの掘削によって生成された平面間の摩擦によって生じる排出抵抗 F_e 、(c)バケット刃先が鉄鉱石山に貫入する際に生じる貫入抵抗 F_p が作用すると考えられる。図9(a)の掘削領域に生じる滑り面について、実験時観察結果から滑り面発生による掘削領域の破壊形態は金属切削の流れ形に類似していた。また、掘削深さ h_D は掘削幅 b_D に対して十分大きいとき、鉛直軸に垂直な任意の断面における鉄鉱石の流れ状態はほぼ同一と見なされた。これらのことより、二次元切削理論⁽⁶⁾を適用すると、図9(a)に示すように滑り面とバケット側板の掘削によって生成される面との成す角は鉄鉱石の内部摩擦角 μ となる。 F_C 、 F_e 、 F_p のチェーン走行方向成分をそれぞれ F_{Cf} 、 F_{ef} 、 F_{pf} とすると、正面掘削抵抗 F_{Df} はこれらの和と考えられ、次式より求められる。

$$F_{Df} = F_{Cf} + F_{ef} + F_{pf} \quad (4)$$

村山⁽⁷⁾は、砂質土を平板によって水平に直線切削する試験を行い、平板進行方向に作用する抵抗が平板の進行方向投影面積に比例することを示している。連続式荷役機械が扱う石炭や鉄鉱石は、粘着力が小さいことから、切削抵抗 F_C に関しては、砂質土に近い特性を示し、村山が求めた平板進行方向に作用する抵抗は前述の F_{Cf} に相当すると考えられる。また、図4に示した $b_D h_D$ で求められる面積が、砂質土の切削試験における平板投影面積に相当すると考えられる。したがって、 F_{Cf} は、式(2)を考慮すれば次式より求められる。

$$F_{Cf} = C_C L_P h_D \tan \beta_s \quad (5)$$

ここで、 C_C は切削抵抗係数、 L_P はバケット間隔、 h_D は掘削深さである。

排出抵抗 F_e は、バケット刃先前方に滞積している鉄鉱石山重量 W_B と鉄鉱石の内部摩擦角 μ を用いて次式で表される。

$$F_e = W_B \tan \mu \quad (6)$$

バケット刃先前方に滞積している鉄鉱石山が、掘削

領域内部に生じる滑り面と同じ方向に移動すると考え、 $W_B = \bar{\rho} d(1 - \eta_B) A_B g$ であること、および図9(b)を考慮すれば F_{ef} は次式より計算される。

$$F_{ef} = C_e A_B \cos(\mu - \beta_s) \quad (7)$$

ここで、 C_e は排出抵抗係数であり、次式で表される。

$$C_e = \bar{\rho} d(1 - \eta_B) g \tan \mu \quad (8)$$

Ludwig⁽⁸⁾は、バケットホイールエキスカベータに関する研究を行い、石炭等のばら物掘削時にバケットホイールに取付けられたバケットに作用する掘削抵抗がバケット刃長さに比例することを示している。バケットホイールに取付けられているバケットは鉛直な円の周上を移動する。掘削領域の掘削物はバケット内に充てんされ、バケット刃先前方にほとんど滞積しないことから F_e は零と考えられる。また、バケット内の掘削物はバケット背板に沿って充てんされバケットチェーンの場合の押し退け面に相当する面が構成されないため、 F_C はほぼ零とみなされる。したがって、バケットホイールに取付けられたバケットに作用する掘削抵抗は、前述の貫入抵抗 F_p に相当すると考えられる。 F_p のチェーン走行方向成分 F_{pf} は図9(c)を考慮し、次式によって求められる。

$$F_{pf} = C_P L_C \cos \beta_s \quad (9)$$

ここで、 C_P は貫入抵抗係数である。 L_C は、バケットチェーンによる側面掘削時においてバケットホイールの場合のバケット刃長さに相当する値であり、次式によって近似的に求められる。

$$L_C = h_D + b_D^* \quad (10)$$

以上より、正面掘削抵抗 F_{Df} は、式(4)に式(5)、(7)、(9)を代入することによって得られる。本掘削実験における β_s の範囲が、0.05~0.11 rad であったことから、 $\cos \beta_s \approx 1$ 、 $\sin \beta_s \approx \beta_s$ および $\cos(\mu - \beta_s) \approx \cos \mu$ と近似し、掘削中の h_D を一定とし、 A_B について整理すると F_{Df} を求める式は次のようになる。

$$F_{Df} = C_{AB} A_B + C_C L_P h_D \beta_s + C_P h_D \quad (11)$$

ここで、 C_{AB} は押し退け面積係数であり、次式で表さ

Fig. 10 Relationship between F_{Df} and A_B

れる。

$$C_{AB} = C_e \cos \mu + \frac{C_P}{h_D} \dots\dots\dots (12)$$

式(11)において、変数は A_B と β_s である。図10は、正面掘削抵抗 F_{Df} との相関の強さが予想される押し退け面積 A_B に注目し、 F_{Df} と A_B の関係を示したものである。太い実線は20回の掘削実験から求めた F_{Df} の平均値を表す。破線で囲まれたハッチング領域は、20回の掘削実験から求めた F_{Df} のばらつきを、平均値を中心とした標準偏差の範囲によって示したものである。

図10より掘削装置設計上あまり重要でない掘削初期状態である $A_B \leq 0.13$ の領域を除けば、 F_{Df} と A_B の関係はほぼ原点を通る直線で表せる。つまり、式(11)の右辺第2項と第3項の影響は少なく、その和はほぼ無視できるといえる。したがって、実用上 F_{Df} は、次式で近似して問題はないと考えられる。

$$F_{Df} = C_{AB} A_B \dots\dots\dots (13)$$

なお、 $A_B = 0.13$ は、バケット満載状態において式(3)から求められる A_B の値の約30%に相当する。また、 F_{Df} のばらつきは、鉄鉱石山の締めり具合が一樣でないことがおもな原因と考えられる。

20回行った実験結果より得られた式(13)の C_{AB} の値は $8.1 \sim 19.5 \text{ kN/m}^2$ の範囲であり、平均値は 13.8 kN/m^2 であった。図10の原点を通る細い実線は、この平均値に対する線である。

3.2 側面掘削抵抗 図11に側面掘削抵抗 F_{Ds} の時間変動の代表的な測定結果を示す。 F_{Ds} は、正面掘削抵抗 F_{Df} の場合と同様に $t = 0 \sim 10$ 秒の最大値で無次元化している。バケット前縁線が前端スプロケット中心直下にある $\ell_D = 0$ となる時刻を $t = 0$ としている。データを得たときのバケットの位置および状態と時間の関係は、図6に示したとおりである。

バケットがスプロケットとチェーンのかみ合いの影響等を受けない外乱のない掘削状態にあるとき、 F_{Ds}

Fig. 11 Example of time history of lateral digging resistance

は $t = \text{約} 2 \sim 6$ 秒の間は図3に示した正方向に作用し、 $t = \text{約} 6$ 秒以降は負方向に作用した。この F_{Ds} の作用方向が反転する現象は20回行ったどの掘削実験でも見られた。掘削中のバケットの側面方向に作用する力 F_{Ds} は、図9に示した切削抵抗 F_C 、排出抵抗 F_e および貫入抵抗 F_P それぞれの側面方向成分の総和であると考えられ、次式で表される。

$$F_{Ds} = F_{Cs} - F_{es} + F_{Ps} \dots\dots\dots (14)$$

掘削開始時は、バケット刃先前方に滞積する鉄鉱石が少ないため、切削抵抗の成分と貫入抵抗の成分の和 $F_{Cs} + F_{Ps}$ のほうが排出抵抗の成分 F_{es} より大きいと考えられる。しかし、掘削の進行によりバケット刃先前方に滞積する鉄鉱石が増加すると、 F_{es} は増加してくる。一方、掘削の進行により b_D と β_s が減少するので $F_{Cs} + F_{Ps}$ は F_{es} に対して相対的に小さくなる。このような掘削の進行による F_{es} と $F_{Cs} + F_{Ps}$ の大小関係の変化によって F_{Ds} の作用方向が反転する現象が生じると考えられる。

F_{Cs} は F_{Cf} の計算式を導出する際に述べた考えによって、二次元切削理論⁶⁾に基づき描かれた図9(a)および式(5)より次式によって求められる。

$$F_{Cs} = C_C L_P h_D \tan \beta_s \tan (\mu - \beta_s) \dots\dots\dots (15)$$

同様に、排出および貫入抵抗の正面方向分力の計算式(7)、(9)と図9より、排出および貫入抵抗の側面方向分力 F_{es} 、 F_{Ps} はそれぞれ次式から求められる。

$$F_{es} = C_e A_B \sin (\mu - \beta_s) \dots\dots\dots (16)$$

$$F_{Ps} = C_P L_C \sin \beta_s \dots\dots\dots (17)$$

側面掘削抵抗 F_{Ds} は、式(14)に上記の式(15)～(17)を代入し、本掘削実験で β_s の範囲が $0.05 \sim 0.11 \text{ rad}$ であったことから、 $\tan \beta_s \approx \beta_s$ 、 $\sin (\mu - \beta_s) \approx \sin \mu$ と近似すると次式より計算される。

$$F_{Ds} = (C_P h_D + C_{AB} A_B - C_e A_B \cos \mu) \beta_s - \left(C_{AB} A_B - C_C L_P h_D \beta_s - \frac{C_P}{h_D} A_B \right) \tan \mu \dots\dots\dots (18)$$

Fig. 12 Relationship between F_{DS}/A_B and β_s

ここで、正面掘削抵抗の解析に際して、図10および式(13)より明らかになった $A_B \geq 0.13$ の範囲では $C_{CLP}\beta_s h_D + C_{PhD} \ll C_{AB}A_B$ といえたことを考慮する。 $A_B \geq 0.13$ の範囲では、式(18)右辺第1項について $C_{AB}A_B$ に対して C_{PhD} を無視できる。また、右辺第2項について $C_{AB}A_B$ に対して $C_{CLP}h_D\beta_s$ を無視できる。したがって、式(18)は次式で近似される。

$$F_{DS} = A_B(C_{DS1}\beta_s - C_{DS2}) \quad \dots\dots\dots (19)$$

なお、 $C_{DS1} = C_{AB} - C_e \cos \mu$ 、 $C_{DS2} = (C_{AB} - C_P/h_D) \tan \mu$ なる定数で整理している。

図12は、式(19)が妥当なことを確認するため単位押し退け面積当たりの側面掘削抵抗 F_{DS}/A_B と横滑り角 β_s の関係を示したものである。 $\beta_s = 0.10 \sim 0.11$ radの間が掘削開始時であり、 $\beta_s = 0.05 \sim 0.06$ radの間が掘削終了時である。20回の掘削実験における F_{DS}/A_B の平均値を実線で示し、 F_{DS}/A_B の標準偏差を破線で示している。図12より設計上重要な $\beta_s = 0.06 \sim 0.10$ radの範囲において、 F_{DS}/A_B の平均値は掘削の進行を意味する β_s の減少に対してほぼ直線的に減少する。このことから、式(19)は妥当であると考えられる。

$\beta_s =$ 約 $0.105 \sim 0.11$ radの間で、 F_{DS}/A_B の標準偏差が大きくなっているのは、この間が掘削の開始時期であり、バケット刃先が初めて鉄鉱石山に接触し貫入する際の不規則に作用する衝撃的な荷重の影響がおもな原因と考えられる。 $\beta_s =$ 約 $0.05 \sim 0.10$ radの間のほぼ一定な F_{DS}/A_B のばらつきは、鉄鉱石山の締固め具合が一定でないことがおもな原因と考えられる。

本実験で得られたデータを式(19)で整理すると、 $C_{DS1} = 601.1$ kN/m²rad、 $C_{DS2} = 41.5$ kN/m²となった。表3には本実験で得られたデータを式(13)、(19)で整理して求めた C_{AB} 、 C_{DS1} および C_{DS2} の各値をまとめて示し、参考のため、実機における石炭荷役時の測定結果から求めた各係数の値を併記する。掘削物の平均密度 $\bar{\rho}$ 、内部摩擦角 μ が大きいほど各係数は大きくなる傾向が見られる。しかし、 C_{AB} 、 C_{DS1} および C_{DS2} と

Table 3 Values of C_{AB} 、 C_{DS1} and C_{DS2}

Material	$\bar{\rho}$ kg/m ³	μ deg	C_{AB} kN/m ²	C_{DS1} kN/m ² rad	C_{DS2} kN/m ²
Ore	2.8	40	13.8	601.1	41.5
Coal	0.8	35	5.7	157.7	3.9

Fig. 13 Frequency distribution of F_{DS}/F_{DF} Fig. 14 Frequency distribution of F_{DSmax}/F_{DFmax}

掘削物の密度や物性値との関係は、今後さらに検討する必要がある。

3・3 正面掘削抵抗と側面掘削抵抗の関係 従来の設計資料⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾では、まず、各バケットに作用する正面掘削抵抗の総和をバケットチェーンの駆動力等から求め、側面掘削抵抗の総和は、正面掘削抵抗の0.3倍として見積もるよう定めている。これにより各バケットに作用する掘削抵抗の平均値は計算できるが、各バケットの掘削抵抗分担率が不明なため、設計上重要な掘削抵抗の最大値を知ることはできない。

ばら物用連続式荷役機械では、長時間の連続運転によるバケットの疲労破壊が問題となることが多い。バケットの疲労強度を検討する際、基本となる荷重振幅は、一つのバケットが図2の $\ell_D = 0 \sim L_D$ を移動する間の掘削抵抗の最大値と最小値より得られる。最小値は、正面掘削抵抗では0、側面掘削抵抗ではその大きさは最大値とほぼ等しいと見て問題はない。したがって、疲労強度設計の観点からも掘削抵抗の最大値を把握することが重要となる。

実測しやすい正面掘削抵抗から、側面掘削抵抗を見積もる際に、従来の設計資料どおりでよいかどうか調べるため、正面掘削抵抗と側面掘削抵抗の比について平均値と上述した理由により最大値に関して検討し

た。

正面掘削抵抗の平均値 $\bar{F}_{Df}$ および側面掘削抵抗の平均値 $\bar{F}_{Ds}$ は次式より求めた。

$$\left\{ \frac{\bar{F}_{Df}}{\bar{F}_{Ds}} \right\} = \frac{1}{L_{DE}} \int \left\{ \frac{F_{Df}}{F_{Ds}} \right\} d\ell_D \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 L_{DE} は外乱のない掘削状態でのバケット掘削長さである。積分は、バケットが外乱のない掘削状態にある範囲について行った。

図13には20回の実験に対する $\bar{F}_{Ds}$ と $\bar{F}_{Df}$ の比に関する頻度分布を示す。 $\bar{F}_{Ds}/\bar{F}_{Df}$ は0.3~0.5となることが多く、従来から用いられている設計資料の値とほぼ一致するが多少大きめである。図14は、正面掘削抵抗と側面掘削抵抗の最大値の比に関する頻度分布である。両者の比は0.7を中心に分布している。図13, 14の結果は、図2の $\ell_D=0$ における β_s が約0.11 radの場合であるが、 β_s が大きくなると $\bar{F}_{Ds}/\bar{F}_{Df}$ および F_{DSMAX}/F_{DFMAX} の値は、いずれもさらに大きくなると考えられ、バケット移動経路依存性も十分考慮しなければならない。

以上より、従来の設計資料どおりでは、バケットに作用する側面掘削抵抗を過小評価する場合があるといえる。

4. 結 言

ばら物用連続式荷役機械において従来未知であった側面掘削中のバケットに作用する掘削抵抗とバケット移動経路の関係を、実機スケールの実験装置を用いた実験により明らかにした。本論文で得られたおもな知見をまとめると次のようになる。

- (1) 正面掘削抵抗は、バケットの移動とともに増加し、押し退け面積 A_B の関数で表される。
- (2) 側面掘削抵抗は、バケットの移動により作用

方向が変化し、押し退け面積 A_B と横滑り角 β_s の関数で表される。

- (3) 側面掘削抵抗 F_{Ds} の正面掘削抵抗 F_{Df} に対する比は、最大値の比で考えると約0.7と大きく、一般に用いられている設計資料の値0.3と異なる。

(1)~(3)の結果よりバケット設計時には、掘削抵抗のバケット移動経路依存性ととともに、その大きさに十分注意する必要がある。

今後、本研究より得られたバケット移動経路と掘削抵抗の関係をもとに荷役作業中の機体挙動について検討し、ばら物用連続式荷役機械の動特性をさらに解明していく予定である。

文 献

- (1) 小林和宏・阿部雅二郎・伊藤廣、ばら物用連続式荷役機械の動特性(第1報、掘削抵抗の理論的研究)、機論、**60**・578, C(1994), 2561-2568.
- (2) 小林和宏・阿部雅二郎・伊藤廣、バケットチェーンのバケットに生じる掘削抵抗、第70期通常総会講演、**4**(1993), 753-142.
- (3) 小林和宏・阿部雅二郎・伊藤廣、バケットチェーンによる側面掘削時の掘削抵抗、第3回交通・物流部門大会講演、(1994), 139-142.
- (4) 日本機械学会編、機械工学便覧C3、(1989), 33.
- (5) 三島庸生・別府和夫、ラダーエキスカベータによる掘削について、四国機械技報、**3**-3(1951), 1-12.
- (6) たとえば、白樫、切削理論の現状と実用性(1)、機械の研究、**44**-9(1992), 31, 養賢堂.
- (7) 村山朔郎・島昭治郎、土の切削抵抗について、土木学会誌、**40**-3(1995), 94-100.
- (8) Ludwig, E. H., *Origin and development of the bucket wheel excavator*, (1975), 67-86, Trans Tech Publications.
- (9) 日本機械学会編、機械工学便覧C3、(1989), 173.
- (10) ISO 5049/1, *Mobile continuous bulk handling equipment-Part1: Rules for the design of structures*, (1980), 3.