

知能化ホイールローダの実現を目指した鉱石すくい取り作業時の抵抗力解析

Analysis on the Resistive Forces in the Scooping Task of Fragment Rocks for Intelligent Loaders

正 高橋 弘 (東北大)

Hiroshi TAKAHASHI, Tohoku University, Aoba01, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579

In order to automate the scooping task by the wheel loader, it is desirable that the resistive forces acting on the bucket are obtained before the scooping is performed. The objective of this study is to derive theoretically the resistive forces acting on the bucket during scooping of piled rock fragments. First, the changes in the shape of the rock pile due to the lifting of the bucket are modeled. Based on this model, the resistive forces acting on the bucket are considered theoretically. Finally, it is confirmed that the calculated results obtained using the model agree well with the experimental results.

Key Words : Resistive Force, Wheel Loader, Scooping, Piled Fragment Rocks

1. はじめに

資源開発現場における熟練オペレータの減少、作業員の負担軽減あるいは2次災害の危険性のある復旧現場における作業員の安全確保等の問題点を解決するため、各種作業機械のロボット化技術が開発されつつある。しかし、発破直後の破砕堆積物の積み込み等を行うホイールローダあるいはLHD (Load-Haul-Dump) の作業の自動化に関しては、ナビゲーションシステムに関してはいくつか検討例が見られるものの¹⁾、積み込み作業に関しては作業の対象物である破砕堆積物の形状や堆積量が作業の進展とともに変化することから、ロボット化・知能化のための研究例が少ないのが現状である。

ところで、ホイールローダあるいはLHDによる積み込み作業をロボット化・知能化する場合、「すくい取り作業が順調に進んでいるかどうか」、「大岩等に衝突して危険な状態にないか」あるいは「バケットには土砂・鉱石等が十分に入っているかどうか」等の判断を機械が自律的に行う必要があり、そのためには作業中の掘削抵抗力を計測するとともに、作業が順調に行われている場合の理論的抵抗力を予め把握しておく必要がある。

そこで、本研究ではホイールローダあるいはLHDの機能の1つであるすくい取り作業を取り上げ、バケットに作用する抵抗力について理論的および実験的に検討することを目的とする。

2. 可視化実験

バケットが破砕堆積物内を運動する場合、破砕堆積物内部に破断面が生じる。この破断面の位置により掘削抵抗力は大きく変化することから、破断面の位置の把握は非常に重要な問題である。そこで、掘削抵抗力の理論的解析に先立ち、初めに破砕堆積物内部の破断面の位置を把握する目的で、バケットの運動に伴う破砕堆積物変形過程の可視化実験を行った。可視化実験では、破砕堆積物を構成する全粒子の数%の粒子を白色に着色し、バケットの運動に伴う白色粒子の移動軌跡をXY座標系で追跡した。実験結果の一例を図1に示す。この図より、白色粒子の軌跡は、1)バケットの動きに伴い上昇する部分(実線)、2)バケット下部に下降する部分(点線)および3)ほとんど動きの無い部分の3つの部分に大別されることが分かる。

3. 破砕堆積物変形過程のモデリングおよび抵抗力の算出

図1よりバケットの上昇によって、破砕堆積物内部には

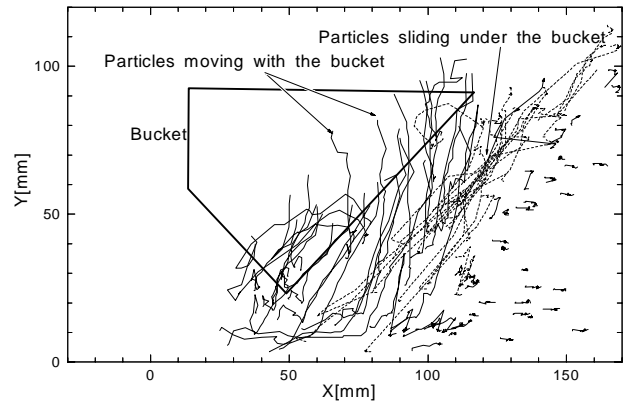


Fig.1 Trajectories of tracer particles in the rock pile

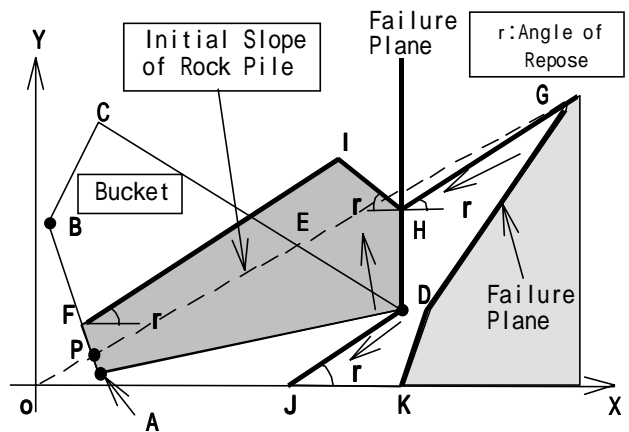


Fig.2 Modeling of the change in shape of the rock pile

図2に示すような2つの破断面が生じていると推定できる。ここに、「AFIHD部分はバケットの動きに伴い上昇する部分」、「JDHGK部分はバケットの下部に下降する部分」、「GDK破断面より右側はほとんど動きの無い部分」である。

すくい取り作業時にバケットに作用する抵抗力は、図2の結果を基にすると図3のように考えられる²⁾。

f_1 : すくい取られた土砂に働く重力。この力は重心に作用するものとみなす

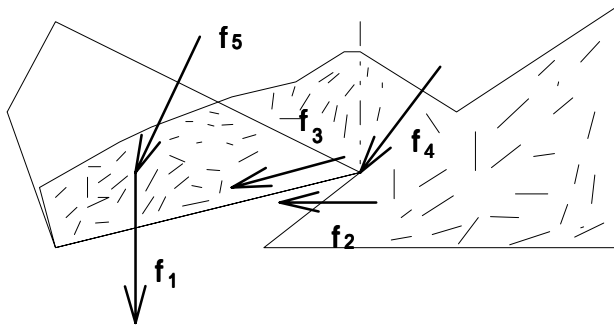


Fig.3 Forces acting the bucket

- f_2 : バケットがすくい取り対象外の土砂を排土、圧縮、移動に要する力。これは、バケットの移動軌跡によっては0とすることができる。
- f_3 : バケットと粒子との間の摩擦力
- f_4 : カuttingエッジに働く力(切削抵抗)
- f_5 : バケット内およびバケット上に存在する土砂を移動させるための力。この力はバケットが定常運動をする場合は、ほぼ0となる。

バケットに作用するX方向およびY方向の抵抗力は、それぞれ次式で表される。

$$F_x = F_{3x} + F_{4x} \quad (1)$$

$$F_y = F_1 + F_{3y} + F_{4y} \quad (2)$$

F_1 は以下のように表される。

$$F_1 = S \cdot B \cdot \rho \cdot (1 - \varepsilon) + W_b \quad (3)$$

$$S = D_x^2 \times \tan \phi / 2 - a(D_x - d)^3 / 3 - (\tan \phi \times D_x - H_y)(D_x - N_x) / 2 \quad (4)$$

B : バケットの幅, ρ : 粒子の密度, ε : 空隙率, W_b : バケットの重量, アルファベットの大文字は各点の座標, 添字 x および y はX方向およびY方向を示す。

F_3 は、粒子・土砂の土圧による力とバケットとの間の摩擦を考えることにより算出されるが、式が煩雑であるため、ここでは紙面の都合上、詳細は省略する。

F_4 は次式のように表される。

$$F_{4x} = (F_{TT} + 2F_{ST}) \cos \delta \quad (5)$$

$$F_{4y} = (F_{TT} + 2F_{ST}) \sin \delta \quad (6)$$

a) バケットの底面について

$$F_{TT} = F_T \times \cos(\delta - \theta) \quad (7)$$

$$F_T = \frac{W_T}{\sin(\theta - \phi_k)} \quad (8)$$

$$W_T = \frac{P \cdot B \cdot ds}{\cos \phi_k} \quad (9)$$

$$P = \rho(1 - \varepsilon)(H_y - D_y) \quad (10)$$

b) バケットの側面について

$$F_{ST} = F_S \cdot \cos \theta \cos(\delta - \omega) \quad (11)$$

$$F_S = \frac{W_S}{\sin(\theta - \phi_k)} \quad (12)$$

$$W_S = \int_0^{(E_y - D_y)} \frac{1}{\tan(\phi - \omega)} P_a \cdot ds \cdot dx \quad (13)$$

$$= \rho(1 - \varepsilon) ds / 2 (\tan \phi - \tan[\phi - \omega]) \frac{(E_y - D_y)^2}{\tan^2(\phi - \omega)}$$

$$P_a = \rho(1 - \varepsilon)(\tan \phi + \tan[\phi - \omega]) \quad (14)$$

ϕ_k : 内部摩擦角, θ : 点Dにおける接線の傾き, δ : バケットの傾斜角, ω : バケットの先端と粒子中心を結ぶ線が水平方

向となす角度であり、これは未知のパラメータである。

4. 抵抗力の測定および計算値との比較検討

図4にバケットに作用する抵抗力の結果の一例を示した。図の横軸はバケットの貫入距離Xをバケット底面の長さLで除して無次元化した値を示している。

X方向の抵抗力は、バケットが破碎堆積物に貫入するに伴い徐々に増加する。バケットが上昇すると抵抗力は大きく増加するが、すぐにピークを示し、その後はXの増加とともに減少し、作業終了時にはほぼ0となっている。

Y方向の抵抗力は、バケット貫入時はほぼ0であり、バケットの上昇とともに増大するが、X方向の抵抗力と同様にピークを示した後減少し、作業終了時にはバケットおよびすくい取られた粒子の重量にほぼ等しくなっている。

図中の太線は本研究で提案したモデルによる計算値を示している。実験値と計算値とはほぼ一致していることが分かる。なお、パラメータは実験値を基に逆算して求めた。その結果、 ω の値としては粒子の内部摩擦角より2~3度大きな値を採用すれば良いことが確かめられた。

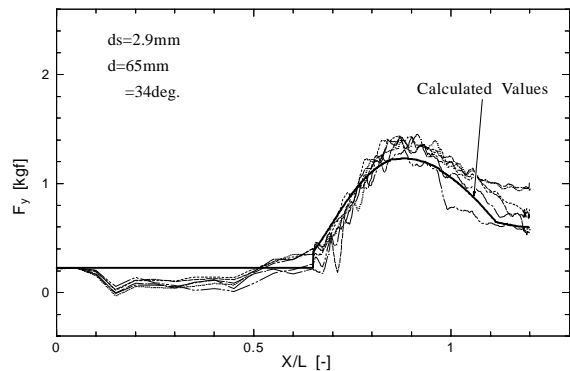
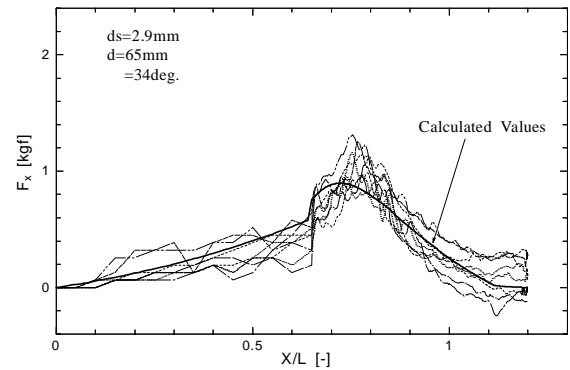


Fig.4 An example of the resistive forces acting on the bucket

5. むすび

本研究では、ホイールローダによる積み込み作業の知能化を実現するために、バケットに作用する抵抗力について理論的および実験的に検討した。今後は、更なるデータの収集および実機によるモデルの検証が期待される。

参考文献

- 1) M.St-Amant et al.: Proc. of 1st Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp.6/1-6/10, 1991.
- 2) A. Hemami: Proc. of 2nd Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp.415-424, 1993.