

論文

鉤石のすくい取り作業時におけるバケットに作用する
抵抗力の個別要素法解析

高橋 弘*

Analysis on the Resistive Forces acting on the Bucket in the Scooping
Task of Piled Fragment Rocks by Use of Distinct Element Method

by

Hiroshi TAKAHASHI†

In order to automate the scooping task of piled fragment rocks by using the wheel loader or Load-Haul-Dump, it is desirable that the resistive forces acting on the bucket are obtained before the scooping task is performed. However, the resistive forces acting on the bucket are not made clear yet because the changes in shape of the rock pile due to the movement of the bucket are unknown. In this paper, the changes in shape of the rock pile due to the movement of the bucket were simulated by use of DEM (Distinct Element Method), and the resistive forces acting on the bucket were calculated. Through the numerical simulation, the changes in shape of the rock pile due to the movement of the bucket were made clear. Furthermore, by comparing the experimental results and simulated results, it was found that the agreement was almost satisfactory. Therefore, it was confirmed that DEM simulation was useful to estimate the resistive forces acting on the bucket.

Key Words : Distinct Element Method, Resistive forces, Rock pile, Wheel Loader, LHD

1. はじめに

資源開発現場における基本的な作業の1つに岩盤の掘削および鉤石の積み込み・運搬がある。この作業では一般に粉塵が多量に舞うことが多く、また地下環境

ではガスおよび湧水の問題ならびに高温・多湿など作業環境は作業員にとって決して快適な環境とは言えず、さらに大深度地下などのいわゆる極限環境下では、人間が立ち入ることさえ困難な場合も存在する。従って、作業員の安全を確保し、かつ作業の効率を向上させるために資源開発現場へのロボットの導入が試みられている¹⁾。

近年、様々な分野において産業用ロボットが使用され、人員の削減、作業能率の向上および生産性向上の面で大きく貢献している²⁾。しかしながら、資源開発

平成11年1月20日受付

* 東北大学大学院工学研究科地球工学専攻

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01

† Department of Geoscience and Technology, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai

980-8579

の分野ではロボットの導入が他の分野より遅れているのが現状である。これは、資源開発現場では自然界を対象とし、かつ作業環境が常に変化するためであると言われている³⁾。従って、今後、これらの現場に導入されるロボットには外界の状況を自ら検知・判断し、作業を行う機能を具備することが必要である。

ところで、上述の基本的な作業の1つである積み込み作業では、一般にホイールローダなどの積み込み機械が使用される。積み込み機械の走行に関しては、既に自動化の研究が数多く行われ、優れた成果が公表されている⁴⁾⁻⁶⁾。しかしながら、積み込み機械の最も重要な機能であると考えられる積み込みおよび荷降ろしに関しては、自動化に関する研究がほとんど行われていないのが現状である。

この積み込み作業を自動化するためには、バケットに作用する抵抗力が予め把握されていることが望ましい。しかしながら機械の対象物が粒状体であり、かつ岩石個々の形状・大きさが一定でないため、その挙動の解析が難しく、その結果、掘削にともなう堆積物内部の変化状況など解明されていない点が多いことから、バケットに作用する抵抗力の理論的研究が非常に少ないのが現状である。

そこで本研究では、バケットに作用する抵抗力を定式化する際の一助とすることを目的として、個別要素法⁷⁾ (Distinct Element Method: DEM) を用いて数値シミュレーションによりバケットによるすくい取り作業における破碎堆積物 (以下、ざり山と記す) の挙動について検討するとともに、バケットに作用する抵抗力をシミュレートする。なお、実際のすくい取り作業は3次元であるが、ローダのリンク機構などは2次元で解析されることが多いことから、ここでは計算を簡略化するため2次元モデルを仮定し、数値シミュレーションを行う。

2. DEM による計算の原理

DEMは個々の要素ごとに運動方程式をたて、粒状体の解析を行う方法である。運動方程式をたてるためには要素間に働く力を評価しなければならない。そこで要素間の力を評価するために図1に示すようなモデルを仮定する。2次元の解析を考える場合、DEMでは要素を円で仮定し、要素の大きさは円の半径で評価する。要素と要素の接触時には、法線方向 (添字 n で

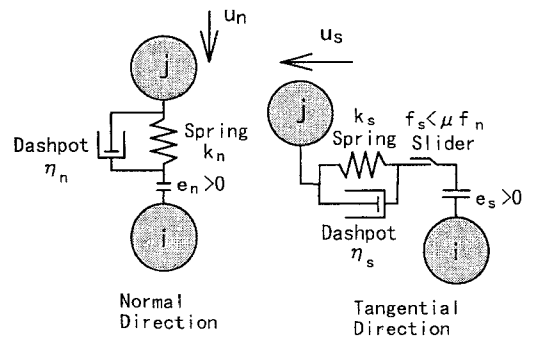


Fig. 1 Schematic diagram of the element model in DEM simulation

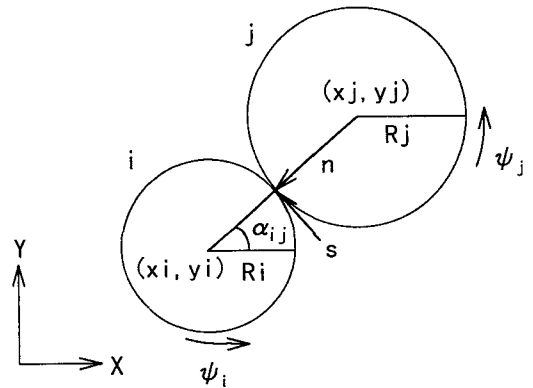


Fig. 2 Schematic diagram of the contact model in DEM simulation

表す) および接線方向 (添字 s で表す) にそれぞれ弾性を表すスプリング (バネ定数 k) と粘性減衰を表すダッシュポット (粘性係数 η) を仮定し、さらに、接線方向には摩擦を考慮するためのスライダを設ける。なお、図中の e および u は、要素間に働くスプリングによる力および要素の変位を示す。

今、粒状体のある要素について考える。この要素の重心の位置座標を (x, y) 、回転を ϕ とし、全ての接触力および物体力の合力を (F_x, F_y) 、全ての接触力によるモーメントを M とすると、要素の運動方程式は次式で与えられる。

$$F_x = m\ddot{x}, F_y = m\ddot{y}, M = I\ddot{\phi} \quad (1)$$

次に、図2に示すような円形要素の接触について考える。2つの要素が接触しているか否かの判断は、それぞれの円形要素の半径 R を用いて次式で行うことが

できる。

$$R_i + R_j \geq R_{ij} \quad (2)$$

$$R_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (3)$$

法線方向は2つの要素の中心を結んだ線になる。この線とX軸とのなす角度を α_{ij} とする。ただし、 α_{ij} は反時計回りを正とする。この時、次式が成り立つ。

$$\cos \alpha_{ij} = \frac{(x_j - x_i)}{R_{ij}} \quad (4)$$

$$\sin \alpha_{ij} = \frac{(y_j - y_i)}{R_{ij}} \quad (5)$$

解析のタイムステップの時間増分を Δt とし、 Δt 間のXおよびY軸方向の変位および回転の増分をそれぞれ、 $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \phi_i)$ 、 $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta \phi_j)$ とおけば、法線方向および接線方向の相対変位の増分 Δu_n (近接を正)、 Δu_s (反時計回りを正)は、次式で与えられる。

$$\Delta u_n = -(\Delta x_j - \Delta x_i) \cos \alpha_{ij} - (\Delta y_j - \Delta y_i) \sin \alpha_{ij} \quad (6)$$

$$\Delta u_s = -(\Delta x_j - \Delta x_i) \sin \alpha_{ij} + (\Delta y_j - \Delta y_i) \cos \alpha_{ij} - R_i \Delta \phi_i - r_j \Delta \phi_j \quad (7)$$

[法線方向]

Δu_n による法線方向のスプリングによる力の増分を Δe_n 、粘性ダッシュポットの力を d_n 、法線方向のバネ定数を k_n 、粘性係数を η_n とすると次式が得られる。

$$\Delta e_n = k_n \Delta u_n \quad (8)$$

$$d_n = \eta_n \frac{\Delta u_n}{\Delta t} \quad (9)$$

[接線方向]

Δu_s による法線方向のスプリングによる力の増分を Δe_s 、粘性ダッシュポットの力を d_s 、法線方向のバネ定数を k_s 、粘性係数を η_s とすると次式が得られる。

$$\Delta e_s = k_s \Delta u_s \quad (10)$$

$$d_s = \eta_s \frac{\Delta u_s}{\Delta t} \quad (11)$$

e_n および e_s については、それぞれの現在の値にそれぞれの増分を加えることにより得られる。なお、要素間の引張りを認めず、要素間接触が外れた場合には、法線方向・接線方向ともに力が作用しなくなるように次式で示される条件を加える。

$$e_n < 0, \quad e_n = d_n = e_s = d_s = 0 \quad (12)$$

以上により各時刻において2つの要素間に働く法線方向および接線方向の力 f_n および f_s は次式のように求められる。

$$f_n = e_n + d_n, \quad f_s = e_s + d_s \quad (13)$$

さて、接線方向の接触力はクーロンの法則に従うと仮定し、次式で示される条件を付加する。

$$|f_s| > \mu \cdot f_n \text{ の時, } f_s = \mu \frac{f_s}{|f_s|} f_n \quad (14)$$

ここに、 μ は要素間の摩擦係数である。

次に着目している要素*i*と接触しているすべての要

Table 1 Physical properties used in DEM simulation

Time Interval	0.00001 sec.	Designed Value
Number of Particles	105	Designed Value
Particle Diameter	12 mm	Designed Value
Slope of the Rock Pile	34 degrees	Designed Value
Density of Particles	2500 kg/m ³	Measured Value
Friction Coefficient between the Bucket and Particles	0.59	Measured Value
Friction Coefficient among Particles	0.93	Measured Value
Spring Constant	5.0 × 10 ⁵ N/m	Assumed Value
Coefficient of Viscosity	8000 Ns/m	Assumed Value

素 j との合力を求める。要素 i における X および Y 方向の合力を F_{x_i} および F_{y_i} とし、中心回りのモーメントを M_i とすれば、これらは以下の式で求められる。

$$F_{x_i} = \sum_j (-f_{n_j} \cos \alpha_{ij} - f_{s_j} \sin \alpha_{ij}) + B_{x_i} \quad (15)$$

$$F_{y_i} = \sum_j (-f_{n_j} \sin \alpha_{ij} + f_{s_j} \cos \alpha_{ij}) + B_{y_i} \quad (16)$$

$$M_i = r_i (\sum_j f_{s_j}) \quad (17)$$

ただし、(15)および(16)式中の B_{x_i} 、および B_{y_i} は、それぞれの方向の物体力（重力等）であり、本研究の場合、 X 方向には物体力は作用せず、 Y 方向には重力のみが作用するため、 $B_{x_i} = 0$ 、 $B_{y_i} = (4\pi/3)R_i^3 \rho_s g$ である（ ρ_s は粒子の密度）。

要素の質量を m_i 、慣性モーメントを I_i とすれば、要素の加速度は次式のように得られる。

$$\ddot{x} = F_{x_i}/m_i, \quad \ddot{y} = F_{y_i}/m_i, \quad \ddot{\phi} = M_i/I_i \quad (18)$$

上式を積分し、 Δt 時間後の変位を求め、これを新たな初期条件として計算を繰り返すことができる。

さて、バケットがずり山に貫入した際には、バケットの壁面と粒子との間の力を評価しなければならない。壁と粒子が接触したときは、粒子の中心から壁に垂直に引いた線と壁との交点に半径 0 の粒子を仮定することにより、粒子と同様に計算を行った。

シミュレーションに必要な諸元を表1に示す。粒子の直径、密度およびずり山の傾斜角は、次章で述べる抵抗力測定実験の条件と合わせてある。粒子とバケットとの間の摩擦係数は、実験に用いたバケットと同じ材質の板の上に穴の開いた容器を置き、その中に粒子を詰め込み、容器をバネはかりで水平に引き、バネはかりが示す値と粒子の重量から算出した。また粒子間摩擦係数は、一面せん断試験を行うことにより求めた。本シミュレーションでは、簡単のため法線方向と接線方向のバネ定数と粘性係数はそれぞれ等しいと仮定し、これらの値は試行錯誤により決定した。

3. 実験装置

DEMシミュレーションにより得られる抵抗力を評価するために、小規模のバケットを作製し、これを市販のマニピュレータの先端に取り付け、すくい取り作業実験を行い、バケットに作用する抵抗力の計測を行った。図3に実験に用いた装置の概略を示す。実験装置は、マニピュレータ、ブリッジボックス、動歪計、A/Dコンバータおよびパーソナルコンピュータから構成されている。バケットとマニピュレータを結ぶアーム部

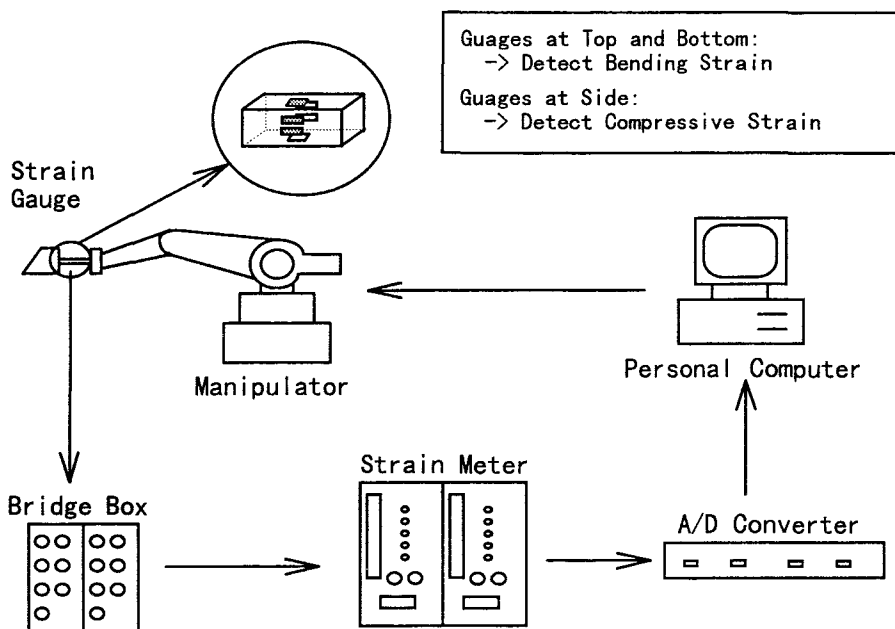


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus to measure the resistive forces acting on the bucket

分に歪ゲージを図に示すように上下面に1枚ずつ、左右面に2枚ずつ張り付け、上下面のゲージでは曲げひずみを、また左右面のゲージでは圧縮ひずみを計測し、これらより X および Y 軸方向の抵抗力を算出した。実験では、バケットの移動軌跡が後述する作業計画に従うようにマニピュレータを制御し、歪ゲージからの信号をブリッジボックス、動歪計および A/D コンバータを介してパーソナルコンピュータに取り込み、その後、再びバケットを作業計画に従って移動させ、同様の測定を繰り返した。

4. 計算結果および実験値との比較検討

4.1 作業計画

バケットの運動ともなうざり山の変形過程やバケットに作用する抵抗力は、バケットの運動軌跡に依存する。そこで、数値シミュレーションを行う前に、どのようなバケットの動きで鉾石をすくい取るかといった、いわゆるすくい取り作業計画を予めたてておく必要がある。このすくい取り作業計画は、バケットの位置と姿勢を時間の関数で与えることに他ならない。

ところで、一般に熟練オペレータは、鉾石のすくい取り作業を行う場合、初めにバケットの底面を地面すれすれに保ちながらバケットをざり山に貫入させ、次にバケットを上昇させて鉾石をすくい取る一連の作業をスムーズに実行する。そこで、本研究では熟練オペレータによるバケットの動きを考慮し、図4に示すような作業計画を与えることにする。すなわち、バケットはバケット傾斜角 θ の状態ですり山に距離 d だけ貫入し、その後バケットの先端が次式で示す2次関数に従うようにバケットを上昇させる。

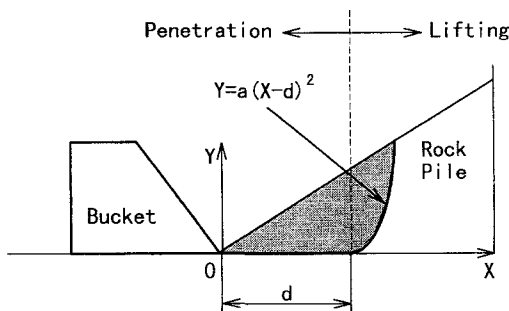


Fig. 4 Trajectory of the bucket movement in the scooping task

$$Y = a(X-d)^2 \quad (19)$$

係数 a は、バケットによりすくい取られる部分(図4の灰色の部分)の面積がバケットの面積に一致するように決定する。(19)式は一見時間の関数でないように見受けられるが、シミュレーションでは後述するように Y 軸方向のバケットの移動速度を70 mm/s とし、 t 時間後のバケット先端の Y 座標を求め、これに対応する X 座標を(19)式より求め、移動すべき座標 (X, Y) にバケット先端を移動させてシミュレーションを行っている。

次に、バケットの姿勢についてはバケット傾斜角 θ (バケット底面が水平方向となす角度)で与える。すなわち、上昇開始時に $\theta = 0$ 、作業終了時に $\theta = \theta_{max}$ とし、傾斜角はバケット先端の Y 座標に比例して増大するように、次式で与えた。

$$\theta = \frac{Y}{Y_{max}} \theta_{max} \quad (20)$$

ただし、 Y_{max} は、作業終了時のバケット先端の Y 座標である。Y 座標が時間の関数で与えられるので、必然的に θ も時間の関数となっている。

4.2 粒子運動軌跡

実験ではマニピュレータの機構上、貫入距離 d を65 mm および80 mm の2種類で作業計画をたて、抵抗力の計測を行った。従って、数値シミュレーションにおいても実験値と比較検討するため、貫入距離 d は65 mm および80 mm とした。また総作業時間(計算時間)は、貫入距離65 mm の場合は3.0秒、80 mm の場合は3.5秒とした。なおこの計算におけるバケット貫入速度は50 mm/s とし、またバケット上昇過程においては、Y 軸方向のバケット上昇速度を70 mm/s と

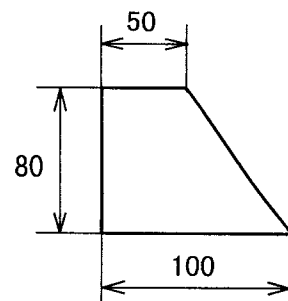
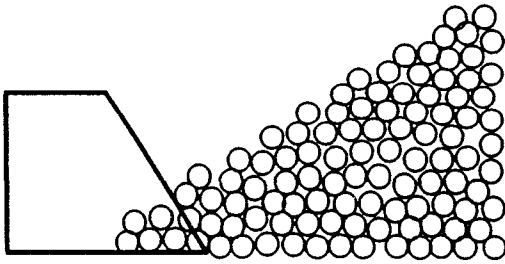


Fig. 5 The shape and size of the bucket used in DEM simulation

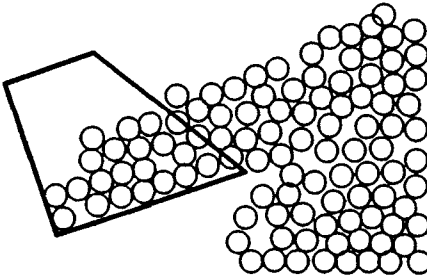
した。なお、計算に用いたバケットの形状および寸法を図5に示す。これは実験に用いたバケットの2次元モデルとなっている。

バケットがずり山に貫入した際の粒子の動きを図6に、また作業開始から終了までの粒子の移動軌跡を図7に示した。これらは貫入距離 d が65 mm の場合の結

$t=1.0$ sec.



$t=2.0$ sec.



$t=3.0$ sec.

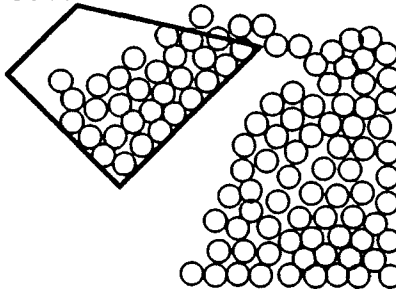


Fig. 6 Simulated results of the behavior of particles in the rock pile ($d=65$ mm)

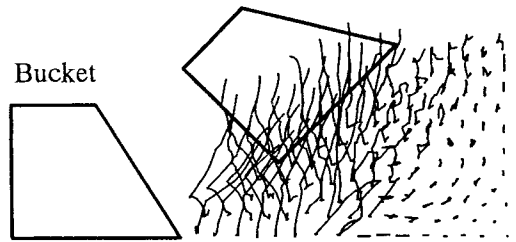


Fig. 7 Simulated trajectory of the particles due to the bucket movement ($d=65$ mm)

果である。計算に要した時間はSunワークステーションで約15時間である。計算の刻み時間は表1に示すように0.00001秒であるが、0.02秒毎に粒子の座標を出力させ、ハードディスクに記録した。全計算が終了した後、全粒子座標の時間変化をアニメーション表示させることにより、バケットの移動にともなうずり山の変形を可視化できるようにした。図6には、バケットの先端がずり山に貫入してから1秒後、2秒後および3秒後のバケット位置および全粒子の位置を示している。バケットにより粒子がすくい取られている様子やバケットの上昇にともない、バケット前方の粒子が持ち上げられている様子がシミュレートされている。なお、図では分かり難いが、バケットですくい取られなかった粒子がバケット下部に滑落する挙動も観察された。

図7は作業開始から終了までの粒子の移動軌跡を示しているが、この図よりバケットによりすくい取られた粒子はバケットの移動とともに上方に持ち上げられており、またバケットから離れた切羽近くに位置する粒子は、ほとんど動かず、バケットの先端付近の粒子は、滑り面に沿って斜めに移動していることが分かる。滑り面の位置および形状は、バケットに作用する抵抗力を理論的に解析する上で極めて重要な因子であり、この結果は、抵抗力のモデリングに際して有益な情報を与えるものと考えられる。

ところで、貫入距離 d が80 mm の場合は(19)式中の係数 a の値が $d=65$ mm の場合よりも大きくなるため、バケットがほぼ垂直に上昇するようになる。従って、バケットですくい取られる粒子の軌跡も、ほぼ垂直に上昇するような軌跡を示すが、全体的には図6および図7の結果と大きな違いはない。なお、今回はずり山の傾斜角を変化させた場合のシミュレーションは行っていないが、傾斜角が変化した場合には、作業計

画で構築されるバケットの移動軌跡が変化するため、当然バケットの運動に伴う粒子の移動軌跡は異なる。しかし、バケットをある程度ずり山に貫入させ、その後、バケットを上昇して粒子をすくい取るといった作業計画を構築する限り、粒子の移道軌跡の全体的な傾向はほとんど変わらないと考えられる。

4.3 バケットに作用する抵抗力

図8および図9に実験により得られた抵抗力とDEMシミュレーションにより得られた抵抗力との比較を示す。図8は貫入距離が65 mmの結果を、また図9は貫入距離が80 mmの結果を示している。ただしシミュレーションは2次元で計算しているの、実験で用いられたバケットの幅(100 mm)を考慮し、シミュレーション結果にバケット幅を乗じて比較を行った。図中の破線、一点鎖線および二点鎖線が実験により得られた抵抗力を示しており、黒丸印でマークされた実線がシミュレーション結果を示している。横軸はバケットの貫入距離 X をバケット底面の長さ L で除した無

次元貫入距離を表している。縦軸の F_x および F_y は、それぞれ X および Y 軸方向の抵抗力である。

X 軸方向の抵抗力は、バケットの貫入とともに微増するが、これはバケットと粒子間の摩擦によるものが主である。 X/L が1を超えるような場合は、バケットの背面がずり山を押し込むことになるため、受働土圧の状態になり抵抗力が急増することが従来の研究にて報告されているが⁸⁾、本実験ではマニピュレータの機構上の制限から X/L が1を超えるような作業計画がたてられなかったため、受働土圧の状態にまでは至っていない。貫入過程を終え、上昇過程に入るとすぐに抵抗力はピークを示し、以後、貫入距離の増加とともに(あるいは作業時間の増加とともに)、抵抗力は減少している。バケットに作用する X 軸方向の抵抗力は、主としてバケットと粒子との摩擦、受働土圧による抵抗力および切削抵抗からなると言われているが⁹⁾、本実験およびシミュレーションでは受働土圧による抵抗力はほぼ0と考えられることから、上昇過程直後に

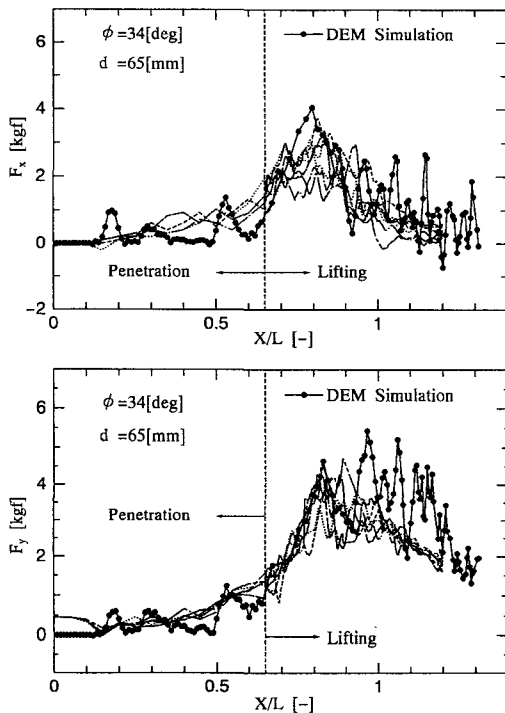


Fig. 8 Comparison between simulated resistive forces acting on the bucket and experimental ones ($d=65$ mm)

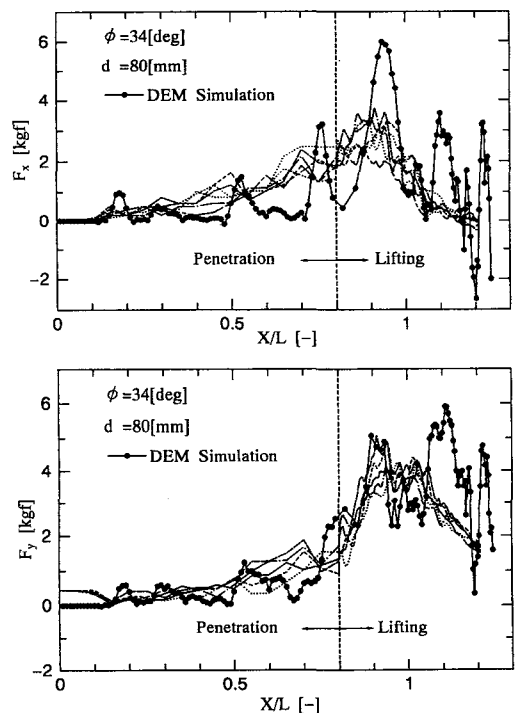


Fig. 9 Comparison between simulated resistive forces acting on the bucket and experimental ones ($d=80$ mm)

見られる大きな抵抗力は、バケット先端に作用する切削抵抗によると考えられる。なお、すくい取り作業を終了し、バケットがずり山から離れると、X軸方向の抵抗力は0となる。シミュレーションによる結果はバケット側面での摩擦を考えていないが、側面における摩擦の影響はあまり大きくないという結果が既に報告されている。従って、シミュレーション結果に大きな振動が見られるものの、シミュレーション結果と実験結果は、ほぼ一致している。

Y軸方向の抵抗力は、バケットの貫入過程においては、ほぼ0の状態であるが、上昇過程に入ると、X軸方向の抵抗力と同様に急激に増大し、ピークを示した後、貫入距離の増加とともに減少する傾向が見られる。すくい取り作業終了時には、Y軸方向の抵抗力はバケットの重量およびバケットですくい取られた鉱石の重量に等しくなる。シミュレーション結果に大きな変動が見られるものの、シミュレーション結果が示す傾向は実験値が示す傾向と一致しており、また抵抗値もほぼ一致していることが分かる。

以上の結果より、DEMを用いたシミュレーションにより、バケットの貫入によるずり山の変形過程およびバケットに作用する抵抗力をほぼ評価できると考えられる。

5. むすび

本研究では、バケットに作用する抵抗力を定式化する際の一助とすることを目的として、個別要素法を用いて数値シミュレーションによりバケットによるすくい取り作業におけるずり山の変形過程について検討するとともに、バケットに作用する抵抗力を算出した。その結果、バケットの移動にともなうずり山の変形過程が明らかになり、バケット先端の移動軌跡の前方に滑り面が存在することを確認するとともに、抵抗力の

計算値と実験値とを比較検討した結果、両者はほぼ一致することから、個別要素法によりずり山の変形過程やバケットに作用する抵抗力を評価できることが確かめられた。積み込み作業の自動化のためには、今後、シミュレーションに用いた各種の物性値（粒子間摩擦係数、バケット—粒子間摩擦係数およびずり山の傾斜角など）を如何にセンシングするかなどについて検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Corke, P. et al. : Proc. of the 4th Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, Vol. 1, pp. B1-11-B1-21, 1997.
- 2) 山本欣市, 柿倉正義編著 : 極限作業ロボット, pp. 217-341, 1992, 工業調査会
- 3) Petty, M. K. et al. : Proc. of the 4 Annual Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice, pp. 219-224, 1997
- 4) At-Amant, M. et al. : Proc. of the 1st Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, Vol. 1, pp. 6. 1-6. 10, 1991.
- 5) Herteau, R. et al. : Proc. of the 1st Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, Vol. 1, pp. 6. 11-6. 20, 1991.
- 6) Gocho, T. et al. : Proc. of the 9th Int. Symposium on Automation and Robotics in Construction, Vol. 2, pp. 803-812, 1992.
- 7) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. : Geotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- 8) 高橋 弘他 : 日本機械学会論文集 (C) 編, Vol. 63, No. 609, pp. 1491-1497, 1997.
- 9) 杉山 昇 : 建設機械と土の諸問題, pp. 145-155, 1982.