

破碎堆積物へのバケット貫入時における抵抗力の解析

Analysis on Resistance Force Acting on Bucket in the Scooping
Operation of Piled Fragment Rocks

塚本佳明*・高橋 弘**

Yoshiaki TSUKAMOTO, Hiroshi TAKAHASHI

The objective of this paper is to theoretically derive the resistance force acting on the bucket in the scooping operation of the piled fragment rocks. The first, the transforming process of the inside of piled fragment rocks was visualized by using tracer particles. Next, the transforming process was modeled simply based on the observation, and the resistance force was calculated. Finally, calculated results were compared with experimental results. As a result, it was confirmed that the digging resistance force acting at the cutting edges was significant in the scooping operation.

Keywords : scooping operation, piled fragment rocks, visualization, digging resistance

1. はじめに

現在、資源開発、土木・建設業等の分野における各種作業はほとんどすべてが機械化されている。例えば、山岳トンネル工事現場においては、削孔、発破、ずりの積み込み、運搬、コンクリート吹き付けなどが基本的な作業であるが、発破を除き、それぞれについて専用の大型機械によって作業が行われており、これらの機械をそれぞれ熟練のオペレータがハンドルやレバー等によって操作している。しかしながら、その作業環境は過酷であり、危険がともなうことなどから若年の作業員が減少しているのが現状である。資源開発現場においても同様であり、また特に資源・エネルギー確保を目的として、開発現場がさらに地下深部へと移行しつつあることを考慮すると、今後、作業ロボットの導入が強く望まれると考えられる。

さて、製造業の分野では、産業ロボットの導入が進み、生産の拡大・効率化が達成され、めざましい発展を遂げてきた。一方、資源開発、土木・建設業の分野においては、製造業と異なり、作業の進展とともに変化する自然環境が作業の対象であり、各要素においてより高度な技術が必要とされるため、ロボット化が遅れているのが現状である。このような変化する状況、環境に対処し得る自律性を備えた作業ロボットの要素技術に関する研究としては、作業対象物の認識・形状計測^{1) 2)}、運搬機械の誘導³⁾、コンクリート吹き付け機のノズル軌道制御⁴⁾等が報告されている。しかしながら、発破後の破碎堆積物の自動積み込みに関しては、ほとんど検討されていない。一部、LHD (Load Haul Dump) のバケットにかかる力の解析についての研究例⁵⁾はあるが、作業対象物である破碎堆積物(以下、ずり山と記す)の形状・大きさが、作業の進展とともに変化する等の理由から、各種

* 学生 東北大学大学院 工学研究科 資源工学専攻

** 正会員 工博 東北大学助教授 工学部資源工学科

の力がまだ概念的に示されている程度であり、定式化されてはいないのが現状である。しかし、この積み込み機械のロボット化実現のためには、視覚機能とともに、力覚機能の有効利用は必要不可欠である。

それゆえ、本研究ではLHDあるいはホイールローダ等の積み込み機械を想定し、山岳トンネル工事現場あるいは地下資源開発現場などにおける発破後のずりの積み込み作業中にバケットにかか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. 力解析

オペレータがLHDあるいはホイールローダなどの積み込み機械を用いて堆積物の積み込み作業を行う場合、一般にバケット底面を地面すれすれに保った状態でずり山に貫入させ、その後、熟練オペレータの勘と経験により、機械をある程度前進させてから、バケットを上昇させるといった動作を繰り返す。この積み込み作業の無人化を考えた場合、まず作業対象物の存在を認識する必要がある。認識手段としては現状では視覚機能を用いる方法以外には考えにくく⁶⁾、また、対象物の存在の認識と同時に形状推定についても視覚が大変有効であると考えられることから、視覚を用いた対象物の認識に関する研究例⁷⁾も見られる。しかし、実際にバケットをずり山に貫入させた後、効率よく作業を進めるためには、どのくらい押し込んだらバケットを上昇させるのか、バケット内には適度な量の堆積物が積み込まれているのか、あるいは大きな岩石塊への衝突など予期せぬ事態は生じていないか、といった状況判断を行うことが必要とされ、そのような状況判断を行う手段としては、バケットが受ける抵抗力の測定すなわち力覚機能が最も重要であり、不可欠な要素と言える。そこで、作業ロボット自体にこのような状況判断の機能を搭載させるために、ずり山へのバケット貫入時における抵抗力の変化について定式化することを試みる。

2・1 ずり山変形過程の可視化

ずり山へバケットが貫入する際にバケットが受ける力の検討を行うには、作業対象物であるずり山の内部の変形過程が極めて重要である。しかしながら、その変形過程について詳しく報告された例はない。それゆえ、ずり山がバケット貫入によってどのように変化するかを実験的に確かめることを目的に可視化実験を行った。図1に実験に用いた装置の概略を示す。アクリル板を用いて図のような容器を作製し、その中に平均径5.7mmの安山岩砕石でずり山を形成した。また可視化のため、数パーセントの粒子を白く着色し、トレーサー粒子として

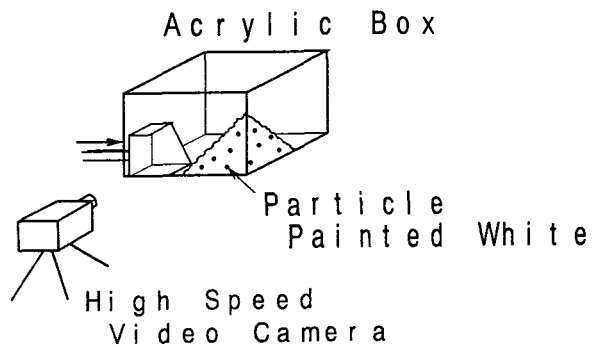


図1 可視化実験に用いた装置の概略

用いた。その山に片側側面を取り外した形のバケットを手動で押し込み、粒子の挙動を横からビデオカメラで撮影し、後にX-Yコーディネータを用いてトレーサー粒子の軌跡を追跡した。図2にトレーサー粒子の移動軌跡を示した。この結果は上述の方法で10回撮影を行い、個々のトレーサー粒子の軌跡を重ね合わせたものである。それぞれの撮影について、バケット先端の到達距離は異なるがおよそ $X=180\text{mm}$ 付近まで到達しており、また山の形成には傾斜角が約 36° とほぼ等しくなるようにした。この図から分かるように、トレーサー粒子の軌跡の特徴として、①ほぼ水平に移動している部分、②ある角度を持って上方に移動している部分および③ほとんど動かない部分の3つの部分に大別されることが分かる。バケット貫入によって、ほぼ水平に移動している部分と上方に移動している部分および上方に移動している部分とほとんど動かない部分の境界には破断面が生じていると考えられる。

2・2 ずり山変形過程のモデリング

ここでは、バケット貫入時に受ける抵抗力を求めるために2・1で行った実験を基に、ずり山内部の変形過程のモデリングを試みる。上述したように、バケット貫入によって、ずり山内部には2つの破断面が生じているが、水平に移動する部分はバケット先端部分の貫入距離 X が、バケット底面の長さ L より大きくなってから生じ始めることを考慮して図3に示すように(1)バケット貫入距離 X がバケット底面長さ L より小さい場合、(2)バケット貫入距離 X がバケット底面長さ L より大きい場合の2つの場合に分けてモデリングを行った。(1)の場合については、 $\triangle ODG$ が斜め上方に移動する部分に相当している。また、(2)の場合については $\triangle ADF$ が水平に移動する部分であり、この部分はバケットの前進とともにバケットと一体となって移動すると考える。また、 $\triangle DFG$ が斜め上方に移動する部分である。この時、バケット貫入によって $\triangle OAE$ の部分が押し込まれるので $\triangle EFG$ と面積を等しくするように F 点を決定することにする。

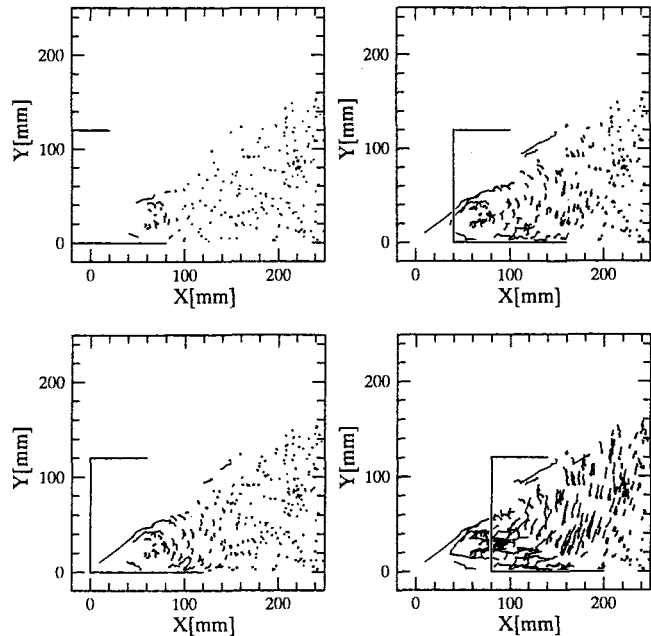


図2 ずり山粒子の移動軌跡

2・3 抵抗力の算出

前述したように、現在、積み込み機械のバケット貫入時における抵抗力について詳しく解析した例はなく、その詳細については未だ不明である。掘削機械であるバックホーの掘削力については、一般に受動土圧による抵抗、バケット外部側面と掘削土との摩擦抵抗および切削抵抗からなるといわれている⁸⁾。このうち、受動土圧による抵抗および摩擦抵抗は理論的に定式化されているが、切削抵抗(すなわちバケット先端部の貫入抵抗)は土質によって異なるので実物あるいは模型を用いて実験的に求める必要があるとされている。

本研究においては、上述したバックホーの掘削力のうち受動土圧および摩擦による抵抗を2・2で行ったモデリングを基に、LHDあるいはホイールローダなどの積み込み機械のバケットにかかる抵抗力の算出に応用する。これに切削抵抗を加えたものが、バケットにかかる抵抗力となるため、抵抗力 F は次式で与えられる。

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

(F_1 :受動土圧による抵抗、 F_2 :バケットとずりとの摩擦抵抗、 F_3 :切削抵抗)

受動土圧による抵抗については、土質力学の分野におけるクーロンの土圧理論を適用する。クーロンの土圧理論とは図4に示すように、擁壁の圧力によってくさび型の土の部分が上方に抜け上がろうとする時の圧力を力の釣合を解くことによって求めるものであり、この時、すべり面 BC の角度は角度を種々に変化させその時の F_p が

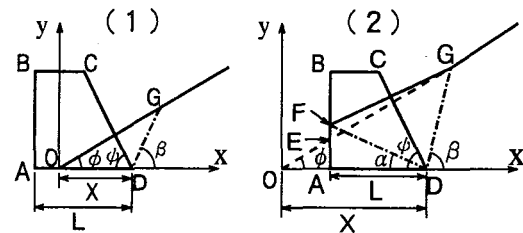


図3 ずり山変形過程モデル

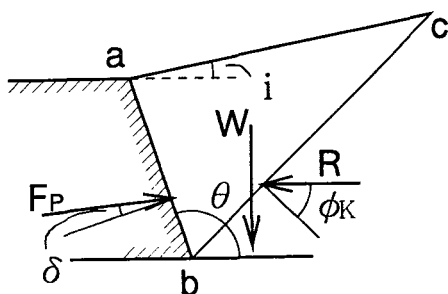


図4 受働土圧時に作用する力

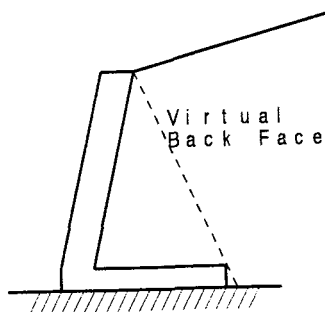


図5 仮想背面

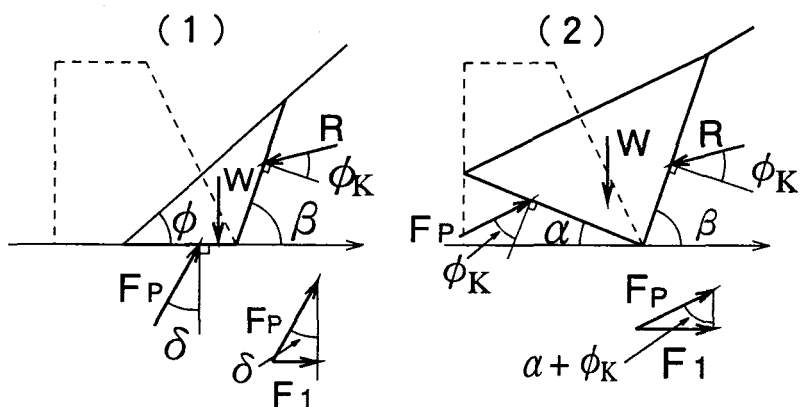


図6 バケット貫入時に作用する力

最小になる角度を求めればよい。また、逆T型擁壁のような場合には図5に示すような仮想背面を用いて計算を行う⁹⁾。バケットが受ける抵抗力 F_1 は F_P の水平成分とする。以上の考察を基に、積み込み作業時に作用する力の釣合を図6に示すように考えると受働土圧による抵抗力 F_1 は(1)(2)の場合についてそれぞれ次式のように求められる。

$$\begin{aligned} \text{(1) の場合} \quad F_1 &= F_P \sin \delta \\ F_P &= W / \left\{ \cos \delta + \sin \delta \frac{\cos(\beta + \phi_K)}{\sin(\beta + \phi_K)} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{(2) の場合} \quad F_1 &= F_P \sin(\alpha + \phi_K) \\ F_P &= W / \left\{ \cos(\alpha + \phi_K) + \sin(\alpha + \phi_K) \frac{\cos(\beta + \phi_K)}{\sin(\beta + \phi_K)} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 α ：図3の(2)で定義される角度、 δ ：バケットとずりとの摩擦角、 ϕ_K ：ずりの内部摩擦角である。なお、ここで(2)の場合については面DFを仮想背面に見立てて計算を行う。

次に、バケットと破碎堆積物との摩擦による抵抗力 F_2 については、図7に示すようにずり山の自重によってバケット側面が受ける静水圧およびバケットとずりとの摩擦係数によって決定し、図8に示すような関係を用いて(1)および(2)の場合についてそれぞれ次式のように求められる。

$$\text{(1) の場合} \quad F_2 = (F_{L1,HI} + F_{L2,HI}) \times 2 \quad (4)$$

$$F_{L1,H1} = \frac{1}{2} \mu \rho (1 - \varepsilon) \left(\frac{1}{3} \tan^2 \phi \cdot L1^3 \right) \times 2$$

$$F_{L2,H1} = \frac{1}{2} \mu \rho (1 - \varepsilon) \left\{ -\frac{1}{3} (2 \tan \phi + \tan \psi) \tan \psi \cdot L2^3 + H1 \tan \phi \cdot L2^2 + H1^2 L2 \right\} \times 2$$

$$(2) \text{ の場合 } F_2 = (F_{L1,H1,H2} + F_{L2,H2} + F_{L3,H3,H4} + F_{L4,H4} - F_{L,H3}) \times 2 \quad (5)$$

$$F_{L1,H1,H2} = \frac{1}{2} \mu \rho (1 - \varepsilon) \left(\frac{1}{3} \tan^2 \phi \cdot L1^3 + H1 \tan \phi \cdot L1^2 + H1^2 L1 \right)$$

$$F_{L2,H2} = \frac{1}{2} \mu \rho (1 - \varepsilon) \left\{ -\frac{1}{3} (2 \tan \phi + \tan \psi) \tan \psi \cdot L2^3 + H2 \tan \phi \cdot L2^2 + H2^2 L2 \right\}$$

$$F_{L3,H3,H4} = \frac{1}{2} \mu \rho (1 - \varepsilon) \left(\frac{1}{3} \tan^2 m \cdot L3^3 + H3 \tan m \cdot L3^2 + H3^2 L3 \right)$$

$$F_{L4,H4} = \frac{1}{2} \mu \rho (1 - \varepsilon) \left\{ -\frac{1}{3} (2 \tan m + \tan \psi) \tan \psi \cdot L4^3 + H4 \tan m \cdot L4^2 + H4^2 L4 \right\}$$

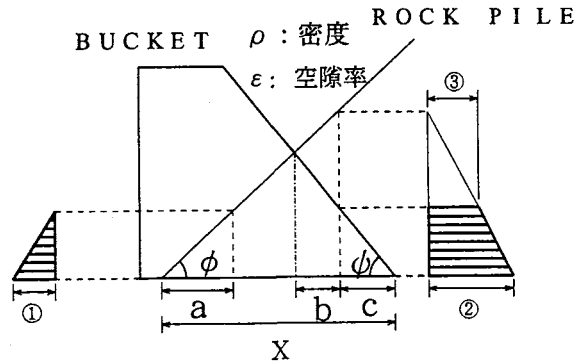
$$F_{L,H3} = \frac{1}{2} \mu \rho (1 - \varepsilon) \left\{ -\frac{1}{3} (2 \tan m + \tan \alpha) \tan \alpha \cdot L^3 + H3 \tan m \cdot L^2 + H3^2 L \right\}$$

ただし、 ϕ ：ずり山の傾斜角、 ψ ：バケットの形状に依存する角度（ $\angle ADC$ ）、 μ ：バケットとずりとの摩擦係数（ $= \tan \delta$ ）、 ρ ：ずりの密度、 ε ：空隙率である。また、 $F_{i,j}$ 、 $F_{i,j,k}$ はそれぞれ図8において i,j を二辺とする三角形および i,j,k を三辺とする四角形部分における摩擦抵抗力を表している。

切削抵抗 F_3 については、土質の影響を受けるため定式化が困難であり、上述したようにバックホーの場合においては実験的に求めるという報告もある。切削抵抗 F_3 の単純なモデル化は、必要不可欠と考えられるが、このモデル化は今後の課題とし、ここでは次に述べる実験から得られる抵抗力から受動土圧による抵抗 F_1 と摩擦による抵抗 F_2 の和を差し引き、切削抵抗 F_3 について実験的に検討する。

3. バケット貫入実験

2・3において、受動土圧による抵抗力およびバケットとずりとの摩擦による抵抗力を求める式を導出した。その各パラメータに適当な値を代入することによって、任意のバケット形状およびずり山の状態における切削抵抗を除いた抵抗力を計算することができる。ここでは、バケット貫入のモデル実験を行い、計算値との比較を行う。その際、実験により得られたデータは計算値よりも切削抵抗の分だけ大きな値が得られることが予想されるが、上述したようにその差を切削抵抗と考え、それについての検討を行う。



- ① $a \rho (1 - \varepsilon) \tan \phi$
- ② $(X - c) \rho (1 - \varepsilon) \tan \phi$
- ③ $b \rho (1 - \varepsilon) (\tan \phi + \tan \psi)$

図7 バケット側面に働く圧力

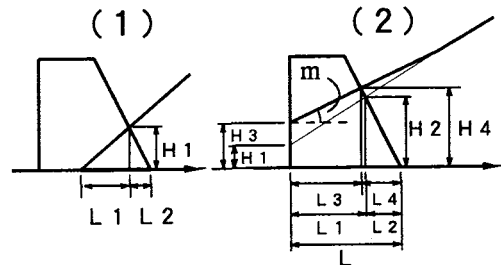


図8 摩擦抵抗力を求める際のモデル

3・1 実験装置および方法

図9に実験装置、ローダのモデルおよび計測系の概略を示した。アルミ製のボディにアクリルの角柱で作製したアームを取り付け、中心部の上下面に歪みゲージを張り付け力センサとした。歪みゲージからの信号は、動歪計およびAD変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込んだ。なお、歪みゲージが検出する値は曲げモーメントであるため、実験に先立ち、重りを用いて歪みゲージの較正を行った。実験では曲げモーメントを計測し、この較正式を基に、アームにかかる荷重を逆算した。また、バケットのずり山への貫入距離を測定するために、ボディ側面にロータリーエンコーダを取り付け距離センサとした。ロータリーエンコーダからの信号はTTLレベルの方形波に変換し、TTLレベル入出力パラレルボードによってパーソナルコンピュータに取り込んだ。ロータリーエンコーダにはピニオンを取り付け、固定したラック上を転がすことにより、ロータリーエンコーダの滑りを防止した。実験はモデルを手動でずり山へ押し込んだが、その時モデルが正確に直進できるように固定したレール上にモデルを乗せて移動させた。まず、バケット先端をずり山の裾野すなわちずり山変形モデルの原点に合わせ、そこでロータリーエンコーダからのパルス数を0にし、それから、少し後ろに引いてからゆっくりと前進させ、ローダのモデルをずり山へと貫入させた。実験に用いたバケットの形状を表す値は、バケット先端角 $\phi=63.4^\circ$ 、バケット底面の長さ $L=8\text{cm}$ 、バケットの幅 $B=14\text{cm}$ である。

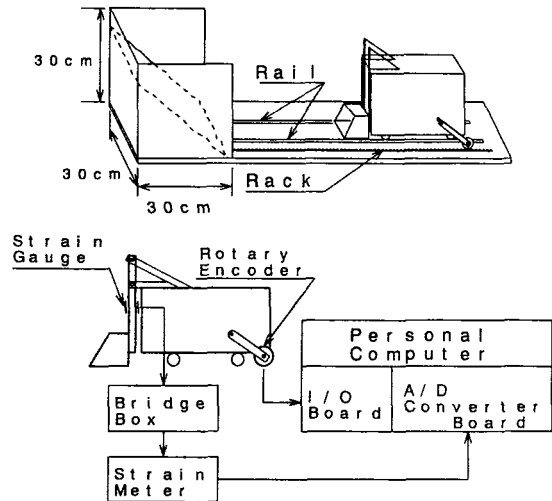


図9 実験装置、計測系の概略

実験には、安山岩碎石、珪砂、ビニールペレットの3種類の粒子を用い、それぞれについて2種類の傾斜角で行った。表1に各傾斜角の値と抵抗計算の際に必要な物性値を示した。

表1 実験に用いた粒子の物性値

	ずり山の傾斜角 [deg]	密度 [g/cm ³]	空隙率	内部摩擦角 [deg]	バケット粒子間の 摩擦係数
安山岩碎石 (平均径5.7mm)	34, 21	2.74	0.47	35	0.56
珪砂 (平均径0.7mm)	33, 23	2.53	0.38	28	0.48
ビニールペレット (平均径3.8mm)	34, 21	1.36	0.36	29	0.38

3・2 計算結果との比較検討

表1に示す値を用いて、(1)式より F_3 を除いて計算した値と実験結果との比較を図10に示す。なお、横軸のずり山へのバケット貫入距離 X はバケット底面長さ L で除して無次元化してある。 $X/L < 1$ の状態、すなわち(1)の状態に比べ、(2)の状態になってからの方が、ずり山の変形が顕著になるため計算値および実験値ともに抵抗力の急激な増加が見られる。しかし、上述したように、ここでの計算値には切削抵抗が含まれていないため、すべてのずり山粒子において実験値の方が計算値よりも大きな値となっており、このことは安山岩碎石の結果に顕著に表れている。以上のことから、切削力がバケットに作用する抵抗力に大きな影響を及ぼしていることが分か

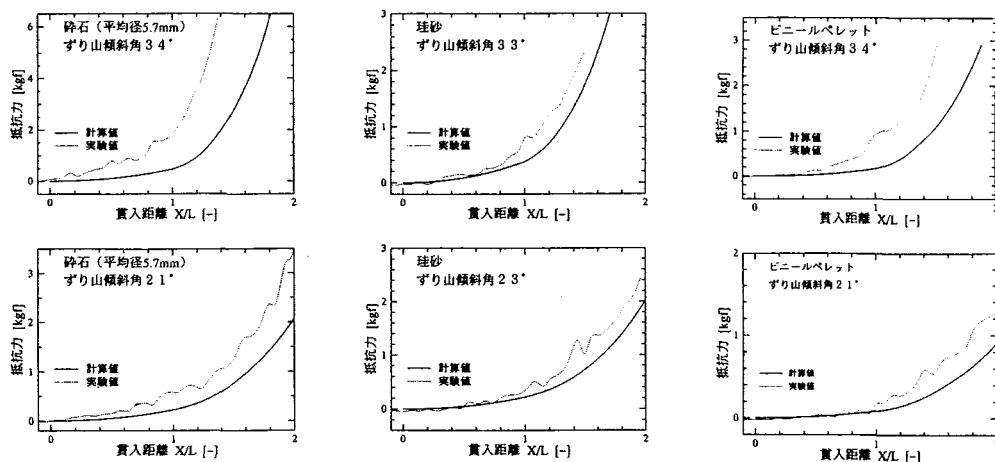


図10 実験結果

る。

3・3 切削抵抗の検討

バケットに作用する抵抗力を定式化の際に切削力が非常に重要な要素であることが確かめられた。そこで、実験値から計算値(F_1+F_2)を引いた値を図11に示した。珪砂の場合については、ずり山の傾斜角の変化による影響が少ないことが分かる。また、安山岩碎石とビニールペレットの切削力の変化を比較してみると傾向は似ているが、安山岩碎石の方の値が大きくなっている。これらの要因として、各粒子の物性値の違いが挙げられるが、中でも珪砂については粒径が小さく、粒度がそろっていること、安山岩碎石については密度、内部摩擦角が大きいことが他の物性値に比べて顕著であることから、これらが大きな影響を及ぼしていることが予想される。以上の結果を基に考察すると、切削抵抗は以下に示す因子による関数と考えられる。

$$F_3 = f(d, \rho, \varepsilon, \phi_K, BKT)$$

ここに、 d :ずり山粒子の粒径、 ρ :ずり山粒子の密度、 ε :空隙率、 ϕ_K :内部摩擦角、 BKT :バケットの形状(厚さ、先端の形等)

以上、切削抵抗 F_3 について簡単に考察を行ったが、今回得られたデータだけでは、切削抵抗についての詳細な知見を得ることは困難であり、今後、より多くのデータの収集を行うとともに切削抵抗 F_3 のモデル化を行う予定である。

4. まとめ

本研究では、トンネル工事現場、資源開発現場等で使用されている、LHD・ホイールローダ等の積み込み機械を想定し、その積み込み作業の自動化を目指し、バケットがずり山に貫入する際のずり山の変形過程をモデル

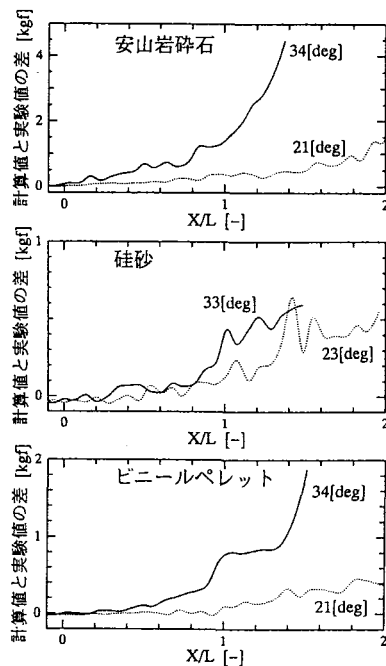


図11 計算値と実験値の差

化し、バケットに作用する抵抗力を評価することを目的とした。

まず、可視化実験を行うことによって、バケット貫入時にずり山内部に生じる破断面の位置を推定し、その結果を基に、ずり山内部の変形過程のモデリングを行った。このモデルにクーロンの土圧理論を適用することによって、抵抗力の算出を行った。次に、バケット貫入実験を行いそこで得られたデータと計算によって得られたデータの比較を行った。その結果、計算値と実験値には差が生じ、抵抗力を算出する際に省略していた切削抵抗の影響がかなり大きいことが分かった。抵抗力の定式化を行うためには、この切削抵抗の解明が不可欠と思われる。よって、今後はこの切削抵抗について詳細に検討する予定である。

なお、本研究を遂行するにあたり、東北大学教授 工博 中野栄二先生より有益な御助言を頂いた。ここに謝意を表する。

5. 参考文献

- 1)高橋義雄他：超音波センサによる岩石の自動形状計測の試み、資源・素材学会誌、Vol.108, No. 7, pp. 529-534, 1992
- 2)伊藤博樹他：レーザースポットと画像を用いた岩盤・岩石の3次元形状計測、資源・素材学会誌、Vol.110, No. 6, pp. 505-510, 1994
- 3)St-Amant, M. et al. :A Simple Robust Vision System for Underground Vehicle Guidance, Proc. of 1st Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp.6/1-10, 1991
- 4)櫛引雅広他：コンクリート吹き付け機のモデリングとノズル軌道制御、資源・素材学会誌、Vol.110, No.12, pp. 959-966, 1994
- 5)Hemami, A:Force Analysis in the Scooping/Loading Operation of an LHD Loader, Proc. of 2nd Int. Symposium on Mine Mechanization and Automation, pp.415-424, 1993
- 6)西松裕一：露天採掘の無人化、平成3年度資源・素材関係学協会合同秋季大会分科研究会資料、pp. 29-32, 1991
- 7)高橋弘他：画像を用いた破碎堆積物の自動すくい取り作業計画構築に関する基礎的研究、第4回建設ロボットシンポジウム論文集、pp. 71-80, 1994
- 8)杉山昇：建設機械と土の諸問題、pp. 134-155, 鹿島出版会、1982
- 9)河上房義：土質力学、pp. 141-152, 森北出版、1993