

ブルドーザブレードによる付着性土砂掘削作業の DEM 解析

大阪大学大学院工学研究科
機械工学専攻
コマツ共同研究講座（高山・辻研）

中 川 裕 太

1. 緒言

ブルドーザなどの建設・鉱山機械が主に仕事を行う相手は、土砂や岩石などであり、掘削などの各種の仕事を行う際、必ず抵抗とこれに伴うエネルギー損失が生じる。掘削時に発生するエネルギー損失の低減は、ブルドーザの燃費効率の改善に直結している。ブルドーザが直接土砂に対して仕事を行う部位は、「ブレード」と呼ばれ、これまでに掘削作業時に発生する抵抗の低減を目指して、ブレード部の最適形状の検討が行われている。現在、実機レベルでの検討から、ブレード部の形状を変化させることにより、燃費効率を 15 パーセント程度改善できることが確認されている。掘削のエネルギー損失は、掘削時に起こる土砂の破壊挙動および、破壊後ブレードに抱え込まれた土砂の挙動に大きく依存していると考えられる。エネルギー損失を最小にするようなブレードの最適形状を検討するには、ブレード形状と掘削時の土砂挙動の相互の関係を知る必要があるが、土砂の振る舞いは大変複雑であり、容易ではない。これまで、ブレード形状の検討は、実機レベルでの実験や、設計者の経験に大きく依存していたが、このような手法による設計の最適化には、多大なコストがかかり、経済的に望ましくない。ブレード形状などの機械特性に加えて、建設機械の燃費効率には、掘削時のブレードの作業軌跡なども大きく影響すると考え、これは今後の建設・鉱山機械の自動化を行う際に特に重要であると考えられるが、これまでに十分な検討が行われていないのが現状である。

近年、コンピュータ性能の飛躍的な進展に伴い、様々な複雑現象の数値シミュレーションが可能となっている。ブルドーザブレードによる掘削作業時の土砂挙動についても、数値シミュレーションによりブレード形状と土砂運動間の関係が検討可能となるのであれば、ブレード形状の最適設計や掘削軌跡の最適化、ひいては燃費効率の向上に大きく貢献するものであると

考えられる。

これまでも、土砂の力学に関する数値シミュレーションが、主に土木・地盤工学分野や地球惑星科学分野などにおいて、数多く試みられてきている。ひとえに土砂と言っても、微視的には一般的に粒状の固体相と、液相、気相の固気液三相からなっており、各相の物性や形状、および内部で形成される構造に依存してその特性が変化し、その振る舞いは大変複雑であることが知られている。ブレードによる土砂の掘削挙動では、土砂は初期の状態においてバルク相の状態を保ち連続体に近いものの、掘削後には大変形を伴ってバラバラになり、粉粒体としての挙動を示す。この様に、状況に応じて、連続体、離散体的両面の振る舞いを持つ現象に対して、有限要素法などの連続体近似に基づく手法を用いる事は不適切であり、ここでは DEM (Discrete Element Method, 離散要素法) を採用した。DEM は、連続体的な手法とは異なり、個々の粒子運動を追跡し、粒子間の相互作用について計算を行うことにより、粉粒体の運動を表現する。実際の土砂は、水を含んでおり、図 1 のように粒子表面に付着した液体により粒子間に液架橋が形成され、粒子間には、付着力が働く。また、実際の土の粒子は完全な球形であるわけではなく、表面に凹凸があり、それぞれ異なった形状を持つ非球形粒子である。本研究では、離散要

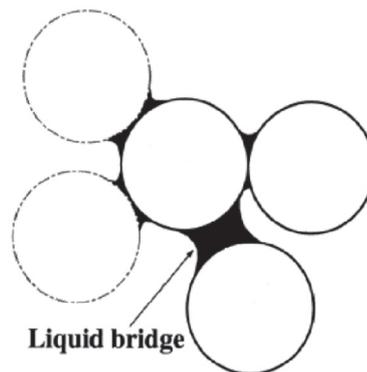


図 1 Example of liquid bridge

素法をベースとして、これに含水に伴う付着力や非球形性による回転の抑制の効果を表す転がり抵抗モデル¹⁾を導入することにより、ブレードによる押し土作業時の実際の付着性含水土砂の挙動を表現し、ブレードの設計を支援する数値シミュレーションツールを構築することを目指した。

2. 計算粒子モデル

2.1 DEM (Discrete Element Method, 離散要素法)

粒状体の数値解析モデルである DEM は、粉粒体などの粒状体の挙動予測に広く利用されるようになってきている。DEM では、個々の粒子に関する運動方程式を積分することにより、粒子の運動をラグランジュ的に計算する。粒子 i の並進運動および回転運動に対する運動方程式は、式(1),(2)のように与えられる。

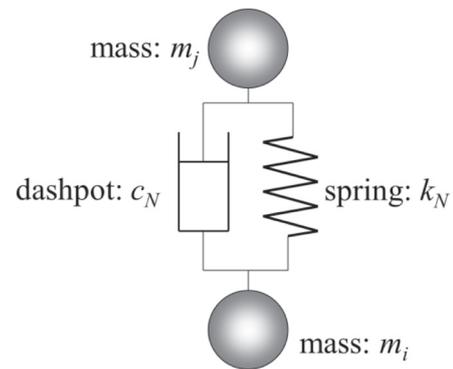
ここで、 x_i は粒子 i の位置ベクトル、 f_{ij} は粒子 i と粒子 j の間に働く力、 m_i は粒子 i の質量、 g は重力の加速度ベクトル、 ω_i は粒子 i の角速度ベクトル、 f_N^{ij} 、 f_S^{ij} はそれぞれ粒子 i と粒子 j の間の接触力の法線方向成分と接線方向成分、 I_i は粒子 i の慣性モーメント、 n_{ij} は粒子 i の中心点から粒子 j の中心点へ向かう単位法線ベクトルである。なお、下式におけるドットは時間 t に関する微分を表し、総和 \sum_j は、粒子 i と直接接触状態にある粒子および壁面やブレードに対して行われる。

一般的な DEM では、粒子 i に働く力 f_{ij} は、粒子間の直接的な接触に伴う相互作用力のみが考慮される。一般的には、図 2(a),(b) に示すように、接触粒子間の相互作用力モデルとして、ばね、ダッシュポットおよび摩擦スライダからなるモデルが用いられる。反発力はばねで、衝突によるエネルギー散逸はダッシュポットで、それぞれ表現される。接線方向には、摩擦スライダを導入することですべりを表現し、クーロンの摩擦則を表現できるようになっている。

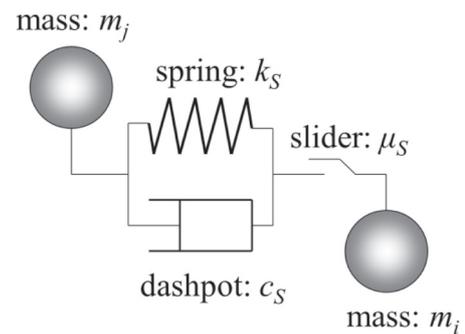
ここで、 k_N 、 k_S はそれぞれ法線方向、接線方向の線形バネのバネ定数、 c_N 、 c_S はそれぞれ法線方向、接線方向の粘性係数、 μ_S は粒子間の摩擦係数を表している。

$$\ddot{x}_i = \frac{\sum_j f_{ij}}{m_i} + g \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{\sum_j r_i n_{ij} \times f_S^{ij}}{I_i} \quad (2)$$



(a) For normal direction



(b) For tangential direction

図 2 Contact model

2.2 付着力モデル

水分を含んだ実際の土砂では、粒子間に液架橋が形成され、付加的な付着力が発生し、これが土砂の破壊特性に対して大きな影響を与える。通常の DEM モデルでは、この含水による付着力の効果は含まれていない。本研究では、Utili & Nova²⁾により提案された粒子間付着力モデルを基にして、改良を加えた。このモデルでは、土砂の破壊挙動のマクロ特性として知られているクーロンの破壊基準に応じて、マイクロつまり粒子レベルでの付着力がモデル化される。ここで例として、図 3 のように 2 粒子が接触している際、2 粒子間のオーバーラップ量 Δx_N と粒子に働く法線方向力 F_N の関係を図 4 に示す。2 粒子間のオーバーラップ量 Δx_N が増加していくと、粒子は弾性変形し、2 粒子が反発する方向に力が働く。また、2 粒子が離れている Δx_N が負の領域においては、 Δx_N が液架橋の破断距離 Δx_{Nmin} に達するまで、 F_N が負の力（引力）が働くこととした。粒子は通常の DEM で用いられるパラメータに加えて、新たに粒子間付着力を表わすパラメータ T_μ を導入することにより、2 粒子間の法線・接線方向の付着力強度が決定される。

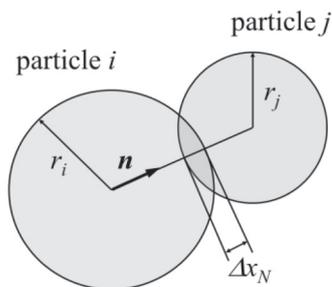


図3 Contact of particles

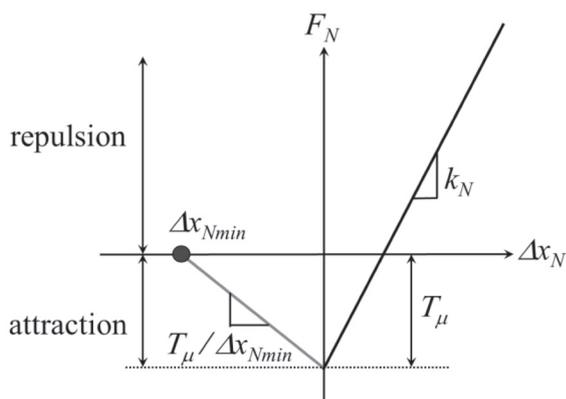


図4 Relationship between amount of overlap Δx_N in normal direction and normal direction force F_N

3. 付着力モデルの効果

付着力モデルを導入し、平板による掘削作業のシミュレーションを、粒子（平均粒径 $d_{50}=4\text{mm}$ ）を用いて行い、粒子挙動や反力の観察を行った。図5は平板が向かって左から一定速度で進んできた時の、粒子層の変形挙動を示したものである。付着力を導入することで、図5(a),(b)に示すように、粒子の振る舞いが大きく変化するのが確認された。含水したガラス粒子 ($d_{50}=286\mu\text{m}$) を用いて行われたベンチ実験の結果と比較したところ、粒子がブレードに沿って盛り上がり、ブレード前方に崩れる様子が類似しており、図6に示す、掘削の際にブレードが進行方向に受ける反力も定量的に近い値となることが確認された。

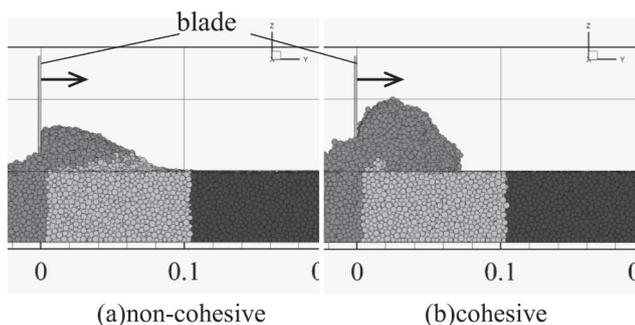


図5 Snapshot of particles (Side view, $d_{50}=4\text{mm}$)

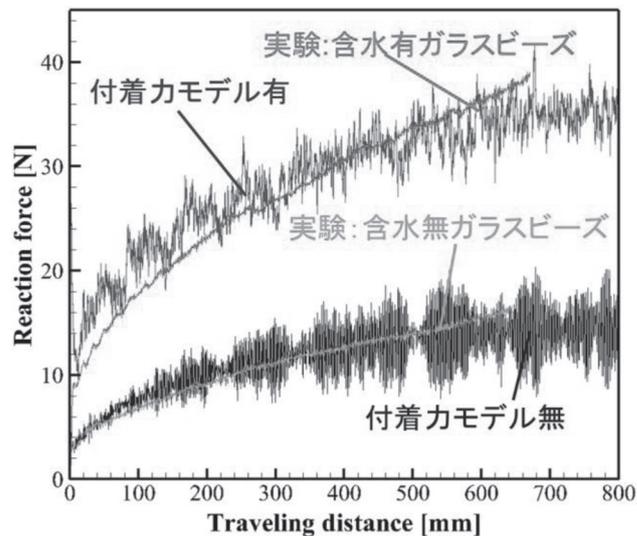
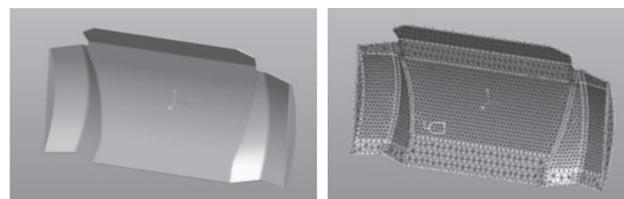


図6 Relationship between reaction force and traveling distance at dry and wet case

4. 開発した計算コードの特徴

4.1 複雑形状の取り扱い

開発したコードで設計的な検討を行うためには、複雑形状の取り扱いが不可欠である。実際のブレードは図7(a)の例のように複雑な形状をしており。これまでのコードではその形状効果を十分に検討できなかった。そこでプログラムの改良を行った。設計の現場では、3D-CADが広く用いられており、CADデータからの形状データの取り込みを念頭において、図7に三角形要素の集合として表せられるものであれば、任意の形状を表現出来るようにコードの開発を行った。設計上で使用する際には、3D-CADからデータを読み込む。それにより、ブレードの様々な形状の効果を、全く同じ場で検証することが可能となった。



(a) CAD data

(b) Mesh data

図7 Example of blade shape data

4.2 二次元並列計算

設計・開発の現場で使用するために問題となるのが、計算時間である。中川³⁾によって開発されたDEMコードでは、MPI並列計算を行っており、他の商用ソフトや計算コードと比較し、大規模な粒子数を扱う場合

に優位性があった。そのコードは、図 8(a)のように計算領域を一方向にのみ分割するものであり、この手法では、隣接領域の境界部分とだけデータの同期をとればよいため、通信回数が少なくて済む、プログラムが比較的単純であるといった利点がある。一方、粒子-壁面、粒子-ブレードの相互作用を計算する際に、壁近傍や、ブレード近傍の粒子の計算を担当するプロセスの負担が大きくなり、計算負荷が不均一になるほか、並列数を分割している方向の接触判定セル数以上に増やすことができないという欠点がある。西嶋⁴⁾は、図 8(b)のように領域の分割方向を 2 方向に拡張した二次元領域分割法を採用することで、より多くのプロセッサを用いることが可能となり、ロードバランスを均一化できることを示した。そこで、本研究においても、2次元並列計算を採用することとした。図 9 は 80 万個の粒子にランダム速度を与えて自由落下させる初期場作成計算において、1次元領域分割に基づく並列、2次元領域分割に基づく並列で、並列数を変化させた際の計算時間を示している。同じ計算でも、並列数を増やすことで計算時間が減少し、1次元並列よりも 2次元並列の方が計算時間が小さく、並列化の効果が高いことがわかる。

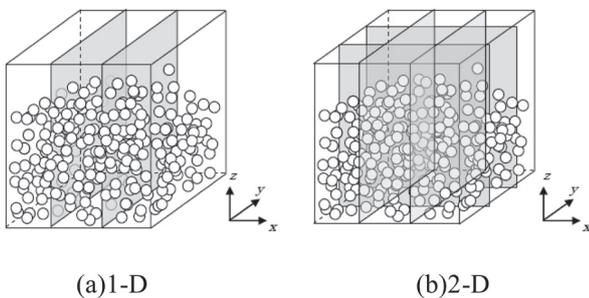


図 8 Domain decomposition

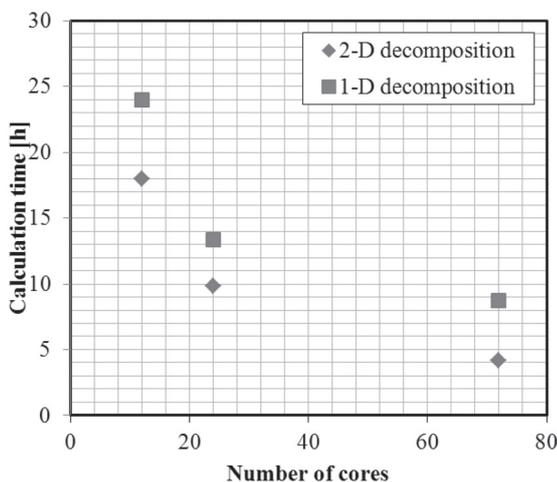


図 9 Calculation time

5. 掘削シミュレーション

DEM は個々の粒子運動を追跡する為、非常に計算コストが高く、計算負荷の制限上、実際の土などの粒径で計算を行うことは困難であり、計算上粒子を大きくする必要がある。計算は、ブルドーザの実機のブレード形状を模擬した 1/2 スケールのブレードを用い、掘削深さを 200mm とすることで、実粒径よりも大きい 4mm の粒子を用いた計算でも、粒径に対する掘削深さを 50 直径分とし、十分な解像度をとれるようにした。系を大きくしたことにより、粒子数が増大するため、図 10(a)に示すように、10 直径分の幅の準 2次元の系において計算を行った。各粒子にランダム速度を与えた状態で落下法により DEM 粒子を配置し、これを初期場とした。その後ブレードを一定速度で並進運動させることにより、押し土作業中の土砂挙動を観察した。粒子-側壁間に摩擦は働かないものとした。粒子層の破壊は不連続に起こり、せん断帯が形成される。また、このせん断帯では、粒子の回転運動が頻繁に起こると報告されている¹⁾。この粒子の回転運動を観察することで、粒子層の破壊の様子を見ることが可能である。図 11(a)に、粒子の角速度ベクトル ω_p の大きさを粒子半径 r_p 、ブレード送り速度 v_b で正規化し、可視化した様子を示す。計算を行った結果、ブレードが進むにつれて、せん断帯が不連続に形成される様子(図中 A, B)が確認された。図 10(b)に示すベンチスケール実験には、平均粒径 $d_{50}=286\mu\text{m}$ のガラス粒子を用い、含水率を 6% とした。実機の 1/20 スケールブレード模型を一定速度で並進させることで、粒子の挙動を観察した結果を図 11(b)に示した。実験は掘削深さが 20mm であり、粒径に対する掘削深さが 50~100 直径分である。シミュレーションとベンチ実験の結果を比較すると、定性的に挙動が一致し、ブレードの上方でせん断帯が形成され、図 11(b)中 C で示

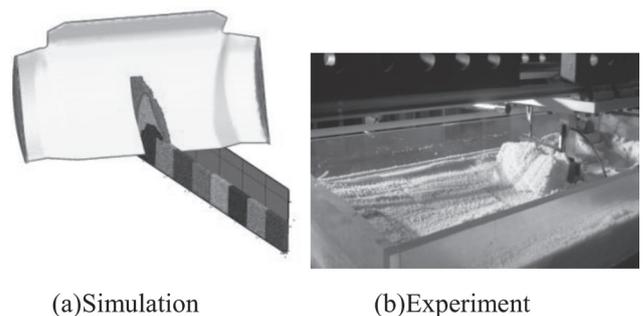
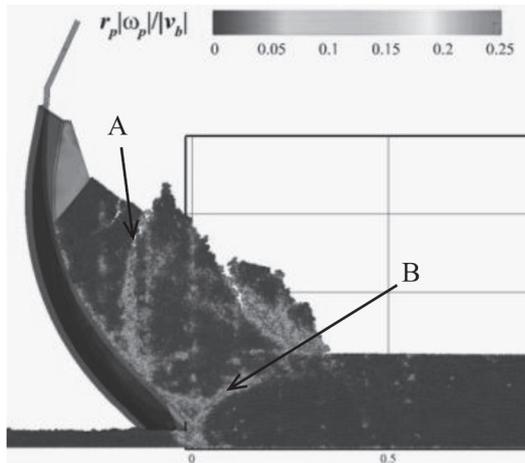


図 10 Snapshot of particles



(a) Simulation



(b) Experiment

図 11 Comparison between simulation and experiment

す破壊された粒子が盛り上がってくる現象もシミュレーションにおいて捉えることができた。

6. 結言

ブルドーザブレードによる、付着性土砂の掘削作業を解析するために、粒子の非球形性に起因する相対回転の抑制を表現する転がり抵抗モデルと、粒子間液架橋形成により発生する引力を表現する付着力モデルを導入し、MPI 並列 3 次元 DEM コードの開発を行った。DEM モデルに付着力モデルを導入したところ、粒子の挙動が大きく変化し、反力も定量的にベンチ実験と近い値が得られた。計算負荷を小さくするため、粒径は 4mm とし、ブレードのスケールを大きくすること

で、破壊現象を大きくした掘削シミュレーションにおいて、ベンチスケール実験の結果と定性的に一致する結果が得られた。

本研究で開発したコードは、設計支援ツールとして用いることを目的としている為、汎用の 3D-CAD からブレード形状データを取り込むことが可能であり、2 次元領域分割 MPI 並列計算を行うことで、計算時間の短縮を図るなどの工夫も行った。将来的には、ブレードの設計だけでなく、パワーショベルのバケット、建設・鉱山機械の足回り、農業機械の設計や、建設・鉱山機械の自動化の際の掘削軌跡の最適化にも使用できる可能性があり、これらの分野において、非常に応用範囲が広いと考えられる。

<謝辞>

本研究は産学連携コマツ共同研究講座で実施されたものであり、直接ご指導頂いた辻拓也准教授に心より感謝致します。

また、研究に協力頂いた関係各位に厚く御礼申し上げます。

<引用文献>

- 1) Iwashita, K. and Oda, M., "Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM", *Int. J. Engrg. Mech.*, Vol.124, No.3 (1998), pp.285-292.
- 2) Utili, S. and Nova, R., "DEM analysis of bonded granular geomaterials", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, Vol.32, (2008), pp.1997-2031.
- 3) 中川, "離散要素法によるブルドーザ押し土シミュレーション", 大阪大学卒業論文, (2010)。
- 4) 西嶋, "超並列計算機に適した並列プログラミングによる DEM-CFD 計算の大規模化", 大阪大学卒業論文, (2011)。



株式会社小松製作所
開発本部建機第一開発センタ
ブルドーザ開発グループ勤務

(機械 平成 22 年卒 24 年前期)