

ブルドーザ撒出し自動化における作業シミュレータの開発

鹿島建設(株) 正会員 ○浜本研一, 黒沼 出, 芝浦工業大学 内村 裕

1. はじめに

重機土工に ICT を活用した、いわゆる情報化施工システムの導入が進められている。例えばブルドーザでは作業機（ブレード）のマシンガイダンスやマシンコントロールを導入することで、丁張や誘導員が不要になるなどの合理化が行われている。しかし、我々は今後の施工の効率向上や将来的な熟練作業員の減少・高齢化を見据えた場合に、現状と同等以上の施工効率を少ない人数で達成する新しい施工技術として建設重機の自動化が重要な課題と考えている。

ブルドーザの撒出し作業の自動化を考えたとき、所定の形状に撒き出すためには、ダンピングされた土砂の位置やブルドーザのブレードの軌跡が重要である。実試験で検討するには時間や費用が大きくなるため、シミュレーションによって予め作業を評価する手法が必要である。

そこで我々はブルドーザ撒出し作業に対して実作業検討に十分な再現性を有するシミュレータを開発する。本報告では開発した作業シミュレータの概要とその計算速度を評価した結果について報告する。

2. ブルドーザ撒出し作業

2.1 対象とする作業

本報告では、ダムや造成工事などにおいて、ブルドーザで行われる撒出し作業を自動化することを考える。また我々が開発した自動化システム¹⁾を搭載しているコマツ製 ICT ブルドーザ D61-PXi (写真-1) を対象としてシミュレータを作成する。



写真-1 19t ブルドーザ (コマツ D61-PXi)

2.2 オペレータによる作業の解析

シミュレータの必要仕様を決めるために、まずは熟練オペレータが撒出し作業時に行う操作、走行軌跡および撒出し形状の計測を行う。

写真-1 のブルドーザを用いて 25m³ のダンプ土砂山を撒出し幅 10m、撒出し厚 0.3m を矩形に撒き出す作業を計測した。図-1 は計測した一例で、青線が作業前に 0.3m 厚で既に撒き出された形状、赤破線が土砂山のダンピング位置、紫線がブルドーザの走行軌跡と緑破線が撒出し後の出来形を示している。左右への土砂の振分けやブレードの向きを変えて押出すアングル操作をしていることが分かった。

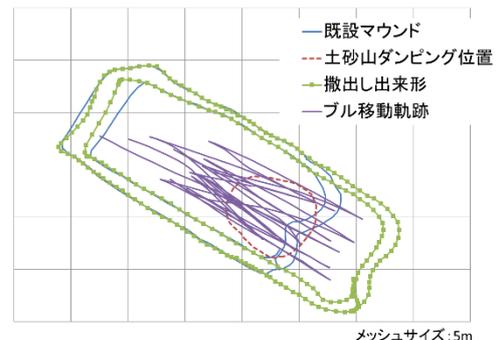


図-1 オペレータによる撒出し形状と軌跡

3. 作業シミュレータ

本章では開発した作業シミュレータの構成について説明する。本シミュレータは土砂の表現、崩落、回転およびブレードとの接触の計算で構成される。

3.1 土砂の表現

これまでにコンピュータ上で土砂を表現する方法として、個別要素法 (DEM) やセルオートマトン法に基づく手法を用いるものが多く研究されている²⁾。DEM は計算負荷が高いことや実際には計量しにくい土の相互作用に関するパラメータが存在するため本シミュレータではセルオートマトン法に基づく Enhanced Sand Pile Model を用いる^{3) 4)}。この土砂モデルでは式(1)のように平面方向 (XY) を一定間隔のメッシュで分割し、それぞれのメッシュ内の土砂量を連続量 $M(i, j)$ として行列により表現する。

キーワード 自動化, 撒出し作業, ブルドーザ, 土工事, 効率化

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-489-6256

$$M(i, j) = h_{ij} \cdot d^2, \tag{1}$$

$$d \cdot (i - 1) < x \leq d \cdot i, d \cdot (j - 1) < y \leq d \cdot j$$

ここで、 d はメッシュサイズで、 h は位置 (i, j) での土砂の高さである。またメッシュサイズは精度や計算量に応じて決める。

3.2 土砂崩壊

前節で表現した量が土砂として振る舞うには崩壊が生じるようにする必要がある。土質力学の知見から、安息角から与えられるすべり面より上に存在する土砂が前後左右に崩壊し移動するよう計算する⁴⁾。

この土砂の移動は後述するブレードの接触による作用よりも速く生じると仮定して、本計算はブルドーザの移動の間に十数回程度行う。また接触時に土砂はブレードから進行方向に力を受けるため、進行方向へより多くの崩壊が生じるよう分配している。

3.3 撒出し方向の回転

後述するブレードと土砂の接触による相互作用は、メッシュと同じ方向 (X 方向もしくは Y 方向) に生じることを前提として計算しているため、本シミュレータで撒出し方向を角度 θ 分だけ回転する場合は、式 (1) で表現される土砂を回転する。土砂の回転は移流として考えることができるため、CIP による移流計算で回転後の土砂量を求める⁵⁾。

3.4 ブレードと土砂の接触

ブレードが土砂との接触した際にブレードに押されて土砂が前方に移動する方法について述べる。ブレード前方に存在する土砂は自重 W 、ブレードからの力 P と土砂の内部で生じる垂直抗力とせん断抵抗力の合力 R を受ける。土質力学での知見から、これらの力はすべり面で拮抗すると考え、すべり面より上に存在する土砂が前方へ移動すると考える (図-2)。またアングル操作時はブレードが左右方向にシフトしながら進むため、両端での補正処理を行うことで実際の撒出し動作に合わせている。

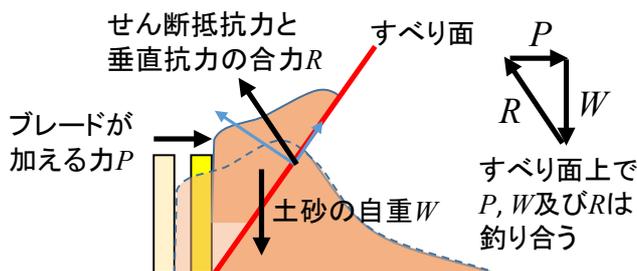


図-2 土砂にかかる力とすべり面での土砂移動

4. シミュレータの実装

3 章で述べた機能を有する撒出し作業のシミュレータを Matlab に実装した。図-1 の作業とほぼ同様の条件で、ダンピングされた土砂 (図-3 左) を幅 10m×長さ約 8m の矩形状 (図-3 右) に撒き出す経路を作成し、シミュレーションをメッシュサイズ 0.2m, 40m×40m (200×200 セル) として CPU Intel Core i7, メモリ 16GB, Windows7 (64bit) のノート PC 上で計算したところ、計算時間に約 120 秒かかった。撒出し形状としては良好な再現が得られたが、今後大量の経路検討を行うには高速化が必要である。

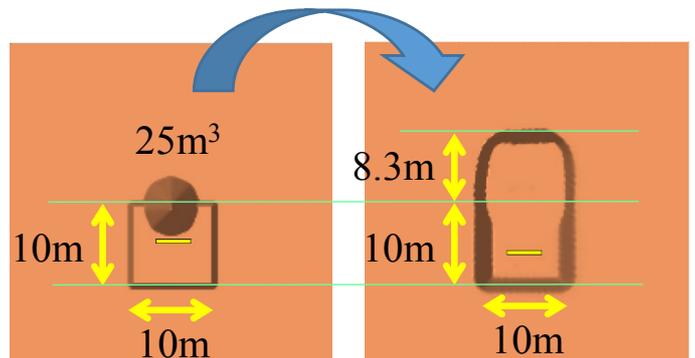


図-3 計算結果 (左: 作業前, 右: 作業後)

5. おわりに

本報告ではブルドーザ撒出し作業に対して実作業検討に十分な再現性を有するシミュレータの概要とその計算速度を評価した結果について報告した。今後、実作業との撒出し形状を比較し、シミュレーションの精度評価を行う予定である。詳細は口頭発表にて報告したいと考えている。

謝辞: オペレータ作業計測ではコマツより機材のご提供等のご助力を賜りました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 黒沼ほか.: 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, pp. 101 - 102(VI-051), 2015
- 2) 加納ほか.: 個別要素法によるテラメカシミュレーション, コマツ技報, Vol. 49, No. 151, pp. 13 - 19, 2003
- 3) M. Pla-Castells et al.: Visual Representation of Enhanced Sand Pile Models, Universidad de Valencia, Spain, 2003, pp. 141 - 146
- 4) M. Pla-Castells et al.: Physically-Based Interactive Sand Simulation, Universidad de Valencia, Spain, 2008, pp. 21 - 24
- 5) 矢部, 内海, 尾形: CIP 法, 森北出版, 2003