

## 二次元 MPM-DDA によるバケット模型掘削実験の再現解析

広島大学	正会員	○橋本 涼太
コベルコ建機 (株)	正会員	島津 泰彦
コベルコ建機 (株)	非会員	沖本 翔
コベルコ建機 (株)	非会員	小岩井 一茂

### 1. 背景と目的

建設機械の自動化を実現する上では機体周辺の環境や施工計画に対して最適な操作方法をいかにして決定し機体に入力するかが重要な技術となる。その要素技術として現場の地形や土の物性値を反映したデジタルツイン上での力学シミュレーションが挙げられ、油圧ショベルによる掘削作業を対象とする場合、曲面形状を持つバケットとの相互作用下での地盤の大変形挙動を表現できること、地盤のマクロな物性値との関連付けが容易な手法であることが求められる。本研究では固体の大変形解析手法の一つである Material Point Method (MPM) と陰解法ベースの離散体解析手法である不連続変形法 (Discontinuous Deformation Analysis: DDA) の連成手法 (MPM-DDA)<sup>1)</sup>に着目し、アルミ棒積層体を用いた二次元模型実験の再現解析を通じて適用性を検討した。

### 2. MPM-DDA の概要

MPM-DDA<sup>1)</sup>では、解析対象を大変形が起こる領域と剛体的な運動をする領域に分け、MPM と DDA でそれぞれをモデル化した上で両者の接触を考慮し、一体的に解析する (図 1)。

MPM は連続体を質量と体積を持つ粒子に分割して、背後に設けた有限要素メッシュの節点に粒子の物理量を投影して運動方程式を解き、節点の加速度等を粒子に補間して移動させる格子と粒子のハイブリッド手法である。増分解析の各ステップで格子の配置をリセットするため、メッシュの歪みにより計算が破綻することなく地盤の大変形を解析できる。

一方、DDA は解析対象を弾性体ブロックの集合体でモデル化し、摩擦を含む接触による相互作用を考慮して運動を解くもので、任意の多角形ブロックを扱える。

そして、MPM-DDA では MPM の粒子と DDA のブロックの辺の間の接触を DDA ブロック同士と同様ペナルティ法で処理し、連続体と離散体の相互作用解析を行う。同手法は MPM にも DDA と同じく時間離散化に陰解法を採用し、系全体の方程式を連立した強連成解析であり、準静的解析も可能なのが特徴である。

本研究では地盤を MPM、バケットを DDA でモデル化して掘削シミュレーションを行った。

### 3. アルミ棒積層体を用いたバケット模型掘削実験および再現解析条件

図 2 にアルミ棒積層体を用いた実験模型<sup>2)</sup>を示す。模型は直径 1.6 と 3.0 mm、長さ 50 mm の 2 種類のアルミ棒を質量比 3:2 で混合・積層した地盤と、奥行き 50 mm のアルミ製のバケット模型からなる。バケット模型の形状は実機を参考に平面部 (図中橙色線) と曲面部 (図中緑色線) で構成される。バケット模型の内壁には摩擦特性を一定にするためテフロンシートを貼付した。バケットは開口面が水平面から 110°になるように設置し、アルミ棒はバケット先端から約 70 mm の高さまで間隙比 0.26 で積層した。以上の条件で、地盤に大きな変形が生じるよう水平面から 50°上方に直線的にバケット模型を 50 mm 変位させて掘削した。準静的条件となるよう変位速度は約 0.006 mm/s とした。载荷中は载荷ロードに接続した 2 方向ロードセルで载荷軸方向と軸直角方向の抵抗値を計測した。

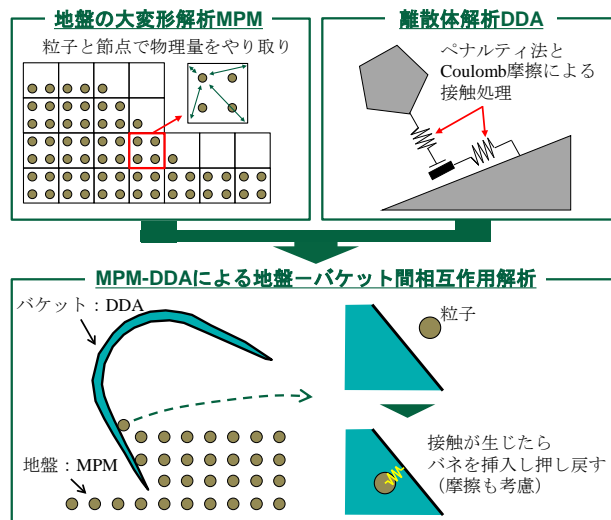


図 1 MPM-DDA の概要図

キーワード 油圧ショベル, バケット, 掘削解析, 大変形, MPM-DDA

連絡先 〒732-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学 TEL082-424-7785

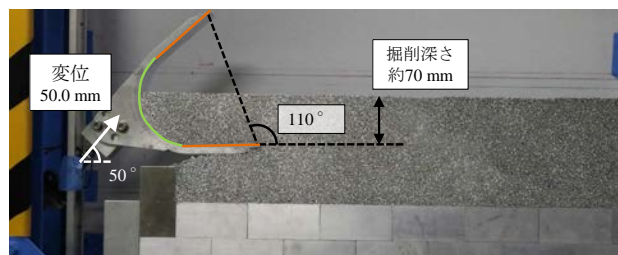


図2 掘削実験模型

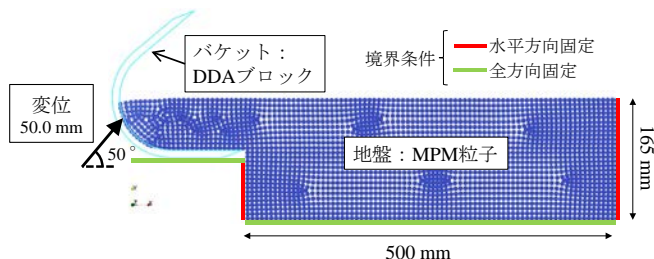


図3 MPM-DDAによる掘削解析モデル

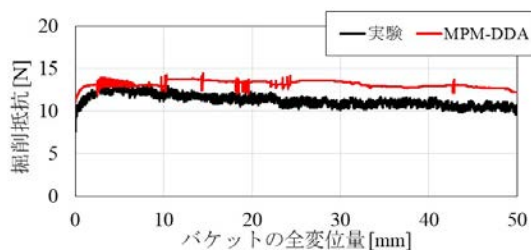


図4 掘削抵抗-変位関係

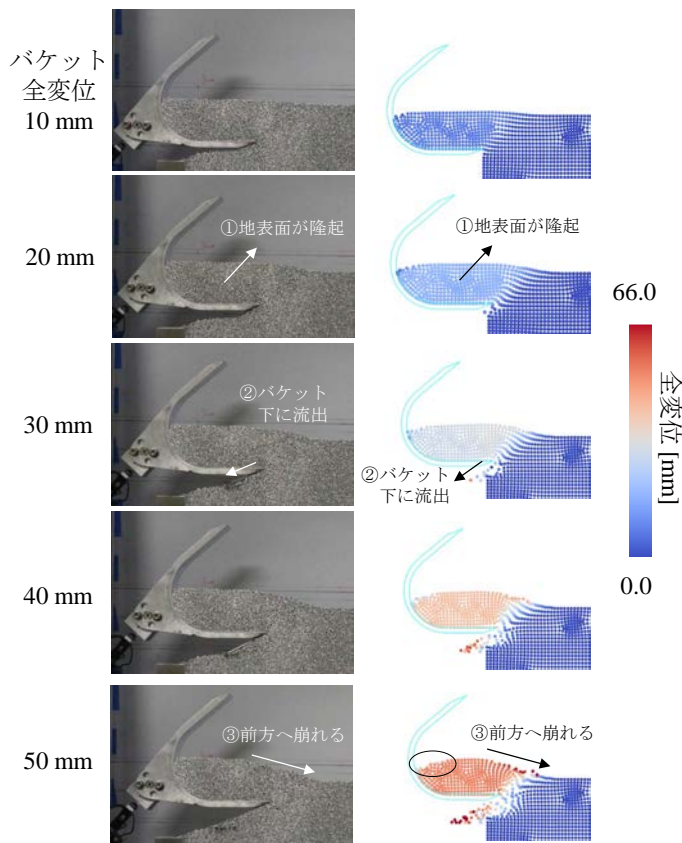


図5 地盤の変形状況の推移

図3にMPM-DDAで使用した解析モデルと境界条件を示す。地盤はMPMの粒子で、バケット模型を単一のDDAブロックでモデル化した。既往の研究<sup>3)</sup>を参考にバケットは弾性体（ヤング率：70 GPa，ポアソン比：0.2，密度：2.7 g/cm<sup>3</sup>），地盤はDrucker-Pragerの破壊規準に基づく弾完全塑性体とし，既往の実験よりヤング率：200 kPa，ポアソン比：0.473，密度：2.14 g/cm<sup>3</sup>，内部摩擦角：21.6°，ダイレイタンス角：10.8°とした。また，地盤とバケットの接触面の摩擦にはCoulomb則を用い，摩擦角は9.3°とした。地盤に自重解析で得られた初期応力を与えた後，実験と同様に水平から50°上向きに50.0 mmの変位を5000ステップに分割して準静的条件で与えた。

#### 4. 結果とまとめ

図4に実験およびMPM-DDAによる解析で得られた掘削抵抗-変位関係を示す。解析では実験より抵抗が大きく評価される傾向にあるが，両者とも掘削抵抗が変位量約5 mmでピークを示し，その後低下する挙動は一致した。

図5では地盤の変形状況の推移を示した。実験では変位量0~20 mmではバケットの持ち上げによりせん断面を生じながら①地表面が隆起し，30 mm以降は②バケット下にできた空間に土が流出しはじめ，40~50 mmでは地表面の隆起部の傾斜が安息角になるよう③前方へと土が崩れたが，解析でもその様子が再現された。ただし，50 mm時点の図の丸囲み部に見られるように，解析ではバケット壁面付近で地表面が沈下している。この原因として，今回用いたMPM-DDAでは，MPMの粒子とDDAのブロックが接触した際に，粒子の体積を考慮せず粒子の中心に接触力を与えている（図1）ことが挙げられる。この場合，バケットと接触している粒子の表面が開放された状態になるため，拘束圧および強度がほぼゼロとなって圧縮する。それに伴い粒子がバケット内側に流れて図のような形状になったと考えられる。また，バケット壁面に向かって粒子が流れたことで掘削中にバケットの外へと流出する土砂が少なくなり，掘削抵抗が大きく評価されたと推察される。

以上より，MPM-DDAによってバケットと地盤の相互作用下での大変形挙動を定性的に再現できた一方，定量的な評価を可能にするためには粒子とブロックの接触の定義方法の改善が必要であることが示された。

#### 参考文献

1) Hashimoto ら：15th WCCM & 8th APCOM, 2022 (採択済)。2) 橋本ら：令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会，No. III-209，2021。3) Hashimoto ら：Proc. of ICADD15, pp. 312-318, 2021。