

MPM-DDA による土のひずみ速度依存性を考慮した地盤切削解析

広島大学	学生会員	○河野 拓未
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	関塚 良太
コベルコ建機（株）	非会員	小岩井 一茂

1. 背景と目的

油圧ショベルをはじめとする建設機械の自動化・自律化を実現するための要素技術として、机上で事前に動作の計画や最適化を検討することができるシミュレーション手法の開発が挙げられる。これに対し著者らは、連続体の大変形解析手法である Material Point Method (MPM) と離散体解析手法の不連続変形法 (Discontinuous Deformation Analysis : DDA) を連成した MPM-DDA を用いて地盤の切削解析を行っている¹⁾。その中で、静的な力学試験で得られた土の強度を用いた解析では実機で計測された切削抵抗を過小評価することを示した。本研究では、二次元 MPM-DDA 解析において土の強度のひずみ速度依存性を考慮するため、von Mises の破壊規準に基づく超過応力型の弾粘塑性モデルを導入した。その上で、油圧ショベルのドーザによる地盤切削実験^{1,2)}を対象としたパラメトリック・スタディを行い、土のひずみ速度依存性の切削抵抗への影響と再現可能性を検討した。

2. von Mises の破壊規準に基づく弾粘塑性モデル

油圧ショベルを走行させてドーザ切削する場合のように、室内の静的な力学試験よりも極めて高いひずみ速度下での現象を表現するには、ひずみ速度に応じて土の静的強度よりも大きな強度を与える必要がある。既往の MPM-DDA 解析では、地盤の材料構成則としてひずみ速度非依存である von Mises の破壊規準を用いた弾塑性モデル（以降、von Mises 弾塑性モデル）を使用したが、その場合、特定のひずみ速度の力学試験で得られた強度が使用される。つまり、油圧ショベルによる実際の作業中に起こり得る地盤への多様な載荷速度下での挙動をシームレスに扱うことは難しい。そこで、

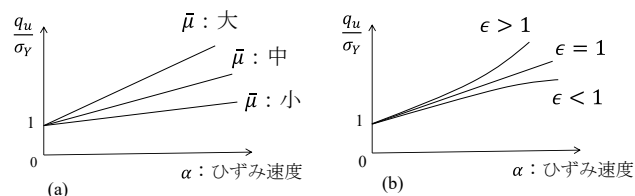


図1 一軸圧縮強度－ひずみ速度関係の特性

ひずみ速度に応じた土の強度変化を考慮可能な von Mises の破壊規準を用いた超過応力型の弾粘塑性モデル³⁾（以降、von Mises 弾粘塑性モデル）を導入した。

超過応力型の弾粘塑性モデルでは弾塑性モデルと違い、塑性ひずみ発生時に、応力状態が静的降伏曲面の外側に出ることを許容し、粘塑性流れ則でひずみ速度に応じた塑性ひずみ速度を制御し、高ひずみにおける大きな応力を評価する。粘塑性流れ則に用いられる粘塑性ポテンシャル関数の関数形によっても多様なモデルが提案されているが、本研究では von Mises の破壊規準を対象にして Perić が提案した次式を用いた。

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\bar{\mu}} \left[(q/\sigma_y)^{1/\epsilon} - 1 \right] \quad (1)$$

なお、 q は偏差応力、 σ_y は静的な降伏応力であり、 $\bar{\mu}$ は粘性パラメータ、 ϵ は速度感度パラメータと呼ばれる材料定数である。本モデルでは一軸圧縮条件下での軸ひずみ速度 α [1/s]と強度 q_u が次の関係にある。

$$q_u = \sigma_y \times (\alpha \bar{\mu} + 1)^\epsilon \quad (2)$$

ひずみ速度 α が大きくなれば強度が増大し、0 に近づけば静的な降伏応力 σ_y に収束する。 $\bar{\mu}$ と ϵ による q_u のひずみ速度依存性の変化を模式的に表したのが図1である。(a) ϵ を1に固定したとき、 q_u は α に関する線形関数となり、 $\bar{\mu}$ が大きいほどひずみ速度が速くなった際の強度増加が大きくなる。

キーワード MPM, DDA, 切削, ひずみ速度依存性, von Mises, 弾粘塑性

連絡先 〒739-0046 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院先進理工系科学研究科 TEL 082-424-7785

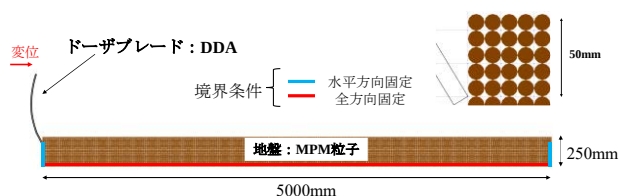


図2 MPM-DDAによる切削解析モデル

また、(b) $\bar{\mu}$ を固定した状態では、 ϵ を1より大きくすればひずみ速度が速くなるほど、強度の増加率が上がり、 ϵ を1より小さくすれば逆になる。

3. 弾粘塑性モデルを用いた地盤切削解析

von Mises 弾粘塑性モデルを導入した MPM-DDA により油圧ショベルのドーザブレードを用いた地盤切削実験^{1,2)}の再現解析を行い、同手法の適用性を検討する。実験の詳細は文献^{1,2)}に譲るが、13 t 級油圧ショベルで締固めた地盤上を走行しながら、前面に付属するドーザブレードで水平に切削した。MPM-DDA による再現解析モデルを図2に示す。地盤を MPM の粒子で、ドーザブレードを単一の DDA ブロックでモデル化した。ドーザは弾性体 (ヤング率: 10^7 GPa, ポアソン比: 0.0)、地盤は von Mises の弾粘塑性モデル (ヤング率: 2.45 MPa, ポアソン比: 0.4, 密度: 1.9 g/cm^3) を使用した。粘性パラメータ $\bar{\mu}$, 速度感度パラメータ ϵ , そして粘着力 c (または σ_y) の値は、実験地盤の土試料に対し複数のひずみ速度 (1, 2, 4, 5.2 %/min) で行った一軸圧縮試験結果にフィッティングさせた。ただし、切削中のひずみ速度は非常に大きく (解析では 200 %/s 程度) 室内試験結果を外挿することになるので、複数の ϵ ($= 0.1, 0.25, 0.3$) について $\bar{\mu}$ と c を定めパラメトリック・スタディを行った。 $\bar{\mu}$ と c の具体的な値は図3に示した。

自重による初期応力を与えたうえで、ドーザに右向きに 3 m の変位を 3.5 s (時間増分 0.0001 s) で与えた。地盤の変形過程 (図3) は 3 ケースとも土がドーザ形状に沿って巻き上がるように変形し、実験²⁾と同様の挙動を示した。切削抵抗値 (図4) は、比較のため von Mises の弾塑性モデルでの結果も示したが、弾粘塑性モデルでは静的強度を用いた弾塑性モデルよりも大きな切削抵抗が生じた。特に $\epsilon = 0.25, 0.3$ のケースでは実験での観測値 (100~200 kN) に近い切削抵抗が得られた。したがって、適切なパラメータを設定すれば実機での切削時の地盤の挙動を表現できる可能性が示された。

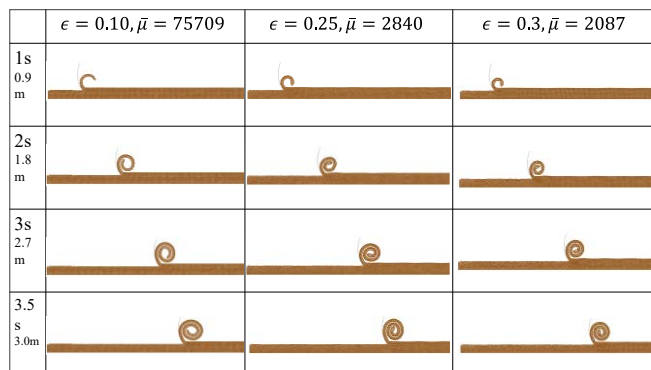


図3 各パラメータの解析結果

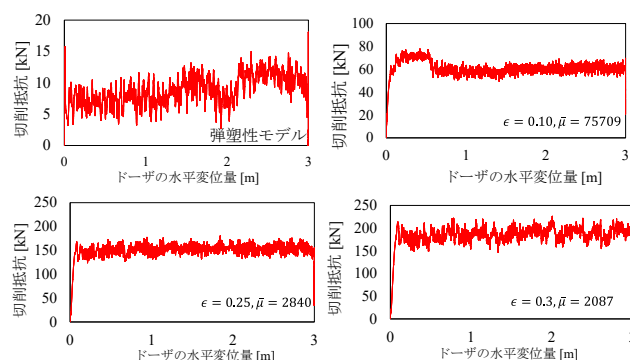


図4 各パラメータの切削抵抗値の変化

4. まとめと今後の課題

本研究では建設機械による地盤の切削・掘削のような高速で土に载荷する現象を表現するために、土の強度のひずみ速度依存性を考慮可能な von Mises 弾粘塑性モデルを MPM-DDA に導入してドーザブレードによる地盤切削解析を行った。その結果、適切なパラメータの最適値を与えることができれば、実機での地盤挙動を再現できることが確認された。

ただし、パラメータの決定方法については課題が残る。今後は、実験的にパラメータを決定するために高ひずみ速度域での土の強度評価法を検討し、開発手法の適用性向上を進めていく。

5. 参考文献

- 河野ら：MPM-DDA による地盤のドーザ切削実験の再現解析，第 58 回地盤工学研究発表会，2023. (投稿中)
- 河野ら：油圧ショベルのドーザブレードを用いた地盤切削挙動に関する実験的研究，第 75 回令和 5 年度土木学会中国支部研究発表会，2023. (投稿中)
- de Souza Neto *et al.*：非線形有限要素法 弾塑性解析の理論と実践，森北出版株式会社，2012.