

京都大学 学生員 ○吉川 峻
 京都大学大学院 学生員 竹川 遊大
 京都大学大学院 正会員 肥後 陽介
 京都大学大学院 正会員 音田 慎一郎

1. はじめに

気候変動の影響によって降雨強度は激しさを増しており、短時間豪雨の発生回数も増加している。豪雨による水害を防ぐために、河川において越流が生じても決壊に至らない粘り強い堤防の整備が求められている。堤防の粘り強さを評価するには越流時の堤体を再現するシミュレーションが必要であるが、堤防法面の侵食挙動を土質力学的なモデルで再現できる解析手法の開発は未だに課題である。

侵食挙動は土の大変形や剥離を伴うために、粒子法を用いた解析が有用であると考えられる。そこで本研究では、Sulsky et al.¹⁾ が提案した粒子法の一つである Material Point Method(MPM) の派生手法である GIMP 法²⁾ に Mohr-Coulomb・Drucker-Prager(MCDP) モデルを導入し、表面流による摩擦せん断応力を模擬した水平外力を粘着性地盤表面に与えることによって、擬似的に表面侵食解析を行い、表面侵食解析に対する MPM の適用性を検証した。

2. 定式化と補間関数

等方線形弾性体の構成式と、土の弾完全塑性体を仮定した Mohr-Coulomb・Drucker-Prager(MCDP) モデルで降伏基準と塑性ポテンシャルを定義し、支配方程式は質量保存則と運動方程式を用いた。

MPM の計算ステップが進行する過程において、粒子と背景格子間で受け渡す物理量は補間関数によって決定される。Sulsky et al.¹⁾ は 1 次の形状関数を補間関数として用いたが、粒子が格子をまたぐ際に応力が反転し、数値振動が生じるという問題を有していた。Bardenhagen and Kober²⁾ は粒子の支配領域を導入し (Fig.1), 粒子が格子をまたぐ際に粒子領域内で応力が連続的に変化するよう改良した、GIMP 法を提案した。

GIMP 法は、計算ステップ毎に粒子の支配領域を更新する contiguous particle GIMP(cpGIMP) 法と支配領域を更新しない uniform GIMP(uGIMP) 法の 2 種類に大別される。cpGIMP 法では、地盤が伸張するような挙動を示す際にも、粒子の支配領域の変化によって連続体としての解析が可能となっている。本解析では、侵食された土は地盤とは不連続なものであると考えられるため、支配領域の更新を行わない uGIMP 法を用いている。

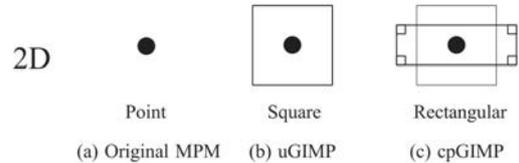


Fig.1 MPM と GIMP の支配領域³⁾

3. 解析条件

解析に用いたモデルを Fig.2 に示す。解析対象は 9.8cm × 1.9cm の水平地盤であり、土相のみの一相系である。そこで、水流による摩擦せん断応力を表現するために、地盤表面右半分の領域の各格子に 0.015 N の一定な水平外力を全ステップにおいて与えた。この外力は平均流速が 1.2 m/s である際の壁面せん断応力に相当する。また、粒子が下流側に流されるよう、地表面より上部の領域においても各格子点に 0.015 N の格子点外力を与えている。解析に用いた物性値と解析条件は Table.1 に示す通りである。

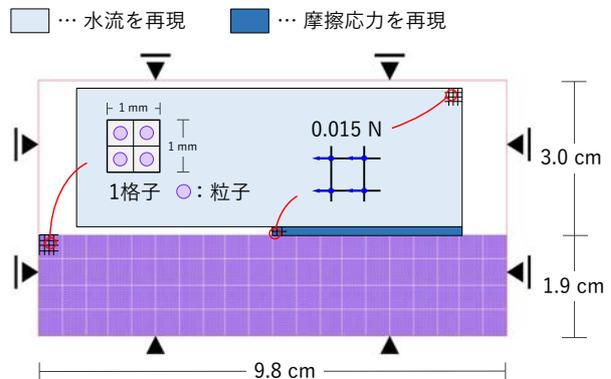


Fig.2 侵食解析に用いたモデル図

密度 (g/cm ³)	2.138	計算格子幅 (mm)	1
初期間隙比	0.45	粒子支配領域幅 (mm)	0.5
ラム定数 λ (kN/m ²)	6.0 × 10 ³	計算時間幅 (sec)	3.0 × 10 ⁻⁶
ラム定数 μ (kN/m ²)	3.0 × 10 ³	計算step数	15000
粘着力 (kN/m ²)	10	総粒子数	7448
内部摩擦角 (°)	20	総格子点数	5151
ダイレイタンシー角 (°)	0	初期応力解析	地盤のみ自重解析

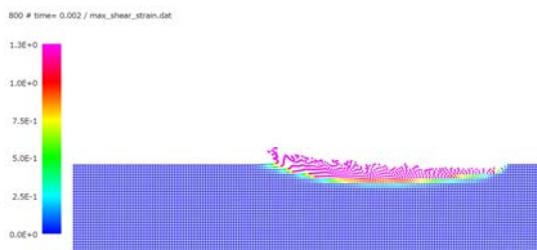
Table.1 侵食解析に用いた物性値と解析条件

4. 解析結果

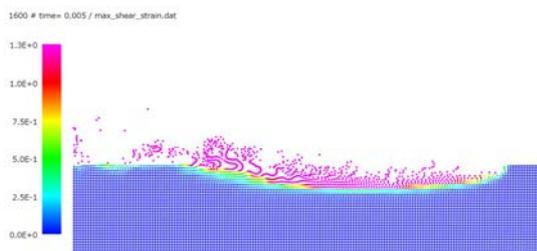
地盤の形状と各粒子の最大せん断ひずみ分布を Fig.3 に示す。地盤の形状変化に着目すると、まずは格子点外力を与えている表面近くの粒子が外力方向に変位し、それに伴って内部の粒子にも外力方向への変位、変形が生じることが観察される。水平応力による土の侵食挙動を、定性的に再現できていると考えられる。最大せん断ひずみは、格子点外力を入力している表面近くで大きな値となり、侵食の進行に伴って徐々に分布が深くなった。表面近くの土は格子点外力によって局所的なせん断破壊を起こすため、最大せん断ひずみの値が大きいと考えられる。

$\phi = 30^\circ$, $c = 10 \text{ kN/m}^2$ である地盤の解析結果を Fig.4 に示す。最大せん断ひずみに注目すると、 ϕ が大きいと僅かに分布が深くに及んでいるため、侵食角も深くなっていることが予想される。肥後ら⁴⁾の研究では、粘着性土の侵食はせん断破壊であり、Fig.6 に示すモールの応力円を用いると破壊角の方向 $\theta = \phi/2$ と評価できることを示した。解析結果で得られた内部摩擦角が破壊面角度に与える影響は、既往の研究結果に整合するものであった。

$\phi = 20^\circ$, $c = 0 \text{ kN/m}^2$ である地盤、つまり非粘着性土の解析結果を Fig.5 に示す。表面の砂のみが輸送されるという非粘着性土の侵食は、表現されなかった。地盤全体がすぐに破壊規準に達し、連続体として全体的に塑性変形してしまうことが原因として考えられる。非粘着性土の定性的な侵食挙動を再現するためには、土粒子が浮遊し、輸送されるというより不連続的な挙動を取り扱える解析が必要である。



(a) step800 0.0024sec



(b) step1600 0.0048sec

Fig.3 地盤の粒子位置と最大せん断ひずみ分布 ($\phi = 20^\circ$, $c = 10 \text{ kN/m}^2$)

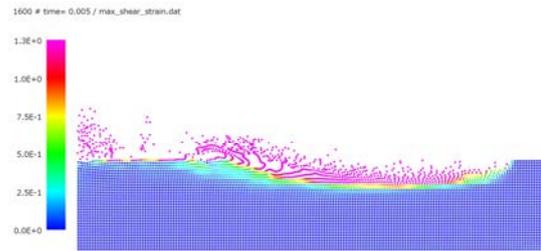


Fig.4 地盤の粒子位置と最大せん断ひずみ分布 (step1600 0.0048sec, $\phi = 30^\circ$, $c = 10 \text{ kN/m}^2$)

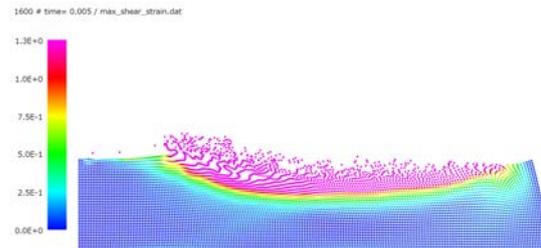


Fig.5 地盤の粒子位置と最大せん断ひずみ分布 (step1600 0.0048sec, $\phi = 20^\circ$, $c = 0 \text{ kN/m}^2$)

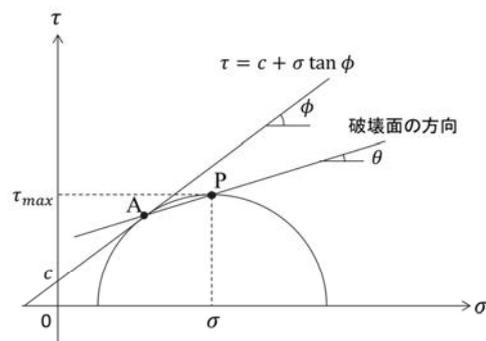


Fig.6 侵食破壊時のモールの応力円

5. 結論と今後の課題

MPM が粘着性土の表面侵食に適用性を有することが確認され、表面侵食はせん断破壊として解釈できることを解析の観点から示した。また、土の内部摩擦角や粘着力といった強度特性による解析結果の変動を再現することができた。今後は、液相を加えた二相系での解析や流体解析との連成といった、水を定性的に表すモデルでの解析が必要である。

参考文献

- 1) Sulsky, D., Chen, Z. and Schreyer, H.L. : *Comput. Methods Appl. Engrg.*, **118**, pp.179-196, 1994.
- 2) Bardenhagen, S.G. and Kober, E.M. : *Computer Modeling in Engineering and Science*, **5**(6), pp.477-495, 2004.
- 3) Kiriya, T. and Higo, Y. : *Soils and Foundations*, **60**(6), pp.1422-1439, 2020.
- 4) 肥後陽介, 音田慎一郎, 高野大樹, 山内敏貴 : 土木学会論文集 B1 (水工学), **74**(5), pp.901-906, 2018.