

半陰的 MPM によるサクション依存型構成モデルを用いた斜面浸透崩壊解析

Semi-Implicit MPM with Suction Dependant Constitutive Model for Seepage-induced Slope Failure Analysis

飛弾野壮真¹⁾ 森口周二¹⁾ 寺田賢二郎¹⁾

Soma Hidano, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada

¹⁾東北大学 (〒 980-8572 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, E-mail: souma.hidano.t4@dc.tohoku.ac.jp)

The standard material point method (MPM) for unsaturated soil employs the explicit time integration scheme using the large water bulk modulus but has two weakness. One is the oscillation of pore water pressure and the other is the large computational cost. To overcome these weaknesses, we have proposed a semi-implicit MPM for unsaturated soil. In the semi-implicit MPM, water is assumed to be incompressible, and thus the numerical stability and computational efficiency are improved. Using the semi-implicit MPM, we achieved simulating infiltration-induced slope failure, but there is a failure mode difference due to the excessive numerical viscosity of the interpolation and ignoring the property of unsaturated soil in the constitutive model. Thus, in this study, we incorporate the semi-implicit MPM for unsaturated soil with XPIC interpolation, which suppresses excessive numerical viscosity and numerical error, and suction-dependent model, respectively. In addition, the effects of them are validated from simulation of the model experiment of infiltration-induced slope failure.

Key Words : Unsaturated soil, Seepage failure, Material point method, Suction dependant model

1. 研究背景と目的

近年、豪雨の頻発に伴い、斜面災害が増加傾向にある。このような斜面災害は、不飽和土から飽和土への遷移過程での、雨水の浸透による間隙水圧の増加、すなわち、土骨格の有効応力の減少によって引き起こされる。この浸透から崩壊までを一貫して解ける手法として Material Point Method (MPM) が注目されている。粒子法の一つである MPM は、有限要素法と類似のアルゴリズムであり、大変形を扱う場合でもメッシュの破綻が起きない利点がある。また、他の粒子法と比べると、運動方程式等の求解は Euler 格子上の点で行うため、近傍粒子探索が不要であり、計算コストを抑えることができる。

しかしながら、この MPM を用いた研究は一般に飽和土を対象としたものが大半であり、不飽和土への適用 [1][2] は少ない。加えて、陽解法を採用しながら間隙水の微圧縮性を仮定する場合が多く、非常に大きな水の体積弾性率により、間隙水圧が不安定となるだけでなく、CFL 条件を満たすために時間刻み幅を小さくしなければならない [3][4]。これらの問題に対して、筆者らは間隙水の非圧縮性を仮定する fractional-step 法を採用した半陰的 MPM を提案している [5]。その中で、斜面浸透崩壊実験の解析を行っているが、実験と解析との崩壊モードの差異を課題として挙げている。これには、採用した物理量の更新方法の過度な数値粘性の抑制や、不飽和土の特性を反映させた構成則への改良が必要と考えられる。そこで本研究では、数値粘性の抑制と安定性の両立を目的に XPIC [6] を用いた物理量更新と、不飽和土特性を反映させるサクション依存型構

成モデルを導入し、それらによる崩壊モードの変化を確認する。

2. 研究手法

(1) 支配方程式

土骨格と間隙水の密度 $\bar{\rho}_s, \bar{\rho}_w$ は、土粒子密度および水の密度 ρ_s, ρ_w を用いて以下のように表される。

$$\bar{\rho}_s = (1 - \theta)\rho_s, \quad (1)$$

$$\bar{\rho}_w = \theta s_w \rho_w. \quad (2)$$

ここで、 θ は間隙率、 s_w は飽和度である。このとき、土骨格と間隙水からなる混合体の連続式は以下のように表される。

$$\theta c_w \frac{D^s p_{c_w}}{Dt} + s_w \nabla \cdot \mathbf{v}_s + \nabla \cdot [\theta s_w (\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_s)] = 0. \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{v}_s, \mathbf{v}_w$ はそれぞれ、土骨格の速度、間隙水の速度を表し、サクション p_{c_w} は、 $p_{c_w} = p_a - p_w$ として間隙空気圧と間隙水圧の差とする。また、 c_w は水分特性曲線から求まる比水分容量であり、本研究では VG モデル [7] を採用する。このとき、有効飽和度 s_{we} は以下の式で表される。

$$s_{we} = \left[1 + (\alpha_{vg} p_{c_w})^{n_{vg}} \right]^{-m_{vg}}. \quad (4)$$

ここで、 $\alpha_{vg}, n_{vg}, m_{vg}$ はパラメータである。

また、土骨格と間隙水の運動方程式は以下のように表される。

$$\bar{\rho}_s \mathbf{a}_s = \nabla \cdot [\boldsymbol{\sigma}' - (1 - \theta) s_w p_w \mathbf{I}] + \bar{\rho}_s \mathbf{b} + \hat{\mathbf{p}}_s, \quad (5)$$

$$\bar{\rho}_w \mathbf{a}_w = -\nabla \cdot (\theta s_w p_w \mathbf{I}) + \bar{\rho}_w \mathbf{b} + \hat{\mathbf{p}}_w. \quad (6)$$

ここで, a_s, a_w は, 土骨格と間隙水の加速度であり, b は物体力, σ' は土骨格の応力, I は二階の恒等テンソルである. また, \hat{p}_s, \hat{p}_w は土骨格と間隙水の相互作用力であり, 以下の式で表現される.

$$\hat{p}_s = -\hat{p}_w = q_{ws} (v_w - v_s) - p_w \nabla(\theta s_w). \quad (7)$$

ここで, $q_{ws} = \theta s_w \bar{\rho}_w g / k_{ws}$ であり, g は重力加速度の大きさ, k_{ws} は透水係数である. k_{ws} は飽和透水係数 k_{ws}^{sat} から以下の式で算出する [8].

$$k_{ws} = k_{ws}^{\text{sat}} (s_w)^{\xi_{vg}} \left\{ 1 - \left[1 - (s_w)^{\frac{1}{m_{vg}}} \right]^{m_{vg}} \right\}^2. \quad (8)$$

ここで, ξ_{vg} はパラメータである.

なお, 本研究では簡単のために間隙空気密度は土骨格や間隙水の密度に対して十分に小さいと仮定し, 間隙空気密度と圧力はゼロと仮定する [2]. また, 粒子が土骨格を表現し, それを基準として間隙水を表現するため, 土骨格は Lagrange 的に記述し, 間隙水は Euler 的に記述する.

(2) 構成則

本研究では, 超弾性構成則の一つである Hencky model を用い, 塑性変形のために次の Drucker-Prager の降伏関数を用いる.

$$\Phi(\sigma', c) = \sqrt{J_2(s)} + \eta p - \xi c. \quad (9)$$

ここで, $J_2(s)$ は偏差応力 $s = \sigma' - pI$ の第二不変量であり, 次式で表される.

$$J_2 = \frac{1}{2} s : s. \quad (10)$$

また, $p = \frac{1}{3} \text{tr}[\sigma']$ は静水圧応力, c は粘着力である. 係数 η, ξ は内部摩擦角 ϕ より定まる材料パラメータであり, 平面ひずみの条件を仮定して, 次式を用いる.

$$\eta = \frac{3 \tan \phi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}}, \quad (11)$$

$$\xi = \frac{3}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}}. \quad (12)$$

Drucker - Prager モデルについては, 過剰なダイレイタンシーを抑制するため, 一般に非関連流れ則が用いられる. 本研究では次の流れポテンシャルを採用する.

$$\Psi(\sigma') = \sqrt{J_2(s(\sigma'))} + \bar{\eta} p. \quad (13)$$

ここに, $\bar{\eta}$ は摩擦角 ϕ をダイレイタンシー角 $\psi < \phi$ に置き換え, 式 (11) と同様に計算される. 上記の塑性モデルにおいて, 次の負荷 / 除荷条件が付帯される.

$$\Phi \leq 0, \quad \dot{\gamma} \geq 0, \quad \dot{\gamma} \Phi = 0. \quad (14)$$

上記の構成則に加えて, サクシオンに依存した粘着力を考慮するために, 粘着力を次のように定義する [1][9].

$$c = c' + c_s, \quad (15)$$

$$c_s = c_{s,\text{max}} \{1 - \exp[-B_s(p_{c_w}/p_{\text{atm}})]\}. \quad (16)$$

ここで, c' は, 飽和状態の有効粘着力であり, c_s は, 不飽和状態でのサクシオンによる粘着力である. また, $c_{s,\text{max}}$ は, サクシオンが増加したときの最大の粘着力であり, B_s はそのサクシオン依存の粘着力の変化の仕方をコントロールするパラメータ, p_{atm} は大気圧である.

さらに, 膨張状態の土骨格が圧縮される場合, 初期状態から同様の圧縮を受けた場合と同等の応力を持つとは考えにくい. そのため, 初期状態よりも膨張している間は, 土骨格の静水圧成分を 0 とする流動化モデル [10] を採用する. したがって, 土骨格の体積弾性係数は, 以下のように表される.

$$K_s = \begin{cases} K_s^{\text{init}} & \text{if } \varepsilon_v^e < 0 \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (17)$$

ここで, K_s は初期の土骨格の体積弾性係数, ε_v^e は体積弾性ひずみである.

(3) 時間離散化

本研究で採用する fractional-step 法では, 加速度を以下のように分解する.

$$a_\alpha^{n+1} = \frac{v_\alpha^{n+1} - v_\alpha^n}{\Delta t} = \frac{v_\alpha^{n+1} - v_\alpha^*}{\Delta t} + \frac{v_\alpha^* - v_\alpha^n}{\Delta t} = a_\alpha^{**} + a_\alpha^*. \quad (18)$$

ここで, 下付き添え字の $\alpha = s, w$ は土骨格または間隙水の値であることを, 上付き添え字の n は時刻 t^n の値であることを示しており, Δt は時間増分である. また, 中間速度 v_α^* および中間加速度 a^* , 修正加速度 a^{**} は, 速度と次の関係にある.

$$v_\alpha^* = v_\alpha^n + a_\alpha^* \Delta t, \quad v_\alpha^{n+1} = v_\alpha^* + a_\alpha^{**} \Delta t. \quad (19)$$

さらに, 相互作用項については, 時間刻み幅を大きくするために中間速度場を用いて評価する [4]. 以上より, 時間離散化した運動方程式は以下のように表される.

$$\bar{\rho}_s^n v_s^* / \Delta t - q_{ws}^n (v_w^* - v_s^*) = \bar{\rho}_s^n v_s^n / \Delta t + \nabla \cdot \{ \sigma^n - (1 - \theta^n) s_w^n p_w^n I \} + \bar{\rho}_s^n b^n - p_w^n \nabla(\theta^n s_w^n), \quad (20)$$

$$\bar{\rho}_s^n v_s^{n+1} / \Delta t = \bar{\rho}_s^n v_s^* / \Delta t - \nabla \cdot [(1 - \theta^n) s_w^n \Delta p_w^{n+1} I] - \Delta p_w^{n+1} \nabla(\theta^n s_w^n), \quad (21)$$

$$\bar{\rho}_w^n v_w^* / \Delta t + q_{ws}^n (v_w^* - v_s^*) = \bar{\rho}_w^n v_w^n / \Delta t - \nabla \cdot (\theta^n s_w^n p_w^n I) + \bar{\rho}_w^n b^n + p_w^n \nabla(\theta^n s_w^n), \quad (22)$$

$$\bar{\rho}_w^n v_w^{n+1} / \Delta t = \bar{\rho}_w^n v_w^* / \Delta t - \nabla \cdot (\theta^n s_w^n \Delta p_w^{n+1} I) + \Delta p_w^{n+1} \nabla(\theta^n s_w^n). \quad (23)$$

また, 混合体の質量保存則および式 (3) より, 圧力 Poisson 方程式は次のように表される.

$$-\theta^n c_w^n \frac{\Delta p_w^{n+1}}{\Delta t} + s_w^n \nabla \cdot a_s^{**} \Delta t + \nabla \cdot [\theta^n s_w^n (a_w^{**} - a_s^{**}) \Delta t] = -s_w^n \nabla \cdot v_s^* - \nabla \cdot [\theta^n s_w^n (v_w^* - v_s^*)]. \quad (24)$$

(4) 空間離散化

MPM を用いて空間離散化する場合、任意の物理量 Φ を保存するのは粒子であるため、各ステップで格子点の物理量は粒子から次式でマッピングした値とする．

$$\Phi_I = \frac{\sum_p N_{pI} m_p \Phi_p}{\sum_p N_{pI} m_p}. \quad (25)$$

ここで、下付き添え字の p, I は、それぞれ粒子、格子点の物理量であることを表し、 N_{pI} は格子点 I の粒子 p に対する基底関数である．また、運動方程式および圧力 Poisson 方程式の解が、各格子点での現ステップの“速度”および“間隙水圧の増分”となるため、次式のように格子点から粒子へと次式で内挿する．

$$\Phi_p = \sum_I N_{pI} \Phi_I. \quad (26)$$

ただし、速度については、次の二種類の内挿が考えられる．

$$\mathbf{v}_{ap}^{n+1} = \mathbf{P} \mathbf{v}_{ap}^n + \mathbf{S} \mathbf{a}_{al}^{n+1} \Delta t, \quad (27)$$

$$\mathbf{P} = \begin{cases} \mathbf{S} \mathbf{S}^+ & : \text{Option A} \\ \mathbf{I} & : \text{Option B} \end{cases} \quad (28)$$

ここで、 \mathbf{S} は格子から粒子への内挿に関するマトリクスであり、 \mathbf{S}^+ は粒子から格子へのマッピングに関するマトリクスである．ただし Option A については、前述のとおり MPM では前のステップの格子の情報は保存されず粒子からのマッピングが必要なため、以下の関係式を用いた．

$$\mathbf{S} \mathbf{v}_{al}^{n+1} = \mathbf{S} (\mathbf{v}_{al}^n + \mathbf{a}_{al}^{n+1} \Delta t) = \mathbf{S} \mathbf{S}^+ \mathbf{v}_{ap}^n + \mathbf{S} \mathbf{a}_{al}^{n+1} \Delta t. \quad (29)$$

式 (28) における Option A は、Particle-in-Cell (PIC) [11] という解析手法で用いられており、Option B は Fluid-Implicit-Particles (FLIP) [12] という解析手法で用いられている．前者は、数値粘性が大きい、計算が発散しにくい特徴があり、後者は数値粘性は抑制されるが、数値誤差の蓄積のために計算が発散しやすいため、大変形などの計算が不安定になりやすい条件では過度な数値粘性を許容して Option A を採用しなければならない場合がある．

この課題に対し、Option A, B を一定の割合で組み合わせる形式 [13] や、Affine 変換による角運動量の保存によって精度を向上させる APIC [14] などが提案されており、そのうちのひとつに XPIC [6] がある．この手法は、Option A の数値粘性の原因である粒子から格子へのマッピング（外挿）の精度の改善を図りながら、安定性を保つ手法である．また、数値粘性の抑制の度合いを調整できるため、調整によっては、計算が発散しやすい大変形時にも最大限数値粘性を抑制しながら、発散しない条件で解析を実施できるという利点がある．

Option A, B に対して、XPIC では \mathbf{P} は次のように表される．

$$\mathbf{P} = \mathbf{I} - (\mathbf{I} - \mathbf{S} \mathbf{S}^+)^m : \text{XPIC}(m). \quad (30)$$

ここで、 m は、XPIC における数値粘性の抑制の度合い（スムージングの度合い）を示しており、 $m = 1$ で

Option A の式と一致し、 m が大きくなるにつれて数値粘性が抑制され、Option B を用いたときの値に近づく [6]．この式から、式 (27) の右辺第一項について、前のステップの粒子の速度をマッピングなしに採用することで数値粘性を抑制しながら、合わせてスムージングすることで数値誤差の蓄積も抑制される．より具体的なアルゴリズムについては Hammerquist and Narin (2017) [6] を参照されたい．

また、間隙水圧も速度と同様に Option A, B の内挿が考えられる．ただし、不飽和土に対して排水条件 ($p_w = 0$) を設定した場合に、Option A の過度な数値粘性により、サクシオンが維持されることなく即座に土全体が $p_w > 0$ となることが確認されている [5]．そのため、不飽和土に対しては Option B が適切だが、大変形時には、格子内の粒子数が減少することにより、積分精度が低下し、応力振動が発生するため、間隙水圧が不安定になりやすい．この間隙水圧の不安定化は Option B の場合により顕著になる．そこで、本研究では飽和度を基準として次の条件を適用して粒子の間隙水圧を内挿する．

$$p_{wp}^{n+1} = \begin{cases} \sum_I N_{pI} p_{wI}^{n+1} & (s_{wp}^n = 1): \text{Option A} \\ p_{wp}^n + \sum_I N_{pI} \Delta p_{wI}^{n+1} & (s_{wp}^n < 1): \text{Option B} \end{cases} \quad (31)$$

このアダプティブな内挿の方式によって、崩壊しやすい飽和領域は発散しにくい Option A を採用でき、不飽和土の領域は数値粘性を抑えた Option B を採用できる．この問題に対しても XPIC の有効性が期待できるため、今後導入予定である．

3. 斜面浸透崩壊実験の模擬解析

水の浸透による斜面崩壊実験 [5] の模擬解析を行う．表-1 に材料パラメータを、寸法および境界条件、解析モデルは図-1 に示す．解析モデルにおける速度格子のサイズは 0.01×0.01 m で、一格子あたり 2×2 の粒子を配置する．時間刻み幅は 1.0×10^{-4} s とする．左の水槽は 120 s で 0.62 m まで水位を上昇させ、その後は一定の水位を保った．ただし、崩壊時に浸水口付近の粒子が裂けて連立方程式が収束しないことを防ぐために、その粒子の粘着力は $c = 10$ kPa とした．

本研究では複数ケースの解析を行うために計算コストを下げる必要があったため、妥当性が確認されている透水係数 ($k_{ws} = 4.21 \times 10^{-5}$ m/s) [5] よりも大きい透水係数 ($k_{ws} = 4.21 \times 10^{-3}$ m/s) を設定して解析を行う．そのため、浸透挙動および崩壊モードに透水係数による違いが発生すると考えられるが、サクシオン依存型モデルおよび XPIC の効果検証に主眼を置き、実験との詳細な比較は今後の課題としたい．これらの効果検証のため、表-2 に示す 8 つの条件で解析を行う．この表のうち、サクシオン依存型モデルのパラメータの $c_{sm \max}$ は、0, 20, 30 の 3 Case を設定した．0 はサクシオン依存型モデルを導入しないことを示す．また、同モデルのもう一つのパラメータである B_s は簡単のために 20 で固定した．

図-2 に示す実験結果から放射状に水が浸透したのち、斜面先端付近がまず崩壊し、それに続く形で上部の斜面が崩れるような段階的な崩壊が確認できる．これに対

表-1 斜面浸透崩壊実験の再現解析で使用する材料パラメータ

パラメータ	記号 (単位)	値
土粒子密度	ρ_s (kg/m ³)	2731
初期間隙率	θ^{init}	0.50
Young 率	E (MPa)	3.00
Poisson 比	ν	0.30
粘着力	c (kPa)	0.0
粘着力 (浸水口付近)	c (kPa)	10.0
内部摩擦角	ϕ (°)	35.0
ダイレイタンシー角	ψ (°)	0
水密度	ρ_w (kg/m ³)	1000
飽和透水係数	k_{ws}^{sat} (m/s)	4.21×10^{-3}
最小飽和度	s_w^r	0.02
最大飽和度	s_w^s	1.0
初期飽和度	s_w^{init}	0.1
初期間隙水圧	p_w^{init} (kPa)	-4.31
不飽和水分特性	α_{vg}	0.28
パラメータ	n_{vg}	12.898
	m_{vg}	0.923
	ξ_{vg}	0.5

表-2 模擬解析を行った各 Case の条件

Case	内挿形式	c_{smax}
1	Option A	0
2	XPIC(5)	0
3	Option A	20
4	XPIC(5)	20
5	XPIC(10)	20
6	Option A	30
7	XPIC(5)	30
8	XPIC(10)	30

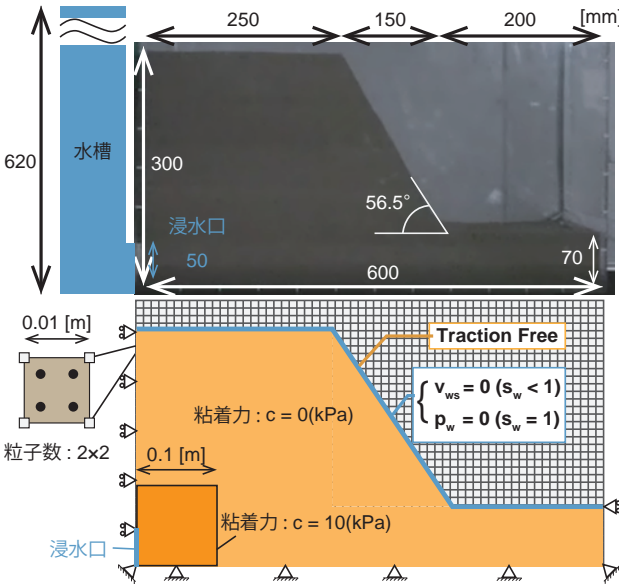


図-1 寸法，境界条件および解析モデル

し，図-3, 4 に示す解析結果からも同様に，初めに斜面先端付近が崩れている様子がいずれのケースでも確認できる．以降では，各ケースごとの比較を行い，XPIC，およびサクシオン依存型モデルの効果を検証する．

まず，Case 1, 2 の比較から，XPIC による数値粘性の抑制によって，Case 1 よりも 2 の方が先んじて崩壊が始まっている．これは，Case 3, 4 の比較からも確認できる．また，Case 1 の 110 s での崩壊土砂の到達距離と Case 2 の 100 s での到達距離が類似しているが，Case 2 の方が斜面先端上部の土砂の形状が保たれていることから，崩壊部が上部の土砂を引張る作用が抑えられており，数値粘性の抑制が確認できる．Case 2 の 110 s での土骨格の速度の大きさが 100 s, 120 s でのそれに対して小さくなっていることが確認できるが，こ

れは線形の形状関数を用いていることによって，cell を跨ぐ際に形状関数の勾配が急激に変化することに起因する "cell crossing error" [15] の影響があると考えられる．これに対しては，B-spline 関数や CPDI などが有効である [15]．次に，Case 1, 3 および，2, 4 の比較から，サクシオン依存型モデルによって，斜面先端付近が先んじて崩壊しており，先端上部が崩れずに保たれている．このときの Case 3, 4 の間隙水圧分布 (図-3) から，先端上部にあるサクシオンによって崩壊していない様子が確認できる．加えて，Case 3-5 と 6-8 の比較から， c_{smax} が大きくなることで，崩壊箇所が小さくなっている．このことから，崩壊モードに対して c_{smax} が影響を与えているといえるため，パラメータスタディによって最適な値を導き出すことや，数値材料試験などを通して，他の物理量から推定するなどの検討が，実現象の再現において重要である．また，今回は比較していない B_s の値についても同様に崩壊モードに影響を与える可能性があるため，今後の研究で比較・検討を行ってきたい．

最後に，Case 3-5 と 6-8 のそれぞれについて比較すると，Option A を採用している Case 3, 6 では，その他の Case に比べて速度場が乱れていないが，代わりに数値粘性によって斜面上部の土砂が比較的同時に崩れている．また，XPIC(5) よりもさらに数値粘性を抑制した XPIC(10) では 120 s でも先端上部の土砂が崩れずに形状を保っている．これに対して，Option A や XPIC (5) を採用した Case では左端付近で斜面がちぎれているが，本研究では損傷モデルを導入していないため，非物理的な損傷と考えられる．これに対しては，粒子数をさらに増やす，または B-spline 関数を形状関数に用いることが対策として有効である [15]．また，損傷モデル [16] については，その導入によって，斜面の先端と上部を切り離すことができればより明確な段階的な崩壊を表現できると考えられる．

4. 結論

不飽和土を対象とする半陰的 MPM に，より実現象に近い崩壊モードを表現するために，XPIC による物理量更新とサクシオン依存型構成モデルを導入し，その効果を検証した．まず，XPIC の導入によって，Option A の数値粘性が抑制され，崩壊部に非崩壊部が引っ張られる作用が抑制された．さらに，サクシオン依存型構成モデルによって，先端付近が先に崩壊し，続いて先端上部が崩れるような崩壊モードが確認できた．ただし，

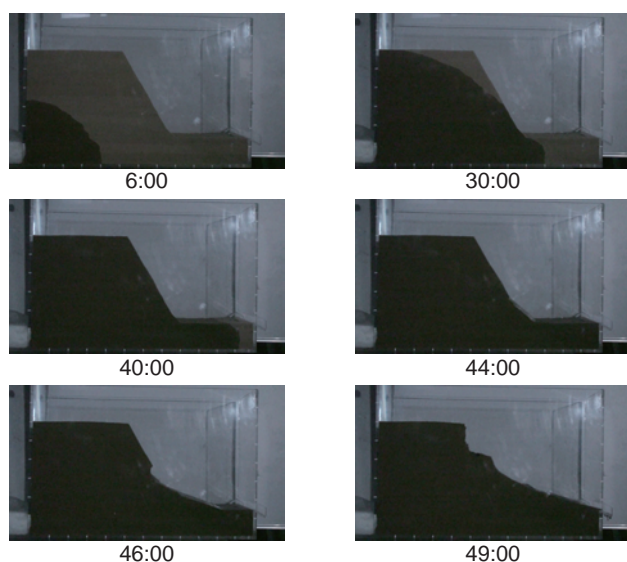


図-2 斜面浸透崩壊実験の浸透-崩壊挙動

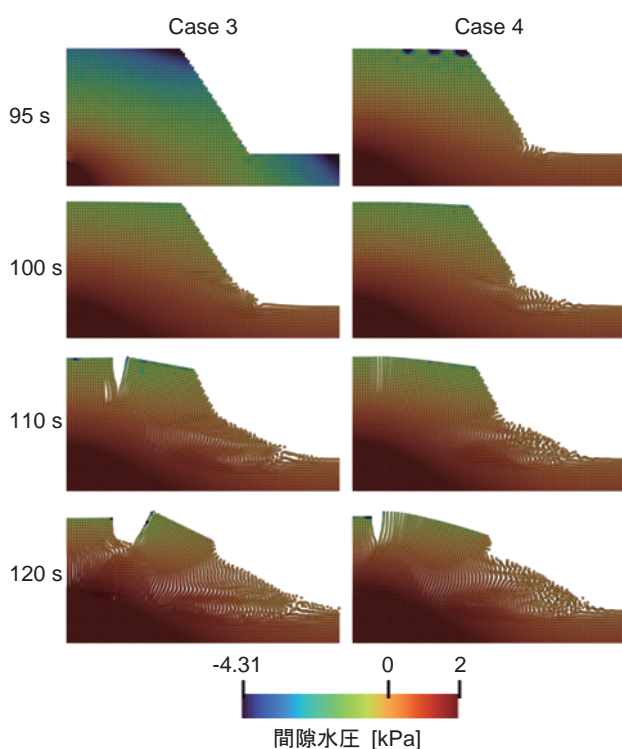


図-3 Case 3,4 の模擬解析の浸透-崩壊挙動（間隙水圧）

サクシオン依存型構成モデルのパラメータの Case 数が少ないため、より詳細な検討が必要である。加えて、パラメータの設定に理論的な裏付けができるように、数値材料試験などの実施が有効であると考えられる。また、線形の形状関数の採用に伴う cell crossing error や非物理的な損傷が確認できたため、その対策として B-spline 関数の導入が必要であり、実験のようなより明確な段階的崩壊を表現するためには、崩壊モデルの導入が必要であると考えられる。

参考文献

- [1] Yerro, A., Alonso, E. and Pinyol, N.: The material point method for unsaturated soils, *Géotechnique*, Vol. 65, No. 3, pp. 201–217, 2015.
- [2] Ceccato, F., Yerro, A., Girardi, V. and Simonini, P.: Two-phase dynamic mpm formulation for unsaturated soil, *Computers and Geotechnics*, Vol. 129, p. 103876, 2021.
- [3] Mieremet, M., Stolle, D., Ceccato, F. and Vuik, C.: Numerical stability for modelling of dynamic two-phase interaction, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 40, No. 9, pp. 1284–1294, 2016.
- [4] Kularathna, S., Liang, W., Zhao, T., Chandra, B., Zhao, J. and Soga, K.: A semi-implicit material point method based on fractional-step method for saturated soil, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 45, No. 10, pp. 1405–1436, 2021.
- [5] Hidano, S., Yamaguchi, Y., Takase, S., Moriguchi, S., Kaneko, K. and Terada, K.: Semi-implicit material point method for simulating infiltration-induced failure of unsaturated soil structures, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Under Review.
- [6] Hammerquist, C. C. and Nairn, J. A.: A new method for material point method particle updates that reduces noise and enhances stability, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 318, pp. 724–738, 2017.
- [7] van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 892–898, 1980.
- [8] Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 513–522, 1976.
- [9] Lian, Y., Bui, H. H., Nguyen, G. D., Zhao, S. and Haque, A.: A computationally efficient sph framework for unsaturated soils and its application to predicting the entire rainfall-induced slope failure process, *Géotechnique*, Vol. 0, No. 0, pp. 1–19, 2022.
- [10] Yamaguchi, Y., Takase, S., Moriguchi, S. and Terada, K.: Solid-liquid coupled material point method for simulation of ground collapse with fluidization, *Computational Particle Mechanics*, Vol. 7, pp. 209–223, 2020.
- [11] Harlow, F. H., Evans, M. and Richtmyer, R. D.: *A machine calculation method for hydrodynamic problems*, Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, 1955.
- [12] Brackbill, J. and Ruppel, H.: Flip: A method for adaptively zoned, particle-in-cell calculations of fluid flows in two dimensions, *Journal of Computational Physics*, Vol. 65, No. 2, pp. 314–343, 1986.

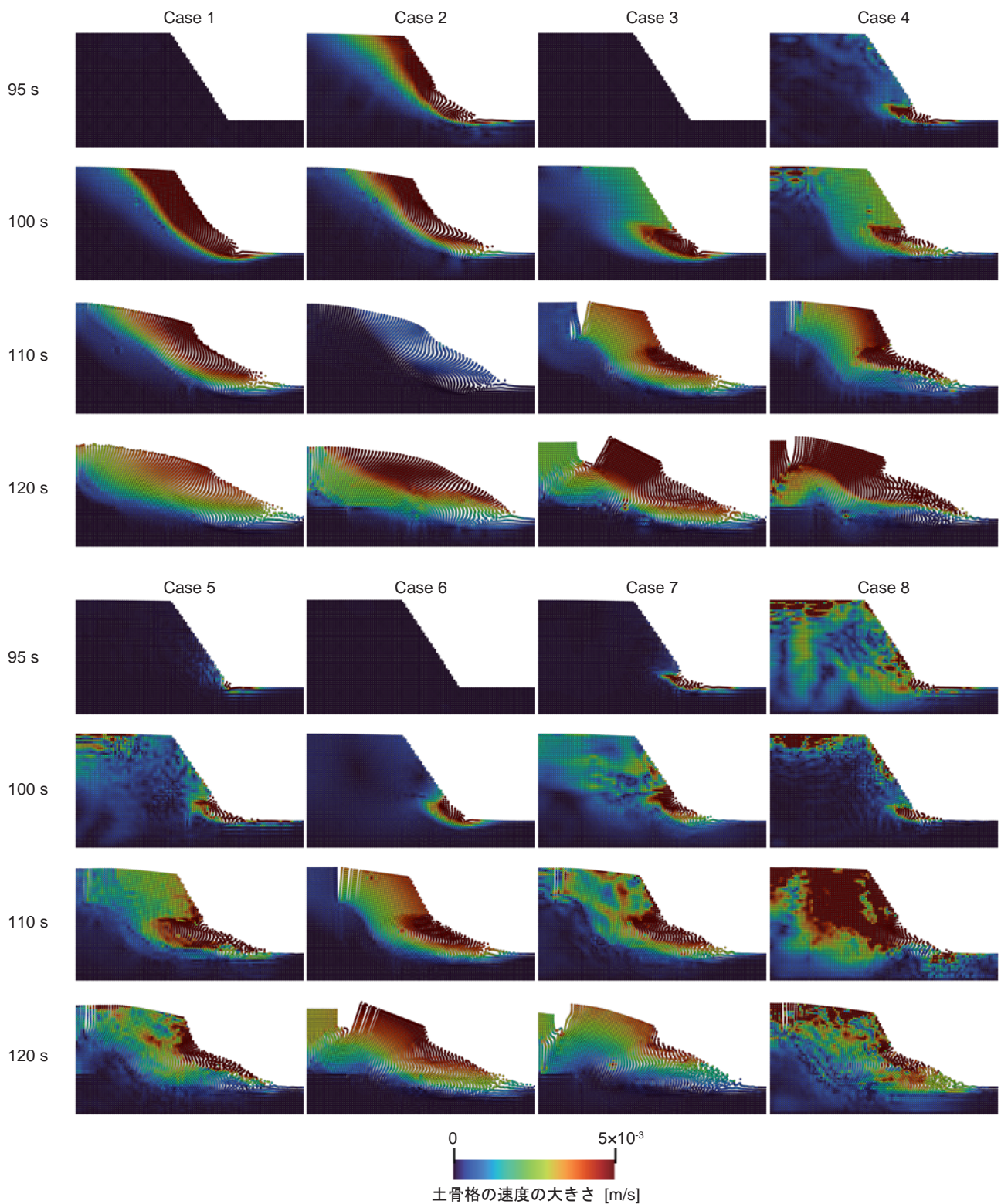


図-4 Case 1-8 の模擬解析の浸透-崩壊挙動（土骨格の速度の大きさ）

- [13] Bridson, R.: *Fluid simulation for computer graphics*, CRC press, second edition, 2015.
- [14] Jiang, C., Schroeder, C., Selle, A., Teran, J. and Stomakhin, A.: The affine particle-in-cell method, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 34, No. 4, jul 2015.
- [15] Nguyen, V. P., de Vaucorbeil, A. and Bordas, S.:

The Material Point Method: Theory, Implementations and Applications, Springer, 2023.

- [16] Sugai, R., Han, J., Moriguchi, S. and Terada, K.: Diffusive-discrete crack transition without remeshing achieved by extended b-spline-based implicit material point method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 421, p. 116771, 2024.