

一般セッション | 一般セッション (第三部門：材料・複雑現象の力学)

2026年5月16日(土) 10:35 ~ 11:50 | 会場(環境棟：4階講義室)

第3部門 (2)

座長:堀口 俊行(防衛大学校)

10:35 ~ 10:50

[13006] 下負荷面モデルを導入したRBSMによる金属六角棒の積層要素試験の再現解析 (シンポジウム講演概要)

*山田 滉一郎¹、山本 佳士¹ (1. 法政大学)

10:50 ~ 11:05

[13007] 摩擦構成則の陰的積分アルゴリズムによる3次元不連続変形法の高精度化 (シンポジウム講演概要)

*下方 淳¹、橋本 涼太² (1. 大成建設、2. 京都大学)

11:05 ~ 11:20

[13008] FEM による実規模落石防護土堤の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討 (シンポジウム講演概要)

瓦井 智貴¹、小室 雅人¹、岸 徳光¹、前田 健一³、内藤 直人⁵、中村 拓郎⁴、牛渡 裕二²、*柴田 蓮¹ (1. 室蘭工業大学、2. 構研エンジニアリング、3. 名古屋工業大学、4. 土木研究所寒地土木研究所、5. 豊橋技術科学大学)

11:20 ~ 11:35

[13009] U字型凍結管周りの土壌の凍結挙動に関する研究 (シンポジウム講演概要)

*大森 大夢¹、小関 良佑¹、松村 邦仁¹ (1. 茨城大学)

11:35 ~ 11:50

[13010] 不飽和浸透特性を考慮したMPM-VOF法連成解析の開発 (シンポジウム講演概要)

*西村 真衣¹、橋本 涼太¹、肥後 陽介¹ (1. 京都大学)

**下負荷面モデルを導入した RBSM による
金属六角棒の積層要素試験の再現解析（シンポジウム講演概要）**
Numerical Analysis of the Stacked Element Test for Hexagonal Metal Bars
Using RBSM with a Subloading Surface Model
(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

山田 滉一郎（法政大院・デザイン工） 山本 佳士（法政大・デザイン工）
Koichiro YAMADA, Hosei University
Yoshihito YAMAMOTO, Hosei University
E-mail: koichiro.yamada.6x@stu.hosei.ac.jp

To establish a seismic resistance evaluation method for discontinuous rock mass, experimental and numerical studies using stacked models of hexagonal bars have been conducted. Previous research has identified challenges in setting constitutive models, with a tendency to overestimate initial stiffness. In this study, a subloading surface model, which enables a smooth representation of elastoplastic transitions, was introduced into the RBSM considering geometric nonlinearity to reproduce element tests. The results demonstrated that the stiff degradation behavior observed after loading in the experiments can be accurately reproduced.

1. はじめに

長大橋や原子力発電所等の重要構造物は、構造物そのものの耐震性は当然のことながら、基礎岩盤や隣接斜面においても耐震性評価を実施することが不可欠である。近年、重要構造物周辺の不連続性岩盤斜面を対象とした地震時安定性評価が進められており、すべり破壊に限らず転倒や崩落などの複数の崩壊モードを想定した検討が注目されているが、それらを統一的に評価できる手法は十分に確立されていない。そこで、土木学会岩盤力学委員会岩盤動力学に関する研究小委員会斜面耐震 WG では、不連続性岩盤の地震時挙動を解明するため、金属六角棒を積み上げた斜面模型の加振実験と数値解析を実施してきた¹⁾。

著者らは WG の一環として、金属六角棒の室内要素試験および積層斜面模型の動的挙動について、剛体バネモデル (RBSM) を用いて評価を実施してきた²⁾。その結果、要素レベルから材料パラメータを再同定することにより、斜面模型の崩壊モード等を概ね再現できたが、要素試験の定量的な再現に課題を残す結果となった。特に、拘束圧の変化に伴う初期弾性係数の不連続性の再現について、新たな構成モデルの開発が必要であることが示唆された。

前述の課題を解決できる構成モデルとして下負荷面モデルが挙げられる。下負荷面モデルとは、Hashiguchi³⁾により提案された非線形の材料モデルであり、降伏関数に新たな変数である正規降伏比 R を導入するだけで弾性域から塑性域への滑らかな遷移を表現することが可能となる。そこで本研究では、上記問題の解明のための基礎検討として、幾何学的非線形性を考慮した RBSM に下負荷面モデルを導入し、金属六角棒の室内要素試験の再現を試みた。

2. 解析手法の概要

(1) 幾何学的非線形性を考慮した RBSM

RBSM とは、Fig.1 に示すように、対象を剛体要素と、それらをつなぐ複数のバネの集合体としてモデル化する手法である。要素間に分布するバネに非線形構成モデルを導入することで、ひび割れ、すべり等の不連続挙動を簡便に表現することができる。本研究では、RBSM と低減積分ディモシェンコはり要素の等価性に着目して新たに開発した、幾何学的非線形性を考慮した手法を用いた⁴⁾。

(2) 本研究で使用する下負荷面モデルの概要

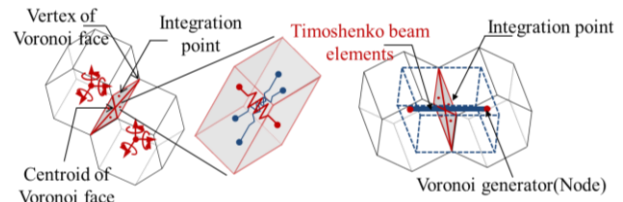


Fig. 1 RBSM overview

本研究では、バネに導入する構成モデルとして、陰的応力更新法を用いた弾塑性構成則の考え方を適用し、下負荷面モデルを導入して新たに開発した RBSM の構成モデル（以下、提案モデル）を用いて検討解析を実施した。ここでは、新たに開発した提案モデルについて説明する。

前節で示したように、RBSM では、各バネの応力およびひずみは次式のように 3 成分のベクトルで表現することができる。

$$\sigma = (\sigma, \tau_1, \tau_2)^T \quad (1)$$

$$\varepsilon = (\varepsilon, \gamma_1, \gamma_2)^T \quad (2)$$

ここで、 σ および ε は、垂直バネの応力およびひずみであり、 τ_1, τ_2 および γ_1, γ_2 は、それぞれ 2 つのせん断バネの応力およびひずみである。バネの応力 σ およびバネのひずみ ε は、以下の弾性構成則が成り立つとする。

$$\sigma = C(\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (3)$$

ここで、 C は弾性係数テンソル、 ε_p はバネのひずみの塑性ひずみ成分である。次に、本研究で用いる降伏関数 Φ は Drucker-Prager 型の弾塑性構成則に基づいており、以下のよう定義する。

$$\Phi(\bar{\tau}, \sigma, \bar{\varepsilon}_p) = \bar{\tau} + \eta(\bar{\varepsilon}_p) \cdot \sigma - c \quad (4)$$

ここで、 $\bar{\tau} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}$ 、 $\bar{\varepsilon}_p$ は相当塑性ひずみ、 $\eta(\bar{\varepsilon}_p)$ は硬化関数である。ここで、降伏関数 Φ に正規降伏比 R を導入することで、下負荷面モデルを前提とする降伏関数 Φ_{sub} を再定義する。

$$\Phi_{sub}(\bar{\tau}, \sigma, \bar{\varepsilon}_p) = \bar{\tau} + R(\eta(\bar{\varepsilon}_p) \cdot \sigma - c) \quad (5)$$

正規降伏比については、正規降伏比 R を用いた関数 $U(R)$ による発展則によって規定できる。

$$\dot{R} = \gamma U(R) \quad (6)$$

$$U(R) = u \cot \left(\frac{\pi}{2} \frac{R - R_e}{1 - R_e} \right) \quad (7)$$

ここで、 $\langle x \rangle$ は Macaulay の括弧である。 ($\langle x \rangle = \max(x, 0)$)

また, R_e は弾性限, u は正規降伏面への接近速度を規定する下負荷面パラメータである.

硬化関数 $\eta(\bar{\epsilon}_p)$ は, 等方線形硬化に基づいており, 以下のよう表すことができる.

$$\eta(\bar{\epsilon}_p) = \tan \varphi + \kappa \bar{\epsilon}_p \quad (8)$$

累積塑性ひずみについては, 以下のように塑性乗数 $\dot{\gamma}$ を用いた発展則によって与えられる.

$$\dot{\bar{\epsilon}}^p = \dot{\gamma} \quad (9)$$

ここで, $\dot{\bar{\epsilon}}^p$ は塑性ひずみ速度である. 流れ則は, 非関連流れ則に従うものとし, 塑性乗数 $\dot{\gamma}$ を用いて, 以下のように表すことができる.

$$\dot{\bar{\epsilon}}^p = \dot{\gamma} \frac{\partial \Psi}{\partial \sigma} \quad (10)$$

$$\Psi(\bar{\epsilon}, \sigma) = \bar{\epsilon} + \bar{\eta} \cdot \sigma \quad (11)$$

ここで, $\bar{\eta} = \tan \psi$ であり, ψ はダイラタンシー角である. 提案モデルでは, 上記の(1)~(11)式について, 井口ら⁹⁾が提案しているリターンマッピング法を用いて, 陰的に応力積分を実行した.

3. 岩盤を模擬した金属六角棒要素試験の再現解析

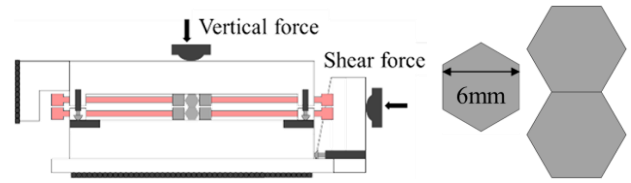
Fig. 2に既往の金属六角棒の室内要素試験の概要および解析モデルを示す. 対辺6mmの六角棒要素を上下2段で配置し, 所定の垂直応力になるように荷重制御で載荷後, 垂直応力を一定としながら変位制御でせん断力を載荷した. 垂直応力は, 実験と同様に, $\sigma_n = 0.05, 0.1$ および 0.4 MPa の3ケースで解析を実施した. 試験方法の詳細は参考文献⁹⁾を参照されたい.

Fig. 3に解析により得られたせん断応力—せん断変位関係を示す. ここで, 図中の Exp.は実験結果, DP は下負荷面を導入していないモデル (以下, 従来モデル), sub は提案モデルを示している. (a)より, 提案モデルでは, 従来モデルでは再現することができなかった, 実験で観測されている, 初期の弾性係数の不連続性を再現可能であることが確認できる. また, (b)より, 従来モデルでは, 直線的な弾性挙動を示すことから, 降伏までの剛性を過大に評価しているが, 提案モデルでは, 載荷直後から生じる剛性の低下を精度よく再現できており, 実験と比較的近い挙動を示していることが確認できる.

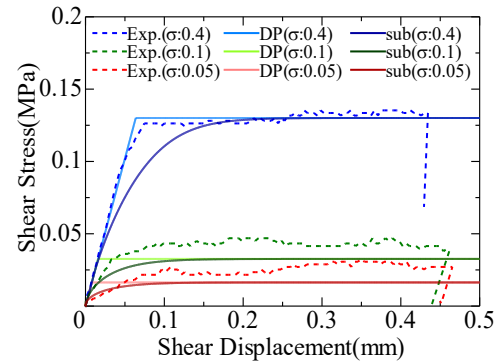
一方で, 高拘束圧下における弾性域の範囲や, 低拘束圧下における最大応力の再現には課題を残す結果となった. 理由として, 線形の降伏関数であることや, 弾性限 R_e を一定として使用していることが挙げられる. 実験の応答を再現するためには, 非線形の降伏関数を適用し, かつ, 下負荷面モデルにおける弾性限 R_e に拘束圧依存性を導入する必要があると考えられ, 今後検討する予定である.

4. おわりに

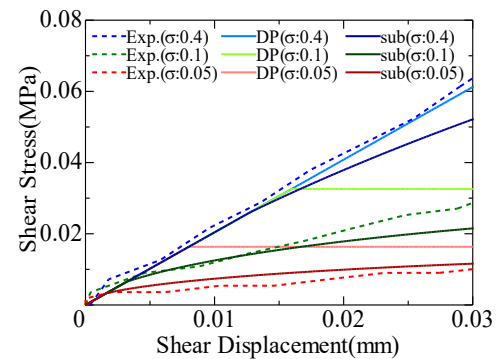
本研究では, 土木学会岩盤力学委員会岩盤動力学に関する研究小委員会斜面耐震WGで実施された金属六角棒の積層模型の要素試験の検討解析の実施, および最終的には不連続性岩盤を対象とした数値解析手法の確立を目的として, 下負荷面モデルを導入した拡張 RBSM による金属六角棒積層要素試験の再現解析を実施した. 検討の結果, 下負荷面を導入した提案モデルでは, 実験において観測された載荷直後の剛性の低下を再現でき, 従来モデルの課題であった初期剛性の過大評価を改善できることを示した. 今後は, 非線形の降伏関数の適用や弾性限 R_e への拘束圧依存性の導入を実施し, 更なる検討を進める予定である.



(a) Test overview (b) Analysis model
Fig. 2 Analysis overview



(a) Shear stress-displacement



(b) Comparison of initial stiffness
Fig. 3 Analysis results

謝辞: 本研究を遂行するにあたり, 土木学会岩盤力学委員会岩盤動力学委員会に関する研究小委員会斜面耐震WGの皆様には, 多大なご協力を賜った. ここに記して感謝の意を示す.

参考文献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会岩盤動力学に関する研究小委員会: 第3フェーズ研究成果報告書, 2022.
- 2) 山田滉一郎, 木村管杜, 山本佳士: 拡張RBSMによる不連続性岩盤を模擬した斜面模型の動的崩壊シミュレーション, 土木学会論文集, Vol.82, No.15, 2026.
- 3) Hashiguchi, K.: Constitutive Equations of Elastoplastic Materials with Elastic-Plastic Transition, Journal of Applied Mechanics (ASME), Vol.47, pp.266-272, 1980.
- 4) 菊池綾嶺, 中村互, 山本佳士: 接触挙動を考慮したRBSMによるコンクリート構造のひび割れ進展・倒壊シミュレーション, 土木学会論文集, Vol.80, No.15, 2024.
- 5) 井口拓哉, 福田達也, 山川優樹, 池田清宏, 橋口公一: 弾性予測子/リターンマッピングによる拡張下負荷面モデルの応力計算における負荷判定法の改良, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, 2017.

摩擦構成則の陰的積分アルゴリズムによる 3 次元不連続変形法の高精度化 (シンポジウム講演概要)

Improvement of 3D discontinuous deformation analysis incorporating an implicit integration algorithm of friction law (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

下方 淳 (大成建設) 橋本 涼太 (京都大・工) *

Atsushi SHIMOKATA, Taisei Corporation

Ryota HASHIMOTO, Kyoto University

*E-mail: hashimoto.ryota.6e@kyoto-u.ac.jp

Estimation of seismic behavior of rock slopes adjacent to an important infrastructure has attracted increasing attention, and Discontinuous Deformation Analysis (DDA) is a promising approach because it can represent block interactions and post-failure motion. However, conventional DDA is sensitive to contact penalty parameters, and accurate prediction of sliding becomes difficult. In this study, to improve accuracy and reduce dependence on parameter tuning, a fully implicit three-dimensional DDA is developed by introducing a return-mapping-based implicit friction update combined with Newton-Raphson iteration. The proposed method is validated through direct shear, dynamic sliding, and slope-sliding benchmarks, confirming stable satisfaction of frictional strength and good agreement with theoretical solutions.

1. はじめに

従来、岩盤斜面の地震時安定性は、有限要素法による等価線形解析で得られた応力状態から算出した安全率に基づく崩壊の有無を判定している¹⁾しかし、この方法は入力地震動の増大に伴い、過大に安全で不経済な設計となり得る。また、近年では崩壊後の岩塊が構造物に衝突する危険性を考慮し、斜面の残留変位や崩壊した岩塊の動的挙動を評価することが求められている²⁾。

本研究ではこれらを考慮することの出来る不連続解析手法のひとつである、不連続変形法 (Discontinuous Deformation Analysis : DDA)³⁾に着目した。DDAでは接触をペナルティ法で処理しているが、適切なペナルティ係数の設定が難しいという課題がある。先行研究では不連続面に作用するせん断力の更新方法に着目し、従来手法では摩擦強度に対してせん断力の超過が生じることを指摘し(Fig. 1), そのような超過が生じないように摩擦構成則の陰的積分アルゴリズム導入し高精度化に成功した⁴⁾。

そこで本研究では同様の考え方を実問題への適用にあたって欠かせない3次元に拡張し、摩擦構成則の陰的積分アルゴリズムを導入した3次元完全陰的DDAを提案する。例題解析を実施し、提案手法の妥当性と適用性を評価した。

2. 摩擦構成則の陰的積分を導入した3次元不連続変形法

提案手法ではせん断力の超過を防ぐリターン・マッピングを導入するとともに、このアルゴリズムで生じる残差による解消のため非線形方程式の解法としてNewton-Raphson法による収束計算を導入した。その際、反復過程での残差の二次収束性を保証するため、Newton-Raphson法に整合するよう方程式を未知数である変位に関して線形化する必要がある。今、系の時刻 m の状態が既知で、 $m+1$ での状態を求めるとして、変位 $\mathbf{u}$ に関する線形化方程式を仮想仕事の原理から以下のように求められる。

$$\sum_{i=1}^n m G_i^{\text{ext,int}} + m G_{jk}^c + \sum_{i=1}^n \Delta G_i^{\text{ext,int}} + \Delta G_{jk}^c = 0 \quad (1)$$

上式を解くことで挙動を計算している。 $G_i^{\text{ext,int}}$ はブロック i の内力と外力による仮想仕事、 G_{jk}^c はブロック j と k の接触力による仮想仕事を表す。このとき接触力による仮想仕事の線形化 ΔG_{jk}^c は次式で計算される。

$$\Delta G_{jk}^c = \int_{\Gamma_{jk}} \Delta t_N \delta g_N d\Gamma + \int_{\Gamma_{jk}} t_N \Delta \delta g_N d\Gamma + \int_{\Gamma_{jk}} \Delta t_S \cdot \delta g_S d\Gamma + \int_{\Gamma_{jk}} t_S \cdot \delta g_S d\Gamma \quad (2)$$

ただし、 t_N : 接触力の法線成分、 t_S : 接触力の接線成分ベクトル、 g_N : 負の法線ギャップ、 g_S : せん断変位ベクトルである。2次元では接触力の接線成分、せん断変位はスカラー量となり、仮想仕事の線形化項はすべてスカラーの積で表されるのに対し、3次元ではせん断方向の仮想仕事の線形化項は力と変位の内積で表される。その結果、滑動状態では接線方向の力に貫入量とせん断変位の単位ベクトルの積が現れるため、せん断方向が変化することに関する3次元解析特有の線形化項が生じる。また、右辺第2, 4項は従来の3次元DDAでは考慮されていない項である。

線形化方程式から剛性方程式を導出するための空間離散化は、従来のDDAと同様に物体形状を多面体ブロックにした上で、応力・ひずみが均一であると仮定し、重心の変位、回転量、ひずみ成分を変位変数として内部の変位場を近似する。また、接触処理はせん断変位量の簡素化のため、従来では考慮されている辺-辺接触処理をせず、任意の面を三角形分割した面と頂点との組み合わせで点-面接触処理を行う。

3. 提案手法の妥当性検証解析

提案手法の妥当性を確認するため、一面せん断解析、動的滑り解析、斜面すべり解析の3例題を実施し、摩擦強度の満足性、動的応答の再現性、並びに滑動方向変化を伴う3次元滑りへの適用性を検証した。

(1) 一面せん断解析

摩擦強度を精緻に表現できているかを確認するために底面2 m×2 m、高さ0.5 m、単位体積重量28.0 kN/m³、静止摩擦角40°、の直方体ブロックを対象に一面せん断解析を実施した。接触ペナルティ係数を100 MN/mとし、強制変位1 mmを変位分割ステップ数20, 40, 200に分けて3ケースを設定した。その結果、Fig. 2に示すように、摩擦強度(46.98 kN)を超えるせん断力が生じず、摩擦強度が安定的に満足されることを確認した。

(2) 2ブロック系の振動解析

動的な滑り挙動の再現精度に対する、解析パラメータで

ある接触ペナルティ係数や時間刻みによる影響を確認するため、2つの直方体ブロックからなる系(Fig. 3)を対象に、下段ブロックへ水平方向に正弦波形の強制変位を与え、上段ブロックの変位応答を理論解と比較した。接触ペナルティ係数は $1.0 \times 10^4, \times 10^5, \times 10^6, \times 10^7$ kN/m の4ケースとした。時間刻みの細かい 0.001 s のとき、従来手法では条件によって発散や理論解からの乖離が生じたのに対し、提案手法では全ケースで理論解を精度よく再現した(Fig. 4)。また、時間刻みを 0.01 s と粗くした場合についても、提案手法では理論解を高精度に表現できた(Fig. 5)。以上より、提案手法は従来手法と比べて、ペナルティ係数や時間刻みが解析結果や計算の安定性に与える影響を軽減し、不連続面の動的摩擦挙動を高精度に表現可能である。

(3) 斜面滑り解析

滑動方向が変化する挙動に対する適用性を検証するため、3次元の斜面上の滑り解析を実施した。対象は傾斜 30° の斜面上に直方体ブロックを設置したもので(Fig. 6)、直方体ブロックに水平方向の初速 0.5 m/s を与えたときの変位応答を計算した。斜面上の変位の時間変化を理論解と比較したところ、接触ペナルティ係数に依らず理論解を精度よく計算できた(Fig. 7)。提案手法は3次元滑り挙動を高精度に表現可能である。

4. まとめ

3次元 DDA の高精度化を目的に、摩擦構成則のリターン・マッピングと Newton-Raphson 法を導入した提案手法では、3つの例題解析を通して摩擦強度を精緻に表現していること、ブロック間の滑り変位の解析精度とパラメータ設定のロバスト性の向上、せん断方向の変化を伴う3次元斜面上の滑り挙動に対する適用性を確認した。

参考文献

- 1) 日本電気協会 原子力企画委員会：原子力発電所耐震設計基準指針，2016。
- 2) 土木学会 原子力土木委員会 地震安定性評価小委員会：原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術<技術資料>「2020 年度版」 原子力土木シリーズ4，公益社団法人 土木学会，2021。
- 3) Shi, G. H. and Goodman, R. E.: Generalization of two-dimensional discontinuous deformation analysis for forward modeling, International Journal of Numerical and Analytical Method in Geomechanics, Vol. 13, pp. 359-380, 1989。
- 4) Hashimoto, R. *et al.*: Improvement of discontinuous deformation analysis incorporating implicit updating scheme of friction and joint strength degradation, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 54, pp. 4329-4263, 2021。
- 5) Wu, W. *et al.*: Improved friction force calculation with an augmented open-close iteration formulation in discontinuous deformation analysis, Computers and Geotechnics, Vol. 130, p. 103932, 2021。

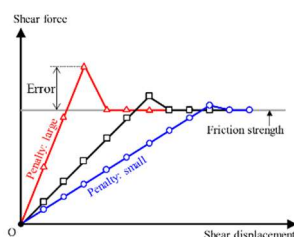


Fig. 1 Update of the friction force in the original DDA⁴⁾

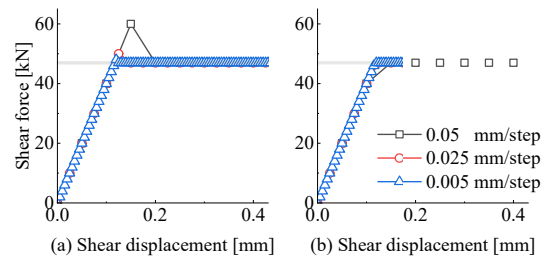


Fig. 2 Shear stress-displacement relation
(a) conventional DDA, (b) proposed DDA

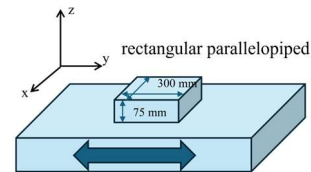


Fig. 3 Two-block vibration model

Fig. 4 Sliding displacement in case $\Delta t = 0.001$ s
(a) conventional DDA, (b) proposed DDA

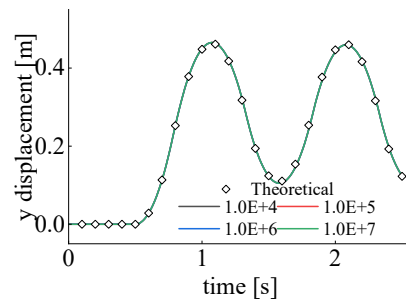


Fig. 5 Sliding displacement in case $\Delta t = 0.01$ s

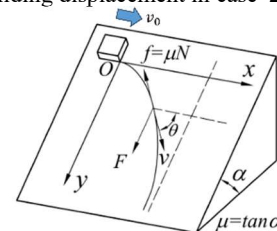


Fig. 6 Configuration of the 3D slide test⁵⁾

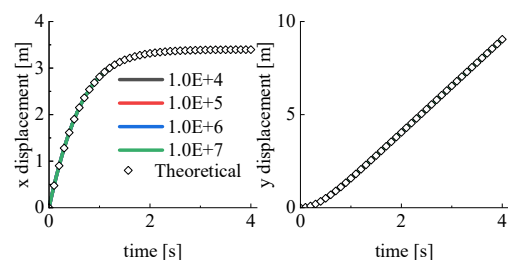


Fig. 7 Displacement of blocks on slope

FEM による実規模落石防護土堤の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討
(シンポジウム講演概要)

Numerical study on impact resistance behavior of full-scale rockfall-protection soil embankment
using the Finite Element method (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

瓦井 智貴 (室工大・理工) 小室 雅人 (室工大・理工) 岸 徳光 (室工大・理工) 前田 健一 (名工大・工)
内藤 直人 (豊橋技術科大・工) 中村 拓郎 (寒地土研) 牛渡 裕二 (構研エンジ) 柴田 蓮 (室工大)

Tomoki KAWARAI, Muroran Institute of Technology
Masato KOMURO, Muroran Institute of Technology
Norimitsu KISHI, Muroran Institute of Technology
Kenichi MAEDA, Nagoya Institute of Technology
Naoto NAITO, Toyohashi University of Technology
Takuro Nakamura, Civil Engineering Research Institute for Cold Region
Kentaro Suzuki, Koken Engineering
Ren SHIBATA, Muroran Institute of Technology
E-mail: kawarai@muroran-it.ac.jp

In this study, in order to investigate impact resistance behavior on a full-scale rockfall protection embankment, a three-dimensional elasto-plastic impact response analyses were carried out varying the energy, impact angle, and rotational component of the weight. From this study, the performance of a full-scale rockfall protection embankment in capturing falling rocks was confirmed.

1. はじめに

落石災害から道路交通網を守る落石防護工の 1 つである落石防護土堤は、現地発生土も利用可能である最も低コストな対策施設である。しかしながら、その耐衝撃挙動については十分に明らかにされておらず、耐衝撃設計法も確立されていないのが現状である。以上より、落石防護土堤の性能設計法の確立を最終目的として、本研究では落石防護土堤の耐衝撃挙動を把握するために、実規模落石防護土堤を対象に、有限要素法を用いた三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、実規模衝突実験結果¹⁾を基に、その耐衝撃挙動を適切に再現可能な数値解析モデルの構築を試みた。その後、重錘のかけ上がり挙動への影響要因の確認を目的に、法勾配や入力エネルギー、回転エネルギー比などを変化させてパラメトリック解析を実施した。

2. 実験概要

Table 1 には本研究で対象とした実験¹⁾のケース一覧を

Table 1 Test cases.

No.	Cases	Impact position	Mass of the weight M (t)	Drop height the weight H (m)	Drop-weight capture	
					Exp.	Ana.
1	A-M2.5-1	A	2.5	30	Passed through	
2	A-M2.5-2	A	2.5	30		
3	B-M1.9-1	B	1.9	25		
4	B-M1.9-2	B	1.9	22		
5	C-M1.9-1	C	1.9	22		



Fig. 2 Test situation.

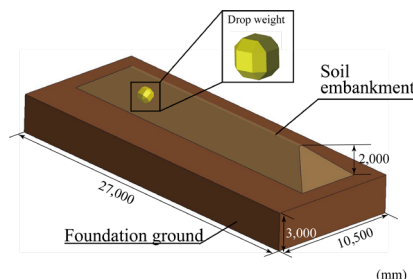


Fig. 3 FE model.

示している。実験ケース名に関して、第一項目は重錘の衝突位置 (A, B, C) を、第二項目の M に付随する数値は重錘質量 (t) を、第三項目は同ケースを実施した回数を表している。実験では、いずれのケースにおいても重錘が土堤の非衝突面側の法肩を越え、重錘が土堤を通過した。

Fig.1 には試験体図を、Fig.2 には実験状況を示している。本実験で対象とした土堤は一般的に製作されている形状を参考に、法勾配は 1:1.2、高さは 2 m、土堤延長方向を 18 m とした。正面図には全 5 ケースの重錘の衝突箇所を示している。なお、土堤材料には実験場周辺で採取可能な現地発生土である細粒分まじり砂質礫を使用した。また、実験は EOTA 型重錘を斜面勾配 50°, 最大高さ 30 m から自由回転落下させ土堤に衝突させている。

3. 再現解析概要と結果

Fig.3 には本数値解析で用いた解析モデルを示している。

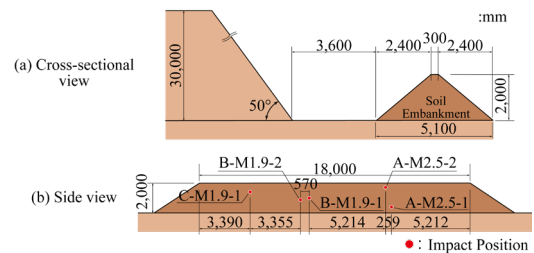


Fig. 1 Configuration of specimen.

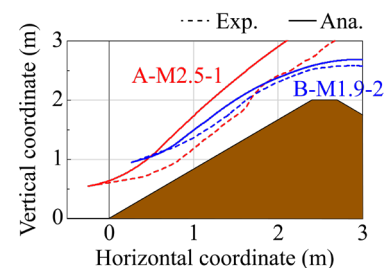


Fig. 4 Comparison of drop-weight path.

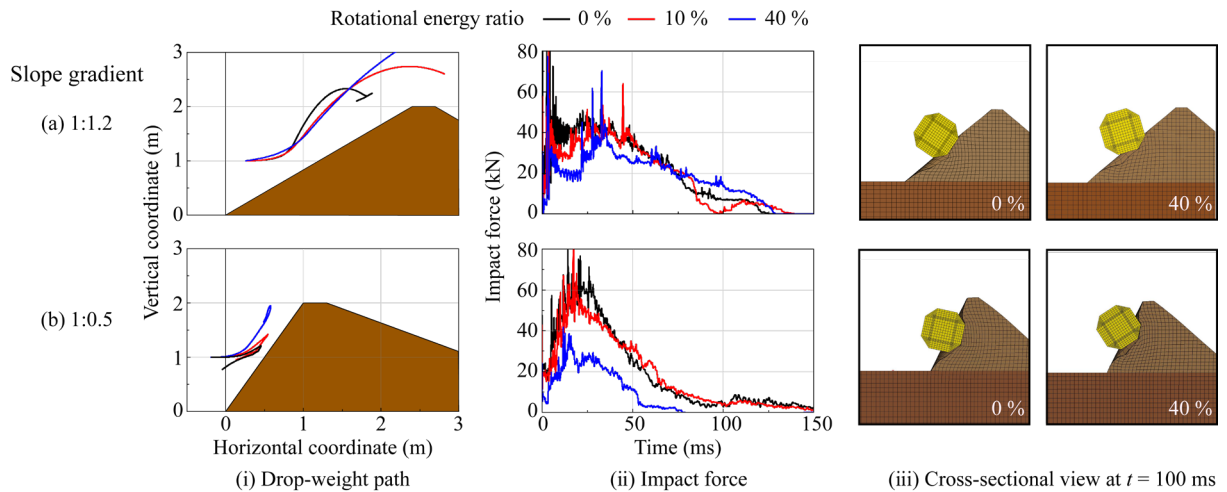


Fig. 6 Effects of rotational energy ratio and slope gradient.

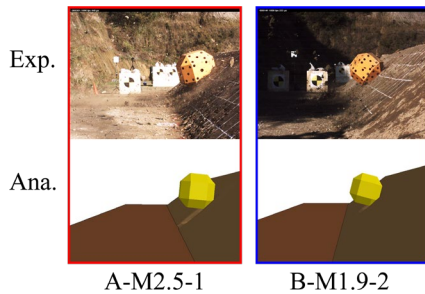


Fig. 5 Comparison of drop-weight impact behavior.

Table 2 Numerical analysis parameters.

Parameter	Values
Slope gradient	1:1.2, 1:0.5
Input energy (kJ)	100, 200, 300
Rotational energy ratio (%)	0, 10, 40
Impact angle (°)	0, 10, 20
Total number of cases	81

ここでは、土堤および基礎地盤までをモデル化することとし斜面は省略している。基礎地盤のモデル化の範囲に関しては、既往の研究結果¹⁾等を参考に土堤の耐衝撃挙動への影響が小さいと判断される程度のサイズを設定し、深さは3 mとした。また、重錘を含む全ての材料に8 節点固体要素を適用している。境界条件は、基礎地盤底面を完全固定とし、全側面の法線方向変位成分を拘束した。

重錘－土堤間には滑り・剥離を考慮した接触を定義し、予備解析より摩擦係数は0.3とした。衝撃荷重は、重錘を土堤に接する形で配置し、実験時における回転成分を含む実測衝突速度を重錘全要素に付加することで作用させた。なお、自重による影響を考慮し、スプリングバック解析を行った後に、衝撃応答解析を実施している。

Fig.4, Fig.5 には、本数値解析結果より得られた重錘軌跡図および重錘衝突後 100 ms 時点の土堤や重錘の状況を、実験結果と比較して示している。なお、一例として、ケース A-M2.5-1 および B-M1.9-2 の 2 ケースについて示した。Fig.4 より、ケース A-M2.5-1 に着目すると、破線で示す実験結果においては土堤にわずかに貫入した後、重錘はかけ上がっている様子が分かる。一方で、数値解析結果を見ると、貫入量に差はあるものの、実験結果と同様に土堤とほぼ平行に移動している様子が分かる。次に、B-M1.9-2 に着

目すると、実験結果と数値解析結果は非常によく対応しており、いずれも土堤を乗り越えていることが確認できる。Fig.5 より、100 ms 時点の状況を確認すると、いずれのケースにおいても重錘の位置や土堤の変状が両方で概ね対応していることが分かる。なお、Table 1 に示す 5 ケースの再現解析を実施した結果、実験結果と同様にいずれも重錘の捕捉には至らなかった。

4. パラメトリック解析概要と結果

本節では、前節の数値解析手法を踏襲し、種々のパラメータを変化させたパラメトリック解析を実施した。Table 2 には、検討に用いたパラメータである法勾配や入力エネルギー、回転エネルギー比および衝突角度について、それぞれの値を一覧にして整理している。ここでは、これらを変化させた全 81 ケースの衝撃応答解析を実施した。なお、2.5 t の重錘を使用し、土堤の中央、高さ 1 m の位置に載荷した。また、本稿では一部の結果のみを示す。

Fig.6 には、法勾配を 2 種類に、かつ重錘の回転エネルギー比を 3 種類に変化させた計 6 ケースのパラメトリック解析より得られた重錘軌跡図、重錘衝撃力および、100 ms 時点の変形状況を示している。なお、入力エネルギーは 200 kJ、衝突角度は 0° の結果である。(a) 図より、一般的な 1:1.2 勾配の場合を見ると、回転エネルギー比が 10 % 以上になると重錘が通過することが分かる。また、衝撃力を見ると、回転エネルギー比の増大に対応して 25 ～ 50 ms 間で示される平均衝撃力は小さくなる傾向が確認できる。(b) 図より、1:0.5 勾配の場合を見ると、いずれのケースにおいても勾配を急にしたことで重錘のかけ上がり挙動は抑制され、重錘を捕捉していることが分かる。

5. まとめ

- 1) 本数値解析モデルを用いることによって、実規模落石防護土堤の耐衝撃挙動をほぼ適切に再現可能である。
- 2) パラメトリック解析より、回転エネルギー比が 40% 程度の場合においても 1:0.5 勾配とすることによって重錘を捕捉できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 杉山ら：落石捕捉性能把握に向けた実規模落石防護土堤の落体衝突実験，構造工学論文集，Vol. 67A，pp. 864-877，2021。

U字型凍結管周りの土壌の凍結挙動に関する研究
(シンポジウム講演概要)

Study on the Freezing Behavior of Soil Around U-Shaped Freezing Pipes
(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

○大森 大夢 (茨城大学・工) 小関 良佑 (茨城大学・工) 松村 邦仁 (茨城大学・工)
Hiromu Omori, Ibaraki University
Ryosuke Koseki, Ibaraki University
Kunihito Matsumura, Ibaraki University
E-mail: 22t1037x@vc.ibaraki.ac.jp

Soil freezing is the phenomenon where frozen soil forms as the pore water contained within the soil freezes. The properties of frozen soil are generally characterized by two main features: high strength and high impermeability. Due to these properties, artificially created frozen soil is sometimes utilized for applications such as frozen soil walls and ground reinforcement. Building upon past geothermal research conducted in this laboratory, we will advance our investigation into the mechanisms of soil freezing through small-scale, preliminary experiments and analysis, focusing specifically on localized frozen ground phenomena.

1. 序論

土壌凍土化とは、土壌内に含まれる間隙水が凍結することによって凍土が形成される現象である。凍土の持つ性質としては、一般的に高い強度と高い遮水性の大きく2つが挙げられる。凍土化することによる強度の増強は、温度低下によって土粒子同士をつないでいる間隙水が強度を増すことで、凍土全体の強度を増強しているためである。また、高い遮水性を持つのは、間隙水の凍結による土壌内の流水経路の閉塞によるものである。これらの凍土の持つ性質から、凍土壁や地盤強化として人工的に凍土を造成させて利用されることがある。

そこで本研究では、当研究室で過去行われていた地中熱の研究を参考にして、局所的な凍土現象を対象に土壌凍土化のメカニズムを小規模で初歩的な実験と解析を通して研究を進めていく。

2. 実験方法

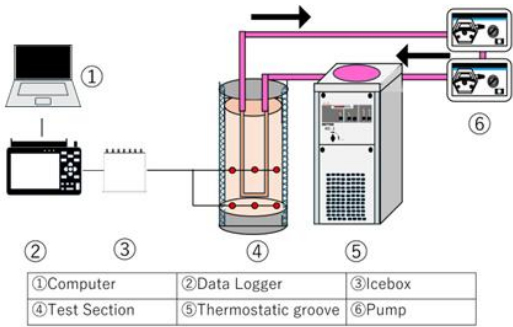


Fig.1 Laboratory equipment configuration

Table.1 Temperature measurement point

測定点	名称	x[mm]	y[mm]	z[mm]	備考
Ch1	left_y43	45	40	81.75	左管近傍・下部
Ch2	right_y43	128.5	40	81.75	右管近傍・下部
Ch3	center_y43	86.75	40	81.75	中央・下部
Ch4	left_y156	45	153.5	81.75	左管近傍・上部
Ch5	right_y156	128.5	153.5	81.75	右管近傍・上部
Ch6	center_y156	86.75	153.5	81.75	中央・上部

実験で用いる実験装置の概要図と温度測定点を Fig.1, Table.1 に示す。この実験装置はテストセクション、冷却システム、温度測定システムの3つのセクションから構成されている。テストセクションには供試体を充填させた円筒容器内にU字型凍結管を設置し、冷却システムから供給される冷媒により凍結管の冷却を行う。温度測定システムには、供試体内部に埋設したk型熱電対とデータロガーから構成され、凍結過程における温度分布の時間変化を計測する。

3. 実験結果

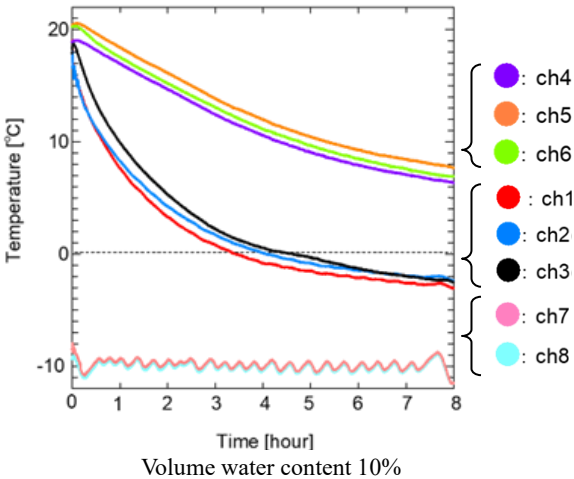
3.1. 温度変化

Fig.2 にブライン温度を-10℃として体積含水比を0% (乾燥土壌)、10%, 20%の3つの条件で供試体の温度変化のグラフを示す。

どの条件での実験でも統一して言える傾向として、U字管周り上部を計測したch1, ch2, ch3では冷却開始初期での温度低下が著しく指数関数的な温度変化が見られ、テストセクション内下部のU字管の通っていないch4, ch5, ch6の測定点では、比較的に緩やかな温度変化が見られる。

体積含水比10%の実験結果では、U字管中央を計測していたch3で冷却初期の温度勾配が激しくなり、U字管近傍を計測していたch1, ch2との計測温度の差異が小さくなっており、テストセクションの下部でも温度勾配が大きくなった。また、ブライン温度が-10℃の条件でch3の測定点にて0℃付近で、一時的な温度停滞が確認され、再度温度低下する現象が起きた。

体積含水比20%の実験結果では、冷却開始から1時間程度でch1とch2の測定温度の逆転が見られた。また、ブライン温度が-10℃の条件でのch3で含水比が10%での結果と同様の一時的な温度停滞が確認された。



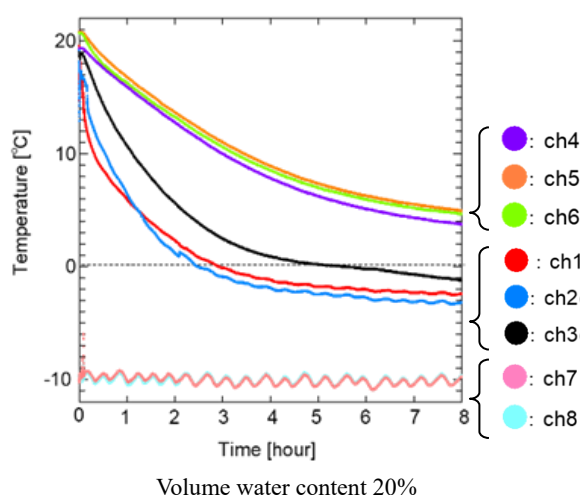


Fig.2 Temperature Change Graph

3.1. 凍土形状の観察

体積含水比 10%, ブライン温度-5°Cの条件では, U 字管を中心とした円柱状に凍土が形成され, 下部, 左管周り, 右管周りの順に大きくなった.

体積含水比 20%, ブライン温度-5°Cの条件では, 他の条件で形成された凍土に比べて脆く, 取り出す際に U 字管の外側の凍土が欠けてしまった.

ブライン温度-10°Cでの体積含水比 10%と体積含水比 20%では, U 字管周りに大きくひと塊に凍土形成が見られ, 凍土壁が観察できた.

Fig.3 に体積含水比 20%のブライン温度-5°C, -10°Cでの形成された凍土形状を示す.

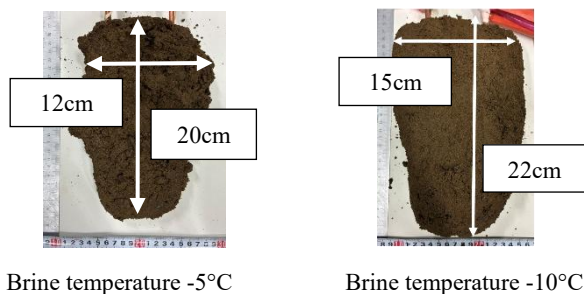


Fig.3 Frozen soil formation at 20% volumetric water content

4. 解析モデル

本研究では, TRM, GCC, Power の異なる潜熱処理手法で解析を行い, それぞれの特性の比較検討を行った. 本解析では, 土壌内の間隙は液状水または氷で満たされていること, 凍結による体積膨張等は無視すること, 熱伝導率の温度依存性は考慮しないことなどの仮定をし, そのうえで以下の 3 次元熱伝導方程式を立てる.

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} - L_f \rho_{ice} \frac{\partial \theta_{ice}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここで, C_p は土壌の体積熱容量 [$J m^{-3} K^{-1}$], T は温度 [$^{\circ}C$], t は時間 [s], L_f は水の凍結潜熱 [J/kg], ρ_{ice} は氷の密度 [kg/m^3], θ_{ice} は体積含水率 [m^3/m^3], λ は土壌の熱伝導率 [W/mK], x, y, z は直交座標の軸である.

GCC と Power では, 式 (1) から潜熱効果を見かけの体積熱容量 C_a に組み込んだ形式で表すことで簡略化し, 以下

の式 (2) で熱伝導方程式を表現し, これを解くことで絶対温度 T を導く.

$$C_a \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \lambda \nabla^2 T \quad (2)$$

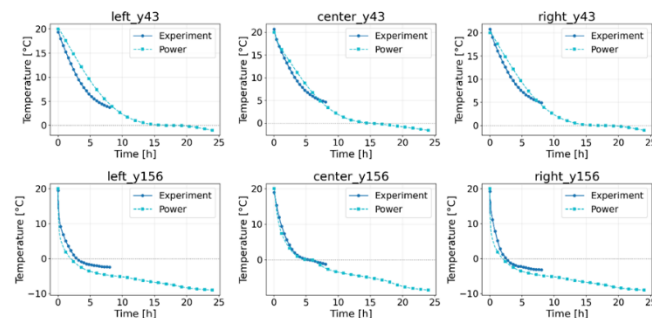
また, TRM では見かけの体積熱容量を用いず, 潜熱項を除いた通常の熱伝導方程式を解き, その後に潜熱処理を行う. TRM における熱伝導方程式は次式で表される.

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (3)$$

5. 実験結果と解析結果の比較

Fig.4 に体積含水比 20%, ブライン温度-5°Cの条件での実験結果と GCC での解析結果を各チャンネルで比較をしたものを示す.

テストセクション下部を測定した y 43 の 3 地点では, 実験開始時と実験終了時での実験値と解析値の温度差が小さいことが分かるが, 実験中盤での温度差が比較的大きく見られた. また, 0°C 付近で見られる一時的な温度停滞が実験値と比べて解析値では短くなり, より急激に氷点下に移行する傾向がみられる.

Fig.4 Comparison of experimental values and GCC (Freezer pipe temperature -10 [$^{\circ}C$], volume moisture content 20 [%])

6. 結論

(1) 含水土壌条件にて土壌内の水分の相変化による 0°C 付近での一時的な温度停滞が観測された. この温度停滞は土壌含水量が多いほど停滞時間が長くなることが分かった. この温度停滞の時間は冷却の進行を大きく阻害する要因であり, 含水比の増加は冷却初期の速い温度低下を実現する一方で, 温度停滞期の長時間化を生じるため, 凍結進行が必ずしも迅速に進むとは限らない.

(2) 含水土壌内の水分量の増加によって, 形成された凍土形状に不均一な歪さと脆弱性が見られた. 含水量を増やすことで土壌内での氷化量が増加し, 土壌の冷却温度が十分でないと土壌内の水分移動による含水量の偏りや水分の凍結による体積膨張, 土粒子同士をつなぐ間隙氷の脆弱性等の影響が大きくなり, 土壌内の構造変化が生じると考えられる.

参考文献

- [1] 含水土壌内の円管周りの凍結-種々のパラメータが凍結速度に及ぼす影響-, 地盤工学ジャーナル, 2008 年 5 月, vol.3, No.2, 143-151
- [2] 菊地駿, 斎藤広隆, 大石雅人 (2025): 潜熱処理の違いが飽和地盤凍結過程の数値解析に与える影響. 土壌の物理性, No.159, pp.13-24.

不飽和浸透特性を考慮した MPM-VOF 法連成解析の開発（シンポジウム講演概要） Development of a Coupled MPM-VOF Method Incorporating Seepage Characteristics of Unsaturated Soils (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

西村 真衣（京都大・工） 橋本 涼太（京都大・工） 肥後 陽介（京都大・工）

Mai NISHIMURA, Kyoto University
Ryota HASHIMOTO, Kyoto University
Yosuke HIGO, Kyoto University
E-mail: ryota.hashimoto.6e@kyoto-u.ac.jp

To analyze large deformation of unsaturated ground, particularly failure phenomena coupled with the behavior of surface water, this study focuses on a coupled MPM-VOF method, which enables analysis of large deformation behavior of ground under the interaction between free-surface and seepage flow. This study extends MPM-VOF method to unsaturated soils incorporating seepage characteristics of unsaturated soils.

1. はじめに

不飽和地盤の大変形、特に地表水の挙動と連動した破壊現象を解析するため、自由表面流れと浸透流との相互作用下での地盤の大変形挙動が解析可能な MPM-VOF 法¹⁾(Fig. 1)に着目する。本研究ではこれに、土の不飽和浸透特性を導入して拡張することで、不飽和地盤における浸透・破壊現象を表現することを目的とする。

2. 不飽和地盤の浸透特性を考慮した MPM-VOF 法

本研究では、不飽和地盤の挙動を記述するにあたり混合体理論に基づく三相系の保存則を出発点とする。通常それらは固液簡易三相系、あるいは固気液三相系で各相の変数を明確に区別して解く。本研究では、不飽和浸透特性を考慮した非圧縮性流体の流れを VOF 法の枠組みで計算するにあたり、Carrillo ら²⁾の方法を参考に、各相の流速と圧力を 1 変数場扱い、気液相を同時に解く。このとき、支配方程式は固気液三相混合体の運動方程式、

$$(1-n)\rho_s \frac{D^S \mathbf{v}_S}{Dt} + n\rho_F \frac{D^F \mathbf{v}_F}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}' - \nabla \cdot p_F \mathbf{I} + (1-n)\rho_s \bar{\mathbf{b}} + n\rho_F \bar{\mathbf{b}} \quad (1)$$

気液二相混合体の運動方程式（オイラー表示）、

$$\frac{\partial \mathbf{v}_F'}{\partial t} + \frac{\mathbf{v}_F'}{n} \cdot \nabla \mathbf{v}_F' = -\frac{n}{\rho_F} \nabla p_F + \frac{\mu_F}{\rho_F} \nabla^2 \mathbf{v}_F' + n\bar{\mathbf{b}} - \frac{n}{\rho_F} M^{-1}(\mathbf{v}_F' - n\mathbf{v}_S) + \frac{n}{\rho_F} \mathbf{F}_c \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_c = M^{-1}\{M_L(1-S_r) - M_G S_r\} \nabla p_c - p_c \nabla S_r \quad (3)$$

$$M = \kappa_0 \left(\frac{\kappa_L}{\mu_L} + \frac{\kappa_G}{\mu_G} \right) = M_L + M_G \quad (4)$$

三相混合体の連続式

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_F' + \nabla \cdot ((1-n)\mathbf{v}_S) = 0 \quad (5)$$

液相飽和度の移流方程式（液相の質量保存則）

$$\frac{\partial n S_r}{\partial t} + \nabla \cdot (S_r n \mathbf{v}_L) = 0 \quad (6)$$

となる。ここに、下付き添字 S, L, G, F は固相、液相、気相、気液混合体の変数、 ρ は密度、 n は間隙率、 $\mathbf{v}$ は速度、 $\boldsymbol{\sigma}'$ は有効応力、 p は圧力（圧縮が正）、 $\bar{\mathbf{b}}$ は重力加速度ベクトル、 ν は動粘性係数、 S_r は液相飽和度、 p_c はサクション、 κ_0 は浸透率、 κ_L と κ_G は気液各相の相対浸透率である。サクションと相対浸透率はそれぞれ水分特性曲線モデルと不飽和透水係数モデルで飽和度と関連付ける。本定式化では、流体挙

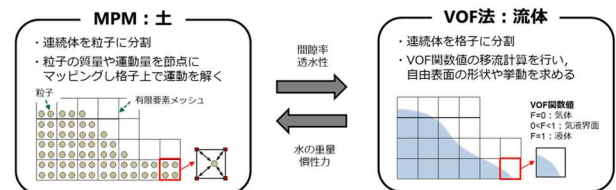


Fig. 1 Schematic figure of a coupled MPM-VOF method.

動は気液相の値を飽和度により重み付き平均した、(Darcy) 流速 $\mathbf{v}_F' = n\mathbf{v}_F$ 、平均圧力 p_F を使って記述されており、毛管力 $\mathbf{F}_c$ はそれに伴い現れる項である。

また、平均流速を主たる未知数としている一方で、式(6)の液相飽和度の移流方程式には、液相単体の流速が含まれており、これを閉じる必要がある。本研究では Carrillo ら²⁾の方法にならい、式(6)を平均流速と液相の気相に対する相対流速 $\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_L - \mathbf{v}_G$ を用いて書き換える。

$$\frac{\partial n S_r}{\partial t} + \nabla \cdot (S_r \mathbf{v}_F') + \nabla \cdot \{n S_r (1 - S_r) \mathbf{v}_r\} = 0 \quad (7)$$

相対流速 $\mathbf{v}_r$ は多孔質体中で気液各相の運動が Darcy 則で近似できるという仮定のもと導出される次式で算出する。

$$\mathbf{v}_r = n^{-1} \left[-\left(\frac{M_L}{S_r} - \frac{M_G}{1-S_r} \right) \nabla p_F + \left(\frac{\rho_L M_L}{S_r} - \frac{\rho_G M_G}{1-S_r} \right) \bar{\mathbf{b}} + \left(M_L \frac{1-S_r}{S_r} + M_G \frac{S_r}{1-S_r} \right) \nabla p_c - \left(\frac{M_L}{S_r} - \frac{M_G}{1-S_r} \right) p_c \nabla S_r \right] \quad (8)$$

以上の支配方程式に基づき、式(1)の三相混合体の運動方程式はその弱形式を Material Point Method (MPM) で離散化し、式(2), (5), (6)は有限差分法 (Finite Difference Method: FDM) で空間離散化し解く。流体挙動は移流項、粘性項、物体力項、毛管力項、抗力項、圧力勾配項を段階的に計算するフラクショナル・ステップ法を採用し解析する。各時間ステップにはまず、MPM 粒子の配置を元に FDM の各セルの間隙率を計算し、流体計算を行う。その後、得られた流体の加速度、圧力、飽和度を使用して MPM の計算を実行する弱連成解析を行う。

なお、式(1)の固気液三相混合体の運動方程式は、不飽和浸透特性を考慮しない従来の MPM-VOF 法で使われているものと同じであり、VOF 法のみ修正によって不飽和地盤へと拡張することができる。

3. 不飽和浸透特性を考慮した VOF 法の実装の検証

実装した不飽和浸透特性を考慮した VOF 法の検証のため、Carrillo ら²⁾と同条件で、気液相間の相対流速を考慮した多孔質中の二相流解析に関する二つの例題を計算した。

まずは、一方の相で満たされた多孔質体に一次的に他方の相を一定流速で注入する Buckley-Leverett 問題で相対速度を考慮した VOF 関数の移流計算の妥当性を検証した。空気あるいは油で満たされた層に水を注入した際の時刻ごとの飽和度分布 (Fig. 2) からは、開発したコードにより参照解とよく一致する結果が得られていることがわかる。

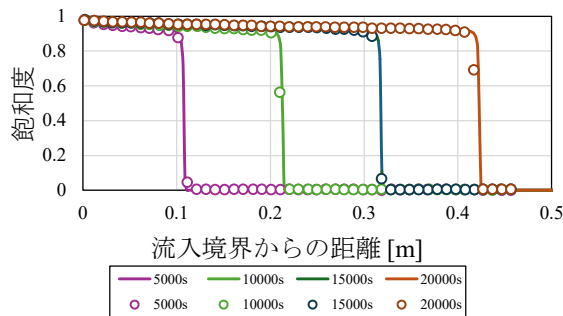
また、毛管力項を考慮した計算の妥当性を検証するため、自重条件下での平衡状態解析を行った。その結果、図 3 のような鉛直飽和度分布が得られ、参照解とよく一致した。

以上より、不飽和浸透特性を考慮した VOF 法が正しく実装できていることが確認された。

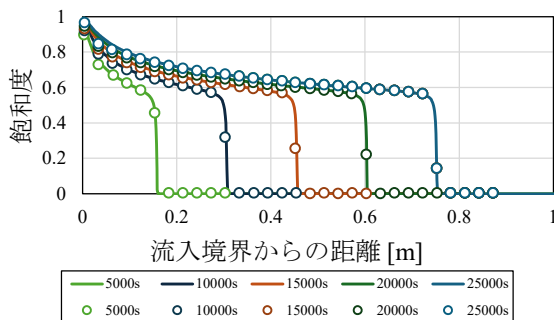
4. 応用例：貯水池の水位低下による堤防の破壊問題

開発手法の、地盤の変形を生じるような問題への応用例として、Ceccato ら³⁾の不飽和土-水連成 MPM での計算例を参考に、水位低下による盛土の破壊解析 (図 4) を行った。自重条件下で水を解析領域左側から流出させて水位を下げた際の盛土の挙動を解析した。また、サクシジョンの効果を検証するため、サクシジョンを考慮する場合としない場合の 2 ケース実施した。

水位低下による有効応力の低下に起因し、いずれも図 5 のように盛土の破壊が生じた。サクシジョンを考慮した場合、法肩で約 0.40m 沈下し、法尻付近で水平に約 0.32m 変位した。一方で、サクシジョンを考慮しない場合は法肩で約 0.65m 沈下し、法尻付近で水平に約 0.65m の変位が発生し、より大きな変形を生じた。水位低下過程での盛土の不飽和化に伴うサクシジョンの効果により、地盤の強度が増している様子を表現することができた。



(a) Air-saturated reservoir (Brooks and Corey model).



(b) Oil-saturated reservoir (van Genuchten model).

Fig. 2 Progress of saturation profiles for Buckley-Leverett problem (Lines: MPM-VOF, Plots: reference).

5. まとめ

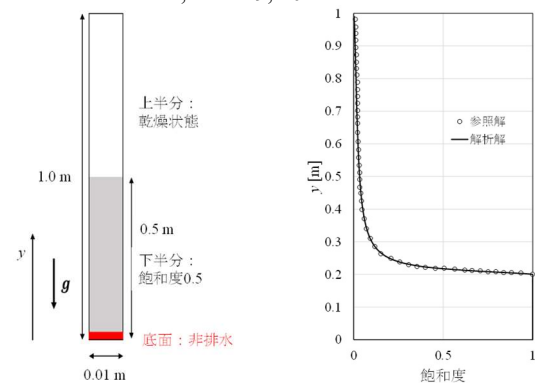
本研究では、MPM-VOF 法の不飽和地盤への拡張を行い、また、それを用いて、水位低下による不飽和化を伴う地盤の破壊現象を表現することができた。水位上昇等による飽和化を伴う地盤の破壊現象についても妥当性検証を行い、表現できるようにすることが今後の課題である。

6. 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(A))研究課題番号 21KK0254 の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) R. Hashimoto, R. Onakado and Y. Higo: A coupled MPM-VOF method for seepage failure of saturated ground, Proceedings of PARTICLES 2025, 2025.
- 2) F. J. Carrillo, I. C. Bourg and C. Soulaire: Multiphase flow modeling in multiscale porous media: An open-source micro-continuum approach, Journal of Computational Physics: X, 100073, 2020.
- 3) F. Ceccato, A. Yerro, V. Girardi and P. Simonini: Two-phase dynamic MPM formulation for unsaturated soil, Computers and Geotechnics, Vol.129, 2021.



(a) Initial condition. (b) Saturation profile at steady state.
Fig. 3 Equilibrium of gravity and capillary forces.

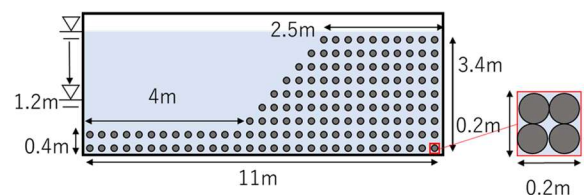
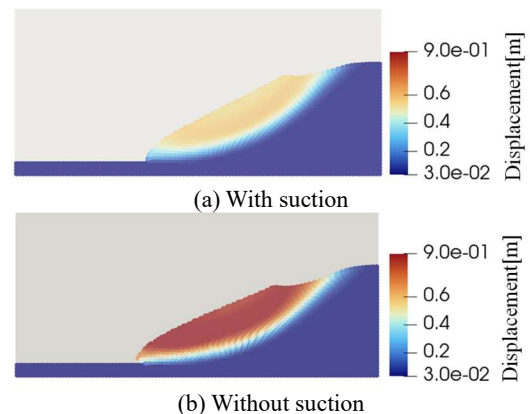


Fig. 4 Rapid drawdown problem of reservoir embankment.



(a) With suction (b) Without suction
Fig. 5 Displacement magnitude profile at the final state.