

合同セッション | 合同セッション（地盤力学の理論と応用の最前線）

■ 2026年5月17日(日) 16:10 ~ 17:40 | 会場(環境棟：5階講義室)

地盤力学の理論と応用の最前線 (4)

座長: 岩井 裕正(京都大学)

16:10 ~ 16:25

[24016] 土粒子単位構造内の排水挙動に対する動粘性係数の影響（シンポジウム講演概要）

*江城 静順¹、肥後 陽介¹ (1. 京都大学大学院工学研究科)

16:25 ~ 16:40

[24017] 模型実験と個別要素法による自立式土留め工の側圧分布評価（シンポジウム講演概要）

*菊池 彬大¹、山栗 祐樹²、西岡 英俊²、岡本 道孝³、井上 直史³、中島 悠介³、内藤 直人⁴ (1. 中央大学大学院、2. 中央大学、3. 鹿島建設（株）、4. 豊橋技術科学大学)

16:40 ~ 16:55

[24018] DEM計算による拡底杭引抜き時の地盤変形挙動の観察（シンポジウム講演概要）

*福元 豊¹、桐山 貴俊²、井戸口 将大¹、樺 真緒² (1. 岡山大学、2. 清水建設株式会社 技術研究所)

16:55 ~ 17:10

[24019] 粒状体系に対するボンドベース型近接場動力学とインパルス接触動力学のハイブリッド計算手法（シンポジウム講演概要）

*李 広治¹、朱 凡²、松島 亘志¹ (1. 筑波大学、2. 京都大学)

17:10 ~ 17:25

[24020] MPMと極限つりあい法に基づく土構造物の限界状態評価の比較（シンポジウム講演概要）

*野々山 栄人¹、宮田 喜寿¹ (1. 防衛大学校)

17:25 ~ 17:40

[24021] 拘束圧がサフィージョンの発生・進展に及ぼす影響に関する数値解析（シンポジウム講演概要）

*中村 陽斗¹、菊本 統²、Previtali Marco³、Ciantia Matteo^{4,5}、崔 瑛¹ (1. 横浜国立大学、2. 京都大学、3. 西湖大学、4. Dundee大学、5. ミラノ・ビッコカ大学)

土粒子単位構造内の排水挙動に対する動粘性係数の影響（シンポジウム講演概要）

Effect of Kinematic Viscosity on Drainage Behavior in a Unit Structure Composed of Soil Particles (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

江城 静順（京大・工） 肥後 陽介（京大・工）

Shizuka ESHIRO, Kyoto University

Yosuke HIGO, Kyoto University

E-mail: eshiro.shizuka.72m@st.kyoto-u.ac.jp

The influence of kinematic viscosity on interfacial advancement is investigated in pore-scale two-phase flow simulations using the lattice Boltzmann method. Equilibrium saturation and gas-liquid interface were nearly identical even at higher viscosity. Interface tracking during drainage showed that increasing packing density changes the direction of air invasion from vertical to a more horizontal advance along the pore geometry.

1. はじめに

不飽和地盤の解析には保水性を数値モデルで表した水分保持曲線モデルが必要であることが多い。この水分保持曲線モデルには、広く一般に使われるものの保水性試験結果によるフィッティングが必要な経験的モデル(e. g., van Genuchten モデル)のほか、土粒子や間隙を簡単な幾何(例えば規則充填)で表現し、粒度分布などから保水性試験なしに水分保持曲線を推定する理論的モデル^{1),2)}がある。理論的モデルでは、あるサクションで各間隙から突発的な排水・吸水が生じるとし、そのサクションをモデル化することで、各間隙が飽和しているかどうかを分別してサクションと飽和度の関係を計算する。既往研究の排水・吸水サクションモデルは実際の排水・吸水挙動を観察してモデル化したものではなく、より精緻な理論的モデル構築には間隙スケールでの観察とそれに基づいたモデル化が必要である。

このような間隙スケールの排水・吸水を観察する手法として、格子ボルツマン法(LBM)がある。この手法は複雑な間隙形状をもつ多孔質媒体内の気液界面移動を比較的簡単に表現できるという利点を持つ。しかし、局所平衡に戻る速さを決め粘性などの散逸を設定する緩和モデルに、最も簡単に広く使われる BGK (Bhatnagar-Gross-Krook)モデルを用いると、動粘性係数を低く設定したときに数値的不安定性が顕在化しやすいという課題がある。

そこで本研究では、LBM (BGK モデル)を用いた間隙スケール二相流解析において、動粘性係数の設定が気液界面の進展挙動に与える影響を検討する。具体的には、動粘性係数を水よりも高く設定した条件でも、平衡状態が水と概ね同等の挙動を示すかを確認し、間隙内の排水・吸水サクションを議論する妥当性を評価する。さらに、異なる密度における単位構造内の排水挙動を再現し、間隙内での界面進展を追跡することで、間隙スケールの排水・吸水挙動の理解に資する知見を得ることを目的とする。

2. 数値解析手法

本研究では、気液界面の進展と固体表面の濡れ性を非平衡熱力学の理論に基づいて統一的に表現可能な phase-field 型二相 LBM を用いて単位構造内の排水挙動を再現する。支配方程式には連続式、Navier-Stokes 方程式、保存型 Allen-Cahn 方程式の3つを用い、Younes et al. (2022)³⁾を参考に3次元19方向に離散化し、以下の2つの格子ボルツマン方程式を用いて計算を行った。

$$f_k(\mathbf{x} + \mathbf{c}_k, t + 1) = f_k(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau_f} (f_k(\mathbf{x}, t) - f_k^{eq}(\mathbf{x}, t)) + F_k \quad (1)$$

$$g_k(\mathbf{x} + \mathbf{c}_k, t + 1) = g_k(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau_g} (g_k(\mathbf{x}, t) - g_k^{eq}(\mathbf{x}, t)) + G_k \quad (2)$$

ここで、 f_k, g_k : 分布関数、 f_k^{eq}, g_k^{eq} : 平衡分布関数、 $\mathbf{x}$: 座標、 $\mathbf{c}_k$: 粒子速度、 t : 時刻、 $\tau_f = \tau_g = 1$: 緩和時間である。各項は以下のように計算される。

$$f_k^{eq}(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 3p(\omega_k - 1) + \rho\omega_k \left[3\mathbf{c}_k \cdot \mathbf{u} + \frac{9(\mathbf{c}_k \cdot \mathbf{u})^2}{2} - \frac{3u^2}{2} \right] & (k = 0) \\ 3p\omega_k + \rho\omega_k \left[3\mathbf{c}_k \cdot \mathbf{u} + \frac{9(\mathbf{c}_k \cdot \mathbf{u})^2}{2} - \frac{3u^2}{2} \right] & (k \neq 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$g_k^{eq}(\mathbf{x}, t) = \omega_k \phi (1 + 3\mathbf{c}_k \cdot \mathbf{u}) \quad (4)$$

$$F_k = \left(1 - \frac{1}{2\tau_f} \right) \omega_k (3\mathbf{c}_k \cdot (\mu_\phi \nabla \phi + \mathbf{G}) + 3(\rho_l - \rho_g) \mathbf{u} \nabla \phi : \mathbf{c}_k \mathbf{c}_k) \quad (5)$$

$$G_k = \left(1 - \frac{1}{2\tau_g} \right) \omega_k \mathbf{c}_k \cdot \left(3\partial_t(\phi \mathbf{u}) + \frac{4\phi(1-\phi)}{W} \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \quad (6)$$

ここで ω_k : 重み係数、 p : 圧力、 $\mathbf{u}$: 流速、 ϕ : オーダーパラメータ、 μ_ϕ : 化学ポテンシャル、 $\mathbf{G}$: 体積力、 W : 界面幅、 ρ_l, ρ_g : 液体・気体の密度である。ここでは $W = 5$ とした。

本研究では、境界条件として固体壁にハーフウェイバンスボックススキームと濡れ性境界条件、計算領域の境界に周期境界条件と圧力境界を用いる。ハーフウェイバンスボックススキームと濡れ性境界条件、周期境界条件は Younes et al. (2022)³⁾の定式化を用い、圧力境界は LBM で広く用いられる Guo et al. (2002)⁴⁾の定式化を導入した。解析モデルには Fig. 1 に示す菱面体構造を用い、間隙が飽和した状態から底面液相の圧力水頭を 200 万ステップごとに粒子半径分低下させることで排水挙動を再現した。上面は 0 kPa の圧力で維持した。

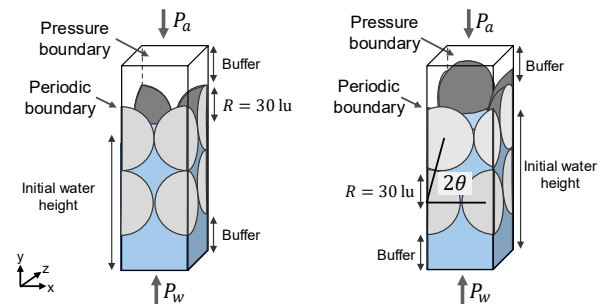


Fig. 1 Simulation model

3. 排水挙動と動粘性係数の影響

動粘性係数はせん断に対する抵抗を特徴づけるものであり、理論上平衡状態における挙動には影響しない。したがって、十分平衡まで待てば、動粘性係数を変化させても本質的に同じ平衡界面が得られると考えられる。そこで、Table 1 に示す 6 つのケースを $2\theta = 90^\circ$ の菱面体構造（単純立方構造）のモデルで解析し、動粘性係数と平衡待機時間が排水挙動に与える影響を調べる。ここで、 ν_w は 20°C における水の動粘性係数である。

Table 1: Number of steps per one pressure stage and kinematic viscosity in each case

Case	1	2	3	4	5	6
Steps/pressure stage	1000000			2000000		
Kinematic viscosity ($\times \nu_w$)	914	548	365	914	548	365

Fig. 2 に各圧力段階で与えた底面圧力と、その最終ステップにおける飽和度の関係を示す。ここで飽和度は計算領域内での液相ノード数と流体相ノード数の比で定義される。最初の 5 段階目まではどのケースもほぼ同じ飽和度であり、十分平衡に至っていると考えられる。6 段階目－8 段階目の飽和度が急激に低下する段階ではケースごとに飽和度に違いがあり、動粘性係数が高く、圧力段階ごとの時間ステップ数が少ないケースほど飽和度が高くなっている。これは、突発的な排水に対して挙動が非平衡になっていることを示している。したがって、十分平衡に至っている状況では動粘性係数は飽和度には影響せず、急激に排水が生じる直前の平衡時の圧力や気液界面形状を取得することで、理論的モデルで重要な排水サクションを議論できる可能性が示唆される。

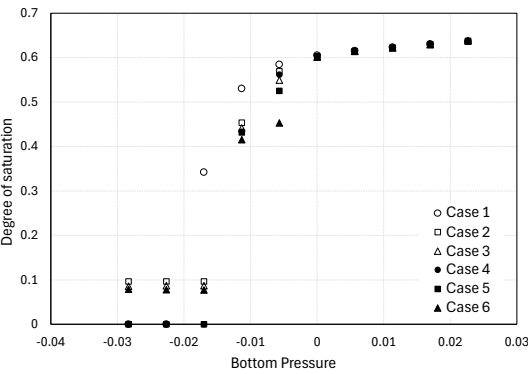


Fig. 2 Relationship between the bottom pressure and the degree of saturation with different kinematic viscosities and number of steps per pressure stage

4. 突発排水中の気液界面の進展

Fig. 3 に $z=35$ の断面における気液界面の進展状況を示す。本検討では単位構造角を $2\theta = 70^\circ, 90^\circ$ 、動粘性係数を $\nu = 914\nu_w, 365\nu_w$ とそれぞれ変化させた 4 ケースを比較する。

まず、 θ が同じで動粘性係数が異なるケースを比較すると、各色の曲線形状はほぼ一致しており、界面の形状については動粘性係数がほとんど影響しないことが分かる。一方で各色の曲線の時刻は異なっており、特に突発的な排水が生じている間の界面進展速度は動粘性係数が小さい方が大きいことが分かる。

次に動粘性係数が同じで単位構造角 θ が異なるケースを比較すると、 $2\theta = 90^\circ$ の構造では気液界面の進展が常に鉛直方向であるのに対し、 $2\theta = 70^\circ$ の構造では初め鉛直下向きに界面が進展しているものの、徐々にその向きが水平方向に変化している。これは $2\theta = 70^\circ$ の単位構造では $2\theta = 90^\circ$ の単位構造とは粒子配置が異なっており、間隙の形状に沿って気液界面が進展しているためと考えられる。

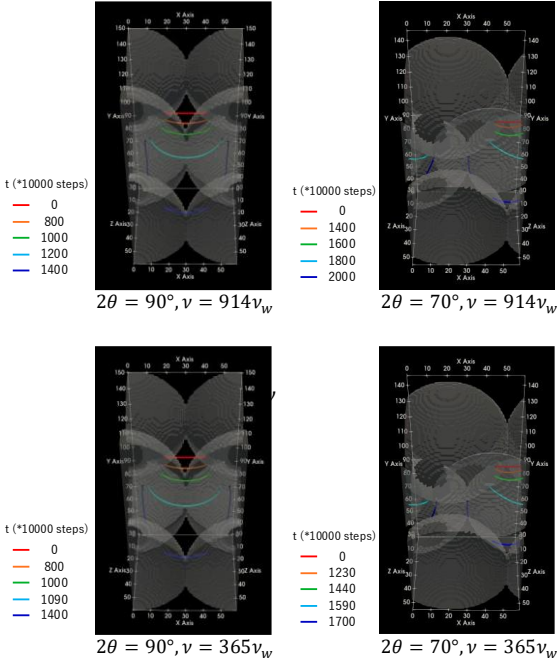


Fig. 3 Air-water interface advancement during drainage

5. 結論

本研究では、LBM (BGK モデル) を用いた間隙スケール二相流解析において、動粘性係数を変化させて排水挙動を観察した。その結果、動粘性係数によらず平衡時はほぼ同じ挙動・気液界面を示すことが分かった。さらに異なる密度の単位構造内の排水挙動を再現し、間隙内での気液界面の進展を観察することで、菱面体構造の密度が大きくなると界面進展方向が間隙形状に沿って鉛直下向きから水平向きに変化することが分かった。

以上の知見は、理論的水分保持曲線モデルの構築に向けた排水・吸水挙動の理解においては、数値解析の安定性を重視した高粘性条件でも議論が可能であることを示唆している。また、本モデルは異なる間隙での排水・吸水挙動を再現可能であり、理論的モデルにおいて重要な突発的な排水・吸水サクションを定量評価しうることが示された。

今後は様々な密度・粒径の単位構造について排水・吸水が生じるサクションを取得することで、理論的水分保持曲線モデルの改良を目指す

参考文献

1) Alves, R. D., et al.: *Computers and Geotechnics*, **127**, 2020.
2) Likos, W. J. and Jaafar, R.: *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **139**(5), 724-737, 2013.
3) Younes, N., et al.: *Powder Technology*, **411**, 117942, 2022.
4) Guo, Z.-L., et al.: *Chinese Physics*, **11**(4), 366, 2002.

模型実験と個別要素法による自立式土留め工の側圧分布評価（シンポジウム講演概要） Assessment of Lateral Earth Pressure Distribution of a Self-Supporting Earth Retaining Work Using Model Experiments and the DEM Analysis (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

菊池 彬大（中央大大学院・理工） 山栗 祐樹 西岡 英俊（中央大・社会理工）
岡本 道孝 井上 直史 中島 悠介（鹿島建設）
内藤 直人（豊橋技科大・建築都市システム学系）
Akihiro KIKUCHI, Chuo University Graduate School
Yuki YAMAKURI and Hidetoshi NISHIOKA, Chuo University
Michitaka OKAMOTO, Naoshi INOUE and Yusuke NAKAJIMA, Kajima Corporation
Naoto NAITO, Toyohashi University of Technology
E-mail: yyamakuri340@g.chuo-u.ac.jp

Previous two-dimensional model excavation experiments using aluminium rod model ground, which can simulate granular material behaviour in 2D, were unable to evaluate lateral earth pressure distribution. This study therefore combined such experiments with the two-dimensional Distinct Element Method (DEM) to achieve continuous and high-accuracy assessment of lateral pressure distribution. In this study, the measured displacement of the model retaining wall from model experiment were applied as a forced displacement in the DEM analysis. The results confirmed that this approach can be used to evaluate the continuous lateral pressure distribution on both sides of a deflecting retaining wall with highly accurate ground deformation distribution.

1. はじめに

掘削土留め工の掘削面及び背面の各側圧の連続的な分布状況は、一般的には離散的に配置された土圧計及びひずみ計の測定結果を逆解析して推定される。しかしながら、土留め壁のたわみに伴って土圧計の設置条件が変化すること等起因した測定誤差が生じるため、実現場だけでなく模型実験であっても側圧分布を高精度に推定することが難しいのが現状である。掘削土留め工の側圧の高精度な評価技術の確立は、土留め工の変形メカニズムを理解する上での応用力学上の重要な課題の一つである。

これまで自立式土留め工に関する2次元模型実験として、粒状体の挙動を2次元的に模擬できるアルミ棒積層地盤での模型掘削実験¹⁾が実施されているが、側圧分布を評価することはできていなかった。そこで本報では2次元個別要素法を組み合わせることで、連続的かつ高精度な側圧分布の評価を試みた結果について報告する。

2. アルミ棒積層地盤での模型掘削実験の概要と結果

既往研究¹⁾と同様に2次元模型掘削実験（Fig. 1）を行った。模型地盤は、直径1.5, 2.0, 3.0 mmのアルミ棒（長さ150mm）を重量比1:1:1で混合して向きを揃えて積み重ねた幅1000 mm、深さ300 mmのアルミ棒積層地盤（単位体積重量21.5 kN/m³）である。

模型土留め壁には、弾性変形を示す土槽奥行方向の幅150 mm、厚さ1.0 mmのアルミ合金板（A5052、ヤング率 $E = 70$ GPa）を使用し、初期根入れ長 $L_0 = 250$ mmとした。また、模型土留め壁には画像解析により掘削時の変位量を高精度に測定するための標点を約10 mm間隔で設置した。土留め壁前面側のアルミ棒を深さ約5 mmずつ取り出すことで段階的な掘削作業を模擬し、掘削段階毎に写真撮影を行って模型土留め壁の変位を求めた。

掘削深さと掘削前の地表面高さ位置での模型土留め壁の水平変位 δ の関係をFig. 2に示し、掘削深さ $H \approx 30, 60, 90, 120$ mmの各時点での模型土留め壁の水平変位 δ の深度分布をスプライン近似した結果をFig. 3に示す。

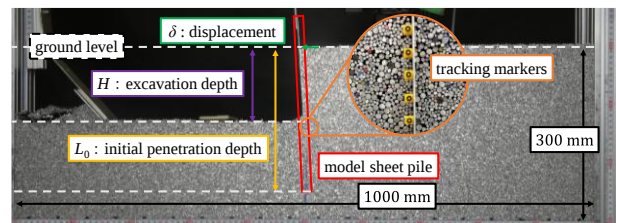


Fig. 1 Excavation experiment using aluminium rods

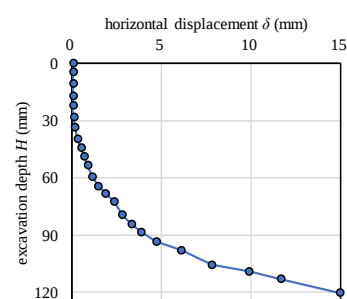


Fig. 2 Excavation-displacement relationship

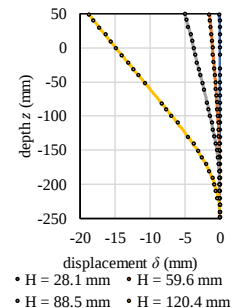


Fig. 3 Displacement distribution

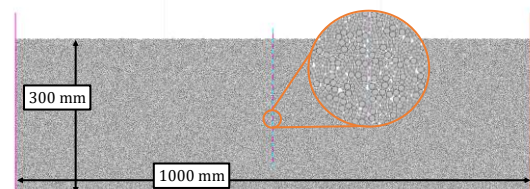


Fig. 4 Model ground in DEM analysis

3. DEM 土圧計測解析の概要

Itasca 社製 PFC2D ver7.0 を用いた個別要素法での解析では、Fig. 4 に示すように掘削模型実験を粒径と粒径分布も含めて同一寸法で直接模擬することとした。アルミ棒のモデル化には、要素の回転運動に対する抵抗力が考慮可能な Rolling Resistance Linear Model を採用し、アルミ棒の安息角試験で同定したパラメータ²⁾を用いた（Table 1）。模型土留め壁は10 mm 間隔で分割した壁要素で模擬し、側圧の抽出

を容易にするために微小 (0.02 mm) 間隔で 2 枚の壁要素を配置した。粒子－壁間のパラメータは、アルミ棒の擁壁土圧実験の再現解析³⁾と同じ値を用いた。

粒子パッキングは、自由落下により行った。パッキング時は粒子－壁間摩擦係数 μ を 0.0 に、粒子間摩擦係数 μ と転がり摩擦係数 μ_r を 0.06 に設定することで、模型実験と同一の単位体積重量 21.5 kN/m³ が得られた。粒子降下後、地盤高さ 300 mm を上回る粒子を削除し、粒子間及び粒子－壁間の各摩擦係数を Table. 1 の値に設定した。最終的な粒子数は計 84831 個である。

本解析では、掘削深さ $H \approx 120$ mm までの土留め壁挙動を再現するため、掘削深さ $H \approx 30, 60, 90, 120$ mm の 4 段階で掘削状況を再現した。具体的には、各段階で掘削面側から地盤粒子を削除した後に、模型実験で求めた模型土留め壁の変位 (Fig. 3 のスプライン近似結果) に一致するように壁要素を強制的に 10 秒間で変位させ、5 秒間静止させた後に次の掘削段階の解析に移行した。

側圧分布は、各壁要素 (長さ 10 mm) 単位で法線方向の粒子反力を集計し、各面積で除して単位面積当たりの地盤反力度として算出した。ただし、本解析では壁要素を強制変位させる力に対するつり合いを取っていないため、壁要素全体での剛体つり合いが取れた側圧分布となるように補正した。具体的には、地表面からの深さ z (掘削面側では掘削底面からの深さ) の 2 次関数として補正土圧 $p_c = az^2 + bz$ を仮定し、補正土圧を含めた両面の全壁要素の粒子反力の合計及び粒子反力による模型土留め壁下端回りのモーメントの合計の二乗和がゼロになるように、最小二乗法で係数

a, b を求めた。また、窓長が概ね土留め壁の特性長 $1/\beta \approx 70$ mm となる 7 点の移動窓を用い、5 次多項式による Savitzky-Golay 法で平滑化した。

4. DEM 解析結果 (掘削深さ 120 mm 時)

DEM 解析で得られた各粒子の変位コンター図と、模型実験で画像解析 (DIC 法) により得られた地盤の変位コンター図の比較結果を Fig. 5 に示す。個別要素法が模型実験での地盤変位分布を精度よく再現できていることがわかる。

個別要素法で得られた側圧分布 (補正後の地盤反力度分布) を Fig. 6 に示す。また、同図中には、トンネル標準示方書での転倒照査に用いられる側圧分布⁴⁾を破線で示している。このトンネル標準示方書の側圧分布は、土留め壁根入れ部の途中で主働土圧と受働土圧が反転して作用する状態を仮定したものであり、アルミ棒積層体での擁壁土圧実験で実測された土圧係数 ($K_a = 0.36, K_p = 3.14$)¹⁾を用いて算定している。

個別要素法で得られた側圧分布は、定性的にはトンネル標準示方書と同様の傾向 (背面側は主働土圧、掘削面側は受働土圧となり、途中で反転する) となることが確認できる。ただし、掘削面側では土圧の反転が GL-200 mm 付近から生じていることや、背面側では GL-170~210 mm 付近で土圧がほぼゼロとなっているなど、比較的深部でトンネル標準示方書での仮定との乖離が見られた。これらは同示方書では土留め壁を剛体と仮定として側圧分布を求めているのに対して、本実験では実際に模型土留め壁のたわみが生じているためと考えられる。

5. おわりに

本報では、アルミ棒積層地盤での模型掘削実験の個別要素法による土圧計測解析として、模型実験で取得した模型土留め壁の変位を強制変位として与えることで、地盤変位分布を精度よく再現できるとともに、たわみ変形が生じた土留め壁両側の連続的な側圧分布が評価可能であることを確認した。

なお、本解析 (粒子パッキングと掘削 4 段階) の計算時間は、4.2GHz・24 コア・48 スレッド・64GB メモリの PC で約 1 日を要しており、模型実験の準備・実施時間よりも解析時間の方が長くなった。両者を相互に補完的に実施することで、より信頼性が高い多くの情報を把握することが可能になると考えられる。

現在、著者らの研究グループでは、二重土留め工法の開発と設計手法の合理化に取り組んでおり、模型実験と個別要素法による土圧計測解析を組み合わせた本技術を活用して、その変形メカニズムの解明に役立てていきたい。

参考文献

1) 西岡英俊, 松本尚也, 福田文香, 小野慶一郎: 壁体剛性の高い自立式土留め工の崩壊を模擬した模型掘削実験と合理的な根入れ長の簡易算定法の提案, 地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.3, pp.401-420, 2022.
2) 亀ヶ谷江梨, 西岡英俊, 山栗祐樹: 安息角の密度依存性に着目した 2 次元個別要素法に用いる粒子間摩擦係数と転がり摩擦係数の決定法, 土木学会論文集, Vol.82, No.15, 25-15022, 2026.
3) 牧野聖, 高橋広大, 山栗祐樹, 西岡英俊: 一体橋梁温度伸縮に伴う土圧増加現象の再現解析 (シンポジウム講演概要), 第 27 回応用力学シンポジウム, 23006-11-01, 2024.
4) 土木学会: トンネル標準示方書 [開削工法編]・同解説, p.362, 2016.

Table. 1 Parameters for earth pressure measurement analysis

parameters	value	
	ball-ball	ball-wall
density ρ	2650 kg/m ³	
normal stiffness k_n	1.0×10^7 N/m	
shear stiffness k_s	2.5×10^6 N/m	
friction coefficient μ	0.464	0.25
rolling friction coefficient μ_r	0.169	0.20
viscous damping coefficient h	0.20	

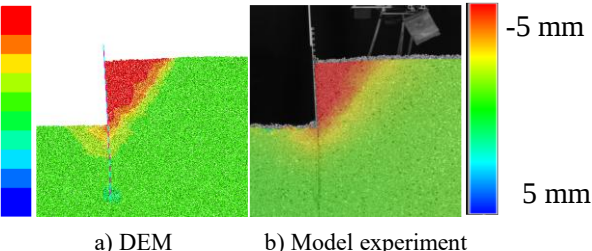


Fig. 5 Distribution of horizontal displacement (Positive: right direction)

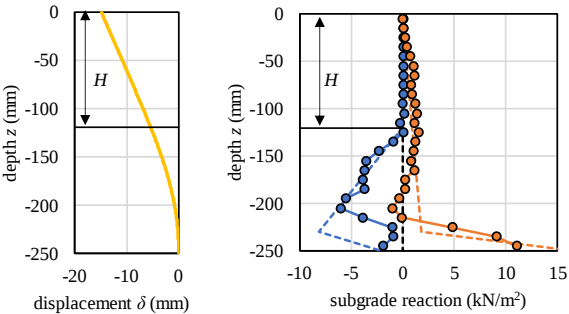


Fig. 6 Distribution of subgrade reaction

DEM 計算による杭底杭引き時の地盤変形挙動の観察 (シンポジウム講演概要)

Observation of soil deformation behavior during pullout of belled piles by using DEM (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

福元 豊 (岡山大) 桐山貴俊 (清水建設株式会社 技術研究所) 井戸口将大 (岡山大)
 樺 真緒 (清水建設株式会社 技術研究所)
 Yutaka FUKUMOTO, Okayama University
 Takatoshi KIRIYAMA, Institute of Technology, Shimizu Corporation
 Shota IDOGUCHI, Okayama University
 Mao KAMBA, Institute of Technology, Shimizu Corporation
 E-mail: yutakafukumoto@okayama-u.ac.jp

During the pullout of piles, specific areas of the soil surrounding the foundation of the pile form resistance zones that resist external forces in the vertical direction. Understanding the mechanism behind the formation of these zones is important for practical applications in the construction process. This study focused on belled piles and used DEM (discrete element method) simulations to evaluate these zones. Prior to the numerical analysis, centrifugal model tests were conducted to provide detailed information on the resistance zones in sandy soil when the edged shapes of belled piles were varied. This report discusses an investigative approach that combines high-resolution, two-dimensional DEM simulations with centrifuge model experiments.

1. はじめに

杭基礎の引抜き抵抗は、地震や暴風時に生じる建物のロッキング、地下および海洋構造物に作用する浮力、さらに膨張土による押し上げ力など、鉛直上向きに作用する外力に対して重要な抵抗機構となる。杭が引き抜かれる際には、杭周辺地盤の特定領域が抵抗土塊を形成し、引抜き方向の外力に抵抗するが、この地盤抵抗領域の発現機構を理解することは実務上極めて重要である。

本研究では、とくに杭底杭に着目し、地盤抵抗領域を評価するための DEM 計算を実施した。数値計算に先立って実施されたアルミ棒積層体実験¹⁾および遠心模型実験^{2,3)}では、杭底比を変化させた際の地盤抵抗領域に関する詳細な知見が得られている。これらの実験結果を踏まえ、高解像度 2 次元 DEM 計算と模型実験を組み合わせた検討方法について考察した。

2. 2 次元 DEM による実験の再現計算

今回参照する遠心模型実験^{2,3)}は、杭先端深度における遠心加速度 60G 場で実施された。装置概要を模型寸(換算寸)で示すと、模型杭は軸幅 2cm (1.2m)、杭底幅 5cm (3m) である。杭底角度 (α) は 10, 20, 30, 45, 90 度を用いた。模型杭は側方から観察するため、Fig. 1 のように半断面に切断されている。杭先端の抵抗力に着目するため軸部はテフロンシートで被覆し摩擦を除去し、場所打ち杭を想定するため、杭底部には豊浦砂 ($D_{50}=0.2\text{mm}$) が貼り付けられている。地盤部の条件は、乾燥豊浦砂であり、目標相対密度は 90% ($\rho_r=1.63\text{ g/cm}^3$) 以上として作成された。

DEM による再現計算では、換算寸を使用した。Fig. 2 において、粒子が堆積した地盤部は横 30m、地盤層厚 18m である。用いた DEM 粒子は円形で平均粒径は 12mm で、粒子数は約 400 万である。これは、遠心模型実験の土槽を側面から観察したときの粒径の大きさが一致する条件である。この他、平均粒径 25mm (粒子数 100 万)、平均粒径 55mm (粒子数 20 万) の条件でも検討した。今回は、杭底角度が 90 度の場合の結果を報告する。杭底杭は複数の線分要素で構成され、これらの線分要素を鉛直上向きに一定速度で制御することで引抜き計算を実施した。DEM の接触計算で

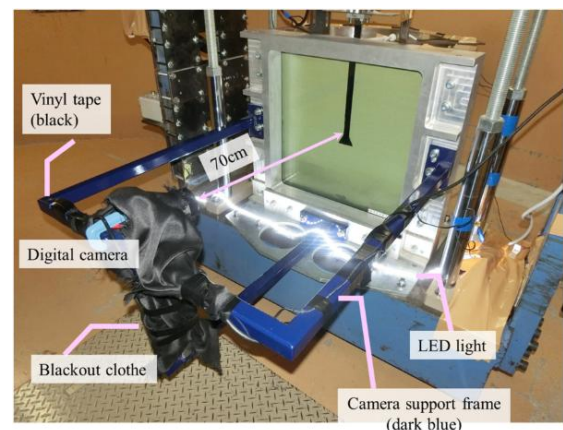


Fig.1 Centrifuge model test for pullout of belled piles with 60G^{2,3)}

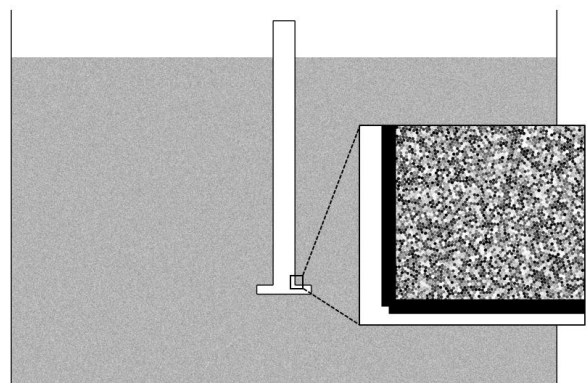


Fig.2 Initial configuration of 2-D DEM simulation with 4 million circular particles

は、通常の滑り摩擦の計算に加えて、砂粒子の形状に起因する回転抵抗を表現するための転がり摩擦⁴⁾も考慮した。引抜き距離は 1m, 粒子数 400 万の場合の計算ステップ数は 2×10^7 であり, A100 GPU を用いて計算を実行した⁵⁾。

3. 再現計算の結果

Fig. 3 では、各粒子数の条件における、引抜き距離に対する引抜き抵抗力の変化を示した。グラフの横軸は、引抜き距離 D を有効拡底幅 (拡底幅と軸幅の差) b で除した値である。グラフの縦軸の引抜き抵抗力 Q は、拡底部に作用する鉛直方向力を合計することで求めた。得られた Q - D/b 曲線は、遠心模型実験^{2,3)}よりもアルミ棒積層体実験¹⁾の結果に近くなった。また、粒子数が多い条件ほど、 $D/b=0.1$ 付近における Q の最大値が小さくなり、計算中の Q の変動幅も小さくなる傾向が見られた。

Fig. 4 は、 $D/b = 0.13$ (引抜き距離 0.25m) の時点における杭先端周辺の粒子変位分布図である。Fig. 4 (a)は水平変位、Fig. 4 (b)は鉛直変位を示している。水平変位の分布からは、拡径部の先端を起点として斜め鉛直上方に地盤変形が生じている様子が確認できた。鉛直変位の分布からは、拡径部の近傍で最も大きな変位が見られ、地表面に向かう広い範囲で地盤変形が生じていることがわかる。このような 2 つの変形モードは、1G 場におけるリブ付き補強材の引抜き挙動を X 線 CT 観察した研究⁶⁾においても確認されている。

次に、実験との比較について述べる。遠心模型実験^{2,3)}で砂粒子に大きな変位が生じた範囲は杭先端の周辺に限定されており、DEM 計算結果での変形範囲よりも小さい傾向を示した。一方で、2 次元的な変形挙動が計測されるアルミ棒積層体実験¹⁾と比較すると、Fig. 4 (b)の鉛直変位分布は良好な一致を示した。今回の計算結果では、杭の下部領域においてリバウンドによる変形領域が確認されたが、この点は実験では見られず、今後の改善が必要である。

最後に、Fig. 5 は Fig. 4 の結果を基に作成したせん断ひずみ分布図である。せん断ひずみの算出には、Hori and Sakaguchi⁷⁾の方法を用いた。遠心模型実験^{2,3)}の画像解析では、複数の輪郭が重なり合うような分布が得られたが、Fig. 5 ではそのような特徴は明確に確認されなかった。

4. おわりに

遠心模型実験の断面における粒径スケールと一致する高解像度条件にて、2 次元 DEM による再現計算を実施した。本報告で示した結果に加えて、拡径角度、初期間隙比、引抜き速度を変化させた検討も行っている。これらの計算結果を踏まえ、今後は 3 次元での再現計算を実施することで、今回明らかになった問題点の検証を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 桐山 貴俊, 大竹 浩太, 赤木 寛一: 拡底杭引抜き時における低拘束圧地盤の変形挙動—実験および数値解析—, 土木学会論文集 A2, 76(2), I_269-I_278, 2020.
- 2) 桐山貴俊, 周友昊, 浅香美治: 画像相関法を用いた拡底杭引抜き時の地盤変形挙動の観察, 第 58 回地盤工学研究発表会, 12-9-3-05, 2023.
- 3) 桐山貴俊, 周友昊, 浅香美治: 異なる拡底比を有する拡底杭引抜き時の地盤抵抗領域の観察, 2023 年度日本建築学会大会, 20208, 415-416, 2023.
- 4) Y. Fukumoto, H. Sakaguchi, A. Murakami: The role of rolling friction in granular packing, Granular Matter, 15, 175-182, 2013.

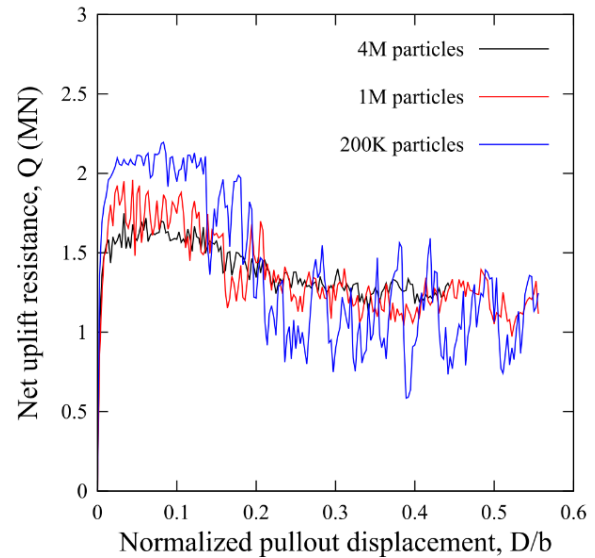


Fig.3 Uplift resistance, Q (MN) vs. Normalized pullout displacement, D/b

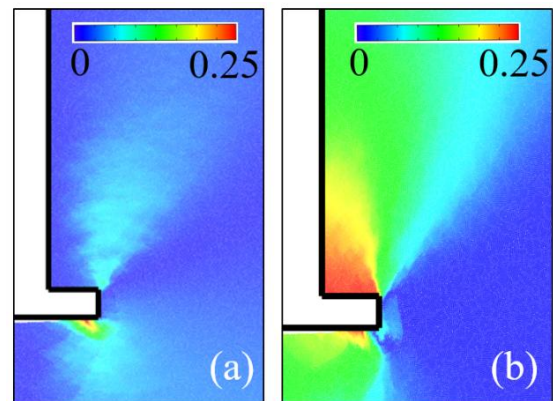


Fig.4 Distributions of particle displacement in case of 4M particles. (a) Horizontal and (b) Vertical directions

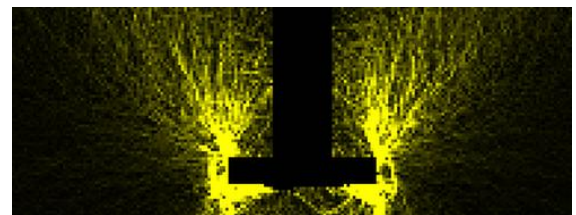


Fig.5 Distribution of shear strain in case of 4M particles.

- 5) 福元 豊, 西浦泰介: DEM の高速化, 地盤工学会誌 (技術手帳), 70(1), 62-65, 2022.
- 6) R. Kido, Y. Sawamura, K. Kimura, M. Kimura: Investigation of soil deformation characteristics during pullout of a ribbed reinforcement using X-ray micro CT, Soils and Foundations, 61(3), 642-657, 2021.
- 7) T. Hori and H. Sakaguchi: Mechanism of décollement formation in subduction zones. Geophysical Journal International, 187(3), 1089-1100, 2011.

A hybrid computational method: coupling bond-based peridynamics with impulse contact dynamics for granular systems

(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

Guangzhi Li, Department of Engineering Mechanics and Energy, University of Tsukuba
 Fan Zhu, Department of Urban Management, Kyoto University
 Takashi Matsushima, Department of Engineering Mechanics and Energy, University of Tsukuba
 E-mail: s2530209@u.tsukuba.ac.jp

Efficient simulation of crushing in granular systems remains challenging due to the high cost of resolving internal crushing and evolving contact topology. This study proposes a hybrid computational method coupling a bond-based peridynamics solver with impulse-based contact dynamics. A virtual mass scaling strategy improves stability during rapid bond rupture. A system state transition framework manages grain motion, reconstruction, and identity across crushing events. A boundary transformation scheme converts contact forces into equivalent radial loading for peridynamics computation. Together, these components enable efficient and physically consistent granular crushing simulation.

1. Introduction

Granular systems are widely encountered in natural and engineered environments, where grain crushing governs macroscopic mechanical behaviors. Crushing alters contact topology and force transmission pathways, making it difficult to accurately capture the transition from intact grains to crushing fragments and the evolution of contact interactions. While contact dynamics methods efficiently resolve rigid-body interactions, modeling grain crushing requires physically consistent continuum-based formulations to capture internal fracture processes.

Peridynamics, introduced by Silling¹⁾ as a nonlocal continuum mechanics formulation, provides a natural framework for modeling crushing initiation and propagation without requiring predefined crack paths. The development of open-source implementations, such as Peridigm, has enabled systematic investigation of crushing behaviors in a wide range of materials. However, despite its strong theoretical foundation, peridynamics has not been widely adopted for large-scale granular systems, primarily due to its substantial computational cost. Even in coupled frameworks that integrate peridynamics with rigid-body dynamics engines, such as the coupling between Peridigm and Chrono²⁾, the computational expense associated with resolving internal fracture within individual grains remains a significant bottleneck, limiting its applicability to large granular systems.

To overcome this limitation, this work proposes a hybrid computational method coupling bond-based peridynamics with impulse contact dynamics for granular systems. Instead of relying on general-purpose peridynamics solvers, a specialized bond-based peridynamics solver is developed to resolve crushing behaviors at the individual grain level. The solver is designed with a highly parallel and computationally efficient structure, tailored specifically for grain-scale crushing simulation within large granular systems. In addition, the contact dynamics formulation is extended to explicitly incorporate the transition from parent grains to child grains, enabling consistent tracking of crushing-induced topology changes and contact interactions. The resulting hybrid framework enables efficient and physically consistent simulation of grain crushing and post-fracture contact dynamics, providing a scalable computational approach for large scale granular systems.

2. Computational Methods

2.1. Bond-based peridynamics

Bond-based peridynamics describes the motion of a material point through pairwise force interactions within a finite horizon. The governing equation of motion is expressed as:

$$\rho(x) \cdot \ddot{u}(x, t) = \int_{H_x} f[u(x') - u(x), (x' - x)] dV_{x'} + b(x, t) \quad (1)$$

Where $\rho(x)$ is the mass density of the material point, $\ddot{u}$ is the acceleration of the material point, f is the bond force in horizon H_x , u is deformed relative displacement, and b is body force.

However, Rapid bond rupture during dynamic fragmentation may produce excessive acceleration due to sudden force imbalance, leading to unstable velocity growth and nonphysical bond breakage cascades under explicit integration. This issue is particularly critical in grain crushing, where high bond stiffness and abrupt topology changes amplify inertial effects. To ensure numerical stability while preserving the original bond-based force formulation, a virtual mass scaling strategy is introduced in the velocity update:

$$v_{t+\Delta t} = v_t + \frac{f_t}{m_p + \alpha m_p} \Delta t \quad (2)$$

Where f_t is the resultant peridynamics force, m is the mass of material point, and α is a stabilization coefficient. This approach locally increases the effective inertia of material points during rapid bond failure events, suppressing excessive velocity increments while maintaining physically consistent crushing evolution.

2.2. Impulse contact dynamics

After bond breakage, child grains are treated as discrete rigid bodies whose interactions are governed by impulse-based contact dynamics. Instead of resolving contact forces through continuous force integration, this approach updates the velocity of each body directly using contact impulses, ensuring robust handling of collision and separation. The velocity update is expressed as:

$$v_{t+\Delta t} = v_t + \frac{J}{m_c} \quad (3)$$

Where J is the contact impulse and m_c is the mass of the rigid body. This formulation ensures momentum conservation and stable contact resolution, even under highly dynamic crushing conditions. It enables efficient simulation of post-fracture grain interactions and naturally captures the

transition from bonded material points to independent rigid fragments.

3. Framework Implementation Methods

3.1. System state representation and transition

To enable consistent coupling between peridynamics crushing computation and rigid body contact dynamics, the granular system is represented as a sequence of discrete system states. Each system state provides a complete description of all objects, including both grains and containers, and serves as the unified interface between successive Chrono simulation systems. For each object, the state includes a tag identifying its type and a unique lineage code preserving its identity across crushing events. The physical configuration is defined by its position and orientation in the world coordinate system, while its inertial properties include mass and inertia tensor in the local frame. The dynamic motion is characterized by linear velocity in the world frame and angular velocity in the local frame. This representation ensures consistent tracking of object identity, physical properties, and motion during crushing generation and reconstruction.

During simulation, the system state is injected into a Chrono system to instantiate rigid bodies and initialize their dynamic variables. As shown in Fig. 1, the Chrono solver advances the system under impulse-based contact dynamics, updating object motion and interactions. Grains satisfying the crushing criterion are converted into material point systems, and the bond-based peridynamics solver resolves internal deformation and bond failure. Newly formed child grains are identified, reconstructed as rigid bodies, and assigned updated lineage codes. These reconstructed objects form a new system state, which is injected into the next Chrono system, enabling seamless transition between crushing computation and contact dynamics.

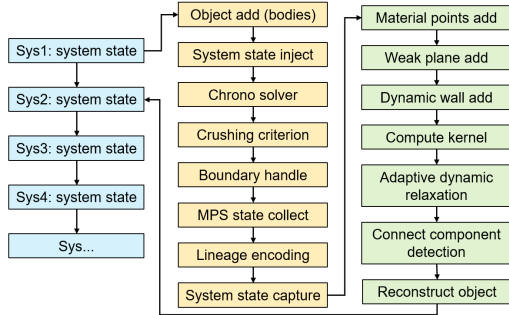


Fig. 1 System state transition framework.

3.2. Boundary condition transformation

To efficiently transfer contact dynamics information into the peridynamics solver, the grain surface is partitioned into 16 angular regions using uniform divisions in spherical coordinates. Contact forces acting within each region are grouped and converted into a representative force to reduce complexity while preserving dominant loading characteristics. For region k , the representative force F_k is defined as a magnitude-weighted average of all contact forces within that region:

$$F_k = \frac{\sum_{m=1}^m \|f_m\| f_m}{\|f_m\|} \quad (4)$$

Where f_m denotes the individual contact force acting within region k , m enumerates all contact forces belonging to region k . As illustrated in Fig. 2, the magnitude-weighted representative force F_k obtained for each region is further decomposed relative to the grain centroid. Specifically, a unit

vector u_k is defined from the centroid to the contact region, and the representative force F_k is projected onto this direction. The resulting radial component, denoted as F_k^{rad} , represents the effective compressive loading transmitted through the grain surface and is responsible for driving internal deformation and fracture. This radial force F_k^{rad} is subsequently applied as the equivalent boundary condition in the peridynamics solver. The tangential component F_k^{tan} , which primarily contributes to rigid body rotation and sliding, is not directly involved in crushing computation. Through this procedure, discrete contact forces are first consolidated into regional representative forces and then converted into physically consistent radial boundary conditions suitable for peridynamics analysis.

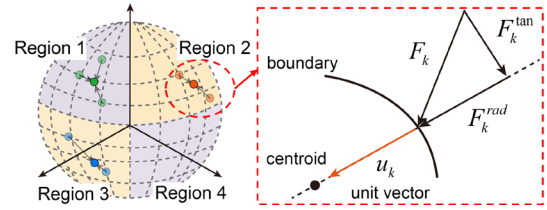


Fig. 2 Radial decomposition of regional representative force.

3.3. Lineage encoding for crushing tracking

To preserve the crushing history and ensure consistent object identity across successive system states, a lineage encoding scheme is introduced. Each grain is assigned a unique lineage code that reflects its hierarchical fragmentation origin. As illustrated in Fig. 3, the initial grain is assigned a base code (e.g., 0001). When crushing occurs, each newly formed child grain inherits the parent code with an appended identifier (e.g., 000101, 000102, 000103, 000104), establishing a direct parent-child relationship. This encoding mechanism allows all fragments to be uniquely identified while retaining their connection to the original grain.

When further crushing occurs, the lineage code is extended recursively by appending additional digits to the parent fragment code (e.g., 000102 $\rightarrow$ 00010201, 00010202). This hierarchical encoding enables efficient tracking of multi-stage crushing behaviors and ensures consistency between peridynamics crushing computation and rigid body reconstruction. The lineage code is stored within the system state and propagated across simulation stages, providing a robust and scalable mechanism for managing dynamically evolving granular systems.

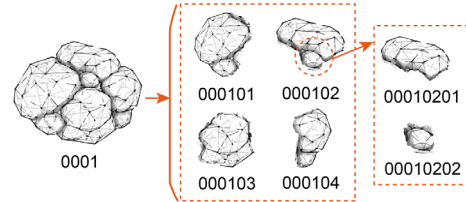


Fig. 3 Lineage encoding of grain crushing tracking

References

- 1) Littlewood, D. J., Parks, M. L., Foster, J. T., et al.: The peridigm meshfree peridynamics code, *J. Peridyn. Nonlocal Model.*, 6, pp. 118–148, 2024.
- 2) Zhu, F. and Zhao, J.: Modeling continuous grain crushing in granular media: a hybrid peridynamics and physics engine approach, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 348, pp. 334–355, 2019.

MPM と極限つりあい法に基づく土構造物の限界状態評価の比較 (シンポジウム講演概要)

Comparison of Limit State Evaluations between the Material Point Method and the Limit Equilibrium Method for Soil Structures

(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

野々山 栄人 (防衛大・システム工) 宮田 喜壽 (防衛大・システム工)
 Hideto NONOYAMA, National Defense Academy of Japan
 Yoshihisa MIYATA, National Defense Academy of Japan
 E-mail: nonoyama@nda.ac.jp

This study uses the Material Point Method implemented in Anura3D to investigate the effects of groundwater conditions on the deformation and stability of soil structures. Parametric analyses that vary the groundwater level and soil strength demonstrate clear correlations between the limit state index and slope displacements. The vertical and horizontal slope displacements exhibit an approximately linear relationship, indicating the potential for displacement-based limit state assessments under groundwater conditions.

1. はじめに

土構造物の防災・減災リスクおける取組みの重要性が高まっている。この要求に対し、数値解析手法の活用は有効と考えられ、大変形を伴う地盤挙動を精度よく再現できる解析手法の整備や、力学的根拠に基づく変状レベルの判定法の構築への応用が期待されている。

本研究では、粒子法の1種で、計算格子と格子内に配置した粒子 (マテリアルポイント) を併用するハイブリッド型解析手法である MPM (Material Point Method) に着目し、MPM と極限つりあい法を用いて、土構造物の限界状態評価の比較を実施した。解析には、オープンソースコード Anura3D (Version 2025) ¹⁾ を用い、 c - ϕ 材で構成される盛土の限界状態について、強度定数と地下水位条件を変えて検討した。

2. Anura3D の概要

本研究で用いた Anura3D は、固相と液相の運動方程式と固相-液相の連続式から構成される Biot型連成方程式を基礎とする解析コードである。固相の挙動は、有効応力をベースに、有効応力勾配、水圧勾配、重力項を含む運動方程式で表される。一方、液相の挙動は、水圧勾配および透水性に依存する Darcy 抵抗を含む運動方程式によって表される。さらに、固相の体積変化と液相の水圧変化を考慮した連続式により、固相の圧縮・膨張に伴う間隙水圧の上昇・減少と、その水圧が固相の応力・変形へ与える影響が連成して表現される。

Anura3D では、これらの支配方程式を MPM により陽的に時間積分して解く。マテリアルポイントは質量、応力、水圧、体積などの内部状態量を保持し、計算格子へのマッピングを通じて運動方程式が解かれる。計算格子は各タイムステップで再初期化されるため、有限要素法で問題となる大変形時のメッシュの歪みや数値不安定を回避できる。

本研究で使用した Anura3D の主な特徴は以下のとおりである。

- ・質量マトリックスの対角化による計算効率向上
- ・Courant-Friedrichs-Lewy 条件に基づく時刻刻みの設定 (今回の計算ではクーラン数 0.98 を使用)
- ・MPM 特有の cell-crossing instability を抑制するため、2 種類の速度場を混合して用いる MPM-Mixed 手法を採用

3. 数値解析

計算は、二次元平面ひずみ条件で実施した。地下水位の影響を考慮するため、本研究では Anura3D の 2 相 1 点完全連成モデルを用い、地盤は飽和材料としてモデル化した。地下水位より上側については水圧を常にゼロとした。

解析モデルと材料パラメータを図-1、表-1 にそれぞれ示す。解析対象は文献 ²⁾ を参考に設定した斜面角度 33.7° の片盛土である。土の構成モデルには、非関連流れ則に基づく Mohr-Coulomb モデルを用いた。

計算は初期応力解析と安定・変形解析の 2 段階で実施した。初期応力解析の境界条件は、盛土の側面を x 方向固定、 y 方向をフリーとし、底面および地表面の x 方向・ y 方向ともに固定した。初期応力は、鉛直方向は土被り圧、水平方向はそれに静止土圧係数 ($K_0=0.5$) をかけたものとした。安定・変形解析では、地表面の拘束を解除して計算を行った。

初期地下水位 $h(x)$ は、図-1 中の赤線で示した最大地下水位 $h_{\max}(x)$ を基準として、次式で設定した。

$$h(x) = \alpha h_{\max}(x) \quad (1)$$

ここで、検討した初期地下水位条件は $\alpha = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ の 6 通りである。水理境界条件として解析領域左右の側方境界には、静水圧分布に基づく線形の水圧を節点に与える境界条件を設定した。具体的には、図-1 中の左側境界に対しては、地表面基準の静水圧を、右側境界に対しては、各ケースで設定した初期地下水位に対応する静水圧を作用させた。強度定数は 3 ケースを設定し、地下水位条件と組み合わせで計 18 ケースの解析を実施した。透水係数 k は 0.0001m/s に統一した。解析メッシュは、三角形の非構造格子 (要素サイズ: 1.0m) を用い、各要素には 3 つのマテリアルポイントを配置した。計算の安定化を目的として、局所ダンピング (安定・変形解析ではダンピング係数 $\beta = 0.02$) を適用し、MPM 特有の数値振動を抑制するために、ひずみおよび水圧増分の平滑化も併せて行った。計算は、変形が収束するまで実施した。

各ケースで得られた解析結果の一例として、法肩の鉛直変位量 D_v (図-1 中の D_v の矢印の向きを正) と限界状態指数 $z=1-F_s$ (F_s : 安全率) の関係を図-2 に示す。各ケースの安全率 F_s は代表的な極限つりあい法である Bishop 法より算出した。図の横軸は、原点より左側が安全側、右側が危険側に相当する。 z が正 ($F_s > 1$) の場合は白抜き、 z が負の場合 ($F_s < 1$) は塗りつぶしのプロットとして表示した。

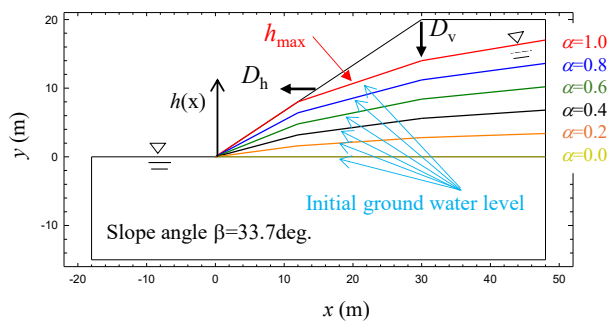


Fig. 1 Analysis cross section.

Table 1 Material parameters.

Case		1	2	3
Bulk unit weight	γ kN/m ³	18.82		
Unit weight of water	γ_w kN/m ³	9.81		
Elastic Modulus	E MPa	100		
Poisson's ratio	ν -	0.3		
Initial porosity	n	0.44		
Hydraulic conductivity	k m/s	0.0001		
Cohesion	c kPa	35.4	33.0	30.6
Friction angle	ϕ deg.	12.8	12.1	11.4
Dilatancy angle	ψ deg.	0		

計算結果より、 z が大きい条件ほど、鉛直変位量 D_v が大きく計算された。このことから、MPM による変形量評価と極限つりあい法による安全率照査の結果が整合的であることが示された。盛土高さ H の $1/2$ の高さでの水平変位量 D_h (図-1 中の D_h の矢印の向きを正) についても、法肩の鉛直変位量 D_v と同様の傾向が得られた。なお、MPM によって計算された斜面の変位量は盛土の築造解析の結果ではなく、先に述べた方法で初期応力を計算し、変位拘束を外した結果として得られていることに注意が必要である。

次に、法肩の鉛直変位量 D_v と盛土高さ H の $1/2$ の高さでの水平変位量 D_h の関係を図-3 に示す。図より、今回の結果では強度定数および地下水位条件によらず、両者の関係は概ね線形関係を示すことが確認された。このことから、限界状態指数の許容値から、法肩の鉛直変位・斜面の中央高さの水平変位に関して限界値を設定する、逆に変位で規定される使用限界から限界状態指数の許容値を設定するなどの MPM の適用方法の可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究では、オープンソースコード Anura3D を用いて、地下水位を有する盛土の安定性および変形挙動に与える影響を検討した。

得られた結果より、初期地下水位の位置が盛土の変形量や限界状態指数に影響を及ぼすことが確認された。法肩の鉛直変位・斜面の中央高さの水平変位を指標とした安定性評価の可能性を示唆するものであり、変位モニタリングと連携した実務的評価手法の構築に向けて有益な知見である。

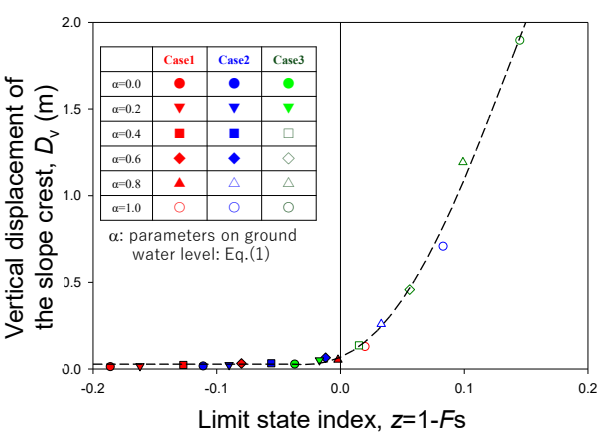


Fig. 2 Vertical displacement obtained from MPM versus the LEM-based limit state index.

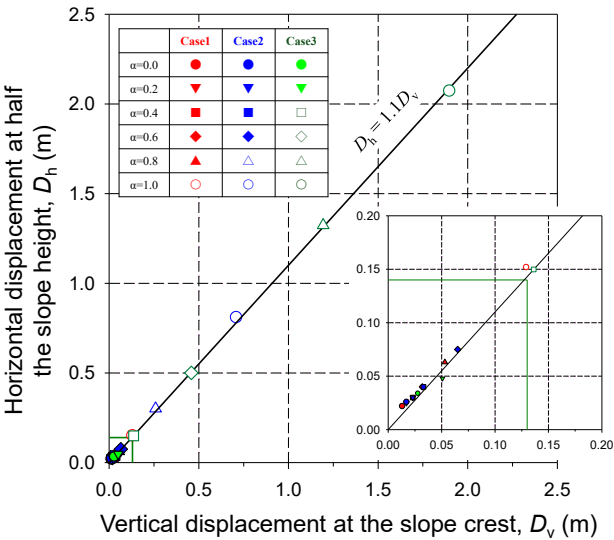


Fig. 3 Relationship between vertical and horizontal displacements of the slope from MPM.

謝辞

本研究は科学研究費補助金 (23K26201) の支援を得て行われたものである。文末ながらここに記して深く謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) Anura3D MPM Research Community: Anura3D MPM Software Scientific Manual version 2022, 2022.
- 2) Arai, K., and Tagyo, K.: Determination of noncircular slip surface giving the minimum factor of safety in slope stability analysis, Soils and Foundations, Vol.25, No.1, pp.43-51, 1985.

拘束圧がサフィージョンの発生・進展に及ぼす影響に関する数値解析
(シンポジウム講演概要)

Numerical Analysis of Influence of Confining Pressure on the Initiation and Progression of Suffusion
(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

中村 陽斗 (横浜国立大・都市イノベーション学府) 菊本 統 (京都大・学術情報メディアセンター) Marco Previtali (西湖大学)
Matteo Oryem Ciantia (ダンディ大学 & ミラノ・ビッコカ大学) 崔 瑛 (横浜国立大・都市イノベーション研究院)
Haruto NAKAMURA, Yokohama National University Mamoru KIKUMOTO, Kyoto University
Marco PREVITALI, Westlake University Matteo Oryem CIANTIA, University of Dundee & University of Milano-Bicocca
Ying CUI, Yokohama National University
E-mail: sai-ei-mx@ynu.ac.jp

In this study, an un-resolved CFD–DEM coupled analysis was conducted to investigate the influence of confining pressure on suffusion from the viewpoint of skeletal structure evolution. The structural state was examined by calculating the skeleton porosity during internal erosion. The results confirmed that a higher confining pressure leads to a smaller amount of eroded fine particles, although the reduction tends to become limited beyond a certain level of confining pressure. In addition, the skeleton porosity remained nearly constant in all cases, indicating that there was almost no deformation of the skeletal structure throughout the analysis and that internal erosion predominantly occurred as a result of the migration of fine particles through pores. It is considered that a higher confining pressure causes the shrinkage of pore channels available for fine particle migration, thereby tending to reduce the amount of fine particles that are eroded.

1. はじめに

地盤内部から土粒子が流出する内部侵食は、河川堤防、ダム、トンネルなどあらゆる地盤構造物において発生し得る現象であり、構造物の安全性および長期耐久性に重大な影響を及ぼすことが知られている。内部侵食の一形態であるサフィージョンは、粗粒分によって形成された骨格構造の間隙を通じて、その間隙径よりも小さな細粒分が流出する現象であり、地盤材料の力学特性に大きな影響を及ぼす^{1,2)}。しかしながら、既往研究では、サフィージョンは試験条件に応じて相反する結果を示すとの知見が報告されている³⁾。また、サフィージョン過程において粗粒分によって形成される骨格構造の変化など微視的な検討は十分に行われていない。そこで本研究では、数値流体力学(CFD)との個別要素法(DEM)連成解析を実施し、拘束圧がサフィージョンの発生および進展過程に及ぼす影響について検討した。

2. 数値解析の概要

本研究では、非解像型 CFD-DEM 連成解析を用いた。DEM 解析には Itasca 社の DEM ソフト PFC3D を用いた。流体解析には有限体積法に基づくオープンソースソルバ FiPy⁴⁾を適用し、流体の挙動はダルシー則に基づきモデル化した。本解析対象は、Ke らの実験⁵⁾でサフィージョンが確認された珪砂 3 号と 8 号の混合材料を想定し、その粒度分布を簡略化したもの (Fig. 1) を用いた。接触モデルは珪砂の複雑な形状に起因する回転抵抗を模擬できる Rolling Resistance Linear Model⁶⁾を採用し、Table 1 に示すパラメータを用いた。Fig. 2 に解析モデルの概要を示す。立方体内に粒子を充填し、底面の wall 材は目開き 1mm のフィルター状とした。フィルター状の底面を除く 5 面に拘束圧 p を付与することで等方応力状態を再現し、その条件下で内部侵食を生じさせた。流体場は、一辺 3mm の立方体状 CFD セルを x , y , z 軸方向にそれぞれ 7 個、7 個、6 個の計 294 個で構成した。上面 49 個のセルの上部と底面 49 個のセル底部にそれぞれ指定の過剰間隙水圧値を与えることで動水勾配を作用させた。本報では、動水勾配は 2 で固定し、Table 2 に示す拘束圧が異なる 3 ケースについて検討した。

Table 1 Parameters used in numerical simulation

壁-粒子間摩擦係数	0.0
滑り摩擦係数	0.60
回転摩擦係数	0.60
有効弾性係数(N/m ²)	2.0×10^8
垂直-せん断剛性比	2
反発係数	0.20
土粒子密度(kg/m ³)	2645
細粒分含有率(%)	25
間隙率	0.42

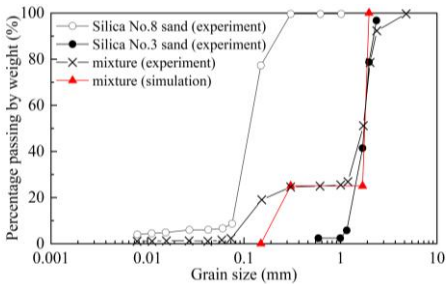


Fig. 1 Grainsize distribution curves

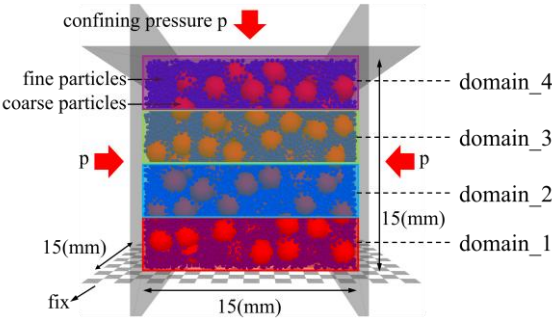


Fig. 2 The numerical model of internal erosion

Table 2 : Summary of simulation conditions.

ケース名	拘束圧(kPa)	動水勾配
case_pli2	1	2
case_p50i2	50	2
case_p200i2	200	2

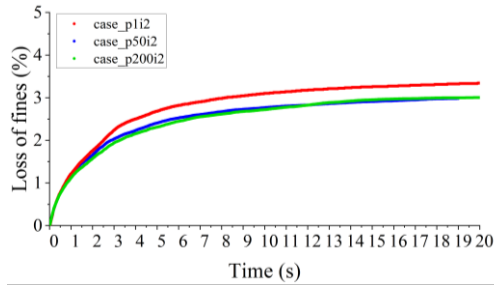
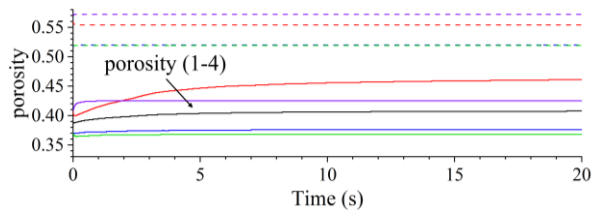
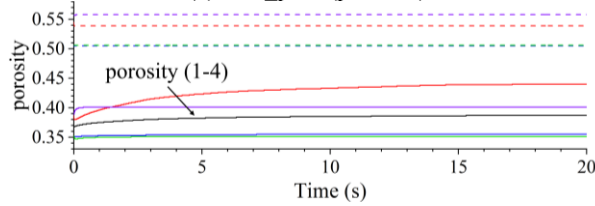


Fig. 3 Temporal evolution of loss of fines

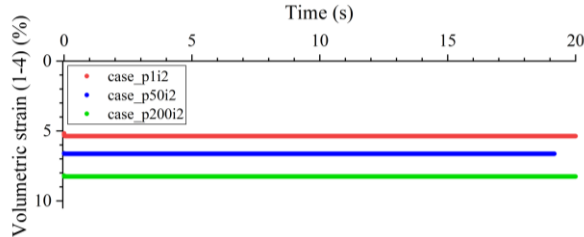
	domain_1	domain_2	domain_3	domain_4
skeleton porosity	--- (red)	--- (blue)	--- (green)	--- (purple)
porosity	— (red)	— (blue)	— (green)	— (purple)



(a) case_pli2 (p=1 kPa)



(b) case_p200i2 (p=200 kPa)



(c) volumetric strain (domain_1-4)

Fig. 4 Skeleton porosity, porosity and volumetric strain

3. 数値解析結果

Fig. 3 に細粒分流出量の時間変化を示す。流出質量は、流出細粒分質量の初期供試体質量に対する百分率(%)として整理した。いずれのケースにおいても流出量は初期に急増し、その後増加率が徐々に低下して漸近的に一定値に近づく傾向を示している。拘束圧が最も小さいcase_pli2では流出量が最も大きく、他の2ケースはほぼ同程度の値で推移している。すなわち、拘束圧の増加は流出量を抑制する傾向を示すものの、その効果は一定以上で頭打ちとなる。

Fig. 4 に間隙率・骨格間隙率、体積ひずみの推移を示す。骨格間隙率は、粗粒分のみを骨格粒子とみなし、細粒分は間隙の一部と見なして算出した間隙率であり、Fig. 2 に示す4つの領域で評価した(間隙率も同様)。Fig. 4(a), (b)より、骨格間隙率は全ケースでほぼ一定に維持されていることが分かる。一方、間隙率は流出口に近いdomain_1において顕著な増加を示し、時間の経過とともに増加率が次第に低下している。他の領域でも初期には増加が見られ、その後安定する傾向を示すが、変化は比較的小さい。Fig. 4(c)より、拘束圧に応じて体積ひずみが大きくなるが、いずれのケースも時間的な変化はほとんど認められない。

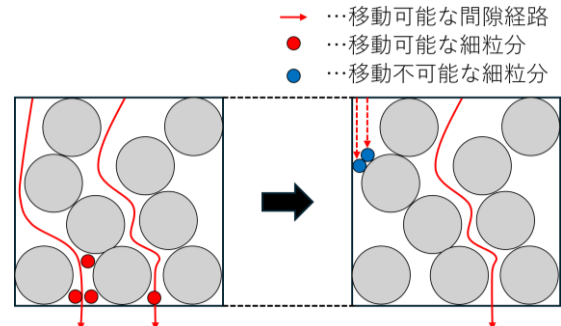


Fig. 5 Schematic diagram of the evolution of pore structure over time (Left: Initial state, Right: over time)

上述結果より、(1) 骨格間隙率はほぼ一定であること、(2) 体積ひずみは時間的にほぼ変化しないこと、(3) 流出口近傍の間隙率のみが増加し、その増加率が次第に低下することが確認された。Fig. 5 に結果から推定できる、時間経過に伴う間隙構造変化の模式図を示す。浸透初期には複数の間隙経路を通じて細粒分が移動可能であるが、時間経過とともに細粒分の閉塞が進行し、移動可能な経路が徐々に限定される。その結果、骨格構造および体積は維持されたまま、局所的な間隙率は次第に安定に向かうと考えられる。

この構造変化を踏まえると、拘束圧の影響も説明できる。拘束圧が大きいほど等方圧密により間隙径が縮小し、細粒分の移動経路が制限されるため、細粒分流出量は抑制される傾向にあると考えられる。本解析では浸透過程において骨格間隙率がほとんど変化しなかったことから、拘束圧の影響は骨格構造の変形よりも主として流出経路の大きさに現れた可能性が高い。粒度分布や初期間隙率が異なる条件では骨格構造の変化が生じる可能性もあり、拘束圧の影響がより顕著に現れる可能性がある。

4. まとめ

本研究では、非解像型 CFD-DEM 連成解析により、骨格構造の観点から拘束圧が内部侵食に与える影響を調べた。その結果、本解析対象では、解析全体にわたり骨格構造が維持されたまま、間隙を通じて細粒分が流出している結果が得られた。また時間経過に伴う間隙構造の変化が考察され、拘束圧の効果について間隙経路の縮小を引き起こすことで流出を抑制する傾向が得られた。本研究では細粒分含有率や動水勾配などの条件を限定して解析を行っているため、粒度分布や初期間隙率が異なる条件における拘束圧の影響については、今後さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) Ke, Lin, and Akihiro Takahashi. "Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil." *Soils and Foundations* 54.4 (2014): 713-730.
- 2) Li, Mao-Wen, Sheng-Liang Hu, and Chen-Xi Tong. "Numerical Simulation of Mechanical Properties of Soil Considering the Effect of Internal Erosion." *Mathematics* 11.13 (2023): 2959.
- 3) Liu, Yajing, et al. "A coupled CFD - DEM investigation of suffusion of gap graded soil: Coupling effect of confining pressure and fines content." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 44.18 (2020): 2473-2500.
- 4) Guyer, Jonathan E., Daniel Wheeler, and James A. Warren. "FiPy: Partial differential equations with Python." *Computing in Science & Engineering* 11.3 (2009): 6-15.
- 5) Iwashita, Kazuyoshi, and Masanobu Oda. "Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM." *Journal of engineering mechanics* 124.3 (1998): 285-292.