

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 1 1 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 東京科学大学 環境・社会理工学院

氏 名 : 澤田 茉伊

研究課題名 : 間隙の物理から構築する不飽和粒状体モデル : 接触角測定の高精度化手法の開発

助成金額 : 1 0 0 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

間隙の物理から構築する不飽和粒状体モデル：
接触角測定の高精度化手法の開発

Pore physics-based wet granular material modelling:
Improving contact angle measurement accuracy

東京科学大学 環境・社会理工学院 准教授 澤田 茉伊

(研究計画ないし研究手法の概略)

研究の背景と計画

粒子と間隙を満たす水・空気からなる不飽和粒状体は、建設材料として多用される。粒子と間隙流体の接触角は、表面張力に由来する粒子間力に作用し、強度や保水性に寄与する。特に気候変動に伴う極端な乾湿を受けて崩壊リスクが高まっている土構造物では、水分移動と変形の予測精度の向上が維持管理の課題になっている。しかし、粒子間力への影響が大きい土粒子－間隙流体の接触角の既存の測定法（毛管上昇法、液滴法）は信頼性に課題が残る（Siebold et al, 1997）。

そこで、本研究では既存の測定法で精度低下やばらつきの要因となっていると考えられる粒子の配置（粒子間の距離、配列）が測定結果に与える影響を明らかにする。間隙スケールの流体解析（CFD）を用い、既存の2種類の接触角測定法のバーチャル実験を実施する。測定精度の影響要因を洗い出し、精度を向上する合理的な手法を提案することを目的とする。

図1に本研究の位置づけを示す。粒子スケールでの個別要素法（DEM）は、複雑な不飽和土の挙動理解で実績を挙げているが（Younes et al., 2023）、粒子間力の主要パラメータである接触角は、実測値の不確か性が高く、実際の土に展開する際の足かせになっている。本研究は、間隙スケールの物理で接触角評価を改善し、土の浸透・

変形予測の本質的な精度向上を可能にする。さらに、従来土質力学が観察対象にしてきた土要素のマクロな挙動と、背景にある粒子・間隙の挙動をリンクし、マルチスケールな土のモデル構築に貢献する。

研究方法

本解析では表面張力を考慮した Navier-Stokes 式を支配方程式とする境界値問題を有限体

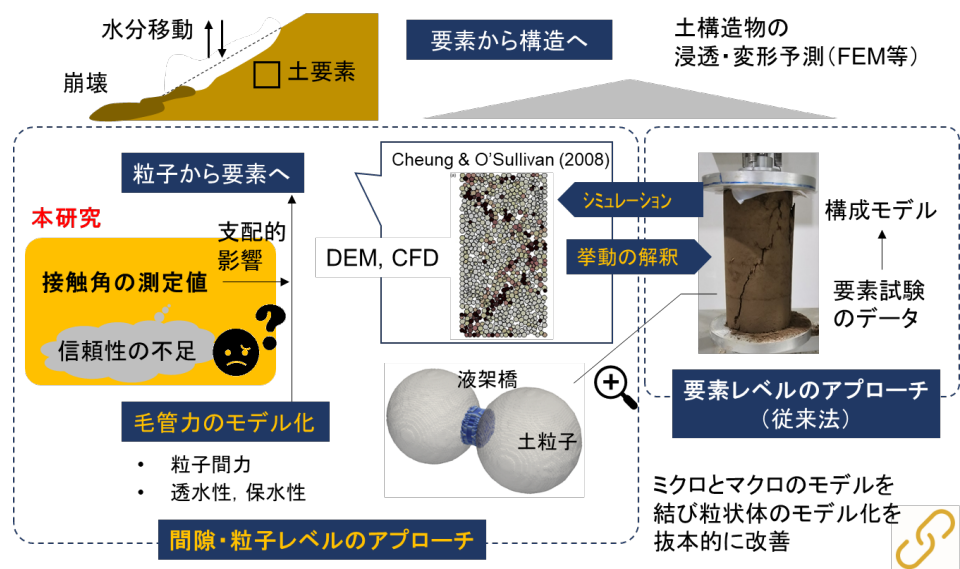


図1 本研究の全体像と位置づけ

積法で解く。オープンソース流体解析コードである OpenFOAM (Open CFD, 2023) を利用した。水と空気の界面はセルの飽和度に相当する指標に閾値を設けて特定する。 θ は入力値として与え、界面形状および表面張力の作用方向の決定に用いられる。

(1) 毛管上昇法

毛管上昇法は、 $\theta=0^\circ$ と見なせるエタノール等の基準溶液と水の 2 種類を用いて、円筒容器に入れた乾燥試料の底面からの吸水高さ h を測定する。測定結果を有効径 r_e の毛管の h と時間 t の関係を理論的に表した Lucas-Washburn 式 (式 (1)) に当てはめることで r_e と θ を得る。

$$h^2 - h_0^2 = r_e \sigma \cos \theta t / 2\eta \quad (1)$$

$$w^2 - w_0^2 = c \rho^2 \sigma \cos \theta t / \eta \quad (2)$$

ここで h_0 は初期の水面高さ、 σ は表面張力、 ρ は液体の密度、 η は粘度である。実験では、水面高さを目視で測定するが、代わりに吸水質量 w を測定することで精度を改良した方法も提案されている。同様の原理で、式(2)を用いて形状係数 c と θ が得られる。式(1)と(2)は Hagen-

Poiseuille 式と Jurin 式から導く過程で、慣性力と重力の影響を無視して単純化しているため、これらの影響が小さい吸水の極めて初期と後半を除く過程に適用できることが知られている。

図 2 に本解析で用いた解析モデルを示す。側面は周期境界とし、上端は空気、下端は水面に接しているものとした。基準溶液は、水よりも σ が小さいエタノールの場合は、重力の影響が測定精度に影響するため、間隙構造に着目する本研究では、

水と同一の諸量を持つ $\theta = 0^\circ$ の水とした。 $h_0=2\text{mm}$ とし、0.15s 間の吸水過程での h を記録した。

(2) 液滴法

液滴法は液滴と試験対象のなす角度を視覚的に直接測定する方法である。Bachmann et al. (2000)によって、粘着テープを張った試験台の上に土粒子を敷き詰めて土に適用されたが、親水性の土では結果のばらつきが大きいことが知られる。

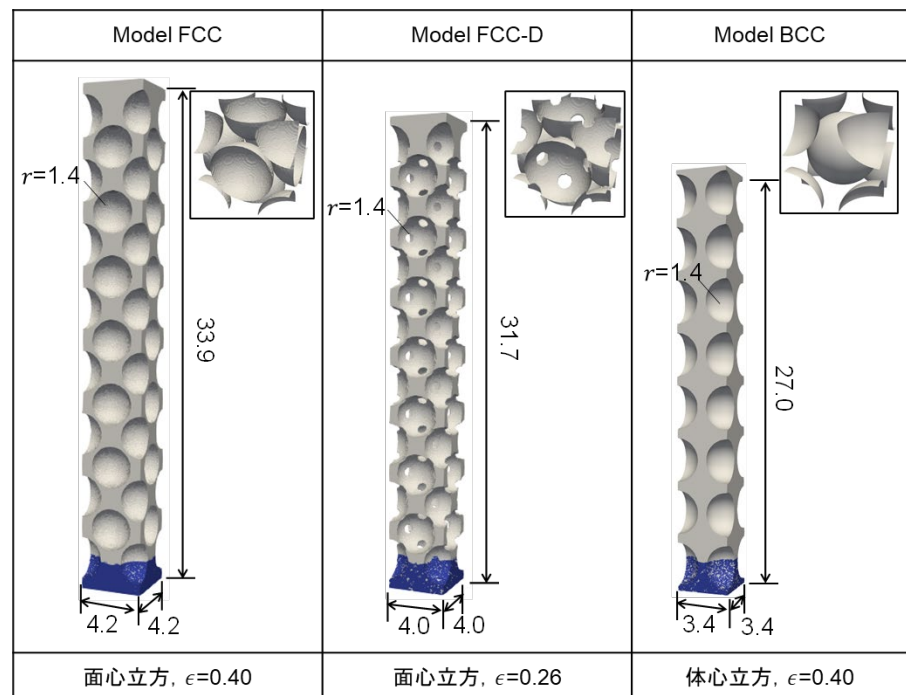


図 2 毛管上昇法の解析モデル

図 3 に解析モデルを示す。計算コストを削減するため短冊状としたが、1/4 対称モデルと同様の結果が得られることを確認している。試験台の表面および 0.2 mm 間隔で並べた半径 0.5 mm の粒子の表面では表面張力を考慮し、それぞれ接触角 (θ_p , $\theta_{s,imposed}$) を与えた。速度はゼロとし、圧力勾配は

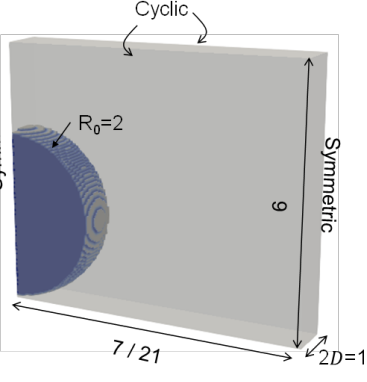
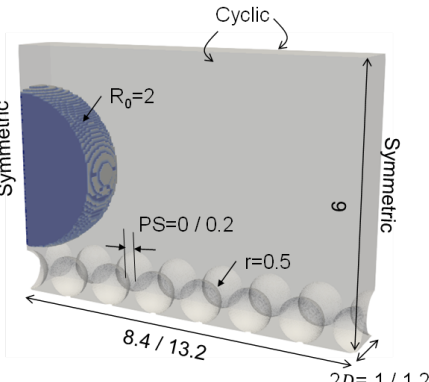
モデル	Model-P	Model-S
寸法 (mm)		
接触角 (deg)	$\theta_p=15, 45, 75, 105$	$\theta_p=45, 75, 105$ $\theta_{s,imposed}=15, 45, 75, 105$

図 3 液滴法の解析モデル

流量がゼロになるように設定した。半径 2 mm の水滴を粒子の上に設置した後、表面張力によって変形する過程をシミュレーションした。解析対象は、多くのケースで水滴の変形がほぼ停止する 0.2 s までとした。

(実験調査によって得られた新しい知見)

(1) 毛管上昇法

毛管上昇法では目標の密度を定めず、円筒容器に投入された緩い試料が用いられることが多いが、供試体の作製方法は間隙構造や透水に影響するため、測定結果のばらつきの要因になっていると考えられる。図 4 は図 2 の間隙率 ϵ もしくは充填構造 (面心／体心立方) が異なるモデルの $\theta = 0^\circ$ での吸水高さの経時変化を表す。これらの吸水曲線の初期の線形部分の傾きが r_e に相当する。粒子を含む界面の形状は凹凸があるため、 h を用いる式(1)では θ の測定精度が低下する可能性があるため、ここでは間隙水の体積を計測して、式(2)からも θ を求めた。表 1 に測定した r_e と c 、 $\theta = 45^\circ$ と 60° の条件での θ の測定値をまとめる。

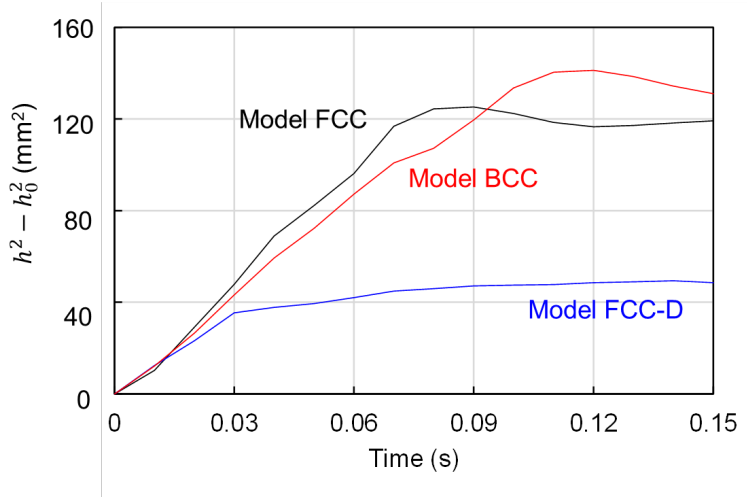


図 4 吸水曲線

充填構造が同一で、間隙率の異なる Model FCC と FCC-D では、Jurin 式が示すように、より密で間隙が小さい FCC-D のほうが、定常時の毛管高さは高くなるはずであるが、FCC-D では 0.03s 付近で吸水が急激に鈍化し、予測と逆である (図 4)。図 5 に $\theta = 0^\circ$ での FCC-D の吸水過程の様子を示すが、起伏のある界面が空気を巻き込みながら上昇している。透水断面が空気で占められて減少し、吸水が阻害される分、 r_e と c は小さくなる。 $\theta = 45^\circ$ と 60° の条

件では、 $\theta = 0^\circ$ の場合と同様に、 $\theta = 45^\circ$ と 60° の条件でも、FCC-D の吸水高さは FCC の場合よりも低くなる傾向が確認された。これは、FCC-D の場合、界面の凹凸が空気を巻き込み、吸水を阻害しているためと考えられる。図 5 に $\theta = 0^\circ$ の FCC-D の吸水過程の様子を示すが、起伏のある界面が空気を巻き込みながら上昇している。透水断面が空気で占められて減少し、吸水が阻害される分、 r_e と c は小さくなる。 $\theta = 45^\circ$ と 60° の条

件では、界面が平滑なため空気の封入は起こらなかった。 r_e および c が減少する結果、FCC-Dの θ は過小評価となり、 $\theta = 45^\circ$ の場合には10%程度の誤差が生じた（表1）。緩いModel FCCでは空気の封入は生じず、 θ の測定精度は高い傾向にある。なお、粒子・間隙のサイズが小さい場合も同様の結果が得られた。これらの結果から、試料を密に締め固めると測定精度が低下することが示唆される。

間隙率が同一で充填構造が異なるModel FCCとBCCでは、 θ の測定精度は同等であり（表1）、

充填構造が測定精度に与える影響は小さいことがわかる。なお、 r_e と c の値が示すように、BCCのほうが吸水は緩やかである（図4）。これは2つのモデルの界面に働く表面張力の鉛直成分を間隙水の単位体積あたりで比較すると、BCCのほうがFCCよりも小さいことに由来すると考える。ただし、粒子・間隙のサイズが小さくなるにつれ、充填構造の違いによる吸水速度の差はほとんどなくなる。

以上より、密な試料では、基準溶液（ $\theta = 0^\circ$ ）が吸水する過程で空気の封入によって吸水が阻害され、間隙構造を表す係数 r_e と c が正しく求まらないため、 θ の測定精度は低下することがわかった。一方、充填構造の違いによって吸水速度に差が生じたが、 θ の測定精度には優位な差が見られなかった。

(2) 液滴法

解析モデルの検証には粒子のないModel-Pを用いた。定常状態での液滴の高さ(e)および半径(L)は以下で表される。

$$e = R(1 - \cos \theta_b) \quad (3)$$

$$L = R \sin \theta \quad (4)$$

表 1 接触角の測定値と誤差

Model	式 (1)			式 (2)		
	r_e (mm)	θ 測定値 (deg)*	誤差 (%)*	c (mm ⁵)	θ 測定値 (deg)*	誤差 (%)*
FCC	0.054	47.1 / 64.4	4.6 / 7.3	1.55	43.1 / 59.9	-4.2 / -0.2
FCC-D	0.035	40.6 / 58.7	-9.8 / -2.2	0.48	40.0 / 57.0	-11.1 / -5.0
BCC	0.044	45.0 / 59.1	0.0 / -1.6	0.55	43.9 / 59.1	-2.3 / -1.6

* $\theta = 45^\circ / 60^\circ$

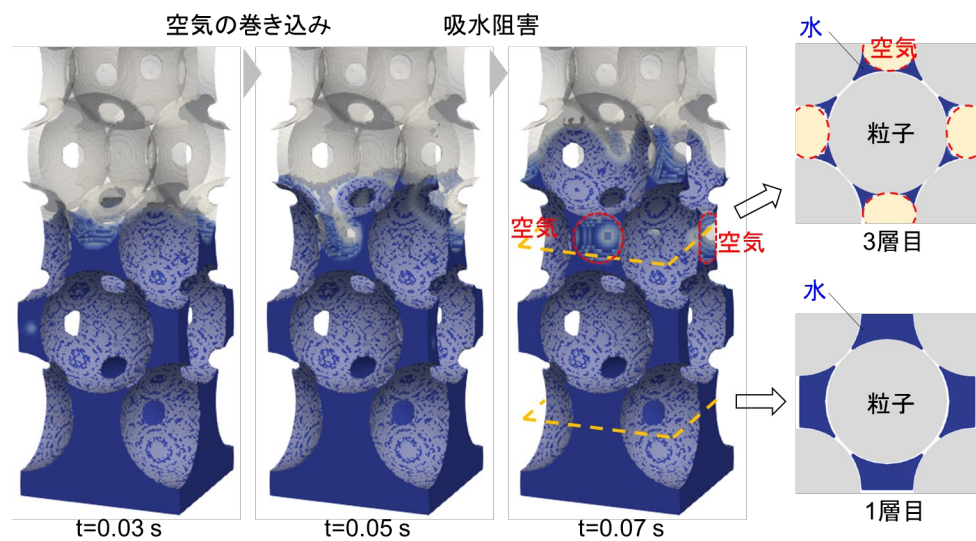


図 5 密な試料の空気の封入

$$R = \sqrt{\frac{\pi \left(2R_0^2 + \frac{2}{3}d^2 \right)}{\theta_b - \sin \theta_b \cos \theta_b}} \quad (5)$$

ここに R_0 は液滴の初期の半径(i.e., 2 mm), R は液滴の曲率半径, d は解析モデルの奥行(i.e., 0.5 mm)である。図 6 は, 定常状態での e および L を R で正規化したものである。解析解は理論解と良い一致を示している。

粒子を配置した **Model-S** を用いた解析では, 液滴は親水性の粒子の間隙に浸透し, 試験台に接触して広がる様子が観察された。図 7 は粒子の接触角を固定し ($\theta_{s_imposed}=75^\circ$), 試験代の接触角 θ_p を 45° , 75° , 105° に変化させた場合の時刻 0.2 s での

定常状態での液滴の様子を表したものである。粒子間の間隔 **PS** は 0mm (接触) と 0.2mm を想定した。また, 液滴の着色は圧力分布を表す。液滴は粒子間に浸み込む過程で, 圧力が消散し, エネルギーが最小になるように定常時の液滴形状が決まる。試験台の接触角が大きいほど, また粒子間が狭いほど浸み込む量は少なく, 高い圧力が維持されている。液滴と粒子がなす見かけの接触角は, 理想的には 75° が計測されるべきであるが, いずれも 75° より小さく, 試験台の濡れ性に大きく依存している。粒子を密に配置したほうがより誤差は小さくなるが, 液滴が試験台に接触する場合はいずれも正確に計測できないことがわかった。従来, 試験台の濡れ性は無視されてきたが, 結果のばらつきの一因であることを示唆している。

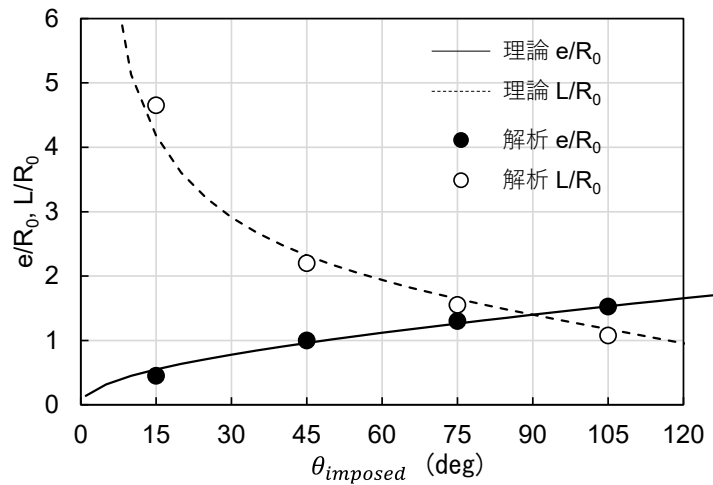


図 6 解析モデルの妥当性検証

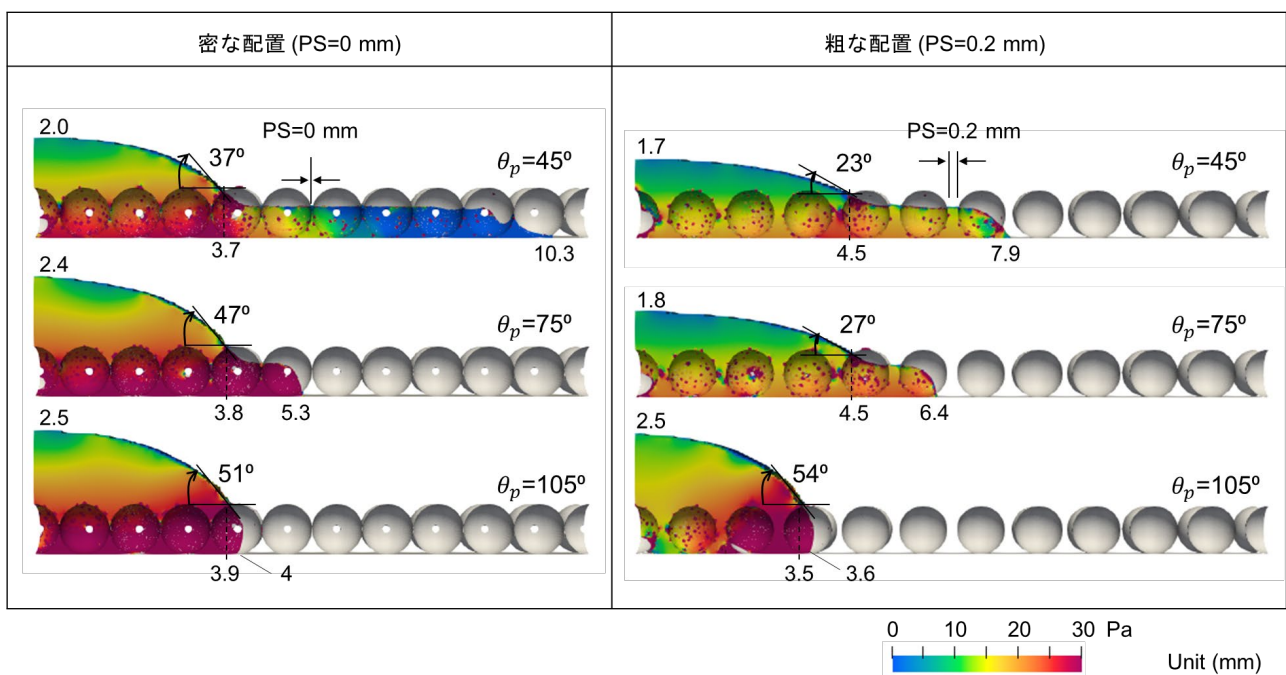


図 7 粒子間の距離・試験台の濡れ性が異なる場合の定常時の液滴

参考文献

Bachmann, J., Ellies, A., & Hartge, K. H. (2000). Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency. *Journal of Hydrology*, 231, 66-75.

Open CFD. 2020. Open CFD Release OpenFOAM® v2012. Accessed Dec 9, 2023.

Siebold, A., Walliser, A., Nardin, M., Oppliger, M., & Schultz, J. (1997). Capillary rise for thermodynamic characterization of solid particle surface. *Journal of colloid and interface science*, 186(1), 60-70.

Younes, N., Wautier, A., Wan, R., Millet, O., Nicot, F., & Bouchard, R. (2023). DEM-LBM coupling for partially saturated granular assemblies. *Computers and Geotechnics*, 162, 105677.

(発 表 論 文)

- 1) Mai Sawada, Catherine O'Sullivan. Sub-particle-scale simulation of droplet test to measure soil-liquid contact angle, *Proc. the 10th international conference on DEM*, 170, 2025.
- 2) 澤田茉伊, Catherine O'Sullivan. 液滴法における試験台の濡れ性が土の接触角に与える影響, 第 60 回地盤工学研究発表会, 24-10-1-01, 2025.
- 3) 川那辺聖, 澤田茉伊. 毛管上昇法による接触角測定における試料作製法の影響, 第 60 回地盤工学研究発表会, 24-10-1-06, 2025.
- 4) 澤田茉伊, Catherine O'Sullivan. 毛管上昇法による土の接触角測定の精度検証, 第 61 回地盤工学研究発表会 (印刷中) .
- 5) Mai Sawada, Catherine O'Sullivan. Effects of base plate wettability on soil-liquid contact angles in the sessile drop method, 21st ICSMGE 2026 (in printing).