

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：22303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06561

研究課題名（和文）土粒子の三次元配列と間隙径分布に着目した砂質系不飽和地盤の強度推定手法の開発

研究課題名（英文）Development of strength estimation method for sandy unsaturated ground focusing on three-dimensional arrangement of soil particles and pore size distribution

研究代表者

森 友宏（Mori, Tomohiro）

前橋工科大学・工学部・准教授

研究者番号：40552394

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、土粒子の模擬体として主にガラスビーズを用いて実験を行い、中密状態（充填率65～70%）の供試体の飽和度55～100%における不飽和強度に占めるサクシジョンの寄与分を、ガラスビーズとメニスカス水との幾何的条件をもとにして、順的に計算・推定することを可能にした。計算・推定が可能となった飽和度55～100%の範囲は、実際に自然界に存在する地盤の飽和度の範囲を十分にカバーしている。供試体に働くサクシジョンの計算・推定値の妥当性について、ガラスビーズを用いた不飽和三軸圧縮試験を用いて検証を行ったところ、飽和度60～90%の供試体におけるサクシジョンの計算・推定値と実測値はほぼ一致した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、不飽和土の強度は、現地より採取したサンプルを用いて室内試験をするよりほか知る手立てがなく、また不飽和土の室内試験には多くの手間と時間がかかることもあり、飽和度の変化による土の強度変化を設計に盛り込むことはできないとされてきた。

しかし、本研究では不飽和土の強度を、室内力学試験ではなく、土粒子とメニスカス水との幾何形状から計算・推定するための基礎理論を構築した。本研究で提案する手法は、実験値の集合から求めた経験式ではなく、純粋な力学のみをベースにしているため、本研究の成果を基とした今後の研究の発展が大いに見込まれる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we mainly used glass beads as a simulated body of soil particles. As a result, it has become possible to calculate and estimate the contribution of suction to the unsaturated strength at a saturation of 55 to 100% for specimens with a filling rate of 65 to 70%. This calculation is based solely on the geometric conditions of glass beads and meniscus water. The range of saturation of 55 to 100%, which can be calculated and estimated, sufficiently covers the range of saturation of the ground that actually exists in nature. The validity of the calculated value of suction acting on the specimen was verified using an unsaturated triaxial compression test using glass beads. As a result, the calculated and measured values of suction in the specimens with a saturation of 60 to 90% were almost the same.

研究分野：地盤工学

キーワード：不飽和土 サクシジョン メニスカス水 飽和度

1. 研究開始当初の背景

2011年東日本大震災，2015年関東・東北豪雨，2016年熊本地震などにおいて，地震動や降雨浸透などに起因する地盤内部の水分状態の変化により，地下水位で浅の不飽和地盤部分における斜面崩壊事例が散見された。これは，地震動や降雨浸透の影響を大きく受ける地表面付近の地盤が，飽和度増加（地震動では見かけの飽和度増加）によって強度が大きく低下する性質を持っていたことも要因のひとつと考えられている。しかし，現段階において不飽和土の飽和度に応じた強度は実際にサンプルを用いた強度試験を行う以外に知る術が無い。それゆえ，不飽和土の飽和度に応じた強度特性を積極的に設計に反映させること，また，地震や降雨浸透に対して危険性の高い人工造成盛土を定量的な序列を示して判別することは難しい状況にある。

将来，発生が予測されている都市域での大規模地震や，増加傾向にある局地的豪雨に対する人工造成地盤の安全性を議論するためには，不飽和地盤の飽和度変化と強度変化との関係性を，簡便な試験法および指標から判別することが求められている。なぜなら，未被災の人工造成地盤で詳細な調査やサンプリングを行うことは困難だからである。

2. 研究の目的

本研究の目的は，「砂質系地盤材料の粒径分布・間隙径分布から土粒子の三次元粒子配列を推定して土に働くサクシオン量を定量的に評価し，変化する飽和度に応じた不飽和土の強度を推定する手法を開発する」ことである。

これまで，不飽和土の強度は現場毎の強度測定を行うしかなく，また，飽和度によって強度がまちまちであるため，不飽和土の強度を設計に組み込むことは難しかった。本研究では，従来の逆解析的な不飽和土の強度予測から一歩前進し，土の不飽和強度に影響を与える土粒子間のサクシオンやダイレーションの問題を，土粒子の幾何学的配置の観点から整理することで，飽和度によって変化する不飽和土の強度を順解析的に予測する手法を開発するものである。

3. 研究の方法

本研究の目的は，土の粒度分布と締固め特性から粒子配列，間隙径分布を推定し，サクシオン，ダイレーションの関係から，不飽和土の飽和度に応じた強度を推定できるようにすることである。

研究全体のフローを図1に示す。本研究は，不飽和土の各種物理・強度特性を実験的に求める部分【担当：森（不飽和土の実験，物理・力学特性）】と，土の三次元的粒子配列を求める部分【担当：土倉（数値計算，DEMなど）】の大きく二つに分けられる。実験による実測結果と土粒子の三次元配列より求められる各種計算値は，実験値と計算値との整合性を検討するために，逐次比較・検証を行う。

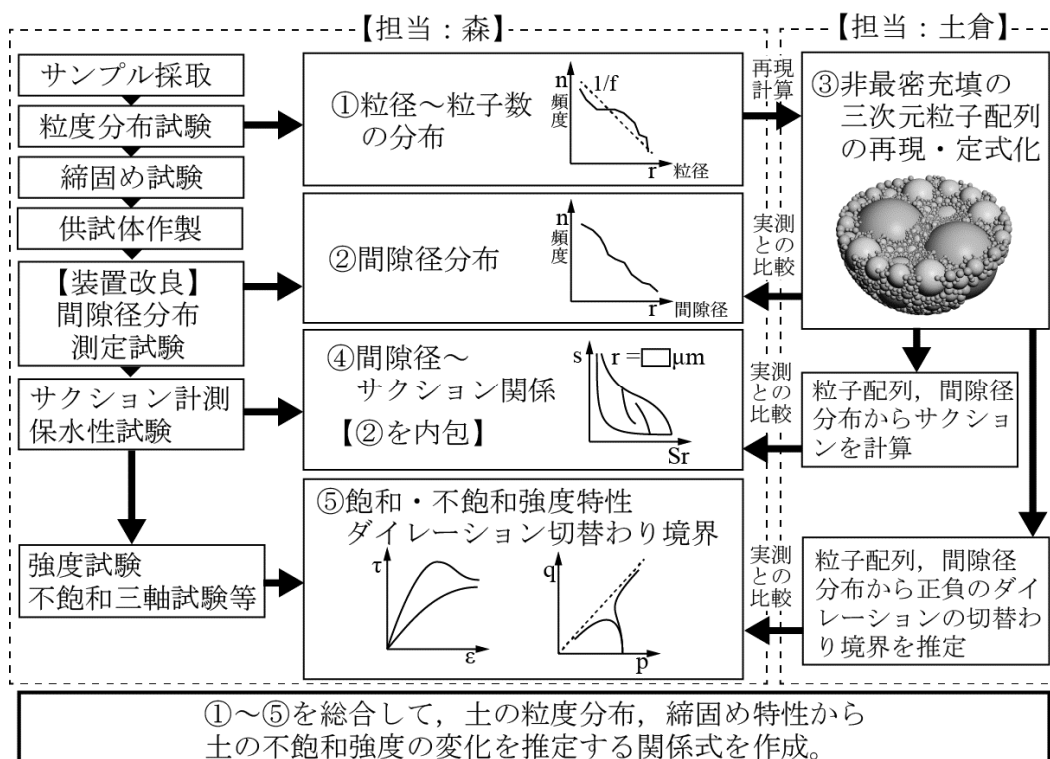


図1 研究の全体の流れ，関連図

## 4. 研究成果

### (1) 研究の主な成果

本研究では、土粒子の模擬体として主にガラスビーズを用いて実験を行い、中密状態（充填率 65～70%）の供試体の飽和度 55～100%における不飽和強度に占めるサクシジョンの寄与分を、ガラスビーズとメニスカス水との幾何的条件をもとにして、順的に計算・推定することを可能にした。計算・推定が可能となった飽和度 55～100%の範囲は、実際に自然界に存在する地盤の飽和度の範囲を十分にカバーしている。供試体に働くサクシジョンの計算・推定値の妥当性について、ガラスビーズを用いた不飽和三軸圧縮試験を用いて検証を行ったところ、飽和度 60～90%の供試体におけるサクシジョンの計算・推定値と実測値はほぼ一致した<sup>1)</sup>。これより、本研究における飽和度に応じた地盤の不飽和強度の推定手法には、相応の妥当性があることが示された。

一方、土の水分特性曲線の形状は、飽和度 70～80%あたりで折れ曲がり、S字を描くことは保水性試験の結果から良く知られているものの、曲線が S 字を呈する明確な物理的理由が示されたことはなかった。本研究では、ガラスビーズの 3 次元配置と飽和度に応じたメニスカス水の形状変化から、ガラスビーズ間に働くサクシジョンを算出した<sup>2)3)4)</sup>。また、顕微鏡を用いて給排水中のガラスビーズとメニスカス水の形状を注意深く観察した<sup>5)</sup>。その結果、土の水分特性曲線が S 字を呈する理由を、ミクロの視点から物理法則に基づいて無理なく説明することができるようになった。

### (2) 得られた成果の国内外における位置づけ

これまで、不飽和土の強度は、現地より採取したサンプルを用いて室内試験をするよりほか知る手立てがなく、また不飽和土の室内試験には多くの手間と時間がかかることもあり、飽和度の変化による土の強度変化を設計に盛り込むことはできないとされてきた。

しかし、本研究では不飽和土の強度を、室内力学試験ではなく、土粒子とメニスカス水との幾何形状から計算・推定するための基礎理論を構築した。本研究で提案する手法は、実験値の集合から求めた経験式ではなく、純粋な力学のみをベースにしているため、本研究の成果を基とした今後の研究の発展が大いに見込まれる。

### (3) 今後の展望

本研究では理論構築を容易にするために、主にガラスビーズを用いて研究を行ってきたが、実際の土粒子は球体ではないため、実際の土粒子とガラスビーズとの差異について明らかにしていく必要がある。

また、ガラスビーズ間に懸架するメニスカス水の形状および働くサクシジョンは、粒子間の配位数によっても大きく影響されることがわかっているので、配位数とサクシジョンとの関係を整理していく必要がある。

- 1) 田中燎，森友宏：メニスカス水の形状に着目した土の不飽和強度と飽和度の関係，第 48 回土木学会関東支部技術研究発表会，Web / DVD-ROM III-42，Mar. 2021.
- 2) 森友宏，秋山誠，土倉泰：最密充填のもとで土粒子間に形成される間隙径分布の算出方法の検討，地盤工学ジャーナル，Vol. 14，No. 2，pp. 197-204，2019.
- 3) 朱田斯乃，森友宏：土粒子間に形成されるメニスカス水の形状とサクシジョン応力に関する基礎的研究，土木学会関東支部第 46 回技術研究発表会，III-24，DVD-ROM，Mar. 2019（前橋市）。
- 4) 三浦佑，森友宏：異粒径の土粒子組合せに働くサクシジョンの推定，土木学会関東支部第 46 回技術研究発表会，III-54，CD-ROM，Mar. 2020（掲載のみ，船橋市の予定が中止）。
- 5) 渡辺純平，森友宏：高飽和度域の不飽和土におけるメニスカス水の形成状況，第 48 回土木学会関東支部技術研究発表会，Web / DVD-ROM III-20，Mar. 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 森友宏, 秋山誠, 土倉泰	4. 巻 14-2
2. 論文標題 最密充填のもとで土粒子間に形成される間隙径分布の算出方法の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地盤工学ジャーナル	6. 最初と最後の頁 197-204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3208/jgs.14.197	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 三浦佑
2. 発表標題 異粒径の土粒子組合せに働くサクシジョンの推定
3. 学会等名 土木学会関東支部第46回技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohiro Mori
2. 発表標題 Study on calculation method of pore diameter distribution formed between soil particles
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朱田斯乃, 森友宏
2. 発表標題 土粒子間に形成されるメニスカス水の形状とサクシジョン応力に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会関東支部第46回技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安部大樹, 土倉泰
2. 発表標題 崩壊する粒状体における局所的間隙比の変化
3. 学会等名 土木学会関東支部第46回技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋山誠
2. 発表標題 土粒子間に形成される間隙径分布の算出方法の検討
3. 学会等名 土木学会関東支部第45回技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠藤千晃
2. 発表標題 空気圧入式間隙径分布測定試験において試験方法が計測値に及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会関東支部第45回技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺純平
2. 発表標題 高飽和度域の不飽和土におけるメニスカス水の形成状況
3. 学会等名 土木学会関東支部第48回技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 燎
2. 発表標題 メニスカス水の形状に着目した土の不飽和強度と飽和度の関係
3. 学会等名 土木学会関東支部第48回技術研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	土倉 泰  (Tsuchikura Toru)  (40236899)	前橋工科大学・工学部・教授    (22303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------