

ユウ キ

氏 名	XIONG Xi
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第1185号
学位授与の日付	2020年9月16日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	Modeling of hydro-mechanical behavior of unsaturated soils considering finite deformation and its application to unsaturated landslide dam stability (有限変形を考慮した不飽和土の力学特性のモデル化および地すべりダム安定性への応用)
論文審査委員	主査 教授 張 鋒 教授 前田 健一 教授 野中 哲也 教授 野田 利弘 (名古屋大学)

## 論文内容の要旨

Generally speaking, most of geomaterials in surface ground are in unsaturated state. The mechanical and hydraulic properties of unsaturated soil are much more complicated than those of saturated soil. When soil in unsaturated state, it is not only the problem that the degree of saturation is less than 1, but also its influence on strength and deformation properties of unsaturated soil. Changes of the degree of saturation sometime may even trigger geological disasters, such as landslides or dam breaks, threatening human being and infrastructure. Therefore, it is undoubtedly important to study the hydro-mechanical properties of saturated/unsaturated soil, both in laboratory tests and modelling, especially proposing constitutive model that can rationally describe the soils under saturated/unsaturated states in unified way.

Firstly, a series of systematic element tests were conducted on Masado, a completely decomposed granite and widely distributed in western Japan. The water retention properties of Masado were clarified first, and then oedometer and triaxial compression tests were conducted under various hydraulic/mechanical conditions. Two special loading conditions, i.e., constant suction and constant degree of saturation, were considered in the triaxial tests. From the tests, it is found that the strength and

deformation of Masado are greatly dependent on the interaction between suction, degree of saturation and hydraulic/mechanical loading conditions. The test results can provide a fundamental database, based on which it is possible for us to propose a constitutive model that could precisely describe the hydro-mechanical behavior of unsaturated Masado, taking into consideration the fully coupled water retention characteristics, including not only suction and degree of saturation but also the change of void ratio.

Secondly, based on the results of element tests, a water retention curve (WRC) considering the volumetric change in soil is newly proposed, in which the skeleton and scanning curves of water retention characteristics were assumed to parallel shift in accordance with the change in void ratio. The proposed WRC is then incorporated into an existing saturated/unsaturated constitutive model that regards the degree of saturation and Bishop-type skeleton stress as state variables. The results of the tests conducted on the unsaturated Masado are used to verify the validity of the newly proposed model. The proposed model has a satisfactory accuracy in describing not only the stress-strain relation but also the variations in suction and saturation of the unsaturated Masado under drained/undrained conditions.

Thirdly, unsaturated slope stability around the Three Gorges Reservoir (TGR) under various combinations of rainfall and water level fluctuation (FRWL) is studied experimentally and numerically. Model tests on the slope stability of the TGR area were conducted with a synthetic colluvial material S1 under three different rainfall and FRWL combinations. Additionally, numerical simulations on the model tests were conducted, in which proposed saturated/unsaturated soil constitutive model was selected. By comparing the calculated results with the test results, the numerical method used in this paper offers satisfactory accuracy to describe the various failure mechanisms of the model slopes under different loading combinations. The results of both the model tests and the numerical simulation indicate that in the TGR area during one year of operation, a decrease in the reservoir water level combined with a long weak rainfall is more likely to trigger a landslide than the other combinations studied.

Fourthly, the stability of unsaturated landslide dam (LD) with various materials and internal structures is discussed. A systematic flume test programme was conducted, in which Tangjiashan LD was referenced for model design. Particular attention is paid to the heterogeneities of Tangjiashan LD in material and internal structure. The development of phreatic line in model LD was carefully measured by sensors, including piezometer, water content sensor and tensiometer. Furthermore,

corresponding numerical simulations on the flume tests were conducted using proposed saturated/unsaturated soil constitutive model. It is found from tested and calculated results that deformation of LD materials influences the development of phreatic line in the dam body. In addition, hydro-mechanical behaviours of LD materials and internal structure of LD play an important role in the stability of LD.

According to abovementioned discussion, the research on the modeling of unsaturated soils hydro-mechanical behavior and its application is comprehensively conducted. It can provide a reference for the development of unsaturated soil constitutive model and promote the application of unsaturated soil theory in practical geotechnical engineering problems.

申請者 { XIONG Xi }

自然界に存在する地盤の多くは、不飽和状態であり、間隙に水と空気が混在した状態であるため、飽和土と比較して複雑な力学挙動を示す。そのため、これまでには飽和土を対象とした構成則が多く提案されており、地盤の挙動予測にも飽和土の構成則を用いることが多い。しかし、降雨による斜面崩壊など水分量の変化に起因した地盤挙動を正確に表現するためには、有限変形を含めた不飽和土の力学的・水理学的特性を理解し、その特性を定式化する必要がある。これまでに、一部の研究者は水分特性曲線に対する変形の影響を不飽和土の基本的な性質として見なし、それを考慮した水分特性曲線モデルをいくつか提案してきた。しかし、系統的な実験結果に基づいた検証はまだ十分とは言えない。本論文の目的は、不飽和土の力学的・水理学的特性を室内要素試験により把握し、それに基づいたモデルの提案を提案する。さらに提案するモデルをベースにした数値解析手法を用いて、同時に進行する地すべりダム浸透破壊に関するモデル試験を再現し、提案する数値解析手法の地すべりダムの浸透破壊への適応性を検証すると同時に、数値実験を行うことで解析手法の予測精度の向上を図る

本研究の第一歩として、変形の影響を考慮する不飽和マサ土の水分特性曲線の特徴を把握するための保水性試験と、さまざまな条件下（定サクション、定飽和度の排水・排気試験、非排気・非排気試験）で不飽和マサ土の力学挙動を調べるための三軸圧縮試験を行った。次に、得られた実験結果に基づき、有限変形の影響を考慮に入れた新しい水分特性曲線モデルを提案し、その解析精度を得られた実験結果で検証した。また、降雨と水位変動による掘削斜面の破壊問題、自然界に多発している地すべりダムの浸透破壊問題を様々なモデル実験で検討した。提案する不飽和土の弾塑性構成モデルを用いて、モデル実験で検討した人工斜面の破壊問題、地すべりダムの浸透破壊問題を境界値問題として捕らえ、水・土・空気連成二次元有限変形法（FEM）による数値解析を行い、実験で得られた破壊メカニズムを数値解析で再現し、以下に示す研究成果を得た。

1) 不飽和マサ土の保水性試験より、水分特性曲線は変形による間隙比の影響を受け、間隙比の減少に伴い飽和度は大きくなったことが分かる。また、さまざまな条件下で行った三軸圧縮試験結果より、飽和度だけでなく、サクションも変形の影響を受け、間隙比の変化に伴い変化することが明らかになった。載荷条件が異なっても、限界状態線の傾きは一定値であり、飽和・不飽和マサ土の力学的・水理学的特性を統一的に表現できることが明らかになった。得られた実験結果に基づき、間隙比が変化すると水分特性曲線が水平に移動する特徴を生かし、変形の影響を考慮に入れた新しい水分特性曲線を提案した。最後に実験結果に基づいた要素シミュレーションを行い、提案する構成モデルが飽和・不飽和土の様々な載荷・排水・排気条件下での要素試験結果を精度良く統一的に表現することに成功した。

2) 境界値問題における不飽和土の力学的・水理学的特性を調べるため、中国の三峡ダム湖における地滑り地域を対象とし、降雨と水位変動による斜面崩壊モデル実験を実施した。三峡ダム湖の年間水位変化と地方年間降水量に基づき、モデル実験の降雨と水位変動を3パターン設定した。実験結果より、3パターンで発生した地滑り形態がすべて異なることが分かり、水位低下と長期間弱い降雨の組み合わせは、他の組み合わせパターンより地滑りを誘発する可能性が高いことが明らかになった。また、モデル実験結果と比較することで、提案する FEM 解析手法の有効性を実証した。地盤工学と地質学の両方の観点から、ダム湖治水・利水の原因で水位は一定範囲内で毎年周期的に変動しているから、斜面は降雨と水位変動の複合作用を受け、崩壊しやすい。したがって、斜面の水位変動部分を補強して斜面の安定性を向上させることが有効であることが推察できる。

3) 2008年四川大地震で形成された最大規模の唐家山地滑りダム（貯水量 2.9 億立米）を対象に、様々な外力・地質条件下での地滑りダムの安定性を検討し、その地滑りダムの破壊メカニズムを調べた。モデル実験と数値解析結果より、不飽和地滑りダムの安定性は地盤材料の種類と地盤の不均質性（異なる地層で構成され、一部の地層はほとんど地質構造が保ったまま）に依存することが分かった。また、浸潤線は下流斜面まで発達し難く、浸透破壊が起き難いことから、唐家山地滑りダムの破壊モードは越流決壊しかないことが明らかになった。これらの結果より、自然に形成された地すべりダムを破壊するのではなく使用する可能性についても議論すべきことはわかった。

以上の結果に基づき、本論文で得られた知見は学術的貢献だけでなく工学的応用価値が十分にあり、博士（工学）論文として価値あるものと認める。