

氏名	シュン ユン リン 熊 勇 林 XIONG YONG LIN
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第954号
学位授与の日付	平成26年3月23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	Thermo-Hydraulic-Mechanical-Air Coupling Finite Element Analysis and Its Application to Geotechnical Engineering Problems (熱・土・水・空気連成有限要素解析手法の開発およびその地盤工学問題への応用)
論文審査委員	主査 教授 張 鋒 教授 前田 健一 准教授 Hossain Md. Shahin 理事・副学長 八 嶋 厚 (岐阜大学)

論文内容の要旨

In relating to geotechnical problem, saturated-unsaturated seepage problem is one of the most important topics for geotechnical engineer because the majority of geotechnical disasters are related to the saturated-unsaturated seepage problem such as the slope stability problem and embankment stability problem due to the heavy rainfall, the geological disposal of nuclear waste, liquefaction due to earthquake and so on. The mechanisms of these problems should be carefully investigated and studied for our geotechnical engineers, because they may lead to tremendous disasters to human being and civil facilities.

As another effective method to study and investigate the mechanism of these geotechnical problems relating with the saturated-unsaturated seepage, in this study, a thermo-hydraulic-mechanical-air (THMA) coupling finite element method (FEM) has been proposed. The main contents of this dissertation are listed as following:

- 1) As we all known, the accuracy of a numerical simulation mainly depends on whether the constitutive model can adequately describes the various features of soils, which are affected by its property (density, bonding, degree of saturation, temperature) and several loading condition (e.g., cyclic loading, stress history, strain rate and creep). In this dissertation, therefore, two rational constitutive models for soft rock and unsaturated soil are introduced, whose verifications are confirmed in detail by the drained triaxial compression tests and the creep tests under different temperatures and triaxial plane-strain tests, the drying-wetting tests, 1D consolidation tests.

- 2) The theory of a thermo-hydraulic-mechanical-air coupling finite element method is explained and derived in detail. In the field equations, the excessive pore water pressure, the displacement of solid phase and the temperature are used as unknown variables. In the THM FE-FD scheme, FEM is used for spatial discretization of the equilibrium and the energy conservation equations, while the backward finite difference scheme is used for the spatial discretization of the continuity equation.
- 3) In order to verify the availability of the proposed numerical method, the model tests on slope failure due to water injection or rainfall at room temperature are firstly simulated by the proposed numerical method based on the proposed unsaturated model. Because the method is based on the soil-water-air fully coupling scheme, not only the seepage of water due to rainfall or water injection, the change of the degree of saturation, the migration of the air pressure, but also the mechanical behaviors of the unsaturated soil such as the deformation of the ground, the change of pore water pressure, the formation of the shear band occurred in the slope failure, can be simulated on the whole in a unified way, judging from the comparisons between the measured and calculated results. It is particularly worth mentioning that due to the incorporation of a proper constitutive model for unsaturated soil, the calculation can well simulate the different failure behavior of the model Shirasu ground observed in the tests that, in Case 1 and Case 3, the slope collapses entirely while in Case 2, only the toe of the slope failed. In the analyses, all the material parameters of the Shirasu in different test cases are the same, which makes the sense for the application of the proposed numerical method.
- 4) A field heating test, carried out within a saturated soft rock called as Opalinus clay by Mont Terri underground laboratory, is then simulated with the same proposed numerical analysis based on the modified thermo-elasto-viscoplastic model. It is found that the proposed numerical method can well describe the THM behavior observed in the test, such as the changes of temperature, the excessive pore water pressure (EPWP) and the heat-induced strain.
- 5) Finally, a heating experiment is simulated, using the same proposed numerical method, in order to investigate the THM behavior of bentonite-host rock composite structure under unsaturated condition. In the simulation, the mechanical behaviors of host rock and bentonite are described by the proposed models for soft rock and unsaturated soil in this dissertation respectively. Based on the simulated results, it is known that the present simulation can properly describe the THM behaviors observed in the heating experiment such as the hydration of water, the evolution of temperature, the evolution of excessive pore water pressure to some extent.

According to the above discussions, it is, therefore, reasonable to conclude that the proposed numerical method can be applied into the geotechnical problems relating with the saturated-unsaturated seepage problems.

論文審査結果の要旨

近年に多相系における地盤工学の諸問題はよく議論されるようになった。例えば、豪雨によって表層斜面の崩壊問題、地震による砂質地盤の液状問題、高レベル放射性廃棄物地層処分 of 長期安定性問題など様々な課題が解決しなければならない。自然災害が発生するたびに、人命・インフラと自然環境は大きな被害を受けている。多相系における地盤災害のメカニズムを解明するために、室内・現場試験は勿論重要であるが、適切な数値解析手法を用いて検討することも重要である。本論文の目的は論理的な地盤構成式を提案し、それに基づき、多相系の地盤工学諸問題を統一的に取り扱える熱・土・水・空気 THMA 有限要素数値解析手法を開発することである。

本研究では、まずに温度の影響を考慮できる飽和/不飽和土の水・空気・土粒子三相系の力学特性を適切に評価できる構成モデルを提案する。次に、提案する構成式を用いて取り扱える統一の THMA 有限要素数値解析手法を開発する。その数値解析を用いて、飽和/不飽和土地盤における表層地盤の浸水破壊による斜面崩壊のモデル実験をシミュレートし、そのメカニズムを解明する。また、飽和/不飽和土(空気圧一定, $S_r \leq 1.0$)における加熱試験のシミュレーションも行った。本研究により得られた研究成果は以下のとおりである：

飽和土の修正 Cam-clay モデルをベースに、温度の効果を考慮できる飽和/不飽和土の構成モデルを提案した。飽和/不飽和土の力学挙動を連続的かつ統一的に表現するために、Bishop の有効応力と飽和度を状態変数とした。これにより、不飽和状態から飽和状態に変更するとき、Bishop の有効応力は自動的に Terzaghi の有効応力になり、不飽和/飽和土の挙動を同時に記述できる。また、温度効果を考慮するために、等価応力の概念を用いた。要素試験のシミュレーションを行った結果、提案する新しい構成モデルの合理性が検証された。

また、有限変形理論に基づいた熱・水・空気・土 THMA 連成の静的有限要素法 (FEM) 解析手法を提案した。有限変形の場合の理論には土骨格の変形、過剰間隙水圧、空気圧および温度が未知数として定式化されている。

提案した解析手法の妥当性を検証するために、非排水/非排気条件下における不飽和土の三軸試験のシミュレーションを行った。FEM を用いた 1 要素の計算結果 (応力経路、空気圧、水圧、せん断応力) と実験結果の傾向が同様になることが確認された。

さらに、シラス材料を用いたモデル地盤における浸水破壊試験をシミュレートした。その数値解析結果と実験結果を比較することにより、飽和/不飽和土の浸透特性および斜面崩壊現象を精度よく再現し、提案する数値解析手法の妥当性が確認された。

尚、THMA 連成有限要素解析による飽和軟岩 (空気圧一定, $S_r=1.0$) における要素加熱実験のシミュレーションも行った。等方圧密状態で、文献で報告された、圧密状態 (OCR) が異なる場合は地盤材料の圧縮と膨張が異なるという記述が正しいかどうかを検証した。その結果、室内加熱試験においては単純に試料から排出された水量で体積ひずみを計ることが不十分であることがわかった。温度の上昇による体積ひずみは OCR に関係なく、かならず膨張することを確認した。また、現場加熱実験のシミュレーションを行った。温度、間隙水圧、ひずみの計算結果は実験結果と同様な傾向をしめしていることが確認された。

最後に、THMA 連成有限要素解析による飽和/不飽和土 (空気圧一定, $S_r \leq 1.0$) の加熱実験のシミュレーションを行った。高いサクション (136MPa) を有するベントナイトに、隣接する飽和軟岩地盤がデサチュレーションとリサチュレーションの浸透過程がよく表現できることが確認された。また、温度、過剰間隙水圧においても計算結果と実験結果が一致することも確認された。

以上の結果に基づき、本論文で得られた知見は地盤力学の理論発展だけでなく、工学的応用価値も大にあることから、博士 (工学) 論文として十分価値があると認める。