

氏名	ホウ 包 小 華 BAO XIAOHUA
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第852号
学位授与の日付	平成24年9月5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 WATER-AIR-SOIL THREE-PHASE MATERIAL AND ITS APPLICATION TO GEOTECHNICAL DISASTER INCLUDING LIQUEFACTION (水・空気・土粒子三相系の力学特性のモデル化と液状化を含めた地盤災害への適用)
論文審査委員	主査 教授 張 鋒 教授 小 畑 誠 教授 前 田 健 一 准教授 Hossain Md. Shahin 教授 朱 合 華 (同济大学)

論文内容の要旨

Geotechnical disasters have always threatened human being not only because the disasters may lead to tremendous loss of life and properties, but also it may take a long time to recover or even unrecoverable. Various factors of the geotechnical disasters are existed, among which, heavy rain and earthquake are the two main factors that are difficult to predict. Slope failures caused by heavy rain and liquefaction caused by earthquake are tremendous disasters to human being and civil facilities. These two phenomenons have been investigated by engineers for a long time. The mechanisms of slope failure due to rainfall and liquefaction due to earthquake have been investigated thoroughly as the development of soil mechanics. In a word, in many cases we have to deal with these geotechnical problems depending on saturated soil mechanics or unsaturated soil mechanics.

As is known that saturated soil mechanics has been widely developed for a long time, but unsaturated soil mechanics, many challenges still lie ahead to geotechnical engineers, especially its engineering practice to solve boundary value problems. The main purpose of this dissertation is to use the existing theories on both saturated and unsaturated soil mechanics to solve various boundary value problems.

For the unsaturated soil problems, first, a new constitutive model based on the experiment study is proposed by Zhang (2011). The constitutive model for unsaturated soil using the skeleton stress and degree of saturation as independent state variables is therefore possible to be able to describe not only the behaviors of unsaturated soil but also saturated soil because the skeleton stress can smoothly shift to effective stress if saturation changes from unsaturated condition to saturated condition.

Next, 2D FEM approaches that consider the interaction between soil skeleton, pore water and pore air in one-dimensional infiltration problem is conducted. In this three-phase field theory, the displacement of solid u , the pore water pressure p^w and pore air pressure p^a are taken as the basic variables in the governing equations. The finite element is used to discretize the field equations in space, and finite difference method is used for the discretization of the continuity equation for the pore fluid. Newmark- β method is employed to discretize the field equation in time.

Last, combining the proposed new constitutive model and soil-water-air three-phase mixture theory, 2D unsaturated-saturated numerical analysis is performed using a FEM program SOFT to simulate the process of infiltration in the unsaturated Shirasu slope. The numerical simulation aims to reproduce the three cases of soil tank model tests of unsaturated Shirasu slope, in which water injection is conducted from the top, bottom and back of the slope respectively. Simulation results are compared with test results to verify the proposed constitutive model and numerical method.

For the saturated soil problems, numerical simulation on different kinds of ground is carried out using cyclic mobility model proposed by Zhang (2007). The calculation includes three types of ground:

- 1) Dry sand ground. Numerical tests on seismic enhancement effect of existing group-pile foundation with ground improvement are first conducted to find out the optimum pattern of ground improvement around existing pile foundation. In the numerical tests, three influential factors are considered, that is, the depth, the thickness (or height) and the width (or length) of the ground-improvement zone around the pile group. The numerical tests are conducted in static push-over condition. Firstly, find out an optimum pattern for the partial-ground improvement around an existing pile foundation, and secondary, confirm the efficiency of seismic enhancement by the partial-ground improvement method both by shaking table tests and numerical analyses. As a consequence, the applicability of the DBLEAVES for evaluating the seismic behavior of pile foundation is verified again. In the numerical analyses, nonlinear behaviors of ground and pile are described by cyclic mobility

model (Zhang et al, 2007) and axial force dependent model (AFD model) proposed by Zhang and Kimura (2002), respectively.

- 2) Saturated soft rock ground. Simulation is performed on the undersea soft rock under high confining stress state subjecting to dynamic loading to clarify the mechanism process of the formation from proto-decollement to decollement, which is one step to the clarification of the earthquake mechanism. In the calculation, parameters of the soft rock are determined based on laboratory tests and element simulation. The mechanical behaviors of the soft rock subjecting to huge dynamic loadings such as earthquake motions are well examined. The study object is selected at a depth of 1650m under seabed, where has a confining stress of 9.75MPa. Through the results including acceleration, effective stress and excess pore water pressure, it is understood that decollement zone with a high confining stress may consolidate and become dense when subjected to huge shear stress caused by earthquake.
- 3) Saturated sand-silt mixed ground. To evaluate the anti-seismic performance of Kanie Parking Lot based on liquefaction analysis, numerical simulation was carried out by 2D soil-water coupled finite element method in two cases, which are the long-pile type foundation and short-pile type foundation. In the numerical calculation, the process during earthquake was simulated by a dynamic soil-water coupled analysis, while the process of dissipation of excess pore water pressure was simulated by a static consolidation analysis. The mechanical behavior of the ground during liquefaction and the settlement in post-liquefaction is well examined. Through the results, it is clear that although the ground in both two cases liquefied, the structure with the long-pile type foundation has less uneven settlement than the short-pile type foundation after earthquake. The seismic stability of the structure foundation was well evaluated by this numerical analysis.

論文審査結果の要旨

地震・豪雨・台風等自然災害に引き起こされる各種地盤災害が多発している中、人命・インフラと自然環境は大きな被害を受けている。その中で、豪雨による不飽和土の斜面表層すべり型崩壊、地震による砂質地盤の液状化は特に重視しなければならない。浸水による斜面崩壊メカニズムと地震による液状化メカニズムの究明に関する研究が多くなされてきたが、飽和土を相手にするものが大多数であり、水・空気・土粒子三相系の力学特性の不飽和土をモデル化した構成式と場の理論に基づいた研究がまだ十分とは言えない。本論文の目的はこのような理論研究を発展させるだけでなく、これらの理論に基づいた境界値問題である様々な地盤災害へ適応できる数値解析手法を開発することである。

種々の地盤災害の発生メカニズムを解明し、最適な対策を構築するためには、地質調査・現場計測および経験によるものは勿論重要であるが、適切な数値解析手法を用いた理論計算も重要である。そのため、複雑な土の挙動を幅広く説明できる土の構成式の開発は極めて重要である。本研究では、まず不飽和土の水・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た数値解析手法により、不飽和土が関わる表層地盤の浸水破壊に起因する表層すべり型の斜面崩壊メカニズムを解明する。また、過圧密・構造・応力誘導異方性を適切に考慮できる移動硬化型弾塑性モデルに基づいて、液状化を含めた地震災害問題をシミュレートし、その適応性を検証した。本研究により得られた研究成果は以下のとおりである：

有限変形理論に基づいた水・空気・土連成の静的有限要素法（FEM）解析手法を提案した。有限変形の場の理論には土骨格の変形、過剰間隙水圧および空気圧が未知数として求めることができる。不飽和土の斜面崩壊をシミュレートする前に、提案したプログラムの妥当性を確認するために、一要素のシミュレーションを2つの異なる荷重条件で行なった。その結果、FEMを用いた1要素の計算結果と理論値が完全に一致したことを確認した。次に、シラス材料をモデル地盤とした降雨浸透による斜面のモデル試験をシミュレートした。数値結果と実験結果の比較により、不飽和土の浸透特性および斜面崩壊のメカニズムを精度よく再現し、提案する数値解析手法の妥当性を確認した。

また、既存の杭基礎の耐震性を高めるために、現場で普及し始める部分改良工法の有効性も検証した。杭基礎周辺地盤の最適改良パターンを見つけるためには、3つの要因、すなわち、地盤改良のサイズ、位置と形をパラメータにした一連の静的FEM解析を用いた数値試験を行った。この数値実験で得られた最適改良パターンを対象に、1g場モデル振動台実験を実施し、既設杭基礎の周辺地盤における地盤部分改良工法の耐震補強効果を検証し、振動台実験と同じ条件の数値解析も行った。数値解析はモデル実験結果を概ねある表現している。また、補強ありのケースにおいては地盤改良部にある杭頭部で曲げモーメントが抑制され、耐震補強効果があることは明らかになった。ただし、杭先端の曲げモーメントについて、計算は過大評価している。また、杭ごと曲げモーメントの分布の差については、解析結果が実験結果よりかなり小さい。今後の課題となる。

また、地震のメカニズムを解明するための手立てとして、プロトデコルマからデコルマへの変化の特性が注目されているが、発達過程においてP波を受ける場合の岩盤の構造・力学特性の変化が重要なポイントとなる。地震についてはせん断力が注目されてきたが、等方荷重の影響があんまり考慮されてこなかった。しかし、繰返し等方荷重が岩石の持つ異方性を顕著に発達させることが実験で判明した（静的な荷重では発達しない）。そこで、岩盤の弾塑性モデルを用いたS波・P波が同時に作用された場合の地下深部岩盤の力学挙動を数値実験で検討した。その結果、岩盤の非線形特性・P波の影響が無視できないことがわかった。

また、砂・シルト互層地盤における杭基礎耐震性能を評価するために、液状化解析を行った。短い杭を用いる場合、液状化による建物の不等沈下が発生し、一方、長い杭の場合には、建物の不等沈下が抑えられていることがわかった。

以上の結果に基づき、本論文で得られた知見は工学的応用価値が大であり、博士（工学）論文として十分価値あると認める。