

氏名	ALI MURTAZA RASOOL
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工甲第 1108 号
学位授与年月日	平成 30 年 9 月 21 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	MECHANICAL BEHAVIOR AND INSTABILITY OF UNSATURATED SOIL UNDER WATER INFILTRATION CONDITIONS (不飽和土の力学挙動と水分浸透に伴う不安定化)
論文審査委員	委員長 教授 桑野 二郎 委員 教授 川本 健 委員 教授 長田 昌彦 委員 准教授 内村 太郎

論文の内容の要旨

In order to mitigate the damages associated with rain induced slope failures, the triaxial tests can be used to study the mechanical behavior of soil knowing its initial state, boundary condition and loading type. However, the detail studies of the evolution of shear stress due to water infiltration simulating field stress paths have seldom been performed in the laboratory. Moreover, the shear strength behavior due to water infiltration and final shear state under different stress paths has not been verified. In the light of such, the main aim of this study is to evaluate the mechanical behavior and instability of unsaturated soil as a result of water infiltration following the field stress paths via a series of laboratory triaxial tests. In addition to this, the effect of stress paths on final shear state is also studied. Most of the previous studies have been performed under constant shear stress conditions. Whereas, the current study has been performed under both constant matric suction and constant shear stress conditions to study mechanical behavior and instability of unsaturated soil slopes. The constant matric suction refers to ordinary triaxial tests performed in drained conditions. In this condition matric suction was first decreased to start water infiltration then it was kept constant throughout the shear process. Three stress paths has been followed in constant matric suction plane. In first path, the shearing process was started simultaneously by decreasing matric suction i.e. opening the drainage valve for the pore water pressure. In second and third path, the soil specimens were first infiltrated with water by keeping deviatoric stress constant. Once the water infiltration completed the specimens were sheared by opening and closing the valve for pore water pressure respectively. No remarkable decrease in shear strength was observed due to decrease in matric suction. It was also observed that specimens produced same deformation state (i.e. degree of saturation) which produced same stress paths and final shear state of specimens and all stress paths fall on the same failure surface. The constant shear stress refers to triaxial test with water infiltration carried out at 80-85% of peak deviatoric stress. In this condition, matric suction was decreased to start water infiltration by keeping shear stress constant. Three stress paths have been followed in constant shear stress plane. In the first and second path, the soil specimens were first sheared to 85 & 100% of q_{max} respectively in constant water content conditions then water was infiltrated by keeping deviatoric stress constant. It was observed

that the water infiltration alone caused failure in the specimens as a result deviatoric stress decreased depending on the increase in water content. Consequently, the stress path moved along the failure surface and failed. In the third path, the soil specimens were first sheared to 25% of q_{max} then water was infiltrated by keeping deviatoric stress constant, no failure was observed during the course of water infiltration. Therefore, specimens were sheared again in constant water content conditions, the stress path also moved along the failure surface during water infiltration and recovered during second shearing. Finally, six stress paths have been carried out under constant matric suction and shear stress planes it was observed that all stress paths fall on the same failure surface forming the state boundary surface. The reduction in shear strength of the soil depends on the drainage condition and increase in water content as per the conducted study.

論文の審査結果の要旨

地盤の表層部は多くの場合不飽和の状態にある。豪雨時の斜面崩壊など地盤の不安定化には、地下水位の上昇による有効応力の低下に伴うものに加え、不飽和状態であっても雨水の浸透による飽和度の上昇に伴いサクシオンが低下することにより不安定化が促進されることも一因となっている。水分浸透に伴う不安定化を含む不飽和土の力学挙動に関する知見は、斜面等の安定性を検討する際に必須であり、様々な研究がなされてはいるものの、十分に調べられていない点も多くある。本論文は、不飽和土の力学挙動と水分浸透に伴う不安定化について、精緻な不飽和三軸せん断試験を実施し、応力径路など各種要因が破壊面などに及ぼす影響について検討している。

本論文は、研究成果を9章に分けて記述している。

第1章では、降雨に伴う斜面の不安定化について、実斜面あるいは室内模型斜面での降雨に伴う挙動が調べられ安定化手法や早期警報システムの開発が行なわれてきたこと、しかしながら不飽和土の力学挙動については必ずしも十分に系統的な研究は行われていないことなどについて述べ、本研究の目的と狙い、論文の構成など、研究全体を概観している。

第2章は既往の研究について述べている。不飽和土の力学におけるサクシオンの役割と応力変数、飽和土・不飽和土の強度特性に関する既往の研究とそこで通常用いられる応力径路、降雨に伴う不飽和斜面の不安定性とそこに至る堆積時からの応力変化と既往の研究における応力径路などについて紹介している。

第3章では、本研究において使用した不飽和土用三軸試験装置について紹介し、特に通常の飽和土用三軸試験装置には無い不飽和土用三軸試験装置に必要な部分については詳細に説明している。また、精緻な試験には欠かせないキャリブレーションについても方法と結果を紹介している。

第4章では、本研究で用いた土試料の物理特性や供試体作製方法と均一性の確認、各種物理的性質の算定、試験方法や実験で用いた応力径路、など実験に係わる事柄を説明している。

第5章では、最適含水比で締固めた試料をサクシオン一定条件で、吸水を伴う排水せん断、吸水後に含水比一定せん断、吸水後に排水せん断し、せん断特性を比較検討している。Net stress が0kPaの場合100kPaや200kPaの場合と比べ吸水に伴う強度低下が著しく、これは斜面表層部の方が不安定化しやすい事を示唆する。Net stress が100kPaや200kPaの場合も、吸水後の含水比一定せん断試験においてサクシオンが0kPaまで低下することでせん断抵抗はある程度低下する。使用した供試体は過圧密状態にあり、net stress が100kPaや200kPaの試料は収縮挙動のみを示したが、0kPaの供試体は吸水とともに膨張性から収縮性へ挙動が変化した。これらの吸水に伴う体積変化特性とせん断抵抗の関係について検討している。

第6章では、最適含水比の乾燥側から湿潤側にかけて作製した供試体について、排気非排水含水比一定せん断試験、非排気非排水せん断試験、吸水を伴う排水せん断、さらにはせん断応力一定条件での吸水サクシオン低下試験を実施し、サクシオンは供試体の含水比とともに低下すること、ピーク強度は最適含水比よりもやや乾燥側で最大となり、同様にピーク時の平均主応力はnet stress、有効応力ともに最適含水比よりもやや乾燥側で最大となること、せん断条件が異なっても今回の実験の範囲では破壊包絡線はほぼ一本の直線となること、せん断応力一定で吸水させた場合の最終的に破壊する状態は他の試験条件の破壊包絡線とほぼ一致したがそこに至る過程で高含水比の低せん断抵抗状態に遷移するため歪軟化挙動を示すことなどの結果を得た。

第7章では偏差せん断応力一定吸水試験、鉛直水平主応力比K一定吸水試験を実施し、締固め度とコープス量の関係を調べnet stress が小さいほどコープス量が大きいことや低いせん断レベルでコープスを生じ

させるとせん断強度が増加することなどを示している。

第8章では、せん断応力レベル一定吸水試験と歪レベル一定吸水試験を実施し、せん断レベルが高ければ吸水のみで破壊が生じること、同一量の給水後には同一の応力～ひずみ関係を示すこと、吸水は間隙比と飽和度の変化をもたらすそれが変形強度特性に大きく影響することなどを示している。

第9章では、本研究により得られた結論を総括して述べるとともに、今後の展望を述べている。

本研究では、豪雨時の斜面崩壊など地盤の不安定化には、地下水位の上昇による有効応力の低下に伴うものに加え、不飽和状態であっても雨水の浸透による飽和度の上昇に伴いサクシオンが低下することにより不安定化が促進されることも一因となっている。水分浸透に伴う不安定化を含む不飽和土の力学特性の把握は、斜面等の安定性を検討する際に必須であり、様々な研究がなされてはいるものの、せん断応力が作用した状態での吸水試験など一面的な捉え方が多く、不飽和土の力学特性に重要な net stress、サクシオン、せん断応力、吸水、体積変化を総合的に捉える試みは多くない。本研究はこれらの要因を、様々な応力径路など多様な条件について一連の精緻な室内試験により調べるとともに、それらの相互関係を応力空間内の状態曲面として把握するとともに、それを視覚的に分かりやすく表現することを試みており、研究の独創性、新規性、発展性など工学的な貢献は大きい。また、結論に至る種々の検討における厳密性も高く評価される。それらの点を総合的に判断して、博士の学位論文として合格と判定した。