

氏 名 (本 籍)	Hla Aung (ミャンマー)
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 授 与 番 号	甲第 302 号
学 位 授 与 日 付	平成 18 年 9 月 13 日
専 攻	生産開発システム工学専攻
学 位 論 文 題 目	Modeling of Time-dependent Behavior of Sedimentary Soft Rock and Its Applications to Progressive Failure of Slope (堆積軟岩に関する時間依存性挙動のモデル化 と斜面の進行性破壊現象への適用)
学位論文審査委員	(主査) 教 授 八 嶋 厚 (副査) 教 授 杉 戸 真 太 教 授 本 城 勇 介 教 授 張 鋒 助 教 授 沢 田 和 秀

論 文 内 容 の 要 旨

For the appropriate prediction in the long-term stability of slope, it is necessary to carried out numerical analysis using a simple and generalized constitutive model for geomaterials. For this purpose, an investigation of the mechanical behavior on sedimentary soft rock under general stress conditions has been conducted in this research. Yet few plane-strain experiments on soft rock can be seen due to the difficulties of experiments on relatively high-strength geomaterials such as sedimentary soft rock. In this study, newly designed plane-strain apparatus was utilized, by which an isotropic compression condition was achieved before shear and continuous monitoring of inner excessive pore water pressure was obtained during tests. A series of experiments including drained triaxial compression/creep tests, drained plane-strain compression tests and unconfined plane-strain compression tests were carried out. The typical mechanical behavior on sedimentary soft rock such as strain softening, positive dilatancy and creep behavior as well as the migration of excessive pore water pressure inside of plane-strain specimen were clearly observed.

Followed by experimental studies, an elasto-viscoplastic constitutive model with strain softening is developed for sedimentary soft rock using newly proposed evolution equation for subloading yield surface originally invented by Hashiguchi (1980). Time effect of geomaterial is introduced into evolution equation for subloading yield surface proposed by Nakai et al, (2004). In the model, an associated flow rule is adopted and t_{ij} concept, which can take into consideration the influence of intermediated stress on deformation and strength of geomaterials, is used. Moreover, as is the same as Cam-clay model, plastic volumetric strain is used as the hardening parameter, which is widely accepted by the researchers who specializes in the constitutive model for geomaterials. The material parameters involved in the model have clear physical meanings and can be easily determined with triaxial

compression/creep tests. The application of the model to experimental results of soft rock indicates that the model can not only describe the time dependency such as strain rate dependency and creep, but also the strain softening behavior of geomaterials. However, element simulations using this model showed that the predicted intermediate principal stresses were much larger than the observed ones to a non-negligible degree. Therefore, the discrepancy between theoretical and observed values of intermediate principal stress is carefully analyzed through 3D FE analysis and identified the validity of the proposed model. Moreover the migration of excessive pore water pressure within a specimen, which is intimately related to the loading rates, is carefully investigated through 2D soil-water coupled FE analysis. From this analysis, it is known that even under very slow loading rates, there still exists some excessive pore water pressure within the specimen.

At the last, two case histories of the progressive failure of slope were studied by FEM based on the newly proposed model with strain softening. In the first case history, a large-scale cut slope of soft rock failed due to a heavy rain. The increase of pore water pressure due to heavy rain is thought to be the main reason of the failure. In order to simulate the progressive failure observed in the slope failure, 2D finite element analysis with soil-water coupled condition is conducted based on the newly proposed model in which time-dependent parameters of the model are neglected. The ground material itself, however, is regarded as elasto-plastic, instead of being regarded as elasto-viscoplastic. In the second case history, a natural slope failure occurred due to a tunnel excavation, in which no any evidence of rainfall or underground water movement was observed. The elasto-viscoplastic nature of the ground is thought to be the main reason for progressive failure. In the second case history, 2D finite element analysis based on the newly proposed time-dependent model is conducted to simulate the progressive failure of the slope. In the analyses, the material parameters are determined based on the results from field tests. The mechanism of failure of slopes, such as the development of shear strain, the deformation of the ground, the propagation of shear band and the progressive failure can be described well through 2D FE analyses based on the new proposed model.

論文審査結果の要旨

斜面の長期的安定性を評価するためには、地盤材料の力学挙動を精度良く表現できる力学モデルを用いた数値解析を実施することが必要である。

この目的のために、本論文では、まず軟岩の力学特性を明らかにするために、平面ひずみ試験を実施している。用いた試験装置は、全く新しい機構に基づいた装置であり、これまでほとんど実施されてこなかった軟岩を対象とした平面ひずみ圧縮試験を可能としている。本装置は等方圧密後にせん断ができるといった新しいタイプの実験装置であり、定ひずみせん断試験とともに、軸応力一定のクリープを模擬した試験についても実施可能である。得られた実験結果は、通常実施される簡便的な三軸圧縮および三軸クリープ試験と比較されている。得られた実験結果に基づいて、中間主応力の影響が見事にまとめられている。しかしながら、実験自体の不備も認識された。つまり、せん断時に排水条件を課し

たが、供試体内部で過剰間隙水圧が完全に消散することはなく、実験自体は部分排水的な挙動を示していたことがわかった。今後完全非排水試験等を実施して、得られた実験結果を再検討する必要がある。また、ひずみを拘束する剛板との間に存在するメンブレンの存在が中間主応力の変動に少なからず影響を与えることがわかった。この影響については3次元有限要素解析によって詳しく検討された。

上記のせん断試験結果に基づいて、それらの力学特性を正確に再現できる構成式を提案した。ひずみ軟化挙動、中間主応力の影響と時間依存性挙動をすべて表現できるモデルとして下負荷局面と t_j 概念を融合させた新たな構成式を提案した。提案したモデルは、三軸応力場（軸対称応力場）の力学挙動のみならず、平面ひずみ条件下での挙動も精度良く再現した。また、定ひずみせん断のみでなく、クリープ挙動といった時間依存性挙動をも定量的に再現できることがわかった。

論文では、最後に提案したモデルを用いた斜面崩壊の再現解析が実施されている。解析は2ケースについて実施されている。ケース1は、豪雨による斜面崩壊事例である。ここでは、提案する構成モデルの時間依存性を無視し、地盤内の地下水挙動に特に注目して、土～水連成解析が実施されている。得られた解析結果は実際に発生した斜面崩壊の最終段階を正確に再現している。しかしながら、有限要素法という性格上、実際に観察された段階的な崩壊は再現できなかった。ケース2は、斜面下部の掘削による崩壊事例である。ここでは、地下水が観察されていないことから、弾粘塑性モデルを用いた解析が実施されている。解析結果より、当初考えられた崩壊抑止のための補助工法が採用されていたならば、斜面は安定を保っていたことがわかった。

以上のように、本論文では、軟岩を対象として、1)室内実験の実施、2)実験結果に基づいた構成式の提案、3)実際の事例解析、といった一連の非常に重要な研究が紹介されている。ただし、前述したように新たに制作した平面ひずみ実験装置とその実験手順は完全なものではなく、軟岩の力学挙動を正確に把握するためには、さらなる研究継続が必要であることがわかった。

最終試験結果の要旨

八嶋 厚、杉戸真太、本城勇介、張 鋒および沢田和秀で構成する審査委員会は、本論文および別刷りなどを慎重に検討した。本論文は学位論文として十分完成された内容を有していること、提出された学位論文および発表論文は、申請者により書かれていることを確認した。また最終試験（公聴会）を平成18年8月18日に開催し、審査委員会での審査の結果、合格と判定した。