

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

(Summary of the Contents of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目
(Dissertation Title)

EFFECTS OF SHEAR DISPLACEMENT RATE AND
ACCELERATION ON SHEAR STRENGTH OF VARIOUS CLAYS IN
RING SHEARING
(リングせん断試験における種々の粘土のせん断強度に及ぼすせん断変位
速度および加速度効果)

氏 名 (Name)

NGUYEN THANH DUONG

This research is laboratory-based experimental research of shear rate and acceleration effects on the shear strength of various clays in ring shearing. In landslide, the change in sliding velocity (i.e. shear displacement rate) affects not only the peak strength but also the residual strength of soils. The rate effect on the shear strength of soil has become one of the most important considerations in geotechnical engineering. A better understanding of the rate effect on the residual strength of a soil would be beneficial in predicting and evaluating the behaviour of reactivated landslides. Hence, the rate effect on residual strength of various soils has extensively investigated. In addition, the rate effect on residual interface strength along bedding planes between two soil layers has been recently investigated. However, there is currently no consistent theory that describes the rate effect on residual strength, particularly for high plasticity and low permeability clay. Furthermore, the research on residual interface strength is still limited and should be more studied. Besides developing along the bedding planes, many landslides also often occur in over-consolidated (OC) soil which is highly fissured and jointed. The rate effect on the shear strength of OC soil has been widely examined in triaxial tests. Nevertheless, it needs to be further studied in ring shearing, especially for residual strength. Regarding the change of velocity during sliding, the acceleration may affect the residual strength. This effect has been unknown and should be clarified. As regards the application of rate effect, the rate dependency of residual strength will affect the estimation of the earthquake-induced velocity and displacement. However, this issue needs to be more examined. To summarize, the main objectives of this study are to investigate the rate effect on residual strength of high plasticity and low permeability clay, on residual interface strength between two different soil layers, and on the shear strength of OC clay in ring shearing. In addition, the effect of acceleration on residual strength will be clarified. Finally, the estimation of earthquake-induced velocity and displacement will be investigated with the rate dependency of residual strength using the Newmark method. In this research, a conventional Bishop-ring shear apparatus was employed. The specimens to be used in ring shearing were cut from samples which were pre-consolidated in a large consolidation tank.

Kaolin and kaolin-bentonite mixture samples were used to investigate the rate dependency of residual strength of high plasticity and low permeability clay. The samples were tested with shear rates from 0.02 to 20 mm/min under the normal stress of 98 kPa using the single-stage procedure. The test results showed that the bentonite content affected significantly the rate dependency of shear strength. Especially, the rate dependency of residual strength appears to be changed from positive to

negative when adding bentonite to kaolin clay. Regarding the physical properties of soil, the results found that the rate effect on residual strength had a relationship with clay fraction and plasticity index. The type of rate effect on residual strength is found to be dependent on test procedure, especially for a very low permeability clay.

Next, the combined specimens consist of one kaolin layer (upper layer of specimen) and one kaolin-bentonite mixture layer (lower layer of specimen) were used to investigate the rate dependency of residual interface strength. The test results presented that the residual interface strength and its rate dependency depended significantly on bentonite content in the lower layer.

Furthermore, in order to investigate the rate effect on the shear strength of OC clay, kaolin clay with artificial overconsolidation ratios (OCRs) ranging from 1 to 6 were conducted in ring shearing at shear rates from 0.02 to 20 mm/min under the effective normal stresses from 98 kPa to 588 kPa. The test results indicated that the rate dependency of both peak and residual strength depended on the stress history (OCRs). In particular, the magnitude of positive rate effect on residual strength tends to decrease as the OCRs increase. In addition, the variation of cohesion and frictional angles of OC kaolin clay at peak and residual states at different shear rates is different. Regarding the test procedure and rate effect, the multi-stage procedure of decreasing normal stress can be used to determine the residual strength of OC clay at shear rates less than or equal to 0.5 mm/min.

The average acceleration values of 50.4 mm/h² and 100 mm/h² were used to investigate the acceleration effect on the residual strength of kaolin and 90% kaolin-10% bentonite mixture samples. The multi-stage procedure of increasing shear rates gradually from 0.002 to 20 mm/min at different shearing times was applied. The test results showed that the effect of acceleration on the residual strength was negligible and this effect could be ignored in slope stability analysis.

Finally, the rate dependency of residual strength was applied to estimate the earthquake-induced velocity and displacement of infinite plane slope whose slip surface has reached the residual state using the Newmark method. The computation results revealed that considering the positive rate effect of slip zone soil, the estimated velocity and displacement decreased significantly as compared with the cases of without the rate effect.

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	Nguyen Thanh Duong
審 査 委 員	主 査：鈴木 素之
	副 査：清水 則一
	副 査：中田 幸男
	副 査：吉本 憲止
	副 査：原 弘行
論 文 題 目	Effects of shear displacement rate and acceleration on shear strength of various clays in ring shearing (リングせん断試験における種々の粘土のせん断強度に及ぼすせん断変位速度および加速度効果)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>土の残留強度はせん断変位が進行し大変形に至ったすべり面で発揮される一定かつ最小のせん断強さであり、過去にすべりを起こした地すべり斜面の安定性評価に用いられる強度パラメータである。通常、地すべり斜面は過圧密状態の種々の粘性土で構成され、すべりは降雨時には既存すべり面で、地震時には異なる地層境界面（層理面）で発生することが多い。しかしながら、従来の研究では、地すべりはせん断変位速度を刻々と変化させながら滑動するが、それに応じてすべり面で発揮される残留強度がどのように変化するかは全く解明されておらず、地すべり斜面の安定性評価に反映されていないのが現状である。</p> <p>申請者は、低塑性のカオリナイト単体とそれに粘性を与えるために高塑性のベントナイトを添加した混合土を作製し、それらに対してせん断変位速度と加速度を変化させたリングせん断試験を実施し、せん断挙動および強度特性の解明に取り組んだ。また、残留強度の速度依存性を考慮した地震時すべり変位の算定法を提案し、平面すべりモデルに対して適用を試みた。これらの研究成果は 9 章からなる論文にまとめた。</p> <p>第 1 章では、本研究の背景と目的を述べた。また、本論文の各章の構成を示した。</p> <p>第 2 章では、土の残留強度の諸性質に関する既往の研究を整理・要約し、本研究の新規性ならびに独創性を示した。</p> <p>第 3 章では、本研究で用いた Bishop 型のリングせん断試験装置の概要ならびに試験方法を説明した。また、双曲線近似による粘土の残留強度の決定法を説明した。</p> <p>第 4 章では、カオリナイトおよびカオリナイトとベントナイトの混合試料の正規圧密粘土に対してせん断変位速度を 0.02～20mm /min の範囲で変化させた場合の試験結果を示した。その結果、カオリナイトにベントナイトを添加すると、残留強度の速度依存性が正から負に変化することが明らかになった。</p>	

第 5 章では、カオリナイトとカオリナイトーベントナイト混合土を上下に貼り合わせた供試体に対する試験結果を示し、層理面の残留強度とその速度依存性は下側のベントナイト含有量に大きく依存することを明らかにした。

第 6 章では、過圧密比 (OCR) を 1~6 の範囲で、せん断変位速度を 0.02~20mm/min の範囲でそれぞれ変化させた場合の試験結果を示し、ピーク強度と残留強度の双方の速度依存性が OCR に依存することを明らかにした。特に、残留強度の正の速度効果の程度は OCR が増加するにつれて減少する傾向があることがわかった。さらに、試験手順および速度効果の検討に関しては、垂直応力を段階的に低下させる載荷方式によりせん断変位速度が 0.5mm /min 以下での過圧密粘土の残留強度を決定できることがわかった。

第 7 章では、カオリナイト単体試料および 90%カオリナイトと 10%ベントナイトの混合試料の残留強度に及ぼす加速度の影響を調べた結果を示した。加速度はせん断速度を 0.002mm/min から 20mm /min に上昇させるまでの時間を変化させることで変化した。その結果、残留強度に及ぼす加速度の効果は無視できることが明らかになった。したがって、この影響は斜面安定性評価において無視できることを示した。

第 8 章では、前章までに明らかになった残留強度の速度依存性を考慮した Newmark 法を提案し、無限長斜面の地震誘発地すべりによる変位速度と残留変位を計算した。その結果、正の速度効果が現れる土に対しては速度効果を考慮した場合の変位速度および残留変位はそれを考慮しなかった場合よりも明らかに減少することが明らかになった。

第 9 章では各章の結果を総括し、今後の課題について言及している。

公聴会における主な質問事項は、1) カオリナイトーベントナイト混合比と実際の地すべり土との対比、2) 速度効果の検討の有無による精度のちがい、3) 計算に用いたモデル斜面の妥当性、4) 地震時の計算に用いた強度パラメータの妥当性、5) せん断変位速度と残留強度の関係の一義性などに関するものであり、いずれの質問に対しても的確かつ十分な答弁がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、新規性、実用性ともに優れ、博士 (工学) の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は以下の通りである (関連論文: 計 3 編)。

- 1) Nguyen Thanh Duong, Motoyuki Suzuki, Nguyen Van Hai, Rate and acceleration effects on residual strength of kaolin and kaolin-bentonite mixtures in ring shearing, *Soils and Foundations*, Volume 58, Issue 5, pp.1153-1172, 2018.10.
- 2) Motoyuki Suzuki, Inoue Yuho, Nguyen Thanh Duong, Effect of shear rate on residual shear strength of over-consolidated cohesive soils, *International conferences on Earth Sciences and Sustainable Geo-Resources Development- ESASGD*, Sub-conference: International Conference on Geology and Geo-resources (GAG), pp. 164-173, 2016.11.
- 3) Motoyuki Suzuki, Nguyen Thanh Duong, Residual shear strength of soils and its shear displacement rate dependency: An overview, *The 4th International Conference on Geological and Geotechnical Engineering in Response to Climate Change and Sustainable Development of Infrastructure (VIETGEO 2018)*, pp.233-245, 2018.9.