

学 位 論 文 内 容 の 要 旨	
学位論文題目	Monotonic and Dynamic Strength Characteristics of Discontinuous Plane in Ring Shearing (リングせん断における不連続面の単調および動的強度特性)
氏 名	NGUYEN VAN HAI
<p>This thesis represents a laboratory-based experimental study into the monotonic and dynamic strength characteristics of discontinuous plane in ring shearing. It is well-known that the residual shear strength is an essential property in evaluating long-term stability of reactivated landslides in geotechnical engineering. According to previous studies, earthquake-induced landslides may occur on discontinuous planes, such as bedding planes between weathered and un-weathered mudstones having different cementation properties resulting from diagenesis. However, the monotonic and dynamic shear behavior at contact surfaces between cemented and non-cemented soil layers has not yet been sufficiently investigated. The objective of this study is to elucidate the ring-shear characteristics of artificial bedding planes that model actual behaviors of slip surfaces occurring between two layers having different degrees of cementation. Additionally, in order to simulate realistic mechanical behavior of naturally cemented clay, artificial cementation bonds were created by adding a cementing agent at different ratios to clay slurry. A series of monotonic and dynamic ring-shear tests was performed under various conditions on non-cemented and cemented kaolin, as well as two-layered specimen combined by attaching cemented kaolin to non-cemented kaolin.</p> <p>(1) <i>Monotonic ring-shear tests</i>: A series of ring-shear tests was performed on reconstituted and cemented one-layer clay specimens, and on two-layered specimens made from clay layers having varied levels of cementation to artificially reproduce a bedding plane. Total nine types of sample were performed. The shear displacement rate, the normal stress, and the curing time were varied in order to better elucidate the influence of these factors on the residual strength characteristics of the discontinuous plane. The test results showed that the residual friction angle of two-part combinations of non-cemented and cemented kaolin was approximately 33.6% lower than that of pure kaolin. In contrast, the residual friction angle of cemented kaolin may be as much as 6.2° greater than non-cemented kaolin. The stress ratio of 2% cemented kaolin increased as the shear displacement rate increased. The degree of increase was not significant as the cement content increased beyond 2%.</p> <p>Furthermore, additional multistage ring-shear tests under different normal stresses and shear speeds performed on four sample types showed that the residual friction angle was significantly different corresponding to types of sample, with a range of 0.5 to 6.2°. Additionally, the effect of cementation on the residual cohesion intercept was identified according to the testing methodology. The stress ratio of combined samples in single-stage and multistage ring-shear tests increased with a similar tendency as the shear displacement rate increased. This increase is different for 0% and 4% cemented kaolin, which indicates that the multistage technique may give erroneous results for these clayey soils.</p>	

(2) *Dynamic ring-shear tests*: Experimental tests were carried out by using a consolidation-constant volume cyclic loading ring-shear apparatus. Three levels of vertical consolidation stress, σ_N , (98 kPa, 196 kPa, and 294 kPa); four over-consolidation ratios (OCR) (1, 2, 3, and 4); and three shear-torque amplitudes (30 kPa, 60 kPa, and 90 kPa), were applied. The response of four types of samples of cemented and non-cemented kaolin under above mentioned various conditions were carried out to investigate the effects of these factors on the cyclic degradation. The cyclic degradation parameter, t , which evaluate the rate of cyclic degradation with the number of cycles, was mainly used to analyze test results. The experimental results showed that t decreases with increasing σ_N , shear-torque amplitude, and OCR. For 2%+0% combined-cement specimen, the effect of σ_N on the cyclic degradation was not significant. As OCR increased from 1 to 4, the value of t reduced approximately 25.7% and 58.6% for 0% and 2% normal cemented kaolin samples, respectively. This decrease is equivalently equal to that of 0% and 2% cemented kaolin samples as σ_N was increased from 98 kPa to 294 kPa. On the other hand, the cyclic stress ratio (τ_{cN}/σ_{N0}) increased with the decrease in the number of cycles (N_f) at a constant vertical consolidation value under a pre-defined failure state.

本研究では、リングせん断試験を用いて地震時の地すべりの潜在的すべり面となる層理面を含んだ粘性土の単調および動的せん断強度特性を調べた。地盤工学において残留強度は再活動型地すべりの長期安定性評価において重要なせん断強度の一つであることはよく知られている。既往の研究において地震時に発生する地滑りは地盤内部の不連続面で発生することが示唆されており、不連続面の一例として、固結強度の異なる泥岩とその風化土の層理面などがある。しかしながら、このような固結土層と非固結土層との境界面における単調および動的せん断強度特性はまだ十分に明らかにされていない。本研究の目的は固結強度の異なる固結土や非固結土の単一層内あるいは層理面のせん断強度特性を解明することである。そこで、本研究では地盤内でセメンテーション特性を有した粘土を人工的に再現するため、カオリン粘土にセメントを添加してセメンテーション効果を与え、固結強度の異なる数種類のカオリン供試体を作製した。固結および非固結カオリンだけでなく、それらを上下に貼り合せた層理面を有する貼り合わせカオリンに対して単調および動的リングせん断試験を実施し、以下のような結果を得た。

(1) 単調リングせん断試験：非固結、固結および貼り合わせカオリンに対して単調リングせん断試験を実施した。セメント添加量を変えることで、固結強度の組合せが異なる 9 種類の供試体を作製した。すなわち、貼り合わせカオリンに対しては上部

と下部のカオリン供試体の固結強度が異なる。そのため、まずは貼り合わせ供試体の残留強度を適切に評価するためにせん断速度、垂直応力および養生時間をそれぞれ変化させ、それぞれの影響の度合いを調べた。非固結カオリンと固結カオリンを貼り合わせた結果、残留強度から算出した内部摩擦角 ϕ は非固結カオリンのそれよりも33.6%低下した。なお、固結カオリン単体の ϕ は非固結カオリンのそれよりも6.2°高くなった。また、セメント添加量2%のカオリンはせん断変位速度の増加に伴いせん断応力比は増加したが、セメント添加量が2%を超えると、せん断速度の影響は小さくなった。

さらに、通常の単調せん断試験だけでなく、せん断中に垂直応力を段階的に変化させる多段階せん断試験を行った。固結強度の異なる4種類のカオリン供試体に対する多段階せん断試験の結果から、 ϕ は供試体タイプによって大きく異なり、 $\phi=0.5\sim 6.2^\circ$ であった。さらに、セメンテーションが残留状態の見かけの粘着力 c_r に及ぼす影響は試験方法に応じて異なった。単一せん断および多段階せん断試験の違いによらず、貼り合わせカオリンのせん断応力比はせん断変位速度の増加とともに大きくなった。しかし、非固結および4%セメント添加固結カオリンに関してはこの増加は相異なり、このことは多段階せん断試験がこれらの土に対して誤った結果を与えるかもしれないことを示唆している。

(2) 動的リングせん断試験：圧密・定体積繰返し載荷リングせん断試験により、垂直応力 σ_N 、せん断応力振幅および過圧密比OCRが非固結カオリン、固結カオリンおよび貼り合わせカオリンの動的せん断強度特性に及ぼす影響を検討した。一連の実験では σ_N は98、196、294kPaの3通り、せん断応力振幅は30、60、90kPaの3通り、OCRは1、2、3、4の4通りに変化させた。繰返し載荷による強度低下を評価するために、繰返し強度低下指数 t を提案した。 σ_N 、せん断応力振幅、OCRがそれぞれ増加すると、 t は減少する結果となった。セメント添加率2%および0%のカオリンを貼り合わせた供試体では σ_N が t に及ぼす影響は小さかった。また、OCRが1から4へ増加すると、非固結カオリンでは t は約25.7%低下し、セメント添加率2%の固結カオリンでは t は58.6%低下した。これらの低下率は垂直応力が98kPaと294kPaのケースで比較してもほぼ等しい値であった。一方、一定の垂直応力下における繰返しせん断応力比 τ_{cN}/σ_{N0} は繰返し回数の減少に伴い増加した。

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 714 号	氏名	Nguyen Van Hai
------	---------------------	----	----------------

最終試験担当者	主査	鈴木 素之	教授
	審査委員	松田 博	教授
	審査委員	中田 幸男	教授
	審査委員	吉本 憲正	准教授
	審査委員	Nhan Tran Thanh	助教

【論文題目】

Monotonic and Dynamic Strength Characteristics of Discontinuous Plane in Ring Shearing (リングせん断における不連続面の単調および動的強度特性)

【論文審査の結果及び最終試験の結果】

地震時あるいはその直後に発生する地すべりは、一般に地震誘発型地すべりと呼称され、降雨や融雪に起因して発生する地すべりが単一地層内の既存すべり面で滑動するのとは異なり、地層境界面（層理面）をすべり面として滑動する。このような地震誘発型地すべりの特徴としては、破壊が急激に進展し大規模になり、しかも高速で長距離滑動する。したがって、一度発生すれば甚大な斜面災害になる恐れがあることから、中山間地において地震誘発型地すべりの発生の予測とその対策は重要な課題になっている。実際、平成16年新潟県中越地震においては、泥岩の基盤岩とその風化層の境界面のような土層強度が異なる不連続面をすべり面とした地震誘発型地すべりが数多く発生している。しかしながら、このような層理面を含む不攪乱試料のサンプリングは容易ではないため、地震誘発型地すべりの素因となる層理面の力学特性の実験的解明はほとんど進展していない。今後も内陸直下型地震の発生が懸念されていることから、層理面の力学特性を把握し、それを地震時の地すべり斜面の安定性評価に反映させることが期待されている。

そこで、申請者は、層理面を含む供試体のせん断特性を実験的に解明することを目的として、まずはセメント系固化材を土に添加し、異なる固結強度を発現させた土層を貼り合わせることにより、層理面を含む供試体を人工的に作製する方法を開発した。次いで、供試体に変形を与えられるリングせん断試験装置を用いて、層理面を含む供試体の静的および動的せん断特性を調べた。本学位申請論文では、層理面を挟む上下層の強度差を種々変えた供試体に対する試験結果に基づき、層理面となる不連続面上の単調せん断特性とその影響要因（垂直応力、セメント添加量、養生時間、せん断変位速度等）を把握し、その上で動的せん断の進行に伴う層理面を含む供試体の劣化損傷プロセスを検討し、その成果を全7章でまとめている。

第1章では、地震誘発型地すべりの実態と防災上の諸課題を整理した上で、本研究の背景と目的を述べている。また、本論文における各章の内容と構成を示している。

第2章では、国内の地震誘発型地すべりの実例を示し、その特徴や発生傾向を整理している。また、土の残留強度とせん断速度依存性、セメンテーション特性を有す土のせん断特性、粘土の繰返しせん断特性など本研究に関連する既往の研究成果を整理・要約し、本研究の新規性を示している。

第3章では、本研究で用いる単調および繰返し載荷リングせん断試験装置の構造、制御・計測システム、

試験手順など申請者が確立した試験方法の全般を述べている。また、セメント系固化材を粘土に添加し、セメンテーション効果を短期間に発現させ、固結強度が異なる層を上下に貼り合わせるにより、層理面を含む供試体を作製する方法を述べている。

第4章では、層理面を含む供試体のピークおよび残留強度を適切に評価するために、非固結、固結および貼り合わせ供試体に対して実施した圧密定圧定速リングせん断試験の結果をもとに、層理面を含む供試体の静的せん断挙動とそれに及ぼす垂直応力、セメント添加量、養生時間等の影響について考察している。その結果として非固結粘土と固結粘土を貼り合わせた供試体の残留状態の内部摩擦角は非固結供試体のそれより3割低下すること、せん断中に垂直応力を段階的に変化させる試験において残留状態の内部摩擦角および粘着力は供試体のタイプや載荷方法によって異なることを明らかにしている。また、このようなせん断特性は供試体のせん断面の状態（起伏や光沢度）に起因することを示唆している。

第5章では、層理面を含む供試体のピークおよび残留強度に及ぼすせん断変位速度の影響について検討し、主要な結果として、固結供試体の場合、セメント添加量が2%までは、残留状態の応力比はせん断変位速度の増加に伴って増加すること、セメント添加量が2%を超えると、せん断変位速度の影響はほとんど現れなくなること、貼り合わせ供試体の場合、残留状態の応力比はせん断変位速度の増加とともに増加することを明らかにしている。

第6章では、繰返し載荷リングせん断試験の結果に基づき、繰返しせん断に伴う層理面を含む供試体の劣化損傷プロセスについて考察している。その際、繰返し載荷に伴うせん断剛性の低下を評価するための繰返し強度低下指数を提案し、その指数を用いて垂直応力、せん断応力振幅、過圧密比の要因の影響を評価している。いずれの要因もそれぞれ増加すると、繰返し強度低下指数は減少し、その度合いは供試体のタイプによって異なることを明らかにしている。

第7章では、以上の結果を要約し、地震誘発型地すべりの潜在的なリスクとなる層理面の力学特性について総括している。また、今後の研究課題について言及している。

公聴会における主な質問は、1) 供試体のせん断面と現場で観察されたすべり面との比較、2) この研究成果を実際の地震誘発型地すべりに適用するときの留意点、3) セメント添加量の影響とその設定範囲、4) 繰返しせん断強度の定義などであり、これらに関して質疑応答がなされた。いずれの質問に対しても申請者からの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、有効性、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下記のとおりである（関連論文：計3編）。

- 1) Suzuki, M., Nguyen, V. H., Yamamoto, T., Ring Shear Characteristics of Discontinuous Plane, Soils and Foundations, 2017年2月（印刷中）。
- 2) 鈴木素之, 井上優朋, Nguyen, V. H., 地震時に地滑りを起こす層理面の静的および動的リングせん断特性, 地盤と建設, Vol.34, No.1, pp.99-108, 2016年12月。
- 3) Suzuki, M., Hai, N. V.: Residual strength of cemented kaolin clays from ring shearing testing, Proc. of 12th International Symposium on Landslides, pp.1875-1882, 2016年6月。