

学 位 論 文 要 旨

氏 名 シュリワント ブッディ ヴィタナ

題 目 地すべり土の排水せん断強度の応力および鉱物依存性に関する研究
(STUDIES ON STRESS AND MINERALOGICAL DEPENDENCY OF DRAINED
SHEAR STRENGTH IN LANDSLIDE SOIL)

残留強度および完全軟化強度は地すべりの発生に関わる土質強度であり、前者は主に再活動型地すべりに、後者は主に初生型地すべりに関与し、両者が複合的に関与する場合もある。地すべり土の残留強度および完全軟化強度の特性を理解することは地すべり対策の実務において重要となる。本論文は、残留強度および完全軟化強度に関する3つの研究課題について検討したものである。

- 1) 粘性土の残留強度は応力履歴に依存しないとされてきた一方で、応力履歴の影響をいくらかは受けるという結果に至った研究もある。そこで、高塑性土および低塑性土について、過圧密比 (OCR=1~6) を変えた供試体を作成し、せん断挙動および残留強度に与える OCR の影響を調べた。両土試料においてせん断挙動および完全軟化強度は正規圧密状態と異なる様相を示したが、残留強度については OCR の明確な影響は認められなかった。
- 2) 地すべり土について、圧密後の試料をプレカットし、カット面を研磨した供試体の一面せん断試験と、プレカットしていない供試体のリングせん断試験を行い、得られた結果に基づいて、粘着力 (c , c_r) および内部摩擦角 (ϕ , ϕ_r) それぞれについての関係式を示した。地すべり土は、凝灰質土、泥岩、シルト岩および黄土の5つである。一面せん断試験で得られた粘着力 (c) および内部摩擦角 (ϕ) は、リングせん断試験で得られた粘着力 (c_r) および内部摩擦角 (ϕ_r) よりも大きかった。有効垂直応力 $\sigma'_n=30-150 \text{ kN/m}^2$ の範囲において、粘着力 (c , c_r) の関係式として $c_r=0.74 \cdot c - 6.69$ (決定係数 $R^2=0.949$) を、内部摩擦角 (ϕ , ϕ_r) の関係式として $\phi_r=1.09 \cdot \phi - 6.02$ ($R^2=0.928$) を得た。
- 3) 地すべり土の含有配向性粘土鉱物総量 (PLSM) は、残留強度の大きさと良好な関係にあることが知られているが、完全軟化強度との関係についての検討は行われていない。完全軟化強度は、明確なすべり面が形成されていない斜面の安定化対策の設計においては、残留強度よりもその重要度が増す。完全軟化強度と配向性粘土鉱物総量の関係を明らかにするため、地質・土質の異なる18の地すべり土について鉱物分析とリングせん断試験を行った。 $\sigma'_n=30-150 \text{ kN/m}^2$, $\sigma'_n=150-400 \text{ kN/m}^2$ および $\sigma'_n=30-400 \text{ kN/m}^2$ の有効垂直応力レベルそれぞれにおいて、 $\phi_{fs}=-0.17 \cdot \text{PLSM} + 40.05$ ($R^2=0.632$), $\phi_{fs}=-0.25 \cdot \text{PLSM} + 40.59$ ($R^2=0.783$), $\phi_{fs}=-0.22 \cdot \text{PLSM} + 40.24$ ($R^2=0.694$) の関係式を得た。

学 位 論 文 要 旨

氏 名	Shriwantha Buddhi Vithana
題 目	STUDIES ON STRESS AND MINERALOGICAL DEPENDENCY OF DRAINED SHEAR STRENGTH IN LANDSLIDE SOIL (地すべり土の排水せん断強度の応力および鉱物依存性に関する研究)

The residual shear strength concerns more with the reactivation of landslides and the fully softened strength deals more with first time slides, although there may be instances where both these parameters may be dynamic at the same time. Understanding these two basic engineering characteristics is most fundamental to landslide engineering practice. This thesis presents three separate studies of these shear strength as listed below.

- 1). The residual shear strength of clay is independent of stress history, though it has been instances in the geotechnical literature of studies that have suggested some dependence of stress history on the residual shear strength. Accordingly, the effect of artificial overconsolidation ratios (OCR) on the drained shear behaviour and residual shear strength of a high plasticity clay and a low plasticity soil has been discussed from an experimental point of view. Between the two samples, although dissimilar patterns of variation of peak shear strength in the overconsolidated state compared to the normally consolidated state was evident, significant differences in the residual shear strength attributable to overconsolidation were not found.
- 2). Based on a laboratory study of drained direct shear tests of remoulded, pre-cut and polished specimens and drained ring shear tests of uncut and remoulded specimens of slip surface materials of five landslide soils, significant correlations of the mobilized shear strength parameters, cohesion (c , c_r) and internal friction angle (ϕ , ϕ_r), are proposed. The investigated soils consisted of the slip surface material belonging to tuffaceous clay, mudstone, loess and siltstone. The effective cohesions and effective friction angles measured by the direct shear apparatus were greater than those by the ring shear apparatus. The proposed linear correlations for effective cohesion (c') and effective friction angle (ϕ') within an effective normal stress range of 30-150 kN/m² can be expressed by the following equations, respectively: $c_r = 0.74 \cdot c - 6.69$ ($R^2 = 0.949$), $\phi_r = 1.09 \cdot \phi - 6.02$ ($R^2 = 0.928$).
- 3). In spite of the fact that the association of the residual shear strength and the platy layer silicate mineral (PLSM) content of landside soils is well known, its effect on the fully softened strength has not been widely discussed in the geotechnical literature. From a design point of view, too, the use of the fully-softened shear strength may be more suitable than the residual strength for the pre-occurrence stability works involving first time slides, where a definitive slip surface has not yet developed. With the objective of replenishing this information void, a mineralogical analysis and a series of ring shear tests were performed on eighteen natural landslide soils belonging to a wide range of geologically differing localities. The significant relationships between the average fully softened strength and the PLSM content are as shown below; The correlation for $\sigma'_n = 150-400$ kN/m² is $\phi_{fs} = -0.25 \cdot \text{PLSM} + 40.59$ ($R^2 = 0.783$); The correlation for $\sigma'_n = 30-150$ kN/m² is $\phi_{fs} = -0.17 \cdot \text{PLSM} + 40.05$ ($R^2 = 0.632$) and the correlation for $\sigma'_n = 30-400$ kN/m² is $\phi_{fs} = -0.22 \cdot \text{PLSM} + 40.24$ ($R^2 = 0.694$).

学位論文審査結果の要旨

学位申請者 氏名	シュリワンタ ブッディ ヴィタナ(Shriwantha Buddhi Vithana)
審査委員	主査 琉球大学 教授 酒井一人
	副査 琉球大学 准教授 中村真也
	副査 佐賀大学 准教授 近藤文義
	副査 琉球大学 教授 井上章二
	副査 鹿児島大学 准教授 地頭菌隆
審査協力者	
題目	地すべり土の排水せん断強度の応力および鉱物依存性に関する研究 (STUDIES ON STRESS AND MINERALOGICAL DEPENDENCY OF DRAINED SHEAR STRENGTH IN LANDSLIDE SOIL)
<p>都市近郊・農村において地すべりが多発しており、甚大な被害が生じている。残留強度および完全軟化強度は、地すべりの発生・再発生に関わる土質強度であり、前者は主に再活動型地すべりに、後者は主に初生型地すべりに関与し、両者が複合的に関与する場合もある。地すべり土の残留強度および完全軟化強度の特性を理解することは地すべりの予知・予防手法の確立および適切な防止対策において重要となる。</p> <p>本研究では、まず、土質の異なる地すべり土について、過圧密比を変えた供試体のリングせん断試験を行い、せん断挙動および残留強度に与える過圧密比の影響を調べた。次に、地質・土質の異なる地すべり土について鉱物分析とリングせん断試験を行い、完全軟化強度と鉱物組成との関係を明らかにした。さらに、プレカット供試体を用いた一面せん断試験とリングせん断試験により得られた結果に基づき、粘着力および内部摩擦角それぞれについての関係を明らかにした。得られた結果は以下のように要約される。</p>	

1) 高塑性土および低塑性土について、過圧密比 (OCR=1-6) を変えた供試体を作成し、せん断挙動および残留強度に与えるOCRの影響を調べた。両土試料においてせん断挙動および完全軟化強度は正規圧密状態と異なる様相を示したが、残留強度についてはOCRの明確な影響は認められなかった。

2) 完全軟化強度と配向性粘土鉱物総量の関係を明らかにするため、地質・土質の異なる地すべり土について鉱物分析とリングせん断試験を行った。

$\sigma_n' = 30-150 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_n' = 150-400 \text{ kN/m}^2$ および $\sigma_n' = 30-400 \text{ kN/m}^2$ の有効垂直応力レベルそれぞれにおいて、 $\phi_{fs} = -0.17 \cdot \text{PLSM} + 40.05$ ($R^2 = 0.632$), $\phi_{fs} = -0.25 \cdot \text{PLSM} + 40.59$ ($R^2 = 0.783$), $\phi_{fs} = -0.22 \cdot \text{PLSM} + 40.24$ ($R^2 = 0.694$) の関係式を得た。

3) 圧密後の試料をプレカットし、カット面を研磨した供試体の一面せん断試験と、プレカットしていない供試体のリングせん断試験を行い、得られた結果に基づいて、粘着力 (c , c_r) および内部摩擦角 (ϕ , ϕ_r) それぞれについての関係式を示した。地すべり土は、凝灰質土、泥岩、シルト岩および黄土の5つである。一面せん断試験で得られた粘着力 (c) および内部摩擦角 (ϕ) は、リングせん断試験で得られた粘着力 (c_r) および内部摩擦角 (ϕ_r) よりも大きかった。有効垂直応力 $\sigma_n' = 30-150 \text{ kN/m}^2$ の範囲において、粘着力 (c , c_r) の関係式として $c_r = 0.74 \cdot c - 6.69$ (決定係数 $R^2 = 0.949$) を、内部摩擦角 (ϕ , ϕ_r) の関係式として $\phi_r = 1.09 \cdot \phi - 6.02$ ($R^2 = 0.928$) を得た。

以上のように、本研究は、地すべり土のせん断挙動および残留強度に及ぼす過圧密比の影響、完全軟化強度と鉱物学的性質との関係およびプレカット一面せん断試験によるせん断強度とリングせん断試験による残留強度との関係を明らかにしており、得られた成果は地域農業工学の発展に寄与するところが大きく、学術的に高く評価できる。したがって、本審査委員会は、本論文が博士(農学)の学位論文として十分に価値あるものと判定した。

最終試験結果の要旨

学位申請者 氏名	シュリワンタ ブッディ ヴィタナ (Shriwantha Buddhi Vithana)		
審査委員	主査	琉球大学	教授 酒井一人
	副査	琉球大学	准教授 中村真也
	副査	佐賀大学	准教授 近藤文義
	副査	琉球大学	教授 井上章二
	副査	鹿児島大学	准教授 地頭 蘭隆
審査協力者			
実施年月日	平成 24年 7月 14日		
試験方法 (該当のものを○で囲むこと。) (口答)・筆答			
<p>主査および副査は、平成24年7月14日の公開審査会において学位申請者に対して、学位申請論文の内容について説明を求め、関連事項について試問を行った。具体的には別紙のような質疑応答がなされ、いずれも満足できる回答を得ることができた。</p> <p>以上の結果から、審査委員会は申請者が博士(農学)の学位を受けるに必要な十分の学力ならびに識見を有すると認めた。</p>			

学位申請者
氏名

シュリワンタ ブッディ ヴィタナ(Shriwantha Buddhi Vithana)

【質問 1】せん断挙動と残留強度に及ぼす過圧密比の影響についての検討に際して、亀の瀬地すべりと廟湾地すべりからの採取土を用いた理由はあるか。両試料は地すべり土として何を代表するものか。

【回答 1】亀の瀬試料は粘土含有量が高く、主要鉱物がスメクタイトの高塑性土で、典型的な地すべり土と言える。一方、廟湾試料は粘土含有量が低く、シルト・砂分を約80%含有し、主要鉱物が石英と長石の低塑性土である。両試料は、地すべり土の粒度組成・鉱物組成の範囲の中で両極端の性質を有するものであるため、試験試料として採用した。

【質問 2】完全軟化強度と配向性粘土鉱物との関係において、15試料によってその関係図を作成している。これらは、地すべり土の鉱物学的性質としてどの程度の範囲のものと言えるのか。

【回答 2】検討に用いた試料は、地質・土質を異にし、配向性粘土鉱物の含有量が0%のものから約80%のものであり、一般的にみられる地すべり土のほとんどをカバーしていると言える。

【質問 3】不攪乱試料と攪乱試料の残留強度に違いはないと考えるか。

【回答 3】本研究では不攪乱試料についての検討は行っていないが、残留強度に及ぼす過圧密比の影響はほとんどないと考える。また、不攪乱試料におけるセメンテーションについても、大変位せん断後に得られる残留強度には影響がないと考えられる。今後は、不攪乱試料についても調査・実験を行いたい。

【質問 4】プレカット一面せん断試験による c とリングせん断試験による c_r との関係から得られた関係式において、 c が0のときに計算上 c_r が0以下となる。どのような範囲の c のときにこの式は活用できるのか。また、 c_r はどのような範囲が想定されるのか。

【回答 4】関係式を活用できる範囲としては、一面せん断より得られた c が約15kN/m²から約25kN/m²の範囲となる。既往の研究により、垂直応力レベルが低い場合に $c_r \neq 0$ となり、高い垂直応力レベルの場合に $c_r = 0$ となるタイプの試料の存在が示されている。これは、拘束圧が弱い低い垂直応力レベルの場合に、土粒子相互の干渉作用が活発となり、残留せん断面付近の粒子が配向しにくくなることに起因すると考えられている。一方、高い垂直応力レベルでは c_r がほとんど認められない場合が一般的である。

【質問 5】配向性粘土鉱物の分析はどの粒径で行ったか。粒径によって含有量が異なると思われる。

【回答 5】配向性粘土鉱物の分析はせん断試験に用いた425 μ m以下試料に対して行った。音波処理反復法によって425 μ m以下試料を粘土分、シルト分および砂分のそれぞれに分離し、含有する鉱物をX線回折法により同定した。回折線のピークから含有量を計算して相対含量を算出した。

【質問 6】鉱物分析結果からどのような岩石で構成された斜面において地すべりが発生しやすいと考えるか。

【回答 6】この岩石であれば発生しやすいとは一概には言えない。地すべり発生の素因のひとつが土質であり、せん断強度が直接的に関与する。せん断強度は、土の種類とその状態によって異なる。低い強度に至るような鉱物（例えばスメクタイト）を多く含有する岩石で構成される斜面の場合に不安定化が懸念されるが、すべり面の状態、地質弱面の有無、地形条件、地下水の状況等も地すべりの発生に関与する。

【質問7】馬蘭黄土，シルト岩および堆積黄土試料において，プレカット一面せん断試験で得られた ϕ とリングせん断試験で得られた ϕ_r に大きな差異が見られない理由は何か。また，このような試料についてはプレカット一面せん断試験で得られた値を安定解析に活用して良いのか。

【回答7】配向性粘土鉱物総量が少ないものでは，リングせん断試験による理想的なせん断によっても配向面が形成されないため， ϕ と ϕ_r の差が小さいと考えられる。今後さらに多くの試料について試験を実施することで，そのことについてはより明確にできると考える。解析に活用するにあたっては， c と c_r の差異が大きいことに留意する必要がある。

【質問8】プレカット一面せん断試験とリングせん断試験により得られる粘着力（ c ， c_r ）および内部摩擦角（ ϕ ， ϕ_r ）のそれぞれの関係式について，今後試験結果の追加がされた場合，粘性土や砂質土といった特性で仕分けをして関係式を求めるべきか。

【回答8】残留強度と配向性粘土鉱物の関係は良好で，本研究で用いた試料の配向性粘土鉱物総量の範囲（20%～80%）ではひとつの関係式として表現することができたため，基本的にはひとつの関係式で表現できると考える。しかし，今後地質・土質を異にする多くの試料についての試験結果を得ることで，物理的性質，鉱物学的性質等による仕分けを行う必要がある可能性もある。

【質問9】プレカット一面せん断試験結果とリングせん断試験との関係式から得られる推定値を活用する場合，現場技術者はその精度をどう確認するか。

【回答9】すべり面土の残留強度の測定は，大変位せん断が可能で高精度な測定値が得られるリングせん断試験を用いることが原則であるが，何らかの制約によってそれが困難な場合に，プレカット一面せん断試験結果から本研究で得られた関係図を活用して残留強度を推定できる。推定値の検証は，同一の地質背景を有する地すべり土のリングせん断試験による既往の結果を調査すること，地すべり安定解析の逆解析において， $c=0$ とした場合に得られる ϕ と比較すること等で行う。

【質問10】本研究の成果は地すべり対策技術にどう活用されるのか。

【回答10】合理的な地すべり対策のためには，すべり面状況を的確に把握し，すべり面で発揮される強度を評価することが重要となる。本研究は，すべり面土試料の採取方法の確立，せん断試験によらない完全軟化強度の推定手法および，より簡易な試験による残留強度の推定に対して寄与するものである。具体的には，まず，残留強度に及ぼす過圧密比の影響を明らかにすることによって，すべり面土の残留強度を把握する場合に，試料採取方法により得られる結果に大きな違いが生じないことを明らかにした。次に，崩積土地すべりや再活動型地すべりに動員される完全軟化強度と配向性粘土鉱物総量との関係を調べることによって，せん断試験によらない完全軟化強度の推定手法を提案した。さらに，プレカット供試体を用いた一面せん断試験とリングせん断試験によって得られる結果を比較検討した。両者の関係を明らかにし，より普及度の高い試験装置によって残留強度を推定できることを示した。