

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 5月 31日現在

機関番号：18001

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22780221

研究課題名（和文） 地すべり土の残留強度を決定づける物理的鉱物学的要因に関する研究

研究課題名（英文） Study on physical and mineralogical factors that affect residual strength of landslide soil

研究代表者

中村 真也（NAKAMURA SHINYA）

琉球大学・農学部・准教授

研究者番号：30336359

研究成果の概要（和文）：地質・土質特性を異にする地すべり土について、物理的鉱物学的性質および比表面積と残留強度 ϕ_r の関係を検討した。 ϕ_r は配向性粘土鉱物総量の増加に伴って減少する椅子型状曲線関係を示し、関係図は3つの領域に分けられた。 ϕ_r と比表面積の関係については、 ϕ_r は比表面積の増加につれて減少する傾向が認められた。 ϕ_r と配向性粘土鉱物総量および比表面積の良好な関係は、 ϕ_r の支配因子と発現メカニズムの解明、 ϕ_r の推定に対して重要な知見となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we examined the physico-mineralogical properties, specific surface area and residual strength of soils collected from different landslides. The plotting of residual strength parameter as a function of total mineral content formed a chair-shaped curve, based on which we classify landslide soils into three distinct groups. The residual strength parameter had a tendency to decrease as the specific surface area increased. The statistical relationship that emerges out of this analysis allows all soils examined in the present study to be plotted near the regression curve. The results conclusively show that these relationships can elucidate the controlling factors and the mechanism of residual strength, and be used for predicting the residual strength parameter of a wide range of landslide soils that differ in terms of geology, soil type, mineralogical properties and shear strength.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：残留強度，配向性鉱物，比表面積，リングせん断

1. 研究開始当初の背景

近年、豪雨の回数が増加し、それに伴って土砂災害発生件数も増加傾向にあるとの報告がある。毎年、豪雨の度に地すべりが数多

く発生し、道路、家屋、農地、用排水路、ダムなどに甚大な被害を与えている。地すべり再発防止対策およびライフライン復旧を適切かつ迅速に行うことが求められるが、地す

べり対策の設計に当たっては測定に長時間を要する土のせん断強度が不可欠であるため、災害現場からの緊急な要請に即応できないのが現状である。

大移動した地すべりの再発生には最小のせん断強度である残留強度 ϕ_r が大きく関与しており、 ϕ_r は地すべり再発生を検討するためには必要不可欠な設計強度である。 ϕ_r の測定には大変位せん断が可能なリングせん断試験装置が最適であるが、高完全な残留状態せん断面を形成させ、高精度で ϕ_r を測定するためには、緩速(0.01mm/min)でのせん断が必要条件であり、 ϕ_r が得られるまでには長時間を要する。そのため、せん断試験によらずに物理的・鉱物学的性質から ϕ_r を推定する方法が検討されている。これまでの研究において、 ϕ_r と粘土含有量、スメクタイト含有量、塑性指数等との関係は、一義的な関係が得られない場合もある。一方、配向性粘土鉱物(スメクタイト St, バーミキュライト Vt, 緑泥石 Ch, 雲母 Mc)総量との関係が良好であることが示されている。配向性粘土鉱物総量は ϕ_r の推定に有効であると考えられるが、検討試料が少なく、この関係の普遍性向上が待たれている。様々なタイプの地すべり土を収集・採取し、この関係を追究する必要がある。また、配向性粘土鉱物総量と ϕ_r の関係から、粘土鉱物と密接な関わりがある比表面積が ϕ_r 推定に有力な指標となることが期待される。配向性鉱物の分析はX線回折法によっており、測定に約半月を要するため、迅速性の点では比表面積測定(3日)に分があり、 ϕ_r との関係を見出す意義は大きい。これらの関係を明らかにすることは、 ϕ_r を決定づける因子の解明への一助となる。

2. 研究の目的

本研究では、地質・土質、物理的・鉱物学的性質およびせん断強度を異にする多くの地すべり土を収集し、鉱物分析、比表面積測定試験およびリングせん断試験を行い、配向性粘土鉱物(St, Vt, Ch, Mc)総量との関係の普遍性を高める。また、比表面積との関係について明らかにし、残留強度の支配因子について考察する。

3. 研究の方法

(1) 試料

地質および土質の異なる多種のすべり面土を、スリーブ内蔵三重管サンプラーにより採取されたすべり面土を基本とし、それが得られない場合、滑落崖に現れたすべり面より試料を採取した。試料は425 μ mフルイを通過させ、各試験に供した。

(2) 物理試験

土粒子の密度試験および液性限界・塑性限

界試験は、それぞれJIS A 1202法およびJIS A 1205法によった。粒度試験は、JIS A 1204法と音波処理反復法によった。音波処理反復法による粒度分析は、約10.0gの試料を500ml トールビーカーに撮り、7%過酸化水素水で加熱処理し、有機物を分解した。脱イオン水450mlを加え、15分間超音波処理し(45kHz, 300W)、土粒子を分散させた。1M水酸化ナトリウムをpH10に調整し、解膠させた。処理後、懸濁液を1l容量メスシリンダーへ移して定容した。ストークスの法則に従い、所定の時間静置後、サイフォンを用いて20cmの深さから粘土画分(<2 μ m)を分離した。分離した粘土画分は2lビーカーに移し、少量の3M塩化ナトリウムを加えて凝集させた。音波処理-静置-分離の操作を繰り返して粘土画分を完全に分離した。粘土画分分離後の残渣について、ストークスの法則に従い、攪拌後所定の時間静置し、サイフォンを用いて10cmの深さからシルト画分(2-20 μ m)を分離した。この操作を繰り返し、シルト画分を完全に分離した。シルト画分分離後の残渣を0.2mmフルイを用いて水中篩別し、細砂画分(20-200 μ m)および粗砂画分(200-425 μ m)に分離した。

シルト、細砂、粗砂画分は上澄み液を除去し、105 $^{\circ}$ Cで加熱乾燥後に秤量した。粘土画分は、全容積を測定し、その一定量を10ml容量遠心分離管に採取した。水、水-メタノール(1:1)、メタノール-アセトン(1:1)、アセトンで順次遠洗洗浄し、脱塩した。粘土濃度に全容積を掛けて粘土画分質量を求めた。各画分の質量から粒度組成を計算した。

(3) 鉱物分析

鉱物分析は、粒度試験で分離した画分を用いてX線回折法により同定した。粘土画分(<2 μ m)ではMg飽和グリセロール処理試料(定方位試料)のピーク強度を基に計算した。その際、スメクタイト St, 18 \AA ; 雲母 Mc, 10.0 \AA ; カオリナイト Kt と緑泥石 Ch, 7.1 \AA ; 緑泥石とバーミキュライト Vt, 14.2 \AA ; 滑石 Tc, 9.3 \AA ; 角閃石 Am, 8.4 \AA ; 石英 Qr, 4.25 \AA ; 長石 Fd, 3.19 \AA と 3.24 \AA のピークを用いた。カオリナイトと緑泥石の相対含量は、3.57 \AA と3.53 \AA のピーク強度比から割り振った。ピーク強度と含有鉱物量は1:1には対応しないので、補正係数を用いた。シルト(2-20 μ m)、細砂(20-200 μ m)および粗砂(200-425 μ m)画分では乱方位試料(シルト、細砂、粗砂をメノウの乳鉢と乳棒で粉碎後、アルミニウムホルダーに充填して調整した試料)のピーク強度を基に計算した。試料全体の鉱物組成は、各画分の含有量とその鉱物組成から計算した。その際、St, 18 \AA ; Mc, 10.0 \AA ; Kt と Ch, 7.1 \AA ; Ch と Vt, 14.2 \AA ; Tc, 9.3 \AA ; Am, 8.4 \AA ; Fd, 3.19 \AA

と 3.24Å ; クリストバライト Cr, 4.05Å ; 苦灰石 Dol, 2.89Å ; ゲータイト Ge, 4.18Å のピークを用いた。ピーク強度と鉱物含量は 1:1 に対応するとみなした。石英は 3.34Å のピーク強度を推算し (4.25Å のピーク強度を 3 倍) 含量とした。

X線回折には理学電気製の RINT2100 型 X線回折装置を使用した。CuKα 線を照射し、感電圧 40kV, 乾電流 20mA, 走査角度 3° ~ 30° 2θ (粘土画分) および 3° ~ 60° 2θ (シルト, 細砂および粗砂画分), 走査速度 2° /min の条件で行った。

(4) 比表面積試験

比表面積 SSA (m²/g) の測定は有機極性液体吸着法のエチレングリコールモノエチルエーテル (EGME) 法によった (Cater et al., 1965)。425 μm フルイ通過試料をカルシウム飽和して凍結乾燥した後, 0.35g~0.40g を秤量ビンに秤取りし, 五酸化二リン酸 P₂O₅ により真空の下で半日脱気乾燥した。乾燥後の試料に 3ml の EGME を加えて攪拌後, EGME-塩化カルシウム CaCl₂ solvate (モル比 2/1) を用いて平衡に達せしめ, 脱気-秤量を繰り返して恒量値を得た。EGME 単分子の吸着量を 2.86m²/mg として試料の SSA (m²/g) とした。

(5) 残留強度測定試験

①高精度リングせん断試験装置

リングせん断試験機は試験中せん断面が不変で, 一定の垂直応力の下で連続的に一定方向に大変位せん断が行えるので, 残留強度測定に有効である。宜保 (1994) は, Bishop et al. (1971) が開発したリングせん断試験機の問題点を大幅に改善して新型の定圧力・定体積兼用リングせん断試験機を開発した。図 2 に改良型リングせん断試験機の構造を示す。改良型リングせん断試験機の機能と特徴を以下に整理する。①回転機構の高精度化により回転盤のブレを解消, ②①により応力変動およびエッジ間からの試料漏出を防止, ③載荷部に加えて受荷部に垂直荷重検出器を取り付けたことにより, せん断面に作用する実荷重の測定が可能, ④シンプルな機械構造としたため, 操作性が向上, ⑤定体積せん断および定圧せん断が可能。

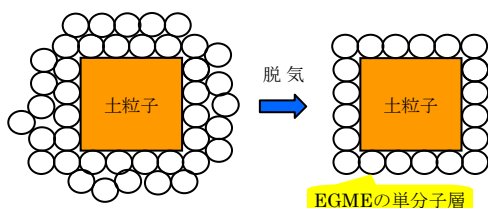


図 1 EGME 法による比表面積測定概念図

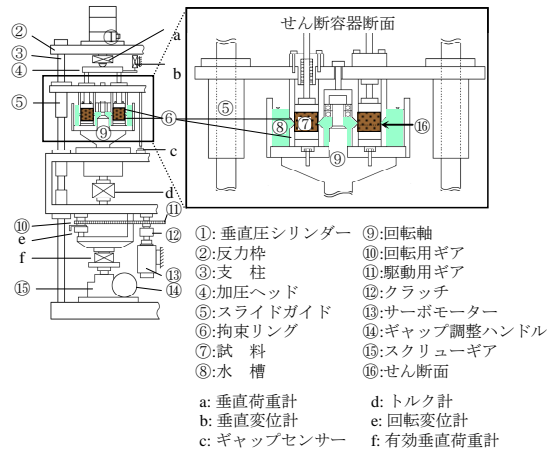


図 2 リングせん断試験機

②試験方法

425 μm フルイ通過スラリー試料について, 水浸下のせん断容器内で所定の垂直応力 σ_n' により正規圧密して供試体を作成し, 多段階載荷試験による定圧力せん断を行った。なお, 完全軟化強度および残留強度は排水強度であるので, せん断は排水条件を満たす変位速度 (0.01mm/min) とした。

4. 研究成果

(1) 物理的性質, 鉱物組成, SSA および ϕ_r

土粒子の密度 ρ_s は 2.615~2.854 の範囲であった。液性限界 WL , 塑性指数 I_p は, それぞれ 24.1%~445.0% および 7.7~206.0 の範囲であった。JIS 法により得られた 2 μm 以下粘土含有量は 4.4%~70.0% の範囲で, 音波処理反復法により得られた粘土含有量は 9.3%~100% の範囲であった。

鉱物組成は, 凝灰岩試料 (90%) や凝灰質礫質土試料 (77%) は St を多く含有し, 島尻層群泥岩試料 (St 8%, Mc 35%, Ch 11%, Qr 31%), 白亜紀頁岩試料 (St 7%, Mc 41%, Ch 2%, Qr 32%) は St をほとんど含有しないが配向性鉱物の雲母, 緑泥石と非配向の石英を有していた。一方, 砂質頁岩試料 (Qr 52%, Fd 12%, Mc 23%, Ch 13%), 赤色砂質土試料 (Qr 35%, Fd 23%, Mc 25%, Ch 9%) は非配向性の石英および長石を主とし, 配向性の雲母および緑泥石を随伴する。馬蘭黄土試料 (Qr 60%, Fd 20%) は配向性鉱物がほとんど含有されていなかった。

SSA (m²/g) は, 7.5m²/g~840.2m²/g の範囲で, 平均値は 205.1m²/g であった。

リングせん断試験によって得られた ϕ_r は, 5.3° ~ 36.0° の範囲であった。図 3 に代表的なシルト・砂質土と粘性土の $\sigma_n' = 300\text{kPa}$ における大変位リングせん断試験結果を示す。シルト・砂質土の馬蘭黄土試料は, せん断変位 $D=7\text{mm}$ でピークを示した後, $D=$

150mm~200mm の大変位を経ても残留状態の応力比が $\tau/\sigma'_n = 0.600$ と高めであった。一方、粘性土の白亜紀頁岩試料では、せん断変位 $D=5\text{mm}$ で完全軟化状態の応力比を示した後に急減し、 $D=150\text{mm}$ 付近で $\tau/\sigma'_n = 0.200$ の残留状態に至った。残留せん断面の発達・形成状況は、試料によって異なった。白亜紀頁岩試料のせん断面は、鏡肌を呈するほどに発達していた。一方、馬蘭黄土試料では、せん断面が乖離できたが、明瞭な鏡肌は形成されなかった。

図4は、両試料の残留強度と完全軟化強度を有効垂直応力に対して整理したものである。粘着力 $c=0$ として得た完全軟化強度 ϕ_{fs} および残留強度 ϕ_r は、砂質土試料でそれぞれ $\phi_{fs}=36.1^\circ$ 、 $\phi_r=31.6^\circ$ 、粘性土試料でそれぞれ $\phi_{fs}=28.2^\circ$ 、 $\phi_r=10.5^\circ$ となった。シルト・砂質土試料の ϕ_r が大きい値となったが、これは残留状態に至ってもせん断領域では粒子が相互に干渉し合って配向が起こらなかったためと推測される。

(2) ϕ_r と物理的性質との関係

図5は、 ϕ_r と、JIS法および音波処理法による粘土含有量 CF との関係を示したものである。CF は、JIS法では粘土粒子が完全に分散されず、いずれの試料においても音波処理反復法による値の方が大きかった。例えば、JIS法で34.0%であった試料が音波処理で73.2%(図5中A)、17.2%が35.3%(同B)、13.8%が18.7%(同C)となった。 ϕ_r はCFの増加に伴って低下する傾向を示したが、両者の間に一義的な関係は認められない。

図6は、 ϕ_r と液性限界 W_L との関係を示したものである。 W_L が大きくなるに伴って ϕ_r は減少し、プロットの多くは $61.3\% \leq W_L <$

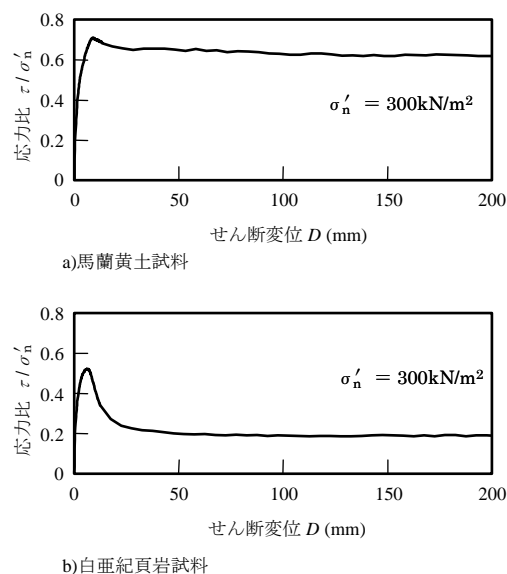


図3 代表的な試料のリングせん断試験で得られた応力-変位曲線

122.1%の領域で $8.0^\circ \leq \phi_r < 19.7^\circ$ 、 $W_L < 61.3\%$ に対して $7.1^\circ \leq \phi_r < 36.0^\circ$ とばらついている。

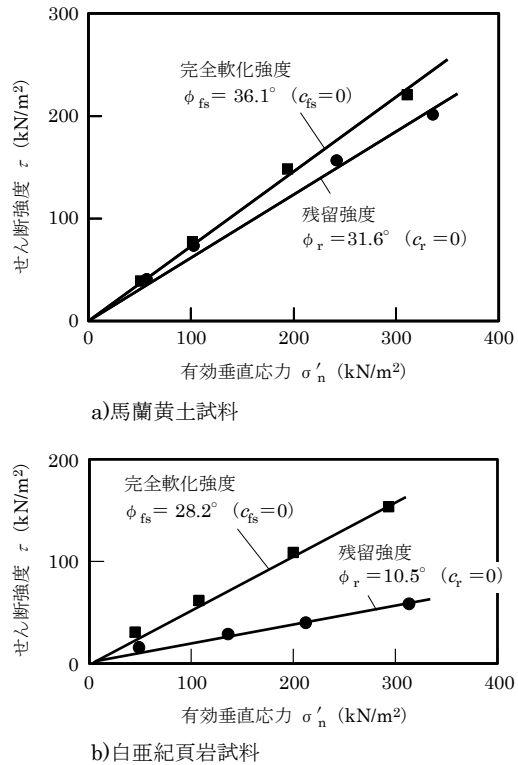


図4 代表的な試料の残留強度および完全軟化強度

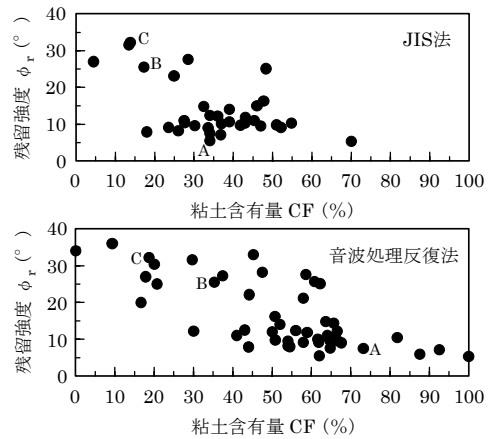


図5 残留強度 ϕ_r と $2\mu\text{m}$ 以下粘土含有量 CF の関係

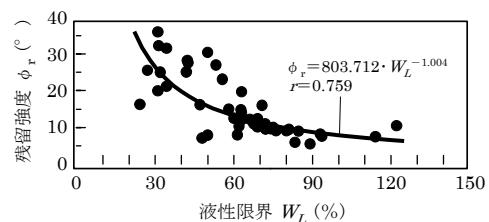


図6 残留強度 ϕ_r と液性限界 W_L の関係

図 7 に ϕ_r と塑性指数 I_p との関係を示す。 ϕ_r と I_p の関係は、 I_p が大きくなるにつれて ϕ_r が減少するが、 $34 \leq I_p$ で $5.5^\circ \leq \phi_r \leq 14.4^\circ$ となるが、 $I_p < 34$ に対して $6.0^\circ \leq \phi_r < 36.0^\circ$ とばらつきが大きい。

(3) ϕ_r と鉱物組成との関係

図 8 に ϕ_r と $425 \mu\text{m}$ 以下試料中の St 含有量 (%) の関係を示す。 ϕ_r は $30\% \leq \text{St}$ において 9.5° から 5.3° に線的に減少した。一方、 $\text{St} < 30\%$ では $7.9^\circ \leq \phi_r \leq 36.0^\circ$ の範囲に広く分布した。St 含有量 30% を境界に両者の関係式を得た。

図 9 は、 ϕ_r と $425 \mu\text{m}$ 以下試料中の配向性粘土鉱物 St, Vt, Ch, Mc の総量 (%) の関係を整理したものである。Vt は、2:1 型層状ケイ酸塩鉱物で、St と同じく薄板状かつ膨張性である。Ch と Mc も 2:1 型層状ケイ酸塩鉱物であるが、St, Vt と異なり非膨張性である。両者の関係はかなり良く、全体として椅子型状となり、総量 0%~30%, 30%~50%, 50%~100% の 3 つの領域に分けられた。総量 30%~50% の領域は、 ϕ_r の支配因子が非配向性鉱物から配向性鉱物へと交代する遷移域であり、 ϕ_r が総量の増加とともに 30° 前後から 10° 前後へと急減する。 ϕ_r と配向性粘土鉱物総量との関係は、3 つの領域でそれぞれの直線式が得られた。

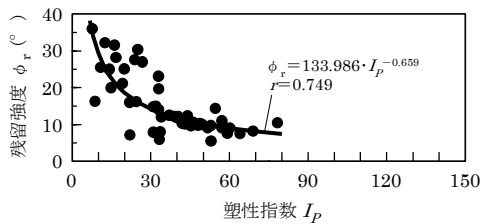


図 7 残留強度 ϕ_r と塑性指数 I_p の関係

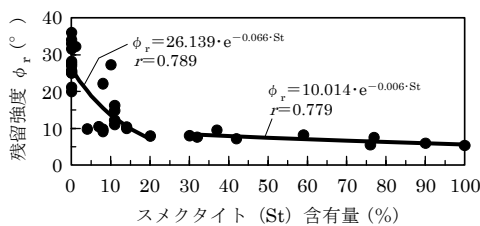


図 8 残留強度 ϕ_r と $425 \mu\text{m}$ 以下試料中のスメクタイト (St) 含有量との関係

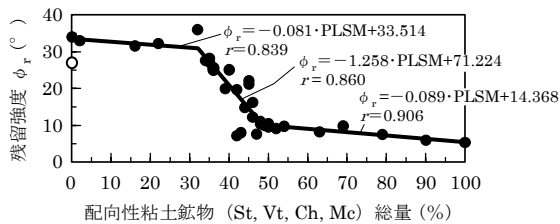


図 9 残留強度 ϕ_r と $425 \mu\text{m}$ 以下試料中の配向性粘土鉱物 PLSM (St, Vt, Ch, Mc) 総量との関係

(4) 鉱物組成と SSA との関係

図 10 は、配向性粘土鉱物総量と SSA の関係を示したものである。全体的には配向性粘土鉱物総量が増加に伴って SSA が大きくなる傾向が見られた。総量が約 35% 以下の領域では、SSA は、 $7.5 \text{m}^2/\text{g} \sim 84.5 \text{m}^2/\text{g}$ 、総量 35%~55% の領域では $16.8 \text{m}^2/\text{g} \sim 440.9 \text{m}^2/\text{g}$ 、55% 以上では $666.6 \text{m}^2/\text{g}, 840.2 \text{m}^2/\text{g}$ となった。また、総量 30%~50% は ϕ_r の支配因子が非配向性鉱物から配向性鉱物に交代する遷移域であり、SSA 値が広範囲を示した領域と概ね合致する。

(5) ϕ_r と SSA との関係

図 11 は、 ϕ_r と SSA との関係を示したものである。両者の関係は良好で、全体として ϕ_r は SSA の増加に伴って小さくなる。SSA が $200 \text{m}^2/\text{g}$ 以下の領域では、 ϕ_r が SSA の増加とともに約 $35^\circ \sim 10^\circ$ へと急激に減少する。一方、SSA が $200 \text{m}^2/\text{g}$ より大きい領域では、 ϕ_r が SSA の増加とともに約 $10^\circ \sim 5^\circ$ へ緩やかに減少する。また、蛇紋岩試料 (蛇紋石 Sp 99%, 滑石 Tc 1%) は、配向性粘土鉱物総量が 0%, ϕ_r が 27.0° である (図 9 中の中抜き)。本試料についても関係線の近傍にプロットされた (図 11 中の中抜き)。 ϕ_r と SSA の良好な関係から、 ϕ_r に関与する残留せん断面の形成されやすさ、発達の数合いにおける SSA の関与を暗示するもので、 ϕ_r の発現メカニズムを理解・解明する上で重要な知見となる。

関係式として $\phi_r = -115.328 \cdot \text{SSA}^{-0.429}$ ($r = 0.860$) が得られた。関係図においてばらつきが見られるが、短期間 (3 日間) で測定が可能のため、迅速な ϕ_r の推定にある程度有効であると言える。

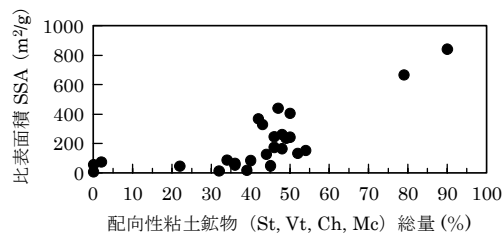


図 10 比表面積 SSA と $425 \mu\text{m}$ 以下試料中の配向性粘土鉱物 PLSM (St, Vt, Ch, Mc) 総量との関係

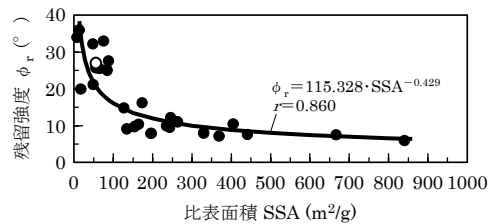


図 11 残留強度 ϕ_r と比表面積 SSA の関係

(6) ϕ_r と過圧密比の関係および異なる試験装置で得られる ϕ_r についての検討
紙面の制約により、成果の公表を論文①、②に譲る。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Shriwantha Buddhi Vithana, Shinya Nakamura, Sho Kimura and Seiichi Gibo, Effects of overconsolidation ratios on the shear strength of remoulded slip surface soils in ring shear, Engineering Geology, 査読有, 131-132, 2012, pp.29-36.
- ② Shriwantha Buddhi Vithana, Shinya Nakamura, Anshun Yoshinaga, Seiichi Gibo and Sho Kimura, Correlation of Large Displacement Drained Shear Strength of Landslide Soils Measured by Direct Shear and Ring Shear Devices, Landslides, 査読有, 2011, Published online, doi: 10.1007/s10346-011-0301-9.
[学会発表] (計 26 件)
- ① Vithana, S. B., Nakamura, S. and Yoshinaga, A., Shear Strength of Landslide Soils and its Measurement by Direct and Ring Shear Techniques, 平成 23 年度農業土木学会九州支部シンポジウム講演論文集, pp.1-13, 別府, 2011.10.19.
- ② Nakamura, S., Vithana, S. B. and Kimura, S., Effects of Artificial Overconsolidation Ratios on the Shear Behaviour and Shear Strength of Landslide Soils, 2011 Geological Society of America Annual Meeting, Minneapolis, 2011. 10. 11.
- ③ 中村真也, 木村匠, ヴィタナ ブッディ シワクタ, 江口佑人, 我如古巧, 地すべり土の残留強度に及ぼすせん断速度の影響, 平成 23 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.364-365, 福岡, 2011.9.8.
- ④ 中村真也, 木村匠, 江口佑人, ヴィタナ ブッディ シワクタ, 地質・土質特性の異なる地すべり土の残留強度と比表面積の関係, 第 50 回日本地すべり学会研究発表講演集, pp.108-109, 静岡, 2011.9.1.
- ⑤ 中村真也, 江口佑人, 木村匠, ヴィタナ ブッディ シワクタ, 宜保清一, 地すべり土の回復強度を活用した安定解析, 平成 23 年度日本地すべり学会九州支部学術講演会講演論文集, pp.43-44, 佐世保, 2011.6.9.
- ⑥ Nakamura, S., and Kimura, S., Estimation of average shear strengths along the slip surface of rainfall induced

mudstone landslides, European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna, 2011. 4. 4.

- ⑦ Vithana, S. B., Nakamura, S. and Kimura, S., Shear strength of landslide soils of different geological origins, European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna, 2011. 4. 4.
- ⑧ Eguchi, Y., Nakamura, S., Kimura, S. and Vithana, S. B., Recovered strength of landslide soils and its relationship with re-consolidation time, European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna, 2011. 4. 4.
- ⑨ Nakamura, S., and Kimura, S., Shear strength characteristics and activation of the Asato landslide, Okinawa, Japan, American Geophysical Union 2010 Fall Meeting, San Francisco, 2010. 12. 13.
- ⑩ Nakamura, S., Gibo, S., Egashira, K. and Kimura, S., Platy layer silicate minerals for controlling residual strength in landslide soils of different origins and geology, 2010 Geological Society of America Annual Meeting, Denver, 2010. 11. 1.
- ⑪ 木村匠, 中村真也, 酒井一人, 宜保清一, 地すべりの発生とすべり面の強度, 平成 22 年度農業土木学会九州支部シンポジウム講演論文集, pp.1-10, 熊本, 2010.10.20.
- ⑫ 中村真也, 木村匠, ヴィタナ ブッディ シワクタ, 宜保清一, 地すべり形態に応じたすべり面平均強度定数の合理的決定, 平成 22 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.356-357, 神戸, 2010. 8. 31.
- ⑬ 中村真也, 宜保清一, 安元純, 木村匠, ヴィタナ ブッディ シワクタ, 地すべりのすべり面平均強度定数の合理的決定, 第 49 回日本地すべり学会研究発表講演集, pp. 15-16, 那覇, 2010.7.7.
他 13 件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 真也 (NAKAMURA SHINYA)
琉球大学・農学部・准教授
研究者番号: 30336359