

すべり面研究の最近の動向

A review of recent slip surface studies

中村真也^{a)}*

Shinya NAKAMURA

Abstract

Scientists and engineers adopt various investigative approaches in the study of slip surfaces aiming at understanding landslides better to configure ways of preventing and/or mitigating such disasters. There are many studies that have focused on shear strength characteristics of slip surface soils, and similar studies still continue to develop to accommodate accuracy improvement and refinement of shear apparatus, or the utilization of newly-developed equipment. In the current context of progress in this field in terms of quantifying forming factors and micro/macro structural features of slip surface soil/zone, interesting results are obtained by technology upgrades of monitoring and sampling, and by price reduction of monitoring devices. The author reviews those recent studies and makes a statement about results, outcomes and trends while reaffirmed the concept of a "residual strength." Furthermore, the review mentions examples of research themes, which merit intensified research effort in the near future.

Key words : high quality boring core, shear test, residual strength, shear rate, preferred-oriented clay minerals

和文要旨

地すべりの理解や地すべり災害の軽減・防止に繋げるため、様々なすべり面研究がなされてきた。すべり面研究においては、すべり面土のせん断強度特性に関して特に多くの実績がある。近年においても、せん断強度測定装置の精度向上や改良、新装置で得られた結果の活用により、様々な新知見が得られている。また、観測やサンプリングの技術向上、各種観測・測定機器の低価格化等に伴い、すべり面土の成因、すべり面の構造的特徴や特定手法等に関し、興味深い研究がなされている。本論では、これらの近年の研究成果をまとめていくつかの課題を示し、「残留強度」の定義について再確認した。また、今後進展が期待される研究テーマを示した。

キーワード：高品質ボーリングコア、せん断試験、残留強度、せん断速度、配向性粘土鉱物

1. はじめに

地すべりのすべり面に関する研究は数多くある。地すべりの発生やすべり形態を決定づける主要因の一つがすべり面土のせん断強度であることから、せん断強度特性に関して特に多くの研究が行われてきた。近年においても、せん断強度測定装置の精度向上や改良、新装置（例えば、Atomic Force Microscope (Okawara *et al.*, 2010)）で得られた結果の活用や援用により、様々な新知見が得られている。また、観測やサンプリングの技術向上、各種観測・測定機器の低価格化や改良・開発、他分野の手法や知見の導入等に伴い、すべり面の形成とその発達過程、すべり面土の成因、すべり面の構造的特徴や特定手法、すべり面に転化し得る弱面や不連続面の認定等に関し、興味深い研究がなされている。すべり面研究についての近年の総説として、山崎（2011）やMesri and Huvaj-Sarihan（2012）^{*}が挙げられ、前者では、地質毎のすべり面の実態、地震時に発生した地すべりのすべり面の特徴、残留強度に与える粘土鉱物の影響等についての、後者では、測定残留強度と逆算平均強度との関係、残留強度の垂直応力依存性、残留状態からの強度回復等の研究成果の整理と見解が示されている。

本総説では、両者との重複をできるだけ避けつつ近年のすべり面研究を整理し、これからの検討に加えるべき

視点や研究課題を示した。

2. すべり面の実態に関する研究

すべり面の実態、すなわち、すべり面構造やすべり面土の物理化学性、鉱物学的特性の把握は、すべり面の位置する土・岩の種類や地質年代と併せて整理することで、同様の土・岩の分布地域におけるすべり面の探索や特定に有益な資料となる。日本地すべり学会は「すべり面－地質的特徴と構造・物性－」を発刊し、その中で、ボーリングコアや集水井でのすべり面観察、すべり面土の物性やせん断強度等についての調査・研究の結果を整理している（日本地すべり学会, 2013）。同学会の「すべり面の地質的特徴及び構造・物性等の実態に関する研究委員会」の研究成果をまとめたもので、我が国の地すべりのすべり面に関する情報が網羅的に紹介されている。

2.1 すべり面の構造

堆積岩および変成岩分布地域のすべり面の実態に関して、山崎（2011）は次のように整理している。新第三系の堆積岩層中に形成されたすべり面は鏡肌を呈し、また、地すべり滑動方向と同方向に条線を有し、すべり面粘土の層厚は1～数mmと薄い。さらに、すべり面の上下には多くの従属せん断面が見られる。三波川帯の結晶片岩層中に形成されたすべり面は、層厚が10～15cmの塩基性片岩が源岩と推定される粘土と粘土化した泥質片岩との境界に形成され、鏡肌は見られない。すべり面粘土とその上下には擦痕のある円みを帯びた礫が存在し、これ

* 連絡著者／corresponding author

a) 琉球大学農学部

Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus

〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1

※“論文”としての掲載であるが内容は総説的

と高い粘土含有量がすべり面特定の根拠となる。このように、個別の地すべりについてすべり面の実態を詳細に調べる努力が長年に亘り続けられている。

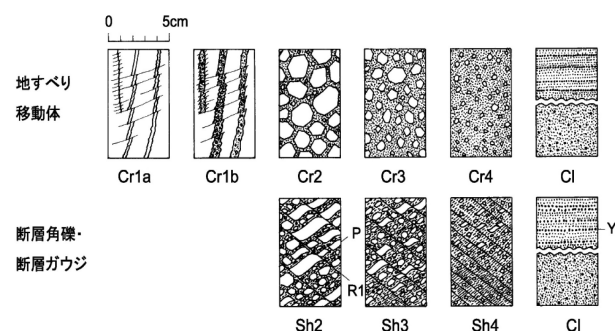
破碎岩やすべり面粘土に関する同様の研究は、気泡式ボーリングや低送水量低給圧工法等により得られる高品質ボーリングコア（以下、高品質コアと称す）を用いることにより大きな進展をみせている（例えば、鈴木ら、2008；山崎・千木良、2008；土木研究所、2013）。脇坂ら（2012）およびWakizaka（2013）は、高品質コアの詳細な観察に基づき、粒度分布、面構造をキーにして地すべり移動体およびその近隣の角礫岩を断層起源と地すべり起源に分けた。面構造が断層角礫には認められ、すべり面には認められないことを識別の基準の一つとしている。さらに、破碎度を区分して破碎度ごとの岩石の分布位置および頻度を指標として地すべり移動体の領域を推定することを試みている（図－1）。地すべり移動体の領域推定においては、面構造が認められない断層角礫や面構造を有するすべり面もあることから、破碎がさほど進行していないCr2やCr3に区分される破碎岩あるいは土の分布位置と頻度を指標とすべきとした。木下ら（2013a）は、結晶片岩地すべりの高品質コアについて、その物理化学性、鉱物学的特性を調べ、すべり面判別に有効な指標について検討している。すべり面付近では砂粒子の円摩度が上昇し、砂画分中の石英粒子量が増加すること、塩基性片岩と泥質片岩の岩種境界のすべり面では細粒分の増加と帯磁率の上昇が認められること、この境界において複合面構造が確認されたこと、さらに、すべり面形成場の把握に岩塊占有率およびエコーチップ反発度が有効であることを示した。

多数の不連続面を有する破碎岩や断層破碎帯の分布する地域においては、すべり面や移動体の判定が困難である場合も少なくない。ここに示した研究成果を鑑みると、高品質コアの詳細な観察により地すべり移動体領域とすべり面を推定し、含有される礫や砂粒子の円摩度を指標として併用することで、多くの場合ですべり面のより正確な特定ができそうである。岩塊占有率、エコーチップ

反発度については、脇坂らの破碎度区分（図－1）のCr2とSh2,あるいはCr3とSh3等の判別は困難と思われるが、他の指標との併用による活用は十分に考えられる。ポケット型帯磁率計によって測定される帯磁率（田中・野村、2006）は、岩や土の自然残留磁化に当たるものと考えられる。これは、岩石形成時の地磁気起因する初生磁化成分とその後の様々な磁場遍歴による二次磁化成分からなり、磁性鉱物の種類に変化がない場合、磁性鉱物の量変化を反映する指標となる（楠ら、2014）。帯磁率は、鉱物の種類によって異なり、磁性鉱物粒子の形状や配列を反映した異方性を示す。地層内において帯磁率の相対的な変化を検知し、その部位の破碎、風化、すべり面における粘土や面の生成といった物理的鉱物学的状況や化学性と共に評価することで、その相対変化の意味を明らかにできる可能性がある。ポケット型帯磁率計によるすべり面判定は、現時点では活用段階にあるとは言えないが、迅速性と利便性を考えると、この研究の今後の進展に対する期待は大きい。

2.2 すべり面土の物理化学的・鉱物学的性質

山崎（2011）は、御荷鉾帯の地すべりのすべり面土にはクロライトと微少のス멕タイトが含有されるとし、宮原ら（2005）は、秩父帯の地すべりから採取された破碎粘板岩にはイライトとクロライトが含有されるもののス멕タイトの出現は稀であると報告している。増山（2012）は、飛騨変成岩類に狭在する石灰岩を基盤とする地すべりのすべり面土の含有粘土鉱物がイライト／ス멕タイト混合層鉱物やカオリナイトであることを示した。これらの粘土鉱物を有する土層が石灰岩中に存在していたのかあるいは異種岩体から供給されたのか、調査の進展が待たれる。前田ら（2014）は、切土のり面で発生した土砂地すべりにおいて、コア観察、N値測定および鉱物分析を行い、熱水変質帯の鉱物組み合わせが、脈中性帯のカリ長石－イライト垂帯、カリ長石－イライト／ス멕タイト混合層鉱物垂帯およびイライト帯に区分されるとし、鉱物組み合わせがすべり面の位置推定をサポートする一例を示している。大河原ら（2012）は、採取土のス멕タイトの定量分析と改良装置による膨潤試験結果からすべり面を判定する手法を示している。これらの結果は、すべり面を確認できない場合に行われている、N値、粒度組成あるいはコア観察に拠るすべり面推定に、鉱物組み合わせや採取土の物理化学性が根拠として加わる可能性を示すものである。なお、前田（2014）は「基岩地質に基づく新たな地すべり分類」を提案し、続成帯地すべり、変成帯地すべり、火成岩地すべりおよび熱水変質帯地すべりの4つに大別することを試みている。また、広域変成帯分布地域のすべり面土の鉱物分析を行い、緑色岩地すべりのすべり面粘土と地すべり地近隣で採取された断層ガウジの類似性を示し、すべり面粘土が断層ガウジ起源である可能性を指摘した（前田ら、2015）。一方で、山根ら（2013）はすべり面粘土と断層



図－1 地すべり移動体および断層岩類の識別と破碎度区分（脇坂、2012）

Fig. 1 Classification of crushed rocks of landslide origin (Cr 1 a to Cl) and fault origin (Sh 2 to Cl). (Wakizaka, 2012)

ガウジを識別できた例を示し、すべり面認定において微細構造の観察によるせん断センスの把握が有効であることを報告している。

2.3 地震地すべりのすべり面

地震地すべりについては、国内外の地震地すべり事例、地形・地質特性、力学的特徴、安定解析等に関する調査・研究成果を整理した「地震地すべり」(日本地すべり学会, 2012)がある。地震地すべりのすべり面に関して、火砕物の風化、マール、鋭敏粘土や液状化、堆積岩の層理、風化、山体重力変形、特殊な地質構造等、様々な観点から整理が試みられている。近年の成果として、千木良ら(2012)は、2011年東北地方太平洋沖地震により発生した降下火砕物の崩壊性地すべり4事例について調べ、すべり面が古土壤上面付近に形成され条線が認められたこと、古土壤は高含水かつ軟弱であり、含有鉱物は石英、ハロイサイト、クリストバライトであったことを報告している。また、斜面に平行な成層構造(流れ盤)と斜面下方部における土層の切断が地震地すべり発生の一因になる可能性を指摘している。この研究では、すべり面が形成された古土壤は粘土質であったと述べており(粒度組成は不明)、細粒土(シルト層)は地震では破壊しにくく高速の運動に転化しないとされたこれまでの知見に(例えば、佐々ら, 2007)、新たな一面を加えた。木下ら(2013b)は地震地すべりはすべり面平均傾斜角が大きいことを示し、木下ら(2013c)においてはすべり面せん断試験(眞弓, 2003)を行って、地震時にすべり面において動員されるせん断強度の発現形態についての考察も加えている。高速せん断時の強度低下はせん断ゾーンの含水比の一時的な増加によるものとし、地震慣性力による層面(酸化フロント)のズレによる吸水が強度低下をもたらしたと、地震時の地すべり発生に至ったと結論付けている。また、木下ら(2015)は、降雨・融雪および地震により発生した地すべりのすべり面土の物性とせん断強度特性の比較を行い、前者を誘因とする地すべりのすべり面土は後者のそれと比較して高塑性で粘土含有量が多いことを示した。この報告においても、地震で発生した地すべりのすべり面土の細粒分(粘土およびシルト画分)含有量が50%を超える場合があることが示されている。Schulz and Wang (2014)は、オレゴン州太平洋沿岸巨大地すべりを対象として、地震時応力を作用させたリングせん断試験を行って地震動と再活動の関係を検討している。この研究では、地すべりの地震時移動量の事前評価を試みており、巨大地震の際に数mから数十mの移動を伴う壊滅的な再滑動が起こることを予測している。既知の地すべりについて、地震時の安定度と移動量の評価・予測ができるようになれば、予防的対策の実施が可能になる。地震地すべりの被害の軽減に繋がる成果である。

3. すべり面土のせん断強度特性に関する研究

3.1 残留強度

残留強度 ϕ_r ($c_r = 0 \text{ kN/m}^2$)とすべり面土(あるいは地すべり土)の物理的・鉱物学的因子との関係については、Skempton (1964)がロンドン粘土等の ϕ_r は $< 2 \mu\text{m}$ 粘土含有量CFの増加に伴って減少することがSkempton (1964)によって示されて以来、塑性指数 I_p 、液性限界 w_L 、CF中のスメクタイトSt含有量、全試料中のSt含量等との関係についての研究がなされてきた(例えば、Lupini *et al.*, 1981; 玉田, 1984; Skempton, 1985; Gibo *et al.*, 1987; Tiwari and Marui, 2005; Stark *et al.*, 2005)。近年、配向性粘土鉱物(St, パーミキュライトVt, 緑泥石Ch, 雲母Mc)総量PLSMと ϕ_r の良好な相関が明らかになっている(Nakamura *et al.*, 2010)。これは、Gibo *et al.* (1987)、矢田部ら(1991)、宜保ら(1992)ほかに引き続き研究深化の成果であり(宜保ら, 2000, 2003; 中村, 2001; Nakamura *et al.*, 2008)、PLSMにより地質・土質を異にする各種のすべり面土の ϕ_r を統一的に評価できる(図-2)。但し、 ϕ_r 値は間隙水の塩類濃度により変わることが分かっている(近年では、Di Maio *et al.*, 2015)、この関係はある程度の幅を持ったものとなることが予想される。また、St, Vt, ChおよびMcの強度低減への貢献度はそれぞれで異なることは容易に想像され、それらを明確にすることでより精度良く ϕ_r を評価できると考えるが、その解明には困難を伴う。純粋粘土鉱物やそれらの混合物の ϕ_r 研究や粘土鉱物の接触・強度発現に関する研究は、各粘土鉱物の ϕ_r 低減への貢献の様相解明に繋がる可能性がある(近年では、Hisatsune *et al.*, 2009; Okawara *et al.*, 2010; Dimitrova and Yanful, 2012)。また、PLSMと比表面積SSAには相関があるとの考えから、 ϕ_r とSSAとの関係についての検討も行われている(中村ら, 2011a)。

ϕ_r に及ぼす過圧密度OCRの影響の有無については相反する見解があったが(例えば、Bishop *et al.*, 1971; Leroueil, 2001)、Vithana *et al.* (2012)は、2種の地すべり土(PLSM = 12および89)についての検討により、OCR =

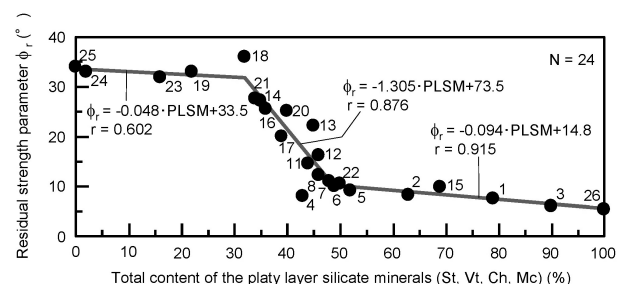


図-2 地すべり土425 μm 以下試料の残留強度と配向性粘土鉱物総量の関係 (Nakamura *et al.*, 2010)

Fig. 2 Variation in the residual strength parameter ϕ_r as a function of total content of layer silicate minerals prone to preferred orientation in the sub-425- μm soil fraction. (Nakamura *et al.*, 2010)

6 以下では ϕ_c への影響は認められないことを示している。

3.2 セン断強度の速度依存性

地すべりや崩壊の移動土砂が長距離かつ高速で移動する場合がある。そのメカニズム解明の試みの中で、せん断強度の速度依存性についての研究が多く行われている(例えば、佐々・福岡, 1993; 佐々・李, 1993; Tika *et al.*, 1996; Fukuoka *et al.*, 2007)。木下ら (2015) は、降雨・融雪と地震により発生した地すべりのすべり面土について、せん断速度 v の違い(0.005~0.02, 0.1~500mm/min)によるせん断強度の変化を調べ、前者を誘因とする地すべりのすべり面土は高塑性の粘性土が多くせん断強度の速度依存性は正であること(速度増に伴ってせん断強度が増加する)、後者は低塑性かつ速度依存性が負であることを示し、速度依存性は粒度組成とコンシステンシー特性と関係が深いとした。また、ニゴリ沢地すべりに関して同様の試験を行い、高速せん断時の強度低下の原因は、せん断ゾーンの含水比が一時的に増加して軟質化することが主であるとした(木下ら, 2013c)。Li *et al.* (2013) は低塑性土($I_p=12\sim36$)について高速リングせん断試験($v=6, 60$ および600mm/min)を行い、せん断強度の変化の様相が3パターンに分けられることを示した。この研究では、低塑性土においても正の速度効果が認められている。

一方で、高速滑動に至った地すべりにおいても、その滑動初期には比較的低速な状態を経ると考えられることから、排水せん断状態から非排水状態に移り変わる“低速度域”でのせん断強度の速度依存性を知ることは重要である。鈴木 (2005) は3種の地すべり土($I_p=19.9, 28.6$ および61.4)についてリングせん断($v=0.02\sim2$ mm/min)を行い、詳細な検討を加えて活性度の高い試料ほど正の速度効果が大きいことを見いだした。Kimura *et al.* (2014b) は、15の地すべり土($I_p=10.8\sim78.4$)の低速度域($v=0.01$ および0.5mm/min)の速度の違いによるせん断応力 τ 変化と、 ϕ の評価により垂直応力との関係を調べ、 ϕ の差異は低い垂直応力レベルで最大4°程度と比較的大きくなることを示す一方、 ϕ の変化の様相とCF, w_L , I_p との間に定まった傾向は見いだせないことを報告している。Chen and Liu (2014) の研究では、 $v=0.02$ および0.1mm/minのリングせん断試験で得られた地すべり土($I_p=12.2$)の τ/σ 値にほとんど差がなかった。

これらの研究成果から、速度効果はせん断速度や垂直応力によっても変化することが伺え、物理的鉱物学的性質と合わせてせん断モードの変化の説明・整理を試みるのが次の研究に求められると考える。

3.3 残留状態からの強度の回復

残留状態に至ったせん断面における強度の回復について、リングせん断試験機を使用して調べた研究が公表されている(中村・宜保, 2000; 中村ら, 2000; 中村, 2001; Gibo *et al.*, 2002; Angeli *et al.*, 2004; Stark *et al.*, 2005)。

中村らは、強度の回復は、低い垂直応力レベルで顕著で、残留せん断面の発達が良い地すべり土では認められないと結論付けた(例えば、中村, 2001; 中村ら, 2012)。一方、Stark *et al.* (2005) は、高塑性土においても回復が認められ、その程度は再圧密時間が長いほど大きくなることを示し、その後再圧密期間を300日まで設定した意欲的な研究(後に取り下げ)でも同様の結果が得られたとした。この研究で認められた高塑性土における再せん断時のピークの発現は、残留せん断面を形成した供試体が過圧密状態にあったため、せん断停止時間に応じてその影響の顕在化が徐々に大きくなったことに起因するものと考えられる。Mesri and Huvaj-Sarihan (2012) も同様の見解を示しており、加えて、実験に用いたBromhead型リングせん断試験機のせん断部の構造にも原因を求めている。Bhat *et al.* (2013) は3種の地すべり土($I_p=13.4, 16.3$ および37.5)の回復強度を測定し、再圧密期間(3日~30日)が長いほど強度の回復が大きくなることを報告している。

Mesri and Huvaj-Sarihan (2012) は、また、同報において、強度回復について懐疑的な見方を示している。これは、“残留強度”の定義の相違に起因するものであり、今後の回復強度研究の深化の上で重要なポイントであるので、ここに整理しておきたい。

Mesri and Huvaj-Sarihan (2012) はMesri and Shahien (2003) を引用して“残留強度”を次のように定義している。

“...drained residual strength represents the face-to-face alignment and interaction of plate-shaped clay particles that are predominantly oriented parallel to the direction of shearing to the maximum extent possible for that composition.” (Mesri and Huvaj-Sarihan, 2012)

残留強度は、薄板状粘土鉱物が面と面の配列をなし、粘土鉱物の相互作用が発揮されたものであるとし、続いてスメクタイトやバーミキュライトを含有しない地すべり土試料について次のように述べ、このような試料では、プレート状の粘土鉱物がせん断方向に十分に配向するような残留状態に至ることは困難であるとした。

“...the Xuechengzhen mineralogical composition, residual condition defined by plate-shaped particles highly oriented in the direction of shear, is hardly applicable.” (Mesri and Huvaj-Sarihan, 2012)

この記述は、Skempton (1964) の次の定義に基づく解釈と考えられる。

“The residual shear strength of a landslide soil is defined as the lowest strength recorded along the slip plane, where the plate shaped particles are reoriented parallel to the direction of shear with sufficiently large displacements.” (Skempton, 1964)

一方、地盤工学会 (2006) においては、“残留強さ(残

留強度)”は次のように説明されている。

“排水せん断あるいは定圧せん断においてせん断抵抗がピーク値をこえ、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達した時の値をいう。”(地盤工学会, 2006)

これまで多種の地すべり土試料についてリングせん断試験を行ってきた結果を尊重すると、粘性土や砂質土の残留強度値は大きく異なり、その強度低減のメカニズムにも違いがあるものの、多くの地すべり土において、ピーク値よりも小さい、究極的な定常せん断状態に達した時の最小の排水せん断強度が存在することは自明である。スメクタイトやバーミキュライトといった薄板状の粘土鉱物を含有していない地すべり土においても、せん断に伴うせん断面粒子の配列やせん断に応じた抵抗の最小化により、明らかな強度低下を示すことは少なくなく、そのような地すべり土においては、再圧密によって強度が回復することは十分に考えられる。地盤工学会(2006)の“残留強度”の定義が最も適切であると考えられ、著者らは、薄板状粘土鉱物を多く含有する地すべり土に限らず、多種の地すべり土においても「残留強度」が存在することを次のように明示した(Vithana *et al.*, 2012)。

“It should be noted that residual shear strength measured in clay soils and sands quantitatively differ because the residual shear strength of sand is identical to its critical state strength, whereas the residual shear strength of clay is lower than its critical state strength. Therefore, the term ‘residual shear strength’ may be associated with various types of soils, but residual conditions achieved in each of them would differ for various reasons.”(Vithana *et al.*, 2012)

回復強度の発現はシルト・砂を主とする地すべり土のせん断ゾーンの再圧密効果によるものであるとした先行研究では、せん断ゾーンの厚さと透水性を鑑みると、再圧密効果が顕在化する期間はさほど長くない、さらにある程度の再圧密期間からはその効果は変化しないと考えられていた(中村・宜保, 2000)。しかしながら、Bhat *et al.*(2013)の研究では再圧密期間15日と30日で回復度に違いが認められており、これが何に起因するのか興味深いところである。

3.4 完全軟化強度

土の物理的・鉱物学的性質に応じて決まるせん断強度を“定数”とすると、“せん断強度定数”と言えるのは ϕ_c と完全軟化強度 ϕ_{is} である。不攪乱ピーク強度は、過圧密度、亀裂の多寡や傾き、膠結作用の有無等の状態を反映した強度であり、“せん断強度定数”とは呼びにくい。同様の状態にある土・岩については、その代表値としてのせん断強度を得ることができるので、このようなせん断強度について本総説では“せん断強度パラメータ”と記す。 ϕ_{is} は、正規圧密状態のピーク強度と同等と考えられており、土の物理的・鉱物学的性質によりその値が決まる。 ϕ_{is} は、風化によって弱化する土・岩の原位置

における最小ピーク強度であり、斜面安定度評価での活用が期待される。近年、完全軟化強度と含有鉱物等との関係、三軸圧縮試験装置およびリングせん断試験装置で得られる ϕ_{is} の差異について研究が公表されている(Stark *et al.*, 2005; Tiwari and Ajmera, 2011; Kimura *et al.*, 2015b)。

4. 測定せん断強度の安定解析(極限平衡法)への適用に関する研究

測定せん断強度を用いた安全率 F_s の順算については、すべり面(またはゾーン)の状態を三次元的に詳細に調べ、すべり面(ゾーン)の土・岩を採取してせん断強度パラメータを得て代表性が損なわれない領域にそれぞれのパラメータを適用することができれば、現実と大きく変わらない結果(F_s)を得ることも可能である(すべり面における地下水の影響や有効垂直応力レベルも適切に反映させる)。しかしながら、比較的規模の小さい地すべりや平面形状が左右対称の地すべりでは、詳細調査の必要性への疑問や経済的な制約からすべり面の状態を三次元的かつ精密に調査することは少なく、多くの場合、すべり面の位置や形状は必要最小限の調査から設定されることになる。また、安定解析式(極限平衡法)も様々な仮定を抱えていることもあり、順算によって得る F_s は慎重に取り扱う必要がある。

すべり面の平均強度と室内試験で得られたせん断強度との関係については、滑動・停止を繰り返す再活動型地すべりにおいては ϕ_c が調和的であるとの報告が近年もなされている(中村ら, 2011b; Di Maio and Vassallo, 2011; Mesri and Huvaj-Sarihan, 2012)。一方、 ϕ_c 適用では安全率 $F_s \ll 1.0$ となるとの報告も多い。このような場合のすべり面の強度の考え方や平均強度の決定については、宜保ら(1981)の先駆的な研究があり、測定せん断強度の活用に応じた考え方の整理が近年も進められている(地すべり学会東北支部, 2001; 山崎, 2011)。極限解析法におけるすべり面平均強度(c' および ϕ')は、安全率を仮定できる地すべりにおいて、すべり面における抵抗力を何らかの手法を用いて c 成分の分担力と ϕ 成分のそれとに分けて対策効果を算定するために設定するものである。宜保ら(1981)以降の一連の研究(木村ら, 2010; 中村ら, 2011b; Nakamura, 2012)では、実務的(社会的)意義に重点を置き、数少ないすべり面採取試料のせん断強度をうまく活用して、すべり面の状況をできるだけ反映させた c' および ϕ' を得る手法を追求している。

滑動・停止を繰り返す再活動型地すべりに発展する前の地すべりには、斜面上方部ではせん断破壊が進行してすべり面が形成され、斜面下方部では圧縮性の変形のみで留まっているものも多くみられる。このような地すべりでは、上方部の主動域のすべり面の強度と、下方部の抵抗域の岩の圧縮強度が同時に動員されている。このよ

うな地すべりにおいて、実務的な視点から地すべり防止対策を考えるためには、すべり面の強度と抵抗域の圧縮強度を同時に勘案して対策量を定めることが合理的であり、そのひとつの手法としてすべり面平均強度への反映が提案されている（宜保ら, 1981；中村ら, 2004, 2011b）。

ϕ_r は、上下リング（せん断箱）間のギャップを $10\mu\text{m}$ 程度で一定に制御できる精密な条件下での理想的な要素試験（主としてリングせん断試験）で、せん断面全域が残留状態となることで得られる、すべり面土の最小排水強度である。 ϕ_r が調和的とされる再活動型地すべりにおいても、すべり面全域が要素試験で達成されるような理想的な残留せん断状態に至ったとしても、有効土かぶり圧（有効垂直応力）レベルによって残留せん断面の発達状況が異なる場合もあることから、 ϕ_r の単一適用により順算で求めた F_s は、三次元解析でも基本的には小さい値となるだろう（実務において、要素試験で得た残留強度を便宜的に適用することはあり得るし、それが問題とならない場合もある）。このことは、順算、逆算のいずれにおいても、要素試験 ϕ_r の利活用にあたって共通的に認識しておくべきことと考える。このことを考えると、複数のせん断強度定数を活用した逆算法による平均強度決定は、再活動型地すべりにおいても有用であり、この手法の適用範囲となる。極限解析式によって $c - \tan\phi$ 関係は異なり $\tan\phi$ 切片値が変わるが、地すべりやすべり面の形状を考慮した極限解析の適切な採用と、すべり面、地下水面（間隙水圧）および土塊重量の設定、すべり面土採取および残留強度測定 of 適切性が担保されれば、 $\tan\phi$ 切片は基本的に ϕ_r より大きくなり、平均強度を得ることができるだろう。

すべり面において発揮されるせん断強度を求めるために、不攪乱のすべり面そのものを供試体とするすべり面せん断試験が行われている。この試験は、室内試験用のすべり面土が確保できないような地すべりにおいて特に有効である。眞弓ら（2003）は、地質を異にする多種のすべり面について、数多くのすべり面せん断試験を行い、様々な地質のすべり面せん断抵抗角、それらとリングせん断試験で得られた ϕ_r との比較等、学術的価値の高い知見を提供している。この研究では、すべり面せん断試験結果から導出されるせん断強度パラメータを論じるにあたり、粘着力 $c \neq 0$ とした上で、せん断抵抗角 ϕ に着目して論を進めている。せん断に抗している応力は τ であり、 ϕ のみでせん断強度パラメータを評価するのは不足があるように思える。特に、鏡肌を呈するほどに発達しているすべり面の定常せん断状態においては、 $c \neq 0$ と考えられてきたため、 $c \neq 0$ として得られる ϕ 値の理論的な解釈が難しい。一方で、要素試験で得た異なる有効垂直応力下での τ 値を機械的に線形回帰（最小二乗法）すると、 $c \neq 0$ とならないことも少なくなく、残留状態せん断面における c については検討の余地を残している。眞弓ら（2003）は、リングせん断試験結果も $c \neq 0$ とし

て整理し、相対的な傾向からすべり面強度に関する結論を適切に導いている。

原位置におけるすべり面のせん断試験は、実際のすべり面において発揮されているせん断強度を把握しようと試みる重要なものであり、その試験データは貴重な知見をもたらす。一方で、すべり面せん断試験結果について認識しておくべき点は、得られるすべり面せん断抵抗角は、厳密に言えば、すべり面が採取された直前の応力状態（有効垂直応力）を再現してせん断試験を行った場合に不攪乱供試体のそれとして評価できるということである。残留せん断面の発達程度は、有効垂直応力レベルに応じて異なる（例えば、Lupini *et al.*, 1981；Hawkins and Privett, 1985）。直前のせん断変位時にすべり面に作用していた有効垂直応力に比べ、試験時（せん断時）の設定有効垂直応力が小さい場合と大きい場合に分け、それぞれの留意点を示す。試験時の設定有効垂直応力が直前まで作用していた原位置の有効垂直応力より小さい場合、正規圧密状態で形成されるよりも発達したすべり面についての直接せん断となるので、すべり面強度を低めに評価してしまう可能性がある。ただし、すべり面が鏡肌を呈するような粒度・粘土鉱物組成を有し、すべり面が形成された際の有効垂直応力よりも低い有効垂直応力レベル下でのせん断であれば、このことはさほど問題にならないだろう。このような土質の地すべり土では、低い有効垂直応力レベルでも発達した残留せん断面が形成されることが知られており、すべり面せん断試験により得られるせん断強度パラメータを不攪乱状態すべり面のそれとしても支障はない。設定有効垂直応力が大きい場合、正規圧密条件下でのせん断面再構築となって残留せん断面形成にある程度のせん断変位を要する場合がある。7 mm程度の一方向せん断や繰り返しせん断では究極的な残留せん断面形成が難しいこともあり得ると考える（これは、リングせん断および一面せん断（繰返しせん断）により得られたせん断応力測定値の比較研究（例えば、矢田部ら（1996）、鈴木ら（2003））からの推測であり、せん断面そのものの平滑度や配向度に基づく見解ではない）。直前の実すべり面せん断時の有効垂直応力と、試験時のそれとの差に起因する影響の大小は、すべり面土の物理的・鉱物学的性質によって異なると推察され問題のない場合もあると考えられるものの、すべり面せん断試験で得られる強度の評価に当たっては、これらのことを認識しておくべきであろう。

また、当然のことだが、すべり面試料についての各種せん断試験結果は、試料採取地点のすべり面土のせん断抵抗角であり、せん断強度の活用においては、試料の代表性とせん断強度定数・パラメータの適用性を慎重に取り扱うことが求められる。

5. 今後の積極的な取り組みが期待される研究テーマ

本総説で紹介したすべり面研究のテーマは多岐に亘る

が、そのいずれも学術的あるいは社会的な意義を礎に科学の進歩に貢献しようとするものであり、これまでの研究とその成果を尊重・継承してさらなる蓄積・深化の試みがなされることが期待される。これらに加え、今後の積極的な取り組みが期待される研究テーマについて私見を述べる。

面的（線的）なすべり面が形成される前の各段階における岩石あるいは土の構造と、すべり面形成に至るまでのその変遷を明らかにするための研究がまず挙げられる。高品質コアの観察、物理的鉱物学的性質、化学的性質および帯磁率等の把握により、すべり面形成に至る岩石・土の構造や物理化学性の変化を明らかにできれば、すべり面の形成が予測されるゾーンの特定が可能になり、地すべり・崩壊の初生域を決めることができるようになる。風化や緩み領域が移動体となるような場合は、初生域推定に弾性波探査も有望だろう。すべり面形成域の岩石・土の状態を明らかにすることは、地すべり・崩壊の発生前対策をより適切かつ合理的に考えることの礎となり、斜面災害の軽減・防止に繋がる。

地すべり・崩壊の土砂が流動化して比較的長距離を移動し、土砂災害の被害が大きくなることは珍しくない。減災・防災の観点から、地すべり・崩壊土砂の移動距離や範囲を予測する手法の確立や予測精度を高める努力が続けられており、数値解析が有力なツールとして考えられる（若井・吉松, 2013）。弾塑性体から流動体となる移動土砂の状態の遷移に伴う物性値の変化に関して、数値解析の要求に応える研究の推進が期待される。

すべり面研究のこれまでの成果や技術が、他分野において応用される例も見られている（例えば、Dewhurst *et al.* (1996) ; Okada *et al.* (2004)）。Zhang and Tullis (1998) および Zhang *et al.* (1999, 2001) は深部断層を、Kimura *et al.* (2014a, 2015a) はメタンハイドレート資源開発領域における貯留層近傍の断層を対象として、断層の状況を高圧リングせん断試験により再現し、せん断面（あるいは粒子破碎を受けたせん断層）に直交または水平方向の透水性について検討・評価している。また、断層の形成・発達（例えば、Torabi *et al.*, 2007 ; Hadizadeh *et al.*, 2010）や杭先端部での砂の粒子破碎の評価（例えば、Yang *et al.*, 2010）に対してもリングせん断試験装置が用いられている。このような取り組みは、斬新なアプローチを生み出す素地となり、すべり面研究の新たな展開に繋がるものと考えられる。関連研究の情報に関心を寄せ、すべり面研究に活かす努力が求められよう。

6. あとがき

地すべり学会の良さは、地すべり・崩壊・土石流等の斜面下方への岩石・土砂の移動現象（広義の地すべり）について、様々な見方や考え方を持つ分野の異なる研究者や技術者がその本質を得ようと多様なアプローチをしているところに、政策決定者や研究成果事業者（主に企

業）が関わって社会への貢献や展開を目指すところにあると考える。それぞれの立ち位置において、様々な前提条件の下に研究が進められている。すべり面研究の深化や新たな展開を目指す上で私たちが成すべきことは、他者の研究成果について、前提条件をしっかりと理解してその知見をみつめ、自らの研究の深化・展開に資する点を見出すことである。このためには他者と自らの「視座」を常に意識することが重要になる。宮野（2015）は、さまざまな目線で研究対象を見るということを「多視的」という言葉で表現（定義）し、本質探索にはこれが欠かせないとした。これは、特定の点をさまざまな方向からみる「多角的」とは異なるもので、すでにある何かを検討するのではなく、そこに何があるのかを検討することであるとし、さまざまな視座、視点、視野を組み合わせることで思考すべきと説いている。地すべり学会については、研究対象領域、規模、構成会員種別からみて、「多視的取り組みにより地すべり（広義）に関する知が磨かれ、知が発展する場」として最も適切な会であると考えられる。日本地すべり学会誌や研究発表会等においてより活発な建設的議論がなされ、すべり面研究のみならず地すべり研究のさらなる深化と展開が続くことを期待する。

引用文献

- Angeli, M. G., Gasparetto, P. and Bromhead, N. (2013) : Strength-regain mechanisms in intermittently moving slides, *Landslides: Evaluation and Stabilization, Proc. of the 9th Int. Symp. on Landslide*, Rio de Janeiro, p. 689 – 696.
- Bhat, D. R., Yatabe, R. and Bhandary, N. P. (2013) : Study of pre-existing shear surfaces of reactivated landslides from a strength recovery perspective, *J. of Asian Earth Sciences*, 77, p. 243 – 253.
- Bishop, A. W., Green, G. E., Garge, V. K., Andersen, A. and Brown, J. D. (1971) : A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength, *Géotechnique*, 21 (4), p. 273 – 328.
- Chen, X. P. and Liu, D. (2014) : Residual strength of slip zone soils, *Landslides*, 11, p. 305 – 314.
- 千木良雅弘（2011）：日本の地すべり研究の発展と未来（地質・地形），日本地すべり学会誌，48 (5)，p. 1 – 8.
- 千木良雅弘，中筋章人，藤原伸也，阪上雅之（2012）：2011年東北地方太平洋沖地震による降下火砕物の崩壊性土すべり，応用地質，52 (6)，p. 222 – 230.
- Dewhurst, D. N., Brown, K. M., Clennell, M. B., Westbrook, G. K. (1996) : A comparison of the fabric and permeability anisotropy of consolidated and sheared silty clay, *Engineering Geology*, 42 (4), p. 253 – 267.
- Dimitrova, S. R. and Yanful, K. Y. (2012) : Factors affecting the shear strength of mine tailings/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy, *Engineering Geology*, 125, p. 11 – 25.
- Di Maio, C., Scaringi, G. and Vassallo, R. (2015) : Residual strength and creep behaviour on the slip surface of specimens of a landslide in marine origin clay shales: Influence of pore fluid composition, *Landslides*, 12 (4), p. 657 – 667.
- Di Maio, C. and Vassallo, R. (2011) : Geotechnical characterization of a landslide in a Blue Clay slope, *Landslides*, 8 (1), p. 17 – 32.
- 土木研究所（2013）：すべり層のサンプリングと認定方法に関する研究，土木研究所，共同研究報告書No. 449.
- Fukuoka, H., Sassa, K., Wang, G. (2007) : Influence of shear speed

- and normal stress on the shear behavior and shear zone structure of granular materials in naturally drained ring shear tests, *Landslides*, 4 (1), p. 63–74.
- Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M. (1987) : Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan, *Canadian Geotechnical Journal*, 24 (3), p. 456–462.
- Gibo, S., Egashira, K., Ohtsubo, M. and Nakamura, S. (2002) : Strength recovery from residual state in reactivated landslides, *Géotechnique*, 52 (9), p. 683–686.
- 宜保清一, 江頭和彦, 林義隆 (1992) : 地すべり土の残留強度の大変位せん断試験による測定法と物理的鉱物学的性質による類推法, 農業土木学会論文集, 159, p. 57–63.
- 宜保清一, 古波蔵政良, 吉沢光三 (1981) : 那覇市真地団地内地すべり性崩壊の発生要因と平均せん断強度定数の決定, 地すべり, 18 (2), p. 11–18.
- 宜保清一, 中村真也, 江頭和彦 (2000) : 地すべり土の残留強度と物理的・鉱物学的性質との関係, 農業土木学会論文集, 210, p. 69–74.
- 宜保清一, 中村真也, 佐々木慶三 (2003) : 地すべり土のせん断挙動に及ぼす鉱物組成の影響, 日本地すべり学会誌, 40 (4), p. 1–7.
- Hadizadeh, J., Sehhati, R., Tullis, T. (2010) : Porosity and particle shape changes leading to shear localization in small-displacement faults, *Journal of Structural Geology*, 32 (11), p. 1712–1720.
- Hawkins, A. W. and Privett, K. D. (1985) : Measurement and use of residual shear strength of cohesive soils, *Ground Engineering*, 18 (8), p. 22–29.
- Hisatsune, T., Okawara, M. and Mitachi, T. (2009) : Surface analysis and frictional force measurement of the shear surface at the residual state of clay by AFM, *Clay Science*, 14, p. 95–101.
- 石田孝司, 杉本宏之, 武士俊也, 高川智, 二木重博, 宇都忠和 (2012) : 善徳地すべりにおける高密度ステップ孔内試験結果と地下水観測結果との比較について, 日本地すべり学会誌, 49 (6), p. 35–41.
- 地すべり学会東北支部 (2001) : 地すべり安定解析用強度決定法—実務における新たな展開をめざして—, (社)地すべり学会東北支部.
- Kimura, S., Kaneko, H., Ito, T., Minagawa, H. (2014a) : The effect of effective normal stress on particle breakage, porosity and permeability of sand: Evaluation of faults around methane hydrate reservoirs, *Tectonophysics*, 630, p. 285–299.
- Kimura, S., Kaneko, H., Ito, T., Minagawa, H. (2015a) : Investigation of Fault Permeability in Sands with Different Mineral Compositions (Evaluation of Gas Hydrate Reservoir), *Energies*, 8 (7), p. 7202–7223.
- Kimura, S., Nakamura, S. and Vithana, S. B. (2015b) : Influence of effective normal stress in the measurement of fully softened strength in different origin landslide soils, *Soil & Tillage Research*, 145, p. 47–54.
- Kimura, S., Nakamura, S., Vithana, S. B. and Sakai, K. (2014b) : Shearing rate effect on residual strength of landslide soils in the slow rate range, *Landslides*, 11, p. 969–979.
- 木村匠, 宜保清一, 中村真也, 佐々木慶三, 周亜明 (2010) : 島尻群泥岩地すべりの発生・再滑動に関与する強度—沖縄, 安里地すべりを事例として—, 日本地すべり学会誌, 47 (3), p. 18–26.
- 木下篤彦, 本城谷貴広, 丹羽諭, 長谷川陽一, 山岡哲也, 山崎勉 (2013b) : 繰返し載荷によるすべり面せん断試験結果を用いた地震時の地すべり安定性に関する研究, 日本地すべり学会誌, 50 (5), p. 23–31.
- 木下篤彦, 柴崎達也, 長谷川陽一, 山岡哲也, 山崎孝成 (2013c) : 地震時に風化軟岩層理面をすべり面として発生した高速地すべりの発生機構, 日本地すべり学会誌, 50 (3), p. 1–10.
- 木下篤彦, 田上弘樹, 山村充, 柴崎達也, 古谷綱崇, 宮本卓也 (2013a) : 四国結晶片岩地すべりの高品質コアを用いたすべり面の特性評価, 日本地すべり学会誌, 50 (4), p. 1–9.
- 木下篤彦, 柴崎達也, 長谷川陽一, 山崎孝成 (2015) : 降雨・融雪及び地震誘因地すべりのすべり面構成土の特性比較—物理特性と残留強度の速度依存性に着目して—, 日本地すべり学会誌, 52 (1), p. 9–14.
- 楠稚枝, 野崎篤, 岡田誠, 和田秀樹, 間嶋隆一 (2014) : 三浦半島北部の上総層群中部 (下部更新統) で掘削されたコアの堆積相とオルドバイ正磁極帯帯の上限, 地質学雑誌, 120 (2), p. 53–70.
- Leroueil, S. (2001) : 39th Rankine lecture: natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms, *Géotechnique*, 51 (3), p. 197–243.
- Li, Y. R., Wen, B. P., Aydin, A. and Ju, N. P. (2013) : Ring shear tests on slip zone soils of three giant landslides in the Three Gorges Project area, *Engineering Geology*, 154, p. 106–115.
- Lupini, J. F., Skinner, A. E. and Vaughan, P. R. (1981) : The drained residual strength of cohesive soils, *Géotechnique*, 31 (2), p. 181–213.
- 前田寛之 (2014) : 基岩地質に基づく新たな地すべり分類の提案, 日本地すべり学会誌, 51 (1), p. 1–4.
- 前田寛之, 河野勝宣, 関下慶彦, 植松聡, 納谷宏 (2014) : 土砂地すべりにおけるすべり面の推定と確定—生田原南地すべり防止区域の熱水変質帯地すべりの例—, 日本地すべり学会誌, 51 (3), p. 26–32.
- 前田寛之, 河野勝宣, 辻健史, 久保仁美, 青木秀晃 (2015) : 北海道常呂帯仁頃層群緑泥岩における非地すべり地の断層ガウジと2006年豊美地すべりのすべり面粘土の類似性, 日本地すべり学会誌, 52 (1), p. 15–20.
- 増山孝行, 矢野亨, 南茂樹, 八島隆志 (2012) : 風化石灰岩中に発達したすべり面粘土の特徴, 日本地すべり学会誌, 49 (1), p. 43–46.
- 眞弓孝之, 柴崎達也, 山崎孝成 (2003) : すべり面せん断試験によるすべり面のせん断強度評価, 日本地すべり学会誌, 40 (4), p. 15–24.
- 宮野公樹 (2015) : 研究を深める5つの問い—「科学」の転換期における研究者思考—, 講談社, p. 17–20, p. 121–123.
- 宮原正明, 地下まゆみ, 宇野洋平, 北川隆司, 末峯宏一, 矢田部龍一 (2005) : 四国中央部の三波川, ミカブ及び秩父帯に産する粘土鉱物について—善徳, 怒田・八畝, 陰, 西の谷地すべり及び松山トンネルより得られたボーリングコアの分析結果—, 日本地すべり学会誌, 42 (3), p. 53–60.
- 森山豊, 山田政典, 森木良太, 長岡弘晃 (2012) : 孔内カメラを用いた地すべり土塊の内部構造調査と地すべり調査の留意点, 平成24年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, p. 91–92.
- Mesri, G. and Huvaj-Sarihan, N. (2012) : Residual shear strength measured by laboratory tests and mobilized in landslides, *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng.*, 138 (5), p. 585–593.
- Mesri, G. and Shahien, M. (2003) : Residual shear strength mobilized in first-time slope failures, *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng.*, 129 (1), p. 12–31.
- 中村真也 (2001) : 地すべり土の残留強度と残留状態からの強度の回復に関する研究, 学位論文, 鹿児島大学.
- Nakamura, S. (2012) : Shear strengths of slip surface of rainfall-triggered mudstone landslides, *Geological Society of America Abstracts and Programs*, 44 (7), p. 466.
- 中村真也, 江口佑人, 木村匠, 宜保清一 (2012) : 地すべり土の強度回復メカニズムに関する一考察, 平成24年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, p. 790–791.
- 中村真也, 宜保清一 (2000) : 地すべり土の回復強度と垂直応力の影響, 地すべり, 37 (3), p. 18–24.
- Nakamura, S., Gibo, S., Egashira, K. (2008) : An empirical equation of predicting residual strength of landslide soils in East Asia from the mineralogical composition, *Proc. of Int. Conf. on Geotechnical Engineering 2008*, Hammamet-Tunisia, p. 505–510.
- Nakamura, S., Gibo, S., Egashira, K. and Kimura, S. (2010) : Platy

- layer silicate minerals for controlling residual strength in landslide soils of different origins and geology, *Geology*, 38(8), p. 743–746.
- 中村真也, 宜保清一, 江頭和彦, 吉永安俊 (2000): 地すべり土の回復強度と鉱物組成の関係, 地すべり, 37(3), p. 10–17.
- 中村真也, 宜保清一, 林義隆 (2004): 残留係数を導入した地すべりの三次元安定解析－沖繩, 仲順地すべりについて－, 農業土木学会論文集, 229, p. 47–53.
- 中村真也, 宜保清一, 木村匠, ヴィタナブッディシワント (2011b): 各種地すべり形態におけるすべり面平均強度定数－沖繩, 島尻層群泥岩地すべりを事例として－, 日本地すべり学会誌, 48(5), p. 9–20.
- 中村真也, 木村匠, 江口佑人, ヴィタナブッディシワント (2011a): 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会講演要旨集, p. 108–109.
- 日本地すべり学会 (2012): 地震地すべり－地震地すべりプロジェクト特別委員会の総括編－, 日本地すべり学会.
- 日本地すべり学会 (2013): すべり面－地質的特徴と構造・物性－, 日本地すべり学会.
- Okada, Y., Sassa, K., Fukuoka, H. (2004): Excess pore pressure and grain crushing of sands by means of undrained and naturally drained ring-shear tests, *Engineering Geology*, 75(3–4), p. 325–343.
- 大河原正文, 太田正裕, 小澤幸彦, 佐藤達也, 齋野崇 (2012): 市野々原地すべり構成土の物理的・化学的特性とすべり面判定, 日本地すべり学会誌, 49(5), p. 17–24.
- Okawara, M., Hisatsune, T., Mitachi, T. and Saino, T. (2010): Microscopic structure and spectroscopic property of the shear surface at the residual state of clay, *Clay Science*, 14, p. 211–218.
- 佐々恭二, 福岡浩 (1993): 高速リングせん断試験機による土砂の運動時の内部摩擦角の測定, 地すべり, 29(4), p. 1–8.
- 佐々恭二, 福岡浩, 汪発武, 王功輝 (2007): 平成16年新潟県中越地震により発生した再活動地すべり地における高速地すべり発生・運動機構, 日本地すべり学会誌, 44(2), p. 71–78.
- 佐々恭二, 李宋学 (1993): 高速リングせん断試験機による地すべり運動時の見かけの摩擦角の測定, 地すべり, 30(1), p. 1–10.
- Schulz, W. B. and Wang, G. (2014): Residual shear strength variability as a primary control on movement of landslides reactivated by earthquake-induced ground motion: Implications for coastal Oregon, U. S., *J. of Geophys. Res.: Earth Surf.*, 119, p. 1617–1635.
- Skempton, A. W. (1964): Long-term stability of clay slopes, *Géotechnique*, 14(2), p. 77–101.
- Skempton, A. W. (1985): Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Géotechnique*, 35(1), p. 3–18.
- 鈴木素之, 小林孝輔, 山本哲朗, 松原剛, 福田順二 (2005): リングせん断試験における粘土の残留強度に及ぼすせん断速度の影響, 山口大学工学部研究報告, 55(2), p. 121–134.
- 鈴木素之, 山本哲朗, 北村一也, 中森克己, 福田順二 (2003): 土の残留強度を測定するための繰返し一面せん断試験の方法と結果の解釈, 山口大学工学部研究報告, 53(2), 35–45.
- 鈴木幸彦, 塚田基治, 桧垣大助 (2008): 新JFB工法を用いた地すべり地におけるコアサンプリング技術の向上－高知県長者地すべりの事例－, 日本地すべり学会誌, 45(4), p. 40–44.
- Stark, T. D., Choi, H., McCone, S. (2005): Drained shear strength parameters for analysis of landslides, *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng.*, 131(5), p. 575–588.
- 武士俊也, 阿部大志, 宇都忠和 (2011): 地すべり鋼管杭の変位計測と孔内カメラ観察による実態把握, 土木技術資料, 53(2), p. 47–49.
- 田中謙次, 野村成宏 (2006): ポケット型帯磁率計を用いたボーリングコアの定量的評価事例, 地盤工学研究発表会講演集, 41, p. 199–200.
- 玉田文吾 (1984): 地すべり面のせん断強度定数と粘土鉱物との関係, 地すべり, 20(4), p. 7–13.
- Tika, T. E., Vaughan, P. R. and Lemos, L. J. (1996): Fast shearing of preexisting shear zones in soil, *Géotechnique*, 46(2), p. 197–233.
- Tiwari, B. and Ajmera, B. (2011): A new correlation relating the shear strength of reconstituted soil to the proportions of clay minerals and plasticity characteristics, *Applied Clay Science*, 53, p. 48–57.
- Tiwari, B. and Marui, H. (2005): A new method for the correlation of residual shear strength of the soil with mineralogical composition, *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng.*, 131(9), p. 1139–1150.
- Torabi, A., Braathen, A., Cuisiat, F., Fossen, H. (2007) Shear zones in porous sand: Insights from ring-shear experiments and naturally deformed sandstones, *Tectonophysics*, 437(1–4), p. 37–50.
- Vithana, S. B., Nakamura, S., Kimura, S. and Gibo, S. (2012): Effects of overconsolidation ratios on the shear strength of remoulded slip surface soils in ring shear, *Engineering Geology*, 131–132, p. 29–36.
- 若井明彦, 吉松弘行 (2013): 地すべりを再現するための数値解析手法の現状, 日本地すべり学会誌, 50(1), p. 7–17.
- Wakizaka, Y. (2013): Characteristics of crushed rocks observed in drilled cores in landslide bodies located in accretionary complexes, *Tectonophysics*, 605, p. 114–132.
- 脇坂安彦, 上妻睦男, 綿谷博之, 豊口佳之 (2012): 地すべり移動体の特徴づける破碎岩－四万十帯地すべりを例として－, 応用地質, 52(6), p. 231–247.
- 山崎新太郎, 千木良雅弘 (2008): 泥質片岩の風化メカニズム, および, 風化と地すべりとの関係について－四国三波川帯の不撓乱ボーリングコアを用いた解析－, 地質学雑誌, 114(3), p. 109–126.
- 山崎孝成 (2011): すべり面の構造とせん断強度研究の現状と課題, 日本地すべり学会誌, 48(3), p. 1–14.
- 山根誠, 山田政典, 仙石昭栄, 脇坂安彦, 赤松薫 (2013): すべり面粘土と断層ガウジを識別する複合面構造－秩父帯の地すべりを例として－, H25年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, p. 193–194.
- Yang, Z. X., Jardine, R. J., Zhu, B. T., Foray, P., Tsuha, C. H. C. (2010): Sand grain crushing and interface shearing during displacement pile installation in sand, *Géotechnique*, 60(6), p. 469–482.
- 矢田部龍一, 八木則男, 榎明潔 (1991): 破碎帯地すべり地の粘性土のリングせん断特性, 土木学会論文集, 436(Ⅲ–16), p. 93–101.
- 矢田部龍一, 八木則男, 向谷光彦, 榎明潔 (1996): 土の残留強度に与える試験法ならびにすべり面の拘束条件の影響, 土木学会論文集, 554(Ⅲ–37), p. 139–146.
- Zhang, S., Tullis, T. E. (1998): The effect of fault slip on permeability and permeability anisotropy in quartz gouge, *Tectonophysics*, 295(1–2), p. 41–52.
- Zhang, S., Tullis, T. E., Scruggs, V. J. (1999): Permeability anisotropy and pressure dependency of permeability in experimentally sheared gouge materials, *Journal of Structural Geology*, 21(7), p. 795–806.
- Zhang, S., Tullis, T. E., Scruggs, V. J. (2001): Implications of permeability and its anisotropy in a mica gouge for pore pressures in fault zones, *Tectonophysics*, 335(1–2), p. 37–50.

(原稿受付2015年12月24日, 原稿受理2017年2月6日)