Notice of retraction

The article of Journal of the Japan Landslide Society, "Residual shear behavior of serpentinite in Shiraishi landslide, Tokushima Prefecture and sliding mechanism" by G. Wang et al., published in Volume 47, Issue 5, pp.265-273, has been retracted by the agreement between the authors and the journal's editorial committee. The retraction has been decided, since most of figures and findings of this article are duplicated with another article published in advance by G. Wang et al., Earth Surface Processes and Landforms, Vol.35, pp.407-416, John Wiley & Sons, Ltd., 2010, and therefore, in violation of journal's policies regarding the prevention of duplicate publication.

We apologize for any inconvenience this may have caused.

The editor-in-chief of Journal of the Japan Landslide Society (September 1, 2017)

徳島県白石地すべり地における蛇紋岩の残留強度特性 および移動土塊の変動メカニズムについて

Residual shear behavior of serpentinite in Shiraishi landslide, Tokushima Prefecture and sliding mechanism

王 功輝^{a)*}, 末峯 章^{a)}, 陳 光齊^{b)}

Gonghui WANG, Akira SUEMINE and Guangqi CHEN

Abstract

During Typhoon Namtheun (also called Typhoon No. 10), heavy rains attacked the Shikoku Island, and triggered numerous landslides in Nakagawa basin of Tokushima Prefecture, Japan on August 1, 2004. One of the catastrophic landslides was triggered in Shiraishi area of Kisawa village, which destroyed more than 10 houses and caused an unstable block on the source area. The unstable block kept moving after the event, showing accelerating/decelerating movement during/after the rainfall and reaching a displacement of several meters before the countermeasures were finished. To examine the mechanism of this landslide, samples of weathered serpentinite from the field were collected and the residual shear behaviour was examined. The test results revealed that the residual shear strength of the samples is positively dependent on the shear rate, which may provide an explanation for the continuous accelerating-decelerating movement of the slide.

Key words : serpentinite landslide, creep movement, residual shear strength, rate effect, sliding mechanism

和文要旨

2004年7月に発生した台風10号により、徳島県南部地域では1日に1317mmの降雨が記録された。この豪雨により、徳島県木沢村では数多くの土砂災害が発生した。特に白石地区では、土石流が発生した後に源頭谷底に沿って地すべりが発生した。数メートルを越える移動量の二次および三次クリープ変動を繰り返し、斜面変動が続いた。しかし、最終的には急速な崩壊には至らなかった。この原因を解明するため、地すべり地から採取した風化して土砂化した蛇紋岩の試料について残留強度特性を調べた。その結果、残留強度がせん断速度の増加によって大きくなる傾向が見出された。これにより地すべり土塊の加速・減速といった繰り返し運動が続いたと推定される。

キーワード：蛇紋岩地すべり、クリープ変形、残留強度、速度効果、変動メカニズム

1. はじめに

2004年7月25日に発生した台風10号は7月31日に高知県西部に上陸し、瀬戸内海を経て広島県に再上陸した。その後8月1日に朝鮮半島の東方で熱帯低気圧に変わった。この台風は移動速度が遅く、南方からの湿った空気が長時間吹き込んだことにより、四国地方東部で豪雨が継続した。特に徳島県南部地域では4日間の連続降雨量が2,000mmを超過した(図-1)。1,500mmを越える雨量が生じた地域は、那賀川上流域に位置する旧木沢村、上那賀町および木頭村の境界部周辺の東西方向5~6km、南北方向10数kmの非常に狭い範囲であった。上那賀町海川では、木頭村日早で観測されたそれまでの日降雨量の日本記録を更新する1,317mmの日降雨量が観測された(図-2)。この豪雨により、那賀川上流域では多数の土砂災害が集中的に発生した。そのうち白石地区では、地区内を南北に縦断するフロン谷で土石流が発生し、下流域の家屋等が被災した。幸いにも住民の方々は土石流発生前に自主避難していたため、人的被害はなかった。しかし、この土石流の発生に伴ってフロン谷の源頭部において地すべりが発生し、直下流に位置する白

図-1 7/30~8/2の4日間降雨量コンター(単位:mm)
(国土交通省四国地方整備局那賀川河川事務所より)

Fig.1 Rainfall distribution in the Shikoku area from July 30 to August 2 during the typhoon (after Nakagawa River Office, Shikoku Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan)

石地区の住民は二次災害の危険性に晒された。その後約二年間をかけた排土工により、地すべりの危険性は排除された。

この地すべりは、土石流災害直後から緩斜面において発生したもので、活発な動きを示し、地すべり土塊の先端部においては小崩壊を繰り返しながら、数メートルを

* 連絡著者 / corresponding author

a) 京都市防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
〒611-0011 宇治市五ヶ庄
Gokasho, Uji, Kyoto

b) 九州大学工学研究院
School of Engineering, Kyushu University

越える移動が発生した。しかし、地すべり全体が急速に崩壊するという事態には至らなかった。このような斜面変動は蛇紋岩地帯の地すべりにおいて極めて稀な現象である。この原因を解明するため、地すべり地から、風化し細粒化もしくは粘土化した蛇紋岩の試料を採取し、リングせん断試験によりせん断強度特性について調べた。この地すべりが大変形をしたことから、地すべり粘土は残留強度の状態になっていることが考えられる。本研究ではこれらの試料に対してリングせん断試験により求められた残留強度の特性をもとに地すべりの移動メカニズムについて検討する。

2. 白石地区フロン谷の地すべり

白石地区は昭和37年1月に国土交通省により地すべり防止区域に指定された(図-3)。今回の豪雨により、白石地区フロン谷の源頭部の谷底において地すべりが発生し、この地すべりの下部において土石流が発生した。この溪流は土石流危険溪流の指定を受けていた。

土石流は8月1日20:00頃に発生し、流出した土砂は国道まで達した。この土石流による人的被害はなかったが、住宅十数戸が半壊又は全壊した(写真-1)。住民

図-2 海川で観測7/30~8/2の4日間降雨(四国電力より)
Fig.2 Hyetograph of the heavy rainfall (data courtesy of Shikoku Electric Power Co., Inc.)

図-3 白石地区地すべり防止区域とフロン谷地すべり位置図
Fig.3 Shiraiishi landslide prevention area and the location of landslide in Furon Valley

は、家の裏の谷で茶色に濁った水がガラガラという石の音とともに流れているのを見て、土砂災害発生の危険性を感じたという。そのため、消防団施設と公民館に避難し、人的被害が回避された(日浦他, 2004)。その後斜面上部の谷底の地すべりが活発な変動を示したので、直下流の住民に対して、避難勧告が出された。

フロン谷の土石流により流出した土砂は約3,300~4,700m³であると推定された。これに対して、斜面上部において発生した地すべりは約18,000m³であることが判明した。地すべりの規模は幅40m, 長さ100m, 深さは約10mである。斜面上部の地表面勾配は12°で、非常に緩い。図-4は地すべりの平面図である。この地すべりは黒瀬川構造帯の蛇紋岩分布域に位置する。地すべり土塊は崩積土と蛇紋岩を主体とした破碎帯より構成され、基盤岩は蛇紋岩を主体としている(図-5)。ボーリング調査、孔内傾斜計による計測、伸縮計による地表変動計測および亀裂分布に関する調査などの結果、地すべり

写真-1 白石地区で2004年8月に発生した土石流と地すべり
Photo 1 Landslide-debris flow hazard on August of 2004, and the landslide on the source area of Furon Valley

図-4 地すべり(ブロックB-I, B-II, B-III)平面図と伸縮計位置(S-1, S-2, S-3)。線P1-P2-P3に沿って描いた断面図を図-6に示す。

Fig.4 Plan of landslide area (B-I, B-II and B-III that are marked by dashed line) and the locations of extensometers (S1, S2, and S3). Longitudinal section along line P1-P2-P3 is presented in Fig. 6.

土塊は三つのブロック（地すべり末端ブロックIとIIおよび本体ブロックIII）により形成されていることが判明した。図-4に示した線P1-P2-P3に沿って描いた地すべり断面図を図-6に示す。ブロックI, II, IIIの土砂量はそれぞれ約3,400, 3,600, 11,000m³である。写真-1の中で、破線で囲まれた区域はこの地すべり土塊が完全に土石流化した場合を想定した被害予想範囲である。地すべり対策として排土工が施工され、2006年7月までに地すべり土塊はほぼ完全に排除され、2006年8月31日に避難勧告が解除された。

地すべり土塊の移動を観測するため、図-4に示すように3台の地盤伸縮計（S-1, S-2, S-3）をそれぞれ地すべりブロックIとIIおよびIIIに設置した。その計測結果および降雨状況を図-7に示す。計測は、2004年9月10日から開始されたが、9月29日から10月21の間は緊急対策工事準備のため、観測が中断された。また、S-1とS-2は工事の進行により撤去され、途中で計測を中止した。全体の変位を見ると、9月10日から12月10日までは降雨が多く、斜面が顕著な動きを見せていた。9月10～28日の期間において、無降雨時には1～5mm/時間、降雨時には6～15mm/時間程度の変位速度で、総変位量は本体ブロック(III)で110cm、末端ブロック(I)で220cm程度と大きな変位を示した。また、10月22日～

12月10日の期間では、無降雨時および連続雨量20mm以下の降雨の期間には末端ブロックのS-1とS-2では0.6～1.5mm/時間、本体ブロックのS-3で約0.3mm/時間の変位速度となり、無降雨状態では沈静化しつつも停止には至らなかった。一方、連続雨量100mm以上の豪雨では三つのブロックとも変位速度は急増し、S-1は最大27.5mm/時間、S-2は最大17.5mm/時間、S-3は最大11.5mm/時間の変位を示した。なお、移動観測が中断された9月29日から10月21の間に、10月18～20日で最大連続雨量が426mmに達する降雨などがあり、この期間にも大きな変動があったのではないかと推察している。

2004年12月から2006年6月の間では、対策工の進行に伴って変位は沈静化し、対策工がほぼ完了した2006年7月以降に明瞭な変位は見られなくなった。以上の通り地すべり発生以後に計測された変動量は本体で約2.5m、末端ブロックで約4～6mに達し、さらに観測中断期間を考慮するとより大きな動きを示したと考えられる。この地すべりに関するより詳細な変動状況は田村他(2006)により報告されている。

蛇紋岩地すべり地には、勾配が10°～20°と比較的緩傾斜であり、軟弱なクレープ性運動を続けているものが多いことは、今までの研究により指摘されている（例えば、低引他, 1993; 矢田部, 1997; 矢田部他, 1991, 1997; 横田他, 1995, 1997, 1999）。しかし、白石地区フロン谷の地すべりにおいては活発な斜面変動が起こり、大変位が発生したにも関わらず、急速な崩壊には至らなかった。例えば、図-8に示されている2005年9月3～10日において観測された降雨と地下水位（自記水位計により観測）および斜面変動から分るように、無降雨期間にも地すべり土塊はゆっくりとした変動を続けている。地下水位が降雨により上昇し、地すべり土塊の移動速度が大きくなり、斜面変動がT1時点から二次クレープ、T2時点から三次クレープ段階に入ったと考えられる。しかし、T3時点から斜面変動が沈静化し、急速な崩壊に至らなかった。このような現象は地下水位の低下や斜面変動に伴う地形の変化に起因すると一般的には受け入れら

図-5 地すべり地域の地質図および試料(①, ②, ③)の採取場所

Fig. 5 Geological map of the landslide area and the locations of sampling

図-6 地すべり縦断面図

Fig. 6 Longitudinal section of landslide

図-7 地盤伸縮計による累積変位図

Fig. 7 Landslide displacement monitored by extensometers and rainfall

れよう。しかし、T3時点の地下水位はT2時点よりまだ高い。また、T2～T3の間において発生した変位量は約10cmに過ぎず、T3時点以降にも斜面変動が続いていたため、地形の変化により移動土塊の平衡が変わったと考えがたい。そこで、本論文では、上述した斜面変動現象を解明するため、地すべり地区の三箇所から風化した蛇紋岩、即ち、地すべり地の外（試料①）、地すべり移動土塊内部（試料②）とすべり面付近（試料③）から試料を採取し（図5）、これらの試料の残留強度特性をリングせん断試験により調べ、地すべりの変動に対する土質力学的検討を行った。

3. リングせん断試験

本研究では、京都大学防災研究所により開発されたリングせん断試験機（4号機と5号機）を用いた（Sassa et al., 2004）。試験中において垂直応力、せん断抵抗、間隙（水）圧、垂直変位とせん断変位について計測を行った。せん断箱は、4号機が内径=21cm、外径=29cm、5号機が内径=12cm、外径=18cmである。試料は4.75mmのふるいを通して、粗粒分を除いた。矢田部他（1991）は残留強度に与える粒度の影響を調べ、砂(>0.074mm)の含有率が30%を超えると影響が大きくなることを明らかにしている。今研究においては4.75mm以上のものが試料①、②と③においてそれぞれ25.3%、6.7%と1.5%であるため、これらの粒径のものを除去しても残留強度に与える影響は少ないものと考えられる。また、試料①と②に対する実験はリングせん断試験機4号機で、試料

③に対しては5号機で実施した。粗粒分を除いた後の試料に対する物性を測定した結果を表-1に示す。試料①は砂礫からなり、試料②と③は礫混じり砂質粘土からなる。また、これらの試料に対して行ったX線回折による粘土鉱物分析結果を表-2に示す。試料①は蛇紋岩の特徴であるクリソタイトの他、タルクと緑泥石/ス멕タイトが多く含まれている。地すべり粘土②と③は、試料①と同様にクリソタイトの他、緑泥石/ス멕タイト混合層鉱物を多く含んでいる。

飽和試料の作成方法としては、乾燥した試料（攪乱）をせん断箱上部からゆっくりと、できるだけ均一になるように詰めた。その後、二酸化炭素ガスを試料下部から注入し、上部から排出することによって、試料中に含まれる空気と入れ替えた。次に脱気水を同様に試料下部から注入し、二酸化炭素ガスと入れ替えて、試料を完全に飽和させた。飽和した試料を一定の垂直応力で（正規）圧密させた後、垂直応力を変えず、一定のせん断速度（変位制御）で試料が完全残留状態になるまでせん断を続けた。

白石地すべり変位を見ると、降雨により加速し、その後減速した移動が続き、かなりの時間の後に停止した。即ち、地すべり土塊は異なった速度で移動していた。また、これらの速度で移動していた過程において、すべり面に発揮されるせん断強度が異なったことも考えられる。本試験では、残留強度に及ぼすせん断速度の影響を調べるために、垂直応力を一定にし、一つの供試体を用いて、一度残留状態に達した後にせん断速度を変化させて、そのせん断速度で再度残留強度になるまでせん断を行った。

図-8 2005年9月3～10日に観測された地すべり移動量とボーリング（図-4のP2に位置する）の地下水位変動。(a) 降雨と地下水位；(b) 地下水位とブロックB-Iの移動量

Fig.8 Monitored landslide displacement and ground water table below the ground surface at point P2 (shown in Fig. 4) during the period of September 3～10, 2005. (a) Rainfall and Ground water table ; (b) Ground water table and displacement for Block B-I

表-1 試料の物性
Table 1 Properties of the samples

試料	土粒子密度 (g/cm^3)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	粘土分含有率 (%)
①	2.70	—	—	—
②	2.70	21	14.7	18
③	2.73	48	16	33

—：粘土化していないため、測定しなかった。

表-2 X線回折結果
Table 2 Results by X-ray diffraction

試料	Sp	Tal	Chl/Sm
①	++++	++	+++
②	+++	++	++++
③	+++	+	++++

注) +：相対的量比を現し、+が多いほど含有量が多い。Sp: サーペンティナイト；Tal:タルク；Chl/Sm: 緑泥石/ス멕タイト混合層。試料①と③に関する測定結果は田村他(2006)による。

4. 実験結果及び討論

4.1 飽和排水せん断試験結果

まず試料①に対して飽和排水せん断試験を行った。150 kPaの垂直応力で圧密した後、0.11mm/minのせん断速度で試験を実施した。せん断抵抗/垂直応力の値とせん断変位の関係を図-9に示す。一面せん断試験により粘土などの残留強度を求める際には、0.02mm/minが標準的なせん断速度とされる。しかし、横田他(1995)の研究によれば、リングせん断試験機を用いて破碎帯地すべり地の粘性土の残留強度を測定する際には、排水条件で1.01mm/min以下のせん断速度でせん断を行えば、残留強度に影響を与えないことが判明している。従って、本実験においては、せん断速度を0.11mm/minとした。また、粘性土やシルト質土などの透水係数の低い供試体を用いたせん断試験における過剰間隙水圧の測定が難しいため(Wang et al. 2007)、本研究は全応力を用いて、せん断強度の変化を議論する。図-9から分かるように、せん断変位が40mmに達した後は、せん断強度の低下が始みられず、残留状態になったと考えられる。粘着力をゼロとすれば、試料の内部摩擦角は約30°になる。また、150kPaの垂直応力でせん断試験が終了した後、垂直応力を変えて、異なった垂直応力状態(70と100kPa)での残留強度を計測した。その結果を図-10に示す。これから、試料①の内部摩擦角が30°で、粘着力が0であることが推定できる。

試料②と③に対して同じ手法で得られた結果を図-11

図-9 試料①を用いた飽和排水せん断試験結果
Fig. 9 Drained shear test on saturated sample ①

図-10 垂直応力と残留強度 (飽和した試料①)
Fig. 10 Residual shear strength against normal stress for saturated sample ①

と図-12に示す。試料②の内部摩擦角は21°、粘着力が約8 kPaであり、試料③の内部摩擦角は16°、粘着力が10 kPaである。横田他(1997)は蛇紋岩由来の粘性土の残留状態において ϕ が25°~30°で、 c が0であることを明らかにしている。一方今回の結果では、これらの範囲に入らないものがある。これは、白石地すべりの蛇紋岩には頁岩起源であるクロライトとスメクタイトおよびタルクなど(表-2に示す)が含まれている影響と考えている。

4.2 せん断抵抗の速度依存性

せん断速度の変化による残留強度の変化を調べるには2つの方法が考えられる(鈴木他, 2004)。即ち、(I)複数の供試体を用いて異なるせん断速度の下で定圧せん断試験を行う方法と、(II)垂直応力を一定にし、一つの供試体を用いて、一度残留状態に達した後せん断速度を変化させて、そのせん断速度で残留強度になるまでせん断を行う方法である。鈴木他(2004)はこれらの二つ方法で得られた結果がほぼ一致することを明らかにしている。本研究では、実験の簡便性の観点から方法(II)を採用した。

残留強度に及ぼすせん断速度の影響を調べるため、4.1で述べた試験の後、せん断速度を0.06mm/minから600mm/minに変化させた。試料①, ②, ③に対して、異なるせん断速度で得られた残留強度をそれぞれ図-13, 14に示す。これらの図から、せん断速度が大きくなるとせん断強度は大きくなる傾向が見られる。

せん断中に発揮される土の内部摩擦角は、土粒子自体の物理的摩擦及び土粒子のかみ合い(interlocking)に

図-11 垂直応力と残留強度 (飽和した試料②)
Fig. 11 Residual shear strength against normal stress for saturated sample ②

図-12 垂直応力と残留強度 (飽和した試料③)
Fig. 12 Residual shear strength against normal stress for saturated sample ③

より決定される (Lambe & Whitman, 1969)。この土粒子の摩擦及びかみ合いはせん断ゾーンにおける土粒子の配列及びせん断モードに依存していると考えられる。

過去の研究 (Kenney, 1977; Skempton, 1964, 1985; Lupini et al., 1981; Lemos, 1986; Tika et al., 1996; 矢田部他, 1997; 鈴木他, 2004; Ancy, 2007; 斉藤他, 2007) により, 残留強度はせん断速度の増加に伴って, (a) 大きくなる「正の速度効果 (positive rate effect)」, (b) 小さくなる「負の速度効果 (negative rate effect)」, (c) ほぼ変化しない「中立の速度効果 (neutral rate effect)」, という三つの場合がある。また, 残留強度に対する速度効果のメカニズムとして下記の二つの仮説が挙げられている。すなわち, (a) せん断速度の変化によって過剰間隙水圧が変化するという有効応力理論に基づいた説 (地盤工学会編, 1987) と, (b) せん断速度の変化に伴ってせん断モードが変化し, 試料の内部摩擦角が変化するという説である (Skempton, 1985; Tika et al., 1996; 斉藤他, 2007)。そのうち, せん断モードの変化からの検討が多く見られる。例えば, 「正の速度効果」のメカニズムとしては, 低速度せん断においては土粒子がせん断方向と平行に配列し, 土粒子間におけるすべりせ

ん断 (sliding shear) が優勢であるが, せん断速度の増加に伴い形成されていたせん断ゾーンが攪乱され, 土粒子間における攪乱せん断 (Turbulent shear) が優勢となることによりせん断抵抗が大きくなるという説が挙げられている (Skempton, 1985)。一方, 負の速度効果のメカニズムとして, せん断速度の変化に伴うせん断ゾーンの含水量変化 (Tika et al., 1996) 或いはせん断モードの変化 (斉藤他, 2007) が提案されている。しかし, これらのメカニズムについてまだ解明されていないところが多い。また, 全ての粘性土における残留強度に対する速度効果を単一のメカニズムで説明することには無理があると考えている。

図-13~14に示された飽和した試料の残留強度の変化が有効応力の変化によるものであるか, 或いは蛇紋岩試料自身の特徴であるかを検証するため, 炉乾燥した試料①に対して, 異なるせん断速度における残留強度を求めた。その結果を図-13に示す。図から乾燥試料でもせん断速度の増加に伴って残留強度が大きくなる傾向が見られる。従って, 上述した飽和試料の残留強度に及ぼすせん断速度の影響は, せん断に伴う過剰間隙水圧の変化によって発生したものではないと推測できる。また, 飽和試料の残留強度の方が大きい傾向が見られる。この原因としては, 飽和試料と乾燥試料が別物として扱えることが考えられるが, これに関する詳しい検討は今後の課題にしたい。

せん断速度の増加に伴う残留強度の増加という現象を解明するため, せん断後のせん断ゾーンの形成およびその中の土 (粘土) 粒子の配向について, レーザー顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) によるせん断面の観察を試みた。試験が終了した後, せん断箱を開けて, 試料の様子を観察した。大変位をせん断したため, いずれの試料を用いた試験においても, せん断ゾーンが発達しており, 光沢を有する面いわゆる鏡肌が形成されていた。写真-2は試料②を用いた飽和排水せん断により形成したせん断ゾーンとせん断ゾーン下の試料の写真である。せん断ゾーンより上の試料は観察のため取り出された。この写真からせん断ゾーンが粘土化して, 色も変わったことが分かる。

形成されたせん断ゾーンに対して, レーザー顕微鏡を用いて, 形状を観察した。写真-2に示されたせん断面に対して得られた超深度 (超焦点深度) 形状測定画像を図-15に示す。この方法により, せん断面の表面粗度に関する計測が可能である。図-15に示す写真の下方にある直線に沿って計測した表面高低形状を, 写真の上方にある曲線 (graph of surface roughness) に示した。図-16には図-15の画像より得られた3D画像を示す。これからせん断方向に対して試料粒子が, 平行に配列し, 瓦状に重なっている構造が確認できる。また, SEMを用いて, せん断ゾーンに対する直接観察 (自然乾燥で蒸着無し) を行った。図-17に異なった倍率で観察された

図-13 せん断速度と残留強度 (飽和と乾燥試料①)

Fig. 13 Residual shear strength against shear rate for sample ① in both saturated and dry states

図-14 せん断速度と残留強度 (飽和した試料②と③)

Fig. 14 Residual shear strength against shear rate for sample ② and ③

せん断面の微視的構造を示す。せん断面の表面に板状結晶（粘土鉱物）が散在し、楕円板状の粒子の長軸（白い線が示す）がせん断方向とほぼ平行して配列されていることが分かる。これらの観察により、上述した試料における残留強度の速度効果は、せん断速度の増加に伴うせん断モードの変化により発生したものではないかと考えられる。即ち、低速せん断時に発揮される残留強度は、ほぼ平行に配列している粒子間において発生するすべりせん断によるものである。せん断速度が大きくなると、せん断面の表面の粒子が回転をはじめ、ランダム状態になっている粒子間において発生する攪乱せん断が始まり、残留強度が大きくなる、というSkempton (1985) 説が考えられる。しかし、せん断進行中におけるせん断面の形状および粘土粒子の配向の直接観察が困難であるため、今後、異なる速度でせん断されたせん断面に対して、レーザー顕微鏡およびSEMによる観察を行い、せん断ゾーンの構造から残留強度へ影響を及ぼす速度効果のメカニ

ズムについて更に検討していきたい。

せん断による蛇紋岩試料の粒子の破碎性を調べるため、試験後、せん断ゾーンおよびその上部と下部から試料を取り出し、JISA1204に基づいて粒度分析を行った。図-18には写真-2に示された実験より得られた粒度分析結果を示す。これからせん断ゾーンにおいて粒子破碎が強く発生したことが分る。またせん断ゾーンの下部から

図-16 せん断面の3D画像
Fig. 16 3D image of the shear surface

写真-2 試料②のせん断後の発達したせん断ゾーン。垂直応力：2.8kgf/cm²；試験中止前のせん断速度：4.46mm/s。
Photo 2 Shear zone of Sample ②. Applied normal stress : 2.8kgf/cm² ; Final shear rate before the termination of test : 4.46mm/s.

図-15 せん断面の状況（レーザー顕微鏡画像）

Fig. 15 Surface of the shear zone observed by laser microscope

図-17 せん断面に対するSEM観察結果。(a)×3,000；(b)×10,000倍。

Fig. 17 Microstructure of shear surface observed by SEM. (a)×3,000 times, and (b)×10,000 times

図-18 飽和状態での試料②に対するせん断試験後の粒度分析結果

Fig. 18 Grain size distribution of the samples that were taken from above and below the shear zone shown in Photo 2, respectively

の試料も元の試料より細くなったことを示しているが、これはおそらく、試料を詰める際に粒子の細かいものが下部試料の土粒子の空隙に落ちていったことによるものと考えられる。せん断ゾーンにおいて粘土化した試料の液性限界は62.0%で、せん断前の約3倍となった。一方、塑性限界は16.1%であり、せん断前の値から大きな変化がなかった。

4.3 地すべりの変動とせん断強度の関係

地すべり崩壊発生時刻の予測には地すべり地表面で観測された変位曲線により得られたクリープ変動式を基にした方法がよく使われている(斉藤・上沢, 1966; 林他, 1988)。これらでは、第2次クリープ後半および第3次クリープ前半におけるひずみ速度と破壊時間の関係を用いて崩壊発生時刻を予測している。白石地すべり地の変位をみると、2次クリープと3次クリープの特徴を有する地すべり運動が繰り返して現れ、最終的に数メートルの変位量に至ったにも関わらず、崩壊には至らなかった。その原因としては、移動速度の増加に伴って、すべり面粘土のせん断強度が大きくなることが作用したものと考えている。即ち、降雨などによって地下水位が上昇し、それによってすべり面付近の有効応力が小さくなり、地すべり移動が加速し、地すべり土塊の移動速度が速くなる。しかし、その移動速度の増大に伴ってせん断抵抗が大きくなることにより、地すべり土塊が減速し、崩壊には至らなかったというものである。さらに、移動速度の減少に伴って、粘土の再配列によってせん断抵抗が小さくなり、移動土塊が加速するといった繰り返し運動が続けられたと考えている。これによって、図-8に示すT3~T4間の地下水位がT4以降より大きいものの、T3~T4間の変位速度(変位S1の傾き)がT4以降のものより小さくなることが説明できる。

また、白石地すべりにおいて観測された最大移動速度は15mm/h (0.25mm/min) であるが、この速度は図-13と図-14に示されたせん断速度の中で一番小さい値に近いと認められる。ただし、この速度は計測された変位を観測した時間で割って算出した平均的な値であるため、

この平均値は計測データのサンプリング間隔によって異なることがある。例えば、クリープ変動中の米国コロラド州Slumgullion地すべりにおいて、一日の変動量が1cmしかないにも関わらず、瞬間速度が0.0012cm/s (100cm/day) に達したことがある(USGSのSchulz, 私信)。白石地すべりの変動は1時間に1回で計測されていたため、瞬間的な移動速度が上述した値(0.25mm/min)より大きかった可能性がある。

5. まとめ

本研究では、2004年7月に発生した台風10号に伴う豪雨により発生した白石地区フロン谷地すべりを対象とした。蛇紋岩地域において発生した稀な地すべり変動現象を説明するため、地すべり地区から試料を採取し、その残留強度特性を調べた。その結果をもとに、白石地すべり土塊の変動の特徴を説明した。結果は次のようにまとめられる。

(1) 地すべり地の外から採取した蛇紋岩(試料①)は30°程度の内部摩擦角があるのに対して、地すべり地から採取した蛇紋岩(試料②)の内部摩擦角は小さく、20°程度で、すべり面付近から採取した粘土の内部摩擦角は16°である。

(2) これら3つの試料に対して、その残留強度がせん断速度に依存することが確認できた。せん断速度が増大すると、せん断抵抗が大きくなった。

(3) いずれの試験においても、せん断ゾーンが発達し、そのせん断ゾーンにおいて粒子破碎が発生し、粘土化されたことが確認された。粘土化した試料においては内部摩擦角がより低下し、粘着力が現れた。

(4) 地すべり粘土のせん断抵抗がせん断速度の増大に伴って大きくなるのが、白石地すべりで数mの変動が発生したにもかかわらず、崩壊に至らなかった要因として考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたっては日本学術振興会による科学研究費補助金(No. 18380094とNo. 19310124)を受けた。白石地すべりの調査資料は徳島県から提供を受けた。現地調査に際して日浦啓全高知大学名誉教授、海堀正博広島大学総合科学研究科准教授と討議を行った。調査及び試料の採取には、徳島県南部総合県民局、旧木沢村役場にお世話になりました。せん断面の3D形状測定には株式会社キーエンスの越智賢一氏にご協力して頂きました。試料②のX線回折による構成鉱物の分析には、山崎新太郎北見工業大学助教にご協力して頂きました。匿名査読者の方々には数々の建設的なコメントを頂いた。ここで、紙面を借りて謝意を表します。

参考文献

- Ancey, C.(2007) : Plasticity and geophysical flows: A review, J. Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 142, pp. 4-35.
- 林 拙郎・駒村富士弥・朴甫減 (1988) : 斜面崩壊発生時期の予測について-斜面崩壊の経時進行過程-. 地すべり, Vol. 24, No. 4, pp. 11-18.
- 日浦啓全・海堀正博・末峯章・里深好文・堤大三 (2004) : 2004年台風10号豪雨による徳島県木沢村と上那賀町における土砂災害緊急調査報告 (速報). 砂防学会誌, Vol. 57, No. 4, pp. 39-47.
- 地盤工学会編 (1987) : 土の強さと地盤の破壊入門, 375p.
- Kenney T. C.(1977) : Residual strength of mineral mixtures. Proc. of the 9th ICSMFE, pp. 155-160.
- 国土交通省四国地方整備局那賀川河川事務所ホームページ (<http://www.skr.mlit.go.jp/nakagawa/>)
- Lambe, T. W., Whitman, R. V.(1969) : Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc. 559p.
- Lemos, L.(1986) : The effect of rate on the residual strength of soil, Ph. D. thesis, University of London
- Lupini, J. F., Skinner, A. E., Vaughan, P. R.(1981) : The drained residual strength of cohesive soils, Géotechnique, Vol. 31, No. 2, pp : 181-213.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G., Ishikawa, N.(2004) : Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics, Landslides, Vol. 1, No. 1, pp. 1-13.
- 斎藤迪孝・上沢弘 (1966) : 斜面崩壊時期の予知, 地すべり, Vol. 2, No. 2, pp. 7-12.
- 斉藤龍太・佐々恭二・福岡浩 (2007) : 珪砂・ベントナイト混合試料における内部摩擦角の速度効果, 日本地すべり学会誌, Vol. 44, No. 1, pp. 33-38.
- 鈴木素之・小林孝輔・山本哲朗・松原剛 (2004) : リングせん断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, Vol. 55, No. 2, pp. 49-62.
- Skempton, A. W.(1964) : Long-term stability of slopes, Géotechnique, Vol. 14, No. 2, pp. 75-101.
- Skempton, A. W.(1985) : Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, Géotechnique, Vol. 35, No. 1, pp. 3-18.
- 低引広隆・横田公忠・山田琢哉・田中元 (1994) : 日本における蛇紋岩地すべりの事例と特性, 第33回地すべり学会研究発表講演集, pp.78-81.
- Tika, T. E., Vaughan, P. R., and Lemos, L.(1996) : Fast shearing of pre-existing shear zone in soil, Géotechnique, Vol. 46, No. 2, pp. 197-233.
- 田村栄治・瀬戸幸彦・浅野晋司 (2006) : 土石流が発生した蛇紋岩地すべりの調査と対策, 「徳島県那賀町における2004年土砂災害」(社)日本地すべり学会関西支部現地討論会論文集, pp.27-67.
- Wang, G., Sassa, K., Fukuoka, H., and Tada, T.(2007) : Experimental Study on the Shearing Behavior of Saturated Silty Soils Based on Ring Shear Tests, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133(3) : pp. 319-333.
- 矢田部龍一 (1997) : 蛇紋岩地すべりの発生機構に関する検討, 地すべり, Vol. 34, No. 1, pp. 57-65.
- 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, Vol. 436, No.III-16, pp. 93-101.
- 矢田部龍一・横田公忠・八木則男・野地正保 (1997) : 蛇紋岩地すべりの発生機構に対する検討, 地すべり, Vol. 34, No. 1, pp. 24-30.
- 横田公忠・矢田部龍一・八木則男 (1995) : 蛇紋岩の風化粘性土の強度特性, 土木学会論文集, Vol. 529, No. III-33, pp. 155-163.
- 横田公忠・矢田部龍一・八木則男 (1997) : 蛇紋岩地帯の地すべりの発達に及ぼす粘土鉱物とせん断強度の影響, 土木学会論文集, Vol. 568, No. III-39, pp. 125-132.
- 横田公忠・矢田部龍一・八木則男・夕部雅丈 (1999) : 蛇紋岩地すべりの要因としての蛇紋岩の風化特性に関する検討, 地すべり, Vol. 36, No. 2, pp. 32-38.
- (原稿受付2009年1月12日, 原稿受理2010年5月20日)