

栗原市荒砥沢地すべり地と南耕英冷沢斜面崩壊地に分布する 凝灰質土の地盤工学的性質*

日本大学工学部 梅村 順
新協地水(株) 原 勝重
日本大学工学部 橋本 桂弥・石塚 陽人・芦田未来矢

1はじめに

平成20年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震の際、宮城県栗原市では、二迫川上流にある荒砥沢ダムの堤体の北西1kmほど上流の北側斜面で、今回の地震で最大の土砂移動となった地すべりが生じた(荒砥沢地すべり:写真-1)。また、三迫川上流の耕英地区冷沢では、その両岸斜面が幅1kmに渡って崩壊(冷沢崩壊:写真-2)した。著者らはこれらの地すべりと斜面崩壊それぞれで素因となった、凝灰質火山灰土について試料を採取し、それらの地盤工学的性質を調べた。本文ではまず、これら地すべりと崩壊の概要について紹介し、次いで採取した試料の地盤工学的性質、特に、地震に伴う破壊と、その後の移動体の長距離移動に着目して、せん断変位の増加に伴う変形性状の変化を調べた結果について述べる。そして、得られた性質から、これら地すべりと斜面崩壊のメカニズムについて、若干の考察を行う。

2 荒砥沢地すべりと冷沢崩壊の概要

2.1 荒砥沢地すべり

荒砥沢地すべりの規模は幅900m、長さ1300m、移動土砂量67,000,000m³で、移動体の平均層厚は100mを超えると推定され、移動体が北西から南東方向に300~350mの距離を滑動した。この地すべりの発生箇所はもともと、地すべり地形が認められるところであった。今回の地震でこの地すべり地形の東側の大部分が滑動し、さらに後方にも波及した^{1),2)}。

図-1は、日本地すべり学会が作成した、レーザープロファイラに基づく陰影図に特徴的な地形を着色した地形分類図である²⁾。移動体の中腹から下部には地表の乱れの少ない地塊A、Bがあり、またそれらの間や不動部との境界には圧縮擾乱帶(E)や圧縮丘(F)がある。さらに、東端には比高は10m以上の泥火山(ダイアピル)様の隆起地形(G)が形成されている。一方、中腹から主滑落崖までは陥没構造を呈し、ここには取り残された2列の尖塔列(リッジC、D(写真-3))と、北東部の小規模な逆向きスランプ型崩壊によって形成されたリッジ(H)群が特徴的である²⁾。



写真-1 荒砥沢地すべり全景
(社)東北建設協会提供



写真-2 耕英地区冷沢崩壊
(上方が下流。(社)東北建設協会提供)

* Geotechnical properties of volcanic ash soils distributed in Aratosawa and Hiyashi-sawa landslide area, Kurihara, Miyagi pref by Jun Umemura, Katsuhige Hara, Katsuya Hashimoto, Akihito Ishizuka and Mikiya Ashida

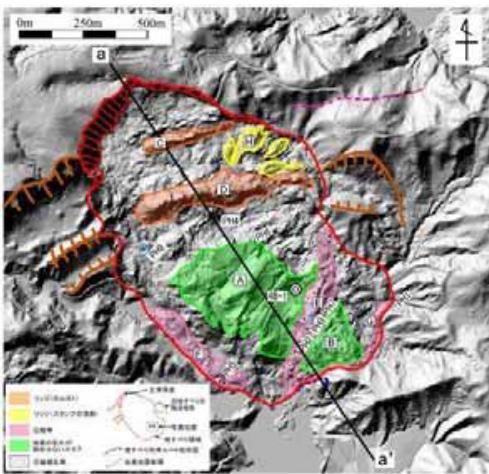


図-1 地形区分図
(基図: 林野庁東北森林管理局)²⁾

2.2 冷沢崩壊

冷沢で発生した斜面崩壊の一例を、写真-4に示す。崩壊の多くはスランプ型であり、比高約 10m の斜面が奥行 5m 程度の規模で崩壊している。また、崩壊後に土石流化して移動体が失われた。

崩壊は、斜面下部に露頭する、上面にアクリーショナリ・ラビリを伴う降下軽石堆積物と、その上位の溶結相を伴う火碎流堆積物の境界面付近をすべり面として生じている。

3. 地質と試料の物理的性質

著者らが確認したこの地域の暫定的な地質層序を、表-1に示す。但し、地質系統は文献3)を参考にし、表中には本文で検討した試料の採取層準を示した。また、中新統後期に属する地層の傾斜はほぼ水平、不整合で接する下位の中新統中期に属する地層は東から北東向きに 8~10 度で傾斜しており、また、中新統後期上面には埋没土壤が発達しており、それを第四系の降下軽石堆積物層が不整合で覆っているため、降下軽石堆積物層は勾配の変化が他の層に較べて複雑である。

荒低沢地すべり地では、写真-5に示す圧縮擾乱帯や圧縮丘等の地形断面から、これらの地形が破碎された小野松沢層中の凝灰質砂岩/頁岩互層構成物から成り、それがたかも移動体縁辺部に沿って下位から絞り出されて形成されたものであった。このことは、この層準にすべり面が形成されたことを示すと判断されるので、この地すべり地左岸側の不動部で、その層準から試料を採取した(凝灰質砂岩/頁岩試料)。また、冷沢崩壊地では、すべり面が形成された第四系の降下軽石堆積物層直上の火碎流堆積物層最下部の非溶結相を、崩



写真-3 地すべり地内に形成された尖塔列



写真-4 代表的な冷沢崩壊の一例

表-1 この付近の地質層序
地質系統は、文献3)を参照した

| 地質系統 | 地層名 | 構成地質 | 観察事項 |
|-------|----------|--|-------------|
| 第四系 | 火碎流堆積物 | 溶結粘土 dense で、理屈的なユータキシティック構造を示す。非溶結相には二次発育が発達。 | ➡ 冷沢崩壊試料 |
| | 降下軽石堆積物 | 緻密。上面にアクリーショナリ・ラビリを伴う。斜面に露み、下位層上面の侵食地形に沿って堆積。 | [不整合] |
| | 埋没土塊 | 下位火碎流堆積物上面の火碎ルージュや数枚の大山灰堆積物を挟んで陥没。一部、段丘堆積物を覆う箇所も見られる。 | |
| 中新統後期 | 火碎流堆積物 | 溶結 partial で、軽石巨礫を伴う。この地層では 50m 程度の厚さを示す。 | |
| | 凝灰質砂岩/頁岩 | 層厚 1.5m 程度。本層で各物理・導電率で剖面が均一。固結度が低く、指で簡単に潰れる。層理面およびそれに直交する方向へのクラックが発達。一部層理面に有機物を含む。 | ➡ 荒低沢地すべり試料 |
| | 礁 | 小豆大～直径数 cm の円錐を主体とした礁層。土壤界面から湧水有り。下位シルト岩と岩盤なし。 | |
| | シルト岩 | 層理が発達した砂岩/頁岩互層。この地層での基礎。荒低沢地すべり活動部には、古く地すべり活動で切断された痕跡有り。 | [不整合?(未確認)] |
| 中新統中期 | 葛峰層 | 凝灰岩 | 現地では土木施設。 |



**写真-5 圧縮丘(F)の開削断面
凝灰質砂岩/頁岩互層構成物(明灰色)の貫入**
壊地背後から試料として採取した(軽石質火山灰試料)。試料はいずれも、ブロックで、乱さない状態として採取した。

それぞれの試料の物理的性質は、図-2、図-3の通りである。凝灰質砂岩/頁岩試料はシルト分が多く含み、コンシスティンシー特性は非塑性であった。なお、図中には参考として、フォールコーン法による液性限界試験結果を示した。一方、軽石質火山灰試料は粒径範囲が広く、軽石礫を主とする礫分から粘土分までを含み、特に粘土分を30%程度含んでいた。また、写真-6のように、自然含水状態のまま練返すと塑性状態からスラリー状態に変化した。コンシスティンシー特性から得られる液性指数(相対含水比)は1を超えて鋭敏な土と判断される結果からも裏付けられ、この試料に特徴的なものであった。

4. 採取した試料の地盤工学的性質

4.1 荒砥沢地すべり凝灰質砂岩/頁岩試料

4.1.1 試験方法

試験はまず、地震で破壊に至ったときにこの層準に作用した応力を推定するための基礎資料として、定体積一面せん断試験と非排水繰返し三軸圧縮試験を、乱さない供試体と再構成した供試体を対象に実施した。乱さない供試体を対象とした試験ではいずれも、試料に葉理面が発達しているので、上下方向は原位置に合わせた。次いで、地すべり移動体が300m以上の長距離を移動したメカニズムを検討するための基礎資料を得る目的で、リングせん断試験

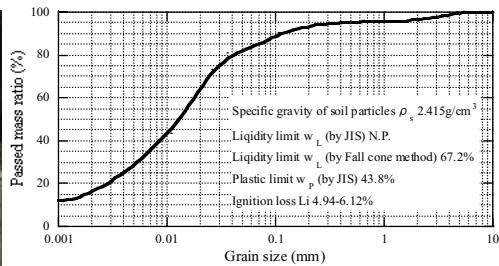


図-2 荒砥沢地すべり凝灰質砂岩/頁岩試料の物理的性質

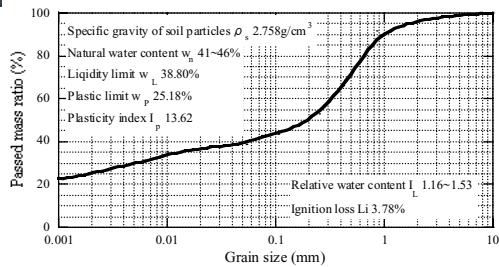


図-3 冷沢崩壊軽石質火山灰試料の物理的性質



**写真-6 冷沢崩壊軽石質火山灰試料の自然含水状態での練返し
(左)練返し前、(右)練返し後**

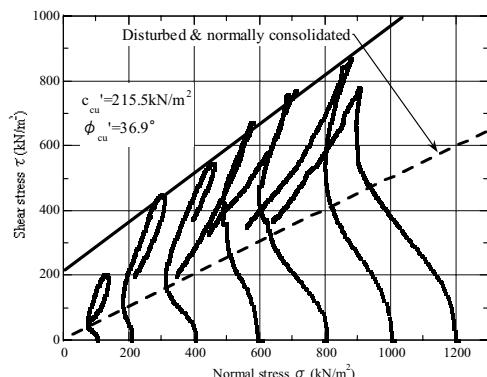


図-4 凝灰質砂岩/頁岩定体積一面せん断試験結果

を、再構成した供試体を対象に行った。

定体積一面せん断試験は、すべり面上での土被り圧が大きいことを考え、上載圧を 1200kN/m^2 まで作用可能な中型(供試体寸法 直径 100mm、高さ 60mm)高圧一面せん断試験装置を行い、せん断変位速度 0.05mm/min、せん断箱間隔 0.02mm で実施した。また、非排水繰返し三軸圧縮試験は、圧密圧力を装置容量限界である 500kN/m^2 、背圧 200kN/m^2 の条件で、正弦波 0.1Hz を与えた。一方、リングせん断試験は、排水、上載圧 300kN/m^2 までの条件で、せん断箱間隔 0.02mm、中心線せん断変位速度を 0.05mm/min で実施した。

4.1.2 試験結果

定体積一面せん断試験結果を図-4 に示す。図中には、乱さない供試体と再構成供試体とを併せて示した。乱さない供試体の強度定数は、再構成供試体に較べて c_{cu}' 値が大きく、aging が認められて軟岩と判断された。また、ピーク強さを呈した後、残留強さにほぼ等しい再構成供試体の破壊規準線に向かって軟化すると考えられるが、試験を打ち切ったせん断変位 15mm に達してもなお、その破壊規準線よりも大きなせん断強さを呈し、脆性的ではあるが、破壊後に一気に軟化する性質はないことが分かった。

また、非排水繰返し三軸圧縮試験での 10 サイクル目から得た結果を、図-5 に示す。図中には乱さない供試体と再構成供試体とを併せて示した。再構成供試体では、圧縮・伸張ともに同程度のひずみが生じたが、乱さない供試体では載荷軸応力が大きくなるに連れ、堆積構造と aging の影響に伴い引張側のひずみが生じにくくなる傾向にあった。等価せん断剛性率 G_{eq} 、履歴減衰率 h とも、乱さない供試体、再構成供試体ともほぼ同じ傾向を示した。0.01%程度以下の片振幅せん断ひずみ γ_a では、 G_{eq} が 76MN/m^2 程度、 h が 0.08%以下で、弾性的な挙動を示した。そして、 $\gamma_a=0.1\%$ から G_{eq} と h の変化が顕著となり、 $\gamma_a=1\%$ 程度では G_{eq} が 15MN/m^2 程度、 h が 15%程度となった。また、初期せん断剛性率 G_0 は、乱さない供試体、再構成供試体とも 76MN/m^2 であった。以上のように、動的せん断特性は、乱さない状態、再構成状態ともほぼ同じ挙動を呈する点で、特徴的であることが判った。

一方、リングせん断試験の結果を図-6 に示す。残留強さから強度定数は、 $\phi_r=36.5^\circ$ であった。

4.2 冷沢崩壊軽石質火山灰試料

4.2.1 試験方法

試験はまず、前述した凝灰質砂岩/頁岩試料同様、作用した応力を推定するために、定体積一面せん断試験を乱さない供試体と再構成した供試体を対象に実施した。また、地震時の繰返し載荷に伴うせん断剛性変化を推定するために、繰返し定体積一面せん断試験を乱さない供試体を対象に行った。次いで、崩壊後に土石流化したメカニズムを検討する目的で、定圧一面せん断試験を乱さない供試体を対象に行った。これらの

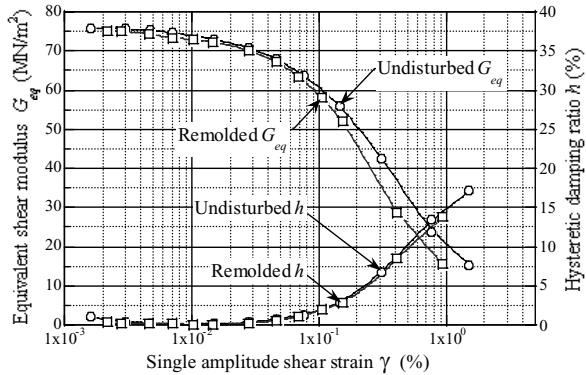


図-5 凝灰質砂岩/頁岩繰返し三軸試験結果

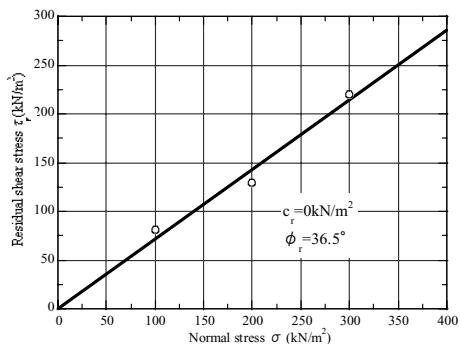


図-6 凝灰質砂岩/頁岩の残留せん断強さ

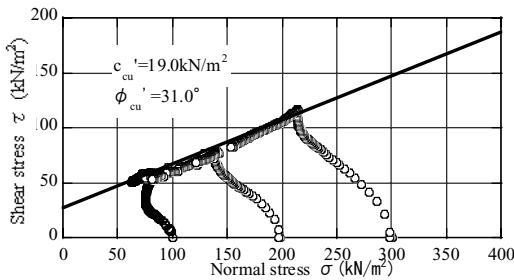


図-7 定体積繰返し一面せん断試験結果

試験ではいづれも、上下方向は原位置に合わせた。

いづれの試験も、標準の一面せん断試験装置(供試体寸法直径 60mm、高さ 20mm)を用いた。せん断変位速度は、定体積を繰返しも含めて 0.05mm/min、定圧を 0.02mm/min、せん断箱間隔をいづれの試験とも 0.02mm で実施した。また、繰返し定体積一面せん断試験では、所定の変位に達したらせん断方向を逆転し、せん断抵抗力が 0kN/m² になつたら再び正転に戻すことを繰返す方法で行った。

4.2.2 試験結果

定体積一面せん断試験結果を図-7 に示す。また、図-8 は、繰返し試験結果の一例である。このような結果から、変位の増加に伴うせん断剛性の変化を見るために、せん断逆転時の除荷過程での(せん断抵抗力/せん断変位)勾配を求めて見掛けの剛性率とし、せん断変位との関係で表して図-9 に示した。上載圧に依らず、変位の増加と共に見掛けの剛性率は急激に低下し、変位 2mm でほぼ塑性状態に移行した。ここで、上載圧 $\sigma_n=200\text{kN/m}^2$ までは、見掛けの剛性率が上載圧に依らずほぼ同じになる傾向にあることが判った。

一方、定圧試験の結果を図-10 に示す。上載圧 $\sigma=100\text{kN/m}^2$ 以上ではせん断応力-変位曲線が延性的でダイレイタンシーが負を呈し、せん断変形を受けると間隙水圧の上昇を引き起こす可能性が示唆された。

また、体積変化は、 $\sigma=150\text{kN/m}^2$ で顕著に収縮するようになり、それ以上の上載圧では、ほぼ一定となった。

なお、いづれの試験でも試験後のせん断面上にスラリー化した様子は視認できなかった。

5. 試験結果から推定される地すべり・崩壊メカニズム

5.1 荒低沢地すべりのメカニズム

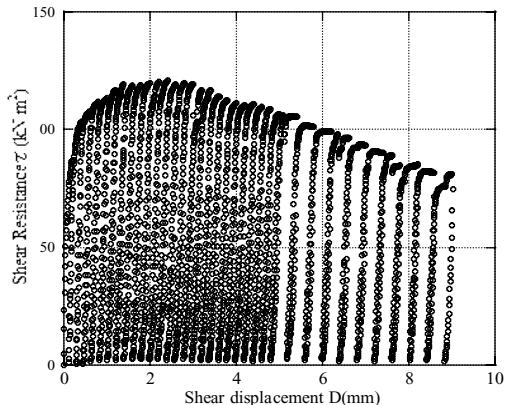


図-8 定体積繰返し一面せん断試験結果

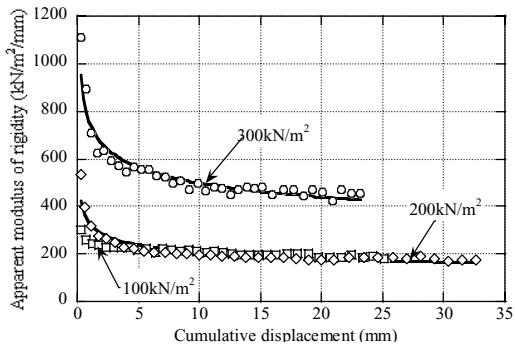


図-9 見かけの剛性率と累積変位の関係

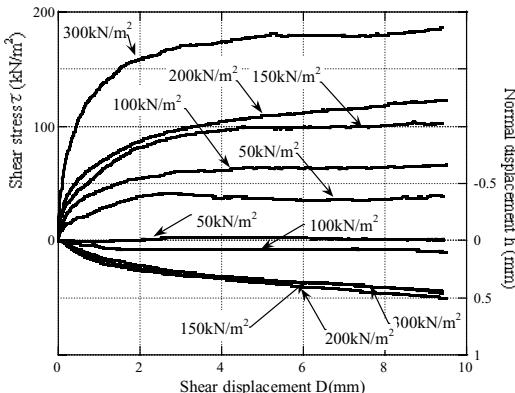


図-10 定圧一面せん断試験結果

荒砥沢地すべりでは、すべり面上に少なくとも2層の溶結相を伴う火砕流堆積物が分布しており、その厚さは100mを超えるものである。今回の地震時に、これら上載層に大きな慣性力が生じ、結果として対象とした凝灰質砂岩/頁岩層に片振幅せん断ひずみで0.1%以上のひずみが生じたと推察された。

対象とした凝灰質砂岩/頁岩層は、軟岩様の強さを呈した。また、動的性質では乱さない状態と再構成状態とほぼ同じ挙動を呈した。これらのこととは、今回の地震とほぼ同規模の外力が作用しなければ、この地すべりは滑動しないと考えられ、過去にこの地域が今回とほぼ同規模の地震に見舞われた可能性を示唆する。それ故、この地すべりの滑動履歴が、この地域の地震活動になり得る可能性がある点で興味深い。

一方、この地すべりは滑動後、移動体は300m以上の距離を移動したが、ここでの試験では、残留強さを用いるモデルでの長距離移動が説明し難い結果となった。流体モデルの適用をはじめ、他のモデルで検討する必要がある。

5.2 冷沢崩壊のメカニズム

冷沢ではすべり面上に1層の溶結相を伴う火砕流堆積物が分布しているので、荒砥沢地すべり同様、この層に作用した慣性力に起因して、対象層に一面せん断変位で2mmに相当する変位が生じ、弾性的性質が失われて変形が大きくなつたと考えられた。

繰返し一面せん断試験では、上載圧 $\sigma=200\text{kN/m}^2$ 程度で見かけの弾性係数の変化が $\sigma=100\text{kN/m}^2$ とほぼ同じ傾向であった。これは、上載圧 $\sigma=200\text{kN/m}^2$ 程度でスラリー化が生じたためと思われる。この崩壊発生箇所のすべり面上の層厚は8~10m程度であり、そこから上載圧は150~200 kN/m²程度と予想され、この推定上載圧と対応している。このことから発生箇所の層厚が崩壊の一因であった可能性が示唆される。

一方、定圧一面せん断試験では、 $\sigma=150\text{kN/m}^2$ 時以降の体積変化傾向がほぼ同じになったが、これは上述した繰返し試験同様、供試体のスラリー化と関連すると考えられる。そして、 $\sigma=150\text{kN/m}^2$ 時以降は体積変化が収縮側に大きく間隙水圧の上昇を生じやすくなり、 $\sigma=200\text{kN/m}^2$ 時程度ではせん断抵抗力も特徴的に低下するので、それらが相互に作用して崩壊後の土石流化を引き起こしたと考えられる。

6. まとめ

- 1) 荒砥沢地すべり凝灰質砂岩/頁岩試料はシルト分を多く含み、コンシステンシー特性は非塑性であった。
また、冷沢崩壊軽石質火山灰試料は粘土分を30%程度含み、自然含水状態のまま練返すと塑性状からスラリー状に変化する性質を示した。
- 2) 荒砥沢地すべり凝灰質砂岩/頁岩試料は、軟岩様のせん断強さであった。また、非排水繰返し三軸圧縮試験の結果、乱さない状態、再構成状態ともほぼ同じ挙動を呈した。
- 3) 荒砥沢地すべりでは残留強さを用いるモデルで、移動体の長距離移動を説明できなかつた。異なるメカニズムでの解説が課題である。
- 4) 冷沢崩壊軽石質火山灰試料は、上載圧は150~200 kN/m²程度で繰返しせん断を受けるとスラリー化することが予想された。

最後に、東北森林管理局宮城北部森林管理署宮城山地災害復旧対策室長の江坂文寿氏、(株)テクノ長谷加藤彰氏、(社)東北建設協会、弘前大学 檜垣大助教授、東北学院大学宮城豊彦教授、東北工業大学千葉則行准教授には、資料の提供や現地調査で大変お世話になった。ここに記して厚く感謝の意を表する。

参考文献 1)千葉他(2009):4.3.2 荒砥沢ダム上流で発生した大規模地すべりと変位地形、平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震災害調査報告書、(社)土木学会東北支部他4学協会編、pp.69-73. 2)東北森林管理局(2009):岩手・宮城内陸地震に係る山地災害対策検討会分科会資料(荒砥沢地すべり)、101p. 3)農水省迫川上流農業水利事務所(1999):『荒砥沢ダム技術誌』、農水省迫川上流農業水利事務所刊。