

斜面崩壊の素因となる不連続面のせん断強度の評価方法

Evaluation of Shear Strength along Discontinuous Planes Causing Slope Failures

山本 哲朗 (やまもと てつろう)
山口大学教授 工学部社会建設工学科

寺山 崇 (てらやま たかし)
山口大学大学院理工学研究科博士前期課程 学生

鈴木 素之 (すずき もとゆき)
山口大学助手 工学部社会建設工学科

原田 博 (はらだ ひろし)
日特建設(株)山口営業所 所長

1. はじめに

降雨が斜面崩壊の誘因であることに相違ないが、非常に僅少な降雨量時に斜面内の節理面・片理面に沿ってすべりが発生した事例がいくつも確認されている^{1),2)}。この場合、降雨に伴う応力変化もあるが、その面に沿う土のせん断強度が元々小さいために崩壊が容易に発生したと考えられる。

山口県内を中心とした斜面崩壊の調査結果に基づいて、崩壊の素因となった不連続面として、①地すべり粘土層、②粘板岩の片理面、③黒色薄層土層、④花崗岩とまさ土境界、⑤まさ土と粘土細脈境界の5タイプを確認している。とくに、③の黒色薄層土は山口県内の各種の地質からなる斜面で見られ、黒色物はマンガンあるいは鉄の酸化物ないし水酸化物によるものだと考えられる³⁾。④の花崗岩とまさ土境界⁴⁾や⑤のまさ土と粘土細脈境界⁵⁾は花崗岩地帯によくみられるもので、いずれも崩壊に深く関与している⁴⁾。

著者らは原位置でこのような不連続面のせん断強度を測定するために超簡易現場せん断試験機を開発し、地すべり粘土や黒色薄層土に対して試験を実施してきた。また、現場せん断試験の実施が困難な場合には、現地で見られた不連続面を室内で模造した供試体に対して一面せん断試験を実施してきた。従来の研究では、斜面崩壊の具体的事例に関連付けた不連続面の意味付けが十分でなかったため、不連続面に沿った土のせん断強度はほとんど明らかにされていない。

本文では、斜面崩壊の素因となった不連続面の具体例を記述するとともに、超簡易現場せん断試験および一面せん断試験を用いて測定した不連続面のせん断強度特性について検討する。

2. 現場せん断試験による不連続面のせん断強度の測定

2.1 超簡易現場せん断試験

斜面内に潜在する不連続面でのせん断強度を原位置で求めるため、図-1に示す超簡易現場せん断試験機を開発した⁶⁾。この試験機はせん断力載荷装置、垂直力載荷装置およびせん断箱(長さ6cm, 幅6cm, 高さ3cm)から構成される(口絵写真-6)。試験は周辺部の土を

排除して残した土塊を一面せん断するもので、必然的に不連続面がせん断面として規定されるので、せん断箱は上箱のみで構成される。載荷板にはスラストベアリングが挿入されており、載荷板とせん断箱の間に発生するせん断方向の摩擦力がほぼ生じないことを確認している。従来の現場せん断試験機と大きく異なる点として、①装置の機構が極めて簡単であること、②軽量であるため斜面でも容易に試験を実施できることが挙げられる。ただし、せん断力および垂直力の載荷はすべて人力で行うので、傾斜角が50°を超える急斜面では垂直応力のある一定の変動幅(±1.96 kPa)に設定することが困難であった。その他の試験の詳細は文献3)に委ねる。

2.2 地すべり粘土に対する適用例

a) 現場概要

上述の超簡易現場せん断試験を山口県油谷町大坊の地すべり地における末端部のすべり面で実施した。地質は中世代白亜紀後期の阿武層群であり、岩種は凝灰岩である。当現場およびその近傍は大規模な地すべり地帯であり、無数のクラックが確認された。すべり面上には白色～暗紫色の地すべり粘土が確認された(口絵写真-7)。

b) 試験結果

図-2に試験結果の一部として破壊線を示す。比較のため、同じ試料を練返し再構成して実施したリングせん断試験から得られた残留強度線も示している。内部摩擦角と粘着力として、超簡易現場せん断試験から $c_d=14.0$ kPa, $\phi_d=16.6^\circ$ 、リングせん断試験から $c_r=0$ kPa, $\phi_r=15.3^\circ$ を得た。内部摩擦角は両試験ともほぼ同じである。粘着力は、リングせん断試験ではゼロであるのに対し、現場せん断試験では幾分か有している。この理由

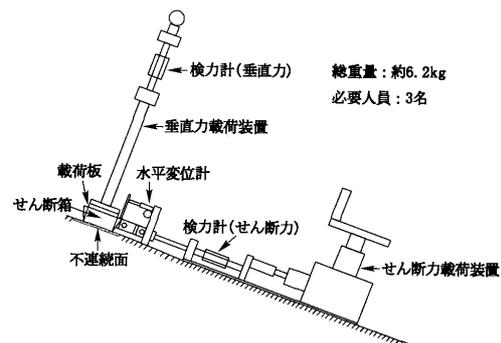
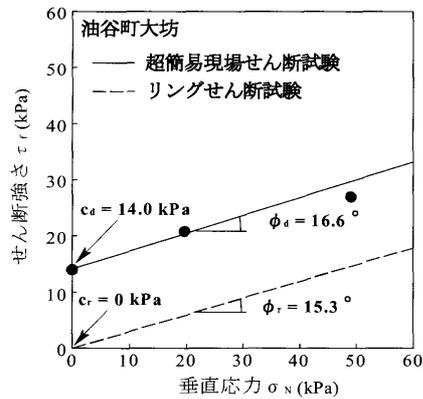


図-1 超簡易現場せん断試験機 (2000)



図一2 現場せん断試験とリングせん断試験の強度定数

として、リングせん断試験では試料を高含水比で練返したことが挙げられる。なお、本試験は Skempton⁷⁾が取り上げた“現場残留強度”を調べるためのすべり面試験としても有用である。

2.3 片理面に付着した粘土に対する適用例

東広島市において上述の油谷町と同様の試験を実施した。地質は古生代後期の粘板岩である。滑落崖を踏査したところ、粘板岩の片理面に白色～茶褐色の粘土が付着していた(口絵写真一8)。試験結果にかなりのばらつきがみられたが、概略として $c_d = 22.4 \text{ kPa}$, $\phi_d = 14.2^\circ$ を得た。ばらつきの理由として、現場の傾斜角が 50° を超えていたことと、土質がきわめて不均質であったことが考えられる。

3. 室内一面せん断試験による不連続面のせん断強度の測定

3.1 貼り合わせ供試体に対する一面せん断試験

上述した現場せん断試験の実施が困難な場合、例えば非常にもろい砂質土が上載した不連続面から供試体を切り出しすることはできないので、不連続面を境に異なる二つの試料を採取し、それらを実験室内で貼り合わせたものに対して一面せん断試験を実施することにした。この時、注意する点として不連続面がせん断面と一致することである。このことは試験終了後にせん断状況を観察して確認した。ここで取り上げるのは、(A) 黒色薄層土、(B) 花崗岩—まさ土、(C) まさ土—粘土の3タイプであり、その簡単な供試体モデルを図一3に示す。

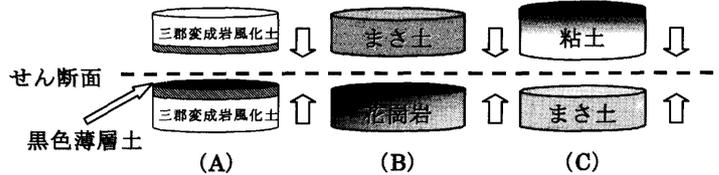
3.2 黒色薄層土層に対する適用例

a) 現場概要

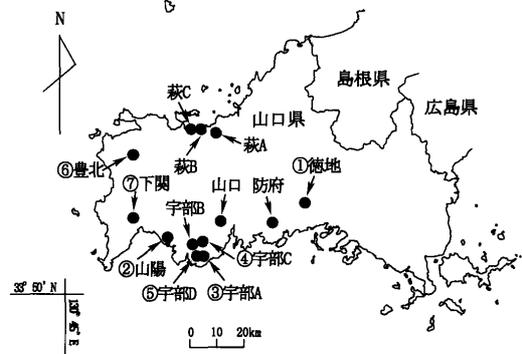
山口県内に黒色薄層土が確認された現場は全部で13箇所であり、図一4にそれらの地点を示す。口絵写真一9にその一例を示しているが、光沢のある滑らかな黒色薄層土ですべりが発生しており、そのせん断強度を求めておくことは重要である。

b) 試験結果

ブロックサンプリングにより黒色薄層土を含む不攪乱試料を採取し、黒色薄層土を端面とした円盤状土塊(直径60 mm, 厚さ10 mm)を二つ作製し、端面同士を互



図一3 (A) 黒色薄層土、(B) 花崗岩—まさ土、(C) まさ土—粘土の供試体モデル



図一4 黒色薄層土が確認された箇所(地点番号を記載しているものは試料を採取できたところ)

表一1 各斜面での黒色薄層土の強度定数

| 地点番号 | 斜面 | $c_d(\text{kPa})$ | $\phi_d(^{\circ})$ |
|------|-----|-------------------|--------------------|
| ① | 徳地 | 2.8 | 24.5 |
| ② | 山陽 | 6.0 | 25.7 |
| ③ | 宇部A | 0 | 23.9 |
| ④ | 宇部C | 2.3 | 26.7 |
| ⑤ | 宇部D | 15.9 | 21.0 |
| ⑥ | 豊北 | 9.5 | 21.5 |
| ⑦ | 下関 | 17.6 | 18.1 |

いに貼り合わせ、せん断箱内に収めた。試験では、垂直応力 $\sigma_N = 49, 98, 147 \text{ kPa}$ の3とおりで圧密した後、せん断速度 1.0 mm/min で定圧せん断した。表一1に得られた黒色薄層土(7試料)の強度定数を示す。粘着力は $0 \sim 17.6 \text{ kPa}$ (その平均値は 7.7 kPa)、内部摩擦角は $18.1 \sim 26.7^\circ$ (その平均値は 23.1°) であり、黒色薄層土の化学的組成はほぼ同じなので、黒色薄層土に起因した斜面崩壊を検討する場合、平均基準強度定数として $c_d = 7.7 \text{ kPa}$, $\phi_d = 23.1^\circ$ を提案した³⁾。

3.3 花崗岩とまさ土との境界に対する適用例

a) 現場概要

広島市佐伯区では1999年6月の集中豪雨により多数の花崗岩からなる斜面崩壊が発生した。ここで取り上げる事例は崩壊長さ 37.0 m 、幅 26.8 m 、厚さ 3.0 m 、勾配 42° の斜面崩壊であり、その形態は平面すべりであった。すべり面上には風化しているものの形状を保った花崗岩が露出しており、崩土はまさ土であった。このことから、崩壊は表層のまさ土と基盤である花崗岩との境界で発生したものと考えられる。

b) 試験結果

この崩壊挙動を再現するため、下部に直径 6 cm に加工した花崗岩を敷き、上部に締固めたまさ土 ($\rho_s = 2.598 \text{ g/cm}^3$, $F_c = 11.1\%$) を貼り合わせ、 $\sigma_N = 24.5, 49,$

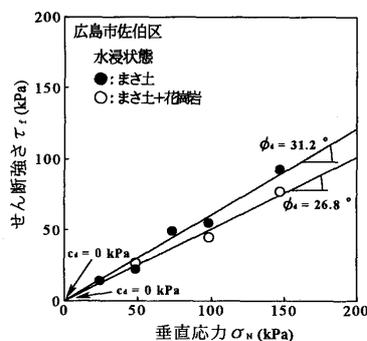


図-5 まさ土と花崗岩の強度定数

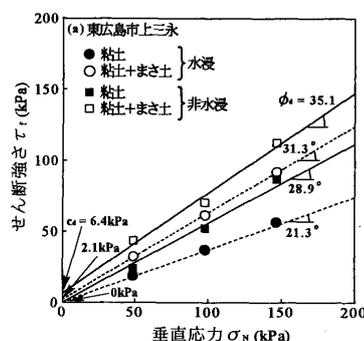


図-6 (a) まさ土と粘土の強度定数 (上三永)

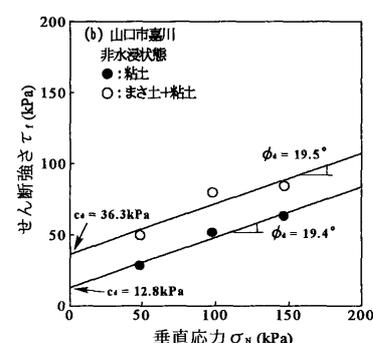


図-6 (b) まさ土と粘土の強度定数 (嘉川)

73.5, 98, 147 kPa の 5 とおりで圧密した後、直ちに水浸状態でせん断速度 1.0 mm/min によりせん断した。また、比較のためにまさ土単体に対しても同じ試験条件で実施した。図-5 に両供試体の破壊線を示す。まさ土単体から $c_d = 0$ kPa, $\phi_d = 31.2^\circ$, 貼り合わせた供試体から $c_d = 0$ kPa, $\phi_d = 26.8^\circ$ が得られた。 c_d はともにゼロであることは水浸状態であるので理解できる。 ϕ_d は貼り合わせ供試体の方がまさ土単体に比べて 4.4° ほど小さい。この結果から、まさ土と花崗岩の境界面上で崩壊が発生しやすいことが示唆される。

3.4 まさ土と粘土との境界に対する適用例

a) 現場概要

まさ土と粘土との境界およびまさ土内の粘土細脈で崩壊が発生した事例として、それぞれ東広島市上三永、山口市嘉川の現場を示す。上三永の場合、切土開削中に節理面上に付着した白色粘土とまさ土との境界付近ですべりが発生していた(口絵写真-10)。嘉川の場合、節理面上に付着した白色の粘土とまさ土との境界付近の粘土内で崩壊の兆候がみられた(口絵写真-11)。地質はともに中性代白亜紀の広島型花崗岩である。

b) 試験条件と結果

これらの崩壊挙動を再現するため、締め固めたまさ土と練返し再構成した粘土を貼り合わせ、一面せん断試験を実施した。試料はいずれも崩壊斜面から採取したもので、その物理的性質は、上三永の場合、粘土 ($\rho_s = 2.627$ g/cm³, $F_c = 92.7\%$, $I_p = 26.3$)、まさ土 ($\rho_s = 2.604$ g/cm³, $F_c = 29.1\%$, $I_p = 6.2$)、嘉川の場合、粘土 ($\rho_s = 2.574$ g/cm³, $F_c = 60.0\%$, $I_p = 15.7$)、まさ土 ($\rho_s = 2.623$ g/cm³, $F_c = 18.8\%$) である。 $\sigma_N = 49, 98, 147$ kPa の 3 とおりで正規圧密状態にした後、せん断速度 0.25 mm/min でせん断した。図-6 (a) および (b) にそれぞれ上三永および嘉川の破壊線を示す。上三永の場合、水浸・非水浸によらず、 c_d, ϕ_d はともに貼り合わせ供試体に比べ粘土単体の方が小さい。嘉川の場合も、上三永と同様である。粘土単体の方がまさ土と粘土を貼り合わせたものよりすべりに対する抵抗力は小さいので、この斜面崩壊は粘土細脈(粘土シーム)ですべりが発生した可能性が高いと

考えられる。すなわち、現場で起きた現象はまさ土で規制された境界面近傍の粘土シーム内部ですべりが発生したといえる。

4. まとめ

斜面崩壊の素因として地すべり粘土、粘板岩の片理面、黒色薄層土、花崗岩—まさ土、まさ土—粘土細脈といった不連続面の存在が挙げられ、現場および室内のせん断試験による不連続面のせん断強度の評価方法について記述した。現時点での結果をまとめると、①地すべり粘土および黒色薄層土で発揮されるせん断強度はその近傍の部分と比較して小さい。②花崗岩とまさ土との境界で発揮されるせん断強度はまさ土単体よりも小さい。③粘土とまさ土との境界で発揮されるせん断強度は粘土単体よりも大きい。

不連続面が斜面内に流れ盤として存在する場合には、それらがすべり面となって崩壊が発生する可能性があるため、少なくともこれら不連続面の強度定数を参考に設計時に切土勾配を決定すべきである。

参考文献

- 山本哲朗・鈴木素之・寺山 崇・池溝友謙：山口県における不連続面の発達した岩盤斜面崩壊，第19回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，pp. 21~22, 2000.
- 山本哲朗・高本直邦・西村祐二郎・瀬原洋一：三郡変成帯における鋸状斜面崩壊，土と基礎，Vol. 44, No. 11, pp. 9~12, 1996.
- 山本哲朗・鈴木素之・原田 博・寺山 崇：光沢質黒色薄層土に起因した斜面崩壊とそのせん断強度測定，地盤と建設，Vol. 18, No. 1, pp. 99~104, 2000.
- (株)地盤工学会編：平成11年の広島県豪雨災害調査報告書，2000.
- 北川隆司：花崗岩の斜面崩壊方向の指標としての粘土細脈，応用地質，Vol. 37, No. 1, pp. 64~71, 1996.
- 山本哲朗・鈴木素之・原田 博・宮内俊彦・寺山 崇：超簡易現場せん断試験による不連続面のせん断強度，第39回地すべり学会研究発表講演集，pp. 365~366, 2000.
- Skempton, A. W.: Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, Geotechnique, Vol. 35, No. 1, pp. 3~18, 1985.

(原稿受理 2001.3.1)