

防府土石流災害の崩壊源頭部の特徴と 崩壊メカニズムに関する検討

CONSIDERATION ON GEOTECHNICAL FEATURES AND COLLAPSE MECHANISM AT SOURCE AREA IN HOFU DEBRIS FLOW DISASTER

野村 英雄¹・寺山 崇²・今岡 洋輔³・鈴木 素之⁴
Hideo NOMURA, Takashi TERAYAMA, Yosuke IMAOKA and Motoyuki SUZUKI

¹ 栄建設コンサルタント (〒755-0154 山口県宇部市今村南 2-1-13)

E-mail: nomura.3d@sakakon.com

² 山口リアライズ (〒753-0067 山口県山口市赤妻町 3-1)

E-mail: terayama@yamaguchi-realize.co.jp

³ 山口大学大学院理工学研究科博士前期課程 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: p005vf@yamaguchi-u.ac.jp

⁴ 山口大学大学評価室 (〒753-8511 山口市吉田 1677-1)

E-mail: msuzuki@yamaguchi-u.ac.jp

Key Words: Debris flow, Slope failure, Masado, Granite, Seepage flow analysis, Discontinuous plane

1. はじめに

平成21年7月21日早朝からの集中豪雨により、山口県防府市を中心に土石流、崩壊等が多数発生し、甚大な被害が生じた。山口県における被害は死者22名、全壊33棟、半壊77棟、床上浸水696棟、床下浸水3864棟であり¹⁾、国の激甚災害に指定された。図-1に防府市周辺の主な土砂災害発生地点を示す。特に被害の大きかった土砂災害発生地点では、いずれも下流域に大量の水・土砂・巨礫・流木が排出され、それらによって家屋や乗用車の被害、道路・橋梁の損壊など甚大な被害が生じた。

著者らの調査・研究によれば、表層の地質が広島花崗岩に覆われた地域への観測史上記録的な豪雨により、源頭部となる尾根等で崩壊が発生した。源頭部の崩壊は概

ね花崗岩とまさ土の境界で発生した。また、源頭部のまさ土の水中安息角は比較的高く、斜面勾配より高い値を示すものがあつたことから、不飽和土であつた地山が飽和化して崩壊するというよりは、地山内に発生した浸透圧の増大により有効応力が低下して崩壊が起きた箇所もあるものと推察される²⁾。

本報告では、図-2に示す真直地区の土石流を対象として、崩壊源頭部の状況をもとに実施した浸透流解析およびまさ土と花崗岩の不連続面のせん断強度特性に着目した安定解析の結果を示すとともに、それらに基づく崩壊メカニズムに関する考察を記述する。

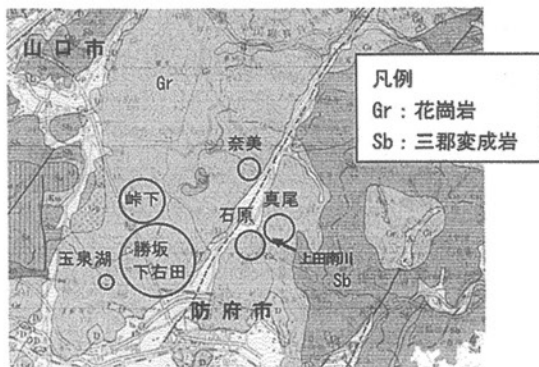


図-1 防府市周辺の主な土砂災害発生地点と地質状況(文献3)の地質図に加筆)

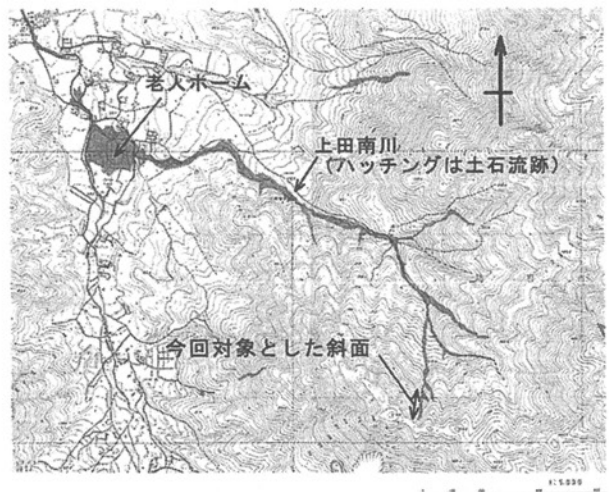


図-2 真直地区の土石流経路と対象とした源頭部斜面

2. 崩壊源頭部の状況²⁾

真尾地区では土石流が標高300~400mの各支流の少なくとも4箇所から発生したと考えられる。被災した老人ホームの北側には過去の土石流あるいは大規模な崩壊によって形成されたとみられる崖錐地形が存在し、土石流はこの崖錐地形に乗り上げることなく、上田南川の流路に沿って流下し、老人ホームを直撃した。扇状地には上流からの土石流等によって供給された花崗岩の土砂や巨礫などが堆積した。また、扇状地堆積物の露頭にはクサリ礫が観察され、古い時代から崩壊や土石流が繰返し発生していたことが示唆された。

本地区における複数の崩壊源頭部のうち、本論文で検討の対象とした崩壊源頭部の特徴をまとめると、①平均斜面勾配は源頭部付近で20~30°の緩勾配、滑落崖付近で70°~80°の急勾配である。②源頭部付近の崩壊厚はうすく、集水地形のようではない。③源頭部直下の斜面勾配は35°程度であり、常時湧水がみられ集水地形のようである。これより、崩壊メカニズムとしては、源頭部とその直下において異なるものと考えられる。すなわち、源頭部の崩壊は降雨浸透によって形成された地下水面も

しくは飽和度の上昇に伴うサクシジョンの喪失によって引き起こされ、しかも崩壊土砂が流下せずに残積していることから、崩壊時の飽和度はそれほど高くないものと推察される。一方、源頭部の直下は集水地形のようであることから、その部分の崩壊は浸透圧の増大によって引き起こされたものと推察される。また源頭部直下の斜面は凹形状をなす谷部を埋めるように溪床土砂あるいは風化残積土(まさ土)が堆積していたと考えられる。また今回の崩壊源頭部の横には過去の崩壊跡が存在する。この古い崩壊跡は植生が貧弱であり、今回の豪雨時に地表流が発生した可能性もある。なお、源頭部及びその直下にパイプ流の跡は見つからなかった。これらの状況を写真-1~5に示している。



写真-1 崩壊源頭部



写真-3 今回の崩壊源頭部と古い崩壊跡



写真-4 崩壊源頭部の滑落崖



写真-2 崩壊源頭部を上流から望む



写真-5 崩壊源頭部直下の斜面(上流から下流を望む)

3. 花崗岩とまさ土の物理・強度特性^{2), 4)}

図-3に本地区の近くの源頭部から採取した土試料の粒径加積曲線を示す。今回の崩壊源頭部で採取した土試料はいずれも、砂あるいは礫に分類され、均等係数は29.3~130と大きく、細粒分含有率は10~20%であることが報告されている²⁾。なお、本地区の源頭部付近で採取した土試料の物理特性は $U_c=41.1$ 、 $D_{max}=10$ mm、 $D_{50}=0.46$ mm、 $F_c=18.7$ %であり、土質分類はSF-G（細粒分礫まじり砂）に分類される。一方、今回の源頭部の崩壊は概ね花崗岩とまさ土の境界で発生したことが報告されている²⁾。このような崩壊形態は、1999年6月29日広島災害の広島市佐伯区における崩壊でも観察されている。そのケースでは、すべり面上に風化しているものの形状を保った花崗岩が露出し、崩土はまさ土であったことから、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推察された。そこで、まさ土と花崗岩を貼り合わせた供試体に対して圧密定圧一面せん断試験が実施された⁴⁾。せん断試験では貼り合わせ供試体の境界面とせん断面が一致するようになっており、写真-6に試験終了後のせん断状況を示している。図-4には、ま

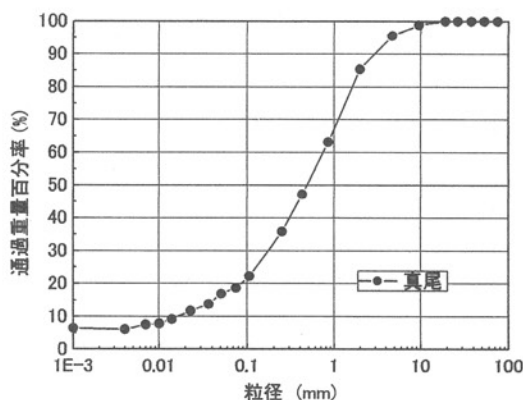


図-3 まさ土の粒径加積曲線

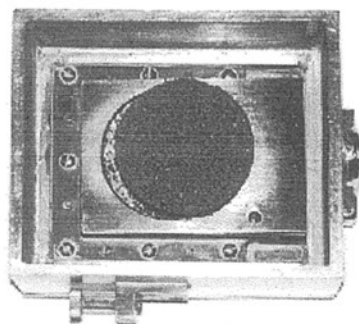


写真-6 試験終了後のせん断面の状況 (上: まさ土, 下: 花崗岩)

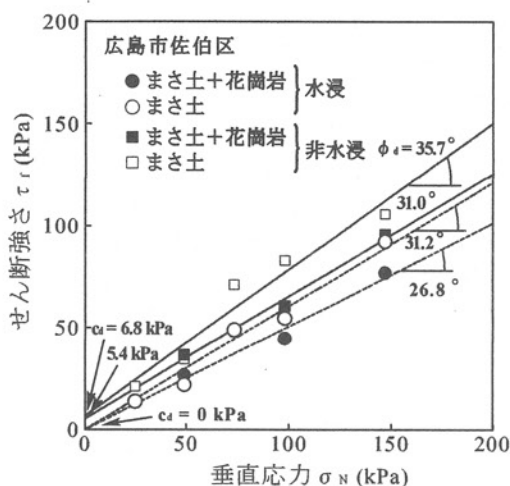


図-4 まさ土と花崗岩の境界面のせん断強さ⁴⁾

さ土のみの供試体、まさ土と花崗岩を貼り合わせた供試体の一面せん断試験結果⁴⁾を示している。貼り合わせ供試体の場合、水浸状態では粘着力 $c_s=0$ kPa、内部摩擦角 $\phi_s=26.8^\circ$ が得られた。一方、まさ土単体の場合、水浸状態では $c_s=0$ kPa、 $\phi_s=31.2^\circ$ が得られた。 ϕ は貼り合わせ供試体のほうがまさ土のみよりも 4.4° 小さく、まさ土と花崗岩の境界面で崩壊が発生しやすいことが示唆された。今回は、この強度定数を代用して、本斜面に対して極限平衡法による安定解析を実施した。

4. 浸透流解析および安定解析

(1) 解析条件

上記の崩壊状況を考慮して、源頭部斜面を対象とした非定常の二次元飽和一不飽和浸透流解析を実施した。使用した解析プログラムは大西・西垣ら⁵⁾によって開発されたUNSAFである。解析断面はレーザープロファイラーによって計測された縦断面より設定した。解析対象範囲は上流端は分水嶺となる尾根部（崩壊滑落崖）に、下流端は傾斜が緩くなり崩壊が土石流の形態をとると考えられる範囲までとして約80mの区間を対象とした。解析モデルは、まさ土と基盤層の2層構成とした。メッシュ分割は概ね水平2~3 m程度、鉛直0.3~0.6 mとなるように設定した。境界条件は地表面に降雨浸透境界条件を設定し、後述する降雨波形を地表面からモデル内に浸透させた。また、谷部において常時湧水がみられる箇所には水位固定境界を設定した。基盤岩の透水係数としては 1×10^{-5} cm/s、まさ土の飽和透水係数は粒度試験結果を参考にして 1.0×10^{-3} cm/sとした。水分特性曲線は竹下・河野ら⁶⁾がまさ土に対してvan Genuchtenモデルを適用した結果を参考に設定した。解析時の初期条件は、本地域と同様の広島型花崗岩地帯で発生した平成11年広島県豪雨災害における原位置のまさ土の飽和度に関す

る調査結果⁷⁾を参考に、まさ土の飽和度が50%となるように負の圧力水頭 ϕ を設定した。図-5(a), (b)にそれぞれ解析に用いた降雨データおよび解析モデルを示している。飽和-不飽和浸透流解析に用いる降雨波形は、国土交通省の降雨観測点(真尾)における記録を用い、非定常計算に用いる降雨記録は解析初期条件の誤差(計測範囲外の地下水位の有無など)の影響を小さくするために、前期降雨を約3ヶ月程度与えることとして2009年4月1日~2009年7月21日までの記録を用いた。

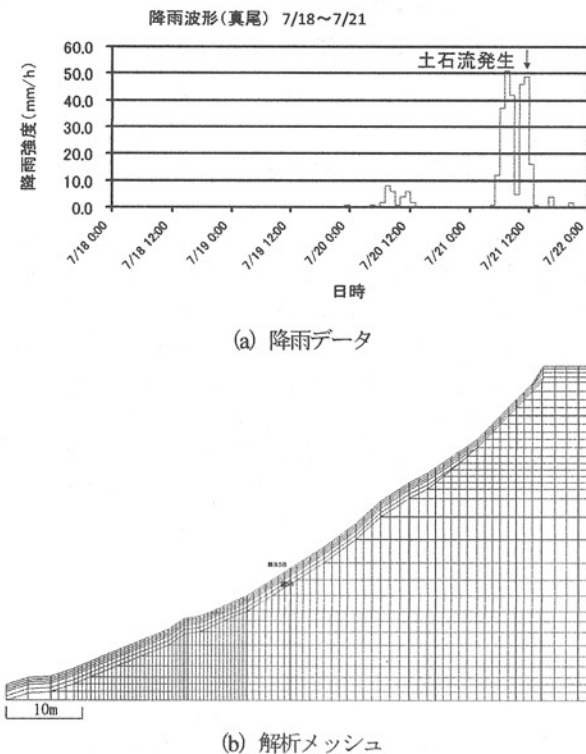


図-5 降雨データと解析モデル

(2) 浸透流解析結果

上述のデータを用いて、浸透流解析から得られた土石流発生8時間前から土石流発生時までの地下水位の経時変化を図-6に示す。また同図には安定計算の対象とした斜面で区分したエリア1~5を示している。同図から、モデル下部の緩傾斜部において地下水位が徐々に上昇し、崩壊発生時にはほぼ完全飽和に近づいていることがわかる。しかし、エリア1, 2, 3の地下水位は土石流発生8時間前から発生時刻に至るまで大きな変化がみられない。また、エリア4, 5では土石流発生4時間前から地下水位が形成され、崩壊発生時には大きな飽和領域が形成されていることがわかる。これに比べてエリア1~3には飽和領域の形成は見られない。これはエリア4, 5のまさ土の層厚が薄いためエリア1~3に比べて飽和度の上昇が早く、降雨強度の上昇とともに斜面表層から飽和領域が形成されたためと考える。また、エリア5の崩壊形態は崩壊跡に基盤岩が露出せず、崩壊土は滑落崖直下に残留

して下流まで流下していない。これは、まさ土層の中で飽和度の上昇に伴ってすべりが発生したことを示唆しており、解析結果で得られたエリア4, 5での飽和領域の形成と良く合っている。

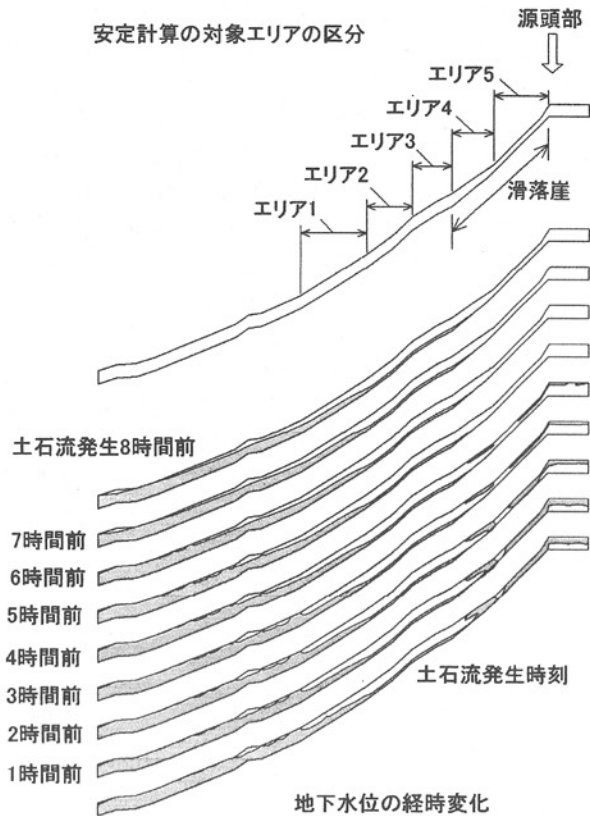


図-6 地下水位の経時変化と対象エリアの区分

(3) 安定解析結果

土石流発生までの地下水位変化に対応した各エリアの安全率 F_s を求めた。ここで、安全率の計算方法としては、無限長斜面の極限平衡式を用いた。なお、強度定数としては、まさ土内でのすべりが推測されるエリア5には、前述のように、まさ土のみの強度定数を、まさ土と花崗岩の境界面でのすべりが推測されるエリア1~4には、境界部供試体の強度定数を用いた⁴⁾。図-6に示した区分した斜面毎の安全率の経時変化を図-7に示す。安全率は土石流発生8時間前の時点においても全体に1.0を下回っているが、これは、不飽和状態で保持されていたサクシオンを強度として見込んでいないこと、エリア1~4は谷部であり三次元効果が強く働かずべり形状であるが、今回の安定計算ではこの点を計算に考慮していない等が原因として考えられる。安全率の低下は斜面中央部のエリア1と滑落崖付近のエリア4, 5において見られ、土石流発生の原因となった崩壊は滑落崖と、斜面中央部の2箇所が考えられる。

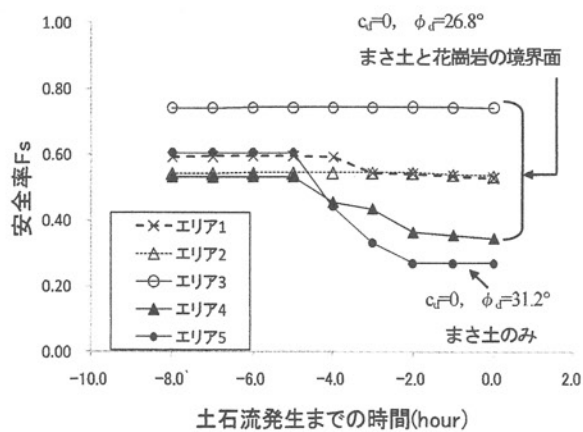


図-7 安全率の経時変化

5. まとめ

源頭部の崩壊状況の観察、浸透流解析および安定解析の結果から、当該箇所崩壊メカニズムは以下のように推察される。

- 源頭部の崩壊状況の観察から滑落崖部の崩壊と、対象斜面中央部の2つの崩壊が発生したことが分かる。
- 浸透流解析・安定解析の結果および崩壊状況の観察から、滑落崖部の崩壊は飽和に伴うサクシオン低下に起因し、対象斜面中央部の崩壊は地下水面の上昇に起因すると考えられる。
- 2つの崩壊の内、滑落崖部の崩壊が先行して発生し、その衝撃で対象斜面中央部の崩壊が誘発された可能性と、2つの崩壊が独立して発生した可能性の両方が考えられる。ただし、滑落崖部の崩壊土砂が流下せず残留していることから斜面中央部の崩壊が滑落崖の崩壊を誘発した可能性は低い。
- 対象斜面中央部には植生の貧弱な古い崩壊跡が合流している。崩壊当時はこの古い崩壊跡に表面流が発生して対象斜面中央部に流下した可能性も考えられる。

- 対象斜面下部ではパイプ流の発達や溪床堆積土よりも深い水深が発生した可能性も考えられるが、滑落崖は集水地形ではないこと、対象斜面中央部は集水面積が小さいこと、パイプ跡が見つかっていないことから、パイプ流や深い水深が発生した可能性は低いと考えられる。

謝辞：国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所には降雨データを提供いただいた。また、アジア航測㈱には地形データを提供いただいた。なお、本研究の一部は科研費 (No. 22360187, 代表 中田幸男山口大学教授) の助成を受けた。ここに記して、関係各位に対して謝意を表す次第である。

参考文献

- 総務省消防庁：平成21年7月中国・九州北部豪雨について (第32報), <http://www.fdma.go.jp/data/011002251707333418.pdf>
- 地盤工学会 2009年7月豪雨による山口県土砂災害緊急調査団：2009年7月21日豪雨による山口県防府地区での斜面災害, 地盤工学会誌, Vol. 57, No. 12, pp. 39-42, 2009.
- 西村祐二郎, 今岡照喜, 宇多村 譲, 亀谷 敦：新編山口県地質図1:150,000, 山口地学会, 1995.
- 山本哲朗, 鈴木素之, 寺山 崇, 原田 博：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, 土と基礎, Vol. 49, No. 7, pp. 7-9, 2001.
- 大西有三, 西垣誠：有限要素法による飽和-不飽和領域の三次元浸透解析, 第12回土質工学研究発表会, pp. 929-932, 1977.
- 竹下祐二, 河野伊一郎：不飽和浸透特性の推定方法とその適用について, 地盤と建設, Vol. 11, No. 1, pp. 95-104, 1993.
- (社)地盤工学会調査部 平成11年広島県豪雨災害緊急調査委員会・(社)地盤工学会中国支部：平成11年の広島県豪雨災害調査報告書, pp. 65, 2000.

(2010. 5. 14 受付)

