

2009年に東広島市志和町内地区で発生した土砂災害に関する研究

Study on a Landslide Disaster Occurred in Higashi-Hiroshima City in 2009

中川翔太	Shouta NAKAGAWA	(広島大学大学院工学研究科)
加納誠二	Seiji KANO	(広島大学大学院工学研究院)
土田 孝	Takasi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究院)
海堀正博	Masahiro KAIBORI	(広島大学大学院総合科学研究科)
中井真司	Shinji NAKAI	(復建調査設計株式会社)
来山尚義	Naoyoshi KITAYAMA	(復建調査設計株式会社)

2009年7月24日から25日にかけての降雨により、東広島市志和町内地区の残土処分場内で崩壊が発生し、斜面が降雨により多量の水を含み、流動化した土砂が下流に流出した。今回の崩壊の特徴としては、建設残土処分場が崩壊し、比較的傾斜が緩やかな溪流であったにもかかわらず、土砂が下流まで到達したことである。その原因として土砂が流動化したことが考えられる。そこで、本研究では、災害発生時の降雨状況、現地踏査結果から推測される土砂流動化要因について、降雨と地下水の条件を変化させて模型実験による検討を行った。

キーワード：斜面安定、地下水、現地調査、残土処分場

(IGC : E06)

1. 背景と目的

平成21年7月25日東広島市志和町内地区において豪雨による土砂災害が発生した。

平成21年7月24日18時頃から広島県内では活発な梅雨前線の影響で最大時間雨量32mm/hr、24日18:00から25日11:00の連続雨量151mm(篠)の大雨が降り、特に24日深夜～25日未明にかけて強い降雨があった(図-1)。降雨は25日3時頃に止まったが、2時間半経過した午前5:30ころに東広島市志和町内地区の残土処分場内で崩壊が発生し、崩壊土砂が約9度の勾配をもつ溪流を下流に500m流下して、住宅1戸を全壊させた。住宅内には2名が就寝中であったが、住民のうち1名が死亡し、もう1名は生き埋めになったものの救助された。

本災害において崩壊は降雨が終了した約2時間半後に発生していること、崩壊土が流動化して緩い勾配の溪流を流下して崩壊地点から500m離れた箇所の住宅に被害を及ぼしたことが大きな特徴である。本論文は本災害において、崩壊した土砂が流動化した点に着目し、現地調査と模型実験によってその原因について検討を行った。

2. 現地調査結果と災害前後の降雨、地下水の状況

2.1 現地調査結果と考察

7月27日、8月7日に実施した現地踏査の結果から、被災地の状況を以下にまとめる。

写真-1は下流の被災家屋付近の崩積土堆積状況を示す。災害発生から2週間近く経た調査時点でも足下が沈み込

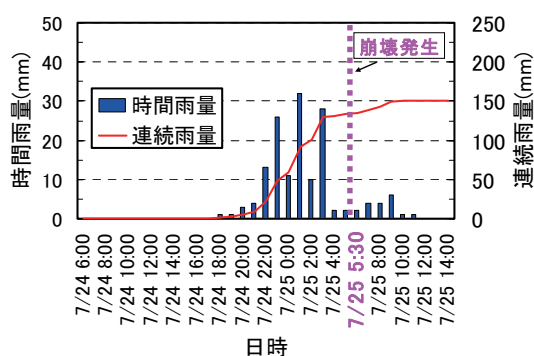


図-1 崩壊時付近の雨量



写真-1 被災家屋周辺の状況(8/7撮影)

むほどぬかるんでいた。土砂は非常に高い流動性を持っていたことが考えられ、残土処分場から人家付近道路間(標高差約 100m)に、水平距離で約 500m 移動していた。この間の斜面勾配から等価摩擦係数を求めると約 0.20 であり、今回の土砂移動現象が土石流的なものであったことを示している。

写真-2 に示すように、崩壊斜面下流では、過去に発生した土石流によって形成されたと考えられる溪床堆積物が連続して存在していることを確認できた。災害発生時には、この層に多量の地下水が供給されていたことが考えられる。



写真-2 崩壊斜面下流の溪床堆積物層(8/7 撮影)

写真-3 は崩壊地右岸の状況を示している。崩壊から 2 週間経過しているにもかかわらず、ポール位置付近から湧水が認められた。



写真-3 崩壊地右岸の状況(8/7 撮影)

写真-4 は、崩壊地頭部の状況であるが、崩壊から数日後にも、湧水が斜面の数箇所から流出した。これは、前述したような斜面底部に存在していた溪床堆積物層を通じて多量の地下水が供給され、崩壊時には湧水が流出していたという崩壊過程を示す根拠となるものであると考えられる。

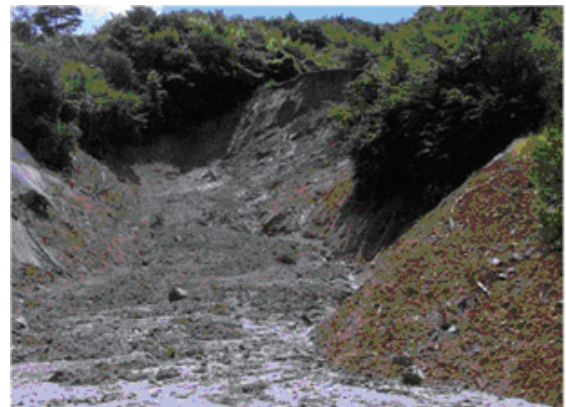


写真-4 崩壊地頭部の状況(7/27 撮影)

2.2 災害前の降雨の状況

災害発生に至る志和町内地区での降雨状況を把握するために、崩壊発生地点付近に最も近い広島県の雨量観測所である篠の降雨記録の解析を行った。

平成 21 年の梅雨期は、6 月 29 日～7 月 2 日間、7 月 8 日～10 日間、7 月 17 日～21 日間など事前に幾度かのまとまった雨が降っており、図-2 に示すように、6 月 29 日からの累積雨量は 1 ヶ月弱で 600mm 程度と大きな値となった。このことから、災害当時は度重なる先行降雨の影響で土中水分が上昇し、土砂災害が発生しやすい状況となっていたものと考えられる。

2.3 地下水位の観測結果¹⁾

現地踏査結果から、斜面底部には溪床堆積物層が存在していることが確認された。この層は、過去にこの溪流にお

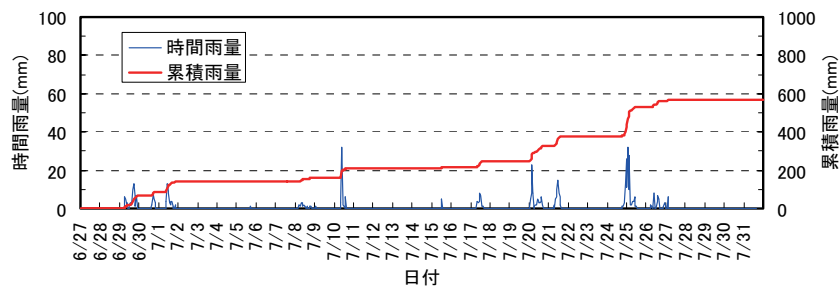


図-2 7月の雨量状況(篠)

いて土石流が発生した際に堆積したとみられ、岩石、礫の粒径の大きい土砂であって透水性が高い。この層に上流の谷地形から多量の地下水が供給されていたことが推定される。渓床堆積物層の地下水位形成機構を調べるために、崩壊発生後、斜面天端のボーリング孔を利用して地下水位の観測が行われた。図-3 は地下水位観測位置を示す。地下水位の観測は8月25日から自記水位計によって、10月末まで実施された。

図-4 は、地下水位観測結果と災害現場付近の篠、志和、東広島の雨量観測所から得られた時間雨量の推移である。観測期間内に2度にわたって顕著な地下水位の上昇が観られる。

図-5 に示すように10月2日の降雨は時間雨量が2~3回ピークを示しているが、地下水位の上昇においても2回のピークが観察され、雨量と地下水位はよく対応している。また、地下水位の上昇は降雨ピークから数時間程度遅れをもっていることがわかる。

今回の災害発生時刻は、特に強い雨の降った7/24 21:00~7/25 3:00の時間帯よりも2, 3時間遅れており(図-1),土砂災害発生の要因として、地下水や谷水として流域内から時間をかけて集められた水の影響を大きく受けていることが推察される。

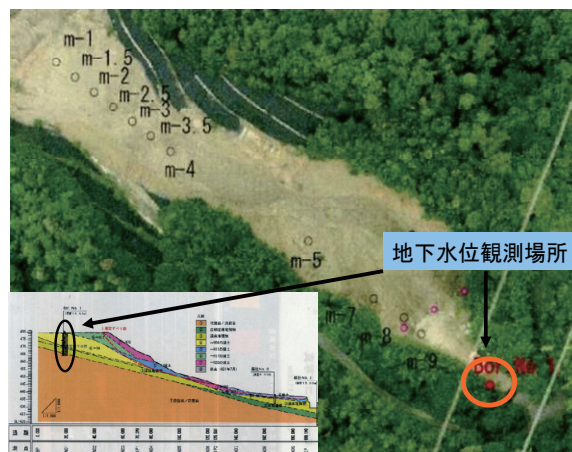


図-3 地下水位観測位置

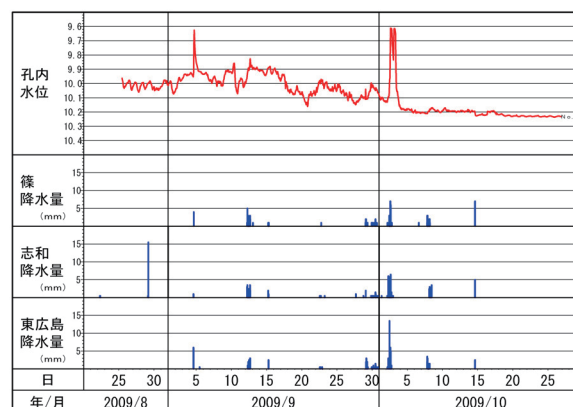


図-4 地下水位観測結果

3. 崩壊した地盤の形成過程と斜面安定解析¹⁾

3.1 崩壊した地盤の形成過程

災害発生箇所は虚空蔵山(標高666.1m)をピークとし、南西-北東に延びる山地の北東向き斜面に刻まれた小溪流内であり、谷を埋める形で残土による盛土が構築されていた。盛土は何度かの期間に分けて盛られたもので、最大比高差30m程度に及んでいると推定された。比高とは、近接した2地点の高度差であり、ここでは、堰堤の上側の地表面標高と盛土天端の標高の差を示しています。

崩壊した残土処分場があった場所は、平成4年に谷地形を利用した産業廃棄物処分場として造成され、切土・盛土工事、堰堤と貯留柵の設置、堰堤上流の法切り、ゴムシート敷設などが行われた。その後、建設直後の施設使用前検査によって産業廃棄物処分場の基準に不適合であることが判明したため事業者が計画を断念し、平成7年3月31日に利用されないまま処分場は廃止された。その後、土地所有者が変わり、平成16年から残土処分場として利用され建設残土の盛土が断続的に行われてきた。

本災害の調査にあたっては、崩壊前の残土盛土の規模を含めた地形の状況を把握することが大きな問題となった。山間部の地形を正確に把握することは容易ではないうえ、

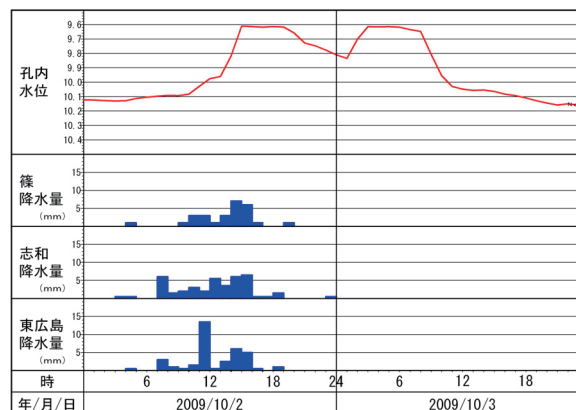


図-5 地下水位観測結果(10/2~10/3)

本災害発生箇所は上記のような地形変化を経ていた。また、残土は林道に面した谷の上部に運搬され、上部から谷の下部に盛られて処分されており、その形状は盛土搬入履歴とともに変化した。残土処分場の管理者から搬入した残土の量と時期の聞き取りを行ったが、その量は崩壊後の状況から推定される崩壊土量と十分に一致しなかった。このため、崩壊地全体の三次元レーザー測量を実施するほか、平成4年の県への申請書類に含まれていた測量図、その後撮影された現場の空中写真を比較検討し、地形変化の状況を三

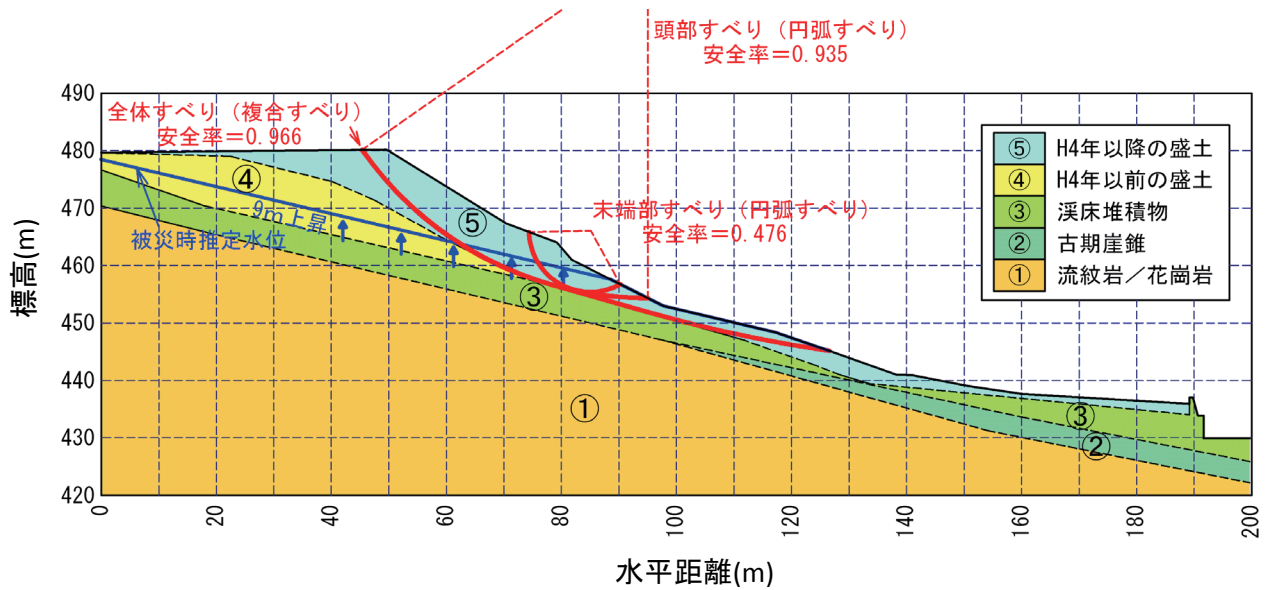


図-6 斜面安定解析結果(水位 9m 上昇時)

次元俯瞰図を作成して表現し、崩壊した盛土の形状を経時的に追跡した。これらの結果より求めた崩壊斜面の代表的な断面図を図-6 に示す。

図-6 のように、崩壊前の斜面は透水性の高い溪床堆積物層の上に平成4年以前に構築された盛土があり、その上に平成4年以降（実際には平成16年以降）の残土処分によって造成された盛土が存在する。

3.2 斜面安定解析

今回の流動性の高い崩壊の原因として、崩壊後の現地調査および地下水の観測から、降雨による盛土の飽和度の上昇と源頭部上流や谷から集水された水が盛土下部にある溪床堆積物層を通じて盛土内に供給され盛土内の地下水位を上昇させたことが推測された。以上の推測より、図-6 に示す代表断面を用いて斜面安定解析を行った。

現地調査結果による湧水位置、崩壊直後のニュース映像にみられた湧水箇所などから崩壊時には地下水位が溪床堆積物層よりも9mの高さまで上昇したと想定し、現地で採取した土を用いて一面せん断試験で求めた強度定数を用いて斜面安定解析を行った結果、安全率は全体で0.966、斜面末端部で0.476となった。

これより、崩壊は地下水位の上昇により、斜面末端部から発生し、斜面の上部に進行的に崩壊が進んだと推定された。

4. 降雨と地下水位の上昇があるときの斜面崩壊と崩壊土砂の流動化に関する模型実験

斜面安定解析の結果、崩壊の原因は盛土底部の溪床堆積

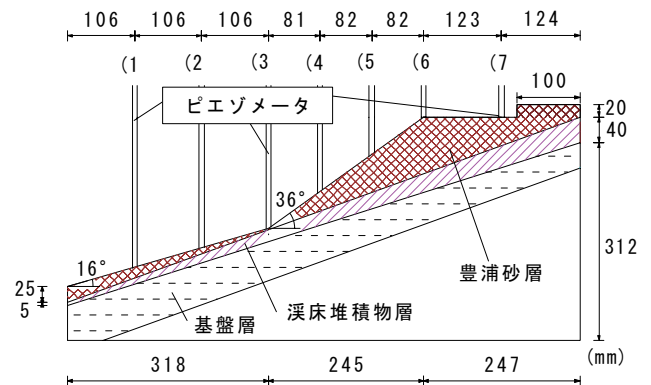


図-7 模型斜面概要図

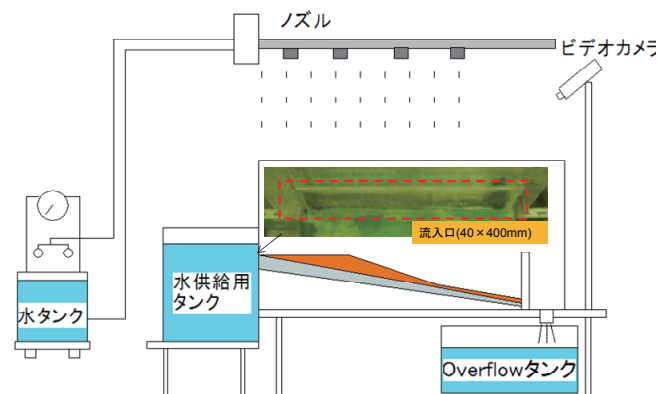


図-8 実験装置概要図

表-1 実験条件

実験 Case	珪砂			豊浦砂			条件	
	飽和度 (%)	間隙比	透水係数 (cm/s)	飽和度 (%)	間隙比	透水係数 (cm/s)	降雨	背後から水の供給
1	40	0.6	9.61×10^{-2}	40	0.75	2.56×10^{-2}	無	有
2							有 (30.60mm/hr)	無
3							有 (30mm/hr)	有

物層から供給された大量の水により、盛土内部の水位が上昇したことでありと推定された。しかし、崩壊後の土砂が500m 下流まで移動するほど流動化した原因は斜面安定解析では明らかでない。流動化発生過程の解明についての実規模の降雨実験が、大倉ら²⁾や森脇ら³⁾によって実施されている。これらの実験から、崩壊源頭部からの崩壊土の急速載荷による圧縮域の過剰間隙水圧の発生がせん断速度の増加に寄与すると報告されている。しかし、これらの模型実験においては、水の与え方は降雨のみであり、本災害事例のように、湧水等が発生するような斜面上流や谷地形から集水する多量の地下水の流入を考慮していない。そこで、降雨と地下水位の上昇の2つの要因を与えた時の斜面崩壊と崩壊後の土砂の挙動を調べるために室内模型実験を実施した。なお、今回の模型実験は、現場斜面を再現し、災害原因を解明するものではないが、本災害において特徴的であった土砂流動化の支配的要因を検討するものである。斜面形状は、土砂が流動化しやすいと考えられる本災害現場源頭部の形状と類似させているが、試料には複数回実験を行えるように豊浦砂、珪砂を用いている。現地の試料($2.52\sim 3.72\times 10^{-4}\text{cm/s}$)に比べ、実験で用いた試料の透水係数は豊浦砂 $2.56\times 10^{-2}\text{cm/s}$ 、珪砂 $9.61\times 10^{-2}\text{cm/s}$ と大きく、水分特性も異なるが、支配要因を検討するためには実験で用いた試料でも問題はないと考えている。

4.1 実験の概要

実験にはアクリル土槽(480×910×950mm)に作成した模型斜面を用いた。傾斜した油粘土で作成した不透水層の上に斜面を構成した。現地の斜面との類似点として、盛土層と見立てた豊浦砂層の下に透水性のよい溪床堆積物層と見立てた珪砂層を敷いた。また、ピエゾメータは、斜面勾配変化点の地下水位変動が計測できるように配置した(図-7)。

今回の模型実験では、地下水と降雨に着目した。斜面内の地下水位を上昇させるために、斜面背後のアクリルに外付けタンクから水が流入できるように流入口(40×400mm)を作成した(図-8)。タンクの水位を上昇させ、斜面内の地下水面との水頭差によって、斜面内に水を一様に流入した。また、降雨は、空気圧と水圧を調整して水を噴霧できる降雨装置を用いて、斜面に均等に降雨を降らせた。

実験は、3 ケース行った(表-1)。Case1 は背後から水の供給を行った。背後からの水の供給は、実地盤における先行降雨によって源頭部上流や谷から集められた水の盛土への流入を再現している。Case2 は降雨強度 30,60mm/hr 程度の強い降雨を降らせた。Case3 は降雨を降らせて土層の飽和度を上昇させた後(地下水位が形成し始めた直後)、降雨

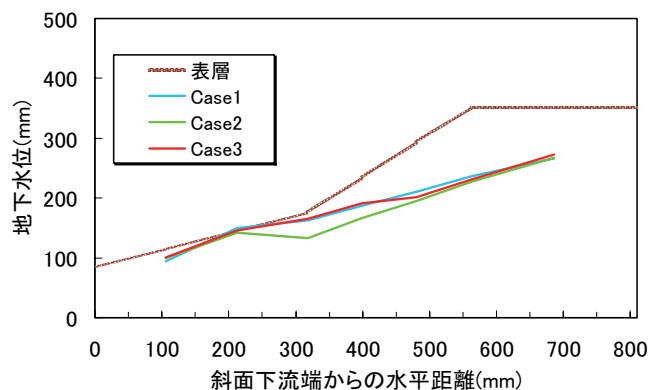
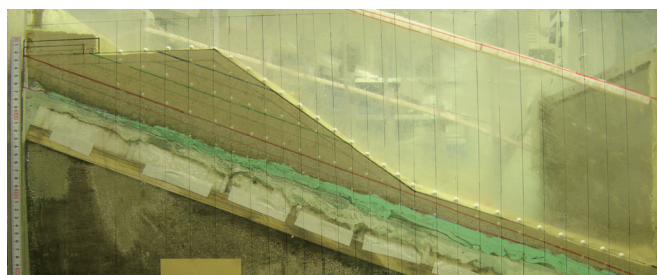
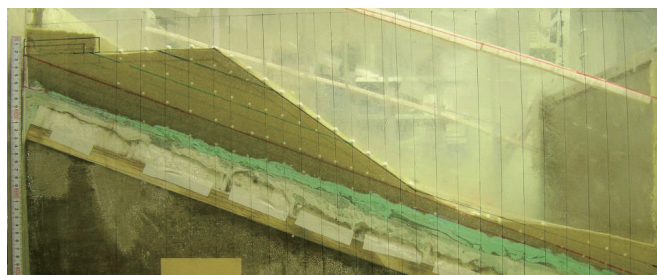


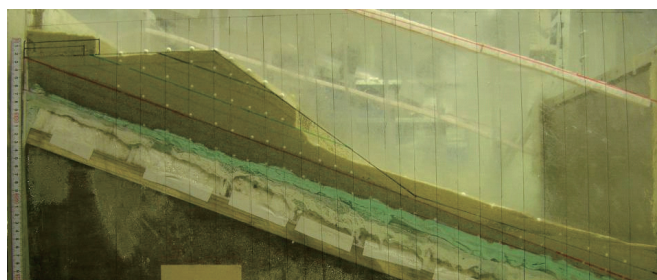
図-9 崩壊開始時の地下水位



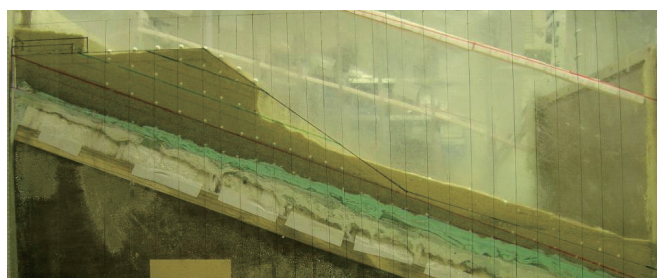
①地下水位の上昇開始



②盛土の末端から砂の移動が始まる



③盛土端部から崩壊が進行



④崩壊が盛土上部に達する

図-10 崩壊の状況 (Case 1)

を停止して、Case1 と同じように背後から水を供給した。全ケースで斜面を崩壊させ、土砂の挙動や強度について検討を行った。なお、Case1 と Case3 は、先行降雨の有無による斜面の初期飽和度の違いで崩壊後の土砂の流動性が異なるかを検討している。

4.2 実験結果

各ケースともに斜面下部で崩壊が発生し、斜面天端に崩壊が進行するという崩壊状況であった。図-9 に各ケースにおける崩壊開始時の地下水位を示す。各ケースともに斜面下部で地下水位が表層付近まで上昇した。このことから、地下水位の上昇によって上向きの浸透流が生じ、斜面下部から崩壊が発生したと考えられる。次に、各ケースでの崩壊概況について詳細に説明する。

[Case1] 図-10 に地下水位を上昇させたときの崩壊過程を示す。図のように、地下水位の上昇とともに斜面の末端から砂の移動が始まり、下端部から斜面上部まで崩壊が進行した。崩壊面からは地下水の流出とともに土砂が流下している様子を観察でき、土砂は流動化していると判断した。

[Case2] 降雨強度 60mm/hr 程度の降雨を降らせた場合、崩壊は斜面下部で発生したが、斜面上部に進行しなかった。実験では降雨によって土層内に浸透した水が盛土層下の渓床堆積物層を通じて勢いよく排水されている様子を観察できた。また、降雨強度 30mm/hr では崩壊に至らなかった。斜面上部まで崩壊に至らなかった原因としては、崩壊開始後に下部部分の土層の飽和度が上昇し、透水係数が大きくなり、渓床堆積物層を通じた排水速度が降雨による地下水位形成速度より大きくなり、斜面中部や上部の地下水位が上昇しなかったためと考えられる。

[Case3] Case1 と同様の崩壊状況で、斜面上部まで崩壊が進行した。Case1 よりも地下水位は早い段階で上昇し、斜面全体で高い地下水位を形成した。流動化については、Case1 と同様の理由から土砂は流動化していたと判断した。

3 ケースの崩壊状況の比較から、多量の降雨があっても、斜面底部の排水層からの排水効果が大きく斜面内の地下水位の上昇がなければ、盛土内部からの大規模な崩壊は発生せず、大量の崩壊土砂が高い流動性を持つことは起こりにくいと考えられる。ただし、今回の実験は崩壊した盛土を忠実に再現した模型実験ではないため、実際の渓床堆積物層の排水効果が実験のように大きく効いているかを断定することはできない。

崩壊状況の観察から Case1 と Case3 のように地下水位が上昇して崩壊する場合は、崩壊した土砂が流動化に近い挙

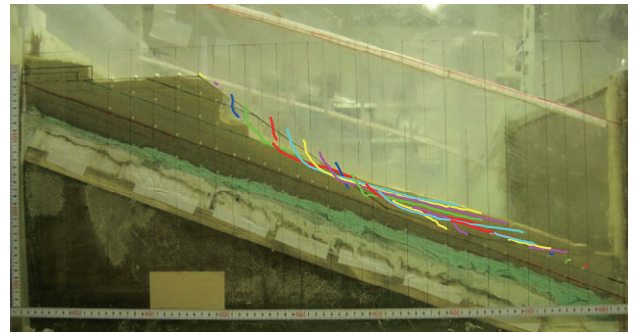


図-11 斜面表層部に設置したターゲットの崩壊時の動き (Case 1)

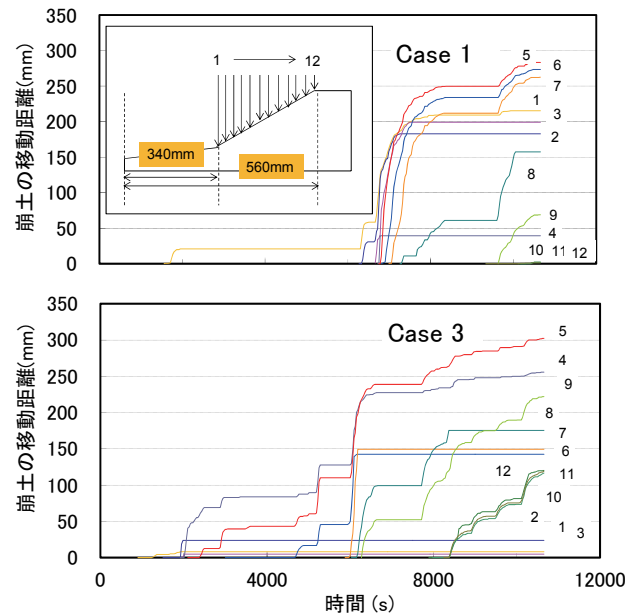


図-12 模型実験におけるターゲットの動き

動を示したと判断した。しかし、崩壊状況だけでは土砂の流動性を定量的に評価することは困難であるので、崩壊した土砂の移動の軌跡とせん断強さを計測し、流動性の程度を定量的に評価することを試みた。

崩壊した土砂の移動距離の計測は、斜面側面に設置したターゲット(質量 0.25g,直径 6.0mm)を撮影し、撮影した写真を用いて画像解析を行った。写真は毎分 2 コマずつ斜面横方向から撮影し、画像解析ソフト MoveTr2D を使用して、ターゲットの軌跡を追った。

崩壊土砂のせん断強度は、実験終了時に斜面下流端から所定の位置における堆積箇所にてペーンせん断試験を行って求めた。

4.3 崩壊した土砂の移動距離とせん断強度

模型斜面全体にターゲットを設置したが、斜面側面に設置したターゲットは崩壊の際に、崩壊に巻き込まれターゲ

ットとアクリル側面の間に土が入り込んだため追跡が困難になった。最後まで見失わずに軌跡を計測できたのは、表層に設置した 27 点のターゲットであり、図-11 に示すように斜面中部に位置する 12 点のターゲットの挙動から崩壊後の土砂の挙動について考察を行った。

図-12 に各ケースにおける崩土の移動距離の経時変化とターゲットの位置を示す。なお、時間は両ケースともに地下水供給用のタンクから水を供給し始めた時間を初期としている。崩土の移動傾向に着目し、各ケースにおける崩壊形態の違いについて考察を行った。Case1 では地下水供給を行い始めてから約 6500s 後に、斜面の各部分がほぼ同時に移動を開始し、移動距離についてもほぼ同一であり、斜面崩壊が同時に全面的に発生したことを示している。すなわち、Case1 では土塊全体が一斉に滑るような崩壊であったと考えられる。一方、Case3 では、斜面表層の各点の

移動が始める時間は様々であり、斜面の下部から移動が始まって徐々に斜面上部の点が移動している。

このことから、崩壊は斜面の下部から上部に進行する進行性もしくは拡大性崩壊であったと考えられる。以上のように斜面の表層部の動きに着目することで、崩壊形態の違いが明らかになった。

図-13 に各ケースについて、実験終了時のベーンせん断強さおよびベーンせん断試験実施時の地下水位の形成状況について示す。

Case2($r=60\text{mm/hr}$)では、崩壊した下部の 2 箇所でもベーンせん断試験を行ったが、せん断強度はどの深度においても地下水を供給したケースより大きな値を示している。崩土のせん断強度が大きいことは、土砂が水をあまり含まず、ある程度締まった状態で堆積していると考えられる。このことは、Case2 の地下水位が他のケースに比べ顕著に小さ

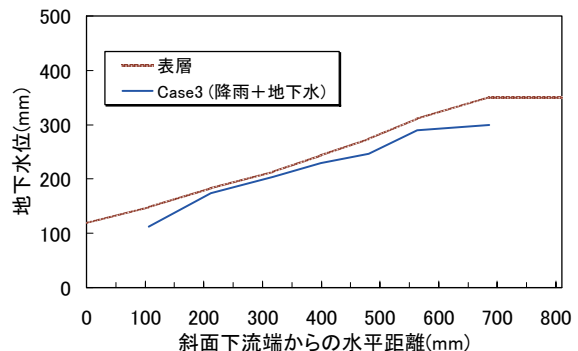
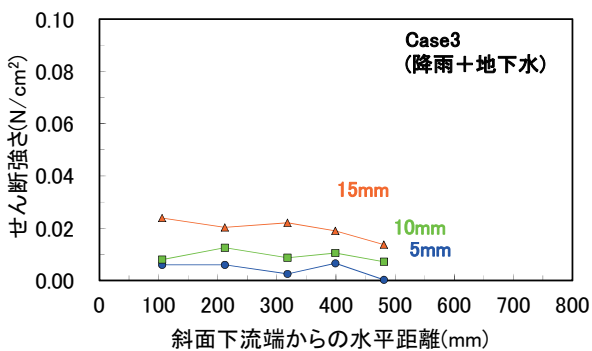
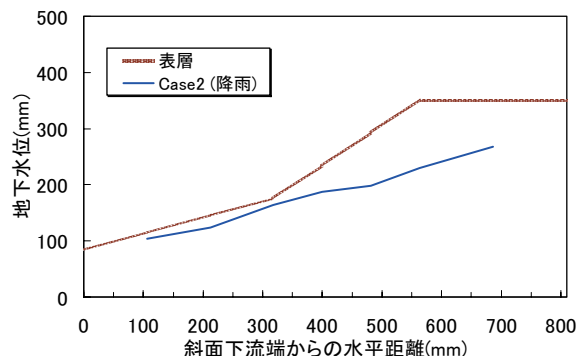
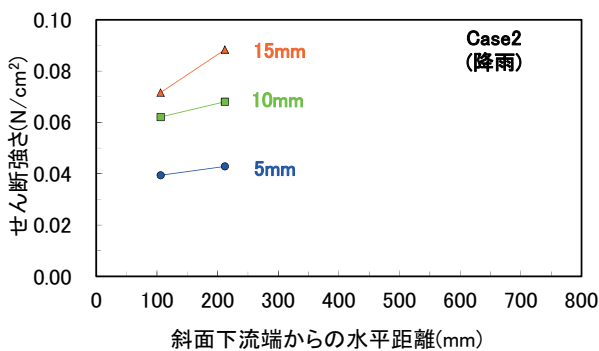
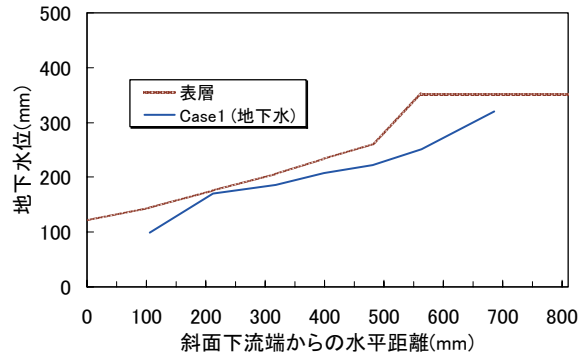
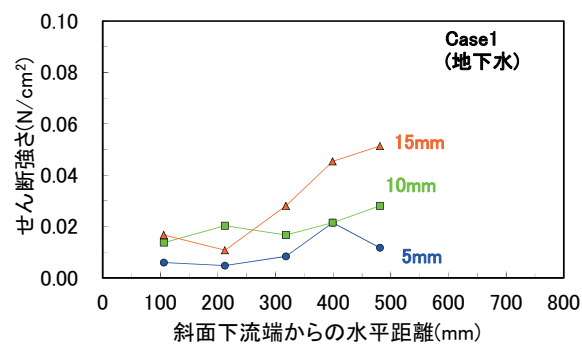


図-13 ベーンせん断試験結果および試験実施時の地下水位形成状況

いことから、考察することができる。そのため、地下水を供給したケースに比べ、流動性が低いことが考えられる。

次に、地下水を供給した Case1 と Case3 の比較を行う。両ケースともに、斜面下部付近の崩壊土砂のせん断強さほどの深度においても低い値であることがわかる。しかし、Case1 については、斜面中部の崩壊土砂のせん断強さが大きかった。それに比べ Case3 は、斜面中部付近の崩土も下部付近と同じ程度の低いせん断強さであることがわかる。図-13 に示すように、ベーンせん断試験実施時の地下水位の形成状況から、Case1 に比べ、Case3 は地下水位が斜面中部付近でも高い。そのため、Case3 では斜面中部においても地下水によって盛土(豊浦砂層)内に多量の水の流入があり、流動化していたと考えられる。また Case1 については、地下水位が高く、盛土内に水の流入があった斜面下部では、流動化しているが、地下水位が低く、盛土内に水の流入がなかったと考えられる斜面中部では、流動化していなかった可能性があると考えられる。

以上の結果より、降雨によって土層の飽和度が高い状態で地下水が供給される場合、崩土のせん断強さが最も低い値を示し、崩壊土砂の流動性が高くなる可能性があると考えられる。

5. 結論

平成 21 年 7 月 25 日 5:30 頃、東広島市志和町内地区の残土処分場内で崩壊が発生し、流動化した土砂が下流に流下し(写真-1 参照)、住宅 1 戸が全壊し、死者 1 名、負傷者 1 名が出る災害となった。本報告は、この災害の調査結果より、災害発生の原因について考察したものである。災害後の現地調査の結果、崩壊が起こった原因として以下のことが推定される。

- 1) 崩壊した残土斜面の底部には帯水層が存在し、上流の集水しやすい地形が集めた地下水が帯水層内を流れていた。崩壊時には帯水層から大量の水が残土斜面内に供給されたと推定される。
- 2) 事故が発生した 7 月 24 日の 1 ヶ月前から、断続的に雨が続き、7 月の月間雨量としては、1999 年以降最大であった。
- 3) 連続した降雨による大量の雨が上流の谷で集水され、帯水層を通じて残土盛土斜面に供給された。地下水位の上昇により、盛土斜面の安全率は急激に低下し、盛土下端部分で崩壊が開始した。地下水位が上昇するとともに天端方向に崩壊が進行したと推定される。
- 4) 降雨後の地下水位の上昇を考慮した安定解析を実施した結果、地下水位が帯水層から約 9m 上昇することによ

り斜面全体の安全率が 1 以下となり、すべり崩壊が発生することが判明した。

- 5) 崩壊した土砂は、多量の水を含み、崩壊に伴う大きな衝撃によって流動化して摩擦抵抗をほとんど発揮しない状態であった。流動化の原因としては崩壊土砂そのものに大量の水が含まれていたと考えられること、地下の帯水層や周囲の斜面などから多量の流水があった可能性があることなどが考えられる。

次に崩壊した土砂が傾斜約 8 度の溪流を 500m 流下するほど流動化した原因を検討するため、模型斜面における実験を行った結果、流動化について以下のことが明らかになった。

- 6) 模型斜面に多量の降雨を与えると表層が崩壊するが、斜面下部の透水層からの地下水の供給がない場合は、大規模な崩壊や崩壊土砂の流動化は起きない。
- 7) 降雨が無い条件下で下部から地下水を上昇した場合、斜面内の地下水位が上昇し土塊全体が同時に崩壊するような破壊が起こるが、崩壊後の土砂の強度は大きく流動化は発生しにくい。これに対して、降雨により斜面の地盤の飽和度が高い状態で、斜面下部からの地下水の供給と位の上昇があると、斜面の下端の法面部から崩壊が始まって徐々に斜面の上部に進行する崩壊が発生し、崩壊した土砂が高い流動性を持つ。この現象は今回の災害の崩壊状況とよく類似している。
- 8) 以上のことから、今回の災害において崩壊土砂の流動化が起こった原因としては、連続する降雨によって盛土内の飽和度が高まっていた状態で、上流からの地下水の供給により盛土内の地下水位が急激に上昇し、崩壊が発生したことが考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、広島県、東広島市から資料を提供頂いた。また、調査にあたって地元の方々のご協力を頂いた。記して各位に感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 広島大学大学院工学研究科地盤工学研究室：平成 21 年度土砂災害発生原因調査報告書，平成 21 年 10 月。
- 2) 大倉陽一：崩壊実験による流動化発生過程の解明，第 50 回平成 13 年度砂防学会研究発表会概要集
- 3) 森脇寛：実大斜面模型を用いた崩壊実験における崩壊発生・流下過程，第 53 回平成 16 年度砂防学会研究発表会概要集

(2010 年 7 月 5 日 受付)