

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22580163

研究課題名（和文） 段階的斜面崩壊の発生機構の解明

研究課題名（英文） Investigation of Mechanism of Multi-phased Landslide

研究代表者

堤 大三 (TSUTSUMI DAIZO)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：40372552

研究成果の概要（和文）：二次的被害を引き起こす危険性が大きい段階的斜面崩壊に関して、実際に発生した可能性のある崩壊跡地の現地調査や、人工斜面実験を通して、降雨浸透・斜面安定解析を適用した数値モデルを開発し、土層の物理特性・斜面の地形特性・降雨特性の観点からその発生メカニズムをある程度明らかにした。このモデルをもちて土砂災害の防止・軽減に資する手法を提供することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：Regarding to the multi-phased landslides which is in danger of secondary damage to evacuees or rescue unit, field investigations and flume experiments are conducted. Based on the results of these investigations and experiments, numerical model is developed to simulate and elucidate the mechanism of the multi-phased landslide. The model can be a useful tool to mitigate a risk of damage by the multi-phased landslide.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012 年度	100,000	30,000	130,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：砂防工学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：パイプ流 / 二次災害 / 台湾高雄県小林村斜面崩壊 / 斜面安定解析 / 段階的斜面崩壊 / 水理特性 / 降雨浸透解析 / 鹿児島県奄美市

1. 研究開始当初の背景

斜面崩壊が発生する現場を実際に目撃することはまれであり、通常は崩壊跡地を調査して、どのような過程で斜面崩壊が発生したのかを想像するという手段に限られている。この場合、崩壊跡地の形状がそのまますべり面形状とされ、一度に全ての土塊が崩壊したとみなされることが多く、崩壊跡地の形状が

特殊なものでない限りは、数回に分かれて土塊が崩壊する段階的な崩壊が想定されることは、まれである。斜面安定解析などによる斜面崩壊の再現・予測においても、安全率が 1.0 を下回った段階で、解析を停止し、そのときのすべり面形状から斜面崩壊規模を算定するに留まっているため、段階的な斜面崩壊には対応していない。しかし、ここ数年日本各地で発生した斜面崩壊のうち、いくつか

の事例において、段階的な斜面崩壊が目撃されており、決して特殊な現象ではないということが示されている。例えば、2004年台風10号と21号の豪雨で、それぞれ徳島県那賀川上流域加州地区、三重県旧宮川村小滝地区で発生した斜面崩壊は、対岸から地元住民により発生状況が目撃されており、それによると、斜面は一度に全てが崩壊したわけではなく、加州地区の崩壊では2日間をかけて斜面下部から部分的に崩壊が成長していったようであり、小滝地区の崩壊では、まず下部2/3が崩壊し20分後に上部1/3が崩壊したようである1)、2) (写真-1a, b参照)。

段階的崩壊では、最初の崩壊後に救助や後片付け等、何らかの理由で斜面に近付き、2回目以降の崩壊によって被災する危険性が高まると考えられる。段階的崩壊による被災事例の典型として、2005年台風14号によって発生した大分県竹田市南河内地区での斜面崩壊を挙げる。この斜面崩壊に先立って、この地区の住民は全て避難し、住宅は無人であったが、9月6日10:00ごろに小規模な崩壊が当該斜面で発生し、それを知った住民3名が現場に戻ったとのことである。そして流下した土砂を処理する準備をしていたところ、11:30頃に、はじめの崩壊地の上部斜面が大きく崩壊し、流下した土砂の直撃を受けて、この内2名が住宅もろとも流されたとのことである3) (写真-1c参照)。これは、段階的崩壊が発生する危険性を認識していれば防げた可能性の高い被害であると考えられる。

2. 研究の目的

段階的斜面崩壊による二次的災害を防止するため、その発生機構を解明することが必要である。段階的斜面崩壊発生には、様々な要素が影響を及ぼしていると考えられるが、土層の水利特性や強度等の物理特性、斜面の全体勾配や局所的な勾配変化・横断方向の凹凸地形等の地形特性、降雨の短時間強度・総降雨量・降雨ピーク数等の降雨特性が想定される。本研究では、土層の物理特性、降雨特性に着目し、人工斜面を用いた斜面崩壊実験と、新たに段階的崩壊を解析可能な浸透解析と斜面安定のシミュレーションモデルを開発し、それらを用いて段階的斜面崩壊の発生機構の解明を目指すとともに、土砂災害の防止・軽減のため広く情報提供することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 現地調査

2009年の台風によって台湾高雄県小林村で発生した斜面崩壊は、小林村集落を壊滅さ

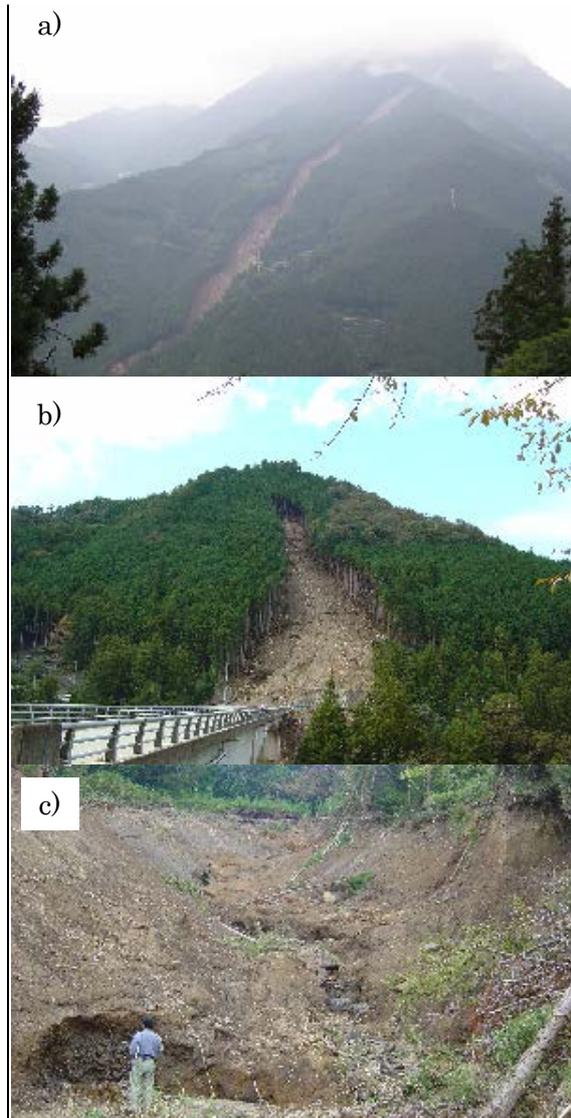


写真-1 段階的な斜面崩壊が発生したと考えられる現場 : a) 徳島県加州地区, b) 三重県小滝地区, c) 大分県南河内地区

せ、500名以上の犠牲者を出す大災害となった。この斜面崩壊は、一般的な規模の斜面崩壊と同じような発生機構を想定することが困難なほど非常に大規模なものであった。現地調査では、斜面崩壊が特に段階的なプロセスで進行したとの目撃情報は得られていなかったが、むしろこれほどの巨大な斜面が、一塊となって同時に崩壊する事を想定する方が不自然でもあるため、時間的なずれの有無は別として、段階的な崩壊現象を想定した検討を行った。まずは、現地斜面の土層試料を、採土円筒を用いて採取し持ち帰り、飽和透水試験、土壌水分特性試験を実施し、土層の物理特性を決定した。

また、鹿児島県奄美市では2010年に土砂災害が多数発生した。災害発生後に、現地調査を実施した。調査の結果、発生した斜面崩

壊のうち少なくとも2箇所においては、その規模や発生プロセスが段階的であった疑いがある事が判明した。

過去に実際に段階的な崩壊が発生した事例の一つとして、大分県竹田市の崩壊跡地の現地調査を既に実施しているが、その調査結果も本研究では活用した。

(2) 人工斜面実験

既往の人工斜面実験をもとに、本研究で補助実験を実施し段階的斜面崩壊発生機構の確認を行った。実験は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーにて行った。水路を用いて人工斜面を作成し、人工降雨装置により土層表面に降雨を与えた。斜面は、斜面長5.0m、土層厚0.3m、幅0.2m、傾斜角 30° であり、側面の片方はガラス製のため、土層の状態が観察できる。また、土層の上下流端、側面、底面は全て不透水境界とし、底面には3号珪砂を貼り付けた。土層表面には人工降雨装置により、強度150mm/hrの降雨を与えた。実験においては、土層底面の圧力水頭を斜面方向に1m間隔で、テンシオメータ(外径6mm、ポーラスカップ長10cm)を用いて測定した。また、崩壊時の斜面形状変化を土層下流側と側面から、ビデオカメラにて記録した。実験土層には、3号、6号珪砂、およびパルクレイを、異なる混合比で調整した3種類の土砂を用い、それぞれ実験Case 1, 2, 3とした。Case 1は、3号珪砂に粘着成分として粒径の非常に小さいパルクレイを混合し、粘着力を大きくした土砂である。Case 2は、3号珪砂そのものであり、粘着性が無く、透水性が非常に高い。Case 3は、3号珪砂と6号珪砂を半々の割合で混合したものであり、Case 2と同様粘着性が無いが、Case 2と比べ透水性が低い。これらの土砂を水路に充填し、実験開始時での土層水分状態が形成される条件を統一するため、土砂充填後に土層を水平状態で完全飽和させた後、大気開放した下流端から1時間自然排水させ、さらに実験時の傾斜角 30° に斜面を調整し、24時間自然排水させた状態を初期水分状態とした。

(3) 数値モデルの開発

降雨浸透解析と斜面安定解析を組み合わせた従来の斜面崩壊シミュレーションモデルでは、一旦斜面安全率 F_s が1.0を下回った時点で崩壊発生と判断し、計算を停止することが一般的である。そのため、崩壊形状が初めの部分的崩壊とみなされ、その後続く可能性のある段階的崩壊を考慮していないという問題点がある。本研究では、この問題点を解消するため、一旦安全率 F_s が1.0を下回って崩壊が発生したと判定された後も、崩壊した土塊を取り除き、新たな計算領域を作成して浸透解析を改めて開始し、その計算結果に基づいた斜面安定解析を実施する手法を

開発した。ここで、モデルにおいて採用した解析手法、仮定・簡略化は以下のとおりである。

①降雨浸透解析では、Richards式をFEMを用いて解き、斜面土層内の圧力水頭分布を求める

②斜面安定解析では、簡易Janbu法を採用し、斜面安全率 F_s を計算すると同時に、DP法と組み合わせて臨界滑り面を求める

③斜面安定解析には浸透解析で求めた圧力水頭分布を入力値として用いる

④斜面安定解析において $F_s = 1.0$ となった時点で、臨界滑り面によって切り取られる土層を全て取り除き、残った斜面に対して新たにFEM用のエレメントをきり直し、改めて降雨浸透解析・斜面安定解析を実施する

⑤臨界滑り面が斜面土層の底面に達していない場合、滑り面と底面との距離が最短の部分を境界としてそれよりも下流側の土層も滑り面によって切り取られる土層と共に取り除く

⑥滑り面等を切り取ることで、土層内部の領域が新たに大気解放された境界部の取り扱いに関しては、崩壊直前の圧力水頭によって判断し、新たな境界条件を与える、つまり、圧力水頭が負の値の場合、そのままの値を用いNeumann境界条件を与え、圧力水頭が0および正の値の場合、圧力水頭を0としてDirichlet境界条件を与える

⑦安全率の値が再び $F_s = 1.0$ となった場合、④に戻ってこの計算過程を繰り返す

4. 研究成果

(1) 台湾小林村での現地調査をもとにした検討

台湾小林村での大規模斜面崩壊跡地周辺のDEMデータから、斜面崩壊前の斜面形状と基岩形状を想定し、更に入手した現地での雨量データを元に、降雨浸透解析と斜面安定解析を組み合わせた数値シミュレーションを実施し斜面崩壊発生の時刻や、斜面崩壊発生時の初期滑り面形状の再現を試みた。

初期滑り面形状は最終的な崩壊形状とは異なり、斜面下部の限られた箇所に留まり段階的な崩壊が発生していた可能性が高い事が分かった。

(2) 人工斜面実験による検討

Case 1では降雨開始から15分5秒後に、またCase 3でも13分13秒後に崩壊が発生した。一方Case 2では、降雨を1時間以上継続し、底面での圧力水頭値が定常値に到達した後も、崩壊は発生しなかった。これは、透水係数が非常に大きく、地下水面がほとんど上昇しなかったためと考えられる。

崩壊が発生したCase 1, 3の崩壊発生直後

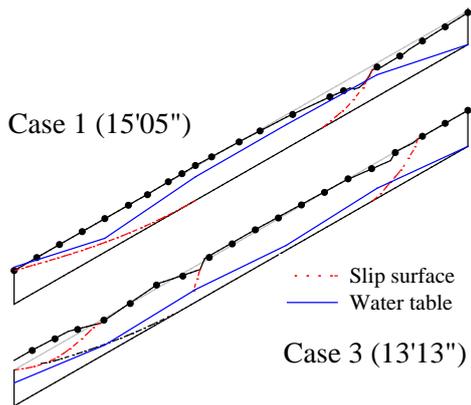


図-2 崩壊実験結果：崩壊1秒後の斜面形状の表面形状，滑り面形状を図-2に示す。Case 1では下流端から約4mの位置に亀裂が生じ，その位置を滑り面の先端とした崩壊が発生した。このとき，一度の崩壊により斜面の大部分が崩土となり流下したため，その後，崩壊は発生しなかった。Case 3では，まず下流端から約1mの位置に亀裂が生じ，その位置を滑り面の先端とした崩壊が発生した。その直後，下流端から約2mと4mの位置の亀裂を先端とした第2，第3の崩壊が順次発生した。全ての崩壊にかかった時間は，1秒未満であり，最終的な崩壊形状も，Case 1とほぼ同じであったが，Case 3の場合は，第1の崩壊によって下流端の支持力を失った斜面が順次崩壊する過程をとり，段階的な崩壊であったといえる。Case 1と3の土層以外の条件は同じであったので，Case 1，3の崩壊過程の差は，土層の水理特性と強度の違いによるものと考えられる。

崩壊発生直前の土層底面における圧力水頭値から推定した地下水面形状を，同じく図-2に示す。Case 1と3を比較すると，Case 1では地下水位が高く，そのような領域が斜面の上部まで広がっている。Case 3では，Case 1に比べ地下水位が全体に低い。これらのことから考えると，Case 1では，土層の粘着力 c が大きいために，地下水位の上昇による抵抗力の低下の度合いが小さく，地下水面が十分に発達した段階で崩壊が発生したため，崩壊発生時には規模が大きくなったものと考えられる。逆に，Case 3では，土層の粘着力 c が無く，内部摩擦角 ϕ のみで斜面が保持されていたため，地下水位の上昇によって抵抗力が下がる度合いが大きく，斜面下流端における比較的小さな地下水位上昇によって小規模な崩壊が発生し，その上部の土層が下流側の支持力を失って順次上方に崩壊が発達していったものと考えられる。さらに，Case 1では透水性が低いため，地下水位が上昇しやすく，Case 3では透水性が高いため，地下水位が上昇しにくい傾向があるため，崩壊発生

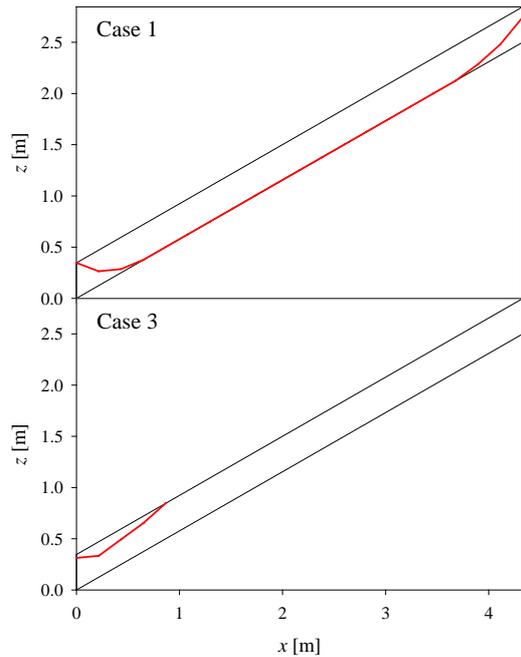


図-3 実験の再現計算により得られた滑り面形状

時間はCase 1，3共にほぼ同じとなったものと考えられる。

上記の斜面崩壊実験においては，土層の物理特性によって斜面崩壊過程が異なることが示された。そこで，数値シミュレーションにより，実験に用いた土層の物理特性を与えた再現計算を行い，土層物理特性と崩壊特性との関係の確認を行った。ただし，ここでは，段階的崩壊の再現ではなく，初期崩壊規模と発生時間の比較にとどめて解析を行っている。その結果を，図-3に示す。図に示される通り，初期斜面崩壊形状はCase 1，3共に実験で得られた形状を良く再現している。また，崩壊発生時刻は，Case 1では降雨開始から25' 00"後に，Case 3では22' 15"後と計算され，実際の時刻と比較して過大評価ではあるが，Case 3の方が少し遅れて発生している関係やおよその時刻が似通っている。以上の事から，土層物理特性が段階的崩壊発生を左右する大きな要因であることが確認された。

(3) 数値シミュレーションモデルによる段階的斜面崩壊の再現計算

本研究で開発した段階的斜面崩壊を再現する数値モデルを用い，実際に段階的斜面崩壊が発生したことが明らかとなっている事例をシミュレートし，その有効性・妥当性を検証する。ここでは，段階的斜面崩壊事例として，2005年大分県竹田市南河内地区で発生した斜面崩壊を対象とする。

斜面形状は，崩壊発生前の地形図と崩壊発

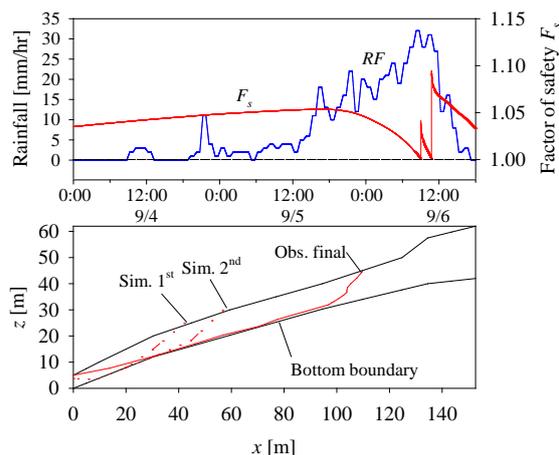


図-4 大分県竹田市で発生した段階的斜面崩壊の再現計算の結果（上段：降雨と斜面安全率の変化，下段：崩壊形状の比較）

生後の現地調査の結果をもとに作成し、土層の水利特性は現地材料を採取して pF 試験によって求めたものを与えた。また、土層の粘着率と内部摩擦角は計測していないため、解析結果が現地崩壊形状を良く表わすような値 $c = 0.012 \text{ tf/m}^2$, $\phi = 20^\circ$ を採用した。解析結果を図-4に示す。図-4上段に示される通り、9月4日の降雨開始以降斜面安全率が徐々に低下し始め、9月6日に降雨ピークを迎える前に急激に安全率が低下し、9:01に $F_s = 1.0$ となり、斜面崩壊発生と判定される。その際の臨界滑り面形状は、図-4下段に示すような斜面下流端の小規模な一部に限定された形状であった。実際に初めの小規模な崩壊が発生したのは、9月6日の朝という事であったので、時間的にも良く再現されている。

その後、先に説明した手法により、臨界滑り面で区切られた土塊を取り除き、解析を続したが、その際、圧力水頭が高く不安定な領域が取り除かれたことで、 $F_s = 1.0$ まで低下していた安全率が再び $F_s = 1.05$ 程度まで上昇している。しかし、降雨強度の高い時間帯であるため、すぐに安全率が低下し、10:46に再び $F_s = 1.0$ となり、2回目の斜面崩壊発生と判定された。その時間差は1:45であり、段階的な崩壊とみなすには十分な間隔である。さらに解析を続したが今度は、 $F_s = 1.1$ 程度まで回復した後、再度安全率が低下したが、降雨の終了に合わせて、解析も終了したため3回目の崩壊までは再現計算を行わなかった。合計2回の段階的崩壊の崩壊形状と実際の崩壊形状を比較すると、再現計算の崩壊形状は実際の崩壊形状のおよそ1/2程度の大きさしかなく、過小評価となっている。降雨終了後も解析を継続していれば、3回目の崩壊が発生し、もう少し大規模な崩壊になった可能性もある。そうでないとすれば、斜面土層の不

均一性やパイプ流等の選択的浸透流を考慮していない点、段階的崩壊において、臨界滑り面よりも上の土層を完全に除去するという簡略化等によって、この違いが生じているものと考えられる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計3件）

① Daizo Tsutsumi and Masaharu Fujita, An experiment and model simulation on multi-phased landslide, Proceedings of the 3rd international workshop on multimodal sediment disasters, 査読有, 1巻, 2012, B1.1-B1.6

② Daizo Tsutsumi and Masaharu Fujita, Study on multiphased landslide by experimental and modeling approach, Proceedings of the 3rd international symposium on sediment disasters & river environment in mountainous area, 査読無, 1巻, 2012, 9-14

③ 堤大三, 藤田正治, 宮本邦明, 今泉文寿, 藤本将光, 国領ひろし, 泉山寛明, 台湾高雄県小林村の深層崩壊発生機構に関する解析, 水工学論文集, 査読有, 55巻, 2011, 721-726

〔学会発表〕（計5件）

① Daizo Tsutsumi, An experiment and model simulation on multi-phased landslide, the 3rd international workshop on multimodal sediment disasters, 2012年09月22~26日, 岐阜県高山市 京都大学防災研究所 穂高砂防観測所

② Daizo Tsutsumi, Study on multiphased landslide by experimental and modeling approach, The 3rd international symposium on sediment disasters & river environment in mountainous area, 2012年08月27~29日, National Cheng-Kung University, Tainan City, Taiwan

③ 堤大三, 台湾高雄県小林村の深層崩壊発生機構に関する解析, 土木学会水工学講演会, 2011年3月9日, 東京都東京大学駒場キャンパス

④ Daizo Tsutsumi, Analysis of triggering mechanism of deep-seated landslide induced by heavy rainfall, International Workshop of TCCIP Project on Climate Change, 2010年11月3日, 台湾台北市

⑤ 堤大三, 2009年台風Morakotによる台湾高雄県小林村での深層崩壊に関する検討, 砂防学会研究発表会, 2010年5月27日, 長野市若里市民文化ホール

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堤 大三 (TSUTSUMI DAIZO)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号：40372552