

平成22年 5月20日現在

研究種目： 若手研究（B）
 研究期間： 2008～2009
 課題番号： 20780109
 研究課題名（和文） 山地流域を対象とした崩壊発生予測手法の開発
 研究課題名（英文） Prediction method of occurrence of landslides in mountainous catchments
 研究代表者
 今泉 文寿（IMAIZUMI FUMITOSHI）
 筑波大学・大学院生命環境科学研究科・助教
 研究者番号：80378918

研究成果の概要（和文）：

広域を対象とした崩壊予測を行うためには崩壊の発生を支配する要因の特定、およびそれを用いた発生予測手法の開発の2つが必要である。そこで本研究では斜面の安定性および斜面内での水の浸透に関する基礎方程式をもとに、崩壊の発生を説明する上で重要な役割を担う「無次元パラメータ」を導き出し、さらにはそれを用いた崩壊発生予測手法について検討した。その結果、本研究の崩壊発生予測手法によって、現地で発生する崩壊のタイミングや崩壊の深さなどを説明できる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：

We need to make clear parameters controlling slope stability to predict occurrence of landslides in large mountainous catchments. New non-dimensional representations for the slope stability were obtained by the normalization of the safety factor equation as well as equations representing groundwater infiltration. The landslide model developed in our study could explain characteristics of landslides, including timing of initiation and depth of slide surface.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：砂防工学

科研費の分科・細目：林学・林学・森林工学

キーワード：表層崩壊，無限長斜面，浸透流解析，山地流域

1. 研究開始当初の背景

わが国、あるいは環太平洋地域、ヨーロッパ中南部など世界の多くの地域では毎年山地・丘陵地において土砂災害により人命・財産が失われている。また下流都市域

には、河床上昇に伴う洪水の危険性の増加や、顕著な海岸侵食のみられる地域がある。これらに対する対策を行うためには流域内での土砂動態予測を行う必要があり、そのためには河床変動計算の境界条件として山

腹から河道への土砂供給量の時系列変化を把握する必要がある。数ある土砂生産過程の中でも崩壊は一度に大量の土砂を供給するため、土砂流出量に及ぼす影響が大きい。しかしながら実際の山地斜面では、崩壊の発生に関わる土の強度、あるいは水の浸透性に空間的なばらつきがあり、それらについて対象とする山地流域全体にわたって調査することは困難である。そのため、従来の崩壊予測手法では流域内で土質定数を一定とするなどの方法がとられ、結果として崩壊の予測精度に限界がみられた。よりの確に崩壊発生予測を行うためには、斜面安定を評価する上で重要なパラメータの特定、さらにはそのパラメータを用いた予測手法の開発が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、詳細な現地調査を行うことが困難な広域の山地流域を対象にできる、新たな崩壊発生予測手法の開発を目的とする。崩壊には深層崩壊、地すべりなどさまざまなタイプがあるが、本研究では崩壊の中でも最も発生数の多い、降雨時に発生する比較的浅い崩壊を対象とする。

具体的にはまず、斜面の安定性や斜面内での水の浸透に関する基礎方程式をもとに、崩壊の発生を説明する上で支配的な役割を果たす無次元パラメータを導きだす。そして、得られた無次元パラメータを用いた崩壊の発生予測手法についての検討を行う。それと並行して、過去実際に発生した崩壊について、発生場所や崩壊の深さなど、崩壊の特徴について調査する。また、あわせて広域を対照とした解析を行う上で必要な地形解析手法についても考察を行う。最後に、開発された崩壊発生予測手法に様々な降雨波形を与えることで斜面の安定性の経時的な変化を評価し、現地で過去に発生した崩壊の特徴を再現できるかについての検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 無次元パラメータの特定と斜面安定の評価

本研究ではまず、斜面の安定性を評価する「無限長斜面の安定解析式」および地下水の鉛直方向への浸透を表す基礎方程式（連続式、運動方程式）を無次元化し、崩壊の発生に関わる無次元パラメータを導きだす。また導きだされるそれぞれのパラメータについて斜面の安定性に対する寄与度を調べ、崩壊発生予測を行う上で支配的なパラメータの特定を行った。その上で、支配的であるとされたパラメータをもとにした斜面安定の評価手法について検討した。本研究は土質定数の空間的な分布を考慮した検討を行うが、無限長斜面の安定解析に基づいた崩壊予測手法の

検討を行うため、深さ方向の分布としてのみ取り扱い地層構造として導入する。

(2) 現地における崩壊の発生状況の調査、水文観測、地形解析

静岡市北部に位置する筑波大学井川演習林周辺を対象として、空中写真判読および現地調査によって、過去に発生した崩壊の特性について調査した(図1)。ここでの特性とは、崩壊の発生タイミングやすべり面の深さなどを指す。降雨時に引き起こされる崩壊の発生には、流域内での水の移動が重要となるため、井川演習林内の溪流において流量観測も並行しておこなった。また、実際に崩壊発生予測手法を現地へ適用するときには広域的な地形を解析する手法が求められる。そこで、DEM (Digital Elevation Model, 数値地形モデル) を用いた斜面の起伏の評価手法や、斜面内での水文特性の推定手法についてもあわせて検討した。



図1 表層崩壊の事例（静岡市井川地区）

(3) 崩壊発生予測手法の検討

上記(1)で検討された斜面安定の評価手法を用い、様々な波形の降雨を与えた場合に崩壊が発生するタイミングや深さがどうなるかについての数値シミュレーションを行った。また、その解析結果と(2)で調べられた実際の崩壊の特性を対比することによって、上記の斜面安定の評価手法が実際の崩壊の特徴を再現できているかについての検証を行った。最後に、この斜面安定の評価手法によって広範囲の山地流域を対象とした崩壊発生予測を行うための手法の検討を行った。

4. 研究成果

(1) 無次元パラメータの特定と斜面安定の評価

表層崩壊は一般的に、降雨によってもたらされた水が斜面内部へ浸透し、それに伴い斜面内の間隙水圧が上昇することによって引き起こされる。そこで地下水の鉛直方向の浸透を表す連続式、運動方程式をもとに、斜面内の間隙水圧の大きさに影響を及ぼす因子について検討した。その結果、間隙水圧の大

きさには地下水位とともに、飽和帯水層を発生させている地層境界の上下での透水係数の変化率が大きく関わっていることを示した。つまり、地層境界での透水係数の変化率が大きいほど、そこで大きな間隙水圧が発生し、さらにはすべり面が形成されやすいといえる。

次に、無限長斜面の安定解析式を無次元化し、斜面の安定性に対して支配的なパラメータについて調べた。その結果、無限長斜面の式は「非粘着性ですべり面上に飽和帯水層が発達していない状態での安定条件」が基本で、それにすべり面上の間隙水圧および粘着力の安定性に対する寄与がそれぞれ線形に安全率の減少・増加率として評価されていることを示した。間隙水圧の斜面安定に対する寄与度は地下水深と土層厚の比に間隙水圧と静水圧の比を乗じた「無次元地下水深」に依存し、粘着力の寄与度は「粘着力と同じ最大摩擦抵抗力を生じるのに必要な土塊の厚さ」の土層厚に対する比である「無次元粘着力」に依存する。この「無次元地下水深」と「無次元粘着力」が斜面の安定性を評価する上で重要な無次元パラメータであり、「無次元粘着力」の空間分布と降雨に伴う「無次元地下水深」の経時変化を求めることで、斜面安定の評価を行うことができると考えられる（図2）。

$$F \frac{\tan \theta}{\tan \phi} = 1 - F_w + F_c$$

→ 非粘着性、飽和帯水層なしの安定条件

F : 安全率 ($F < 1$ で崩壊発生)
 $\tan \theta$: 傾斜, $\tan \phi$: 内部摩擦角
 F_w : 間隙水圧の寄与度
 (主に無次元地下水深に依存)
 F_c : 粘着力の寄与度
 (主に無次元粘着力に依存)

図2 斜面安定の概略

(2) 現地における崩壊の発生状況の調査、水文観測、地形解析

井川演習林における過去の崩壊発生状況を空中写真判読および現地調査によって調べた結果、崩壊には深さ1 m程度以下の浅いものと深さ数m以上の深いものの両方が確認された。また井川演習林では1982年に連続雨量933 mm、時間雨量69.5 mmの記録的な雨があり、このときに多数の崩壊が発生していることがわかった。崩壊が多発している小溪流において水文観測を行った結果、降雨から10分~20分程度の時間差で流量ピークがみられた。よって、井川演習林の崩壊多発溪流

では比較的浅い流出成分が卓越している可能性がある。

次に、DEM（数値標高モデル）を用い、演習林内の地形解析を行った。その結果、山腹の傾斜の変化度が高い地域において崩壊が多く発生していることが明らかになった。また、降雨によってもたらされた水が主に浅い流出成分として流下する溪流では流路の開始位置（channel head）が傾斜と集水面積の関係により表現され、一方深い流出成分の割合が多い地域では流路の開始位置が傾斜と集水面積の関係により表現できないという結果が得られた。このことは、地形の解析により崩壊の発生予測に必要な流域の水文特性をある程度推定できる可能性を示唆している。

(3) 崩壊発生予測手法の検討

上記の(1)で得られた斜面安定の評価法を用い、さまざまな降雨波形を与えた場合に発生する崩壊のタイミング、深さがどうなるかについてのシミュレーションを行った。その結果、短期間の強雨があると浅い地層境界付近で無次元地下水深が増加し、そこでの崩壊の危険性が高まること明らかになった。その一方で長期間の降雨が続くと深い地層境界付近で無次元地下水深が増加し、そこでの崩壊の危険性が高まる結果となった。このことは、井川演習林内に様々な深さの崩壊が存在しているという調査結果と整合性があり、また短期間の強雨に対応して表層崩壊が発生し長期間の雨に対応して深層崩壊が発生しやすいという既往の研究成果とも一致する。よって、本研究で開発された斜面安定の評価手法により実際の斜面の安定性を適切に評価できる可能性がある。

本研究によって導かれた無次元パラメータは土質定数や土層の透水性とは違い直接的に現地調査によって得られるものではない。しかしながら、対象流域の過去の崩壊発生履歴と流域の水文特性に関するデータがあれば逆解析によって算出可能であると考えられる。場合によっては、流域の水文特性は、本研究で行ったような地形因子から推定ができる可能性がある。以上より、実際の流域を対象として崩壊発生予測を行う場合、①崩壊発生履歴、水文特性についての調査（推定）、②無次元パラメータの分布の逆解析、③降雨波形を与え崩壊発生予測を実施、の手順をとればよいと考えられる。

本研究では、「無次元パラメータ」を用いた新しい崩壊発生予測手法を提案した。従来の崩壊発生予測手法は土質定数、透水性、間隙率など多数のパラメータを必要としていたが、本研究により提案された手法は「無次元地下水深」と「無次元粘着力」の2つのパラメータのみで斜面の安定性の評価を行う。

このため、過大な現地調査を行わずともこれら2つのパラメータの空間的、時間的な分布傾向を調べるだけで崩壊発生予測を行うことが可能である。本研究で得られた崩壊予測手法は、今後山地流域における崩壊発生の予測精度に大きく寄与すると考えられる。

本研究の成果は学術雑誌に論文として掲載されているほか、国内外の学会において発表を行った。今後は①本崩壊発生予測手法をさまざまな山地流域に適用してその適用性について調査する、②本崩壊発生予測手法を河川での河床変動計算と結びつけることで山地河川における流砂量の推定を行う、の2つについて取り組んでいきたいと考えている。

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2件)

- ① Fumitoshi IMAIZUMI, Tsuyoshi HATTANJI, Yuichi S. HAYAKAWA, Channel initiation by surface and subsurface flows in a steep catchment of the Akaishi Mountains, Japan, *Geomorphology*, 査読有, 115, pp. 32-42, 2010
<http://www.tulips.tsukuba.ac.jp/dspace/handle/2241/104874>
- ② 今泉文寿, 眞板秀二, 宮本邦明, 表層崩壊の無次元発生支配パラメータと崩壊機構, 砂防学会誌, 査読有, Vol. 62, No. 2, 2009, pp. 13-20

[学会発表] (計9件)

- ① 今泉文寿, 眞板秀二, 宮本邦明, 降雨時における地下水位の変動と表層崩壊の発生に関する考察, 平成21年度砂防学会研究発表会, 2009年5月27日, 広島市
- ② 今泉文寿, 八反地 剛, 早川裕一, 赤石山脈南部での流路形成過程に関する解析, 日本地形学連合 2008年秋季大会, 2008年10月19日, 東京都世田谷区
- ③ Roy C. Sidle, Fumitoshi IMAIZUMI, Shallow Landslide and Debris Flow Behavior and Linkages in Steep Terrain: Hydrogeomorphic Influences, 2008 Joint Annual Meeting GSA/SSSA/ASA/ CSSA/GCAGS /HGS, 2008年10月8日, アメリカ合衆国テキサス州ヒューストン

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今泉 文寿 (IMAIZUMI FUMITOSHI)
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・助教