

4.1 高精度空間情報を用いた崩壊・土石流発生危険度評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 17～平 19

担当チーム：土砂管理研究グループ（火山・土石流）

研究担当者：田村圭司、内田太郎

【要旨】

平成 19 年度は、表層崩壊による土石流を対象として、浸透流解析と斜面安定解析を組み合わせた簡易モデルを作成した。その上で、土層厚の空間分布データを用いた「斜面単位の危険度評価手法」及び土層厚の確率分布を用いた広域に適用可能な「溪流単位の危険度評価手法」を作成し、妥当性を確認した。また、過去の深層崩壊事例を分析し、地質および第四紀隆起量に基づく深層崩壊危険地域の抽出を行った。その上で、微地形判読および地形量解析の手法を用いて、深層崩壊危険地域の中から、深層崩壊発生の恐れの高い溪流を抽出する手法の開発を行い、妥当性を確認した。

キーワード：高精度空間情報、表層崩壊、深層崩壊、土石流、危険度評価

1. はじめに

砂防事業の更なる重点化、効率化を図るために、土砂災害が発生する危険度の高い箇所からハード対策を推進していくことが有効であると考えられ、膨大かつ広大な危険箇所の危険度を評価できる手法の構築が望まれる。それらを検討するためには、土砂災害の発生の要因となる表層崩壊の危険度評価手法が必要となるが、その手法は確立されていない。また、近年多発している深層崩壊についても、発生危険箇所を抽出できる手法の構築が望まれている。よって、本研究は両者を踏まえた土砂災害危険箇所の危険度評価手法の検討を行うものである。

2. 表層崩壊に起因した土石流発生危険度評価手法

2.1 表層土層厚の空間分布の実態把握・定式化

2.1.1 背景・目的

これまで、表層崩壊の発生場所の予測手法として、浸透流解析と斜面安定解析を組み合わせた、いわゆる物理モデルに基づく手法が提案されてきた（例えば、平松ら、1990）。これらの手法において、表層土層厚は入力条件であり、出力結果である斜面崩壊危険度に及ぼす影響は大きいことが示されている（例えば、内田ら、2007）。しかし、これまで山地斜面における表層土層厚の測定事例が必ずしも多くなく、山地斜面の土層厚分布の実態は明らかになっていないと言え難い。そのため、表層崩壊発生予測に関する物理モデルを用いる場合、流域の代表値か少数の点のデータを内挿していることが多い。

一方、表面地形等比較的容易に手に入るデータから土

層厚を推定する手法の構築が試みられている。しかしながら、これまでのところ、表層崩壊発生危険度を予測する上で十分な精度で、土層厚を推定する手法は構築されていないのが現状である。そこで、ここでは、まず、広島西部山系内の 2 地域で簡易貫入試験を用いて、表層土層厚の測定を行い、表層土層厚の空間分布の実態を把握した。その上で、表層土層厚と地形の関係について考察を行った。

2.1.2 調査箇所と方法

調査は広島西部山系荒谷流域および宮内流域で行った。いずれも花崗岩を基岩とする地域である。以下では、荒谷流域の結果を中心に述べる。荒谷流域は、広島市佐伯区五日市町北西方に位置する八幡川の上流域の支流であり、1999 年 6 月の豪雨時に多数の崩壊が発生し、多大な被害が出た荒谷川流域内に位置する。流域面積は約 1.4ha、斜面の勾配は概ね 40° 程度である。植生は、斜面下部から中腹部までは主として針葉樹の植林が目立ち、一部、広葉樹が分布している。

土層厚の測定は、土研式簡易貫入試験機を用いて行った。荒谷流域では全域を対象とした。測定は 10 から 15m 間隔で面的に行った（図 1 参照）。本研究では、崩壊地内の貫入試験結果より、概ね Nd 値が 20 以上の部位は崩れ残っていることから、表層崩壊として崩れる恐れのある土層として、Nd 値が 20 以下の部位の厚さを「土層厚」として計測した。

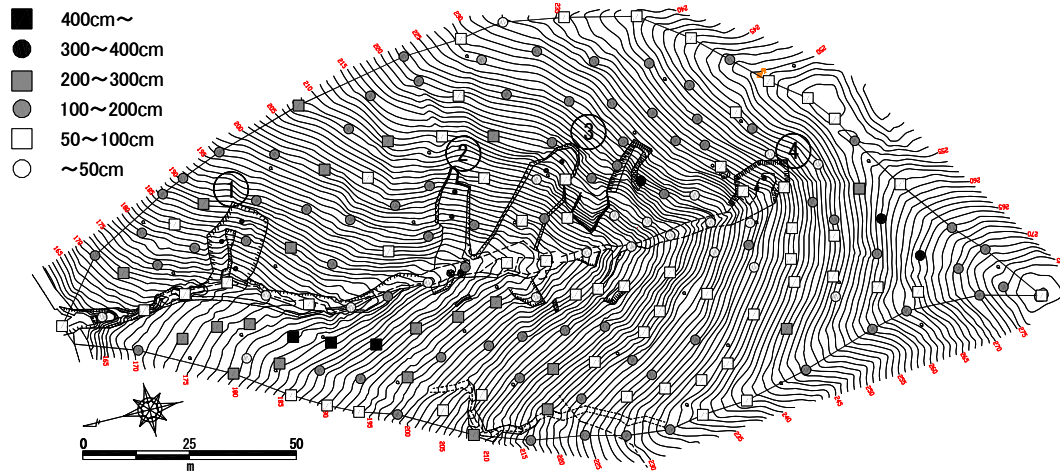


図-1 荒谷試験流域(図中のプロットは貫入試験実施箇所、丸数字の箇所は崩壊地を示す。等高線間隔は1m)

2. 1. 3 調査結果

土層厚の測定結果は図-1 に示したとおりであり、15～417cm まで差が見られた。隣り合った測定点であっても、100cm 以上の差がある場合もあった。

2. 1. 4 土層厚の空間分布に関する考察

(1) 限界土層厚の算出

本研究では、無限長斜面安定解析の式(式1)、ダルシー則(式2)ならびに水の質量保存則(式3)より、安全率と崩壊強度(γ)を算出し(式4)、安全率が1以上となる土層厚を算出した(式5)。

斜面の安全率(F_s)は、無限長斜面安定解析の式より、

$$F_s(t) = \frac{c + (\gamma h \cos I_s - \gamma_w u(t)) \cos^2 I_s \cdot \tan \phi}{\gamma h \cos I \cdot \sin I_s} \quad \text{式1}$$

ここで、 c は粘着力、 γ は土層の単位体積重量、 h は土層厚、 I_s は斜面勾配、 γ_w は水の単位体積重量、 u は間隙水圧、 ϕ は土の内部摩擦角とする。

ここで、ダルシー則より、土層内の水深が地表面に達しない範囲では以下のように表すことができる。

$$Q(t) = K_s u(t) \tan I \quad \text{式2}$$

ここで、 $Q(t)$ は単位幅あたりの時刻 t のある地点の流量、 K_s は飽和透水係数、 I は動水勾配である。

また、水に関する質量保存則から、

$$Q(t) = r(t)A + \frac{dv}{dt} \quad \text{式3}$$

ここで、 $r(t)$ は時刻 t の降雨強度、 A はある地点の集水面積、 v はある地点の貯留水量である。本研究では、既往の研究成果から、(1)表層崩壊が発生するような降雨規模が大きい降雨条件下においては、降雨量と流出量が概ね等しくなる場合があること(例えば、Tani, 1997)、(2)表層崩壊が発生する場合、土層が十分に湿っており土層内の含水率の時間変化は比較的小さいと考えられることから、水文過程は定常状態($dv/dt=0$)を仮定した。その結果、式1から3より次式が得られる。

$$F_s = \frac{c + (\gamma h \cos I - \gamma_w \frac{Ar}{K_s \tan I}) \cos^2 I \cdot \tan \phi}{\gamma h \cos I \cdot \sin I} \quad \text{式4}$$

ここで、 c は粘着力、 A は集水面積、 r は降雨強度、 K_s は飽和透水係数、 I は斜面勾配、 ϕ は土の内部摩擦角、 h は土層厚、 γ 、 γ_w は土層及び水の単位重量とする。ここで、崩れ残っている斜面の安全率は1以上であるとし、土層厚について解くと、式5が得られる。

$$h \leq \frac{cK_s \tan I - \gamma_w Ar \cos^2 I \cdot \tan \phi}{K_s \gamma \sin I (\sin I - \cos^2 I \cdot \tan \phi)} \quad \text{式5}$$

式5より、土層厚は斜面勾配及び集水面積により決まるある土層厚(この土層厚を以下では、「限界土層厚」と呼ぶ)より小さいことが分かる。ここで、限界土層厚の算出結果を図2に示す。算出にあたっては、荒谷流域で計測した土質強度(表-1; 詳細は2.2.3 参照)と同地域で崩壊が多発した1999年6月の豪雨時の最大時間降雨強度の63mm/hを用いた。図から分かるように、斜面勾配が内部摩擦角より大きく、60度までの範囲では、集水面積

表1 限界土層厚算出に用いたパラメータ

土質パラメータ	採用値
飽和透水係数 K_s	0.05 cm/s
粘着力 C	11.51 kN/m ²
内部摩擦角 ϕ	36.1 °
飽和単位体積重量 γ_s	17.9 kN/m ³
湿潤単位体積重量 γ_t	15.2 kN/m ³
水の単位体積重量 γ_w	9.8 kN/m ³

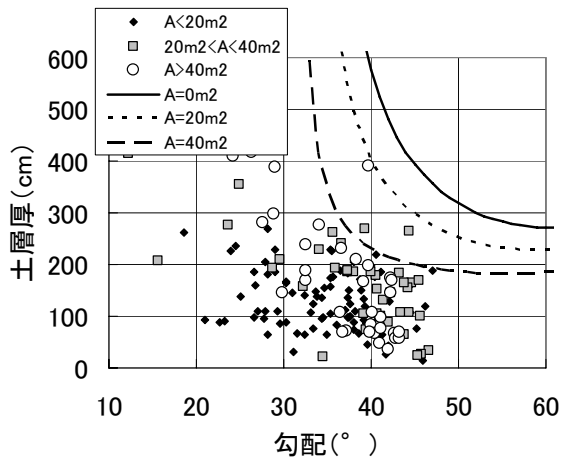


図-2 基岩地形より求めた集水面積・斜面勾配と土層厚の関係（図中の線は式2を用いて算出した限界土層厚の算出結果、プロットは測定結果）

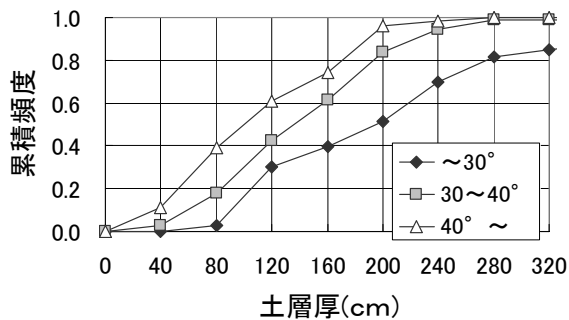


図-3 勾配ごとの土層厚分布

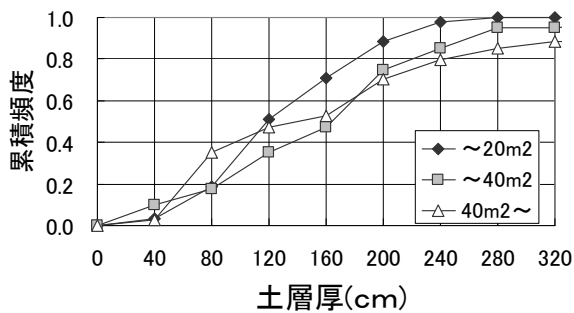


図-4 集水面積ごとの土層厚分布

および斜面勾配が大きいくほど、限界土層厚は小さくなった。

(2) 地形量と土層厚の関係

前節の考察から、斜面の土層厚は、斜面勾配と集水面積で決まる限界土層厚以下であると考えられることが分かった。そこで、本研究では、測定点ごとの斜面勾配及び集水面積を求めた。斜面勾配と集水面積は基岩地形(基岩表面はNd値は20であると仮定した)を用いて求めた。

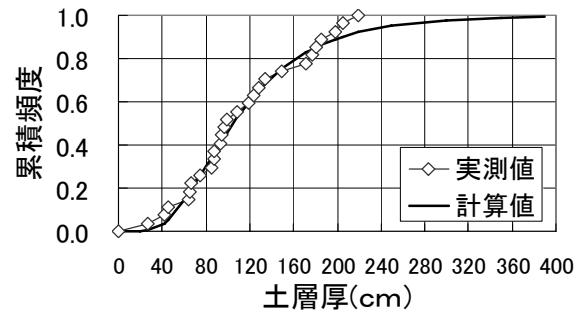


図-5 土層厚頻度分布（斜面勾配 37.5~42.5, 集水面積 20m²以下）

地形量の算出には、D-Infinity Flow Direction 法 (Tarboton, 1997) を用いた。なお、D-Infinity Flow Direction 法は全方向を 0.01° 刻みで算出し、最急勾配の方向を求めることで、上流側のメッシュから下流側2メッシュに対して流下する流量の重み付けを行い、流下させる手法である。

各測定点の地形量と土層厚の測定結果を図2上にプロットした。図より、1点を除いて、計測された土層厚は、式2で求めた限界土層厚以下であることが分かる。さらに、集水面積が 40m^2 以上の測定点のうち、5点は限界土層厚（図の破線）付近にプロットされていた。この結果は、斜面の土層厚が式2で求まる範囲内であるとした前節の考察と矛盾しない。

次に、斜面勾配、集水面積ごとの土層厚の頻度分布を図3、4に示した。勾配が大きくなるに従い、全体的に土層厚が薄い方に偏っており、限界土層厚の傾向と一致した。例えば、 200cm 以上の割合は、勾配 30° 以下では48%、 $30\sim 40^\circ$ では18%であるのに対し、勾配 40° 以上では5%以下であるように、勾配が大きくなるに従い、厚い土層厚の地点が存在する可能性が低い。

一方、集水面積による土層厚の頻度分布の違いは比較的小さく、集水面積が土層厚に及ぼす影響は、斜面勾配に比べて小さかった。

2. 1. 5 土層厚の空間分布に関するまとめ

以上の結果に基づくと、土層厚の限界値は、地形及び土質強度から求まる可能性があると考えられる。しかしながら、図2~4に示したように、同じ流域内で斜面勾配及び集水面積が概ね近い値であっても、土層厚は1~2m異なることがあり、地形から決定論的に土層厚を推定することは困難であると考えられる。このため、精度良く表層崩壊発生危険箇所を抽出するためには、土層厚の調査が不可欠であることが分かった。

一方、図5に示したように、土層厚の頻度分布はほぼ対数正規分布に近い関係を示した。なお、このとき式2

で求める限界土層厚(390cm)の累積頻度は0.994であり、式2で求めた土層厚を限界とした考えと矛盾しない。この結果より、土層厚を対数正規分布を用いて確率論的に推測することにより、表層崩壊発生確率が求まる可能性が指摘できる。

2.2 斜面スケールの表層崩壊発生予測手法の構築

2.2.1 背景・目的

1980年代から表層崩壊の予測手法として、浸透流解析等の雨水流出に関するモデルと斜面安定解析を組み合わせた手法が提案され、複雑な自然現象に近づけようとモデルの改良が加えられてきている。しかし、複雑な自然現象の全てをモデル化することは困難な上、各現象を支配する場の条件を測定することは非常に多大な労力を要する。実際、複雑なモデルを用いて表層崩壊の危険箇所を抽出する試みを行う場合においても、場の条件に関する情報は流域内の数点の測定値の平均値などの代表値が用いられてきている場合が多い。すなわち、予測精度の向上のためには、モデルと場の条件(入力条件)の測定をバランス良く高度化していく必要があると考えられる。

一方、前節の考察から、土層厚は空間的にばらつきが大きいことが明らかとなった。そこで、本項では、物理モデルの入力条件のうち、比較的測定が容易な土層厚の空間分布を面的に測定し、基本的に実測できる入力条件のみで構成されている簡易な「物理モデル」を用いて表層崩壊の発生箇所の予測計算を行い、モデルの再現性について検討を行った。

2.2.2 モデル

本研究では、無限長斜面安定解析の式(式1)、ダルシー則(式2)ならびに水の質量保存則(式3)より、表層崩壊に必要な最小定常崩壊強度(r_c)を算出し(式4)により危険度を評価した。前節の式1~3を用いて、安定解析式での安全率が1となる降雨強度について、式6が得られる。

$$r_c = \frac{K_s \tan I \left\{ \frac{c}{\cos I} - \gamma_s h (\sin I - \cos I \tan \phi) \right\}}{A \left\{ \gamma_w \cos I \tan \phi + \frac{(\gamma_s - \gamma_t)(\sin I - \cos I \tan \phi)}{\cos^2 I} \right\}} \quad \text{式6}$$

γ_s 、 γ_t はそれぞれ、飽和状態、不飽和状態の土層の単位体積重量とする。式6から、 r_c は、任意の地点で、測定可能な土層の単位体積重量、土層厚、斜面勾配、土の粘着力、土の内部摩擦角、飽和透水係数、集水面積から求まる。

2.2.3 モデルの適用

前節で示した崩壊地内及びその周辺の貫入試験結果から、Nd20程度が崩壊面と考えられたため、検討に用い

る土層厚は各試験地点のNd20の深度とした。なお、崩壊地内の土層厚は簡易測量を行い、崩壊前の土層厚を推定した。

(1) パラメータの設定

検討に用いるパラメータは土の等価飽和透水係数 K_s 、粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ 、飽和単位体積重量 γ_s 、土の湿潤単位体積重量 γ_t 、集水面積 A 、斜面勾配 I ならびに表層土層厚 h である。

等価飽和透水係数を除く土質定数については、流域内で土質試験に供する試料を採取し、室内土質試験を行い、パラメータの設定を行った(表-1)。豪雨時の斜面の等価飽和透水係数は、パイプ流など選択的な流れの影響を受け、小さい土壌サンプル(例えば、100cc)で求めた透水係数より大きい可能性が高い。そこで、本研究では、豪雨時の現象の再現のため、検討対象流域内で継続して行っている水文観測から得られた間隙水圧と流量をもとに、斜面内の浸透流はダルシー則に従うと仮定し、斜面の等価飽和透水係数を算出し、検討に用いた(表-1)。

崩壊のおそれのある土層厚の検討結果より、Case1として検討に用いる表層土層厚は図-1より地表面よりNd20までの土層厚を用いた。なお、崩壊地は崩壊後の表層土層厚のみしか把握できないため、現地で簡易測量を行い、崩壊前の滑り面より上部の表層土層厚を推定し、崩壊前に復元して検討を行った。また、Case2として、土層厚の空間分布を考慮せず、流域平均表層土層厚(Nd20値)141cmを一律で与えた。さらにCase3として、Case2の流域平均表層土層厚(Nd20値)141cmを1.2倍に割増した土層厚である169cmを一律で与えた。

(2) 集水面積、斜面勾配

集水面積ならびに斜面勾配については、貫入試験実施箇所ごとに、地形測量結果ならびに簡易貫入試験結果をもとに算出した基岩面の5mメッシュの地形データを用いて算出した。集水面積、斜面勾配の算出は、D-Infinity Flow Direction法を用いた。

2.2.4 モデルの適用結果

表-1に示したパラメータを用いCase1で計算した場合、流域内の4地点(うち、2点は崩壊地①内)を除いて土層が完全に飽和しても崩壊に至らなかった。このことは、設定した土質強度の値が、実際の表層崩壊時に比べて大きかった可能性が考えられる。そこで、土壌の飽和度による強度の変動が大きいと考えられている粘着力の値を、間隙水圧0の状態、安全率が1を切らない範囲で、小さく設定($C=7.5\text{kN/m}^2$)し、再計算を行った。

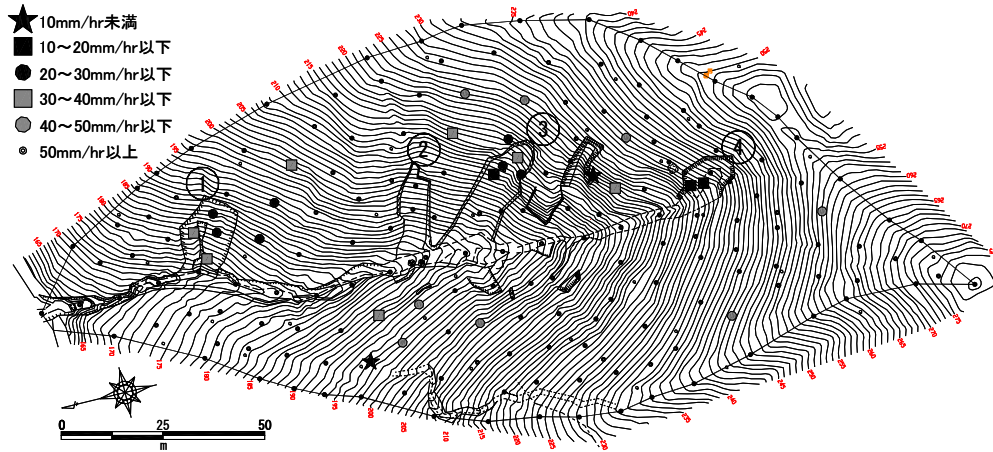


図-6 崩壊危険降雨強度算出結果 (Case1)

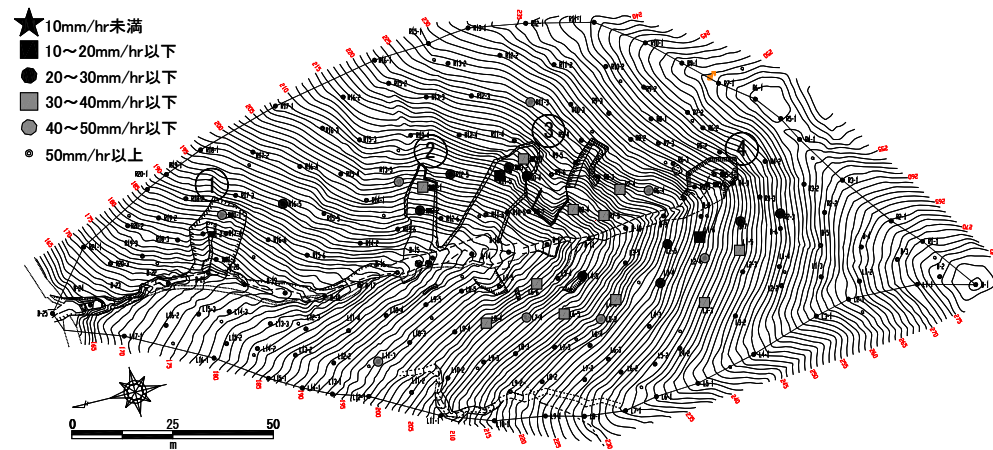


図-7 崩壊危険降雨強度算出結果 (Case3)

検討の結果、Case1 では r_c の値が小さい箇所と実際に崩壊した箇所は、崩壊地②を除き、概ね一致する結果となった(図-6)。崩壊地②は土層厚が薄く、土層内水深が地表面に達するほどの降雨強度を与えても斜面が崩壊には至らない結果となった。Case2 では流域内の全ての地点で表面流が発生してもいずれの地点も崩壊しない結果となった。Case3 では、崩壊地②、③では崩壊地内の計算地点が 50mm/hr未満の降雨で崩壊に至る結果となっているが、崩壊地①、④については、1 点を除いて崩壊地内の計算地点が 50mm/hr未満の降雨で崩壊に至ることはなかった。また、実際には崩壊が発生していない左岸上流部付近に計算上崩壊する地点が多数見られた。図-1 より、左岸上流部は土層厚が 100cm未満の箇所が多数であるが、これらの地点の土層厚を 169cmと厚く設定したことで、本来であれば崩壊危険度が低いと考えられる地点の崩壊危険度を高く評価した結果となっている。

図-8、9はCase1、Case3 の流域内の全地点と崩壊地

内に含まれる地点(全 14 点)の r_c の地点数の分布を示した。Case1 では計算地点のうち、39 地点が 100mm/hr未満の降雨で崩壊する結果となっている。この中で、 r_c が 30mm/h以下の地点の 6 割強、40mm/h以下の地点では 5 割強が崩壊地内の点が占めるのに対し、40~100mm/hの地点では、崩壊地内に属する地点は 1 つも見られなかった。なお、崩壊地内の 4 点については土層が完全に飽和した場合においても、安全率は 1 以下とはならなかった。このことから、Case1 では、 r_c が小さいほど、斜面崩壊する可能性が高く、 r_c が斜面崩壊発生危険度を良く表しているといえる。

これに対して、Case3 では 55 地点が 100mm/hr未満の降雨で崩壊する結果となった。Case1 と同様に崩壊地内の地点が占める割合に着目すると、 r_c が 30mm/h以下の地点の約 3 割、30~40mm/hの地点では約 3 割弱が崩壊地内の点が占めている。なお、Case3 では、崩壊地内の 6 点は土層が完全に飽和した場合でも安全率は 1 以下

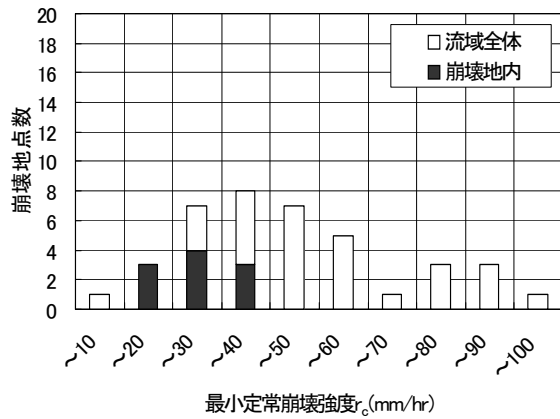


図-8 最小定常崩壊強度算出結果 (Case1)

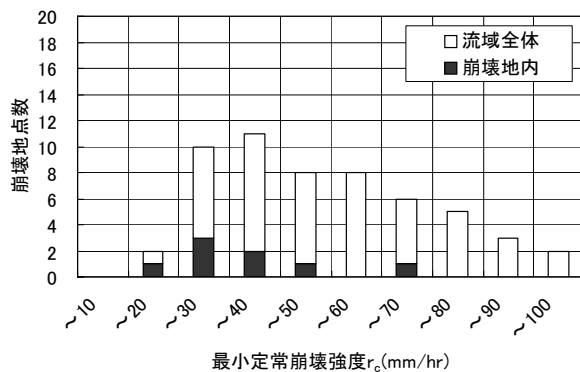


図-9 最小定常崩壊強度算出結果 (Case3)

とならなかった。

2.2.5 斜面スケールの表層崩壊発生予測手法に関するまとめ

本項では、水文過程を単純化（定常状態を仮定）し、入力条件には実測した値を用いた比較的簡易な表層崩壊危険度評価手法を採用し、土層厚の空間分布を計測し、それを考慮して再現計算を行った（Case1）が、水文観測結果から等価飽和透水係数を推定した場合、比較的精度良く崩壊の危険性の高い斜面を抽出可能であることが分かった。一方で、土層厚を一定値として再現計算を行った場合には、Case2 では、流域内では崩壊の危険性が高い斜面が全くない結果となり、Case3 では、Case1 と比較し、崩壊の危険性の高い斜面を抽出する的中率が下がるとともに、崩壊する可能性が低いと考えられる斜面の危険性を高く評価する空振りが多い結果となった。以上より、表層土層厚の空間分布ならびに入力条件の精度を向上させた予測計算を行い、モデルの入力条件の精度向上が表層崩壊予測計算の計算精度を向上させることを確認できた。

2.3 溪流スケールの表層崩壊発生予測手法の構築

2.3.1 背景・目的

前項までに検討した物理モデルは、降雨条件、地形情報、土層厚、土質強度（内部摩擦角、粘着力）、土の水理特性（水分特性曲線、透水係数）を入力条件として、斜面の安全率を出力するものである。入力条件のうち、降雨条件、地形情報は比較的容易に手に入るものの、土層厚、土質強度、土の水理特性は広域で面的に情報を得ることは現時点では多大な労力を必要とし、現実的ではない。一方、土層厚、土質強度、土の水理特性を確率的に評価できれば、少なくとも、崩壊発生確率を推定することができる可能性が考えられる。仮に、斜面ごとの崩壊発生確率が算出された場合、崩壊発生確率が高い斜面が多い溪流が土石流発生危険度の高い溪流と評価すれば、溪流単位の土石流発生危険度が求まることになる。実際、2.1 で検討したように土層厚の空間分布は確率論的に評価可能であると考えられる。

そこで、本項では、土層厚、土質強度、土の水理特性など地下の情報を確率的に与え、斜面崩壊確率を算出し、斜面崩壊確率に基づき、流域単位の土石流発生危険度を評価する手法について検討する。

2.3.2 方法

(1) モンテカルロシミュレーション

本研究では、メッシュごとに、ある降雨条件下において、土層厚、土質強度、土の水理特性を確率的に与え、当該降雨条件下において、安全率が1以下となる確率を、「崩壊確率」として算出した。地下の情報を確率的に与えるにあたっては、以下の式を用いた。

$$C = C_{\mu} + C_{\sigma} \times rd$$

ここで、 C はあるパラメータとし、 C_{μ} はパラメータ C の平均値、 C_{σ} はパラメータ C の標準偏差、 rd はモンテカルロシミュレーションで発生する正規乱数である。正規乱数の発生には、Box-Muller の方法（三根、1994）を用いた。シミュレーション回数は10000回とした。

(2) 安全率の算出手法

安全率の算出にあたっては、土層内の間隙水圧は定常状態に達した状態を仮定した式1で算出した。これにより、地下の情報に関するパラメータは、①土層厚、②粘着力、③土の内部摩擦角、④飽和透水係数の4つとなる。また、定常状態を仮定したことにより、飽和—不飽和の浸透流解析が不要となるため、多ケースのシミュレーションが比較的短時間で可能となる。

2.3.3 手法の適用

(1) 検討対象地域

検討対象は、愛媛県新居浜市多喜浜地区の面積3.22km²の地域である（図-10）。同地区は新居浜市の背後に広がる標高300m未満の丘陵性の山地であり、和泉層群の砂岩、

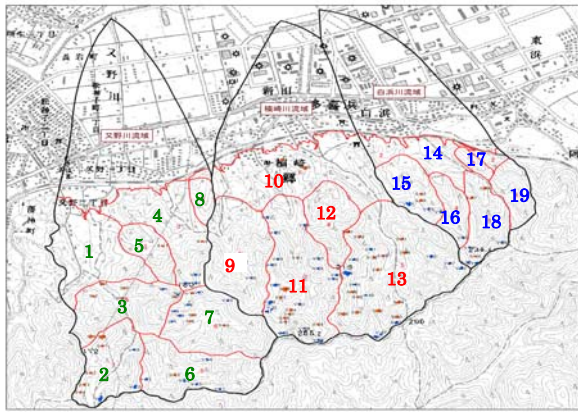


図-10 検討対象地域（愛媛県新居浜地区）

泥岩からなる。同地域は2004年の台風15号と21号により、表層崩壊や土石流が多発した。検討対象地域内では108個の表層崩壊が発生した。

(2) パラメータの設定

土層厚は図-10中の流域13の崩壊地周辺で25点土研式簡易貫入試験を実施し、平均値、標準偏差を求めた。また、粘着力、土の内部摩擦角については、貫入抵抗値と粒度分布より、粘着力および土の内部摩擦角が推定できる若月ら（2007）が提案した式により、貫入試験結果と粒度分布の測定結果より平均値及び標準偏差を算出した。さらに、飽和透水係数については、ここでは、六甲山地において大型サンプルを用い、測定したHedorayanto（1999）のデータを参考に平均値及び標準偏差を設定した。なお、算出結果、いずれのパラメータとも正規分布よりも、対数正規分布に近い分布形を示したため、正規乱数の発生にあたっては、対数値を用いた。

(3) 地形量の算出

ここではレーザープロファイラーによる地形データを用いて、10mメッシュで勾配、集水面積を算出した。算出には、D-Infinity Flow Direction法を用いた。

2.3.4 適用結果

(1) 溪流ごとの危険度算出

対象地域を図-10に示すように0.04～0.46km²の19の溪流に分割した。その上で、溪流ごとの危険度を「崩壊危険面積（ α ）」として、以下の式で算出した。

$$\alpha = \sum_{i=1}^n a_i p_i \quad \text{式7}$$

ここで、 a_i は各メッシュの面積（=100m²）、 p_i はメッシュ i の崩壊確率（10000回の計算で安全率1以下になる確率）、 n は溪流内のメッシュ数である。降雨強度を50mm/hにした場合の溪流ごとの崩壊危険面積の算出結果と実際に

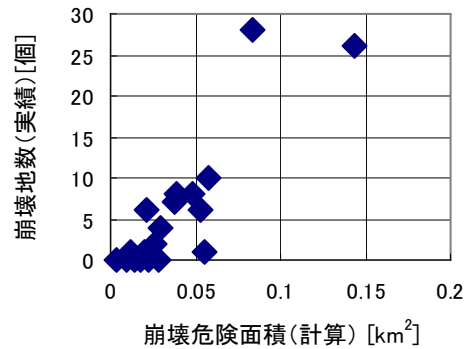


図-11 溪流単位の崩壊危険面積と崩壊地数の関係

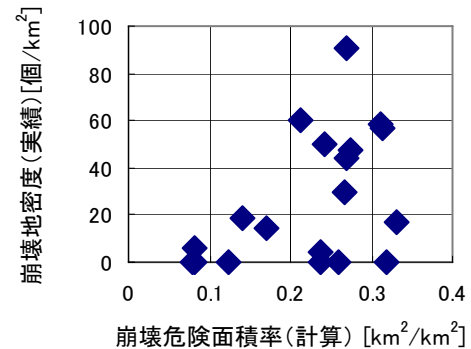


図-12 溪流単位の崩壊危険面積率と崩壊地密度

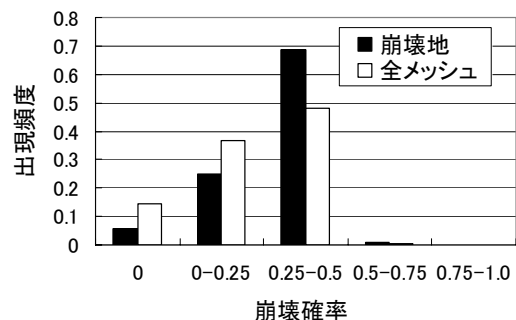


図-13 崩壊確率の出現頻度

2004年の台風で発生した崩壊地数の関係を図-11に示した。図に示したように、溪流単位で見た場合、崩壊危険面積と崩壊地数の相関は高く、崩壊危険面積は溪流単位の表層崩壊発生危険度をよく表しているといえる。

また、図-12には、単位面積（1km²）あたりの崩壊危険面積（以下、崩壊危険面積率）と2004年に発生した崩壊地数（以下、崩壊地密度）の関係を示した。崩壊危険面積率が大きいにもかかわらず、崩壊地密度が小さい溪流はあるものの、崩壊地密度が高かった溪流は、崩壊危険面積率も大きく、斜面崩壊が多発する溪流は概ね抽出できていた。

(2) 溪流ごとの危険度算出

次に、メッシュ単位で見た場合の危険度評価の可能性

について検討する目的で、崩壊確率別の出現頻度を対象地域の全メッシュと崩壊地メッシュについて図-13 に示した。図に示したように、崩壊確率が大きくなるに従い、崩壊地メッシュの出現頻度が全メッシュの出現頻度を上回るようになり、メッシュ単位で見た場合においても、本手法でもとめた崩壊確率はある程度相対的な斜面崩壊危険度を表しているといえよう。

2. 3. 5 渓流スケールの表層崩壊発生予測手法に関するまとめ

簡易な物理モデルとパラメータの確率分布を用いて、溪流単位で表層崩壊の発生危険度の評価を試みたところ、概ね良い再現性が見られた。また、今回対象とした3.22km²をパソコン（Intel CoreTM2 CPU 2.40GHz）を用いて計算するに要した時間は、勾配・集水面積の算出に約2時間、その後の崩壊確率の算出は15分程度であった。

3. 深層崩壊に起因した土石流発生危険度評価手法

3. 1 深層崩壊発生危険地域の抽出

3. 1. 1 背景・目的

深層崩壊の発生するおそれのある斜面を予測することは、大規模土砂災害を防止・軽減する対策を立案する上で極めて重要である。これまで、深層崩壊の発生するおそれのある斜面を予測することを目的に、深層崩壊地周辺の地形、地盤特性、水文環境に関する詳細な調査・研究が行われてきた。その結果、微地形、地質、隆起量、水文環境などが深層崩壊発生に影響を及ぼす因子として指摘されてきている（浅井ら、1987；寺戸、1993 など）。このうち微地形や水文環境は、深層崩壊発生のおそれのある斜面の抽出に有効である可能性は高いが、全国的に調査するためには膨大な時間や労力を要する。そこで、微地形や水文環境により深層崩壊発生危険箇所を抽出するためには、地域を限定する必要がある。その点、地質や隆起量は、全国的に情報が整備されているため、日本全土における深層崩壊の発生危険度を評価する有効な指標となりうる。しかし、地質や隆起量の違いが深層崩壊発生に及ぼす影響を定量的に検討した例はない。そこで、本項では、既往の深層崩壊事例を分析し、地質や隆起量の違いが深層崩壊発生に及ぼす影響を明らかにする。

3. 1. 2 検討方法

本研究では、「表土層だけでなく、深層の地盤までもが崩壊土塊になる現象」を深層崩壊とし、これまでの研究（浅井ら、1987；寺戸、1993 など）を参考に、平均崩壊深が概ね5m以上、かつ崩壊土砂量が10⁵m³以上の崩壊

表-2 用いた地質区分

No.	地質年代区分	岩種区分	地質体区分
1	第四系	堆積岩	付加体以外
2	第四系	火山岩	付加体以外
3	第三系	堆積岩	付加体以外
4	第三系	堆積岩	付加体
5	第三系	火山岩	付加体以外
6	第三系	火山岩	付加体
7	第三系	深成岩・変成岩	付加体以外
8	中・古生界	堆積岩	付加体以外
9	中・古生界	堆積岩	付加体
10	中・古生界	火山岩	付加体以外
11	中・古生界	火山岩	付加体
12	中・古生界	深成岩・変成岩	付加体以外

を収集の対象とした。なお、本研究では、地すべり危険箇所あるいは同防止区域に該当する箇所で行った崩壊現象については検討の対象から除いた。事例収集の対象は、明治期（1868年）以降に降雨あるいは融雪により発生した深層崩壊とし、既往文献中に発生場所、発生年月日が明記されているものを対象とし、122事例収集した。

地質分布の解析には、「100万の1 日本地質図第3版 CD-ROM 第2版（独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター発行）」を用いた。本研究では、地質年代区分、岩種区分、地質体区分の観点から、165種類に分類されている地質を表-2に示す12種類に再区分した。また、第四紀隆起量の分布は、第四紀地殻変動研究グループ（1968）によって作成された集成隆起沈降量図を用いた。

3. 1. 3 検討結果

第四紀隆起量と崩壊密度（1,000km²あたりの深層崩壊発生数）の関係を地質年代、岩種、地質体ごとに図-14～16に示した。また、地質区分ごとの崩壊密度を図-17～19に示した。

(1) 第四紀隆起量の影響

図-14～16に示したように、地質年代（第四系の地域を除く）、岩種、地質体によらず、第四紀隆起量の増大に従って崩壊密度は増加した。このことから、第四紀隆起量は崩壊密度に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

(2) 地質年代の影響

第四系の崩壊密度は、第四紀隆起量によらず、第三系、中生界に比べて概ね小さかった（図-14）。一方、第三系と中生界の崩壊密度を比較した場合、崩壊密度の大小関係は第四紀隆起量により異なった（図-14）。同様に、第三系と中生界の崩壊密度の大小関係は岩種によっても異なった（図-17）。また、図-18 に示したように、地質体が同じ場合、第三系と中生界で崩壊密度に

明瞭な差は見られなかった。以上の結果から、崩壊密度に第四系かそれ以外かの違いは影響するものの、第三系と中生界の違いは崩壊密度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(3) 岩種の影響

図-15 示したように、岩種ごとの崩壊密度の大小関係は第四紀隆起量により異なった。また、図-17、19 に示したように、崩壊密度の高い岩種は、地質年代、地質体により異なった。このことから、第四紀隆起量、地質年代、地質体に比べて、岩種が崩壊密度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

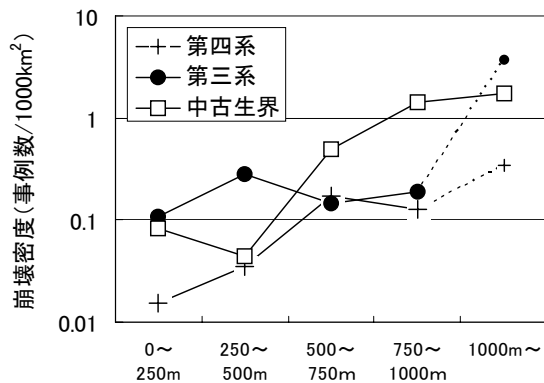


図-14 地質年代別の第四紀隆起量と崩壊密度の関係
(第四系、第三系の隆起量 1000m以上の領域は面積が 5000km²以下であるため点線で示した)

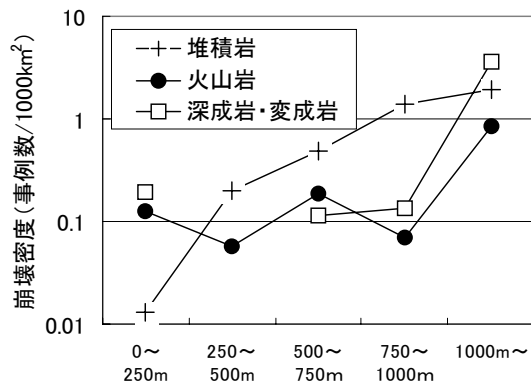


図-15 岩種別の第四紀隆起量と崩壊密度の関係

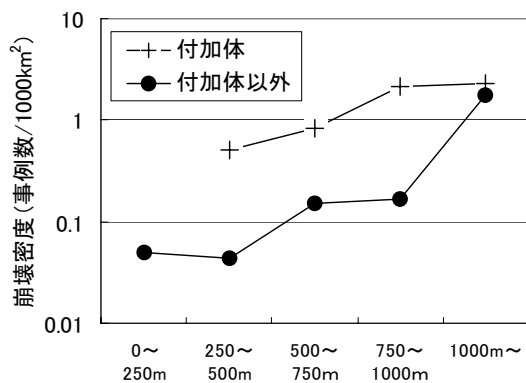


図-16 地質体別の第四紀隆起量と崩壊密度の関係

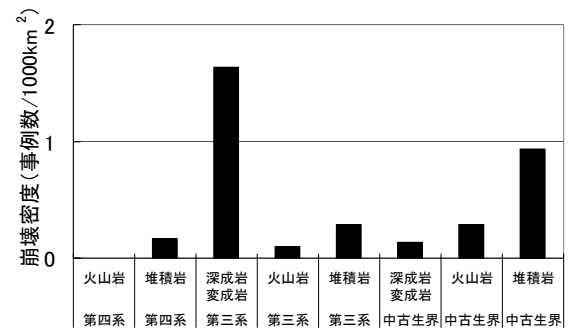


図-17 地質年代と岩種および崩壊密度の関係

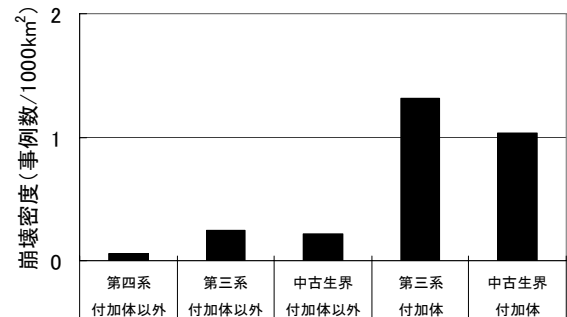


図-18 地質年代と地質体および崩壊密度の関係

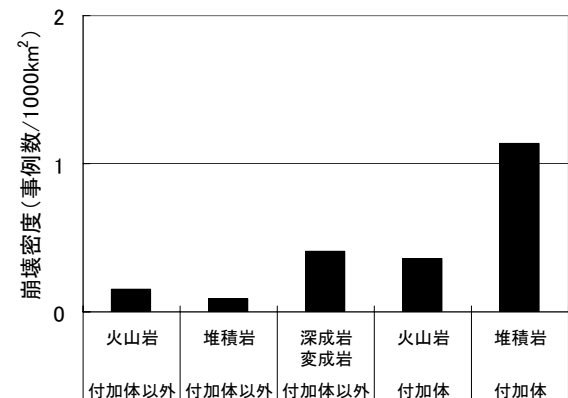


図-19 岩種と地質体および崩壊密度の関係

表-3 深層崩壊発生危険度による地域分類例

危険度	崩壊頻度 (全国平均に対する比)	発生事例数	面積 (国土面積に対する比)
特に高い地域	5倍以上	67	7.8%
高い地域	1～3倍	30	13.5%
低い地域	0.1～0.6倍	24	61.2%
特に低い地域	0.1倍以下	1	17.5%

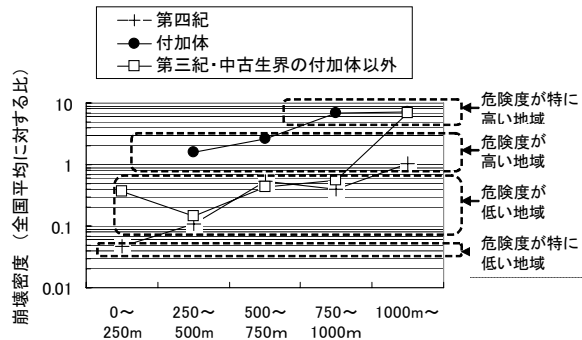


図-20 地質年代と形成過程および崩壊密度の関係

(3) 地質体の影響

図-16 に示したように、付加体では、付加体以外と比べて、第四紀隆起量が250m以上のいずれの領域でも、崩壊密度が大きかった。また、図-18、19 に示したように、付加体の崩壊密度は、地質年代、岩種によらず、付加体以外に比べて高かった。以上の結果、地質体は、崩壊密度の大小に明らかな影響を及ぼしていると考えられる。

3. 1. 4 深層崩壊発生危険地域の抽出

明治期以降の深層崩壊について、崩壊密度と地質、第四紀隆起量の関係を調べた結果、以下の点が明らかになった。

- ① 第四紀隆起量が大きいほど崩壊密度は大きい
- ② 第四系の地域では、それ以外の地域に比べて崩壊密度が小さい
- ③ 付加体では、付加体以外に比べて大きい
- ④ 岩種が崩壊密度に及ぼす影響は小さい
- ⑤ 第三系と中生代の崩壊密度の差は小さい

すなわち、深層崩壊の発生に影響を及ぼしている因子として、第四紀隆起量、地質体、第四系か、第三系または中生代であるかの3点が挙げられた。そこで、これに従い分類し、崩壊密度を全国平均(0.32)で除した結果を図-20に示す。図-20に基づく、崩壊密度を深層崩壊の発生危険度とすると、深層崩壊の発生危険度から表-3に示すように日本全国は4つに分類できた。

表-3 の分類に従うと、特に深層崩壊の危険性の高い地域は面積で全国の約8%で、全国平均に比べて5倍以上深層崩壊の発生危険度が高い。また、この5倍以上深

層崩壊の発生危険度が高い地域以外にも全国の約13%の地域で、深層崩壊の発生危険度は全国平均より高かった。深層崩壊の発生危険度が全国平均より高い約21%の地域で、約80%の深層崩壊が発生していた(表-3)。

3. 2 深層崩壊発生危険渓流の抽出

3. 2. 1 背景・目的

従来の深層崩壊発生場に関する研究では(建設省土木研究所, 1988)、崩壊発生前後の空中写真判読による崩壊地周辺の特徴的な微地形の抽出、斜面勾配や起伏量などの地形量の解析結果などが報告されている。しかし、これまで深層崩壊は発生頻度が低く、崩壊機構も未解明な部分が多かったため、発生危険箇所の予測は困難とされていた。そこで、本項では、前節で抽出した深層崩壊危険地域から、特に深層崩壊の発生の恐れの高い渓流の抽出を目的とし、検討を行った。地質構造及び微地形要素とDEMデータから算出される地形量を用いて、深層崩壊の発生斜面・非発生斜面における特徴の違いを明らかにすることにより、深層崩壊の発生危険度評価に有効な指標の抽出と深層崩壊発生危険渓流の抽出手法の検討を行った。

3. 2. 2 検討対象

検討対象地域は、2005年9月に台風14号による豪雨(5日間累加雨量1,029mm:「鰐塚山(気象庁)」)によって深層崩壊が多数発生した宮崎県鰐塚山周辺の面積約

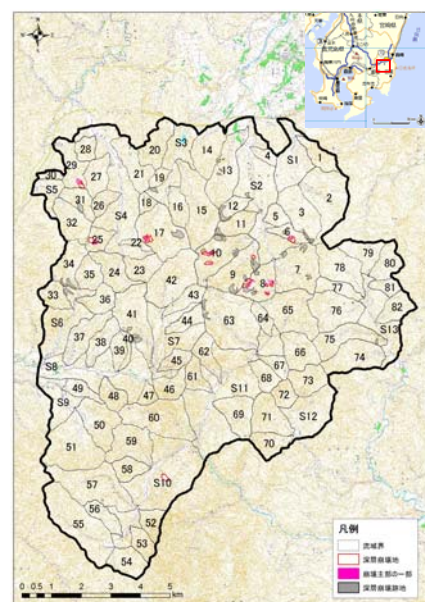


図-21 検討対象地域(宮崎県鰐塚山)

130km²の地域である。検討対象地域を渓流単位で1～2km²程度になるように95の単元渓流(以下、流域とす

る)に区分した(図-21)。

3. 2. 3 検討方法

(1) 深層崩壊跡地の抽出・整理

土地質図(S=1/20 万)及び2005 年台風 14 号による崩壊発生前に撮影された空中写真(2003 年撮影)の判読により「深層崩壊跡地」を抽出した。また、2005 年台風 14 号による崩壊発生後に撮影された空中写真の判読により「深層崩壊発生箇所」を抽出した。

(2) 地質構造と微地形要素の抽出及びこれらと深層崩壊発生との関連性の分析

本研究では、既往の研究(建設省土木研究所, 1988)において深層崩壊発生と関連性が高いとされてきた地質構造要素のうち、①活断層、②明瞭なリニアメント、③キャップロック構造の3要素を対象とし、地質図、活断層マップ等から抽出した。また、深層崩壊発生と関連性が高いと考えられる微地形要素として、①円弧状クラック、②岩盤クリープ斜面、③線状凹地、④山頂緩斜面、⑤地すべり地形、の5要素を対象とし、地質図及び深層崩壊発生前の空中写真(2003 年撮影)判読により抽出した。

この抽出結果を基に、溪流ごとに各要素の有無を集計した。その上で、①ある要素が分布する溪流のうち、深層崩壊発生箇所または深層崩壊跡地がある溪流の割合(以下、「的中率」とする)及び②深層崩壊発生箇所または深層崩壊跡地がある溪流のうち、ある要素が分布する溪流の割合(以下、「カバー率」とする)を算出した。

(3) 地形量の算出及び深層崩壊発生との関連性の分析

2.1 で検討したように表層崩壊発生に関する物理モデルでは、表層崩壊発生場所をコントロールする地形要因としては、斜面傾斜度、集水面積が挙げられている。そこで、本項でも、同じ考え方に従い、国土地理院発行の数値地図 50mメッシュ(標高)を用いてメッシュごとの斜面勾配、集水面積を算出した。その上で、斜面傾斜度 8 階級と集水面積 9 階級の категорияに区分し、各 category に属する全メッシュ数に対する深層崩壊跡地メッシュ(メッシュの重心が深層崩壊跡地ポリゴン内にあるメッシュ)の割合を「深層崩壊跡地率」として算出した。

3. 2. 4 検討結果

(1) 地質構造及び微地形要素と深層崩壊の発生確率

深層崩壊跡地を対象に、的中率とカバー率を算出した結果を図-22 に示す。カバー率では、活断層は他の要素と比べて小さく、深層崩壊が発生した溪流においてあまり分布していないことが分かった。また、他の 5 要素はいずれもカバー率が概ね 0.4 以上であり、深層崩壊が発

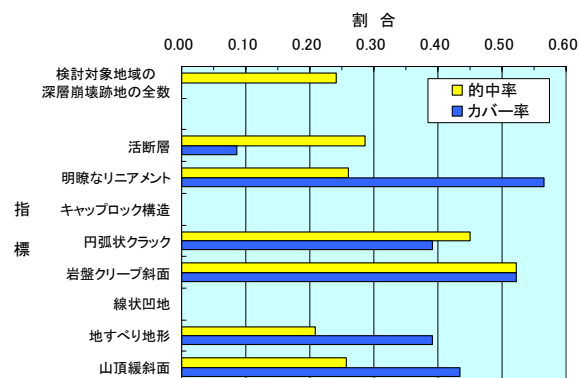


図-22 地質構造及び微地形要素と深層崩壊跡地の関係

表-4 斜面傾斜度－集水面積と深層崩壊跡地率の関係

		集水面積 (log ₁₀ As)					
		3.40	3.70	3.88～4.00	4.10～4.40	4.44～4.70	4.72～
斜面傾斜度 (度)	～10	0.00	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)
	10～15	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	(0.00)
	15～20	0.10	0.08	0.17	0.54	0.41	0.42
	20～25	0.50	0.50	0.54	0.62	1.83	2.40
	25～30	0.81	1.54	1.87	3.18	3.31	(0.86)
	30～35	1.02	3.72	3.93	3.60	(5.40)	(1.89)
	35～40	(1.95)	5.73	3.23	(2.09)	(2.11)	(0.00)
	40～	(7.34)	(1.28)	(3.77)	(0.00)	(0.00)	—

※・実線より下の着色部分の領域が「危険メッシュ」を表す。
・表中の数値は検討対象地域の平均値との比を表す。
・カッコ付きの数値は category の全体メッシュ数が検討対象区域総メッシュ数の 1% 以下の場合、「—」は該当メッシュなしの場合。

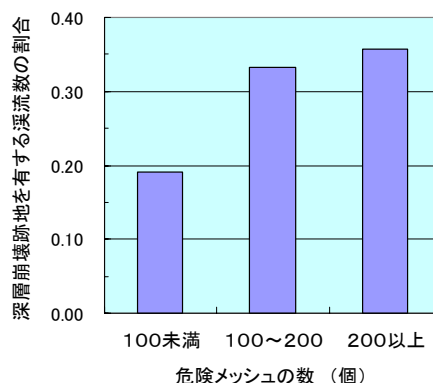


図-23 危険メッシュ数と深層崩壊跡地を有する溪流の関係

生した溪流に比較的多く分布する確率の高い要素であることが分かった。

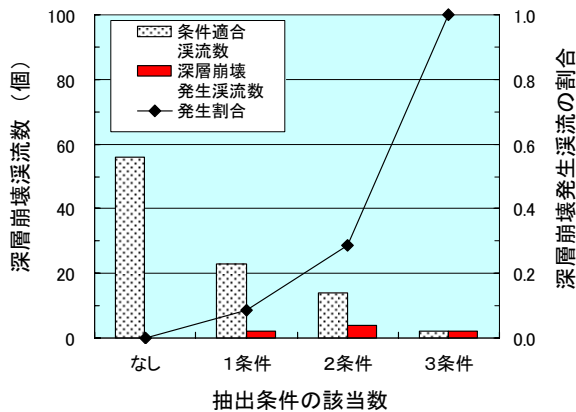


図-24 抽出手法の適用結果

一方、深層崩壊跡地が分布する溪流は 23 あり、検討対象地域全体での的中率は 0.24 となった。「円弧状クラック」と「岩盤クリープ斜面」の的中率は 0.24 より明らかに大きいものの、他の 5 要素の的中率は概ね 0.24 以下の値であり、これら 5 要素が存在する溪流においては、要素のない溪流に比べて深層崩壊が発生しやすいとは言えないことが分かった (図-22)。

以上のことから、鰐塚山周辺地域においては、「円弧状クラック」と「岩盤クリープ斜面」が深層崩壊跡地と関連性が高いと推定された。

(2) 地形量と深層崩壊発生危険度の関係

地形量ごとの深層崩壊跡地率を検討対象地域全体の平均深層崩壊跡地率で割った値を表-4 に示す。なお、対象地域の総メッシュ数は 51,621 個、深層崩壊跡地メッシュ数は 370 個で、深層崩壊跡地率は 0.007 となる。この結果からは、斜面傾斜度と集水面積が大きいほど深層崩壊跡地率は概ね大きくなり、表層崩壊と同様に、斜面傾斜度と集水面積が深層崩壊の発生場所をコントロールする可能性の高いことが分かった。

そこで、深層崩壊跡地率が対象地域の平均値より 2 倍以上のメッシュを深層崩壊の危険度の高いメッシュと考え、「危険メッシュ」とした (表-4)。溪流ごとの危険メッシュ数を集計し、危険メッシュ数の階級区分ごとに深層崩壊跡地の分布する溪流数の割合を整理した結果 (図-23)、危険メッシュ数が多くなるほど深層崩壊跡地が存在する可能性が高くなり、危険メッシュ数が溪流単位の深層崩壊発生危険度を表す指標として有効である可能性が指摘できた。

3. 2. 5 危険溪流抽出手法の提案及び検証

(1) 抽出手法の提案

前述した深層崩壊跡地に関する分析結果に基づいて、

以下に示す各条件を全て備える溪流が最も深層崩壊発生
の恐れの高い溪流と考えた。

- ① 地質構造及び微地形要素の条件 : 「円弧状クラック」または「岩盤クリープ斜面」を有する溪流
 - ② 地形条件 : 「危険メッシュ」数が 200 個以上ある溪流
 - ③ 過去の深層崩壊実績 : 深層崩壊跡地を有する溪流
- (2) 2005 年発生の深層崩壊地予測への適用

この考えに基づいた抽出を行った場合の抽出手法の妥当性を検証するために、2005 年の深層崩壊実績について解析した。すなわち、深層崩壊が発生した 8 溪流を含む検討対象地域の 95 溪流について、上記①～③の条件のうちのいくつを満たす溪流かという点で整理した (図-24)。その結果、1 つの条件も満たさない溪流では、深層崩壊は発生していなかった。一方、満たす条件数が多いほど、深層崩壊が発生した溪流数の条件を満たす全溪流数に対する割合が高くなり、①～③の条件は同地域の深層崩壊発生危険溪流を抽出する上で有効な指標であることが明らかになった。

3. 2. 6 深層崩壊発生危険溪流抽出手法に関するまとめ

鰐塚山周辺地域を対象に、2005 年以前に発生した深層崩壊跡地に関して地質構造・微地形要素及び地形量から解析した結果に基づき、深層崩壊発生のある溪流を抽出した結果、2005 年に発生した深層崩壊が分布する溪流は精度良く抽出できた。このことは、事前に深層崩壊跡地を対象に深層崩壊の発生と関連性の高い地質構造・微地形要素及び地形量を抽出しておけば、深層崩壊発生危険溪流が抽出できる可能性を示している。

4. まとめ

本研究では、土石流危険溪流の危険度評価を目的とし、表層崩壊及び深層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価手法の検討・開発を行った。表層崩壊に起因する土石流に関しては、浸透流解析と斜面安定解析を組み合わせた簡易モデルを作成した。その上で、土層厚の確率分布を用いた広域に適用可能な「溪流単位の危険度評価手法」を作成し、妥当性を確認した。また、過去の深層崩壊事例を分析し、地質および第 4 紀隆起量に基づく深層崩壊危険地域の抽出を行った。その上で、微地形判読および地形量解析の手法を用いて、深層崩壊危険地域の中から、深層崩壊発生のある恐れの高い溪流を抽出する手法の開発を行い、妥当性を確認した。

さらに、これらの成果を基に、「土石流危険溪流の危険

度評価マニュアル(案)」及び「深層崩壊に起因する土石流危険渓流調査マニュアル(案)」を取りまとめた。それぞれのマニュアルの調査・検討フロー図を図-25、26に示した。図-25に示したように、表層崩壊に起因する土石流に関する危険度評価は、まず、概略の危険度判定を行い、その上で、危険度が高いと判定された渓流について、詳細な危険度調査を行う。詳細調査においては、概略調査において危険度が高いとされた渓流の中で特に危険度の高い渓流の抽出、渓流内で発生源として危険度の高い斜面、支溪の抽出を行う。概略の危険度評価を行うにあたっては、数値地形情報を用い、土質定数、土層厚、透水係数は確率分布を与え、単純化した浸透流理論と斜面安定解析に基づく手法により、危険度を評価する。一方、詳細な危険度評価にあたっては、土層厚の空間分布の測定、詳細な地形測量を行った上で、単純化した浸透

流理論と斜面安定解析に基づく手法により、危険度を精査する。

一方、深層崩壊に起因する土石流に関しては、深層崩壊発生危険地域において、過去の深層崩壊に関する文献収集、空中写真判読および地形量解析により、深層崩壊の発生の恐れのある渓流の抽出を行う。抽出にあたっては、はじめに、深層崩壊跡地を対象に深層崩壊の発生と関連性の高い地質構造・微地形要素及び地形量を抽出する。その上で、深層崩壊の実績のある渓流、深層崩壊と関連性の高い地質構造、微地形要素を有する渓流、深層崩壊跡地と同様の地形特性を有する斜面が多く存在する渓流、を危険な渓流の条件として抽出を行う。

参考文献

- 1) 平松ら:雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究, 砂防学会誌 Vol.43 No.1, 1990
- 2) Montgomery, DR., and WE. Dietrich: A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding, Water Resources Research, Vol. 30, 1153-1171, 1994
- 3) Tarboton DG.: A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models, Water Resources Research, Vol.33, 309-319, 1997
- 4) Tani, M : Runoff generation processes estimated from hydrological observations on a steep forested hillslope with a thin soil layer, Journal of Hydrology, 200, 84-109, 1997.
- 5) 三根:現代応用数学講座 4、40-48、コロナ、1994
- 6) 若月ら:簡易貫入試験値と粒度組成を用いたマサ土の単位体積重量とせん断強度定数及び透水係数の推定, 砂防学会誌 Vol.59, No.6, 38-46, 2007.
- 7) Hendrayanto, Analysis on Spatial Variability in Hydraulic Properties of Forest Soils, Ph.D. Thesis, Kyoto Univ., 1999.
- 8) 浅井, 仲野, 寺本(1987) 大規模崩壊の発生場の条件, 土木技術資料, 29(6), 287-292
- 9) 寺戸(1993) 四国島における大規模マスマーブメント, 香川県土質工学研究会テキスト(平成4年度), 24-35
- 10) 第四紀地殻変動研究グループ(1968) 第四紀地殻変動図, 第四紀研究, 7(4), 182-187
- 11) 例えば、建設省土木研究所(1988): 土木研究資料 第2544号, pp.252

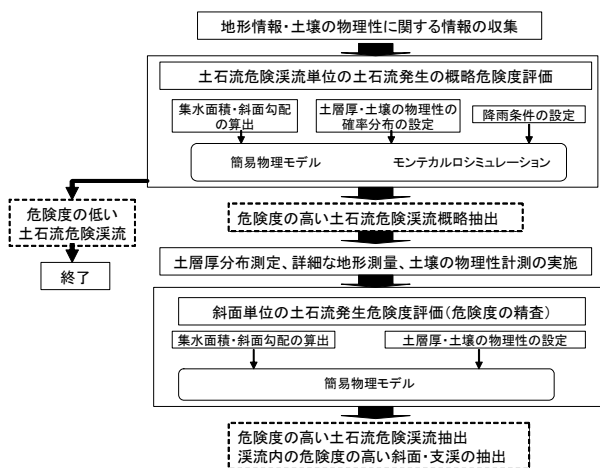


図-25 土石流危険渓流の危険度評価マニュアル案における調査・評価フロー図

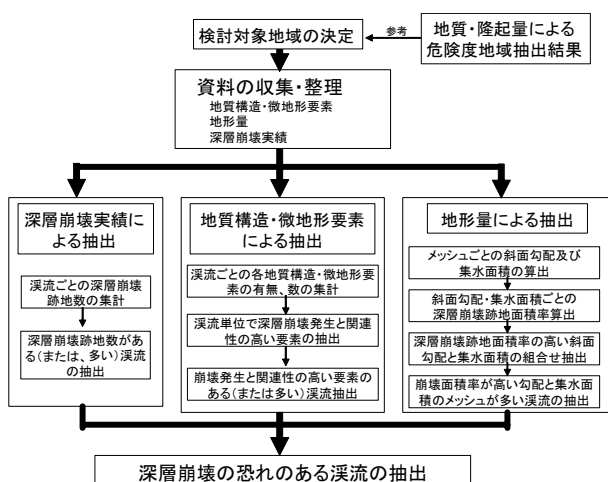


図-26 深層崩壊発生危険渓流抽出マニュアル案における調査・抽出フロー図

STUDY ON THE METHOD TO EVALUATE RISKS OF LANDSLIDE-INDUCED DEBRIS FLOWS USING NEW GEOGRAPHICAL DATA

Abstract : In the F.Y. 2007, the authors linked a simple hydrological model and the infinite slope stability model to predict spatial pattern of critical steady-state rainfall required to cause slope instability. Here we propose a new stochastic method for evaluation of shallow landslide susceptibility combined simple hydrological model, the infinite slope stability model and soil thickness-frequency relationship model. We also proposed the method for large catastrophic landslide hazard mapping using rock-uplift rate, geology and topography.

Key words : new geographical data, shallow landslide, deep sheeted landslide, debris flow, risk evaluation