

豪雨による斜面災害

沖村 孝 (おきむら たかし)
神戸大学名誉教授, 勸建設工学研究所

1. はじめに

我が国は島国で周りが海に囲まれているため、またモンスーン地帯に位置しているため、年間降水量は世界平均の880 mmより多く1718 mmであり、これは世界で第4位である¹⁾。降水は6月末から7月初めにかけての梅雨、9月頃の台風、日本海側では冬の降雪に主として集中している（以後は、降雪を含めないため降水ではなく「降雨」と称する）。一方、我が国の70%は山地で急峻であるため、集中豪雨により山崩れや崖崩れが発生する。わが国は平野が少ないために、山地と平野の境界の山麓部にも多くの住宅や都市インフラが密集している。そのため、ひとたび、山崩れや崖崩れが発生すると、崩れてきた土砂により多くの人命が失われ、あるいは家屋等が被害を受ける。山崩れや崖崩れのように斜面上の土砂が移動することにより被害を受けることは一般に「土砂災害」と呼ばれる。斜面上の土砂の移動は、原因や地盤条件により様々な形態で出現する。一般には小規模で地表がはがれるような移動現象は「表層崩壊（崖崩れという名称を含む）」、大規模で基岩が壊れる現象は「深層崩壊（大規模崩壊）」、大規模でゆっくり移動する現象は「地すべり」、移動する土砂があたかも水のように流下する現象は「土石流」と呼ばれる。本稿では表層崩壊による土砂災害を「斜面災害」と呼ぶことにする。

図-1は、自然災害の原因別によって死亡した人の数を示したものである²⁾。この図から、地震の場合は大きな被災の原因となるが、毎年発生していないことがわかる。しかし、風水害はほぼ毎年人命を失う原因となっている。風水害は洪水災害と土砂災害が含まれるが、近年では圧倒的に土砂災害のほうが大きな割合になっている。このため、土砂災害を少なくするための対策が行政によ

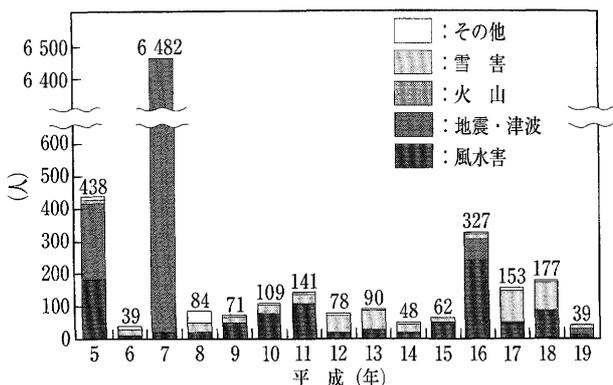


図-1 自然災害の災害原因別死者・行方不明者²⁾

り講じられるとともに、大学等の研究機関では土砂災害の原因究明、防災対策等の研究が進められている。

ここでは地震ではなく（地震による斜面災害は次号で説明予定）、風水害、主として豪雨により発生する土砂災害の種類、斜面災害の発生と降雨との関係、斜面災害を対象とした研究分野、斜面災害に関する研究、斜面災害対策手法、および近年進められている防災対策等について説明する。

2. 土砂災害の種類

上述したように斜面上の土砂移動は、表層崩壊、地すべり、土石流に区分されている（このうち、地すべりに関しては次々号で説明予定）。これらを口絵写真-6～8に示す^{3)~5)}。このように斜面上の土砂移動が3種類に分けられる理由は、主として崩壊機構、規模、発生する材料や対策工の違いによるためである。対策工の施工は行政によって行われるが、その根拠は法律に依存している。この法律が土砂移動現象ごとに異なるため、通常このような区分が多く使われている。

表層崩壊は自然斜面で発生する薄い崩壊であるため、無限長斜面安定解析式³⁾（図-2 および式(1)）や非円弧すべり安定解析式⁶⁾がよく用いられている。

$$F(t) = \frac{C_s + C_r + A \cos^2 \beta \cdot \tan \phi}{B \sin \beta \cdot \cos \beta}$$

$$A = (\gamma_{sat} - \gamma_w) h(t) \gamma_t (H - h(t))$$

$$B = \gamma_{sat} \cdot h(t) + \gamma_t (H - h(t)) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $F(t)$: 時刻 t の安全率、 C_s : 地下水位以下の土の粘着力 (kN/m^2)、 C_r : 根系による見かけの粘着力 (kN/m^2)、 ϕ : 土の内部摩擦角 (度)、 γ_{sat} : 土の飽和単位体積重量 (kN/m^3)、 γ_t : 土の湿潤単位体積重量 (kN

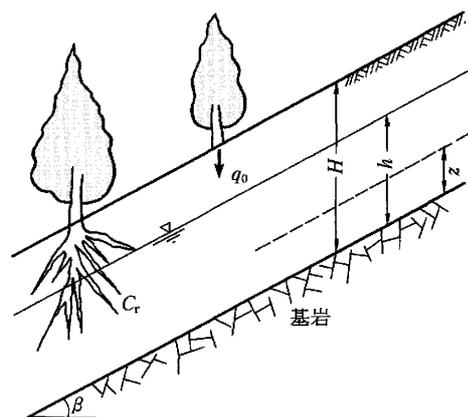
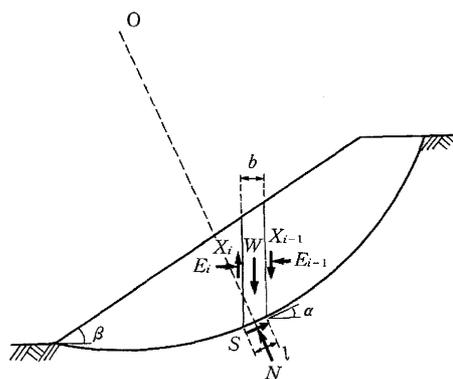


図-2 無限長斜面安定解析のモデル³⁾

図-3 円弧すべりのモデル⁶⁾

$/m^3$), γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m^3), H : 基岩面からの表土層厚 (m), $h(t)$: 時刻 t における基岩面からの浸透水位 (m), z : 基岩面からすべり面までの高さ (m, 式(1)ではゼロと仮定), β : 基岩勾配 (度) である。

一方, 地すべりは, 地質の影響を強く受け粘性土で発生するため, 円弧すべり安定解析式⁶⁾ (図-3 および式(2)) が多く使われるが, すべり面の状況により非円弧すべり面解析式が用いられる場合もある。

$$F = \frac{\sum \{c'l + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi'\}}{\sum W \sin \alpha} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, c' , ϕ' : 有効応力で表した土の粘着力 (kN/m^2) と内部摩擦角 (度), W : 分割片の自重 (kN/m), l : 分割片のすべり面長さ (m), u : すべり面に働く間隙水圧 (kN/m^2), α : すべり面の傾斜角 (度) である。

非円弧すべり安定解析式の紹介は本稿では省略する。

土石流は, 表層崩壊等により溪流に崩落・堆積した土砂が天然ダムを形成し, これが破壊することによって一気に溪流を流下する場合と, 溪流に堆積していた不安定土砂が豪雨により増水した渓流水により流される場合がある。それぞれ機構が違うので, 解析は別々に行われる。

崩壊した土砂の下流への移動は, 地すべりではほとんど移動せず斜面上に残るが, 表層崩壊の土砂は崩落したり, 斜面を削り取りながら下流に移動する。土石流も下流の渓床上にある不安定堆積物や溪流の兩岸を削り取りながら下流に流れる。このため, 表層崩壊や土石流の場合, 土砂の移動や堆積, 停止の距離を求めることが災害を防ぐ上では重要になってくる。流下してきた土砂が停止する機構は, 水と土砂が分離し, 水が絞り出された状態になると土砂が停止すると考えられているが, この現象を説明できる式がまだよくわかっていないので, 9.2で説明する「土砂災害警戒区域」の設定には, せん断抵抗や下流の構造物により停止する考え方が提案されている⁷⁾。

1996年から2005年までの10年間で表層崩壊, 地すべり, 土石流がどれくらい発生したかをみると, 表層崩壊が年平均693件 (66%), 地すべりが173件 (16%), 土石流が191件 (18%) であり (括弧内は発生比率), 表層崩壊が圧倒的に数多く発生している⁸⁾。表層崩壊は規模は小さいが数多く発生し, 土砂の移動速度も大きいため人的な被災が多くなる。地すべりは移動速度が小さい

ため, 人的な被災は少ないが, 規模が大きいため被害の規模が大きくなる。土石流は移動速度が非常に大きいため, 人命や家屋に大きな被災を及ぼす。

3. 表層崩壊が起きやすい降雨条件

式(1)や式(2)からも明らかなように, 降雨により雨水が表土層に浸透し, 地下水位が上昇すればこれらの式の h や u の値が大きくなるため, 摩擦による抵抗力が減少することにより崩壊が発生する。地下水位は総降雨量が大きくなればなるほど上昇すると考えられるため, 総降雨量は崩壊発生に重要な降雨条件となる。しかし, 浸透した雨水は表土層内を流下するので, 降雨強度 (1時間あたりの降雨量) の小さな雨が長時間継続しても地下水位は上昇しない。このため崩壊発生の条件として, 次には大きな降雨強度が出現することが必要になる。さらに, この大きな降雨強度は一連の降雨の終盤に出現すると, より崩壊が発生しやすくなる。このため, 表層崩壊が起きやすい降雨条件は, 1) 総降雨量, 2) 降雨強度, 3) 降雨パターンの3条件が重要になる。これらの値は各地域で経験的に求められることが多く, 六甲山系の場合を例にとると, 1) 総降雨量は200 mm 以上, 2) 降雨強度は, 時間雨量50~60 mm 以上, または時間雨量30 mm 以上が3時間以上継続, 3) 降雨パターンは後方集中型の場合に崩壊が発生しやすい。これらの値は, 地域によって大きく異なり, 豪雨常襲地域では大きく, そうでない地域は小さな値となる。

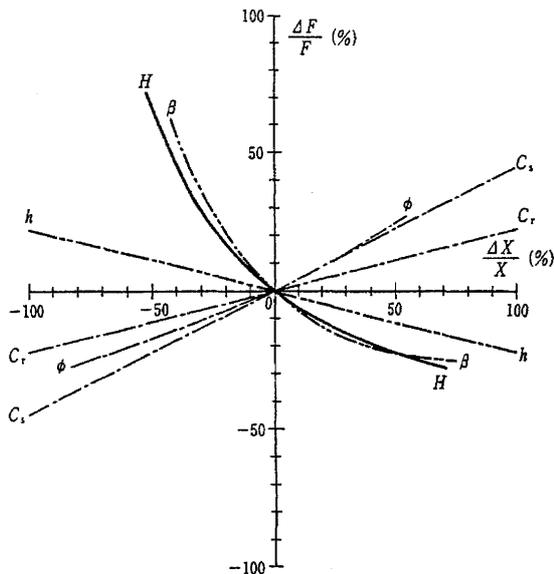
4. 多くの分野で行われている斜面崩壊の研究

自然斜面で発生する表層崩壊は, 地質条件, 地形条件, 地盤条件, 植生条件, 降雨条件等の多くの条件が関係する。このため, 表層崩壊の研究は, 地質学, 地形学, 地盤工学, 治山工学, 砂防工学, 地球物理学等数多くの分野で研究が進められている。しかし, これらの研究はそれぞれの専門分野からの研究が多く, これらの成果を総合化することが今後の大きな課題である。

5. 地盤工学分野からの研究アプローチ

図-4は, 式(1)の右辺に使われているパラメータがわずかに変化した場合 ($\Delta X/X$), 安全率がどれくらい変化するか ($\Delta F/F$) を求めた結果を示している。これによると安全率に大きな影響を及ぼすパラメータは, 表土層厚 H と基岩傾斜 β が大きいことがわかる。地表面の標高情報は近年, レーザ測量等で正確に求められるようになってきているので, H がわかれば β は求めることができる。このため H が重要なパラメータとなる。この値は簡易貫入試験等で求められるが, 数多くの地点でこの試験を行うことは多くの時間を要するので, 新しい試験法の開発が必要になっている。

次に重要なパラメータは, せん断強度定数に重要なパラメータは, せん断強度定数 (c, ϕ) であるが, 表層崩壊の場合は小さな拘束力でのせん断強度定数となる。しかし, 試験でこれを求めることは容易ではないことが問

図一4 無限長斜面安定解析式の感度分析⁹⁾

題である。このため、三軸試験ではなく、一面せん断試験が用いられる場合もある。次は、地下水位 h であるが、これは透水係数 k と関係する。筆者の経験では室内試験で求められる k と、現地では経験的に推定される k の値は大きく異なり、現地では試験より1桁大きくなると思われる。これは、植生の根茎や小動物の影響により、空隙が多いことによるものと思われる。

近年、不飽和研究の成果が蓄積され、崩壊発生も不飽和条件を考慮する必要があることが強調されるようになってきた。不飽和条件で安定解析を行う場合、多くのパラメータが必要になるため、崩壊発生時刻や場所の予知予測に活用されるまでにはまだ多くの課題があると思われるが、不飽和研究から得られてきた「キャピラリーバリア³⁾」など新たな知見には着目する必要がある。しかし、研究者によっては、崩壊発生時にはすでに多くの降雨が観測されていることが多いため、飽和条件の考え方で崩壊の発生を論じることができるとしている人もいる。

6. 斜面防災対策

表層崩壊は自然斜面上で発生するので、一般構造物設計のように安全に施工するための設計基準はなく、防災の仕組みは、1)自然斜面上での行為の規制、2)防災構造物の施工、および3)通行規制や避難による減災により行われている。

6.1 自然斜面上での行為の規制

行為の規制とは自然斜面を対象として地形の変更や土砂採取等何らかの行為を行う場合に、安全に施工され、あるいは施工後も安全を確保できるように区域の設定や技術基準が定められ、それに沿った工事が行われるように届け出あるいは許可により行為を規制しようとする制度である。代表的な仕組みは宅地造成である。宅地は完成後は住民の財産となり、一般に維持管理が行われないので、より安全側の基準になっているとともに、行政が許可をすることにより工事の質を担保した仕組みで行為

が規制される。

6.2 防災構造物の施工

自然斜面の崩壊から人命や家屋を守るための防災工事は、法律によって危険または保全する区域が決められ、この区域内で「公」によって工事が行われる。崩壊と土石流に関する代表的な区域には以下のようなものがある。

「砂防指定地」：砂防堰堤や流路工事などの砂防工事が行われる区域や土地の形状を変更する行為を制限する区域で、主に山地と居住地との境界付近が指定される。

「保安林」：伐採や開発に制限を加える森林を対象として、土石崩壊防止保安林や土砂流出防備保安林などがある。主として山地の森林の育成のために斜面崩壊や土砂流出を防ぐための区域として指定される。

「土石流危険渓流」：流域面積 5 ha 以内の小流域を対象として、土石流が発生するおそれがあると認められた川や沢が対象に指定され、保全対象によって重要度が三つに区分されている。

「急傾斜地崩壊危険区域」：豪雨により崩壊が発生しやすい傾斜が30度、高さが5 m以上の斜面が対象となり、保全対象によって重要度が三つに区分されている。

また道路や鉄道の防災工事は、各機関によって行われる。鉄道や道路の場合は自然斜面のみならず切り取り斜面や盛土斜面に対しても防災構造物が施工される。

代表的な工事を以下に紹介する。

「擁壁工」：斜面が崩壊しないように、斜面下端部にコンクリートや石積によって施工される。コンクリートは鉄筋が入っている場合と入っていない場合がある。切り取り斜面で上流側が自然斜面の場合には、自然斜面から落石を防止するため、擁壁の天端にネットと支柱で構成されるストーンガードが建設される場合が多い。

「枠工」：自然斜面や切り取り法面が崩壊しないように、これらの斜面上にコンクリートの枠を施工する工法で、枠は現場で施工される場合と工場で作られたコンクリート製品で施工される場合がある。枠で斜面を覆うため、斜面を抑える効果と局所的な移動に対して枠が形成する面で抵抗する効果がある。

「アンカー工」：自然斜面や切り取り斜面で、安定解析によって所要の安全率が確保できない場合の一つの対策工法で、斜面に挿入したアンカーで斜面を押さえつけ、土のせん断抵抗を増加させたり、アンカー自体の力で引き留めることにより、必要とされる安全率を満足させる工法である。1988年に二重防食が義務づけられて以来、アンカーの耐久性に対する信頼性が増し、多く使われるようになってきた。今後は、施工してから20~30年経過後のアンカー本体や地山の劣化を考慮した斜面の安定性に注意する必要があると言えよう。

「落石防止ネット工」：自然斜面上に大きな石が点在している場合は、一つ一つの石に対応することが困難なため、これらの石が落石や転石となって災害を起ささないよう、斜面をワイヤーのネットで覆う工法である。転がってきた石を途中で捕まえる待ち受け型のネット工法もある。

「モルタル吹付け工」：昭和30年代から多く使われてきた工法で、切取り斜面を金属製の網で覆い、さらにモルタルで吹付ける工法である。切取り斜面の劣化や落石を防ぐ効果があるが、景観を害すること、施工後30年以上を経過してくるとモルタルや地山の劣化により突然崩壊が発生する可能性があるため、劣化の程度を把握することが現在求められている。

「堰堤工」：土石流による災害を防止するため、溪流に構築されるダムのことである。堰堤下流での河床の浸食を防止するため、近年では大きな土石は止め、細かい土砂や水は下流に流す、隙間のあるスリットダムが構築されている。堰堤が満砂になると河床勾配が緩くなるため、この河床で土石流を停止させたり、満砂した土砂が兩岸の斜面の裾を押さえることにより山腹崩壊を防止する効果も期待されている。山の流域を対象として工事する治山では谷止め工と呼ばれている。

「流路工」：土砂が河床に不安定な状態で堆積しないよう、さらには河床が土砂で浸食されないようにコンクリートや石積で構築される水路である。山地では急勾配になることが多いので、途中で落差工を構築したり、床固め工で浸食を防止する方法が併用される。

「植栽工」：自然斜面や切取り斜面に木や草を植えることにより、浸食を防止する工法である。近年、景観が大きな話題となっており、緑地空間を創造するためにも植栽工は大きな働きをする。山地の植栽では木が生長するように苗床を造る工事が行われる。

6.3 通行規制による減災

昭和43年8月に発生した飛騨川のバス転落事故は、集中豪雨に伴う土石流により104人の尊い人命を失う大災害となった。この事故を契機として道路法面防災対策の必要性が顕在化した。予算の制限もありすべての斜面で防災対策を行うことが困難であった。そこで当時の建設省では豪雨時には通行規制を実施することにより、崩壊が起きても人命を守る仕組みを構築した。この目的を達成するためには危険区間の設定と、いつ通行止めをするかという課題を解決する必要がある。国道では過去の災害事例等から「異常気象時通行規制区間」を定め、それぞれの区間を対象として総降雨量を用いて経験的に「規制雨量」を設定した。現在でもこの方式により豪雨時には通行規制が行われている。近年では、防災対策工の施工に伴って、規制区間の縮小と規制雨量を大きくすることにより、道路通行サービスの向上が図られている。この通行規制の仕組みは、高速道路や鉄道にも採用されているが、使われているパラメータはそれぞれの機関で異なっている。本手法の課題は、通行規制区間以外の斜面でも崩壊が発生することもあり、危険場所の予知や危険時刻の予測が重要となる。以下では、7. で危険場所の予知、8. で危険時刻の予測に関して、今まで進められてきた研究成果を紹介する。

7. 豪雨による斜面崩壊発生場所予知の研究

自然斜面を対象とする場合、危険な場所が事前にわか

ればその場所を対象に対策工を行うことにより崩壊の発生を未然に防止し、災害の発生を防ぐことができる。このため危険場所予知の研究は従来から様々な機関で進められてきた。代表的な手法を以下に紹介する。

7.1 経験的手法

地域防災計画等には危険斜面の場所が示され、この斜面を対象とする防災計画が明示されている。この危険斜面は過去に崩壊発生があった斜面、あるいはもし崩壊が発生すれば大きな被害が生じると考えられる斜面が経験的に選定されてきた。国道における異常気象時通行規制区間の設定も同様に経験的手法と言える。

7.2 スコア法

スコア法とは、崩壊発生に影響する要因を調べて、点数により対象斜面の危険度を判定する方法である。表1は、急傾斜地崩壊危険箇所選定のために使われていた表である¹⁰⁾。この手法は、この表のように要因を選定し、各要因に程度や内容を表す属性を設定し、各属性に点数を与える。現地調査でこれらの要因を調べ、どの属性に属しているかにより点数を求め、次にこれらの合計点により危険度を判定するものである。一般に、要因を「アイテム」、属性を「カテゴリ」、点数を「スコア」、危険度判定の数値を「判別基準値」と呼ぶ。これらはすべて経験的に設定されるため、崩壊事例により修正が必要になってくる場合もある。また地域による特徴を反映させる必要がある。このスコア法は、平成8年度に実施された道路防災一斉点検にも採用され、道路法面危険度を判定するために使われている¹¹⁾。

7.3 統計的手法

スコア法で経験的に設定されるパラメータのうち、スコアと判別基準値を統計的判別手法の一種である数量化Ⅱ類法を用いて求める手法である。経験的な要因が少なくなるが、アイテムとカテゴリは経験的に設定する必要がある。本手法やスコア法には、崩壊の原因である降雨が一般にアイテムに入っていない。これは、研究対象地で複数回の崩壊データが容易に集められないこと、さら

表1 急傾斜地崩壊危険区域危険度判定基準¹⁰⁾

要 因		点 数		備 考
		自然斜面	人工斜面	
高 さ	10m以上	7	7	がけ上に奥行10m以上の平坦地がある場合を含む。
	10m未満	3	3	
傾 斜 度	45°以上	1	1	
	45°未満	0	0	
オーバーハングの有無	有	3	3	
	無	0	0	
表 土 の 厚 さ	a(0.5m以上)	1	1	
	b(0.5m未満)	0	0	
湧 水 等 の 有 無	有	1	1	
	無	0	0	
崩 壊 の 有 無	有	3	3	
	無	0	0	
急傾斜地崩壊防止工事の技術的基準	満足	0	0	
	不満足	3	3	
構造物等の異常の有無	有	3	3	
	無	0	0	
計				人為的工事によって、各要因による危険が消滅しているものは、その要因がないものとして計算する。 例①オーバーハングしているが、コンクリートで完全に保護している場合は0点とする。

ラ ン ク	点 数	
	自 然	人 工
A	9 点 以 上	15 点 以 上
B	6 点 ~ 8 点	9 点 ~ 14 点
C	5 点 以 下	8 点 以 下

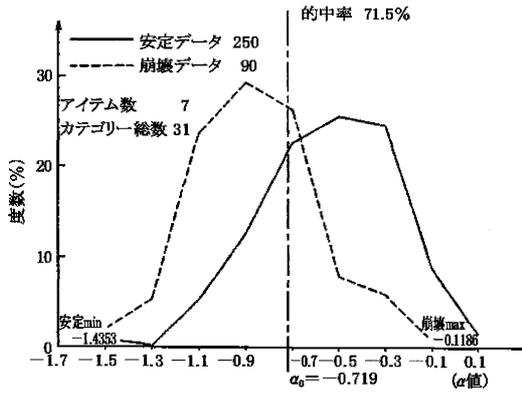


図-5 数量化解析による判別結果¹²⁾

表-2 数量化解析に用いられた要因と評点レンジ¹²⁾

要因	評点レンジ
経過年数	-0.1944~0
地形	-0.1363~0
曲率半径	-0.0026~0.1046
のり高	-0.3711~0.0488
のり勾配	-0.0220~0.1606
土質	-0.3291~0.0793
防護工	-0.6400~0

に3. で述べたように降雨には総降雨量、降雨強度等様々なパラメータがあり、個別の事例により影響が異なるためと思われる。

統計的手法により解析された事例を図-5 および表-2 に示す。図-5 の実線は解析結果より求められた安定(非崩壊)事例の値(α値)のヒストグラムを示し、破線は崩壊事例のそれを示しており、2群(崩壊と非崩壊)に判別できたことがわかる。表-2 のレンジとはカテゴリ内のスコアの最大値と最小値を示している。この範囲が大きければ大きいほど、崩壊・非崩壊に及ぼす影響が大きいと考えられている。

7.4 力学的手法

与えられた斜面に対して危険度を力学的手法により求める場合には対象とした斜面で仮定すべり面をいくつか設定して、式(1)や式(2)を用いて、最も小さな安全率を示す位置と危険度を判定する。仮定すべり面の設定に主観が入ることを避けるために、表土層をブロックに分割し、そのブロックの組み合わせにより仮定すべり面を設定する多平面安定解析手法が提案されている¹³⁾。図-6 はこの手法により求められた結果を示す。図中の破線は簡易貫入試験等で定義された表土と基岩の境界を示している。この手法から求められた危険すべり面の位置と大きさ(長さ)は、ほぼ過去に発生した事例と一致していることがわかる。しかし、この手法を用いるためには、表土層厚を詳しく調べる必要がある。

二次元断面を対象とする力学的手法は解析する断面を特定する必要がある。自然斜面を対象として広い範囲から危険斜面を求めるためには、どこに二次元断面を設定していいかわからないので、一般に地形情報を用いる。

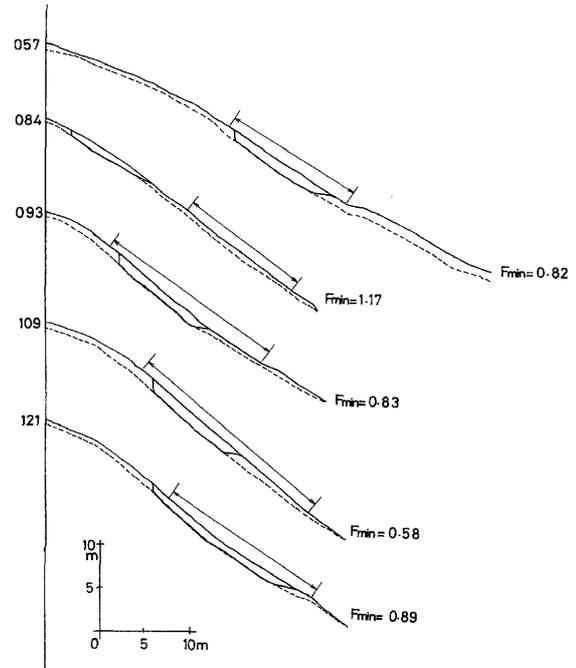


図-6 多平面安定解析による危険場所の抽出¹³⁾
斜面上の矢印の範囲は既崩壊地、太線は解析結果

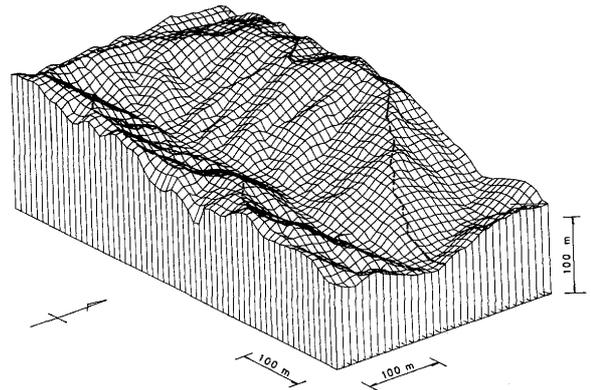


図-7 試験地のブロックダイアグラム¹⁵⁾

具体的には、集水面積と傾斜という地表面情報だけで危険斜面を抽出する手法¹⁴⁾や、地形を格子で数値化し格子点に表層厚を与え、この表土層内の浸透地下水位を求め、式(1)で危険な格子(場所)を求める手法も提案されている¹⁵⁾。図-7 は10mメッシュで数値化した調査地のブロックダイアグラムである。

地形を数値化すると、降雨が地中に浸透し、地形に沿って流下する横流れモデルができる。式(3)はメッシュを対象とした連続の式とダルシー式であり、この微分方程式を差分法で解くと、浸透水位を求めることができる。

$$\lambda \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r$$

$$q_x = h \cdot k \cdot I_x$$

$$q_y = h \cdot k \cdot I_y \dots \dots \dots (3)$$

ここで、*h*: 見かけの水位 (m), *q*: 単位時間あたりの単位幅流量 (m²/h), *I*: 動水勾配, *r*: 有効降雨 (浸透

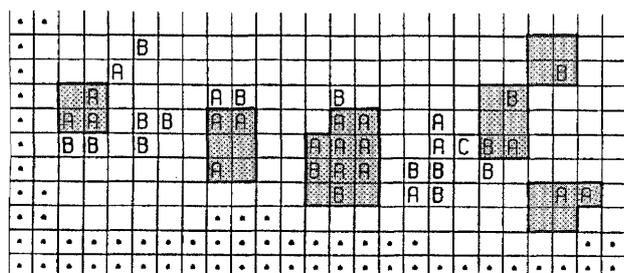


図-8 広域を対象とした危険メッシュ抽出結果の一部¹⁵⁾ (格子間隔は10 m。点の格子は他流域)

水位上昇に直接寄与する降雨) 強度 (m/h), k : 透水係数 (m/h), λ : 有効 (土中水が重力で移動する) 間隙率である。

上式を解いて得られた h を式(1)に代入すると, 各メッシュを対象として安全率を求めることができる。図-8は図-7に示した調査地において20時間一定の降雨強度 (20 mm/h) を継続させた場合の解析結果の一部 (流域の南西側) を示したものである。アルファベットは求められた危険な斜面 (Aは危険度の出現が早く, B, Cと順に遅くなる) を示し, 網掛け部分は過去の崩壊発生位置を示している。これによると, 過去の崩壊地内には必ず危険と判定されたアルファベットの記号が現れているが, 崩壊していない場所にも危険と判定されたメッシュが現れている。これは表土層厚を一定 (1.2 m) と仮定したため, これを正確に求めることができれば, 危険な場所を正しく求めることができると思われるが, 表土層厚を求めることが一般には困難なため, 実用化には至っていない。

8. 豪雨による崩壊発生時刻予測の研究

危険な斜面が特定できれば, その斜面に対して積極的な崩壊防止工事を行えば防災が達成できるが, 予算の事情により崩壊防止工事が行えない場合には, 豪雨時には6.3に述べたように通行規制によって安全を確保する必要がある。この場合には崩壊発生時刻を予測する必要がある。以下に, この代表的な手法を紹介する。

8.1 総降雨量による方法

今までいくらの雨が降ったかによって危険度を判定する手法で, 国道の異常気象時通行規制に使われている。

8.2 総降雨量と降雨強度を使う方法

3.で述べたように崩壊の発生には, 総降雨量と降雨強度が重要である。地域防災計画では, 前日までの総降雨量と, 当日の日雨量により避難勧告や避難指示を出す。また総降雨量を横軸に, 縦軸には時間降雨を設定し, 過去の雨をプロットすると, 過去に崩壊が発生した事例は一般に右上に出現する。砂防関係では崩壊・非崩壊の境界を右下がりの直線で求め, この直線を「限界直線 (CL線)」と呼んでいる。気象庁が出す短時間降雨予報を用いて, 予想される降雨がこの直線を超える時刻を危険と判定する。運用上は, より直近の降雨の方が影響が大きいと考え, 総降雨量は72時間, 時間雨量は1.5時間

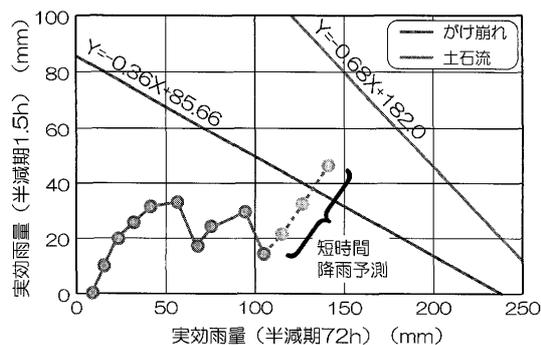


図-9 CL線による危険時刻の予測

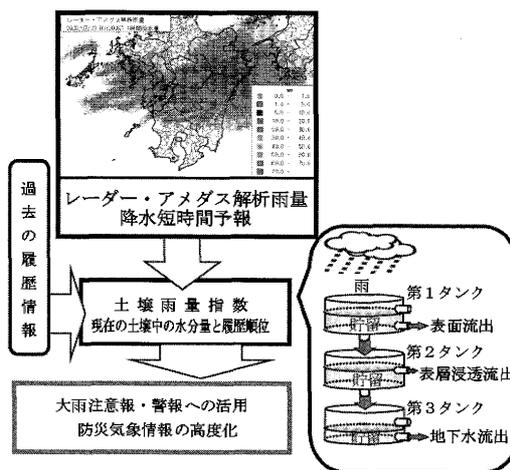


図-10 土壌雨量指数の考え方¹⁷⁾

の半減期を設定した実効雨量を用い, 崩壊や土石流に対して危険時刻の情報を発信する方法が提案されている¹⁶⁾。この方法を図-9に示す。図中の2本の線は, 六甲山系の崖崩れと土石流のCL線を示している。図中の○印は雨量観測地点で測定された値を, 点線上の○印は短時間降雨予報から求められる1, 2, 3時間後の値を示している。ここでは3時間後にCL線を超え, 危険が近づいていることがわかる。

高速道路や鉄道の通行規制も基本的には総降雨量と時間雨量のパラメータを用いているが, それぞれの機関で降雨量の定義や設定方法が異なる。

8.3 土壌雨量指数による方法

気象庁では, 近年, レーダアメダス解析雨量により降雨観測精度を向上させるとともに, 短時間降雨予報として, 1時間, 2時間, 3時間, 6時間後の降雨量を予測している。加えて気象庁ではこれらの情報を用いて土砂災害の発生危険度を予測するため, 土壌雨量指数を開発した。これは図-10に示すように, 3段のタンクモデルにより求められるもので, 観測降雨量を最上段のタンクに入力し, それぞれのタンク内に貯留している量を表土層内に浸透した雨水の量と見なし, 3段の貯留量の和を「土壌雨量指数」と名付け, 観測所ごとに10年間の降雨を対象にこの指数を計算し, 歴代順位を求めた¹⁷⁾。危険時刻の判定は, レーダアメダス解析雨量と短時間降雨予報から求められる雨量を用いて土壌雨量指数を求め, この値が歴代3位以上の値になると崩壊の危険性が大

初級講座

きくなるものとし、土砂災害の危険性に関する情報を発信している。

この方法だと過去の降雨事例のみから、崩壊発生の危険性を判断しており、過去の災害事例が考慮されていないので、土壌雨量指数を総降雨量と見なして横軸に、縦軸に降雨強度を設定しCL線を活用する方法も提案されている。あるいは過去の災害事例を考慮するのではなく、過去の観測事例から土壌雨量指数を求めるとともに、その降雨の60分間積算雨量を縦軸にプロットし、降雨発現確率値ごとに曲線を設定し、これを使って危険時刻を予測する「連携案」と呼ばれる手法も提案されている¹⁸⁾。平成19年度からは各都道府県で「土砂災害警戒情報」を発信しているが、それぞれの都道府県でCL線もしくは連携案、あるいはその両方が使われている。

8.4 解析的手法による研究

松尾・上野は過去の崩壊斜面を対象として、崩壊は円弧すべりで現れると仮定し、複数の土層からなる表土層を対象に飽和・不飽和浸透解析および確率統計的手法により求められる破壊確率を用いて、いつ崩壊したかを解析的に明らかにした¹⁹⁾。それによると過去の崩壊多発時刻は、破壊確率が大きくなった時点ではなく、破壊確率の時間変化率がピークを示した時と一致していることを報告している。これは3.に述べたように崩壊発生の降雨条件で降雨強度が必要な要因であることと関係しているものと思われる。

9. これからの斜面防災対策

6.の防災対策で記述したように従来の防災対策は、1)自然斜面上での行為の規制、2)防災構造物の施工、3)通行規制による減災であった。しかし、1)は積極的な防災対策ではないこと、2)は図-11²⁰⁾に示されるように、工事を必要とする箇所に対して工事の進捗率が低く、いつまで経っても防災構造物の施工で安全が達成できないこと、3)の通行規制は道路や鉄道を対象構造物が限られ、自然斜面が対象の場合はその仕組みがないこと等の課題があった。

加えて、平成7年に発生した阪神・淡路大震災は、高架道路等の一般構造物でも崩壊し、従来の対策も想定を超える場合には役に立たなかったこと等が明らかになった。このため土砂災害も完全に防ぐことができず、崩壊が発生する可能性があるという前提で防災を考える必要があることが明らかになった。これを受けて、斜面防災には次に説明する新たな視点が登場した。

9.1 防災空間の創造

従来の防災は災害を防ぐ視点で対策がとられていたが、震災後は崩壊が発生しても災害とならないような防災空間を創造するという考え方が新たに登場した。これは「グリーンベルト構想」と呼ばれるもので、崩壊が多発する山腹斜面の下流側の山麓に、防災空間としてグリーンベルトを設定しようとするものである²⁰⁾ (図-12参照)。山腹で崩壊が発生しても設定されたグリーンベルト内で土砂が止まれば、市街地で災害は発生しない。グ

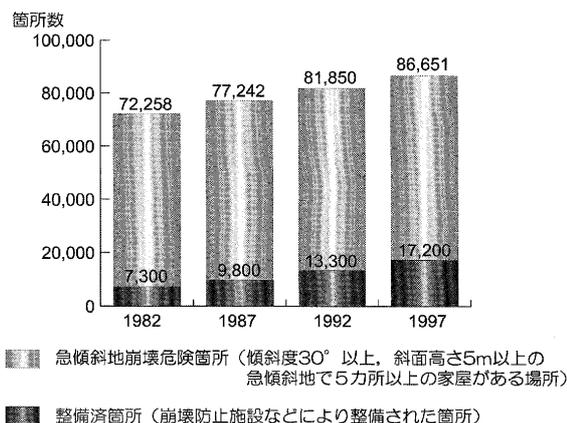


図-11 急傾斜地崩壊危険箇所と整備済み箇所²⁰⁾

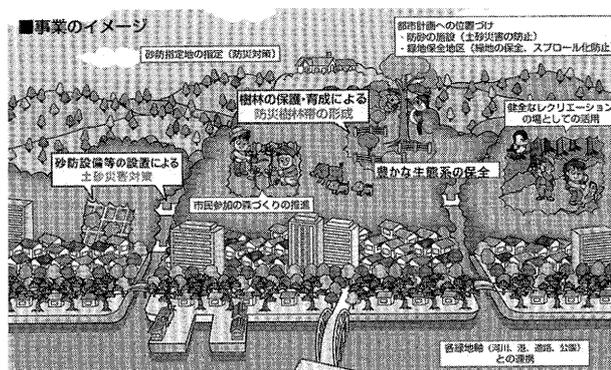


図-12 グリーンベルトの考え方²⁰⁾

リーンベルトが植生により緑で保全されれば、都市の緑地景観が向上する。また散歩道の建設によりレクリエーション空間が増えるといった利点が考えられる。しかし、高度な土地利用が進んでいる都市で空間を創造することは容易ではない。にもかかわらず多くの都市でグリーンベルトの創造が行われつつある。

9.2 避難による減災

1999年の広島豪雨災害(24名死亡)を契機として、避難による減災の手法が新たに法律として登場した。これは傾斜30度以上、高さ5m以上の自然斜面はすべて崩壊が発生する可能性があるとして、これらの斜面で崩壊が発生した場合、避難する区域を「土砂災害警戒区域(イエロー)」として設定し、豪雨の発生が近づいてきた場合は避難をすることにより命の安全を守ろうとする仕組みである。特に危険な区域は「土砂災害特別警戒区域(レッド)」と指定され、行為の制限や建物の補強、場合によっては移転により命の安全を守る仕組みで、これらは都道府県によって指定される。一方、避難は市町村が勧告するが、これには8.3で述べた気象庁と都道府県が出す土砂災害警戒情報が役に立つ。従来の土砂災害防止に関する法律は6.2で述べたように構造物を作るためであったが、避難による安全確保の法律は初めてとなった。現在、各都道府県でイエローやレッドの設定が行われている。

しかし、次に問題となるのは、自治体から避難勧告が出ても住民が避難行動を起こさない場合があるということである。今後は降雨の状況に応じてリアルタイムで、

市町村単位ではなく限られた地域を対象として警戒情報を発信する手法の開発, ならびに行政から出された避難勧告というリスク情報をいかにして住民に認知してもらい, かつ避難行動に移してもらうかという課題を解決する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 財水資源協会：日本の水 2005, 2005.
- 2) 内閣府：平成20年版 防災白書, 2008.
- 3) 地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測, 地盤工学・実務シリーズ 23, 2006.
- 4) 川崎地質㈱より提供.
- 5) 鹿児島県 HP より.
- 6) 澤 孝平ほか：地盤工学, 森北出版, 1999.
- 7) 土砂災害警戒区域等における土砂災害の防止対策の推進に関する法律.
- 8) 砂防・地すべり技術センター：土砂災害の実体 2005, 2006.
- 9) 沖村 孝・大西勝則：各種の要因が斜面安定解析に及ぼす影響, 建設工学研究所報告, 29, 1987.
- 10) 全国地すべりがけ崩れ対策協議会：急傾斜対策事業の手引き, 1983.
- 11) 道路保全技術センター：道路防災点検の手引き (豪雨・豪雪等), 2007.
- 12) 南部光広ほか：統計的手法による道路用盛土のり面の安定度解析, 土木学会論文報告集, 241, 1975.
- 13) 沖村 孝：山腹崩壊発生位置の予測に関する一研究, 土木学会論文報告集, 331, 1983.
- 14) 羽田野誠一：崩壊性地形 (その2), 土と基礎, Vol. 22, No. 11, 1974.
- 15) 沖村 孝・市川龍平：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法, 土木学会論文報告集, 358, 1985.
- 16) 瀬尾克美ほか：土砂災害警戒基準雨量の課題と改良について, 新砂防, 53(6), 2001.
- 17) 岡田憲治：土壌雨量指数, 測候時報, 69(5), 2001.
- 18) 野呂智之・倉本和正・小山内信智：土砂災害発生危険基準線に関する客観的な設定手法の有効性, 土木技術資料, 47(4), 2005.
- 19) 松尾 稔・上野 誠：破壊確率を用いた自然斜面の崩壊予知に関する研究, 土木学会論文報告集, 281, 1979.
- 20) 国土交通省 HP より.