

## 土砂災害のためのリアルタイムハザードシステムの作成手順

### The Creation Procedure of the Real-time Hazard System for a Landslide Disasters at a Heavy Rainfall

沖村 孝      鳥居 宣之      中川 渉      原口 勝則  
Takashi Okimura      Nobuyuki Torii      Wataru Nakagawa      Katsunori Haraguchi

#### 1. はじめに

近年では、観測史上最大の降雨量や降雨強度が報告されることが多くなっている。従来、土砂災害の発生時刻に関する危険度指標は、過去の被災経験から総降雨量あるいは土壌雨量指数や降雨強度のパラメータが用いられ、これら過去に観測された値とその時の崩壊発生の有無から、崩壊発生の危険度が経験的に求められ、土砂災害警戒区域に対する土砂災害危険情報として警戒避難の場面で利用されている。しかしながら、過去に経験したことの無い大きな降雨量に対しては、経験的に求められた空間情報である土砂災害警戒区域や時間情報である土砂災害危険情報等の危険度判別基準が、果たして効果的に活用できるか否かという疑問が生じる。すなわち、過去に崩壊記録のなかった斜面で崩壊が発生したり、総降雨量よりも大きな降雨強度の出現時刻に崩壊が発生したりする可能性がある。これを解消するためには経験的なデータのみで危険度を判断するのではなく、降雨を入力値として力学的な斜面安定解析から安全率を求め、この安全率から危険度を判定した土砂災害危険情報も合わせて活用することが望まれる。

筆者の一人は、かつて表土層崩壊を対象として地形を 10m 格子間隔で数値モデル化し、格子点（もしくはセルの中心点）に表土層厚を設定し、降雨を入力し、飽和横流れ浸透解析によりセルの地下水位を計算し、無限長斜面安定解析式を用いて、各セルで、時間ごとに安全率を計算する手法を提案した<sup>1)</sup>。しかし、当時は数値地形モデルを求める手法は縮尺 1/2,500 以上の大縮尺地形図から格子点の標高を直接読み取る手法で、かつ降雨量は測点が少なく近隣の観測所のデータを活用するしかなかった。このため詳細な解析を目的にしているにもかかわらず、入力データはそれを満足する精度ではなかった。しかし、近年、技術の開発により高精度の地形データや降雨データを入手できる状況になってきたこともあり、かつて提案したモデルを用いてリアルタイムでハザード情報を計算できるようになってきた。

このような環境条件下で、兵庫県のご協力を得て平成 19 年度を初年度とする 3 カ年で「六甲山系土砂災害危険度予測システム」プロジェクトにおいてかつて提案したモデルを実用化する機会に恵まれた<sup>2)</sup>。また、このプロトタイプモデルが平成 22 年度より兵庫県によって試験運用に供され、この試験運用を通じた課題や対応方法について多くの知見を得た<sup>4)5)6)</sup>。さらに、平成 24 年度より豊岡市や上郡町などにおける実運用のためのシステムの構築を行う機会を得て、六甲山系と異なる地形や地質に適用する場合の課題や対応方法についても数多くの知見を得ることができた<sup>7)</sup>。

本報は、土砂災害のためのリアルタイムハザードシステムについて、平成 19 年度以降の長きにわたる取り組みで得られた課題や対応方法をもとに、任意の地域において適用できるようその作成手順についてとりまとめたものである。また、これにより全国各地における活用を期待するものである。

なお、本システムで対象とする現象は主に表層崩壊であって、地すべりや岩盤崩落などには対応していない。また、土石流についても対象とし、流域内で表層崩壊の発生危険度の高いエリアが一定面積率以上となった場合に土石流発生の危険があるとするとする方法を提案している。このように、本システムでは豪雨によって生じる様々な土砂移動現象の全てに対応していないものの、比較的早期に発生する表層崩壊の発生場と発生時刻を予測できれば、これに遅れて発生する現象も含めたアラート情報として避難等の判断に活用できるものと考えている。

## 2. 検討の流れ

土砂災害のためのリアルタイムハザードシステムの作成手順についてフローチャートにとりまとめた（図-1.1）。このフローチャートの各過程について次章以降で解説する。

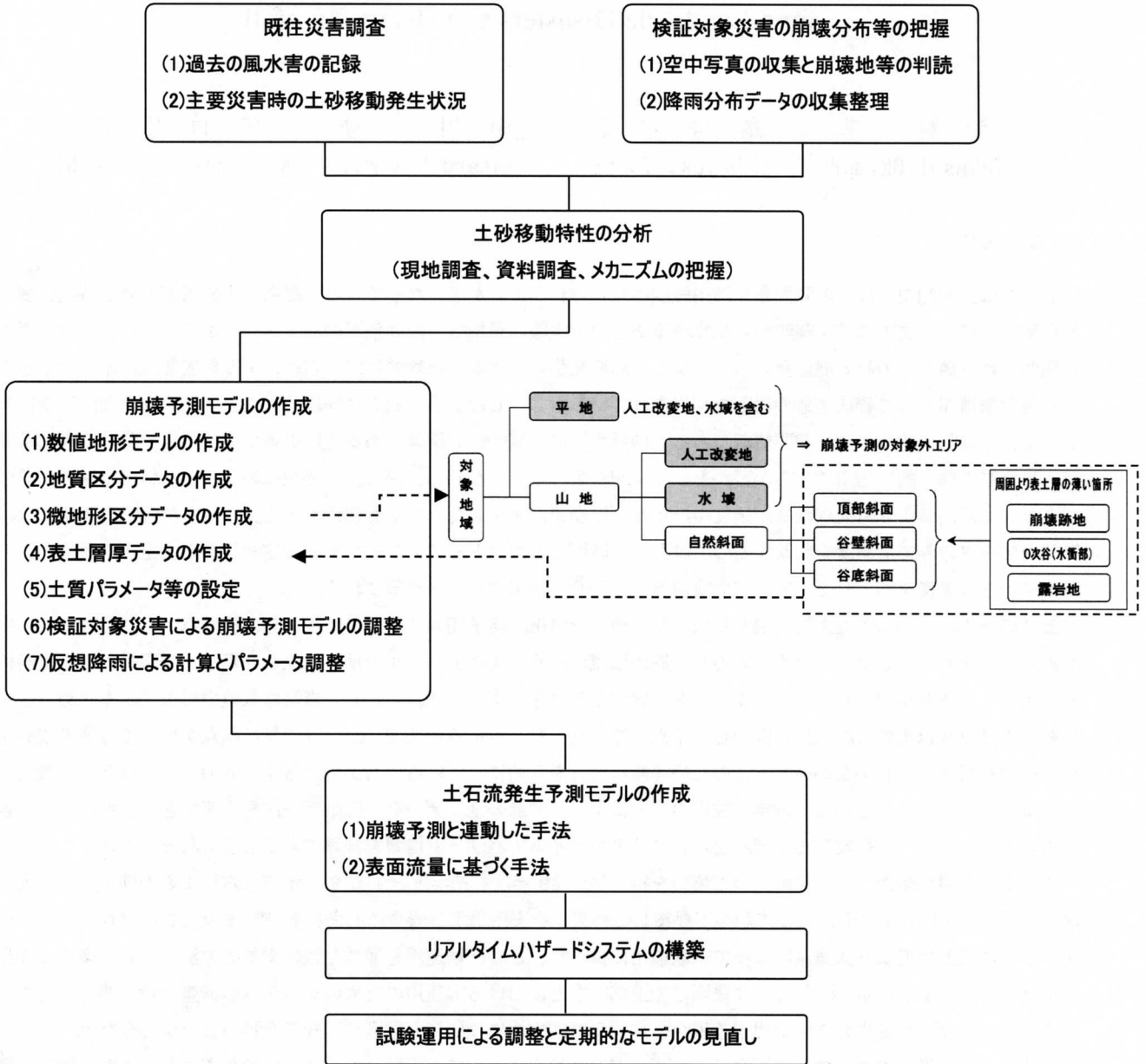


図 - 1.1 リアルタイムハザードシステムの作成の流れ

### 3. 既往災害調査

#### 3. 1 過去の風水害の記録

対象地域における過去の風水害の記録について既存資料をもとに収集し、気象状況や被害状況、崩壊等の発生状況などについて概括的に把握する。

(解説)

風水害の記録は、都道府県および市町村の災害資料や気象庁による記録などの既存資料に基づき整理する。

地域防災計画や土砂災害警戒避難基準雨量の検討業務報告書などで整理されている場合が多いので、既存の整理結果の活用も検討する。

#### 3. 2 主要災害時の土砂移動発生状況

整理した風水害の記録の中で、特に崩壊等の発生が多い事例について、既存資料をもとにその詳細を把握するとともに、検証計算の対象とする災害（以下、検証対象災害と呼ぶ）を抽出する。

(解説)

主要災害において詳細を把握する事項は次のとおりであり、災害ごとに検証計算に必要な情報がどの程度記録されているかを把握する。

- ① 崩壊や土石流等の発生状況（災害報告、現地調査資料、発生時刻のヒアリング情報、写真判読結果など）
- ② 降雨状況（降雨分布および主要地点のハイトグラフなど）
- ③ 災害前後の空中写真の撮影状況

また、検証対象災害の抽出は、対象地域の全体に及ぶ広域災害を対象に抽出する。適当な災害事例が無い場合には複数の災害によって対象地域全体をカバーする。

### 4. 検証対象災害の崩壊分布等の把握

#### 4. 1 空中写真の収集と崩壊地等の判読

検証対象災害の発生後に撮影された空中写真を収集し、崩壊や土石流等の発生状況を判読することで検証計算の基礎資料とする。

(解説)

空中写真は、災害発生後に撮影されたもののほか、比較のために災害発生前の写真についても収集することが望ましい。また、災害発生後のレーザ計測などによる詳細な地形図がある場合にはこれについても収集し、判読作業に用いるとよい。

判読項目は以下のとおりとし、後述する崩壊予測モデルの基礎となる数値地形モデルの位置座標と対応づけてGISデータとしてとりまとめる。

なお、地すべりおよび溪岸崩壊は崩壊予測モデルの対象外であるが、崩壊地との混在を防ぐために判読項目に加えている。

- ① 崩壊地
- ② 地すべり
- ③ 溪岸崩壊
- ④ 土砂流送域
- ⑤ 土砂堆積域

#### 4. 2 降雨分布データの収集整理

検証対象災害の誘因となった降雨について、地上観測雨量あるいはレーダ解析雨量等の雨量データを収集し、降雨分布の時系列変化を把握することで検証計算の基礎資料とする。

(解説)

雨量データの収集は、検証対象災害の発生日時より遡ること1カ月程度の降雨の状況を確認し、災害発生の前期にまとまった降雨が確認される場合にはその期間を含めて対象地域を網羅するよう収集する。

#### 5. 土砂移動特性の分析

検証対象災害における崩壊等について、地質区分ごとに代表的な調査箇所を選定し、発生メカニズム等の土砂移動特性を把握するための現地踏査を実施する。また、既存の地質調査資料や文献などについても参照し、対象地域を代表する崩壊等の土砂移動特性について地質区分ごとにとりまとめる。

(解説)

土砂移動特性の分析は、サンプル的な現地調査や資料調査に基づき、代表的な地質区分ごとに以下の事項について特徴をとりとまとめる。

- ① 地形
- ② 地質
- ③ 崩壊特性（発生数、平面形状、断面形状、規模）
- ④ 土砂流出特性（流送域や氾濫域の侵食・堆積特性）

#### 6. 崩壊予測モデルの作成

崩壊予測モデルは、沖村・市川（1985）<sup>1)</sup>による手法に基づき、崩壊地の大きさを考慮した数値地形モデル（図-6.1）を用いて、その格子点をつないだ線分によって区切られるメッシュ（以降、セルと称する、図-6.2）に表土層厚や土質パラメータ（透水係数、 $c$ 、 $\phi$ 、 $\gamma$ など）を定義し、雨水が表土層内に浸透、流下することによる地下水位を集水モデルにより求め、この地下水位を用いた無限長斜面安定解析モデルにより崩壊の危険性を安全率によって評価する。このモデルの内容や解析方法などについては沖村・市川（1985）<sup>1)</sup>が詳しいので参照されたい。

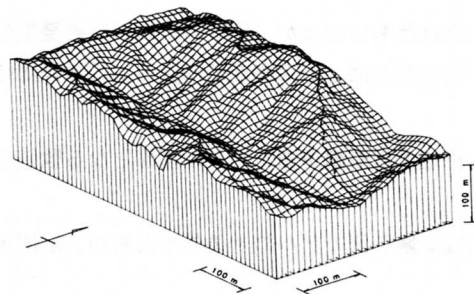


図 - 6.1 数値地形モデルより作成したブロックダイアグラム

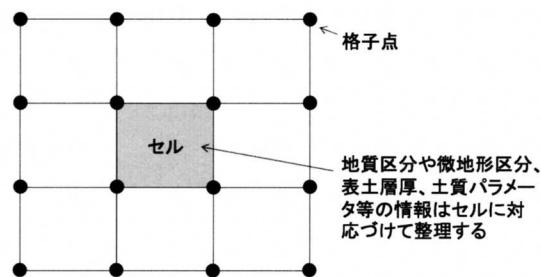


図 - 6.2 格子点とセル

### 6. 1 数値地形モデルの作成

対象地域を一定間隔の格子状に分割した格子点ごとの地盤標高データからなる数値地形モデル (DEM; Digital Elevation Model) を作成する。なお、格子間隔については対象地域の崩壊規模を勘案して定める。

(解説)

数値地形モデルは植生や建築物などを取り除いた地盤の標高モデルである。その作成方法には、空中写真測量や航空レーザ測量などの手法が代表される。

日本全国をカバーする数値地形モデルには国土地理院による数値地図 10m メッシュが代表される。近年では、公共事業において航空レーザ測量の活用が進みその成果を国土地理院が集約して一般に提供している。なお、全国のレーザ測量の実施状況については、公益財団法人日本測量調査技術協会の航空レーザ測量データポータルサイトで閲覧することができる (<http://www.sokugikyo.or.jp/laser/>)。

数値地形モデルの格子間隔は、10m を採用するケースが実績として多い。異なる間隔を採用する場合には、対象地域の崩壊規模のほか、地下水の流出速度や計算時間の刻みなど流出解析モデルの特性との関連性も踏まえて総合的に検討する。

### 6. 2 地質区分データの作成

既存の地質図や地質調査資料を収集し、作成した数値地形モデルと整合した地質区分データを作成し、数値地形モデルのセルごとにその属性データとしてとりまとめる。

(解説)

既存の地質図と数値地形モデルを重ねるとき、それぞれの精度の違いによって、本来同一であるはずの地形境界と地質境界が合致しないなどの問題が生じることがある。このため、数値地形モデルから作成したコンター図と既存の地質図を GIS 上で重ね合わせ、数値地形モデルと整合するように調整した地質区分データを作成する。

### 6. 3 微地形区分データの作成

表土層厚データ作成の基礎となる各種の微地形情報について、地形判読や数値地形解析などの手法を用いて把握し、数値地形モデルのセルごとにその属性データとしてとりまとめる。

(解説)

微地形区分データは、地形判読や数値地形解析、既存資料などを用いて対象地域を図-6.3 のエリアに区分し、セルごとの属性データとしてとりまとめる。それぞれの区分方法については次項以降に示す。

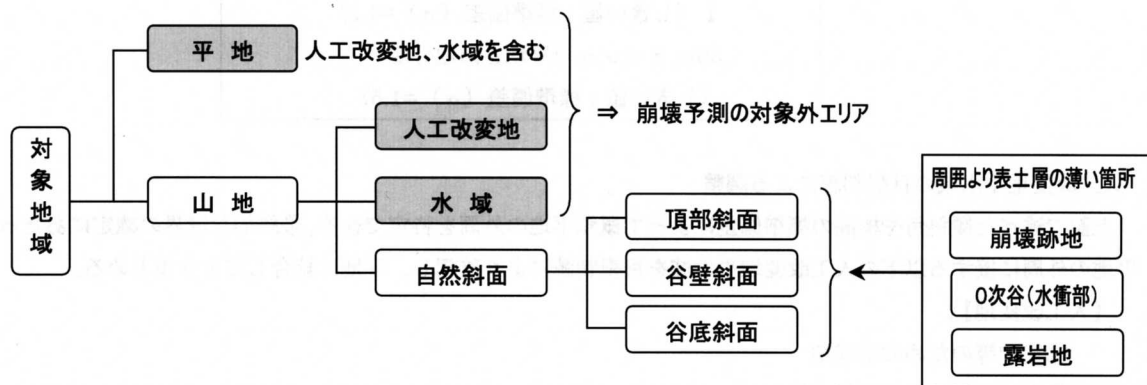


図 - 6.3 対象地域の微地形区分

## (1) 平地 (人工改変地、水域を含む)

平地は、崩壊予測の対象外となる領域であり、地表面の傾斜が緩やかな箇所や人工改変地、水域からなる。平地の区分は、数値地形モデルを用いた地形量の解析や目視による地形図等の判読により山地と平地の境界線を検討することで平地に該当するセルを特定する。

## (解説)

広範囲を対象とするとき、目視による地形判読では多くの労力を要する上に不均質な結果となりやすい。このため、数値地形モデル等を用いて以下の手順により客観的かつ効率的に平地を特定する。

## ① 傾斜角による平坦地の抽出

DEMを用いて地表面の傾斜角を求め、目視による平地と山地の境界と調和的な閾値を検討し、その閾値を用いて平坦地を抽出する。なお、10mDEMで傾斜面の傾斜角によって評価するとき、経験的には5度程度の傾斜角が閾値として採用されている。

## ② 標高の標準偏差を用いた局所的な急傾斜地の除去

傾斜角による平坦地の抽出では、俯瞰的にみて平地と判断されるエリア内にある局所的な急傾斜地が散在することがある。このため、標高の分散を窓領域の大きさを変化させて分析し、窓領域のサイズごとに平地と山地の境界となる標高の標準偏差の閾値を検討することで、局所的な急傾斜地を除去する。

なお、経験的には10mDEMを用いて窓領域や閾値を以下のように段階的に変化させて絞り込むことで、比較的良好な結果が得られている(表-6.1)。

表-6.1 10mDEMによる窓領域の大きさと標高の標準偏差による平地の絞り込み事例

750m メッシュで平地と山地分離
↓ (しきい値: 標準偏差 ( $\sigma$ ) =1.5)
500m メッシュで平地と山地分離
↓ (しきい値: 標準偏差 ( $\sigma$ ) =1.5)
250m メッシュで平地と山地分離
↓ (しきい値: 標準偏差 ( $\sigma$ ) =1.5)
100m メッシュで平地と山地分離
↓ (しきい値: 標準偏差 ( $\sigma$ ) =1.5)
50m メッシュで平地と山地分離
↓ (しきい値: 標準偏差 ( $\sigma$ ) =1.5)
30m メッシュで平地と山地分離
(しきい値: 標準偏差 ( $\sigma$ ) =1.5)

## ③ 人工改変地や水域の目視判読による調整

上記で述べた傾斜角や標高の標準偏差によって概ね平地の外周を特定できる。最終的な境界の確定にあたっては、平地の外周に接する以下の人工改変地や水域を目視判読により確認し、平地に統合してとりまとめる。

## 【人工改変地】:

- ① 宅地等のための造成地
- ② 水田・田畑などの耕作地
- ③ 道路・鉄道
- ④ えん堤などの人工構造物
- ⑤ 擁壁や対策工事が施された斜面・法面

## 【水域】: ため池や湖沼などの水域部

## (2) 人工改変地 (山地)

山地における人工改変地は、その規模が大きく崩壊予測の対象としないエリアとして区別したい場合に設定する。

(解説)

人工改変地には以下のものがあげられる。

- ① 宅地等のための造成地
- ② 水田・田畑などの耕作地
- ③ 道路・鉄道
- ④ えん堤などの人工構造物
- ⑤ 擁壁や対策工事が施された斜面・法面

## (3) 水域 (山地)

山地における水域は、その規模が大きく崩壊予測の対象としないエリアとして区別したい場合に設定する。

(解説)

水域には、ため池や湖沼などがあげられる。

## (4) 自然斜面 (山地)

山地の自然斜面は、崩壊予測の対象となるエリアであり、平地や人工改変地、水域以外のエリアとして特定する。また、自然斜面の領域は表土層厚の分布と関連深い微地形区分(頂部斜面、谷壁斜面、谷底斜面)を行うことで表土層厚データの作成に資するものとする。

(解説)

自然斜面における谷底斜面、谷壁斜面、頂部斜面の区分は、目視による地形判読では多くの労力を要する上に不均質な結果となりやすいため、数値地形モデルを用いて演算する地形量を活用した以下の手順により客観的かつ効率的に区分する。

## ① 検証エリアの設定

地形量を用いた地形分類の妥当性の検証を行うために、対象地域の地質区分ごとに代表的な地形を有するエリアを検証エリアとして設定する。

## ② 目視による微地形区分

検証エリアにおいて空中写真や地形図等を用いた目視判読により図-6.4を概念とした頂部斜面、谷壁斜面、谷底斜面の区分を行い、後述する地形量を用いた自動区分の検証材料とする。

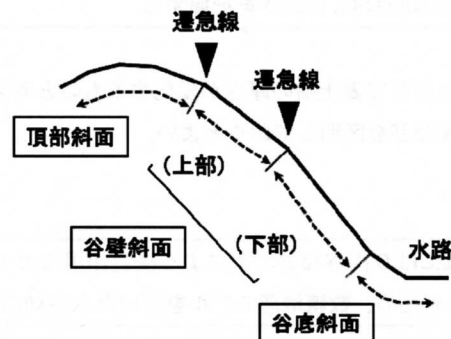
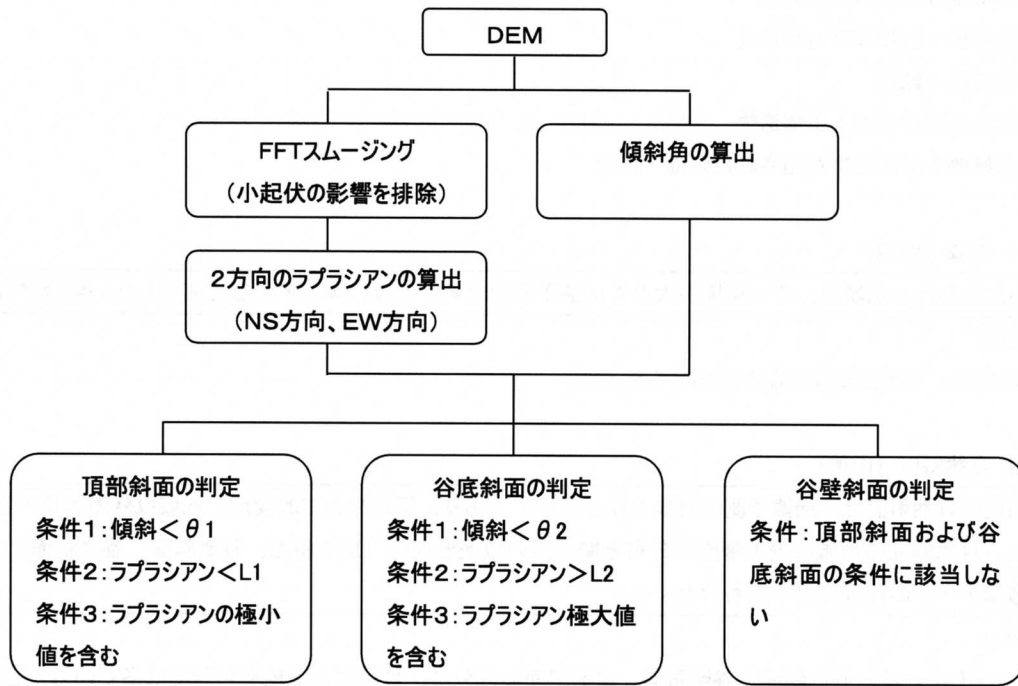


図-6.4 微地形に着目した自然斜面の区分

### ③ 地形量を用いた微地形の自動区分

微地形の自動区分は図-6.5 の手順により行う。閾値である傾斜角 ( $\theta 1$ 、 $\theta 2$ ) とラプラシアン ( $L1$ 、 $L2$ ) については、検証エリアにおける目視判読結果と整合性の高い値を検討し、これを対象地域全体に適用する。

なお、傾斜角は地形の緩急を、ラプラシアンは地形の凹凸を表す。また、ラプラシアンの極小値や極大値は山頂や谷底を特定するために用いる。



※  $\theta 1$ 、 $\theta 2$ 、 $L1$ 、 $L2$  は、地質区分ごとに目視判読結果と適合する閾値を検討する

※ 経験的な目安:  $\theta 1=25$ 度、 $\theta 2=20$ 度、 $L1=-0.3$ 、 $L2=+0.3$

図-6.5 地形量を用いた微地形の自動区分

### ④ 微地形の自動区分結果の妥当性の確認

微地形の自動区分結果について、以下の2点について確認し必要に応じて調整を行う。

- ・谷壁斜面に既往の崩壊地を含むことができていない。
- ・谷壁斜面と土砂災害警戒区域および特別警戒区域が全く重なっていない箇所が確認されない。

### (5) 崩壊跡地

崩壊跡地は、周囲の斜面に比べて表土層が薄くその設定において個別に調整が必要であるため、空中写真判読やレーザ計測データ等を用いて崩壊の範囲および深さを把握する。

(解説)

崩壊跡地は、崩壊後の経過年数に応じて表土層の厚さが変化するものと考えられる。このため、植生の回復状況に応じて古い崩壊や比較的最近の崩壊などを区別しておくといよい。

### (6) 低次谷

谷壁斜面として区分された領域には0次谷など流水による浸食作用によって周囲の斜面に比べて表土層が薄いと考えられる低次谷が含まれる。このため、数値地形モデルを用いた水系網の解析によりその領域を特定する。

(解説)

数値地形モデルを用いた水系網の解析は、地表水が最大傾斜方向に流れるものとして、格子点間を結ぶ流れの方向(流線)を求め、各格子点に流入するエリア(集水面積)を把握する(図-6.6)。

格子点ごとに求めた集水面積は、そのレンジに応じて着色するなどして、崩壊跡地の下流端付近と整合する集水面積の閾値を求め、これを上回る流線の区間(谷壁斜面内)を浸食の影響を評価する低次谷区間として特定する(図-6.7)。

なお、水系網の解析に用いる数値地形モデルは、崩壊予測に用いる数値地形モデルの格子サイズと必ずしも一致する必要はなく、できるだけ格子間隔の狭い細密なものを用いたほうが浸食の影響を評価するセルを的確に特定できる。

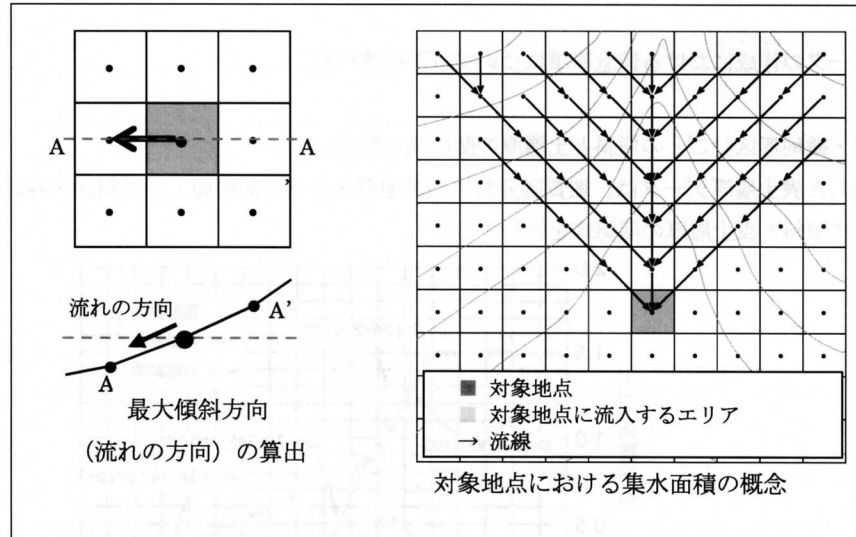


図-6.6 水系網解析による任意地点における集水面積の把握

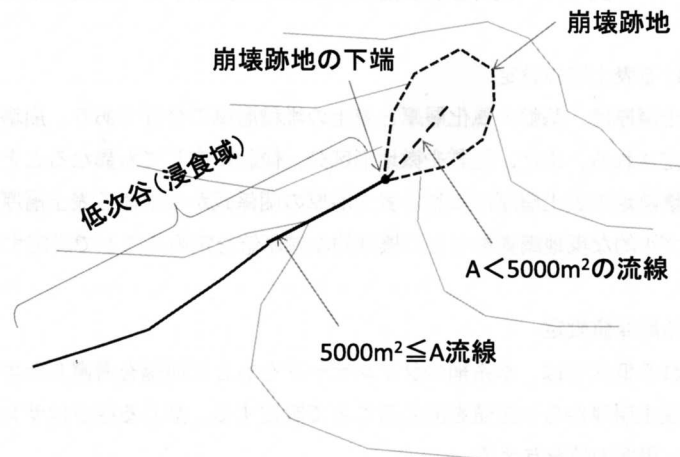


図-6.7 浸食による影響を考慮する低次谷の抽出概念

#### (7) 露岩地

露岩地は、表土層が未発達の領域であり、表土層厚の設定において考慮する必要があるため空中写真判読や地形図等により該当箇所を把握する。

#### (解説)

露岩地は、空中写真判読や地形図等で確認できない箇所もあるため、土砂災害警戒区域等の調査資料などの既存の現地調査資料を活用して可能な範囲で把握する。

#### 6. 4 表土層厚データの作成

表土層厚データは、既存の計測データや過去の崩壊地の深さに関する資料を収集するほか、レーザ計測データを用いた崩壊深の計測や、簡易貫入試験等の実施によって把握する。また、収集・計測した表土層厚データをもとに、代表的な地質区分や微地形区分ごとに傾斜と表土層厚の関係式を検討することで、対象地域全体の表土層厚データを作成する。さらに、崩壊跡地や低次谷（浸食域）、露岩地について個別に表土層厚を調整する。

(解説)

表土層厚データの作成における留意事項について以下に述べる。

##### (1) 地質・微地形区分ごとの傾斜と土層厚の関係式の作成

収集・計測した表土層厚データは、地質区分および微地形区分（頂部斜面・谷壁斜面・谷底斜面）ごとに分類し、図-6.8のように傾斜と表土層厚の関係式を検討する。

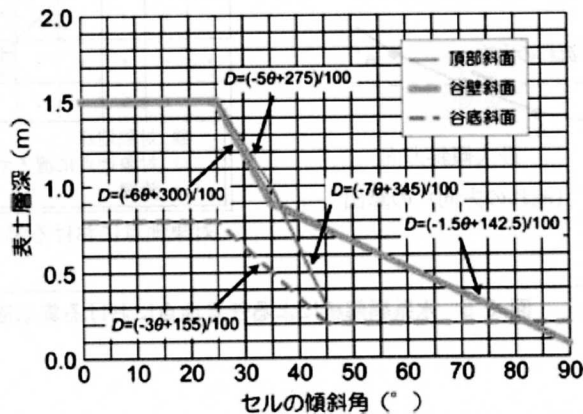


図-6.8 傾斜と表土層厚の関係式の設定事例（花崗岩地域）

##### (2) 崩壊跡地における表土層の設定

崩壊跡地における表土層厚は、基盤の風化層厚と表土の堆積層厚の合計であり、崩壊発生時点からの経過年数に応じて変化することが想定される。また、地質や微地形区分、傾斜に応じて異なることが想定されその推定は容易ではない。このため、崩壊跡地の表土層厚は傾斜と表土層厚の関係式から求める表土層厚を基本として、植生の状況に応じて既存資料やサンプル的な現地調査をもとに標準的な減厚値を定めることで設定する。

##### (3) 低次谷における減厚値設定

浸食の影響が想定される低次谷は、水系網のラインデータをもとに河幅を考慮したエリアを設定し、傾斜と表土層厚の関係式から求めた表土層厚から一定値を減じることで設定する。減じる厚さはサンプル的な現地調査等により定める。経験的には15cm程度の値を与える。

##### (4) 露岩地

露岩地における表土層厚は0cmであるが、地下水計算の連続性を確保するために便宜的な値を設定する。経験的には20cm以下の層厚を与える。なお、露岩地における地下水位を考慮する必要がない場合は表土層厚に0cmを与える。

##### (5) 人工改変地や水域における表土層厚の取り扱い

人工改変地や水域における表土層厚は、地下水計算の連続性を確保するために便宜的な値を設定する。経験的には谷底斜面と接する位置関係にあることから谷底斜面の傾斜と表土層厚の関係式を準用することが多い。

##### (6) 表土層厚データの作成

以上までの手順による表土層厚データを統合し表土層厚データを完備する。

## 6. 5 土質パラメータ等の設定

表土層における地下水の挙動や斜面安定解析に関わる土質等のパラメータについて既存の土質調査資料等に基づき地質区分ごとの代表値を定めて該当セルに割り当てる。ただし、地質構造による弱部や人工改変の影響のある自然斜面など、土質パラメータの調整が必要と思われる箇所については個別に検討したうえで設定する。

(解説)

設定する土質パラメータ等は以下のとおりであり、地質区分ごとに代表値を設定する。

- ① 地下水挙動パラメータ
  - ・有効間隙率
  - ・透水係数 (m/hr)
- ② 安定解析パラメータ
  - ・土の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)
  - ・土の飽和単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)
  - ・土の有効粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)
  - ・土の内部摩擦角 (°)
  - ・根系の粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)
  - ・植生による上載荷重 (kN/m<sup>2</sup>)

## 6. 6 検証対象災害による崩壊予測モデルの調整

検証対象災害について崩壊予測モデルの適合性を検証し、必要に応じて表土層厚データや土質パラメータ等の調整を行う。

(解説)

検証対象災害による検証計算は、以下の手順により実施する。

### (1) 検証用の数値地形モデル作成 (崩壊前地形の再現)

数値地形モデルは検証対象災害発生前の地形を再現しておく必要がある。このため、検証対象災害時に発生した崩壊地についてスムージング処理などによって凹地を取り除いた数値地形モデルを作成する。

### (2) 検証用の表土層厚データの作成

崩壊前地形を再現した数値地形モデルを用いて、検証用の表土層データを作成する。作成方法について、「6. 4 表土層厚データの作成」による。

### (3) 初期計算

検証用の数値地形モデルおよび表土層厚データなどをもとに、災害当時の降雨分布を与えて安全率の空間分布の時系列を把握する。また、検証対象災害における崩壊地等の判読結果と重ね合わせ演算結果の特性分析に資するものとする。

### (4) 演算結果の特性分析

初期計算による結果について、検証対象災害における崩壊地との適合性について以下の観点から分析し、表土層厚や土質パラメータ等の調整課題を抽出する。

#### ① 評価指標にみる適合性

評価指標として、適中率、捕捉率、空振率、見逃率を図-6.9に基づき算出し予測精度を確認する。

なお、崩壊地判読結果の移写精度に応じて、崩壊エリアにバッファを設けて評価指標を演算することも考慮する。

