

GIS を用いた三次元斜面安定評価のための単位斜面 (Slope Unit) の抽出

A GIS-Based Approach of Identifying Slope Unit from Natural Terrain for Slope Stability Evaluation

周 国 云 (しゅう こくうん)

西日本工業大学助教授 環境都市デザイン学科

江 崎 哲 郎 (えさき てつろう)

九州大学教授 工学研究院環境システム科学研究センター

邱 騁 (きゅう てい)

九州大学大学院工学研究院 修士課程

佐々木 靖 人 (ささき やすひと)

独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ 上席研究員

1. はじめに

我が国では急峻な山地や崖地が多く、急傾斜地およびその周辺において高密度の都市的土地利用が行われており、斜面崩壊や地すべり等の斜面災害は経済・人命的損失を与え、大きな社会問題となっている。

広域自然斜面から危険斜面の抽出、いわゆる斜面安定ハザードマッピングは、斜面災害防止には極めて重要である。現状として広域の不安定斜面を抽出する方法は大きく見れば2種類がある^{1),2)}：定性的および定量的な評価手法。定性的な評価は、過去に斜面不安定となった場所の地形、地質、土質力学特性等との類似性から評価対象斜面の安定性を推定する方法であり、概略的な斜面安定性評価手法である。定量的な評価手法では、力学モデルを使用しない数学・統計的手法（多変量解析、数量化理論、遺伝的アルゴリズム等）と力学モデルを取り入れる手法、すなわち、確定モデル手法（Deterministic model：無限斜面モデル等）がある。数学・統計的手法による研究は、GIS やリモートセンシングを用い、研究対象区域での斜面安定に関係する因子（地質、傾斜角度、谷密度、断層、植生、地形分類、地形のフラクタル次元等）の空間分布図を作成し、各因子の重要度に応じて点数を与え、各因子図を重ね合わせることによって総合的な評価指標分布図を作成する。それを用いて、斜面安定性のゾーニングを行う。

一方、確定モデルでは、斜面安定の力学的なモデルを用い、安定評価およびハザードマップの作成を行う。確定モデルは、力学的なメカニズムを考慮した合理的な方法であるが、広域での評価には、力学解析に必要な斜面の空間分布、その範囲内の地盤の標高、傾斜、傾斜方向、弱層の分布等の多くの空間情報が要求され、GIS との高度なカップリングが必要なため、研究は限られている。過去の類似の研究では、無限斜面を想定し、地震や地下水の浸透等を考慮して、斜面を構成する各地点の要素（セル）のすべり安全率を求めることで斜面破壊ハザードマップを作成する。これらの研究では、すべて一次元モデルであり、地すべりの三次元性を反映することができない。

本来地形は複雑な三次元の形態をしており、斜面の不安定に大きな影響を及ぼす。したがって、三次元斜面安

定力学モデルを広域的に適用することによる不安定斜面の抽出が望ましい。しかしながら、これまでこのような研究はほとんどされていない。その原因は、広域解析に必要な膨大な地形の幾何学情報やすべり面の形状、空間位置等が未知であることと考えられる。著者らは GIS を用いた三次元空間斜面安定評価方法を提案した^{3)~4)}。この方法では、自然の地形から各单位斜面 (Slope Unit) の空間分布の範囲を抽出する必要がある。ここで単位斜面とは、同じ方向とみなせる斜面である。広域自然地形から各斜面(単位斜面)の分布位置の特定は三次元斜面安定力学モデルを広域的に適用するのに極めて重要である。

本研究では、GIS を用い、数値地形 (DEM) から広域にわたる各单位斜面の形状、位置、分布範囲を抽出する方法を提案し、その方法の有効性や抽出結果の精度について考察し、三次元斜面安定ハザードマッピングの重要な基礎過程を確立することを目的とする。

2. GIS による数値地形の作成および単位斜面の抽出

2.1 GIS による数値地形の作成

GIS のデータとしては、点、線、面から構成されるベクトルデータおよび正方形のセル (メッシュ) の集合体で構成されるラスタデータがある。土地利用や地質分布等のような境界線が明確で、分布が非連続的なものを表現するのにベクトルデータがよく用いられる。地形や地下水位等の連続的に分布するデータに対しては基本的にラスタデータが使用される。

数値地形 (DEM) は、地盤標高を各セル (メッシュ) に与え、実際の地形を数値的に表現するものである。数値地形の一般的な作成方法としては、対象地区の地形図の地形等高線を線のデータとして GIS に入力し、GIS の空間内挿機能を使い、連続的に分布する標高のラスタデータを得る。標高のラスタデータをベースに、空間解析により、各セルでの傾斜角度、傾斜方向の分布を計算する。また標高、傾斜角度、傾斜方向のラスタデータを ASCII 形式で GIS から外部へ出力することも出来る (図-1)。

2.2 広域での各单位斜面 (Slope Unit) の抽出

地形は斜面および平坦地から構成される。作成した数値地形から平坦地を識別し、斜面安定の評価対象となる

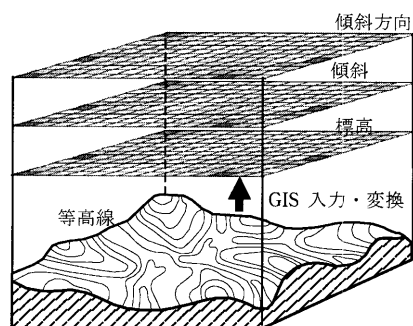


図-1 GISによる数値地形の作成

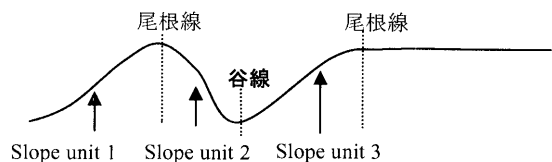


図-2 Slope Unit の概念

各斜面を検出し、それぞれの斜面の空間分布範囲を特定する。また、その範囲をGISのベクトルデータ（例えば、多角形であるポリゴンシェップファイルデータ）として保存する。

図-2に示すように、単位斜面（Slope Unit）は基本的に山の尾根線と谷線で囲まれた領域である。尾根線と谷線を確定できれば各单位斜面を特定することが可能となる。

数値地形による尾根線の抽出は、GISのラスターデータを用い、各セルの最急勾配方向（水の流れる方向）を計算し、その方向および標高を比較することで、集水域（流域）の範囲および集水域の境界線（尾根線）を抽出することが出来る。本研究では、下記のアプローチで空間解析を行い、尾根線の抽出および単位斜面の特定を行う。

① 数値地形の凹点の検出と処理（Fill sink）

数値地形の中に標高の内挿による誤差が生じる可能性がある。例えば、地形のセルの中に標高が極めて低い孤立するセルが存在する場合がある。このようなセルは集水域の抽出に影響するため、当該セルを見つけ出して、周辺セルの標高の平均値を与え直す操作が必要である。図-3には標高ラスターデータの例を示す。図-4にはその標高ラスターデータの3D図を示す。

② 流れの方向の計算（Flow direction）

あるセルの標高に対して周辺八つのセルの標高との差および中心点の距離で傾斜角度を計算し、その中に最急勾配方向を確定する。図-5には各セルの最急勾配方向の例を示す。外縁部セルの勾配計算には外側のセルの標高を参考したため、その最急勾配方向の表示を省略した。プログラムの作成の便を考え、最急勾配方向を数値で示す必要がある。図-6には一つのセルに対して流れる八つの方向を代表する値を示す。例えば、南方向を4、北方向を64をとす。図-7は図-5で示した流れ方向を方向を示す値で示した例である。

③ 流れの集計（Flow accumulation）

一つのセルに周囲から水が流れてくるセルの数を集計する。これは流れの方向値を利用し、流れてくる可能性のあるセル（集水セル）の数をカウントする。すべてのセルに対してこのカウントを行い、カウントした値をそれぞれのセルに与える。図-8には計算した集水セルの数の例を示す。その見方の例として、図の3行4列目のセル値は5であり、図-5を見ると、そのセルの周囲から五つのセル（灰色で示されたセル）の水が流れてくることが分かる。

④ 落水線の抽出（Stream network）および尾根線の特定

流れの方向値および流れの集計結果を利用し、集水セルの中心点をつなげることによって、落水線（溪流）を抽出することが出来る。図-8には特定した落水線の例を示す。各落水線（溪流）に流れてくるセルの範囲を特定し、その境界のセルをつなげて尾根線（流域の境界線）が求められる。しかしながら、山地において様々なレベルの集水域（流域）が存在するので、どのレベルの集水域を抽出するのか事前に決める必要がある。一つ流域に包含されるセルの数がその流域の流出点（Pour point）、つまり、落水線交差点での流れの集計値である（図-9の中に丸で囲まれたセル）。流域に包含されるセルの数の最小値（例えば、 N ）を設定し、その値（ N ）を超える流域を特定することが出来る。図-10には流域のセル

49	67	56	49	46	50	47
47	53	44	37	38	48	40
50	58	55	22	31	24	23
42	61	47	21	16	19	18
36	53	34	12	11	12	12
38	39	30	12	10	9	13
50	52	33	12	9	7	15

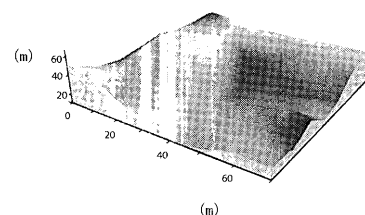
図-3 標高ラスターデータの例
(数値は標高, 単位: m)

図-4 標高の3D図

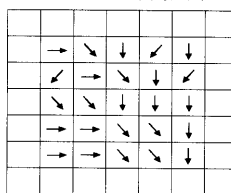


図-5 各セルでの最急勾配方向

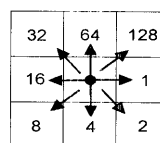


図-6 流れ方向値の設定

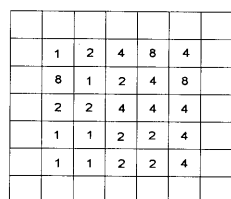


図-7 方向値で表した最急勾配

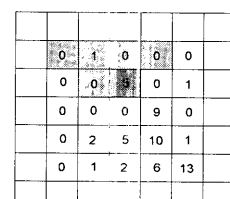


図-8 流れの集計計算

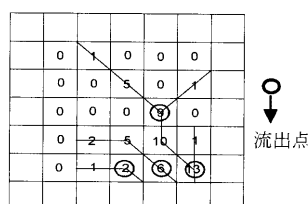
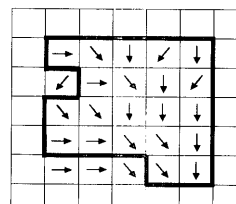


図-9 落水線の作成

図-10 尾根線の特定 ($N > 9$)

論文

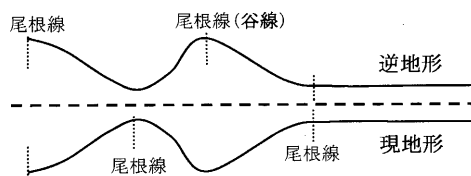


図-11 谷線特定の方法

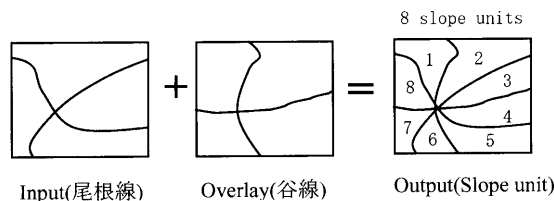


図-12 GISのユニオン処理の概念図

総数が9以上の場合の流域の境界線（尾根線）の例を示す。この場合では、小さい流域（例えば、図の中に流域セルの総数が3, 5である流域）を無視し、セルが9個以上となる流域を特定した。

この演算により尾根線をポリゴンデータ（多角の図形データ）として得られるが、谷線に関しては直接に得られない。ここでは、上記の数値地形を逆にし（図-11）、同じ処理を行い、新しい尾根線、つまり、谷線を特定する。

更に、得られた尾根線および谷線のポリゴンデータの二つGISデータをユニオン処理で（図-12）結合することによって、尾根線および谷線で囲まれたそれぞれの単位斜面を特定することが出来る。

流域に包含されるセルの総数の下限値の設定は単位斜面の規模に係わるので、研究対象地域の地質、地形、斜面崩壊の規模を考慮することで設定することになる。

3. 適用例

以上のGIS演算プロセスに対してVisual Basicコードを開発し、数値地形から単位斜面の自動抽出を実現した。その適用例として、ある地区の約2 km²の山地を対象として抽出した結果を図-13, 14に示す。図-13には細い線は標高の等高線で、太い線で囲まれた範囲は単位斜面である。図-14には地形および特定された単位斜面の三次元図を示す。この事例では、数値地形の入力・作成および単位斜面の抽出には比較的短時間で実行できた。抽出した結果を見ると、地形の谷線や尾根線を正しく抽出しており、本研究で提案した方法により数値地形から単位斜面の自動的かつ効率の良い抽出が可能であると考えられる。抽出した斜面の中に細い長い斜面が存在するが、これは長い谷であることを示している。抽出した単位斜面はポリゴンのデータ形式であるので、GIS上でそのポリゴンによる地形標高、傾斜角度、傾斜方向データの統計処理（Focal statistics）を行い、各単位斜面内の地形の統計値（平均、最大、最小等）を得ることができ、平坦地と斜面を区別することが出来る。また、それぞれの単位斜面はID番号を自動的に割り振られており、番号順で各斜面範囲内の地形や地質等の数値情報を取得し、三次元斜面安定搜索計算³⁾を行える。

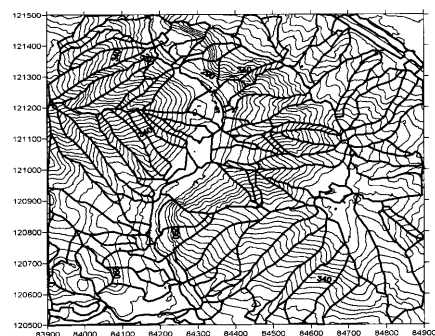


図-13 単一斜面の抽出結果

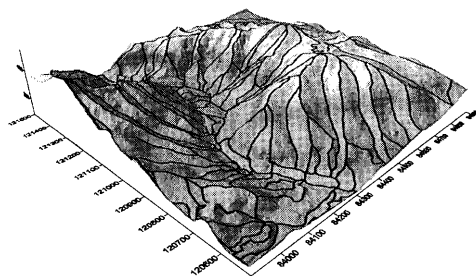


図-14 単一斜面の抽出結果（三次元図）

4. まとめ

(1) 本研究で提案したGISによる数値地形の作成および山地の尾根線と谷線の抽出を行うことで、広範囲にわたるすべての単位斜面の空間分布範囲を確定することが出来る。

(2) 実例の抽出計算の結果から、提案した方法を用い、数値地形から斜面の自動的かつ効率の良い抽出が可能であることを実証した。また、このような単位斜面の空間分布がポリゴンデータとして得られるため、その斜面範囲内の地形特性（標高、傾斜角度、傾斜方向等）を定量的に把握することが出来る。

(3) 提案した斜面抽出方法は、数値地形をベースにした三次元斜面安定力学モデルの広域への適用に極めて重要な基礎データを提供することが出来る。三次元斜面から最もすべりやすい三次元すべり体を抽出するという研究の展開は斜面防災対策に極めて重要であると考えられる。

参考文献

- 1) Aleotti, P., Chowdhury, R.: Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives, Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Springer-Verlag, 58, pp. 21~44, 1999.
- 2) 大林成行・小島尚人・Chang-Jo F. Chung: 斜面安定性評価モデルの精度比較とその実用化への提案, 土木学会論文誌, No. 630/VI-44, pp. 77~89, 1999.
- 3) 周 国云・江崎哲郎・謝 謨文・三谷浩泰: GISとモンテカルロ法を用いた新しい三次元空間斜面安定評価方法の提案, 土と基礎, Vol. 50, No. 5, pp. 23~25, 2002.
- 4) G. Zhou, T. Esaki, Y. Mitani, M. Xie, J. Mori: Spatial probabilistic modeling of slope failure by using GIS and Monte Carlo method. International Journal of Engineering Geology, Vol. 68, issues 3~4, 2003, pp. 373~386, 2003.

(原稿受理 2003.7.3)