GISを活用した数量化理論による斜面崩壊ハザードマップ 作成手法の開発と適用

周 国云*・横矢直道**・陳 光齊***・北園芳人****

要 旨

本研究では、近年飛躍的な技術の進歩を遂げた地理情報システム(GIS)と数量化理論を用いた斜面崩壊ハザードマップの新しい作成方法を提案し、熊本県水俣市集地区をモデル地区として、提案方法による斜面崩壊ハザードマップの作成の実証を行った。従来の数量化理論によるハザードマップの作成では、崩壊素因(地質、傾斜角度、横断形状、集水面積、土地利用等)の空間分布の作成は非常に煩雑で、解析に時間が掛かり精度の向上に制約があるため、実用上に問題があった。本研究では、GISの最新入力方法により各素因のデータを入力してラスターデータに変換し、ラスターデータの解析機能を使用することにより短時間で数量化理論解析に必要なアイテム(説明変数)の空間分布を作成することができる。また数量化理論解析用の標準メッシュをGISで作成し、説明変数の空間分布値を標準メッシュの属性データとして変換しASCIIの形式で保存し、このASCIIデータを用いて数量化理論による解析を行い、解析結果を標準メッシュにリンクさせハザードマップを作成した。この方法を熊本県水俣市集地区の崩壊事例に適用した結果、短時間で精度の高い斜面崩壊ハザードマップの作成可能であることが実証された。作成に要した時間は、従来の方法の約1/10の時間であり、入力データの確認・修正・再解析も容易に行うことができ、提案した方法が精密なハザードマップの作成に極めて有効であることがわかった。

Key words : 斜面崩壊 slope failure, 数量化理論 quantification methods theory, ハザードマップ hazard mapping, 地理情報システム GIS

1. は じ め に

近年、わが国では集中豪雨による斜面崩壊や土石流などの土砂災害が頻繁に発生し大きな社会問題となっている。過去の10年間で合計6,000件以上の崖崩れが発生し、全国で11万か所以上の急傾斜地崩壊危険箇所が指定されている。そのため、高い精度と信頼性のある土砂災害ハザードマップの作成・整備が住民の安全の確保や経済損失の低減等に極めて重要な課題となっている。

広域の斜面崩壊ハザードマップの作成に関しては、力学

モデルが含まれない方法および力学モデルを取り入れる方法の2種類が挙げられる。力学モデルが含まれない方法として多変量解析(数量化理論)、遺伝的アルゴリズム等の統計的手法が挙げられ、1970年代から現在まで多用されてきた^{1)~11)}。このような統計的な手法では基本的に対象区域での斜面崩壊に関係する素因(地質、傾斜角度、谷密度、断層、植生、土地利用分類等)と外的基準(既崩壊地)の分布図を作成し、素因と崩壊の関係を統計的に分析し、その関係に基づいて崩壊危険度の予測図を作成する。ところが、崩壊の素因である地質、地形、植生等の質的な要因は、量的な表現が困難であるため、従来は定量的な扱いができなかった。しかし、近年の数量化理論の発達¹²⁾とコンピュータ技術の飛躍的な発展とともに、これらの数多くの空間的に分布する質的な要因を対象として統計的な解析を行うことが可能となり、量的な要因と一緒に扱えるようになってきた。

一方、力学モデルを取り入れる方法^{13)~15)}では、斜面安定の力学的なメカニズムを考慮するが、広域での評価には、解析に必要な地盤の力学パラメータ、標高、傾斜角度、弱層の分布および地下水位等の多くの空間情報が要求され、

* 西日本工業大学環境建設学科 Department of Civil and Environmental Engineering, Nishinippon Institute of Technology(会員)

E-mail: zhou@nishitech.ac.jp

** (株)福山コンサルタント Fukuyama Consultants Co. Ltd.(会員)

*** 九州大学工学府建設システム工学専攻 Department of Civil and Environmental Engineering, Kyushu University

**** 熊本大学工学部環境システム工学科 Department of Civil and Environmental Engineering, Kumamoto University

データの精度に限界がある。そのため、広域の斜面崩壊ハザードマップの作成には、過去の崩壊履歴と地形、地質等の素因を収集・整理し、その関連性を統計的に分析する手法の方が実用的と考えられる。

しかしながら、これまでの統計的な手法の応用には、地質、傾斜角度、植生、土地利用分類等の多くの素因と、崩壊履歴の空間的な分布を定量的に把握・加工・処理する必要があった。これらの作業は非常に煩雑で効率が悪く、入力データの精度低下および解析結果の正確性にも影響を与えて、実用の面には問題が残されている。

近年、注目されている地理情報システム(GIS)はさまざまな分野に急速に応用されてきている。GISは異なる種類の空間的な情報(図形、画像、文字、数値など)を統合して管理および解析するツールとして、地盤防災分野への応用も期待できる。また最近、高精度の航空機レーザー計測による地形データ、高解像度衛星データ、道路、建物分布などのデジタルデータの整備は多くの地域で行われており、これらのデータをGISで取り扱うことで、より効率的で信頼性の高いハザードマップの作成が可能になると考えられる。

本研究では、GISを活用した数量化理論による斜面崩壊ハザードマップ作成の方法を提案し、この方法により熊本県水俣市集地区の斜面崩壊を対象として、GISデータの入力、数量化理論による解析のためのデータ変換、解析の実行、斜面崩壊ハザードマップの作成および精度の確認を行い、提案した方法の実用化について検討する。

2. GISを用いた数量化理論による斜面崩壊ハザードマップの作成方法の提案

2.1 GISによる空間データの処理・提供

空間情報技術としてのGISは、データの取得(Capture)、格納(Storage)、表示(Display)、管理(Management)、解析(Analysis)等の強力なツールとして注目され、さまざまな分野において応用されてきた。GISのデータモデルとしては、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ーデータがある(図-1)。ベクトルデータは、土地利用や地質分布等の境界線が明確で分布が非連続的なものを表現するのに適している。一方、ラスターデータは、地形、地下水等の広範囲で連続的に変化する現象の表現には便利である。図-2に示されるように、実世界のさまざまな空間情報の特性に応じて、ベクトルデータとラスターデータを分けて使用すべきである。

最近のGIS技術の著しい発展により、これまでは解析事例の少なかったラスターデータの応用範囲が大きく広がられてきている。現在利用されている多くのGISソフトはラスターデータに対して下記の解析機能を提供している。

図-1 GISのデータモデルと実物の表現の違い

図-2 異なるGISのデータモデルによる実物の表現

- 1) レイヤーの間の算術計算
- 2) 組み合わせ計算, 論理演算, 集積計算, 代入演算
- 3) 三角関数演算, 指数計算, 対数計算, 分類, 統計
- 4) 3D地形解析, 標高分布, 傾斜方向, 傾斜度の計算
- 5) 流出解析, 流域の分割と確定, 地表面流下の追跡

最近のGISソフトは、ベクトルデータとラスターデータのデータ形式の双方向の変換もでき、データの入力と処理が便利になってきている。本研究では、GISのこのような空間データの加工・提供・解析の優れた機能を活用し、斜面崩壊に関するさまざまな素因のデータ分布の作成とこれを用いた解析を効率良く行う方法を提案する。

2.2 数量化理論による斜面崩壊解析

危険度の高い斜面の抽出は、数量化理論のうちの数量化理論Ⅱ類と呼ばれる判別手法により行い、この手法で崩壊・非崩壊の危険度を判別し、ハザードマップの作成を行う。

表-1 斜面崩壊のアイテムのカテゴリー化

アイテム	分類	カテゴリー
起伏量 (m)	0-5	1
	5-10	2
	10-20	3
	>20	4
傾斜角 (度)	0-15	1
	15-30	2
	30-40	3
	40-90	4
地質	砂岩泥岩互層	1
	安山岩	2
	低地堆積物	3
	火山岩	4
土地利用	人工物	1
	広葉樹	2
	針葉樹	3
	田畑 竹林	4 5

メッシュID	素因のカテゴリー				外的基準
	起伏量	傾斜角	地質	土地利用	崩壊
1	1	2	1	3	0
2	1	3	2	3	0
3	1	4	1	1	1
4	2	4	1	3	1
5	3	4	1	2	0
6	2	4	2	2	0
7	4	3	3	2	0
8	4	3	4	2	1
9	4	4	2	4	1
10	3	4	1	4	1
11	4	1	3	1	0
..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..

図-3 崩壊影響素因と外的基準のマトリックス

この手法では、解析対象範囲をメッシュで区切り、各メッシュの斜面崩壊の有無を外的基準(目的関数)とし、これとの関係を調べたい斜面崩壊の各要因アイテム(素因)の目的関数への反応パターンから各メッシュの斜面崩壊の危険度を判定する。解析の手順を以下に述べる。

各要因アイテムを更に分類して、カテゴリーに分類する。表-1のように、各アイテムを分類(例えば、起伏量は4分類、傾斜角度は4分類等)することで、定量的な素因(起伏量等)と定性的な素因(地質等)をすべてカテゴリーに変換する。崩壊の有無についても分類(例えば崩壊あり0で、なし1で分類する)し、各メッシュのカテゴリーと崩壊の有無から構成されるマトリックスを作成する。図-3には崩壊影響アイテムのカテゴリーと崩壊の有無のマトリックスを示す。

以上のマトリックスを数量化理論解析プログラムで読み込み、統計解析を行い、各カテゴリーのスコアが得られる。表-2の右2列目にカテゴリースコアの例を示す。このカテゴリースコアは、崩壊発生の危険度を表現するものであり、数値が大きいほうが斜面崩壊の危険度が高いことを意味する。それぞれの数値を正規化し(0～1の間の数値にする)、一つのメッシュの中の各カテゴリースコアの正規化後の値

表-2 カテゴリースコアから変換した評価点数の例

アイテム	分類	カテゴリー	カテゴリースコア	評価点数
起伏量 (m)	0-5	1	0.0124	0.08
	5-10	2	0.0223	0.15
	10-20	3	1.2363	8.32
	>20	4	0.8654	5.82
傾斜角 (度)	0-15	1	0.1341	0.90
	15-30	2	0.3453	2.32
	30-40	3	2.9821	20.00
	40-90	4	0.3842	2.59
地質	砂岩泥岩互層	1	0.0932	0.63
	安山岩	2	0.231	1.55
	低地堆積物	3	1.1213	7.55
	火山岩	4	0.2321	1.56
土地利用	人工物	1	0.0325	0.22
	広葉樹	2	0.1342	0.90
	針葉樹	3	0.1453	0.98
	田畑 竹林	4 5	0.0431 0.4522	0.29 3.04

を合計し、その合計値でメッシュの崩壊発生危険度を代表する¹⁾。一般的に合計数値が小さいため、下記の式(1)で正規化の後の値を拡大(例えば20倍)し、評価点数とし、合計点数を計算する。表-2の最右の列には式(1)で計算した評価点数の例を示す。

$$\text{評価点数} = \frac{|\text{カテゴリースコア} - S_{\min}|}{|S_{\max} - S_{\min}|} \times 20 \quad (1)$$

ここに、 $S_{\max}$ はすべてのカテゴリーのスコアの最大値で、 $S_{\min}$ はその最小値を意味する。

数量化理論解析は、各素因のカテゴリー化をすることで、経験的な数値を一定の基準で定量化することができるのが大きな特徴である。加えて、一つのアイテム内におけるカテゴリースコアのばらつきの大きさを示すレンジにより、要因の影響の大きさを評価できる利点もある。しかしながら、このような統計的な方法の実用化においてもっとも重要なポイントは、いかに効率的に高い精度の崩壊履歴と素因の空間分布値を得るかという点にある。

斜面崩壊の危険度評価対象範囲が広い場合、考慮すべき素因も多いため、従来の方法では数量化理論解析の実用化に大きな課題が残されている。

2.3 斜面崩壊の数量化理論解析のための素因

斜面崩壊に影響する素因は種々考えられるが、下記の素因が斜面崩壊評価を行う場合によく使用されている^{1), 2), 4), 7), 11)}。

(1) 傾斜角度

傾斜角度は、斜面の最急勾配方向において斜面と水平面の間の角度で、斜面崩壊に極めて重要な指標で、その空間分布の把握が必要不可欠である。

(2) 傾斜方向

傾斜方向は、斜面の最急勾配方向の矢印を平面に投影したものの方位角である。斜面の向きにより降雨量、日照量や気温に違いがあり、これが斜面崩壊に影響を与えると考えられる。

(3) 起伏量

起伏量は、一定範囲内(例えば一つのメッシュ範囲)における地形標高の最大と最小の差を意味し、地形の凹凸の量

を反映する指標である。

(4) 横断形状

地形の断面を作り、その形状の凹、平坦、凸の区分およびその量を意味する。地形が平坦な場合は斜面崩壊の危険性が低く、凹と凸の場合は斜面の崩壊のパターンも違うと考える。

(5) 集水面積

ある地域に水が流れてくる周辺地域の面積を意味する。降雨の場合は、地形上ある場所に周辺から水が流れるかとか周辺地形の標高や傾斜方向で決定される。周辺から傾斜集水しやすい場所は、崩壊の危険性が高いと考える。

(6) 土地利用

土地利用の形態によって斜面崩壊にも影響があると考えられる。例えば、竹林地域は地下水が豊富で根が浅いため、表層崩壊の発生しやすい場所とされている。

(7) 地質

地質は地盤の力学特性や層理・節理などの弱面の形成に関連するため、斜面崩壊にも影響する。

(8) 崩壊履歴

過去の崩壊履歴箇所の分布図は数量化理論解析の外的評価基準として極めて重要なデータである。その輪郭の分布の抽出にはいくつかの方法がある(例えば、現地調査、写真判読、衛星データの解析等)。

上記以外の斜面崩壊影響素因も考えられるが、本研究では、以上を代表的なものとして使用し、GISによるデータの作成方法を提案し、現場への応用により実証を行う。

2.4 GISを用いた数量化理論解析の効率化の提案

GISの高い空間データ処理能力を利用し、数量化理論解析に必要な影響素因の空間分布を作成し、数量化理論の解析結果をGISに取り込みハザードマップ作成を行う効率化したシステムを図-4のように提案する。

図-4 GISと数量化理論を活用したハザードマップ作成の流れ

提案する方法は、大きく以下の三つのステップから構成される。

(1) 地図の準備

さまざまな斜面崩壊に関連する地図を収集し入力のための準備を行う。地図のスケールと精度に留意する必要がある。

(2) GISによるデータ準備

これは本研究で提案するGISによる数量化理論解析の中でも最も重要なステップで、具体的な処理方法については2.5で詳細に述べる。GISで準備したデータをASCIIファイルとして保存し、数量化理論解析に提供する。

(3) 数量化理論解析

GISで用意されたデータを数量化理論解析プログラムで読み込み、判別解析を行う。

(4) GISによるハザードマップの作成

数量化理論解析から得られた各カテゴリースコアを評価点数に変換し、評価点の合計値を分類し、ハザードマップの作成を行う。

2.5 GISによるデータの準備

2.5.1 GISデータ入力

入力データとして、地形図、土地利用図、地質図、崩壊履歴図等がある。デジタイザを使用して入力を行う方法もあるが、この場合非常に時間が掛かり効率が悪いので、本研究では、下記のような方法で入力することを提案する。

(1) 地図のスキャン

収集した地図は、A4～B1サイズのものがあり、これらをカラースキャンして、画像として保存する。

(2) 画像の座標補正

GISソフトで画像を読み込み、座標補正を行う。座標系に関しては、一般的に1/5,000以下の大縮尺の地図は平面直角座標系が多いが、それ以上の小縮尺の地図はUTMや緯度経度がよく使用される。座標補正の方法はGISソフトによって多少異なるが、基本的にGCP(Ground Control Point)あるいは地図の四隅の図郭の座標を

表-3 GISによるデータの入力

素因	GISデータの形式	属性の内容
地形	Polyline	等高線の標高
地質	Polygon	地質区分コード番号 地質種類に応じて順番にコード番号で記入
土地利用	Polygon	土地利用コード番号 土地利用種類に応じて順番にコード番号で記入
崩壊履歴	Polygon	コード番号 崩壊あり：1 崩壊なし：0

利用して補正を行う。

(3) GISデータの入力

座標補正した地図画像を基に、GISの自動追跡と半自動追跡の方法(いわゆるラスターベクター変換手法)で効率的に地図のデジタル化を行う。このようなGIS手法を用いれば、従来の手法では数日間掛かる入力作業を数時間で完了することが可能である。地形図には、等高線および標高値をポリライン(Polyline)データとして入力する。とくに急な崖地の場合を反映する場合はBreaklineを活用することが必要である。地質、土地利用、崩壊履歴は、ポリゴン(Polygon)データとして、輪郭の分布と属性(地質区分と土地利用)を入力する(表-3)。

2.5.2 標準メッシュの作成

標準メッシュとは、数量化理論解析を行う地域を分割する基本的なメッシュである。メッシュのサイズは、研究対象地域で収集したデータの精度、崩壊の規模等を総合的に考慮して決定すべきである。メッシュの作成は、一般的にGISの作成ツールがあり、範囲を設定すれば、簡単に対象地域をカバーするメッシュを作成することができ、各メッシュの番号がそのメッシュの属性とされる。

2.5.3 地形解析

(1) TINモデルの構築

入力した地形等高線を使用し、TINデータを作成する。TINとは、不整三角網(Triangulated Irregular Network)と呼ばれ、ランダムに配置された点を一番近い3点で結び、三角形で地表面の形状を表現するデータモデルである(図-5)。等高線によるTINの作成には、線を一定間隔で点に変換してTINを作成する方法と、直接線上の変化点(ノード)を使用して作成する方法がある。

(2) データ変換

地形のTINモデルからラスター形式に変換することで、セル形式の地形ラスターデータが得られる。

(3) 地形解析

地形のラスターデータを使用して、GISの一般的な地形解析で下記のデータを簡単に整備することができる。

- ①標高分布
- ②傾斜角度
- ③傾斜方向

これらのデータはラスターデータの形式で得られ、セルのすべての情報(座標位置、属性)をデジタルデータとして

図-5 地形のTINモデルの構築

ASCIIの形式でGISから外部へ出力することが可能である。

2.5.4 地形起伏量

一般的に数量化理論解析のための標準メッシュのサイズを地形ラスターデータのセルよりも大きく設定するので、一つのメッシュの中に多数の地形セルが含まれる。このメッシュに含まれる地形セルの最大値と最小値の差がこのメッシュの地形起伏量に相当する。GISのラスターデータ解析機能の中のゾーン統計機能(Zonal Statistics)を使用すれば、簡単にメッシュごとの起伏量の数値が得られる。図-6に示されるように、Zonal Statisticsという計算では、地形標高のラスターデータに対して、統計用のメッシュを使用し、そのメッシュの範囲に含まれる多数の地形セル(図の場合は9個のセル)の値の統計計算を行い、得られた統計値をそのメッシュに属性として与える。統計値としては、最小値(Min)、最大値(Max)、平均値(Mean)、レンジ(Range)、偏差値(STD)、多数値(Majority)が得られる。この中の、レンジという統計値はセル値の最大と最小の差で、起伏量に相当する値である。従来の手法による起伏量の計算では、専用のプログラムを作成して処理をする必要があったが、GISの機能を利用すれば、メッシュデータとラスターデータ間の簡単な演算で効率的にデータの準備ができる。

2.5.5 横断形状

横断形状は、図-7に示されるように、地形セル(中心9番)の周りのセルの標高の平均値とその中心セルの標高値との差で現す(式(2))。

$$\text{地形セルの横断形状値}(P_9) = \left[\frac{\sum_{i=1}^8 h_i}{8} \right] - h_9 \quad (2)$$

ラスターデータの近隣解析(Neighborhood Analysis)機能を使用すれば、横断形状の値の分布が得られる。GISの近隣解析では、地形の標高ラスターデータを対象とし、図-8(1)に示されるように、任意のセル(Processing cell)

図-6 GISのゾーン統計による起伏量の取得

図-7 横断形状の計算ための地形セル図

の周辺八つのセルの標高値の平均値を計算し、そのセルの属性として与え、新しいラスタデータ(平均値ラスタ)が作成される(図-8(2))。さらに、この平均値ラスタデータと元の地形標高ラスタデータとの引き算を行うことで(図-8(3))、横断形状の値が得られる。

2.5.6 集水面積

集水面積は一つの地形セルに水が流れてくる周辺セルの数を意味する。GISのラスタデータを用い、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各セルの集水域を抽出し、集水面積を計算する¹⁶⁾。本研究では、下記のアプローチでGISの空間解析を行い、集水面積の計算を行う。

(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

図-8 横断形状の計算ためのGIS統計処理

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-9 標高ラスタデータの例(数値は標高, 単位: m)

図-10 標高の3D図

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なおす操作が必要である。図-9には標高ラスタデータの例を、図-10にはその標高ラスタデータの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、その中の最急勾配方向を確定する⁶⁾。図-11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にしたため、その最急勾配方向の表示を省略した。GISデータ処理の便を考え、最急勾配方向を数値で示す必要がある。図-12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とする。図-13は図-11で示した流れ方向を、図-12に示した流れ方向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-14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-11を参考に見ると、そのセルの周囲から五つのセル(図-14の中に灰色で示されたセル)の水が流れてくることがわかる。

以上のような計算が一部のGISソフトでは標準的機能となっている。地形ラスタデータがあればこの計算を実行することにより、各セルの集水面積を簡単に得ることができる。従来の手法では集水面積の計算は大変煩雑な処理を要する作業であったが、GISの機能を活用した計算では作

図-11 各セルでの最急勾配方向

図-12 流れ方向値の設定

図-13 方向値で表した最急勾配

図-14 流れの集計計算

図-15 土地利用、地質のデータのラスター化

図-16 GISデータの標準メッシュへの格納の概念図

業時間を大幅に短縮することができる。

2.5.7 土地利用、地質と崩壊履歴

土地利用、地質および崩壊履歴のデータは、GISにポリゴンデータとして入力するが、標準メッシュにデータを格納するために、図-15に示したようにこれらのデータをラスターデータの形式に変換する。

2.6 GISによるデータの標準メッシュへの格納

以上のステップで作成された崩壊素因と崩壊履歴のGISデータを標準メッシュへ格納する必要がある(図-16)。作成されたGISデータはすべてラスターデータの形式であるため、2.5の起伏量データの作成で提案したゾーン統計方法(図-6)を使用して統計処理を行うことにより、標準メッシュに各種のラスターデータを格納する。

ラスターデータの統計処理は下記のように行う。

- 傾斜角度 ゾーン統計の平均値を使用する。
- 横断形状 ゾーン統計の平均値を使用する。
- 地形起伏量 2.5に説明した方法でデータを準備する。
- 集水面積 メッシュサイズでの地形ラスターデータを作成し、それを使用して集水面積の計算を行う。得られた集水面積のラスターデータのセルサイズはメッシュサイズと一致するので、ゾーン統計を行うと、集水面積ラスターセルの値をそのままメッシュに格納することになる。
- 土地利用・地質 一つのメッシュに複数の土地利用が含まれる場合は、ゾーン統計の多数値を使用すれば面積の多い土地利用と地質区分をそのメッシュに与えることができる。図-17に示すように、一つのメッシュに3種類の土地利用があり、土地利用のラスターのセルにも3種類の土地利用コード番号(真ん中の図)が含まれる場合についてメッシュのゾーン統計を行うと、多数値は3、

図-17 複数の土地利用の場合のメッシュ

図-18 崩壊履歴のメッシュ対応処理の方法

メッシュID	起伏量	傾斜角度	地質	土地利用	集水面積	横断形状	崩壊履歴
1	1.4	12.3	2	1	1200	2.5	0
2	2.3	56.7	3	3	2345	3.4	1
3	4.5	25.4	1	2	3456	4.4	0
4	5.7	35.4	2	1	6543	2.3	1
5	6.8	28.8	3	3	323	3.4	1
6	5.8	34.6	1	2	32	3.8	0
7	7.9	56.6	2	1	23	3.2	0
8	5.8	66.8	3	3	34	12.2	0
9	3.5	78.8	1	4	2355	23	1
..	..	..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..	..	..

図-19 GISの標準メッシュに格納された属性データ

最小値は1、最大値は3、平均値は2.5となる。多数値を使用すれば、面積の最大の土地利用番号をそのメッシュに与えることになる。

- 崩壊履歴 一つのメッシュの全範囲が崩壊区域である場合はそのメッシュが崩壊メッシュとして問題がないが、メッシュの一部に崩壊範囲が含まれる場合(図-18の左図)は、そのメッシュを崩壊メッシュか非崩壊メッシュに判定する必要がある。その処理には二つの方法がある。図-18に示すように、ゾーン統計の最大値を使用する場合は崩壊メッシュになり(崩壊が1、非崩壊が0とする場合)、多数値を使用すれば、崩壊の面積がそのメッシュの半分以上でない場合は非崩壊メッシュとなる。

以上の作業によって、ポリゴンデータである標準メッシュにすべての素因の値が属性として格納される(図-19)。この属性データは多くのGISソフトではテーブルの形式で表示され、外部に保存することができる。

2.7 数量化理論解析とハザードマップの作成

以上のGISの解析操作で数量化理論解析に必要なデータの準備ができる。標準メッシュの属性データをGISから外部にエクスポートする。基本的にTXT, EXCELあるいは

DBFの形式になる。このようなデータはEXCELで整理することにより、ほとんどの数量化理論の解析プログラムに読み込むことができる。このデータを用いて2.2に説明した数量化理論解析を実行すれば、それぞれのアイテムのカテゴリスコアと評価点数が得られる。EXCELあるいはプログラムで標準メッシュの属性テーブルを読み込み、各メッシュの各カテゴリーの評価点数を合計し、その合計値を分類し、GIS上の標準メッシュに表示すれば危険度ランク分けをした崩壊危険性ハザードマップができる。このように、GISデータの属性テーブルと図形データがリンクされているため、属性テーブルの操作を行うことで、ハザードマップが簡単に作成できる。そのため、従来の数量化解析およびハザードマップ作成手法に比べると大幅な省力化が可能となる。

3. 適用例

実証モデルを熊本県水俣市集地区(面積=17km²)とし(図-20)、提案した方法でデータ入力および解析を行った。

3.1 モデル地域の地質および斜面災害状況

この地域では過去に降雨による多くの斜面崩壊が発生しており、とくに平成15年7月20日に発生した豪雨災害に伴う斜面崩壊による土石流災害は、死者15名、住宅の全半壊15棟という甚大な被害が生じている。

地域の地質は、最下部に基盤岩である泥岩が主体として、砂岩頁岩互層(白亜系四万十累層群)が分布する。この基盤岩の上に風化した安山岩質の礫を含む凝灰角礫岩が分布し、最上部の尾根沿いに安山岩が分布している。平成15年7月に発生した土石流のきっかけとなった大規模な崩壊は、この安山岩と凝灰角礫岩が分布する斜面で発生している。土石流は流域中ほどの右岸斜面標高410m付近で発生した大規模な崩壊が土石流化し、約1.5km流下して、集地区で氾濫堆積したものである。崩壊した土砂量は約43,000m³、崩壊残土量は約12,000m³と推定されている。この崩壊土砂量に加えて、溪床や溪岸から浸食した約60,000m³の土砂量が土石流として流下し、災害を生じさせたものである¹⁷⁾。

図-20 実証モデル地域(熊本県水俣市集地区)

3.2 データの入力

当該地域の地形図(縮尺=1/2,500)、土地利用図(縮尺=1/50,000、熊本県企画振興部土地資源対策課)、地質図(縮尺=1/50,000、熊本県企画振興部土地資源対策課)、崩壊履歴図(縮尺=1/25,000)を収集し、画像をスキャンしGISに取り込んだ。崩壊履歴図は水俣市芦北振興局が過去の斜面崩壊調査結果に基づいて作成したものである。入力した地形図の等高線からGISのTINモデルを構築し、地形標高、

図-21 地形のラスターデータ

図-22 傾斜角度のメッシュデータ

図-23 起伏量のメッシュデータ(m)

傾斜角度、傾斜方向をラスターデータとして作成した。図-21に標高ラスターを示す。地形横断形状、地質、土地利用、起伏量、集水面積のGISデータも入力・整理した。過去の崩壊履歴の分析により^{9)~11)}、過去の斜面崩壊の形状と規模を全体的に見ると、辺長が20m以上の四角形に相当する場

図-24 集水面積のメッシュデータ

図-25 地質のメッシュデータ

図-26 崩壊履歴のメッシュデータ

で表示された素因の例と崩壊履歴の分布図である。

3.3 数理化理論解析とハザードマップ作成

以上の標準メッシュに格納した各素因の属性テーブルをASCIIの形式で保存し、MS Excelで分類、整理した。土

表-4 数理化II類判別解析結果

実際の崩壊メッシュ数	崩壊と判定したメッシュ数	非崩壊と判定したメッシュ数
360	215	145
判定的中率=215/360 =60%		
実際的な非崩壊メッシュ数	非崩壊と判定したメッシュ数	崩壊と判定したメッシュ数
37981	25960	12021
判定的中率 =25960/37981=68%		

表-5 カテゴリスコアと得点計算結果

アイテム	分類	カテゴリ	カテゴリスコア	得点	出現頻度 (メッシュ数)
起伏量 (m)	0~1	1	-0.2753	8.48	807
	1~5	2	-0.1286	9.12	4265
	5~9	3	0.2361	10.72	10784
	10~	4	-0.0789	9.34	22485
傾斜角 (度)	0~20	1	-0.4311	7.79	13102
	20~30	2	-0.5484	7.28	13537
	30~40	3	0.0798	10.04	9975
	>40	4	0.1164	10.20	1727
地質	砂岩泥岩互層	1	1.3552	15.64	3774
	安山岩	2	0.1458	10.33	26624
	低地堆積物	3	-1.8899	1.38	7877
	火山岩	4	-0.2228	8.71	66
土地利用	田畑	1	0.0022	9.69	3972
	針葉樹	2	0.2594	10.82	28049
	果樹園	3	-1.0779	4.95	1167
	広葉樹	4	-1.3436	3.78	3633
	竹林	5	0.2419	10.75	680
	茶畑	6	-1.5423	2.91	47
	人工物	7	-1.3862	3.60	766
	その他	10	-2.2047	0.00	74
横断形状	凸	1	-0.7410	6.43	4344
	平	2	0.1584	10.38	29671
	凹	3	-0.3422	8.18	4236
集水面積 (メッシュ数)	0~99	1	0.0327	9.83	36103
	100~499	2	-0.8147	6.11	1440
	500~999	3	-0.9211	5.64	181
	1000~4999	4	-1.2066	4.38	361
	5000~	5	2.3484	20.00	254

図-27 斜面崩壊ハザードマップ

地利用は 8 分類、地質は 4 分類、傾斜角度は 4 分類、横断形状は 3 分類、集水面積は 5 分類で各アイテムのカテゴリの設定を行った(表-4)。このデータを、数量化理論(Ⅱ類)解析機能を有するソフトであるSPSSに読み込み、崩壊判別解析を行った。解析結果は下記ようになっており、的中率は60%であった(表-4)。的中率とは、「崩壊」と判別したメッシュの数(215個)と実際に崩壊したメッシュの数(360個)との割り算である。斜面崩壊素因の分類などの試行錯誤の調整によりこの的中率の更なる改善ができる。

表-5には、計算した各アイテムのカテゴリースコアを示す。得点は式(1)で各カテゴリースコアを変換したものである。さらに、各メッシュで各カテゴリの得点の合計を15点ずつ5分類して、崩壊危険度の小、やや小、中、やや大、大の5等級をつけ、GISでのハザードマップを作成した(図-27)。全体の崩壊判定の的中率は60%となっていることから、計算の精度はかなり満足できるものと考ええる。

3.4 提案した方法の効率と精度の検証

本研究では、収集したアナログの原図を使用し、地図のデジタイズからハザードマップの作成までの各ステップに必要な作業時間を計測・確認し、従来の方法と比べることにより本手法の効率性の検証を行った。表-6にはその検証比較結果を示す(両方とも熟練技術者が行ったと想定した場合のおよその作業時間である)。

水俣市の集地区のデータについてまとめた表-6によると、従来の方法で約1か月掛かっていた作業は、本提案のGISを活用した方法を使用することにより約1/10の時間で完成できることがわかった。また、従来の方法では、完成した作業の精度確認がプログラムで計算をしないと確認できなかったため、かなりの時間を必要としていた。一方、提案した方法ではすべてのデータはGISの中に保存しており、視覚的に確認できるので、入力したデータと原図をGIS上で拡大したり移動したりすることでデータ入力精度の確認とデータ修正を簡単に行える。また従来の方法では、最初に標準メッシュを作成し、次にメッシュを固定したままで

解析用のデータの準備をしていく必要があるため、メッシュの変更が基本的に不可である(変更すれば最初からすべての作業をやり直す必要がある)。これに対して提案の方法では、GISデータの入力と標準メッシュへのデータ格納が分けられているので、標準メッシュの変更が可能である。これにより、解析を繰り返し行うことによりハザードマップの精度を向上させることが可能と考える。

4. ま と め

GISを活用した数量化理論(Ⅱ類)による斜面崩壊ハザードマップの作成手法の提案、および検証を行った。主な結論は下記のとおりである。

- 1)GISの強力な空間データの作成・管理と解析機能を活用し、数量化理論と結合した高度なハザードマップの作成方法を提案した。従来の方法では非常に煩雑なデータ準備作業を、本提案の方法では大幅に省力化ができる。
- 2)熊本県水俣市集地区をモデル地区として、データの入力からハザードマップの作成までを提案方法で実施・検証した結果、効率および精度の向上が期待できることがわかった。
- 3)従来の方法での標準メッシュを固定したままでのデータ準備と異なり、本方法ではデータの入力・作成とメッシュデータの格納が分けられているため、データの照査、修正・更新も容易である。本方法によるハザードマップの作成に要した時間は、水俣市の集地区の例では、従来の方法の1/10であることが検証できた。
- 4)数量化理論によるハザードマップの作成にはアイテムとカテゴリ設定のケーススタディが重要である。本方法によるデータの作成や解析用データシートの準備は容易であるため、くり返し解析が可能であり、数量化理論解析の精度と信頼性の向上に大きく貢献することができる。
- 5)今後更に多数の現場へ適用することにより本方法を確立し、より高い精度と信頼性のあるハザードマップの作成手法を目指していきたいと考えている。

表-6 ハザードマップ作成の効率性の比較

入力	本提案のGIS方法	従来の方法 (デジタイザとプログラムでの整理)
地図のスキャン	数分間程度	20分程度(座標校正)
地形入力(B1サイズ4枚)	2日程度	2週間程度
標高分布	2分以内	1日間程度
傾斜角度	数秒程度	1日間程度
傾斜方向	数秒程度	1日間程度
起伏量	数秒程度	1日間程度
横断形状	2分以内	1日間程度
集水面積	5分程度	1日間程度
地質分布	半日程度	3日間程度
土地利用分布	半日程度	3日間程度
崩壊履歴	半日程度	2日間程度
メッシュの格納	5分程度	3日間程度
ハザードマップ作成	5分程度	1~2日間程度
合計	3日半間程度	34日間程度(約1ヶ月)

引 用 文 献

- 1) 久保村圭助・武井昌博(1971): 数量化による切り取りのり面の安全度解析, 土木学会論文報告集, No.194, pp.141-150.
- 2) 持永竜一郎・福山俊朗(1972): シラスのり面崩壊に関する要因分析, 土木学会論文報告集, No.197, pp.101-110.
- 3) 南部光広・軽部大蔵・浅野雅行(1975): 統計的手法による道路用盛土のり面の安定解析, 土木学会論文報告集, No.241, pp.93-103.
- 4) 沖村孝・杉本博(1979): 統計的手法による自然斜面崩壊の研究, 土木学会論文報告集, No.290, pp.159-168.
- 5) 田尻要・中山洋・今泉繁良(1992): 地盤情報データベースを用いた熊本県中部域斜面災害の解析, 土木学会論文集, Vol. 32, No.2, pp.159-168.

- 6) CARRARA, A. (1983) : Multivariate models for landslide hazard evaluation, *Mathematical Geology*, Vol.15, pp.403-426.
- 7) 大林成行・小島尚人・藤井克史(1996) : 衛星マルチスペクトルデータを適用した地すべり危険か所の評価精度の向上, 土木学会論文集, No.534, pp.173-184.
- 8) 仲宗根典子・寺園忠彦(2001) : 地盤情報データベースの作成と斜面崩壊予測への対応, 自然災害科学, Vol.20, No.1, pp.75-87.
- 9) 国原晃・北園芳人(2001) : 斜面崩壊におよぼす微地形変化の影響, 平成12年度土木学会西部支部研究発表講演概要集, pp.A256-257.
- 10) 藤田淳子・北園芳人・柿原孝一郎(2005) : 数値地図を用いた斜面崩壊ハザードマップの精度について, 平成16年度土木学会西部支部研究発表講演概要集, pp.523-524.
- 11) 北園芳人・仲宗根典子・寺園忠彦(2001) : 地盤情報データベースの作成と斜面崩壊予測への応用, 自然災害科学, JJSNDS 20-1, pp.75-87.
- 12) 林知己夫(1954) : 数量化理論とその応用例, 統計数理研究所報, Vol.2, No.1, pp.1-30.
- 13) 周国云・江崎哲郎・謝漢文・佐々木靖人(2005) : GISを用いた山地地形から三次元すべり危険斜面を抽出方法の開発と適用, 応用地質, Vol.46, No.1, pp.28-37.
- 14) 周国云・江崎哲郎・謝漢文・森二郎(2004) : GISとモンテカルロ法に基づく広域斜面崩壊確率の評価手法, GIS-理論と応用, Vol.11, No.2, pp.21-31.
- 15) XIE, M., ESAKI, T., ZHOU, G., MITANI, Y. (2003) : GIS-based 3D critical slope stability analysis and landslide hazard assessment, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, No.12, pp.1109-1118.
- 16) 周国云・江崎哲郎・邱 聘・森二郎(2004) : 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, 土と基礎, Vol.52, No.4, pp.26-28.
- 17) 池谷浩・國友優・中森広道・関谷直也・中村功・宇田川真之・廣井修(2005) : 2003年7月水俣市土石流災害における災害情報の伝達と住民の対応, 東京大学大学院情報学環情報学研究, 調査編, Vol.22, pp.117-239.
<http://www.soc.toyo.ac.jp/~nakamura/minamata.pdf>

(2007年2月22日受付, 2007年9月3日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.49, No.1, pp.2-12, 2008

An Advanced Slope Failure Hazard Mapping Method by Combing GIS and Hayashi's Quantification Methods Theory

Guoyun ZHOU, Naomoichi YOKOYA, Guangqi CHENG and Yoshito KITAZONO

Abstract

A new Geographical Information System(GIS)-based slope failure hazard mapping method using Hayashi's quantification methods theory is proposed and applied in a slope failure prone area in Minamata City of Kumamoto Prefecture. In the past, Hayashi's quantification methods theory is often used in slope failure hazard mapping, however, the preparation of larger spatial data is very hard and the work efficiency is low and reliability of the results are doubtful sometime. In this research a series of GIS-based spatial data preparation method is proposed for quantification methods theory analysis and the results of the analysis results can be input into GIS to make hazard map directly. The application of proposed method on Minamata area shows that created hazard map has good agreement with real slope failure condition.

Key words : slope failure, quantification methods theory, hazard mapping, Geographic Information System(GIS)