同時多発型・斜面崩壊危険箇所評価を目的とした 教師データ再設定方法の提案と評価支援策

吉田 智也¹・野崎 亮¹・小島 尚人²

¹ 学生員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: a7612634@rs.tus.ac.jp

² フェロー会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

E-mail: kojima_h@rs.noda.tus.ac.jp

本研究は「同時多発型・斜面崩壊危険箇所評価支援」を目的として、「教師データの再設定方法」を提案し、崩壊形態別・危険箇所の判別精度を向上させたものである。同時多発型・斜面崩壊危険箇所問題における判別精度は教師データの代表性に依存することを指摘した上で、クラスター分析を通して崩壊形態が異なる現状型教師データ（表層崩壊、深層崩壊、地すべり）をグループ化し、現状型教師データと一致する教師データを抽出・再設定（再設定型教師データ）する方法を提案した。教師データ再設定前後の崩壊形態別・斜面崩壊危険箇所評価図間の違いを表示した感度分析図（四分位法）を提示するとともに、これに対する一般解釈表を併用すれば、崩壊安全側・危険側評価が展開でき、技術者支援情報として寄与できることを示している。

Key Words : *simultaneous slope failure, types of slope failures, representativeness of training data, structural equation modeling, cluster analysis, Niigata-ken Chuetsu earthquake*

1. はじめに

衛星リモートセンシングデータや各種地理情報（説明変量）を併用し、「潜在危険斜面の広域推定」を目的とした評価モデルの構築に関わる研究は、国内外を含めて枚挙にいとまがない¹⁾。数量化理論、共分散構造分析法、ファジー理論、ニューラルネットワーク等をベースとした評価モデルが広く知られている。これらのモデルでは既崩壊地を目的変量（以下、現状型教師データ）とし、これと類似する土地の性状を有する斜面を判別することから、その判別精度は教師データの代表性に依存する。

ここ最近の予期せぬ集中豪雨や巨大地震を誘因として、表層崩壊、深層崩壊、地すべり等、様々な形態の斜面崩壊が広域にわたって同時多発的に発生している。これらの崩壊形態は性質がそれぞれ大きく異なる。複合斜面災害が発生した領域において、二次災害対策を実施する上でも崩壊形態別・斜面崩壊危険箇所の評価支援策（精度向上を含む）が求められている^{2,3)}。

同時多発型斜面崩壊において崩壊形態別の斜面崩壊危険箇所評価精度（的中率：後述）を高めるためには、教師データの代表性について検討することが不可欠と言える。斜面崩壊危険箇所評価モデルを構築する上で、教師データの代表性の問題は避けては通れない検討課題となる。

以上の背景のもと、本研究では、同時多発型・斜面崩

壊危険箇所評価における評価モデルの精度向上を目的として、クラスター分析を通して崩壊形態が異なる現状型教師データ（表層崩壊、深層崩壊、地すべり）をグループ化し、現状型教師データと一致する教師データを抽出・再設定（再設定型教師データ）する方法を提案するとともに、崩壊形態別に教師データの代表性が向上できるか否かについて検討する。検討の結果、崩壊形態別に教師データの代表性向上（教師データに対する的中率向上）を確認している。

この結果のもとに、さらに検討を進め、教師データ再設定前後の崩壊形態別・斜面崩壊危険箇所評価図間の違いを表示した感度分析図（四分位法）を新たに提示している。感度分析図とこれに対する一般解釈表を併用すれば、「崩壊安全側・危険側」評価が展開でき、技術者支援情報として寄与できることを示すとともに、本研究で提案した教師データ再設定方法の有用性についてとりまとめている。

2. 本研究の特色

本研究の特色は以下の2点にまとめられる。

(1) 再設定型教師データの提案

これまでの斜面崩壊危険箇所評価に関する研究では、

図-1 教師データ代表性向上アルゴリズム

各斜面崩壊の発生箇所に基づいて教師データを設定している。しかし、形態を異にする斜面崩壊が同時多発的に発生した場合、崩壊地の土地の性状は多様となる。土地の性状を基準に教師データを統計的手法により分類することは意義ある検討である。斜面崩壊危険箇所評価精度は教師データに大きく依存するため、評価精度向上には教師データの代表性向上が必要不可欠と言える。

本研究では、再現性のある統計的手法であるクラスター分析を用いて現状型教師データを再分類した「再設定型教師データ」を提案する。統計的な分類手法を用いて教師データを再設定することによって、教師データの代表性が向上し、評価精度を向上できる。

(2) 教師データ代表性向上アルゴリズムの構築

本研究では、2種類の教師データ（現状型、再設定型）を用いて斜面崩壊危険箇所評価を実施しているため、2種類の「斜面崩壊危険箇所評価図」が提示される。これらの違いを効率的に分析するためのアルゴリズムを構築する必要がある。

具体的には、現状型と再設定型の評価値の違いを抽出した「感度分析図（四分位法）」と「一般解釈表」を提示する。「感度分析図（四分位法）」は2種類のモデル間の評価値の大小関係を分析できるだけでなく、両モデルともに崩壊の危険性が高い箇所、低い箇所も詳細に分析でき、さらに崩壊安全側・危険側評価を展開することを可能としている。この感度分析図を用いて、教師データの再設定に伴う危険箇所評価結果の変化箇所を顕在化

することは、潜在危険斜面を推定する上で有用であると言える。

教師データを再設定することによって代表性を向上させ、さらに、その効果を感度分析図（四分位法）によって顕在化させるアルゴリズムを提案した点が既往の研究には見られない本研究の大きな特色となる。

本研究で構築した教師データ代表性向上アルゴリズムの全体構成を図-1に示す。教師データ代表性向上アルゴリズムは以下の4つのステップから構成されている。

- ・STEP1：素因データと教師データの準備（3章）
- ・STEP2：素因分析（4章）
- ・STEP3：共分散構造分析法の導入（5章）
- ・STEP4：斜面崩壊危険箇所評価（6章）

この流れにしたがって処理を進めることによって、教師データの再設定に伴う代表性の向上とその効果の確認を効率的に実施できる。

3. 素因データと教師データの準備

(1) 対象領域

評価対象領域は、新潟県長岡市（東西3.6km×南北3.0km）とした。新潟県長岡市では、2004年10月に発生した新潟県中越地震に伴い、形態を異にする斜面崩壊が同時多発的に発生している。近年、大地震や集中豪雨に数多く見舞われており、斜面二次崩壊に伴う災害への影響が無視できない領域である²⁾⁴⁾。

図-2 再設定型教師データの作成概念

表-1 教師データの対応付け表

崩壊タイプ	教師データ数	クラスター分類結果		
		崩壊形態 group1	崩壊形態 group2	崩壊形態 group3
現状型教師データ	表層崩壊	53	25	6
	深層崩壊	63	7	28
	地すべり	44	16	28
計		160	48	78

(a) 再設定型表層崩壊

(b) 再設定型深層崩壊

(c) 再設定型地すべり

【対象領域】
東西3.6km×南北3.0km
画素サイズ：30m/pixel

【凡例】
■ 再設定型教師データ ■ 取り除かれたデータ

図-3 教師データ

(2) 素因データ（説明変量）の準備

土地分類基本調査の成果図面を数値化した土地分類図から「地形分類，土壌，表層地質」と数値地形モデル（DTM：Digital Terrain Model）から「標高区分，傾斜区分，起伏量，斜面方位，谷密度」の計8種類を用意する。さらに，本研究ではIKONOS データから植生指標を作成し，素因として加えた。これらの素因は，土地に内在する潜在的な因子であり，斜面崩壊危険箇所評価を進める上で基本となるものである。これらの素因データは全て地形図に合わせて精密幾何補正（座標変換式；アフィン変換）を実施している。

(3) 再設定型教師データの作成

一般的に，斜面崩壊危険箇所の推定には航空写真や衛星写真等を使用した評価が多く用いられている。しかし，本研究の対象領域である新潟県長岡市では，多数の崩壊が広域にわたり同時多発的に発生していることから，本研究では報告書等を参考に，実際に崩壊が発生した箇所を「現状型教師データ」として設定した。土木学会の調

査報告書で確認されている「表層崩壊，深層崩壊，地すべり」の3種類の斜面崩壊形態を現状型教師データとして設定した⁴⁾。

現状型教師データに対して，「クラスター分析」を実施し，「崩壊形態 Group1，崩壊形態 Group2，崩壊形態 Group3」の3つのグループに分類する。今回用いたのは，非階層型クラスタリング手法の一つであるk-means法^{5),6)}で，前述した9種類の素因のうち多重線形共線性を取り除いた7素因を変数とした。さらに，クラスター分類結果と現状型教師データで類似性の高いもの同士を対応付け，一致した箇所を抽出したものを，新たに「再設定型教師データ（再設定型表層崩壊，再設定型深層崩壊，再設定型地すべり）」として定義する。図-2に再設定型教師データの作成概念を示す。この概念図では，簡略化のため変数の数は2つとした。

表-1に教師データの対応付け表を示す。教師データの対応付けは「現状型教師データとクラスター分類結果で一致したデータ数/現状型の教師データ数」の数値に基づいて決定した。

図-3に、作成された再設定型教師データ（再設定型表層崩壊，再設定型深層崩壊，再設定型地すべり）の分布図を示す。赤色の画素が再設定型表層崩壊の教師データ設定箇所，緑色の画素が教師データを再設定したことによって取り除かれたデータの分布を示している。

再設定型教師データを設定することによって，各崩壊形態別・教師データの一様性が保証され，教師データの代表性向上が期待できる。

4. 素因分析

(1) 素因選定

斜面崩壊危険箇所評価モデルでは，「分析する素因の独立性問題」と「素因を構成するカテゴリ分析」に数量化Ⅱ類および数量化Ⅲ類を用いている。素因間の独立性を確保しておくことは，斜面崩壊危険箇所評価を実施するにあたって重要な前処理に位置付けられる。

数量化Ⅲ類を介して素因間の相関係数を計算し，相関の高い素因の組み合わせを判別する。さらに，数量化Ⅱ類を介して計算される偏相関係数を基準として，これらの組み合わせのうち偏相関係数の低い一方の素因を除去することによって，多重線形共線性を排除する。

(2) カテゴリ分析

斜面崩壊危険箇所評価モデルでは，Favorability 理論^{7,8)}に基づいて各素因を構成するカテゴリに付与される条件付き確率の値が入力情報となる。

具体的には，画素 q において斜面崩壊が発生すると想定される事象を「 Tq 」とし，画素 q に該当する「 i 番目の素因における j 番目のカテゴリ」を C_{ij} ($i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$) とすると画素 q の「斜面崩壊発生確率： Sq 」は次式で表される。

$$Sq = P \{Tq / C_{1j}, C_{2j}, \dots, C_{mj}\} \quad (1)$$

計算される条件付き確率は，次式で表される。

$$P(Tq | C_{ij}) = \frac{T_{ij}}{N_{ij}} \quad (2)$$

ここに，

T_{ij} : i 番目の素因におけるカテゴリ j に属する斜面崩壊既発地（教師データ）の画素数

N_{ij} : i 番目の素因におけるカテゴリ j の画素数

各素因を構成するカテゴリに属する画素に付与される条件付き確率を統合することにより，画素単位で評価値 Sq が計算される。 $P(Tq|C_{ij})$ を統合する際の枠組みとして，

図-4 パス図

ベイジアンモデル，ファジーセットモデル，確信度モデル等といった様々なモデルが構築され，十分な適用実績が示されている⁸⁾。なお，Favorability 理論^{7,8)}の詳細については参考文献に記載されているので本文では割愛する。

5. 共分散構造分析法の導入

(1) パス図

斜面崩壊危険箇所評価モデルは共分散構造分析法を中核としており，未観測変数である「誘因」と観測変数である「素因」との因果関係があると仮定した上で，素因が「地形要因」と「被覆要因」を説明付け，さらにこれらの要因が目的変数としての「斜面崩壊発生（教師データ）」を説明するといった考え方に基いて構成されている。この考え方をもとに構成されたパス図を図-4に示す。パス図からも判るとおり，斜面崩壊危険箇所評価モデルの評価精度は，教師データの精度に大きく依存する。教師データの精度向上は斜面崩壊危険箇所評価精度の向上に直接影響することから，斜面崩壊危険箇所評価において教師データの代表性問題は避けては通れない検討課題であると言える。

(2) 適合度検定

本研究では，共分散構造分析法で一般に利用されている「GFI (Goodness of Fit Index), AGFI (Adjusted Goodness of Fit Index), RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation)」といった3つの適合度指標を用いて，パス図の適合性を検定する。なお，これらの指標そのものの説明については，多くの参考書に記載されているので割愛する^{9,10)}。表-2に検討ケース別の適合度検定結果を示す。

a) GFI と AGFI について

GFI は，簡単かつ確実なモデル選択の指標として知られている指標である。GFI の値が 0.90 以上の場合はモデルの適合性が高いことを意味しており，0.90 未満の場合には，モデルは棄却される。

AGFI は、パラメータに対する拘束の数に影響を受けるという GFI の欠点を修正した指標である。パラメータが多く、複雑なモデルに対してペナルティを加える。GFI と同様に、AGFI の値が 0.90 以上の場合はモデルの適合性が高いことを意味しており、0.90 未満の場合には、モデルは棄却される。

表-2 より、全ての検討ケースにおいてモデル採択基準 (GFI, AGFI $\geq$ 0.90) を満たしている。

b) RMSEA について

RMSEA は、モデルの複雑さに伴う見かけ上の適合度の上昇を調整するための適合度指標の 1 つである。この値が 0.08 以下であれば適合度が高く、0.10 以上であれば、そのモデルを採択すべきでないと判断される。

表-2 より、全ての検討ケースにおいてモデル採択基準 (RMSEA $\leq$ 0.08) を満たすことが示された。

以上の 3 つの評価指標による適合度検定の結果、本研究における全ての検討ケースについてパス図が成立することが確認された。しかし、適合度検定のみでは「モデルが正しい」と断定することはできない。これは、モデルが棄却されないことはモデルを採択する上での「必要条件」であり、「十分条件」ではないからである。そこで、「十分条件」を補うために、パス図を用いて計算される「斜面崩壊危険箇所評価値」の精度分析を実施する必要がある。

(3) 教師データに対する精度分析

本研究では、上述したとおり「十分条件」を補う上で、式(3)で計算される教師データに対する判別精度を示す的中率 $S(i)$ を用いて、斜面崩壊危険箇所評価結果の教師データ(斜面崩壊発生)に対する精度について分析する。

$$S(i) = \frac{T(i)}{T_{all}} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

ここに、

$T(i)$: 斜面崩壊危険箇所評価値が高い画素から順に並べかえた後の上位 i % の画素のうち、教師データに該当する画素数

T_{all} : 教師データ総画素数

横軸に評価値の上位画素数の割合 $i=10\%$, 20% , $30\% \cdots$ をとり、これに対応する的中率 $S(i)$ を縦軸にとってグラフ化したものが図-5 であり、本研究では、これを「的中率曲線」と呼ぶ。

一般的に、評価値上位 30% の画素での的中率が 60% を超えている場合、モデルの判別精度は妥当であると言われている⁷⁾。図-5 より、全ての検討ケースにおいて、評価

表-2 適合度検定

		GFI	AGFI	RMSEA
現状型	表層崩壊	0.995	0.977	0.036
	深層崩壊	0.991	0.969	0.050
	地すべり	0.996	0.994	0.032
再設定型	再設定型表層崩壊	0.998	0.996	0.020
	再設定型深層崩壊	0.989	0.971	0.056
	再設定型地すべり	0.988	0.970	0.056

注) GFI : Goodness of Fit Index

AGFI : Adjusted Goodness of Fit Index

RMSEA : Root Mean Square Error of Approximation

図-5 的中率曲線

値上位 30% のときの的中率 60% を超えているため、教師データに対するモデルの成立条件が満たされていると判断できる。教師データの精度は保証されており、斜面崩壊危険箇所評価において適用できると言える。

再設定型教師データの的中率は、それぞれ現状型と比較して向上していることが判る。評価値の上位画素数の割合 20% において、再設定型教師データの的中率は全てのケースで 90% を超えており、非常に高い値を示している。特に表層崩壊と地すべりの的中率は、教師データを再設定したことによって大幅に上昇している。再設定に伴い教師データに対する判別精度が向上したことから、教師データの代表性が向上したと言える。

再設定に伴い教師データに対する的中率が向上したことから、教師データの精度向上が確認できた(必要条件)。しかし、教師データの精度向上が満たされただけでは画像全体の評価精度が保証されるとは限らない。そこで、次章では斜面崩壊危険箇所評価を通して、安全側・危険側評価の視点から評価モデルの精度について検討する。

図-6 斜面崩壊危険箇所評価図

6. 斜面崩壊危険箇所評価

(1) 斜面崩壊危険箇所評価図の作成

斜面崩壊危険箇所評価図（以下、危険箇所評価図）は、共分散構造分析法を介して斜面崩壊発生に対する評価値を画素毎に計算することによって作成される。図-6(a)～(f)に「現状型（表層崩壊、深層崩壊、地すべり）」と「再設定型（再設定型表層崩壊、再設定型深層崩壊、再設定型、地すべり）」の6種類の危険箇所評価図を示す。危険箇所評価図は、緑色系の画素から赤色系の画素に変化するほど評価値が高く、崩壊形態の影響を強く受ける領域であることを示している。赤色の画素は崩壊発生の危険性が高く、緑色の画素は崩壊発生の危険性が低いと解釈できる。

図-6(a)の「表層崩壊」と図-6(d)の「再設定型表層崩壊」の危険箇所評価図において領域Aに着目すると、どちらの危険箇所評価図でも赤色の画素が帯状に分布しており、崩壊の危険性が高い領域であると判る。この領域は素因データの一つである「起伏量」の大きい領域と一致している^{付録2)}。一般的に表層崩壊は起伏量が大きい斜面で発生しやすいと言われているため²⁾、実際の土地の性状と整合が取れている。

このように、危険箇所評価図を用いれば検討ケース毎に斜面崩壊危険箇所を推定することができる。しかし、危険箇所評価図だけでは、同一領域における評価図間の

図-7 感度分析図（差分値法）；表層崩壊 vs.再設定型表層崩壊

危険性の違いについて分析することは困難である。教師データの再設定に伴う危険箇所評価結果の違いを分析するためには、新たな評価図が必要となる。

(2) 従来の感度分析図の限界

危険箇所評価図の違いを効率的に分析するために、筆者らは図-7のような「感度分析図(差分値法)」を提示し、2つの危険箇所評価結果の違いを分析する上で有用な技術

斜面崩壊危険箇所評価図: 表層崩壊

感度分析図(四分位法)

(a) 現状型教師データ使用

(b) 再設定型教師データ使用

(c) 表層崩壊 vs. 再設定型表層崩壊

感度分析図凡例

	グループ1				グループ2				グループ3			
ケース	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

図-8 斜面崩壊危険箇所評価図と感度分析図(四分位法)

者支援情報となることを示してきた¹¹⁾。しかし、感度分析図(差分値法)は複数の危険箇所評価結果の「差分値」をもとに作成されていることから、崩壊の危険性が異なる領域同士が同じランクに分類されてしまう場合がある。

例えば、両検討ケースともに崩壊の危険性が「強」と判断された領域と、ともに崩壊の危険性が「弱」と判断された領域は、感度分析図(差分値法)の上では、同じ「危険箇所評価結果に差がない領域」に分類される。安全箇所も危険箇所も同義に取り扱われてしまうという点が、感度分析図(差分値法)の問題点と言える。

そこで、危険箇所評価結果の違いのすべての組合せ事象を網羅して分析できる新たな感度分析図を作成する必要がある。

(3) 感度分析図(四分位法)の提案

教師データの再設定に伴う危険箇所評価結果の違いにおける全ての組み合わせを分析するためには、複数の評価結果を組分けする必要があるが、差分値による評価

図-9 危険箇所評価結果の組み合わせ

は前述したとおり感度分析上の問題がある。そこで、本研究では一般的に統計解析で使われている「四分位法¹²⁾」を適用し、評価図A(現状型)、評価図B(再設定型)から得られる危険箇所評価結果を組分けして色分けした「感度分析図(四分位法)」を提案する。図-8(c)に、評価図Aを「表

表-3 感度分析図(四分位法)の一般解釈表

グループ名	評価図A vs. 評価図B 評価値の大小関係			安全側・危険側評価 教師データ再設定後	ケース	ピクセル数	色付け
グループ1	危険レベル3 (第4四分位群)	$\leq$	危険レベル3 (第4四分位群)	安全側	1	1256	
		$>$	危険レベル3 (第4四分位群)	危険側	2	1163	
		$>$	危険レベル2 (四分位範囲)	危険側	3	581	
		$>$	危険レベル1 (第1四分位群)	危険側	4	0	
グループ2	危険レベル2 (四分位範囲)	$\leq$	危険レベル2 (四分位範囲)	安全側	5	824	
		$>$	危険レベル2 (四分位範囲)	危険側	6	3894	
		$<$	危険レベル3 (第4四分位群)	安全側	7	574	
		$>$	危険レベル1 (第1四分位群)	危険側	8	709	
グループ3	危険レベル1 (第1四分位群)	$\leq$	危険レベル1 (第1四分位群)	安全側	9	372	
		$>$	危険レベル1 (第1四分位群)	危険側	10	1912	
		$<$	危険レベル2 (四分位範囲)	安全側	11	706	
		$<$	危険レベル3 (第4四分位群)	安全側	12	9	

注1) 評価図A:現状型教師データ使用、評価図B:再設定型教師データ使用

2) 安全側評価: 評価図A $\leq$ 評価図B

再設定型教師データを使用した場合、「評価値が高く」なった画素。

再設定後に教師データの土地性状との類似性が高くなったことから、評価者から見れば「安全側評価」領域となる。

危険側評価: 評価図A $>$ 評価図B

再設定型教師データを使用した場合、「評価値が低く」なった画素。

再設定後に教師データの土地性状との類似性が低くなったことから、評価者から見れば「危険側評価」領域となる。

層崩壊」, 評価図Bを「再設定型表層崩壊」とした「感度分析図(四分位法)」を示す。

具体的には、評価値を四分位点で区切り、第1四分位群(評価値下位25%)に該当する領域を「危険レベル1(危険度:弱)」、四分位範囲(評価値上位25%~75%)に該当する領域を「危険レベル2(危険度:中)」、第4四分位群(評価値上位25%)に該当する領域を「危険レベル3(危険度:強)」と定義した上で、危険箇所評価結果をグループ分けした。

図-9に、危険箇所評価結果の違いの全ての組み合わせを示す。危険レベル、評価値の大小関係に基づき、評価結果の組み合わせを12ケースに分類した。これらの12ケースに分類される画素を、対応する色に色分けして出力したものが、本研究で提案する感度分析図(四分位法)となる。

(4) 感度分析図(四分位法)の一般解釈

感度分析図(四分位法)は、危険箇所評価結果の違い

の全ての組合せ事象を網羅的に示した上で、詳細な分析を可能としている。特に、図-8(c)の領域Aのように両モデルともに「危険レベル3(危険度:強)」と判断された箇所や、領域Bのように「危険レベル1(危険度:弱)」と判断された箇所は、従来の感度分析図(差分値法)の上では1つのグループにまとめられている。この領域は、四分位法を適用したことによって、初めて分析可能となった領域である。感度分析図(四分位法)を用いれば、このような領域を顕在化できる。

図-8(c)に示した感度分析図(四分位法)の組み合わせ事象を表にまとめると表-3のようになる。感度分析図(四分位法)の優れた点として、「崩壊安全側・危険側評価」を展開できるという点が挙げられる。

a) 安全側評価領域

「安全側評価領域」は、評価値の大小関係が「現状型 $\leq$ 再設定型」となり、再設定型教師データを使用した場合に「評価値が高く」なった画素である。再設定後に教

表-4 感度分析図の標準解釈表

グループ名	ケース名	ケースの一般解釈
グループ1	ケース1	・教師データ再設定に伴って評価値が高くなり、モデル前後の危険レベルが3(危険度:高)に属する領域。 ・安全側評価: 評価図A ≤ 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が高くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が高くなったことから、評価者から見れば「安全側評価」領域となる。
	ケース2	・教師データ再設定に伴って評価値が低くなったものの、モデル前後の危険レベルが3(危険度:高)に属する領域。 ・危険側評価: 評価図A > 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が低くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が低くなったことから、評価者から見れば「危険側評価」領域となる。
	ケース3	・教師データ再設定に伴って評価値が危険レベル3(危険度:高)から危険レベル2(危険度:中)へと変化した領域。 ・危険側評価: 評価図A > 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が低くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が低くなったことから、評価者から見れば「危険側評価」領域となる。
	ケース4	・教師データ再設定に伴って評価値が危険レベル3(危険度:高)から危険レベル1(危険度:低)へと変化した領域。 ・危険側評価: 評価図A > 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が低くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が低くなったことから、評価者から見れば「危険側評価」領域となる。
グループ2	ケース5	・教師データ再設定に伴って評価値が高くなり、モデル前後の危険レベルが2(危険度:中)に属する領域。 ・安全側評価: 評価図A ≤ 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が高くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が高くなったことから、評価者から見れば「安全側評価」領域となる。
	ケース6	・教師データ再設定に伴って評価値が低くなったものの、モデル前後の危険レベルが2(危険度:中)に属する領域。 ・危険側評価: 評価図A > 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が低くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が低くなったことから、評価者から見れば「危険側評価」領域となる。
	ケース7	・教師データ再設定に伴って評価値が危険レベル2(危険度:中)から危険レベル3(危険度:高)へと変化した領域。 ・安全側評価: 評価図A < 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が高くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が高くなったことから、評価者から見れば「安全側評価」領域となる。
	ケース8	・教師データ再設定に伴って評価値が危険レベル2(危険度:中)から危険レベル1(危険度:低)へと変化した領域。 ・危険側評価: 評価図A > 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が低くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が低くなったことから、評価者から見れば「危険側評価」領域となる。
グループ3	ケース9	・教師データ再設定に伴って評価値が高くなり、モデル前後の危険レベルが1(危険度:低)に属する領域。 ・安全側評価: 評価図A ≤ 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が高くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が高くなったことから、評価者から見れば「安全側評価」領域となる。
	ケース10	・教師データ再設定に伴って評価値が低くなったものの、モデル前後の危険レベルが1(危険度:低)に属する領域。 ・危険側評価: 評価図A > 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が低くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が低くなったことから、評価者から見れば「危険側評価」領域となる。
	ケース11	・教師データ再設定に伴って評価値が危険レベル1(危険度:低)から危険レベル2(危険度:中)へと変化した領域。 ・安全側評価: 評価図A < 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が高くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が高くなったことから、評価者から見れば「安全側評価」領域となる。
	ケース12	・教師データ再設定に伴って評価値が危険レベル1(危険度:低)から危険レベル3(危険度:高)へと変化した領域。 ・安全側評価: 評価図A < 評価図B 再設定型教師データを使用した場合、「評価値が高くなった画素」。 再設定後に教師データの土地性状との類似性が高くなったことから、評価者から見れば「安全側評価」領域となる。

師データの土地性状との類似性が高くなったことから、評価者から見れば「安全側評価」領域となる。表-3 より、「ケース1, 5, 7, 9, 11, 12」の6ケースが該当する。

b) 危険側評価領域

「危険側評価領域」は、評価値の大小関係が「現状型 > 再設定型」となり、再設定型教師データを使用した場合に「評価値が低く」なった画素である。再設定後に教師データの土地性状との類似性が低くなったことから、評価者から見れば「危険側評価」領域となる。表-3 より、

「ケース2, 3, 4, 6, 8, 10」の6ケースが該当する。

このように評価値の大小関係、崩壊危険性を同時に分析するとともに、崩壊安全側・危険側評価が展開できるという点は、感度分析図(四分位法)を適用したことによって初めて可能となったことである。感度分析図(四分位法)とその一般解釈表は、実務面において現地調査時のルート選定問題や計測機器設置の計画策定時等の優先順位づけ等、技術者支援情報として役立つと言える。

さらに、本研究では表-4に示すとおり、感度分析図(四

分位法) に対する標準解釈表も取りまとめた。この標準解釈表は表-3 に示した組み合わせ事象に対する解釈内容をそのまま自然な表現で文章化したものである。

一般解釈表は危険箇所評価の際の凡例として、標準解釈表は斜面崩壊危険箇所評価結果を報告書として取りまとめる際の標準的な解釈表として利用でき、利用者の必要に応じて使い分けができる。

(5) 感度分析図 (四分位法) の分析

図-8(c)の領域 A に着目すると、赤色の画素であるケース 1 の画素が帯状に分布していることが判る、ケース 1 は、現状型よりも再設定型の評価値が高く、両モデルの危険レベルが 3 の領域であり、安全側評価領域となる画素である。この領域は上述のとおり、表層崩壊が起りやすいとされている起伏量が大きい領域と一致している(付録2)。また、崩壊の危険性が高く、安全側評価領域であることから、防災対策をする上で、最優先で調査・対策すべき領域であると判断できる。

このように「再設定型表層崩壊」の危険箇所評価図は、現状型の「表層崩壊」の評価図と比較して崩壊発生懸念領域を強調できている。感度分析図 (四分位法) を用いたことによって、教師データの代表性の向上に伴い変化した箇所を顕在化できたことから、本研究で提案する「教師データ代表性向上アルゴリズム」は潜在危険斜面を推定する上で有用であると言える。

7. まとめ

本研究の内容は、以下の 3 項目にまとめられる。

(a) 斜面崩壊危険箇所評価モデルにおいて、教師データの代表性の問題は避けては通れない検討課題となることを指摘した。この対策として、クラスター分析を通して崩壊形態が異なる現状型教師データ (表層崩壊、深層崩壊、地すべり) をグループ化し、現状型教師データと一致する教師データを抽出・再設定 (再設定型教師データ) する方法を提案するとともに、崩壊形態別に教師データの代表性が向上できるか否かについて検討した。検討の結果、崩壊形態別に教師データの代表性向上 (教師データに対する的中率向上) を確認した。

(b) この結果のもとに、さらに検討を進め、教師データ再設定前後の崩壊形態別・斜面崩壊危険箇所評価図間の違いを表示した感度分析図 (四分位法) を新たに提示した。

(c) 感度分析図とこれに対する一般解釈表を併用すれば、「崩壊安全側・危険側」評価が展開でき、技術者支援情報として寄与できることを示すとともに、本研究で提案した教師データ再設定方法の有用性を示した。

今後の課題として、初期の教師データから除去された

教師データを用いた場合の斜面崩壊危険箇所評価図上に現れる違いを分析すれば、斜面崩壊形態に関わる発見的検討が展開できる可能性がある。換言すれば、本研究で提案した教師データの再設定方法が崩壊形態分析にも役立つものとなり、興味深い研究課題になると考えている。

謝辞: 本研究は、平成 24 年度文部科学省科学研究費・挑戦的萌芽研究 (研究代表者: 小島尚人, 課題番号: 24651209) のうちの一課題として進めたものである。関係各位に記して謝意を表します。

付録

1) 対象領域における斜面崩壊形態と本論の位置付け²⁾⁴⁾

本研究の対象領域である旧山古志村は、古くから地震、降雨を誘因として「斜面崩壊」と「地すべり」が数多く発生している。この一帯の斜面崩壊は「表層崩壊」と「深層崩壊」に分けられ、深層崩壊は「地すべり」とは異なる崩壊形態として取り扱われている。

表層崩壊は、すべり面の深さは約 2m 以内と言われ、深層崩壊はそれよりも深い位置にある。これらの崩壊は、突発的に発生し、土塊が乱れる。表層崩壊に比べて、深層崩壊は規模が大きく、地質構造との関係がある。表層崩壊では、地表面の植生が崩壊抑制要因となるが、深層崩壊では、植生影響は少ないことも知られている。地すべりは、地盤が広域にわたって継続的、断続的に動いており、土塊の乱れは少なく、土塊が斜面上に留まるといった崩壊形態に相当する。

旧山古志村では、新潟中越地震を誘因として、広域地すべり地帯の中にあつて局所的に表層崩壊と深層崩壊が発生している。つまり、地すべり地帯であっても局所的にみれば、「表層崩壊」あるいは「深層崩壊」が発生しやすい土地の性状を持つ領域が存在する。旧山古志村を含めたこの一帯では、「表層崩壊、深層崩壊、地すべり」といった 3 種類の崩壊形態に分けて分析している研究報告が多い²⁾⁴⁾。

その代表的なものとして、文献2)を挙げることができ、斜面複合災害の問題とその対策の必要性が指摘されていることは知られている。

深層崩壊と表層崩壊は土塊の量も異なり、河川閉塞や道路崩壊等の被災状況も異なる。特に、大規模地すべりの場合では、陥没やせき止めにより、地すべりダム湖が形成され、その決壊問題もあり、斜面災害・減災対策もおのずと異なる。崩壊形態を定義・区分し、斜面崩壊モニタリングシステムを構築すること、さらにハザードマップを作成することは複合斜面防災上、必要課題として指摘されている²⁾。本研究の内容は、そのうちの崩壊形

図-10 起伏量

態別・斜面崩壊広域危険箇所評価, ハザードマップ作成支援に応える上で一支援策に位置付けられる。

形態を異にする斜面崩壊が同時多発的に発生した場合、崩壊地の土地の性状は多様となる。土地の性状を基準に教師データを統計的手法により分類することは意義ある検討である。斜面崩壊危険箇所評価精度は教師データに大きく依存するため、評価精度向上には教師データの代表性向上が必要不可欠と言える。

2) 斜面崩壊危険箇所評価図と「起伏量」の比較

図-10 に素因データ「起伏量」の図を示す。図-6, 図-10 より、「現状型表層崩壊」と「再設定型表層崩壊」の危険箇所評価図において、起伏量が比較的大きい領域において評価値が高く、起伏量が比較的小さい領域において評価値が低くなる傾向があることが判る。

一般的に表層崩壊は起伏の大きい斜面で発生しやすい傾向があると言われているため^{2),3)}, 図-6 の危険箇所評価図は、この表層崩壊の土地の性状における特徴を反映していると言える。

本研究の対象領域は広域にわたっており、使用している斜面崩壊危険箇所評価モデルには多変量解析 (SEM) を使用している。そのため、報告書の内容と相反する結

果となっている箇所も存在する。しかし、評価図と起伏量図を比較する限り、報告書の内容が反映されている箇所が確認できる。

各素因と評価結果との個別の一致率を求めることによって、各崩壊形態との関係の更なる分析を実施することも可能である。しかし、対象領域が広域にわたり、評価別・ランク結果と素因別・カテゴリ数が多いため、「素因別・カテゴリと評価別・ランク間」の一致率分析の課題として、本研究の範囲には含めず、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Chang-Jo F. Chung, Hirohito Kojima and Andrea G. Fabbri : Stability analysis of prediction models applied to landslide hazard mapping, *Applied Geomorphology, Theory and Practice*, John Wiley & Sons Publication, pp.3-19, 2002.
- 2) 地盤工学委員会：新潟県中越地震における「斜面複合災害」- 総合的斜面工学からの検討 -, 土木学会平成 18 年度全国大会研究討論会資料, pp.1-15, 2005.
- 3) 砂防学会：新潟県中越地震土砂災害調査研究委員会第一回委員会資料, 砂防学会, 全 21 頁, 2005.
- 4) 日本地すべり学会：2004 年新潟県中越地震による斜面災害調査報告, 日本地すべり学会誌, VI-41, pp.83-86, 2005.
- 5) 上田尚一：クラスター分析, 朝倉書店, pp.75-92, 2003.
- 6) 宮本定明：クラスター分析入門—ファジィクラスタリングの理論と応用, 森北出版, pp.13-26, 1999.
- 7) Chung, C.F. and Fabbri, A.G.: Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.65, No.12, pp.1389-1399, 1999.
- 8) 小島尚人, 北村良介, 大林成行：シラス自然斜面の崩壊誘因推定支援を目的とした衛星熱赤外域情報の活用方法の提案, 土木学会論文集, No.749, VI-61, pp.99-110, 2003.
- 9) 豊田秀樹, 竹内啓 監修：SAS による共分散構造分析, 東京大学出版会, pp.99-152, 1992.
- 10) Hoyle, R.H.(Ed.): Structural Equation Modeling, Concepts, Issues, and applications, *SAGE Publications*, 1995.
- 11) 小島尚人, 大林成行, 青木太：共分散構造分析法を導入した斜面崩壊危険箇所評価アルゴリズムの構築, 土木学会論文集, No.714/VI-56, pp.7-93, 2002.
- 12) 樗木武：土木計画学, 森北出版, B5 判, 全 254 頁, 2001.

(2012. 10. 18 受付)

AN ALGORITHM FOR IMPROVING REPRESENTATIVENESS OF TRAINING DATA SETS IN HAZARD ZONATION OF DIFFERENT TYPES OF SIMULTANEOUS SLOPE FAILURES AND ITS PRACTICAL APPLICATION

Tomoya YOSHIDA, Ryo NOZAKI and Hirohito KOJIMA

For better estimation of hazardous areas affected by different types of simultaneous slope failures, this paper proposes an algorithm for improving representativeness of training data sets (i.e., past occurrences of slope failures) for producing susceptibility maps of slope failures. The spatial quantitative models generally elucidate the relationship between training data sets and causal factors (e.g. topography, surface geology, soil, vegetation, slope, aspect, drainage, etc.). The proposed algorithm resamples the matched pixels between original groups of past slope failures (i.e., surface slope failures, deep-seated slope failures, landslides) and classified three groups by cluster analysis for all pixels corresponding to those slope failures. For all cases of three types of slope failures, the improvement of success rates with respect to resampled training data sets was confirmed. Furthermore, the differences between produced susceptibility maps by using original and resampled training data sets are delineated on difference maps which are effective in evaluating hazardous areas affected by different types of simultaneous slope failures.