

地形・地質的に不安定な条件を有する 自然斜面の簡易な抽出方法

西金 佑一郎* 川越 健*
浦越 拓野* 石原 朋和*

Easy Selection of Unstable Slopes Based on Topographical and Geological Conditions

Yuichiro NISHIKANE Takeshi KAWAGOE
Takuya URAKOSHI Tomokazu ISHIHARA

The occurrence of the land slide is affected by topographical and geological conditions. These conditions have been reported in previous studies. However, the selection of unstable slopes based on these conditions needs professional knowledge and detailed surveys. Therefore, the authors considered a method for selecting slopes in danger of a land slide easily based on topographical and geological conditions. First, the authors organized topographical and geological conditions involved in land slides showed in previous studies. Second, the authors obtained topographical and geological conditions in areas where a number of land slides recently occurred, and selected conditions involved in land slides using statistical methods. Finally, the authors suggested points for the selection of slopes with these conditions and proposed a method of selecting unstable slopes easily.

キーワード：斜面崩壊，地形・地質条件，図面判読，現地調査，数量化2類解析，項目表

1. はじめに

斜面災害の発生には、降雨や地震などの誘因とともに素因である地形・地質条件が大きく影響することから、防災施設投資の計画立案に際し危険箇所抽出を行うためには、まず地形・地質的な観点から斜面災害に対して不安定な条件を有する斜面を抽出する必要がある。そのためには、斜面災害と関連する地形や地質を航空写真や地形図、地質図などから判読（以下、「図面判読」と呼ぶ。）したり、図面からは判読できない微地形や湧水状況などを現地調査により把握したりする必要がある。斜面災害に関わる地形・地質条件は過去の災害事例などをもとにした調査、研究から様々な条件が明らかにされている¹⁾。また、図面判読や現地調査においてそれらの条件を把握するための着目点が多く提案されている²⁾。しかし、それらの着目点は専門技術者による定性的な解釈を必要とするものが多く、鉄道の斜面防災に係わる実務者が的確かつ効率的に抽出、評価できるものとは必ずしもなっていない。さらに、線路から離れた自然斜面で発生する斜面崩壊の影響を鉄道施設が受ける場合があるため、広域を効率的に調査する必要もある。そこで、斜面災害に関して地形・地質的に不安定な条件を有する自然斜面を広い範囲から簡易に抽出する手法について検討した。なお、

* 防災技術研究部 地質研究室

斜面災害の形態を斜面崩壊、地すべり、土石流、落石に区分して検討したが、本報告ではこれらの中から斜面崩壊に関する内容を述べる。

本報告では、文献調査および近年に崩壊が多発した地域を対象にした図面判読、現地調査により斜面崩壊に関わる地形・地質的な条件を明らかにし、それらの条件を有する不安定な自然斜面を抽出する手法について提案した内容を紹介する。

2. 既存文献の調査

斜面災害に関わる地形・地質的な条件は過去の災害事例の研究などから様々なものが報告されている¹⁾。それらは斜面災害に対して地形・地質的に不安定な条件を把握する上で有用と考えられる。そこで、本研究ではまず既往文献に基づいて斜面崩壊に関わる地形・地質の特徴を抽出した。さらに、抽出した地形・地質の特徴を以下の2点に注目して整理した。

・地形・地質的な特徴の取得方法

主に図面判読から把握できる特徴と、主に現地調査でなければ把握できない特徴に大別した。

・斜面崩壊との関係

それぞれの特徴と斜面崩壊との関係について、斜面崩壊が発生する原因となりやすい条件を「素

特集：防災技術

因」，斜面崩壊が発生する前に認められる斜面の変状などを「兆候」，現象が発生した後に認められる状態を「結果」として分類した。

表1に抽出した特徴を整理した結果の一部を示す。素因や結果を示す特徴は，図面判読で得られるものと現地調査で確認できるものが同程度の数であった。また，図面判読と現地調査の両方で得られる特徴もある。兆候を示す特徴は現地調査によって取得できる場合が多く，代表的なものとしては地層境界からの湧水，斜面表層のクリーブなどがある。

表1 既往文献による斜面崩壊に関わる特徴の例

		斜面崩壊との関係		
		素因	兆候	結果
取得方法	図面判読	・傾斜30°以上 ・遷急線	・二重山稜	・斜面下部の扇状の緩斜面 ・斜面下部の地形的な高まり
	現地調査	・風化土の分布 ・流れ盤	・湧水 ・クリーブ	・谷型を呈する ・凹形を呈する

* 図面判読と現地調査の両方で取得できる特徴がある。

** 素因，兆候，結果の複数を示す特徴がある。

3. 図面判読に基づく調査

2章で抽出した地形・地質的な特徴およびその取得方法を確認するために現地調査を行った。ここでは地震および豪雨によって斜面崩壊が多発した地域を対象に図面判読を行い，崩壊箇所と未崩壊箇所の地形・地質に関する情報を取得した。さらに，それらの情報を用いた数量化2類解析により，崩壊箇所と未崩壊箇所との判別に寄与する程度が大きい地形・地質的な条件を抽出した。

3.1 調査地域

調査地域は過去に斜面崩壊が多発し，かつ地質が異なる2地域を選んだ。対象とした地域は新潟県中越地域および山口県防府地域における，それぞれ5km×5kmの範囲である。中越地域では2004年7月に発生した「平成16年7月新潟・福島豪雨」，および同年10月に発生した「平成16年新潟県中越地震」により斜面崩壊および地すべりが多発した³⁾。防府地域では，2009年7月に発生した「平成21年7月中国・九州北部豪雨」により斜面崩壊と土石流が多発した⁴⁾。

中越地域の調査範囲は標高300～450mの丘陵地である。この丘陵地の地質の大部分は中新世～鮮新世の砂岩泥岩互層からなる。一方，防府地域の調査範囲は標高250～400m程度の山地であり，地質は主に白亜紀後期の花崗岩である。

3.2 調査方法

3.2.1 崩壊箇所および未崩壊箇所の抽出

両地域において崩壊箇所および未崩壊箇所を抽出した。3.1で示した災害の発生前後に撮影された航空写真を判読し，この間に崩壊が発生した箇所を前述の豪雨または地震によって崩壊した箇所と見なした。抽出した崩壊箇所は中越地域で106箇所，防府地域では193箇所である。

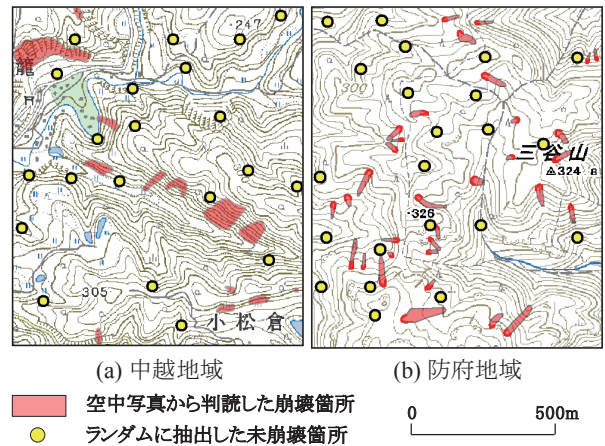


図1 崩壊箇所と未崩壊箇所の抽出結果

* 全体から一部を抜粋

未崩壊箇所は地形図上の座標に乱数を発生させ，崩壊箇所，旧崩壊箇所（本研究で対象とした災害発生前の航空写真判読で認められた崩壊地）および人工構造物や池などを除き，無作為に各々の地域で400点を抽出した。中越地域における崩壊箇所と未崩壊箇所の位置を図1(a)に，防府地域のそれらを図1(b)に示す。

3.2.2 地形・地質情報の取得

航空写真判読で抽出した崩壊箇所を25,000分の1の地形図および既往の地質図に転記し，崩壊箇所および未崩壊箇所が位置する斜面の地形・地質情報を判読した。なお，崩壊箇所の地形情報は崩壊が発生する前に作成された地形図から判読した。判読した地形に関する情報は，鈴木⁵⁾，田村⁶⁾で示される斜面の地形区分を基に以下の項目を選定した。それぞれの項目における分類を図2に示す。

- ・斜面の垂直断面形 (図2(a))
- ・斜面の水平断面形 (図2(b))
- ・斜面の傾斜
- ・斜面の垂直方向の位置 (図2(c))

また，地質に関しては一般的な地質図から判読可能な以下の項目に関して情報を取得した。

- ・岩種
- ・向斜軸・背斜軸からの距離
- ・斜面の傾斜方向と地質構造の方向との関係 (図3)

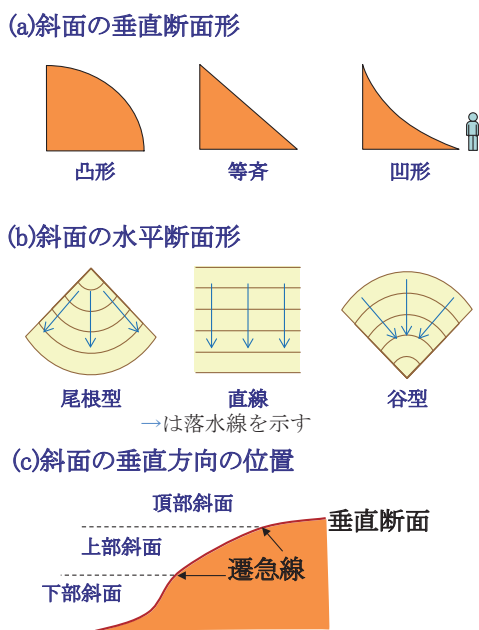


図2 地形情報の分類

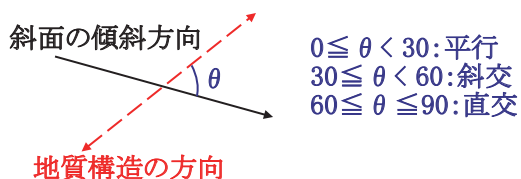


図3 斜面の傾斜方向と地質構造の方向との関係

崩壊箇所の地形・地質に関する情報は崩壊頭部が位置する斜面の情報を取得した。未崩壊箇所は点のデータであることから、それが位置する周辺斜面の情報を取得した。なお、防府地域では層理面の方向や褶曲構造などの地質構造に関わる情報が地質図では認められないため、これらに関する情報は判読対象外とした。

3.2.3 数量化2類解析

図面判読から抽出した崩壊箇所と未崩壊箇所の地形・地質に関する情報を用いて、数量化2類解析を行い、崩壊箇所と未崩壊箇所を判別する項目を抽出した。ここでは、崩壊地の有無（崩壊箇所、未崩壊箇所）を目的変数とし、地形・地質に関する項目を説明変数とした。なお、数量化2類解析の手法ならびに目的変数と説明変数の相関、説明変数相互の相関の評価基準は菅⁷⁾、菅・藤越⁸⁾によった。

3.3 斜面崩壊に関わる項目の抽出

崩壊箇所と未崩壊箇所を判別する項目を抽出するための数量化2類解析を行う前に、解析に用いる説明変数の選択^{7) 8)}を行った。その結果、説明変数と目的変数の相関や説明変数相互の相関の基準を満たさないことから、中越地域では「岩種」、「背斜軸からの距離」を、防

(a) 中越地域のカテゴリースコア

地形・地質的特徴		該当数*	カテゴリースコア				
項目	カテゴリ		-1	-0.5	0	0.5	1
斜面の垂直断面形状	凸形	185 (83)					
	等斉	237 (22)					
	凹形	84 (1)					
斜面の水平断面形状	尾根型	95 (21)					
	直線	308 (48)					
	谷型	103 (37)					
斜面の傾斜θ (°)	θ < 20	63 (3)					
	20 ≤ θ < 30	141 (8)					
	30 ≤ θ < 40	139 (26)					
	40 ≤ θ	163 (69)					
斜面の垂直方向の位置	頂部斜面	57 (3)					
	上部斜面	322 (87)					
	下部斜面	127 (16)					
向斜軸からの距離L(m)	L < 300	114 (37)					
	300 ≤ L < 600	102 (23)					
	600 ≤ L	290 (46)					
斜面の傾斜方向と地質構造の方向との関係	直交	163 (46)					
	斜交	145 (32)					
	平行	198 (28)					

(b) 防府地域のカテゴリースコア

地形・地質的特徴		該当数*	カテゴリースコア				
項目	カテゴリ		-1	-0.5	0	0.5	1
斜面の垂直断面形状	凸形	161 (75)					
	等斉	302 (84)					
	凹形	130 (34)					
斜面の水平断面形状	尾根型	122 (4)					
	直線	221 (54)					
	谷型	250 (135)					
斜面の垂直方向の位置	頂部斜面	71 (7)					
	上部斜面	346 (146)					
	下部斜面	176 (40)					

*全箇所での該当数(うち崩壊箇所での該当数)

図4 数量化2類解析の結果

府地域では「岩種」、「斜面の傾斜」を除外した。これらの説明変数を除外して数量化2類解析を行った結果を図4に示す。解析によって得られるカテゴリースコアが大きいカテゴリほど、崩壊箇所と未崩壊箇所の判別に寄与する度合いが強いことを意味する。カテゴリースコアの大きさから、中越地域においてそれらの判別に強く寄与する条件は、「垂直断面形状が凸形」、「水平断面形状が谷型」、「斜面の傾斜が40°以上」であった。一方、防府地域においては「垂直断面形状が凸形」および「水平断面形状が谷型」が強く寄与する条件であった。また、分析の精度を表す判別の中率は中越地域で84.6%、防府地域で74.0%であった。菅⁹⁾による区分を基にすれば、中越地域での判別の中率は分析精度がやや良いとされる区分にあることから、数量化2類解析で用いた項目は妥当であったと考えられる。防府地域での判別の中率は中越地域よりもやや小さい値となっているが、菅・藤越⁸⁾の基準でやや良いと区分される75%に近いことからおおむね妥当な項目の選択がされていると考えられる。

4. 抽出結果の検証と着目する項目の整理

4.1 文献調査結果の確認

3章で抽出した崩壊箇所、未崩壊箇所において、2章の既往文献調査で得られた地形・地質的な特徴の有無を

表2 中越地域・防府地域における現地調査結果

評価対象領域	斜面崩壊に関する地形・地質の特徴	崩壊箇所					未崩壊箇所				
		確認箇所数		該当箇所数		該当率	確認箇所数		該当箇所数		該当率
		中越	防府	中越	防府		中越	防府	中越	防府	
斜面全体	傾斜が30°以上である	44	5	43	3	93.9	36	2	22	2	63.2
	垂直断面形が凹形を呈する	25	4	3	0	10.3	34	2	6	0	16.7
	水平断面形が谷型を呈する	40	5	20	5	55.6	34	2	7	1	22.2
崩壊源	樹木の根曲がり認められる	8	4	5	0	41.7	17	2	9	0	47.4
	遷急線が認められる	42	4	37	3	87.0	35	2	8	1	24.3
	急崖を呈する露岩斜面が認められる	11	0	4	0	36.4	35	2	4	0	10.8
	湧水が認められる	22	4	10	1	42.3	15	1	1	0	6.3
	亀裂が認められる	5	4	0	0	0.0	9	0	0	0	0.0
	表層クリープまたは岩盤クリープが認められる	2	3	1	0	20.0	9	0	1	0	11.1
	移動域・堆積域	急斜面の下方に扇状の緩斜面が広がる	23	5	10	3	46.4	25	2	1	0
	急崖下部に地形的な高まりが認められる	21	5	1	0	3.8	26	2	0	0	0.0

確認するために現地調査を行った。現地調査ではそれぞれの箇所について、道路などから全体を概観する調査を主に行い、必要に応じて斜面内を踏査した。

調査した箇所は、中越地域では崩壊箇所が44箇所、未崩壊箇所が36箇所、防府地域では崩壊箇所が5箇所、未崩壊箇所が2箇所である。調査結果を表2に示す。

表2中の該当率は(1)式により求めた値である。

$$\text{該当率 (\%)} = (\text{特徴が認められた箇所数} / \text{特徴の有無が調査できた箇所数}) \times 100 \quad (1)$$

植生の状況や崩壊箇所、未崩壊箇所の立地条件などの問題から当該箇所に到達できない場合があったため、調査箇所ごとに2章で整理した特徴の有無について全ては確認できなかった。

各特徴の該当率について、崩壊箇所と未崩壊箇所との有意な差の有無を検討するため、独立性の検定を実施した。標本数が小さいデータを扱うため、検定にはフィッシャーの正確確率法¹⁰⁾を用いた。有意水準を0.05として検定を実施した結果、「傾斜が30°以上である」、「水平断面形が谷型を呈する」、「遷急線が認められる」、「湧水が認められる」、「急崖下部に扇状の緩斜面が認められる」の5つの特徴に有意な差が認められた。

4.2 図面判読結果の確認

現地踏査の結果、3章における図面判読項目の内「垂直断面形が凸形」とは遷急線が認められること、「水平断面形が谷型」とは集水地形を呈することであることを確認した。3.3で示した図面判読で得られる情報の内、崩壊箇所と未崩壊箇所との判別に強く寄与する項目と崩壊箇所との関係(中越地域の例)を図5に示す。

斜面の傾斜については、文献調査の結果では「傾斜が30°以上」が斜面崩壊に関わる特徴として抽出されたが、中越地域の判読結果からは崩壊箇所と未崩壊箇所が判別される斜面の傾斜は40°以上であった。そのため斜面

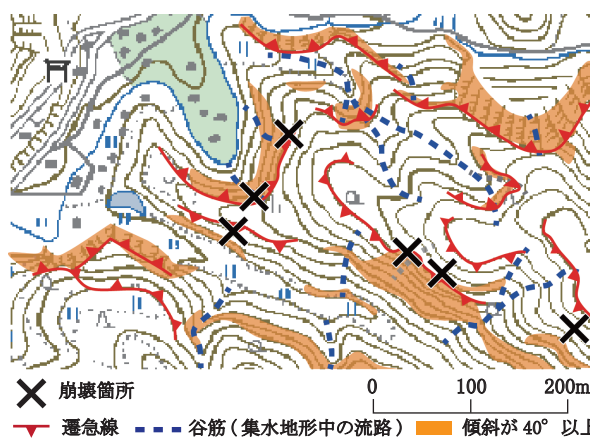


図5 現地調査結果(中越地域の例)

の傾斜が30°以上の場合は不安定な条件を有し、傾斜が40°以上の場合にはより不安定な条件であると考えられる。一方、防府地域での斜面崩壊は、斜面の傾斜が30°以上の下部斜面(溪岸斜面)、傾斜が30°以下の頂部斜面付近(図2(c)参照)で多数発生していた。下部斜面での崩壊箇所では風化した花崗岩類の岩盤が露出している場合が多く認められた。頂部斜面付近の崩壊箇所の崩壊面にはまさ土が認められ、また崩壊箇所から下方へかけてガリーなどの水による浸食地形が発達しているのが確認できた。一般的に花崗岩類が分布する地域では頂部斜面付近の傾斜が緩い箇所にはまさ土が厚く分布し、防府地域では「平成21年7月中国・九州北部豪雨」の際に、まさ土が厚く分布する頂部斜面付近に相当する斜面でも斜面崩壊が多く発生したと考えられる。このことから、防府地域では傾斜の比較的緩い斜面においても斜面崩壊が多く発生したため、「斜面の傾斜」が数量化2類解析に用いる説明変数の選択時に崩壊箇所と関連性が低い項目として除外されたと考えられる。

4.3 調査時に着目する項目表の作成

自然斜面のうち斜面崩壊の危険性がある不安定な条件の箇所を地形・地質の観点から抽出するために必要な項

目を整理する。

2章の既往文献調査で得られた斜面崩壊に関する地形・地質的な特徴は、不安定な条件を有する斜面を抽出する際に有用であると考えられる。そのためこれらの特徴は、調査時に「着目する項目」とした。

図面判読で取得できる項目の内、3章で示した崩壊箇所と未崩壊箇所との判別に強く寄与する項目は、地形・地質的に特に不安定な条件であるといえることから、「垂直断面形が凸形（遷急線が認められる）」、「水平断面形が谷型（集水地形を呈する）」は崩壊の発生の素因として図面判読で必ず着目すべき項目であると考えられる。よってこれらの項目を「特に着目すべき項目」とした。さらに、傾斜については4.2で述べたように傾斜が40°以上の条件がより不安定な条件と考えられる。傾斜については、地形図の精度を考慮すると現地調査での確認が必要と考えられるため、図面判読での「傾斜が30°以上である」の項目に加えて、現地調査で「傾斜が40°以上である」を確認する必要があると考えられる。

上記の項目の他に、4.1で述べたように、「湧水が認められる」と「急崖下方に扇状の緩斜面が認められる」が崩壊箇所と未崩壊箇所との判別に有効である。この内、「湧水が認められる」は斜面崩壊の兆候を示す項目であり、「急崖下方に扇状の緩斜面が認められる」は斜面崩壊の結果を示す項目である。また、崩壊箇所では未崩壊箇所と比べて湧水が認められる場合が非常に多いこと（表2）、不安定な条件の斜面を抽出する項目としては兆候を示す項目が重要であることから「湧水が認められる」を「特に着目すべき項目」の一つとして取り上げる必要があると考える。図6に「特に着目すべき項目」が該当する斜面の概念を示す。

表3に調査時に着目する特徴を項目表として整理した結果を示す。これらの項目は図面判読で取得可能な項目と現地調査によらなければ取得できない項目があることから、項目表は「主に地形図・地質図から読み取る項目（項目表A）」と「主に現地調査で観察する項目（項目表B）」に分けた。

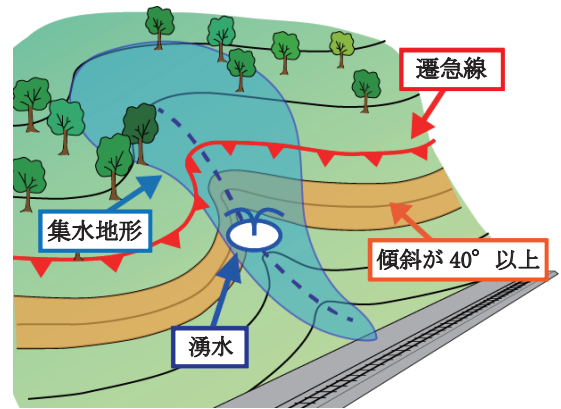


図6 特に着目すべき項目

4.4 不安定な条件を有する自然斜面の抽出方法

ここでは、4.3で提案した項目表（案）を用いた斜面崩壊に関わる地形・地質的に不安定な条件を有する斜面を抽出する手順について、一般的な図面判読や現地確認などの調査方法を踏まえて検討した。本報告で提案する手順の概要は以下の通りである（図7）。なお、この手順は詳細な調査や点検を実施することが必要な斜面を抽出することを目的としており、斜面崩壊の危険性をランク付けすること目的としたものではない。

(1) 地形図・地質図の判読（項目表Aの活用）

既存の地形図、地質図などにより鉄道沿線の自然斜面ならびに鉄道施設に流入する沢の斜面を対象として、表3の項目表A中の「特に着目すべき項目」や他の項目の該当の有無を確認する。

(2) 不安定な条件にある斜面の抽出

項目表Aの「特に着目すべき項目」の複数が該当した斜面やその他の項目において数多くの項目が該当する斜面は地形・地質的に不安定な条件にあると判断する。

(3) 現地調査

上記(2)で抽出した斜面について、現地調査を行う。現地調査では項目表Aの結果を確認し、現地で確認する項目（表3の項目表B）について調査をする。なお、本研究で実施した現地調査では、4.1で記述したように、

表3 調査時に着目する項目表（案）

項目表 A	項目表 B
主に地形図・地質図から読み取る項目 (現地調査でも観察する必要がある)	主に現地調査で観察する項目
◎ 遷急線が認められる	◎ 傾斜が40°以上である
◎ 集水地形を呈する	◎ 湧水が認められる
傾斜が30°以上である	樹木の根曲がり認められる
急斜面の下方に緩斜面が分布する	土砂や軟岩が分布する
地質構造が流れ盤構造を呈する	表層土のクリープが認められる
	斜面に亀裂が認められる

項目表中の◎は「特に着目すべき項目」

特集：防災技術

それぞれの斜面を見通せる範囲での観察を主に実施したことから、例えば線路から見える範囲で沿線斜面を目視観察する場合でも今回提案した項目表を活用できると考えられる。

(4) 詳細な調査を必要とする斜面の抽出

上記 (3) の調査でも多くの項目が該当した斜面は、より詳細な調査や点検を実施することが必要な、不安定な条件を有する自然斜面としてとらえることができる。

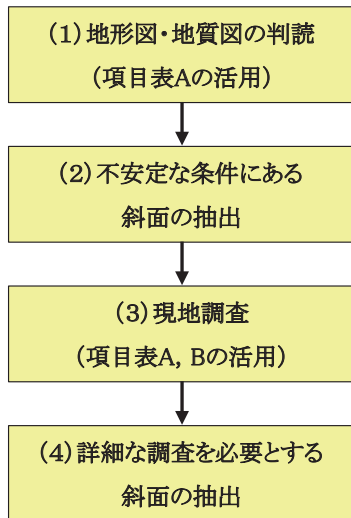


図7 斜面崩壊に関わる地質・地形的に不安定な条件を有する斜面の抽出手順 (案)

5. まとめ

本研究では、文献調査および近年に崩壊が多発した地域を対象にした図面判読、現地調査により、斜面崩壊に関わる地形・地質的な条件を抽出した。さらに、それらの条件を有する不安定な自然斜面を抽出する手法について提案した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 既往文献などから斜面崩壊に関わる地形・地質的な特徴を抽出し、それらの特徴を取得方法（図面判読、現地調査）と斜面崩壊との関係（素因、兆候、結果）に着目して整理した。その結果、素因や結果を示す特徴は、図面判読で得られるものと現地調査で確認できるものが同程度の数であることが分かった。また、兆候に関する特徴の多くは現地調査で得られることが分かった。
- (2) 図面判読によって崩壊箇所と未崩壊箇所の地形・地質に関する情報を取得した。それらの情報について

数量化2類解析を行い、崩壊箇所と未崩壊箇所の判別に強く寄与する地形・地質的な条件を抽出した。その結果、判別に強く寄与する条件は、「垂直断面形が凸形」、「水平断面形が谷型」、「斜面の傾斜が40°以上」であった。

- (3) 斜面崩壊に関する地形・地質的に不安定な条件を、現地調査結果を基に整理した結果、「遷急線が認められる」、「集水地形を呈する」、「傾斜が40°以上」、「湧水が認められる」が「特に着目すべき項目」であることが分かった。このことを踏まえ、図面判読で取得可能な項目と現地調査により取得する項目に分けた項目表（案）を作成し、その活用方法を提案した。

文 献

- 1) たとえば、鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門 第1巻 読図の基礎，古今書院，200p，1997
- 2) たとえば、(財) 鉄道総合技術研究所：航空写真判読基準カード・斜面管理図作成マニュアル，(財) 鉄道総合技術研究所，2006
- 3) たとえば、八木浩司・山崎孝成・守岩勉・渥美賢拓：2004年新潟県中越地震にともなう地すべり・崩壊分布—その特徴と詳細判読事例—，応用地質，Vol.46，No.3，pp.145-152，2005
- 4) たとえば、若月強・石澤岳昂・植竹政樹・川田真也：2009年7月防府市・山口市豪雨災害において花崗岩斜面に発生した土石流と斜面崩壊の特徴，防災科学技術研究所主要災害調査，No.44，pp.39-51，2010
- 5) 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門第3巻 段丘・丘陵・山地，古今書院，388p，2000
- 6) 田村俊和：微地形分類と地形発達—谷頭部斜面を中心に—，恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編 水文地形学—山地の水循環と地形変化の相互作用，古今書院，pp.177-189，1996
- 7) 菅民郎：多変量解析の実践（下），現代数学社，257p，1993
- 8) 菅民郎・藤越康祝：質的データの判別分析数量化2類，現代数学社，264p，2011
- 9) 菅民郎：ホントにやさしい多変量統計分析，現代数学社，326p，2000
- 10) 池田央（編）：統計ガイドブック，新曜社，239p，1989