

AHP法を用いた14人の熟練地質技術者による不安定斜面の評価

Evaluation of Unstable Slope using AHP Method by 14 Experienced Geological Engineers

木村 隆行¹⁾, 八野 祐二²⁾, 吉川 猛³⁾, 伊達 裕樹⁴⁾, 松井 彰弘⁵⁾, 西垣 誠⁶⁾

1) Takayuki KIMURA, 技師長, (株)エイト日本技術開発, kimura-ta@ej-hds.co.jp

2) Yuji HACHINO, 部長, 基礎地盤コンサルタンツ(株), hachino.yuji@kiso.co.jp

3) Takeshi YOSHIKAWA, 副部長, 基礎地盤コンサルタンツ(株), yoshikawa.takeshi@kiso.co.jp

4) Yuuki DATE, 課長, (株)ウエスコ, y-date@wesco.co.jp

5) Akihiro MATSUI, 主査, 中電技術コンサルタント(株), matsui@ccenet.co.jp

6) Makoto NISHIGAKI, 理事長, 統合物性モデル技術研究組合, n_makoto@imtera.or.jp

現在 AHP 法を用いた様々な地すべり危険度評価手法が研究されているが、地すべり特性が地域で異なるため、地域毎に AHP 評価項目を設定する必要がある。本論文では、中国地方吉備高原面を開析する古生層の斜面において、地理院地図 GSIMaps の地形図と傾斜量図で不安定斜面を抽出するとともに、14人の熟練地質技術者により AHP 法を用いて評価点を設定した。その評価点は現況安全率を設定できる可能性があり、地すべり地形発達過程に適用すると、地すべり活性期が最も評価点が高くなる傾向が認められた。また衛星 SAR による絶対値平均変動量とも相関があったので報告する。

キーワード: AHP 法, SAR, 安全率, 不安定斜面

(IGC: B-09, C-01, E-06)

1. はじめに

現在の急傾斜地崩壊危険区域や砂防指定地、地すべり防止区域の範囲外でも、多くの不安定斜面が分布し、その適正な評価手法は、まだ確立されていない。木村ら(2023)¹⁾は、中国地方吉備高原面を開析する古生層の斜面において、公開されている地理院地図 GSIMaps の地形図と傾斜量図で不安定斜面を抽出するとともに、14人の熟練地質技術者により AHP 項目評価を行い、評価点を設定し、リスク評価の1次スクリーニングとして6段階の評価点分類を行った。

本論文では、その AHP 評価項目の中分類で評価点の低い「リニアメント遭遇数」が、熟練地質技術者においても設定に差が大きいこと、大規模な地すべりには断層破碎帯関与がしばしばみられるが、小規模な地すべりには関与が明確でないこと、リニアメント=断層破碎帯ではないことなど、熟練地質技術者との議論により、「リニアメント遭遇数」を削除して AHP 評価点を再構築した。また、地すべり地形発達過程に当てはめて、発達段階での評価点の変化を検討した。その検討過程を以下の手順で報告する。(a)国土地理院 GSIMaps 傾斜量図による不安定斜面の設定、(b)熟練地質技術者14人の AHP 法による斜面安定度の評価、(c)地すべり地形発達過程の安定度の評価、(d)衛星 SAR 干渉解析による変位速度の評価。

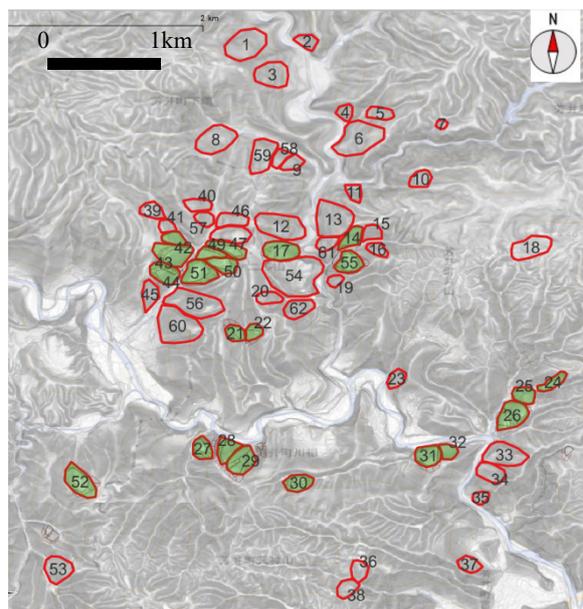


図-1 「不安定斜面」の分布

(国土地理院 GSIMaps 傾斜量図による)

● 地すべり地形分布図³⁾の地すべり

2. 傾斜量図による不安定斜面の設定

中国地方の地形は、吉備高原面に代表される小起伏面と、それらを開析したV字谷の開析斜面に大別できる。

その開析斜面には、地すべりに準じる不安定斜面が多く分布するが、典型的な地すべり地形は少なく、多くが地すべりに準じるような凸型斜面か凹型斜面などからなる。それらは地形図のみからは判読が困難ではあるが、熟練地質技術者が傾斜量図や空中写真判読を併用することで、推定可能な地すべり性の不安定地形である。当論文では、準地すべり地形ではあるが地すべり指定地ではなく、災害予備群の「動いていない地すべり地形」を「不安定斜面」と定義する。

研究区域は岡山県南西部で、東西 4km 南北 5km の区域で、地質は脆弱で砕屑質な古生層（泥岩、変輝緑岩など）の夜久野オフィオライトが分布している。山頂は標高 300~400m の吉備高原で、河川が 150~250m 程度下刻し、開析斜面を形成し、その斜面に多くの地すべり地形に準じる「不安定斜面」が分布している。

図-1 は、木村が空中写真判読を併用しながら、国土地理院地図 GISMaps の傾斜量図で、尾根地や窪地など含む変形地形を経験に基づき主観的に「地すべり地形」を判読し、5 人の熟練地質技術者で確認し設定した「不安定斜面」62 箇所分布図である¹²⁾。この分布図には、防災科学技術研究所の地すべり地形分布図の 24 箇所 (J-SHISMap : 2 箇所はブロック統合)³⁾を含んでいる。ただし地すべり防止指定地はない。

3. AHP 法による斜面安定度の評価

3.1 AHP 法による階層構造について

階層分析法 AHP 法 (Analytic Hierarchy Process) は、意思決定の分析法で、主観的判断とシステムアプローチとの両面から決定する意思決定手法である。1970 年代にトーマス・L・サーティによって創始され、数学と心理学がベースになっている。階層分析法の主な工程は、「(1) 階層構造の構築」、「(2) 一対比較」、「(3) ウェイトの計算」、「(4) 総合評価値の計算」である。多数の要素を 2 個毎に比較していくことで、どちらに重みがあるかを感覚的に判断し、その感覚的判断を数値化し、重みづけを行い、総合評価点で表現する手法である。

中国地方では河野ら(2020)⁴⁾が地形や地質などの項目による AHP 法を適用し、防災科学技術研究所の地すべり地形を評価し、妥当性を検証している。今回は不安定斜面の評価を想定し、北海道立総合研究機構・地質研究所ら(2012)⁵⁾による「地すべり活動度評価手法マニュアル(案)」の項目に準じたが、現地にあわせて修正した。この AHP 法は木村ら(2023)¹²⁾で一度まとめているが、その成果で関連の小さい「リニアメント遭遇数」の中分類(小分類 4 項目)を削除し、再度、階層構造を構築したのが図-2 になる。その階層構造は、大分類 3 項目中分類 7 項目・小分類 28 項目になる。

図-2 及び表-1, 4 の大分類の項目は北海道立総合研究機構・地質研究所ら(2012)⁵⁾による「地すべり活動度評価

手法マニュアル(案)」の大分類と同じである。

大分類「地すべりの発達段階」を地形に反映した場合、中分類「地すべり地形明瞭度」になり、その発達過程を小分類で「形状初期」「形状ややあり」「形状明確」「形状解体」の 4 段階で区分し、図-2 及び表-3, 6 に示した。

大分類「地すべり活動の新しさ」を、地すべり地の位置関係で上部「滑落崖領域」、中間域「移動体内微地形鮮明度」、下部「移動体舌端部」に 3 区分したのが中分類で、図-2 及び表-2, 5 に示す。その中分類の地形発達段階に応じて 4 区分したものが、それぞれの小分類になる。

大分類「地すべりのポテンシャル」は移動の運動エネルギーに影響する勾配や応力開放に関する項目で、中分類は 3 区分した。中分類「地すべり全体開放度」は、下部や側部拘束などの侵食による開放度で、その程度を 4 区分し小分類とした。中分類「移動体下部の勾配」は下部の傾斜が急なほど不安定であるので、その勾配により 4 区分し小分類とした。中分類「末端の侵食状況」では河川攻撃斜面の有無などによる 4 区分し小分類とした。

「一対比較」は 14 人の熟練地質技術者により、9 段階 (5~1/5) の幅で行った。一対の項目に対し、地すべりの不安定化に関与する程度を比較して、右寄りか左寄りか、その程度を感覚的に判断した。その「一対比較」の例として表-1 は大分類、表-2 は中分類、表-3 は小分類を示す。

表-1 の「地すべり活動の新しさ」と「地すべりのポテンシャル」の対比では、やや分散していた。表-2 の「滑落崖領域」と「移動体舌端部」の対比では、近傍のふた山に分かれた。また「滑落崖領域」と「移動体内微地形鮮明度」の対比では、ややバラツキがみられた。表-3 では「地すべり形状初期」と「地すべり形状明確」の対比および、「地すべり地形ややあり」と「地すべり形状解体」の対比で、ピークの最大頻度と中間値にわずかなずれがあった。必ずしも最大頻度が中間値とはならなかったが、近似しており、意思決定として中間値を採用した。

この 14 人の評価では、「斜面下部に関する項目」および「地すべりのポテンシャルの項目」においてバラつく傾向があり、その「下部の安定度」を重視するか、「全体の安定バランス」を重視するかで、見解に相違があるように見られた。その差は熟練技術者の経験の差が反映された可能性がある。ただ、今回は中間値を採用した結果、両者の見解をある程度反映し、「下部の安定度」も、「全体の安定バランス」もある程度考慮した集計になった可能性がある。試算で「下部の安定度」に重みを置いた配点の場合も、結果の考察に影響を及ぼさない程度のばらつきで、中間値を見解の集約値と考え、妥当と判断した。

「ウェイトの計算」の例として大分類を表-4 に、中分類を表-5 に、小分類を表-6 に示す。大分類で中分類の評価点を決定し、中分類の値を最大値として小分類の評価点を決定する。例えば、表-6 の小分類では、比率の列は 1 対比較による対比で 5~1/5 となる。積は比率の積の合計で、「地すべり形状初期」は $1 \times 0.5 \times 0.33 \times 1 = 0.17$ となる。

大分類 階層 1	中分類 階層 2	小分類 階層 3				
【I】 地すべりの 発達段階 (13.96)	(a) 地すべり 地形 明瞭度 (13.96)					
		(1) 地すべり形状初期 (4.33)	(2) 地すべり形状 ややあり(8.06)	(3) 地すべり形状明確 (13.96)	(4) 地すべり形状解体 (4.32)	
		(b) 滑落崖 領域 (21.12)				
			(1) 滑落崖のみ (12.16)	(2) 背後段差あり (21.12)	(3) 集水地形勾配化 (6.33)	(4) 地表従順化 (4.48)
【II】 地すべり 活動の 新しさ (52.79)	(c) 移動体内 微地形 鮮明度 (21.11)					
		(1) 段差地形点在 (11.34)	(2) 明瞭段差地形多数 (21.11)	(3) 小凹凸微地形点在 (6.55)	(4) 小凹凸微地形不明 瞭(3.52)	
	(d) 移動体 舌端部 (10.56)					
		(1) 前面崩壊急斜面あり (10.56)	(2) 凹凸面あり (5.13)	(3) 移動体のみ (3.28)	(4) 地表の従順化 (1.95)	
【III】 地すべりの ポテンシャル (33.25)	(e) 地すべり 全体 開放度 (7.99)					
		(1) 下部のみ開放 (2.74)	(2) 側部一部および下部 開放(沢など) (4.75)	(3) 側部および下部開放 (沢など) (7.99)	(4) 下部閉塞 (ボトルネック) (1.63)	
	(f) 移動体 下部 の勾配 (6.98)					
		(1) 移動体平均勾配より 著しく急 (6.98)	(2) 移動体平均勾配より やや急(4.15)	(3) 移動体平均勾配と 同じ(2.40)	(4) 移動体平均勾配より ゆるい (1.42)	
	(g) 末端の 浸食状況 (18.28)					
		(1) 河川攻撃斜面 (18.28)	(2) 河川または海岸線 (8.64)	(3) 沢に面する (4.64)	(4) 沢に面していない (2.54)	

(数字) はAHP評価点数

図-2 階層構造と AHP 評価点

表-1 一対比較・大分類

大分類 階層1	左の項目が圧倒的に重要					右の項目が圧倒的に重要								
	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	右の項目				
地すべりの発達段階	0	0	0	0	0	5	8	1	0	地すべりの活動の新しさ				
地すべりの活動の新しさ	0	0	0	2	2	2	7	1	0	地すべりのポテンシャル				
地すべりの活動の新しさ	0	2	3	4	3	2	0	0	0	地すべりのポテンシャル				
中間値														

表-2 一対比較・中分類 (地すべり活動の新しさ)

中分類 階層2 地すべり活動の新しさ	左の項目が圧倒的に重要					右の項目が圧倒的に重要								
	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	右の項目				
滑落崖領域	0	2	3	1	3	2	2	0	0	移動体内微地形鮮度				
移動体内微地形鮮度	0	1	5	2	4	1	0	0	0	移動体舌端部				
移動体内微地形鮮度	0	0	5	4	0	2	2	0	0	移動体舌端部				
中間値														

表-3 一対比較・小分類 (地すべり地形明瞭度)

小分類 階層3 地すべり地形明瞭度	左の項目が圧倒的に重要					右の項目が圧倒的に重要								
	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	右の項目				
地すべり形状初期	0	0	1	1	3	5	4	0	0	地すべり形状ややあり				
地すべり形状中期	0	0	0	0	1	5	4	2	2	地すべり形状明確				
地すべり形状後期	0	0	3	4	5	1	1	0	0	地すべり形状解体				
地すべり形状ややあり	0	0	0	1	2	5	2	2	2	地すべり形状明確				
地すべり形状ややあり	0	0	5	4	3	1	1	0	0	地すべり形状解体				
地すべり形状明確	2	3	4	4	1	0	0	0	0	地すべり形状解体				
中間値														

幾何平均は個数が4個なので、積^(1/4)で積から幾何平均に戻す(0.17^(1/4)=0.64)。この幾何平均の合計が4.53なので、4.53を1とする比率を出す。中分類の評価点が13.96なので、最も比率の大きい「地すべり形状明確」0.46を13.96として、他の小分類の項目を比率に応じて点数を案分し、AHP評価点を求めた。小分類の最大評価点は中分類の評価点と等しく、その合計が100点になるように案分した。

図-2に示すAHP評価点数は地すべり不安定の程度を示すので、小分類の最大値を中分類毎に合計すると100点になり最も不安定となり、小分類の最小値を中分類毎に合計すると19.86点になり最も安定ということになる。つまり、19.86から100の間で「不安定斜面」の安定度を評価することになる。

3.2 AHP法の評価点と安定度評価

現地62箇所の「不安定斜面」の評価点の頻度分布は、図-3のように中間40~50点を中心に分布した。現地は現状で確定変動以上の著しく移動している地すべりはなく、地すべり防止区域でもない。そのため、「不安定斜面」とはいえ、道路土工などで設定されている「現在活動していない風化岩地すべり」は現状の安全率Fs=1.05~1.15⁶⁾に相当すると考えられる。

表-4 ウエイトの計算・大分類

大分類 階層1	地すべりの発達段階	地すべりの活動の新しさ	地すべりのポテンシャル	積	幾何平均	比率	AHP評価点数
地すべりの発達段階	1	0.33	0.33	0.11	0.48	0.14	13.96
地すべりの活動の新しさ	3	1	2	6.00	1.82	0.53	52.79
地すべりのポテンシャル	3	0.50	1	1.50	1.14	0.33	33.25
				合計	3.44	1.00	100.00

表-5 ウエイトの計算・中分類 (地すべり活動の新しさ)

中分類 階層2 地すべり活動の新しさ	滑落崖領域	移動体内微地形鮮度	移動体舌端部	積	幾何平均	比率	AHP評価点数
滑落崖領域	1	1	2	2.00	1.26	0.40	21.12
移動体内微地形鮮度	1	1	2	2.00	1.26	0.40	21.11
移動体舌端部	0.5	0.5	1	0.25	0.63	0.20	10.56
				合計	3.15	1.00	52.79

表-6 ウエイトの計算・小分類 (地すべり地形明瞭度)

小分類 階層3 地すべり地形明瞭度	地すべり形状初期	地すべり形状中期	地すべり形状後期	地すべり形状ややあり	積	幾何平均	比率	AHP評価点数
地すべり形状初期	1	0.5	0.33	1.00	0.17	0.64	0.14	4.33
地すべり形状中期	2	1	0.5	2	2.00	1.19	0.26	8.06
地すべり形状後期	3	2	1	3	18.00	2.06	0.46	13.96
地すべり形状ややあり	1	0.50	0.33	1	0.17	0.64	0.14	4.32
				合計	4.53	1.00	30.67	

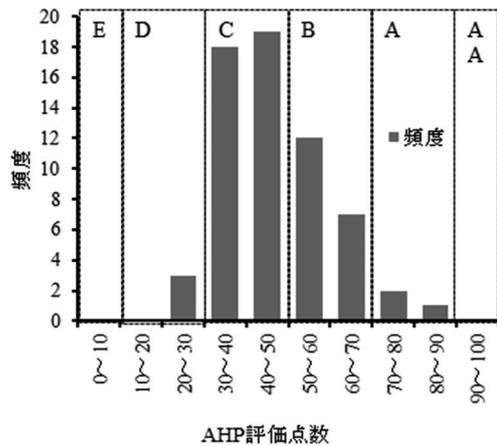


図-3 AHP評価点数の頻度分布

「動いていない地すべり：Fs=1.05~1.15」の評価は、高速道路調査会(1985)⁸⁾においてFs=1.02~1.21のデータ分布の中でほとんどがFs=1.05~1.15に分布していたことによる。現地データもほぼ同様にFs=1.0~1.20の分布のなかで、Fs=1.05~1.15にほとんどが分布すると考えると、表-6のようになる。その場合、AHP評価点数が70点で

表-5 AHP評価点数区分と安全率 F_s 案

AHP評価点数A	安定度	目安としてのAHP評価点数と F_s 案
~10	E: かなり安定	-----10 $F_s=1.20$
10~30	D: 多少安定	-----30 $F_s=1.15$
30~50	C: 僅かに安定	-----50 $F_s=1.10$
50~70	B: 僅かに不安定	-----70 $F_s=1.05$
70~90	A: 多少不安定	-----90 $F_s=1.00$
90~	AA: かなり不安定	

$F_s=1.05$, 30点で $F_s=1.15$ と考え、式(1)が導かれる。式(2)は稲垣ら(2005)⁷⁾による開析度による F_s で、式(3)は高速道路調査会(1985)⁸⁾による式を地形要素のみで再構成した F_s の修正式になる。

AHP評価点数による安全率

$$F_s = (90 - A) / 400 + 1 \quad (1)$$

A: AHP評価点数

稲垣ら(2005)⁷⁾の開析度 $D(\%)$ による安全率

$$F_s = 1 + 0.007 \times D \quad (2)$$

高速道路調査会(1985)⁸⁾の地すべり地形安定度評価の地形項目限定の修正式

$$F_s = 1.148 + T + D + S \pm 0.05 \quad (3)$$

T: 地質年代

- 0.035: 第四紀, 新第三紀
- +0.089: 古第三紀, 中生代
- 0.038: 古生代

D: 断面斜面形

- 0.029: 凸型斜面
- +0.047: 凹型斜面
- +0.119: 直型斜面
- 0.061: 複合斜面

S: 遷急線

- +0.033: 遷急線あり
- 0.106: 遷急線なし

図-4はAHP評価点数と高速道路調査会(1985)⁸⁾の式(3)に現地の不安定地形を当てはめた F_s の分布図と、AHPによる式(1)の F_s の分布図である。式(3)の F_s 分布のほぼ中央にAHPの F_s 式(1)が分布し、明確な相関があるとはいえないものの、AHPが大きくなると F_s が小さくなる調和的な分布を示している。図-5はAHP評価点数と稲垣ら(2005)⁷⁾の開析度による式(2)の F_s の分布図と、AHPによる式(1)の F_s の分布図である。式(2)の F_s 分布の中央部にAHPの F_s 式(1)が分布し、明確な相関があるとはいえないものの、AHPが大きくなると F_s がやや小さくなるわずかに調和的な分布を示している。式(2)の分布の下位にAHPの F_s 式(1)が位置している理由は、開析度の設定がやや大きめになったためと推定される。これらから、現在明確には動いていない「不安定斜面」に対し、AHP評価点数と式(1)の安全率 F_s は、式(3)などと調和的

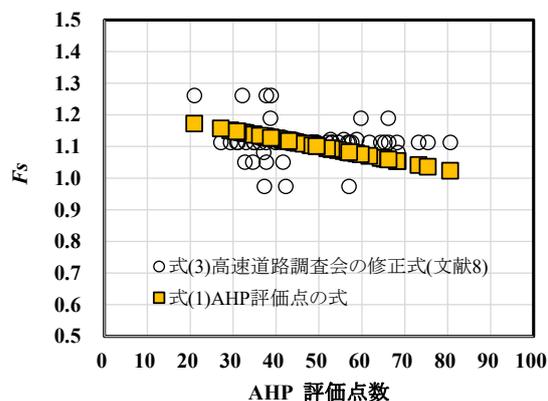


図-4 高速道路調査会(1985)⁸⁾の修正式による F_s とAHP評価点数

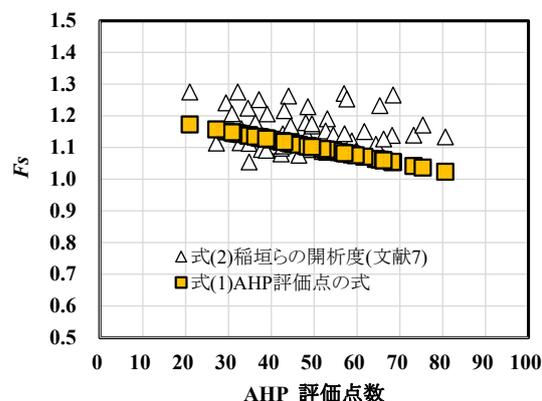


図-5 稲垣ら(2005)⁷⁾の開析度による F_s とAHP評価点数

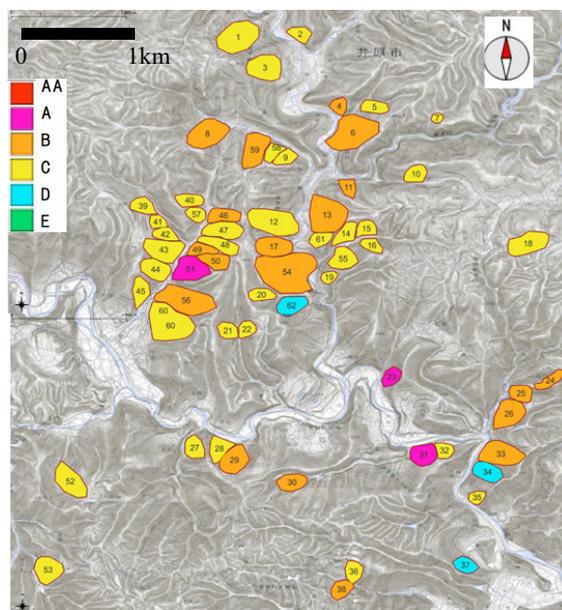


図-6 不安定斜面安定度分布図

であり、目安としては、概ね妥当と考えられる。

3.3 不安定斜面の安定度区分図

表-5で区分した62箇所の不安定斜面の安定度区分図を図-6に示した。この区分ではAAとEはなく、Aが3カ所、Dが3カ所で、大半がBとCであった。

地すべり地形発達期		地すべり初期		地すべり中期		地すべり活性期		地すべり後期		地すべり解体期	
地すべり地形発達段階		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
【I】 地すべりの 発達段階	(a) 地すべり地形 明瞭度 (13.96)										
		(1)地すべり形状初期 (4.33)		(2)地すべり形状ややあり (8.06)		(3)地すべり形状明確 (13.96)			(4)地すべり形状解体 (4.32)		
【II】 地すべり 活動の 新しさ	(b) 滑落崖領域 (21.12)										
		(3)集水地形勾配化 (6.33)		(1)滑落崖のみ (12.16)		(2)背後段差あり (21.12)			(3)集水地形勾配化 (6.33)	(4)地表後傾化 (4.48)	
	(c) 移動体内 微地形鮮明 度 (21.11)										
		(4)小凹凸微地形不明 瞭(3.51)		(1)段差地形点在 (11.34)		(2)明瞭段差地形多数 (21.11)			(3)小凹凸微地形点在 (6.55)	(4)小凹凸微地形不明 瞭(3.51)	
	(d) 移動体 舌端部 (10.56)										
		(1)前面前端急斜面あり (10.56)		(2)凹凸面あり (5.13)		(3)移動体のみ (3.28)			(4)地表の後傾化 (1.95)		
【III】 地すべりの ポテン シャル	(e) 地すべり 全体開放 度 (7.99)										
		(1)下部のみ開放 (2.74)		(2)前部一部および下部開 放(沢など)(4.75)		(3)前部および下部開放 (沢など)(7.99)					
	(f) 移動体下 部の勾配 (6.98)										
		(1)移動体平均勾配より 著しく急(6.98)		(2)移動体平均勾配より やや急(4.15)		(3)移動体平均勾配と同 じ(2.40)			(4)移動体平均勾配より ゆるい(1.42)		
(a)地すべり地形明瞭度		4.33	6.20	8.06	11.01	13.96	10.75	7.53	4.32	4.32	
(b)滑落崖領域		6.33	9.25	12.16	16.64	21.12	13.73	6.33	5.41	4.48	
(c)移動体内微地形鮮明度		3.52	7.43	11.34	16.23	21.11	13.83	6.55	5.04	3.52	
(d)移動体舌端部		10.56	10.56	7.85	5.13	4.21	3.28	2.62	1.95	1.95	
(e)地すべり全体開放度		2.74	3.41	4.08	4.75	6.37	7.99	7.99	7.99	7.99	
(f)移動体下部の勾配		6.98	6.98	5.57	4.15	3.28	2.40	1.91	1.42	1.42	
AHP合計		34.46	43.82	49.05	57.91	70.04	51.97	32.93	26.12	23.68	
補正(河川に面する+8.64)		43.10	52.46	57.69	66.55	78.68	60.61	41.57	34.76	32.32	
AHPによるFs		1.12	1.09	1.08	1.06	1.03	1.07	1.12	1.14	1.14	

図-7 地すべり地形発達過程

図-6 で示すように、緊急度の高い AA ランクの不安定斜面はないものの、注目すべき斜面の選別ができ、不安定斜面の調査順位などを選定するうえで、かなり有効な手法になることが考えられる。A ランクの位置は、今回の結果では、周辺箇所集中しておらず、点在している結果となった。

また、図-6 は、安全率の順位での整理も可能であり、調査対策の順位決定にも役立ち、地質リスクの判定にも有効と考えられる。

4. 地すべり地形発達過程の安定度の評価

図-2 で示した各階層 3 の小分類の区分は、地すべり発達過程の順位とほぼ調和的だが、必ずしも一致しない。そのため、地すべり地形発達史を考慮した区分として細分したものを図-7 に示した。地すべり発達期を初期、中期、活性期、後期、解体期の 5 期に区分し、更に 9 段階に細分した。図-7 での小分類の評価点がない箇所は、左右の平均値またはどちらかの値を採用した。

図-7 の配置按分について、図-2 で示した(1)~(4)の順位通りに地すべり初期、中期、活性期、後期に案分したのが「地すべり地形明瞭度」と「移動体舌端部」「移動体下部の勾配」で、その細分の 1~8 については、他の地形バランスを考慮し配置した。

「滑落崖領域」は、地すべり初期では図-2 で示した「(3)集水地形勾配化」程度の変状はあると判断し、その後、滑落崖の発達に伴い(1)~(4)を地すべり中期、活性期、後期、解体期に案分し、細分の位置は他の地形バランスを考慮し配置した。

「移動体内微地形鮮明度」は、地すべり初期では図-2 で示した変状の少ない「(4)小凹凸微地形不明瞭」程度と判断し、その後の地すべりの発達に伴い(1)~(4)を地すべり中期、活性期、後期、解体期に案分し、細分の位置は他の地形バランスを考慮し配置した。

「地すべり全体開放度」は、図-2 の「(4)下部閉塞(ボトルネック)」のみが地すべり発達過程とは別の地形要素であるため除外し、地すべりの発達に伴い(1)~(3)を地すべり初期、中期、活性期に案分し、細分の位置は他の地形バランスを考慮し配置した。いずれも全体の地形バラ

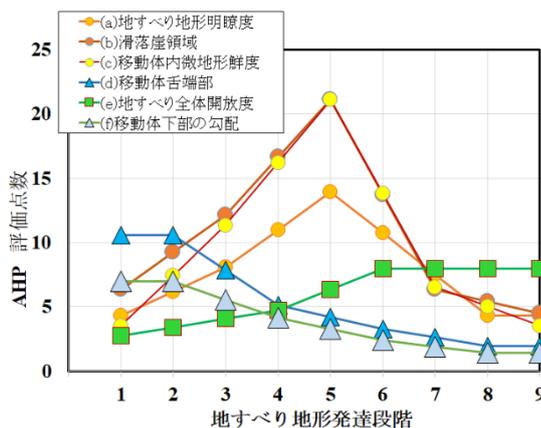


図-8 地すべり発達段階と個別項目の AHP 評価点数

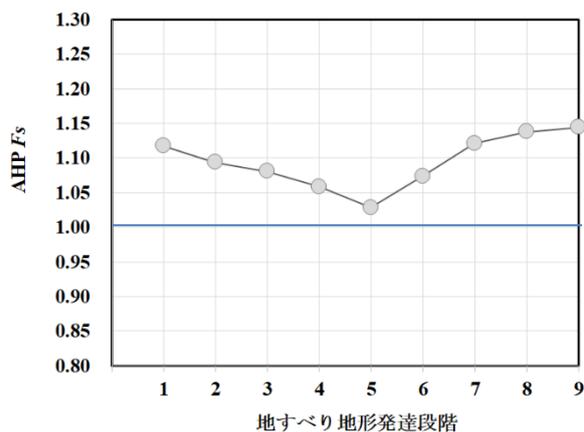


図-9 地すべり発達段階の合計 AHP・Fs

を考慮しながら配置し、熟練地質技術者 5 人と確認した。

図-7 の AHP 評価点の各段階の分布図を図-8 に示した。また図-9 の F_s は、「末端の侵食状況」が地すべり発達過程に対応しないため除外していたが、算定のため河川に面するとして「(2)河川または海岸線」に対応させ+8.64 とし追加合計し、 F_s を試算した。

図-8 に示す中分類の「(a)地すべり地形明瞭度」「(b)滑落崖領域」「(c)移動体内微地形鮮度」については地すべり活性期の段階 5 が最も AHP 評価点数が高かった。これは、滑落崖を含む地すべり内部地形については、地すべり活性期の中間時期が最も不安定という判断があると考えられる。

図-8 で示す中分類の「(d)移動体舌端部」「(f)移動体下部の勾配」については地すべり初期の段階 1~2 が最も高く、「(e)地すべり全体開放度」については地すべり後期~解体期の段階 7~9 が高くなる傾向を示した。つまり、地すべり初期では舌端部に不安定な特徴があり、全体の開放度は徐々に不安定化していく傾向となっている。

それらの合計の評価点の安全率は図-9 となり、地すべり活性期の段階 5 が最も評価点数が高く、安全率が低い結果となっている。その値は大きく 3 種類（舌端部地形変化、地すべり地内地形変化、全体の拘束力）のバランスで評価していることが考えられ、地すべり地形発達過程では複雑に相互影響し、単一の関係ではないことが推定された。

5. 衛星 SAR 干渉解析による変位速度の評価

衛星 SAR による地すべり変位については、佐藤ら(2012)¹⁰⁾、石塚ら(2017)¹¹⁾、清澤ら(2020)¹²⁾などの事例において、適用が検証されている。ゆるく平坦で広い地すべりについては入射角の条件が良く、効果的な予測ツールとして期待されている。また、条件が不利な谷部の不安定斜面においても適用が可能であれば、広く展開が可能になると考えられる。そのため、吉備高原を 150~

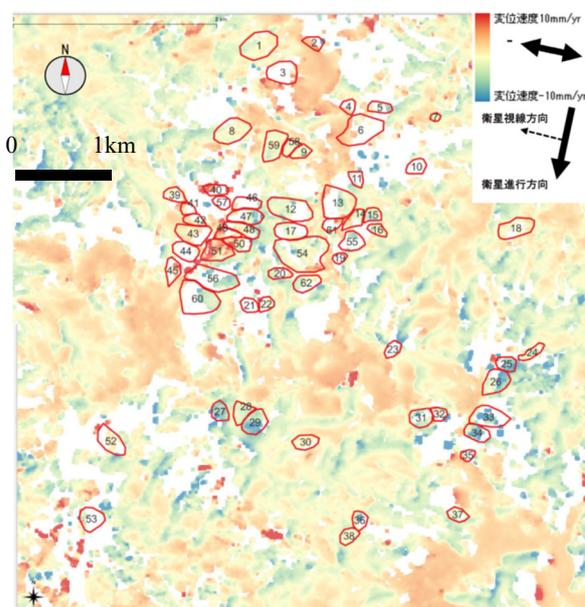


図-10 変位速度分布図と不安定斜面

250m 下刻して形成されている開析斜面の不安定斜面に対し適用し検討した。

データは ALOS-2/PALSAR-2 の 2015/9/2~2022/5/18 までの 7 年間の 15 データとし、解析範囲は前述の岡山県南西部（緯度 34 度 36 分、経度 133 度 21 分~緯度 34 度 42 分、経度 133 度 27 分）を交点とした四角とした。

解析方法は、SarScape(sarmap 社)を使用し、SBAS (Small Baseline InSar) 時系列解析を行った。補正は精密軌道補正、大気補正、高さ補正 (PS 地点自動補正) とし、干渉処理の解析グリッドは 10m×10m とした。また SarScape による自動取得で GCP (Ground Control Points) を求め、7 年間の平均変位速度 Δv (mm/y) を表示した。その分布図を図-10 に示す。

図-10 では、衛星軌道がおおよそ北から南に移動しながら西方向に照射している関係から、東向き斜面が+側、西向き斜面が-側に変位する傾向がみられ、全体の変位速度分布と不安定斜面の変位速度に有意な差は認められない。この分布図では不安定斜面を区分することはできな

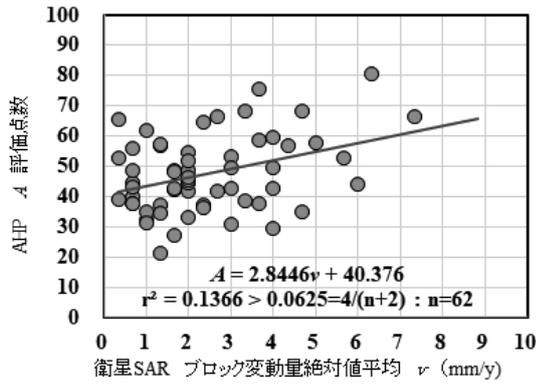


図-11 全ブロック「うごめき量」とAHP 評価点数

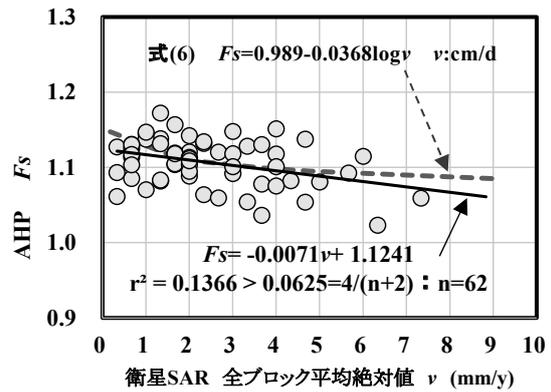


図-12 全ブロック「うごめき量」とAHP Fs

いものの、色の濃い変位速度部分も認められ、現在動いていないと判断される微細な斜面変動を捉えている可能性も考えられた。

地すべり方向は衛星入射方向に対しバラバラであるので、この観測変位は地すべりの「うごめき量」と考え、方向性を除外した絶対値で整理する方法を考案した。

不安定斜面の上中下の3地点の変位移動速度の絶対値を合計平均した全体平均 $|\Delta v|$ と AHP 評価点との相関を図-11 に示した。相関の判定は、データ数に依存するため $r^2 > 4/(n+2)$ の時に相関があると判定できる¹³⁾。データ数 $n=62$ であるので、 $r^2=0.1366 > 0.0625=4/(n+2)$ となり、相関はある程度あると判断された。

同様の整理を $AHPFs$ に対し行ったのが図-12 である。その相関式は図-13 の式(6)のラインと近似していることが判る。

菅原(2003)¹⁴⁾はクリープ性地すべりによる移動速度と安全率のデータをまとめ、式(4)を示した。また、べき乗式の式(5)を提案し、その定数 A と n は下記となる。

$$Fs = 1.0 - 0.1 \log v \pm 0.05 \quad (4)$$

ここで、 Fs : 安全率、 v : 移動速度(cm/d)

$$Fs = 1/(v/A)^{1/n} \quad (5)$$

ここで、定数 $A=1.01$ 、 $n=22.7$

今回、そのデータに他のデータ¹⁵⁾⁻¹⁹⁾を加え、衛星 SAR による「うごめき量」も追加しまとめると、図-13 に示すように「うごめき量」は、ちょうど国内のデータの延長線上に分布していた。この国内のデータの相関式は下式となる。

$$Fs = 0.989 - 0.0368 \log v \quad (6)$$

$$Fs = 1/(v/A)^{1/n} \quad (7)$$

ここで、定数 $A=1.01$ 、 $n=62.5$

図-13 において、菅原(2003)¹⁴⁾の式(4)は国外のデータが主体で、国内のデータのみをまとめた式(6)と大きく勾配が異なる結果となった。ただし、菅原の式も今回の式も $Fs=1$ 、 $v=1\text{cm/d}$ 付近を通過している点が共通で、べき乗式では定数 $A=1.01$ が同じであった。

それらの式の比較のため、藤原(1994)²⁰⁾による伸縮計の移動速度の指標と、丸山ら(1994)²¹⁾による警戒避難の管理基準値に対し、安全率で比較したのが、表-6 及び図

表-6 移動速度と各種基準対比表

藤原 ²⁰⁾ 地すべり区分	警戒避難 管理基準 ²¹⁾	移動量 v (cm/d)	国内の 式(6) Fs	菅原 の式(4) Fs
変動C 潜在		0.002	1.09	1.27
変動B 準確定		0.01	1.06	1.20
変動A 確定	注意	0.1	1.03	1.10
	警戒	1	0.99	1.00
	避難	4.8	0.96	0.93
	立ち入り禁止	24	0.94	0.86

表-7 各データの c 及び ϕ

項目	斜面 角度	c (kN/m ²)	ϕ (°)
Selborne(Cooper1998)菅原(2003) ¹⁴⁾	26.6	不明	不明
Salledes(Pouget1985)菅原(2003) ¹⁴⁾	10	0	10
St Barbara 鉱山(Deia1980)菅原(2003) ¹⁴⁾	11	0	11
Jezerka 鉱山(Rozsypai1988)菅原(2003) ¹⁴⁾	15	不明	不明
Smreka 鉱山(Mandzic 1988)菅原(2003) ¹⁴⁾	30	20	22
(2D)Peltonダム公園 $V=1; Fs=1$ (Cornforth1991)菅原(2003) ¹⁴⁾	5	不明	不明
(3D)Peltonダム公園 $V=1; Fs=1$ (Cornforth1991)菅原(2003) ¹⁴⁾	不明	不明	不明
国道328号線(堀1993)菅原(2003) ¹⁴⁾	30	不明	不明
高速道路八戸線(藤野1989)菅原(2003) ¹⁴⁾	不明	20	9.5
和歌山四万十(宇都ら2011) ¹⁵⁾	不明	25	17.9
長野第三紀凝灰岩(石田ら2011) ¹⁶⁾	不明	8.5	23.5
群馬崩積土(若井ら2021) ¹⁷⁾	不明	5	15
コスタニエック(濱崎ら2016) ¹⁸⁾ 【ダンパーモデル】	不明	0	9
三波川帯(木村2022) ¹⁹⁾	35	不明	不明
古生層 SAR(木村ら2023) ¹⁹⁾ 【AHP法+SAR】	30	不明	不明

-13 である。

表-6 では変動 C の潜在変動に対し、式(4)では $Fs=1.20 \sim 1.27$ で 1.2 以上を示し安定となってしまうが、式(6)では $Fs=1.06 \sim 1.09$ であり 1.2 未満で不安定な状況と判断できる。菅原(2003)¹⁴⁾の式が潜在～準確定変動レベルの移動速度において、安全率が $Fs=1.2$ 以上の高すぎる Fs になるのは、相関式の勾配が大きいことによる。その理由は表-7 で示すように、 $c=0$ の強度設定のデータに大きく左右されているためと考えられる。 $c=0$ の場合、地下水変動に敏感に反応し、水位低下に応じて安全率が c がある場合より大きくなるためと推定される。日本での適用は、逆算法で c と ϕ の両方を考慮するため、式(6)の方が、日本の安全率の実情に合う設定になっていると考えられる。なお、濱崎ら(2016)¹⁸⁾のデータが $c=0$ でも勾配が小

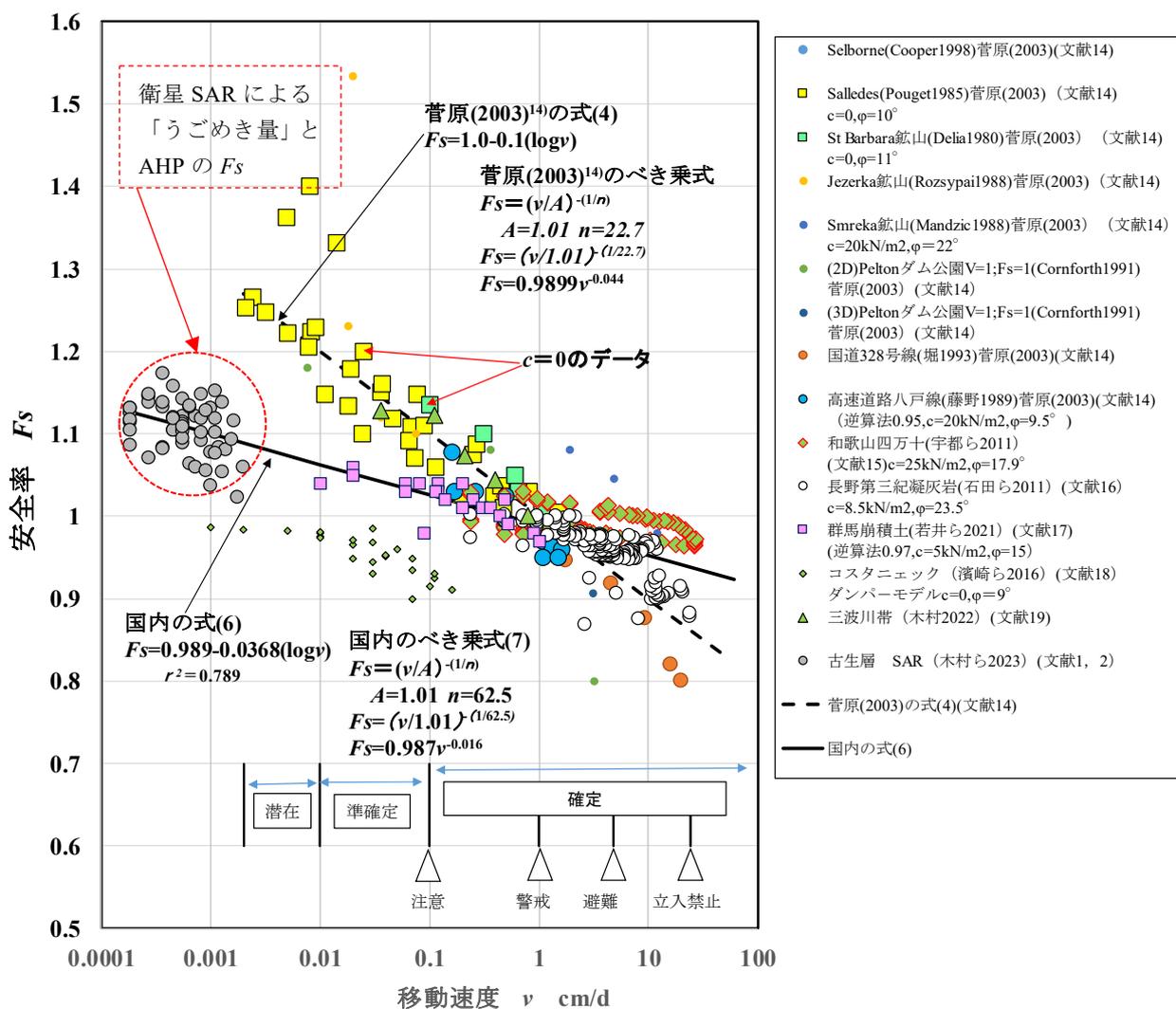


図-13 移動速度と安全率の相関

さいのは、ダンパーモデルの解析のためと推定される。

6. おわりに

今回の研究成果として下記の事項を確認できた。

- (1) 考案した不安定斜面のAHP法の評価点は不安定斜面の順位付けに有効である。
- (2) AHP法の F_s は、旧日本道路公団の地形による F_s と調和的であり、比較的妥当と考えられる。
- (3) AHP評価点は地すべり地形発達過程において変化し、中間の地すべり活性期に最も高くなる傾向が認められた。
- (4) AHP評価点は衛星SARによる変位速度の絶対値とも相関傾向が認められた。
- (5) AHP F_s とSAR変位速度絶対値は、動いていない地すべりの微細な変動をとらえ、既存の国内地すべりの移動速度と安全率の相関上に分布し、式(6)が得られた。

これら不安定斜面は現在も微細に動き、通常では把握できないレベルだが、将来の地形改変や地震や豪雨など、不安化要因の増加により顕在化する可能性が考えられる。AHP法はその事前評価として有効なスクリーニング手法と考えられる。ただ、14人のAHP法「対比較」であるため、より多数の熟練地質技術者や、項目の適正化や改良により、より精度の高い評価手法になる可能性がある。また、今後の課題として、以下の点が考えられ、検討を進める予定である。

- (1) 他の地域や地形でのAHP法の適用。
- (2) AHP法の項目の再検討や修正。
- (3) 「動いている地すべり」でのAHP法適用の検討。
- (4) 熟練地質技術者の多数の参加による高精度化。
- (5) 推定スベリ層厚との安定度評価。
- (6) 衛星SARの絶対値評価での全体分布図評価。
- (7) 移動速度と安全率のデータ蓄積と相関評価。
- (8) AIによる自動識別・自動評価機能の導入。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、助成を賜りました八雲環境科学振興財団に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 木村隆行, 工藤健雄, 八野祐二, 吉川猛, 井上真, 今西将文, 伊達裕樹, 笹井友司, 松井章弘: 衛星 SAR や地形データを活用した不安定斜面分布図 (新ハザードマップ), 公益財団法人八雲環境科学振興財団研究レポート集, 第 24 号, pp.46-52, 2023.
- 2) 木村隆行, 工藤健雄, 八野祐二, 吉川猛, 井上真, 今西将文, 伊達裕樹, 笹井友司, 松井章弘, 西垣誠: AHP 法を用いた地形学的要素による不安定斜面の分類, 第 58 回地盤工学研究発表会, pp.13-8-3-05, 2023.
- 3) 国立研究開発法人防災科学技術研究所: J-SHIS/Map 地震ハザードステーション, 地すべり地形, <https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>, (参照 2022.11.30).
- 4) 河野勝宣, 前田寛之: 熱水変質岩の点荷強さを考慮した AHP 法に基づくランドスライドハザードマッピングの試み-北海道黄壁沢-シケレベンベツ川地すべり地域の例-, 地すべり, Vol.50, No.3, pp.19-27, 2013.
- 5) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構・地質研究所, 北見工業大学, 明治コンサルタント, 構研エンジニアリング, 防災地質工業, テレリサーチ, 地盤工房: 地すべり活動度評価手法マニュアル (案), pp.1-7, 2013.
- 6) 社団法人日本道路協会: 道路土工, 切土工・斜面安定工指針, pp.402-403, 2009.
- 7) 稲垣秀輝, 大久保拓郎, 長谷川修一, 矢田部龍一: 古期地すべりの安定性, 土と基礎, 7月号, pp.17-19, 2005.
- 8) (財)高速道路調査会: 地すべり地形の安定度評価に関する研究報告書(日本道路公団委託), pp.5-199, 1985.
- 9) 一般財団法人リモート・センシング技術センター: 画像製品・サービス一覧, 光学衛星, SAR 衛星, <https://www.restec.or.jp/solution/index.html>, (参照 2022.12.25).
- 10) 佐藤浩, 岡谷隆基, 小荒井衛, 鈴木啓, 飛田幹男, 矢来博司, 関口辰夫: SAR 干渉画像を用いた地すべり地表変動の検出について-山形月山周辺を事例にして-, 地すべり, Vol.49, No.2, pp.61-67, 2012.
- 11) 石塚師也, 藤井幸泰, 金子誠, 高橋亨, 松岡俊文: 干渉 SAR 解析によって推定した地表変動と地すべりブロックとの関連-白山甚之助谷周辺の地すべりを例にして-, 応用地質, 第 57 巻, 第 6 号, pp.289-294, 2017.
- 12) 清澤友弥, 佐藤浩: 長野県小谷村における PALSAR-2 干渉解析による地すべり性地表変動の検出, 地すべり, Vol.57, No.1, pp.24-29, 2020.
- 13) 上田太郎, 荻田正雄, 本田和恵: 実践ワークショップ, Excel 徹底活用, 多変量解析, 秀和システム, pp.95-96, 2003.
- 14) 菅原紀明: クリープ性地すべり斜面の安全率と地表の移動速度, 応用地質技術年報, No.23, pp.3-17, 2003.
- 15) 宇都忠和, 石田孝司, 中間広樹, 武士俊也: 急速な変位を示す地すべりのひずみ速度と安全率との相関を検討した事例について, 第 46 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1985-1986, 2011.
- 16) 石田孝司, 宇都忠和, 中間広樹, 武士俊也, 細川謙一, 南澤正幸: 地すべりの変位速度と安全率の変化に関する検討事例について, 第 60 回砂防学会研究発表会講演集, pp.150-151, 2011.
- 17) 若井明彦, 小谷健太, 大澤宗一郎, Deepak Raj Bhat, 相楽渉: 安全率とすべり速度の経験則を粘性定式化に応用した地すべり運動の有限要素シミュレーション, 地すべり, Vol.58, No.1, pp.1-15, 2021.
- 18) 濱作英作, 丸井英明, 吉松弘行, 加藤猛士, 古谷元, 王純祥: 地すべり移動速度を予測するためのダンパー質点系モデル, 地すべり, Vol.53, pp.128-133, 2016.
- 19) 木村隆行: タマに役立つ土質と地質の話, p.35, 2022.
- 20) 藤原明敏: 地すべり調査と解析(改訂版), 理工図書, p.95, 1994.
- 21) 丸山清輝, 小嶋伸一: 移動観測による地すべり斜面の管理基準値, 地すべり, 第 31 巻, 第 1 号, pp.45-51, 1994.

(2024年6月14日 受付)