

高精度DEMを使用したゆるみ岩盤斜面の抽出

矢島良紀・松尾達也・阿南修司

1. はじめに

ゆるみ岩盤は土木構造物の安定に対して、変形による沈下や透水性等が設計上の問題となるだけでなく、変形が継続することにより維持管理や構造物の長寿命化に対しても好ましくない影響を与えることがあり、切土法面に存在した場合には掘削に伴う応力解放によるゆるみの促進やその後の重力・風化作用により、時間遅れを伴って岩盤崩壊等の現象が生じることもある（写真-1）。

ゆるみ岩盤が構造物基礎や切土斜面等に分布する場合には、その規模や性状に応じた対応を行う必要があるが、ゆるみ岩盤は、事業段階が進み詳細な地質調査や施工が行われるタイミングで顕在化することも多く、事業によっては対応方法が限られることもある。特に施工段階では、ゆるみ部の追加掘削やアンカー工などの対策工が実施されることが多いが、掘削した岩盤の廃棄処理も含め、事業費や工期の増大を招く要因となっている。

そのため、事業の初期段階でゆるみ岩盤を的確に抽出することができれば、それを回避した構造物の配置や設計など、効率的な事業実施が可能になることが期待される。

そこで、航空レーザー測量により得られた高精度な数値標高モデル（Digital Elevation Model、以下「DEM」という。）を用いた微地形判読や地形解析により、ゆるみ岩盤斜面を抽出する手法に



写真-1 ゆるみ岩盤の崩壊

Detecting of Looseness Rock Mass Distribution Using Geomorphological Analysis on a High Resolution DEM

ついて検討した。本稿ではその結果を報告する。

2. ゆるみ岩盤の特徴

ゆるみ岩盤は、「応力解放・重力作用・風化作用等に起因した変形・体積増加・密度減少などにより、亀裂の発生・開口・ずれなどを生じ、岩盤の状態を保ちつつも全体として変形しやすかつ非弾性的性質が大きくなった状態」と定義されている。つまり、ゆるみ岩盤は個々の岩片としては相応の強度を有するものの、亀裂の開口やその発達等により岩盤としての強度や安定性が大きく低下した状態の岩盤とも言える（写真-2）。

ゆるみ岩盤からなる斜面の変位量や変位速度は図-1に示すように地すべりや深層崩壊に比べて小さく、地形的な特徴も不明瞭なため、従来の地形図や空中写真の判読による抽出は困難であったが、近年では航空レーザー測量の普及により各地で高



写真-2 ゆるみ岩盤の性状例
（左：亀裂が開口した岩盤、右：開口亀裂が発達し積石状となった岩盤）

	地すべり	深層崩壊	ゆるみ岩盤	健全な岩盤斜面
概略の定義	すべり面上の地塊が一体となって移動する現象	豪雨や地震を誘因として基礎の岩盤を含んで大規模に崩壊する現象	亀裂の開口などにより岩盤が変形しやすい状態となったもの	変形やゆるみがほとんど発生していない斜面
地形のイメージ				
規模	小～特大	大～特大	小～特大	—
地形の明瞭さ	明瞭	やや明瞭	不明瞭	ほとんどない
変位量	10m程度	数m程度	数10cm～数m程度	数cm～10cm程度
変位速度	小さい	大きい	非常に小さい	ほとんどない
構造物設置における問題点	○	○	○	—
基礎の変位・変形	○	○	○	—
崩壊による構造物への影響	○	○	△	—

図-1 ゆるみ岩盤と他の斜面との比較

表-1 研究対象地域の概要

地区	地質	地質構造	斜面勾配	地表からのゆるみの鉛直深さ	地形的特徴		
					地形概要	頭部の崖地形	水系の発達
A	白亜紀砂岩・泥岩	斜面に直交	35°	10m	断面形状が直線的で水系に乏しい平滑な斜面	なし	なし
B	白亜紀片麻岩	流れ盤	上部～下部 25°～45°	35m	明瞭な遷急線の上方に馬蹄形の緩斜面が分布崩壊斜面や崩壊堆積物斜面として抽出	なし	なし
C	ジュラ紀花崗岩	流れ盤	上部～下部 30°～40°	47m	緩斜面が周辺に比べ河床まで分布変動斜面に隣接	あり	なし
D	ジュラ紀～三畳紀チャート	受け盤	45°	18m	両サイドが攻撃斜面となるやせ尾根状。短い遷急線と遷緩線が繰り返し、小規模な崩壊が発生	なし	なし
E	二畳紀粘板岩	流れ盤	40°	18m	明瞭な遷急線の下方斜面で地形的特徴に乏しい谷状斜面	なし	なし

精度のDEMが取得されるようになっており、これを用いた地形判読や地形解析によって、これまで困難で多くの労力を要していた微地形の詳細な把握が飛躍的に向上していることから、ゆるみ岩盤抽出への適用性も期待されている。

3. 研究方法

3.1 対象地域

航空レーザー測量により高精度なDEMが作成されており、かつ既往地質調査によりゆるみ岩盤斜面の分布が確認されているA～Eの5地区を研究の対象とした。各地域の地質構造や想定されているゆるみの規模、地形的特徴を表-1に示す。

3.2 現地地質踏査

A、Bの2地区において、ゆるみ岩盤斜面の地形的な特徴の把握を目的として、【固有値比の概念図】ゆるみ岩盤の分布が確認されている斜面を対象に現地地質踏査を実施した。踏査にあたってはゆるみ岩盤の指標となる露頭の岩盤状態のほか、斜面における滑落崖、沢地形の有無などに着目した。

3.3 微地形判読

A～Eの5地区を対象に高精度なDEMを用いて微地形判読を実施した。判読は土木研究所資料第4344号²⁾に基づいて、地形の傾斜変換線である遷急線や遷緩線、ガリー（雨裂）および凹地に着目して実施した。判読にあたっては、傾斜

量図と等高線図を重ね合わせたものを基図に使用し、必要に応じてオルソ写真やその他の地形量図を併用した。

3.4 地形解析

ゆるみ岩盤は、地すべりと比べ変位量は小さいものの、変位により地形に多少の乱れが生じていると考えられる。そのため、地形の乱れを定量的に評価すれば、健全岩盤との対比によりゆるみ岩盤の範囲を抽出できる可能性がある。そこで、A～Eの5地区を対象に、主に地すべり地形等の抽出に有効な解析手法とされる固有値比解析³⁾のゆるみ岩盤斜面への適用性について検討した。

固有値比の概念図と計算方法を図-2に示す。固有値比は地表面の乱れを示す指標とされ、DEMより作成した各グリッドセルの法線ベクトルの、

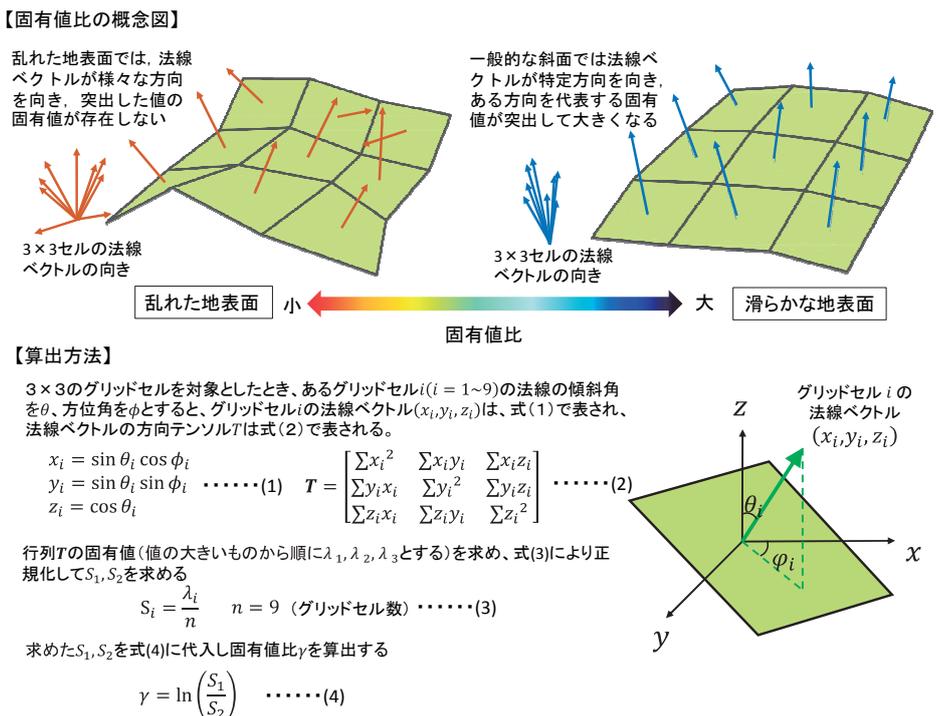


図-2 固有値比の概念図と計算方法（土木研究所資料第4150号³⁾をもとに作成）

隣接セル間における方向のばらつき（揃い具合）を評価する値である。一般的な斜面では、表面形状が比較的滑らかであり、隣接セルの法線ベクトルは同じような方向となるため、特定の方向を示す指標である固有値比の値は大きくなる傾向にある。一方で、地すべり地等ではその活動により斜面に段差や小丘などの微地形が形成されることが多く、法線ベクトルの向きが不揃いとなり卓越した方向を示さないため、固有値比は一般的に小さくなる。

なお、固有値比解析にあたっては、対象に応じた適切なグリッドスケールの設定が必要である。グリッドスケールが小さいと局所的な固有値比をとらえることとなり、大きなグリッドスケールでは広域的な傾向が把握できるが分解能が低下する。本解析では対象斜面の微地形スケールを勘案し、試行錯誤的な検討の結果、これを4mに設定するとともに、グリッドスケールが解析結果に与える影響についても合わせて検討した。

4. 研究結果

4.1 現地踏査結果

A地区で実施した現地踏査の例を図-3に示す。同地区の地質は白亜紀の硬質な砂岩・泥岩等から構成され、走向は斜面に直交する方向で下流側を高角度で傾斜している。また、既往地質調査では、尾根に挟まれた斜面にゆるみ岩盤の分布が確認されている。踏査により尾根部では、岩盤の亀裂が発達して積石状となっている岩盤や、亀裂が大きく開きトップリングを生じている岩盤が見られるなど、ゆるみ岩盤の分布が確認できた。一方で、



図-3 A地区における現地踏査例
（背景地図はCS立体図⁴⁾を使用）

斜面内では全般的に露頭に乏しく、一部に転石やガレ場が確認できる程度である。また、全般的に平滑であり、崩壊地形や明瞭な段差地形はなく、ガリーなどの沢地形の発達も確認できなかった。これらは、ゆるみ岩盤の分布する斜面の特徴とも捉えることができ、転石やガレ場の存在は、ゆるみによって積石状やブロック状になった岩盤が発生源であると考えられる。同様の踏査をB地区においても実施したが、A地区同様にゆるみ岩盤を示唆する開口亀裂を伴う岩盤露頭やガレ場が確認できる一方で、明瞭な沢地形は確認できなかった。

現地踏査は、斜面におけるゆるみの岩盤の存在を示す露頭や微地形等の要素を直接確認できるため、概査段階での調査に不可欠である。ただし、ゆるみ岩盤斜面において、その要素の分布は限定的であることも多いため、効率的な調査のためには微地形判読や地形解析といった広域的な調査手法と組み合わせて実施することが有効である。

4.2 微地形判読結果

微地形の判読結果を図-4に示す。A～Eの5地区のうちC地区については、斜面頭部の滑落崖が比較的明瞭で緩斜面が河床付近まで連続しているため、周辺斜面からおおまかな範囲抽出が可能であった。C地区は既往調査で明らかになった地表面からのゆるみの鉛直深さや、単位区間あたりの岩盤亀裂の開口量が研究対象地区の中では最も大きな値を示しているが、主測線断面における滑落崖の高さとその下方の斜面長の比から算出した変位率は約3%であり、風化花崗岩の初生地すべりの変位率約5%⁵⁾に比べると小さいことから、ゆるみ岩盤であっても、その深さやゆるみに伴う地山の変形量などがあるレベルに達すると、それが地形にあらわれるようになり、微地形判読によって範囲が抽出できることがわかった。

一方、他の地区では、微地形判読から地質調査で確認されたゆるみ岩盤の範囲を特定することは困難であった。このうちA地区の対象斜面は崩壊地形や滑落崖が認められず地形的な特徴に乏しい平滑斜面、BおよびD地区は崩壊地形や崩壊堆積物と判読された。またE地区の対象斜面は遷急線付近に位置し、相対的にゆるみが生じやすい領域と判読されたものの、いずれもゆるみ範囲特定には至らなかった。

このように滑落崖などの特徴的な地形的要素が

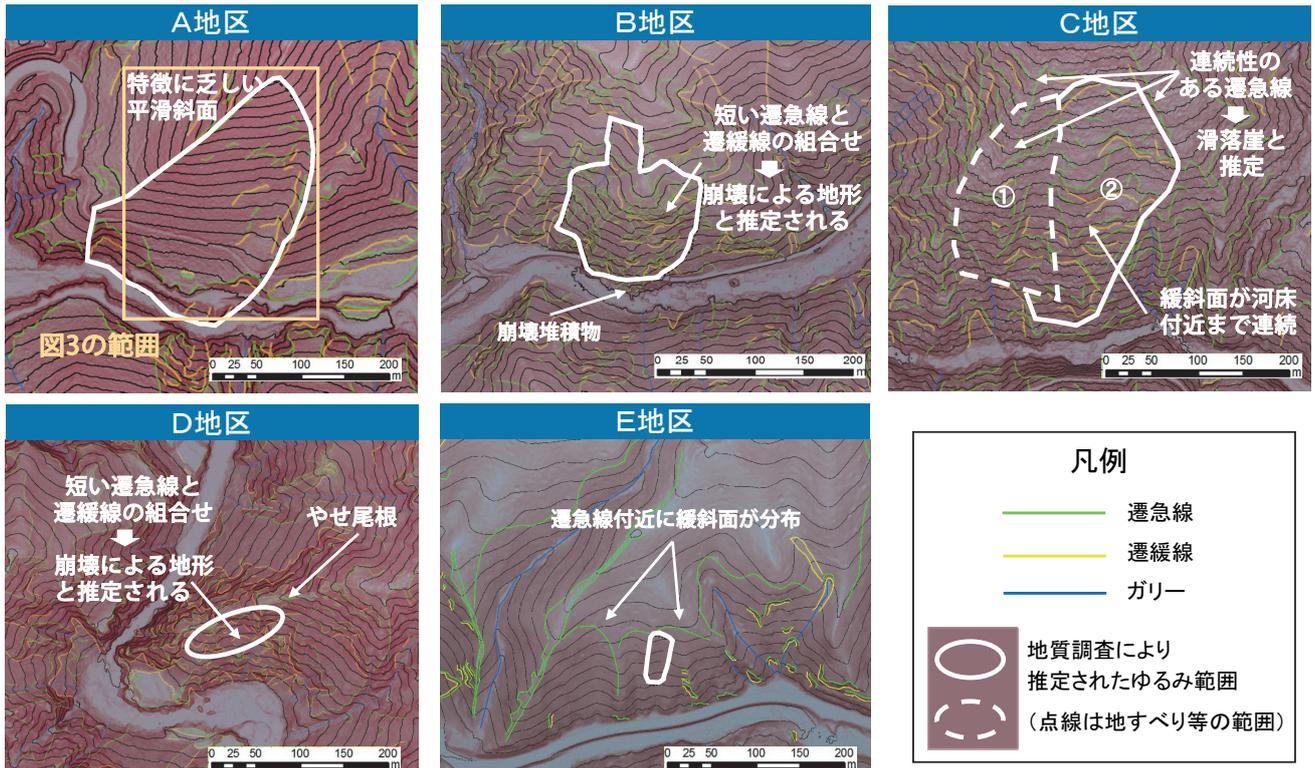


図-4 微地形判読結果

乏しく、一般的な地形判読ではゆるみ岩盤範囲が特定できなかった斜面について、それぞれのゆるみ岩盤がどのような地形場に分布しているか、という観点からゆるみ岩盤が分布する範囲の地形的特徴を整理し、今後の地形判読の際に留意すべき

要素としてとりまとめた(表-2)。このうち、全地区に共通してみられる特徴として、ゆるみ岩盤斜面では水系の発達乏しいことが挙げられる。これは、ゆるみ岩盤では開口亀裂等により岩盤の透水性が高いため地下水位が低くなる傾向があり、このために降雨が地中に浸透しやすく、表流水による浸食が生じにくくなっているためと考えられる。このため、ゆるみ岩盤の抽出にあたっては、水系発達の程度(谷密度・形状など)に着目した調査解析の実施が有効となる可能性がある。

表-2 地形判読時に留意すべき地形的特徴⑥

地形の特徴(事例地区)	イメージ図	事由
①水系の発達が乏しい(A~E地区)		ゆるみによる開口亀裂の発達に伴い、岩盤の透水性が高く、地表に水系が発達しにくいことを反映している。
②明瞭な遷急線の上方に分布する馬蹄形の緩斜面(B・E地区)		浸食作用が進んでいない遷急線の上方斜面は長期間、地形が変化せず、経時的にゆるみや風化が進行している。遷急線下方斜面にも残存する可能性がある。
③地すべり地形・崩壊斜面周辺の斜面(C地区)		地すべり・崩壊等により不安定化した斜面周辺は地すべり等の斜面変動の影響を受けるとともに、末端部・側方部の拘束圧の減少により、ゆるみが進行する。
④やせ尾根箇所(D地区)		比較的急斜面が形成され、谷側への応力解放が生じやすい。特に尾根走向で高角度の地質構造を有する場合はトップリングが発生しやすい。
⑤地形的特徴の乏しい平滑斜面(A地区)		応力解放や風化が作用するが、地質による物性のコントラストが小さく、斜面全体にゆるみが分散されるケースがある。

4.3 地形解析結果

図-5にA~E地区の固有値比解析結果と既往地質調査により推定されたゆるみ岩盤等の分布範囲を示す。全地区において、尾根や谷など地形の傾斜方向が大きく変化する箇所では低い固有値比値を示した。また、地質図との比較では、地質体による固有値比の変化は確認できなかった。

各地区を個別に見ると、C地区は微地形判読ではゆるみ岩盤の範囲をおおよそ特定できたが、固有値比解析では周辺斜面も固有値比が比較的高い傾向にあり、明瞭なコントラストは確認できなかった。ただし同地区ではゆるみ岩盤斜面である②ブロックに隣接して、計器観測により軽微な変動が認められる①ブロックが存在しており、両ブロックを比較すると、地盤変動域である①ブロッ

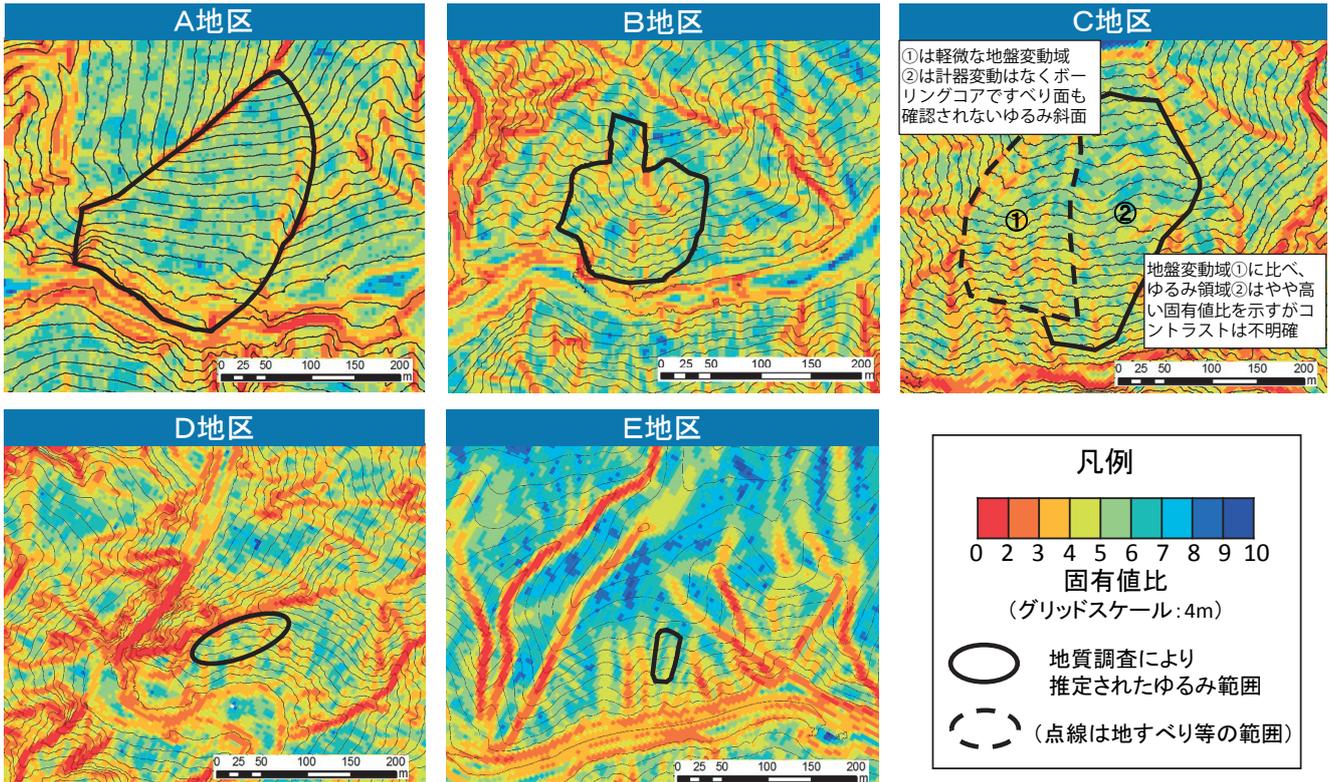


図-5 固有値比解析結果

クの平均固有値比は、変動していない②ブロックよりも低い値を示している。グリッドスケールを変化させても（表-3）この傾向に変化はないことから変動の有無による地表の乱れ程度の違いは、固有値比解析によって区別できることがわかった。また、B地区ではゆるみ岩盤が分布すると推定されている範囲に周辺斜面と比べ固有値比のやや低い領域が見られた。現地踏査よりB地区における固有値比の低い領域は、ゆるみ岩盤を示唆する開口亀裂を有する露岩や崩壊した岩塊が斜面に点在することにより地表面に凹凸が生じ、これが乱れと評価されていると推測した。そこで図-6に示すように、ボーリング孔の孔壁画像解析等により得られた岩盤の累積開口量を用いてゆるみ範囲を区分し、各区分における平均固有値比をグリッド

表-3 C地区のブロック別平均固有値比

	グリッドスケール				
	1m	2m	4m	10m	20m
①ブロック(変動あり)	3.78	4.32	4.60	4.15	4.08
②ブロック(変動なし)	4.07	4.59	5.07	5.03	4.91

表-4 B地区の斜面別平均固有値比

	累積開口量	グリッドスケール				
		1m	2m	4m	10m	20m
ゆるみ斜面	10mm/m以上	5.09	4.97	4.80	4.66	4.56
	5~10mm/m	5.81	5.42	4.88	4.33	3.72
その他斜面	5mm/m未満	5.82	5.41	4.90	4.20	3.74

スケールごとに算出した（表-4）。4m以下のグリッドスケールに着目すると、累積開口量が5~10mm/mを示すゆるみ斜面は同5mm/m未満の斜面とほぼ同じ平均固有値比を示したが、累積開口量10mm/m以上を示すゆるみ斜面は、その他斜面に比べて低い平均固有値比となり、特に小さいグリッドスケールにおいて顕著であった。このことから、ある程度ゆるみが進行した斜面であれば、固有値比解析によりゆるみ範囲を表現できることがわかった。なお、グリッドスケールが10m以上になると累積開口量が10mm/m未満を斜面の平均固有値比が大きく低下し先の傾向が逆転するのは、グリッドスケールが大きくなると一般的に周辺の

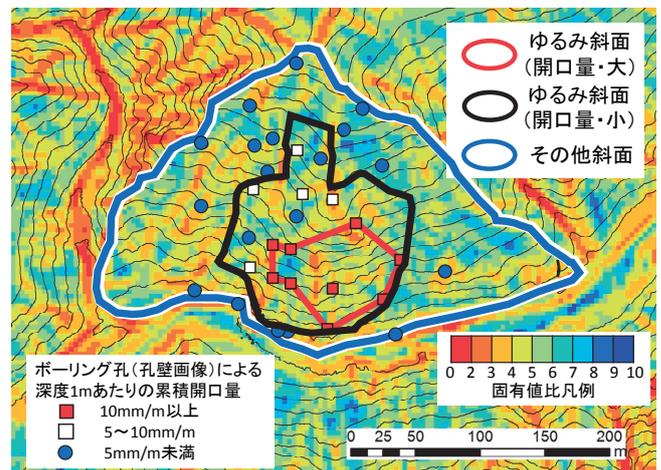


図-6 B地区の固有値比と岩盤の累積開口量の比較

尾根や谷地形の影響を受ける一方、ゆるみ斜面では水系の発達が悪く、グリッドスケール拡大の影響を受けにくいためと考えられる。

一方、A、DおよびE地区ではゆるみ岩盤斜面と周辺斜面の固有値比の発現傾向に大きな違いが見られないことから、これらの地区においては固有値比解析によってもゆるみ岩盤の分布範囲を特定することが困難なことがわかった。このうちA、D地区では、ゆるみの深さが比較的浅いことに加え、崖錐堆積物が厚く堆積しているためと考えられ、特にD地区では固有値比が高い範囲と崖錐堆積物の分布範囲が非常によく一致していた。一方で、崖錐堆積物が薄い斜面や露岩している斜面については、必ずしも固有値比が低くなるわけではなく、E地区のように、そのような斜面であっても全般的に高い固有値比を示す地区もあり、これらの解明は今後の課題である。

以上より、固有値比解析は、頭部の崖地形が地形判読可能な程度に発達し変形が進んだ斜面や、ゆるみ岩盤が露頭に残存するような崩壊斜面では、その範囲を推定するための有効な手法であり、解析結果と微地形判読や地質踏査等と組合せて総合的に解釈することで、ゆるみ範囲の推定が可能になることがわかった。一方でゆるみ量が軽微で地山内の変形が小さい場合や表土や崖錐堆積物などの厚い被覆層によって微地形が埋没している場合は、抽出が困難であることもわかった。これらのゆるみ斜面の特定については水系解析などが必要と考えられる。

5. まとめ

ゆるみ岩盤斜面の抽出を目的に、高精度なDEMを用いた微地形判読や地表面の乱れの指標である固有値比を用いた地形解析を実施した。

結果を以下に示す。

遷急線や遷緩線、ガリー等に着目した微地形判読では、ある程度地山の変形が進んだ場合を除き、ゆるみ岩盤斜面の範囲を抽出することは困難であったが、各地区の地形的特徴からゆるみ岩盤斜面にみられる地形的特徴を整理し、判読にあたって留意すべき要素としてとりまとめた。また、固有値比解析においても、ゆるみが進んだ斜面においてはその範囲を表現できる可能性があるが、地山の変形が小さい場合や被覆層が厚い場合など適用が難しい場合があり、課題も残されている。

今後、地山変形量が小さい領域も含めたゆるみ岩盤範囲の抽出に向け、水系解析等の新たな地形解析手法やその適用性の検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 佐々木靖人、片山弘憲、倉橋稔幸：ダムにおけるゆるみ岩盤の実態と分類試案、ダム技術、No.228、pp.9～21、2005
- 2) 国立研究開発法人土木研究所：航空レーザ測量データを用いた地すべり地形判読用地図の作成と判読に関する手引き（案）、土木研究所資料、第4344号、pp.9～10、2016
- 3) 独立行政法人土木研究所：地すべり地における航空レーザー測量データ解析マニュアル（案）、土木研究所資料、第4150号、pp.16～36、2009
- 4) 戸田堅一郎：曲率と傾斜による立体図法（CS立体図）を用いた地形判読、森林立地、Vol.56、No.2、pp.75～79、2014
- 5) 鶴飼貴文、稲垣秀輝、小坂英輝：山梨県北部、風化花崗岩における初生地すべりの変位率と内部構造、応用地質、Vol.53、pp.2～11、2012
- 6) 松尾達也、矢島良紀、阿南修司：ゆるみ岩盤斜面の範囲抽出に関する地形的検討、平成30年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp.253～254、2018

矢島良紀



土木研究所地質・地盤研究グループ地質チーム 主任研究員
Yoshinori YA-JIMA

松尾達也



研究当時 土木研究所地質・地盤研究グループ地質チーム 研究員、現（独）水資源機構総合技術センターダムグループ
Tatsuya MATSUO

阿南修司



土木研究所地質・地盤研究グループ地質チーム 上席研究員
Shuji ANAN