

基礎岩盤の不安定化プロセスと領域抽出に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 2

担当チーム：地質チーム

研究担当者：阿南修司、矢島良紀、梶山敦司
松尾達也

【要旨】

土木構造物の安定上の課題となるゆるみ岩盤に対し、概査段階でその分布や規模を的確に抽出することを目的に、航空レーザー測量により取得された高精度 DEM を用いた微地形判読や、ゆるみ岩盤の進展と関係のある地形要素を用いた地形解析、空中電磁探査結果を用いた解析手法の検討を行った。その結果、ゆるみ岩盤の地形判読にあたり注意すべき要素を整理したほか、地形解析による領域抽出に用いる地形要素としては、斜面の浸食度、楕状谷の発達度の組合せが有効であることがわかった。また、空中電磁探査結果では表層のゆるみ岩盤の抽出は困難であるが、ゆるみが進行し深い地すべりとなった場合や変質が生じている箇所等の特定を行える可能性がある事がわかった。

キーワード：ゆるみ岩盤、微地形判読、地形解析、空中電磁探査

1. はじめに

岩盤のゆるみとは、風化や応力解放などの影響で岩盤内の亀裂の開口や流入粘土の充填などが進行する現象であり、このような性状を有するゆるみ岩盤は、土木構造物に対し、変形による沈下等が安定上の問題となるだけでなく、その高い透水性なども設計上の課題となることがある。また、ゆるみ岩盤が切土法面に存在した場合には掘削に伴う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り（写真-1）、斜面安定上の課題ともなっている。

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



写真-1 ゆるみ岩盤の崩壊

もある。特に施工段階でゆるみ岩盤の存在が顕在化した場合には、ゆるみ部の追加掘削やアンカー工などによる対策工が実施されることも多く、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（概査段階）でゆるみ岩盤の分布や規模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。

そこで本研究では、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のほか、同じくリモートセンシング技術である空中電磁探査を用いて広域的な範囲からゆるみ岩盤が存在する可能性がある斜面を抽出する手法を検討した。

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表-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な場合が多かったが、近年では航空レーザー測量の普及により各地で高精度・高分解能な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。



写真-2 露頭におけるゆるみ岩盤の性状例
(左：亀裂が開き、右：開口亀裂が発達し積石状となる)

表-1 ゆるみ岩盤と他の斜面との比較

	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
基礎の変位・変形	○	○	○	—
構造物設置における崩壊による構造物への影響	○	○	△	—

3. 研究方法

3.1 研究対象地域

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等の分布が確認されているA～Gの8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-2に示す。なお、F地区については、開口亀裂等が発達するなどゆるみ岩盤に類似した岩盤劣化の特徴を有しているものの、その後の地質調査により岩盤劣化の原因はゆるみではなく、変質由来であることが明らかになっている。

3.2 岩盤斜面におけるゆるみの進展と地形要素の関係把握

1) 解析指標の抽出

ゆるみ岩盤の形成機構の典型的な例として、①河川の浸食作用による岩盤の応力解放が生じ、②その結果として岩盤内に開口亀裂が発生、③弱層によるすべりやトップリングによる重力移動、④亀裂の拡大や岩盤の回転、崩壊等の発生、という過程をたどることが多い。また、土木研究所の既往の研究成果ではFEMを用いたステップ解析により、河川浸食による応力解放によって生じる塑性歪みを駆動力として岩盤のゆるみが徐々に斜面内部上方に拡大していくとともに、斜面表層部は崩壊等により地形に乱れが生じることが確認されている²⁾。

そこで、岩盤斜面におけるゆるみの進展と地形要素の関係について、応力解放とその結果による開口亀裂、重力移動にともなう段差等の地形の乱れに着目して、各地区のボーリングや横坑調査で確認されたゆるみ岩盤の深さとの関係性を分析した。なお、ゆるみ岩盤には統一的な定量指標がないため、地区ごとにゆるみの分類が異なる。そこで、本研究では

表-2 研究対象地域

地区	地質	地質構造	斜面勾配	ゆるみの最大鉛直深さ	地形的特徴			空中電磁探査結果
					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°	20m	断面形状が直線的で水系に乏しい平滑な斜面	なし	なし	なし
B	ジュラ紀砂岩・粘板岩	流れ盤	45°	100m	遷急線の下方に緩斜面が分布 緩斜面の下方では馬蹄形を呈する崩壊跡地が分布	あり	なし	あり
C	ジュラ紀花崗岩	流れ盤	上部～下部30°～40°	55m	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	あり
D	ジュラ紀～三畳紀チャート	受け盤	45°	40m	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	なし
E	二畳紀粘板岩	流れ盤	40°	25m	明瞭な遷急線の下方面で地形的特徴に乏しい谷状斜面	なし	なし	なし
F	新第三紀中新世凝灰岩・凝灰質砂岩	流れ盤	30°	25m	頭部の急崖地形と側部の尾根地形に囲まれた崩壊跡地形	なし	なし	なし
G	新第三紀中新世凝灰岩・泥岩	流れ盤	35°	60m	遷急線と遷緩線のペアがあり、階段状の地形を呈する。遷急線より下方斜面では浸食・崩壊により急傾斜	なし	なし	なし
H	三畳紀～ジュラ紀花崗岩・安山岩	流れ盤	32°	15m	断面形状が直線的で水系に乏しいやや平滑な斜面	なし	なし	あり

構造物の基礎として不適であり、掘削除去の対象となる程度の岩盤をゆるみ岩盤として取り扱うこととした。

2) 地形要素の選定と算出方法

①応力解放に関する指標

応力解放に関する指標として、その要因となる地形浸食量を選定した。浸食量の算出にあたっては谷埋法により作成した接峰面を浸食が生じる前の旧地形面と推定した。今回用いた谷埋法は、ある地点における標高値を、検索範囲内における最高値に置きかえるものである。検索範囲は厳密には各地区の地質や浸食（隆起）速度に応じて設定する必要があるが、本研究では簡便性と各地区を横並びで比較するために、検索範囲を 50m×50m に統一した。

上記より推定した旧地形面標高と現在の地形面標高から式(1)に基づき各地点の浸食量を算出した。

$$\text{浸食量} = \text{旧地形面標高} - \text{現地形面標高} \quad (1)$$

②開口亀裂に関する地形要素

開口亀裂はゆるみ岩盤を特徴付ける一番の指標であるが、岩盤内部の開口亀裂の分布や性状を直接的に地形と結びつけるのは困難である。そのため、間接的ではあるが、開口亀裂による透水性の高さに着目して地形要素の選定を行った。

降雨や融雪による斜面への水の供給を考えたとき、一般的な斜面では地下深部への浸透が少なく表流水が卓越するため、流路沿いに斜面の浸食が生じやすく谷が発達する。一方、ゆるみ岩盤のような開口亀裂が発達する斜面では、水は開口亀裂を通じて地下へ浸透しやすいために表流水が少なく、相対的に谷が発達しにくいことが想定される。DEM を用いて水系図を作成すると一般的な斜面では、図-1 に示すとおり、主要谷と支谷からなる樹枝状の水系パターンを示すのに対し、ゆるみ岩盤斜面には大きな谷は形成されず、流域面積の極めて小さい谷が最大傾斜

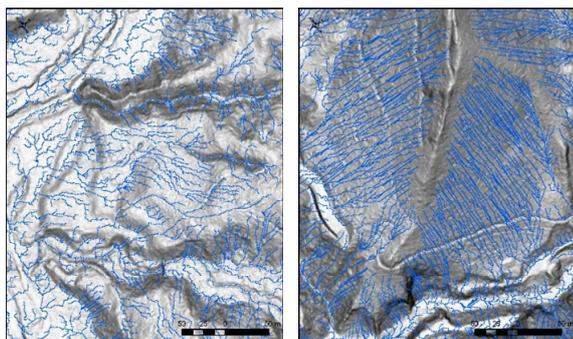


図-1 水系パターンの違い（左：樹枝状 右：櫛状）

方向に櫛状に並行するような水系パターンを示している。このことから、櫛状の水系パターンを呈する斜面に特徴的な浅い谷地形の発達度（卓越度）を、櫛状谷地形の発達度と定義し、開口亀裂に関する地形要素として選定した³⁾。

図-2 のフローに基づき、櫛状谷地形の発達度を算出した。櫛状の水系パターンを呈する斜面では、谷の発達が乏しく、5m×5m メッシュによる地形の平均化を実施した場合、細かな谷地形が消失してより平滑な斜面となるため、平均化した DEM から水系図を作成すると集水面積はさらに小さくなるものの、谷の密度は大幅に増加する。一方、樹枝状の水系パターンを呈する斜面では、同様に小さな谷は消失する一方、下刻された多くの谷は谷埋めこそ生じるものの地形には残存するため、谷の密度には前者ほどの大きな変化は見られない。

これらの特性を利用し、通常の DEM と 5m×5m メッシュ移動平均標高から生成した谷密度の差分を取ることによって、櫛状谷地形の発達度を算出した。発達度は櫛状の水系パターンを呈する斜面では、数値が大きくなり、樹枝状の水系パターンを呈するような斜面では、数値が小さくなる。

櫛状の谷地形発達度

$$= \frac{\sum \text{河川セル数}(5 \times 5\text{m 平均DEM}) - \sum \text{河川セル数}(1\text{mDEM})}{\sum \text{セル数}(49 \times 49\text{m に含まれる全てのセル数})} \quad (2)$$

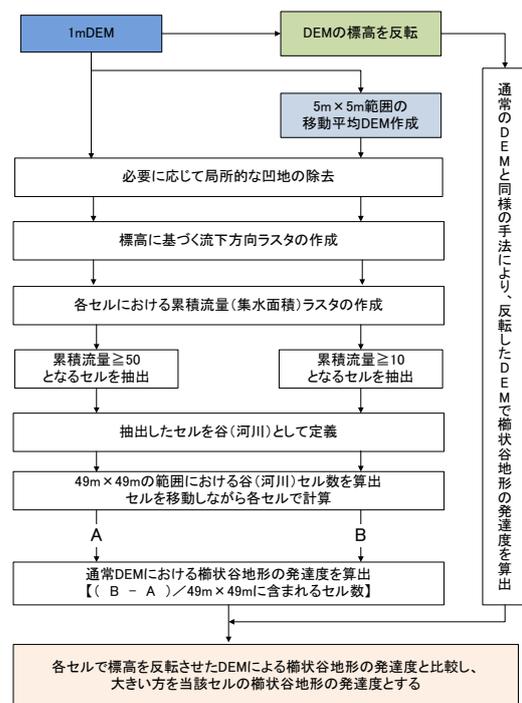


図-2 櫛状の谷地形の発達度算出フロー

この手法では、解析上は水系が生じない尾根部の評価ができないため、DEMの標高を反転させて同様の解析を行い、通常・反転のそれぞれのDEMから算出した2つの楕状の谷地形発達度を重ね合わせた上で、各地点における値の高い方を同地点における楕状の谷地形の発達度として算出した。

③地表面の乱れに関する地形要素
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、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⁴⁾を地表面の乱れに関する指標として選定した。固有値比の概念図と計算方法を図-3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、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捉えることとなり、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⁵⁶⁾。本解析では対象斜面の微地形スケールを勘案し、グリッドスケールは1mとするものの、固有値比の解析範囲を11×11セルとすることで、ある程度広域的なスケールでの評価と分解能確保との両立を図った。

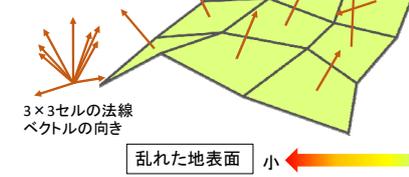
3.3 ゆるみ岩盤斜面の抽出手法の検討

3.3.1 地形要素に基づくゆるみ岩盤斜面の抽出手法

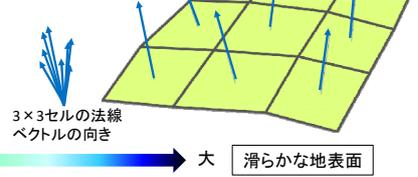
1) 微地形判読による抽出

【固有値比の概念図】

乱れた地表面では、法線ベクトルが様々な方向を向き、突出した値の固有値が存在しない



一般的な斜面では法線ベクトルが特定方向を向き、ある方向を代表する固有値が突出して大きくなる



【算出方法】

3×3のグリッドセルを対象としたとき、あるグリッドセル i ($i=1\sim 9$)の法線の傾斜角を θ 、方位角を ϕ とすると、グリッドセル i の法線ベクトル (x_i, y_i, z_i) は、式(1)で表され、法線ベクトルの方向テンソル T は式(2)で表される。

$$\begin{aligned} x_i &= \sin \theta_i \cos \phi_i \\ y_i &= \sin \theta_i \sin \phi_i \quad \dots \dots (1) \quad T = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum z_i x_i & \sum z_i y_i & \sum z_i^2 \end{bmatrix} \quad \dots \dots (2) \\ z_i &= \cos \theta_i \end{aligned}$$

行列 T の固有値(値の大きいものから順に $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ とする)を求め、式(3)により正規化して S_1, S_2 を求める

$$S_i = \frac{\lambda_i}{n} \quad n = 9 \text{ (グリッドセル数)} \quad \dots \dots (3)$$

求めた S_1, S_2 を式(4)に代入し固有値比 γ を算出する

$$\gamma = \ln \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \quad \dots \dots (4)$$

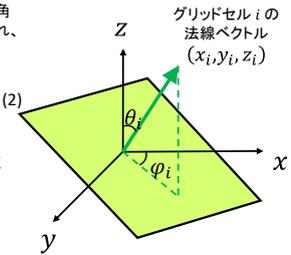


図-3 固有値比解析の概念図と計算方法(3×3セルの例)

A~Hの8地区を対象に0.5~1.0mをセルサイズとするDEMを用いて微地形判読を実施し、既往調査で明らかになっているゆるみ岩盤斜面の抽出可否や、ゆるみ岩盤斜面周辺の地形的特徴について、考察した。微地形判読は石井ほか⁷⁾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。

2) 地形解析による抽出手法

3.2で選定した地形要素のうち、ゆるみの進展と相関性が見られる要素やその重ね合わせ図を用いて、ゆるみ岩盤の抽出を試みた。また、抽出結果に対し、各地区における既往調査で明らかになったゆるみ岩盤や地すべり地形などその他の地形区分との比較を行い、抽出手法の適用性や課題について分析した。

3.3.2 空中電磁探査結果を利用したゆるみ岩盤斜面の抽出手法

空中電磁探査は、空中から広範囲の探査を行うことが可能な手法であり、探査によって得られる比抵抗値と地質や岩盤の状態(地すべり、変質やゆるみ等)と対比することによって、地質や岩盤の状態を推定できる可能性がある。

1) 空中電磁探査の原理と逆解析

空中電磁法探査は電磁誘導を利用して、地下に存在する鉱体等の導電体や大地の比抵抗値の分布を求

める電磁探査法の一つである。通常、見かけの比抵抗値と呼ばれる値をもとに、観測周波数毎に図が作成される。計測された見かけの比抵抗値は、式(3)を用いて計測深度の計算が可能となっており、計測深度までの表層からの比抵抗値として取り扱われる。

$$\delta = 503 \sqrt{\rho / f} \quad (3)$$

δ : 表皮深度(m), ρ : 見かけの比抵抗値(Ω m),
 f : 計測周波数(Hz)

周波数が5区分で計測された場合、各周波数によって計算される比抵抗値は、それぞれ式(3)から得られる探査深度まで地盤の比抵抗値の平均値として表される。逆解析は複数の周波数で計測された比抵抗値と深度の関係を基に、解析することによって、対象となる地点の真の比抵抗値を求める手法である。

2) 逆解析結果との比較方法

①対象地域の選定

空中電磁波探査結果と各種地質情報と比較するため、「空中電磁波探査を実施されている場所」、「ボーリング調査が面的に実施されている場所」、「地質分布がある程度わかっている場所」としてB、C、Hの3地区を対象とした。各地区で得られている情報を表-3に示す。B地区の地質は堆積岩類(付加体)のみが分布する地域である。C地区とH地区は、いずれも花崗岩類と堆積岩類(新第三紀火山砕屑物)が分布している地域である。

②ボーリング調査結果との関係

ボーリング調査結果に対し、以下の手順で逆解析結果の情報を抽出した。

- ・各地点に対し第一層の深度と比抵抗値を割り当て
- ・第一層の深度より掘削長の長いボーリングを抽出
- ・第一層の深度に対する崖錐の割合を計算
- ・着岩後の地質区分を抽出
- ・地すべりや変質等の有無

上記の抽出結果をもとに、崖錐・花崗岩類・堆積岩類の各区分の真の比抵抗値との関係を整理するために、第一層の区間に対し崖錐の割合がどの程度含まれるかについて整理を行った。調査結果との対比イメージを図-4に示す。また、解析結果において第一層の深度が大幅に増加するものが一部認められたことから、見掛けの比抵抗値によって計算される第一層の深度と比較し、深度が大幅に変化する箇所の特徴を整理した。

表-3 空中電磁探査結果の解析対象地域諸元

地区名	地質	センサー	ボーリング数
B地区	堆積岩類(付加体)	水平5周波数	250
C地区	花崗岩類	水平3周波数	191
	堆積岩類(新第三紀火山砕屑物)	鉛直2周波数	
H地区	花崗岩類	水平3周波数	44
	堆積岩類(新第三紀火山砕屑物)	鉛直2周波数	

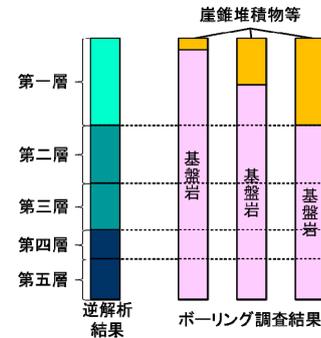


図-4 ボーリング調査結果との対比

4. 研究結果

4. 1 ゆるみの進行度と地形要素の関係

図-5 にボーリング実施地点におけるゆるみ岩盤の鉛直方向の下限深度と、浸食量、谷地形発達度および固有値比の比較結果を示す。なお、ゆるみ岩盤の上位には崖錐堆積物が分布することもある。崖錐堆積物はゆるみ岩盤ではないが、ゆるみが進行して崩壊に至ると下方斜面では崖錐堆積物になること、透水性が高いことや強度や変形性の面からも構造物基礎として不適な場合が多いことなど、ゆるみ岩盤と類似する特徴も有することから、本解析では崖錐堆積物もゆるみ岩盤の一部としてその層厚に含めている。また、ボーリング調査地点における局所的な偏りを回避するため、あらかじめ49m×49mの範囲で解析を行っている谷地形発達度以外の、浸食量、固有値比の2指標については、ボーリング調査地点から半径10mの範囲における平均値を用いている。

①浸食量

各地区で多少のばらつきはあるが、全体として浸食量が小さいほどゆるみの下限深度が大きくなる傾向にある。ゆるみ岩盤を特徴付ける開口亀裂の形成に応力解放が直接的に関係しているが、浸食量が小さいと評価された地点では、応力解放後に地表に露出している期間が長くなるため、風化等の影響も加わりゆるみがより進行すると考えられる。

②楯状谷地形の発達度

楯状谷地形の発達度は、解析範囲内における相対的な評価であるため、地区ごとに絶対値の違いはあ

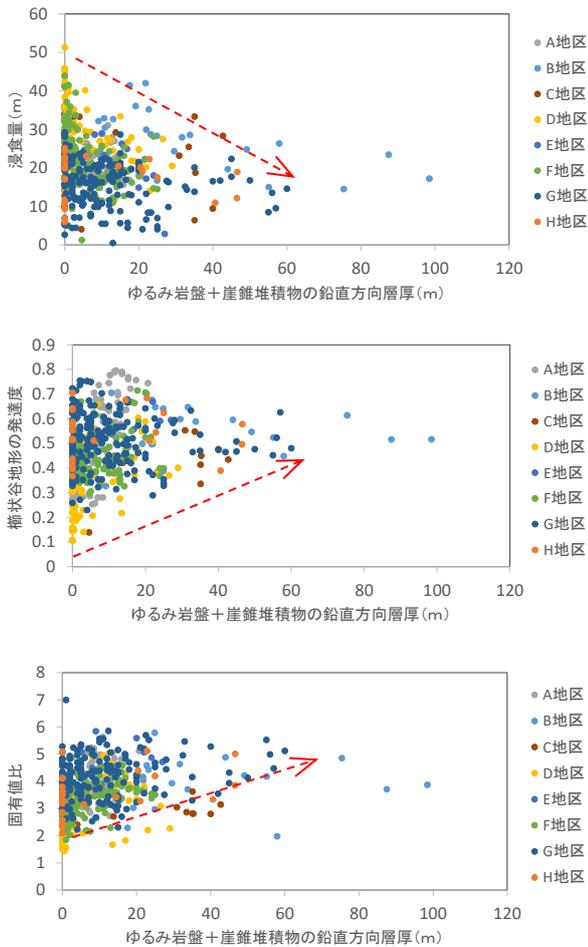


図-5 ゆるみの進行度と地形要素の関係

るが、全体的な傾向として楯状谷地形の発達度が高い斜面ほどゆるみの下限深度が大きくなる傾向があり、透水性が高いために表流水による浸食が起これにくく谷が発達しない、という想定と調和的である。

③固有値比

ゆるみ岩盤斜面ではトップリングや崩壊、斜面下方への移動などにより、地表面には段差などの地形乱れが生じ、固有値比が低くなると想定したが、比較の結果、反対に地表面が滑らかな（固有値比が高い）斜面ほど、ゆるみ下限深度が大きくなる傾向がみられた。これは、ゆるみ岩盤の進展にともなう地表面の乱れは固有値比で表れるほど大きくなく、むしろ谷地形が発達しないために地表面は平滑となっているためにこのような結果になったものと推測する。また、C地区の一部など地すべり変動に近い状態の斜面やD地区のように受け盤斜面のトップリングに起因するようなゆるみの斜面では、固有値比が低下する傾向が見られた。

①から③をもとにゆるみ岩盤の抽出に用いる地形

要素について検討した結果、①の浸食量と②の楯状谷地形の発達度を用いることを基本とした。③の固有値比については、地表の滑らかさの程度が楯状の谷の発達度と類似するため指標として重複するために基本的には使用しないものの、地すべり地形や崩壊地形では有効な指標となる可能性がある。

4.2 ゆるみ岩盤斜面の抽出手法検討結果

4.2.1 地形要素に基づく抽出

1) 微地形判読による抽出

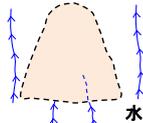
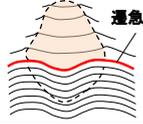
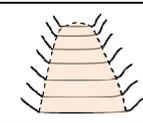
微地形判読の結果、A～Hの8地区のうちC地区については、斜面頭部の滑落崖が比較的明瞭で緩斜面が河床付近まで連続しているため、また、F地区では頭部の急崖地形と側部の尾根地形に囲まれた緩斜面として周辺斜面からおおまかな範囲抽出が可能であった。また、B地区では、頭部に微少な崖地形があり、ゆるみ範囲の一部を把握することができた。

これらの3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、単位数間あたりの岩盤亀裂の開口量が研究対象地区の中では相対的に大きな値を示している（表-2）。このうちC地区において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変位率 θ を算出すると約3%となり、風化花崗岩の初生地すべりの変位率約5% θ 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、それが地形に表れるようになり、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およびG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、D地区は崩壊地形や崩壊堆積物と判読された。またB、E、FおよびH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-4）。また前述のとおり、ゆるみ岩盤斜面では水系の発達が乏しいことが、全地区に共通してみられる特徴として確認できた。

表-4 地形判読で見いだされたゆるみ岩盤の特徴

地形の特徴(事例地区)	イメージ図	事由
① 水系の発達が少ない (A~H 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馬蹄形の緩斜面が分布 (B・E・F・H 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・F 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・G 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。

2) 地形解析による抽出手法

A から G の各地区において、「浸食度」と「楯状谷地形の発達度」を指標として、既往調査等で確認されたゆるみ岩盤斜面の領域推定を行った。4. 1にて、浸食量はゆるみの進展と負の関係、楯状谷地形の発達度は正の関係が見られたため、次式により、ゆるみ岩盤指標を作成した。

$$\text{ゆるみ岩盤指標} = \text{楯状谷地形発達度} \times \text{浸食度}$$

$$\text{浸食度} = 1 - (\text{各セルの浸食量} / \text{各地区最大浸食量}) \quad (4)$$

なお、浸食度は各セルにおける浸食量(m)を各地区における最大浸食量(M)で除すことにより正規化したものである。

その上で、計算により求めた各セルのゆるみ岩盤指標と既往調査等により判定した地形区分との関係を求めた。ここで解析対象とした地形区分は、「ゆるみ岩盤斜面」のほか、主に地形判読より抽出された「地すべり地形」、「崖錐堆積物」、一部地区では「段丘堆積物」、「緩斜面」、「扇状堆積物」の分布範囲も対象とした。なお、地形区分がなされていない斜面については、「その他斜面」としたが、その他斜面には未確認の各地形区分が含まれている可能性があること留意する必要がある。図-6 に各地区で求めたゆるみ岩盤指標と地形区分の関係を示す。ゆるみ岩盤

斜面の分布域に対応するゆるみ岩盤指標の範囲が、他の地形区分（特にその他斜面）と異なっていれば抽出できる可能性が高い。図より、A、F 地区では他の地形区分と傾向が大きく異なっており、抽出の可能性が高い地域と判断できる。また、B、E、G、H の各地区は地すべり地形や崖錐堆積物と指標範囲が類似しているが、その他斜面とは異なる傾向を示すため、同様に抽出できる可能性があり、また、これらの地区のゆるみ岩盤は地すべりまたは崖錐堆積物に近い状態となっている可能性もある。一方、C、D 地区はその他斜面との差異があまり認められないため、抽出が難しいことが示唆された。

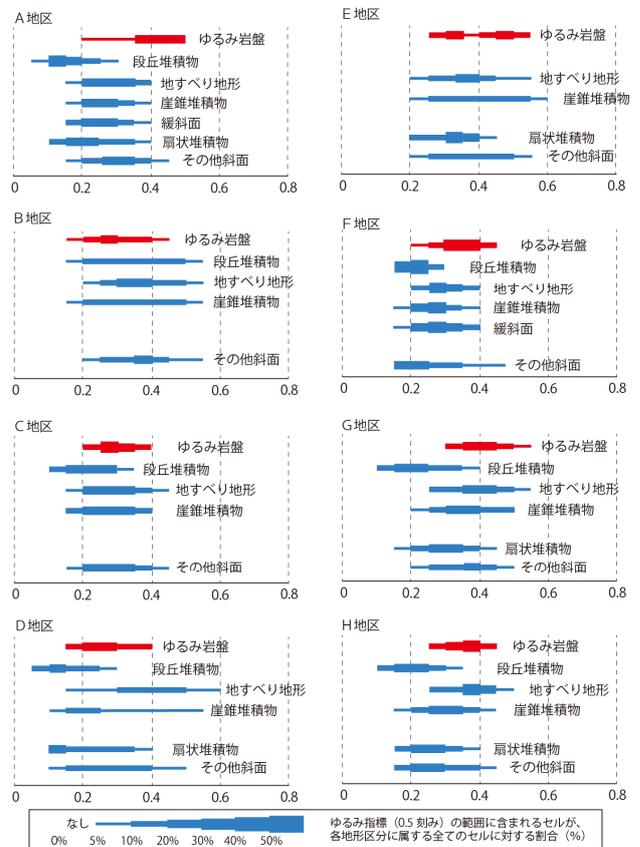


図-6 ゆるみ岩盤指標と地形区分の関係

作成したゆるみ岩盤指標は前述のとおり正規化しているため、その値は各地区における相対的なものとなるが、図-6 からゆるみ岩盤斜面は全地区とも概ねゆるみ岩盤指標 0.25~0.55 の範囲をとることがわかった。そこで、この範囲となるゆるみ岩盤指標を用いて抽出結果を図化し、各地区で確認されたゆるみ岩盤斜面の分布範囲との比較を行った。

結果を図-7 に示す。本研究で作成したゆるみ指標は、図より A、F、H 地区ではゆるみ岩盤斜面等に

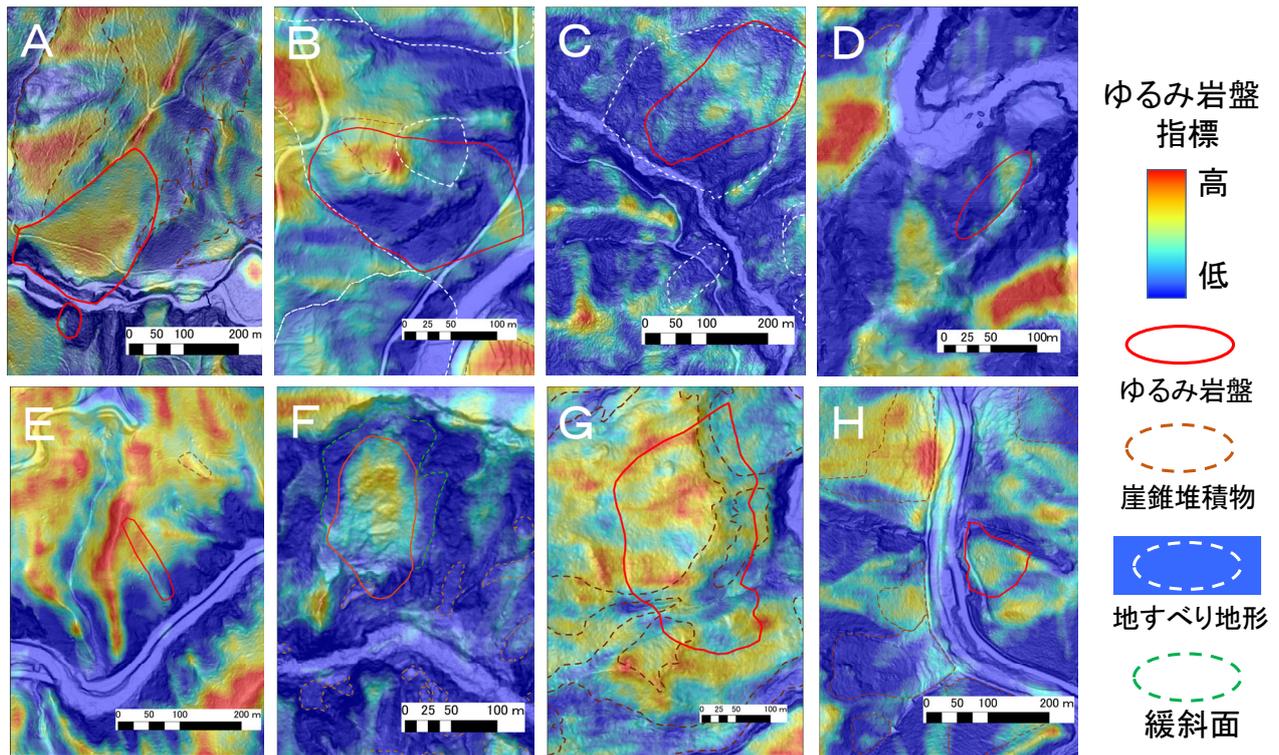


図-7 ゆるみ岩盤斜面等の抽出結果

相当する範囲を良く捉えている。C、G 地区ではゆるみ岩盤斜面を比較的良く捉えているものの、ゆるみ範囲の絞り込み精度がやや低い。また B、E 地区では、ゆるみ岩盤斜面の一部を捉えている。このうち、B 地区では、地質調査の結果より作成した地質断面図上のゆるみ深度と重ね合わせると、ゆるみ岩盤内でも不均質性があり、今回の指標はそれを比較的良く捉えていることがわかった (図-8)。また、E 地区では、ゆるみ岩盤斜面の上部は捉えているが、下部の薄い尾根地形の範囲は抽出できなかった。一方、D 地区については、崖錐斜面の範囲は良く抽出できているものの、ゆるみ岩盤斜面の範囲はあまり

抽出できていない。以上をまとめると、本研究で作成した指標は、多くのゆるみ岩盤の抽出に利用できるが、やせ尾根となるような斜面では見かけ上浸食度や楕状谷地形の発達度が小さくなるため、本手法による抽出は困難であることもわかった。そのため、ゆるみ岩盤の抽出にあたっては、地形解析のみではなく、詳細な地形判読と併用することを基本に、注意すべき箇所を絞り込んでいくことが必要である。

4. 3. 2 空中電磁探査結果を利用した抽出手法検討結果

1) 比抵抗値と地質の関係

比抵抗値と地質の関係を把握するために、第一層の崖錐堆積物の層厚と基盤岩の割合による比抵抗値の分布範囲を整理した (図-9)。

①崖錐の割合毎の比抵抗値の違い

第一層の崖錐堆積物の割合毎の変化からは、ばらつきが大きく比抵抗値との関係を見出すことは難しい。着岩後の地質が花崗岩の場合のみ、極わずかに崖錐の割合が増えると比抵抗値が下がるように見える程度となっている。

②着岩後の地質による違い

堆積岩と花崗岩が分布する C 地区を対象として、比抵抗値の分布範囲を比較した。その結果、花崗岩分布域における比抵抗値分布域が $300\sim 900\Omega\cdot m$ 程度であるのに対し、堆積岩分布域における比抵抗値

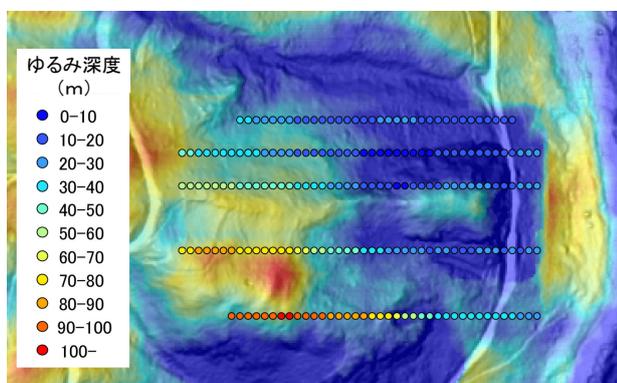


図-8 ゆるみ岩盤の抽出結果と既往調査にもとづくゆるみの下限深度の比較 (B 地区)

分布域が 250~800Ω・m 程度となっており、わずかに花崗岩分布地域の比抵抗値が高くなっていることが認められた。

2) 逆解析結果による深度と比抵抗値の関係

第一層の比抵抗値と観測深度の関係を表したグラフを図-10 に示す。いずれの地区においても放物線を描く同様の形状を示す箇所が認められる。一方で、C 地区のデータのみ放物線を描くラインと異なる位置にデータが一部分布する結果となっている。

①放物線を描くライン上の点について

空中電磁波探査の特性として、各周波数によって計算される計測データは、表層から探査深度間の岩盤の比抵抗値の平均値が見かけの比抵抗値として計算され、深度と見かけの比抵抗値は式(3)の関係で表される。第一層の比抵抗値は、最高周波数の計算結果とほぼ一致するものと考えられることから、「最高周波数」、「見かけの比抵抗値」「深度」の関係は式(3)で表されるものと考えられる。実際に図-10 に示す放物線を描くラインに存在する点は、いずれも式(3)

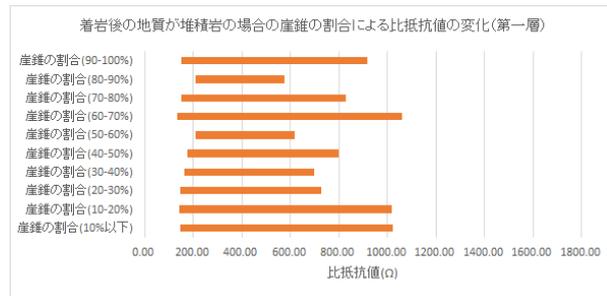
の関係で表される値となっている。

②放物線のライン上以外の点について

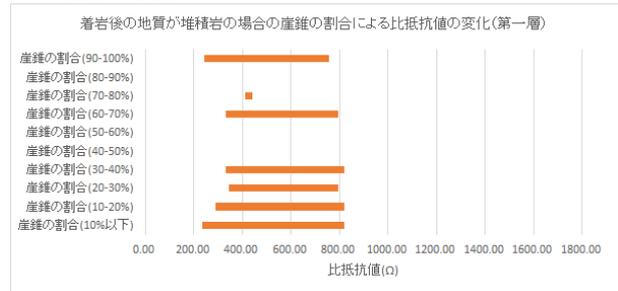
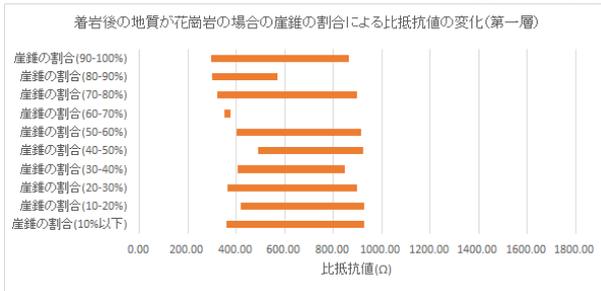
C 地区に見られるような、式(3)の関係で表現される値よりも一部深度が深くなるものは、着岩部が花崗岩類を主体とする箇所となっている。対象のボーリングデータを確認するといずれも地すべりや深部に变质が確認されている箇所であり、低周波数の計測結果の影響を反映した可能性が高いと考えられる。なお、今回のボーリング地点では確認できなかったが、H 地区の花崗岩類分布域および C 地区の花崗岩類分布域でも同様に式(3)で表される関係よりも第一層の深度が深くなる箇所が見られた。一方、H 地区および B 地区の堆積岩類分布地域では、いずれの地点でも式(3)の関係式で表される値であった。

③比較の結果

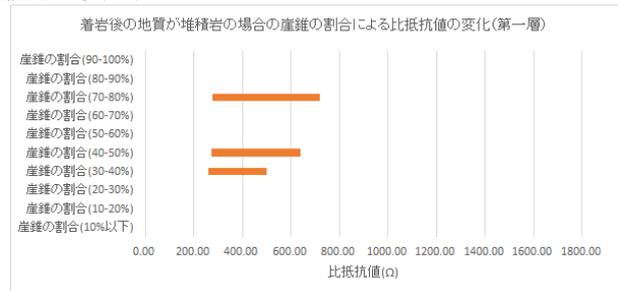
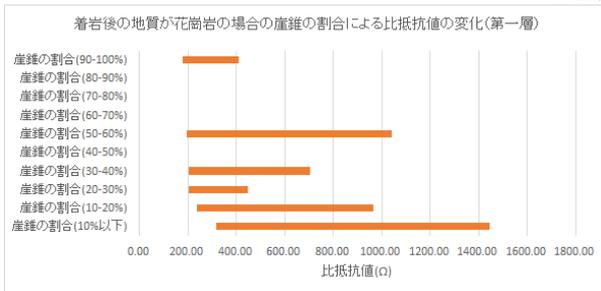
第一層の比抵抗値と観測深度の関係を表したグラフより、地すべりや变质等が認められる箇所において、深度と比抵抗値の関係が、式(3)で表される関係よりも深度が深くなる箇所があることを確認した。



B 地区の比抵抗値と地質の関係



C 地区の比抵抗値と地質の関係



H 地区の比抵抗値と地質の関係

図-9 崖錐割合および着岩後の岩種と比抵抗値の分布範囲

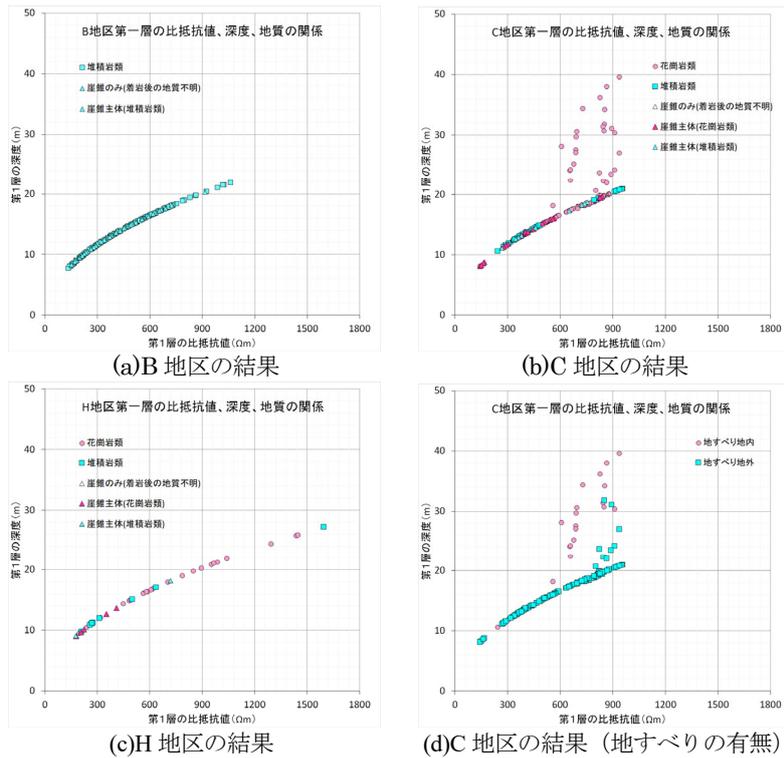


図-10 深度、比抵抗値、対象地質の関係

これらのことより、空中電磁探査結果を用いた解析では、表層のゆるみの範囲を抽出することは困難であるが、ゆるみが進行し深い地すべりとなった場合や変質が生じている箇所等の特定を行える可能性があることがわかった。

5. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) ゆるみ岩盤斜面におけるゆるみ規模は、地形解析の結果、浸食量、楕状谷地形の発達度、固有値比と関係することがわかった。
- 2) ある程度ゆるみが進行した斜面では地形判読による抽出が可能であるが、中程度以下のゆるみの場合には抽出が困難なことが多い。
- 3) 浸食度と楕形を呈する谷地形の発達度を組み合わせた地形解析により、ゆるみ岩盤斜面はおおよその抽出が可能であるが、やせ尾根となる地区では見かけ上浸食量や楕形を呈する谷地形の発達度が小さくなるため、抽出が困難であることがわかった。そのため、ゆるみ岩盤の抽出にあたっては、地形判読と地形解析を併用し、注意すべき箇所を絞り込んでいくことが重要である。
- 4) 空中電磁探査結果を用いた解析では、ゆるみが進行し深い地すべりとなった場合や変質が生じている箇所等の特定を行える可能性がある事がわかった。

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) 佐々木靖人、浅井健一、日外勝仁、江口貴弘：「ゆるみ岩盤の安定性評価法の開発」、平成 27 年度重点研究報告書、国立研究開発法人土木研究所ホームページ、<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2015/pdf/ju-4.pdf>、2016
- 3) 松尾達也、矢島良紀、阿南修司：「谷地形解析によるゆるみ岩盤斜面の抽出に関する検討」、令和元年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp.237-238、2019
- 4) 藤澤和範、笠井美青：「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
- 5) 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
- 6) 矢島良紀、松尾達也、阿南修司：「高精度 DEM を使用したゆるみ岩盤斜面の抽出」、土木技術資料、No.61、Vol.8、pp.8-13、2019
- 7) 石井靖雄、西井稜子、武田大典：「航空レーザー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

- 8) 鵜飼貴文、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
- 9) 梶山敦司、矢島良紀、阿南修司：「空中電磁探査データを用いた逆解析結果と地質調査結果の比較」、令和2年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp.85-86、2020

A STUDY ON IDENTIFICATION OF FORMATION MECHANISM AND AREA IDENTIFICATION FOR LOOSENESS ROCK MASS

Research Period : FY2016-2020

Research Team : Geology and Geotechnical
Research Group(Geology)

Author : ANAN Shuji

YAJIMA Yoshinori

KAJIYAMA Atsushi

MATSUO Tatsuya

Abstract :

Looseness rock mass is a problem for the stability of civil engineering structures. For the purpose of accurately screening the distribution of looseness rock mass, we conducted microlandform interpretation and topographical elements analysis using high-resolution DEM which measured by aerial laser surveying. And we also examined the development of analysis methods using results of aerial electromagnetic survey.

As a result, it was found that the combination of the amount of erosion of the slope and the degree of development of the valley is effective as the topographical elements used for area identification. In addition, although it is difficult to identify looseness rock mass from only the results of aerial electromagnetic exploration, it was confirmed that it could be used to estimate the range and depth of large-scale landslides.

Key words : looseness rock mass, topographical analysis, aerial electromagnetic survey