

論 文

岩盤斜面の展開写真による 地上デジタル写真測量

今井忠男^{*1)}
山崎貴博^{*※※)}

鴨志田直人^{*※1)}
大塚尚寛^{*※2)}

杉本文男^{*2)}

1. はじめに

岩盤斜面を開発し安全に維持管理するためには、斜面の形状および岩盤中の劣化部や断裂など岩盤情報を詳細に把握し、その後の設計・施工に反映させなければならない。

従来、岩質や断裂など岩盤情報の記録には、主に地質技術者の観察によるスケッチおよび現場の展開写真を用いて、岩盤情報の正確な把握につとめてきた¹⁾。しかしながら、現場の観察および展開写真から、岩盤の断裂や弱面などの構造に関する詳細なスケッチを作成するには、訓練された技術者が必要となる²⁾。また、このスケッチ情報から、断裂の位置や長さなど正確な座標データを読み取り、これらのデータを設計・施工の計画に用いることは容易ではない。

そこで、現場の展開写真のみを活用し、この写真から誰でも容易に岩盤情報をデジタルデータとして取得できれば、これまで以上に、岩盤の開発および維持に関わる安全な設計・施工技術が進むものと思われる。

本研究の目的は、現場写真から岩盤表面の構造情報を簡易的に数値データとして取得する手法の開発にある。具体的には、岩盤斜面をステレオ撮影した写真を用い、これを用いて展開写真を作成するとともに、デジタル写真測量法³⁾によって、斜面の数値標高モデル（DEM）および断裂系の分布などの数値データを簡易的に得られる手法を提案した。

2. 研究手法

2. 1 測定現場

本研究では、採石場（秋林工業株）の岩盤斜面を研究



図1 採石場の所在地（秋田県北秋田市）

対象とした。図1に示すように、本採石場は秋田県北部（北秋田市森吉）に位置しており、碎石用の安山岩を生産している。

計測現場を図2(a)～(c)に示す。図2(a)は付近の国道から見た採石場の遠景であり、矢印で示した部分が測定場所である。図2(b)は測定斜面の全景であり、おおよその測定範囲を白線で囲んだ。斜面の測定範囲は長さ約12m、幅（高さ）約4mを想定した。図2(c)に測定範囲の拡大写真を示す。斜面は切立っており、平均斜度は概算で約75°である。

2. 2 展開写真的ステレオ撮影法

岩盤斜面は横に長大なため、斜面全体を1枚の遠景の写真として撮影すると、岩盤の断裂や弱面など細部がわからない。そのため、岩盤斜面の撮影では、斜面全体を

*1) 個人会員 秋田大学 工学資源学部

*2) 秋田大学 工学資源学部

*※1) 岩手大学 工学部

*※2) 個人会員 岩手大学 工学部

*※※) 秋田土建㈱



(a) 採石場の全景



(b) 測定斜面



(c) 測定斜面の拡大

図2 測定現場（秋林工業）

近景の写真何枚かで分割して撮影し、それを貼り合わせて全体像を構成している。とくに、これを展開写真という。

このような展開写真は、そのまま写真測量に用いることはできない。展開写真を用いて写真測量をおこなうには、展開写真の撮影法を工夫しなければならない。すなわち、展開写真を構成する写真をすべてステレオ撮影する必要がある。ステレオ撮影された1対の写真を並べると、肉眼でも撮影対象を立体視することができる。デジ

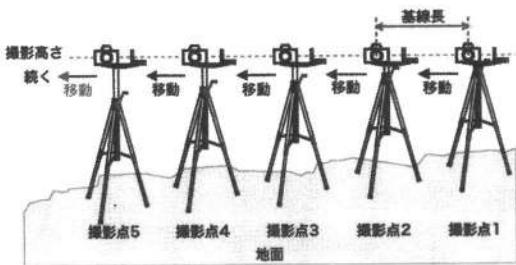


図3 撮影機材

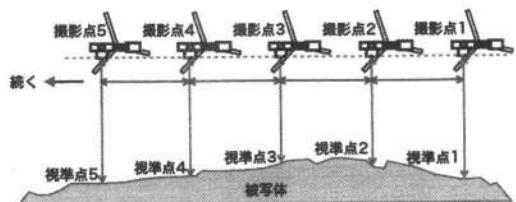
タル写真測量とは、人間が両眼の網膜に映る画像によって立体を構成するように、一定間隔に置かれた2台のカメラでステレオ撮影された1対の写真から、被写体の3次元座標を求める手法である。ただし、3次元座標の計算には、カメラ間距離、カメラと被写体間との距離、カメラレンズの焦点距離が必要となる。

図3に本研究で用いた撮影機材を示す。撮影は、デジタルカメラ（オリンパス製、E-10）を三脚に取り付けておこなった。撮影にあたっては、クリノメータ、巻き尺、ポールによって、撮影の方位、カメラの仰角、対象物とカメラとの距離（撮影距離）、カメラの高さなどを測定した。

本研究ではステレオ撮影のうち平行撮影法を用いた。平行撮影法とは、カメラの撮影位置を対象物に対し水平に一定間隔（カメラ間隔）移動させて、2枚（1対）以上撮影する方法である。ただし、1対の写真は、撮影対象をそれぞれ60%以上オーバーラップするように撮影しなければ測量精度が低下する。図4（a）（b）に具体的な平行撮影法を示す。カメラ位置の移動について図4（a）はカメラを正面から、図4（b）はカメラを上空から示したものである。はじめに撮影点1にカメラを設置し、被写体の岩盤を撮影する。次に、対象岩盤に向かたカメラの方位、仰角、高さを固定したまま、カメラを対象物に平行（撮影方位と垂直）に一定距離（撮影点1のアングルと60%オーバーラップする程度）に移動させ、そこを撮影点2として再び撮影する。この撮影法によって、撮影点1と2の写真は1対のステレオ写真となる。



(a) カメラの平行移動（正面図）



(b) カメラと被写体との関係（上面図）

図4 撮影方法

この作業を各撮影点で繰り返しおこなうことで、多くのステレオ写真が得られる。ここで、撮影点を結ぶ線を基線、撮影点間の距離を基線長、撮影点からカメラの視準点との距離を撮影距離とする。

上述のように撮影された写真は、それぞれ近接の撮影点の写真と互いにステレオ写真の関係にある。また、それぞれの写真を順番に重ねて貼り合わせることで、斜面全体を示す大きな展開写真を作成できる。

よって、従来の展開写真の撮影に際し、上記のような平行撮影法を用いるだけで、簡単に写真測量可能なステレオ写真が得られる。

2. 3 デジタル写真測量法

展開写真として撮影した数組のステレオ写真は、パソコン用のデジタル写真測量ソフト（アジア航測製、ADIMS）を用いて解析し、岩盤斜面各点の3次元位置データおよび断裂系の座標を取得した。

デジタル写真測量では、ソフトウェアで測量解析するにあたって、1対のステレオ写真上において、目視によって同一の座標位置を20点以上同定（標定解析）し、座標位置を一致させなければならない。これによって、両

者の偏位を修正した写真（偏位修正写真）が作成でき、測量解析が可能となる。このとき、両者の偏位が大きいと、ステレオ画像としての精度が低下するので、測量の精度に大きく影響を及ぼす。したがって、平行撮影の精度が測量精度を支配するため、撮影にあたっては十分な注意が必要である。測量解析では、偏位修正写真内の測定範囲を格子状に分割し、各点の3次元座標を算定（面的計測）したのち、DEMデータとして出力する。

さらに、上述の写真測量解析の作業を撮影点1-2、2-3、3-4、…の組み合わせの写真順で繰り返しおこない、それぞれのDEMデータを得る。これらのDEMデータを足し合わせることで、展開写真によって示される対象物全体のDEMデータを得ることができる。

なお、解析にあたっては、基準とする撮影点の高さ、撮影距離およびそれぞれの基線長等のデータが必要となるため、撮影時にはこれらのデータを計測しておかなければならぬ。また、解析の精度（分解能）は、対象物との距離およびデジタル写真の分解能に比例し、基線長、レンズの焦点距離に反比例する。

2. 4 岩盤構造の位置情報の抽出

岩盤には、断裂系および劣化帯など岩盤の力学的物性を特徴付ける構造が多く存在する。デジタル写真測量では、これら岩盤構造の位置情報を直接ステレオ写真から得ることができる。具体的には、ステレオ写真の測量解析過程において、コンピュータ上の写真から岩盤の構造（断裂など）を目視でトレースすることで、その位置座標が1点ずつ計測でき、構造ごとの座標データが得られた。

このようにして取得した岩盤構造の座標データは、岩盤斜面のDEMデータと重ね合わせコンピュータ上に表示することで、岩盤スケッチと同等の情報を表すことができる。

3. 計測結果および考察

3. 1 展開写真およびスケッチ

図5に、今回の測定岩盤に対する展開写真の撮影計画と撮影パラメータを示す。図は、岩盤の撮影を上空から見たものである。最初に撮影点（1）において、カメラを岩盤斜面に垂直となるようN20°Wの方位に向け（仰角0°）、さらに撮影点と視準点間の距離が1150cmとなる位置に設置し撮影した。次に、基線をN70°Eの方位

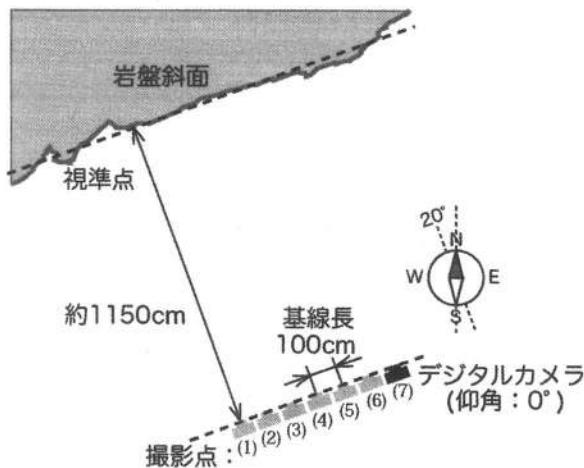


図5 撮影計画と撮影パラメータ

とし、基線長100cmの位置にカメラを移動（撮影点（2））して撮影した。このように撮影点（7）まで平行撮影を繰り返し、岩盤斜面を7枚のステレオ写真におさめた。

図6(a)～(c)に撮影点（1）～（3）の写真をそれぞれ示す。図より、撮影点がN70°Eの方向に進むに従い、撮影領域も少しずつズれていることがわかる。この撮影では、ステレオ写真の精度を上げるために、基線長を短くし、それぞれ80%程度オーバーラップさせた。一般的の測定には、オーバーラップの割合を60%程度とし、写真的枚数を少なくしても良い。

図7は7枚のステレオ写真を合成した岩盤斜面の展開写真である。この展開写真の領域は、幅1600cm、斜面長830cmである。正確なステレオ写真ならば、写真を画像ソフトで重ねて並べるだけで、このような展開写真が簡単に作成できる。ここで、図中の枠線は写真測量の範囲、

矢印は断裂を示している。図8は、展開写真と現場での観察を基にして描いた岩盤斜面のスケッチである。スケッチにあたっては、主に断裂および岩盤と堆積物との境界を描いた。図8のスケッチより、地面から1/3程度の高さまでは落石などの堆積物で占められており、また写真上部の岩盤には、6つの主たる断裂が観察された。

今回の写真測量では、岩盤領域のみを測定対象と考え、堆積物を除いた枠線で囲んだ部分を計測範囲とした。この計測範囲には図7（図中の矢印）および図8に示す

ように、5つの断裂（1～5）が存在する。この岩盤斜面の安定維持においては、これら断裂の情報が重要となる。

岩盤における断裂の3次元情報には、傾斜と走向が必要である。そのうち断裂の走向は、写真やスケッチから読み解くことはできないため、現場において、クリノメータを用いて断裂1～5の走向を測定した。その結果を表1に示す。表より、ほとんどの断裂は、斜面におよそ垂直な方向に発達していることがわかった。

3.2 写真測量結果

図7の展開写真において、測量範囲を幅1250cm、高さ420cmとし（枠線内）、7枚のステレオ写真を用いて岩盤斜面を6分割し、それぞれの領域で写真測量をおこなった。さらに、これらを足し合わせて全体のDEMデータを得た。なお、座標原点は視準点3とした。



(a) 撮影点 (1)



(b) 撮影点 (2)



(c) 撮影点 (3)

図6 各撮影点における写真

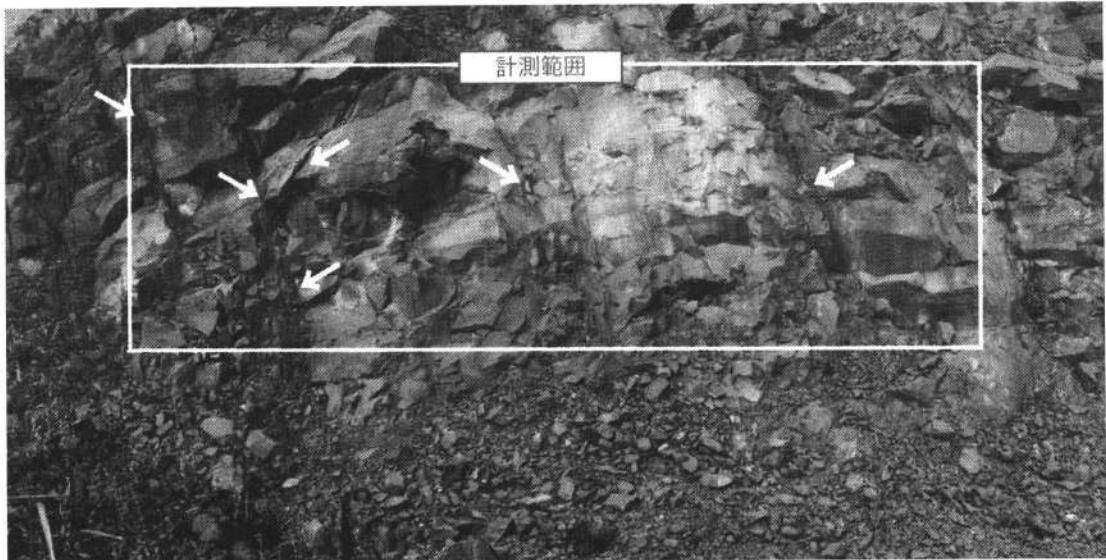


図7 測定斜面の展開写真（7枚合成）

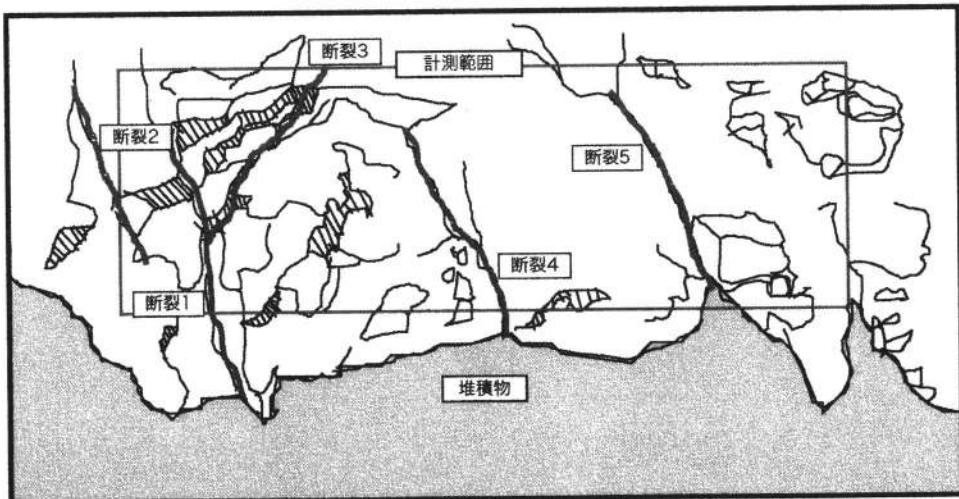


図8 測定斜面における断裂系のスケッチ

表1 測定斜面における断裂の傾斜方位

	断裂 1	断裂 2	断裂 3	断裂 4	断裂 5
傾斜方位	不明	N	N 5° E	不明	N 17° W

これによって得られた斜面の3次元座標データ(DEM)を用い、図9および図10に斜面の形状をコンターマップおよびワイヤーフレームとして表した。ここで、斜面の傾斜および凹凸を、コンターマップでは等高線で、ワイヤーフレームでは立体としてそれぞれ表した。なお、

ワイヤーフレーム図では、斜面を左回転で転倒させて凹が分かり易いように表示した

測量の結果、斜面の平均傾斜は78°、測量の絶対精度は1.3cmであった。両図とも、斜面の傾斜だけでなく、岩盤の凹凸、断裂部の窪み、斜面下部の堆積部との境界

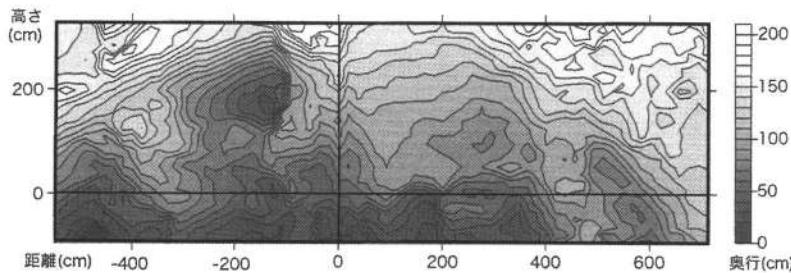


図9 写真測量結果による斜面の等高線図（正面図）

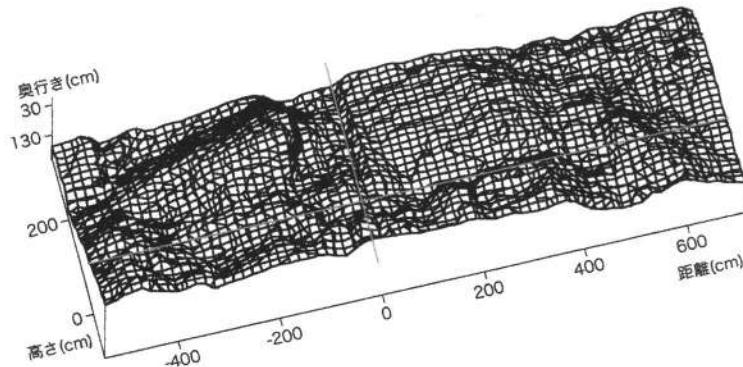


図10 写真測量結果による斜面のワイヤーフレーム線図（転倒図）

など、岩盤表面の特徴を良く示していることがわかる。とくにワイヤーフレーム図では、斜面形状が視覚的に詳細に把握し易い。

3. 3 岩盤表面の断裂分布と内部構造の推定

図11に岩盤表面の断裂分布をワイヤーフレーム図で示した。また、断裂の走向データから岩盤内部の断裂面も図中に予測した。図より、この領域の岩盤斜面において、断裂2と3に囲われた部分は、開発時に落石等の危険性があるが、他の断裂は独立しているため比較的安全であることが推測できる。

このような推測は、岩盤の観察とスケッチからでも容易に可能であるが、設計および施工にこれら断裂に関する情報を反映させる場合、本手法で得られるような正確な数値情報が必要となる。これまで、展開写真とスケッチが主流であった岩盤調査を、本法で示したデジタル写真測量によるDEMおよび断裂座標データに置き換えることで、調査者と設計・施工者との間で岩盤情報の共有化が確実となり、岩盤開発の安全性が向上するものと期待される。

待される。

4. おわりに

本研究では、ステレオ撮影された写真を用いて写真測量し、岩盤斜面の傾斜や凹凸および断裂などの情報を簡易的に数値データとして取得する手法について検討した。

その結果、幅1250cmの斜面をステレオ写真7枚で構成した場合、これより得られる斜面の3次元座標データ(DEM)の精度は、1.3cmであった。また、このDEMを用いて、斜面の形状をコンターマップおよびワイヤーフレームとして示すことで、斜面形状が容易に把握できることがわかった。さらに、岩盤写真から断裂の分布を測量することで、断裂分布の情報を数値化することが可能となった。

すなわち、本法で示したデジタル写真測量による岩盤斜面のDEMおよび断裂座標データを用いることで、安全な岩盤開発に対する適切な設計・施工の精度が向上するものと期待される。

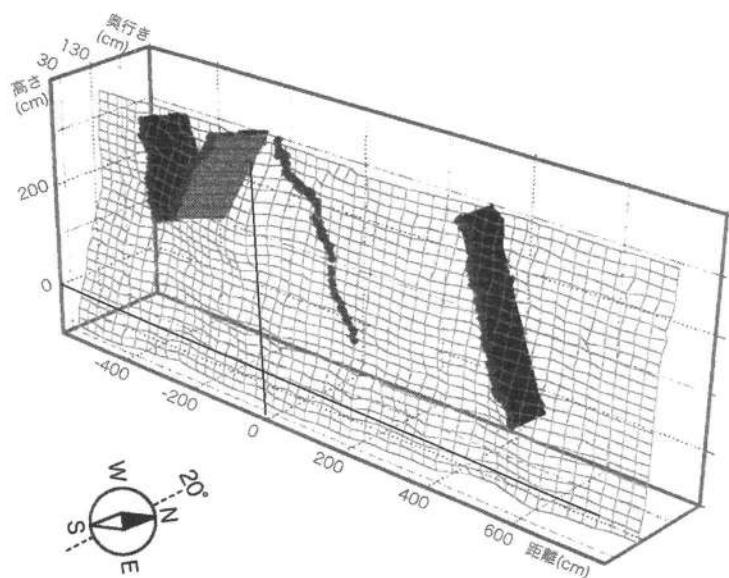


図11 岩盤表面の断裂分布と内部の予測（立体図）

謝 辞

本研究に携わり、熱心に研究に協力していただいた、元秋田大学学生 大村嘉男君および柏木健一君の両君に、心より感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 中筋章人、小野尚哉、丸山智康 (2005) : 溪流調査におけるレーザスキャナデータの利活用方法、日本

応用地質学会平成16年度研究発表会講演論文集、

pp. 149-152.

- 2) 村木広和、田中成典、古田均 (2000) : デジカメ活用によるデジカメ測量入門、森北出版、
- 3) 飯村友三郎、中根勝見、箱岩英一 (1998) : TS・GPSによる基準点測量、東洋書店、pp174-270.