

2.1 画像解析による岩盤掘削面評価図の作成手法に関する研究

研究年度：平成30年度

研究分野：地質・基礎に関する研究

調査研究名：画像解析による岩盤掘削面評価図の作成手法に関する研究

研究者：藤澤侃彦、中村康夫*、安田成夫

【要約】

ダム事業の施工段階で出現する岩盤掘削面に関しては、地質技術者によって詳細な岩盤スケッチが実施され、各種の岩盤掘削面評価図として取りまとめられる。これらの図は、設計技術者が施工段階における設計の妥当性を検証するうえで、不可欠な情報として利用されている。しかしながら岩盤スケッチは、作成に長時間を要するうえ位置情報が不正確である、弱層等の地質要素と構造物の関係がイメージし難い、安全性の面から危険個所での作業が不可能である等の、多くの課題を抱えている。

他方 UAV による画像情報は、これまで不可能であった位置から取得できるうえ、正確な位置情報を持つことから、対象物の精度の高い位置や形状の把握が可能である。このような特性は、岩盤スケッチが有する課題の解決に大きく貢献できると考えられることから、岩盤掘削面評価図作成の効率化を目的として、UAV の活用方法について検討し、標準的な手法について提案した。

【キーワード】

岩盤掘削面、岩盤スケッチ、岩盤画像、岩盤情報、岩盤掘削面評価図、UAV

【背景・目的】

ダム事業の施工段階では、本体基礎・洪水吐基礎・原石山等の掘削によって、大規模な構造物基礎面や法面が出現する。これらの掘削面に関しては、地質技術者によって岩盤スケッチが実施され、取得された岩盤情報は、地質区分図・岩級区分図・岩盤透水性区分図等、各種の岩盤掘削面評価図として取りまとめられる。これらの各種岩盤掘削面評価図は、設計技術者が施工段階における設計の妥当性を検証するうえで、不可欠な情報として利用されている。

しかしながら岩盤スケッチは、①作成に長い作業時間を要するうえ、位置情報が不正確である、②施工の高速化に伴い、岩盤スケッチ作業も効率化が望まれている、③表現上の制約から、弱層等の地質要素と構造物の関係がイメージし難い、④安全性の面から、危険個所での作業が困難である、⑤熟練技術者の減少により、品質の確保が困難となりつつある、等の多くの課題を抱えている。

他方 UAV による画像情報は、画期的な新技術として建設業界においても、既に多くの現場で利用されている。これまで不可能であった位置からの画像情報は、正確な位置情報を持つことから、対象物の精度の高い位置や形状の把握が可能である。このような特性は、岩盤スケッチが有する課題の解決に大きく貢献できると考えられることから、岩盤掘削面評価図作成の効率化を目的として、UAV による岩盤画像の効率的な取得方法・解析手法等について、現地実験を含めて検討した。

【研究経緯】

最近、画期的な新技術として各分野で利用されている UAV による画像情報を、ダム基礎や法面の岩盤性状把握に適用し、良好な成果を挙げた事例が見られるようになった。このような経験を有する技術者が、個々の経験を整理して、UAV によるダム基礎や法面の岩盤情報を把握するための、体系的な技術資料を作成することを目的として、平成27年5月「岩盤画像解析技術研究会」を発足させた。

研究会においては、まずそれぞれの技術者が各現場において、さまざまな目的で取得した UAV による岩盤情報の、取得法・解析法・利用法・適用限界等についてケーススタディーを実施した。続いて、ケーススタディーによって得られた知見を基に設定された撮影条件で取得した同一の岩盤画像について、複数の技術者で解析し、個人差を検討した。

この作業を、地形・地質条件の異なる複数の現場で繰り返してデータを集積するとともに、高品質な岩盤画像を取得する条件を確認するため、センサーサイズの異なるカメラを用い、距離を変えて撮影する現地実験を、複数個所で実施した。以上の過程で得られたデータを基に、UAV による岩盤画像の効率的な取得法・解析法・利用法・適用限界等について、技術資料として平成31年2月に取りまとめた。

【研究内容】

(1) 岩盤掘削面評価図

① 岩盤掘削面評価図の種類

岩盤掘削面評価図は、掘削面における岩盤情報を強度や透水性等の評価対象に応じて、数段階に区分して表示した図面の総称である。ダム基礎掘削面および掘削法面における岩盤掘削面評価図の種類と、それらの作成に必要な岩盤情報の例を表-1に示す。地質区分図は、岩種や不連続面等の岩盤の基本情報を示したもので、掘削面地質調査において最初に作成される。以降に示す各種岩盤評価図の基礎となるので、高い精度が要求される。

岩級区分図は、基礎岩盤の強度特性が推定できるよう、岩級区分基準に基づいて岩盤を区分したもので、ダムの安定性評価に不可欠である。岩盤透水性区分図は、割れ目の透水性とみずみちの連続性を、総合的に検討して決定された、岩盤透水性区分基準に基づいて、岩盤の透水性を区分したもので、基礎処理計画の策定にあたって不可欠である。両者とも岩盤情報として割れ目が重要であるが、前者ではかみ合わせとしての評価、後者ではみずみちとしての評価であり、割れ目の性状に関して土木地質学的見地からの着目点が異なる。

以上の三種類の岩盤掘削面評価図が基本的なもので、いずれのダムでも必ず作成される。これらのほか、重力式コンクリートダムの岩着面としての妥当性を評価するため、岩盤検査時等に岩着面評価図を作成することがある。これは、仕上げ掘削面の状態に対して、適切な岩着面処理方法とその必要箇所を示したもので、前三者とは性格が異なる。すなわち前三者は、岩盤の基本情報として永久保存すべきであるが、岩着面評価図はダムの施工時に必要とされるものの、必ずしも永久保存する必要はない。

また、掘削に伴う法面の安定性検討や、法面対策工の要否の判定のために、不安定化の程度と範囲を明示した、緩み区分図を作成することもある。さらに、上記の各種岩盤掘削面評価図作成の前段階として、単一の岩盤情報に基づいて、風化区分図・変質区分図・割れ目区分図・断層区分図等が作成される場合もある。

② 岩盤掘削面評価図の課題

岩盤掘削面評価図の作成にあたっては、表-1に示すような各種岩盤情報が必要であるが、現状ではそ

の取得や利用にあたって、以下に示すような多くの課題がある。各種評価図の作成にあたって、最も重要な位置情報は現地の基線を基に、巻き尺やコンベックスによる簡易計測によって、相対的位置関係を求めて取得しているため、不正確で精度は光波測量に遠く及ばない。また、このような手法による位置情報の取得に長い時間が割かれるので、地質状況が複雑で精密な観察が必要な場合には、岩盤スケッチの完了には極めて長時間が必要となる。

施工技術の進歩のに伴い、施工が高速化しているが、上述のような岩盤スケッチの非効率性が、高速化の制約条件となっていることが多い。特に、スレーキング等によって掘削後急速に劣化が進行する岩盤では、時間的制約から通常の岩盤スケッチの方法を適用できない。また、急傾斜の法面の高所や立ち入りが危険な箇所は、直接岩盤掘削面を観察できないため、岩盤情報の取得に制約がある。さらに、得られた岩盤情報を基に作成された各種岩盤掘削面評価図は、一般的に二次元の図面として表現されるので、弱層等地質要素の立体的分布状況と、構造物の関係がイメージし難い。

以上のような課題に対して、直接観察できない箇所を含めて、掘削面を UAV で撮影して座標を有するオルソ画像等の岩盤画像を取得し、掘削面を視覚的に画像で再現できる、三次元モデルを作成することで対処可能となる。

(2) 現地実験

① 固定カメラ

センサーサイズおよび、画素数が異なる 6 機種(1/2.3・1200 万画素、1/2.3・1600 万画素、1.0・2010 万画素、3/4・1600 万画素、APS-C・2430 万画素、フルサイズ・2430 万画素)を用いて、ほぼ同一の撮影条件(レンズ焦点 28mm・ISO100・絞り F8・シャッター速度 1/100 程度)で、距離を変えて(2.5・5・10・15・20・30・50m)岩盤を撮影し、画像を比較した。その結果、大型の画像センサーを用いたカメラほど画質が良いが、1.0 型以上であれば実用上問題ないことが確認された。1/2.3 の画像センサーでは画質が劣り、高精度の解析に耐えられない。

さらに、感度・絞り・シャッター速度等の撮

表-1 岩盤掘削面評価図の種類と評価対象・岩盤情報

種類	評価対象	必要な岩盤情報
地質区分図	地質分布	岩種、不連続面(断層・割れ目・地質境界等)等
岩級区分図	強度特性	岩片の硬さ、割れ目の間隔・状態等
岩盤透水性区分図	透水特性	割れ目の間隔・状態・風化・連続性・分布状況等
岩着面評価図	岩着面処理	浮石・挟在粘土の有無、不陸の程度、湧水箇所・湧水量等
緩み区分図	法面安定性	不連続面(走向・傾斜・性状・分布)、風化、熱水変質等

影条件を変えて撮影し、岩盤撮影に最適な条件を検討した。まず、1.0型センサーのカメラで感度(100・200・400・800・1600)と、距離(1・2.5・5m)を変えて撮影した画像を比較した結果、撮影距離にかかわらずISO400以下で良好な画像が得られた。したがって、岩盤画像で微細な構造を把握するためには、できるだけISOを低くすることが重要であり、可能ならばISO400以下とすべきで、暗いなど撮影条件が厳しい場合でも、ISO800程度以下が望ましい。

1/2.3型～フルサイズまでの、センサーサイズの異なる5機種のカメラを使用し、感度(400・800・1600)・絞り(開放～最小)・距離(2.5・5m)を変えて岩盤を撮影し、露出状況の比較を行った。その結果、すべての機種で適正露出が得られたが、F値を大きくすると細部がぼける「小絞りボケ」が発生するため、F値は11程度までが良いことが確認された。また、露出オーバーにならない限り、絞りを開けた方がシャッタースピードが速くなり、ブレの防止に有利である。

② UAV 搭載カメラ

①の実験結果を踏まえ、一般に使用されているセンサーサイズの異なる2機種(1/2.3・1.0)のUAVで、撮影距離を変えて(5・10・20・30・50m)岩盤を撮影し、オルソ画像および三次元モデルを比較した。その結果、オルソ画像はいずれの撮影距離においても問題なく作成でき、撮影距離やセンサーサイズに応じた画像精度を有することが確認された。すなわち、距離が大きくなるほど細い線が確認できなくなり、出力画像も小縮尺としないと鮮明な画像とならない。また、センサーが大きく高解像度のカメラの方が、より遠距離から高精度の画像を取得できる。

三次元モデルは、いずれの撮影距離でも機種にかかわらず、問題のない精度で作成されることが確認された。

(3) 岩盤画像解析のレベル区分

岩盤を評価するには、小縮尺の図で大構造を、大縮尺の図で詳細な構造を記載する。ここでは、岩盤掘削面評価図に要求されるレベルを、最低の1から最高の5までの5段階に区分し、評価内容と縮尺・精度等の関係を表-2に示す。表-2に示す成果の精度は、成果図作成時の縮尺で表現できる大きさと、最低限必要な精度である。また岩盤観察時の精度は、画像を拡大して記載する(最終成果の倍以上の精度で観察することが通常であるため)際に必要な精度である。

レベル1は、対象箇所の全容把握を目的とするもので、成果図面の縮尺は1/500～1/200程度である。レベル2は岩盤性状のうち、大局的な地質構造や劣化状況の把握を目的とするもので、成果図面の縮尺は1/200～1/100程度である。レベル3は岩盤性状を特徴づける、主たる地質境界や弱層の性状の把握を目的とするもので、成果図面の縮尺は1/100～1/50程度である。レベル4は個々の割れ目の、定量的評価を目的とするもので、成果図面の縮尺は1/20程度である。レベル5は肉眼観察と同程度の、岩盤性状の詳細な評価を目的とするもので、成果図面の縮尺は1/10～1/5程度である。

いたずらに精度を上げると、画像取得および解析時間が膨大となる。1ランク上の成果を得るには作業量・費用が倍以上となるため、上記レベルの設定にあたっては、目的に応じて慎重に行う必要がある。画像取得手段は、表-2に示すレベルの縮尺・精度に応じて設定する。一般的に、レベル1～3はUAV、レベル4はUAVまたは固定カメラ、レベル5は固定カメラ(接写を含む)が用いられる。なお通常、三次元解析にはレベル3以上が必要とされるので、三次元解析の有無も考慮して、精度を検討する必要がある。

表-2 岩盤画像解析のレベル区分と精度

レベル	把握すべき事項	成果図の縮尺	成果図に必要な精度*		観察時に必要な精度	
			幅(mm)	画素ピッチ(mm/Pixel)	確認すべき大きさ(mm)	画素ピッチ(mm/Pixel)
1	対象範囲の概要、大構造	1/500～1/200	100	50以下	15～50	7.5～2.5
2	岩盤性状の概要、基本的な地質構造	1/200～1/100	50	25以下	5～15	25～7.5
3	岩盤面形状の概要、主要割れ目・弱層の分布・性状	1/100～1/50	25	12.5以下	3～10	1.5～5
4	岩盤面形状、割れ目の走向・傾斜・開口量	1/20	10	5以下	2～3	1～1.5
5	岩級、風化度、変質度、地質要素の詳細	1/10～1/5	2.5	1.25以下	1～2	0.5～1

*成果図の縮尺で0.5mmとなる実際の幅と、その表現に必要な画素ピッチ。

(4) 画像取得条件と精度

(2)で紹介した現地実験等から求めた、機材の性能(センサーサイズ)・撮影条件(撮影距離)と、取得できる岩盤画像の精度との関係を、表-3 および表-4 に示す。塗色は表-2 の岩盤画像解析のレベル区分に対応している。表-3 および表-4 に示すように、評価する項目によって、必要な精度は異なる。例えば必要精度は、地質区分等ゾーンを評価する場合は相対的に低くなり、粒径や切断関係等を評価する場合は高くなる。またいずれのセンサーでも、レベル5相当の精度は確保できない。

カメラのセンサーサイズは、岩盤画像の精度を決定するため、利用するカメラが決まっている場合は、目的とするレベルの画像を取得するのに、撮影条件の制約を生じる。表-3 と表-4 を比較して明らかなように、センサーサイズが大きければより遠い場所から広範囲に撮影しても、高精度の画像を得ることができるが、センサーサイズが小さい場合には、より接近して撮影する必要がある。

例えば10mの距離からの撮影では、1/2.3型センサーでは表-3 に示すように、おおむねレベル3程度の精度が得られるが、詳細の確認にはやや精度が不足する。これに対し、1.0型センサーでは表-4 に示

すように、レベル2~3程度の精度が確保できる。すなわち、同一距離で得られる画像の精度は、1.0型センサーの方が1/2.3型センサーより、おおむね1ランク高い。

【技術資料の構成】

技術資料は表-5 に示すように、5章と参考資料から構成されている。これらのうち、第1章~第4章が岩盤画像の取得法・解析法・利用法等に関する記述、第5章は4章までの内容から作成した岩盤画像解析手法の手引き、参考資料は本書作成にあたって実施した現地実験データおよびUAVの飛行計画書である。

第1章では技術資料の構成・目的・利用法・用語の定義等について、第2章では岩盤の特性と評価に関する問題点と、岩盤画像の有効利用による問題点の解決策について解説している。第3章は高精度の岩盤評価を行ううえで必要な岩盤画像の取得方法について、現地実験を主体に記述したものである。第4章は岩盤画像を用いた掘削面岩盤評価の実施例で、時間的制約のある掘削面評価、広範囲掘削面評価、原石山掘削面評価の3事例を示している。

表-3 1/2.3型センサーによる撮影距離と精度

項 目		撮 影 距 離					備 考
		5m	10m	20m	30m	50m	
一 般	鮮明に出力できる尺度	1 : 20	1 : 50	1 : 100	1 : 200	1 : 500	
	スタッフの文字	○	△	×	×	×	*1
	線の太さ(明瞭に確認可能)	2mm	8mm	20mm	40mm	—	
	同上(不明瞭ながら確認可能)	2mm	2mm	4mm	10mm	40mm	
	三次元モデルの作成	○	○	○	○	○	*2
地 質 要 素	粒状構造(粒径)	φ 2mm	φ 8mm	φ 20mm	φ 40mm	φ 50mm	
	線状構造(幅)	2mm	2mm	4mm	10mm	40mm	
	地質区分・風化区分・変質区分	○	○	△	△	×	*3
	変位量・切断関係・割れ目間隔	○	×	—	—	—	*4
補 助 要 素	調査孔	○	○	○	△	×	*5
	湧水	○	○	○	△	△	*6
	構造物	○	○	△	△	×	*7
	走向・傾斜の測定	○	○	○	○	○	*2

注)塗色は表-2 に対応している。

*1 ○ : 読める・△ : 文字があるのが分かる・× : 文字があるのか不明

*2 ○ : 可能

*3 ○ : 10cm オーダーで区分可能・△ : 50cm オーダーで区分可能・× : 100cm オーダーで区分可能

*4 ○ : 2~3mm を判断可能・× : 5~15mm を判断可能・— : 15mm 以上で判断可能

*5 ○ : 見える・△ : 見えないことがある・× : 見えない

*6 ○ : 水濡れが分かる・△ : 条件によっては水濡れが分かる

*7 ○ : 網掛けが見える・△ : アンカーボルトが見える・× : フレームが見える

(構造物の大きさとして、○,△,×の順に大きくなる)

表-4 1.0型センサーによる撮影距離と精度

項 目		撮 影 距 離					備 考
		5m	10m	20m	30m	50m	
一 般	鮮明に出力できる尺度	1 : 20	1 : 20	1 : 50	1 : 100	1 : 200	
	スタッフの文字	○	○	×	×	×	*1
	線の太さ(明瞭に確認可能)	2mm	4mm	10mm	30mm	30mm	
	同上(不明瞭ながら確認可能)	2mm	2mm	6mm	8mm	8mm	
	三次元モデルの作成	○	○	○	○	○	*2
地 質 要 素	粒状構造(粒径)	φ 2mm	φ 4mm	φ 10mm	φ 30mm	φ 30mm	
	線状構造(幅)	2mm	2mm	6mm	8mm	8mm	
	地質区分・風化区分・変質区分	○	○	○	△	△	*3
	変位量・切断関係・割れ目間隔	○	△	×	—	—	*4
補 助 要 素	調査孔	○	○	○	○	△	*5
	湧水	○	○	○	○	△	*6
	構造物	○	○	○	△	△	*7
	走向・傾斜の測定	○	○	○	○	○	*2

注)塗色は表-2 に対応している。

*1 ○：読める・×：文字があるのか不明

*2 ○：可能

*3 ○：10cm オーダーで区分可能・△：50cm オーダーで区分可能

*4 ○：2~3mm を判断可能・△：3~5mm を判断可能×：5~15mm を判断可能・—：15mm 以上で判断可能

*5 ○：見える・△：見えないことがある

*6 ○：水濡れが分かる・△：条件によっては水濡れが分かる

*7 ○：網掛けが見える・△：アンカーボルトが見える

(構造物の大きさとして、○,△,×の順に大きくなる)

表-5 技術資料目次

【今後の課題】

第1章 概説
第2章 岩盤画像を活用した岩盤評価
2.1 岩盤評価
2.2 岩盤掘削面評価図
2.3 ドローンと三次元地形モデル・オルソ画像を活用した岩盤掘削面評価図
2.4 岩盤掘削面評価図作成の実証実験
2.5 岩盤画像の有用性を高めるための検討事項
第3章 岩盤画像解析技術の理論・実証実験
3.1 オルソ画像の作成手順
3.2 鮮明なオリジナル画像を取得するための条件
3.3 高品質な合成画像を取得するための条件
3.4 岩盤画像の有用性を高めるための条件
第4章 活用事例
4.1 限られた時間で実施した岩盤スケッチ
4.2 広範囲岩盤スケッチ
4.3 原石山法面
第5章 岩盤画像解析手法の手引き(案)
参考資料
参1 岩盤画像解析実証実験データ集
参2 飛行計画書

現時点では、ダムの地質調査分野における UAV による画像の利用は一般化しておらず、適用された現場も限られている。しかしながら、本研究で明らかになったように、この技術は各種地質調査に対して、極めて有効であるのでさまざまな現場に適用して、データを収集・解析する必要がある。

また、UAV による画像取得・解析技術は、今後著しい速度で進歩し、現時点では入手不可能な岩盤情報が、安価で効率的に入手できるようになると考えられる。このため、現時点における技術レベルにとらわれず、開発された技術に迅速に対応して、利用分野を拡大する方策を考えるべきである。