

川内沢ダムの堤体基礎掘削時における定量的な岩盤評価手法の適用

西松建設(株) 正会員 ○黒田 卓也

西松建設(株) 正会員 水野 直希

西松建設(株) 白武 知浩

西松建設(株) 小野 雄司

1. はじめに

ダム堤体の打設に先立って行われる本体掘削において、必要岩盤強度および斜面安定性の確保の観点から基礎岩盤評価が重要となる。円滑かつ安全に施工を行っていくためには、施工時に迅速かつ確実な岩盤評価を行っていくことが求められる。そこで筆者らは、近年活用が進められているセンシング技術の一つであるスペクトルカメラおよびシュミットロックハンマー試験等の現場試験を組合せてダム基礎岩盤の評価指標を構築し、地質技術者の目視による定性的な岩盤評価を定量的かつ簡易的に評価する手法を確立した。本稿では、川内沢ダムの基礎掘削時の岩盤の評価における定量的な岩盤評価手法の構築およびその適用結果について述べる。

2. 現場概要

(1) 工事概要

川内沢ダムは、一級河川名取川水系川内沢川の上流、名取市愛島笠島地内に治水ダムとして建設するものである。ダム形式は重力式コンクリートダムで、洪水調整および流水の正常な機能の維持を目的としている。

(2) 地質概要

ダムサイトの基礎岩盤は大部分が堅硬な塊状安山岩からなるが、一部に潜在割れ目が発達し破碎質な自破碎状部が存在する。自破碎状部は不規則に分布しており、掘削時に想定より劣化した岩盤が出現するリスクがあった。

一般的にダムの基礎岩盤評価は、専任の地質技術者の目視およびハンマーの打診によって定行的に行われている。掘削面に露出する岩盤に対して、岩種・岩盤の硬さ・割れ目の間隔・割れ目の状態などを確認し、それらを組み合わせて岩級区分評価を行い、調査・設計段階との差異を評価することが行われる（表-2）。



図-1 完成イメージ

表-1 ダム堤体および貯水諸元

ダム諸元		貯水池諸元	
堤高	36.7 m	集水面積	3.65km ²
堤頂長	140.0 m	湛水面積	0.18km ²
堤体積	51,000 m ³	総貯水容量	1,790,000m ³
堤頂幅	4.0m	有効貯水量	1,510,000m ³
天端標高	EL 68.7m	常時満水位	EL 58.5m

表-2 川内沢ダム岩級区分基準

岩級	記事	代表写真
CH	岩片は堅硬・緻密。一部の割れ目沿いに風化・変質または破碎がわずかに認められる。割れ目間隔は概ね15cm以上。	露頭にて未確認
CMH	岩片は堅硬だが潜在的な割れ目含む。割れ目沿いに風化・変質または破碎が認められる。割れ目間隔は概ね5～50cm。	
CML	岩片は中硬質、潜在割れ目が顕著。割れ目沿いに風化・変質または破碎が認められる。割れ目間隔は概ね5～50cm。	
CL	岩片は中硬質、潜在割れ目が顕著割れ目沿いに風化・変質または破碎が認められる割れ目間隔は概ね15cm未満。	
D	岩片は中硬～軟質割れ目沿いに風化・変質または破碎しており、割れ目として認識できない。	露頭にて未確認

キーワード ダム，基礎岩盤評価，マルチスペクトルカメラ，定量評価

連絡先 〒105-0001 東京都港区虎ノ門二丁目2番1号 西松建設株式会社 技術研究所 TEL 03-3502-0247

3. 岩盤評価における課題およびその対策

(1) 課題およびその対策

ダム本体掘削では、粗掘削、岩盤清掃を行い、粗掘削完了面を、専任の地質技術者が基礎岩盤評価することを標高毎に繰り返す（写真-1）。評価結果を元に、関係者間で追加掘削等の対策の必要性について協議を実施する。本現場では、複雑な地質構造によって掘削時に想定より劣化した岩盤が出現するリスクがあったため、基礎掘削時に詳細に岩盤状況を把握し、設計段階の岩級区分図を見直してゆく必要があった。施工中に評価を行うためには、施工を妨げない迅速性と一般土木技術者でも簡易的に評価を可能とするための定量性が必要となる。

そのため、本現場では地質技術者の目視およびハンマー打診に代わるものとして、施工時にマルチスペクトルカメラとシュミットロックハンマーを活用し、定量的に岩級区分評価を行うものとした。

(2) マルチスペクトルカメラの活用

地質技術者による目視観察に代わるものとして、マルチスペクトルカメラを活用した。通常のデジタルカメラは2次元的にRGBの3バンドの波長情報を取得し、人間の視覚情報に近いイメージを表現している。それに対し、マルチスペクトルカメラは10バンド程度、ハイパースペクトルカメラでは100バンド以上の波長情報を取得しており、人間の視覚以上に細かい違いを検知できる。これにより、対象物の波長情報を2次元的かつ定量的なデジタルデータとして取得することが可能になる。

本検討では、施工と並行して撮影することを想定し、迅速かつ広範囲に撮影が可能で波長範囲475～842nmのスペクトルを取得できるマルチスペクトルカメラ搭載 UAV（MicaSense 社製、写真-2）を使用した。

4. 定量的な岩盤評価指標の構築

(1) 検討方法

本体掘削に先立ち実施したダム基礎岩盤のトレンチ掘削部（写真-3）において、マルチスペクトルカメラによる撮影と、シュミットロックハンマー試験を実施した。スペクトルの情報から得られるパラメータと反発度を、地質技術者による地質・岩級区分を比較することで、堤体基礎岩盤の岩級区分への適用性を確認した（図-2）。

また、マルチスペクトルカメラは反射スペク



写真-1 地質技術者による基礎岩盤評価



写真-2 マルチスペクトルカメラ搭載 UAV

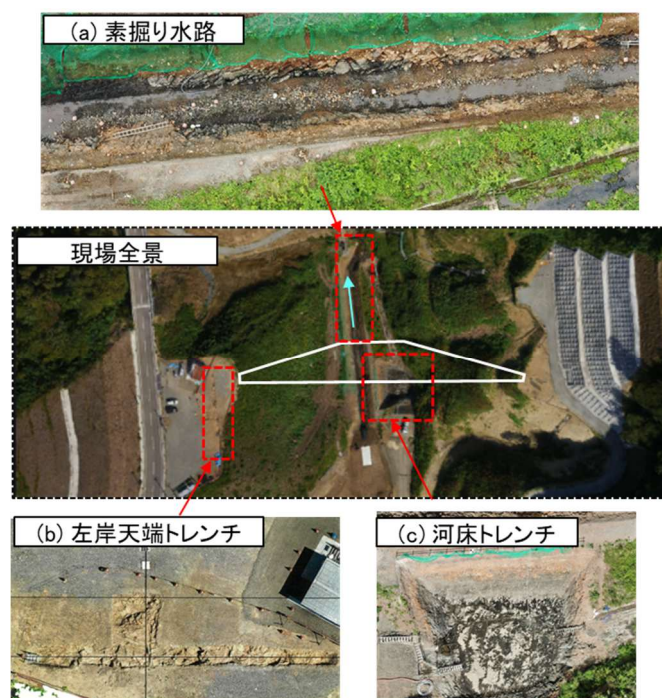


写真-3 トレンチ位置図

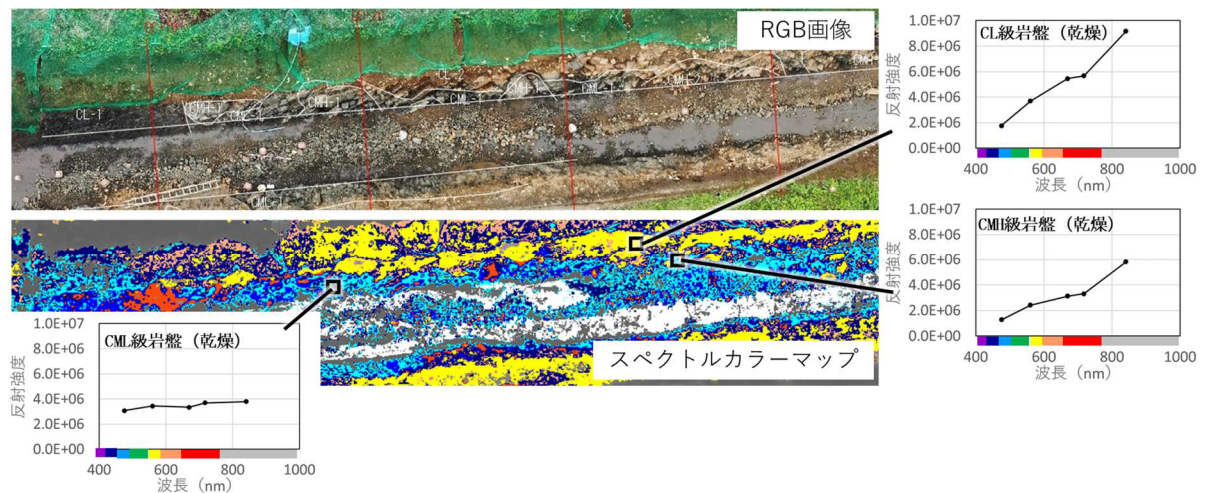


図-2 素掘り水路の撮影結果とスペクトルの抽出

トルを取得する技術であり、屋外環境では同一区分であっても、日射条件の違いや岩盤の湿潤状態によって岩盤の色彩が異なり、スペクトルに影響を及ぼすことが想定された。そのため、同一個所を天候や撮影時間を変えて複数回撮影し、スペクトルの岩級区分ごとの違いと、撮影環境による違いを合わせて評価した。

(2) マルチスペクトルカメラによる測定結果

河床部・左岸天端部のトレンチで、各岩級区分の代表箇所においてスペクトルを抽出して岩級区分毎に比較した結果、スペクトルのパターンは大きく2区分に分類されており、風化程度の違いを表すものと推測された（図-3）。よって、スペクトルにより岩盤の風化程度の違いを定量的に評価できる可能性が示唆された。

しかし一方で、スペクトルは環境条件（天候、岩盤の乾湿）の影響を受け、乾燥、湿潤、日射条件の違いが反射強度（色の明暗）に影響することが判明した。そのため、定量的な境界値により区分基準を作成することが困難であった（図-4）。ダム基礎掘削面の評価に際しては、評価を行う際の環境条件は常に一定でなく、1回の撮影範囲内でも日射条件は斜面の向きにより異なることから、定量的な評価においては、これらに影響されない評価指標を構築する必要がある。

一般的に岩盤の色彩において、湿潤の違いは明度の差異として現れるが、色み（彩度）には影響しないと言われている。また、スペクトルデータの解析方法として、明るさの影響を除外して、彩度のみで評価する方法が提案されている。これらを踏まえて、環境条件によらない指標として、風化による相対的な赤みの強さを表す指標として、blue (475nm) と red (669nm) の反射強度の比 (669/475nm) で評価した。その結果、反射強度

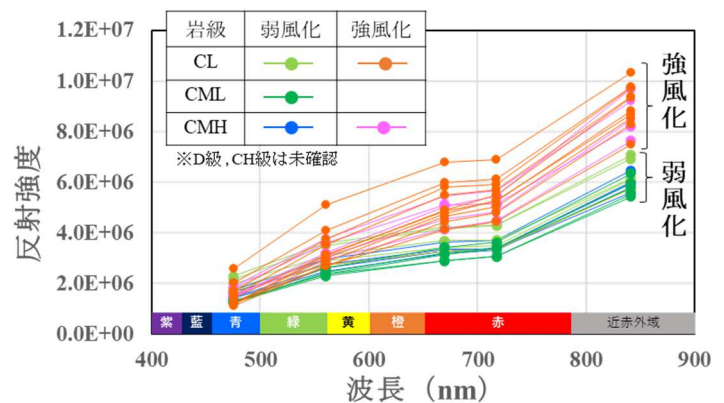


図-3 岩級区分毎のスペクトル

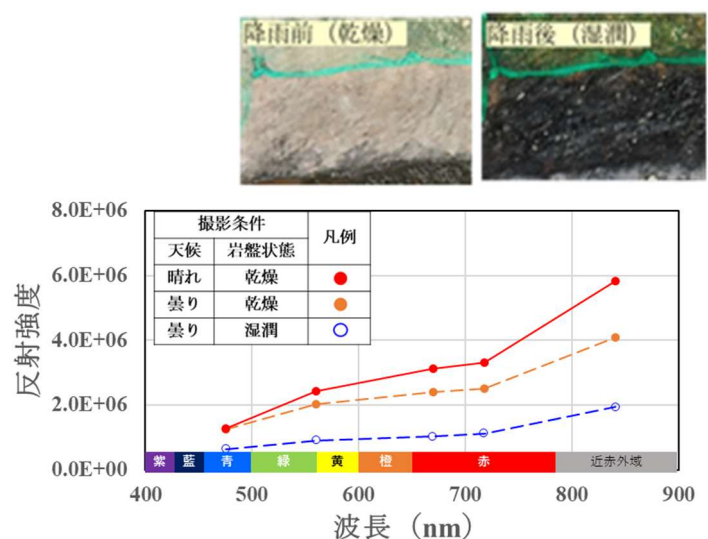


図-4 同一区分における環境条件の影響

比で評価することで環境条件の影響を受けず、669/475nm 反射強度比=1.25 および 2.5 付近で風化による岩級区分の境界値を設定できることを確認した(図-5)。

このことから、トレンチにおける撮影結果を、上記の反射強度比によって着色し表現した(図-6)。その結果、地質技術者によって評価された CL 級と CML 級岩盤の境界部をほぼ同様の形状で抽出できることを確認した。なお、これは強風化した CL 級岩盤と相対的に風化の弱い CML 級岩盤の風化程度の違いによる色彩の境界を捉えたものである。一方で、分布比率は少ないが一部に出現する未風化の CL 級岩盤は、CML 級岩盤との色彩の差異がなく区別できないため、今後の課題とした。

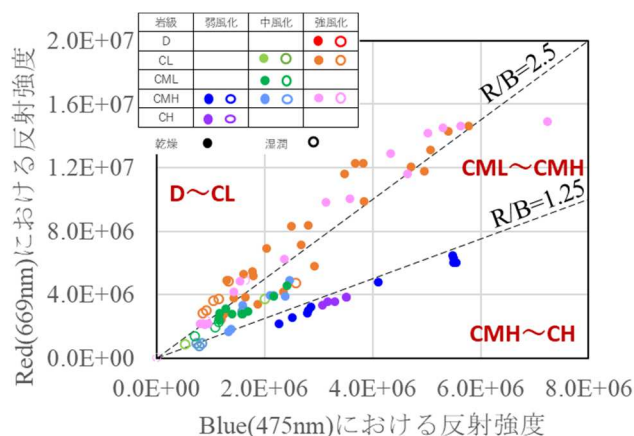


図-5 Blue と Red の反射強度比による評価

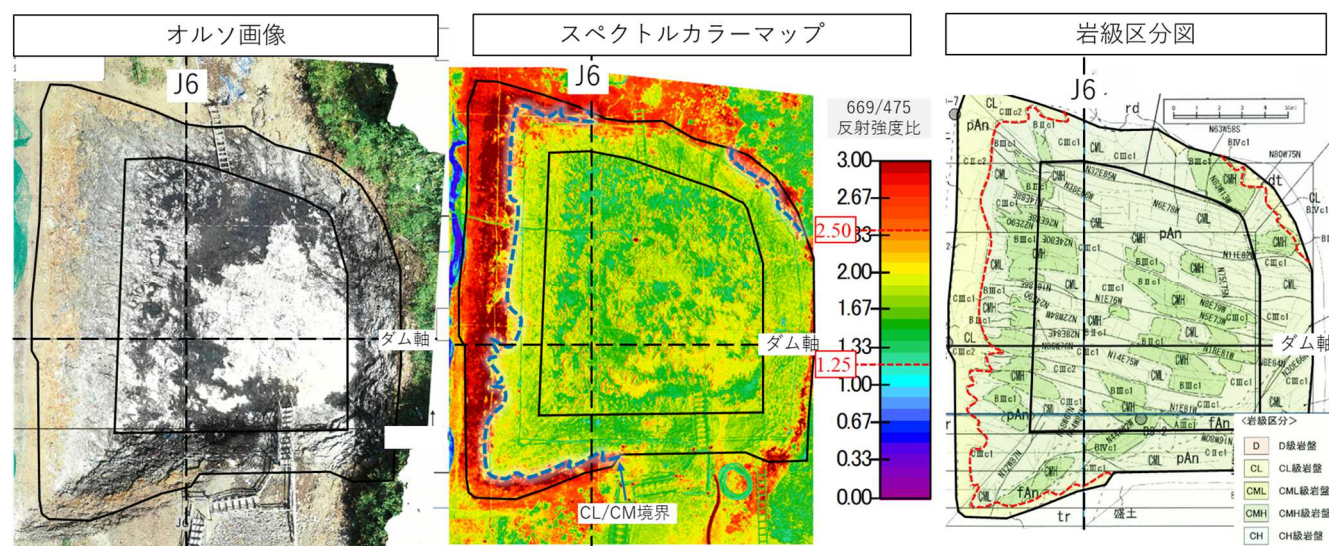


図-6 河床トレンチにおけるスペクトル評価結果と岩級区分の比較

(3) シュミットロックハンマー測定結果

地質技術者による打診を定量評価するため、調査横坑および河床部・左岸天端部のトレンチでシュミットロックハンマー試験実施し、岩級区分と比較した。その結果、対象地の岩盤は、シュミットロックハンマーの反発度 35 を境に CL・CML 級と CMH・CH 級の 2 区分に分類できることを確認した(図-7)。

CML 級岩盤と CMH 級岩盤には色彩の差異がなく、マルチスペクトルカメラでの分類が難しいことから、シュミットロックハンマーを活用することとした。

(4) 定量的な岩盤評価基準の作成

上記を踏まえ、マルチスペクトルカメラから得ら

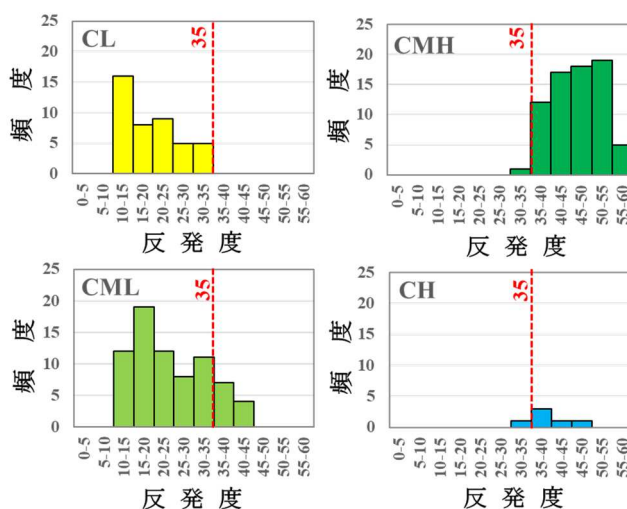


図-7 各岩級区分における反発度

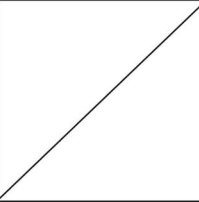
		スペクトル強度比 周波数669nm/475nmの反射強度比			
		1.25以下	1.25～2.5	2.5以上	
シュミットロックハンマー 反発度	35以上	CH  (一部CMH含む)	CMH 	(一部のCMH) 	硬質
	35未満		CML  (一部CL含む)	CL 	軟質
		弱風化	中風化	強風化	

図-8 定量的な岩盤評価基準

れるスペクトル強度比（周波数 669 nm/475nm の反射強度比）とシュミットロックハンマーの反発度で構成される定量的な L 型マトリックスの岩級区分指標を構築した(図-8). マルチスペクトルカメラで風化程度の違い、シュミットロックハンマー試験で硬さの違いを定量評価することで、定量的に岩級区分境界を把握することが可能となった。

基礎掘削時にはマルチスペクトルカメラによる面的な評価、2m メッシュでのシュミットロックハンマー試験により、2 次元的な岩級分布を得るものとした。

5. 定量的な岩盤評価指標の構築

(1) 定量的な岩盤評価基準の作成

実際の運用方法としては、5m 掘削盤が下がるごとに掘削面の清掃を行い、地質技術者による評価に先立って、マルチスペクトルカメラ搭載 UAV での撮影(写真-4)とシュミットロックハンマー試験(写真-5)を実施した。

UAV での撮影は、1 回あたりの撮影範囲（およそ 1000m²）に対して 20 分～30 分程度、解析には 2 時間程度の時間を要する。マルチスペクトルカメラによる評価結果は、各岩級区分に応じて着色したオルソ画像として受領した。得られた結果をシュミットロックハンマーの計測結果と併せ、岩盤評価指標に照らし合わせて岩盤を評価した。これにより、広範囲の岩盤を迅速かつ定量的に評価することが可能となった。

また、得られた結果は、3D データの共有・閲覧が可能なクラウド上に集約し、施工関係者・発注者・設計担当者に共有した。これにより、関係者間で早期の情報共有を図ることにより、基礎掘削に影響する岩盤が出現した際は、迅速に関係者間で岩盤状況を確認し、協議を行うことを可能とした。



写真-4 マルチスペクトルカメラ搭載 UAV
による撮影状況



写真-5 シュミットロックハンマー
試験状況

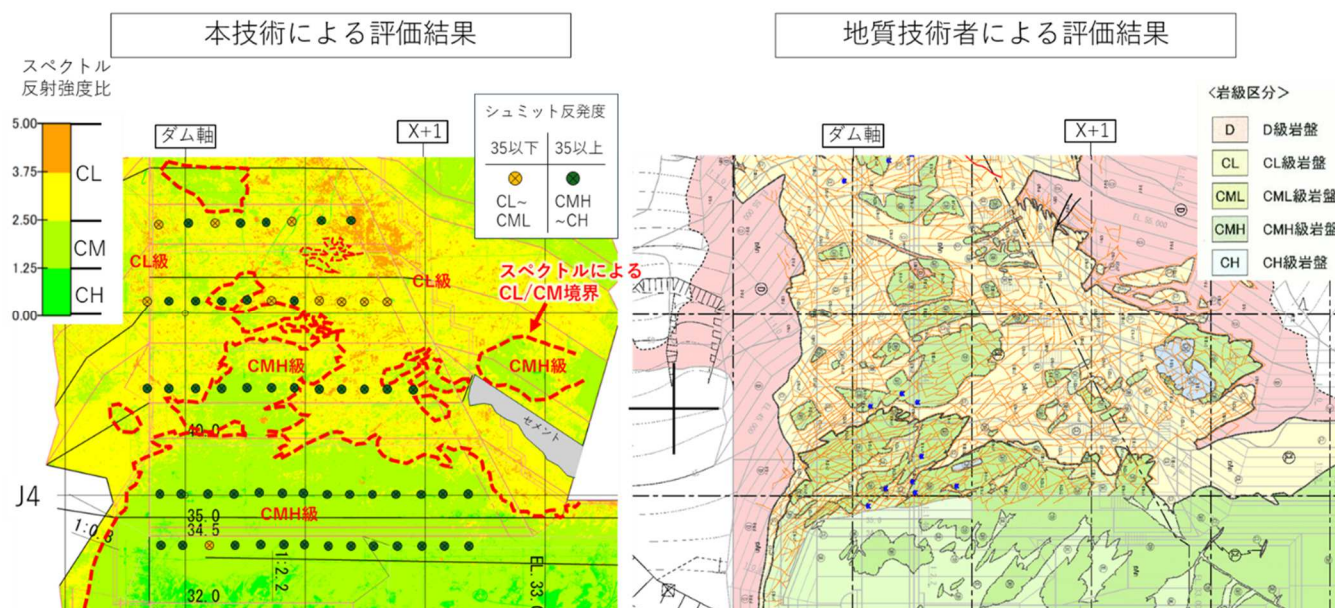


図-9 基礎掘削時の岩盤評価結果

(2) 基礎岩盤の評価結果

本現場では、掘削途中段階および粗掘削時の基礎岩盤の評価に本技術を適用した。実施結果を図-9に示す。スペクトル画像およびシュミットロックハンマー試験の結果を岩級区分指標と照らし合わせたところ、CMH級とCL級の境界は、地質技術者による定性的な岩盤評価結果と概ね一致していた。また、本結果は複数日の撮影結果を結合したものであり、撮影時の天候や掘削面の湿潤状態は撮影毎に異なっていたが、影響を受けず評価することが可能であった(図-10)。このように、定量的に岩盤を評価することにより、地質の専門知識を有さない一般土木技術者でも大まかな岩級区分を推察することが可能となった。

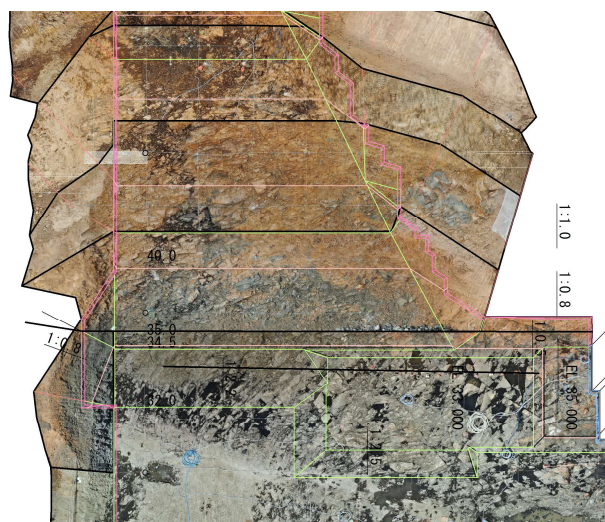


図-10 基礎掘削時の岩盤オルソ画像

一方で、本評価手法では、D級岩盤を分類することができないことが課題として挙げられた。今回は、CL～CM級岩盤の分類ができるよう評価手法を構築したが、評価対象に合わせて評価指標を見直すことや、他のセンシング技術と組み合わせることなどが必要になると考えられる。

本技術による評価結果は、適宜地質技術者の評価結果と比較し、差異が生じた場合や、これまで出現しない岩級区分が確認された際は、基準値の見直しを図った。これにより、精度よく岩級区分を推定することが可能となった。

6. まとめ

マルチスペクトルカメラと現場計測を併用して、定量的かつ簡易的な基礎岩盤評価手法を構築した。本評価手法を用いることにより、対象岩盤の岩級区分を迅速に定量的かつ簡易的に評価することができ、地質の専門知識を有さない一般土木技術者でも岩級区分評価を行うことを可能とした。本技術により評価した岩級区分は、専門的地質技術者による定性的な評価と概ね一致していた。また、得られた結果をクラウド上で共有することで、基礎岩盤によって生じるリスクを早期に関係者間で把握することが可能となった。

川内沢ダムでは、岩級区分の境界で岩盤の風化程度の違いが顕著であったため、色の違いを定量的に捉えるマルチスペクトルカメラでの評価が有効であった。今後、他の岩種や評価項目などの知見を蓄積するとともに、他のセンシング手法との組合せていくことにより、適用範囲を拡大し、目視点検の省力化・高度化に寄与していきたい。