

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

Application of quantitative evaluation method for foundation rock of Kawauchisawa Dam

水野 直希*

Naoki Mizuno

白武 知浩*

Tomohiro Shiratake

黒田 卓也**

Takuya Kuroda

小野 雄司*

Yuji Ono

要 約

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。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 岩盤評価における課題およびその対策
- § 4. 定量的な岩盤評価指標の構築
- § 5. 現場適用結果
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

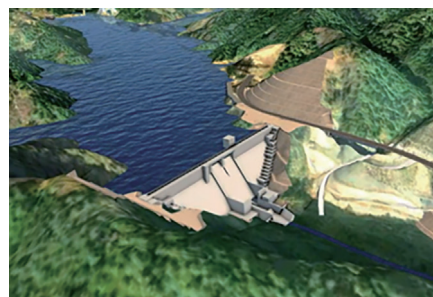
ダム堤体の打設に先立って行われる本体掘削において、必要岩盤強度および斜面安定性の確保の観点から基礎岩盤評価が重要となる。川内沢ダムの基礎岩盤は不規則に自破碎状部が分布しており、掘削時に想定より劣化した岩盤が出現するリスクがあった。想定より劣化した岩盤が出現した場合は、対策工実施による工程遅延や掘削中の安定性低下などのリスクが生じる。施工中に遅滞なく岩盤状況を評価し、発注者や設計担当者と情報共有を図り、早急に協議していくことが求められていた。そこで、対象物の波長情報を取得するマルチスペクトルカメラを活用し、地質技術者の目視による定性的な岩盤評価を定量化することに取り組んだ。本稿では本体掘削を円滑に進めるために実施した定量的な岩盤評価手法の構築とそ

の適用結果について述べる。

§ 2. 工事概要

2-1 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、洪水調整及び流水の正常な機能の維持を目的としている。



図ー1 完成イメージ

表ー1 ダム堤体および貯水諸元

ダム 諸 元		貯 水 池 諸 元	
堤 高	39.7m	集 水 面 積	3.65km ²
堤 頂 長	145.0m	湛 水 面 積	0.18km ²
堤 体 積	54,000m 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

* 北日本（支）川内沢ダム（出）

** 技術研究所土木技術グループ

2-2 地質概要

ダムサイトの基盤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。

川内沢ダムの基礎岩盤評価は、専任の地質技術者の目視によって、岩種・岩盤の硬さ・割れ目の間隔・割れ目の状態などが確認され、それらを組み合わせた岩級区分評価によって、調査・設計段階との差異が評価された(表-2)。

§ 3. 岩盤評価における課題およびその対策

3-1 課題およびその対策

ダムの本体掘削では、粗掘削、岩盤清掃後に、専門の地質技術者による粗掘削完了面の基礎岩盤評価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、基礎掘削時に詳細な岩盤状況を把握し、設計段階の岩級区分図を見直しておく必要があった。施工中に評価を行うために、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であった。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った。

3-2 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のに対し、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でき、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である。

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

4-1 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。

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



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

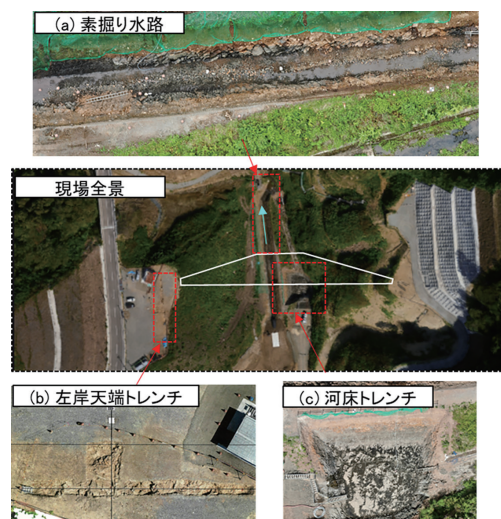
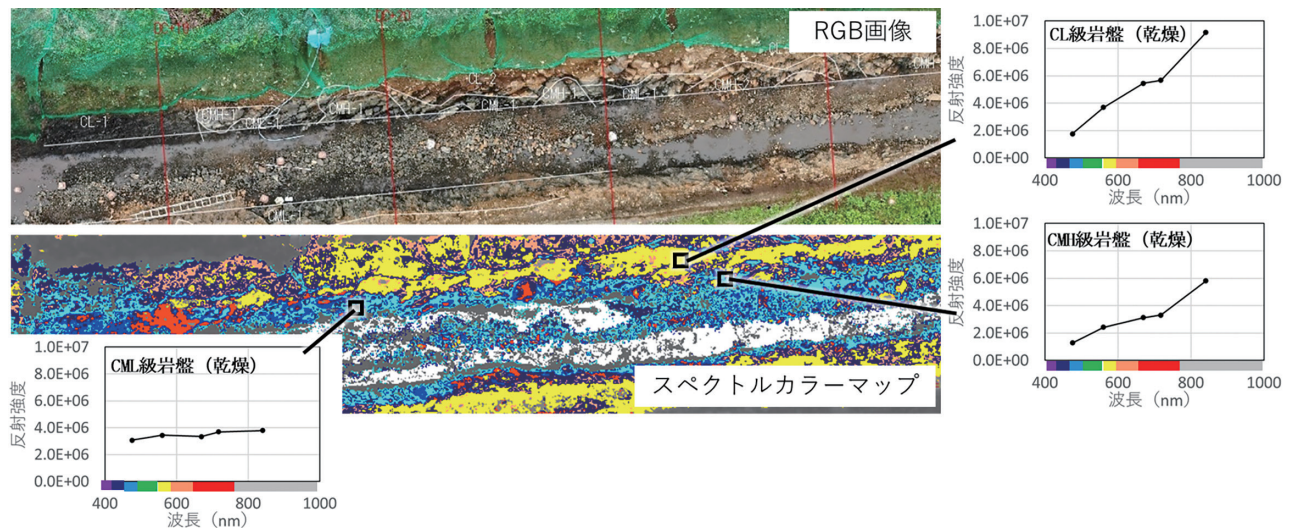
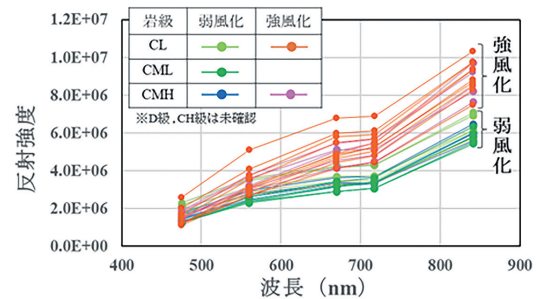


写真-3 トレンチ位置図



図ー2 素掘り水路の撮影結果とスペクトルの抽出

スペクトルの情報から得られるパラメータ及び反発度と、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(図ー2)。マルチスペクトルカメラは反射スペク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評価した。



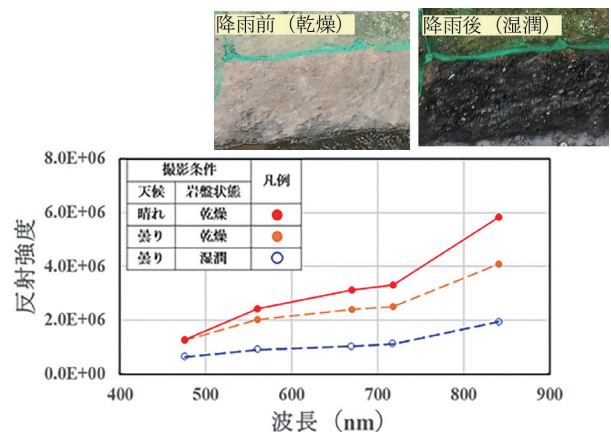
図ー3 岩級区分毎のスペクトル

4-2 マルチスペクトルカメラ測定結果

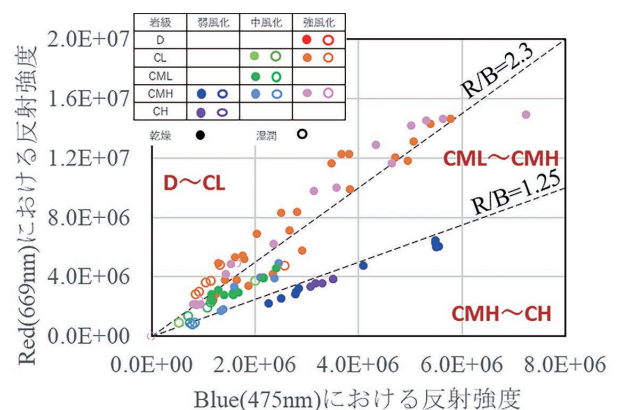
河床部・左岸天端部のトレンチで、各岩級区分の代表箇所においてスペクトルを抽出して岩級区分毎に比較した。結果、スペクトルのパターンは大きく2つ分類され、風化程度の違いを示していた(図ー3)。スペクトルにより岩盤の風化程度の違いを定量的に評価できる可能性が示唆された。

一方で、スペクトルは環境条件(天候、岩盤の乾湿)の影響を受けた。特に、乾燥、湿潤、日射条件の違いが反射強度(色の明暗)に影響していた。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(図ー4)。ダム基礎掘削断面の評価に際して、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。定量的な評価において、変化する環境条件に影響を受けない評価指標を構築する必要がある。

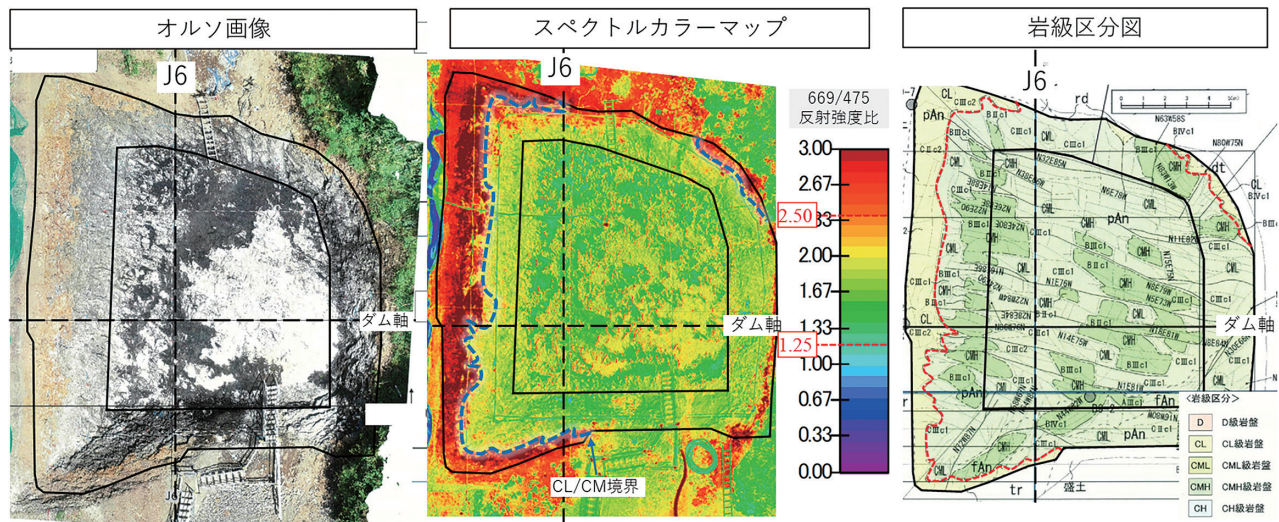
一般的に、岩盤の色彩において、湿潤の違いは明度の差異として現れるが、色み(彩度)には影響しないことが知られており、. スペクトルデータの解析方法として、明るさの影響を除外して、彩度のみで評価する方法が提案されている。環境条件によらない指標として、風化による相対的な赤みの強さを表す指標である blue (475 nm) と red (669 nm) の反射強度の比 (669/475 nm)



図ー4 撮影条件のスペクトルへの影響



図ー5 Blue と Red の反射強度比による評価



図ー6 河床トレンチにおけるスペクトル画像と岩級区分の比較の例

を用いてスペクトルデータを評価した。結果、環境条件の影響を受けず、669/475 nm 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が確認された（図ー5）以上より、トレンチにおける撮影結果を、反射強度比によって着色し表現した（図ー6）。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が確認された。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境界を捉えたものであり、分布比率は少ないが一部に出現する未風化のCL級岩盤は分類できなかったため、今後の課題とした。

4-3 シュミットロックハンマー測定結果

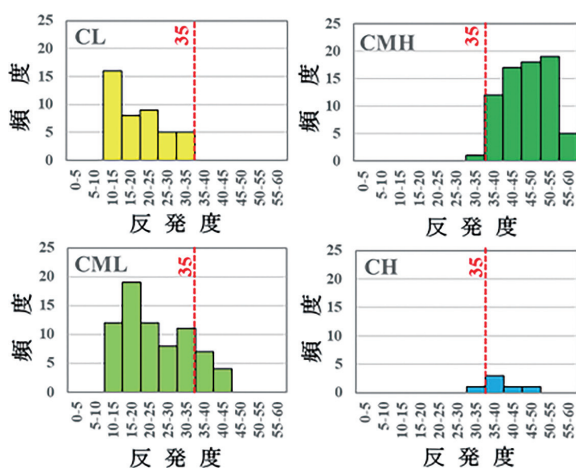
地質技術者による打診を定量評価するため、調査横坑および河床部・左岸天端部のトレンチでシュミットロックハンマー試験実施し、岩級区分と比較した。結果、対象地の岩盤は、シュミットロックハンマーの反発度 35 を

境にCL・CML級とCMH・CH級の2区分に分類できることが確認された（図ー7）。

4-4 定量的な岩盤評価基準の作成

マルチスペクトルカメラから得られるスペクトル強度比（周波数 669 nm/475 nm 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型マトリクスの岩級区分指標を構築した（図ー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と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た。



図ー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 反発度 ロックハンマー	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	

図ー8 定量的な岩盤評価基準

§ 5. 定量的な岩盤評価指標の構築

5-1 基礎掘削時の運用方法

実際の運用として、5 m 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 1000 m²）に対して 20 分～30 分程度、解析には 2 時間程度の時間を要した。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出力した。得られた結果はシュミットロックハンマーの計測結果と併せ、岩盤評価指標を基に岩盤区分境界を評価した。以上により、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。

得られた結果は、3 D データの共有・閲覧が可能なクラウドサービスである KOLC+（コルク社製）に集約した。本クラウドは、施工関係者・発注者・設計担当者が閲覧可能であり、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、協議を行うことが可能となった。



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

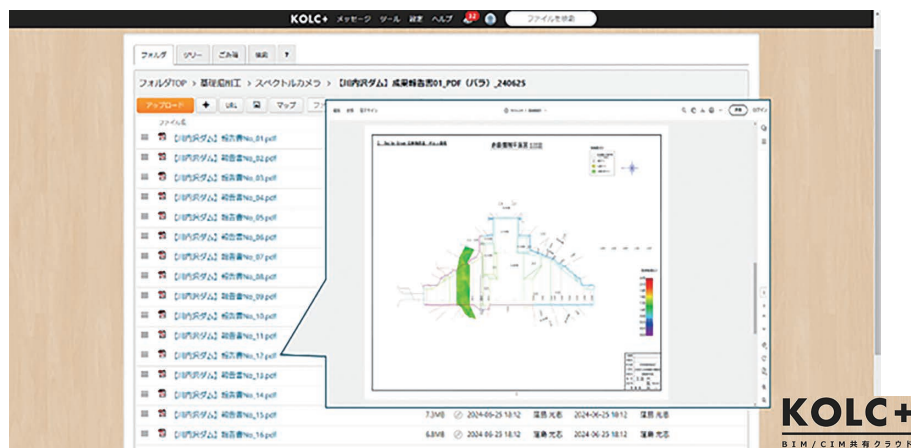
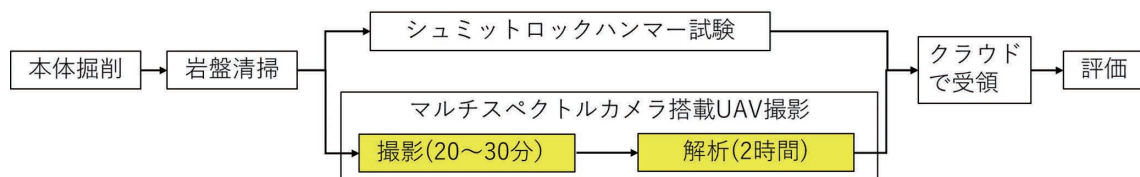
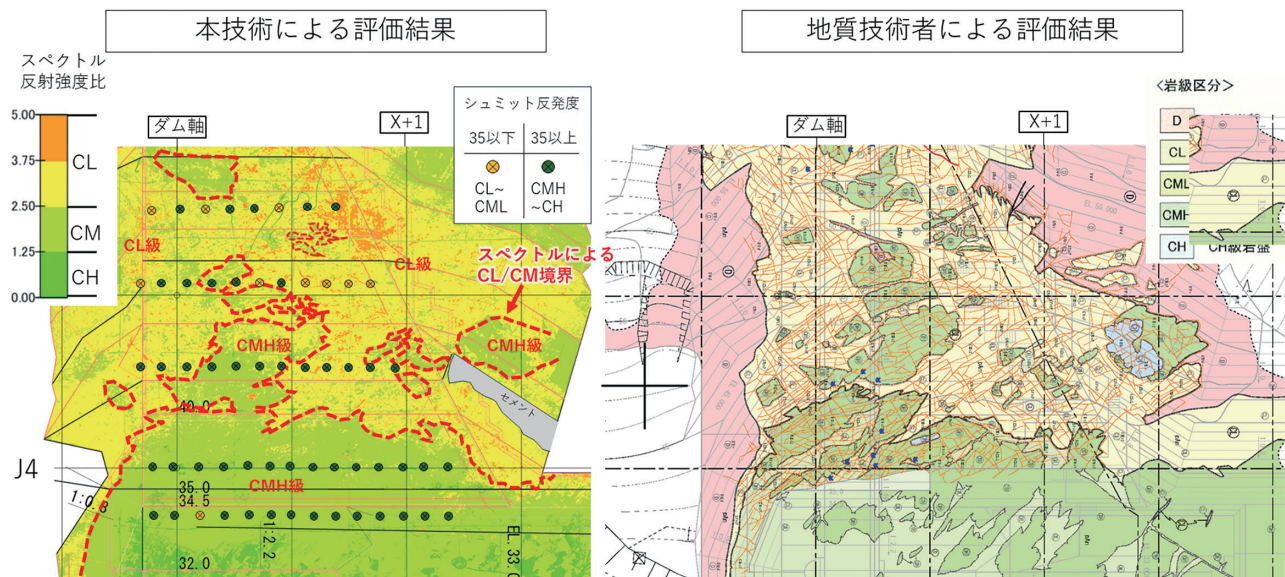


図-9 運用の流れとクラウドでの共有



図－10 基礎掘削時の岩盤評価結果

5-2 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－10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。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、環境変化の影響を受けず評価することが可能であった。定量的に岩級区分境界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、大まかに推察することが可能となった（写真－6）。

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、より高い精度で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るようになり、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が可能となった。本技術によって評価された岩級区分は、専門の地質技術者による定性的な評価と



写真－6 定量的な岩盤評価手法を活用した施工時の岩盤確認

概ね一致していた。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、色の違いを定量を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。マルチスペクトルカメラの性質上、天候や岩盤表面の湿潤等に影響を受けるため、撮影条件や現場の状況に左右されるが、適用条件を整理することで、ダムのみにならず他工事でも、目視で判定している項目を定量的に評価することができると考えられる。引き続き本現場ではICT機器を積極的に活用し、施工の効率化・省人力化を図る。