

素粒子ミュオンを用いた石積砂防堰堤等の内部密度分布把握技術の検討

一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構 酒谷幸彦※・森 俊勇・○金子剛史・小笠原 諒
 東京大学 田中宏幸・László Oláh
 ※現明治コンサルタント株式会社

1. はじめに

ミュオグラフィは、素粒子ミュオンを使って巨大な物体の内部を描き出す技術である。その原理はX線レントゲン撮影法とほぼ同じであるが、ミュオンは、直進性や貫通力が高く1,000m単位の物体も透過することができ、しかも無害であるため扱いやすい。このことから、火山から地震断層、洞窟、氷河、地下鉱山資源などの調査への応用や、原子炉、溶鉱炉等の設備の内部透視技術として応用する研究が行われている。

砂防関係では、古い砂防堰堤の健全度を調べる場合、目視ではわからない堤体内部の健全度は、従来から非破壊調査手法の「弾性波トモグラフィ」で調べることがある。同様に今回、堤体内部の健全度を非破壊で調べる手段にミュオグラフィが利用できるかを明らかにするため、「弾性波トモグラフィ」が実施されている烏川上流砂防堰堤（利根川水系砂防事務所管内）で計測し、結果を比較した。

さらに、手法を標準化して砂防技術者でもミュオン計測とデータの解析により、砂防施設や崩壊の恐れのある斜面や山体の内部構造を把握できるようにすることを目的として「ミュオン解析マニュアル（案）」を作成した。

2. ミュオグラフィの原理

ミュオンは、宇宙を構成する12個の素粒子の一つで、宇宙から常時高速で飛来する宇宙線（陽子等）が地球の大気中で二次的に生産する素粒子である。その数は1m²当り1秒間に100個程度であるが、必ずしも安定的に飛来しているわけではない。あらゆる方向から飛来しているが、水平より上方向から飛来してくるミュオンを利用する。ベーテ（Bethe-Bloch）の式により、ミュオンは物体の密度に応じて貫通量が減るので物体を透過してくるミュオンの数からミュオンが通ってきた経路に沿った相対的な物質質量（密度）を見積もることができる。

今回使用するミュオン検出器は、「多線式比例計数管」（Multi-Wire Proportional Chamber MWPC）である。MWPCはアルゴン混合ガスで満たされており、この中を荷電粒子が通過するとガス分子をイオン化する。検出器の中にある細いワイヤーに高電圧を流すことで周辺に高い電場勾配を形成する。ガスのイオン化でできた電子がワイヤーに寄ってくると電場からエネルギーをもらって加速される。加速された電子は他のガス分子を電離することでさらに多くの電子を発生させる。MWPCはこのような過程を

繰り返して電子を増幅させ、通過ミュオンを電子パルスとして取り出す粒子検出器である。

3. 観測システム

天空から降り注ぐミュオン粒子が溪岸、上流の山体の影響がないように、また、計測期間中の出水による影響を避けるため流水部分を避け、砂防堰堤の下流側に検出器を設置した。検出器



写真-1 MMOS

は40cm×40cmのサイズのMWPCを6枚使用し、これにデータ収集、解析装置DAQを含め、三方50cmのポリカーボネートの箱にセットされている（写真-1）。重さは約60kgである。装置は架台に載せてシートで覆い風雨等を防いだ。消費電力は時間5-6Wである。ガスは、不燃性で環境に対し無害のAr 80%、CO₂ 20%を使用している。圧力130 barでMWPCに供給し、使用量は2L/h程度であった。

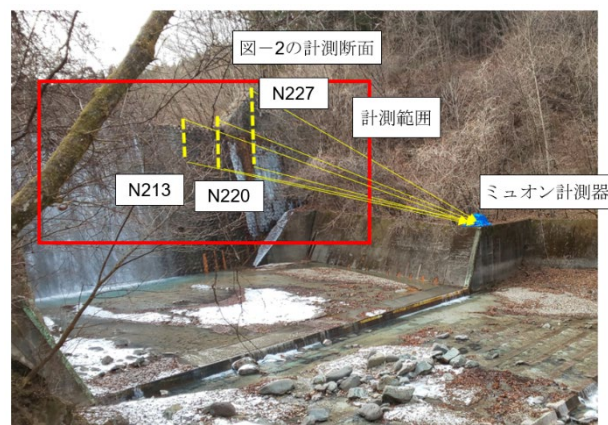


写真-2 ミュオン検出器と砂防堰堤

写真-2の赤い四角形は、計測領域の範囲である。ミュオン検出器は、副堰堤の袖に仰角12.2°で堤体に向かい真正面向きに設置した。

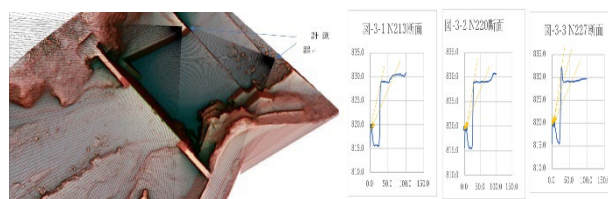


図-1 検出範囲（観測方向と各断面の例）

4. ミュオン検出結果と弾性波トモグラフィの比較

観測期間は、2020年11月26日から2021年2月1日まで行った。設置個所を移動させ、2か所で観測した。バッテリー、ガス交換のため約2週間でデータを回収した。Wifiが使用できる場所ではリアルタイムでデータを収集することができるが、今回はできなかった。

堰堤下流右岸副堰堤部袖に設置したケース2で、13日3時間25分間の観測結果では、約14百万のミュオンの軌跡をとらえ、6枚のMWPC板の内5枚を透過した1,536,900軌跡を有効軌跡数として解析した。この有効軌跡数はすべての軌跡の90%以上となっており、正常に観測されていることが確認できた。

ミュオン検出器は堰堤下流面から26.1m下流に設置しており、堰堤正面図に2次元に投影させたイメージング映像、ミュオグラフィを作成した。一辺約45cmのメッシュごとに観測された密度長から堆砂地に堆積した土砂の密度を1.8と仮定した密度長を差し引き、堰堤本体の密度長を算出し、これをメッシュごとの堰堤の透過長で除して密度を計算した。

ここでは、弾性波トモグラフィ調査、ボーリング坑を利用した密度検層が過去なされており、これらのデータと今回のミュオグラフィ結果を比較した。密度検層は放射線源(60Co)と γ 線強度を検出する装置を持つゾンデをボーリング孔に挿入しながら、この線源から放出され孔壁沿い(約20~30cm)を伝播する γ 線強度の変化を連続的に測定し、この測定値から地層密度を計算により求める方法である。ミュオグラフィ結果を図-2の上図に示す。黄色は密度が4、群青色は0として表示している。堰堤の表面は安山岩質の石張となっているが、安山岩の密度は2.6~2.7 g/cm³、コンクリートは2.3~2.4 g/cm³であることを考えると、3.5~4の値は明らかに大きい。

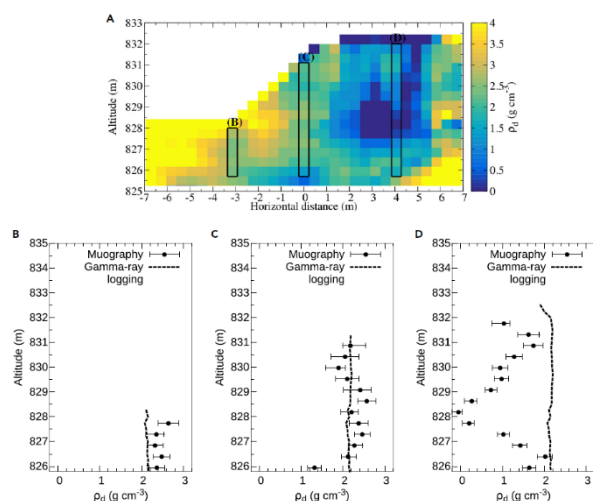


図-2 ミュオグラフィ結果(上図)と密度検層結果(下図)の比較

また、水通し部には流水が流れており密度が1以下

も考えづらい。図-2 下図に、密度検層の結果を比較した。

図-3 上図は、標準偏差単位での密度差を示す:

$$\sigma = (\rho_{d, \text{logging}} - \rho_{d, \text{muon}}) / \Delta \rho_{d, \text{muon}}$$

堤体からコンクリート成分が溶出された領域の1つで、密度が大幅に減少した領域(<-5 σ)を強調している(写真2の右側の漏水部分を参照)。堰堤の他の部分は、堰堤の天端に沿ったものを除いて、そのような有意な密度差を示さなかった。

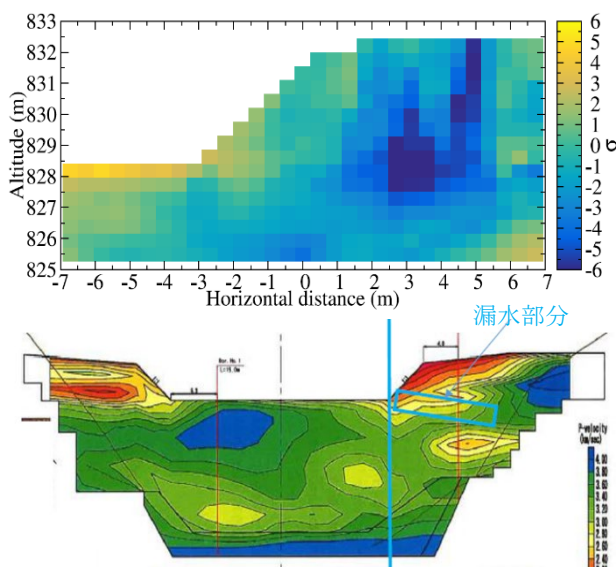


図-3 漏水部分と弾性波トモグラフィ結果

図-3 の上部のミュオン計測で得られた相対的な密度差図と図-3 下図で示す弾性波トモグラフィ結果は、いずれもコンクリートの密度の低いと想定される区域から密度の高いと想定される区域の変化地点と漏水地点が一致しているように見える。

5. まとめ

ミュオグラフィはトモグラフィと類似しておりコンクリートの内部密度を計測し、内部構造を把握する手法として利用できる可能性を示した。ただし、計測される密度は相対的な値であり、結果の扱いについてキャリブレーションの方法などを検討する必要がある。また、計測手法をマニュアル化することにより広く本手法が使われることを期待している。

参考文献

- 1) ミュオグラフィ ピラミッドの謎を解く 21 世紀の鍵, 田中宏幸 大城道則, 2017
- 2) Overview of muographers, Hiroyuki K. M. Tanaka and László Oláh, 2019
- 3) Structural health monitoring of sabo check dams with cosmic-ray muography, László Oláh, Hiroyuki K.M. Tanaka, Toshio Mori, Yukihiro Sakatani and Dezső Varga, iScience 26, 108019, 2023