

宇宙線ミュオンによるフィルダムの堤体材料密度の同定 Identification of density of fill-dam body materials by cosmic ray muons

○高橋 健, 柴田俊文, 西村伸一, 金子周平, 珠玖隆行

○Ken Takahashi, Toshifumi Shibata, Shinichi Nishimura, Syuhei Kaneko and Takayuki Shuku

1. 背景と目的

近年、大規模地震が高い確率で発生することは広く知られており、地震による被害から大規模社会インフラ施設を守るための対策と維持管理が急務である。大規模社会インフラ施設である土木構造物の調査には内部探査が不可欠だが、従来の探査手法、例えば地中レーダーでは浅い場所では高精度の結果が得られる反面、深い場所での分解能が低いといった短所を有している。こうした従来の手法の不得手な深さ（探査区域）の情報を得る方法として、宇宙線ミュオンを用いた探査手法がある^{1,2)}。本研究では、宇宙線ミュオンを用いてフィルダム内部の密度構造を探査することで、ミュオン探査手法の適用可能性を検討する。

2. 宇宙線ミュオンについて

宇宙線ミュオンとは μ 粒子、ミュオン(muon)とも呼ばれる素粒子の一種である（以下ミュオン）。Fig. 1に示すように、宇宙線が地球入射後に大気圏内の原子核との衝突・相互作用により生成される2次宇宙線にミュオンは含まれてる。このようにしてミュオンは絶えず地表に降り注いでいる。ミュオンが持つ特徴の中で、本研究と最も関連しているものが透過能力の高さである。ミュオンは非常に微小な粒子であるため透過能力に優れており、地下100m以上でも検出可能である。このことから、大規模な土木構造物を対象にミュオン探査を実施することが可能となる。

3. 探査原理

ミュオンを用いた構造物の探査原理は、地上に飛来するミュオンの数と、探査対象物を透過した後の数を比較することで、その減少程度から密度を算出するというものである。これはミュオンが透過する物質の面密度(密度×厚み(透過距離))に応じて物質透過後に飛来数が減少するという特徴を持つことを利用した方法であり、探査対象を透過したミュオン飛来数と、対象物の設計図や測量結果から厚みの情報を得ることで透過距離に沿った平均密度を算出することができる。

4. 測定方法

本研究では広島県にあるMダム（中心遮水ゾーン型ロックフィルダム）の監査廊にて、下流側に対して天頂角0度から60度まで10度毎に、ダムを透過したミュオン飛来数の

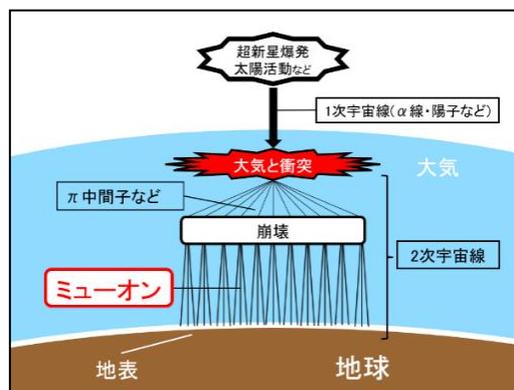


Fig. 1 宇宙線と大気によるミュオン発生過程
Diagram of muon generation process by cosmic ray and atmosphere

測定を行う。そして測定値から算出した密度と理論値を比較することでミュオン探査の適用可能性を検討する。なお、理論値は三宅の式¹⁾を用いて算出する。測定対象のダムは5種類のゾーンで構成されており、Table 1 に各ゾーンの築堤材料及び試験値密度等を、Fig. 2 にダムの内部構造と計測角度(天頂角:真上をゼロとして水平を90度としたときの角度)を表した断面図を示す。

5. 結果と考察

Table 2 に測定によって得られたミュオンの飛来数から各天頂角における密度について算出した値を示す。Table 2 から分かるように0度で最も密度が大きく、天頂角の増加に伴って密度が減少していることが分かる。また、Table 3 に算出した密度からダムの各ゾーンの密度を計算した結果を示す。ただし、過去の試験結果で得られている各ゾーンの密度を“理論値密度”として示している。ここで、天頂角0度ではZone 1のみを透過しているため測定値から直接算出し、その他のゾーンについては最小二乗法を用いて算出している。この表から、Zone 2の値が大きく、またZone 3が負の値に、Zone 4が0に近い値になっており、測定精度が低いことが分かる。一方で天頂角0度の測定で得られたZone 1の値は理論値とほぼ同一の値を示しており、測定の精度が十分であることが確認できる。

天頂角の増加に伴い、計算された密度が減少するのは、透水性ゾーンであるZone 3及びZone 4の透過距離が増加したことが要因として考えられる(Fig. 2)。これらのゾーンはZone 1及びZone 2と比較して粒径や透水性が大きく、ミュオン飛来数に何らかの影響を与えている可能性が考えられる。

6. 結論

研究結果から、ミュオンを用いた測定によってロックフィルダムの密度構造の一部を解明することができたことから、ミュオン探査手法の適用可能性が示された。一方で他のゾーンの探査精度は問題を残した。今後、ミュオンの測定回数を増やして算出密度の精度を高くすること、そして天頂角が大きくなった際の誤差の原因を明らかにすることが重要である。

参考文献

- 1) 三宅三郎, 地下深部における宇宙線研究, 日本物理学会誌, 1979, 第34巻, 第4号, pp.292-301.
- 2) 鈴木敬一, ミュオン粒子による土木物理探査の可能性, 物理探査, 2012, 第65巻, 第4号, pp.251-259.

Table 1. フィルダムの材料特性
Material properties of fill-dam

凡例	ゾーン名称	ゾーン区分	築堤材料	理論値密度(g/cm ³)
	Zone 1	遮水性ゾーン	マサ土	2.07
	Zone 2	遮水性ゾーン	マサ土	2.08
	フィルターゾーン	フィルターゾーン	粒度調整碎石	1.97
	Zone 3	透水性ゾーン	風化花崗岩	2.11
	Zone 4	透水性ゾーン	花崗岩	2.14

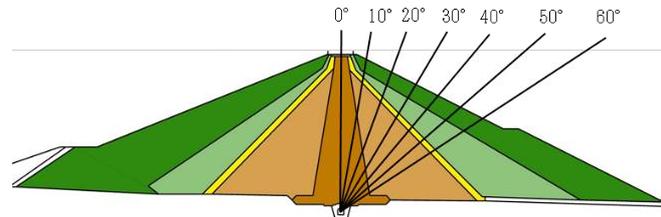


Fig. 2 フィルダム断面と計測角度(天頂角)
Cross-sectional view of fill dam and zenith angle of observation

Table 2. 天頂角に対する算出密度
Calculated density at each zenith angle

天頂角(deg)	密度(g/cm ³)
0	2.093
10	2.043
20	1.924
30	1.838
40	1.669
50	1.445
60	1.200

Table 3. 各ゾーンの密度の比較
Comparison of density in each zone

ゾーン名称	理論値密度(g/cm ³)	算出密度(g/cm ³)
Zone 1	2.07	2.093
Zone 2	2.08	3.610
フィルターゾーン	1.97	2.010
Zone 3	2.11	-3.687
Zone 4	2.14	0.048