

高精度・高解像度な堤防内部の可視化に向けた 観測時間と観測点がトモグラフィ解析の結果に与える影響

中央大学大学院 学生会員 ○並河 奎伍 中央大学研究開発機構 正会員 小山 直紀
日本電気(株) 非会員 草茅 太郎 川崎地質(株) 正会員 鈴木 敬一
中央大学研究開発機構 フェロー会員 山田 正

1. 研究背景

堤防は洪水から人々の命や財産を守る最後の砦である。一度決壊すれば甚大な被害が生じるため、昔から築堤が行われてきた。しかし、その際に用いられた土質材料や築堤方法は時々によって異なり、地盤内部が決壊へとつながる不均質構造となっている可能性がある。この内部構造を探查する手法として物理探查が行われてきたが、堤防および堤防内で生じる空洞のスケールに適した手法は従来確立されていなかった。そこで著者らは宇宙線ミュオン粒子を用いた探查を河川堤防に応用できないかと考え、実際に堤防で観測を行い、そのデータを解析することで堤防の幾何形状や密度分布を再現してきた²⁾。1つの検出器のみでは、限られた観測点・観測時間となり、解析精度・空間分解能が粗くなってしまうが、多くの検出器を設置し同時観測することで精度と分解能の向上が期待できる。そこで本研究では、データを内挿することで擬似的に観測時間と測点を増やした状態で解析し、観測点数が精度と分解能に与える影響を明らかにする。

2. 観測の概要

ミュオン粒子の観測状況（堤防の横断面、観測波線、測点）を図-1に示す。ミュオン粒子探查の原理、観測に用いた検出器、1地点あたりの観測時間は過去の文献²⁾と同様に設定したため、参照いただきたい。図-1に示す通り、測点は樋管入り口から21~36mの区間で1m間隔とし、天頂角 -30° ~ 15° 方向のミュオン粒子数を計測した。

3. 解析手法

構造物内の密度分布を得るためのトモグラフィ解析を行うために、堤防の面密度 h [hg/cm²]（土被り[m]×密度[g/cm³])を求める必要がある。そこで本研究では観測したミュオン粒子フラックス $I_{\mu}(h, \theta)$ [個/cm²/s/sr]から面密度を求める湊の式³⁾を用いた。式(1)を以下に示す。

$$I_{\mu}(h, \theta) = I_{\mu 00} \cos^{\alpha+\beta h} \theta \cdot \ln \left(-\frac{h}{A + Bh + Ch^2} \right) \quad (1)$$

$$I_{\mu 00}=0.00723[\text{cm}^2/\text{s}/\text{sr}], A=17.61[\text{cm}^3/\text{hg}], B=0.1404[\text{cm}^4/\text{hg}^2], \\ C=-7.06910^{-5}[\text{cm}^6/\text{hg}^4], \alpha=1.495, \beta=0.02018[\text{cm}^2/\text{hg}]$$

観測したミュオン粒子フラックス $I_{\mu}(h, \theta)$ と天頂角 θ より求めた面密度 h を左辺、ミュオン粒子が通った格子の密度 ρ と通過距離 l の積を各格子で計算し、それらを足し合わせたものを右辺におき1つの式とする。これを複数のミュオン粒子の経路についてつくり、密度についての連立方程式を解く。このときの既知量は h と l で、非線形最小二乗法により各格子の ρ を求めた。式とアルゴリズムを図-2に示す。通過経路上に解析格子が無いといけなため、格子を小さくしすぎると正しい結果が得られなくなる。そこで通過経路ごとに定まる観測データの平均値と標準偏差をもとに正規分布を作成し、そこから乱数を発生させて観測データと測点を擬似的に増やし、1.0m, 0.5m, 0.25m格子でトモグラフィ解析を行った。なお、解析格子の初期値は一律1.7g/cm³としている。

4. 解析結果

湊の式より換算した面密度を図-3に示す。同図より、面密度は堤防の幾何形状（黒破線）を示していることが分かる。また、土被りの大きい天頂角 15° 方向の面密度が大きいことも堤防形状と整合的である。次に得られた面密度を用いて行ったトモグラフィ解析の結果（1.0m, 0.5m, 0.25m格子）を図-4に示す。同図より、格子を小さくすることで、樋管壁（コンクリート）の密度が妥当な値になった。測点を多くとることで、分解能が向上すると期待できる。なお、格子を小さくしていくと高密度または低密度の格子が線状に連続する部分がある。これらはデータ不足で、解析値が更新されていないと考えられる。

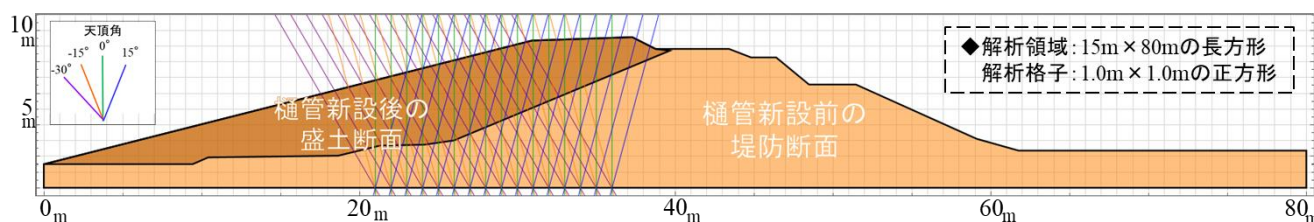


図-1 ミュオン粒子観測状況（堤防の横断面、観測波線、測点）と観測波線

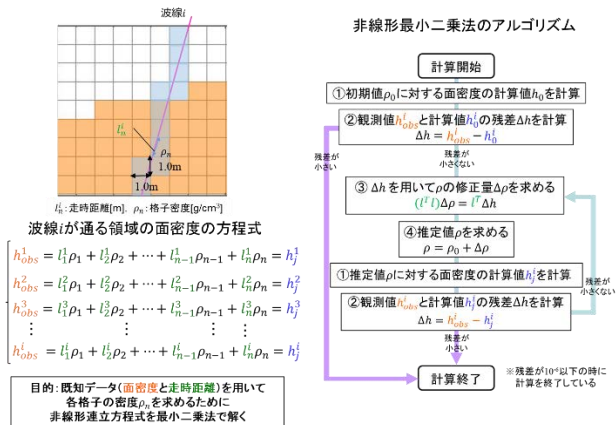


図-2 トモグラフィ解析で解く連立方程式と解析フロー

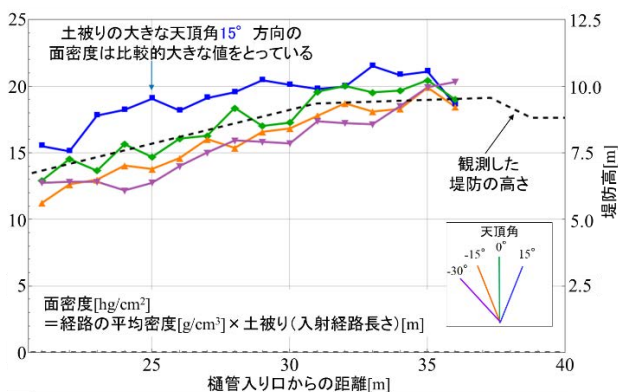


図-3 湊の式より換算した面密度と堤防高さ

面密度は堤防の幾何形状(黒破線)を示している

最後に1地点あたりの観測時間が精度に与える影響をみた。実際の観測時間8時間に乱数データを加え最大20時間分のデータを作成した。20時間解析値との差を解析格子番号ごとの結果を図-5に示す。同図より、観測時間が長くなるほど差のばらつきが小さくなるのが分かった。これは、どの格子大きさの場合でもみられた。

5. まとめ

本研究では、河川堤防におけるミュール粒子トモグラフィの精度と分解能の改善に向けて、多点同時観測がトモグラフィ解析に与える影響を分析した。その結果、観測時間が長くなるほど精度は向上し、格子を小さくすることで妥当な密度と分解能を得られる可能性にあることを明らかにした。

参考文献

- 1) 社団法人全国地質調査業協会連合会: - 防災・維持管理分野における物理探査の適用 - 報告書, 2007.
- 2) 並河奎伍, 小山直紀, 草茅太郎, 鈴木敬一, 山田正: 宇宙線ミュール粒子を用いた河川堤防内部の可視化と小型検出器の性能検証, 土木学会論文集G(環境)Vol78, No.5, pp.217-224, 2022
- 3) 湊進: 宇宙線透視像, 放射線, 第19巻, pp.49-56, 1992

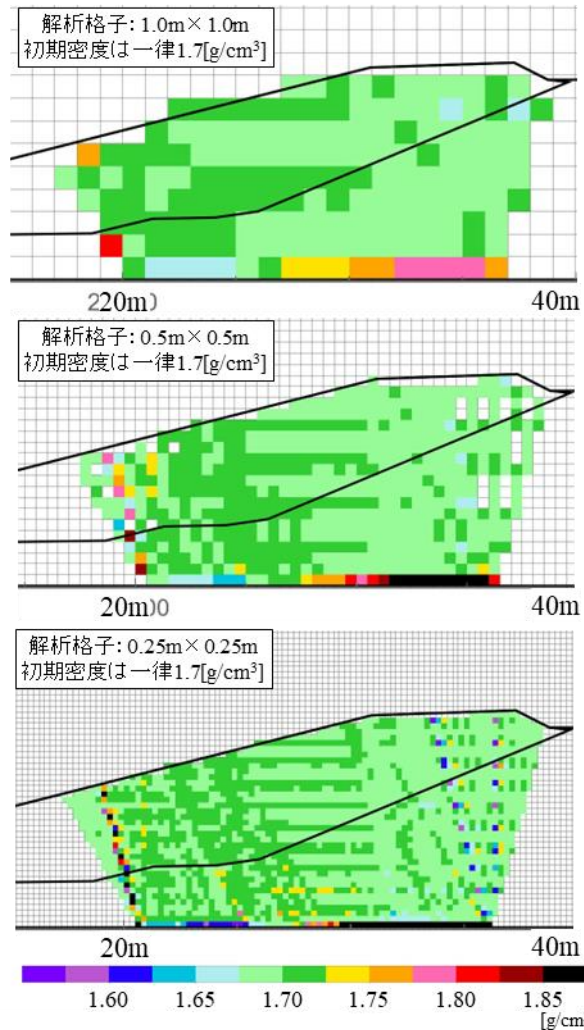


図-4 測点を増やした時のトモグラフィ解析の結果の違い

格子を小さくすることで、樋管壁(コンクリート)が妥当な密度になった。

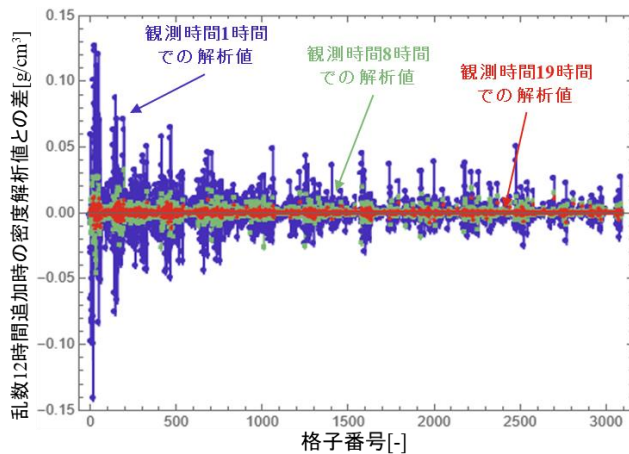


図-5 観測時間20時間での0.25m × 0.25m解析値とそれ以外の時間での0.25m × 0.25m解析値の差

観測時間が長くなるほど差のばらつきが小さくなるのがわかる