

散乱型小型 RI 密度計の開発とダム遮水材への適用性に関する検討

(株) 熊谷組 正会員 ○沼宮内 雅人, 高木 秀和, 中出 剛, 北原 成郎, 高橋 正人
ソイルアンドロックエンジニアリング (株) 正会員 池永 太一

1. はじめに

近年、働き方改革に始まる時間短縮, ICT (情報通信技術) の活用による生産性向上を求められている。筆者らは、ロックフィルダムの遮水材の密度管理において、線源棒挿入孔を必要としない散乱型 RI 法 (以下、散乱型と記す) を用いた密度管理の適用の可能性について検討を進めてきた¹⁾。従来の散乱型密度計を小型化することで、計測地点まで簡単に持ち運びできる。さらに、密度試験を実施するために行う測定面の不陸を整形する人力による苦渋作業が不要となる。本稿では、散乱型小型密度計 (以下、小型密度計と記す) の開発を行い、適用性に可能性を得たのでその検討結果について報告する。

2. 小型密度計の設計

筆者らの既往の研究によると、散乱型は測定面との密着性が重要であることが示された¹⁾。そこで、散乱型の新規開発に際し、外寸サイズを小型化することで、測定面との密着性を高めることを重視することとし、将来的にタンピングローラの突起によって生じる地盤面の穴に入れての計測も想定し、外寸 10cm×10cm×10cm を目標とした (写真-1, 2 参照)。散乱型の概略図を図-1 に示す。線源には、セシウム 137 (Cs-137, 3.7MBq, 半減期約 30 年) 密封ガンマ線源を用いる。散乱型の設計は、検出部と線源部の間に遮へい材を入れ、線源部で発生したガンマ線が、地中を通して、検出部に入射するように、適切な配置を決定する必要がある。小型化の限界と影響範囲を調べるために、放射線シミュレーション解析ソフト PHITS (Ver.3.27) を用いて解析を行った。PHITS は、放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬する国産のモンテカルロ計算コードで²⁾、主に放射線施設の設計、医療、宇宙分野で用いられており、筆者らは RI 計器の解析についても高い再現性を持つことを示してきた¹⁾。

PHITS の解析例を図-2 に、解析した全ケースを表-1 に示す。Case1 では、湿潤密度の増加に対して RI カウント数が減少する適切な応答が得られる最小の配置を確認した。Case2, Case3 では、Case1 で得られた最良の設計で湿潤密度 1.8g/cm³ における深度方向の影響と、壁の影響を確認した。



写真-1 タンピングローラの突起

写真-2 地盤面の穴

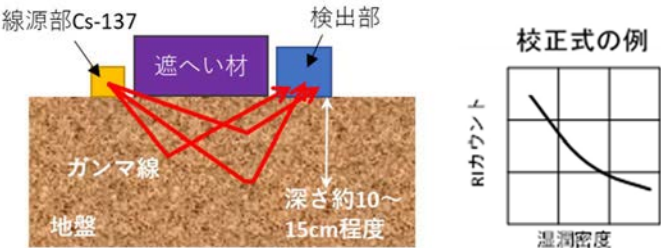


図-1 散乱型の概略図

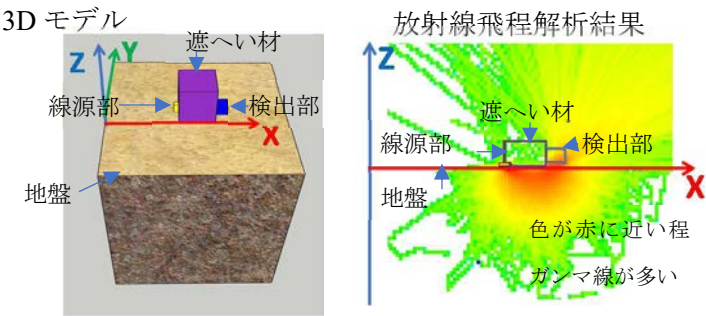


図-2 PHITS の解析例

表-1 解析ケース

	検出部形状	線源検出部距離 (cm)	湿潤密度 (g/cm ³)	
Case1 (最適配置の検討)	①φ25.4×25.4円柱 ②13x13x25直方体 ③38x38x25直方体 (mm)	5、7.5、10、12.5、15	1.4、1.6、1.8、2.0、2.2	合計75 ケース
検出部形状③38x38x25直方体、線源検出部距離10cm、湿潤密度1.8g/cm ³				
	地盤深さ (cm)			
Case2 (深度方向の影響)	3、6、9、12、15、18、21、24、27、30			合計10 ケース
検出部形状③38x38x25直方体、線源検出部距離10cm、湿潤密度1.8g/cm ³				
	壁の方向	壁との距離 (cm)		
Case3 (側面方向の壁の影響)	①線源方向 ②検出部方向 ③他の側面 ④全面	1、3、5、7、10、15、20、30、50、75		合計40 ケース

キーワード 散乱型 RI, ロックフィルダム, 密度計, PHITS

連絡先 〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1 (株) 熊谷組土木事業本部 TEL03-3235-8622

Case1 の確認手順を表-2 に示す。確認手順に従い算出された検討結果の抜粋を図-3 に示す。得られた各回帰式から放射線のばらつきに起因する統計誤差の平均値（以下、壊変揺動誤差と記す）³⁾を算出した結果の抜粋を表-3 に示す。線源 - 検出部距離が最小となる 10cm の場合、検出部 38×38×25(mm)で最も壊変揺動誤差が小さいという結果が得られた。

Case2 の検討の結果を図-4 に示す。地盤深さ方向の影響は地盤深さが約 15cm で RI カウント (cpm) が収束することがわかった。深度が浅くなるほどガンマ線検出数の変化が大きくなることから、散乱型が地表面付近を過大評価するという傾向が示された。この結果より計測には、測定面の不陸を均し、散乱型を測定面に密着させることが望ましい。

Case3 はタンピングローラの突起によって生じる地盤面の穴に入れて計測する場合を想定し、図-5 の解析結果例に示すように単側面方向に壁を設定し、線源部、検出部、他の側面を入れ替えた場合と全面壁の場合の 4 パターンの影響を確認した。壁の影響は図-6 に示すとおり壁の距離が遠くなるほど影響が小さくなり約 30cm で収束することがわかった。

3. 小型密度計の試作器と応答確認実験結果

前章の検討結果を元に製作した試作器を写真-3 に示す。外寸 10cm×10cm×10cm、重量 2.5kg と、筆者らが検討に用いていた従来型（外寸 25.5cm×19.8cm×17.4cm、重量 5.5kg）から大幅な小型軽量化を達成することができた。ガンマ線の遮へい材には、一般に用いられる鉛よりも比重の大きいタングステンを採用した。本試作器の応答確認実験として、密度が既知の亚克力材、ガラス材、ローム材、まさ土材を用いて密度に対するガンマ線検出数の応答を確認した（図-7）。この得られた回帰式より、壊変揺動誤差の平均値を算出すると 0.012g/cm³ となった。この算出値は、設計時に PHITS により算出した 0.025g/cm³ より小さい値となった。この結果は、小型密度計の内部の遮へい材の配置を工夫したこと等により RI カウント数が上昇したことが精度改善に寄与したと推察される。

4. まとめ

PHITS を設計に用いて 10cm×10cm×10cm の小型密度計を開発し、応答確認実験の結果、設計時に想定していた密度応答の結果を得ることができた。今後は、稼働しているダム現場において使用し、精度検証を行う予定である。

参考文献

1) 沼宮内 雅人, 高木 秀和, 中出 剛, 北原 成郎, 池永太一: 散乱型 RI 密度計・水分計の不陸補正とダム遮水材への適用性に関する検討, 土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-193. 2022.

2) Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa et al. : Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, pp.684-690. 2018.

3) 日本道路公団試験所: RI 計器で土の密度・水分計をはかるしくみ (測定原理と較正曲線の作成), pp.82-83

表-2 確認手順

確認作業	
①	PHITSで各モデルの密度に対するRIカウントを算出
②	密度-RIカウントのグラフで応答を確認し回帰式を算出
③	統計計算により壊変揺動誤差を算出
④	最も優先度が高い「線源検出部距離」の最小値を確認
⑤	④の中で最も壊変揺動誤差が小さい検出部を確認

表-3 壊変揺動誤差

解析ケース 形状 (mm) _ 距離(cm)	壊変揺動誤差 (g/cm ³)
φ2.54×2.54_10	0.037
13×13×25_10	0.033
38×38×25_10	0.025
38×38×25_12.5	0.015
38×38×25_15	0.013

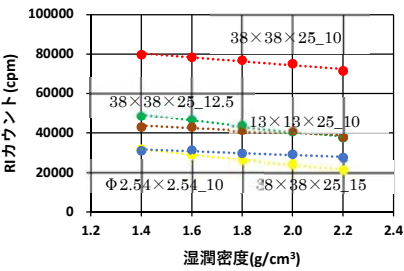


図-3 最適配置の検討結果

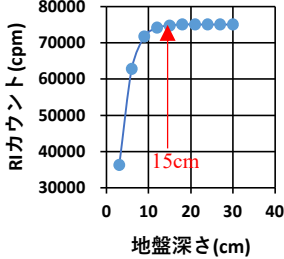


図-4 深度方向の影響結果

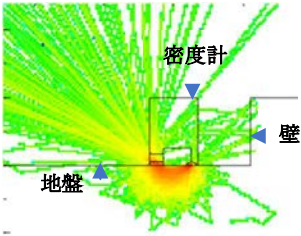


図-5 Case3 の解析結果例

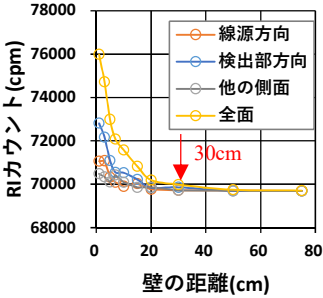


図-6 側面方向の壁の影響結果



写真-3 小型密度計試作器

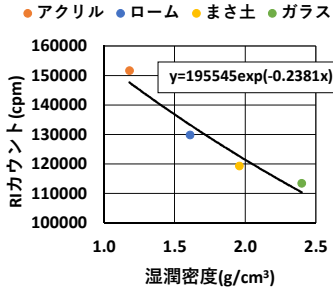


図-7 小型密度計の応答確認結果