# 電気探査法によるフィルダム堤体内部の 水理特性モニタリング

尾留川 剛1\*・安藤 悠<sup>2</sup>・角野 淳也<sup>3</sup>・鈴木 浩一4

<sup>1</sup>電源開発株式会社 技術開発部茅ヶ崎研究所(〒253-0041 神奈川県茅ケ崎市茅ヶ崎1-9-88)
<sup>2</sup>電源開発株式会社 土木建築部(〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)
<sup>3</sup>電源開発株式会社 東日本支店上士幌電力所(〒080-1408 北海道河東郡上士幌町字上士幌東2線228-3)
<sup>4</sup>一般財団法人電力中央研究所 地球工学研究所(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
\*E-mail: go\_orukawa@jpower.co.jp

筆者らは、供用中のフィルダム安全管理手法として、貯水位の変化に応じて堤体内部の水理特性の変化 を比抵抗構造変化として捉えるモニタリング手法の開発を行っている.まず、貯水位の違いによる堤体の 比抵抗変化率を求めるため数値実験を行った.その結果、堤体内の比抵抗変化率は最大2%程度であるこ とが示されたため、電気探査測定結果の標準偏差はそれよりも低い値にする必要があることを確認した. 数値実験の結果を踏まえ、供用中のフィルダムにおいて高水位時に電気探査測定を行った結果、得られた 比抵抗値の標準偏差を概ね1%以下とすることができた.以上より、今後取得する低水位時の比抵抗分布 との差を可視化することによって、堤体内の水理特性のモニタリングに適用できる可能性が示された.

Key Words : electrical exploration, electrical resistivity, monitoring, fill dam

# 1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された構造物の老朽化が 大きな話題になり、社会的インフラ設備の補修の実施や 検討が行われている. 電源開発株式会社が全国に所有・ 管理する水力発電用ダムは44地点あり、これらは1950年 代後半から1960年代に集中して建設され、竣工から50年 以上経過しているダムが多い. これらの設備を適切に維 持管理していくためには、構造物の現況を把握しておく ことが重要である. ダムは、河川法の規定に基づいて制 定されている河川管理施設等構造令<sup>1)</sup>に基づき、巡視点 検や各種計測により管理されている. 特にフィルダムに おける堤体からの浸透量の計測は、フィルダムの安全管 理において最も重要な計測項目の一つである.しかし, この浸透量には降雨や地山からの湧水が含まれる可能性 があること、測定施設位置や構造の違いによる計測され る浸透量の違い、さらに基礎岩盤の地質構造が異なるこ となどから、各ダムにより浸透量の大きさや貯水位との 関係が異なる.

フィルダムの安全性を監視するためには、従来から建 設時に堤体内に埋設設置する間隙水圧計、土圧計、層別 沈下計などの計器や、堤体内部の浸潤面観測孔による監 視が行われているダムもある.しかし、これらの埋設計 器は、施工中の断線や接続ミス、さらには経年劣化や落 雷による故障等により信頼性が低下する場合が多く、長 期間供用されてきたダムの機能を確認する上で支障をき たすことが多い.また、これらの埋設計器は堤体のごく 一部の状態を表すに留まる.さらに、他の計測器と整合 しない場合、計測器の故障か真の現象を表しているか判 断することや、漏水などの異常箇所を特定することは困 難である.

そこで筆者らは、計測器のような局部の測定ではなく、 二次元的な情報を非破壊で捉える物理探査技術として、 ダム堤体内部の水分飽和度の変化を可視化することが可 能な手法の一つである電気探査法の適用を検討した.こ れまで電気探査法によって、地滑り地における降雨浸透 水の調査<sup>3</sup>、湛水池地山のグラウト材注入範囲の調査<sup>3</sup>な どが実施されており、地表面に展開された測線において 繰り返し電気探査法を行うことで、水分飽和度の変化に 伴う地盤の比抵抗変化から地下水やグラウト材の流動状 況が可視化できることを示している.人工構造物への適 用事例として、河川堤防への降雨浸透状況を測定した事 例<sup>4</sup>があるが大規模構造物を対象とする事例は報告され ていない.

フィルダムに対する調査としては、漏水箇所を調査す る事例<sup>9</sup>や初期湛水時の浸透水モニタリング事例<sup>9</sup>がある. 前者の事例では繰り返し調査を実施していないため漏水 箇所が明確に特定されている様子はない.後者は建設時 の測定であり,湛水前と後の2回の電気探査測定に留ま っているため,供用中の安全管理手法として適用されて いない.また,ダム新設時に堤体内部への電極設置によ るモニタリング事例<sup>7</sup>があるが,既設ダムへの適用事例 ではない.

そこで、既に供用開始しているフィルダムを対象に堤 体内部の浸透流の状況や漏水などを貯水位の変動に伴う 比抵抗構造変化としてモニタリングし、異常領域の発見 につながる安全管理用システム構築の可能性について検 討した.

# 2. 電気探査法によるモニタリング手法の概要

#### (1) 電気探査法によるモニタリングの原理

土質材料や岩盤の比抵抗値は、次のArchieの式<sup>7</sup>で示される地盤の比抵抗モデルより、地盤やそこに含まれる間隙水の比抵抗値、飽和度、間隙率などのパラメータで決定される。

$$\rho_s = a \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \cdot \rho_w \tag{1}$$

ここで、 $\rho_s$ :地盤の比抵抗値 ( $\Omega$ m)、 $\phi$ :間隙率、 *S*:飽和度、 $\rho_w$ :間隙水の比抵抗( $\Omega$ m)、a,m,n:地 盤の性質に依存する定数である.

比抵抗は電気の流れにくさを表す物性値であり,地盤 中の間隙の大きさ,間隙の飽和度および間隙水の比抵抗, 地温などが複合的に反映される.ここで,地盤の比抵抗 変化に影響する要因を表-1に示す.得られる比抵抗値が 主として何に起因するかを考慮する必要があるが,間隙 率や間隙水の比抵抗が一定であれば,飽和度の変化を推 定することが可能となる.つまり,主に貯水池の水位の 変化が堤体内の水理的特性の変化を及ぼすと考えられる. なお,地温については,地表面では気温と同様に季節変

表-1 比抵抗値への影響要因				
要因項目		地盤の比 低比抵抗	抵抗の変化 高比抵抗	関連項目
間隙率	飽和時	大きい	小さい	風化,
	乾燥時	小さい	大きい	破砕体
飽和度 (間隙率一定)		高い	低い	地下水
地下水の 電気伝導度		高い	低い	塩水など
粘土鉱物 (導電性鉱物)		多い	少ない	風化, 変質
温度(地温)		高い	低い	地温, 温泉

動が生じるが、本稿では5m以深を対象とした調査であることから、比抵抗の結果に大きな影響がないと判断し、 堤体内の飽和度のみが比抵抗値の変化に影響を及ぼすと 仮定して考察を行うものとした.

## (2) 電気探査法による測定概要

測定対象のフィルダムは、図-1 に示す電源開発株式 会社が建設・管理する中央土質遮水壁型ロックフィルダ ムの標準断面である. 堤高 27.5m, 堤長 220.1m(うち洪 水吐幅 50.1m)に満水位 EL.206.0m, 低水位 EL.204.1m (利用水深 1.9m)の水で発電を行っている.

電気探査法の測線は堤体表面に電極を設置して,比抵 抗値を計測するものとした.主としてダム堤体右岸側や 右岸アバットメントからの浸透流を確認するために右岸 側に測線を高密度に配置した.測線は、ダム軸方向(左 右岸方向)に2測線、ダム横断方向(上下流方向)に6 測線とし、電極間隔は1mまたは2mとした.電極は、 長さ30cmの銅めっき製S型アース棒を設置したが、ダ ム横断方向の測線の上流側斜面のリップラップ部(レキ 材設置部)においては、長さ1mの銅めっき製丸型アー ス棒を使用した.極設置位置にレキが位置する場合は、 測線の直交方向に打ち込み可能な位置にずらして設置し た.



なお、ダム上流側斜面に設置の電極の一部は貯水池内 に水没するため、堤体表面に電極を設置することが困難 である.そこで、電極棒を塩ビパイプに所定の間隔で固 定した上で貯水池内に塩ビパイプと共に堤体表面沿いに 水没させた.

電気探査法で使用した測定装置は、電流送信部と電位 受信部で構成され、電極接続装置を300極まで接続可能 であり、AC100V電源で駆動するシステムである(図-2).データの収録はパソコンで制御し、電極の選択や データのサンプリング間隔、スタッキング回数などの測 定条件を任意に決定することが可能である.

電極配置は、ウェンナー配置、エルトラン配置、ダイ ポール・ダイポール配置の3ケースとした.

## 3. 電気探査数値実験よる適用可能性検討

#### (1) フィルダムを模擬した数値実験

## a) 数値実験の概要

堤体内の浸透流や漏水などの現象により,堤体内部に 比抵抗変動が生じた場合,それらが電気探査法で識別可 能かを事前に把握した.

測定対象とするダムの貯水位は日変動することに加え, 降雨等による大規模出水時や発電所設備の点検時に洪水 吐ゲートをフリーフローにして,貯水位を低下させるこ とがある.洪水吐クレストの標高がEL.193.0mであるこ とから,フリーフローによる水位低下時は越流水深を考 慮しても,通常の貯水位運用範囲から10m程度の水位低 下が生じる.当該ダムでは,貯水位が高い時と低い時で 浸透量が異なることに加え,貯水位上昇時にある貯水位 になると浸透量が増加しはじめることがこれまでの点検 時の浸透量測定で確認され,特定の浸透経路(本稿では 「高透水域」と称す.)が存在する可能性が示唆されて

「高近小域」と称り、)か存住りる可能住が小域されている。そこで、堤体内に高透水域が存在することを想定した比抵抗モデルを作成し、ウェンナー配置、エルトラン配置、ダイポール・ダイポール配置の3通りの電極配置を適用し、数値実験を行った。解析に際しては、ウェンナー配置とエルトラン配置を組み合わせた。

## b)解析モデルと堤体材料の比抵抗値の設定

堤体の模式図を図-3に、数値実験で使用したダム軸方 向の比抵抗モデルを図-4に示す.周辺構造物によるノイ ズの解析結果や比抵抗変化率への影響を確認するために、 低比抵抗の構造物として埋設管を堤体上部に配置した. モデルは測線長60m、測点間隔lmとし、堤体の比抵抗値 を300Ωm、埋設管の比抵抗値を100Ωmと仮定した.

# c)高透水域の設定

図-3の黒色および図-4の黒四角で示した領域に高透水 域を設定した.高透水域の比抵抗値は、地下水(ダム湖



図-2 使用した電気探査装置



図-3 堤体模式図(上下流方向断面)



図-4 数値実験で使用した比抵抗モデル(ダム軸方向断面)

の水)の比抵抗値を $50\Omega$ mとしてArchieの式から、飽和 状態になる高水位時を $100\Omega$ m,不飽和状態になる低水 位時を $300\Omega$ mとした.高透水域はダム天端から8m下に 位置すると仮定し、領域の寸法は幅2m×高さ2mと幅1m×高さ1mの2ケースとした(図-4には、幅1m、高さ1mを記載).

#### (2) 数値実験の結果

# a) 電極配置の検討

電極配置の違いによる高透水域特定の可能性について 検討した. 図-5 はウェンナー+エルトラン配置, 図-6 はダイポール・ダイポール配置の高透水域寸法 2m×2m のモデルによる高水位時の比抵抗分布を解析した結果で ある. ウェンナー+エルトラン配置では, 高透水域の存 在は不明瞭であるが, ダイポール・ダイポール配置は高 等水域をよく捉えていることが分かる. したがって, 高 透水域を検出するためには, ダイポール・ダイポール配 置で測定する方が解析精度は高いと考えられる.

# b) 高透水域寸法の検討

高透水域寸法の比抵抗分布への影響について検討した.





電極配置の検討結果から、ウェンナー+エルトラン配置 では、高透水域が不明瞭であったため、ダイポール・ダ イポール配置を検討対象とした.

図-7に高透水域寸法1m×1mの解析結果を示す.図-6 に示した2m×2mの解析結果と比較すると、やや不明瞭 になるが、高透水域の存在を捉えている.

# c) 水位変動の検討

水位変動が生じることで高透水域の飽和度が変化する ことを想定し、これが比抵抗分布へ与える影響について 検討した. 電極配置の検討結果から、ダイポール・ダイ ポール配置での検討を行った.

図-8に高透水域寸法1m×1mの高水位時と低水位時の 比抵抗分布を,図-9に比抵抗分布の変化率を示す.

図-8のa)高水位時の比抵抗分布からも高透水域が確認できるが、図-9に示すように高水位時と低水位時の比抵抗構造の変化の方が、高透水域の位置を明瞭に推定できることが示された.ただし、その変化率は最大で2%程度であるため、実測時における測定電位のスタッキング回数分の標準偏差/測定電位の平均値(以降、「標準



図-9 高水位時と低水位時の比抵抗分布の変化率 (ダイポール・ダイポール配置)

偏差」という.)は、それよりも低い値にする必要があり、1%程度以下の再現性の良いデータを取得する必要があることが示唆された.

# 4. 電気探査測定

#### (1) 現地測定

図-10 に電気探査測線名および位置を含むダム平面を示す.電気探査の測線のうちダム横断方向の測線は堤体 天端をまたぐように 6 測線設置した.ダム軸方向の測線 はダム天端下流側の法肩(EL209.5m)に A1 測線を,堤 体下流側の EL.201.0m 盤上に A2 測線を設置した.電極 数は全測線合計 599 点である.電極と地面との間の接地 抵抗を極力低減するために,すべての電極部に接地抵抗 低減剤を投入した.その結果, lkΩ程度まで低減できた ため,多くの電極から 200mA 近くの流電が可能となっ た(送信電圧 200V).測定時の貯水位は, EL205.4~



図-10 ダム平面,電気探査測線名および位置

205.5mの範囲であった.

送信電流波形は矩形波とし,周期 0.25 秒,流電時間 0.1 秒に休止時間 0.025 秒を加えた波形によって測定した. また,現場での測定時間を考慮してスタッキング回数は 4回とした.

標準偏差を小さくするためには、大きな信号かつ低ノ イズの測定値が必要であるが、接地抵抗低減剤投入によ る流電量の増加やスタッキングにより、ほとんどの電極 配置で測定電位の標準偏差を目標としていた 1%以下に することができ、再現性の良いデータが得られたといえ る.

## (2) 2次元解析

2 次元解析は、ラプラシアンフィルターによる平滑化 制約付き非線形最小二乗法<sup>8</sup>を使用した.解析における 比抵抗ブロック配置図の一例を図-11 に示す.

結果は比抵抗分布図で整理し、以降実施する水位低下 時との微小な比抵抗変化を解析する際の高水位時の基準 データとした.堤体の各セルの初期値は、測定した見掛 比抵抗の平均値を与え、計算から得られる理論上の見掛 比抵抗値との差が小さくなるように繰返し計算を行い、 比抵抗断面図を作成した.

解析後の比抵抗断面図を図-12,図-13 に示す.図-12 よりコア材の比抵抗は、ロック材の比抵抗よりも低い値 が示されており、堤体材料特性と整合している.

図-13 右岸側の低比抵抗領域は,鉄筋コンクリート構造物のアバット擁壁の影響である.擁壁の比抵抗値は周辺のそれと大きく異なるため,解析時に擁壁部の比抵抗値の影響が周辺地盤に及ぶこととなる.今後計測する水位低下時の微小な比抵抗変化から高透水域を捉えるため



図-12 比抵抗断面図(B4測線), (a) ウェンナー+エルトラン 配置, (b) ダイポール・ダイポール配置

には、境界条件を設定するなど、より厳密な評価を可能 とする解析手法を検討する必要がある.



図-13 比抵抗断面図(A1 測線), (a) ウェンナー+エルトラン配置, (b) ダイポール・ダイポール配置

# 5. おわりに

本研究では、供用中のフィルダムを対象に堤体内 の水理特性の変化を電気探査法によるモニタリング 手法の開発を目指している.そこで本稿では、数値 実験によって微小な比抵抗構造の変化を捉えるため に必要な測定データの品質を調査し、その結果を現 場に適用した.以下に得られた知見を示す.

- ✓ 解析結果から、高透水域を捉えるためには、 実測時には標準偏差1%程度のデータを取得す る必要があることを確認した。
- ✓ 現場測定では、各電極に接地抵抗低減剤を適用することで、標準偏差1%以下の再現性の良いデータを得ることができた.また、大局的な堤体内の構造を把握することができた.
- ✓ 一部,比抵抗値が急激に変化する箇所がある ため,解析手法の検討が必要である.

以上より,課題はあるものの,電気探査法はフィ ルダム堤体内部の水理特性モニタリングに有効とな る可能性が示された.今後予定されている貯水位低 下時に計測を行い,堤体内の比抵抗構造の変化を捉 えることで,高透水域の特定やその状態変化をモニ タリングする取り組みを引き続き実証していく予定 である.

#### 参考文献

- (財)国土技術研究センター編:改定 解説・河川管 理施設等構造令,技報堂出版, pp.95-97, 2000.
- Suzuki, K.. and Higashi, S. : Groundwater flow after heavy rain in landslide-slope area from 2D inversion of resistivity monitoring data, *Geophysics*, No. 66, pp.733-743, 2001.
- Suzuki, K., Oyama, T., Kawashima, F., Tsukada, T. and Jyomori, A. : Monitoring of grout material injected under a reservoir using electrical and electromagnetic surveys, *Exploration Geophysics*, No. 63, pp.69-79, 2010.
- 管智浩:連続電気探査法による河川堤防内への降雨浸 透水状況の推定,物理探査, No.57, pp.545-552, 2004.
- Walid, A. F. : Application of electrical resistivity tomography technique for characterizing leakage problem in Abu Baara earth dam, Syria, *International Journal of Geophysics*, Article ID 368128, 2014
- 6) 鈴木浩一,藤井健知,高橋章:電気探査法によるロッ クフィルダム初期湛水時の浸透水モニタリング,物理 探査, No.68, pp.189-199, 2015
- 7) 森充広,増川晋,渡嘉敷勝,田頭秀和:比抵抗トモグ ラフィ法によるフィルダム堤体内部の比抵抗モニタリ ング,ダム工学, No.19 (3), pp.143-153, 2009
- 8) 佐々木裕:比抵抗法2次元インバージョンの改良,物 理探査, No.41, pp.111-115, 1988

# HYDROLOGIC CHARACTERIZATION MONITORING OF THE INSIDE OF FILL TYPE DAM USING ELECTRICAL RESISTIVITY SURVEY

# Go ORUKAWA, Yuu ANDO, Junya KAKUNO and Koichi SUZUKI

The authors aim to develop a monitoring method to capture the hydraulic characteristics change inside of the dam as different resistivity at different reservoir water levels. Firstly, we conducted numerical analysis to estimate the resistivity change rate of the dam due to the water level difference. As a result, it was confirmed that the resistivity change rate was about 2% at the maximum, so the standard deviation of the electrical exploration result should be lower than that. Based on the results, it could be reduced to approximately 1% or less on the electrical exploration. From the above, electrical exploration can be applied to monitoring of the hydraulic characteristics of the dam by visualization of the resistivity change.