

比抵抗トモグラフィー法によるフィルダム堤体内部の 比抵抗モニタリングモデル実験

Laboratory Experiments of Resistivity Monitoring within Fill Dam Models
Using a Resistivity Tomography Method

森 充 広 (もり みつひろ)

㈱農業工学研究所造構部施設機能研究室 研究員

櫻 井 健 (さくらい けん)

応用地質株式会社技術開発センター探査工学センター

長 束 勇 (なつか いさむ)

㈱農業工学研究所造構部施設機能研究室 室長

畑 山 元 晴 (はたけやま もとはる)

農林水産省農村振興局整備部設計課

1. はじめに

築堤後のフィルダムの安全管理方法は、一般に、堤体内部に埋設した間隙水圧計、土圧計、変位計等の継続観測や周辺地山の地下水位観測が主である。これらの計器は、自動観測が可能で、データ収集が容易であるという理由から、電気式の計器が設置されることが多い。しかし、電気式の埋設計器は、施工時のケーブル断線、落雷等により施工直後あるいは施工後数年でその機能を失しているものもある。また、埋設計器のデータはあくまでその「点」におけるデータにすぎず、局所的に発生する漏水等の異常を検出するには、必ずしも十分でないと考えられる。今後、新たに建設するダムは少なくなり、建設後数十年を経過したダムの補修・改修工事が増加すると思われるが、信頼できる計器データが得られない場合、漏水等の問題箇所を特定し、部分補修することは極めて難しい。特に、堤高15 m未満の小規模な“ため池”では、これら埋設計器が設置されることはほとんどないため、漏水経路調査等に多大な労力・費用を投じているのが現状である。

筆者らは、築堤時にフィルダム堤体内部にあらかじめ金属製の電極を埋設し、比抵抗トモグラフィー法により堤体内部の含水状態を非破壊、かつ二次元的にモニタリングすることにより、フィルダム内部の浸潤状況を盛立て直後から長期的に監視するシステムを提案し、1999年から実験を行っている^{1),2)}。本報告では、実ダムでの実証実験に先立って行った小規模な試験堤体実験結果を報告する。

2. モデル実験の方法

2.1 試験堤体の概要

試験堤体は、独立行政法人農業工学研究所敷地内に設けた堤高105 cm、堤頂長700 cm、天端幅90 cm、底幅300 cmの小規模な盛土である。堤体作製に際しては、まず平坦な地盤を掘込み、その中に堤体を盛り立てた。表層は黒ぼく土であり、その下位には関東ローム層が分布している。試験堤体の平面図および縦横断面図を図一1

に示す。堤体盛土材料は、実証試験を予定しているフィルダムのコア材（強風化花崗岩）を使用し、巻出し厚15 cm、80 kg級タンパーで締め固めた。盛土施工の結果は、表一1に示すとおりであり、透水係数については、若干実証試験地の施工管理基準値を上回っているものの、ほぼ実証試験堤体の施工管理値が得られた。

試験堤体には疑似水みちモデルとして底部および底部から50 cmの位置に、不織布を巻き付けた有孔管（φ10 mmおよびφ30 mm）を設置した。

2.2 電極配置の詳細

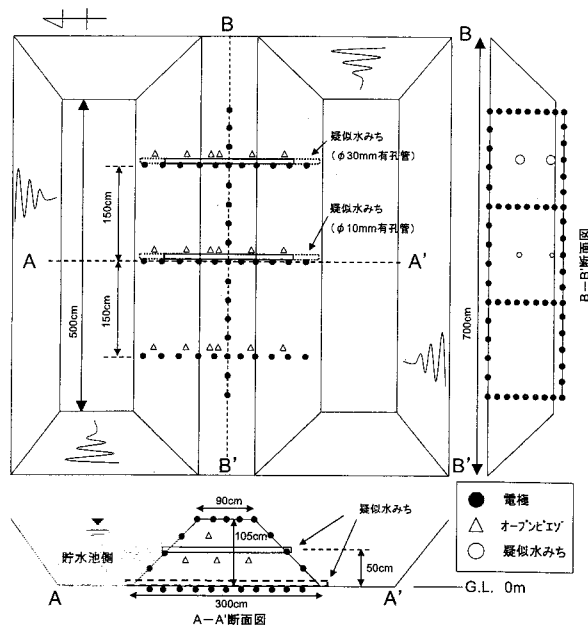
比抵抗トモグラフィー法に用いる堤体下部の電極は、一度基盤を溝状に掘り込んだ後、電極を巻き付けた塩ビ管を埋設し、コア材で埋め戻すことにより設置した。鉛

表一1 試験堤体施工結果

項 目	結 果	施工管理基準（実証試験堤体）
含水比 ※1	29.9%	$W_{opt} + 5\% (W_{opt}: 24.9 \sim 27.6)$
透水係数 ※2	$1.13 \times 10^{-5} (\text{cm/s})$	$1 \times 10^{-5} (\text{cm/s})$ 以下
密度 ※2	$1.51 (\text{g/cm}^3)$	$1.30 (\text{g/cm}^3)$ 以上

※1: G.L. 0.15m で 9 点、0.50m で 9 点、0.85m で 6 点、計 24 点の平均値

※2: 試験盛土で 5 点、堤体 G.L. 0.73m で 1 点、計 6 点の平均値



図一1 試験堤体の平面図および縦横断面

直方向の電極についても同様に、電極を巻き付けた塩ビ管を垂直方向に固定し、周辺を十分転圧した。電極間隔は鉛直方向15 cm、水平方向25 cmを基本として配置した。

湛水および疑似水みちの影響を評価するために、上下流断面の電極は、右岸側、中央、左岸側の3断面に配置した。以下、それぞれNS-1, NS-2, NS-3断面と呼ぶことにする。また、ダム軸方向の電極は、ダム軸断面に配置し、以下EW断面と呼ぶことにする。

2.3 計測方法

比抵抗トモグラフィ法による電位差の計測には、得られる電位差が大きく、S/N比に優れる2極法を用いた。測定器には応用地質機製のMcohm21を使用した。なお、比抵抗トモグラフィ法による試験堤体の比抵抗計測は表-2に示すとおり実施した。

2.4 解析方法

比抵抗トモグラフィ法による解析は、順問題にアルファセンタ法³⁾を用い、逆解析は非線形最小二乗法を用いている。

結果の解釈は、次の手順で行った。まず、各計測結果を逆解析し、比抵抗分布を求めた。次に、堤体盛立てから湛水、落水に至る際の堤体内部の比抵抗変化領域を明確化するため、盛立て後間隙水圧が十分消散した1999.11時点の比抵抗値を初期値とみなし、[(その時点の比抵抗値-1999.11時点の比抵抗値)/(1999.11時点の比抵抗値)]×100を比抵抗変化率と定義して、この比抵抗変化率で結果を表示した。すなわち、以降に示す各図においては、盛立て直後の結果以外は、この比抵抗変化率で結果を表示している。

3. 実験結果

3.1 湛水前の比抵抗分布

試験堤体は1999年9月末に完成した。また、降雨による実験結果への影響を防ぐため、堤体全体を覆うように屋根を設けた。

湛水前の計測は盛立て完成直後および1.5箇月後に実施した。例として、完成1.5箇月後のNS-2断面の比抵抗分布を図-2に、EW断面の比抵抗分布を図-3に示す。堤体の表層部が120 Ω・m以上を示し、堤体内部は

表-2 計測時期とその目的

時 期	計測の有無・イベント	計 測 目 的
1999.9	○試験堤体完成直後	初期状況把握
1999.11	○試験堤体完成 1.5 箇月後	初期状況確認、間隙水圧の消散
1999.11	湛水開始	
1999.12	○湛水終了直後	湛水の影響
2000.3	○湛水約 3 箇月後	湛水の影響
2000.12	○湛水約 1 年後	湛水の影響
2000.12	疑似水みち（有孔管）に導水	
2000.12	○疑似水みち導水約 2 週間後	漏水の影響
2001.4	○疑似水みち約 4 箇月後	漏水の影響、温度の影響
2001.5	○疑似水みち導水約 5 箇月後	漏水の影響、温度の影響
2001.6	○疑似水みち導水約 6 箇月後	漏水の影響、温度の影響
2001.7	○疑似水みち導水約 7 箇月後	漏水の影響、温度の影響
2001.7	落水	
2001.8	○落水約 1 箇月後	落水の影響
2001.9	○落水約 2 箇月後	落水の影響

○は比抵抗トモグラフィ法による測定を実施

下部から上部にいくにつれて比抵抗値が高くなるような層構造が認められた。なお、NS-1, NS-3断面においても比抵抗値、比抵抗分布ともに同様の傾向が認められた。

3.2 湛水直後の比抵抗変化率

初期状態を確認した後、1999年11月に湛水した。貯留水は水道水である。湛水直後の比抵抗変化率（NS-2断面）を図-4および図-5に示す。白色は比抵抗値が1999年11月時点（湛水前）と比較して増加した部分を、黒色は比抵抗値が減少した部分を示している。主にNS断面において、貯水池側の比抵抗値が斜面に沿った形で減少していることが確認できた。基盤面付近の比抵抗値が逆に上昇しているが、これは基盤面付近の止水処理（コンタクトクレイ）をベントナイトにより十分行ったため、浸潤しにくい状況であったと考えられる。なお、設置したオープンピエゾメーターでも、基盤面への浸潤は認められていない。一方、EW断面では、全体的に比抵抗の変化が小さく、湛水したことによる有意な比抵抗変化は認められなかった。湛水後の期間が短いため、ダム軸付近にまで浸潤の影響が及んでいない、ということがNS断面結果からも想定される。

3.3 湛水1年後の比抵抗変化率

湛水後は、できる限り上流側の水位を一定に保つため、定期的に水を補給しつつ浸潤状況を観測した。敷地の地下水位は、G.L.-3.2 mと低く、湛水した水が堤体に浸潤せず、湛水池底面や掘り込んだ地山への浸透が卓越している状況であった。湛水から約1年が経過した2000年12月の比抵抗変化率を図-6および図-7に示す。NS断面において、比抵抗変化率が負になっている領域が拡大し、ほぼ堤体全域に及んでいる。EW断面においても、上下流断面と同様に比抵抗変化率が負になっている領域が拡大していることがわかった。

3.4 疑似水みち解放後の比抵抗変化率

2000年12月の計測後、疑似水みちを解放した。貯水池側の栓を開き、次に下流側の栓を開いて貯留水が流出してくるのを確認した後、再び下流側の栓を閉じて放置した。解放して約6箇月を経過した2001年6月の比抵抗変化率を図-8および図-9に示す。ほぼ全体的に低比抵抗化し、基盤面付近を除いてほぼ全体が浸潤してきた様子が可視化できた。特に水みちの径が大きい左岸側（EW断面右側）では、設置した疑似水みち付近で低比抵抗化した領域が確認できた。

3.5 落水後の比抵抗変化率

2001年7月の計測後、貯水を落水し、比抵抗値の変化率を観測した。落水2箇月後の2001年9月の結果を図-10および図-11に示す。堤体法面部分から乾燥が進み、比抵抗変化率が堤体外側から変化している様子が認められた。

4. まとめと今後の課題

本研究では、フィルダム堤体内部の浸潤状況を面的かつ長期的に監視するために、比抵抗トモグラフィ法を応用した小規模なモデル実験を行った。その結果、堤体

内部の浸潤した領域を比抵抗値が減少した領域として可視化できる見通しを得ることができた。この結果を受け、現在、東北農政局管内のフィルダムにおいて、比抵抗トモグラフィ法による実証試験を行っている。

今後の課題としては、次の点が挙げられる。

- ① 基盤を掘込んで実施していることから、盛土部と基盤の接触面付近（EW断面の両端部）は、三次元的な地形の影響を受けている可能性があるため、この影響を評価する必要がある。
- ② 解析に際しては、各段階における測定結果を逆解析した後に比較していることから、解析に伴って発生する誤差を増大して評価している可能性がある。これについては、解析前の電位データの段階で各段階の変化率を取り、その差のデータについて逆解析する等の処理を行うことにより、さらに精度の高い結果が得られるものと考えられる。
- ③ 堤体内部の温度変化が比抵抗値変化に影響を及ぼし

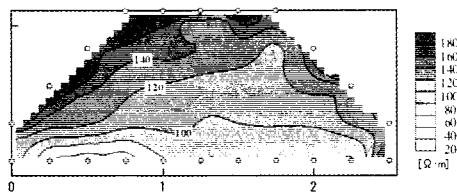
ている可能性があるので、この影響を評価し、解釈の精度を高める必要がある。

なお、本研究は平成11年～13年度に実施した農林水産省の官民連携新技術研究開発事業「比抵抗トモグラフィ法によるダム管理システム技術の開発」（代表：日本技研㈱）の一環として実施した実験成果の一部をとりまとめたものである。関係者各位に謝意を表します。

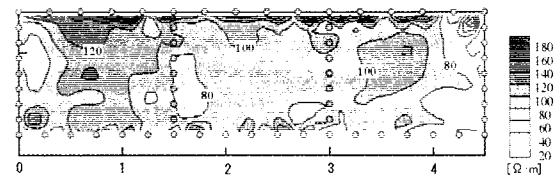
参 考 文 献

- 1) 中里裕臣・長束 勇・中島賢二郎：比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システムおよびその管理方法，特許第3041426号，2000.
- 2) 長束 勇・畑山元晴・森 充広・利岡徹馬・櫻井 健：比抵抗トモグラフィ法を利用したダム管理システムの検討，第36回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1397～1398，2001.
- 3) 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹：比抵抗映像法，古今書院，1995.

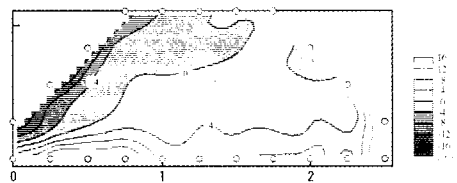
(原稿受理 2002.2.28)



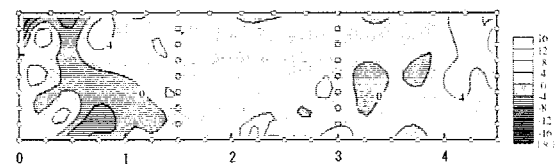
図一 2 NS断面の比抵抗分布（完成1.5箇月後1999.11）



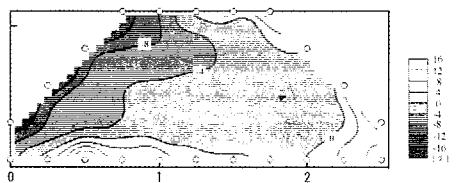
図一 3 EW断面の比抵抗分布（完成1.5箇月後1999.11）



図一 4 NS断面の比抵抗変化率（湛水直後1999.12）



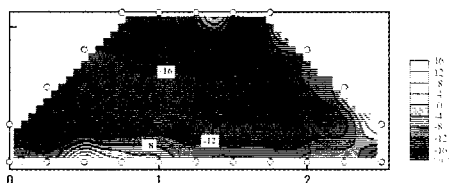
図一 5 EW断面の比抵抗変化率（湛水直後1999.12）



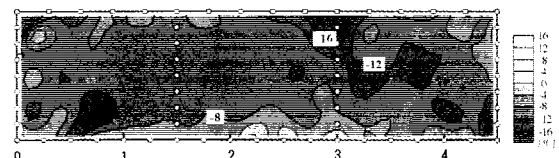
図一 6 NS断面の比抵抗変化率（湛水1年後2000.12）



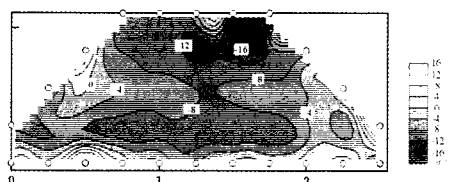
図一 7 EW断面の比抵抗変化率（湛水1年後2000.12）



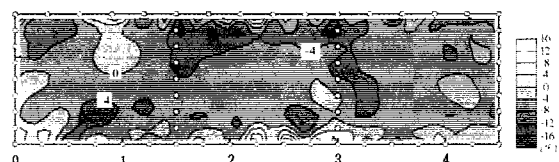
図一 8 NS断面の比抵抗変化率（水みち解放6箇月後2002.6）



図一 9 EW断面の比抵抗変化率（水みち解放6箇月後2002.6）



図一 10 NS断面の比抵抗変化率（落水2箇月後2002.9）



図一 11 EW断面の比抵抗変化率（落水2箇月後2002.9）