

# 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

## 1. 研究開発の概要

この研究は、フィルダム堤体の安全性を「面」的かつ長期的に管理できるシステムとして、比抵抗トモグラフィ法を用いた堤体安全管理システムの研究開発を行い、実ダム（高柴調整池）においてその可能性を検証したものである。

## 2. 導入効果

フィルダムの盛立及び初期湛水過程の複雑浸透流や残留間隙水圧の挙動を「面」的に追跡でき、センサーに電極（金属棒）を用いるため耐久性に優れた長期間のダム管理システムを構築できる。

## 3. 研究開発期間、国庫補助金

平成11年度～平成13年度(20,000千円)

## 4. 研究体制

農工研：造構部施設機能研究室

組合：日本技研（株） 応用地質（株） 勝村建設（株）（株）三祐コンサルタンツ、日立電線（株）

## 5. 従来技術との比較

### 1) 従来技術

従来の埋設計器によるダム管理システムは「点」による管理であり、さらに初期湛水時の不飽和・飽和域における浸透流の挙動把握は困難であった。また、長期のダム安全管理上、センサーの劣化による耐久性の面で課題が残っていた。

### 2) 新技術

「面」的な管理

堤体全周囲にセンサーを配置した比抵抗トモグラフィによるダム管理システムにより、フィルダムの貯水位変動に伴う残留間隙水圧や浸透流の挙動を従来の間隙水圧計による「点」の情報としてではなく「面」的な情報として追跡できる。電極配置図を図-1, 2に示す。

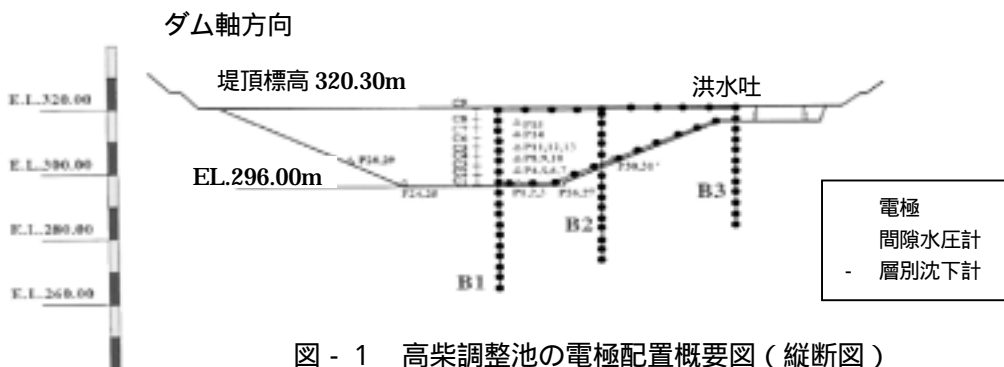


図 - 1 高柴調整池の電極配置概要図（縦断面図）

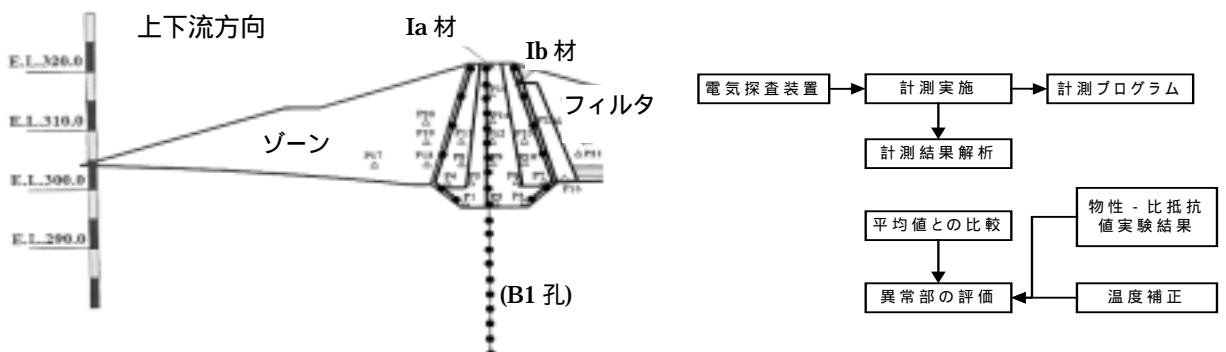


図 - 2 高柴調整池の電極配置概要図（横断面図）

## 管理システムの耐久性

センサーに電極（金属棒）を用いるため耐久性に優れ、長期間の観測が可能なダム管理システムを構築できる。

盛立から初期湛水過程までの複雑な浸透・間隙水圧の挙動把握

比抵抗値の相異により遮水ゾーンの不飽和・飽和域を同時に計測、貯水池から遮水ゾーンへの浸透状況を把握することが可能である。

以上の特徴を持つ比抵抗トモグラフィによるダム管理システムにより安全管理上重要な初期湛水時の堤体の浸透流や間隙水圧挙動の「面的な追跡ができるようになった。またその際、堤体の締固め土における空気-水系を考慮した浸透流解析法を併用すれば、飽和度と浸透流がより関連づけられ、複雑な挙動を把握ができるダム管理システムを構築することが可能である。

### 3) 高柴調整池における計測・解析結果

横断面における初期湛水直後(t=1日)及び湛水位(t=69日)の比抵抗値分布と残留間隙水圧を考慮した非定常浸透流解析で予測した流速分布を図-3及び図-4に示す。事前に実施した遮水材料の試験から、比抵抗値 53 m 以下が飽和度 100%に対応することから判断して、コア内部は中心ほど比抵抗値が小さく、飽和度が高いことがわかる。

貯水位が約 7m変化しても両者の比抵抗値は上流側の EL.313m付近で若干飽和度が上昇したことを示すのみで、コア中心部はほとんど変化せず、貯水池の水が浸透していないと推定される。

また、浸透流解析結果の流速分布からも内側のコア内部では貯水池から浸透がほとんど無く、コア部の上流側表面以外、比抵抗値は非常に小さい。これらの結果から、比抵抗トモグラフィを適用した管理システムにより、初期湛水時の面的な浸透流形態を推測できることが実証されたと考えている。

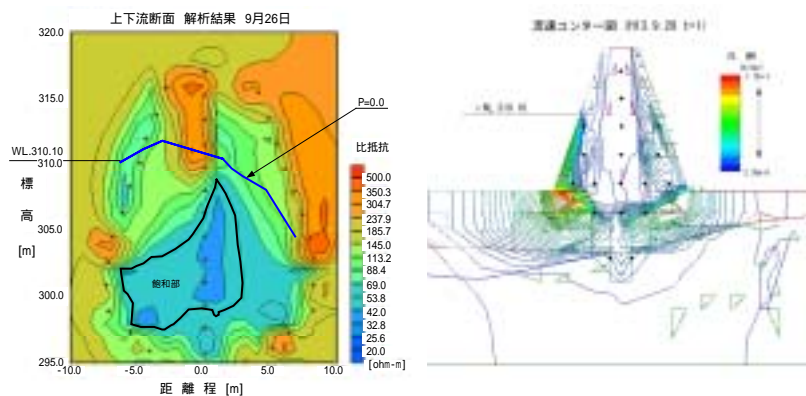


図 - 3 比抵抗値と流速分布の比較（初期湛水開始時）

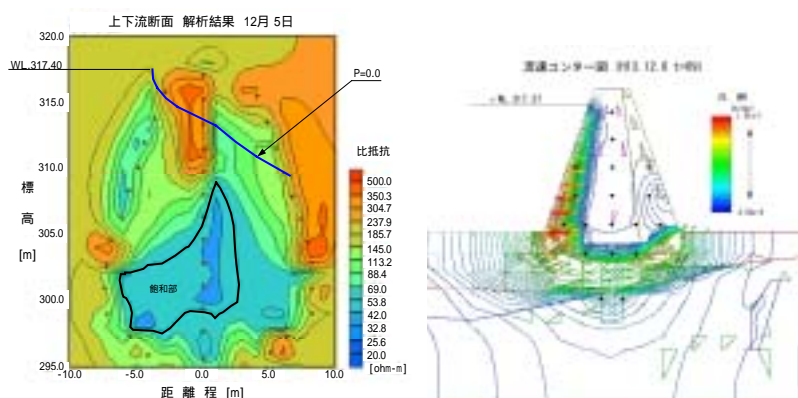


図 - 4 比抵抗値と流速分布の比較（満水位維持 32 日間）

## 1.1 新技術の概要

### 1.1.1 新技術導入のポイント

#### (1)初期湛水時の浸透挙動

従来の埋設計器によるダム管理システムでは、コア内に残留間隙水圧が分布する場合、初期湛水時の間隙水圧や浸透の挙動を詳細に評価することが難しいことが多い。その理由として、

従来型の間隙水圧計では「点」の情報しか得られず、各間隙水圧の値を補間して、間隙水圧の分布を推定せざるを得ない。仮に何らかの理由で堤体内に水みちが生じた場合、その位置を特定することは難しい。

日本のように比較的湿潤な気候では、重機施工により締固められたコア部は飽和されていないにもかかわらず正の間隙水圧が発生して残留することが多い。初期湛水時にはこの残留間隙水圧が貯水池からコア部への浸透を邪魔をしてほとんど堤体からの漏水が無いことが報告されている。従来の間隙水圧計はコア材の飽和・不飽和は区別できないことから、正の間隙水圧を測るのみで、不飽和の状態であっても間隙水圧が正の場合、飽和流れとして考える場合が多かった。

従来のように正の間隙水圧を全て飽和系としてキャサグランド式等により自由水面位置を求めて、漏水量を求める場合、安全管理上の目安となる漏水量の値を過大に評価し、危険になることが考えられる。

これに対し、比抵抗トモグラフィによるダム管理システムは比抵抗値から飽和度が推定でき、貯水池の水とコア部土中の水（空気を含む）との区別によって貯水池からの浸透の状況を把握できるようになる。

#### (2)ダム管理システムの耐久性

ダム完成後、数十年に及ぶ管理を継続する必要があるが、従来の電気式埋設計器ではかなりの計器が計測不能となるか、精度の低下が避けられない。経年後のメンテナンスには耐久性があるダム管理システムが必要である。

### 1.1.2 新技術の概要

#### (1)比抵抗トモグラフィによるダム管理システム

従来の埋設計器によるダム管理システムは「点」による管理であり、さらに初期湛水時の不飽和・飽和域における複雑な浸透流の挙動を把握することは困難であった。また、長期のダム安全管理上、センサーの劣化による耐久性の面で課題が残っていた。

一方、堤体全周囲にセンサー（電極）を配置した比抵抗トモグラフィによるダム管理システムにより、安全管理上重要な初期湛水時の堤体の浸透流や残留間隙水圧挙動の「面」的な追跡が可能となった。その際、不飽和土の保水モデル（飽和度の関数）や比貯留係数（空気が混じった水の圧縮率を考慮）を考えた不飽和・飽和浸透流解析を併用すれば、飽和度

と浸透流がより関連づけられ、複雑な挙動を把握ができるダム管理システムを構築することが可能となる。

## (2)電極の配置計画

高柴調整池電極埋設位置図を図 - 1 , 2 に示す。

( 堤高 24.3m、天端幅 6.0m、堤頂長 128.0m、堤体積 98,700m<sup>3</sup> )

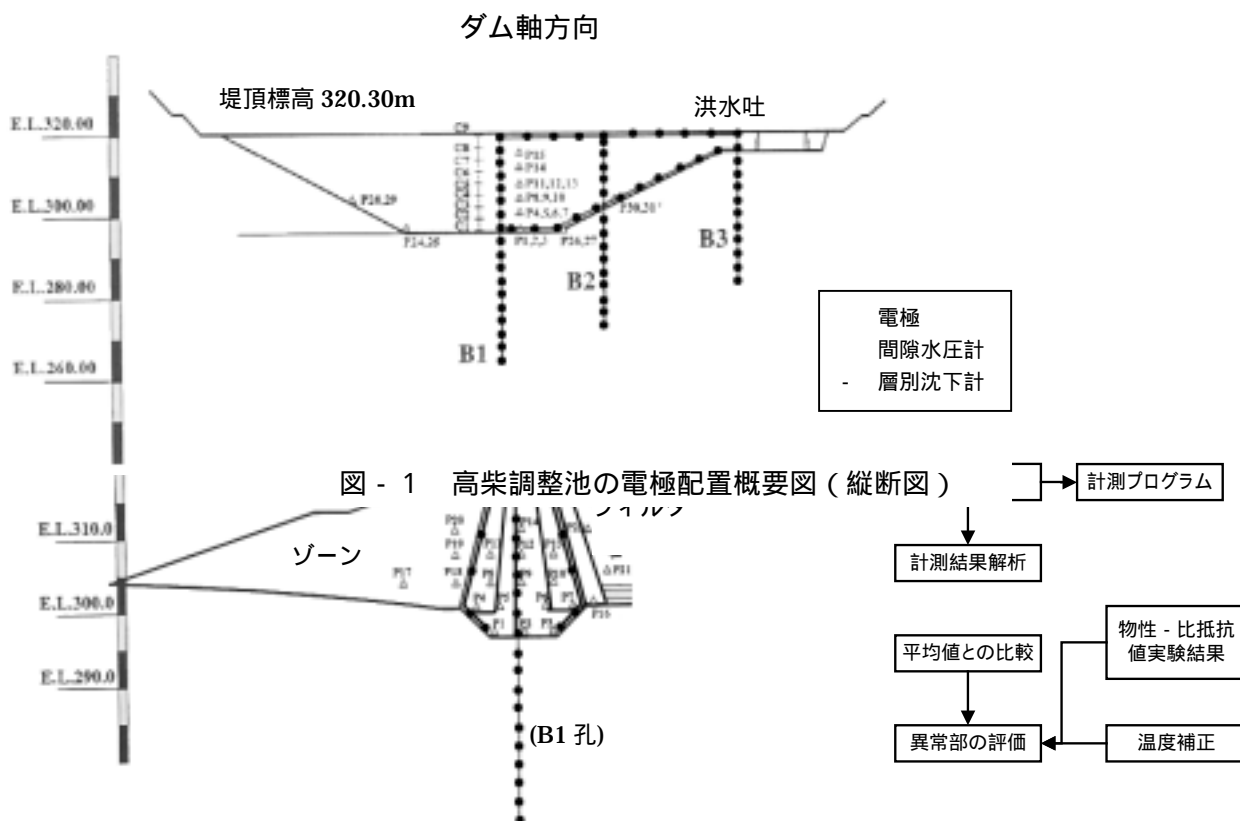


図 - 2 高柴調整池の電極配置概要図 (横断面図)

## (3)高柴調整池における計測・解析結果

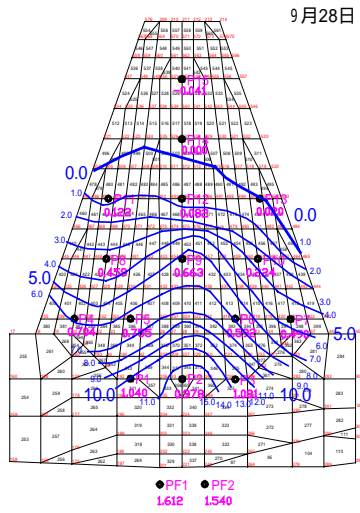
図 - 3 (a)(b)に初期湛水直後(t=1day)の間隙水圧計による観測値及び比抵抗値分布を示す。また、残留間隙水圧を考慮した非定常浸透流解析で予測した間隙水圧分布を図 - 3 (c)に示す。

コア内部は不飽和ながら正の圧力水頭を持っており、コア部の中心ほど比抵抗値が小さく、飽和度が高いことがわかる。事前に実施した遮水材料の試験から、比抵抗値 53 m 以下が飽和度 100%に対応していると推定される。初期湛水開始から 69 日後の満水位(WL.317.37 m)観測による間隙水圧、比抵抗値および非定常浸透流解析による間隙水圧の予測値を各々図 - 4 に示す。

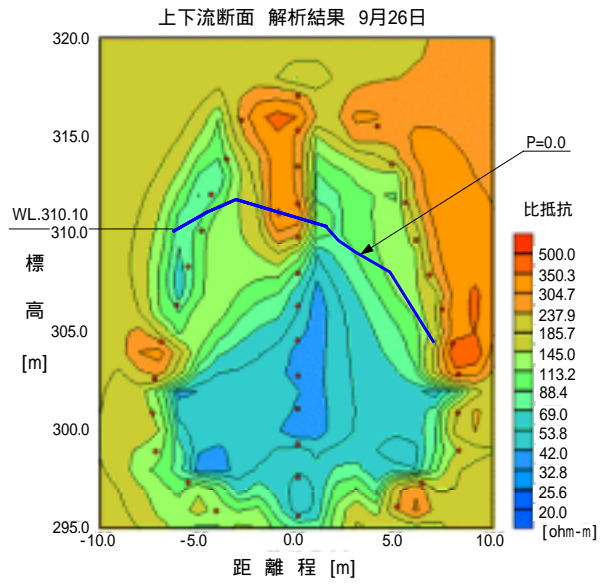
t=1day と t=69days の比抵抗値は貯水位が約 7m変化しても上流側の EL.313m付近で若

干飽和度が上昇したことを示すので、コア中心部はほとんど変化しないことがわかる。

これは図 - 5 ~ 6 と浸透流解析結果の流速分布を見ると、内側のコア内部では貯水池からの浸透がほとんど無い結果からも、コア部の上流側表面以外、比抵抗値がほとんど変化しないことと対応している。これらの結果から、比抵抗トモグラフィを適用した管理システムにより、初期湛水時の浸透流形態が推測できることが実証された。

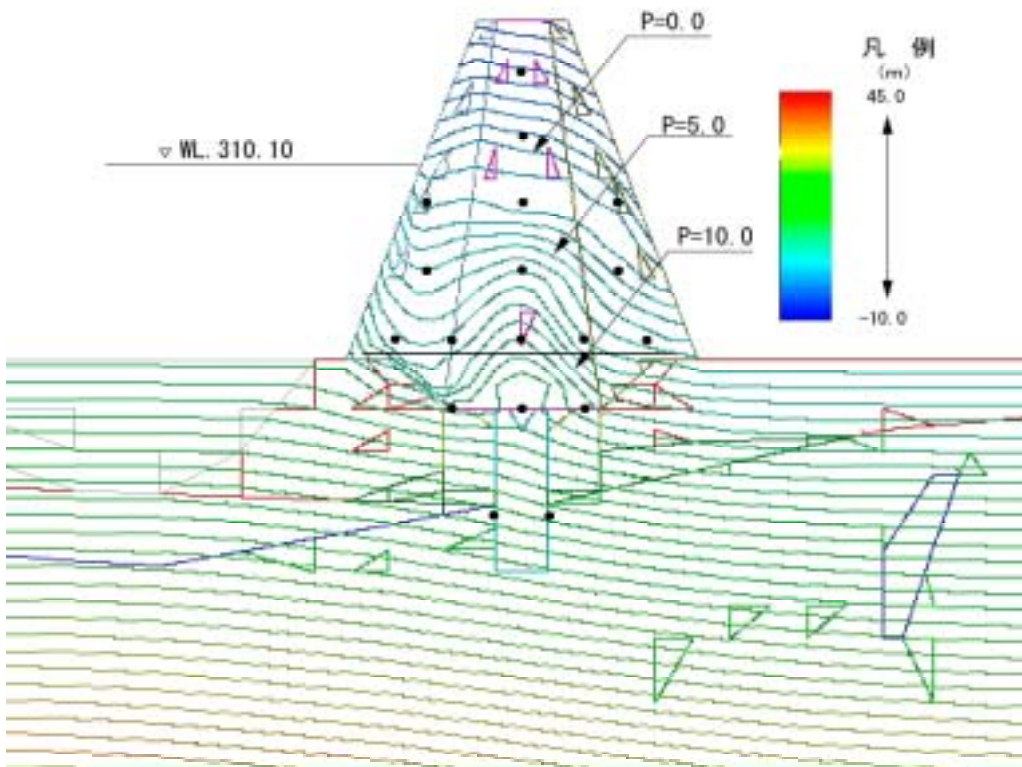


a. 間隙水圧分布  
(間隙水圧計による観測値)



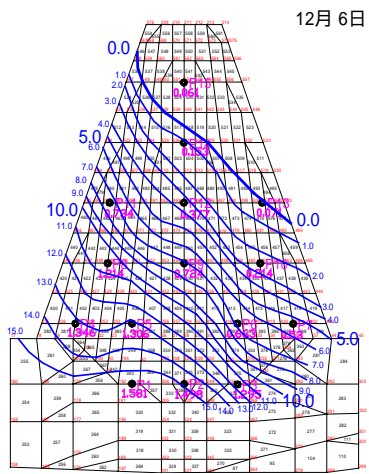
b. 比抵抗値分布  
(比抵抗トモグラフィ法)

圧力水頭コンター図 (H13. 9. 28 t=1)

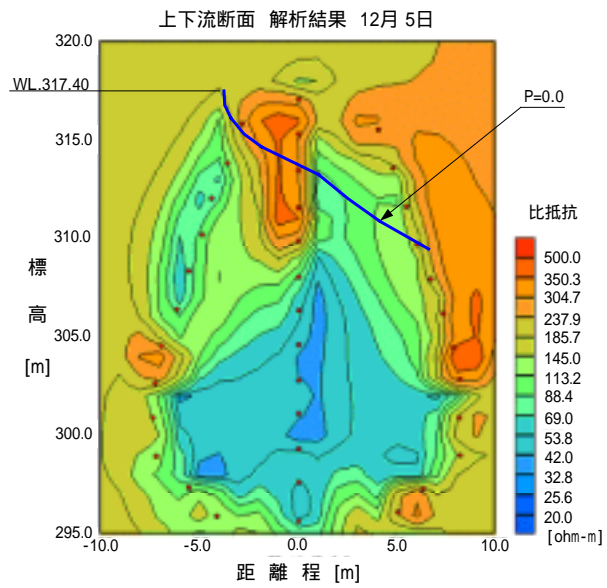


c. 非定常浸透流解析結果

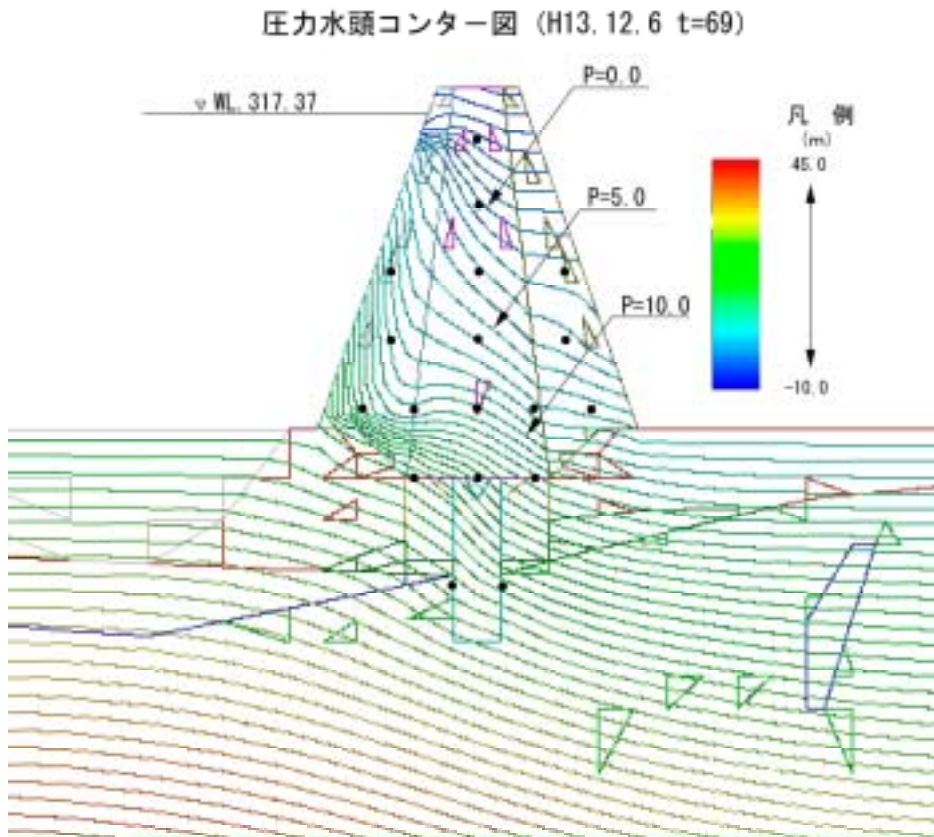
図 - 3 間隙水圧分布  
(初期湛水開始時)



a. 間隙水圧分布  
(間隙水圧計による観測値)



b. 比抵抗値分布  
(比抵抗トモグラフィ法)



c. 非定常浸透流解析結果  
図 - 4 間隙水圧分布  
(満水位維持 32 日間)

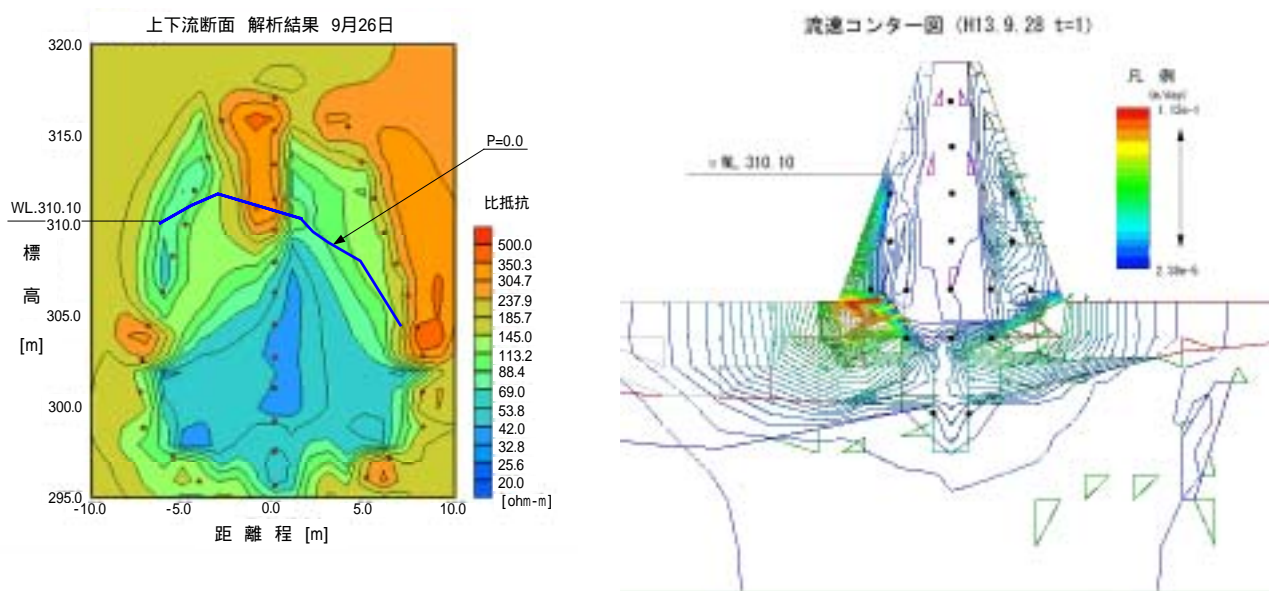


図 - 5 比抵抗値と流速分布の比較  
(初期湛水開始時)

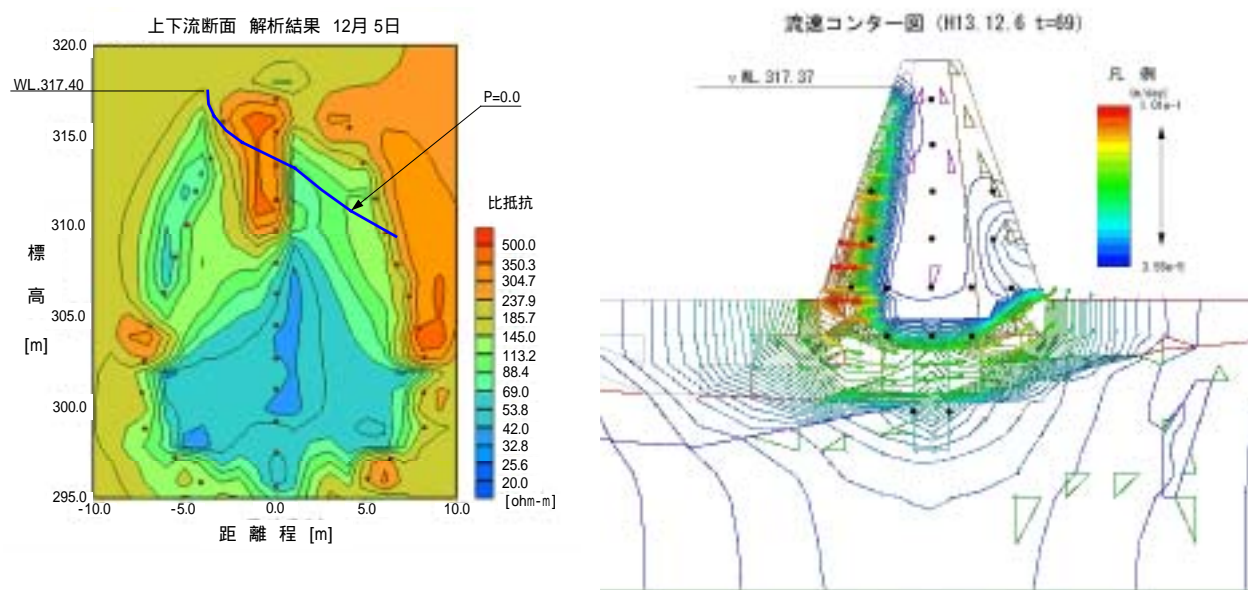


図 - 6 比抵抗値と流速分布の比較  
(満水位維持 32 日間)



### 1.1.3 新技術の特徴

#### (1)「面」的な管理

フィルダムの貯水位変動に伴う残留間隙水圧や浸透流の挙動を従来の間隙水圧計による「点」の情報としてではなく「面」的信息として追跡できる。

#### (2)管理システムの耐久性

センサーに電極(金属棒)を用いるため耐久性に優れ、長期間の観測が可能なダム管理システムを構築できる。

#### (3)盛立から初期湛水過程までの複雑な浸透・間隙水圧の挙動把握

遮水ゾーンの不飽和・飽和域を同時に計測、貯水池から遮水ゾーンへの浸透状況を比抵抗値の相異により把握可能。

## 1.2 新技術に適合する現場条件

フィルダムにおける初期湛水管理や経年変化後の地震時における診断などに対し、従来の埋設計器の過大を強力に補うことが可能と判断される。

また、管理体制が十分と言えない小規模なため池に施工すれば、将来の漏水問題が発生した場合でも漏水箇所を特定でき、迅速な対応が可能と思われる。

## 1.3 設計の考え方

比抵抗トモグラフィ法では、対象領域を取り囲むように地下にも電極を埋設する。したがって、地表からのみ行う水平電気探査と比較すると、格段に異常物に対する分解能が高い。こうした比抵抗トモグラフィ法の効果を最大限に発揮させるため、本フィルダム管理システムでは、あらかじめフィルダム築堤時に電極を埋設することとした。埋設する電極は耐腐食性の金属片であり、可動部がないため、経年劣化が少なく、間隙水圧計・土圧計などの埋設計器類と比較すると長期的な使用が可能である。また、万一落雷などの事態が発生しても全く被害はない。さらに、築堤材料が比較的均一であり、しかも事前にその物性を実験的に求めることができることから、コア材の比抵抗値などの事前情報を解析に組み込むことが可能となり、部分的で微妙な比抵抗変化を精度よくとらえることができると考えられる。

## 1.4 設計のフローチャート

比抵抗トモグラフィ法による測定で得られる測定値は、ある2極間で流した電流値と、別の2極間で計測した電位差である。これらの値から対象領域内の電気の流れにくさを示す比抵抗値を再構成する。次の反復法による数値解析が一般的である。解析のフローチャートを図-7に示す。

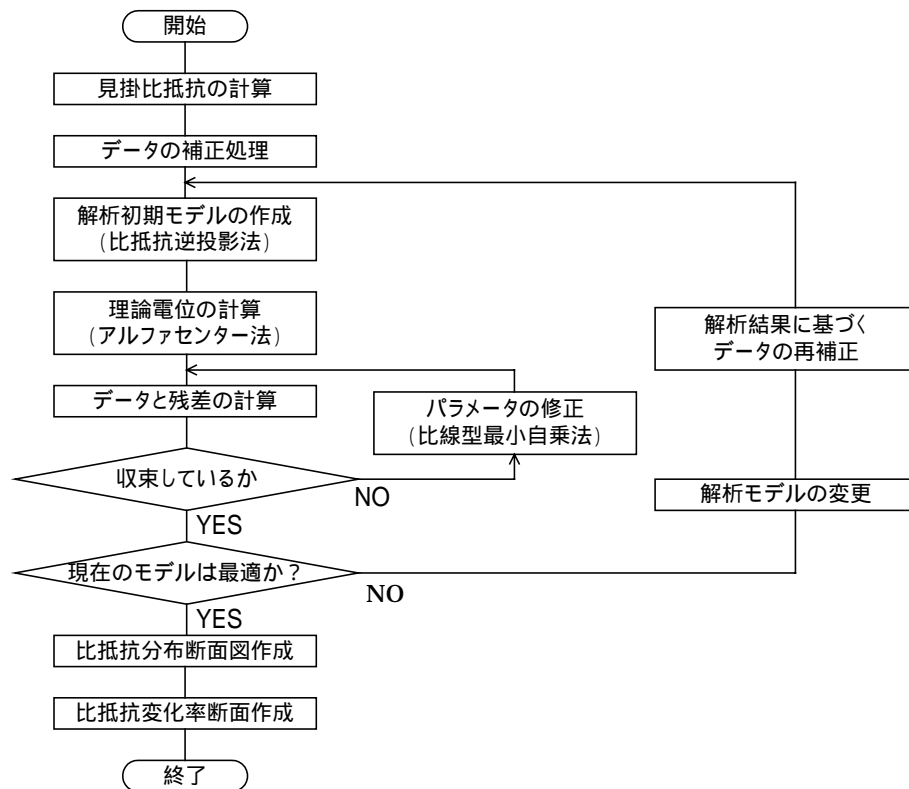


図 - 7 比抵抗トモグラフィ法の解析フローチャート

解析は二次元比抵抗トモグラフィ解析プログラム（「ElecGraf」2極法電極配置でのトモグラフィ解析）を用いて行った。

以下に解析過程の概要を示す。

#### 比抵抗逆投影法

立体的な電極配置で、さまざまな組み合わせで得られた比抵抗トモグラフィのデータに関して、比抵抗逆投影法により比抵抗断面図を作成する。大局的な比抵抗構造を把握できる。

#### 逆解析

解析には非線形最小二乗法を用いた反復自動解析手法を使用する。また、電位の理論計算にはアルファセンター法を用いる。

#### 比抵抗変化率図の作成

貯水前の解析結果と貯水直後の解析結果から各セルの比抵抗変化率を計算し、表示する。

## 1.5 設計にあたっての注意事項

### 電極の配置

ダム堤体横断方向の電極の配置は、電極を埋設することにより、上下流方向の水みちが生じないようにコンタクトクレイ等により対処する必要がある。

高柴調整池では、電極は水平間隔を 4m，垂直間隔を 2mを基本としたが、構造物規模に応じて間隔の修正が必要。

堤体中への電極の配置は盛立の進行によって遮水部が圧密沈下を生じ、最初の設置標高からズレを生じるため、解析時に補正する必要がある。

## 1.6 解析に必要な物性値

堤体遮水材料の飽和度、比抵抗値関係と貯水池の比抵抗値解析結果から、貯水池から堤体内への浸透挙動を推定するには、遮水材料の飽和度と比抵抗値の関係及び貯水池の水の比抵抗値を予め求めておく必要がある。(図-8の事例参照)

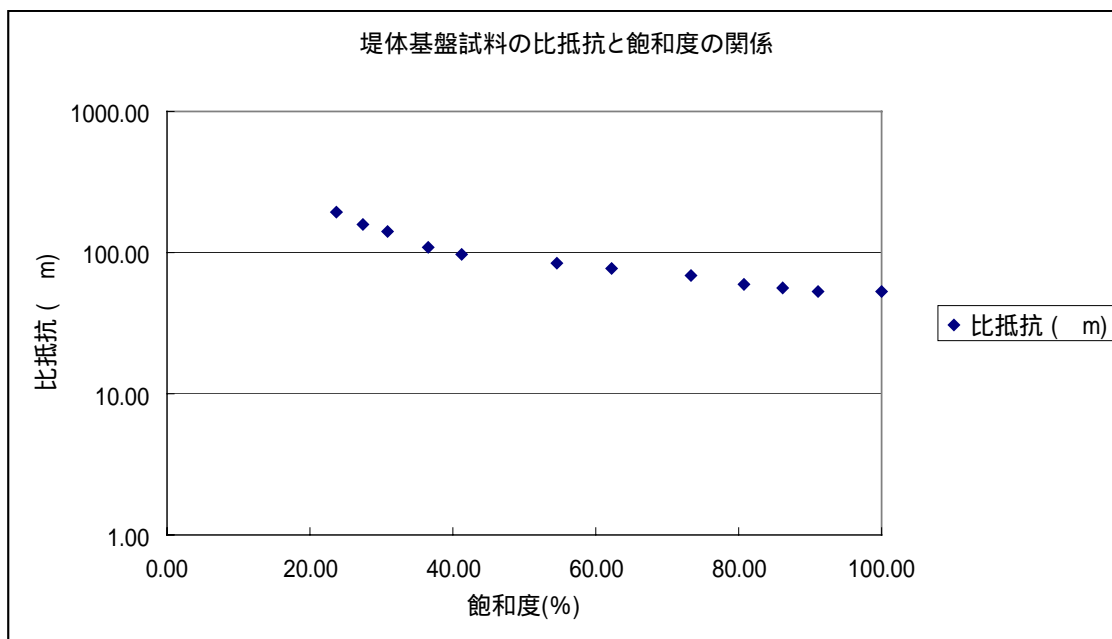


図 - 8 堤体基盤試料の比抵抗と飽和度の関係

## 新技術の適用地区および状況写真

### 1. 計器設置概要

国営総合農地開発事業「郡山東部地区」において、農業用水を確保する目的で高柴調整池が建設された。その諸元は堤高 24.3m，堤頂長 128m，堤長幅 6.0mおよび総貯水量は 115,000m<sup>3</sup>である。取水源となる三春ダム（国土交通省：多目的ダム）から北約 7km に位置する。本調整池において、比抵抗トモグラフィを用いた新しいフィルダム安全管理システムを構築し、盛立から初期湛水過程の浸透挙動を計測、解析を実施した。



図 - 9 高柴調整池位置図

## 2 . 設置状況



(1)電極設置作業  
(コアトレンチ全景)



(2)電極（センサー）仕様



(3)コアトレンチにおける電極  
・ケーブル設置状況  
(ダム軸縦断方向)



(1)コアトレンチ側面  
電極・ケーブルの設置とコンタクト  
クレイの張り付け



(2)コアトレンチ側面  
設置溝の掘削と電極  
・ケーブルの設置



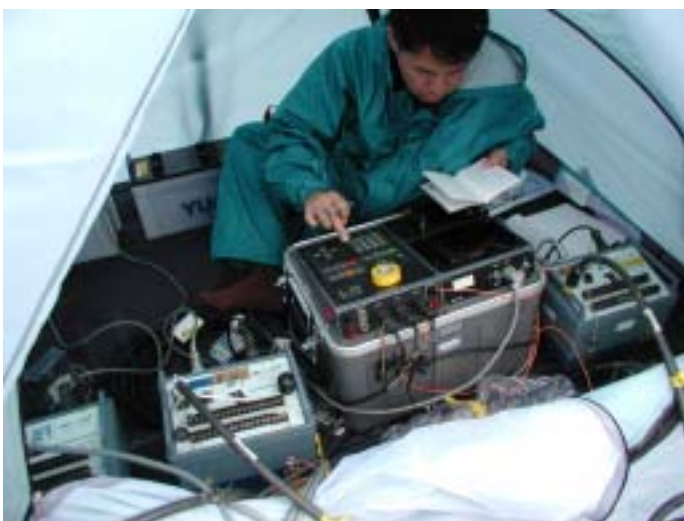
(3)コア（遮水）部における電極  
・ケーブルの埋戻し、締め固めの  
状況



観測ボックス設置作業



観測ボックス（右岸洪水吐近傍）



計測作業



下流側から見たダム全景



湛水時の貯水池状況



湛水前の池敷状況