

(19)日本国特許庁 (J P)

(12)特許公報 (B 1)

(11)特許番号

特許第3041426号

(P 3 0 4 1 4 2 6)

(45)発行日 平成12年 5月15日(2000.5.15)

(24)登録日 平成12年 3月10日(2000.3.10)

(51)Int.Cl.⁷

識別記号

F I

G01V 3/20

G01V 3/20

請求項の数10 (全17頁)

最終頁に続く

(54)【発明の名称】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

1

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】 遮水部と遮水部上下流側の外殻部とからなる堤体の築造時、予め決められた所定の配置に基づいて遮水部の所定の断面のほぼ外周に沿って多数埋設された電極と、上記電極と電気的に接続され、これら電極のうち任意の電流電極により電流を送信し、上記電流電極を除く他の電位電極間の電位差を測定し、その測定値を外部に出力する電気探査装置と、電気探査装置と電気的に接続され、この電気探査装置を制御するとともに、電気探査装置から入力された測定値に基づいて所定の断面の比抵抗構造を解析するコンピュータとを備え、上記所定の断面の比抵抗構造から第1回目の比抵抗分布を作成し、この第1回目の作成時から所定時間経過後新たな比抵抗分布を順次作成し、これら経時的に異なる比抵抗分布を比較して比抵抗分布の変化を経時的にモニターし、

2

比抵抗分布中、異常な比抵抗変化が発見された際、異常部分に対応する堤体の異常部位を検出することを特徴とする比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システム。

【請求項2】 堤体の築造時、予め決められた所定の配置に基づいて堤体内に埋設され、物性を計測して外部に出力する埋設計器を備え、電気探査装置の測定値により解析された比抵抗変化と埋設計器から出力される計測データとの比較により堤体内の異常を解析することを特徴とする請求項1に記載の比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システム。

【請求項3】 予め遮水部の遮水材料について比抵抗と物性との関係を導き、この比抵抗 - 物性関係に基づいて、解析時の異常判定の基礎諸元を取得し、この既知情報を用いて逆解析を行うことを特徴とする請求項1また

10

は 2 に記載の比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システム。

【請求項 4】 モニター時、堤体の異常非検出時の値に基づいて正常値を、異常検出時の値に基づいて異常判定値をそれぞれ更新することを特徴とする請求項 1 ないし 3 のうちいずれか 1 に記載の比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システム。

【請求項 5】 電極は遮水部の堤軸方向と上下流方向との少なくともいずれか一方に埋設されることを特徴とする請求項 1 に記載の比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システム。

【請求項 6】 埋設計器は温度センサとこの温度センサに電氣的に接続され堤体の所定の面の温度情報を外部に出力する温度計とからなることを特徴とする請求項 2 に記載の比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システム。

【請求項 7】 遮水部と遮水部外側の外殻部とからなる堤体の築造時、電極を予め決められた所定の配置に基づいて遮水部の所定の断面のほぼ外周に沿って多数埋設する電極埋設工程と、電気探査装置を上記電極と電氣的に接続し、これら電極のうち任意の電流電極により電流を送信し、上記電流電極を除く他の電位電極間の電位差を測定し、その測定値を外部に出力する測定工程と、コンピュータを上記電気探査装置と電氣的にかつ制御可能に接続し、電気探査装置から入力された測定値に基づいて上記所定の断面の比抵抗構造を解析し、上記所定の断面の比抵抗構造から第 1 回目の比抵抗分布を作成するとともに、この第 1 回目の比抵抗分布作成時から所定時間経過後新たな比抵抗分布を順次作成する比抵抗分布作成工程と、これら経時的に異なる比抵抗分布を比較して比抵抗分布の変化を経時的にモニターし、比抵抗分布中、異常な比抵抗変化が発見された際、異常部分に対応する堤体の異常部位を検出する検出工程とを備えたことを特徴とする比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理方法。

【請求項 8】 堤体の築造時、予め決められた所定の配置に基づいて物性を計測して外部に出力する埋設計器を堤体内に埋設し、電気探査装置の測定値により解析された比抵抗変化と埋設計器から出力される計測データとの比較により堤体内の異常を解析することを特徴とする請求項 7 に記載の比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理方法。

【請求項 9】 予め遮水部の遮水材料について比抵抗と物性との関係を導き、この比抵抗 - 物性関係に基づいて、解析時の異常判定の基礎諸元を取得し、この既知情報を用いて逆解析を行うことを特徴とする請求項 7 または 8 に記載の比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理方法。

【請求項 10】 モニター時、堤体の異常非検出時の値に基づいて正常値を、異常検出時の値に基づいて異常判

定値をそれぞれ更新することを特徴とする請求項 7 ないし 9 のうちいずれか 1 に記載の比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明が属する技術分野】本発明は、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に関するものである。

【0002】

10 【従来の技術】フィルダム（堤体が土石材料を主要材料として造られるダム）の管理は従来、表面変位計もしくは層別沈下計による変形観測、土圧計による応力状態観測、間隙水圧計もしくは観測孔水位による浸潤線観測及び流量計による漏水量観測により行われている。

【0003】しかしながら、従来のフィルダム管理では、計器による観測はセンサの経年劣化により観測値の長期的な信頼性に問題がある。また、観測値は点情報であり、二次元的に堤体の異常箇所を特定するためには、多数の観測点数が必要となり、観測作業に手間がかかるという問題がある。ここでいう二次元的とは、地下構造や地形が測線方向と深度方向にのみ変化し、測線下の鉛直断面に直交する方向（奥行き方向）には変化しないことをいう。さらに、観測点数を増やしたからといって必ずしも所望の情報が得られるとは限らない。また、観測点は堤体内部もしくは基礎地盤内部にあるため、遮水部の安全性に大きく関与する堤体と基礎地盤とが接する部分に関する情報が得られなかった。このため、フィルダムの異常部を特定するのに、比抵抗トモグラフィ法による二次元的な非破壊探査の適用が考えられる。

30 【0004】比抵抗トモグラフィ法は、地表のみに電極を設置して行う電気探査比抵抗法に対して、探査対象部分の周囲のボーリング孔やトンネル等を利用して地下にも電極を設置し、地下の比抵抗構造をより高精度に解析する手法である。また、比抵抗モニタリングは、電気探査比抵抗法や比抵抗トモグラフィ法を経時的に実施し、得られた比抵抗の変化から地下の飽和度や間隙率の変化を推定する手法である。

【0005】

40 【発明が解決しようとする課題】比抵抗トモグラフィ法をフィルダムの異常部を特定するのに用いる場合、ダム築造後に、ボーリング孔を穿設し、電極を設置するようにしているので、堤体上流側の貯水池内や堤体底部に電極を設置するのが困難であった。また、堤体下流側は遮水部が岩石材料で覆われているため、電流の送信が困難であった。また、一般的な比抵抗トモグラフィ法では、探査対象部分の全周に電極を設置することは困難であり、電極を設置できない領域での解析精度に問題があった。さらに、探査対象部分の比抵抗構造が未知であるため、解析結果に大きな影響を与える初期モデルを試行錯誤を繰り返しながら求める必要があった。また、自然地

盤を対象とする一般的な比抵抗モニタリングにおいては、得られた比抵抗変化の主要因の特定に多くの仮定を必要とし、特に土木分野では地層の比抵抗に与える外的条件の影響はあまり考慮されてこなかった。

【 0 0 0 6 】本発明は、上記問題点を除くためになされたもので、簡素な構成で、容易かつ高精度にフィルダムの異常部を把握することができ、しかも長期間に渡り低コストで管理を行うことができる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を提供することを目的とするものである。

【 0 0 0 7 】

【課題を解決するための手段】本発明に係る比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システムは、遮水部と遮水部上下流側の外殻部とからなる堤体の築造時、予め決められた所定の配置に基づいて遮水部の所定の断面のほぼ外周に沿って多数埋設された電極と、上記電極と電気的に接続され、これら電極のうち任意の電流電極により電流を送信し、上記電流電極を除く他の電位電極間の電位差を測定し、その測定値を外部に出力する電気探査装置と、電気探査装置と電気的に接続され、この電気探査装置を制御するとともに、電気探査装置から入力された測定値に基づいて所定の断面の比抵抗構造を解析するコンピュータとを備え、上記所定の断面の比抵抗構造から第 1 回目の比抵抗分布を作成し、この第 1 回目の作成時から所定時間経過後新たな比抵抗分布を順次作成し、これら経時的に異なる比抵抗分布を比較して比抵抗分布の変化を経時的にモニターし、比抵抗分布中、異常な比抵抗変化が発見された際、異常部分に対応する堤体の異常部位を検出するようにしたものである。

【 0 0 0 8 】本発明に係る比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システムでは、遮水部と遮水部上下流側の外殻部とからなる堤体の築造時、電極を予め決められた所定の配置に基づいて遮水部の所定の断面のほぼ外周に沿って多数埋設し、電気探査装置を上記電極に電気的に接続し、この電気探査装置によりこれら電極のうち任意の電流電極により電流を送信し、上記電流電極を除く他の電位電極間の電位差を測定し、その測定値を外部に出力し、この電気探査装置と電気的に接続されたコンピュータによりこの電気探査装置を制御するとともに、電気探査装置から入力された測定値に基づいて所定の断面の比抵抗構造を解析するようにし、上記所定の断面の比抵抗構造から第 1 回目の比抵抗分布を作成し、この第 1 回目の作成時から所定時間経過後新たな比抵抗分布を順次作成し、これら経時的に異なる比抵抗分布を比較して比抵抗分布の変化を経時的にモニターし、比抵抗分布中、異常な比抵抗変化が発見された際、異常部分に対応する堤体の異常部位を検出するようにしているため、非破壊探査により異常部を正確に検出することができ、しかも、計測機器が簡素化されて長期間に亘る精密な管理が可能となる。

【 0 0 0 9 】また、本発明に係る比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理方法は、遮水部と遮水部外側の外殻部とからなる堤体の築造時、電極を予め決められた所定の配置に基づいて遮水部の所定の断面のほぼ外周に沿って多数埋設する電極埋設工程と、電気探査装置を上記電極と電気的に接続し、これら電極のうち任意の電流電極により電流を送信し、上記電流電極を除く他の電位電極間の電位差を測定し、その測定値を外部に出力する測定工程と、コンピュータを上記電気探査装置と電気的にかつ制御可能に接続し、電気探査装置から入力された測定値に基づいて上記所定の断面の比抵抗構造を解析し、上記所定の断面の比抵抗構造から第 1 回目の比抵抗分布を作成するとともに、この第 1 回目の比抵抗分布作成時から所定時間経過後新たな比抵抗分布を順次作成する比抵抗分布作成工程と、これら経時的に異なる比抵抗分布を比較して比抵抗分布の変化を経時的にモニターし、比抵抗分布中、異常な比抵抗変化が発見された際、異常部分に対応する堤体の異常部位を検出する検出工程とを備えるようにしたものである。

【 0 0 1 0 】本発明に係る比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理方法では、電極埋設工程により遮水部と遮水部外側の外殻部とからなる堤体の築造時、電極を予め決められた所定の配置に基づいて遮水部の所定の断面のほぼ外周に沿って多数埋設し、測定工程により電気探査装置を上記電極と電気的に接続し、これら電極のうち任意の電流電極により電流を送信し、上記電流電極を除く他の電位電極間の電位差を測定し、その測定値を外部に出力し、比抵抗分布作成工程によりコンピュータを上記電気探査装置と電気的にかつ制御可能に接続し、電気探査装置から入力された測定値に基づいて上記所定の断面の比抵抗構造を解析し、上記所定の断面の比抵抗構造から第 1 回目の比抵抗分布を作成するとともに、この第 1 回目の比抵抗分布作成時から所定時間経過後新たな比抵抗分布を順次作成し、検出工程によりこれら経時的に異なる比抵抗分布を比較して比抵抗分布の変化を経時的にモニターし、比抵抗分布中、異常な比抵抗変化が発見された際、異常部分に対応する堤体の異常部位を検出するようにしているため、堤体全体について探査不能領域を生じることなく非破壊により精密に探査することができるとともに、電極および電線が機能する限り半永久的に堤体の管理を行うことができる。

【 0 0 1 1 】

【発明の実施の形態】以下、図面に基づいて本発明の実施の形態について説明する。図 1 は、本発明の一実施の形態に係る比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システムの概念図、図 2 はそのフローチャートである。上記実施の形態に係るフィルダム管理システムは、堤体 3 (図 1 参照) 築造の計画段階で、堤体の材料試験 (図 2 参照) とともに、電極の配置計画が作成される (図 2 のステップ S 1 参照) 。また、所定の実験場では、実験

により予め遮水部 4 (図 1 参照) の遮水材料について比抵抗と温度との関係、比抵抗と間隙比との関係、比抵抗と飽和度との関係等が求められる (図 2 のステップ S p 1、図 5 および図 6 参照、)。さらに、堤体 3 の基礎掘削時、基礎地盤の比抵抗測定が行われる (図 2 のステップ S p 2 参照)。これら実験により求められた比抵抗と各物性 (温度、間隙比、飽和度等) との関係 (図 5 及び図 6 参照) と、実地の測定により求められた基礎地盤の比抵抗測定とに基づいて、比抵抗トモグラフィ法による初期モデルを既知とするため、解析・異常判定の基礎諸元を取得する (図 2 のステップ S p 3 参照)。

【 0 0 1 2 】また、上記実施の形態に係るフィルダム管理システムは、図 1 に示すように、電気探査装置 2 と、堤体 (フィルダム) 3 内に埋設され、電気探査装置 2 と電氣的に接続された測定用電極 P a 1 ~ P a n、P b 1 ~ P b n と、遮水部 4 の所定位置に埋設される温度センサ 6 と、この温度センサ 6 と電氣的に接続され温度センサ 6 から温度データを外部に出力する温度計 7 と、電気探査装置 2 と温度計 7 とに電氣的に接続され、この電気探査装置 2 を制御するとともに、電気探査装置 2 から送られてくる測定結果を解析処理する解析・制御用コンピュータ 5 とを備えている。堤体 3 は、図 1 に示すように、遮水部 4 とこの遮水部 4 の上下流側に岩石や土砂などが投入された外郭部 3 A が形成される。

【 0 0 1 3 】ところで、測定用電極 P a 1 ~ P a n、P b 1 ~ P b n は、図 1 に示すように、堤体 3 の築造時、遮水部 4 の所定の方向 (本実施の形態では、上下流方向 A と堤軸方向 B との二方向) に所定の配置で設置され、築造後、堤体 3 内に埋め込まれてしまう耐腐食性金属片により構成される。すなわち、予め決められた電極の配置計画に基づき (図 2 のステップ S 1 参照)、堤体 3 の基礎掘削 (図 2 のステップ S 2 参照) 後、図 1 に示すように、遮水部 4 の底面となる部分に所定の電極 P a 1... P a 5、P b 1... P b 5 を設置し (図 2 のステップ S 3 参照)、盛立てを行いつつ (図 2 のステップ S 4 参照)、予め決められた所定の設置場所に電極 P a 1 ~ P a n、P b 1 ~ P b n および温度センサ 6 が設置されて (図 2 のステップ S 5 参照)、遮水部 4 を形成し堤体 3 の盛立てを完了する (図 2 のステップ S 6 参照) ようになっている。そして盛り立て完了後は、図 2 に示すように、湛水試験が行われ、供用開始となる。

【 0 0 1 4 】また、堤体 3 の築造時 (図 2 のステップ S 3 ~ S 6 参照)、所定の場所に間隙水圧計等の埋設計器 (図示せず) を埋め込むようにしている。これら埋設計器は、間隙水圧、応力、変形量を計測するためのもので、比抵抗トモグラフィ法による解析において、物性の計測データをコンピュータ 5 に出力し、その時の比抵抗分布と比較して物性データと比抵抗分布とを関連づけ、これら比較を経時的に繰り返し、少なくとも物性と比抵抗との関係を導くまでその機能を果たせばよい。このた

め、関係式が導かれた後は、たとえ故障しても取り換えなくともよい。埋設計器のうち、特に間隙水圧計のデータから遮水部の飽和領域が推定され、その変化と比抵抗分布の変化の対応を関連づけることになる。埋設計器そのものは、本願発明に特有のものではなく、従来から必要に応じてダムの一部として設置される。しかしながら、本願発明に関連するのは、特に間隙水圧計による飽和部の分布である。すなわち、ダムに埋設された間隙水圧計により、圧力から水柱高を求めると、浸潤線 (飽和部・不飽和部の境界) が描ける。水圧の変化は浸潤線の変化を示し、飽和部の変化を示す。これにより飽和度に関する比抵抗変化と関連づけられる。その他、土圧計や沈下計で異常があった場合、その付近の比抵抗変化と関連させて異常判断の資料とすることができる。その際、間隙比が変化しているが直接間隙比を測定しているわけではない。

【 0 0 1 5 】本実施の形態では、各測定用電極系 P a 1 ~ P a n、P b 1 ~ P b n は、図 1 に示すように、遮水部 4 に対し上下流方向 A と堤軸方向 B との両方向に遮水部 4 のほぼ外周に沿ってそれぞれ埋設される。温度センサ 6 は、遮水部 4 築造時、各測定用電極系 P a 1 ~ P a n、P b 1 ~ P b n により形成される平面上の所定位置に埋設される。この温度センサ 6 は、得られた比抵抗変化に対する温度の影響を除いたり、反対に比抵抗変化に対する温度変化の寄与度を明らかにするために設けられ、堤体 3 内部のそれぞれの埋設位置の温度情報を外部に送出するようになっている。温度センサ 6 については、電気伝導度が温度で変化し、2 5 度 C 換算で示されるように、その逆数である比抵抗も温度により変化する。堤体上部は温度変化するため、例えば、昼と夜、夏と冬では比抵抗が異なる。このような日変化、年変化を堤体異常と誤認しないため、温度センサ 6 が必要となる。

【 0 0 1 6 】電気探査装置 2 は、図 3 に示すように、例えば、測定用電極 P 1 ~ P n と、このこれら測定用電極 P 1 ~ P n ごとに電氣的に接続された多芯ケーブル 2 1 と、この多芯ケーブルと電氣的に接続された端子板 2 2 と、この端子板 2 2 に電氣的に接続され、端子に接続され各端子を移動しつつ測定を繰り返す送信器 2 3 および受信器 2 4 とを備えて構成される。電気探査装置 2 は、測定用電極 P 1 ~ P n のうちある 2 点の電極 (C 1、C 2) を電流電極として用い、他の測定用電極を電位電極として電位測定用の電極として用いるようになっている。すなわち、電気探査装置 2 は、例えば、図 1 に示すように、上下流方向 A に設置された電極 P a 1 ~ P a n のうち、ある 2 点の電流電極 (送信電極) C 1、C 2 (例えば C 1 = P a 1、C 2 = P a 1 4) により電流を送信し、この電流電極以外の別の 2 点の電位電極 (測定用電極) P 1、P 2 間 (例えば、P 1 = P a 2... P a n (P a 1 を除く)、P 2 = P a 2... P a n (P a 1 4 を

除く)の電位差を測定し、その測定値をコンピュータ5に送出するようになっている。測定の組み合わせは決まった仕様はないが、できるだけ多くの組み合わせで送受信を行い、データ数を増やし、解析精度を向上させることが望ましいが、考え得る全ての組み合わせを測定するのは不経済でもあるので、現場に応じて必要十分な点数の測定にとどめることになる。

【0017】コンピュータ5は、これら複数の組み合わせの測定値から、電位電極(例えば電流電極 $C1 = Pa1$ 、 $C2 = Pa14$ の場合、これら $Pa1$ 、 $Pa14$ を除いた $Pa2 \sim Pan$)により形成される面(すなわち、堤体3の断面)に対応する比抵抗構造を解析するようになっている。また、コンピュータ5に温度計7を介して温度センサ6からの温度情報が入力されると、電極 $Pa1 \sim Pan$ に囲まれた遮水部4断面における温度分布がモニターできるようになっている。すなわち、コンピュータ5は、測定値の変化及び比抵抗構造の変化から堤体3内の温度分布の変化及び含水状態の変化を推定することができるようになっている。すなわち、入力されたデータを比抵抗トモグラフィ法により処理し、基準となる最初の比抵抗構造を解析し、所定の期間または時間経過後、同様に処理して解析された比抵抗構造を、以前のものと比較して経時的な変化をとらえ、この比抵抗変化により物性の変化を推定するようにしている。

【0018】次に、本実施の形態に係る比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システムの作用に基づき比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理方法について説明する。堤体3築造の計画段階で、図2に示すように、電極の配置計画が作成されるとともに(図2のステップS1参照)、所定の実験場では、実験により予め比抵抗と温度との関係、比抵抗と間隙比との関係、比抵抗と飽和度との関係等が求められる(図2のステップSp1、図5および図6参照)。また、堤体3の基礎掘削時、基礎地盤の比抵抗測定が行われる(図2のステップSp2参照)。これら実験により求められた比抵抗と各物性(温度、間隙比、飽和度等)との関係(図5及び図6参照)と、実地の測定により求められた基礎地盤の比抵抗測定とに基づいて、比抵抗トモグラフィ法による初期モデルを既知とするため、解析・異常判定の基礎諸元が取得される(図2のステップSp3参照)。

【0019】堤体3の築造時、電極 $Pa1 \sim Pan$ 、 $Pb1 \sim Pb n$ が遮水部4のほぼ外周面全体(底部も含む)に、上下流方向Aと堤軸方向Bとの二方向に所定の配置で設置されて埋設される(埋設工程)。このため、電気探査装置2により、これら電極 $Pa1 \sim Pan$ 、 $Pb1 \sim Pb n$ のうち、ある電極系PaまたはPbのうち、いずれか一方の系について、選択されたある2点の電流電極 $C1$ 、 $C2$ ($C1$ 、 $C2$ とも電極 $Pa1 \sim Pan$ から任意に選択された電流電極(送信用電極)となるもの)から電流を送信すると、これら電流電極を除く他

の2点の電位電極間の電位差を測定する。この測定は多数の電極の組み合わせにより行われる(測定工程)。すなわち、比抵抗トモグラフィ法に基づいて、一方の電極系Paで囲まれる断面は、探査対象領域として小領域に分割され、電極の組み合わせによりこれら小領域ごとの電位差が測定されるようになっている。つまり、この電極系Paについては、堤体3の上下流方向の断面(図7の各領域に分割されたモデル参照)を、他の電極系Pbについては、堤体3の堤軸方向の断面をモデル化して測定を行う。

【0020】また、この比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理方法では、堤体3の築造時(図2のステップS3～S6参照)、所定の場所に温度センサ6、間隙水圧計等の埋設計器(図示せず)を埋め込むようにしている。これら埋設計器は、各物性の計測データを出力するようになっている。ところで、第1義的には、比抵抗変化の変数として働く関数は、温度であり、堤体3内に埋設された温度センサ6により得られる堤体3内部の温度分布モニターにより比抵抗変化に対する温度の影響を除くようになっている。さらに、埋設計器により計測されたデータはコンピュータ5に出力され、コンピュータ5は埋設計器により計測された、例えば、浸潤線変化(飽和部の変化)等のデータを比抵抗変化と比較するようになっている。

【0021】電気探査装置2により各電極の組み合わせについて行われた測定値は、コンピュータ5に出力される。コンピュータ5は電気探査装置2により入力された測定値に基づき、モデル(図7参照)の比抵抗ブロックについて比抵抗構造を解析し、第1回目の比抵抗分布を作成する(図2のステップS7参照)。次に、この第1回目の作成時から、経時的に計測を繰り返し(図2のステップS8参照)、経時的に異なる比抵抗分布を順次作成する(比抵抗分布作成工程)。この経時的計測時、図2のステップSp4に示すように、実験により予め取得された解析・異常判定の基礎諸元(図2のステップSp3参照)に基づいて、埋設計器から計測される物性のデータと比抵抗分布とを比較し、これら経時的に異なる比抵抗分布を比較して比抵抗分布の変化を経時的にモニターし、比抵抗分布中、異常な比抵抗変化が発見された際、異常部分に対応する堤体の異常部位を検出する(検出工程、図2のステップS9参照)ようになっている。さらに、図2のステップSp4で得られた埋設計器のデータに基づいて、平常値・異常判定値の更新が行われるようになっている(図2のステップSp5参照)。このため、経時的計測を繰り返すたびに正常・異常判定の精度が向上する。

【0022】上述のように、上記実施の形態にかかるフィルダム管理システムおよびフィルダム管理方法では、比抵抗と各物性(温度、飽和度等)との関係を予め実験により求めて解析・異常判定の基礎諸元を取得し、堤体

3 築造時、堤体 3 の間隙水圧等を測定する埋設計器及び温度センサ 6 と、比抵抗を検知する電極 P a、P b とを堤体 3 に予め埋設し、堤体 3 完成後、堤体 3 に埋め込まれた埋設計器及び温度センサ 6 から収集される物性データと、電気探査装置 2 により測定された電位データとをコンピュータ 5 により処理して物性分布（温度分布、飽和度分布等）と比抵抗分布とを経時的に作成し、しかる後、これら作成された物性分布と比抵抗分布とを、予め実験で求められた関係式に基づいて比較し、この比較に基づいて、比抵抗分布の変化が異常か正常か判定し、異常と判定された場合、比抵抗分布の領域に応じて異常部位を検出するようになっている。さらに、この比較により得られたデータを正常・異常判定の判定データとして更新しつつ蓄積することができる。

【 0 0 2 3 】また、予め実験により求められた解析・異常判定の基礎諸元に基づいて、初期モデルを既知とすることにより、この既知情報を用いて逆解析を行うと異常を検出する精度が向上する。この場合、埋設計器から検出される物性データの有無に関係なく比抵抗分布の変化により異常を検出することも可能であるが、好ましくは、比抵抗分布と埋設計器から検出される物性分布とを比較することにより異常を検出すれば、より精度が向上する。

【 0 0 2 4 】なお、図 5 及び図 6 に示す比抵抗と各物性（含水比、温度）との関係は、予め室内実験で求められるものであり、比抵抗関数の変数となりうる各物性は、堤体内の温度、遮水材料の飽和度、遮水材料または基礎地盤のうち少なくともいずれか一方の間隙率、間隙水の電気伝導度等である。また、電気伝導度は温度の変数となっている。温度センサ 6 は、堤体 3 内の比抵抗変化から温度の変化の影響を除くために、データが収集できる限り必要となる。さらに、温度センサ 6 は二次元的な温度補正用であるが、温度変化そのものからその点における異常がわかる場合もある。比抵抗によるモニターは、堤体 3 の物性を直接検知する直接的なセンサ類（埋設計器）が停止した後、利用するもので、間隙水圧計などによる計測が可能な間はセンサ類がモニター事項として優先される。埋設計器の一種としての間隙水圧計については、一般的な埋設計器として用いられているので、図示していない。

【 0 0 2 5 】ところで、比抵抗トモグラフィ法は、多数の電極の組み合わせにより実測値を取得し、探査対象領域を小領域に分割し、各小領域の比抵抗値を変化させて比抵抗分布モデルを修正し、モデルから計算される測定値と上記実測値とを比較し、その差の二乗和が最小となるモデルを求める手法である。ある 2 時期の解析結果を比較し、比較抵抗変化部が認められた場合、その部分において次式（Archie, 1942）に示される物性の変化が推定される。

【 0 0 2 6 】

【数 1】

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

ρ_s : 土の比抵抗、 ϕ : 間隙率、 S : 飽和度、

ρ_w : 間隙水の比抵抗、 a, m, n : 定数

【 0 0 2 7 】ここで飽和度 S は

【 0 0 2 8 】

【数 2】

$$\text{飽和度 } S = \rho \cdot \omega / e$$

ρ : 土の密度、 e : 間隙比、 ω : 含水比

【 0 0 2 9 】と表されるので、含水比と土の比抵抗にも指数関数の関係が成り立つ。

【 0 0 3 0 】図 5 は、遮水材料に用いられる風化泥岩を試料として含水比を変化させた場合の比抵抗変化を示す図であり、予め室内での試験により得られたデータである（数 3 参照、図 2 のステップ S p 1 参照）。

【 0 0 3 1 】

【数 3】

$$\rho_s = 5253 \cdot 7 \omega^{-2.20912}$$

【 0 0 3 2 】また、間隙水の比抵抗は温度によって変化するため、比抵抗は温度の関数となる。図 6 は、粘性土を試料として温度を変化させた場合の比抵抗変化を示す図であり、予め室内での試験により得られたデータである（図 2 のステップ S p 1 参照）。

【 0 0 3 3 】一方、フィルダムに関する異常は大きく 2 つの現象としてとらえられる。1 つは埋設された間隙水圧計の計測データから示される、遮水部 4 内部の含水状態変化による浸潤線の変化であり、1 つは漏水量観測からとらえられる遮水部 4 内部もしくは遮水部 4 周辺の基礎地盤中の漏水経路の形成である。これらの異常は、物性的に前者は遮水材料の飽和度の変化を、後者は遮水材料もしくは基礎地盤の間隙率の変化及び間隙水の温度や電気伝導度の変化としてとらえられる。これらの物性は、上述のように比抵抗関数の変数であり、築堤時に遮水部 4 周辺に埋設した電極系を使用する比抵抗トモグラフィ法を経時的に実施し、比抵抗分布の変化をモニターすることにより、堤体 3 の遮水部 4 の異常を長期的に検知することができる。また、同時に堤体 3 内部の温度分布をモニターすることにより、比抵抗変化に対する温度変化の寄与度を明らかにできる。比抵抗トモグラフィ法では、電極系で囲んだ領域の外側の部分における比抵抗分布も解析できることから、堤体に接する基礎地盤についても異常を検知できる。

【 0 0 3 4 】

【実施例】次に、上記構成に係る比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システムを用いて実験を行った一実施例を示す。実験は、堤体の上下流方向の断面をモデル化し、遮水部に変化が生じた場合の比抵抗変化について数値実験を行った。モデルはフィルダムを単純化し、図 7 に示すように、中央の遮水部を 30 m とし、下流側のロック部材（外殻部）及び空間を 999, 999 m、上流側の飽和したロック材及び貯水を 50 m とし、基礎地盤は 300 m とした。差分法による数値モデリングと逆解析に使用する計算領域は、59 × 50 メッシュの範囲とし、逆解析の解析領域は 2 × 2 メッシュの比抵抗ブロックを単位とする 20 × 21 ブロックの範囲とした（図 7 参照）。電極間隔は 2 メッシュとし、遮水部の外周に 64 点を配置した。測定電極配置は 2 極法とし、総測定点数は 2016 点である。

【0035】以上のモデルについて、初期モデルの比抵抗ブロックにケースに応じた比抵抗変化を与え、それに対して差分法による数値モデリングを行い、測定値を計算した。この測定値に対して平滑化制約付き最小二乗法による逆解析を行い、10 回の反復計算結果を解析結果として表示した。

【0036】図 8 は、図 7 の初期モデルから得られる計算測定値について、比抵抗構造が未知として、ブロック比抵抗の初期値を 100 m 均一として解析を行った結果である。おおむね初期モデルに近い比抵抗値が解析されており、さらに電極系で囲まれた範囲の外側の比抵抗構造も求められることを示している。

【0037】図 9 は、図 8 と同じ計算測定値を用いて初期モデル通りの比抵抗構造をブロック比抵抗の初期値として与えたものである。比抵抗構造が既知であることにより解析精度が向上することがわかる。

【0038】図 10 および図 11 はそれぞれ、遮水部底面に電極が設置できない場合で、図 8、図 9 と同様の解析を行った結果である。この場合、電極は 53 点、計算される測定値は 1, 378 点である。図 10 および図 11 はいずれも電極のない底面付近の遮水部及び基礎地盤の解析結果とモデルの差は大きく、このことから、底面への電極設置の必要性が示されている。

【0039】図 12 は、堤体遮水部の一部に漏水箇所が生じ、間隙率の増大によりその部分が 30 m から 20 m に変化した場合を想定し、そのモデルから得られた計算測定値について解析を行った結果である。変化状況がよく解析されている。

【0040】図 13 は堤体基礎に漏水箇所が生じ、間隙率の増大によりその部分が 300 m から 150 m に変化した場合を想定し、そのモデルから得られた計算測定値について解析を行った結果である。電極系の外側の変化についても変化状況がよく解析されている。

【0041】図 14 は、堤体上部で浸潤線が変化し、不飽和部の増大によりその部分が 30 m から 50 m に

変化した場合を想定し、そのモデルから得られた計算測定値について解析を行った結果である。これについても変化状況がよく解析されている。

【0042】以上の結果から、本実施の形態に係る比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システムでは、堤体 3 の遮水部 4 に生じる比抵抗変化をモニターすることができ、異常の発生と、その場所が推定できる。このシステムでは、各種埋設計器の稼働中には、比抵抗変化の原因となる物性変化の特定が可能であり、埋設計器故障後の比抵抗変化の評価に対して事例を蓄積することができる。また、このフィルダム管理システムでは、ボーリング孔内等に電極を設けることによりさらに広い範囲のモニターを行うことが可能となる。

【0043】なお、上記実施の形態及び実施例においては、埋設された測定用電位電極のうち所定の 2 点の測定用電位電極を電流電極として用いているが、これに限られるものではなく、図 4 に示すように、採用する電極配置 P31 - P3n に応じて送受信に遠電極 C31、C32 のいずれか一方を用い、埋設された測定用電位電極 P31 - P3n のうち、送受信に 1 点ずつ使用してもよい。符号 22、23、24 はそれぞれ端子板、送信器、受信器である。また、電極は遮水部の堤軸方向と上下流方向とに埋設するようにしているがこれに限られるものではなく、堤軸方向と上下流方向とのいずれか一方であっても本願発明の目的を達成することができる。また、堤体に応じて適宜配置を変更してもよいことは言うまでもない。さらに、上記実施の形態にかかるフィルダム管理システムおよびフィルダム管理方法では、埋設計器と温度センサとによりデータを収集するようにしているが、これに限られるものではなく、たとえ、埋設計器が無い場合でも、温度センサがあれば本願発明の目的を達成することができる。

【0044】

【発明の効果】以上説明したように本発明の比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システムでは、遮水部と遮水部上下流側の外殻部とからなる堤体の築造時、予め決められた所定の配置に基づいて遮水部の所定の断面のほぼ外周に沿って多数埋設された電極と、上記電極と電気的に接続され、これら電極のうち任意の電流電極により電流を送信し、上記電流電極を除く他の電位電極間の電位差を測定し、その測定値を外部に出力する電気探査装置と、電気探査装置と電気的に接続され、この電気探査装置を制御するとともに、電気探査装置から入力された測定値に基づいて所定の断面の比抵抗構造を解析するコンピュータとを備え、上記所定の断面の比抵抗構造から第 1 回目の比抵抗分布を作成し、この第 1 回目の作成時から所定時間経過後新たな比抵抗分布を順次作成し、これら経時的に異なる比抵抗分布を比較して比抵抗分布の変化を経時的にモニターし、比抵抗分布中、異常な比抵抗変化が発見された際、異常部分に対応する堤体

の異常部位を検出するようにしたので、非破壊探査により異常部を正確に検出することができ、しかも、計測機器が簡素化されて長期間に亘る精密な管理が可能となるので、ダム管理のコストダウンを図ることができる。また、従来の埋設計器と比較してより長期間の計測が可能となる。このため、長期的なダムの安全管理を行うことができ、異常時の的確な調査計画を立てて対策を講じることができる。さらに、施設の老朽化による補修や更新時期の評価への応用も期待できる。

【 0 0 4 5 】また、本発明の比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理方法では、遮水部と遮水部外側の外殻部とからなる堤体の築造時、電極を予め決められた所定の配置に基づいて遮水部の所定の断面のほぼ外周に沿って多数埋設する電極埋設工程と、電気探査装置を上記電極と電気的に接続し、これら電極のうち任意の電流電極により電流を送信し、上記電流電極を除く他の電位電極間の電位差を測定し、その測定値を外部に出力する測定工程と、コンピュータを上記電気探査装置と電気的にかつ制御可能に接続し、電気探査装置から入力された測定値に基づいて上記所定の断面の比抵抗構造を解析し、上記所定の断面の比抵抗構造から第 1 回目の比抵抗分布を作成するとともに、この第 1 回目の比抵抗分布作成時から所定時間経過後新たな比抵抗分布を順次作成する比抵抗分布作成工程と、これら経時的に異なる比抵抗分布を比較して比抵抗分布の変化を経時的にモニターし、比抵抗分布中、異常な比抵抗変化が発見された際、異常部分に対応する堤体の異常部位を検出する検出工程とを備えるようにしたので、堤体全体について探査不能領域を生じることなく非破壊により精密に探査することができる。とともに、電極が機能する限り半永久的に堤体の管理を行うことができるので、管理コストを低減させ、しかも長期間にわたり管理することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の一実施の形態に係る比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理システムを示す概念図である。

【図 2】本発明の一実施の形態に係る比抵抗トモグラフィ法によるフィルダム管理方法の工程を示すフローチャートである。

【図 3】図 1 の比抵抗トモグラフィ法に用いられる電気探査装置を模式的に示す概念図である。

【図 4】図 3 の電気探査装置の変形例を示す概念図である。

【図 5】予め実験で求めた含水比と比抵抗との関係を示すグラフである。

【図 6】予め実験で求めた温度と比抵抗との関係を示すグラフである。

【図 7】細線の領域が計算領域 59×50 メッシュ、太線の領域が解析領域 20×21 ブロックの計算領域、解析領域及び初期モデルを示す説明図である。

【図 8】図 7 の初期モデルから得られる計算測定値の解析結果を示すグラフである。

【図 9】図 8 と同じ計算測定値を用いて初期モデル通りの比抵抗構造をブロック比抵抗の初期値として与えた解析結果を示すグラフである。

【図 10】遮水部底面に電極が設置できない場合で、図 8 と同様の解析結果を示すグラフである。

【図 11】遮水部底面に電極が設置できない場合で、図 9 と同様の解析結果を示すグラフである。

【図 12】堤体遮水部に漏水個所が生じた場合の、モデルから得られた計算測定値についての解析結果を示すグラフである。

【図 13】堤体基礎に漏水個所が生じた場合の、モデルから得られた計算測定値についての解析結果を示すグラフである。

【図 14】堤体上部で浸潤線が変化し不飽和部が生じた場合の、モデルから得られた計算測定値についての解析結果である。

【符号の説明】

2 電気探査装置

3 フィルダム（堤体）

3 A 外殻部

4 遮水部

5 コンピュータ

Pa1 ~ Pan, Pb1 ~ Pbn 測定用電極（電極）

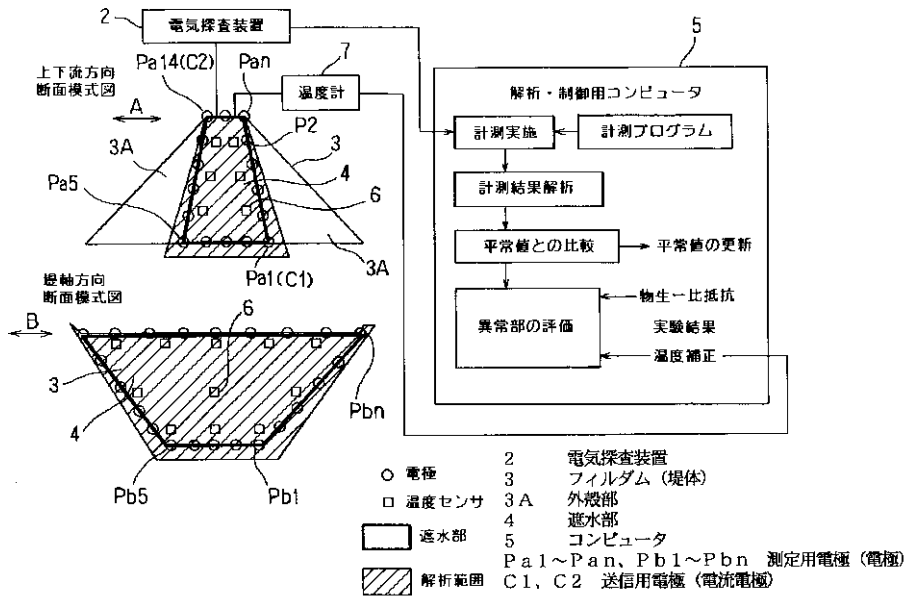
C1, C2 送信用電極（電流電極）

【要約】

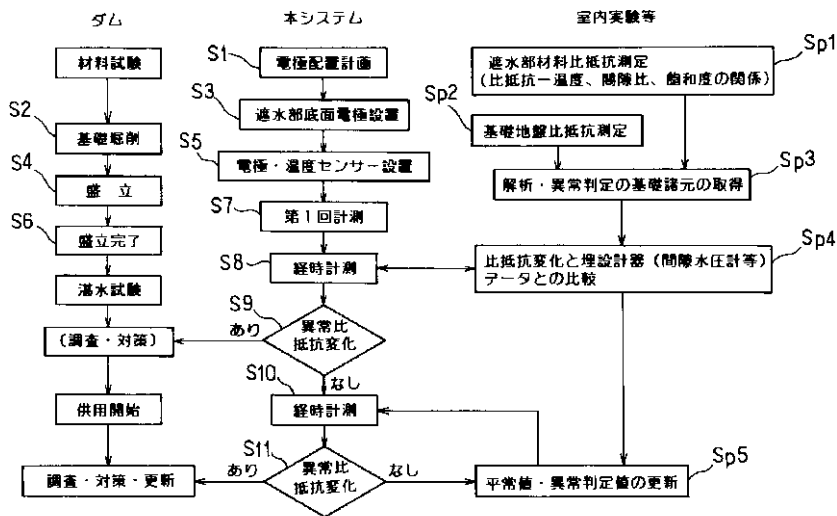
【課題】簡素な構成で長期間に渡り低コストでダム管理を行う。

【解決手段】比抵抗と温度、間隙比、飽和度等の各物性との関係を予め実験により求めて解析・異常判定の基礎諸元を取得し、堤体 3（4, 3 A）築造時、堤体 3 の温度を検知する温度センサ 6 と、比抵抗を検知する電極 Pa1 ~ Pan, Pb1 ~ Pbn とを堤体 3 に予め埋設する。堤体 3 完成後、堤体 3 に埋め込まれた温度センサ 6 から収集される温度データと、電気探査装置 2 により測定された電位データとをコンピュータ 5 により処理して温度分布と比抵抗分布とを経時的に作成し、しかる後、これら作成された物性分布と比抵抗分布とを、予め実験で求められた関係式に基づいて比較し、この比較に基づいて、比抵抗分布の変化が異常か正常か判定し、異常と判定された場合、比抵抗分布の領域に応じて異常部位を検出するようにしている。

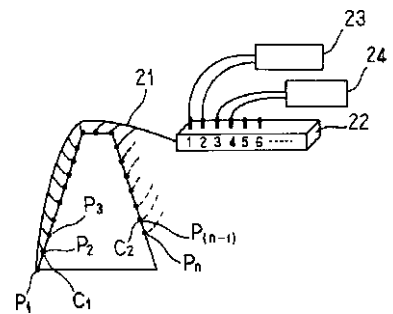
【 図 1 】



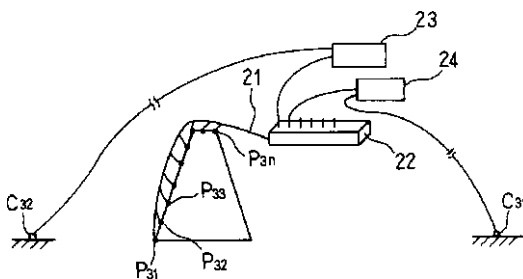
【 図 2 】



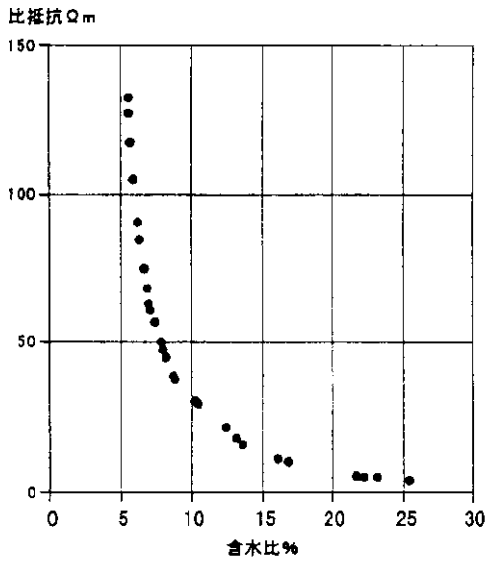
【 図 3 】



【 図 4 】

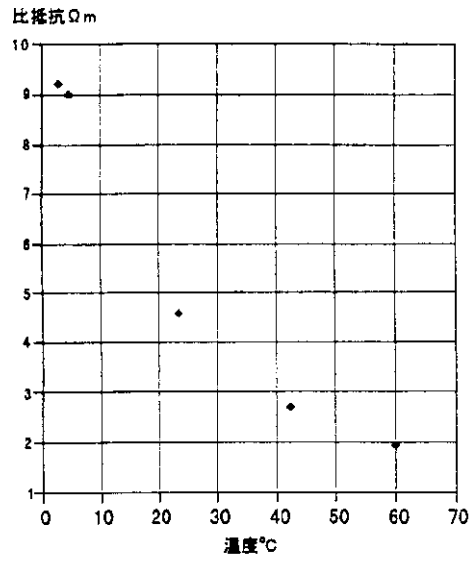


【 図 5 】



含水比と比抵抗の関係
(風化泥岩試料)

【 図 6 】



温度と比抵抗の関係
(粘性土試料)

【 図 8 】

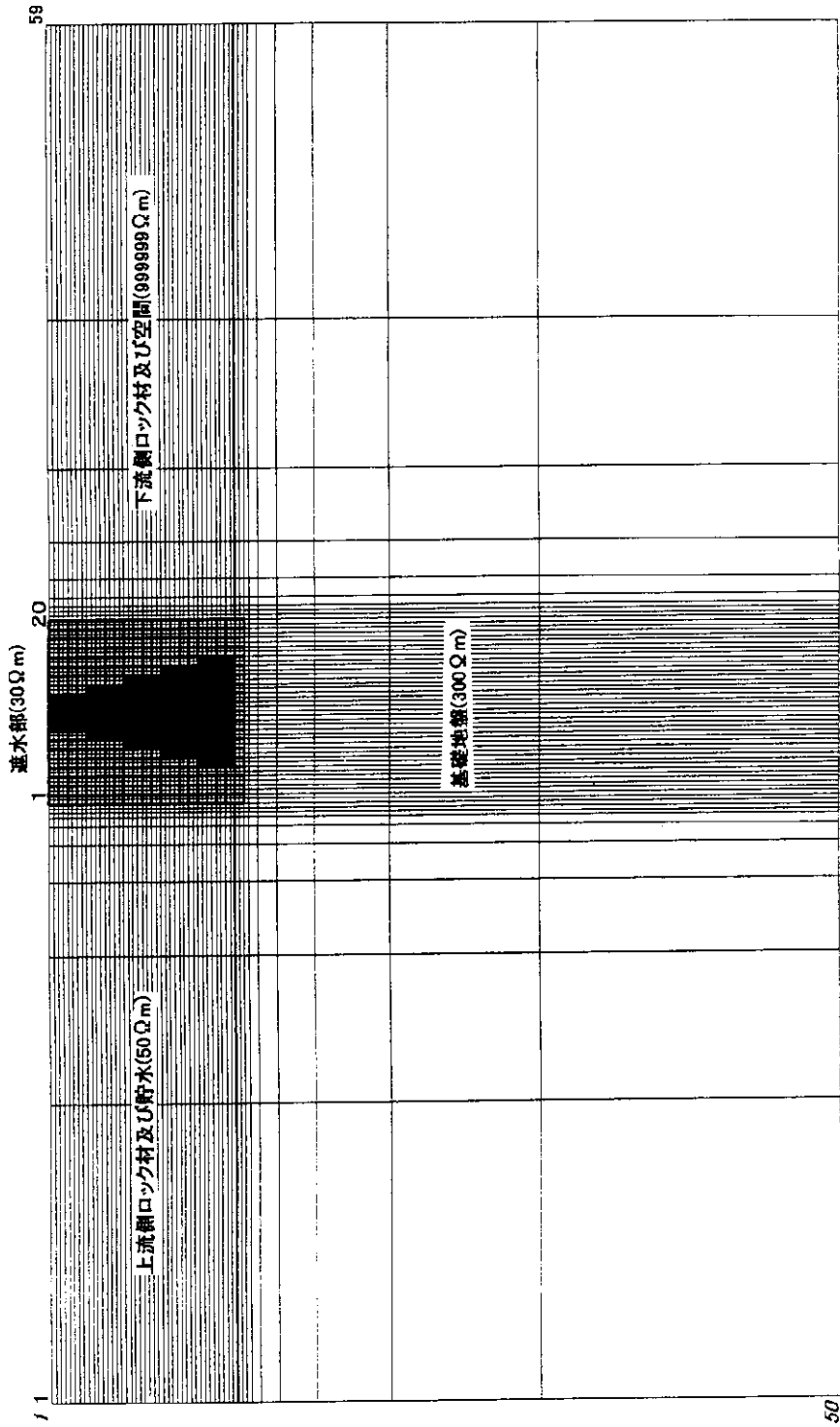
上流側ロック材及び貯水(50 Ω m) 下流側ロック材及び空下流側ロック材及び空間(999999 Ω m)

52	51	51	50	50	51	52	50	30	30	30	30	***	***	***	***	***	***	***	***
52	51	50	48	49	49	50	50	30	30	30	30	***	***	***	***	***	***	***	***
51	51	50	48	48	48	49	52	29	33	28	31	***	***	***	***	***	***	***	***
51	50	50	50	50	50	52	50	30	32	25	32	***	***	***	***	***	***	***	***
50	50	50	50	51	52	50	30	30	31	28	32	31	735	***	***	***	***	***	***
49	49	49	49	50	52	51	30	29	31	32	28	31	978	***	***	***	***	***	***
49	49	49	48	50	51	51	30	29	33	36	27	31	***	***	***	***	***	***	***
48	49	49	50	51	51	50	30	28	30	31	24	32	***	***	***	***	***	***	***
48	48	50	51	53	50	30	30	29	29	30	30	32	31	648	***	***	***	***	***
48	48	49	50	52	51	30	30	30	30	32	33	28	31	958	***	***	***	***	***
48	48	49	48	50	50	30	29	30	32	34	35	27	31	***	***	***	***	***	***
49	48	50	51	50	50	30	28	30	30	29	28	24	32	***	***	***	***	***	***
50	51	52	53	48	30	30	31	30	28	28	30	31	32	31	651	***	***	***	***
51	51	52	53	48	30	30	30	29	29	30	34	35	27	31	***	***	***	***	***
51	52	51	50	50	30	29	29	30	30	32	34	34	25	31	***	***	***	***	***
50	51	52	50	50	30	29	29	30	31	29	29	29	25	32	***	***	***	***	***
48	49	51	50	30	30	30	30	31	30	28	28	32	35	31	31	813	***	***	***
45	45	48	52	29	30	31	31	32	32	30	31	34	36	25	32	939	***	***	***
49	48	49	48	31	29	29	29	29	29	29	27	28	31	32	***	***	***	***	***
65	70	72	50	30	30	31	30	30	30	31	31	31	31	31	32	553	***	***	***
88	114	178	264	298	282	275	278	278	274	272	273	272	284	350	191	267	***	***	***

基礎地盤(300 Ω m)

初期モデルによる計算測定値の
解析結果 (初期値 100 Ω m 均一)

【 図 7 】



【 図 9 】

上流側ロック材及び貯水(50 Ω m)										遡水部(30 Ω m)				下流側ロック材及び空間(999999 Ω m)									
48	49	52	53	53	51	49	50	30	30	30	30	***	***	***	***	***	***	***	***				
48	49	51	53	52	50	50	50	30	31	30	30	***	***	***	***	***	***	***	***				
48	49	50	51	49	48	48	50	30	29	30	30	***	***	***	***	***	***	***	***				
49	49	50	50	49	50	51	50	30	31	29	30	***	***	***	***	***	***	***	***				
50	50	50	49	50	52	50	30	30	30	31	30	30	***	***	***	***	***	***	***				
51	51	50	48	48	50	50	30	29	29	29	30	30	***	***	***	***	***	***	***				
51	51	50	48	48	51	50	30	32	32	30	30	30	***	***	***	***	***	***	***				
52	52	51	50	51	50	50	30	28	31	30	30	30	***	***	***	***	***	***	***				
51	51	51	51	51	51	30	30	30	30	28	30	30	30	***	***	***	***	***	***				
48	50	50	49	47	51	30	30	30	31	30	31	30	31	***	***	***	***	***	***				
48	48	50	51	51	50	30	30	30	30	30	30	30	32	***	***	***	***	***	***				
47	48	49	49	50	50	30	31	30	30	30	28	30	33	***	***	***	***	***	***				
48	49	50	49	50	30	30	30	30	30	30	30	30	30	***	***	***	***	***	***				
50	51	52	52	49	30	30	30	30	31	31	30	31	30	31	***	***	***	***	***				
52	52	51	47	50	30	30	28	30	31	30	28	30	30	32	***	***	***	***	***				
52	52	51	50	50	30	32	30	30	31	30	29	30	30	33	***	***	***	***	***				
51	50	46	51	30	30	30	30	30	31	30	30	31	30	30	30	***	***	***	***				
51	50	49	50	30	30	28	31	30	31	29	30	30	30	30	30	***	***	***	***				
50	52	54	50	30	30	30	31	29	31	29	31	29	30	30	30	***	***	***	***				
48	49	48	50	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	***	***	***	***				
292	292	294	301	308	305	300	298	303	304	287	301	300	299	301	300	300	301	297	295				

基礎地盤(300 Ω m)

初期モデルによる計算測定値の
解析結果 (初期モデルと同一)

【 図 1 0 】

上流側ロック材及び貯水(50 Ω m)										遮水部(30 Ω m)				下流側ロック材及び空間(999999 Ω m)									
59	58	51	48	45	49	53	50	30	30	30	30	***	***	***	***	***	***	***	***				
80	57	51	48	44	48	51	51	30	30	30	31	***	***	***	***	***	***	***	***				
81	59	53	48	48	48	50	52	29	33	28	31	***	***	***	***	***	***	***	***				
60	59	55	51	48	49	52	50	30	32	25	32	***	***	***	***	***	***	***	***				
57	57	55	52	51	51	51	30	29	31	29	32	31	858	***	***	***	***	***	***				
53	53	52	52	51	52	50	30	29	32	31	28	32	858	***	***	***	***	***	***				
49	49	49	50	51	53	52	30	28	33	36	27	31	***	***	***	***	***	***	***				
47	47	48	49	48	51	50	30	27	32	34	24	32	***	***	***	***	***	***	***				
46	47	48	51	52	51	30	30	28	30	31	27	33	31	553	***	***	***	***	***				
46	47	50	53	54	50	30	30	30	30	32	30	28	32	785	***	***	***	***	***				
48	48	50	53	54	51	30	28	29	31	35	35	27	31	***	***	***	***	***	***				
50	50	50	50	50	50	30	28	27	30	34	34	24	32	***	***	***	***	***	***				
54	54	54	52	49	30	31	30	27	28	32	32	26	33	31	523	***	***	***	***				
58	58	57	54	49	30	30	30	28	29	31	32	28	29	32	758	***	***	***	***				
53	58	56	52	51	30	28	29	29	30	33	36	33	28	31	***	***	***	***	***				
47	48	51	48	50	30	30	30	28	30	33	37	36	25	32	***	***	***	***	***				
43	42	48	51	30	31	32	30	28	27	28	31	33	31	34	31	513	***	***	***				
48	43	41	50	32	25	26	26	26	25	25	24	25	25	25	33	851	***	***	***				
77	69	56	48	34	29	29	29	30	31	31	30	30	27	21	34	747	***	***	***				
141	137	96	40	31	49	49	44	44	47	52	59	72	81	60	35	325	***	***	***				
197	221	212	174	148	118	85	88	80	82	71	90	125	161	141	95	373	***	***	***				

基礎地盤(300 Ω m)

初期モデルによる計算測定値の
 解析結果 (初期値 100 Ω m 均一)
 遮水部底面に電極がない場合

