

地盤改良の評価技術の研究

—比抵抗トモグラフィによる水みち検出方法の適用性の検討—

Study on Performance Evaluation Technique of Ground Improvement

- Examination for Applicability of Water Leakage Detection

by Resistivity Tomography -

清水智明* 今泉和俊**

要 旨

薬液注入による地盤改良の遮水性能を正しく評価できる手法の確立は、改良体に対する信頼性の向上、コストダウンにつながる。そこで著者らは、改良体の水みちを検出する方法を研究してきた。比抵抗トモグラフィが水に感度の高い探査であることに着目し、それをういた漏水位置の検出方法を考案した。具体的には、導電率の高い即ち電気を通し易いトレーサーを水みちに沿って分散させ、地盤内の比抵抗変化をモニタリングするものである。考案した方法の適用性を検証するために地盤内に模擬改良体を作製して、水みち検出の実験を行った。その結果、本方法の原理の妥当性が確認できた。

キーワード：比抵抗モニタリング、トレーサー、薬液注入

1. まえがき

薬液注入工法は建設工事の多くの場面で適用される。一方、その遮水性能を正確に評価する手法がないために、遮水性能に関する不確実性を改良体の厚さを増すことで担保しているのが現状である。また、その不確実性のために薬液注入工法が棄却され、代わりにコストの高い凍結工法などが採用されるケースも多い。したがって、薬液注入の遮水性能を正しく評価できる手法の確立は、水みちを再注入等で充填する技術との連携により、改良体に対する信頼性の向上、コストダウンにつながる。

このような背景から、本研究では、改良地盤の水みちを事前に検出する技術を研究してきた。本研究で対象としている具体的な適用場面は、例えば地下水位を下げられない都市部山岳工法トンネルの切羽前方に造成される遮水ゾーンや、シールド工法の発進・到達・合流部における防護工などである。

本研究では、物理探査法の一つである比抵抗トモグラフィを活用した水みち検出方法を考案し、その適用性を実験により検討した。

2. 考案した水みち検出方法の原理

地盤改良において改良範囲の確認は品質確保のために重要である。そのため、チェックボーリングや物理探査

法を用いた手法は従来より行われてきた。しかし、従来方法では改良範囲を精度よく同定できても改良体内に水みちが無いことを判定できるわけではないので、水みちに対する補注注入を合理的に実施するためには水みちの有無および位置を検出することが重要と考えられる。そこで比抵抗トモグラフィを用いた水みち検出方法を考案し、その適用性について検討した。

比抵抗トモグラフィは、地盤内または地表に設置した1ないし2点の電極に通電し、その際に発生する電位分布を別に設置した電位電極で測定するものである。測定される電位は通電量と地盤内の比抵抗分布によって決定される。したがって測定された電位から非線形最小二乗法等の逆解析により地盤内の推定比抵抗分布が得られる。

比抵抗とは、単位面積、単位長さ当りの電気の流れにくさを表し、材料固有の値を持つ。地盤の比抵抗は間隙水の導電率、間隙の飽和度、間隙率、土粒子固有の導電率、地盤の温度等多くのパラメータの影響を受ける。このことから、比抵抗分布のみから工学的に有意な特性を求めることは困難である。したがって、従来の比抵抗探査法では比抵抗トモグラムと既存情報や経験的知見とを組み合わせることで熟練者による解釈が行われてきた。しかし、比抵抗の変化に着目した場合、それに影響を及ぼす要因は限定される。上記要因のうち、一般的に土粒子固有の導電率や、地盤の温度は短期的には変化が少なくと考えられ、比抵抗変化に及ぼす要因は間隙水の導電率と間隙

*技術本部東京土木技術部 **技術研究所

の飽和度の変化に絞り込むことができる。

このことを利用して遮水を目的とした薬液注入による改良地盤における水みち検出方法を考えた。図-1はその一例を示した概念図である。図のような台形の閉じた地盤領域の中央に壁状の改良地盤があり、その中の1箇所に貫通した水みちが存在する場合を考える。そして改良地盤の右半分の領域に導電性のトレーサーを湛水する。するとトレーサー中のイオンは分散あるいは浸透によって水みちを通過して左半分の地盤領域に移動する。その結果、イオン濃度が水みちの出口付近より上昇し、徐々に外側に広がっていく。トレーサーは導電率が高いため、地盤の比抵抗を低下させるので、上記の現象により比抵抗も出口付近より低下し始め、低下域は徐々に外側に広がる。したがって、比抵抗を湛水開始からモニタリングし、ある時点から比抵抗が低下し始める箇所が漏水位置であると仮定した。

上記の仮定が原理的に妥当であることを検証するために、模擬地盤内に模擬改良体を作製して、トレーサーを湛水し、比抵抗トモグラフィのモニタリングによる水みち検出実験を行った。

3. 水みち検出実験の方法

実験では、図-2に示すような形状で9.5m四方の地山を深さ2.3m掘削し、掘削面全体にゴム製遮水シートを敷設した。実験に用いた模擬改良体は、掘削領域を東西に二分する形で設置した厚さ20cmのモルタル製の壁である。模擬改良体の両側には、模擬地盤として川砂を均等に転圧しながら充填した。模擬改良体には水みちとしてφ25mmの漏水孔を模擬改良体ほぼ中央の位置に貫通させた。

比抵抗トモグラフィの電極には直径10cmの銅製の円盤を用いた。電極は漏水孔を含む南北方向に中央の断面に配置した。断面内においては図-3に示すように漏水孔を取り囲むようにπの字型に10cm間隔で配置した。また、実験では比較的地表面から浅い場所を観測対象とするため気温変化の影響を受けることが予想された。そのため、図に示す8箇所に熱電対を配置して観測値を温度補正した。

トレーサーには10%食塩水を使用し、供給は地上に設置したタンクから東側水位制御孔（有孔パイプ）に自然流下させた。そして図-3のように漏水孔の10cm下の高さまで東側の地盤にトレーサーを湛水した。今回のトレーサーの水位は、移動が浸透によらずイオンの分散のみに限定される、検出に最も時間を要する条件を想定して設定した。なお、今回の実験では便宜的に塩水を用いたが、実際には改良体に害の少ないトレーサーを用いる必要があり、その点については今後解決しなければならない課題の一つである。

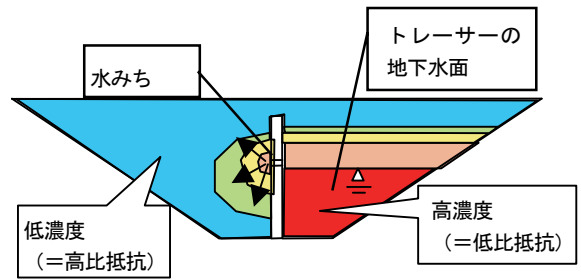


図-1 トレーサーの移動現象の概念図

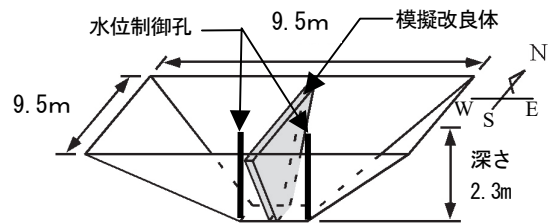


図-2 模擬地盤・模擬改良体の形状

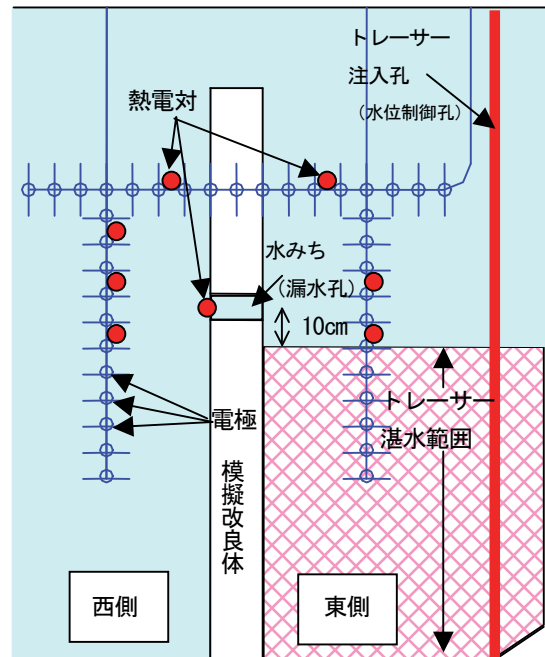


図-3 模擬地盤内の配置



写真-1 砂の比抵抗測定用アダプタ

電気探査法で一般的に用いられるのは測定効率の良い2極法であるが、今回の模擬地盤はゴム製遮水シートにより周辺地盤と絶縁されているため、遠電極と模擬地盤内の電極との間を通電することはできない。そのため、比抵抗トモグラフィには4極法を採用した。

4. 地盤材料の比抵抗の特性

今回模擬地盤に用いた材料は霞ヶ浦産の中目川砂である。この砂の比抵抗を含水比、間隙比、温度、間隙水比抵抗（電解質濃度）を様々に変化させて測定した。含水比の調整には精製水を用いた。

測定は市販の小型比抵抗測定機に自作アダプタを接続して測定した。アダプタを写真-1に示す。アクリル製の筒と塩化ビニル製の上下の蓋より構成されており、上下の蓋に電流電極として銅の円盤が、電位電極として筒を1周する形で2箇所帯状の銅板が付けられている。これを組み立て、筒内に試料を詰め込んで通電する。各電極は軸方向に等間隔に配置されており、両端を通電して中間の2点で電位測定するウェンナー型の電極配置となっている。

図-4に間隙率と飽和度の積である体積含水率と比抵抗の逆数である電気伝導率の関係を示す。体積含水率の増加とともに電気が流れ易くなり、電気伝導率が増加する。試料の突固め方を変えてみたが、体積含水率と電気伝導率の関係は突固め方によらずほぼ同一の一次関数で表される。したがって、今回の試料については他の条件が同じであれば電気伝導率は体積含水率で一意に定まることが分かる。

次に間隙水の比抵抗への影響を調べた。間隙水に3、10、15%の3種類の食塩水を用いて同様の測定を行い、体積含水率を0.10に固定して電気伝導率を求めた。間隙水のNaCl濃度と試料の電気伝導率（体積含水率0.10時）の関係を図-5に示す。

次に試料の電気伝導率と温度の関係を調べた。精製水で調整した体積含水率0.10の湿潤砂と塩水に浸漬した砂について断熱容器内で一定温度に制御した状態で電気伝導率を測定した。温度を10~40℃の範囲で変化させた結果、温度と電気伝導率の間に図-6に示す関係が得られた。縦軸は計測された電気伝導率を25℃時の電気伝導率で除して正規化しており、正規化された電気伝導率を用いる地盤材料の種類によらずほぼ1本の曲線（計測した温度範囲においてはほぼ直線）に乗る。このことは既往の研究結果とも整合する¹⁾。

一方、比抵抗トモグラフィで測定される電位は領域内の地盤の比抵抗の温度依存性が累積した結果であり、厳密に温度補正を施す場合には、場所ごとの比抵抗に対してその場所での温度で補正した値を用いて解析することが必要である。しかし、本実験では寄与率の高い電極周

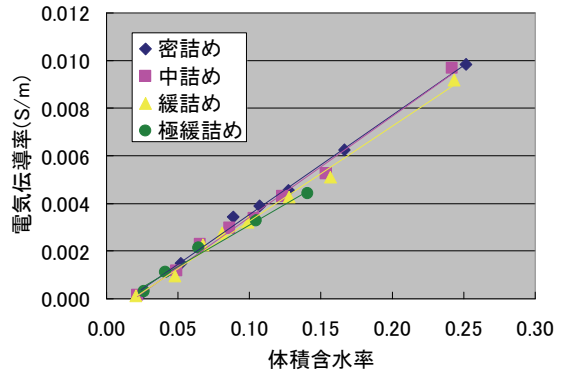


図-4 体積含水率と電気伝導率の関係

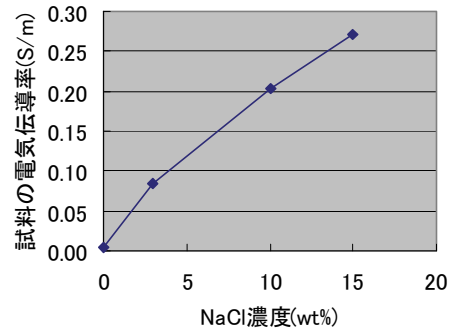


図-5 間隙水のNaCl濃度と試料の電気伝導率（体積含水率0.10時）の関係

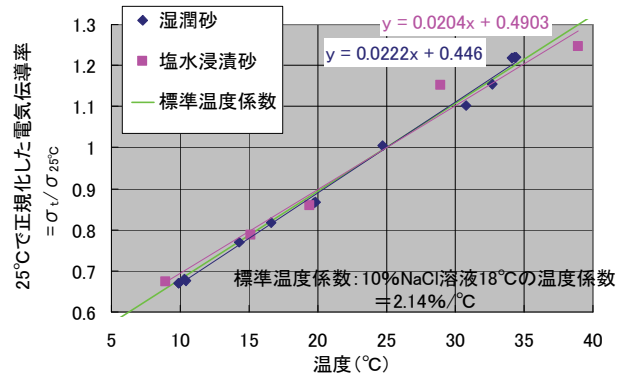


図-6 温度と試料の電気伝導率の関係

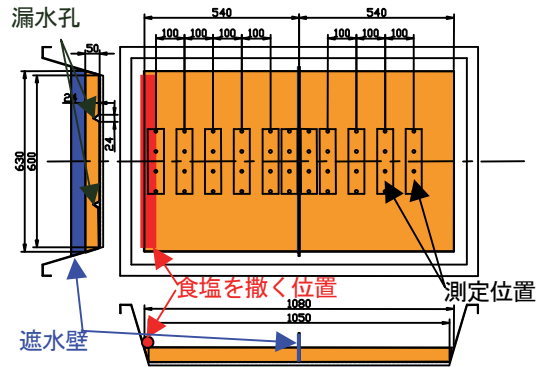


図-7 実験装置の形状

辺の測定温度の精度が重要と考え、電極周辺に設置した 8 箇所熱電対による温度の平均値から図-6 の線形回帰式に則って、測定より得られた見かけ比抵抗を 25°C 相当の値に換算することで温度補正を行っている。

5. 事前予測解析

5.1 目的

本実験の成否は水みちからトレーサーが分散することにより、どの時点でどの程度の比抵抗の変化とコントラストが現れるかにかかっている。そこで、事前に予備実験と数値解析により実験時の比抵抗変化を予測した。なお、ここで述べている分散とは、物質の拡散と分散による移動を包括したものである。拡散とは水中での純粋な拡散、つまり物質の分子運動に起因する移動（分子拡散）を意味する。

一方、土中の間隙の大きさがそれぞれ違うために、間隙ごとにその中の水のもつ流速が異なることにより、局所的な溶質の移流が空間的にランダムな方向に発生する。土中のこのような移動は分散と呼ばれる²⁾。

本実験は体積含水率 0.1 程度の不飽和状態の砂中で行われるため、水分移動は少なく、NaCl の濃度の拡散が比抵抗変化において支配的になると予想し、Fick 則に基づく NaCl の拡散現象を FEM により予測した。初めに室内での簡易拡散実験によって対象地盤内における NaCl の拡散係数を同定した。

5.2 拡散係数の同定

拡散係数は実験的に同定した。図-7 のように、プラスチック容器内に砂を入れて、間隙率、含水率を実験時に予定している平均的な値に調整した後、容器の 1 辺に食塩（純度 98% の NaCl）を撒きだした。容器は遮水壁により中央で左右に分かれており、遮水壁には漏水孔として 2 箇所の小孔があいている。そして図に示す 10cm 間隔の位置で定期的に 4 極法による比抵抗探査を行った。測定期間中、体積含水率を一定に保つために容器の上部は蓋をして密閉したうえで、蒸散による微小な水分の減少分を霧吹きで定期的に表面に補填した。通常拡散係数を求めるにはカラム試験が用いられるが、本実験では拡散係数を高精度に求めることが主目的ではないこと、および中間の遮水壁の影響で何らかの不測の現象が起きるか否かを予め確認しておくため、上記のような方法を採用した。

得られた測定値から拡散係数を求めるために図-8 のフローに示す解析を実施し、最終的に測定値との残差が最小となる拡散係数を採用した。実験の結果、図-9 に示す比抵抗探査で測定された電位分布の推移が得られた。図のように中央がほぼ境界となるために初期状態では ω 型の電位分布を示す。つまり左右各領域の端部では電流が流れにくいために電位が上昇し、中間では電流が流れ

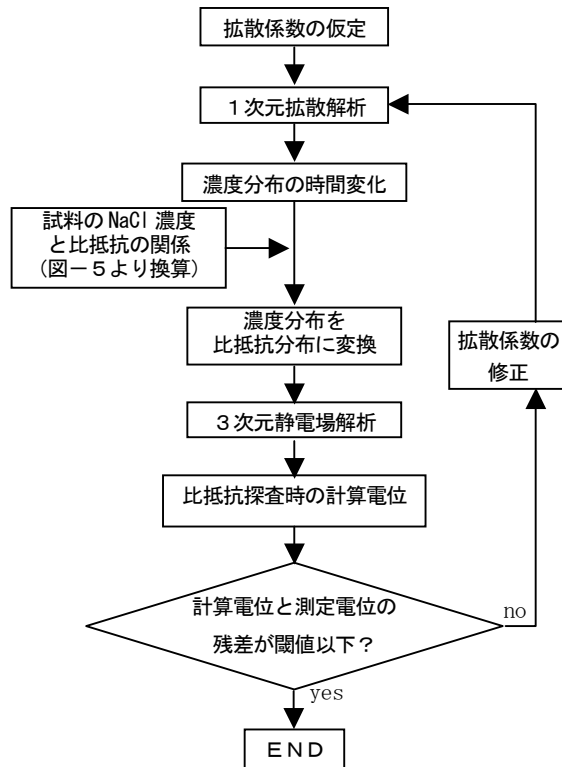


図-8 拡散係数導出フロー

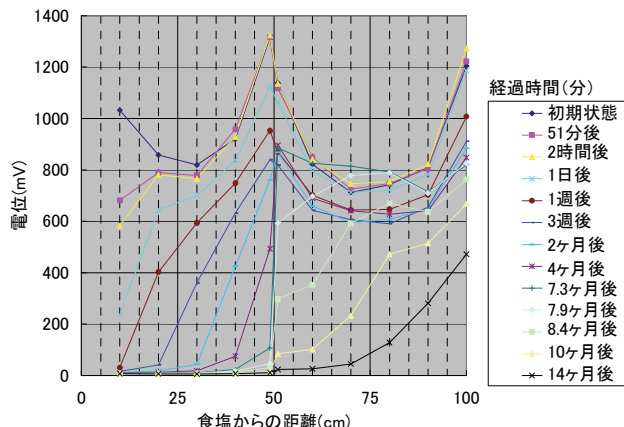


図-9 比抵抗探査による電位分布の推移

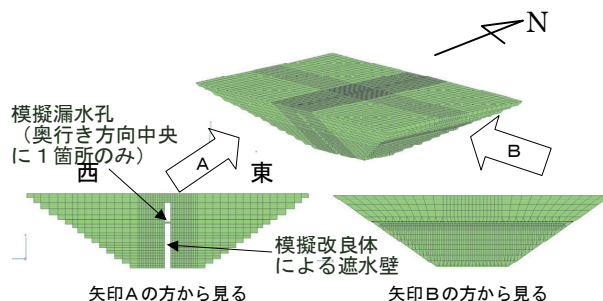


図-10 解析モデル

易く電位は低くなっている。時間経過とともに食塩に近い位置から NaCl の影響で比抵抗が低下し、電位も低下

する。その後、NaCl の拡散により比抵抗の低下が遠方に及んでいく。最終的に逆解析により得られた拡散係数は $6.45 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{h})$ となった。

5.3 解析結果

図-10 に示す解析モデルで東側の所定深度以下の領域に塩水を湛水し、前節で算出した拡散係数に基づいて比抵抗分布の変化を算定した。結果は次章の実験結果と対照できるよう、図-11 の右列に示す。

6. 実験結果とその考察

杉本³⁾ は電気探査の時系列データの解析法として差トモグラフィ法を提案した。この方法によれば各時期のインバージョン結果の差を取る従来の方法に比べて逆解析時のノイズの影響を低減し、微小な比抵抗変化を精度良く求めることができる。本実験でもトレーサー注入直後のデータを初期データとしてこの手法を用いた。図-11 に漏水孔周辺の比抵抗変化率分布の変遷を示す。

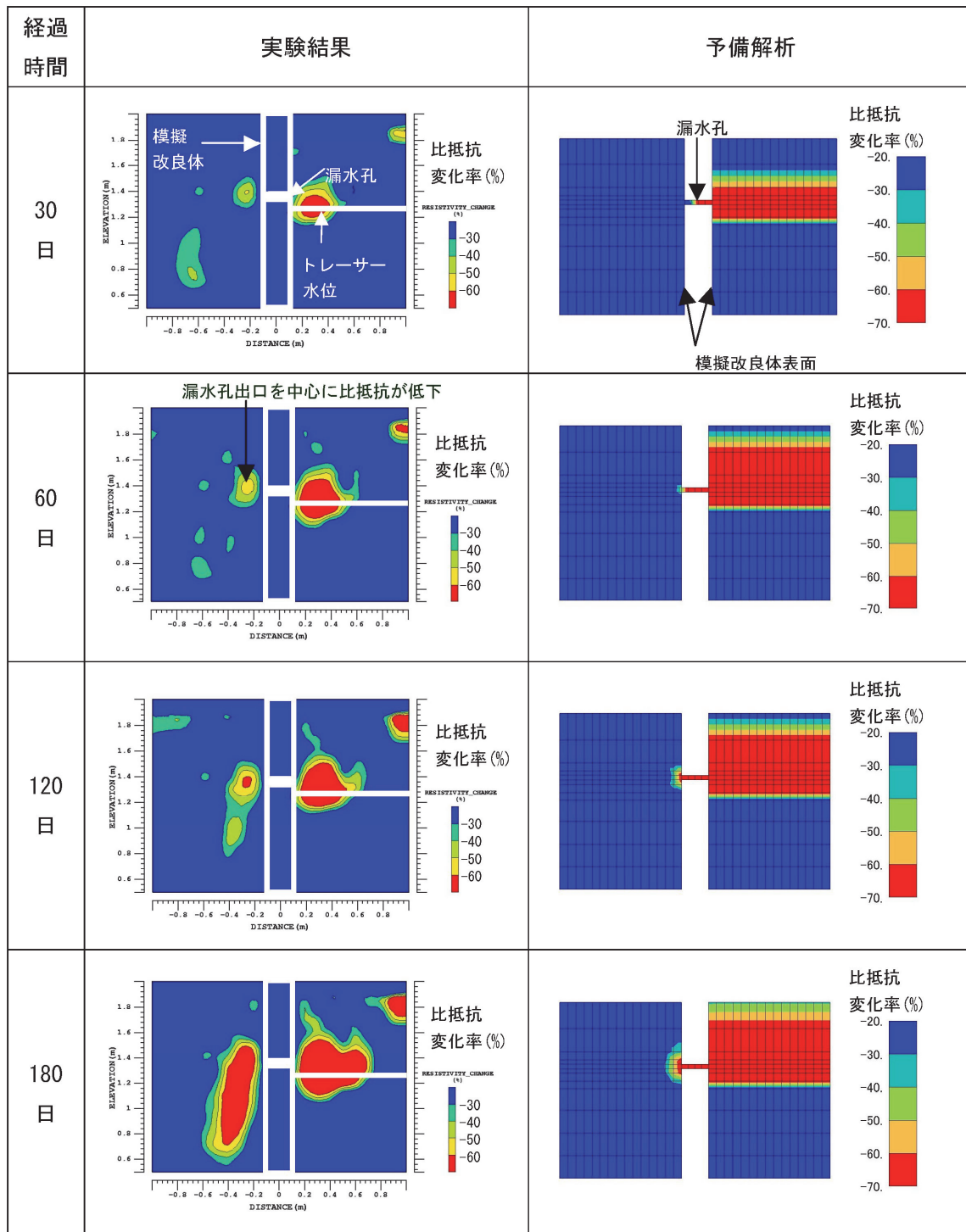


図-11 実験結果と予備解析による比抵抗変化率分布の変遷

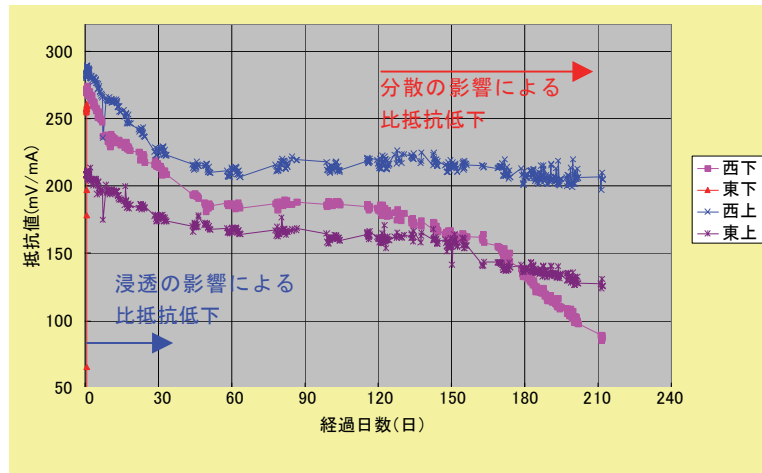


図-12 見かけ比抵抗の定点観測結果（温度補正済）

ここで、比抵抗変化率とは、

$$\text{比抵抗変化率} = \frac{\text{逆解析結果} - \text{参照断面の比抵抗}}{\text{参照断面の比抵抗}}$$
 と定義される。本検討の場合、変化の方向は比抵抗が低下する方向に限定されるため、以下、これを比抵抗低下率とする。また、塩水投入直後を参照断面とした。
 注入後 30 日で漏水孔出口を中心とした比抵抗低下が現れ始め、中心での比抵抗低下率は 50%である。60 日経過すると比抵抗低下はより顕著になり、範囲も拡大する。120 日になると中心での比抵抗低下率は 60%を超え、そこが漏水孔出口であることがより明らかとなるが、重力の影響で低下域が下方に広がってしまい、漏水孔出口の検出という意味ではややぼやけてしまう。さらに 180 日になると凡例のレベルの取り方にもよるが、西側の模擬改良体近傍の比抵抗が全体的に低下してしまい、その断面図だけを見てもどこから漏水しているか全く分からなくなってしまう。

一方、東側の領域に着目すると、模擬改良体に近いところは大きく比抵抗が低下し、時間経過とともに範囲が広がっているが、模擬改良体から離れるにつれて比抵抗低下の程度が小さくなっている。

これらの結果を予備解析結果と比較してみる。まず東側の領域では、予備解析では模擬改良体からの距離に関係なく一様に上方に比抵抗低下領域が広がっている。しかし、実験では模擬改良体近傍のみで比抵抗低下が発生している。解析で考えている分散は拡散の分のみとしているため、分散係数は等方的であると仮定しているが、実際には重力の影響で移動方向によって異なる値をとる。つまり上方に拡散しても、その結果間隙水の比重が重くなって下向きの力が作用するため、解析で予想したほど上方には分散しなかったものと考えられる。一方、当初無視できると予想していた不飽和浸透流が実際には発生しており、東西の地盤の水頭の差によって漏水孔を通じて塩水が東から西へ移動していると考えられる。

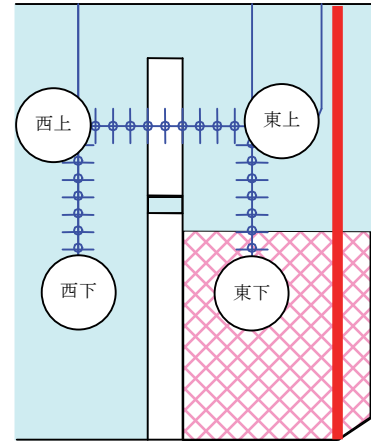


図-13 見かけ比抵抗の定点観測点

図-12 は図-13 に示す 4 箇所測定したウェンナー法による抵抗値の時間変化である。東下の抵抗値は注入と同時に大きく低下し、グラフの表示範囲から外れている。東上、西上、西下での比抵抗の低下は注水直後から始まり、一旦変化が収まった後、西下、東上では 120 日以降再度低下している。最初の比抵抗低下は注水直後から始まっていることから推察して不飽和浸透の影響が現れており、後半の比抵抗低下は注水からかなり時間が経過してから始まっていることから分散の影響と解釈できる。後半の比抵抗低下が西上ではほとんど見られないのは前述の分散における重力の影響のためと考えられる。

以上の考察から、実験では浸透が無視できない程度に影響しており、計画時に考えていたような拡散のみによる最も時間の要する条件での実験とはならなかった。また、緩やかな浸透の下で分散を起こさせることで、水みちの位置を検出できた。

7. あとがき

比抵抗トモグラフィを用いた塩水トレーサーのモニタリングによる水みち検出方法を考案し、実験により適用性を検討した。浸透の影響により比抵抗の低下が予想より早く発生したが、今回考案した水みち検出方法が原理的に可能であることが確認できた。

【参考文献】

- 1) 朴 三奎、朴 美京、松井 保、「地下水と飽和土における比抵抗の温度依存性」、物理探査、Vol. 52、p. 251
- 2) 中野政詩、「土の物質移動学」、東京大学出版会、p. 45
- 3) 杉本芳博、「比抵抗トモグラフィによる電解質トレーサーのモニタリング—数値的検討—」、物理探査学会第 92 回学術講演会講演論文集