

比抵抗トモグラフィによる 薬液注入範囲の可視化

小川 渉¹・清水 智明²・高畠 哲朗³・今泉 和俊⁴

¹国土交通省 関東地方整備局 千葉国道事務所（〒263-0016 千葉県千葉市稲毛区天台5-27-1）

²正会員 工修 株式会社奥村組 東日本支社 土木技術部（〒108-8381 東京都港区芝5-6-1）

³正会員 株式会社奥村組 東日本支社 土木第2部（〒108-8381 東京都港区芝5-6-1）

⁴正会員 理博 株式会社奥村組 技術研究所（〒300-2612 茨城県つくば市大砂387）

液状化対策として施工した地盤改良工の面的な出来形確認方法として比抵抗トモグラフィを試行した。その結果、注入の途中段階においてはそれまでに注入した箇所を中心に比抵抗が低下しており、注入に反応して比抵抗が低下した様子が確認された。また、注入完了段階においては、効果確認用のボーリングコアの成分分析結果と照合し、比抵抗の低下した領域に薬液が注入されていることが確認でき、比抵抗トモグラフィによる注入範囲推定方法が有効であることが分かった。

キーワード：比抵抗トモグラフィ、薬液注入、液状化、可視化

1. はじめに

液状化対策に用いる恒久薬液注入では、注入範囲、改良効果の確認が必要である。その方法としては、効果確認用ボーリングを行い、採取試料の強度や成分分析から確認する方法が一般的である。しかし、この方法では、試料採取箇所における薬液注入の改良効果は確認できるが、点あるいは線状の情報しか得られない。

今回対象となった工事は、液状化対策工の対象構造物である幹線共同溝の重要性、および薬液注入（工法名：浸透固化処理工法）の水平施工による実績が少ないことから、薬液の注入範囲を面的に評価することが必要であった。そこで、浸透した薬液を直接的、かつ面的に測る手段として電気探査の一種である比抵抗トモグラフィを用い、以下の項目を目的として注入範囲の評価を行った。

- ① 浸透固化処理工の薬液注入範囲の面的な把握
- ② 注入工程の途中段階における注入範囲の変化過程の可視化

①により、これまでのような局所的な評価ではなく、対象範囲全体での評価が可能となり、これまでに発見できなかった出来形不良や品質不良を発見する一助になることが期待される。また、②により①の評価の妥当性の間接証拠となることが期待される。

2. 工事概要および地盤条件

本工事は、東京都江東区において国道357号地下部に構築された砂町共同溝のうち、交差点直下における液状化対策として恒久薬液を低圧で浸透させる浸透固化処理工法を施工する。

これまでに当現場で行われた地盤調査から、GL-14.7m まで緩い砂質土層が分布しており、その下位にはGL-37m付近 まで軟弱な粘性土が分布していることが確認されていた。このうち改良対象となるのは砂質土層であり、N値が概ね10を下回る軟弱な地盤であった（図-1）。

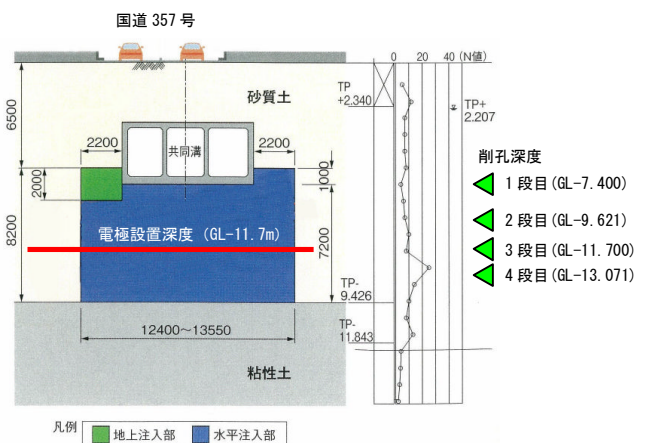


図-1 地盤調査結果と液状化対策工の施工断面図

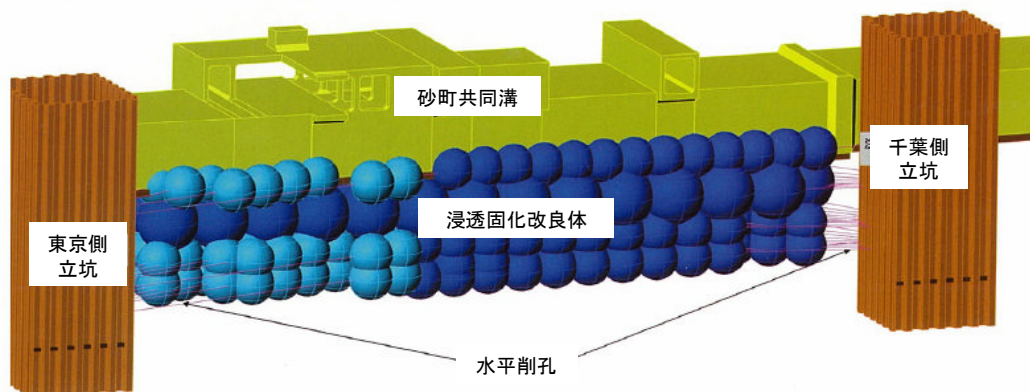


図-2 浸透固化処理工の概念図

地下水位はGL-2.7m付近と高い位置にあり，設計での無対策時の液状化に対する抵抗率FLの最小値は0.31（レベル2タイプⅡ地震時）であり，極めて液状化の可能性の高い場所である．東北地方太平洋沖地震の際にも近辺で液状化被害が多数報告されている．

浸透固化処理工の施工断面図を図-1に，概念図を図-2に示す．施工延長は，交差点直下の40mであった．路上規制の制約から，道路外の2箇所注入用立坑より深度方向に4段の水平削孔を行って注入外管を設置した．使用した薬液は，特殊シリカ系の溶液型恒久薬液であった．注入は約1.5ヶ月間行われ，その間の地下水位はGL-2.7m付近にあり，すべて地下水位以下での注入となった．

3. 材料特性

予備実験として，比抵抗トモグラフィに影響する以下の材料の比抵抗を測定した．

- ① 現地から採取した砂（以下，未改良地盤とする）
- ② 現地から採取した砂と薬液を設計注入率で混合して作成したサンドゲル（以下，改良地盤とする）

②の測定状況を写真-1に示す．①の未改良地盤は自立しないため，写真-2のアダプタを用いて測定したが，①②は原理的に同一の測定方法となっている．①の測定については，比抵抗が体積含水率から概ね一意に決まるため，体積含水率と電気伝導率の関係を作成した（図-3）．一方，地盤調査結果の含水比と土粒子密度から換算した体積含水率が42.7%であったことから，図-3より電気伝導率0.434S/mを得る．したがって，比抵抗は電気伝導率の逆数であるから，未改良地盤の比抵抗を2.30Ωmと推定した．

表-1の結果によれば，改良の前後で比抵抗が約半



写真-1 改良地盤の比抵抗測定状況

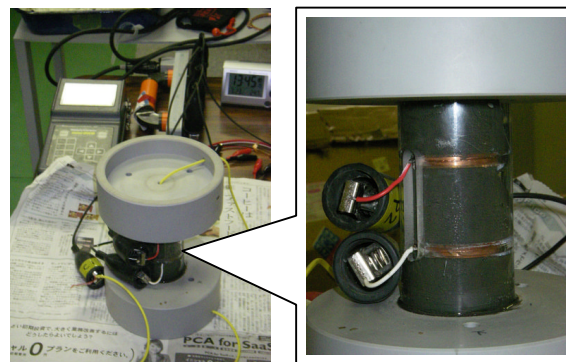


写真-2 未改良地盤の比抵抗測定状況

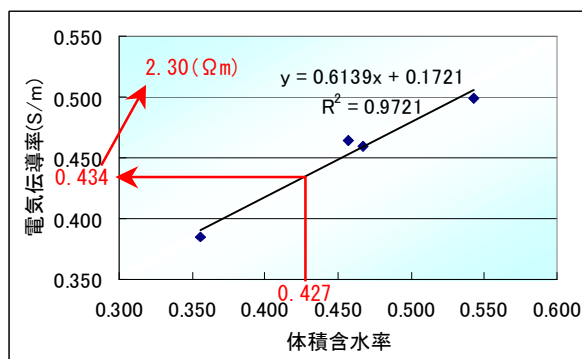


図-3 現地砂における体積含水率と電気伝導率の関係

表-1 比抵抗の材料試験結果

測定対象	比抵抗(Ωm)
①未改良地盤	2.3
②改良地盤	1.0

分に低下することが分かった。このことから、注入の前後で比抵抗の低下した領域が注入範囲であると評価できると考えた。また、設計注入率を満足する注入範囲の基準は、効果確認用ボーリングにより得られた採取試料の成分分析結果と当該位置での比抵抗変化率との比較により設定することとした。

4. 比抵抗トモグラフィ

(1) 概要

物理探査法の一つである比抵抗トモグラフィでは、探査範囲を取り囲むように地中に電極を設置し、1つの電極から電流を流した際に生じる電位をその他の電極で測定する。測定された電位から、逆解析により地盤内の電気の流れにくさである比抵抗を推定する技術を比抵抗トモグラフィと呼ぶ。

(2) 電極配置

電極の設置手順を図-4に、配置平面図を図-5に示す。

電極の配置は、調査対象範囲を極力取り囲むように配置したほうが探査精度が上がるため^{1),2)}、図-5に示すように、両立坑から改良範囲を3辺で包囲する配置とした。また、注入により比抵抗が低下する範囲と注入の影響のない範囲のコントラストを確認するために、設計注入範囲から数m離れた位置に電極を配置した。電極間隔は1mとした。

設置深度は全て同じとし、設計注入範囲の中点付近である3段目の削孔深度と同じGL-11.7mとした(図-1)。

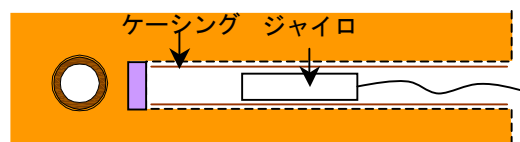
以上に述べた電極配置で、計75極の電極を設置した。なお、電流遠電極は、測定箇所から約200m離れた位置に接地した。

(3) 現地の特質点と対策

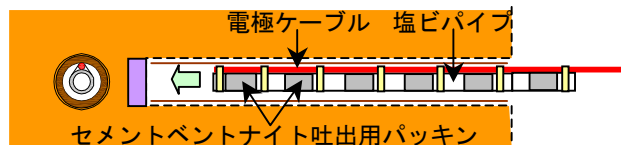
今回の地盤条件では、元地盤の比抵抗が低いため、改良前後の比抵抗コントラストがそれほど大きくないこと、および都市部の電氣的ノイズが比較的大きい場所での測定であることから、通常の測定・解析では評価が困難となることが予想されたため、以下の点に配慮した。

- ① 電極配置は、ノイズの多い地表での電位測定を避けて、地中に配置した電極のみを用いる3極法(ポール・ダイポール法)を採用した(図-1, 4, 5)。
- ② 電極の位置は、解析上の精度確保のため、3

1. 削孔完了後、ジャイロ走査



2. 塩ビパイプに束ねた電極ケーブルを挿入



3. 塩ビパイプを先端ビットに固定し、ケーシング引き抜き



4. セメントベントナイトを注入し、孔内を充填

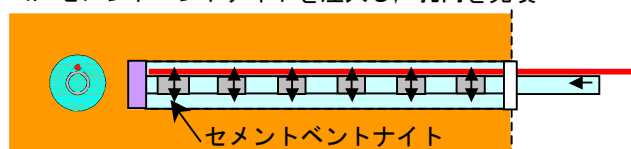


図-4 電極設置手順

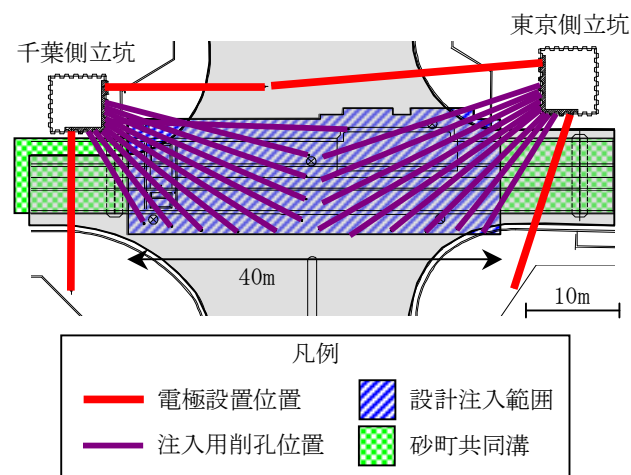


図-5 3段目の注入用削孔配置と電極設置位置

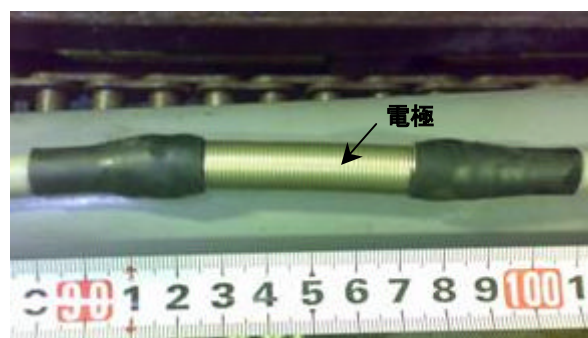


写真-3 ステンレス材を用いた電極

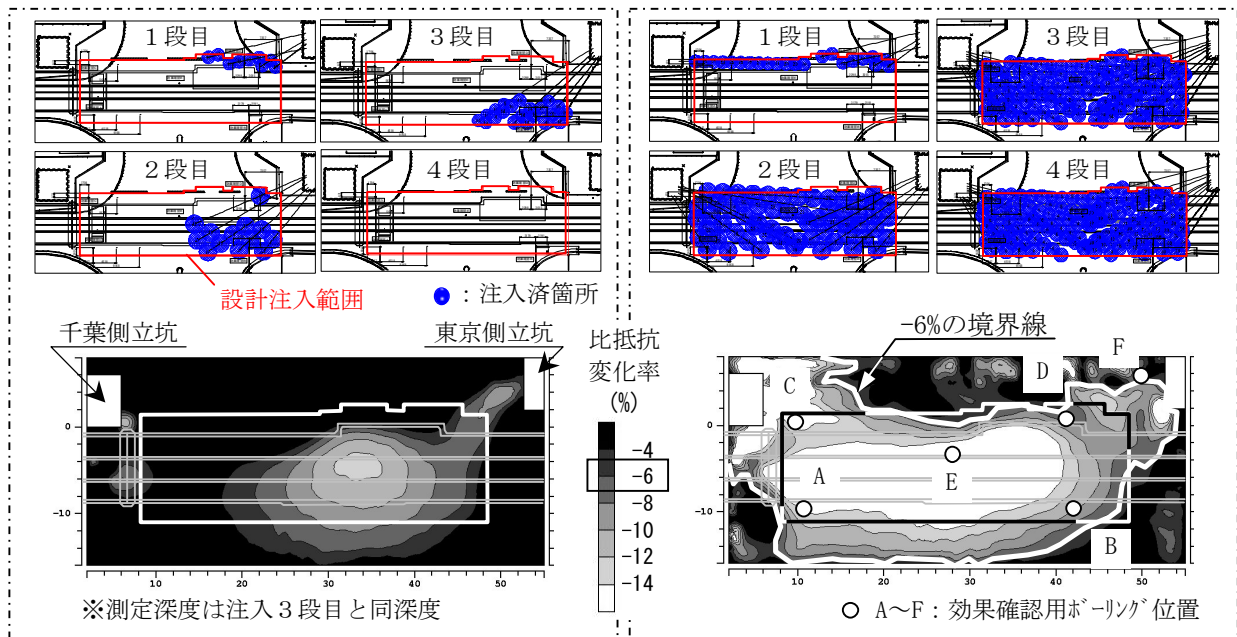


図-6 注入開始1週間後の注入箇所と比抵抗変化率分布

図-7 注入完了時の比抵抗変化率分布

- 次元ジャイロを用いて計測した（図-4）。
- ③ 電極の接地抵抗を極力低減し、かつ安定するように、電極の周囲をセメントベントナイトで充填して接地を確保した（図-4）。
 - ④ 電極にはステンレス材を用いて腐食を防止した（写真-3）。
 - ⑤ S/N 比向上のため、パワーブースターを接続して通常の約10 倍の1A を通電した。

(4) 測定

注入期間中の測定は、1回の測定に約10時間を要するため、平日は注入作業のため測定できず、休工日を利用して1週間毎に行った。

注入前に実施した予備測定では、試験的に2極法も実施したが、地表付近の迷走電流のためか測定電位のノイズが大きく、適用不可能と判断した。また、4極法は組み合わせ数が膨大になり、休工日中に測定を完了できないため、適用不可能であった。

5. 結果および考察

(1) 比抵抗トモグラフィ

解析は杉本（1995）³⁾の方法で行った。比抵抗変化率 ϕ は、従来より一般的に用いられている次式（1）より算定した⁴⁾。

$$\phi = \frac{\rho' - \rho}{\rho} \quad (1)$$

ただし、 ρ ：注入前の比抵抗、 ρ' ：注入後の比抵抗
解析結果の例として、図-6に注入開始1週間後、

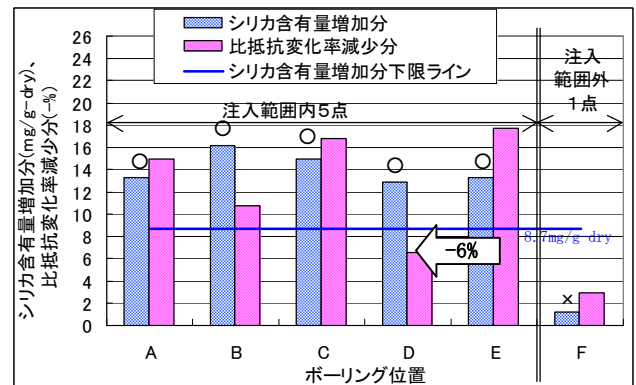


図-8 比抵抗変化率とシリカ含有量増加分の関係

図-7に注入完了時の比抵抗変化率の分布を示す。図-6では、注入した箇所で比抵抗が低下しており、薬液注入による比抵抗の変化が確認できる。図-7の注入完了時では、比抵抗低下範囲が改良予定範囲と概ね一致していることから、適切な範囲に注入されたことが確認できる。

(2) 効果確認工と比抵抗変化率の対比

図-7に示す6箇所において効果確認用ボーリングを実施し、採取した試料を用いて薬液の主成分であるシリカの含有量を測定した。

成分分析により得られたシリカ含有量増加分と比抵抗変化率の比較を図-8に示す。ボーリング地点のうち注入範囲内の5点A～Eでは、比抵抗変化率、シリカ含有量増加分ともに大きい絶対値を示した。一方、注入範囲外の1点Fでは小さい絶対値を示しており、明確な違いが認められた。

また、配合試験結果より得られた設計上のシリカ含有量増加分の下限値が8.7mg/g-dryであったことから、この値を越える箇所では所定の注入がなされていると判断され、注入範囲内5点の値はこれを満足している。したがって、この5点のうちの比抵抗変化率の最小値が-6%であることから、少なくとも6%以上比抵抗が減少している範囲では、設計注入量を満足していると考えられる。図-7に、-6%の境界線を点線で追記した。これより、改良予定範囲については必要量が注入されていると判断できる。

(3) 検証解析

前節までの結果から、注入範囲の面的評価に一定の見通しが得られた。しかし、比抵抗トモグラフィの比抵抗変化率コンターでは、変化率は注入範囲中心部付近の最大でも-20%程度であり、3章で述べた試験結果から得られる材料レベルでの比抵抗が半分に低下することとは乖離している。図-9には、注入完了時の共同溝センターにおける比抵抗変化率を示す。著者らはこの理由を以下の3点の影響と推定し、数値解析によるモデル計算から本結果の妥当性を検証した。

① 奥行き方向（深度方向）の影響

解析は水平断面での2次元解析であるため、奥行き方向（深度方向）には一様であることを仮定している。実際には、奥行き方向（深度方向）には約8mの領域を改良しているのみであり、改良範囲外の領域は原則比抵抗変化率0%であるため、それらの影響を反映してやや薄まった比抵抗変化率になっていると推定した（図-10）。

② 領域端部での低下

比抵抗トモグラフィの解析の性質上、図-11のように明確な境界をもって理想的に改良されているモデルを逆解析しても、その結果は図のように滑らかな変化となってしまう。そのため改良域端部では実際以上に変化率が小さくなってしまうため、そのことを考慮して改良範囲あるいは出来形を評価する必要がある。

③ 薬液の均一度の違い

材料試験で用いた室内作製コア試料は薬液と地盤を混合して作成したものであり、薬液はほぼ均等に間隙内に行き渡っているものと考えられる。一方、本工事で用いた浸透固化処理工法は浸透性の良い薬液を低圧で浸透注入することを特徴としており、一般的な薬液

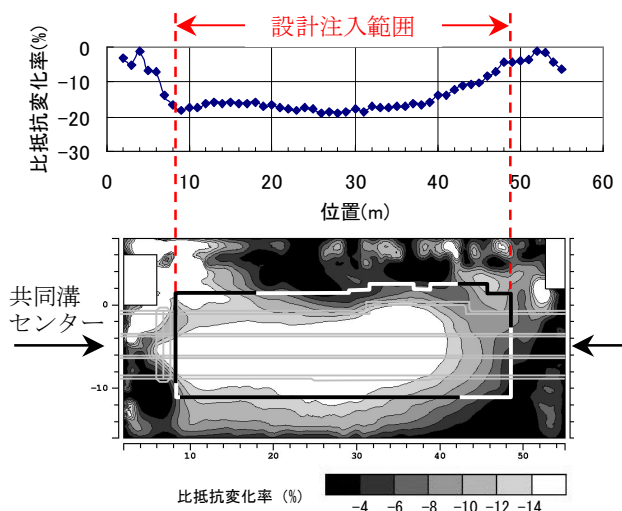


図-9 注入完了時の共同溝センターにおける比抵抗変化率

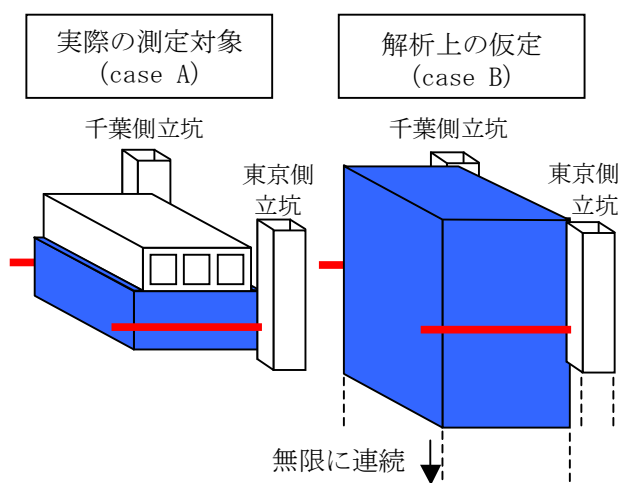


図-10 実際と解析上の仮定との違い

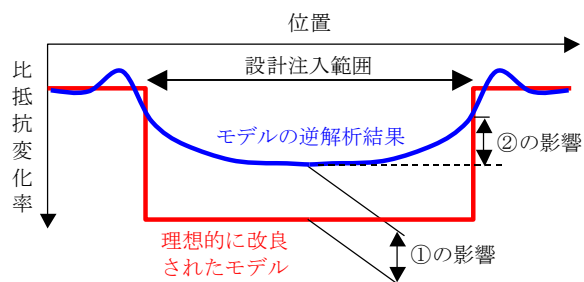


図-11 モデルと逆解析結果の違いの概念図
(改良範囲を横断する任意のライン上の比抵抗変化率)

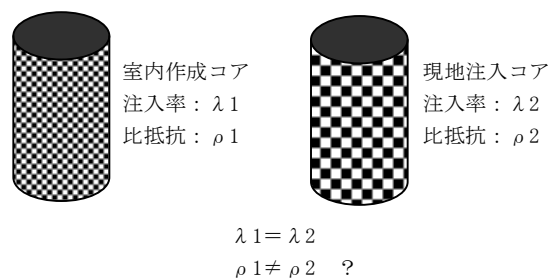


図-12 薬液の均一度の違いの概念図

注入に比べれば均一な改良地盤が作製されているはずであるが、細かく見ればどうしてもムラが生じる。この影響により、同じ注入率でも比抵抗変化率は異なる値となると考えられる（図-12）。

上記①、②の検証のために、図-13に示すように現地の配置を再現した3次元FEMモデルを作成し、図-10に示す2パターンの状況（case A：実際の設計注入範囲を改良，case B：全深度に渡り設計注入範囲を改良）における理論観測電位を求め、それぞれを逆解析した。このとき地盤は $2\Omega\text{m}$ ，注入範囲は50%低減して $1\Omega\text{m}$ になるものとした。結果を図-14に示す。

全深度注入したcase Bでは領域端部を除いて50%の比抵抗の低下が見られる。一方，case Aでは設計注入範囲内の比抵抗変化率は平均して約-20%であり，概ね①を裏付ける結果となった。さらに設計注入範囲端部での変化率の形状は②を裏付けている。ただし，case Aの変化率の分布形状は設計注入範囲の両端部のやや内側で谷が見られるが，このことの原因については分からなかった。

以上の結果より，今回実施した比抵抗トモグラフィの実測結果はモデル計算結果と概ね矛盾しない結果となっており，妥当であったと考えられる。

6. まとめ

比抵抗トモグラフィによる注入範囲の面的評価を試みた。比抵抗トモグラフィと効果確認用ボーリングとの併用により注入範囲を面的に評価できた。また，モデル計算による検証の結果，今回の結果が概ね妥当であると確認できた。ただし，今回の注入範囲の評価は，6点のみのチェックボーリング結果との比較に立脚しており，測定値のばらつきや統計的な信頼性を議論するには至っていない。今後，類似の物件で比抵抗トモグラフィの実績を重ね，評価方法の信頼性を高めていきたい。

参考文献

- 1) 佐々木裕：比抵抗トモグラフィの精度・分解能－電極配置の影響について－，物理探査学会第81回学術講演論文集，pp. 212-215，1989。
- 2) 窪田健二，鈴木浩一，池野谷尚史，高倉 望，谷和夫：比抵抗トモグラフィによる堆積軟岩ヒーター試験に伴う高温域進展状況のモニタリング，物理探査学会第118回学術講演論文集，pp. 186-

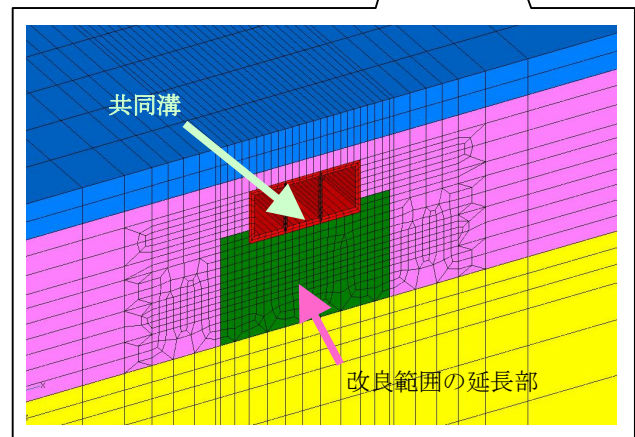
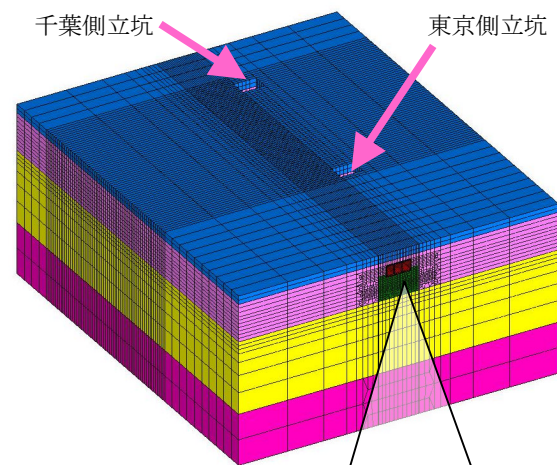


図-13 電位計算に用いた FEM モデル

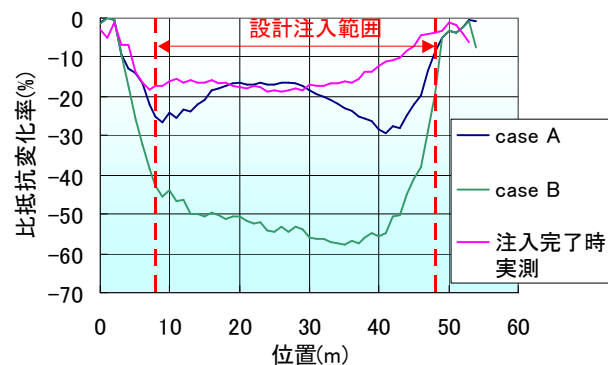


図-14 モデル計算の逆解析結果

189, 2008.

- 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ー数値的検討ー，物理探査学会第92回学術講演会論文集，pp. 57-62，1995。
- 4) 藤沢 一，桑原 清，宮崎育三：比抵抗による薬液注入モニタリング実験，物理探査学会第93回学術講演会論文集，pp. 164-167，1995。