

# 比抵抗トモグラフィによる 地盤改良体の形状と品質の評価

## Evaluation for Profile and Quality of Soil Improvement Body by Electrical Resistivity Tomography

清水智明\* 今泉和俊\*\* 高島哲朗\*\*\* 倉田和彦\*\*\*

### 要 旨

液状化対策として施工した地盤改良工の面的な出来形と品質の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、注入済の箇所比抵抗が低下する解析結果が得られた。また、注入完了後は、改良体の品質確認のために実施したチェックボーリングコアの薬液成分分析結果とコア採取位置の比抵抗を照合し、比抵抗の低下した位置に薬液が注入されていることが確認できた。以上のことから、薬液注入範囲と改良効果の面的な評価手法として、比抵抗トモグラフィの適応性を示すことができた。

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. まえがき

液状化対策として行う薬液注入では、改良範囲と改良体の品質を精度良く把握することが重要である。一般的には、限られた本数のチェックボーリングを行い、コアの強度やコアに含まれる薬液成分の分析から改良効果が確認される。しかし、この方法では、試料採取箇所におけるピンポイントの情報しか得られず、改良範囲全体の品質評価に課題が残されている。

今回対象とした液状化対策工事は、改良範囲が交通量の多い交差点下方にある既設幹線共同溝の下であること、さらに、浸透固化処理工法を水平方向に施工するという実績の少ない方法を採用した点が特徴であった。そのため、施工できるチェックボーリングの数が制約され、また、これまでの同じ工法の改良実績を参考にすることができなかった。

そこで、薬液注入による改良範囲と改良体の品質を面的に評価する手段として、電気探査の一種である比抵抗トモグラフィを通常のチェックボーリングに加えて適用した。チェックボーリングによる従来の局所的な評価に加えて、注入範囲全体での改良効果の評価、さらに、注入の途中段階における改良範囲の変化も把握することを目指した。

### 2. 工事概要および地盤条件

砂町共同溝は、東京都江東区の国道 357 号線の地下に

ある既設構造物である。本工事では、砂町共同溝のうち交差点直下区間の液状化対策として、共同溝底盤の下方地盤に薬液を低圧で浸透させる浸透固化処理工法を施工した。

地盤調査から、GL-14.7m まで砂質土が分布しており、その下位には GL-37m 付近まで粘性土が分布していることが確認されている。このうち、改良対象となるのは共同溝下方 8.2m の砂質土層であり、N 値は概ね 10 を下回った。

地下水位は GL-2.7m 付近と高い位置にあり、設計段階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状況であった。

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。施工範囲は、共同溝の幅方向に最大 13.55m、延長方向に 40m、深さ方向に 8.2m である。交通量の多い交差点であるため、路面からの施工を極力避け、交差点外側に設けた 2 箇所の注入用立坑より深度方向に 4 段の水平ボーリングを行って設置した注入外管から薬液を注入した。使用した薬液は、特殊シリカ系の溶液型であった。注入は約 1.5 ヶ月間行われ、その間の地下水位は GL-2.7m 付近にあって変動せず、すべて地下水位以下での注入となった。

### 3. 材料特性

予備調査として、比抵抗トモグラフィに影響する以下

\* 東日本支社土木技術部 \*\* 技術研究所 \*\*\* 東日本支社土木第 2 部

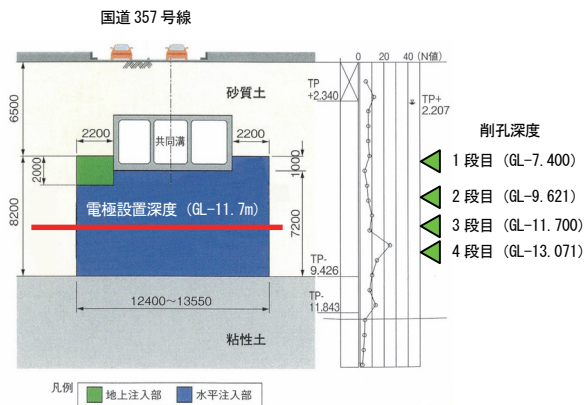


図-1 地盤調査結果と液状化対策工の施工断面



写真-1 改良地盤の比抵抗測定状況

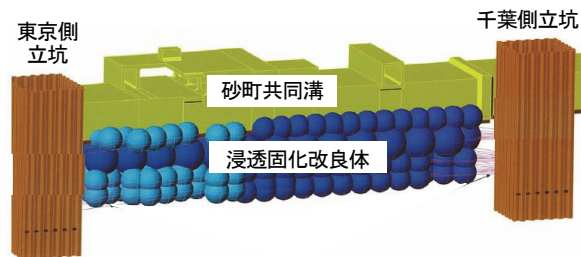


図-2 浸透固化処理工の概念図

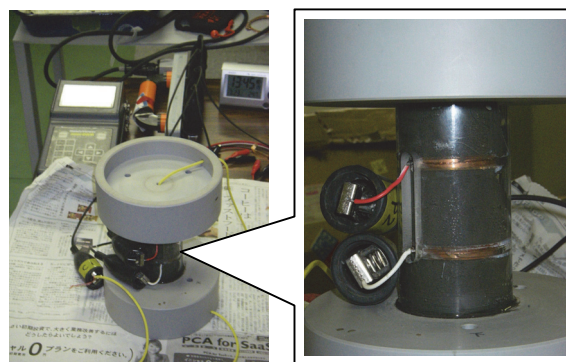


写真-2 未改良地盤の比抵抗測定状況

の3種類材料の比抵抗を測定した。

- i. 現地から採取した砂（以下、未改良地盤と称す）
- ii. 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、改良地盤と称す）
- iii. ボーリング孔内に設置する電極と地盤間を充填するために用いたセメントベントナイトを固化させたコア（以下、セメントベントナイトコアと称す）

改良地盤の比抵抗は、写真-1に示すように、コアに電極を巻付け4極法で測定した。

未改良地盤は軟弱でコアに整形できないため、写真-2に示す容器の中に試料を締め、同じく4極法で測定した。しかし、この方法では、原位置地盤の密度と含水比が容器の中で締められた試料と一致しない。一方、比抵抗あるいはその逆数の電気伝導率は、飽和度と間隙率の積である体積含水率と相関がある。そこで、容器内の試料の締め程度を変えて、そのときの密度、含水比および比抵抗を測定し、図-3に示すように、体積含水率と電気伝導率の関係を求めた。次に、地盤調査結果の含水比と密度から換算した原位置地盤の体積含水率が42.7%であったので、同図から、未改良地盤の電気伝導率を0.434S/m、比抵抗を2.3Ωmと推定した。

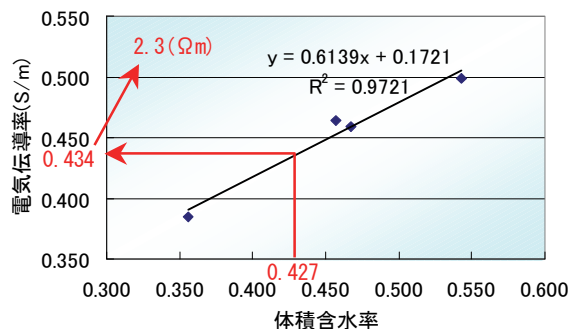


図-3 現地砂における体積含水率と電気伝導率の関係

表-1 材料の比抵抗測定結果

測定対象	比抵抗 (Ωm)
未改良地盤	2.3
改良地盤	1.0
セメントベントナイトコア	1.7

電極と地盤の接地を目的として充填するため、全ての電極に同じ電圧降下を与えると考えられること、また、比抵抗が未改良地盤と改良地盤の中間程度であるために電圧降下が測定に及ぼす影響は小さいと判断した。

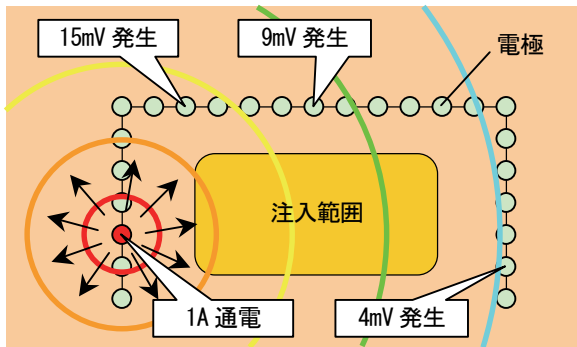


図-4 電位発生とトモグラフィ測定のイメージ

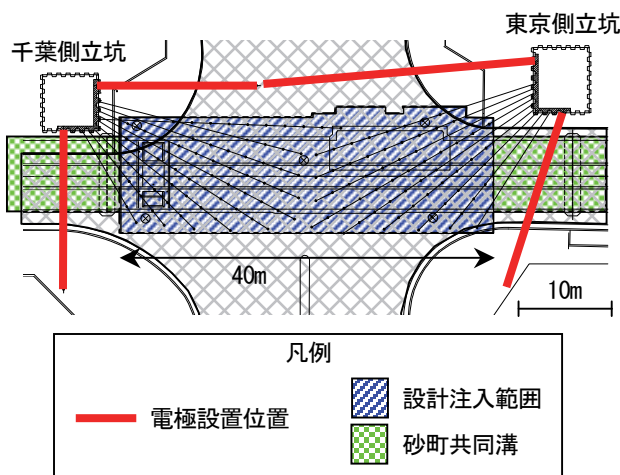


図-5 3 段目の注入用削孔配置と電極設置位置

以上のことから、注入によって比抵抗の低下した領域を特定できれば、薬液が浸透したと判定することにした。また、注入率が設計値に至ったか否かの判定は、チェックボーリングから回収したコアの成分分析結果とその位置の比抵抗変化率との相関を見て判断することにした。

#### 4. 比抵抗トモグラフィ

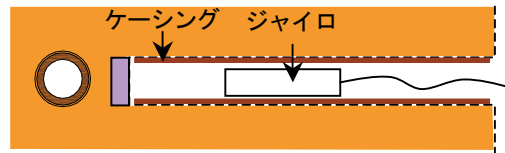
##### 4.1 概要

物理探査法の一つである比抵抗トモグラフィは、探査範囲を取り囲むように地表面やボーリング孔に設置した多数の電極を用いて、電流を流す 2 極の電流電極と電位を測る 2 極の電位電極のペアを切り替えることにより探査範囲の電位を測定し、得られた電位分布から逆解析によって地下の比抵抗構造モデルを導出する。その概念を図-4 に示すが、今回の測定で採用した 3 極法（ポール・ダイポール法）では、電流電極のうち 1 極を探査範囲から離れた電気的な擾乱の及ばない位置に遠電極として設置する。

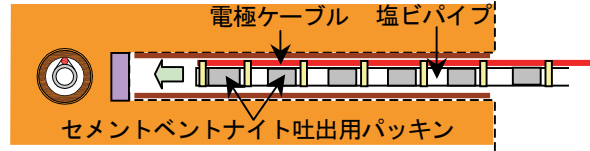
##### 4.2 電極配置

電極を設置する水平ボーリング孔の配置を図-5 に示す。ここでは、探査精度を良くするために、調査対象範

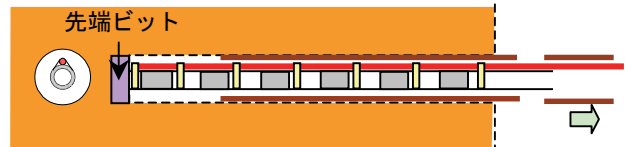
##### 1. 削孔完了後、ジャイロ走査



##### 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

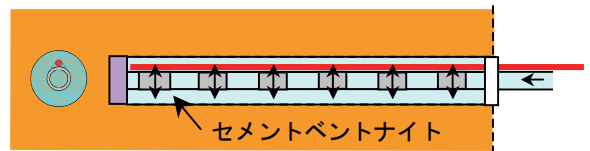


図-6 電極設置手順

囲を 3 辺で取り囲んだ<sup>1),2)</sup>。また、逆解析に際して、注入により比抵抗が低下する注入範囲とその外側のコントラストを顕在化させるため、設計注入範囲から外側に数 m 離れた位置に水平ボーリング孔を配置した。ボーリング孔内の電極間隔は 1m である。

図-1 に併記したが、電極の設置深度は、設計注入範囲の midpoint 付近である 3 段目の削孔深度と同じ GL-11.7m とした。

以上に述べた配置で、合計 75 個の電極を設置した。そのときの設置手順を図-6 に示す。なお、前述した電流速電極は、設計注入範囲から約 200m 離れた位置に接地した。

##### 4.3 地盤条件、測定条件に関する配慮

今回の探査では、砂地盤の比抵抗が小さいために改良前後の比抵抗のコントラストが大きい。また、都市部の電氣的ノイズが大きい場所での測定である。このことから、通常の測定・解析方法では改良効果の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。

- i. ノイズの多い地表での電位測定を避けるため、図-7 に示すように、地中に配置した電極のみを用いる 3 極法を採用した
- ii. 逆解析の精度を確保するため、電極の正確な設置位置を 3 次元ジャイロを用いて計測した (図-6 参照)
- iii. ボーリング孔に電極を設置するため、電極と地盤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た  
(図-6参照)

- iv. 写真-3に示すように、電極にはステンレス材を用いて腐食を防止した
- v. 図-8の模式に比較して示すように、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

#### 4.4 測定

今回の比抵抗トモグラフィでは、1回の測定に約10時間を要するため、休工期を利用して1週間毎に測定を行った。

注入前に実施した予備測定では、2極法も実施したが、地表付近の迷走電流の影響を受けて測定電位のノイズが大きく、データとして使えなかった。また、4極法は測定の組み合わせ数が膨大となり、休工期中に測定を完了できないため、適用しなかった。

### 5. 結果および考察

#### 5.1 比抵抗トモグラフィ

比抵抗トモグラフィの逆解析は杉本(1995)<sup>3)</sup>の方法で行った。ここで比抵抗変化率  $\phi$  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<sup>4)</sup>。

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

ただし、 $\rho$  : 注入前の比抵抗、 $\rho'$  : 注入後の比抵抗である。

解析結果の例として、図-9に注入開始1週間後、図-10に注入完了時の比抵抗変化率の分布を示す。図-9では、同図上段に示した注入箇所では比抵抗が低下しており、薬液注入による比抵抗の変化が現れた。図-10の注入完了時では、比抵抗低下範囲が設計改良範囲と概ね一致し、適切な範囲の注入改良が行われたと判断できる。

#### 5.2 品質確認工と比抵抗変化率の対比

図-10に併記した6箇所において品質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-11に示す。6箇所のボーリングの内、注入範囲内の5箇所(A~E)では、比抵抗変化率は6~16%程度、シリカ含有量増加分は15.0mg/g-dry前後の値を示した。これに対して、注入範囲外のFでは両方の値ともにはるかに小さく、明確な違いが認められた。

また、配合試験による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設計どおりの注入改良が行われたと判断した。注入範囲内5点のシリカ含有量増加分の値はこれを満足している。したがって、この5点の比抵抗変化率の最小

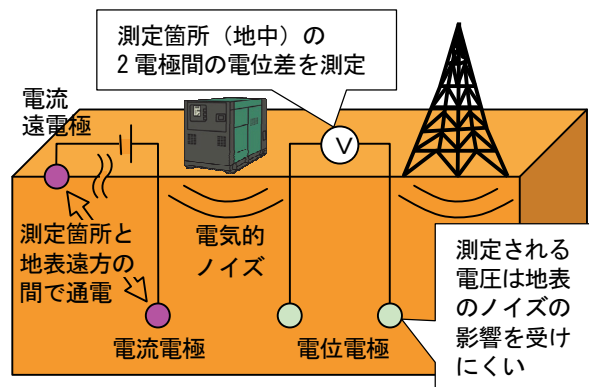


図-7 3極法による測定

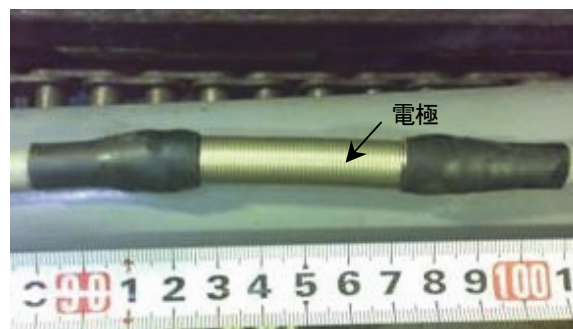


写真-3 ステンレス材を用いた電極

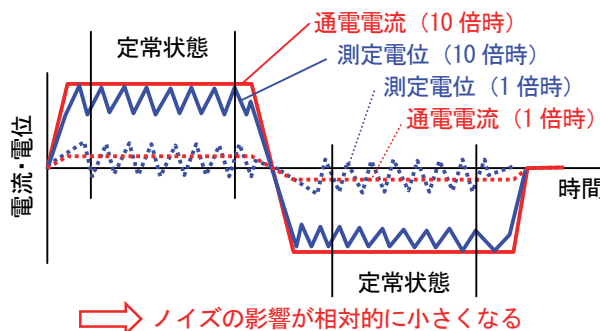


図-8 10倍通電のイメージ

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-10に、-6%の境界線を点線で併記したが、この中に設計改良範囲が含まれており、設計どおりの範囲と品質で注入改良が行われたと判断できる。

#### 5.3 比抵抗変化率の差異に関する考察

前節までの結果から、比抵抗トモグラフィによる注入改良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結果では、比抵抗変化率が最大となった注入範囲中心部付近においてもその値は-20%程度であり、3章で述べた材料レベルでの比抵抗が半分以下に低下することとは異なっている。注入完了時の共同溝中心軸(GL-11.7m)における比抵抗変化率の分布を図-



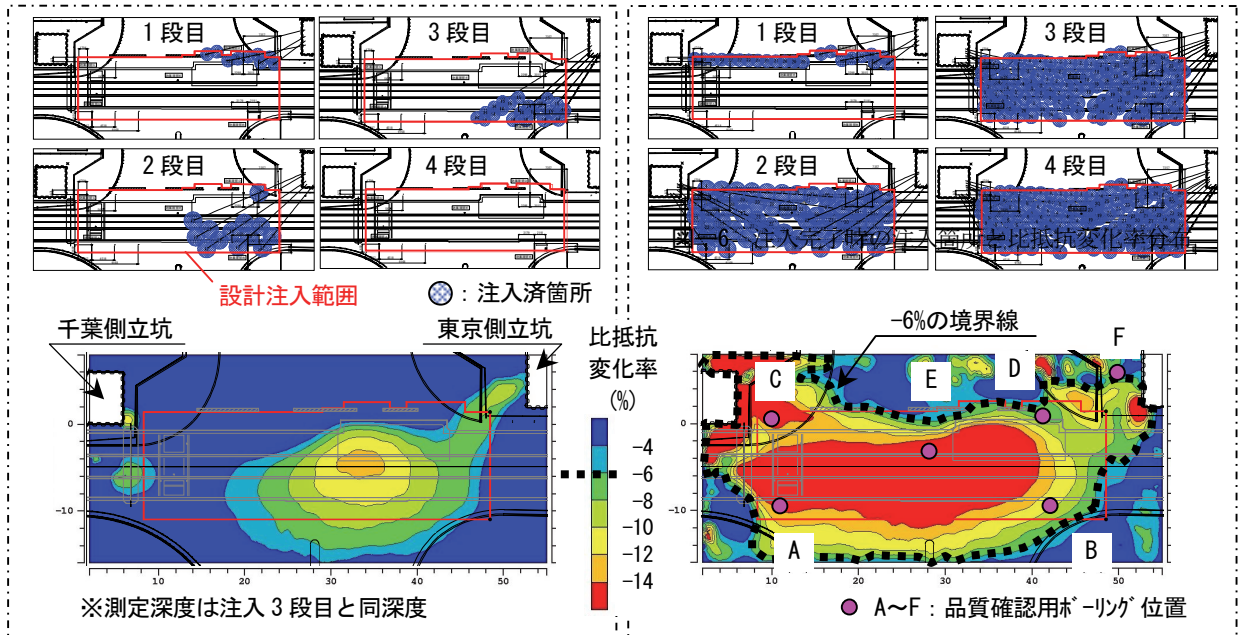


図-9 注入開始 1 週間後の注入箇所と比抵抗変化率分

図-10 注入完了時の比抵抗変化率分布

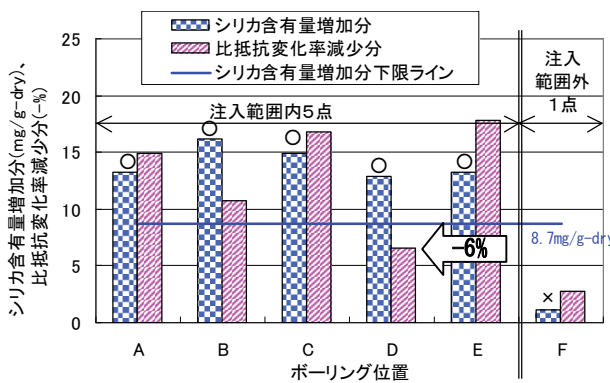


図-11 比抵抗変化率とシリカ含有量増加分の関係

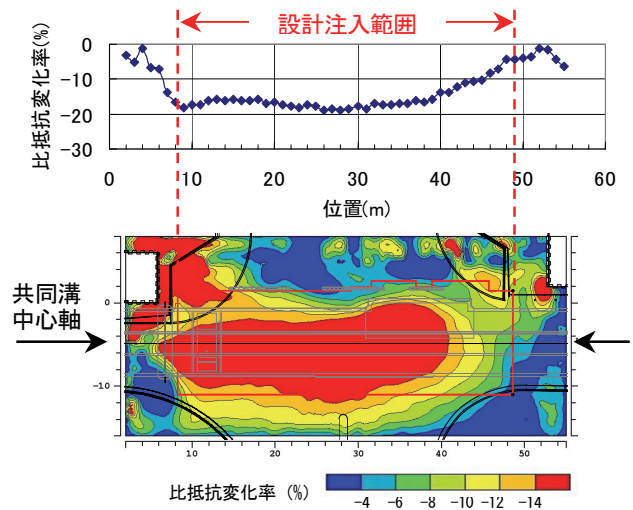


図-12 注入完了時の共同溝センターにおける比抵抗変化率

12 に示すが、比抵抗変化率は設計注入範囲全体で-20%弱であった。この理由については、次の 2 点の影響であると考え、3 次元モデルの数値解析を加えて考察した。

i. 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）には比抵抗が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、その下方の領域は比抵抗変化率が 0% である。すなわち、図-13 に示すように、改良範囲の厚みが薄い場合の測定結果を厚みが無限大のモデルで逆解析するので、比抵抗変化率が小さく現れたと考えられる。

ii. 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-14 に示すように、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、その結果は同

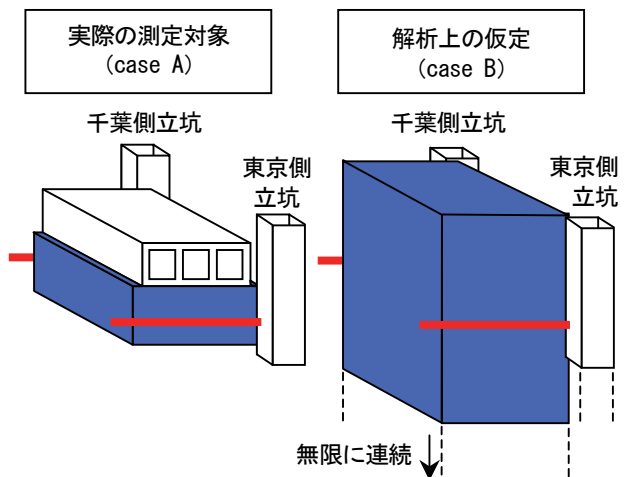


図-13 実際と解析上の仮定との違い

図のように滑らかで連続的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いうため、そのことを理解して改良範囲あるいは出来形を評価する必要がある。

上記 i、ii の検証のために、図-15 に示すように設計改良範囲を再現した 3 次元 FEM モデルを作成した。

図-13 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) を設定し、今回の通電状況を再現した理論観測電位を求め、それぞれを逆解析して比抵抗分布の変化を求めた。このとき地盤は 2Ωm、注入範囲は 50%低減して 1Ωm になるものとした。

逆解析の結果を図-16 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た。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 i の影響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分布形状は ii の影響を裏付ける結果となった。

## 6. あとがき

比抵抗トモグラフィと注入改良体の品質確認用ボーリングとの併用により注入範囲と改良効果を面的に評価できた。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の結果とその位置の比抵抗変化率との比較に基づいており、測定値のばらつきや信頼性を統計的に議論するだけのデータは得られていない。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行きたい。

### 【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.186-189、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 - 数値的検討-」、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

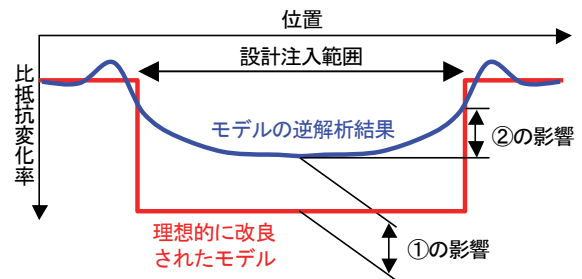


図-14 モデルと逆解析結果の違いの概念図 (改良範囲を横断する任意のライン上の比抵抗変化率)

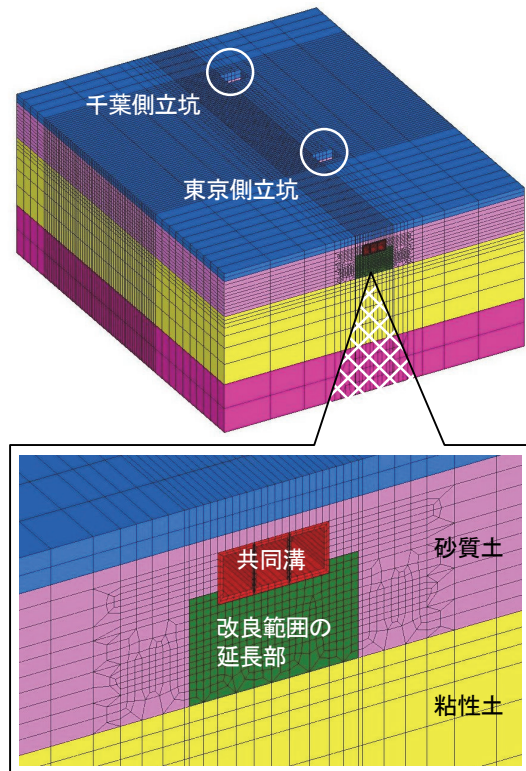


図-15 電位計算に用いた FEM モデル

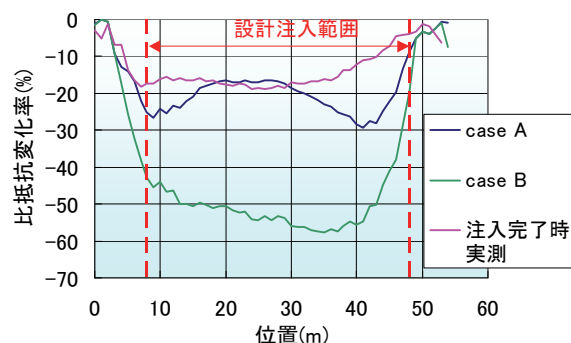


図-16 モデル計算の逆解析結果