

2021年度 博士論文

比抵抗分布のリアルタイム  
モニタリングによる薬液注入工法  
の信頼性向上に関する研究

清水 智明

東京都立大学 都市環境科学研究科  
都市基盤環境学域

# 目次

第1章 序論	...	1
1.1 研究の背景と目的	...	1
1.2 論文の構成	...	4
第2章 薬液注入工法の品質管理における現状と課題の整理	...	7
2.1 概説	...	7
2.2 薬液注入工法を取り巻く現状と課題	...	8
2.2.1 薬液注入工法の現状	...	8
2.2.2 本論文で扱う薬液注入工法の範囲	...	12
2.2.3 薬液注入工法の現状における課題	...	14
2.2.4 第一の課題（注入中の注入状況の把握）の現状	...	18
2.2.5 第二の課題（注入後の水みちの位置検知）の現状	...	25
2.3 比抵抗トモグラフィを取り巻く現状	...	27
2.3.1 比抵抗トモグラフィの位置付けと経緯	...	27
2.3.2 比抵抗トモグラフィの解析法に関する既往の研究	...	29
2.3.3 比抵抗トモグラフィを薬液注入工法の改良範囲評価に用いた既往の研究	...	29
2.3.4 比抵抗トモグラフィの適用事例	...	30
2.4 リアルタイムモニタリングにおける問題点と対応方針	...	34
2.4.1 リアルタイムモニタリングに関する既往の研究	...	34
2.4.2 比抵抗分布のリアルタイムモニタリングにおける問題点	...	35
2.5 第2章のまとめ	...	38
第3章 リアルタイムモニタリングのための新しい逆解析方法の提案	...	39
3.1 概説	...	39
3.2 比抵抗トモグラフィによる薬液注入範囲の評価方法の基本原則	...	40
3.2.1 比抵抗トモグラフィの基本原則	...	40
3.2.2 薬液注入範囲の評価方法の基本原則	...	40
3.3 時系列解析法	...	43
3.3.1 問題点の解決方法	...	43
3.3.2 変数の説明	...	44
3.3.3 比抵抗トモグラフィの従来解析法	...	44
3.3.4 比抵抗トモグラフィの時系列解析法	...	46
3.4 数値実験による時系列解析法の基本性能の検証	...	55
3.4.1 数値実験の概要	...	55
3.4.2 数値実験の方法	...	55
3.4.3 塩水濃度と地盤の比抵抗の関係	...	59
3.4.4 数値実験結果	...	61
3.4.5 精度の検証	...	61
3.4.6 時間ステップの設定方法	...	65
3.4.7 時系列解析法の各特徴の必要性の検証	...	65
3.4.8 既往の解析法との比較	...	68
3.4.9 数値実験のまとめ	...	70

3.5 第3章のまとめ	...	71
第4章 リアルタイムモニタリングによる薬液注入の改良範囲の評価	...	72
4.1 概説	...	72
4.2 模型実験による時系列解析法の有効性の実証	...	74
4.2.1 目的・概要	...	74
4.2.2 模型装置	...	76
4.2.3 模擬地盤の作成	...	77
4.2.4 注入方法	...	77
4.2.5 電位測定方法	...	78
4.2.6 塩水濃度の設定（予備実験—1）	...	81
4.2.7 密度流の影響（予備実験—2）	...	81
4.2.8 採水からの比抵抗の換算方法（予備実験—3）	...	83
4.2.9 模型実験の導電率測定結果	...	83
4.2.10 逆解析方法の精度の比較検討	...	86
4.2.11 現実的な電極配置での精度の比較検討	...	91
4.2.12 一様な浸透注入が行われない場合の実験	...	92
4.2.13 ノイズの特性に関する分析	...	99
4.2.14 模型実験のまとめ	...	101
4.3 薬液のゲル化が改良地盤の電気伝導特性に及ぼす影響についての検討	...	103
4.4 時系列解析法を用いたモニタリング方法の提案	...	105
4.5 第4章のまとめ	...	107
第5章 注入不良により生じた水みちの末端位置の検知	...	108
5.1 概説	...	108
5.2 水みち末端位置の検知の基本的な考え方	...	110
5.3 水みち末端位置検知の検証実験	...	112
5.3.1 実験目的	...	112
5.3.2 実験土槽の概要	...	112
5.3.3 実験方法	...	114
5.3.4 電位測定の方法	...	115
5.3.5 使用材料の比抵抗に関する特性	...	116
5.3.6 観測値の履歴	...	119
5.3.7 逆解析の方法	...	120
5.3.8 逆解析の結果	...	123
5.3.9 水みち末端位置の検証	...	125
5.3.10 移流拡散解析との比較	...	126
5.3.11 条件変化に対する考察と残された課題	...	128
5.3.12 土槽実験のまとめ	...	129
5.4 検知方法の実大シミュレーションによる実用検討と適用限界	...	130
5.4.1 シミュレーションの目的・位置付け	...	130
5.4.2 検討手順	...	130
5.4.3 シミュレーションモデルの設定	...	130
5.4.4 変化させるパラメータの選定	...	133
5.4.5 検討ケースの設定	...	136
5.4.6 移流拡散解析の方法	...	138
5.4.7 静電場 FEM 解析の方法	...	138

5.4.8 逆解析の方法	…	138
5.4.9 水みち末端位置の同定方法	…	139
5.4.10 適用限界の評価方法	…	142
5.4.11 シミュレーションの結果	…	143
5.5 水みち末端位置検知方法の提案	…	148
5.6 第5章のまとめ	…	150
第6章 結論と今後の研究展望	…	151
6.1 本研究のまとめ	…	151
6.2 今後の研究課題	…	153
参考文献	…	155
本研究に関して発表した主な論文	…	161
謝辞	…	162
付録A 移流拡散解析に使用する物性値の設定	…	付-1
付録B 比抵抗の換算方法	…	付-11



## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景と目的

通常、地盤の間隙は、飽和地盤であれば地下水で、不飽和地盤であれば地下水と空気であらわされている。そこで、ボーリング等で設置した注入管を通して、固まる時間を数秒から数時間の間で調整できる注入材料を注入し、土粒子の間隙を埋めることで、地盤の強度や遮水性を高める工法を一般に薬液注入工法という。薬液注入工法は地盤改良工法の1つであり、使用する設備が比較的簡易であることから多様な場面で活用されている。適用場面により、強度が求められるケース、遮水性が求められるケース、両方が求められるケースがある。

シールド工法や推進工法では発進到達防護に薬液注入が施工されることが多い。とりわけ近年では切削可能部材の普及により、立坑の側壁を切除して鏡面を開放しなくても発進到達できるようになってきた。その結果、地盤改良に大きな強度を必要とせず遮水性さえ確保できればよいケースが増えてきたため、攪拌混合工法のような大きな強度を担保する剛性の高い高価な地盤改良ではなく、比較的安価な薬液注入工法を適用できるケースが増えてきている。また、近年増えてきたシールドトンネルの非開削地中接合でも薬液注入は簡便に地山に遮水性を付与できるツールとして活用場面が今後増えてくると考えられる。

一方、開削工事でも床付面の盤ぶくれ対策やボーリング対策等で薬液注入が行われることが多い。これらの仮設工事としての用途に加えて、近年では液状化対策のような本設工事にも活用領域を広げつつあり、その重要性が増している。

しかし、薬液の注入は地下での事象であるため、注入効果の確認が難しく、計画範囲内の地盤を一様に改良することに対して不確実性を伴うことが薬液注入工法の難点となっている。これは、地盤内の浸透現象に依拠した工法であるため、地盤内の水みちや注入管と地盤の間隙に沿って薬液が逸走したり、障害物となる巨礫や介在粘土層等で浸透が阻害されることで背後にある砂質土まで薬液が到達できずに注入不足や偏りが生じることが一様に改良できない場合の主たる原因と考えられる。注入効果の確認不足により出水・崩壊した事例は近年になっても発生しており、注入効果を確認することは品質管理上の重要事項である。

従来の注入効果の確認では、ボーリングを行い、回収したコアの強度試験や成分分析等から判定されるが、いずれも確認範囲が点や線であり、判定の結果、合格したとしても未改良箇所が残るリスクがある。また、遮水性の直接的な確認手法としては、注入孔を利用した注入試験などがあるが、通常は漏水の有無が確認できるのみであり、仮に漏水が検知できても、未改良箇所を特定することはできないため、どこを補強すればいいのか分からないなど問題も多い。そのため、これまでの実施工では、このようなリスクは改良厚を厚くすることで対処されてきたが、その設計法は経験的なものであり、不経済であるばかりでなく、上記の水みちや介在粘土層等の規模が把握出来ない以上、根本的な解決にはなっていない。この問題の解決には大きく2つの課題がある。

第一の課題は注入状況をリアルタイムに監視することである。大規模な未改良箇所の発生は強度、遮水性のいずれの確保にも影響することから、防止する必要がある。薬液注入の施工範囲全体の改良状況をリアルタイムに精度良く捉えることができれば、未改良箇所発生のリスクを大幅に低減できる。そのための手法として、注入範囲を点や線ではなく、面で評価することが可能な比抵抗トモグラフィは有望である。本研究では比抵抗トモグラフィによる比抵抗のリアルタイムモニタリングを薬液注入工法の施工管理・効果確認に活用することを検討する。

比抵抗トモグラフィは対象領域の比抵抗の分布を推定する物理探査の1つであり、土木分野でも山岳トンネルの地下水調査<sup>1)</sup>、グラウトの効果判定<sup>2)</sup>などに対して適用されてきた。比抵抗は土粒子固有の導電性のみならず、飽和度、含水比、間隙水の導電性など多くのパラメータに影響を受けるため<sup>3)</sup>、単一の結果から解釈を得るのがやや難しい側面もある。しかし、含水比の変化等に敏感に反応するために、地盤の状態変化を捉えるうえでは弾性波探査等、他の物理探査にはない利用価値がある。

地盤の比抵抗は前述のように多様な特性に影響を受けるため、比抵抗分布そのものから注入範囲を評価することは困難であるが、一般的な傾向として、薬液を注入した後に地盤の比抵抗は低下するため、注入の前後で比抵抗トモグラフィを行い、比抵抗変化率から注入範囲を評価する方法が有効である<sup>4)5)6)</sup>。この方法は従来から検討されてきたが、現状では施工管理として用いられるのではなく、あくまで参考程度の確認行為として用いられることが多い。また、いずれも定性的評価にとどまっている。

第二の課題は、改良体内部に潜在する水みちの検知である。前述のように、薬液注入に期待するのは強度と遮水性の向上であるが、強度のみを確保する場合には改良体のマクロな強度が基準値を上回っていれば要求品質を確保でき、局所的な注入不良は問題となりにくい。この点に対し、遮水性を確保する場合、注入不良により1本貫通した水みちが潜在するだけで遮水性が確保できなくなる恐れがあることから、より性能確保が難しいのは遮水性の方である。このため、遮水性は第一の課題を解決するだけでは確保できない恐れがあり、第二の課題を解決する必要がある。さらに、注入完了後の改良体に対して遮水性を確保するためには、水みちの有無のみならず、水みちがあればその位置を特定し、補足注入を行う必要がある。前述のように比抵抗トモグラフィでリアルタイムに注入状況を監視できるようになれば、改良体に大きな注入不良が生じるのを防げるようになることが期待できる。しかし、比抵抗トモグラフィの電極ピッチは一般に1m程度であり、それ以上の分解能は原理上得られない。このため、数cmから数十cmオーダーの小さい水みちは検知されずに残る可能性があり、遮水性を担保するためには、上記の注入時の管理とは別に注入完了後に遮水性を確認し、もし水みちが残っていれば、その末端の位置を検知し、補足注入を行うことが必要となる。本研究では、この第二の課題についても比抵抗のリアルタイムモニタリングを行う。低比抵抗のトレーサーを注水し、水みちから漏出したトレーサーを比抵抗の低下として捉える。

以上より、本研究では、これら2つの課題に対し、比抵抗分布のリアルタイムモニタリングを活用して注入範囲や水みちの位置を把握することで注入不良を抑制し、薬液注入工法の信頼性向上に寄与することを目的としている。

## 1.2 論文の構成

本論文の構成をフローチャートで図-1.2.1に示す。

第1章は序論で、研究の背景、目的を述べ、論文構成を明らかにしている。

第2章では、薬液注入の品質管理における現状を整理し、本論で取り組む課題を整理した。本研究は、薬液注入の品質管理に比抵抗トモグラフィによるリアルタイムモニタリングを用いることを特徴としている。薬液注入と比抵抗トモグラフィはそれぞれが独立した分野であることから、それぞれの現状を整理し、取り組むべき課題、本研究の新規性を明確にする。

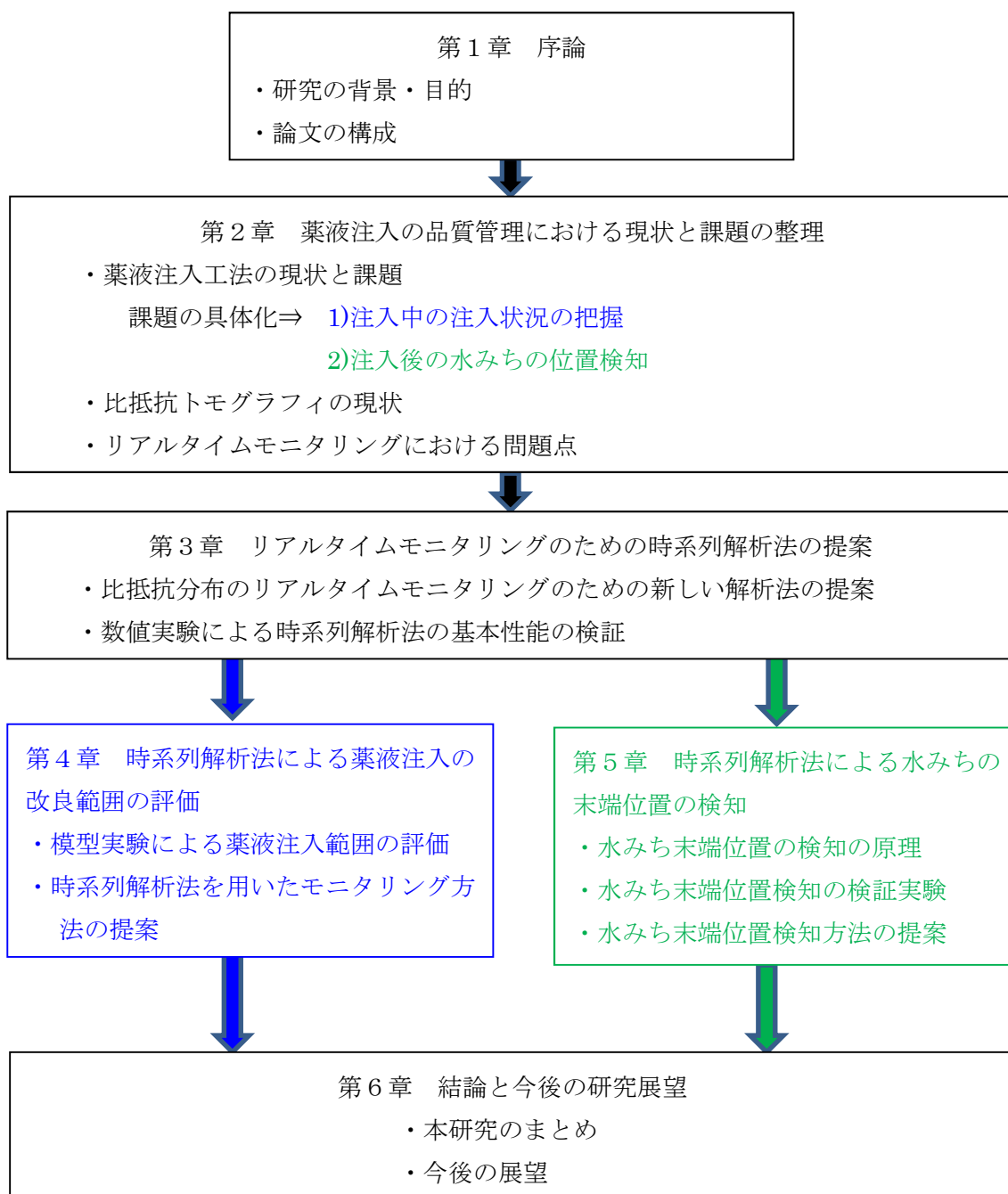
第3章では、比抵抗分布が時々刻々変化する状況において精度よく比抵抗分布を求める逆解析方法を述べる。本研究では、2章で述べた2つの取り組むべき課題に対して、いずれも比抵抗のリアルタイムモニタリングを行うが、リアルタイムモニタリングでは、測定中に比抵抗分布が時々刻々変化するため、通常の比抵抗トモグラフィで用いられている逆解析方法では精度低下の懸念がある。このため、精度低下の抑制を期待できる新たな逆解析法（以下、時系列解析法）を考案した。そして、数値実験による時系列解析法の基本性能の検証を行い、時系列解析法が従来の解析法より正確に正解の比抵抗分布を再現できることを示す。

第4章では、第一の課題である、注入中並行して行う比抵抗分布のリアルタイムモニタリングによる注入範囲の推定精度向上に向けた取り組みを述べる。数値実験では、ランダムノイズの影響を考慮しているものの、理想化された条件での検証であるため、実際に実施してみると予期せぬ不具合が生じる事もある。そのため、時系列解析法を用いれば薬液の浸透状況を従来の方法より精度よくモニタリングできることを模型実験により検証する。模型実験では想定通りの注入が行われるケースに加えて、想定通りに注入が行われず、計画範囲の一部が未改良のまま残るケースも行っており、時系列解析法がどちらのケースでも実際の注入状況を精度良く把握でき、注入中の改良範囲の評価が可能であることを示す。最後にこれらの検証結果を踏まえた実用上の手順を提案する。

第5章では、第二の課題である改良体の遮水性の確保、すなわち水みちの有無とその位置検知に向けた取り組みを述べる。初めに水みちを検知する原理を説明し、それを踏まえた土槽実験の結果を述べる。また、実験は一通りの条件のみで行ったため、諸条件（元地

盤の透水係数、元地盤の間隙水の導電率、水みちと電極設置位置の関係)が変化したときの適用性を数値実験によるパラメータスタディで検討した結果を述べる。最後に実験結果を踏まえた水みち末端位置の検知の実用上の手順を提案する。

第6章では、各章で得られた結論を取りまとめ、本研究の結論を述べるとともに、残された課題を明らかにする。



凡例

黒文字部分：共通の記載事項

青文字部分：第一の課題に関する記載事項

緑文字部分：第二の課題に関する記載事項

図-1.2.1 本論文の構成

## 第2章 薬液注入工法の品質管理における現状と課題の整理

### 2.1 概説

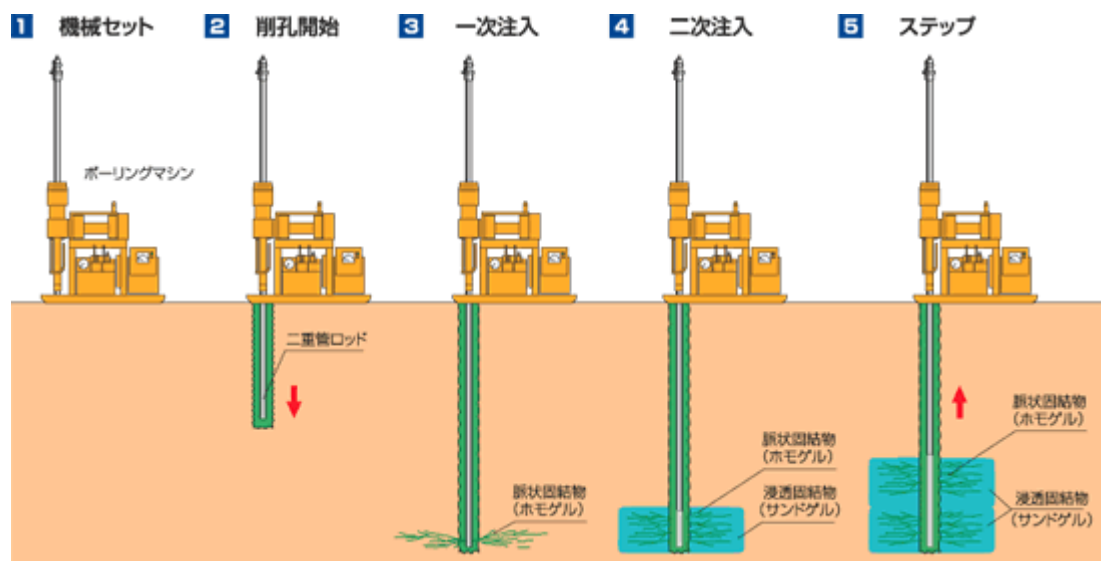
本章では、薬液注入工法の品質管理における現状を踏まえ、課題を整理し、本研究で取り組む課題とその位置づけを明確にする。

薬液注入工法の歴史は古く、最初の薬液注入工法が行われてから約 200 年が経過しており、工法は確立されている。しかし、いまだに多くの課題を抱えており、それらを一度に解決するのは不可能である。そこで、2.2 では、薬液注入工法の現状を踏まえ、これら課題を整理する。そして、本研究で取り組む2つの課題を明確にし、それらの現状を述べる。次に 2.3 では課題解決のための手法として使用する比抵抗トモグラフィの現状を述べる。2.4 では、リアルタイムモニタリングに関する現状を述べる。そして、それを実施するうえで新たに生じる問題点を述べ、新しい解析方法の開発の必要性を説明する。2.5 は2章のまとめである。

## 2.2 薬液注入工法を取り巻く現状と課題

### 2.2.1 薬液注入工法の現状

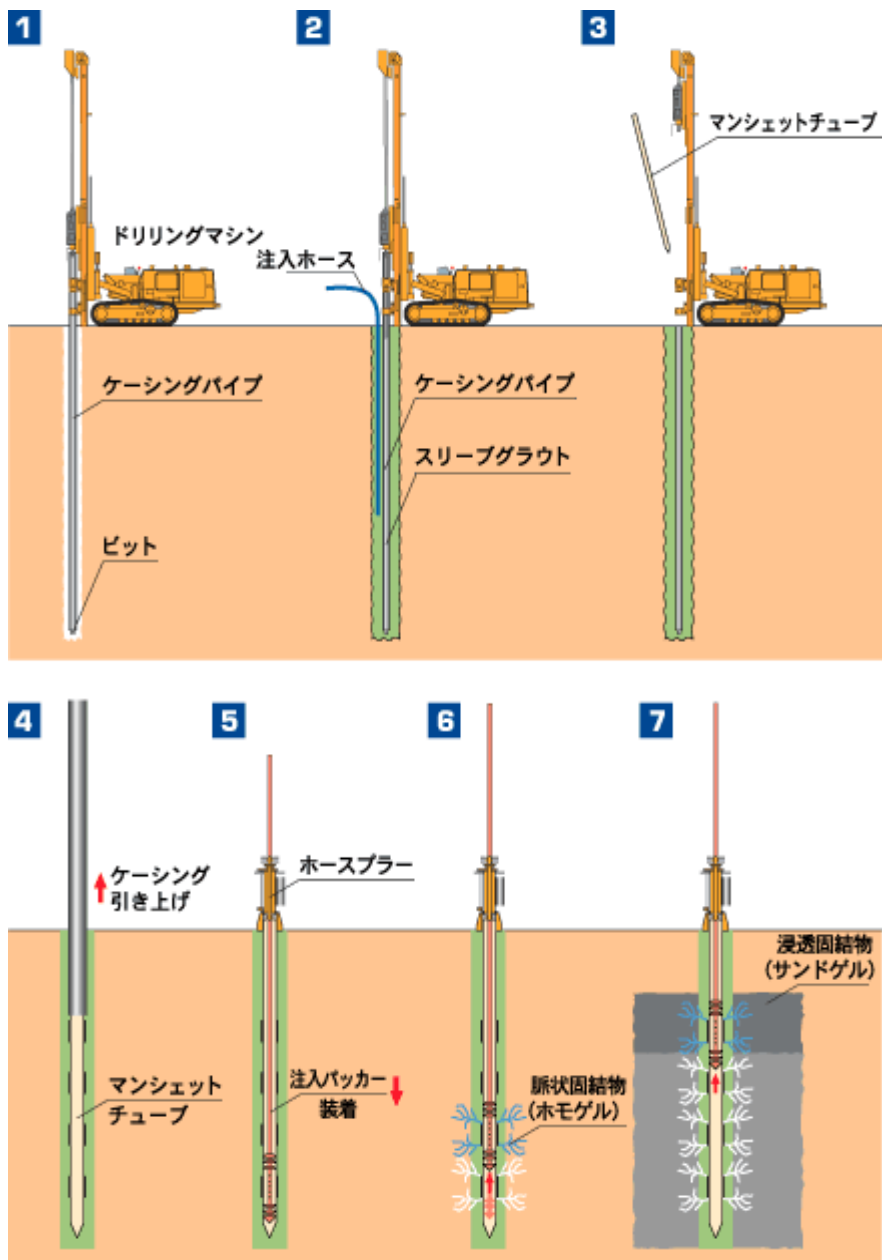
薬液注入工法は施工会社各社で様々な工法が開発されているが、大別すると、二重管ストレーナー工法と二重管ダブルパッカー工法に分けられる。それぞれの代表的な施工方法を図-2.2.1 に示す。図のように、二重管ストレーナー工法では、削孔と注入が1本のロッドで行われるため、施工が簡便であるのに対し、二重管ダブルパッカー工法では、パッカーで注入位置を制御するため、任意の注入孔の順序で注入できる。施工条件に合わせてこれらを使い分けているのが現状である。



- (1) 5.5kW 級のボーリングマシンをセットする。
- (2) 直径 40mm の二重管を用いて削孔。
- (3) 改良範囲最下端深度まで削孔完了。
- (4) 一次注入として、瞬結性注入材料を注入し、管回りの閉塞と地山の粗詰め処理を行う。
- (5) 二次注入として、ゲルタイムの長い長結性注入材を用い、地山の間隙への浸透注入を行う。
- (6) ステップアップし、一次注入+二次注入を行う。以降、改良範囲最上端深度まで(4)(5)を繰り返す。

(a)二重管ストレーナー工法<sup>8)</sup>





- (1) 高性能の削孔機を用いて 100mm 前後のケーシングにて所定深度まで削孔する。
- (2) ケーシング内にスリーブグラウトを充填する。
- (3) スリーブグラウト充填後マンシエツチューブを建て込みケーシングを引き抜く。
- (4) マンシエツチューブの中にダブルパッカーを装着した注入パイプを建て込み一次注入を行う。
- (5) 一次注入完了後、低粘性にて浸透性に富んだ注入材を注入し、土粒子間浸透を行う。

(b)二重管ダブルパッカー工法<sup>9)</sup>

図-2.2.1 代表的な薬液注入工法

次に、薬液注入工法を用途の面から整理してみる。用途の分類は図-2.2.2 のように表せる。大別して本設注入（恒常的な改良）と仮設注入（施工時の一時的な改良）がある。

本設注入は構造物の基礎における液状化対策のために施工されることが多い。液状化対策として施工する場合、地下水位の高い緩い砂地盤に立地する構造物の直下に注入を行い、地盤中の間隙水を薬液に置換することで過剰間隙水圧の上昇を抑制して液状化の抑制を図る。改良範囲は構造物の接地範囲を包括する領域が設定され、深度方向の改良範囲は基本的には液状化層となる。本設注入では耐久性を高めた恒久薬液を使用する。

一方、仮設注入では、シールド工法の発進到達部や分岐合流部、あるいは開削工法における底盤の止水、土留め欠損部の補強、さらには山岳トンネルにおける切羽安定など、多様な場面で採用されている。

シールド発進到達部では、鏡切後の露出地山の安定、止水を目的として行う。また、これらの立坑にライナープレート工法を用いる場合、地下水位以深には予め立坑外周に薬液注入工法を施工する。

開削工法では、地中埋設物との干渉のために土留壁が施工できない欠損部や近接施工対策として変位抑制のために掘削側地盤に実施されることがある。また、パイピングやヒーピング等、底盤の安定が問題になる場合には底盤改良として薬液注入工法が行われる。

近年、地上用地の制約からシールド工法により施工された大規模道路トンネルの分岐合流部を非開削工法により地中で接合することが行われている。2本のシールドトンネルを繋ぐために、両トンネルを包含する支保構造を構築した後に、もしくは構築しながら支保構造の内部を掘削し、接続部分のセグメントを取り除いて両トンネルを繋ぐ切り開き作業を行う。内部掘削を行う際にはこの支保構造だけで遮水性を担保するのは難しく、支保構造の外周に地盤改良を行う。このとき、地盤改良としては凍結工法や薬液注入工法等が採用される。

以上のように、薬液注入工法は本設・仮設を問わず様々な建設工事において採用されて実績を増やし、さらに近年ではその用途が多様化し、ニーズが増加し続けている。

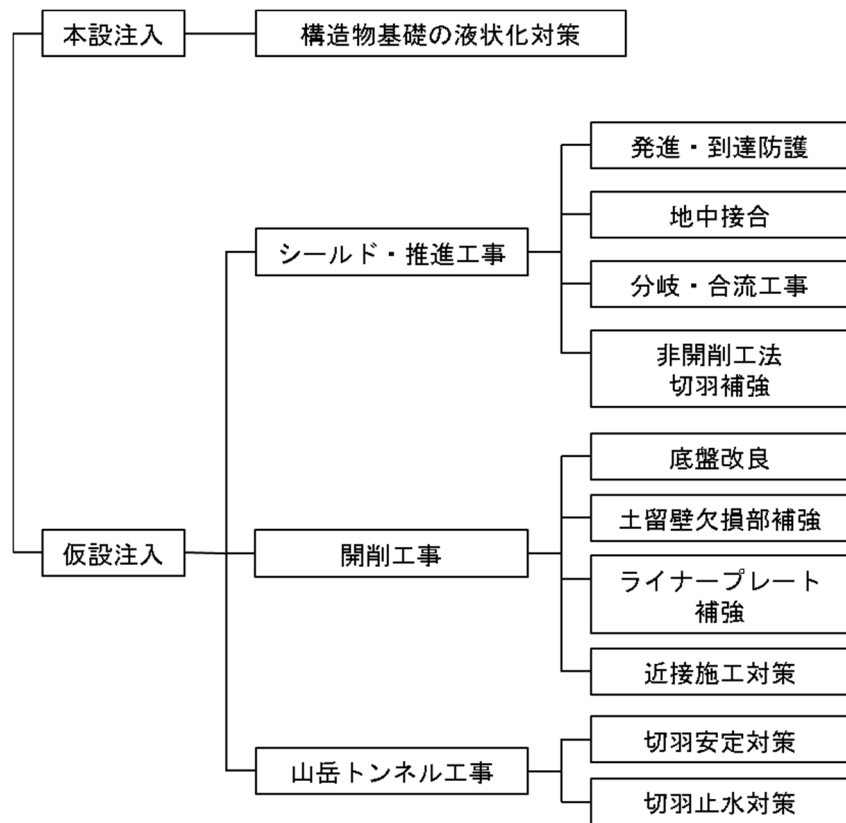


図-2.2.2 注入工法の用途分類

## 2.2.2 本論文で扱う薬液注入工法の範囲

薬液注入工法に限定せず、広く地盤注入工法を材料で分類すると、図-2.2.3 のように表せる<sup>9)</sup>。大別すると薬液系と非薬液系に分類される。非薬液系の多くはセメントやスラグを使用したものであり、ダム基礎のカーテングラウト、トンネルの裏込グラウトが代表例である。非薬液系の代表例であるセメント懸濁液は水和反応で固結する性質を利用するものであり、長期的に比較的高い強度が得られる反面、粘性等の影響により侵入できる空隙の大きさに限界があるため、図-2.2.4 に示すように適用可能な土質が限定されている<sup>10)</sup>。一方、薬液系には水ガラス系、特殊シリカ系、高分子系がある。このうち、高分子系は薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針<sup>11)</sup>により使用が禁じられており、実質的に使用可能なものはそれ以外の2種類である。水ガラス系は主に仮設用途で使用され、

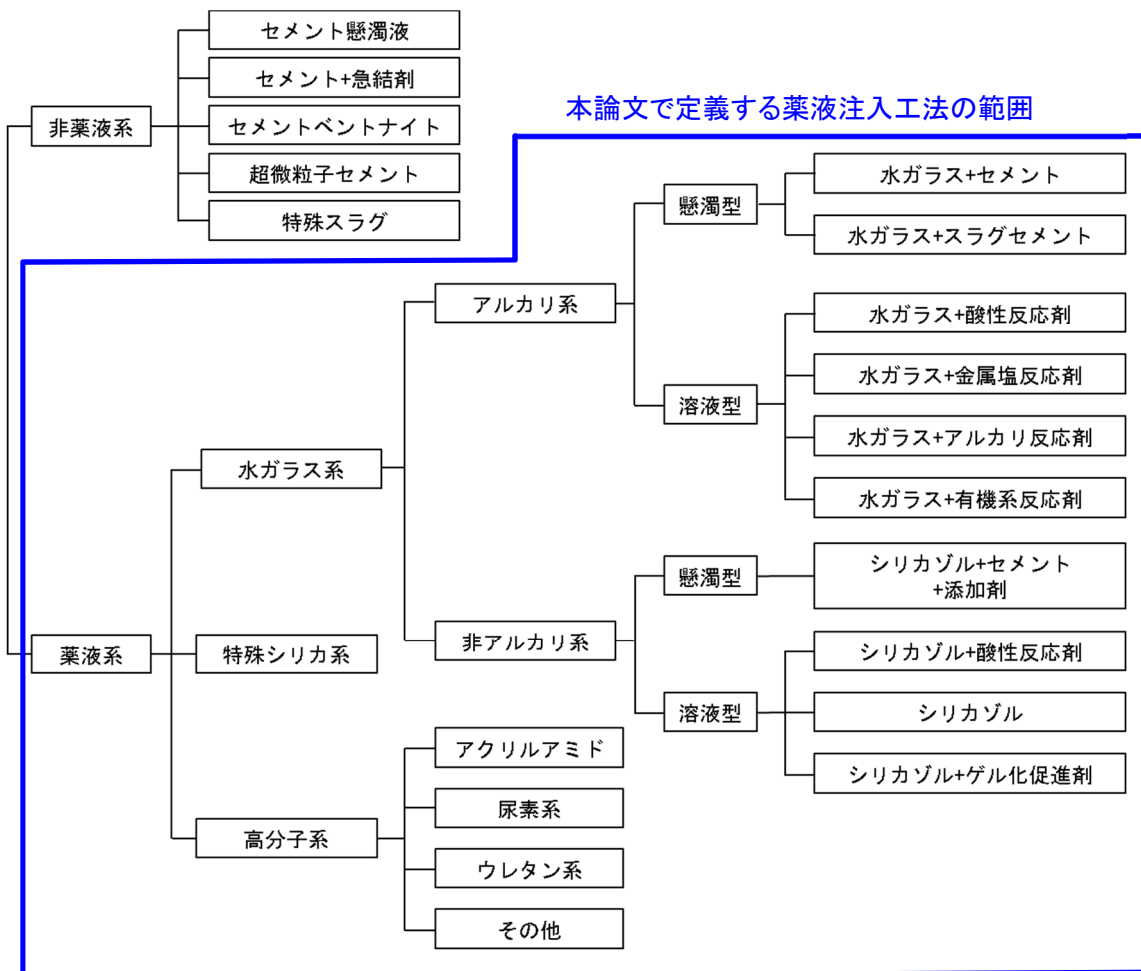


図-2.2.3 注入材料の分類<sup>9)</sup>

広く汎用的に用いられている。特殊シリカ系は溶脱の原因であるアルカリ成分を取り除いたもので、恒久薬液として液状化対策等に使用されることが多い。薬液系の注入材は適用可能土質が非薬液系に比べて広く、ゲルタイムを制御しやすいため注入範囲を制御しやすいという利点がある。反面、基本的には溶脱するため、長期的には効果が減少する。また、高価であり、低強度である。

薬液注入工法は、通常、薬液系の注入材を使用した地盤注入と定義されるので、本論の取扱い対象も薬液系注入材とする。即ち、本論文で取り扱う薬液注入工法とは、透水係数  $10^{-5}$  m/sec 程度以上の未固結砂質土を二重管ストレーナー工法等の一般的な浸透注入を行う工法で薬液系の注入材を地盤内に注入する工法である。

グラウト		土質		礫	2.000	粗砂	0.500	中砂	0.250	細砂	0.075	シルト	0.005	粘土
懸濁液	セメント	[Bar chart showing permeability range for cement]												
	ベントナイト	[Bar chart showing permeability range for bentonite]												
半濁液	不安定水ガラス	[Bar chart showing permeability range for unstable water glass]												
	水ガラス系	低粘度	[Bar chart showing permeability range for low viscosity water glass]											
		高粘度	[Bar chart showing permeability range for high viscosity water glass]											
土質	粒径(mm)	5.000, 1.000, 0.100, 0.010												
	透水係数 (m/s)	$10^{-3}$ , $10^{-4}$ , $10^{-5}$ , $10^{-6}$ , $10^{-7}$												

- 1.電電会社の「基準・標準」をもとにして作成したものである。
- 2.--- は特にゲルタイムが長い場合である。
- 3.土質による浸透可能限界は、注入材の種類、ゲル化時間のほかに施工法とも大きな関係がある。

図-2.2.4 注入材の土質に対する浸透性能<sup>10)</sup>

### 2.2.3 薬液注入工法の現状における課題

ここでは、薬液注入工法の現状を踏まえ、本研究で取り組む課題を明らかにする。

薬液注入工法と競合しやすい類似技術としては、噴射攪拌、機械攪拌をはじめとした攪拌混合工法がある。これらを表-2.2.1にて比較した。薬液注入工法は他の技術に比べて簡易な設備で施工できるため、単価が安く、施工に必要な面積が比較的少なく、工期が短いといった点で優位性がある反面、薬液の浸透現象に依拠した工法であるために適用土質が限定され、シルトや粘性土のような透水係数の低い土質には適用が難しい。さらに、確実性の面で攪拌工法に劣る。攪拌混合工法の場合、現場の地山と固化材を攪拌するため、オーガーやトレンチャーのような比較的大型の機械が必要となったり、噴射設備が必要となるため、適用可能土質が比較的広い反面、単価がやや高めである。したがって、薬液注入工法の確実性を高めることは競合技術に対する優位性を確保するうえでの重要課題である。

以上を踏まえ、現状の薬液注入工法における課題を整理する。国土交通省港湾局では平成 28～29 年度にかけて「埋立地等における薬液注入工法による地盤改良工事に関する検討委員会」を立ち上げ、薬液注入工法においてより適切な地盤評価方法、施工管理方法、施工確認方法に関する技術的検討を行っており、その中で課題が抽出された<sup>12)</sup>。

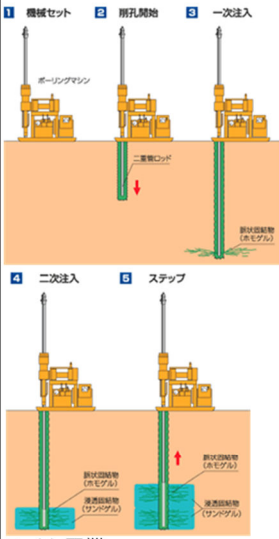
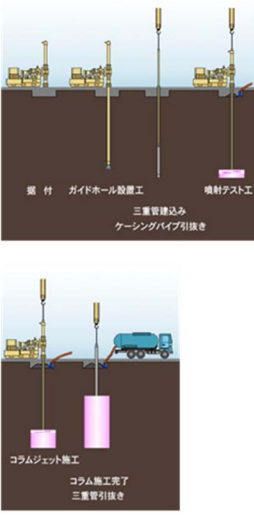
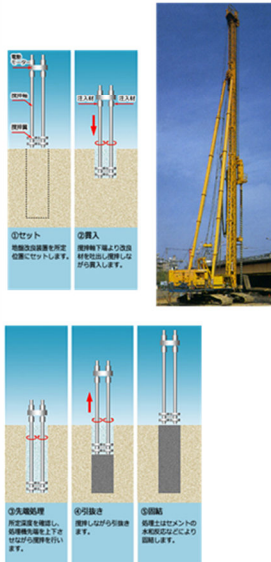
一方、日本薬液注入協会<sup>13)</sup>でも薬液注入の課題が整理されている。

これらを要約すると、薬液注入工法で生じる問題およびその原因は以下の 7 点になると考えられる。

- 課題 1. 地盤調査等、事前調査不足に起因する改良体の品質不良の発生
- 課題 2. 材料品質のばらつき、およびその管理不足に起因する改良体の品質不良の発生
- 課題 3. 施工時、および施工後に注入状況を把握する技術に限界があることに起因する改良体の品質不良の発生
- 課題 4. 地下水の水質汚染
- 課題 5. 近接施工に起因する既設構造物の性能低下
- 課題 6. 適用土質が限定される
- 課題 7. 改良体の強度が他の地盤改良工法に比べて比較的小さい

課題1. ～課題3.は品質不良に関わる課題であり、具体的には以下のようなことである。  
薬液注入工法は浸透現象に依拠した工法であるために他の工法に比べてやや確実性が低い  
にもかかわらず、注入状況を確実に把握できない。例えば、砂質土の地盤に粘性土が挟在

表-2.2.1 類似技術の比較

	薬液注入工法	高圧噴射攪拌工法	機械攪拌混合処理工法
概要	<p>注入薬液を地盤中に注入管より注入し、薬液が固化することにより透水性を減少させたり、地盤強度を増加させる工法</p>  <p>ライト工業 マルチライザー工法HPより</p>	<p>改良材・空気を併用して、地盤中に回転して噴射させ地盤を切削し、そのスライムを排出させるとともに硬化材を同時に充填し、円柱状の固結体を造成する工法</p>  <p>小野田ケミコ CJG工法HPより</p>	<p>アースオーガー工法の施工手順で削孔を行い、貫入時あるいは引抜時にスラリーまたは粉体の改良材を注入し、攪拌翼によって機械的に土と改良材を混合攪拌して土質性状を改良する工法</p>  <p>CDM研究会HPより</p>
改良強度	改良強度は低い	改良強度は比較的高い	改良強度は比較的高い
耐久性	仮設目的：長期的には溶脱する 本設目的：耐久性を有する	耐久性を有する	耐久性を有する
土質の適用性	適用土質が限定される	硬質地盤以外は施工可能	硬質地盤以外は施工可能
施工の確実性	水みち等で注入不良が生じる恐れがある（浸透現象のため不確実性が伴う）	確実性が高い	確実性が高い
施工設備等	比較的狭いヤードで簡易な設備で施工可能	大規模なプラントと広い用地を要する	大規模なプラントと広い用地を要する
コスト	仮設目的：安価 本設目的：やや高価	やや高価	やや高価
工期	短い	やや長い	やや長い
その他	近接構造物・埋設管を巻き込んでの施工がある程度可能	地中障害物の背面は施工不可	近接構造物・埋設管の周囲は施工不可

凡例  
青字：長所 緑字：中間 赤字：短所

していると粘性土が不透水層となって薬液の浸透を阻害し、注入不良が生じることがある。また、地盤内に巨礫や障害物が伏在する場合もその背面には薬液が浸透しにくい。地盤内に水みちが発達していると、水みちに沿って薬液が逸走し、本来注入すべき箇所に薬液が注入されないといったことも考えられる。また、品質のばらつきの大きい材料を使用していたり、品質管理が不十分な施工をしていたり、注入量・注入圧力等の管理が不十分であったりしても注入不良が生じるリスクが高まる。このような理由で注入不良が生じた場合、薬液注入改良体が発揮すべき強度や遮水性を確保できない恐れがある。このため、薬液が計画通り注入されていることを確認することが品質管理の上で重要である。この課題を、調査時に着目すると課題1に、施工時に着目すると課題2や3に、完了時に着目すると課題3に帰結する。

課題3については、上記の委員会資料でも「現時点では、最適な調査手法は確立されていないため、周辺技術の適用を含めた新たな手法の開発が必要と考えられる。」と記されており、今後開発が必要な手法の例として、改良土の物性変化をパラメータにした物理探査やトモグラフィによる確認等が示されている。

これらの課題の中で、課題3、すなわち”施工時、および施工後に注入状況を把握する技術に限界があることに起因する改良体の品質不良の発生”は特に事故に直結する切実な問題である。注入不足による漏水・出水事故は近年になっても発生しており、有効な解決方法は確立されていない。この課題に対し、不確実性を改良厚で補っているのが現状であるが、不経済であるばかりでなく、上記の水みちや介在粘土層等の規模が把握出来ない以上、根本的な解決にはならない。そこで本研究では施工時、および施工後に注入状況を把握する技術を確立し、改良体の品質不良の発生を抑制して薬液注入工法の信頼性を高める方法を研究する。

課題1～3は関連した課題である。事前の地盤調査が不適切だと注入不良のリスクが高まるのは言うまでもないことであり、地盤調査の精度を高めることも重要課題の一つであるが、この課題において取り組むべき領域は広範であり、本研究では課題3に対象を絞ることとした。

現状における注入状態確認方法としては、注入完了後、所定の材令が経過してから定められた頻度でサンプリングコアを採取し、一軸圧縮試験、シリカ含有量試験等を行って事



後確認していることが多い<sup>12)</sup>。一軸圧縮試験は薬液が間隙に充填されることにより粘着力が付加される性質を利用したものである。シリカ含有量試験はシリカ系の薬液の場合に使用可能であり、薬液成分であるシリカの含有量を測定することで薬液が浸透していることを確認する。

しかし、上記の方法ではボーリングコア採取箇所の情報が得られるのみであり、注入不良を見落とす恐れがある。これらの点の情報を補完する技術として、注入範囲を面的、あるいは立体的に可視化できる技術が望まれる。

課題3を更に掘り下げて考えると、この課題の解決にあたり、2つの課題に分けて考える必要があると思われる。第一の課題は注入中の注入状況の把握・管理である。注入時に薬液の浸透状況をリアルタイムに全体把握できれば、注入不良を抑制することができると思われる。つまり、薬液が所定範囲まで届いていない状況が把握できれば、注入圧力・注入時間を変更したり、別の注入孔から補足注入したりといった対応により注入不良を減らすことができると考えている。第二の課題は注入完了後の水みち確認である。遮水性確保を目的とした薬液注入工法では、注入完了後の改良体に対して水みちの有無とその位置を特定できれば、上記の注入中の管理で捉えきれなかった小さな水みちも補足注入により閉塞し、改良体の遮水性を確保できると考えられる。なお、本論で考える小さな水みちとは数cm乃至数十cmオーダーの水みちを想定している。また、両課題に共通することであるが、検知した注入不良箇所を補足注入する方法を確立することも薬液注入工法の信頼性を高めるうえで必要になるが、これについては本研究の対象外とする。

以上より、本研究で取り組む課題は表-2.2.2に示す2つである。

なお、第1章で述べたように、薬液注入工法により改良された地盤に期待する機能は主として強度と遮水性であるが、表-2.2.2にはこれらの機能との関係を追記した。

表-2.2.2 本論文で取り組む課題

課題	内容	改善する機能
第一の課題	注入中の注入状況の把握	強度、遮水性
第二の課題	注入後の水みちの位置検知	遮水性

## 2.2.4 第一の課題（注入中の注入状況の把握）の現状

表-2.3.1 は既往の文献<sup>14)</sup>に取りまとめられた改良範囲の評価方法の一覧に最近の研究事例を踏まえて再整理したものである。薬液注入工法の改良範囲を評価する手法には、主なものとして、直流比抵抗法、電気検層法、弾性波探査法、温度法、電磁波法がある。また、近年では音響トモグラフィが適用されたケースもある。さらに、電磁探査法の1つで、非接触で行える EM 探査なども評価手法の一つである<sup>15)</sup>。本研究の研究対象である比抵抗トモグラフィは直流比抵抗法の一つである。

直流比抵抗法（図-2.2.5<sup>16)</sup>）は地表、または地中に電極を設置し、任意の1電極からの通電時に生じる地盤内の電位、または電位差を他の電極で測定し、これを通電電極を切替えて複数測定する。得られた電位から逆解析により地盤の比抵抗分布を求めるものである。

電気検層（図-2.2.6<sup>17)</sup>）はボーリング孔内に4端子法用のプローブを挿入し、ボーリング孔周辺の深度ごとの比抵抗を求めるものである。電気検層を薬液注入工法の効果確認に使用した例として、山本ほか<sup>18)</sup>は岸壁改良工法の薬液注入工法において電気検層・PS 検層・孔内水平載荷試験（LLT）・流向流速試験、さらには一軸圧縮試験、シリカ含有量試験等を一斉実施した。そして、電気検層結果より事後の比抵抗値は相対的に低下しており、改良効果の連続性が確認出来たとしている。また、永山ほか<sup>19)</sup>も注入前後で標準貫入試験、

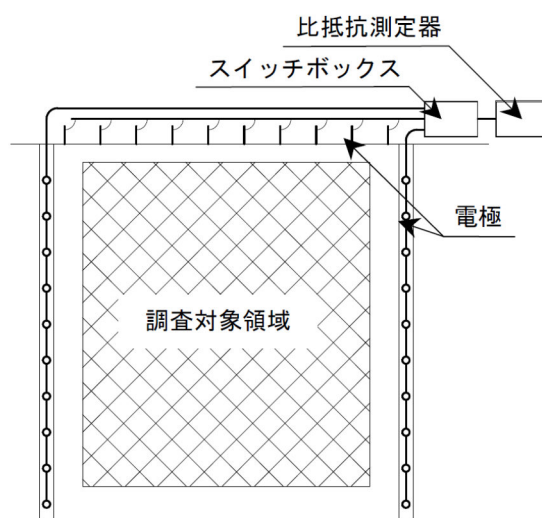


図-2.2.5 直流比抵抗法(比抵抗トモグラフィ)の測定概念図<sup>16)</sup>

PS 検層とともに電気検層を行い、電気検層では比抵抗の低下を確認している。

弾性波探査は人工震源により発生させた弾性波動の地盤内での伝播速度を測定し、弾性波速度分布を得るものであり、注入による速度変化を捉える方法である。ただし、使用する薬液のタイプによって異なるものの、薬液の浸透部分は微小歪レベルでは強度は変化しないため、弾性波速度の変化から改良範囲の特定を行うことは難しいとされている<sup>20)</sup>。このため、深層混合処理工法や岩盤グラウトへの適用事例はあるが、薬液注入工法への適用事例は現実には少ないようである。

温度法（図-2.2.7<sup>14)</sup>）はボーリング等により地中に複数の熱電対等の温度センサーを配置し、ゲル化する際の薬液の反応熱を測定して温度上昇量から薬液の填充率を推定するものである。温度法を薬液注入工法の効果確認に使用した例として、川地ほか<sup>21)</sup>は開削工事の掘削盤より行った薬液注入工法に温度法を適用し、各測点において試料の化学分析から求めた填充率と温度上昇量から求めた填充率とを比較し、温度法の有効性を確認している。ただし、周辺への熱伝導の影響があり、端部では誤差が大きいこと、発熱量が土質や薬液の種類によって異なることなど実用化には課題が残っている。また、それ以前に出来形として捉えるには多数のセンサーの設置が必要となることも課題であろう。

電磁波法には、反射法と透過法の2つの方法がある。反射法は、薬液の注入領域と比注

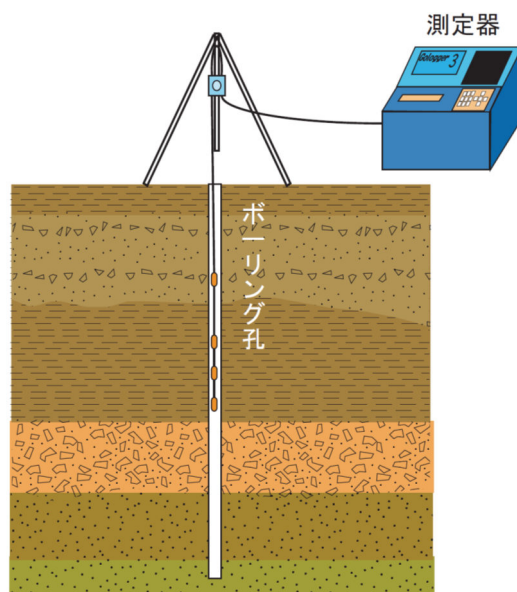


図-2.2.6 電気検層の測定概念図<sup>17)</sup>

入領域との比誘電率の差により境界が電磁波の反射境界となるため、地下に射出した電磁波の反射波を地上のセンサーで捉え、多数の反射波動を重合して反射面を可視化するものである。この方法の場合、下端深度が10m程度と限られること、地下水面が強力な反射面となるため、地下水位以深を捉えることは難しいこと、原則改良体の上面しか出来形を捉えられないことなどが課題である。一方、透過法は2つのボーリング孔の一方から電磁波を射出し、他方でそれを捉えるものであり、ボアホールレーダーとして実用化されている。ただし、透過距離に限度がある点では反射法と同じであり、現状では、全体を面的に捉えるには困難なことが多い。このため、電磁波法が薬液注入工法の出来形確認のために使用されたケースは少ない。

音響トモグラフィ（図-2.2.8<sup>22)</sup>）は高周波数の弾性波を弾性波トモグラフィと同様の方法で伝播させ、受振するものであるが、発振波として疑似ランダム波を用いることで、従来

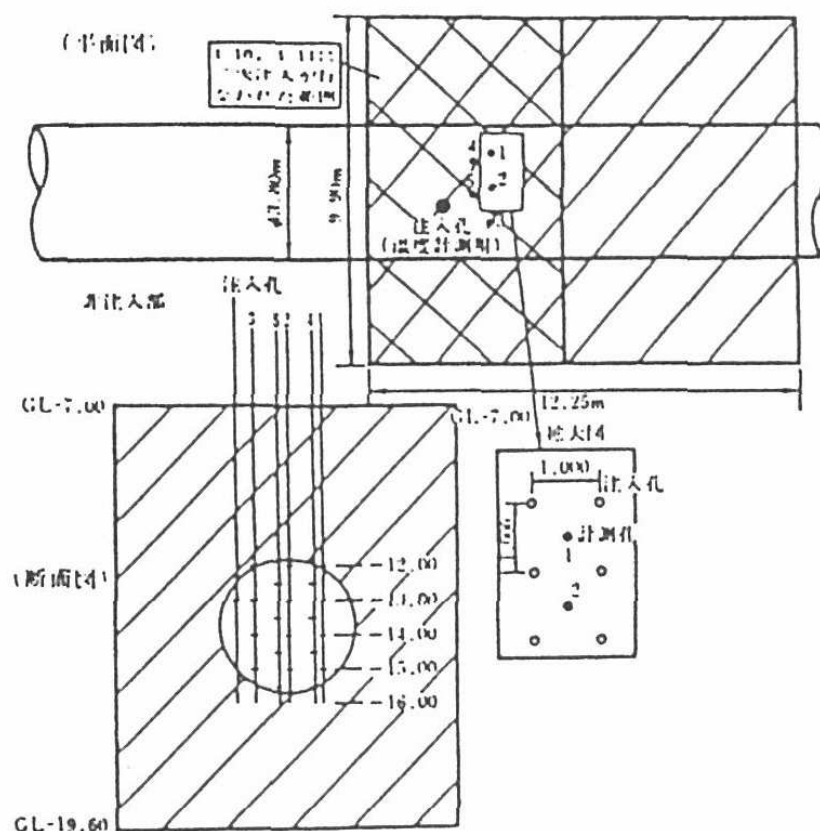


図-2.2.7 温度法の測定概念図<sup>14)</sup>

は減衰が大きく届きにくかった高周波弾性波を遠方まで到達させることを可能にした。これにより(1)従来手法よりも精度が高い、(2)弾性波速度だけではなく振幅減衰を計測できる、(3)周囲のノイズの影響を受けにくいという特長がある。そして、これら特徴により、注入前後でそれほど速度は変化しないものの、減衰率分布は変化するため、弾性波探査とは異なり、減衰率分布により改良範囲を評価できる。澤田ほか<sup>23)</sup>は速度に関しては注入の前後で大きな変化はないものの、飽和地盤では減衰率が大きくなること、不飽和地盤では減衰率が小さくなることで改良範囲を評価可能であることを示した。

発振器から出力した音響波は薬液の注入部分や障害物で大きく減衰するため、音響波の減衰率を出力することでこれらの位置や広がりを把握することができる。

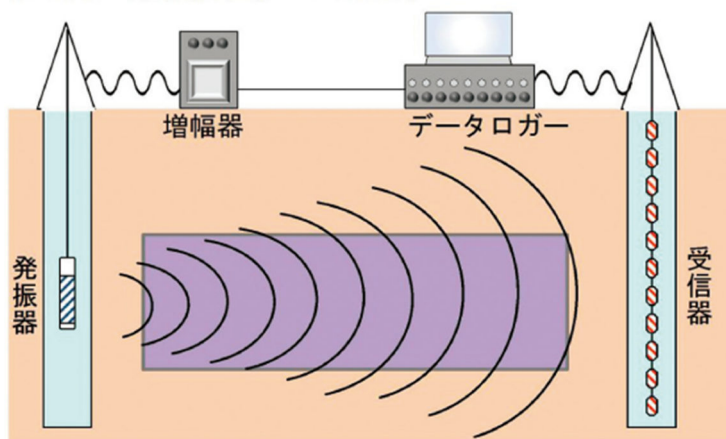


図-2.2.8 音響トモグラフィの測定概念図<sup>22)</sup>

表-2.3.1 改良範囲評価技術

種類	評価方法	測定・解析方法	面的評価への適用	問題点	評価
直流比抵抗法	一般に薬液注入工法により地盤の比抵抗が低下することを利用して注入前後の比抵抗を比較して注入範囲を評価する。	地表または地中に設置した電極のうち任意の電極より通電し、その時に地盤に生じる電位を他の電極で計測する。得られた電位を逆解析して比抵抗分布を求め	比抵抗の低下症域として面的に評価可能である。	地下水の塩分濃度が高い場合、周囲に大きい金属塊がある場合、バックグラウンドの電氣的なノイズが大きい場合には精度が低下する。	○
電気検層法	直流比抵抗法と同じ。	ボーリング孔内に電極を装備したプローブを挿入し、電流電極から通電する。その時の電位を測定し、当該深度の地盤の比抵抗を求め	ボーリング孔周辺の1次元的な評価しかできない。複数のボーリングから補間して推測することは可能。	直流比抵抗法と同じだが、電極間の距離が短いため、周囲にある大きい金属塊の影響は直流比抵抗法よりは小さい。	×
弾性波探査法	弾性係数と弾性波速度の二乗が比例することを利用して、注入の前後における弾性係数の変化を可視化することで注入範囲を評価する。	人口発振源からの弾性波動の振動を受振器で記録し、初動走時等から弾性波速度分布を求め	解析領域内の分布が得られるため、面的に評価可能である。	薬液注入工法で明らかに弾性係数が大きくなる場合には有効だが、一般的には弾性係数の増加は小さく、判別困難である。既往実績も少ない。	×
温度法	薬液がゲル化する際に発生する反応熱に伴う地盤中の温度変化を測定し、変化パターンや温度上昇量から薬液の到達、填充率を判定する。	事前にボーリングを行い、孔内に温度センサーを設置して注入中の温度履歴を記録する。	ボーリング孔周辺の1次元的な評価しかできない。	周辺への熱伝導の影響があり、端部では誤差が大きい	×

電磁波法	電磁波が比誘電率の境界で反射する性質を利用して、元地盤と注入範囲の境界面を評価する。	地上を送受信のアンテナを移動させながら測定する。多数の送受信店での記録を重合処理して反射面を画像化する。	改良体を全方向から走査すれば、面的に評価することは理論上は可能である。	下端深度が10m程度と限られること、地下水面は強力な反射面となるため、地下水位以深を捉えることは難しいこと、通常は地上を走査するため改良体の上面しか出来形を捉えられないことなどが課題である。	×
音響トモグラフィ	注入により減衰率が大きくなる（不飽和地盤では小さくなる）性質を利用して注入範囲を評価する。	弾性波探査と同様の方法で、周波数の制御された振動を伝播させることで速度分布とともに減衰率分布を得る。	解析領域内の分布が得られるため、面的に評価可能である。	地盤の飽和状態により減衰率の増減が変わるなど、解釈に複雑さが伴う。	△
EM探査	直流比抵抗法と同様に比抵抗の変化を評価する。地中における誘導電磁場の応答から、地盤の比抵抗および磁化率を測定する。	地表にメッシュ状に測線を設定し、各測点で5~10秒間静止して測定する。	色々な周波数で測定することで、3次元的な分布が評価可能である。	分解能が低く、概略調査には使用できるが、詳細調査には向かない。周囲に大きい金属塊がある場合、バックグラウンドの電氣的なノイズが大きい場合には精度が低下する。既往実績がほとんどない。	△

第一の課題は注入状況の把握であるので、面的な評価が必要である。表-2.3.1 には前節の現状評価を踏まえて総合評価を記載した。評価にあたっては、(1) 面的な評価が可能であること、(2) 実現性(コントラスト等に関して実用的な結果が望めること)、の2つの基準を評価基準とした。表に示した評価方法のうち、面的な評価のできる方法、つまり基準(1)を満足する方法は直流比抵抗法(比抵抗トモグラフィ)、弾性波探査法(弾性波トモグラフィ)、電磁波法、音響トモグラフィ、EM探査である。なお、電気検層法をはじめとする各種検層技術や温度法も複数箇所実施して中間部を何らかの方法により補間すると面的な分布にはなるが、中間部の情報を持たないという点で対象から除外した。

次に(2)実現性を評価した。

まず、直流比抵抗法は地盤によっては注入後の比抵抗が1/10程度に低下するケースもあり、比較的コントラストが期待できる有望な技術である。

弾性波探査法については、前項で述べたように、あまり大きなコントラストは期待できない。このため、上記文献でも水ガラス系薬液などでは、その変化を捉えるのは現実にはかなり困難であると結論付けている。

電磁波法は比誘電率の変化境界での反射を捉える技術であり、波長が短く高精度な測定が期待できるが、地下水位以下では減衰が大きく、測定困難であること、地上から測定するため、得られる反射面は改良体の上面に限られることなどから、実現性が難しいと考えられる。

音響トモグラフィは近年着目され、発展してきた技術の一つである。高周波弾性波を用いて精度を高めた技術であり、榊原ほかの一連の研究<sup>20)23)</sup>によれば、注入の前後で弾性波速度はほとんど変化しないものの、減衰率分布から改良範囲が推定できる。ただし、地盤の飽和状態により減衰率の増減が変わるなど、解釈に複雑さが伴う。

EM探査も非接触で簡便に比抵抗の3次元分布が得られる点で優位性がある。ただし、出来形を評価し、注入不良箇所を検出するという目的に対してはやや精度が劣ると考えられる。また、実績もほとんどない。

以上より、薬液注入工法に対する既往の適用事例が多く、実用面での確実性が高いのは比抵抗トモグラフィと考えられる。なお、複数の探査技術を組み合わせて、地下の状態の推定精度を高めるとともに、より実用的な値や特性に置き換えて評価する統合物理探査<sup>24)</sup>



が近年盛んに研究されている。また、比抵抗推定精度を複数の探査法・調査法で高める方法も考えられる。例えば、ボーリング調査と比抵抗トモグラフィを組み合わせるケースを考える。複数個所のボーリング柱状図から地質縦断図を精度よく推定できている場合（例えば、成層地盤であることがほぼ確実な場合など）、地層境界では比抵抗が急変する可能性があるため、電気探査法（比抵抗トモグラフィを含む）の解析で用いる平滑化フィルタにおいて、地盤内に一様に平滑化をかけるのではなく、地層境界では不連続を許容するような工夫（場所ごとにフィルタの重みに変化を付ける）をすれば、より推定精度を高められる可能性がある。しかし、通常薬液注入工事は全体工事の中で極一部を占めるものであり、その1工種に対して複数の探査技術を実施するのはコストのバランスが取りにくくなると思われる。

#### 2.2.5 第二の課題（注入後の水みちの位置検知）の現状

2.2.3 で述べた第二の課題、注入完了後の改良体に対して水みちの有無・位置を検知し、補足注入により遮水性を確保することに関して、本節ではこれまでの水みち検知に関する既往の研究事例をレビューする。

水みち検知の問題の先行研究として、1つは水みちを物理探査法で可視化する研究が挙げられる。戸井田ほか<sup>25)</sup>は比抵抗トモグラフィと塩水トレーサーを用いて岩盤内の水みちの検知を試みている。また、小島ほか<sup>26)</sup>は塩水を注入する前後の比抵抗の変化から、塩水の侵入領域を推定している。一方、北村ほか<sup>27)</sup>はボアホールレーダーを用いた電磁波探査によって水みち探査、ダムグラウトの進入範囲の推定、止水性の効果判定等を行っている。しかし、これらの研究事例はダム等に対して比較的広範な、厚みのある水みちを探査対象としているため、水みちそのものを可視化しているが、本研究で問題にしているのは改良体間の隙間に生じる数 cm 乃至数十 cm オーダーの比較的小さな水みちであり、これを同様の方法で可視化することは困難と考えられる。

次に、多数のボーリング孔があることを前提として、孔間をつなぐ水みちの構造を把握する研究としては、フローメーター検層<sup>28)</sup>、温度検層<sup>29)</sup>、電気伝導度検層<sup>30)</sup>といった事例がある。これらは上記の物理探査法より高分解能ではあるが、信頼できる情報はボーリング孔近傍のみであり、周囲への補間は推定でしかない。また、薬液注入改良体に対して水

みちが発見された場合、改良体内部を再削孔して補足注入を行うことは困難であり、水みちを塞ぐための補足注入はその外周に行うことが考えられるため、これらの方法で得られる情報では、補足注入すべき位置を決定できない。

また、廃棄物処分場では、処分場境界面に敷設する遮水シートに電極を付けて電氣的に損傷位置（漏水位置）を検知するシステムが実用化されている<sup>31)</sup>。しかし、処分場建設ではシート敷設面まで掘削するため、電極を面的に設置しておくことが可能であるが、薬液注入工法では困難である。

## 2.3 比抵抗トモグラフィを取り巻く現状

### 2.3.1 比抵抗トモグラフィの位置付けと経緯

1章で述べたように、本研究では比抵抗トモグラフィを用いて課題解決を図ることから、本節では比抵抗トモグラフィの現状を述べる。

比抵抗トモグラフィは電気探査法の1つである。電気探査法とは、比抵抗をはじめとする地盤の電氣的物理量の分布を把握する物理探査法の総称である。電気探査法の中で、比抵抗トモグラフィは直流比抵抗法の1つである。これらの関係を図-2.3.1に示す。直流比抵抗法は地盤に直流電流を流して電位応答を測定し、地下の比抵抗分布を求める手法である。測定や解析が比較的簡便であるため古くから実施されており、現在も電気探査といえは直流比抵抗法を指す場合が多い。なお、直流電流といっても正負1回ずつの矩形波で通電する交替直流を用いることが一般的である。

電気探査法は19世紀の初めには欧米ですでに試みられており、物理探査法の中でも最も古い歴史を持つものと言われている。中でも、最も早くから試みられていたのは自然電位法である。1900年代には非分極性電極などが実用化され、鉱床の発見などにつながった。

直流比抵抗法は1920年代に実用段階となり、日本には1930年に鉄道省の橋梁基礎調査に初めて適用された<sup>32)</sup>。1980年代にはコンピュータの発達により二次元探査技術が急速に発展し、今日の電気探査の基礎ができた。その後、今日に至るまでに三次元解析や多チ

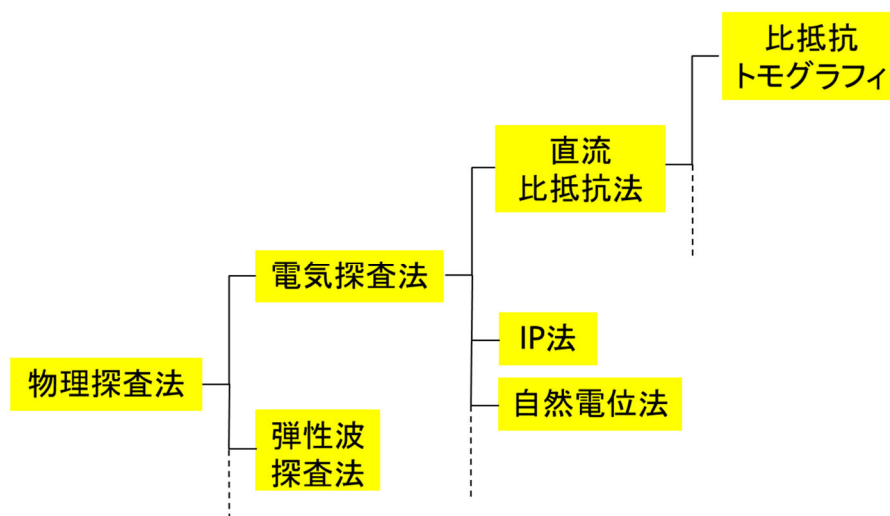


図-2.3.1 物理探査法の分類

チャンネル同時測定が可能な探査装置など、より高度な探査が可能になっているが、精度改善に寄与する技術の向上はやや停滞している。

地表面に配置した電極のみを使用した電気探査では、探査深度に限界があり、地表から遠ざかるにつれ解析精度が低下する。そこで、1980年代後半になると、電極を地表面に配置するだけでなくボーリング孔や坑道を利用して対象領域を囲うように配置して高精度に比抵抗分布を把握する研究が進められた。

この背景には先行して進められた弾性波トモグラフィ等、波動現象を利用したトモグラフィ技術の目覚ましい適用領域の拡大があった。弾性波トモグラフィでは波線が通過しないセルは決定すべき情報を持たないセルのため、すべてのセルに波線を通すことは信頼できる結果を得るための必要条件である。そこで、知りたい領域に波線を通すためにその領域の近傍にボーリング孔を設けることは自然な発想であった。

これに対して電気探査では、上記の波動現象に基づくトモグラフィ技術とは取り扱う現象が異なり、電極から遠ざかると急激に感度が低下するため、ボーリング孔を設けるだけでは解決できない面もある。しかし、ボーリング孔を設ければ探査対象に電極が近づくことは間違いないので、前述のように1980年代後半から適用性の検討が始まった。その後、1990年代になると様々な場面で比抵抗トモグラフィが頻繁に適用されるようになった。さらに地下の時間変化を可視化する時系列トモグラフィの開発など、技術の発展も見られた。しかし、研究ベースの事例が多く、いずれの分野においても実務として定着するには至らなかった。この背景には、折角ボーリング孔を設けて高精度に地下の情報を把握することを意図して実施しているのであるから、2次元平面を1次元探査と同程度の（もしくはそれ以上の）精度で把握したいという依頼者のイメージと現実との乖離、コストや時間と成果とのアンバランスがあったのではないと思われる。

したがって、更なる精度向上を求めて技術を発展させなければならなかったが、以後目覚ましい技術の発展は見られず、停滞した。その後、精度が低い理由を地質や探査対象物の3次元性に求め、3次元トモグラフィが2000年代以降行われるようになった。これにはコンピュータ技術の発展により、より大きなモデルを実用的な計算時間で扱えるようになったことも素因であろうと思われる。しかし、3次元トモグラフィでも劇的に精度が改善するには至らなかった。これは杉本<sup>33)</sup>が時系列解析について指摘しているように、時系

列解析が抱える基本的な問題点をいまだに解決できていないことも一因である。なお、杉本が指摘する基本的な問題点は以下の問題点である。

1. 経時的に測定している途中で電極配置を変更すると、解析断面の分解能がそのたびに変化し、分解能の違いによる見かけの比抵抗変化が検出される可能性がある
2. 計測毎にノイズ状況が変化するため、これが見かけの比抵抗変化として解析される可能性がある
3. 逆解析における繰り返し計算の収束性は制約条件やイタレーション数などに依存し、これらにより断面の分解能や偽像の発生状況を変化させるため、収束性の異なる2つの比抵抗断面から求めた比抵抗変化には見かけの比抵抗変化が含まれる
4. 分解能より細かい構造が存在すると、周辺部に偽像を発生させることがある

### 2.3.2 比抵抗トモグラフィの解析法に関する既往の研究

現在の直流比抵抗法2次元解析における標準的な解析法を確立したのは、佐々木<sup>34)</sup>の研究である。佐々木は、順解析には有限要素法を用い、逆解析では非線形最小二乗法を用いた。そして、ヤコビアン<sup>35)</sup>の算出においては相反定理を用いて順解析結果から効率的に求める方法を採用した。先行研究として、Coggon<sup>35)</sup>は2次元有限要素法による静電場解析の方法を確立した。また、Pelton et al<sup>36)</sup>は dipole-dipole 電極配置に対する見掛比抵抗の解析に非線形最小二乗法を応用し、矩形鉱体の探査に有効な自動解析プログラムを開発した。

新村ほか<sup>37)38)</sup>は有限要素法を用いた比抵抗トモグラフィについて数値実験によって適用性検討を行った。トモグラフィ対象範囲と外周範囲とでダンピングの強さを分けるなど、いくつかの改良が試みられている。

### 2.3.3 比抵抗トモグラフィを薬液注入工法の改良範囲評価に用いた既往の研究

ここでは本研究でも使用する比抵抗トモグラフィを用いた薬液注入状況の把握に関して、既往の研究事例をレビューする。

薬液注入工法の改良範囲評価に比抵抗トモグラフィを適用する研究としては、小峯ほか<sup>39)</sup>の研究が挙げられる。小峯ほかは薬液注入範囲の評価に比抵抗トモグラフィを活用するにあたり、得られた比抵抗から注入範囲を推定する方法を提案している。彼らは地盤が土

粒子と間隙水の混合物であり、そこに薬液が追加されると考えて、それらが直列と並列の混合した複合的な回路を形成するモデルを考えて注入範囲とみなせるのに必要な比抵抗変化率の閾値を設定する方法を定めた。この研究はトモグラフィから得られた比抵抗から注入範囲をどのように解釈するかに着目した研究であり、トモグラフィの方法自体は従来の方法を踏襲したものである。また、内田ほか<sup>5)</sup>は薬液注入工事に比抵抗トモグラフィ、比抵抗水平探査（地表面のみに電極を配置した直流法電気探査）、弾性波トモグラフィを一斉実施している。その結果、弾性波トモグラフィでは、薬液注入による地盤の剛性変化量が少ないために注入範囲を捉えられず、比抵抗水平探査は電極から注入範囲までの距離の増加により未改良部の影響が大きくなり、やはり注入範囲を検出できなかった。一方、比抵抗トモグラフィでは小峯ほかの方法を使えば注入範囲をおおむね評価できたとしている。高橋ほか<sup>6)</sup>は鉄道シールドトンネルと鉄道駅部の開削工事との地中接合における接合部周辺に施工した薬液注入工法において、比抵抗トモグラフィを注入の前後で実施し、比抵抗変化率から改良範囲をマクロ的に捉える試みを行っている。芝本ほか<sup>40)</sup>は注入実験を行って、比抵抗トモグラフィによる注入前後の比抵抗変化率と再掘削した改良体の形状との比較を行った。その結果、注入領域を低比抵抗体として捉えることができたものの、注入の良否を判断するには精度が不十分であると結論付けている。

#### 2.3.4 比抵抗トモグラフィの適用事例

比抵抗トモグラフィを薬液注入工法の実工事で注入範囲の評価に適用した事例として、著者らが共同溝直下の液状化対策用の薬液注入工法に適用した事例を示す。

砂町共同溝夢の島交差点（東京都江東区）における液状化対策工事では、道路外の2箇所所に注入用立坑を築造し、立坑側面からの恒久薬液注入（工法名：浸透固化処理工法）の水平施工が行われた。施工地点は、GL-14.7mまで緩い砂質土が分布しており、その下位にはGL-37mまで軟弱な粘性土が分布している。図-2.3.2に液状化対策工の施工範囲の横断図を、図-2.3.3に平面図を示す。使用した薬液は特殊シリカ系の溶液型恒久薬液である。成分分析結果から、設計基準強度を薬液の主成分であるシリカ含有量の増加分に換算すると8.7mg/g-dryだった。

注入は約1.5ヶ月間行われ、期間中1週間おきに休工期を利用して比抵抗トモグラフィ

の測定を行った。現地採取土、および現地採取土より作成したサンドゲルの比抵抗測定の結果、未改良地盤の比抵抗は  $2.3 \Omega m$ 、設計注入率で改良した地盤の比抵抗は  $1 \Omega m$  となり、改良の前後で比抵抗が約半分に低下することが分かった。このことから、注入前の地盤に比べて比抵抗が低下した領域が注入範囲であると評価できる。測定が長期になるため、電極には耐食性の高いステンレス製のスプリングを使用し（図-2.3.4 参照）、1m 間隔に計 75 箇所設置した。

効果確認ボーリングは図-2.3.5 に示す 6 箇所を実施した。採取資料より、シリカ含有量を測定した。実施箇所のうち、注入範囲内の端部と中央の 5 箇所（A～E）では、注入範囲に薬液が行き渡っていることを確認し、後述の比抵抗変化率の少ない注入範囲外の 1 箇所に

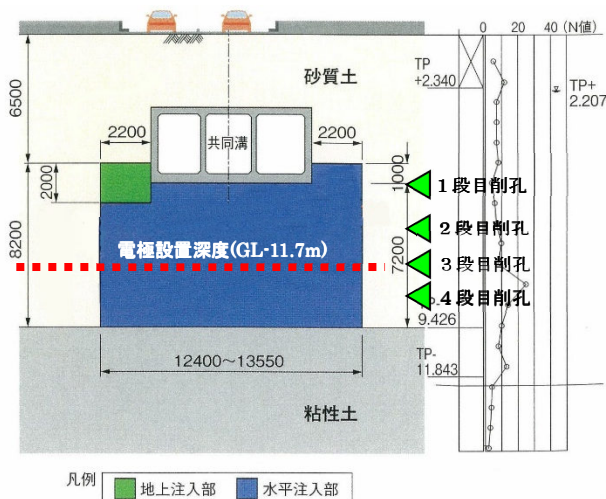


図-2.3.2 横断面図と電極設置深度

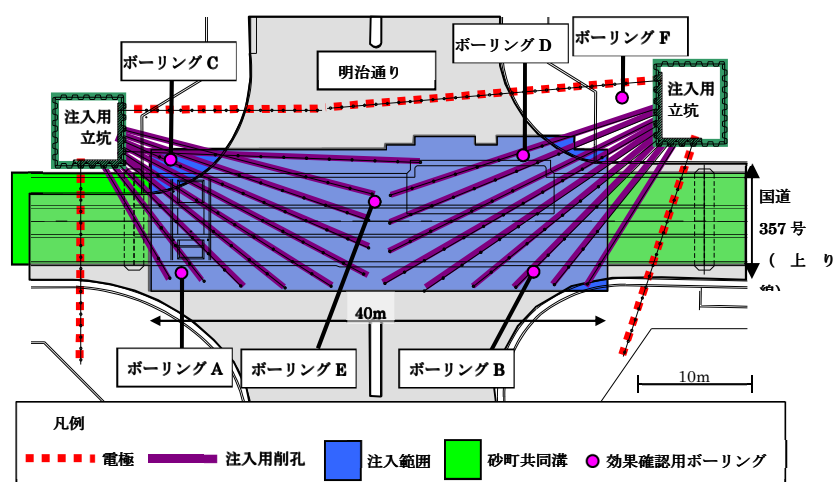


図-2.3.3 平面図と電極設置位置

(F) では、比抵抗変化の少ない箇所が注入されていないことを確認した。

比抵抗トモグラフィの解析結果の例として図-2.3.5 に注入完了時の比抵抗変化率の分布を示す。注入範囲で比抵抗が低下していることが分かる。効果確認ボーリング実施位置での、シリカ含有量増加分と比抵抗変化率の値を図-2.3.6 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、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る。注入範囲内の5点 A～E では前述のシリカ含有量増加分の必要量  $8.7\text{mg/g-dry}$  を満足しており、所定の注入がなされていると判断された。この5点での比抵抗変化率の最小値は-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この基準を満足していると考えられる。-6%の境界線を図-2.3.5 に点線で追記した。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した。

以上のように、本工事では、比抵抗トモグラフィが想定通りに機能し、注入範囲を可視化できた。また、その結果、計画通りの注入が行えたことが確認できた。しかし、トモグ



図-2.3.4 電極

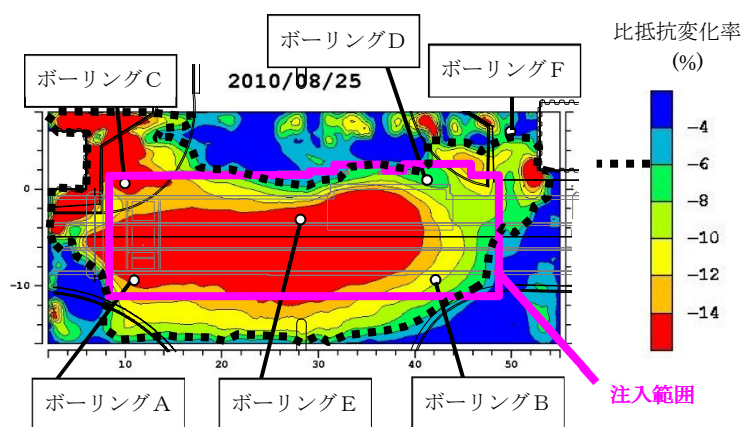


図-2.3.5 注入完了時の注入箇所と比抵抗変化率の分布



ラフィの結果が出るまでには相応の時間を要すること、ボーリングコアの採取には地盤の固結を待たなければならず、待ち時間が生じることなどから、最終結果が出るまでに注入完了後 1 か月間、立坑を埋め戻さずに存置しなければならなかった。このことが工程・コストの面でロスとなった。また、本工事では計画通りに注入が行えたため、問題は生じなかったが、仮に注入不良が検知された場合、施工計画には注入孔を追加して補足注入を行うこととしていた。しかし、改良された地盤に包囲された中に注入孔を設置してもどれだけの注入効果が見込めるのかは不明だった。このため、具体的にどのような補足注入を行うのかについては曖昧な施工計画だった。結果的に上記のようなことが課題として残った。

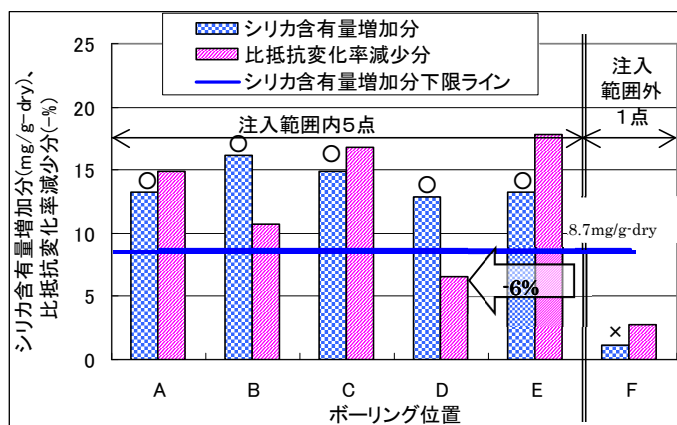


図-2.3.6 比抵抗変化率とシリカ含有量増加分の関係

## 2.4 リアルタイムモニタリングにおける問題点と対応方針

### 2.4.1 リアルタイムモニタリングに関する既往の研究

1章で述べたように、本研究では比抵抗分布のリアルタイムモニタリングを用いて課題の解決を図る。比抵抗分布のリアルタイムモニタリングは時系列問題の一種である。ここでは、比抵抗トモグラフィの時系列問題に関する既往の研究事例をレビューする。

最初に適用例としての研究事例をレビューする。比抵抗トモグラフィの時系列問題がしばしば適用される場面は地下水の動きの可視化である。井上<sup>41)</sup>は注水試験を行い、見掛比抵抗の変化により概略の含水状態を把握した。竹内ほか<sup>42)</sup>、楠見ほか<sup>43)</sup>、東、鈴木<sup>44)</sup>は、室内試験において地下水モニタリング実験を行い、未固結地盤や強風化岩盤などの間隙の多い地盤では地下水の流れを把握できる可能性があること、間隙の少ない硬質岩盤では困難なことが示されている。高倉<sup>45)</sup>は揚水試験現場で観測された比抵抗変化と井戸で観測された地下水位変化を検討している。これらはいずれもやや広域な範囲に対して概略の地下水の流動状態を把握するために実施されており、その目的は果たされているが、実際の流動状態をどこまで再現できていたのかは厳密には検証されていない。

次に解析方法に関する研究をレビューする。杉本<sup>46)33)</sup>は比抵抗トモグラフィの時系列問題における問題点、すなわち電極配置の影響、ノイズの影響、解の収束性のばらつき、探査分解能の制約によって発生するサイドロープを指摘し、これらの問題を解決するための新しい解析方法を提案した。具体的には、比抵抗トモグラフィによる電解質トレーサーの地盤内でのモニタリングにおいて、複数回の比抵抗測定から比抵抗の変化を検出する際には、各回のデータを別々に解析するよりも測定値の変化を求め、これを逆解析した方がノイズの影響を受けづらく、解析精度が向上することを示した。そして、正規化データを逆解析すること、比抵抗の変化方向を制約することを提案した。同様に、LaBrecque and Yang<sup>47)</sup>も二時点の比抵抗の変化量を求める方法、*difference inversion* を提案している。この方法の第一の利点は収束が早いこと、第二の利点は系統誤差をキャンセルするため、偽像を抑えられることである。さらに、Daily et al.<sup>48)</sup>は参照時刻と解析対象時刻とのデータの比を用いた換算データを解く方法、*ratio inversion* を提案している。これらの手法は上記のような利点を有する反面、各時間ステップに共通の電極の組み合わせで測定する必要

があるため、比較的短い時間ステップで実施するリアルタイムモニタリングでは、電極組み合わせが限定され、精度が低下する恐れがある。

中里ほか<sup>49)</sup>は杉本の方法の問題点として、比抵抗の変化方向を特定できない場合を指摘し、ロバスト推定を用いることの有効性を示した。

Vauhkonen et al.<sup>50)</sup>は医療分野で活用される電気インピーダンストモグラフィにカルマンフィルタを適用し、その有効性を確認している。カルマンフィルタは時系列問題をオンラインで解く著名な方法であるが、当初制御分野で発展してきたこともあり、比抵抗トモグラフィへの適用性を検証した例は少なかった。しかし、佐々木ほか<sup>51)</sup>はトンネル工事における切羽前方探査に三次元比抵抗トモグラフィを活用する中でモデルの更新に拡張カルマンフィルタを用いる方法を提案し、その妥当性を確認している。ただし、検証において拡張カルマンフィルタ以外の方法との比較は行われておらず、当該の問題において拡張カルマンフィルタが必須だったのかについては検証されていない。

Kim et al.<sup>52)</sup>は比抵抗トモグラフィにおいて隣接する2時点間の比抵抗から任意の測定時刻における順解析値やヤコビアンを補間により求めることで、時間ステップ内の比抵抗変化に起因する解析誤差の軽減を図って精度を向上させている。Hayley et.al.<sup>53)</sup>はKim et al.の方法を改良した **simultaneous time-lapse inversion** を提案している。

Karaoulis et al.<sup>54)</sup>は従来の標準的な解析法では正則化の際に全てのセルに一律な平滑化を行うことの弊害に着目し、比抵抗変化の大きさに応じてセルごとの正則化パラメータの大きさを調整する **4D active time constrained** 法を提案している。

#### 2.4.2 比抵抗分布のリアルタイムモニタリングにおける問題点

リアルタイムモニタリングを行うにあたり、先ず注入前に測定を行い、初期状態の比抵抗分布を求める。そしてリアルタイムモニタリングのトモグラフィ測定を注入開始とともに開始する。その後、**図-2.4.1**のように注入完了までトモグラフィ測定を継続し、一定時間間隔ごとにそれまでに取得された測定データを用いて逆解析を行い、比抵抗分布の変化を監視する。本論では、一定時間間隔ごとの区切りを時間ステップと呼ぶ。**図-2.4.2**はその活用状況を示した概念図である。**図-2.4.2(a)**はシールド発進立坑の発進防護の薬液注入工法の施工中に、**図-2.4.2(b)**は道路トンネルの本線シールドにランプシールドが合流する位

置の切り上げ施工のためのトンネル間薬液注入の施工中に、それぞれ並行してリアルタイムモニタリングを行っている状況を示している。

このリアルタイムモニタリングの実現のために解決すべき最も重要な課題は、測定データの同時性の問題である。従来の解析手法の場合、シャッターを開け続けて写真を取るとぼやけてしまうのと同じように、薬液注入の途中のような計測対象の比抵抗が測定中に時々刻々変化する場面ではうまく可視化できないという問題が生じる。カメラのシャッターであれば、すぐに閉めれば正しく感光するが、比抵抗トモグラフィの場合、多数の電極において通電し、その時の電位を他の電極で計測するという作業を様々な電極組み合わせについて行うため、電極を切り替えるなどが必要で、計測には相応の時間を要することから、感光に要する時間の極めて長いフィルムと言える。

比抵抗トモグラフィの解析では、様々な電極の組み合わせによって得られた電位差の測定データから逆解析を行い、測定値を最もよく説明できる1つの比抵抗分布を求める。この解析では、測定データの同時性を仮定している。つまり、測定中に比抵抗分布が変化しないことが前提条件となっている。しかし、薬液注入と並行して行う測定では、測定中に比抵抗分布が変化するため、この前提条件は成り立たない。そこで、注入時間を複数の時間ステップに区分し、時間ステップごとに比抵抗分布を求めることによって、一定の比抵抗分布を仮定している前提条件との乖離を小さくする。しかし、時間ステップを短く取れば、1つの時間ステップの測定データ数が不足し、逆解析の精度が低下するため、問題を解決できない。反対に時間ステップを長く取れば、通常の薬液注入では浸透速度が速く測

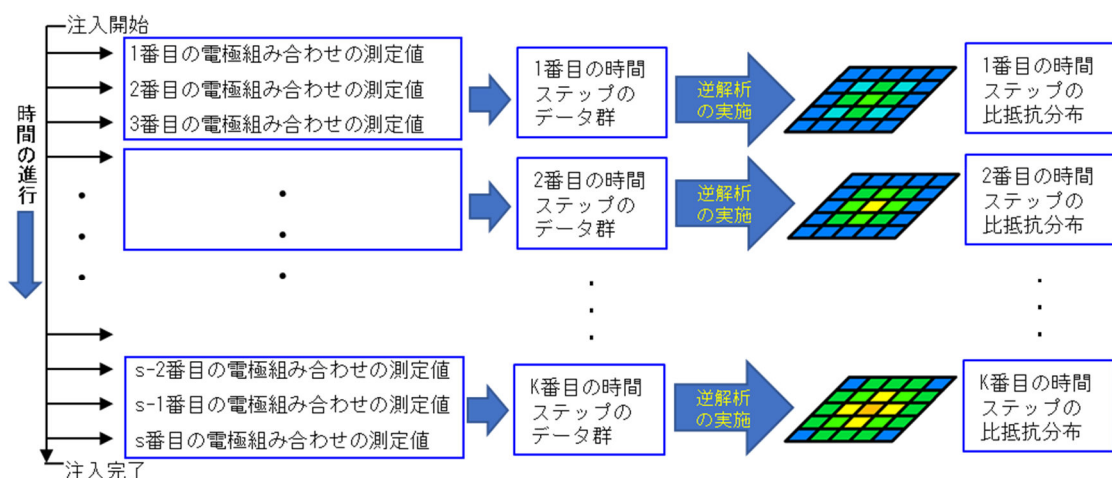


図-2.4.1 リアルタイムモニタリングの概念図

定中に比抵抗の分布が変化するため、上記の前提条件を満足せず、正しい結果が得られない。したがって、いずれにしても正しい結果を得にくいと考えられる。この問題点の解決方法については3章で述べる。

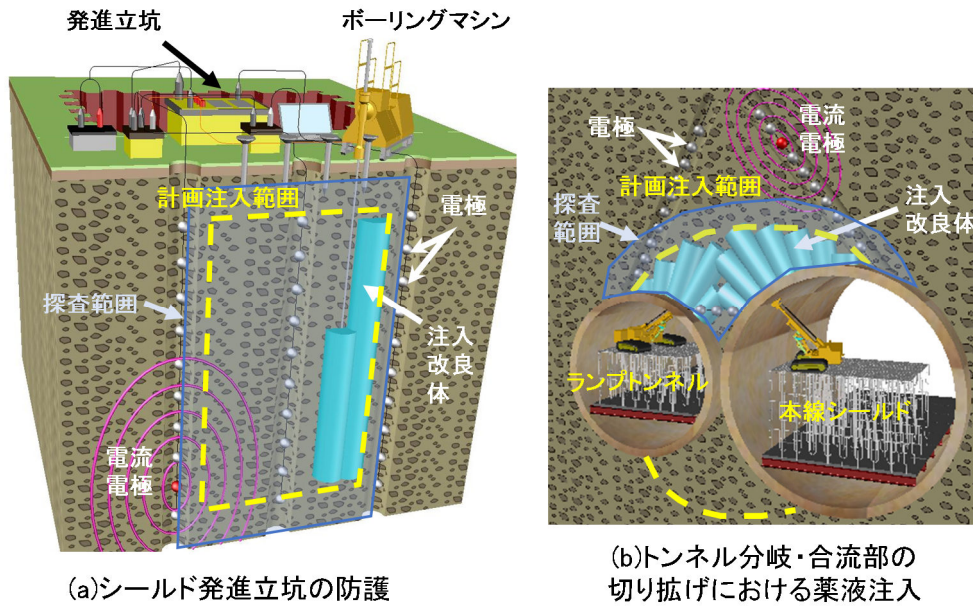


図-2.4.2 注入中のリアルタイムモニタリングの活用状況

## 2.5 第2章のまとめ

2章では、まず2.2で薬液注入工法に関する現状の課題を整理した。具体的な課題としては、以下のとおりである。

1. 地盤調査等、事前調査不足に起因する改良体の品質不良の発生
2. 材料品質のばらつき、およびその管理不足に起因する改良体の品質不良の発生
3. 施工時、および施工後の管理不良に起因する改良体の品質不良の発生
4. 地下水の水質汚染
5. 近接施工に起因する既設構造物の性能低下（水質汚染に起因する劣化を含む）
6. 適用土質が限定される
7. 改良体の強度が比較的小さい

このうち、本研究では安全上特に重要となる課題3. に取り組むこととした。さらにこの課題は以下の2つの課題に帰結することを述べた。

第一の課題：注入中の注入状況の把握

第二の課題：注入後の水みちの位置検知

次に2.3では比抵抗トモグラフィを取り巻く現状を整理した。

2.4では、リアルタイムモニタリングの現状を踏まえ、比抵抗トモグラフィを用いたリアルタイムモニタリングを行う上での問題点を提起した。

## 第3章 リアルタイムモニタリングのための新しい逆解析方法の提案

### 3.1 概説

2.4 で述べたリアルタイムモニタリングにおける問題点を解決するために、リアルタイムモニタリングに適応した新しい解析方法、時系列解析法を開発した。本解析法は、4章で述べる薬液注入の改良範囲の評価（第一の課題の解決）、5章で述べる水みちの末端位置の検知（第二の課題の解決）のいずれにも共通して用いるものであるため、3.3 でその考え方を述べる。特に従来解析法と対比できるように説明することで時系列解析法の特徴とその効果が分かるように記述した。3.3に先立って3.2では比抵抗トモグラフィによる薬液注入範囲の評価方法の基本原理を述べる。

3.4 では、時系列解析法の基本性能の検証を数値実験により行った結果を述べる。数値実験では最も簡単な移流拡散現象として、地盤内の一点から継続的にトレーサーの注入が行われ、トレーサーが時間経過とともに同心円状に拡散する現象を対象に基本性能を検証した。3.3 で述べるように、時系列解析法は3つの従来解析法と異なる特徴を有しており、それらの特徴がいずれも必須のものであり、3つの特徴が揃って初めて有効に機能することを確認する。また、従来解析法の他にも既往の複数の時系列問題に関する手法と比較し、時系列解析法の有効性を確認する。

## 3.2 比抵抗トモグラフィによる薬液注入範囲の評価方法の基本原則

### 3.2.1 比抵抗トモグラフィの基本原則

比抵抗トモグラフィの測定概念図を図-3.2.1 に示す。はじめに探査範囲を取り囲む形で地中、および地表に電極を設置する。探査範囲の四辺を取り囲む設置方法が理想的であるが、底辺に設置するのは困難なため、通常は底辺以外の三辺に設置することが多い。任意の電極（電流電極）から通電し、これにより周辺地盤に生じた電位を他の電極（電位電極）で測定する。これを電流電極と電位電極の組み合わせを切り替えて繰り返し行う。

次に、得られた測定電位より、比抵抗分布を求める。通常、図-3.2.2(a)に示すように、静電場における発生電位は流れる電流の位置と量、および地盤内の電気の流れにくさ、すなわち比抵抗の分布のみから一意に決まる。そこで、図-3.2.2(b)に示すように、電流の位置と量、および測定電位から地盤内の比抵抗分布を逆算により求める。

### 3.2.2 薬液注入範囲の評価方法の基本原則

地盤の比抵抗の推定や解釈には、式(3.1)に示す一般化されたアーチーの式<sup>5)</sup>が使用されることが多い。

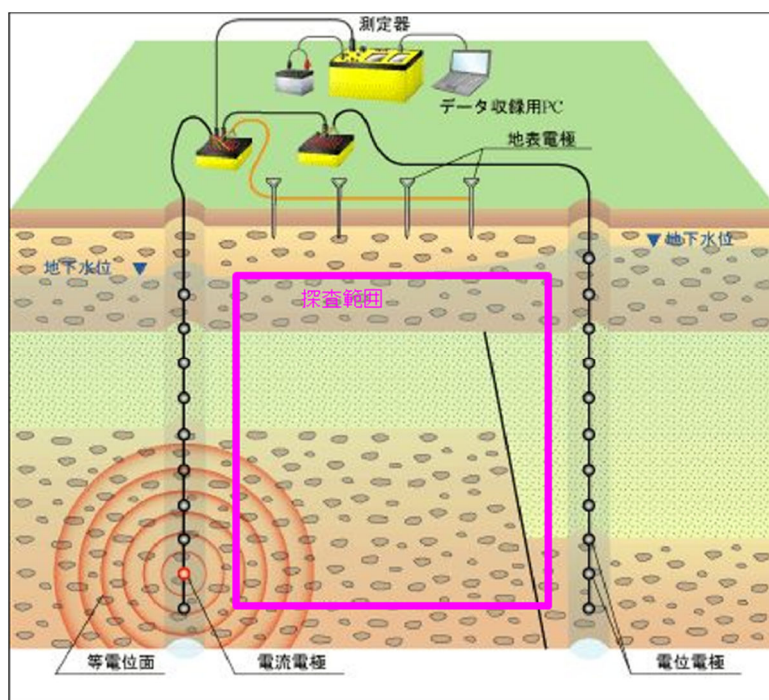


図-3.2.1 比抵抗トモグラフィの測定概念図  
(株)日本地下探査 HP より引用)



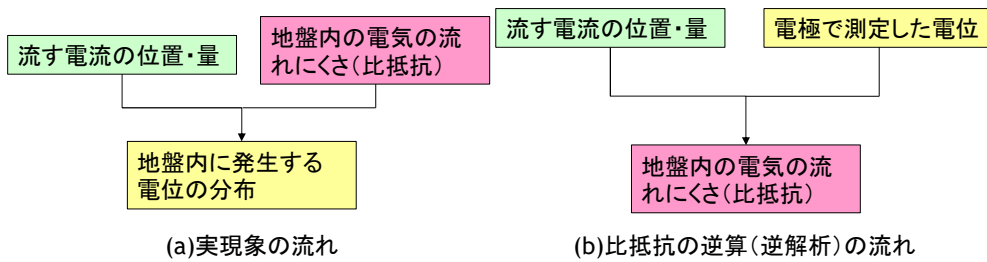


図-3.2.2 比抵抗分布を求める流れ

$$\rho = a\phi^{-m}S_w^{-n}\rho_w \quad (3.1)$$

ここで、 $\rho$ は地盤の比抵抗、 $\phi$ は間隙率、 $S_w$ は飽和度、 $\rho_w$ は間隙水の比抵抗である。 $a$ 、 $m$ 、 $n$ は地盤の性質に依存する定数であり、 $a$ は迂回係数、 $m$ は膠結係数、 $n$ は飽和係数と呼ばれる。

アーチーの式によれば、地盤の比抵抗は間隙率、水飽和度が増加すると減少し、間隙水の比抵抗に比例する。なお、この式は間隙率が10~40%の砂岩を対象に、間隙水として20~100g/lのNaCl溶液を用いた実験式である。したがって、適用には限界があり、特に粘土鉱物を含有する場合、実際の比抵抗は表面伝導の影響でアーチーの式から推定される値より小さくなる。粘土鉱物のように比表面積の大きな鉱物粒子ほど表面伝導の影響は大きい。このような場合の対応として、並列回路モデルが提唱されている。また、比抵抗は常温付近で約2%/°Cの温度依存性を有し、温度によっても変化する。

上記のように比抵抗は土粒子固有の導電性のみならず、飽和度、含水比、間隙水の導電性、温度など多くのパラメータに影響を受ける<sup>3)</sup>ため、単一の結果から解釈を得るのがやや難しい側面があり、薬液注入工法に適用する場合でも必ずしも地盤の比抵抗の低い領域が薬液の注入された領域とは限らない。従って、通常は1回の測定から推定した比抵抗分布だけでは、改良効果の判定は難しい。

しかし、一般的な傾向として、薬液を注入した後に地盤の比抵抗は低下する。これは一般的な薬液がおおよそ3%の食塩水と同程度の大きな導電率を有するため、淡水域での地下水よりは間隙水の導電率が大きくなることに起因している。そこで、注入の前後に測定を行い、両者の比抵抗分布の変化から注入範囲を評価する方法が行われている<sup>39)</sup>。一般に、式(2.2)で定義される比抵抗変化率 $R$ より注入範囲を評価する。

$$R = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (3.2)$$

ここで、 $\rho$ は注入後の比抵抗、 $\rho_0$ は比抵抗の初期値である。

### 3.3 時系列解析法

#### 3.3.1 問題点の解決方法

2.4.1 で述べた比抵抗分布のリアルタイムモニタリングに関する既往の研究事例を総括すると、それぞれの研究者が独自の視点で従来の解析方法を改善し、精度向上を図っており、従来の解析手法のある問題点に着目し、理に適った解決方法を提案している。しかし、薬液注入は改良規模と透水係数によっては数時間で探査領域の大半で比抵抗低下が生じるケースもあり、これらの解析技術がそのような時間変化の激しい場面での状態監視に対応できるのかについては未検証である。筆者は時系列問題、とりわけ時々刻々薬液浸透状況が変化するような変動の激しい場面で効力を発揮できる解析方法がまだあるのではないかと考え、2.4.2 で述べたリアルタイムモニタリングにおける問題点を解決できる新たな解析方法を提案することで薬液の注入状態をリアルタイムにモニタリングできる方法の開発に取り組むこととした。

一方、2.4.2 で述べた問題点の解決策として、複数対の送信電極を用いた同時通電を実施したり、1 回の通電時間中に、多数の電極で電位を測定するなど、測定装置を多チャンネル化する方法<sup>56) 57) 58)</sup>が提案されている。しかし、他の送信ユニットへの電流の流入を考慮する必要があったり<sup>56)</sup>、電極配置・接地抵抗・通電装置の容量によって通電波形が不安定になり正しい測定結果が得られないことがある<sup>58)</sup>など、実用に向けて克服すべき課題が残っている。また、将来上記のようなハードウェアによる方法で問題が解決できたとしても、解析方法により精度向上が図られれば、より速い浸透問題に適用できるようになるため、比抵抗トモグラフィ全体の発展のためには、ハード・ソフト両面から改良していくことは重要である。つまり、測定装置の多チャンネル化による対策と本論で述べる新しい解析方法の提案による対策は競合するものではなく、両者を併用した技術は、一層速い比抵抗変化に適応可能な強力なリアルタイムモニタリングのツールとなることが期待できる。

本研究では、4ch～8ch 程度の一般的な測定装置の使用を前提にして、改良した解析方法（以下、時系列解析法と呼ぶ）による比抵抗モニタリングの精度向上を試みる。これにより注入不足を合理的に解消できるようになり、薬液注入工法の確実性を高めることができると考えられる。

### 3.3.2 変数の説明

初めに、本論で使用する変数を説明する。注入開始とともに測定を開始し、注入完了まで測定を継続すると、その間連続的に測定データが取得される。注入時間を等間隔に $K$ 個の時間ステップに分割し、1ステップにつき $L$ 個の測定データが取得される状況を想定する。 $k$ 番目の時間ステップの測定データは列ベクトル $\mathbf{y}_k$ で表す。添字 $k$ は時間ステップ $k$  ( $k$ 番目の時間ステップ) での値であることを意味しており、 $\mathbf{y}_k$ の成分は $y_{\ell,k}$  ( $1 \leq \ell \leq L, 1 \leq k \leq K$ ) のように表され、 $k$ 番目の時間ステップの $\ell$ 番目の測定データを意味する。なお、本論では、時間ステップという言葉を用いて、全体の注入時間を分割した個々の時間帯、及びその長さとして使用する。また、比抵抗トモグラフィでは、対象領域を複数のセルに分割し、セル内の比抵抗は一律であると仮定するが、対象領域は $M$ 個のセルで構成されるとする。各セルの比抵抗は列ベクトル $\boldsymbol{\rho}_k$ で表す。 $\boldsymbol{\rho}_k$ の成分は $\rho_{m,k}$  ( $1 \leq m \leq M, 1 \leq k \leq K$ ) のように表し、 $k$ 番目の時間ステップの $m$ 番目のセルの比抵抗を意味する。また、本論では記号 $\Delta$ と $\delta$ を用いるが、 $\Delta$ は1つ前の時間ステップからの変化量を表し、 $\delta$ は非線形最小二乗法の繰り返し過程における変化量を表す。非線形最小二乗法の繰り返し計算における $p$ 回目の比抵抗修正過程において得られる一時的なセルの比抵抗の列ベクトルは $\boldsymbol{\rho}_k^{(p)}$ と表す。さらに $\boldsymbol{\rho}_k^{(p)}$ に基づいて順解析により得られる $k$ 番目の時間ステップの計算上の応答値列ベクトルを $\mathbf{F}_k(\boldsymbol{\rho}_k^{(p)})$ で表す。これら以外に、本論で使用する主要な変数の意味を下記に示す。

$\Delta\rho_{m,k}$  :  $m$ 番目のセルの比抵抗についての $k-1$ 番目の時間ステップから $k$ 番目の時間ステップまでの間の時間変化量

$\mathbf{A}_{i,j}$  :  $i$ 番目の時間ステップの計算上の応答値列ベクトル $\mathbf{F}_i(\boldsymbol{\rho}_i^{(p)})$ を $j$ 番目の時間ステップの比抵抗列ベクトル $\boldsymbol{\rho}_j$  (時系列解析法では比抵抗の時間変化量) で偏微分した値を成分に持つヤコビアン行列

$\mathbf{A}$  : 部分行列 $\mathbf{A}_{i,j}$ で構成される区分行列

### 3.3.3 比抵抗トモグラフィの従来解析法

比抵抗のモニタリングにおいて従来行われてきた標準的な解析方法 (以下、従来解析法と呼ぶ) と時系列解析法との相違点を明確にするために、はじめに従来解析法の原理を示して定義付けを行う。従来解析法では、図-3.3.1のように、ある時間ステップ $k$ において取

得られた測定データ $\mathbf{y}_k$ から同じ時間ステップにおける比抵抗分布 $\boldsymbol{\rho}_k$ を求める。ここで、 $\mathbf{y}_k$ と $\boldsymbol{\rho}_k$ はそれぞれ測定データ数とセル数の次元を持つ列ベクトルである。すなわち、 $\mathbf{y}_k$ の取得期間には比抵抗分布 $\boldsymbol{\rho}_k$ はほぼ変化していないという仮定がなされており、時間ステップ $k$ 前後の観測データは $\boldsymbol{\rho}_k$ の推定には使用しない。具体的な手順を下記に示す。はじめに暫定的な比抵抗分布を仮定し、それに基づいた計算上の応答値を有限要素法（FEM）等により求める<sup>59)</sup>（順解析）。次に最小二乗法により計算上の応答値と実測された応答値（観測値）との差の二乗和、すなわち残差二乗和が最小となるような比抵抗の修正量を求める。なお、ここでの応答値には一般には見掛比抵抗の対数を用いる<sup>34)</sup>。見掛比抵抗は電位差に電極配置係数を掛け、電流で除したものであり、同じ電極配置については電極配置係数と電流は定数であるから見掛比抵抗は電位差に比例する。最後に、求めた修正量に応じて比抵抗分布を修正する（逆解析）。これを収束基準を満足するまで繰り返し、最終的に尤度の最も高い時の比抵抗分布を逆解析結果として採用する。このような比抵抗分布の推定を、全観測時間のうちの各時間ステップに対して実施して、地下比抵抗のモニタリングが行われている。なお、後述する時系列解析法はこのうちの逆解析過程を改良するものであり、順解析過程は従来の方法と同様である。

次に、逆解析の具体的な方法を述べる。実測された応答値列ベクトル $\mathbf{y}_k$ と $p$ 回目の反復過程における暫定的に設定されたセルの比抵抗 $\boldsymbol{\rho}_k^{(p)}$ から算定される計算上の応答値列ベクトル $\mathbf{F}_k(\boldsymbol{\rho}_k^{(p)})$ との残差二乗和 $S$ は、

$$S = \left\| \mathbf{y}_k - \mathbf{F}_k(\boldsymbol{\rho}_k^{(p)}) \right\|^2 \quad (3.3)$$

と表せる。残差二乗和最小状態にある計算上の応答値を $\mathbf{F}_k(\boldsymbol{\rho}_k)$ とした時、 $\mathbf{F}_k(\boldsymbol{\rho}_k)$ を $\boldsymbol{\rho}_k^{(p)}$ のまわりでテイラー展開して一次の項までを使うと、

$$\mathbf{F}_k(\boldsymbol{\rho}_k) = \mathbf{F}_k(\boldsymbol{\rho}_k^{(p)}) + \mathbf{A}_{k,k} \delta \boldsymbol{\rho}_k^{(p)} \quad (3.4)$$

となる。ここで、 $\mathbf{A}_{k,k}$ はヤコビアン行列であり、その成分 $a_{\ell,m}$ は、

$$a_{\ell,m} = \left( \frac{\partial F_{\ell,k}(\boldsymbol{\rho}_k)}{\partial \rho_{m,k}} \right)_{\boldsymbol{\rho}_k = \boldsymbol{\rho}_k^{(p)}} \quad (3.5)$$

であり、 $k$ 番目の時間ステップの $\ell$ 番目の応答値 $F_{\ell,k}(\boldsymbol{\rho}_k)$ を $k$ 番目の時間ステップの $m$ 番目のセルの比抵抗 $\rho_{m,k}$ で偏微分したものである。順解析結果をもとに、相反定理を使えば、簡単な積和により効率的にこの偏微分を計算することができる<sup>59)</sup>。式(3.3)の $S$ が最小となる

ためには変数 $\rho$ についての偏微分が0となるため、

$$\mathbf{A}_{k,k} \delta \rho_k^{(p)} = \mathbf{y}_k - \mathbf{F}_k(\rho_k^{(p)}) = \delta \mathbf{y}_k \quad (3.6)$$

が成り立つ。

最終的に観測方程式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{k,k} \\ \alpha \mathbf{C} \end{bmatrix} \delta \rho_k^{(p)} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_k - \mathbf{F}_k(\rho_k^{(p)}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

を特異値分解法<sup>60)</sup>、ハウスホルダー法<sup>60)</sup>等により解くことにより比抵抗の修正量 $\delta \rho_k^{(p)}$ が算出される。式(3.7)の行列 $\mathbf{C}$ は収束安定性を高めるために拘束条件を与える行列であり、初期値拘束や平滑化拘束が一般的である<sup>59)</sup>。一例として等間隔な格子状の2次元セルに対する平滑化拘束の場合には次式のようなになる。

$$\delta \rho_{m,k} = \frac{1}{4} \delta \rho_{m-h,k} + \frac{1}{4} \delta \rho_{m-1,k} + \frac{1}{4} \delta \rho_{m+1,k} + \frac{1}{4} \delta \rho_{m+h,k} \quad (3.8)$$

ここで、 $h$ は横1列のセルの個数を表し、右辺第1項は下のセルとの関係、第2項は左のセルとの関係を表し、以下順に右のセル、上のセルとの関係を規定している。また、 $\alpha$ は拘束の強さを規定するスカラー量である。なお、後述する時系列解析法との比較を明確にするために、式中の各文字式には添字 $k$ を付記して時間ステップ $k$ でのものであることを明示している。

### 3.3.4 比抵抗トモグラフィの時系列解析法

本研究での時系列解析法は、従来解析法と異なり、時間ステップとともに連続的に変化する比抵抗分布を扱うことができ、以下の3つの主な特徴を有している。

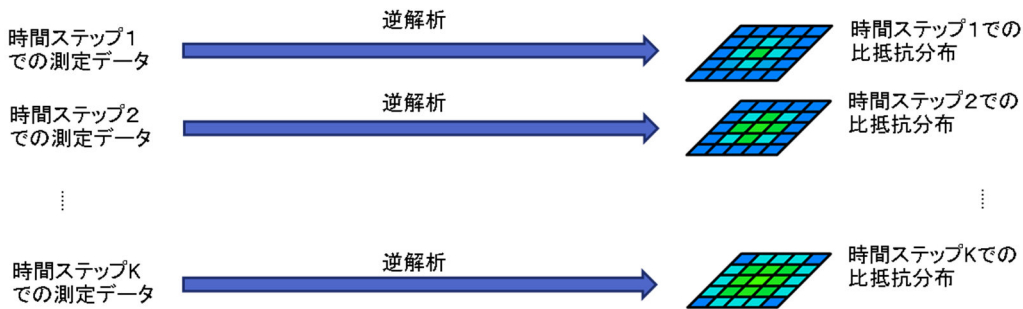


図-3.3.1 従来解析法概念図

特徴 1 : 時間ステップ毎に個別に観測方程式を解くのではなく、全ての時間ステップを一体の観測方程式で解く

特徴 2 : 求めるパラメータを比抵抗そのものではなく、比抵抗の時間変化量とする

特徴 3 : 1つの時間ステップの中では比抵抗は一定と仮定するのではなく、比抵抗が変化することを許容し、時間ステップの中での測定時刻の違いを考慮した観測方程式を立てる

特徴 1 については一体の観測方程式を解くことで、正則化の過程において時間的に滑らかに変化する制約が与えられるため、従来解析法のように各時間ステップを単独で解いた場合に生じる比抵抗分布の偽像を防ぐ効果が期待される。特徴 2 については比抵抗トモグラフィの逆問題は求める比抵抗分布に線形従属性が強く、悪条件となることが多いことから、比抵抗そのものを求めるのではなく、比抵抗の時間変化量を求めることで線形従属性が弱められるのではないかと考えた。さらに、特徴 1 と特徴 2 をあわせて行うことで、透水係数が速い場合等で1つの時間ステップあたりの計測データが少な過ぎて分解能が低下する際に1つのパラメータに関連する計測データを増やすことができ、精度を向上できる可能性がある。特徴 3 については、Kim et al.<sup>52)</sup>の考え方を導入した。特徴 1 では、従来解析法と同様に、各時間ステップの中では比抵抗が一定と仮定している（異なる時間ステップにおいては比抵抗が変化することを前提としている）。しかし、実際には時間ステップの中でも比抵抗は変化するため、そのことに伴う誤差が生じる可能性がある。そこで、時系列解析法における特徴 3 として、時間ステップ内で比抵抗が変化することを許容し、それに応じて順解析値やヤコビアンが変化することを考慮して各測定データの測定時刻ちょうどでの順解析値、ヤコビアンを用いた観測方程式を立てることとした。

次に時系列解析法の定式化について述べる。従来解析法の課題である測定データ数の不足の解決のために、時系列解析法では、それまでに測定された全測定データを用いてそれまでの全時間ステップの比抵抗分布をまとめて求めることを考える。すなわち、前述の時系列解析法の特徴 1 は、図-3.3.2に示すように、従来解析法と同様に定義される 2次元のセルを時間軸であるz軸方向に積層した立体セルの比抵抗を求めることにある。なお、3次元

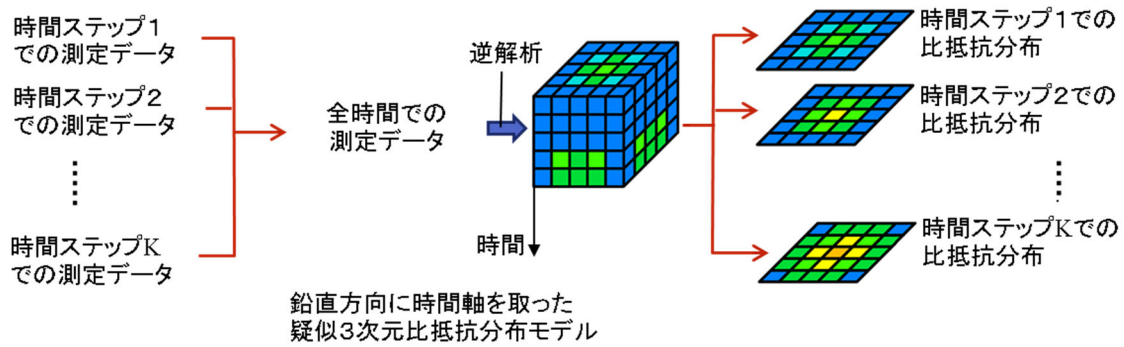


図-3.3.2 時系列解析法のご概念図

地盤構造の逆解析では4次元で定義するセルの比抵抗を求めることとなる。

図-3.3.2に示した上記の立体セルの比抵抗を未知パラメータとし、観測データとの関係を観測方程式で表現すると、

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_{1,1} & & & 0 \\ & \mathbf{A}_{2,2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \mathbf{A}_{K,K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\rho_{1,1} \\ \vdots \\ \delta\rho_{M,1} \\ \delta\rho_{1,2} \\ \vdots \\ \delta\rho_{M,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \delta\rho_{1,K} \\ \vdots \\ \delta\rho_{M,K} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta y_{1,1} \\ \vdots \\ \delta y_{L,1} \\ \delta y_{1,2} \\ \vdots \\ \delta y_{L,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \delta y_{1,K} \\ \vdots \\ \delta y_{L,K} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

となる。ここで、右辺の $\delta y_{\ell,k}$  ( $1 \leq \ell \leq L, 1 \leq k \leq K$ )は時間ステップ $k$ における $\ell$ 番目の観測値 $y_{\ell,k}$ とその計算上の応答値 $F_{\ell,k}(\boldsymbol{\rho})$ との残差である。しかし、式(3.9)のままでは、式(3.6)に示した従来解析法の観測方程式について全時間ステップ分を一度に表現したのみであり、使う測定データ数が増加する反面、求めるパラメータの数も増加するため、効果は少ない。そこで比抵抗を求める代わりに比抵抗の時間変化量を求めるパラメータとする。そのために、 $\rho_{m,k}$ を時間変化量形式で表現する。

$$\rho_{m,k} = \rho_{m,1} + \sum_{s=2}^k \Delta\rho_{m,s} \quad (3.10)$$

ここで、 $\Delta\rho_{m,s}$ は $m$ 番目のセルの時間ステップ $s$ における1つ前の時間ステップ $s-1$ からの変化量である。

従来解析法ではセルの比抵抗



$$\boldsymbol{\rho} = (\rho_{1,1} \sim \rho_{M,1}, \rho_{1,2} \sim \rho_{M,2}, \dots, \rho_{1,K} \sim \rho_{M,K})^T \quad (3.11)$$

を求めていた代わりに、時系列解析法ではセルの比抵抗の時間ステップ変化量

$$\Delta\boldsymbol{\rho} = (\rho_{1,1} \sim \rho_{M,1}, \Delta\rho_{1,2} \sim \Delta\rho_{M,2}, \dots, \Delta\rho_{1,K} \sim \Delta\rho_{M,K})^T \quad (3.12)$$

を求め、式(3.10)により、各時間ステップの比抵抗を算定する。ここで、

$\Delta\boldsymbol{\rho}$  : セルの比抵抗の時間変化量ベクトル

である。これが前項の時系列解析法の特徴2であり、求めるパラメータ（ここでは比抵抗）の線形従属性の改善を期待して考案した。

式(3.12)のように比抵抗分布を設定したことにより、観測方程式は

$$\delta\mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{F}(\boldsymbol{\rho}^{(p)}) = \mathbf{A}\delta\Delta\boldsymbol{\rho} \quad (3.13)$$

となる。ここで、 $\delta\mathbf{y}$ は観測値 $\mathbf{y}$ と $p$ 回目の収束計算におけるセルの比抵抗 $\boldsymbol{\rho}^{(p)}$ について順解析から求めた計算上の応答値 すなわち発生電位 $\mathbf{F}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})$ との残差である。ただし、時系列解析法では全時間ステップ分の測定データをまとめて計算するため、その点で式(3.6)とは内容が異なる。つまり、式(3.13)を成分表示すると、

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_{1,1} & \mathbf{A}_{1,2} & \dots & \mathbf{A}_{1,K} \\ \mathbf{A}_{2,1} & \mathbf{A}_{2,2} & \dots & \mathbf{A}_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{K,1} & \mathbf{A}_{K,2} & \dots & \mathbf{A}_{K,K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\rho_{1,1} \\ \vdots \\ \delta\rho_{M,1} \\ \delta\Delta\rho_{1,2} \\ \vdots \\ \delta\Delta\rho_{M,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \delta\Delta\rho_{1,K} \\ \vdots \\ \delta\Delta\rho_{M,K} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta y_{1,1} \\ \vdots \\ \delta y_{L,1} \\ \delta y_{1,2} \\ \vdots \\ \delta y_{L,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \delta y_{1,K} \\ \vdots \\ \delta y_{L,K} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

となる。部分行列 $\mathbf{A}_{i,j}$ は

$$\mathbf{A}_{i,j} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_{1,i}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})}{\partial \Delta\rho_{1,j}} & \dots & \frac{\partial F_{1,i}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})}{\partial \Delta\rho_{M,j}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_{L,i}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})}{\partial \Delta\rho_{1,j}} & \dots & \frac{\partial F_{L,i}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})}{\partial \Delta\rho_{M,j}} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

である。なお、ここでは便宜上、各時間ステップにおける観測データ数を等しく $L$ としているが、実際にはそれぞれの時間ステップで異なる数となっても考え方は同じである。

次に、式(3.15)に示したヤコビアン行列の部分行列の性質について考える。まず、観測データはそのデータの観測された時間ステップより後の時間ステップにおける比抵抗変化に影響を受けないので、次式が成り立つ。

$$\mathbf{A}_{i,j} = \mathbf{0} \quad (i < j) \quad (3.16)$$

また、合成関数の微分公式より次式が得られる。

$$\frac{\partial F_{\ell,i}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})}{\partial \rho_{m,j}} = \frac{\partial F_{\ell,i}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})}{\partial \Delta \rho_{m,t}} \cdot \frac{\partial \Delta \rho_{m,t}}{\partial \rho_{m,j}} \quad (3.17)$$

式(3.10)を $\rho_{m,k}$ で偏微分して次式が得られる。

$$\frac{\partial \Delta \rho_{m,s}}{\partial \rho_{m,k}} = 1 \quad (3.18)$$

$j, k, s, t$ は $K$ 以下の任意の自然数（ただし、 $s \leq k, t \leq j$ ）であるから、式(3.17),(3.18)より次式が成り立つ。

$$\frac{\partial F_{\ell,i}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})}{\partial \rho_{m,j}} = \frac{\partial F_{\ell,i}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})}{\partial \Delta \rho_{m,1}} = \frac{\partial F_{\ell,i}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})}{\partial \Delta \rho_{m,2}} = \dots = \frac{\partial F_{\ell,i}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})}{\partial \Delta \rho_{m,j}} \quad (3.19)$$

式(3.19)の $\frac{\partial F_{\ell,i}(\boldsymbol{\rho}^{(p)})}{\partial \Delta \rho_{m,j}}$ はヤコビアン $\mathbf{A}$ の部分行列 $\mathbf{A}_{i,j}$ の $\ell$ 行 $m$ 列の成分である。これが任意の $i, j, \ell, m$ で成り立つ（ただし、 $1 \leq i \leq K, 1 \leq j \leq K, 1 \leq \ell \leq L, 1 \leq m \leq M$ 、）ことから、 $K$ 以下の任意の自然数 $i$ について次式が成り立つ。

$$\mathbf{A}_{i,j} = \mathbf{A}_{i,i} \quad (i \geq j) \quad (3.20)$$

結局、式(3.9)(3.13)における行列 $\mathbf{A}$ は

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{1,1} & & & 0 \\ \mathbf{A}_{2,2} & \mathbf{A}_{2,2} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ \mathbf{A}_{K,K} & \mathbf{A}_{K,K} & \dots & \mathbf{A}_{K,K} \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

となり、階段状に下三角形をなす行列となる。 $\mathbf{A}_{i,i}$ は各時間ステップ $i$ における比抵抗分布について従来解析法で算定するヤコビアン行列と同じであり、その成分は式(3.5)のように表すことができ、順解析結果の重ね合わせで得られる。式(3.21)より、式(3.14)は次式のように表せる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_{1,1} & & & 0 \\ \mathbf{A}_{2,2} & \mathbf{A}_{2,2} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ \mathbf{A}_{K,K} & \mathbf{A}_{K,K} & \cdots & \mathbf{A}_{K,K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\rho_{1,1} \\ \vdots \\ \delta\rho_{M,1} \\ \delta\Delta\rho_{1,2} \\ \vdots \\ \delta\Delta\rho_{M,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \delta\Delta\rho_{1,K} \\ \vdots \\ \delta\Delta\rho_{M,K} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta y_{1,1} \\ \vdots \\ \delta y_{L,1} \\ \delta y_{1,2} \\ \vdots \\ \delta y_{L,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \delta y_{1,K} \\ \vdots \\ \delta y_{L,K} \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

ここで、特徴2に期待するもう一つの効果について述べる。まず、逆解析では、未知量の情報を含んだより多くの測定データを用いることが有効な解を得る上で基本となる<sup>61)</sup>。データを増やすだけではデータの独立性は必ずしも保証されないが、必要な量のデータを得ることで精度が改善する可能性がある。データの量が増えることは、観測方程式の行数が増えることに相当することから、ヤコビアン行列の各列に関する非ゼロ成分の数が一つの目安となると考えられる。ここで、時系列解析法の式(3.22)を従来解析法の式(3.6)や式(3.9)と比較する。従来解析法の式(3.6)や式(3.9)では1つの比抵抗に関連している（ヤコビアン行列の成分が非ゼロである）観測値は、その比抵抗の時間ステップと同じ時間ステップにおいて測定された観測値のみである。したがって、1つの時間ステップにおいて取得される観測データが少ない場合には、セルの比抵抗の決定に寄与できる観測データの数が不足して分解能が低下する恐れがある。一方、時系列解析法の式(3.22)では、1つの比抵抗変化量に対してその時間ステップ以降、現在に至るまでに取得された全ての観測値に対応するヤコビアン行列の成分が非ゼロとなっている。したがって、1つの時間ステップにおいて取得される観測データが少ない場合にも、セルの比抵抗の決定に寄与できる観測データ数の不足を防ぐ効果が期待できると考えている。

従来解析法において収束安定性を高めるために拘束条件を加えるのと同様に、式(3.22)についても拘束条件を付加する。初期値拘束、平滑化拘束などが一般的であり、例えば等間隔な格子状の2次元セルに対する平滑化拘束の場合、時間軸方向の拘束を加えるために以下ようになる。

$$\delta\Delta\rho_{m,k} = \frac{1}{6}\delta\Delta\rho_{m-\#k} + \frac{1}{6}\delta\Delta\rho_{m-1,k} + \frac{1}{6}\delta\Delta\rho_{m+1,k} + \frac{1}{6}\delta\Delta\rho_{m+\#k} + \frac{1}{6}\gamma\delta\Delta\rho_{m,k-1} + \frac{1}{6}\gamma\delta\Delta\rho_{m,k+1} \quad (3.23)$$

ここで、 $h$  は横 1 列のセルの個数を表し、右辺は第 1 項から順に下のセル、左のセル、右のセル、上のセル、1 つ前の時間ステップのセル、1 つ後の時間ステップのセルとの関係を規定している。 $\gamma$  は空間方向の平滑化の強さに対する時間方向の平滑化の強さの比率である。以上のような拘束条件の付加は従来から行われている手法からの延長ではあるが、時間軸方向の拘束を考慮するため、時間的に連続性を持った比抵抗分布の変化となる。一方、薬液注入をはじめ多くの地盤内の浸透問題を比抵抗でモニタリングする場合、間隙水の薬液濃度や含水比の分布を比抵抗を介して推定することになるが、それらは塩淡境界や浸透フロント等で局所的に変化の激しい箇所は起こり得るが、時間的に近い 2 時点での全体的な分布は似たものとなるのが一般的である。そのため、時間方向に平滑化する本解析法は浸透問題の比抵抗モニタリングと相性が良いと考えられ、前項で述べた特徴 1 の効果が期待できる。

式(3.23)を式(3.22)に組み込み、

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \alpha \mathbf{C} \end{pmatrix} (\delta \Delta \rho) = \begin{pmatrix} \delta \mathbf{y} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

が最終的に解くべき観測方程式である。これを従来解析法と同様にハウスホルダー法等で解いて、時間ステップごとの  $\rho$  を逐次更新しながら反復収束計算を行って  $\rho$  の最尤値を求める。ここで、 $\alpha$  と  $\gamma$  は各回の反復過程の中で AIC<sup>60)</sup>等の情報量規準を最小化するように滑降型シンプレックス法等により最適値を定める。なお、今回本研究に伴い作成した解析コードでは、最小化すべき目的関数に AIC、ABIC<sup>62)</sup>、残差二乗和のうちの 1 つを選ぶことができる。また最適な  $\alpha$ 、 $\gamma$  の探索には、経験的な値で  $\gamma$  を固定した上で  $\alpha$  のみを黄金分割法で最小値を探索する方法と、滑降型シンプレックス法を用いて  $\alpha$ 、 $\gamma$  を変動させながら最小値を探索する方法のいずれかを選択できる。

次に前項の時系列解析法の特徴 3 について説明する。式(3.13)の順解析応答値  $\mathbf{F}(\rho^{(p)})$  や式(3.22)の左辺のヤコビアン  $\mathbf{A}_{i,i}$  は前述のように有限要素法等による順解析結果から算出する。この際、厳密に言えば比抵抗が時間ステップの中でも変化するため、残差やヤコビアンも時々刻々変化する。従って、それらの値は対象時刻そのものの値を算出する方が誤差が少なく精度が上がるが、比抵抗分布は設定した時間ステップごとの値しか定義されていないので、任意の時刻の残差やヤコビアンを求めることは、通常はできない。

そこで、Kim et al.<sup>52)</sup>と同様に、隣接する 2 つの時間ステップでの順解析結果から、当

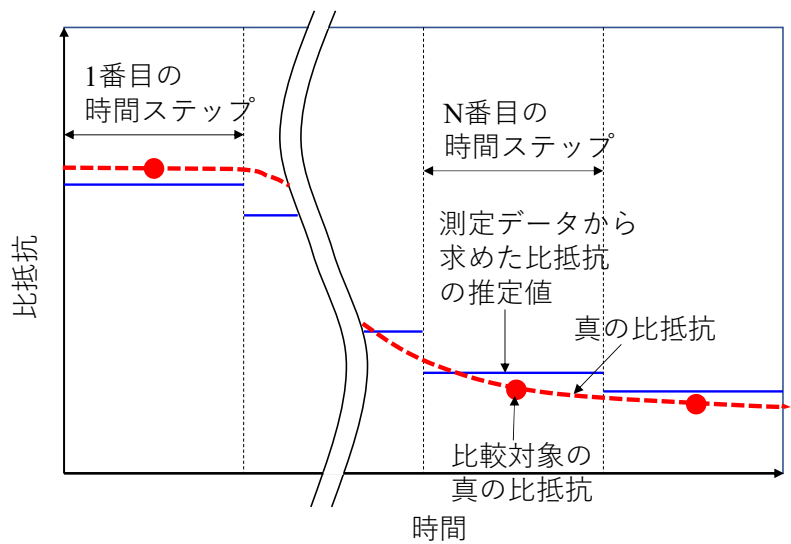
該データ取得時の順解析応答値を下式による補間を用いて求める。

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_i(\boldsymbol{\rho}_{t=t_{true}}) &= \frac{t_{i+1} - t_{true}}{t_{i+1} - t_i} \left\{ \mathbf{F}_i(\boldsymbol{\rho}_i) + (t_{true} - t_i) \mathbf{A}_{i,i} \frac{\boldsymbol{\rho}_{i+1} - \boldsymbol{\rho}_i}{t_{i+1} - t_i} \right\} \\ &+ \frac{t_{true} - t_i}{t_{i+1} - t_i} \left\{ \mathbf{F}_i(\boldsymbol{\rho}_{i+1}) + (t_{true} - t_{i+1}) \mathbf{A}_{i+1,i+1} \frac{\boldsymbol{\rho}_{i+1} - \boldsymbol{\rho}_i}{t_{i+1} - t_i} \right\} \end{aligned} \quad (3.25)$$

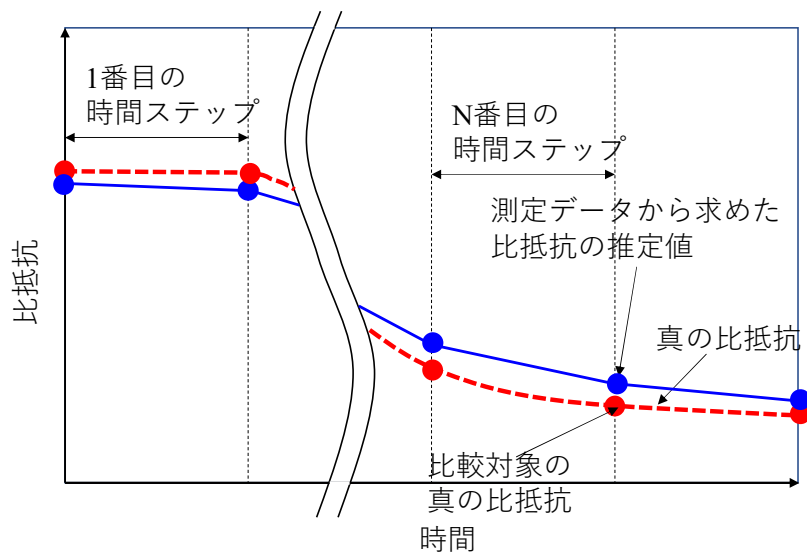
ここで、 $t_i$ は*i*番目の時間ステップの開始時刻、 $t_{i+1}$ は*i*+1番目の時間ステップの開始時刻、 $t_{true}$ は当該データの測定時刻を表す。また、 $\mathbf{F}_i(\boldsymbol{\rho}_{t=t_{true}})$ 、 $\mathbf{F}_i(\boldsymbol{\rho}_i)$ 、 $\mathbf{F}_i(\boldsymbol{\rho}_{i+1})$ はそれぞれ  $t_{true}$ 、 $t_i$ 、 $t_{i+1}$ における順解析応答値、 $\mathbf{A}_{i,i}$ 、 $\mathbf{A}_{i+1,i+1}$ はそれぞれ*i*番目、*i*+1番目の時間ステップにおけるヤコビアンである。これにより、より精度の高い当該時刻での残差やヤコビアンを用いて逆解析を行うことができ、逆解析の精度が向上すると考えた。

この結果、従来解析法で求めるパラメータは各時間ステップにおける時間的に平均的な比抵抗分布を求めていたのに対し、時系列解析法では時間ステップの節目における瞬間的な比抵抗分布を求めることとなった。これを模式図にしたのが図-3.3.3である。図-3.3.3(a)は従来解析法概念を表している。前述の通り、従来解析法では測定中、すなわち1つの時間ステップの中で比抵抗は変化しないことを仮定しているが、実際には変化している。つまり真の比抵抗は赤破線のように変化しており、そのような変化のある中で得られたデータから逆解析により得られた比抵抗分布はおよそ時間ステップごとの変化の平均（図中の赤丸）を推定した値（図中の青線）を表していると考えられる。なお、推定誤差があるので、図のように両者は一般には一致しない。また1つの時間ステップのデータから1つの比抵抗分布を推定するため、従来解析法で得られる比抵抗分布の数は時間ステップの分割数と一致する。

これに対し、時系列解析法では、あるデータについて測定時刻ちょうどの観測方程式を立てるために、当該時刻の順解析応答値やヤコビアンを時間ステップの節目における比抵抗分布から補間により求めるため、図-3.3.3(b)のように、求めるパラメータは時間ステップの節目における比抵抗分布である。また、時系列解析法で得られる比抵抗分布の数は時間ステップの分割数より1多い。



(a) 従来解析法の場合



(b) 時系列解析法の場合

図-3.3.3 比抵抗の推定値と正解比抵抗の関係を示す概念図

(a) 従来解析法の場合、(b) 時系列解析法の場合

### 3.4 数値実験による時系列解析法の基本性能の検証

#### 3.4.1 数値実験の概要

時系列解析法の有効性の検証を目的に数値実験を行った。薬液注入に関する最も基本的な現象として、2次元均質半無限地盤内の1点より塩水注入を行い、塩水が同心円状に広がっていく過程を対象とした。薬液ではなく、塩水を対象としたのは、ゲル化を考慮する必要がなく、移流拡散解析のみで現象をシミュレーションし正解の比抵抗分布を求めることができるからである。注入中連続的に注入孔周辺に配置した電極で電位を測定することを想定し、測定電位を用いて時系列解析法、従来解析法の両方法で逆解析を行い、求めた比抵抗分布を正解の比抵抗分布と各時刻で比較することで時系列解析法の有効性を検証した。

#### 3.4.2 数値実験の方法

図-3.4.1に数値実験の手順を示す。初めに均質地盤の2次元FEMモデルにおいて移流拡散解析を行い、濃度分布の時刻歴を10秒ごとに計算した(STEP-1)。地下2.5mの位置に3%塩水を0.5N/mm<sup>2</sup>で定圧注入を行った。なお、別途実施した予備実験結果より塩水濃度を設定した。地盤の移流拡散に関する特性は薬液注入が行われる標準的な砂質土に相当する値を想定した<sup>63)64)</sup> (表-3.4.1)。透水係数については3通りを想定した。なお、注入終了時間は塩水が電極のラインまで概ね到達する時間とした。

次に上記で計算した濃度分布を比抵抗分布に換算した(STEP-2)。換算方法の妥当性を確認するために、濃度と導電率(比抵抗の逆数)との関係を実測により求めた。詳細は次項で述べる。

次に各時刻の比抵抗分布より、通電時の電位を2次元FEMを用いた静電場解析より求めた(STEP-3)。なお、この通電時の電位には人工的に標準偏差5%のガウスノイズを加えている。また、この時のメッシュ図を図-3.4.2に示す。通電と電位測定には図中に示した48個の電極を用い、2極法を行った。電極の設置間隔は25cmとした。通常、2極法では、電流電極をNo.1に固定して電位電極をNo.2,3,4と順次移動していき、1巡した後に電流電極をNo.2に移動して電位電極を同様にNo.3,4,5と順次移動していく方法がとられる。しかし、注入中連続して測定を行い、設定間隔で区分された時間ステップごとの測定データから逆

解析を行う場合、電極配置の違いにより時間ステップごとに感度に偏りが生じることが予想されたため、電極切替順序（以下、アレイパターン）をランダムに並べ替えた。さらに、切替順序による感度のばらつきを並べ替えのみで解消することは困難なため、20通りのアレイパターンを作成し、各パターンによる結果の平均値で評価した。

また、半無限地盤であることを考慮するために、地表面以外の端部境界条件には無限に連続した地盤を考慮できる混合境界条件<sup>65)</sup>を適用した。

上記の方法で得られた通電電位（順解析応答値）より、時系列解析法と従来解析法の両方法で逆解析を行い(STEP-4)、得られた比抵抗分布をSTEP-2で得られた正解の比抵抗分布と比較した(STEP-5)。

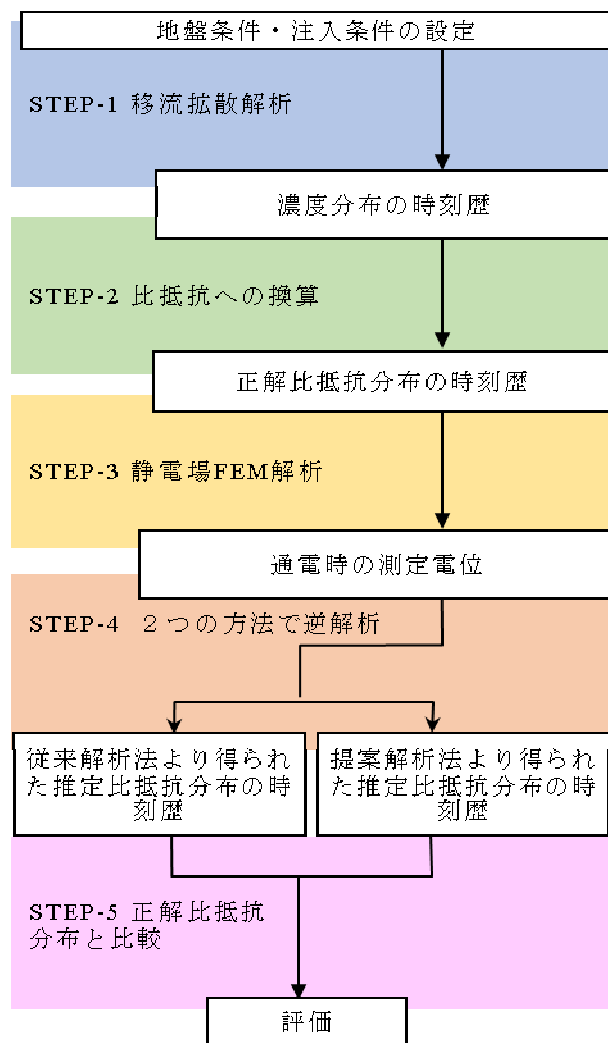


図-3.4.1 数値実験の手順



表-3.4.1 移流拡散解析のパラメータ

透水係数	5.0×10 <sup>-5</sup> m/sec 2.5×10 <sup>-5</sup> m/sec 1.0×10 <sup>-5</sup> m/sec
分子拡散係数	1.6×10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /sec
有効間隙率	0.35
縦分散長	40mm
横分散長	4mm

表-3.4.2 数値実験の検討ケース(パラメータの組み合わせ)

透水係数(m/sec)	注入所要時間 <sup>※1</sup> (sec)	時間ステップ(sec)
5.0×10 <sup>-5</sup>	250	10,20,30 <sup>※2</sup> ,40,60,80
2.5×10 <sup>-5</sup>	470	10,20,40,60,80,120,160
1.0×10 <sup>-5</sup>	1130	20,40,60,80,160,320,550

※1：塩淡境界が電極ラインに到達するまでの所要時間

※2：3.4.4 で示す標準ケース

塩水が解析対象領域全体に行き渡る速度が速いほど、時間ステップを短く設定して測定データの同時性を確保する必要があることから、透水係数と時間ステップを変動パラメータとし、表-3.4.2のように検討ケースを設定した。各ケースの時間ステップは移流拡散解析の出力ステップである10秒から全注入時間のおよそ1/2～1/3となる時間ステップまで変動させた。時間ステップは透水係数ごとに異なる設定となっているが、これは誤差分布の変曲点等、密に調べたい箇所に追加ケースを設定したためである。また、透水係数1.0×10<sup>-5</sup>m/sec、時間ステップ10秒のケースは計算機の仮想記憶容量の制限から解くことができなかった。

2.2.4で述べたように、本来は不均質地盤であることを前提に注入範囲を比抵抗変化率で評価するが、本数値実験では初期状態において全体が均質であることを前提としているため、初期値の比抵抗は全セル同一となるため、比抵抗変化率に変換する意味がない。そのため、時系列解析法と従来解析法の両方法により得られた各時間ステップでの比抵抗分布そのもので評価する。

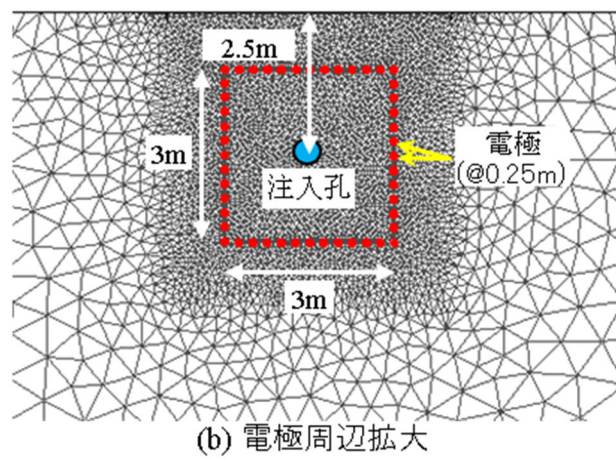
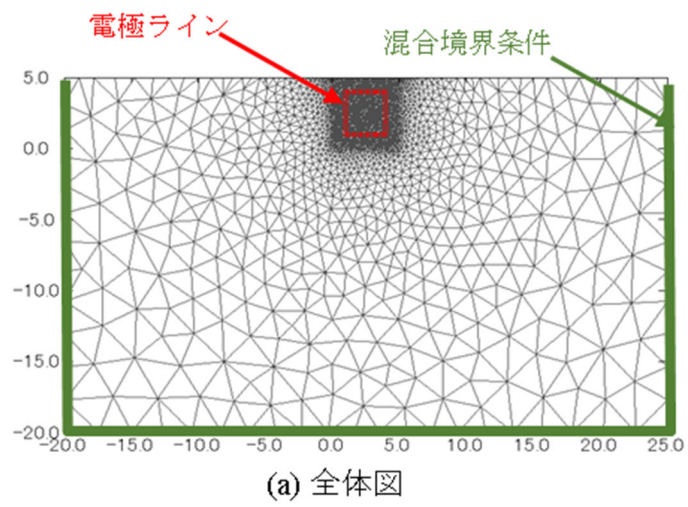


図-3.4.2 静電場解析のFEMメッシュ図

### 3.4.3 塩水濃度と地盤の比抵抗の関係

STEP-2 で行った濃度分布の比抵抗分布への換算にあたり、濃度と導電率（比抵抗の逆数）との関係を実測により求めた。使用した測定装置を図-3.4.3 に示す。図示の四端子法による測定装置を用いて材料の導電率測定を行った。容器の内面には電極として幅 5mm の銅板が 30mm 間隔で 4 本巻かれており、両端の 2 本が電流電極、中間の 2 本が電位電極である。市販の電気探査装置と結線して電流電極に通電し、その際の電位電極間の電位差を測定して導電率に換算した。砂地盤には 7 号珪砂を使用した。塩水の入った容器内に試料を入れ、加振により一定の密度となるよう密度調整した。各濃度について 3 個の供試体を作成し、測定したところ、再現性の高い結果が得られた。測定された電位より、1次元の電気伝導を仮定して比抵抗 $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ ) を次式により算定した<sup>66)</sup>。

$$\rho = \frac{VA}{Is} \quad (3.26)$$

ここで、

$V$  : 測定した電極間の電位差(V)

$A$  : 資料の断面積( $\text{m}^2$ )

$I$  : 通電電流(A)

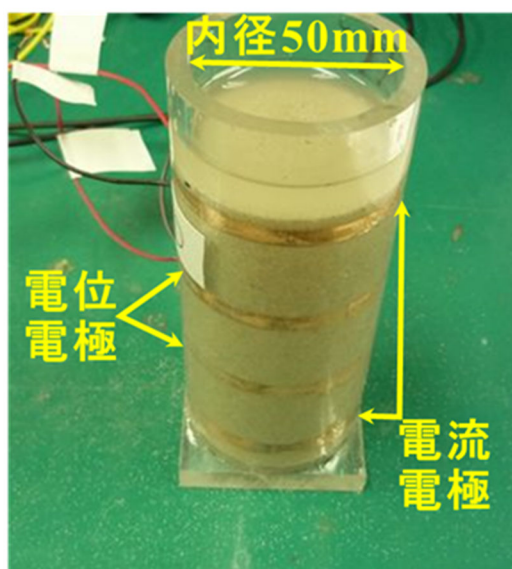


図-3.4.3 導電率の測定装置

s : 電位電極の間隔(m)

なお、比抵抗には約 2%/°Cの温度依存性があるため<sup>67)</sup>、実験は温度一定条件のもとで行った。

実験に先立って当測定装置の精度を導電率既知の塩水によって検定した。式(3.26)を用いて比抵抗が測定できることを検証するために、比抵抗が既知の試料として塩水を比抵抗測定用容器に入れて測定を行った。塩水濃度を0~1%の範囲で4段階に設定し、各濃度について導電率計で測定した導電率（比抵抗の逆数）と比抵抗測定用容器で測定した導電率を比較した。図-3.4.4のように両者はほぼ一致しているが、比抵抗測定用容器で測定した導電率は導電率計のものより約3%小さい結果となった。これは主に比抵抗測定用容器の形状に起因するものと考えられる。本検討では比抵抗の時間変化を相対的に比較することが目的であるためこれらの差異の影響は少ないと思われるが、念のため測定値に上記3%分の補正を加えた。この室内試験の結果を図-3.4.5に示す。図のように濃度0~3%の範囲において、塩水濃度と比抵抗の逆数である導電率とはほぼ線形の関係が認められたため、その関係を用いて換算した。

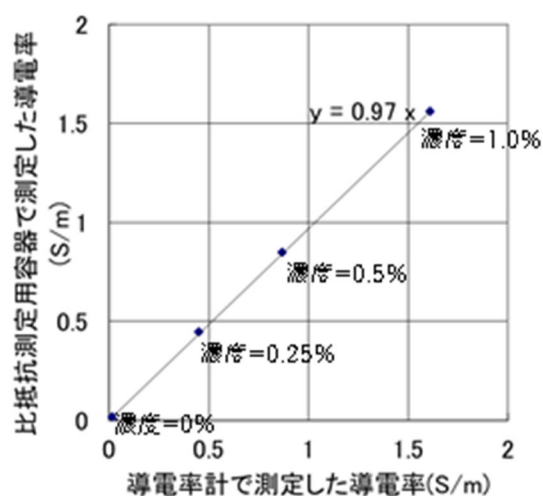


図-3.4.4 比抵抗測定装置の検定結果

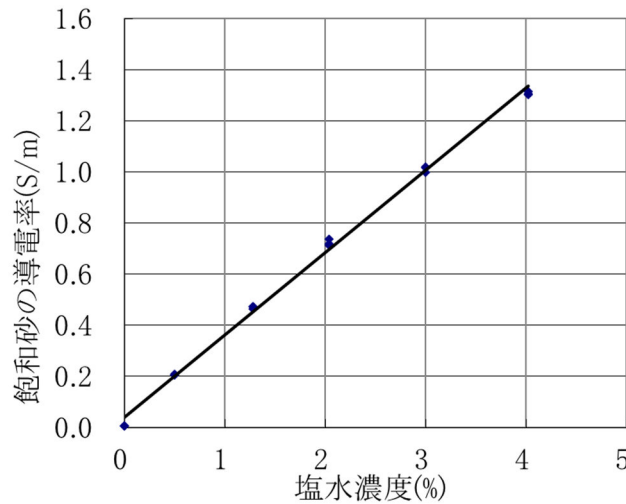


図-3.4.5 塩水濃度と飽和砂の導電率の関係

### 3.4.4 数値実験結果

図-3.4.6に代表的な時刻での比抵抗分布の例として、透水係数 $5.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ 、時間ステップ30秒での結果を示す。時系列解析法による比抵抗分布(図-3.4.6(b))の方が、従来解析法による比抵抗分布(図-3.4.6(a))よりも正解となる比抵抗分布(図-3.4.6(c):以後、正解比抵抗と呼ぶ)に近いことが分かる。従来解析法では注入孔を中心に比抵抗が低下している傾向も認められず、正解比抵抗との違いが大きかった。なお、元々のモデルが左右対称なモデルであるにもかかわらず逆解析結果が非対称となっているが、これは電極の配置やその切替順序が非対称であること、および疑似計測データ(通電時電位)にガウスノイズを加えていることに起因していると思われる。以上より、適切な時間ステップを設定すれば、時系列解析法は従来解析法より正解に近い結果を得られ、有効に機能すると考えられる。

### 3.4.5 精度の検証

各ケースの逆解析より得られた比抵抗分布と正解比抵抗との一致度を分析し、時系列解析法における時間ステップの設定方法、時系列解析法の各特徴の必要性、既往の解析法との性能比較について検討した。本節では、正解比抵抗との乖離の度合いを定量的に評価できる指標として各時間ステップで得られる平均二乗誤差 $\mu_{k,u}$ を次式のように定義した。

$$\mu_{k,u} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M (\rho_m - \rho_{p,m})^2}{M}} \quad (3.27)$$

ここで、

$\rho_m$  : 逆解析から求めた各セルの比抵抗

$\rho_{p,m}$  : 前章STEP-2で得られた各セルの正解比抵抗

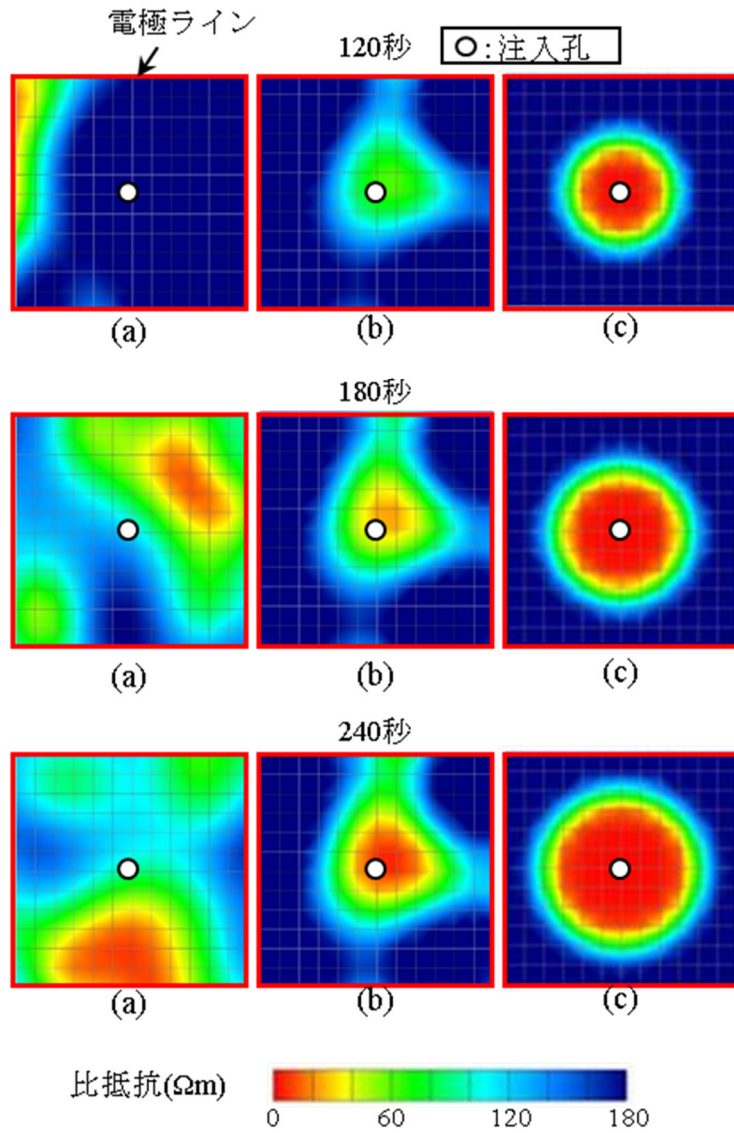


図-3.4.6 従来解析法と時系列解析法の正解比抵抗分布との比較

(a): 従来解析法より得られた比抵抗分布、(b): 時系列解析法より得られた比抵抗分布、

(c): 正解比抵抗

※図中の赤線は図-3.4.2 で示した電極ラインを示す

$M$ :セルの数

と定義する。また、添字 $k, u$ はそれぞれ、 $k$ 番目の時間ステップと、 $u$ 番目のアレイパターンを表す。

これより、各検討ケースについてアレイパターンと時間ステップごとに1つの $\mu_{k,u}$ が得られ、その平均値をもって当該検討ケースに対する評価値 $\mu$ を求めた。

図-3.4.7に $\mu$ と時間ステップの関係について従来解析法と時系列解析法を対比して示す。両者を比較すると、いずれのケースでも従来解析法より時系列解析法の方が小さく、正解比抵抗に近いことが分かる。従来解析法では、透水係数に拘らず時間ステップ40秒付近をピークに持つ上に凸の分布形状を呈した。透水係数が小さいケースでは、時間ステップの

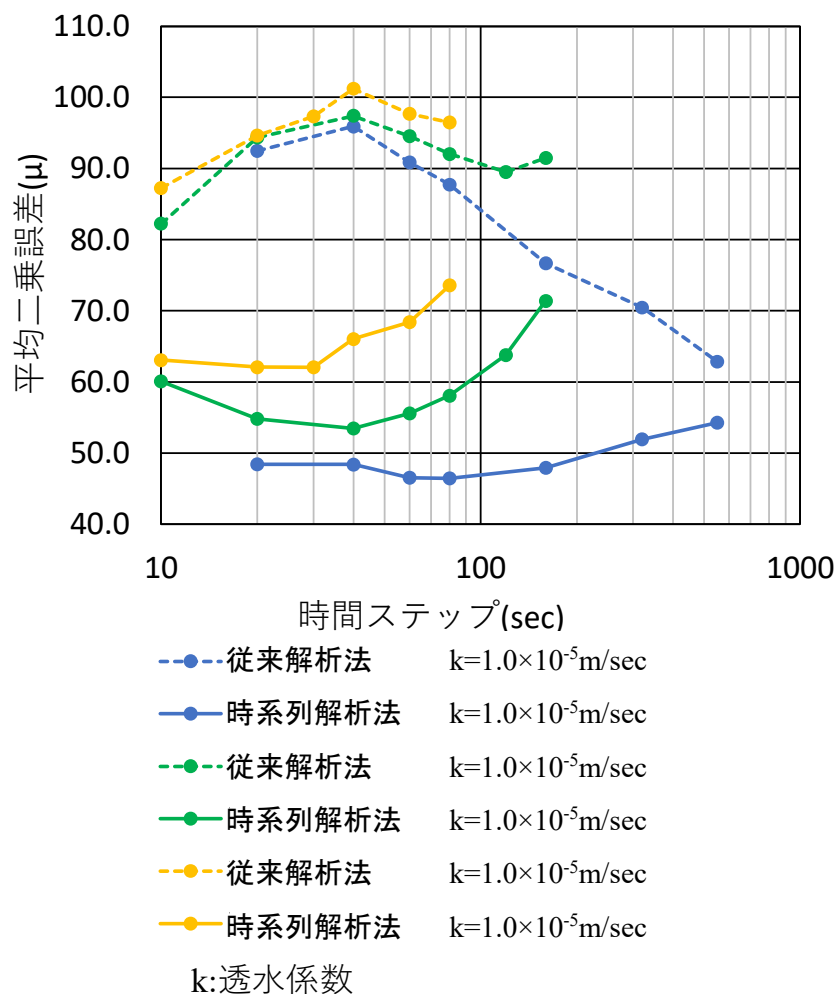


図-3.4.7 評価値 $\mu$ と時間ステップの関係

増加とともに誤差が漸減しているが、これは変化が緩やかなため、時間ステップを長く設定しても前述の測定データの同時性の問題が生じにくく、そのため時間ステップを長く設定するほど測定データ数が増加し、誤差が減少したと考えられる。しかし、時間ステップを長く設定することは本論で目標としている注入途中の過程を捉えるということに繋がらない。

時系列解析法では、従来解析法とは異なる分布形状を呈した。すなわち、変曲点となるある時間ステップまでは誤差はほぼ一定となった。しかし、変曲点を超えると誤差は増加する。

#### 3.4.6 時間ステップの設定方法

図-3.4.7を見ると、移流拡散の速度に応じて誤差最小となる時間ステップが移動し、同時に誤差の大きさも変化している状況が分かる。そこで、横軸の時間ステップは注入所要時間で除して正規化し、縦軸の誤差は各ケースの誤差の最小値で除して正規化した。図-3.4.8にその結果を示す。この図において、透水係数ごとに極小値の位置は若干異なるものの、概ね同一形状となっており、極小値は注入所要時間の5～12%の範囲にある。従って、対象地盤の透水係数が今回のパラメータスタディの範囲内であれば、時間ステップを上記の範囲内（注入所要時間の5～12%の範囲）に設定することで時系列解析法が有効に機能すると考えられる。なお、以降の検討は、上記の時間ステップの範囲で行う。



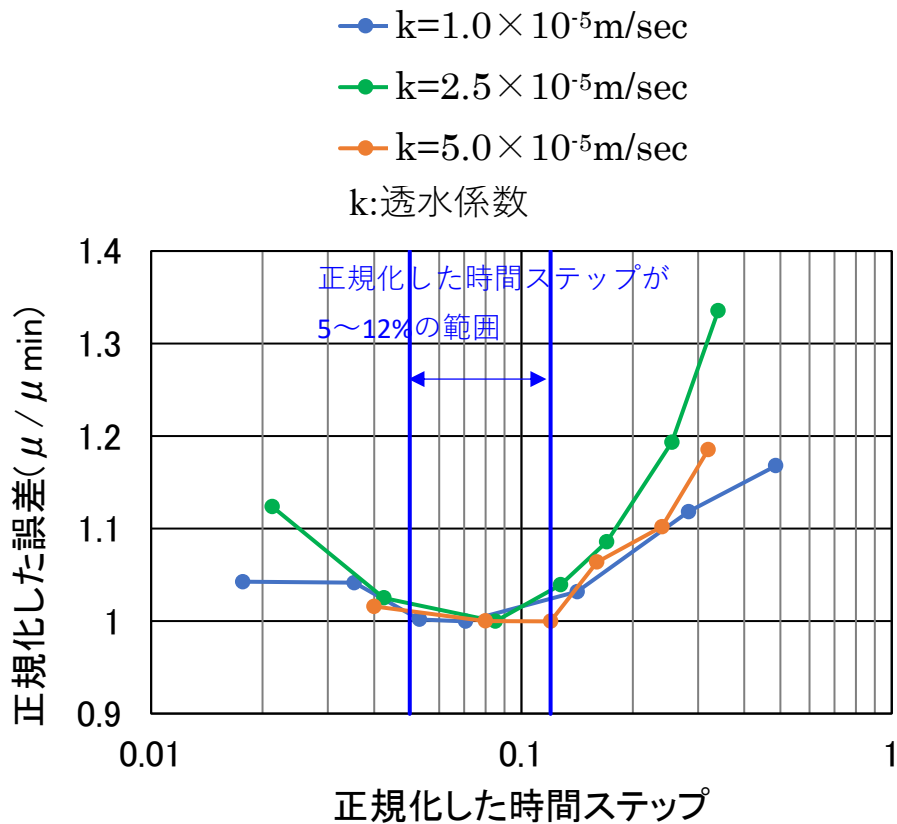


図-3.4.8 正規化した評価値  $\mu$  と正規化した時間ステップの関係

### 3.4.7 時系列解析法の各特徴の必要性の検証

3章で述べたように、時系列解析法は3つの特徴より構成されていることから、各特徴の必要性を説明する。3つの特徴のうち、特徴1は特徴2や3を実施するための前提条件となるものであるため、特徴1をなしにすることはできない。一方、特徴2や3はそれぞれ

表-3.4.3 解析法の比較条件

解析法	説明	特徴 1 <sup>※1</sup>	特徴 2 <sup>※2</sup>	特徴 3 <sup>※3</sup>
A	従来解析法	-	-	-
B	時系列解析法	○	○	○
C	式(3.9)を解く方法	○	-	-
D	式(3.22)を解く方法	○	○	-
E	Kim et al. (2009)の方法	○	-	○

※1：全ての時間ステップを一体の観測方程式で解くこと

※2：求めるパラメータを比抵抗の時間変化量とすること

※3：比抵抗が変化することを許容し、時間ステップの中での測定時刻の違いを考慮した観測方程式を立てること

れ独立した実施事項であるため、逆解析時にこれらの特徴を加味するか否かは選択可能である。そこで前節と同じ検討条件について、従来解析法、時系列解析法に追加する形で表-3.4.3に示す解析法で検討し、比較した。解析法Aは従来解析法であり、前節までの結果と同一である。解析法Bは時系列解析法であり、特徴1～3を実施するものである。解析法Cは従来解析法に比べて特徴1のみを取り入れた解析法であり、式(3.9)を解くものである。解析法Dは特徴1と2を取り入れた解析法であり、式(3.22)を解くものである。解析法Eは特徴1と3を実施するものであり、結果的にKim et al.<sup>52)</sup>と同じ手法である。誤差の比較結果を図-3.4.9に示す。解析法B～Eはいずれも解析法A（従来解析法）より誤差は小さくなっているものの、解析法CとDの誤差はほぼ同じであり、両者の比較だけで見ると、特徴1に特徴2を付加する理由は見当たらない。一方、解析法Eも解析法Cより誤差が小さくなっているとは言えず、特徴1に特徴3を付加する理由も見当たらない。しかし、特徴1～3を全て取り入れた解析法Bは解析法Cより誤差が小さくなっており、特徴2と3を同時に取り入れることによって相乗効果を発揮し、精度を高めていると推察される。従って、特徴1～3を全て取り入れることが解析精度の面から重要であることが分かった。

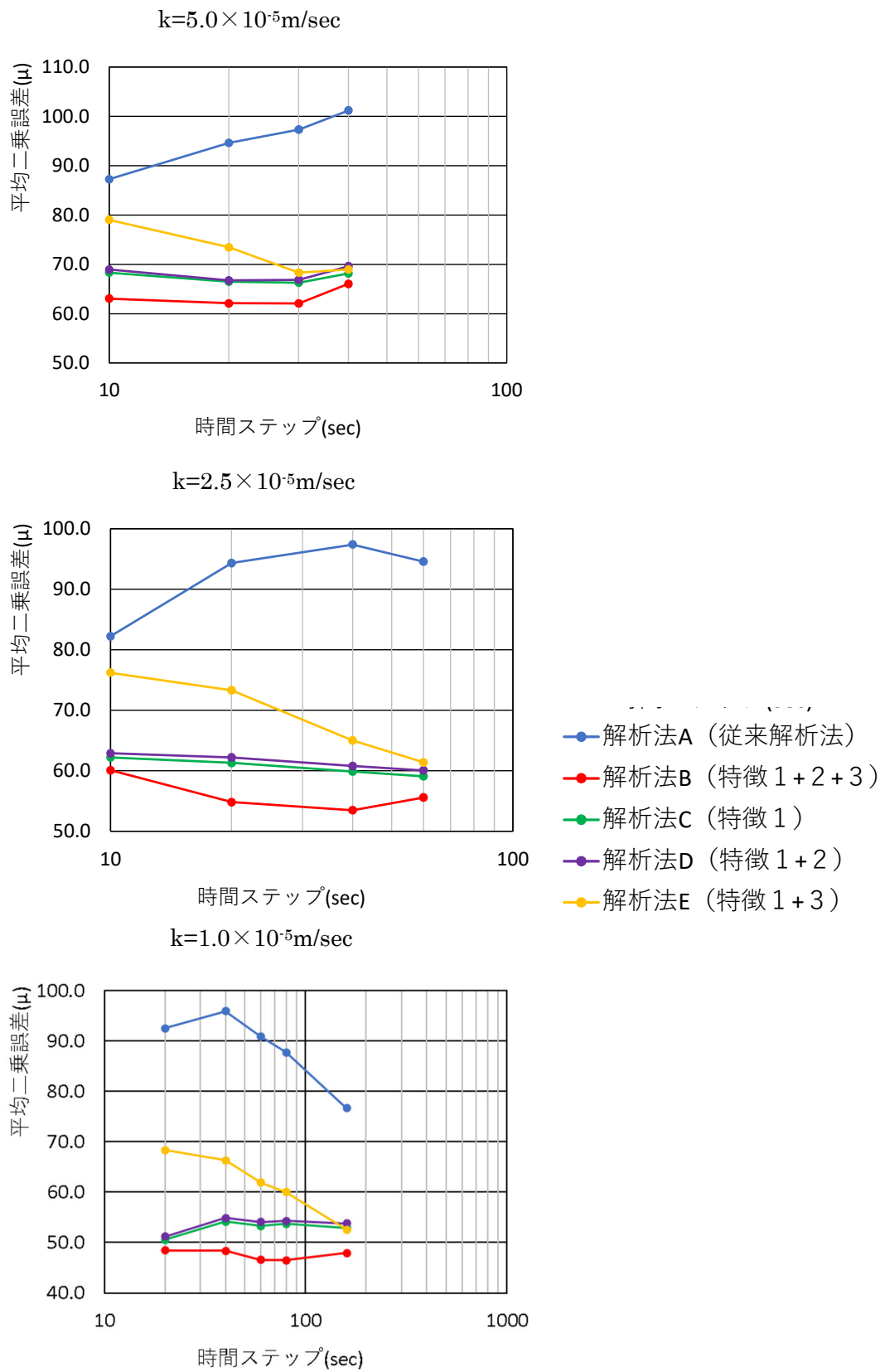


図-3.4.9 逆解析の誤差の比較

### 3.4.8 既往の解析法との比較

既往の主な解析法と時系列解析法との比較を試みた。解析法には、以下のようなものがある。

- A. Independent inversion (従来解析法)
- B. proposed method (本論文での時系列解析法)
- F. Difference inversion (LaBrecque and Yang<sup>47)</sup>)
- G. 4D inversion (Kim et.al.<sup>52)</sup>)
- H. 4D Active Time Constrained (Karaoulis et al.<sup>54)</sup>)
- I. Kalman filter (Vauhkonen et al.<sup>50)</sup>)

解析法の表記のうち、A、F、G、HについてはKaraoulis et.al.<sup>54)</sup>に倣った。Iは一般的な名称である。また、冒頭の記号は前項で比較した手法との重複を避けて使用している。また、解析法F~Iも広義の従来解析法であるが、本論では従来解析法を3.3.2で示したように定義しているため、これらの解析法を本論では既往の解析法と称して従来解析法と区別する。

Karaoulis et.al.<sup>54)</sup>はモデルシミュレーションにより解析法A、F、G、Hを比較し、Hの4D Active Time Constrained (以下、4D-ATCとする) が最も誤差が少なかったとしていることから、本論では解析法B、H、Iを比較対象とした (参考のため、解析法Aの結果も記載した)。

解析法Hでは、比抵抗の変化率 $k$ とtime Lagrangian  $a$ の関係を設定する必要があるが、原文の設定値をそのまま用いた。

解析法Iでも、カルマンフィルタのパラメータを設定する必要があるが、原文の設定値を用いている。つまり、状態遷移行列は単位行列とし、状態遷移のノイズの共分散は $0.8I$ の定常値とした。また、観測ノイズの共分散は $0.2I$ の定常値とした。事前状態推定誤差の共分散の初期値は $0.1I$ とした。

図-3.4.10に結果を示す。透水係数の速い $k=5.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ のケースでは、カルマンフィルタ、時系列解析法、4D-ATC、従来解析法の順に誤差が少ない結果となった。ただし、4.2.5で述べた推奨時間ステップである30~40秒付近でのカルマンフィルタと時系列解析法の誤差の差は僅かである。透水係数の遅い $k=2.5 \times 10^{-5} \text{m/s}$  や $k=1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$

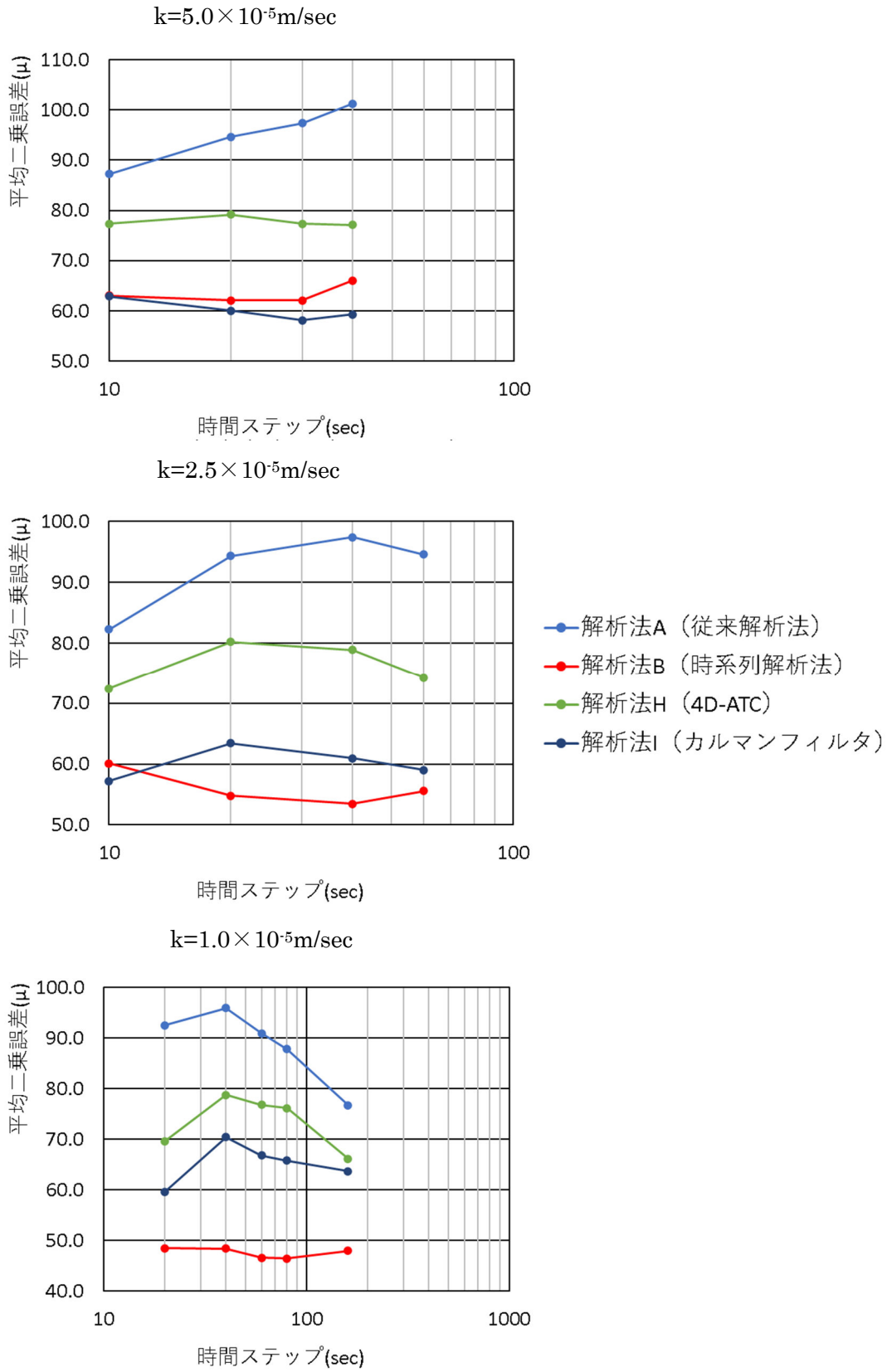


図-3.4.10 既往の解析法との比較

のケースでは、時系列解析法、カルマンフィルタ、4D-ATC、従来解析法の順に誤差が少ない結果となった。時間ステップが長くなると、4D-ATCの精度が大きく改善しているが、リアルタイムモニタリングの実用性の面から考えると、あまり重要ではない領域と思われる。4D-ATCは事前に従来解析法で各時間ステップでの比抵抗変化率 $k$ を計算し、それに基づいてtime Lagrangianを計算するため、従来解析法が偽像等により誤った比抵抗変化率を算出すると、time Lagrangianも不正確となり、4D-ATCの解析精度が低下する。この意味で事前に行う従来解析法の精度と4D-ATCの解析精度は連動している。このため、時間ステップが長いレンジでは従来解析法の精度向上に伴って4D-ATCの精度も向上しているものと考えられる。以上より、条件によってはカルマンフィルタや4D-ATCに精度が劣るものの、全体的に見れば時系列解析法は最も高精度となる可能性の高い解析法であることが分かった。ただし、カルマンフィルタや4D-ATCには解析者自身が設定すべきパラメータが複数あるが、参考文献で示されているパラメータの値をそのまま用いており、今回の数値実験に対する最適値を追求してはいない。パラメータを変更すれば結果が変わる可能性はある。

### 3.4.9 数値実験のまとめ

本節では、時系列解析法の理論の妥当性を検証するために数値実験を行い、時間ステップを適切に設定することにより従来解析法より精度向上が図れることを示した。さらに、パラメトリックスタディを行い、時間ステップは全体時間（対象領域全体が変化し終わる時間）の5～12%の範囲に設定することで時系列解析法が有効に機能することを示した。

次に、時系列解析法を構成する3つの特徴のうち、時間変化量形式に置き換えることと観測方程式の中で用いるヤコビアンや残差ベクトルを当該測定データの測定時刻の瞬時値に補間することについては、互いに相乗効果を有するため、3つの特徴が揃って初めて有効に機能することが分かった。

さらに、既往の解析法との精度比較を行った。その結果、条件によっては他の解析法に精度が劣るものの、全体的に見れば時系列解析法は最も高精度となる可能性の高い解析法であることが分かった。

以上のように、薬液注入のリアルタイムモニタリングにおいて、時系列解析法を採用す

ることにより比抵抗分布の推定精度を向上できることを明らかにした。

### 3.5 第3章のまとめ

本章では、時系列解析法の考え方を従来解析法と対比できる形で示した。時系列解析法は2章で述べたリアルタイムモニタリングを行う上で解決しなければならないデータの同時性の問題を解決する新しい逆解析方法である。時系列解析法は4章で述べる注入時のリアルタイムモニタリングによる薬液注入の改良範囲の評価、5章で述べる注入不良により生じた水みち末端位置の検知の両方に共通して必要となる本研究の中心技術である。時系列解析法は従来解析法にはない以下の3つの特徴を有している。

特徴1：時間ステップ毎に個別に観測方程式を解くのではなく、全ての時間ステップを一体の観測方程式で解く

特徴2：求めるパラメータを比抵抗そのものではなく、比抵抗の時間変化量とする

特徴3：1つの時間ステップの中では比抵抗は一定と仮定するのではなく、比抵抗が変化することを許容し、時間ステップの中での測定時刻の違いを考慮した観測方程式を立てる

そして、それらが機能して従来解析法より精度の高いモニタリングが可能となる。

次に時系列解析法の基本性能の検証を目的とした数値実験を行った。最も単純な拡散現象として地盤内の1点から塩水が注入され、同心円状に拡散する現象を対象に、時系列解析法の精度を他の解析法と比較した。その結果、条件によっては他の解析法に精度が劣るものの、全体的に見れば時系列解析法は最も高精度となる可能性の高い解析法であることが分かった。

## 第4章 リアルタイムモニタリングによる薬液注入の改良範囲の評価

### 4.1 概説

本章では、2.2 で述べた第一の課題の解決を図る。即ちそれは注入中の注入状況を精度よく把握することである。しかし、2.3 で述べたように、既往の方法では薬液注入の前後での比抵抗変化から注入範囲を推定してきた。注入前後の比抵抗分布の差異から注入不良箇所が検出されると、この位置に注入孔を再削孔し補足注入が行われる。しかし、この作業は施工の大きな手戻りであり、工程遅延や施工費の増大を招く。また、改良範囲の内部に生じた注入不良箇所に補足注入すると、不良箇所周囲の改良部が薬液の浸透を邪魔する。そのときの地盤条件、注入方法に見合った新たな注入管理方法を設定できないと、補足注入の効果を期待することは難しい。

しかし、比抵抗トモグラフィによって薬液の浸透過程を施工中に監視できれば、不良箇所を検出するとともに注入量や注入圧の変更などの対応を施工途中に行うことができる。その結果、注入不良を施工途中に解消でき、薬液注入工法の信頼性を大幅に高めることが可能になる。これまでリアルタイムモニタリングが行われてこなかったのは 2.4 で述べたリアルタイムモニタリングにおける問題点を克服する方法が当時なかったためと思われる。そこで、上記の問題点を解決し、注入中に平行して実施する比抵抗トモグラフィによる比抵抗分布のリアルタイムモニタリングの実現のために 3 章で述べた時系列解析法を提案した。

本章では、薬液注入と並行して行う比抵抗トモグラフィによる注入状況のリアルタイムモニタリングの実現に向けた検討結果を示す。そして、これらを踏まえた評価方法を提案する。

4.2 では、時系列解析法を用いれば、注入状況のリアルタイムモニタリングを他の既往の手法より精度よく行えることを模型実験で検証する。土槽内に薬液の代わりに塩水を注入し、これと並行して連続的に比抵抗トモグラフィ計測を行う実験を行った。

4.3 では、薬液のゲル化の影響を検証した。薬液はゲル化反応により固結する。これは化学反応であるため、比抵抗がゲル化の前後で変化し、モニタリング結果に影響を及ぼすことが懸念される。このため、ゲル化の前後で比抵抗がどの程度変化するかを実験的に検



証した。

これらの検証結果を踏まえて 4.4 で時系列解析法を用いたリアルタイムモニタリングの方法を提案する。

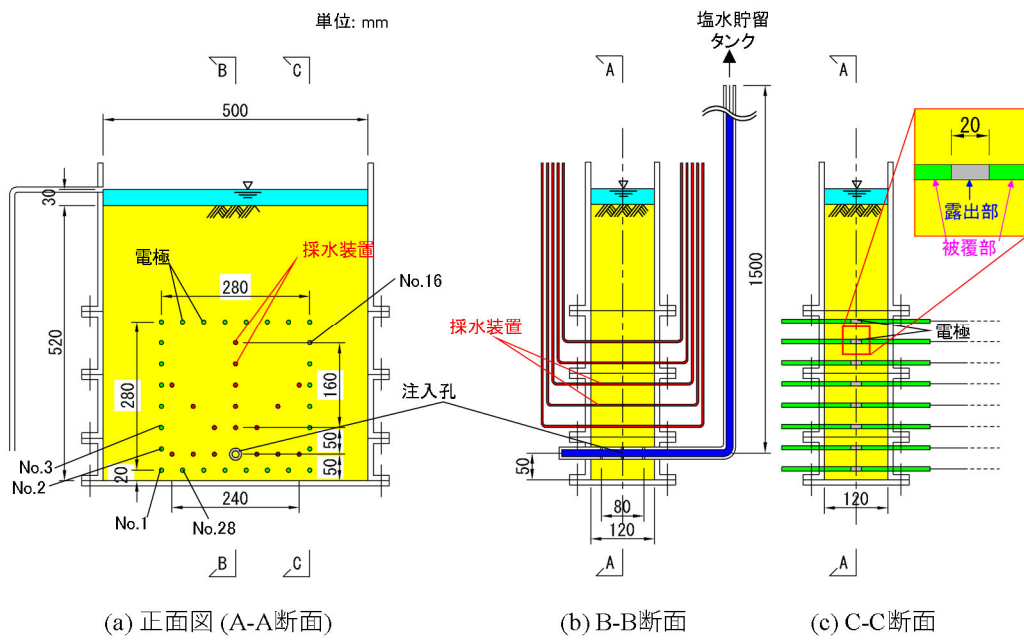
最後に 4.5 で本章のまとめを述べる。

## 4.2 模型実験による薬液注入範囲の評価

### 4.2.1 目的・概要

3.3で、複数の時間ステップにおける観測方程式を一度に解くこと、時間増分を求めるパラメータとすること、測定データを測定時刻ちょうどのものに補間することを組み合わせた方法（時系列解析法）を提案し、3.4で、特定の条件の下での数値実験において、その他の主要な既往の方法と比べて誤差が少ないことを示した。しかし、計測誤差を伴う実測データを用いても時系列解析法が有効に機能することは未検証であった。理論上優れた解析法であってもノイズに対して脆弱な可能性もあり、また数値実験でも擬似計測データに人工的にガウスノイズを加えてはいるものの、それらは実現象で計測したデータにおけるノイズとは特性が異なる可能性もある。さらに、数値実験では想定しえない事象が生じる恐れもある。いずれにしても、解析手法の提案は机上検討にとどまらず、実測して検証することが重要である。そこで、本節では時系列解析法が実測データの下でも有効に機能し、薬液注入範囲の評価に活用可能であることの検証を目的として模型実験を行い、既往の解析法と精度を比較した。模型実験では、実測した地盤内の比抵抗分布とトモグラフィから得られた比抵抗分布とを比較して検証を行った。物理探査は自然地盤を対象に行うものであるから、本来は自然地盤のフィールドで実規模実験を行うことが理想的であるが、検証には正解の比抵抗分布（以下、正解比抵抗と呼ぶ）を精度よく把握する必要がある。しかし、自然地盤では本来の地盤の比抵抗にばらつきがあること、正解の比抵抗分布をモニタリングする手段に限界があること、地表面付近での探査の場合は気象等の影響を受けることなどにより、正解比抵抗分布の正確な把握が困難であると考え、模型実験で代用することとした。そこで、模型実験では、時々刻々の正解比抵抗を把握できる装置を用いた。

図-4.2.1に示す透明アクリル製容器内に淡水で飽和させた地盤を製作した。図中の注入孔より質量濃度3wt%の塩水を20分間注入し、塩水の拡散過程を濃度測定と比抵抗トモグラフィの両方で捉える実験である。これは、薬液の浸透に伴い注入範囲が面的に広がっていく状況を塩水の拡散によって模擬したものである。



(d)写真

図-4.2.1 実験装置

本実験では塩水で薬液を代用しているが、3wt%食塩水は薬液注入用の薬液と導電率（比抵抗の逆数）がほぼ等しく、地盤に注入した状態での導電率もほぼ等しいことを後述する予備実験－1により確認した。なお、薬液と塩水の違いはゲル化の有無であるが、薬液の比抵抗がゲル化の前後で変化しないことは4.3で後述する。また、薬液はゲル化後は地盤内で固化するのに対して、塩水は固化しないため、密度流の影響で下方に沈降することが懸念された。しかし、今回設定した注入時間の範囲では密度流の影響はほぼないことを後述する予備実験－2により確認した。

正解比抵抗は容器内の17箇所にて採水装置を配置して間隙水を採水し、その導電率から換算した。後述する予備実験－3を予め行い、間隙水の導電率と地盤の比抵抗の関係を求め、採水位置での地盤の比抵抗に換算して、これを正解比抵抗とした。そして、測定電位の逆解析から得られた地盤の比抵抗分布と正解比抵抗を比較した。

#### 4.2.2 模型装置

図-4.2.1(a),(b)に示したように、装置の中央、底から50mmの位置に注入孔を配置した。注入孔は装置を貫通する内径13mmの透明塩ビパイプ（注入管）に空けた直径4mmの孔である。注入管は水位で注入圧を制御できるよう鉛直に立ち上げ、塩水貯留タンクと接続している。

採水は装置を貫通する外径4mm内径2mmのビニールチューブを配管し、採水する部分はビニールチューブに穿孔して周面にフィルターを巻いてあり、地盤内から間隙水のみを抽出する。これを注入孔を中心とする放射状の5方向17点に配置した。採水は約2分に1回行い、チューブ内の滞留分を廃棄（約5秒間排水）してから約10秒間採水し、5～20cc程度の間隙水を取り出した。

比抵抗トモグラフィの測定に用いる電極は直径3.5mmの丸棒であり、注入孔の周囲28箇所に矩形状に40mmピッチで配置した。図-4.2.1(a)に示したように、左下端をNo.1とし、時計回りに番号付けした。素材には耐食性のあるニッケルを用いた。図-4.2.1(c)に示したように、電極は装置短辺方向の中心において幅20mmの範囲が露出しており、他は被覆している。比抵抗トモグラフィのような楕円型偏微分方程式を支配方程式とする逆問題では、観測可能な境界の多さが逆解析の精度に大きな影響を及ぼすことが知られており<sup>68)</sup>、今回

のように矩形の対象領域を設定した比抵抗トモグラフィの場合には電極ラインの辺の数が多ほど精度は向上し、4辺で測定できれば理想的である。実際の薬液注入では対象領域周囲の4辺で測定するのは困難であるが、解析方法以外の精度低下要因を極力排除するために、はじめに理想的な4辺の電極の配置で実験を行った。次に現実的な電極配置として底辺以外の3辺（上辺、左右の辺）にのみ電極を配置した状況を想定して、得られた測定データから底辺の電極を使用しているデータを除いたデータを使用して同様の検討を行った。

#### 4.2.3 模擬地盤の作成

模擬地盤の材料には7号珪砂を使用した。空気の混入により地盤の比抵抗にばらつきが生じることを抑えるためには、極力飽和度を高める必要があることから、あらかじめ容器内に水深10cmの水を入れておき、その中に乾燥状態の珪砂を投入した。また、予め定めた重量の珪砂を計量して容器内に均等に投入し、密度を均等にするために各層6cmの高さになるよう容器側面より木槌で振動を加えて調整した。

#### 4.2.4 注入方法

実際の薬液注入においては、ステップ注入により一定の速度で注入範囲が広がっていくことが予想される。そのため、模型実験においても塩水の浸透範囲が一定の速度で広がっていくように注入圧を調整した。事前に3次元有限要素法で移流拡散解析を行い、今回設定した20分の注入時間で注入範囲が側方の電極ラインに一定速度で到達するよう、図-4.2.2に示す注入圧の時間管理方法を設定した。

注入時間の20分は、実際の薬液注入において想定される所要時間のうち最も短い（条件的に厳しい）条件より設定した。現在、薬液注入工法には各社より多くの工法が開発されているが、大別すると二重管ダブルパッカー工法と二重管ストレーナー工法に分類される。このうち施工速度が速いのは二重管ストレーナー工法であり、これをモニタリングする場合における最小施工単位は削孔1本分の注入である。下記条件でその標準的な施工時間を見積もったところ、注入の所要時間は35分となった<sup>69)</sup>。これに施工時間のばらつきを15分と考え（実際、地山の透水係数により相応のばらつきが生じる）、本論で述べるモニタ

リング手法が対応すべき最小時間を20分と想定し、模型実験の注入時間もこれに合わせた。

#### 積算条件

- ・ 準拠基準：国土交通省土木工事標準積算基準書（共通編）平成24年度
- ・ 1本あたりの改良対象面積：1 m<sup>2</sup> (=1 m×1 m)
- ・ 改良高さ：3 m
- ・ 工法：二重管ストレーナー工法（单相式、溶液型）
- ・ 単位時間当たり注入量：18.0 L/min
- ・ 土質：N値30以上の締まった砂質土
- ・ 間隙率：30 %
- ・ 重点率：70 %
- ・ 注入率：21 % (=30 %×70 %)

#### 4.2.5 電位測定方法

測定時間を短縮するために、No.1電極は通電用固定電極（C1）、No.2及びNo.16電極は電位測定用固定電極（P1）とし、それ以外の25電極について2極法の測定要領で合計1200通りの組み合わせについて測定することを考えた。ただし、通常の2極法のように番号の小さい方からの電極の組み合わせで順に測定すると、時間ステップ間に感度の偏りが生じ、変化を捉えられない時間帯が生じることが予想された。そのため、電極組み合わせの順番をランダムに並べ替えて測定した。また、注入時間が20分のため、実際に注入時間内に測定できたのは1200の組み合わせのうちの200データ分であった。これは、元々1200の組み

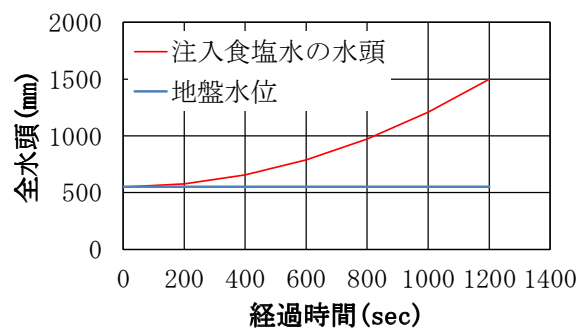


図-4.2.2 注入圧の計画

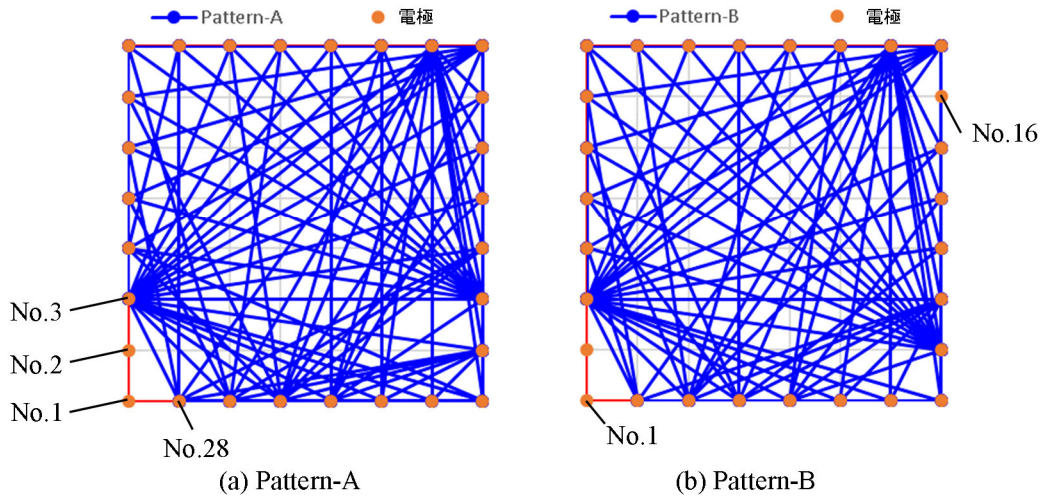


図-4.2.3 電極の組み合わせ

合わせすべてを測定することを目指したわけではなく、1200通りの組み合わせから200通りをランダムサンプリングしたという考えである。図-4.2.3に具体的な組み合わせを示す。通電用電極のNo.1と組み合わせる電極番号をC2電極、電位測定用電極のNo.2及びNo.16と組み合わせる電極番号をP2電極とし、図中の線分はC2とP2を結んだものである。図中のPattern-Aとは、電位測定用固定電極にNo.2を選んだ場合を表し、Pattern-Bとは、No.16を選んだ場合を表している。図のように、比較的偏りの少ない組み合わせとなっていることが分かる。

次に電極組み合わせの順序をランダムに並べ替えたことにより感度の偏りが抑制できていることを検証するために、感度分布を時間ステップ毎に分析した。図-4.2.4は比抵抗100  $\Omega$  mの均一地盤において100 mAの通電による個々の電極組み合わせでのセル単位の感度（ヤコビアン行列の要素）の絶対値を時間ステップ分合計したものを対数目盛で図化したもので、時間ステップトータルでの感度の偏り具合を表している。比抵抗によって感度は変化するため、この図の絶対値にはあまり意味はないが、感度の相対的な偏りを評価するうえでは有効と考えた。また、No.1電極を通電用固定電極、No.2電極を電位測定用固定電極とする考え方は上記と同じにして、標準的な電極組み合わせ順序として、C2、P2電極を電極番号の小さいものから順に組み合わせていくものも比較対象として図化した（以

下、標準的順序とする)。標準的順序におけるC2、P2電極の組み合わせは3-4,3-5,3-6・・・と巡回し、次に4-5,4-6,4-7・・・と進めるものである。図を見ると、標準的順序ではNo.3、No.4、・・・と順次選択するため、その近傍（探査領域の左下付近）に感度が集中している状況が見られ、感度に偏りが生じている。その偏り具合は、大半のコンター図のカラーが赤～水色の4色を超える色で構成されており、場所によって2桁以上の偏りが生じていることが分かる。一方、今回の模型実験で設定した電極組み合わせ順序はランダムに設定しているため、標準的順序と比べてコンターの分布が比較的平坦となっていることが分かる。コンター図は黄色～水色の3色が大半の領域を占めている。したがって、標準的順序と比べて感度の偏りが少なく、領域を比較的均等に探査できていることが確認で

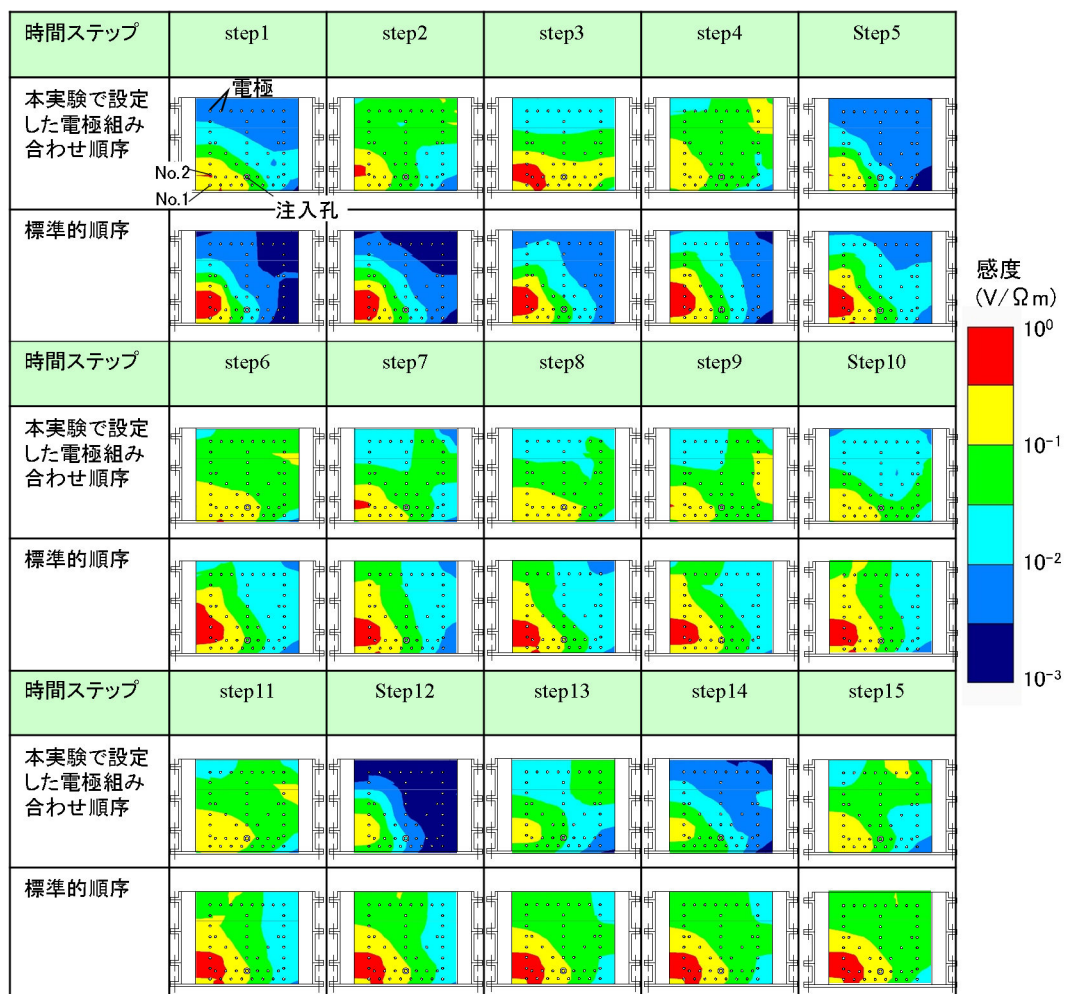


図-4.2.4 各時間ステップにおける感度の絶対値の和の分布



きた。

測定には汎用的な電気探査装置を用いた。通電電流は20 mAを基本とした（本機は測定電位がスケールアウトする場合には自動的に通電電流を調整する仕様となっている）。この20 mAを周期2秒の交替直流、すなわち正負1回ずつの矩形波で通電し、その際の電位の平均値をもって1回あたりの電位とし、2回のスタッキングを行った。

#### 4.2.6 塩水濃度の設定（予備実験—1）

本模型実験では薬液の代わりに塩水を用いるため、薬液と同じ導電率となる塩水濃度を調整する必要がある。そのために薬液によるサンドゲルの導電率、および塩水の濃度とその塩水で飽和した砂地盤の導電率との関係を調べた。後者は3.4.3で述べた実験と同じものである。薬液には汎用的な非アルカリ性浸透グラウト（高強度タイプ）を使用した。使用した砂は模型実験で使用するものと同じ7号珪砂である。測定には3.4.3で述べた測定装置を使用した。薬液サンドゲルの導電率は1S/mであった。塩水濃度と塩水飽和砂の導電率の関係は図-3.4.5で示した通りである。図より、薬液サンドゲルと同じ導電率を有する塩水飽和砂の塩水濃度は3%であることが分かり、模型実験で使用する食塩水の濃度を3%に設定した。

#### 4.2.7 密度流の影響（予備実験—2）

模型実験の注入時間が20分間であるので、その間の塩水の密度流の影響を推定するために、密度流のみによる塩水の移動状況を予備実験から調べた。図-4.2.5(a)、(b)に示す実験装置において内側容器には飽和砂（7号珪砂）を充填した。外側容器と内側容器は内側容器の底面のフィルターを介して連通している。外水位と内水位が等しいため、浸透流は生じず、密度流のみが生じる。試験開始直前に内水位を20mm下げおき、開始と同時に水位20mm分の6%塩水を投入し、素早く攪拌することで、3%塩水が内側容器内上部に湛水している初期状態を作った。塩分濃度の増加に伴う見掛比抵抗の低下状況を複数地点でモニタリングできるように、図のように14本の電極を配置した。電極名は左から順にa, b, c, …, nとする。

実験結果の一例として2つの電極配置での測定電位差の時刻歴を図-4.2.5(c)に示す。1

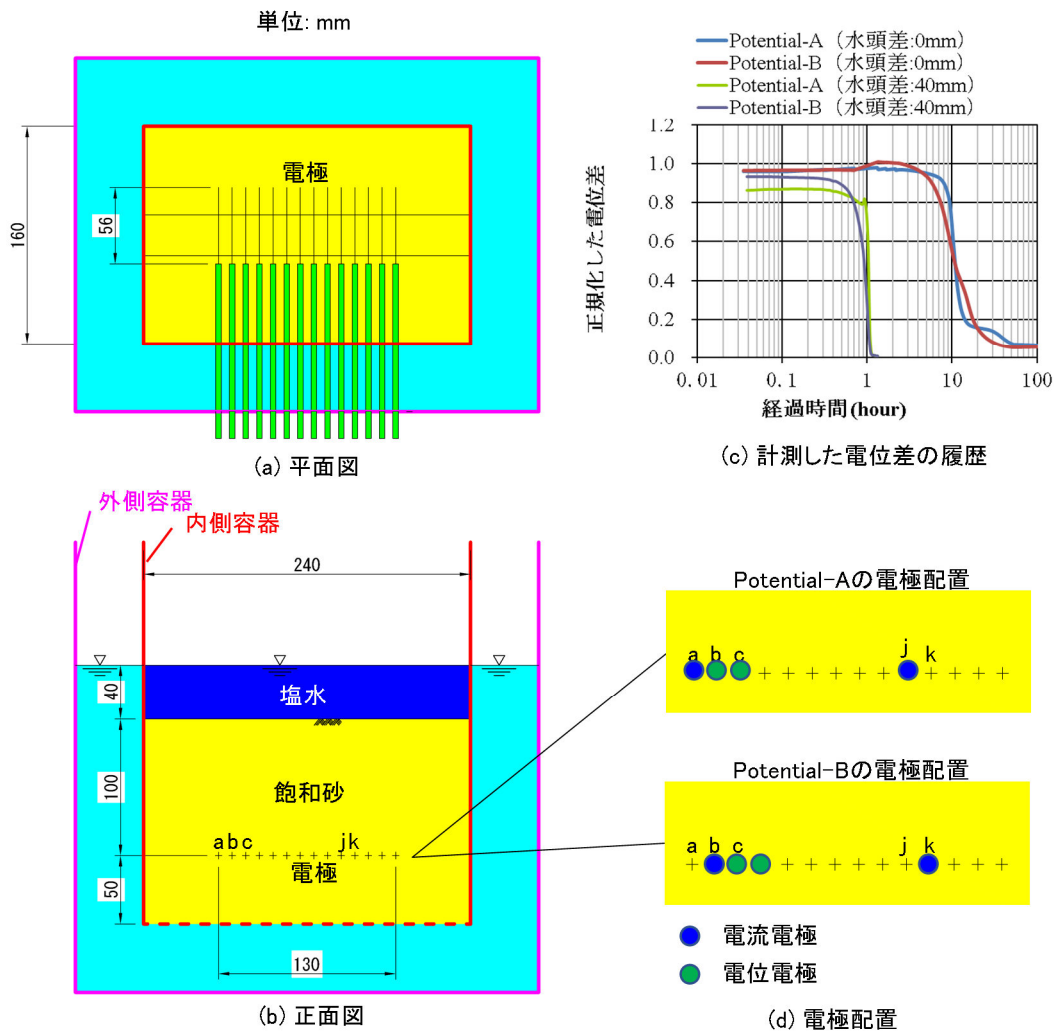


図-4.2.5 密度流の影響に関する実験(予備実験—2)

つは電極aと電極jを電流電極とした時の電極bと電極cの間の電位差の履歴 (potential-A)、もう1つは電極bと電極kを電流電極とした時の電極cと電極dの間の電位差の履歴 (potential-B) である (図-4.2.5(d)参照)。初期状態のばらつきを取り除いて電位差の低下の比率で評価するために、縦軸は初期状態の電位差で除した値 (電位差変化率) を表示している。充填した飽和砂の上面から電極ラインまでの深度は100mmであり、模型実験での注入孔から左右の辺の電極までの距離 (=最短で約140mm) と概ね同程度である。図のように、内外の水頭差を0mmとした場合、どちらの測点の電位差も6時間経過したあたりか

ら低下し始め、およそ18時間後に低下が完了している。

一方、外水位を40mm下げて容器内外に40mmの水頭差を与え、下向きの浸透流を生じさせた場合、電位差が低下するまでに要した時間は1時間程度であった。これらの結果から、本番の模型実験における20分間の注入時間の範囲では密度流の影響がほぼないことは明らかである。

#### 4.2.8 採水からの比抵抗の換算方法（予備実験—3）

模型実験では採水により抽出した間隙水の導電率を換算して正解比抵抗を求める。そのため、模型実験で使用する7号珪砂について間隙水の導電率と地盤の比抵抗との関係を予備実験により調べた。地盤の比抵抗は予備実験—1と同じ装置で測定した。間隙水の導電率は市販の導電率計で測定した。実験の結果、**図-4.2.6**に示す関係が得られ、模型実験においてもこの関係から間隙水の導電率を地盤の導電率に換算し、その逆数を取って地盤の比抵抗とした。

#### 4.2.9 模型実験の導電率測定結果

各採水ポイントでの導電率の測定履歴を**図-4.2.7**に示す。いずれのポイントでも塩淡水境界の到達とともに導電率が急激に増加（比抵抗が急激に減少）していることから、塩淡水境界

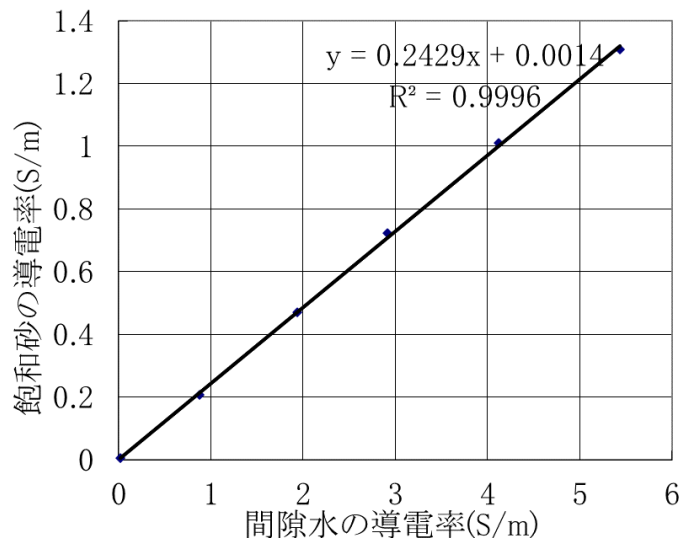
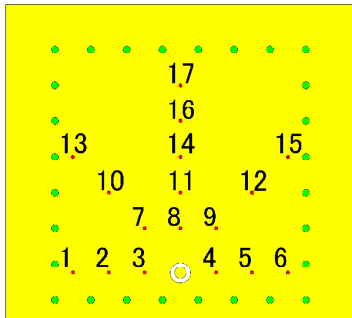
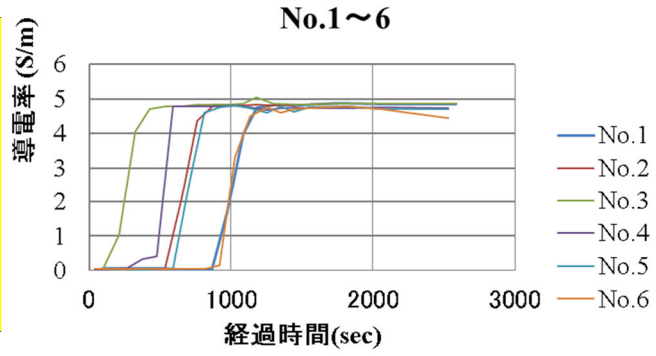


図-4.2.6 間隙水の導電率と飽和砂の導電率の関係

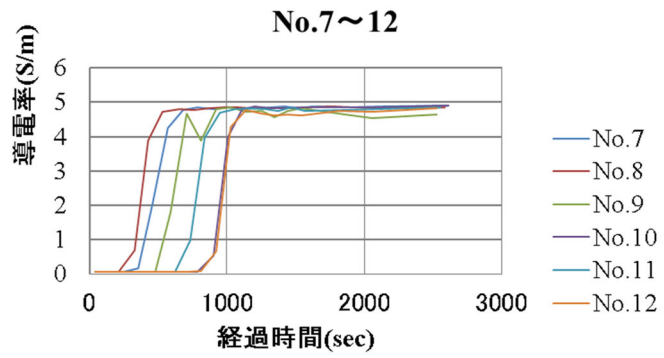
は注入時間中、常に明瞭な境界を持っており、塩水と淡水の混じりあった遷移区間の幅は狭いことが分かる。なお、No.9、No.14では、導電率が急激に増加した後、一旦少し戻っている（減少している）が、その原因は特定できなかった。地盤の比抵抗のコンターを図-4.2.8(d)に示す。注入孔から近いポイントから順に比抵抗低下が起こっており、ほぼ同心円状に塩水が広がっている。また、設定した20分の注入時間で概ね想定どおり塩水は左右の電極ライン付近まで到達している。



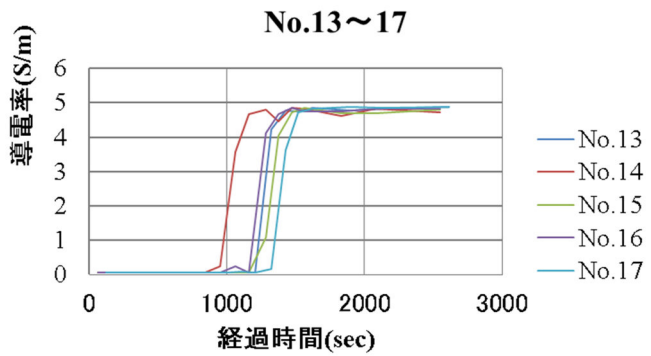
(a)採水ポイントの配置  
(図中の番号は採水ポイント No. を示す)



(b)No.1~6



(c)No.7~12

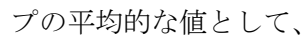
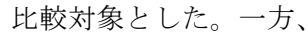


(d)No.13~17

図-4.2.7 各採水ポイントで測定した導電率の履歴

#### 4.2.10 逆解析方法の精度の比較検討

模型実験での電位測定データを用いて時系列解析法、従来解析法<sup>59)</sup>、カルマンフィルタ<sup>50)</sup>で逆解析を行い、比較した。差トモグラフィ法<sup>46)</sup>については各時間ステップにおいて同じ電極の組み合わせで測定していないため、適用できなかった。なお、カルマンフィルタも広義の従来解析法の一つであるが、本論では上記のように物理探査ハンドブック<sup>59)</sup>に記載の方法を従来解析法と定義しているため、カルマンフィルタは従来解析法と区別して呼称している。また、今回の模型実験では、地盤が奥行き方向（測定断面に垂直な方向）に有限であり、順解析において奥行き方向の境界条件を考慮する必要があることから、3次元解析を用いた。さらに地盤がすべての方向に有限であることから、そのことを踏まえて見掛け比抵抗を算出する必要がある。このため、算出の際に必要な電極配置係数は鏡像法<sup>70)</sup>を用いて求めた。なお、カルマンフィルタの実施にあたり、測定誤差の共分散、状態遷移誤差の共分散、状態推定誤差の共分散の初期値の3つのパラメータについて、事前に設定しておく必要があるが、今回の検討では、滑降型シンプレックス法により測定値との残差が極小となるパラメータの組み合わせを探索し決定した。滑降型シンプレックス法はパラメータの初期値によっては局所的な誤差極小解に停留する可能性がある。このため、初期値はランダムに設定し、10回の試行を行って結果を評価した。後述する誤差 $\mu$ の評価では各時間ステップにおいて10回の試行の誤差の平均値で評価した。また、時系列解析法においても、2章で述べたように $\alpha$ 、 $\gamma$ を滑降型シンプレックス法で最適値を探索するにあたり、初期値をランダムに設定して10回の試行を行い、誤差は同様に10回の平均値で評価した。

従来解析法、カルマンフィルタより得られる解は各時間ステップの間、比抵抗分布を一定と仮定して求めているが、実際の比抵抗分布は時々刻々変化しているため、時間ステップの平均的な値として、-3.3.3(a)に示すように時間ステップの中間時点での正解比抵抗を比較対象とした。一方、-3.3.3 (b)に示すように、時系列解析法より得られる解は時間ステップの節目における比抵抗分布であるから、当該時点（時間ステップの節目）の正解比抵抗を比較対象とした。

まず、基本ケース（case1）として、注入時間を暫定的に15の時間ステップに分割し、時間ステップあたりの測定時間を80秒とした場合の結果を示す。3.4.5で述べたように、時

系列解析法における時間ステップは全体時間の5～12%が適当である。本実験での時間ステップの全体時間に対する比率は6.7%(=80÷1200÷0.067)であり、上記の目安を満足している。図-4.2.1(a)に示したA-A断面について、各時間ステップにおける比抵抗分布を図-4.2.8に示す。全体的に時系列解析法(図-4.2.8(a))は正解比抵抗(図-4.2.8(d))を最もよく表現できているといえる。従来解析法(図-4.2.8(b))の場合、1ステップの間に一気に遠方まで拡散したり、一度比抵抗が低下した領域が再度増加したり、解が不安定となっている。これに対し、時系列解析法では注入孔を中心に徐々に塩淡境界が広がっていく様子が再現できている。さらに、時系列解析法では塩淡境界部に等高線が密集しており、図-4.2.7において正解の導電率(正解比抵抗の逆数)が塩淡境界で急変している事実と整合している。一方、カルマンフィルタ(図-4.2.8(c))の場合、領域上方にしばしば偽像が見られ、また注入孔近傍の塩分の拡散の速度も正解比抵抗より遅く、図中に寸法線で示したように、1160秒時点での10 Ωmの領域はおよそ正解比抵抗より120 mmほど遅れている。

正解比抵抗との差を定量的に評価するために時間ステップごとの平均二乗誤差 $\mu_k$ を図-4.2.9(a)に示す。ただし、 $\mu_k$ は

$$\mu_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \rho_{p,i})^2}{n}} \quad (4.1)$$

$\rho_i$  : 逆解析から求めた*i*番目の採水ポイントでの比抵抗

$\rho_{p,i}$  : *i*番目の採水ポイントでの正解比抵抗(抽出した間隙水の導電率測定より求めた地盤の比抵抗)

$n$  : 採水ポイントの数 (=17)

$k$  : 時間ステップの番号

と定義した。

開始80秒後の結果は正解比抵抗のデータが揃っていないため除外した。図中の大半のステップで時系列解析法が最も誤差が小さいことが分かる。全14ステップの誤差の平均値は時系列解析法19.3、従来解析法22.7、カルマンフィルタ33.8となり、時系列解析法の優位性が確認できた。特に時系列解析法の特徴は誤差が安定している点である。従来解析法を見ると、今回の場合、360、440、600秒等で誤差が大きくなっており、それらの時間ステップに感度の悪い電極配置が含まれていたことも考えられる。時系列解析法では、感度の

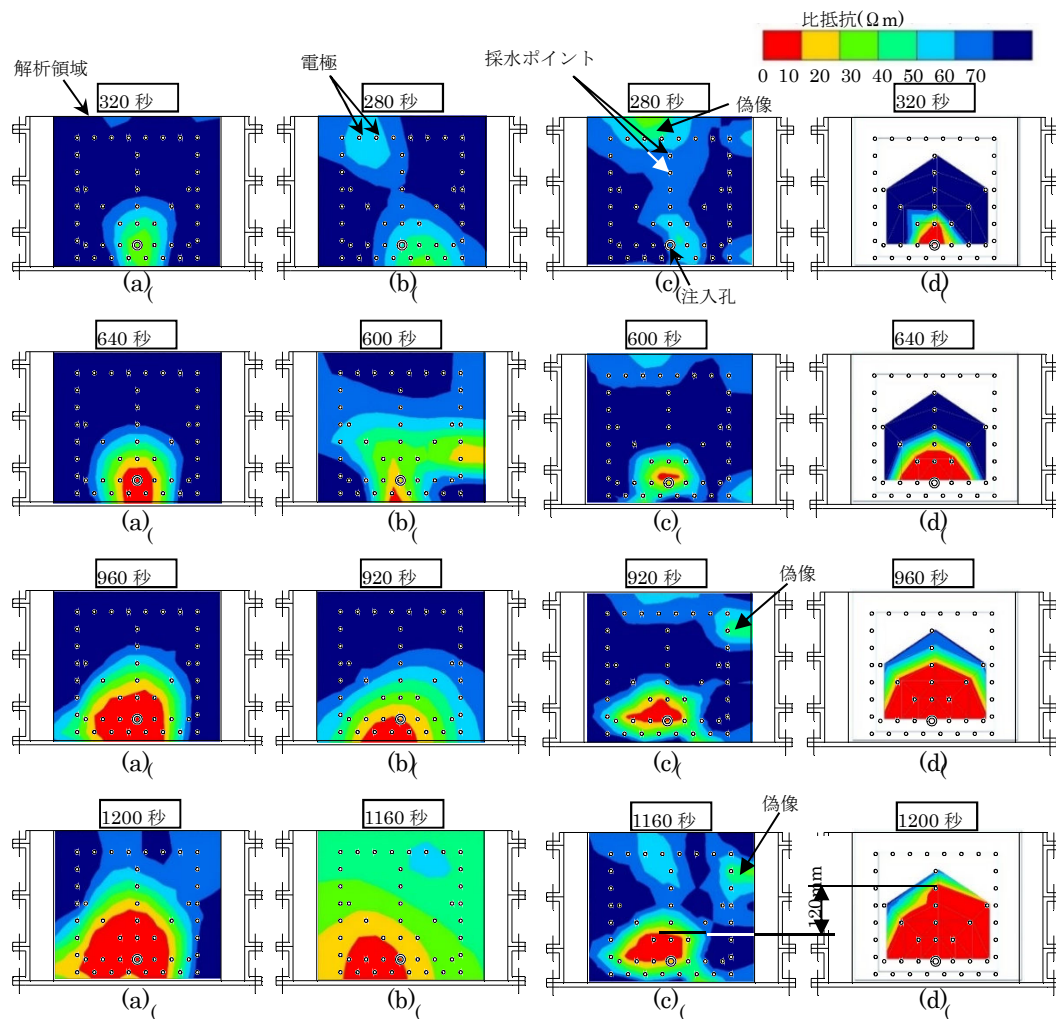


図-4.2.8 比抵抗分布の履歴

(a:時系列解析、b:従来解析法、c:カルマンフィルタ、d:正解比抵抗)

悪い電極配置で測定されたデータを多く含む時間ステップにおいても、当該時間ステップで取得した測定データのみでそのステップの比抵抗分布を解くわけではないので、そのような影響を受けにくいと推察される。

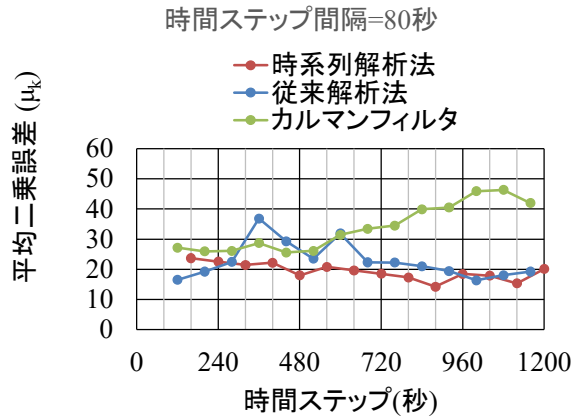
カルマンフィルタは設定パラメータの良否が結果に大きく影響している可能性がある。後半の時間ステップで誤差が大きくなっているのは、注入孔を中心とした後半の低比抵抗領域の広がりには追従できていないように見える。今回は滑降型シンプレックス法で誤差の少ないパラメータを探索しているものの、誤差をそれほど小さくできなかった。この結果に対する原因は不明なものの、扱う問題によってはカルマンフィルタが従来解析法より精度が劣ることはYiheng et al.<sup>7)</sup>でも示されていることから、この結果は妥当と考えられる。



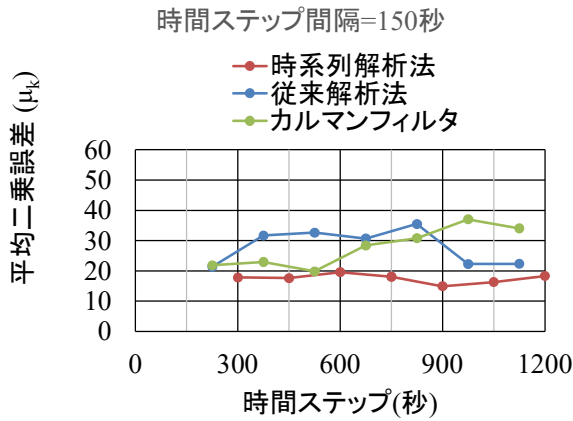
次に、時間ステップの設定の仕方が解析結果に及ぼす影響を調べた。時間ステップを120秒(case2)、150秒(case3)、240秒(case4)および300秒(case5)に変更した場合について、同様に模型実験データより逆解析を行った。注入時間1200秒を分割したため、時間ステップ数はそれぞれcase2で10ステップ、case3で8ステップ、case4で5ステップ、case5で4ステップとなる。図-4.2.9(a)に相当する時間ステップごとの平均二乗誤差 $\mu_k$ の推移の例として、case3、case5の結果をそれぞれ図-4.2.9(b)、図-4.2.9(c)に示す。また、各ケースの $\mu_k$ の平均値 $\mu$ を図-4.2.10(a)に示す。

図-4.2.9(b)、図-4.2.9(c)を見ると、前節で述べた図-4.2.9(a)と同様の傾向が認められる。すなわち、時系列解析法は誤差が小さく安定しており、従来解析法はいくつかの時間ステップで誤差が大きくなっており、カルマンフィルタは後半の誤差が大きくなっている。

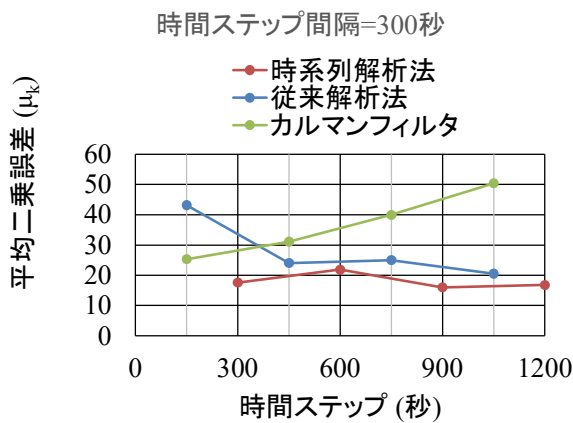
図-4.2.10(a)を見ると、 $\mu$ はいずれのケースでも時系列解析法の誤差が最小である。時系列解析法は短周期領域では前述の特徴1、2による効果（時間ステップあたりのデータ数が減少しても誤差が大きくなる）が、長周期領域では特徴3による効果（時間ステップの中で比抵抗分布が大きく変動しても誤差が大きくなる）が機能してそれぞれ誤差を抑制していると考えられる。



(a)



(b)



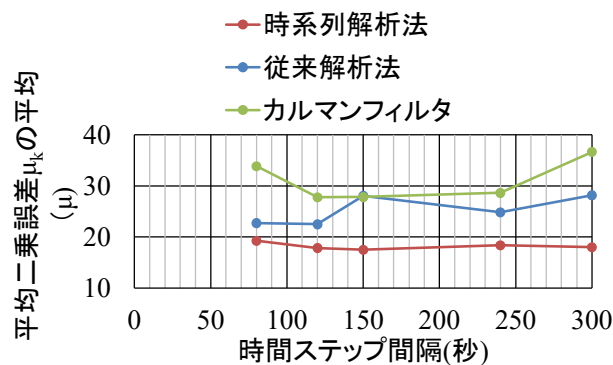
(c)

図-4.2.9 各時間ステップにおける平均二乗誤差 (a:時間ステップ間隔=80 秒、b:時間ステップ間隔=150 秒、c:時間ステップ間隔=300 秒)

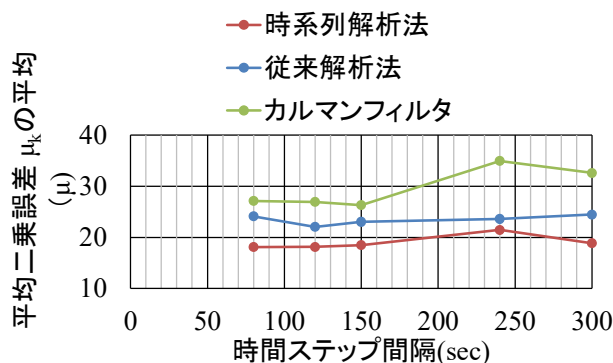
#### 4.2.11 現実的な電極配置での精度の比較検討

現実的には今回の実験のように対象範囲4辺を電極で包囲することは困難である。本節では現実的な電極配置として底辺以外の3辺（上辺、左右の辺）にのみ電極を配置した状況を模擬して、得られた測定データから底辺の電極を使用しているデータを除いた間引きデータを使用して前項と同様の検討を行った。得られたデータの一部を除外することは、計測速度が低下することと同じであるため、本来の3辺のみの計測データとは異なる。このため、前節の結果と直接比較することにはあまり意味がないと思われるが、時系列解析法を他の解析法と相対的に比較するうえでは意味があると考えた。

各ケースの $\mu_k$ の平均値 $\mu$ を図-4.2.10(b)に示す。図-4.2.10(a)と同様に $\mu$ はいずれのケースでも時系列解析法の誤差が最小である。精度の悪い不良データを除外すれば誤差は改善し、



(a)測定された全データを使用した場合

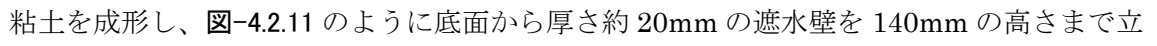


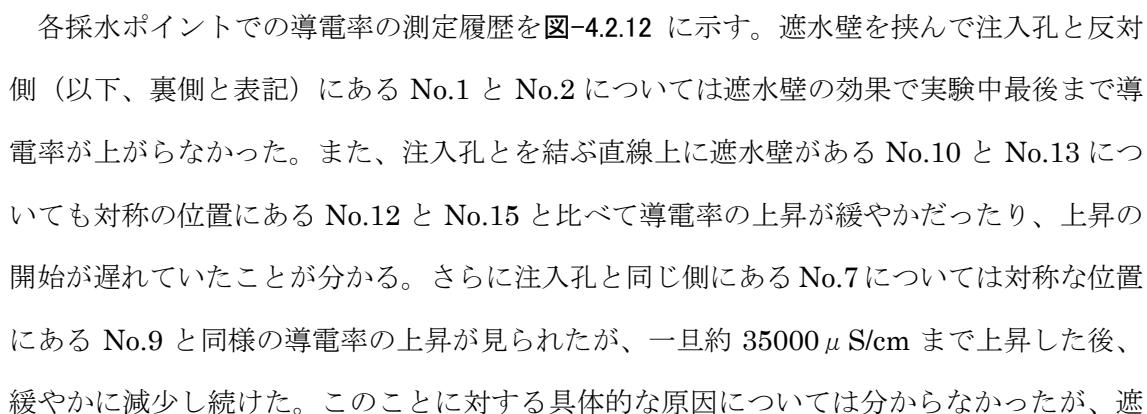
(b)底辺を除く3辺の電極ラインで測定されたデータのみを使用した場合

図-4.2.10 平均二乗誤差 $\mu_k$ の平均 $\mu$ と時間ステップ間隔の関係

反対に精度の良いデータを除外すれば誤差は大きくなるため、解析法による誤差の大小関係が多少前後することも考えられたが、前節の理想的な電極配置での検討、本節での現実的な電極配置での検討のいずれにおいてもほぼ誤差は時系列解析法<従来解析法<カルマンフィルタという結果となり、大きな違いは見られなかった。以上より、実測データにおいて、理想的な電極配置、現実的な電極配置のいずれでも時系列解析法の有効性を確認できた。

#### 4.2.12 一様な浸透注入が行われない場合の実験

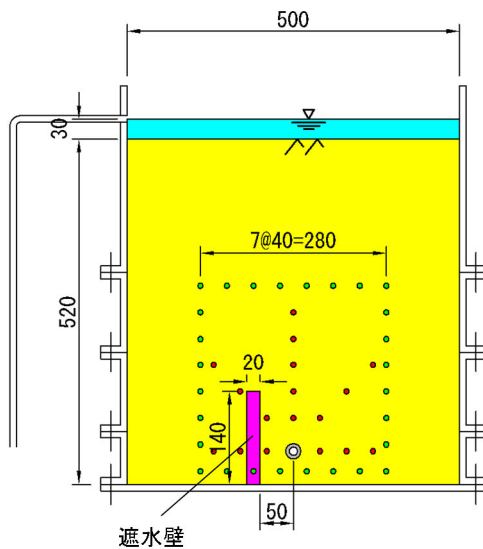
以上より、今回の模型実験では時系列解析法により精度よく注入範囲を可視化できることが分かった。しかし、これまでに述べた実験は初期地盤が一様で予定通りの浸透注入が行えた場合にそれを可視化できることが分かったのみであり、地盤内に障害物があり、計画範囲を注入できなかった場合に対する検証はできていない。比抵抗モニタリングの本来の目的は注入が予定通り行えなかった場合に、それを精度良く検知できることであるため、その検証が必要である。そこで、地盤内に障害物がある場合の実験を行った。今回は障害物として介在粘土層を模擬した遮水壁を配置した。遮水壁の作成にあたっては、市販の油粘土を成形し、のように底面から厚さ約 20mm の遮水壁を 140mm の高さまで立ち上げた。それ以外の実験条件は 4.2.3~4.2.5 で述べた条件と同じであるが、遮水壁天端の高さまでの模擬地盤を作成するには遮水壁が土圧で崩壊しないように、遮水壁の両側において高さが極力均等になるように注意しながら珪砂を充填した。なお、介在粘土層は通常水平に成層していることが多いが、4.2.7 で述べたように今回の実験において重力方向は関係しないため、遮水壁の作成難度から鉛直方向に延びる遮水壁とした。

各採水ポイントでの導電率の測定履歴をに示す。遮水壁を挟んで注入孔と反対側（以下、裏側と表記）にある No.1 と No.2 については遮水壁の効果で実験中最後まで導電率が上がらなかった。また、注入孔とを結ぶ直線上に遮水壁がある No.10 と No.13 についても対称の位置にある No.12 と No.15 と比べて導電率の上昇が緩やかだったり、上昇の開始が遅れていたことが分かる。さらに注入孔と同じ側にある No.7 については対称な位置にある No.9 と同様の導電率の上昇が見られたが、一旦約 35000 μ S/cm まで上昇した後、緩やかに減少し続けた。このことに対する具体的な原因については分からなかったが、遮

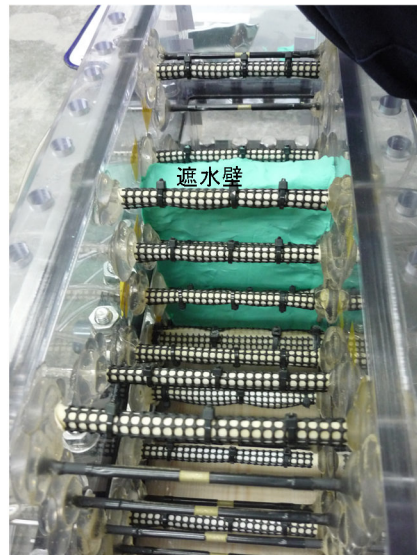
水壁によって塩水の流動が阻害され、複雑な流れが生じているものと考えられる。

以上より、遮水壁が確実に機能して裏側への塩水の拡散が遮蔽されていたこと、遮水壁の天端を迂回して裏側に塩水が遅れて到達していたこと、遮水壁近傍では塩分濃度が複雑な動きをしていたことが推察された。

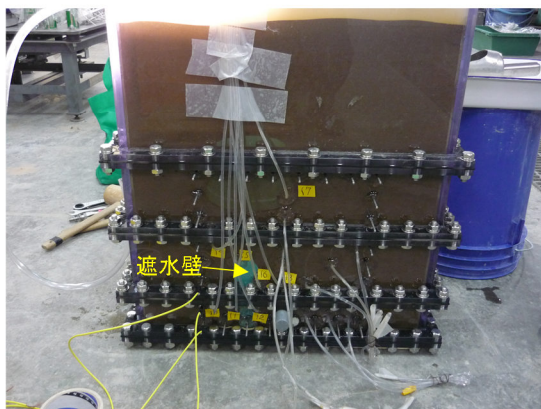
次に、採水による正解比抵抗分布と逆解析結果を図-4.2.13 に示す。この実験でも時系列解析法、従来解析法、カルマンフィルタを比較対象とした。はじめに正解比抵抗を見ると、320 秒までは遮水壁の影響を受けずに同心円状に低比抵抗領域が拡散していることが分かる。640 秒の時点では遮水壁で左方向への拡散は止められ、左右非対称の低比抵抗領域と



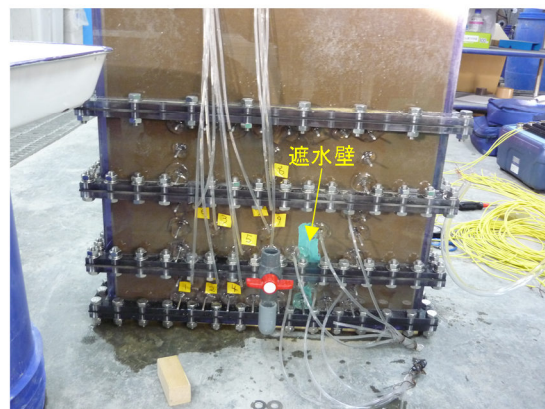
(a)断面図(図-3.4.1(a)のA-A断面と同じ断面)



(b)遮水壁整形状況



(c)砂充填状況((a)と同じ向き)

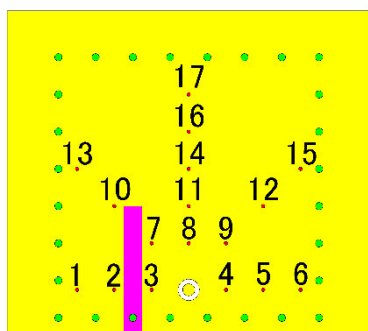


(d)砂充填状況((c)の裏側から見る)

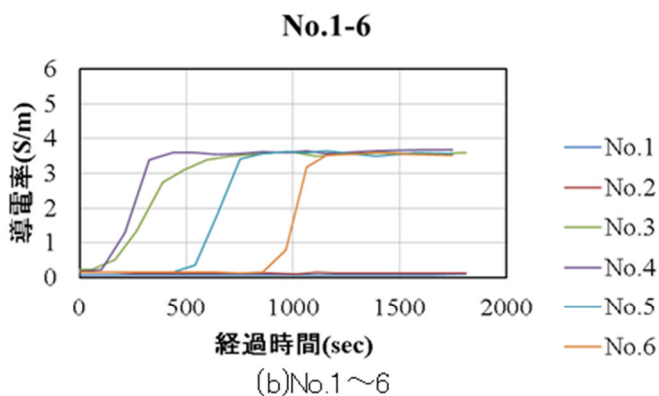
図-4.2.11 遮水壁の形状・作成状況

なり始めている。960 秒、1200 秒と時間が進行するに伴い右側や上方へは低比抵抗領域が拡散し続けるが、遮水壁より左側は最後まで高比抵抗のままである。

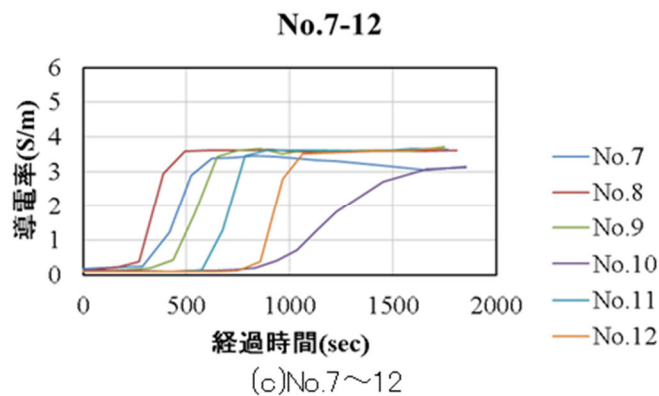
3つの逆解析結果を比較すると、コンター図の概形が正解比抵抗と最も似ているのは時系列解析法であることが分かる。時系列解析法では、いずれも遮水壁左側の領域には塩水が届かず、最後まで比抵抗低下は見られない。また、遮水壁以外の方向への拡散について



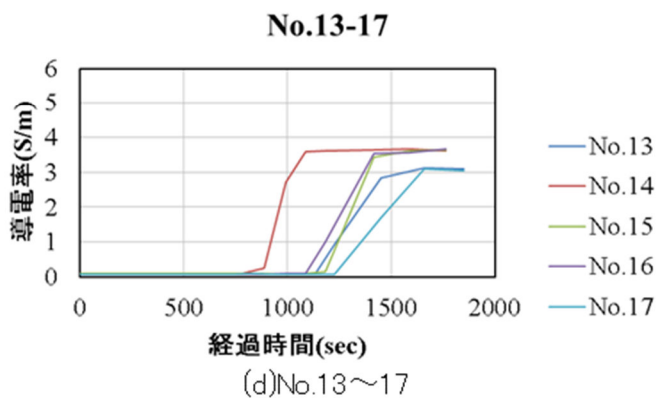
(a)採水ポイントの配置  
(図中の番号は採水ポイント No.を示す)



(b)No.1~6



(c)No.7~12



(d)No.13~17

図-4.2.12 各採水ポイントで測定した導電率の履歴

もおおむね正解比抵抗と同様の逆解析結果が得られた。

従来解析法の場合、280 秒、920 秒のように比較的正確比抵抗の分布と似た結果となっているステップがある一方で、600 秒や 1160 秒のように乖離の激しいステップもあり、安定していない。また、遮水壁なしの基本ケースの実験結果でも見られたように、一度比抵抗が減少した領域が再度増加するなど、常識的な傾向と反することが起きている。ただし、遮水壁により左側に低比抵抗領域が拡散しにくい状況は再現できている。

カルマンフィルタの場合、ある点から徐々に低比抵抗領域が拡散している状況は見られるものの、拡散速度は正確比抵抗と比べて明らかに遅い。しかし、カルマンフィルタでも遮水壁による左側への低比抵抗領域の拡散の抑制は認められる。

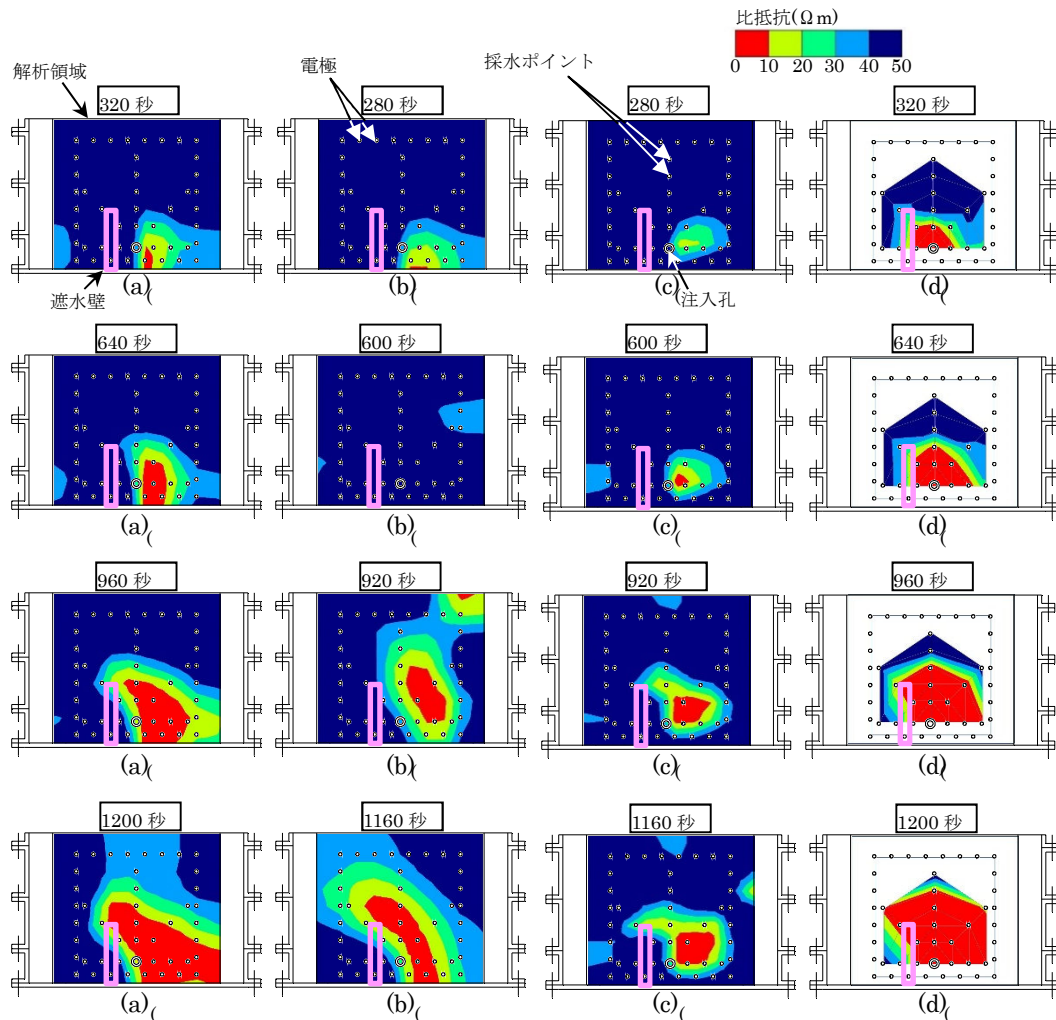


図-4.2.13 比抵抗分布の履歴

(a:時系列解析、b:従来解析法、c:カルマンフィルタ、d:正確比抵抗)

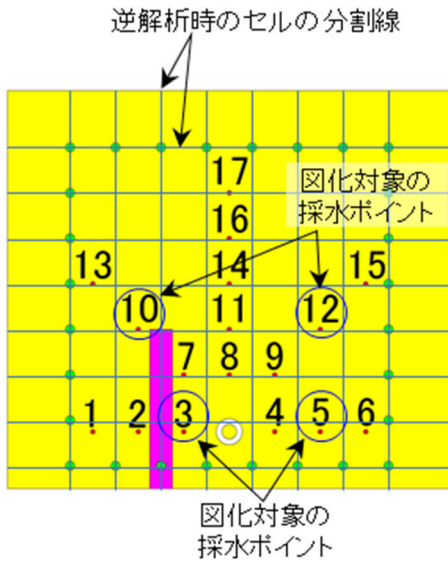
以上の概形の比較から、薬液注入状況のモニタリングへの適用性が最も高いのは時系列解析法であると推測できるが、今回の実験においてはいずれの解析法でも遮水壁近傍の採水ポイントの比抵抗が正解比抵抗と大きく乖離している。図-4.2.14 は採水ポイントごとの比抵抗の履歴の例を示している。図-4.2.14(a)内の青丸で示した4か所の採水ポイントを図化した。これらのうち、遮水壁に近い採水ポイントの例として、No.3 と No.10 を抽出し、比較対照のための遮水壁から遠い採水ポイントの例として、No.5 と No.12 を抽出した。遮水壁から遠い No.5 と No.12 では、ばらつきの程度に差はあるものの、いずれの逆解析結果も正解比抵抗と概ね近い値を示しているのに対し、遮水壁から近い No.3 と No.10 では正解比抵抗より明らかに高い値を示している。

図-4.2.14(a)は逆解析のセル分割の区分と遮水壁の範囲を示している。遮水壁近傍のセルでは、その約 1/4 の領域を遮水壁が占めている。正解比抵抗は遮水壁以外の飽和砂の比抵抗を反映しているのに対して、逆解析から得られるセルの比抵抗はセル内の構成材料の平均的な比抵抗を表していると考えられる。そこで、遮水壁を作成した油粘土の比抵抗を材料試験で求めたところ、 $104\ \Omega\text{m}$  の比較的高い値を示した。このため、遮水壁に近い No.3 や No.10 では正解比抵抗より高い値を示したものと考えられる。

比抵抗トモグラフィでは電極間隔より細かい分解能を得ることは原理上不可能であるため、今回の実験においては遮水壁を含むセルの比抵抗を参照している No.2、No.3、No.7、No.10 については、例外として考えることとし、これらを除く 13 箇所の採水ポイントを対象として 4.2.10 と同様の誤差評価を行った。4.2.10 で述べた遮水壁を置かない基本パターンと同様に時間ステップ間隔を 120 秒(case2)、150 秒(case3)、240 秒(case4)および 300 秒(case5)に変更した場合についても模型実験データより逆解析を行った。

時間ステップごとの平均二乗誤差 $\mu_k$ を図-4.2.15に示す。この実験でも、時系列解析法は誤差が小さく安定しており、従来解析法はいくつかの時間ステップで誤差が大きくなった。ただし、基本パターンではカルマンフィルタによる結果において時間ステップの進行とともに誤差が拡大する状況が見られたが、今回は見られなかった。

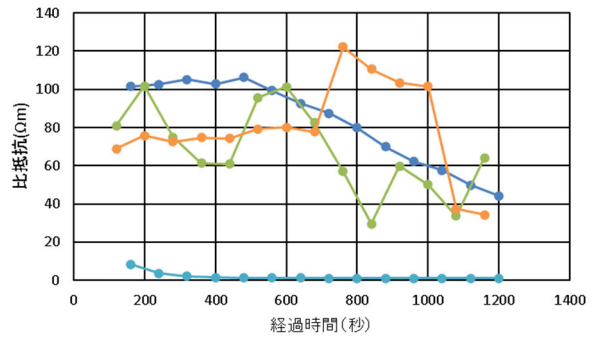




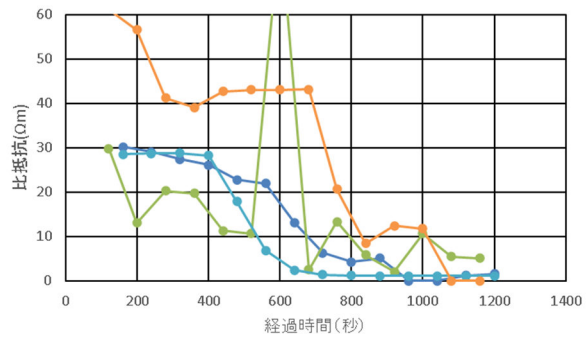
(a) 採水ポイントの配置  
(図中の番号は採水ポイント No.を示す)

凡例

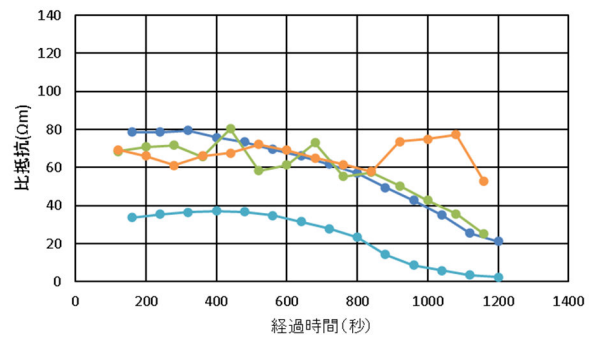
- 時系列解析法
- 従来解析法
- カルマンフィルタ
- 正解比抵抗



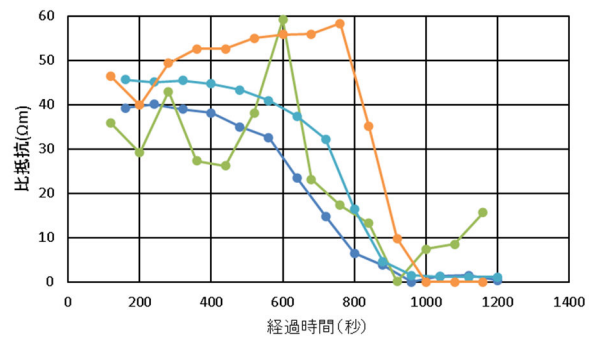
(b) No.3 (遮水壁から近いポイント)



(c) No.5 (遮水壁から遠いポイント)

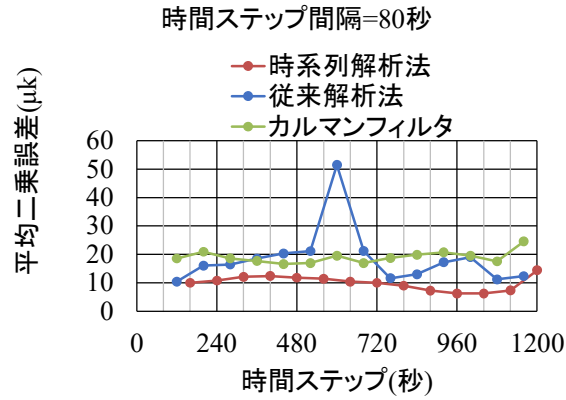


(d) No.10 (遮水壁から近いポイント)

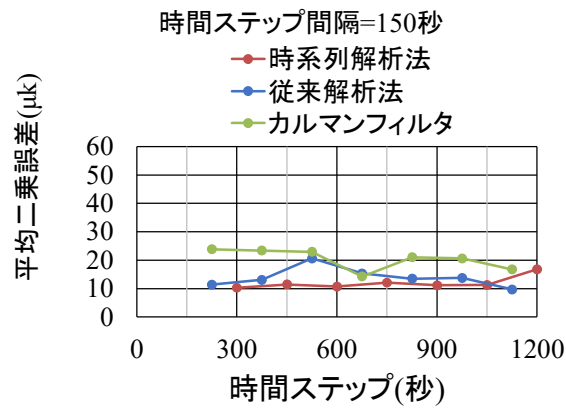


(e) No.12 (遮水壁から遠いポイント)

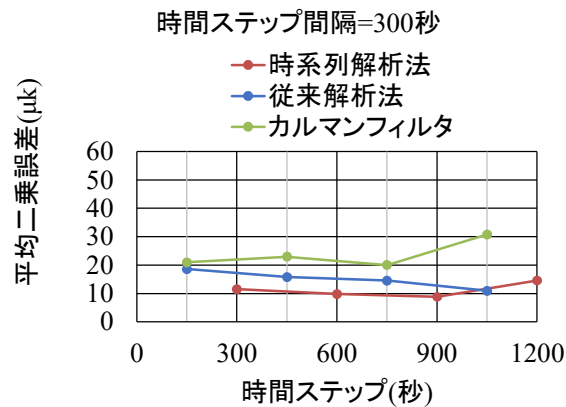
図-4.2.14 採水ポイントごとの比抵抗の履歴



(a)



(b)



(c)

図-4.2.15 各時間ステップにおける平均二乗誤差 (a:時間ステップ間隔=80 秒、b:時間ステップ間隔=150 秒、c:時間ステップ間隔=300 秒)

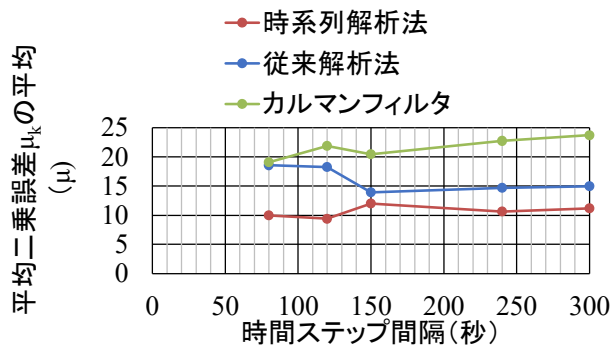


図-4.2.16 平均二乗誤差  $\mu$  の平均  $\mu$  と時間ステップ間隔の関係

図-4.2.16 に時間ステップ間隔と誤差（平均二乗誤差  $\mu_k$  の平均  $\mu$ ）との関係を示す。いずれの時間ステップ間隔でも誤差は時系列解析法<従来解析法<カルマンフィルタの順に大きくなっており、基本パターンの結果と同様の傾向となった。

以上より、時系列解析法によれば、障害物の有無にかかわらず、すなわち様な浸透注入が行われる場合でも、行われない場合でも、他の解析法より精度の高い比抵抗モニタリングが可能であることが分かった。

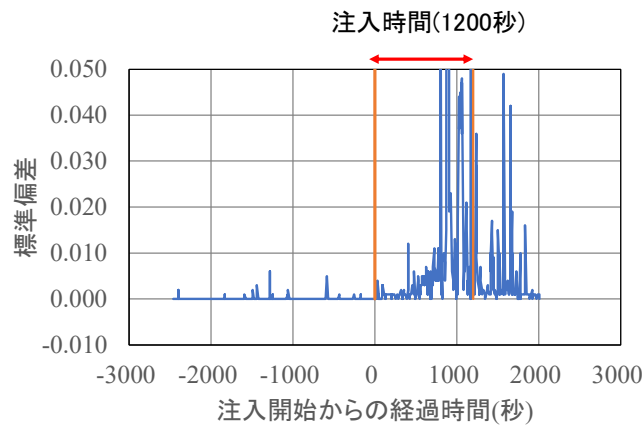
#### 4.2.13 ノイズの特性に関する分析

4.2.1 で述べたように、この実験の主な目的は、実測データへの適応性、計測データに含まれるノイズの特性が数値実験で仮定したガウスノイズとは異なる場合への適応力の検証である。そこで、今回の実験に含まれるノイズの特性の分析を試みた。

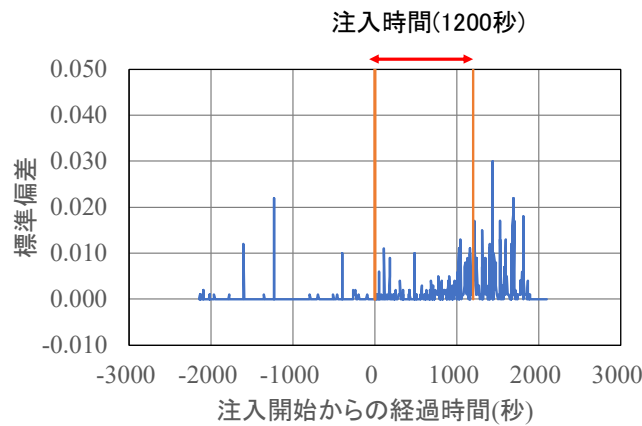
本実験では同一条件での測定は1回行っているのみであり、計測値からノイズを分離することは困難である。そこで、今回の実験記録でノイズに関連する唯一の情報であるスタッキング時の標準偏差に着目した。スタッキング回数を2回としているため、標準偏差は2回の計測値の差の1/2を意味する。実験ではおよそ注入開始30分前から注入終了10分後まで電位測定を継続して計測していたので、その期間の標準偏差の推移を図-4.2.17に示す。遮水壁の有無の2ケースについてそれぞれ図化した。いずれのケースでも注入開始とともに徐々に標準偏差が増加していることが分かる。大きく振動しているデータもあるものの、それらを見れば無視すると注入中はほぼ単調に増加し、注入終了後、徐々にそのレベルは小さくなる。ただし、注入前よりは大きいレベルである。また、遮水壁ありのケースでは、

標準偏差の減少の速度が遮水壁なしのケースより遅い。この両ケースの微妙な違いの原因は分からなかったが、このような注入中の単調増加の傾向は図-4.2.2 に示した注入孔の水頭と似ていることが分かる。

一方、細管または多孔体の中の液体の両端に $\Delta p$ の圧力差を加えたときにそれらの両端に流動電位差 $E$ が発生し、その大きさは $\Delta p$ に比例することが知られている<sup>72)</sup>。この圧力差は、連続した地盤の中では動水勾配によるものと解釈できるので、注入孔の水頭と関連していると考えられる。以上より、本実験で見られた注入に伴う標準偏差の増加は流動電位に起因している可能性がある。その場合、測定電位には流動電位によるノイズが含まれていた



(a)基本パターン（遮水壁なし）



(b)遮水壁あり

図-4.2.17 標準偏差の推移

ことになるが、そのような状況でも時系列解析法は従来解析法より正解に近い結果が得られたことから、時系列解析法はそのようなバイアスのかかったノイズに対しても耐ノイズ性を有すると考えられる。ただし、流動電位の大きさは測定電位の大きさ（概ね数百～数千 mV）に比べて微小であるため、そもそも逆解析結果への影響は限定的だった可能性もある。

以上より、薬液注入中のモニタリングでは、流動電位によるノイズが含まれている恐れがあり、時系列解析法はそれらに対しても耐ノイズ性を有する可能性が高いが、確定的な知見は得られなかった。このため、通電電流を大きくして測定電位を大きくするなど、極力その影響を受けないような配慮が必要と思われる。また、今回の模型実験のみではどの程度に測定電位を大きくすれば、このようなノイズの影響を無視できるのかまでは検討できなかった。この点については今後の課題である。

#### 4.2.14 模型実験のまとめ

本節では、注入薬液の地中での拡散過程を模擬した塩水注入の模型実験により時系列解析法による薬液注入範囲の評価を行い、その効果を検証した。土槽中に注入中連続的に測定した電位測定データを元に注入時間を複数のステップに分け、各時間ステップにおける比抵抗分布の推定を試みた。従来解析法（各ステップを個別に逆解析）とカルマンフィルタを比較検討対象とした。実験の結果、以下のことが分かった。

（１）時系列解析法より求めた比抵抗分布は最も正解比抵抗に近い結果となり、時間ステップや電極の配置を変動させてもその傾向は変わらなかった。

（２）土槽内に遮水壁を作成し、塩水が一様に浸透しない状況においても、時系列解析法は最も正解に近い結果となった。

（３）薬液注入中のモニタリングでは、流動電位によるノイズが含まれている恐れがあり、提案解析法はそれらに対しても耐ノイズ性を有する可能性が高いが、確定的な知見は得られなかった。このため、実用においては通電電流を大きくして測定電位を大きくするなど、極力その影響を受けないような配慮が必要と思われる。

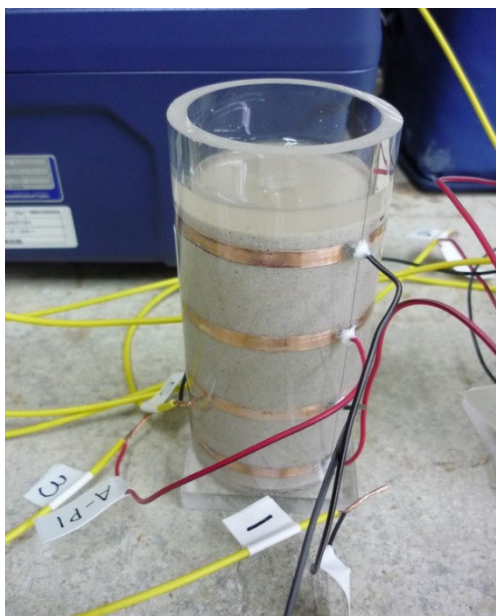
以上より、実測データにおいても時系列解析法により従来より高精度に薬液注入範囲の評価が可能であることが分かった。今回の実験は既往の解析法との相対評価であるが、薬

液注入途中における薬液浸透範囲の把握が従来以上に可能となり、補足注入の必要な位置を施工中に明確化できるとともに、次ステップの注入仕様を合理化できる可能性が高まった。これにより、改良性能の向上とコストダウンを期待できる。

### 4.3 薬液のゲル化が改良地盤の電気伝導特性に及ぼす影響についての検討

リアルタイムモニタリングでは、薬液のゲル化によって電気伝導特性が変化しないことを前提としており、変化するのであれば、そのことを考慮したモニタリングを行う必要がある。そこで、本節では薬液のゲル化が改良地盤の電気伝導特性に及ぼす影響について実験的に検証した結果について述べる。

実験には 3.4.3 で述べた実験装置と同じものを使用してサンドゲルの比抵抗を時系列に測定した (図-4.3.1(a))。なお、この珪砂は 4.2 で述べた模型実験で使用している珪砂と同じものである。また、薬液には汎用的な非アルカリ性浸透グラウト (高強度タイプ) を使用した。ここで、液状化対策工法に適用する薬液注入を想定し、ゲルタイムを3時間にPH調整した所定量 (90mL) の薬液を容器内に入れ、珪砂 340g を振動を加えながら充填した。供試体は A~C の3体を作成し、すべての供試体に等しい電流が流れるように電流電極は直列に接続した (図-4.3.1(b))。充填直後より電極を比抵抗測定装置に接続して 20mA の電流を周期2秒の交代直流にして通電し、繰り返し測定を行った。測定は間隔を徐々に広げながら念のため4か月間行った。



(a) 測定装置内に形成したサンドゲル

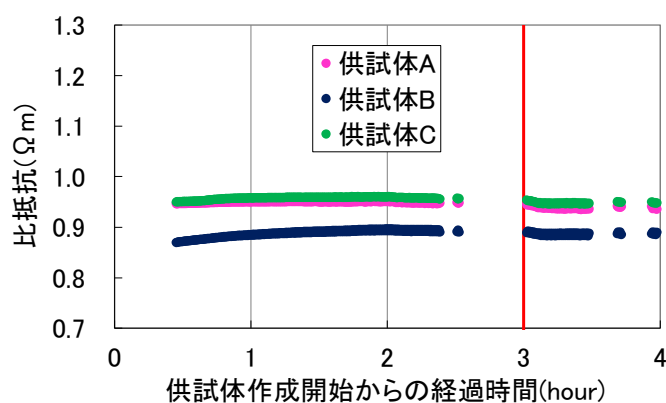


(b) 測定状況

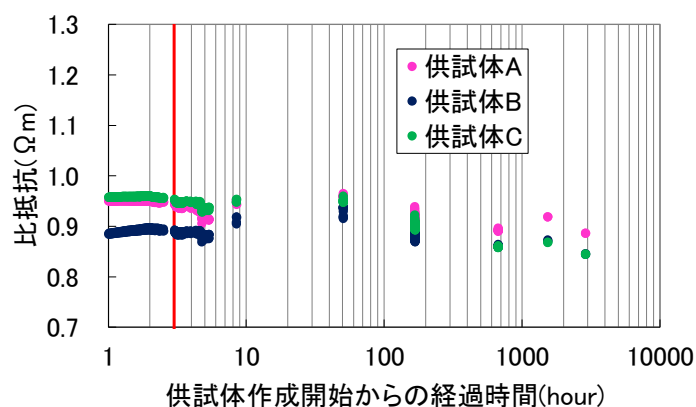
図-4.3.1 サンドゲルの導電率測定

図-4.3.2にサンドゲルの比抵抗の経時変化を示す。いずれの供試体も測定開始直後から材齢28日までの変動は約 $0.05 \Omega m$ と小さく、概ね一定値となった。また、同じ砂を用いて飽和砂の比抵抗を測定したところ、3供試体の平均で $185 \Omega m$ であった。したがって、未改良地盤（飽和砂）が注入により約 $1/185$ に比抵抗が低下することと比べれば、上記の約 $0.05 \Omega m$ の増減は十分小さいことが分かった。当初は、サンドゲルはゲル化により固結して力学特性が変化するため、比抵抗も変化する可能性があると考えていたが、今回の実験ではゲルタイムの前後で比抵抗変化は現れなかった。

以上より、薬液注入の注入状況を比抵抗トモグラフィでリアルタイムにモニタリングするための前提条件を模擬砂地盤の注入実験から検証した結果、サンドゲルはゲル化以降も比抵抗が変化せずに安定した状態が継続することを確認できた。したがって、本研究で提



(a)短期の経時変化（充填後4時間まで）



(b)長期の経時変化（充填後4か月まで）

図-4.3.2 サンドゲルの比抵抗の経時変化



案するモニタリングにおいてゲルタイムを特に考慮することなく比抵抗をモニタリングすればよいことが分かった。

#### 4.4 時系列解析法を用いたモニタリング方法の提案

時系列解析法を用いたリアルタイムモニタリングの具体的な実用手順を図-4.4.1のフローチャートに示す。最初に薬液の注入計画を立案し、モニタリングの対象範囲を設定する。

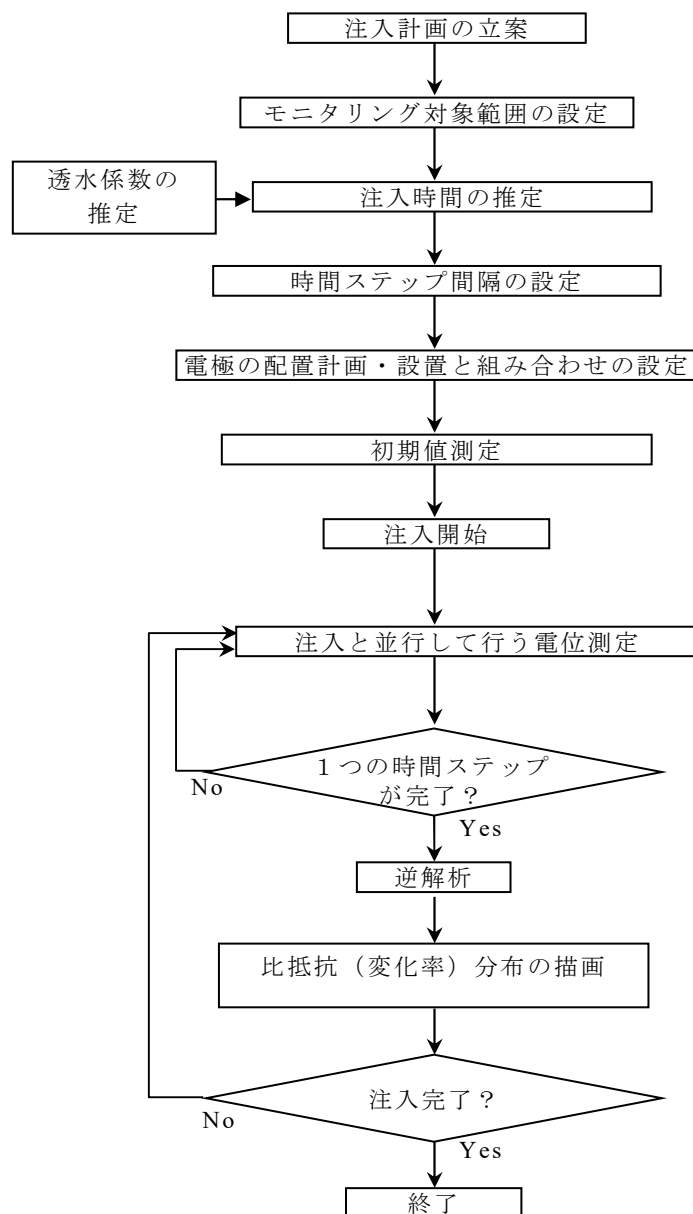


図-4.4.1 リアルタイムモニタリングのフローチャート

これは、一般的には注入の計画範囲であるが、大規模な注入で対象範囲が広大となる場合には、複数の範囲に分割した方が効果的な場合もあると思われる。次に対象範囲内の地盤の透水係数を適当な方法で推定する。現地で透水試験を行って直接的に透水係数を把握するのが理想であるが、試験を行えない場合には、現地採取試料の粒度試験結果から推定する方法等もある。次に透水係数からおよその注入時間を理論解や数値解析、実績等により推定し、その時間の5～12%程度の時間を時間ステップ間隔に設定する。なお、試験施工を実施する場合には、その結果を注入時間の推定に反映させれば、より適切な時間ステップを設定できると考えられる。時間ステップを過剰に短く設定すると、コンピュータのメモリを大量に必要とするために計算不能になったり、計算に多大な時間を要することに注意が必要である。その後、電極を設置して初期値測定（電位測定）を行い、注入開始とともに、電流を送信して注入中の電位測定を開始する。2～3の時間ステップが経過した後、それまでの測定データを用いて最初の逆解析を行う。このようにして注入終了まで時間ステップ経過ごとに繰り返し逆解析を行うことで、注入過程を時間ステップごとにモニタリングすることができると考えられる。

#### 4.5 第4章のまとめ

本章では、2.2.3 で述べた第一の課題、注入中の注入状況の把握を目的として、薬液注入と並行して行う比抵抗トモグラフィによる注入状況のリアルタイムモニタリングの実現に向けた検討を行った。

4.2 で述べた模型実験では、実際に塩水注入を行い、正解の比抵抗分布との比較を行った。時系列解析法より求めた比抵抗分布は最も正解比抵抗に近い結果となり、時間ステップや電極の配置を変動させてもその傾向は変わらなかった。また、障害物により塩水が一樣に浸透しない状況においても時系列解析法は最も正解に近い結果となった。すなわち、実測データにおいても時系列解析法により従来より高精度に薬液注入範囲の評価が可能であることを確認した。

4.3 では、注入した改良体であるサンドゲルにおいてゲル化以降も比抵抗が変化せずに安定した状態が継続することを確認できた。したがって、本研究で提案するモニタリングにおいてゲルタイムを特に考慮することなく比抵抗をモニタリングすればよいことを確認した。

4.4 では、4.2～4.3 での検討結果を踏まえて時系列解析法を用いたモニタリング方法を提案した。

以上より、今回の実験は既往の解析法との相対評価であるが、薬液注入途中における薬液浸透範囲の把握が従来以上に可能となり、補足注入の必要な位置を施工中に明確化できるとともに、次ステップの注入仕様を合理化できる可能性が高まった。これにより、改良性能の向上とコストダウンを期待できる。ただし、提案した方法を実現場で適用した実績はまだない。今後は実現場で適用し、新たな問題点が生じればそれらを解決してより汎用性の高い技術にしていく必要がある。

## 第5章 注入不良により生じた水みちの末端位置の検知

### 5.1 概説

第4章では信頼性向上に対する第一の課題に対応するため、注入状況をモニタリングする手法を論じた。比抵抗トモグラフィを注入中継続的に実施し、リアルタイムに注入状況を監視できれば、注入不良個所を即時に補足注入でき、信頼性の高い薬液注入が可能と考えられる。

しかし、この方法のみでは、遮水性を担保するには不完全な場合がある。高水圧下での薬液注入では、数 cm 乃至数十 cm オーダーの比較的小さな水みちであっても、線状に連続すればそれが引き金となって大きな出水事故に繋がる恐れがあるが、比抵抗トモグラフィの分解能は基本的に電極間隔より小さくすることは原理上不可能なため<sup>73)</sup>、そのような細く連続性の高い水みちを上記の方法で捉えることは困難である。2.2.5 で述べたように、いづれの先行研究例でも、本論で扱う数 cm 乃至数十 cm オーダーの比較的小さな水みちの位置を把握し、補足注入を行うための情報は得られない。

薬液注入工法の遮水性確保の問題では、仮に水みちが存在した場合、その位置・大きさを水みち全線にわたって可視化する必要はなく、改良体外周部に補足注入するための位置を提供できれば十分である。そこで本章では第二の課題である水みちの末端位置（出口の位置）を検出する方法に取り組む。

具体的には、トレーサーの拡散過程を比抵抗トモグラフィで可視化して水みちの末端位置を検知することを検討する。さらに、この第二の課題の解決にも前述の比抵抗トモグラフィによる比抵抗分布のリアルタイムモニタリングを用いる。注入完了後の改良体に注入孔を設け（可能なら薬液の注入孔を再利用してもよいと思われる）、導電性のトレーサーを注入する。外部と繋がる水みちが存在する場合、改良体の表面を測定断面として継続的にリアルタイムモニタリングを実施すれば、トレーサーが水みちを通過して水みち末端から未改良地盤に拡散するはずであり、比抵抗の低下領域として水みち末端位置を捉えられると考えた。具体的な取り組み内容は次節以降で述べる。

なお、地盤の透水性によっては末端からの拡散が短時間で周囲に広がる場合があり、従来の逆解析方法では、モニタリングが困難となることが予想される。そこで、3章で述べ

た時系列解析法を活用して水みち末端（出口）の位置を把握することを考えた。

また、概して比抵抗トモグラフィは地盤調査の中で高価な手法であるが、筆者らの調査した範囲では、シールドトンネルの到達防護における注入不良による出水事例において、到達立坑の水没を免れたにもかかわらず、その対策費用は一般的な比抵抗トモグラフィ実施費用の約 10 倍を要した事例も見られ、補足注入のために末端位置を検知することの意義は大きいと考えている。

本章では、まず 5.2 で水みち末端位置の検知の基本的な考え方を述べる。次に 5.3 で、この方法の実験と数値解析（移流拡散解析）による検証について述べる。5.3 の実験は 1 通りの条件のみで実施したため、5.4 では実験条件が変化したときの適用性について、実大シミュレーションにより検討した。5.5 でそれまでに得られた検討結果を踏まえて実務における水みち末端位置の検知方法を提案する。最後に 5.6 で本章のまとめを述べる。

## 5.2 水みち末端位置の検知の基本的な考え方

比抵抗は土粒子固有の導電性のみならず、飽和度、含水比、間隙水の導電性など多くのパラメータに影響を受けるため<sup>3)</sup>、単一の結果から解釈を得るのがやや難しい側面もあるが、含水比の変化等に敏感に反応するために、地盤の状態変化を捉えるうえでは有効である。

塩水で飽和した地盤は淡水で飽和した地盤より比抵抗が低いため、**図-5.2.1**のように水みち内に塩水を通水すると漏水個所の末端では漏出した塩水が拡散して注入前に比べて比抵抗が低下し、時間とともにその領域が広がっていく。そのため、比抵抗トモグラフィを時間間隔をあけて繰り返し行うのではなく、注水中の比抵抗分布をリアルタイムにモニタリングし続けていれば、比抵抗変化率から漏水個所の末端を同定できると考えた。

比抵抗トモグラフィでは対象範囲の周囲に電極を配置する。1つの電極より直流電流を通電し、その際に周囲に生じる電位を他の電極で測定する。そして、さまざまな電極の組み合わせに対して同様の測定を行い、得られた測定データを逆解析して地盤の比抵抗分布を求める。

この前提条件として測定中は比抵抗分布が一定であることを仮定している。しかし、計画した電極組み合わせを一通り測定するには相応の時間を要するのに対し、水みち末端

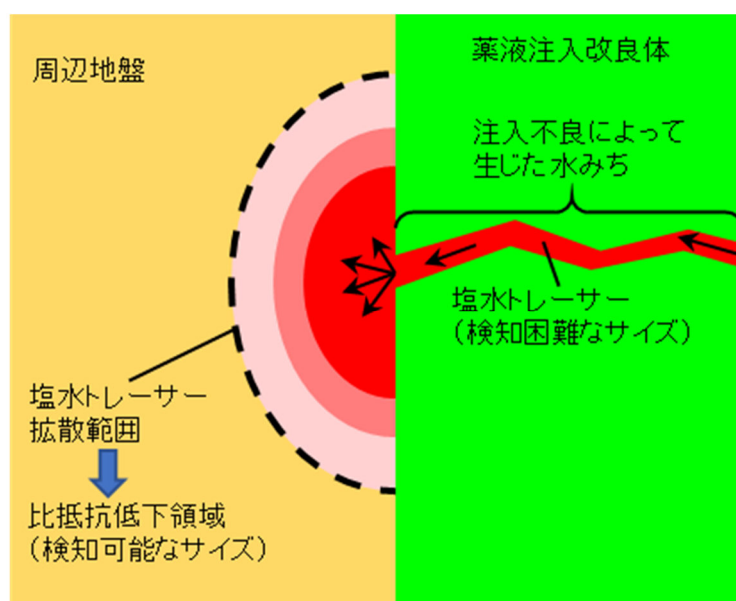


図-5.2.1 時系列解析法による漏水位置検知の概念図(断面図)

から低比抵抗のトレーサーが漏出し始めると、比較的短時間に時々刻々水みち末端周辺の地盤の比抵抗が低下し続ける状況となることが予想される。したがって、このように測定中に比抵抗分布が変化し続ける状況では、測定中の変化が測定誤差となって推定精度を低下させる恐れがある。本来、流れの速い浸透現象を比抵抗トモグラフィでモニタリングすることは困難であった。しかし、3章で述べた時系列解析法を用いれば測定中の比抵抗分布の変化による悪影響を抑制できることが確認されている。そこで、水みち末端位置の検知でも時系列解析法を用いた比抵抗のリアルタイムモニタリングを行う。そして、水みち末端位置はトレーサーの供給源であるため比抵抗が最も低下する位置と考えられる。以上より、水みち末端位置は以下のように検知できると考えた。

1. 低比抵抗のトレーサーを改良体内部より注入し、水みちから外周地盤へ漏出させる
2. 注入開始と同時に時系列解析法を用いた比抵抗のリアルタイムモニタリングを行う
3. 比抵抗が最も低下した位置を水みち末端位置と推定する

なお、本論では未検討であるが、海岸付近などの元々比抵抗の低い場所では、逆に高比抵抗のトレーサーを用いるといった応用も考えられる。

## 5.3 水みち末端位置検知の検証実験

### 5.3.1 実験目的

今回行った実験の目的は前節で述べた方法による水みちの末端位置の検出である。

図-5.3.1(a)に本実験の概念図を示す。本実験は、片側に湛水した塩水トレーサーを水みちを通じて反対側に漏出させる実験である。ここで、実験目的で述べた水みちの末端位置の検出とは、水みちの末端を中心にトレーサーが拡散する様子を比抵抗の低下として捉えることである。

本実験では予め水みち末端の正確な位置が既知であることから、比抵抗トモグラフィが示す水みち末端の位置と実際の位置とを比較した。また、参考情報として移流拡散解析を行い、その結果とも比較した。

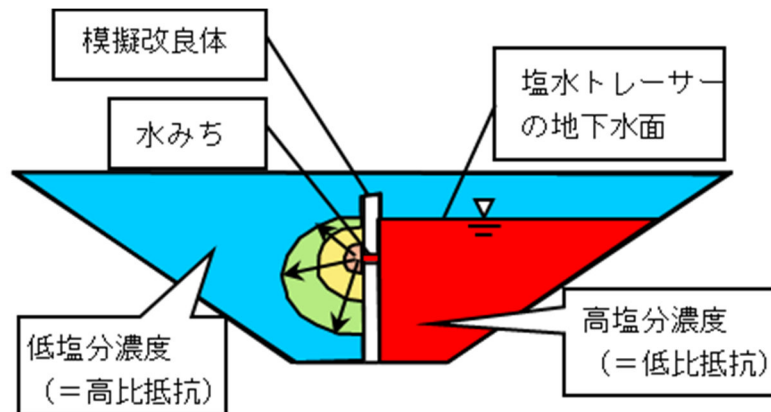
### 5.3.2 実験土槽の概要

前項で述べた実験目的のもと、屋外土槽実験を行った。

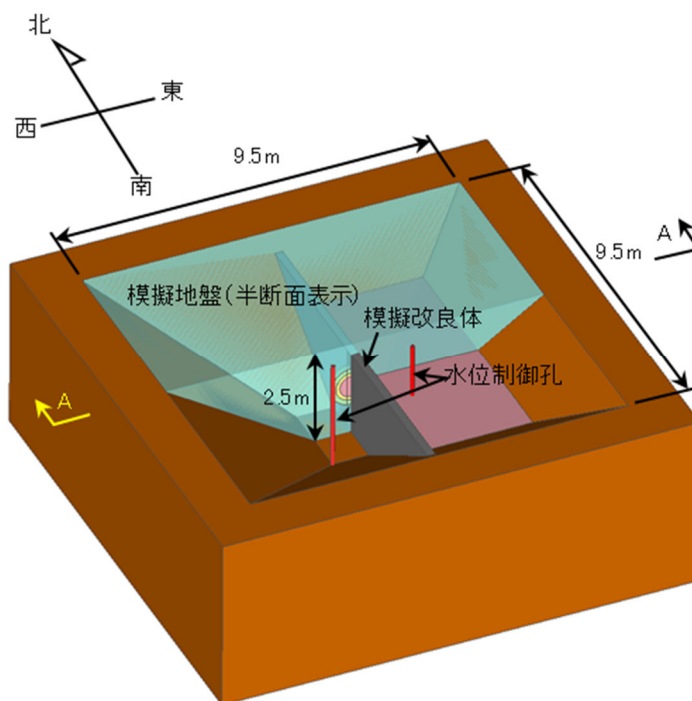
土槽の形状を図-5.3.1(b)に示す。土槽は底面が 2.0m 四方、上面が 9.5m 四方の正方形をした高さ 2.5m の四角錐台である。土槽の範囲を掘削し、表面に遮水シートを敷設した後、内部を模擬地盤で充填した。模擬地盤に使用した材料は霞ヶ浦産の中目川砂である。粒径加積曲線を図-5.3.2 に示す。豊浦標準砂よりやや粒度が粗く、粒径幅が広い。土槽は中央を模擬改良体で二分されており、模擬改良体は両側の模擬地盤を遮断している。模擬改良体は壁状薬液注入による改良体の代用物であり、厚さ 200mm の無筋モルタル壁である。模擬改良体中央、壁高の約半分の高さに削孔径 25mm の模擬漏水孔が設けられている。壁厚や削孔径も上記の縮尺に合わせて作れば、より細く長い水みちとする必要があるのかもしれないが、実際の水みちの大きさを想定するのは困難である。5.2 で述べたように、本方法は水みちそのものの可視化ではなく、トレーサーの拡散を利用した水みち末端の検出を目的としているため、この実験では模擬漏水孔は単に漏水を確実に発生させるためのみに使用するものである。したがって、削孔径や壁厚は実現象の想定に基づいて大きさを決定したわけではなく、実験効率を考慮して、漏水の時間を早めるために、比較的大きな孔径や薄い壁厚を用いた。



後述する塩水トレーサーの水位制御は図-5.3.1(b)に示した東側の水位制御孔にトレーサーを注入することで行った。



(a) A-A断面図 (概念図)



(b) 鳥瞰図

図-5.3.1 実験の概念図・土槽の形状

### 5.3.3 実験方法

図-5.3.3(b)のように、まず初期状態として模擬地盤の東側に塩水トレーサーとして 10% 食塩水を模擬漏水孔より 100mm 低い高さまで湛水した。塩水トレーサーの水位管理のため、模擬改良体中央より東側に 0.2m、模擬漏水孔より南側に 0.4m 離れた位置に塩ビパイプを立てて水位観測孔とした (図-5.3.3(a))。そして、水位制御孔にトレーサーを注入して水位を徐々に上げていき、模擬漏水孔より水位が高い状態を約 6 時間継続した。注入にあたっては塩水ストック用のタンクからポンプで水位制御孔に送水した。

注入開始からの水位観測孔の水位の履歴を図-5.3.4 に示す。模擬漏水孔は GL-1.2m の高さにあるので、図中のハッチングした範囲が漏水の生じていた時間である。開始から 1.5 時間は注水を続けて水位を上げていった。水位が 1.5m (GL-1.0m) を越えた時点で注水量を減らして水位を維持するモードに切り替えた。さらに 5 時間経過時点で実験終了準備として注水を止め、水位制御孔にポンプを入れて揚水を開始した。最終的に注入開始後 7 時間の時点で実験を終了した。

上記の水位制御により図-5.3.1(a)のようにトレーサーが模擬漏水孔より西側の模擬地盤に漏水し、模擬漏水孔を中心に比抵抗が低下するのを可視化できるのではないかと考えた。

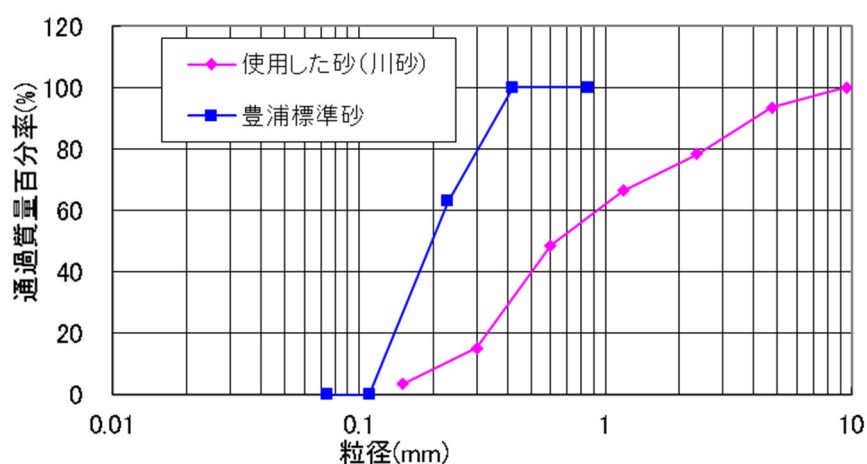


図-5.3.2 粒径加積曲線

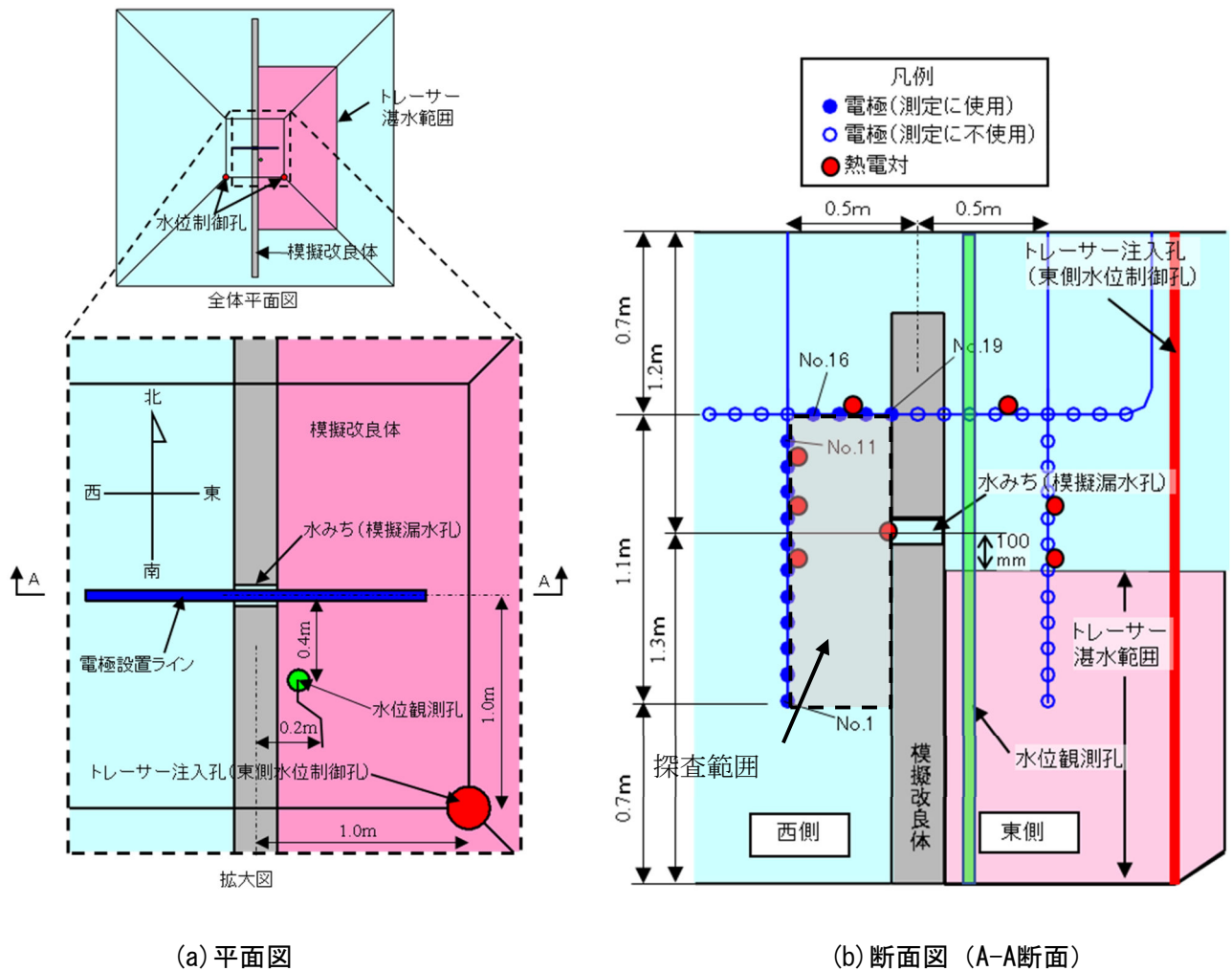


図-5.3.3 電極等の配置・湛水位置(初期状態)

また、一般に、比抵抗は温度依存性を有するため、長期のモニタリング<sup>74)</sup>、地表面近傍のモニタリング、比抵抗変化率が小さいことが予想されるモニタリングなど、温度変化が有意な影響を及ぼすと予想される場合には温度補正が必要である。本実験は、地表面近傍でのモニタリングであることから、温度補正が必要であると判断し、図-5.3.3(b)のように電極の近傍 8 箇所に熱電対を設置して地中温度を 1 分間隔で連続計測した。

#### 5.3.4 電位測定の方法

比抵抗トモグラフィは扱う物性がスケールに影響を受けないため、任意のスケールで実

験できるという特徴がある。そこで本実験では縮尺を小さくした。

5.2 で述べた方法を適用するにあたり、実際の改良体の大きさはさまざまであるが、標準的な大きさのシールド発進防護用薬液注入を仮想場面とした。この場合、およそ 10～20m 四方の領域に 1～2m の間隔で電極を配置することを想定しているが、本実験ではおよそ 1/10～1/20 に縮小し、1.1m×0.5m の領域に対して電極間隔を 0.1m 間隔で設置した。

図-5.3.3(b)に示すように模擬改良体を中央に挟んでπの字状に設置した。図に示したように左下より No.1, No.2・・・とナンバリングした。ただし、今回の実験では、探査対象は模擬漏水孔末端より西側の地盤のみであるため、実際にモニタリングに使用したのは No.1～11、および No.16～19 (図中青丸) である。また、比抵抗の低下領域が拡散していく過程を時系列に捉えられるよう、本実験では計測断面を改良体を横断する形で設定した。

電極は接地面積を確保するために直径 100mm の円盤とし、各円盤の法線が一致する向きで配置した。同じ電極配置パターンを繰り返し測定することで個々の電極配置に対する時間変化が明瞭になると考え、電極配置は極力限定した。具体的には、電極間隔 100mm のウェンナー配置と No.2 と No.11 を電流電極、No.5 と No.8 を電位電極とするウェンナー配置のみとし、全部で表-5.3.1 に示す 9 通りの電極配置を用いた。電極間隔 100mm のウェンナー配置は近傍 (特に両電位電極の間) に感度が集中するため、これらのみを用いた場合、感度が電極設置ライン周辺に集中して電極から離れた場所の情報が得にくいと考えて、No.2 と No.11 を電流電極、No.5 と No.8 を電位電極とするウェンナー配置を追加した。この 9 通りを 1 回ずつ測定するのを 1 サイクルとし、実験中はこのサイクルを繰り返し測定した。

### 5.3.5 使用材料の比抵抗に関する特性

今回の逆解析では、後述するように比抵抗が既知の領域には、既知情報としてその値を用いている。このため、市販の導電率計等を用いて使用材料の比抵抗を調べた。結果を表-5.3.2 に示す。

次に、比抵抗の温度依存性について述べる。前述のように、本実験では温度補正が必要と判断したため、測定電位に対して温度補正を行うために、砂の比抵抗の温度依存性を調べた。湿潤砂と塩水に浸漬した砂について測定した。4 端子法で測定できるアダプタを作

成し（図-5.3.5）、下蓋と上蓋に砂を充填した筒を挟んで比抵抗を測定した。アダプタは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した。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。これは、3.4.3で述べた測定装置と電流電極の形状以外は同じものである。

3.4.3で述べたサンドゲルの測定では薬液で完全に飽和した試料も測定する必要があったため、筒と下蓋は接合して、薬液を先に入れてから砂を投入する必要があった。その結果、

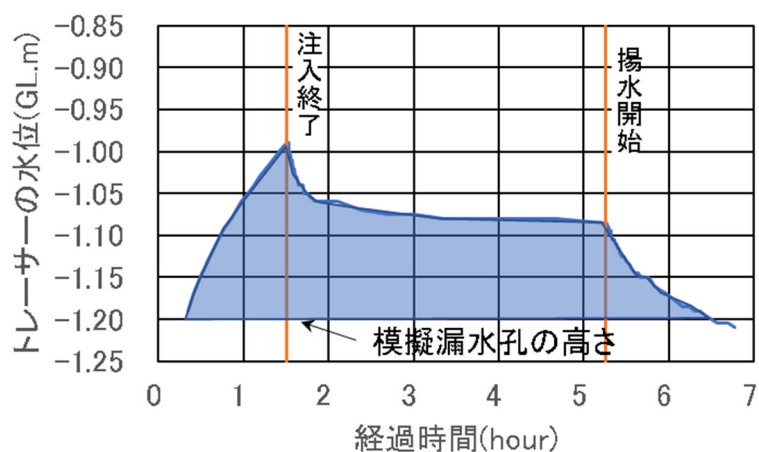


図-5.3.4 水位観測孔での水位の履歴

表-5.3.1 電極配置

C1電極 (+側電流電極)	C2電極 (-側電流電極)	P1電極 (+側電位電極)	P2電極 (-側電位電極)
1	4	2	3
2	5	3	4
3	6	4	5
4	7	5	6
5	8	6	7
6	9	7	8
7	10	8	9
16	19	17	18
2	11	5	8

表-5.3.2 材料の比抵抗

材料	比抵抗 ( $\Omega\text{m}$ )
水	59.0
模擬改良体	26.2
初期状態の模擬地盤 (不飽和部) (体積含水率9%)	300.0
10%食塩水で飽和した 模擬地盤	1.22

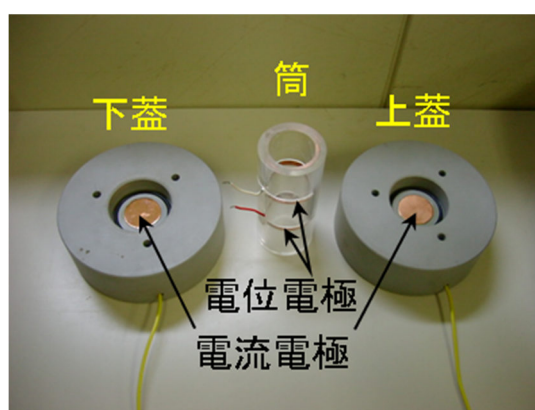


図-5.3.5 砂の比抵抗測定用アダプタ

上澄みの薬液が残った状態となり (図-3.4.3 参照)、電流電極は前述のように帯状に側面から通電する必要があったが、今回の測定では、不飽和砂を突き固めにより充填したため、図のように上下の蓋に付けた電流電極 (円盤状の銅板) を試料と圧着する方が良好な接触が保てると考えた。

試料温度を測定するために試料内に熱電対を挿入した。図-5.3.6 に示すように、温度変化を与えるために、保冷剤等の温度調整材と熱電対 (3箇所) を入れた断熱容器内にアダプタを静置し、容器内温度と試料温度が安定してから、比抵抗を測定した。

結果を図-5.3.7 に示す。縦軸は 25°C時の導電率で正規化している。測定した温度範囲において試料の種類によらず温度と導電率にはほぼ線形の関係が見られる。また、導電率計の標準温度係数ともほぼ一致している。温度補正に用いる温度係数は2試料の回帰係数の平均値 2.13%/°Cとした。これらの結果は朴ほかの研究結果<sup>67)</sup>とも整合する結果となった。

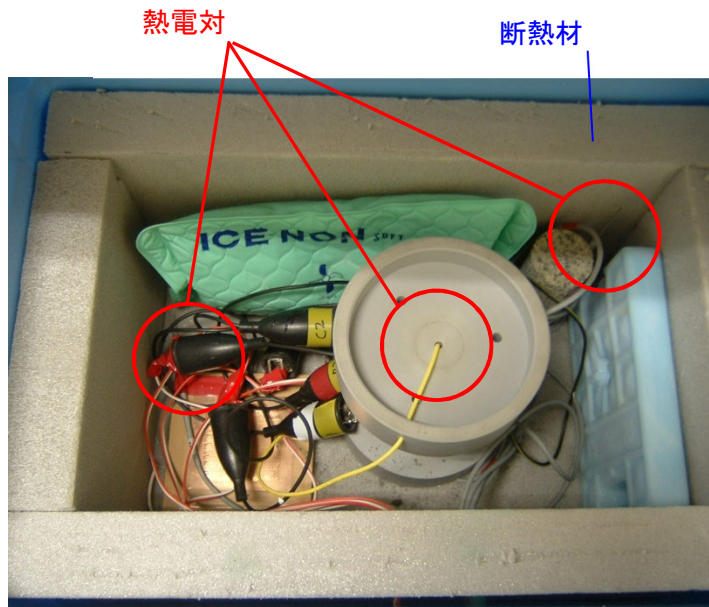


図-5.3.6 温度変化を与えた比抵抗測定状況

温度補正係数の平均値 $= (0.0222 + 0.0204) \div 2 = 0.0213 (1/^\circ\text{C})$

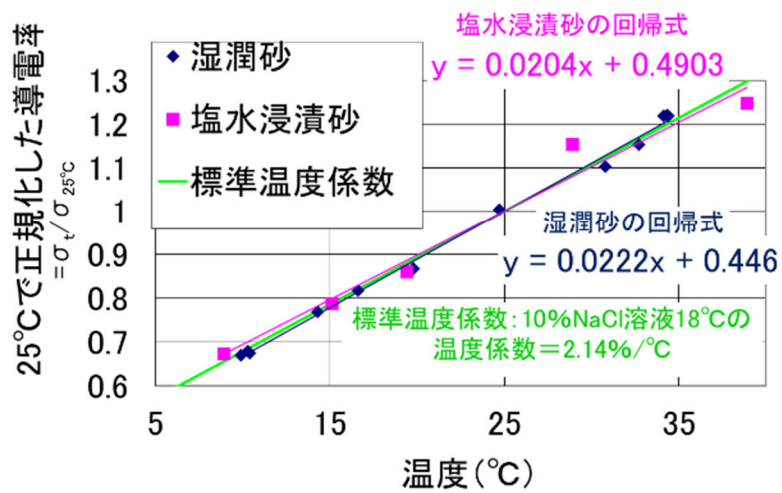


図-5.3.7 温度と導電率の関係

### 5.3.6 観測値の履歴

実験中の計測電位の履歴を図-5.3.8 に示す。図は電極配置ごとに分けてプロットしてい

る。凡例に示す電極配置は電極番号の組み合わせで表記しており、たとえば C1 電極が No.2、C2 電極が No.11、P1 電極が No.5、P2 電極が No.8 の電極配置を 2-11-5-8 と表し、他の配置についても同様の規則で表記している。ウェンナー配置の場合、一様地盤では2つの電位電極の midpoint に感度中心を持つため、図中の凡例には感度中心の標高を併記している。ただし、2-11-5-8 は遠方までの広い範囲を感度に持つため、探査領域全体の変動を捉えるために用いた電極配置であることから、感度中心の標高ではなく、「西側全体」と表記している。縦軸は注入開始時の値に対する比である。図より、2-11-5-8 が最初に測定電位が低下し始め、5 時間経過時点で 6%低下した（初期値に対する比率が 1 から 0.94 に変化した）ことが分かる。また、他の配置については、2-11-5-8 よりおよそ 1 時間遅れて低下し始めたが、高い位置に感度中心を有する配置ほど電位の低下が少なく、17-20-18-19 は測定電位がわずかながら増加し続けた。この電極配置の初期状態の感度分布を確認したところ、漏水孔末端付近は逆感度の領域（比抵抗が低下すると電位が増加する領域）にあったため、恐らくそれが増加の理由であると考えている。

図-5.3.9 に、実験中に 8 か所の熱電対で記録された地中温度の平均値の履歴を示す。ばらつき大きく、瞬時値を逆解析の温度補正に使用するのは不相当であると考え、温度補正ではこのデータの 10 データごとの移動平均を使用した（図では赤線で図示）。実験中、約 0.7°C の増減があった。

### 5.3.7 逆解析の方法

今回の実験土槽は絶縁体であるゴム製の遮水シートで原地盤と遮蔽されているため、解析対象の 3 次元性を考慮する必要があると考え、3 次元解析を行った。また、実験土槽は計測断面を対称面として面対称の形状であるため、解析モデルは 1/2 モデルとした。

順解析には有限要素法を採用し、実験土槽の形状を近似したモデルを作成した。メッシュには 6 面体アイソパラメトリック要素を使用した。図-5.3.10 に解析モデルを示す。

図-5.3.8 の 7 時間分の計測電位を 1 時間ごとの 7 ステップに分割し、各時間ステップ毎の測定データから比抵抗分布を逆解析により求めた。

一般に、解析の信頼性を高めるためには、既知情報を積極的に利用することが有効である<sup>32)</sup>。一方、今回の実験では、計測電位の履歴を連続的に取得するために使用電極を限定



したため、東側模擬地盤や模擬改良体に関する情報が不足していることから、土槽全体の比抵抗分布を求めるのは困難なことが予想された。これらを踏まえ、塩水トレーサーをコントロールできている東側模擬地盤と模擬改良体の比抵抗分布は既知情報として与えた。具体的には該当部分の比抵抗を表-5.3.2 に示した値に強制した。初期状態の模擬地盤（不飽和部）と 10%食塩水で飽和した模擬地盤との境界線、つまり東側模擬地盤内の塩水トレーサーの水位は時間ステップ毎に図-5.3.4 に則って時間ステップ毎に変動させた。この時、水位は水平であることを仮定した。

逆解析の対象範囲（セル分割して比抵抗分布を求める範囲）は西側の模擬地盤のうち、使用した電極で2辺を接する図-5.3.10 の図示の範囲とした。奥行き方向には対称面から 1m までの範囲の 1 列のセルのみである。それ以外の外周地盤はまとめて 1 つのセルとして比抵抗を求めた。逆解析の収束安定性を高めるために、セル間の関係性として平滑化拘束を与えた。

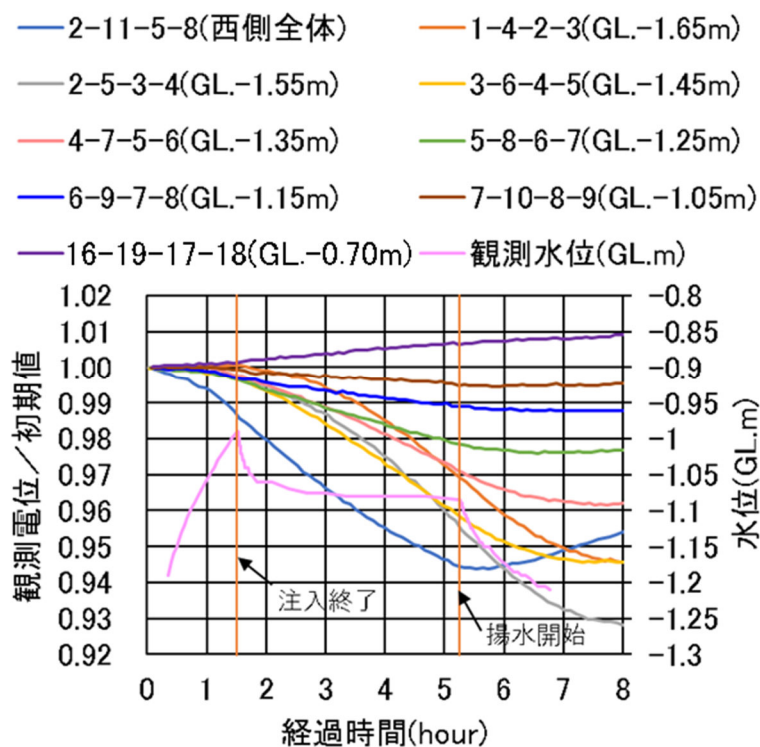


図-5.3.8 計測電位と観測水位の履歴

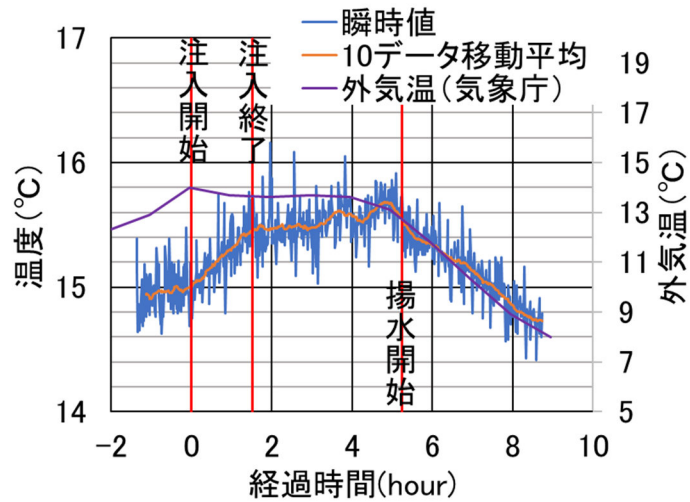


図-5.3.9 地中温度の平均値の履歴

実験中、約  $0.7^{\circ}\text{C}$  の温度変化が見られたため、測定電位に対して式エラー! 参照元が見つかりません。による温度補正を施し、 $25^{\circ}\text{C}$  換算の測定電位に変換した。式エラー! 参照元が見つかりません。は Heyley et al の温度補正式<sup>74)</sup>に基準温度  $25^{\circ}\text{C}$  を代入し、電流一定条件でのオームの法則に基づいて電位に書き直したものである。また、温度補正係数（温度に対する導電率の変化割合）は図-5.3.7 から  $0.0213$  とした。

$$V_{conv} = V_{meas} \{1 + 0.0213(t_{meas} - 25)\} \quad (5.1)$$

ここで、

$V_{conv}$  : 換算電位 (mV)

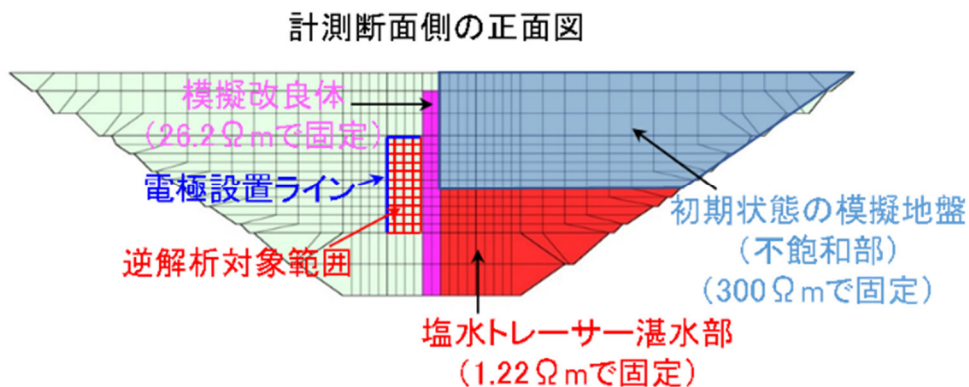


図-5.3.10 解析モデル

$V_{meas}$  : 計測電位(mV)

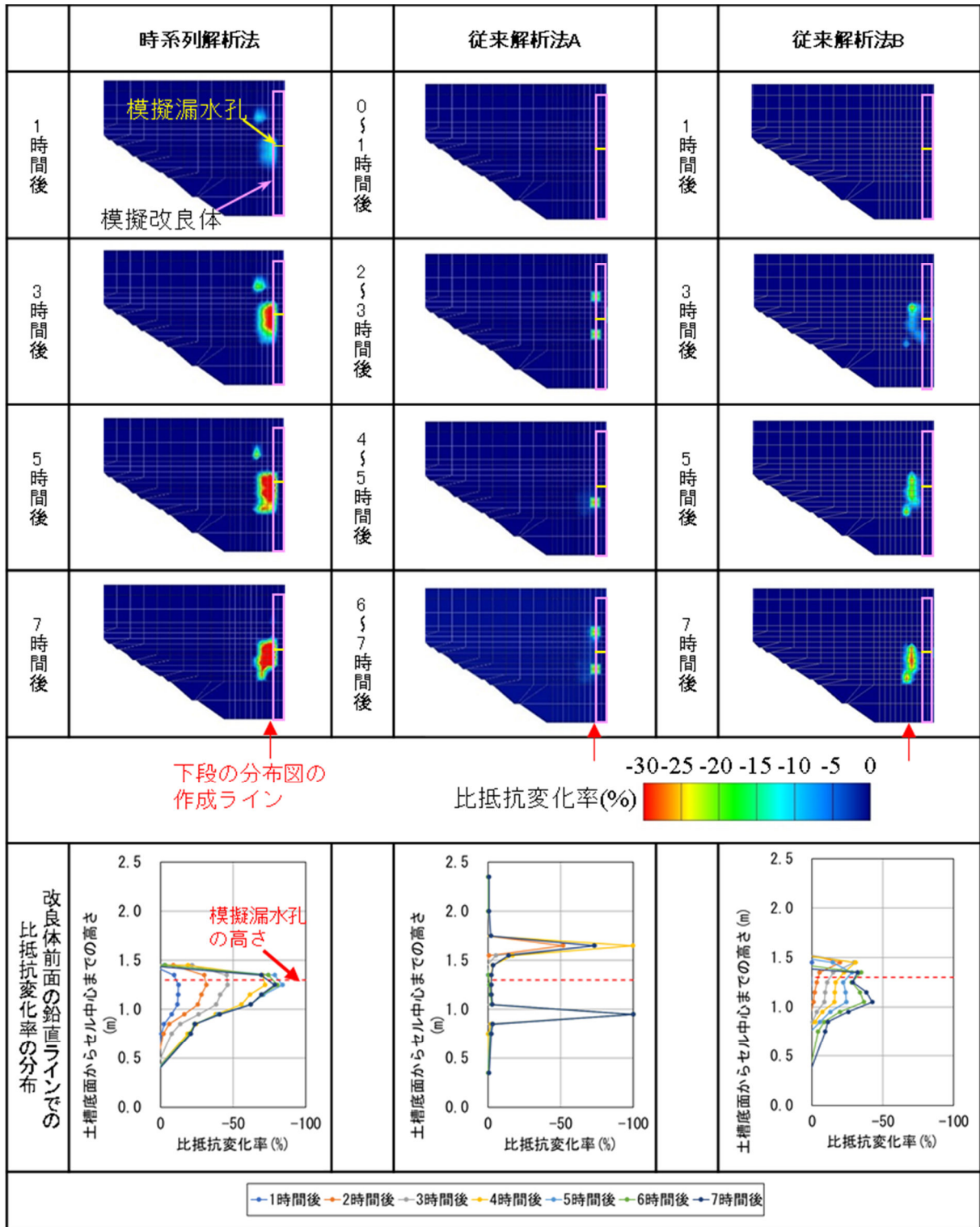
$t_{meas}$  : 計測温度 (8か所の平均温度の10データ移動平均値)

### 5.3.8 逆解析の結果

図-5.3.11に西側の比抵抗変化率分布の推移を示す。図には比較のために、従来解析法<sup>59)</sup>による結果 (従来解析法A) を併記した。

従来解析法Aでは、模擬漏水孔以外の個所に比抵抗低下が認められ、かつ連続的に拡散していく状況は見られない。これは、今回の場合、従来解析法では1つの時間ステップの中での比抵抗変化を考慮せず、時間ステップの中で比抵抗が一定と仮定している解析法であるため、時間ステップ中の比抵抗の変動が誤差となって実際の比抵抗の変化を打ち消した可能性がある。

そこで、次に従来解析法でこのような時間ステップ中の比抵抗変動に影響を受けないような逆解析を試行した (従来解析法B)。5.3.4で述べた1サイクル分 (1つの時間ステップが60分であるのに対し、測定所要時間は約6分) のデータのみを使用した場合、その間の比抵抗変動はほとんど生じないはずであるから、各時間ステップの最後の1サイクルの測定データのみを用いた逆解析を行った。結果を図-5.3.11の従来解析法Bに示す。



従来解析法A：時間ステップ内に測定したすべてのデータを使用  
 従来解析法B：時間ステップの最後の1サイクルの測定データのみを使用

図-5.3.11 西側の比抵抗変化率分布の推移(上段:コンター図、下段:最も比抵抗変化率が低下している鉛直ライン(時系列解析法と従来解析法Aは模擬改良体前面、従来解析法Bはその2列左)での深度分布)

### 5.3.9 水みち末端位置の検証

土槽実験の逆解析結果を実際の水みち末端の位置と比較する。まず、コンター図について考察する。図-5.3.11 において時系列解析法は1時間後の時点で模擬漏水孔末端を起点に比抵抗の低下が生じている。さらに時間経過とともに連続して比抵抗低下領域が周囲に拡大している。模擬漏水孔末端からやや離れた左上の位置にも小さな比抵抗低下が見られるが、拡大は見られず、7時間後には消滅していることから比抵抗トモグラフィにしばしば見られる偽像と考えられる。以上より、時系列解析法によれば時間的な推移も踏まえて模擬漏水孔の位置を精度よく同定できていることが分かる。なお、比抵抗低下領域が時間経過とともにやや下方に広がっているのは、重力の影響であると考えられる。

一方、従来解析法 B でも解析領域内で徐々に比抵抗低下領域が広がる様子が見られる。しかし、時系列解析法と比べると位置は模擬漏水孔の位置と離れており、不正確である。短時間の測定データのみ限定したために測定中の比抵抗変動の影響が減ったものの、使用データ数が約 1/10 に減少したため、位置が不正確になった可能性がある。

さらに、特定した水みち末端の位置には水みちを閉塞する補足注入を行う必要があるため、コンター図の色調だけでなく得られる比抵抗変化率分布から精度よく水みち末端位置を検出する方法を考察する。水みち末端はトレーサーの供給源であるから、比抵抗が最も低下する場所と考えられる。したがって、比抵抗変化率が最小となる（変化幅が最大となる）場所を水みち末端位置と同定できると考えた。

図-5.3.11 の下段は模擬改良体前面の縦一列のセルに関する比抵抗変化率分布の履歴である（従来解析法 B については最も比抵抗変化率が小さい当該列より2列左の列を表示している）。時系列解析法では模擬漏水孔は時間ステップによらず、比抵抗変化率の最小値を取る場所（高さ）とほぼ一致していることが分かる。これに対し、従来解析法 A、B の場合、いずれも最小値の示す位置が変動しており、水みち末端位置の同定自体が困難であり、実際の模擬漏水孔の位置（高さ）に明確なピークは見られない。なお、筆者らが実施してきたこれまでの時系列解析法の研究結果を見る限りでは、時系列解析法によれば比抵抗低下の原因（ここでは漏水孔）が空間的に移動しない限り最小値の位置が時間ごとに変動することはあまりなさそうである。したがって、上記の水みち末端位置の検出方法は妥当で

あると考えられる。

以上より、本実験結果を見る限りでは、時系列解析法は従来解析法に比べ模擬漏水孔末端の位置の推定精度が優れている可能性が高い。

### 5.3.10 移流拡散解析との比較

#### (1) 比較の方法

土槽実験の逆解析結果と比較するために、本実験を数値解析で再現した。まず、移流拡散解析から体積含水率、塩分濃度が得られる。そして、体積含水率と間隙率（既知）から飽和度に換算した。塩分濃度は既往のデータ<sup>75)</sup>から間隙水の比抵抗に変換した。また、間隙率、飽和度、間隙水の比抵抗と地盤の比抵抗を関連付ける要素実験を行い、地盤の比抵抗に換算したうえで、最終的に比抵抗変化率を求めた。

解析では3次元FEMによる移流拡散解析を行った。水位制御孔が実験土層に対して非対称な位置にあるため、対称モデルとはせず実験土槽全体をモデル化した。境界条件として、水位制御孔の底面から1.3mの範囲の節点を時間変化する全水頭境界として規定した。水位制御孔における水位測定記録はないので、水位観測孔で記録された水位の履歴にフィッティングするよう全水頭境界条件を定めた。また塩水を供給する水位制御孔の底面から1.3mの範囲の節点について濃度固定境界とし、使用した塩分の濃度である10%で固定した。全水頭、塩分濃度の初期条件は実験と同じように設定した。解析用物性値は浸透実験、拡散実験を行い、主たる物性値を同定した。詳細は付録Aに示す。解析結果を比抵抗変化率に換算する換算式を求めるために要素実験を行った。詳細は付録Bに示す。

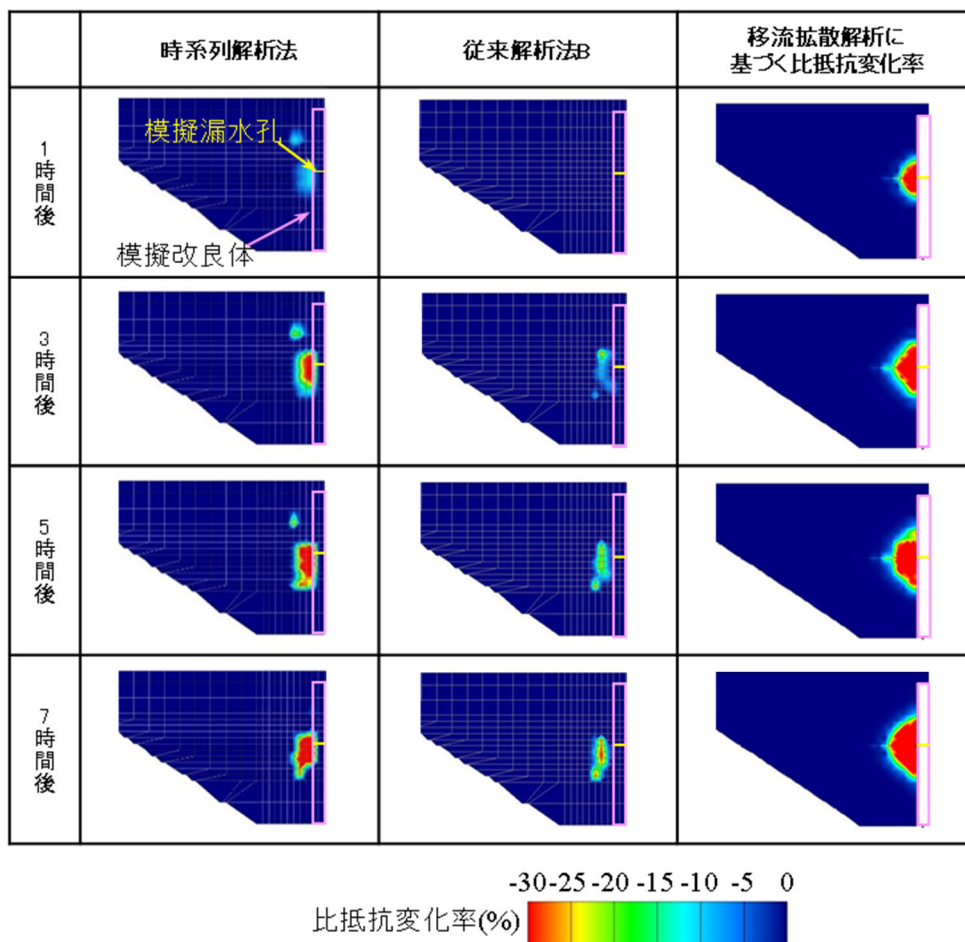
#### (2) 解析結果と考察

移流拡散解析の結果をもとに、体積含水率を飽和度に、塩分濃度を間隙水比抵抗に換算し、地盤の比抵抗を求めた。比抵抗変化率分布の推移を比抵抗トモグラフィの逆解析結果と対比する形で図-5.3.12に示す。図より、塩水は模擬漏水孔から漏水し、その後範囲を広げていくことが分かる。これは、時系列解析法による比抵抗トモグラフィの逆解析結果とよく一致した結果となった。なお、時系列解析法による逆解析結果では重力の影響で時間経過とともにやや下方に比抵抗低下領域が広がっているのに対し、移流拡散解析ではそれ

があまり見られないのは、今回の移流拡散解析では密度流の影響を考慮しなかったことが影響している可能性がある。

また、この探査の目的は水みち末端位置の検知であるので、最初の比抵抗低下を感度よく捉えられることは重要と考えられるが、移流拡散解析結果を見ると、1時間後の時点で比抵抗低下が生じており、時系列解析法では敏感にこれを捉えられているのに対し、従来解析法では比抵抗低下は見られない。

さらに、図中の30%の比抵抗低下領域（図中の赤色領域）の面積が移流拡散解析と近いのは時系列解析法であり、比抵抗変化率の絶対値を見ても時系列解析法の方が移流拡散解析の結果と近いことが分かる。なお、移流拡散解析は多くのパラメータを要する数値解析であるため、パラメータが変われば結果も変化する可能性はあるが、今回の移流拡散解析



従来解析法B：時間ステップの最後の1サイクルの測定データのみを使用

図-5.3.12 比抵抗変化率分布の推移



では、ほとんどのパラメータを実測から求めているため、客観性は概ね担保できていると考えている。

以上より、本論で提案した時系列解析法を用いれば、従来解析法より精度良く水みち末端の位置を検出できると考えられる。

### 5.3.11 条件変化に対する考察と残された課題

今回の実験では、1つの条件のみで行っているため、諸条件が変化した場合に対する本手法の限界を評価できていないが、比抵抗のコントラストの変化、トレーサーの拡散速度の変化、測定断面（電極設置ラインを有する断面）から漏水孔までの離隔の変化に対する手法の適用性を以下に考察する。

まず、比抵抗のコントラストについて述べる。小峯の比抵抗トモグラフィを用いた薬液注入範囲の評価方法に関する研究(26)によれば、薬液注入における改良範囲の評価において薬液の比抵抗が地下水の1/10以下程度であれば、十分良好な評価が可能であるとしている。したがって、本論で述べる手法についても上記の比抵抗コントラストが適用性を判断するうえでの1つの目安になると思われる。事前に現地で試料を採取し、室内試験を行えば、適用性を判定できると考えられる。

次にトレーサーの拡散速度については、水みちの太さ、地盤の透水係数、水みちに作用する水頭など多様なパラメータに影響を受けると考えられるため、定量的に判定すること、事前に予測することは困難であるが、3章で述べたように、領域浸透時間の5～12%の範囲に時間ステップ間隔を設定すれば低比抵抗領域の広がりを精度良く捉えられる。このため、解析時に時間ステップ間隔について何パターンか試行し、最も測定値との残差が小さいものを選択するといった対応が考えられる。

さらに、今回の実験は主に時系列解析法の有効性を確認するために漏水孔と電極設置ラインが同一面上に存在する条件で実施したが、漏水孔が測定断面から離れた場合に対する限界は追及できていない。一方、二極法電気探査では電極間距離を直径とする半球状に感度が分布しており<sup>76)</sup>、最大の電極間距離は探査範囲と概ね等しいことから、探査範囲の1/2程度の奥行き方向の乖離までは条件によっては対応可能と考えられる。ただし、対応可能な乖離の程度については条件によって変化する。さらに、実用にあたっては、改良体



表面に沿って測定断面を設置するなど、実用上効果的な電極配置の検討も必要である。

以上のように、ある程度諸条件が変化しても提案する方法で水みち末端位置を検知できると考えているが、今回の実験では検証できなかった。さらに最適な電極配置を追求することも必要である。これらについては次節で述べるシミュレーションにより検討を加える。

### 5.3.12 土槽実験のまとめ

実験結果より、以下のことが分かった。

- (1) 提案した方法の実現性を検証するために、屋外土槽実験を行った。水みちの末端を中心に比抵抗低下領域が徐々に拡散していく状況を捉えることができ、方法の実現性が確認できた。
- (2) 比較対照のために従来解析法で実施した結果は、水みち末端の位置を精度よく示唆する結果にはならなかったことから、今回の実験では、水みちの末端を検知するためには時系列解析法を逆解析に用いることが必要だった。
- (3) 移流拡散解析により実験の再現を試みた。その結果、得られた比抵抗変化率の分布は、時系列解析法を使用した比抵抗トモグラフィより得られたものと同様の結果となった。

## 5.4 検知方法の実大シミュレーションによる実用検討と適用限界

### 5.4.1 シミュレーションの目的・位置付け

前節の検証実験により、時系列解析法を使用すれば水みち末端位置の検出が可能であるとの見通しを得られた。しかし、条件変化に対する適応性については一通りの実験条件のみで実施した今回の実験では分からず、課題として残った。本来は、実験条件を変化させて複数のパターンでの実験を行うことが理想であるが、比抵抗コントラスト、浸透速度など様々な条件変化が想定される中で、それらをすべて実験で検証するのは限界がある。一方、5.3.11において水みち末端からのトレーサーの漏水は移流拡散解析によるシミュレーションがある程度可能であることが分かった。以上より、本節では条件変化に対する適応性を数値シミュレーションにより検討した。

### 5.4.2 検討手順

検討手順を図-5.4.1に示す。基本的な手順は4.2.2で述べたものと同様である。初めに条件設定をし、移流拡散解析により濃度分布、飽和度の時刻歴を算出した。次にこれらから比抵抗分布の時刻歴を換算した。換算方法は付録Bに示す。求めた比抵抗分布の時刻歴に基づいて静電場 FEM 解析により測定電位を計算した。測定電位より時系列解析法を用いた逆解析により推定比抵抗変化率分布の時刻歴を求め、後述する方法で推定漏水位置を求めた。最後に、得られた推定漏水位置から適用限界を評価した。

### 5.4.3 シミュレーションモデルの設定

本検討のモデル図を図-5.4.2に示す。長辺 15m×短辺 8m×深さ 21m のシールド発進立坑の坑口防護の薬液注入を想定したもので、既往の薬液注入の設計マニュアル 77)に記載の例題を用いた。そのため、改良体の寸法等の妥当性は担保できていると考えている。図中の注入範囲に予定通り注入が行われているが、図示の位置に 0.2m 四方の断面を持つ直方体の水みちが潜在し、改良体表面から 3.2m の深さまで、つまり大小2つの改良体の境界面まで繋がっている。この水みちの先端よりなんらかの方法で塩水トレーサーを注入し、水みち末端から未改良地盤に漏出している状態を想定した。

図のように、地下水位は地表面とした。また、立坑は RC 製とした。

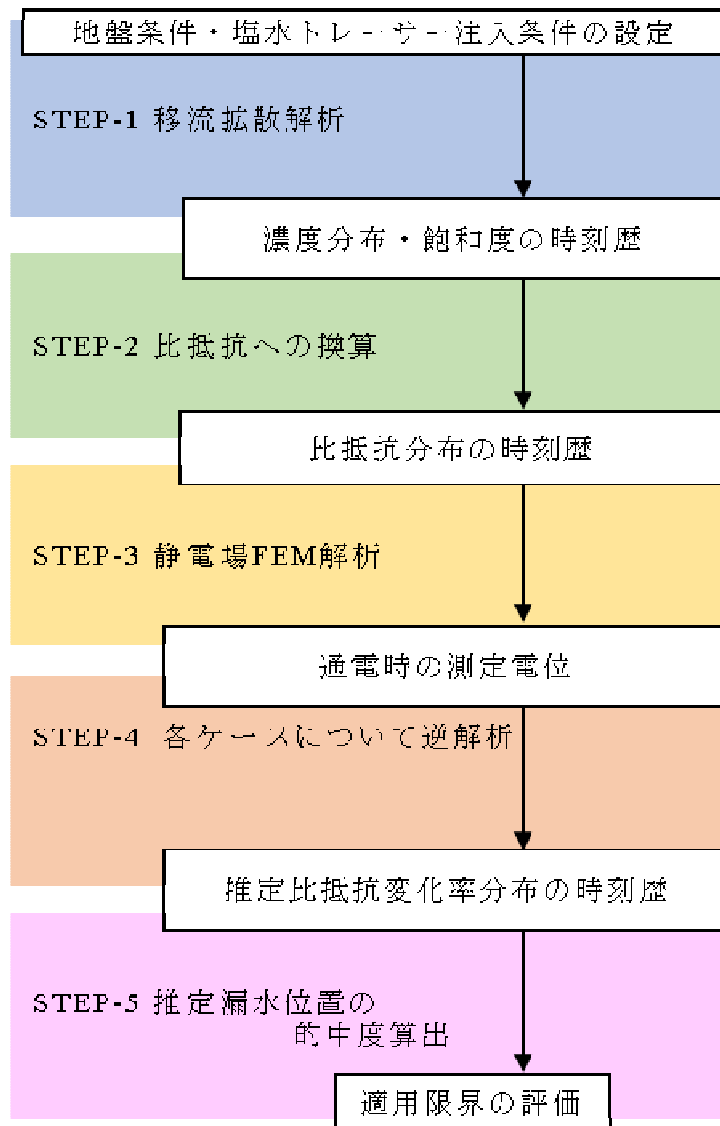


図-5.4.1 検討手順

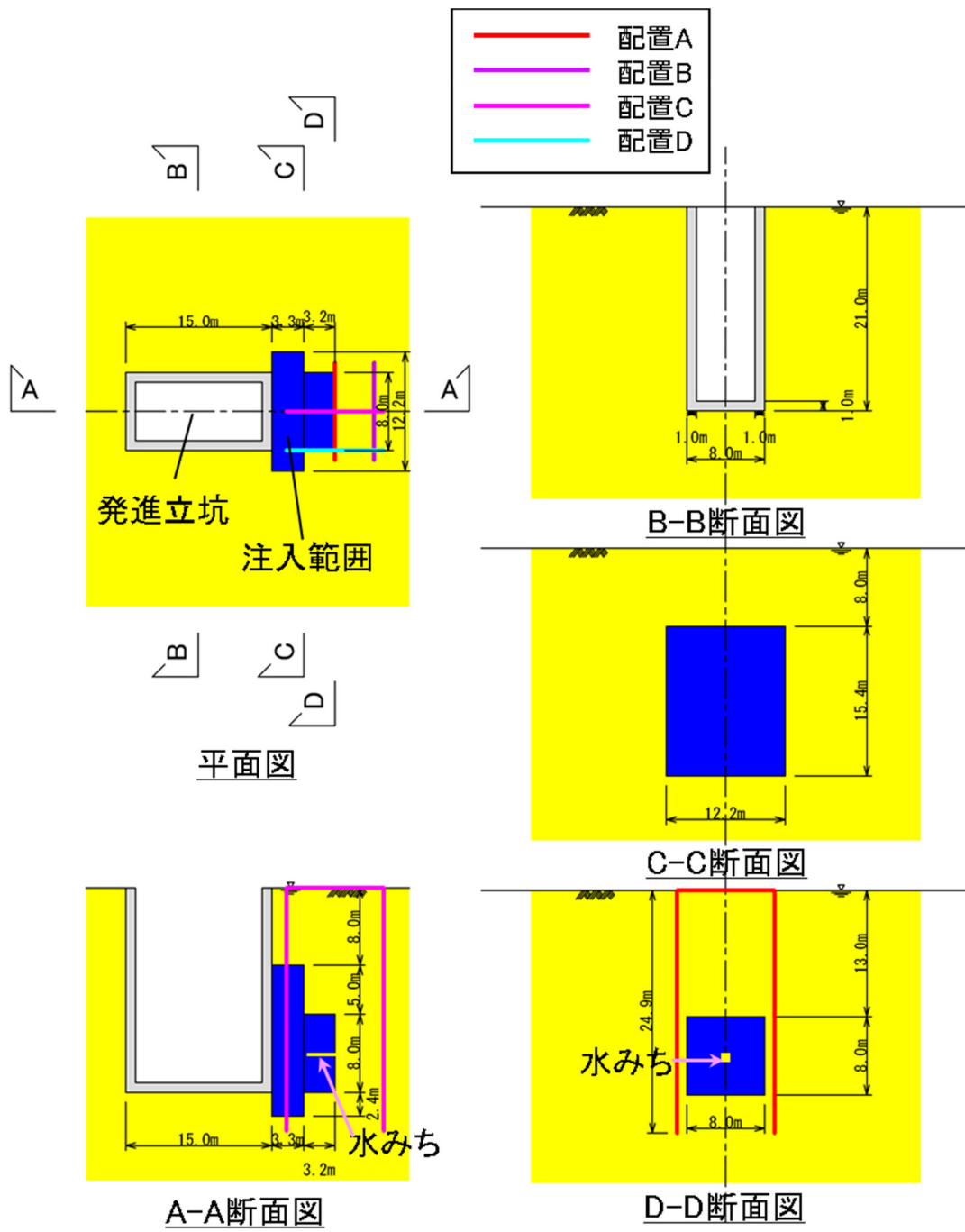


図-5.4.2 検討モデル

#### 5.4.4 変化させるパラメータの選定

図-5.4.3 は水みち末端位置の検知性能に影響する要因をロジックツリーで整理したものである。第2階層に示した5つの要素のうち、電極組み合わせ、バックグラウンドノイズに対する S/N 比については今回は考慮しないこととした。電極組み合わせは重要な要素の1つではあるが、3章で述べたように、時系列解析法では時間ステップ毎の感度の偏りを抑制するために電極組み合わせをランダムに並べ替えることを前提としている。したがって、どのような組み合わせであれば検知性能が上がるかを検討しても結果的にどのような速度で拡散するかには依存するため、事前予測が困難である。バックグラウンドノイズに対する S/N 比も検知に大きな影響を及ぼす可能性があるが、4.3.13 で述べた流動電位の影響も含め、ノイズの特性、レベル等、不明な点が多く、現時点でシミュレーションに組み込むことは難しいと考えた。以上より、電極組み合わせ、バックグラウンドノイズは一定と仮定し、比抵抗のコントラスト、漏出したトレーサーの拡散速度、水みち末端と電極設置位置の関係が変化した場合の検知性能を検討した。

まず、比抵抗のコントラストについては以下のように考えた。トレーサーで飽和した地盤の比抵抗はトレーサーの導電率と間隙率により決まる<sup>5)</sup> (地下水面以下であれば飽和度はほぼ 100%で一定)。トレーサーの導電率が高いほど高コントラストが得られるので、環境に影響しない範囲で十分高く設定するはずであり、これはあまり大きな条件変化とは考えにくい。また、間隙率は測定中一定なので、元地盤の比抵抗とトレーサーで飽和した地盤の比抵抗に等しく寄与し、コントラストをこれらの比と考えた場合、相殺される。また、薬液注入を地下水位以下で実施することを考えれば、元地盤の飽和度も通常 100%一定である。したがって、比抵抗コントラストは間隙水の導電率で決まると考えられるため、条件変化の1つとして間隙水の導電率を取り上げることとし、設定した間隙水の導電率から付録Bに示す回帰式(式(3))を用いて地盤の導電率に換算して解析に導入した。ここで、回帰式(3)はあらゆる土質に汎用的に適用可能であることを仮定した。

一方、トレーサーの拡散速度はトレーサーの漏出流量と地盤の透水係数に影響を受けると考えられる。漏水の流量が極端に多く、短時間にトレーサーが広域に拡散すると漏水の出始めを捉えることが困難になると考えられるため、その影響を検討する必要がある。なお、漏水の流量は透水係数の他に水みちの太さ(直径： $D$ )、水みちに作用する水頭(水頭

差： $H$ ) や水みちの延長 $L$ にも影響を受けるが、流量 $Q$ を1次元のダルシー則を用いて表すと、式(5.2)のように表せる。

$$Q = Aki = \frac{\pi D^2}{4} k \frac{H}{L} \quad (5.2)$$

ここで、

$A$  : 水みちの断面積

$k$  : 透水係数

$i$  : 動水勾配

である。

このため、流量に換算すればどれも同種の影響要因であり、元地盤の透水係数を変化させたパラメータスタディの結果から他の要因の影響は推定可能と考えられるため、本検討では透水係数のみを変動パラメータとした。

以上より、①元地盤の透水係数、②元地盤の間隙水の導電率、③水みちと電極設置位置の関係をパラメータスタディで変化させることにした。

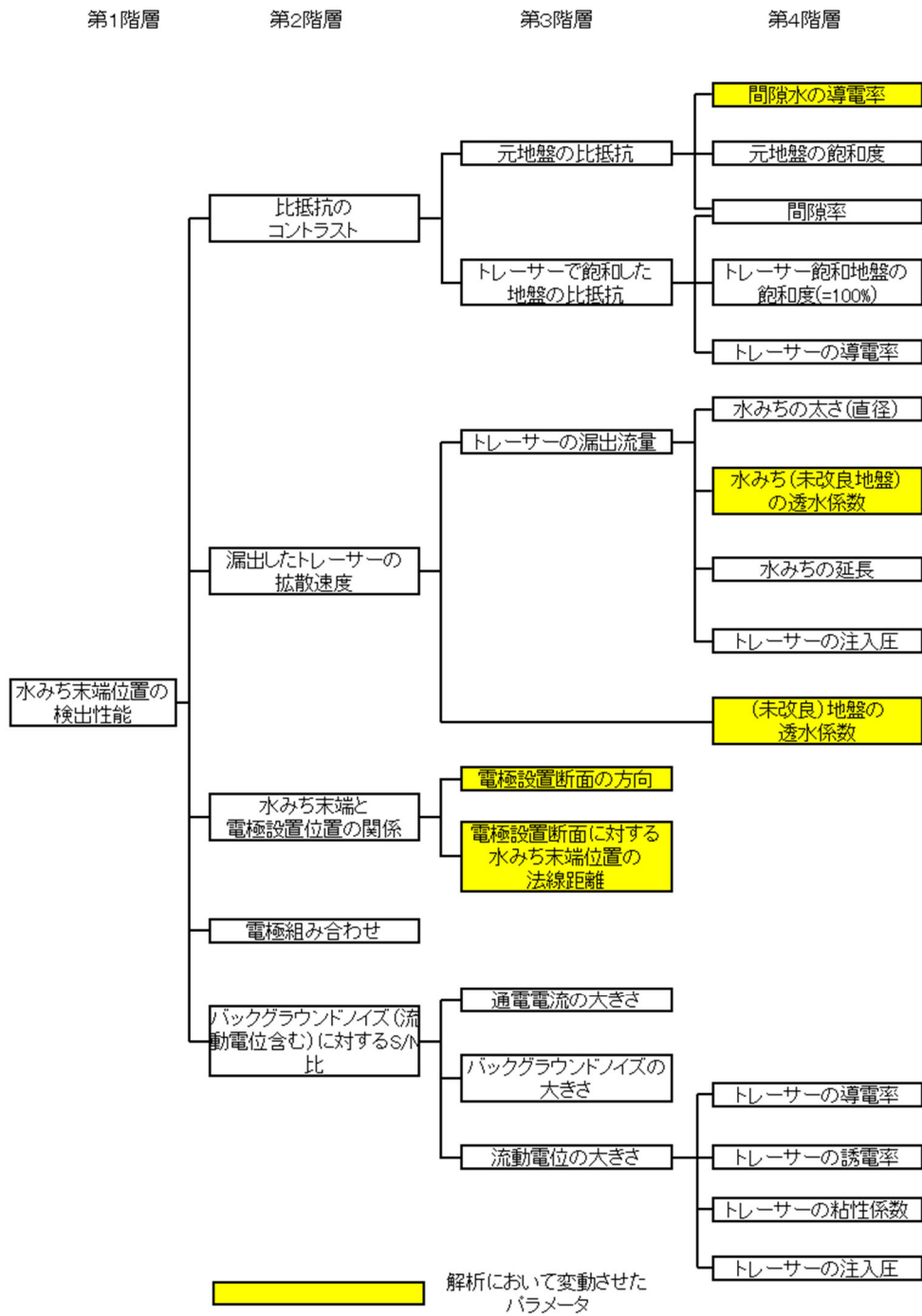


図-5.4.3 水みち末端位置の検知性能に関する影響要因図

#### 5.4.5 検討ケースの設定

今回のシミュレーションで実施したケースの一覧を表-5.4.1 に示す。本検討では①元地盤の透水係数、②元地盤の間隙水の導電率、③水みちと電極設置位置の関係の3つのパラメータを変化させることとしたため、これらについて全組み合わせを検討すると、ケース数が膨大となる。そこで、本検討では標準的な条件設定とした基本ケースを設定し、これに対して単一のパラメータのみを変動させたケースを実施し、各パラメータの変動に対する漏水位置推定能力への影響を調べた。ケース1が基本ケースである。ケース2、3では20%通過粒径  $D_{20}$  を増加させることで、透水係数推定式の1つである Creager の式により元地盤の透水係数を増加させた。図-5.4.4 は島田・兼松が発表した水ガラス有機反応材の適用可能限界図にケース1～3で設定した粒径をプロットしたものである<sup>78)</sup>。図-5.4.4 より用いた  $D_{20}$  の値が適用範囲内であることが分かる。ケース4、5では間隙水の塩分濃度を増加させることで元地盤の比抵抗を低下させた。ケース6～8では電極配置を変化させた。

表-5.4.1 検討ケース一覧

ケース No.	$D_{20}$ (mm)	元地盤の 透水係数 (m/s)	元地盤の 間隙水の NaCl 濃度 (%)	元地盤 比抵抗 ( $\Omega$ m)	電極配置パ ターン
1	0.2	$7.90 \times 10^{-5}$	0.001	59.5	配置 A
2	0.3	$2.08 \times 10^{-4}$	0.001	59.5	配置 A
3	0.4	$4.10 \times 10^{-4}$	0.001	59.5	配置 A
4	0.2	$7.90 \times 10^{-5}$	0.01	16.9	配置 A
5	0.2	$7.90 \times 10^{-5}$	0.1	4.89	配置 A
6	0.2	$7.90 \times 10^{-5}$	0.001	59.5	配置 B
7	0.2	$7.90 \times 10^{-5}$	0.001	59.5	配置 C
8	0.2	$7.90 \times 10^{-5}$	0.001	59.5	配置 D



表中の電極配置パターンについては、図-5.4.2に示すA～Dの4パターンを試行した。これらの違いを表-5.4.2に整理した。いずれのパターンも電極設置ラインは幅10mの門型の形状とした。鉛直のラインは、探査対象範囲を挟む形でボーリングを2本実施すれば接地可能と考えられる。次に水平のラインについては探査対象範囲の上辺と下辺に設置できるのが理想であるが、実際には不可能である。そこで、ボーリング孔間を結ぶ地表面に電極を接地する設定とした。

配置Aは改良体表面に沿って設置するもので、基本ケースである。配置BはAと同様に改良体表面に平行な方向にラインを配置するものであるが、Bは水みち末端から法線方向に4mずれた状況を想定した。配置C、Dは5.3で述べた土槽実験と同様に改良体表面に垂直にラインを配置して、基本パターンとの違いを把握する目的で設定した。

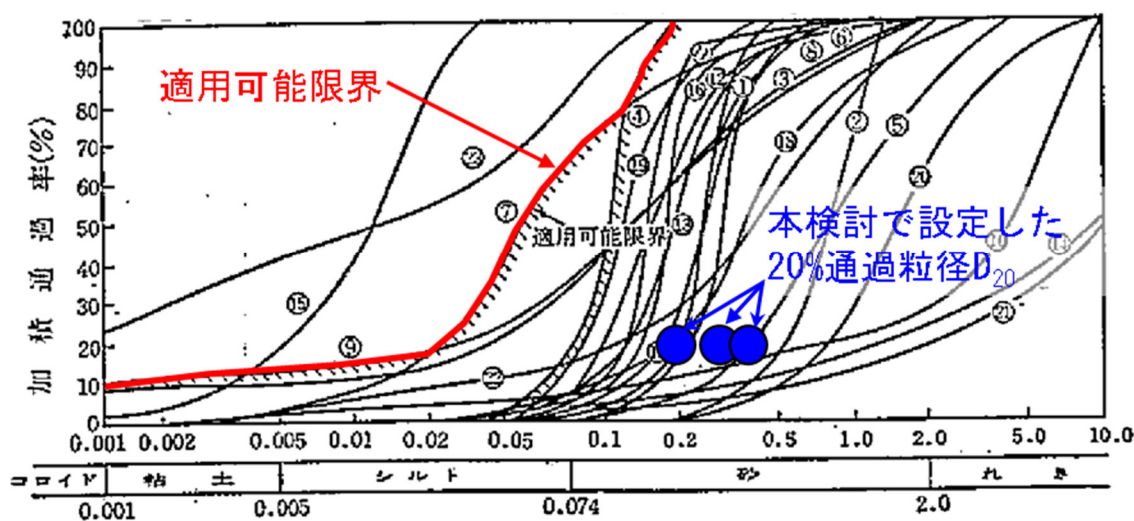


図-5.4.4 薬液(水ガラス有機反応材)の適用限界と本検討で設定した20%通過粒径との関係

表-5.4.2 電極配置の条件一覧

配置	方向	水みち末端との位置関係
配置A	改良体表面に平行	水みち末端に対し法線距離0m
配置B	改良体表面に平行	水みち末端に対し法線距離4m
配置C	改良体表面に垂直	水みち末端に対し法線距離0m
配置D	改良体表面に垂直	水みち末端に対し法線距離4m

#### 5.4.6 移流拡散解析の方法

移流拡散解析には3次元有限要素法を用いた。

トレーサーの注入条件として、水みち先端に50mの圧力水頭（水圧0.5MPaに相当）を作用させ、3%の濃度固定境界とした。地盤は土槽実験と同じものを使用することとし、透水係数以外の特性は5.3.10で行った移流拡散解析と同じとした。なお、ケース2、3では地盤の粒度を粗くして透水係数を大きくしていることから、厳密に考えれば間隙率や不飽和パラメータ等、透水係数以外の透水特性も変化するはずであるが、本検討では地下水位が地表面にあり、ほぼ解析領域全体が飽和状態であることが想定されるため、これらは結果にほとんど影響しないと考え、変化しないこととした。

注入は6時間（21600秒）継続し、この間を600秒間隔で計算して各時刻の塩分濃度を算定した。

境界条件として、地盤要素の側面、底面は全水頭固定（立坑底面を基準として21m）、濃度固定（0.001%～0.1%、ケースによる）の境界とした。また、RC製の立坑、および改良地盤は完全に不透水なものとして、要素のない領域とした。

#### 5.4.7 静電場 FEM 解析の方法

静電場 FEM 解析においても立坑等、3次元性を考慮する必要がある検討条件であるため、3次元有限要素法を用いた。解析モデルを図-5.4.5に示す。静電場解析では、移流拡散解析より境界の影響を受けやすいことから、モデル境界をより遠方にとり、広域モデルとした。移流拡散解析の解析領域外の位置での塩分濃度は初期濃度（0.001%～0.1%、ケースによる）のまま一定とした。

4.3.6で述べた室内試験において薬液サンドゲルの導電率は1S/m（比抵抗に換算して1Ωm）であったことから、本検討における改良地盤の比抵抗も同じ1Ωmとした。立坑のRCの比抵抗は5.3で述べた土槽実験で使用した模擬改良体（無筋モルタル壁）の実測値、26.2Ωmを用いた。電極配置はランダムに並べ替えたものを用いた。

#### 5.4.8 逆解析の方法

本検討は自然地盤内での薬液注入を前提としており、半無限地盤を対象としている。さ

らに、提案する水みち末端位置検知方法では経済性の観点から2次元解析を通常使用することを想定している。以上より、本検討では2次元解析を用いた。

順解析には有限要素法を採用し、メッシュには三角形要素を使用した。

6時間(21600秒)分の計測電位を40分(2400秒)ごとの9ステップに分割し、各時間ステップ毎の測定データから比抵抗分布を逆解析により求めた。

逆解析の対象範囲(セル分割して比抵抗分布を求める範囲)は左右の電極ラインに挟まれた幅10mのうち、改良範囲を包括する図-5.4.10の図示の範囲とした。それ以外の外周地盤はまとめて1つのセルとして比抵抗を求めた。逆解析の収束安定性を高めるために、セル間の関係性として平滑化拘束を与えた。

#### 5.4.9 水みち末端位置の同定方法

水みち末端位置を同定するにあたり、一律の基準で客観的に同定する必要がある。本検

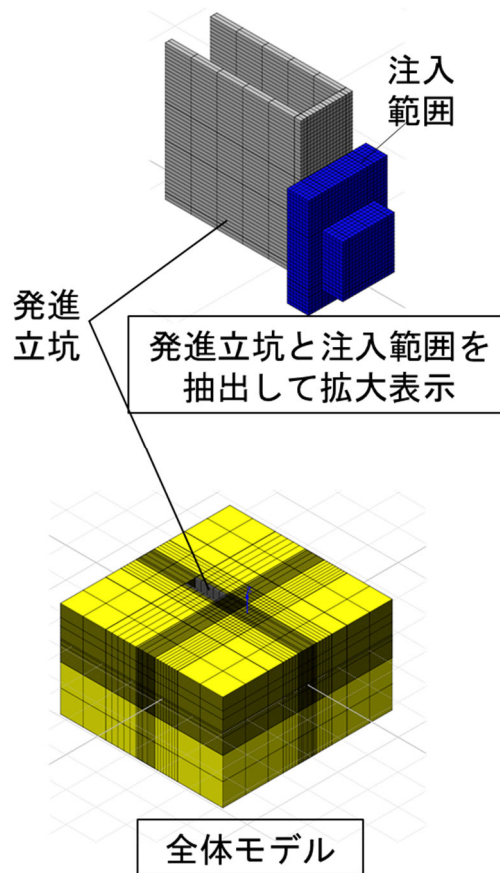


図-5.4.5 静電場 FEM 解析の解析モデル図

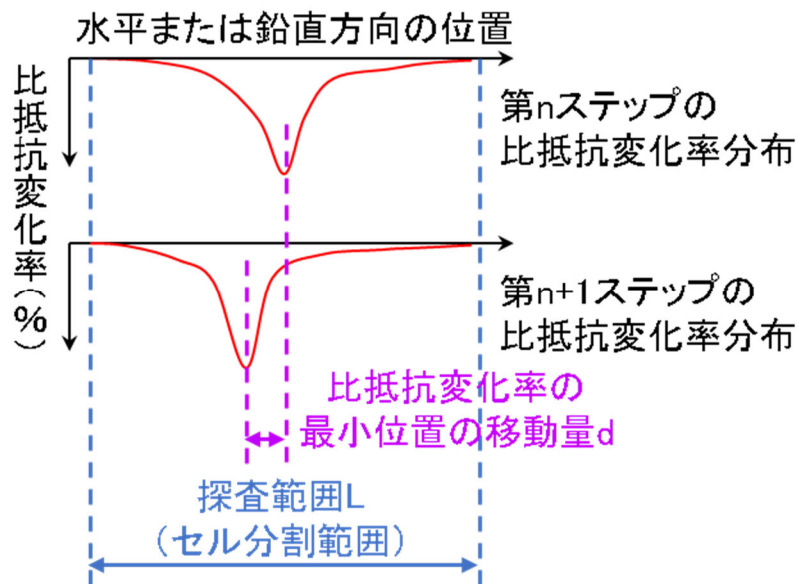


図-5.4.6 相対移動量に関わる変数の定義

討では、5.3 で述べた検証実験結果を踏まえ、水みち末端位置の同定方法を定める。検証実験の時系列解析法での結果によれば、水みち末端位置は比抵抗変化率が最小となる位置（以下、ピークポイント）と一致し、かつピークポイントは大きく移動せず、さらにそこでの比抵抗変化率は定常的に低下し続ける。そこで最小となるピークポイントの安定性を相対移動量という指標で評価することを考えた。図-5.4.6 に示すように変数を定義し、相対移動量 $m_r$ を式(5.3)のように定義する。

$$m_r = \frac{d}{L} \quad (5.3)$$

ここで、

$d$  : 比抵抗変化率の最小位置の移動量

$L$  : 探查範囲（セル分割範囲）

実験結果の図-5.3.11 下段のグラフ（最小比抵抗変化率発生断面における比抵抗変化率の深度分布）について表-5.4.3 に示す項目で整理した。このうち、時系列解析法は成功例、従来解析法 A、B は失敗例とみなし、安定性等を評価するうえでの閾値を設定した。

最終ピークポイントの比抵抗減少ステップ数については、時系列解析法が 71%であることから、全ステップの 70%以上であれば定常的に低下しているとみなせると考えた。

ピークポイントの相対移動量の最大値については、時系列解析法は 0%であるが、この値を閾値に採用すると、ピークポイントの時間ステップ間の移動を一切許容しないこととなり、かなり厳しい条件である。そこで、従来解析法 B 寄りの中間点に閾値を設定することとして 20%とした。次にこの 70%を超過しないステップがどの程度を占めているのかを確認した。従来解析法 A では 4 ステップ/全 6 ステップ=66%、従来解析法 B では 5 ステップ/全 6 ステップ=83%となった。失敗例でも超過しているのは 1、2 ステップであり、この程度の許容は必要と考え、従来解析法 A と B の中間にある 70%を閾値とした。

以上より、以下のプロセスで水みち末端位置を同定することとした。

プロセス A：比抵抗トモグラフィのセルのうち、初期値に比べて最終ステップの比抵抗が減少しているセルを対象とする

プロセス B：プロセス A で限定したセルのうち、全ステップ数の 70%以上のステップで比抵抗が減少しているセルを対象とする

プロセス C：プロセス B で限定したセルのうち、比抵抗変化率が最小となるセルを暫定の水みち末端位置とする

プロセス D：暫定水みち末端位置の各ステップ間の相対移動量が水平・鉛直 2 方向について 20%以内となるステップが全体の 70%以上であれば、その末端位置は定常的であるとみなし、各ステップでの暫定水みち末端位置の平均位置を最終の漏水位置とする。20%を超過する場合は該当なしとする

プロセス A,B は偽像等により一時的に比抵抗が低下するものを排除する目的で行うものである。検証実験でも偽像が部分的に見られたが、偽像であれば継続的に比抵抗が低下することはないので、プロセス A,B により排除できると考えた。プロセス C は実際に水みち

表-5.4.3 実験結果の整理

	時系列	従来 A	従来 B	閾値
最終ピークポイントの比抵抗減少ステップ数	71%	14%	86%	70%以上
ピークポイントの相対移動量の最大値	0%	82%	27%	20%以下
相対移動量 20% 非超過比率	100%	67%	83%	70%以上

末端を同定するもので、検証実験から得られた水みち末端は比抵抗変化率最小位置と一致するという知見を活用するものである。プロセス D は水みち末端の定常性を確認するために行う。水みち末端位置は移動しないので検証実験においても比抵抗変化率最小位置は 1 か所に固定していたことから、そのチェックが必要と考えた。

#### 5.4.10 適用限界の評価方法

前項で述べた方法により同定した水みち末端位置が実際の位置とどの程度一致しているかを定量的に評価する指標として、本検討では的中度という指標を用いることとした。図-5.4.7 のように変数を定義し、的中度  $H$  は式(5.4)のように定義する。

$$H = \frac{r}{L_{min}} \quad (5.4)$$

ここで、

$r$  : 解析断面内における実際の水みち末端位置（もしくはその投影位置）から 5.4.9 で述べた方法で同定した水みち末端位置までの距離

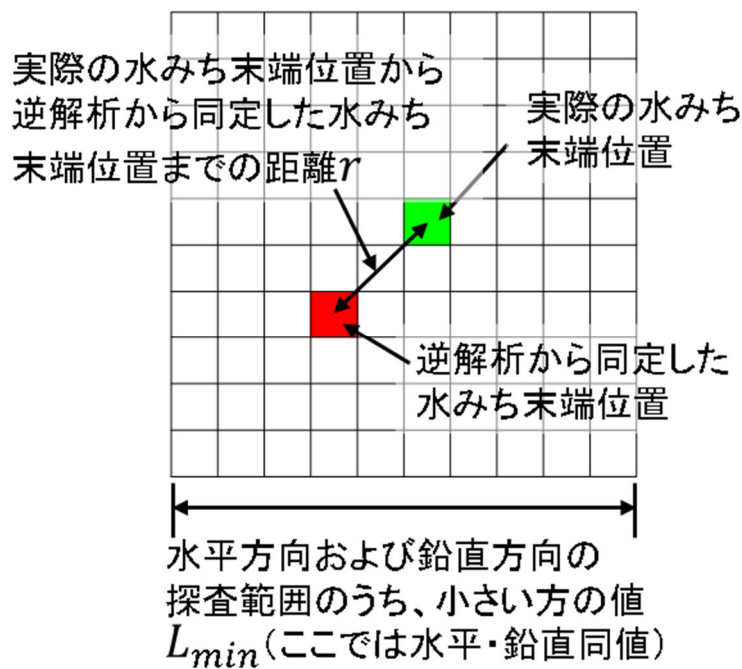


図-5.4.7 的中度に関わる変数の定義

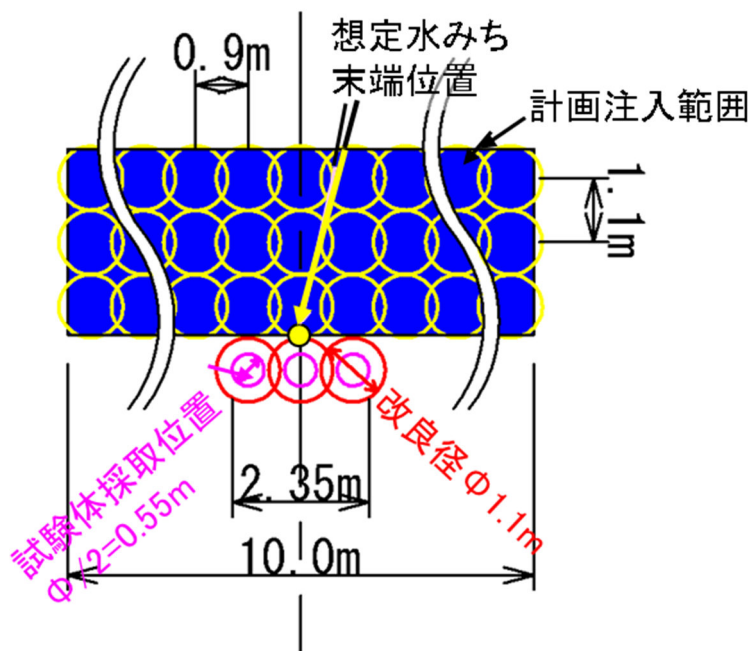


図-5.4.8 補足注入における注入孔の想定配置

$L_{min}$  : 水平方向および鉛直方向の探査範囲のうち、小さい方の値

そして的中度が 0.25 (25%) 以下であれば、当該条件が適用可能と判断することとした。ここで、この 25%は以下のような意味を持つ。ここではシールド発進防護の改良体の標準的なサイズとして、改良体の幅 10m を想定する。この時、水みちが検知できた時に実施する補足注入は図-5.4.8 に示すような配置で 3 本程度は実施されると考えられる。水みち正面の位置に 1 本、両サイドに安全のため 1 本ずつという配置である。一般に、薬液注入改良体の品質確認のために採取される一軸圧縮強度試験体は、改良径を  $r$  とした時、中心から  $r/2$  の位置で採取されることから、少なくとも図示の 2.35m の範囲内に水みち末端があれば補足注入は成功し、水みちを閉塞できると考えられる。従って、 $2.35 \div 10 \approx 0.25$  より、25%を限界値とした。

なお、この限界値は複数の想定のもとに設定した暫定値であり、今後実績を重ねて見直しが必要と考えている。

#### 5.4.11 シミュレーションの結果

はじめに移流拡散解析結果の例として基本ケースであるケース 1 の結果を示す。図-



5.4.9 は 5.4.2 で述べた方法で換算した比抵抗の各時刻における 3 次元コンター図である。図は水みちを通過する水平断面（断面 A）でスライスした断面を表示している。水みちを中心に拡散している状況が分かる。

図-5.4.10 に逆解析により求めた各ケースの比抵抗変化率分布および的中度を示す。水みち末端の正解位置は表示範囲のほぼ中央である。

ケース 1 では概ね水みち末端の位置を示唆する結果となっている。ほぼ定常的に水みち末端位置を中心に比抵抗低下が生じており、的中度も 0.07 となっている。

ケース 2 では、的中度は基準値以下になっているが、実際には 2 か所で比抵抗低下が生じており、あまり定常的に比抵抗が低下しているとは言えない。今回のルールでは合格ではあるが、リスクが伴うと考えた方がいいと思われる。ケース 3 では、該当なしとなった。透水係数が増加する場合、本手法には限界があるようである。この限界をどのように見積もるかについては今後の検討課題である。

元地盤の比抵抗を減少させたケース 4、5 を見ると、ケース 4 では、的中度が不合格となったが、さらに減少させたケース 5 では、問題なく水みち末端位置を推定できており、的中度も 0.08 と良好な結果となった。ケース 4 の場合、初期のステップで正解の水みち位置から離れた位置で比抵抗が低下した影響で的中度が大きくなったが、全体的な傾向としては正解の水みち末端位置付近で比抵抗低下が生じている。このことから序盤の明瞭なピークが見えない時期のステップにおける比抵抗低下部を水みち推定から除外するルールが必要かもしれない。今回の検討ではどのようなピークが見え始めたら水みち末端として認定できるかといった点については詰め切れなかった。今後の課題である。

電極配置を変化させたケース 6～8 を見ると、どれも良好な結果が得られており、的中度も合格範囲内である。このことから電極配置についてはある程度柔軟に対応可能であると判断できる。ただし、土槽実験と同じ向きで配置されているケース 7 や 8 については水平方向に関する水みち末端位置の情報が得られないため、実務上は改良体表面に平行に測定断面を設けるケース 1 や 6 のような配置にする必要があると思われる。



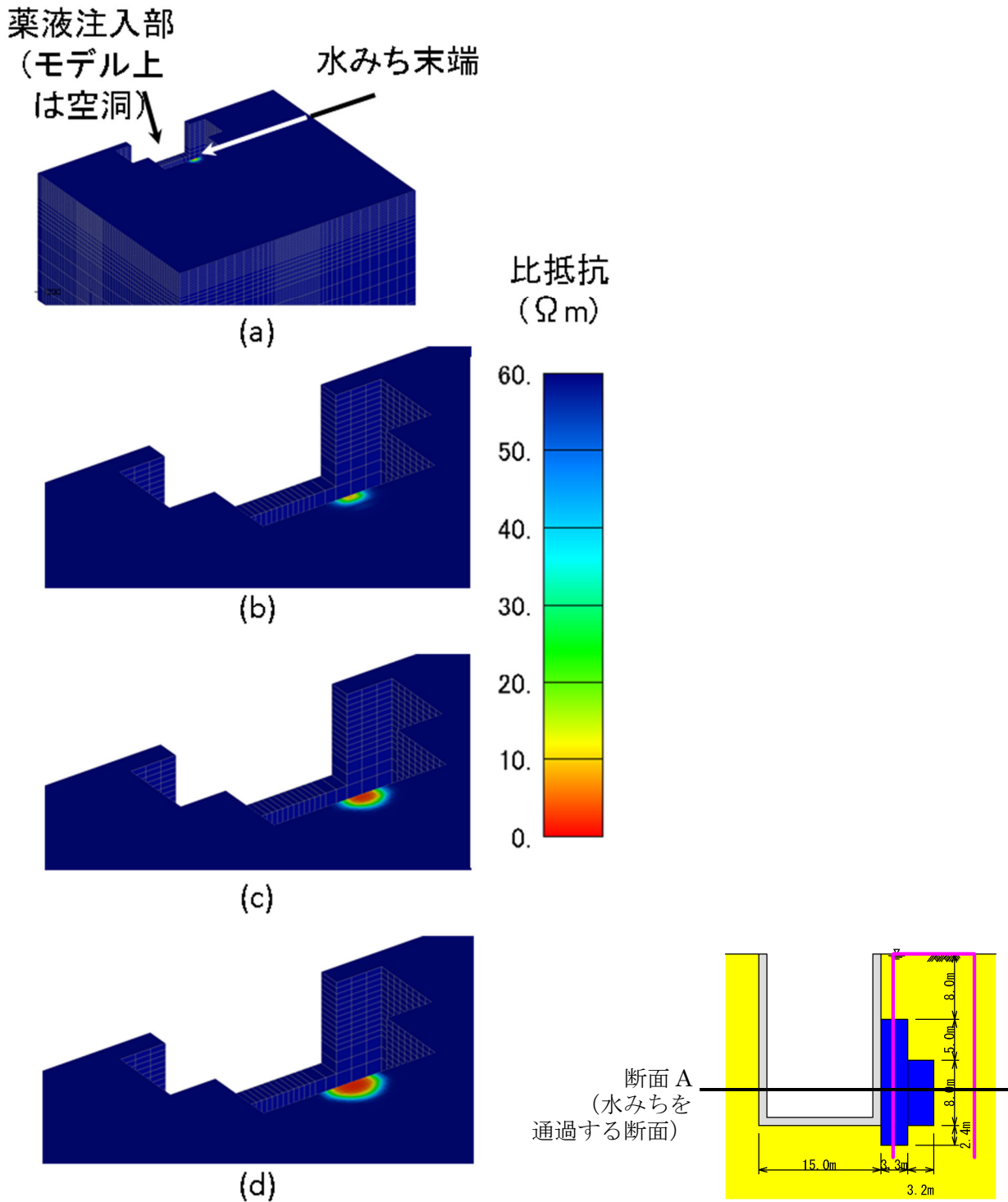


図-5.4.9 移流拡散解析と比抵抗への換算より求めた3次元比抵抗コンター図(断面 A で切断)

(a)全体鳥瞰図(b)開始 2 時間後の水みち末端周辺の比抵抗分布(c) 開始 4 時間後の水みち末端周辺の比抵抗分布(d) 開始 6 時間後の水みち末端周辺の比抵抗分布

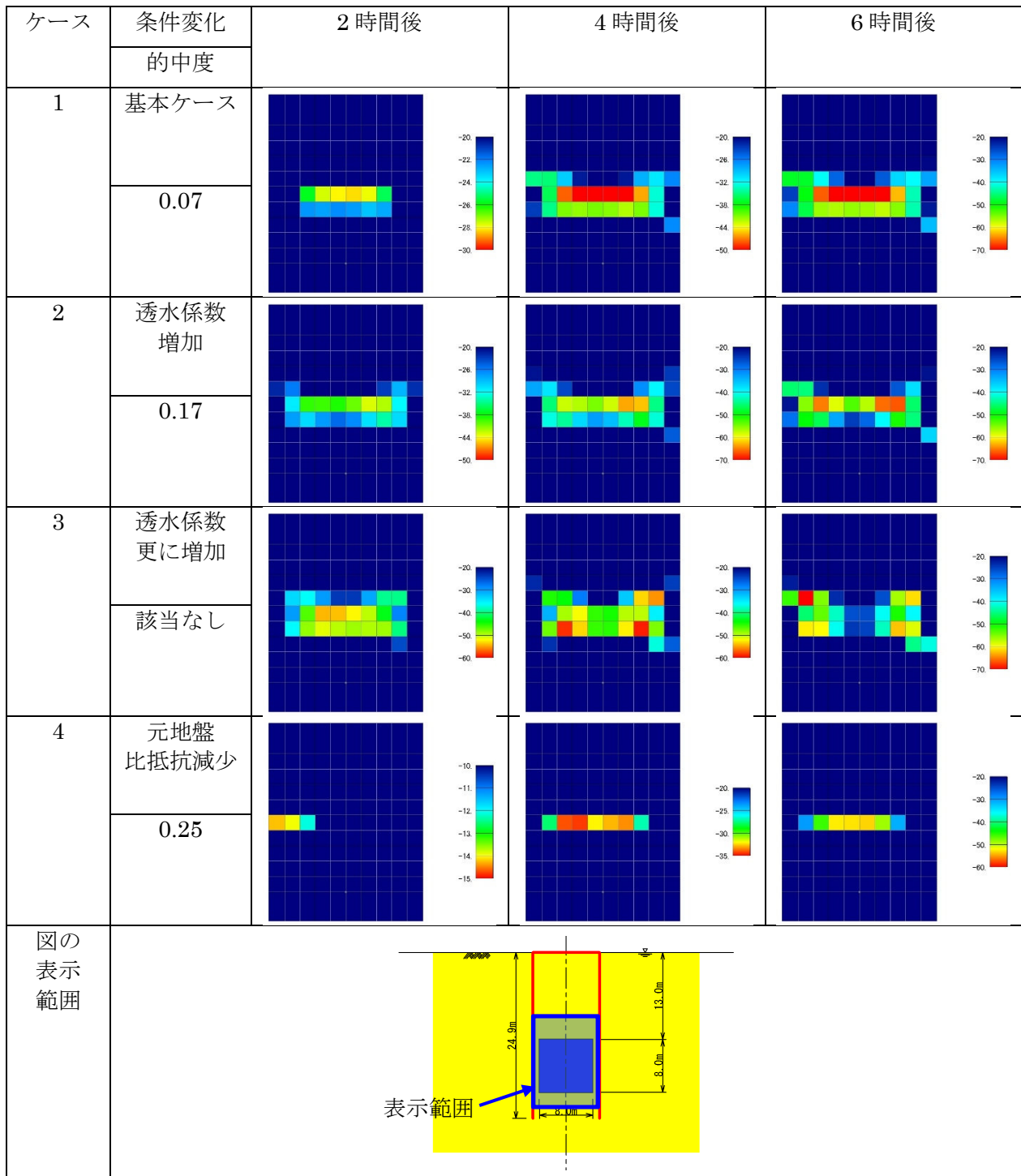


図-5.4.10(a) 比抵抗変化率分布(ケース1~4)

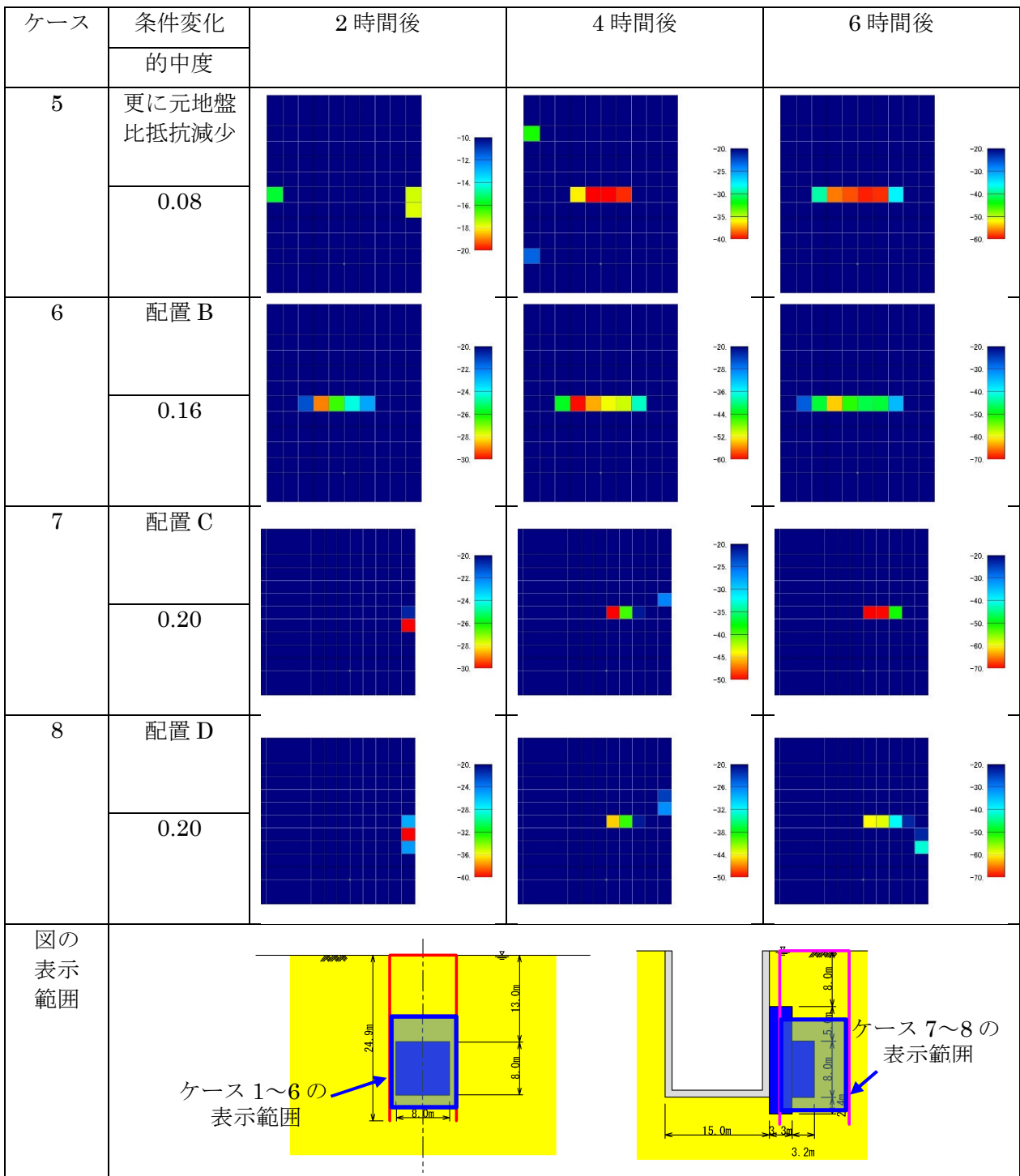


図-5.4.10(b) 比抵抗変化率分布(ケース 5~8)

## 5.5 水みち末端位置検知方法の提案

図-5.5.1 は筆者が考える水みち末端位置の検知手法の一例を示した概念図である。シールド発進立坑の坑口に施工した薬液注入工法の完了後に実施している状況を想定した。これまでの検討結果を踏まえて配置等を考案した。図のような直方体の薬液注入が完了した状況を考える。地盤は透明の直方体で示している。改良体は立坑と接しており、地盤と接しているのは残る3面である。改良体は図のように前面に通じる水みちが形成されている。注入完了後、図示の4か所に鉛直ボーリングを行い、改良体の側面3面に対してそれぞれ門型に電極を配置する。地表面に配置した電極ラインは地表面に打設するが、地上条件により常設が難しい場合は地中に埋設する。また、改良体に貫入する形で地上からの鉛直ボーリングにより注入孔を設置する。規模の大きい改良体においては複数の注入孔を設置することも必要である（図では2本設置）。

そして注入孔より導電性のトレーサーを低圧で注入する。するとトレーサー中のイオンは水みちを通過して改良体の外側に漏出し、徐々に広がっていく。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末端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あればそこが漏水位置と推定される。なお、比抵抗低下領域は時々刻々広がっていくため、時系列解析法を用いたモニタリングを行う。

以下に、筆者の想定する具体的方法・手順を示す。

手順1：電極および注入孔用の鉛直ボーリングを行う

手順2：淡水で試験注入を行い、水みちの有無を確認する。注入圧は極低圧から徐々に増加させ、改良体が注入圧で割裂破壊しないよう改良体の設計基準強度の1/10程度の圧力まで増加させる。その時点で注入不可能な場合には水みちなしと判断し、完了する。

手順3：水みちがある場合には注入圧と注入量の関係を把握し、トレーサー注入時の注入圧設定のためのデータを取得する。

手順4：およそ6時間で改良幅の半分程度の領域にトレーサーが拡散するように注入圧を設定し、トレーサーの注入を開始すると同時にトモグラフィの電位測定を開始する。

手順5：6時間程度継続し、注入を終了する。

手順6：5.4.9で述べた方法で水みち末端位置を同定する。

手順7：補足注入

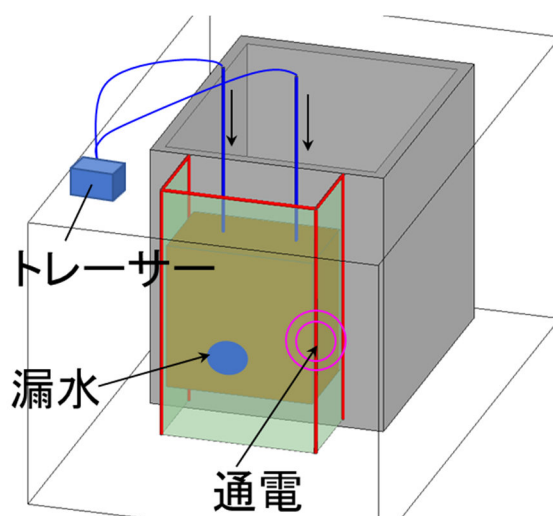


図-5.5.1 水みち末端位置の検知手法の一例

## 5.6 第5章のまとめ

本章では、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末端位置の検出方法を考案し、適用性を検討した。

5.2 では、改良体の水みち末端からトレーサーが漏出する状況を模擬した土槽実験を行った。時系列解析法を使用すれば、従来解析法より高い精度で水みち末端の位置検出が可能であることを確認した。

土槽実験では、1通りの条件で行ったため、数値解析によるパラメータスタディにより条件変化に対する適用性を5.3で検討した。適用できる透水係数には限界があり、適用にあたり慎重な判断が必要なことが分かった。元地盤との比抵抗コントラストについては透水係数ほど問題にはならないようである。ただし、序盤の明瞭なピークが見えない時期のステップにおける比抵抗低下部を水みち推定から除外するルールなど、細部を詰める必要がある。電極配置についてはある程度柔軟に対応可能であると判断できた。現場条件に合わせて配置を決めればよいと思われる。ただし、土槽実験と同じ向きで配置されているケース7や8については水平方向に関する水みち末端位置の情報が得られないため、実務上は改良体表面に平行に測定断面を設けるケース1や6のような配置にする必要があると思われる。

5.4 では、これらの成果を踏まえた水みち末端位置の具体的な方法をシールド発進防護用の薬液注入を対象に例示した。

以上より、トレーサー注入試験に時系列解析法を用いた比抵抗トモグラフィのリアルタイムモニタリングを適用することにより水みち末端位置を同定することができ、同定した水みちを補足注入することで、注入不良による水みちを閉塞することができ、薬液注入工法の信頼性を高めることができると考えられる。

## 第6章 結論と今後の研究展望

### 6.1 本研究のまとめ

本論文は、信頼性の高い薬液注入工法の施工を行うために、注入効果の確認の確実性を高めることを目的として行った研究の成果についてまとめたものである。各章の概要あるいは結論を以下に示す。

第1章では、序論として薬液注入工法の現状と問題点を指摘し、本研究の目的と論文構成を述べた。

第2章では、薬液注入工法の現状と課題を整理し、本研究で取り組む課題を示した。具体的には、施工時、および施工後の管理不良に起因する改良体の品質不良の発生を抑制して改良体の信頼性を高めることを本研究の課題とし、この課題を選定した経緯を述べた。次にこの課題は以下の2つの課題に帰結することを述べた。第一の課題は注入中の注入状況の把握、第二の課題は注入後の水みちの位置検知である。この2つの課題の解決にあたり、本研究では比抵抗トモグラフィによるリアルタイムモニタリングを利用することを述べた。次にリアルタイムモニタリングを行う上でデータの同時性の問題を解決する必要があることを述べた。

第3章では、時系列解析法の考え方を従来解析法と対比できる形で示した。時系列解析法は2章で述べたリアルタイムモニタリングを行う上で解決しなければならないデータの同時性の問題を解決する新しい逆解析方法である。時系列解析法は4章で述べた注入時のリアルタイムモニタリングによる薬液注入の改良範囲の評価、5章で述べた注入不良により生じた水みち末端位置の検知の両方に共通して必要となる本論の中心技術である。時系列解析法は従来解析法にはない以下の3つの特徴を有している。

特徴1：時間ステップ毎に個別に観測方程式を解くのではなく、全ての時間ステップを一体の観測方程式で解く

特徴2：求めるパラメータを比抵抗そのものではなく、比抵抗の時間変化量とする

特徴3：1つの時間ステップの中では比抵抗は一定と仮定するのではなく、比抵抗が変化することを許容し、時間ステップの中での測定時刻の違いを考慮した観測方程式を立てる

そして、それらが機能して従来解析法より精度の高いモニタリングが可能となる。

次に時系列解析法の基本性能の検証を目的とした数値実験を行った。最も単純な拡散現象として地盤内の1点から塩水が注入され、同心円状に拡散する現象を対象に、時系列解析法の精度を他の解析法と比較した。その結果、時系列解析法を用いれば、時間ステップを適切に設定することで既往の解析法より精度向上が図れることを示した。

第4章では、第一の課題である注入中の注入状況の把握を目的として、薬液注入と並行して行う比抵抗トモグラフィによる注入状況のリアルタイムモニタリングの実現に向けた検討を行った。実際に塩水注入を行った模型実験で、時系列解析法の有効性を検証した。時系列解析法より求めた比抵抗分布は最も正解比抵抗に近い結果となり、時間ステップや電極の配置を変動させてもその傾向は変わらなかった。また、障害物により塩水が一様に浸透しない状況においても時系列解析法は最も正解に近い結果となり、注入範囲を正確に推定できることが分かった。最後に時系列解析法を用いたモニタリング方法を提案した。これらの結果を踏まえ、時系列解析法を用いれば薬液注入と並行して行う比抵抗トモグラフィによる注入状況のリアルタイムモニタリングの実現の見通しが得られた。

第5章では、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末端位置の検出方法を考案し、土槽実験により適用性を検討した。時系列解析法を使用すれば、従来解析法より高い精度で水みち末端の位置検出が可能であることを確認した。土槽実験では、1通りの条件で行ったため、数値解析によるパラメータスタディにより条件変化に対する適用性を検討した。その結果、適用できる透水係数には限界があり、適用にあたり慎重な判断が必要なことが分かった。元地盤との比抵抗コントラストや電極配置については透水係数ほど問題にはならないようである。最後にこれらの成果を踏まえた水みち末端位置の具体的な方法をシールド発進防護用の薬液注入を対象に例示した。

以上より、第4章で提案した方法を用いれば注入不良の発生を即時に検知することができ、今後補足注入技術を確立できれば、注入不良の発生を抑えることができると考えられる。さらに第5章で提案した方法を用いれば水みち末端位置を検知することができ、今後補足注入技術を確立できれば、注入完了後の水みちを補足注入で閉塞して水みちの発生を抑えることができると考えられる。したがって、本研究の成果は施工時、および施工後に注入状況を把握する技術に限界があることに起因する改良体の品質不良（強度不足・遮水性不足）の発生を抑制して信頼性の高い薬液注入工法の施工を実現するための一助となる



と考えられる。

## 6.2 今後の研究課題

第4章で述べた薬液注入時のモニタリングについては、模型実験において注入圧力の増加とともに標準偏差が増加する傾向が見られ、流動電位に起因する可能性が考えられた。今回の測定条件では、そのような状況でも時系列解析法を用いれば従来解析法より正解に近い結果が得られたことから、時系列解析法はそのようなバイアスのかかったノイズに対しても耐ノイズ性を有すると考えられる。ただし、より厳しい条件下で測定せざるを得ないような場合に、どこまで耐ノイズ性が機能するのかは確認できていない。仮に流動電位が測定電位に影響する可能性があるとするれば、その影響を定量的に把握し、対策を立てておく必要があり、今後の検討課題である。

また、模型実験は閉じた空間内にある地盤を対象として行ったため、基本的に外部からのノイズは混入しにくい環境と考えられる。一方、実際の薬液注入の現場で適用する場合、周辺のアースからの漏洩電流等、バックグラウンドで生じているノイズが測定データに悪影響を及ぼす可能性があり、どういったノイズがどの程度影響するのかを把握し、本研究で提案したモニタリングの適用可否の判断において考慮すべきと思われ、今後の検討課題である。

以上のことを踏まえ、提案した方法を実現場で適用し、問題なく適用できることを確認する必要がある。まだ本方法を実現場で適用した例はないため、今後は適用現場を増やし、実用上の諸問題を解決していくことも今後の検討課題である。

第5章で述べた水みち末端位置の検知については、トレーサーを用いて漏水を検知するが、トレーサー試験用の注入孔が水みちにぶつかるかは確率問題である。これは改良体からサンプルコアを取り出して強度試験を行うのと考え方は同じであり、サンプルを抽出して不良を見つける場合にどのような抽出頻度であればどの程度の確率で水みちにあたるかについては、現状では未検討である。基本的な考えとして、改良体内部に水みちが残る場合、水みちは脈上に形成されて改良体表面と繋がることを想定しており、その中の任意の1本の水みちに注入孔をあてることができれば、水みち検知は可能と考えているが、その想定が正しいのかは未検討である。

また、本研究で実施した土槽実験では水みちが 1 本のみという前提条件の下で検討しているが、複数の水みちが改良体外部と繋がっている場合にどのように水みち位置を検知できるのかについても今後併せて検討が必要である。また、適用できる透水係数については限界があることがパラメータスタディにより分かった。適用の可否を判定できる指標を定めることも今後の検討課題である。加えて、注入試験序盤の明瞭なピークが見られない時期の比抵抗低下を除外する方法も検討する必要がある。

また、本研究で取り組んだ両課題を解決して注入不良個所を検知するだけでなく、確実に補足注入する方法を確立することも薬液注入工法の信頼性を高めるうえで必要になるが、これについても今後取り組む必要がある。

最後に本研究で述べた方法はいずれも一定の費用を要する。コストの低減につながる方法の改善が必要であるとともに、費用対効果を踏まえた合理的な適用範囲（適用限界）を把握することも必要と思われ、今後の検討課題である。

## 参考文献

- 1) 近藤和男, 山本和義, 竹内伸光, 北川幸夫: 比抵抗法によるトンネル切羽前方の地下水探査の新技术法について, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.749-754, 1998.
- 2) 服部邦男, 川村精一, 川上純, 服部弘道, 板倉武好, 坂下晋: ジオトモグラフィによるグラウト注入範囲の評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集第Ⅲ部, Vol. 45, pp. 1120-1121, 1990.
- 3) 中村真, 近藤悦吉, 楠見晴重: 併用探査によるトンネル施工ルートの岩盤および湧水予測評価法, 土木学会論文集, No.735/VI-59, pp.209-214., 2003.
- 4) 小峯秀雄, 後藤和夫: 現場試験による比抵抗トモグラフィを利用した薬液注入の改良範囲評価方法の実証, 土木学会論文集, No.603/Ⅲ-44, pp.129-138, 1998.
- 5) 内田明彦, 畑中宗憲, 松村正裕, 今里武彦: 比抵抗トモグラフィによる薬液注入改良範囲の定量的評価, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 4, pp.269-274, 1999.
- 6) 高橋浩一, 松本伸, 大河内保彦, 龍岡文夫: りんかい大井町駅建設工事における東京礫層の止水対策, 土木学会論文集, No.777/VI-65, pp.53-58, 2004.
- 7) 柴崎光弘, 下田一雄: 薬液注入工法の設計と施工, 山海堂, 1985.
- 8) ライト工業 (株): マルチライザー工法パンフレット
- 9) ライト工業 (株): ソレタンシュ工法 HP, <https://www.raito.co.jp/project/doboku/grout/groutkouhou/sorentash.html>
- 10) 福岡正巳, 立石俊一: 最新の薬液注入工法の設計と施工, 近代図書, 1983.
- 11) 国土交通省: 薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針, 建設事務次官通達, 1974.
- 12) 国土交通省港湾局: 埋立地等における薬液注入工法による地盤改良工事に関する検討第 1 回委員会資料, 2017.
- 13) 日本薬液注入協会: 正しい薬液注入工法, 2002.
- 14) 土質工学会薬液注入工法における注入効果の予測・確認手法に関する研究委員会: 薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム委員会報告, 薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム発表論文集, pp.1-

144, 1993.

- 15) 岡二三生, 八嶋厚, 大野康年, 関口宏二, 片山辰雄: EM法を用いた薬液浸透注入改良地盤の形状確認実験について, 地盤工学研究発表会発表講演集, Vol.38, pp.845-846, 2003.
- 16) (株)奥村組: 比抵抗トモグラフィによる薬液注入範囲の評価技術, テクニカルリーフレット
- 17) (株)ジオフィールド: 電気検層パンフレット
- 18) 山本慎一郎, 辻中孝信, 野島昌男, 岡田和成, 大西正夫: 供用中岸壁の大規模地盤改良工事について(その2品質管理), 土木学会年次学術講演会講演概要集第VI部, Vol. 66, pp. 377-378, 2011.
- 19) 永山晁, 熊谷浩二, 大野茂: 薬液注入効果の判定について, 昭和53年度土木学会関東支部年次研究発表会講演概要集, Vol. 6, pp. 127-128, 1979.
- 20) 榊原淳一, 毛利栄征, 山本督夫: 弾性波の速度と減衰率を用いた地盤の不均一性評価と可視化手法の開発, 土木学会論文集C, No.67, pp.310-318, 2011.
- 21) 川地武, 喜田大三: 薬液注入工法における施工管理に関する研究(その7), 大林組技術研究所報, No.32, pp.72-76, 1986.
- 22) (株)地域地盤環境研究所: 音響トモグラフィ地盤探査パンフレット
- 23) 澤田亮, 植田康宏, 粥川幸司, 菅茜椽, 山内淑人, 榊原淳一: 音響トモグラフィを用いた不飽和地盤における薬液注入による地盤改良効果の確認, 土木学会年次学術講演会講演概要集第III部, Vol. 65, pp. 353-354, 2010.
- 24) 物理探査学会統合物理探査調査研究委員会: 統合物理探査による地盤物性評価と土木建設分野への適用, 委員会報告書, 2017.
- 25) 戸井田克, 升本一彦, 日比谷啓介: 比抵抗トモグラフィによる塩水トレーサーを用いた岩盤内水みち調査, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol. 27, pp. 391-395, 1996.
- 26) 小島圭二, 神尾重雄, 石橋弘道, 内山成和, 斎藤秀樹, 島裕雅: ジオトモグラフィによる岩盤の画像化(その2)—岩盤内の地下水の流れの画像化, 応用地質, 30巻4号, pp. 1-10, 1989.

- 27) 北村孝海, 米田俊一, 寺戸康隆, 中川浩二: 岩盤レーダーによる水みち推定およびグラウト硬化過程と効果の推定, 土木学会論文集, No. 454/III-20, pp. 83-92, 1992.
- 28) 宮川公雄, 中川加明一郎, 玉井信也: 干渉試験時のフローメーター検層による水みちの構造推定の試み, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 IIIA 部, Vol. 54, pp. 524-525, 1999.
- 29) 末永弘, 中川加明一郎: 光ファイバ温度検層の水みち推定への適用性について, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 IIIA 部, Vol. 55, pp. 496-497, 2000.
- 30) 竹内真司, 天野健治, 下茂道人, 松岡清幸: 電気伝導度検層を用いた亀裂性岩盤中の水みち検出技術, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 CS 部, Vol. 58, pp. 413-414, 2003.
- 31) 西山勝栄, 伊藤洋, 木内幸則: 面電極法による処分場しゃ水シートへの漏水検知システム, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 VII 部, Vol. 51, pp. 586-587, 1996.
- 32) 島裕雅, 神谷英樹, 梶間和彦: 比抵抗映像法—建設・防災・環境のための新しい電気探査法, 古今書院, 1995.
- 33) 杉本芳博: 比抵抗トモグラフィによる時系列探査の新しい逆解析法, 物理探査学会第 107 回学術講演会論文集, pp.207-210, 2002.
- 34) 佐々木裕: 比抵抗垂直探査における 2 次元構造の自動解析 (I), 物理探査, Vol.34, pp.15-24, 1981.
- 35) Coggon,J,H. : Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method, Geophysics, Vol.36, pp.132-155, 1971.
- 36) Pelton,W.H.,Rijo,L. and Swift,C.M. : Inversion of two-dimensional resistivity and induced polarization data, Geophysics, Vol.43, pp.788-803, 1978.
- 37) 新村浩成, 野口康二, 西田薫, 杉本芳博: 有限要素法による比抵抗トモグラフィの数值解析, 物理探査学会第 79 回学術講演会論文集, pp.247-249, 1988.
- 38) 新村浩成, 野口康二, 西田薫, 杉本芳博: 有限要素法による比抵抗トモグラフィの数值解析 (II), 物理探査学会第 80 回学術講演会論文集, pp.255-259, 1989.
- 39) 小峯秀雄, 西好一, 後藤和生: 比抵抗トモグラフィを利用した薬液注入の改良範囲評価方法, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.137-146,1994.

- 40) 芝本真尚, 山本松生, 中村創, 森麟: 比抵抗トモグラフィによる実地盤での注入固結領域の調査研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第III部, Vol. 47, pp. 1096-1097, 1992.
- 41) 井上誠: 地表面の降雨による比抵抗変化の測定方法, 物理探査学会第78回学術講演会論文集, pp.187-188, 1988.
- 42) 竹内睦雄, 長江亮二: 電気探査による地下水流動モニター法の研究, 応用地質, 第31巻1号, pp.12-18, 1990.
- 43) 楠見晴重, 谷口敬一郎, 中村真, 濟木鉄哉: ダイポール・ダイポール法による斜面内の浸透水探査, 物理探査学会第86回学術講演会論文集, pp.373-375, 1992.
- 44) 東貞成, 鈴木浩一: 比抵抗トモグラフィによる地下水位のモニタリング室内実験, 物理探査学会第86回学術講演会論文集, pp.396-400, 1992.
- 45) 高倉伸一, 吉岡真弓, 内田洋平, 石澤友浩, 酒井直樹: 比抵抗モニタリングによる盛土中の水分変化の推定, 物理探査, Vol.65, pp.223-236, 2012.
- 46) 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, 物理探査学会第92回学術講演会講演論文集, pp. 57-62, 1995.
- 47) LaBrecque D.J. and Yang X. : Difference inversion of ERT data:a fast inversion method for 3-D in situ monitoring, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol.6, pp.83-89, 2001.
- 48) Daily W., Ramirez A., Labrecque D., and Nitao J. : Electrical-resistivity tomography of vadose water-movement, Water Resources Research, Vol.28, pp.1429-1442, 1992.
- 49) 中里裕臣, 井上敬資, 香村一夫, 竹内睦雄: 比抵抗トモグラフィによる時系列探査の逆解析法の改良, 物理探査学会第116回学術講演会講演論文集, pp. 155-156, 2007.
- 50) Vauhkonen M., Karjalainen P. A. Kaipio J. P. : A Kalman Filter Approach to track fast impedance changes in electrical impedance tomography, IEEE transactions on biomedical engineering, 45, 486-493, 1998.
- 51) 佐々木丈, 阿部和久, 椎谷成孝, 今村大介, 紅露一寛: 比抵抗トモグラフィによるトンネル切羽前方の三次元地山構造推定, 計算数理工学論文集, Vol.17, No.15-171215, 2017.

- 52) Kim J.-H., Yi M.-J., Park S.-G., Kim J. G. : 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model, *Journal of Applied Geophysics*, Vol.68, pp.522-532, 2009.
- 53) Hayley K., Pidlisecky A., and Bentley L. R. : Simultaneous time-lapse electrical resistivity inversion, *Journal of Applied Geophysics*, Vol.75, pp.401-411,2011.
- 54) Karaoulis M. C., Kim J.-H., Tsourlos P.I. : 4D active time constrained resistivity inversion, *Journal of Applied Geophysics*, 73, 25-34, 2011.
- 55) Archie, G. E.: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans, A. I. H. E.*, Vol. 146, pp. 54-67, 1942.
- 56) 神宮司元治, 狩野嘉昭 : マルチ送信比抵抗トモグラフィ計測システムの開発とその応用について, *物理探査学会第 114 回学術講演会論文集*, pp.215-218, 2006.
- 57) 鈴木浩一, 塩竈裕三, 久野春彦, 東義則 : 超高速電気探査装置の開発 — 未固結地盤中の地下水流動モニタリングへの適用 —, *物理探査*, Vol.60, pp.515-526, 2007.
- 58) 山下善弘, Lebert F. : 符号分割多重化を用いた多点同時通電電気探査のデータ品質と実用上の課題について, *物理探査学会第 133 回学術講演会論文集*, pp.211-214, 2015.
- 59) 物理探査学会 : *物理探査ハンドブック*, pp.241-292, 1998.
- 60) 中川徹, 小柳義夫 : 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, 1982.
- 61) 中村正行 : 逆問題のコンピュータ解析手法とその応用に関する研究, 博士論文, 信州大学, 1994.
- 62) 内田利弘 : ABIC 最小化法による最適平滑化拘束の比抵抗法 2 次元インバージョン, *物理探査*, Vol.46, pp.105-119, 1993.
- 63) 小橋秀俊, 三木博史, 平山光信, 菱谷智幸, 山本博之, 大北康治 : 地盤汚染の影響予測に用いる分散長の決定法について, *土木学会論文集*, No.764/III-67, pp.53-67, 2004.
- 64) 山本修一 : 物質移動物性としての拡散係数と水分吸脱着 (乾燥), *日本食品工学会誌*, Vol.11, pp.73-83, 2010.
- 65) 羽竜忠男 : 地表比抵抗探査に関する有限要素法による電位計算精度の評価, *物理探査*, Vol.49, pp.273-284, 1996.

- 66) 災害科学研究所トンネル調査研究会：地盤の可視化と探査技術，鹿島出版会，2001.
- 67) 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, pp.247-253, 1999.
- 68) 小國健二：応用例で学ぶ逆問題と計測，オーム社., 2011.
- 69) 国土交通省：土木工事標準積算基準書（共通編）平成24年度（4月版），II-2-⑮-3,  
2012.
- 70) 熊田政弘，飯博行：比抵抗トモグラフィの物理モデル実験；実験水槽と2極法電極配置  
の検出限界，日本原子力研究所研究開発報告書（JAERI-Tech 94-032），1994.
- 71) Yiheng Z., Alireza G., Dana H. B. : An analytical comparison of three spatio-temporal  
regularization methods for dynamic linear inverse problems in a common statistical  
framework, Inverse Problems, Vol.21, pp.1-26, 2004.
- 72) 伊藤芳郎，斎藤輝夫，市川浩，南雲政博，川口英雄，竹内篤雄：地下水流速の新しい  
測定方法の試み，日本地下水学会会誌，Vol.26, pp.77-96, 1984.
- 73) 災害科学研究所トンネル調査研究会：地盤の可視化と探査技術，鹿島出版会，2001.
- 74) 高倉伸一，吉岡真弓，石澤友浩，酒井直樹，内田洋平：盛土斜面での長期比抵抗モニ  
タリング：温度が比抵抗に及ぼす影響とその補正，物理探査学会第128回学術講演会  
論文集，pp. 199-202, 2013.
- 75) 横河電機株式会社：Technical Information (FLEXA シリーズ プロセス用導電率(SC)計  
プロセス用電磁導電率(ISC)計), 2020.
- 76) 杉本芳博，中里裕臣，竹内睦雄，金喜俊，井上敬資，山田直之，青野哲雄：2次元電  
気探査データを活用する実用的な3次元電気探査，物理探査学会第111回学術講演会  
講演論文集，pp. 165-168, 2004.
- 77) 社団法人日本グラウト協会：新訂 正しい薬液注入工法, 日刊建設工業新聞社, 2007.
- 78) 草野一人：注入工法ハンドブック，吉井書店，1983.



#### 本研究に関して発表した主な論文

- 1) 清水智明, 小川渉, 高島哲朗, 今泉和俊: 比抵抗トモグラフィを併用した恒久薬液注入の出来形確認, 土木学会年次学術講演会講演概要集第Ⅲ部, Vol. 66, pp. 761-762, 2011.
- 2) 清水智明, 蛭子清二, 西村和夫: 薬液注入改良地盤の弱材令時からの電気伝導特性, 土木学会年次学術講演会講演概要集第Ⅲ部, Vol. 70, pp. 75-76, 2015.
- 3) 清水智明, 蛭子清二, 西村和夫: 測定中に状態変化する比抵抗モニタリングのための新しい解析手法の提案, 物理探査学会第133回学術講演会講演論文集, pp. 9-12, 2015.
- 4) 清水智明, 小田義也: 薬液注入の浸透過程を監視するための比抵抗トモグラフィの時系列解析法の提案, 物理探査, Vol. 72, pp. 139-154, 2019.
- 5) 清水智明, 小田義也: 薬液注入の浸透過程を監視するための比抵抗トモグラフィの時系列解析法の実験的検証, 物理探査, Vol. 73, pp. 192-208, 2020.
- 6) 清水智明, 東宏幸, 小田義也: 時系列解析法による比抵抗モニタリングを用いた薬液注入改良体の水みち末端位置の検出, 土木学会論文集(FI)Vol.76, No.2, pp.34-48, 2020.

## 謝辞

著者は、1996年に株式会社奥村組に入社後、2001年からの7年間技術研究所に所属し、物理探査に関わる研究開発に従事して本研究の基礎的な知識・技術を修得してきました。その後、東日本支社土木技術部に異動した後、関東地方整備局発注の砂町地区共同溝補強（その1）工事にて、液状化対策としての薬液注入工法の面的な出来形確認を目的として実際の現場で初めて比抵抗トモグラフィを適用したのが本研究の発端です。当時は本研究の中心技術である時系列解析法を考案する前のことでしたので、薬液注入工法と並行して比抵抗トモグラフィを行うという発想はなく、休工期を利用して1週間に1回実施するのみでした。当時、薬液注入中にもトモグラフィを行いたいという考えがあり、それが後に時系列解析法を考案するに至った端緒となりました。本研究の開始前までのこれらの経緯の中でも多くの方々からの指導、支援を賜りました。本研究はそれらの指導、支援が礎となっており、厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行および論文の取りまとめに際して、東京都立大学大学院教授西村和夫博士には大学院博士後期課程の学生として受け入れて頂き、多くの貴重な意見を賜りました。特に、入学当初の研究状況を聞き、実験で実証すべきであるとのこと助言を基に実験を行ったことは本研究を論文として完成させるのに必須のことでありました。ここに、深く感謝の意を表します。

また、東京都立大学大学院教授小田義也博士には、西村博士定年後の筆者の研究指導をしていただきました。3本の外部審査論文、および本論文を取りまとめるにあたり、構成方法等、多くのご指摘、ご指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

東京都立大学大学院教授砂金伸治博士、同准教授吉嶺充俊博士、特任研究員東宏幸博士には論文としての記載方法をはじめ本論文の質向上に向けた適切なご指導、ご指摘を頂きました。厚く御礼申し上げます。

国立研究開発法人産業総合技術研究所の研究部門長光畑裕司博士、グループ長横田俊之博士、高倉伸一博士、神宮司元治博士、小森省吾博士におかれましては、時系列解析法の理論構築にあたり、多くの貴重な指摘を賜りました。厚く御礼申し上げます。

本研究をまとめることができたのは、私が勤務する株式会社奥村組の皆様のご指導、ご支援の賜物と感謝しております。株式会社奥村組土木本部長小寺健司氏、技術研究所長川

井伸泰氏には、博士号取得を目的とした支援制度の中で、博士号取得に挑戦する機会を与えて頂き、本研究に対してのご理解とご支援を頂きました。村崎建設蛭子清二博士には技術研究所配属当時の直属の上司として技術的な指導を賜るとともに、この研究分野へ取り組む道筋を与えて頂きました。心より厚く御礼申し上げます。

4章で述べた薬液のサンドゲルの電気伝導特性に関する実験では、ライト工業株式会社の林田晃氏、羽田哲也氏より御支援を賜りました。厚く御礼申し上げます。

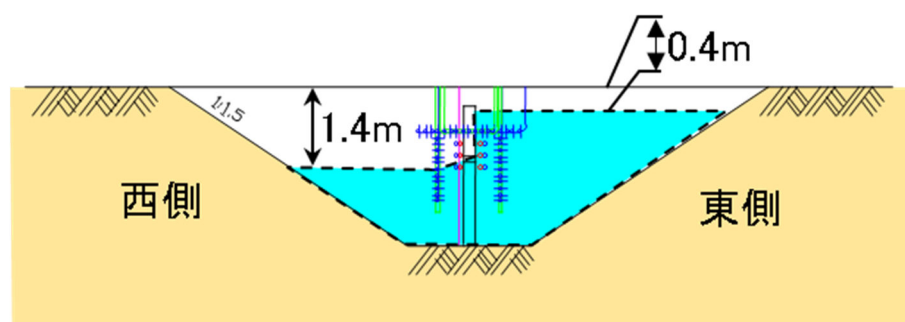
以上の皆様をはじめ、ここに名前を挙げることのできなかつた多くの関係の方々に深く御礼申し上げます。

## 付録A 移流拡散解析に使用する物性値の設定

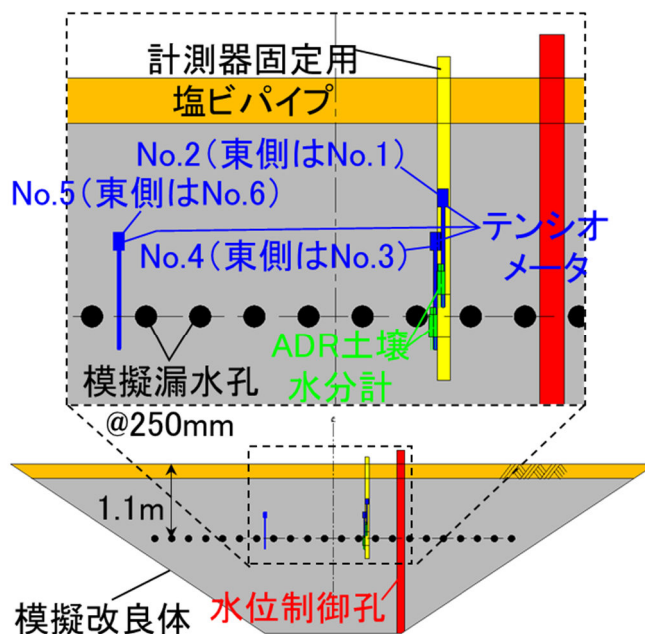
付録Aは本文5.3.10で実施した移流拡散解析に使用した物性値の設定根拠を示したものである。

### (1) 浸透特性の設定

浸透特性は実験土槽で別途実施した浸透実験より求めた。不飽和浸透特性には採用実績の豊富な Van Genuchten モデル<sup>1)</sup>(以下、VGモデル)を使用した。それらは地中に埋設した複数のテンシオメータ、ADR 土壌水分計の履歴等から逆解析を行って求めた。浸透実験



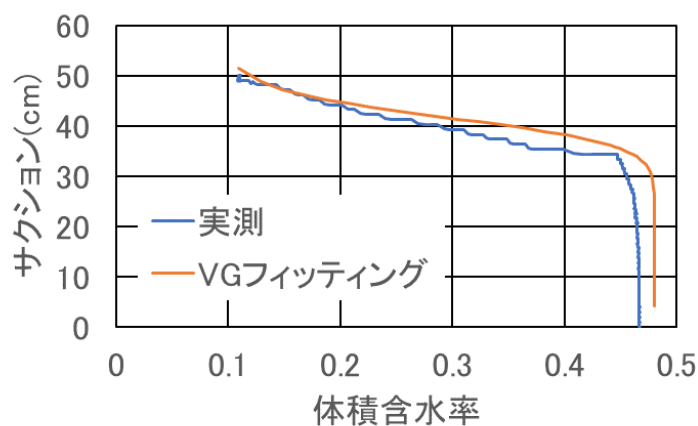
付図-1 浸透実験における定常状態の概略図



付図-2 計測器の配置 (西側より見る)

では、本文 5.3.2 で述べた実験と異なり模擬漏水孔は GL.-1.1m の深度に水平一列に 250mm 間隔に設けた。はじめに地下水の無い状態から両側の水位制御孔から水を注入し、一旦両側とも GL.-0.4m まで水位を上げた。その後、西側の水位制御孔より揚水しながらその一部を東側水位制御孔に還流して付図-1 のような定常状態を作った。最後に両側の水位制御孔より揚水して初期状態に戻った。

実験にあたり、付図-2 に示した 6 箇所の位置にテンシオメータと ADR 土壌水分計をペアで設置した。どのペアも概ね同様の結果となったことから、これらのうち、No.2 のペアについて浸潤過程における体積含水率とサクシヨンの関係を付図-3 に示す。これにフィッ



付図-3 体積含水率とサクシヨンの関係

付表-1 移流拡散解析の入力物性値（浸透特性）

項目	物性値
透水係数	$2.136 \times 10^{-4}$ m/sec
間隙率	0.48
VGモデルパラメータ n	15.0
VGモデルパラメータ $\alpha$	2.4
最小体積含水率	0.09
最大体積含水率	0.48
比透水係数最小値	0.001

ティングするよう VG モデルのパラメータを決定した。

次に定常状態における還流流量が 2.55L/min だったことから、FEM による 3 次元定常浸透流解析の逆解析を行い、飽和透水係数を同定した。同定した浸透特性に関わる物性値を付表-1 に示す。ここで、本文図-5.3.2 の粒径加積曲線から Hazen の式<sup>2)</sup>を用いて飽和透水係数を概算すると、

$$\begin{aligned}k &= 100D_{10}^2 = 4.8 \times 10^{-2} \text{cm/s} \\ &= 4.8 \times 10^{-4} \text{m/s}\end{aligned}\tag{1}$$

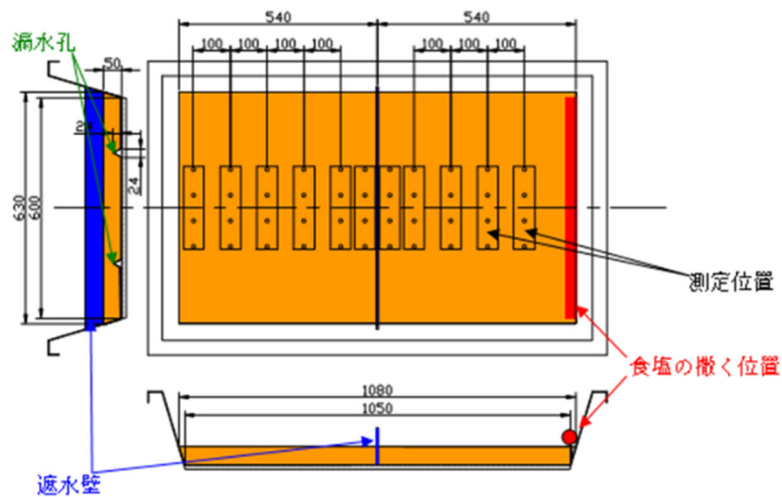
ここで、 $D_{10}$ は砂の 10%有効径(=0.022cm)

となり、上記の飽和透水係数が概ね妥当なものと判断した。

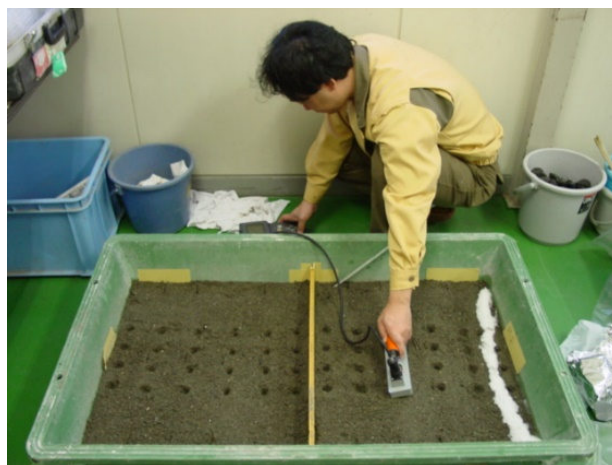
## (2) 拡散特性の設定

拡散特性については、模擬地盤と同じ砂を使用した拡散実験を行った<sup>3)</sup>。付図-4 に示す水平に静置した大型の平型容器内に体積含水率一定の砂を入れ、端部に食塩を撒いた。容器内は動水勾配がないため、分子拡散のみによって溶質が拡散する。これを比抵抗測定装置で継続的に電位差測定を行った。

まず、模擬地盤に用いている川砂を含水比と間隙比が模擬地盤と一致するよう調整して容器に入れた。含水比は目標含水比（9%）となるよう容器への投入前に乾燥砂を加水し



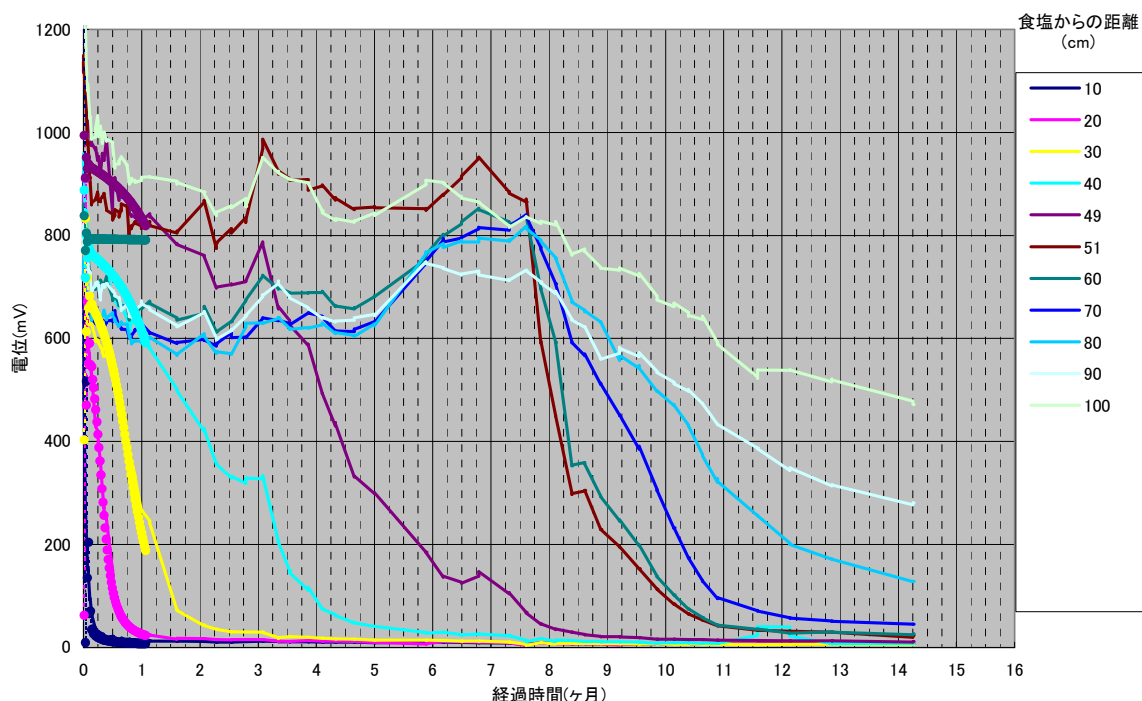
付図-4 拡散実験の装置の形状



付図-5 計測状況

て調整・攪拌した。間隙比（48%）は容器への投入後に鉄板を介してランマで締め固めた。容器は本実験を模して長辺中央に遮水壁を設け、遮水壁の中央下部に漏水孔として1辺の長さ 2.4cm の正三角形の孔を2箇所空けた。これは、遮水壁と漏水孔の設置により何らかの通常の拡散とは異なる現象が起こるのかを確認するために本実験と同様に設置したものである。

試料内の含水比の分布が安定した後、付図-5 に示すように、容器の短辺の片側に食塩を一行に撒いた。拡散源として固体の食塩を用いたのは、食塩水を供給する場合、必ず動水勾配が発生し、水分が移動するため、純粋な拡散現象を評価することが困難であると想定したためである。そして、付図-4 に示す測定位置について比抵抗測定機器ミニオーム（応用地質㈱製）による電位を適当な時間間隔で測定した。試料内の含水比は初期値から変化しないよう管理した。容器は測定時以外は間隙水の蒸発を防ぐため上面にビニールシートを被せていたが、完全に蒸発を止めることは出来ないため、水分の不足分は表面に霧吹きで補給した。食塩も溶解とともに減少していくが、目視で食塩が無くなること無いよう都度補充した。ミニオームアダプタの仕様上、通電は電極間隔 70mm のウェンナー配置で行っている。（ウェンナー配置：外側2極が電流内側2極が電位の等間隔配置）

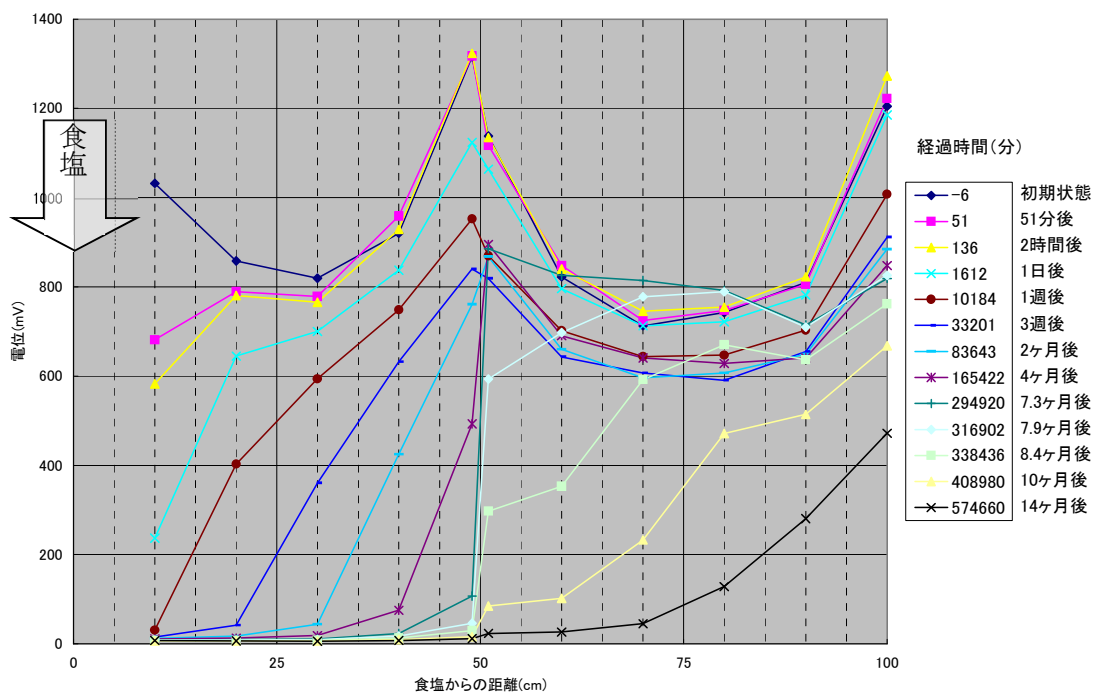


付図-6 測定電位の時系列変化



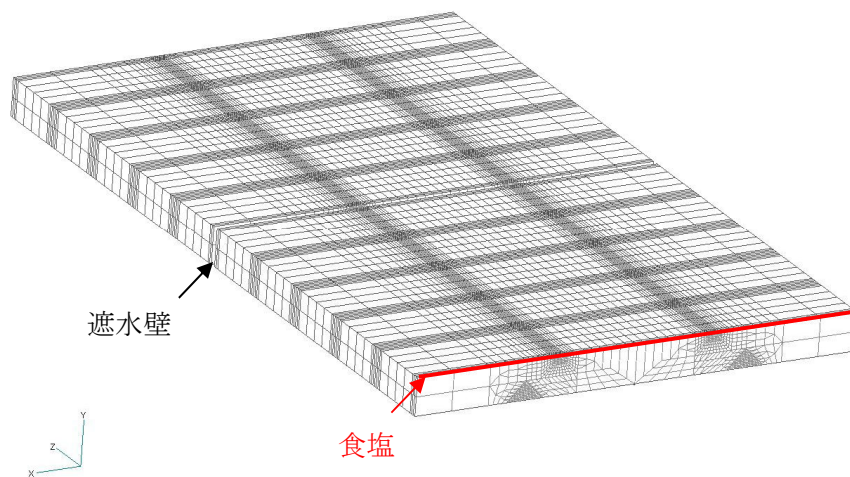
付図-6 に測定電位の時系列変化を示す。ここで、測定電位とは各測定時の通電量から換算した電流 1000mA 相当の電位である。時間とともに食塩に近い測点から電位が低下し始める。イオンの拡散に伴い、電気伝導率が上昇している状況が分かる。漏水孔より下流の電位は塩淡境界が漏水孔を通過するまではほとんど変化せず、通過後に同時に電位の低下が始まっている。付図-7 は横軸を食塩からの距離として電位分布の変化の様子を示す。初期状態において電位はω型の対象形状をなしている。これは、資料内の電気伝導率が均一であると仮定すると、電位は境界条件のみによって決まる。端部は半無限境界と同じ理由で電気が流れにくく、中央は端部に比べて流れやすいことからω型の分布形状を呈しているものと考えられる。食塩の投入に伴い、その近傍から低下し始めていく。遮水壁のため遮水壁を境に変化は不連続となり、遮水壁より下流では遮水壁を起点とした拡散が起こっているような分布形状となっている。

30 日経過時点までに得られた測定電位に整合するよう拡散係数を調整して 3 次元 FEM による拡散解析と静電場解析により拡散係数を同定した (付図-8 参照)。付図-9~付図-10 に最終的に同定した拡散係数を用いた静電場解析の例を示す。また、フィッティングの結果を付図-11 に示す。縦分散長と横分散長については既往の文献<sup>4)</sup>から同定した。同定した

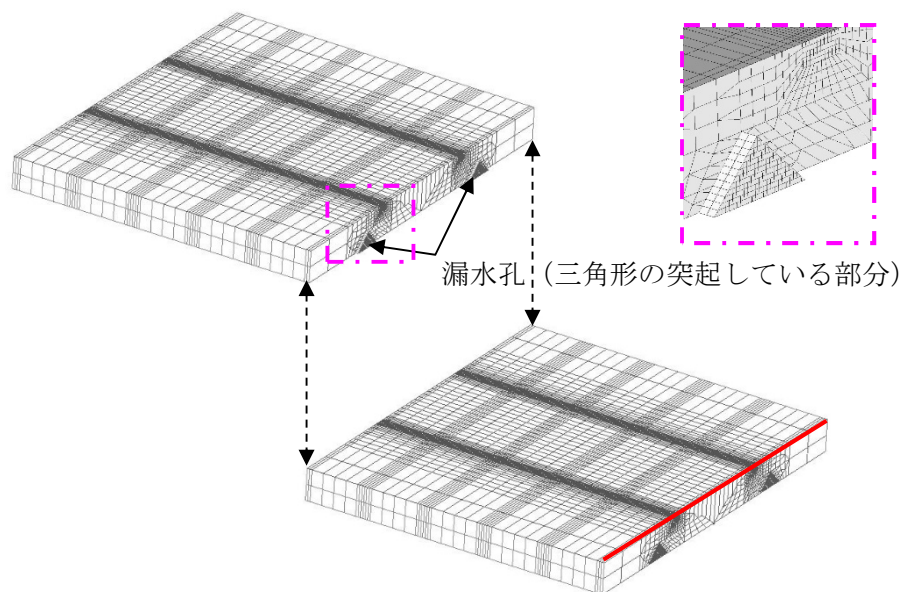


付図-7 測定電位の分布の変化

移流拡散の物性値を付表-2 に示す。

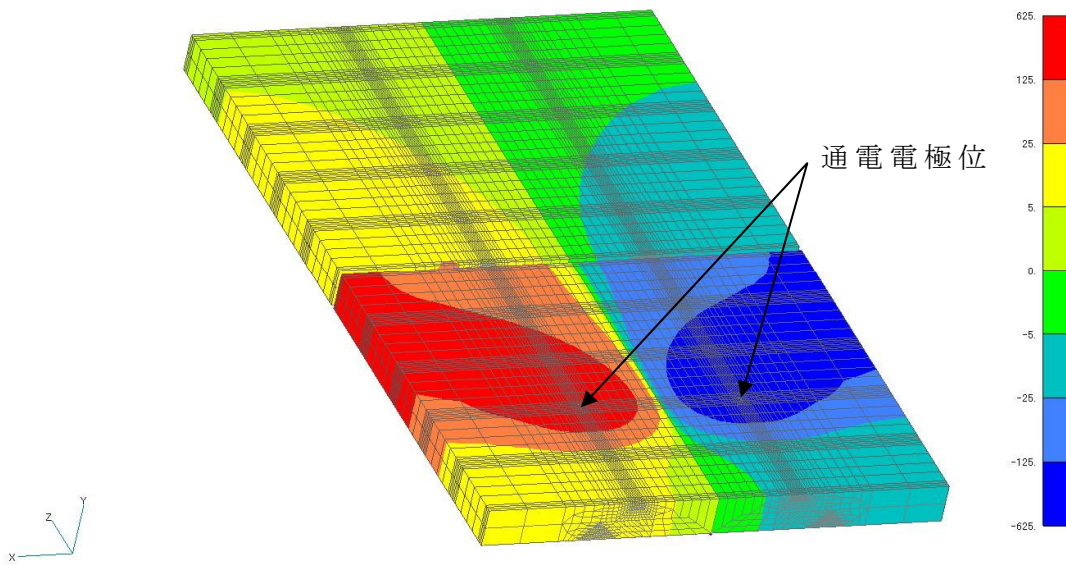


(a)全体図

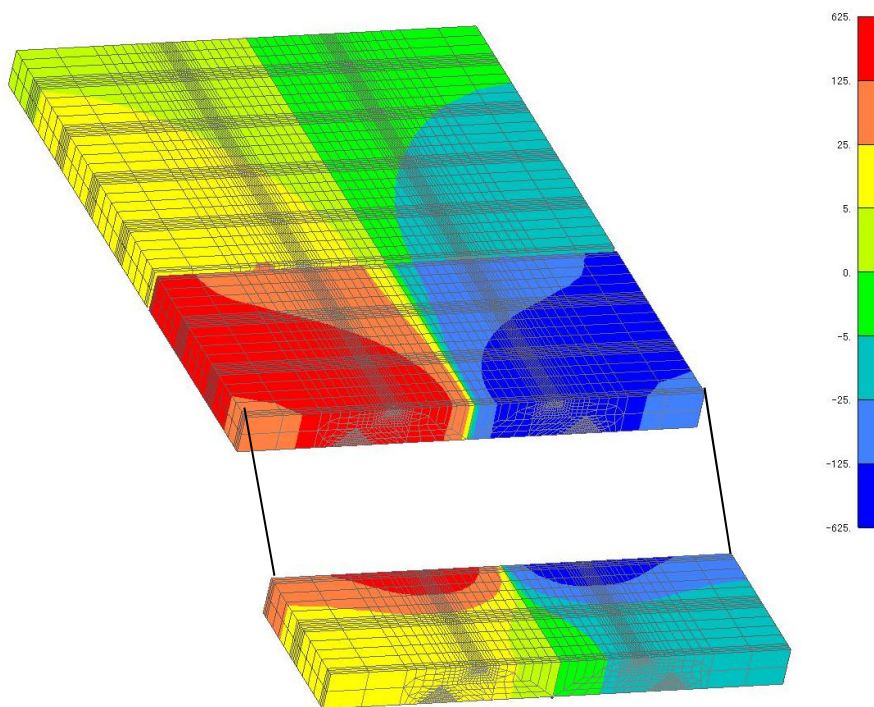


(b)遮水壁での切断図

付図-8 3次元 FEM 解析モデル(拡散解析・静電場解析共通メッシュ)



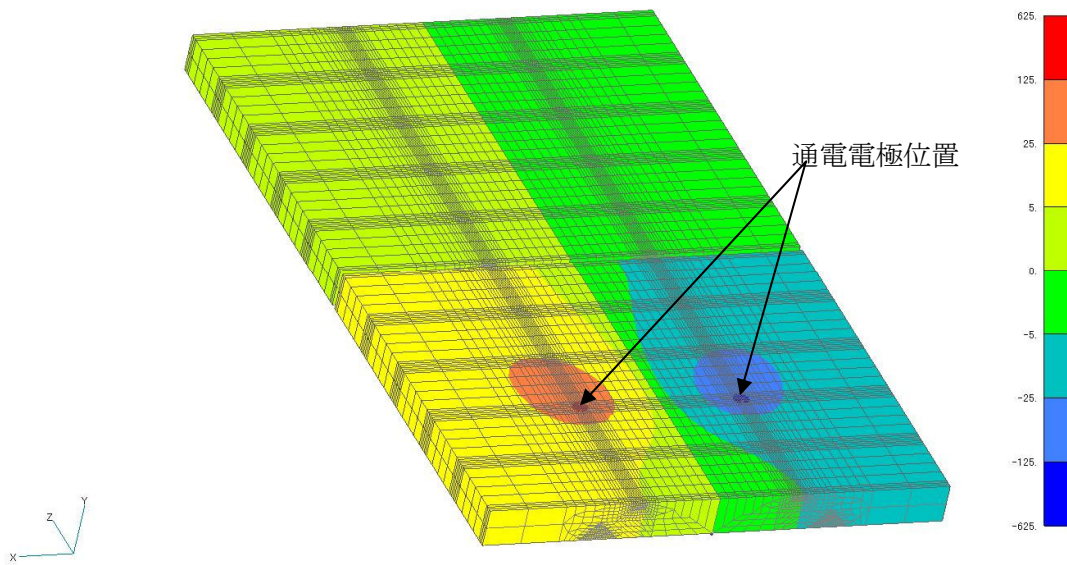
(a) 開始9日後の電位分布（食塩から20cm 離れの位置で通電）



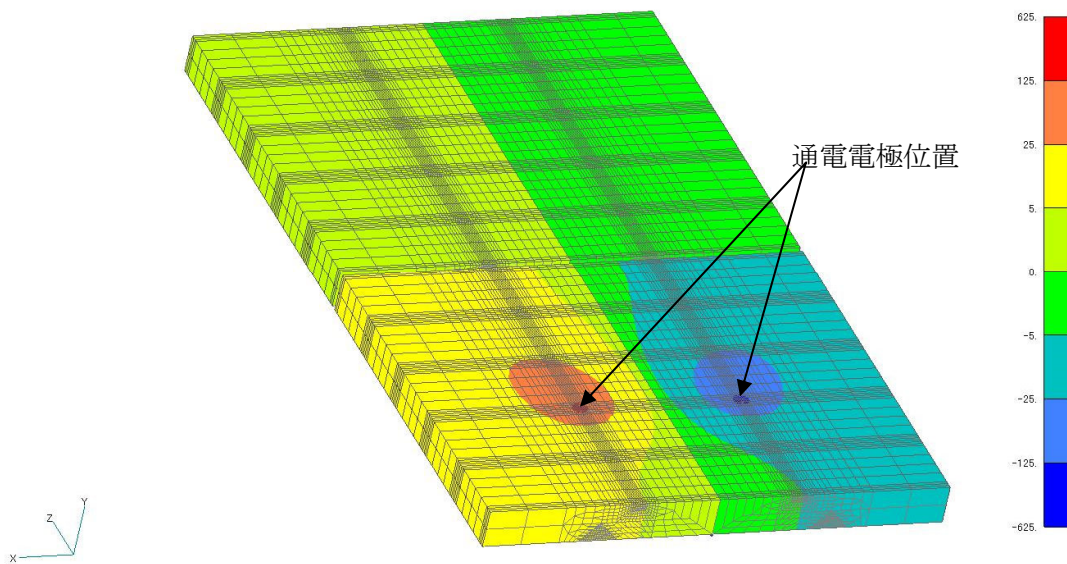
(b) 開始9日後の電位分布（(a)を電極断面で切断）

付図-9 開始9日後の電位分布



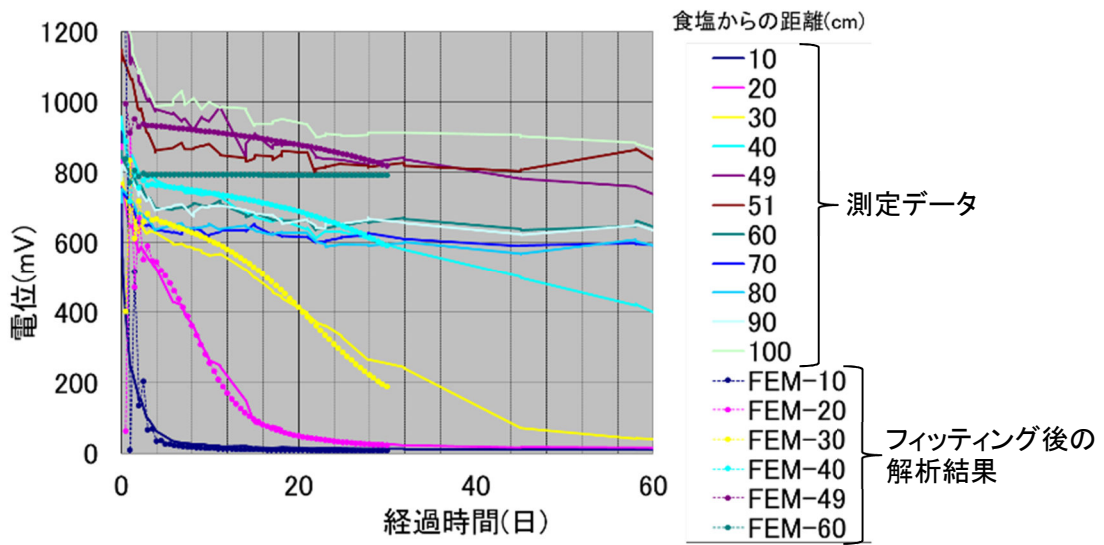


(a)開始 30 日後の電位分布(食塩から 20cm 離れの位置で通電)



(b) 開始 30 日後の電位分布((a)を電極断面で切断)

付図-10 開始 30 日後の電位分布



付図-11 測定電位差とFEMによる同定結果

(同定した拡散係数 $1.790 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ を用いた解析結果)

付表-2 移流拡散解析の入力物性値 (拡散特性)

項目	物性値
分子拡散係数	$1.790 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$
縦分散長	0.04 m
横分散長	0.004 m

## 付録B 比抵抗の換算方法

本文5.3.10で実施した移流拡散解析において、解析結果から得られる飽和度や塩分濃度より地盤の比抵抗に換算するために、模擬地盤に用いた砂について、飽和度、間隙率、間隙水の塩分濃度を変化させて導電率（比抵抗の逆数）を調べた。ここでも測定には図-3.4.3で示したアダプタを使用した。まず、間隙水の塩分濃度の影響を調べるために以下の4種類の溶液について体積含水率を変化させて測定した。

- A) 精製水
- B) 3%食塩水
- C) 10%食塩水
- D) 15%食塩水

付図-12は塩分濃度、即ち間隙水の比抵抗を変化させた時の体積含水率と砂の導電率（比抵抗の逆数）の関係を示す。体積含水率は間隙率と飽和度の積である。さらにA)についてはこれとは別に試料の充填の仕方を変えて間隙率を変化させて体積含水率と導電率の関係調べた。結果を付図-13に示す。凡例にある、“密詰め”～“極緩詰め”とは試料充填時のおもりの落下回数を順に10、3、1、0回と変化させたものである。間隙率は0.35～0.55まで変化している。これらのデータを既往の経験式にあてはめ、適合性を調べた。はじめに、式(2)(2)で表されるアーチーの式 $\rho_R$ をそのまま適用し、実測した砂の比抵抗 $\rho_R$ との相関を調べた。

$$\rho_R = a\phi^{-m}S^{-n}\rho_W \quad (2)$$

ここで、 $a, m, n$ は定数であり $\phi$ は間隙率、 $S$ は水飽和度、 $\rho_W$ は間隙水の比抵抗である。

結果を付図-14に示す。図は導電率で整理した。相関係数は0.72だった。ややばらつきがみられるのは、アーチーの式が2～10%の食塩水を用いて導かれたものであるのに対し $\rho$ 、今回の実験結果はそれよりやや広範な濃度の範囲で試験したためと考えた。そこで回帰の精度改善のために、式(2)(2)の間隙水の指数にもパラメータを追加し、式(3)(3)のように修正したところ、相関係数は0.99に改善した。

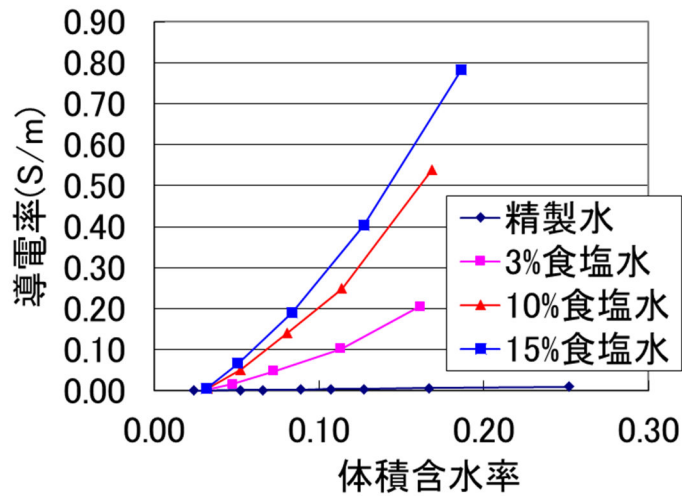
$$\rho_R = a\phi^{-m}S^{-n}\rho_W^p \quad (3)$$

得られた回帰係数は $a = 7.03 \times 10^{-2}$ 、 $m = 4.57$ 、 $n = 1.72$ 、 $p = 0.55$ だった。

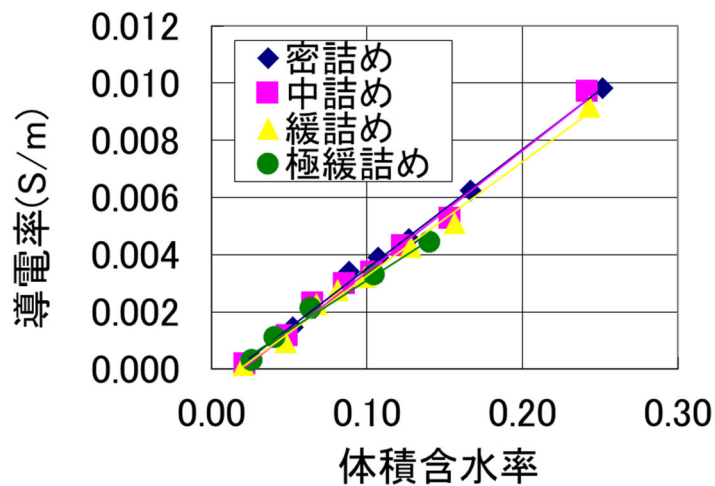
そこで、比抵抗への換算には換算に伴う誤差が小さくなる式(3)(3)を採用することとした。

参考文献

- 1) Van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for pre-dicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Am. J., Vol. 44, pp. 892-898, 1980.

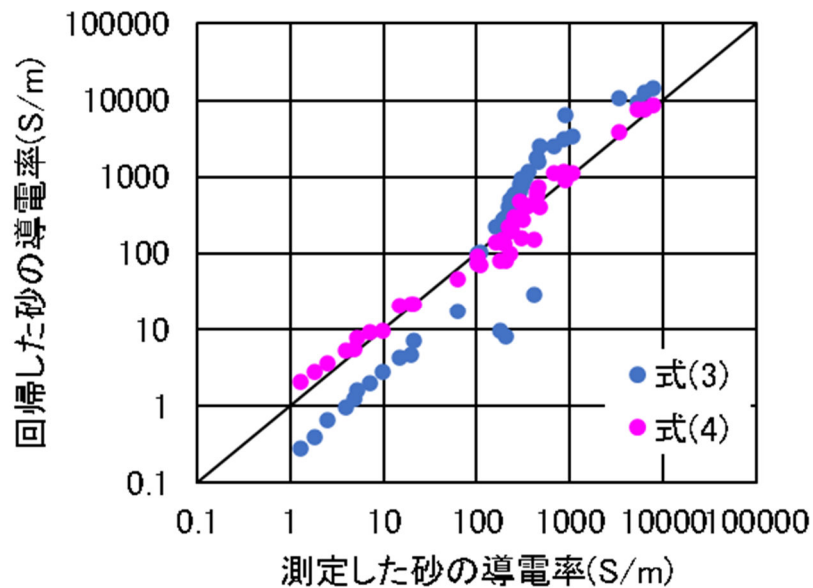


付図-12 食塩水濃度の違いによる体積含水率と導電率の関係



付図-13 充填方法の違いによる体積含水率と導電率の関係

(精製水を使用)



付図-14 測定した砂の導電率と回帰した砂の導電率の関係

2) Hazen, A.: Some physical properties of sand and gravel with special reference to their use in filtration, 24th Ann. Rep., Mass. State Board of Health, 1893.

3) 清水智明, 今泉和俊: 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—, 奥村組技術研究年報, No. 34, pp. 41-46, 2008.

4) 小橋秀俊, 三木博史, 平山光信, 菱谷智幸, 山本博之, 大北康治: 地盤汚染の影響予測に用いる分散長の決定法について, 土木学会論文集, No. 764/III-67, pp. 53-67, 2004.

5) Archie, G. E.: The electrical resistivity log as an aid in de-termining some reservoir characteristics, Trans, A. I. H. E., Vol. 146, pp. 54-67, 1942.

6) 高倉伸一: 高密度電気・電磁探査法による比抵抗構造の調査と解釈に関する研究, 京都大学学位論文, p. 96, 2004.