

薬液注入工法の改良効果評価手法（ジオレジスタ法）の開発

小型動的コーン貫入試験と電気検層を用いた改良効果確認

DEVELOPMENT OF IMPROVEMENT EFFECT EVALUATION METHOD (GEO-RESISTANCE METHOD)
FOR CHEMICAL GROUTING METHOD

Confirmation of improvement effects using small dynamic cone penetration test and electrical logging

下坂 賢二*¹, 利根 誠*²
Kenji SHIMOSAKA, Makoto TONE

In the case of confirming the ground improvement by a chemical injection method as liquefaction countermeasure, the uniaxial compression test has been normally used to measure the strength of the ground. However, when the degree of improvement is only about $q_u=50-100$ kPa, the strength is low, and the specimens are easily disturbed when taking samples and specimen preparation, leading to decrease in strength and making it difficult to evaluate accurately.

The authors, with attention on changes in electrical resistivity of the soil which are triggered before and after improvement, have been developing an upgraded method to confirm effectiveness by combining a small dynamic cone penetration test and electrical logging. The main objective of this method is to measure the electrical resistivity of the ground before and after improvement by electrochemical logging, in which an electric current is applied to the ground and the potential distribution is continuously measured and analyzed, and to capture changes in the properties of the ground per resistivity change. When applied in conjunction with the confirmation of ground strength, this method has less dependence on ground conditions than conventional uniaxial compression tests by taking samples, and enables in-situ evaluation of ground strength without sampling, which therefore is suitable for evaluating the effect of ground improvement.

The paper defines the application scope of this method, as well as the results the method demonstrated when applied to a field demonstration test and a liquefaction countermeasure project in the existing plant facility.

Keywords : Chemical grouting method, Liquefaction, Electrical resistivity, In situ test
薬液注入工法, 液状化, 電気比抵抗, 原位置試験

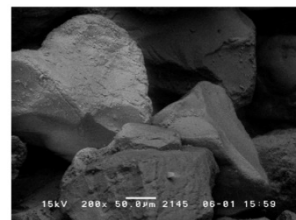
1. はじめに

薬液注入工法は、既存構造物直下地盤、狭隘箇所の液状化対策として広く用いられている。液状化対策を目的とした薬液注入工法は、薬液を土粒子間に浸透、固化させることを基本原理としているため、地盤の粒度状態の違いや不均一性により薬液の浸透性にばらつきが生じることが少なくない。薬液による良好な改良効果とは、止水性の向上、強度の増加が十分満足されることである。実際の薬液注入工法による地盤改良工事では、改良地盤の出来形を直接確認できないため、注入量とボーリングによる代表地点の事後調査（品質評価）により出来形評価に代えるのが一般的である。事後調査は、所定の養生期間の後、改良地盤から乱さない試料を採取し、改良効果を一軸圧縮強さによって評価する機会が多い。しかしながら、薬液注入地盤の改良土は、一軸圧縮強さ $q_u=50\sim 100$ kPa 程度とさほど高いものではないため、対象地盤によっては事後調査における試料採取時、供試体作成時において、強度低下に繋がる乱れが生じやすく、適正に評価されない課題がある。

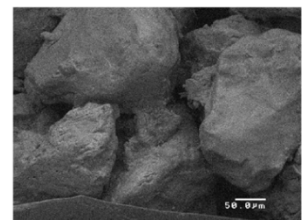
本研究では、改良前後における地盤の電気比抵抗変化に着目し、改良地盤の強度と併せて判断指標にすることで、より正確な改良範囲の特定が可能になると考え、小型動的コーン貫入試験と点電極を用いた電気検層法による改良効果評価手法（ジオレジスタ法）を開発し、実験を通じその適用性を検証した。本報では、同手法の適用範囲を明らかにするとともに、同手法を用いた現地実証実験および既存プラント施設の液状化対策工事に適用した結果について報告する。

2. 薬液注入地盤の特性

本研究では液状化対策を目的とした薬液注入工法の中から、周辺地盤への影響が少なく、既存施設、狭隘地での適用が可能な「特殊シリカ液を使用する薬液注入工法¹⁾」を取り扱う。本薬液注入工法は、ボーリング孔を利用して低圧で特殊シリカ液を浸透注入し、地盤内で改良体を形成する工法である。同工法は、液状化対策の他、止水および地盤の強度増加を目的とする地盤改良工法として広く普及している。既往の文献²⁾では、写真1に示すように改良砂を走査型電子顕微鏡で観察すると、未改良砂では $100\mu\text{m}$ ほどの大きな間隙が存在しているのに対して、改良砂では薬液による固化体が観察され、未改良砂よりも間隙が小さくなっていることがわかる。また、薬液固化体は砂粒子間に付着することで砂粒子同士を結合している。このことから、同改良体の強度を調べるために、薬液シリカ濃度ごとに一軸圧縮試験を実施している。



未改良豊浦砂 (×200)



材令 28 日 改良豊浦砂 (×200)

写真1 未改良豊浦砂及び改良豊浦砂の走査型電子顕微鏡写真¹⁾

*1 戸田建設株式会社 技術研究所 博士 (工学)

*2 戸田建設株式会社 土木技術部 修士 (工学)

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, Dr.Eng.

Technology Division (Civil Engineering), TODA CORPORATION, M.Eng.

ここで、薬液シリカ濃度とは、混合液全体の体積に対するシリカの重量の割合を表すものである。薬液の配合には重量と容量による配合があり、薬液の比重は薬液温度により変化するため、容量配合ではなく重量配合を用いることから、本文中ではシリカ濃度を wt% と表記する。改良体の一軸圧縮強さと薬液シリカ濃度の関係を図 1 に示す。一軸圧縮強さは薬液シリカ濃度に比例して増加している。改良砂では薬液シリカ濃度が高いほど粒子間に付着した固化体の結合力が強く、一軸圧縮強さが大きくなることが知られている。

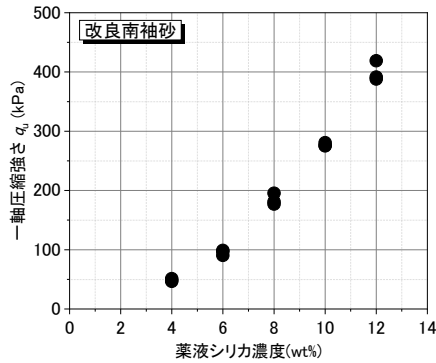


図1 一軸圧縮強さ～薬液シリカ濃度関係¹⁾

特殊シリカ液は、水ガラスを原料とした薬液で、pH は初期に 3～4 を呈するが、同液が地盤に注入されると、同液に含まれる硫酸イオンと地盤中のカルシウムやマグネシウム等の化合物が反応し、硫酸カルシウムや硫酸マグネシウム等が生成されることで薬液の pH は中性に変化するため、環境負荷が少ない注入材であると言える。

また、既往の研究²⁾では、地盤や地下水と比べ、注入後の固化過程で薬液ホモゲルの組織が密になっていき電気を通しやすい性質を有している。そのため、著者らは、改良前後の地盤の電気比抵抗を地盤に電流を流し電位分布を連続的に測定把握する「電気検層」により測定し、比抵抗変化から地盤の性状変化を捉え、地盤の強度と合わせて適用することで適正な改良効果の評価が可能と考えた。

3. 電気検層の概要

電気比抵抗を利用して地盤の調査を行う代表的な手法としては、電気探査法と電気検層法がある。電気探査法では、地下水の位置やマクロ的な地盤構成を調べることを目的としている一方、電気検層は、ボーリング孔内に電極を下げ、周りの地盤の電気抵抗（比抵抗）を測定する技術で、比抵抗検層とも呼ばれている。地層の区分を電気抵抗という物理量で計測できるため、ノンコアで掘ることの多いさく井工事や、目的の地層を特定する必要がある石油や温泉の掘削、地下水の調査では必須の計測技術になっている。

3.1 測定のメカニズム

電気検層で測定するのは地盤の電気抵抗である。電気抵抗の測定は、基本的に測定対象物に 2 本の電極を設置して電流 I を流し、その電流 I が流れた経路の電圧 V （電位差）を測定することで、オームの法則 ($R=V/I$) により抵抗値 R (Ω) を求める。

抵抗値 R は導体の長さ L に比例し、導体の断面積 S に反比例するため、次式で表される。

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1)$$

ここで、比例定数 ρ は導体の電気の流れにくさを表す抵抗率であり、測定対象物の大きさ（例えば、地層の層厚など）によって変化する。そのため電気検層の場合、電極間隔が広がると、同じ地層でも電流の流れる範囲が広がり測定される「見掛け抵抗値」が小さくなる。この抵抗値を標準化し、1m の立方体（断面積 $S=1m^2$ ）の両端の抵抗値に換算した数値が「比抵抗値 ρ 」であり、次式で表される。

$$\rho = R \frac{S}{L} = R \frac{1m^2}{1m} = R(\Omega \cdot m) \quad (2)$$

比抵抗値の単位は「 $\Omega \cdot m$ 」で、均質な地盤であれば測定する電極間隔に影響されず同一の値となる。

実際の電気検層では、電極が 2 個の場合、電極と大地の接地抵抗が、測定値に直接上乘せられてしまうため、電流を流す電極と、電圧（電位差）を測定する電極 2 本を分けて 4 本の電極を用いた 4 端子法で抵抗測定を行う。代表的な電極配置には、2 極法（ノルマル法）と 4 極法（ウエンナ法）があるが、いずれも 4 本の電極を使う。孔内検層における 2 極法と 4 極法の電極配置模式図³⁾を図 2 に示す。

これらの方法で測定した「見掛けの抵抗値 R 」から「地盤の真の比抵抗値 ρ 」への換算は次式のようになる。

$$\rho = 4 \cdot n \cdot a \cdot R = 4 \cdot n \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad (3)$$

ここに、 n は円周率 π 、 a は電極間隔 (m)、 R は見かけの抵抗値 (Ω) である。

比抵抗は、地層の含水量とは関係が薄く、間隙水のイオン濃度・粘土鉱物・間隙率に関係する。例えば、一般的に頁岩・粘土・塩水を含む砂の比抵抗は低く、淡水を含む砂・礫・割れ目の少ない溶岩・石灰岩などでは高い数値を示す。地質調査では、比抵抗値が 100～300 ($\Omega \cdot m$) は透水層、80 ($\Omega \cdot m$) 以下の地層は難透水層または不透水層である場合が多く、砂礫や砂層で低比抵抗値を示す場合は、細粒分を多く含む場合や間隙水のイオン濃度が高い（例えば、海水）ことを意味している。

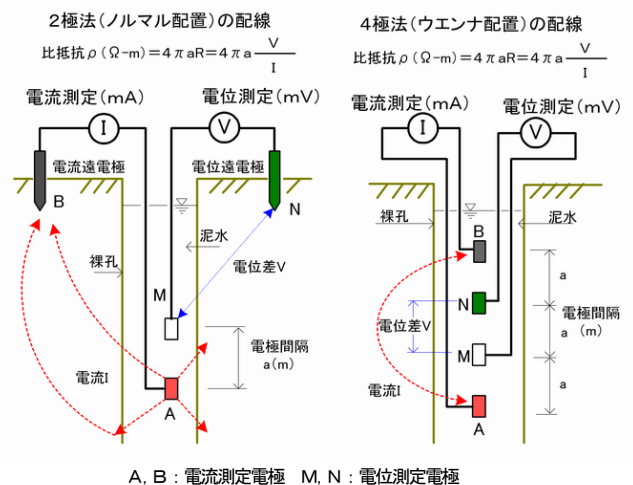


図2 孔内検層における電極配置模式図（2極法、4極法）³⁾

3.2 電気検層の既往技術と課題

電気検層を用いた薬液注入工法の改良効果確認については、比抵抗トモグラフィ、比抵抗コーン貫入試験、ボーリング孔内電気検層等を用いた研究および適用事例がある。

比抵抗トモグラフィを用いた研究では、例えば小峯⁴⁾が詳細に検討を行い、図3に示すように(薬液ゲルの電気比抵抗 R_{cg}) / (間隙水の電気比抵抗 R_{pw})の値が0.1より大きい場合、電気比抵抗値のバラツキが大きく、良好な精度を有した評価を困難としている。すなわち、薬液(特殊シリカ液)の電気比抵抗値は $1\Omega\cdot m$ 以下であるため、同手法の適用範囲は、間隙水の電気比抵抗値が $10\Omega\cdot m$ 以上(間隙水の塩分濃度で600ppm程度以下)となり、沿岸域埋立て地盤等の地下水に塩分を含む地盤への適用は難しいとされている。

比抵抗コーン貫入試験を用いた事例⁵⁾では、液状化対策を目的に実施した重力式岸壁背後地の薬液改良を対象に、改良前後の比抵抗変化を測定し、改良前の比抵抗が $30\sim 40\Omega\cdot m$ に対して、改良後の比抵抗が $1\sim 10\Omega\cdot m$ に低下することが確認されている。

同事例で使用した比抵抗コーンの電極プローブは、図4に示すように円周状の電極を四極配置(ウエンナ法)し、電極間隔は1種類の仕様である。同種の電極プローブは、スウェーデン式サウンディングの測定孔を利用した手法⁶⁾、電気式静的コーン貫入試験のコーン上端ロッド部に電極を配置した手法等にも使用され、土の判別分類、細粒分含有率の評価等に利用されている。高ら⁶⁾は、円周状に配置したプローブの課題として、図5に示すように電極径に対する測定孔径の比の影響が極めて大きく、電極径と測定孔径を同程度の寸法にする必要があると指摘しており、同手法では測定時の電極の損傷、電極径と測定孔径の影響による精度低下、および測定孔壁の乱れによる電気比抵抗の異常値が課題となる。

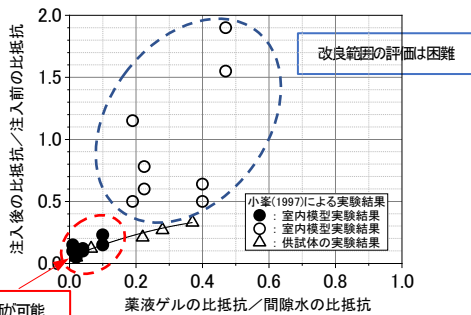


図3 薬液と地下水の比抵抗値のコントラストの影響⁴⁾

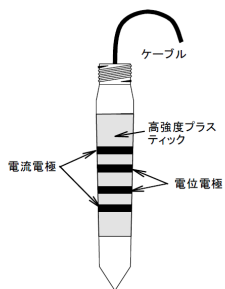


図4 電極プローブの例⁵⁾

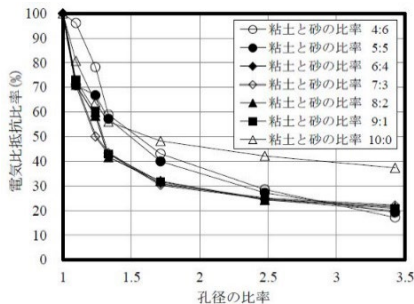


図5 電気比抵抗比率と孔径比の関係⁶⁾

4. 改良効果評価手法の概要

本手法は、小型動的コーン貫入試験から得られる N_d 値より一次効果確認を行い、改良前と比較し、改良後の N_d 値の増分が明確でない場合は、同孔を用いた電気検層から得られる電気比抵抗より二次的改良効果確認を行う。本手法による改良効果確認フローを図6に示す。

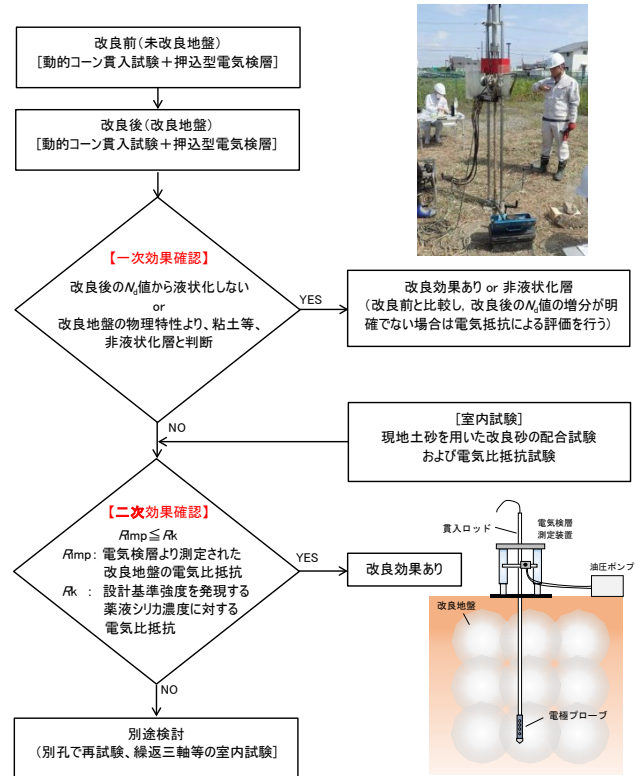


図6 本手法による改良効果確認フロー

4.1 測定方法

本研究では、小型動的コーン貫入試験と電気検層測定を併用する測定装置を開発した。電気検層測定に円周状電極の課題であった電極径と測定孔径の比の影響の無い点電極を採用し、同電極を異なる間隔で配置することで、孔壁周辺の乱れの有無を確認できるようにした。本手法で使用する測定装置を図7に示す。

本手法は小型動的コーン貫入試験後、地中に貫入された電極プローブを引抜きながら電気検層を行う。測定装置は、小型動的コーン貫入試験の先端コーン上部に電極を配置し、同周方向位置と反対側の周方向位置に鏢付きの偏心スペーサーを設け、先端コーンは引抜き時に電極プローブから抜ける構造としている。

同スペーサーは、先端コーンが電極プローブから抜けた後の電極プローブ引抜き時に、鏢部が孔壁に接触し、孔壁の地山を削り取って、鏢部上部に土砂が堆積することにより、電極プローブ

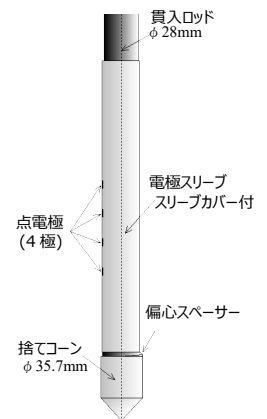


図7 測定装置

ブを電極側に押し寄せるよう作用し、電極を孔壁へ確実に密着させることができる。本測定方法により、電極プローブの1回の貫入によって、貫入時に動的コーン貫入試験を行い、引抜き時に電気検層を行うことができ、測定効率が大幅に改善する。測定状況を写真2に示す。



貫入時：小型動的コーン 引抜き時：電気検層

写真2 測定状況

4.2 本手法の薬液改良地盤の適用性

本手法の電気検層を用いた評価手法の適用範囲を明らかにする目的で、小型土槽模型実験を通じ、間隙水の塩分濃度（電気比抵抗）が地盤の比抵抗に及ぼす影響を確認し、改良前後の比抵抗変化から改良域の判別が可能であるか検証した⁷⁾。

(1) 実験方法

実験は、図8に示す小型円筒土槽と電極プローブを用い、塩分濃度の異なる間隙水にて作製した未改良地盤と同地盤に特殊シリカ液を注入して改良した薬液改良地盤を作製し、各地盤の電気比抵抗を測定した。実験に使用した砂は、珪砂7号（瀬戸産）および遠州珪砂である。土槽地盤の作製条件を表1に、使用砂の物理特性を表2に示す。

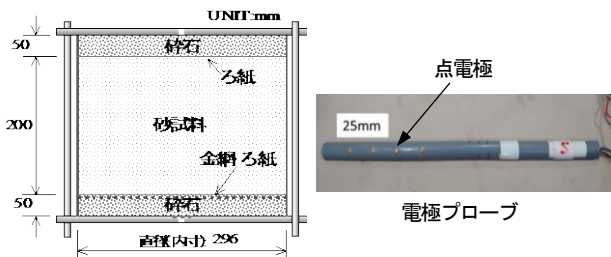


図8 小型円筒土槽と電極プローブ

表1 土槽地盤の作製条件

	珪砂7号 (瀬戸産)	遠州珪砂
土槽地盤密度	$D_r=50\%$ ($e=0.976$)	$D_r=50\%$ ($e=0.742$)
間隙水 塩分濃度	0, 50, 100, 500, 1,000, 2,000, 5,000, 10,000, 30,000 ppm	
薬液シリカ濃度	6wt% (電気比抵抗: $0.5\Omega\cdot m$)	

表2 使用砂の物理特性

	珪砂7号 (瀬戸産)	遠州珪砂
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.652	2.665
平均粒径 D_{50} (mm)	0.24	0.27
細粒含有率 F_c (%)	1.20	0.60
間隙比 e	0.976	0.742
均等係数 U_c	2.03	1.98

(2) 特殊シリカ液の電気比抵抗

実験に際し、特殊シリカ液の電気比抵抗特性を把握するため、水で薬液を希釈して薬液シリカ濃度を変えて電気比抵抗を測定した。実験に使用した特殊シリカ液の電気比抵抗と薬液シリカ濃度の関係を図9に示す。同電気比抵抗はシリカ濃度が1.5wt%より低くなると急激に増加するが、2.0wt%を超えると電気比抵抗は低くなるが、その値は $0.4\sim 1.3\Omega\cdot m$ の範囲である。

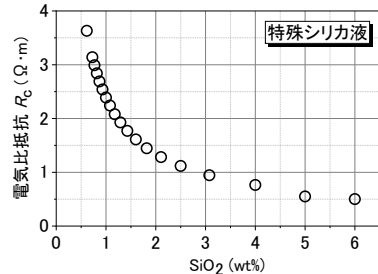


図9 電気比抵抗 R_c ~ 薬液シリカ濃度 SiO_2 関係⁷⁾

(3) 実験結果

図10に珪砂7号（瀬戸産）および遠州珪砂の未改良地盤、改良地盤の電気比抵抗と間隙水塩分濃度の関係を示す。同図より、未改良地盤では、間隙水の塩分濃度が高くなるにつれて比抵抗が小さくなる。一方、改良地盤では、間隙水の塩分濃度に関わらずほぼ一定となる。未改良地盤と改良地盤の電気比抵抗は、間隙水の塩分濃度が10,000ppm程度で同程度となり、同濃度を超えると間隙水の電気比抵抗は薬液の比抵抗より小さくなる。以上より、未改良・改良の電気比抵抗の差異は、地盤種別によるが、間隙水の塩分濃度が5,000~10,000ppm程度までは、判別することが可能と考えられる。

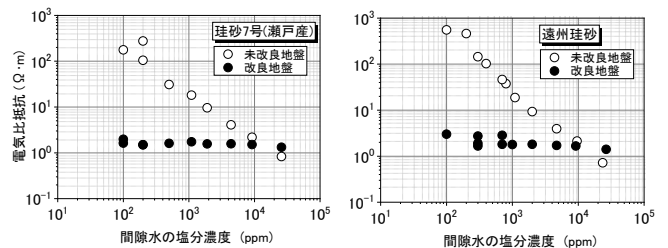


図10 電気比抵抗 ~ 間隙水の塩分濃度関係（未改良・改良地盤）⁷⁾

(改良地盤の電気比抵抗 R_{imp}) / (未改良地盤の電気比抵抗 R_{unimp}) と (薬液の電気比抵抗 R_c) / (間隙水の電気比抵抗 R_{pw}) の関係を図11に示す。

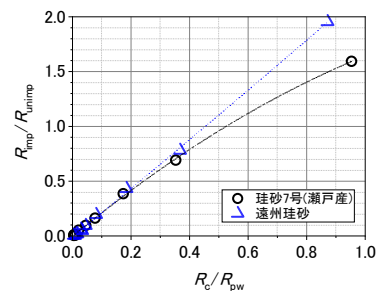


図11 $R_{imp}/R_{unimp} \sim R_c/R_{pw}$ 関係⁷⁾

図 11 に示すように電気比抵抗値のバラツキはほとんど無く、改良地盤と未改良地盤の電気比抵抗比 R_{imp}/R_{unimp} は薬液と間隙水の電気比抵抗比 R_c/R_{pw} に比例し、図 3 に示す既往の電気比抵抗測定結果と同様な傾向であることを示している。以上より、比抵抗トモグラフィでは R_c/R_{pw} の値が 0.1 より大きい場合は有効な精度が得られないが、本手法の電気検層では、 R_c/R_{pw} が 0.0~1.0 の範囲で十分な精度を得ることができる。

4.3 本手法の改良効果確認方法

本手法は、従来行っていた一軸圧縮試験に比べて試料採取による乱れの影響が少なく、原位置での地盤の強度評価が可能となるため、地盤の改良効果を評価する上で適している。ただし、液状化対策としての改良地盤の設計基準強度 $q_{uck}=50\sim 100\text{kPa}$ に対して、 N_d 値増分は $\Delta N_d=1\sim 4$ と僅かであり、改良前の地盤の N_d 値が大きい場合や、土質性状のばらつきが大きい埋立地では、 ΔN_d から一軸圧縮強さ q_u を推定することが困難となる場合もある。その場合は電気検層から得られる電気比抵抗を用いて、改良砂の一軸圧縮強さと薬液シリカ濃度関係と改良砂の電気比抵抗と薬液シリカ濃度関係から改良効果の定量的評価を行う。具体的には、図 12 に示すように、改良体の一軸圧縮強さ~薬液シリカ濃度の関係から設計基準強度 q_{uck} に相当する薬液シリカ濃度を求めた後、電気比抵抗~薬液シリカ濃度の関係より SiO_{2k} に相当する電気比抵抗値 R_k を求める。 R_k は、設計基準強度 q_{uck} を満足する電気比抵抗値に相当する。したがって、改良体の電気比抵抗 R_{imp} が R_k 以下である場合、設計基準強度 q_{uck} を満足すると評価する。

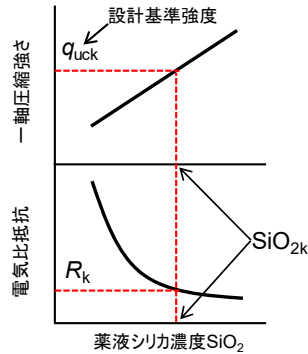


図 12 電気比抵抗を用いた改良効果の定量的評価

5. 現地実証実験

5.1 実験概要

本手法の適用性を確認するため、愛知県津島市で実施した薬液注入改良試験の施工サイトにて、未改良地盤および薬液改良地盤を対象に現地測定を実施した。同サイトの地層は、地表面から玉石混り礫（盛土）、シルト、シルト混り砂が堆積し、GL-3.0m~GL-4.5m のシルト混り砂には、木片が点在する。土質柱状図と薬液改良体位置を図 13 に示す。薬液改良体 C は、直径 $D=2.5\text{m}$ 、改良中心深度 GL-3.0m であり、有効改良範囲は、GL-2m~4m（改良層厚:2m）となる。また、改良仕様は、薬液シリカ濃度 8wt%（特殊シリカ液）、注入率 40.5%、設計基準強度 $q_{uck}=100\text{kPa}$ である。

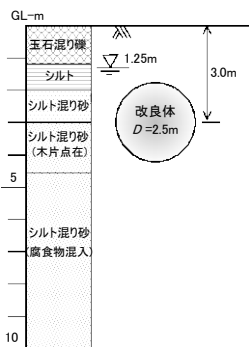


図 13 柱状図と改良体位置図

電極有の本測定法を実施し、 N_d 値の比較を行った。また、改良地盤を対象に本測定法を実施し、改良前後の N_d 値および電気比抵抗 R から改良効果の確認を行った。測定平面位置を図 14 に示す。

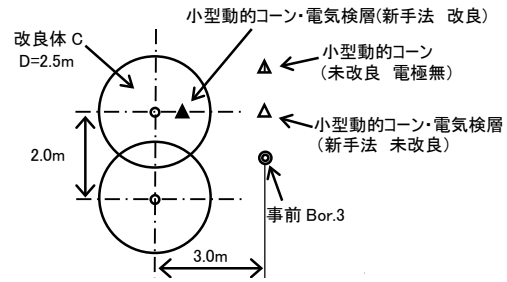


図 14 測定平面位置図

実験に使用した小型動的コーン貫入試験⁸⁾は、質量 300N のハンマーを高さ 20cm から自由落下させて、先端コーン（断面積 10cm^2 、先端角 90° ）を 10 cm 貫入するのに要する打撃回数 N_d' を測定するもので、式(4)を用いて標準貫入試験の N 値と等価な N_d 値に換算することができる。

$$N_d = \alpha(N_d' - \beta(p - 3.2n_R)) \quad (4)$$

ここに、

α : 大型動的貫入試験 (SRS, ISO 22476:2002) との打撃効率を考慮した先端コーンの単位面積当たりの打撃エネルギーと貫入長から決まるエネルギー消費が等価となるように求めた係数 (=0.38)

β : 周面摩擦抵抗が打撃回数に及ぼす影響係数 (=0.24)

p : 貫入ロッド引抜抵抗 (bar), n_R : ロッド本数

5.2 実験結果

未改良地盤にて実施した小型動的コーン貫入試験より得られた N_d 値（電極無）および本手法より得られた N_d 値（電極有）の深度分布を図 15 に示し、同一深度で整理した N_d 値（電極無）と N_d 値（電極有）の相関関係を図 16 に示す。 N_d 値（電極無）と N_d 値（電極有）は、同様な深度分布を示し、相関係数は 0.94 を示しており、本手法より測定される N_d 値（電極有）は、小型動的コーン貫入試験（電極無）より測定される N_d 値と同等であることがわかる。

本手法により測定した未改良地盤と改良地盤の電気比抵抗 R の深度分布を図 17 に示す。電極プローブ引抜時に測定した本手法は、測定エラーも発生せず、未改良地盤、改良地盤とも電気比抵抗 R の測定が可能であった。これは、地中に貫入された電極プローブの引抜時に先端コーンが抜ける構造と、電極プローブに装着された鍔付きの偏心スペーサーの効果により、電極が孔壁に確実に密着したものと考えられる。

また、GL-2m~4m の有効改良範囲において、本手法により測定した未改良地盤、改良地盤の電気比抵抗は、GL-2m~3m にて、未改良の電気比抵抗 $R_{unimp}=58$ （平均）、改良後の電気比抵抗 $R_{imp}=8$ （平均）と改良後の電気比抵抗の著しい低下が見られる。ただし、GL-3m~4m では、 $R_{imp}=79$ （平均）、 $R_{unimp}=75$ （平均）と改良前後の変化は見られない。これは、GL-3m~4m に介在するシルト層、木片による影響が考えられる。

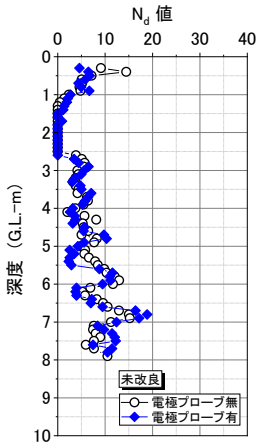


図 15 N_d 値の深度分布

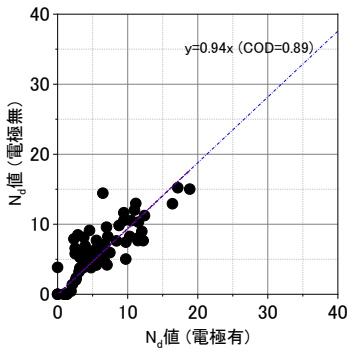


図 16 N_d 値（電極有無）の相関図

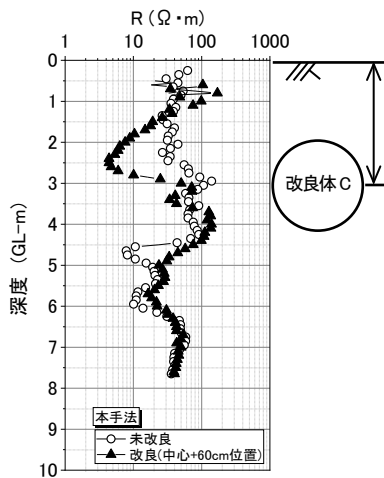


図 17 電気比抵抗 R の深度分布

6. 液状化対策工事への適用

6.1 工事概要

本工事は、臨海地区プラント施設の液状化対策工事である。対象地盤はばらつきの大きい埋立地盤で、地表面より細砂～粗砂を主体とした盛土、細砂、粘土質砂が堆積し、盛土、細砂層には、貝殻片が多く、シルト、粘土を層状に含む。地下水位は、概ね GL-2m で、同ボーリング孔内で測定した地下水の電気伝導率は、800～1200 μ S/cm (塩分濃度：400～600ppm) の範囲にあり海水の影響は小さい。

薬液注入工法の改良深度は、施工箇所により異なるが、GL-2m～GL-11m の範囲にある。供用中のプラント施設周辺および既設構造物直下の地盤改良となるため、本工事には恒久型薬液（特殊シリカ液）を用いた低圧浸透注入による薬液注入工法（ハイグリップグラウト工法（NETIS：CB-180028-A））が採用されている。また、改良地盤の設計基準強度 $q_{uck}=100kPa$ 、使用薬液は特殊シリカ液で、現地土砂を用いた配合試験および現地試験注入等に

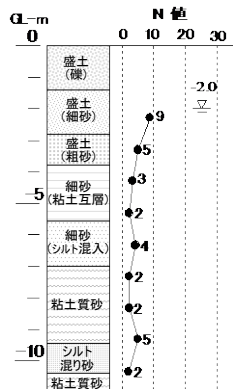


図 18 土質柱状図

より、シリカ濃度 9wt% および注入率 $\lambda=36\%$ としている。土質柱状図を図 18 に示す。

6.2 本手法による事後調査

本手法は、従来の改良体をサンプリングして室内試験（一軸圧縮強度試験等）を実施する一般的な事後調査と比較して、調査時間が短く、安価であることから、従来の事後調査 6 箇所に加えて、施工中の効果確認として 4 カ所の調査を実施した。

調査の平面位置は、従来の事後調査と同様に改良体半径の 1/2 位置で、改良体の材齢は 14 日とした。改良効果確認は、小型動的コーン貫入試験から得られる N_d 値より一次効果確認を行い、改良前と比較し、改良後の N_d 値の増分が明確でない場合は、電気検層から得られる電気比抵抗 R より二次的改良効果確認を行う。

電気比抵抗を用いた効果確認は、図 12 に示す一軸圧縮強さ、電気比抵抗と薬液シリカ濃度の関係を室内試験（配合試験、電気比抵抗試験）より求め、同図より得られる設計基準強度 q_{uck} ($=100kPa$) に相当する薬液シリカ濃度 SiO_{2k} 、電気比抵抗値 R_k を求め、 R_k を閾値として効果判定する。本工事では、3 深度より採取した砂試料を用いて同試験を実施した。試験結果を図 19 に示す。同図より、電気比抵抗の閾値 R_k は、1.7～3.0 $\Omega \cdot m$ となる。

6.3 本手法による改良効果確認

図 20 に調査の一例を示す。改良前後の N_d 値を比較すると、改良後の N_d 値はばらつきが大きい。有効改良範囲 GL-2.0m～8.0m における改良による N_d 値増分 ΔN_d は、2～19 の範囲にあり、改良により N_d 値の増加が確認できるが、GL-4.5～5.5m および GL-7m～8m では、層状に堆積した粘土層および細粒分含有率 F_c が 40% 以上の粘土質砂の影響により、 N_d 値増分 ΔN_d は、2～3 と小さい。改良後の電気比抵抗 R は、改良後の N_d 値と比較して、ばらつきは小さい。

動的コーンから得られる改良前後の N_d 値増分 ΔN_d 値と一軸圧縮強さ q_u には相関があり q_u の推定式として式(5)が提案されている⁹⁾。本調査から得られた N_d 値増加分から本式より推定 q_u を算定し、改良効果確認を行った。また、電気検層から得られる電気比抵抗値 R が改良前と比較して小さいことを確認することで、地盤への薬液浸透がされていることが判断できる。

$$q_u = f(F_c) \times \Delta N_d \quad (5)$$

ここに、 F_c ：細粒分含有率

$f(F_c)$ ：細粒分含有率に応じた係数

$F_c < 25\%$ の時、 $f(F_c) = 20 + F_c \times 1.2$ 、 $F_c \geq 25\%$ の時、 $f(F_c) = 50$

ΔN_d ： N_d 値の増加分

算定の結果、改良範囲の推定一軸圧縮強さ q_u は下記となる。

改良層（上層 GL-2m～5m）の平均値：推定 $q_u=480kPa$

改良層（中層 GL-5m～8m）の平均値：推定 $q_u=130kPa$

改良前後の電気比抵抗 R を比較すると、GL-2.0m～5.0m では、2～4 $\Omega \cdot m$ (平均：3 $\Omega \cdot m$) の範囲にあり、改良前と比較して大きく低下している。また、同深度の電気比抵抗（平均値）は、前述した設計基準強度 q_{uck} を満足する電気比抵抗値 R_k より小さい値を示しており、目標改良強度を満足していると評価できる。一方、GL-5.0m～GL-6.0m では、4～11 $\Omega \cdot m$ (平均：6 $\Omega \cdot m$) の範囲にあり、改良前

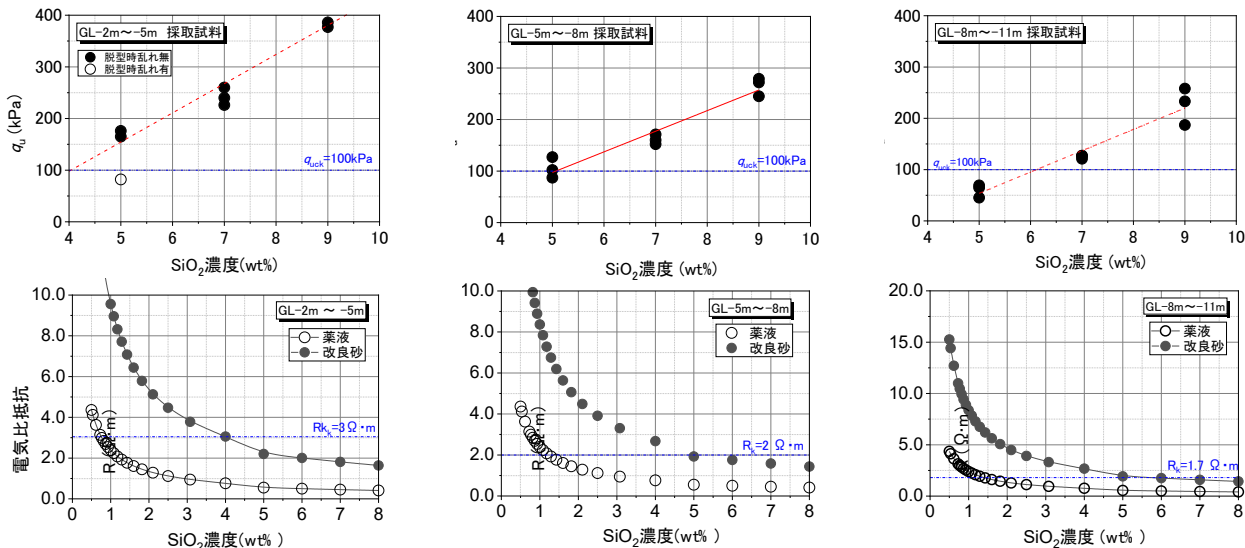


図 19 現地土を用いた室内試験結果

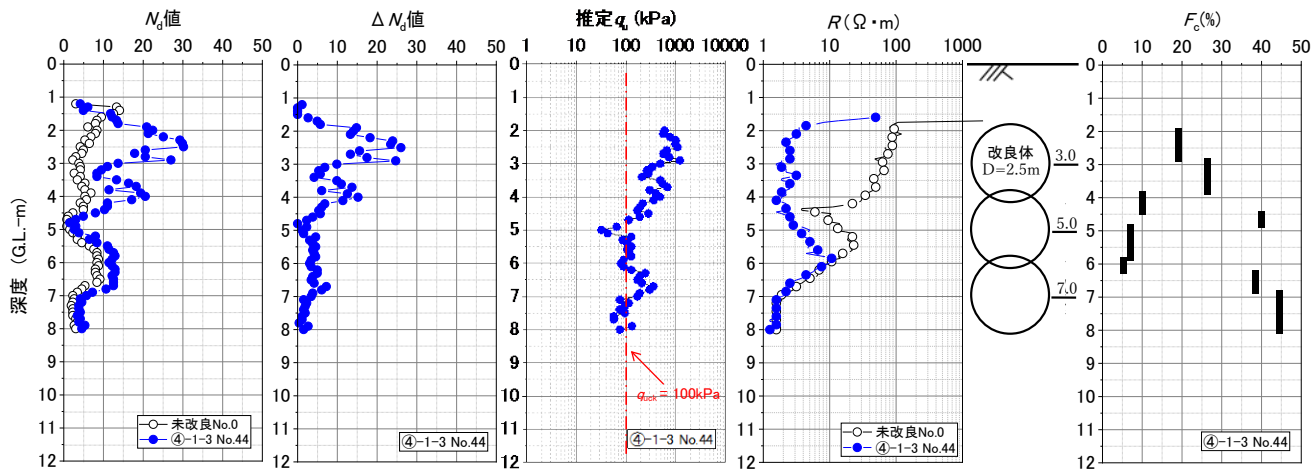


図 20 測定結果の一例(No. 44)

と比較して低下しているものの、GL-2.0m~5.0m の改良後電気比抵抗と比較して、約 2 倍の値を示す。これは、同深度に互層に堆積する粘土、シルト層の影響と考えられる。また、GL-6.0m~GL-8.0m では、改良前後の電気比抵抗の変化は見られない。これは、GL-6.0m~7.0m に互層に堆積するシルト層、GL-7.0m~8.0m に堆積する粘土質砂の影響と考えられるが、 N_d 値の増加分により目標改良強度 $q_{uck}=100\text{kPa}$ を概ね満足すると評価できる。

7. おわりに

本研究では、従来の改良体のサンプリングによる一軸圧縮強度試験等の事後調査の課題に対し、小型動的コーン貫入試験と電気検層法による改良効果評価手法（ジオレジスタ法）を開発し、同手法の現地適用性確認のため現地実証実験および液状化対策工事への適用を行った。その結果、本手法は、地盤性状のばらつきの大きい埋立地盤においても、改良前後の地盤特性の変化を明確に捉えることが可能であり、 N_d 値の増加分と電気比抵抗 R を評価することで改良効果を定量的に推定、評価できる原位置試験として有効であることが実証された。

参考文献

- 1) 大野康年：特殊シリカ液を用いた浸透注入改良砂の力学特性と地盤改良技術に関する研究，京都大学博士論文，2006。
- 2) 大野康年他；薬液により浸透改良された砂の微視的構造，土木学会第 57 回年次学術講演会，III-092，pp.183-184，2002。
- 3) ジオテクノサービス株式会社：電気検層とは，<http://www.geots.co.jp/500Well/510WellPack10/511WellPackELog/WellPackELog.html>，(参照 2021.9.23)
- 4) 小峯秀雄：電気比抵抗による薬液注入改良効果の定量的評価法（その 3）—比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価法の適用性—，電力中央研究所報告，pp.42-44，1996。
- 5) 斉藤正明他：多点浸透注入工法によるウォーターフロント既設構造物基礎の耐震補強，土と基礎，Vol.50，No.4，pp.16-18，2002。
- 6) 高元浩他：電気比抵抗を利用した土の細粒分含有率の評価法，地盤工学ジャーナル，Vol.9，No.2，pp.299-308，2014。
- 7) 大野康年他：電気検層を用いた薬液注入工法の出来高確認，第 14 回地盤改良シンポジウム論文集，pp.607-614，2020。
- 8) 村田芳信他：小型動的貫入試験を用いた既設宅地の耐震調査例，土木学会第 63 回年次学術講演会，III-280，pp.559-560，2008。
- 9) (一財)沿岸技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル（改訂版），pp.107-109，2020.7。