

# 薬液注入工法の改良効果評価手法「ジオレジスタ法」 小型動的コーン貫入試験と電気検層法を用いた改良効果確認

下坂 賢二・村田 芳信・大野 康年

薬液注入後の地盤の改良効果確認は、従来、一軸圧縮試験による強度確認が用いられているが、改良土が低強度のため、試料採取時や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。著者らは、改良前後における地盤の電気比抵抗変化に着目し、地盤性状のばらつき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小型動的コーン貫入試験と電気検層法を組み合わせた新たな改良効果評価手法を開発した。本報では、評価手法の概要と同手法を用いた液状化対策工事の適用事例について報告する。

キーワード：地盤改良、薬液注入工法、電気検層法、小型動的コーン貫入試験、液状化、原位置試験

## 1. はじめに

近年、狭隘な箇所や既設構造物直下の有効な液状化対策として、斜め、曲がり削孔を併用した溶液型の薬液注入工法が活用されている(図-1)。この工法は、飽和した砂地盤中に水ガラス系の恒久薬液を浸透注入し、間隙水をゲル化した薬液で置換することにより、地盤に繰返しせん断力に対する粘り強さを付加し、地震時に発生する過剰間隙水圧の発生を抑える工法である。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、注入量と代表地点のボーリング試料採取による事後調査を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

場合が多い。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 程度と低強度のため、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、強度低下の原因となる乱れが生じやすく、適正に評価されない課題がある。

そこで著者らは、地盤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電気比抵抗変化を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<sup>1)</sup>と電気検層法による改良効果評価手法(ジオレジスタ法)を開発した。従来行っていた試料採取による一軸圧縮試験と比べて、地盤条件による影響が少なく、試料採取を伴わず原位置での地盤の強度評価が可能となる。本報では、新たな評価手法の概要と、同手法を用いた液状化対策工事での適用事例について報告する。

## 2. 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法から得られる電気比抵抗  $R(\Omega \cdot m)$  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-2に示す。

### (1) 改良効果確認方法

小型動的コーン貫入試験は、質量 300 N のハンマー

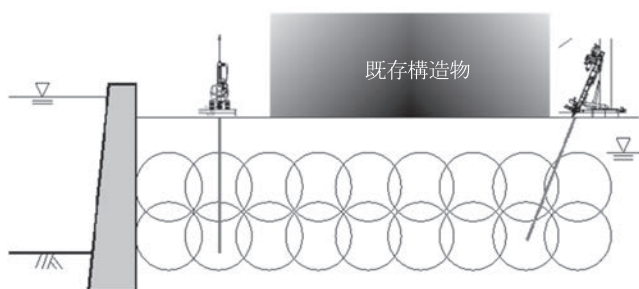


図-1 液状化対策工事(薬液注入工法)

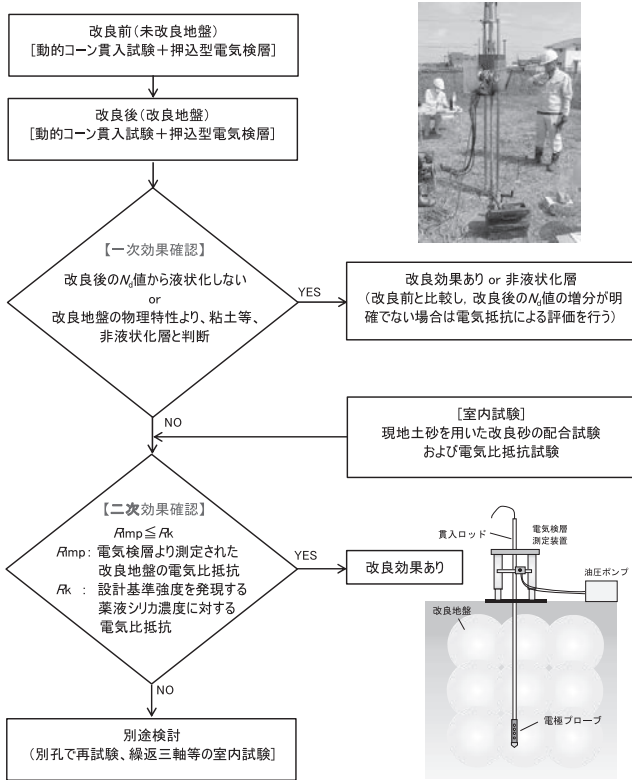


図-2 本手法による改良効果確認フロー

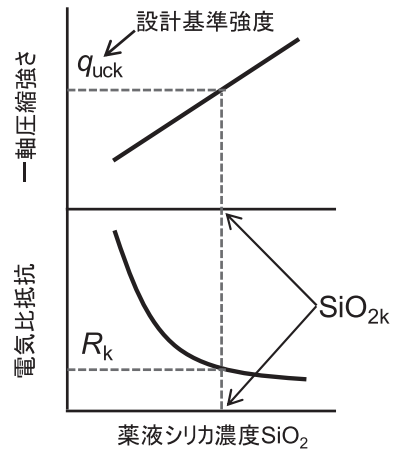


図-3 電気比抵抗を用いた改良効果の定量的評価

(2) 測定方法

本手法は、小型動的コーン貫入試験と電気検層法を併用した原位置試験であり、両測定を可能とする測定装置を開発した。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鏝付きの偏心スパーサーを設け、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。また電気検層測定には、従来の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-4に示す。

測定方法は、この測定装置を用いて小型動的コーン貫入試験を所定深度まで実施し、次に貫入ロッド引抜き時に電極プローブを孔壁に接触させ、電気比抵抗を連続的に測定（電気検層）する。偏心スパーサーは、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、鏝部が孔壁に接触し、孔壁の地山を削り取って鏝部上部に土砂が堆積することにより、電極プロー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。本測定方法による

を高さ 20 cm から自由落下させて、先端コーン（断面積  $10\text{ cm}^2$ 、先端角  $90^\circ$ ）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、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。一軸圧縮強さと  $N_d$  値の増分には相関関係があることから<sup>1)</sup>、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り、地盤の改良効果を評価する上で適している。ただし、前述したように液状化対策としての改良地盤の設計基準強度  $q_u = 50 \sim 100\text{ kPa}$  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、 $\Delta N_d$  から  $q_u$  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および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-3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  $q_{uck}$  を満足すると評価できる。

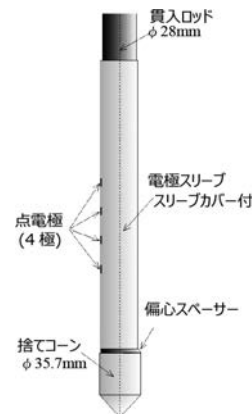
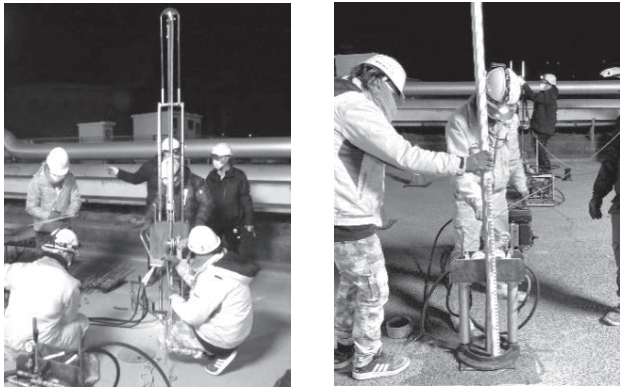


図-4 測定装置



貫入時：小型動的コーン貫入試験  
引抜き時：電気検層  
写真-1 本手法による測定状況

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-1に示す。

### (3) 適用範囲

本手法は、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<sup>2)</sup>」を適用対象とする。特殊シリカ液は、水ガラスを原料とした薬液で、薬液シリカ濃度が高いほど土粒子間に付着した固化体の結合力が高くなり一軸圧縮強さが大きくなることが知られており、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。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事例がある。既往の研究<sup>3)</sup>では、薬液（特殊シリカ液）の電気比抵抗値は $1\Omega \cdot m$ 以下と小さく、間隙水の電気比抵抗値が $10\Omega \cdot m$ 以下（間隙水の塩分濃度で600 ppm程度以上）の場合は、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が困難であることから、地下水に塩

分を含む沿岸部の埋立地盤では、地下水の電気比抵抗値が小さく電気検層による判別は不向きとされていた。

そのため、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ため、本手法の電極プローブを用いて間隙水の塩分濃度（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実験検証した。実験結果を図-5に示す。

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10,000 ppm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、地下水に塩分を含む沿岸部の埋立地盤においても間隙水の塩分濃度が5,000～10,000 ppm程度までは、判別することが可能である。

## 3. 液状化対策工事への適用事例

### (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、粘土を層状に含んでいた。地下水位は概ねGL-2 mで、同ボーリング孔内で測定した地下水の電気伝導率は、 $800 \sim 1,200 \mu S/cm$ （塩分濃度：400～600 ppm）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、GL-2 m～GL-11 mの範囲にあり、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：

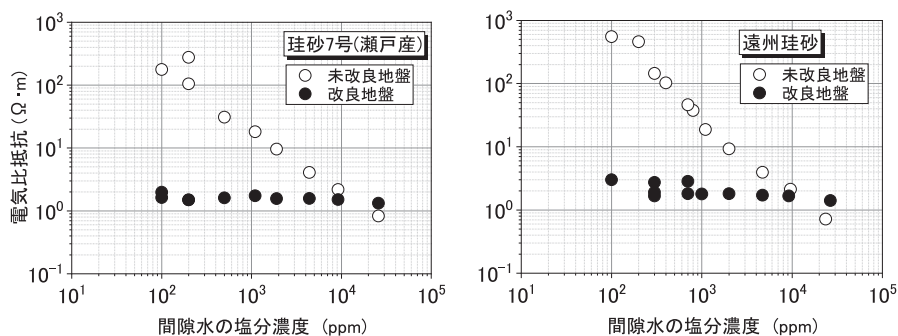


図-5 電気比抵抗～間隙水の塩分濃度関係（未改良・改良地盤）

CB-180028-A)) が採用された。また、改良地盤の設計基準強度  $q_{uck} = 100 \text{ kPa}$ 、現地土砂を用いた配合試験および現地試験注入等により、シリカ濃度 9 wt% および注入率  $\lambda = 36\%$  で施工した。土質柱状図を図-6 に示す。

(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 箇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  $R$  より二次効果確認を行う。

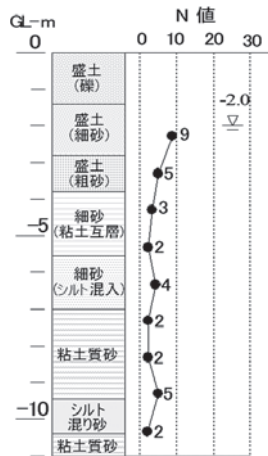


図-6 土質柱状図

電気比抵抗を用いた効果確認は、前記の図-3 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  $q_{uck} (= 100 \text{ kPa})$  に相当する薬液シリカ濃度  $\text{SiO}_{2k}$ 、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-7 に示す。同図より、電気比抵抗の閾値  $R_k$  は、 $1.7 \sim 3.0 \Omega \cdot \text{m}$  となる。

(3) 本手法による改良効果確認

図-8 に調査結果の一例を示す。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-2.0 m ~ -8.0 m における改良による  $N_d$  値増分  $\Delta N_d$  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 ~ -5.5 m および GL-7 m ~ -8 m 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  $\Delta N_d$  は、2 ~ 3 と小さい。一方、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結果であった。

(a) 一次効果確認

一次効果確認として本調査より得られた  $\Delta N_d$  値から、(一財) 沿岸技術研究センターから提案されている  $q_u$  の推定式<sup>4)</sup> を用いて、推定  $q_u$  を算定した。

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

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

$$F_c < 25\% \text{ の時, } f(F_c) = 20 + F_c \times 1.2,$$

$$F_c \geq 25\% \text{ の時, } f(F_c) = 50$$

$\Delta N_d$  :  $N_d$  値の増加分

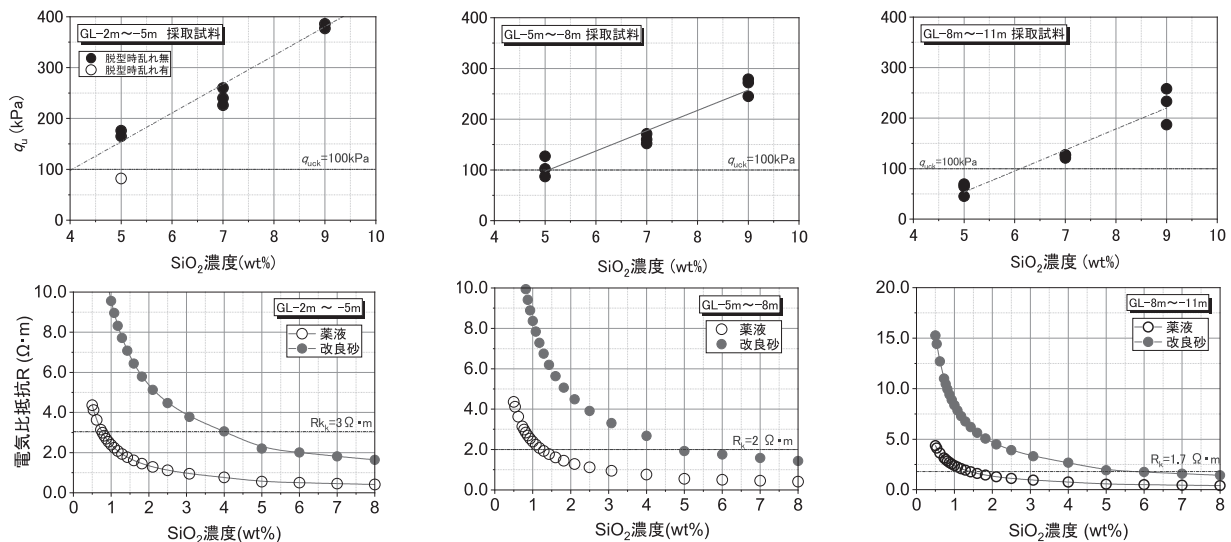


図-7 現地土を用いた室内試験結果

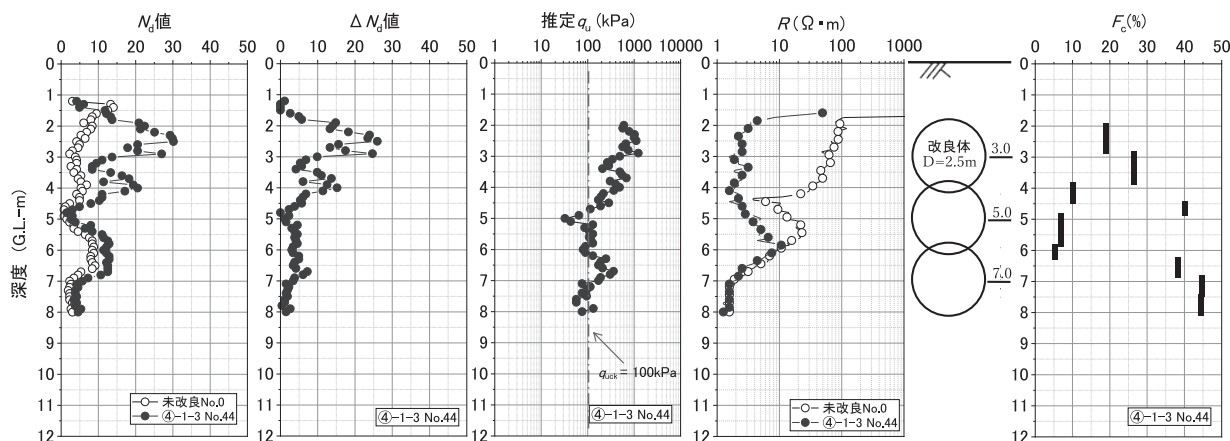


図-8 調査結果の一例

算定の結果、改良範囲の推定  $q_u$  は、上層 GL-2 m ~ -5 m の平均値：推定  $q_u = 480$  kPa、中層 GL-5 m ~ -8 m の平均値：推定  $q_u = 130$  kPa となり、目標改良強度  $q_{uck} = 100$  kPa を概ね満足すると評価できる。

(b) 二次効果確認

二次効果確認として改良前後の電気比抵抗  $R$  を比較すると、GL-2.0 m ~ -5.0 m 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ことから、地盤に薬液が浸透されていることが確認できる。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-5.0 m ~ GL-6.0 m では、4 ~ 11  $\Omega \cdot m$  (平均：6  $\Omega \cdot m$ ) の範囲にあり、改良前と比較して電気比抵抗は低下しているものの、GL-2.0 m ~ -5.0 m の改良後の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-6.0 m ~ GL-8.0 m 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-6.0 m ~ -7.0 m に互層に堆積するシルト層、GL-7.0 m ~ -8.0 m に堆積する粘土質砂の影響と考えられ、薬液が浸透せず、割裂する粘土分の多い地層であったと推定される。なお、これらの地層は浸透注入の適用範囲外であり液状化判定の非対象層でもある。

4. 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、同手法を用いて液状化対策工事の調査を実施し適用性確認を行った。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。現在、本手法の実用化に向けて、調査機による測定作業の自動化に取り組んでおり、適用範囲の拡大と更なる調査作業の省力・効率化を図る。

JICMA

《参考文献》

- 1) 村田芳信他 (2008)：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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) (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.

【筆者紹介】



下坂 賢二 (しもさか けんじ)  
戸田建設(株)  
技術研究所 社会基盤構築部  
主管



村田 芳信 (むらた よしのぶ)  
(大) 東海国立大学機構 岐阜大学  
工学部附属インフラマネジメント技術研究センター  
客員教授



大野 康年 (おの の やすとし)  
太洋基礎工業(株)  
施工本部  
技術部長