

# 構造物近傍・直下の薬液注入工法による地盤改良

## 霞ヶ浦用水施設の効用回復工事 超多点注入工法

岡田 和成・木下 圭介

構造物近傍・直下の薬液注入工法による地盤改良においては、確実な浸透注入を行い割裂を生じさせないことが重要であるが、従来の方法では瞬結型薬液の併用により割裂脈が生じ地盤が隆起するなど、均質な改良効果の確保が課題であった。そこで、低吐出量のポンプを用いて32箇所の注入ポイントから同時に注入し、浸透注入を確保しながら急速施工を可能にした技術が、超多点注入工法（以下「本工法」という）(NETIS:KK-120050-A)である。

本報では、本工法の概要を紹介する。また、東日本大震災で被災した霞ヶ浦用水施設の効用回復として本工法を実施し、管路に変位を与えることなく施工を行った事例を報告する。

キーワード：液状化、地盤改良、薬液注入工法、構造物直下、浸透注入、恒久グラウト、活性シリカコロイド

### 1. はじめに

構造物近傍・直下の地盤改良においては、比較的安価である締固め工法や密度増大工法などは周辺環境への影響や敷地の制約上採用が難しく、また高圧噴射攪拌工法は排泥などの建設副産物が発生することから、薬液注入工法が多く使用されてきた。

近年、社会資本整備は維持補修に整備の軸足を移しつつあるが、施設を供用しながら施工が出来る薬液注入工法はこれからの維持管理時代に貢献出来る工法のひとつであると考えられている。また、2011年3月11日に三陸沖を震源にM9.0という東北地方太平洋沖地震が発生し、東北から関東にかけて広範囲で液状化が発生したことから、被災した既設インフラおよび宅地における経済的・効果的な液状化対策工法の技術開発が必要であるとされており、液状化対策としての薬液注入工法に期待が集まっている。

### 2. 本工法の概要

#### (1) 開発の背景

薬液注入工法は、我が国に約50年前に導入されて以来、仮設工法として発展してきたが、1982年に恒久グラウト協会と東洋大学が共同で注入材の長期耐久性の研究<sup>1)</sup>をスタートし、1995年の阪神淡路大震災をきっかけに本設注入に適用され、液状化対策などへ

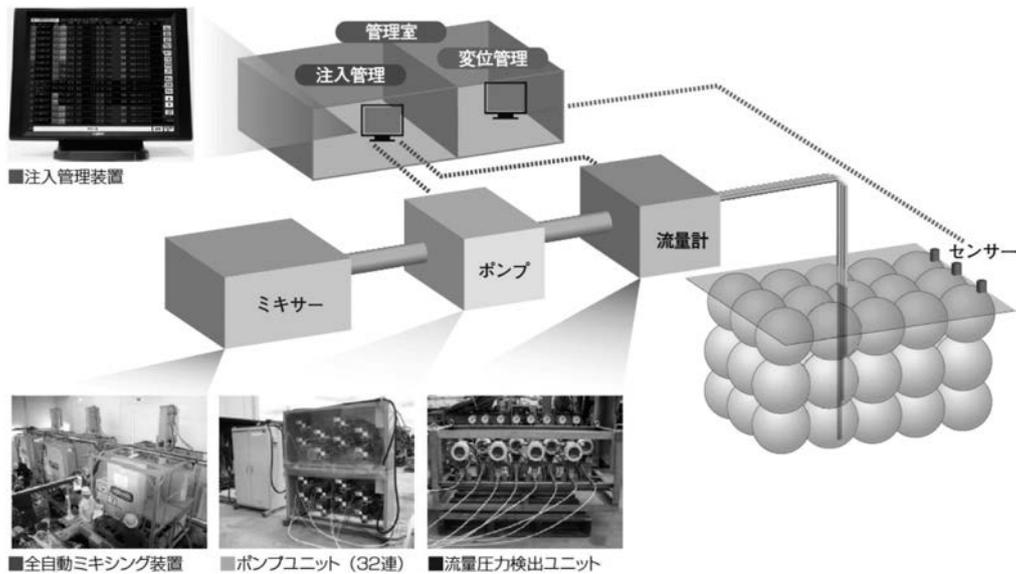
の適用が拡大している<sup>2)</sup>。液状化対策の対象となる砂質地盤の改良原理は、間隙水をゲル化物に置き換えることにより間隙水圧の上昇を抑止するものである。すなわち、確実な浸透注入を行って割裂を生じさせないことが重要であるが、従来の方法では瞬結型薬液の併用により割裂脈が生じるなど、均質な改良効果の確保が課題であった。

#### (2) 工法の概要

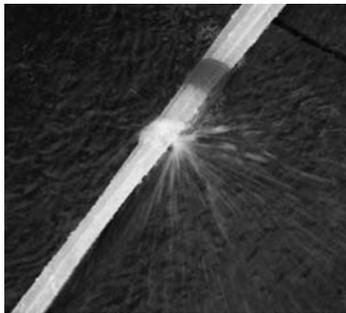
薬液注入における一つの理想は、薬液を均等に土粒子間にしみ込ませる浸透注入にある。少しずつゆっくりと注入することで球体に近い理想的な固結体が得られることは過去の経験からも分かっているが、従来の方法では莫大な時間と手間がかかってしまい、施工効率から理想的ではなかった。この矛盾を解決するため、低吐出量のポンプを用いて32箇所の注入ポイントから同時に注入し、浸透注入を確保しながら急速施工を可能にした技術が、本工法(NETIS:KK-120050-A)である。図-1にシステム概要図を、写真-1に注入ノズルを、写真-2に結束細管(注入管)を示す。

改良型のDCI多点注入工法(NETIS:KT-100019-A)は構造物変位を監視し、計測結果を注入施工管理にリアルタイムに反映させるシステムを採用し、軌道など構造物直下の止水・地盤強化に用いられている。

2013年10月現在の施工実績は120件をかぞえ、注水量は1.7億リットルに達する。本工法およびDCI多



図一 本工法システム概要図



写真一 注入ノズル



写真二 結束細管 (注入管)

点注入工法は、ともに結束細管多点注入工法<sup>3)</sup>に分類される。

### (3) 本工法の適用範囲

本工法は、低吐出で地盤を乱すことなく地盤に浸透注入することを特徴としている。対象地盤の細粒分含有率が大きい場合には、所定の浸透距離や改良強度を得ることが困難となる。このことから本工法の改良対象の地盤は砂質土とし、適用限界は細粒分含有率  $F_c < 40\%$  を基本としている。用途としては各構造物基礎地盤の液状化対策の他に、岸壁・護岸背面砂地盤の吸

出し防止、止水対策、地盤強化・支持力増加等である。

### (4) 本工法の特長

本工法の特長を以下に示す。

- ①浸透注入により地盤の変位を最小限に抑制出来ることから、既設構造物直下の施工が可能である<sup>4)</sup>。
- ②1ポンプ当りの注入速度は低速(1~6 L/min)ながら、多点同時注入(最大192 L/min/ユニット)による急速施工が可能である。
- ③コンパクトにユニット化された専用システムにより、狭隘部での施工性に優れる。
- ④注入圧力・構造物変位に応じて、個々のポンプを自動制御出来る。
- ⑤フレキシブルな注入管を集積し、占有範囲を限定出来る。
- ⑥深度方向のステップ長は地盤条件にあわせて0.5~2.0 mの範囲で任意に設定出来る。

### (5) 施工方法

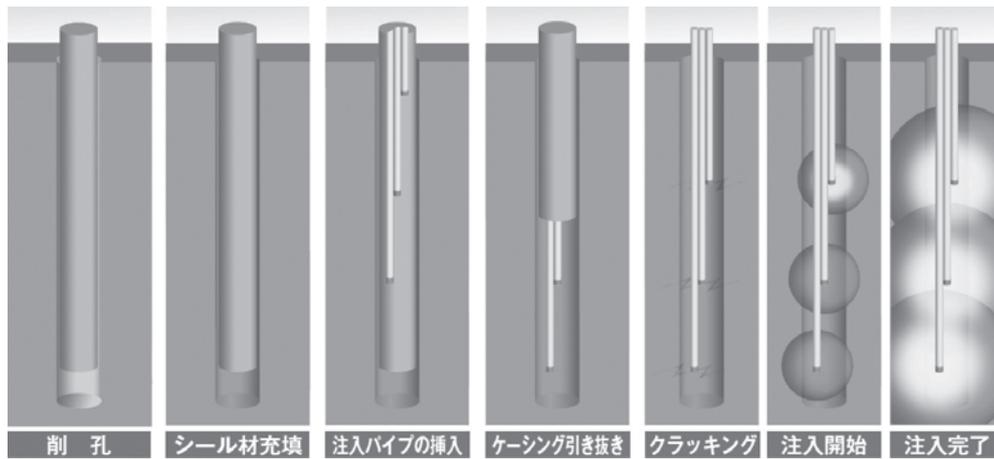
本工法の施工手順は、一般的な二重管ダブルパッカ工法と同様である。深さ方向の注入順序には上昇式、下降式、上昇・下降折衷式<sup>3)</sup>があり、本工法はすべての方式を採用可能である。超多点注入工法の施工手順を図一2に、注入模式図を図一3、4に示す。

#### ① 削孔

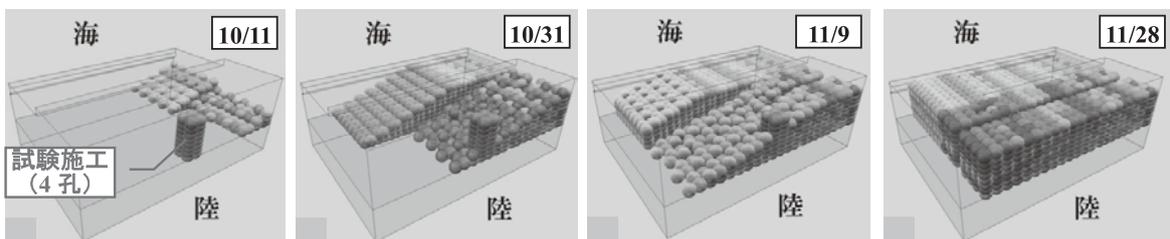
削孔機械は、ロータリーパーカッション式ドリリングマシン(ケーシング外径 $\phi 96$  mm)を標準的に使用する。

#### ② シール材充填

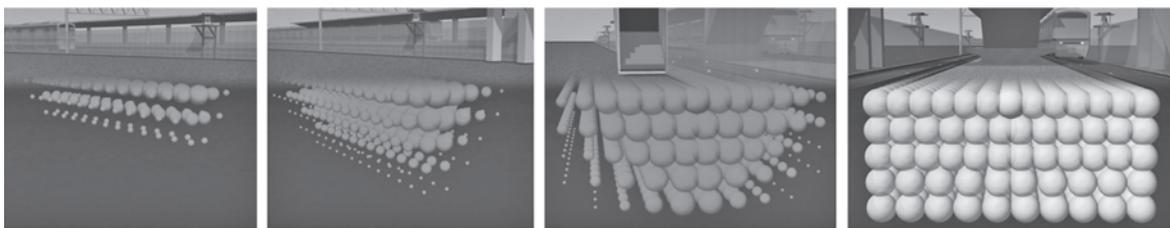
シール材は、速硬性弱アルカリ性懸濁性グラウトで



図一2 施工手順



図一3 上昇式注入模式図



図一4 下降式注入模式図

ある「ジオパックスグラウト」を標準的に使用する。

③注入パイプの挿入

異なる長さで複数本束ねた結束細管（内径6～8mm）をケーシング内の所定の深度に建て込む。

④ケーシング引き抜き

ケーシング引き抜き時にシール材液面が下がる場合は、シール材の補足充填を行う。

⑤クラッキング

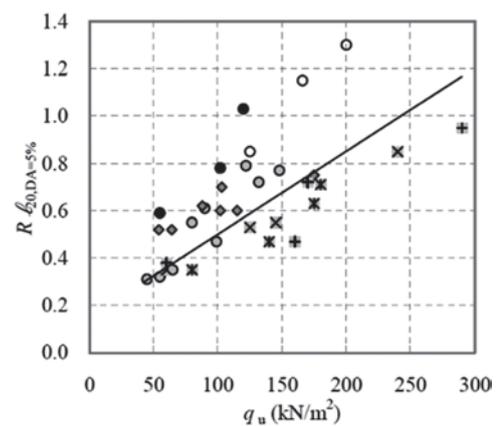
シール材硬化後、シール材にクラックを入れて、地山への注入経路を確保する。

⑥注入

注入工は、事前に限界注入速度試験を実施して注入速度や注入管理値を決定し、効率的な改良効果が期待できる注入順序を設定し行う。

(6) 改良効果

既往の試験結果として、溶液型恒久グラウト材であるパーマロックASF-IIaによる改良体の、一軸圧



図一5 一軸圧縮強度と液状化強度比の関係

縮強度と液状化強度比の関係<sup>5)</sup>を図一5に示す。

一軸圧縮強度が増加するとともに液状化強度比も大きくなる傾向を示している。簡易的に改良強度を決定する場合、この関係を用いて改良強度を設定する。

### 3. 施工事例<sup>6), 7)</sup>

#### (1) 被災の状況

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、茨城県と千葉県にある水資源機構の8施設が大きな被害を受けた(図-6)。中でも霞ヶ浦用水管路近傍の震度は、筑西市の震度6強を始め、かすみがうら市・土浦市・石岡市及び桜川市の深度6弱であった。



図-6 被災した水資源機構の施設(文献<sup>8)</sup>に加筆)

地震の影響により、管路からの漏水、管路地表部の沈下・亀裂、機場周辺の沈下などが生じた。地表面の沈下状況を写真-3に示す。直ちに通水再開等に係る応急復旧および施設からの漏水出水対策等の二次被害の防止に取り組んだ結果、同年3月18日の朝6時には浄水場に向けて水道用水および工業用水の通水を、4月25日には農業用水の通水をそれぞれ再開した。

応急復旧により通水は再開したが、地震動により管路の埋戻し土部分が液状化し、埋戻し土の側方流動やゆるみにより管体支持力が低下したため、機能や効用を被災前の状態に回復させる必要があった。被災状況及び応急復旧状況の詳細は、文献<sup>8), 9)</sup>を参照されたい。



写真-3 埋設管直上の地表面の沈下・亀裂<sup>9)</sup>

#### (2) 地盤概要

水資源機構が実施した震災後の土質調査結果による

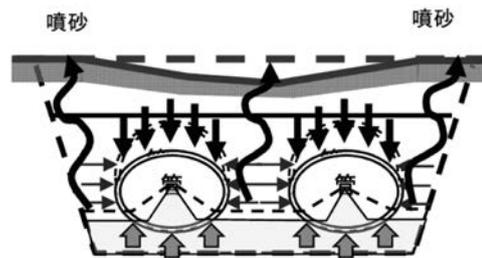


図-7 地震後の模式図(水資源機構検討委員会資料)

と、管路周辺の埋戻し土の受動土圧係数は、新設時の $7 \text{ MN/m}^2$  想定が $2.8 \text{ MN/m}^2$  程度となり、明らかな密度の低下が確認され、管体に生じる応力を分散する機能を有していない結果であった。図-7に地震後の模式図を示す。

対象地盤は、「地盤材料の工学的分類(JGS 0051-2009)」によると、主に細粒分混じり砂(S-F)、細粒分質砂(SF)に分類され、細粒分含有率 $F_c$ は $7.6 \sim 33.7\%$ である。図-8に粒径加積曲線を示す。

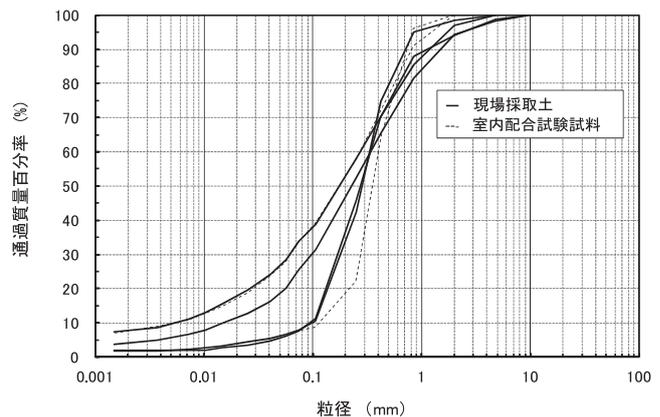
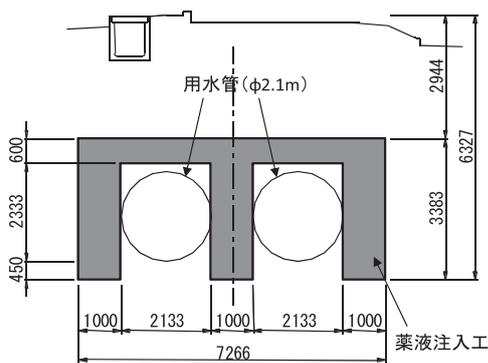


図-8 粒径加積曲線

#### (3) 目標強度と改良断面の決定

調査結果に基づき目標強度と改良断面の検討が行われた。以下に記述する検討結果は、水資源機構の調査報告書(H24.1)及び検討委員会資料からの抜粋である。

土質調査により得られた土質パラメータを用いてFEM解析を実施し、管体変形量の実測値と計算値が合致するように液状化後の埋戻し土の変形係数を補正した。図-9に改良断面図を示す。改良体施工後の解析結果より、管体上部の改良体の有無による影響は軽微であったが、再度液状化が発生した場合の管体の浮き上がりに対する安全性が向上することから、上部改良を行うこととした。目標強度は受動土圧係数 $3.5 \text{ MN/m}^2$ に相当する変形係数 $E_{50} = 5.148 \text{ MN/m}^2$ 以上とした。ただし、地震時の埋戻し土と鋼管の挙動において改良体の強度が高すぎる場合、鋼管と埋戻し土が一体化し慣性質量が増すことにより管体に歪みが集中



図一 9 改良断面図

する懸念があった。このことから、改良体の受動土圧係数は  $3.5 \sim 7.0 \text{ MN/m}^2$  の範囲が望ましく、これに相当する変形係数  $E_{50}$  は  $5.148 \sim 10.296 \text{ MN/m}^2$  であった。

工事発注後において地盤改良工の施工に先立ち、現場採取土を用いた室内配合試験<sup>7)</sup>を実施した。本試験では、目標強度を満足する薬液濃度および地盤の間隙に対する薬液充填率の設定を目的として、拘束圧条件下で浸透注入により作成可能な装置を用いた。本試験に使用した薬液は、活性シリカコロイドを主材とする溶液型恒久グラウト「パーマロック ASF-II $\delta$ 」<sup>10)</sup>である。室内配合強度の目標値は、安全率<sup>2)5)</sup>より  $E_{50} = 10.296 \text{ MN/m}^2$  とした。試験結果から、薬液シリカ濃度 6% のとき変形係数は平均  $14.543 \text{ MN/m}^2$  であり室内配合強度を満足し、薬液充填率は 90.5% が妥当な数値であることが分かった。

(4) 工事概要

本工事は管路周囲の埋戻し土の剛性回復を目的とした地盤改良であり、管路に有害な変位を与えずに小型の機械で施工可能な工法として、溶液型恒久グラウト(活性シリカコロイド)による薬液注入工法を採用した。本報では、筑西工区について報告する。

写真一 4 は管路の新設時の施工状況である。施工



写真一 4 二連管路新設時 (鋼管)

表一 1 施工仕様

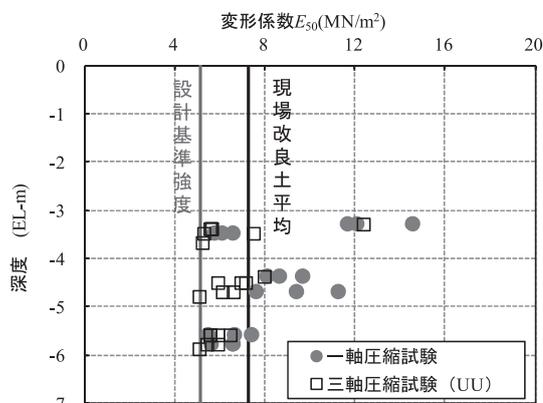
注入工法	本工法
削孔間隔	1.5 m
注入材料	パーマロック ASF-II $\delta$
改良率	100%
注入率 (充填率)	40.5% (90.5%)
目標強度	$E_{50} = 5.148 \text{ MN/m}^2$
シリカ濃度	6%
注入速度	4.0 L/min

箇所は茨城県筑西市に位置し、7号制水弁を起点とした 61号空気弁工方向に延長 269m の区間である。管路は直径 2.1m の鋼管 (水道用塗覆装鋼管) の二連管路であり、地下 3.6 ~ 5.7m に埋設されている。主な工事数量 (揚水機場を含む) は、対象土量  $3,601 \text{ m}^3$  (注入率 40.5%)、削孔本数 949 本 (標準削孔間隔 1.5m) であり、契約工期 2012年 3月 24日 ~ 2013年 1月 31日 (10.3ヵ月) のうち現場作業は 4.5ヵ月である。表一 1 に施工仕様をまとめる。

(5) 実施方法

施工仕様の妥当性の確認を目的として、改良対象範囲において異なる注入率の 2 ケースで試験施工を行い、目標強度を満足しかつ薬液充填率が適切であることを確認したのち本施工を行った。本施工による品質管理として、養生期間を経た後ボーリングによる乱れの少ない試料を採取し、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験 (UU) により変形係数の確認を行った。

図一 10 に深度方向の変形係数の分布を示す。現場改良土の平均変形係数  $E_{50}$  は平均  $7.277 \text{ MN/m}^2$  であり、目標強度を満足しかつ適切な範囲内であった。



図一 10 変形係数の深度分布

(6) 施工上の課題と対応

効用回復工事の施工上の課題として、(A) 近接する農地への影響の軽減のため大規模な掘削工事を伴わ



写真一五 施工状況 (削孔作業)



写真一六 施工状況 (注入作業)

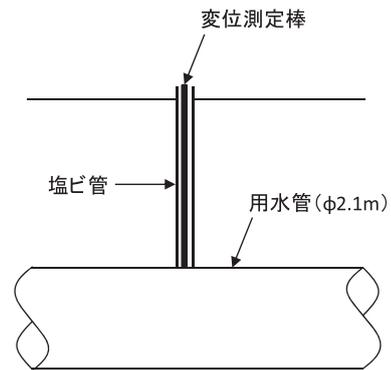
ない工法を採用する必要がある、(B) 管路に有害な変位を与えずに施工を行う必要がある、(C) 地盤改良範囲は農地に近接しており短期間（農閑期）で施工を完了させる必要がある、などが挙げられた。そこで本工事では、(a) 小型・軽量の機械で施工可能な工法として薬液注入工法を選定し、(b) 注入方式は地盤や埋設物への注入負荷の小さい「結束細管多点注入方式<sup>3)</sup>」とし、(c) 1箇所当りの注入速度は最大6 L/minと低速ながら、32箇所を同時注入し急速施工が可能な工法として「本工法」を採用した。写真一五、六に施工状況写真を示す。

薬液注入工の施工時は、地盤改良範囲に近接する水田を地権者から借地し、トレンチを設けて注入薬液の流出に備えた。工事期間中は、用水管の管頂部に変位測定棒を合計14箇所（20 m 毎）設置し、変位測定棒のレベル測量により動態観測を行った。図一11に変位測定棒設置状況を示す。

上記の観測の結果、施工中の管路の累積変位量は±0 mmであり、注入圧力による有害な変位を与えることなく短工期（農閑期）で施工を完了させることが出来た。

#### 4. おわりに

本報では、本工法超多点注入工法の概要を紹介し、東日本大震災で被災した霞ヶ浦用水施設の効用回復と



図一11 変位測定棒設置状況

して、本工法を実施した事例を報告した。本工法を用いることにより、管路に有害な変位を与えることなく施工を行うことが出来、構造物近傍の地盤改良に適用性が高いことが確認出来た。

#### 謝辞

本報の執筆にあたり、水資源機構霞ヶ浦用水管理所の皆様にご多大なるご協力を頂きました。付記して謝意を表します。

JCMIA

#### 《参考文献》

- 1) 米倉・島田：薬液注入における長期耐久性の研究、土質工学会、土と基礎、1992.12
- 2) 岡田ら：供用中岸壁の大規模地盤改良工事における各種原位置試験による注入固化地盤の評価例、日本材料学会 第10回地盤改良シンポジウム論文集、pp47-54、2012.10
- 3) 鉄道総合技術研究所：注入の設計施工マニュアル、2011.10
- 4) 地盤注入開発機構 恒久グラウト・本設注入協会：Project Report 歴史的建造物の液状化対策工事～旧神戸生糸検査所～、2012.3
- 5) 地盤注入開発機構：超多点注入工法技術マニュアル、2012.2
- 6) 岡田ら：東日本大震災で被災した霞ヶ浦用水施設の効用回復工事について（その1）、土木学会第68回年次学術講演会、2013.9
- 7) 佐々木ら：東日本大震災で被災した霞ヶ浦用水施設の効用回復工事について（その2）、土木学会第68回年次学術講演会、2013.9
- 8) 水資源機構：水とともに2011年7月号 No.93、pp11-14、2011.7
- 9) 水資源機構：水とともに2011年5月号 No.91、pp21-26、2011.5
- 10) 地盤注入開発機構：パーマロック ASF- II δ 技術資料、2012.2

#### 【筆者紹介】



岡田 和成 (おかだ かずなり)  
日本基礎技術(株)  
技術本部 技術部 地盤改良グループ  
課長



木下 圭介 (きのした けいすけ)  
日本基礎技術(株)  
東北支店 工事部 工事課  
工事長