

品質向上と計測管理の省力化を実現する地盤改良工 管理技術の開発

地盤改良施工管理システム「OGIMS™」

田中博之・三浦国春・稲川雄宣

地盤改良工事では、従来、事前ボーリング調査から得られる情報に基づき地盤性状を推定し、改良仕様を決定していた。しかし、工事着手後に推定した地盤性状と実際が異なっていた場合は、改良不足や隆起、亀裂などの地盤変状が発生する可能性があり、実際の地盤性状の把握とそれに応じた施工管理方法が課題であった。これらの課題を解決するために、削孔検層技術による改良範囲の地盤推定、3次元モデルを用いた地盤情報の可視化、及び施工状況を常時監視することで改良地盤の品質向上や計測管理の省力化が図れるシステムを開発した。本稿では、システム概要及び開発したシステムの有効性を検証するために実施した実験結果について報告する。

キーワード：地盤改良工，削孔検層，地盤推定，ICT，計測管理

1. はじめに

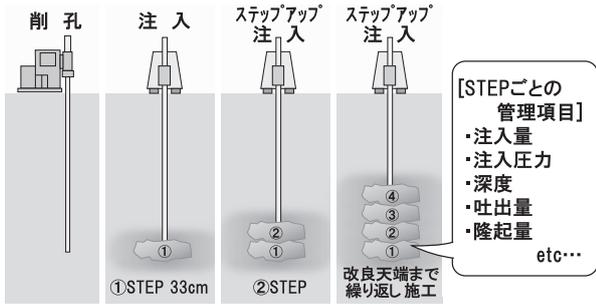
地盤改良工事は、主に軟弱地盤対策として実施される。また、岩砕や建設残土、浚渫土砂など不均一な材料で埋め立てられた地盤上に建設された空港・港湾施設などの地震時の耐震性の向上や液状化対策としても実施され、静的圧入締固め工法（以下 CPG 工法）や高圧噴射攪拌工法、薬液注入工法などの工法が広く用いられている。従来は、事前調査ボーリングから得られる地盤性状、強度特性、標準貫入試験結果などから改良仕様（改良間隔、改良径、注入率等）を決定している。しかし、設計時に想定した地盤と実際の地盤が異なると、所定の改良径ができない、逆に所定の改良径以上の改良となる等の事象が生じ、改良不足や地盤隆起といった問題が生じる。これらの課題を解決するため、削孔検層技術による改良範囲の地盤推定、3次元モデルを用いた地盤情報の可視化、施工状況を常時監視することで改良地盤の品質向上や計測管理の省力化が図れる地盤改良施工管理システム「OGIMS（オージムス）」(Obayashi Ground Improvement Management System) を開発した。本技術を CPG 工法等の地盤改良工法に用いることで、地盤改良材の注入前に改良対象地盤の土質が推定できる。これにより、細粒分を含む中間土などの隆起が発生しやすい土質に対しては、注入速度や改良箇所の打設順序を変更することで、改良不足や地盤隆起の発生を抑制する施工が可能となり、高品質かつ効率的な地盤改良が実施できる。本稿

では、技術の適用対象工法の一つである CPG 工法の概要、開発したシステムを構成する技術の概要と地盤推定技術の開発経緯、および有効性を検証するために実施した検証実験結果について報告する。

2. CPG 工法の概要

CPG 工法とは、極めて流動性の低い注入材を地盤中に静的に圧入して固化体を連続的に造成し、固化体間の締固め効果により液状化を防止する工法である。CPG 工法が他の注入工法と最も異なる点は、注入材が地盤に浸透や脈状割裂、攪拌混合せずに、注入点付近で地盤を押し上げて固化体を形成するところにある。所定の改良効果を確保するために、設計注入量を管理する他、圧入工法の特性から地盤隆起を生じ易いため、隆起量やその要因となる注入圧力の上昇に留意しながら施工する必要がある。

CPG 工法は、図-1 に示す施工手順の通り、所定深度まで削孔終了後に注入材を注入し、固結体を造成する。施工 STEP ごとに注入量、最大注入圧力、隆起量などの項目を記録・管理する必要がある。改良層厚が厚く、かつ広範囲に渡る工事では膨大な管理情報量となり、施工管理や品質管理における記録整理が煩雑となる。さらに、同時に施工する注入の影響範囲が重なると、地盤のせん断抵抗が働かなくなり、上方に向かって押し上げようとする力が加算される。特に土被り 5 m 以浅では注入圧による鉛直変位（地盤隆起）



図一 1 施工手順及び管理項目

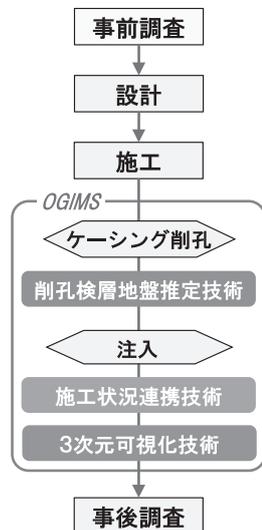
が顕著になるため、近接施工時の影響半径を考慮し、同日に施工する注入孔を離れた順序の分散施工を行う。また、改良後は、注入材の圧入により周辺の間隙水圧が上昇して地盤隆起が生じやすい状態にあることから、間隙水圧が消散する期間（3～5日程度）を空けて施工する必要がある。このように、施工箇所を不連続に移動して施工するため、工程管理や進捗管理が非常に複雑となる上、確実な改良効果を得るために改良箇所の地盤性状や過去の施工情報を把握しながら次段階の施工検討を行うことが重要となる。

3. システムを構成する技術の概要

本技術は、図一 2 に示すフローで適用することができる。各技術の概要を以下に示す。

(1) 削孔検層地盤推定技術

削孔機に取り付けた各種センサーを用いて、ケーシング削孔時に回転トルク値と深度情報を取得し、分析することで改良前に施工範囲の地盤情報を把握する技術である。本技術は、既往の調査ボーリングのデータ

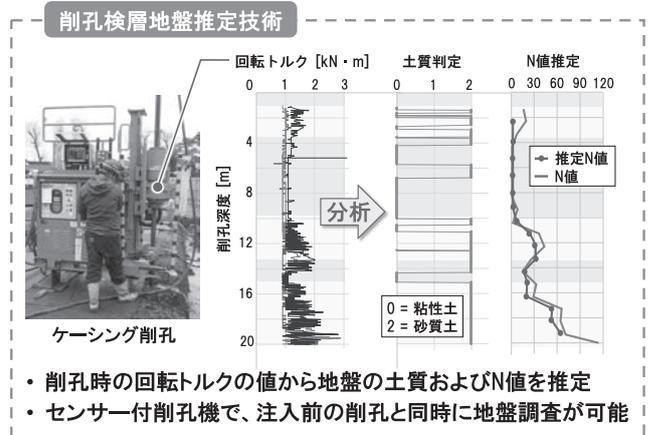


図一 2 OGIMS の適用フロー図

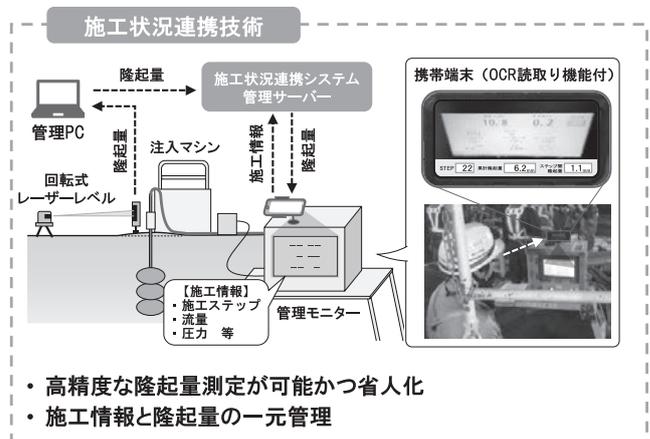
およびその孔に最も近い施工孔を基準削孔としてキャリブレーションを行う。基準削孔で得られた回転トルクデータから土質判定に必要な各データの閾値および、N 値の推定式を求める。求めた各データの閾値と推定式を他の孔に適用し、地盤推定を行い、既往ボーリング調査を補完する（図一 3）。

(2) 施工状況連携技術

従来、地表面の隆起量はレベル測量により取得しており、注入圧力などの施工情報とは連携されていなかった。このため、隆起量は注入ステップなどの施工進捗状況とは連動して管理されておらず、各注入機の進捗状況を計測管理の担当者が巡回しながら確認にあたり、別途レベル測量により得られた隆起量を突き合わせて管理していた。しかしながら、各注入機の進捗は一律ではなく、1つの施工エリアに複数台同時に作業していることから、限られた人員で正確な進捗状況を把握することに多大の労力を要した。この課題を解決する目的で、リアルタイム計測で得られる隆起量と注入情報を集約・管理する技術を開発した。図一 4 に



図一 3 削孔検層地盤推定技術の概要



図一 4 施工状況連携技術の概要

示すように、OCR 技術（光学的文字認識技術）を搭載した携帯端末で注入装置の注入管理モニター画面に表示される施工管理情報を撮影して数値情報を自動で読み取り、取得した施工情報と回転式レーザーレベルを用いて 0.1 mm 単位で自動計測した隆起量を管理サーバー上で集約・管理する技術である。隆起量と施工情報を連携することで、施工ステップ毎の隆起量を一元管理でき、隆起量、注入圧力などの警戒値で自動発報（メールで通知等）も行えるシステムとした。

(3) 3次元可視化技術

地盤改良工における施工情報（施工日、注入圧力など）や隆起量、削孔検層で推定した地盤情報を3次元地盤改良モデルで一元管理して可視化する技術（図-5「鉛直削孔」）である。また、隆起量を3次元可視化するシステム（図-5「隆起量の可視化」）も構築した。注入情報や隆起量を可視化し、対象地盤に応じた注入方法（注入速度の低減等）を判断することで、改良効果を確保できる。

4. 削孔機を利用した地盤推定技術の開発

3章で示した削孔検層地盤推定技術は、センサーを取り付けた削孔機を用いて、注入用の削孔と同時に地盤情報を収集し地盤性状の推定を行う。そのため、追加ボーリング調査を行わずに、注入作業前に施工箇所での地盤性状が推定できる。本章では、本技術を開発するにあたり実施した検証および土質判定方法やN値推定式の構築方法について示す。

(1) 地盤推定の可能性確認

ケーシング削孔時に、削孔機から得られるスピンドルの回転トルクや削孔速度、フィード圧などの取得

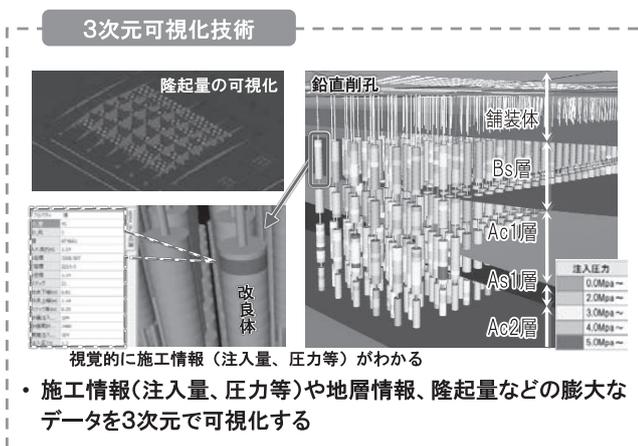


図-5 3次元可視化技術の概要

データが、どのように変化するか確認し、得られた結果から地盤の推定が可能であるか検討するために、試験施工を実施した。使用機械の仕様等を図-6、本試験のケースを表-1、結果を図-7に示す。これより、削孔条件を削孔速度：2.0 m/min、スピンドル回転数：50 rpm に設定することで、削孔地盤に応じて回転トルクに特徴的な変化を確認することができた。また、削孔速度を一定に保つことで、N 値の変化と回転トルクの変化の間に相関性が得られた。これらにより、削孔用ボーリングマシンでのケーシング削孔時において、地盤推定の可能性が確認できた。

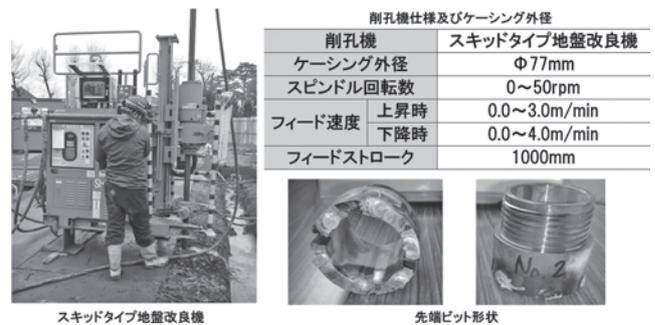


図-6 使用資機材

表-1 試験ケース

CASE	スピンドル回転数 (rpm)	削孔速度 (m/min)
1	50 (高回転数)	1.0
2		2.0
3		4.0

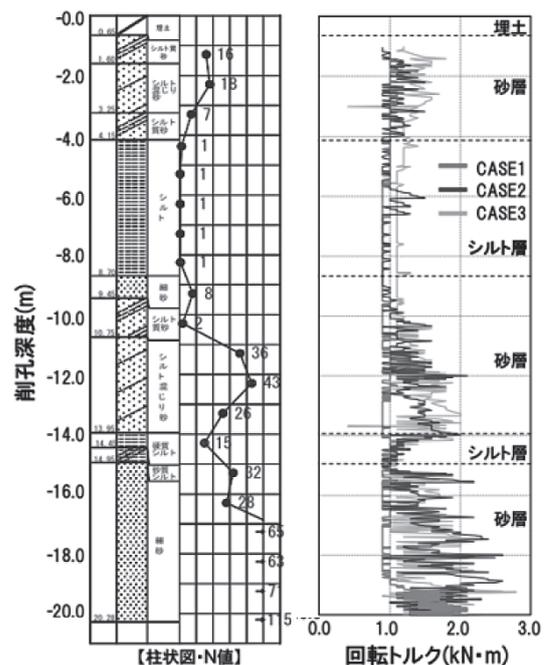


図-7 試験結果

(2) 土質判定方法・N 値推定式の検討

土質判定方法およびN 値推定式を検討するにあたり、既往の調査ボーリングのデータおよびその孔に最も近い施工孔を基準削孔としてキャリブレーションに用いることとした(図-8)。また、本技術に用いたセンサーは1秒ごとに連続してデータを取得しており、段取り替えなどの削孔以外のデータが含まれていたため、取得した回転トルク値の不要データの除去を行った。図-9に示すように、不要データを除去することでノイズがなくなり回転トルクの変化傾向の把握が容易となった。この回転トルクの変化傾向から以下に着目し、土質判定を行うこととした(図-10)。

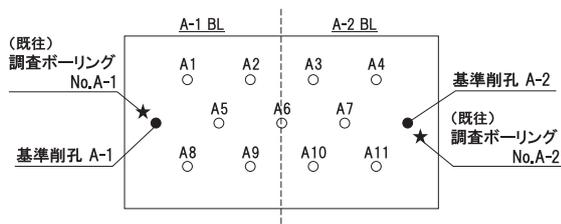


図-8 施工孔の例

①回転トルクデータの平均値
判定対象土層の平均的な回転トルク値として土質判定の参考値とするため、判定対象深度の前後区間データから平均的な回転トルク値を求めた。

②回転トルクデータの分散値

データのばらつきの度合いから土層の変化や均質性を評価するため、判定対象深度の前後区間のデータに対して、ばらつきを示す分散を求めた。

③回転トルクデータの補正

データのばらつきの度合いから土層の変化や均質性を評価するため、判定対象深度の前後区間のデータに対して、ばらつきを示す分散を求めた。

回転トルクデータの平均および分散と、本技術を施工する孔に最も近い既往の調査ボーリングと比較検証してそれぞれ閾値を設定し、対象土層が粘性土なのか砂質土なのかを判定することとした。また、N 値の推定式を求めるために、まず回転トルク値を補正した。補正の内容は、削孔速度による補正(図-11)と変化量の補正である。削孔速度による補正は、削孔機側で設定した削孔速度に対して、実際の削孔速度の速度変化比に応じて補正した。変化量の補正は、N 値が1

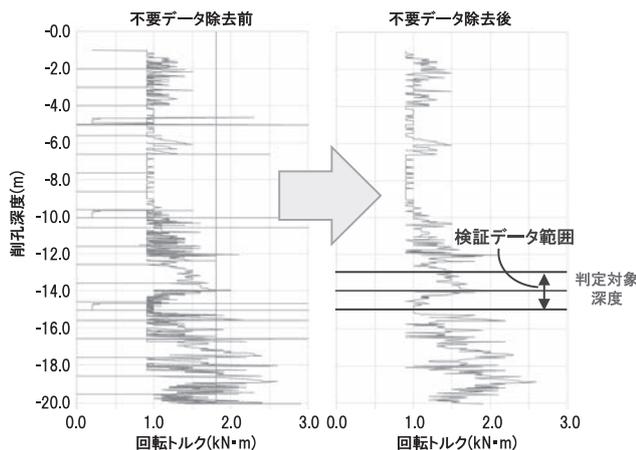


図-9 不要データ除去

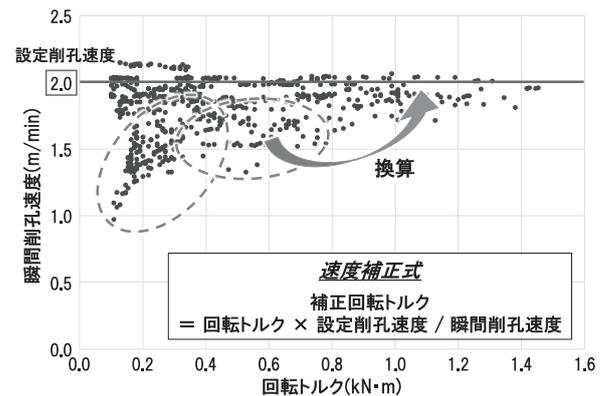


図-11 削孔速度の補正

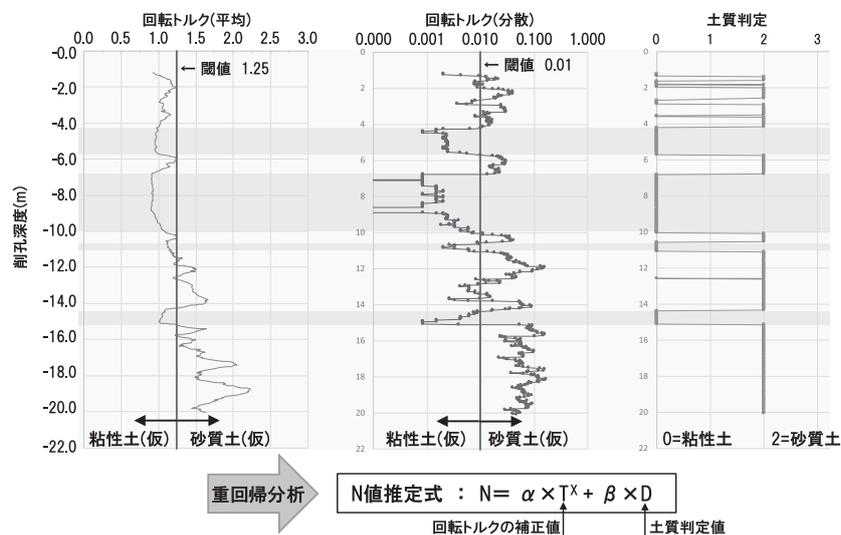


図-10 土質判定・N 値推定式

～100程度の幅で変化するのに対し、回転トルク値は1～10程度の幅でしか変化しないため、変化比が1:1となるように補正した。得られた土質判定値（仮に粘性土=0、砂質土=2）および補正後の回転トルク値を説明変数、既往ボーリングにおける実測N値を目的変数として重回帰分析により推定式を求め、改良箇所での土質判定及び推定N値を算出可能な地盤推定を行うシステムを構築した。

5. 実現場での検証実験

削孔検層地盤推定技術および施工状況連携技術の有効性を検証するため、某地盤改良工事において検証実験を実施した。本工事では液状化対策としてCPG工法が採用されていた。本実験では、削孔データの取得や地盤推定方法の検証、施工状況連携技術の連携状況の確認、及び施工情報や隆起量と推定した地盤の関連性の確認を実施した。実験を実施した削孔位置平面図を図-12に示す。改良箇所にもっとも近い既往の調査ボーリング孔として『01-BB-3』、N値推定式を求めるためのキャリブレーション用の基準削孔として『C14-11』を用いた。キャリブレーションを行い、実測N値に対して重相関係数0.955、重決定係数0.912と高い相関（図-13）が得られたN値推定式を用いて、その

他の調査箇所の土質性状を推定した。また、図-14に示すように施工状況連携技術の検証結果は、リアルタイムに注入情報や隆起量のデータを集約でき、設定した警戒値で自動発報も確認できた。土質判定の結果は、既往の調査ボーリングの結果と概ね一致した。N値の推定結果は、推定したN値が実測N値と比較して大きくなる傾向を有していることがわかった。これは実測N値を取得した時期と違い、地盤改良工により実験実施孔周辺での注入が進んでいたことが一因と考えられる。結果の一例（孔番：C18-10）を図-15に示す。得られた結果より、4.0m以浅の浅層部において隆起量が増大する傾向が示された。

6. おわりに

検証実験において、削孔検層地盤推定技術を用いて土質の判定およびN値を推定することができた。これにより、本技術の地盤推定結果をもとに注入前に注入速度を計画し、隆起量の抑制を図ることが可能であると考えられる。さらに、施工状況連携技術を用いる

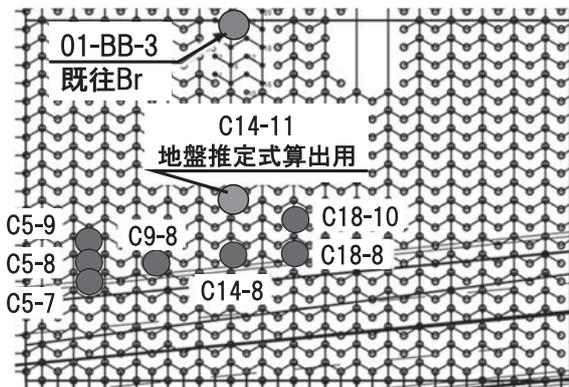


図-12 削孔位置

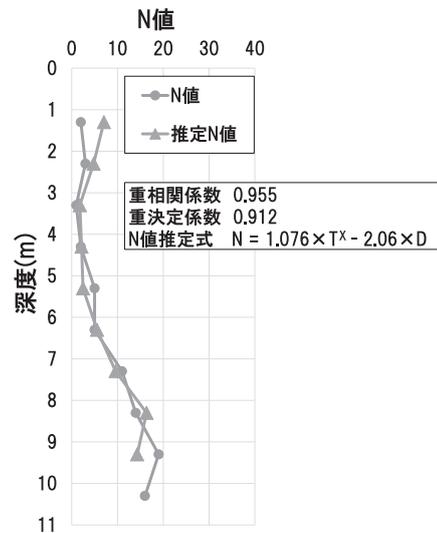
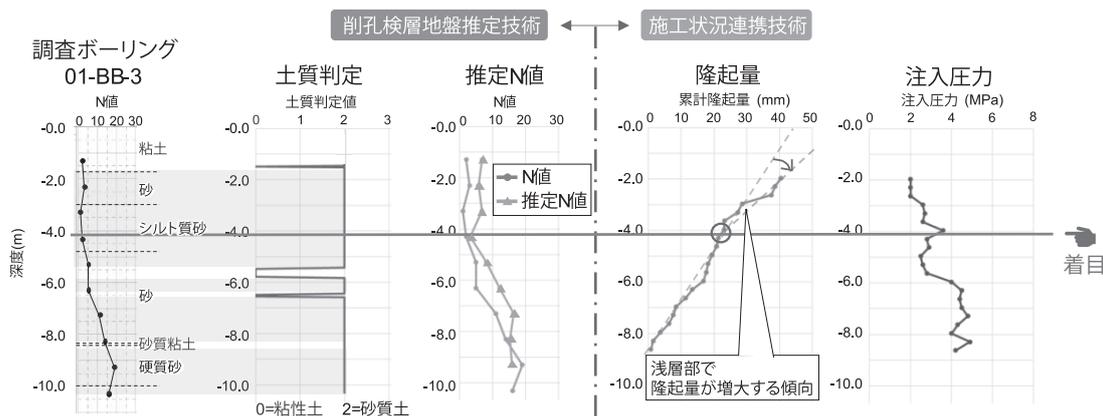


図-13 キャリブレーション結果



図-14 施工状況連携技術 検証状況



図一 15 検証実験結果

ことで、施工中は各種施工情報と隆起量を一元管理し、隆起量や注入圧力の上昇をリアルタイムに監視できる。そのため、隆起や注入圧力の増大傾向に応じた注入速度の調整などが可能となり、高品質かつ効率的に地盤改良を実施できると考えている。今後は、空港・港湾施設等の重要構造物の液状化対策や耐震性向上を目的とする地盤改良工事に本システムを適用することで、改良地盤の品質向上、計測管理の省力化を実現していく予定である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 田中他：地盤改良施工管理システム「OGIMSTM」の検証実験，第58回地盤工学研究発表会，2023年7月（投稿中）
- 2) 三浦他：空港滑走路下における液状化対策工事の舗装隆起管理事例，第21回空港技術報告会，2020年12月

【筆者紹介】



田中 博之（たなか ひろゆき）
 (株)大林組
 土木本部 生産技術本部 技術第二部
 主任



三浦 国春（みうら くにはる）
 (株)大林組
 土木本部 生産技術本部 技術第二部
 担当部長



稲川 雄宣（いながわ ゆうせん）
 (株)大林組
 技術本部 技術研究所 地盤技術研究部
 首席技師