

地盤改良に伴う地表面変状を抑制する地盤改良管理システムの現場適用

(株)大林組 正会員 ○田中 博之
正会員 稲川 雄宣
正会員 三浦 国春

1. はじめに

液状化防止対策として実施される静的圧入締固め工法（以下、CPG工法 図-1）や薬液注入工法などの地中不可視部に改良体を造成する地盤改良工事において、確実な改良効果を得るためには、現地盤に適した改良仕様や施工方法で確実な改良体を造成する必要がある。

従来、地盤改良工事では、施工箇所近傍の事前調査ボーリング等の結果から現地盤を推定し、それに基づく改良仕様で施工している。現

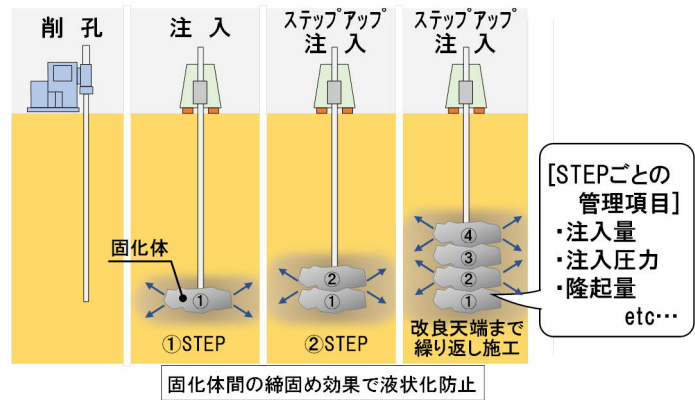


図-1 CPG工法

地盤が想定と異なる場合には地盤の改良不足や地盤の隆起、地表面の亀裂が発生する可能性があった。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、施工状況の常時監視、3次元モデルを用いた地盤情報等を可視化することで改良に伴う地盤の隆起抑制や計測管理の省人化が図れる地盤改良施工管理システムを開発した。本システムを用いることで、地盤改良材の注入前に改良対象地盤の土質を推定し、地盤の隆起が発生しやすい土質に対しては、リアルタイムに隆起や注入状況を確認しながら、注入速度の低減や改良箇所の打設順序を変更するなど、隆起の発生を抑制する施工が可能となり、効率的な地盤改良が実施できる。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、および現場適用について報告する。

2. システムを構成する技術の概要

本システムは図-2に示す削孔検層地盤推定技術、施工状況連携技術、3次元可視化技術の3つの技術からなる。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、分析することで注入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、①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を行い、②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、③求めた各データの閾値と推定式を他の孔に適用し、地盤推定を行うことで、既往ボーリング調査による地盤情報を補完する。

(2) 施工状況連携技術

従来、地表面の注入ステップごとおよび累計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、各注入機の進捗は一樣ではなく、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、注入時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-2の施工状況連携技術に示すように、OCR技術（光学的文字認識技術）を搭載した携帯端末で注入機の注入管理

キーワード 地盤改良工, 静的圧入締固め工法, 削孔検層, 地盤推定, BIM/CIM, 生産性向上

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟 (株)大林組 土木本部 TEL050-3829-1244

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（施工日や注入量，注入圧力など）と回転式レーザーレベルを用いて 0.1mm 単位で自動計測した隆起量をクラウドサーバ上で集約・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，施工ステップごとの隆起量を一元管理でき，隆起量や注入圧力などの警戒値で自動発報（警報音やメール等で通知）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や隆起量を3次元モデルで一元管理して可視化する技術（図-2の3次元可視化技術）である。さらに，3点以上の既往ボーリングデータをもとに地層構成図を作成できる3次元地盤構造推定システムと合わせて表示することもできる。施工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。

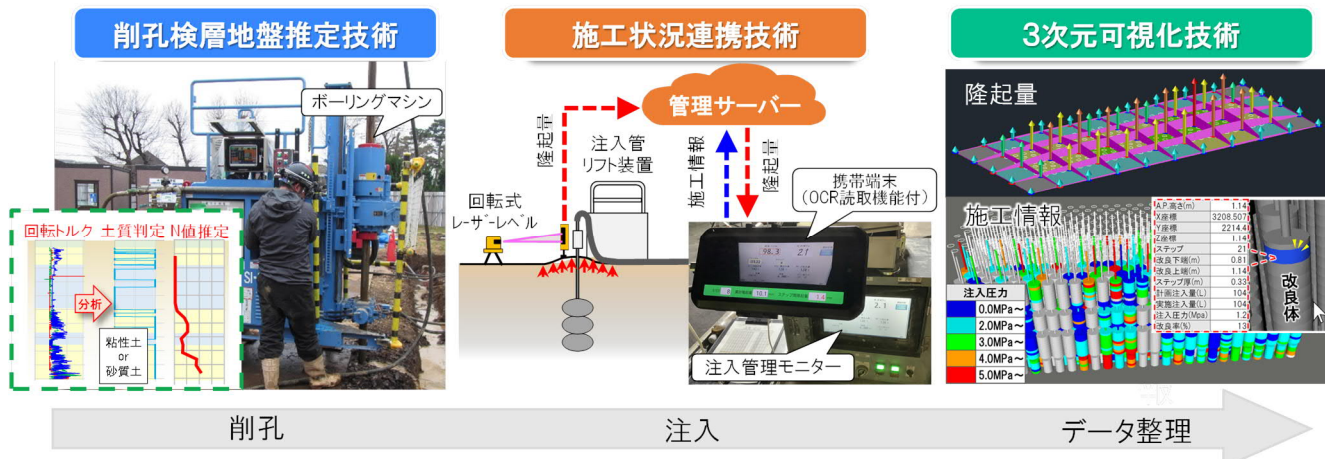


図-2 地盤改良管理システム

3. 削孔機を利用した地盤推定技術の開発

本章では2章で示した削孔検層地盤推定技術の開発経緯を示す。筆者らは，注入作業前に，より詳細な地盤性状を把握するための技術開発を進めてきた。既往の研究²⁾³⁾にて，削孔する地盤に応じて回転トルクに特徴的な変化があること，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あることを確認した。これらをもとに，土質判定方法やN値推定式の検討を行った。検討するにあたり，既往の調査ボーリング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-3）。また，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-4）。

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。

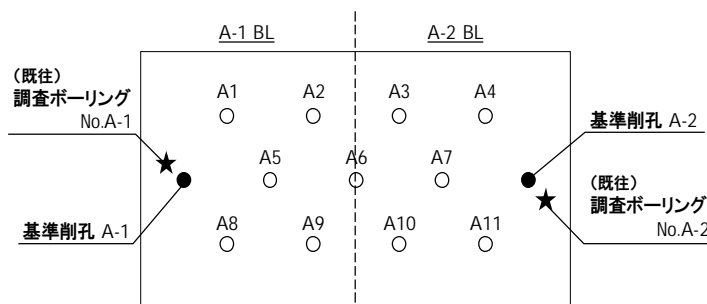


図-3 施工孔の例

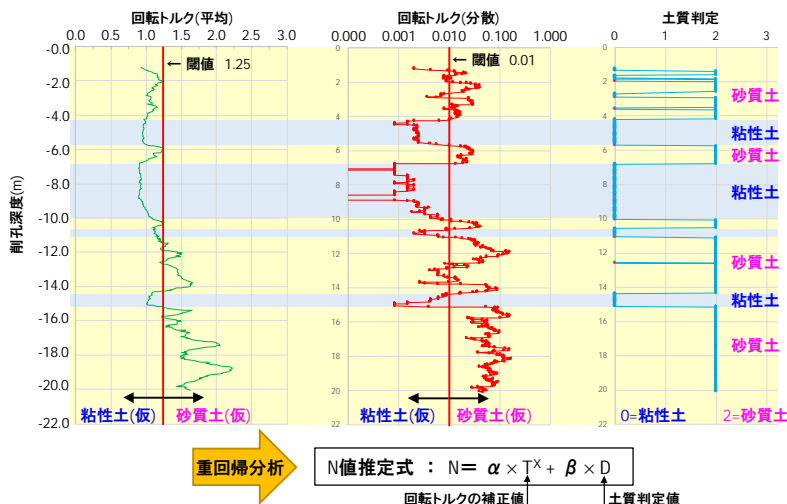


図-4 土質判定・N値推定

②回転トルクデータの分散値

データのばらつきや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。得られた土質判定値（仮に粘性土=0、砂質土=2）および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、改良箇所土質判定および推定 N 値を算出可能な地盤推定を行うシステムを構築した。その後、某地盤改良工事において実証試験⁴⁾を実施し、構築したシステムの有効性が確認できた。この結果を受けて、実際の現場に適用した。次章にその内容を示す。

4. 現場適用

(1)実施内容と施工へのフィードバック

本システムを現場に適用するに際して、まず初めに 3 次元地盤構造推定システムを用いて既往ボーリングデータにもとづく地層構成図(図-5)を作成した。その後、削孔検層地盤推定技術を用いて実際の地盤性状の推定を行った。実施した位置を図-6に示す。改良箇所最も近い既往ボーリング孔として「A2-6」、キャリブレーション用の基準削孔として「C1-7」を用いた。キャリブレーションを行い、実測 N 値に対して高い相関が得られた N 値推定式を算出し、その N 値推定式を用いてその他の調査箇所の地盤性状を推定した。得られた結果をもとに地層構成を 3 次元モデル化し、前述した 3 次元地盤構造推定システムにて作成した地層構成図と削孔検層地盤推定技術で求めた図を統合し検証を行った。

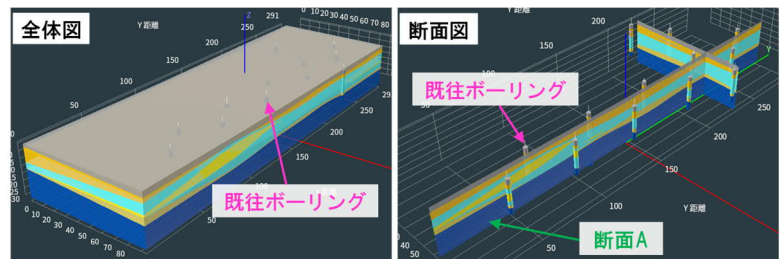


図-5 3次元地層構成図

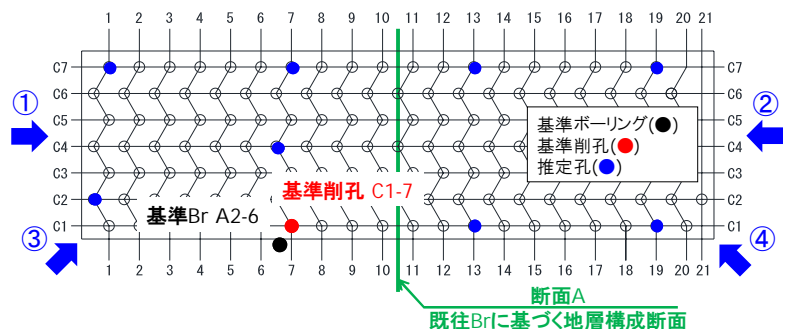


図-6 実施平面図

図-7に示すようにこれらの地層構成図は、概ね一致していたが、一部粘性土が優勢なエリアが存在している。この理由として、3次元地盤構造推定システムで推定した地盤は、図-6のエリアを含む広範囲を限られた既往ボーリングで地盤を推定し、削孔検層で推定した地盤はより狭いエリアを9か所の削孔データで推定している影響が大きいと

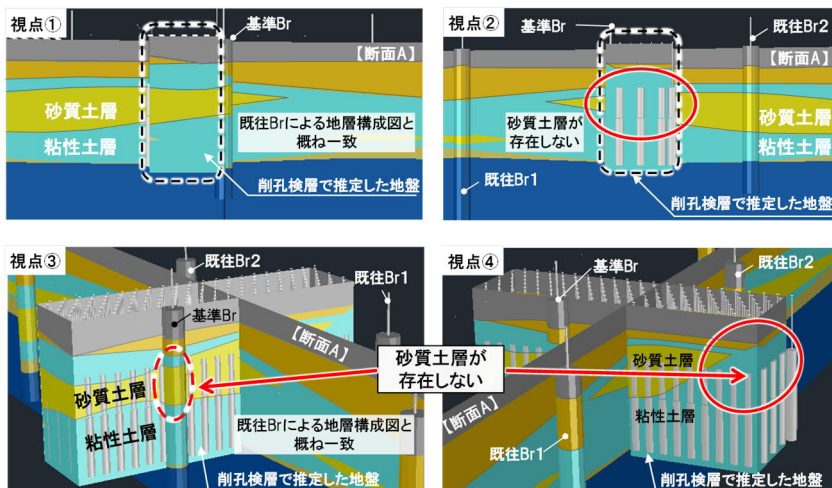


図-7 既往ボーリングと推定結果の比較

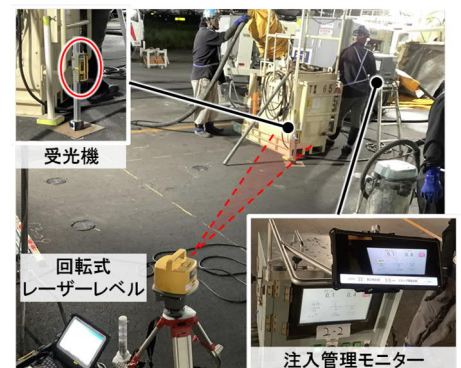


図-8 施工状況連携状況

考えられる。この削孔検層による地層構成を念頭に置き、**図-8** に示すように施工状況連携技術を用いて地表面の隆起量を計測・監視し、事前に設定した隆起量等の警戒管理値をもとに、必要に応じて注入速度を標準速度の1/3~1/2程度に低減させるなどの対策を実施することとした。

(2) 施工後の検証

施工時の隆起量について、注入孔1本当たりの累計隆起量を**図-9**に、注入ステップごとの隆起量の一例を**図-10**に示す。これらから、上載荷重が小さくなる浅層部、あるいは既に施工済みの改良体に挟まれて後日注入した箇所（C3, C6列の中央部）が隆起しやすい傾向にあることが確認できる。また、**図-10**における深度-13m付近の隆起については、本エリアが作業時間の制限から1孔の注入作業を2日に分けており、2日目の注入開始深度付近で前日に硬化した改良体によって、モルタルの押し出し方向が限定されたためと推察される。また、削孔検層によって推定した結果が既往ボーリングから推定した地層構成図と一致しなかった粘性土が優勢なエリアについては、本来間隙水圧の消散が期待できず、隆起が懸念されたが、注入速度の低減対策を行ったことにより隆起量が砂質土層と同等あるいはそれ以下に抑制することができた。

5. おわりに

本システムの現場適用において、有効性を確認できた。削孔検層地盤推定技術は、地盤推定結果をもとに注入前に注入速度や注入順序を計画し、隆起の抑制を図ることが可能であると考えられる。施工状況連携技術では、施工中に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することで、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即座に可能となり、効率的に地盤改良できると考えている。さらに、従来方法と比較して計測人員を1/3に削減できることを確認した。3次元可視化技術は、得られたデータを可視化することで、データ管理の合理化や施工の速やかな状況判断、地盤改良結果のエビデンスに繋がるものとする。今後も、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し、改良地盤の品質向上、計測管理の省人化を実現していく。

参考文献

- 1) 児島他：3次元地盤構造推定システム「ちかなび®」, 大林組技術研究所報, No. 86, 2022.
- 2) 盛田他：地盤改良工削孔機を利用した地盤推定の基礎検討(その1), 土木学会第75回年次学術講演会, VI-1000, 2020.
- 3) 重野他：地盤改良工削孔機を利用した地盤推定の基礎検討(その2), 土木学会第75回年次学術講演会, VI-1001, 2020.
- 4) 田中他：地盤改良合理化施工管理システムの開発, 土木学会第77回年次学術講演会, VI-195, 2022.

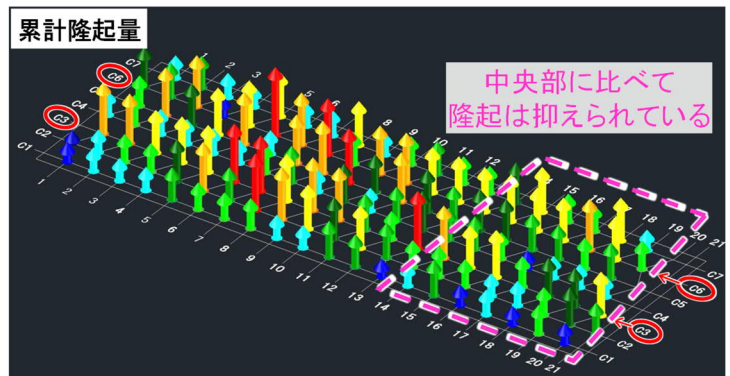


図-9 累計隆起量

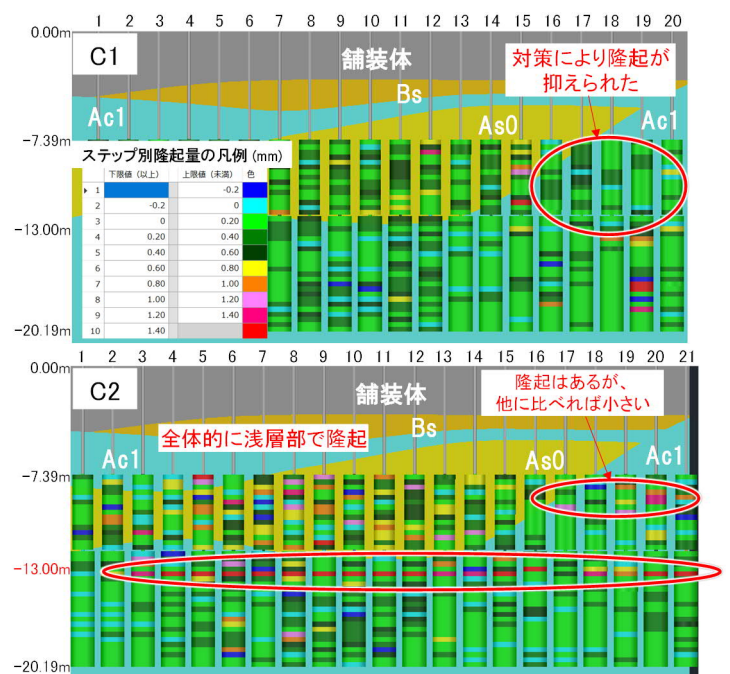


図-10 ステップ別隆起量