

## || 投稿論文 ||

# ICT の活用による地盤改良工事の施工管理技術 と施工機械のモータ電流値に基づく N 値の推定

稲積 真哉<sup>1</sup>・足立 有史<sup>2</sup>・木付 拓磨<sup>3</sup>・土屋 潤一<sup>4</sup>・舟橋 宗毅<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 芝浦工業大学准教授 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

E-mail: inazumi@shibaura-it.ac.jp

<sup>2</sup> 株式会社安藤・間 (〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20)

E-mail: adachi.yuji@ad-hzm.co.jp

<sup>3</sup> 株式会社安藤・間 (〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20)

E-mail: kizuki.takuma@ad-hzm.co.jp

<sup>4</sup> 計測ネットサービス株式会社 (〒114-0013 東京都北区東田端 2-1-3)

E-mail: tsuchiya@keisokunet.com

<sup>5</sup> 明石工業高等専門学校学生 専攻科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3)

E-mail: ac1713@s.akashi.ac.jp

地盤改良工事では地中に改良体を造成するため、施工状況や出来形を目視により確認・評価することが困難である。そこで、地盤改良工事の施工管理における改良体の施工情報をリアルタイムに記録、見える化し、評価するための施工情報可視化システムを開発している。また、従来の限られた地盤改良工事の事前調査では、地盤状況に応じた改良体の設計値に対する実際の施工仕様の妥当性やその見直しを迅速に判断することは困難であった。しかし、上記のシステム内に、事前に実施する標準貫入試験の結果と支持層や地盤性状を評価するために計測する施工機械が負荷として受けるアースオーガーのモータによる電流値との相関関係に基づいた N 値の推定式を有することで、限られた地盤調査から設定した施工仕様の妥当性の確認や追加対策の必要性の判断が容易となる。本研究では施工情報可視化システムの概要と事前調査としての標準貫入試験結果と施工管理で得られる電流値から N 値を推定する手法を検討する。

キーワード: *Ground Improvement Works, Information and Communication Technology, Visualization, Kinetic Measurement, Estimated N-value*

## 1. はじめに

現在、土木分野では基礎工、ダム工ならびにトンネル工等において、施工状況をリアルタイムにモニタリングして施工する技術が適用されている。また、土工や舗装工においても設計データや現場計測データを建設機械に入力して施工する技術が実用化されている<sup>1)</sup>。一方、地盤改良工事においてもリモートセンシングや傾斜計のような種々のセンサ類や画像処理等で代表される Information and Communication Technology (ICT) や Information Technology (IT) が適用されつつある。すなわち、施工現場の省人化、施工管理の効率化ならびに生産性を向上させることを目的とした魅力ある建設現場を目指す新しい取り組みである i-Construction が推進されている<sup>2)</sup>。しかし、地盤改良工事にて各種技術を有効に活用するまでには解決しなければならない課題が存在する。例え

ば、地盤改良工事は地中を対象とした工事のため、施工状況をリアルタイムに目視で確認・評価することが困難である。このため、改良体の品質や出来形、地盤状況ならびに支持層の変化をリアルタイムに評価し、施工にフィードバックする点に課題がある。

上記した課題を解決するため、一連の研究では地盤改良工事の施工管理において改良体施工時の掘削深度、掘削速度、スラリー量および電流値等の改良体の施工情報をリアルタイムに計測・記録し、地盤見える化、評価および共有することが可能な施工情報可視化システムを開発している。当該システムにより、今日まで課題であった目視が困難な地中にて改良体の各種施工情報をリアルタイムに判りやすく可視化し、現場関係者に共有できるため、地盤改良工事の施工管理の効率化を図ることが可能になる。現在、当該システムは実際の施工現場へも展開している状況である<sup>3)</sup>。

地盤改良工事の事前調査では、施工エリアに対して限られた本数でのみ実施されることが多い。そのため、事前調査位置から離れた施工箇所に対する支持層到達の確認、地盤性状から固化材量の調整ならびに施工順序等、設計時に対する施工時の妥当性や見直し確認を迅速に判断することが難しい。そこで、地盤性状や支持層評価のため、施工時に計測・記録する電流値と事前調査として実施する標準貫入試験結果に関する各々の相関関係からN値をリアルタイムに推定する機能を新たに施工情報可視化システムに追加する。なお、施工機械に取り付けられた攪拌翼を回転させるためには地盤の抵抗に応じて電流値を変化させることが不可欠であるため、電流値の変化は地盤を掘削する際に施工機械が受ける負荷を表現していると考えられる<sup>4)</sup>。上記機能の追加によって、施工中の地盤状況に合わせてリアルタイムに固化材量を調整することで改良体の強度は調整でき、かつ原地盤と固化材が確実に混合されることにより、品質の良い改良体を造成することが可能であると考えている。

本研究では、様々な地盤改良工事の施工管理に適用された計測技術やICTについて述べる。また、一連の研究で開発した施工情報可視化システムの概要とともに、地盤改良工事において施工管理に必要な電流値を計測することで、その電流値からN値をリアルタイムに推定する手法、N値の推定式、N値の推定結果および実現場への適用の可能性について述べる。

## 2. 地盤改良工事の施工管理例

現在における地盤改良工事の施工管理について、埋戻し工法の場合では原地盤と固化材の混合攪拌状態等、薬液注入工法の場合では薬液の注入量やエア量等、高圧噴射攪拌工法の場合では噴射圧力や噴射量等、各々工法に合わせた管理項目を計測機器を用いてリアルタイムに計測し、臨機応変に施工することが可能になるため、改良体の品質を確保することができる。また、地中の施工状況をリアルタイムに把握し、施工するシステムも開発されている。以下に、様々な地盤改良工事に導入されている施工管理事例について述べる。

### 2.1 埋戻し工法

埋戻し工法はセメント系固化材と混練水を用いて埋戻し処理を施すことで、ブロック状の均質な改良体を造成する地盤改良工事の一種である。ただし、改良体は地中に造成されるため、施工中に改良範囲や混合攪拌状態を目視で確認することができず、混合攪拌状態が管理基準値を正確に満たしているかの判定が困難であった。そこ

で、施工中に改良範囲や混合攪拌度合をモニタで監視できる施工管理装置が開発されている(図-1参照)<sup>5)</sup>。図-1はポンプに設置した流動計にて使用混練水量を計測し、施工機械のバケットに設置した回転計および電気比抵抗計測センサーにて混合攪拌回数と混合攪拌の度合を計測し確認するものである。また、図-2は電気比抵抗計測の測定例を示しており<sup>5)</sup>、左側の電気比抵抗値をリアルタイムに計測した結果が施工機械のモニタに表示されるため改良体の攪拌混合度合や出来形を把握し易くなっている。計測位置は改良体平面形状に関して実施するものである。また、電気比抵抗値は電気比抵抗計測センサーによって改良体方向に毎秒5cm程度の速度で挿入し、改良体中の抵抗値の変化を計測間隔10cm毎に計測し、計測結果を電気信号によりロッド内ケーブルを通じて地上までリアルタイムに送信する仕組みである(図-3参照)<sup>5)</sup>。電気比抵抗値の変化は大きなばらつきが確認された場合、土塊等の未攪拌の割合が多い状態であると推測し、埋戻し工法による地盤改良工事は攪拌混合された地盤の電気比抵抗値が小さくなる傾向にあることがわかっている<sup>6)</sup>。一般に混合攪拌度合が良いとされる判定基準は改良体強度および電気比抵抗の変動係数が管理目標値の30%以下<sup>7)</sup>であり、この状態であれば改良強度のばらつきは少ないものとされている。



図-1 埋戻し工法における施工管理装置

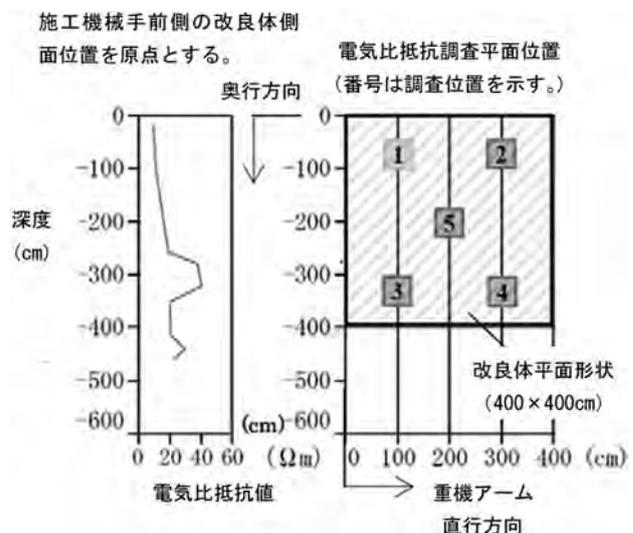


図-2 電気比抵抗値の測定例

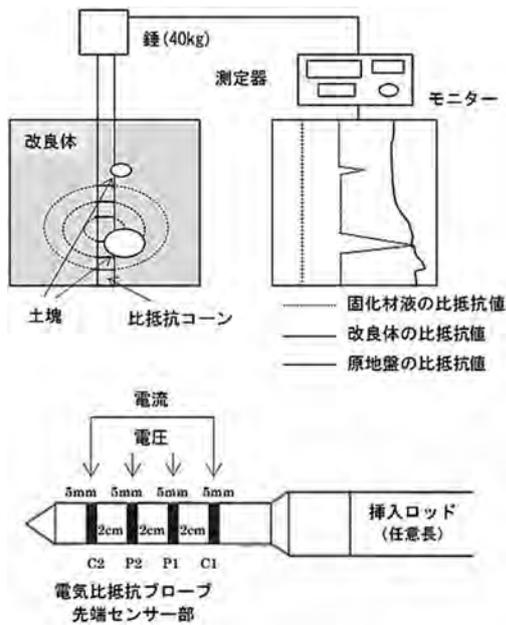


図-3 電気比抵抗計測装置 (先端コーン貫入型センサー)

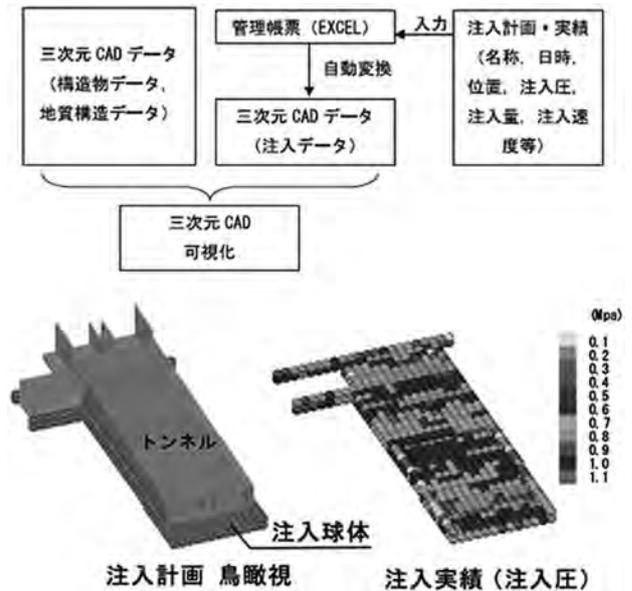


図-4 3次元注入管理・支援システム

2.2 薬液注入工法

薬液注入工法は地盤中に薬液を注入して、地盤の透水性を減少させたり、地盤の強化を図る地盤改良工法の一つである。この工法では注入に伴い、地盤の間隙水圧が上昇し易くなることがある。深度が浅い既設構造物直下の地盤の薬液注入工事を行う際は、躯体(既設構造物)が動かないように確認しながら作業を行う必要がある。したがって、躯体の動きは目地部の変形集中や注入材のリークの可能性があり、改良地盤の品質が低下する恐れもあるため、リアルタイムに施工状況を確認できるシステムが必要である。そこで、薬液注入工法の施工管理において重要な計測項目は掘削位置、注入状況および躯体の変状の把握である。掘削位置はボーリング試験機に挿入式の位置計測器を取り付け、削孔先端位置を計画線に合わせ実施する。注入状況は地表面上に圧力流量測定装置や間隙水圧計を設置することで、薬液を浸透注入できる適切な量を予め考慮して注入速度、注入圧ならびに間隙水圧を計測する。また、躯体の変状は躯体自身に傾斜計および変位計を設置し、躯体の傾斜角度、継目の目開き量ならびに目違い量を管理基準値を満たすように計測することで躯体の動きをモニタリングする。

上記した施工管理に重要な現場計測データを管理帳票に取り込むことで、3次元のCAD注入データおよび地質・構造物データとともに組み合わせた3次元注入管理・支援システムが開発されている(図-4 参照)<sup>8)</sup>。図-4において、左側は注入計画における構造物データと薬液の注入予定位置を鳥瞰図として表現している。右側は実施工における薬液の注入実績として注入圧を可視化している。以上より、注入圧のみならず施工中に得られる様々

なデータ(変状データ, 地盤データおよびボーリングデータ)を鳥瞰図, 平面図ならびに断面図等の形式でリアルタイムに可視化することができる。また、障害物のある地盤を対象とした場合においても、障害物の影となり注入されない箇所の見落とし防止, 効率的な注入孔の配置, 施工計画の立案ならびに現場の省力化につながるものとして実現場へ導入されている。

2.3 高圧噴射攪拌工法

高圧噴射攪拌工法はボーリングマシンを用いてセメントミルクとエアを混合, 超高压で地中に噴射し原地盤と混合攪拌することで改良体を造成する地盤改良工事の一種である。特に、既存構造物を対象とした工事では、狭隘な箇所での施工や構造物を供用しつつ施工を行う場合も多く、地中を確認しながら既存構造物への影響の低減や改良体の品質管理の向上が求められる。また、通常の施工では噴射エネルギーのパラメータである固化材噴射量, 噴射圧力および噴射時間(引上速度)が一定に固定されているため、改良地盤の同一が想定される場合は改良径を1ケースに設定する。しかし、地中では想定外の地盤状況である可能性もあるため、上記のパラメータを適切に調整することが望まれる。そこで、高圧噴射攪拌工法の施工管理においては改良体の出来形ならびに品質管理の向上を目的として、施工速度, 回転速度, 固化材の噴射圧力, 噴射量ならびに空気量の管理項目をリアルタイムに制御し表示する専用管理装置が開発されている(図-5 参照)<sup>9)</sup>。図-5における装置モニターに表示された①~⑤の設定値と実測値により施工状況を把握し、上記の管理項目をリアルタイムに調整しながら施工すること



図-5 専用管理装置のモニター

ノートPCに送信できるため、施工ロスのない効率的な計測管理が可能になる。

## 2.4 機械攪拌工法

機械攪拌工法は攪拌翼により原地盤とスラリーや粉体系の改良材を混合攪拌し、地中に改良体を造成する地盤改良工事の一種である。一般的に地盤沈下や液状化対策等に利用されている。しかし、地中を目視できないため施工状況の見える化を図りながら施工するシステムが必要であった。そこで、地盤改良工事の施工管理に情報化施工を組み合わせることで計画から維持管理に至る一連のプロセスにおける施工情報が見える化し、施工現場全体の最適化や品質管理の高度化を図る品質・出来形可視化システムが開発されている(図-7参照)<sup>10)</sup>。なお、本節での見える化とは地盤内における施工が目視で確認できないといった条件があるため、施工中の改良体の位置や変位を、現場計測したデータに基づき地盤内に造成中の改良体を3次元的にモデル化しイメージし易くする意味を持つものである。また、図-7に示されたシステムは以下の1)~3)で構成されている。

- 1) 施工情報(深度, スラリー量, 攪拌翼回転数および電流値等)が見える化するとともに、管理単位毎にオートで記録・保存する施工管理システム
- 2) 品質情報(改良体の形状, 寸法, 強度の計画値およびその実績値), 施工仕様, 日時ならびに施工位置等の施工に関する情報を一元的に集約し, 3次元表示する情報管理システム
- 3) 予め設計図書から取得した地盤改良工事の平面における杭芯位置にGPS情報を利用して施工機械を誘導・

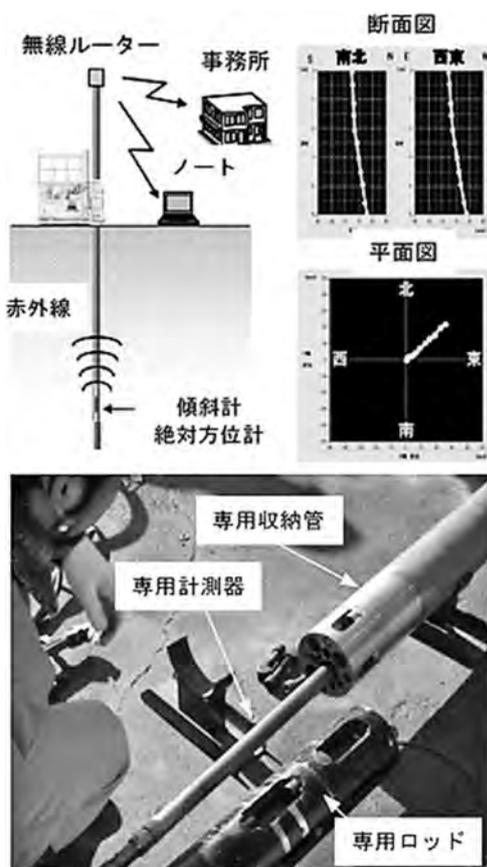


図-6 孔曲り専用計測装置

が可能である。また、施工深度が50mを超える場合、掘削の鉛直精度を保てない可能性がある。そこで、図-6に示されるように掘削位置をリアルタイムに計測するための孔曲り専用計測装置も開発されている。これより、掘削1m毎に直交2方向の傾斜計と絶対方位計で計測し、掘削時の孔曲り形状をリアルタイムで確認することができる。先端位置の計測データは赤外線通信により無線化し、無線ルーターにより現場内事務所や関係者の

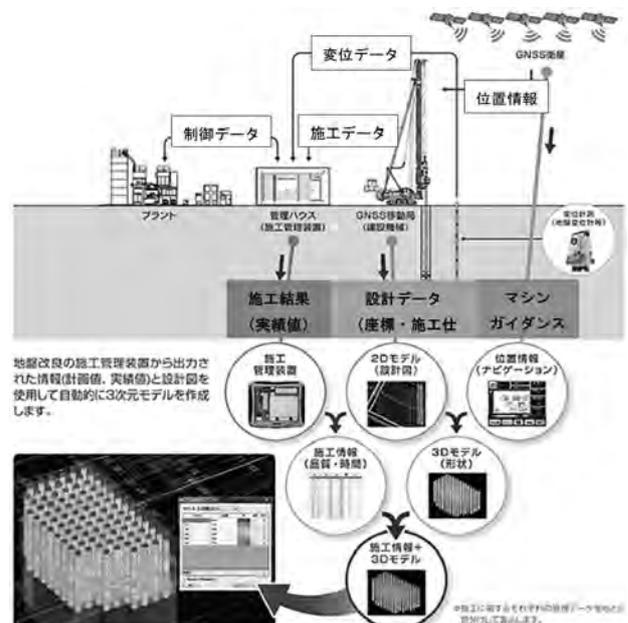


図-7 品質・出来形可視化システム

操作する機械誘導システム

上記1)~3)のシステムにより、施工管理を実施している。一方、本研究の一連で開発した施工情報可視化システムは施工情報を現場内部と外部における関係者にインターネット環境(Cloud)を利用したリアルタイムに共有する技術を取り入れている。それに対し、品質・出来形可視化システム内の施工情報は現場内のみの情報共有となるため、現場内の施工管理の効率化向上は期待できると考えられる。しかし、今後は地盤改良工事に計測技術や遠隔支援を提供するIoT等を導入し、現場内の省人化を図る意味においても現場外の工事関係者にもリアルタイムに施工情報を共有できる環境が必要になる。

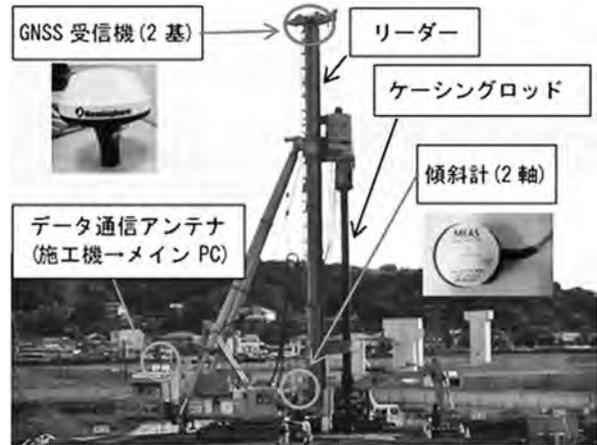


図-9 地盤改良工事の施工状況

3. 施工情報可視化システム

地盤改良工事では、地盤性状や支持層の位置等を各施工箇所にて把握しながら進めることが重要である。一連の研究では地盤改良工事の施工管理においてリアルタイムに各種現場計測データを計測・記録し、施工状況を見える化するシステムを開発している。また、実際に機械攪拌工法や砂杭置換工法を使用した施工現場に導入している状況でもある。ここでは、実際の施工現場に導入している施工情報可視化システム(図-8 参照)について述べる。図-8より、施工情報可視化システムは施工現場と施工現場の外部を網羅するものであり、以下の機能から構成されている。



図-10 キャビン用モニター

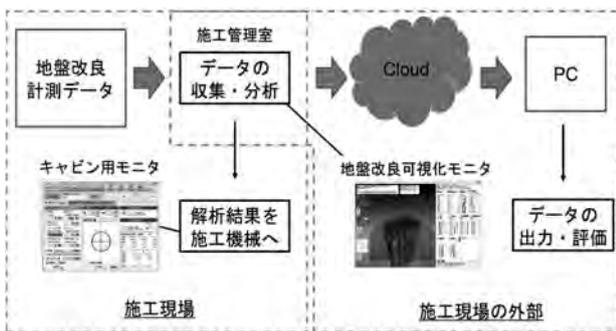


図-8 施工情報可視化システム

3.1 施工機械の位置誘導機能

従来の地盤改良工事では改良体の施工位置を測量により確認し、誘導する方法がとられている。また、改良深さが大きい場合、改良体同士をオーバーラップさせることもあり、施工開始前に実施する杭芯セットの精度が高く要求される。上記の課題を解決するため、予め改良体や杭の3次元の設計情報をシステムに登録しておき、施工時にリーダー上部に設置した全球測位衛星システム(GNSS受信)、トータルステーション(TS)およびリー

ダー下部に設置した傾斜計を利用し、杭芯位置の誘導を正確に行うものである(図-9参照)。図-9において改良体施工時の計測データは、施工機械から図-8に示した施工管理室内のメインPCに送信される仕組みである。また、杭芯位置の誘導に関しては、施工機械のオペレータ室に表示されたキャビン用モニターの施工情報に従うことで杭芯位置を設計値に誘導する(図-10参照)。キャビン用モニターには上記した位置誘導機能により、造成する杭の番号や座標位置、杭長およびスラリー等の使用材料や施工仕様等が登録されており、施工中の改良体情報をリアルタイムで視覚的に確認することができる<sup>11)</sup>。すなわち、これまで課題として挙げられていた目杭(従来の測量や施工位置のマーキングに使用する杭)のずれやオペレータの見誤りによるヒューマンエラーの防止を期待することができる。

3.2 施工情報の可視化・記録・共有機能

従来の地盤改良工事では、施工機械のオーガの掘削速度や攪拌翼の回転等を操作するオペレータとプラントでの材料の残量を確認し調整する作業員や施工管理室にて施工機械に指示を送る作業員が最低限必要であり、そ

の後の出来形や品質確認等を目的に管理していた<sup>12)</sup>。しかし、上記の状況では効率が良くないため、目視にて地中を把握し、改良体の状況を確認しながら施工できるシステムが必須であった。そこで、施工情報可視化システムでは、施工管理における様々な施工情報(深度、電流値、速度、スラリー量および攪拌翼先端軌跡等)を動態計測により0.5秒毎に記録する。その後、電気信号によりリアルタイムに施工管理室へと送信し、計測データを3次元で見える化、**図-11**のようにモニタに表示する。**図-11**より、モニタ右側は改良体1本毎の施工情報(深度、電流値、速度、スラリー量ならびに攪拌翼先端軌跡等)を縦軸に施工深度・横軸に計測量としてグラフ表示する。また、グラフ中には予め現場毎に設定した上記の施工情報の上限値や許容範囲値が示してあり、それらの管理値を逸脱すると視覚的に認識することが可能になる。さらに、施工管理における全ての施工情報は**図-8**の施工管理室内のメインPCを経由し、構築されたインターネット環境(Cloud)を通じて工事関係者間でリアルタイムに共有することも可能である<sup>13)</sup>。

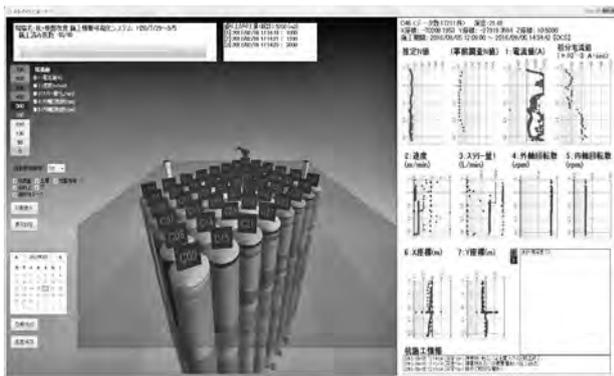


図-11 施工情報可視化システム

上記の機能により、予め設定した施工情報の上限値や許容範囲値に対する現状値を把握することができ、目杭による位置誘導と比較して高精度の改良体出来形および品質を確保することが可能となった。また、従来の数値情報のみでは把握することが困難であった改良体の施工状況から一変し、地中における改良体の施工情報をリアルタイムに計測し、3次元的に見える化することが可能となるため、地中での改良体の施工状況をイメージとして確認することができる。

### 3.3 施工情報可視化システムの導入事例

地盤改良工事のうち、機械攪拌工法を使用した施工現場において施工情報可視化システムを導入した事例を述べる。施工する改良体については、改良長さが深度方向に3パターンあり、隣り合う改良体は長さが異なる。ま

た、設計基準強度についても海側と陸側で異なる事例である。そのため、改良体どうしをオーバーラップさせるため、施工開始前に行う杭芯セットの精度が要求されることもあり、改良体の出来形や品質管理値を3次元的に見える化するためのシステムを試験的に導入した。

改良体の天端高、杭径および改良深度の出来形については全施工本数で施工計画時に決定した天端高、杭径および改良深度の設計値を満たし、施工位置や改良体どうしの間隔、長さについても全施工本数で許容値以内での出来形を確保できている<sup>14)</sup>。また、施工中に発生する盛上り土量についても固化材吐出量の70~80%程度とされているが<sup>15)</sup>、本工事でも約70%程度の盛上り土量となることがわかり、適切な盛上り土量の管理を行うことができています。

## 4. 機械攪拌工法による支持層・地盤性状のリアルタイム評価

地盤改良工事における施工管理では支持層の位置や地盤性状を評価するため、随時各施工箇所にて電流値または積分電流値<sup>16)</sup>を計測する。本研究では地盤改良工事のうち、機械攪拌工法に対して各施工箇所計測する電流値と標準貫入試験のN値に基づき、リアルタイムにN値を推定する手法を提案するものである。当該地盤に応じたN値の推定手法から導かれた推定式を施工情報可視化システムに入力することで、標準貫入試験の結果に頼らなくてもリアルタイムにN値を推定することが可能になる。以下に、N値の推定手法とその手法により立案したN値の推定式について述べる。

### 4.1 施工機械の制御条件

本研究において事例として取り上げた施工機械(アースオーガー)の制御条件としては、**表-1**のとおりトルクと回転速度がある。**表-1**では出力量90kWのモータが2基あり、内翼と外翼の相対攪拌翼で構成されている。また、内翼と外翼のモータによるトルクや回転速度は異なる値である。そのうち、外翼回転速度は4.84rpm、内翼回転速度は13.1rpmと全施工本数において施工開始から施工が終了するまで一定値に管理されている。そこで、N値の推定式立案の際、回転速度については考慮

表-1 施工機械の制御条件

施工機械 (アースオーガーのモータ)			制御条件
出力 (kW)	攪拌翼	回転速度 (rpm)	トルク (kN・m)
90 × 2	内翼	13.1	131.94
	外翼	4.84	355.44

しないものとする。なお、本研究で使用した施工機械（アースオーガー）は、モータの電流値が最低 400 A および最大 800 A を出力するものである。

一方、表-1 には示していないものの掘削速度については掘削速度を一定に保持しながら施工するべきであるが、施工機械のオペレータが掘削箇所に応じて掘削速度を調整しながら施工していることが全施工本数で確認された事例である。例として図-12 は改良体番号 c50 における掘削速度の深度分布を示している。これより、電流値は掘削速度の影響を受けると考えられる。ただし、改良体番号 c50 を含め、図-13 に示す全ての改良体位置において掘削速度 1 ~ 1.5 m/min の範囲内で極力一定に保

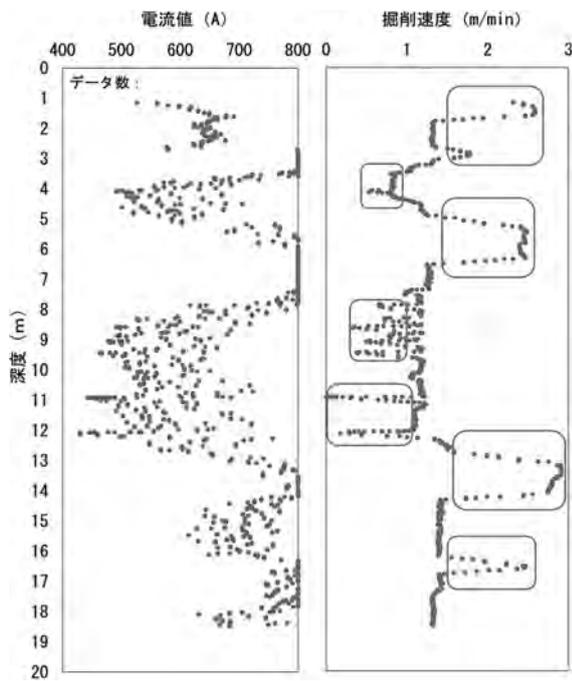


図-12 掘削速度の深度分布図例 (c50)

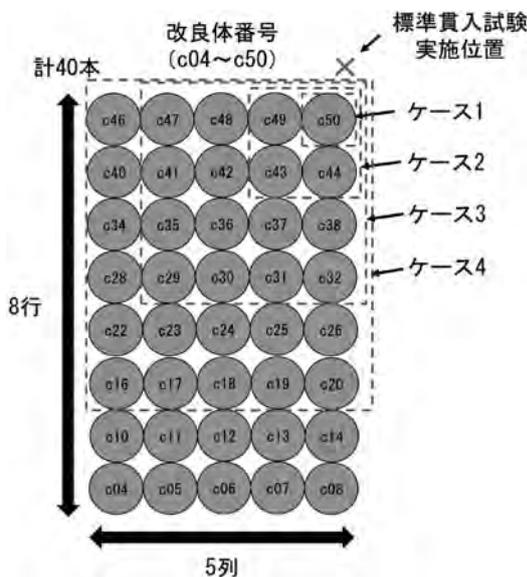


図-13 対象地盤の施工状況

ちながら施工している。また、深度 11 ~ 12 m 付近では大深度施工のためのロッドの継足しを行ったため、掘削速度が 0 m/min 付近に低下している箇所もある。以上より、N 値の推定式立案の際は、図-12 の橙色の枠で囲んだ箇所のように掘削速度が 1.5 m/min を超える箇所や 1 m/min よりも低下した箇所における電流値については除くものとする。

4.2 N 値の推定手法

本研究において事例検討する地盤改良工事では、図-13 に示されるように施工エリアに対して事前調査として 1 本のみの標準貫入試験の実施であった<sup>17)</sup>。また、施工する改良体の径は 2300 mm と大口径であり、改良体番号 c04 ~ c50 までの計 40 本を施工する工事である (図-13 参照)。図-14 は改良体番号 c50 を例として、標準貫入試験の結果と電流値の深度方向分布を示す。これより、対象地盤の改良範囲は TP+8.95m ~ TP-7.62m の長さ 16.21 m と大深度であり、粘土やシルトを主とした軟弱地盤である。ここで、本研究では図-14 のとおり施工開始から支持層に着底した箇所までの電流値を使用し、標準貫入試験で得られた N 値と改良体を施工する際に得られる電流値の相関関係を統計的処理によって分析する。

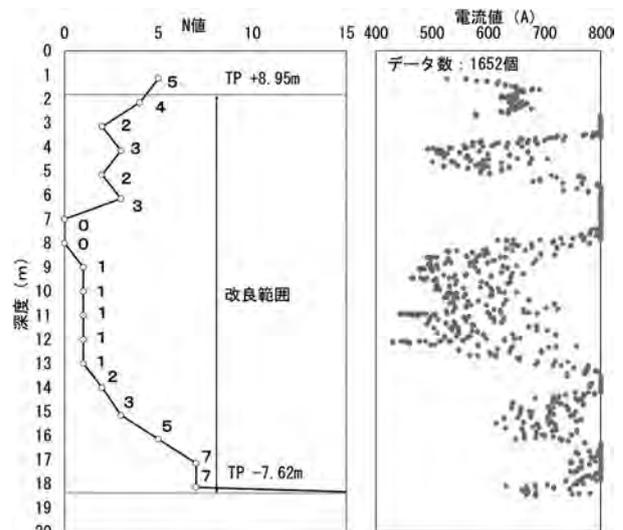


図-14 標準貫入試験結果と電流値の深度方向分布例 (c50)

以下では N 値の推定手順を示す。

- 1) 改良範囲に関する標準貫入試験の N 値は 0 ~ 7 まであり (図-14 参照)、シルトや粘土を主体とした土質区分である。また、電流値は 400 ~ 800A の範囲かつ 0.5 秒間隔で計測している。電流値は貫入開始から支持層と想定される位置まで貫入攪拌を実施した場合のみの計測データを採用する。以上より、標準貫入試験の N

値を0, 1, 3, 5および7の5段階のステージに区別し、電流値と対応するように分類する。

- 2) 各N値のステージに対応付けた電流値に関するヒストグラムを作成する。作成例として改良体番号c50(図-13参照)のN値が0のステージにおけるヒストグラムを図-15に示す。なお、電流値の分布形は正規分布であると仮定する。

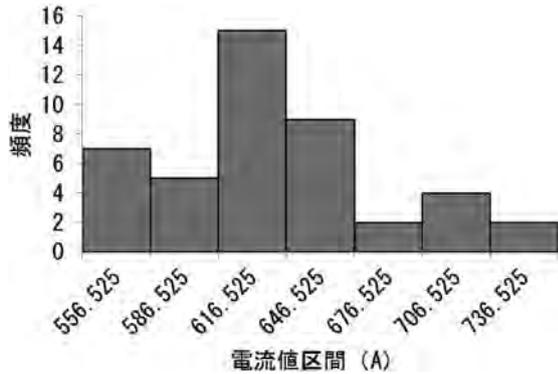


図-15 電流値のヒストグラム作成例 (c50, N値=0)

- 3) 各N値のステージに対応付けた電流値のヒストグラムに関して、電流値の平均と標準偏差を求める。さらに、各N値のステージから求めた電流値の平均と標準偏差および標準貫入試験のN値を用いてグラフ化する。

### 4.3 N値の推定式の立案結果

4.2で示したN値の推定手順に従い、N値の推定式を求めた結果を表-2に示す。表-2においてケース2以降はケース1の計測データを網羅した上で、ケース1と比較して周辺の改良体の計測データの影響を考慮した際の変化傾向を確認する。そこで、ケース1を含んだ周辺改良体の計測データをケース2からケース4へと増やすことで、推定式の構造(本研究では一次式として仮定の上、傾きと切片)が一定の値に収束することを考えるために計測データを平均化している。なお、表-2ではN値の推定式について独立変数xを電流値、従属変数yをN値として示している。図-16～図-19はN値の推定式の立案結果を図化しており、標準貫入試験の実施位置(図-13参照)に最も近い改良体である改良体番号c50の1本

表-2 N値の推定式の立案結果

	N値の推定式		
	N-σ (式(1))	N (式(2))	N+σ (式(3))
ケース1	$y=0.028x-12.827$	$y=0.031x-16.511$	$y=0.035x-20.647$
ケース2	$y=0.016x-6.236$	$y=0.022x-11.129$	$y=0.031x-18.133$
ケース3	$y=0.023x-9.650$	$y=0.028x-14.255$	$y=0.033x-19.183$
ケース4	$y=0.027x-11.98$	$y=0.031x-16.15$	$y=0.035x-20.165$

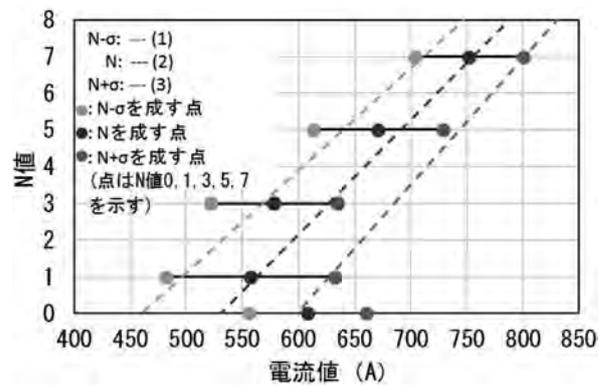


図-16 N値の推定式 (ケース1)

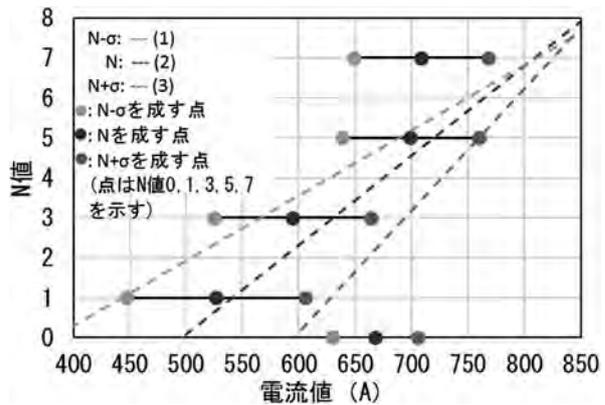


図-17 N値の推定式 (ケース2)

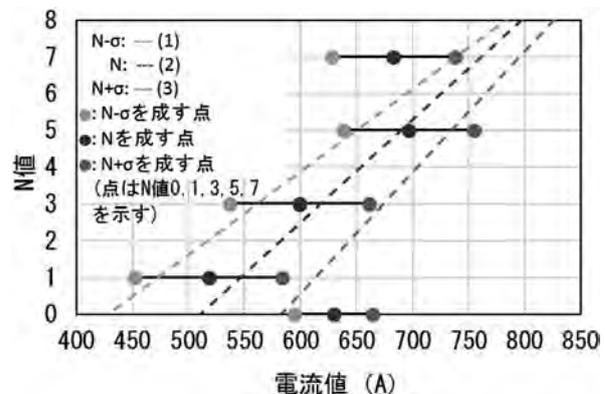


図-18 N値の推定式 (ケース3)

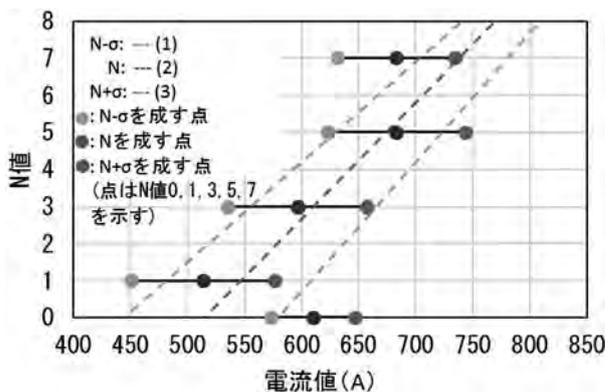


図-19 N値の推定式 (ケース4)

表-3 N 値の推定結果 (ケース 1)

N 値の推定式	電流値 (A)									
	400	450	500	550	600	650	700	750	800	
ケース 1	$N + \sigma$ (式(3))	-7	-5	-3	-1	0	2	4	6	7
	N (式(2))	-4	-3	-1	1	2	4	5	7	8
	$N - \sigma$ (式(1))	-2	0	1	3	4	5	7	8	10

表-4 N 値の推定結果 (ケース 2)

N 値の推定式	電流値 (A)									
	400	450	500	550	600	650	700	750	800	
ケース 2	$N + \sigma$ (式(3))	-6	-4	-3	-1	0	2	4	5	7
	N (式(2))	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
	$N - \sigma$ (式(1))	0	1	2	3	3	4	5	6	7

表-5 N 値の推定結果 (ケース 3)

N 値の推定式	電流値 (A)									
	400	450	500	550	600	650	700	750	800	
ケース 3	$N + \sigma$ (式(3))	-6	-4	-3	-1	1	2	4	6	7
	N (式(2))	-3	-2	0	1	3	4	5	7	8
	$N - \sigma$ (式(1))	0	1	2	3	4	5	6	8	9

表-6 N 値の推定結果 (ケース 4)

N 値の推定式	電流値 (A)									
	400	450	500	550	600	650	700	750	800	
ケース 4	$N + \sigma$ (式(3))	-6	-4	-3	-1	1	3	4	6	8
	N (式(2))	-4	-2	-1	1	2	4	6	7	9
	$N - \sigma$ (式(1))	-1	0	2	3	4	6	7	8	10

を対象としたケース 1, さらに周辺の改良体を含んだケース 2(2 × 2 本), ケース 3(4 × 4 本)およびケース 4(6 × 5 本)の範囲に区別して示している。また, 式(2)は施工において最も計測し得る可能性の高い電流値から N 値を推定する式として設定している。さらに, 式(1)と式(3)は式(2)を基準として電流値の正と負の方向に標準偏差の大きさを電流値を計測し得るであろう範囲として設定している。表-3 ~ 表-6 は, 図-16 ~ 図-19 から得られた電流値から推定される N 値を示している。

#### 4.4 考察

ケース 2 およびケース 3 は改良体の施工本数をそれぞれ 4 および 16 本に増加させているため, ケース 1 における N 値の推定式を構成する傾きと切片の値に収束すると考えられるものの, 傾きと切片ともに値は収束せず減少する傾向である(表-2 参照)。特に, ケース 1 とケース 2 の式(1)を比較すると, 最大で傾きが 0.012, 切片が約 6.6 の減少が確認される。一方, ケース 4 では式(1) ~ 式(3)において傾きと切片がケース 2 およびケース 3 の場合よりもケース 1 に収束する傾向がある。

ケース 1 において N 値が 0 に対応した電流値の範囲は 608 A を中心に 556 ~ 660 A の幅を有し(図-16 参照),

N 値として 0 ~ 5 の広範囲を推定する結果である(表-3 参照)。また, N 値が 1 に対応した電流値の範囲についても 557 A を中心に 482 ~ 632 A の幅を有し, N 値として 1 ~ 4 の範囲を推定する結果である。一方, ケース 2 において N 値が 0 に対応した電流値の範囲は 668 A を中心に 630 ~ 706 A の幅を有し(図-17 参照), N 値として 1 ~ 5 の範囲を推定する結果である(表-4 参照)。同様に, N 値が 1 に対応した電流値の範囲では 526 A を中心に 447 ~ 605 A の幅を有し, N 値として 1 ~ 3 の範囲を推定する結果であり, ケース 2 はケース 1(図-16 および表-3 参照)よりも約 50 A 大きくかつ正の方向に分布しているため, ケース 2 の N 値の推定式は傾きと切片が減少する傾向にある。なお, 図-16 では N 値が 7 に対応した電流値の範囲が 751 A を中心に 704 ~ 800 A の幅を有しており, また N 値が 5 に対応した電流値の範囲は 671 A を中心に 613 ~ 729 A の幅を有する。一方, 図-17 ~ 図-19 に共通して N 値が 5 および 7 に対応した電流値の取り得る範囲はほぼ同じであり, 式(2)を構成するプロットが 700 A 周辺に分布している。

図-16 および表-3 ではケース 1 において計測する電流値が 400 ~ 450 A の場合, 式(1) ~ 式(3)において N 値が -7 ~ -2 であるため, この範囲において N 値を推定することができない。ただし, 式(1)では電流値が 450 A よりも大きい計測結果である場合において N 値を推定することが可能である。また, ケース 2 における式(3)では電流値が 400 ~ 550 A の場合, 式(3)で N 値が -6 ~ -1 となり N 値を推定することができない(図-16 ~ 図-19 および表-3 ~ 表-6 参照)。しかし, 電流値が 450 A 以上であれば式(1)を用いることで N 値を推定することが可能である。

表-2 に示されるようにケース 2 およびケース 3 における N 値の推定式の傾きと切片の値がケース 1 のように収束せず減少する傾向になった要因は, ケース 1 では標準貫入試験の位置から中心位置まで 1.63 m, 同様の条件でケース 2 では 3.25 m ならびにケース 3 では 6.51 m と離れており, 標準貫入試験での結果と比較して地中の層厚や土質構成が変動している可能性があると考えられる。

ケース 1 ~ ケース 4 における N 値の推定式より, 標準貫入試験の位置から最も近い位置での改良体(改良体番号 c50)で施工する際の計測データのみを利用したケース 1 を実際の施工現場全体で一律に適用することは必ずしも正しいとはいえない。したがって, 標準貫入試験の位置から離れた各施工箇所においてはケース 1 のような標準貫入試験の位置から近い場所での計測データも考慮しつつ N 値の推定式を立案することが望ましく,

この立案手順であれば効率的な現場管理に即した評価手法になると考えられる。

## 5. おわりに

本研究では地中にて目視が困難な箇所で行われる地盤改良工事において、施工時に地盤状況や支持層の変化を確認するために必要なデータを計測し、計測データの見える化を図り、施工管理にフィードバックが容易な施工情報可視化システムを開発した。

また、標準貫入試験で得られるN値と改良体の施工中に得られる電流値の相関関係に着目し、N値の推定式を立案した。本研究で事例検討した施工エリアではケース1からケース4に検討領域を設定し、ケース毎にN値の推定式を比較した。その結果として、ケース1からケース4へ検討領域内の改良体施工本数を増加させても、ケース2～ケース4の推定式が標準貫入試験位置に近いケース1の推定式の構造に必ずしも収束しないことを確認した。したがって、いずれのケースを施工現場で適用していくかについては、他の施工現場における計測データも検討の視野に入れることで計測データを蓄積し、いずれの検討領域におけるN値の推定式を適用するかを追究する必要がある。

電流値からN値を推定する手法を確立していくことは、現場管理に応じた効率的な地盤性状、改良体の施工状況および新たな品質の評価・検討につながると考えられる。また、施工現場の地盤状況によっては、地盤の種類別に応じたN値の推定式も立案することにつながると期待できる。

## 参考文献

- 1) 国土交通省:ICTを活用した施工技術(情報化施工)の事例と課題, 国土交通省情報化施工推進会議資料, pp.1-5, 2008.
- 2) 国土交通省:i-Construction 建設現場の生産性向上の取り組みについて, i-Construction 委員会資料, pp.1-7, 2015.
- 3) 木付拓磨, 澤口宏, 今井正, 高植俊彰, 土屋潤一, 稲積真哉:大口径・大深度深層混合処理工法の適用におけるリアルタイム管理システムの導入, 第12回地盤改良シンポジウム論文集, pp.451-454, 2016.
- 4) 日本建設業連合会:杭の施工管理における支持層到達の確認方法, 既製コンクリート杭施工管理指針, pp.4-5, 2017.
- 5) 持田泰秀, 塚本政昭:セメント系固化材と現地土を用いた流動化処理地盤改良工法の開発(その1施工及び管理方法), 日本建築学会技術報告集, 第19巻, 第42号, pp.485-490, 2013.
- 6) 持田泰秀, 酒井幸雄, 前田典彦, 岡田元宏:電気比抵抗を用いた品質管理法(その2地盤改良や流動化処理), 第42回地盤工学研究発表会発表論文集, pp.2047-2048, 2007.
- 7) 持田泰秀, 酒井幸雄, 前田典彦, 岡田元宏:電気比抵抗と混合度合いの関係に関する研究, 第43回地盤工学研究発表会発表論文集, pp.643-644, 2008.
- 8) 深澤哲也, 鎌田哲也, 可能善晴:供用中の沈埋トンネル直下地盤を対象とした液状化対策, 建設の施工企画, pp.26-30, 2012.
- 9) 手塚広明, 山内崇寛, 安井利彰:新しい高圧噴射攪拌による地盤改良工法の開発, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.2, pp.179-195, 2012.
- 10) ライト工業株式会社:ICT, CIMを適用した地盤改良の品質, 出来形可視化システム, pp.1-3, 2016.
- 11) 足立有史, 木付拓磨, 土屋潤一, 稲積真哉:ICTの導入による杭・地盤改良工事の見える化, 地盤工学会誌, Vol.66, No.1, pp.24-25, 2018.
- 12) 那須徹夫, 平川真吾, 吉田哲雄:地盤改良工事を全自動で施工管理ICTを導入した全自動施工管理制御システムの開発 Y-LINK, 第385号, 九州建設技術フォーラム「日本の新技術・新工法」, pp.14-15, 2017.
- 13) 木付拓磨, 高植俊彰, 土屋潤一, 稲積真哉:深層混合処理工法におけるリアルタイム3D可視化システムの適用, 第13回地盤工学会関東支部発表会発表論文集, pp.1-2, 2016.
- 14) 木付拓磨, 澤口宏, 今井正, 高植俊彰, 土屋潤一, 稲積真哉:大口径・大深度深層混合処理工法の適用におけるリアルタイム管理システムの導入, 材料, Vol.67, No.1, pp.93-98, 2018.
- 15) Cement Deep Mixing Method Association, "Cement based deep mixing process, Q&A collection", 2005.
- 16) 橋詰善光, 内田浩一, 木谷好伸:埋込み杭工法の施工管理について, 第37回地盤工学研究発表会発表論文集, pp.1391-1392, 2002.
- 17) 舟橋宗毅, 木付拓磨, 足立有史, 土屋潤一, 石丸和宏, 稲積真哉:地盤改良工事における電流値計測に基づくN値の推定について, 第52回地盤工学研究発表会, pp.721-722, 2017.

(2018.3.26 受付, 2018.7.4 採用決定)

## ESTIMATION OF N-VALUE BY CURRENT MEASUREMENT FOR VISUALIZATION OF INFORMATION IN GROUND IMPROVEMENT WORKS

Shinya INAZUMI<sup>1</sup>, Yuji ADACHI<sup>2</sup>, Takuma KIZUKI<sup>3</sup>,  
Jun-ichi TSUCHIYA<sup>4</sup> and Muneki FUNAHASHI<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Shibaura Institute of Technology

<sup>2</sup> Hazama Ando Corporation

<sup>3</sup> Hazama Ando Corporation

<sup>4</sup> Keisoku Net Service Company Limited

<sup>5</sup> Undergraduate Student, Akashi College, National Institute of Technology

In the ground improvement work, it is difficult to visually check and evaluate the construction situation and the finished shape in order to construct a structure under the ground. Therefore, we have developed a construction information visualization system which visualizes, evaluates and records the construction information of the soil improvement body in construction control of ground improvement work in real time. In addition, it was difficult to quickly judge the validity of the actual construction specifications against the design values of the improvement body according to the ground condition and the review thereof, in advance in the limited investigation of ground improvement work. However, by having the N-value estimation formula based on the correlation between the current penetration test results and the current values by the earth auger motor which the measuring machine to be measured as the load to evaluate the support layer and the ground property, in the above system, it is easy to confirm the validity of the construction specifications set from the limited ground survey and judge the necessity of additional measures. In this manuscript, we estimate N-value from the developed system and standard penetration test results and current value and describe its possibility.