

深層混合処理工法のリアルタイム先端位置計測システムの開発と現場適用

足立 有史・グエン ホンソン

防災・減災対策の推進，都市部の地下空間利用の多様化など，掘削や地盤改良を含む基礎工事における大深度化のニーズが高まっている。一方，施工の大深度化により出来形不良リスクの増加や近接構造物との接触など周辺環境への影響が懸念される。さらに手戻りや手直しが発生した場合，工程やコストにも大きく影響を与える。これらのリスクを回避するために深層混合処理工法を対象に施工中リアルタイムに攪拌翼の先端位置を計測可能な大深度先端計測システムを開発した。施工中にオペレーターおよび工事関係者が攪拌翼の先端位置をリアルタイムに管理することを目的としている。本論文では，システムの特徴および実施工へ適用事例について述べる。

キーワード：地盤改良，深層混合処理工法，リアルタイム位置計測，可視化，ICT

1. はじめに

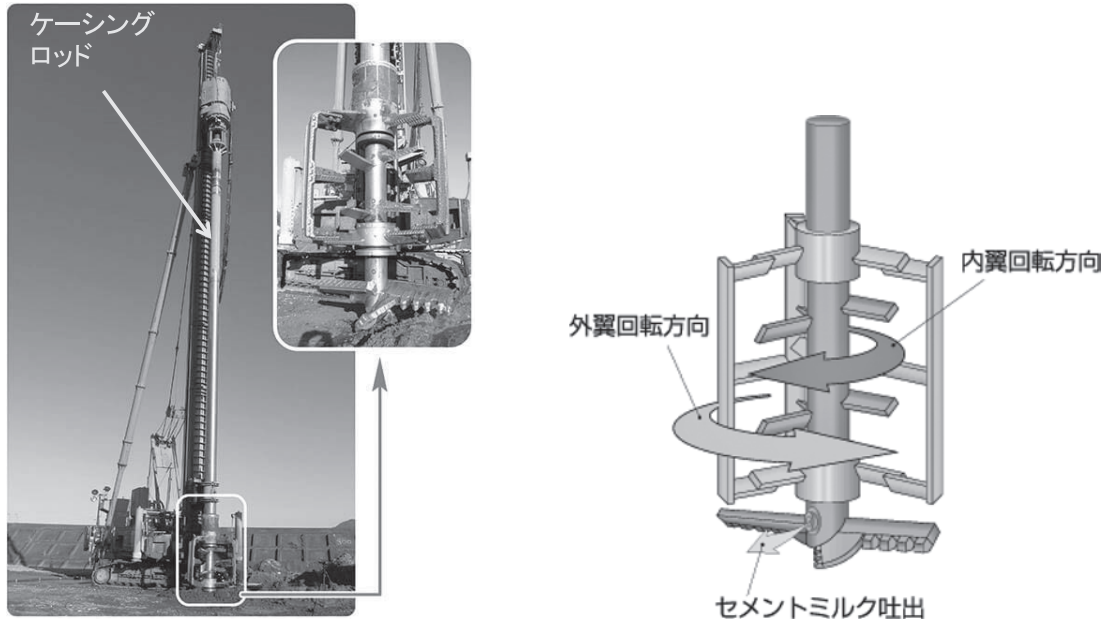
近年，防災・減災対策の推進，都市部の地下空間利用の多様化など，掘削や地盤改良を含む基礎工事における大深度化のニーズが高まっている。一方，施工の大深度化により出来形不良リスクが増加したり，近接する構造物に接触するなど周辺環境への影響が懸念されている。さらに手戻りや手直しが発生した場合，工程やコストにも大きく影響を与える。特に施工深度40mを超えるような大深度施工では，削孔軌道が正規の位置からずれると支持力，変形抑制，遮水性能など地盤改良の品質低下が懸念される。また，供用中の埋設構造物と近接して施工する場合，所定の離隔を確保しながら施工する必要もある。これらのことから，地中での削孔機先端の位置を含む様々な施工情報をリアルタイムに見える化し，共有・分析が可能な技術のニーズが高まっている。

これらのリスクを回避するため，大深度施工が可能な相対攪拌式深層混合処理工法を対象に施工中リアルタイムに攪拌翼の先端位置を計測可能な大深度先端計測システムを開発した¹⁾。本システムは，施工機材のケーシングロッド内部に設置した2軸傾斜計と一連の通信装置により，操作中のオペレーターおよび工事関係者が攪拌翼の先端位置をリアルタイムに管理することを目的としている。本稿では，システムの特徴および実施工へ適用事例について述べる。

2. 相対攪拌式深層混合処理工法の概要

相対攪拌式深層混合処理工法「Deep Cement Stabilization Method：DCS工法」（以下，本工法と記す）²⁾は，スラリー状に混練したセメントあるいはセメント系固化材を原地盤に吐出しながら，原地盤と固化材を相対攪拌機能により強制的に混合・攪拌を行うことで，均質な大口径改良体を造成する深層混合処理工法である。図1に施工機械の概要と攪拌翼の形状を示す。先端の攪拌翼は相対攪拌式を採用しており，外翼と内翼が逆方向に回転することで地盤のつれ回り・共回り現象を防ぎ，高品質の改良体を造成することが可能である。

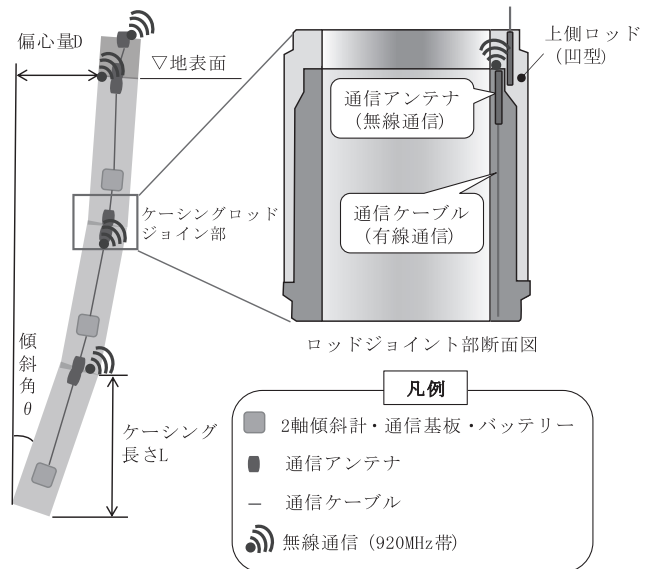
本工法の改良径は，1,000mm～2,500mmに対応可能である。施工可能深度は，最大50mであり，礫径300mm，標準貫入試験でのN値<40の硬質地盤への適用も可能である。近年の大深度施工の需要に対応した大口径，大深度，硬質地盤対応型の深層混合処理工法である。大深度施工ではケーシングロッドを複数本継ぎ足すことで所定の深度まで改良を行う。このような施工条件においてこれまでロッドにセンサー等を取り付け計測する方法は検討されたが，ケーシングロッドの脱着に伴うデータ通信の構築や施工性が大きく低下するという問題が解決されるまでに至っておらず実用化には課題があった。



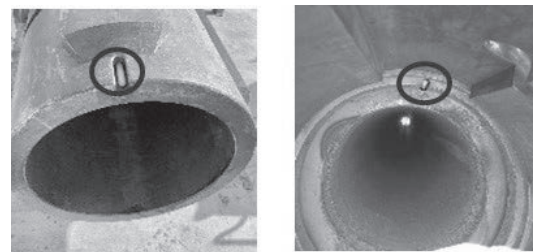
図一 1 相対攪拌式深層混合処理工法の施工機と攪拌翼

3. 計測システムの構成・特徴

図一2に本システムの計測原理とデータ無線通信方法を示す。本工法は10mのケーシングロッドを継足し最大50m程度の大深度地盤改良が可能である。このロッド1本ごとに2軸傾斜計を設置した。ケーシングロッドごとに傾斜を計測し、ケーシングロッド長及び傾斜量から深度方向の掘削位置を算出する方法を採用した。傾斜計は通信基盤とバッテリーを一体型としてロッド内部の収納ボックスに配置した。傾斜計の計測データの通信方法は、ケーシングロッド内は通信ケーブルを用い、また、ケーシングロッドのジョイント部はアンテナを介した無線通信とした。無線通信には電波周波数920MHz帯を採用している。データは、深部から順次浅部の通信基盤に配信される(マルチホップ通信)。最浅部の通信装置は常に地上に位置しており、そこから有線でオペレーター室内に設置するデータ処理専用端末に転送される。これまで困難とされていたケーシングロッドのジョイント部の地中・水中無線通信を可能にしたことで、ケーシングロッドの脱着作業に影響を受けることなく、安定的に計測およびデータ通信が可能となった。図一3にジョイント部(凸部、凹部)に設置したアンテナの状況を示す。ジョイントは挿入式で専用ボルトを用いて固定される。ジョイントを挿入した際のアンテナ間の距離は7mmとなる。別途実施した水中無線通信実験では、清水中でアンテナ同士の離隔が60cm以下であれば安定した無線通信が可能であることを確認済みである。図一4に本システムを搭載したDCS機の全景を



図一2 計測とデータ通信の原理



(a) ジョイント凸部 (b) ジョイント凹部

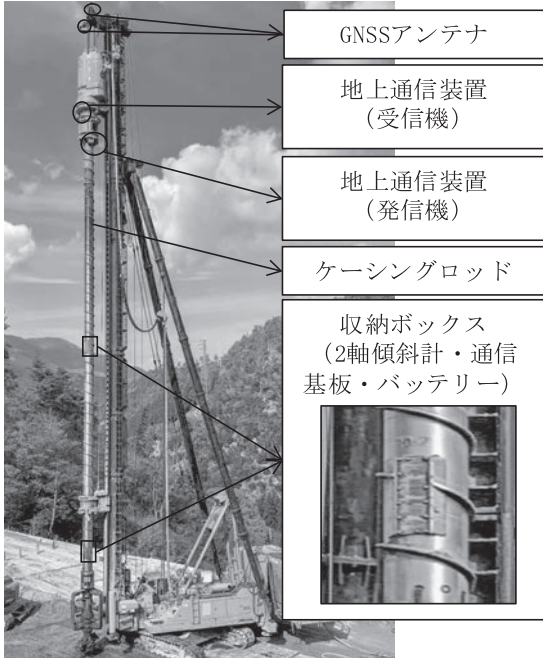
図一3 ジョイント部にアンテナを取付けた状態

示す。ケーシングの収納ボックス、地上通信装置(発受信機)及び全球測位衛星システム(GNSS)アンテナにより構成されている。バッテリーは通常施工において約1か月間の連続使用が可能な仕様とした。

本システムで採用した傾斜計は、分解能が0.01度と高精度仕様である。地上で実施した確認試験で、計測誤差を0.1度以下（深度40mに対して誤差7cmに相当）の高精度で計測できることを確認した。また、

専用ソフト上で計測モードとして一定間隔（最低間隔が5秒）及び任意タイミングを自由に指定でき、リアルタイムにケーシングロッドの姿勢と変位量を確認できる。

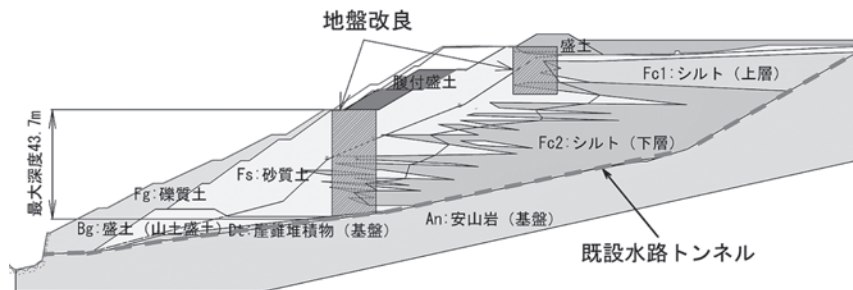
本システムは、2016年に開発済みである杭・地盤改良施工情報可視化システム(3Dパイルビューアー)^{3)・4)}と連携させることで改良体の設計座標に対する攪拌翼先端位置での変位量をリアルタイムに可視化することが可能となった。攪拌翼先端の設計値に対する変位量は、施工機械の傾斜や施工位置による地表面での変位量とケーシングロッドの傾斜計から算出される地中での変位量の合計として算出される。3Dパイルビューアーの専用クラウドより、ブラウザ上で施工中の先端位置に加えて必要な施工管理情報をリアルタイムにオペレーターと工事関係者が共有でき、施工管理値を超えた場合には関係者に通知して異常を早期に把握することで施工上のリスクを低減し、出来形や品質が確保できる。



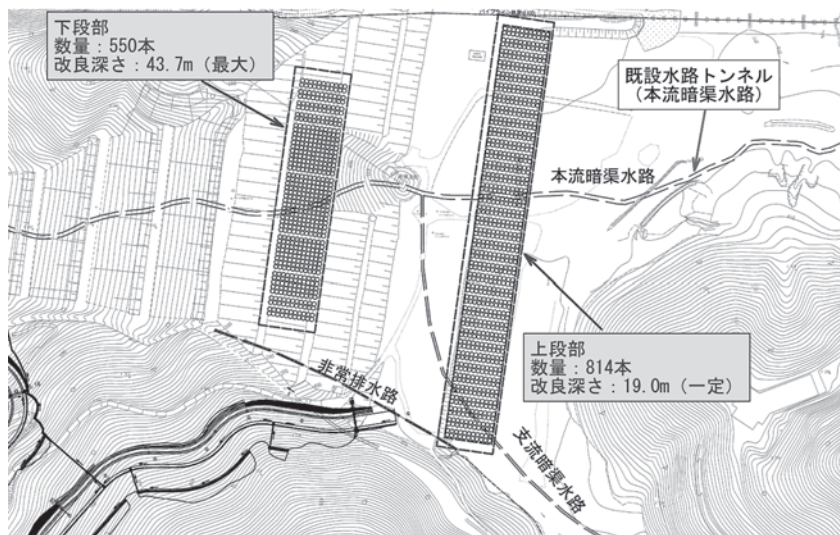
図一四 本システムを搭載したDCS施工機

4. 適用事例

DCS工法による大深度地盤改良工事に本システム



図一五 標準断面図



図一六 全体平面図

を初適用した。対象工事の標準断面図を図-5に、全体平面図を図-6に示す。高さ100m程度の高盛土の耐震補強を目的とし、盛土せん断強度を増加させる工事である。地盤改良体の改良径は1,600mmであり、上段部と下段部の2つのエリアが対象である。改良体本数は合計約1,400本であり、下段部の改良深さは最大43.7mと大規模大深度施工である。また、下段部の改良体の下端部には供用中の水路トンネルが通過しているため、このトンネルに影響を与えないようにトンネルの頂部および側部に所定の離隔を確保しながら施工する必要があった。図-7に水路トンネル周辺の改良体配置平面図を示す。地盤改良の施工による水路トンネルへの影響範囲を側部1.4m、上部1.0mに設定し、その範囲内に攪拌翼が進入しないように本システムを用いて施工管理を行った。

本工事で適用したDCS機械を図-4に示す。工事管理室内及び施工機のオペレーター室内における管理画面を図-8に示す。本システムは専用ソフトを用

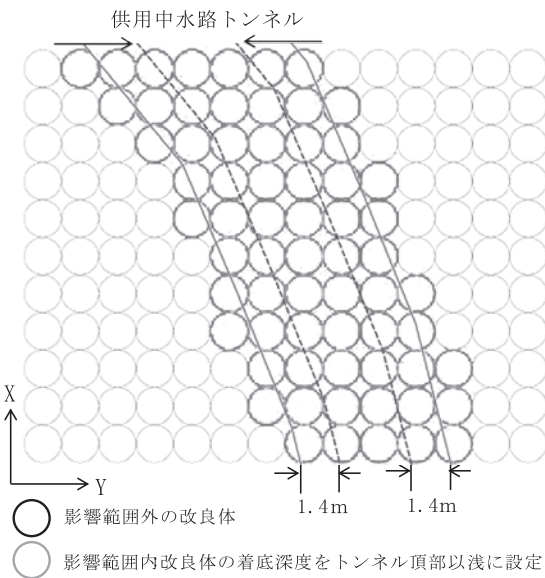


図-7 改良体配置平面図

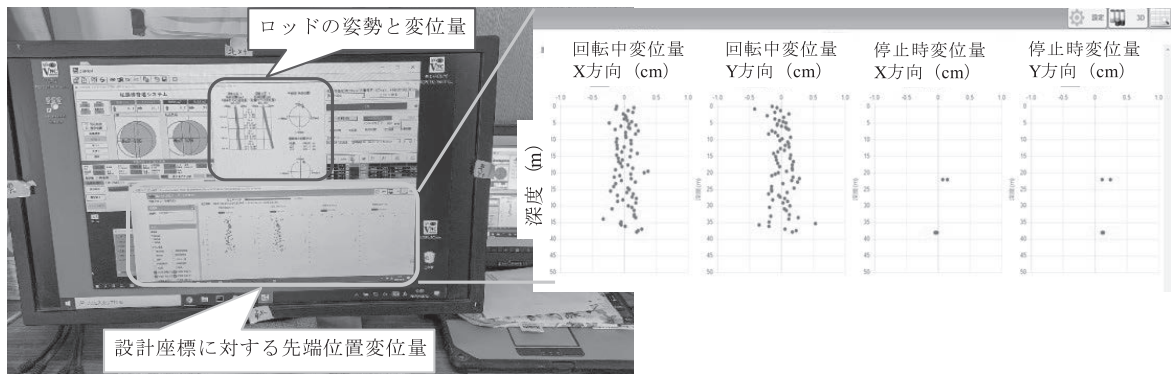
いて施工中のケーシングロッドの姿勢及び変位量をリアルタイムに表示する。地中の計測結果は3Dパイルビューアーで地表面変位と合成され、設計座標に対する先端位置変位量の軌跡を表示するとともに、ブラウザ上で工事関係者ともリアルタイムに情報を共有できる。

図-9に供用中の水路トンネル付近の施工状況を3次元リアルタイム可視化画面(3Dパイルビューアー)で示す。改良体の着色は、施工中の電流値であり、貫入・攪拌時の地盤の抵抗が大きいほど赤色に近づく。電流値は地盤剛性と正の相関を示すため、支持層確認の判断材料となる。3次元可視化画面の下部に着目すると、供用中のトンネルに対し所定の離隔を確保した施工状況を確認することができる。

図-10に供用中のトンネルに隣接する改良体先端の水平変位量のグラフを示す。本工法ははじめ深層混合処理工法では施工時の鉛直傾斜は経験的に1/100以下と言われている。これを参考に、施工深度40mの場合、水平方向の許容変位量を40cm以内とする管理基準値を設定した。計測結果よりすべての改良体の合成成分の先端位置の変位量が管理基準値に収まるように管理することができた。また、地盤改良施工による既設水路トンネルへの影響なく安全に施工を完了することができた。



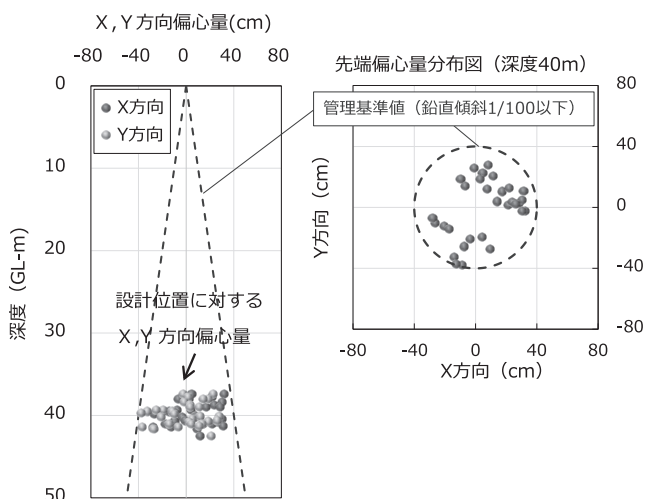
図-9 3次元リアルタイム可視化



(a) 専用PCの管理画面

(b) 3Dパイルビューアーによる先端位置確認画面

図-8 管理画面による先端位置監視状況



(a) X, Y 方向の深度分布図 (b) 先端位置の平面分布図
 図-10 水路に隣接する改良体下端の水平変位

5. おわりに

高精度傾斜計と地中・水中無線通信機能を搭載した大深度先端計測システムを開発し、大深度地盤改良施工に適用した。施工中の攪拌翼先端の位置を高精度で確認でき、設計位置との差異や既設構造物との離隔をリアルタイムに管理することが可能となった。

引き続き、適用事例を増やし施工リスク低減や施工管理の効率化に向け使用性の向上を図る。さらに他の地盤改良工事や杭・山留工事への展開も進める予定である。本システムが大深度掘削を伴う工事の出来形及

び品質の確保、施工管理の信頼性の向上及び現場での操作作業効率化に貢献できるよう技術の改良に努めるとともに、自動化施工への活用も検討する予定である。

JCMA

《参考文献》

- 1) グエン ホンソン・足立有史・山田実・高植俊彰・小林雅人・高田守康・稲積真哉, 本工法のリアルタイム位置計測管理システムの開発, 第14回地盤改良シンポジウム, 2020
- 2) 公益社団法人 日本材料学会, 本工法 技術評価証 第1006号 第2回更新版, 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施工管理システムの導入, 第13回地盤改良シンポジウム, 2018
- 4) Nguyen, H.S. et al., Integration of information and communication technology (ICT) into cement deep mixing method, International Journal of GEOMATE, 19, 74, 194-200, 2020

【筆者紹介】

足立 有史 (あだち ゆうじ)
 (株)安藤・間
 建設本部 技術研究所
 土木研究部長



グエン ホンソン (ぐえん ほんそん)
 (株)安藤・間
 建設本部 土木技術統括部 技術第二部
 地盤グループ
 主任

