

深層混合処理工法における 大深度先端位置計測システムの開発

グエン ホン ソン^{*1}・足立 有史^{*1}・山田 実^{*2}・高植 俊彰^{*3}・高田 守康^{*4}・稲積 真哉^{*5}

大深度施工や既存構造物の近接施工において、攪拌翼先端の軌跡をリアルタイムで高精度に計測・制御する技術が求められている。筆者らは、深層混合工法の施工中に攪拌翼の先端位置をリアルタイムで計測できるシステムを開発し、実際の施工に初めて適用した。本システムでは、ケーシングロッド内に設置した2軸傾斜計と地中無線通信装置により、作業に影響を与えることなく、オペレータや関係者が先端位置をリアルタイムで共有できる。施工深度43.7mにおいて、設計位置に対する施工時の偏心量は約40cm（約1/100）以下であり、既設の地下水路に影響を与えることなく安全に施工を完了した。本稿では、システム構成の詳細と施工現場での計測結果を紹介する。

キーワード： 大深度施工、リアルタイム計測、先端位置計測、地中・水中無線通信、深層混合処理工法

1. はじめに

近年、大規模な土構造物の新設・耐震補強など、さらには防災を目的とした大深度な地盤改良を含む基礎工事が増加している。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。一方、地盤改良における施工中の鉛直性管理は、施工機械の姿勢やオペレータの目視確認など、施工管理者の経験的管理が中心であった。また、地中でのケーシングロッドの傾斜はリーダーの傾斜と同じであると想定し、この仮定に基づいて掘削の先端位置を推定するため、先端位置を正確に把握できていない恐れがある。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取得後・見える化し、それらの情報を共有・分析が可能な技術のニーズが高まっている。

筆者らは、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、施工中の攪拌翼の先端位置をリアルタイムに直接計測可能な大深度先端計測システムを開発した。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軸傾斜計と地中の無線通信装置により、ロッドの繋ぎ換え作業等に影響を及ぼすことなく、操作中のオペレータ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、システムの構成、水中無線通信試

験及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（DCS）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）¹⁾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。

DCS工法用のケーシングロッドの断面写真を写真-1に示す。内翼と外翼を反対方向に回転させるために内軸（径339.7mm）と外軸（径457.2mm）の2軸構造となつて

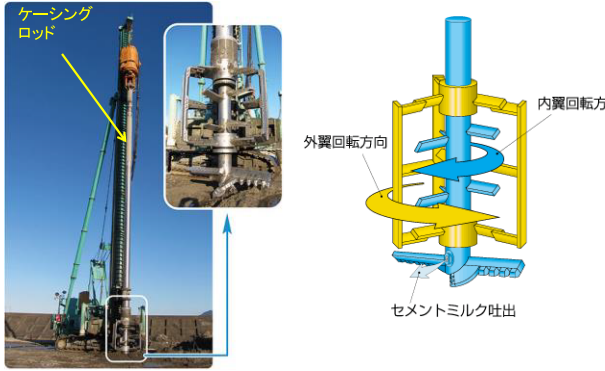


図-1 相対攪拌式深層混合処理（DCS）の施工機と攪拌翼

*1 地盤・基礎研究部 *2 大阪支店加西北条作業所 *3 青山機工株式会社 *4 システム建設株式会社 *5 芝浦工業大学

いる。さらに外軸は2つの径の異なる鋼管を一定の間隔(58.8mm)を設けた二重管構造となっている。この二重管の空間を利用して傾斜・バッテリー・通信基板のセットの格納スペースを確保した。

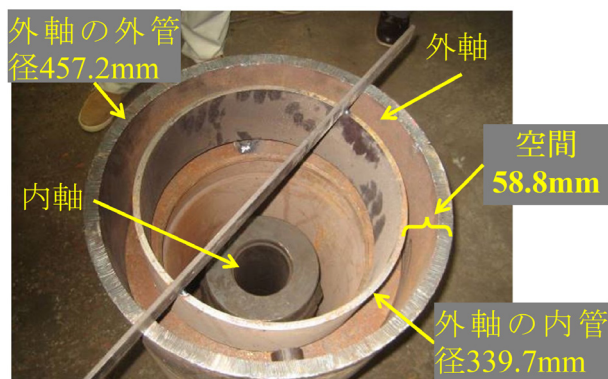


写真-1 DCS 工法用の二重管ケーシングロッドの構成

3. 計測システムの構成

図-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ぎ足し最大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。施工中、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。2軸傾斜計と通信基板を構成したノードを写真-2に示す。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。バッテリーは通常施工において土日を除く約1か月間の連続使用が可能な仕様となっている。このノード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。写真-3に示した収納ボックスは、水圧10MN/m²で耐圧防水が可能である。傾斜計の計測データの通信方法は、ケーシングロッド内では配線した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(電波周波数920MHz帯)とした。マルチホップ通信は、無線通信を使用して計測データをノードからノードへとバケツリレーのような転送する方式である²⁾。データ通信は、図-2に示すように深部から順次浅部の通信基板に通信されるマルチホップ方式とした。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

信に成功したことで、ケーシングロッドの脱着作業時に配線の手間をかけることなく、安定的に計測およびデータ通信が可能となった。写真-4に実際ケーシングロッドのジョイント部(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。次の第4章に述べる水中無線通信実験で、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された。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。

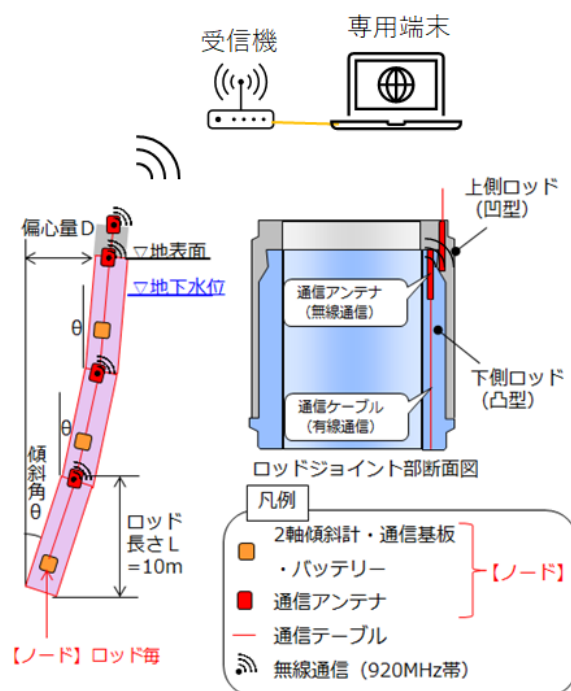


図-2 先端位置計測及びデータ通信の原理

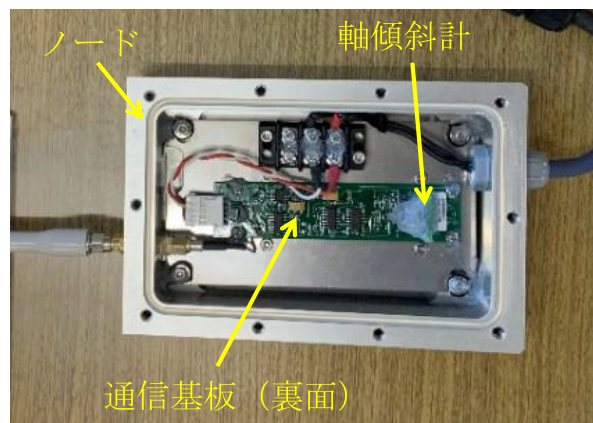


写真-2 2軸傾斜計と通信基板を構成したノード

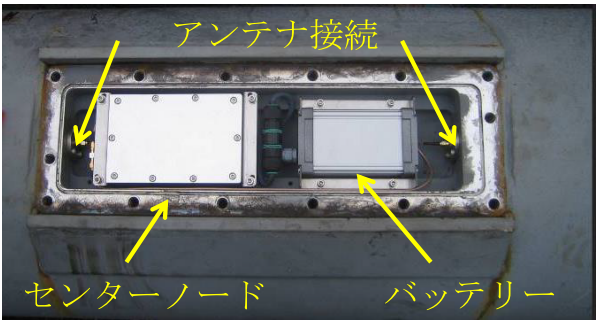


写真-3 収納ボックス内の構成



凸部（内径310mm）
(a) ジョイント凸部
凹部（内径310mm）
(b) ジョイント凹部

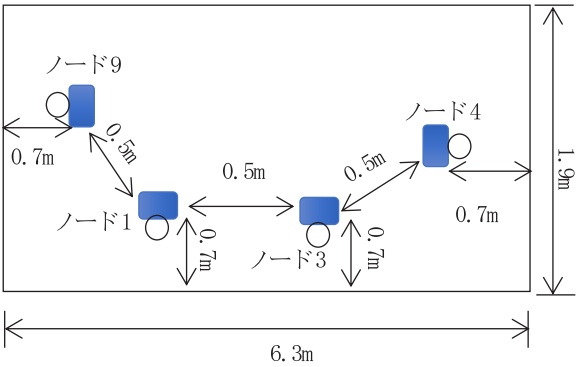
写真-4 ジョイント部にアンテナを取付けた状態

4. 水中無線通信試験

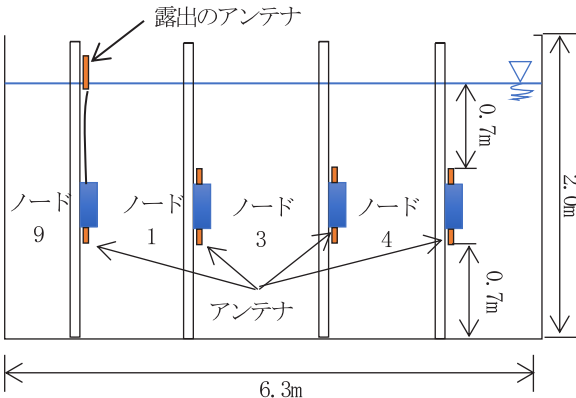
一般的に土水中では無線通信が困難であると言われていたが、土中は水中と比べて減衰が小さいため³⁾、より減衰が大きい水中で無線通信が可能であることが確認できれば、土水中の無線通信も可能であるとの考えのもと、事前に水中無線通信実験を実施した。その結果、周波数920MHz帯で0.6m程度の距離であれば通信が可能であることが確認された。そのため、今回新たに開発したノードにおいても920MHz帯を採用することとした。

図-3a, bに水中試験におけるノード配置図を示す。鋼製の水槽（長さ6.3m×幅1.9m×深さ2.0m 体積24m³）を満水にし、水槽長さの半分の3.0mを試験領域とした。ノード4個を0.5m程度の間隔で配置した（図-3a）。次に、水槽の壁の影響を受けないように水槽壁との離隔を事前試験で確認できた水中無線通信可能な距離0.6m以上（0.7m）確保してノードを設置した。図-3bに示すようにノード1, 3, 4の測定データを直接受信機と通信することがないように水面からアンテナ設置場所までの距離を0.7m程度設定した。また、ノード9に装備しているアンテナは空中に露出させ、データ処理専用端末の受信機と通信可能な状態とした。これにより、ノードで測定したデータが順次隣り合うノードを経由して転送され（ホップ通信機能）、ノード9からデータ処理専用端末の受信機に通信できることを確認する。写真-5に水中試験状況を示す。

表-1に水中無線通信確認試験結果を示す。ノード9のデータはアンテナを露出しているので直接受信機に送信している。ノード1はノード9を経由して受信機に送信されている。ノード3はノード1やノード9を経由して受信機に送信している。最後に、ノード9から最も遠い位置にあるノード4はノード3, 1, 9をそれぞれ経由して受信機に送信された。また、ノード3と4の位置を変更した場合、同様の通信経路を確認できた。以上の結



(a) 試験配置平面図



(b) 試験配置断面図

図-3 水中無線通信実験の配置図

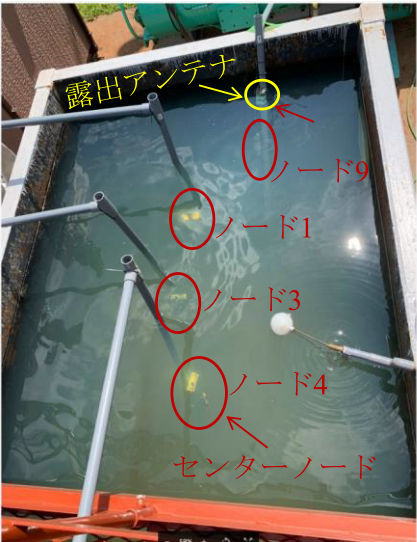


写真-5 水中無線通信試験状況

表－1 水中無線通信試験状況

ケース	ノード	通信経路	備考
ケース1 図-3の配置	9	9	直接通信
	1	1→9	1ホップ
	3	3→1→9	2ホップ
	4	4→3→1→9	3ホップ
ケース2 ノード3と4 の位置変更	9	9	直接通信
	1	1→9	1ホップ
	4	4→1→9	2ホップ
	3	3→4→1→9	3ホップ

果から、各ノードの傾斜データは水中においてもホップ通信機能により、近接するノードを経由して地上のデータ処理端末に通信できることが確認された。

5. 杭・地盤改良施工情報可視化システムに連携

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）^{4), 5)}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（図－8, 9参照）。攪拌翼先端の設計位置に対する偏心量は、施工機械のリーダー傾斜や全球測位衛星システム（GNSS）で測定する施工位置による地表面で偏心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偏心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



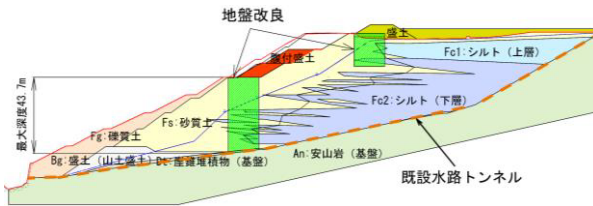
図－4 大深度先端位置計測システムを搭載した DCS 機

レーターと工事関係者が共有し、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。このため、施工上のリスクを低減、出来形・品質が確保できる。大深度先端位置計測システムのケーシングの収納ボックス、地上通信装置（発受信機）と 3D パイルビューアー用の GNSS のアンテナにより構成されている施工機械を図－4に示す。

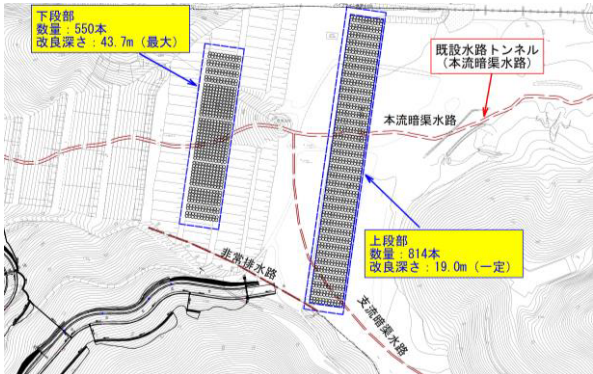
6. 適用事例

6.1 工事概要

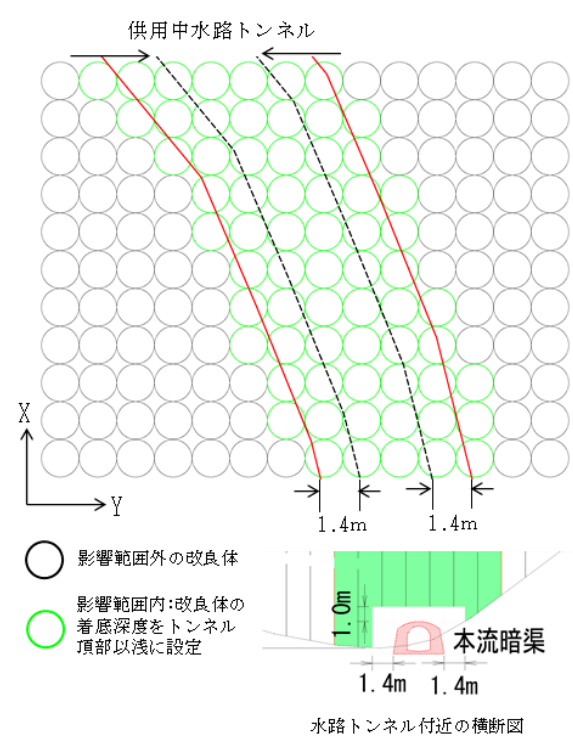
DCS 工法による大深度地盤改良工事に本システムを初適用した。この工事の標準断面を図－5と全体平面を図－6に表示する。高さ 100m 程度の既設高盛土の耐震補強・安定化を目的として、堤体盛土を深層混合処理工法により改良しせん断強度を増加させる工事である。深層混合処理工の改良径は 1600mm であり、上段部と下段部の 2 つのエリアを対象として実施した。改良体本数は合計約 1400 本と大規模な改良工事である。下段部の改良深さは最大 43.7m と大深度施工であった。また、下段部の改良体の下端部には既設の供用中水路トンネルが通過しているため、このトンネルに影響を与えないようにトンネルの頂部・側部に所定の離隔を確保しながらの施工が求められた。図－7に下段部の改良体と既設トンネル部の平面図を示す。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 の離隔を設置し、その範囲内に攪拌翼が進入しないように本先端位置計測システムを用いた管理を行った。



図－5 標準断面図



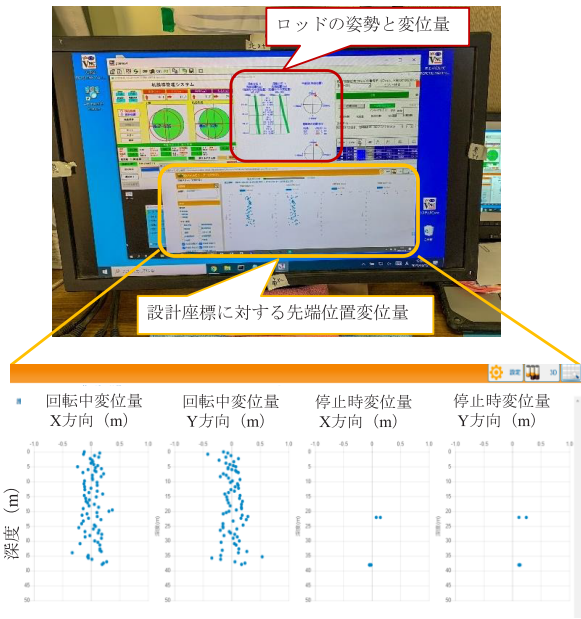
図－6 全体平面図



図－7 供用中水道トンネル付近の改良体配置図

6.2 計測状況及び結果

本工事で適用した DCS 施工機械を図－4 に示す．工事管理室内及び機械のオペレーター室内における管理画面を図－8 に示す．

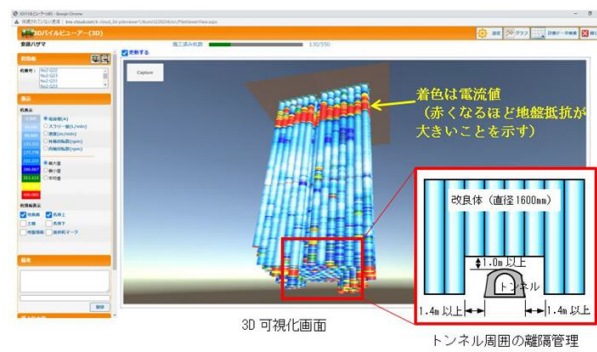


図－8 管理画面による先端位置監視状況

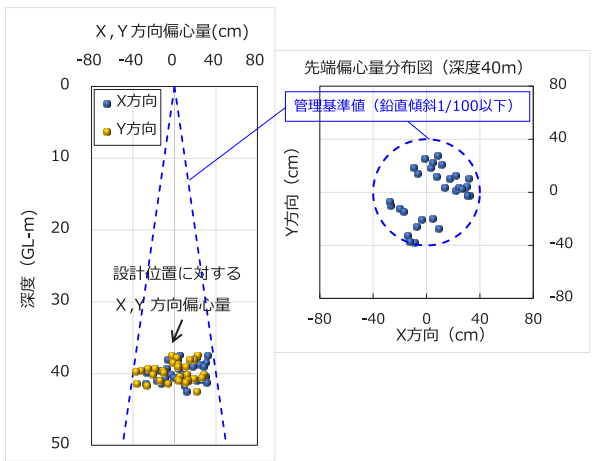
図－9 に供用中の水路トンネル付近の改良体の施工状況を可視化した 3D パイルビューアー画面を示す．改良体の着色は、施工中の電流値であり、貫入・攪拌時の地

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．3D パイルビューアーの画面下赤枠部分に着目すると、供用中のトンネルに対し所定の離隔を取り施工している様子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．この結果は、施工振動及びロッドの回転の影響を削除するため、ロッドを停止してから計測を行ったものである．深層混合処理工法では、施工時の鉛直精度は経験的に 1/100 以下と言われている．これを参考に、施工深度 43.7m 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．本システムの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供用中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 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 管理画面による先端位置監視状況

6.3 回転時の改良体先端部の軌跡について

従来、杭・地盤改良施工の鉛直性管理では、ケーシング

グロッドの傾斜角が常にリーダーの傾斜角と全長にわたって等しいと仮定している場合が多い。その場合、ケーシングロッド先端の位置、つまり設計位置に対する実際の偏心量は、リーダー傾斜角に基づいて推定され、ケーシングロッドが回転しても偏心量は変化しないことになる。しかし、今回開発した大深度先端位置計測システムにより、ケーシングロッドの回転が偏心量に与える影響を確認することが可能となった。このため、実機による確認試験を行った。改良体施工中に、ケーシングロッドを回転させ、傾斜計（収納ボックス）を4つの異なる方位（位置）で停止させて計測した。基準位置（0度）は、傾斜計の位置が施工機の向きと同じ方向かつ外側を向いている場合である。その後、ケーシングロッドを反時計回りに90度回転させて、残りの3つの方位で計測した。計測時の傾斜計位置の方位は、図-11に示す通りである。改良体の計測深度は、攪拌翼先端位置が地表にあるとき（掘削開始前）と所定深度に達したときに実施された。計測は、24.30mから33.74mの施工深さの改良体8本とした。

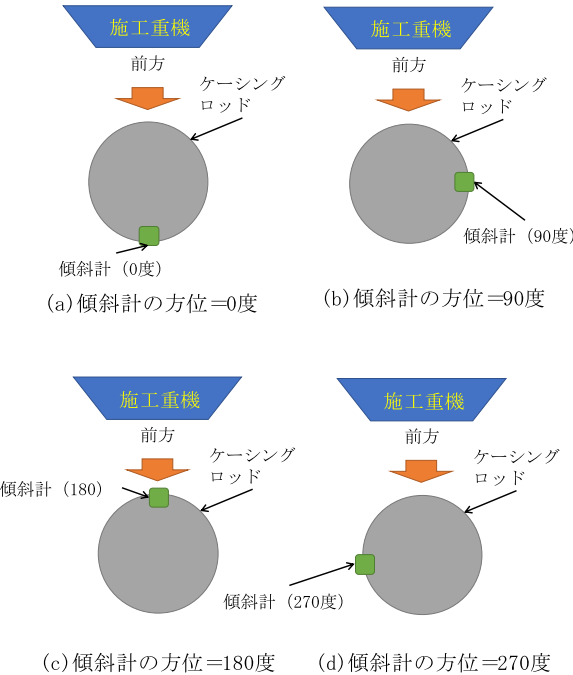


図-11 傾斜計の4方向に先端位置計測のイメージ

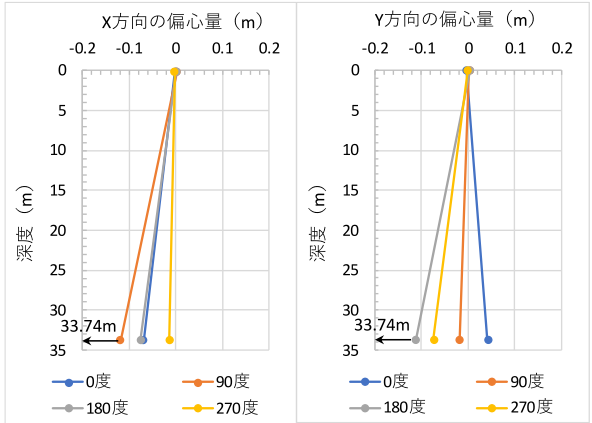
計測の結果は、表-2及び図-12（深度方向分布）、図-13（平面図）に示されている。結果から、先端位置の偏心量が、4つの異なる方向で測定した場合に異なることが明らかになった。掘削開始時、先端位置が地表にある状態では、偏心量は非常に小さく、4つの異なる方向において設計位置とほぼ一致した。しかし、先端位

置が所定深度33.74mに達すると、計測結果に明確な差異が見られた。X方向の偏心量は-11.9cm～-1.3cm、Y方向の偏心量は-11.3cm～4.1cmとなった。8本の改良体の計測結果を総合すると、上記の傾向が確認され、偏心量が設計値に対して、ケーシングロッドの回転による傾斜計位置の方向に依存していることが示唆される。この結果から、既存構造物に近い施工を行う際の離隔をより確実するためには、ケーシングロッドに付ける傾斜計で多方向から計測し離隔を確認することが重要であることが明らかになった。これにより、施工リスクを軽減することが可能となる。

ケーシングの回転によりケーシング先端位置が変化する理由は、掘削中に、ケーシングロッドが傾き、かつ曲がっていることが、今回の測定結果の原因の一つとして考えられる。回転中心軸が曲がっている状態でケーシングロッドが回転すると、傾斜計位置の方向によって設計位置からの偏りが異なることが想定される。このメカニズムは、図-14に示されている。今後、この現象をより深く理解するために、地中において各ケーシングロッドの傾斜計測データを詳細に分析する必要がある。

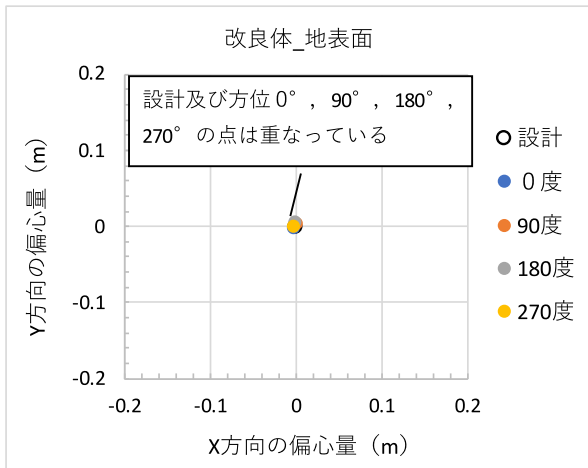
表-2 傾斜方位の計測結果

計測深度	傾斜計方位	偏心量 (cm)	
		X方向	Y方向
地表面 (0.00m)	0度	-0.1	-0.4
	90度	0.2	0.2
	180度	0.1	0.3
	270度	-0.2	-0.2
着底 (33.74m)	0度	-6.9	4.1
	90度	-11.9	-1.9
	180度	-7.5	-11.3
	270度	-1.3	-7.4

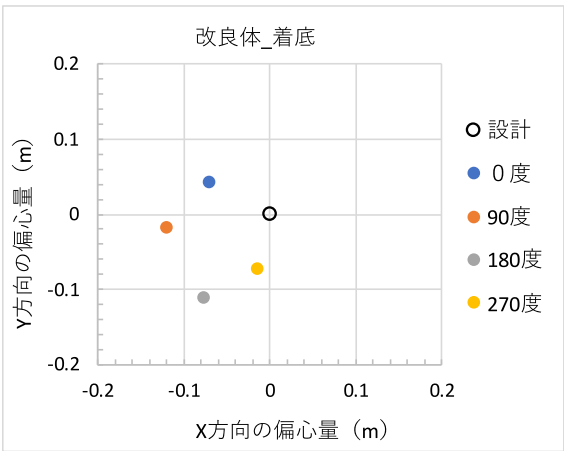


(a) X方向 (b) Y方向

図-12 傾斜計の4方向（X,Y 軸）計測結果の深度分布



(a) 傾斜計の4方向 (X,Y軸) 地表面位置



(b) 傾斜計の4方向 (X,Y軸) 先端位置

図-13 傾斜計の4方向 (X,Y軸) 計測結果の断面

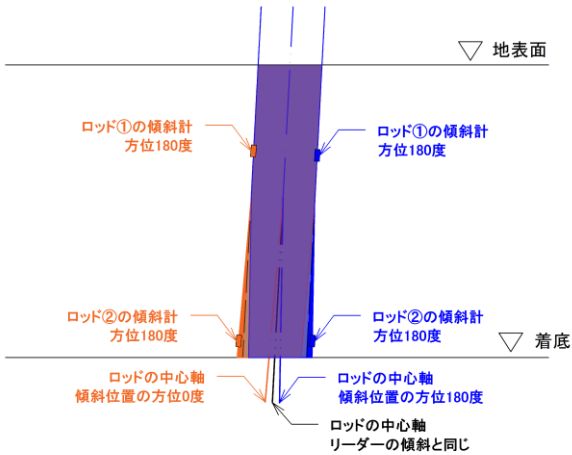


図-14 傾斜位置の方位による偏心量異なるのイメージ

7. おわり

高精度傾斜計と地中・水中無線通信機能を搭載する大深度先端計測システムを開発し、実際の大深度地盤

改良施工に初めて適用した。このシステムでは、深層混合処理工のDCS工法のケーシングロッド毎に高精度の2軸傾斜計と地中・水中通信装置を設置し、ケーシングロッドのジョイント部に通信アンテナを搭載した。このシステムにより、工事関係者は施工中の攪拌翼先端の位置を高精度で確認でき、実際の施工位置と設計位置とのずれ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。実際に最大施工深度43.7mの大深度地盤改良工事において、設計位置に対する施工時の偏心量は約40cm(約1/100)以下をリアルタイムに管理でき、既設水路トンネルに影響を与えることなく安全に施工を完了した。

引き続き、適用事例を増やし、施工リスクの低減や施工管理の効率化に貢献する。DCS工法以外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、現場での操作作業効率化に貢献できるよう、通信とバッテリー容量増加と防水機能強化などに関する技術の改善に努めるとともに、自動化施工への活用も検討する予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 寺田真介：無線マルチホップネットワークにおける自律分散経路制御に関する研究，博士学論文，東京大学大学院，2008.
- 3) 小澤正宜：水中での電波通信を用いたモジュール型水中ロボット開発，東京海洋大学博士論文，p. 43，2019.
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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：DCS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論文集，pp. 583～586，2020
- 7) 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：深層混合処理工法におけるリアルタイム先端位置計測システムの開発と適用事例，第15回地盤改良シンポジウム論文集，pp. 213～216，2022

Development of real-time measuring system of tip position with deep mixing methods

Hong-Son NGUYEN, Yuji ADACHI, Minoru YAMADA, Toshiaki TAKAUE, Moriyasu TAKADA and Shinya INAZUMI

The accuracy control during the construction in the soil improvement work was mainly the empirical control of the construction manager such as attitude of the construction machine and experience of the operator. There is a growing need for technology that capable of measuring and controlling the trajectory of the mixing tool tip in real time and with high accuracy in deep construction or construction in close proximity to existing structures. The authors developed a deep depth measurement system capable of measuring the tip position of a mixing tool in real time during construction for the Deep Cement Mixing method and applied it to actual construction work for the first time. In this system, the biaxial inclinometers in-stalled inside the casing rod and the underwater and underground set of communication equipment made it possible to share the tip position information acquired by the operator and related staffs through wireless communication without affecting the rod connection as well as disassemble work. In the actual construction depth of 43.7m deep, the eccentricity of the mixing tool tip during construction relative to the design position was within 40 cm or less (approximate 1/100 of depth), which was within the range of the construction error initially assumed, and the construction was completed safely without affecting the existing underground drainage structure. This article is going to describe the detailed of system configuration and present to measurement results of the first applied construction site.