

第 22 回(令和 5 年度)技術報告会
北海道土木技術会 土質基礎研究委員会

土質基礎に関する「D X 技術」技術報告会

報 告 集

令和 6 年 2 月

主催 北海道土木技術会 土質基礎研究委員会

目 次

セッション a

- a-1 デジタルトルクレンチを活用した補強土壁の新たな品質管理手法 …………… 1
岡三リビック株式会社 岩崎 凌子、林 豪人、木村 壮一
- a-2 デジタルデータを活用した真空圧密ドレーン工法の施工管理に関する適用事例 …………… 11
錦城護謨株式会社 榊原 司
真空圧密ドレーン工法研究会 山内 義文
株式会社 熊谷組 脇 英二、原 俊之
- a-3 北海道新幹線，共立・静狩地区地盤改良工事における DX の取り組み…………… 18
株式会社 不動テトラ 杉本 知弘、伊藤 竹史、柳崎 直樹
- a-4 施工現場における土質 BIM/CIM 活用事例…………… 25
宮坂建設工業株式会社 熊谷 大輔、板垣 和貴、林 啓二

セッション b

- b-1 V-JET 工法の生産性向上への取り組み…………… 31
三信建設工業株式会社 島野 嵐、山口 洋
- b-2 省力化および品質向上を実現する地盤改良管理システム
薬液注入制御・モニタリング装置「Grout Conductor」
変位抑制自動注入制御システム「Grout Producer」…………… 37
日特建設 株式会社 池田 淳、青木 園子
- b-3 地盤改良工事におけるICT施工事例
～ICT 地盤改良システム『Picture（ピクチャー）シリーズシステム』～…………… 42
小野田ケミコ株式会社 武田 裕樹、木下 和徳、梶原 裕太、大住 学
- b-4 圧入工法に関する施工技術「PPT システム®」…………… 46
株式会社 技研製作所 山口 雅史、岡田 充弘

デジタルトルクレンチを活用した補強土壁の新たな品質管理手法

岡三リビック株式会社

岩崎 凌子*1 林 豪人*2 木村 壮一*3

1. はじめに

補強土壁とは、垂直もしくは垂直に近い壁面工と補強材から構成され、壁面工に作用する土圧と盛土内に敷設した補強材の引抜き抵抗力との釣合いによって安定を保つ土留め構造物である。補強土壁は補強材の引抜き抵抗力によって安定を保つ構造であるが故に、締固め不足や不適切な盛土材を使用すれば、必要な引抜き抵抗力が発揮されず、壁面のはらみ出しや座屈等が生じる場合がある。盛土材の締固め密度の品質は現場密度試験によって実施するが、砂置換法による試験では、結果は即座に得られない。また、現行の現場密度試験の品質管理基準は、締固め土量 500 m³に 1 箇所の割合で実施することが標準であり、局所的な不良土の混入や締固め不足を見逃すリスクがある。また、盛土材料は降雨等による含水比の変化に加えて、現場発生土を使用する 경우가多く、施工中の土取り場の変更等によって土質が変化することもある。これらの現場状況の変化の都度、最大乾燥密度など設計の数値を見直すべきか判断するのは現実的に極めて難しい。

そこで、多数アンカー式補強土壁における盛土材の品質を補強材に作用する抵抗力を直接計測することにより管理できる品質管理手法を確立した。この品質管理手法によって品質管理の連続化、結果判定の迅速化が図られ、品質向上が期待できる。

本報告では、多数アンカー式補強土壁の新たな品質管理手法の確立や検証を目的に実施してきた屋内模型試験や屋外試験、実大実験から得られた知見について紹介する。

2. 多数アンカー式補強土壁及び品質管理システムの概要

2. 1 多数アンカー式補強土壁の構造

図-1 は多数アンカー式補強土壁の構造図である。補強材は、丸鋼（タイバー）の端部に支圧板（アンカープレート）が取り付けられた構造となっており、支圧板に作用する支圧アンカー力が引抜き抵抗力となっている。また、壁面材とタイバーの間には回転させると壁面工と支圧板との距離が伸縮するターンバックルが標準装備されている。本来、ターンバックルは壁面の角度を調整するための部材である。

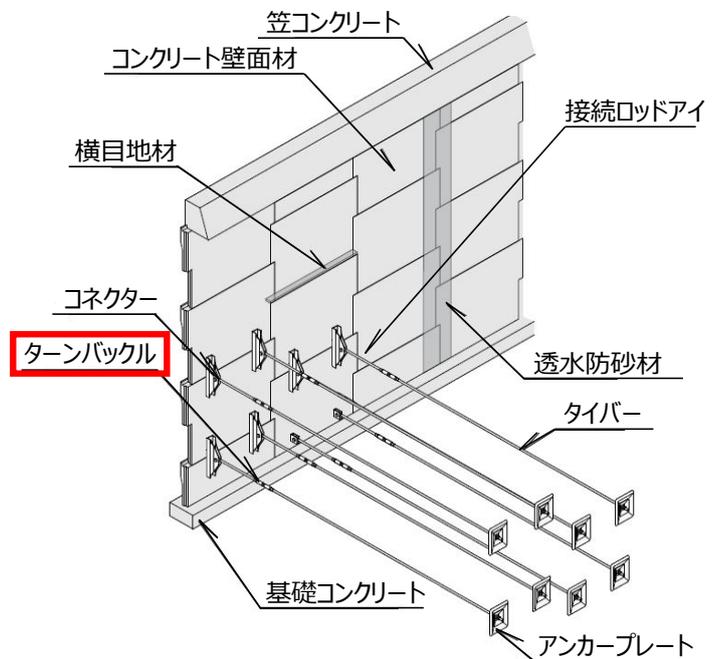


図-1 多数アンカー式補強土壁の構造図

2. 2 施工手順

多数アンカー式補強土壁は基本として、壁面材の設置、補強材の取付け、盛土材の敷均し・転圧を繰り返すことにより構築する。図-2 に基本的な施工手順を示す。

*1 Ryoko Iwasaki 札幌市中央区北 1 条東 2 丁目 5-8 ・ TEL 011-222-3351 ・ FAX 011-222-3929

*2 Taketo Hayashi 東京都港区港南 1 丁目 8-27 ・ TEL 03-5782-9088 ・ FAX 03-3450-5380

*3 Soichi Kimura 札幌市中央区北 1 条東 2 丁目 5-8 ・ TEL 011-222-3351 ・ FAX 011-222-3929

①基礎工

基礎コンクリートを設置する。基礎コンクリートの良否は壁全体のレベル調整に大きな影響を与えるため、念入りに水平を出して施工する必要がある。

②壁面材設置

設計図書に準拠した規格の壁面材を設置する。各壁面材は水準器を利用して鉛直度と水平度を確認する。壁面材同士はコネクターを用いて、壁裏側で連結する。

③補強材取付け

壁面材に取り付けられたコネクターに補強材を連結する。タイバーを壁背面に対して垂直かつ水平間隔が0.75mになるように設置する。タイバーにたわみを生じさせないようにするため、アンカープレート設置面は150mm程度盛土材を掘削する。

④土の敷均し・転圧

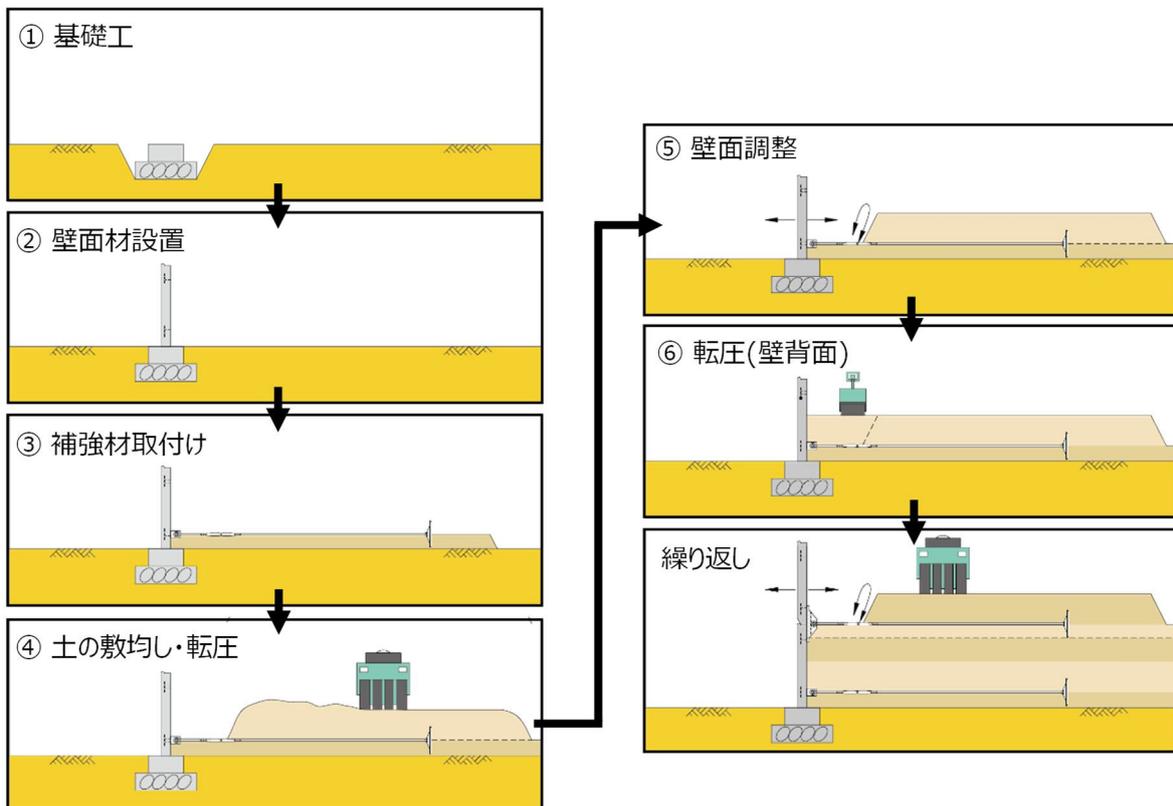
敷均し厚は、締固め層の下層部でも所定の締固め度を確保できることを確認して、1層の仕上がり厚さは最大0.25mとする。タイバーの鉛直敷設間隔は0.5mであるため、これを2層に分けて敷均しを行う。壁面調整を行うため、壁面より1m程度はこの段階での撒き出しは行わない。引抜き抵抗力はアンカープレートにかかる支圧アンカー力によって発揮されるため、アンカープレート付近は特に入念に締固めを行う。現場密度試験での品質管理基準は、締固め土量500m³あたり1箇所の割合で行う。

⑤壁面調整

盛土材の敷均し・転圧により壁面材が多少ずれた場合や、壁面材の鉛直度が適正でない場合にターンバックルにて調整する。

⑥転圧（壁背面）

壁面際の締固めは薄層で敷均し、人力による入念な施工を行う。



図－2 基本的な施工手順の概略図

2. 3 施工時の品質管理システムの概要

現行の現場密度試験での品質管理基準は、締固め土量 500 m³あたり 1 箇所の割合で行うため、盛土材の適否を簡便、頻繁そして即座に確認することができない。したがって、施工中の変状リスクを減らすことを目的として、デジタルトルクレンチを活用した、施工時の品質管理システムを開発した。多数アンカー式補強土壁の施工の際、通常は壁面から 1m 程度の範囲には盛土材を入れず、補強材の設置後に厚層が 0.25m となるように敷均し及び転圧を行った状態で、壁面材の鉛直度等の調整を実施する。壁面調整はターンバックルを用いて行われるが、回転させる際の抵抗（トルク値）はアンカープレートによって発揮される引抜き抵抗力の大きさによって変化すると考えられる。また、発揮される引抜き抵抗力の大きさはアンカープレート周辺における盛土材の力学的性質に依存すると考えられ、壁面材とアンカープレートの距離を縮める側へ回転させる時のトルク値を把握することで、アンカープレート周辺の盛土材が壁面を支えるのに十分な引抜き抵抗力を発揮できるか否かを即座に確認できると考えられる。図-3 にトルク管理使用時のフローチャート、図-4 に施工時の品質管理システムの概略図を示す。3 章にて述べるが、屋内模型試験や供用目的で構築された多数アンカー式補強土壁において、トルク値と引抜き抵抗力の間に正の相関があることを確認している。

このトルク値を施工現場だけでなく、遠隔地でもリアルタイムで確認できるように、通信手段は、無線送信機能を備えたデジタルトルクレンチと LTE 搭載のモバイル PC を使用した。また、トルク値の変化は付属のアプリケーションソフトによってモバイル PC にリアルタイムで描画され、その結果は自動的にクラウドストレージに保存されるようにした。

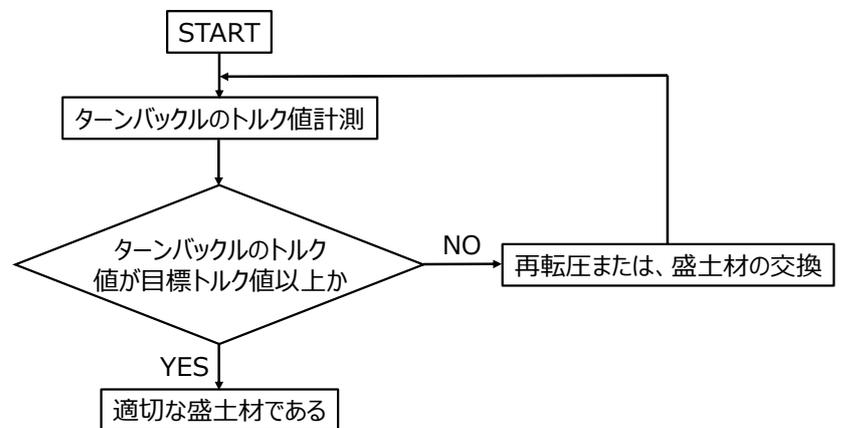


図-3 トルク管理フローチャート

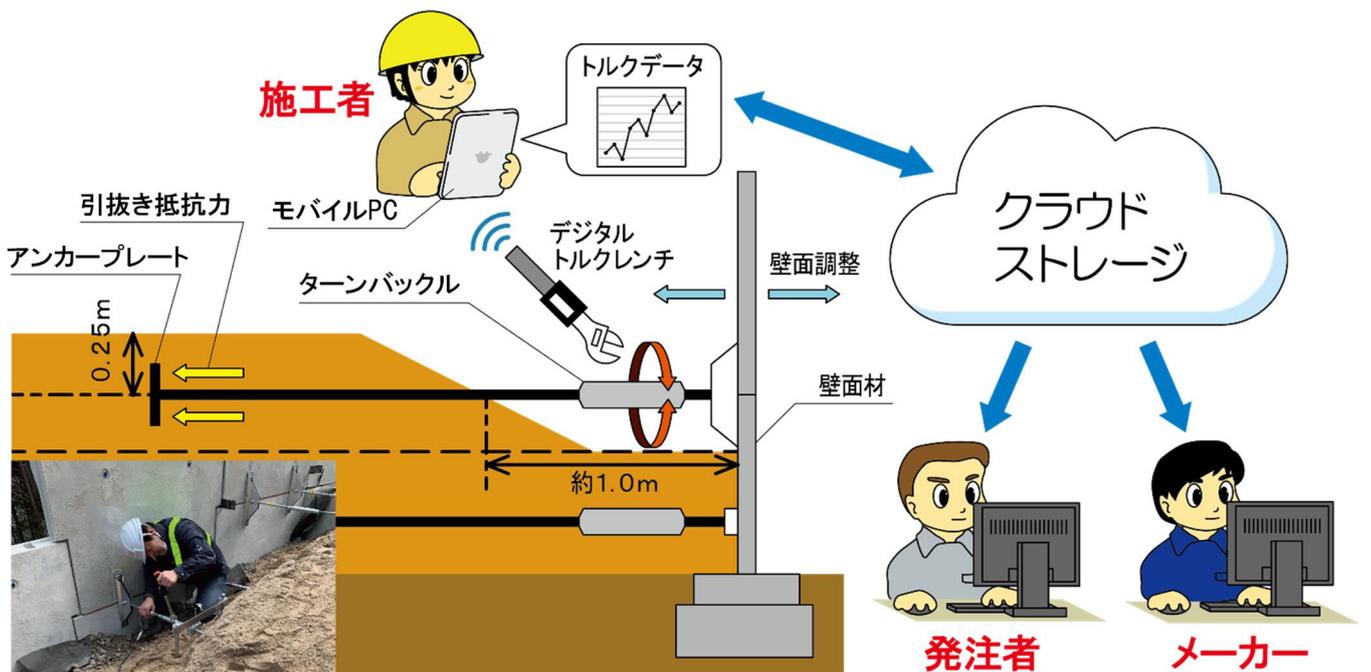


図-4 施工時の品質管理システムの概略図

このデータを施工者だけでなく、遠隔地にいる発注者等と共有すれば、不良な盛土材が混入する等によってトルク値が急激に変化した際に、速やかな情報交換と対応策の検討を促すことにつながり、たとえ竣工後に変状した場合でも、この記録データは変状要因の特定に貢献すると考えられる。また、データを共有することにより、遠隔地から施工の進捗状況を随時確認することが可能となる。

なお、3章に示す試験におけるデジタルトルクレンチは、9.5sq.デジラチェ[メモルク]モンキタイプ 無線ホストモジュールセット for Win を使用した（表-1参照）。

表-1 使用したデジタルトルクレンチの詳細

製品名	9.5sq.デジラチェ[メモルク] モンキタイプ無線ホストモジュールセットfor Win
製造	KTC
型番	TGED085W36Z
トルク測定範囲	17~85N・m
測定精度	トルク測定範囲内で±3%+1digit (digit=最小表示単位)
測定単位	N・m
無線距離	~20m (作業環境により変化する)

3. 実験内容と結果

3. 1 屋内模型試験

写真-1は50mm角のアンカープレートを使用した屋内模型試験の様子を示したものである。土槽に設けた反力板に荷重計を設置して引抜き抵抗力を計測しながら、ターンバックルのトルク値を計測した。実験には2種類の盛土材（粘性土と砂質土）を使用し、締固め度と含水比を変化させて計5回実施した。

図-5はターンバックルを90度ずつ回転させた際に得られた最大トルクと最大引抜き抵抗力の関係を示したものである。盛土材や締固め度によらず、全体的に正の相関が見られ、ターンバックルのトルク値から概略的に引抜き抵抗力を把握することは十分に可能であることが分かる。

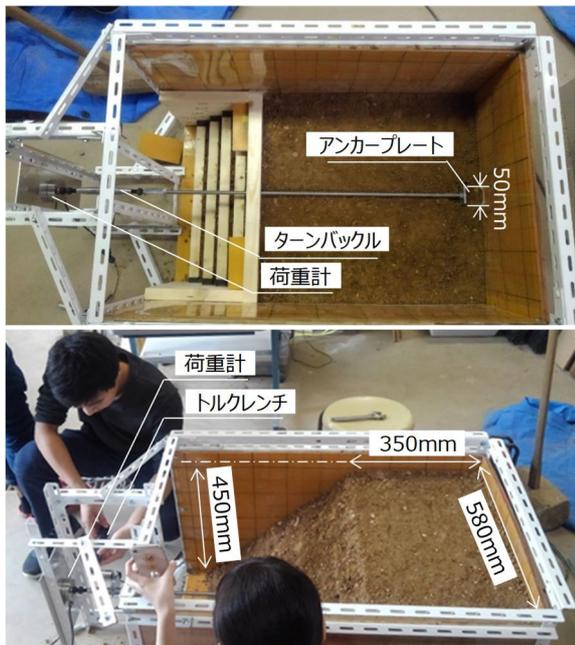


写真-1 屋内模型試験

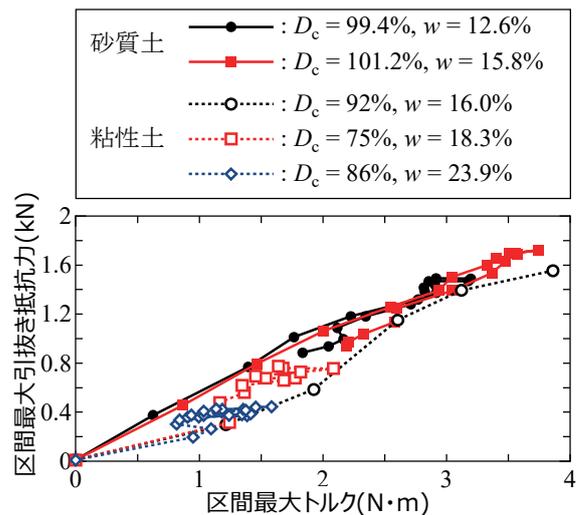


図-5 最大トルクと最大引抜き抵抗力の関係

3. 2 屋外試験

屋内模型試験から得られたトルク値と引抜き抵抗力の関係が、実際の多数アンカー式補強土壁の補強材でも同様の関係が得られるか否か、また同時に計測上の問題点の有無について検討するために以下の屋外試験を実施した。これらの屋外試験は、国土交通省「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」（データを活用して土木工事における品質管理の高度化等を図る技術）に基づき、北海道開発局函館開発建設部発注の「函館新外環状道路函館市上湯川西改良工事」内で実施した。

写真-2は試験の様子を示したものである。なお、この試験では壁面材の代わりにバックホーのバケットを反力として実施した。必要とするトルクレンチの仕様（最大トルク 100N・m 程度）や、上述の屋内模型試験と同様にトルク値と引抜き抵抗力に正の相関があること、さらには引抜き抵抗力が十分に大きい場合には、当然ながらアンカープレート側は変位せず、反力として使用したバックホーのバケット側（実際には壁面材）が変位することが確認された。また、施工に悪影響を与えないことを考慮すると、ターンバックルの回転は 90 度ずつ 2 回転（計測回数 8）程度が望ましいこと、壁面とターンバックルを接続するロッドアイと呼ばれる部材はアンカープレート上に盛土材が転圧された状態でも交換が可能であるため、写真-3に示すようにこの部材中に荷重計を埋め込むことで、屋内模型試験や試験盛土と同じように実際の補強土壁の部材を用いた場合でも引抜き抵抗力を計測できると判断した。

写真-4は以上の検討結果を踏まえ、函館新外環状道路の建設に伴って施工中の多数アンカー式補強土壁でトルク値等を計測した際の様子を示したものである。なお、ここでは予め壁面材とターンバックルとの間に設置されていたロッドアイを荷重計が内蔵されたものと交換し、先述した試験と同様に引抜き抵抗力の計測も行った。また、簡易な不動点を設置して、アンカープレート側の変位についても計測した。



写真-2 屋外に構築した試験盛土を用いた試験の様子

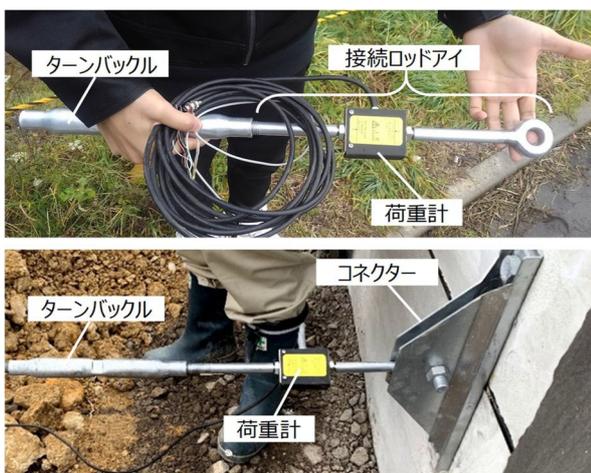


写真-3 荷重計を内蔵した接続ロッドアイ



写真-4 施工中の補強土壁で実施した試験の様子

図-6は異なる2箇所の補強材において、ターンバックルを 90 度ずつ 2 回転させた際の各区間における最大トルクと最大引抜き抵抗力の変化、そのときの壁面やアンカープレートの変位を示したものである。ここで、

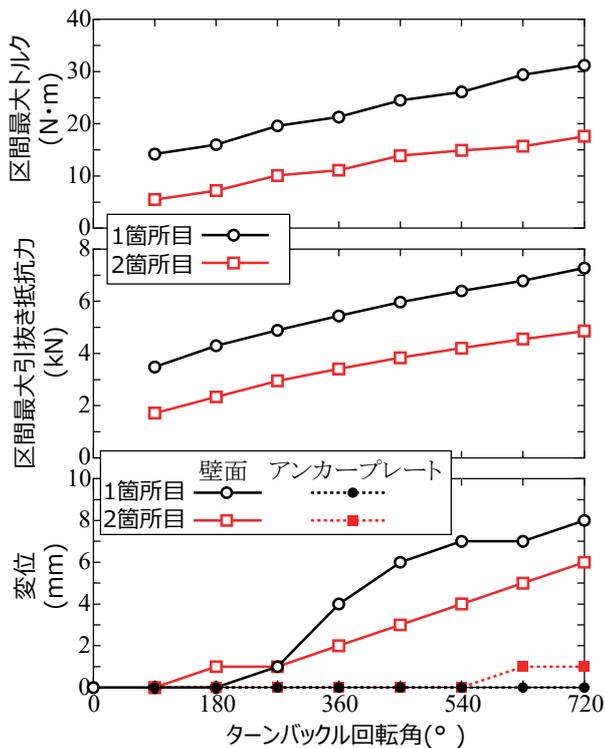


図-6 施工中の補強土壁での計測結果

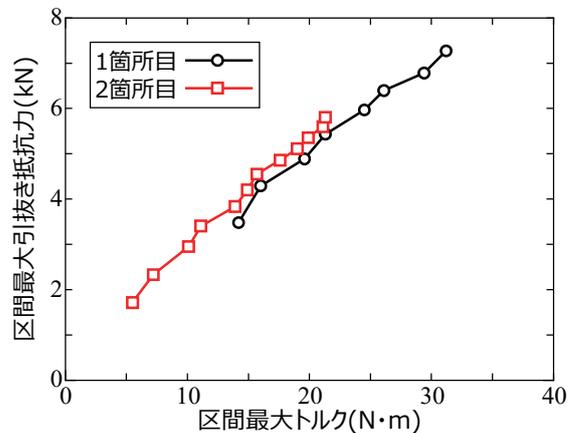


図-7 最大トルクと最大引抜き抵抗力の関係

アンカープレートの変位はタイバーに付けた目印と不動計測点との変位から求めた（写真-4参照）。計測した2箇所の補強材において、計測開始時のトルク値が異なっているが、いずれもターンバックルの回転に伴って荷重とトルク値が上昇していることが分かる。また、引抜き抵抗力が増加してもアンカープレートはほぼ動いていないことが分かる。

図-7は得られた区間最大引抜き抵抗力と区間最大トルクの関係を示したものである。試験開始時のトルク値と引抜き抵抗力の大きさが異なるにもかかわらず、両試験結果は同様な関係にあることが分かる。

これらの試験より、実際の補強材においてもターンバックル回転時のトルク値から間接的に引抜き抵抗力を把握できる目途が立った。また、写真-5に示すように多数アンカー式補強土壁の建設過程において構築した品質管理システムについての検証も実施しており、計測したデータは近くの現場事務所だけでなく、函館道路事務所や、遠隔地にあるメーカーでも随時確認した。計測データの急変がきっかけとなって、電話確認が行われるなど、発注者、施工者、補強土壁工法メーカーの密な情報交換や共有に役立つことも確認した。例えば、実施工で盛土の品質管理基準を満たさなかった場合、砂置換法を用いた現場密度試験では結果が出るのに時間を要するが、トルク値による品質管理であればその場で盛土の品質が分かり、即座に対応が可能となる。

しかし、システムの確立には多様な盛土材を用いた更なる検証が必要だと考え、以下に示す実大実験を実施した。



写真-5 施工で行ったトルク計測の様子

3. 3 実大実験

図-8はターンバックルを用いた施工時の品質管理手法を確立するために構築した多数アンカー式補強土壁の概略図である。高さは5m（地上部は4.5m）とし、図中に赤丸で示した位置にある補強材でターンバックル回転時の区間最大トルク値と区間最大引抜き抵抗力との関係を計測した。表-2は図-8中に示した各計測点で使用した盛土材やその含水比、締固め度などをまとめたものである。本実大実験では、含水比の変化などにより盛土材として不適な材料が混入した場合にトルク計測を用いて察知できるか否かを検証することも目的としているため、本来であれば使用しない可能性の高い粘性土を使用し、安全に留意した上で散水や転圧方法・回数によって意図的に含水比や締固め度を変化させながら施工をした（写真-6参照）。また、5段目についてはアンカープレート周辺のみを砕石（C-40）で置換した。図-9は施工時の計測方法を示しており、先述した屋外試験と同様に、壁面から1m程度のターンバックル周辺を除く領域にあるタイバーが0.25m転圧された状態で計測を行った。実際の引抜き抵抗力はロードセルを装着した接続ロッドアイによって計測し、ターンバックルを90度ずつ2回転程度回転させる過程で、各区間におけるトルクの最大値と引抜き抵抗力の最大値との関係を記録した。また、簡易的な不動点を設置し、ターンバックル回転に伴う（アンカープレート側の）補強材の変位を1mm単位で目視計測した。



写真-6 施工の様子

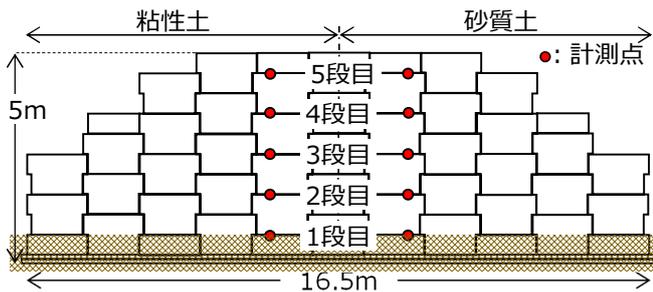


図-8 構築した多数アンカー式補強土壁の概略図

表-2 盛土材に関するまとめ

計測点	盛土材	最大乾燥密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)	含水比 (%)	締固め度 (%)
1段目	粘性土	1.41	28.2	35.6	94.4
2段目				32.3	98.0
3段目				34.2	96.2
4段目				36.8	96.4
5段目				砕石置換	2.13
1段目	砂質土	1.36	26.8	26.6	87.3
2段目				21.7	88.2
3段目				20.6	85.4
4段目				29.0	86.1
5段目				砕石置換	2.13

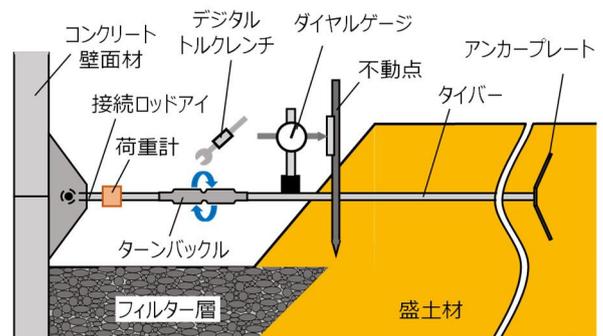


図-9 施工時の計測方法

図-10は補強土壁に示した計測点のうち、代表的な3箇所における補強材変位と区間最大トルクとの関係を示したものである。まず、粘性土に比べて砂質土の方が、小さい補強材変位で大きなトルク値が発揮されていることが分かる。粘性土は含水比の高い4段目の方が発揮されるトルク値が小さいこともわかる。さらに、アンカープレート周辺を砕石（C-40）で置換した5段目は砂質土・粘性土ともに、小さな変位量で大きなトルク値が発揮されていることが確認できる。

図-11は各計測時に得られたターンバックル回転時の区間最大トルクと区間最大引抜き抵抗力との関係を示したものである。図中にはこの実大実験で計測した結果に加えて、他のアンカー補強土壁で計測した結果についてもプロットしている。この関係は盛土材の土質によらないことが分かり、盛土材の種類に関係なくターンバックル回転時のトルク値から引抜き抵抗力の把握が可能であることが分かる。また、図中には計測時の土被り0.25mにおいて、設計上アンカープレートに期待される地震時の許容抵抗力の大きさ(3.3kN)を示しているが、それに相当するトルク値は概ね12N・mを超えていることが分かる。

図-12は計測時の補強材変位と区間最大トルクとの関係を示したものである。粘性土はアンカープレート側の変位が大きくなってトルク値12N・mを発揮できていないのに対し、碎石置換や礫質土などの良質な盛土材では2~3mm以内の変位量で12N・mを超えていることが分かる。これらのことから、ターンバックル回転時のトルク値とアンカープレート側の変位量を計測することで、盛土材の適否を確認しながら施工できると判断した。さらに、多数アンカー式補強土壁における引抜き抵抗力は構造上アンカープレート周辺の盛土材に大きく影響されており、周辺を碎石置換するだけでも引抜き抵抗力の改善が可能となることが分かる。

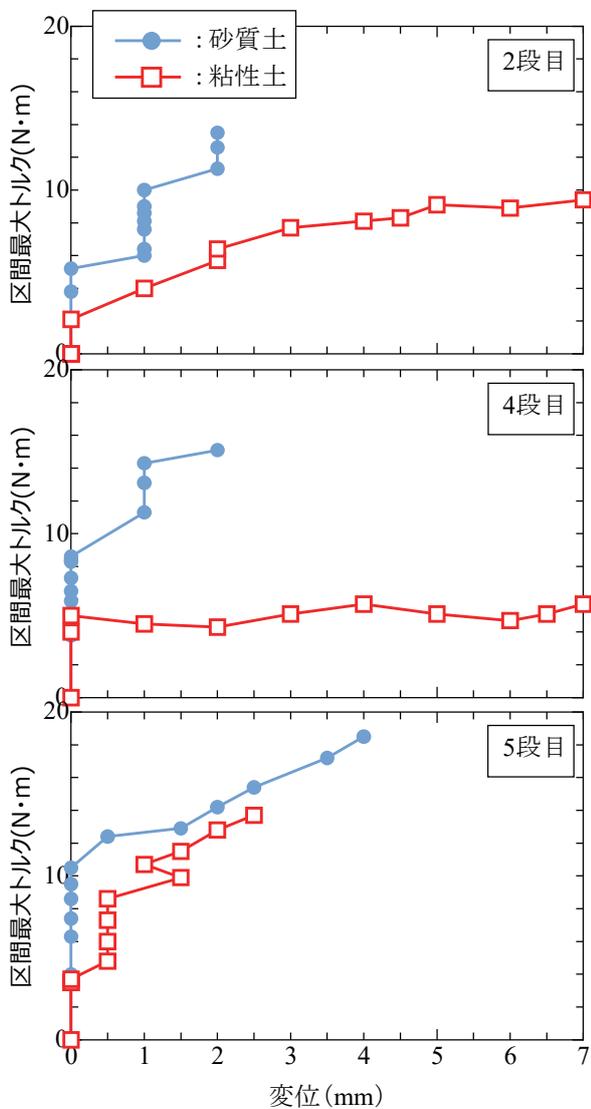


図-10 代表的な補強材変位と最大トルクの関係

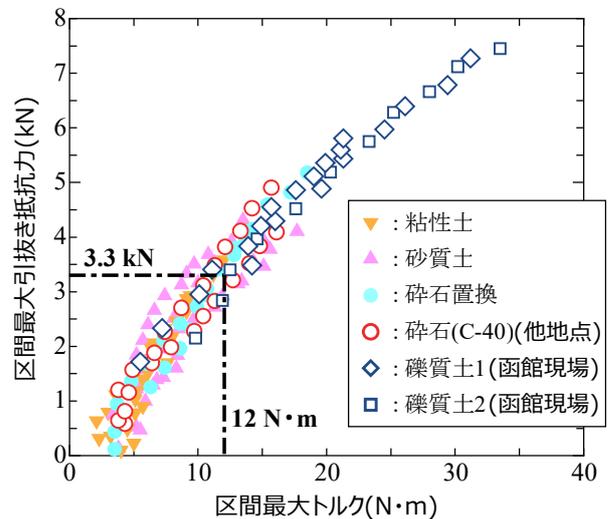


図-11 最大トルクと最大引抜き抵抗力の関係

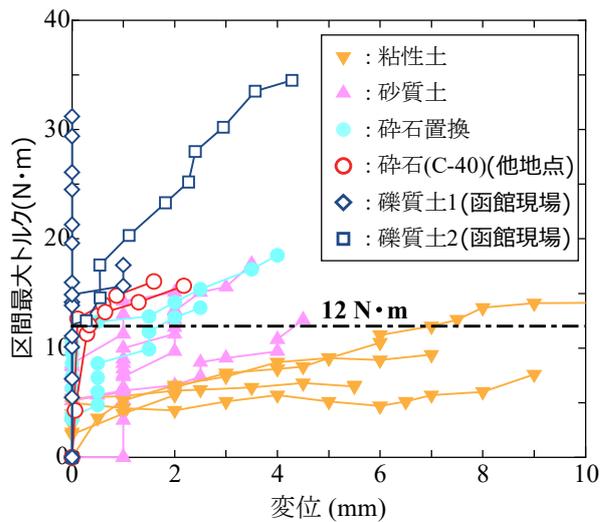


図-12 補強材変位と最大トルクの関係

4. まとめ

多数アンカー式補強土壁の補強材を使って施工中に高い頻度で盛土材料の適否を確認・共有できる品質管理手法に関して屋内模型試験や屋外試験、実大実験に基づく検討を行った。また、この中で多数アンカー式補強土壁の補強材を活用して、遠隔地でもリアルタイムで盛土材や土質の変化を把握することができたことから、より高品質で安全性の高い補強土壁の構築が可能になると考えられる。以下に、得られた知見をまとめる。

- ・無線送信機能付きのデジタルトルクレンチとクラウドストレージを活用することで、多数アンカー式補強土壁におけるターンバックル回転時のトルクデータを遠隔地でもリアルタイムで共有するシステムを構築した。
- ・タイバーに標準装備されているターンバックルを用いることで、補強材をわずかに縮めた際の引抜き抵抗力を把握できることが明らかとなり、回転時のトルクによって盛土材料の適否を判別できることが分かった。
- ・ターンバックル回転時のトルクとアンカープレート側の変位量を用いることで、盛土材の適否を簡単かつ頻繁に確認しながら施工を進めることが十分に可能であることが分かった。
- ・アンカープレート周辺の盛土材を砕石置換するだけでも引抜き抵抗力の改善が可能となることが分かった。

なお、本技術は国土交通省公共工事等における新技術活用システム（NETIS）に登録（HK-220006-A）されており、今後の活用が期待されている。

5. おわりに

公共事業を効率的に推進することを目的として、公共工事のコスト縮減があらゆる面で求められている。補強土壁においても同様に経済性のみが重要視され、品質がなおざりになっている場合もある。「トルク管理システム」は補強土壁の品質向上が期待される技術であることから、我々は経済性のみならず、トルク管理システムを活用して補強土壁の品質向上に貢献したい。ついては、これらの技術の積極的な採用をお願いするとともに、周知活動に尽力していきたい。

参考文献

- 1) 松本日和、川口貴之、中村大、安達謙二、小浪岳治、村田松一：トルクデータを活用したアンカー補強土壁の品質管理に関する基礎的研究、土木学会北海道支部論文報告集、Vol.76、2020.
- 2) 松本日和、川口貴之、川尻峻三、館林雅治、安達謙二、林豪人、小浪岳治、：補強材抵抗力の計測に基づくアンカー補強土壁の品質管理システムに関する検討、ジオシンセティックス論文集、Vol.35、pp.121-128、2020.
- 3) 岩崎凌子、安達謙二、林豪人、小浪岳治、川口貴之：補強材を活用した補強土壁の品質管理および健全性評価手法に関する研究、地盤工学会北海道支部技術報告集、Vol.63、pp.99-106、2023.
- 4) 土木研究センター：多数アンカー式補強土壁工法設計・施工マニュアル 第4版、2014.
- 5) 地盤工学会：地盤工学用語辞典、2006.
- 6) 川尻峻三、澁谷啓、鳥居宣之：ジオテキスタイル補強土壁の変状メカニズムに関する事例研究、地盤工学ジャーナル、Vol.6、No.1、pp.15-25、2011.
- 7) 日経BP社、日経コンストラクション2019年7月22日号、pp.16-17、2019.
- 8) 川尻峻三、橋本聖、川口貴之：北海道東部で結成した「補強土壁わかってん会」の取り組み～現場での協働関係向上による補強土壁の品質確保への挑戦～、地盤工学会誌、No.742/743、pp.20-21、2019.

- 9) 東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社：設計要領第二集 擁壁保全編・擁壁建設編 カルバート保全編・カルバート建設編，2019.
- 10) 国立研究開発法人 土木研究所：補強土壁の維持管理手法の開発に関する共同研究、486号、2016.
- 11) 橋本聖，山梨高裕，林宏親，山木正彦：既設アンカー補強土壁の健全性評価手法について、第50回地盤工学研究発表会発表講演集、pp.1667-1668、2015.
- 12) 許晋碩、澁谷啓、鄭珉守：ジオテキスタイル補強土壁における施工中の変状トラブルの原因と対策工に関する数値解析的研究、ジオシンセティックス論文集、Vol.26、pp.19-26、2011.
- 13) 橋本聖、川尻峻三、川口貴之、林憲裕、林宏親：変状したジオテキスタイル補強土壁に関する調査事例、地盤工学会北海道支部技術報告集、Vol.57、pp.347-352、2017.
- 14) 中根淳：補強土工法の設計・施工マニュアルの改訂概要（その1）、土木技術資料、Vol.55、No.12、pp.58-61、2013.
- 15) 土木学会 構造工学委員会 構造物ヘルスマニタリングにおける意思決定手法研究小委員会：活動報告書 構造物ヘルスマニタリングにおける意思決定、2017.
- 16) 辻慎一郎、久保哲也：ジオテキスタイル補強土壁工法の健全性診断に関する取組み、ジオシンセティックス技術情報、Vol.35、No.2、pp.12-13、2019.
- 17) 許晋碩、澁谷啓、野並賢、白濟民、丁經凡、黄雲植：補強土壁を併用した高盛土の施工時発生した変形の原因解明と対策工に関する事例研究、ジオシンセティックス論文集、Vol.32、pp.45-52、2017.
- 18) 原田道幸、川口貴之、川尻峻三、中村大、大谷匠、山下聡：積雪寒冷環境下におけるジオセルを用いた斜面安定工に関する検討、ジオシンセティックス論文集、Vol.33、pp.91-98、2018.

デジタルデータを活用した真空圧密ドレーン工法の施工管理に関する適用事例

錦城護謨株式会社 榑原 司*1

真空圧密ドレーン工法研究会 山内 義文*1

株式会社熊谷組 脇 英二*2 原 俊之*2

1. はじめに

近年、圧密促進工法として上載荷重に真空荷重を用い、盛土の低減や変位抑制を目的とした「真空圧密ドレーン工法」が採用されている¹⁾。類似の一般的な工法としてプレファブリケイティッドバーチカルドレーン工法（以下、PVD工法）が挙げられ、粘土地盤の圧密改良工法として広く利用されている。PVD工法は、地盤中にドレーン材を等間隔で打込み排水距離を短縮して圧密を促進する工法で、ドレーン材を下部排水層まで貫入させ両面排水とするのが一般的である。しかし、真空圧密ドレーン工法では真空圧を確保するため、粘性土の上部や改良下端に負圧シール層が必要で、負圧シール層を含めた地層構成を工事着手前調査で推定し、その地層構成に沿ってドレーン材の仕様を決定するなどの施工管理・品質管理が重要になる。

DX技術としての真空圧密ドレーン工法における、デジタルデータを活用した施工管理・品質管理としては、工事着手前調査での地層構成の推定、ドレーン仕様の決定、ドレーン打設にデジタル式記録計を用いた全打設本数の管理、作用負圧や盛土安定管理などの地盤計測データを一元化しクラウドでの閲覧や夜間などの計測データ管理システムが挙げられる。また、ドレーン施工後には工事着手前調査で推定された地層構成およびドレーン仕様を、ドレーン打設データから解析した推定地層と比較し、整合性を検証する技術などがある。

本稿では、「真空圧密ドレーン工法」の工法概要と適用事例の工事概要、工事着手前調査、施工方法、施工管理方法およびドレーン仕様とドレーン打設データによる推定地層との検証などについて報告する。

2. 工法概要¹⁾

2-1. 工法の概要

真空圧密ドレーン工法は、排水ホース付き気密キャップを取り付けたプラスチックボードドレーンを軟弱地盤中に所定の間隔・深度に打設する。排水ホースと集水管を通して負圧作用装置に直結して負圧（真空圧）を作用させると、ドレーン内部は減圧され外部よりも圧力が小さくなる。この時のドレーンの内と外の圧力差を利用して粘性土に動水勾配を生じさせ、粘性土中の間隙水をドレーン内に誘導して上部へと排水するのが本工法の改良原理である（図-2-1、図-2-2）。

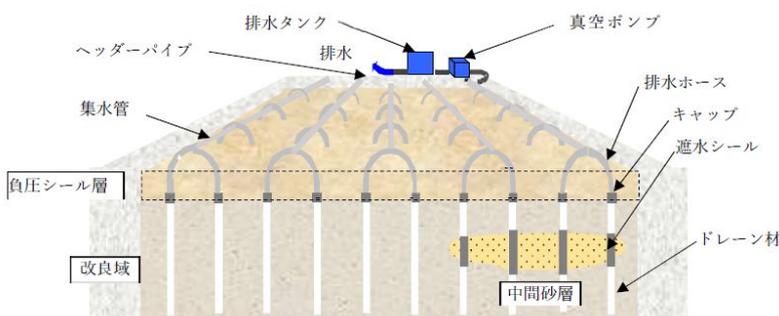


図-2-1 工法概要図（その1）

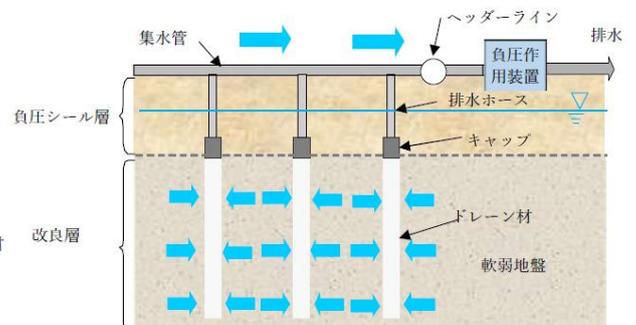


図-2-2 工法概要図（その2）

*1 Yoshifumi Yamauchi, Tsukasa Sakakibara、大阪府八尾市跡部北の町 1-4-25・TEL072-992-6630・FAX072-922-4175

*2 Eiji Waki, Toshiyuki.Hara

広島市中区大手町 4-6-16 ・TEL082-241-3225・FAX082-241-4190

2-2. 工法の特徴

1) 他工法との比較

①気密シートが不要

シート式真空圧密工法は、改良地盤内の気密性を保持するために地表面を気密シートで覆う必要があったが、本工法は粘性土の上部 1.0m 程度を負圧シール層として利用することで気密シートが不要となる。負圧シール層の適用条件は、1)透水係数 $k=10^{-7}m/s$ 程度以下、2)キャップ部より上部に水位を確保すること。

②中間砂層への対策が可能

中間砂層が介在する場合、中間砂層からの吸水により中間砂層下部の改良が不十分になる、中間砂層の水位を低下させ改良域外の沈下など周辺地盤への影響が懸念されるが、該当するドレーン部にあらかじめ遮水シールを取り付けることで対応可能である。

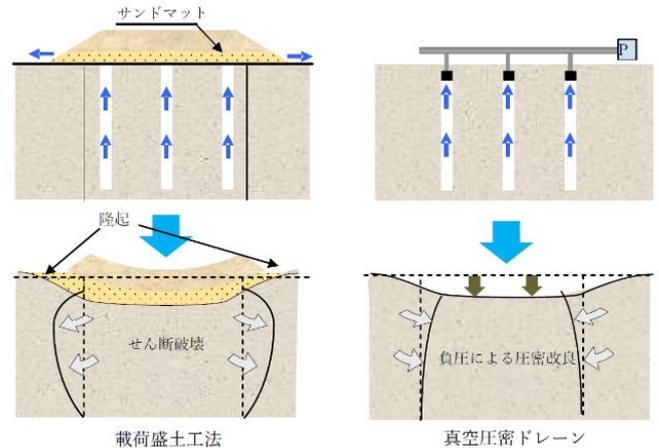


図-2-3 従来工法との比較

2) 工法の特徴 (図-2-3)

- ①せん断破壊 (円弧すべり) を起こさない
- ②周辺地盤の変位を抑制できる
- ③安定した改良効果が得られる
- ④盛土が不要、もしくは減量できる
- ⑤盛土工の工期短縮が図れる

2-3. 適用地盤

本工法は、軟弱な粘性土地盤の圧密改良の全般に適用できる。適用可能な地盤条件は以下の通りである。

- ①地盤条件：N 値 15 以下、これ以上の場合は別途打設に対策が必要となる。
- ②適用深さ：陸上打設・・G.L.-50m 程度、現状でのドレーン施工機の仕様による。

3. 適用事例

3-1. 工事概要

本工事は、国営宍道湖西岸農地整備事業計画に基づき論田川排水機場の建設を目的とし、供用後の残留沈下量を低減するための地盤改良工事である。当工事は、全体工期に制約があるため、短期間で圧密促進を完了できる工法を検討した。圧密促進工法は盛土などの上載荷重を必要とするが、上載荷重に負圧荷重を用いることで盛り立て期間を短縮できる「真空圧密工法」が検討され地表面に厚い砂層が確認されていたので「真空圧密ドレーン工法」が採用された。工事は盛土を併用しない真空単独荷重での地盤改良工事である。設計では次工程の杭打機の足場確保のため表層改良を行った後に真空圧密ドレーン工の施工が計画されていたが表層改良後にキャップ付きドレーンを打設し負圧作用装置を稼働させると表層改良部の剛性で沈下に追従せず粘性土との間に隙間(空間)ができる懸念があったので真空圧密ドレーン工法を先に施工する手順となった。

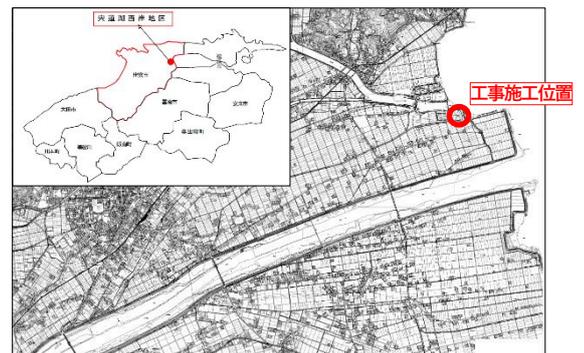


図-3-1 施工位置図

論田川排水機場は、図-3-1 に示すように島根県中東部で出雲平野東部の宍道湖に面する平田船川の河口付近に位置する。当該地区の地層は上部から、層厚 1m 程度の表土・盛土層 (Fsc) (N=2~14 程度)、層厚 2~3m

程度の砂質土層 (As1) (N=0~4 程度)、層厚 10~12m 程度の粘性土 (Ac1,Ac2) (N=0~3 程度)、層厚 2m 程度の礫質層 (Asg) (N=2~8 程度)、その下部に層厚 10m 程度の粘性土 (Ac3) (N=0~5 程度) で構成されている。中間の Asg 層以深は N=0~8 程度となっており比較的高い N 値を示している。既設堤防の下部は未改良で一部の範囲に変位抑制の鋼矢板が GL-12m 程度施工されている。また、既設堤防横の排水路も埋め立てられて圧密促進が予定されている (図-3-2、図-3-3)。



図-3-2 地盤改良計画図

工事着手前に、ドレーン施工機のトラフィカビリティ確保のためにポータブルコーン貫入試験を実施し、地盤強度の確認を行った。次に、ドレーン施工機で三成分コーン貫入試験を実施し地層の確認とドレーン材仕様を決定した。

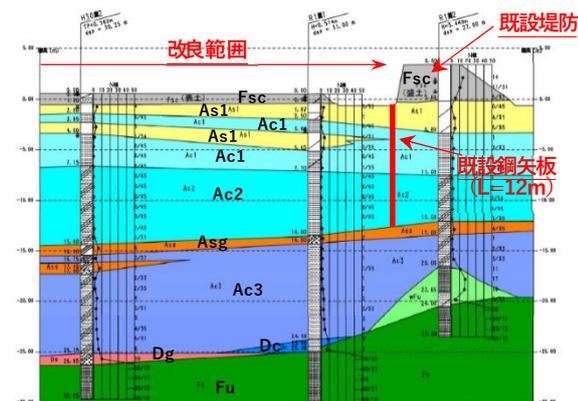


図-3-3 計画縦断面図

3-2. 工事着手前調査

1) ポータブルコーン貫入試験

当工事は、現地盤を施工基面とする計画でドレーン施工機が上載可能かどうかの判断基準として地盤強度を測定するために、簡易試験のポータブルコーン貫入試験を実施した。ポータブルコーン貫入試験は 9 か所実施し、調査結果にばらつきが大きかったため各深度の最小値を参照しその平均値を採用した。地盤強度の採用値は、 $C=42.5\text{kN/m}^2$ となった。検討条件として、基礎地盤の形状係数 $\alpha=2/3$ 、支持力係数 $N_c=5.1$ 、安全率 $F_s=1.5$ 、ドレーン施工機仕様を、全重量 430kN、キャタ接地長 4.01m、履帯幅 0.76m、衝撃係数 0.3 とし、限界支持力 q_d および分散接地圧 q_M を算出した結果は、

$$q_d = \alpha \times c \times N_c = \frac{2}{3} \times 42.5 \times 5.1 = 144.5(\text{kN/m}^2)$$

$$q_M = \frac{(430 \times 1.3)}{(0.76 \times 4.01) \times 2} = \frac{559}{6.10} = 91.6(\text{kN/m}^2)$$

となる。よって安全率は、

$$F_s = \frac{q_d}{q_M} = \frac{144.5}{91.6} = 1.57 \geq 1.50$$

となり、ドレーン施工機のトラフィカビリティは現地盤強度で確保できる結果となった。

2) 三成分コーン貫入試験

真空圧密ドレーン工法は、真空圧の気密性を確保するために粘性土上部および下部の 1m 程度を負圧シール層として利用する。また、中間に砂層が介在する場合は、ドレーン材に遮水シールを取り付ける必要がある。このため、当工法では工事着手前に調査を行い、地層構成を推定して地層構成に合ったドレーン材仕様を決定する。調査には三成分コーン貫入試験を採用したが施工性、費用低減、工期短縮などから専用調査機を搬入せず、ドレーン施工機に三成分コーンを取り付け



写真-3-1 三成分コーン試験状況

て調査を実施した（写真-3-1）。

従来の三成分コーン試験の解析には市販のソフトを使用し補間データの解析、コンタ図の作図をしていたが施工範囲が矩形であることが解析条件にあり、実際には異形な現場が多く、対応が難しかった。当社では三成分コーン試験のデジタルデータを使用した異形な現場でも対応できる解析ソフトおよびコンタ作図ソフトを製作し、全ての現場に対応可能となり、解析日数・コンタ作図日数の削減に繋がった。当工事での調査は20箇所実施し、解析結果よりドレーン仕様は71種類となった。

3-3. 工事仕様

当工事では供用後の残留沈下量を低減することを目的に真空圧密ドレーン工法が採用された。

既設堤防下部は、未改良で既設鋼矢板により変位抑制対策が施されているが圧密促進に伴う既設堤防の変位が懸念されていた（図-3-4）。そこで、既設堤防への変位抑制として影響線を45°で想定しドレーンの配置を既設鋼矢板下端より45°の上部に設置した。既設鋼矢板が無い箇所は、地表面から45°とした（図-3-5）。

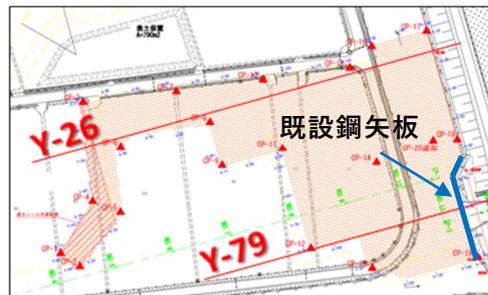
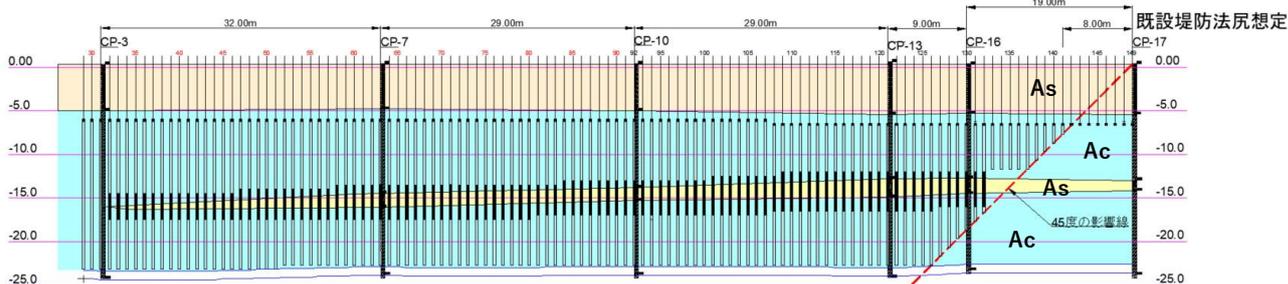
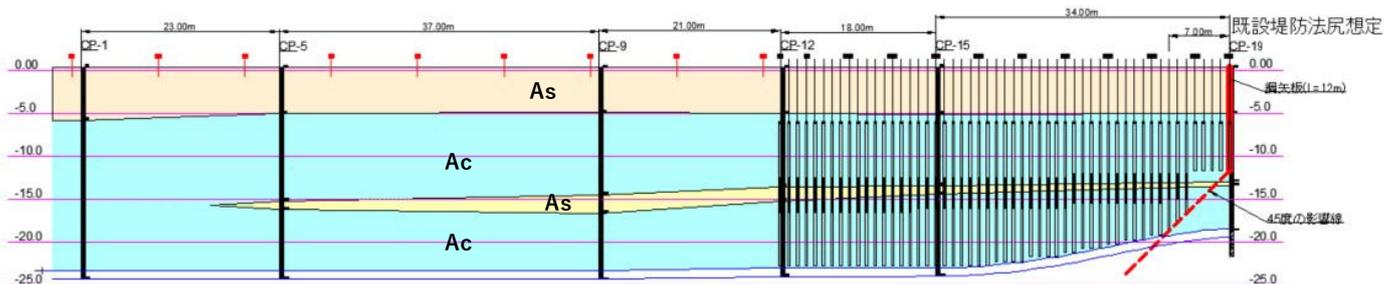


図-3-4 計画平面図

工事は、改良面積 5,089m²で2ブロックとし、打設間隔は正方形配置 1.0m、打設本数は 5,089 本である。着手前調査結果からドレーンの仕様を、打設長は 8.0m~23.5m（平均 21.1m）、排水ホース長は 7.5m~8.5m（平均 7.6m）、遮水シールは不要箇所および 2.5m~5.0m（平均 3.2m）とした。



既設鋼矢板がない場合（Y-26 想定）



既設鋼矢板がある場合（Y-79 想定）

図-3-5 調査後のドレーン仕様縦断図

計測管理項目は、作用負圧と排水量および沈下量である。作用負圧は、平均 60kN/m²以上を維持し、負圧作用装置の停止時期は圧密度が 80%になったと判断される時点で停止するものとする。

3-4. ドレーン打設工

当工事は、現場に狭い箇所があり足場確保が難しかったため打設位置が機械中心にあるセンター打ち機と

打設位置が機械先端にあるコーナー打ち機（写真-3-2）の2台で施工を行った。

また、デジタルデータで記録できる施工管理装置を使用しケーシングの打込み長および残置長を全打設本数計測した（写真-3-3）。

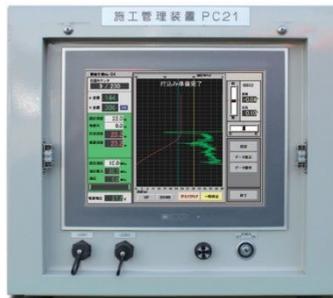


写真-3-3 デジタル式
施工管理装置



写真-3-2 ドレーン施工機
（コーナー打）

3-5. 負圧作用装置運転管理

当工事は、2ブロックでの管理となる。負圧作用装置の運転日数は83日（試運転期間7日含む）、作用負圧は平均値で60kN/m²以上が計画されている。計測管理項目は沈下量とポンプ元圧、集水管端部

圧、ドレーン先端圧の作用負圧および排水量を計測した。計測データはデジタルデータとして保存され一元管理を行うため計測小屋を設置した。従来はPCのみで管理されていたが、一元管理されたデジタルデータはクラウドに保存されインターネット回線を利用することで全国どこからでも閲覧できる。また、負圧作用装置は昼夜運転管理されるので夜間も計測を継続し無人で管理を行うため、計測データが基準値を下回るなどの異常時に関係者へメール警報を送信するシステムで管理し対応した（図-3-6）。

ブロック数が多くなると、計測小屋までの距離が長くなりケーブルも長くなる。当現場では使用していないが、このような現場では各計測器をネットワークモジュールを介してネットワークケーブルに接続することで計測器から計測小屋（PC）までのケーブルが集約でき、ケーブルの削減、配線の簡略化、トラブル要因の削減などができる。沈下板は図-3-7に示す4箇所に設置し、沈下量は光波測距儀を用いて計測した。計測頻度は最初の2週間は1回/日、その後は2~3回/週とした。既設堤防の変位も懸念されていたので数か所の計測を実施した。

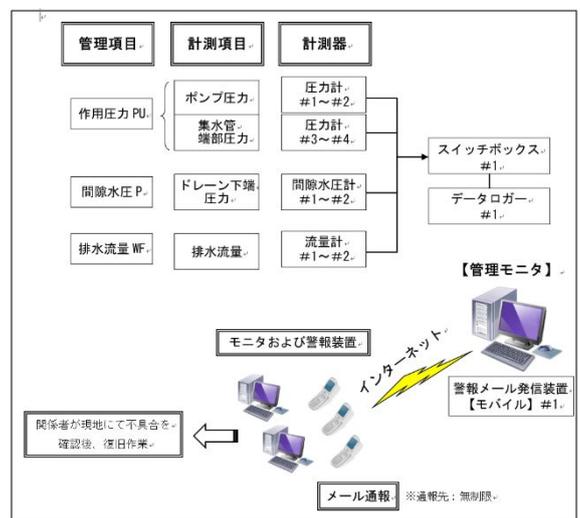


図-3-6 計測管理システム図（例）

3-6. 動態観測結果

各計測項目についての結果を示す。負圧作用装置は、2022年11月10日から運転を開始し、作用負圧は設備の不具合などのメンテナンスで一時停止したが、平均値で60kN/m²以上を確保できた（図-3-8）。排水量は初期に100m³/日程度であったが徐々に減少し30~40m³/日程度に収束した。

沈下量は、ドレーン施工前に沈下板を設置し、負圧作用装置運転開始前に約20~25cmの沈下が生じた。これは、ドレーンを打設することで排水経路が確保され、ドレーン施工機などの荷重により沈下したものである。負圧作用装置運転後は50~60cm程度の沈下を生じた。負圧作用装置の停止時期は圧密度U=80%なので、動態観測の解析手法の一つである双曲線法²⁾を用いて各沈下板の最終沈下量を推定した。沈下板位置図、沈下データおよび解析結果を図-3-7、図-3-9および表-3-1に示す。

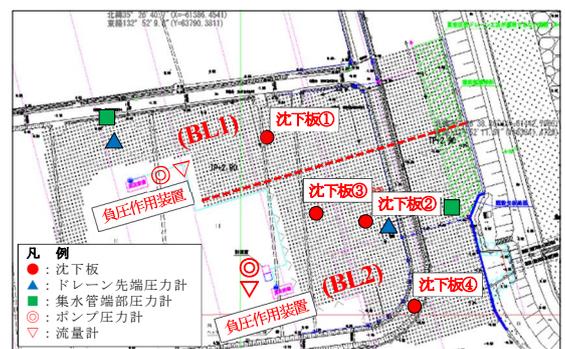


図-3-7 沈下板位置図

表-3-1 より、沈下板①、②および④は 2023 年 1 月 29 日、沈下板③は 2023 年 1 月 30 日で圧密度 U=80%に達する結果となった。負圧作用装置は、計画の運転日数 83 日となる 2023 年 1 月 31 日に停止した。停止日に動態観測を行った結果、沈下板 4 箇所とも圧密度 U=80%に達していることが確認された。既設堤防の計測結果は、数 mm の変位はあったが堤防には大きな変状が確認されなかった。これは、既設堤防への変位抑制として影響線を 45° に設置しドレーン配置を影響線までとした対策の効果も考えられる。

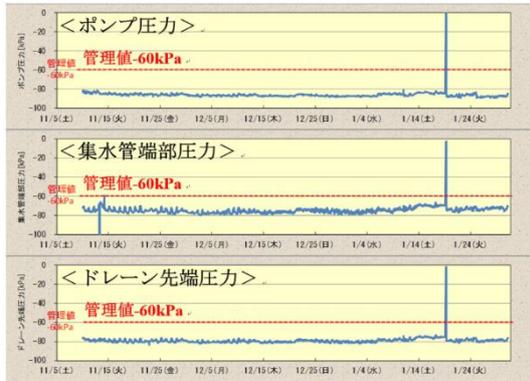


図-3-8 作用負圧データ (2BL)

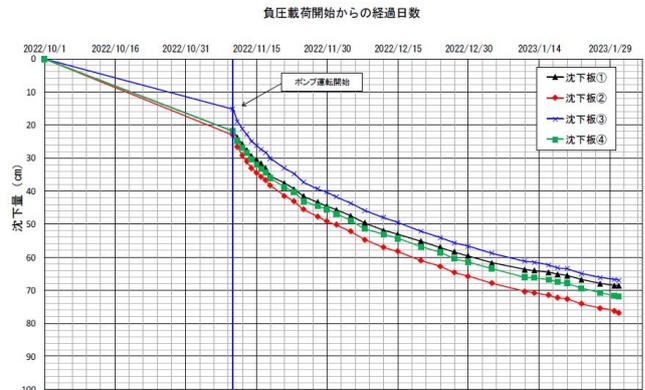


図-3-9 各沈下板の沈下データ

表-3-1 沈下量測定結果と解析結果

沈下板位置	現在の沈下量 (cm) (2023/1/30)	最終沈下量 (cm)	現在の圧密度 (%)	圧密度 80%時の沈下量 (cm)	圧密度 80% 到達日	真空ポンプ 停止日	運転日数 (日)
沈下板①	68.6	84.4	81.3	67.6	2023/1/29	2023/1/31	83
沈下板②	76.2	93.9	81.2	75.2	2023/1/29	2023/1/31	83
沈下板③	66.8	81.3	82.2	65.1	2023/1/30	2023/1/31	83
沈下板④	71.7	88.0	81.5	70.4	2023/1/29	2023/1/31	83

3-7. 工事着手前調査と実測値の整合性の検証

工事着手前調査で推定したドレーン仕様の整合性について検証を行った。工事着手前調査は、三成分コーン貫入試験を約 50m 間隔で 20 箇所を実施し、地層構成の推定およびドレーン仕様を決定した。その後、ドレーン施工機による 1m 間隔の約 5,000 本の打設データ（貫入抵抗値、打込み深度）で解析することにより精度の高い地層を推定することができる。ドレーン打設データはデジタルデータで保存され、解析は PVD 打設機の油圧抵抗を利用した地層推定システム「GEO-DIVER® (ジオ・ダイバー)」³⁾⁴⁾を使用した。図-3-10 にドレーン打設データから推定された地層図に、工事着手前調査の三成分コーン貫入試験から推定されたドレーン仕様を重ね合わせた図を示す。

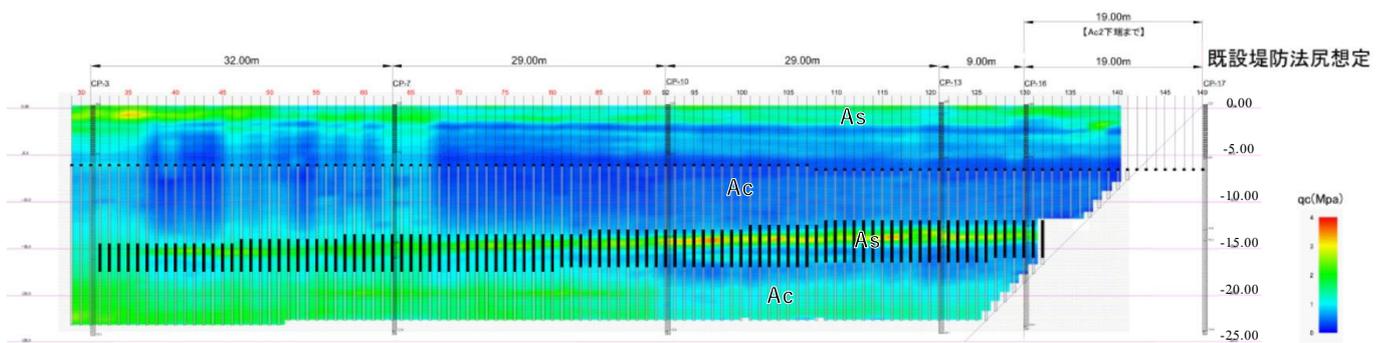


図-3-10 ドレーン打設データからの推定地層とドレーン仕様の対比 (Y-26 想定)

当工事は、中間 (-15.0m 付近) に A_{sg} 層、その下部に A_{c3} 層で構成されている。解析断面は青色～水色 (N=0～4 程度)が粘性土で、緑～黄色～赤の順で qc が高くなる。中間 (-15.0m 付近) の緑色～赤色(N=4～16 程度)は A_{sg} 層と推定され該当箇所のドレーン材に遮水シールが取り付けられており、工事着手調査で推定したドレーン仕様の整合性が確認できた。また、A_{sg} 層下部は A_{c3} 層の構成となっているが緑色の範囲が確認されている。これは、先に述べたように A_{c3} 層は

N=0～5 程度で比較的硬く A_{sg} 層と同等程度の地盤強度があるためと考えられる。

今回解析に使用した GEO-DIVER[®]は PVD 施工時に取得するオシログラフに記録されている油圧抵抗を有効利用して、静的コーン貫入試験の貫入抵抗 (コーン支持力 qc) を推定し、PVD 打設位置情報と連動させることで、地盤の強度分布や地質分布を多次元的に図化处理するシステムである (図-3-11)。

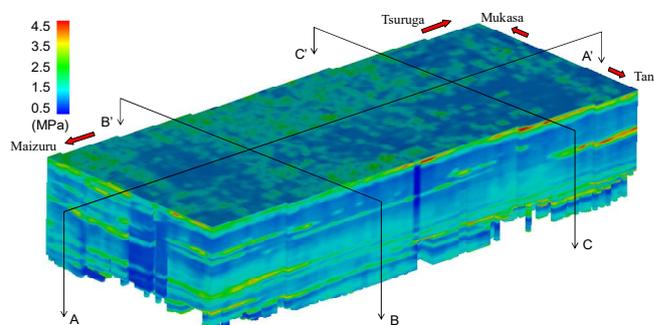


図-3-11 油圧抵抗から推定したコーン支持力 qc の三次元分布図 (例)

4. おわりに

本稿ではデジタルデータを活用した真空圧密ドレーン工法の施工管理に関する適用事例を紹介した。デジタルデータを用いて調査データの補間解析やコンタ図作図ソフトなどを独自に製作し、作業工数を低減することができた。工事着手前調査で推定したドレーン仕様もドレーン打設の膨大なデータを解析した精度の高い推定断面に重ね合わせた結果、遮水シール層の位置など整合性が確認された。また、既設堤防への影響を低減するため既設鋼矢板下端、あるいは現地盤から 45° の影響線を想定しドレーン配置を影響線までとした対策の効果も確認できた。

今後もデジタルデータを活用して調査データの補間、コンタ図作図、AI による検証などができる仕組み作りに取り組み、ドレーン打設データから地層構成や地盤強度などを推定し圧密促進や地盤改良の計画や検証に繋げるよう改善、開発に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 真空圧密ドレーン工法研究会：技術資料，2023.4
- 2) 道路土工 軟弱地盤対策工指針 平成 24 年 8 月，pp373-375
- 3) 平田ら プラスチックボードドレーン打設機の油圧抵抗を利用した地質推定方法の開発,土木学会論文集 C,Vol.67,No.3,358-371,2011
- 4) 大澤,浅井ら 载荷盛土に真空圧密工法を併用した宅地造成工事の施工例 (その 3) —ドレーン打設時の油圧抵抗を用いた地質分布の推定—,第 53 回地盤工学研究発表会,2018.7

北海道新幹線，共立・静狩地区地盤改良工事におけるDXの取り組み

株式会社不動テトラ 杉本 知弘*1

株式会社不動テトラ 伊藤 竹史*2

株式会社不動テトラ 柳崎 直樹*3

1. はじめに

近年，我が国では人口減少や少子高齢化が進行しており，建設業においても労働力不足が深刻な問題となっている．建設業は労働集約型産業であり，人手不足による労働生産性の低下を補う対応策の実施が急務である．この課題に対し，近年急速に進展するデジタル技術を活用して作業プロセスの効率を向上させ，作業の品質や安全性を高めることのできる“DX”が着目されている．国土交通省では，2016年から推進する「i-Construction」を中核とした，データとデジタル技術を活用することによりインフラ関連の業務，組織，プロセス，文化・風土や働き方を変革することを目的として「インフラ分野のDX推進本部」を設置する等，DX実現の加速化を図っている．

㈱不動テトラ（以下，当社）でもこの取り組みに賛同し，2016年以降ICT地盤改良技術を開発・実用化しており，現場での更なる生産性向上を図っている¹⁾．本稿では，2023年10月現在，当社で施工中の北海道新幹線，共立・静狩地区地盤改良工事で導入しているICT地盤改良技術やBIM/CIMに向けた取り組みを紹介する．

2. 導入現場概要

本工事は，北海道新幹線新青森起点 239km757m から 247km370m（約 7.6km）のうち，第1共立路盤（636m），第1から第5静狩路盤（2874m），第6静狩路盤（260m），総延長 3770mの本線部，及び長万部保守基地の地盤改良を施工するものである．

対象土質は上部より盛土層・泥炭層，砂層であり，軟弱部の地盤改良として静的締固め砂杭工法（SAVE-CP-HA²⁾： ϕ 700mm， \square 1.6~2.5m，L=3.0~8.1m），深層混合処理工法（CI-CMC-HA/HG³⁾： ϕ 1600mm \times 2軸，L=5.0~17.9m），中層混合処理工法（PB⁴⁾：L=3.0~9.3m）で施工を行っている．本工事の平面位置図を図-1に示す．

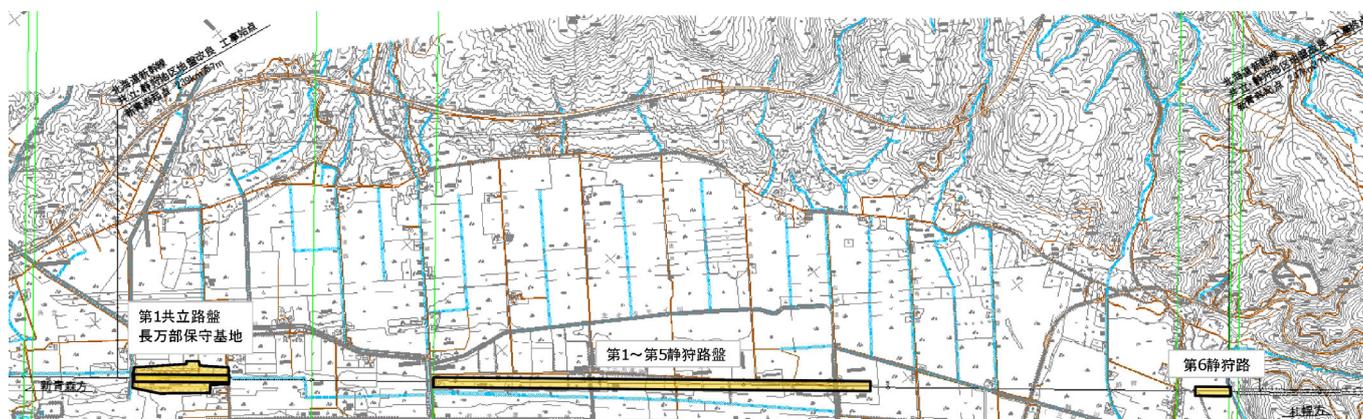


図-1 平面位置図

*1 Tomohiro Sugimoto 札幌市中央区北1条西7丁目3番地 ・TEL 011-233-1640 ・FAX 011-233-1641

*2 Takeshi Ito 東京都中央区日本橋小網町7番2号 ・TEL 03-5644-8500 ・FAX 03-5644-8510

*3 Naoki Yanagisaki 同上

3. 本工事で導入している ICT 地盤改良技術

本工事で導入している ICT 地盤改良技術の概要、及び活用状況と効果について以下に紹介する。

3-1 GNSS 地盤改良機誘導システム

GNSS 受信機を地盤改良施工機の後部架台に搭載して VRS 方式による測位を行い、施工機械の位置をリアルタイムに車載モニター上に表示する。これにより、オペレータは誘導員なしで設計打設位置へ施工機械を移動することができる。打設位置の座標データ (x,y) はシステムに記録され施工履歴データとして提出できるため、従来行っていた施工前の測量や打設位置への目杭 (目印) の設置作業、打設位置の立会い確認が不要となり、大幅な省力化が可能となる。

本工事の施工状況を写真-1、表示モニターを写真-2 に示す。SAVE-CP-HA のような締固め砂杭工法においては、施工時の地盤隆起が大きいのので隣接する目杭の位置ずれが懸念される。本技術を活用することで、全本数の砂杭で確実に設計位置での砂杭造成ができています。締固め砂杭工法では打設位置のずれは均質な締固め改良地盤の造成に影響することから、本工事では高品質な改良地盤を確保できていると考えられる。また、作業員による目杭の再測量、再設置による手待ちが無いため、工程確保や安全性確保にも貢献できている。



写真-1 本工事の施工状況 (SAVE-CP-HA)

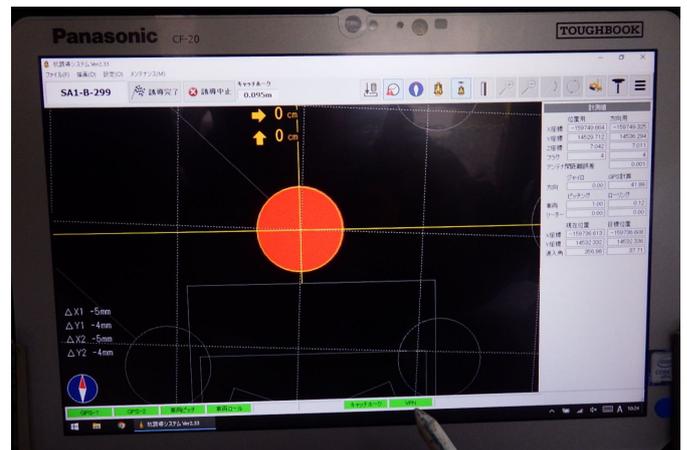


写真-2 誘導システムの表示モニター

3-2 Visios®-AR (拡張現実を利用した多目的施工支援システム)

大型機械を用いる地盤改良の施工においては、敷鉄板による足場養生が必要不可欠である。本システムは、敷鉄板の敷設作業を行うバックホウやホイールローダーにカメラ、GNSS 受信機、傾斜計、タブレットを取り付け、AR (拡張現実) を用いて敷設位置をガイダンスするものである⁵⁾。

従来、敷鉄板の敷設位置は目杭を目印にしていたが、GNSS 地盤改良機誘導システムの開発により、目杭が不要となる現場も増えてきている。このシステムを活用することにより、敷鉄板の敷設のための測量作業を省略することができる。

本工事における使用状況を写真-3、表示モニターを写真-4 に示す。施工区域毎に AR ガイダンスを搭載したホイールローダーを配備し、運転席に設置したタブレット上の現実の映像上に表示された敷設位置の仮想画像に合わせて敷鉄板を敷設している。特に SAVE-CP-HA の工区では 1 本あたりの施工深度が短いため、1 本あたりのサイクルタイムが短く施工機の移動が頻繁となるが、本システムの活用により、敷鉄板敷設のための測量作業が省略できるので、手待ちによる工程の遅滞を防止できている。また、測量のための作業員が必要ないので、現場内の立ち入りがなく安全な施工環境が構築できている。



写真-3 Visios[®]-AR の使用状況



写真-4 Visios[®]-AR の表示モニター

3-3 GeoPilot[®]-AutoPile (地盤改良工法の自動打設システム)

深層混合処理工法に対応した地盤改良工法の自動打設システムであり、施工機にコントロールユニットを搭載することで固化材スラリー流量や貫入・引抜き速度を適切な値に自動制御することが可能である⁶⁾ (図-2)。従来は1本の改良杭を造成する際に、オペレータが手動で計15項目の操作を行っていたが、本技術を活用することで操作が自動化され、4項目の作業で済むこととなった(表-1)。

本工事の施工状況を写真-5に示す。本技術をCI-CMC-HAの施工機に搭載して自動化施工を行っている。攪拌翼の昇降速度や固化材スラリーの吐出量を自動制御することから地質の変化や軟硬に起因する固化材添加量の不足を防止できている。また、オペレータの技量に影響されないため、安定した品質を確保できている。自動化施工により、オペレータは施工時の排泥の詰まりや周囲の安全状況にもより配慮が可能となり、品質や安全性の向上が図れている。

表-1 手動操作と自動操作の比較

項目	内容	操作	
		手動運転	GeoPilot [®] -AutoPile
貫入開始	開始信号の送信	開始アイコンタッチ	開始アイコンタッチ
	オーガーモーターの回転 攪拌軸の貫入	制御ボタンON 速度を操作しながらレバー操作	
セメントスラリー吐出	流量調整	規定値になるようにダイヤル調整	自動
貫入終了	攪拌軸の貫入停止	レバー中立操作	終了アイコンタッチ
	グラウトポンプの停止 終了信号の送信	制御ボタンOFF 終了アイコンタッチ	
先端処理	攪拌軸の引上げ	速度を確認しながらレバー操作	自動
	攪拌軸の再貫入	速度を確認しながらレバー操作	
引抜き開始	開始信号の送信	開始アイコンタッチ	開始アイコンタッチ
	オーガーモーターの停止 攪拌軸の引上げ	制御ボタンOFF 速度を確認しながらレバー操作	
引抜き終了	攪拌軸の引上げ停止	レバー中立操作	終了アイコンタッチ
	オーガーモーターの停止	制御ボタンOFF	
施工終了	終了信号の送信	終了アイコンタッチ	終了アイコンタッチ



図-2 GeoPilot[®]-AutoPile のシステム概要



写真-5 本工事の施工状況 (CI-CMC-HA)

4. 地盤改良の BIM/CIM の取り組み

4-1 FUTEOS-CIM (地盤改良の BIM/CIM 業務のパッケージ化)

2023 年度より国土交通省直轄工事で原則 BIM/CIM 適用が始まっており、地盤改良工事についても BIM/CIM の対応が必須となっている。地盤改良は、地盤状況に応じて多種多様な改良杭を打ち分ける必要があり、現場の規模によっては数千本の施工数量となることも珍しくない。このため BIM/CIM 適用にあたっては、膨大で複雑な施工データ（属性情報）の入力が必要となり、これを手入力で行うとなると現場作業の負担が大きい。

このような背景のもと、地盤改良の BIM/CIM 作業の生産性向上を目指して「FUTEOS-CIM」(2023.6 プレスリリース)を開発した。本システムは、地盤改良の BIM/CIM 業務をパッケージ化したもので、従来の ICT 地盤改良システムの連携機能を強化して、各システムから出力される施工データ（属性情報）を自動で統合する事と、新たに開発した「ToolPileX」により、CIM モデルを瞬時に作成することができる。

FUTEOS-CIM の概要図を図-3 に示す。

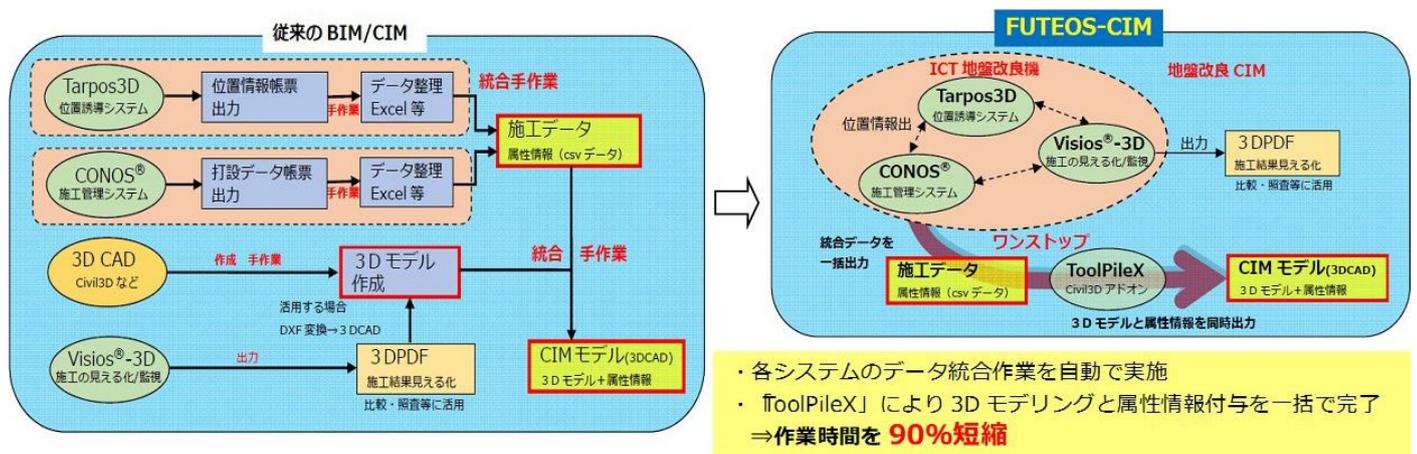


図-3 FUTEOS-CIM の概要図

4-2 CIM 作成までの一連の流れ

地盤改良施工後は、施工管理システム CONOS で生成された施工記録を事務処理 PC に取り込むことで、各種操作を行うことができる。事務処理 PC ではオシログラフや施工日報の出力といった従来の機能に加えて、全改良杭の深度、材料使用量などの施工結果をひとまとめにした施工結果ファイル (CSV 形式) の作成や、3DPDF 用ファイルの作成ができるようになった。図-4 に各システムのデータ連携イメージを示す。

施工結果ファイルには杭の施工日や杭番、座標情報、杭長、材料使用量など 100 種類以上ある項目から選ばれた現場毎に必要な情報が保存されており、これを Civil3D 用アドオンソフト ToolPileX で読み込むことで各情報が付与された地盤改良杭の CIM モデルを一括で作成できる。ToolPileX は締固め工法や深層混合処理工法などの円柱形状はもちろん、表層混合処理工法の直方体形状にも対応しているため、様々な工種で使用することができる。座標情報のファイルさえあれば、施工前から CIM モデルが作成で

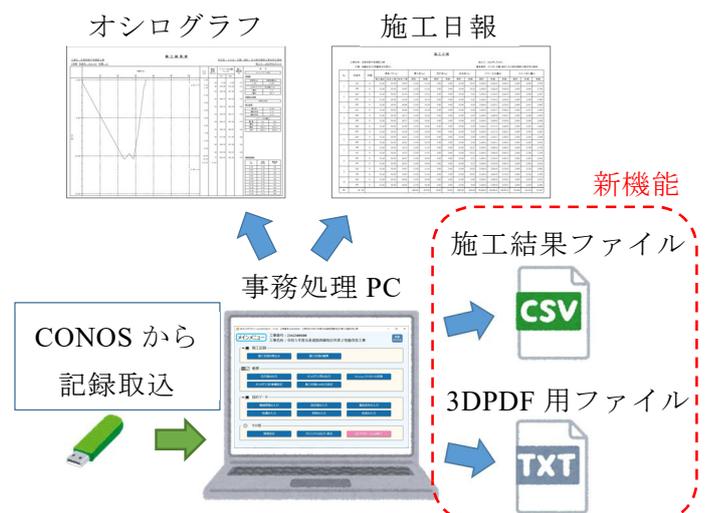


図-4 施工後のデータ連携イメージ

施工結果ファイルには杭の施工日や杭番、座標情報、杭長、材料使用量など 100 種類以上ある項目から選ばれた現場毎に必要な情報が保存されており、これを Civil3D 用アドオンソフト ToolPileX で読み込むことで各情報が付与された地盤改良杭の CIM モデルを一括で作成できる。ToolPileX は締固め工法や深層混合処理工法などの円柱形状はもちろん、表層混合処理工法の直方体形状にも対応しているため、様々な工種で使用することができる。座標情報のファイルさえあれば、施工前から CIM モデルが作成で

きるため、地中埋設物との干渉チェックや支持層との位置関係など事前の設計に活用することも可能である。ToolPileXで作成した円柱形状と直方体形状のCIMモデルのイメージを図-5に示す。

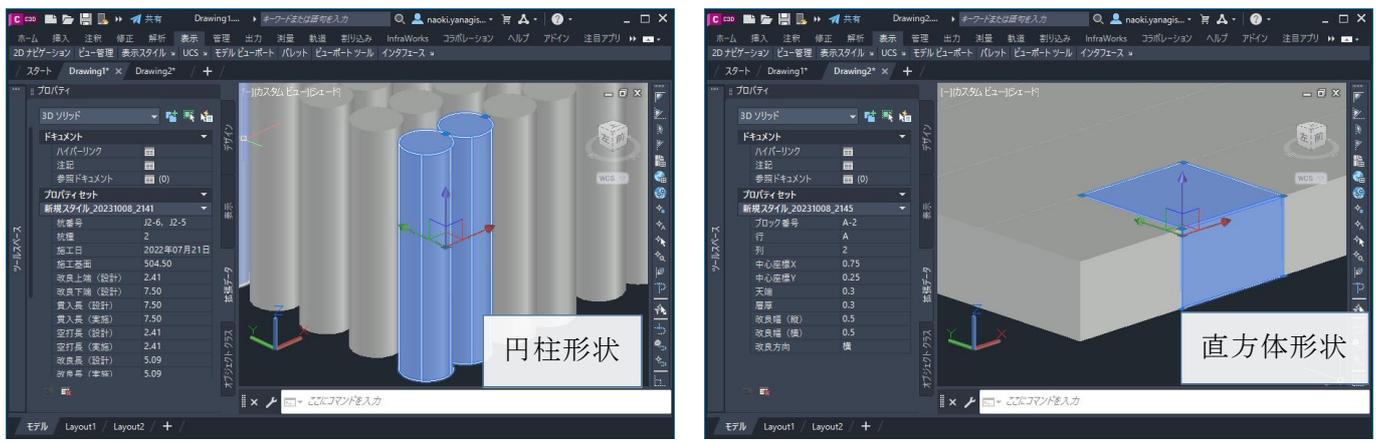


図-5 ToolPileXで作成したCIMモデル

従来はCIMモデルの作成と属性情報付与は全て手作業で行っていたため、改良杭の数に比例して作業時間がかかっており操作ミスによる手戻りや確認作業が発生していた。ToolPileXではこれらの作業が短時間でミスなく完了するため、作業時間の短縮だけでなく作業品質の向上にも繋がる。ToolPileXを用いた作業手順のイメージを図-6に示す。

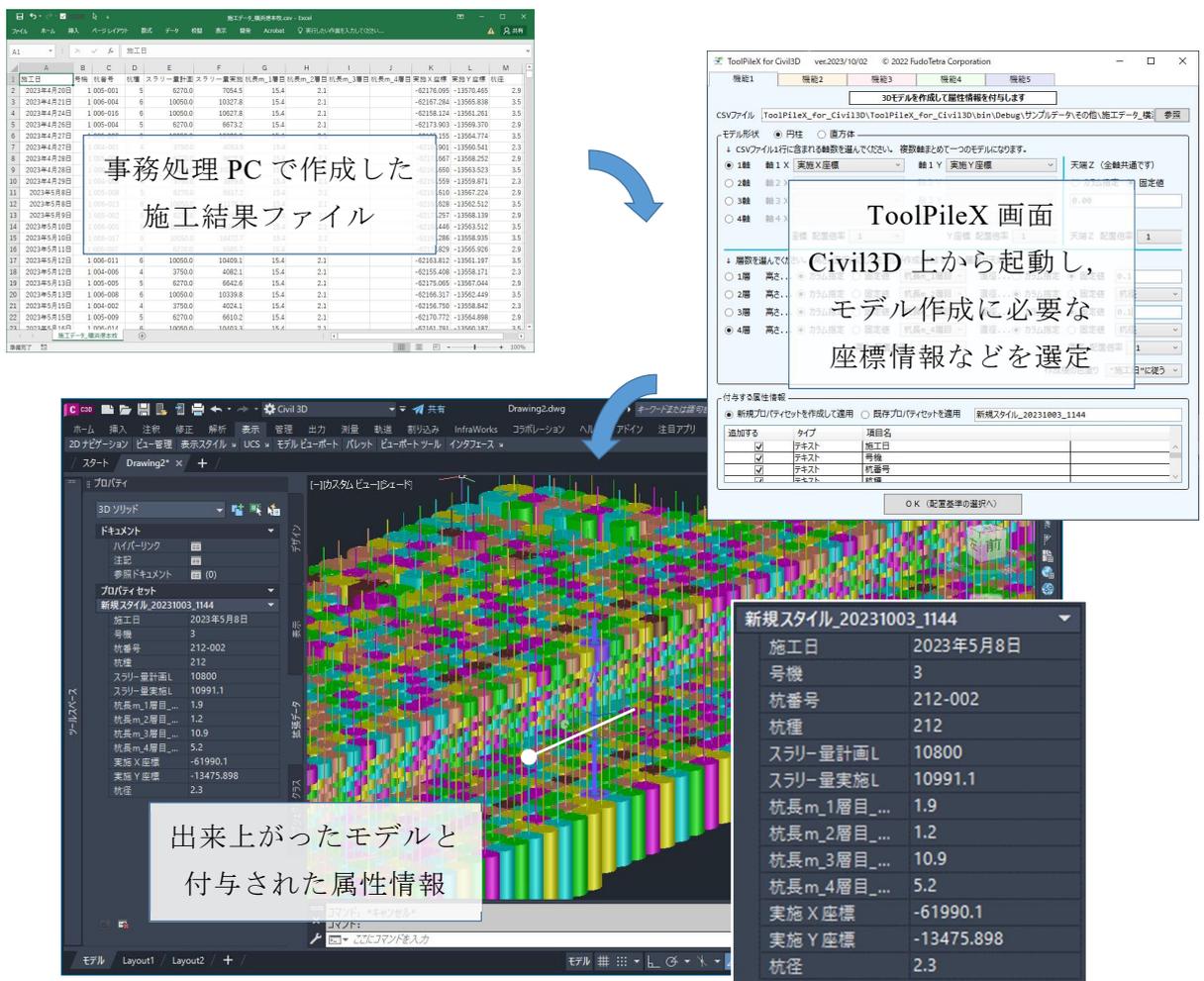


図-6 ToolPileXによるモデルの作成と属性付与（例）

4-3 本工事における BIM/CIM の取り組み

本工事では、SAVE-CP-HA、CI-CMC-HA/HG、PB とすべての地盤改良工法で FUTEOS-CIM を適用して CIM モデルを作成している。本工事の CIM モデルを図-7~8 に示す。記録された施工データを一括で出力できるので、確実なデータ取得が可能であると同時に、現場作業の省力化が実現できている。

CIM モデルは Autodesk Docs のクラウド上で共有しており、関係者間のスムーズな情報共有に役立っている。また、本モデルを地質モデルと統合することにより、地盤改良の品質管理で求められる改良位置や改良深度の情報を視覚的に把握できるため、高精度な施工管理が実現し、高い品質と施工の安全性を確保できている。

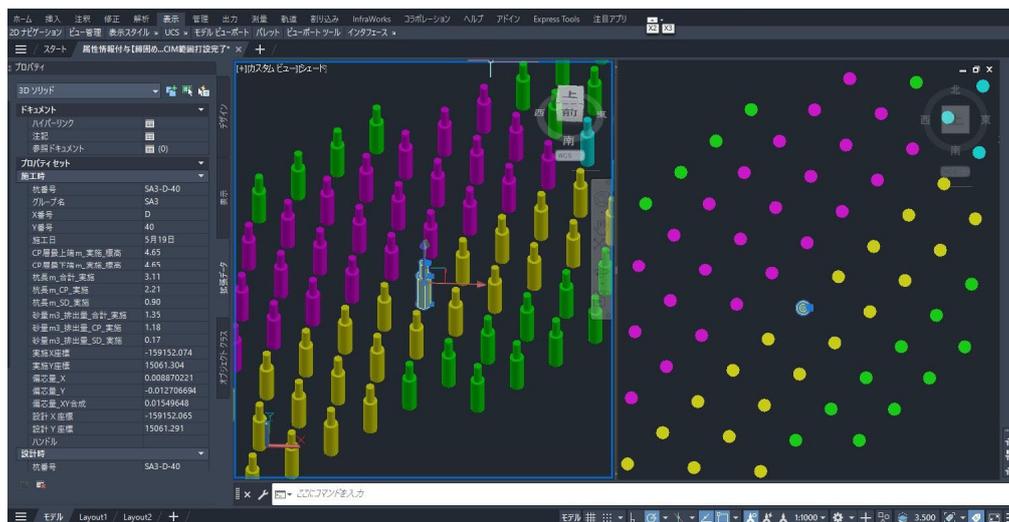


図-7 本工事の CIM モデル (SAVE-CP-HA)

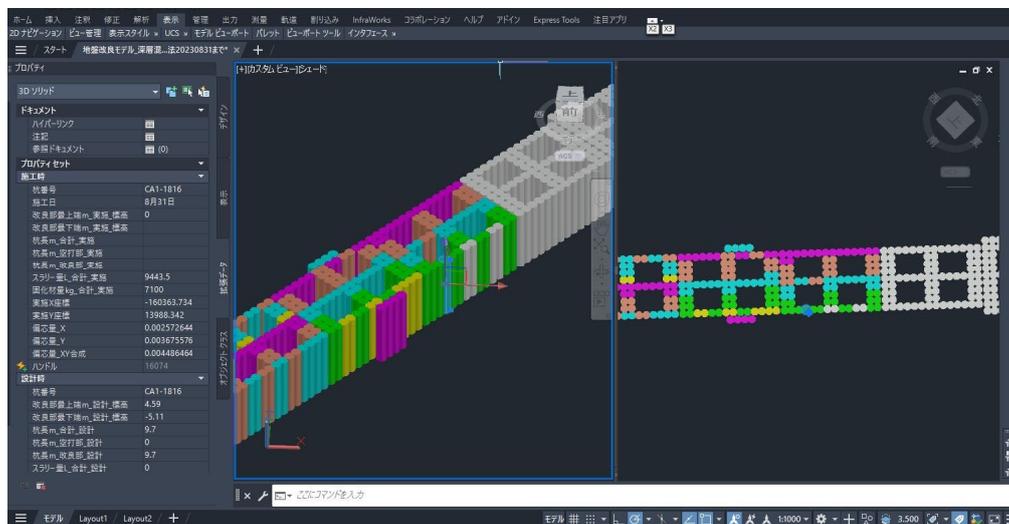


図-8 本工事の CIM モデル (CI-CMC-HA)

5. 終わりに

本稿では、DX に向けた取り組みとして北海道新幹線、共立・静狩地盤改良工事で導入している ICT 地盤改良技術や BIM/CIM の対応状況について紹介した。本工事は 2023 年 10 月現在、順調に施工を進めており、これら技術の活用により生産性向上に加え、品質面や安全面についても高い効果があることを確認できている。しかし、ICT 地盤改良技術や BIM/CIM はまだ普及段階にあり、扱える人材不足や導入時の費用負担といった問題を抱えている。各現場において、導入の利点や考慮すべき点、及び導入コスト等の検証を行い、合理的な活用を考えていく必要がある。

【参考文献】

- 1) 伊藤竹史：新たな ICT 地盤改良への取り組み，建設機械 Vol.58. No.6 pp.35-39, 2022
- 2) SAVE コンポーザー工法研究会：SAVE コンポーザー工法/SAVE コンポーザーHA 工法 設計・施工マニュアル，2018.
- 3) CI-CMC 工法研究会：CI-CMC 工法 施工マニュアル CI-CMC 工法/CI-CMC-HA 工法/CI-CMC-HG 工法，2019.
- 4) パワーブレンダー工法協会：中層混合処理工（スラリー噴射式・トレンチャ式攪拌混合）パワーブレンダー®工法 技術資料，2023.
- 5) 今給黎健一他：拡張現実技術を利用した多目的施工支援装置の実用化 汎用重機に取付可能な作業位置ガイダンスシステム，令和元年度 建設施工と建設機械シンポジウム 論文集・梗概集 pp.35-36, 2019.
- 6) 伊藤竹史他：地盤改良施工機における自動打設システムの開発と施工事例，地盤工学会誌 2023 年 5 月号 Vol.71 No.5 pp.24-27, 2023.

施工現場における土質 BIM/CIM 活用事例

宮坂建設工業株式会社 熊谷 大輔*1
宮坂建設工業株式会社 板垣 和貴*2
宮坂建設工業株式会社 林 啓二*3

1. はじめに

昨今の施工現場においては、ICT の活用を筆頭とした働き方改革が推進されて久しい。道内の工事においてもブルドーザーの排土板の位置と高さを自動制御する 3DMC (マシンコントロール) や、バックホウの刃先の位置と計画面をモニター上に表示する 3DMG (マシンガイダンス) など、いわゆる情報化施工と呼ばれる取り組みが 2009 年から本格的に始まってきている。2 次元の紙図面から 3 次元のデータへの活用と移り変わることで、従来の施工や管理方法をより効率的に、より分かりやすいものへと改善させ様々な成果を上げている。

DX 技術は現在、それらの取り組みから脈々と受け継がれてきた改善・変革の先端にあるもので、施工現場にて 3 次元データの活用 (BIM/CIM の活用) に取り組み、ICT 施工や各種解析、シミュレーションを行うことで、生産性向上や若手職員への技能継承を円滑に進めることを可能とするものである。

本論文では様々な事例の中から、土質に関連する BIM/CIM 事例を紹介するとともに、今後建設 DX を推進するために必要な準備や課題を実工事を例として報告する。

2. BIM/CIM の概要

施工段階で使用される BIM/CIM データの多くは、2 次元の発注図面を 3 次元 CAD にて立体化したデータを基本としている。平面線形、縦断線形、横断形状を X,Y,Z の座標でプロットし、点と点を繋いで線とし、線と線を繋いで面とする。この面の集合体のデータのことを TIN サーフェスと呼ぶ (図 1)。

TIN サーフェスは厚みを持たない不等辺三角面の集まりで、地形や土工形状を表現するのに適している。このほか、面に厚みを持たせて構造物や垂直壁を表現したものを 3D ソリッドと呼ぶ (図 2)。

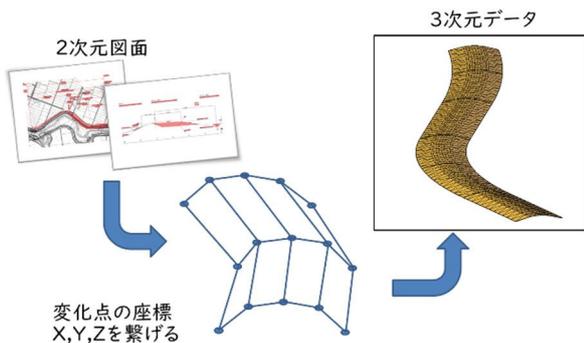


図 1 TIN サーフェス

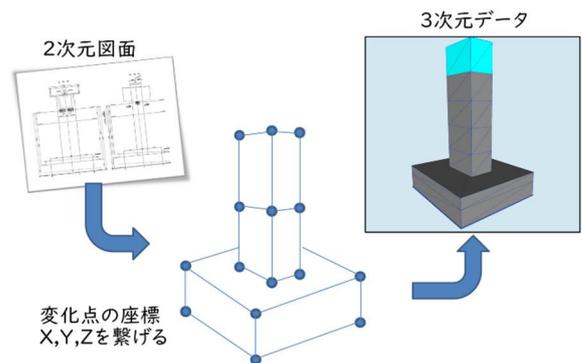


図 2 3D ソリッド

TIN サーフェスは現地の座標に合わせて作成されているため、GNSS を搭載した重機に付与することで ICT 施工を行うことが可能となる。これにより任意の位置での断面図を作成したり、異なる 2 つの TIN サーフェスを比較することで土量を算出することができ、従来の作図業務や数量算出の省力化に繋げることができる。

*1 Daisuke Kumagai 札幌市北区北 14 条西 3 丁目 2-12 ・ TEL 011-736-1821 ・ FAX011-736-1822
*2 Kazuki Itagaki 札幌市北区北 14 条西 3 丁目 2-12 ・ TEL 011-736-1821 ・ FAX011-736-1822
*3 Keiji Hayashi 札幌市北区北 14 条西 3 丁目 2-12 ・ TEL 011-736-1821 ・ FAX011-736-1822

また施工現場ではこれから作り上げる構造物（道路土工、堤防、橋、トンネル、コンクリート工、仮設工など）を3次元モデルで確認することで、複雑な形状の把握や、施工手順の検討、協力会社や若手職員への説明資料として活用している。現地の形状を表現する際は、ドローンや地上型レーザースキャナを用いて点群測量を行い、施工後の出来形管理にも同じく点群計測を行うことで面的な管理を行うことができる。この一連の取り組みを「i-Construction」と呼び、3次元データを基にした生産性の向上を図っている。

以上のように作成した3次元データをベースとし、様々な情報を付与することで、あたかも実際に施工を行うようにパソコン上でシミュレーションすることが可能となる。例えば、工事看板や標識を3次元モデル化し設置することで、歩行者や車の運転者目線で視認性を確認できる。また実際には目に見えない振動や騒音の影響範囲をグラデーションで「見える化」することにより、事前に適切な対策を練ることが可能になる。このような取り組みをBIM/CIMと呼ぶ。

3. 土質 BIM/CIM の事例

河川・道路・農業・トンネル現場において、土質の情報を3次元データに付与した土質BIM/CIM事例を紹介する。

(1) 河川

はじめに河川現場の事例として、河道掘削の工事において泥炭部の数量算出の事例を記載する。当工事ではi-Constructionの取り組みからデータを取得・準備し、現地を3次元データ上にて再現した（図3）

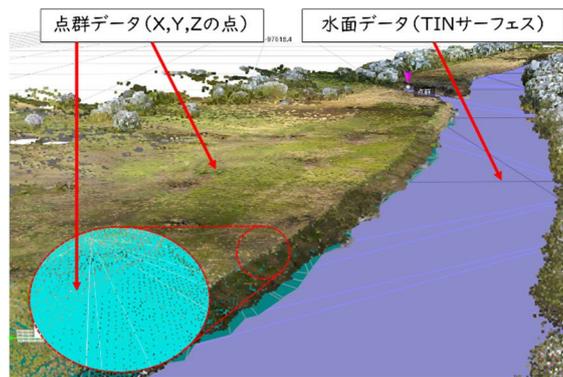


図3 河道掘削工事の例

従来の横断測量に比べて線上のデータだけではなく、それ以外の地表データも面的に計測することができるため、工種変更などの設計変更に対応でき、それにかかる作業も大幅に省力化することができる。このX,Y,Zの座標点の集まりを点群データと呼び、このデータを基に現況地形のTINサーフェスを作成する。

また、ICT施工の取り組みとして河道掘削形状の3次元データを作成した。設計の土層断面図では、掘削箇所にて粘性土層と泥炭層が混在しており、施工前に泥炭層の数量の把握、泥炭と粘性土を置き換えるポケット部の計画が必要であった（図4、図5）。

泥炭層の範囲は土質試験と試掘により点的なエリアで採取し、その情報を地層線で結んで補間推測することで、面的に土量を算出した。BIM/CIMの効果としては、地中部を「見える化」することによる理解度の向上と、現況点群データと比較して正確な土量算出と作業の省力化となり、更にこれを施工の初期段階で計画することで、関係者間での協議を円滑に進めることで迅速に合理的な工程の改善にも繋がった。

当工事では固結工法の区画割りを、3次元の直方体でブロック分けで表現した。従来では平面図と断面図にて2次的にイメージする地中の情報を立体的に可視化し、道路土工部と地盤改良工部の位置関係を分かりやすく明示している。

各区画はそれぞれに番号が振られており、3次元CAD上でもレイヤ分けされ、エリアごとの体積も容易に算出することが可能である。また施工予定時期の情報や、施工する順番の情報もこれに含まれており、施工手順をアニメーション動画で再生し確認することが出来る。紙に出力した図面に、手書きで色分けして進捗を確認していた業務が、3次元データ上でより分かりやすく管理するBIM/CIMデータとなった(図8)。

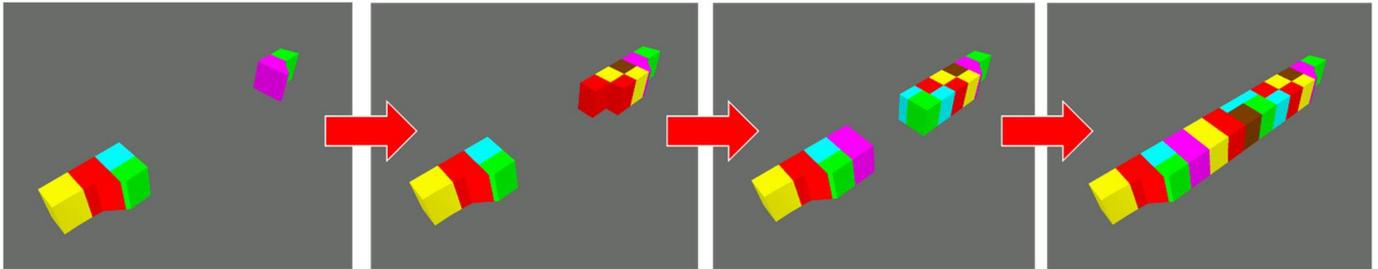


図8 施工ステップの例

BIM/CIMデータは測量・設計・施工・維持管理といった建設ライフサイクル上の各フェーズにて、情報をデータに付与し次工程へ引き継ぐことで、3次元データの連携による生産性向上や業務の効率化を図るものである。現在はi-Construction等により施工段階での活用が進んでいるが、設計図書に上記のような3次元データが含まれていれば、施工段階ではより素早くBIM/CIMを活用でき効果が期待できる。

また設計段階において、前倒しで工事の計画を行うことで、事業の課題点の早期発見、迅速な解決案の着手が可能となり、建設業界全体の効率化に繋がる。

上記の地盤改良工の3次元モデルに、施工段階で管理する出来形情報(設計値、実測値、差、規格値など)や品質情報(添加量、セメント比、材料値、スラリー量など)を付与することで、BIM/CIMデータから施工情報をさかのぼって確認することができる。建設業界におけるトレーサビリティをBIM/CIMデータで表現することで、補修工事や有事の際の対策検討に大きく役立つことが期待できる。

今後、設計から施工へ、施工から維持管理へとデータを受け渡す際に、どのような情報をデータに付与することで、次工程の生産性を向上できるかといった議論が必要不可欠であると考える。

(3) 農業

農業土木の現場では、地中の岩盤掘削量の算出にBIM/CIMを活用した(図9, 図10)。

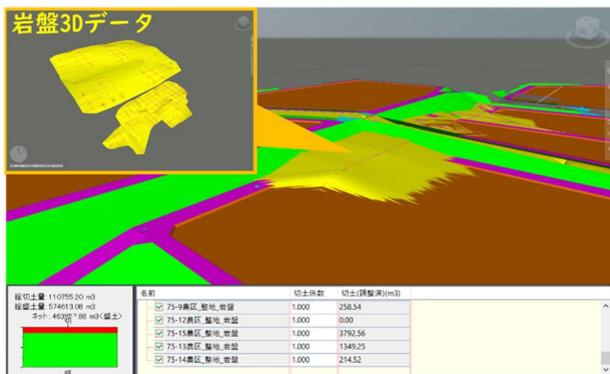


図9 岩盤掘削量算出の効率化

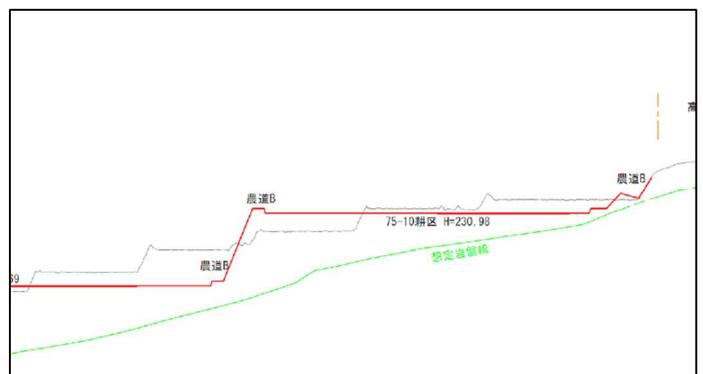


図10 想定岩盤線(横断面)

大規模な圃場整備工事において、区画割りされた圃場ごとに土量、畦畔の法面積、運土計画の算出と検討を行い、更に地中の岩盤層を表現することでより正確な数量算出が可能となる。ICT 施工および i-Construction と BIM/CIM を併用することで、土量算出や施工における丁張設置の工数を大幅に削減し、重機の手元作業員を別の業務に充てることで安全性の向上にも寄与した。

この作成した BIM/CIM データをタブレット PC に入れ、現地のカメラの映像と 3 次元データを重ねる AR 技術による丁張検査でも円滑な合意形成が達成できた。取付道路の位置や、用排水路といった埋設物の位置を実際の映像と重ねて把握することで、完成イメージを思い違いなく共有することが出来る。ここでも「見える化」をキーワードに、土質および地中の情報を一元管理することで、既設のライフライン施設の確認など安全面にも活用が可能である（図 1 1）。



図 1 1 AR 技術を用いた丁張検査

(4) トンネル

最後に、トンネル工事における地層 BIM/CIM 事例を紹介する。

周辺地形、トンネル工、仮設工および地層を表現し「見える化」した当現場では、定期的に地上型レーザー スキャナで現地計測し、点群データ上で変位計測を行った。またトンネルの掘削状況に合わせて切羽写真を属性情報として 3 次元モデルに配置し一元管理を行った。トンネルの地質情報、掘削、完成までの施工管理値を 3D モデルと紐付けることで、施工時のリアルタイムな情報共有を図り、トンネル供用後の維持管理段階に引継ぎ活用を目指した BIM/CIM データである（図 1 2）。

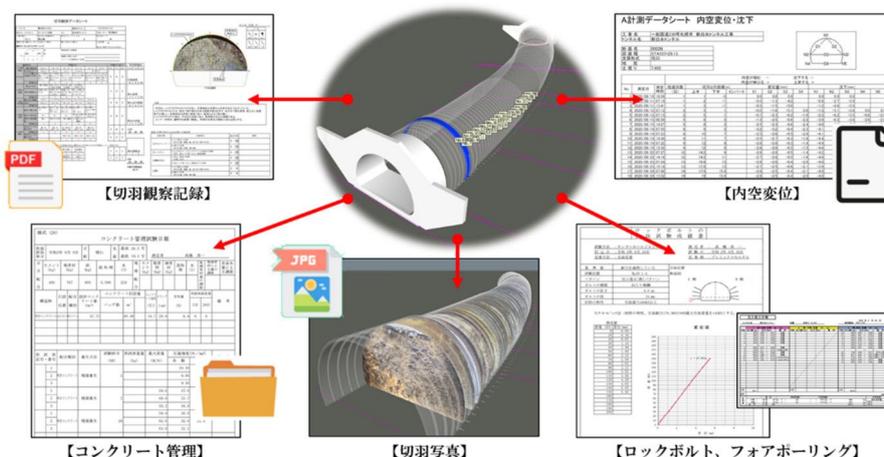


図 1 2 トンネル工事における BIM/CIM

地山全体の形状は現況測量した点群データで表現し、地層の情報は地層断面図から作成した。フォアポーリングやロックボルトを正確に作成して重ね合わせることで、地層との位置関係や地表面との兼ね合いを分か

りやすく把握することが可能となる（図13）。

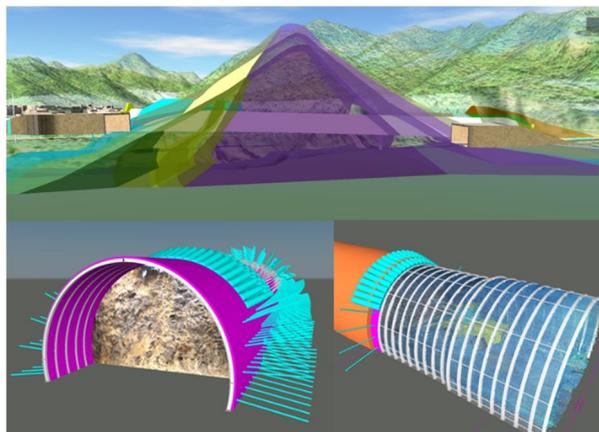


図13 地層の見える化

長いトンネル延長の工事や断層が多く見られる個所での施工において、土質分布の「見える化」が施工にも重要なポイントとなる。本工事では1枚の地層断面図からデータを作成したが、ボーリング調査結果や熟練の経験者の知識を BIM/CIM データに載せることで、データはより正確性を増し、実際に役立つデータへと改善されて引き継がれていく。

地層の3次元データを専門に作成することができるソフトもあり、今後 BIM/CIM において地質に関するデータの利活用はますます進んでいくものと考えられる。

4. おわりに

令和5年度より BIM/CIM は原則適応することとなり、施工会社だけではなく測量・設計・維持管理・公共事業を発注する国や北海道のような官公庁も、データを横断的に受け渡してスムーズに活用する体制作りが必要となる。ICT や BIM/CIM を工事特性に合わせて活用し、建設業界に関わる技術者だけではなく、一般人にも分かりやすいデータであることが、業界全体の生産性向上を図るのに重要なポイントである。

土質に関するデータや知見、情報もより分かりやすく「見える化」することで、培われた技術の継承と、これまでにない新しい仕事のあり方を変革するインフラ DX に繋がるものであると確信している。

最後に、弊社のインフラ DX に関する打合せ状況を写真1に示し、本稿作成に協力頂いた皆様への感謝の意を表す。



写真1 BIM/CIM データから生まれるコミュニケーション

V-JET 工法の生産性向上への取り組み

三信建設工業株式会社

島野 嵐*1

山口 洋*2

1. はじめに

国土交通省は、「ICTの全面的な活用による建設生産性向上に関する研究」の中で施工段階の開発目的として「情報化施工の導入による省力化」、「出来高・出来形管理の迅速化」、「計測結果の見える化による監督検査の効率化」を挙げている¹⁾。高圧噴射攪拌工法である V-JET 工法（以下、本工法）では、これらの課題に対応可能なシステムを開発・導入し、生産性の向上を図った。本稿では本工法の概要ならびに開発・導入した管理システムについて述べる。

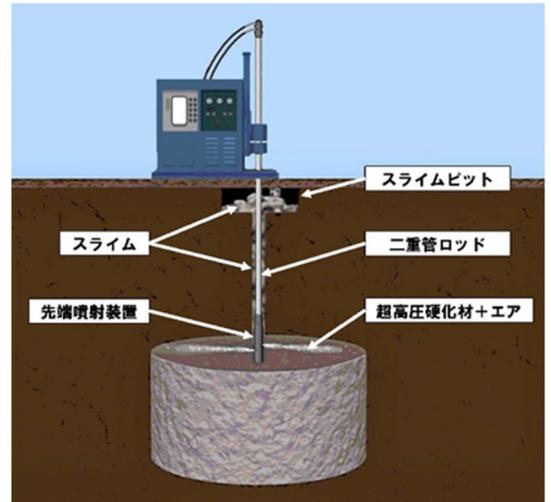


図1 V-JET 工法の概要

2. 工法概要

本工法は、長年にわたる数多くの実績をもつ JSG 工法の特徴を生かしつつ、施工の高速化・効率化を図った地盤改良工法である。

図1に工法の概要図を示す。

本工法は高い噴射攪拌効率を発揮する先端噴射装置（特殊専用モニター）を用いており、従来技術と比較して施工性や経済性が向上し、環境負荷の低減を可能にしている。表1および表2に示すように、硬化材の噴射量、造成時間、特殊専用モニターおよび機械設備などにより 1.5m ~ 6.0m と幅広い改良径の設定や目的に合わせた改良強度の設定が可能である。

表1 V-JET 標準施工仕様

タイプ	V0	V1	V2	V3
標準有効径 (m)	1.5、2.0	2.5、3.0	3.5、4.0	4.5、5.0、5.5、6.0
噴射量 (L/min)	160	240	360	540
造成時間 (min/m)	4~7	7~10	9~12	10~18

表2 V-JET 設計基準強度

種別	土質	一軸圧縮強さ (MN/m ²)	粘着力 (MN/m ²)
標準仕様	砂質土	3	0.5
	粘性土	1	0.3
低強度仕様	砂質土	1	0.2
特殊土仕様	有機質土	0.3	0.1

3. 管理システムの概要

管理システムは表3に示すように施工段階ごとに5つのシステムから構成される。

以下に各システムについて詳細を示す。

表3 管理システムの構成

施工段階	使用システム	概要
改良機セット時	平面位置誘導システム	GNSS を用いた施工機の誘導
削孔時	削孔精度確認装置	削孔管路位置の確認・記録
造成時	切削状態モニタリングシステム	改良径の可視化（施工1本目または試験施工で実施）
	専用施工管理装置	施工データの一元管理・履歴データの記録
施工後	3次元描画システム	地盤情報や施工情報（施工履歴データ）を3次元描画、改良体の可視化

*1 Arashi Shimano 東京都台東区柳橋 2-19-6 ・TEL 03-5825-3704 ・FAX03-5825-3756

*2 Hiroshi Yamaguchi 東京都台東区柳橋 2-19-6 ・TEL 03-5825-3707 ・FAX03-5825-3757

3.1 平面位置誘導システム(検測作業の省力化・作業員の省力化)

平面位置誘導システム(TOMECC-Navi TJI-1A:国土交通省 ICT 建設機械等認定制度申請中)は、事前に平面図 CAD データと現場の変化点座標(現場を囲む 3 点以上の既知点座標)を入力し、施工箇所の x・y の位置情報を事前に把握することで、改良機セット時に施工ポイントに誘導するものである。本システムは GNSS 基地局を遮蔽物の少ない箇所に設け、写真 1 に示す改良機本体に設置された 2 機の GNSS 受信機および傾斜計により改良体杭芯位置を把握して改良機を誘導するものであり、改良機に装着したモニターにリアルタイム表示される。モニターへの表示は図 2 に示すように、誘導対象の杭番号、計画座標、実測座標、計画座標と実測座標(現在位置座標)との差が表示され、容易にかつ正確に改良機の誘導が可能である。

高圧噴射攪拌工法の施工位置は図 3 に示すよう排泥ピット開口部の直上となり、開口部端部に印したマーキングからの離隔より出す空中の施工ポイントにセットする手法を取ることが多いが、マーキングが消えた場合や覆工盤がずれた場合は再測量などが必要であった。本システムの導入によってこれらの作業がなくなり、作業員の省力化が図れる。導入に際し、光波測量により設けた 25 か所の測量点に本システムを用いて誘導し、改良機の前、左右方向の誤差を計測し精度確認を行った。精度確認状況を写真 2 に示す。結果として、誘導誤差は改良機の前、後方向で 0.1~3.0cm、左右方向で 0.1~2.5cm、合成距離で 0.7~3.3cm(平均 1.6cm)であった。この値は本工法の管理基準値±10cm 以下²⁾や施工履歴データを用いた出来形管理の監督・検査要領(固結工(スラリー攪拌工)編)に示される管理基準値±100mm 以内³⁾であり、本システムによる平面位置管理の有効性が確認されている。

3.2 削孔精度確認技術装置(施工履歴データの記録)

削孔精度確認技術は図 4 に示すジャイロセンサが設置されたセンサプローブにより削孔孔の管路位置(孔曲がり)を測定するものである。出力データは、事前に設置した施工位置の x 軸、y 軸および深度の z 軸で計測用 PC に表示され、各深度での管路位置を出力・記録できる。出力データの表示例を図 5 に示す。本システムは x 軸、y 軸の計測を同時にできることから、従来の片軸ずつ計測する機器と比較し、おおよそ半分の作業時間にて計測可能であり省力化が図れる。



写真 1 改良機 GNSS 装着状況



図 2 平面位置誘導システム表示例



図 3 従来の施工ポイントへの誘導時の課題



写真 2 誘導精度確認状況

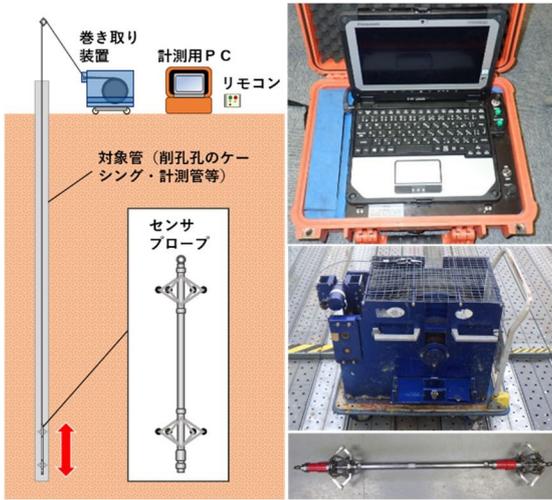


図4 削孔精度確認技術概要

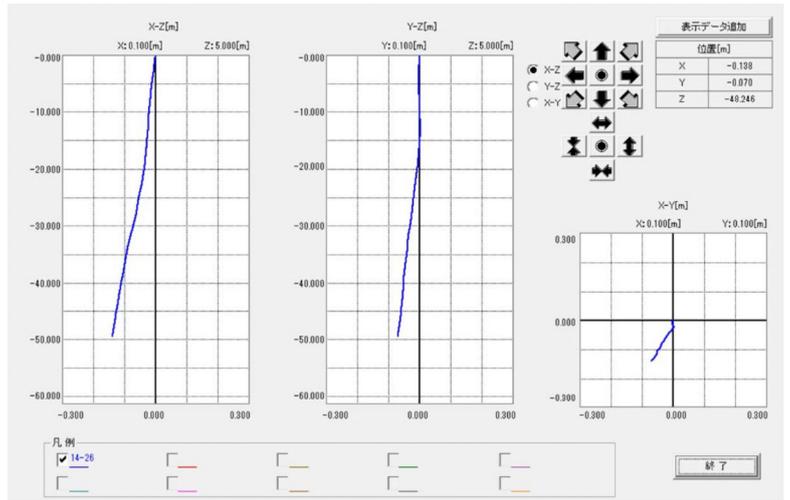


図5 出力データ表示例

3.3 切削状態モニタリングシステム(改良体の可視化)

切削状態モニタリングシステム (JWM システム: Jet Wave Monitoring System)は、図6に示すように改良杭の造成範囲の複数位置(最大4か所)に事前に集音器を挿入するための計測管を設置し、集音器により計測管に当たるジェット流を音の大きさとしてモニタリングし、この経時変化を記録・分析し、地盤の切削状態(改良径)を評価するものである。計測管にジェット流が到達している場合、図7に示すように一定間隔で山型のグラフ線形が確認でき、噴射エネルギーは山の大きさに比例してロッドに近い計測管ほど明確になる。このグラフにおいて、音圧レベルの振れ幅(最大値-最小値)が規定値を超えた場合に改良体の出来形が計測管の外側まで達していると判断し、改良径の出来形を特定するものである。実現場での改良径判定例を図8に示す。本システムは2011年の実用化から30件を超える現場にて50ケース以上の地盤・施工仕様での使用実績がある。これにより試験施工による出来形確認が不要となり工期の短縮が図れる。

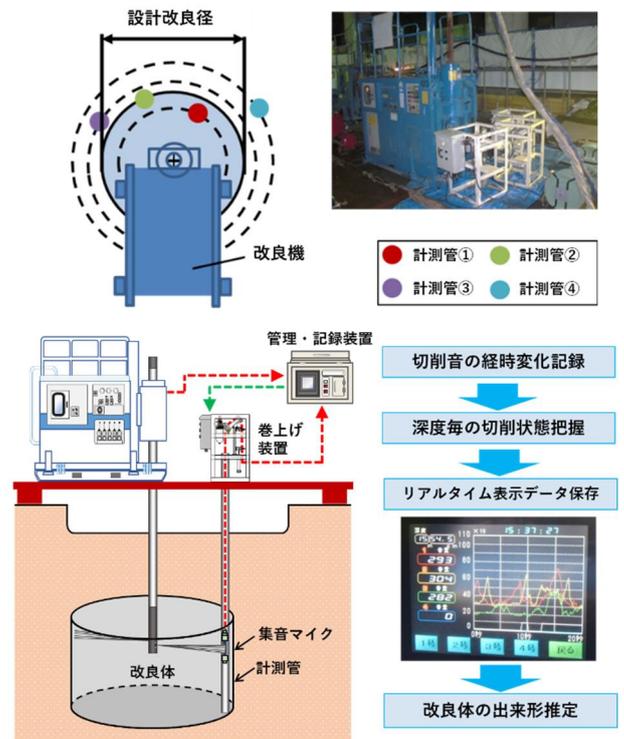


図6 JWM システム概要

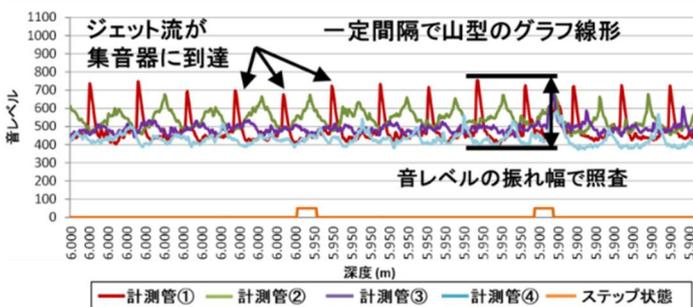


図7 JWM システム計測例

深度 (GL-m)	土質	最低判定径 (m)	改良径判定図	計測位置 ①②③④	判定径 (m)	深度 (GL-m)
13.100	砂質土 0 < N ≤ 50	4.400	[Diagram showing improvement body reaching measurement tubes 1, 2, 3, and 4]	計測径: 4.000m	4.400	13.100
14.000					4.800	13.600
14.400					4.400	14.400
16.300	粘性土 0 < N ≤ 3	4.400			4.000	15.700
					4.400	16.300

図8 改良径判定例

3.4 専用施工管理装置(施工履歴データの記録・検測作業の省力化)

V-JET 専用管理装置を用いることにより、地中での地盤改良の施工状況をリアルタイムに確認・管理をすることが可能である。従来の高圧噴射攪拌工法の施工データは一般的には図9に示すように、硬化材の単位噴射量と噴射時間のみが紙チャートに印字されるが、本装置を用いることにより図10に示す施工ヤード、プラントヤードの複数個所で計測された各々の施工データを一括管理でき、装置本体に記録保存される。

記録可能なデータは図11および図12に示すように「深度」、「硬化材の噴射圧力および流量（瞬時流量および積算流量）」、「圧縮空気の圧力および瞬時流量」、「噴射装置の回転速度・引上げ時間」、「施工機の傾き」、「施工時間」であるため、表示データは画面ミラーリングにより外部表示可能であり現場と事務所の複数個所でリアルタイムにデータ共有が可能である。施工データの帳票例を図13に、実現場での施工管理状況を図14に示す。実現場において施工管理における作業時間省力化度合いおよび施工データ（チャートデータ）整理時間省力化度合いの確認をした結果、前者は施工日1日当たり最大90分の省力化、後者は約3割の作業時間を省力化できることを確認されている⁴⁾。

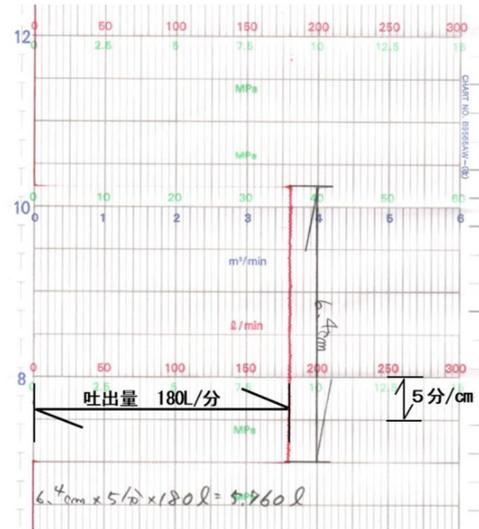


図9 従来技術施工履歴データ

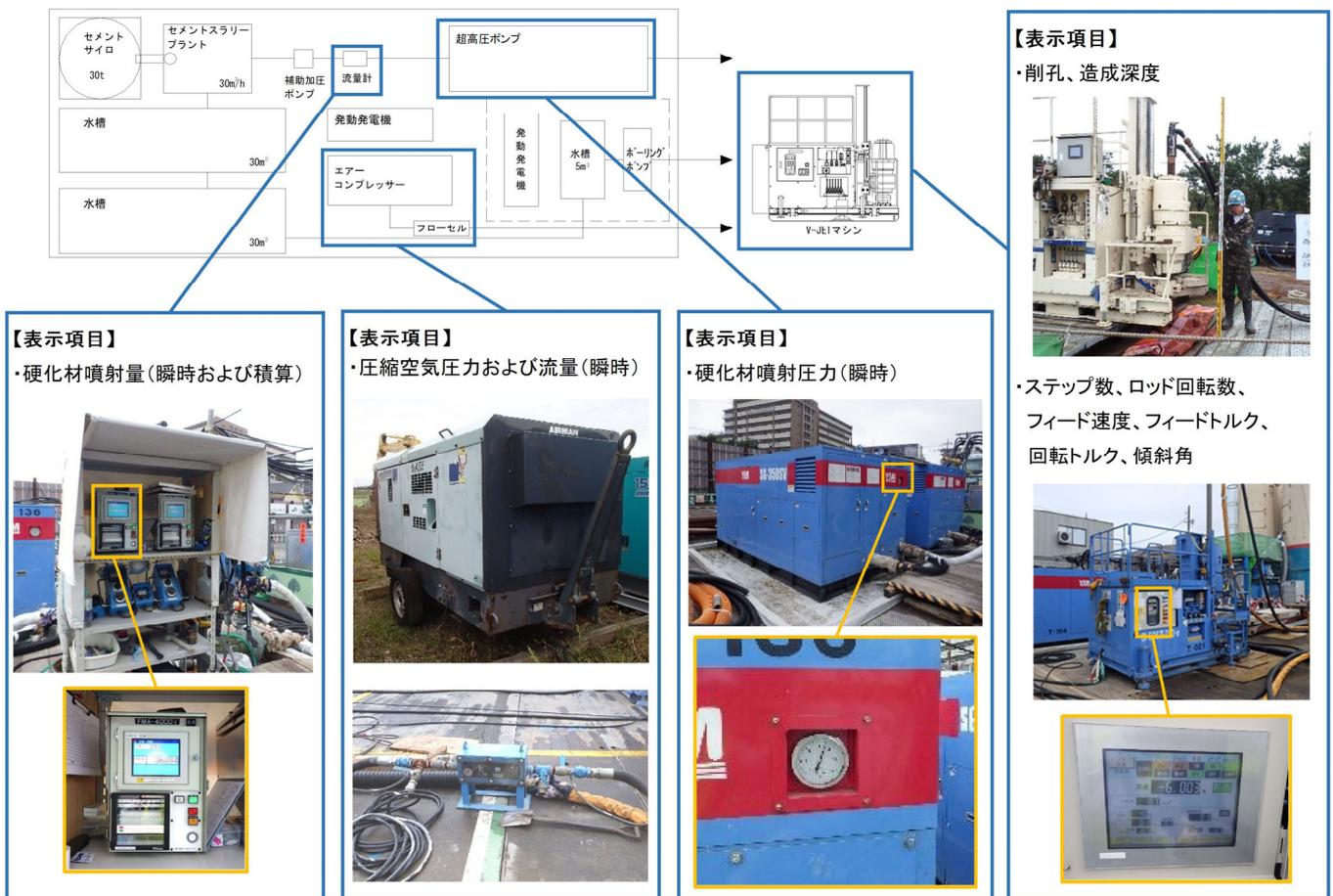


図10 施工管理項目



図 11 施工管理装置表示例（標準表示）



図 12 施工管理装置表示例（経時変化表示）

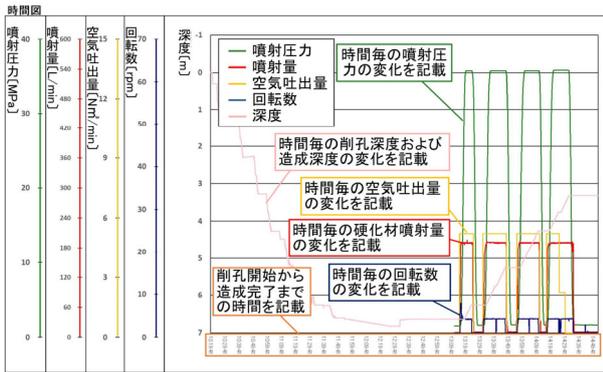


図 13 施工履歴データ表示例



図 14 実現場での施工管理状況

3.5 3次元描画システム(施工履歴データの描画・改良体の可視化)

3次元描画システム(3D wrapping system: 3D wide-range improved data rapid plotting system)は前述の施工管理技術の取得データを統合・一元管理して3次元で描画・可視化する技術である。斜視図は図15に示すように任意の方向で表示することや拡大縮小表示が可能である。改良体は設計位置と実施工位置で描画できるほか、任意で表示・非表示が可能であり、施工日ごとに色を変え進捗図とすることも可能である。

また、図16に示すように改良深度10cmごとに噴射量や噴射圧などの各施工管理項目が計画値を満足しているか否かの表示が可能である(管理項目ごとに切り替え可能)。さらに、図17に示すように任意の断面で2D断面図の描画や局部点の拡大が可能であり、図18に示すように改良部を非表示にし、改良体同士が接合しているか(未改良部が連続して存在しないか)等の確認も可能である。

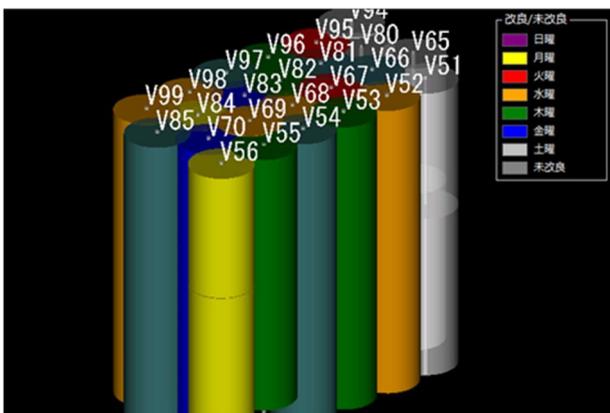


図 15 斜視図表示例

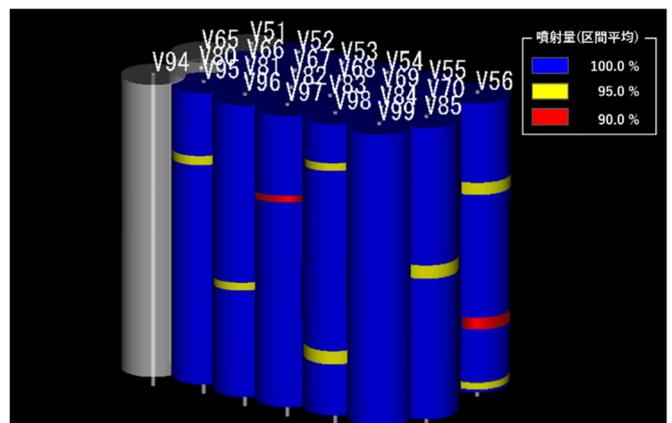
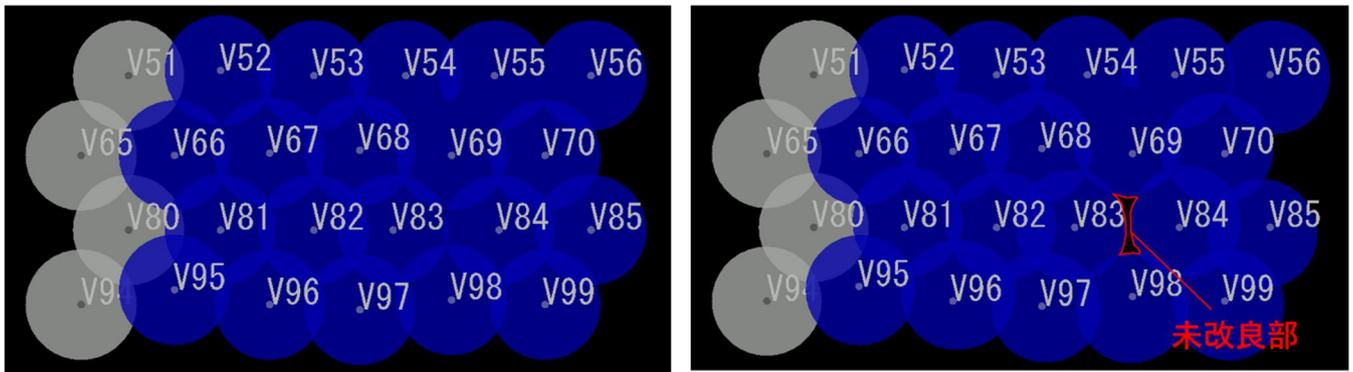


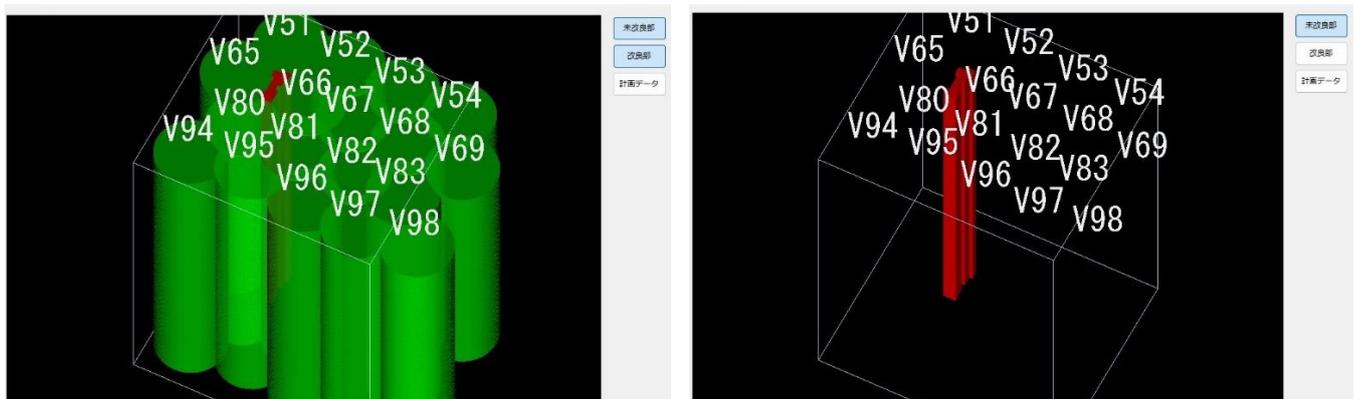
図 16 施工管理値確認例



(a) 未改良部無し

(b) 未改良部有り

図17 2D断面表示例



(a) 改良部+未改良部の表示

(b) 未改良部のみの表示

図18 改良部・未改良部の表示切替例

4. まとめ

V-JET 工法は、複数の管理システムを用いることで作業員の省力化や工期の短縮により生産性の向上が図れ、また、各施工段階での施工状況のリアルタイム一元管理・可視化ならびに施工履歴データの保存が可能となった。これらより、従来の施工管理手法と比べ効率的かつ高水準な施工管理を実現した。今後も、日々進化している新しい ICT 技術等を積極的に導入し、さらなる生産性の向上を目指す。

参考文献

- 1) 国土交通省：ICT の全面的な活用による建設生産 性向上に関する研究（最終検索日 2023 年 10 月 13 日）、
https://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/kaihatu/pdf/h28/160801_04ict.pdf
- 2) V-JET 協会：V-JET 工法技術・積算資料（第 10 版）、2023
- 3) 国土交通省：3 次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）令和 5 年度 3 月版、p. 8-21、2023
- 4) 公益社団法人日本材料学会：「地盤改良」に関わる技術評価証明報告書 V-JET 工法、2020

省力化および品質向上を実現する地盤改良管理システム 薬液注入制御・モニタリング装置「Grout Conductor」 変位抑制自動注入制御システム「Grout Producer」

日特建設株式会社 池田 淳*1

青木 園子*2

1. はじめに

建設業界では、施工現場の省人化、施工管理の効率化、生産性の向上など、多くの課題を抱えており、これらの対応策として DX 技術を活用した取り組みが活発化している。また、地盤改良工事においては、施工箇所が地盤中であるために、改良体の品質や出来形、地盤状況などの変化をリアルタイムに評価し、どのように施工にフィードバックしていくかなど、各種技術を有効活用するまでにはさらなる課題が存在する。

上記の課題を解決するため、当社は、薬液注入制御・モニタリング装置「Grout Conductor（グラウトコンダクター）」および変位抑制自動注入制御システム「Grout Producer（グラウトプロデューサー）」を開発した。

本報告では、これら 2 つのシステムの概要およびシステム導入の効果と今後の展望について紹介する。

2. 薬液注入制御・モニタリング装置「Grout Conductor（グラウトコンダクター）」

（1）概要

Grout Conductor は、薬液注入工法の施工時に、注入の制御（流量、注入圧力）をするとともに、それらをモニタリングするシステムである。

計画された注入量等の仕様を設定することにより、流量計・グラウトポンプを集中制御するとともに、注入データ（積算流量、注入圧力）をデジタルデータとしてモニタリングし、その結果を 2 次元、3 次元で表示することが可能である。

（2）システムの特徴

Grout Conductor のおもな特徴は、以下のとおりである。

① 最大 8 セットの流量計、グラウトポンプを制御可能

Grout Conductor1 台で、最大 8 セットの流量制御が可能である。

従来、流量計 8 セットの場合、作業員 2 名が必要であったが、本システムを使用することにより作業員 1 名での操作が可能になる。

また、本システムは二重管ストレーナ工法やダブルパッカ工法、液状化対策、低圧浸透注入工法などに適用可能かつ、様々な注入材料に対応している。

Grout Conductor 概要を図-1 に示す。

*1 Jun Ikeda 東京都中央区東日本橋三丁目 10 番 6 号 ・ TEL03-5645-5062 ・ FAX03-5645-5066

*2 Sonoko Aoki 東京都中央区東日本橋三丁目 10 番 6 号 ・ TEL03-5645-5110 ・ FAX03-5645-5113



図-1 Grout Conductor 概要

② 注入圧を検知し、設定圧力の上限值を超えないよう自動で注入材流量を制御

本システムは、注入圧を検知し、設定した注入圧力の上限值を超えないよう、自動で注入材流量を制御している。これは、当社が得意とするダムグラウトの圧力管理注入方式を取り入れたものである。

従来は、注入材流量を常に一定としていたため、注入圧が上昇し、周辺構造物や地盤の変状が発生する可能性があったが、本システムの注入材流量自動制御により、その影響を低減することが可能となった。

注入制御イメージを図-2 に示す。

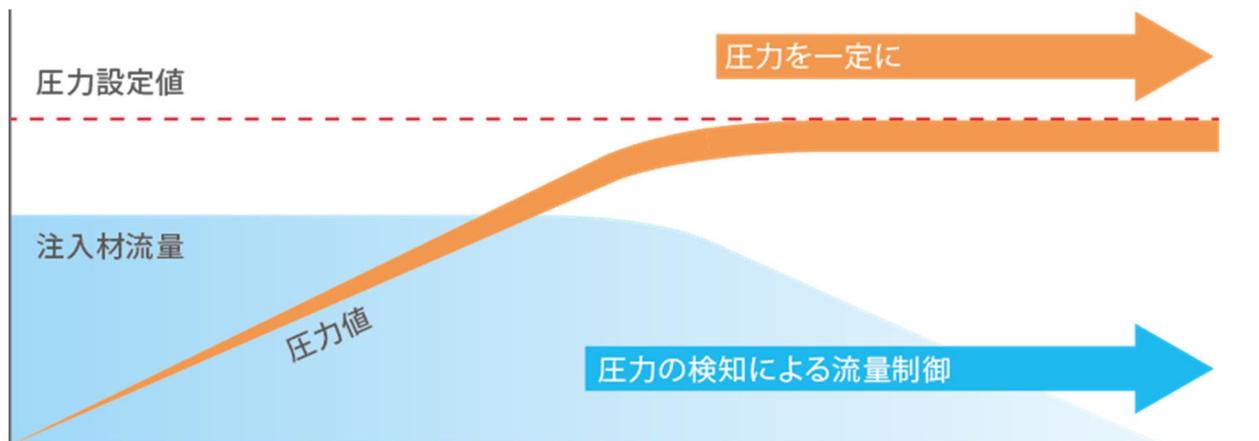


図-2 注入制御イメージ

③ 注入データをデジタルで集積

従来、注入データはチャート用紙を人間が読み、手動で抽出したうえで解析を行っていたが、本システムでは注入データをデジタルで集積し、帳票の自動作成や施工データの3次元表示を可能にすることにより、施工の省力化、施工品質の向上を図ることができる。

データの読込・出力のイメージを図-3 に示す。

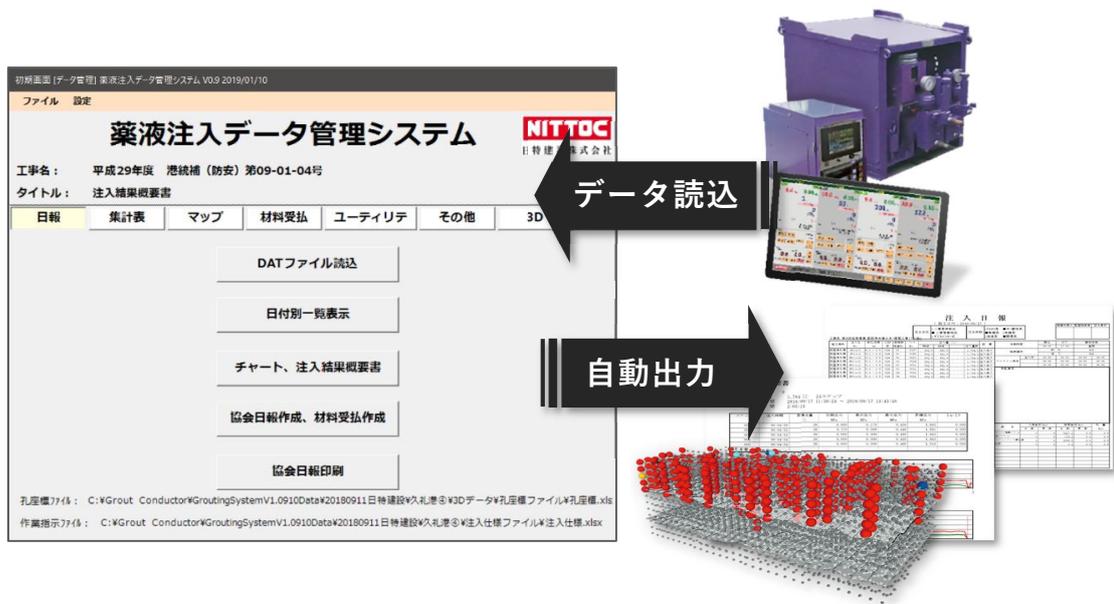


図-3 データの読込・出力のイメージ

④ 注入結果を、2次元、3次元で表示し、色・大きさで表現

積算流量、注入圧力を色・球の大小で表現し、直的に注入状況を確認することが可能である。

また、色や球の大きさのしきい値の設定、積算流量、注入圧力の表示切替を施工状況に合わせて任意に行うことができ、注入状況の即時把握が可能である。

注入結果表示画面を図-4に示す。

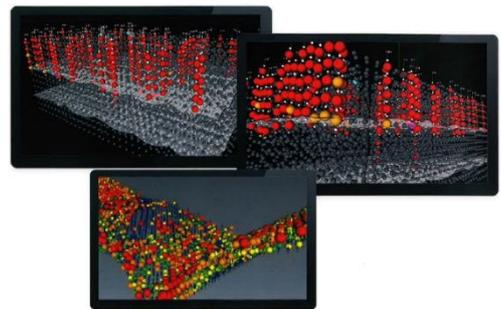


図-4 注入結果表示画面

(3) システム導入の効果と今後の展望

本システムの導入によるおもな効果は以下の通りである。

- ・ 施工情報をデジタル化、3次元表示可視化し、「見える化」に対応
- ・ 得られたデータの「集積・分析・評価」により注入効果判定に活用が可能
- ・ 地盤情報を取り込むことで、「i-Construction」への対応が可能
- ・ 汎用機械の制御・運転を自動化することで「作業の省力化、作業員の負担を軽減」

Grout Conductor はすでに多くの現場で導入し稼働している。

今後は、さらに導入実績を増やして施工データを収集するとともに、作業者がより使いやすいシステムとなるよう、ユーザビリティの向上を図っていく予定である。

3. 変位抑制自動注入制御システム「Grout Producer (グラウトプロデューサー)」

(1) 概要

Grout Producer は、薬液注入工法の施工時に懸念される「地盤変位」を抑制するため、周辺地盤の変位を随時計測し、その結果をもとに薬液の注入速度を自動制御するシステムである。

注入速度を抑制することによって過剰な注入圧力が発生しないことから、地盤変位が抑制され、浸透注入の均質化・品質向上を図ることができる。

(2) システムの特徴

Grout Producer のおもな特徴は、以下のとおりである。

① 周辺地盤の変位測量結果より、自動で流量を制御し変位を抑制

注入中の地盤変位を随時計測し、設定した変位を超えると注入速度を制御することにより、地盤の変位が抑制され、高品質の地盤改良が可能となる。

Grout Producer の概要を図-5 に示す。

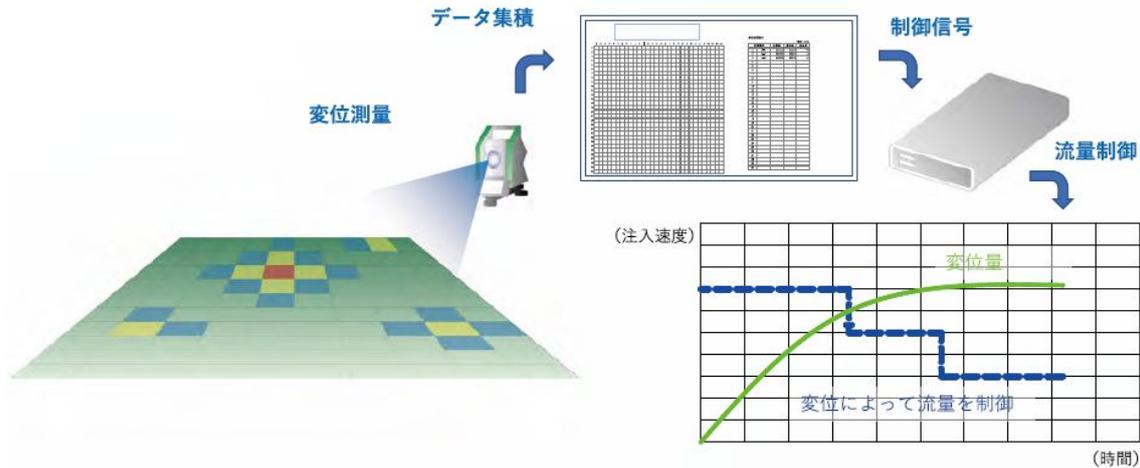


図-5 Grout Producer 概要

② 周辺地盤の状況を視覚的に把握

本システムのモニタ左側には計測位置と変位状況、中央部には各計測地点の変位測量値が表示される。モニタ右側のポンプ制御表示の緑色が通常運転状態であり、変位が発生して第一段階の制御がかかると表示が青色に変化する。

Grout Producer のモニタを図-6 に示す。

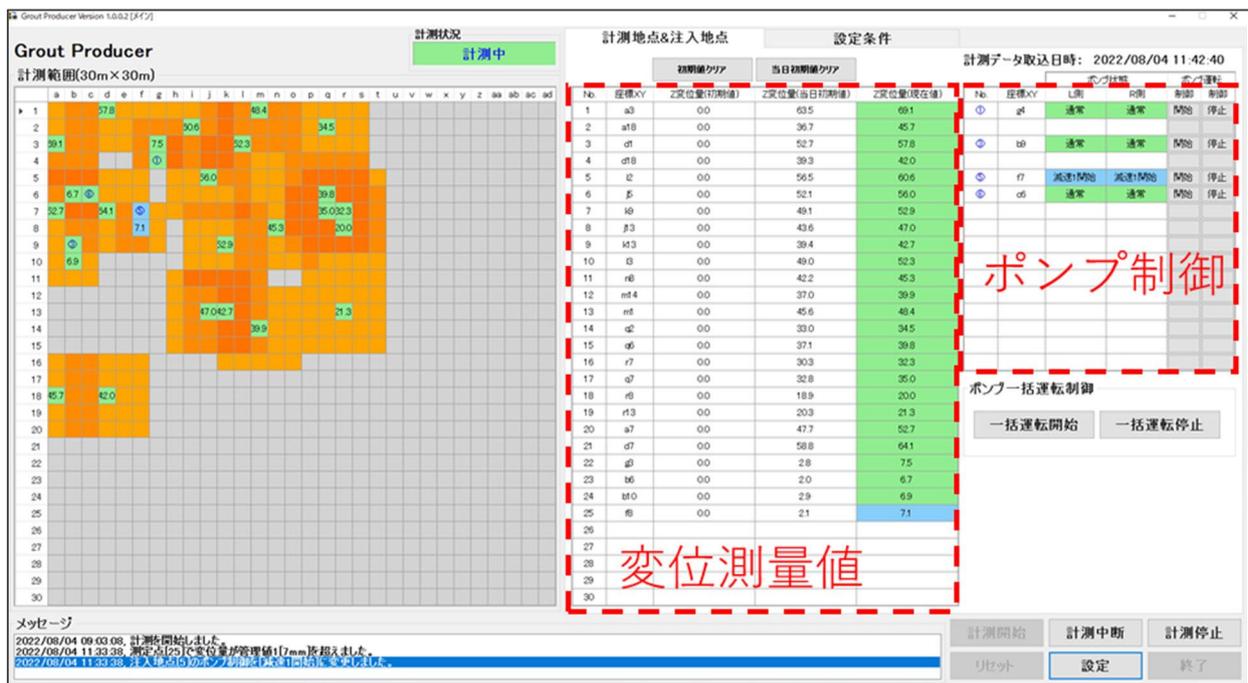


図-6 Grout Producer モニタ

③ Grout Conductor および Grout Producer の併用による 3 次元表示

本システムと Grout Conductor を併用することで、積算流量、注入圧力を、色・球の大小で表現し、直感的に注入状況を把握することが可能である。

2 つのシステムを併用する場合、Grout Conductor は積算流量計の制御のみを行い、注入ポンプの制御は Grout Producer が優先される。

Grout Conductor および Grout Producer の併用状況を図-7 に示す。

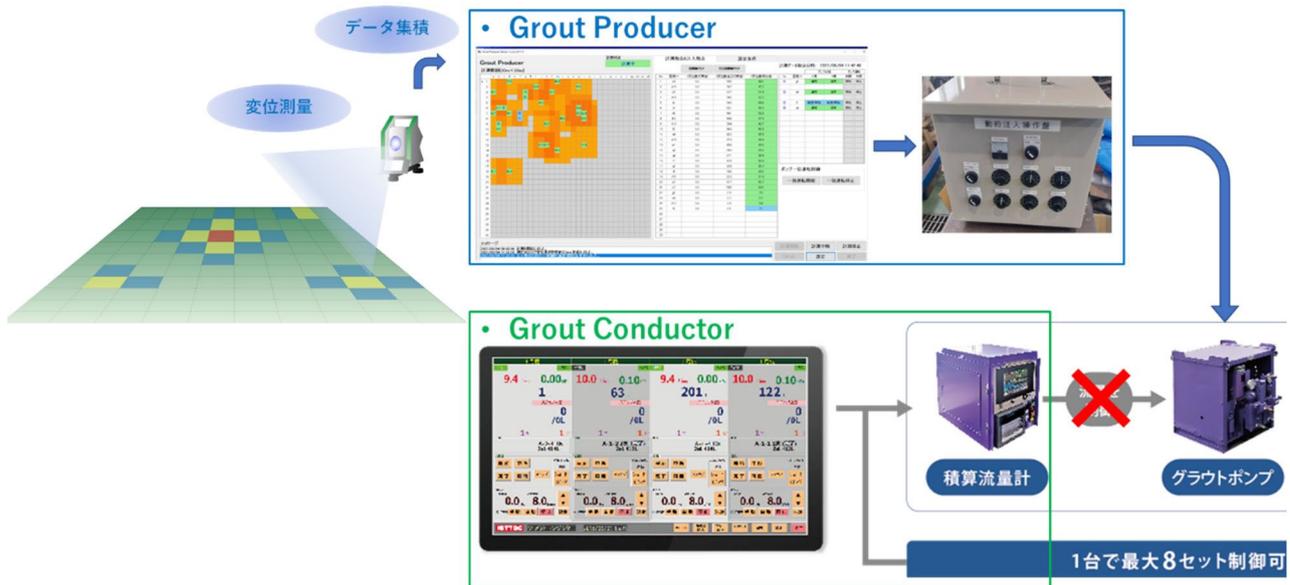


図-7 Grout Conductor および GroutProducer 併用状況

(3) システム導入の効果と今後の展望

本システムの導入により、地盤変状の発生を抑制し、3次元モデルを用いて地盤情報などを可視化できることから、高品質かつ効率的な地盤改良を実現することが可能となった。

また、既設構造物周辺や軌道下など、地盤変位を制限するような現場での施工においては、注入による周辺地盤や近接構造物への影響を小さくすることができる。

現在、本システムの現場導入実績は1件であるが、今後、さらなる現場導入の推進を図るとともに、現場で抽出された課題を解決することにより、より使いやすいシステムにバージョンアップを図ることも検討している。

4. おわりに

本報告で紹介した2つの技術は、目視が困難な地盤中で行われる地盤改良工事において、DX技術を活用することにより「見える化」、「省力化」、「施工品質の確保」を可能にしたものである。これらの技術は、今後、施工実績を積み重ねることによりその効果やニーズを検証し、より実用的な技術へと改良を重ねていく予定である。

国土交通省においては、2025年までにすべての建設生産工程でICTや3次元データを活用し、生産性を2割向上させることを目指している。

作業員の高齢化や人手不足が問題となっている建設業界の中で、DX技術の活用は、生産性を向上させるための手段の一つとして急ピッチに進められており、こうした動きの中で、本報告で紹介したこれらの技術がその一端を担い、貢献できればと考えている。

地盤改良工事における ICT 施工事例 ～ICT 地盤改良システム『Picture(ピクチャー)シリーズシステム』～

小野田ケミコ株式会社 武田 裕樹*1, 木下 和徳*2
梶原 裕太*3, 大住 学*4

1. はじめに

全国的に建設現場における技能者不足や就業者の高齢化などによる担い手不足が課題となっているが、特に北海道においては全国よりも人口減少・高齢化が 10 年先行しているほか、積雪寒冷地や広域分散などの課題を抱えているりとされる。そこで、令和5年度 北海道開発局インフラ DX・ i-Construction アクションプランでは、令和 5 年をインフラ DX「躍進の年」と位置づけ、更なる生産性の向上が強く求められている。

直轄工事においては、「土工」や「コンクリート工」が ICT 施工の約4割を占めており、これら 2 工種が先行している。「地盤改良工」も令和元年から ICT 活用対象工事として発注され、年々その件数は増えてきている²⁾。令和 4 年までの対象工事件数は 33 件で、そのうち活用実施件数は 27 件と実施割合が 80%を越えており、今後も ICT 活用対象工事の発注および活用実施件数は増えていくことが期待される。

本報において、ICT 施工への取り組みを紹介すると共に、実施した事例を報告する。

2. ICT 施工への取り組み

地盤改良工事における生産性の向上と見える化による品質の向上を目指して、弊社では表-2.1 に示す ICT 施工技術に取り組んでいる。本技術は Picture シリーズと総称し、NETIS 登録(QS-220014-A)も行っている。それぞれの ICT 技術の一部を紹介する。

2.1 Picture Navi: 施工位置誘導システム

本システムは、図-2.1に示すように施工管理用の CAD 図面画像に GNSS などによる施工機の位置情報を表示することで、画像上で施工機の位置を確認できる。これにより目標の杭芯までの距離や向きを確認しながら、正確な位置に施工機を誘導させることが可能である。従来の測量や人による機械誘導に比べ、位置精度が向上するだけでなく、省力化も計れる。なお、GNSS 測量に支障が生じる都市部・狭隘部などの環境下では、トータルステーションとの連動で、本システムを運用することも可能である。

また、施工完了時には画像上に完了を示すスタンプを施すことで、打設前後の識別が可能であり、誤打設や打ち忘れなどの人為的ミスを防止することもできる。

表-2.1 ICT 技術(Picture シリーズ)の一覧³⁾

名称	内容
Picture Navi [®]	施工位置誘導システム
3D Picture View [®]	施工情報の 3D モデル化システム
Picture Eye [®]	遠隔画面表示システム
Picture Watch [®]	自動施工判定管理システム

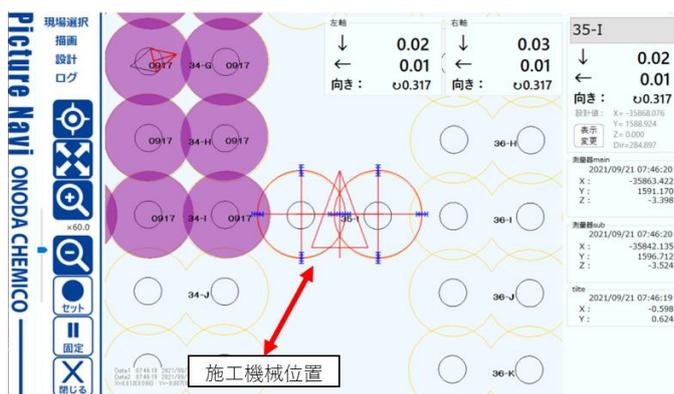


図-2.1 Picture Navi 施工機位置画像例

*1 Hiroki TAKEDA	宮城県仙台市青葉区本町 1-13-22	TEL:022-706-4067	FAX:022-706-4070
*2 Kazunori KINOSHITA	北海道札幌市中央区北 1 条西 13-4	TEL:011-219-6560	FAX:011-219-7887
*3 Yuta KAJIWARA	東京都千代田区神田錦町 3-21	TEL:03-6386-7044	FAX:03-6386-7022
*4 Manabu OHSUMI	東京都千代田区神田錦町 3-21	TEL:03-6386-7043	FAX:03-6386-7022

2.2 3D Picture View: 施工情報の 3D モデル化システム

本システムは、図-2.2 に示すように Picture Navi と共通の 2 次元図面に、施工管理装置からの施工情報を加え、3 次元モデルとして施工の見える化を可能としたシステムである。施工情報として、改良深度、流量、回転数、電流値などを改良体上に描画することで、一目で施工の良否を判定できるものである。出力は PDF 画像に加え、図-2.3 のように 3DCAD として出力することができ、BIM/CIM にも対応可能である。

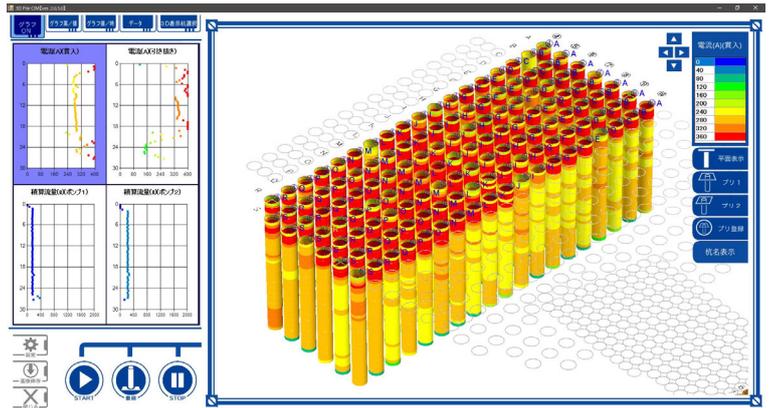


図-2.2 3D Picture View 施工管理画像例

加えて土質柱状図や地層図などの設計情報をリンクさせることにより、改良体の着底深度や添加量の深度毎の変化点を一目で識別することが可能となる。これにより、リアルタイムに着底深度や土層変化点を、設計値および周辺改良体と比較でき、その妥当性を検証することができる。そのため、妥当性に欠ける改良体の早期発見と迅速な再施工の対応が可能である。

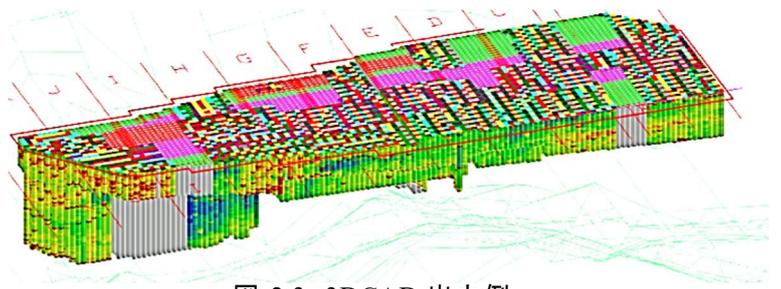


図-2.3 3DCAD 出力例

2.3 Picture Watch: 自動判定施工管理システム

本システムは、従来、施工機オペレータや管理室オペレータが、監視、施工判定していた品質に関わるスラリー流量、圧力、軸回転数などの管理値の良否を自動で判定する施工管理システムである。あらかじめ設定した管理値を逸脱した場合には図-2.4 に示すように警告がプラント管理室および施工機操作室の管理画像上に表示され、管理値を満足するまで当該区間の再施工を促す。このシステムでも、リアルタイムに施工の妥当性を検証できる。



図-2.4 Picture Watch 施工管理画像例

2.4 Picture Eye: 遠隔画面表示システム

従来、施工管理に利活用する情報は、プラント管理室や施工機操作室内に限定されて表示されていた。この情報を、インターネット回線を介して現場事務所などに転送し、オペレータに限らず、施工管理者にも共有することを目的に Picture Eye:遠隔画面表示システムを開発した。このシステムの導入により、事務所内に設置したモニタには Picture Navi および Picture Watch の画像が表示され、各施工箇所とのリアルタイムでの情報共有が可能となった。図-2.5 に示すようにインターネット回線を経由することで最大 10 台程度の施工機情報をリアルタイムで遠隔表示することが可能である。

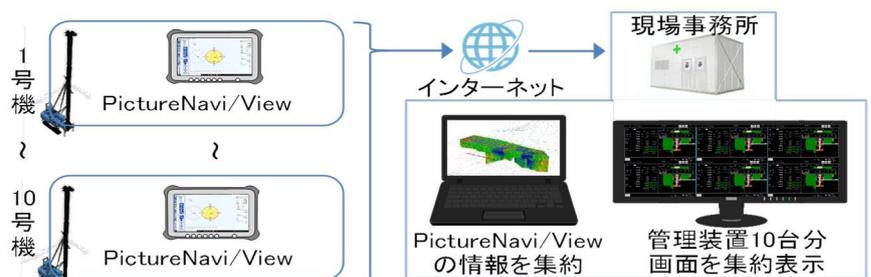


図-2.5 Picture Eye イメージ図

3. 施工位置誘導システムを用いた施工事例

港湾において実施した ICT 施工の事例を報告する。

当該工事は、図-3.1 に示す小樽市の観光エリアに近い小樽港第 3 号ふ頭での、矢板式岸壁の受働土圧増加を目的とした地盤改良工事において ICT 施工を計画・実施した事例である。図-3.2 の施工断面図に示すような地盤改良を行う計画で、既設矢板に密着でき、大口径の改良体造成が可能な単管式で超高圧噴射攪拌工法 (SMM-Dy 工法:NETIS 登録 QS-210021-A) により地盤改良を行った。なお、本工法はエア噴射を伴う工法と異なり排泥の拡散が少なく、水域内でも水質への影響を低減できるので、水中施工が可能な環境負荷低減型の工法である。

表 3.1 に工事概要を示す。海上での施工機の移動性を高めるため、図-3.3 および図-3.4 に示すように、仮設構台を設置し、覆工足場を必要としない走行台車(スライドベース)を用いた施工が計画された。

従来の上記計画における杭芯の位置出しは、縦断方向については仮設構台の走行桁にポイントを明示して、横断方向は、走行桁からの横断方向への離隔距離にて実施されていた。しかしながら、走行桁のズレや明示したポイントの消失などもあり、施工管理として施工前および施工途中に都度再測量による杭芯位置の確認を実施しなければならず、非常に労力のかかる作業である。



図-3.1 施工位置図

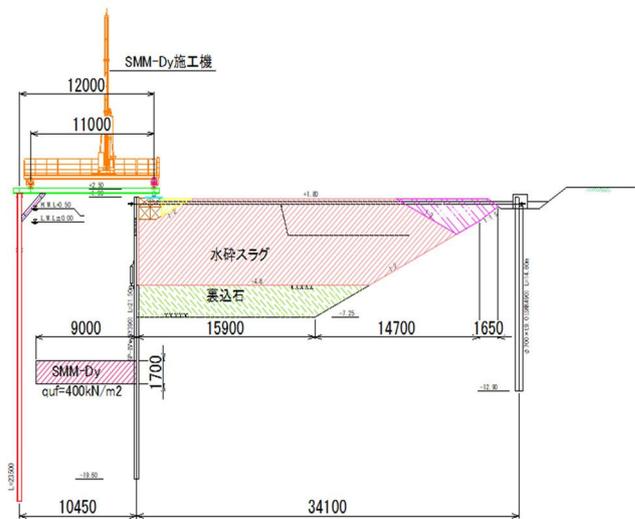


図-3.2 施工断面図

表 3.1 工事概要

年度	現場名	発注者	工法/改良径	本数	総削孔長 (平均)	総改良長 (平均)
2021	令和3年度小樽港 岸壁(-10m)工事	北海道開発局 小樽開発建設部 小樽港湾事務所	単管式超高圧 噴射攪拌工法 (SMM-Dy) /φ0.9m	752本	10,076.8m (13.4m/本)	1,278.4m (1.7m/本)
2023	令和4年度小樽港 岸壁(-10m)改良工事			1242本	16,642.8m (13.4m/本)	2,111.4m (1.7m/本)



図-3.3 仮設構台の設置状況



図-3.4 走行台車(スライドベース)上の施工機

特に本工事では、工期の制約もあり2プラント4マシンの施工のため、それぞれの施工機械について杭芯位置の再測量による確認を実施した場合には、施工準備時間が多大となることが予想された。このため、当工事においては、正確かつ短時間での杭芯位置への誘導を目的として、弊社独自の Picture Navi を各施工機に装着して、施工管理の効率化および施工の高品質化を図った。図-3.5 は施工機に搭載された GNSS アンテナとオペレータ用の管理画面の位置を示したものである。



図-3.5 施工機に搭載された GNSS アンテナとオペレータ用の管理画面

施工機の杭芯セット時は管理者とオペレータが離れた場所でも Picture Eye を介して同じ管理画面を見ることによって施工位置のダブルチェックを実施できた。

図-3.6 に Picture Navi による杭芯セット状況を示す。Picture Navi を用いることで、施工機械を杭芯位置へ確実に誘導することができ、大幅な時間短縮が図れ、施工準備の省力化に大きく寄与した。また、施工完了後には 1 本毎にスタンプが施されるため、各施工機の進捗状況が一目で確認でき、誤打設防止や確認作業の省力化にも大きく寄与した。

本工事において Picture Navi を用いた結果、打設位置の精度は、規格値 100mm に対して、0~28mm (平均 5mm) の範囲で、非常に高い精度での施工管理が実施できた。

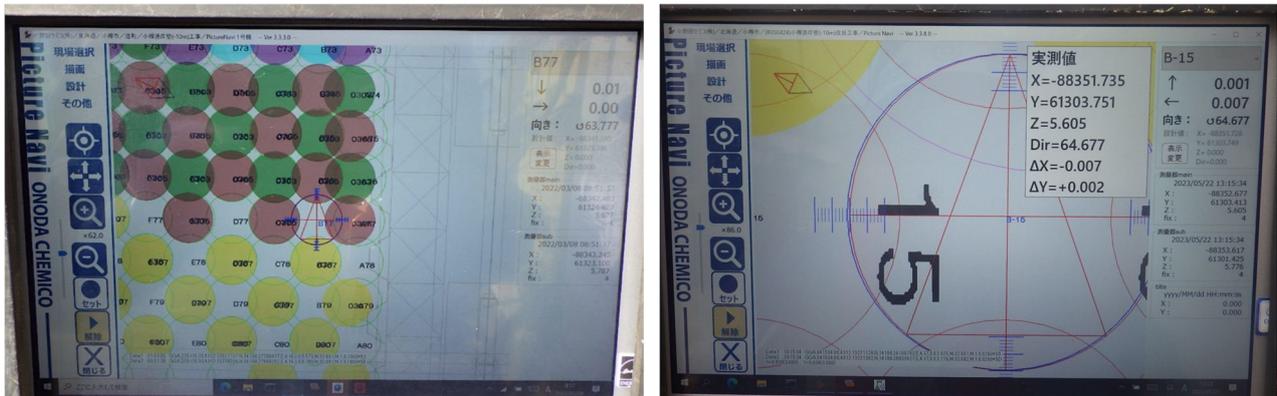


図-3.6 Picture Navi による杭芯セット状況

4. まとめ

弊社における ICT 施工の取り組み事例を報告した。ICT 施工を行うことで以下のメリットが確認された。

- 1) Picture Navi による施工機誘導によって、正確かつ効率的な施工ができ、生産性の向上が図れた。
- 2) Picture Eye を用いることで管理者、オペレータで同じ画面を共有し、管理することで高精度の施工が行えた。
- 3) 3D Picture View および Picture Watch を活用することで、さらなる施工の効率化や人為的ミスの防止が期待できる。今後も、システムの改善に努め、生産性向上に寄与したいと考える所存である。

5. 引用文献

- 1) 国土交通省北海道開発局 HP: 北海道開発局インフラ DX・i-Construction, 2023
- 2) 国土交通省北海道開発局 HP: 北海道開発局インフラ DX・i-Construction アクションプラン令和4年度 of 取組状況, 2023
- 3) 梶原裕太: 河川護岸工事における ICT 地盤改良の適用事例, 積算資料公表価格版 pp8-11, 2022 年 10 月

圧入に関する ICT 施工技術「PPT システム[®]」

株式会社技研製作所 山口 雅史*1

株式会社技研製作所 岡田 充弘*2

1. はじめに

『圧入工法（あつにゆうこうほう）』とは、油圧などを用いて工場生産された鋼管杭や鋼矢板（以下、杭／矢板）などを、地盤中の所定深度まで貫入し設置する施工技術の一つである。油圧式杭圧入引抜機（以下、圧入機）が、すでに地中に押し込まれた杭／矢板を数本掴み、その引抜抵抗力を反力として次の杭／矢板を油圧による静荷重で地中に押し込むことから、振動や騒音が小さく、地盤を乱さない等の優れた特長を有している。

この圧入工法において、圧入機が地盤情報の推定から圧入条件の設定、鋼矢板の施工まで自律的にこなうことを可能とする画期的な自動運転システムが PPT システム[®]であり、サイレントパイラー[®] F シリーズより実装された。本稿では、PPT システムの概要とその実証試験、実施工にて採取したデータを検証することで、デジタル技術の活用により既存技術では困難とされていた地下の可視化、建設従事者の減少に備える省力化・省人化および圧入施工の生産性の向上に対する同システムの効果について述べる。

2. 杭／矢板の施工に関する課題

（1）地盤に関する情報

杭／矢板を施工する場合、地盤の組成、強度などは施工性と密接な関係にあるため、地盤調査により対象となる基礎地盤の情報を得る必要がある。加えて、地盤状況は対象とする地点によって種々変化するため、適切な調査を行う必要がある。

施工箇所の地盤や地下水の状態が、杭／矢板施工の可否や難易度、確実性を決定づける重要な要素となる。計画段階などで採取された既知の土質試験結果を見直し、構造形式や地盤の状況等によっては新たにボーリングや各種の試験を補足することが一般的に推奨される。

杭基礎構造物を対象とした主な調査法の概要を図-1 に示す。圧入工法を用いて杭／矢板の施工を計画する場合、国土交通省土木工事積算基準¹⁾または一般社団法人全国圧入協会から発刊される各種積算資料²⁾では、現位置試験に分類される標準貫入試験から得られる最大 N 値をもとに、機種と日当り施工枚数を選定する。

ここで、標準貫入試験とは地盤に対して鉛直方向に調査をおこなう試験である。このため、水平方向の地質状況を把握するには、相互に数十メートル以上離れた地点で実施された複数のボーリング柱状図をもとに、地形などの状況や文献、経験などを加味したうえで推測された地質断面図を作成することが一般的である。

しかし、岩の隆起など実際の地盤状況は地形により水平方向に対して均一ではないため、地質横断図と異なることは稀にある。このことが調査結果と実際の地盤条件との乖離となり、杭／矢板における施工の可否や効率だけでなく、構造物の信頼性に関わる問題に発展することもある。

（2）建設従事者の減少

日本国内における労働人口の減少が進む中で、建設業に従事する労働者数も減少を続けている（図-2）。

*1 Masafumi YAMAGUCHI 札幌市北区北七条西 4 丁目 5 番地 伊藤 110 ビル 704 室 ・ TEL 011-374-7261

*2 Mitsuhiro OKADA 大阪府大阪市西区阿波座 2 丁目 1 番 1 号 大阪本町西第一ビルディング 6 階
・ TEL 06-6537-1616 ・ FAX 06-6537-6900

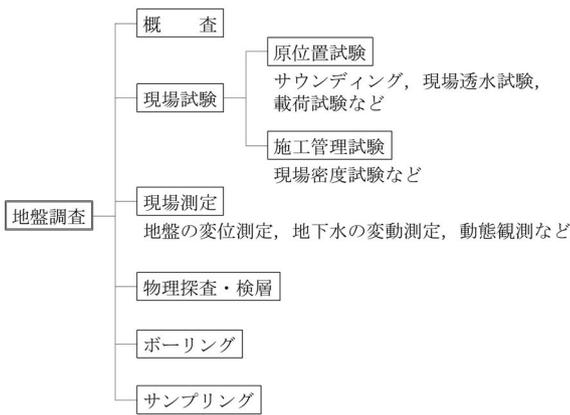


図-1 杭基礎構造物を対象とした
主な地盤調査法の概要^{3)改}

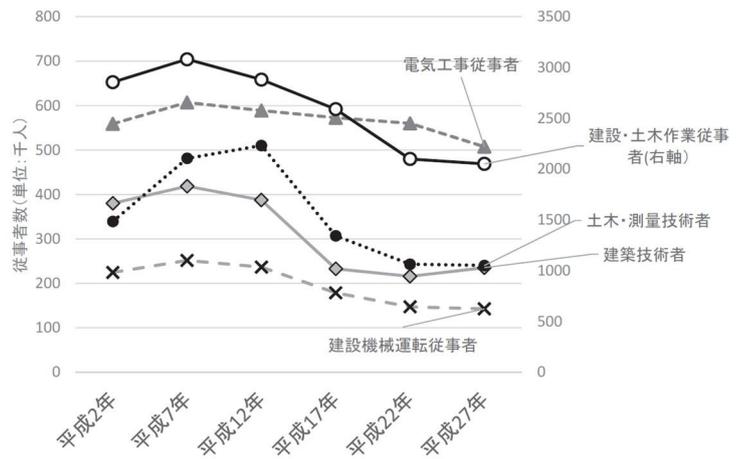


図-2 建設業に関する労働者の推移^{4)改}

杭／矢板の施工に従事することが多いと推定される職業分類である建設・土木作業従事者、建設機械運転従事者についても平成7年以降、減少を続けている。このような状況下においても、政府投資額および民間投資額は平成23年を境に緩やかな増加傾向にある⁵⁾。

このことから杭／矢板の施工においても、外国人労働者などによって従事者を一定数確保する、省力化・省人化と生産性の向上に貢献する技術開発を促進するなどの具体的施策が必要である。

3. PPT システム (Press-in Piling Total System)

(1) PPT システムの概要

圧入機は杭／矢板に静荷重を加えて地中に押し込む過程で、地盤への貫入状況をリアルタイムに計測し、その挙動を油圧制御することができる。また、全数の鋼矢板に対して圧入管理データ（圧入力・トルク・速度・時間・杭／矢板の貫入深度など）を取得することも可能である。これらの圧入管理データを適切に加工することにより地盤情報の推定や、杭／矢板の性能の推定など、複数の用途に利用できる（図-3）。^{6)改}

この特性をもとに圧入機が地盤情報の推定から圧入条件の設定、鋼矢板の施工まで自律的におこなうことを可能とする近年開発された自動運転システムが PPT システムであり、「PPTS[®]地盤情報推定」と「PPTS[®]自動運転」の2機能で構成される（図-4）。なお、同システムは NETIS（国土交通省 新技術情報提供システム）に登録済みであり（登録番号：SK-170006-VE）、「令和4年度 準推奨技術」に選定された。⁷⁾

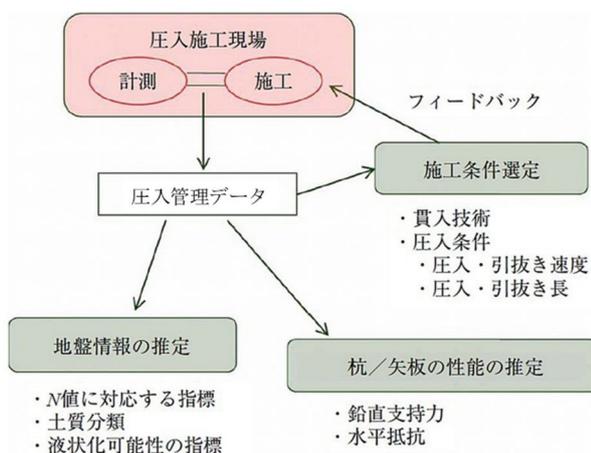


図-3 施工データ利用技術の概念の一例⁶⁾

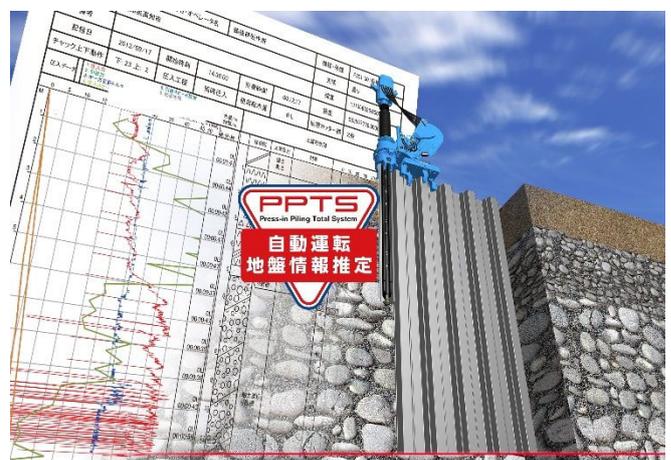


図-4 PPT システム[®]の概念図

(2) PPTS 地盤情報推定

PPTS 地盤情報推定とは、施工中に自動計測される圧入管理データを解析して地盤情報を推定する⁸⁾機能である。補助工法を使用せず圧入機のみで鋼矢板を圧入する単独圧入時には土質、換算 N 値、CPT のコーン指数 (q_c 値) を、パイルオーガ併用圧入時には換算 N 値を推定できる (図-5)。その情報は、圧入機に装備した情報端末「G-Terminal[®]」に連続的に記録・保存されながら結果表として表示することが可能である (図-6)。

PPTS 地盤情報推定の効果は、大別すると次の3点となる。

① 施工した鋼矢板の品質証明

既存の地盤調査を実施した位置が施工位置から離れていても、鋼矢板ごとに地盤情報を取得し、その場で確認することができる。更に、施工した鋼矢板全数の鋼矢板下端の深度を記録していることから、根入れ長の管理など出来形管理の一助として活用することもできる。このため、設計の安全性の確認や現場立会、完成検査の省力化・簡素化などに利用できる。

② 設計変更の判断が容易

施工時に想定外の地盤条件に遭遇し、当初予測した日当り施工枚数を確保することが困難となった場合、設計変更の判断を客観的かつ数値的に行うことができる。

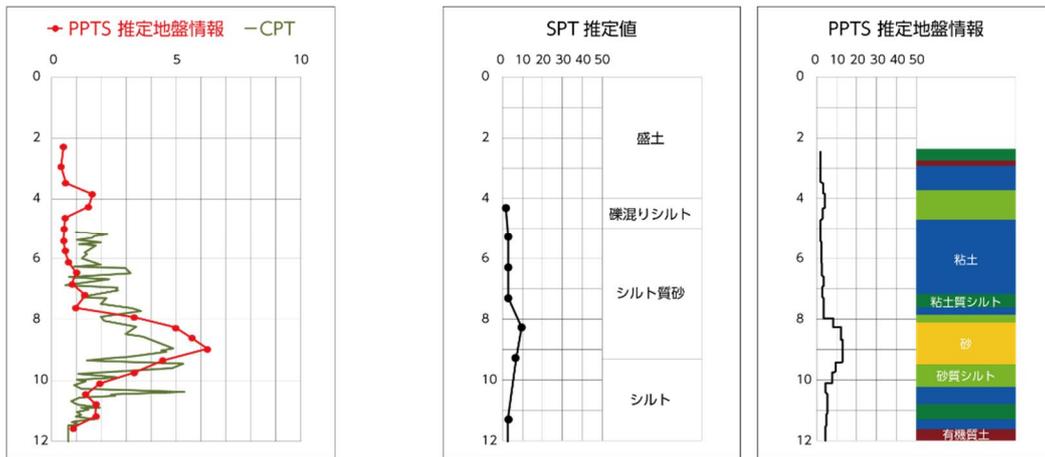


図-5 地盤調査により取得した q_c や N 値と推定結果との比較

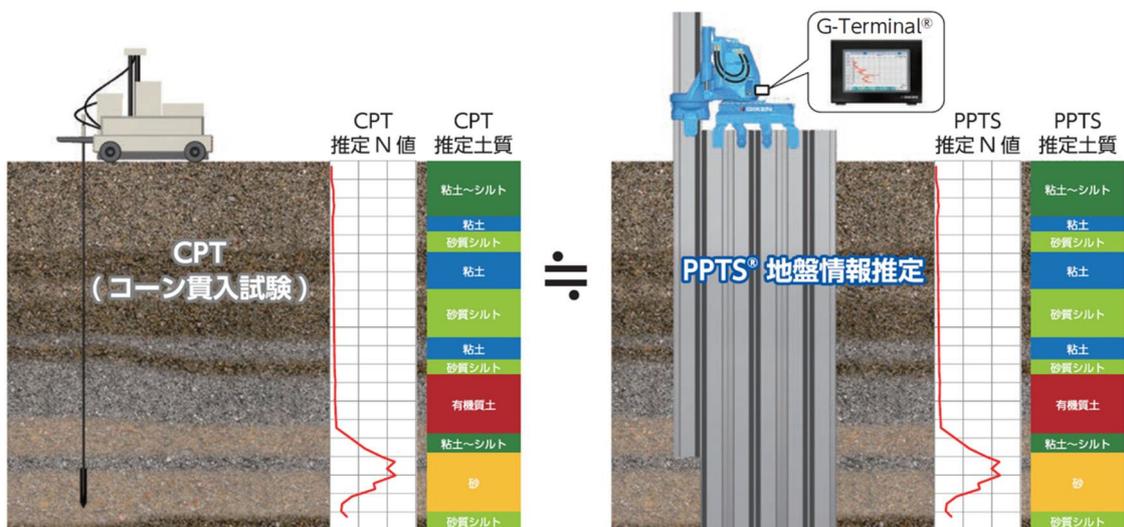


図-6 PPTS[®]地盤情報推定の概念図

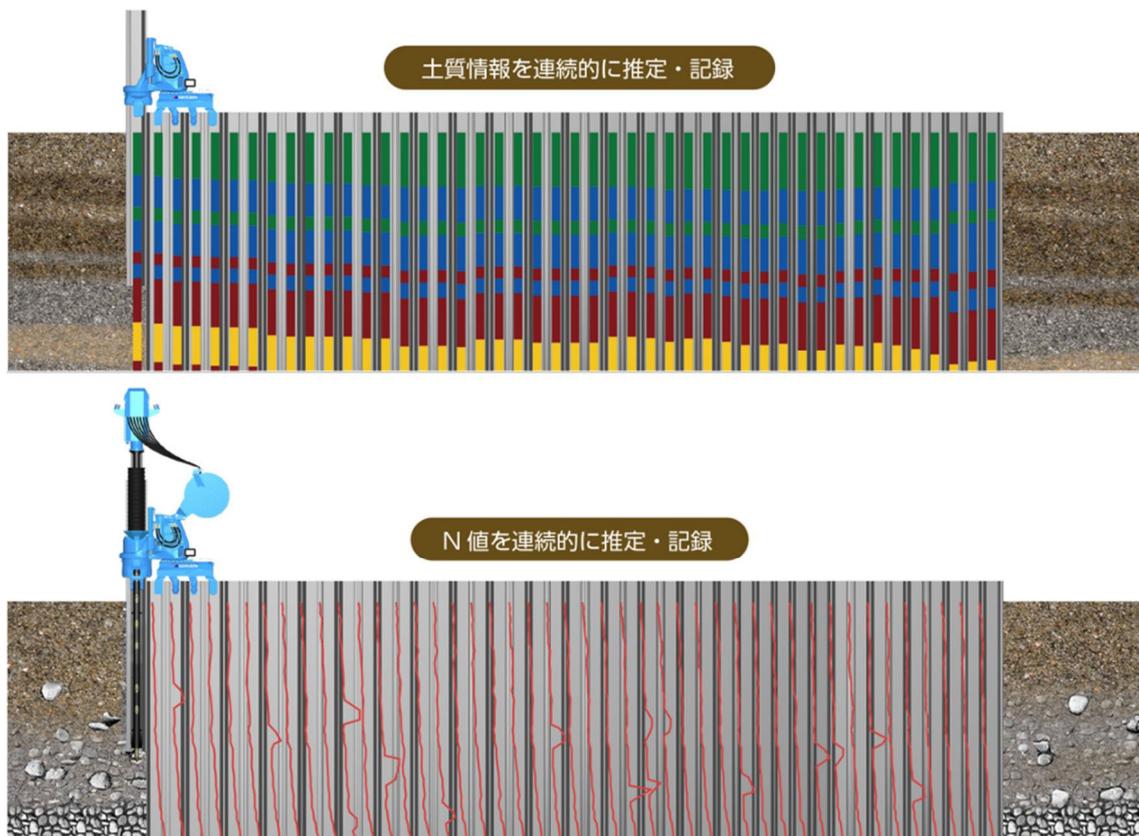


図-7 連続的に地盤情報を推定した概念図

③ 土質調査の不連続部分の補完と構造物の設計条件との比較検証

隣接して採取されたボーリング柱状図と、地形・文献などをもとに推定して作成した地質横断図に対し、鋼矢板から連続的に地盤情報を推定（図-7）する PPT システムを使用することで、既存の土質調査の不連続部分を現地で採取されたデータで補完することが可能である。例えば設計段階で用いた N 値や地質と比較検証することにより、設計の安全性や経済性の確認などにも利用できる。

（3）PPTS 自動運転

圧入機による杭／矢板の施工は、圧入機本体に制御の目標値となる圧入条件を設定して行われる。鋼矢板を施工する場合の「圧入条件の設定項目」を表-1⁹⁾に示す。

従来の自動運転（以下、旧自動運転）とは、オペレーターが決定した圧入条件の設定値を圧入機に入力し、圧入機がその条件ごとの施工を行うというシステムであった。単独圧入の場合は圧入力、圧入速度、打抜の距離の設定値を入力する。オーガー併用圧入ではそれらに加えて、オーガートルクと速度の設定値を各々入力することにより、圧入条件の設定項目と値に基づいた再現性の高い施工を可能とした。¹⁰⁾

この他、圧入力やトルクに上限値を設定し、圧入力やトルクが上限値に達すると、自動的に圧入動作から引抜き動作に切り替わり、圧入機や鋼矢板に負荷を与えない施工を実現した。このように、オペレーターの負担軽減や、手動運転よりも無駄な動作や施工ミスを省いた正確かつ効率の良い施工を実現する効果を狙い開発されたシステムが旧自動運転である。ただし、水平および鉛直方向に施工が進むにつれて地盤の状況は変化するため、オペレーターはそれに合わせて圧入条件を初期設定値から適宜見直すことが求められた。¹⁰⁾

近年開発された圧入機には、前述した旧自動運転の機能に加えて、PPTS 地盤情報推定より取得した地盤条件や圧入機本体の施工状態から適切な圧入条件を自動的に再設定する機能を有する PPTS 自動運転を搭載して

表-1 鋼矢板を施工する場合の圧入条件の設定項^{9)改}

■ 圧入機制御のためのインプットデータ

補助工法を用いない単独圧入の場合

- ・ 圧入力 of 最大値
- ・ 圧入速度
- ・ 引抜き速度
- ・ 打抜動作の条件 (圧入長さ・引抜き長さ)

オーガー併用圧入の場合

- (単独圧入に下記項目を追加) ・ オーガートルクの最大値
- ・ オーガー回転速度

いる (図-8)。従来必要であったオペレーターによる圧入条件の見直しが不要で、地盤条件や施工状態に応じた圧入条件に自動で書き替えられるため、オペレーターの負担をさらに軽減できる。また、施工効率も向上することが確認されている。PPTS 自動運転の効果は、次の3点となる。

① 施工時間の短縮による生産性の向上

圧入機の自動制御により、常に圧入条件が最適化されるため、施工速度を維持・向上できる (図-9)。

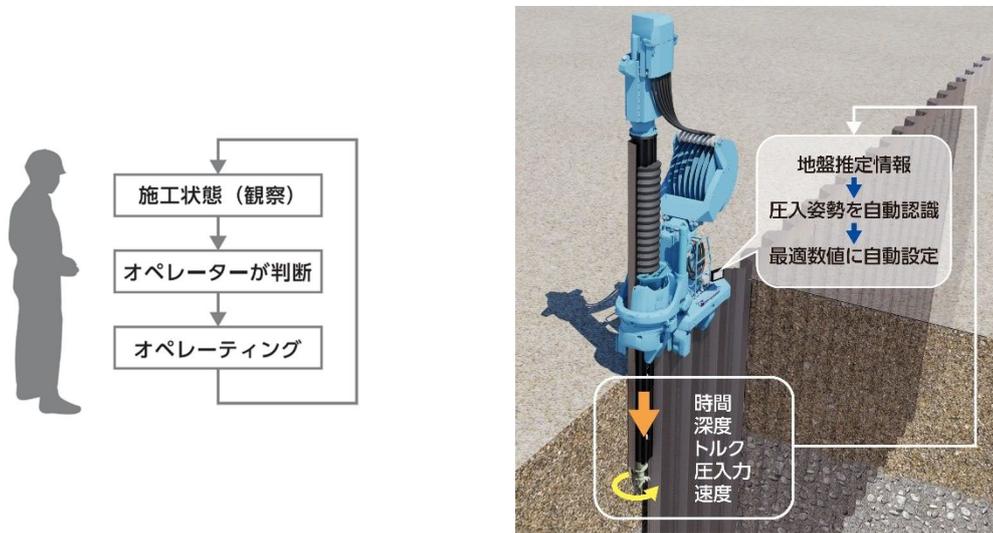


図-8 旧自動運転 (左) と PPTS[®]自動運転 (右) の概念図

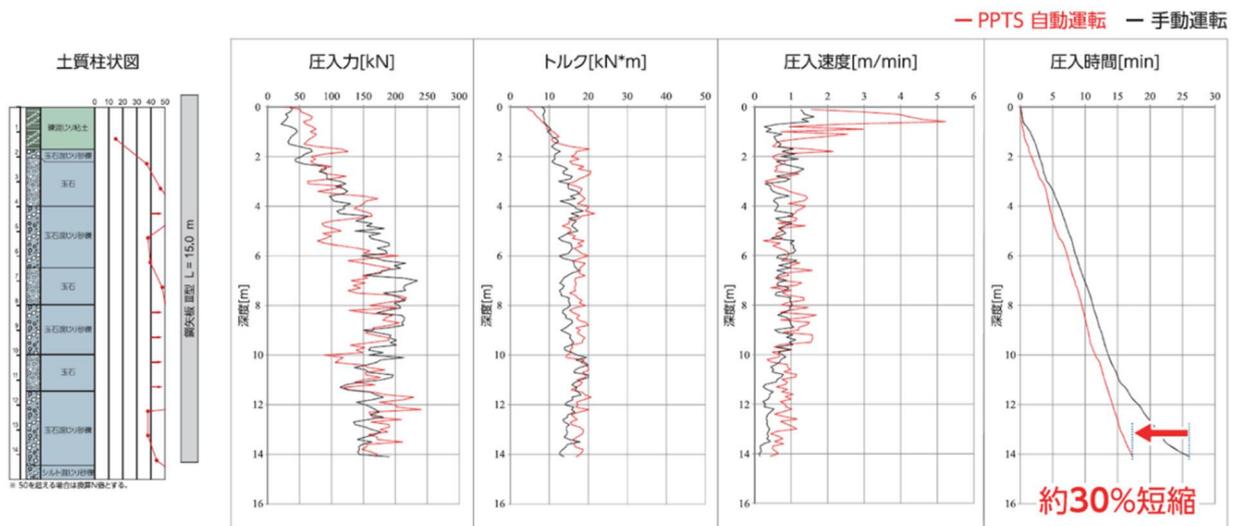


図-9 施工時間の短縮例 (PPTS[®]自動運転と手動運転の比較)

② 熟練オペレーター不足への対応

オペレーターの熟練度に頼らず施工できるため、人材不足への対応、教育期間を短縮できる。

③ 高い施工精度の維持と圧入機の長寿命化

常に最適化された状態で施工するため、圧入機や鋼矢板への過負荷を抑制できる。

4. 地盤推定に関する確認試験、実施工における手動運転と自動運転の比較

(1) 地盤推定技術に関する確認試験¹¹⁾

高知県、高知大学、株式会社技研製作所は平成25年度高知県産学官連携産業創出研究推進事業「南海地震による津波被害軽減と浸水時間を短縮する減災時の技術開発」において、地盤情報推定システムの確認試験を行った。

試験概要を表-2、試験手順と試験矢板の配置図を図-10、試験位置から約200m離れた場所(平地)にて採取されていた既往のボーリング柱状図を図-11(左)に示す。試験位置は川岸(図-12左)で、既往ボーリングにおける孔口標高と地盤高さは4.5m程度の標高差があった。既往のボーリング柱状図に記載のある孔口標高から深度4.5~20.0mまでの地盤情報(N値、層厚、土質の種類)を推定とすることを目的とした。試験方法は、圧入機本体を据え付けるための3枚の鋼矢板を事前に打設しておき、その両端に試験用の広幅型鋼矢板(IIIw型、矢板長17.5m)を圧入することで、各々の試験矢板からPPTS地盤情報推定の結果を取得した(図-12右)。

既往の地盤情報では深度4.5~6.5mにはN値27の礫混じりシルト層、深度6.5~21.0mまではN値5未満のシルト質細砂またはシルト層が存在することを確認できており、試験矢板1および2の圧入も既往の情報通り地盤への貫入を続けた。しかし、深度18.0mに到達した段階で鋼矢板の貫入速度は、それ以浅と比較してあきらかに低速に変化した。こうした鋼矢板が地盤へ貫入する挙動は、過去の事例から経験的に地層に変化が生じたものと判断でき、実際にPPTS地盤情報推定においてもN値20を超えるシルト混じり砂礫層が記録された。

図-11は、既往の地盤情報と本試験により取得したPPTS地盤情報推定の結果を比較したものである。地盤情報推定においては、深度18.0~19.0mにおいて推定N値20を超える砂または砂礫層を記録した。既往の地盤情報では深度24.0m以深において最大N値50を超えるシルト混じり砂礫層が記録されている。既往および推定情報を組み合わせることにより、試験地においてシルト混じり砂礫層が5.0m程度、既往の地盤情報より隆起しているものと推測できる。

当該試験を通じ直近の地盤情報がない場合においても、鋼矢板を施工した箇所の地盤条件の把握が可能であることを確認した。このようなPPTS地盤情報推定の実績をもとに、PPTS地盤情報推定の結果を設計・施工を変更する際の参考資料として利用する事例が現在増えている。

表-2 試験概要

試験名	地盤情報推定システム確認試験(平成25年度高知県産学官連携産業創出研究推進事業「南海地震による津波被害軽減と浸水時間を短縮する減災技術の開発」)		
試験期間	2014年1月6日~同年1月8日	試験場所	高知県 高知市
試験目的	鋼矢板の圧入施工における地盤情報(N値、層厚、土質の種類)の推定		
試験方法	深度20mまで鋼矢板を単独圧入し、データを取得する		
施工機械	サイレントパイラー® ECO600S	鋼矢板規格	広幅型鋼矢板IIIw型 L=17.5m n=2枚

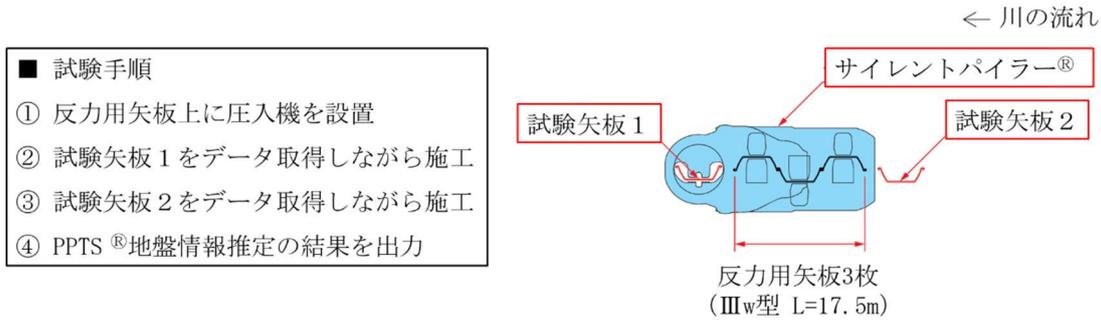


図-10 試験手順と試験矢板の配置図

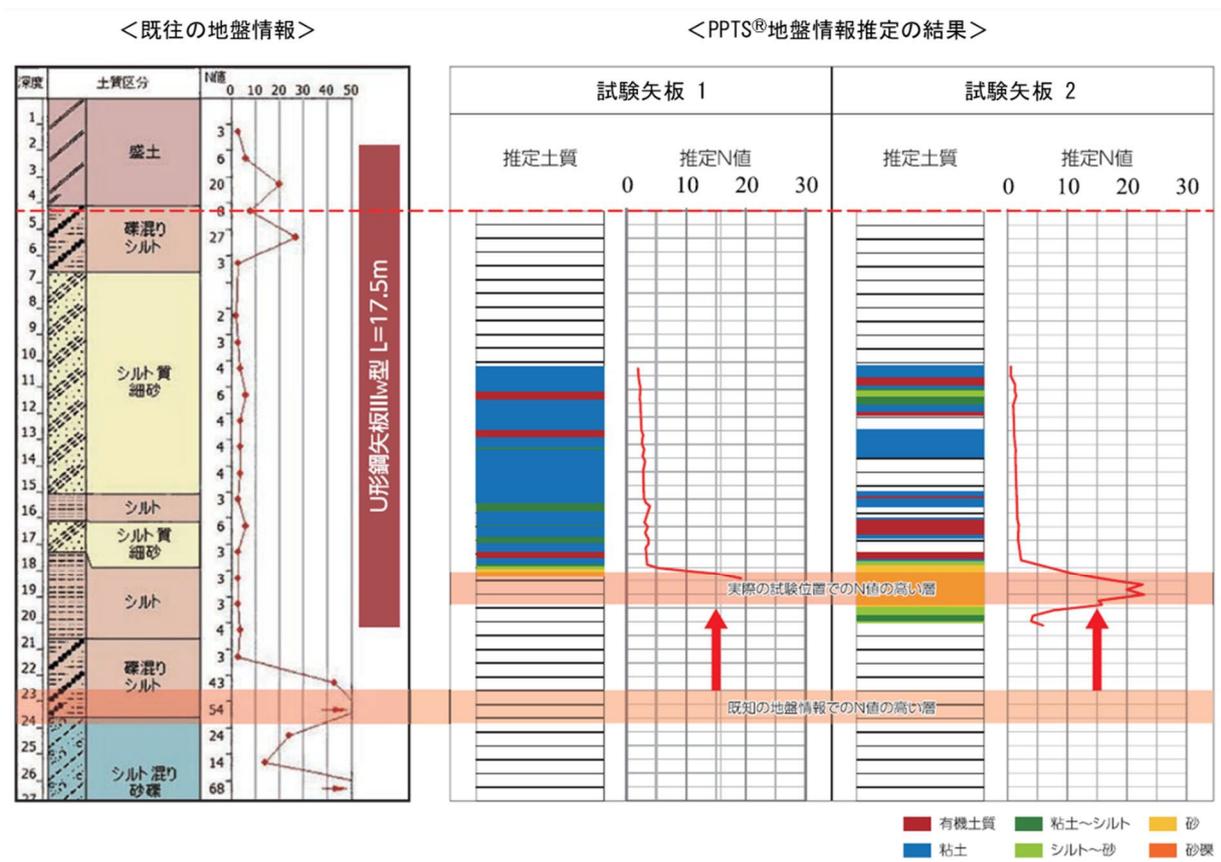


図-11 既知の地盤情報（左）と試験位置における推定結果（右）の比較



図-12 試験時の状況（左：河川上の圧入機，右：データの取得）

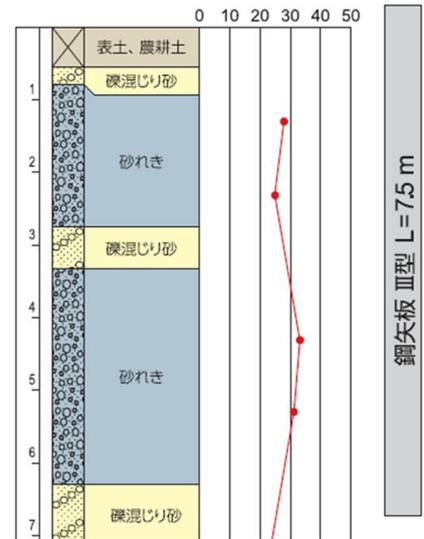
(2) 実施工における手動運転と自動運転の比較¹¹⁾

静岡県浜土木事務所から発注された「平成 27 年度 一級河川安間川流域治水対策河川事業」と神奈川県厚木土木事務所頭部センターから発注された「平成 27 年度 河川改修工事 県単 (その 2)」では、オペレーターによる手動運転と、PPT システムを使用した自動運転における圧入時間、圧入速度を比較し、検証した。ここで圧入時間とは、鋼矢板の圧入を開始してから完了するまでの時間、圧入速度とは鋼矢板の施工速度を意味する。

安間川流域治水対策河川事業では、N 値 30 程度の砂礫層に対して普通鋼矢板Ⅲ型、矢板長 7.5m をオーガー併用圧入にて施工した (図-13)。その際に取得した鋼矢板ごとの圧入速度と時間を表-3 に示す。圧入時間に

表-3 手動運転と自動運転の比較 (安間川)

運転区分	鋼矢板 No.	圧入長 (m)	圧入時間 (分:秒)	圧入速度 (mm/s)	平均速度 (mm/s)
手動運転	1	4.38	3分23秒	21.53	23.01
	2		2分59秒	24.49	
自動運転	9		2分37秒	27.99	29.01
	10		2分40秒	27.36	
	11		2分14秒	32.68	
	12		2分31秒	29.07	
	13	2分37秒	27.95		

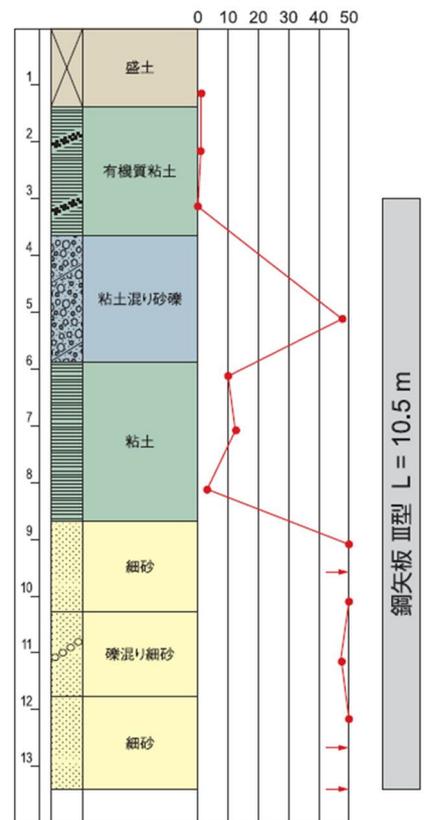


※ 50を超える場合は換算N値とする。

図-13 土質柱状図 (安間川)

表-4 手動運転と自動運転の比較 (県単その 2)

運転区分	鋼矢板 No.	圧入長 (m)	圧入時間 (分:秒)	圧入速度 (mm/s)	平均速度 (mm/s)	
手動運転	1	6.00	8分44秒	11.45	11.18	
	2		11分23秒	8.78		
	3		8分52秒	11.28		
	4		7分58秒	12.55		
	5		8分28秒	11.83		
自動運転	7		7分55秒	12.63	14.84	
	8		7分32秒	13.27		
	9		6分19秒	15.85		
	10		5分27秒	18.34		
	自動運転		11	7分06秒		14.84



※ 50を超える場合は換算N値とする。

図-14 土質柱状図 (県単その 2)

において、手動運転は鋼矢板 No.2 が 2 分 59 秒、自動運転は鋼矢板 No.11 が 2 分 14 秒を記録し最短であった。両者を比較した場合、自動運転を使用することにより手動運転に要する時間を 26%削減できたことを確認した。

続いて、河川改修工事 県単（その 2）では、 N 値 50 を超える砂層に対して普通鋼矢板Ⅲ型、矢板長 10.5m をオーガー併用圧入にて施工した（図-14）。同様に、鋼矢板ごとの圧入時間と圧入速度を表-4 に示す。本工事において、手動運転は鋼矢板 No.4 が 7 分 58 秒、自動運転は鋼矢板 No.10 が 5 分 27 秒を記録したことにより、自動運転を使用することで手動運転に要する時間を 32%削減できたことを確認した。

5. まとめと今後の展望

本稿では杭／矢板の施工における課題として、地盤に関する情報と建設従事者の減少を示したうえで、地盤情報推定と自動運転の機能を有する PPT システムの概要、地盤推定の実証試験、実施工における手動運転と自動運転の圧入時間と速度に関する比較を紹介した。

近年問題となった杭基礎構造物における基礎杭が支持層に達しておらず、更に施工記録データの一部を不適切に転用・加筆されたことによる問題や、わが国の建設従事者の減少とインフラ整備における生産性の向上といった社会的課題に対して、PPT システムが一定の役割を果たせることを確認した。技研製作所では、適用事例を増やししながら、他の杭／矢板や貫入技術への適用、地盤情報の推定と自動運転の更なる向上に関する取り組みを継続する。加えて、最近では建設プロセス全体を合理化する視点での施工データを利用する技術の研究開発を進めており、構造物の設計とあわせた展開にも注力する所存である。

最後に、本稿で紹介した PPT システムとその適用事例が、社会資本の整備に関わるすべての研究者、実務者にとって参考となり、社会課題を解決するための一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 一般社団法人 建設物価調査会: 国土交通省土木工事積算基準 令和 5 年度版, 2023, pp.262 - pp.280
- 2) 一般社団法人 全国圧入協会: 積算資料と Q&A,
URL: <https://atsunyu.gr.jp/general/sekisanShiryo/> (閲覧日: 2022 年 10 月 31 日)
- 3) 一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会: 鋼管杭 -施工と施工管理- (改定 3 版), 2022, p.57, 2022
- 4) 一般財団法人 建設業振興基金: 登録基幹技能者 共通テキスト 第 5 版, 2022, p.206
- 5) 国土交通省: 最近の建設業を巡る状況について
URL: https://www.mlit.go.jp/tochi_fudousan_kensetsugyo/const/content/001493958.pdf, p.4
(閲覧日 2022 年 10 月 31 日)
- 6) 株式会社 総合土木研究所: 基礎工 10 月号 (第 51 巻 第 10 号 通巻 603 号), 2023, pp.090 - pp.093
- 7) 国土交通省: 令和 4 年度推奨技術等を 6 技術選定 ～公共工事等における新技術活用システムの取組～
URL: https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000894.html (閲覧日: 2022 年 10 月 31 日)
- 8) 国際圧入学会: 圧入工法における施工データの利用に関する技術資料 I. 地盤情報の推定, 2017, pp.63
- 9) 国際圧入学会: 圧入工法 設計・施工指針 (2020 年版 第 2 刷) 本篇, 2020, p.228
- 10) 国際圧入学会: 圧入工法 設計・施工指針 (2020 年版 第 2 刷) 本篇, 2020, pp.223 - pp.224
- 11) 株式会社 技研製作所: PPT システム®
URL: <https://www.giken.com/ja/wp-content/uploads/PPTsystem.pdf>, pp.7 - pp.10 (閲覧日: 2022 年 10 月 31 日)