

深礎杭孔内無人化施工システムの試験施工と実用化への課題

岐阜大学 国際会員 ○原 隆史
 岐阜大学 国際会員 沢田 和秀
 中日本高速道路株式会社 正会員 宮澤 敏孝
 中日本高速道路株式会社 正会員 杉山 裕一
 エイト工業株式会社 辻 八郎
 新日鐵住金建材株式会社 大高 範寛

1. はじめに

これまで小口径深礎杭は、主に山岳部へ高速道を建設する際に橋脚の基礎として多く用いられてきた。しかしながら、孔内の作業環境が狭小であり、掘削（掘削＋人力によるライナープレート設置）の効率性、土砂搬出の際の安全性、鉄筋組立に伴う作業足場や鉄筋の運搬の安全性と鉄筋組立そのものの効率性、およびライナープレートを埋め殺しとする経済性などの観点で課題も多い。また、岩に深く根入れする深礎杭では、モルタル吹き付けにより周面摩擦を考慮して設計しているが、小口径深礎孔内でのモルタル吹き付けは劣悪な作業環境が課題となっている。これに対し、表-1 に示す特徴を有する孔内作業の完全無人化を目指した深礎杭工法の開発が進められており、先の課題を克服して、合理的（効果的で経済的）な小口径深礎杭工事の実現が期待されている。

そこで本研究では、平成 24 年度より表-1 に示す特徴のうち、実用化レベルにある各システムについて、実現場で試験的に適用しその実現性について検証してきた。平成 26 年度は、改良した土留と土留挿入・引抜システム、深礎杭孔頭部鉄筋籠組立・挿入システム、および土留先端バイブレータによる孔内無人化コンクリート打設の実用性を検証している。

ここでは、高速道路の橋梁基礎における 2 回の試験施工から検証した、各施工段階におけるそれぞれのシステムの実用性と課題について報告する。

表-1 対象深礎杭工法の特徴と試験施工

作業過程	特 徴	試験施工	
		24 年度	26 年度
1. 掘 削	孔外からの遠隔操作掘削機による無人化掘削	○	
2. 土砂搬出	掘削機と連動したバキューム装置による掘削土砂の搬出	○	
3. 土 留	ライナープレートのような分割型土留の孔外組立・解体	○	●
4. 土留挿入	土留挿入装置による孔内無人化土留設置	○	●
5. 鉄筋籠組立・挿入	深礎杭孔頭部鉄筋籠組立・挿入システムによる孔内無人化鉄筋組立		○
6. コンクリート打設	土留先端バイブレータによる孔内無人化コンクリート打設		○
7. 土留引抜き	土留引抜装置による土留の引抜撤去	○	●

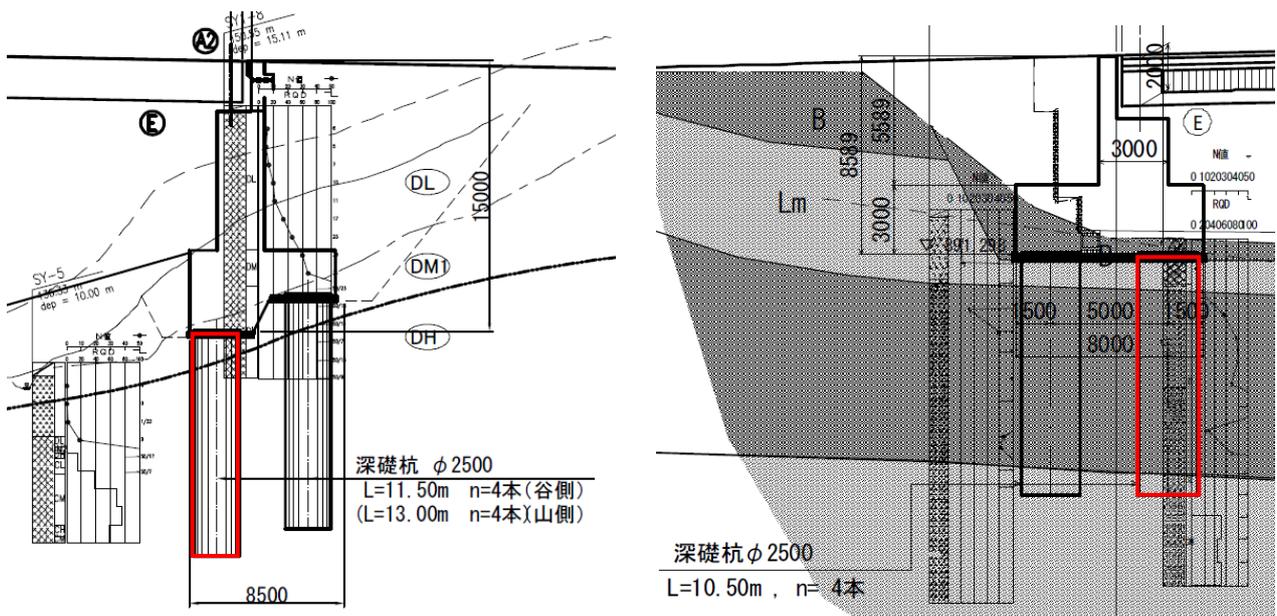
凡例：○（実施項目）、●（改良実施項目）

Test construction and future issues for practical application of unmanned caisson type pile foundation installing system, Hara, T & Sawada K. (Gifu University), Miyazawa T. & Sugiyama, Y (Central Nippon Expressway Co., Ltd.), Tsuji H. (Eight Kogyo Co., Ltd), Otaka H. (Nippon Steel and Sumikin Metal Products Co., Ltd.)

2. 試験施工現場の概要

平成 24 年度の試験施工は、第二東名高速道路設楽原パーキングエリアにおける矢畑川橋上り線 A2 橋台の 1 本の深礎杭（ $\phi 2.5\text{m}$, $L = 11.5\text{m}$ ）に対し実施した。図-1(a)で着色している谷側の杭が試験杭である。設計過程における橋台位置の変更から、ジャストポイントでの柱状図はないが、参考として周辺の柱状図を断面に重ねたものを図-1(a)に示す。この結果によれば、山側から谷側へ向けて地層が傾斜していることは容易に想定できる。実際に掘削した状況によれば、杭頭から径 300~1000mm 程度の転石を多く含むまき土が 5m 強続き、その後一軸圧縮強度が 100~150MPa の亀裂の少ない硬岩が続く地盤であった。

これに対し平成 26 年度の試験施工は、図-1(b)に示す東海北陸自動車道 4 車線化に伴う高鷲~荘川間の下り線本谷橋 A1 橋台の谷川の 2 本の深礎杭（ $\phi 2.5\text{m}$, $L = 10.5\text{m}$ ）に対して実施した。図に柱状図を併せて掲載するが、地盤は杭頭から支持地盤まで径 300~1000mm 程度の転石を多く含む風化した凝灰岩であった。



(a) 平成 24 年度試験施工

(b) 平成 26 年度試験施工

図-1 試験施工現場の概要

3. 各施工システムの実用性と課題

(1) 孔外からの遠隔操作掘削機とバキューム土砂搬出システム（平成 24 年度試験施工）

掘削は、図-2 に示す旋回可能な円形フレームの掘削機を最下端の土留材へ装着し、オペレーターが写真-1 に示すモニターを見ながら行う。

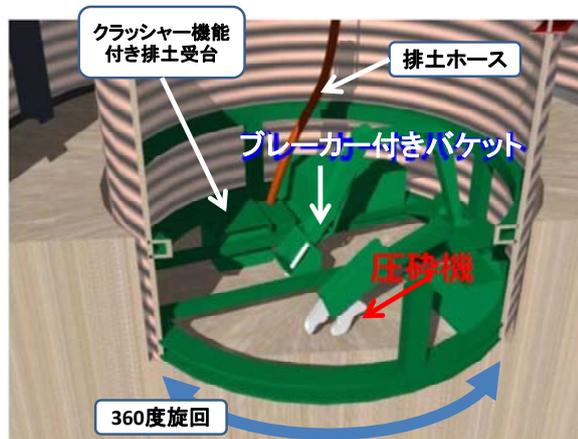


図-2 掘削機の概要



写真-1 掘削用モニター

掘削機には、図-2 に示すように、2本のアームと礫や岩塊をバキューム可能な大きさに破碎するクラッシャー機能付き排土受台、および排土ホースで構成される。2本のアームには、A：30kgのブレーカ付バケット（0.025m³）、B：ジャイアントブレーカ（195kg）、C：削孔機（2.3m³/min）、D：圧砕機（カッター部 2300kN）などのアタッチメントを現場の状況に応じて装着する。標準的な掘削ではAとBを装着し、一般土と300mm程度までの礫はバケットで直接クラッシャーへ投入し、大きな礫は一度ジャイアントブレーカで小割りしてから投入する。参考として図-2では、AとDを装着したイメージを示している。

杭頭から5m強までの径300～1000mm程度の転石を多く含むまき土の掘削について、作業員3名編成で実施したが、作業に慣れるにつれ0.75m/7hrの掘進速度を確認することができた。これに対し、標準歩掛（A工法：人力掘削・機械排土）によれば、7人編成（特殊運転手含む）で1.3m/日とされており、対象システムの0.75m/7hrの掘進速度は決して早いものではない。しかしながら、対象システムが3人編成で施工が可能なこと、掘削は基本的にオペレーターが一人で行うため、状況に応じて4人編成で2本の杭を施工することも可能なこと、さらには土留の組立を孔外で行うことで、途中で作業を止めずに連続した掘削が可能なことを考慮すれば、0.75m/7hrの掘進速度は十分に実用的なものであると考えている。また、ここでの実績によれば、崖錐や岩でも亀裂が多ければ同様の速度での施工が可能と考えている。

なお、掘削機のサブアームに取付けたジャイアントブレーカによる転石の小割りにおいて、径300mm強程度までは問題なく破碎することができたが、周囲がやわらかいまき土であったため、転石が逃げてそれ以上に小割りするのが困難で時間を要した。この点については、写真-2に示すように、頭部設置クレーンを用いた転石ホッパーにより排出することにより、掘削速度を落とすことなく処理することができた。転石ホッパーの活用も、孔内に人がいないからできることであり、今後対象システムに標準装備する予定である。

杭頭から5m強程度まで順調に掘削できた一方、それ以深から露出した一軸圧縮強度が100～150MPaの亀裂の少ない硬岩の掘削では、掘削機のみで最後まで掘削できたものの、施工途中における機械の改良の試行錯誤も含め、掘削速度が0.05～0.15m/7hrと多大な時間を要した。参考として、隣接する杭では発破を用いて従来工法により掘削していたが、それでも掘削速度は0.2～0.25m/7hrであり、それほどに掘削が困難な岩であったといえる。今後、対象システムを用いてこのような岩へ深く挿入する場合には、硬岩専用の掘削機の開発や非火薬破碎剤を活用した併用掘削など、その対応策について検討する必要があると考えている。

バキューム装置による土砂搬出については、写真-3に示すように終始スムーズに行うことができた。騒音防止の関係で吸引機を深礎施工箇所から20m以上離れた位置に設置したが、その影響もなく、今すぐにも現場へ適用しうるほどの実用性を確認することができた。



写真-2 転石ホッパー



写真-3 バキュームによる土砂搬出状況

(2) 杭頭での土留組立・挿入、引抜き・解体システム（平成24、26年度試験施工）

平成24年度の試験施工では、写真-4と5に示すように、市販のライナープレートを上下に2枚連結し背面にプレートを溶接した土留を1ブロックとし、5ブロックの連結で1リングの土留を杭頭で組み

立てていた。この作業では5ブロックを杭頭で連結（組立）、あるいは解体するため、これに要する時間が20～25分を要した。これは従来工法における杭孔底での人力による組立と比較した場合には大幅な効率化ではあるものの、特に20m以上の長い杭のコンクリート打設に伴う引抜き・解体では、この時間がコンクリート打設のクリティカルパスとなり、同日におけるコンクリート打設完了を考えた場合の解体時間の簡略化が課題となっていた。

そこで平成26年度の試験施工では、写真-6と7に示すように、手作業で組立てることが可能な1リング20分割の土留を製作し、これを一度孔外の作業スペースで組立て、その後2分割して杭頭へ運搬し組立てるシステムを考案し試験施工でその実用性を検証した。こうすることで、孔外での組立・解体は掘削作業やコンクリート打設に支障しないこと、杭頭での組立そのものは2分割で省力化（クリティカルパス時間短縮）を図ることができると考えたものである。

これに対し試験施工では、各ブロックを小割りにしたため、下のリングとの接続のボルト本数が増加したこと、平成24年度の試験施工でリング間の接続部に礫がかんで挿入時の支障となったことから、この部分にカバープレートを取付けることとしたため、このための接続ボルト本数も増加し、結果として杭頭での組立・解体時間は20～25分を要し、特に20m以上の長い杭に対するコンクリート打設に伴う大きな省力化（クリティカルパス時間短縮）を図ることはできなかった。このため、今後はボルト本数の削減、接続方法の省力化をさらに検討していきたいと考えている。

なお、土留を挿入・引抜のための杭頭ジャッキは、平成24年度の試験施工ではストロークが70cmのものを用いていたが、1段（1.0m）の土留の挿入・引抜きに段取り替えが必要であったため、平成26年度の試験施工ではストロークが135cmのジャッキを用いている。

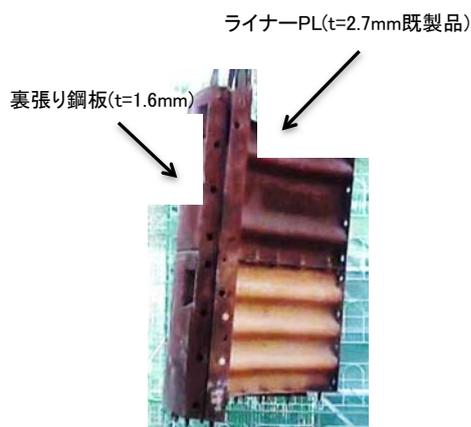


写真-4 H24年度土留（1ブロック）の外観



写真-5 H24年度土留の杭頭での組立状況



写真-6 H26年度孔外土留（1リング）組立後の2分割状況



写真-7 H26年度土留の杭頭での組立状況

(3) 杭頭孔外での鉄筋組立・挿入システム

鉄筋孔外組立・挿入システムとは、鉄筋を杭頭孔外で組立て、土留挿入・引抜きシステムを用いて鉄筋籠を杭孔へ挿入するものである。

試験施工では、このための方法として、鉄筋組立装置を用いるものと用いないものの2つの方法について実用性を確認した。これらの違いは、鉄筋籠へのフープ筋の設置方法が異なる。鉄筋組立装置を用いる場合のフープ筋の設置状況を図-3、鉄筋組立装置を用いない場合の状況を図-4に示す。これらの図から分かるように、鉄筋組立装置を用いる場合には、鉄筋組立装置にフープ筋を一度収納し鉄筋籠の下側からフープ筋を設置しつつ鉄筋籠を杭孔内へ挿入する。こうすることにより、鉄筋籠の移動は一方向（下方向）となり、無用なジャッキの段取り替えがなくなりスムーズな配筋が可能になると考えたものである。これに対し、鉄筋組立装置を用いない場合には、一度鉄筋籠を杭孔内へ挿入した後、施工基面へフープ筋を配置して鉄筋籠を上げつつフープ筋を設置するものである。ここでの最大のメリットは、鉄筋組立装置を用いないことであり、この方法が可能であれば、無用な工程を削除してスムーズな配筋が可能になると考えたものである。

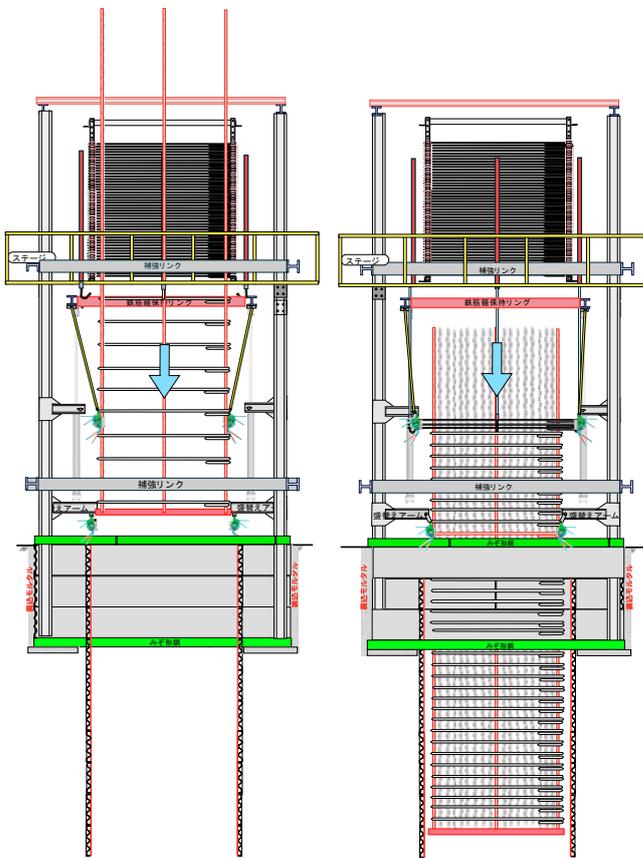


図-3 鉄筋組立装置を用いたフープ筋の設置

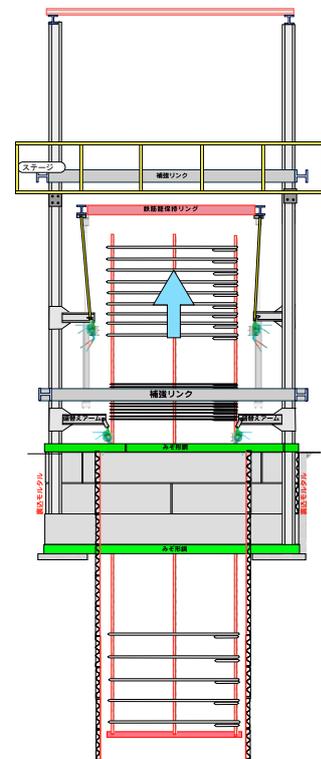


図-4 鉄筋組立装置を用いないフープ筋の設置

具体的な鉄筋籠の組立・挿入方法としては、鉄筋組立装置を用いない場合で説明すると、図-5に示すように、まず現場に配置されたクレーンで吊れる重量の範囲の鉄筋籠（主筋4本以上と剛性を確保できる程度のフープ筋）を杭孔外で組立て、これを杭頭部のジャッキシステムまで運搬し、これを杭頭部に受け替える。次に図-4で示したように、土留の挿入・引抜きのジャッキに固定された鉄筋保持リングで受け替えて、鉄筋籠を上昇させながらフープ筋を設置する。フープ筋の設置が完了後、図-6に示すように、残りの主筋を建て込みフープ筋に連結して第一ロッドの鉄筋籠が完了する。第2ロッド以降の鉄筋籠は、基本的にはこの繰り返しにより設置する。なお、主鉄筋の継手は、原則として機械式継手により行う。

また、鉄筋籠の正確な挿入については、土留にガイドレールを設置し鉄筋籠最下端に設置しているガイド

リングがこれを伝わるように挿入することで可能となる。この際のガイドレールは、コンクリート打設に伴う土留の引抜きにおいても、鉄筋のとも上がり防止に有用となる。

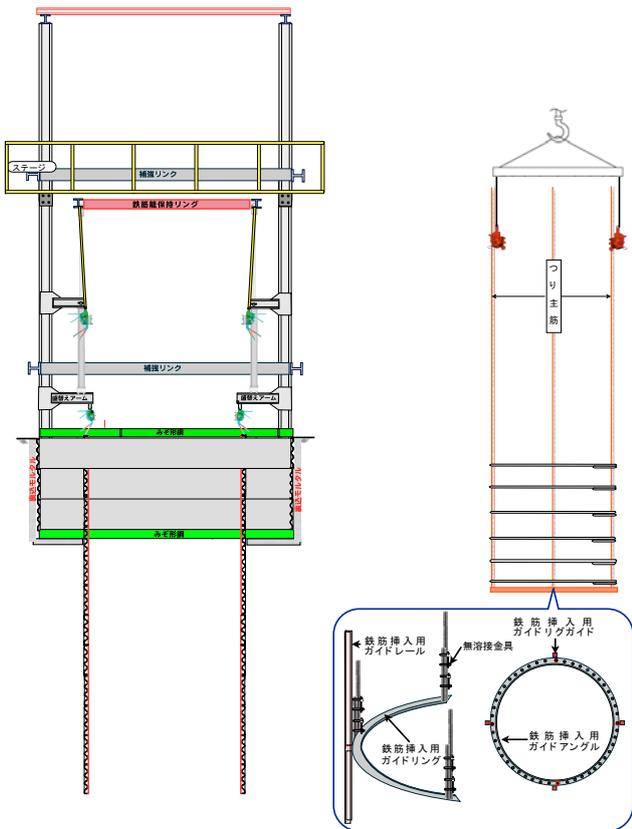


図-5 孔外で組立てたクレーンで吊れる鉄筋籠の設置

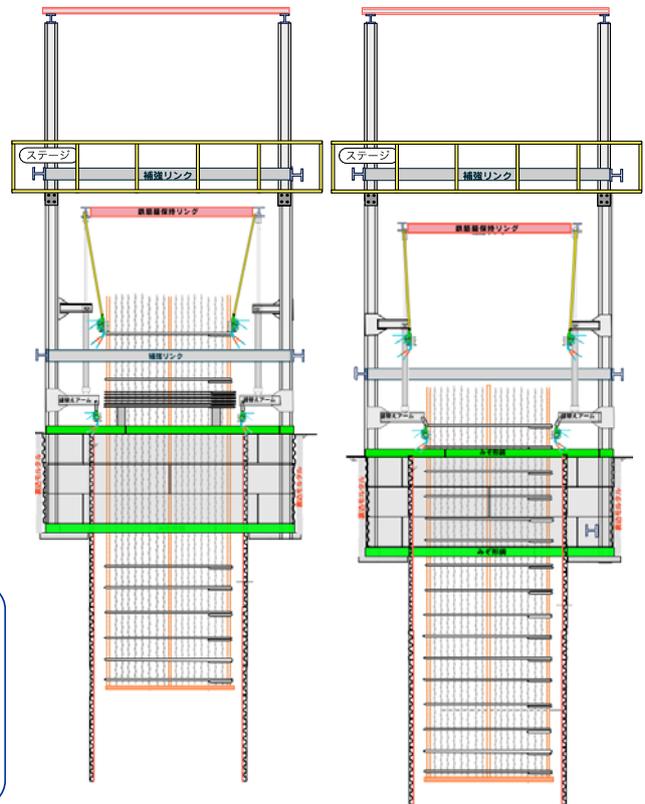


図-6 第1ロッド鉄筋籠完了状況

試験施工の結果、鉄筋組立装置によるフープ筋の設置は予測した以上に時間を要するとともに、これを用いなくともフープ筋は用意に設置可能なことを確認し、1本目の途中から鉄筋組立装置は単に鉄筋の傾斜防止として使い、これを用いないフープ筋配置を行った。写真-8 から 12 に、孔外作業スペースによる最低限の鉄筋籠組立、その建て込み、フープ筋の設置、残りの主鉄筋の建て込みとフープ筋との連結、そして最後に鉄筋の挿入完了のそれぞれの状況を示す。このような配筋を行うことで、シングル鉄筋ではあったが深礎杭における鉄筋の設置を3日かからずに行うことができ、当該システムの実用性を確認することができた。



写真-8 孔外作業スペースでの最低限の鉄筋籠組立状況



写真-9 孔外で組立てた鉄筋籠の建て込み状況

なお、杭頭部のジャッキシステムのストローク長を平成 24 年度で用いた 70cm のものから、平成 26 年度は 135cm のものに変更したことを述べたが、長くしたことによる各ジャッキの吐出圧誤差が大きく、同時にストロークを伸ばす、あるいは縮める作業が困難なものとなった。このため、鉄筋籠を上下する際に鉄筋籠が傾ぐなどの課題が露見し、今後は油圧シリンダーのストロークをデジタル化して吐出圧誤差を最小限にする対応が必要と考えられた試験施工では、この点について吐出圧誤差を小さくできれば、十分に当初の計画通り鉄筋籠の組立と挿入が可能なることを確認し、当該鉄筋籠がシングル鉄筋でクレーン吊りが可能であったことから現場ではクレーンを用いて行った。



写真-10 フープ筋の設置状況



写真-11 残りの主筋の建て込み状況

(4)孔内無人化コンクリート締固め

コンクリート打設時に作業員が杭孔内へ入らずにコンクリートの締固めが可能なシステムとしては、浮き型枠にバイブレータを配置する方法、土留め先端とコンクリート打設ホース先端にバイブレータを配置する工法の 2 つの方法を考案した。浮き型枠を用いる方法とは、図-7 に示すように、塩ビフロートにバイブレータを配置し、コンクリートを打設しながらバイブレータで締固めつつ、打設面上昇とともにバイブレータを配置した浮き型枠も移動するシステムである。これに対し土留先端にバイブレータを設置する方法とは、図-8 に示すとおり、土留先端にバイブレータを設置し、バイブレータそのものの振動と土留が共鳴振動する締固め効果を狙ったものである。当該工法では、コンクリート打設面上昇とともに土留を徐々に引抜くが、土留の引抜きとともにバイブレータは移動し、コンクリートを土留の引き抜かれた箇所への充填も促す効果も期待している。なお、中央付近のコンクリートの締固めについては、打設ホース先端へもバイブレータを配置して締固めを行った。



写真-12 鉄筋籠挿入完了状況（完成）

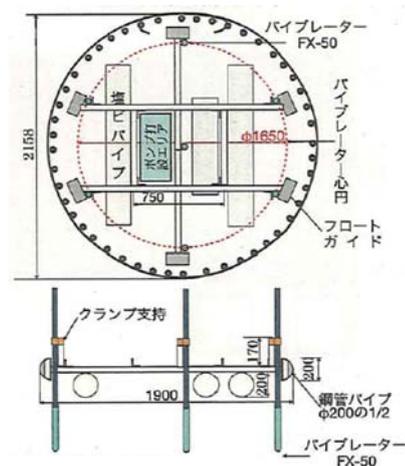


図-7 塩ビフロートによる締固めシステム

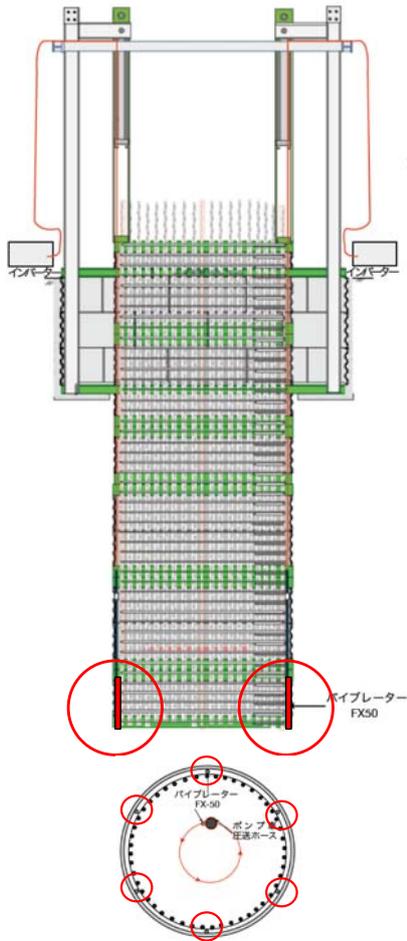


図-8 土留にバイブレータを設置する方法



写真-13 塩ビフロートにバイブレータを設置した締固め状況



写真-14 土留と打設ホースにバイブレータを設置した締固め状況

写真-13 と 14 にそれぞれの締固め状況を示す。これらのうち、浮き型枠を用いたものは、コンクリートの打設面上昇に伴いフープ筋のフックに引っかかり効率のよい締固めはできなかった。これに対し土留にバイブレータを付けたものはよく効き、土留の引抜きを行うシステムでは高い実用性を確認することができた。

4. まとめ

平成 24 年度と 26 年度の 2 回に渡り、開発中の深礎杭孔内無人化施工システムの試験施工を実施した。この結果によれば残された課題は少なくないものの、いずれも現場への適用が可能で高い実用性を確認することができた。また、ここで用いた個別のシステムは、それぞれに単独で深礎杭の現場への適用が可能であり、その観点での展開も視野に置いて開発を続けていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 原隆史, 沢田和秀, 八嶋厚, 川井田実, 藤野友裕, 谷本泰雄, 辻八郎, 岩田悟, 石田剛 (2013) : 深礎杭無人化施工システムの開発, 基礎工 Vol.41, No.8, pp.98-108.
- 2) 原隆史, 沢田和秀, 藤野友裕, 谷本泰雄, 辻八郎 (2014) : 深礎杭無人化施工システムの試験施工, 第 23 回地盤工学会中部支部 調査・設計・施工技術報告会
- 3) 沢田和秀, 原隆史, 藤野友裕, 谷本泰雄, 辻八郎 (2014) : 深礎杭無人化配筋システム, 第 23 回地盤工学会中部支部 調査・設計・施工技術報告会
- 4) 沢田和秀, 八嶋厚, 原隆史, 辻八郎, 宮澤敏孝, 杉山裕一, 大高範寛 (2014) : 深礎杭無人化施工システムと試験施工, 第 59 回地盤工学シンポジウム