

様式第 11 別紙 2

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1) 課 題 名：深礎杭孔内無人化施工システムの開発
- (2) 研 究 期 間：平成 27～28 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：八嶋 厚（岐阜大学・教授）
- (4) 研 究 代 表 者 名：八嶋 厚（岐阜大学・教授）
- (5) 共 同 研 究 者 名：沢田 和秀（岐阜大学・教授）
原 隆史（富山大学・教授（元 岐阜大学・特任教授））
辻 八郎（エイト工業(株)・社長）
村田 芳信（地盤防災ネットワーク・理事長）
荻谷 敬三（岐阜大学・客員教授）
曾我 宣之（岐阜大学・特定研究補佐員）
- (6) 補 助 金 交 付 総 額：44,590,000 円
- (7) 技 術 研 究 開 発 の 目 的

山岳部における道路橋基礎や送電線の鉄塔基礎などでは、大型建設機械の山岳部への搬入が困難なことから、わが国では人力施工に依存する比率の高い小口径の深礎杭（特にφ2～3m）が多く用いられている。これらの深礎杭では、作業員が深礎杭孔内に入った状態で掘削、土砂搬出、土留の搬入・組立（あるいは吹付けコンクリート）、鉄筋用足場の搬入・組立・解体・搬出、鉄筋の搬入・組立、およびコンクリートの締固めが行われている。このような作業状況は、劣悪な作業環境下で危険な作業であるとともに、人力施工であるがゆえに非効率な作業となっている。また、このように劣悪な作業状態に関連して若年技術者の減少も加速させている。これに対し、我々はこれまで深礎杭孔内に作業員を入れない深礎杭の施工システムを開発してきた。本システムは、すでに高速自動車国道の 2 つの現場で試験施工を実施しており、深礎杭孔内に作業員を入れずに深礎杭を施工できることを確認している。しかしながら、効率性と省力化の観点での改善点も明らかとなっている。そこで、本研究開発において、安全・施工環境に加え、より効率的で現場の省力化を可能とするシステムを実現したいと考えている。

本研究開発では、これまで開発してきた本システムを構成する各システムについて、以下のような効率化と現場の省力化を目標とする。具体的には、各システム作業と杭の構築そのものが、孔内に作業員が入らずとも従来工法の標準歩掛を上回る効率性と省力化を実現するシステムとする。

- 1) 深礎杭孔外からの遠隔操作掘削機：既往の試験施工では、巨礫混じりまさ土で 0.75m/7 時間の掘進速度であった。本研究開発では目標速度を 1.0m/7 時間以上とする。また、硬岩を掘削する場合の静的破碎剤や非火薬破碎剤との併用方法とその作業手順書を整備し、硬岩掘削においても標準歩掛以上を目指す。
- 2) バキューム土砂搬出システム：漏水がそれほど多くない現場では水中ポンプ排水が非効率であるため、バキュームに排水機能を持たせ、効率的なドライ掘削を実現する。
- 3) 深礎杭杭頭（孔外）での土留組立・挿入、引抜き・解体システム：現在、組立・挿入、引抜き・解体とも、20～25 分/1 段（1m）を要しているが、ジャッキストローク誤差や土

留の改良などから 10～15 分/1 段 (1m) で可能な、土留設置・撤去の効率化と省力化を実現する。

4) 深礎杭杭頭 (孔外) での鉄筋籠組立・挿入システム：現在、深礎杭杭頭での鉄筋籠組立・挿入に、鉄筋籠長さ 11m のシングル配筋で 3 日を要しているが、鉄筋組立装置や傾斜防止装置の改良や作業手順書の整備により、孔内で鉄筋を組立てる従来施工を上回る 2 日以内の作業性を目指す。また、試験施工では配筋検査に時間を要したが、本システム用の検査要領を整備する。

5) 深礎杭孔内無人化コンクリート締固めシステム：現在は深礎杭径 2.5m でその実用性を確認しているが、大きな系の小口径深礎杭 (3～4m) での適用性を確認するとともに、実用性を満足しうる改良を行う。

また、本システムでは、オールケーシング杭と同様にコンクリート打設とともに土留を引抜き撤去するため、杭の周面摩擦力を期待できる。これまでの検討に加え、本研究でもこの点について確認し、本システムを用いた深礎杭の今後の合理的な設計に資することも目標とする。

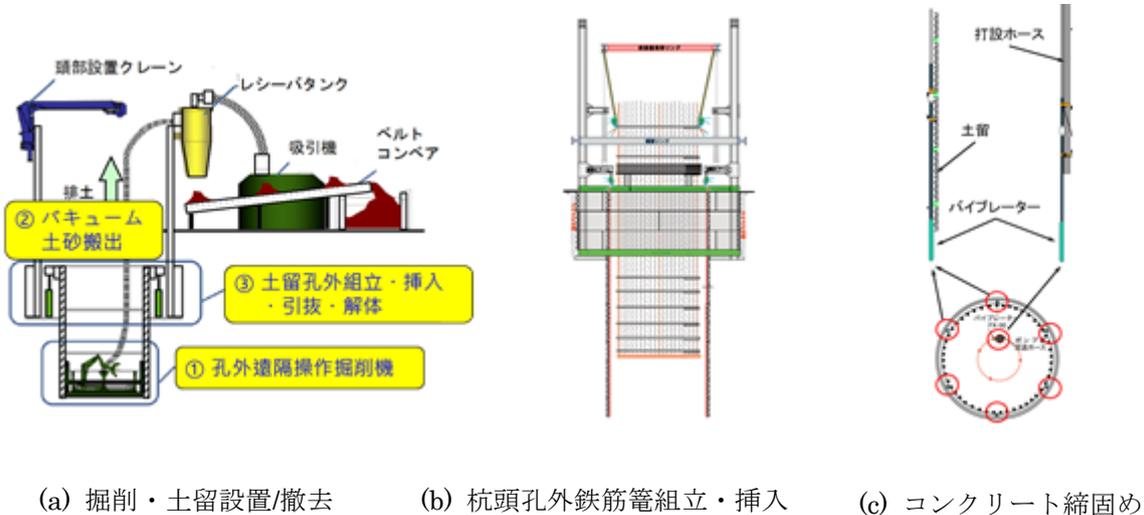


図 1 小口径深礎杭孔内無人化施工システムの概要

(8) 技術研究開発の内容と成果

1. 各システムの改良設計

本システムの効率化と省力化のため、各システムの改良設計を実施した。

① 転石ホッパーの設計

掘削土をバキュームシステムで排土する場合、巨礫をジャイアントブレイカーで小割りする必要があるが、周囲の地盤が比較的軟らかい土の場合、礫を 30cm 程度以下に小割りするのは困難であり、その作業に時間を要した。孔内に作業員がいない本システムにおいて簡易なホッパーを用いたところ、その効率性が確認できた。また、送電線の鉄塔基礎のようにバキュームシステムの搬入が困難な現場においては、転石ホッパーは排土ホッパーとしても活用できる。そこで図 2 に示す

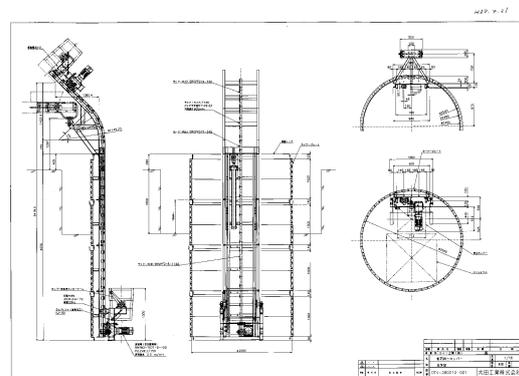


図 2 転石ホッパーの設計

ような転石・排土ホッパーを設計した。これを土留工に設置し、転石とともに掘削土砂を孔外へ搬出することが可能となる。

②土留下端部掘削位置確認システムの設計

土留背面の掘削においてはブレイカーを用いるが、余掘りを最小限とするために掘削位置を確認する作業に時間を要していた。そこで杭頭において掘削位置を確認するためシステムを設計した。(図3) このシステムを杭頭の土留めに設置しカメラをセットすることにより、掘削機のオペレーターが掘削機操作室で土留下端部の掘削位置(ブレイカー位置)を調整することができ、効率的に掘削を行うことが可能となる。

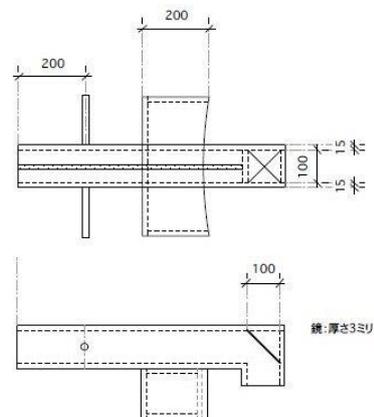


図3 土留下端部掘削位置確認システム

③バキューム排水システムの改良設計

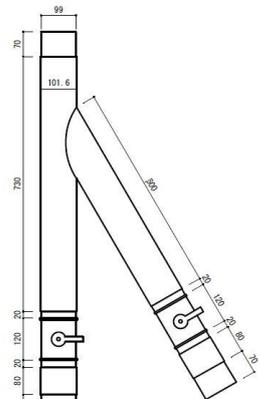


図4 排水システム

モニターの映像を見ながら掘削する場合、孔底に薄く溜まる水(水面)が反射して光り掘削に支障をきたした。通常、湧水は水中ポンプで排水するが、湧水量が少ない場合孔底に溜まる水を水中ポンプで排水することは困難であった。そこで掘削土を排出するバキュームシステムを改良して少量の水も排水するシステムを設計した。(図4) これはレシーバタンクから掘削機の排土受台に接続しているバキュームホースを途中で分岐し、掘削時と排水時で使い分けて使用するものである。

④3本ジャッキ・3分割土留システムの改良設計

本システムは従来工法と異なり、杭頭でライナープレートを組み立てジャッキにより挿入、およびコンクリートの打設面の上昇とともに引抜き、杭頭で解体・撤去する工法である。これにより孔内に作業員が入る必要がなくなる。ただし、引抜き・解体時間はコンクリートの打設時間に上乗せされクリティカルパスとなることからその時間短縮が課題である。これまでに2度の試験施工を実施し、3本ジャッキ間での3分割土留が杭頭孔外での土留の組立・解体がよりスムーズに行える知見を得た。そこで図5に示す3本ジャッキの設置架台と3分割土留への改良設計を行った。

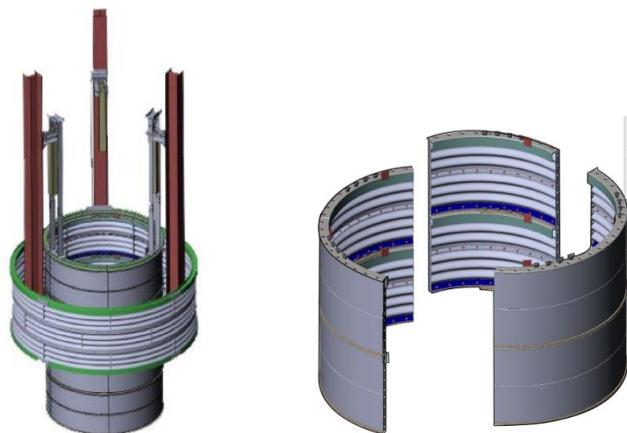


図5 3本ジャッキ・3分割土留

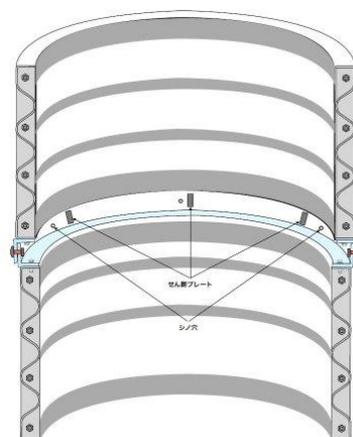


図6 土留接合方法

⑤接合方法の改良設計

φ2.5mのライナープレートを2段(h=1.0m)積み重ね、3分割して杭頭部で組立・解体する場合、上下の接続に50本、側面の接続に6本×3箇所=18本、計68本のボルトの接合が必要となり、さらにはカバープレートを設置する時間も要していた。そこで図6に示すような接続方法とせん断プレートを改良設計した。従来は、上限方向の接続のために上下のライナープレートにあらかじめ溝形鋼を取り付けておき、接続は溝形鋼を50本のボルトで連結していたが、溝形鋼を等辺山形鋼に替え角穴にせん断プレートを挿入、固定することにより上下のライナープレートを連結することができる。この場合、1段当たり5本のせん断プレートで固定することとした。

⑥ジャッキストローク伸縮誤差の改良設計

土留の挿入・引抜き、および鉄筋籠組立における効率化を目指し、ジャッキストロークを1回目の試験施工の0.75mから2回目の試験施工では1.35mに変更した。しかしストロークの伸縮誤差が大きくなり、逆に水平制御に時間を要することとなった。そこで土留の挿入・引抜き、鉄筋籠の組立・挿入をよりスムーズに行うため、ジャッキシリンダー内部にセンサーを組み込み、ジャッキストロークを制御するストローク伸縮同調ジャッキシステムを改善設計した。

(図7)

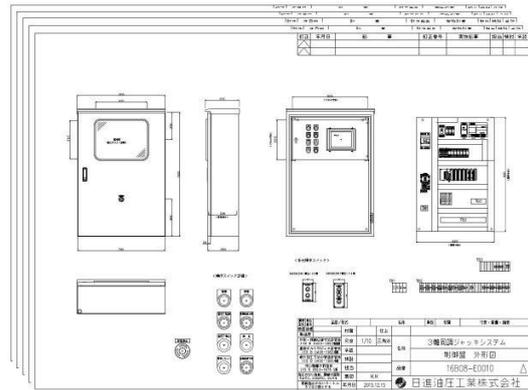


図7 伸縮同調ジャッキシステムの設計

⑦鉄筋籠の受け替えシステムの改良設計

本システムにおいて鉄筋籠を杭頭で組み立てる場合、現地に搬入できるクレーンで吊ることができる最大の鉄筋籠を予め孔外で組立ててから杭内へ挿入する。杭内に挿入した後は、油圧ジャッキと連動する鉄筋クランプと、反力架台から吊り下げられた鉄筋クランプとで交互に受け替えることにより、鉄筋籠を上昇、下降させながら鉄筋籠を組み立てて行く。鉄筋籠の帯筋の間隔は150mm~300mmのケースが多く、帯筋の径が28mmの場合鉄筋クランプの長さは122mm以下の必要がある。また、鉄筋クランプの受け替えは頻繁に行われるため、その操作時間が作業効率に影響する。そこで縦サイズが100mm以下で油圧機構により操作ができる油圧鉄筋クランプを設計した。(図8) このクランプにより迅速かつ確実に鉄筋の受け替え作業が可能となる。

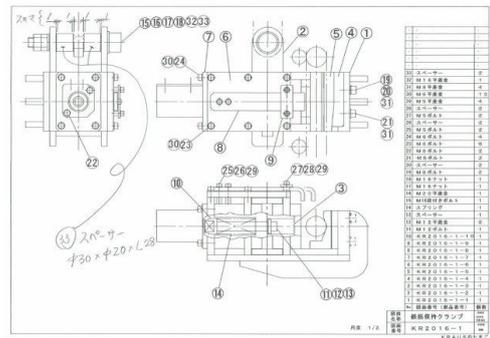


図8 油圧鉄筋クランプの設計

⑧2 ロッド目以降の主筋の位置決めと機械式継手接続の効率化のための改良

本システムでは、主筋の継手を機械式継手とすることを前提としているが、機械式継手では継ぐ主筋と継がれる主筋が正確に上下にセットされなければならない。これまでの試験施工では、2 ロッド目以降の最初の数本の主筋で構築する鉄筋籠を杭頭で組立てたため、この作業に多大な時間を要した。そこで孔外鉄筋籠組立において、ロッド間の主筋の機械式継手

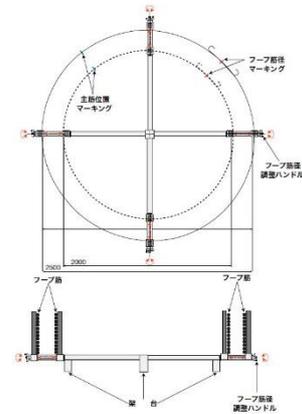


図9 フープ筋マーキング機

を確実にを行うための、図 9 に示すようなフープ筋へ主筋位置をマーキングするシステムを設計した。これを用いることにより主筋位置を正確に特定できるため、効率的な配筋が可能となる。

2. 各システムの改良

「1.各システムの改良設計」に基づいてシステムの改良を実施した。

①転石ホッパーの製作

図 10 に示す転石ホッパーを製作した。容量は 0.3m^3 とした。2本のレールを土留工に固定し、ホッパーは下部の電動モーターにより掘削機のオペレーターがリモコン操作により上下動させることができる。ホッパーが最上端まで上昇するとホッパーが回転し、中の土砂を杭頭孔外に設置したベルトコンベアーに投下させることができる。その後孔内に下降し、任意の高さで一時停止させることができる。掘削の進行に伴いレールを繋いでいく必要があるため、2本レールの中央に油圧ジャッキを組み込んであり、土留工（ライナープレート）装着時に最上端のレールをジャッキで持ち上げ、2本レールを取り付けた土留工を組み込むことにより連結することができる。



図 10 転石ホッパー



図 11 土留下端部
確認システム

②土留下端部確認システムの製作

図 11 に示す土留下端部確認システムを製作した。内部に鏡と十字線を組み込んであり、土留工の上端に固定することができる。肉眼あるいはビデオカメラを設置することで、掘削下端部の位置を確認することができ、効率的な掘削が可能となる。



図 12 排土・排水分岐管

③バキューム土砂搬出システムの改良（排水機能の付加）

バキューム土砂搬出システムに排水機能を付加するため、図 12 に示す枝分かれ管を開発した。二股となった管のそれぞれに開閉コックが内蔵されており、コックを開閉することにより土砂搬出と排水を切り替えることができる。

④3本ジャッキ・3分割土留システムの改良

杭頭での効率的な土留の組立・解体を実現するため3本ジャッキ（反力支柱）、3分割土留システムに改良した。反力支柱は反力用の外側ライナープレート（ $\phi 4.0\text{m}$ ）に固定し、油圧ジャッキを取り付け、油圧ジャッキに取り付けた枠形支柱を介して土留に連結させることができる。 $\phi 2.5\text{m}$ ライナープレートは5枚で構成されているため、2枚、2枚、1枚の組み合わせで3分割とした。2枚、2枚、1枚の順に組み立てることにより（解体時は1枚ものから解体する）、また支柱を3本にしたことにより土留めと反力



図 13 3分割枠形支柱

支柱が干渉することが少なくなり、土留めの組立解体の効率化を図ることができる。

⑤せん断プレートの開発（接合方法の改良）

ライナープレートの上下接合の効率化を図るため図 14 に示すせん断プレートを開発・製作した。これは杭頭においてライナープレートの外側から上下の連結を可能とするものである。内部の2枚のプレートの方向を合わせた状態でライナープレートの接合部の矩形の穴に挿入し、中央の溝にマイナスドライバーを当てて 90 度回転させることにより抜けなくなる。その後、特殊レンチで円形ナットを回転させて締め付けることで接合させることができる。円形ナットは周囲がテーパ形状となっており、土留を挿入する際に地盤の抵抗を減少させる効果がある。



図 14 せん断プレート

⑥ジャッキストローク伸縮誤差の改良

3本の油圧ジャッキのストローク誤差を制御するため、ストローク伸縮同調ジャッキシステムを開発・改良した。図 15 そのシステムを示す。3本の油圧シリンダーと制御装置の構成となっており、油圧ジャッキはコントロールパネルで上限値、下限値を入力しボタン操作により伸縮させることができる。また、ジャッキ内部に伸縮センサーを内蔵しており、3本のうちどれか1本でも 3mm 以上の伸縮誤差が発生すると自動的に停止する構造となっている。停止した場合は自動制御を一時解除し、誤差の生じたジャッキを単独で伸縮させて他のジャッキとストロークを合わせることで、再度自動制御が可能となる。



図 15 伸縮同調油圧ジャッキシステム

⑦鉄筋籠の受け替えシステムの改良

（油圧クランプの改良）

鉄筋籠を杭頭にて組み立てる場合、鉄筋籠の上昇・下降の際のクランプによる受け替えを迅速かつ確実に作業するための油圧式鉄筋クランプを開発・製作した。（図 16）これは油圧ジャッキシステムから油圧を供給し、クランプのレバー操作により鉄筋を掴み、また開放することができ、作業の迅速化・省力化を図ることができる。クランプの高さは 100mm とし、フープ筋のピッチが 150mm の場合で



図 16 油圧式鉄筋クランプ

も対応が可能となっている。

⑧主筋位置決めのための改良（フープ筋マーキング機の製作）

帯鉄筋の径と主筋位置をマーキングするための定規（フープ筋マーキング機）を製作した。（図 17）これは鉄筋籠を杭頭で組み立てるために予め孔外で位置決めをするものであり、この装置を用いてマーキングしたフープ筋をもとに組み立てることにより、杭頭においても鉄筋籠を正確に組み立てることが可能となる。フープ筋径は $\phi 2.0\text{m} \sim 2.5\text{m}$ に対応しており、4つのハンドルにて正確に調整することができる。



図 17 フープ筋マーキング機

3. 各システムの工場実験

1) 掘削関連の実験

①転石・排土ホッパー

開発した転石・排土ホッパーの動作確認を工場内で行った。（図 18）動力源は工場内の電力を利用し、ホッパー内に土のうを積載し、上昇、排土、下降、の速度ならびに操作性を確認した。主要諸元ならびに実験結果を表 1 に示す。

表 1 転石・排土ホッパー諸元表

容量	0.3m ³
上昇・下降速度	9.6m/分
作業量	10m ³ /日

工場内ではスムーズな動きで操作できたが、産官学テーマ推進委員会の委員から以下の指摘があった。

- (1)狭い孔内で掘削機（小型バックホウ）と併用して活用するためには、バケット容量を小さくした方が作業効率が良いのではないか。
- (2)バケットの荷重がライナープレートにかかるため、その意味においても小型化が良いのではないか。
- (3)実現場における作業環境より、ラック部の耐久性について今後検討が必要と思われる。



図 18 転石・排土ホッパー実験状況

②土留下端部掘削位置確認システム



図 19 土留下端部確認状況

開発したシステムの確認状況を図 19 に示す。工場内の 2 階部に本システムを固定し、1 階床部に設置したブレーカーを模した器具の位置の視認性を確認した。図 19 に示すとおり望遠鏡の十字線と器具位置を鮮明に確認することができた。孔内作業においても照明を設置することにより十分視認性をあると思われる。極めて単純な手法ではあるが確実に確認することができる。

2) 排水機能付きバキューム土砂排出システム

バキューム排土システムの配管の途中にこの装置を設置し、ハンドルレバーを操作することにより、排土と排水を切り替えることができる。工場実験においてはバキュームカーに排土管を接続し、バケツに入れた土砂の排土とパレットに入れた水の排水能力を確認した。パレット内の水は水深が浅くなくても最後まで排水できることを確認した。(図 20)



図 20 排水実験状況

3) 深礎杭杭頭（孔外）での土留組立・挿入・引抜・解体実験

①組立解体実験

工場内でライナープレートの組立解体実験を実施した。(図 21) 事前に反力架台として $\phi 4.0m$ $h=1.5m$ のライナープレートを組立て、反力支柱、油圧ジャッキを設置した。その



図 21 土留組立解体実験

表 2 ライナープレート組立解体時間

組立時間	16 分 50 秒
解体時間	11 分 30 秒

の中に $\phi 2.5m$ $h=0.5m$ のライナープレートを設置し、その上に $\phi 2.5m$ 、 $h=1.0m$ の 3 分割したライナープレートを接続する実験を行った。クレーンは実際の現場を想定して、クレーン付きトラックを用いた。以前の試験施工では反力支柱は 4 本、ライナープレートは 2 分割であり、組立解体時にライナープレートの設置にかなりの時間を要したため、今回は反力支柱を 3 本、ライナープレートを 3 分割とした。2.5m ライナープレートは一周で 5 分割であり、これを 1 : 2 : 2 の 3 分割とし、長いライナープレートを先に設置し、最後に短いライナープレートを組み立てる方法をとることにより、非常にスムーズに設置することができ

きた。同時にせん断プレートで上下を連結し、通常のボルトで側面を連結し、カバープレートを取り付けた。解体は逆の手順で行った。反力支柱には油圧ジャッキも取り付けられており、慎重な作業が要求されたが、数回繰り返すうちに組立解体に要する時間を短縮することができた。組立に要した時間は 16 分 50 秒、解体に要した時間はおよそ 11 分 30 秒であった。特に解体に要する時間は杭本体のコンクリート打設時におけるクリティカルパスとなるが、目標の 10~15 分/1 段を達成することができた。

②伸縮同調油圧ジャッキのストローク伸縮誤差実験

反力支柱に取り付けたストローク伸縮同調油圧ジャッキをライナープレートに接続し、油圧ジャッキの伸縮実験を行った。油圧ジャッキはコントロールパネルで上限値、下限値を入力しボタン操作により伸縮させることができる。また、ジャッキ内部に伸縮センサーを内蔵しており、3 本のうちどれか 1 本でも 3mm 以上の伸縮誤差が発生すると自動的に停止する構造となっている。わずかな油圧ジャッキの傾きやそれに伴う偏荷重により伸縮誤差が発生するとジャッキが停止することを確認した。この場合は本体パネルで伸縮誤差を確認することができ、誤差の発生したジャッキを手動で伸縮させて他のジャッキに合わせることで、また同調して操作ができることが確認できた。ただし、精密機械であるため今後防護カバー

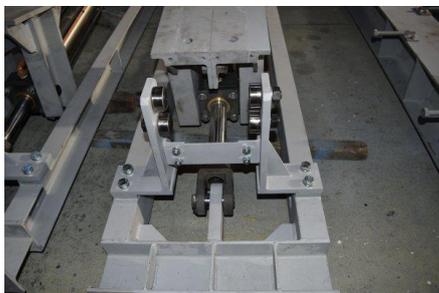
など装置を保護する対策を検討する必要があると考えられた。

4) 工場実験後の改良

以上の工場実験を通して、以下の改良を行った。

① 枠形支柱の改良

ライナープレートは油圧ジャッキの上部とピン接続された枠形支柱と接続されている。このため枠形支柱の動きの自由度が大きいため、わずかな偏加重により油圧ジャッキならびに枠形支柱が傾くことがわかった。そこで枠形支柱が外側の反力支柱と平行に上下動するように枠形支柱を改良した。(図22)



② カバープレートの製作

本工法はライナープレートを地中に挿入するため、ライナープレートの外側を平滑にするため鉄板を取り付けている。しかしライナープレートの組立時に側面のボルト接続を要するため、その部分は組み立てた後に鉄板を取り付ける必要がある。そこでカバープレートを製作した。これは側面のボルトを固定した後にライナープレートの上下端に設けた角穴に差し込むだけで固定することができる。



図22 枠形支柱の改良 (上部・下部)

③ 簡易足場の製作

ライナープレートの組立・解体、鉄筋籠の組立等、ほとんどの作業は外側ライナープレート (φ4.0m) と内側ライナープレート (φ2.5m) の間の狭い空間で行うことになる。また、その作業床は地上より-1.5mである。鉄筋籠の組立等においては上部での作業も必要になることから反力支柱に取り付ける簡易な足場を製作した。(図23)



図23 簡易足場

4. 現場での試行と周面摩擦力の計測

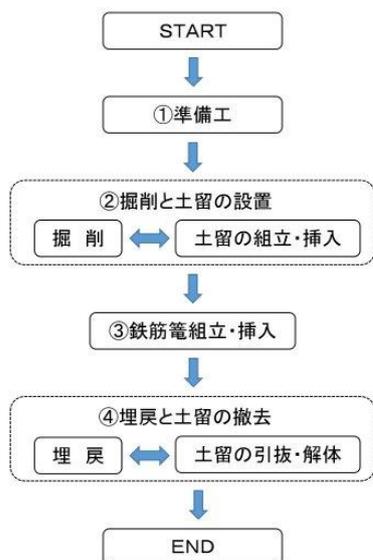


図24 施工フロー

開発・改良したシステムの効果を確認するために実際の現場を想定して現場試験施工を実施し、実用性の確認を行った。施工フローを図24に、工程表を図25に示す。作業は工場実験で本システムを十分理解している作業員で施工した。また、各作業に要した時間を表3に示す。

	第1日	第2日	第3日	第4日	第5日	第6日	第7日	第8日	第9日	第10日	第11日
資機材搬入	■										
φ4.0掘削		■									
均しコンクリート			■								
φ4.0土留工			■								
反力架台組立			■								
φ2.5掘削・土留挿入				■	■	■	■				
鉄筋用足場組立							■				
鉄筋組立								■	■	■	
埋戻・土留引抜										■	■
後片付け											■

図25 工程表

表 3 各作業に要した時間（試験施工）

① 作業スペース（反力設備）の構築時間			
φ 4.0mLP 地上での組立	3 時間	(作業員 2 名+クレーン)	
φ 4.0mLP 建込	10 分	(作業員 3 名+クレーン)	
反力架台建込	35 分	(作業員 3 名+クレーン)	
② 杭頭部ジャッキシステムの設置時間			
油圧ジャッキ取付	30 分	(作業員 3 名+クレーン)	
油圧ジャッキ揺れ防止取付	1 時間 40 分	(作業員 3 名+クレーン)	
③ 土留の 1 段（1 m）当たりの杭頭での組立時間			
	1 段目	2 段目	3 段目
盛替えリング設置・ジャッキ切り離し		1 時間	5 分
LP(3 分割)設置・連結	26 分	20 分	18 分
ジャッキと連結	1 時間	8 分	8 分
盛替えリング切り離し		5 分	5 分
④ 土留の 1 段（1 m）当たりの掘削・挿入時間			
	1 段目	2 段目	3 段目
	2 時間 10 分	1 時間 10 分	1 時間 20 分
⑤ 土留めの 1 段（1 m）当たりの引抜・解体時間			
	1 段目	2 段目	3 段目
盛替えリング外し・油圧ジャッキ引き上げ		3 分	2 分
盛替えリング設置	3 分	5 分	5 分
油圧ジャッキ切り離し・引き上げ	7 分	3 分	3 分
土留工解体	5 分	10 分	9 分
計		21 分	19 分

1) 準備工

準備工は反力架台を設置するまでの作業である。

- ① φ 4.0m のライナープレートを設置するため、直径 4.0m 深さ 1.6m の床掘を小型バックホウに掘削し、杭外周部分（作業床）の均しコンクリート（t=10cm）を打設した。
- ② 同時に φ 4.0m のライナープレートを孔外にて組み立てた。底部補強リング（H 形鋼）、ライナープレート（h=0.5m×3 段）、上部補強リング（H 形鋼）の順で組み立てた。なお、最終の解体時にライナープレートを内側に取り外しができるよう、各段にテーパーのついたライナープレートを組み込んだ。
- ③ 均しコンクリートの養生後、組み立てた φ 4.0m ライナープレートをクレーンにより設置し周囲を埋め戻した。本施工では地盤との周辺摩擦を得るために生コンクリートで埋め戻すことになる。
- ④ その後、反力支柱（H-200）、油圧ジャッキ、



図 26 反力架台設置完了

枠形支柱を取り付けた。反力支柱は垂直になるよう慎重に取り付けた。
⑤油圧ユニット（本体）と油圧ジャッキを油圧ホースで連結した。

作業スペースの構築時間 表 3-①

油圧ジャッキシステムの設置時間 表 3-②

作業スペースの構築には延べ 6 時間 10 分を要しているが、本試験施工のように掘削とライナープレートの組立を同時に行うことにより、3 時間ほどで可能となる。ただし、均しコンクリートの養生時間は必要である。

杭頭部のジャッキシステムの設置に要した時間は 2 時間 45 分であった。支柱の建込、油圧ジャッキの取り付けは工場実験を経験しており、スムーズに取り付けることができたが、枠形支柱は工場実験後に揺れ防止装置を追加しており、取り付けに手間取った。この作業は時間の短縮化が可能である。

2) 掘削と土留の設置

①掘削床に刃口（ $\phi 2.5\text{m}$ ）を設置。この刃口は杭内の掘削時にライナープレートを傷めないよう先端に取り付けるものである。

②その上部に $\phi 2.5\text{m}$ ライナープレート（ $h=1.0\text{m}$ ）を組み立てる。ライナープレートはあらかじめ 3 分割の状態ですぐで地上で組み立てておき、長い部材から順に設置し、せん断プレートで連結、側面をボルトにて連結した。その後、側面連結部にカバープレートを設置した。

③ライナープレートと枠形支柱（油圧ジャッキ）をせん断プレートにて連結。

④バックホウにて掘削、ライナープレートを油圧ジャッキにて挿入。

⑤1.5m 掘削・挿入した時点で盛替えバンドでライナープレートを仮受け。

⑥枠形支柱（油圧ジャッキ）を切り離し、上昇。

規定の深さになるまで②～⑥を繰り返す。

なお、今回の試験施工においては地盤が盛土地盤であり、深さ 1.5m 以深の締め固めが良くなかったため、周辺地山が緩み、外側ライナープレートが不安定となったため掘削は 5.5m で終了した。

・土留の 1 段（1m）当たりの杭頭での組立時間 表 3-③

・土留の 1 段（1m）当たりの掘削・挿入時間 表 3-④

土留の 1 段（1m）当たりの杭頭での組立時間は、1 段目はライナープレートと枠形支柱との連結に手間取り、2 段目では盛替えリングの設置に手間取った。どちらも試験施工ではじめての作業であったため時間を要したが、2 回目以降はスムーズに作業できた。これより 1 段当たり 40 分程度で作業できることを確認した。

土留の 1 段（1m）当たりの掘削・挿入時間は 1 段目で時間を要しているが、これは日付を跨いだ作業となったため、前後の準備時間が含まれていることによる。したがって



図 27 土留組立状況

1 段（1m）辺りの掘削・挿入時間は 1 時間 15 分程度であった。試験施工現場の土質が緩い盛土地盤であったため短時間で掘削できたが、実現場においては土質状況に左右される。

3) 鉄筋籠組立・挿入

- ①主筋・帯筋マーキング
- ②主筋を鉄筋リングに接続
- ③クレーンにて吊り上げ、下部の帯筋結束
- ④杭内に建込、油圧クランプにて受け替え
- ⑤鉄筋籠を挿入しながら帯筋組立

今回の試験施工においては、①～③までの作業は実施できたが、油圧ユニットからクランプへの油圧が正常に送られなくなったため、④～⑤の作業を確認することができなかった。

4) 埋戻と土留の撤去

実施工においては杭内部に生コンクリートを打設しながらライナープレートを引き上げ、解体・撤去するが、試験施工においては生コンクリートが打設できないため、掘削土で埋戻しながらライナープレートを引き上げ、解体撤去した。

- ①枠形支柱とライナープレートを接続
- ②盛替えリングはずし・油圧ジャッキ引き上げ
- ③盛替えリング設置 20
- ④枠形支柱切り離し
- ⑤ライナープレート解体・撤去

①～⑤を繰り返す。

・土留めの 1 段（1 m）当たりの引抜き・解体時間・・・表 3-⑤

ライナープレートの解体・撤去に要する時間は 11～16 分程度であるが、ライナープレートと枠形支柱との接続・切り離し、盛替えリングの設置・外しの時間も要するため、1 段（1 m）当たりの引抜き・解体時間は 20 分程度となった。

5) 杭頭孔外鉄筋籠組立試験施工

本研究開発における産官学テーマ推進委員会委員の一人である、国土交通省中部地方整備局中部技術事務所 青山秀樹総括技術情報管理官と、同整備局飯田国道事務所の協力を得て、当該システムが対象とする杭頭孔外鉄筋籠組立に対する試験施工を実施した。ただし、ここでの試験施工は、杭頭孔外で鉄筋籠を組立てる実用性と効率性の確認を主な目的とした。すなわち、本システムは大型クレーンの搬入が困難な現場に対し、現場に搬入可能なクレーンで吊れるだけの鉄筋籠を杭頭に配置したジャッキに受替えた後はジャッキで鉄筋籠を上下させながら鉄筋籠を組立てるものであるが、ここでは大型クレーンで鉄筋籠を吊りながら杭頭での組立を試験施工したものである。対象とした深礎杭は、径が 2.5m で長さは 13m の 4 本である。図 28 に杭軸方向に基本となる 4 段のフープ筋を取付けた状況を示す。本施工では最初にこれらを取付けることにより主筋位置を確定させているが、この際には図 17 で示した「フープ筋マーキング機」による正確な主筋位置のマーキングから施工精度を向上することができた。図 29 には、杭頭でのフープ筋の取付け状況を示す。フープ筋 1 段の取付け時間は 2 分弱であり、孔の中で実施するのと比較して非常に高い効率性を確認した。図 30 には一部を除いて組み上がった鉄筋籠を吊り上げた状況を示す。綺麗に組み上がっていることが確認できる。これは、地上でフープ筋を取り付けるため、取り付けの水平精度が格段に向上することが大きな理由であると考えられる。また、上部にリボンテープを取り付けて吊

り上げれば配筋検査も地上で行うことができ、これまでのように検査員が孔内に入ることもなく効率的に検査することも可能となる。なお、ここでの施工では、現場の要望から図 30 で分かるとおり鉄筋籠から抜けているフープ筋継手部の主筋と、鉄筋籠を深礎杭孔内に固定するスペーサーは、鉄筋籠を孔内に挿入した後、作業員が孔内に入って実施した。ただし、これらの作業も作業員を孔内に入れずに行うことも十分に可能である。

このように施工した深礎杭 1 本あたりの鉄筋配置は 6 時間であり、従来の孔内作業では通常 2~3 日かかることを考慮すると、出来形を含め当該システムが対象とする杭頭孔外での鉄筋籠組立・挿入の有効性を確認することができた。



図 28 基本となる 4 本のフープ筋の
取付完了状況



図 29 杭頭孔外でのフープ筋の取付状況



図 30 鉄筋籠組立完了（一部を除く）

6) 試験施工での結果と課題

試験施工ならびに産官学テーマ推進委員会での議論より以下の結果と課題が明らかになった。

- ・今回の試験施工においては、試験期間の短縮のためにも、 $\phi 4.0\text{m}$ ライナープレート設置用の掘削、均しコンクリート打設と同時にライナープレートを地上で組み立て、翌日にクレーンにて設置した。掘削は 3 時間ほど要した。クレーンで組み立てたライナープレートを吊ることができない現場の場合は、均しコンクリートの養生を待ってから $\phi 4.0\text{m}$ ライナープレートを組み立てることになり、実施 2 日を要する。

- ・掘削しながら土留（ライナープレート）挿入することができるため、このような緩い地盤でも安全に作業することができた。

- ・通常の深礎杭の施工においては、ライナープレートの高さが 50cm なのでライナープレート下方 60~70cm くらいは掘削しなければならないが、本工法の場合はスコップやツ

ルハシが入る程度（20cm くらい）掘削すればライナープレートを挿入することができる。

・本試験施工において孔壁の崩れが生じたが、 $\phi 4.0\text{m}$ と $\phi 2.5\text{m}$ ライナープレートの掘削が偏心しているため、狭いほうの孔壁が崩れやすかった。

・孔壁の崩れに伴ってライナープレートの挿入抵抗が生じたため、油圧ジャッキを押し下げたり引き抜いたり作業が生じ、これに伴って外側の $\phi 4.0\text{m}$ ライナープレートに上下動が生じた。地山が自立するような地盤においては、油圧ジャッキがライナープレートを吊っている状態となる。

・今回開発したストローク油圧ジャッキはストロークを検出しており、それぞれのジャッキに架かる荷重の差によりストロークに差が生じた場合、自動的に止まる。この場合は手動でストロークを調整するとまた同調して作動させることができる。石が当たっている場合でもどのジャッキに荷重が架かっているかがわかるので、その場合は一度上昇させて石を取り除いてから挿入させることができる。

・掘削挿入時間は、本試験施工の場合は地盤が緩かったため、1段（1m）1時間程度で施工できた。

また、鉄筋組立の今後の対応策として、

①今回と同じ段取りで施工する場合には、最初の主筋は3本とする。

②鉄筋連結クランプは改良して最低限用いるとともに、必要に応じて溶接を併用したり、内側に組立筋も設置したりする。

③ジャッキは鉄筋吊り金具を支えクランプはその吊り金具に支持されるものなので、受け替えのクランプを増加することが可能である。

総合的に望ましいと考えられる対応として、受け替えクランプの数を増やして最初の鉄筋籠の主筋はその本数とし、主筋と帯筋との連結にはすべて鉄筋連結クランプを改良して用いるか一部溶接を併用する。

7) 周辺摩擦力の評価のための計測

本システムの大きな特徴の1つは、オールケーシング杭と同様にコンクリート打設に伴い土留を引抜くため、掘削孔内へのコンクリートの充填が可能となることから、設計において深礎杭の周面摩擦を期待することができる点にある。このため、これまでの試験施工と同様に、本現場試行においても深礎杭周辺地盤における試験施工前後の孔内水平載荷試験、およびパイプひずみ計による施工中の周辺地盤の変位測定から、設計で期待できる周面摩擦力について検討を行った。ただし、後述するように、現場は締固め不十分な盛土地盤であったため、自然地盤での深礎杭に期待できる周面摩擦力度の評価はできなかったが、杭頭において緩んだ盛土や崖錐といった状況は多くの現場であり得るため、この観点から評価を実施したので報告する。

① 調査位置

・調査孔の位置を図31に示す。

② 地盤概要

・柱状図を図32に示す。

・土質区分はシルト混じり砂礫（ $\phi 20\sim 40\text{mm}$ 程の垂角礫～角礫主体）、マトリックスはシルト混じり中砂・粗砂であり、締固め不十分な盛土と考えられ、全体的に緩んでいる。

・2m以浅でN値が高いのは、大きめの礫にサンブラーが当たった影響だと考えられる。

・2m以深が本来のこの地盤の特性だと考えられ、シルト混じり砂礫でありながらN値は4～13と緩んでおり、掘削に伴う崩壊が懸念される地盤

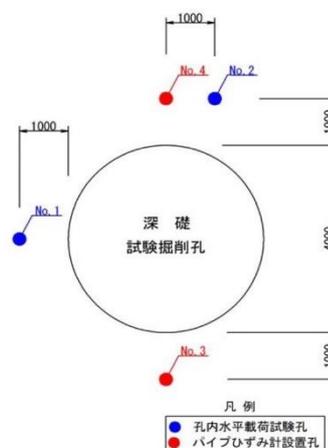


図31 調査孔位置図

である。



図 32 土質柱状図

③ 変形係数

- 現場における孔内水平載荷試験結果（変形係数）と N 値との相関を図 33 に示す。
- この結果によれば、変形係数の N 値との相関は $290 \cdot N$ (最小二乗法) となり、自然地盤における設計上の一般的な相関 ($2800 \cdot N$) と比較して 1/10 程度で非常に緩んでいることが確認される。

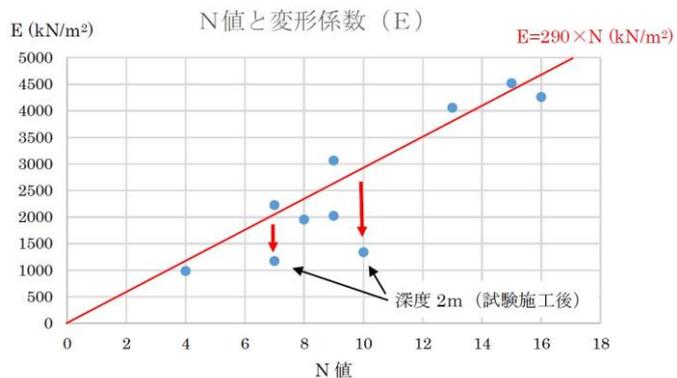


図 33 N 値と変形係数

- 図 33 には、試験施工後に計測した変形係数の低減が特に顕著な深度 2m の値を試験施工前の N 値に対応したプロットも示すが、これによると変形係数は 50% 程度低減しているものの、これは前述 (4.2) したとおり、掘削に伴い小規模な崩壊 (大きな礫の剥落等) があったためであると考えられる。

④ 周辺地盤のひずみ

- パイプひずみ計の計測結果を図 34 に示す。
- この結果によれば、試験施工での最終掘削時 ($d=5.5m$) の各深度のひずみは以下のとおりであり、締固め不十分で緩んだ盛土内での施工にも関わらず、周辺地盤のひずみは小さいことを確認した。
 - No.3 $d=2.0m$ 地点で ひずみ 80μ
全体で ひずみ $40 \sim 80 \mu$
 - No.4 $d=2.0m$ ひずみ 50μ strain
全体で ひずみ $30 \sim 50 \mu$
- 最大ひずみ 80μ を対象に、砂礫地盤の静的な $G/G_0 - \gamma$ 曲線からせん断弾性係数 (G) の低減量は $0.6 \sim 0.8$ 程度と推定される。

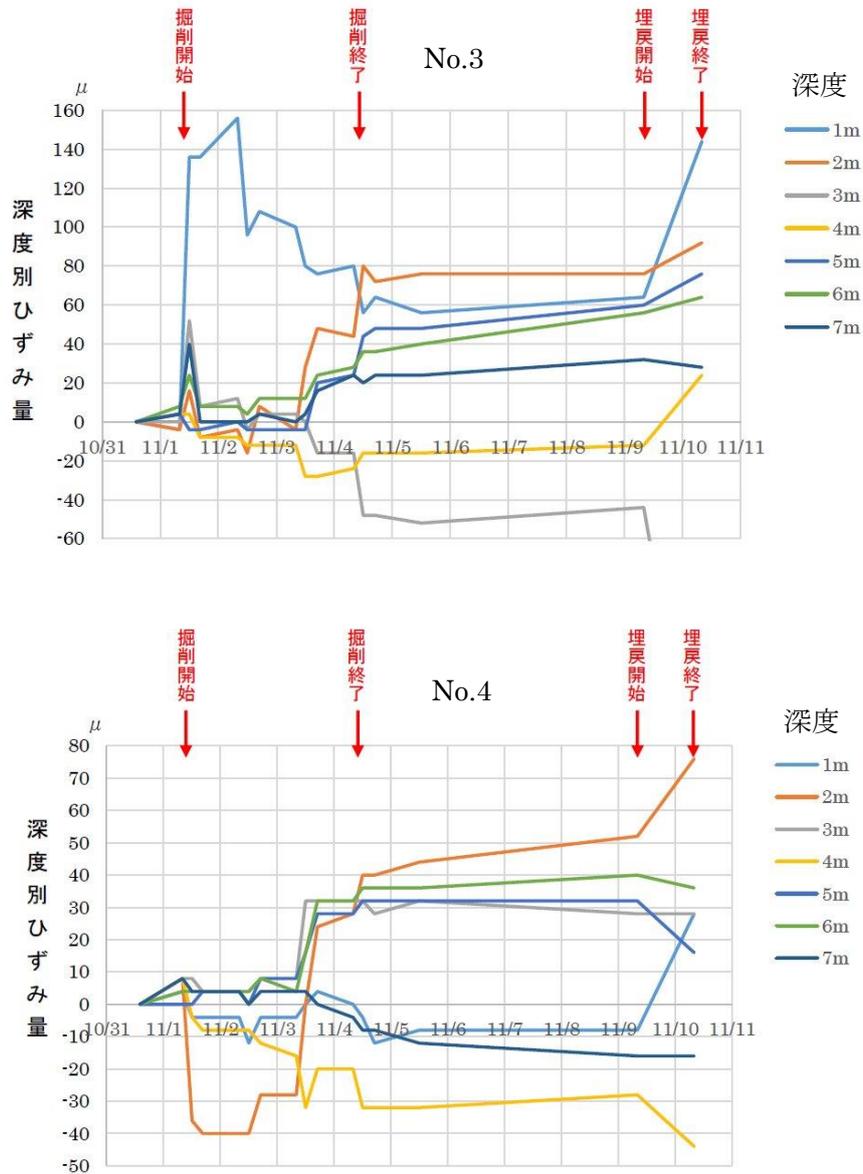


図 34 パイプひずみ計による計測結果

⑤ 設計上期待し得る周面摩擦力度

今回の試験施工では、締固め不十分な盛土における深礎杭施工にともなう周辺地盤のゆるみ (=せん断弾性係数の低減=周面摩擦力度の低減) について計測することができた。このことは、杭頭における盛土や崖錐堆積物の層などで同様な状況が考えられるため、このような層では、本試験施工でも確認された小規模な崩壊 (大きな礫の剥落等) も考慮し、周面摩擦力度を場所打ち杭の 1/2 とする対応が必要であると考えられた。

5. 施工手順書と設計要領

1) 施工手順書

工場実験ならびに現場試験施工を踏まえて、本研究において開発・改良した深礎杭孔内無人化施工システムの施工手順書を作成した。(資料別添) 手順項目は以下の通りである。

① 土留工構築手順

- (1)反力架台の用ライナープレートの設置
- (2)反力架台の設置
- (3)先端刃口と1段目LPの建込
- (4)掘削・ライナープレート挿入・土留壁構築
- ②鉄筋組立手順
 - (1)準備工
 - (2)鉄筋組立
- ③躯体コンクリート打設、ライナープレート引抜・解体手順
 - (1)準備工
 - (2)躯体コンクリート打設、ライナープレート引抜・解体
 - (3)反力架台、ライナープレート解体

2) 設計要領 (案)

これまでの試験施工における計測結果より、深礎杭でも土留を撤去する本工法では 設計上周面摩擦力を期待できること、その大きさは自然地盤で場所打ち杭の 85%、盛土や崖錐部では場所打ち杭の 50%程度とすることが望ましいと考えられた。

そこでこれらの知見より、現時点での本深礎杭の鉛直支持力の設計要領 (案) を場所打ち杭を参考として以下に示す。

本工法で施工された1本の深礎杭の軸方向許容押し込み支持力

本工法で施工された1本の深礎杭の軸方向許容押し込み支持力は、地盤条件等を考慮した地盤から決まる杭の極限支持力に対し、表4に示す安全率を確保して、式(1)により算出するものとする。

$$R_a = (R_u - W_s) / n + W_s - W \quad (1)$$

ここに、

- R_a : 杭頭における杭の軸方向許容押し込み支持力 (kN)
- n : 表4に示す安全率
- R_u : 地盤から決まる杭の極限支持力 (kN)
- W_s : 杭で置換えられる部分の土の有効重量 (kN)
- W : 杭及び杭内部の土の有効重量 (kN)

表4 安全率 n

荷重状態	安全率
常時	3
暴風時、レベル1地震時	2

極限支持力を支持力推定式によって算定する場合には、適切な地盤調査結果に基づき、式(2)を用いてよい。

$$R_u = q_d A + U \sum L_i f_i \quad (2)$$

ここに、

- R_u : 地盤から決まる杭の極限支持力 (kN)
- A : 杭先端面積 (m²)

q_d : 杭先端の単位面積当たりの極限支持力度 (kN/m^2) で、表5のとおりとしてよい

U : 杭の周長 (m)

L_i : 周面摩擦力を考慮する層の層厚 (m)

f_i : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度 (kN/m^2) で、杭頭の盛土層や崖錐層では表6の50%、その他の自然地盤では表6の85%を用いてよい

表5 本工法による深礎杭先端の極限支持力度 q_d

地盤種類	杭先端の極限支持力度 (kN/m^2)
砂れき層及び砂層 ($N \geq 30$)	3,000
良質な砂れき層 ($N \geq 50$)	5,000
硬質粘性土層 (岩を含む)	$3q_u$

ただし、 q_u は一軸圧縮強度 (kN/m^2) でコンクリートの許容圧縮応力度を超えない、 N は標準貫入試験の N 値

表6 最大周面摩擦力度 (kN/m^2)

施工方法	地盤の種類	
	砂質土	粘性土
本工法による深礎杭	$5N (\leq 200)$	c 又は $10N (\leq 150)$

ただし、 c は地盤の粘着力 (kN/m^2)、 N は標準貫入試験の N 値

6. まとめと今後の課題

本開発システムは、作業員を深礎杭孔内に入れずに深礎杭を構築するシステムであり、①遠隔操作掘削、②掘削土砂孔内無人化搬出、③杭頭での土留挿入・引抜き、④杭頭での鉄筋籠組立て挿入、⑤孔内無人化コンクリート締固めの5項目で構成されている。それぞれの開発目標と本研究における成果を表7に示す。

また、これらの項目は個別に従来の工法の各ステップへ適用することにより、従来工法の省力化・効率化を図ることもできる。今後は、下記の改良を追加することにより、さらなる効率化が図られるものと考えている。

- ・ 転石・排土ホッパーの改良・・・現場条件に応じた容量と耐久性の向上
- ・ 伸縮同調油圧ジャッキの改良・・・ジャッキ端部のコネクター類の防護
- ・ 鉄筋組立システムの改良・・・現場条件ごとに組立手順・方法の多様化
- ・ 鉄筋油圧クランプの改良・・・軽量化と組立手順に応じた個数の増加

表 7 研究開発目標と成果

目的・目標・実施計画	実施・成果
<p>1. 深礎杭孔外からの遠隔操作掘削機</p> <ul style="list-style-type: none"> 掘進速度を 1.0m/7 時間以上とする 	<ul style="list-style-type: none"> バキューム土砂排出システムは巨礫を小割りする必要があるが、その作業を省略するため、転石ホッパーを開発し、工場実験によりその作業能力を確認した。 土留下端部の地山をブレーカーで掘削する際その位置確認のための時間を短縮するため、土留下端部確認システムを開発し、工場実験によりその有効性を確認した。 これらの改良により掘進速度 1.0m/7 時間以上を達成できるものと考えられた。
<p>2. バキューム土砂搬出システム</p> <ul style="list-style-type: none"> バキュームに排水機能を持たせ、効率的なドライ掘削を実現する。 	<ul style="list-style-type: none"> 孔底に薄く溜まる水を排水するため、バキューム土砂搬出システムに分岐管を設け、切替弁により排水機能を持たせた。工場実験により、薄く少量の水も吸引可能であることを確認した。
<p>3. 深礎杭杭頭（孔外）での土留組立・挿入、引抜き・解体システム</p> <ul style="list-style-type: none"> ジャッキストローク誤差や土留の改良などから 10～15 分/1 段（1m）で可能な、土留設置・撤去の効率化と省力化を実現する。 	<ul style="list-style-type: none"> 杭頭での土留の組立・解体の効率を高めるため、反力支柱 3 本、土留 3 分割システムを採用し改良した。 ライナープレートの上下の接合のためのせん断プレートを開発した。 土留の挿入・引抜き時の傾き防止のため、伸縮同調ジャッキシステムを改良した。 これらの改良後、工場実験ならびに現場試行により土留めの解体は 12 分/1 段（1m）で可能なことを確認した。
<p>4. 深礎杭杭頭（孔外）での鉄筋籠組立・挿入システム</p> <ul style="list-style-type: none"> 鉄筋籠長さ 11m のシングル配筋で鉄筋組立装置や傾斜防止装置の改良や作業手順書の整備により、孔内で鉄筋を組み立てる従来施工を上回る 2 日以内の作業性を目指す。 	<ul style="list-style-type: none"> フープ筋マーキング機の開発により鉄筋組立の省力化と施工精度が向上することを確認した。 深礎杭の実施工現場において杭頭孔外で鉄筋組立が可能なことを確認した。従来の孔内作業では 2～3 日かかっていた鉄筋組立作業が 6 時間で完了し、本システムの施工効率も確認した。 鉄筋油圧クランプの開発により迅速・確実に鉄筋の受け替えが可能であることを確認した。
<p>5. 杭周面摩擦力</p> <ul style="list-style-type: none"> 本システムを用いた深礎杭の今後の合理的な設計に資すること 	<ul style="list-style-type: none"> 孔内載荷試験、パイプひずみ計による計測から孔壁周辺地盤の緩みを観測した。 変形係数の変化とひずみ計測より、本工法では設計上周面摩擦力を期待できること、その大きさは自然地盤で場所打ち杭の 85%、盛土や崖錐部では場所打ち杭の 50% 程度とすることが望ましいと考えられた。

(9) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
Japanese Geotechnical Society Special Publication Vol.5(2017) No.2, Development of unmanned caisson type pile installing system,	H29. 2. 1	地盤工学会	原、沢田、八嶋、宮澤、杉山、辻
地盤工学会第 51 回地盤工学研究発表会講演概要書、小口径深礎杭孔内無人化施工システム	H28. 9. 15	地盤工学会	荻谷、原、八嶋、沢田、曾我、辻、大高
基礎工 2016 年 12 月号、小口径深礎杭孔内無人化施工システムの開発	H28. 12. 15	総合土木研究所	原、沢田、八嶋、荻谷、宮澤、杉山、辻、大高

(10) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
平成 27 年度なし 平成 28 年度なし				

(11) 成果の実用化の見通し

本開発システムは、①遠隔操作掘削、②掘削土砂孔内無人化搬出、③杭頭での土留挿入・引抜き、④杭頭での鉄筋籠組立て挿入、⑤孔内無人化コンクリート締固めの 5 項目で構成されている。本システム全体で作業員を深礎杭孔内に入れずに深礎杭を構築するシステムではあるが、その副次的な成果として、いくつかのシステムを個別に従来工法へ活用することもでき、従来工法を省力化・効率化することも可能である。このうち、④杭頭での鉄筋籠組立挿入について、国土交通省飯田国道事務所管内における橋台基礎（深礎杭）の工事現場において試行的に実用化し、杭頭孔外で鉄筋籠を組み立てる実用性と効率性の確認を行った。また、山岳部の橋梁基礎はもとより、現在、関東から九州までの広い範囲で数百基におよぶ送電線鉄塔事業（基礎は深礎杭）が計画されている。東京電力管内の送電線事業を施工している(株)システックエンジニアリングにおいては、本システムの本格導入を目指して、土留工の挿入、鉄筋組立の杭頭組立の試験施工を実施し、本施工への採用のために更なる改良を進める予定である。さらに、本システムのパンフレットを作成し、ゼネコン等への広報にも努めている。

(12) その他

なし