３．硬質地盤に対応したオープンケーソン工法

－硬質地盤が掘削可能な水中掘削機の開発－

アーバンリング工法研究会　○ 小倉　剛
内山　敬二
本田　啓

１．はじめに

ケーソン工法は基礎工法の一種であり，ケーソンと言われる円形や矩形，小判形の筒状構造物を陸上に構築して所定の支持地盤まで沈設させ，基礎あるいは地下構造物を構築する工法である。ケーソン工法は，オープンケーソン工法とニューマチックケーソン工法に大別される。

オープンケーソン工法は，ケーソン内の地盤を大気中または水中においてグラブバケットなどにより掘削を行い，ケーソン自体の重量及び圧入アンカーによる沈下荷重を利用して沈設させるものである。

ニューマチックケーソン工法は，ケーソン下部に隔壁を設けて気密作業室をつくり，この中に圧縮空気を送り込み地下水の浸入を防ぎ，人力または専用機械により掘削を行い，ケーソン自体の重量及び気密作業室に発生する揚圧力を調整して沈設させるものである。

オープンケーソン工法は地下における有人作業はないので安全性に優れる一方，掘削地盤が硬質な場合，ケーソン刃口部の直下を掘削しないとケーソンを沈下できない。しかし，グラブバケットでは刃口部直下を直接掘削できないため，ケーソンを陸上に構築する前に地上から刃口部の硬質地盤を掘削の容易な砕石などに置き換える必要がある。そのため，オープンケーソン工法は平面形状や深度，対象地盤など適用範囲を限定されたり，硬質地盤の置換掘削の費用増加や工期の延長などの課題があった。この課題解決を目指し，新たな水中掘削機（**写真-1**）を開発した。

写真-1　硬質地盤対応水中掘削機

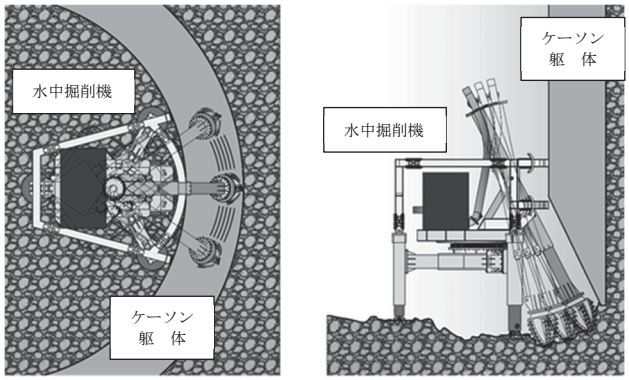

図-1　ケーソン刃口部掘削イメージ図

２．水中掘削機の概要

水中掘削機は，通常のグラブバケットなどにより直接掘削できない硬質地盤が出現した時に，地上部からクローラクレーンを用いて投入し，ケーソン刃口部直下の沈設に必要な範囲を掘削する（**図-1**）。

さらにケーソン刃口部直下だけではなく，ケーソン中心部の硬質地盤を先行削孔して緩めることによって，グラブバケットなどによる掘削作業の効率化を可能とする。そして，掘削土砂は水中掘削機に搭載された排土ポンプを使用してケーソン中心側に集めることによって，グラブバケットや水中サンドポンプなどを使用して地上への効率的な搬出を可能としている。

水中掘削機の概略仕様（**図-2**，**図-3**）は次のとおりである。

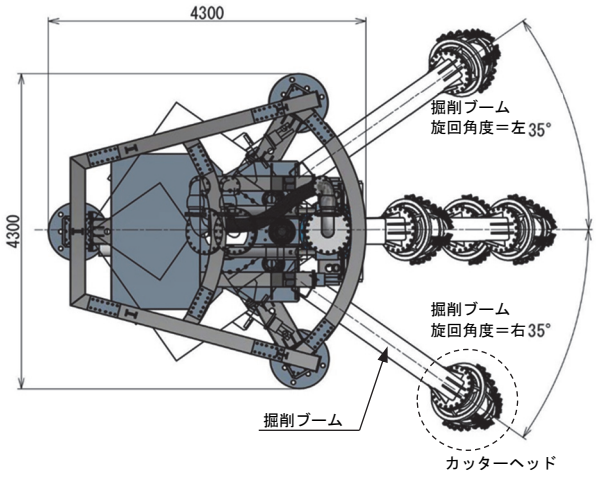

図-2　水中掘削機平面図

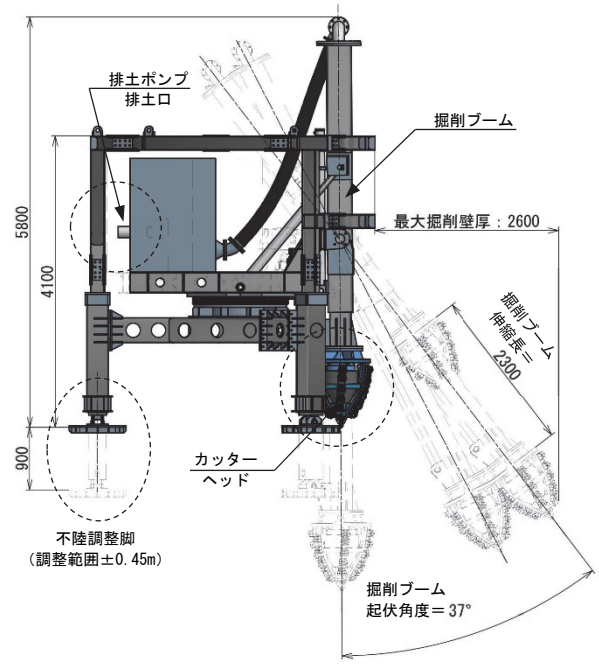

図-3　水中掘削機側面図

外　形　寸　法	：L4.3m×W4.3m×H5.8m
重　　量	：14.8ｔ（水中：約 13.0ｔ）
掘削ブーム旋回角度	：70°　（左右 35°）
掘削ブーム起伏角度	：最大 37°
掘削ブーム伸縮長	：2,300 ㎜
カッターサイズ	：φ945 ㎜×H1,110 ㎜
カッター回転数	：最大 60rpm
カッタートルク	：最大 8,000Nm
不陸調整範囲	：0.90m（±0.45m）
掘削可能壁厚	：最大 2,600 ㎜程度
使用可能水深	：100m

水中掘削機は，ケーソン立坑内の掘削位置に設置完了後，3 本の不陸調整脚（調整範囲±0.45m）で水中掘削機本体が水平になるようにレベル調整し，硬質地盤の掘削を開始する。

硬質地盤の掘削は初めにカッターヘッドを右回転または左回転（最大 60rpm）させる。次に掘削ブームを伸長（最長 2,300 ㎜）させ，掘削ブームを 0 度から徐々に倒し（最大 37 度），カッターヘッドを掘削位置に合わせる。そして，掘削ブームを左右に旋回（左右 35 度）させながら硬質地盤を掘削する。

掘削土砂は，水中掘削機に搭載された排土ポンプを使用してカッターヘッドから吸い込み，掘削ブーム内を通し水中掘削機後方へ排土する。

３．水中掘削機の特長

水中掘削機の主な特長は，以下のとおりである。

3.1　機動性に優れ，メンテナンスも容易

水中掘削機は，通常のケーソン工事に使用する掘削設備の一部であるクローラクレーンにより揚重，移動できるため，機動性に優れ，ケーソンの規模や平面形状に関係なく使用できる。

また，水中掘削機は掘削時の反力を自重により保持する機構であり，水中掘削機をケーソン本体に固定する必要はないため，グラブバケットによるケーソン内掘削に移行する時やメンテナンスの際の地上への引上げは容易である。

3.2　GNSS や各種センサーによる姿勢管理

水中掘削機の設置深度や平面位置，姿勢は，GNSS（測位衛星を利用した全世界測位システム）や水中掘削機に搭載された各種センサーの情報を遠隔操作室に集約し，遠隔操作モニタ画面（**図-4**）に表示して視覚的に把握することによって，精度よく掘削することを可能としている。遠隔操作モニタ画面には，画面左側に掘削ブームの旋回トルクやカッターヘッドの回転トルク，水中掘削機の姿勢，不陸調整脚の伸縮ストロークなど各種センサーや計測機器の出力値を表示する。そして，画面右側に水中掘削機の姿勢や掘削状況をグラフィックにより確認することができる。さらに，掘削深度は 10 ㎝ごとに色分け表示しているため，直感的に掘削状況を把握することもできる（**図-5**）。

また，高性能水中音響カメラなどを用いて，施工前や施工完了後の掘削状況を確認することも可能である。

3.3　硬質地盤に対応

硬質地盤が出現する地盤条件でのオープンケーソン工法は，刃口部直下は地上部から硬質地盤部まですべての深度において事前に砕石への置換えを必要としたが，出現した硬質地盤を直接掘削できるように硬質地盤を一軸圧縮強度 5.0N/㎜^{2} 程度と想定し，機械の設計及び製作を行った。

これにより，事前の置換えは不要となり、コストダウンと工期短縮を図ることができる。

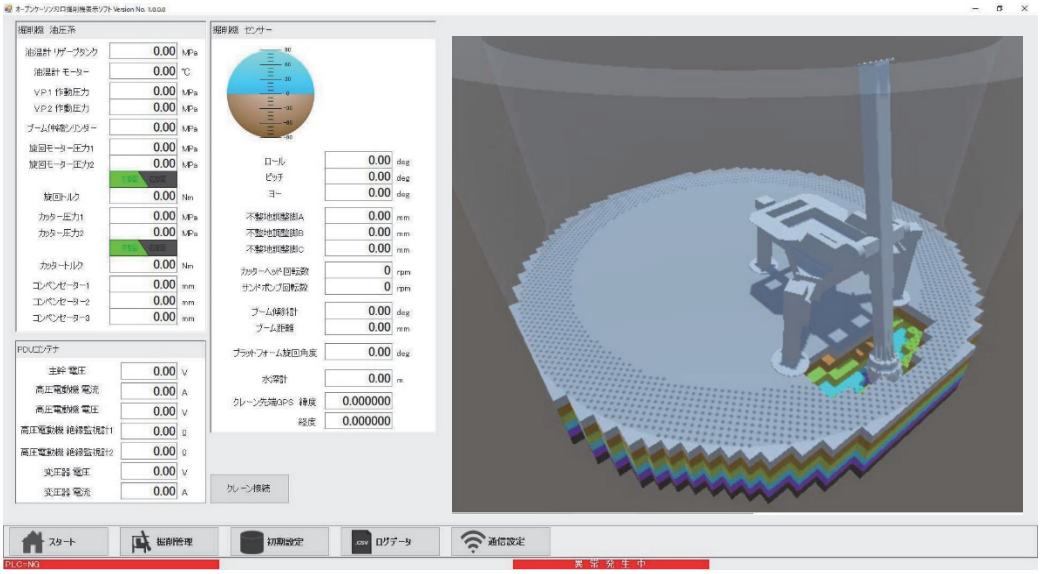

図-4　遠隔操作モニタ画面

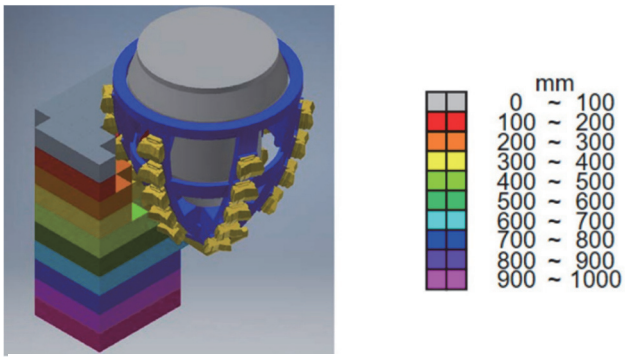

図-5　掘削深度表示モニタ画面拡大図

４．性能確認試験の実施

新規製作した水中掘削機が設計した動作や要求する能力を満たしているか確認する必要があるため，性能確認試験を実施した。性能確認試験は陸上（大気中）と水中の 2 回に分けて実施した。

4.1　陸上性能確認試験の確認項目と結果

陸上性能確認試験では，水中掘削機の基本的な動作である掘削ブームの旋回や起伏，伸縮，不陸調整脚の伸縮の確認，水中掘削機本体の安定性確認，掘削位置精度確認，事前に構築した模擬地盤（一軸圧縮強度 5.0N/㎜^{2} 程度）を用いた掘削能力確認を実施した。

試験項目は，以下に示す①～⑥を実施した。

①水中掘削機の吊重心位置の確認
②無負荷状態における各アクチュエータの動作及びセンサー作動の状況確認
③インターロックの作動可否確認
④水中掘削機本体を最大 3 度傾斜させた状態における安定性確認
⑤実掘削位置（＝カッターヘッド先端位置）と遠隔操作画面表示値の精度確認
⑥水中掘削機の掘削能力（旋回・起伏・伸縮・正転逆転）確認及びサイクル計測

試験項目①～③については，各アクチュエータ，各センサーやインターロックが設計どおり作動することを確認した。

試験項目④は，**写真-2** のように水中掘削機を最大 3 度傾斜させた状態においても安定的に掘削できることを確認した。

試験項目⑤は，掘削位置（＝カッターヘッド先端位置）の実測値と遠隔操作画面の表示値の比較による精度確認を実施し，最大誤差 19 ㎜以内であり，許容値 20 ㎜以内であることを確認した。

試験項目⑥は，試験ヤード内の L5.5m×W3.5m×H1.5m×3 箇所を掘削した後，設計強度 5.0N/㎜^{2} のエアモルタルを打設して模擬地盤を構築した。この模擬地盤を使用して水中掘削機の掘削能力（旋回・起伏・伸縮・正転逆転）確認を実施した結果，掘削ブームの旋回掘削による純掘削能力は 3～5m3/h であることを確認した。

模擬地盤を掘削している状況を**写真-3** に示す。

写真-2　水中掘削機安定性確認状況（3度傾斜）

写真-3　模擬地盤（qu=5.0N/mm2程度）掘削状況

4.2　水中性能確認試験の実施状況と実績

水中性能確認試験は陸上性能確認試験終了後，陸上性能確認試験に使用した模擬地盤を撤去，地盤を復旧して内径φ9.0m×高さ 9.3mの大型水槽を組み立てた。大型水槽内には，砕石を 1.0mの厚さに敷き均し，水槽天端から約 1.5m下がり（約 420 m^3）まで注水した。そして，水中掘削機を大型水槽内に投入し，水中掘削機に搭載された水中油圧ユニットを稼働させ，陸上性能確認試験により確認した動作確認と排土ポンプの作動確認を実施した。

試験項目は，以下に示す①～⑤を実施した。

①水中における水中掘削機の吊重心位置の確認
②水中油圧ユニットの稼働による無負荷状態における各アクチュエータの動作及びセンサー作動の状況確認
③水中油圧ユニットの稼働によるインターロックの作動可否確認
④水中掘削機本体を最大 3 度傾斜させた状態における安定性確認
⑤排土ポンプの作動状況確認

試験項目①～③は，水中掘削機に搭載された水中油圧ユニットを稼働させて実施したが，陸上性能確認試験と同様に各アクチュエータ，各センサーやインターロックが設計どおり作動することを確認した。

試験項目④は，水中において水中掘削機を最大 3 度傾斜させて動作確認を実施し，安定して稼働することを確認した。

写真-4 に大型水槽内への水中掘削機投入状況を示す。

試験項目⑤は，排土ポンプを作動させ掘削ブームを旋回と起伏，伸縮させて水槽底面に敷き均した砕石を掘削して作動状況を確認した。大型水槽内は強い水の濁りにより目視や光学カメラによる確認はできないため，濁水中においても可視化できる音響カメラや 3Dソナーを使用して確認作業を実施した。

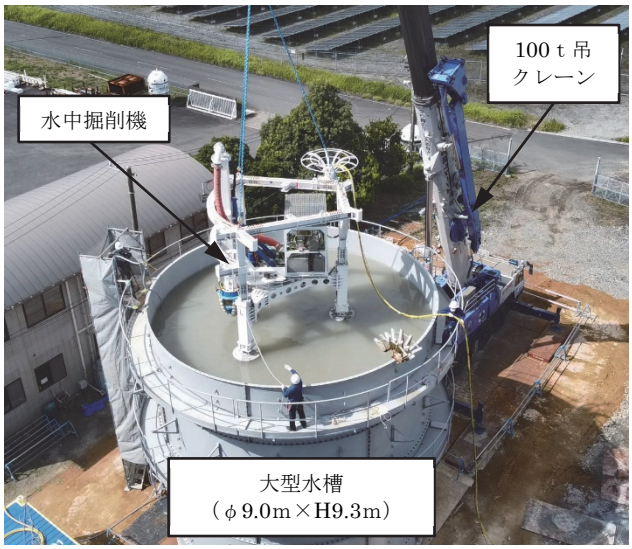

写真-4　大型水槽内へ水中掘削投入状況

水中掘削機の掘削ブームを左右35度旋回させながら，掘削ブームを 0 度から 37 度まで起伏させて連続的に掘削した後，3Dソナーによって撮影した結果を**図-6** に示す。掘削した跡は，ほぼ掘削ブームを旋回・起伏させた軌跡どおりの形状（そら豆ような形状）を確認した。そして，砕石を掘削したため掘削した跡は再び埋め戻されていることも考えられたが，掘削前の基準面に対し最大 30 cm程度掘り下げられ，排除された砕石は周りへ 30 cm程度の山となっていた。

5．現場への適用計画

通常のオープンケーソン工法に必要な建設機械は，ケーソンの組み立てやケーソンの圧入に必要となる圧入装置の組立解体，グラブバケットによる掘削作業などに必要な 100ｔ吊級クローラクレーン，掘削残土の搬出に必要な油圧ショベルとコンテナダンプである。

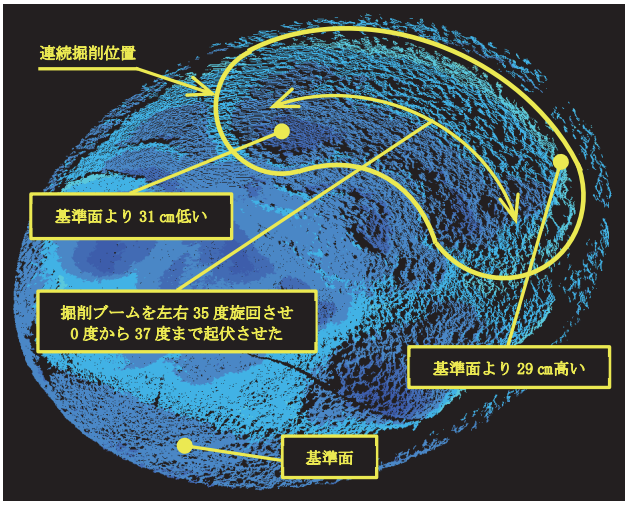

図-6　3Dソナー撮影による連続掘削状況図

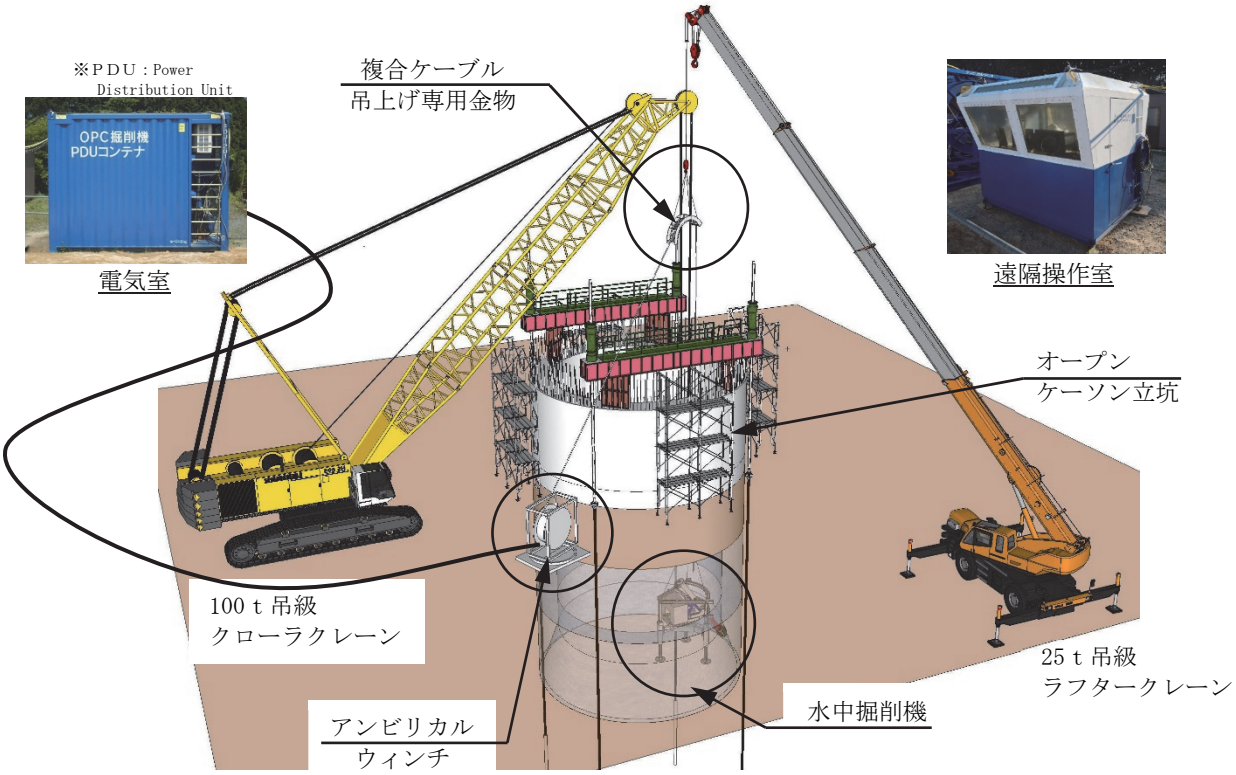

図-7　現場での資機材配置計画（案）

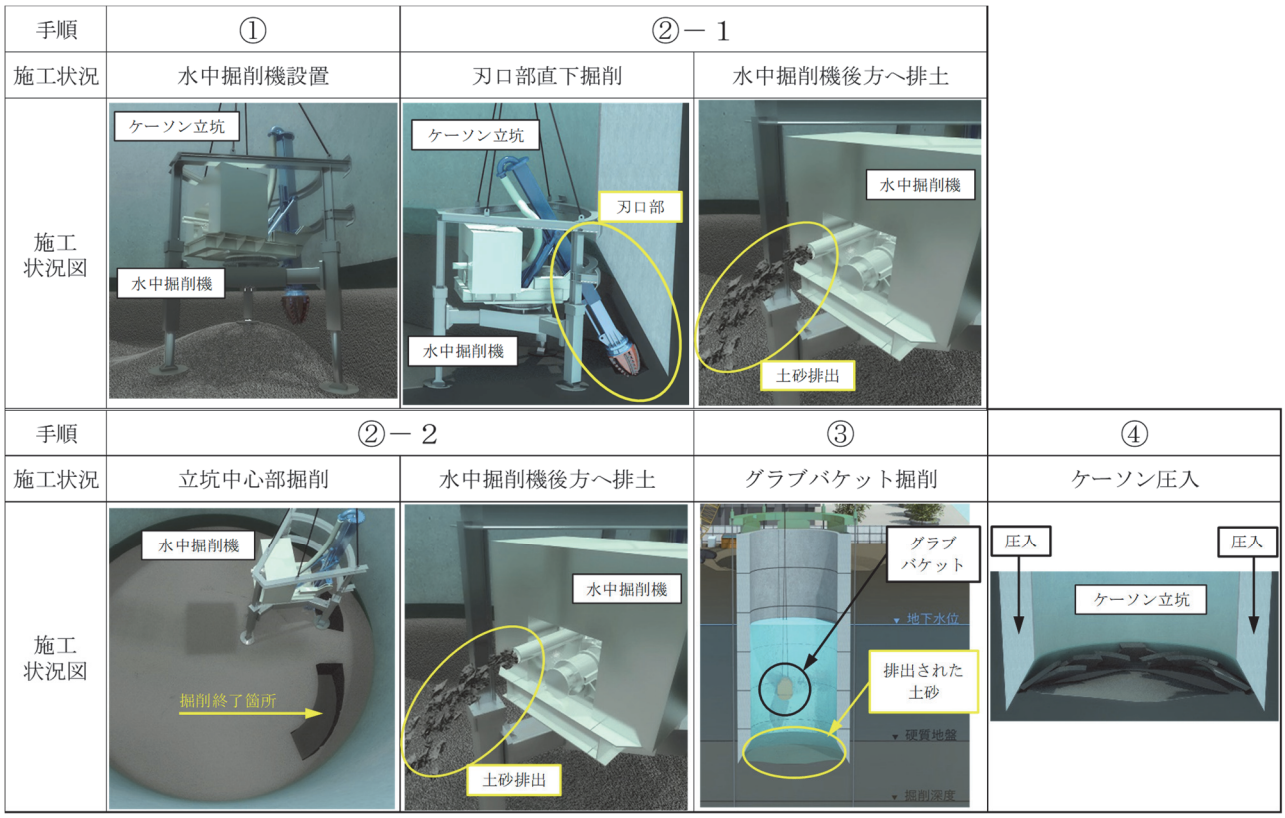

図-8　水中掘削機の施工手順

そして，硬質地盤が出現し水中掘削機を使用する場合，水中掘削機本体のほか電気室，電気室から水中掘削機へ電源供給するための複合ケーブルを巻き取るアンビリカルウィンチ，立坑上において複合ケーブルを吊り上げるための専用金物を吊る25ｔ吊級ラフタークレーンを必要とする。現場における資機材配置計画図を**図-7**に示す。

この水中掘削機はケーソン立坑深度 100m，ケ

ーソン刃口部の躯体壁厚約 2,600 ㎜まで掘削可能である。

水中掘削機のケーソン立坑内の掘削及びケーソン圧入の手順は次のとおりとなる。通常はグラブバケットによってケーソン立坑内を掘削するが，硬質地盤の出現によりケーソン刃口部直下，立坑中心部の掘削及びケーソン圧入も不可能となるため，水中掘削機を必要とする。水中掘削機の施工手順図を**図-8** に示す。

①100 t 吊級クローラクレーンにより水中掘削機を吊り込み，ケーソン立坑内に設置する。

②ケーソン刃口部直下（②-1）や立坑中心部（②-2）を掘削する。ケーソン立坑内において水中掘削機の移動・設置・掘削を繰り返し，ケーソン沈設に必要な範囲を掘削する。掘削した土砂は水中掘削機に搭載された排土ポンプにより，水中掘削機後方へ排出する。

③水中掘削機をケーソン立坑内から引上げる。100 t 吊級クローラクレーンはグラブバケットを吊り込み，ケーソン立坑内の中心側に排出された土砂を掘削し，立坑外へ排土する。

④グラブバケットによる掘削完了後，ケーソンの圧入を実施する。圧入完了後は再び手順①へ戻り，手順を繰り返す。

６．おわりに

今日，労働環境と環境負荷に対する制約は，これまでになく強まっている。たとえば，欧州においては洋上風力発電設備の建設から潜水作業を排除し，すべて ROV 作業に置き換えられている。これはヒトを危険作業に従事させないという社会の意思を請負契約として具現化したものである。立坑や基礎の建設も例外ではない。世界最大のシールドマシンメーカーである Herrenknecht 社は，オープンケーソン工法を念頭に全自動・無人・岩盤対応可能の掘削構築システムを商品化し，安全・高速・環境負荷ゼロを前面に出して世界に事業展開している。

欧米におけるこの傾向は徹底的かつ圧倒的であり，かつて日本の建設業界は同様の経験をしている。1960 年代，日本ではいまだ人力掘削作業を主流としていた頃，フランスのポクレン社からパワーショベルを導入し，建設現場の様子は一変した。そのころは，ポクレンという固有名詞はパワーショベルを意味する普通名詞として使われるほどであった。1970 年代に日本国内において小型のディーゼルエンジンや油圧ポンプの製造を始めて，都市部の狭隘な現場においても国産の油圧パワーショベルが活躍するようになった。

今回の当研究会において開発した硬質地盤を掘削可能な水中掘削機は，上記のポクレンにも相当すると考えている。今後，当研究会は水中掘削機の現場適用を繰り返すとともに，オープンケーソン工法に係わる周辺技術開発や水中掘削機の軽量化・コンパクト化などをさらに図っていく所存である。

当研究会の活動によって，特殊環境における有人作業を排除した安全性に優れるオープンケーソン工法の適用範囲は確実に広がっていくものと考えている。

参考文献

1) 小倉　剛・内山　敬二・本田　啓：硬質地盤の沈下掘削を可能とする水中掘削機の開発, 建設機械施工, 通巻852号，pp.42～49, 2021年