

硬質地盤の沈下掘削を可能とする水中掘削機の開発

小倉 剛・内山 敬二・本田 啓

オープンケーソン工法は、硬質地盤に対して通常のグラブバケットによる掘削は難しいため、先行削孔などの補助工法を併用する必要があるが、補助工法併用による費用の増加や工期の延長など課題があった。

アーバンリング工法研究会はこの課題解決を目指すため、通常のグラブバケットによる直接掘削が難しい硬質地盤の出現とともにケーソン内に投入し、ケーソン刃口部直下のケーソン沈設に必要な範囲を掘削する新たな水中掘削機を開発した。本稿では水中掘削機の特長、性能確認試験結果及び現場への適用計画について報告する。

キーワード：基礎、大深度地下、ケーソン、硬質地盤、水中、掘削機

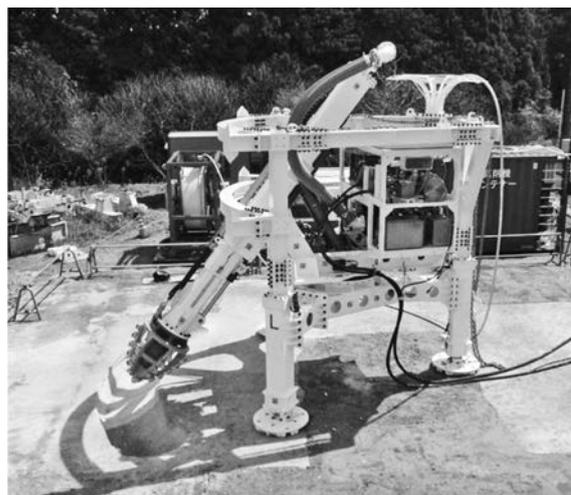
1. はじめに

ケーソン工法は基礎工法の一つであり、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、大きく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く安全性に優れる一方、掘削地盤が硬質の場合、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、グラブバケットをケーソンに接触させて、ケーソン自体を破損させるおそれがあることから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碎石などに置き換える必要があった。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



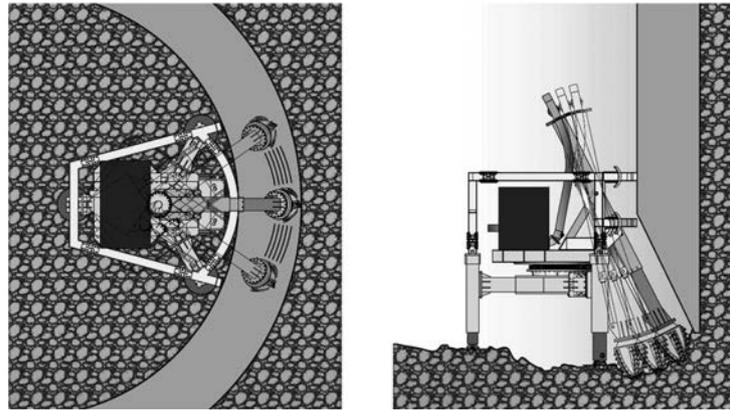
写真—1 硬質地盤対応水中掘削機

決を目指し、新たな水中掘削機(写真—1)を開発した。

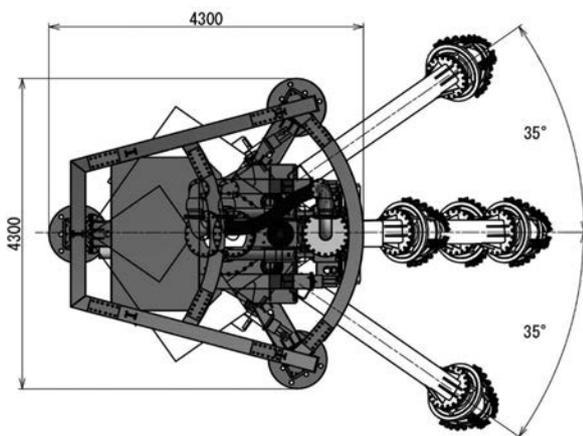
2. 水中掘削機の概要

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により吊り下げ投入し、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り、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り、グラブバケットや水中サンドポンプなどを使用し



図一 ケーソン刃口部掘削イメージ図



図二 水中掘削機平面図

- 外形寸法 : L4.3 m × W4.3 m × H5.8 m
- 重量 : 14.8 t (水中: 約 13.0 t)
- 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 mm
- カッターサイズ : φ 945 mm × H1,110 mm
- カッター回転数 : 最大 60 rpm
- カッタートルク : 最大 8,000 Nm
- 不陸調整範囲 : 0.90 m (±0.45 m)
- 掘削可能壁厚 : 最大 2,600 mm 程度
- 使用可能水深 : 100 m

3. 水中掘削機の特長

水中掘削機的主要な特長は、以下のとおりである。

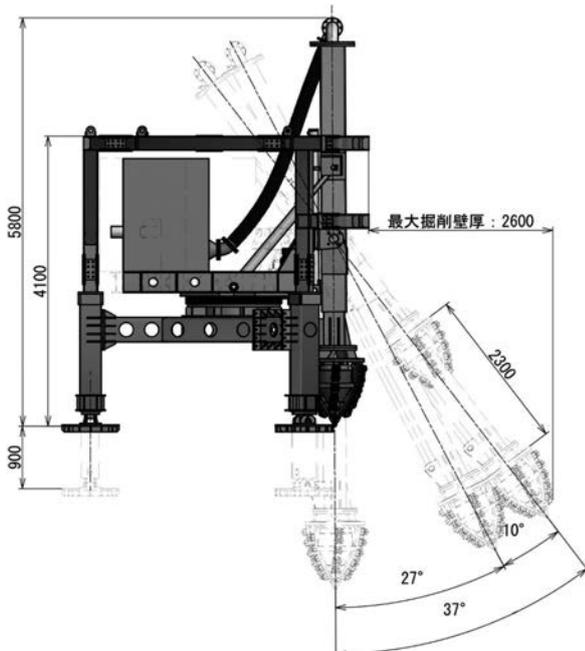
(1) 機動性に優れ、メンテナンスも容易

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。

(2) GNSS や各種センサーによる姿勢管理

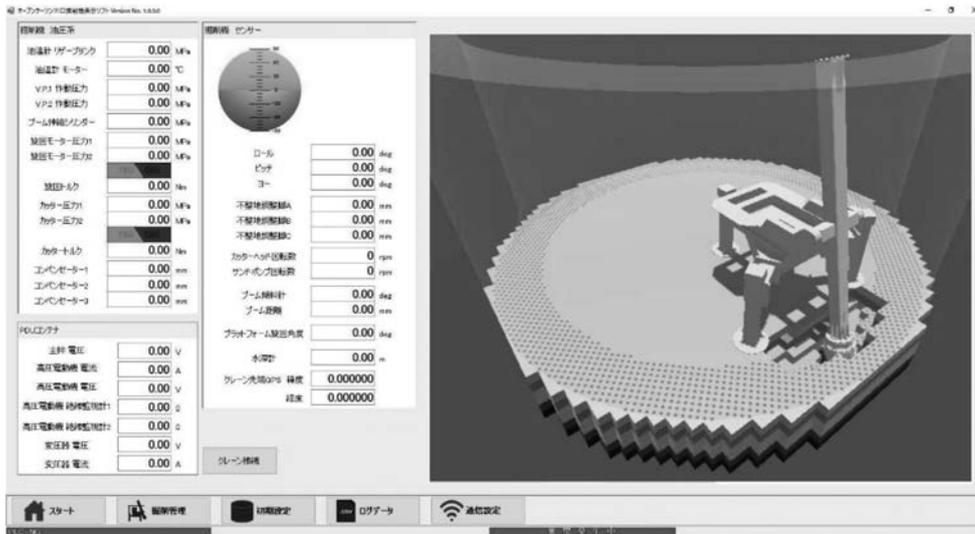
水中掘削機の設置深度や平面位置、姿勢は、GNSS (測位衛星を利用した全世界測位システム) や水中掘削機に搭載された各種センサーの情報を遠隔操作室に集約し、遠隔操作モニタ画面 (図一4) に表示して視覚的に把握することにより、精度よく掘削することを可能としている。遠隔操作モニタ画面には、画面左側



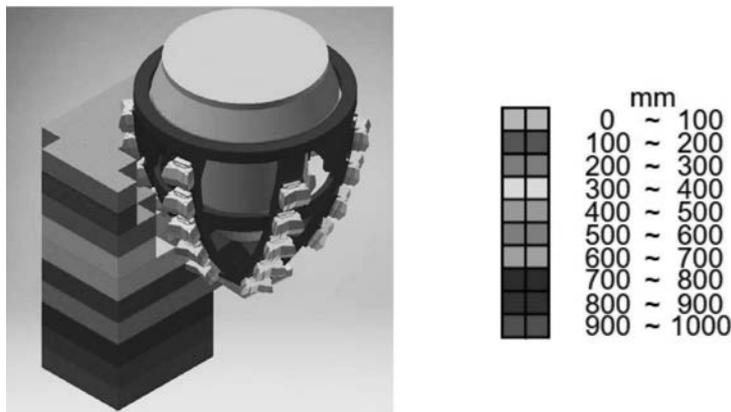
図三 水中掘削機側面図

で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 (図一2, 3) は以下のとおりである。



図一4 遠隔操作モニタ画面



図一5 掘削深度表示モニタ画面拡大図

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として確認することができる。さらに、掘削深度は10 cm ごとに色分けしているため、色により把握することもできる(図一5)。

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) 硬質地盤対応とコストダウン

水中掘削機に用いるカッターヘッドは、一軸圧縮強度 5.0 N/mm^2 程度の硬質地盤を掘削できるように設計及び製作した。そして、設計した水中掘削機の動作や要求する能力を満たしているか確認するため、2020年3月から性能確認試験を実施した。

この性能確認試験により水中掘削機の安定性や一軸圧縮強度 5.0 N/mm^2 程度の硬質地盤を掘削できるこ

と、水中において設計どおり稼働することなどを確認することができた。

これまで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碎石への置換えを必要としたが、水中掘削機を使用することによって置換えは不要となるため、コストダウンと工期短縮を図ることができる。

4. 性能確認試験の実施

性能確認試験は、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ため実施した。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。

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、模擬地盤(一軸圧縮強度 5.0 N/mm^2 程度)を用いた掘削能力確認を実施した。

水中性能確認試験では内径φ9.0 m×高さ 9.3 m の大型水槽を組み立て、水中掘削機を大型水槽内に投入して実施した。そして、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。

この性能確認試験を実施した結果、水中掘削機は設計したとおり一軸圧縮強度 5.0 N/mm² 程度の硬質地盤を掘削可能であり、水中油圧ユニットや排土ポンプを安定的に作動できることを確認した。

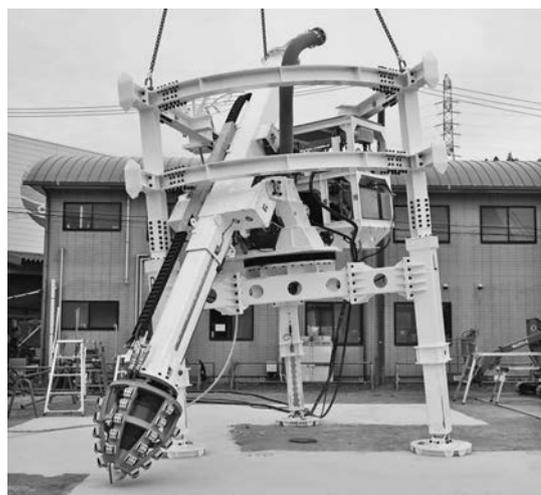
(1) 陸上性能確認試験の確認項目と結果

陸上性能試験は事前に模擬地盤を 3 箇所構築し、水中掘削機と 80 t 吊級クレーンを図一 6 陸上性能試験状況図のように配置して、以下に示す①～⑥試験項目を実施した。

- ①水中掘削機の吊重心位置の確認
- ②無負荷状態での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は、各アクチュエータが設計どおり動作すること、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、写真一 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作業が

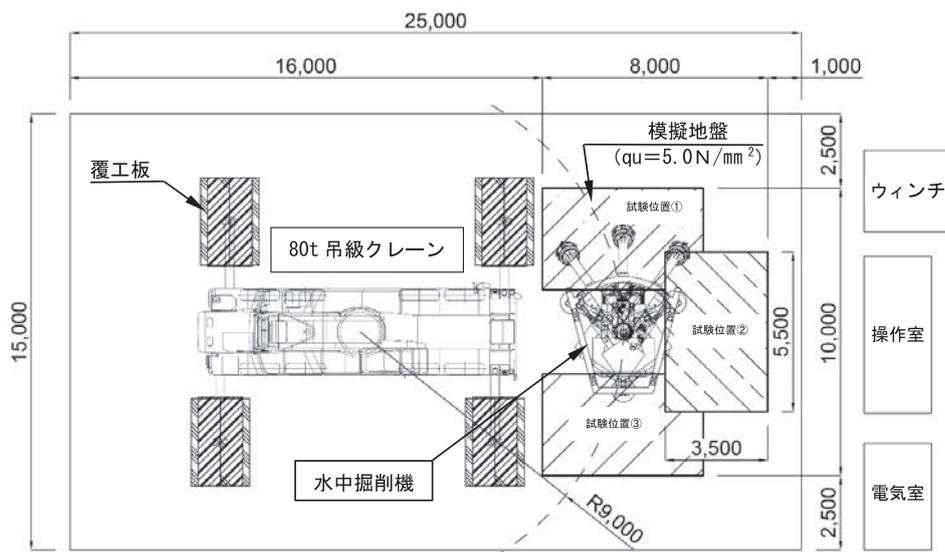


写真一 2 水中掘削機安定性確認状況 (3 度傾斜)

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 7 回実施したが、表一 1 のとおり最大誤差 19 mm 以内であり、許容値 20 mm 以内であることを確認した。

試験項目⑥は、初めに試験ヤード内の L5.5 m×W3.5 m×H1.5 m×3 箇所を掘削した後、設計強度 $q_u = 5.0 \text{ N/mm}^2$ のエアモルタルを打設して模擬地盤を構築した。図一 7 にエアモルタルの一軸圧縮強度試験報告書を示す。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 3～5 m³/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一 3 に示す。



図一 6 陸上性能試験状況図

表一 掘削位置精度確認結果一覧表

試験回数	水中掘削機の掘削ブーム姿勢状況			項目	掘削位置座標 (カッターヘッド先端位置)		
	旋回角度	起伏角度	伸縮長		Z軸	X軸	Y軸
					実測値	遠隔操作画面表示値	差 (実測-表示)
1	0度	0度	0mm	実測値	1,400 mm	0 mm	148 mm
				遠隔操作画面表示値	1,396 mm	0 mm	150 mm
				差 (実測-表示)	4 mm	0 mm	-2 mm
2	0度	10度	0mm	実測値	1,849 mm	0 mm	193 mm
				遠隔操作画面表示値	1,847 mm	0 mm	190 mm
				差 (実測-表示)	2 mm	0 mm	3 mm
3	0度	20度	0mm	実測値	2,284 mm	0 mm	308 mm
				遠隔操作画面表示値	2,280 mm	0 mm	306 mm
				差 (実測-表示)	-4 mm	0 mm	-2 mm
4	0度	30度	0mm	実測値	2,690 mm	0 mm	496 mm
				遠隔操作画面表示値	2,682 mm	0 mm	493 mm
				差 (実測-表示)	8 mm	0 mm	3 mm
5	0度	37度	0mm	実測値	2,994 mm	0 mm	702 mm
				遠隔操作画面表示値	2,990 mm	0 mm	701 mm
				差 (実測-表示)	4 mm	0 mm	1 mm
6	右旋回 35度	37度	662mm	実測値	2,810 mm	1,912 mm	173 mm
				遠隔操作画面表示値	2,799 mm	1,918 mm	173 mm
				差 (実測-表示)	11 mm	-6 mm	0 mm
7	左旋回 35度	37度	662mm	実測値	2,743 mm	-2,012 mm	173 mm
				遠隔操作画面表示値	2,753 mm	-1,993 mm	182 mm
				差 (実測-表示)	-10 mm	-19 mm	-9 mm



写真一 3 模擬地盤 (qu=5.0 N/mm²程度) 掘削状況

(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、掘削能力の確認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、底部に砂を0.25mの厚さに敷き均し、その上に0~40mmの碎石を1.0mの厚さに敷き均し、水槽天端から約1.5m下がり(約420m³)まで注水した。その後、水中掘削機と100t吊級クレーンを図一8水中性能試験状況図のように配置して、以下に示す①~⑤試験項目を実施した。

- 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での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、陸上性能試験と同様に各アクチュエータが設計どおり動作したこと、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。また、試験項目④も水中で水中掘削機を最大3度傾斜させた状態において動作確認を実施し、安定して稼働することを確認した。

写真一4に大型水槽内への水中掘削機投入状況を示す。

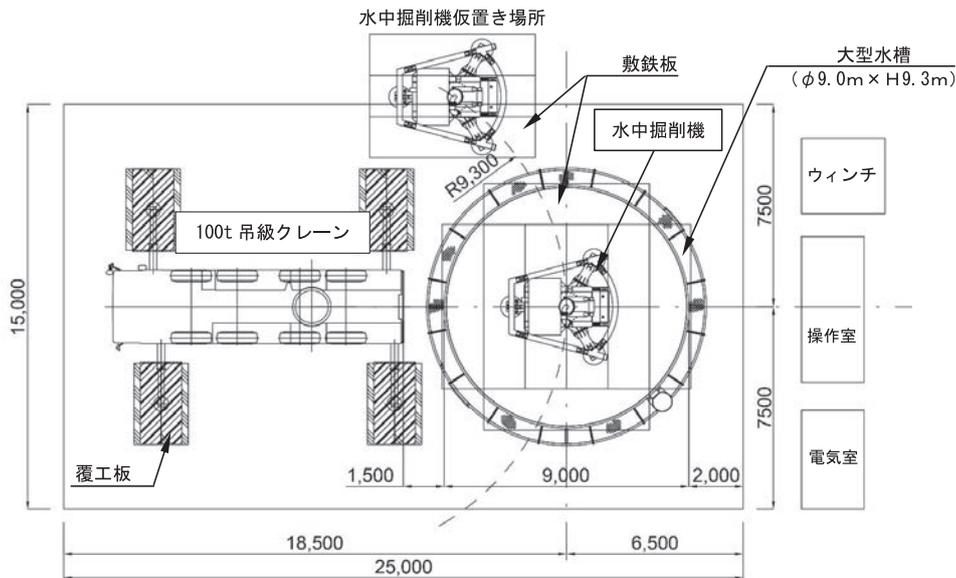
試験項目⑤は、排土ポンプを作動させ掘削ブームを旋回と起伏、伸縮させて水槽底面に敷き均した碎石を掘削して作動状況を確認した。大型水槽内は強い水の濁りにより目視や光学カメラによる確認はできないため、濁水中においても可視化できる音響カメラや3D

試験報告書

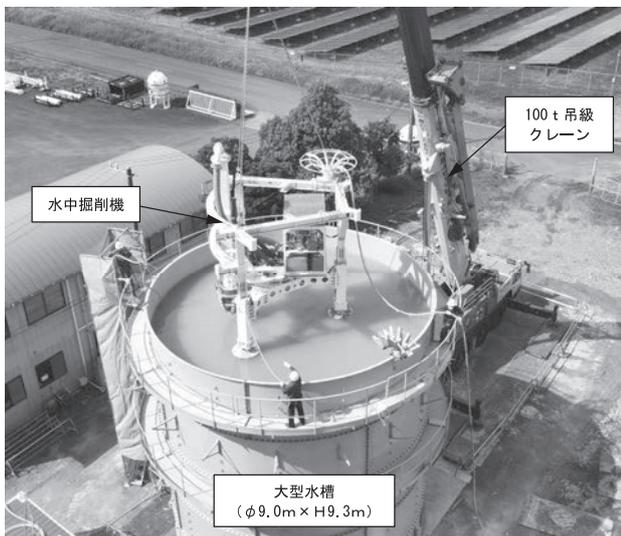
2020年3月30日
株式会社
福岡支店 試験室

試験名称	一軸圧縮強度試験					
元請名						
工事名称	オープンケーソン高度化技術開発性能確認試験用エアモルタル造成業務					
配合	セメント (kg)	細骨材 (kg)	減水剤 (kg)	起剤 (kg)	28日圧縮強度 (N/mm ²)	
	425	425	270	1.42	5.0以上	
供試体	名称	エアモルタル				
	供試体作成日	2020年3月2日				
	試験日	2020年3月30日				
	材 質	28日				
	寸 法	φ10×20cm				
数	5本					
試験結果						
番号	1	2	3	4	5	平均
圧縮強度 (N/mm ²)	5.68	5.32	5.84	5.30	5.13	5.45
試験場所	福岡県糟屋郡		TEL (092) 932-	FAX (092) 932-		
記述						

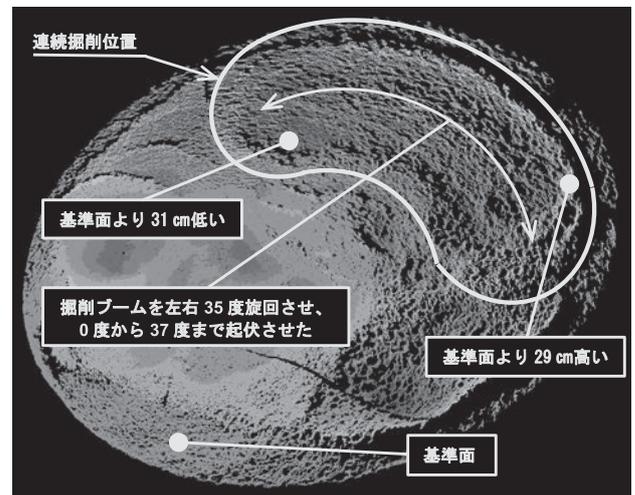
図一 7 エアモルタル一軸圧縮強度試験報告書



図一 8 水中性能試験状況図



写真一 4 大型水槽内へ水中掘削機投入状況



図一 9 3D ソナー撮影による連続掘削状況図

ソナーを使用して確認作業を実施した。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結果を 3D ソナーによって撮影した結果を図一 9 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（そら豆のような形状）が確認できた。そして、掘削した跡は碎石を掘削したため埋め戻されていることも考えられるが、掘削前の基準面に対し最大 30 cm 程度掘り下げられ、排除された碎石は周りへ 30 cm 程度の山となっていた。

5. 現場への適用計画

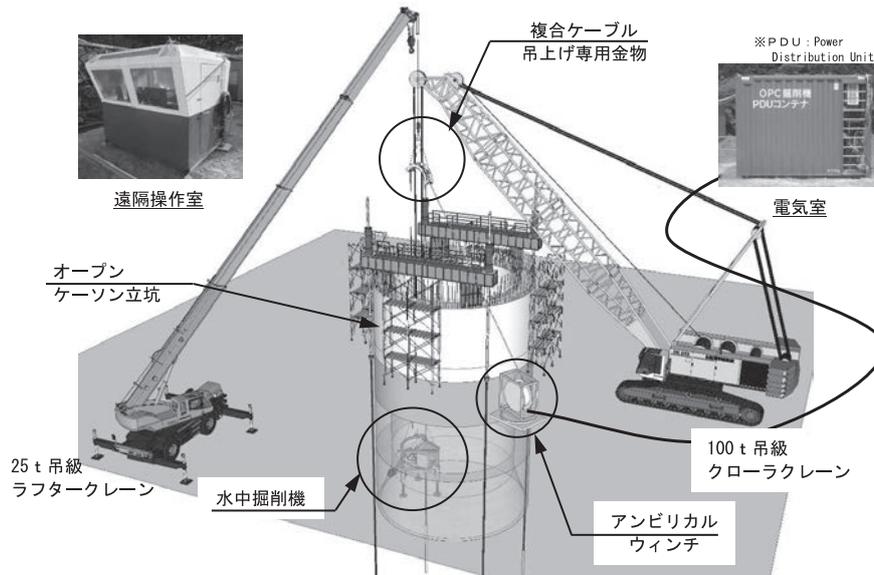
通常のオープンケーソン工法に必要な建設機械は、ケーソンの組み立てやケーソンの圧入に必要な圧

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 100 t 吊級クレーン、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。

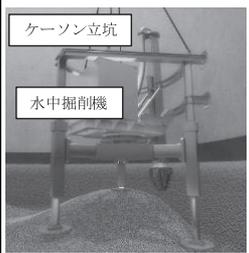
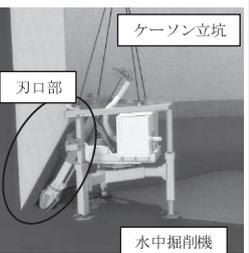
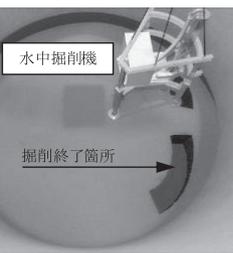
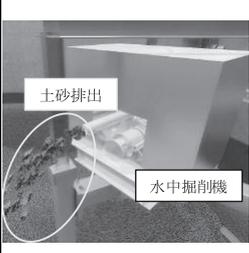
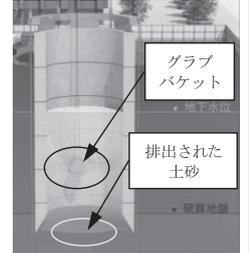
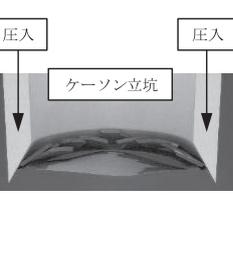
そして、硬質地盤が出現し水中掘削機を使用する場合、水中掘削機本体のほか電気室、電気室から水中掘削機へ電源供給するための複合ケーブルを巻き取るアンビリカルウィンチ、立坑上で複合ケーブルを吊り上げるための専用金物を吊る 25 t 吊級ラフタークレーンを必要とする。現場における資機材配置計画図を図一 10 に示す。

この水中掘削機はケーソン立坑深度 100 m、ケーソン刃口部の躯体壁厚約 2,600 mm 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



図一 10 現場での資機材配置計画 (案)

手順	①	②	
施工状況	水中掘削機設置	刃口部直下掘削	立坑中心部掘削
施工状況図			
手順	②	③	④
施工状況	立坑中心部へ排土	グラブバケット掘削	ケーソン圧入
施工状況図			

図一 11 水中掘削機の施工手順

ケーソン圧入も不可能となるため、水中掘削機の使用となる。水中掘削機の施工手順図を図一 11 に示す。

- ① 100 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や立坑中心部を掘削する。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、立坑内の中心部側へ排出する。

- 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部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。

最後に水中掘削機は、関西地方の橋梁基礎への適用を予定しており、適用結果は順次公開する予定であ

る。また、その他にも複数の問合せもあり、それらについても適用結果を可能な限り公開する予定である。

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。それを商機と捉えてか、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・岩盤対応可能な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しており圧倒的だが、日本の建設業界はかつて同様の経験をしている。すなわち、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を製造可能となり、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。

今回の当研究会により開発した硬質地盤対応水中掘削機は、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。それによって、特殊環境における有人作業を排除して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。

JICMA

【筆者紹介】

小倉 剛 (おぐら つよし)
アーバンリング工法研究会
技術委員



内山 敬二 (うちやま けいじ)
アーバンリング工法研究会
技術委員



本田 啓 (ほんだ けい)
アーバンリング工法研究会
技術委員

