

情報化施工を活用した大口径・大深度立坑における効率的な水中掘削技術

自動化オープンケーソン工法による大口径・大深度オープンケーソンの施工

秋田 満留

オープンケーソン工法は施工方法がシンプルかつ経済的な工法で、最大の特徴は、ケーソン内に外水位と同程度の水を張った状態で水中掘削することである。しかしながら、水中掘削は定量的な施工管理が難しく、ケーソン深度が深くなるほど安定した掘削揚土量やケーソン沈下量が得られなくなる。また、沈下抵抗となるケーソン刃先下の地盤を直接掘削できないことから硬質地盤での適用が難しいなどの課題もあった。自動化オープンケーソン工法（SOCS；Super Open Caisson System）は、このオープンケーソン工法に水中ロボットの水中掘削機や、水中下での確実な掘削揚土管理を行えるシステムを導入したもので、これら水中掘削技術について紹介する。

キーワード：ケーソン、立坑、基礎、大口径、大深度、水中掘削、情報化施工

1. はじめに

高齢化社会の到来が進む中、安全な社会の創造や多様化する生活様式への対応のため、質の高い社会資本の効率的な整備が強く望まれている。特に東京、大阪、名古屋などの都市部では、新しいインフラ整備や災害に強いライフライン再構築を効率的に行うため、「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」の制定以降、大深度地下開発が活発になっている。

自動化オープンケーソン工法（以下；本工法）は、地下へのアプローチである大口径・大深度の立坑や基礎を施工可能な技術で、建設事業における技能労働者不足や高齢化に対処し、ロボット化の推進と作業環境の改善策の一つとして当時の建設省総合技術開発プロジェクトにおいて、建設省土木研究所、（財）先端建設技術センター、民間会社の共同研究で開発された。

本工法最大の特長は無人化（遠隔操作）で高水圧（1.2 MPa）対応が図られた水中掘削機の導入で、従来は困難であったケーソン刃先直下の地盤を直接掘削・除去できる。これにより、硬質地盤でのオープンケーソン施工を可能にすると共に、大深度施工においても高精度で計画的な施工が行えるようになった。

本工法は、平成8年に霞ヶ浦導水事業の立坑工事に採用されて以来、施工の確実性、品質、安全性や省人化に対し発注者から高い信頼を得て、深度50m程度の大口径・大深度立坑を中心に施工実績を積み重ねた。その中には、オープンケーソンとして我が国で最

大級となる外径φ35mの雨水調節池や、深度73.5mに及ぶ取水立坑がある。

2. 工法概要

本工法は、①掘削揚土システム、②沈下管理システムで構成され、施工条件に応じてシステム単独あるいは2つを組み合わせで使用される。本工法の概要図を図1に示す。

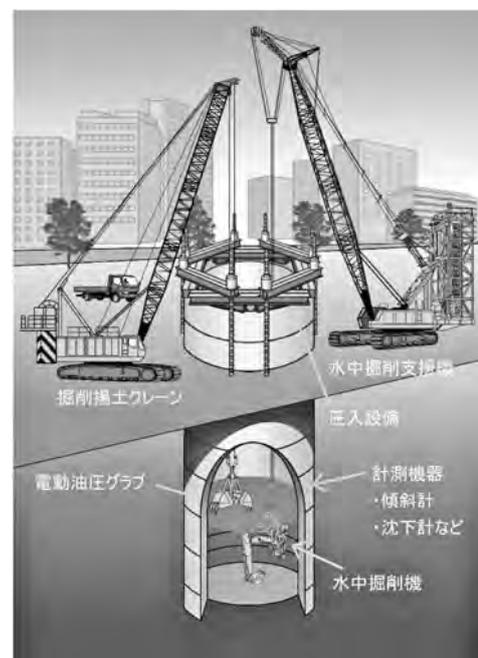


図1 自動化オープンケーソン工法概要図

(1) 掘削揚土システム

本システムは、水中掘削機と水中掘削支援機（ベスマシン：120t吊級クローラクレーン）、並びに掘削揚土クレーンと水中施工のための掘削揚土支援システムで構成されている。各機械の役割を以下に示す。

(a) 水中掘削機

水中掘削機(写真—1,2)はバックホウ型の機械で、地上運転室からの遠隔操作でケーソン刃先直上の躯体内壁に設置した走行レール上を水平方向に走行・停止する。走行レールを把持して掘削反力を確保し、ケーソン刃先下3.5～5.0mの範囲の地盤を直接掘削する。掘削した土砂はケーソン中央付近に放土し、掘削揚土クレーンでケーソン内から搬出される。



写真—1 水中掘削機 全景



写真—2 ケーソン刃先付近での掘削・放土状況

開発当初は走行・把持機構の構造上、曲率一定の円形断面ケーソンのみ施工可能であったが、走行・把持機構の改良で直線部や曲線部を組み合わせた走行レールに対応し、矩形や小判形等の断面への適用も可能になった(写真—3)。また、止水Oリングの見直しや細部にわたる構造改良で耐水圧は1.20MPa(水深120m相当)に、掘削力は従来機に比べ1.1～1.2倍に性能向上している。なお、適用可能なケーソン側壁厚は、大



写真—3 直線部と曲線部を組み合わせた走行レール

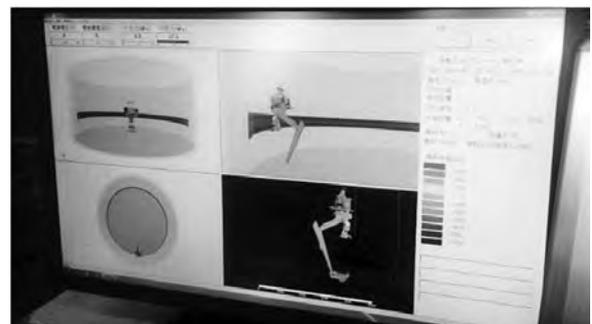
深度における構造部材厚と水中掘削機の大きさ・質量等のバランスを考慮して最大3.5mである(表—1)。

水中掘削機の稼働状況は、ブーム・アーム・バケットの各シリンダストローク量からバケット通過軌跡を座標演算し、地上運転室のモニターにCGでリアルタイム表示して管理している。同時に「情報化施工による見える化」を推進することにより、沈下掘削中の傾斜精度を管理する上で重要なケーソン刃先下地盤の掘削量を三次元表示し、刃先下全体での掘削状況をひと目で確認できるように工夫している(写真—4)。

上記以外には、電圧・電流値、油圧値・油温、電動機稼働音等をモニタリングして地上運転室で一元管理

表—1 水中掘削機諸元

水中掘削機(ガイドレール式水中バックホウ) 仕様	
全 幅	2,810 mm
全 高	待機姿勢時 6,922 mm
奥 行	4,500 mm
待避姿勢時/バケット高さ	刃口より 988mm(ロングブーム装着時)
質 量	18,100 kg
走行速度	水平方向(直線部, 曲線部) 70 mm/sec
掘削方法	遠隔操作式手動掘削
施工可能な側壁厚	最大3.5 m(水中掘削機の刃先下掘削範囲5 m)
耐水圧	1.20 MPa(水深120mのケーソンに対応可能)
掘削精度	ケーソン中央部 ±200 mm
	ケーソン刃先部(上下・半径方向) ±100 mm
アタッチメント	バケット(広幅, 中幅, 狭幅), リッパ, 刃先清掃ブラシ
バケット容量	山積0.55 m ³ (広幅)→山積0.23 m ³ (狭幅)
電動機型式	油浸型海中電動機(出力75 kW/1,750 rpm)
油圧ポンプ型式	可変容量型ピストンポンプ(最高圧力325 kgf/cm ²)
操作卓, 電力制御盤	据え置き型(地上運転室に設置)



写真—4 水中掘削機運転モニター



写真一5 ケーソン刃先下の1.6mの転石除去例

することで、機械故障の早期発見やケーソン刃先下支障物の検知と除去を行っている（写真一5、バケット通過軌跡や、油圧値等の変動・負荷状況により転石等の支障物を検知する）。

(b) 水中掘削支援機

水中掘削支援機は120～150t吊級クローラクレーンをベースマシンとし、水中掘削機用の電力ケーブルや制御ケーブル用のケーブルリールを追加で装備している（写真一6）。



写真一6 水中掘削支援機

水中掘削支援機の役割は、以下の通りである。

- ①水中掘削機の地上への引き上げ機能（躯体構築時、点検時、故障時等に地上に引き上げ）
- ②水中掘削機のケーソン内への投入機能
- ③電力・制御ケーブルの送り出し、巻き取り及びケーブルの緊張力管理機能

(c) 掘削揚土クレーンと掘削揚土支援システム

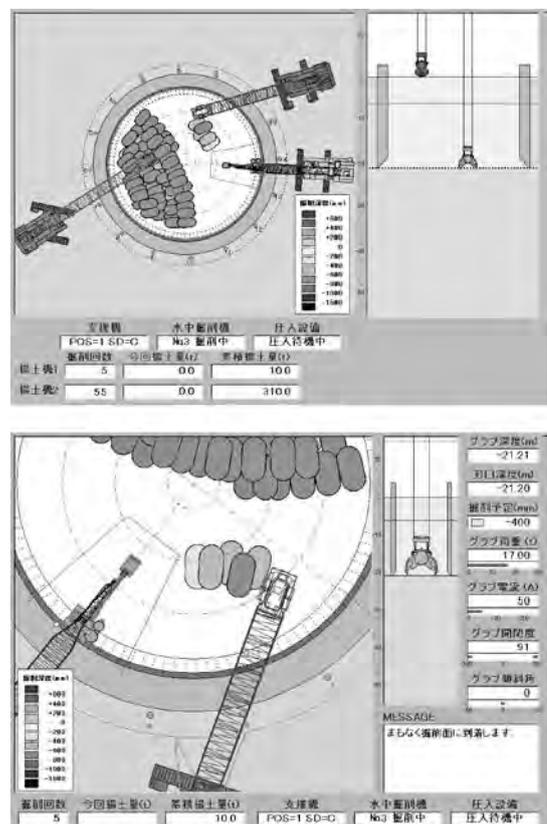
通常のオープンケーソンの掘削揚土は、クローラクレーンにドレッジャーバケット等を装備し、水面下での土砂掘み作業を行う。しかしながら、合図者による掘削位置指示では掘削面状況（バケットの平面位置・深度、土砂掘み量）を定量的に管理できないという課

題があった。特にバケット揚程作業や地盤へのバケット爪の貫入、開閉度合い等はオペレータの技量と経験に頼るところが大きく、作業効率に大きく影響していた。本工法では、水中施工の大深度ケーソンにおいても効率かつ安全・確実に施工可能な掘削揚土支援システムを開発し、前述の課題をクリアしている。

掘削揚土支援システムは、クローラクレーンに旋回角度・起伏角度・ワイヤー送り出し量センサー、荷重センサー等を設置する（表一2）。これら信号データとケーソン刃先深度データをあわせてバケット位置を座標演算し、クレーン運転室と圧入管理室に設置したモニター上に掘削揚土の平面位置・深度等をリアルタイム表示することで、合図者なしでの施工管理を実現した。図一2にある俵形図形がバケットにより掘削

表一2 掘削揚土支援システム諸元

掘削揚土支援システム 仕様(ドレッジャーバケット使用時事例)		
検出器	旋回角度	ロータリーエンコーダ(絶対値型12ビット)
	起伏角度	ポテンショメータ(温度補償型10KΩ)
	主巻ドラム回転量	磁気スケール(分解能0.45°)
	補巻ドラム回転量	同上
	主巻+補巻荷重	引張式ロードセル(クレーン装備)
	補巻荷重	ピンロードセル(最大荷重15t)
表示器	15インチ液晶ディスプレイ(クレーン運転室と圧入管理室に設置)	
音声出力	音声合成ユニット	
制御盤	寸法1,200x600x600	
電源	DC24V 20A(クレーンより供給)	



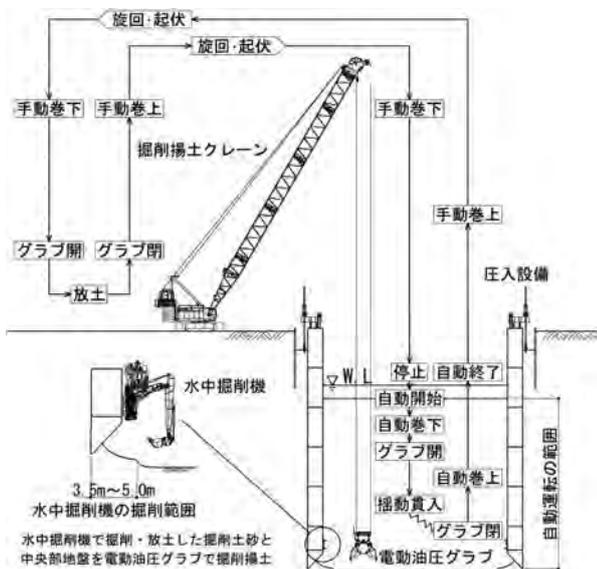
図一2 掘削揚土支援システムモニター

揚土した平面位置で、深度はケーソン刃先からの距離に応じて色分け表示される。また、バケットに対しては侵入禁止エリアを設定し、水中掘削機や走行レール、ケーソン側壁等との接触防止が図られている。

本工法では、掘削揚土用バケットとしてドレッジバケットの他に電動油圧グラブ（容量3m³、自重15t）も使用可能で、高水圧・硬質地盤の大口径・大深度ケーソン施工に対応している（写真一7）。これは、従来のワイヤーによるバケット開閉動作を油圧で行うグラブバケットで、硬質地盤ではグラブバケットを小刻みに開閉して爪を貫入させる揺動貫入掘削により効率的に掘削揚土できる。加えて、電動油圧グラブ用の掘削揚土支援システムでは、グラブの巻上げ下



写真一7 掘削揚土クレーンと電動油圧グラブ



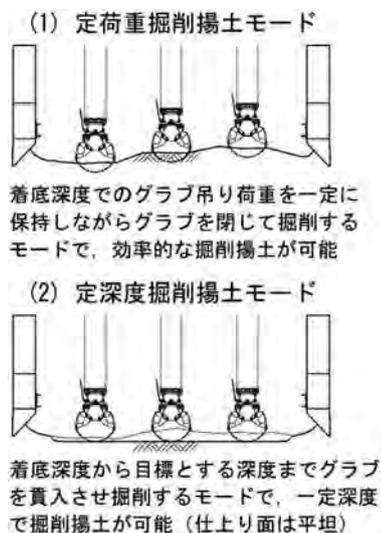
図一3 掘削揚土作業の自動運転

げ動作の一部やグラブの開閉度合、土砂掴み量（吊り荷重）調整の自動運転を実現した（図一3、表一3）。

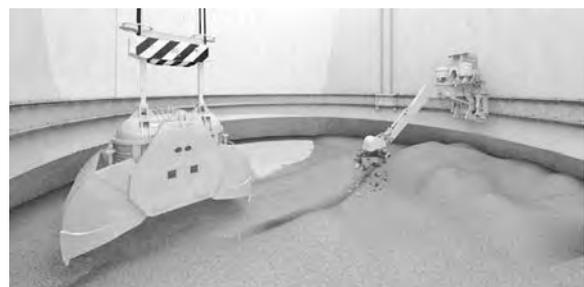
この電動油圧グラブと掘削揚土支援システムの両方を適用した場合、水中下・大深度においても作業効率は揚程距離での時間増以外ほぼ一定で、掘り過ぎや掘り残しが少なく平坦で安定した掘削面が得られる（図一4、5）。これはケーソンの沈設精度向上や掘削揚土にともなう周辺地盤への影響抑制に効果的である。また、自動運転機能は、クレーンの長時間操作に対するオペレータの身体負担低減に寄与するものである。

表一3 電動油圧グラブ諸元

電動油圧グラブ 仕様		
型式	電動油圧式、グラブ型	
容量	(W.L.) 3.0 m ³	
自重	(除 吊り金具) 15,000 kg	
油圧ユニット	本体搭載型	
油タンク	1,250 ℓ	
油圧シリンダー	φ200 x φ130 x 540 ³ x 4本	
開閉動作	開き	約9秒
	閉じ	約15秒
最高使用圧力	210 kg/cm ²	
耐水圧	1.20 MPa	
電源	動作	AC 100 V 50 Hz
	操作	AC 200 V
ツース	2体型ツース x 7本 (209-70-54143・横ピンタイプ)	
吊り金具	吊り方向90° 反転式	



図一4 電動油圧グラブの掘削揚土方法



図一5 水中下での掘削揚土状況 (CG イメージ)

(2) 沈下管理システム

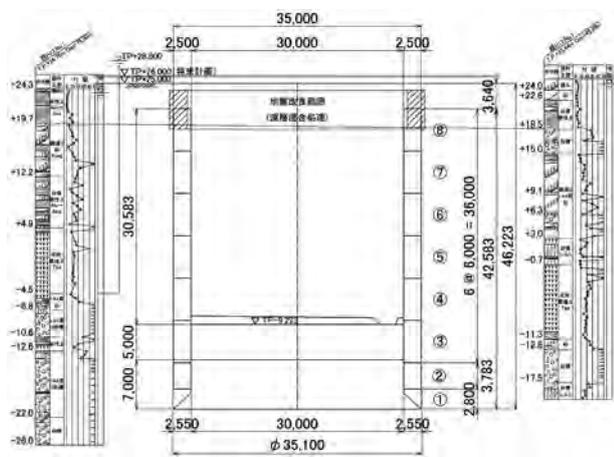
いわゆる油圧ジャッキを用いた圧入工法で、ケーソン挙動の計測から圧入までの流れを一体化し、1秒毎に更新される傾斜量、沈下量等の計測データを基に、迅速かつ高精度に姿勢制御しながらケーソンを圧入するものである。

3. 施工事例

(1) 工事概要

寺畑前川は河道断面が小さい都市の中小河川で、近年の都市型集中豪雨により周辺では浸水被害が頻繁に発生していた。最近でも床上・床下浸水被害が約260戸発生するなど早急な対策が求められ、雨水を一時的に貯留する調節池（貯留量：約19,400m³）が築造された。調節池の構造図を図一6に示す。

- ・ 工事名：床上浸水対策特別緊急事業
淀川水系寺畑前川調節池整備工事
- ・ 施工場所：兵庫県川西市南花屋敷
- ・ 立坑形状：内径φ30.0m、外径φ35.0m
躯体長42.583m、深さ47.223m



図一6 調節池構造図

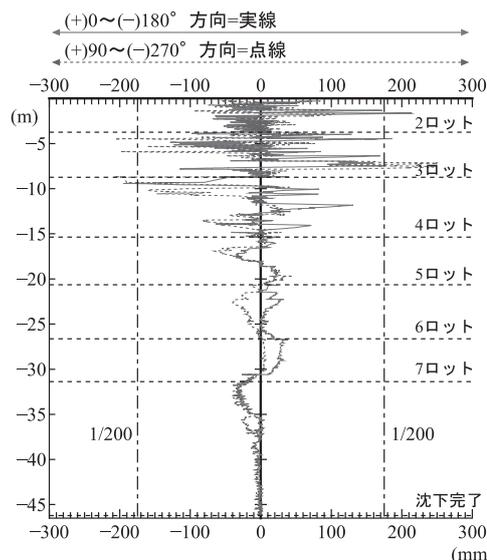
(2) 施工状況

施工機械は、各機械の作業量・稼働時間を考慮して水中掘削機1台・電動油圧グラブ2台とした（写真—8）。圧入設備は、各ロットで打設するコンクリート重量相当を事前載荷可能な3,000kN油圧ジャッキ16台である。

上層部の土質は軟弱で、傾斜管理図（図一7）からも判るように掘削作業に対するケーソン挙動が非常に敏感であった。そこで、水中掘削機による刃先部の掘削量に差をつけ、刃先反力の調整で傾斜修正を促すと共にケーソン中央部の掘削揚土量を綿密に管理し、掘



写真—8 施工時の様子



図一7 傾斜管理図

削完了後に傾斜修正しながらケーソンを圧入した。

沈下進捗にともなって傾斜量の一時的増加が見られたが、各ロットでの沈下完了時には管理基準値の1/200以内に収め、更には傾斜量0mmを目標に姿勢制御しながら施工した。

4. おわりに

本工法は深度100mへの挑戦を目指して開発され、これに応えるべく、機械・ソフトの改良と信頼性向上に努めてきた。熟練作業員の減少、安全作業の確立、作業環境の改善等への対応が求められる中、引き続きオープンケーソン工法の利点を活かした地下利用を通じて社会貢献できるものと期待している。

JICMA

【筆者紹介】

秋田 満留（あきた みつる）
 (株)鴻池組
 本社 土木事業本部 技術統括本部
 土木技術部 施工技术課
 課長

