

シャフト式遠隔操縦水中作業機 (T-iROBO UW)

大成建設(株)	正会員	○中野	文裕
大成建設(株)	正会員	水野	智亮
(株)アクティオ	正会員	三浦	久
(株)アクティオ	フェロー会員	八重田	義博
極東建設(株)	正会員	上山	淳

1. はじめに

国内には多くのダムがあり、建設当時から50年以上が経過したダムが増加し、ダムの新規建設に適した地点も少なくなっている。また、自然災害が局地的かつ大規模化する傾向にある。このため、既存ダムの長寿化、さらに活用するための機能・能力向上や多目的化などを目的に、既存ダムを再開発・リニューアルする需要が増加している。

しかし、ダム湖内で行われる再開発・リニューアル工事は、ダムの機能・稼働を維持した状態での施工が求められるため、ダム湖に貯水された状態での工事となる。そのため、大水深での水中作業が多く、さらには施工ヤードが確保できない等さまざまな課題がある。特に、ダムサイトは岩盤であることが多く、大水深で水中岩盤掘削を行う場合、これまでは大規模な高橋脚の仮設栈橋を設置して施工ヤードを確保し、仮設栈橋上から全周回転掘削工法やパーカッション工法（ダウンザホールハンマ工法）等の大型機械で施工が行われていた。

この場合、栈橋の設置には多大な時間と費用を要するとともに、栈橋上からの大型機械施工では水中状況の目視ができない。そのため、栈橋上の機械の位置や鉛直精度のみで管理を行うため、詳細な出来形や施工状況の確認ができなかった。また、水中の既存構造物近傍の細かい作業も前記の理由より精度よく行うことができなかった。特に急峻な地形では栈橋上からの目視できない大型機械施工では鉛直精度の確保が困難であり、工期が長期化する原因であった。

一方、潜水作業を併用して細かい作業や状況の確認等を行う場合もあるが、潜水作業は潜在的に危険度が高く、空気潜水では減圧に長時間を要するため作業時間が短く、また、飽和潜水では大規模な設備に膨大な費用を要する。

そこで、これらの課題を解決するため、シャフトに油圧ショベルタイプの水中作業機を取付け、遠隔操作により施工するシャフト式遠隔操縦水中作業機「T-iROBO UW」(Taisei intelligent ROBOT Under Water) (特許第 4792123 号) (図-1, 表-1 参照)を開発し、京都府宇治市の天ヶ瀬ダム再開発工事に適用した。

T-iROBO UW の適用により、遠隔操作による安全性の向上に加え、様々な水中可視化技術を導入し、情報化施工による生産性の向上を実現することが出来た。

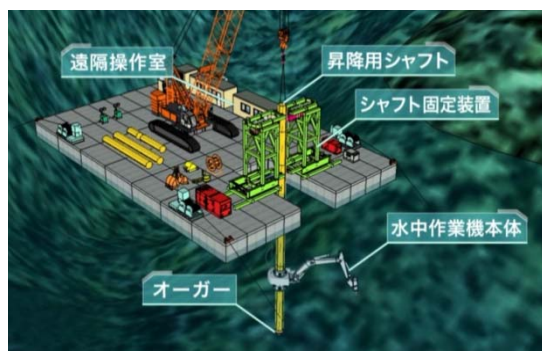


図-1 T-iROBO UW 全体構成

表-1 水中作業機の仕様

許容最大水深	－50m
バケット容量	0.8m ³
定格出力	掘削用水中モーター 110kw
	昇降用水中モーター 45kw
昇降速度	4.2 m/min
旋回角度	300°
動力伝達方式	電動油圧変換方式

キーワード ダム，水中作業機，シャフト式，遠隔操縦，無人化，情報化施工

連絡先 〒611-0021 京都府宇治市宇治金井戸 15-4 大成建設株式会社 天ヶ瀬ダム放流設備建設工事 TEL 0774-22-8277

2. T-iROBO UW の特徴

「T-iROBO UW」は、図-1 に示すように水上の台船から湖底地盤で鉛直に支持されたシャフトに油圧ショベルタイプの水中作業機を取り付けたものである。この水中作業機はブレーカー、バケット、サンドポンプ等のさまざまなアタッチメントが取付け可能で、シャフト沿いに昇降し、旋回、削岩、掘削、集積、ずり処理などの水中作業を遠隔操作できる。T-iROBO UW による施工フローを図-3 に示す。

水中作業機の遠隔操作は台船上の操作室にて行い、陸上のバックホウと同じジョイスティック、ペダル等により操作する。そのため、水中作業機の操作には特別な資格は必要なく、一般のオペレーターで操作が可能である。

また、T-iROBO UW は後述する水中可視化技術をモニターに表示し、水中マイクによる音声を確認することで、遠隔操作において臨場感のある操作を行うことができる。さらに、水中作業機本体の位置やアーム及び先端位置を正確に把握することが出来、水中可視化技術と併用することで、ダム湖のように深くて視界の悪い水中等の悪条件の場所での作業を安全に正確かつ確実に短工期で行う、世界初の水中作業機である。

以降に、T-iROBO UW の詳細な特徴を述べる。

① シャフト式水中作業機

水中作業機は0.8m³級の油圧ショベルをシャフトに取り付け、昇降・旋回ができるようにしたものである。

水中作業機本体をシャフトに取り付け、シャフトの位置・傾斜・シャフト上の水中作業機本体の位置等を測定することにより、目視できない水中での作業機の位置座標を特定することができる。

また、後述する情報化施工装置と連動させて構造物際の細かな作業を行うことができる。

シャフト方式の採用により急傾斜地盤でも固定が容易で、反力を確保できる。台船上のシャフト固定装置は鉛直方向をローラー機能とし、水位変動や台船の動揺を吸収し、シャフトへの影響を回避した。そのため、水中において常に安定した姿勢での作業を行うことが出来る。

② シャフト先端水中オーガーの装備(図-4)

ダム周辺地盤は一般に岩盤である。シャフト先端を堅固に固定させるため、シャフト先端に水中オーガーを装備した。なお、岩塊によるシャフト内閉塞を防止するため、岩塊を外に押出す水圧シリンダーを搭載した。

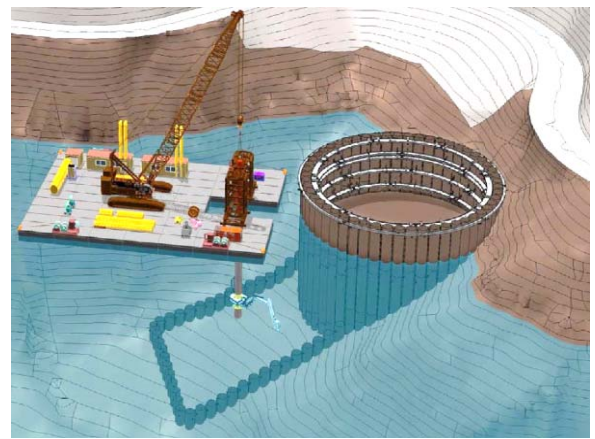


図-2 T-iROBO UW 作業イメージ図



図-3 T-iROBO UW 施工フロー

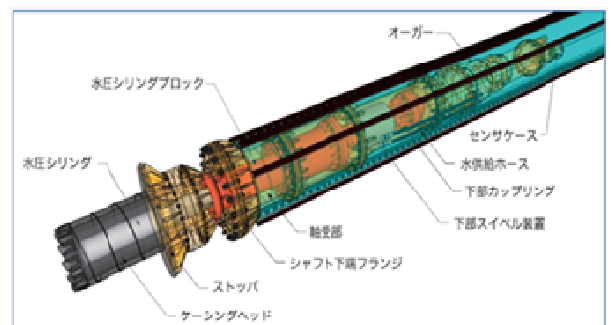


図-4 水中オーガーの構造

③ 情報化施工装置による遠隔操作

T-iROBO UW による水中掘削作業で最も重要な機能のひとつが情報化施工装置（水中可視化装置および音声受信装置）であり、以下の4つの機能を有している。

a) マルチファンビーム（ソナー）による湖底地形のレベル測深装置及び3次元画像変換システム(図-5, 6, 7)

マルチファンビーム（ソナー）は扇状の音波を湖底に向けて発信し、湖底で反射した時間から距離を測定するものであり、これを水中作業機本体に取り付けることにより湖底地形のレベルを測深することができる。さらに、この探査により得られた湖底の地形データを、モニター画面上に3次元で画像化するシステムを構築した。モニターには平面、断面及び運転席からの視点の3つの画像を表示できる。特に運転席からの視点では水中作業機が目の前にあるかのような感覚での操作を可能にした。これにより遠隔室で操縦する作業機オペレータが視覚的に容易に凹凸を把握できる。

また、これまでは錘付テープにより水上から湖底までの距離を探査する程度の掘削管理（掘削レベル、掘削量）しかできなかったが、この測深を作業前後に行うことにより地形レベルの変化を把握することが可能になり、掘削の管理が容易に、かつ格段に精度が向上した。

b) 水中作業機の動作をアニメーション化

水中作業機のアーム、ブーム、バケットの3箇所角度計を取り付け、ショベルの動きを把握することができる。この動きを3次元でアニメーション化し、操作に連動して3次元モニター画面に表示するシステムを組み込んだ。

これにより、水中で見えない作業機の動きを可視化することが出来、作業機オペレータが陸上のバックホウを運転している感覚で作業ができる。また、モニターにはバケットの先端レベルがデジタル値として表示され、オペレータは数値を確認しながら掘削でき、精度の高い掘削が可能である。なお、陸上でのキャリブレーションの結果では、実際とデジタル表示の誤差は50mm程度であり、陸上での掘削と遜色のない掘削が可能となった。

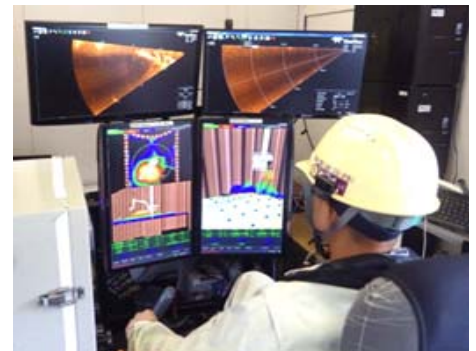


図-5 遠隔操作状況

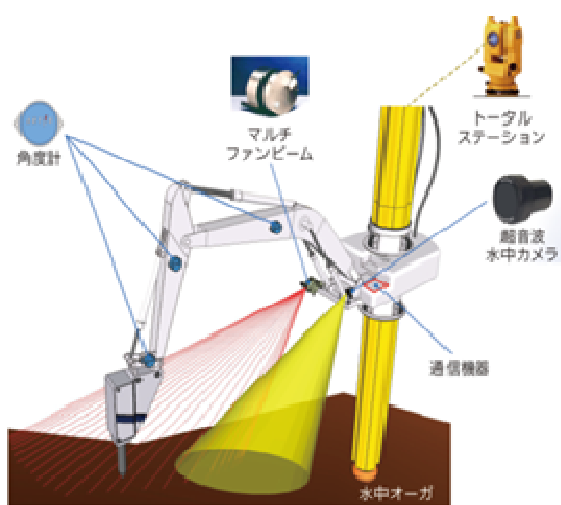


図-6 水中作業可視化装置

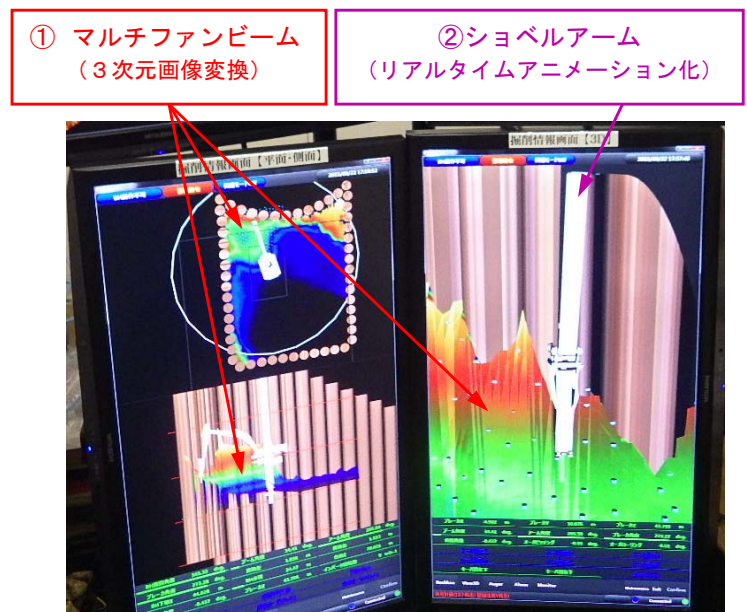


図-7 マルチファンビーム(3次元画像変換)
およびショベルアームアニメーション

c) 超音波水中カメラによるリアルタイム映像表示(図-8, 9)

前述の湖底地形のレベル測深画像は、探査時点のデータを3次元化しているため、掘削作業をしても画像は変化せず、再度、探査を行うことで画像が変化するものである。そのため、リアルタイムの変化を確認することはできない。そこで、超音波カメラを水中作業機前方に搭載し、リアルタイムの映像を表示できるようにした。超音波カメラを装備することによって、水深が深く、透明度が低い湖底で、掘削による濁度上昇の際にも、湖底状況を把握・確認することができる。

超音波カメラは約10mの範囲がより鮮明に映し出せるように2.25MHzのカメラを選定した。この映像及び後述する音声により臨場感が大きく向上した。また、リアルタイム映像が視認できることにより、遠隔操作でも、水中の障害物等と接触することなく精度の高い掘削ができた。

d) 水中マイクによる音声受信

水中マイクを作業機に搭載し、作業中に発生する音を遠隔操作室で聴こえるようにスピーカーを取り付けた。

これにより、岩を破碎する音やバケットで岩砕等をかき集める音だけでなく、水中作業機の油圧音も鮮明に受信できる。視覚のみならず、聴覚に訴える情報を獲得し、陸上施工機械の操作とほぼ同様の臨場感豊かな操作性を体感することで、正確で確実な作業を行うことができる。

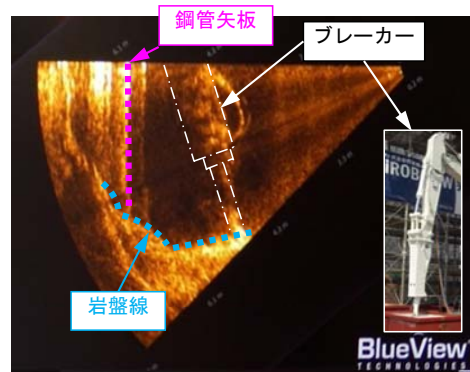


図-8 超音波カメラ映像（ブレイカー施工）

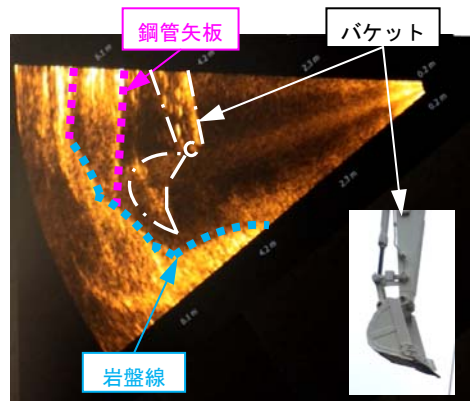


図-9 超音波カメラ映像（バケット施工）

4. 適用効果

①仮設栈橋が不要

既存ダム再開発・リニューアル工事特有の大水深での作業において、施工ヤード確保のための仮設栈橋が不要となる。

②細部作業が可能で、掘削精度が向上

シャフト方式で作業機本体の位置座標が特定でき、水中可視化装置により、直接水中の状況を確認しながら細かい作業が可能であるため、掘削精度が向上し、水中構造物と接触することなく確実な施工ができる。

③遠隔操作かつ潜水作業が不要となり、安全性が向上

台船上の操作室において、作業機オペレーターが遠隔操作するのみであり、クレーンはシャフトや水中作業機等の設置・移動・撤去時以外は稼働しない。また、水中作業可視化装置により潜水土が不要となり安全性が大きく向上する。

④工期短縮

従来工法 : 栈橋設置撤去 10.2 ヶ月 + 大型機械による掘削 10.1 ヶ月 = 20.3 ヶ月

T-iROBO UW : 6.5 ヶ月 (施工実績 : 天ヶ瀬ダム再開発トンネル放流設備 流入部建設工事)

13.8 ヶ月短縮

⑤工費縮減

従来工法 : 1.0 (比率)

T-iROBO UW : 0.4 (比率)

60%縮減

(施工実績 : 天ヶ瀬ダム再開発トンネル放流設備 流入部建設工事)

⑥作業用途に応じた先端アタッチメントの交換(図-10)

水中作業機のアタッチメントを作業用途に応じて取り替えられるため、掘削・削岩・集積のみならず、コンクリート壊しや付着物除去・目荒らし等、さまざまな作業へ適用できる。今後、ますます増加する既存ダムの再開発・リニューアル工事をはじめ、さまざまな工事に対して適用できる。

				
サンドポンプ	シングルヘッダー	ワイヤーブラシ	ダウンザホール	エアードリフター

図-10 その他アタッチメント取付例

5. 施工実績（図-11）

平成 27 年 6 月から 11 月にかけて、国土交通省近畿地方整備局発注による「天ヶ瀬ダム再開発トンネル放流設備流入部建設工事」にて T-iROBO UW による施工を行った。本工事は、ダムの放流機能を高めるトンネル式放流設備の流入部を建設するものである。

T-iROBO UW は、このうち前庭部と呼ばれる部分の水中岩盤掘削に適用し、鋼管矢板に囲まれた約 21m×18m の範囲（約 1,300m³）を最大水深 40m 下での施工を行った。

また、本工事での水中作業機のアタッチメントは、鋼管矢板（φ 1,500）際の岩破碎、掘削、集積でブレイカー、バケットを使用し、床付け部の清掃でサンドポンプを使用した。

当該工事において、T-iROBO UW はその性能と機能を十分に発揮し、機械的な不具合ならびに施工上の支障のない高い作業性と安全性・工期短縮・工費縮減を実証した。



図-11 天ヶ瀬ダム再開発 位置図・完成イメージ図

6. まとめ

- ①水中オーガーを用いて、シャフトを地盤内に埋込みに確実に固定して作業ができるため、急傾斜地あるいは狭隘箇所等、湖底の形状に左右されず安定性の高い施工ができる。
- ②シャフト天端位置をトータルステーションにて計測し、シャフトに取付けた傾斜計やロータリーエンコーダーおよび水中掘削機に取付けた角度計等を用いて、水中作業機の先端位置を座標で特定し管理することで、様々な構造物際の施工をすることができる。
- ③最先端の水中可視化装置や音声受信装置の搭載により、陸上の施工機械とほぼ同様の感覚で操作できるため、大水深で暗く透明度の低い箇所でも、専門のオペレータを必要とせず、一般のオペレータであれば誰でも操作できる。
- ④作業機を構成する機構が単純であるため、シャフト径を大きくする等の改造を行うことで、水深 100m 程度までは対応可能である。

シャフト式遠隔操縦水中作業機「T-iROBO UW」は、今回適用した天ヶ瀬ダム再開発工事ではトラブルなく工期短縮を実現し、建設現場におけるロボット化・無人化の推進・発展へ、大きな成果を収めることが出来た。

今後ますます増加するダム再開発工事をはじめ、本作業機を有効利用できるさまざまな工事に対して適用を提案していき、技術の活用を通じて持続可能なインフラ整備に貢献してまいりたい。