遠隔操縦式水中作業機による硬岩掘削技術の開発

大成建設(株)　正会員　○畠山　峻一　正会員　新井　博之
正会員　金　浩昭

１．背景・目的

近年のダム再生事業では，気候変動の影響による水害の激甚化・頻発化に備えた治水機能の強化とともに，カーボンニュートラルの実現に向けて水力発電の利活用を促進するハイブリッドダムの取組みが推進されている．既設ダムリニューアル工事では，多くの場合，ダム供用下で貯水位を維持しながら湖底の土砂や岩盤を掘削する必要があり，安全かつ効率的に水中掘削を行う技術が求められている．

当社は 2014 年，マシンガイダンスを用いた遠隔操縦によって，台船上から湖底の土砂や岩盤を機械掘削する水中作業機「T-iROBO UW」を開発したが，ダム基礎周辺にはブレーカ掘削の困難な亀裂性の少ない硬岩も多く存在するため，こうした条件にも対応可能な水中掘削技術の確立が課題とされてきた．

そこで筆者らは，陸上作業で広く用いられる割岩工法を水中作業に適用すべく，新たに 2 種類のアタッチメントを開発した．本稿では，上記アタッチメントを用いた硬岩掘削フローおよび各アタッチメントの性能試験結果について報告する．

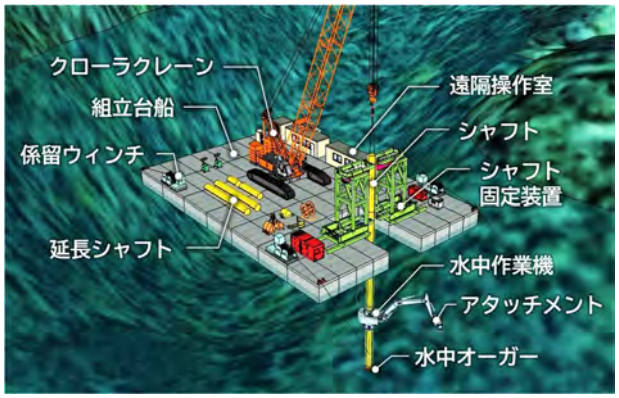


図-1　T-iROBO UW 全体構成

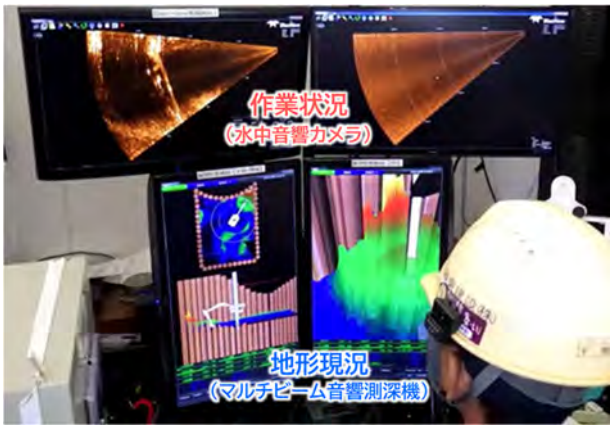


図-2　マシンガイダンスによる遠隔操縦

２．T-iROBO UW の概要

T-iROBO UW の全体構成を**図-1** に示す．本機は，水上の台船，台船－湖底間で鉛直支持されたシャフト，シャフト沿いに昇降・旋回する水中作業機，台船上の遠隔操作室の，大きく 4 つの要素で構成される．

シャフトは，上部を台船上のシャフト固定装置によって把持し，下部を湖底岩盤にシャフト先端を挿入させて保持する．

シャフトに取り付けられた油圧ショベル型の水中作業機は，台船上の遠隔操作室を通じて操縦する．遠隔操縦においては，水中音響カメラとマルチビーム音響測深機を併用した水中可視化技術により，視界の確保および出来形の確認を支援する（**図-2**）．また，水中作業機に装着するアタッチメントを各種組み合わせて使用することにより，様々な水中作業を効率的かつ安全に実施できる．

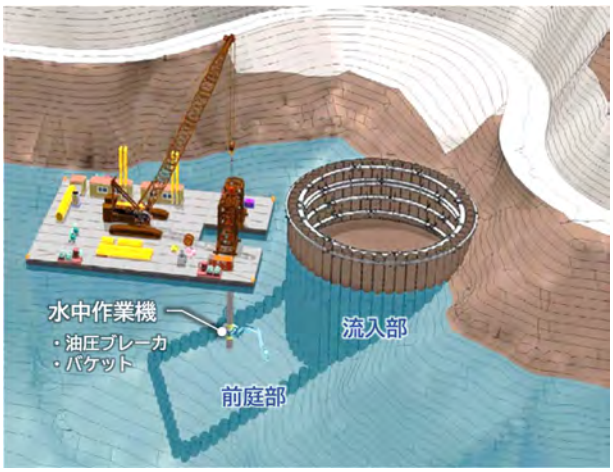


図-3　T-iROBO UW 作業イメージ（天ケ瀬ダム）

キーワード　ダム再生，水中掘削，割岩工法，無人化施工，マシンガイダンス
連絡先　〒163-0606　東京都新宿区西新宿 1-25-1　大成建設㈱本社土木本部土木技術部ダム技術室　ＴＥＬ03-5381-5282

T-iROBO UW による施工では，従来工法で生じる大規模仮設や危険作業が不要となり，工期短縮および安全性の向上が期待できる [1]．本機の適用事例として，2015 年の天ケ瀬ダム再開発工事における前庭部の水中岩盤掘削が挙げられる（**図-3**）．掘削作業には，油圧ブレーカやバケット等の汎用アタッチメントを使用した．施工期間は台船の組立・解体を含めて約 6.5 ヶ月であり，当初計画 10.1 ヶ月に対して 4 割程度の工程短縮効果が確認された [2]．

３．硬岩掘削フロー

水中の硬岩掘削方法には，割岩工法を採用した．割岩工法では，クローラドリル等の穿孔機で孔をあけ，その孔に油圧パッカー先端のくさびを挿入して岩盤を押し広げ，自由面に向かって人工亀裂を発生させることで岩盤を破砕する（**図-4**）．

T-iROBO UW では，シャフトを中心とする旋回範囲内で上記の割岩作業を実施する（**図-5**）．掘削工法はベンチカットを採用し，ベンチ高さ（1 回の掘削深さ）を 0.75m，割岩孔ピッチを 1.0m とした．1 サイクル当りの作業面積は 60m^2，掘削量は 45m^3 となる．



図-4　割岩工法

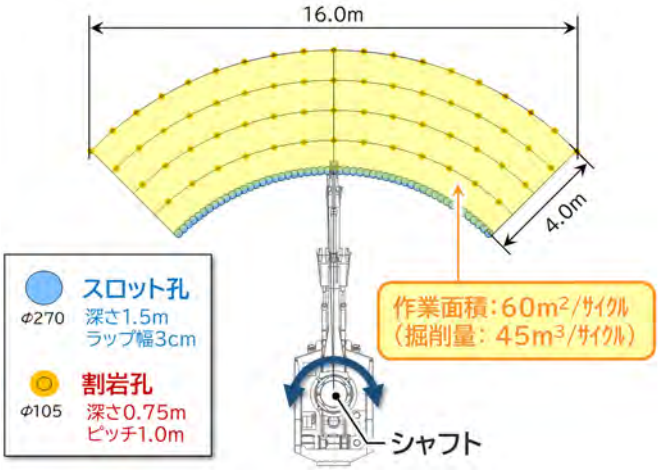


図-5　割岩作業範囲（T-iROBO UW）

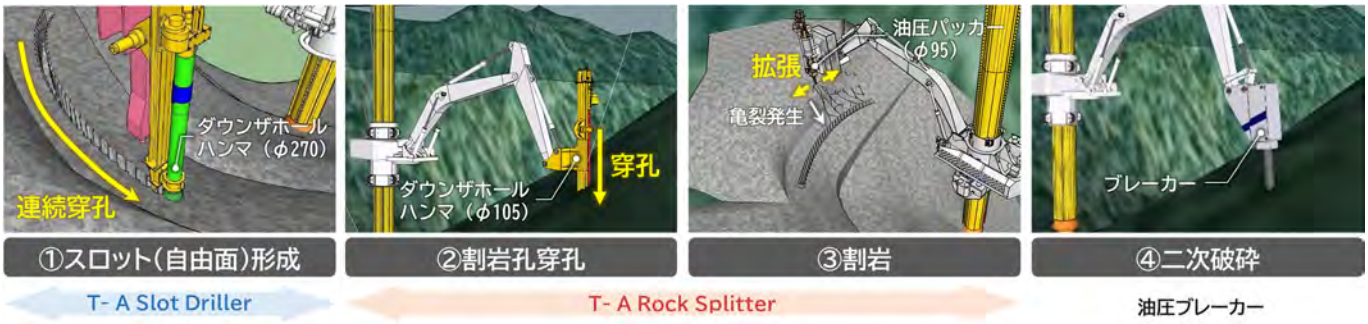


図-6　硬岩掘削フロー（T-iROBO UW）

また，対象岩盤には自由面が少ないことも想定されるため，割岩作業の前に自由面形成の手順を加えた．

T-iROBO UW による硬岩掘削フローを**図-6** に示す．まず，岩盤の掘削境界を連続して穿孔し，岩盤にスロット（自由面）を形成する．次に，掘削する岩盤に割岩孔を穿孔し，割岩孔に油圧パッカーを挿入後，くさびを圧入して割岩する．最後に，割岩した岩盤を油圧ブレーカで二次破砕し，岩砕はグラブバケットで搬出する．

各種アタッチメントの切替えは，台船上に一度水中作業機を引上げてから行う．また掘削範囲が広域となる場合は，都度シャフトを引上げて台船を移動後，シャフトを再設置して，同様の作業を繰り返す（**図-7**）．

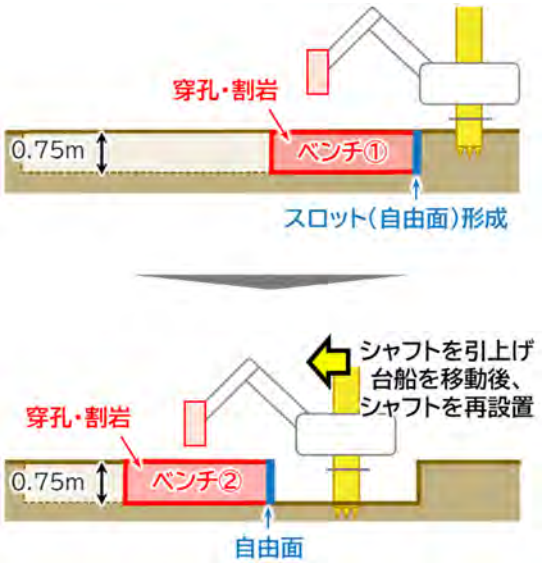


図-7　台船の移動（ベンチカット工法）

以上の硬岩掘削フローのうち，特にスロット形成のための連続穿孔や割岩孔へのパッカー挿入では，視界の効かない水中で精密な遠隔操縦が要求される．本課題を解決するため，連孔スロット穿孔アタッチメント「T-A Slot Driller」および穿孔・割岩一体型アタッチメント「T-A Rock Splitter」を開発した（**図-8**）．

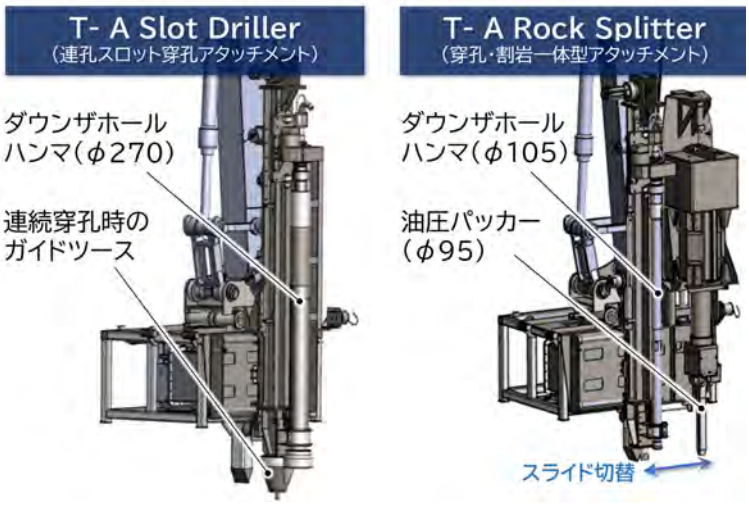


図-8　開発したアタッチメント

４．硬岩掘削用アタッチメントの概要

(1) 連孔スロット穿孔アタッチメント「T-A Slot Driller」

T-A Slot Driller は，**図-6** に示す硬岩掘削フローのうち，①スロット（自由面）形成を行うアタッチメントである．本アタッチメントは，岩盤穿孔用のダウンザホールハンマ（φ270mm）と，これに並行して設置されたガイドツースを有している（**図-8**, **写真-1**）．



写真-1　スロット孔の連続穿孔状況

ガイドツースの先端は円錐形状をしており，隣接孔にダウンザホールハンマを挿入する際，ガイドツースが既設孔の中心に誘導挿入される．これにより，隣接孔との間隔を一定に保持することができ，スロット孔の間隔 240 ㎜に対して 30 ㎜という微小なラップ幅での連続穿孔を可能とし，スロット形成作業の効率化が図れた（**写真-2**）．

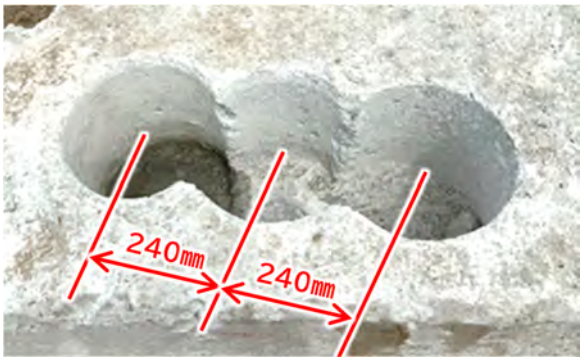


写真-2　連続穿孔完了（3 孔）

(2) 穿孔・割岩一体型アタッチメント「T-A Rock Splitter」

T-A Rock Splitter は，**図-6** に示す硬岩掘削フローのうち，②割岩孔穿孔および③割岩を行うアタッチメントであり，岩盤穿孔用のダウンザホールハンマ（φ105mm）と割岩用の油圧パッカー（φ95mm）を一体に備える．

割岩作業では，内径 105 mm の割岩孔に外径 95 mm のパッカーを挿入する必要があるため，±5mm という高い作業精度が要求される．そこで，ダウンザホールハンマと油圧パッカーの両装置を可動式架台に固定し，この架台をアタッチメント内でスライドさせる機構を設けた（**図-9**）．これにより，穿孔完了後，水中作業機のアームを固定したまま両装置を切替えてパッカー挿入時の位置精度を確保し，効率的な割岩作業を可能とした．

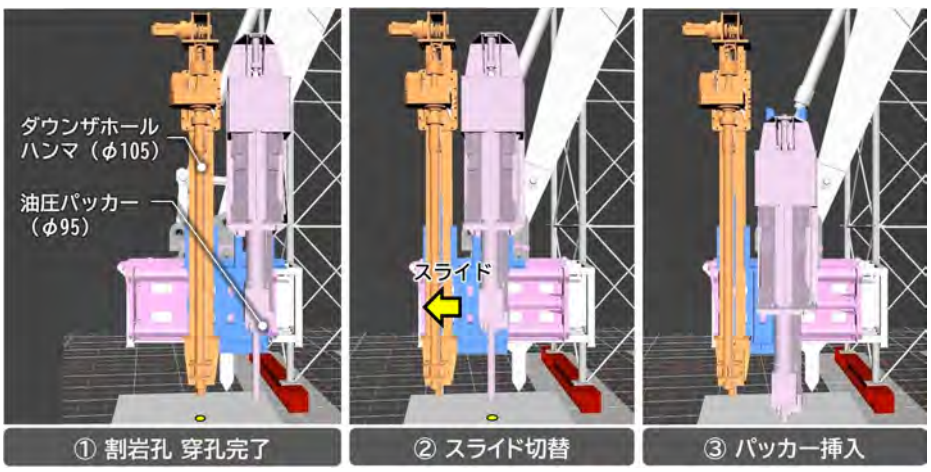


図-9　パッカー挿入時のアタッチメント操作手順

５．水中作業機の改良

前章の通り，水中における硬岩掘削では，遠隔操縦による高

い作業精度が要求される．そこで，上記のアタッチメント開発に加え，マシンガイダンス機構の改良および微操作モードの搭載により，機体の位置検出精度および操作精度の向上を図った．

(1) マシンガイダンス機構の改良

マシンガイダンスにおける水中作業機のアタッチメント先端の位置座標は，水中作業機を保持するシャフトの天端を基点として，シャフトの傾斜や水中作業機の位置・姿勢情報を基に算出される（**図-10**）．

水中作業機の姿勢情報（バケット角度，アーム角度，ブーム角度）は，これまでは一軸傾斜センサを用いて検出していた．しかし，掘削作業に伴う機械振動等の影響により，計測値が安定するまで時間を要し，リアルタイムに機体位置を検出することが困難であった．そこで，これらを磁気式ロータリーエンコーダ（角度分解能：約 0.09°）に変更し，機体位置検出時における慣性の影響を排除することによって，アタッチメント先端の位置座標を高精度かつリアルタイムに確認可能とした．

(2) 微操作モードの搭載

水中作業機のベースとなる油圧ショベルは，通常，動作速度が負荷に反比例する．そのため，アタッチメント先端の微細な位置合わせを行う際の起動・停止時には挙動が安定せず，作業性に課題があった．そこで，油圧ポンプの圧力を適宜調整し，駆動に必要な最小限の油量を一定に保持する「微操作モード」を搭載した．微操作モードの使用により，アタッチメント先端の初動速度を通常の 1/10 の低速かつ一定に制御することが可能となり，操作性と位置精度の向上につなげた．

6．アタッチメントの性能試験

(1) 陸上実証試験

各アタッチメントの本体性能および割岩工法の妥当性を検証するため，建設中ダムの原石山において，一連の硬岩掘削フロー（**図-6**）に関する陸上実証試験を行った．試験岩盤は，発破掘削で施工する硬質な安山岩とした．施工仕様は，掘削ベンチ高さ 0.75m（割岩孔の穿孔長 1.3m），割岩孔ピッチ 1.0m 格子，スロット掘削深 1.5m（2 ベンチ分），孔間隔 240mm とした（**図-11**）．

T-A Slot Driller によるスロット形成作業においては，全スロット長 7.0m を 29 孔のスロット孔を施工し，ガイド

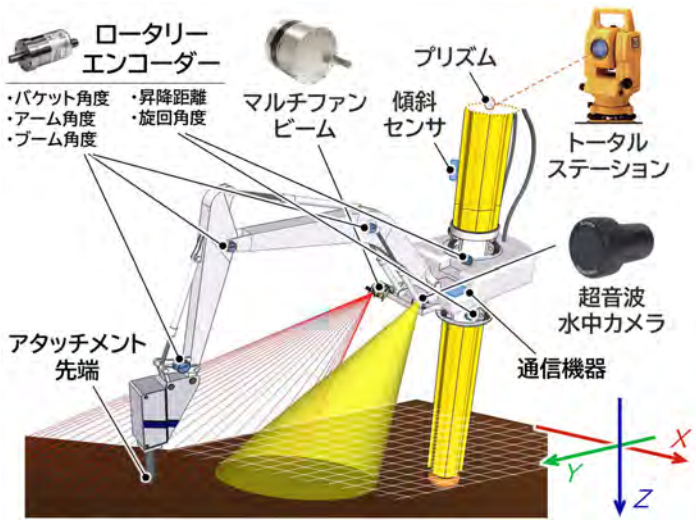


図-10 水中作業機の搭載機器

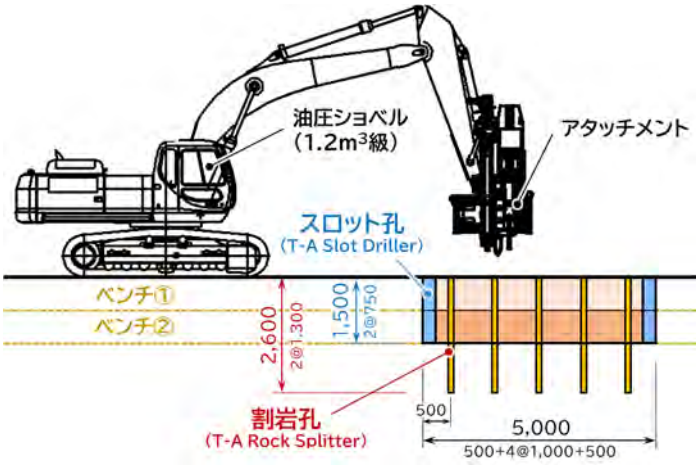


図-11 検証時の施工方法（断面図）



写真-3 スロット孔の連続穿孔状況



写真-4 連孔スロット形成完了

ツースの効果によってほぼ一定間隔（平均 239mm）で連続穿孔できることを確認した（**写真-3**，**写真-4**）．また，同作業に要した時間は 14.5 時間であり，1 孔当りの穿孔時間は平均 0.5 時間，時間当たりのスロット形成能力はスロット長 0.45m となった．

T-A Rock Splitter による穿孔・割岩作業においては，スライド機構の効果として，パッカーを割岩孔へ確実に挿入できることを確認した（**写真-5**）．また，1 孔当りの作業時間は約 15 分（0.25 時間）であり，時間当たりの割岩施工能力は 3.0m^3 となった．

陸上実証試験の結果を**表-1** に整理する．本試験により，陸上における各アタッチメントの施工能力および想定した施工仕様の妥当性が確認された．なお，実施工では視界の効かない水中で遠隔操縦を行うため，陸上と比べて施工能力および作業精度が低下することが想定される．

(2) 実機精度検証試験

硬岩掘削アタッチメントによる穿孔・割岩作業について，T-iROBO UW の実機を用いて遠隔操縦を行った場合における作業性およびマシンガイダンスの位置精度について検証した．

実機試験の設備配置を**図-12** に示す．本試験では，当社施設内に組立てた模擬台船（仮設構台）に T-iROBO UW を設置し，穿孔・割岩一体型アタッチメント（T-A Rock Splitter）を装着した水中作業機を遠隔操作室からマシンガイダンスによって操縦することで，模擬岩塊である高強度コンクリート供試体（圧縮強度 50MPa，100MPa）を割岩した（**写真-6**，**図-13**）．



写真-5　パッカー割岩状況

表-1　陸上実証試験の結果

作業区分	施工仕様	施工歩掛	施工能力
スロット形成	・掘削深1.5m ・孔間隔240mm	0.5h/孔	0.45m/h
穿孔・割岩	・ベンチ高さ0.75m （穿孔長2.6m） ・割岩孔ピッチ1.0m	0.25h/孔	3.0m^3/h

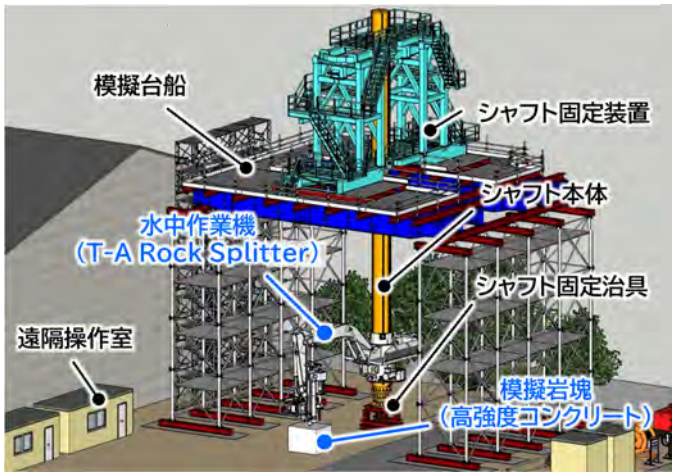


図-12　実機試験の設備配置



写真-6　模擬岩塊の割岩状況

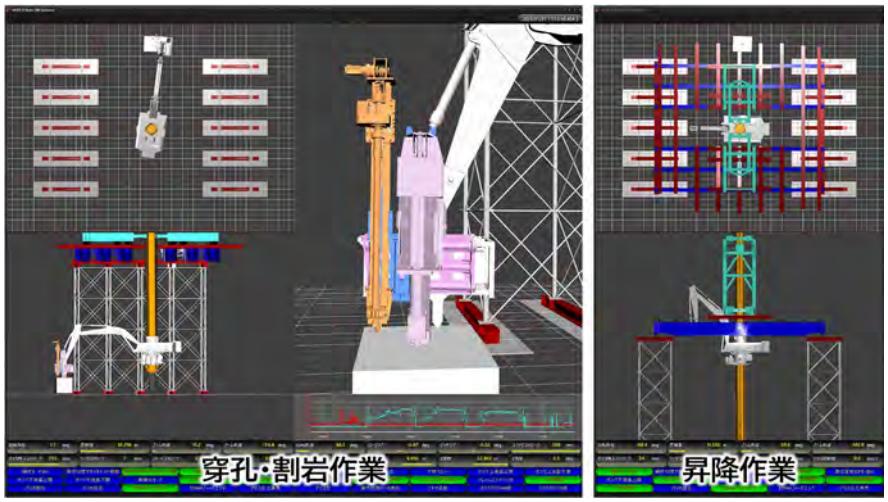


図-13　マシンガイダンス画面

はじめに，マシンガイダンスの位置精度を確認するため，アタッチメント先端を任意の目標地点に移動させ，各エンコーダの移動量を基に算出されたマシンガイダンス上の座標とトータルステーションで計測した座標を比較した（**表-2**）．その結果，各地点における X, Y, Z 座標の計測誤差は±50mm 以内であり，マシンガイダンス機構の改良による位置精度の向上効果が確認された．

また，アタッチメント先端を目標地点に合わせるまでの所要時間について，微操作モードと通常モードを比較した（**写真-7**）．その結果，微操作モードを使用することで停止時のぶれが抑制され，通常モードよりも素早く位置合わせを完了でき，微操作モードによる操作性の向上効果が確認された．

穿孔・割岩作業は，①アタッチメントの位置合わせ，②穿孔準備（エアー等），③穿孔，④穿孔機から油圧パッカーへの切替え，⑤割岩，⑥移動・アタッチメント切り離しの一連の手順を確認した．

各工程の平均作業時間を**表-3** に示す．穿孔作業時間については，コンクリートの圧縮強度が高いほど長くなった．圧縮強度 50MPa の場合は陸上実証試験と同程度の作業時間であり，現地の安山岩で推定される一軸圧縮強度からも，本結果は妥当と考えられる．ただし，ダウンザホールハンマの穿孔速度は対象岩盤の様々な要因によって変化するため，施工計画時の歩掛設定にあたっては，できるだけ対象岩盤の原位置試験データを使用することが望ましい．

割岩作業時間については，圧縮強度に依らず概ね同等であると判断される．ただし，実機試験の平均作業時間が 183 秒であるのに対して，陸上実証試験では 214 秒と約 17%長い．模擬岩塊と違い自由面の限られる原位置作業においては，施工効率の低下を見込む必要があると考えられる．

以上，本試験を通じて，遠隔操縦においても陸上と同等の施工能力を発揮でき，またマシンガイダンスによる位置精度も十分確保できることが確認された．

7．従来工法との工程比較

従来の水中岩盤掘削作業は，大規模な仮設桟橋を設置して，目視できない水中の岩盤を桟橋上から全周回転掘削機等で掘削するとともに，細かな作業は潜水作業を併用して行われる．そのため，工程の長期化や工事量の増大，危険作業の発生といった問題が懸念される．

表-2　位置精度の検証結果

計測地点		TS計測座標 (mm)	MG計算値 (mm)	誤差 (mm)
No.1	X	-3,448	-3,437	11
	Y	7,478	7,433	-45
	Z	24,403	24,374	-29
No.2	X	35	66	31
	Y	6,729	6,749	20
	Z	24,421	24,388	-33
No.3	X	3,104	3,148	44
	Y	5,574	5,570	-4
	Z	24,425	24,388	-37

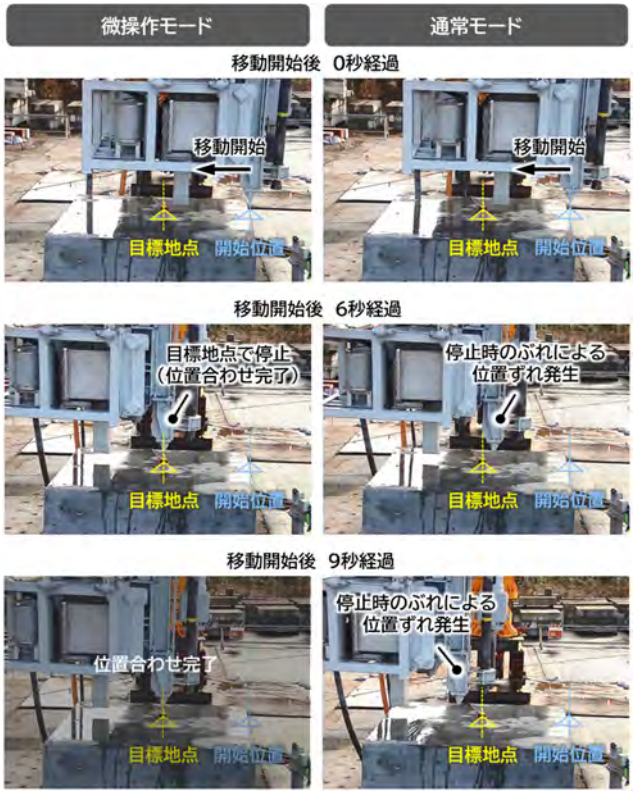


写真-7　微操作モードと通常モードの比較

表-3　穿孔・割岩作業時間

作業区分	平均作業時間（秒）		
	実機精度検証試験		陸上実証試験
	模擬岩塊 (σ=100MPa)	模擬岩塊 (σ=50MPa)	実岩盤 (安山岩)
①位置合わせ	82		—
②穿孔準備	28		—
③穿孔	649	586	565
④装置切替え	25		—
⑤割岩	177	189	214
⑥移動･切り離し	235		—

そこで，前述の性能試験結果を基に，天ケ瀬ダム再開発工事における掘削対象岩盤が全て硬岩であったと仮定し，T- iROBO UW 工法と従来工法（全周回転機掘削）について，それぞれ工程シミュレーションを行った．

施工数量は，土砂を含む硬岩の掘削・浚渫が 4,800m^3 あり，これを行うための仮設備工として，従来工法では桟橋設置・撤去が，T-iROBO UW 工法では台船組立・解体を必要とする．稼働率は 4 週 8 休を想定し，両者とも 2 セット昼夜施工を行う想定とした．施工歩掛は，従来工法については土木工事標準積算基準を使用した．T-iROBO UW 工法については，水中作業に伴う作業効率の低下を考慮し，陸上実証試験で確認された施工能力の 75%で計算した．

表-4　各工法の工程シミュレーション結果

従来工法(全周回転機掘削) … 26.6か月

工種	種別	単位	施工数量	施工月数
桟橋設置・撤去	1セット昼間施工	m^2	1,000	17.1
掘削・浚渫	土砂・硬岩, 全周回転掘削機φ2000, ｸﾗﾑｼｪﾙ2.5m^3, 2セット昼夜施工	m^3	4,800	9.5

T-iROBO UW工法 … 13.2か月

工種	種別	単位	施工数量	施工月数
台船組立・解体	台船搬入・組立, 作業機組立・艤装, 台船解体・搬出, 作業機解体	式	1	1.5
掘削・浚渫	土砂・硬岩, T-iROBO UW, ｸﾗﾑｼｪﾙ2.5m^3, 2セット昼夜施工	m3	4,800	11.7



図-14　水中岩盤掘削用アタッチメント

両者の工程比較結果を，**表-4** に示す．T-iROBO UW による掘削・浚渫では，シャフトの段取り替え作業等によるロス時間を見込むと，従来工法と比べてやや工程が長くなるものの，桟橋の設置・撤去の不要化による仮設備工の短縮効果が大きいことから，工期全体としては，従来工法の所要期間 26.6 ヶ月に対して T-iROBO UW 工法が 13.2 ヶ月と，13.4 ヶ月（約 50%）の工程短縮となった．

8．まとめ

T-iROBO UW 工法を硬岩掘削に適用するため，自由面形成と割岩を行うアタッチメントの開発・実証を行った．その結果，従来工法と比較して工程を約 50%に短縮可能であると試算された．また，本アタッチメントを既存の各種アタッチメントと併用することによって，軟質な堆積土から硬質な岩盤まで，様々な地盤条件での水中掘削が可能となった（**図-14**）．

今後のダムリニューアルをはじめとする各種水中掘削工事に本作業機を活用し，様々な地盤条件で水中作業の精度向上・効率化を図り，工期短縮，コスト縮減および作業の安全性確保を推進していく所存である．

謝辞

本アタッチメントの開発にあたっては，株式会社アクティオおよび極東建設株式会社をはじめ，多くの関係者にご協力を賜りました．本文に代えて，心より感謝申し上げます．

参考文献

1) 谷地宣之，蒲谷大輔，八重田義博，上山淳：T-iROBO UW（シャフト式遠隔操縦水中作業機）について，土木学会第 70 回年次学術講演会，VI-723，2015.
2) 矢部和史，水野智亮，谷地宣之：シャフト式遠隔操縦水中作業機による岩盤掘削，土木学会第 71 回年次学術講演会，VI-522，2016.
3) 新井博之，金浩昭：T-iROBO UW に装着する水中硬岩掘削用アタッチメントの開発，土木学会第 70 回年次学術講演会，VI-332，2023.