

ROVを用いたダム施設水中部の現地調査

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム

○岸 寛人
小林 勇一

ダム施設の中には一年を通して水中に没している構造物等がある。構造物水中部の点検には潜水士が必要となるものがあるが、作業水深や作業時間の制約等から調査の実施は容易ではない。そこでダム水中部の点検手法としてROV（水中カメラロボット）の活用の可能性を検証するため、現地調査試験を実施したので報告する。

キーワード：ダム水中部、ROV、調査手法

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたインフラ設備の老朽化が社会問題と言われて久しい。ダム便覧2021によると1900年以降に建設され建設後50年を経過したダムの割合は、2019年までの集計で4割以上となっており、今後その割合はさらに増加する。ダムには堤体のほか、ゲート設備、網場、取水塔、曝気装置等の管理に関わる設備が設置されているが、設備によっては供用後一度も水上に現れることがないものもある。これらダム水中部に位置する設備について点検を実施する場合、潜水士が必要となるが、水深数十メートルという環境は人体にとって危険な作業であるため作業水深や作業時間が制限される²⁾。また、日本の人口減少、少子高齢化という情勢から、潜水士の人数が減少することも予想される。

このような状況から、国土交通省では次世代インフラ用ロボット開発・導入の推進の中でダム水中部点検技術を公募し、その中で多数の技術が開発された³⁾。これらの技術は高精度な計測等を行えるシステムであるが、大型の機材やコストを要するものとなっている。

一方で、潜水士や上述のような技術を使用するのは大がかりすぎるが、簡易にできるのであれば水中部の状態を確認したいというニーズは存在している。当チームではこの点に着眼し、保有しているROV（Remotely Operated Vehicle、有線で遠隔操作する水中カメラロボット）を用いて簡易にダム施設水中部の調査を行う方法について検証を行っている。本稿では、R4年度に函館開発建設部今金河川事務所美利河ダムおよび札幌開発建設部豊平川ダム統合管理事務所豊平峡ダムにおいて、フィールド試験を兼ねて現地調査を実施した結果と、そこから得られた知見と課題について報告する。

2. ROVを用いた水中調査

(1) 使用機材

ROVを用いた水中調査に使用する主な機材を表-1に、写真を図-1～3に示す。

表-1 ROVを用いた水中調査に使用する主な機材

機材名	仕様	図
ROV本体	寸法W620xL840xH483.5、重量40kg 使用限度水深150m、光学ビデオカメラ（38万画素、パン±55°、チルト±45°）、LEDライト、深度計、方位計、トランスポンダ（ROV側）	1
コントロールユニット	寸法W554xL610xH315、重量33kg 電源、制御ケーブルを接続	2
PCモニタBOX	寸法W554xL610xH600、重量24kg ROV状態表示PC、モニタを配置	2
位置表示制御BOX	寸法W554xL610xH261、重量8kg GNSS、トランスポンダを接続	2
トランスポンダ（船側）	寸法φ130xH355、重量4.5kg ROV相対位置把握、水中設置	3
GNSSアンテナ	寸法L348xW158xH75、重さ1kg トランスポンダ座標把握、空中設置	
ハンドコントローラ	寸法L150xW170xH50、重量1kg	

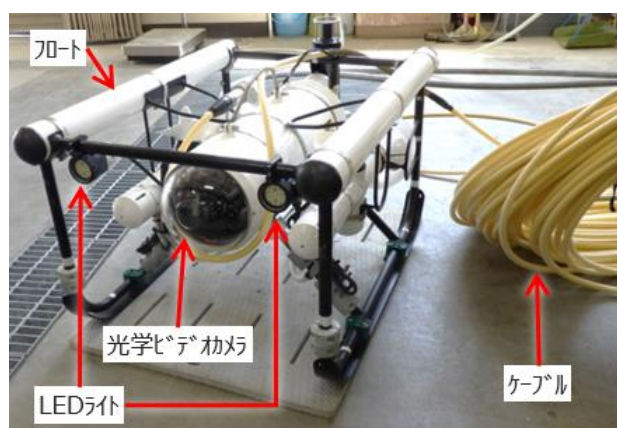


図-1 ROV本体



図-2 コントロールユニット、PCモニタBOX、位置表示制御BOX

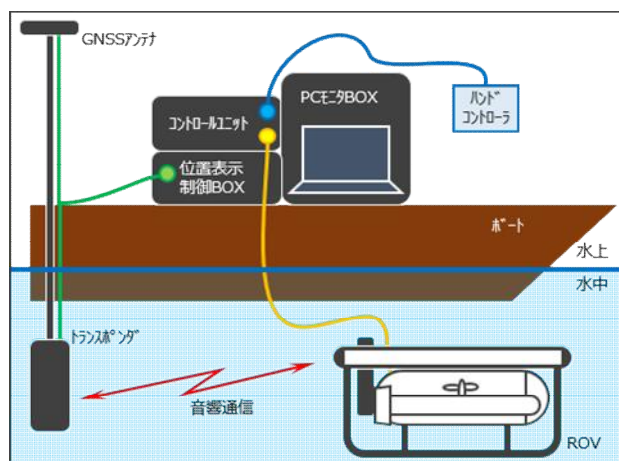


図-4 調査概略図



図-3 トランスポンダ

当チーム保有のROV（150m級ROV、広和（株）製）は前後方向スラスト2基および上下方向スラスト2基を搭載し、前後進、水平方向回転、上昇下降を行うことができる。また、前方の透明な半球体内部に上下左右に回転可能な光学ビデオカメラを有している。このカメラからの映像がPCモニタBOX内のPCに表示され、これをもとにROVの操作を行うとともに、録画操作を行うことで同映像を記録できる。左右上部の白い円筒部品はフロートであり、ROV全体として淡水と同じ浮力（中性浮力）となるよう調整されている。ROVへの制御信号、映像データはROVからコントロールユニットへつながるケーブルを介して送受信され、ケーブル自体も中性浮力となっている。ROVは水中に没しているため位置の把握に電波を使用することができない。そのため、本ROVではボート等の水上部にGNSSアンテナを取り付け、その直下およびROV後部にトランスポンダを設置することで、水中音響通信により位置を把握する。

これらの機材を調査箇所に応じてボートまたは栈橋等に設置、固定し、操作を行う。図-4にボートで調査を行う場合の概略図を示す。

(2) 作業手順

表-2に現地作業の手順と所要時間を示す。作業所要時間は準備と撤収におおよそ2.5時間程度を要する。調査自体の時間については調査内容および調査範囲により大きく異なるほか、風が強くボートが流されやすいような場合や、水の濁りがひどい場合には時間がかかるなど周囲の環境の影響を受ける。

表-2 現地作業手順と所要時間

作業手順	所要時間	作業人員
1. 機材搬入、ボート等への設置	1.5 hr	8人程度
2. 調査箇所への移動、調査	調査内容、調査範囲、作業環境による	ROV操作1、ROV補助1、操船1人、補助1名
3. 機材撤収	1.0 hr	8人程度

3. 現地調査

(1) 美利河ダムにおける網場アンカおよび網場ネットの現況調査

a) 調査概要

函館開発建設部美利河ダムにおいて、網場アンカおよび網場ネットの現況調査を行った。調査対象である網場設備は、堤体および湖岸から離れた場所に位置しているため、ボートを利用し調査を実施した。当日の調査箇所水深は約10 m、天候は曇り、気象庁観測地点（今金）のデータによると、風向は東、風速は5 m/s程度であった。

b) 網場アンカ調査

網場アンカの設置位置についての情報は図面のみであったため、ボートを網場の中央フロートにロープで固定し、中央フロートからアンカへつながるワイヤロープをたどりROVを降下させる方法で調査を行った。下降時に撮影した映像を図-5に示す。

上部の黒い枠には左から日時、ROVの水深 [m]、ROVの方向 [度]および位置座標[度分]が表示されている。なお、美利河ダムの調査を行った際には、トランスポンダの不具合により位置座標は正しく取得できなかった。

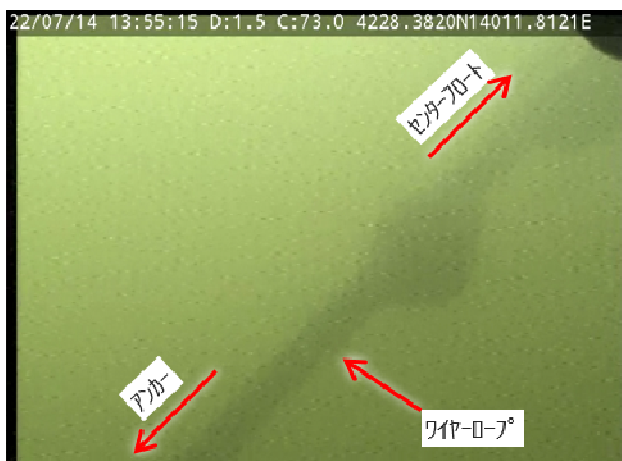


図-5 ワイヤロープ調査画像（上から水深1.5m、6.8m）



図-6 ネット調査画像（上から水深0.1m、1.3m）

上段の水深1.5 mの画像では右上方向に網場のセンターフロートとワイヤロープの接続部が見えており、左下方向にワイヤロープが延びているのが見える。下段は水深6.8 mの画像で、中央左側にワイヤロープの影が見えている。ロープの太さが水深1.5 mの画像と同程度であることから、距離も同程度と推定されるが、水深1.5 mの画像と比べて非常に不明瞭となっている。この調査では何度か潜行を繰り返し行ったが、水深6 m程度まではワイヤロープをたどることができたものの、それより深い位置では濁りがひどくアンカまで到達することができなかった。

c) 網場ネット調査

この調査ではネットの面的な撮影を試みた。ネットの高さは水面から水深2 mほどまでであるため、ネットから離れなければ一度に高さ方向全体を写すことはできないが、水の濁りにより約1 m離れるとぼやけた映像になってしまう。そこで上下方向全体が写るようカメラを上下に動かしながら、センターフロートから右岸側へ徐々に移動し撮影を行った（図-6）。上段はフロートの下部とネット、下段の写真はバランスウェイトの画像である。

今回の調査ではカメラを上下に動かし水平移動しながら撮影を行ったが、調査した日は風が強く波立っており、水面近くで調査をしているROVが流されやすい状況であり、作業に不利な条件であった。

網場ネットの面的な調査については、平成23年度に寒地土木研究所道南支所が美利河ダムにおいて、水中で使用可能なデジタルカメラをポール下端に取り付け、ボートからデジタルカメラを水中部に垂下し、低速でボートを網場に沿って移動させながら動画を撮影するというシンプルな方法で実施し、画像を取得している。この時も網場からの距離が0.5～0.6 m程度であったため、網場の高さ方向全体を撮影するために、デジタルカメラの水深を2～3段階に分けて撮影することを提案している。

今回の調査ではアンカの調査と合わせて実施したため、ROVを使用した方が、浅い箇所における面的な調査については、ROVではない方が有利な場合がある。そこで、ROVと水中カメラ+ポールによる手法を対比させ、表-3に整理した。なお、優位な条件については、それぞれの手法についての作業への適性を定性的に考察したもので、今後調査回数を重ねることで変化することもあると考えられる。

表3 ROVと水中カメラ+ポールによる調査の対比

項目	ROV	水中カメラ+ポール
調査可能水深	・100mまで ・水中移動の自由度が高い	～数m（ポールの長さによる）
観察方向	いろいろな角度から観察可能	固定（ポールの長さ、向きを変えることで、変更可能）
調査方法	船または陸上から操作	船に取り付け、移動しながら調査
準備	機材が多く重いものもあるため、労力と作業時間が大	ポールを船体に取り付けるのみ、労力と作業時間が小
作業人員	4人（ROV操作：1、ROV補助：1、操船：1、その他補助：1） ・船での作業を想定する場合の最小人数 ・機材搬入出があるため、人数が多いほど作業時間短縮可能	2-3人（撮影：1、撮影補助：1、操船：1）
優位な条件	水深が深く、位置、深度、観察方向を変えながら複数箇所の調査が可能	・水面付近であれば、低速で移動しながら撮影することで面的な調査が可能 ・水深が深くても移動しないで撮影する場合、ケーブルのみで垂下する水中カメラの使用が可能

(2) 豊平峡ダムにおけるゲート設備の現況調査

a) 調査概要

札幌開発建設部豊平峡ダムにて、常用洪水吐副ゲート（コースターゲート）の現況調査を行った。本設備は最上部のガイドレール上端から最下部のスクリーン下端までの標高差が約45 mであり、スクリーン、扉体ガイドレール及び下部戸当り等は通年水中にあるため、調査を行う場合は、潜水土による困難な作業となる。当日の調査箇所水深は約50 m、天候は晴れ、気象庁観測地点（札幌）のデータによると風向は北、風速は2m/s程度であった。

b) ゲート設備調査

本設備については、設備上部が水上に見えており図面と対比しやすいことや、調査対象物が大きく位置を確認しやすいことから、比較的スムーズに調査を実施することができた。

まず水深約14 mで撮影した副ゲート点検架台の画像を図-7に示す。上段の画像に写っている縦の桁の間隔が約2 mであることから、2 m以上先まで見えていることがわかる。下段は同点検架台を斜め下方向から撮影した複数枚の画像を結合したものであり、塗装の色や状態を確認できる。画像の結合にはオープンソースの画像処理ライブラリであるOpenCVを利用した。この結合処理では複数の画像上の共通の形状をもとに結合を行っている。画像を結合し表示することで面的な状態の確認に利用できると考えているが、堤体表面など特徴的な形状がない場合は正常に処理できていないため、今後他の手法も含め検討したい。

次に水深約50 mで撮影したスクリーンおよびコースターゲートのガイドレールの画像を図-8に示す。このように観察対象に数 cm～数十 cmまで接近することができれば、1 mm以下の腐食やコンクリートの損傷等の観察も可能である。

美利河ダムの調査では水深6 m程度でおよそ1 m以上離れるとワイヤロープを全く見つけられなくなるほどの濁りであったが、豊平峡ダムの調査では全体的に2 m程度離れても対象物の存在を確認することができた。美利



図-7 副ゲート点検架台（水深約14m）



図-8 上段：スクリーン近接撮影（水深49.3 m）、下段：ゲートガイドレール（水深30.7m）

河ダムでは網場フロートのワイヤロープは湖岸から離れた位置にあるため周囲に位置確認に利用できる構造物などがなかったことも調査を難しくした要因ではあるが、水の濁りが少ないことはROVの操作性、映像の質を大きく向上させることがわかった。

4. ダム施設調査へのROV使用における課題

前章まででROVを用いることにより、これまで潜水士でしか実施できなかったダムの深い箇所調査を、完全に代替できるわけではないが、比較的容易に実施することがわかった。一方で、これらの現地調査からいくつか課題も見出された。そこで、ROVを用いた調査手法をより有効なものとするために課題とその要因を抽出し考察する。

図-9にこれまでに経験した現状の課題とその主要因、またこれまでは未発生だが現状の課題に起因して起こり得る想定課題を示す。現状の課題のうち、「船上の作業性低い」、「作業時間かかる」、「人手必要」については、作業方法や装置の改良で対応することを考えておりここでは議論しない。一方で「ケーブル引っかかる」、「構造物見えない」は検討すべき課題であり、以下に詳述する。

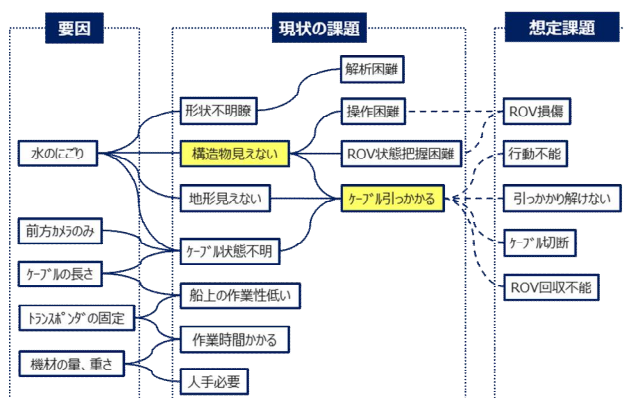


図-9 ROV使用の課題と要因

(1) ケーブルの引っかかり

美利河ダムでの調査では、ROVがアンカーワイヤロープや網場ネットの下をくぐりそうになる場面が度々あったが、濁りがひどく危険と判断したためすぐに後進したり、ネット付近は水面に近いので水上から目視でROVの位置を確認しながら作業を行うことができたことから、実際には構造物をくぐる等の事象は起こらなかった。一方、豊平峡ダムでの調査では、作業中にケーブルが構造物や湖底に沈んだ木などに引っかかりROVが自由に動けなくなる状況が3回ほどあった。構造物は複雑な形状をしているため、引っかかりはある程度想定していた事態であり、ケーブルをたどって戻ることによって、引っかかりを解消することができた（図-10）。しかしな

がら場合によっては、想定課題に記載したような事象に至る可能性も考えられる。ケーブル引っかかりの要因としては、ROVには光学カメラが前方に1台付いており、これを操作と撮影に使用していることが挙げられる。水の濁り具合によっては、一瞬で対象物を見失うことがあるため、ROV操作者は対象物に非常に集中した状態にある。そのため、調査は前進し続けることが多く、後方のケーブルの状態を確認できず引っかかりに至る。これについては、時折ケーブルや周辺状況を確認することで引っかかりを減らすことができると考える。また、ケーブルの長さも要因となっている。両ダムの調査では水平方向の行動範囲や深さを考慮して120 mのケーブルを使用した。作業中は1人がROVを操作し、もう1人がROVの位置を推測しながらケーブルの出し入れを行っているが、豊平峡ダムでは最深で約60 mまで潜行し、水平移動分も考慮して100 mほどケーブルを繰り出した。これにより水中でのケーブル長が過剰となり構造物をケーブルが回り込む状況になったと考えられる。事前に引っかかりが発生しそうな箇所を想定することやROVの位置をこれまで以上に確認しながらケーブルの出し入れを行うなどの予防策や、引っかかりが発生した場合の対処法を複数検討しておく必要があると考える。



図-10 構造物に引っかかっていたケーブル（水深12.8m）

(2) 構造物が見えない

図-9に示すとおり、ROVの光学カメラを用いた調査では水の濁りは多くの課題の要因となっており、ROVの操作や取得した映像の処理の支障となっている。図-8のように近接すれば非常に鮮明な映像を取得できたが、一方で水深10 m付近のアンカーは発見できなかった。水が濁っている状況では超音波による方法が有効であり種々の水中音響機器が利用されている。水中音響機器の1つである音響カメラは、物体に向けて送信した超音波の反射波から映像を生成する技術であり、光学カメラより分解能は劣るものの水の濁りの影響を受けないため、離れた位置からでも観察できるという利点をもっている。当チームでは過年度に音響カメラを使用して構造物水中部の調査を行う手法を開発している⁴⁾。簡易にROVを使用

するという意味では機材が増えることになるが、調査内容に応じてROVと組み合わせて使用する方法も考えられる。

5. まとめ

当チームのROV調査で水深60 mまで潜行したのは本調査が初めてであったが、潜水土によらず深い位置にある構造物の現況確認ができること、職員自らの目でリアルタイムで状況を確認し必要に応じて調査したい箇所へ移動できること、潜水作業のような人体的危険に伴う作業水深や作業時間等の制約がないことなど、これまでの構造物水中部の点検、調査にはない自由度の高さと可能性を見出すことができた。

またROVの使用が優位な条件を整理するとともに、水深が浅い箇所ではROVよりも水中カメラとポールを組み合わせて使用する方が効率よく調査ができる場合があることを述べた。同様の調査を検討する場合の参考となれば幸いである。

一方で、ダム施設の調査にROVを使用することによる課題と要因を抽出することで、作業時に留意すべき点を整理した。今後調査を行っていく中で、このような事

象がどの程度発生するのか、発生した場合の状況などを整理し、必要に応じて装置や運用方法を改善することで、調査の効率化とトラブルの回避を図り、ダム施設の維持管理の支援に寄与できると考える。

謝辞：函館開発建設部施設整備課、美利河ダム管理支所および札幌開発建設部豊平川ダム統合管理事務所の皆様には、業務ご多忙の中、調査に多大なご協力をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 一般財団法人日本ダム協会：ダム便覧 2021、<http://damnet.or.jp/cgibin/binranA/Syuukei.cgi?sy=syunkei>
- 2) 厚生労働省：高気圧作業安全衛生規則の一部を改正する省令（平成 26 年 12 月 1 日厚生労働省令第 132 号）、<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisaku-jouhou-11300000-Roudouki-junkyokuanzeniseibu/kaiseishourei.pdf>
- 3) 国土交通省総合政策局公共事業企画調整課：水中部点検におけるロボット活用マニュアル（案）【ダム堤体編】、https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam8/pdf/suityubutenken_robot_manual_dam.pdf
- 4) 柳沢、片野、国島、五十嵐、長瀬、平：結氷する港湾に対する水中構造物点検技術に関する技術開発、土木研究所資料第 4249 号 2012 年 12 月、pp. 2-30