

大水深構造物の点検用水中調査ロボット

杉本英樹・本山昇

労働力不足が懸念されるなか、老朽化の進む社会インフラの効率的・効果的な維持管理は、喫緊の課題である。また、水深 40 m 以上の大水深となるダム堤体や海洋・港湾構造物の潜水士による点検・調査は、安全面と効率面から、特に困難な課題といえる。

本報では、国土交通省により公募された「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」に参加し、水中調査ロボットによる実際のダム構造物の現場実証試験で性能検証を行って効果を確認できたので、その内容について報告する。

キーワード：維持管理、大水深、ダム、遠隔操作無人探査機、現場実証

1. はじめに

高度経済成長期から整備された社会インフラは、長きにわたり国民の生活基盤として機能してきた一方で、老朽化が進行しており、効率的・効果的な維持管理は喫緊の課題である。構造物の維持管理を行う上で点検・調査が基本であるが、供用しているインフラの点検・調査は劣悪な作業環境下での作業であり、従事する労働力不足といった問題も抱えている。特に、水深 40m 以上の大水深となるダム堤体等の大型水中構造物では、上流面からの潜水士による目視調査が最適であるが、平成 27 年 4 月 1 日に改正された高気圧作業安全衛生規則に基づいて潜水作業時間が制限される事や、減圧施設が必要となる事から、監査廊や下流面での目視調査の結果により健全度評価および診断する事が主流となっている。

このような背景から、筆者らは遠隔操作無人探査機 (Remotely operated vehicle : ROV) を利用した大水深域に適用できる水中調査ロボット (以下、「ロボット」と記す) を開発した。本報では、国土交通省により公募された「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」に参加し、2014 年度の宮ヶ瀬ダム、2015 年度の天ヶ瀬ダムで取組んだ現場実証試験で得られた成果から、ダム堤体の維持管理に必要な水中構造物診断システムの機能と課題について報告する。

2. 水中調査ロボットのシステム概要

図-1 にロボットのシステム概要図を示す。ロボットは、船上もしくは陸上に設置した操作室より本体に搭載したカメラの映像を見ながら遠隔操作し、無人航行が可能である。また、GNSS と水中音響測位装置を組み合わせた測位システムによって、ロボットとダム堤体との位置関係を把握する事が可能である。

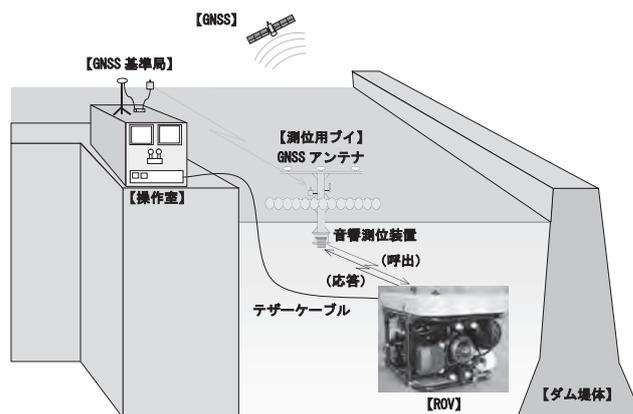


図-1 システム概要図

(1) ロボット

ロボットの寸法は、長さ 90 cm、幅 56 cm、高さ 63 cm、気中重量は約 90 kg である。適用水深は 150 m である。水中では中性浮力を保持し、3 方向のスラストによって、前後・上下・左右方向への自由な航行が可能であり、スラストの自動制御機能によって任意に設定した深度や方位の保持が可能である。

ダム堤体壁面やダムゲート設備の点検は、検査装置面の4箇所配置した伸縮ロッドをダム堤体壁面の角度に合わせて長さを調整して、ロボットをダム堤体壁面に平行になるように押し付けてロボットの位置を保持しながら主要検査装置によって実施する。ロボットは主要検査装置として、計測用カメラ（光学カメラ）、ケレン装置（清掃ブラシ）、肉厚計、打音装置を機体側面に搭載している。これらの装置によって、ダム堤体壁面の高精細な画像取得、ダム堤体壁面の清掃、ダムゲート設備（鋼材）の肉厚計測、ダム堤体壁面の打音検査が可能であり、水深の深い箇所ではLEDライトによって必要な光量を確保する事が可能である。濁水中においてもロボット前面に搭載した音響カメラとロボット底面に搭載した全周囲ソナーによって、ロボットとダム堤体や障害物との距離を把握しながら調査箇所へ接近する事が可能である。また、計測用カメラ前面に取り付けた濁水対応装置内に清浄な水を注水し、計測用カメラと被写体との間をクリアにする事で、濁水中でも鮮明な画像取得が可能である。ロボット本体を写真-1に、ロボット側面に搭載した主要検査装置を写真-2に示す。

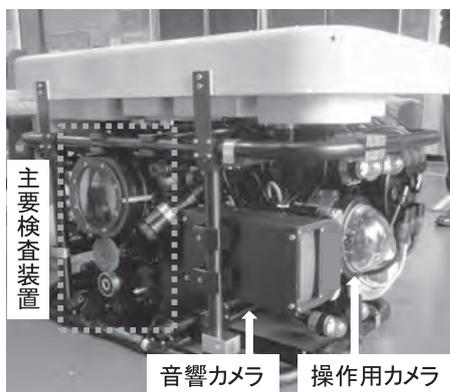


写真-1 ロボット本体



写真-2 ロボット本体および主要検査装置

(2) 測位装置

水面に浮かべたブイ（浮力体）に搭載したGNSS、方位センサ、音響測位装置と、ロボットに搭載した水圧計、方位・姿勢センサ等のデータを組み合わせる事で、ロボットの位置や姿勢情報をモニタリアルタイムに3D表示し、操作者は視覚的にロボットの位置を把握する事が可能である。

(3) 調査方法

構造物の調査は、ロボットの操作者と調査管理者の2名で行う。事前に計画された調査ラインに沿って操作者がロボットを潜航させる。調査管理者が対象物の状況を確認しながら、映像を記録していく。精査が必要と思われた場合は対象位置をソフト上でマーキングしておき、後にロッド調整して対象面がコンクリートであれば清掃して高精細な画像を取得し、鋼材部であれば肉厚計測を実施する。操作状況を写真-3に示す。



写真-3 操作状況

3. 現場実証試験の概要

(1) 宮ヶ瀬ダム

宮ヶ瀬ダムの現場実証試験は2014年11月に実施した。神奈川県に位置する宮ヶ瀬ダムは、2001年に運用を開始したダムであり、堤頂長約400m、堤高156mの重力式コンクリートダムである。調査項目は、ダム堤体コンクリートの浮き・剥離などの状況確認、あらかじめ設けた模擬体の状況確認、洪水吐およびダム最深部付近の状況確認であった。調査時のダム湖水の透明度は高く、水深約20mにおいて計測用カメラによってダム堤体壁面の鮮明な画像取得が可能であり、コンクリート打継目の視認も可能であった。水平方向に約50mロボットを走らせ調査したが、画像取得できる範囲内で浮き・剥離などは確認されず、調査した箇所は健全であると判断できた。

(2) 天ヶ瀬ダム

天ヶ瀬ダムの現場実証試験は2015年11月に実施した。京都府に位置する天ヶ瀬ダムは、1964年に竣工した淀川本川に建設された唯一のダムであり、堤頂長約254m、堤高73mのアーチ式コンクリートダムである。調査項目は、ダム堤体コンクリートの浮き・剥離などの状況確認、あらかじめ設けた模擬体の状況確認、コンジット予備ゲートおよびダム最深部付近の状況確認であった。ここでは現場実証試験の調査項目の他に、水中の濁度が高い環境下での調査である事が課題であった。濁水中においても調査を可能にするため、著者らはロボットの計測用カメラ前面に濁水対応装置と、間隔5cmの平行ラインレーザを追加装備した。調査時のダム湖水の濁度は低かったが、堤体壁面には堆砂や貝等が付着しており、コンクリート横目地の視認は所々で確認可能な状況であった。ダム堤体壁面のコンクリート水平目地に沿って、ロボットを水平方向に約30mの距離を4箇所走らせて調査したが、水平目地の開きや浮き・剥離などは確認されず、調査した箇所は健全であると判断できた。

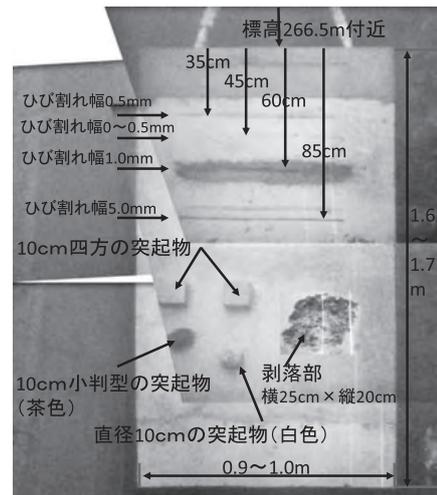
4. 大水深構造物への適用

(1) 調査対象物の状況把握

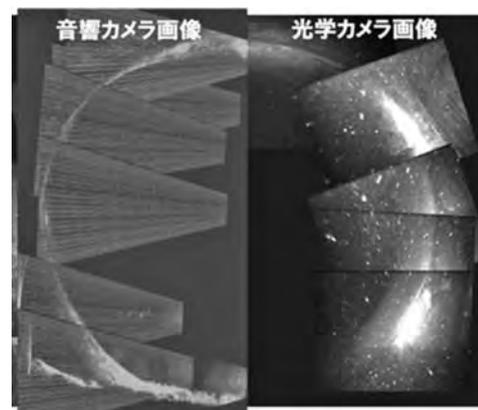
宮ヶ瀬ダムにおいて、水深約17mに設置された模擬体の画像を計測用カメラで取得し、調査後に画像内に写り込ませた平行ラインレーザ（間隔10cm）を長さの基準として模擬体の外形、ひび割れ、突起物や剥落部の寸法を算出して図化した。模擬体計測結果を写真一4に示す。模擬体が緩やかな斜面に設置されていたため模擬体の正対画像を取得できず、模擬体の長さ方向（実際は2m）の計測誤差は大きくなったが、その他は概ね実物とおりの計測が可能であった。

また、水深約48mの高位常用洪水吐では、管口部を光学カメラと音響カメラで撮影し、形状を比較した。光学カメラ画像と音響カメラ画像の比較を写真一5に示す。光学カメラ画像と音響カメラ画像の形状は概ね一致しており、ロボットに搭載した音響カメラによって水中の濁度が高い場合であっても構造物を視認できる可能性が示唆された。水深約93mの低位常用洪水吐では、鋼管内に進入し、管内底部に木や葉が堆積している事を確認した。今回はダム最深部と推定される水深約127mまで潜航して堆砂や沈木を確認し、潜水士では難しい大水深域まで調査が可能であることを確認した。ダムの堆砂状況を写真一6に示す。

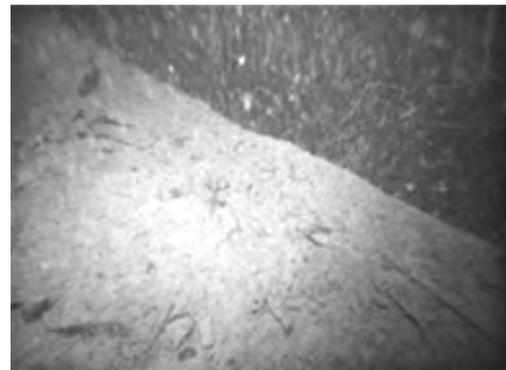
天ヶ瀬ダムでは、水深約28mへ潜航し、ダム最深部において細かな堆砂や沈木が堆積していることを確



写真一4 模擬体計測結果

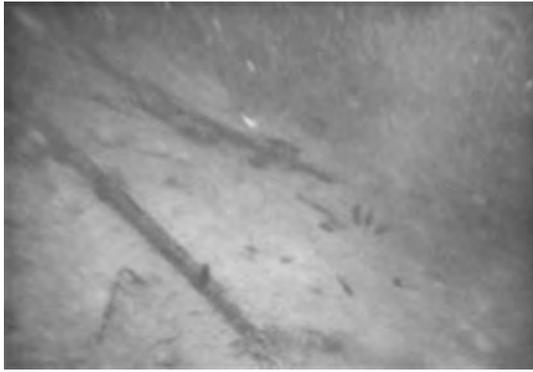


写真一5 光学カメラ・音響カメラ画像比較

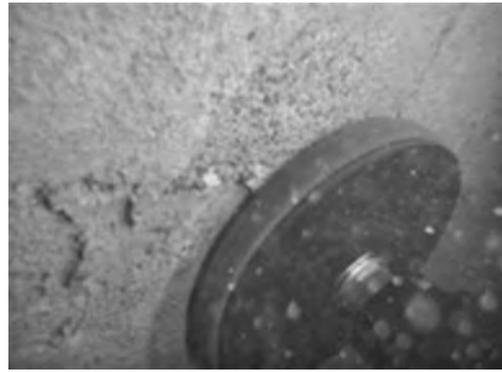


写真一6 宮ヶ瀬ダム堆砂状況

認した。ダムの堆砂状況を写真一7に示す。ここでも水深約12mに設置された模擬体を計測用カメラで画像取得した。設置位置の詳細な情報は与えられていなかったため、概略調査（概査）により模擬体を探索し、調査を実施した。画像内に写り込ませた平行ラインレーザ（間隔10cm）を長さの基準として模擬体の外形、ひび割れ、凹凸部の寸法を算出し、概ね用意された回答と合致した。模擬体の状況を写真一8に、模擬体の計測結果を写真一9に示す。



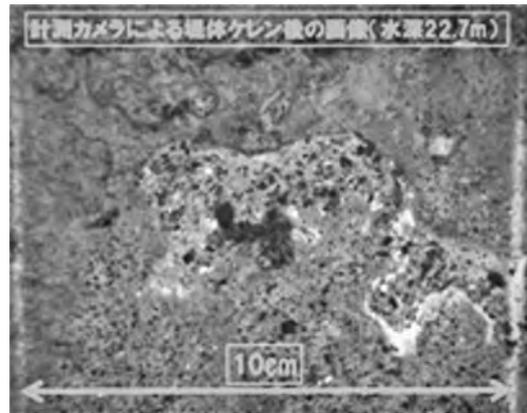
写真一七 天ヶ瀬ダム堆砂状況



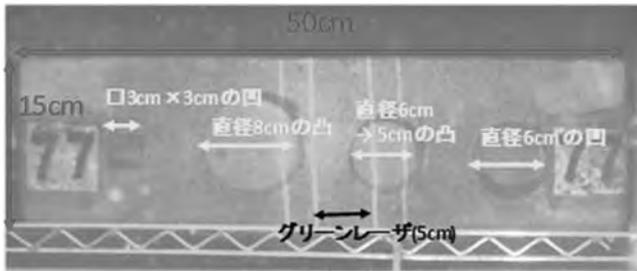
写真一〇 壁面清掃状況



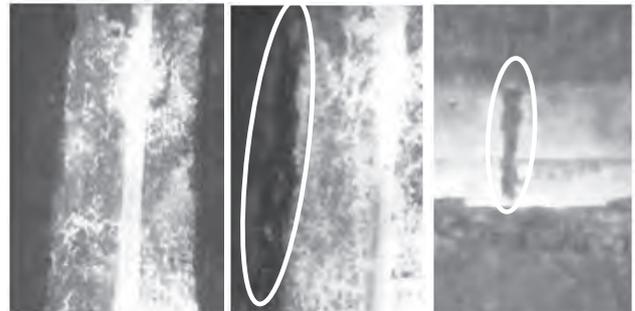
写真一八 模擬体の状況



写真一一 壁面清掃後状況



写真一九 模擬体の計測結果

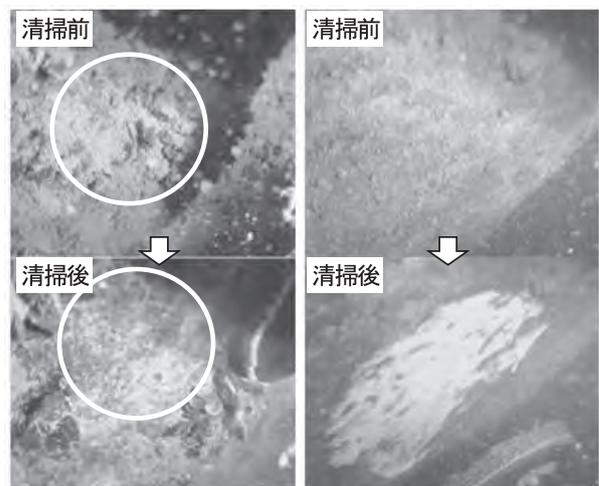


写真一二 ゲート鋼材の変状

(2) 調査対象物の精査

宮ヶ瀬ダムのダム堤体壁面は斜面のため薄く堆積物で被覆されている箇所が多かったが、ケレン装置で清掃を行う事で、堆積物を除去した清浄な検査面とした。壁面清掃状況を写真一〇に、壁面清掃後状況を写真一一に示す。壁面清掃後、打音装置（機械駆動のハンマ）によって検査面を叩き、近傍の水中マイクで打音を取得したが、明らかな浮き・剥離箇所はなく、健全部のみでの打音検査であったため、調査方法の評価はこれからの課題である。

天ヶ瀬ダムでは、コンジット予備ゲート戸当たり部の調査を行った。全体を操作用カメラによって調査し、一部のゲート鋼材の錆等の変状について確認した。写真一二にゲート鋼材の変状を示す。ダム堤体壁面には薄い堆積物や貝が付着している箇所が多く、ケレン装置で清掃を行う事で、堆積物や貝を除去した



写真一三 清掃状況 (左: 堤体面, 右: 鋼材面)

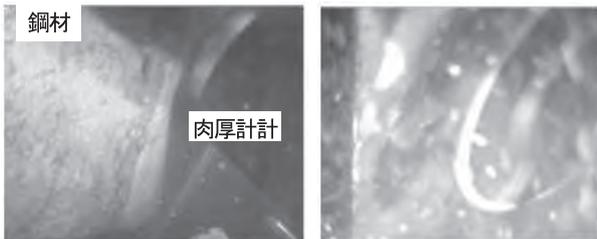


写真14 肉厚測定・ボルト緩み確認状況

清浄な検査面とした。清掃状況を写真13に示す。予備ゲートの鋼材清掃では、対象物の硬さに合わせた清掃用ブラシを適用した事で写真13に示すように、塗装面を損傷させる事なく清掃し、肉厚計によって鋼材の肉厚計測も可能であった。また、予備ゲートのボルトの緩み確認については、清掃用ブラシを回転させながらボルトに当てる事によって、緩みがない事を確認した。予備ゲートの肉厚測定状況およびボルト緩み確認状況を写真14に示す。

清掃用ブラシによる清掃時に、ダム提体上の堆積物が舞い上がって視認しづらくなる事を利用して、濁水対応装置の効果を検証した。濁水対応装置の効果検証を写真15に示す。濁水対応装置を装備した計測用カメラでは、鮮明に提体面を観察する事が可能であった事に対し、濁水対応装置を装備しない作業監視用カメラでは、浮遊物等によって観察が困難である状況となりやすく、濁水対応装置の有効性を確認した。

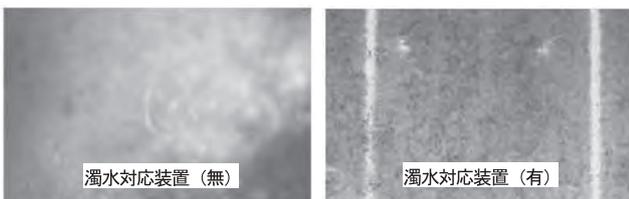


写真15 濁水対応装置の効果検証

5. おわりに

参加した「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」では、水中調査ロボットのシステムの機能および性能、運用性、品質、工期、経済性等の総合的な側面か

ら検証された。宮ヶ瀬ダムと天ヶ瀬ダムでの現場実証試験の結果、開発したロボットは潜水作業が困難な水深40m以深において、潜水士が行う目視点検、形状把握と同等の作業を行える事を確認でき、試行的導入推薦レベルの技術であると評価された。今後は、実証試験で得られた成果をもとに、調査範囲の拡大を狙った運動性能の向上、コスト縮減を狙ったシステム構成機器の簡素化と運用体制の見直し、水中構造物の診断に必要な機能拡張等に取り組み、本技術の適用範囲を広げていく予定である。

謝辞

現場実証試験において、格別のご配慮をいただいた国土交通省、(一財)先端建設技術研究センター、(一社)日本建設機械施工協会、実証現場をご提供いただいた宮ヶ瀬ダムを管轄する相模川水系広域ダム管理事務所、天ヶ瀬ダムを管轄する近畿地方整備局淀川ダム統合管理事務所ほか、多大なご協力をいただいた関係各位に紙面を借りて謝意を表す。

JCMMA

【参考文献】

- 1) 小笠原, 杉本, 森屋: 遠隔操作無人探査機 (ROV) を利用した大水深水中調査ロボットの現場適用, 土木学会第70回年次学術講演会, VI-142, pp.283-284, 2015年9月
- 2) 水野, 小笠原, 杉本, 森屋, 武井: 大水深水中調査ロボットによるダムの点検・調査への現場適用, 土木学会第71回年次学術講演会, VI-740, pp.1479-1480, 2016年9月

【筆者紹介】

杉本 英樹 (すぎもと ひでき)
五洋建設(株)
船舶機械部開発グループ
開発グループ長



本山 昇 (もとやま しょう)
五洋建設(株)
船舶機械部開発グループ

