

アクアジャスター®を搭載した水中心点検ロボット「ディアグ」と 栈橋下面点検ロボット「ピアグ」の開発

株式会社 大林組 正会員 ○濱地 克也
正会員 徳永 篤
沼崎 孝義
青山 裕作

1. はじめに

我が国の社会インフラ施設は多くで進行する老朽化、年々リスクの高まる大規模地震や頻発する風水害などの災害、一方、社会情勢としての人口減少・少子高齢化の進行といった重要かつ喫緊の課題がある。これに対して、近年の ICT などを活用し、効率的・効果的な対応を可能とする技術を開発し、導入することが求められている。そうした中、ダム水中部の潜水士による近接目視の代替（精査）または支援（概査）ができる技術・システムが国交省から公募の対象となった。そこで、アクアジャスター®を搭載した水中心点検ロボット「ディアグ」を新規製作し、ダム現場の実証試験に参加し、水中部のダム壁面やゲート戸当りの良質な映像を取得することができた。また、栈橋上部工コンクリート下面のひび割れや浮き・剥離等を効率的に計測可能な技術というテーマで、国交省中部地整から新技術情報提供システム (NETIS) テーマ設定型の公募があった。そこで、先行して開発を行ったディアグの技術を生かして栈橋下面点検ロボット「ピアグ」を新規製作し、栈橋下面の現場実証試験に参加し、栈橋下面の良質な映像を取得することができた。本報文は、これら開発した2機の点検ロボットの機能ならびに各現場実証試験の結果について記述する。

2. アクアジャスター®の機能

当社が開発したアクアジャスター®は、東京スカイツリー®建設時に威力を発揮したスカイジャスター®を水中で使用できるようにした吊冶具で、ジャイロ効果を活用した回転制御できる機能を有する。ジャイロ効果とは、地球ゴマのように物体が自転運動をすると高速になればなるほど姿勢保持できる現象である（図1）。

ダムなどの水中構造物の点検作業は、通常潜水士により実施され、水中写真の撮影も行われている。また、栈橋下面の点検は、通常船または足場上の点検者により、目視調査や打音調査などが行われている。このジャイロ効果をディアグやピアグに付加させることで、対象物を見失うことなく低速で本体を回転・静止させ、波浪などの影響を抑えたブレのない映像取得が可能となる。

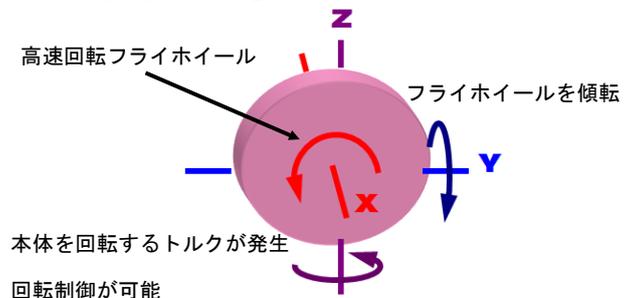


図1 ジャイロ効果の説明図

3. 点検ロボットの機能

(1) システム構成

ディアグとピアグのシステム構成は、図2に示すとおりである。ROV (Remotely Operated Vehicle) 本体は、水中に潜航して水中映像を取得する目的と水上に浮きながら気中映像を取得する目的の違いがあるため、異なる機体構成となっている。ROV 本体以外のテザーケーブルから PC ユニットまでは、ディアグとピアグで共通に使用できるようシステムが構築されている。

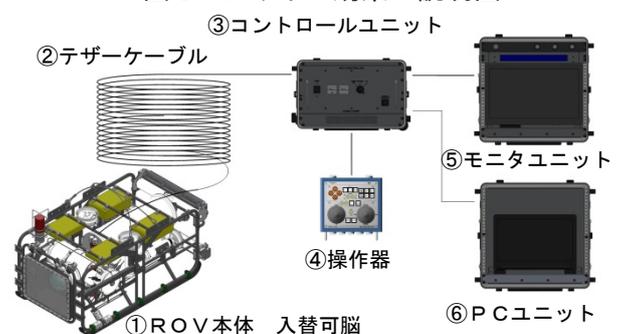


図2 ディアグのシステム構成図

キーワード 点検ロボット, ROV, ダム堤体, ダム戸当り, 海上栈橋, 維持管理

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組 本社 土木本部 設計第三部 TEL 03-5769-1314

①ROV 本体:点検を行うロボット本体. ディアグの場合は, アクアジャスター®, パンチルト機能付きハイビジョンカメラ, 後方監視カメラ, 高輝度 LED 照明, 推進装置, ケレン装置, ラインレーザー, プロファイリングソナー, 深度センサ, 姿勢センサなどを搭載している (写真 1). ピアグの場合は, アクアジャスター®, パンチルト機能付きハイビジョンカメラ, 全方位カメラ, 高輝度 LED 照明, 推進装置, ラインレーザー, プロファイリングソナー, 姿勢センサなどを搭載している (写真 2). ②テザーケーブル: ROV 本体とコントロールユニットを接続する水中ケーブル. 送電線, 光ファイバー, テンションメンバで構成されている. ③コントロールユニット: ロボットシステムを制御するコントローラ. CPU やトランスなどを内蔵している. ④操作器: ROV 本体の運転を行う. アクアジャスター®やカメラの操作スイッチ, 推進装置操作のアナログスティックなどにより構成されている. ⑤モニタユニット: ROV が撮影したハイビジョン映像を表示するモニタおよび録画するレコーダー, ROV の方位などの状態表示するディスプレイで構成されている. ⑥PC ユニット: ROV の全ての情報を表示し, ログ保存するための PC. PC ユニットの表示画面を写真 3 に示す.

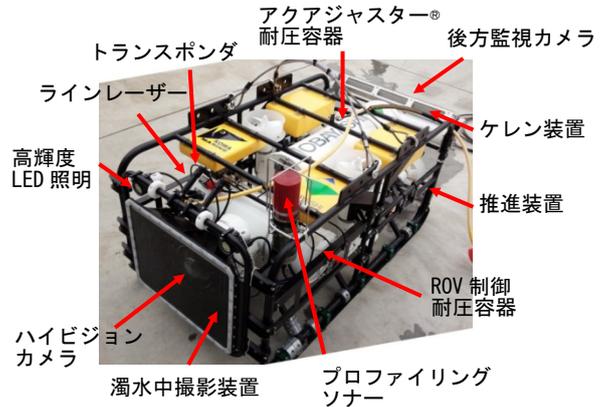


写真1 ディアグの装備機能

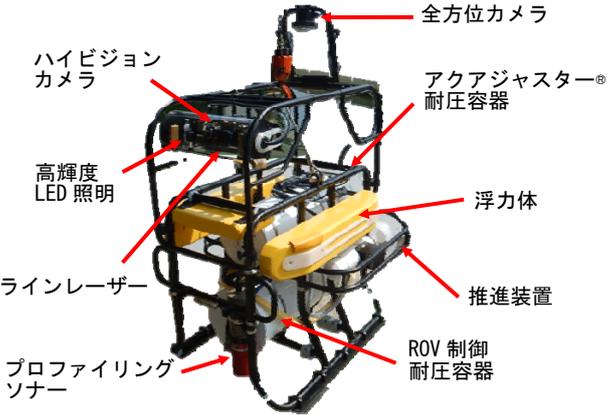


写真2 ピアグの装備機能

(2) ROV 本体の機能

ディアグとピアグともに ROV 本体に搭載したハイビジョンカメラで対象物を撮影し, ラインレーザーの照射幅やラインレーザーのレーザー幅により, 点検対象物の大きさの把握が可能である.

ディアグのハイビジョンカメラには, 濁水中での撮影環境を改善させるため, カメラ前方に清水を満たした容器 (濁水中撮影装置) と画面上のマリンスノーなどが除去できる画像詳細強化装置を配置している. さらに, ソナーを使用することで, 濁って視界の悪い環境でも, ダム壁など周囲の構造物と ROV の位置関係を広範囲に把握することができる. ROV の後方には写真 4 に示すように, ケレン装置と後方監視カメラを装備しており, 推進装置の力でロールブラシを壁面に押し付けて清掃することが可能である.

ピアグの全方位カメラは魚眼レンズを取り入れており, 写真 5 に示すように, ROV 本体周囲の状況を常に把握できるため, 点検場所への移動や障害物の回避が容易にできる.

PC ユニットに保存したログは, 再生時に全ての情報を同期して再生することができ, 報告書作成時の作業負担を軽減している. ROV 本体には拡張性があり, 横移動用推進装置や水中で軽作業を行うマニピュレーターなどを追加可能である. また, Ether 通信を使用し, 各種センサなどを増設して PC に

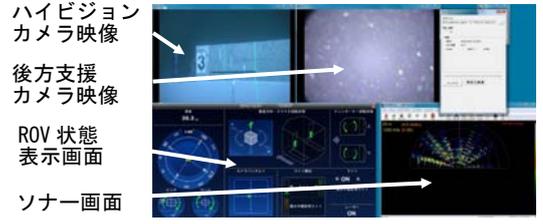


写真3 PC ユニット表示画面

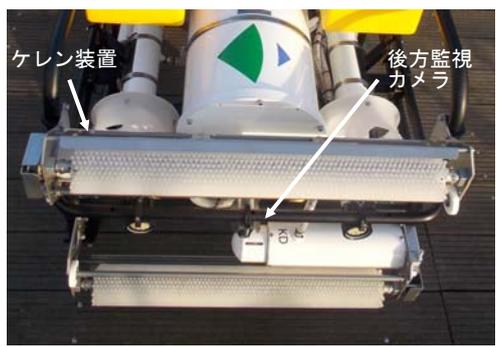


写真4 ケレン装置と後方監視カメラ



写真5 全方位カメラからの映像

表示することができるよう設計されている。

4. 点検ロボット位置確認機能

(1) ディアグの位置確認機能

作業船が見渡せる陸上に自動追尾機能付きのトータルステーションを設置し、作業船に設置したプリズムの位置座標を連続的に取得した。さらに、作業船に船体ジャイロと ROV にトランスポンダ（音波センサ機器）を設置し、作業船の方位や ROV の相対位置をリアルタイムにモニタリングできる位置確認システムを構築した。図3に天ヶ瀬ダムでの検証時のディアグの軌跡をプロットしたものである。

(2) ピアグの位置確認機能

栈橋下面点検ロボットが見渡せる栈橋下に、写真6のような足場を設置し、足場上に自動追尾機能付きのトータルステーションをセットし、ロボットに取り付けたプリズムの位置座標を連続的に取得した。そして、写真7に示すように、栈橋下を航行するロボット位置を、リアルタイムにモニタリングできる位置確認システムを構築した。

5. 現場実証試験の結果

(1) ダム現場での実証試験結果

ダム現場の実証試験は、平成 27 年 11 月 20 日に天ヶ瀬ダム（京都府）、同年 12 月 7 日に弥栄ダム（広島県・山口県）で実施した。各ダムでの調査項目は①横継目、水平継目、壁面の概査、②模擬版探索、精査、③予備ゲート戸当り変状調査、④低水放流設備および着底水深調査、⑤選択取水塔調査（弥栄ダムのみ）であった。模擬版とは、あらかじめ予備ゲート付近に設置されたコンクリート製の調査用試験体である。模擬版は、各ダムにおいて4種類設置されており、円柱状の突起や幅の異なるクラックが設けられている。

①横継目、水平継目、壁面の概査ではクラックの有無を確認しながら水深 40m 付近まで潜行した。水中映像は、高輝度 LED 照明と画面上のマリンスノーなどが除去できる写真8に示す効果がある画像詳細強化装置を使用しながら、ハイビジョンカメラで撮影した。弥栄ダムの横継目の概査状況を写真9に示す。②模擬版精査はアクアジャスター®機能とラインレ

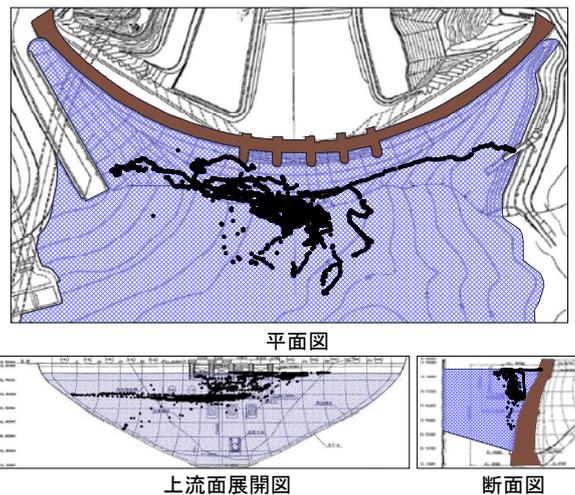


図3 検証時のディアグの軌跡図（天ヶ瀬ダム）



写真6 足場上での測量状況

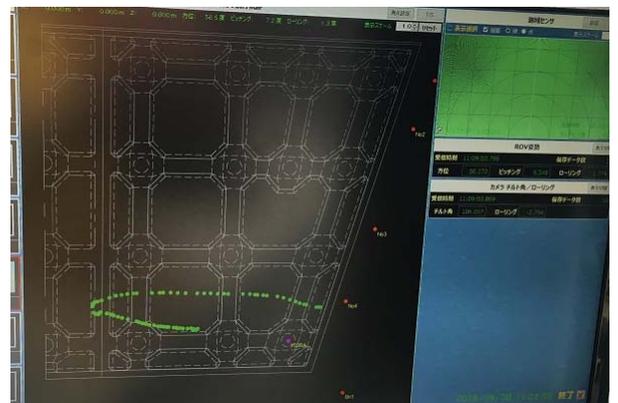


写真7 検証時のピアグの軌跡表示画面

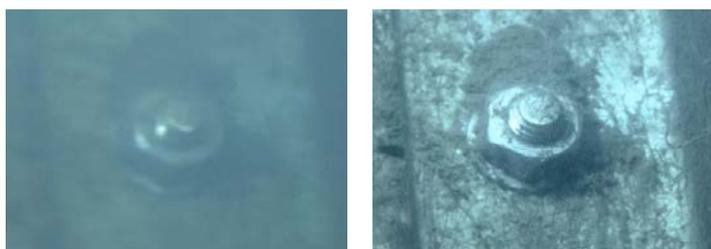


写真8 画像詳細強化装置による効果

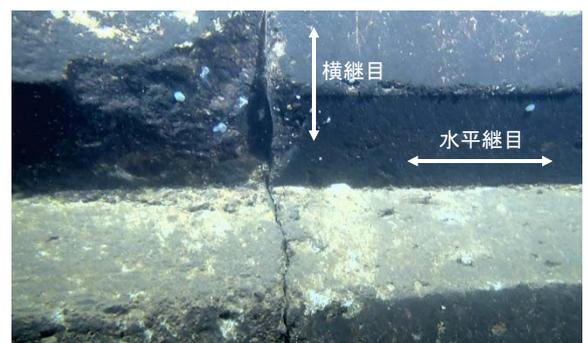


写真9 水深 30m 横継目概査状況（弥栄ダム）

レーザー（照射幅 100mm，レーザー幅 3mm）を用いて計測した。弥栄ダムの模擬版精査状況を写真 10 に示す。③予備ゲートの戸当り調査では変状箇所が見られなかった。④調査時間の制約から低水放流設備を確認することができなかった。予備ゲート下部着底水深調査では天ヶ瀬ダムで 40m，弥栄ダムで 82m であった。⑤選択取水塔調査では，水深 41m にて流木の堆積を確認した。また，水深 20m 付近で ROV に搭載したケレン装置を使用してスクリーンの清掃を行った。その結果，スクリーンのヘドロが取れて金属の光沢が現れた。選択取水塔流木状況を写真 11 に，清掃後のスクリーン状況を写真 12 に示す。

これら 2 つのダム現場の水中心点検を実施した結果，水中撮影において，撮影時の ROV の動きを固定できるアクアジャスター®を使用して，ブレない鮮明な動画が撮影できたことや，画像鮮明化技術を有してより精細な動画の撮影ができていたことなどが評価され，平成 27 年度末に国交省より最高評価となる「★★★」星 3 つの評価をいただき，試行的導入推薦技術とされた。そして，平成 28 年度は国交省直轄の 2 つのダムで，精査・概査方法の確認を行い，将来の本格導入に向けた試行的導入試験を行った。

(2) 海上棧橋現場での実証試験結果

平成 28 年 9 月 30 日に某港の棧橋上部工コンクリートの下面調査を行った。調査は棧橋梁下にトータルステーションを設置するために，潮が引いた時間を狙って 5 時から 14 時まで作業を行った。この作業時間の中で，準備・片付け作業を除いた点検時間の内，実質の撮影時間は短時間であったが，足場とトータルステーションの設置時間が 8 割程度を占めることとなった。

調査手順は，棧橋下面に足場や測量機器を設置，ROV を海中に投入し，棧橋杭間範囲の棧橋下面映像をもれなく取得するよう，写真 13 に示すように ROV を数回往復させる。この往復作業を杭間ごとに繰り返し，映像と ROV 位置を取得してデータを持ち帰り，それらのデータから映像を貼り合わせたモザイク図を作成し，クラック位置やクラック幅などを図面上に落とし込んだ。その加工写真の一部を写真 14 に示す。

ROV はアクアジャスター®機能により ROV の回転方向制御はできるものの，波の上下方向の動きは制御できない。今回の点検時は大きな波浪はなかったため，ハイビジョンカメラのピントが合わないほどの上下動にはならなかった。このため，棧橋下面の状況を的確に捉えることができ，ラインレーザー（照射幅 210mm，レーザー幅 3mm）から，クラック長さや幅が計測できた。

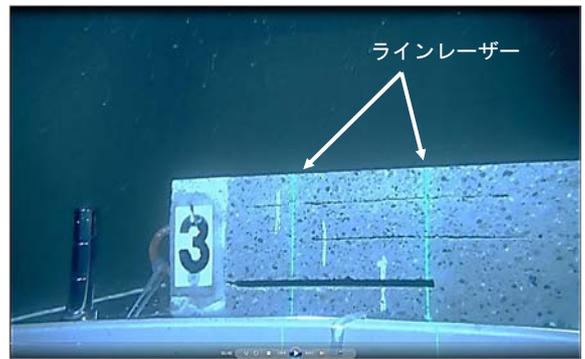


写真 10 模擬版精査状況 (弥栄ダム)



写真 11 選択取水塔流木状況 (弥栄ダム)



写真 12 清掃後のスクリーン状況 (弥栄ダム)



写真 13 ROV による点検状況

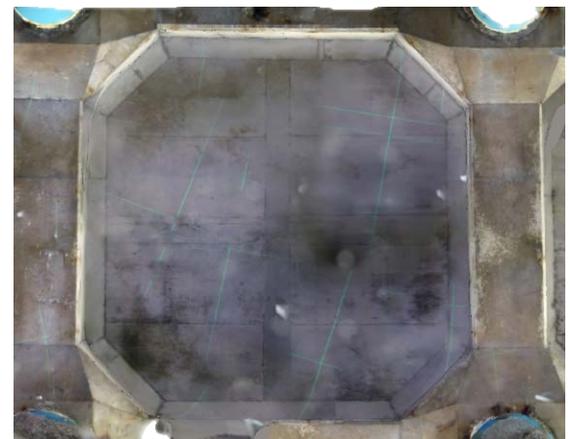


写真 14 点検映像からの加工写真

国交省からの評価結果については現在取りまとめ中であり、評議会後に NETIS 維持管理支援サイトの技術公募のページに掲載予定となっている。

また、民間所有の栈橋上部工コンクリートの下面調査を、ROV 位置を特定する足場とトータルステーションの設置作業を行わずに実施した。既設の栈橋では、杭位置や梁位置が図面でも把握できるので、ROV 位置を特定しなくても映像からクラックなどの位置特定が可能となり、精度も測量時と遜色ないため、概査を目的とした調査であれば、充分機能を発揮できることを確認した。

6. おわりに

合計 4 現場でのダム調査は、クラックの把握ができる映像を取得することができ、一定の点検支援が可能な性能を有することが確認できた。対象となるダムを定期的に調査する場合には、事前に検査対象の図面を 3 次元化してシステムに取り込んでおき、トランスポンダやトータルステーションで測位した ROV の位置を、システム上にリアルタイムでプロットすることも可能であり、検査対象位置が分かっているならばその位置への誘導も可能となる。今後は、ダムの中点検ロボットの本格導入に向けて、ディアグのさらなる改良を行う予定である。

今回、新技術情報提供システム (NETIS) テーマ設定型の公募では、栈橋下面を ROV の位置を確認しながら点検を行った。この位置確認には、足場とトータルステーションを使ったが、このセット時間に多くの時間を割くこととなった。そこで、民間所有の栈橋下面で、測量機器なしでの映像取得を試みた。その結果、映像や既存の図面から、問題なくクラック位置の把握ができた。ピアグの映像取得については、栈橋の下面を捉えることができるが、今回公募案件で実施したような梁スラブ構造の栈橋では垂直面も存在する。垂直面では斜め下からの映像取得となるため、垂直面が近接する場所などの映像取得については、今後の課題となる。

参考文献

- 1) 濱地 他, アクアジャスター®を搭載した水中点検ロボットのダム現場実証試験, 第 71 回年次学術講演会, 土木学会, 2016.9
- 2) 濱地 他, アクアジャスター®を搭載した栈橋下面点検ロボットの現場実証試験, 第 72 回年次学術講演会, 土木学会, 2017.9
- 3) 濱地 他, 水中点検ロボットのダム現場実証試験, 環境浄化技術, vol.15 No.4, p 66~70, 日本工業出版, 2016.7-8
- 4) 椎名 他, アクアジャスター®搭載 ROV による姿勢制御した水中構造物の健全性評価, 日本ロボット学会誌 vol.34 No.8, p 507~508, 日本ロボット学会, 2016.10