

港湾構造物の維持管理への ICT の活用

無線操作式ボートを用いた港湾構造物の点検・診断システム

本 山 昇

我が国の社会インフラは老朽化が進行しており、効率的・効果的な維持管理が求められている。栈橋や岸壁といった港湾構造物も例外ではなく対応が急がれるが、栈橋上部工下面の点検・調査は従事する労働力不足や狭隘な箇所では調査が困難であるなどの問題を抱えている。

そこで、市販のラジコンボートにカメラ、無線機などを搭載し、直接栈橋下部に点検者が行かずとも効率的に点検・調査が可能である「無線操作式ボートを用いた港湾構造物の点検・診断システム」を開発した。

本報は、開発したシステムを実際の栈橋へ適用し、確認された内容および効果について報告するものである。

キーワード：維持管理、栈橋、無線操作式ボート、劣化診断、モニタリング

1. はじめに

高度経済成長期から整備された我が国の社会インフラは、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急務な課題である。維持管理を行っていく上で、構造物の点検・調査が基本となるが、供用中のインフラの点検・調査は十分な作業範囲を確保する事が難しく、加えて作業時間も制約されるなど、劣悪な作業環境下での作業になり、近年加速する調査に従事する労働力不足といった課題を抱えている。

栈橋上部工下面の一般的な点検・調査は、専門知識を有する者（例えば海洋・港湾構造物維持管理士やコンクリート診断士などの有資格者）が小型船に乗り込み、知識を駆使しつつ船上から観察して劣化状態を把握する。しかし、小型船には操船者と点検者が乗船するため、ある程度の大きさの船が必要となり、例えば前垂れ部が水面付近まで存在しているような狭隘な箇所へは進入できない。また、調査施設の劣化度判定は、専門技術者がひび割れ図や写真などをもとに部材ごとに行っているため、調査者の主観的な評価となり、調査者によって結果にばらつきがでるといった問題がある。

これらの背景から、筆者らは専門知識を有する技術者が直接栈橋下部に進入する事なく、効率的な点検・調査が可能で技術として、カメラを搭載した無線操作式のボート（以下、ボートと記す）を用いた点検・調

査システムと、点検・調査によって取得した画像を用いて構造物の劣化度を自動判定する自動劣化度判定システムの開発を行った。

本報では、開発したそれぞれのシステムの概要と、建設から45年経過した栈橋にシステムを適用し、そこで確認された劣化の抽出精度や調査効率について報告する。

なお、本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：NEDO）に応募して採択され開発したものである。

2. 無線操作式ボートを用いた点検・調査システム

ボートは、市販のラジコンボートに画像伝送無線機やLED照明などを搭載し、全長2.2m、全幅1.1m、全高0.65m、重量57.5kgであり、栈橋上部工下面と水面との距離が80cm程度確保できれば、栈橋内部へ進入できる設計とした。写真1に使用したラジコンボートを、写真2に無線操作式ボートを示す。

また、操船は船尾に配備した2基のスラスタを専用のコントローラで無線遠隔操作する事で、前後左右方向へ航行でき、動力は船体に内蔵したバッテリーを使用した。無線操作式であるため、ROV（Remotely Operated Vehicle）のように本体が制御ケーブルで繋がれておらず、杭が乱立しているような栈橋内部であっても、



写真一 市販のラジコンボート

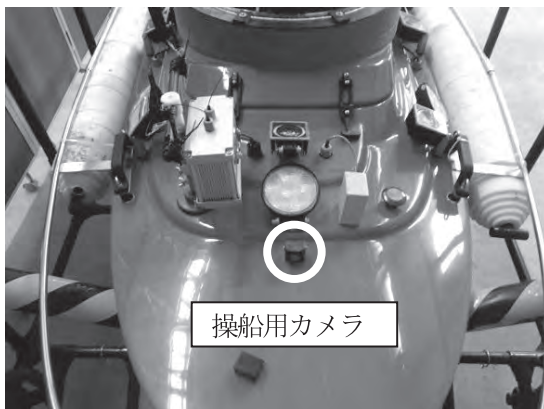


写真二 無線操作式ボート

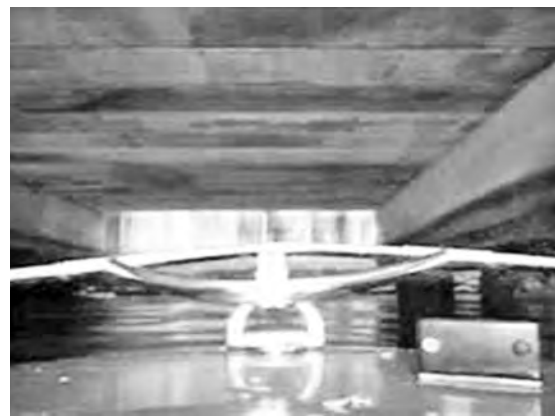
ケーブルの干渉を懸念する事なく、内部を自由に走行する事ができる。搭載した主な機器の詳細を以下 (1)～(4) へ項目別に示す。

(1) 操船用カメラ

ボートの船首には操船用のカメラとして小型の防水カメラを搭載し、カメラの映像を画像伝送無線機によって桟橋上に設置したモニタへリアルタイムに表示させた。これによって、操船者が陸上に位置し、ボートが桟橋内部へ進入しても操船者の視界を確保でき、操船する事が可能である。写真一三に搭載した操船用カメラを、写真一四にモニタに表示させた操船用カメラの映像を示す。



写真三 操船用カメラ



写真四 操船用カメラのモニタ映像

(2) 撮影用カメラおよびジンバル

ボートの船体中央には、桟橋上部工下面を撮影する撮影用のカメラを搭載した。撮影用カメラは市販の一眼レフカメラを使用しており、動画撮影時の画素数は最大 3840×2180 の約 840 万画素を有している。

撮影用カメラは動揺抑制装置（以下、ジンバルと記す）を介して船体に搭載し、波浪による動揺を抑えて安定した撮影を可能とした。さらに、撮影用カメラの映像は操船用カメラと同様に、画像伝送無線機によって陸上に設置したモニタにリアルタイムに表示させた。ジンバルは、専用のコントローラで無線遠隔操作できるため、点検・調査者はモニタの映像を確認しながら、自由に撮影用カメラを撮影したい箇所へ向ける事ができる。写真一五に搭載した撮影用カメラおよびジンバルを、写真一六にモニタに表示させた撮影用カメラの映像を示す。

(3) 操船用無線機

ボートの操船には、常用無線機として周波数 2.4 GHz 帯のものを、応急用無線機として周波数 350 MHz 帯のものを切替えて使用する設計とした。

周波数 2.4 GHz 帯の無線機ではリアルタイムでの操



写真五 撮影用カメラおよびジンバル



写真一六 撮影用カメラのモニタ映像



写真一七 LED 照明

船が可能であるため、カメラの映像を見ながら操作を行うボートの操船に適している。しかし、長距離の通信には不向きであるため、万が一、調査中に通信が途切れた場合に海域への船体の流出が懸念される。そのため、ボートには常用無線機に加え、応急無線機として周波数 350 MHz 帯の無線機を搭載した。常用無線機に比べて通信遅延が少々あるが、通信距離が長く、常用無線機での操船中に通信が途絶えた際の応急用として使用し、コントロールを継続する事で船体の海域への流出を防いでいる。



写真一八 閉鎖空間での LED 照明点灯状況

(4) LED 照明

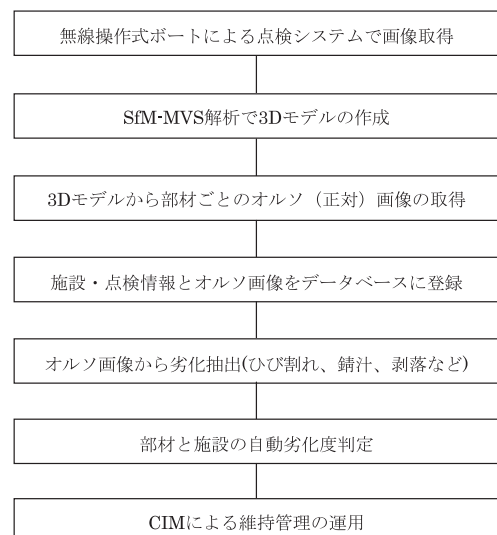
栈橋下面部では光が入り込まない箇所や、船舶接岸時に日射が入り難くなる場合があり、施設の構造や状況によって得られる光量は都度異なる。開発した自動劣化度判定システムでは、ボートによって得られた画像を解析し、画像上の濃淡分布からひび割れや錆汁等の変状を抽出するため、均一な光量が必要である。そのため、ボートの船体に大小 2 灯を 1 セットとした LED 照明を装備した。LED 照明は船首に 1 セット、左右舷にそれぞれ 2 セット、船尾に 1 セットの計 12 灯配置し、各 LED は操船用コントローラで個別に ON/OFF できる。陽射しによる濃淡の緩和や光量の補完をする事で、光量が極端に低下する閉鎖されたサイトや夜間の点検・調査にも対応できる。写真一七に搭載した LED 照明の点灯状況を、写真一八に閉鎖空間での LED 照明の点灯状況を示す。

3. 自動劣化度判定システム

ボートによる点検・調査で撮影した動画データから大量の静止画を取得し、SfM/MVS (Structure from Motion/Multi View Stereo) 解析して 3D モデルを作成する。作成した 3D モデルから正対画像 (オルソ画像) を抽

出し、画像上のひび割れや錆汁等の変状を抽出する。この処理を各部材ごとに行い、抽出した各部材ごとの劣化度を判定・集計する事で構造物全体の劣化診断を行うことが可能である。

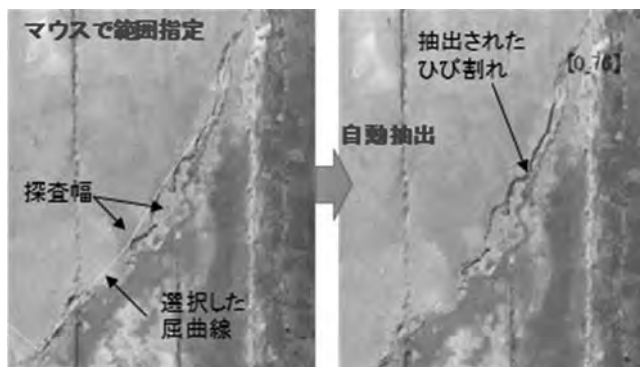
さらに、これらの処理によって得られた画像および関連情報をデータベース化し、劣化の経時変化を管理する事ができ、構造物のモニタリングを行う事が可能である。図一にデータ処理のフローを示す。



図一 データ処理フロー

(1) 変状の抽出方法

ひび割れ等の変状の抽出は、西村ら¹⁾のひび割れ半自動抽出とひび割れ近傍の濃淡分布から幅を算定する手法を用いた。半自動抽出とは、撮影した画像内に写っているひび割れのおおよその位置を手動で屈曲線として選択し、屈曲線を基準として探査幅を与え、各画素に含まれる濃淡レベルから自動でピーク位置を検出し、ひび割れをCAD図として描画する方法である。この方法では、画像の解像度を均一にする必要があり、各部材の解像度が2 mm/pix 以下であれば、幅3 mm 以上のひび割れ等を検出する事が可能である。図一2 にひび割れ抽出のイメージを示す。



図一2 ひび割れ抽出イメージ

4. 現場実証試験

建設から45年が経過している、長さ80 m × 幅20 mの栈橋を対象に現場実証試験を実施した。この時の栈橋上部工下面と水面との距離は0.8 m ~ 1.5 m程度であった。また、ボートによる点検・調査時の撮影用カメラの解像度は2 mm/pix 以下となるよう設定した。撮影は栈橋上部工下面の梁とスラブを対象に行い、2時間で約1600 m²を撮影する事が可能であった。システムの調査時間は、機器の準備や片付けおよび調査中に機器のバッテリー交換等の作業が必要であった

め、1日あたり最大で4時間程度である。

海上目視点検の標準歩掛²⁾は、1240 m²/日(調査時間は6時間)とされており、今回の結果から想定される1日あたりの調査面積は約3200 m²/日であり、従来の人員目視調査に比べて調査効率は2.5倍程度であった。ただし、ボートに搭載している各無線機の通信距離は、現場条件や環境によって前後するため、調査効率は変動する場合がある。図一3に栈橋の平面図およびボートの航行ルートを、写真一9に試験状況を示す。

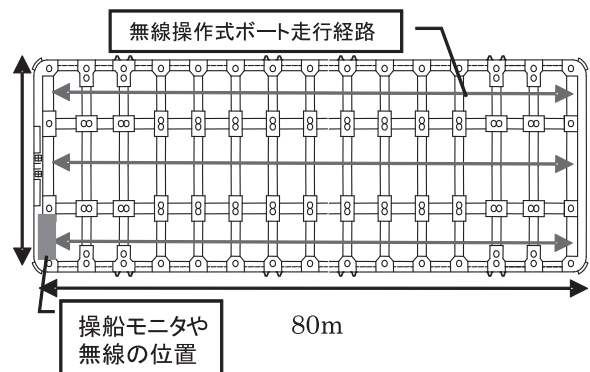
(1) データ処理結果

ボートによる点検・調査によって撮影した動画データから3Dモデルを作成し、3Dモデルから部材の位置や劣化位置を特定した。図一4に調査した栈橋下面部の3Dモデルを示す。

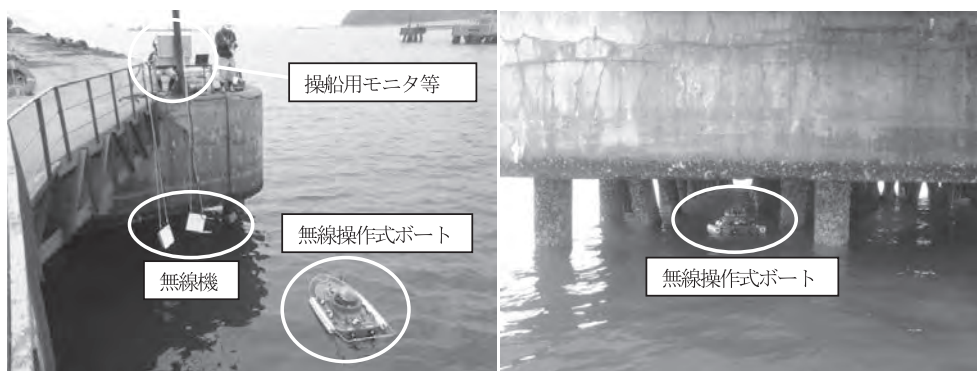
図一5に梁・スラブの変状抽出結果の一例を示す。梁についてはかぶりコンクリートが剥落し、鉄筋の露出が生じていた。また、スラブについてはひび割れや鋼材露出等の変状が抽出された。

(2) 劣化度判定

各部材の劣化度の判定は、表一1に示す「港湾の施設の点検診断ガイドライン」³⁾の栈橋上部工の劣化



図一3 平面図およびボート航行ルート



写真一9 試験状況

度の判定基準を参考に設定した。剥落面積による判定は、小さな損傷による剥落がある事を考慮し、全体の面積の1%以上をa判定とした。部材数は梁が129箇所、スラブ54箇所であった。調査した栈橋は劣化が

進行している状況であり、梁では約80%がa判定、スラブでは約96%がc判定であった。また、スラブに比べて梁は劣化が進行している状態であった。図一6にスラブと梁のそれぞれの劣化度ごとの分布を示す。



図一4 調査栈橋下面部の3Dモデル



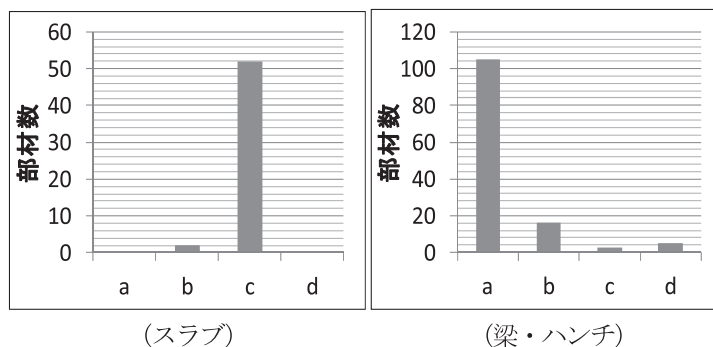
図一5 変状抽出結果の一例

表一 「港湾の施設の点検診断ガイドライン」の劣化度の判定基準

(スラブ)

(梁・ハンチ)

(スラブ)		(梁・ハンチ)	
a	網目状のひび割れが部材の表面50%以上ある かぶりの剥落がある 錆汁が広範囲に発生している	a	幅3mm以上の鉄筋軸方向のひび割れがある かぶりの剥落がある 錆汁が広範囲に発生している
b	網目状のひび割れが部材の表面50%未満である 錆汁が部分的に発生している	b	幅3mm未満の鉄筋軸方向のひび割れがある 錆汁が部分的に発生している
c	一方向のひび割れ若しくは帯状又は洗浄のゲル吐析物がある 錆汁が点状に発生している	c	軸と直角な方向のひび割れのみがある 錆汁が点状に発生している
d	変状なし	d	変状なし



図一6 劣化度の分布

(3) 人員目視による調査結果との比較

試験を行った栈橋では、本試験による調査の1年前に人員目視による調査が行われている。その診断結果と、開発した自動劣化度判定システムによる診断結果との比較を行った。スラブについての結果はすべて一致し、梁は約90% (116箇所/129箇所) の一致であった。約10%異なった原因としては、劣化の進行、鉄筋軸方向のひび割れが長さに関係なくb判定以上とした事や、幅3mm以上のひび割れ抽出不足が考えられる。ひび割れ幅3mm以上の抽出不足は抽出する幅が広い事や、光が当たる事で、ひび割れが白くなり、濃淡差を検出できない事が原因であると考えられる。

5. おわりに

今回実施した現場実証試験により、開発したポートによる点検・調査システムと、自動劣化度判定システムでは、従来の人員目視による点検・調査に比べて、約2.5倍の効率化が図れる事が確認された。また、開発した自動劣化度判定システムによって、画像処理で変状を抽出し、劣化度判定した結果は、人員目視との結果と概ね一致する事が確認された。

今後はさらに調査実績を増やし、データの蓄積を行っていく事で、より効率的・効果的な栈橋の維持管理に繋げていく所存である。

謝 辞

本研究は内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：NEDO) によって実施している。SIPの関係各位、また現場実証試験フィールドを提供いただいた関係各位に、誌面を借りて謝意を表す。

JICMA

《参考文献》

- 1) 西村正三, 原健司, 木本啓介, 松田浩: 3D レーザ・デジタル画像を用いた軍艦島計測と損傷図作成, Journal of JSPRS, pp.46-53, 2012
- 2) 国土交通省: 維持管理計画書策定のための現地調査積算基準, pp.6, 2015
- 3) 国土交通省: 港湾の施設の点検診断ガイドライン【第2部 実施要領】(平成26年7月), pp.3-34, 2015
- 4) 水野, 酒井, 小笠原, 本山, 杉本: ラジコンポートを用いた栈橋下面部の点検・診断システムの開発, 第42回 海洋開発シンポジウム(2017)

【筆者紹介】

本山 昇 (もとやま しょう)
五洋建設㈱
船舶機械部開発グループ

