

回転翼 UAV を用いた栈橋上部工下面の点検診断の試行

安達 昭宏*・松村 健悟**・篠原 真三***・秋山 知士****・田中 瞭佑*****・松本 裕樹*****

* (一財) 沿岸技術研究センター 関西支部長

** (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

*** 前 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 所長

**** 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 技術開発課 課長

***** 前 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 技術開発課 技官

***** CalTa (株) 事業部

港湾施設（係留施設）の主要な構造の一つである栈橋の性能評価においては、栈橋上部工下面の塩害劣化の進行状況を確認することが必須である。従来、栈橋上部工下面の状態把握は小型ボートに乗船した調査員または潜水士による直接目視や写真撮影による点検が採用されてきた。しかし、これらの方法は海象条件や上部工と水面の離隔、調査対象施設における船舶の着船・周辺航行の状況によっては作業の安全性に支障をきたす可能性が懸念される。これに対し、近年では水上を航行する無人機（ROV）の活用についても研究が進められているが、機材の揚重や海流・航走波の影響など制約条件がある。本研究では、栈橋上部工下面の点検診断手法の選択肢の一つとして、空中を飛行する回転翼 UAV を活用して栈橋上部工下面の表面状態の撮影を試みた。そして、3D モデル上での変状の視認及び劣化度評価まで実施可能な画像を取得することが可能であるか検証を行った。

キーワード：栈橋上部工、空中 UAV、3D モデル、維持管理

1. 検証の目的と背景

港湾施設で多く採用されている栈橋式係船岸の上部工下面の点検は、小型ボートからの目視による点検若しくは、小型ボート等で栈橋の下に入り込めない場合は、潜水士等により目視によって実施している¹⁾。小型ボートでの調査の場合、栈橋上部工下面と水面との離隔が大きいとクラックスケールが当てられない、逆に潜水調査で離隔が小さいと広範囲を計測する場合、時間が長くなる、床板下面の調査が多いため常に上を向いた調査となる、小型ボートであっても、クレーン付トラック等により水上に下ろす必要がある、潜水作業の場合は送気設備などの準備が必要である、などが課題となっている。

近年では、水上を航行するボート型の無人機(ROV)²⁾などが開発されているが、機材の揚重が必要なことや費用面の課題等がある。このため、調査に必要な機器が少なく費用が安価で、かつ陸上から栈橋上部工下面の調査を行うことが可能となれば、維持管理の効率化に繋がる。

2. 検証内容

2.1 検証施設および環境条件

検証施設は、徳島県小松島市に位置する徳島小松島港の金磯地区岸壁(-11m)とした。本施設は、栈橋式構

造となっており、図-1に示す延長200m、幅40mの範囲で検証を実施した。

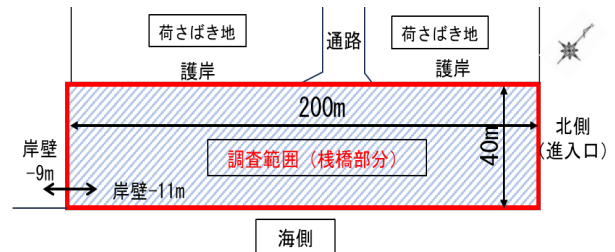


図-1 検証施設 平面図

また検証施設は、図-2に示すとおり、①岸壁前面に前垂れがあり、岸壁前面側の鋼管杭と前垂れとの間隔や土留護岸と栈橋杭との間隔が狭くなっており、1番狭い箇所は1m程度となっていること。②栈橋上部工の梁下端の高さが+2.3m、平均潮位が+1.0mであり、かつ土留護岸に向けて基礎マウンドが施工されている施設であること。③栈橋上部工下面部を調査するには、

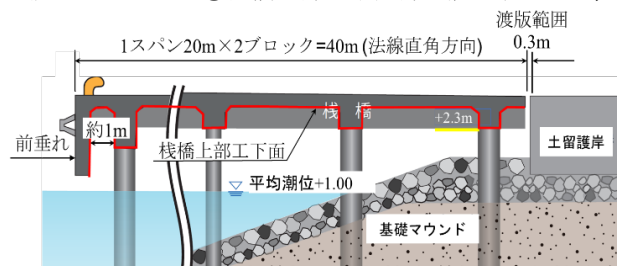


図-2 検証施設 断面図

岸壁前面に前垂れがあることや、図- 1 に示すとおり、隣接バースと連続していることから、平面図の右側（北側）から進入する必要がある。等の特徴を有している。

2.2 検証に使用した機器

検証は、回転翼 UAV (IBIS2) 「寸法：縦 20 cm×横 20 cm×高さ 6 cm」(写真- 1)に落下時に回収できるよう、発泡スチロール製のフロート「寸法：直径 5 cm×長さ 20 cm」を取り付けた。(写真- 2)

使用した回転翼 UAV は、栈橋上部工下面の GPS 環境外で利用できる機種で、フルハイビジョン（解像度 1920×1080）の広角カメラを搭載し、風速 3m/s まで飛行が可能で、最大飛行時間は 11 分である。



写真- 1 使用した回転翼 UAV (通常時)

発泡スチロール製フロート



写真- 2 使用した回転翼 UAV (フロート装着時)

2.3 実証実験に向けた課題の抽出

実証施設の特徴等から、下記に示す課題を抽出し、対応策を検討した。

a) 栈橋上部工下面の風の状況

表- 1 風速測定結果

測定	風速 (栈橋上)	風速 (栈橋下)
1	4.5~2.5 (m/s)	0.8~0.6 (m/s)
2	4.5~2.5 (m/s)	0.6 (m/s)
3	4.0~2.0 (m/s)	0.0 (m/s)
4	3.2~5.5 (m/s)	0.5 (m/s)
5	2.0~3.8 (m/s)	0.1 (m/s)

栈橋上部工下面は、岸壁前面側の前垂れと土留護岸に囲まれているため、栈橋上の風速と異なることが予想された。実証実験において、栈橋上の風速と栈橋上部工下面の風速を計測した結果、栈橋上で風速 5.0m/s を超える風を観測していても、栈橋上部工下面の調査空間は、0~0.8m/s であり、栈橋上部工下面は、風速が小さいことが分かった。

b) 栈橋上部工下面の進入方法の検討

栈橋上部工下面は、岸壁前面の前垂れと土留護岸に囲まれ、調査範囲は、幅 40m、延長 200m と広く、回転翼 UAV の最大飛行時間 11 分では、北側から進入する方法では調査できない。実証実験を行う栈橋には、渡版が設置される計画で、30 cm~50 cm 程度の隙間があった。この隙間を利用して離着陸させるため、図- 3 に示す移動式の離着陸装置（カタパルト）を制作した。また、カタパルトの離着陸の方法を図- 4 に示す。



図- 3 離着陸装置（カタパルト）の外観

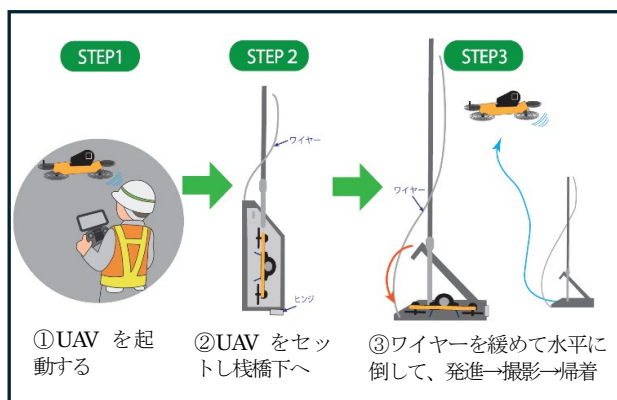


図- 4 カタパルトを用いた離着陸の方法

c) 通信環境の確保

無線通信は、栈橋の杭や梁の配置の影響を受ける可能性があるため、実証実験場所にて電波通信状況（受信強度）を、写真- 3 に示す操作モニターにより、無線通信の安定性を確認する方法とした。



写真- 3 操作モニター

無線通信の安定性確認は、実証実験で使用する無線レンジエクステンダー（諸元を表-2に示す）を用いて実施した結果、図-5に示すとおり、最長通信可能距離は、約80mであった。

表-2 無線レンジエクステンダーの諸元

機器型式	詳細	出力
WR-VDJ02T1	9M00F3F 周波数 5655～5725, 5740, 5750Mhz	10mW

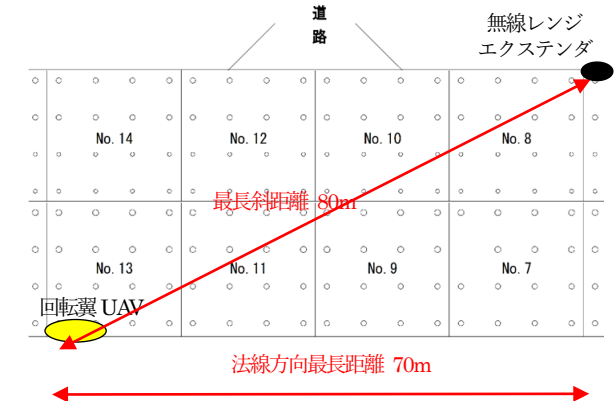


図-5 無線レンジエクステンダーによる無線通信の距離



写真-4 使用した無線レンジエクステンダー

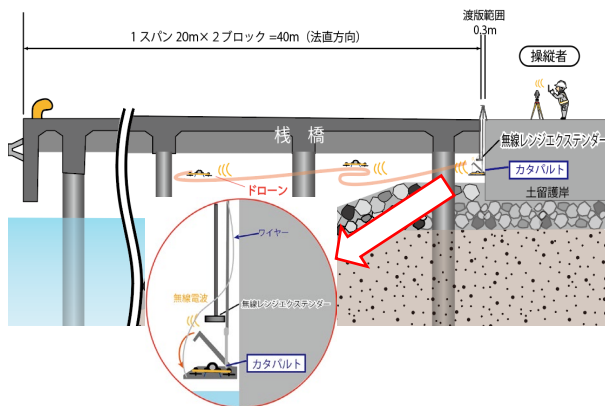


図-6 回転翼UAVによる現地調査のイメージ

d) 栈橋上部工下面の飛行可能高さ

現地調査は、栈橋上部工下面の最も標高が低い部分（D.L.+2.3m）から水面までの距離を桁下飛行可能高さとして定義し、回転翼UAVの性能と操縦者の意見から、最低50cm以上確保できる日時を基本とした。さらに万が一

墜落した場合、ゴムボートでの回収となるため、ゴムボート等で回収できる桁下飛行可能高さとして80cm以上確保できる日時を選定した。図-7に桁下飛行可能高さを示す。

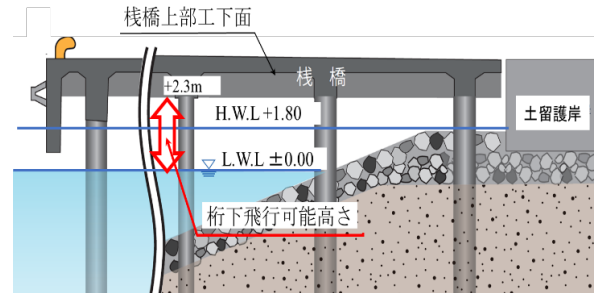


図-7 桁下飛行可能高さ

3. 実証実験

3.1 回転翼UAVによる調査

回転翼UAVの離着陸の状況を写真-5及び写真-6に、回転翼UAVによる調査の状況を写真-7示す。

制作した離着陸装置（カタパルト）の開閉や回転翼UAVの離着陸は、問題なく実施することが出来た。

又、回転翼UAVにフロートを装着していたため、墜落時に水没することなく回転翼UAVを回収できた。

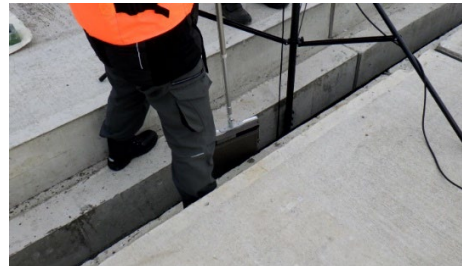


写真-5 栈橋上部工下面へのカタパルトのセット状況（隙間30cm）

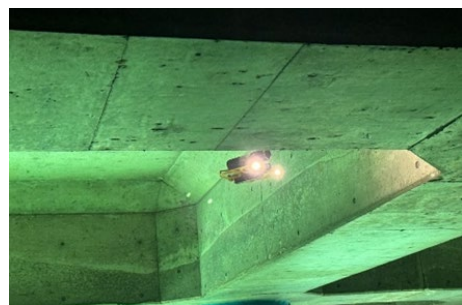


写真-6 回転翼UAV離着陸の様子



写真-7 回転翼UAVによる調査状況

3.2 回転翼 UAV による調査

目視調査と同等以上の画像取得を目的としてフルハイビジョン画像が安定的に撮影可能か確認した結果、写真- 8 及び写真- 9 に示すとおり、剥離が読み取れる画像が取得できた。従来の方法によるデジタルカメラの画素数は、1600 万画素に比べて、今回使用した回転翼 UAV のカメラは、解像度 1920×1080 であり、画素に変換すると、約 200 万画素となる。画素数は低いが、SfM を目的として撮影する場合、ラップ率を加味した撮影が必要となること、また、栈橋下面は暗いため、暗所でも明るく撮れるセンサ及びライトを搭載したカメラが必要となる。今回、実証実験で使用したカメラの性能で、目視調査に必要な精度での撮影に問題ないことが分かった。



写真- 8 栈橋上部工下面の剥離状況①



写真- 9 栈橋上部工下面の剥離状況②

3.3 SfM について

3 次元化は、画像から自動的に作成可能な技術である SfM (Structure from Motion) を用いることとした。

SfM とは、1900 年代から実施されてきた航空ステレオ写真測量の原理を 3 次元に応用したものであり、複数画像から特徴点を検出して座標を算出し 3 次元点群や形状を構築する技術である。SfM で 3 次元形状を作成するために必要な情報は、複数の画像のみでありカメラ座標などは不要である。ただし作成される 3 次元形状は無次元化された形状のため、縮尺を合わせるためのスケールなどを写し込ませ、後から縮尺を現地縮尺とする事とした。また、SfM 中には特徴点をソフトウェア上で認識させる必要があり、そのためにはピン트가合った画像を利用する必要がある。

3.4 作業効率

a) 栈橋上部工下面の飛行可能高さ

回転翼 UAV による作業効率を計測するため、準備・片付け、1 スパン (400m2) 単位での飛行時間を計測した。計測結果を表- 3 に示す。

表- 3 現地調査における所要時間 (回転翼 UAV)

No.	準備	フライト毎の飛行時間				片付け
		1	2	3	4	
1	0:32	3:12	2:01	—	—	0:29
2	0:50	2:19	2:22	—	—	0:29
3	0:30	1:33	1:37	1:35	1:46	0:34
4	0:19	1:17	1:44	1:43	—	0:30
5	0:32	1:24	1:08	0:52	1:06	0:31
6	0:32	1:14	—	—	—	0:30
7	0:51	1:31	1:26	0:46	0:26	0:22
8	0:24	0:41	0:34	1:05	0:29	0:32
平均	0:34	1:26				0:31

※着色部分は、スパン単位での飛行ではないため、分析データから除外している。

b) 回転翼 UAV による調査の人員構成

調査の人員構成は、測量技師補：1 名 (測量指示や内容確認)、測量撮影士 (回転翼 UAV 操縦士)：2 名、測量撮影助手：1 名 (PC 操作、バッテリー交換などの補助員) の作業体制となる。

回転翼 UAV を 2 機使用して、1 機目が飛行中に待機中の回転翼 UAV のバッテリーを交換する方法が効率的となるが、撮影漏れがないか人の目で確認する必要があるため、撮影漏れの確認中にバッテリー交換を行う方法とした。回転翼 UAV の飛行は、モニターを頼りにした操縦となり、集中力が求められるため、操縦士 2 名の体制となる。

c) 作業効率の比較

回転翼 UAV と作業効率を比較するため、従来の海上目視調査を実施し、1 スパン (400m2) 当たりの作業効率の比較を行った。表- 4 に示すとおり、回転翼 UAV を用いた場合、準備工の平均時間は 34 分、片付け工の平均時間は 31 分、1 スパン (400m2) 当たりの平均撮影時間は 1 時間 26 分であった。また、従来の海上目視は、準備工の時間は 33 分、片付け工の時間は 35 分、1 スパン (400m2) 当たりの平均撮影時間は 1 時間 58 分であり、回転翼 UAV は従来の海上目視に対して約 18% 短縮することが分かった。従来の海上目視調査の状況写真を写真- 10 及び写真- 11 に示す。

表- 4 現地調査における作業効率比較

項目	回転翼 UAV	海上目視
準備	0:34	0:33
栈橋下面の調査	1:26	1:58
片付け	0:31	0:35
合計	2:32	3:06



写真- 10 海上目視調査の状況



写真- 11 海上目視調査の状況

3.5 3D モデルの作成

栈橋上部工下面 1 スパンのうちの 1 ブロック(4.6m × 4.6m)において表-5 に示す 3 種類のソフトウェアで試行した。

今回の検証は、クラックスケールを貼り付けて識別精度の確認を実施した。

表- 5 使用したソフトウェア

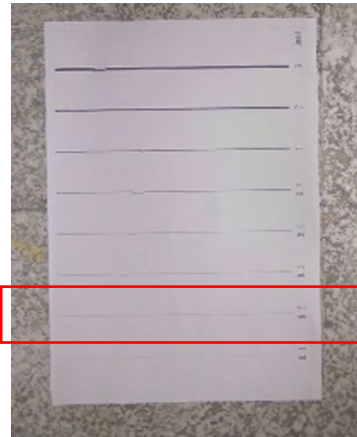
No.	ソフト名	作成概要
1	TRANCITY	撮影動画をサーバにアップロードすることで 3D モデルの自動作成が可能
2	ReCapPhoto	撮影画像をインポートすることで 3D モデルの自動作成が可能
3	PIX4Mapper	撮影画像をインポートすることで 3D モデルの自動作成が可能

3 種類のソフトウェアで 3D モデル化し、変状の識別を実施した結果、使用するソフトウェアによって、所要時間（撮影した動画の 3D モデル化に必要な時間）では、約 50 分から 21 時間の差が生じ、動画をそのままアップロードする方式や撮影画像を作成した後に、インポートする方式のものがある。撮影画像として切り出す枚数も、切り出し枚数の上限が 300 枚のものから、およそ 10 フレーム/秒で切り出し、約 1,800 枚を使用するものがある。3D モデル作成に必要な時間は、動画をサーバにアップロードする TRANCITY が最も短く、PC にインポートする方式は、ReCapPhoto、PIX4Mapper の順に所要時間が長くなる。変状の識別精度では、0.2 mm 程度から 0.3 mm 程度の精度となり、使用するソフトウェアで異なることが分かった。（写真- 12、写真- 13、写真- 14 参照）

①ソフト名：TRANCITY

表- 6 TRANCITY の作業内訳

動画時間	所要時間	変状の識別精度
0:4:48	0:50	ひび割れ幅 0.2 mm 程度



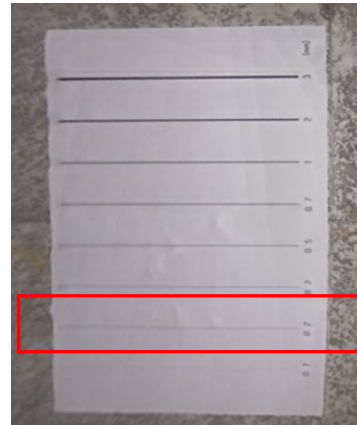
0.2 mm 幅の線
が確認可能

写真- 12 TRANCITY による変状の識別

②ソフト名：ReCapPhoto

表- 7 ReCapPhoto の作業内訳

写真枚数	所要時間	変状の識別精度
300 枚	4:40	ひび割れ幅 0.2 mm 程度



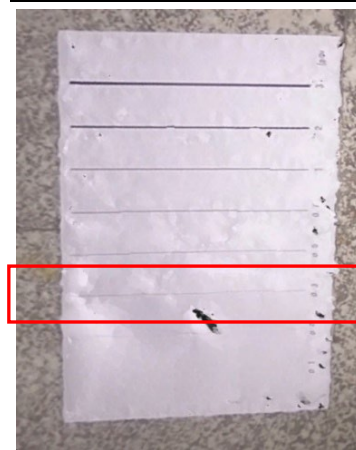
0.2 mm 幅の線
が確認可能

写真- 13 ReCapPhoto による変状の識別

②ソフト名：PIX4Mapper

表- 8 PIX4Mapper の作業内訳

写真枚数	所要時間	変状の識別精度
1792 枚	21:00	ひび割れ幅 0.3 mm 程度



0.3 mm 幅の線
が確認可能

写真- 14 PIX4Mapper による変状の識別

4. まとめ

今回の調査では、以上のように、回転翼 UAV を活用した栈橋上部工下面の調査の長所は、カタパルトを使用すれば、栈橋上の風の影響を受けずに調査が可能となることや、無線レンジエクステンダー、コントローラ等が必要であるが、陸上から全て調査が可能であり、機器の積み卸しなどは人力で可能となり、コスト低減、期間短縮、安全性の向上等が挙げられる。短所としては、万が一、落下した場合、海中への落下となるため、回転翼 UAV が使用できなくなることや、GPS が利用できないため、人力で飛行位置を確認しながら撮影するため、撮影漏れの確認が必要であること、栈橋下面は狭隘で複雑な場所を飛行する必要がある、操縦者の慣熟が求められる事などが挙げられ、更なる効率化に向けた技術開発が望まれる。確認された事項を以下に示す。

- ・栈橋下面は、GPS 環境外であるため、GPS 環境外で飛行できる回転翼 UAV を選択する必要がある。
- ・カタパルトの使用により、風の影響をあまり受けずに、回転翼 UAV による栈橋上部工下面の調査（撮影）が可能である。
- ・カタパルト（カタパルトの開閉を含む）は、幅 30 cm 以上の隙間があれば、離着陸が可能である。
- ・栈橋上部工下面の調査で無線レンジエクステンダーを使用する場合、杭や梁の影響で無線の通信距離が短くなるため、調査前に確認が必要である。
- ・回転翼 UAV で撮影した画像は、目視調査に必要な精度を満たしている。
- ・3D モデルによるひび割れ幅の識別精度は、0.2 mm～0.3 mm 程度以上であるが、使用するソフトウェアによって精度が異なる。
- ・回転翼 UAV の飛行位置確認は、GPS 環境外であるため、人の目により把握する必要がある。
- ・回転翼 UAV の操縦の慣熟が必要である。
- ・墜落した場合の効率的な回収方法の検討・開発が必要である。

なお、国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所は、一連の検討結果を取りまとめた「小型ドローンを活用した栈橋式岸壁の上部工下面点検マニュアル」を事務所ホームページにて公開している。
(<https://www.pa.skr.mlit.go.jp/tkgityou/pdf/20240329manyuaruann.pdf>)

謝辞

本稿は、国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所発注の「令和 5 年度管内技術課題検討業務」の成果の一部をまとめたものである。

試行にあたっては、徳島県、小松島港湾事務所、徳島海上保安部をはじめとする関係者の皆様にご協力をいただきました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 港湾の施設の維持管理技術マニュアル（改訂版）pp. 136-139, 沿岸センターライブラリ No. 49, 2018. 7
- 2) 宇野健司, 田中敏成, 加藤絵万: 栈橋上部工点検用 ROV による点検の効率化に向けた取組み, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol. 74, No. 2, 第 43 回海洋開発シンポジウム, pp. I_109-I_114, 2018.
- 3) 国土交通省国土地理院: UAV を用いた公共測量マニュアル (案) 平成 29 年 3 月改正 2017. 3