3. UAV を用いた護岸の健全度評価

The soundness evaluation of the revetment using UAV

木本 啓介*・坂本 和雄**・田村友紀夫***・太田 智***

Keisuke KIMOTO, Kazuo SAKAMOTO

Yukio TAMURA and Satoshi OHTA

Abstract: The revetment in Ota-gawa River in Hiroshima is long structure and it also has many damaged parts, so a work of survey and evaluation, especially visual inspection is spent huge cost and time. An urgent task is the development and application of efficient and easy inspection method. Therefore, we tried to survey and inspect the revetment by Structure from Motion with the Unmanned Aerial Vehicle. We verified about measuring range, shooting procedure measuring accuracy, the time needed to measure and compared the result of this trial, and the last soundness evaluation. Based on their results, we summarized the effectiveness and problems of inspection with UAV for the future application.

1. 概 要

太田川高潮区間の護岸整備は1970年代より進められており、直轄管理区間の護岸延長は約80kmある。これらの護岸は目地の欠落や継手部の開口等の変状が多く見られ、老朽化が進んでいる。護岸背後地の多くが高潮時の海面（T.P.+2.0m）より低く、高潮被害を受けやすい土地でもある。そのため、2000年度から護岸の外観調査、物理探査等により健全度評価を行い、計画的な補修対策や継続的な監視を行っているが、護岸延長が長く、変状箇所も多いため、調査に膨大な費用・時間を要しており、中でも外観調査における効率的・簡易的な調査手法の適用が急務となっている。

そこで、多様な情報記録・加工処理が可能な調査手法として、UAV（Unmanned Aerial Vehicle）で取得した画像による Structure from Motion（以下 SfM）を用いた調査を一部区間にて試行し、調査可能範囲・撮影方法・計測精度・調査時間等を把握し、今後の運用に向けた適用性と課題を整理した。

2. 現状と課題

2.1 護岸の状況

太田川は、日々の干満による潮位差が、月平均で約

3 m、大潮時になると 4 m 程度あり、護岸法面は急激な水位変動により大きな外力を受けており、それに伴う、裏込侵食・圧力増大・強度低下により背面土砂が吸い出され、護岸背面の空洞化、緩み等の変状が進行し、護岸天端のひび割れや陥没が発生している。

2.2 従来手法による調査状況

従来手法の調査員による外観目視調査では、護岸 1 km あたり 5 日間を要し、全長約 65.4 km の感潮区間全域を対象とすると、作業可能日ベースで約 2 年 7 ヶ月の日数を要してしまう。評価・取りまとめ作業も含め、調査が完了するまで、5 年近くかかってしまう。

また、護岸構造物に調査員が近づくことが難しい場所もあり、危険作業となる可能性もある。その上、複数の調査員が目視作業を行うため、調査員の技量・解釈に委ねられる部分が多く、定量的な把握・判断が困難である。

図1 調査員による外観目視調査状況

* 株式会社計測リサーチコンサルタント

** 太田川河川事務所 管理第一課

*** パシフィックコンサルタンツ株式会社

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 54, NO. 6, 2015

3. UAV を用いた調査

3.1 UAV を用いた調査の背景

近年、安定した飛行の可能な UAV が普及し、従来では困難であった視点から対象物を把握することが可能となった。また、PC 性能の向上や画像解析技術の向上により、一般化してきた SfM を用いることで、対象物を画像から 3D 化することが容易となり、護岸調査への応用が期待できる。

SfM は、多視点で撮影した画像内の特徴点から共通点を逐次判別し、カメラの 3 次元位置を特定することで少ない基準点からでも対象構造物の表面形状をリアルな高密度データとして取得できる技術である。

UAV を用い護岸全体を 3D モデル (DEM) 化することで、法面のはらみ出し、法面、法尻付近からの吸い出しの有無、根固め工の沈下または流出の状況を面的に捉える、健全度の評価を行うことが可能となる。長期間、複数回にわたり蓄積された 3D モデル (DEM) は、時系列で整理することで、変状の進行部位の特定と進行速度を定量的に把握でき、損傷の予兆となる変状箇所を事前に把握でき、予防保全型の河川管理に寄与する。

3.2 調査の概要

3.2.1 実施範囲

太田川河川事務所管内の護岸工手の異なる 5 箇所 (総延長約 600m) で UAV を用いた調査を行った。

3.2.2 作業の流れ

計測対象を UAV に搭載したカメラで連続的に撮影し、SfM により現地状況を 3 次元化する。生成された 3 次元の TIN (不整三角網モデル) から正射画像 (オ

図2 作業の流れ

ルソ画像) への変換、概略の寸法算出、断面図 (形状寸法調査) 作成が可能である。このとき、生成する TIN に座標系を与えるため、予め対象範囲に標定点 (GCP: Ground Control Point) を数点配置する必要がある。

3.2.3 使用機材と撮影計画

UAV は、従来のラジコンヘリに比べ、飛行時の安定性に優れており、より安全な撮影が可能である。バッテリー電池による飛行のため騒音に関しても比較的静かである。また、GPS・ジャイロ等により、予め、飛行経路を設定することで、自動飛行が可能である。

本件に使用した UAV は、上下左右回転の 3 軸が自由に動かせるジンバルを装備しており、一眼レフカメラ Nikon D7100 を搭載した (焦点距離 24mm)。撮影範囲を地上のモニターにより確認が可能である。

表 1 UAV の仕様

機体重量	5.0kgf
搭載重量	3.5kgf
耐風安定性	10m/s
飛行時間	~10分
プロポ周波数	2.4GHz
プロポ空中電力	10mW

図3 使用した一眼レフカメラ Nikon D7100

図4 使用した UAV

3.2.4 現地調査

本論では、対象とした 5 箇所のうち、コンクリートブロック張り護岸 (延長 45m) での検証例を示す。

a) GCP 設置

生成するモデルに縮尺を与え、地形図等と同じ位置座標で管理するために、対象範囲に 11 点の対空標識 (ターゲット) を配置・測量し、SfM 解析時にそれらの座標値を GCP として入力した。河川の場合、200m 毎

に距離標が設置されており、これらを基準にターゲット測量を行うことで、同一箇所を経年的に調査する場合、有効である。

図5 河川距離標とターゲットの測量状況

b) 画像撮影

UAVにカメラを搭載し、コンクリート護岸の変状を捉えるため、目標解像度を2.5mm/pixelとし、対象範囲上空約15mを飛行しながら、連続的に撮影を実施した。1回/秒のインターバル撮影で、約7分間のフライトを2度実施し、合計800枚程度の画像を取得した。

図6 UAVの操作状況と撮影画像

c) 撮影画像整理・写真解析

約800枚の撮影画像から解析に適した450枚程度の画像を選定し、SfM解析を行った。

解析した結果を以下に示す。生成されたモデルは、撮影画像がマッピングされており、ビューワにより一般的なPCでも軽快に閲覧することができる。また、モデル上で距離の算出も可能で、拡大すると撮影解像度そのまま表面の状況を把握できる。

d) 損傷判読

基本的にマルチ画面でPC作業を行い、左画面では損傷の半自動抽出が可能な「ひび割れ位置・幅判読図化システム」を用い、3Dモデルから生成したオルソ画像を下図として損傷を抽出し、画像上に記載してい

図7 SfM解析の流れ

く。その際、画像解像度が2mm/pixの場合、約3.5m×1.5m範囲を1画面に表示し、損傷を探索する。このとき、ほぼ目視判読レベルとなるように、画像をPC上で拡大して、詳細に判読する。右画面には、3Dモデルを表示し、様々な視点より3次元で対象範囲を確認することに利用している。3Dモデルを見ながら、損傷を探索することで、2次元では分からない段差や孕みなどの変状も確認することが可能である。室内の落ち着いた状態で評価作業が可能な点でも非常に有効な手法である。記載した損傷は、CADデータへ変換し、管理図面などへ転記する。

図8 損傷抽出作業状況

図9 UAV調査結果より作成した護岸損傷図

図10 3Dモデルから判読可能な変状

4. 外観調査と UAV の比較検証

4.1 ターゲット配置による精度検証

4.1.1 精度検証の方法

理論上、最低3点のターゲットを一連の画像の中に写し込み GCP として解析することで、方位・高度を地図情報と合わせることは可能だが、対象物の形状や色、撮影方法、ターゲット配置位置により生成モデルにバラつきが生じる。そこで、対象範囲に配置した11点のターゲットを用い、下記2パターンのターゲットを GCP として解析を行い、解析に未使用のターゲット（検証点）の座標値（生成した3Dモデルから抽出した座標と測量座標）を比較することで精度検証を行った。現在、複数の SfM 解析ソフトがリリースされている中で、本検証は、Agisoft 社製 Photoscan を用いた。

<検証パターン1>

偏った GCP 配置 (t1, t2, t4, t5)

<検証パターン2>

対象範囲を囲むよう GCP 配置 (t1, t4, t10, t11)

図11 各検証パターン

4.1.2 精度検証結果

検証を行った2パターンの結果を以下に示す。

<検証パターン1>

対象範囲に対し GCP を偏って配置した場合、GCP は概ね ± 5 mm 程度に収まっているが、検証点は GCP の範囲から離れるにつれ誤差が大きくなり、t11では Y 方向に60cm, Z方向に-50cmの誤差が生じている。

このような GCP 配置の場合、拘束点が狭い範囲に限定されるため、それ以外は外挿することになり、精度の確保が難しくなる。

図12 検証パターン1の誤差分布

<検証パターン2>

対象範囲を囲むように GCP を配置した場合も GCP は概ね ± 5 mm 程度に収まっている。検証点では XY 方向に最大 2 cm, Z 方向は約 4 cm の誤差が生じている。このような GCP 配置の場合、対象範囲の外側を拘束するため、その内側は内挿となり、パターン1に比べ精度の確保が容易である。

図13 検証パターン2の誤差分布

4.1.3 考察

GCP より離れた位置にある検証点ほど誤差が大きくなる傾向があるため、ターゲットの偏った配置などは避けるべきであり、内挿した解析が可能なよう対象

範囲を囲むだけでなく、一定距離ごとにターゲットを配置することが有効であると言える。

4.2 図化精度検証

UAV を用いた調査から得られた損傷図と従来の外観調査による損傷図との比較を行った結果を図14に示す。

外観調査結果に記載されていた損傷（ひび割れの幅や寸法、その他損傷等）も本手法では十分に確認可能な上、直線的に記載されていたひび割れや浮きの状況も画像を元にするすることで、より詳細な形状を把握できる。また、位置関係も正確に再現しているため、現地での結果との照合も容易となる。

特に、はらみだしや陥没等の目視観察や従来の写真では確認しにくい箇所についても3Dモデルを併用することで充分確認が可能である。また、図10に示すカラーコンター図や横断面図などの表現も可能となる。一方、湧水の染み出しや打音での確認が必要となるような浮きについては、UAVによる調査では困難であることが今回の調査で明らかとなった。

図14 損傷調査結果の比較

5. まとめ

今回、UAV 調査にて、護岸の損傷図作成や評価を行い、精度及び有用性があることを確認した。UAV の活用は護岸調査の他、足場架設・ロープアクセス等の手間を省力化が可能のため、多方面（橋梁調査・ダム調査等）でも期待でき、災害時の概略の対策設計などにも十分活用が可能である。3Dモデル・画像等の付加価値のあるデータを蓄積するため、今後の維持管理の上では、充分メリットのある調査手法であるといえる。

しかし昨今、UAV の安全性が問われ、社会問題となっている。本件でも、UAV の安全には充分配慮し、検証を行ったが、気象や電波等の影響を受けやすく、安全に飛行するためには、制約が多々ある。その他、道路・鉄道・橋梁・電波塔・高圧電線の近傍での飛行は、特に注意する必要がある、操縦者の熟練度も不可欠である。

参考文献

- 西村正三, 原 健司, 木本啓介, 松田 浩, 2012. 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, 写真測量とリモートセンシング, 51(1), pp. 46-53.
- 西村正三, 木本啓介, 松岡のどか, 大谷仁志, 緒方宇大, 松田 浩, 2013. 橋梁維持管理調査における遠隔計測手法の有効性検証, 応用測量論文集, 24.
- 日高雅彦, 2014. 太田川高潮護岸の健全度調査, H26中国地方技術研究会発表論文.