無人航空機を用いた係留施設の 地震時残留変位計測に関する検証実験

大矢 陽介¹・伊藤 広高²・小濱 英司³

¹ 正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)
E-mail: ooya-y@pari.go.jp

² 正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

³ 正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

災害発生時に港湾係留施設の利用可否判断に必要な残留変位を迅速かつ効率的に調査する方法として、無人航空機による取得画像を利用した計測方法を検討した。無人航空機を利用した方法は、航空機やカメラの種別、飛行や撮影の条件および対象施設の立地や形状等の諸条件により、精度が大きく変わる。本研究では、無人航空機を利用した変位計測手法の精度確認および計測時の課題抽出を目的とした検証実験を行った。実験では実際に近い計測条件として、係留施設に岸壁模型を設置し、模型を移動することで地震時の残留変位を模擬した。大規模地震発生時のように、岸壁背後地の地上基準点の移動や地殻変動が懸念される場合、RTK 測位を利用可能な UAV を用いた計測手法が優位であることが分かった。

Key Words : *unmanned aerial vehicle, mooring facility, residual displacement, seismic damage, global navigation satellite system, real time kinematic*

1. はじめに

港湾の係留施設は、災害発生時に被害状況の把握、利用可否の判断を迅速かつ効率的に実施することが求められている。大規模地震・津波発生時には被災範囲が広範囲となり、津波警報発令時には施設に立ち入ることができないため、効率的な調査方法として無人航空機(以降、UAVと称する)の利用が期待されている。

港湾施設および海岸保全施設の目視点検における UAV の活用は検討され、施設や部材に発生した段差やずれ、ひび割れの有無など、変状の有無の確認できることが分かった¹⁾。本研究が目的とする、地震時に発生する係留施設の残留変位の計測においては、従来の航空写真を用いて写真に含まれる基準長さ(例えば、構造物の長さ)を設定し、対象施設の地震前後の移動量と基準長さを比較することで変位量を評価する方法を、UAV による取得画像について適用することも可能である。本研究では、地震時残留変位の評価方法として、UAV による地震前後の取得画像から画像処理により座標情報が含まれる三次元点群データを作成し、そのデータから対象施設の地震前後の位置座標の差分より変位量を求める方法を検討する。このような UAV による取得画像を用いた調査方法では、航空機やカメラの種別、飛行や撮影の条件および対象施設の立地や形状等の諸条件により、精度が大き

く変わる。本研究では、UAV を活用して発災後に迅速かつ効率的に変位計測することを想定し、変位計測手法の精度確認および計測時の課題を抽出すること目的とした検証実験を行った。実験では、実際に近い計測条件として、係留施設に岸壁模型を設置し、模型を移動することで地震時の残留変位を模擬した。

2. 検証実験

(1) 実験条件

a) 岸壁模型

地震時に発生する岸壁の海側への変位は、岸壁模型を製作し、海に張り出すよう設置した模型を海側へ移動させることで模擬した。模型は、ベニア板にグレー色のカラーダンボールを貼り付けて製作し、平面の寸法は縦 90 cm × 横 120 cm とした。岸壁の変位量の違いが取得画像における認識精度、変位量の計測精度に与える影響を評価するため、所定変位量として水平 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm および鉛直 16 cm を設定した。そのため、模型は 5 体製作した。岸壁模型の概要を図-1、設置状況を図-2 に示す。なお、本稿では水平変位のみを扱う。

b) 調査方法

調査に用いた UAV は、表-1 に示す回転翼および固定

図-1 岸壁模型の概要

図-2 岸壁模型の設置状況 (変位後)
(模型の所定変位量は手前から
水平 5, 10, 20, 50 cm, 鉛直 16 cm)

表-1 UAV 機体情報と調査実績

名称		回転翼		固定翼	
製品名		Phantom 4 Pro		eBee RTK	
機体外観
機体 情報	RTK	無し		有り	
	重量 [kg] (カメラを含む)	1.39		0.73	
	カメラ機種	1インチ20 MP (標準搭載)		18.2 MP (Sony WX)	
	カメラ方向	真下 (ジンバル有り)		真下固定 (ジンバル無し)	
	寸法 [cm]	35 (プロペラ除く)		96 (翼幅)	
調査 実績	模型設定	変位前	変位後	変位前	変位後
	飛行高度 (対地高度) [m]	100	100	120	120
	オーバーラップ率 [%]	90	90	75	75
	サイドラップ率 [%]	60	60	80	80
	取得画像数 [枚]	159	159	103	109
	飛行時間 [min]	7	7	19	17

翼の2種類を用いた。飛行方法の違いのため、離着陸方法にも違いがある。回転翼は任意の場所から垂直離着陸が可能である。一方、固定翼は、離陸はプロペラ始動後に手で投げて行い、着陸は胴体着陸となる。本調査では、調査対象がコンクリート版、コンクリート舗装またはアスファルト舗装であることから、機体への衝撃を緩和させるため、近くの海水浴場を着陸場所とした。

調査には、UAVによる取得画像を用いた変位計測手法と比較するため、変位量評価位置(対空標識中央)でより高精度な変位量が評価可能な調査方法としてRTK-GNSS (Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System. 以降、直接法と称する)を用いた。直接法の機器情報を表-2、調査状況を図-3に示す。直接法に加えて、固定翼のUAVについてもRTK測位が可能であり、基準局から補正情報を受け取ることで高精度の位置座標の測

位が可能である。本調査では、調査対象である岸壁より約2.7 km離れたRC造3階建の屋上に基準局を設置し、直接法および固定翼の調査に用いた。

大規模地震の際、地殻変動が発生すれば位置座標に地殻変動量が含まれてしまい、施設の利用可否判断に必要な残留変位の評価には地殻変動量を取り除く必要がある。RTK測位の場合、基準局を係留施設と地殻変動量が同じ範囲内かつ、岸壁背後の地盤流動の範囲外に設置することで、係留施設の利用可否判断に必要な地殻変動量を除いた変位量を求めることができる²⁾。

基準局はバッテリーまたは小型発電機で動作可能である。もし仮に、停電等により基準局に電気が供給できなくなり、基準局として利用できない場合、固定翼はRTK測位ができず単独測位となるため、回転翼と同じ座標測位精度となる。

表-2 直接法の機器情報

名称	直接法
製品名	ProMarker500
機器外観
RTK	有り
重量 [kg]	1.4(本体のみ)
寸法 [cm]	22.8×18.8×8.4
操作	スマートフォン(Android)
付属品	無線機, ポール, バッテリー

図-3 直接法による調査状況

c) 飛行経路

本研究では、発災後に迅速かつ効率的に UAV を活用して変位計測することを想定しているため、UAV は自動運転により飛行し、一度に複数バース計測可能な飛行計画および計測条件を設定した。調査実績を表-1 に示す。

調査周辺施設には、荷役機械や発電所建屋等があるため、回転翼の飛行高度は 100 m とした。固定翼は、着陸地点の海水浴場までの経路途中の山の高さを考慮して、飛行高度は 120 m とした。

UAV による撮影範囲は、模型を設置した 1 バースと地震時の地盤流動の範囲を想定して約 300 m 離れた背後地までの範囲を基本とした。また、三次元点群データを作成するための画像処理において、既知の座標点として補正に必要な地上基準点 (Ground Control Point. 以降、GCP と称する) は、図-4 のように配置した。地震時に津波警報が発令されている場合、施設へ立ち入ることができないため、GCP に対空標識を設置することができない。そのため、対空標識を設置しなくても、位置を識別できる基準点として、既設構造物を GCP として設定した。具体的には、側溝の蓋の角や、マンホール蓋の中央を設定した (図-4 参照)。

なお、オーバーラップ率やサイドラップ率等の飛行時の撮影条件は、機体を制御するソフトウェアの既定値を

図-4 岸壁模型と GCP の配置

用いた。

d) 調査手順

UAV による撮影は、地震前として模型設置後、地震後として模型移動後の 2 回実施した。模型の移動は、メジャーで測りながら所定の変位量を移動させた。模型の変位量は、模型に貼り付けた対空標識中央で評価し、UAV の場合、三次元点群データより地震前後の位置座標を読み取り、座標の差分を変位量とした。三次元点群データの作成には、ソフトウェア「Pix4Dmapper」、位置座標の読み取りには、「Global Mapper」を用いた。

UAV の飛行後には、直接法により対空標識中央の位置座標を計測し、地震前後の差分を変位量とした。

(2) 実験結果

a) 調査実績

回転翼および固定翼の飛行軌跡を図-5 に示す。固定翼は飛行軌跡を示しているが、回転翼は撮影画像の Exif 情報から作成された軌跡であるため、画像が撮影されている間の飛行軌跡である。回転翼では 1 バースを、固定翼ではより広範囲の 2 バースを撮影対象として飛行した。図中で「待機」と記載された固定翼の軌跡は、UAV が空中で同じ場所を回り続けて待機したことを示している。これは、調査地点の周辺の山を塹とする多数の鳥 (カラスやトンビ) に追従されたため、飛行の継続や、最短距離で着陸地点へ向かうことが困難となり、待機したためである。そのため、固定翼の飛行時間は長くなり、回転翼の 2 倍～3 倍となった。

b) 取得画像

画像処理により作成したオルソ画像を図-6、岸壁模型近傍の拡大図を図-7 に示す。本調査では飛行高度が 100 m 以上と高い条件設定ではあったが、対空標識の中心お

図-5 UAVの飛行軌跡(回転翼は撮影時のみの軌跡)

よび既設構造物のエッジを識別するのに十分な画質の画像が得られた。また、岸壁模型の所定変位量5 cmと10 cmの変位量の大小関係も目視で判断できた。

表-1に示した枚数の取得画像について、画像処理を実施したところ、処理時間は固定翼で約1.3 h、回転翼で約1.5 hと画像枚数に応じた時間となった(PCスペックは、CPU: Intel® Core™ i7-6700 CPU @ 3.40 GHz, RAM: 32 GB, GPU: NVIDIA GeForce GTX 950M)。本調査では、1バースまたは2バースを対象に、比較的高い高度から撮影したため100枚程度の少ない取得画像について処理を行ったため、発災後の調査内容として許容できる短い処理時間になったと考えられる。

c) 変位量評価

計測結果の一覧を表-3に示す。同表には、地震前後の位置座標の差分から求めた変位量と、模型を移動する際にメジャーで計測した所定変位量との差分を示した。また、UAVの調査結果は、画像処理の際にGCPを設定する場合、GCPを設定しない場合の2ケースの結果を示した。

直接法の結果は、所定変位量との変位差の最大値が13 mmとなり、一般的に認知されているRTK測位の座標計測精度(水平で1 cm~2 cm)の範囲内であった。次にUAVの結果は、所定変位量との変位差の最大値は、GCPを設定する場合、回転翼で23 mm、固定翼で58 mmとな

り回転翼の方が精度は高くなった。2つのUAVの結果の違いの要因は、固定翼の方が飛行高度、オーバーラップ率およびカメラの固定方法等の計測条件で不利であったと考えられる。

次に、GCPを設定しない場合、回転翼の変位差の最大値は1 m以上となり、位置座標の計測誤差が変位差となって現れた。一方、固定翼では65 mmとなりGCPが無い場合でも一定の変位計測精度が認められる。三次元点群データの位置座標から施設の変位量を評価する場合、画像処理の際にGCPによる補正が必須であるが、RTK測位が可能であれば、GCPによる補正を行わなくても座標計測精度が高いため、変位計測についても一定の精度が確保されたと考えられる。

d) 大規模地震時の留意点とRTK測位の優位性

大規模地震の際、地盤の液状化によって地盤流動が発生すれば岸壁背後地も変位するため、地震後にGCPを既知の座標点として利用することができない可能性が高い。対処法として、地震後にGCPの位置座標を再計測することが考えられるが、津波警報が発令されている場合、施設へ立ち入ることができない。また、GCPの位置座標を再計測するのであれば、直接法により施設の位置座標を直接計測することも考えられる。そのため、発災直後の迅速かつ効率的な調査実施の観点より、さらに、前述の地殻変動量の取り扱いを踏まえて、RTK測位が可能な

図-6 オルソ画像（変位前）

(a) 固定翼 変位前 (b) 固定翼 変位後 (c) 回転翼 変位前 (d) 回転翼 変位後

図-7 オルソ画像（岸壁模型近傍の拡大図．模型の所定変位量は上から水平 5, 10, 20, 50 cm, 鉛直 16 cm.）

表-3 計測結果一覧（回転翼と固定翼の撮影日が違うため直接法は2回計測）

機体	模型名	直接法		ケース1（GCP有り）		ケース2（GCP無し）	
		水平変位量(m)	所定変位との差(m)	水平変位量(m)	所定変位との差(m)	水平変位量(m)	所定変位との差(m)
回転翼	水平 5 cm	0.043	0.007	0.046	0.004	1.151	-1.101
	水平 10 cm	0.099	0.001	0.111	-0.011	1.125	-1.025
	水平 20 cm	0.189	0.011	0.216	-0.016	1.024	-0.824
	水平 50 cm	0.488	0.012	0.477	0.023	0.793	-0.293
固定翼	水平 5 cm	0.052	-0.002	0.058	-0.008	0.115	-0.065
	水平 10 cm	0.113	-0.013	0.106	-0.006	0.137	-0.037
	水平 20 cm	0.208	-0.008	0.193	0.007	0.225	-0.025
	水平 50 cm	0.492	0.008	0.442	0.058	0.499	0.001

UAV を用いた変位計測手法が地震後の調査方法として優位と考えられる。

以上より、発災後、GCP が利用できない、地殻変動が発生した、津波警報が発令された、いずれかに該当する場合、RTK 測位が利用可能な UAV を主体とした調査計画を立てるのが良いと考えられる。

3. 地震後の利用可否判断の目安と UAV の活用

被災程度と利用可否判断の目安の関係は、現在も検討が進められている。地震後の利用可否判断の目安は、施設の構造形式や地盤条件といった個々の特性に大きく依存する。例えば、岸壁の供用上の変形量の限界値を数値

解析より求めた検討では、重力式岸壁 10 cm、矢板式岸壁 15 cm という水平変位量の目安が提案されている³⁾。この程度の変位量に対して、固定翼 (GCP 無し) の計測精度 (誤差の最大値 65 mm) では精度が十分とはいえない。10 cm 程度の目安を対象に計測するのであれば、直接法を用いるべきである。

重力式係船岸については、構造本体そのものの破壊が問題になった事例は報告されていないため、地震後の利用可否判断においては、船舶の接岸や車両によるアクセスの機能上の観点から判断を行えば良いと考えることができる。例えば、耐震強化岸壁ではレベル 2 地震動に対する使用性確保の目安として残留変位 100 cm が用いられることが多い⁴⁾。このような、重力式係船岸を対象に 100 cm を目安に利用可否を判断する場合、初期調査として被災状況を把握し利用可能な施設を絞り込む用途においては、固定翼 (GCP 無し) の計測精度で十分と考えられる。

4. おわりに

本研究では、UAV を活用して発災後に迅速かつ効率的に変位計測することを想定し、変位計測手法の精度確認および計測時の課題を抽出すること目的とした検証実験を行った。得られた主な知見は以下の通りである。

- 模型の所定変位量との差異の最大値は、直接法で 13 mm、回転翼で 23 mm、固定翼で 58 mm となった。直接法が最も精度が高い結果であるが、UAV の計測精度も地震後の被災状況を把握する目的では、十分な精度であることが分かった。
- GCP を設定しない場合、回転翼の結果は 1 m 以上

の差異となり、GNSS の座標測位の誤差が変位量の誤差となって現れた。一方、固定翼の変位差の最大値は 65 mm であり、GCP を設定しなくても RTK 測位を搭載しているため座標計測精度が高く、一定の変位計測精度が確保された。

- 大規模地震時は、GCP が既知の座標値として利用できず、位置座標に地殻変動量が含まれる可能性があるため、GCP を用いなくても一定の変位計測精度を確保し、地殻変動量を変位量から除くことが可能な、RTK 測位を利用した方法が地震後の変位計測手法として優位と考えられる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省北陸地方整備局ならびに港湾管理者の方々からご協力を頂きました。関係各位に対して、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 野上周嗣, 山本幸治, 加藤絵万, 田中豊: マルチコプターを利用した港湾施設・海岸保全施設の点検に関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1325, 2016.
- 2) 小濱英司, 菅野高弘: RTK-GPS を用いた地震後岸壁変形量計測ツールの開発, 地盤工学会誌, Vol.63, No.1, pp.34-35, 2015.
- 3) 長尾毅, 岩田直樹, 藤村公宣, 森下倫明, 佐藤秀政, 尾崎竜三: レベル 1 地震動に対する重力式および矢板式岸壁の耐震性能照査用震度の設定手法, 国土技術政策総合研究所資料, No.310, 2006.
- 4) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2007.

(2018.2.8 受付)

VERIFICATION EXPERIMENT ON RESIDUAL DISPLACEMENT MEASUREMENT OF MOORING FACILITIES USING UNMANNED AERIAL VEHICLES AFTER EARTHQUAKE

Yousuke OHYA, Hirotaka ITO and Eiji KOHAMA

As a survey method to promptly and efficiently judge availability of mooring facilities at the time of seismic disaster occurrence, a method of residual displacement measurement using photographed images by unmanned aerial vehicles(UAV) was examined. In the method using the UAV, accuracy varies greatly depending on the conditions such as the type of the UAV and camera, the conditions of flight and photographing and location and shape of the target facility. In this research, for the purpose of confirming the accuracy of the displacement measurement method using UAV and extracting issues during measurement, the verification experiment was performed. In the experiment, as a situation close to the actual measurement condition, quay wall models were installed at a mooring facility, and by moving them, the residual displacement at the time of the earthquake was simulated. When the earthquake is large scale and the movement of the ground reference point due to the displacement of the ground behind the quay wall and the crustal movement are concerned, it turned out that the measurement method using UAV which can utilize Real Time Kinematic positioning is superior.