

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1365 February 2020

現地試験による係留施設を対象とした
地震時の残留変位計測手法の精度検証

大矢 陽介
小濱 英司

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. 序論	4
2. 災害時の利用可否判断と残留変位評価	4
2.1 被災時の調査内容と変位量評価	4
2.2 地盤変位と地殻変動	5
2.3 RTK 測位を利用した残留変位評価	6
3. 試験条件	7
3.1 試験場所と実施日	7
3.2 岸壁模型	7
3.3 試験方法	7
(1) 直接法による試験	8
(2) UAV による試験	8
3.4 飛行経路	8
3.5 変位量の評価方法	14
(1) 座標計測方法	14
(2) 変位評価位置の選択ユーザー	14
(3) 変位評価位置の判定手順	14
3.6 地震災害時の GCP の制約と配置	15
(1) 地震災害時における GCP の制約	15
(2) GCP の配置	15
3.7 検討ケース設定	15
4. 試験結果	19
4.1 試験実績	19
4.2 取得画像	19
4.3 計測精度評価	21
(1) 検討 1 の結果 (GCP 有無, RTK 測位有無)	21
(2) 検討 2 の結果 (GCP の配置)	21
(3) 検討 3 の結果 (模型エッジでの変位評価)	22
(4) 検討 4 の結果 (地震前後で異なる GCP 配置)	23
5. 地震災害時の UAV 活用における留意点	24
5.1 利用用途と計測精度	24
5.2 地殻変動の考慮	24
5.3 UAV 写真測量における留意点	24
6. 結論	24
謝辞	25

Field Test on Validation Accuracy of Residual Displacement Measurement Method after Earthquake for Mooring Facilities

Yousuke OHYA*
Eiji KOHAMA**

Synopsis

As a method of evaluating the residual displacement required to judge availability of mooring facility after earthquake disaster, a measurement method using satellite positioning and 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, field tests were conducted at a port facility. The measurement accuracy obtained in the experiment was in the order of satellite positioning (RTK-GNSS), and UAV, but the measurement accuracy of method using UAV was sufficiently accurate for the purpose of grasping the damage situation after the earthquake. If the ground control point (GCP) behind the quay wall cannot be used due to ground displacement after earthquake, it was difficult to evaluate the residual displacement of the mooring facility by analyzing the captured images taken by UAV. However, it was turned out that moderate accuracy of displacement measurement can be secured even under conditions that assume earthquake disasters by using the GCP near the quay wall or using RTK positioning.

Key Words: mooring facility, residual displacement, earthquake damage, unmanned aerial vehicle, global navigation satellite system

* Senior Researcher, Earthquake and Structural Dynamics Group
and Senior Researcher, Productivity Improvement Research Center

** Head, Earthquake and Structural Dynamics Group
and Principal Researcher, Productivity Improvement Research Center
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan
Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-0839 E-mail : ooya-y@p.mpat.go.jp

現地試験による係留施設を対象とした 地震時の残留変位計測手法の精度検証

大矢 陽介*・小濱 英司**

要 旨

災害発生時に係留施設の利用可否判断に必要な残留変位の計測方法として、衛星測位および無人航空機 (UAV) による取得画像を利用した計測方法を検討した。UAV による方法は、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ため、変位計測精度の確認および計測時の課題抽出を目的に、港湾施設における現地試験を行った。試験における計測精度は衛星測位 (RTK-GNSS)、UAV 写真測量の順序であったが、UAV による方法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。また、災害時に地盤変位によって岸壁背後の地上基準点を利用できない場合、UAV による取得画像から係留施設の残留変位を評価することは困難であったが、岸壁付近の基準点が利用できる場合や RTK 測位の利用によって、地震災害を想定した条件下においても一定の変位計測精度が確保できることが分かった。

キーワード：係留施設，残留変位，地震被害，UAV，GNSS

* 地震防災研究領域耐震構造研究グループ主任研究官
港湾空港生産性向上技術センター主任研究官 併任

** 地震防災研究領域耐震構造研究グループ長
港湾空港生産性向上技術センター上席研究官 併任
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 E-mail：ooya-y@p.mpat.go.jp

1. 序論

港湾の係留施設は、災害発生時に緊急物資輸送や人員輸送の拠点として利用されることから、被災時には被害状況の把握、利用可否の判断を迅速かつ適切に行うことが求められている。耐震構造研究グループでは、地震後係留施設の利用可否判断支援ツール「Berth Surveyor¹⁾」を開発し、被災現場での利用可否判断に資する研究を行っている。このツールは、衛星測位のうちRTK-GNSS (Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System. 以降、RTK測位と称する) を利用したもので、基準点でのGNSSからの測位情報等を補正情報として計測点に送り、計測点の誤差補正に使用する方式で、精度は1 cm程度である²⁾。計測に必要な機器は被災後に設置し、電源は発電機やバッテリーを利用することが出来るため、被災時においても停電や通信設備の不通の影響を受けずに、利用可否判断に必要な変位量を高精度で計測できる。耐震構造研究グループでは現在、全国の港湾施設で利用できるよう、計測点や基準点の選定、地震前の座標計測の実施等、利用可否判断支援ツール導入を支援している。

一方、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(Unmanned Aerial Vehicle. 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、変位の有無を確認できることが分かった³⁾。本研究が対象とする、地震時に発生する係留施設の残留変位の計測においても、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。なお、本研究では、地震後に施設が変形によって地震前の位置に戻らず、残った変位を残留変位と呼び、断りが無い場合は水平方向の成分を示す。

本研究では、地震時の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。本研究では係留施設を対象に、UAVを利用して被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現地試験を行った。試験では、実際の被災状況に近い計測条件として、係留施設に岸壁の変位を模擬した装置(以降、岸壁模型と称する)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。また、地盤の液状化等によって岸壁背後の地盤が変位し、地震前に座標計測済みの基準点も移動して地震後に利用できない想定など、被災時の制約と計測精度について検討した。

2. 災害時の利用可否判断と残留変位評価

2.1 被災時の調査内容と変位量評価

発災当日から着手する初期調査のうち被災状況の概略把握調査は、施設の被災状況について目視で確認できる範囲を把握する。そのため、情報の正確さより早さが優先されるため、UAVによる取得画像を活用すれば港湾周辺の被害状況の全体像を把握することができる⁴⁾。例えば、図-2.1に示すように被災後に自動運航により、港湾内の初期調査が可能と考えられる。

概略把握調査に引き続いて行う施設の利用可否の判断調査は、緊急物資輸送のルート確定のため被災後2日目程



図-2.1 UAV を利用した災害時の初期調査イメージ



図-2.2 重力式係船岸の被災事例
(1995年兵庫県南部地震)⁵⁾

度以降に着手し、5日目頃までには完了を目指し実施される。利用可否判断の着眼点として、係留施設については、施設の構造上の安定の確保に加えて、船舶や輸送用車両のアクセスの確保等がある。本研究で対象とする構造上の安定については、施設の構造形式により着眼点異なる。例えば、図-2.2に示す重力式係船岸については、兵庫県南部地震のような大きな外力が作用した場合においても、堤体そのものの破壊が問題となった事例は報告されていない。そのため、利用可否判断においては、船舶の接岸や車両のアクセスの観点からの判断を行えば良い。そのため、重力式係船岸の利用可否判断については、ある程度目視による判定も可能であり、UAVによる調査も有用である⁴⁾。

矢板式係船岸や棧橋など鋼部材を主体とする係留施設では、部材の損傷により構造上の安定が失われた事例⁶⁾があり、利用可否の判断においては部材の変形・応力状態を確認する必要がある。地震後の利用可否判断の目安となる変位量は、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、岸壁の供用上の変位量の限界値を数値解析より求めた検討では、矢板式岸壁で15 cmという変位量の目安が設定されている⁷⁾。そのため、利用可否判断のための変位計測手法には高い精度が要求され、Berth Surveyorによる方法が利用できる。一方、UAVの活用については、撮影方法と計測精度を踏まえて慎重な判断が求められる。

2.2 地盤変位と地殻変動

図-2.2のように、土留めの役割を果たす岸壁が移動すると液状化した岸壁背後地盤も地盤流動によって海側へ変位する。図-2.3は1995年兵庫県南部地震の際のポートアイランドにおける水際からの距離と水平変位の関係⁸⁾

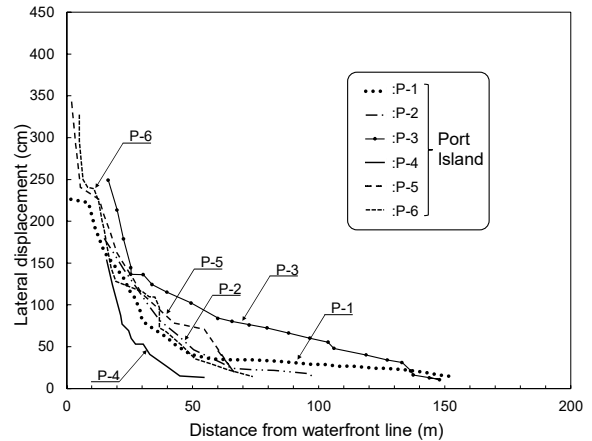


図-2.3 水際からの水平変位分布⁸⁾

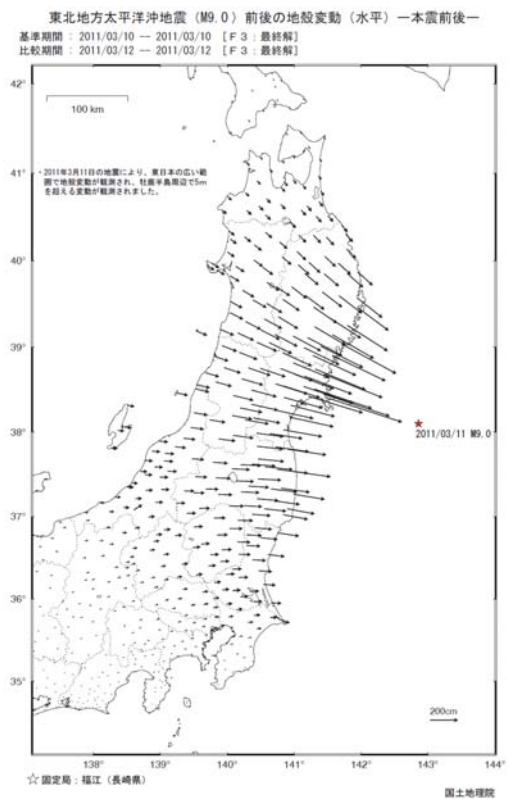


図-2.4 地殻変動による水平変動量
(2011年東北地方太平洋沖地震 本震前後)⁹⁾

である。この変位分布は、地表に発生した亀裂の幅を測って足し合わせて求めたものであり、岸壁で2 m以上の水平変位が発生し、大部分の測線の変位が水際からの距離150 mまでに変位が一定値に収束している。このように埋立地で地盤の液状化が発生する場合、地盤変位が護岸から数百m離れた範囲まで発生することは明らかである。

同じように地震時に発生する変位として地殻変動がある。図-2.4は、2011年東北地方太平洋沖地震前後の地殻

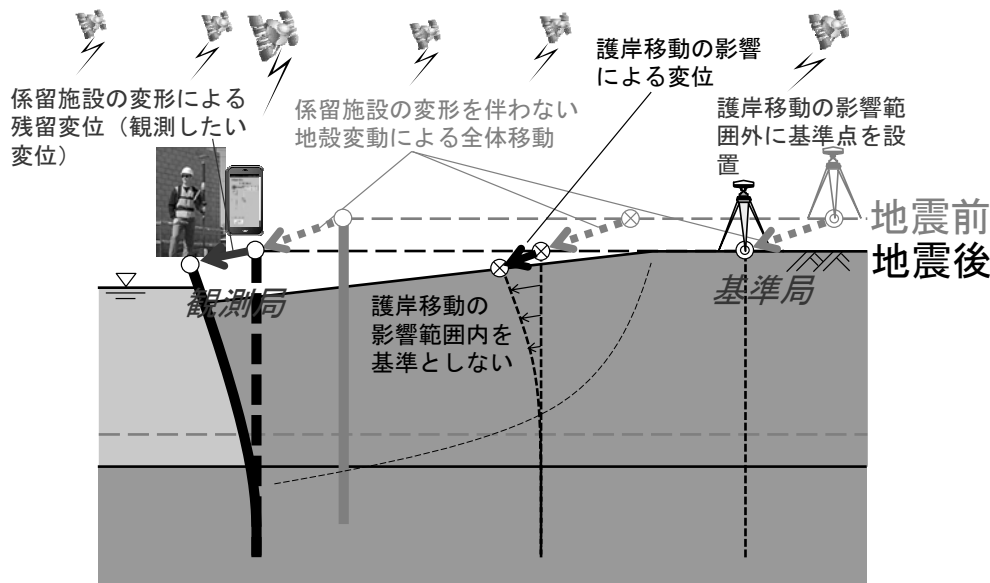


図-2.5 RTK 測位による残留変位計測の概要 (文献 1)を修正)

変動による水平変動量のベクトルを示している。地震発生により、牡鹿半島周辺で、水平方向で5 mを超える地殻変動が観測された⁹⁾。地殻変動は施設延長に対して十分広い範囲で発生するため、施設は地殻変動とともに変位し、地殻変動によって施設が損傷することはない。このような、地殻変動による座標の移動量は、地震後の衛星測位による座標値に含まれるため、留意する必要がある。

2.3 RTK 測位を利用した残留変位評価

施設の利用可否判断のための部材の変形・応力状態の評価に必要な残留変位は、係留施設の変形に伴う変位であり、地震前後の衛星測位による座標の移動量から地殻変動分を除く必要がある。

このような残留変位の計測には、図-2.5に示すようにRTK測位を利用すると利点がある。RTK測位は、基準局でのGNSSからの測位情報等を補正情報として観測局の誤差補正に使用する方式で、本質的に、基準局座標を基に観測局座標を相対的に評価する。まず、残留変位を計測したい観測局と地殻変動量が大きく差が無い位置に基準局を設けることで、地殻変動量を見捨てることのできる。次に、基準局を施設の変形による影響の範囲外で地震動による変位が小さい位置に設けることで、基準局と観測局の相対変位、すなわち、観測局の残留変位を評価することができる。

Berth SurveyorはAndroidアプリケーションで、一人で計測操作でき、RTK測位により誤差1~2 cmの高精度の残留変位計測が可能となり、係留施設の残留変形計測に適している。

3. 試験条件

3.1 試験場所と実施日

現地試験は、敦賀港鞠山北岸壁にて行った。試験実施日は以下の通りである。

2017年9月28日：敦賀港鞠山北地区において現地試験を実施

2017年10月31日～11月2日：現地にてUAVのフライト実施

3.2 岸壁模型

地震時に発生する岸壁の海側への変位は、海に張り出すよう設置した岸壁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90cm×横120cm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5cm、10cm、20cm、50cmおよび鉛直16cm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-3.1、設置状況を図-3.2に示す。なお、模型の移動は、メジャーで測りながら所定の変位量を手動で移動させた。

3.3 試験方法

試験は、RTK測位を利用した衛星測位（以降、直接法と称する）と機体が異なる2機種UAVを用いた。



図-3.2 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、50cm、鉛直16cm）

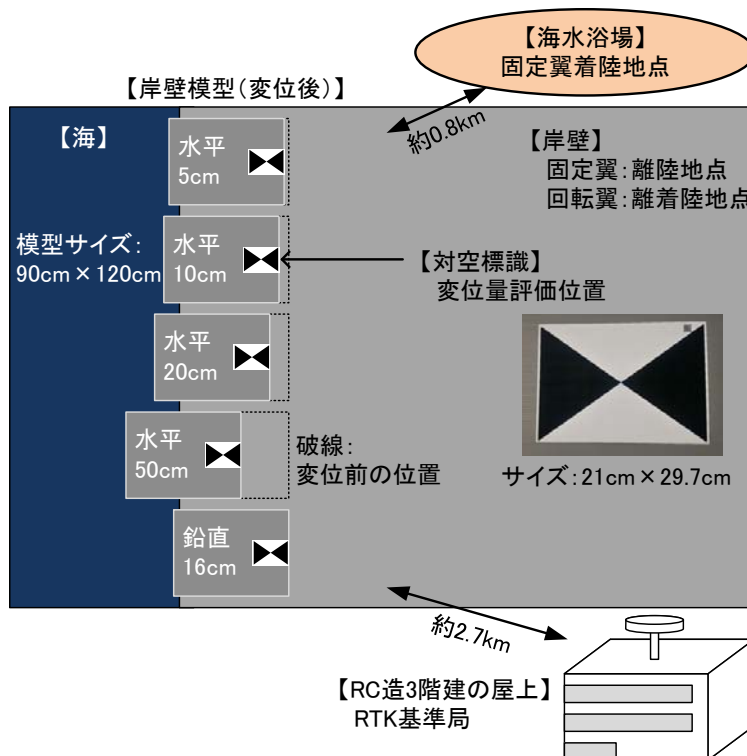


図-3.1 岸壁模型の概要



(a) 観測局 (スマートフォンで計測操作, 衛星受信機と無線受信機)



(b) 基準局 (左: GNSS アンテナ, 右: 無線アンテナ)

図-3.3 直接法による試験状況

表-3.1 直接法の機器情報

名称	直接法
製品名	ProMarker500
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

(1) 直接法による試験

試験には、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試験方法として直接法を用いた。直接法の機器情報を表-3.1、試験状況を図-3.3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。本試験では、試験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試験に用いた。

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うため、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、岸壁背後の地盤変位の範囲外に設置し、地殻変動で移動した基準局の座標を更新しないことで、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。

なお、直接法の計測には、耐震構造研究グループが開発しているスマートフォンアプリケーション「Berth Surveyor」を用いた。

(2) UAVによる試験

計測に用いたUAVは、表-3.2に示す回転翼および固定翼の2種類を用いた。UAVによる試験状況を図-3.4および図-3.5に示す。飛行方法の違いに加えて、RTK測位の有無が大きな違いであり、本研究ではRTK測位の有用性を確認するため、RTK測位可能な固定翼を試験に用いた。

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。本試験では、施設がコンクリート版、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。

3.4 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。実際の飛行状況は後述する(表-4.1参照)。

試験場所の周辺には、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。固定翼では、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

表-3.2 UAV 機体情報

名称		回転翼	固定翼
製品名		Phantom 4 Pro	eBee RTK
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・接続方法	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)



(a) 機体とコントローラ



(b) 離陸状況



(c) 着陸状況



(d) コントローラの表示画面

図-3.4 UAV による試験状況 (回転翼)

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-3.6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、側溝のグレーチングやコンクリート構造の角を設定した (図-3.7参照)。

GCPや対象施設が被写体として含まれるよう、図-3.8に示す飛行経路を設定した。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用いた。GCPの座標は直接法により計測した。GCPの座標一覧を表-3.3に示す。強風により、UAVによる試験は2日かけて実施したため、対空標識は試験日毎に設置し、直接法により座標を計測した。そのため、同表には対空標識を用いたGCPには、UAV機体毎の座標が示されている。



(a) 機体



(b) 機体のリリース状況



(c) 着陸状況



(d) コントローラの表示画面

図-3.5 UAVによる試験状況（固定翼）

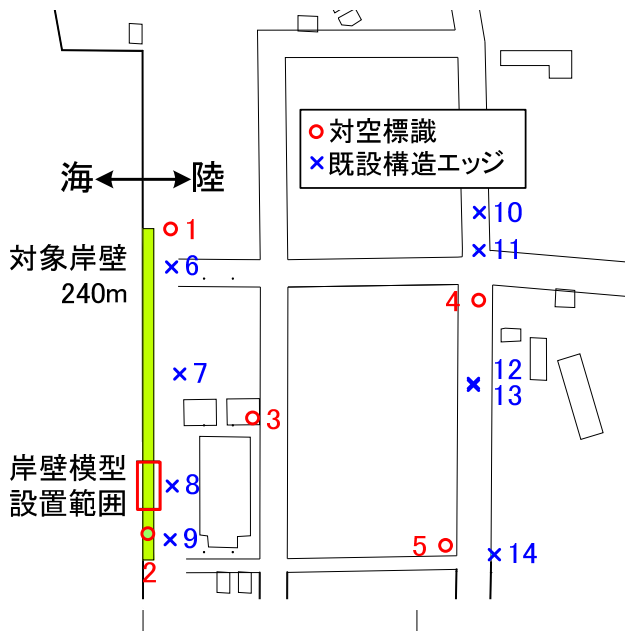


図-3.6 岸壁模型とGCPの配置

GCP 番号	外観と形状	GCP 番号	外観と形状
1 2 3 4 5	 <p data-bbox="403 591 635 620">標識中央 (1 m×1 m)</p>	10	 <p data-bbox="986 591 1313 620">既設構造 (グレーチングの角)</p>
6	 <p data-bbox="355 916 699 945">既設構造 (グレーチングの角)</p>	11	 <p data-bbox="986 916 1313 945">既設構造 (グレーチングの角)</p>
7	 <p data-bbox="331 1240 707 1270">既設構造 (コンクリート構造の角)</p>	12	 <p data-bbox="986 1240 1313 1270">既設構造 (グレーチングの角)</p>
8	 <p data-bbox="355 1565 699 1594">既設構造 (グレーチングの角)</p>	13	 <p data-bbox="986 1565 1313 1594">既設構造 (グレーチングの角)</p>
9	 <p data-bbox="355 1890 699 1919">既設構造 (グレーチングの角)</p>	14	 <p data-bbox="986 1890 1313 1919">既設構造 (グレーチングの角)</p>

図-3.7 GCPの外観と形状

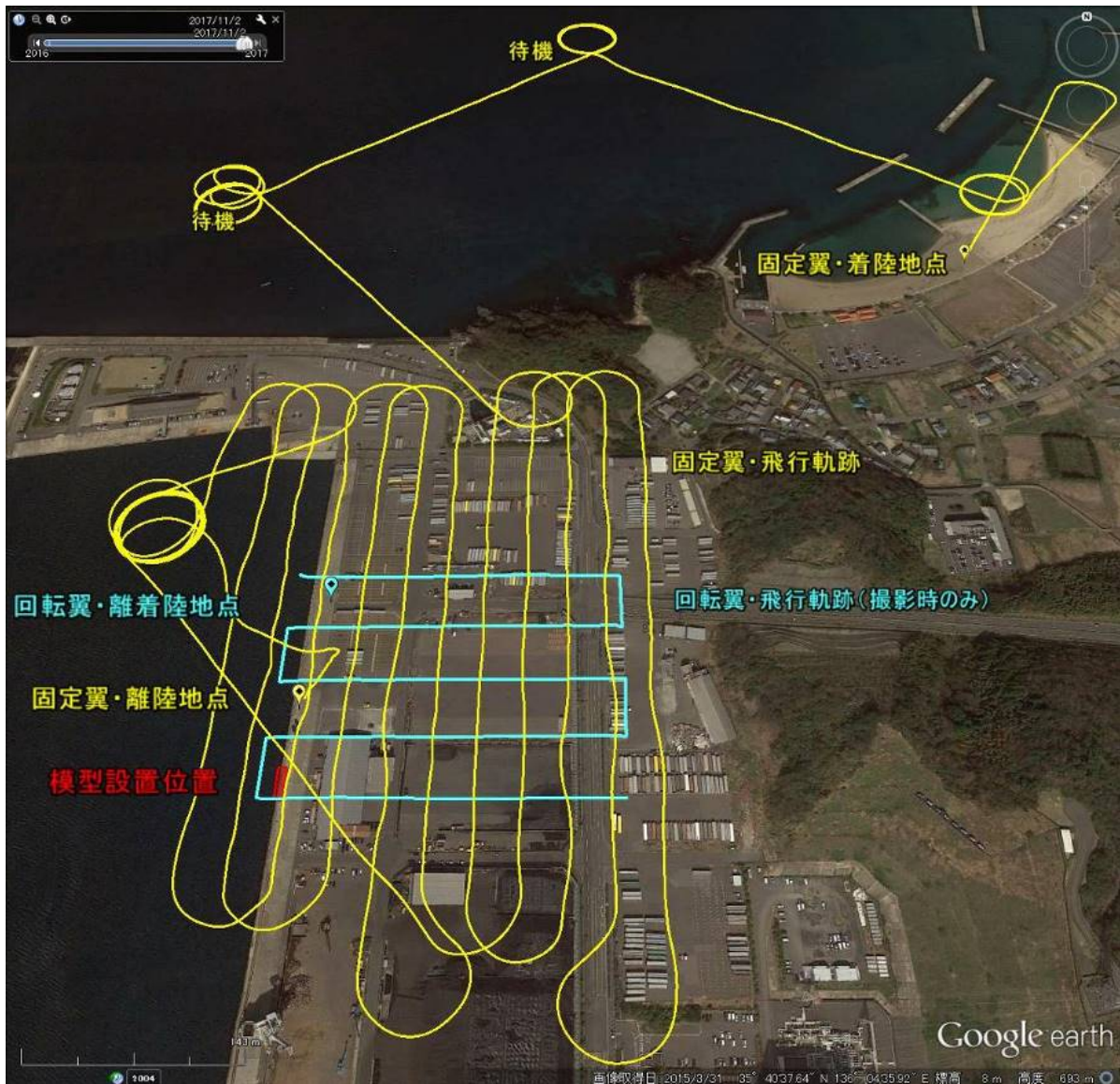


図-3.8 UAV の飛行軌跡 (回転翼は撮影時のみの軌跡)

表-3.3 GCPの座標一覧（公共測量座標系，単位：m）

GCP 番号	X 座標	Y 座標	Z 座標	備考
1	-36066.573	6730.400	2.465	回転翼用
2	-35846.393	6745.876	2.629	
3	-35896.674	6969.111	5.785	
4	-36075.832	6943.668	5.525	
5	-35980.170	6805.744	3.228	
1	-36065.944	6729.446	2.414	固定翼用
2	-35850.696	6748.999	2.607	
3	-35860.598	6969.215	5.824	
4	-36075.690	6944.520	5.487	
5	-35982.479	6805.433	3.197	
6	-36071.313	6745.441	2.400	回転翼，固定翼共通
7	-35958.511	6965.285	5.609	
8	-36081.566	6980.360	5.283	
9	-35950.823	6752.009	2.530	
10	-35872.587	6746.075	2.512	
11	-35851.566	6969.506	5.728	
12	-36032.418	6746.783	2.476	
13	-35833.156	6969.710	5.707	
14	-35904.087	6968.759	5.739	

3.5 変位量の評価方法

(1) 座標計測方法

地震による残留変位量は、岸壁模型が移動する前後の座標の移動量とする。試験方法により以下の方法で座標を計測した。

① 直接法

GCPを計測する時と同様に、図-3.3のように模型に貼り付けた対空標識の中心にポールを立てて座標を測った。

② UAV

はじめに飛行により画像を撮影する。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。次に、100枚以上の取得画像について、ソフトウェア「Pix4Dmapper¹⁰⁾」を用いて画像処理により撮影した複数の画像を1枚の画像として合成し、正射投影したラスターデータであるオルソ画像と数値表層モデル（以降、DSMと称する）を作製した。最後に、ソフトウェア「Global Mapper¹¹⁾」を用いて、オルソ画像より後述する方法により、模型の対空標識中央または模型のエッジを判別し、DSMから座標値を抽出した。

模型エッジにおいて変位を評価した理由は、係留施設の残留変位を評価する際、実際は岸壁の水際位置を測ることが一般的と考えられ、また、このような岸壁水際付近では、対空標識を設置することは困難であり、さらに、被災時には対空標識を用いずにUAVを飛行させることも考えられるためである。すなわち、係留施設の残留変位については、対空標識でなく模型エッジで評価する方法が現実に即した方法と言える。

一方、直接法については、模型エッジにポールを立てることは困難である。そのため、実際の施設を対象として計測する場合は、水際より数十cm陸側に鉾を打ち、鉾の座標を測ることが一般的である。

(2) 変位評価位置の選択ユーザー

オルソ画像より座標を抽出する際、ソフトウェア上で位置を選択（マウスでクリック）する必要があるが、その位置の判断はユーザーに依る。特に、本研究では広範囲の撮影を対象としているため飛行高度は100 m以上と高く画像の解像度が低い。そのため、変位評価位置は明瞭ではなく、画像をピクセル単位で分析し、判断する必要がある。このとき、ユーザーによって判断が異なり、結果的に座標値に違いが現れる。また、本研究では以下のように、検討内容によってユーザーが異なるため、評価位置の判断方法にも違いがある。

① ユーザー1



図-3.9 対空標識および模型エッジの変位評価位置の判定手順

UAVを用いた写真測量を生業とするベテラン技術者1名であり、画像処理および座標抽出に用いたソフトウェアに熟知している。評価の際は評価位置（例えば、対空標識中央）を指示し、位置選択の判断は委ねた。

② ユーザー2

本研究で用いたソフトウェア操作を習得した研究者と、異なる画像処理ソフトウェアの経験がある研究者の2名である。画像処理の条件の違いによる計測精度を公平に評価するため、予め変位評価位置の選択手順を決めて、判断方法を共有した。また、1名の選択位置が適当かどうか、もう1名が確認し、必要があれば選択し直した。

(3) 変位評価位置の判定手順

ユーザー2による、オルソ画像を用いて座標値の抽出するため位置を判定する手順の概要を図-3.9に示す。模

型に貼り付けた対空標識はA4サイズ（長辺30 cm）と小さいため解像度が低いので、対空標識の左右を見比べて同色のピクセルを見つけ（(a-1)）、同じ色が隣り合わせになった位置のピクセル下側中間点を評価位置として選んだ（(a-2））。

実際の岸壁を対象とした調査では、岸壁の水際位置で変位を評価することが考えられる。そのため、変位の評価位置として、岸壁模型のエッジを選んだケースも検討した。模型エッジの評価位置は、縦方向（赤枠）および横方向（青枠）のように色が変化しないピクセルを見つけ、枠同士が重なる点を選んだ（(b-2)）。このような、岸壁水際付近では、対空標識を設置することは困難であり、また、被災後の調査では対空標識を用いないでUAVを飛行させることも考えられるため、現実に即した方法と考えられる。

GCPに用いた対空標識は大きさが1 m×1 mであるため、画像から容易に中央点を選定できた（(c-2)）。

3.6 地震災害時の GCP の制約と配置

(1) 地震災害時における GCP の制約

UAVを用いた公共測量マニュアル¹²⁾では、計測対象物を囲むようにGCPを配置することが基本とされている。本研究の計測対象である岸壁は、水際に位置するため取り囲むようなGCPの配置が困難であるため、図-3.6に示したようにGCPは岸壁付近と水際から200 m以上離れた位置に設定した。これは、前述のように、地震時に地盤の流動変位によって、護岸背後にGCPを設置したとしてもその位置も移動してしまうためである。GCPが移動した場合には、地震後にその座標計測が必要となるが、津波警報発令等により座標計測のための現地立ち入りができないことも多いと考えられる。

地盤変位の影響範囲については、例えば、神戸港の事例（図-2.3）を参考に水際から150 mの範囲で地盤が変位したとすると、図-3.10に示すように海側のGCPは移動し、水際から200 m以上離れたところに位置する陸側のGCPは移動しない。そのため、災害時には陸側のGCPのみが利用できる想定とする。

(2) GCP の配置

画像処理の際に設定したGCPの配置一覧を図-3.11に示す。災害時の制約を考慮した陸側2点（配置番号8）に加えて多数のGCP配置を検討した。

GCP無し（配置番号1）は、GCPを利用せずに画像処理が可能かどうか、精度が確保できるかどうか不明確であったため設定した。また、RTK測位可能な固定翼は、GCPを設定しなくても写真撮影時の座標について高い計測精

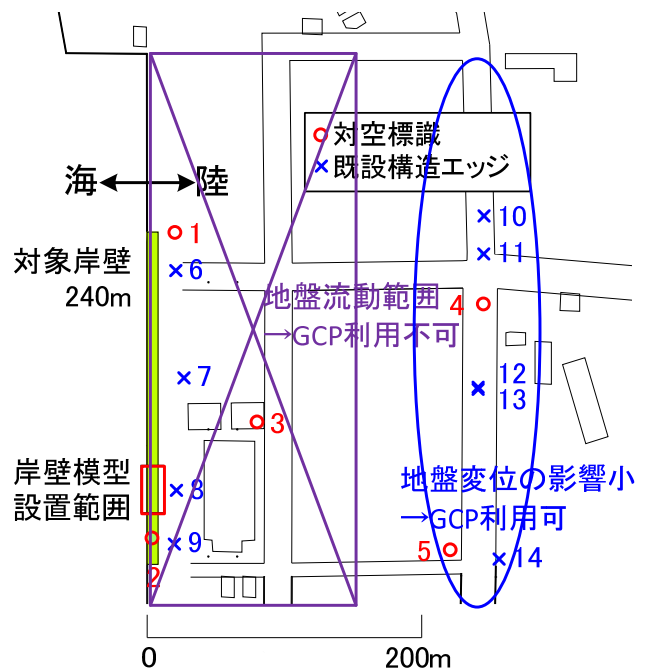


図-3.10 災害時の GCP 利用可否

度を確保できることから、RTK測位の優位性の有無を確認できる。

配置番号2および3は、計測したGCPをほぼ全て用いた配置で、撮影範囲の四隅だけをpushした配置番号4と比較する。

後述のように、災害時を想定した陸側2点のみ画像処理を行うと、オルソ画像の画質が悪く、座標評価位置を識別できなかつたり、識別できても変位量がメートルオーダーになつたりする結果となった。そのため、陸側2点に加えて、海側に1点追加したGCP3点の配置（配置番号5、6および7）を設定した。GCP3点配置の3つのケースは、海側1点のGCPと岸壁模型との距離が異なる。災害時に施設に立ち入り1点のGCPの座標を計測した、または、地盤の流動変位の影響を受けない強固な施設上のGCP1点を設定した場合が該当するが、現実的な条件設定ではない。

3.7 検討ケース設定

これまで述べてきた、変位評価位置を選択するユーザー、UAV機体（RTK測位）、GCP配置および変位の評価位置の組み合わせが異なる検討ケースを表-3.4のように設定した。

検討内容は4つに大別でき、以下に検討の着目点を示す。

① 検討1（GCP有無、RTK測位有無）

GCPの有無と、RTK測位の有無を比較する。UAV写真測量で一般的な条件はCase1-2が該当し、写真測量の際にGCPによる補正を行う。Case1-3は、RTK測位でGCP無しとしたケースで、実際の災害時に適した条件設定

で計測精度を確認する。

② 検討2 (GCPの配置)

GCPの配置の影響を比較する。災害時に適用可能なGCP配置は陸側2点を用いるCase2-6のみであるが、GCP配置が精度に及ぼす影響を確認する。

③ 検討3 (模型エッジでの変位評価)

検討2と同じ条件で画像処理を行い、変位評価位置を対空標識中央の代わりに模型エッジで行った検討である。係留施設の残留変位評価については、対空標識を用いず既設構造エッジで評価する方が、現実に即した方法と考えられる。

④ 検討4 (地震前後で異なるGCP配置)

地震前は全てのGCPが利用でき、地震後のみGCPの利用に制約が加わった場合を想定する。地震前は全てのGCPを用いたGCP配置番号3の座標を、地震後は各検討ケースのGCP配置に基づく座標を用いて、地震前後で異なるGCPを用いた場合の計測精度を確認する。

同表には地震時の適用性として、地震時の地盤変位や地殻変動に対して有効な条件設定となっているのかを評価した。つまり、計測精度を評価したものではない。

RTK測位の利用によって地盤変位と地殻変動の影響を

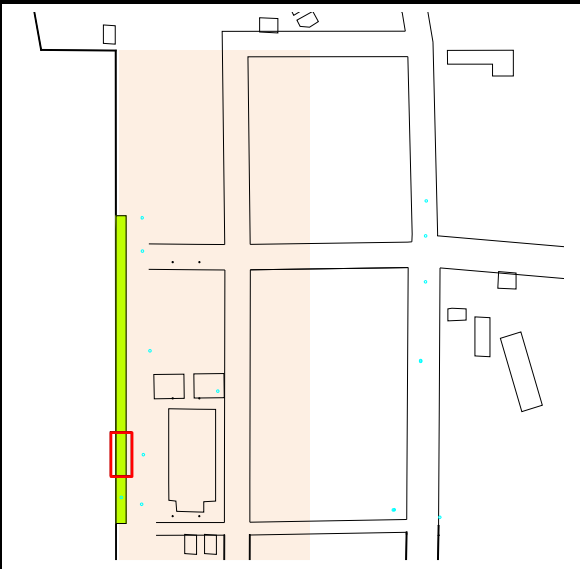
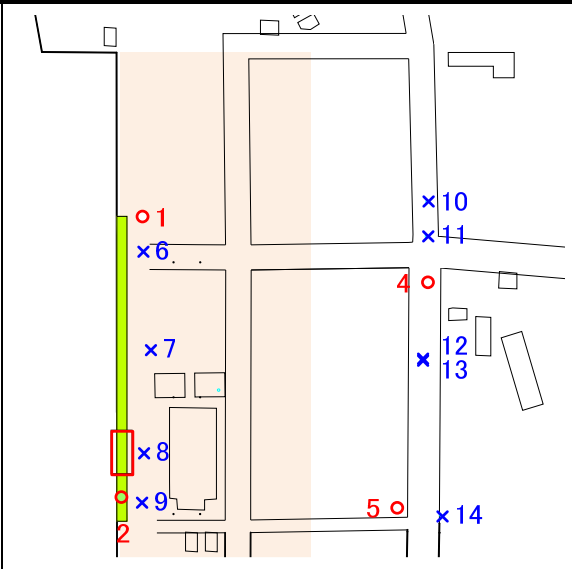
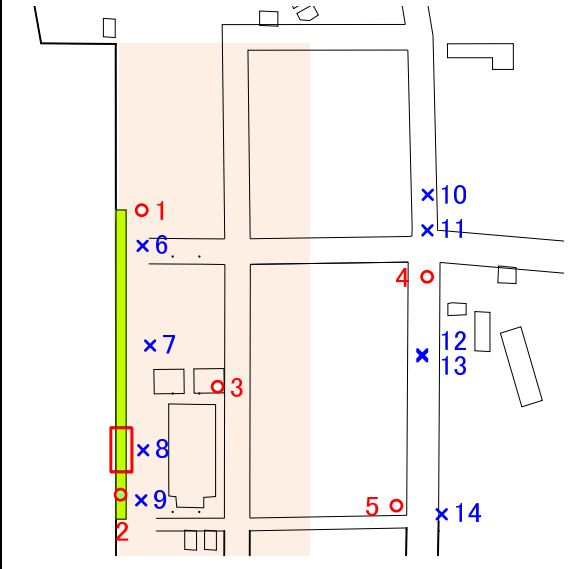
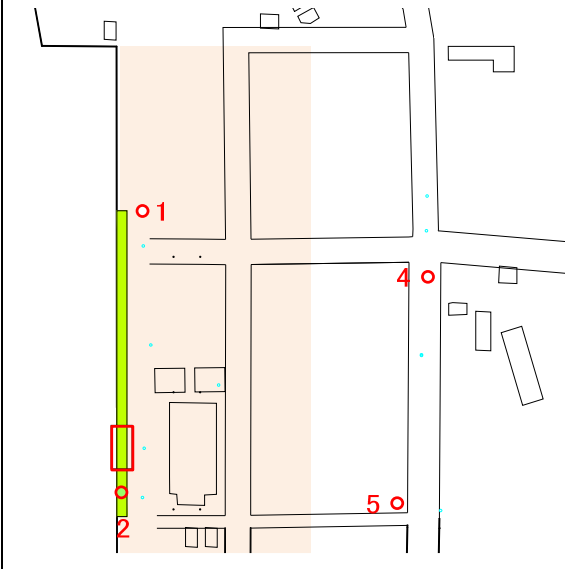
配置番号	GCP 配置	配置番号	GCP 配置
1		3	
2		4	

図-3.11 画像処理に用いる GCP の配置

配置番号	GCP 配置	配置番号	GCP 配置
5	<p>GCP3 点 (陸側 2 点+海側 1 点)</p>	7	<p>GCP3 点 (陸側 2 点+海側 1 点)</p>
6	<p>GCP3 点 (陸側 2 点+海側 1 点)</p>	8	<p>GCP2 点 (陸側 2 点)</p>

図-3.11 画像処理に用いる GCP の配置 (つづき)

受けず、GCPを利用しないCase1-3のみを◎とした。次に、GCPを利用しない、または、陸側2点のみのGCPを利用するCase1-1、Case2-6、Case3-6およびCase4-6は、地殻変動の影響が少ない場合、設定できるので○とした。その他のケースは、地震時に移動して利用できないと考えられる水際付近のGCPを用いているため、設定できないので×とした。

表-3.4 検討ケース一覧

検討番号	ケース名	選択ユーザー	UAV	RTK測位	GCP配置		変位評価位置	地震時の適用性
					地震前	地震後		
検討1	Case1-1	1	回転翼	×	1		標識中央	○
	Case1-2	1	回転翼	×	2		標識中央	×
	Case1-3	1	固定翼	○	1		標識中央	◎
	Case1-4	1	固定翼	○	2		標識中央	×
検討2	Case2-1	2	回転翼	×	3		標識中央	×
	Case2-2	2	回転翼	×	4		標識中央	×
	Case2-3	2	回転翼	×	5		標識中央	×
	Case2-4	2	回転翼	×	6		標識中央	×
	Case2-5	2	回転翼	×	7		標識中央	×
	Case2-6	2	回転翼	×	8		標識中央	○
検討3	Case3-1	2	回転翼	×	3		模型エッジ	×
	Case3-2	2	回転翼	×	4		模型エッジ	×
	Case3-3	2	回転翼	×	5		模型エッジ	×
	Case3-4	2	回転翼	×	6		模型エッジ	×
	Case3-5	2	回転翼	×	7		模型エッジ	×
	Case3-6	2	回転翼	×	8		模型エッジ	○
検討4	Case4-1	2	回転翼	×	3	3	標識中央	×
	Case4-2	2	回転翼	×	3	4	標識中央	×
	Case4-3	2	回転翼	×	3	5	標識中央	×
	Case4-4	2	回転翼	×	3	6	標識中央	×
	Case4-5	2	回転翼	×	3	7	標識中央	×
	Case4-6	2	回転翼	×	3	8	標識中央	○

(注)

- ・地震時の適用性
 - ◎:RTK測位によりGCPを利用しない。地盤変位と地殻変動の影響を受けない
 - :水際から200m離れたGCPのみを利用する。地盤変位の影響は受けないが、地殻変動の影響は受ける
 - ×:GCPを利用するため、地震後に地盤変位と地殻変動の影響を受ける
- ・Case4-1はCase2-1と同じ

表-4.1 試験実績

名称		回転翼		固定翼	
製品名		Phantom 4 Pro		eBee RTK	
試験 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



図-4.1 カラスとトンビの来襲

4. 試験結果

4.1 試験実績

回転翼および固定翼の飛行軌跡を図-3.8、試験実績を表-4.1に示す。固定翼は飛行軌跡を示しているが、回転翼は取得画像のExif情報(写真データに含まれるカメラの設定、撮影日時、GNSSにより自動的に記録された緯度・経度・標高の位置情報などのメタデータ)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、図-4.1に示すように試験場所周辺の山を峙とする多数の鳥(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。

4.2 取得画像

画像処理により作成したオルソ画像を図-4.2、岸壁模型近傍の拡大図を図-4.3に示す。本試験では飛行高度が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-4.1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時間、回転翼で約1.5時間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)。本試験では、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。



(a) 固定翼



(b) 回転翼

図-4.2 オルソ画像 (変位前)
(四角枠内が岸壁模型設置位置)



(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-4.3 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.)

4.3 計測精度評価

ここでは、画像処理で抽出した座標値について地震前後で差分を取った値を変位量と呼ぶ。また、この変位量と岸壁模型を移動する際の目標値である所定変位量との差を誤差と呼ぶ。岸壁模型はメジャーで測りながら所定変位量分を移動させたため、実際の模型の移動量と目標値（所定変位量）とはミリ単位の違いがあると考えられる。計測精度の評価として、各ケースで計測された変位量と所定変位量との差（以降、変位差と称する）の最大値がより小さいものを精度が高いと表現する。

(1) 検討1の結果（GCP有無，RTK測位有無）

計測結果の一覧を直接法の結果と合わせて表-4.2に示す。回転翼と固定翼の計測日（飛行日）が異なり、岸壁模型を2回設置したため、合わせて直接法の計測も2回行った。なお、本検討では評価は水平変位のみを行った。

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測位の計測精度（水平で1 cm程度）と大差なく、地震前後で2回の計測結果の差分を計算するため、精度が半分（2 cm程度）に低下することもなかった。

UAVの結果は、回転翼（RTK測位無し）、固定翼（RTK測位有り）について、画像処理の際にGCPを設定する場合、GCPを設定しない場合、合計4ケースの結果を示した。

表-4.2 検討1の計測結果一覧

	所定変位 [cm]	水平	
		変位量[m]	所定変位との差[m]
直接法 回転翼用	水平5	0.043	0.007
	水平10	0.099	0.001
	水平20	0.189	0.011
	水平50	0.488	0.012
直接法 固定翼用	水平5	0.052	-0.002
	水平10	0.113	-0.013
	水平20	0.208	-0.008
	水平50	0.492	0.008
Case1-1 GCP無し 回転翼	水平5	1.151	-1.101
	水平10	1.125	-1.025
	水平20	1.024	-0.824
	水平50	0.793	-0.293
Case1-2 5点と全エッジ 回転翼	水平5	0.046	0.004
	水平10	0.111	-0.011
	水平20	0.216	-0.016
	水平50	0.477	0.023
Case1-3 GCP無し 固定翼・RTK	水平5	0.115	-0.065
	水平10	0.137	-0.037
	水平20	0.225	-0.025
	水平50	0.499	0.001
Case1-4 5点と全エッジ 固定翼・RTK	水平5	0.058	-0.008
	水平10	0.106	-0.006
	水平20	0.193	0.007
	水平50	0.442	0.058

*太字は、所定変位との差が最大の結果。

変位差の絶対最大値（表-4.2の太字）について整理した図を図-4.4に示す。

変位差は、GCPを設定する場合、回転翼で23 mm（Case1-2）、固定翼で58 mm（Case1-4）となり回転翼の方が精度は高くなった。しかし、表-4.2の最大値以外の結果を見ると、固定翼の結果も1 cm以下の精度で計測できている。このような精度が異なる結果が得られた理由として、不鮮明な画像が撮影されたことが考えられる。固定翼は、回転翼と比べて飛行高度が高く、オーバーラップ率が低くなっていて、カメラの固定方法が本体固定（回転翼はジンバル固定）等、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。

また、前述のようにRTK測位により地殻変動分を除くことも可能であり、大規模地震発生時の係留施設の残留変位計測手法として、RTK測位可能なUAVを利用した写真測量は有利である。

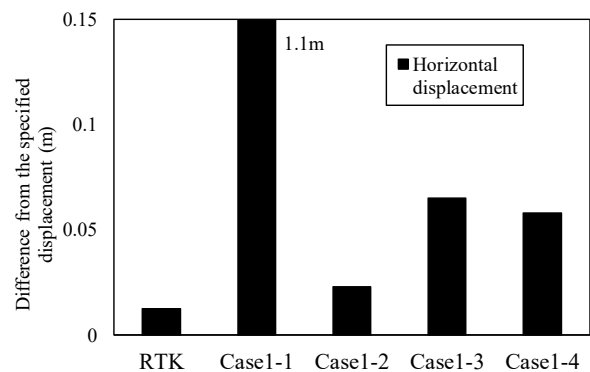


図-4.4 検討1の計測精度比較，縦軸：各ケースの変位差の最大値，RTK：直接法（計測2回分の平均値），Case1-1は縦軸最大値0.15 mを超える1.1 m

(2) 検討2の結果（GCPの配置）

計測結果の一覧を直接法の結果と合わせて表-4.3に、変位差の絶対最大値を整理した図を図-4.5に示す。

水平変位に着目すると、全てのGCPを用いたCase2-1の変位差の最大値は16 mm、撮影範囲の四方4箇所にGCPを

表-4.3 検討2の計測結果一覧

	所定変位 [cm]	水平		鉛直	
		変位量[m]	所定変位 との差[m]	変位量[m]	所定変位 との差[m]
直接法	水平5	0.043	0.007	-0.026	0.026
	水平10	0.099	0.001	-0.004	0.004
	水平20	0.189	0.011	-0.014	0.014
	水平50	0.488	0.012	0.013	-0.013
	鉛直16	0.071	-0.071	-0.147	-0.013
Case2-1 4点と全エッジ	水平5	0.052	-0.002	0.003	-0.003
	水平10	0.105	-0.005	-0.001	0.001
	水平20	0.216	-0.016	0.009	-0.009
	水平50	0.498	0.002	-0.024	0.024
	鉛直16	0.064	-0.064	-0.145	-0.015
Case2-2 4点 (1,2,4,5)	水平5	0.036	0.014	0.003	-0.003
	水平10	0.123	-0.023	-0.002	0.002
	水平20	0.205	-0.005	0.013	-0.013
	水平50	0.484	0.016	-0.012	0.012
	鉛直16	0.046	-0.046	-0.163	0.003
Case2-3 3点 (2,4,5)	水平5	0.076	-0.026	0.001	-0.001
	水平10	0.127	-0.027	-0.007	0.007
	水平20	0.209	-0.009	0.006	-0.006
	水平50	0.517	-0.017	-0.029	0.029
	鉛直16	0.039	-0.039	-0.162	0.002
Case2-4 3点 (1,4,5)	水平5	0.078	-0.028	0.067	-0.067
	水平10	0.114	-0.014	0.062	-0.062
	水平20	0.249	-0.049	0.075	-0.075
	水平50	0.531	-0.031	0.035	-0.035
	鉛直16	0.062	-0.062	-0.098	-0.062
Case2-5 3点 (3,4,5)	水平5	0.012	0.038	-0.046	0.046
	水平10	0.041	0.059	-0.054	0.054
	水平20	0.151	0.049	-0.046	0.046
	水平50	0.434	0.066	-0.101	0.101
	鉛直16	0.115	-0.115	-0.229	0.069

*太字は、水平は水平変位用模型のうち所定変位との差が最大の結果。鉛直は全ての模型で差が最大の結果。

配置したCase2-2の最大値は23 mmとなり、計測精度としては直接法と同程度であることが確認できた。しかしながら、検討1で示したように両ケースではGCPが移動しないことを前提とした条件であることに留意する必要がある。

地震時に岸壁背後150 mまでの範囲で地盤変位が発生し、この範囲のGCPの座標が利用出来ないことを想定したCase2-6は、地盤変位の影響が小さい岸壁から200 m離れた2点のGCPを利用して画像処理を行ったが、オルソ画像の画質が悪いため、変位評価位置を識別できなかったり識別できても変位量がメートルオーダーになったりする結果となった。そのため、表-4.3や後述の検討でも陸側GCP2点の検討結果を示していない。

Case2-6で用いた岸壁から200 m離れた陸側GCP2点に加えて、岸壁付近に1点を加えた、GCPが三角形配置となるCase2-3の誤差は27 mmとなり、四辺形配置のケース(Case2-1, Case2-2)と精度が大きく変わらない結果となった。しかし、3点目のGCPが模型設置位置と離れてしまうと誤差は大きくなり、精度が低くなることが分かった

(Case2-4で49 mm, Case2-5で66 mm)。被災時に地盤変位によって岸壁背後のGCPを利用できない場合、UAVの取得画像から係留施設の残留変位を評価することは困難である。しかし、岸壁から離れたGCPに加えて少なくとも1点、施設近傍にGCPを設定できれば、一定の計測精度を確保できることが分かった。

図-4.5に示すように、鉛直変位の計測精度も水平変位と概ね同じ傾向を示す結果となった。直接法が水平変位よりも鉛直変位の誤差が低くなった結果に対して、UAVの結果のうち、鉛直変位の精度が高かった3ケースは水平変位と同程度であった。

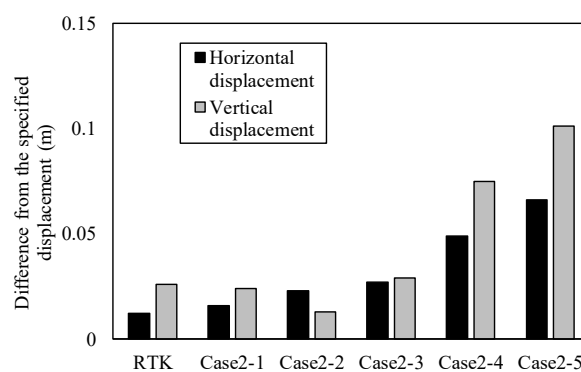


図-4.5 検討2の計測精度比較，縦軸：各ケースの変位差の最大値，黒色：水平変位，灰色：鉛直変位，RTK：直接法

(3) 検討3の結果（模型エッジでの変位評価）

計測結果の一覧を表-4.4に、変位差の絶対最大値を整理した図を図-4.6に示す。模型エッジで評価した水平変位の結果は、対空標識中央の評価で精度が高かったGCP配置ケース(Case2-1, Case2-2, Case2-3)において、対空標識よりも2倍程度誤差が大きくなった。鉛直変位の精度の低下はより顕著に現れ、GCPの配置との関係性は見られない。

図-3.9に示したように模型エッジは、定めたルールに則り、ピクセル単位で分析しながら設定したため、このような誤差は、変位評価位置の選択によるものとは考えにくい。そのため、模型エッジが水際であるため、座標の精度が低かったと考えられる。実際の運用を考慮すると、岸壁を対象とした場合、水際より陸側(例えば、ケーソン陸側の面付近の、ソフトウェア上で選択できる何らかの特徴点)で変位量を評価した方が精度を確保できるものと考えられる。

表-4.4 検討3の計測結果一覧

	所定変位 [cm]	水平		鉛直	
		変位量[m]	所定変位との差[m]	変位量[m]	所定変位との差[m]
Case3-1 4点と全エッジ	水平5	0.073	-0.023	-0.054	0.054
	水平10	0.130	-0.030	-0.101	0.101
	水平20	0.228	-0.028	-0.044	0.044
	水平50	0.476	0.024	-0.037	0.037
	鉛直16	0.031	-0.031	-0.189	0.029
Case3-2 4点 (1,2,4,5)	水平5	0.097	-0.047	-0.118	0.117
	水平10	0.120	-0.020	-0.105	0.105
	水平20	0.230	-0.030	-0.059	0.058
	水平50	0.492	0.008	-0.047	0.047
	鉛直16	0.054	-0.054	-0.216	0.056
Case3-3 3点 (2,4,5)	水平5	0.098	-0.048	-0.010	0.010
	水平10	0.123	-0.023	-0.035	0.035
	水平20	0.234	-0.034	-0.059	0.059
	水平50	0.522	-0.022	-0.053	0.053
	鉛直16	0.039	-0.039	-0.176	0.016
Case3-4 3点 (1,4,5)	水平5	0.107	-0.057	0.004	-0.004
	水平10	0.154	-0.054	0.011	-0.011
	水平20	0.252	-0.052	-0.033	0.033
	水平50	0.524	-0.024	0.012	-0.012
	鉛直16	0.054	-0.054	-0.145	-0.015
Case3-5 3点 (3,4,5)	水平5	0.057	-0.007	-0.141	0.141
	水平10	0.076	0.024	-0.128	0.128
	水平20	0.172	0.028	-0.115	0.115
	水平50	0.438	0.062	-0.088	0.088
	鉛直16	0.086	-0.086	-0.273	0.113

*太字は、水平は水平変位用模型のうち所定変位との差が最大の結果。鉛直は全ての模型で差が最大の結果。

表-4.5 検討4の計測結果一覧

	所定変位 [cm]	水平		鉛直	
		変位量[m]	所定変位との差[m]	変位量[m]	所定変位との差[m]
Case4-1 4点と全エッジ	水平5	0.052	-0.002	0.003	-0.003
	水平10	0.105	-0.005	-0.001	0.001
	水平20	0.216	-0.016	0.009	-0.009
	水平50	0.498	0.002	-0.024	0.024
	鉛直16	0.064	-0.064	-0.145	-0.015
Case4-2 4点 (1,2,4,5)	水平5	0.077	-0.027	-0.134	0.134
	水平10	0.133	-0.033	-0.131	0.131
	水平20	0.243	-0.043	-0.103	0.103
	水平50	0.523	-0.023	-0.092	0.092
	鉛直16	0.039	-0.039	-0.207	0.047
Case4-3 3点 (2,4,5)	水平5	0.047	0.003	-0.119	0.119
	水平10	0.072	0.028	-0.120	0.120
	水平20	0.174	0.026	-0.097	0.097
	水平50	0.480	0.020	-0.116	0.116
	鉛直16	0.077	-0.077	-0.221	0.061
Case4-4 3点 (1,4,5)	水平5	0.304	-0.254	0.277	-0.277
	水平10	0.356	-0.256	0.278	-0.278
	水平20	0.494	-0.294	0.298	-0.298
	水平50	0.802	-0.302	0.286	-0.286
	鉛直16	0.249	-0.249	0.183	-0.343
Case4-5 3点 (3,4,5)	水平5	0.148	-0.098	0.100	-0.100
	水平10	0.155	-0.055	0.097	-0.097
	水平20	0.282	-0.082	0.117	-0.117
	水平50	0.586	-0.086	0.103	-0.103
	鉛直16	0.112	-0.112	-0.013	-0.147

*太字は、水平は水平変位用模型のうち所定変位との差が最大の結果。鉛直は全ての模型で差が最大の結果。

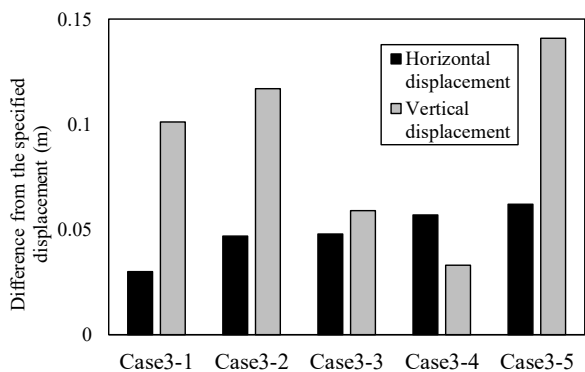


図-4.6 検討3の計測精度比較，縦軸：各ケースの変位差の最大値，黒色：水平変位，灰色：鉛直変位

(4) 検討4の結果（地震前後で異なるGCP配置）

計測結果の一覧を表-4.5に、変位差の絶対最大値を整理した図を図-4.7に示す。

地震前後で異なるGCP配置を用いた場合、全ケースで精度が低く、特に鉛直変位の精度が顕著に低い結果となった。座標にはGCP配置に起因する誤差が含まれ、GCPの数が少なく撮影範囲の四方に配置できない場合、この誤差は大きくなると考えられる。変位量は地震前後の座標の差分から求めているため、同じGCP配置を用いた場

合、この誤差の影響は互いに打ち消しあって小さくなると考えられる。一方、地震前後でGCP配置が異なる場合、地震前後でGCP配置に起因する誤差に差があるため、座標の差分を取っても誤差の影響は必ずしも小さくならず、精度が低い結果になったと考えられる。特にGCPを3点用いたCase4-4およびCase4-5においては、地震前後で同じGCP配置を用いることで四方配置のケースの数倍の誤差に収まっていたが、地震後に異なるGCP配置を用いることで、水平変位の精度が著しく低下した。

GCPの数や配置が精度を確保するのに十分でない場合、地震前後で同じGCP配置を用いることで、GCP配置に起因する誤差の影響を小さくでき、変位量の計測精度の低下を避けられると考えられる。すなわち、地震後に利用できるGCPの配置に合わせて、地震前のGCPを設定して地震時の残留変位を評価することで、計測誤差を小さくできると考えられる。

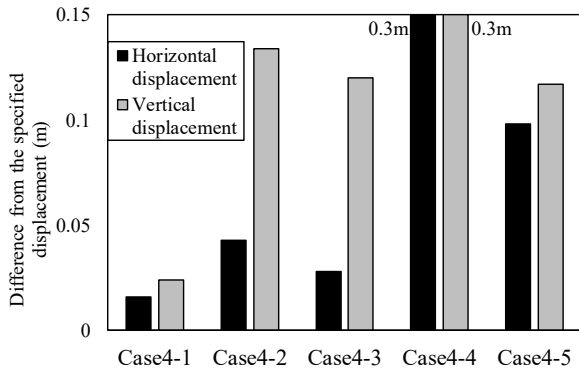


図-4.7 検討4の計測精度比較，縦軸：各ケースの変位差の最大値，黒色：水平変位，灰色：鉛直変位，Case4-4は縦軸最大値0.15mを超える0.3m，Case4-1は地震前後でGCP配置が同じ（Case2-1と同じ）

5. 地震災害時の UAV 活用における留意点

5.1 利用用途と計測精度

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示されている⁷⁾。この程度の変位量に対して，固定翼（RTK測位有り，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と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¹³⁾。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（RTK測位有り，GCP無し）の計測精度で十分と考えられる。

5.2 地殻変動の考慮

大規模な地震災害の場合，地殻変動が発生することが考えられる。この場合，地殻変動による変位がUAVでの写真撮影時の座標に含まれ，写真測量より評価した座標

値に含まれる可能性が高い。地殻変動による変位は，施設の変形・損傷には影響を及ぼさないため，利用可否判断のための残留変位量には地殻変動分を取り除く必要がある。例えば，RTK測位を用いて係留施設と地殻変動が同程度と考えられる範囲に基準局を設けることにより地殻変動分を無視した計測が可能である。また，RTK測位を搭載したUAVを用いることで，GCPを設定しなくても一定の計測精度を確保した変位評価が可能である。

5.3 UAV 写真測量における留意点

現地試験を実施して気づいたUAV写真測量における留意点を以下に記す。多くはUAV操作や写真測量の熟度に依存する事項である。

- ① 試験地が敦賀港であったため，日本海側での季節風による強風が懸念されたため，試験日は11月迄と設定していた。晴天にもかかわらず，初日午後にはUAV飛行が困難な強風となったため，翌日に試験を延期した。試験地の天候の特徴の把握，リアルタイムで雨雲や風向きの予報が分かるアプリケーションが必要と感じた。
- ② 固定翼飛行の際，カラスやトンビの襲来があり，自動運転を解除して待機やマニュアル運転を行った。非常時にも対応する運転技術が必要である。
- ③ 固定翼では近くの海水浴場を着陸地点として利用したため，施設等管理者の他，海水浴場までの経路に入る自治体首長へ周知を行った。
- ④ UAVの写真測量の計測精度は，取得画像の質に依存するところが多い。連続撮影するなかで，あるタイミングでピントがずれた写真が含まれると，評価位置の判別が困難で精度が低く評価される可能性が考えられる。UAV飛行後に取得画像について現地で確認し，必要に応じて複数回飛行できると，取得画像のエラーを取り除くことができ，精度の向上に繋がると考えられる。
- ⑤ 画像解析については，未経験者でも簡単に操作できるアプリケーションが用意されている。一方，調査条件の設定，UAVの運転，画像処理の種々の設定など，計測精度に関しては技術者の熟度が大いに影響する。

6. 結論

得られた主な知見は以下の通りである。

- ① 現地試験で得られた残留変位の計測精度は，直接法，UAV写真測量の順序であった。直接法がセンチメー

トルオーダーの最も精度が高い結果であったが、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。

- ② GCPを設定しない場合、回転翼の結果は1 m以上の誤差となり、RTK測位を搭載していないため、写真撮影時の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、地殻変動量を除くことも可能で、災害時に適した変位計測が可能であることが確認できた。
- ③ 災害時に地盤変位によって岸壁背後のGCPを利用できない場合、UAVの取得画像から係留施設の残留変位を評価することは困難である。しかし、岸壁の変位の影響が無視できる岸壁から200 m以上離れたGCPに加えて少なくとも1点、岸壁付近にGCPを設定できれば、一定の計測精度を確保できる可能性を示した。ただし、加える1点のGCPは岸壁に近いほど精度は高かった。
- ④ 実際の運用を想定した岸壁水際位置で変位量を評価する際、岸壁の水際位置をソフトウェア上で目視により判断することは可能である。しかし、水際の座標の精度は低い可能性があり、岸壁では水際よりも陸側の位置で変位を評価することが望ましい。
- ⑤ 地震時の変位を評価する際、GCPの数や配置が精度を確保するのに十分でない場合、地震前後で同じGCPの配置を用いることで、GCPの配置に起因する誤差の影響を小さくできる可能性がある。地震前後に異なるGCP配置を用いると、精度は著しく低下する可能性がある。

(2019年11月8日受付)

謝辞

現地試験に協力頂いた国土交通省北陸地方整備局ならびに港湾管理者の方々、画像処理に協力頂いた岐阜工業高等専門学校 長屋佑美氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤広高, 小濱英司, 遠藤正洋, 黒木真也: RTK-GNSSを用いた地震後係留施設の使用可否判断支援ツールの開発, 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集, CS12-39, 2019年.
- 2) トランジスタ技術編集部: GPSのしくみと応用技術,

CQ出版, pp.91-93, 2018年.

- 3) 野上周嗣, 山本幸治, 加藤絵万, 田中豊: マルチコンピュータ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年.
- 4) 国土交通省港湾局監修, 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻)作用及び材料強度条件編に関する参考技術資料, 2018年.
- 5) 稲富隆昌, 善功企, 外山進一, 上部達生, 井合進, 菅野高弘, 寺内潔, 横田弘, 藤本健幸, 田中祐人, 山崎浩之, 小泉哲也, 長尾毅, 野津厚, 宮田正史, 一井康二, 森田年一, 南兼一郎, 及川研, 松永康男, 石井正樹, 杉山盛行, 高崎伸彦, 小林延行, 岡部勝彦: 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告, 港湾技研資料, No.857, 1762pp., 1997年.
- 6) 井合進, 菅野高弘, 野津厚, 一井康二, 佐藤陽子, 小濱英司, 深沢清尊: 港湾構造物の耐震性能照査型設計体系について, 港湾空港技術研究所資料, No.1018, 48pp., 2002年.
- 7) 国土交通省港湾局監修, 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻)施設編に関する参考技術資料, 2018年.
- 8) Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H.: Soil Characteristics and Ground Damage, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects on the January 17 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake, pp.109-118, 1996年.
- 9) 国土地理院: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震から5年 地震時の地殻変動と地震後の余効変動, 2016年.<https://www.gsi.go.jp/kanshi/h23touhoku_5years.html>, (参照2019.11.6)
- 10) Pix4D SA: Pix4Dmapper 4.1 USER MANUAL <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf->>>, (参照2019.4.7)
- 11) Blue Marble Geographics: Global Mapper User Guide <<https://www.bluemarblegeo.com/knowledgebase/global-mapper-20-1/index.htm>>, (参照2019.4.7)
- 12) 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年.
- 13) 国土交通省港湾局監修, 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(中巻)施設編, 2018年.

港湾空港技術研究所資料 No.1365

2020.2

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2019) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています