

UAVを用いた消波ブロックの 測量手法に関する検討

西 広人¹・琴浦 毅²・堺 浩一³・今野 洋幸⁴

¹ 正会員 五洋建設 (株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: Hirohito.nishi@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設 (株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: tsuyoshi.kotoura@mail.penta-ocean.co.jp

³ 正会員 (株) パスコ 事業統括本部新空間情報部
(〒153-0043 東京都目黒区東山 2-8-10 目黒ビル別館 2F)
E-mail: kioaok2610@pasco.co.jp

⁴ 正会員 (株) パスコ 事業統括本部生産改革推進部
(〒153-0043 東京都目黒区東山 2-8-10 目黒ビル別館 2F)
E-mail: hoinrn4764@pasco.co.jp

UAV 写真測量は陸上工事現場で広く普及し、省力化や無人化、安全性の確保に一翼を担っている。この測量では国土地理院から公表されているマニュアルに従い計測対象範囲を囲うよう外側標定点を配置することが求められる。しかし、港湾構造物である消波ブロック被覆堤の消波ブロックを計測対象とした場合、安全管理上の観点から消波ブロック上に標定点を設置することが困難である。そこで、本研究では消波ブロック上に標定点を配置しない UAV 写真測量の消波ブロック計測の精度検証をするとともに、消波ブロック計測における UAV 計測手法の適用性について検討した。その結果、UAV 写真測量は消波ブロック上に標定点を用いない場合の誤差は 10 cm 以下であることが確認され、UAV レーザ測量と併せて施工中の出来形測量、災害時の被害計測などへの UAV 測量の適用が期待できることが確認された。

Key Words : *unmanned aerial vehicle, UAV, ICT, i-Construction, wave-dissipating block, survey*

1. はじめに

国土交通省が i-Construction を推進し ICT 技術の活用により各工種の生産性向上を図っている中で、UAV 測量は「UAV を用いた公共測量マニュアル (案)」¹⁾ や「UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル (案)」²⁾ が整備されるなど広く普及している。UAV 写真測量は水平位置及び標高の基準となる標定点として、計測対象内側の内側標定点と計測対象を囲う外側標定点を設置し、±5.0cm 以下の検証点での精度を確保することで陸上の土工現場などで幅広く普及している。

UAV 写真測量は港湾構造物を対象としても実施されており、従来の測量と比較して簡易な測量手法として活用されつつある^{3) 4) 5) 6) 7)}。しかし、港湾に広く見られる消波ブロック被覆堤では、安全管理上の観点から消波ブロック上への標定点の設置が困難なため、計測対象を囲うように標定点を配置できない。このため、消波ブロック範囲についてはマニュアル¹⁾とは異なる標定点の配置となり、消波ブロック部分の計測精度に与える影響が懸

念されており⁸⁾、内側標定点の間隔を密にして精度向上に努めるなどの取組がなされている⁹⁾。しかし、消波ブロック部分の計測精度に関する検討は十分になされていない。

また、気中から水中に連続する構造物である消波ブロックの 3 次元形状は、水中のナローマルチビームと気中の UAV 計測を組み合わせることで、従来は困難であった全体形状の把握が可能となっており、災害発生時などの被害状況の把握などへの活用が期待される。しかし、計測のタイミングが異なる 2 種類の計測が必要になることから、筆者らは一度の計測で気水中の連続した計測が可能な航空機グリーンレーザの港湾構造物への活用を検討した¹⁰⁾が、UAV 搭載型グリーンレーザの港湾構造物への適用性の検討は十分ではない。

そこで、本研究では消波ブロックにおける外側標定点を設置しない UAV 写真測量についての精度検証を行うとともに、消波ブロックへの UAV レーザ (近赤外・グリーン) 測量の適用性を検討した。



図-1 UAV を用いた測量手法概念図

表-1 各計測手法諸元

	地点A	地点B		地点C
測量手法	写真測量	写真測量	近赤外レーザ測量	グリーンレーザ測量
使用機体	DJI-Matrice600Pro	DJI-Matrice600Pro	DJI-Matrice600Pro	DJI-Matrice600Pro
飛行高度	35m	50m	30m	40m
飛行速度	2.5m/s	2.6m/s	3.5m/s	2.5m/s
使用カメラ	sony α6000(24mmレンズ)	sony α7R(35mmレンズ)	-	-
SfM処理ソフト	AIRBUS-StreetFactory	MAGNET collage	-	-
地上画素寸法	5mm	7mm	-	-
レーザ測距装置	-	-	YellowScan Surveyors	T-DOT GREEN
コース間重複度	75%	60%	73%	75%標準
計画点密度	-	-	100点/m ² 以上	100点/m ² 以上
対象水域透明度	-	-	-	9m(着底)

2. UAV を用いた測量手法

本研究で検証した UAV 測量手法は①写真を用いた測量, ②近赤外レーザを用いた測量, ③グリーンレーザを用いた測量の3種類である。各測量手法の計測概念を図-1に示す。各測量手法とも3次元的な形状取得を目的としたものであり, 点群データの取得が可能である。

①写真を用いた測量は, UAVに搭載したカメラにより, 連続的に重複させて撮影した画像と地上基準点の情報から, 対象となる構造物や地形の3次元モデルを作成するSfMを用いる。UAVを用いた測量の中では比較的安価な機材で測量することができ, 「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」¹⁾が整備されるなど, 広く普及している測量手法の一つである。

②近赤外レーザを用いた測量は, LiDARシステムと呼ばれるレーザスキャナをUAVに搭載し, レーザの照射とその反射パルスの往復時間によって距離を計測して空間情報を測定するものである。レーザ光によって直接対象物を3次元点群として捉えることができる測量手法である。「UAV搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案)」²⁾が整備されており, 測量の無人化や省力化に寄与することが期待される測量手法の一つである。

③グリーンレーザを用いた測量とは, 水中も透過する緑色レーザを照射し, 気中及び水中の計測対象物で反射するパルスの往復時間差から気中と水中の地形を同時計測するものである。消波ブロックなどの気水中に連続する構造物をシームレスに形状取得できることから, 気水中の取得データ合成の省略や事前準備の簡略化などに寄与することが期待される測量手法である。

3. 各計測手法諸元と計測目的

検証はそれぞれ異なる消波ブロック被覆堤を対象に3手法を用いて実施した(表-1)。

地点Aでは写真測量を行った。写真測量時にはSfMを用い3次元モデルを作成するが, SfMの過程で作成される3次元点群モデルにはノイズ等の影響により再投影誤差が発生する。この誤差を標定点を用いて最適化する手法をバンドル調整という。今回は調整標定点の配置及び点数を変化させた複数パターンを調整計算し, 消波ブロック被覆堤上の検証点の較差評価を行った。

地点Bでは同じ測量対象物を写真とレーザによって測量し, 取得した点群データを用いて形状取得と計測精度

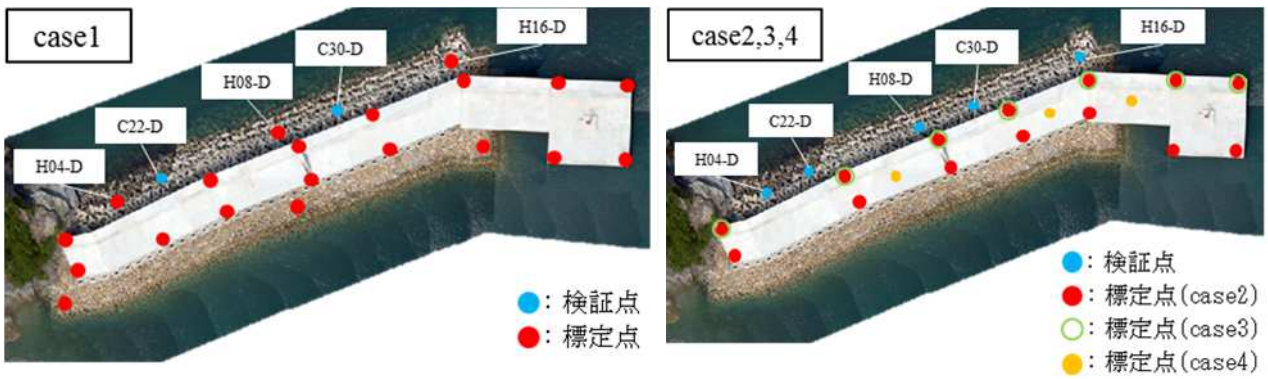


図-2 対空標識配置図

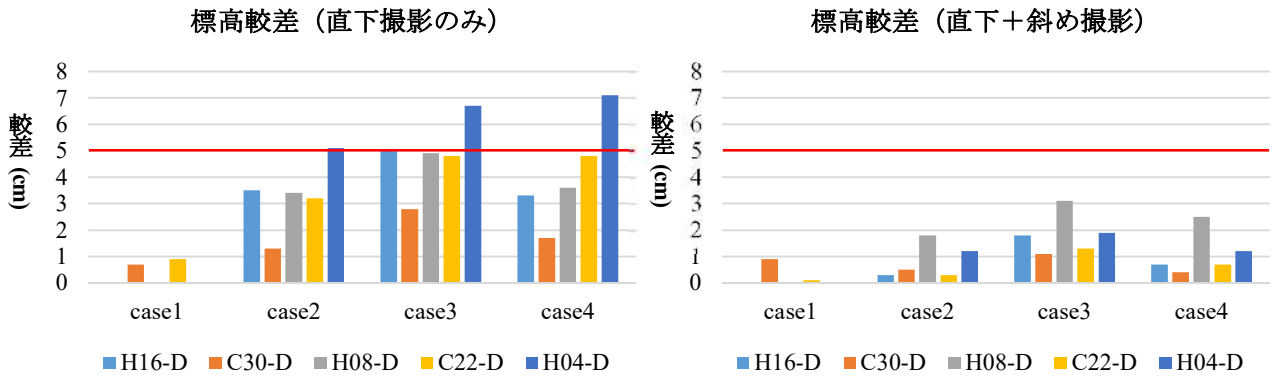


図-3 標高較差分布図

の面的な比較を行った。

地点Cではグリーンレーザを用いた測量を行い、UAVグリーンレーザを用いた測量の消波ブロックへの適用性の検討や精度評価、気水中の連続測定評価を行った。

4. 計測結果

(1) SfM処理におけるバンドル調整の比較

地点Aでは、直下と斜めの両撮影を行い、直下写真のみのデータと直下と斜め写真の統合データにわけ、それぞれで標定点設置を4case設定して(図-2)バンドル調整を行い、消波ブロック上検証点の較差から位置精度の比較検討を行った。通常、今回の機材を使用しての写真を用いた出来形測量では、マニュアルに倣うと地上画素寸法1cmは高度約60mでの撮影となる。しかし、消波ブロック被覆提を対象とする場合は、対象範囲が狭いことから上記の設定では1枚の写真に海面が多く写り込んでしまい、海面で特徴点を捉えられずバンドル調整が困難となる。従って、今回は海面が写り込む範囲を狭くするため高度約35mで計測を行ったため、地上画素寸法0.5cmとなった。それに伴い、標定点の間隔もマニュアルに記載された100mから50mに変更し計測を行った。

各caseの標高較差について直下撮影のみを図-3(左)、斜め撮影を加えた結果を図-3(右)に示す。

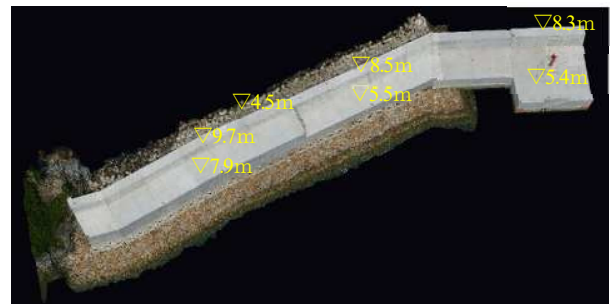


図-4 防波堤標高図

case1は消波ブロック上に標定点と検証点の両方を配置しバンドル調整を行った。マニュアルに記載の標定点配置と同等であり、直下撮影のみでも5.0cmを下回る精度が確認された。

case2は消波ブロック上の対空標識をすべて検証点とし、標定点は上部工長手方向に2列配置した対空標識を用いてバンドル調整を行った。直下撮影のみの場合はH04-Dにおいて5.0cmを超過する結果(較差5.1cm)となり、消波ブロック上に標定点がないとcase1と比較して精度低下が確認できた。しかし、斜め撮影を加えることで精度向上が確認され、較差は2cm以下となった。

case3は消波ブロック上の対空標識をすべて検証点とし、標定点は上部工側端部に長手方向へ1列設置した対空標識を使用してバンドル調整を行った。最大較差はH04-Dの6.7cmとなり、case2より精度低下がみられた。これは、計測対象物に対して標定点が線的にしか配置さ

れていないことに加え、高低差が大きい対象物の場合には、高低差が大きい部分に標定点を設置して計測することで精度を確保する手法がマニュアルに記載されているが、case3ではすべての標定点が上部工のパラペット上に配置されており、計測対象との高低差が4.0m以上あったことで較差が増大したと考えられる(図-4)。

case4は消波ブロック上の対空標識をすべて検証点とし、防波堤上部工中心部分に1列に配置している対空標識を標定点としてバンドル調整を行った。直下撮影のみの場合、case3と同じくH04-Dで較差が5.0cmを超過し、計測対象物に対して標定点が線的にしか配置されていなかったため端部で較差が増大したと推察される。case3と比較すると、H04-D以外は精度が向上しており、標定点の一部が5.5mに設置しているため対象物との高低差が1.0mになったことが影響していると考えられる。なお、case4でも斜め撮影を加えると全点で5.0cm以下の精度となった。

以上より、消波ブロック被覆堤を対象とした写真測量は、標定点配置により最大で7.0cmの較差が発生したが、消波ブロック上の標定点を設置しない直下撮影のみでも実用的な精度を得られ、斜め撮影を加えることで精度が向上することが明らかとなった。また、標定点は対象構造物との高低差を抑えて設置することで精度を確保することが確認された。

(2) 写真測量と近赤外レーザ測量の精度比較

地点Bでは同じ測定対象物に対して写真と近赤外レーザで測量を行い、それぞれの手法について点群データを作成し面的な精度比較を行った。なお、今回の写真測量UAVはTSトラッキングタイプを用い、消波ブロック上

に対空標識は設置せず、防波堤上のみ真値とする検証点を2か所設置して計測を行った。今回の計測における対空標識配置を図-5に示す。また、「UAV搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案)」²⁾より計測対象範囲の調整用基準点設置数は2点で基準を満たす(約16,100m²)ため、近赤外レーザ測量の計測結果を正解値とし写真測量の結果と比較した。

計測で取得した点群データを図-6に、各測量手法点検測量結果を表-2に示す。写真測量の最大較差が3.4cm(SH3:水平方向)、近赤外レーザ測量の最大較差が0.5cm(SH4:高さ方向)となり、各手法とも要求精度を満たした点群データであった。各手法で取得した点群データの標高較差ヒートマップ(図-8)より、高さ方向の最大較差10cmは消波ブロックと防波堤際に分布している。これは、水部に起因する写真測量でのノイズと欠測したレーザとの較差の影響が考えられる。部分的に5.0cmを上回る精度となるのは地点Aと同じであるが、点群全体の95%以上が5.0cm以内に収まっている(図-7)。

以上より、写真測量はノイズによる欠損部の発生が懸念されるものの、近赤外レーザ測量と同程度の計測精度を有しており、消波ブロックの面的形状取得が確認できた。よって、写真測量の消波ブロック計測への適用性が示された。

表-2 点検測量結果

	写真測量		近赤外レーザ測量	
	真値とする検証点	検証点	調整用基準点	検証点
点数	2	7	3	1
水平位置	標準偏差	0.1	0.9	-
	最大較差	0cm	3.4cm	2.4cm
標高	標準偏差	0	0.8	0.5
	最大較差	0cm	1.9cm	1.0cm

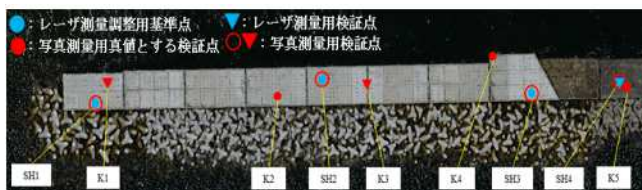


図-5 対空標識配置



図-6 写真・近赤外レーザ点群データ

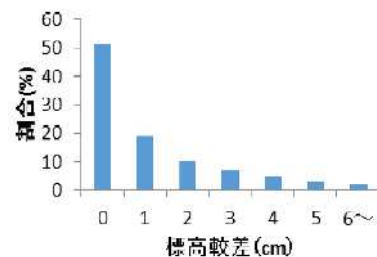


図-7 標高較差ヒストグラム

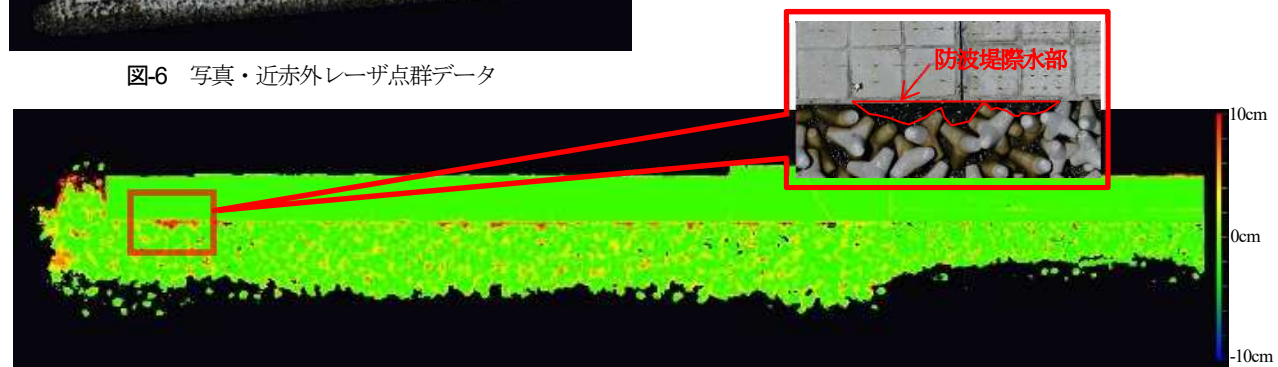


図-8 標高較差ヒートマップ

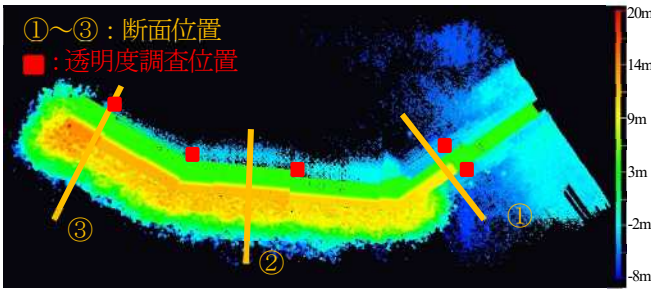


図-9 グリーンレーザ点群データ



図-11 透明度調査状況

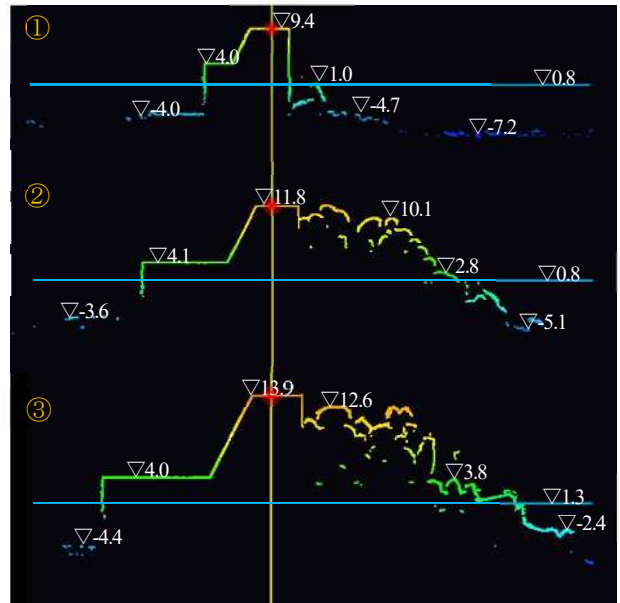


図-10 断面図

(3) グリーンレーザ測定の精度評価と適用性の検討

地点Cでは、防波堤上のみを設置した対空標識を調整用基準点及び検証点としてグリーンレーザ測量を行った。グリーンレーザ測量において取得した点群データを図-9に、断面図を図-10に示すが、気中部分では検証点の最大較差が2.2cmの計測精度となった。

海中部は図-9より、気水中の消波ブロックがシームレスに取得できており、防波堤基部周辺では海底地形を約5.0mまで取得できていることが確認できる。水中部は消波ブロック被覆堤に比べて自然地形の方が広範囲に形状取得できていることがわかる。図-10より、断面部①では気中の上部工天端面に加え、ケーソン壁面についても気水中を連続的にデータ取得できている。港内側は4.0mまでの測深が確認され、港外側は本計測の最大測深である8.0mが計測できた。これは、防波堤基部周辺と同様に自然地形であるためだと推察される。断面部②では、港外側の消波ブロック部分は最大測深が5.9mとなり、水中部を含めた全体の形状が取得できていることが確認できる。港内側ではケーソン壁面と下部の欠測があるが、海藻や貝類が表面に付着して黒色になっており、レーザが吸収された可能性が考えられる。断面部③では、港内側が港外側に比べ2.0m深く測深できている。これは、港内外及び消波ブロックに起因する水面付近の静穏度の影響と推察される。

また、グリーンレーザの計測深度は対象区域の濁度に大きな影響を受けることが知られており¹⁰⁾、現地での透明度調査を実施した(図-11)。透明度調査において9.0mで海底に着底したことから、本計測は透明度9.0m以上の条件であった。なお、対象区域は伊豆諸島沿岸部であり、本州周辺に比べて透明度が比較的高い水域である。

以上より、グリーンレーザ測量は濁度依存性や対象水

域の静穏度、対象物の色によるレーザの吸収などが懸念されるものの、消波ブロックの気中水中形状をシームレスに取得できる技術として継続した検討が期待される。

5. まとめ

消波ブロックを対象に UAV を用いた測量を実施し、適用性や精度を検討した。写真測量時の標定点はマニュアルに記載された対象物を囲うために設置しなくても、消波ブロックに近接する防波堤上に設置することで直下撮影のみの場合で較差は10cm以下になった。また、精度が必要となる場合は斜め撮影を加えることで精度向上が可能であることが明らかになった。

写真測量と近赤外レーザ測量の面的な精度比較では、防波堤際水部でのノイズの影響はあるものの、消波ブロック上に標定点を設置していない写真測量でも消波ブロック範囲の大部分で近赤外レーザ測量と同程度の計測精度を有していることが示され、消波ブロックの面的な形状取得手法として利用できることが確認できた。

グリーンレーザを用いた測量では、気水中の連続的な状態把握及び水深8mまでの計測が確認された。従来では、ナローマルチビームや音探測距離機による水中部の計測データと写真測量や近赤外レーザで取得した気中部計測データを統合して作成していた消波ブロック被覆堤モデルを一度の測量で取得できることが示唆された。静穏度や濁度への依存等の課題はあるものの計測手法として期待される。

以上より、UAV 写真測量は消波ブロック上の標定点を設置しない場合でも、現状の管理で要求される精度を有していることが明らかとなり、グリーンレーザと併せて

消波ブロックの面的形状取得の有効な手段であることが確認された。

参考文献

- 1) 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
- 2) 国土交通省国土地理院：UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案），平成 30 年 3 月
- 3) 櫻井 淳，田中 成典，中村 健二，窪田 諭，今井 龍一，重高 浩：UAV の空中写真測量による施工管理のための計測手法の提案，土木学会論文集 F3（土木情報学）vol. 72, No. 2, II_73-II_81, 2016
- 4) 佐々木 信和，浮田 浩行，中野 晋，石河 雅典：港湾・海岸における被災状況調査時の UAV 運用の安全性向上技術の検討，土木学会論文集 B3（海洋開発）Vol. 74, No. 2, I_115-I_120, 2018
- 5) 川口 真吾，鶴田 修己，高阪 雄一，岡崎 裕，朝比 翔太，酒井 和也，鈴木 高二朗：UAV を用いた港湾構造物の計測技術に関する検討，土木学会論文集 B3（海洋開発）Vol. 75, No. 2, I_121- I_126, 2019
- 6) 山本 也実，菅原 健司，松本 浩史：UAV を用いた消波ブロックの施工管理について，第 62 回（2018 年度）北海道開発技術研究発表会発表論文集
- 7) 齋藤 聡，須藤 浩，鍋谷 泰紀：防波堤消波工の ICT 技術を活用した現況把握における安全性と生産性の向上，平成 28 年度東北地方整備局管内業務発表会
- 8) 吉田 英治，井山 繁，鈴木 啓介：港湾分野における i-Construction 推進のための 3 次元データ等の活用に関する検討，国土技術政策総合研究所資料 No. 1024, 2018
- 9) 清水 毅，大筒 牧男：輪島港防波堤工事における ICT の試行について，平成 29 年度北陸地方整備局事業研究発表会
- 10) 琴浦 毅，Sivaranjani JAYAPRASAD，今野 洋幸，宮作尚宏，堺 浩一，間野 耕司：港湾事業における航空機測深技術 ALB 活用に関する検討，土木学会論文集 B3（海洋開発）Vol. 75, No. 2, I_109- I_114, 2019

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1)

INVESTIGATION ON THE SURVEYING METHOD OF WAVE DISSIPATING BLOCKS USING UAV

Hirohito NISHI, Tsuyoshi KOTOURA, Kouichi SAKAI and Hiroyuki KONNO

UAV Photogrammetry plays a major role in labor saving by unmanned operation, ensuring work safety and this survey method has been widely used in the land construction sites. According to the Survey Manual published by Geospatial Information Authority of Japan, it is required to set up Reference Control points in the target survey area for geo-referencing. However in case of the survey of wave dissipating blocks, one of the widely used harbor structures, it is difficult to set up the reference control points on the wave dissipating blocks because of the safety management issues. In this paper, the measurement accuracy of the wave dissipating blocks by UAV Photogrammetry without the Reference Control Points is verified by the applicability of the results of UAV Measurement Survey.

As a result, this suggested method has an error of 10cm or less and measurement results could be expected to be used for surveying the output forms during construction and the disaster damage assessment.