

# 水中点群データを活用した 出来形検査に向けた検討

塚本 高文<sup>1</sup>・琴浦 毅<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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: takafumi.tsukamoto@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup> 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

ナローマルチビーム測量(以下、NMBと略記)は水中部を可視化できる技術として、ICT活用工事へと実用化が進み、ICT浚渫工の出来形検査、ICT基礎工の数量算出で実用化されているものの、捨石マウンドの出来形検査は実現していない。これは、捨石マウンドの複雑な形状と管理基準の要求精度の高さや、NMBの点群特性に起因するところが大きい。そこで本研究では、捨石マウンドのNMB点群特性を踏まえた出来形検査手法の構築を検討した。

その結果、捨石マウンドを対象としたNMB測量の取得点群に及ぼす影響は、捨石マウンドの凹凸が支配的であることが明らかになり、捨石マウンドの出来形管理基準の管理項目である天端高、法面高、延長、幅の評価を可能とする評価値を点群から算出する手法を構築した。これにより捨石マウンド全体の面的評価を可能とした。

**Key Words :** narrow multi-beam, base-mound, working-form inspection, ICT, i-Construction

## 1. はじめに

国土交通省では、「ICTの全面的な活用」等の施策を建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、魅力ある建設現場を目指す取り組みであるi-Constructionを進めている。港湾分野においても、平成28年からは「港湾におけるICT導入検討委員会」が発足し、令和2年には「港湾におけるi-Construction推進委員会」へとプロジェクトを拡大するなど、BIM/CIMの導入をはじめとする3次元データの活用が進められてきた。陸上のUAVを用いた測量や、レーザスキャナによる取得点群データを活用した出来形管理が進められる中で、水中の形状確認が難しい港湾事業では、水中の3D形状取得が可能なNMBを活用し、施工数量の算出や、電子検査、完成状況の可視化など、設計から工事完了までの一連の過程で業務効率化を図り、現場全体の生産性向上を目指している。NMBを用いた測量が実用化され始めたICT浚渫工では、検査対象範囲の取得した点群を1m平面格子に分割し、格子内の最も浅い最浅値を用いた出来形管理を行うことで、従来の10m毎の測線管理と比較して高密度の検査を可能にしている<sup>1)</sup>。

基礎工はケーソンなどの本体構造物を設置するため、現地盤上に石材によって構成される構造物であり、本体

工直下で数10cm程度の石材を使用する本均し部と、その外側で石材寸法が大きくなる荒均し部、法面部に大別される(図-1)。表-1に基礎工の出来形管理基準を示すが、本体工直下の本均し天端高の測定単位:1cm、許容範囲:±5cmは、荒均し部(測定単位:10cm、許容範囲:±30cm)や、他工種(浚渫工測定単位:10cm、許容範囲:+0、マイナス:規定しない)と比較して要求精度は高い。捨石マウンドの構築時は、写真-1に示すように潜水士は石材の天端と高さの基準となる丁張や定規が一致するように作業を行うものの、石材形状が一様でないことも影響し、天端面にも空隙が存在する構造となる。この時従来の天端高の出来形検査では、本体工の設置水深の確認として、10m間隔で捨石マウンドの石材天端(最浅値)を水中水準器もしくは水中スタッフで計測している。一方、NMBの計測は、計測範囲内の水深値を水平方向に0.1m間隔程度、100点以上/m<sup>2</sup>と、従来計測手法と比較すると高密度にデータを取得するため、空隙や凹凸も含めた水深方向にばらついた点群データになる。この捨石マウンドNMBの点群特性を詳細に検討された事例は少なく<sup>2)</sup>、従来計測手法との関係は明らかになっていない。

そこで、本研究では捨石マウンドを対象としたNMBの点群特性を把握し、基礎工の広範囲、高密度なICT検査を可能にするための出来形検査手法を構築する。

## 2. NMB 計測点群特性

NMB計測データは、ソナー本体、動揺補正機器、GNSS機器などの各計測機器の計測精度に起因するノイズに加え、水中生物や気泡による反射、海中の周囲雑音によるノイズも含まれる。膨大なNMBのデータのノイズ処理は機械的処理を実施した後に、技術者が目視確認することが多く、作業的、時間的負担が大きい。海底地形を計測する水路測量ではNMBデータに対してCUBE処理を採用することでノイズ処理の効率性・客観性を高めているが、この手法は海底面計測を対象とした計測機器などの不確かさ情報に基づく処理方法であり<sup>3)</sup>、捨石マウンドの凹凸によるばらつきを考慮する検討は進んでいない。

ICT基礎工で天端高を評価するためには、潜水士が計測する石材の最浅値に相当する評価値をNMBのデータより算定する必要があるが、可能な限り人為的処理を排除した評価値を効率的に算出できる手法が求められるため、捨石マウンドのNMBの点群データ特性を明らかにし、評価値について検討する。

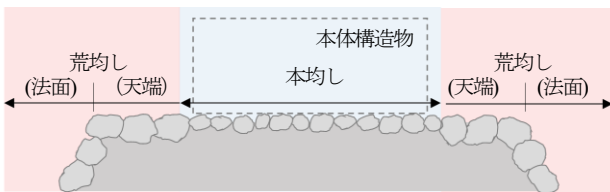


図-1 基礎工における基本構造

表-1 出来形管理基準 (抜粋)

工種	管理項目	測定単位	許容範囲	測定密度
本均し	天端高	1cm	±5cm	測線及び測点間隔は10m以下
	天端幅	10cm	+規定しない -10cm	測線間隔は10m以下
	延長	10cm	+規定しない -10cm	法線上
荒均し	天端高	10cm	±30, 50cm※1	測線及び測点間隔は10m以下
	法面高	10cm	±30, 50cm※1 ※2	測線間隔10m以下, 測点3点以上
	天端幅	10cm	+規定しない -10cm	測線間隔は10m以下
	延長	10cm	+規定しない -10cm	法線上

※1: ブロック据付面の高さ±30cm ※2: 法面に直角

### (1) NMB 計測点群の検討

NMB計測データの点群特性を明らかにするために、計測条件の異なる3港湾でNMB計測を実施した。計測対象とした3港湾における計測条件一覧を表-2に示す。なお、対象地点は従来検査手法で合格している捨石マウンドとし、本均し、荒均し天端部、法面部、加えて平坦なコンクリートブロック、海底地形を対象にNMBデータを取得した。地点Bの本均し部、地点Cの荒均し天端部、コンクリートブロック、海底地形について、対象毎に取得した点群データを1m平面格子内の点群を昇順に並び替え、その中央となる値(中央値)をグラフの中心とした深度1cm毎の頻度分布と標準偏差 $\sigma$ を示した(図-2)。上面が平坦であるコンクリートブロック、海底地形ではグラフの中央値がそれぞれの天端高と推察されるものの、 $\sigma$ は1~2cm程度存在しており、これはNMBの計測データに一樣に含まれる固有の誤差であると考えられる。一方、本均し、荒均しは $\sigma$ が大きい、これはコンクリートブロックで確認された $\sigma$ : 1~2cmに加え、凹凸が存在する捨石マウンドの特性が含まれるためと考えられる。

### (2) 捨石マウンドを対象とした NMB 評価値の検討

捨石マウンドの凹凸が及ぼす取得点群への影響について確認するため、写真-2の捨石マウンド本均し後の1m格子内の石材を直方体の3Dモデルを用いて再現した。

NMBのデータ取得性能とする100点/m<sup>2</sup>以上の想定で、



写真-1 潜水士による捨石マウンド築造

表-2 対象港湾における計測条件一覧

計測対象	地点A	地点B	地点C
測深機器動揺センサ	Sonic2024 / Applanix POS/MV	Seabat T-50P / Navsight Mrine Apogee	Sonic2024 / Applanix POS/MV
海象条件	波高 0.8 m 程度	波高 0.5 m 以下	波高 0.5 m 以下
験潮所との距離	3.5 km程度	13.5 km 程度	2.0 km 程度
石材材法	本均し 30~500kg/個程度	本均し5~100kg/個程度, 荒均し100~300kg/個程度	荒均し 200~500kg/個程度
均し天端水深	D.L. -15.50m	D.L. -8.95m	D.L. -14.50m
計測対象範囲			

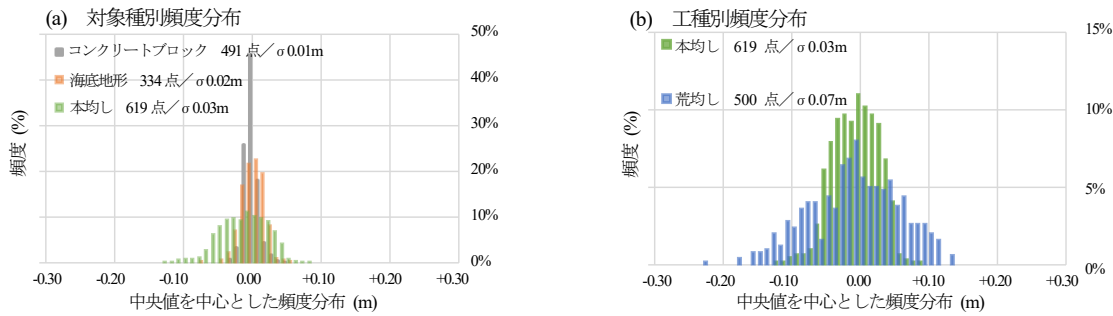


図-2 1m平面格子内点群における1cm毎の頻度分布

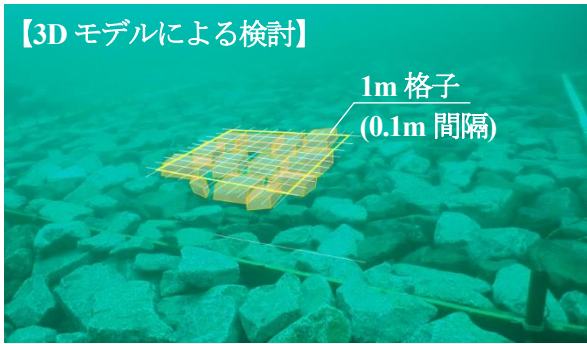


写真-2 捨石マウンド本均し部の水中写真

範囲内を0.1m格子に分割し、ノイズを含まない理想的な石材天端の水深値を取得した。その取得した点群にNMBの固有誤差と想定される $\sigma=1\text{cm}$ を考慮して仮想的なNMB点群を作成し高さ方向の頻度分布を作成した(図-3)。この図の-0.16m付近に図-2には存在しないピークが確認できるが、再現3Dモデル上では石材の重なり目の小さな隙間の点を取得した値となっているのに対し、実際の計測では計測超音波のフットプリントのため当該部の計測はできず浅い値となっていると推察される。また、この図における0cmは3Dモデルにおける石材天端であるが、0cmを上回る分布が確認できる。この分布は0cmや-1cmの計測値が、NMBの固有誤差の $\sigma=1\text{cm}$ を考慮することで得られる分布であり、このことは、NMB点群の最浅値は実際より浅い値となることを示している。ICT浚渫工や海底地形測量の測定単位は10cm単位であるためこの影響は小さいが、基礎工本均しの測定単位1cm、許容範囲 $\pm 5\text{cm}$ を考慮すると、NMBの最浅値をそのまま採用することはできない。ここで、0cmを上回るのが15%程度であることを踏まえ、点群の平均値に標準偏差 $\sigma$ を加算した値を算定したところ0cmに近い値が得られた。この結果は、1m格子内の点群の統計処理によって当該格子の最浅値相当の評価値を効率的に算出できることを示している。なお、ここで平均値と中央値はともに-0.05mであり、ノイズなどの特異値に影響されることが懸念されるため、中央値を採用した中央値+ $\sigma$ が評価値として適していると推察される(図-4)。

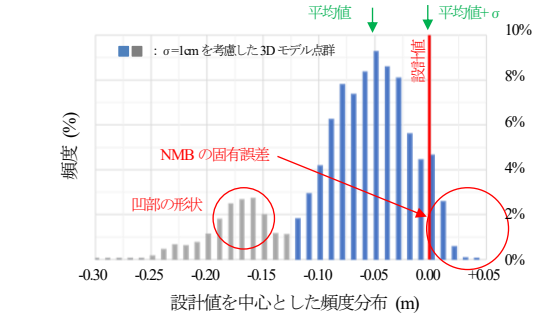


図-3 捨石マウンドを想定した3Dモデルの頻度分布

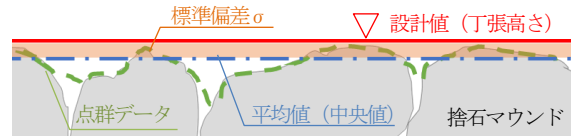


図-4 捨石マウンドにおける点群分布概念図

### (3) NMB と従来計測値との誤差

コンクリートブロック天端の水中水準器による計測値とNMBデータ計測値を比較すると、地点Aでは7cm、地点Bでは5cmの水深差が確認された。この時のNMB計測は潮位観測データを基準とした水深値を算定しているが、潮位観測地点との距離や地形、港湾形状などの影響により潮位観測地点とNMB計測地点の潮位に差異が生じていた可能性が考えられ、NMB点群が全体的に地点Aでは7cm、地点Bでは5cm低いことを示唆している。今回はブロック天端を水中基準点としてNMBデータの水深方向の補正は可能であるが、このような潮位誤差による影響を排除するために、従来の電子基準点に加え民間の電子基準点の整備が進むネットワーク型RTK-GNSSなどの標高値の活用も期待される。しかし、RTK-GNSSの標高値も誤差を有しており、天端高出来形基準 $\pm 5\text{cm}$ を満たすデータとなるかは継続した検討が必要である。

### 3. 捨石マウンド天端部の面的評価

前章で検討した格子の最浅値相当である中央値+ $\sigma$ を用いて表-2のデータを対象に面的評価を検討する。NMB高さの基準は、潮位観測データ、RTK-GPSデータの2種類とした。

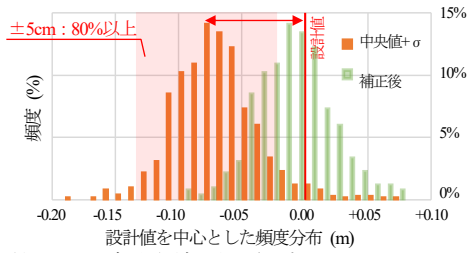


図-5 中央値+σの頻度分布結果例 (地点A, RTK-GPS, 1m格子)

表-3 捨石マウンド天端部の面的評価達成率

計測対象	地点A	地点B		地点C
		本均し	本均し	荒均し
潮位基準	1m格子	85%	81%	100%
	0.5m格子	78%	81%	100%
RTK-GPS基準	1m格子	83%	92%	—
	0.5m格子	78%	81%	—

■ : 合格箇所 色無 : 不合格箇所 延長・幅 : 1m格子数 (設計値)

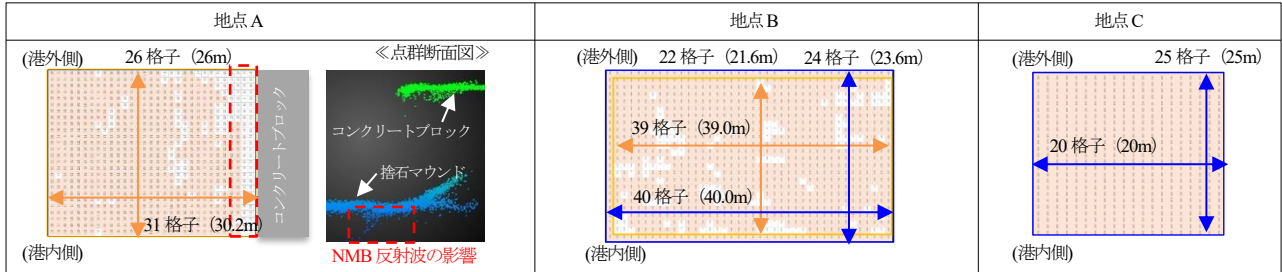


図-6 捨石マウンド天端部の中央値+σによる面的評価結果例 (RTK-GPS, 1m格子)

(1) 天端部の高さの面的評価

地点A, Bの捨石マウンドの本均し天端範囲を1辺1m格子で分割後, それぞれの1m平面格子内点群の中央値+σを評価値として算出し, 設計水深を中心とする1cm毎の頻度分布を作成した. 図-5に地点AのRTK-GPS基準データの結果例を示す. 評価値の平均値を中心とした±5cmに80%以上の格子が含まれる結果が得られたが, その平均値は設計値と比較すると地点Aで7cm, 地点Bで5cm低く, これはコンクリートブロック天端の水中水準器による計測値の差と等しい. そこで地点A, Bともにこの差を用いてNMB点群を水深方向に補正したところ, 設計値を中心とした±5cmに全体格子の80%以上が含まれることを確認した (表-3). したがって, 従来計測手法で計測したコンクリートブロック天端高を用いて, 同位置のNMB計測値との差を補正することは, 面的出来形評価の実施において有効であると考えられ, 今後の検討は補正したデータを用いる.

次に, 分割格子サイズの影響を評価するため, 捨石マウンドの本均し, 荒均し天端範囲を0.5m, 1m格子で分割後, 格子内点群の中央値+σを当該格子の評価値として算出し, 全格子数に対する出来形管理基準を達成した格子の割合である達成率を算出した (表-3, 図-6). 地点A, Bの本均し部0.5m格子では達成率が低い割合を示したが, 石材凹部に相当する格子数の増加が達成率低下の要因と推定されるため, 面的評価格子サイズは1mを採用することで, いずれの港湾においても80%以上の達成率が得られた. また, 地点A, Bの本均し部RTK-GPS基準の達成率は潮位基準と同等以上の達成率を示し, RTK-GPS基準を活用したNMBデータの有効性が示された. さらに, 地点B, Cの荒均し部では, 本均し部で採用した評価値を採用することで100%の達成率を示し, このことから捨石マウンド天端全体で

の適合性が確認できた.

以上より, 従来検査で合格した捨石マウンド天端のNMBデータでは, 計測機器, 海象条件, 石材寸法や計測対象水深が異なる条件でも, 水中基準点を用いた水深の補正と, 1m格子内の中央値+σを評価値とすることで, 本均し設計値±5cm, 荒均し設計値±30cmに含まれる達成率が80%を上回ることが, 従来検査と同等の結果を得られる手法であると考えられる.

なお, 地点Aではコンクリートブロック前面で不合格箇所の割合が多くなった. これは捨石マウンドに隣接する水中のコンクリートブロック垂直面で生じた乱反射現象が要因であり, 構造物周辺の捨石マウンド評価においてはノイズ処理が課題となるが, 検討が進められるAIによるノイズ処理の展開も今後期待される.

また, 宮田ら<sup>4)</sup>は捨石マウンド天端均し精度が±10cmでも本体構造物底版断面力に及ぼす影響は小さいとしていることを踏まえると, 計測誤差を含めたNMBの評価値が設計値±10cmに含まれる割合の達成率を評価基準としても安全側の評価と考えられる. なお, この場合水中基準点の設置が不要となり, より効率的な検査手法となる可能性が期待できる.

(2) 天端部の延長, 幅の面的評価

捨石マウンドの延長, 幅の測定単位は10cm, 許容範囲は「+規定しない」「-10cm」であるが, 点群を10cm格子に分割しての評価は石材凹部の存在のため難しい. そこで, 地点A, B, Cの天端部を1m平面格子に分割して天端高の基準を満たした範囲の格子数から延長, 幅を算出したところ, いずれも設計値を上回る結果を示した (図-6).

したがって, 天端部の延長, 幅の面的評価は, 天端高の基準を満たした範囲の格子数で評価可能と考える.

#### 4. 捨石マウンド法面部の面的評価

捨石マウンド全体の検査効率化の実現に向けて、法面部も天端部同様、面的管理を行うことが重要であると考えられる。法面の出来形管理基準は表-1に示すよう表面の凹凸のみであるが、法面部のNMB点群を平面格子で分割した場合、格子内の法肩側と法尻側の点群高さが大きく異なり、凹凸の評価が困難であることを踏まえ、法長の長さが大きい地点Cを用いて、以下の検討を行った。

##### (1) 法面高の設計面との面的評価

図-7にNMBで取得した点群断面と設計法面を示す。分割する格子の大きさを $\Delta x: 1m, 0.5m, 0.1m$ 、平面格子内点群の中央値+ $\sigma$ を評価値として算出し、式(1)の勾配算定式より格子毎の法勾配を計算した。

$$\theta = \tan^{-1}(h_n - h_{n-1})\Delta x \quad (1)$$

ここで、 $\theta$ : 隣接格子の中央値+ $\sigma$ から算出される平均法勾配、 $h$ : 分割格子サイズ内点群の中央値+ $\sigma$ 、 $n$ : 格子数、 $\Delta x$ : 分割格子サイズ、である。

捨石マウンド天端高では、中央値+ $\sigma$ が設計値と近似した結果となった一方、法面部では格子サイズ $1m \times 1m$ の式(1)で算出した平均法勾配 $1:2.07$  ( $\theta=25.8^\circ$ )は設計勾配 $1:2.0$ より緩く一致しない。加えて天端の延長・幅の管理基準が「+規定しない」とされることで、天端幅・延長は大きくなるのが想定される。そのため、天端幅・延長が広く勾配が緩やかであると、設計法面と点群は必ずしも一致せず、設計法面を基準とした点群の評価は難しいと考えられる。

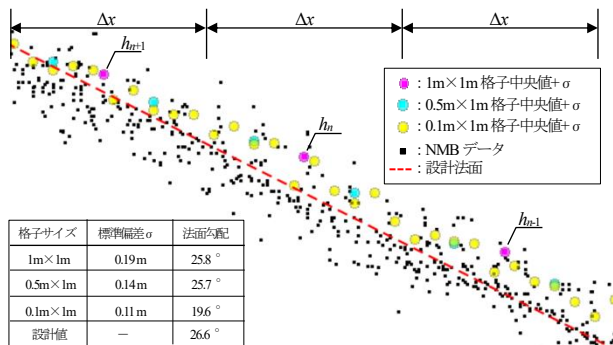


図-7 荒均し法面勾配評価

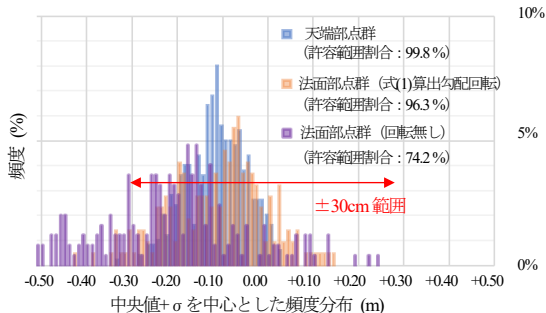


図-8 1.0m 格子内の荒均し天端部と法面回転後の頻度分布

##### (2) 法面高の取得点群を用いた面的評価

###### a) 法面部点群を水平に回転した上での面的評価

設計値を用いず、取得点群のみで評価する手法を検討する。天端面と同様の評価とするために、法面の点群を式(1)で算出した勾配回転させて水平にした点群を対象に、平面格子で分割し、中央値+ $\sigma$ を中心とした $\pm 30cm$ に含まれる格子内の点群の割合を評価した(図-8, 表-4)。法面の $\Delta x: 0.1m, 0.5m$ の場合は回転の影響は少なく、回転の有無にかかわらず点群中央値+ $\sigma$ を中心とした $\pm 30cm$ に含まれる点群の割合は100%であるのに対し、 $\Delta x: 1m$ は回転しない点群でマイナス側の頻度が高いものの、回転することで点群割合が90%を上回る。このことは、点群を回転させる変換が必要であるものの、法面部を回転して評価することの有効性を示している。

###### b) 法面部許容範囲算定式による面的評価

法面部点群を回転させずに評価する手法として、式(2)、式(3)による鉛直許容範囲を定義する。

$$z_{max} = h + 0.5\Delta x \tan \theta + \Delta z \cos \theta \quad (2)$$

$$z_{min} = h - 0.5\Delta x \tan \theta - \Delta z \cos \theta \quad (3)$$

ここで、 $z_{max}$ ,  $z_{min}$ : 鉛直方向の許容上限値, 下限値、 $\Delta z$ : 法面直角方向の許容値、である。

この計算式は、法面に直角方向に定義される許容値を鉛直に変換することと同等である。 $\Delta x: 1m, 0.5m, 0.1m$ に対して、点群が鉛直方向の許容範囲に含まれる点群割合を確認した結果、全ての格子サイズで95%以上の割合となった(表-4)。この手法では $\Delta x$ が小さいほど局所的な評価が可能となるが、 $\Delta x: 1.0m$ でも局所的な評価と同程度の結果が得られたことから、鉛直許容範囲を用いることで、点群法面部の検査において従来の検査手法と同等の評価が可能であると考えられる。

表-4 捨石荒均し全点群データ許容範囲割合

荒均し条件	格子サイズ条件	$\sigma$	中央値+ $\sigma$ を中心とした全点群の許容範囲割合	
天端部	1m 格子	0.07m	100%	
法面部 ※式(1)算出 勾配回転	1m 格子	0.11m	94%	
	0.5m 格子	0.09m	100%	
	0.1m 格子	0.07m	100%	
法面部 ※回転無し	1m 格子	0.17m	74%	式(2)(3)による評価結果 97%
	0.5m 格子	0.11m	100%	式(2)(3)による評価結果 100%
	0.1m 格子	0.08m	100%	式(2)(3)による評価結果 100%

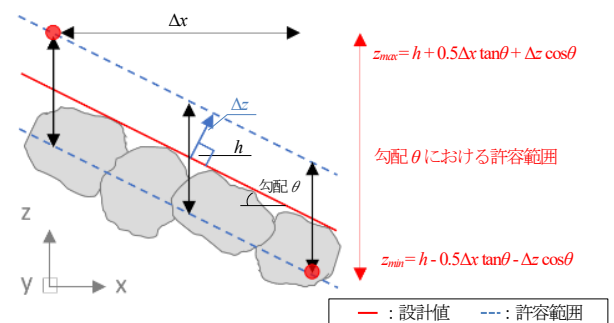


図-9 法面部の許容範囲算定図

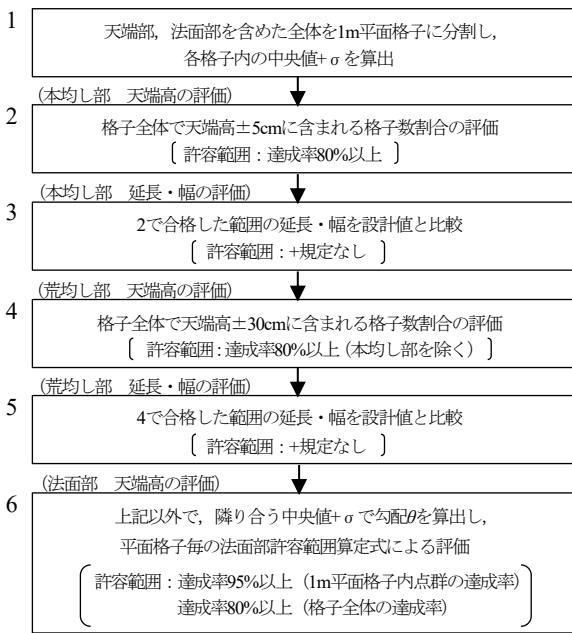
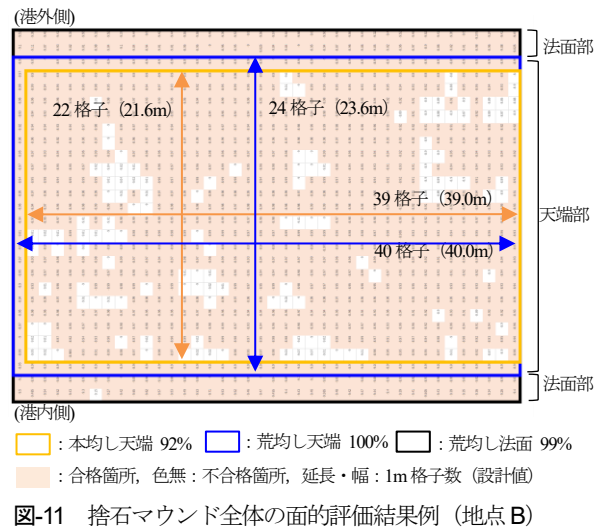


図-10 基礎工の出来形評価フロー

## 5. まとめ

従来計測手法で合格している捨石マウンドを対象に, NMB の取得データを用いた統計処理による検査手法を構築し, その有効性を確認した. 捨石マウンドには天端部本均し, 荒均し, また法面部と, 管理項目が異なる範囲が混在するものの, 天端高, 法面高は全ての範囲で 1m 平面格子の中央値+ $\sigma$ を算出し面的評価を行い, 出来形評価基準の 80%以上の達成率を確認すること, 延長・幅は天端高の基準を満たした範囲の格子数と設計値を比較することで, 従来検査と同等の検査が可能と考えられる. この NMB を用いた基礎工の出来形評価フロー (案) を図-10 に示す. フローに倣い, 地点 B を面的評価した結果 (図-11) より, 従来の測線管理と比較して捨石マウンド全体を広範囲, 高密度



に評価することができた.

以上より石材寸法, 水深, 法勾配の相違による NMB 計測への影響を考慮するため継続的なデータの取得・合否基準の検証が求められるが, 従来の潜水士検査と比較して安全で効率的な出来形検査手法が構築できた.

## 参考文献

- 1) 国土交通省 港湾局: 港湾における ICT 導入検討委員会 第7回委員会資料, 2019.
- 2) 国土交通省 港湾局: マルチビームを用いた深淺測量マニュアル (浚渫工編) (令和3年4月改訂版), 2021.
- 3) 住吉昌直, 栗田洋和, 安原徹, 橋本崇史, 小川遥, 長澤亮佑, 長野勝行, 吉澤信, 眞保智彦, 秋山裕平: マルチビーム水深測量成果における CUBE 水深の採用について (海外水路機関における最適化の事例紹介), 海洋情報部研究報告 第58号, pp.66-79, 2021.
- 4) 宮田正史, 菅野高弘, 長尾毅, 篠原勝次, 近藤隆道: 均し精度がケーソン底版断面力に及ぼす影響, 港湾空港技術研究所資料 No.945, 1999.

(Received February 3, 2022)

(Accepted May 9, 2022)

## UTILIZING UNDERWATER POINT CLOUD DATA EXAMINATION FOR WORKING FORM INSPECTION

Takafumi TSUKAMOTO and Tsuyoshi KOTOURA

Narrow multi-beam surveying (hereinafter abbreviated as NMB) is being put to practical use as a technology that can visualize underwater parts, and is being put to practical use in ICT dredging work completion inspection and ICT foundation work quantity calculation. However, the completed inspection of the rubble mound has not been realized. This is largely due to the complicated shape of the rubble mound, the high accuracy required for management standards, and the point cloud characteristics of NMB. Therefore, in this study, we examined the construction of a finished product inspection method based on the NMB point cloud characteristics of the rubble mound.

As a result, it became clear that the unevenness of the rubble mound was dominant in the influence on the acquisition point cloud of the NMB survey for the rubble mound. We constructed a method to calculate the evaluation value from the point cloud, which enables the evaluation of slope height, extension, and width. This made it possible to evaluate the entire rubble mound.