

材料の拡散・堆積特性を踏まえた 人工マウンド礁の最適築造方法に関する研究

Optimal Construction Method of Artificial Reef
Considering Diffusion and Accumulation Property of Dumped Materials

琴浦毅¹・佐貫宏¹・熊谷隆宏²

Tsuyoshi KOTOURA, Hiroshi SANUKI and Takahiro KUMAGAI

In the construction of artificial reef in deep water, constitutive materials are usually dumped from a barge into the sea directly. In case that rubbles are used, dumped rubbles are not accumulated effectively on the seabed in a conventional method because significant diffusion occurs in the longitudinal direction of a barge during their fall. In this study, tank-coverage sheet is proposed to reduce the diffusion of the rubbles. The effectiveness of the diffusion-reducing sheets was confirmed, and diffusion and accumulation property of dumped rubbles was clarified by laboratory experiment and actual construction. The optimal construction method of artificial reef is proposed by use of the methods for predicting the movement of dumped materials due to flow and accumulation shape and for reducing the diffusion during their fall.

1. はじめに

近年、沿岸海域のより広域的な資源の回復や増殖を図るため、大規模な漁場整備が積極的に推進されている。このうち、ブロックや石材を用いて人工マウンド礁を築造する場合、一般に土運船からの直投方式が用いられる。このとき、土運船から投入された材料は、水深が増すにつれて材料の拡散が大きくなり、潮流の影響を受けて移動しながら落下し、着底した位置の地質や勾配などの要因によって移動した後に、堆積してマウンドを形成する。そのため、投入材料の拡散・堆積特性の把握が、効率的な人工マウンド礁築造のために重要である。

著者の 1 人は、ブロックを対象にして、現地スケールで拡散・堆積特性が把握するとともに、拡散抑制のために、土倉内を区分けして微速航行しながらピンポイント投入する方法を提案している(熊谷ら, 2004)。一方、石材に対しては、実験で拡散・堆積特性が調査されているものの、現地への適用性を調査した研究は少ない(五明ら, 2007)。また、ブロックと異なり、土倉内を区分けすることが困難であり、拡散の抑制が課題となる。そこで、本研究では、長手方向の拡散を抑え、効率的な人工マウンド礁の築造を可能とするために、シート工法を提案する。シート工法は土倉上端部に柔軟性のあるシートの一端を固定し、土倉下部にシートを敷設した上に石材を積載し、土運船が底開する際、図-1 のように展開し、長手方向の拡散を抑えることを目的としている。本研究では、1t 内外の石材を用いて、模型実験を行うとともに、水深約 85m における現地施工結

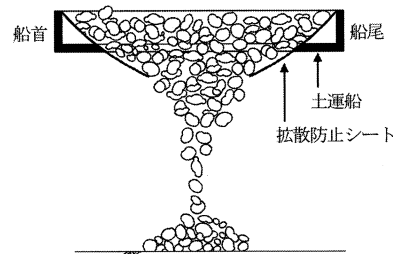


図-1 シート工法イメージ図

果を検証して、フルード則の適用性、投入石材の拡散・堆積特性を明らかにすると同時に、拡散防止シートの効果を評価して、人工マウンド礁の最適築造方法に関する研究を行った。

2. 人工マウンド礁築造方法の概要

土運船からの直投方式により、人工マウンド礁を築造する場合、投入した材料群は、流れの影響を受けながら落下・移動する。さらに、落下過程において、材料群は拡散し、海底に堆積する。このため、投入材料の落下過程における流れによる移動特性および拡散・堆積特性を予測しながら施工を進めることが重要であり、熊谷ら(2004)は、ブロック材料を対象にして、流れ等の影響下における材料の落下挙動を解析するモデルと、拡散・堆積形状を解析するモデルを投入位置管理システムに導入した。併せて、落下過程における拡散抑制のために、土倉内を区分けして微速航行しながらピンポイント投入する方法を用いて、ブロックを使用する場合の最適築造方法を提案している。熊谷らが提案した人工マウンド礁の築造における投入位置決定手法のフローを図-2 に示す。この研究では、ブロックのみを対象としているが、以下の課題を解決することで、石材を含む

1 正 会 員 修(工) 五洋建設(株)

2 正 会 員 Ph.D. 五洋建設(株)

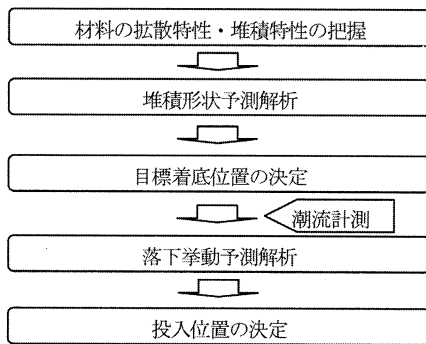


図-2 人工マウンド礁築造における投入位置決定手法

人工マウンド礁の最適築造方法の確立に拡張が可能となると考えられる。

(1) 拡散特性

石材を使用する場合、ピンポイント投入が可能であるブロックとは異なり、開口部全体から投入されるため投入範囲が広い。また、開口部からの時間投入量により拡散特性が異なる（小田ら，1987；五明ら，2007）。通常方法と併せて、投入材料の拡散低減を実現できる方法における拡散・堆積特性を明らかにすることが重要である。

(2) 堆積特性

同一形状のブロックと異なり、石材は異形状の材料であり、投入個数も多くなるため、堆積特性が異なることが予想される。石材を用いた場合の堆積特性を明らかにすることが重要である。

3. 拡散・堆積特性の検討

石材を材料とした場合の拡散・堆積特性を明らかにするために、模型実験を実施するとともに、現地施工結果を検証する。

(1) 現地施工条件と模型実験条件

現地施工は水深85mの海域に全開式土運船からの直投方式で人工マウンド礁を造成する工事である。実験は水深85cmの水槽に全開式土運船模型を設置し、シートの有無をパラメタとして縮尺1/100で実施した。土運船扉を全開にするのに要する時間を開扉時間とし、開扉時間に関する

表-1 現地施工条件と実験条件(実験縮尺 1/100)

		現地条件	実験諸元
水深		85m	85cm
捨石質量		1t内外	約 1g/個
土運船形状	土倉形状	長さ 30m 幅 10m 深さ 5m	長さ 30cm 幅 10cm 深さ 5cm
	開口幅	4m	4cm
開扉時間		80 秒	3 秒, 8 秒, 12 秒
シート形状	長さ	開口長の 50%	
	幅	土倉幅の 50%	

実験条件として、標準的な時間、施工性を考慮した短い時間、拡散低減を目的とした長い時間の3ケース実施した。

表-1に現地施工条件と実験条件を示す。

(2) フルード則の適用性および拡散特性の検討

投入された材料の水中挙動を実験で模擬する際、一般に、フルード則に基づいて実験条件が定められる。小田ら（1987）は、縮尺の違う実験結果から、室内実験においてフルード則が適用できることを確認している。しかしながら、土運船に積載された材料を開扉して投入する条件では、開扉速度によって、海面からの材料の供給条件（初期条件）が変化するため、現地における材料の拡散特性は、必ずしもフルード則に従わないことが考えられる。このため、土運船の開扉による投入方法を採用する場合の材料の拡散特性に関して、フルード則の適用性を検討する。拡散性の指標となる標準偏差の評価に際しては、松見ら（1990）の手法に基づく海底面における堆積形状を解析する手法を用いた。この手法は深度方向の解析対象区間における水平方向の移動距離の分布について、式(1)、式(2)の正規確率分布を仮定するものである。

$$f(x^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma^*)} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x^*/\sigma^*)^2\right\} \quad (1)$$

$$f(y^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma^*)} \exp\left\{-\frac{1}{2}(y^*/\sigma^*)^2\right\} \quad (2)$$

ここで、 f ：確率密度関数、 σ^* ： $(\sigma_{xm} + \sigma_{ym})/2$ で示す無次元標準偏差、 $x^* = x/d$ 、 $y^* = y/d$ 、 d ：捨石の代表径である。

実験で観測した堆積形状と、解析による堆積形状を比較したところ、図-3に示すように、材料の拡散性は開扉速度が遅いほど小さくなることが確認された。これは小田ら（1987）、五明ら（2007）の研究と同様の結果である。

現地投入における開扉時間が80秒の条件では、拡散性の指標となる標準偏差は2.7と評価された（図-4）。一方、フルード則に基づいて、実験の開扉時間を8秒に設定した模型実験では、図-3に示すように、標準偏差の値は3.5と、拡散性が大きく評価された。この結果は、フルード則に基づいて開扉速度を与えると、初期条件としての材料の供給が現地条件に比べて過大となり、初期の海面近傍における乱れの影響が、最終的な拡散性に影響を与えることを示している。すなわち、現地での拡散性を定量的に評価する目的に対しては、フルード則の適用に課題があることが明らかとなった。

熊谷ら（2004）の研究では、1.6m角（6ton）の立方体形状に近い石炭灰硬化体ブロックの標準偏差は、2.5と評価されている。今回使用した1t内外の石材では、標準偏差は2.7と評価されており、均等形状に作成されたブロック材と、

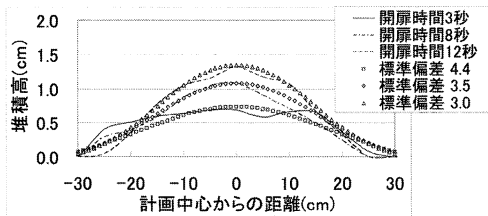


図-3 1投平均堆積形状 (実験：船首尾方向)

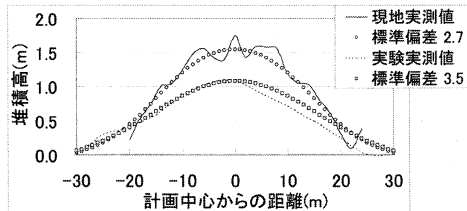


図-4 現地と実験の1投平均堆積形状比較 (船首尾方向)

ほぼ同等の拡散性をもつことが確認された。

(3) 拡散低減方法の検討

土運船からの直投方式では、延長の長い船首尾方向に堆積形状が大きく広がる傾向にある。このため、船首尾方向への拡散を抑制するため、図-1に示すような拡散防止シートを導入し、実験でその効果を検証した。従来の直投方式における投入状況を示す。写真-1では、土運船開口範囲全体から材料が落下している一方で、シート工法を用いた投入状況の写真-2では、開口範囲より狭い範囲の投入となり、土運船中央直下付近への集中投入の形態になっている。その結果、写真-3に示すように、従来工法と比較すると、シート工法の拡散範囲が小さくなり、中央付近に集中して堆積していると定性的に評価できる。

図-5は実験で得られたシート工法の堆積高さ and 開口長を変更した解析結果との比較である。この結果からシート工法は、同じ土運船を使用した施工であっても、土運船の開口長を約50%にすることと同等の效果があることを評価するとともに、拡散低減効果が十分に発揮されることが明らかになった。

実験でシート工法の効果が明らかになったことから、現地の施工でもシート工法を実施した。図-6は現地のシート工法による拡散状況である。なお、現地の施工では船尾側のシートが投入中に破断したため、拡散低減効果が十分に発揮されなかった。一方、船首側はシートが効果的に機能



写真-2 従来の直投方式の投入状況 (船首尾方向)



写真-2 シート工法を用いた投入状況 (船首尾方向)

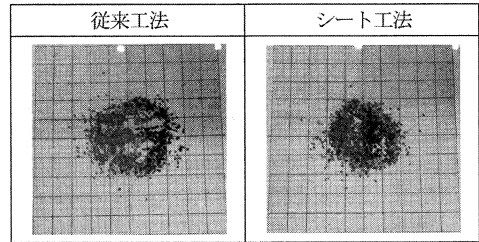


写真-3 拡散状況図 (実験：開扉時間 8 秒)

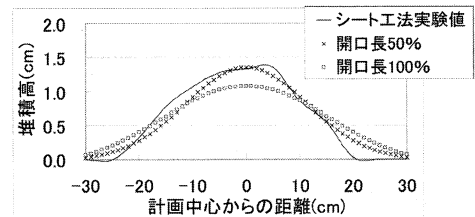


図-5 シート工法の効果検証実験 (実験：船首尾方向)

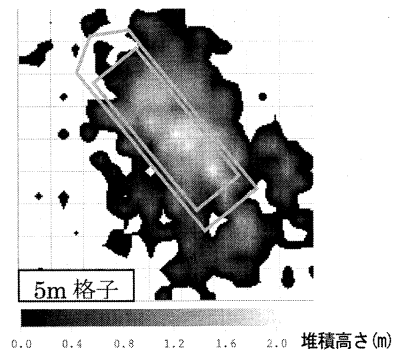


図-6 シート工法拡散状況図 (現地：開扉時間80秒)

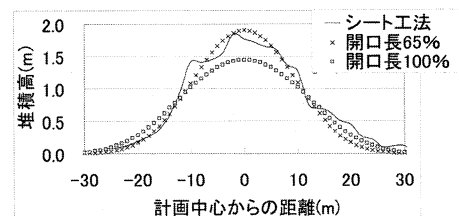


図-7 シート工法の現地施工での効果 (現地：船首尾方向)

したため、拡散抑制効果が十分に発揮され、現地においてもシート工法は開口長が65%と同等の効果があることを実証した(図-7)。

(4) 堆積特性の検討

現地の施工範囲は80m程度であるため、投入位置を毎回変更しながら30回を超える投入を行った。なお、本工事における石材の総投入量は、31,222m³である。

堆積形状の解析に関して、小田ら(1989)は、土運船からの直投のように、広い範囲から投入されるときに堆積形状は、一点投入に対する堆積形状の重ね合わせではほぼ予測できることを実験値との比較で示している。また、岡田ら(1990)は斜面上に落下した材料が法尻側に移動することを報告しており、松見ら(1992)は、DEM解析によって、土運船からの直投時における斜面の局所限界勾配を予測し、堆積形状を補正する手法を提案している。本田ら(2007)は、トレミー管を使用した現地施工結果を検証し、斜面の局所限界勾配は、安息角の37.2°になることを明らかにしている。ただし、本研究のように海面から材料を投入する条件では、材料の落下エネルギーが大きいため、斜面の局所限界勾配は安息角よりも緩勾配になることが推定される。

図-8は、今回の石材投入における代表的な投入前後の堆積形状の比較である。マウンドの高さが増加すると、新たな投入により、既存の斜面上の石が滑落し、堆積形状が広がることが確認できる。既往の研究に示されるように、斜面の局所限界勾配が存在すると考えられる。20投終了時の堆積形状(図-9)から、土運船からの直投条件における堆積可能な限界局所勾配($\tan \theta$)は、0.5程度と評価される。この限界勾配は、本田ら(2007)のトレミー管投入の条件に比べて、緩勾配であり、投入材料の落下エネルギーの影響が大きいことが示唆される。

次に、土運船検収時の体積に対する投入後に測量で得られた海底における体積の比を体積変化率と定義し、図-10に投入回数による体積変化率の推移を示す。1投目の体積変化率が極端に小さくなっているが、これは海底が砂地盤であり、落下した石材が海底にめり込んだためと考えられる。一方、2投目以降の1投毎の体積変化率は、1投目ほど小さくない。この結果より、1投目が砂地盤の上に基礎を造り、2投目以降はその上に堆積することで、極端な体積変化が生じずに、1投毎の体積変化率は0.8~0.9程度に収束したと考えられる。なお、総投入量に対する体積変化率は、1投目のめり込みが影響して10投目まで0.8を下回る結果となったが、20投を超えたとほぼ一定になり、1投毎の体積変化率と同程度の0.85程度になった。つまり、堆積予測を行うにあたり、原地盤や投入回数、投入量を考慮して体積変化率を考慮する必要があることが明らかになった。

図-11に、20投までの堆積形状を解析した結果を示す。

解析では、現地での投入位置、土運船の移動誤差、体積変化率を考慮している。限界局所勾配を考慮しない場合、実測値に比較して、天端付近が全体的に厚い一方で、法尻の幅が小さく、現実的には現れにくい急勾配となっている。本研究で実証された局所限界勾配の値を用いて、松見ら、本田らと同様に、斜面形状を補正することにより、法尻から天端にかけての勾配が実測に近い形状となり、堆積形状を精度よく予測できることがわかった。

4. 人工マウンド礁の最適築造方法の提案

先述したように、人工マウンド礁の築造において、投入材料の落下過程における流れによる移動特性、および拡散・堆積特性を予測した上で、最適投入位置を決定し、施工を行うことが重要である。

本研究では、石材に対して、これまで明らかにされていない拡散・堆積特性を明らかにするとともに、その結果を踏まえた堆積形状解析モデルを構築し、投入位置管理手法

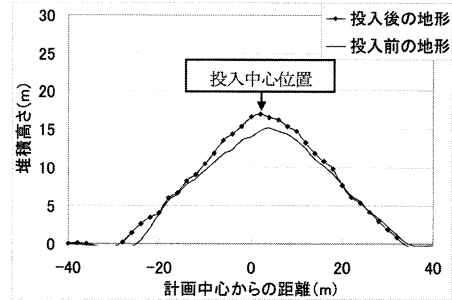


図-8 堆積形状と局所勾配(現地)

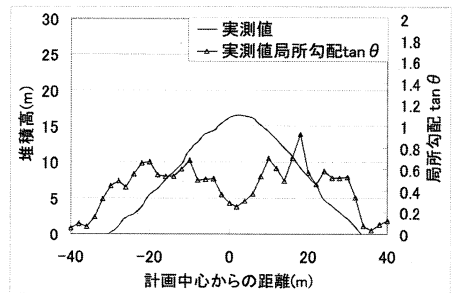


図-9 堆積形状と局所勾配(現地)

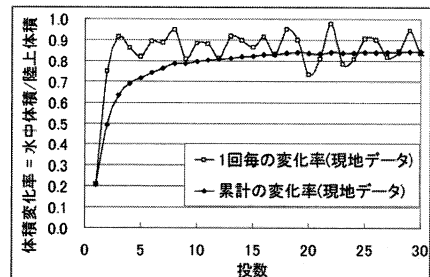


図-10 体積変化率の推移(現地)

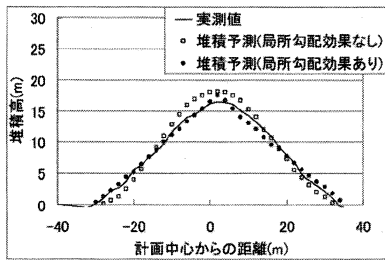


図-11 局所勾配を考慮した堆積モデル

に導入するマウンド築造方法を実現した。さらに、従来困難であった石材の拡散低減方法を新たに導入し、石材を使用する場合の最適築造方法を構築する。図-12に、本研究の石材を対象にした研究成果と、熊谷ら(2004)のブロックに関する研究成果を統括する形で、材料に応じた人工マウンド礁の最適築造方法を提案する。また、研究結果を駆使した結果、現地において、図-13に示すように精度の高い施工を実現できた。

5. おわりに

本研究では、投入石材の拡散低減方法を新たに導入しながら、模型実験を実施するとともに、水深約85mにおける現地施工結果を検証して、投入石材の拡散・堆積特性を明らかにした。さらに、その結果を踏まえて、石材に対応した堆積形状解析モデルを構築し、投入位置管理手法に導入するマウンド築造方法を実現した。現地施工と同時に進めた研究により、ブロック材および石材の材料特性に応じた人工マウンド礁の最適築造方法を構築することができたとともに、研究成果を施工にフィードバックさせることにより、高精度な施工を実現することができた。なお、拡散防止シートの必要強度を事前に検討したものの、想定していなかった石材の鋭角部との接触によって生じた傷からの引裂きによって、シートが破断した。今後の課題として、シートの適切な材質、シートの保護方法、シートの必要強度評価方式などについて、検討することが重要である。

参考文献

- 岡田凌太・土谷政治・今井貫爾・池谷毅・秋山義信・田川寿美(1990):底開ページから投入される捨石の出来形予測システム,海工論文集,第37巻,pp.764-768.
 小田一紀・沢田充弘・樋口俊光・岩田潔(1987):底開式ページから投入された捨石粒子群の堆積形状に関する研究,海工論文集,第34巻,pp.281-285.
 小田一紀・樋口俊光・岩田潔(1989):捨石粒子群の多点投入時および流れの中の堆積形状に関する研究,海工論文集,第36巻,pp.814-818.
 熊谷隆宏・山本省吾・平山達也・真鍋匠・清水英久・川口毅・平田賢治・小宮一成・小林一美(2004):ブロック直投方式を用いた人工海底山脈築造に関するブロックの落下挙動および拡散特性に関する研究,海工論文集,第51巻,pp.801-805.
 五明美智男・松田信彦・浅沼丈夫・関根信寛(2007):人工湧昇

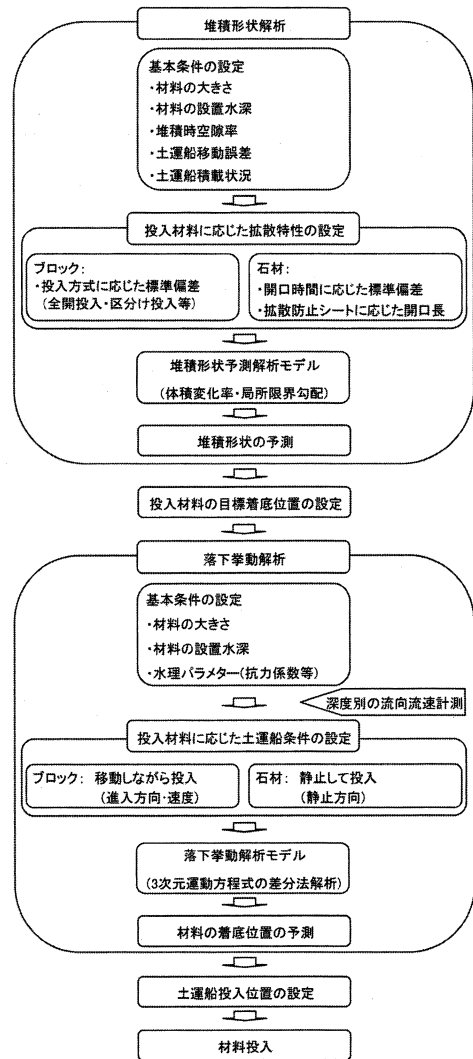


図-12 最適マウンド築造フロー

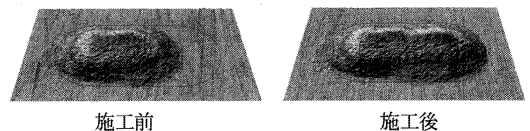


図-13 現地出来形鳥瞰図

流マウンド造成のための捨石投入の管理と最適化,海洋開発論文集,第23巻,pp.381-386.
 本田隆英・織田幸伸・上野成三・八重田義博・伊藤一教(2007):大水深強潮流下における薄層捨石基礎の高精度施工,海洋開発論文集,第23巻,pp.339-344.
 松見吉晴・岸口孝文(1990):捨石マウンド築造時のバージ船の配船位置について,海工論文集,第37巻,pp.769-773.
 松見吉晴・泉一幸(1992):底開式ページによる投入捨石群の堆積形状に関する予測モデル,海工論文集,第39巻,pp.966-970.