

大水深捨石投入における個別要素法を用いた 堆積形状の予測

PREDICTION OF DEPOSITION CONFIGURATION IN DUMPING RUBBLE
AT DEEPWATER BY USING DEM

長山英樹¹・小竹 望²・加藤直幸³・阪下勝啓⁴・城戸誠司⁵・重松孝昌⁶
Hideki NAGAYAMA, Nozomu KOTAKE, Naoyuki KATOU,
Katsuhiko SAKASHITA, Seiji KIDO and Takaaki SHIGEMATSU

¹正会員 修(工) 東洋建設(株)技術本部土木エンジニアリング部 (〒135-0064 東京都江東区青海2-43)

²正会員 博(工) 高松工業高等専門学校建設環境工学科(元東洋建設) (〒761-8058 高松市勅使町355)

³東洋建設(株)土木本部土木技術部 (〒135-0064 東京都江東区青海2-43)

⁴東洋建設(株)関東支店土木部 (同上)

⁵東洋建設(株)九州支店土木部 (〒810-0022 福岡市中央区薬院3-3-31)

⁶正会員 博(工) 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

A rubble mound and an artificial fishing mound are often made at deepwater. These rubble materials are usually dumped from a barge into the sea directly. So, the control of deposition configuration is difficult. Therefore, the dumping plan based on the prediction of deposition configuration is necessary. In this study, to make it efficiently, prediction of deposition configuration has been verified by the field data. As a result, it was identified that prediction of deposition configuration was good accuracy.

Key Words : *Rubble Mound, Artificial Fishing Mound, Prediction of deposition configuration, DEM*

1. はじめに

近年, 沿岸域の開発が沖合へ展開するに従い, 防波堤や護岸の基礎となる捨石マウンドは, 大水深での施工が増加している. また, 水産分野において漁業資源の回復を目的とした人工海底山脈の造成が水深 50m 以深にて行われている. 一般に捨石構造物を築造する場合, ガット船により捨石を投入後, 潜水士などによる均し作業で計画断面に仕上げられる. 大水深の場合には, 潜水作業が困難なため, 全開式バージによる直接投入が多く用いられている. この直接投入では, 大量で急速に施工ができる反面, 計画断面との差異が大きくなりやすい. そのため, 捨石の堆積形状予測を用いた施工計画に基づいた, 効率的な施工が求められ, 堆積形状予測を組み込んだ施工管理システムが開発されている¹⁾.

この堆積形状予測には, 確率論に基づき三次元の堆積形状を予測する松見・岸口の手法²⁾が用いられている. 一方, 重松らは個別要素法を用いた三次元固液混相流モデルを提案している³⁾. これは, 粒子の運動解析には個別要素法を適用し, 流体運動には

空隙率を考慮した基礎方程式(連続の式・Navier-Stokes 方程式)を用いて解を得る手法である. そして重松は, 本手法が水理実験による堆積形状の結果を十分な精度で予測できることを検証している⁴⁾. これをふまえ, 著者らは大水深の捨石投入に関する施工管理システムにおいて, 個別要素法を用いた三次元固液混相流モデルによる投入計画作成サブシステムの実用化を行っている⁵⁾.

そこで本研究では, 個別要素法を用いた三次元固液混相流モデルによる堆積形状予測の, 投入計画作成手法としての妥当性について, 実測データをもとに検証を行った. また, 水深変化や開扉時間による本手法の堆積形状の傾向や法面安定勾配についても検証を行った.

2. 堆積形状予測について

個別要素法を用いた三次元固液混相流モデルによる捨石投入の数値解析の特徴は, 水深や捨石重量, バージの形状および開扉時間などを解析条件として

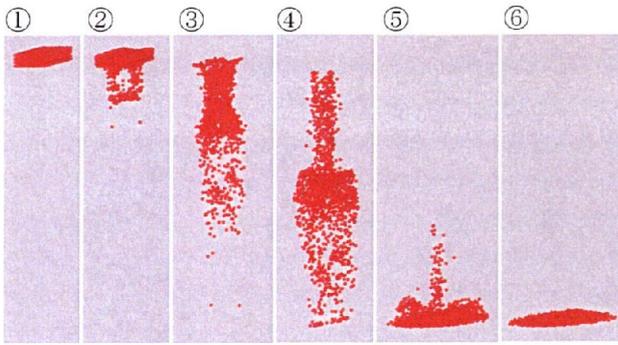


図-1 予測解析での落下状況

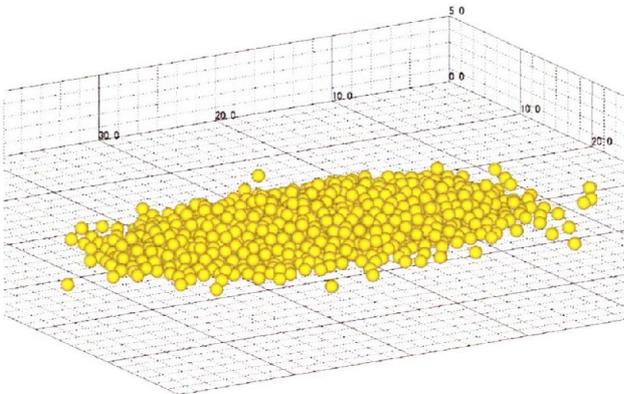


図-2 堆積形状の予測結果例

直接考慮できる点であり、施工経験や実験値のない条件での堆積予測が可能となる点である。

バージから捨石を落下させた解析から得られた、落下過程の例を図-1に示す。この図より、落下する要素が誘起流により散乱する様子が確認できる。投入条件を変えることで誘起流の発生状況が変化するが、この変化による要素の散乱状況も再現できることが確認されている。また、要素が海底面に堆積している例を図-2に示すが、要素が積み重なることで堆積形状を形成していることが確認できる。このように、投入条件によって変化する落下過程の違いを推定できることで、所定の堆積形状を得るための投入方法の検討が可能となる。

3. 堆積形状の予測値と実測値の比較

投入計画を作成するには、全体形状を確認しながら、1投毎の投入位置や投入方法を判断する。そこで、個別要素法を用いた三次元固液混相流モデルにより予測した堆積形状と、実際に投入された捨石の堆積形状の1投毎の比較を行い、本予測手法の現地への適用性について検証を行った。実測値としては、人工海底山脈工事での結果を用いた。

比較は全体形状と縦横断形状および高さ、堆積面積、体積により行った。

(1) 人工海底山脈築造工事の概要

長崎市沖合の海底（水深約76m）に、中心間隔75mの間隔で2つの円錐形状（直径75m、高さ

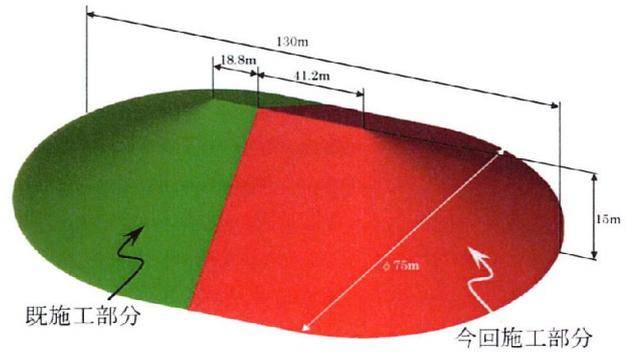


図-3 人工海底山脈の概略図

15m)を並べ、2つの円錐間を稜線でつなぐ形状の海底山脈を約1.0t/個の自然石により造成した。このうち本工事では、図-3に示すように、既施工部分の稜線延長18.8mに引き続き、稜線延長41.2mを施工した。投入作業の船団構成は、1,300m³の全開式バージと押船、引船2隻の3船で行った。施工は、6月から9月までに計35回の投入を行い、合計約34,000m³の石材を投入した。

堆積形状はナローマルチビーム測深機（SeaBat8125型；周波数455Khz、ビーム幅〔前後〕1°〔直行〕0.5°）を使用して投入毎に測量した。得られた水深測量データは、2m×2mのメッシュで処理した。

捨石投入毎の潮流観測結果は、流速は平均10.3cm/s、最大37.7cm/sで、流向は全方向に分布し、S0°W～S22.5°Wにピークを持っていた。

本工事においては、堆積形状を制御するため、開扉時間を制御することで、時間あたりの投入量を調整した。さらに、投入量やバージへの積込み形状を工夫することで、計画断面に近い人工海底山脈の築造ができた。

(2) 予測計算条件

実測値との比較のため、実施工の条件と同様に水深を76.0m、要素直径1.0m、バージ土倉形状を長さ32.0m、幅10.4m、高さ4.5mで行った。

実施工の投入においては、開扉時間を制御することによって投入量を制御した。予測においても実施工と同様に、開扉時間で投入量を制御し、開扉時間が短い場合と長い場合の2つの投入パターンを計算した。また、投入計画においては、予測計算におけるランダム性を無視した堆積形状で行うため、予測形状の計算結果を、重心を通る長軸および短軸で軸対称となるように平滑化した。

(3) 堆積形状の比較

捨石の直接投入では、投入方法や投入条件（海象、投入位置底面の状況や石材形状など）など、様々な要因により堆積形状が変化する。そのため、潮流やバージの移動、堆積位置の底面形状の影響が比較的少ないと考えられるケースを抽出して比較した。実測の抽出ケースを表-1に、実測に対応する

表-1 実測ケースの抽出

	開扉時間が短い場合 (一斉に投入)	開扉時間が長い場合 (まばらに投入)
投入回	2投目	8投目
投入体積	966m ³	993m ³
開扉時間※1	38秒	168秒

※1 開扉開始から捨石が土倉内になくなるまでの時間(実測値)

表-2 予測計算の条件

	開扉時間が短い場合 (一斉に投入)	開扉時間が長い場合 (まばらに投入)
投入水深	76.0m	
投入石材	1.4t/個(半径 r=0.50m)	
投入体積	900m ³ (要素数 1,110 個)	
開扉時間※2	1秒	30秒

※2 開扉開始から全開までの時間

予測計算の条件を表-2に示す。

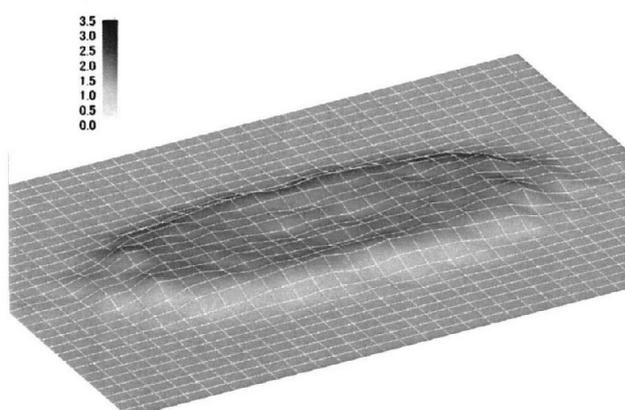
堆積形状予測の目的は投入計画の作成である。そのため、堆積形状の比較では全体的な形状が類似していることや、高さの違いが投入される捨石1個

分(±0.7~0.8m 程度)の範囲内であれば、予測精度は妥当であると判断した。なお、実測値では海底地盤やすでに投入された捨石の間に食い込むが、予測計算では食い込みは考慮していない。また、ナローマルチビームによる深淺測量で得られた水深測量データは、2m×2mのメッシュ中に存在するフットプリントの平均値としているが、予測値ではメッシュ内に存在する要素の最大値と最小値の差とした。このように、実測値と予測計算値では、高さの算定方法に違いがあることを前提に比較した。

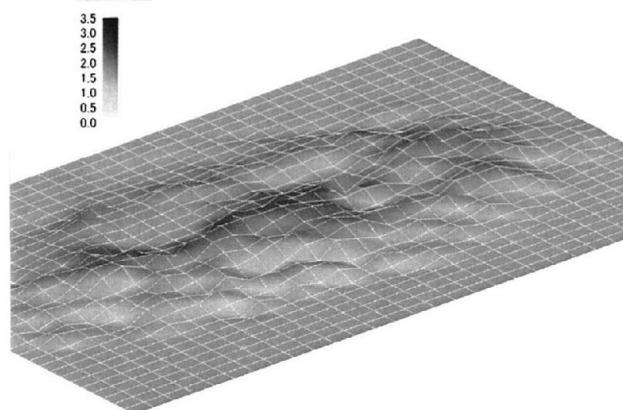
開扉時間での比較においては、同じ「開扉時間が短い場合」であっても、実測と予測とで値に違いがある。「開扉時間が長い場合」についても同様である。これは、定義が異なるだけではなく、実測ではバージ土倉内で捨石同士がかみ合い、断続的に落下するので時間がかかるためである。そのため本研究においては、開扉時間を勘案しつつ、落下する様子が類似している同士で比較を行った。

a) 全体形状

開扉時間が短い場合の鳥瞰図を図-4に示す。予測と実測ともに広く薄く堆積している様子が確認でき、全体的な形状もよく一致しているといえる。このように短時間に多くの捨石が投入される場合には、強い誘起流が発生し、この流れによる散乱が大きくなるのが予測計算における落下過程から確認され

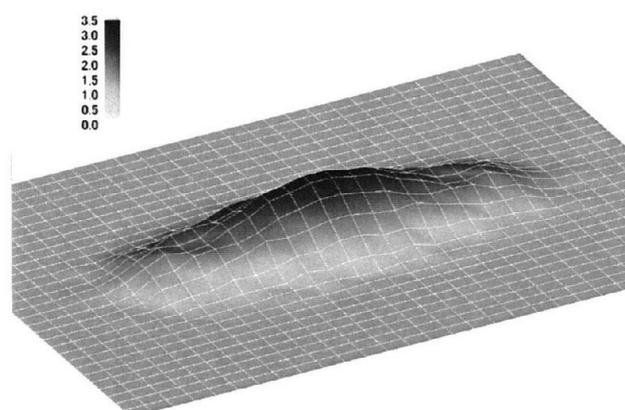


(a) 予測堆積形状(開扉時間T=1.0s)

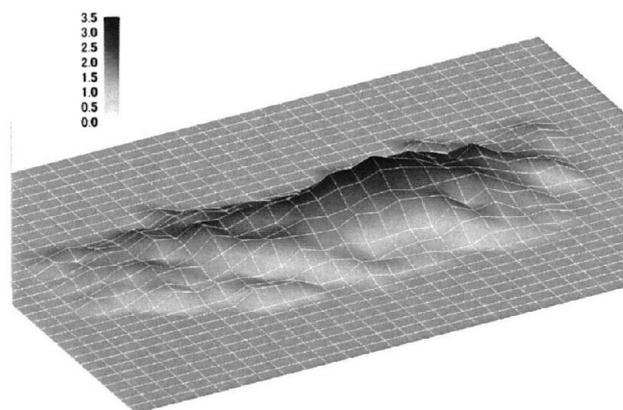


(b) 実測堆積形状(2投目)

図-4 堆積形状の比較(開扉時間が短い場合)

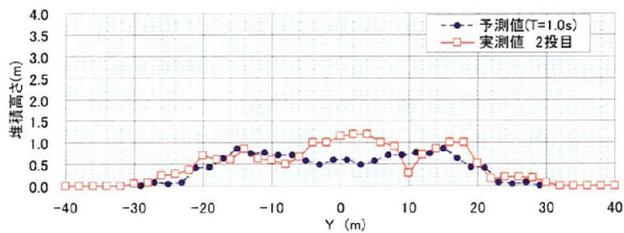


(a) 予測堆積形状(開扉時間T=30.0s)

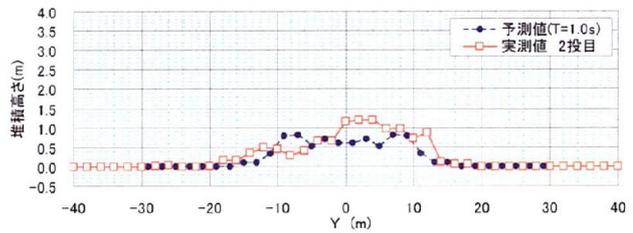


(b) 実測堆積形状(8投目)

図-5 堆積形状の比較(開扉時間が長い場合)

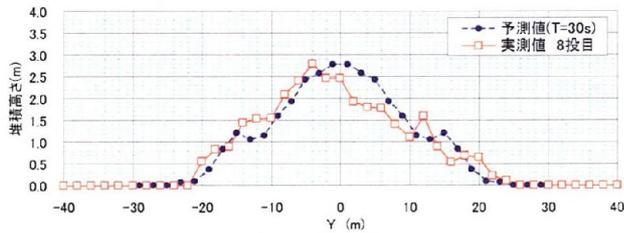


(a) 長軸方向

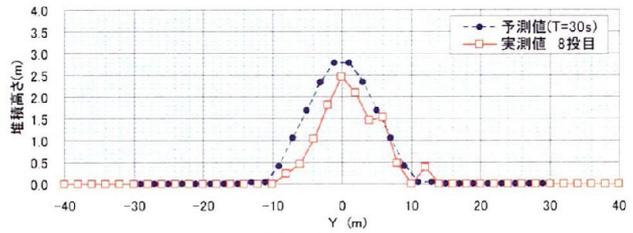


(b) 短軸方向

図-6 断面形状の比較(開扉時間が短い場合)

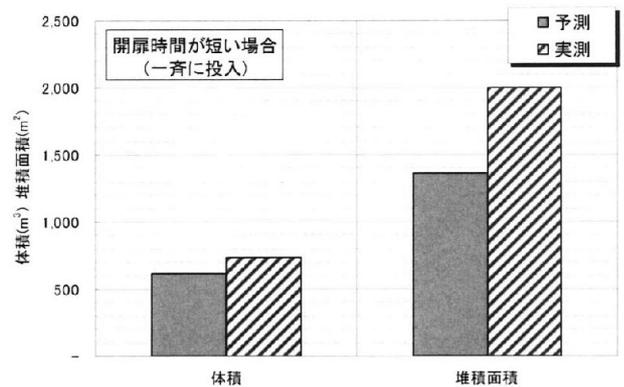


(a) 長軸方向

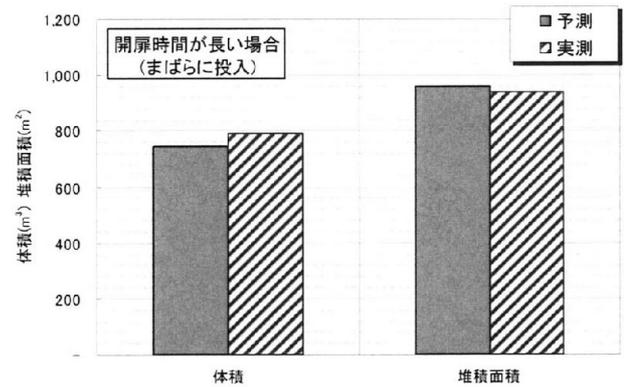


(b) 短軸方向

図-7 断面形状の比較(開扉時間が長い場合)



(a) 開扉時間が短い場合



(b) 開扉時間が長い場合

図-8 堆積面積と体積の比較

ている。実際の投入においても同様の現象により、広く薄く堆積したと推測された。

一方、開扉時間が長い場合の鳥瞰図を図-5に示す。開扉時間が短い場合よりも狭く高く堆積し、堆積の主となる部分の形状は予測と実測で類似した傾向を示していた。このように少しずつ捨石が投入される場合には、誘起流が弱いため散乱が小さくなる。予測計算における落下過程から確認されている。実際の投入においても同様の現象により狭く高く堆積したと考えられた。なお、実測形状のピークの位置が堆積範囲の中心からずれているのは、施工条件により発生したものであり、抽出したケース特有のものと推測される。

b) 断面形状

図-6および図-7には、実測と予測の長軸方向と短軸方向の重心位置での断面比較を示す。開扉時間が短い場合(図-6)と長い場合(図-7)の両方において、予測と実測の長軸および短軸方向の堆積幅はほぼ等しい。一方、堆積高さについては、開扉時間が短い場合(図-6)にはほぼ一致しているが、開扉時間が長い場合(図-7)には、抽出した実測値のケースが開扉時間が長い分類の中でも堆積高さが高

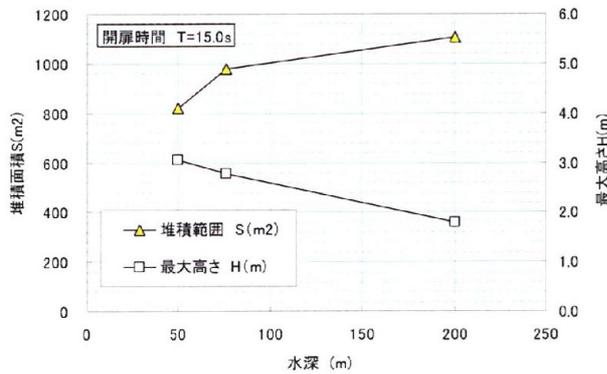
いケースにもかかわらず、短軸方向において予測値の方が高くなっている。これは抽出したこのケースにおける断面比較の位置が原因とも考えられたが、予測値の方が高くなる傾向は、後に示すように、本工事の結果全体として見られた傾向であった。

c) 堆積面積・体積

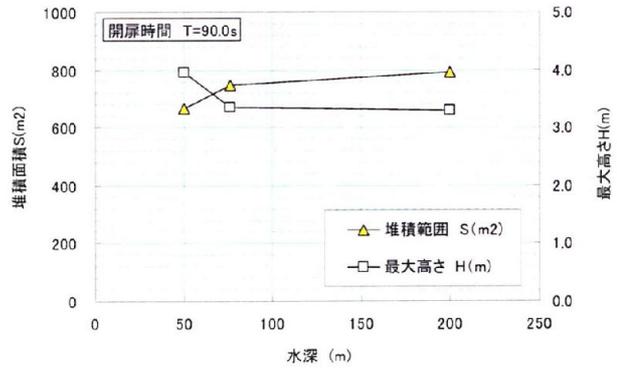
堆積面積と体積の比較の結果を図-8に示す。開扉時間が短い場合を図-8(a)に示すが、体積はよく一致していた。一方、堆積面積は実測の方が大きい結果となっていた。これは、他の開扉時間が短いケースではここまで顕著には見られず、抽出したケース特有のものであると考えられた。また、図-8(b)に示す開扉時間が長い場合には、体積および堆積面積の両方とも、予測値と実測値でほぼ同じとなった。

d) 比較のまとめと考察

予測値と実測値では高さが実測値の方が小さくなる傾向が見られた。原因として予測計算では食い込みを考慮していないこと、メッシュの高さの算定方法に違いがあることなどが挙げられる。以上のように、高さの相違が生じる原因については、予測値および実測値の処理方法の整合性や、高さおよび体



(a) 開扉時間が短い場合 (開扉時間T=15.0s)



(b) 開扉時間が長い場合 (開扉時間T=90.0s)

図-9 水深による堆積形状の変化(予測)

積の妥当性について、今後検討すべき課題である。

今回の実測値との比較の範囲では、予測計算は開扉時間の違いによる堆積形状の違いの傾向を再現していた。堆積高さは予測の方が高くなるが、捨石1個程度(0.7~0.8m程度)の範囲であり、投入計画を作成するための精度は十分にあると判断した。

4. 堆積予測形状の傾向の確認

個別要素法を用いた三次元固液混相流モデルによる堆積形状の予測結果について、水深と開扉時を変えた場合の堆積形状の傾向を調べた。また、本予測手法による捨石法面の安定勾配を確認した。

(1) 水深変化による堆積形状の傾向

水深による影響を確認するため、水深を50m, 76m, 200mの3つに変化させた場合の堆積形状の変化を調べた。開扉時間が短い場合と長い場合の2つの場合の結果を図-9に示す。これを見ると、開扉時間に関係なく、水深の増加とともに最大高さは減少し、堆積面積は増加する傾向を示した。また、これらの傾向は水深が増加するに従い弱くなっていた。

武藤ら⁶⁾が実験的に得た水深と堆積形状との定性的な関係によると、水深の増加に伴い、高さが低くなり、また、堆積面積が増加するとされており、こ

こでの予測結果と傾向が一致する。よって、水深変化による堆積形状の傾向は、本予測手法で定性的に予測可能であると考えられる。

(2) 開扉時間の変化による堆積形状の傾向

開扉時間が短い場合には一斉に多くの石材が落下するため誘起流が大きくなり、散乱が大きくなる。一方、開扉時間が長い場合には捨石がまばらに投入されるため誘起流が小さくなり、散乱は少なくなる。この傾向は前述の通り確認したが、この一般性を確認するため、予測計算において開扉時間を変化させて傾向を確認した。また、実測された全ての結果も示し、予測計算との傾向を比較した。

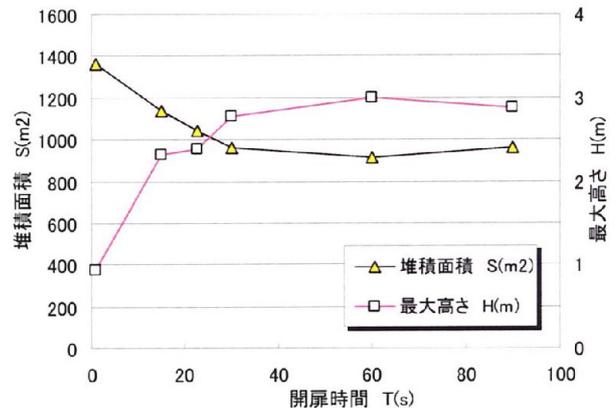
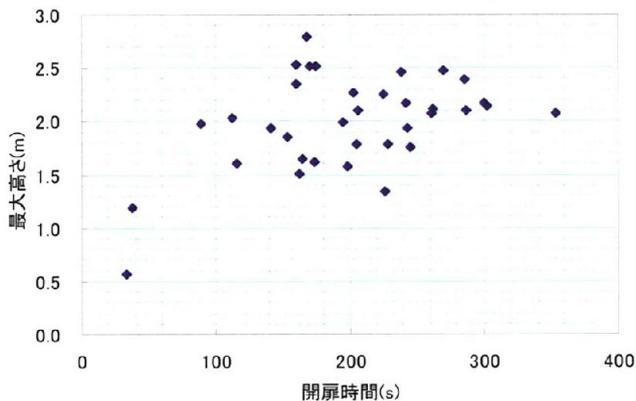
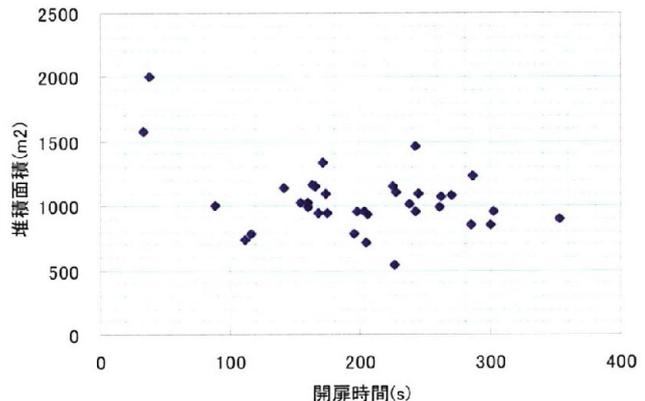


図-10 開扉時間による堆積形状変化(予測)



(a) 最大高さ



(b) 堆積面積

図-11 開扉時間による堆積形状変化(実測)

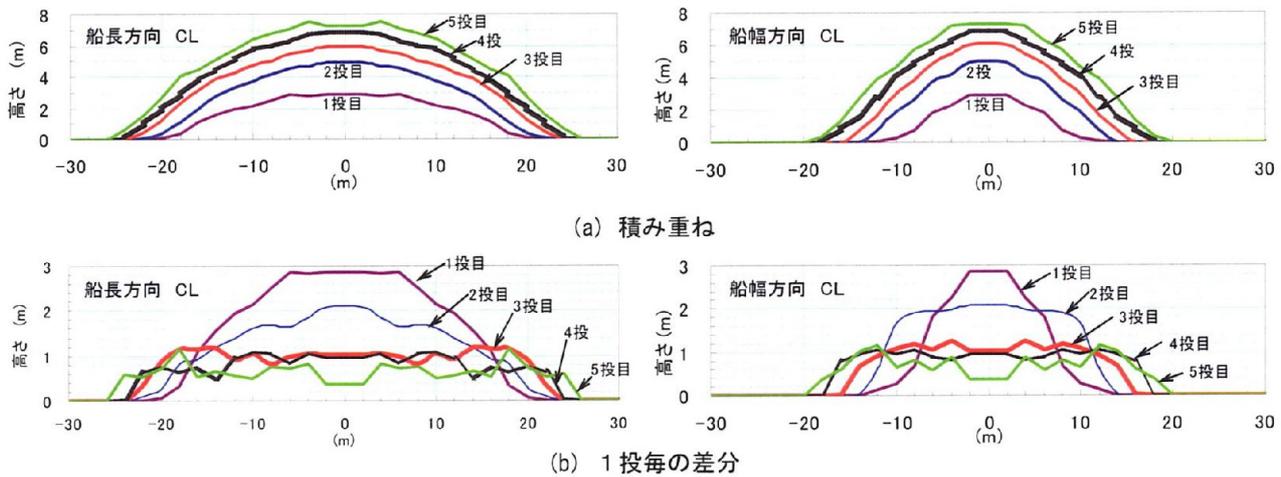


図-12 開扉時間による堆積形状変化(予測)

予測計算において、開扉を開始してから全開となるまでの時間(開扉時間)の違いによる変化を図-10に示す。開扉時間が長くなると最大高さは一定値に収束するように増加し、堆積面積も一定値に収束するように減少する傾向が確認された。

また、実測値の結果を図-11に示すが、ここに示す開扉時間は、開扉開始から捨石が土倉内になくなるまでの実測時間を示す。バースに積載した体積や開扉時間以外の投入条件に違いがあることから、高さや堆積面積にもばらつきが見られるが、開扉時間が長くなるとともに最大高さは一定値に収束するように増加し、堆積面積も一定値に収束するように減少していることが確認された。この傾向は予測計算と同様の傾向であった。

予測と実測の数値的な比較では、最大高さについては予測では最大で約 3.0m となるのに対し、実測最大値の平均はおおよそ 2.2m となり、予測のほうが捨石 1 個分程度大きくなる傾向があることがわかる。一方、堆積面積においては、開扉時間が長くなると、予測と実測ともにおおよそ 900m² 付近に収束することが確認された。

(3) 堆積の安息角について

本予測手法における捨石法面の安定勾配を確認するため、一定の位置に連続して 5 回投入した場合の法面勾配の変化を求めた。図-12 に示すように、3 投目以降は捨石が法面に沿った崩落を伴って堆積することが確認され、このときの法面の局所最大勾配は 1.0:1.3 付近であった。

人工海底山脈の最終の出来形における法面の局所最大勾配は 1.0:1.1 となっていた。これは予測での局所最大勾配 1.0:1.3 や、一般的な捨石の安息角(内部摩擦角=40° ~45°)とほぼ同じであった。

これらのことから、本予測手法における捨石法面の安定勾配は、ほぼ妥当な値を示すことが確認された。

5. おわりに

個別要素法を用いた堆積形状予測結果の適用性を人工海底山脈築造時に計測した実測値により確認した。その結果、実測値と予測値での高さの処理の方法に課題はあるものの、1 投ごとの予測値は堆積高さが捨石 1 個程度高くなる傾向があり、堆積の範囲や体積はほぼ一致することが確認された。また、体積予測形状の傾向を確認した結果、水深や開扉時間を変化させた場合の堆積形状の変化の傾向、および堆積の安息角は、文献や実測と比較しても妥当な傾向を示した。

実測値の蓄積により投入計画の修正を行いながら施工を進めていく。そのため、本手法により予測した堆積形状は、初期の投入計画作成においては十分な予測精度を確保していると考えられた。今後は課題の検討を行いつつ、さまざまな施工条件での検証を行い、予測精度の向上を行う予定である。

参考文献

- 1) 松見吉晴, 住谷圭一, 浅沼丈夫: 漁礁マウンド構築における投入工法管理システムの開発, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp. 343-348, 2005.
- 2) 松見吉晴, 岸口孝文: 捨石マウンド築造時のバース船の配船位置について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 769-773, 1990.
- 3) 重松孝昌, 小田一紀, 田野雅彦, 廣瀬真由: 個別要素法による水中沈降粒子群の 3 次元挙動に関する研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 996-1000, 2000.
- 4) 重松孝昌: 水面から投入された粒子群の堆積形状の推定について, 流体力学会年会講演集, AM06-07-019, 2006.
- 5) 長山英樹, 加藤直幸: 大水深における高精度な捨石マウンド築造技術, 電力土木, N0.340, pp. 101-103, 2009.
- 6) 武藤碩夫, 吉井総介, 石田 勉: 大規模埋立用底開バースによる土砂投下の研究, 三菱重工技報, Vol. 11, No. 1, pp. 92-104, 1974.