

魚礁マウンド構築における投入工法 管理システムの開発

DEVELOPMENT OF MANEGEMENT SYSTEM ON SCHEME OF DUMPING BLOCKS FROM BARGE IN CONSTRUTING ARTIFICIAL FISHING MOUND

松見吉晴¹・住谷圭一²・浅沼丈夫²

Yoshiharu MATSUMI, Keiichi SUMIYA and Takeo ASANUMA

¹正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²正会員 東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

The artificial fishing mound (AFM) is constructed in deepwater by dumping a large amount of rubble or concrete blocks from a hopper barge to expand the fishing ground by uplifting the eutrophied water with the upwelling current generated on mound. In order to produce a designed geometry of AFM accurately and effectively, the operation management for the discharge position of barge, which is taken the transfer displacement of the falling blocks by the current into consideration, is required. In this study, the numerical simulation model to estimate the spatial deposition configuration of blocks dumped from barges has been expanded for the current field, and its practical adaptability has been verified by the field experiments. Furthermore, the management system on positioning of the barge, which is correspondent to the real-time utilization in the field, is developed by linking this simulation model and the input-output divisions for the ADCP measured data, the simulated shape of AFM and the position of barge.

Key Words : *Operation management, Discharge position of barge, Deposition configuration of discharged rubble and concrete blocks*

1. はじめに

大規模な海底人工山脈（魚礁マウンドと呼ぶ）とは、海流、潮流が卓越するような外洋において流向に直角に長さ100m程度にわたって高さ10数mにコンクリートブロックや石材等を積み上げて構築される広域漁場造成事業の主要な施設である。その魚礁マウンドの目的は、マウンド設置に伴う周辺流水の変化、特に深層水の富栄養塩水塊の湧昇流効果により生産性の高い漁場を造成しようとするものである。

この種の造成には、施工の効率性から土運船による投入工法が一般に採用されている。魚礁マウンドのような海流・潮流が強い海域での施工管理には、流れによる投入されたブロックや石材の水平方向の移動変位を考慮した土運船の投入位置に関する誘導が要求される。したがって、効率的な施工を実施するためには、流れに伴う投入ブロックおよび石材の水平方向の移動変位を考慮に入れた堆積形状予測モデルと、土運船の投入位置決めに現場サイドで迅速に対応できる入出力条件に関するインターフェースを組み合わせた投入工法管理システムが必要となる。

本研究は、流れ場における投入材の堆積形状予測モデルの確立を目指すと共に、現場におけるリアルタイムな利用に対応可能な堆積形状に関する予測計算部と入出力部の結合に対してユーザーフレンドリーなインターフェースをもつ投入工法管理システムを開発するものである。

2. 従来の堆積形状予測モデルの概要

著者の一人¹⁾は、バージ直投による堆積土砂の現場サイドで確認されている堆積土砂形状が投入水深の増加に伴って「一山型→台形円錐→二山型→平型」への変化パターンを再現できる予測モデルを確率論に基づいて開発してきた。その予測モデルは、投入材の水深方向への散乱現象に関して水深方向に分割した各区分における投入材の水平方向の散乱現象が同一の確率的性状を示すことに注目し、各水深間の投入材の落下散乱に関する確率過程にマルコフ・チェーンを適用したものである。予測モデルの全開式および底開式バージによる投入土砂堆積形

状に対する適合性は、既に模型実験より明らかにされていると共に、現地への適合性に対しても確認されていることが報告されている²⁾。ここでは、従来の堆積形状予測モデルの概要を示す。

(1) 等分割水深区間の投入材の確率特性

水深方向に等分割された各区間における投入材の水平方向への移動距離に関する船幅および船首尾方向の各々の確率分布は、図-1の(a)に示すように各区間同一で、次式で示す正規分布で与えられている。

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

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

ここで、 x^* および y^* は船幅および船首尾方向の座標系を x と y としたときの代表長（例えば、計算上の座標セグメントの単位など）による無次元化座標、 σ_x^* 、 σ_y^* はそれぞれ船幅および船首尾方向の投入材の散乱に関する標準偏差で無次元量である。この標準偏差は、投入材の寸法や形状によって変化し、その値は寸法が大きくなるほど小さくなる³⁾。

このように投入材が位置する区間から次の区間のどの位置へ落下移動するかに関する確率は、式(1)と(2)によって一義的に決定されることになる。そこで、各区間の投入材の落下散乱に関する確率過程に対して、マルコフ・チェーンを適用して、等分割された各水深区間での落下位置に関する確率モデルは以下のように誘導できる。

(2) 投入材単体の落下位置に関する確率モデル

投入位置から最終着定位置までの水平方向の最長距離を r （代表長で無次元化された整数値）とすると、投入材の着定位置に関する状態空間 S は次のように $2r+1$ 個の要素によって与えられる。

$$S = \{-r, -r+1, \dots, 0, \dots, r-1, r\} \quad (3)$$

船幅および船首尾方向の推移確率行列 P は、区間 $m-1$ における i 位置から区間 m において j 位置となる推移確率 $p(i, j)$ を確率行列の要素とすると、次式で表示できる。

$$P = [p(i, j)] \quad (i = -r, \dots, r, j = -r, \dots, r) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i-j=0 & \quad p(i, j) = p_0 \\ i-j=-k & \quad p(i, j) = p_k^+ \\ i-j=k & \quad p(i, j) = p_k^- \\ |i-j|>k & \quad p(i, j) = 0 \end{aligned}$$

ここに、 p_0 、 p_k は式(1)、(2)より算定される投入材の移動距離が0および k の場合の確率で、添字の±は移動方向を表す。なお、 k は式(1)、(2)が有限値を持つ範囲の値である。また、各区間における投入物体の位置に関する船幅および船首尾方向の確率分布 $\Pi_x(m)$ 、 $\Pi_y(m)$ は、投入点を解析上、1点に固定していることから投入時

$m=0$ の状態が次式で与えられ、

$$\begin{aligned} \Pi_x(0) &= [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0] \\ \Pi_y(0) &= [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0] \end{aligned} \quad (5)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{r\text{個}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{r\text{個}}$

最終的に、

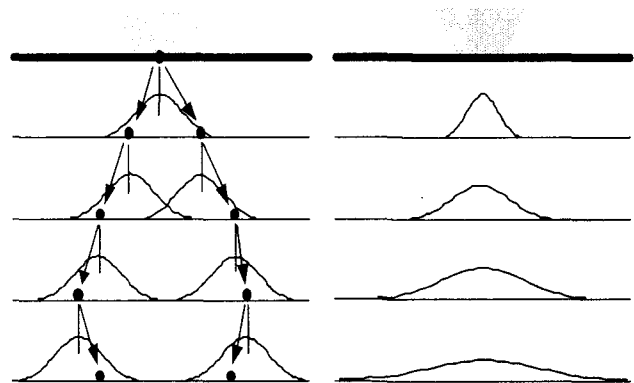
$$\Pi_x(m) = \Pi_x(m-1) \cdot P_x \quad (6)$$

$$\Pi_y(m) = \Pi_y(m-1) \cdot P_y \quad (7)$$

ここに、 P_x 、 P_y は式(4)から算定された船幅および船首尾方向の推移確率行列である。図-1の(b)は、上記のマルコフ・チェーン理論によって算定される各水深における投入材の落下位置に関する確率分布形状の模式図を示したものである。

投入材単体の海底（水深分割番号： m ）での落下位置に関する平面確率分布 $P_r(x^*, y^*)$ は、船幅および船首尾方向の落下散乱に関する確率特性として独立性が既に明らかにされている¹⁾ことから、船幅および船首尾方向毎に独立に算出された着底位置に関する確率分布の各々の積として次式で与えられる。

$$P_r(x^*, y^*) = \Pi_x(m) \cdot \Pi_y(m) \quad (8)$$



(a) 水深区間の確率特性

(b) 各水深での確率分布

図-1 確率モデルの模式図

(3) 投入材の堆積形状に関する確率モデル

バージより投入された物体群の着底位置に関する確率分布の算定に当たっては、バージホップ開口部からそれぞれ落下した投入材の着底位置に関する確率分布の和で与えている。いま、バージのホップ開口部を計算上の代表長で分割した数 N_x （船幅方向）および N_y （船首尾方向）とした場合、バージより投入された物体群の着底位置に関する確率分布は次式で与えられる。

$$P_s(x^*, y^*) = \frac{1}{(N_x + N_y)} \sum_{i=1}^{N_x} P_{ij}(x^*, y^*) \quad (j = 1, 2, \dots, N_y) \quad (9)$$

ここに、 $P_{ij}(x^*, y^*)$ はホップ開口部の船幅方向 i の位置、船首尾方向 j の位置から投入された物体が (x^*, y^*) 位置に着底する確率で、式(8)で与えられる。

マウンドの堆積形状 $h(x^*, y^*)$ は、式(9)から算定される投入材の着底位置に関する確率分布と投入材の総体積の積として、次式で与えられる。

$$h(x^*, y^*) = \frac{V \cdot P_s(x^*, y^*)}{D^2} \quad (10)$$

ここに、 V は投入材の総体積（堆積空隙率を含む）、 D は解析上の無次元化に用いた代表長である。

3. 流れ場に対する堆積形状予測モデルの拡張

魚礁マウンドが築造される海域は、マウンドの集魚機能から数10m以上の大水深で、かつ海流や潮流のような時間的に一方向流れが卓越する場である。このような流れ場における土運船による直投工法では、流れによる投入物体の水平移動を考慮した堆積中心を事前に予測計算し、その結果を基に土運船の進入方向や投入目標位置が決定されることになる。ここでは、2. で示した静水場を対象とした従来の堆積形状予測モデルを流れ場へ拡張するための、流れ場を落下する物体群の水平移動に関する考え方とその拡張モデルを示す。

(1) 落下物体群の水平移動量に対する考え方

流れ場を落下する物体群に関する運動方程式には、群としての効果を表現するBasset項が含まれる⁴⁾。このBasset項は、ここで対象としている0.5~1t/個程度の捨石や一辺が1mを越えるコンクリートブロックのような大粒径の場合、その影響は無視できると言われている⁵⁾。したがって、流れ場の投入物体群については個々の物体が流れによって水平移動を伴いながら落下散乱するものとみなすことができる。

そこで、本研究では従来の確率モデルに対して、流れに伴う投入物体の水平移動を組み込むため、流れ場を落下する物体挙動に関して以下の仮定を設定した。すなわち、図-2に示すように水深方向に分割した区間における個々の物体の散乱分布は、流れに伴ってそれぞれ同一の水平移動変位をもちながら同一の確率分布で落下するものと仮定する。このことは、水平移動量は確率分布の平均値のずれを意味することになり、各水深区間の落下位置に関する確率分布が船幅および船首尾方向に関して次式で与えられることになる。

$$f_{xi}(x^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x^*} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^* - \mu_{xi}^*}{\sigma_x^*}\right)^2\right\} \quad (11)$$

$$f_{yi}(y^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y^*} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y^* - \mu_{yi}^*}{\sigma_y^*}\right)^2\right\} \quad (12)$$

ここに、 μ_{xi}^* 、 μ_{yi}^* は水深区間 i における流れに伴う船幅および船首尾方向の確率分布における平均値のずれであり、これらの値は以下のような方法で設定している。

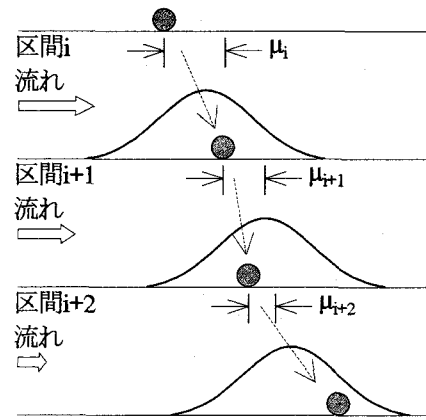


図-2 流れ場における落下散乱に関する確率分布

投入物体の落下運動は加速度運動であるが、ここでは便宜上、等速運動と仮定し、まず各水深区間における投入物体の鉛直方向の運動について各区間とも次式で示す最終沈降速度 v で落下するものとする。

$$v = \sqrt{\frac{2(\rho_s - \rho)gd}{C_d}} \quad (13)$$

ここに、 ρ_s 、 d は投入物体の密度および代表径、 ρ は海水の密度、 g は重力加速度、 C_d は物体の抗力係数である。次に、水平方向への運動は区間を沈降するに要する時間 Δt と流れの流速ベクトルの積で与えることとし、式(11)と(12)中の μ_{xi} 、 μ_{yi} を次式のように定義した。

$$\begin{aligned} \mu_{xi} &= (U_i \cos \beta + V_i \sin \beta) \cdot \Delta t / D \\ \mu_{yi} &= (-U_i \sin \beta + V_i \cos \beta) \cdot \Delta t / D \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、 β は図-3に示す座標系におけるバージ船首方向の回転角、 U_i 、 V_i は現地においてADCPにより計測された水深区間 i における流速である。

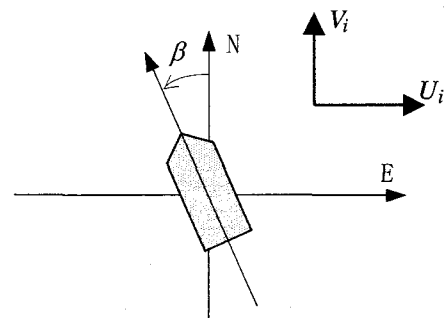


図-3 土運船の回転角、流速の定義

(2) 着底位置に関する平面確率分布

従来の堆積形状予測モデルでは、着底位置の平面確率分布に対して船幅および船首尾方向毎に独立に算出された着底位置に関する確率分布の各々の積で与えていた。しかし、流れ場の流向・流速が各水深区間において変動するため、水深区間毎に落下位置に関する平面確率分布を計算し、最終着底位置まで連続的に平面確率分布を算

出できるように以下のような改良を行っている。

図-4は、離散化されたバージ開口部のある1つのセグメントから投入された物体の各水深における落下平面位置に関する模式図を示したものである。この例では、水深区間の投入物体の x 、 y 方向への最長距離が散乱分布中心から ± 2 セグメント($s=2$)で示していることから、区間 $m=1$ では散乱幅が x 、 y 方向とも $5 (=1+2 \cdot s)$ 、 $m=2$ では散乱幅が $9 (=1+2 \cdot 2s)$ となり、区間 $m=m$ では散乱幅が $1+m \cdot 2s$ となる。本研究では、区間 m における投入物体の落下位置に関する平面確率分布 $Ps_m(x^*, y^*)$ を次式で算定することにした。

$$Ps_m(x^*, y^*) \Big|_{\substack{x^*: -m \cdot s \sim m \cdot s \\ y^*: -m \cdot s \sim m \cdot s}} = Ps_{m-1}(x^*, y^*) \int_{-s}^s \int_{-s}^s f_{xm}(x^*) f_{ym}(y^*) dx^* dy^* \quad (15)$$

$$\{x^* = -(m-1) \cdot s \sim (m-1) \cdot s\}$$

$$\{y^* = -(m-1) \cdot s \sim (m-1) \cdot s\}$$

ここに、 $f_{xm}(x^*)$ 、 $f_{ym}(y^*)$ は区間 m における式(11)、(12)および(14)より得られる船幅および船首尾方向の落下位置に関する確率分布である。

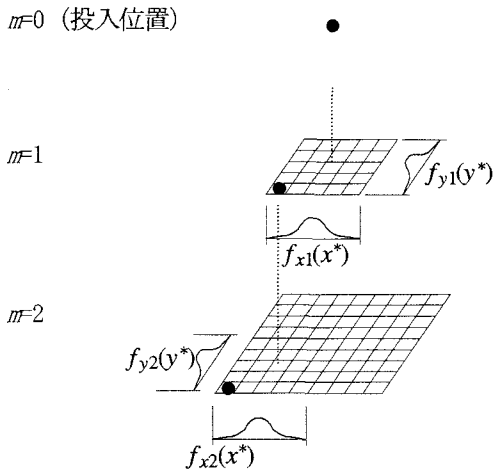


図-4 ある一セグメントから落下沈降する物体の散乱位置に関する模式図

4. 標準偏差と代表長・水深間隔の関係

本堆積形状予測モデルに含まれる投入物体の落下散乱を表現する標準偏差は、無次元化のための代表長の取り方、また水深区間の間隔によっても変化する。そこで、現場サイドにおける無次元平面座標系の取り方および施工水深の変化にも対応できるよう標準偏差と代表長・水深間隔の関係について以下に検討する。

ここでは、船幅方向の式(11)について考えることにする。いま、 $x' = x/D_L$ 、 $\sigma'_x = \sigma_x/D_L$ 、 $\mu'_x = \mu_x/D_L$ と無次元変数に書き換える。なお、 x 、 σ_x 、 μ_x は次元量、 D_L は無

次元化の代表長さである。式(11)をこれらの変数を用いて変数変換すると次式が得られる。

$$f(x') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma'_x(D/D_L)} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x' - \mu'_x(D/D_L)}{\sigma'_x(D/D_L)}\right)^2\right\} \quad (16)$$

したがって、代表長として D で無次元化した無次元標準偏差 σ'_x 、無次元平均値 μ'_x を用いて、他の代表長 D_L で無次元化された標準偏差 σ'_x および平均値 μ'_x は次のように与えられる。

$$\sigma'_x = \sigma'_x(D/D_L), \quad \mu'_x = \mu'_x(D/D_L) \quad (17)$$

次に、任意の水深間隔における標準偏差に関する理論的な取り扱いが困難なため、便宜上、数値解析により検討を行った。図-5は、一例として $\sigma^* = 2.0$ の場合について、区間間隔 D_p を5等分した場合の各区間における標準偏差 σ_z^* と次式で示す近似式を比較したものである。

$$\sigma_z^* = \sigma^*(D_z/D_p)^{1/2} \quad (18)$$

式(18)は各区間における標準偏差とよく一致することから、堆積形状予測モデルにおける水深区間間隔を変化させたときの標準偏差は、基準となる σ_x^* 、 σ_y^* を用いて式(18)で換算できることになる。

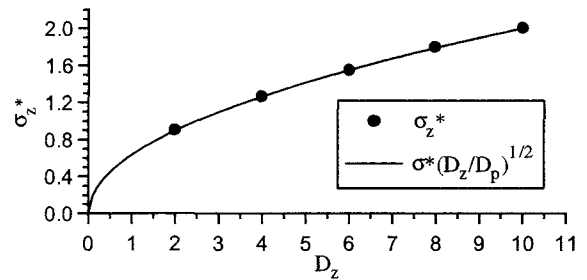


図-5 水深間隔に関する標準偏差の近似式

5. 堆積形状予測モデルの適用性

(1) 現地実験の概要

現地実験は、長崎県五島列島沖合8kmの水深85mに1トン内外の捨石4,000m³を5航海(800m³/航海)による全開式バージによる魚礁マウンド築造施工である。土運船の誘導には、DGPS測位システムを用い、土運船の定点保持に引船3隻を使用している。マウンド出来形測量は、ナローマルチビーム測深システムにより行われている。投入前の流向・流速計測は、ADCP(300Hz)を用いて水深6m~82m間を4m間隔で20測点において行っている。

実験期間の海象条件は、風速:1~8m/s、波高:0.5~2m、表層流速:12~46cm/sであった。図-6は、流速の計測結果の1例として第1回目投入前に観測された流速の深度分布を示したもので、卓越流向は南東方向で、最大流速が28cm/s程度である。このような流向・流速に関する計測結果を堆積形状予測モデルに組み込み、水深区間

間隔4mで解析された投入目標位置と計画中心位置との水平距離を表-1に示す。なお、第1回目投入において計画中心と堆積中心との間に、東西方向に約6.0m、南北方向に約2.6mの誤差が生じたため、第2回目以降の投入では第1投目の堆積中心を計画堆積中心位置にとっている。表-2は、土運船の投入中の投入目標位置からの最大移動距離を示したものである。

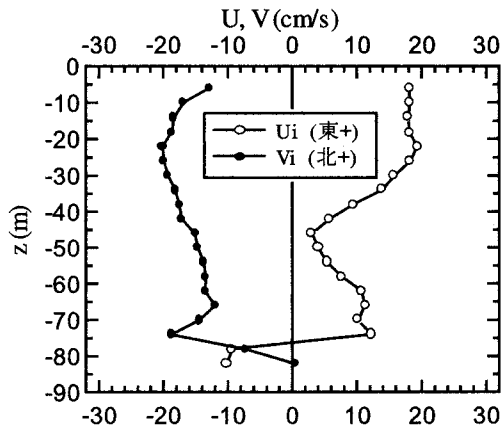


図-6 計測流速の深度分布（第1投目前）

表-1 投入目標と計画中心との水平距離

投入回数	E-W方向への距離(m)	N-S方向への距離(m)
1	-3.07	3.37
2	-1.35	4.96
3	3.45	-3.54
4	3.33	-5.70
5	0.18	-2.57

符号：東(+), 北(+)

表-2 投入中の土運船の最大移動距離

投入回数	1	2	3	4	5
最大誤差(m)	3.8	3.5	2.5	1.9	7.2

(2) 投入目標位置に関する検討

図-7は、1, 3, 5回投入後の出来形測量結果に投入目標位置(○印)と堆積中心位置(+印)を併記して示したものである。まず、表-2より投入中の土運船は風や表層流によって移動しているが、捨石はホッパを開き始めて10数秒で投入されることから、土運船の移動誤差は最大でも4m以内と見積もられている。そこで、図-7において投入目標位置より投入された捨石堆積マウンドの頂部の立ち上がり位置と目標堆積中心位置の関係は、誤差変位として4m以内にほぼ収まっており、土運船の移動4m程度を考慮するとほぼ精度よく投入目標が設定されたものと判断できる。

(3) 堆積形状に関する検討

堆積形状の解析に当たっては、投入中の土運船の移動の取り扱いとして、投入時の全航跡座標の平均値を投入

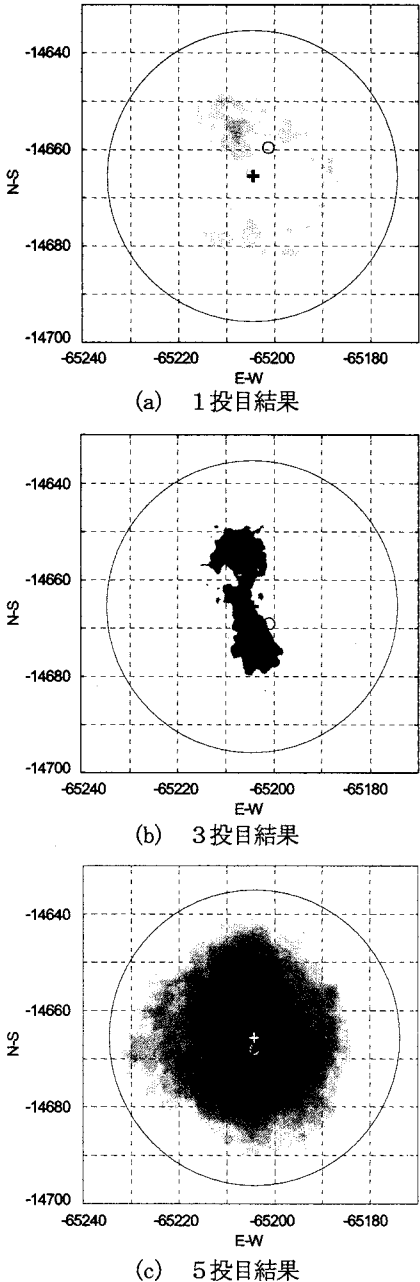


図-7 出来形測量結果における投入位置と堆積中心の関係

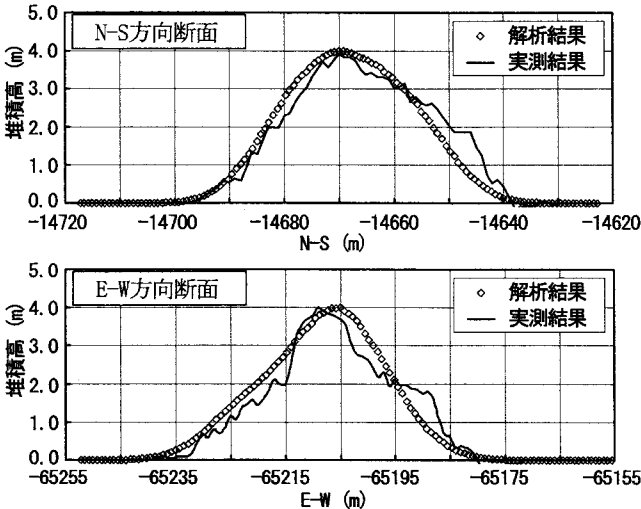


図-8 出来形断面の実測結果と予測結果の比較

位置に設定した1点投入の場合と、全航跡座標を離散的に考慮した多点投入について計算したが、両者に差異がなかったため、ここでは1点投入で実施した。図-8は、5回投入後のマウンド出来形の中央断面形状について実測結果と解析結果を比較したもので、解析結果は実測結果とよく再現している。

以上のことより、本堆積形状予測モデルは、流れ場における投入捨石の堆積マウンド形状を十分な精度で予測できるものと言えよう。

6. 投入管理システムの概要

今回開発したシステムは、図-9に示すように堆積予測計算ルーチン部を核として、データの手入力部、ファイルリンクされる解析基礎データとADCPデータ部および結果出力部から構成され、出力表示部において投入目標座標、堆積形状表示（差分表示、出来形表示など）をウィンドタイプのインターフェースにより現場サイドで簡易に使用できるようになっている。

従来のシステムは、投入条件、船舶条件および流速データ等をその都度、手入力していたため、動揺する船上では時間を要していた。本システムでは、図-10(a)にデータ入力部の1例を示すように、ファイルリンクにより入力項目が削減され入力データも視覚的に判別できるようになったと評価されている。図-10(b)に示した画面では解析結果と実測値を3次元的に表示でき、各解析パラメータの妥当性を即座に検証できる。また、前述の標準偏差と代表長・水深間隔の関係より、任意に解析水深ピッチを変化できるように拡張したことにより、解析条件設定の柔軟性を向上させることができた。

7. あとがき

本研究は、流れ場における捨石、ブロック等の投入工法に関する現場対応の管理システムの開発を目指したものである。流れに伴う投入物体の水平方向の移動を考慮した堆積形状予測モデルの現地への適用性が確認できたと共に、従来、現場において堆積計算を行う度にテキストベースで入力していた計算条件がウィンドタイプの管理システムの開発に伴い簡易にリアルタイムな対応が可能となり、施工の効率化につながった。

最後に、現地実験データに関しては長崎県水産部漁港漁場整備課よりご提供いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 松見吉晴, 岸口孝文: 捨石マウンド築造時のバージ船の配

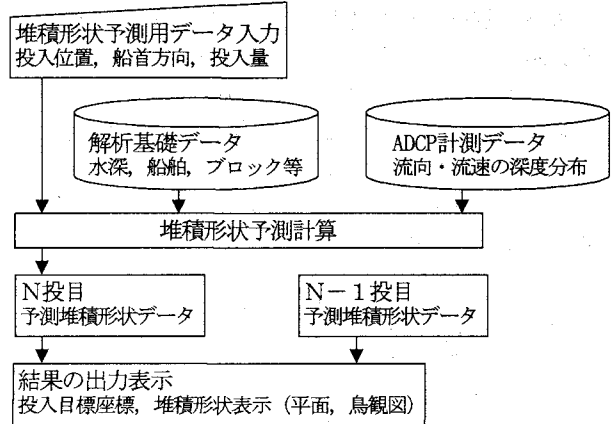
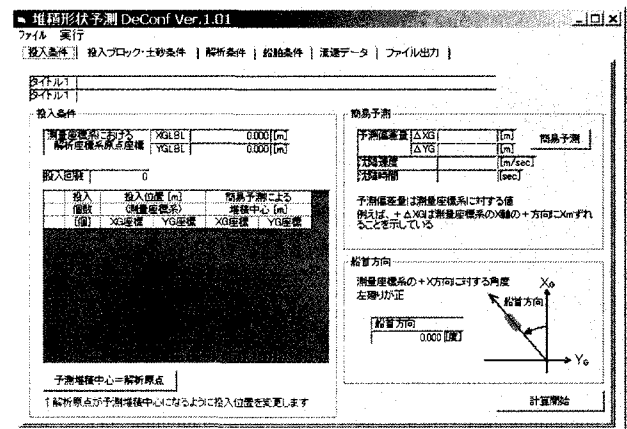
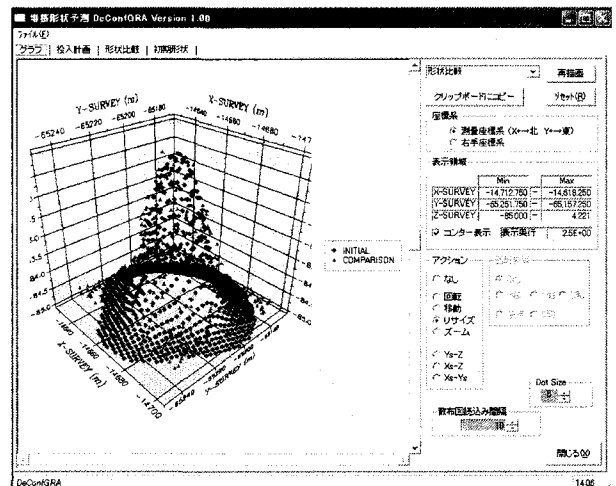


図-9 投入管理システムフロー



(a) 投入条件の入力画面



(b) 解析結果の表示画面 (実測値と解析値の比較)

図-10 画面イメージ

- 船位置について、海岸工学論文集、第37巻、pp.769-773、1990。
- 2) 松見吉晴, 荒井 清, 太田正規, 矢内栄二, 増田 稔: 軟弱底面上に投入した土砂の堆積形状とその予測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.891-895, 1998。
 - 3) 太田正規, 荒井 清, 五明美智男, 矢内栄二, 松見吉晴: 投入土砂堆積形状予測モデルにおけるパラメータ設定と流れ場への適合性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.976-980, 1999。
 - 4) Hiuze, J.O.: Turbulence, McGraw-Hill, pp.353-361, 1959。
 - 5) 林 泰造, 大橋正和: 流体中を沈降する粒子の乱流特性について, 第24回水理講演会論文集, pp.7-12, 1980。