

小特集 建設施工にかかわるシミュレーション技術 建設技術のシミュレーション技術

バージによる投入土砂の堆積形状に関する予測手法と適用事例

増田 稔

関西国際空港2期工事のような大水深における海上工事を円滑かつ迅速に施工するには、大型バージで土砂を投入し、所定の設計土層厚を効率よく施工することが重要であり、土砂投入位置決めを事前に把握しておく必要がある。そのためには、バージによる投入土砂の堆積形状に関する予測手法の確立が不可欠である。

本報文では、特性（海象、土砂）の変化を確率変数で考慮した松見モデルを採用した堆積形状予測モデルの概要と、深浅測量と組合わせた施工管理システムおよび関西国際空港2期工事での適用事例を紹介する。

キーワード：バージ、堆積形状予測、情報化施工、造成工事、埋立て工事

1. はじめに

海面から土砂を投入する場合、効率的な施工を行うためにはあらかじめマウンドの形成状況を予測する必要がある。

関西国際空港2期工事のように対象となる海域の水深が20m前後と大きい場合、堆積形状を精度よく予測することにより目標形状をより効率的に施工することがより重要となる。

今回、施工土層厚を均一化するための適正な投入位置に関する底開・全開式バージの配船計画について、予測モデル（松見モデル）と堆積形状計測システムを組込んだ施工管理システム（図-1）を提案し運用したので、その事例を紹介する。

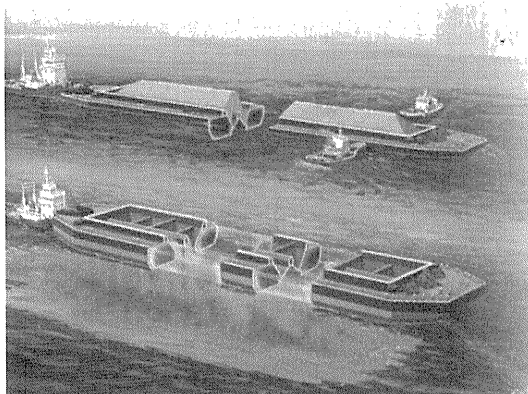


図-1 バージ船による土砂投入イメージ

2. システムの概要

(1) 予測（松見）モデルの概要

松見らは、水深方向に分割した各区間での土砂の散乱に関する確率的性状が同一であることを明らかにした。これに基づき、水深方向に分割した区間ごとに土砂の散乱分布特性を算出し、各区間の土砂の落下移動の確立過程に関してマルコフ・チェーンの確率モデルを適用して、土砂の落下質に関する平面的な確率分布を求め、土砂堆積との積により堆積形状を求める（図-2）。

モデル関係式 $f(x^*)$, $f(y^*)$ は以下のとおりである。

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

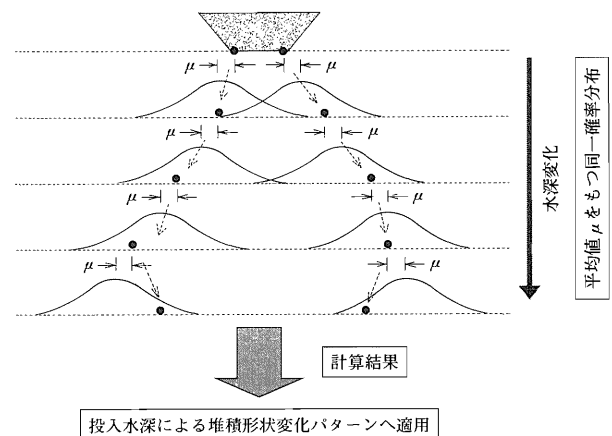


図-2 予測モデル説明図

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

ここで、 $x^*=x/d$, $y^*=y/d$, d : 土砂の中央粒径
 σ_x, μ_x : 船幅方向の標準偏差, 平均値 (実験パラメータ)
 σ_y, μ_y : 船首尾方向の標準偏差, 平均値 (実験パラメータ)
 \pm : 船幅方向の場合,
 左舷側 (+) と右舷側 (-)
 船首尾方向の場合,
 船首側 (+) と船尾側 (-)

土砂群の平面確率分布 P_r は (3) 式で表される (図-3)。

$$P_r(x^*, y^*) = \left\{ \sum_{i=1}^N P_{ri}(x^*, y^*) \right\} / N \quad (3)$$

ここで、 N : ホッパ開口部の分割総数
 d : ホッパ開口部の分割幅

また、堆積形状 H は $P_r(x^*, y^*)$ を用いて (4) 式で表される。

$$H(x^*, y^*) = V \cdot P_r(x^*, y^*) / d^2 \quad (4)$$

ここで、 V : 土倉船の積載土砂体積 (空隙も含む)

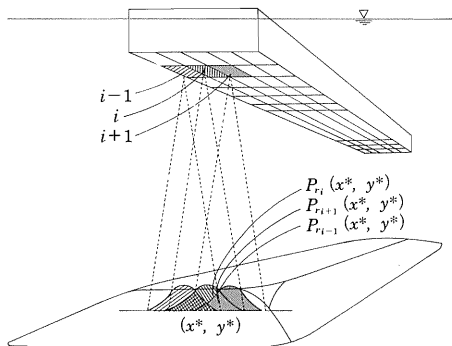


図-3 分割されたホッパ開口部イメージ

確率モデルを採用した堆積形状予測は、

- ① 計算が簡単である、
- ② 特性 (海象, 土砂) の変化を確率の変数で考慮できる、

などの特徴があり、实际的で利用しやすい。

特に②で示す特徴から、本モデルがもともと捨石マウンドの堆積形状 H を予測するものとして開発されたものの、山砂や漁礁ブロックなどのさまざまな材料に対しても、水理実験などによって確率特性をとらえることによって利用可能であることが大きな利点となっている。

本予測モデルを採用することにより、

- ① 護岸工事における盛砂の投入を予測し高精度に管理することが可能である。

② 埋立て工事においては、直投の施工層厚を均一化することにより、不同沈下の出現を低下させる施工管理が可能である。

③ 工事着工前に施工中に任意の時点における埋立て形状をシミュレートでき、海底面の状況を三次元的に把握し、より高精度な施工管理が可能である。

ことが分かった。

(2) 堆積形状計測システム

土砂投入前の海底地形および投入後の深淺測量には、既に開発されたベルーガ (Beluga) システムを用いる。

このシステムは、GPS による測位システムと、広範囲の地形データを一度に取得可能なナローマルチビーム測深ソナー、さらには計測作業船の動揺補正装置を組み合わせることにより、水深の 2 倍~6 倍の幅で海底面の 3 次元情報をリアルタイムで高精度に処理できるものである。

3. システムの検証

投入した土砂堆積マウンドの形状の特長の把握と、堆積マウンド形状に関する予測モデル式に含まれる統計量の設定資料を得るために、バージ模型を用いた水理実験、その後現場実験を実施した。

(1) 水理実験

水槽は、長さ 4 m × 幅 3.8 m × 高さ 2 m の大きさで、水槽の二面側はガラス張りになっており、投入土砂の落下状況を確認できる。

バージ模型は、47 cm × 45 cm × 21 cm のアクリル製の縮尺 1/36 の全開式バージを採用した。ホッパ開閉部分はモータにより制御され、開閉速度は可変式となっている。ホッパの最大開閉角度および開閉幅は、それぞれ 29° と 18.5 cm である。ホッパの開閉速度は 20 秒一定で、バージの設置高さは、原型の満載時の喫水 5.4 m を考慮して 15 cm で実施した (写真-1)。

実験に使用した砂は、50 mm 以下 2 mm 以上のも

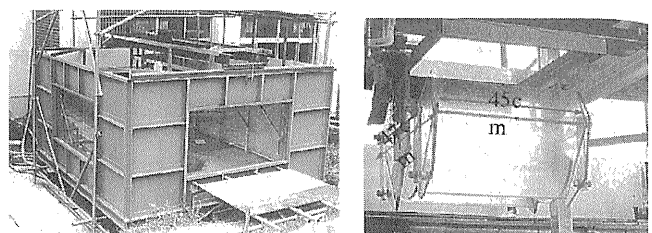


写真-1 実験水槽とバージ模型

ので、中央粒径は 14 mm である。

投入水深の増加に伴ってマウンド形状が山型から台形型への変化特性並びに堆積高さをよく再現しており、本堆積マウンド形状に関する予測モデルの投入土砂に対する適合性が認められる (図-4)。

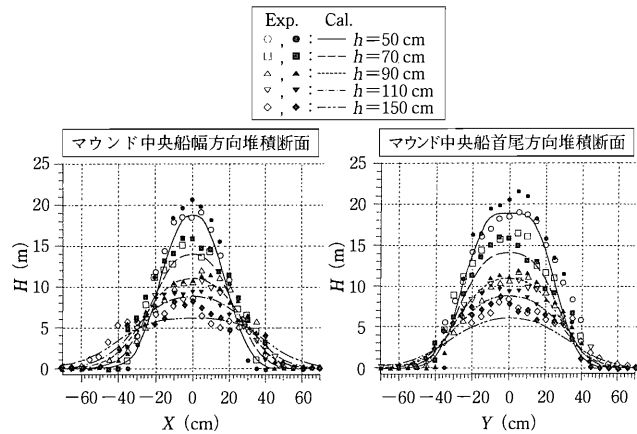


図-4 実験結果と予測結果の比較

(2) 現場実験

バージによる投入土砂の堆積マウンド形状に関する本予測モデルの実用性を検証するため、大阪湾内における投入土砂の堆積形状について予測計算と比較検討した。

投入水域は山砂によって平均 1 m の盛砂が施工された海域で、平均水深がほぼ 14 m であった。バージは積載量 3,200 m³ の底開式 (土倉長: 66 m, 開口幅: 1.7 m × 2, 開口幅: 8.5 m) と 3,500 m³ 積みの全開式 (土倉長: 56 m, 開口幅: 8.5 m) である。投入土砂は 200 mm 以下の山砂である。土砂投入前の事前測量と投入後の出来形の計測には、ベルーガシステムを用いて実施した。

計算条件としては、バージの開口部の分割幅を d

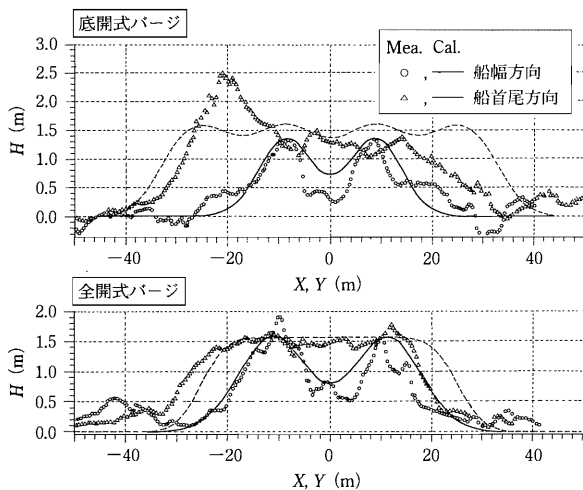


図-5 現地投入結果と計算結果の比較

= 20 cm, 水深方向の分割間隔を 1 m に設定した。予測モデル式に含まれる標準偏差と平均値については現地投入結果より推定している。

図-5 は、底開式および全開式バージによる土砂堆積マウンドの船幅方向中央断面、船首尾方向については二山の頂部について現地結果と予測計算結果を比較したものである。

計算結果は、大水深域における一般的な特徴である二山型の断面形状を再現している。したがって、本予測モデルは、投入土砂の堆積高さおよびマウンドの斜面勾配の事前把握に対して実用性が認められる。

4. プロジェクトへの適用

(1) 導入現場の状況

現場は関西 2 期空港島護岸築造工事 (その 6) の工事区域で、海底地盤に対して 1.5 m の敷砂を砂撒き船で施工した後に、サンドドレーンによる地盤改良が完了している。したがって、土砂投入区域の地盤は平面で、平均水深は -18 m である。

対象とした投入土砂は粒径 50 mm 以下の山砂で、平均中央粒径および均等係数はそれぞれ 1.3 mm および 10.7 である。土砂投入時の工事水域は、懸垂式および自立式の汚濁防止膜で水面下 5 m, 海底面上の 7 m が封鎖された状態であった (写真-2)。



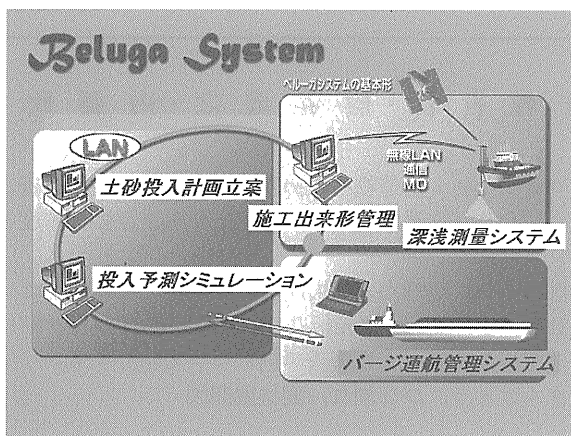
写真-2 導入現場状況

(2) 土砂投入管理方針

土砂投入作業を実施する工事区域は、約 26 m の沖積粘土層をサンドドレーンにより地盤改良をしている。この地盤改良区域に対して、直投土砂が載荷することにより圧密沈下と強度増加が生じるものの、初期段階における載荷を極力薄層で均一に行うことは、より安

定性の高い断面を構築するためにも重要である。

そこで、均等な载荷が行われるよう土砂投入後の海底面の平坦性を向上させるために、底開・全開式バージによる投入土砂堆積形状に関する本予測モデルとリアルタイム計測システムを組込んだ土砂投入位置管理システムを構築し土砂投入管理を実施した(図一6)。

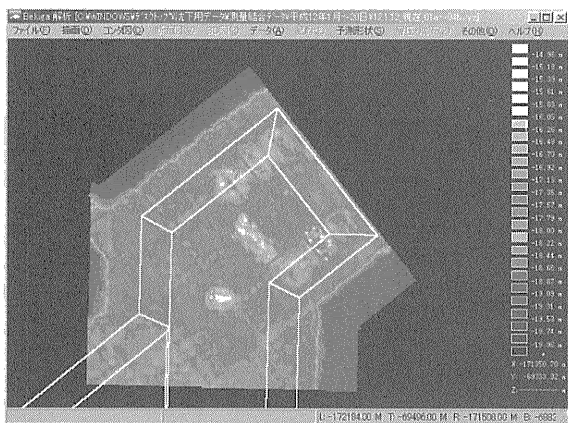


図一6 土砂投入位置管理システムのイメージ

(3) 土砂投入位置管理システム利用例

護岸築造工事では、幅員約400m、護岸延長2.2kmの範囲に対して層厚約6.0mの盛砂を施工した。施工中の水深を考慮した堆積形状予測結果より求めた層厚が1.0m~1.3mであることから、盛砂断面を五つの土層に分割して各土層を平面的に施工し高い平坦性を持つよう投入位置の決定を行った。

図一7は、土砂投入位置管理システムの利用状況の一例を示したものである。

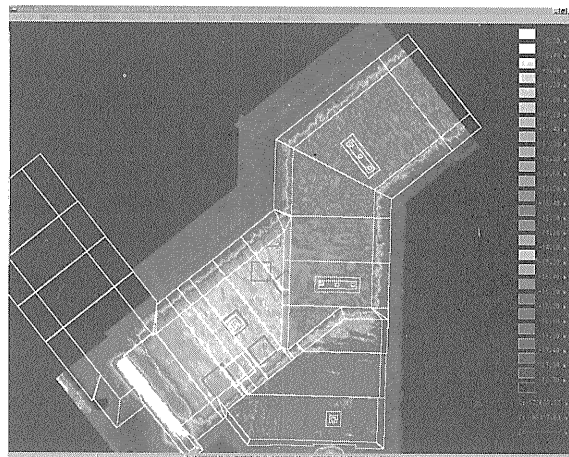


図一7 位置決定シミュレーション例

現地の深浅測量結果の深い領域に対し、各バージの堆積形状予測結果から求めた堆積土砂の広がり領域を「枠」で示し、投入位置を概略決定する。

続いて堆積形状予測結果を加えることにより海底地盤高を表示させ、平坦性の評価、投入位置の微修正を含めた調整等を土砂投入管理者が視覚情報を有効利用しながら、バージの最適な土砂投入位置を決定する。これらの投入結果は全てデータベースに蓄積され、予測モデルの精度向上に利用された。

この結果、図一8のように要求された品質の護岸を築造することができた。また、埋立て工事にも適用され、貢献することができた。



図一8 投入管理された現場深浅図

5. あとがき

近年の建設業界を取巻く状況は、刻々と変化しており、特に情報化、合理化に関する技術革新のスピードは目覚ましいものがある。海底の詳細情報が容易に取得できるようになり、従来実験でしか得られなかった情報が実施中に取得可能となり、予測モデルへのフィードバック等現場への適用がさらに確実になった。これらの技術革新によってもたらされる成果は、求められる高い品質の確保を実現するものと思われる。

平成15年11月~12月には、これら蓄積した技術を活用して水深-85mの海底にバージによりブロックを投入管理し、人工山脈を造成する予定である。

最後に実験および現場導入にあたり、ご指導ご協力頂いた関係各位に厚く御礼申し上げます。 **JCMA**

【筆者紹介】
 増田 稔(ますだ みのる)
 東亜建設工業株式会社
 機電部
 課長

