

土運船による土砂投入堆積形状に関する簡易予測図表の提案

矢内栄二*・松見吉晴**・伊東 剛***・住谷圭一****

廃棄物の海洋投棄による海洋の汚染を防止することを目的としたロンドン条約が採択・発効し, さらに予防的取り組みとして96年議定書が採択された。本条約および議定書では廃棄物を厳格管理することが盛り込まれており, わが国で実施されている浚渫土砂の海洋投入処分なども対象となっている。本研究では, 土砂の海洋投入処分における堆積形状予測として, 確率モデルを用いた土砂堆積形状予測モデルについてとりまとめるとともに, わが国で実施されている基本的な施工条件を対象としてシミュレーションを行い, 汎用図表を提案した。

1. はじめに

国際的な海洋環境保全への取り組みとして, 廃棄物の海洋投棄による海洋汚染の防止を目的としたロンドン条約(廃棄物その他の投棄による海洋汚染の防止に関する条約)が1972年に採択, 1975年に発効しており, わが国は1973年に署名, 1980年に国内発効している。その後, 「予防的取り組み」の考え方が定着するようになり, 廃棄物を厳格管理することおよび潜在的影響の検討を盛り込んだ96年議定書が採択された。そのため, わが国ではロンドン条約および96年議定書の内容を担保する海洋汚染防止法の改正準備が進められており, それに伴い浚渫土砂の海洋投入処分に関わる予測技術の確立が必要となってきた。ロンドン条約では, 小規模な土砂投入では簡易なアセスメントによることを認めており, しかもわが国で実施されているほとんどの水底土砂処分が小規模投入に分類されることから, 投入後の堆積形状を推定する簡易算定図表が求められている。著者らはこれまで, 大規模埋立工事を対象とした土運船による土砂投入堆積形状予測モデルを提案してきており, このモデルでは投入水深・土砂, 施工条件を与えることにより堆積形状を予測することができる(松見ら, 1998; 太田ら, 1999, 荒井ら, 2000)。

本研究は, 浚渫土砂の海洋投入に対応できるように予測モデルを改良するとともに, わが国における基本的な施工条件を対象として堆積形状シミュレーションを行い, 最終的に堆積形状を簡易に推定できる汎用図表を提案するものである。

2. 堆積形状予測モデル(基本モデル)

(1) 基本確率モデル

松見ら(1990)は, 水深方向に等分割した各区分ごと

の捨石の平面散乱分布特性(平面座標: x, y)を検討した結果, 各区分における捨石の x および y 方向の散乱分布に関する確率的性状として, 平均値ゼロの正規分布で近似できることを確認している。しかし, そのまま平均値ゼロを適用した場合, 予測される堆積形状が投入水深の増加に伴って山型→台形円錐→二山型→平型へ変化するパターン(武藤ら, 1974)を評価することができない。そこで, このような投入水深の増加に伴う堆積形状変化パターンは, 投入された土砂群の沈降により誘起される周辺流体の循環的な流れによって土砂群が船幅および船首尾方向ともに水平方向へ移動させられながら沈降するものと考え, 各区分における土砂の水平方向への移動距離に関する確率分布に対して次式で示す平均値をもつ正規分布を仮定した。

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

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

ここに, x^* および y^* は船幅および船首尾方向の座標系を x (右舷方向を正) と y (船首方向を正) としたときの土砂の中央粒径 d による無次元化座標, σ_x と σ_y および m_x と m_y はそれぞれ船幅および船首尾方向の標準偏差と平均値で d によって無次元化されたものである。式中の $\pm$ の符号は, 式(1)ではプラスが左舷側でマイナスが右舷側, 式(2)ではプラスが船首側でマイナスが船尾側を示す。

このように投入土砂が位置する区分から次の区分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, 各区分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分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。

図-1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土砂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,

* フェロー 工博 千葉工業大学教授 工学部生命環境科学科
** 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
*** 正 会 員 (財)港湾空間高度化環境研究センター
**** 正 会 員 (株)ドラムエンジニアリング

水深区間の投入土砂の 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 $5 (=1+2s)$, $m=2$ 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 における投入土砂の落下位置に関する平面確率分布 $P_{sm}(x^*, y^*)$ を次式で算定することにした。

$$P_{sm}(x^*, y^*) \Big|_{\substack{x^* : -m \cdot s \sim m \cdot s \\ y^* : -m \cdot s \sim m \cdot s}} \dots \dots \dots (3)$$

$$= P_{sm-1}(x^*, y^*) \int_{-s}^s f(x^*) f(y^*) dx^* dy^*$$

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

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

ここに、 s は投入点から最終着底位置までの最長水平距離、 $f(x^*), f(y^*)$ は区間 m における式 (1), (2) 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り、投入時の初期平面確率分布 $P_{s0}(x^*, y^*)$ は投入位置 $x^*=0$ および $y^*=0$ において 1 をとり、 $x^* \neq 0$ および $y^* \neq 0$ の位置ではすべて 0 となる。

バージより投入された土砂の着底位置に関する確率分布 P_r は、ホッパ開口部を土砂の代表長 d で分割した各位置から投入されるものと考え次式で与える。

$$P_r(x^*, y^*) = \left\{ \sum_{i=1}^N P_{smi}(x^*, y^*) \right\} / N \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 P_{smi} はホッパ開口部 i 位置より投入された土砂が区間 m における (x^*, y^*) 位置に着底する確率を表し、 N はホッパ開口部の分割総数である。最終的にマウンド高さ H は、バージ積載土砂体積を土砂間の空隙率も含めて V とすると次式で与えられる。

$$H(x^*, y^*) = V \cdot P_r(x^*, y^*) / d^2 \dots \dots \dots (5)$$

太田ら (1999) は、式 (1), (2) の σ および m に関して、数多くの模型実験および現地実験より粒径レイノルズ数を変数として次式に示す関係式を提案している。

$$\frac{m}{D} = C_{1m} \left(\frac{w_f d_{50}}{\nu} \right)^{-1/4} + C_{2m} \dots \dots \dots (6)$$

$$\frac{\sigma}{D} = C_{1\sigma} \left(\frac{w_f d_{50}}{\nu} \right)^{-1/4} + C_{2\sigma}$$

ここに、 D は投入水深、 d_{50} は土砂の中央粒径、 w_f は土砂の平均沈降速度であり、本研究では Rubey の式を用いた。

砂礫や捨石などの非粘着性粒子に対して、式 (6) に含まれる係数 $C_{1\sigma}$, $C_{2\sigma}$, C_{1m} および C_{2m} は表-1 に示す値を得ている。これらの値を用いて予測計算における水深区間長ごと ($\Delta z = 10 \sim 90$ cm の間を 20 cm 間隔ごと) に σ/D および m/D と $w_f d_{50}/\nu$ (ν : 流体の動粘性係数) の関係を示したのが図-2 と図-3 である。

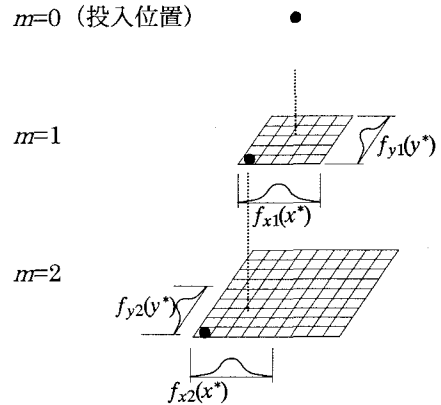


図-1 投入土砂の平面確率に関する模式図

表-1 確率パラメータ設定式の係数

Δz (cm)	$C_{1\sigma}$	$C_{2\sigma}$	C_{1m}	C_{2m}
10	0.4022	0.0104	0.0693	0.0031
30	0.6966	0.0180	0.2078	0.0093
50	0.8993	0.0233	0.3463	0.0155
70	1.0641	0.0275	0.4849	0.0217
90	1.2065	0.0312	0.6234	0.0279

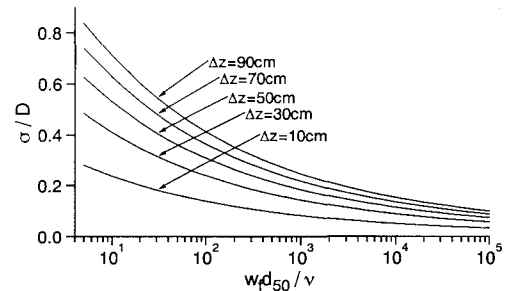


図-2 各水深区間長における σ/D の設定式

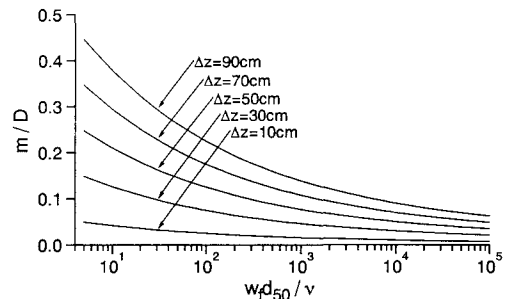


図-3 各水深区間長における m/D の設定式

(2) 標準偏差・平均値と解析水深区間長の関係

本確率モデルに含まれる標準偏差と平均値は、図-2 および 3 に示すように水深区間長によって変化する。そ

ここで、現場サイドにおける施工水深の変化にも対応できるように標準偏差および平均値と解析水深区間長の関係について以下に検討する。

まず任意の解析水深区間長 D_z における平均値 m_z は、平均値がマルコフチェーン理論に基づく水深区間長と線形増加にあることから、次式で与えられる。

$$m_z = m \frac{D_z}{D} \dots\dots\dots (7)$$

次に、任意の解析水深区間長 D_z における標準偏差 σ_z については理論的な取り扱いが困難なことから、本研究においては便宜上、数値解析により検討を行った。図-4は、一例として $\sigma/D=2.0$ の場合について、水深区間長 D_z 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。

$$\sigma_z = \frac{\sigma}{D} \left(\frac{D_z}{D} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

式(8)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、図-2に示す基準となる σ/D を用いて式(8)で換算できることになる。

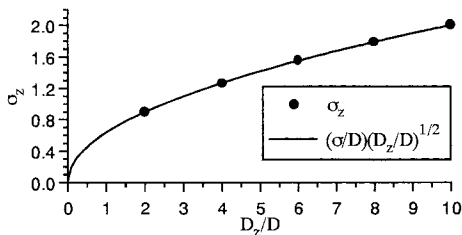


図-4 解析水深区間長における標準偏差値

3. 粘着性粒子を対象とした現地実験

(1) 実験概要

本研究のモデルは、本来捨石や土砂のような非粘着性粒子を対象としたものである。しかし、水底土砂処分においては粘土分が多く含まれるケースもあり、その場合には投入後の沈降過程が非粘着性粒子の場合とは異なることが知られている(矢内, 1996)。そこで、粘着性粒子の土砂投入を対象とした現地実験を実施した。

投入に使用した船舶は、600 m³積全開式土運船である。調査は、2004年8月3日～10月8日までの2ヶ月間実施した。堆積状況確認の深浅測量は、事前と事後の2回高精度D-GPS測位システムとナローマルチビーム測深ソナーを用いて実施した。投入海域の水深は、45 m～48 mである。

(2) 実験条件

表-2に現地実験条件を示す。浚渫土砂は粘着性の高

い土質であるため、グラブシャベルで浚渫して土運船へ移しても、土塊のような状態であった。投入は投入範囲の中心位置を目標に集中的に投入するようにした。

(3) 現地堆積状況

図-5に堆積深浅図を示す。土運船の投入範囲(投入目標中心: 図中の+印)には、高さ4 m程度の明確な堆積形状が見られる。現地の堆積状況を基に、土運船による浚渫土砂(シルト質土)の堆積形状予測に必要なパラメータ(標準偏差 σ)の設定に当たっては、式(6)に基づいて予備的な値を算定し、現地計測結果との比較より設定した。また、土運船が移動しながら土砂を投入しているため投入位置に関して以下の設定を行った。すなわち、土運船のホッパ開口開始から30秒程度で全土砂が投入されることから、航跡データのホッパ開口開始から30秒を有効投入時間と考え、図-6に示すように積載土量を10等分して投入するように設定した。

図-7は、解析結果と実測結果の比較を示したものである。このときの標準偏差 σ/D は0.65であり、解析結果は現地の堆積状況を良く再現している。この標準偏差

表-2 現地実験条件

使用船舶	600 m ³ 土運船
投入土砂の中央粒径	0.003～0.01 mm (粘土～シルト)
期間中の全投入数量	81,600 m ³

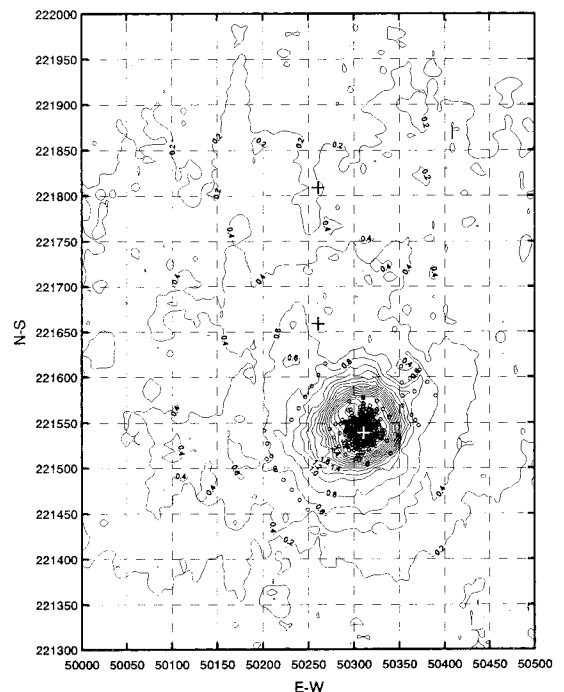


図-5 堆積深浅図

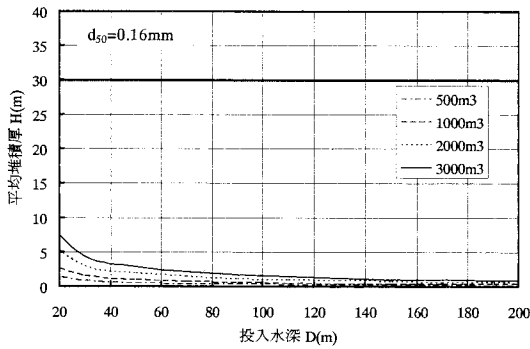
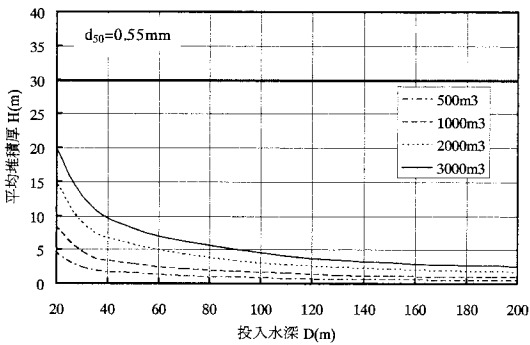
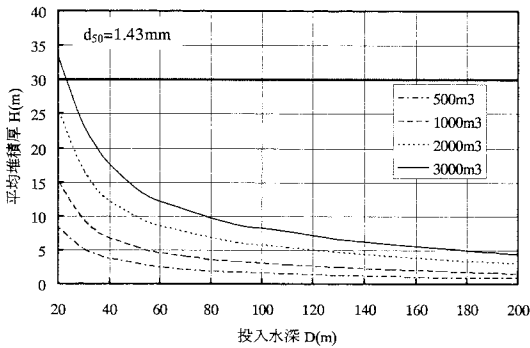
(a) $d_{50}=0.16\text{mm}$ (b) $d_{50}=0.55\text{mm}$ (c) $d_{50}=1.43\text{mm}$

図-8 平均堆積高

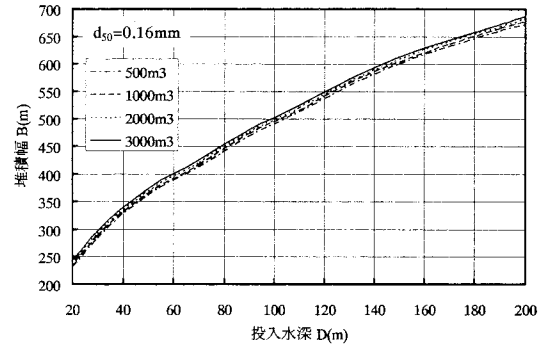
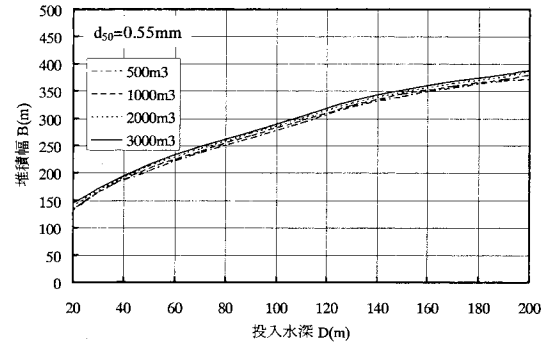
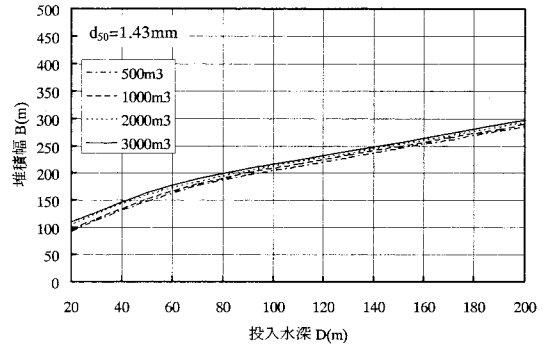
(a) $d_{50}=0.16\text{mm}$ (b) $d_{50}=0.55\text{mm}$ (c) $d_{50}=1.43\text{mm}$

図-9 最大堆積幅

堤 一高・内河栄作・半沢秀郎・島 正憲(1975):軟弱地盤上に投下された砂の状況調査-大型土捨船による砂投下実験-,土と基礎, Vol.23, No.11, pp. 57-63.
 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, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 769-773.
 松見吉晴・荒井 清・太田正規・矢内栄二・増田 稔(1998):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.
 武藤碩夫・吉井総介・石田 勉(1974):大規模埋立用底開バージによる土砂投下の研究, 三菱重工技報, Vol.11, No.1, pp. 92-104.
 矢内栄二(1996):海洋投棄底泥の沈降・分散過程, 土木学会論文集, No.535, pp. 109-119.