

捨石マウンド築造時のバージ船の配船位置について

松見吉晴*・岸口孝文**

1. まえがき

海洋空間の有効利用を目的として開発、施工が進められている海域制御構造物の1つである重力式消波構造物は、基礎部に捨石マウンドを有する構造形式である。その捨石マウンド築造には、一般に底開式バージ船による捨石投入工法が採用される。この工法は施工効率が極めて良いが、海底での捨石の散乱および連続投入の際の配船位置の設定によってはマウンド間の継目に不陸部を生じるなど施工管理の点から問題を残している。さらに今後海洋空間として注目される大水深域における施工の場合、捨石基礎部の膨大化に伴い海洋工事における捨石マウンド築造工事の占める比率が増大することから、所定の設計断面を効率よく築造する配船位置に関して十分に検討しておく必要がある。

従来、底開式バージから投入された捨石群の堆積形状に関する予測手法については、小田ら(1987, 1989)が3次元拡散理論に基づいた予測式を提案しており、1000 m³ 積バージを対象とした1点投入および多点投入の場合に対する予測式の適合性が実験結果との比較により確認されている。小田らの予測式には、長さの次元を有する実験係数(拡がり係数と呼ばれている)が含まれていることから、積載体積量が異なるバージ船を対象とする場合、その都度模型実験より拡がり係数を求める必要がある、汎用性の点から問題を残している。

本研究は、捨石投入工法に関する施工管理計画システムの確立を目指し、まず、捨石群の海中落下に伴う散乱の主たる要因が不規則な揺動外力による捨石単粒子の落下動揺によることに着目し、静水中における捨石単粒子の落下実験より捨石の落下に伴う散乱特性を統計的に検討し、その結果を基に捨石マウンドの堆積形状に関する確率論的な予測モデルを提案し、その予測モデルを用いて連続投入したときの捨石マウンド間の不陸部を最小にするバージ船の配船間隔と施工水深の関係を示したものである。

2. 静水中の捨石単粒子の落下に伴う散乱特性

(1) 実験の概要

本研究では、落下する捨石の散乱に関する確率論的な性状を明確にするため、静水中における捨石単粒子の落下実験を行った。実験に用いた水槽は、断面1.1×1.1 m、高さ2 mの水槽である。使用した捨石は、実スケールでの重量が200 kgf/個の捨石を対象として、その縮尺1/20, 1/14, 1/12の3種類のコンクリート材料用砕石(以下、CASE-A, B, Cと呼ぶ)である。なお、この捨石を球形に換算したときの各粒径 d は、それぞれ $d=2.8, 3.7, 4.3$ cmである。水深は、各粒径についてそれぞれ120, 160, 185 cmとした。

投入方法は、捨石を水槽の底中心点に向かって水面直下より各粒径毎に個別に計3000個落下させた。投入された捨石の落下位置の計測に当っては、座標に関して3次元解析が出来るように2台のビデオカメラを直角方向に平面配置することにより行った。落下位置に関する統計量としては、図-1に示すように水深を6等分した各測定区間における捨石の落下位置(x, y)および各区間における捨石の x, y 方向の移動距離(dy, dy), 並びにそれぞれの値に関する平均値および標準偏差を求めた。

(2) 捨石の散乱に関する確率論的な性状

ここでは、水深を6等分した各区間における捨石の散乱を表示する捨石の移動距離(dx, dy)について統計的

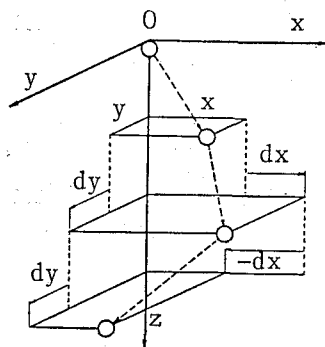


図-1 落下位置に関する説明図

* 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

** 学会員 鳥取大学大学院 工学研究科

な検討を行う。

図-2 は、CASE-A の場合の各区間毎の dx, dy に関する頻度分布を示したものである。この頻度分布を作成するときの階級については、 dx および dy を捨石の粒径 d で無次元化した値に関して階級幅を 1 としている。この図より、 x および y 方向共に第 1 区間を除いた他の区間の分布形状は互いにほぼ等しく、また x と y 方向の分布形状を比較すると、両者は同等の確率論的な性状を示すことが推測できる。なお、他の粒径の捨石の分布形状についてもこの CASE-A と同様の性状が認められている。

図-3 および 図-4 は、各区間における捨石の無次元移動距離に関する平均値 ($dx_m/d, dy_m/d$) および標準偏差 (σ_x, σ_y) の水深方向の変化を示したものである。なお、図-4 のシンボルは 図-3 と同じである。図-3 よ

り、各区間における dx_m/d および dy_m/d は、それぞれ水深によって変動するが、その変動幅は捨石の粒径および水深に関係なく粒径の $\pm 10\%$ 程度以下と小さい値である。一方、標準偏差は第 1 区間 ($z/d \div 14.3$) での値が他の区間における値に比べて小さくなっているが、第 2 区間 ($z/d \div 28.6$) 以下の σ_x, σ_y は捨石の粒径に関係なくほぼ一定値をとることが認められる。

このような結果より、第 1 区間のデータを除いた他の区間における捨石の無次元移動距離に関する平均値と標準偏差を算術平均して示したのが表-1 である。この表より、各 CASE における平均値 ($dx_m/d, dy_m/d$) は x 方向および y 方向共にほぼゼロであり、また標準偏差 (σ_x, σ_y) については各 CASE において $\sigma_x \div \sigma_y$ とみなしても問題なかろう。

以上のことより、水深方向に等分割した各区間における捨石の移動距離に関する確率論的な性状としては、 x および y 方向共に同一であると言えよう。従って、以下に述べる捨石マウンドの堆積形状に関する予測モデルでは、水深を等分割した各区間における捨石の移動距離の

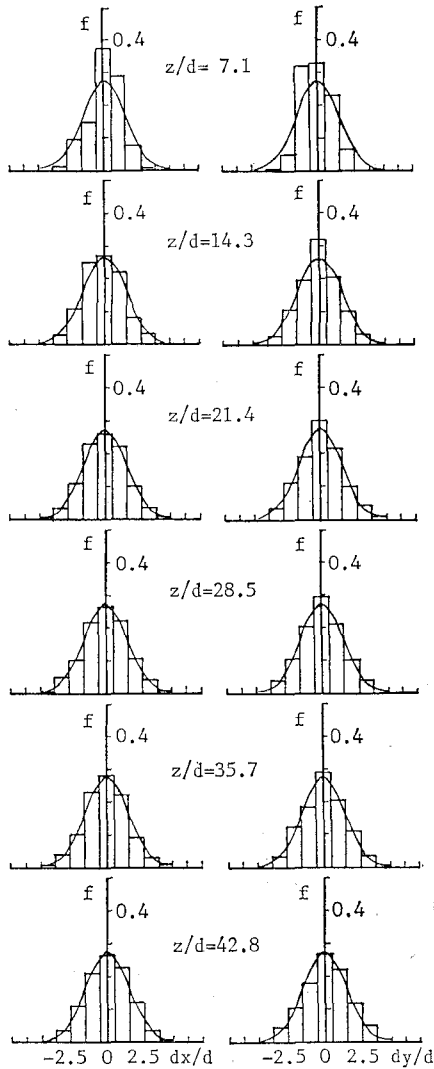


図-2 捨石の移動距離 ($dx/d, dy/d$) の頻度分布

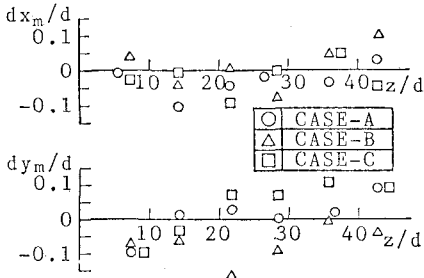


図-3 捨石の移動距離の平均値と水深の関係

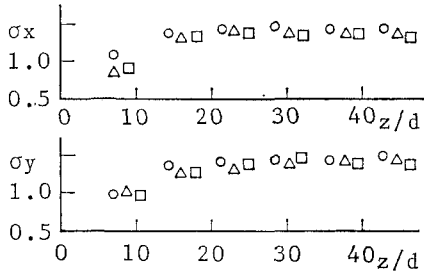


図-4 捨石の移動距離の標準偏差と水深の関係

表-1 捨石の移動距離に関する統計量

CASE	X方向		Y方向	
	dx_m/d	σ_x	dy_m/d	σ_y
A	-0.03	1.43	0.03	1.43
B	0.01	1.35	-0.06	1.37
C	-0.02	1.34	0.05	1.37

平均値については x および y 方向共にゼロとおき、またその標準偏差については $(\sigma x_m + \sigma y_m)/2$ で定義することとした。

3. 捨石マウンドの堆積形状に関する予測モデル

(1) 捨石単粒子の落下位置に関する確率モデル

2. で述べた水深方向に分割した各区間における捨石の移動距離に関する確率論的な性状と、図-2 に示す捨石の移動距離に関する頻度分布の形状より、各区間における捨石の x および y 方向の移動距離に関する分布に対して次式で示す平均値がゼロの正規分布を仮定する。

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

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

ここに、 $\sigma = (\sigma x_m + \sigma y_m)/2$ 、 $x^* = x/d$ 、 $y^* = y/d$ である。図-2 において曲線は式 (1) および (2) による計算結果を示したもので、第 1 区間を除いて実験結果とよく一致することがわかる。また、他のケースについても同様の結果を得ていることから、水深を等分割した各区間の捨石の移動距離に関する確率分布に対する正規分布の適合性が確認できる。

各区間毎の捨石の移動距離に関する確率特性としては、図-2 から明かなように、同一の標準偏差を持った確率分布で近似できることから定常とみなせる。従って、捨石がいま存在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、捨石が存在する区間の捨石の移動距離に関する確率分布によって一義的に決定されることになる。そこで、この捨石の落下に伴う散乱に関する確率過程に対して、本研究ではマルコフ・チェーンを適用し、分割された各水深での捨石単粒子の落下位置に関する確率モデルを誘導することにした。

捨石単粒子の投入点から最終着底位置までの水平方向の最長距離を r ($=x^*=y^*$) とすると、捨石単粒子の落

下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。

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

(r : 正の整数)

また、 x および y 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、次式のように表示できる。

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

ただし、

$$\begin{aligned} i-j=0 & \quad p(i, j) = p_0 \\ i-j=-k & \quad p(i, j) = p_k^- \\ i-j=k & \quad p(i, j) = p_k^+ \\ |i-j| > k & \quad p(i, j) = 0 \end{aligned} \quad (k=1, 2, \dots, 6)$$

ここに、 p_0, p_k は式 (1), (2) より算定される捨石の移動距離が 0 および k の場合の確率で、添字の $\pm$ は移動方向を表す。なお、 k については式 (1), (2) が有限値を持つ範囲とした。また、投入時の捨石の位置に関する確率ベクトル Π は、捨石の投入点を図-1 に示す座標原点に固定していることから次式で与えられる。

$$\Pi(0) = [\underbrace{0, \dots, 0}_{r \text{ 個}}, \underbrace{1, 0, \dots, 0}_{r \text{ 個}}] \quad \dots\dots\dots(5)$$

以上のことより、各水深における捨石の x および y 方向の落下位置に関する確率分布は、それぞれ次式によって与えられることになる。

$$\Pi(m) = \Pi(m-1) \cdot P \quad \dots\dots\dots(6)$$

図-5 は、CASE-B の場合の捨石単粒子の落下位置の頻度分布について実験結果と計算結果を比較して示したものである。この図から明かなように、計算結果は実験結果とよく一致しており、捨石単粒子の落下位置に関する x および y 方向の確率分布に対する本予測モデルの適合性が確認できる。また、他の粒径の場合についても同様の結果を得ている。

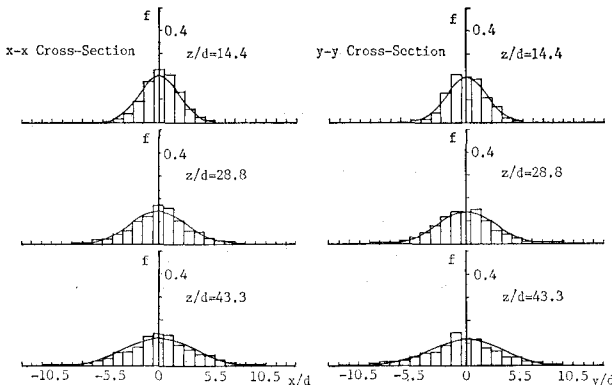


図-5 捨石単粒子の落下位置に関する頻度分布

次に、捨石単粒子の落下位置に関する平面的な確率分布を決定するため、 x と y 方向の落下位置に関する独立性について検討する。表-2 は、各区間における dx/d と dy/d の相関係数を示したものである。この表より、第 1 区間を除いて相関係数は非常に小さいことから、各区間における捨石の x と y 方向の移動距離に関しては独立性があると言えよう。従って、捨石単粒子の落下位置に関する平面的な確率分布 $p_r(x^*, y^*)$ は、次式で与えられる。

$$p_r(x^*, y^*) = \Pi_x \cdot \Pi_y \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 Π_x, Π_y は式 (6) より算定される、 x, y 方向の捨石単粒子の落下位置に関する確率分

表-2 dx/d と dy/d の相関係数

測定区間	CASE-A	CASE-B	CASE-C
I	0.176	0.129	0.136
II	0.019	0.006	-0.012
III	-0.002	0.013	-0.021
IV	0.017	0.003	-0.047
V	-0.008	0.025	-0.044
VI	0.032	0.023	-0.058

布を表す。

(2) 捨石マウンドの堆積形状に関する予測モデル

バージより投入された捨石群の海底での堆積形状は、バージの積載体積と海底における捨石群の落下位置に関する確率分布の積として求められる。

バージより投入された捨石群の着底位置に関する確率分布については、図-6 に示すようにバージのホップ開口部を捨石粒径 d の幅で分割した各位置から捨石が個々に投入されるものと考え次式で与える。

$$Pr(x^*, y^*) = \left\{ \sum_{i=1}^N pri(x^*, y^*) \right\} / N \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $Pr(x^*, y^*)$ は (x^*, y^*) 位置に着底する捨石群の確率、 $pri(x^*, y^*)$ はホップ開口部の i 位置より落下した捨石単粒子が (x^*, y^*) 位置に着底する確率を表し、 N はホップ開口部の分割総数である。従って、捨石マウンドの (x^*, y^*) 位置における堆積高さ h は、バージの積載体積を V とすると次式で与えられる。

$$h = V \cdot Pr(x^*, y^*) / d^2 \dots\dots\dots (8)$$

次に、上述した捨石マウンドの堆積形状に関する本予測モデルの妥当性について、捨石重量 200 kgf/個を対象に 100 m³ 積バージの 1/20 模型を用いた静水中における捨石マウンドの堆積形状に関する実験結果(奥出ら, 1982) と、この実験条件にはほぼ一致する CASE-A に対する計算結果との比較検討を行う。なお、計算においてはバージのホップ部 (模型サイズ: 70×24.4 cm) を

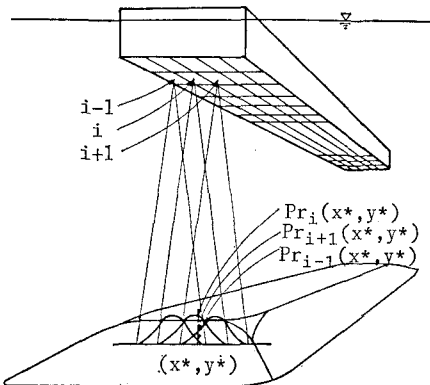


図-6 捨石着底位置の確率モデル説明図

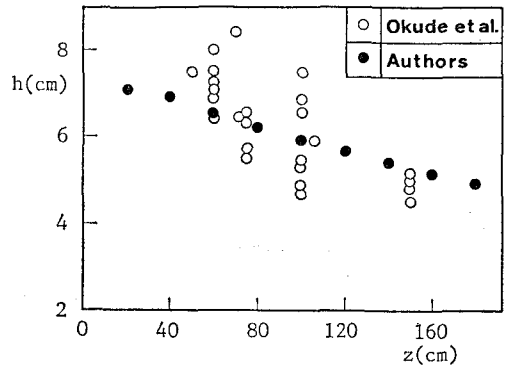


図-7 マウンド高さに関する計算結果と実験結果の比較

25×9 個に分割している。図-7 は、各落下水深における捨石マウンド中央部の堆積高さ h について本予測モデルによる計算結果と奥出らの実験結果を示したものである。この図によると、計算結果は奥出らの実験結果とよく一致し、また計算結果が実験結果に見られる落下水深によるマウンドの堆積高さの変化をほぼ再現していることから、本予測モデルの妥当性が確認できる。

4. バージの配船間隔について

ここでは、バージによる多点連続投入を対象にバージの配船間隔とマウンド間の継目に生じる不陸部との関係について検討を加える。

図-8 は、2 隻のバージが船幅方向に捨石粒径の 2 倍の間隔で配船された場合と 12 倍離れた場合のマウンドの堆積形状の水深変化を示したものである。なお、この堆積形状は船首尾方向の前半分を示したものである。この図より明かなように、配船間隔の狭い (a) の場合の不陸部は水深が浅いときから小さく、2 つのマウンドは水深が深くなるに伴って平坦化され 1 つのマウンドとな

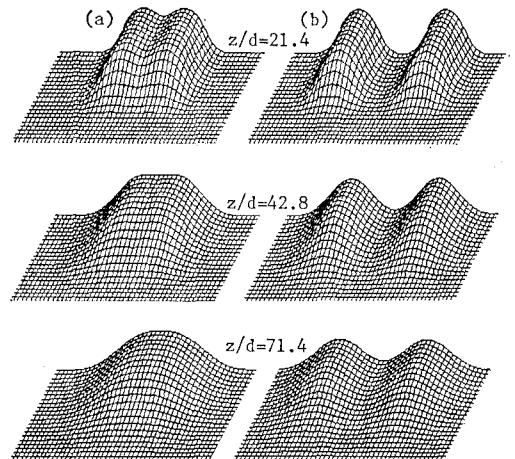


図-8 2 隻のバージによるマウンド形状の計算結果

る。一方、配船間隔が広い (b) の場合、2つのマウンドが1つに平坦化されるまでに要する水深が (a) に比べて極端に深くなることが推測できる。このようなことから、バージの配船間隔の決定に際しては、施工水深を十分に考慮して行う必要があると言える。

図—9 および 10 は、 100 m^3 積バージによる船幅方向および船首尾方向に多点連続投入するときの捨石マウンド間の不陸部の深さとバージの配船間隔の関係を各水深毎に示したものである。なお、図中縦軸の δ/H は、2隻のバージの1回投入によって築造された捨石マウンド中央部の船幅方向および船首尾方向の断面における不陸部の深さ δ と捨石マウンドの最大高さ H の比である。この両図より、各施工水深におけるマウンド間の不陸部を最小にするバージ船の船幅および船首尾方向の配船間隔が決定できることになる。また、両図を比較すると、同じ配船間隔および施工水深であっても配船方向の違いによって δ/H の値に差が認められる。すなわち、船首尾方

向の場合は、船幅方向における δ/H と同じ値を生じさせる配船間隔が各施工水深において狭くなる。以上のことから、バージによる多点連続投入を行う場合の配船間隔の決定に当っては、施工水深だけでなく配船方向に関しても重要なパラメータになると指摘できる。

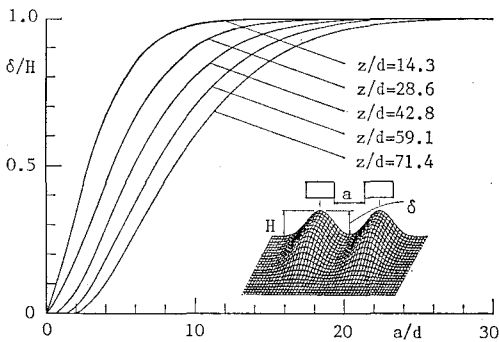
同一箇所における多数回投入の場合の捨石マウンドの堆積形状に対する本予測モデルの適用性については、本予測モデルがバージのホップ開口部に配置させた捨石群の着底位置に関する確率分布とバージの積載体積の積によってマウンド堆積高を算定する方法であるから、式 (8) 中の積載体積を投入回数倍したものに置き換えることによって適用できる。また、多数回投入の場合の配船間隔については、マウンドの堆積高さが上述したように1回投入の場合の投入回数倍になることから、不陸部の深さ δ と捨石マウンドの最大高さ H の比が1回投入の場合と等しくなり、図—9 および 10 がそのまま適用できることになる。

5. 結 語

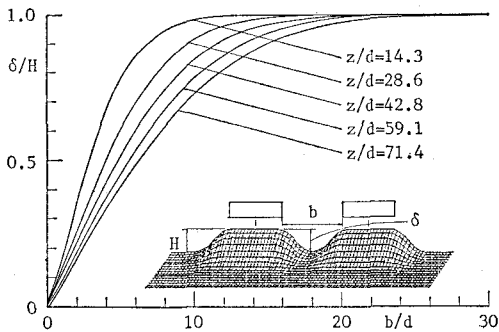
本研究では、静水中を落下する捨石単粒子に関する実験結果より得られた捨石単粒子の散乱に関する確率論的な性状を基に、バージから投入された捨石マウンドの堆積形状に関する確率論的な予測モデルを提案し、本予測モデルの適合性が奥出らの実験結果との比較より確認できた。また、連続投入したときの捨石マウンド間の継目の不陸部の深さと配船間隔の関係を施工水深について明示した。今後は、多数回投入の場合の捨石マウンドの堆積形状に対する本予測モデルの適合性並びに汎用性を検証するため、捨石マウンド法面における捨石の転倒・滑落といった現象の確率論的なモデル化、並びにこの種の研究において重要な問題である縮尺効果について捨石の粒径を種々変化させた実験より検討を加えて行く予定である。

参 考 文 献

- 奥出 律・山谷弘幸・松本 茂 (1982): 底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験, 港湾技術研究所報告, 21巻, 4号, pp. 132~171.
- 小田一紀・沢田充弘・樋口俊光・岩田 潔 (1987): 底開式バ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, 第34回海岸工学講演会論文集, 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, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 814~818.



図—9 バージの配船間隔と不陸部の深さ (船幅方向の場合)



図—10 バージの配船間隔と不陸部の深さ (船首尾方向の場合)