

II-385

捨石投入工法による捨石マウンドの堆積形状予測について

鳥取大学工学部 正会員 松見吉晴

1. まえがき 消波構造物の基礎部の捨石マウンド築造には、施工効率の点から底開式バージによる捨石投入工法が用いられるが、この工法は施工管理の点から、海底での捨石の散乱とか、連続投入した場合のマウンド間の継目に生じる不陸部などの問題がある。さらにまた、大水深防波堤の場合、防波堤の全工事における捨石基礎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捨石投入工法に関する管理システムの開発が必要になろう。従来、捨石のような大粒径の粒子群の堆積形状に関する予測手法については、小田ら¹⁾が3次元拡散方程式に基づく方法を提案し、実験値とのよい一致を示している。本研究は、水中を落下する個々の捨石の散乱が捨石に作用する揺動力の不規則性によるものと考え、捨石の落下の運動方程式に確率微分方程式を用いて捨石群の堆積形状を確率論的に予測しようとしたものである。なお、本予測モデルでは、堆積形状だけを目的としていることから、捨石群の水深方向の拡がりに関しては無視して理論展開を行っている。

2. 解析方法 1) 基礎式: 水中を落下する1個の捨石に関する運動方程式は、揺動力(不規則変動外力: X方向成分 $F_x(t)$, y方向成分 $F_y(t)$)を考慮し、図-1に示す座標系に対して次式のように表される。

$$\frac{du}{dt} = -Au^2 + \beta F_x(t), \quad \frac{dv}{dt} = -Av^2 + \beta F_y(t) \quad (1)$$

ここに、 $A = C_D A_p \rho / \{2(M + C_{MA} m)\}$, $\beta = \alpha / (M + C_{MA} m)$, ρ : 流体の密度, M : 捨石の質量, m : 捨石と同体積の流体の質量, A_p : 捨石の射影面積, C_{MA} , C_D : 捨石の付加質量係数, 抵抗係数, α : 係数, u, v : x, y方向の捨石粒子の移動速度である。式(1)は非線形の確率微分方程式であるため、ここでは計算の各時間ステップにおける捨石の移動速度を一定(U_x, V_y)と仮定し、式(1)の右辺第1項を次式で与えて線形化した。

$$u^2 = U_x \cdot u, \quad v^2 = V_y \cdot v \quad (2)$$

$F_x(t), F_y(t)$ については、林ら²⁾のようにx, y方向に独立で、強度 γ をもつ平均値0の正規性外力とすると、任意の時間における捨石の位置に関する分散 σ^2 および確率密度関数 p_r は次式のように導かれる。

$$\sigma_x^2 = \frac{\gamma \beta^2}{(AU_x)^3} \left\{ AU_x t - \frac{3}{2} + 2 \exp(-AU_x t) - \frac{1}{2} \exp(-2AU_x t) \right\} \quad (3)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\gamma \beta^2}{(AV_y)^3} \left\{ AV_y t - \frac{3}{2} + 2 \exp(-AV_y t) - \frac{1}{2} \exp(-2AV_y t) \right\}$$

$$p_r(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x^2} \exp \left\{ -\frac{(x - \bar{u}t)^2}{2\sigma_x^2} \right\}, \quad p_r(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y^2} \exp \left\{ -\frac{(y - \bar{v}t)^2}{2\sigma_y^2} \right\} \quad (4)$$

ここに、 $\bar{u}, \bar{v}$ はx, y方向の捨石の平均移動速度である。

2) 固定値 U_x, V_y : 固定値 U_x, V_y は、外力 $F_x(t), F_y(t)$ の影響による粒子速度であることから、式(1)に対して粒子の移動距離を用いて誘導される、任意の位置における粒子速度の標準偏差 σ_u および σ_v より、 $U_x = \sigma_u$ および $V_y = \sigma_v$ と与えることにした。3) 捨石マウンドの堆積形状: 捨石マウンドの堆積形状は、バージによる1回当りの投石量とマウンドの空隙率および海底における捨石の着底位置に関する確率分布の積によって求められる。この確率分布については、図-2に示すようにバージのホップ部を微小間隔(捨石粒径 d)で区分した各位値から、捨石が個々に投入落下するものと考え、海底のj位置に関する確率 $p(j)$ は次式によって与えられる。

$$p(j) = \left\{ \sum_{i=1}^N p_i(j) \right\} / N \quad (5)$$

ここに $p_i(j)$ は、図-2に示すホップのi位置より落下した

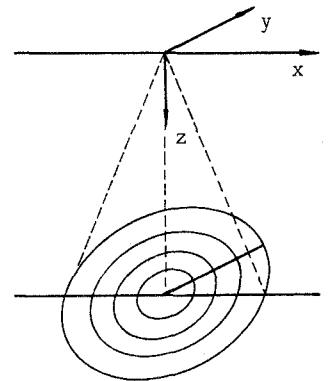


図-1 座標系

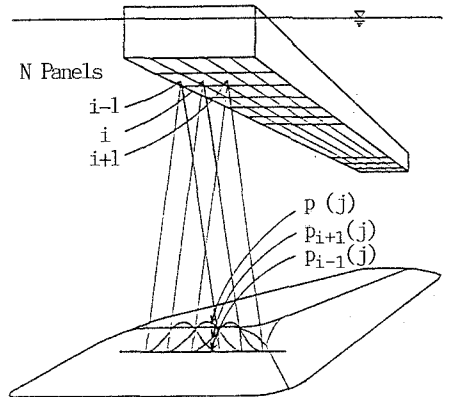


図-2 捨石着底位置の確率モデル

捨石が海底の j 位置に着底する確率である。なお、本予測モデルではマウンド法面での捨石の滑落を考慮していない。

3. 解析結果 1) 堆積形状について 図-3は、奥出ら³⁾の実験で使用された 100m^3 積み底開ページの1/20模型(ホッパー開口部: $70 \times 8.6\text{cm}$)を対象に計算された捨石マウンドの堆積形状を示したものである。なお、計算に用いた捨石の粒径、マウンドの空隙率は 2.5cm および 0.44 で、正規性外力の強度 γ については γ を種々変化させたときの捨石の着底分布に関する計算と実験結果の比較より、 $\gamma = 2.5 \times 10^5$ が妥当な値であると判断し用いている。また、この計算結果における中央断面の形状について、実験結果と比較したのが図-4であって、図中縦軸より左側が $x-x$ 断面形状、右側が $y-y$ 断面形状を表す。この図より、 $y-y$ 断面において計算結果が端部を長めに予測するものの、本予測モデルは実験結果を比較的良好に再現していることがわかる。

2) マウンド幅の水深変化について 図-5は、捨石マウンド最大幅の水深変化に関する計算結果と実験結果を比較して示したもので、図中実線で示す計算結果の最大幅は式(5)の確率分布 $p(j)$ の値が $1/N$ (N : 捨石の総個数) 以下になる領域には捨石が存在しないとして求めている。この図より、 x 方向の計算結果は実験結果における変化特性をよく再現しているが、 y 方向については両者の変化特性に大きな差が認められる。奥出らによると、実験結果における x 、 y 方向の変化特性の違いがページより投入された捨石群の散乱の特徴であるが、本計算では揺動力を表す正規性外力の強さを x および y 方向とも同じ値にしていることから、この実験結果に現れる特徴を再現するまでに至っていない。

4. あとがき 捨石の散乱範囲を左右する x および y 方向の γ の値については、水深による変化も含めて今後検討を加えていく予定である。また、本予測モデルでは、ページのポップ部が瞬間的に開き捨石群も瞬間的に落下するものとして取扱っているが、このポップ開口に要する投石時間は捨石マウンドの堆積形状に影響するものと推測されることから、投石時間を計算の初期条件に取り入れる必要がある。

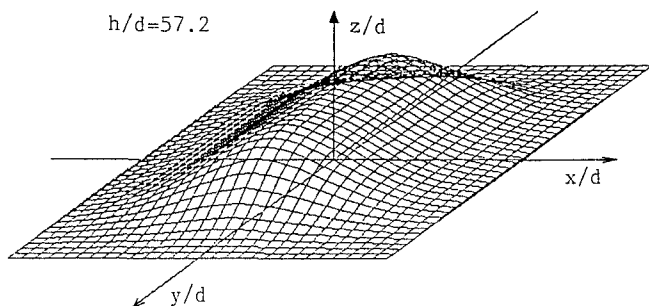


図-3 捨石マウンドの堆積形状

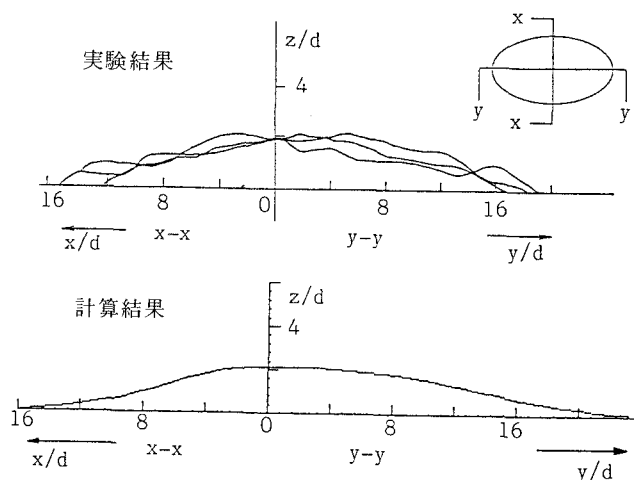


図-4 実験結果と計算結果の比較

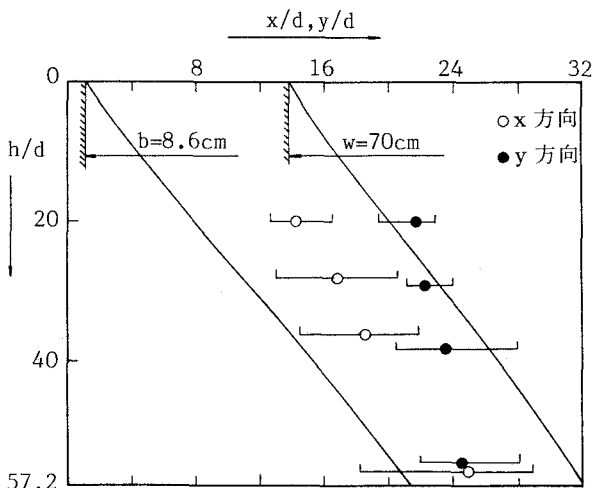


図-5 捨石マウンド幅の水深変化

【参考文献】1)小田一紀他:底開式ペ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回海講論文集,pp.281-285,1987. 2)林泰造他:流体中を落下する粒子の乱流特性について,第24回水講論文集,pp.7-12,1980. 3)奥出律他:底開式ページによる捨石マウンドの造成に関する実験,港研報告,Vol.21, No.4, pp.131-171, 1982.