

底開式バージによる捨石マウンドの堆積形状に関する予測モデル

愛媛県庁 正会員 ○ 泉 一幸
鳥取大学工学部 正会員 松見吉晴
㈱フジタ 正会員 岸口孝文

1. はじめに： 著者ら¹⁾は、既に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に関する確率論的な性状を検討し、その結果を基に底開式バージによる捨石マウンドの堆積形状の予測モデルに対してマルコフ・チェーンを適用した確率モデルを提案している。この予測モデルは、捨石マウンドの斜面における捨石の滑動・転落が考慮されていないことから、多数回投入へ適用する場合に、算定結果に対して補正を施す必要がある。そこで本研究は、底開式バージの模型船を用いた捨石多数回投入実験によるマウンドの堆積形状と、岩塊集合体の動力学的挙動が数値解析できる個別要素法 (DEM) を用いたマウンド斜面での捨石の衝突並びにそれに伴う滑動・転落を考慮したマウンドの堆積形状に関する計算結果より、捨石マウンドの堆積形状に関する著者らの予測モデルの補正方法を検討したものである。

2. 実験の概要： 実験で用いた模型バージは、ホッパ積載量が100m³ 積のスプリット式バージの1/20模型である。ホッパ部の開口速度は、ホッパ部分の船首尾位置の2カ所にワイヤーを取り付け、その伸縮速度によって調節した。実験は、断面2×2m、高さ1.5mの水槽を用いて、模型バージを水槽中央部に固定し、マウンドの斜面勾配が一定になるまで投入を繰り返し行った。堆積形状の測定は、船幅および船首尾方向から2台のビデオカメラで撮影を行った。実験に用いた捨石は、重量が20～40gf/個で、平均粒径は球に換算して2.8cmである。

3. DEMの概要： DEMは、岩塊を剛体要素とみなし、岩塊のもつ弾性的および非弾性的性質を要素の接触点間に挿入した弾性スプリング (剛性定数K) と粘性ダッシュボット (粘性定数 η) によって表現し、要素の並進および回転に関する運動方程式を全ての要素について連立して解くことにより、運動状態から静止状態に至る要素の挙動を解析するものである。いま、この手法を流体中を運動する捨石群に適用すると、その並進u、vおよび回転 ϕ に関する運動方程式は次式に示す逐次近似式で与えられる。

$$(m+C_m\rho_wV)\ddot{u}_i=-\eta[\dot{u}]_{i-\Delta t}-K[u]_{i-\Delta t}-\frac{1}{2}\rho_wC_{Dd}\left[\dot{u}\right]_{i-\Delta t}\left[\dot{u}\right]_{i-\Delta t}+(\rho_s-\rho_w)Vg$$

$$(m+C_m\rho_wV)\ddot{v}_i=-\eta[\dot{v}]_{i-\Delta t}-K[v]_{i-\Delta t}-\frac{1}{2}\rho_wC_{Dd}\left[\dot{v}\right]_{i-\Delta t}\left[\dot{v}\right]_{i-\Delta t}$$

$$I\ddot{\phi}_i=-\left(\eta\left[\dot{\phi}\right]_{i-\Delta t}+K\left[\phi\right]_{i-\Delta t}\right)\frac{d^2}{4}$$

ここに、m、V、I、 ρ_s 、およびdは、それぞれ捨石の質量、体積、慣性モーメント、密度および粒径、 ρ_w は流体の密度、 Δt は計算の時間増分である。なお、抗力係数 C_D および付加質量係数 C_m には $C_D=1.0$ 、 $C_m=2.0$ を採用している。

DEMで使用する捨石要素間の材料定数は、木山ら²⁾の決定方法を参考にして、捨石接触時の法線方向の剛性定数を $K_n/\rho_s g=3.64\times 10^4\text{cm}$ とした。その他の法線方向の粘性定数、接線方向の剛性定数、粘性定数は、それぞれ次式で与えられる。

$$\eta_n=2\sqrt{mK_n}\quad , \quad K_s=K_n\cdot S \quad , \quad \eta_s=\eta_n\sqrt{S} \quad S:\text{減速率}=0.25$$

一方、捨石と海底面との衝突については、砂層による衝撃の緩和作用を考慮する必要がある。本計算では、上述した法線方向の材料定数値 K_n 、 η_n に関してそれぞれ1/5倍した値を用いている。なお、要素間の摩擦抵抗を表す摩擦スライダの定数には、近似的に粒子の内部摩擦角を用いて $\tan 30^\circ$ ³⁾で、また捨石と海底面との内部摩擦は、 $\tan 10^\circ$ と仮定した。計算の時間間隔は、解の安定性と収束性を得るために、できるだけ小さくとる必要があるが、計算ステップが増加し、計算誤差の累積の増大を招くことにもなることから、本計算では木山ら²⁾を参考に $\Delta t=1.0\times 10^{-4}\text{sec}$ とした。

DEM法の計算における捨石の初期位置および初期速度については次のように決定した。初期位置は、確率モデルより算定された捨石マウンドの堆積形状に捨石要素を密に配置させることによって与える。初期速度は、捨石単粒子の実験より得られた沈降速度 (定常状態; 60.0cm/sec) を各捨石位置における落下速度として与える。多数回投入の捨石マウンドの堆積形状の計算に当っては、1投入毎に捨石要素の挙動が総て静止するまで計算を行うことによって得られた捨石マウンド上方より、次の捨石群を落下させ、計9回投入の計算を行った。

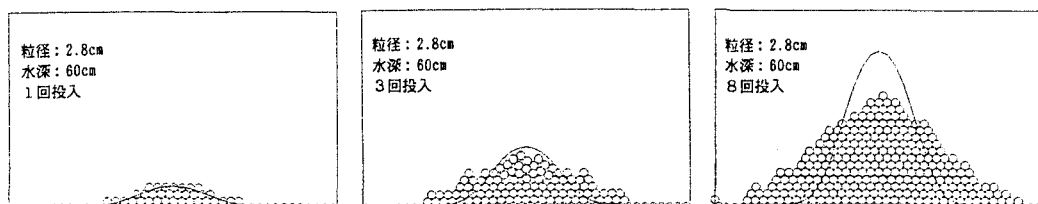


図-1 捨石マウンドの堆積形状

4. 捨石マウンドの堆積形状に関する補正モデル: DEM法による捨石マウンドの堆積形状は、図-1に示すように投入回数の増加に伴って2等辺三角形に近似できる。計算結果よりマウンド形状を2等辺三角形にモデル化して勾配 θ を求めると、図-2に示すように投入回数 n の増加に伴って 40° 付近の値に漸近することが認められる。そこで本研究では、捨石マウンドの斜面の最大勾配を $\theta = 40^\circ$ と定義した。一方、実験結果より捨石マウンド幅は投入回数に関係なくほぼ一定値をとること、さらに堆積形状が図-1に示す計算結果と同様に台形から2等辺三角形へ移行することが確認された。以上の結果を参考にして、著者の予測モデルに対する補正モデルとして図-3に示すように、 $\ln \cdot \sin \theta \leq Hn$ のときは斜線部AとBが等しくなるように五角形に近似し、 $\ln \cdot \sin \theta \geq Hn$ のときは2等辺三角形に近似するモデルを考案した。補正モデルの堆積幅 Bn および堆積高さ Hn は、表-1に示すように実験結果の堆積幅 B が予測モデルの堆積幅 Bmn の約1.39倍、堆積高さ H が予測モデルの堆積高さ Hmn の0.5~0.6倍となることから、次式で与えることにした。

$$Bn = a \cdot Bmn, \quad Hn = b \cdot Hmn \quad (a = 1.39, b = 0.54)$$

なお、 Bmn については、実験結果より堆積幅の投入回数による変化が認められなかったため、 $\ln \cdot \sin \theta \leq Hn$ の条件では1回投入の値を代表値として用いた。

図-4は、水深120cmのときの実験結果と、補正モデルによる計算結果を比較したもので、図中丸印が堆積幅を表し、三角印が堆積高さである。この図より、堆積幅については、本補正モデルが堆積形状を五角形で近似している間、堆積幅を一定値としていることから、実験結果を10%程度過小に評価している。一方、堆積高さは堆積形状モデルが五角形から2等辺三角形に変化してから実験結果と差異が生じ出しているが、本補正方法の妥当性が確認できよう。

【参考文献】

- 1) 松見・岸口: 捨石マウンド築造時のバースの配船位置について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 769-773, 1990
- 2) 木山・藤村: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文報告集, pp. 137-146, 1983
- 3) 小田・重松: DEM法とMAC法の併用による粒子群の沈降分散挙動のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 759-763, 1990

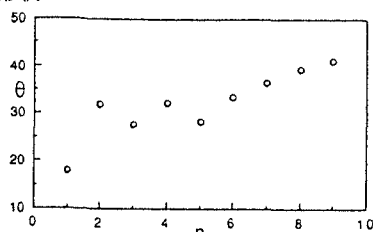


図-2 マウンド勾配の変化

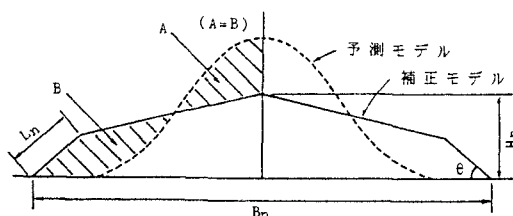


図-3 捨石マウンド形状の補正モデル

表-1 実験結果と予測モデルによる堆積幅と堆積高さ(水深: 60cm)

n	B [cm]	Bmn [cm]	Bn/Bmn	H [cm]	Hmn [cm]	Hn/Hmn
1	79.88	57.40	1.39	3.34	6.69	0.50
2	80.12	57.40	1.40	6.63	13.38	0.50
3	79.89	57.40	1.39	11.03	20.07	0.55
4	79.02	57.40	1.38	15.84	26.77	0.59
5	79.45	57.40	1.38	18.30	33.46	0.55
6	79.62	57.40	1.39	22.59	40.15	0.56
7	80.78	57.40	1.41	25.42	46.84	0.54

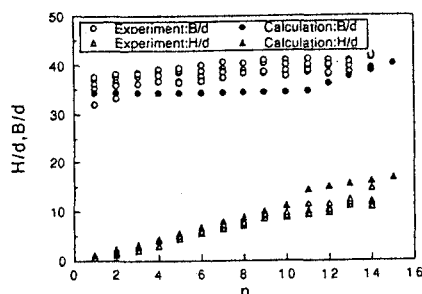


図-4 実験結果と補正結果