

捨石マウンド法面における捨石の滑落に関する数値計算

若築建設 正会員 ○嘉藤聖治
鳥取大学 正会員 松見吉晴

1. はじめに: 著者の1人¹⁾は、既に底開式バージより投入された捨石群の堆積形状予測に関してマルコフチェーンを用いた確率モデルを提案しているが、捨石の海底面及びマウンド法面での衝突による捨石の転落・滑落現象を考慮していないことから、特に水深が浅い場合に問題を残している。そこで、本研究は、捨石群の堆積形状予測モデルに、捨石群の海底面及び捨石間の衝突による捨石の滑落現象を力学論的に取り扱うために、離散剛要素法を導入するときの材料定数に関する基礎資料を得ようとしたものである。なお、本研究において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の算定には、落下する捨石に作用する不規則な揺動力を考慮したランジュバン型の運動方程式を用いている。

2. 捨石群の着底分布: 捨石単粒子の落下挙動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 $F_y(t)$)を考慮すると、次式のようになる。ただし、捨石群の水深方向の拡がりは無視している。

$$\ddot{x} = -Ax^2 + \beta F_x(t), \ddot{y} = -Ay^2 + \beta F_y(t), \ddot{z} = -Az^2 + B \quad (1)$$

ここに、 x , y および z は捨石の座標位置、 $\cdot$ は時間微分、 $A = 3C_0 / \{2d(s+1)\}$, $B = 2g(s-1)/(2s+1)$, $\beta = 12\alpha / \{\rho_w \pi d^3 (2s-1)\}$, d , s 及び ρ_w はそれぞれ捨石の球形に換算したときの粒径、比重及び流体の密度、 C_0 は抗力係数、 α は係数である。 $F_x(t)$, $F_y(t)$ については、強度 γ をもつ平均値 0 の正規外力で、強度 γ の値を決定しておく必要がある。そこで、捨石単粒子の投入実験から算出した捨石の落下位置に関する標準偏差 σ と、 γ を変動させることによって得られる拡がり幅に関する標準偏差との比較検討を行った。図-1は、実験結果と最も適合性が良かった $\gamma = 658000$ の場合の

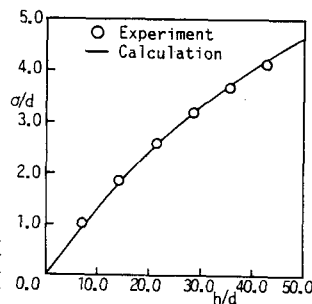


図-1 σ の水深変化

結果を示したもので、横軸には水深 h を d で無次元化したものをとっている。バージより投入される捨石群の堆積形状は、バージのポッパ開口部を捨石粒径で分割した各位置から捨石単粒子が個々に落下するものとして得られる捨石群の着底位置に関する確率分布と、バージの積載体積との積で求められる。図-2は、捨石マウンド中央断面の堆積形状について、奥出ら²⁾の実験結果と本解析による計算結果を比較したものである。図

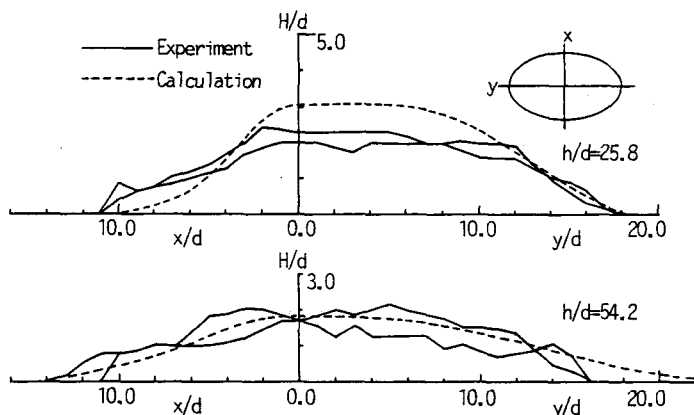


図-2 捨石マウンド堆積形状の実験結果と計算結果の比較

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、水深が深い場合、計算結果は実験結果をよく再現しているが、水深が浅い場合、計算結果は堆積高さを過大に予測する。この原因は、捨石着底時における捨石・底面間の衝突及び捨石間の衝突による捨石の転落・滑動、さらには捨石群の圧密が本解析で考慮されていないためと推測される。そこで本研究では、2次元の岩質粒体の重力流動解析で用いられた離散剛要素法(以下、DEMと略す)を、捨石マウンド形状予測手法に適用することにした。

3. DEMの概要: DEMは、岩塊(要素)を剛体とみなし、要素のもつ弾性的及び非弾性的性質を要素間の接点に挿入した弾性スプリング(剛性定数)と粘性ダッシュボット(粘性定数)で表現し、要素の並進及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落下して底面及びマウンド法面に着底する直前の捨石群に適用すると、その並進(u, v)及び回転(ψ)に関する運動方程式は、次式に示すように未知変位 u, v, ψ (直接的には u, v, ψ)を陽に含む逐次近似式で与えられる³⁾。

$$\begin{aligned} (M + C_M \rho V) [\ddot{u}]_t &= -\eta [\dot{u}]_{t-\Delta t} - K[u]_{t-\Delta t} - \frac{1}{2} \rho C_D [\dot{u}]_{t-\Delta t} [\dot{u}]_{t-\Delta t} + (\rho_w - \rho)V \\ (M + C_M \rho V) [\ddot{v}]_t &= -\eta [\dot{v}]_{t-\Delta t} - K[v]_{t-\Delta t} - \frac{1}{2} \rho C_D [\dot{v}]_{t-\Delta t} [\dot{v}]_{t-\Delta t} \\ I [\ddot{\psi}]_t &= -\eta [\dot{\psi}]_{t-\Delta t} + K[\psi]_{t-\Delta t} \frac{d^2}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 M, V, I および ρ は、それぞれ捨石の質量、体積、慣性モーメントおよび密度、 Δt は時間増分である。なお、作用流体力は付加質量力及び抗力を考慮しており、それぞれの係数 C_D 及び C_M には $C_D=1.0$ 、 $C_M=2.0$ を用いている。式(2)の初期条件として、式(1)より計算される着底直前の捨石の落下速度、加速度を用いることにより、時間増分毎の捨石の加速度および移動位置が求まる。捨石 i が捨石 j に接触開始を行う条件は、 $2d \geq R_{ij}$ (R_{ij} : 捨石要素 i と j の距離)で与えた。

4. 材料定数の問題: DEMで使用する捨石要素間に関する材料定数は、木山らの決定法を参照して、捨石接触時の法線方向の剛性定数、粘性係数をそれぞれ $K_N/\rho g=1.8 \times 10^7 \text{ cm}$ 、 $\eta_N/\rho g=3.2 \times 10^4 \text{ cm/s}$ 、接線方向のそれぞれを $K_s/\rho g=4.5 \times 10^6 \text{ cm}$ 、 $\eta_s/\rho g=8.0 \times 10^3 \text{ cm/s}$ と決定できる。しかし、捨石と海底面の間の材料定数については、砂層による衝撃の緩和作用を考慮する必要があるため、上述した捨石要素間の法線方向の材料定数値より小さくする必要があると推測できる。そこで、本研究では、捨石単粒子が海底に衝突するときの計算モデルを対象に、捨石と海底面の間の法線方向の材料定数(K_{nw} 、 η_{nw})を種々変化させた計算より検討を加えることにした。図-3(A)~(B)は、それぞれ K_{nw} を一定として η_{nw} を変化させたときの、捨石が底面に接触してから静止するまでの変位の時間変化を示したものである。計算ステップの時間増分値 Δt は、 $\Delta t < \eta_{nw}/K_{nw}$ の関係式³⁾を満足するように決定した。これらの図より、

変位の時間変化は、粘性定数が多いほど速く収束し、また剛性定数が小さいほど速く収束することが分かる。以上のことより、捨石と海底面との間の材料定数は、着底時の捨石の跳ね返りができるだけ小さくなる $K_N=K_N/10$ 、 $\eta_N=\eta_N$ を採用することにした。捨石群を対象にした計算結果については、講演時に発表させて頂きます。【参考文献】1)松見吉晴他: 捨石マウンド築造時のバジ船の配船位置について、第37回海講論文集, PP.769-773, 1990. 2)奥出律他: 底開式バ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. 3)木山英郎他: 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, 土木論文集, Vol.333, PP.137-146, 1983.

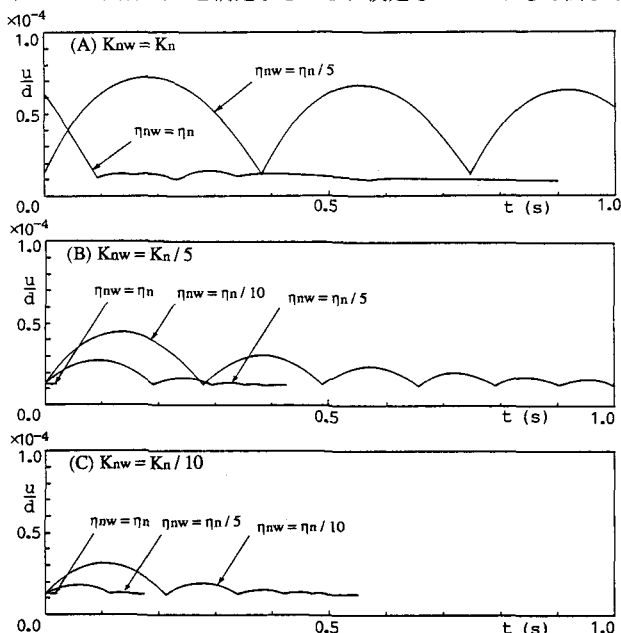


図-3 捨石単粒子の相対変位 u の時間変化