

大阪市立大学工学部 正会員 小田一紀 重松孝昌
大阪市立大学工学部 学生員 ○ 和田一斗

1. はじめに

流れによる砂礫の運動は、古くから数多くの研究者によって研究されている。この種の研究は、個々の粒子について運動方程式を立てて解析する確定論的手法と、粒子と流体と粒体の相互作用に起因する複雑な現象を確率関数を用いてモデル化して解析する確率論的手法に分類できる。しかし、従来の研究では粒子の飛び出し過程のモデル化に疑問点を有していたり、粒子と流体の相互作用が十分に考慮されていないなどの問題点を有しており、砂礫粒子の飛び出し挙動から水中における浮遊挙動までの一連の過程を取り扱うことができる理論的手法はまだ提案されていない。そこで、本研究ではこのような砂粒子の一連の挙動を解析し得るような数値解析手法を開発することを目的として、個別要素法を用いて一方向流中の水底砂粒子の挙動に関する鉛直2次元計算を試みた。

2. 数値シミュレーションに用いる計算手法

本研究では、個々の粒子の運動解析には個別要素法 (DEM) を用いた。その手法の詳細は文献 1) を参照されたい。また、流体の運動解析には SMAC 法のフローを用い、次式で示される基礎式²⁾を解いた。

$$D \equiv \frac{\partial \varepsilon u}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon u}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u u}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon u w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \varepsilon p}{\partial x} + \nu \nabla^2 \varepsilon u - F_p \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon w}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u w}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon w w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \varepsilon p}{\partial z} + \varepsilon g + \nu \nabla^2 \varepsilon w - F_p \quad (3)$$

ここに、 ε ：空隙率、 u, w ：流体の x 軸および z 軸方向の速度成分、 ρ_f ：流体の密度、 p ：圧力、 g ：重力加速度を表す。本来、式 (1) 中には空隙率の時間変化の影響を表す項が含まれるが、ここではその項の影響が微小であるとして省略した。式 (2), (3) の右辺の F_p は、粒子に作用する抗力の反作用として流体が受ける力を表す項である。粒子の存在密度が希薄である仮定の下に、 F_p を単一粒子に作用する抗力から算定している研究例³⁾もあるが、ここで扱うような粒子の存在密度が密であるときにはそのような計算方法は適用できないと思われる。そこで、ここでは流動層内の流体運動の解析に用いられている次式⁴⁾によって求めた。

$$F_p = \begin{cases} -\frac{1-\varepsilon}{d\varepsilon^3} \left[150 \frac{(1-\varepsilon)\mu\varepsilon}{\rho_f d} + 1.75\varepsilon^2 |\vec{v}_f - \vec{v}_p| \right] (\vec{v}_f - \vec{v}_p) & (\varepsilon \leq 0.8) \\ -\frac{3}{4} C_D \frac{|\vec{v}_f - \vec{v}_p|(1-\varepsilon)}{d} \varepsilon^{-2.7} (\vec{v}_f - \vec{v}_p) & (\varepsilon > 0.8) \end{cases} \quad (4)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24(1+0.15R_e^{0.687})}{R_e} & (R_e \leq 1000) \\ 0.43 & (R_e > 1000) \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 $\vec{v}_f, \vec{v}_p$ ：各セル内における流体および粒子の平均速度、 d ：粒径、 μ ：粘性係数、 C_D ：抗力係数、 R_e ：粒子と流体の相対速度により求められる粒子レイノルズ数である。一方、個別要素法による粒子の運動を解析する際には、この F_p を個々の粒子に作用する流体力として導入することによって、粒子系と流体系の相互作用を考慮した。

3. 計算条件

計算に用いた粒径は $d = 0.2$ cm、比重は 2.65 とした。計算に用いたその他の諸定数を表 1 に示す。流れの中の粒子の運動解析を行う前に、まず、静水中に 1200 個の粒子を、 $50 \leq x/d \leq 130$, $0 \leq z/d \leq 30$ の範囲

表 1：計算に用いた諸定数

計算対象領域	$x = 30, z = 30$	(cm)
メッシュサイズ	$\Delta x = \Delta z = 1.5$	(cm)
タイムステップ	$\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$	(s)
水深	$h = 23.25$	(cm)
剛性バネ定数	$K_n = 1.0 \times 10^5$	(g/cm ²)
	$K_s = 2.5 \times 10^4$	(g/cm ²)
粘性定数	$\eta_n = 5.0$	(g/cm ² ・s)
	$\eta_s = 2.5$	(g/cm ² ・s)
摩擦係数	$\mu = 0.577$	

に互いに接触しないように配置し、流れのない状態で全粒子が互いに接触して水底に広く拡がるまで計算を行った。その後、後述のような流れの条件の下で粒子の運動解析を行った。なお、計算領域の下端には粒子と同じ径を持つ半円をひきつめ、これらは運動しないものとした。さらに、計算領域の右端から流出した粒子は、そのときの速度を有したまま左端から再び計算領域内に入るものとして計算を行っている。

流れは一方向流とし、対数分布則にしたがってその平均流速が 100cm/s となるように $t = 0$ で全領域で与え、その後は左端のみで与え続けた。また、右端には開境界条件を、下端には "no-slip" の条件を課した。

計算結果

図-1 は、本手法を用いて計算した結果を示したものである。図-1 より、初期条件 ($t=0\text{s}$) では粒子層内でも流体は約 80cm/s の速度を有しているが、時間の経過とともに粒子層内および粒子層のすぐ上ではほとんど流速がなくなることがわかる。また、粒子層に着目すれば、左端では粒子が浮遊していること、および計算領域の右端で粒子数が少なくなっていることがわかる。これは、左端で流速を与え続けることによって計算領域の左端近傍の粒子層内の流速が速くなるために粒子が舞い上がり粒子数が少なくなり、その結果、右端からの粒子流出を促進するためである。したがって、 $0 \leq x/d < 50$ で粒子が浮遊しているのは左端における流体の境界条件の影響であると考えられる。

図-2 は、粒子層内の粒子の水平移動速度 u_p の鉛直方向分布を摩擦速度 u_* で無次元化して示したものである。同図によれば、1 秒後には粒子層表層部 $u_p/u_* = 1.75$ 程度あった水平移動速度は徐々に減少し、3 秒後には $u_p/u_* = 0.25$ 程度にとどまっている。しかし、ほぼ $d/z < 10$ の底層部の粒子の水平速度成分は $t = 3.0$ のときが最も大きく、また、 $4 < z/d < 12$ の範囲ではほぼ一様な速度で移動していることがわかる。

図-3 は、粒子層の表面にある粒子の鉛直速度成分を $w_0 = \sqrt{(\rho_p/\rho_f - 1)gd}$ (ρ_p : 粒子の密度) で正規化して示したもので、正の値を持つということは上向きに運動していることを、また、負の値を持つということは沈降していることを表している。同図によれば、時間の経過とともに表面粒子の上昇あるいは沈降速度が大きくなっていることから、掃流現象が再現できているものと考えられる。

まとめ

本手法を用いて掃流砂の挙動の解析を試みた結果、初期条件や境界条件の与え方に問題点があるものの大きな粒子や流体の運動の概要は計算できたと思われる。今後は、計算条件の与え方を検討するとともに、粒子や流体運動の定量的な検討を行いたい。

参考文献

- 1) 小田・他 (1990) : 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, 海講論文第 37 巻, pp759-763.
- 2) T. B. Anderson and Roy Jackson (1967) : "A FLUID MECHANICAL DESCRIPTION OF FLUIDIZED BEDS", I & EC Fundamentals, Vol.6 No.4 Nov., pp.527-539.
- 3) たとえば、後藤他 (1992): PSI-セルモデルによる Saltation 層の解析, 海講第 39 巻 (2), pp266-270.
- 4) Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N. (1960) : TRANSPORT PHENOMENA, John Wiley & Sons.

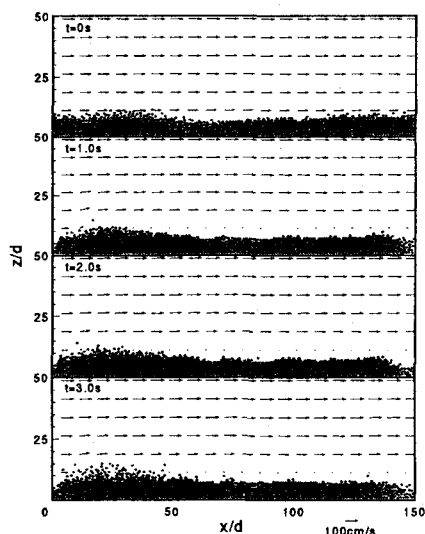


図-1 計算結果

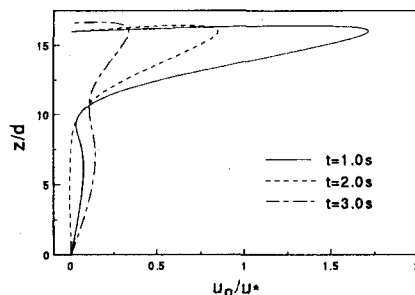


図-2 粒子の水平速度成分

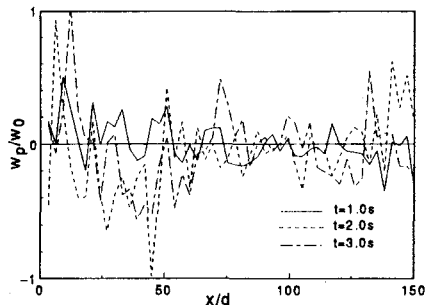


図-3 表面粒子の鉛直速度成分