

II-586

改良型DEM-AC法を用いた沈降粒子群の分散挙動の数値シミュレーション

大阪市立大学 正 会 員 小田一紀 ○重松孝昌

学生会員 大西伸幸

大 阪 市

井上雅夫

■はじめに 著者らは、粒子に作用する粒子間反力や流体力を考慮して個々の粒子の運動を解析する個別要素法(DEM)と粒子を含む流体の運動を密度流的に解析するMAC法を併用することによって、粒子と流体の相互作用の影響を考慮することができる数値シミュレーション手法(DEMAC法)を開発し、その成果を第37回海岸工学講演会で発表した¹⁾。しかし、DEM-AC法中の流体運動を表す鉛直方向の運動方程式に静水圧近似を仮定した簡略式を用いていたため、沈降過程における粒子の分散挙動を実現象に忠実に再現するところまでには至らなかった。そこで、本研究では流体の運動方程式に Boussinesq 近似を仮定した運動方程式を用い、鉛直方向の運動方程式中の移流項や粘性項をも考慮した改良型DEM-AC法を用いて、底扉の開扉速度が沈降粒子の分散挙動に及ぼす影響を検討した。

■計算手法 従来のDEM-AC法中で用いた鉛直方向の流体の運動方程式は、

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g = 0 \quad (1)$$

であったが、ここでは、Boussinesq 近似を仮定した次式を用いる。

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_0} g + \epsilon_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \epsilon_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (2)$$

ここに、 u, w : x, z 方向の流速、 ϵ_x, ϵ_z : 水平および鉛直渦動粘性係数、 ρ : 混相流体の密度、 ρ_0 : 流体の初期密度、 g : 重力加速度、 p : 圧力である。流体の運動方程式の解法の手順にはSMAC法のフロー²⁾を用いた。

■計算結果

まず、幅5cmの容器の中に粒径3mmの粒子を233個配置し、容器の底扉を瞬時に開いて水深30cmの水中に粒子を投入したときの粒子群の2次元沈降・分散挙動を解析した。図-1は同様な投入条件の下で行われた室田らによる実験結果(但し、水深は100cm)²⁾を、図-2は以前のDEM-AC法による計算結果²⁾を、図-3は改良型DEM-AC法による計算結果を示したものである。図-2に示すように、従来のDEM-AC法による計算では図-3の実験結果のような沈降過程における水平方向への拡がりや再現実現されていなかった。しかし、図-3に示す改良型DEM-AC法による計算結果は、図-2の実験結果を良く再現できていることがわかる。また、同図の流速ベクトルより、底扉の中心軸に関して対称で互いに逆方向に回転する循環流が発生しており、その影響を受けて粒子群は、その中心部が速く沈降し、側部は中央に巻き込まれるように沈降していく挙動を



図-1 実験結果

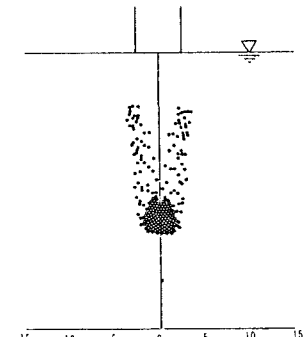


図-2 従来のDEM-AC法による計算結果

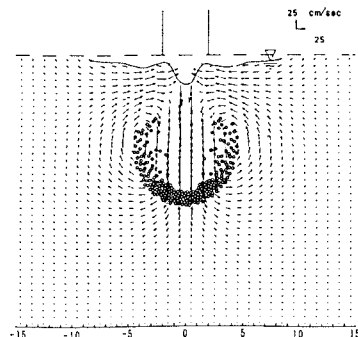


図-3 改良型DEM-AC法による計算結果

示すことがわかる。図-4は、粒子群の最大分散幅 B の鉛直方向変化の計算結果と実験結果を比較したものである（但し、単位奥行き当たりの見かけの投入容積 q_0 を用いて無次元表示してある）。計算値が $z/\sqrt{q_0}$ で急に大きくなっているのは、計算では水深が30cmであるため粒子群が着底して水底上を水平方向に分散していることを示している。同図からも、水中を沈降する粒子群の分散幅に関する従来のDEMAC法による計算結果は実験値よりも小さくなっているのに対して、改良型DEMAC法による計算値は実験値と非常に良く一致していることがわかる。以上のことから、改良型DEMAC法の妥当性がかなりの程度、証明されたと考えられる。

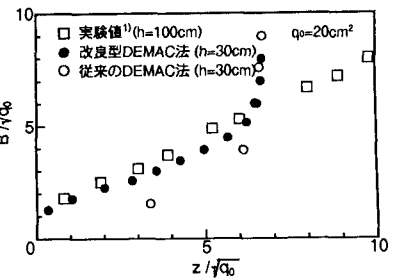
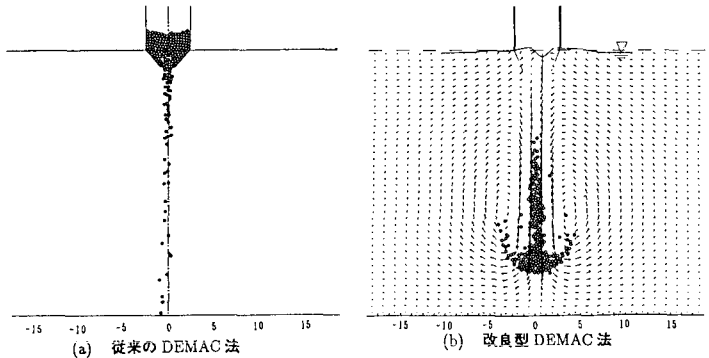


図-4 瞬間投入時の粒子群の最大分散幅の鉛直方向変化

図-5は、水深30cm、底扉の開扉速度 $\omega = 60 \text{ deg./sec}$ のときの従来のDEMAC法と改良型DEMAC法による粒子群の沈降・分散過程の計算結果を比較して示したものである。同図(a)に示すように従来のDEMAC法による計算結果では粒子は横方向に拡がらず鉛直方向にバラバラに沈降しているが、改良型DEMAC法による計算結果では容器から流出した粒子は群となって沈降していることがわかる。これは、従来のDEMAC法では鉛直方向の運動方程式中の移流項と粘性項を無視して計算していたため流体の運動速度が速くなり、これによって粒子群の沈降速度も速くなるためであると考えられる。


 図-5 粒子群の沈降・分散挙動の比較 ($\omega = 60 \text{ deg./sec}$, $h = 30 \text{ cm}$)

次に、開扉速度 ω を変えて計算を行い、開扉速度が粒子群の分散挙動に及ぼす影響について検討した。図-6は ω が30, 60, 90, および ∞ （瞬間投入）deg./secのときの最大分散幅の経時変化を示したものである。但し、横軸の時間は容器から粒子が流出し始めた瞬間を原点とし、黒く塗りつぶした記号は粒子群の下端がほぼ着底した瞬間を表している。図-6より、 ω が大きいくほど粒子群が着底するまでに要する時間は短い、すなわち沈降速度が大きくなっていることがわかる。さらに、 ω が大きくなるほど水底に着底するまでの粒子群の最大分散幅は大きくなっている。これは、 ω が大きいくほど投入初期段階における単位時間当たりに容器から流出する粒子数が多くなり、水中を沈降する粒子は群としての挙動を示すためであると考えられる。

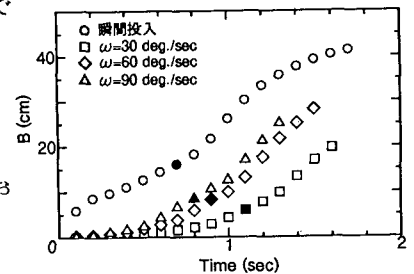


図-6 粒子群の最大分散幅の経時変化

■結論 改良型DEMAC法による瞬間投入時の粒子群の水中沈降・分散挙動の計算結果は、既往の実験結果と良く一致した。また、沈降過程における粒子群の最大分散幅の変化も実験値と非常に良く一致し、本手法が流体中を沈降する粒子群の運動を解析する有用な手法であることが明らかになった。また、本手法によれば、底扉の開扉速度の分散挙動への影響も明瞭に表現でき、開扉速度が大きくなるほど沈降中の粒子群の分散幅が大きくなることがわかった。

■参考文献 1)小田ら: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. 2)室田ら:海域での土砂投下における密度流現象, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.777-781, 1988.