

II-332

MAC法とDEM法を併用した直投土砂の沈降分散挙動の解析

大阪市立大学工学部 正会員○重松孝昌 小田一紀
松下電器産業 氏本浩介

1. まえがき バージ船等から水中に投下された土砂の沈降・分散挙動や水底における堆積過程に関する研究は従来より数多く行われており¹⁾、投入条件や粒度分布等が大きな影響を与えることが指摘されている。しかし、従来の研究ではこれらの影響は実験定数等に含まれており十分に説明されたものとは言い難いように思われる。本研究は、個々の土粒子の運動を個別要素法(Discrete Element Method)²⁾を用いて解き、これらの粒子を物性マーカーとして含む全体的な流体運動(密度流)を従来のMAC法で解き、直投土砂の沈降分散挙動を解析しようとするものである。この方法によれば、従来のMAC法³⁾だけを用いる場合には取り扱えなかった投入条件や粒度分布の影響を考慮することができ、また粒子と流体の相互干渉効果を取り入れることができる点でMAC法のもつ欠点を補うことが可能である。

2. 計算手法 本研究では、投入条件の影響を考慮するため投入過程における粒子の運動をDEM法を用いて解析する。この手法は、個々の粒子間に図-1に示すような弾性スプリング、粘性ダッシュポット、摩擦スライダ、ノーテンション・ジョイントを想定することにより粒子間作用力のモデル化を行い、これらを外力として個々の粒子の運動方程式を解き、粒子群の挙動を求めるものである。

2粒子*i, j*が接触する時、粒子*i*に作用する*x, z*方向の作用力およびモーメントは次式で表される。

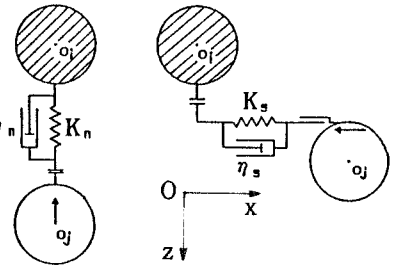


図-1 粒子間作用力のモデル化

$$[F_x]_{ij} = -(K_n \Delta U_{ij} \Delta t + \eta_n \Delta U_{ij}) \sin \alpha_{ij} + (K_s \Delta U_{ij} \Delta t + \eta_s \Delta U_{ij}) \cos \alpha_{ij} \quad (1)$$

$$[F_z]_{ij} = -(K_n \Delta U_{ij} \Delta t + \eta_n \Delta U_{ij}) \cos \alpha_{ij} - (K_s \Delta U_{ij} \Delta t + \eta_s \Delta U_{ij}) \sin \alpha_{ij} \quad (2)$$

$$[M]_{ij} = -r_i (K_s \Delta U_{ij} \Delta t + \eta_s \Delta U_{ij}) \quad (3)$$

ここに、 K_n, K_s はそれぞれ法線、接線方向の弾性係数、 η_n, η_s は法線、接線方向の粘性係数、 α_{ij} は2粒子間の相対角度、 $\Delta U_{ij} = \sqrt{u_i^2 + w_i^2} - \sqrt{u_j^2 + w_j^2}$ 、 u_i, w_i は粒子*i*の*x, z*方向の速度で、モーメントは反時計回りを正とする。水中を運動する粒子に作用する流体力は鉛直下向きを正とすると

$$[f_x] = -\frac{1}{2} C_D A \rho_w u' \sqrt{u'^2 + w'^2} \quad (4)$$

$$[f_z] = -\frac{1}{2} C_D A \rho_w w' \sqrt{u'^2 + w'^2} - V \rho_w g \quad (5)$$

$$C_D = \frac{24}{R_e} + C_{D0}, \quad R_e = \frac{r \sqrt{u'^2 + w'^2}}{\nu} \quad (\text{但し}, C_{D0} = 2.0) \quad (6)$$

ここに、 ρ_w は流体密度、 V は粒子の体積、 C_D は抗力係数、 A は粒子の投影面積、 u', w' はそれぞれ*x, z*方向の粒子と流体間の相対速度、 R_e はレイノルズ数、 ν は流体の動粘性係数である。

したがって粒子の密度を ρ_s 、回転角速度を ϕ とすると、粒子*i*の運動方程式は、

$$(m + m') \ddot{u} = \sum_j [F_x]_{ij} + [f_x] \quad (7)$$

$$(m + m') \ddot{w} = \sum_j [F_z]_{ij} + [f_z] + V \rho_s g \quad (8)$$

$$(I + I') \ddot{\phi} = \sum_j [M]_{ij} \quad (9)$$

ここに m', I' は付加質量係数および付加慣性モーメントである。上式を差分近似することにより求められた加速度 $[\ddot{u}, \ddot{w}, \ddot{\phi}]_t$ を前タイムステップの変位に基づく接触時の作用力(右辺)の陽関数とみなしこれを数値積分して新しい変位を求める。なお弾性係数 K やダッシュポットの粘性係数 η 、時間増分 Δt は木山他⁵⁾を参考にして決定した。水中に入った粒子はその運動によって周囲の流体運動を誘起するが、本研究ではDEM法で扱った粒子を物性マーカーとして従来のMAC法に導入し周囲の流体運動の解析を行った。さら

にこのようにして得られた流れ場の情報をDEM法にフィードバックして、粒子と流体との相互干渉効果を表現した。

3. 計算結果とその考察 本手法を用いて行った数値シミュレーションの一例を図-2～図-5に示す。図-2は水面におかれた幅5cmのバージ船模型に粒径3mmの土粒子を積載し、その底部を瞬時に取り除いたときの粒子の挙動を示したもので、粒子群が水中に入った直後から分散運動が始まっていることがわかる。また、図-3は水中を落下する粒子群の挙動を示したものであり、この図より瞬間投入された粒子群の先端部は個々の粒子があまり分散しないで塊となって沈降していくことがわかる。図-4に粒子群が着底した直後の周囲流体の流況を示す。この図より投入中心面を対称面とした大きな循環流が発生しており、この流れが粒子群の沈降・分散・堆積挙動に大きく関与しているものと考えられる。図-5は水深と堆積幅の関係を示したもので、表-1に平均粒径 $d=3.38\text{mm}$ の砂を用いて行った室田ら⁶⁾の実験値との比較を示す。図-5より堆積形状は水深が浅いほど高く、水深が深くなると平らになっていることがわかる。また粒子群の堆積幅は水深が深くなると広がる傾向が示されており実験値との整合性も良いことがわかる。

表-1 堆積幅の計算値と実験値

水深	計算値 (cm)	実験値 (cm)
10 cm	38.24 cm	約 40 cm
30 cm	60.02 cm	約 50 cm
50 cm	83.99 cm	-----

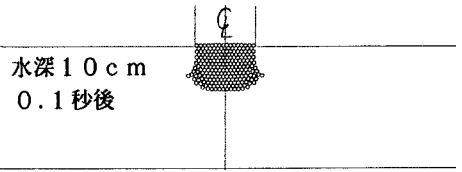


図-2 投入直後の粒子群の挙動

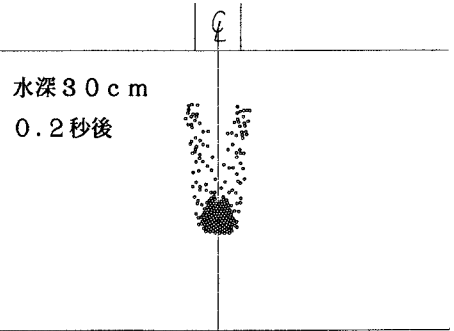


図-3 粒子群の沈降挙動

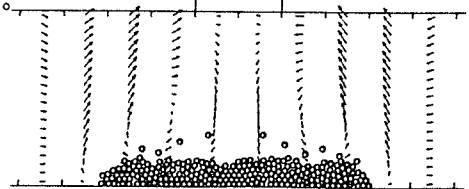


図-4 着底直後の周囲水の流況
(水深10 cm, 0.3秒後)

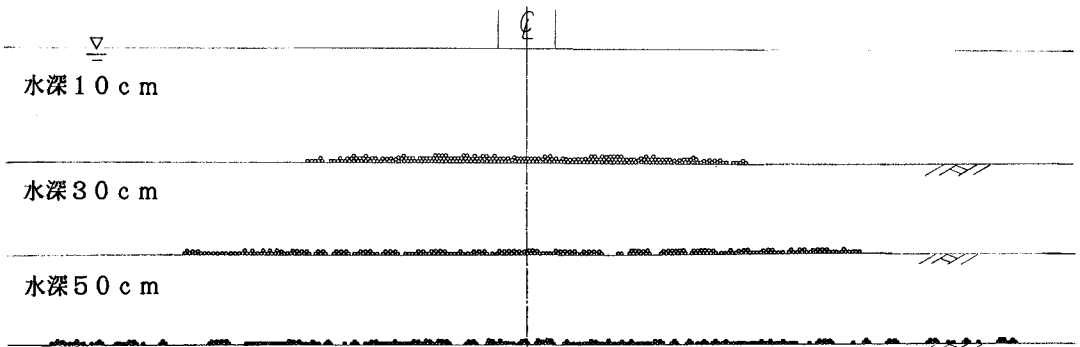


図-5 粒子群の堆積形状

4. あとがき 本手法は、土粒子の運動を解析するDEM法と粒子の運動に誘起される周囲流体の運動を解析するMAC法を併用することによって、個々の粒子の運動と周囲流体の運動を同時に表現し得る新しい手法である。MAC法によって密度流を研究する際に密度差のみを起動力として取り扱っている点などまだ改良すべき余地は残されているが、一連の計算より投入条件や粒度分布が及ぼす影響が考慮できる直投土砂の沈降分散挙動の数値シミュレーション解析の可能性が示されたものとする。

【参考文献】 1) 例えば、武藤他：三菱重工技報，Vol.11，1974。 2) Cundall, P.A.: Technical Report MRD-2-74, 1974。 3) 小田他：平成元年度関西支部講演概要，II-103，1989。 4) 林他：第24回水理講演会論文集，1980。 5) 木山他：土木学会論文報告集，No.333，1983。 6) 室田他：第35回海講論文集，1988。