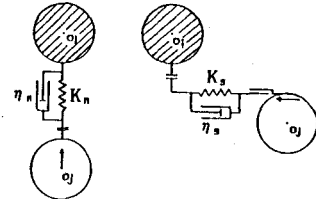


MAC法とDEM法の併用による 直投土砂の落下沈降挙動のシミュレーション

大阪市立大学工学部 正会員 小田 一紀 ○重松 孝昌
学生員 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挙動や堆積形状を予測する研究は従来から数多く行われており、投入幅や投入速度等の落下初期の条件がそれらに大きな影響を与えることが指摘されている。しかし周囲流体と土砂粒子の相互干渉を解析的に解くことが非常に困難であるため、十分に解明されているとは言い難いように思われる。本研究は、個々の土粒子に作用する衝突・摩擦力および流体中を運動するときに働く流体力等の再現に個別要素法(DEM法)¹⁾を用い、また粒子群の沈降に伴う周囲流体の挙動解析にはMAC法^{2), 3)}を用いるという新しい解析手法を提案し、その妥当性を検証するものである。

2. 計算手法 DEM法は、不連続面で区切られた要素の集合体に対し個々の要素が運動方程式を満足し要素間の力の伝達が作用・反作用の法則に従うことを条件として集合体の動力学的挙動を数値的に解析する手法である。その力学的条件は、全要素間に〔図1〕のように弾性スプリング、粘性ダッシュボット、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表現する。



(図1) 要素間作用力のモデル化

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。

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

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

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

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

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

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

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

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_* 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、

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

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

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

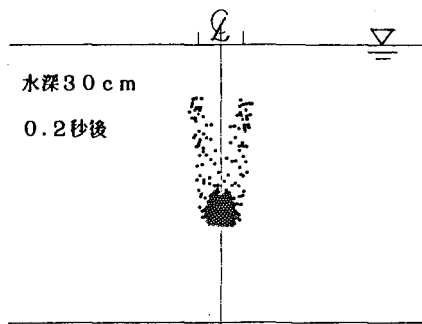
ここに m', I' は付加質量係数および付加慣性モーメントである。上式を差分近似することにより求められた加速度 $[\ddot{u}, \ddot{w}, \ddot{\phi}]_i$ を前タイムステップの変位に基づく接触時の作用力(右辺)の関数とみなし、これを数値積分して新しい変位を求める。なお、弾性係数 K や粘性係数 η 、時間増分 Δt は木山他⁵⁾を参考にして決定した。さらにDEMで扱った粒子を物性マーカーとしてMAC法に導入し周囲流体の運動の解析を行い、得られた流れ場の情報をDEM法にフィードバックして、粒子と流体との相互干渉効果を表現した。

3. 計算結果とその考察 今回のシミュレーションでは、室田他⁶⁾の実験を参考にして水面上におかれた幅5 cmのバージから粒径3 mmの土粒子を300 cm³ (233個)投入し、水深によるその沈降・落下挙動と堆積形状の変化を調べた。

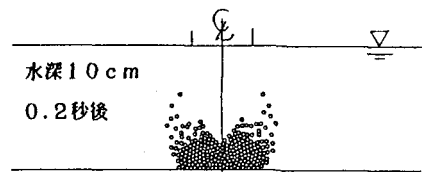
〔図2〕に粒子群の沈降中の挙動を、また〔図3〕に粒子群が着底した瞬間の挙動を示す。これらの図より、粒子群は個々の自由沈降速度より速い速度で沈降しており、落下沈降する粒子は単一粒子として運動するのではなく大きな粒子塊として運動することがわかる。〔図4〕に着底直後の周囲水の流況を示す。粒子群の沈降に伴いその周辺に循環流が発生しており、このような流況の影響が粒子群の沈降挙動を複雑にしているといえる。〔図5〕は水深と堆積幅の関係を示したもので、〔表1〕に室田らの実験値との比較を示す。〔図5〕より堆積形状は水深が浅いほど高く、水深が深くなると平らになっていることがわかる。また粒子群の堆積幅は水深が深くな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。このことは本手法の妥当性を示しているものと考えられる。

〔表1〕堆積幅の計算値と実験値

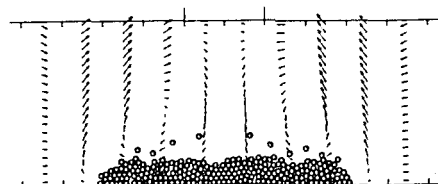
水深	計算値 (cm)	実験値 (cm)
10 cm	38.24 cm	約 40 cm
30 cm	60.02 cm	約 50 cm
50 cm	83.99 cm	-----



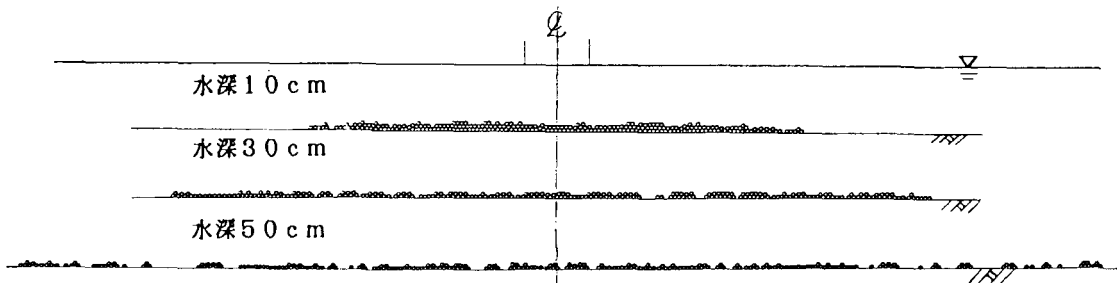
〔図2〕粒子群の沈降挙動



〔図3〕粒子群の着底時の挙動



〔図4〕着底直後の周囲水の流況



〔図5〕粒子群の体積形状

4. 結 論 本研究で得られた結論をまとめると以下ようになる。

本手法は個々の粒子の運動をDEM法によって、また粒子の運動に誘起される周囲水の運動をMAC法によって解析し個々の粒子と流体との相互干渉効果を表現するものである。本手法によって、水中を落下する粒子の挙動を可視することが可能となった。また、水深と堆積幅の関係については実験値との整合性も良好で、本手法の妥当性が検証できたものとする。

【参考文献】

- 1) Cundall, P.A.: Technical Report MRD-2-74, 1974.
- 2) 堀江: 港湾技研資料, No.471, 1983.
- 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