

第II部門

三次元 DEM-MPS 法によるシートフロー漂砂に関する計算力学的検討

京都大学工学部 学生会員 ○仲村 風哉
 京都大学工学研究科 正会員 原田 英治
 京都大学工学研究科 正会員 五十里 洋行
 京都大学工学研究科 正会員 後藤 仁志

1. はじめに

山地溪流河川や荒天時の海岸部などにみられる、底質土砂が高濃度かつ集合的に流動するシートフロー漂砂は、固相間・固液間の複雑な相互作用を伴うため、その内部構造の理解はいまだ十分とはいえない。そこで本研究では、液相の解析に粒子法の一つであるMPS (Moving-Particle-Semi-implicit) 法¹⁾を、固相の解析に個別要素法 (DEM: Distinct Element Method) を用いたDEM-MPS法により、開水路条件でのシートフロー漂砂の三次元数値シミュレーションを実施し、既往の実験結果と比較することでシミュレーションの再現性を検証した上で、その内部構造を計算力学的に検討する。

2. 数値解析手法

流体解析には高精度 MPS 法 (MPS-HS-HL-ECS-GC-DS法) を用いた。DEM とのカップリングは、流体粒子に対する DEM 粒子群の重複率によって相互作用を評価するモデル (後藤ら²⁾) を採用した。

3. シートフロー漂砂の数値シミュレーション

1) 計算条件

既往の Larcher らの実験³⁾と同等の条件になるように、図-1 に示す計算領域を設定した。流下方向には周期境界条件を課す。固相粒子は、粒径 3.5mm、比重 1.54 の DEM 粒子から構成される。なお、MPS 粒子および DEM 粒子はそれぞれ 123,462 個および 98,318 個である。また、実験の固相粒子は円柱形であり、通常の球形の DEM 粒子では内部摩擦角を再現することが困難であるため、剛体回転を拘束することで実際の内部摩擦角を模擬する。

2) 数値解析結果

図-2 に平衡状態での両相表示のスナップショットと固相粒子の速度コンター表示のスナップショットを示す。全層にわたって DEM 粒子が流動していることが見てとれる。

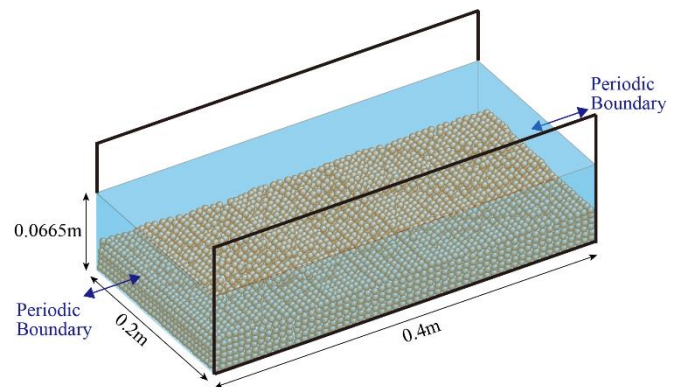


図-1 計算条件

また、水表面が激しく変動していることが理解できる。

平衡状態での DEM 粒子の (a)速度、(b)変動強度、(c)体積占有率の z 方向分布について、既往の実験結果との比較を図-3 に示す。ここで粒子速度 $u_p=0$ の堆積層表面から体積占有率 $C_s=0.35$ までの範囲をシートフロー層と定義し、図中に影をつけて示す。粒子速度、体積占有率は実験結果と良好に一致しているが、変動強度についてはシートフロー層より上層で実験結果との乖離が見られる。これは水面波の存在が原因であると考えられる。

図-4(a)に平衡状態における奥行方向中央断面での DEM 粒子の衝突回数分布と流体の乱れエネルギーの z 方向分布を示す。衝突回数については、シートフロー層の中心付近で最大値を持つ凸な分布となっていることがわかる。これは、堆積層表面から体積占有率の減少に従って衝突を含んだ接触回数は減少するものの、堆積層表面付近では DEM 粒子同士が接触から衝突へと遷移することで一時的に衝突回数は増加するためだと考えられる。乱れエネルギーについては、シートフロー層で急激に増大し、シートフロー層より上層ではほぼ一定の値をとることがわかる。シートフロー層内部では固相粒子の衝突回数の増加に起因して乱れエネルギーも増大し、衝突回数の比較的少ないシートフロー層より上層部では水面変動により乱れエネルギーが発生していると推察される。

図-4(b)に平衡状態における奥行方向中央断面でのDEM粒子に作用する力の合力の x 成分と z 成分の分布を示す。平衡状態において流動層全体にわたって合力 $F=0$ に一致しないことから乱れが発生していると考えられる。特に自由表面付近で $F=0$ を大きく外れることから自由表面付近での再現性の低さが説明される。

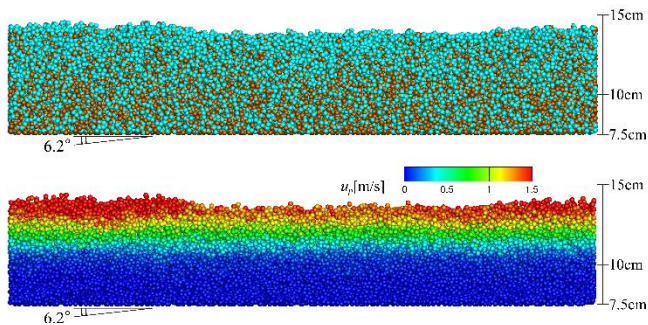


図-2 スナップショット

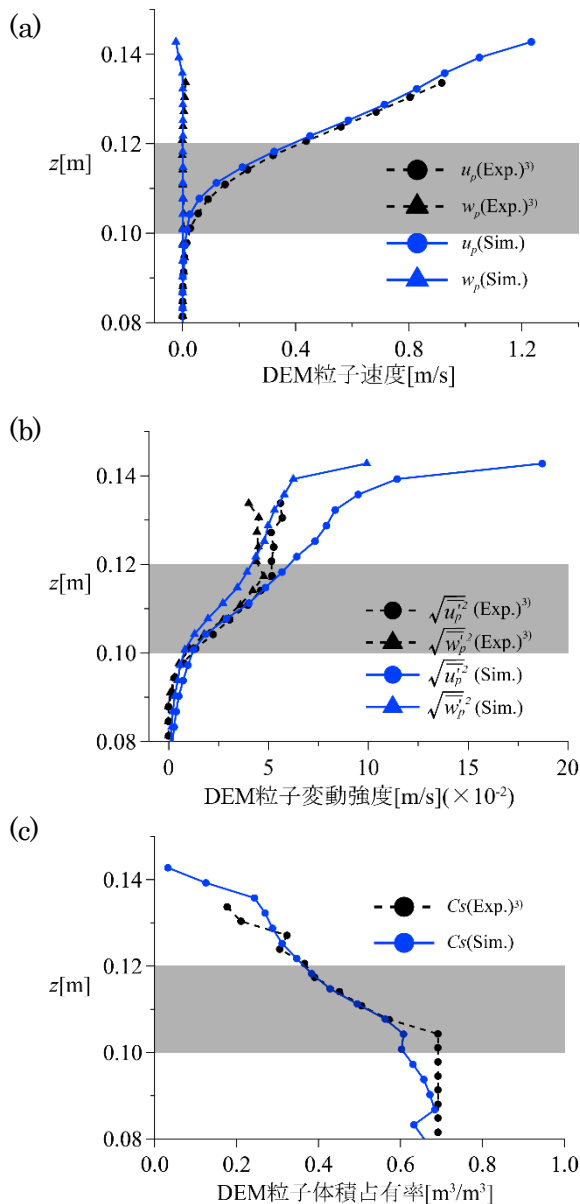


図-3 実験結果との比較

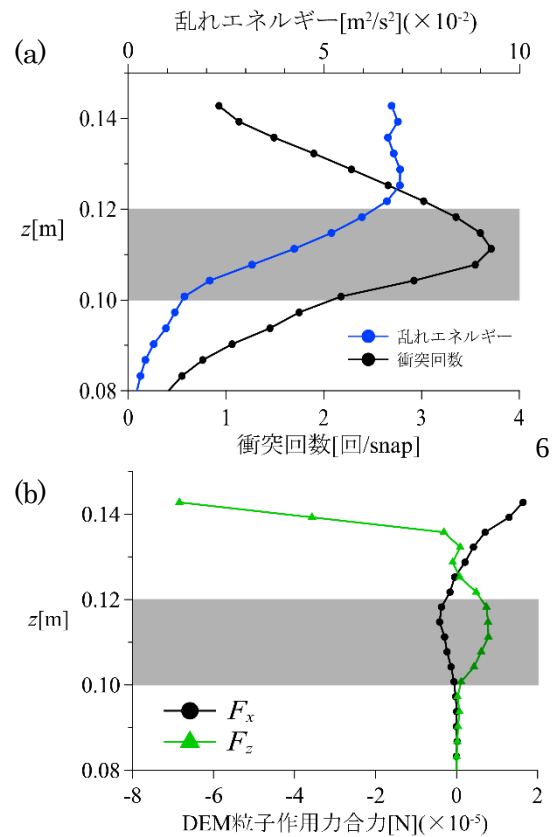


図-4 内部構造

4. おわりに

本研究では、三次元 DEM-MPS 法を用いて数値シミュレーションを行い開水路条件でのシートフロー漂砂に対して一定の再現性を得ることができた。DEM 粒子衝突回数分布はシートフロー層で最大値をとる凸な分布となることが確認された。また、衝突回数の増加に従って流体の乱れエネルギーも増加することが明らかとなった。シートフロー層においては、平衡状態でも DEM 粒子に作用する力の合力はゼロに一致せず、内部で乱れが発生していると推察された。

参考文献

- 1) 後藤仁志:粒子法 連続体・混相流・粒状態のための計算科学, 森北出版, 289p, 2018.
- 2) 後藤仁志, 鶴田修己, 原田英治, 五十里洋行, 久保田博貴: 固液混相流解析のためのDEM-MPS連成手法の提案, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.21-25, 2012.
- 3) M. Larcher, L. Fraccarollo, A. Armanini, H. Capart: Set of measurement data from flume experiments on steady uniform debris flow, *Journal of Hydraulic Research*, 45/sup1, pp.59-71, 2007.