

全層流モデルのための河床波中の粒子運動の解析

ELUCIDATION OF PARTICLE MOVEMENT IN RIVER BED WAVE WITH DEM-URANS COUPLING

北海道大学工学部環境社会工学科 学生会員 土田 航
北海道大学大学院工学研究院准教授 正会員 木村 一郎
北海道大学大学院工学研究院教授 フェロー 清水康行

1. はじめに

河床波は水理的抵抗として作用し、水位上昇やそれに伴う河川の氾濫を引き起こす要因となりえる。そのため河床波の抵抗変動機構解明と予測手法の確立は大変重要な課題となっている。河床波を数値解析的に予測するためには、掃流層内の多数の粒子が存在する領域での、粒子間の衝突や流体粒子間相互作用の評価が重要になる。流体から粒子への抗力のみを計算した One-way model は一般的に行われてきた。さらに粒子に流体から作用する流体抗力を流体の運動方程式にそのまま組み込んだ解析方法、Two-way model が考案された Two-way model を用いた研究は行われており、その再現性は確認されている 2)3)4)。特に後藤らは均一粒径の砂粒子高濃度流れ場において、シートフロー層、saltation 層、清水層からなる 3 層構造を Two-way model を導入することで、明瞭に再現した 2)。Two-way model は One-way model より粒子が流れ場の構造的影響を考慮でき、砂粒子濃度が高い領域から砂粒子濃度が低い領域にかけて、砂粒子の運動などの変化が漸变的に行われることを指摘している。また原田ら 3)はこれを混合粒径に発展させ、3 層構造と類似した傾向を確認している。

本研究では河床波に着目し、数値解析モデルの再現性の向上を図るものである。先行研究として、堀内ら 5)は、流体粒子間相互作用に Two-way model を導入し、粒子間の衝突には個別要素法を用いた。一つは単一球に流体から作用する流体抗力を流体の運動方程式にそのまま組み込んだもの、もう一方は多数の粒子が存在した場合の抗力を評価し、流体の運動方程式に組み込んだものである。流体粒子間相互作用を用いた Two way model によって河床波の再現においてより実現像に近づいた数値解析を行うことができた。堀内の河床波の解析は、流速の計算をある粒子の座標から鉛直方向上向きになされていた。このときに掃流層が扱われる。混相流境界から経験的な式で求めた掃流層厚を減じた位置を計算河床と定義する。この作業を各検査断面で行い全範囲の河床高を決定する。流れの計算は河床に沿って実行されるため、この河床を起点に算出される。粒子の層は粒子が高密度のため、流体の影響はないと考えられ、このような流速の計算がなされる。この掃流層を用いた流速の計算方法は河床波のシミュレーションに一般に使われている。

一方で粒子層の上表面に式により求めた厚さである掃流層を定義し、そこで経験的な値を用いていること、固相の中に流体が流れているにもかかわらず、流速の計算を

掃流層の下端から計算していることは実現像に基づいた解析とはいいがたい。そういった問題点を克服することで再現性の向上した解析を行えることが予想される。

具体的な手法としては掃流層を使わず、流速の計算を解析の下端から行うことである。流体は固相間に流れているのでこのアプローチは経験的な値に頼らないより合理的な方法であると言える。その場合、掃流層で粒子間力だけでなく流速の力をあたえられ、他の粒子より速く動くという式は使えないので、掃流層の粒子と同じ動きをするように緻密な計算を行うために、粒子、流体に働く力について詳細に解析しなければならない。また、堀内が指摘したように、粒子数の多少が砂堆の再現に影響を及ぼしているので再度堀内と同じ方法で解析を行い、粒子の数を増やしたものと比べ、値の変化を見る。

2. 砂堆中の粒子の流下方向の速度の分析

2.1. 計算手法

液相は二次元乱流モデル (URANS)、固相は DEM を用いて計算を行う。なお、流体への抗力として流体・粒子間相互作用、粒子の空隙率により算出される遮蔽力を用いた Two way model を用いた。詳しくは堀内の手法を参照されたい 5)。

2.2 計算条件

水理条件はフルード数は 0.46 の常流流れである。計算を実施する検査領域の長さは 2m、境界は上・下流周期境界条件、河床は粗面河床と定義し、粒子数は 8 万個と 10 万個とする。それぞれ簡略化のため、図などに粒子数を付記する場合、8 万個を 8p と、10 万個を 10p と明記する。周期境界条件で流量を保持するために平均流速に見合った水位を随時更新する。この水理条件は粒子数以外、堀内と同じであり、実験から砂堆ができることが確認されている 6)。粒子間力の計算は粒子間接触面の鉛直方向のダッシュポット、スプリングの 2 つの機構に基づいた DEM の計算を行う。

2.3 計算結果と考察

時間はいずれも砂堆がはっきり確認された 60 秒時点で、計算領域の上流から 1m で計算した値を出している。右向きが流下方向である。図-1、図-2 のように 8 万個の粒子、10 万個の粒子どちらも砂堆が確認される。砂堆中の粒子の水平方向速度は図-3、図-4 のように鉛直分布で示す。縦軸は水深と粒径の比で表し、横軸は流下方向の粒子

の速度を最大流速で割ったものである。一番上にある粒子の y 座標を 0 とする。両図を見ると、下方にある粒子は動いていないものの、ある点から情報の粒子の速度分布は下に凸のグラフに変わる。この粒子の流下方向の速度の鉛直分布は後藤ら 7) が解析した粒子の流下方向の速度の鉛直分布(図-5)と一致している。そのため、掃流層を用いた粒子の速度分布は再現されている。

図-6 は図-4 の横軸のオーダーを小さくして、細かい粒子の速度を見やすくしたものである。この図より、箇所付近の粒子は速度がゼロでなく、流下方向へ速度を持っていることが分かる。最大流速で割った流下方向の速度 $u/u_{\max}$ は下層の粒子が 0.05-0.07 である。堀内は 8 万個の粒子で解析を行って砂堆の波速は 0.28m/min であることを得た。この値を $u/u_{\max}$ に直すと 0.003 である。速度のオーダーを見てみると、10 倍違うことが分かる。この原因は摩擦による底からのせん断応力が得られないため、流下方向への減速がないからである。粒子間力の計算は、低密度下、特に掃流層内では粒子間力は流下方向に卓越している。しかし、粒子層の下方にいくにつれて、粒子の密度が高くなり、上下の粒子による摩擦が無視できなくなる。流速の計算を解析の下端からする場合、粒子間の摩擦がないと、上方の粒子の速度が上がりすぎる。粒子から流体へ働く抗力が小さくなり、上から粒子が削れ過ぎて粒子層の維持ができなくなる。堀内の方法では粒子間力は接触面の鉛直方向の力しか考えられていない(図-7)ので、流速を下端から計算する場合、粒子間の摩擦を考慮した DEM を採用しなければならない。次章で摩擦を考慮した粒子の動きについて解析していく。

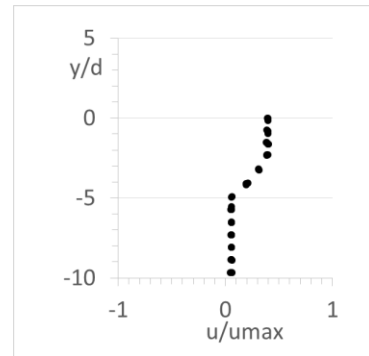


図-3 粒子の流下方向の速度の鉛直分布 8p

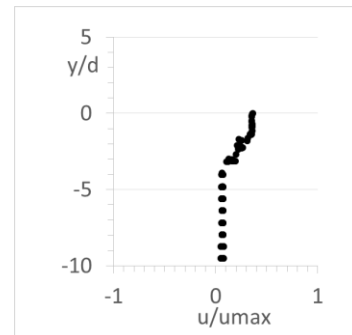


図-4 粒子の流下方向の速度の鉛直分布 10p



図-1 8p 60 秒後

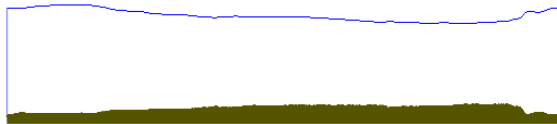


図-2 10p 60 秒後

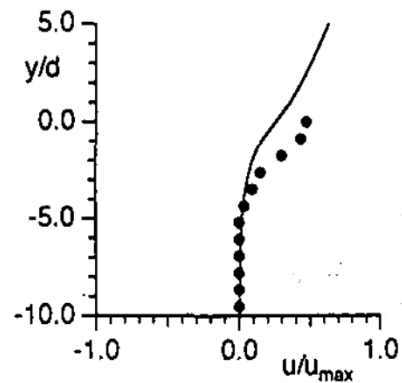


図-5

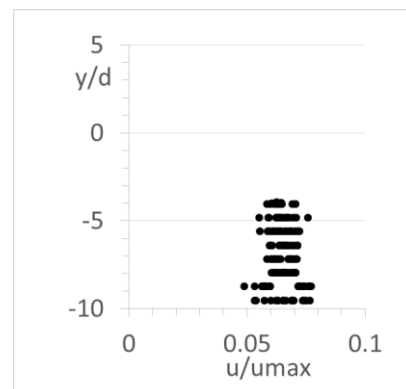


図-6 図-4 の拡大図

3.粒子間力に摩擦を用いた粒子の動きの解析

本章では摩擦により実際に粒子がどのような挙動を示すか解析していく。

粒子の接触面の鉛直方向への力のみのモデルとさらに摩擦を導入したモデルの二つの動きを比較してみる。まず、衝突のメカニズムとして二つのモデルの機構を説明する。前者では接触面の鉛直方向にスプリングとダッシュポットが使われている。図-7 はその模式的な図である。後者ではさらに接線方向にスプリングとダッシュポット、スライダーが加えられている。

スプリングは粒子間の食い込みによる粒子間力の蓄積、ダッシュポットは衝突を減衰させる。スライダーはある一定の接線方向の力が加わると、せん断力による拘束がなくなる。

流体、粒子の動きは堀内のモデルに準拠している。二つのモデルでは下端から対数側による流速計算を行っており、一番下のマーキングした粒子は摩擦力を計算しやすくするために空間に固定されている。

図-7,8 は堀内のモデルで 0.05 秒の間にどのようにマーキングした粒子が動くか視覚化したものである。図のように粒子がスライドしていく様子が分かる。水平方向の粒子間力は流下方向にある粒子からしか受けないので上下の粒子とのかみ合いはない。図-9,10 は堀内のモデルに摩擦力を加えたモデルで図-7,8 と同様にマーキングした粒子の動きを資格化したものである。この図ではマーキングした粒子が動いていないことが分かる。水平方向の粒子間力を見ると、後者のモデルでは、摩擦が働いてい

るため、上の粒子の動きが制限されていることが分かる。図-11 と図-12 の水平方向の粒子間力の分布を見てみる。縦軸は水深を示し、横軸は、計算式中の項のひとつである粒子ひとつに働く水平方向の粒子間力 F_x である。

双方の水平方向の粒子間力を見ると、図-11 では水平方向の粒子間力はあまり変動しない。粒子が他の粒子による抗力を受けていないので水平方向の粒子間力は変動しない。

一方で、図-12 では粒子間力のばらつきが大きい。

摩擦力を考慮したモデルは水平方向の力が加わるために粒子間力も大きくなる。摩擦を受けた粒子は互いに相互作用を受けるので、流下方向の粒子間力は高くなる。また、摩擦により粒子同士のかみ合いが強くなると、粒子の構造が崩れにくくなる。この結果は、掃流層を用いた砂堆の解析にも有効なので、今後の改良に期待される。

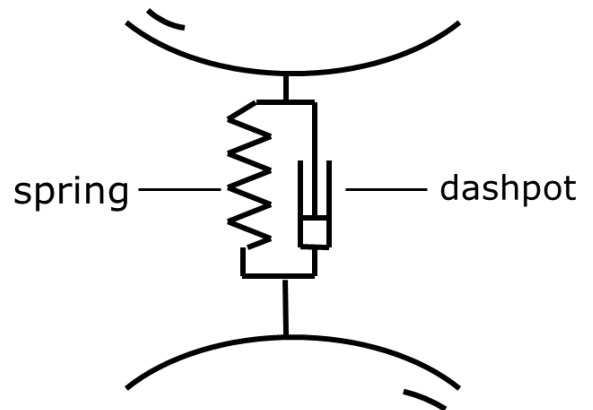


図-7 堀内モデルの DEM の機構

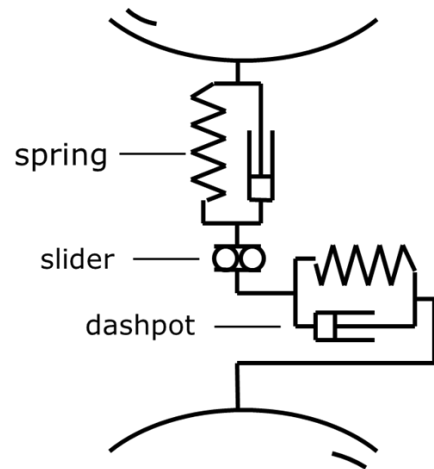


図-8 摩擦を考慮した DEM の機構

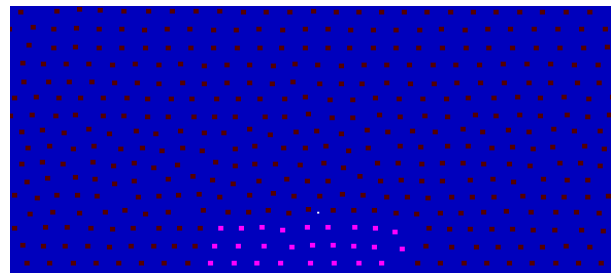


図-9 堀内モデル 0.15 秒

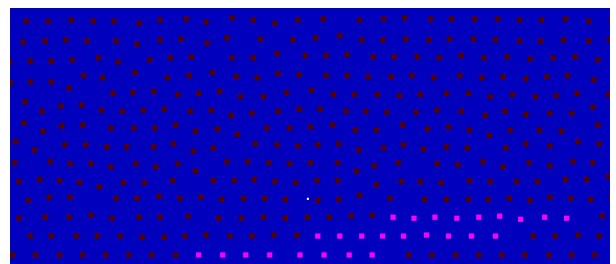


図-10 堀内モデル 0.2 秒

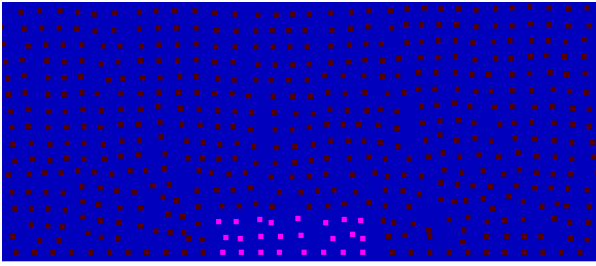


図-11 粒子の摩擦あり 0.15 秒

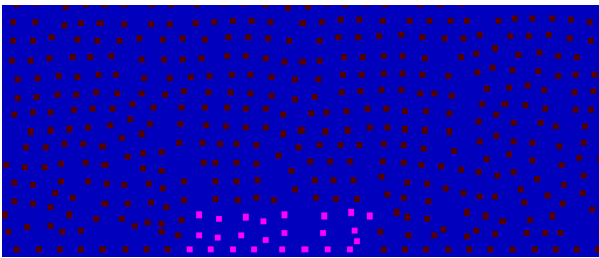


図-12 粒子の摩擦あり 0.2 秒

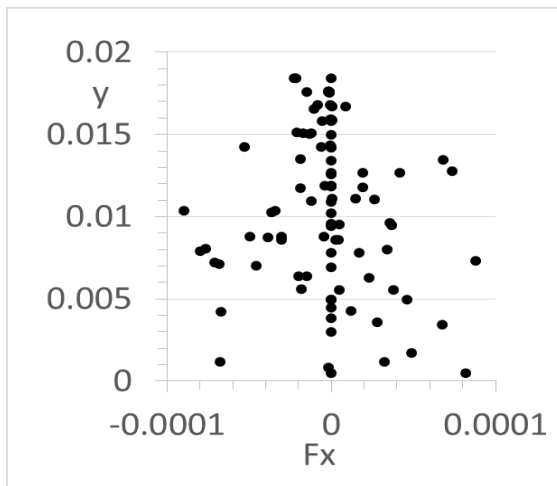


図-12 粒子の摩擦あり 鉛直方向の水平粒子間力の分布

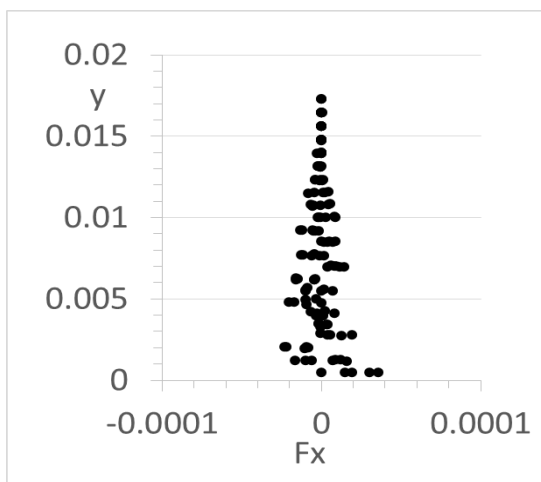


図-13 粒子の摩擦無し 鉛直方向の水平粒子間力の分布

4.まとめ

1. 摩擦を考慮した粒子を扱う場合,掃流層のせん断力が大きくなりすぎ,掃流層の維持のための係数の調整が難儀になる.堀内はその点を考慮して摩擦力を扱わなかったと思われる.
2. 摩擦力に関する係数の調整で河床波の研究における掃流層モデルの改良ができる.その点で,まだ掃流層を用いた解析はよりいっそうの改良が期待できる.
3. 一方で,掃流層を使わないモデルでは,摩擦が非常に重要な力であり,より物質の諸条件に即した解析ができるとと思われる.すでに河床波の解析のモデルはいくつか作られているため,それらと比較することで掃流層無しでも河床波の再現できるはず.

5.参考文献

- 1) 笠原孟, 清水康行, 木村一郎, 山口里美: 個別要素法を用いた河床変動計算 土木学会論文 集 B1 (水工学) Vol.68, No.4, I_I201-I_I206, 2012
- 2) 後藤仁志, Abbas YEGANEH-BAKHTIARY, 酒井哲郎: 混相流モデルと個別要素法の融合による高濃度掃流層の数値解析 土木学会論文 集 No.649/II-51, 17-26, 2000
- 3) 原田英治, 鶴田修己, 後藤仁志: 混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程の個液混相型 LES 土木学会論文 集 B2 (海岸工学) Vol.67, No2, I_471-I_475, 2011
- 4) 福田朝生, 福岡捷二, 内田龍彦: 移動床数値実験水路を流下する石礫粒子群の三次元運動 水工学論文 集, 第 57 卷, 2013.
- 5) 堀内 孝輔, 木村 一郎, 大村 健祐, 山 口 里 実, 清水 康行: Two-Way 型 DEM-URANS カップリングによる河床変動計算における相互作用項の効果 土木学 会論文 集 B1 (水工学) Vol. 70 (2014) No. 4 p. I_1057-I_1062
- 6) H. P. GUY, D. B. SIMONS, and E. V. RICHARDSON: Sumary of Alluvial Channel Data From Flume Experiments, 1956-61, United states government printing office, Washington: 1966
- 7) 後藤仁志・酒井哲郎・豊田泰晴(1996): 表層せん断力の急増減に対するシートフロー層の動的応答 海岸工学論文 集 Vol. 43 P 471-475