

II-276 土砂粒子スケールの運動から見た河床上微地形の形成過程に関する研究

早稲田大学理工学部 正会員 関根正人
早稲田大学大学院 学生会員 浅田 宗

1. はじめに

河床には河床波として知られる組織立った凹凸が生じることが知られている。これについての従来の研究は、河床波の形成条件やその上の流れの解析などを主な目的としてなされてきており、よりミクロな視点から土砂の運動の集積として河床波が形成されていく過程を論じたものはほとんどない。本研究では、河床波として認識されている規模の凹凸にまで発達する以前の、初期の微地形の形成過程に限定して解析を行うものである。解析に当たり、著者らがこれまで開発してきた Saltation Model を、土砂の初期移動（離脱）から停止までの一連の運動を解析できるように拡張した。そして、計算領域内の全ての河床面構成粒子の運動（静止もそのひとつの状態と考える）を追跡し、粒子の河床からの離脱あるいは河床への停止によって生じる河床面の局所的な上下変動を評価することにより、時間の経過とともに河床面に微小な凹凸が形成される過程を数値模擬した。

2. 解析の概要

本研究では、河床面を構成する土砂粒子の運動を順次追跡しながら、河床面が変化していく様子を数値模擬するため、著者らが開発してきた Saltation Model を核とする新たな解析モデルの開発を行った。個々の土砂の運動の解析方法については、別論文¹⁾に説明されているため、ここでは、新たにモデルに取り込んだ事項についてのみ以下に記す。すなわち、(1)運動を追跡しようとする粒子として河床面を構成する粒子そのものをとることにし、その離脱過程から流送・停止過程までの運動の1サイクルを全て解析できるようにした。これにより、Pick-up rate（離脱率）、平均移動速度・Step Length および流砂量を予測できる。なお、運動の解析の際には粒子の遮蔽の影響を考慮する、(2)粒子の離脱あるいは停止に伴い、河床面が1粒径分だけ低下あるいは上昇することを考慮に入れて、土砂移動に伴う河床面形状の変化を算出する、(3)解析の簡略化のため、元々の三次元モデルを鉛直面内における二次元のモデルへと次元を落とし、計算対象区間を粒径の1000倍程度として、境界には周期境界条件を適用する。これにより、計算領域より小さい規模の河床上微地形の形成過程を解析する。

3. 土砂の運動特性—モデルの検証—

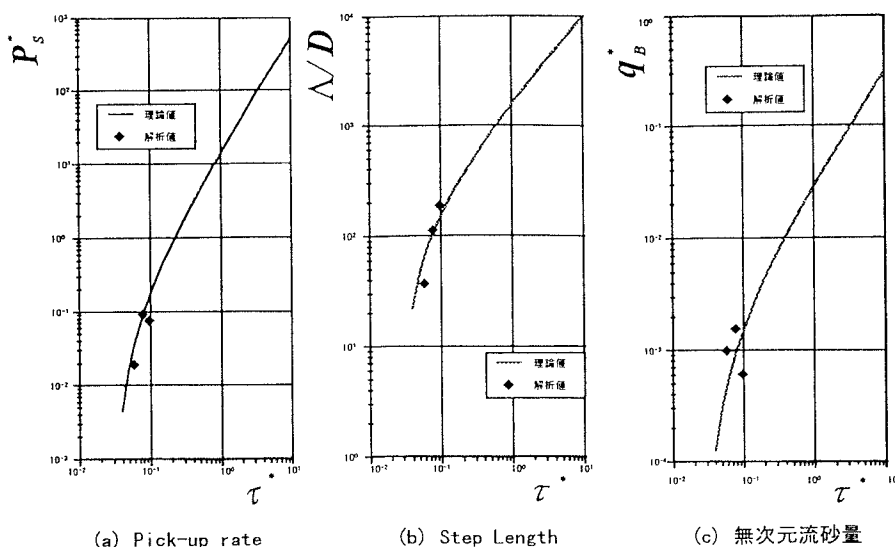
解析モデルの検証のため、掃流砂としての土砂移動を特徴づけるパラメータである Pick-up rate と Step Length に加え、流砂量自体の予測値を求めた。Pick-up rate は、次の式(1)から算出することができる。

$$P_s^* \equiv P_s \times \sqrt{D/(\sigma_s - 1)g} = (n_s / N_s) \times (1/t_r) \times \sqrt{D/(\sigma_s - 1)g} \quad (1)$$

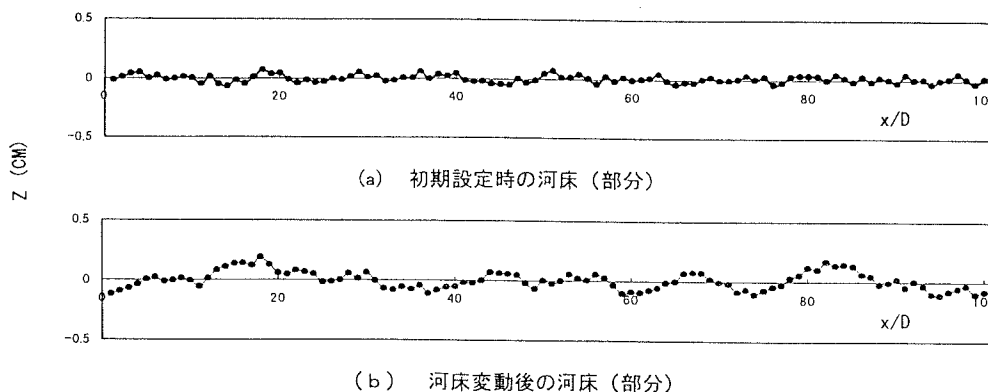
ここに、 N_s は着目した粒子の総数、 n_s は着目した粒子のうち移動した粒子の数、 t_r は粒子が離脱する際に要した時間の平均値である。また、Step Length は、移動開始位置から停止位置までの距離のアンサンブル平均として算出される。粒径 0.1(cm)の砂を対象として行った計算による予測値と従来の関係との比較を行ったのが図-1である。図中には、Pick-up rate については Nakagawa & Tujimoto²⁾の式、Step Length については Sekine & Kikkawa¹⁾の式、流砂量式については芦田・道上³⁾の式に相当する曲線がそれぞれ示されている。なお、Step Length の予測式と実験結果との比較については別論文で検証済みであること、および、ほぼ同一のモデルを用いて得られた式とここでの予測値とがほぼ一致するのは予想されたことであること、を付記する。さて、データ数がわずかであるため十分な判断を下すことはできないが、この図-1から、ここで行った解析により粒子の初期移動から停止までの一連の運動が概ね良好に模擬できることが推察される。

4. 河床上微地形の形成過程

図-2には、粒径 0.1(mm)の砂を対象として、掃流力 $\tau^* = 0.1$ の下での河床面の凹凸の変化の求めた結果の一例を示した。図-2(a)には標準偏差を粒径の1/6として設定した初期状態としてのランダムな河床面を、(b)にはある時間経過した後の河床面を、それぞれ示した。初期状態として設定したランダム河床については著者らの従来のモデルにおけるものと同一であり、この是非については検討済みと考える。図-2より、時間の経過につれて、河床面上に流下方向に粒径の数10から数100倍のスケールの組織立った凹凸が形成されつつあることがわかる。移動粒子同士の相互干渉を考慮しておらず、河床面から離脱し、移動していく粒子を無作為に選び、その運動を順次追跡していくという方法をとっているため、図-2(b)に示した状態が初期状態からどのくらい時間が経過したものとするべきか不明である。ただし、解析時間が十分とはいえず、未だ発達の上にあることが確認されていることから、今後、長時間にわたる解析が必要であるが、粒子スケールでの河床



図一 解析モデルの検証



図二 河床変動前後の比較

上微地形の形成過程は、このような考え方により再現可能ではないかと考えている。ただし、河床波として認識されるほど大きなスケールの地形変化にまで発達すると、流れの場が複雑になり、組織的な乱流構造をもつに到るため、ここでの流れ場の取り扱いでは不十分となる。

5. おわりに

粒径スケールの土砂の運動の解析から、河床面に微小な凹凸が形成される過程を数値模擬することを目的として、従来の Saltation Model を核とする新たな解析モデルを開発した。これは、河床面を構成する粒子が停止状態を保つか、あるいは離脱してから河床面上へ停止までの一連の過程を追跡可能とするものである。ここでは、限られた条件・限られた時間内での解析に留まったことから、今後はさらに解析を続け、河床波の形成過程を粒子スケールの運動から説明したいと考える。

参考文献

- 1) Sekine, M. and Kikkawa, H. : Mechanics of Saltating Grains, Journal of Hydro. Eng., ASCE, 118, pp. 536 - 558, 1992.
- 2) Nakagawa, H. and Tujimoto, T. : Sand Bed Instability due to Bed Load Motion, Proc. of ASCE, Journal of Hydr. Div., 106, HY12, pp. 2029 - 2051, 1980.
- 3) 芦田・道上：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文集，206, pp. 59 - 69, 1972.