

移動限界の勾配への依存性に関する考察

○筑波大学環境科学研究科 柳田明日美
 筑波大学環境科学研究科 瀬田 尊紀
 筑波大学農林工学系 宮本 邦明
 立命館大学理工学部 伊藤 隆郭

1. はじめに

掃流砂の運動は pick up rate と step length を素過程とする個々の粒子の離散的で有限な運動の統計的性質により特徴づけられる¹⁾。一方、土石流や土砂流における砂礫粒子の運動は連続体で近似される高濃度の集合流動としての性質をもつ。掃流砂を伴う流れは、勾配が大きくなるに従い、土砂流、土石流へと変化してゆく。江頭らによると、土石流から土砂流の領域までの流れは単一の構成則により説明されることが分かっている²⁾。

本研究では、同様の解析法を掃流砂の領域にまで拡張し、移動床における理論河床と砂礫の流動層厚に関する取り扱いから、掃流砂を伴う流れと土砂流との境界および移動限界の説明を試み、その勾配への依存性について考察を行う。

2. 土砂流・掃流砂を伴う流れの境界と限界掃流力に関する定式化

江頭らの構成則を定常等流の流れに適用すると、河床面で外力のせん断応力と粒子間の個体摩擦応力が釣り合わなければならないという力学的条件から、理論河床と砂礫粒子を高濃度に含む集合流動層厚の関係が以下のように定まる³⁾。

$$\eta_s \equiv \frac{h_s}{h} = \frac{\tan \theta}{c_s(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (1)$$

また、式(1)は次式のように書き改められる。

$$\eta_d \equiv \frac{h_s}{d} = \frac{1}{c_s \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)} \tau_* \quad (2)$$

ここに、 c_s は砂礫高濃度流動層の砂礫の平均濃度で静止堆積層（移動床）の濃度 c_* を用いておよそ $c_s = c_*/2$ 、 σ は砂礫の質量密度、 ρ は間隙流体の質量密度、 ϕ は砂礫の内部摩擦角、 d は砂礫の粒径、 τ_* は無次元掃流力、 h, h_s, θ は図.1 に示す通りである。

式(1),(2)は以下のことを意味する。すなわち、理論河床は、水面（流れの表面）から計って、集合流動層厚との比が式(1)を満たす位置（下方）にあり、式(2)より集合流動層の表面（清水層との境界面）から計って粒径の η_d 倍下方にある。

$\eta_d = 1$ を掃流砂を含む流れと土砂流の境界だとすると、そのときの無次元掃流力 τ_{*s} は、河床勾配が小さく重力の影響が無視できる条件のもとで $\theta \approx 0$ として、 $\tan \phi \approx 0.75$ であるから、式(2)より $\tau_{*s} \approx 0.2$ を得る。掃流砂運動の重要なパラメータである pick up rate は流れの乱れ速度の統計的確率分布と粒子の沈降速度との関係から説明されており、理論的には乱れ速度の確率分布の特性から $\tau_* > 0.2$ の領域でも有限の値を持つが、実験からはおよそ $\tau_* = 0.2$ を境としてそれより大きな無次元掃流力の領域ではその値が得られていない。この値は τ_{*s} にほぼ等しく、掃流砂を含む流れから土砂流へ遷移する領域であることを示唆している。

一方、移動限界は次のように考えることができよう。今、勾配を一定にして流量を（水深を）連続的に小さくしてゆくことを考える。このとき、理論河床の位置は力の釣り合いから η_s が式(1)を満たすところでありこの値は変化しないが η_d の値は連続的に小さくなってゆく。 η_d がある値 η_{dc} より小さくなると、粒径という幾何学的な条件が重要な役割をたすようになり、理論河床から上の（集合流動層と清水層の境界）砂は動かなくなっていわゆる移動限界を迎える。 η_{dc} は幾何学的な条件なので一定値を取るとすると式(2)より η_{dc} に対応する一定の τ_* の値 τ_{*c} が存在することがわかる。こ

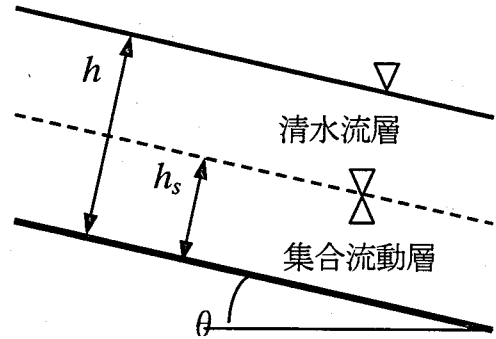


図.1 定常等流の土砂流の模式図

のように考えると、移動限界として τ_{*c} のかわりに η_{dc} を用いることができる。そこで、 η_{dc} の値を見積もってみよう。重力の影響が無視できる程度の緩勾配 ($\theta \approx 0$) では $\tau_{*c} = 0.04 \sim 0.05$ 程度の値をとるので $\eta_{dc} = 0.2 \sim 0.25$ 程度の値となる。この値は粗面固定床における理論河床位に関する実験結果、礫頂部より粒径の $1/6 \sim 1/4$ 程度下方、と同程度の値となっている。

3. τ_{*s} , τ_{*c} の勾配への依存性

2. で得た τ_{*s} , τ_{*c} は $\theta \approx 0$ の条件のもとでの値であり、これは式(2)によると勾配とともに変化する。 $\theta \approx 0$ のもとでの τ_{*s} , τ_{*c} を改めて τ_{*s0} , τ_{*c0} と表すと、式(2)より次式が導かれる。

$$\tau_{*s} = c_s \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta) \quad (3) \quad \tau_{*s0} = c_s \tan \phi \quad (4)$$

$$\tau_{*c} = \eta_{dc} c_s \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta) \quad (5) \quad \tau_{*c0} = \eta_{dc} c_s \tan \phi \quad (6)$$

式(3), (4)の比, 式(5), (6)の比をとると, τ_{*s} , τ_{*c} の勾配への依存性が導かれともに次式で表される。

$$\frac{\tau_{*s}}{\tau_{*s0}} = \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*c0}} = \frac{\cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)}{\tan \phi} \quad (7)$$

式(7)によると, ともに, 勾配に対して減少関数となっている。移動限界については, 芦田ら⁴⁾により次式で表されるように勾配の増加にともない増加することが報告されておりそれとは異なる結果となっている。

$$\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*c0}} = 10^{1.72 \tan \theta} \quad (8)$$

図2に式(7), (8)の比較を示す。このような相違は移動限界時の理論河床の位置 η_{dc} が勾配により異なるとして説明される可能性もあるが, 本来 η_{dc} は幾何学的パラメータであり勾配の変化に伴い変化するものではないとも考えられ, 詳細についてはさらに検討を必要とする。

4. おわりに

江頭らの土砂流の砂礫流動層厚に関する解析を, 掃流砂を伴う流れと土砂流との遷移条件, および移動限界に適用した。その結果, 掃流砂を伴う流れと土砂流との遷移を支配する条件 (無次元掃流力) が, 実験から pick up rate を得られる掃流力の上限と一致すること, 移動限界に対応する理論河床位が固定床実験から得

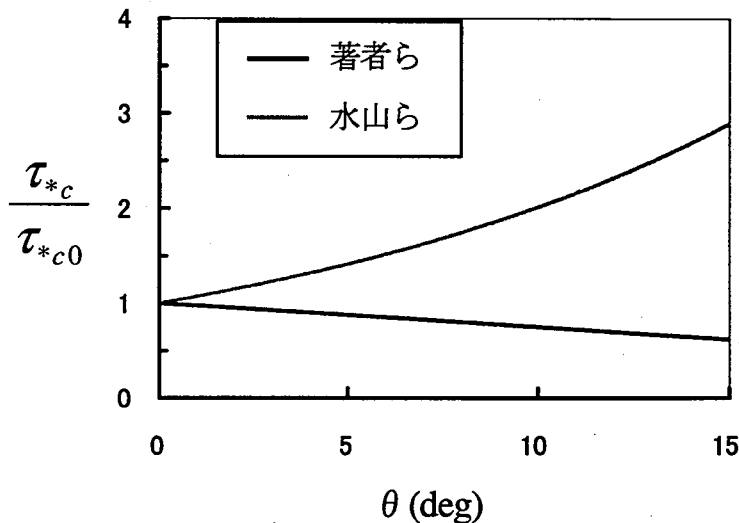


図2 移動限界掃流力の勾配への依存性

られる理論河床位とほぼ一致することを明らかにした。これらの結果をもとに, 掃流砂を伴う流れと土砂流の遷移条件および移動限界の勾配への依存性を調べると, ともに同じ関数で表され, 勾配に対して減少関数であることが導かれた。移動限界については, これまでに報告されている傾向と異なっており, 移動限界時の理論河床の位置 η_{dc} が勾配により異なっていることも考えられるが, むしろ変化しないとも考えられるため, さらなる検討が必要であることを示した。

参考文献: 1) 中川博次・辻本哲郎: 新体系土木工学 23, 移動床流れの水理, 土木学会編, 技報堂, 1986, 2) 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭: 掃流砂量に関する力学的解釈, 水工学論文集, 41 巻, 789-794, 1997, 3) 江頭進治・芦田和男・田野中 新・高橋徹也: 連続体手法による掃流砂量式に関する研究, 京大防災研年報, 34 号 B-2, pp.261-274, 1991, 4) 芦田和男・大同淳之・高橋 保: 水山高久: 急勾配流れの抵抗と限界掃流力に関する研究, 京大防災研年報, 16 号 B, pp.481-494, 1973.