

土石流の固定床から移動床流れへの 遷移過程に関する研究

TRANSITION OF DEBRIS FLOWS OVER RIGID BEDS TO OVER ERODIBLE BEDS

伊藤隆郭¹・江頭進治²・宮本邦明³・竹内宏隆⁴

Takahiro ITOH, Shinji EGASHIRA, Kuniaki MIYAMOTO and Hirotaka TAKEUCHI

¹学生会員 立命館大学大学院 総合理工学専攻 (〒525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

³正会員 工博 鳥取大学助教授 地域共同研究センター (〒680 鳥取県鳥取市小山町南 4-101)

⁴学生会員 立命館大学大学院 環境社会工学専攻 (〒525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

In debris flows over erodible beds, kinematic bed conditions such as velocity and velocity gradient are determined from the dynamic condition that the driving force must be equal to the yield stress at the bed surface. On the other hand, debris flows over rigid beds depend on the conditions; bed slope, sediment discharge rate, static friction angle of sediment and friction angle of grain to the bed surface. In present study, the differences between debris flows over erodible beds and ones over rigid beds, and their transitions are clarified theoretically by solving velocity profile, sediment concentration profile and flow resistance and experimentally by using flume data.

Key Words : Constitutive equations, debris flow, erodible bed, rigid bed, transition process

1. 緒言

土石流の構成則に関する研究は、種々の観点から進められ、1980年代の後半までに高橋¹⁾、椿ら²⁾、宮本³⁾および江頭ら⁴⁾の研究が提案されてきた。これらは、それぞれ、修正が加えられながら改良され、各々によって行われた実験結果と比較されている。これらの構成則を運動量保存則に適用し、適切な境界条件を適用すれば、流れの諸量が解ける。ところが、土石流に関する理論および実験的な検討の多くにおいて、境界条件としての河床の状態、すなわち、移動床か固定床かといった問題は、あまり考慮されていない。

移動床上における土石流において、理論河床やそこにおける速度勾配といった運動学的条件は、外力としてのせん断力と静的な摩擦力とが等しくなり、流動応力が0となることによって定まる。これは、移動床上の土石流の流れ、すなわち、流速分布と濃度分布が、勾配に対して一意に定まることを意味する⁵⁾。それに対して、固定床上の土石流の流れは、河床が人工的に与えられるため、勾配、給砂量および砂粒子と河床材料との摩擦角といった条件に支配される。これらの違いが、固定床と移動床上における土石流の河床近傍の応力分布の違いを生み、流速分布が異なるのである。

著者らは、このように、固定床と移動床上におけ

る土石流を対象にして、両者の違いは、応力構造そのものにあるのではなく、河床近傍における応力分布の違いにあることを明らかにしている⁶⁾。ところが、両者の遷移過程に関する検討はなされておらず、他の土石流研究においても、これらの問題は着目されていない^{1), 2)}。そこで、本研究は、固定床上における土石流の移動床上への遷移過程について、理論と実験の両面から検討を行うものである。

2. 遷移過程における流れの特性

(1) 支配方程式と応力モデル

図-1は、江頭ら⁶⁾による等流状態における土石流の応力、流速および粒子濃度分布の模式図である。図において、 τ_y は降伏応力、 τ_f は粒子間隙流体の乱れによる応力、 τ_d は粒子の非弾性衝突に伴う応力である。非圧縮性連続体の2次元等流状態における運動量保存則に、構成則として江頭らの土石流に関するものを適用すれば、運動方程式の x 、 z 成分はそれぞれ次式で与えられる⁶⁾。

$$p_s \tan \phi_s + \rho (f_f + f_d) d^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) = \int_z^h \rho \{ (\sigma/\rho - 1) c + 1 \} g \sin \theta dz \quad (1)$$

$$p_s + \rho f_{pd} d^2 (\partial u / \partial z)^2 = \int_z^{h_t} \rho (\sigma / \rho - 1) c g \cos \theta dz \quad (2)$$

p_s の表示式：

$$p_s / (p_s + p_d) \equiv f(c) = (c/c_*)^{1/n} \quad (3)$$

ここに、

$$f_d = k_d (1 - e^2) (\sigma / \rho) c^{1/3}, \quad f_f = k_f (1 - c)^{5/3} / c^{2/3}$$

$$f_{pd} = k_d e^2 (\sigma / \rho) c^{1/3}$$

ここに、 ϕ_s は砂粒子の内部摩擦角、 θ は x 軸と水平とのなす角度、 ρ は水の密度、 σ は粒子の密度、 c は混合物中の粒子の体積濃度、 c_* は静止堆積層の体積濃度、 d は砂粒子径、 e は固体粒子の反発係数、 g は重力加速度、 h_t は流れの厚さ、 k_f 、 k_d は実験定数でそれぞれ 0.16⁶⁾、0.0828⁴⁾、 n は経験定数 ($n=5.0$)⁵⁾、 u は流速、 p_d は粒子の非弾性衝突の前後で保存されるエネルギー、 p_s は粒子の接触圧力である。式(1)の左辺1～3項は、 τ_y 、 τ_f および τ_d であり、 $\tau_f + \tau_d$ を流動応力と呼ぶ。式(2)の左辺2項は、 p_d である。また、座標軸は図-1 に従う。

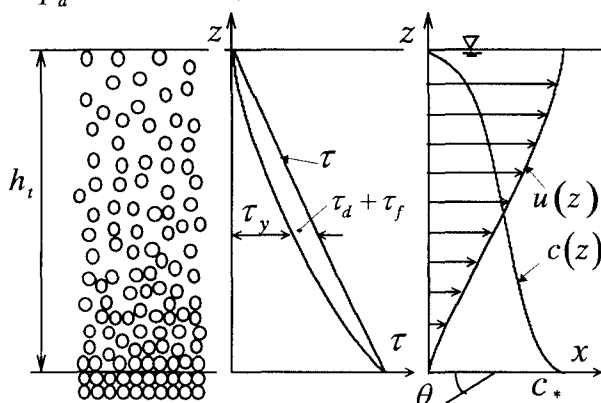


図-1 流れのモデル (移動床)

(2) 流速分布と濃度分布

図-1 に示すように、砂粒子が自由水面まで分散している流れを対象にする。固定床および移動床上における土石流の流速分布と濃度分布は、適切な境界条件のもとで、式(1)、(2)の p_s に式(3)を用い、これらを連立して解くことにより求められる^{5), 6)}。ここで、勾配一定の固定床において給砂量を増加させていくと、流速分布、濃度分布および応力分布がどのように変化するかを調べる。なお、簡単のために、砂粒子の内部摩擦角 ϕ_s と砂粒子と固定床材料との摩擦角とが等しいものとして、 $z=0$ における流速の境界条件として $u=0$ を採用する。

図-2 (a)、(b) および (c) は、水と砂礫を合わせた全流量が一定のもとで、流砂量を増加させていくときの流速および濃度の分布形、ならびに河床における

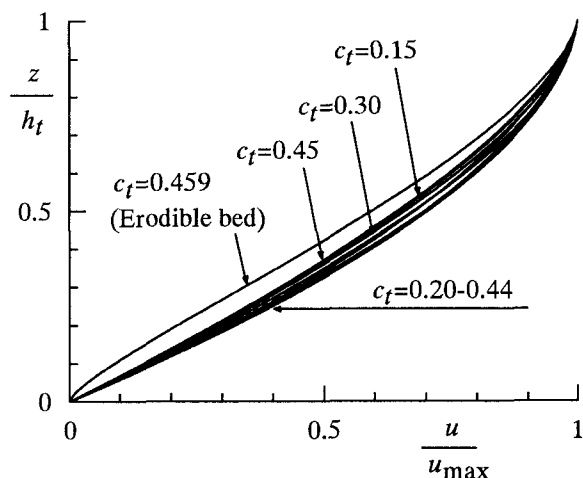


図-2 (a) 流速分布

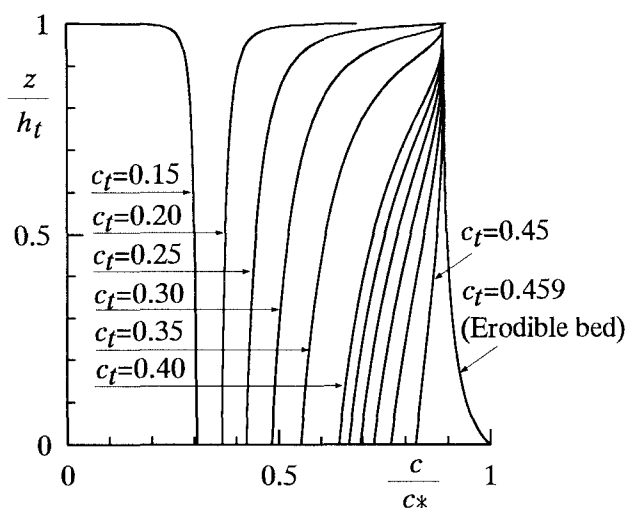


図-2 (b) 粒子濃度分布

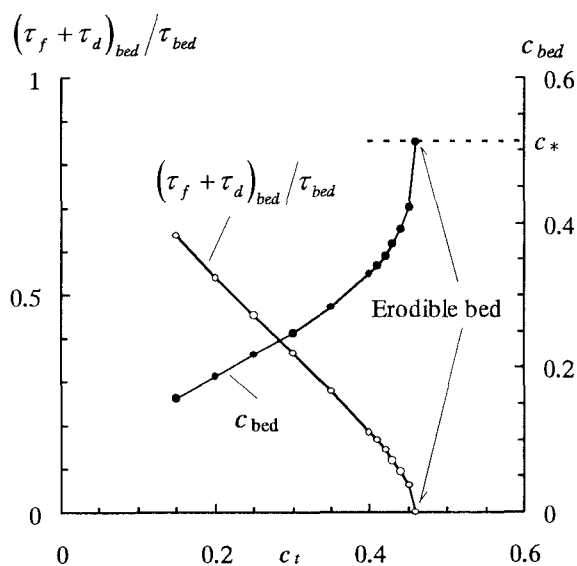


図-2 (c) 河床における流動応力と底面濃度

流動応力および底面濃度と c_* の関係を示している。

ここに、 c_t は砂礫の輸送濃度で、 $c_t \equiv \int_0^{h_t} c u dz /$

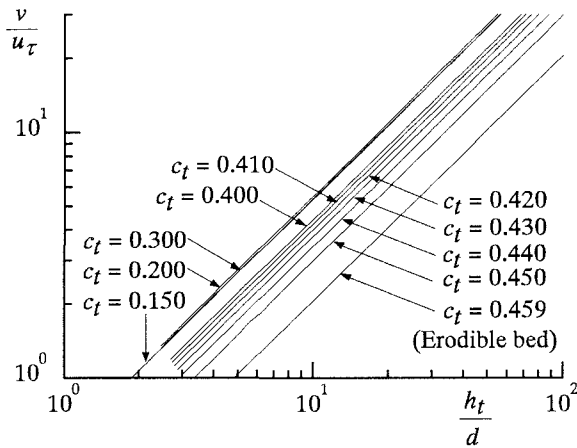


図-3 抵抗則

$\int_0^{h_t} u dz$ と定義される。計算において、 $\theta = 19.0^\circ$ 、 $\phi_s = 38.7^\circ$ 、 $e = 0.85$ 、 $c_s = 0.512$ 、 $d = 0.218$ (cm)、 $\sigma/\rho = 2.62$ を用いている。また、流速分布と濃度分布の図には、移動床上のものも載せている。 c_t は 0.15 から 0.40 まで 0.05 ずつ増加させ、0.40 から 0.45 までは 0.01 ずつ増加させている。

まず、図-2 (a) の流速分布について検討する。 $c_t = 0.15 \sim 0.45$ の領域において分布形に顕著な差は見られないが、 $c_t = 0.45$ から 0.459 へと変化する時に、大きな変化が見られる。これは、 c_t の増加に伴い、底面における流動応力が減少し、 $c_t = 0.459$ になれば、0 となるためである。ここで、 $c_t = 0.459$ の結果は、 $\theta = 19.0^\circ$ における移動床上の土石流の分布形である。 $c_t = 0.459$ の値は平衡濃度であり、 c_t がこの値以上になれば、堆積が生じる。

つぎに、図-2 (b) の濃度分布についてみる。分布形には、 c_t の増加に伴って濃度の逆転現象が見られる。これは、供給エネルギーが増加すると、一様の濃度分布ではエネルギー散逸ができなくなり、速度勾配の大きい底面近傍の粒子間隙を広げること、すなわち、底面近傍の粒子濃度が小さくなることによって、エネルギー散逸を増加させる方向に現象が進むからである⁴⁾。また、 $c_t = 0.45$ と $c_t = 0.459$ (移動床) の分布形には、大きな違いが見られる。これについては、次のように解釈できる。図-2 (c) を参照すれば、底面における流動応力は c_t の増加に対して、ほぼ直線的に減少し、 $c_t = 0.45$ から 0.459 にかけて急激に減少する。ここで、流動応力とは、全せん断力から河床における降伏力を差し引いたものである。この流動応力の変化に対応して、同図の底面濃度は、移動床流れへ遷移する際に、急激に増加している。これは、移動床の場合の底面濃度が c_s であるのに対し、固定床では、勾配、摩擦角および c_t といった条件に支配されているからである。これは、また、勾配によって流速と濃度分布が一意に定まる

移動床の流れとは異なり、固定床上の流れは、特に河床近傍において流動応力をもつことを示している。

(3) 流れの抵抗

前節(2)において、流速分布と濃度分布が求められた。そこで、求められた流速分布を次式の定義に従って抵抗則の形で表す。

$$v/u_\tau = \left[\int_0^{h_t} u dz / h_t \right] / \sqrt{gh_t \sin \theta} \quad (4)$$

図-3 は、 c_t をパラメータとして固定床上の流れの抵抗を表したものである。図には、その勾配に対応する移動床上の流れの抵抗も示されている。計算条件は、図-2 で用いた諸量と同じである。図-3 によれば、 $c_t = 0.45$ までは、 c_t の増加に対する抵抗の増加は顕著ではないが、 $c_t = 0.45$ から 0.459 の間で抵抗の増加は著しく、移動床流れへと遷移している。この結果は、 c_t が僅かに異なるだけで、固定床 ($c_t = 0.45$) と移動床 ($c_t = 0.459$) における河床近傍の流動応力がかなり異なることを示している。また、図-2 および図-3 の計算結果はこの種の実験等において土石流の応力構造を議論する際に、細心の注意を払わなければならないことを示唆している。

3. 実験値と計算値の比較

(1) 実験とその結果

実験には、長さ約 12m、幅 10cm の勾配可変の矩形断面開水路を用い、勾配は 19.0° に設定している。これは、粒子濃度の鉛直分布がほぼ一様になる勾配である。水路床には、実験に用いるものと同じ砂を張り付けている。実験用砂は、 $d_{50} = 0.218$ cm、 $\phi_s = 38.7^\circ$ 、 $c_s = 0.512$ 、 $\sigma/\rho = 2.62$ の一様砂である。ここに、 d_{50} は 50% 粒径、 ϕ_s は砂粒子の内部摩擦角の実測平均値である。

実験においては、上流端より定常給水し、同時にホッパーにより給砂を行い、定常状態の土石流を形成させた。給砂位置は下流端より 6.0m の地点である。混合物の全流量 q_m は、 $\bar{q}_m = 48.4$ 、 146.0 、 283.0 cm²/s の 3 ケースである。ここに、 $\bar{q}_m$ は実測流量の平均値である。

諸量の測定は次のように行っている。輸送濃度は、水路下流端において、5 回採水したものを平均して求めた。流速分布の測定においては、水路下流端より 160cm の位置に設置された高速ビデオカメラによって水路側壁より撮影された粒子を追跡することによって求められた。濃度の鉛直分布の測定においては、鉛直方向に千鳥状に飲み口を持つサンプラーを用いて局所輸送濃度分布 $c_t(z)$ を測定した。なお、サンプラーの飲み口において流れの乱れが生じたため、輸送濃度と流速分布の測定値を用いて、若干の補正を行っている。流動深は、下流端より 50.0cm、

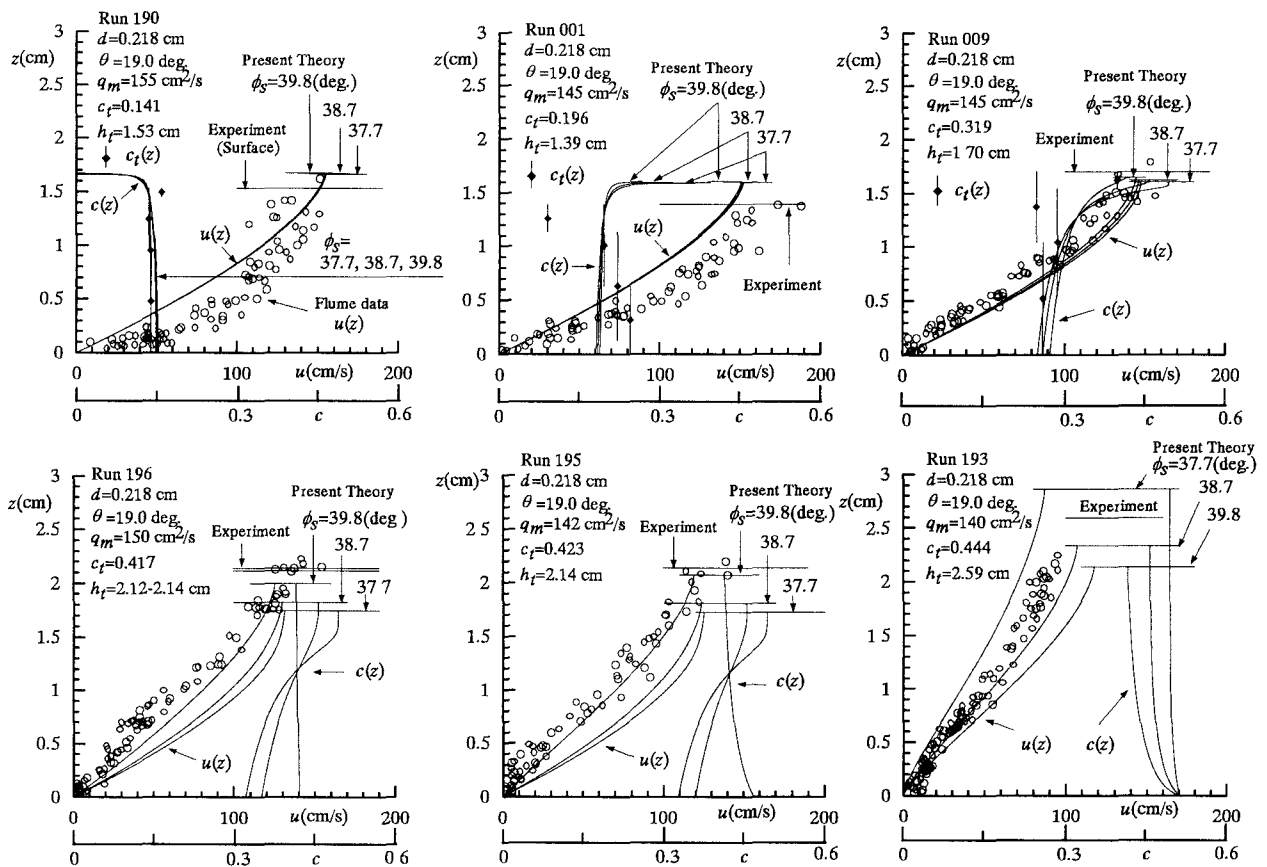


図-4 固定床上における土石流の移動床流れへの遷移過程(流速, 局所輸送濃度分布)

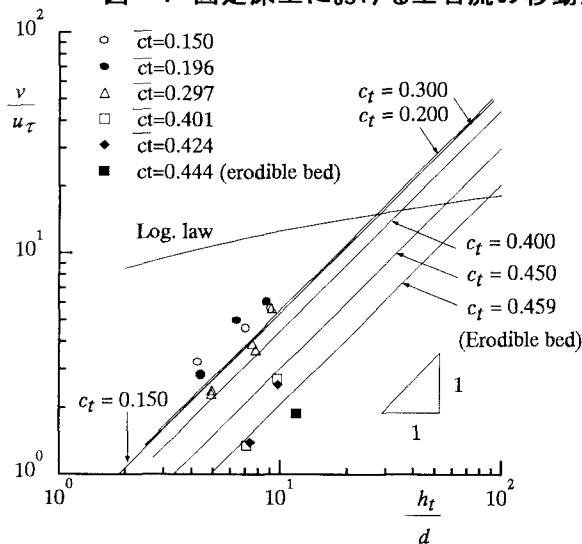


図-5 抵抗に関する実験値と計算値の比較

160.0cm および 250cm の位置に設置されたポイントゲージによって測定され、それらの平均値を用いている。移動床実験においては、河床勾配は、水路側壁において、水面および河床に一致するように細糸を張り、その勾配から定めている。固定床の実験においては、勾配一定のもとで、輸送濃度 c_t を徐々に増加させて、流速と粒子濃度の鉛直分布がどのように変化するかを調べている。

図-4 は、実験で得られた流速および局所輸送濃度 $c_t(z)$ の鉛直分布である。それぞれの全流量 q_m は

ほぼ等しい。 $c_t(z)$ の測定点は、サンプラーの飲み口の厚さを棒の長さで示し、◆印は、飲み口の図心である。 c_t が 0.141 程度の領域においては、流速分布は下に凸の分布形である。 c_t を増加させると、河床近傍においては、ほぼ直線に近い分布形を経て、上に凸の分布形を有する移動床流れ(Run 193)へと連続的に遷移している。このとき、 c_t の僅かな違いにより、移動床流れに遷移し、急激に流れの抵抗が増加する様子も分かる。また、 $c_t = 0.141$ (Run 190) のように、濃度が小さくなると、固定床近傍の速度勾配が著しく大きくなっている。なお、輸送濃度が大きい Run 196 以降においては、サンプラーの飲み口の目詰まりのため、 $c_t(z)$ の測定ができなかった。

図-5 は、 c_t をパラメータとして、流速係数 v/u_τ と相対水深 h_t/d の関係を示したものである。図中には、比較のため清水乱流の対数型の抵抗則も載せている。ここに、相当粗度 k_s は、 $k_s = 2d$ を用いている。これによれば、図-4 と同様に、 c_t の増加と共に流れの抵抗が増加し、移動床流れへと遷移するものと推察される。

(2) 実験値の解析

前章の方法^{4), 5), 6)}を用いて計算された流速と濃度の鉛直分布(厳密解)を図-4 に、流れの抵抗を図-5 に示している。2章で述べたように、固定床と移動

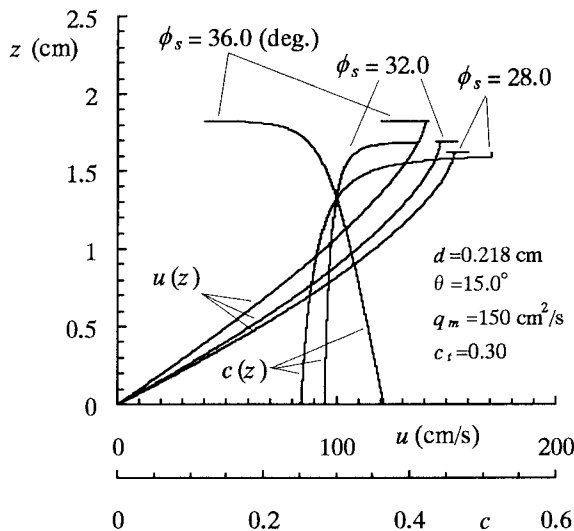


図-6 (a) 固定床上の流れに及ぼす ϕ_s の影響 ($\theta = 15.0^\circ$)

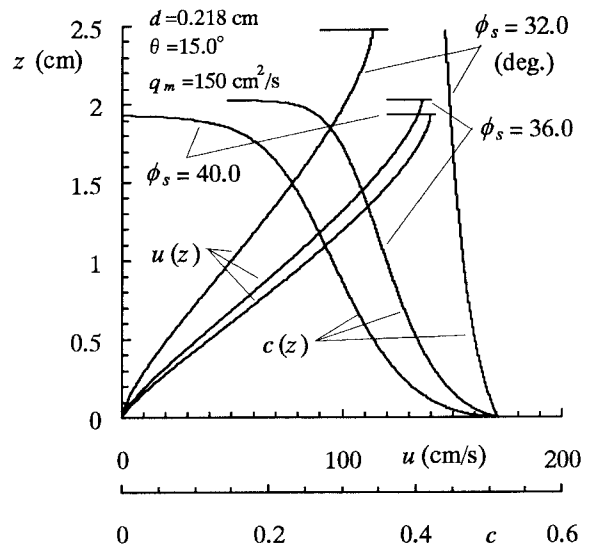


図-6 (b) 移動床上の流れに及ぼす ϕ_s の影響 ($\theta = 15.0^\circ$)

床の遷移過程の流れにおいては、 c_i や摩擦角といった量の僅かな違いによって流速や濃度分布が変化してしまう。ここでは、測定の精度を考慮して、砂粒子の摩擦角 ϕ_s に幅を持たせている。図-4 には、 ϕ_s の実測値の最小値 (37.7°) と最大値 (39.8°) を用いた計算値も示している。これらによれば、 $c_i = 0.196$ (Run 001) のケースにおいて、濃度勾配の傾向に相違がみられるものの、水面近傍の $c_i(z)$ の測定値は、水面の変動の影響を受けるため信頼性に乏しいことと、実測の僅かな誤差が $c_i(z)$ に影響することを考慮すれば、本モデルは、 $c_i = 0.141$ 程度の領域 (Run 190) から移動床に遷移する領域 (Run 193) に渡って実験値の傾向を概ね説明している。次に、図-5 に示す流れの抵抗についてみると、流速分布と濃度分布の場合と同様、両者はよく一致しているのが分かる。

なお、他の土石流の構成則を用いて、このような土石流の遷移現象を説明することはかなり困難である。これは、土石流の流れにおいて粒子接触応力が重要であるか否かによるものである⁷⁾。

(3) 流れに対する摩擦角 ϕ_s の影響

図-4 の結果において、 ϕ_s の違いによる計算水深に着目すると、固定床上における土石流の流れの抵抗は、 ϕ_s の増加に伴い増加するが、移動床上における流れの抵抗は、 ϕ_s の増加に伴い減少している。これについて検討する。図-6 (a), (b) は、2 章の構成則を用いて得られた固定床および移動床上における土石流の流速および濃度分布の ϕ_s に対する感度分析の結果である。計算においては、全流量 $q_m = 150.0 \text{ (cm}^2/\text{s)}$ 、 $\theta = 15.0^\circ$ を用い、 e 、 d 、 c および σ/ρ は、図-2 と同様で、 ϕ_s の値は図中に

示す。上述のように、移動床と固定床では、流れに対する ϕ_s の影響が逆に表れることを示している。これは、次のように解釈できる。固定床上の流れにおいて、 ϕ_s が減少すれば、せん断変形、すなわち降伏応力によるエネルギー散逸が減少するため、流れの抵抗は小さくなる⁴⁾。一方、移動床流れにおいては、 ϕ_s が減少すれば、せん断変形に伴うエネルギー散逸が減少して、速度勾配が大きくなり、濃度は一様化する方向に現象は進むが、河床における濃度 $c = c_r$ の境界条件によって、河床近傍とほぼ等しい濃度が一様化する。その結果、せん断変形に伴うエネルギー散逸が増加し、流れの抵抗が大きくなる。固定床と移動床流れにおけるこのような特性は、本モデルによって予測される結果である。これらについては、今後、実験的に検討する必要がある。

(4) 流れに対する固定床の影響

図-4 において、 c_i の小さいケース (例えば、Run 190) に着目すると、固定床近傍の実験値の速度勾配が、計算値よりも大きくなっている。これは、本理論において、粒子間隙の空間スケールの評価には固体壁面の存在が考慮されていないため、粒子濃度が小さくなると、空間スケールが固定壁からの距離に依存する乱れスケールよりも大きくなり、粒子間隙流体の乱れによる応力が過大に評価されているためと思われる。これについて、古典的な解析によって若干の検討を行う。江頭らの構成則に含まれる粒子間隙流体の乱れによる応力に関して、次のように修正を行う。本モデルにおける粒子間隙の空間スケールは次式で与えられている⁴⁾。

$$l_0 = \sqrt{k_f} \left\{ (1-c)/c \right\}^{1/3} d \quad (5)$$

固定壁近傍において、粒子間隙の空間スケール l_0 が、Prandtl の混合距離 ($l = \kappa z$)、すなわち乱れスケール

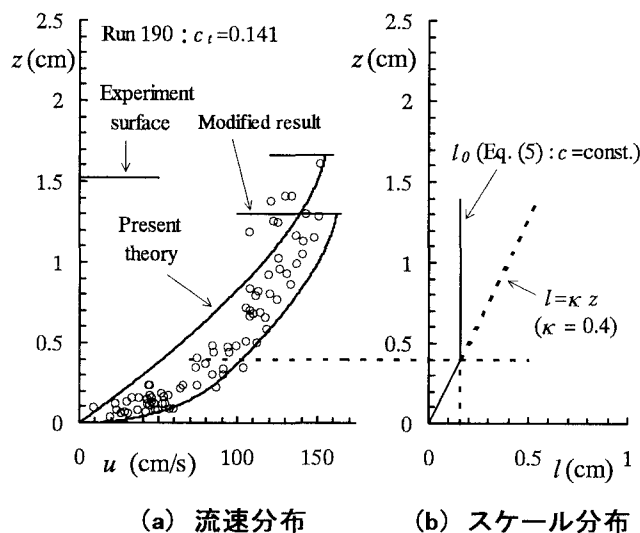


図-7 固定壁近傍に着目した流速および空間スケール分布

よりも大きいときは、 l_0 を l に置き換えて計算を行うものとする。簡単のために、粒子濃度は鉛直方向に一様とする。

図-7(a), (b)は、 $c_t = 0.141$ (Run 190)に対する計算結果と l_0 および $l = \kappa z$ の鉛直分布の比較である。比較のために、図-4の計算値も載せている。これによれば、河床から水深の約 $1/4 \sim 1/3$ の位置まで、乱れスケールに対する固定壁の影響が強いことが示唆され、このような計算によって、固定壁近傍の実験値の流速分布の傾向を概ね説明できるようなのである。しかし、このような問題については、流体の乱れに関する詳細な検討が必要であることは言うまでもない。

4. 結語

固定床上の土石流の流れから移動床上の流れへの遷移過程について、著者らの土石流の構成則を用いて検討するとともに、水路実験ならびにその結果の解析を行った。本研究によって得られた知見および課題を列挙すると、次のようである。

(1)本モデルを用いた計算結果によれば、固定床から移動床への遷移過程に関して次のような結果が得られた。固定床上の土石流において、輸送濃度の増加に対する流速分布、濃度分布と底面濃度、および流れの抵抗の変化は連続的である。ところが、固定床流れから移動床流れへと遷移する限界近傍において、これらは急激に変化する。この結果は、固定床および移動床上における土石流の底面近傍における応力分布の相違に起因するものであり、特に、流れにおける降伏応力が重要な役割を果たしている。

(2)内部摩擦角に対する流速分布や濃度分布の感度分析を行い、次のことが明らかにされた。砂粒子の摩擦角の増加によって、固定床上における土石流の抵抗は増加し、一方、移動床上における流れの抵抗は減少することが示された。このことは、固定床と

移動床とにおける河床近傍の濃度分布の違いによって説明できるが、実験的に確かめる必要がある。

(3)上述(1)の結果は、水路実験によって確認された。すなわち、固定床から移動床への流速分布および流れの抵抗の遷移現象は連続的であるが、移動床上の流れに遷移する限界近傍において、流れの抵抗が急激に増加する傾向が認められた。

(4)本モデルによる計算値は、実験値にみられるような遷移現象の連続性、および遷移限界近傍における流速や粒子濃度分布および流れの抵抗に関する急激な変化を概ね説明できるようなのである。

(5)輸送濃度の小さい実験において、固定床近傍の速度勾配が非常に大きくなっている現象がみられた。これに対して、速度勾配の計算値は、実験値よりも小さく評価されている。これについては、本モデルにおいて、乱れスケールに及ぼす固定壁の影響を考慮することによって、概ね実験値の傾向を説明できることが示された。

(6)実験において、輸送濃度が大きい場合、サンプラーの飲み口の目詰まりのため、局所輸送濃度の測定を行うことができなかった。今後、移動床上や固定床上、およびそれらの遷移過程における土石流の流れの構造を更に詳細に把握していくするためにも、このような領域における測定は必要である。

謝辞: 本研究は、一部、文部省科学研究費基盤研究B(代表者 江頭進治)の補助を受けて進めているものである。ここに記して感謝するものである。

参考文献

- 1) 高橋 保: 土石流の発生と流動に関する研究, 京大防災研年報, 20B-2, pp.405-435, 1977.
- 2) 椿 東一郎・橋本晴行・末次忠司: 土石流における粒子間応力と流動特性, 土木学会論文報告集, 317, pp.79-91, 1982.
- 3) 宮本邦明: Newton 流体を含む粒子流の流動機構に関する基礎的研究, 立命館大学学位論文, pp.39-72, 1985.
- 4) 江頭進治・芦田和男・矢島 啓・高濱淳一郎: 土石流の構成則に関する研究, 京大防災研年報, 32B-2, pp.487-501, 1989.
- 5) Egashira, S., K. Miyamoto and T. Itoh: Constitutive equations of debris flow and their applicability, 1st, Int., Conf., on Debris-Flow Hazard Mitigation, ASCE, pp.340-349, 1997.
- 6) 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, pp.789-794, 1997.
- 7) 伊藤隆郭・江頭進治: 土石流に関する構成則の比較研究, 水工学論文集, 42 巻, pp.913-918, 1998.

(1998.9.30 受付)