

水と固体粒子の混合物の流れに及ぼす内部摩擦角の影響

水資源開発公団

正会員

竹内宏隆*

立命館大学理工学部

正会員 江頭進治**

立命館大学大学院

学生員 伊藤隆郭**

1. はじめに 水・固体粒子を含む混合物の流れの特性は河床の状態、つまり移動床であるか、固定床であるかによって異なる。これは、粒子間摩擦による降伏応力が流れに対して支配的であることを示唆するものである。著者らは降伏応力によるエネルギー散逸が支配的であるモデルを提案し¹⁾⁻³⁾、それを固定床および移動床上における土石流に適用して、実現象をほぼ説明できる段階にある。そこで本研究においては、構成則の一般化を見据えて、流れに及ぼす材料特性の影響、特に内部摩擦角の影響に焦点を当て、実験および理論の両面から検討を行う。

2. 実験的検討 長さ12m、幅10cmの可変勾配式矩形断面開水路を用い、水路床には、実験材料と等しいものを粗度として貼り付けた。実験においては、砂とビーズの2種類を用いた。なお、両者とも一様砂である。それぞれの材料特性は次のようである。

砂 : $d_{50} = 0.218 \text{ (cm)}$ 、 $\bar{f}_s = 38.7^\circ$ 、 $c_* = 0.512$ 、 $s/r = 2.62$; ビーズ : $d_{50} = 0.210 \text{ (cm)}$ および 0.237 (cm) 、 $\bar{f}_s = 27.3^\circ$ 、 $c_* = 0.595$ 、 $s/r = 2.49$ 。ここに、 d_{50} : 中央粒径、 \bar{f}_s : 内部摩擦角の実測平均値、 c_* : 静止堆積層の土砂濃度、 s/r : 比重である。水路上流端より定常給水し、同時にホッパーより給砂して、定常状態の土石流を形成させ、流速分布、流量、流砂量、水深および局所輸送濃度を測定している。各実験とも流量はほぼ一定になるように留意している。

図-1 および図-2 は勾配が 19° のときの、固定床上における砂礫粒子およびビーズ粒子を含む流れの流速分布と局所輸送濃度の分布である。流速分布を見ると、砂礫粒子と比べてビーズ粒子の方が速度勾配が大きく、水深は小さい。局所輸送濃度の鉛直分布を見ると、砂礫粒子の結果は、濃度がほぼ一様化しているが、ビーズ粒子の結果は、水面に近づくにつれ、濃度が大きくなるという逆転現象が見られる。これは、過剰な外力の増加を粒子間隙水の乱れによって主にエネルギーを散逸することによって生じる³⁾。すなわち、速度勾配の大きな河床近傍において、粒子間隙の空間スケールを広げてエネルギー散逸を増加させるためである。以上より、固定床上の流れは内部摩擦角の減少に伴い、流速は大きくなり、濃度は一様化するが、もしくは逆転現象が生じ、流れの抵抗は小さくなる。

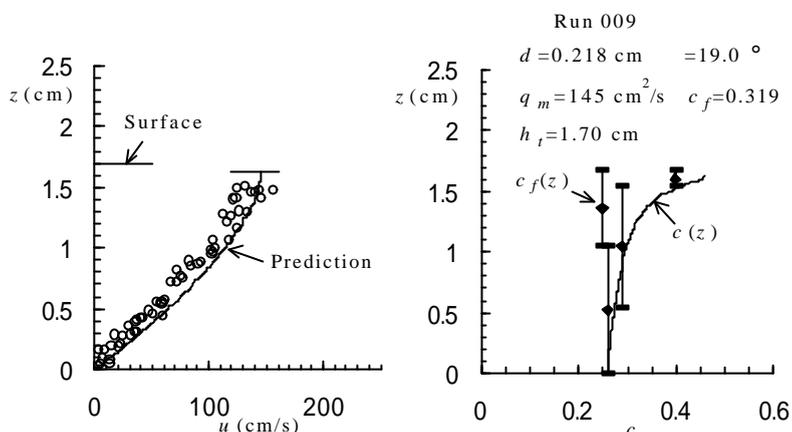


図-1 固定床上における流速・濃度分布(Sand)

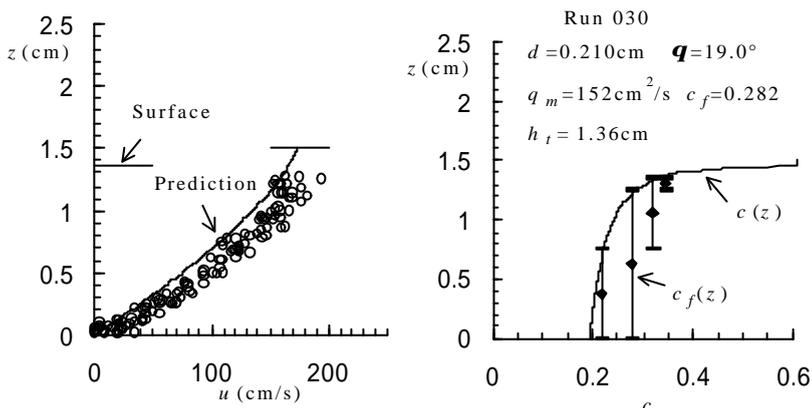


図-2 固定床上における流速・濃度分布(Bead)

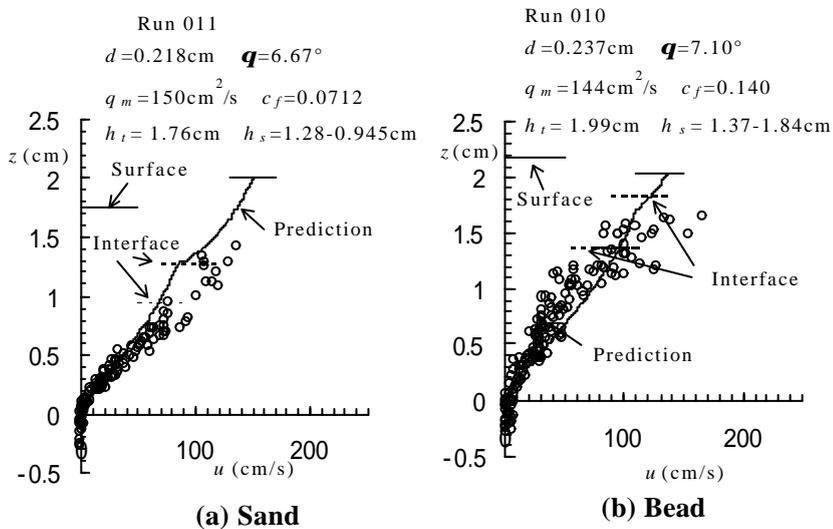


図-3 移動床上における流速分布

Key words : debris flow, interparticle friction angle, constitutive equations

* 〒369-0137 東京都港区赤坂 5-3-3

TEL. 03-3584-1251

** 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

TEL. 077-561-2732

FAX 077-561-2667

図-3は勾配がほぼ同じ場合の移動床上における砂礫粒子およびビーズ粒子を含む流れの流速分布である。砂礫粒子と比べてビーズ粒子の方が若干速度勾配が小さく、水深が大きくなっているようである。これは、移動床上の流れにおいては、内部摩擦角の減少により流れの抵抗が大きくなることを示唆している。

3. 理論の適用性 非圧縮性の1次元等流状態の運動量保存則に江頭・宮本・伊藤の構成則^{1), 2)}を適用して得られる計算値を用いて、前節の実験データの解析を行う。図-1, 2および3の実験結果には計算値も載せており、実線が計算値である。図-1, 2および3の固定床および移動床上における結果をみる。流速分布、濃度分布ともに、実験値と計算値は概ね一致している。

図-4(a), (b)は固定床および移動床上における流れの抵抗を示したものである。図には、今回の実験により得られたものと過去の実験値³⁾⁻⁵⁾および計算値を載せている。計算値、実験値ともに、 f_s が小さくなると、固定床における流れの抵抗は小さくなり、移動床上のそれは大きくなることを確認できる。これらのメカニズムについて検討する。1次元等流状態の運動量保存則に、江頭らの構成則を適用すると式(1)が得られる。また、移動床の理論河床において、外力が静的な降伏応力と釣り合う条件を用いると式(2)が得られる。なお、式(1)は、外力としてのせん断力に対する流動応力の比を、式(2)は、移動床上における土石流の断面平均濃度を表す。

$$\frac{t - t_y}{t} = 1 - \frac{(c/c_*)^{1/n} (\tan f_s / \tan q) (s/r - 1) \bar{c}(z)}{(s/r - 1) \bar{c}(z) + 1} \quad (1)$$

$$\bar{c} = \frac{\tan q}{(s/r - 1)(\tan f_s - \tan q)} \quad (2)$$

ここに、 $\bar{c}(z) = \int_z^{h_t} cdz / (h_t - z)$ である。固定床上の流れにおいては、式(1)を用いると、 f_s の減少により、降伏応力 t_y が減少し、そのため、 $(t - t_y)/t$ が増加する。これにより流速は大きくなり、濃度分布は一様化するが、あるいは逆転現象が生じ、流れの抵抗が小さくなる。一方、移動床上の流れにおいては、式(1)、(2)を用いると、 f_s の減少により、断面平均濃度 \bar{c} および $\bar{c}(z)$ は増加し、 $(t - t_y)/t$ は減少する。これにより、流れの抵抗は大きくなる。これらの結果は、固定床および移動床上の流れにおける応力分布の違い、特に、河床近傍の応力分布の違いに起因するものである。

移動床上の土石流において、輸送濃度に対する f_s の影響について検討する。図-5は、輸送濃度 c_f と勾配 q の関係である。ここに、 $c_f = \int_0^{h_t} cudz / \int_0^{h_t} udz$ である。これによれば、移動床上における流れは、勾配に対して一意に定まることを示すとともに、 c_f に及ぼす f_s の違いが顕著に現れている。また、同じ勾配に対する輸送濃度は砂粒子に比べてビーズ粒子の方が大きく現れている。

4. おわりに 水と固体粒子の混合物の流れは、固定床上においては内部摩擦角の減少に伴い、流れの抵抗が小さくなり、移動床上のそれは逆に大きくなるのが実験値を用いて示された。この結果に対して、著者らの構成則を適用して合理的に説明できることが明らかになった。これらの結果は、固定床および移動床上における応力分布の相違に起因するものであり、粒子摩擦に伴う降伏応力の存在を示唆するものである。

本研究は、文部省科研費基盤研究B(代表 江頭進治)および文部省科研費特別研究員奨励費(伊藤隆郭)の補助を受けている。ここに記して感謝します。

参考文献 1)江頭ら：水工学論文集，41，789-794，1997，2)S. Egashira et al. Proc. 1st Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, 340-349, 1997, 3)江頭ら：京大防災研年報，32B-2, 487-501, 1989, 4)江頭ら：京大防災研年報，34B-2, 261-274, 1991, 5)江頭ら：京大防災研年報，33B-2, 293-306, 1990

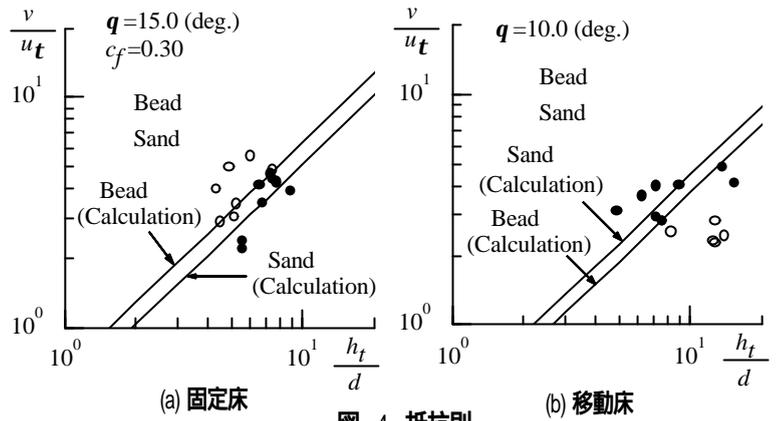


図-4 抵抗則

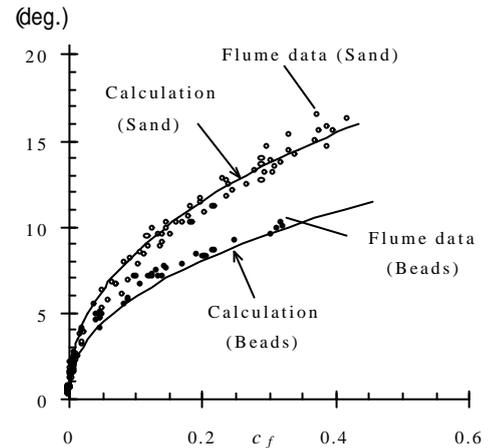


図-5 輸送濃度と勾配の関係