

II-208

土石流の流れに及ぼす内部摩擦角の影響

立命館大学大学院 学生員 ○ 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 移動床上の土石流の流速分布や濃度分布は、固定床上のそれらとは異なる。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。著者らの構成則¹⁾³⁾によれば、降伏応力は内部摩擦角 ϕ_s と等方圧 p_s から構成され、流れに及ぼす ϕ_s の影響は大きい。これを検証するため、本研究においては、土石流の流れに及ぼす内部摩擦角 ϕ_s の影響について実験及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。それぞれの材料特性は次のようである。砂: $d_{50} = 0.218$ (cm), $\phi_s = 38.7^\circ$, $c_s = 0.512$, $\sigma/\rho = 2.62$; ビーズ: $d_{50} = 0.210$

(cm), $\phi_s = 27.3^\circ$, $c_s = 0.610$, $\sigma/\rho = 2.49$ 。ここに、 d_{50} : 中央粒径, ϕ_s : 内部摩擦角の実測平均値, c_s : 静止堆積層の土砂体積濃度, σ/ρ : 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、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、濃度はほぼ一様であるが、水面近傍に近づくにつれ濃度の逆転現象が見られる。ビーズ粒子の結果も砂礫粒子と同様に濃度の逆転現象が見られ、砂礫粒子のものよりも顕著に現れている。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。ビーズ粒子の結果において、クリープ現象が生じ、流速の小さい領域が深い層に及んでいる。河床近傍を除けば、両者には顕著な違いは見られない。

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 および図-2の固定床における結果をみる。流速分布においては、実験値と計算値は概ね一致している。濃度分布についてみると、ビーズ粒子については実験値と計算値は概ね一致しているが、砂礫粒子においては、計算値の方が逆転現象が強く現れている。これについては、輸送濃度の小さい実験を行って検討する必要がある。

図-3の移動床上における流速分布の結果をみる。砂礫粒子については、実験値と計算値は概ね一致しているが、ビーズ粒子の分布形については、特に河床近傍において違いが見られる。これは、河床近傍においてクリープによる影響を大きく受け、河床面が深めに判定されたためであると推察される。そこで、実験値と計算値の水面を一致させて、流速分布を描いたものを図-3(b)に示している。図のように、クリープ現象を除いた領域においては、両者はほぼ

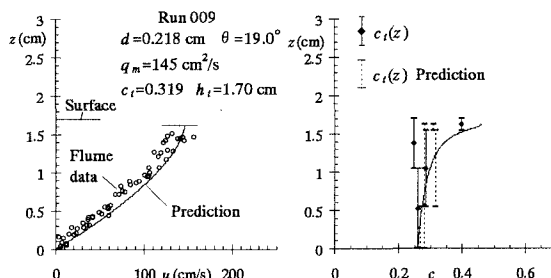


図-1 固定床上における流速・濃度分布 (Sand)

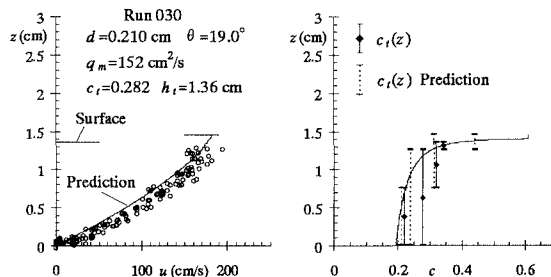
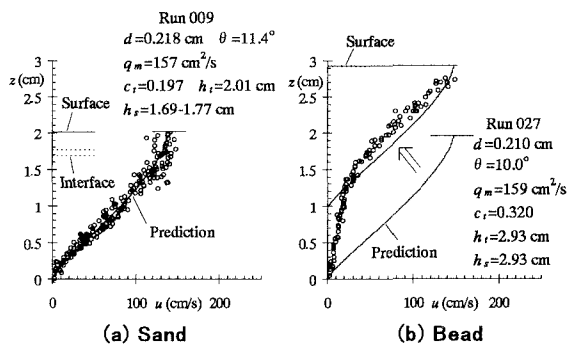


図-2 固定床上における流速・濃度分布 (Bead)



(a) Sand (b) Bead

図-3 移動床上における流速分布

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

* 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

TEL. 077-561-2732

FAX 077-561-2667

ば一致している。クリープ現象については、内部摩擦角の違い、すなわち材料の形状と材料表面の性質、すなわち表面が Rough であるか Smooth であるかの2つの要因が関連するものと考えられる。粒子の充填率を c の値に着目して見ると、粒子が球体粒子であると仮定すれば、砂礫粒子、ビーズ粒子は、それぞれ Simple cubic packing ($c = 0.524$)⁴⁾、Cubical-tetrahedral ($c = 0.605$)⁴⁾に近く、粒子の充填率は同程度に小さい。このように、充填率が同程度に小さい状態において等しいせん断を与えれば、粒子同士のかみ合わせや粒子の表面摩擦のために、内部摩擦角の小さいビーズ粒子の方が変形しやすい。このような理由から、ビーズの河床面近傍において、クリープ現象が生じているものと推察される。これについては、今後更に検討を行う必要がある。

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、今回の実験値、従来の実験値^{3), 5), 6)}および計算値を載せている。計算値は、 ϕ_s が小さくなると固定床における土石流の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示している。これに対し、実験データは、かなり点状に散らばっているものの、計算値の傾向を示している。

今回の実験結果に過去の実験結果^{5), 6)}を含めて、輸送濃度及び流砂量に対する ϕ_s の影響について検討する。図-5 は、輸送濃度 c_t と勾配の関係である。ここに、 $c_t = \int_0^{h_t} c u dz / \int_0^{h_t} u dz$ である。これによれば、 c_t に及ぼす ϕ_s の違いが、顕著に現れており、ビーズ粒子の方が平衡勾配が小さくなる。図-6 は、無次元掃流力 τ_* に対する無次元流砂量 Φ との関係である。ここに、 $\tau_* = u_{\tau}^2 / \{(\sigma/\rho - 1)gd\}$ 、 $\Phi = q_b / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}$ である。図の右下には、実験結果を詳細に見るために $\tau_* = 0.4 \sim 1.6$ の範囲のデータを図示している。

図-4(b)、図-5 および図-6 に着目する。図-5 によれば、輸送濃度に対する ϕ_s の影響は顕著であって、しかも理論曲線と実験データは一致している。次に、図-6 をみると、顕著ではないものの計算値、実験値とも ϕ_s の小さいビーズの流砂量が若干大きくなっている。これらの結果は、ビーズを含む流れの抵抗が砂粒子の場合よりも大きくなることを示している。ここで、図-4(b)をみると、ビーズを含む流れの抵抗が若干大きくなっているのが分かる。図-5 のデータは十分の精度を持っていることを考慮すれば、以上の結果は、土石流の流れに対する ϕ_s の影響が、著者らの構成則によってほぼ評価されていることを示している。

4.おわりに 土石流の流れに対する粒子内部摩擦角の影響は、著者らの構成則によってほぼ評価できるようである。摩擦角の影響を更に検討するためには、質の高い実験データが必要である。

本研究は、文部省科研費基盤研究 B(代表 江頭進治)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・宮本・伊藤: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・芦田・矢島・高濱:京大防災研年報, 32B-2, 487-501, 1989, 4)例えば, 久保輝一郎ら:粉体, 5章, 丸善, 5)江頭・芦田・田野中・高橋:京大防災研年報, 34B-2, 261-274, 1991, 6)江頭・芦田・高濱・田野中:京大防災研年報, 33B-2, 293-306, 1990.

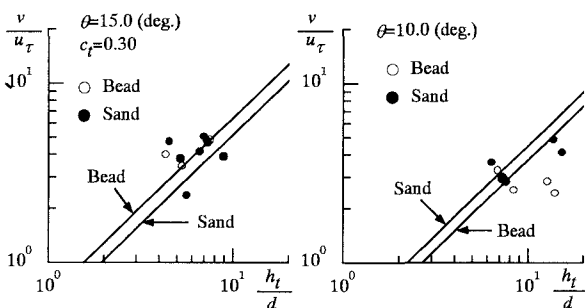


図-4(a) 抵抗則（固定床） 図-4(b) 抵抗則（移動床）

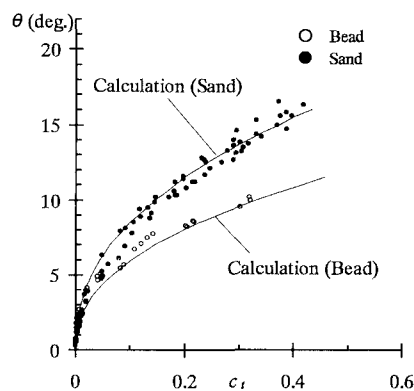


図-5 輸送濃度と勾配の関係

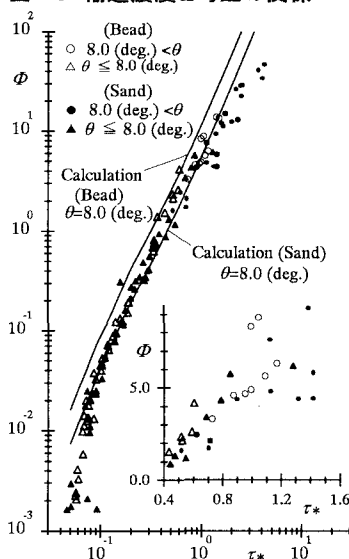


図-6 無次元流砂量