

1. はじめに 土石流は砂礫と水との混合物の流れであり、これに関する構成則は数多く提案されている¹⁾⁶⁾。ところが、構成則の導出において、研究者の解釈の相違により、応力構造を支配する要因が大きく異なっている。たとえば、粒子衝突による応力と粒子接触によるそれとでは、どちらが支配的なのだろうか？そこで、本研究においては、粒子摩擦に着目し、内部摩擦角の異なる材料を用いて得られた実験データと計算値とを比較することによって、流れの特性値に及ぼす粒子摩擦の影響を検討する。

2. 実験データの解析 砂礫粒子と水との混合物およびガラスビーズ粒子と水とのそれに関するデータ⁷⁾を用いて解析を行う。砂礫粒子およびビーズ粒子の材料特性値はそれぞれ次のようである。砂: $d_{50} = 0.218$ (cm), $\bar{\phi}_s = 38.7$ (deg.), $c_s = 0.512$, $\sigma/\rho = 2.62$, ビーズ: $d_{50} = 0.237$ (cm), $\bar{\phi}_s = 27.3$ (deg.), $c_s = 0.595$, $\sigma/\rho = 2.49$ 。ここに、 d_{50} は 50% 粒径, $\bar{\phi}_s$ は内部摩擦角の実測平均値, c_s は静止堆積層の体積濃度, σ/ρ は固体粒子の比重である。図-1および図-2は、それぞれ勾配が 19° の時の固定床上における砂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 $c_f(z)$ の鉛直分布である。ここに、 $c_f(z) = \int_z^{z+\Delta z} cudz / \int_z^{z+\Delta z} u dz$ のように定義される。なお、図において、 h_t は流動深, c_f は輸送濃度であり、 $c_f = \int_0^{h_t} cudz / \int_0^{h_t} u dz$ のように定義される。同図のデータにおいて、流量および流砂量はほぼ一定である。流速分布についてみると、ビーズ粒子を含む流れの方が、流速の絶対値は大きく、水深は小さい。 $c_f(z)$ の鉛直分布についてみると、砂粒子を含む流れにおいては、ほぼ一樣な分布形であり、水面に近づくにつれて濃度が大きくなる現象、すなわち濃度の逆転現象がみられる。一方、ビーズ粒子のものは、砂粒子のものよりも更に濃度の逆転現象が強く現れている。図-3(a), (b)は、それぞれ移動床上における砂粒子およびビーズ粒子を含む流れの流速分布の比較である。同図において、流量および勾配はほぼ等しい。ここに、 h_s は粒

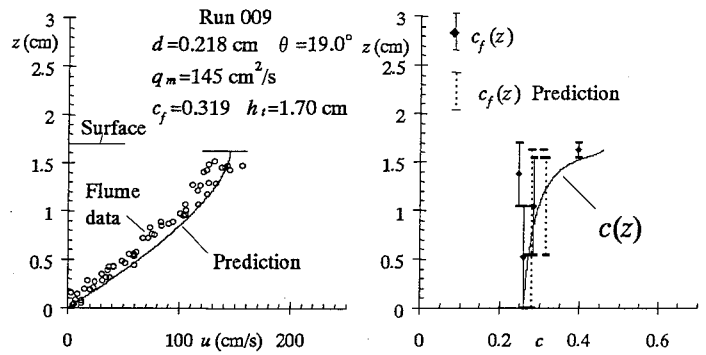


図-1 固定床上における流速・濃度分布 (Sand)

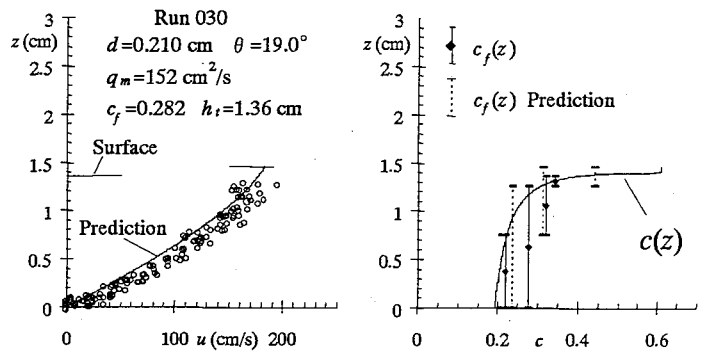


図-2 固定床上における流速・濃度分布 (Bead)

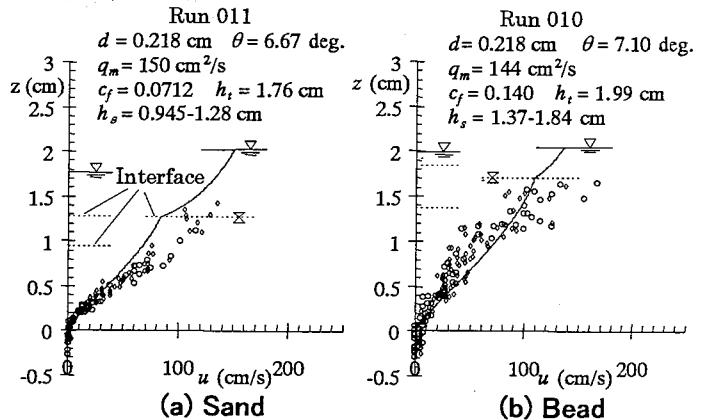


図-3 移動床上における流速分布

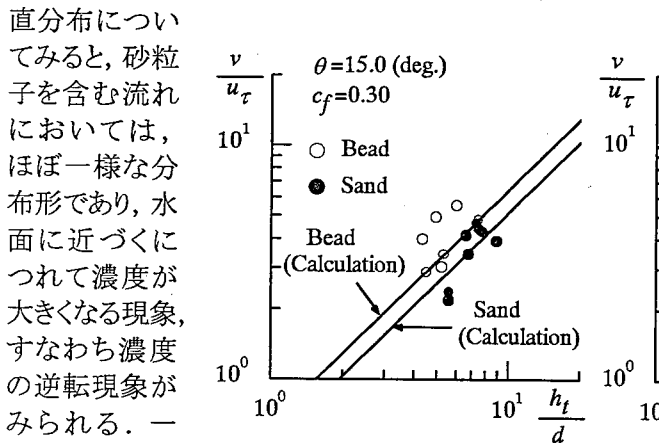


図-4 抵抗則(固定床)

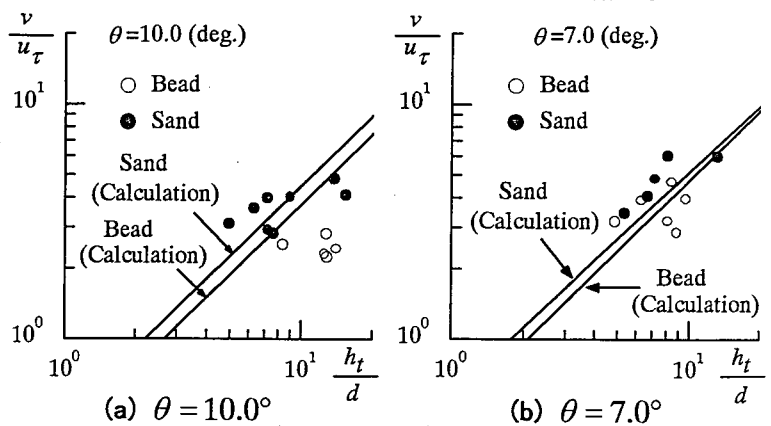


図-5 抵抗則(移動床)

砂粒子のものよりも更に濃度の逆転現象が強く現れている。図-3(a), (b)は、それぞれ移動床上における砂粒子およびビーズ粒子を含む流れの流速分布の比較である。同図において、流量および勾配はほぼ等しい。ここに、 h_s は粒

子移動層の厚さであり、粒子移動層と清水流の層との境界を **Interface** と表記している。同図によると、ビーズ粒子を含む流れの方が、流速の絶対値が小さく、水深が大きくなっている。以上の結果は、固定床上の流れにおいては、粒子摩擦の増加に伴い、流れの抵抗が増加し、移動床上のものは、それとは逆の傾向が現れることを示唆している。

図-4および図-5(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。同図には、過去に得られたデータ⁸⁾も載せている。ここに、 v/u_τ は流速係数、 h_t/d は相対水深、 u_τ は摩擦速度で、 $u_\tau = \sqrt{gh_t \sin \theta}$ である。これによれば、明らかに、固定床上の流れにおいては、砂粒子を含む流れの抵抗の方がビーズのものよりも大きく、移動床上の流れにおいては、固定床のものと逆の結果になっている。

3. 構成則の適用 図-6を参考にして、定常・等流の運動量保存則に著者らの構成則⁹⁾を用いて得られる流速と粒子濃度の鉛直分布および流れの抵抗に関する計算値を実験データと比較する。計算値は、図-1から図-5に実線で示されている。図-1から図-3の流速および濃度の鉛直分布をみる。これらによれば、概ね計算値と実験値は一致している。図-4および図-5を用いて、流れの抵抗をみる。摩擦角が大きくなると、固定床上における流れの抵抗は大きくなり、移動床上のものは小さくなっている。更に、実験値と計算値は概ね一致している。

以上の結果は、著者らの構成則を適用して流れに及ぼす摩擦角の影響が説明できることを示していると共に、土石流の応力構造において粒子摩擦に起因する応力の存在を示唆している。これらの結果を著者らのモデルを用いて、応力分布、特に粒子摩擦に伴う降伏応力 τ_y の変化に着目して考察する。図-7(a), (b)は、それぞれ

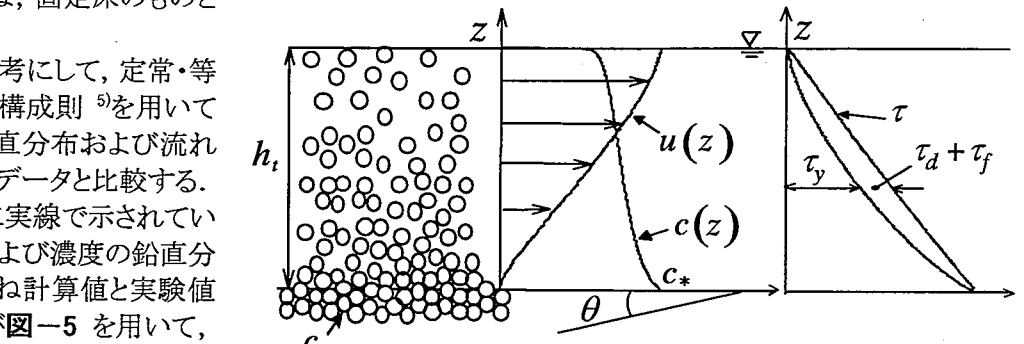


図-6 流れのモデル(移動床)

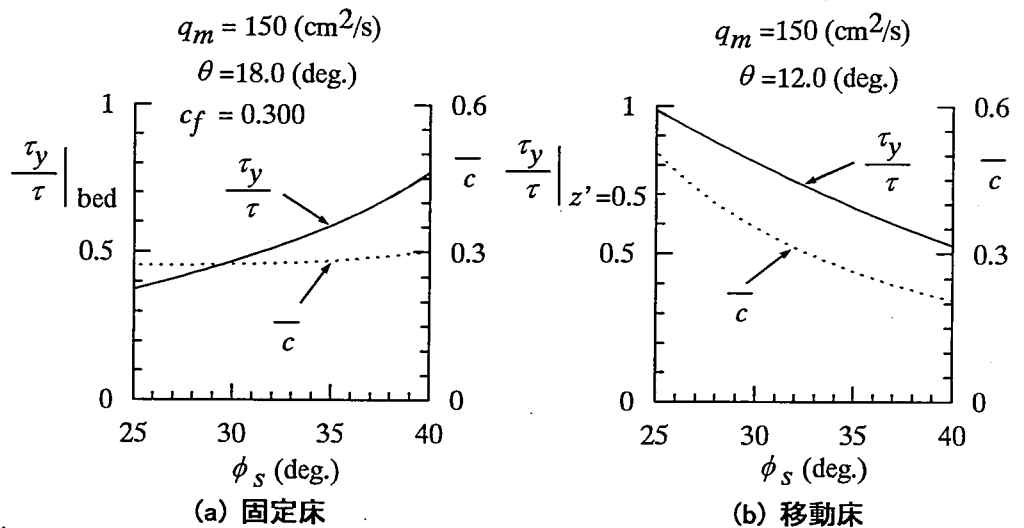


図-7 内部摩擦角の変化に伴う降伏応力および断面平均濃度の変化

固定床および移動床上の流れにおいて、内部摩擦角に対する降伏応力と断面平均濃度の変化をみたものである。ここに、 $\tau_y/\tau|_{bed}$ は河床における τ_y と外力 τ の比、 $\tau_y/\tau|_{z=0.5}$ は、半水深の位置における τ_y と τ の比、 \bar{c} は断面平均濃度であり、 $\bar{c} = \int_0^{h_t} c dz / h_t$ である。同図によれば、固定床上の流れにおいては、摩擦角が増加しても \bar{c} は殆ど変化しないため、河床に作用する圧力はあまり変化しない。このとき、摩擦角の増加分だけ τ_y/τ が増加するので、相対的に流動応力 $\tau - \tau_y$ が減少して、流れの抵抗が増加する。一方、移動床上の流れにおいては、摩擦角の増加に伴って \bar{c} が減少するため、河床に作用する圧力が減少する。これに比べて、摩擦角の増加率は小さいので、結果として τ_y/τ が減少し、流れの抵抗が減少することが分かる。すなわち、内部摩擦角の変化に伴う固定床および移動床上における流れの抵抗の違いは、粒子濃度および降伏応力の分布特性に起因している。

4. おわりに 固体粒子を高濃度を含む流れに及ぼす摩擦角の影響を実験値と計算値を用いて検討した。著者らの構成則を適用すると、土石流の流れに及ぼす粒子摩擦の影響を概ね評価できるようなのである。これは、土石流の応力構造において降伏応力が支配的であることを示唆する興味深い結果である。なお、本研究は、文部省科研費基盤研究 B (代表 江頭進治)および同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)高橋:京大防災研年報, 20B-2, 405-435, 1977, 2)高橋ら:京大防災研年報, 39B-2, 333-346, 1996, 3)椿ら:論文報告集, 317, 79-91, 1982, 4)橋本ら:水理講演会論文集, 38, 235-240, 1986, 5)江頭ら:水工学論文集, 41, 789-794, 1997, 6)江頭ら:京大防災研年報, 32B-2, 487-501, 1989, 7)伊藤ら:水工学論文集, 44, 677-682, 2000, 8)江頭ら:京大防災研年報, 33B-2, 293-306, 1990, 9)江頭ら:京大防災研年報, 34B-2, 261-274, 1991.