

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)~5)}。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、粒子接触による応力と粒子摩擦によるそれとでは、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、粒子の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⁶⁾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.), $c_s = 0.595$, $\sigma/\rho = 2.49$ 。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。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、ほぼ様な分布形であり、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および図-4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。なお、粒子の移動層と清水流との境界をInterfaceと表記している。図-3をみる。ビーズを含む流れにおいて、河床近傍でクリープの影響を受け、流速の小さい領域が深くまで及んでいる。この領域を除いて比較すると、流速の絶対値および水深にそれほど顕著な違いは見られない。図-4は、図-3のものよりも勾配が緩く、河床近傍においてクリープ現象が見られないデータである。これによると、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、固定床土上の土石流においては、粒子摩擦の増加に伴い、流れの抵抗が増加し、移動床土上の流れにおいては、それとは逆の傾向が現れていることを示唆している。図-5および図-6は、固定床および移動床土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⁷⁾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、

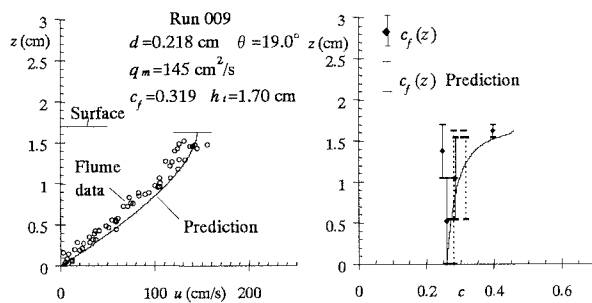


図-1 固定床上における流速・濃度分布 (Sand)

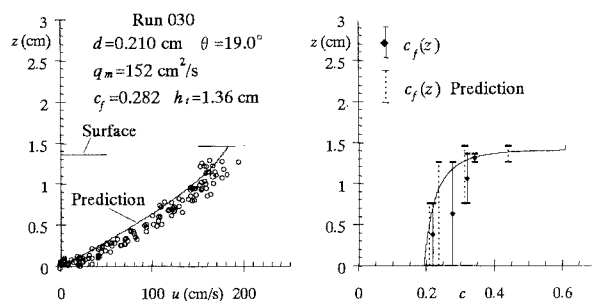
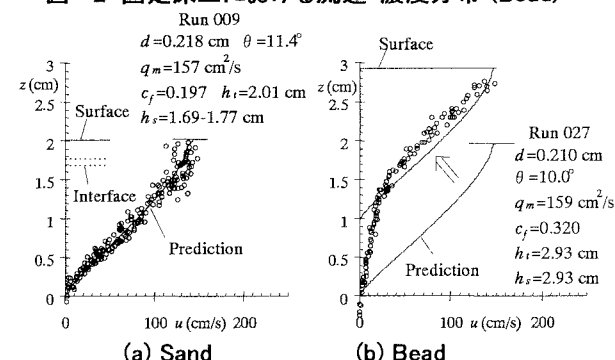


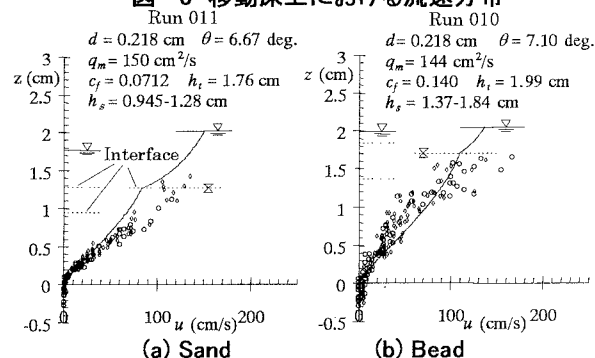
図-2 固定床上における流速・濃度分布 (Bead)



(a) Sand

(b) Bead

図-3 移動床上における流速分布



(a) Sand

(b) Bead

図-4 移動床上における流速分布

$u_\tau = \sqrt{gh_t \sin \theta}$ である。なお、図-6(a)においては、クリーピングと思われる領域を除いている。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、ビーズ粒子を含む流れの抵抗の方が大きい。

図-7は、移動床上の土石流における輸送濃度 c_f と勾配 θ の関係である。ここに、 $c_f = \int_0^h cudz / \int_0^h u dz$ である。図によれば、輸送濃度 c_f に及ぼす内部摩擦角の影響が顕著に現れている。

3. 構成則の適用 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、流れの抵抗および輸送濃度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-7に実線で示されている。図-3(b)のケースにおいては、クリープの影響を避けるため、実験値に水面を一致させた計算値も載せている。図-1～図-4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-5と図-6を用いて、流れの抵抗をみる。実験値と同様に、固定床上においては、摩擦角が大きくなると流れの抵抗が大きくなり、移動床上においては、摩擦角が大きくなると、流れの抵抗が小さくなっている。この結果を著者らのモデルを用い、外力 τ と降伏応力 τ_y との差、すなわち、流動応力に着目して説明する。固定床上の流れにおいては、摩擦角の増加に伴って τ_y が増加し、流動応力 $\tau - \tau_y$ が減少するため、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、粒子濃度の鉛直分布が濃度勾配を有する分布形になる。このため、 τ_y が減少し、流動応力 $\tau - \tau_y$ が増加するので流れの抵抗が減少する。図-7の輸送濃度 c_f の結果をみる。計算値は実験値とよく一致しており、粒子摩擦の影響を顕著に受けている。

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降伏応力の存在を示唆している。最後に、土石流の流れにおいて、粒子衝突による応力が支配的であるとしている構成則を適用して得られる結果を実験値と比較する。図-7および図-8は、輸送濃度および流れの抵抗について、幾つかの土石流研究の成果¹⁾⁻⁴⁾と実験データを比較したものである。比較のため、著者らによる結果も載せている。図によれば、著者らの構成則以外のものを用いて土石流に及ぼす摩擦角の影響を合理的に評価するのは、かなり難しいようである。

4. おわりに 著者らの構成則を適用して、土石流の流れに及ぼす摩擦角の影響を概ね評価できることが明らかになった。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ものである。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)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)伊藤ら:水工学論文集, 44, 677-682, 2000, 7)江頭ら:京大防災研年報, 34B-2, 261-274, 1991。

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)伊藤ら:水工学論文集, 44, 677-682, 2000, 7)江頭ら:京大防災研年報, 34B-2, 261-274, 1991。

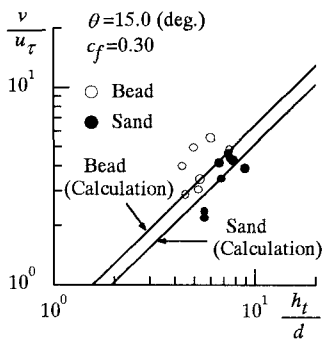
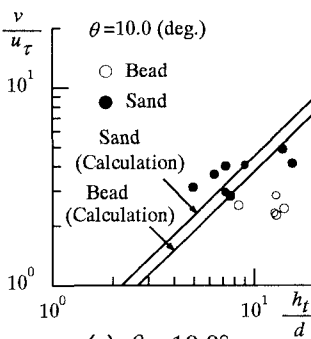
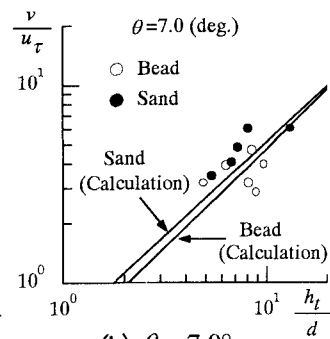


図-5 抵抗則(固定床)



(a) $\theta = 10.0^\circ$



(b) $\theta = 7.0^\circ$

図-6 抵抗則(移動床)

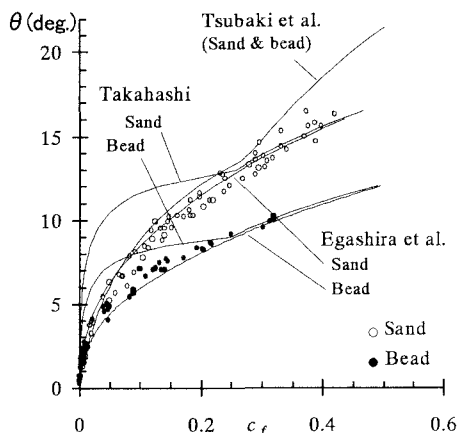
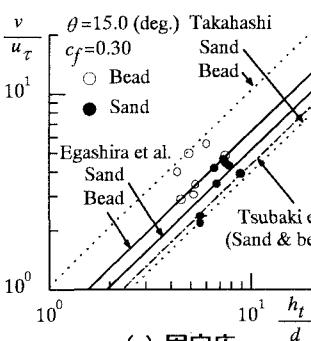
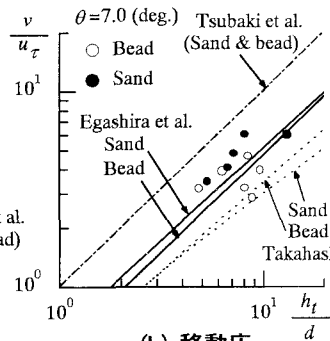


図-7 輸送濃度と勾配の関係



(a) 固定床



(b) 移動床

図-8 抵抗則の比較