

高濃度の泥水によって発生する土石流の特性

Characteristics of Debris Flow Caused by Denser Fluid

平野 宗夫*・橋本 晴行**・峯 敏雄***・福富 章****・パルー・ムハマト・サレー****

By Muneo HIRANO, Haruyuki HASHIMOTO, Toshio MINE, Akira FUKUTOMI and Muh. Saleh PALLU

Sediment discharge and concentration are experimentally investigated for debris flows caused by denser fluid and by plain water, respectively. Denser fluid is represented by the mixture flow of sand and water. The former debris flow is found to carry more gravels than the latter. Gravel discharge and concentration increase with the decrease in the sand grain diameter. This can be explained by critical fluid velocity for gravel movement in the mixture flow. For the estimate of the critical velocity the drag force is also investigated. The value of the drag force in the mixture flow of very fine sand is close to that in plain water. Therefore, such mixture flow is found to behave like a single fluid.

Keywords : debris flow, mud flow, hyperconcentrated flow, granular flow.

1. まえがき

実際現象の土石流は砂や石礫のみから成るのではなく、その間隙にシルトや粘土など微細土砂を多く含有している。このような流れは、従来、水と微細土砂があたかも高密度流体のように挙動するため、比較的多くの土砂を輸送することができると考えられ、実験による検証の試みも行われてきた¹⁾。しかしながら、粗粒な粒子とそのような役割をする微細土砂との区別は不明確な上に、その効果のほども明らかではない。したがって、高密度流体がどの程度の規模の土石流を発生させることが出来るかとなると推測の域を出ないのが現状であろう。本研究では、以上のような観点から、高密度流すなわち高濃度の泥水によってどのような特性の土石流が発生するかを実験的に調べたもので、まず、泥水流を砂礫床上に流入させて土石流を発生させ、純水により発生した土石流と比較しながら、その特性を検討した。次に、砂礫に作用する泥水流の流体力を概算し、泥水流による砂礫の輸送の可能性を調べた。

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科

(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科

*** 正会員 工修 電源開発(株) 総合技術試験所

(〒253 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

**** 学生員 九州大学大学院 工学研究科

2. 実験方法

実験に使用した水路は長さ12m、幅12.5cmの可変勾配水路である(図-1)。この水路の上流側5.9mの部分には泥水流発生のための微細砂を、下流側6.0mの部分には土石流発生のための河床材料として平均粒径 $d_{cs}=1.9\text{mm}$ 、比重 $\sigma/\rho=2.61$ の砂礫をそれぞれ厚さ10cmに敷き詰めた。実験は、水路勾配 θ_0 、微細砂材料を種々変えて行った。この水路を所定の勾配に設定した後、あらかじめ河床材料を水で飽和状態にするため、浸透性のよい砂礫層には下流から6.0m地点において水路真上から単位幅流量 $q_g \approx 1.6 \sim 5.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ の水を供給する一方で、微細砂層には上流端から若干量の浸透水を供給した。上流端から単位幅流量 $q_p=100 \text{ cm}^2/\text{s}$ の水を急激に供給すると、まず泥水流が発生して流下し、下流側砂礫床部の上を流れる。その際、泥水は砂礫を取り込みながら流下し、土石流に変化していく。下流端ではその土石流を採取して、土砂と水を合わせた全流量 q_t 、微細砂及び砂礫の流砂量 q_{fs} 、 q_{cs} などをそれぞれ計測した。

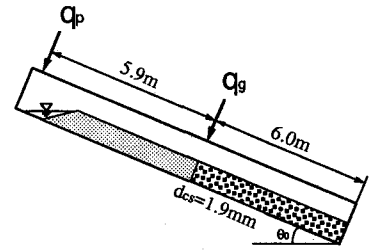


図-1 実験水路

次に、砂礫床部に流入する泥水流の特性を知るため、同一水路の下流側に同じ微細砂のみを5.9mの長さにわたって敷き詰め、 $q_p=100 \text{ cm}^2/\text{s}$ の水を上流から供給して泥水流を発生させた。下流端でその泥水流を採取して、土砂と水を合わせた全流量、微細砂の流砂量などをそれぞれ計測した。

最後に、泥水により発生した土石流を純水により発生した土石流と比較するため、水路下流側6.0mの部分に平均粒径 $d_{cs}=1.9\text{mm}$ の砂礫だけを敷き詰め、泥水流の定常部の流量と同じ流量の水を上流より供給して、純水による土石流を発生させた。下流端ではその土石流の流砂量、及び全流量をそれぞれ計測した。

なお、以下においては、純水による土石流に関する諸量に添字 w 、泥水による土石流に関する諸量に添字 M 、砂礫床部に流入する泥水に関する諸量に添字 in をそれぞれ付けて区別することにする。

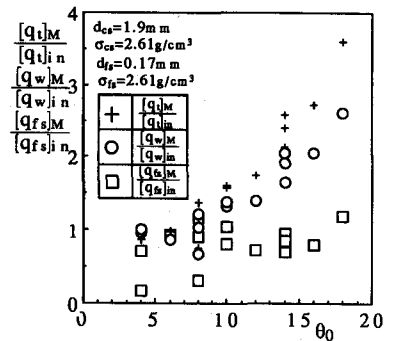


図-2 土砂および水の流出流量と流入流量の比

3. 実験結果

3・1 流入泥水流特性と流出土石流特性との関係

図-2, 3は、砂礫床部に流入した泥水流とそれにより発生した土石流とを比較したものである。

図-2は、微細砂材料として粒径 $d_{fs}=0.17\text{mm}$ の珪砂を用いて水路勾配を種々変化させて行った実験の結果で、流出全流量と流入全流量との比 $[q_t]M/[q_t]in$ 、流出水量と流入水量の比 $[q_w]M/[q_w]in$ は、砂礫と砂礫床内の間隙水がpick upされて流出するため1.0以上となっているが、水路勾配とともに大きくなっていることが分かる。一方、泥水により発生した土石流における微細砂の流砂量と砂礫床部に流入した泥水の流砂量との比 $[q_{fs}]M/[q_{fs}]in$ は1.0以下となり水路勾配にかかわらず、ほぼ一定値となっている。従って、微細砂は砂礫床上を流下するに伴い、その一部は砂礫層間隙内に沈積していることになる。

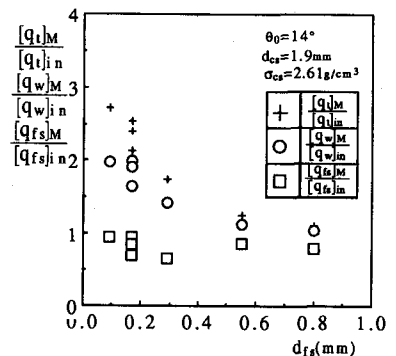


図-3 土砂および水の流出流量と流入流量の比

これは砂礫がpick upされた結果、間隙水の乱れが減衰したためと考えられる。

図-3は、水路勾配を $\theta_0=14^\circ$ に固定し、微細砂材料を種々変えて行った実験の結果で、流出流量および流砂量と微細砂粒径との関係を示したものである。微細砂粒径が小さくなるほど、土石流の流出流量 $[q_t]_M$ 、 $[q_w]_M$ が大きくなっていることが分かる。特に約0.3mm以下の微細砂の場合にその傾向が著しい。一方、微細砂の流砂量比 $[q_{fs}]_M/[q_{fs}]_N$ は図-2の場合と同様に1.0以下となり、流下途中で微細砂は沈降している。その比は微細砂粒径に無関係にほぼ一定である。

以上の結果、水路勾配は大きいほど、微細砂材料は小さいほど流量比 $[q_t]_M/[q_t]_N$ は大きくなっている。

3・2 純水によって発生した土石流特性と泥水によって発生した土石流特性との比較

図-4、5は、泥水により発生した土石流と同流量の純水により発生した土石流との比較を行ったものである。

図-4は、微細砂材料を $d_{fs}=0.17\text{mm}$ に固定し、水路勾配を変化させた場合の実験結果で、 8° 以上の水路勾配においては、泥水による砂礫の流砂量

$[q_{cs}]_M$ は純水による砂礫の流砂量 $[q_{cs}]_W$ よりも平均的に1.4倍程度大きくなっている。

他方、泥水による土石流中の純水量 $[q_w]_M$ は純水による土石流中の純水量 $[q_w]_W$ よりも少なく、その比は平均的には約0.8である。また、泥水による土石流中の泥水量 $[q'_t]_M$

$[q_w+q_{fs}]_M$ は純水による土石流中の純水量 $[q_w]_W$ とほぼ同程度の量である。

図-5は、水路勾配を $\theta_0=14^\circ$ に固定し、微細砂材料を種々変化させた場合の実験結果で、どの程度の大きさの微細砂までが砂礫の輸送量の増大に寄与するかを示したものである。微細砂の粒径が大きくなるに従い、砂礫の輸送量が減少することがわかる。特に、約0.3mm以上の微細砂は、砂礫の輸送量を、純水による砂礫輸送量に比較して増大させることができない。

このように、約0.3mm以下の微細砂からなる泥水により発生した土石流は、同流量の純水による土石流と比べて純水量が少なく、またその泥水量は純水による土石流中の純水量と同程度であるにもかかわらず、砂礫の輸送能力が大きくなっていることがわかる。

図-6は、泥水により発生した土石流における微細砂と砂礫とを合わせた全流砂濃度 $[C_t]_M$ 、砂礫濃度 $[C_{cs}]_M$ 、及び純水により発生した土石流における砂礫濃度 $[C_{cs}]_W$ を水路勾配に対して示したものである。泥水による土石流中の砂礫濃度は純水による土石流中の砂礫濃度よりも大きくなっている。また、全流砂濃度はさらに大きく、土石流限界勾配と言われる約 14° よりも低い水路勾配においても高濃度の土砂が流れ得ることが分かる。しかしながら、図-7に示すように、微細砂の粒径が大きくなると

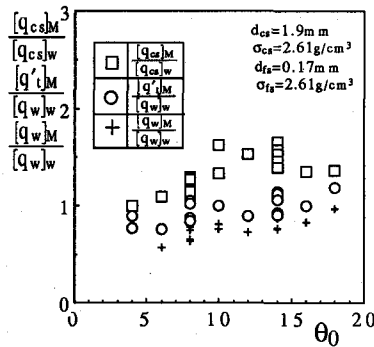


図-4 泥水による土石流と純水による土石流との比較

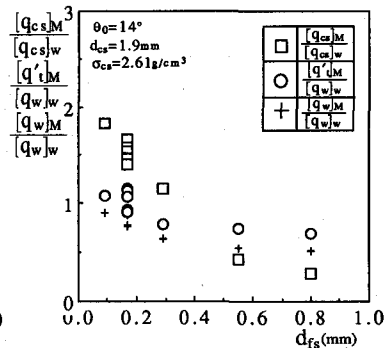


図-5 土砂及び水の流出流量と微細砂粒径との関係

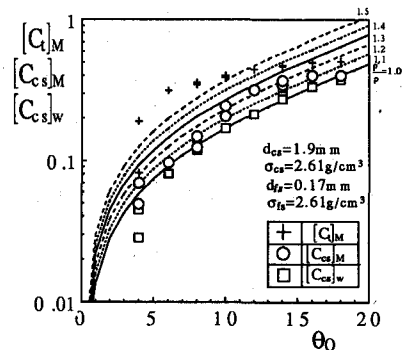


図-6 流砂濃度と水路勾配との関係

流砂濃度 $[C_t]_M$ 、 $[C_{os}]_M$ は減少している。特に泥水による砂礫濃度 $[C_{os}]_M$ は著しく減少している。これは、図-5において微細砂粒径が大きくなるに従い、砂礫の流砂量比 $[q_{os}]_M / [q_{os}]_W$ が著しく減少していることに対応している。

以上の結果より、泥水により発生した土石流は、純水による土石流の場合より高濃度の砂礫及び高濃度の土砂を輸送することができる。また、その効果は微細砂材料が小さいほど大きいことが分かった。

4. 高濃度の泥水流による砂礫の輸送

前章において、約0.3mm以下の微細砂からなる泥水は、純水と比較して、より多くの砂礫を輸送することができることが実験的に示された。これを説明するため、本章では、まず泥水流の流体力について調べ、この成果を基にして泥水流による砂礫の輸送の可能性について検討する。

4・1 砂礫に作用する泥水流の流体力

静止した砂礫に作用する泥水流の流体力 D は、水流相の流体力と微細土砂からなる固相の部分の衝突・接触に起因する衝突・接触力との線形和であると仮定し、

$$D = \frac{\rho}{2} (1-C) u^2 C_{Dw} \pi \left(\frac{d_{cs}}{2}\right)^2 + \frac{\sigma}{2} C u^2 C_{Dp} \pi \left(\frac{d_{cs}}{2}\right)^2 \quad (1)$$

とおくことにする。ここに、 ρ 、 σ はそれぞれ水及び微細土砂の密度、 C は泥水流の微細土砂濃度、 u は砂礫に当たる泥水流の代表流速、 C_{Dw} 、 C_{Dp} はそれぞれ水流相の流体力及び固相の衝突・接触力の抗力係数である。

ここで、衝突・接触力の抗力係数 C_{Dp} の評価が問題となるが、まず直径 $d_L = 8\text{mm}$ の円柱に働く泥水流の流体力を調べる実験を行い、円柱における C_{Dp} / C_{Dw} の値を求める。そしてこの値を便宜的に、砂礫の場合の値として代用することにする。

実験には、幅12.5cm、全長12mの水路において、上流側7mの部分移動床、下流側5mの部分ベニヤ板で滑面固定床とした水路を使用した。まず、移動床部に粒径 d_{fs} の微細砂を敷き、上流端から水を供給して泥水流を発生させ、固定床の上に流入させた。水路勾配は $\theta_0 = 14^\circ$ に固定した。水路下流端から1.0mの地点の水路中央部には、直径 $d_L = 8\text{mm}$ のアルミ製円柱棒を設置しておき、それに働く泥水流の流体力をひずみゲージを用いて測定した。また、同じ水路において泥水流と同流量の純水のみを流し、水流の流体力も別個に測定した。

長さ L の部分の円柱に働く泥水流の流体力 D は、式(1)に対応して

$$\frac{D}{L} = \frac{\rho}{2} (1-C) u^2 C_{Dw} d_L + \frac{\sigma}{2} C u^2 C_{Dp} d_L \quad (2)$$

のように与えられる。

上式において、流体力 D 、微細砂濃度 C 、流速 u 、水流の抗力係数 C_{Dw} にそれぞれ実験値を代入し、 C_{Dp} / C_{Dw} の値を求めた結果が図-8である。同図には、 C_D / C_{Dw} の値も示した。泥水流の抗力係数 C_D も、衝突・接触力の抗力係数 C_{Dp} も微細土砂の粒径が粗くなるにしたがい大きくなっている。これは、粒子が粗くなると泥水流の流体力における衝突・接触力の寄与が大きくなってい

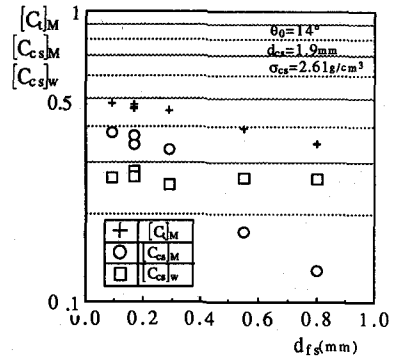


図-7 流砂濃度と微細砂粒径との関係

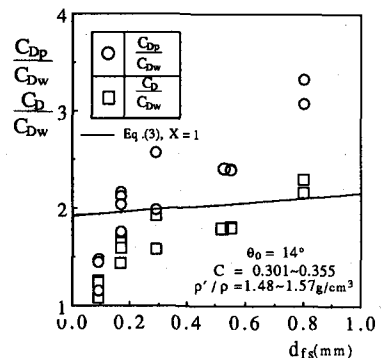


図-8 泥水流における円柱の抗力係数

ることを意味している。

図中の曲線は椿・橋本・末次²⁾の粒子衝突モデルを円柱棒に適用して求められた泥水流による衝突力の抗力係数である。すなわち

$$C_{DP} = \frac{4}{3} \left(1 + \frac{\rho}{2\sigma} \right) \frac{d_{fs} + d_L}{d_L} X \quad (3)$$

ここに、 X は多体衝突効果を考慮した補正係数で、濃度 C の関数であることが推定された。 $d_{fs}=0.17\text{mm}, 0.29\text{mm}$ の場合 $X=1$ とした衝突モデル（2体衝突モデル）で、 $d_{fs}=0.55\text{mm}$ や 0.8mm では $X=1.2 \sim 1.5$ とした多体衝突モデルで説明されよう。しかしながら $d_{fs}=0.09\text{mm}$ の場合、抗力係数 C_{DP} は水流のそれに近づき、式（3）の計算値より小さく、衝突モデルでは説明できなくなっている。

すなわち、約 0.1mm 以下の微細砂からなる泥水流は粒子性の特徴が失われ、単一流体のような挙動を示していると考えられる。従

って、このような泥水流は単一の高密度流体として取り扱うことが可能であることが類推される。

さて、円柱の C_{DP}/C_{DV} の値を球の場合にも適用できるものと仮定すると、次式で定義される抗力係数

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho'}{2} u^2 \left(\frac{d_{cs}}{2} \right)^2 \pi} = \frac{\rho(1-C)C_{DW} + \sigma C C_{DP}}{\rho(1-C) + \sigma C} \quad (4)$$

を求めることができる。その結果が図-9である。ここに $\rho' = \sigma C + \rho(1-C)$ である。

4・2 泥水中における砂礫の移動限界流速

密度 ρ' の高濃度泥水流が砂礫層上に流入した際に、移動限界にある河床砂礫に作用する力の釣合いを考える（図-10）。比重 σ_{cs}/ρ 、粒径 d_{cs} の河床砂礫に作用する力には、重力 W 、浮力 B 、抗力 D 、揚力 L 、そして摩擦力 F などがあり、これらは次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} W &= (\pi/6) d_{cs}^3 \sigma_{cs} g & B &= (\pi/6) d_{cs}^3 \alpha \rho' g \cos \theta_0 \\ D &= (\rho'/2) C_D u^2 (\pi/4) d_{cs}^2 & L &= (\rho'/2) C_L u^2 (\pi/4) d_{cs}^2 \\ F &= (W \cos \theta_0 - B - L) \mu \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 α は浮力に関する補正係数、 μ は摩擦係数である。

流れ方向について力の釣合いを考えると

$$D + W \sin \theta_0 = F \quad (6)$$

式（5）を式（6）に代入して整理し、遮へい係数 ε を考慮すると

$$u^2 = \frac{4}{3} \frac{\sigma_{cs} - \alpha \rho'}{\rho'} g d_{cs} \frac{\mu \cos \theta_0 - \frac{\sigma_{cs}}{\sigma_{cs} - \alpha \rho'} \sin \theta_0}{\varepsilon (C_D + \mu C_L)} \quad (7)$$

となる。上式において、遮へい係数 ε や揚力係数 C_L の値は定かではないので、ここでは

$$\varepsilon (C_D + \mu C_L) = C_D \quad (8)$$

とおくことにする。従って式（7）は

$$u^2 = \frac{4}{3} \frac{\sigma_{cs} - \alpha \rho'}{\rho'} g d_{cs} \frac{\mu \cos \theta_0 - \frac{\sigma_{cs}}{\sigma_{cs} - \alpha \rho'} \sin \theta_0}{C_D} \quad (9)$$

となる。

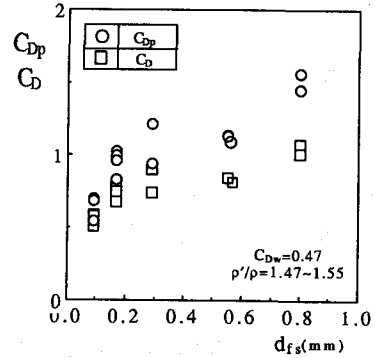


図-9 泥水流における球の抗力係数

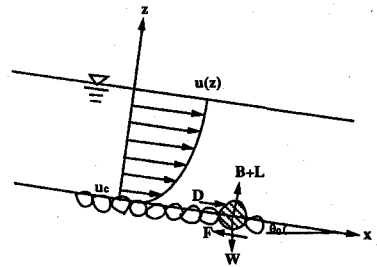


図-10 河床砂礫に働く力

さて、 $\theta_0 = 14^\circ$ の水路勾配において砂礫層上に泥水が流入し、砂礫に流速 u_b の泥水が作用した場合の砂礫の移動可能性について考えてみよう。泥水の無次元流速分布形として平野・橋本・田崎³⁾らが測定した分布形を用いて u_b を算定し、式(9)から u_c^2 / u_b^2 を求めた結果が図-11である。同図には、泥水流の浮力補正係数として $\alpha = 1$ とおいた場合と、 $\alpha = \rho' / \rho$ とおいて水流の浮力と同様に考えた場合の2通りの計算をおこなっている。ここに u_b としては粒子頂点 $z = d_{os}$ での流速を用いた。式(9)は揚力係数や遮へい係数を無視するなど、問題を多く残しているし、浮力補正係数としてどちらが適しているか定かではないが、明らかに、微細土砂の粒径が小さくなるにしたがい u_c^2 / u_b^2 の値も小さくなっている。これは、図-5の実験結果を説明するものであり、泥水を構成する微細土砂の粒径が小さくなれば、砂礫の移動量が増加することを表している。したがって、細粒の微細土砂から成る泥水によって土石流が発生すれば、より規模の大きい土石流が流出することになる。

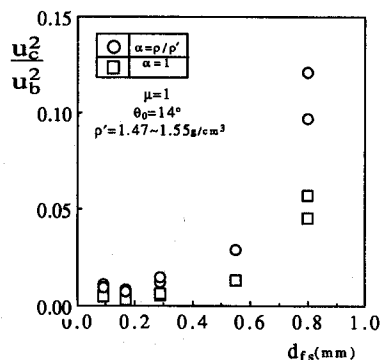


図-11 泥水中における砂礫の移動限界流速

図-8の結果によると、約0.1mm以下の微細砂から構成される泥水は砂礫粒子に対して、高密度の単一流体のように挙動する。そこで土石流中の流砂濃度に対する簡便な次式¹⁾

$$C = \frac{\rho' \tan \theta_0}{(\sigma - \rho')(\tan \phi - \tan \theta_0)}, \quad \tan \phi = 0.83 \quad (10)$$

を用いて泥水比重 ρ' / ρ の効果を調べたものが図-6の曲線である。約 10° 以上において、上式の計算値と泥水流による土石流中の砂礫濃度とが $\rho' / \rho = 1.2$ の場合に、概ね適合していることがわかる。実験においては、下流端に流出した砂礫間隙中の泥水比重 $[\rho' / \rho]_H$ は平均で約1.3であり、単一流体としての取扱いがほぼ妥当であると考えられる。

5. 結語

約 8° 以上の水路勾配において、泥水を構成する微細砂の粒径が小さくなるほど、純水の場合より多くの砂礫を輸送することができることが分かった。これは、泥水流による砂礫の移動限界流速についての考察から説明されるものである。また、約0.1mm以下の微細砂からなる泥水流の抗力係数は、衝突モデルで評価される値より小さく、水流のそれに近い値となる。これは、約0.1mm以下の微細砂からなる泥水流が単一の高密度流体として取り扱えることを示唆しているものと考えられる。なお、流体力の測定については、データ数が少ない上に、 C_D への Re 数の影響の評価などに問題があり、さらに検討を行う必要がある。

最後に、実験、データ整理に際し、松岡雅博(現・建設省)、吉松浩二(現・フジタ工業)、本学院生の前田雄一、本学学部生の島田哲治の4氏には多大の助力を受けた。また、本研究の一部は文部省科学研究費、重点領域研究(1)「土石流の発生及び規模の予測に関する研究」(研究代表者、名古屋大学 片岡順教授(当時))の補助を受けてなされたものである。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋 保：土石流の発生と流動に関する研究、京都大学防災研究所年報、第20号B-2、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、No. 317、1982。
- 3) 平野宗夫・橋本晴行・田崎武詞・峯敏雄・高尾直徳・八尋和郎：泥流の特性に関する実験的研究、土木学会第44回年次学術講演会、1989。