

細粒土砂の堆積機構に関する実験的検討

京都大学防災研究所

○長谷川祐治

京都大学大学院農学研究科

中谷加奈

国土技術政策総合研究所

内田太郎

筑波大学生命環境系

堀田紀文

1. はじめに

地球温暖化による極端な気象条件が増大して、それに伴い土砂災害の発生頻度や規模が増大している。土砂災害には河道に土砂が堆積し、水位上昇・氾濫を引き起こすものがあり、ある時間内の河道上昇を検討するには土砂が堆積する速度が重要な結果となる。一般に、下流まで流出する土砂は、掃流砂だけでなく浮遊砂やウォッシュロードと呼ばれる比較的粒径の細かい材料が多いとされる。細かい粒径の堆積機構は、粒子の沈降によって発生するものや、流れの濃度が平衡濃度以上になる場合に起こるものがある。後者は、比較的粒径の大きな材料では石礫型土石流の領域 ($h/d < 30$) となり、平衡濃度式から堆積速度が導かれ、適用性も数多く検討されている。しかし、粒径の小さな材料では乱流型の領域 ($h/d > 30$) となり、その領域での平衡濃度や堆積機構については不明な点が残されている。本研究では、細粒土砂を含む高濃度流れの流動、堆積に関する水路実験を実施し、堆積速度と既存の理論との比較を行った。

2. 実験概要

実験には長さ 7 m、幅 10 cm、高さ 40 cm の直線矩形断面水路を使用した。水路下流端には、直径 1.2 m、高さ 1.2 m のタンクを設置して、タンク内で土砂と水を攪拌用のサンドポンプにより混合させて、もう一台別のサンドポンプを用いて水路上流端に土砂と水の混合物を供給した。使用した土砂の粒径はほぼ一様な 0.16 mm である。流量は水路上流にあるバルブを用いて所定の量 ($q=0.01\sim0.1\text{ m}^3/\text{s}$) を供給した。本実験では $h/d=66\sim426$ である。土砂濃度はタンク内の上層、中層、下層と水路上で土砂が堆積しない条件下で下流端から流出する濃度が一定であることを確認した。土砂の堆積は、水路上に設置した超音波センサ（オムロン製、E4C-DS30）の値の変化から確認した。超音波センサは水路下流端から 0.5 m の位置から 1 m 間隔で 6 台使用して、下流側から Ch1、上流側は Ch6 とした。実験の概要を図-1 に示す。

3. 実験結果

実験は、流量、水路勾配、土砂濃度を変えて、数種類のケースを実施した。図-2 に流動深さの時系列を示す。実験は一定の流量、濃度で供給したため、通水初期でセンサ Ch5、Ch6 のように一定の値を示す時は土砂堆積が生じていない。堆積時はセンサ値が変化する。各断面で堆積速度は異なるため、本検討では、堆積が始まってから停止するまでの堆積速度を求めて、各断面の平均値を採用した。図-2 の結果より、Ch1 では 0.92 cm/s、Ch2 では 2.59 cm/s、Ch3 では 3.21 cm/s、Ch4 では 1.15 cm/s、Ch5 では 14.8 cm/s、Ch6 では 5.89 cm/s となり、先述の仮定から 4.76 cm/s とした。

4. 既存理論との比較

石礫型の土石流から乱流型の土石流に徐々に遷移することが知られているが、乱流型の土石流を対象とした堆積

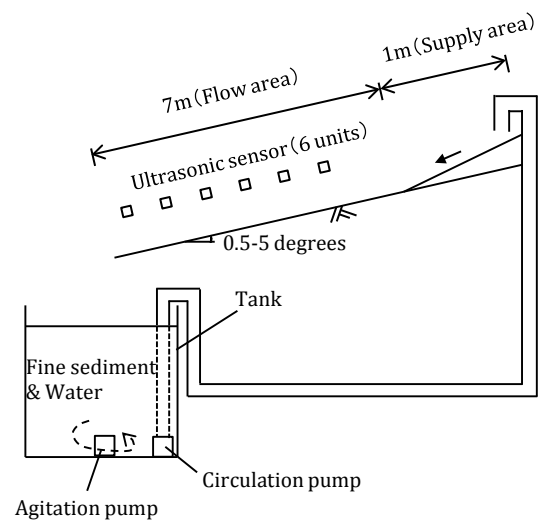


図-1 水路概略図

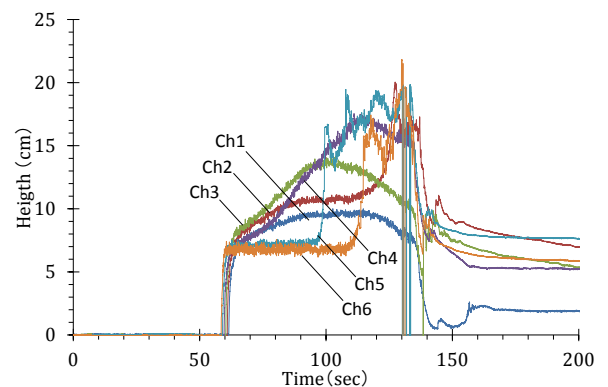


図-2 流動深時系列の一例

(侵食)速度式は提案されていない。水路実験での細粒土砂の流れの形態は石礫型とは異なるが、水路実験で得られた堆積速度を既存理論と比較した。

江頭モデル¹⁾による堆積速度 i_b は次式のように表される。侵食も堆積も起こらない平衡勾配 θ_e を想定し、土石流流動層の流下速度で移動する移動座標系から見ると、その河床勾配が流動層濃度に対応する平衡勾配から計算される平衡勾配を満たすように維持されると考えて次式で堆積速度 i_b を評価する。

$$i_b = u \tan(\theta - \theta_e)$$

$$\tan\theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c \tan\phi}{(\sigma/\rho - 1)c + 1}$$

ここに、 θ は河床勾配、 θ_e は平衡勾配、 σ は砂礫密度、 ρ は水の密度、 ϕ は粒子の摩擦角である。

一方で、高橋モデル²⁾による堆積速度 i_b は次のように表される。 C_∞ は土砂流領域 ($0.03 < \tan\theta \leq 0.138$) における定常・等流状態における断面平均濃度とした。

$$i_b = \delta_d \frac{C_\infty - c}{c_*} \frac{q}{h}$$

$$C_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\rho \tan\theta}{(\sigma - \rho)(\tan\phi - \tan\theta)} \right\}^2$$

ここに、 δ_d は堆積速度係数 (0.5)、 q は単位幅流量、 h は水深、 C は河床堆積物の体積濃度、 c は土砂濃度である。

個々の粒子の沈降速度 w_0 は、以下の式から求めた。

$$C_D = \frac{24}{Re_*} + \frac{3}{\sqrt{Re_*}} + 0.34$$

$$\rho(\sigma - 1)Vg = \frac{1}{2}\rho C_D A w_0$$

ここに、 C_D は抗力係数、 Re_* は粒子レイノルズ数、 V 、 A はそれぞれ粒子体積、投影面積である。沈降速度から堆積速度を推定する際、鉛直方向の濃度が一定、流速を0とすると、 $i_b = c w_0 / c_*$ で表される。

図-3～5に河床勾配と速度比の関係を示す。ここで、流速 u は Manning 則 ($n=0.015 \text{ m}\cdot\text{s}$) より求めた断面平均流速を与えた。計算結果は勾配に対して速度比が小さくなり、実験結果もやや減少率は小さいが同じ傾向を示す。実験結果は平衡濃度式で求められる速度比より若干小さく、沈降速度から求められる速度比より大きい。特に、沈降速度との差が大きい。これは、実験における堆積機構が沈降による堆積とは異なることを示唆する。平衡濃度式から求められる堆積速度は、平衡勾配が緩く、断面平均濃度が大きくなると小さくなる。実験での堆積速度比は、平衡濃度式から求められる速度比と比べて、ほぼ同じか、若干小さい。一方、実験では平衡濃度式よりも高い濃度で流動することが確認された³⁾。すなわち、実験における堆積機構は前述の沈降による堆積と同様に、平衡濃度と土砂濃度との関係から求められる機構と異なることが考えられる。

参考文献

- 1) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム(1)，砂防学会誌（新砂防），Vol.46，No.1，p.43-47，1993
- 2) 高橋保，中川一：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，砂防学会誌（新砂防），Vol.44，No.3，p.12-19，1991
- 3) 長谷川祐治，内田太郎，林真一郎，堀田紀文：土砂流・掃流砂の遷移勾配付近の細粒土砂の流動，堆積に関する実験，平成25年度砂防学会研究発表会概要集A，p.120-121，2014

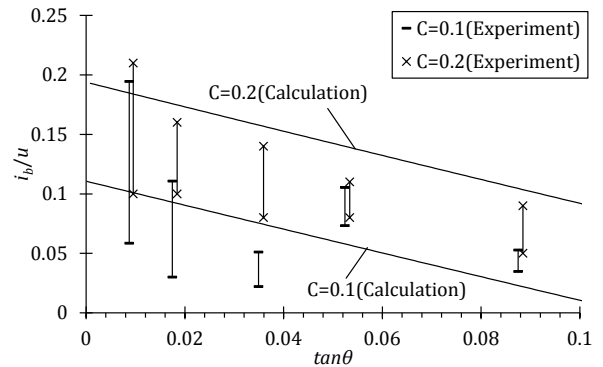


図-3 堆積速度(江頭モデル)と比較

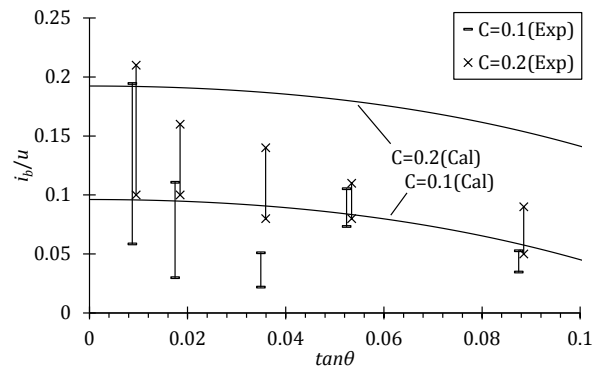


図-4 堆積速度(高橋モデル)と比較

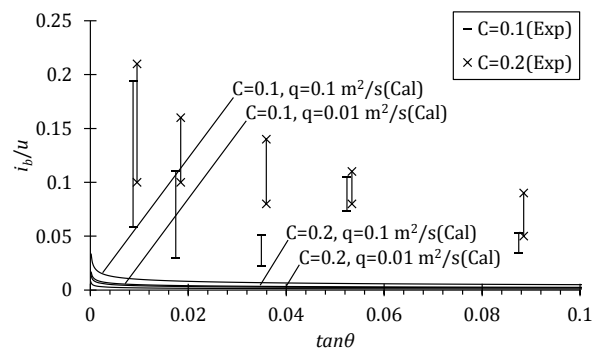


図-5 堆積速度(沈降速度から推定)と比較