

土石流形成における微細砂の役割

Role of fine sediment in debris flow process

○江頭進治・萬矢敦啓・エスカローナ ロシレット・山崎祐介・工藤 俊
土木研究所 ICHARM

1. はじめに

土石流間隙流体の質量密度と土石流の発達機構との間には密接な関係が推察される。江頭ら(2016)は、先の研究において土石流の発達は侵食領域に存在する微細砂の含有率に支配されることを示した。ここでは、微細砂の役割が土石流の質量保存則においてどのように記述されるかを示すとともに、微細砂に着目した現地調査の一例について報告する。

2. 土石流の質量保存則

侵食過程における流れの質量保存則：流れ全体、粗い粒子、流体として振舞う微細粒子に関する質量保存則は、侵食土砂に含まれる粗い粒子と微細砂の含有率を考慮すると、それぞれ、次のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{\partial rc_c uh}{\partial x} + \frac{\partial rc_c vh}{\partial y} = p_c E \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_f(1-c_c)h}{\partial t} + \frac{\partial c_f(1-c_c)uh}{\partial x} + \frac{\partial c_f(1-c_c)vh}{\partial y} = p_f E \quad (3)$$

ここに、 h :流動深、 u :流速のx-成分、 v :流速のy-成分、 E :侵食速度(侵食率)、 c_* :表土層の土砂濃度、 c_c :粗い粒子の土砂濃度、 r :土砂輸送補正係数、 c_f :微細砂の土砂濃度、 p_c :斜面および溪床における粗い粒子の含有率、 p_f :斜面および溪床における微細砂の含有率で、これらには次式の関係がある。

$$p_c + p_f = 1 \quad (4)$$

堆積過程($E < 0$)における流れの質量保存則：堆積過程においては、粗い粒子の堆積に伴い、その間隙に流体相が取り込まれるものとすれば、上述の式はそれぞれ、次のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = \frac{E}{c_{*D}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{\partial rc_c uh}{\partial x} + \frac{\partial rc_c vh}{\partial y} = E \quad (6)$$

$$\frac{\partial c_f(1-c_c)h}{\partial t} + \frac{\partial c_f(1-c_c)uh}{\partial x} + \frac{\partial c_f(1-c_c)vh}{\partial y} = \frac{1-c_{*D}}{c_{*D}} c_f E \quad (7)$$

ここに、 c_{*D} :堆積層における粗い粒子の土砂濃度。

式(1)~(7)の侵食速度は、次式で評価される。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (8)$$

ここに、 $E > 0$ は侵食、 $E < 0$ は堆積を意味する。 θ :河床の局所勾配、 θ_e :粗い粒子の土砂濃度に対する平衡勾配で、次のように定義される。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_c}{(\sigma/\rho - 1)c_c + 1} \tan \phi \quad (9)$$

ここに、 σ :粒子の質量密度、 ϕ :土粒子の内部摩擦角、 ρ :流体相の質量密度で、これは次式で与えられる。

$$\rho = \sigma c_f + (1 - c_f)\rho_w \quad (10)$$

ここに、 ρ_w :水の質量密度である。

これらの式より、侵食領域において p_f (あるいは p_c)が一定であれば、流体相の質量密度は土石流の全過程において変化しないことが導かれる。紙面の都合から証明は省略する。このとき、式(10)は次のように表される。

$$\rho = [(1 - c_*)\rho_w + p_f c_* \sigma] / [1 - (1 - p_f)c_*] \quad (11)$$

図1は、土砂濃度の崩壊土砂の移動過程において、細粒土砂の成分が流体相として振舞うときの土砂濃度 c_c に対する平衡勾配(式(9))である。これより、水の供給がなくても微細砂によって流動性が高くなるのが分かる。

3. 溪床材料調査

2014年広島豪雨災害において土石流を引き起こした八木3丁目の谷および八木4丁目の治山ダムを対象として、溪床材料の調査を行った。調査日は、2016年2月11~12日である。図2は、八木3丁目の谷の縦断形状と調査地点である。粒度

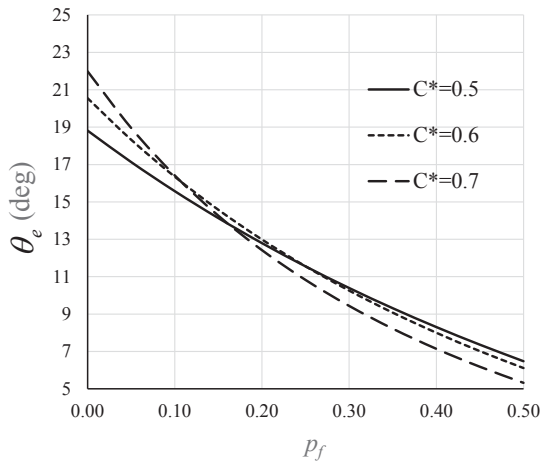


図1 土石流の平衡勾配と微細砂の含有率

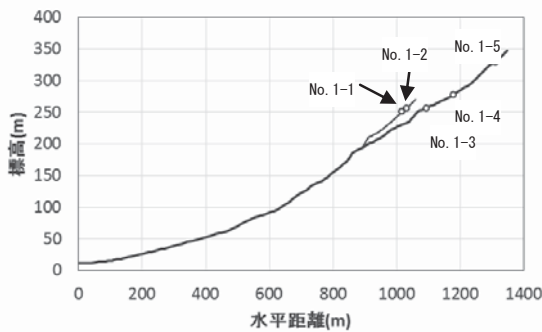


図2 八木三丁目の谷の縦断形状と土砂のサンプリング地点

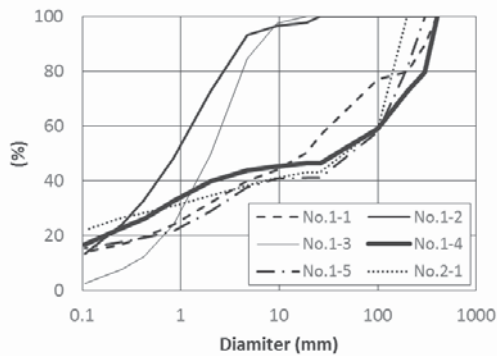


図3 溪床材料の粒度分布



写真1 治山ダムにおける土石流の堆積状況

分布は写真解析および篩い法を併用して求めている。まず、石礫およびマトリックスの単位面積当たりに占める見かけ上の割合を写真解析によって求め、マトリックスの間隙を考慮して両者の占有面積率を定めた。石礫については写真解析によって粒度分布を求め、マトリックスについては資料を持ち帰り、 $212\mu\text{m}$ と $100\mu\text{m}$ の網を用いて水洗いをした後、篩い法によって分析した。図3は、このようにして求めた材料の粒度分布である。図において、No.1-2は、プールに貯留されている材料で、これは表面流によって輸送されてきたものと推察され、微細砂の含有率は他のものに比べて小さくなっている。No.1-3は、未固結の粒子群のものである。これら以外は、渓床や河岸において侵食を受けた材料の粒度分布である。いずれにおいても、流体相として振舞うことが予想される $200\mu\text{m}$ 以下の微細砂が、20%程度含まれている。

なお、図3に掲載のNo.2-1は、八木4丁目の谷に設置されている治山ダム上流の河岸領域のものであって、これにも微細砂が20%程度含まれている。一方、当該ダムの堆積勾配は、13度程度であった。写真1に治山ダムの土石流の堆積状況を示す。図1から分かるように、微細砂の含有率が0.2のとき、崩壊土砂および渓床の材料が水で飽和していれば水の供給がなくても土石流の平衡勾配は12~13度程度となる。この値は、ダムの堆積勾配とかなりよく一致しており、崩壊土砂がその流動過程において、土石流となって流下したことを物語っている。

4. おわりに

侵食土砂に含まれる微細砂は、土石流本体に取り込まれることによって流体相の質量密度を増加させ、その結果、流動性を高めて土石流の発達を支配する。一方、堆積過程においては、微細砂は粗い粒子の間隙流体として堆積層に取り込まれ、残りは流体相として流下する。このように、微細砂は土石流過程において重要な役割を担っている。

本研究は、一部河川砂防技術開発研究公募の補助を受けていることを記し、ここに感謝申し上げます。

参考文献

江頭・宮本・竹林 (2016) : 崩壊に伴う土石流・泥流の形成と規模の決定機構、砂防学会誌、Vol. 68, No. 5, 38-42.