

京都大学農学研究科 ○里深好文・水山高久  
三菱UFJリサーチ&コンサルティング(株) 飯尾達朗

1. はじめに

石礫型土石流においては、巨礫が流動層の表面付近に上昇し、次第に先頭部に集中してゆくことが知られている。このような機構を単純な形で表現するために、混合粒径からなる土石流を対象として、流動層を上下2層に分割する「2層モデル」を新たに構築し、水路実験への適用を通じてその妥当性を検討した。

2. 混合砂礫を対象とする土石流の2層モデル

土石流の構成材料が  $k$  個の粒径階によって表されるものとし、 $k$  番目の粒径階の代表粒径を  $d_k$  とする。土石流を上下2層に分け、上層に関する諸量は添字  $U$  で表し、下層に関する諸量は添字  $L$  で表す。

上層と下層の厚さが共に流動深  $h$  の半分であるとすると、粒径階  $k$  の全層の平均濃度  $C_k$  は、

$$C_k = (C_{Uk} + C_{Lk}) / 2 \quad (1)$$

となり、上・下層における粒径階  $k$  の単位幅流砂量は、

$$q_{bUk} = u_U C_{Uk} h / 2 \quad (2), \quad q_{bLk} = u_L C_{Lk} h / 2 \quad (3)$$

と表される。ここに、 $u_U$  と  $u_L$  はそれぞれ上層と下層の平均流速であり、図-1に示すように流速が直線分布であるとすると、

$$u_U = \frac{3}{2} u_0 \quad (4), \quad u_L = \frac{1}{2} u_0 \quad (5)$$

となる。ここに、 $u_0$  は全層の平均流速である。

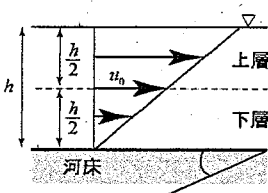


図-1 流速分布の模式図

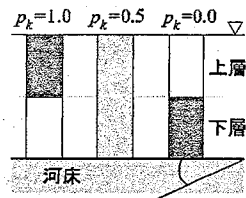


図-2  $p_k$  の模式図

いま、ダイナミックシービングなどにより上層と下層の間で砂礫の入れ替わりがあったとすると、各粒径階の土砂濃度に上下方向の偏りが生じる。そこで、図-2に示すように  $C_{Uk}$  の偏りを表す変数  $p_k$  を導入すると、 $p_k$  は次のように表される。

$$p_k = \frac{C_{Uk}}{C_{Uk} + C_{Lk}} \quad (6)$$

式(1)を式(6)に代入すると、

$$p_k = \frac{C_{Uk}}{C_{Uk} + C_{Lk}} = \frac{C_{Uk}}{2C_k} \quad (7)$$

となるので、

$$C_{Uk} = 2p_k C_k \quad (8), \quad C_{Lk} = 2(1-p_k) C_k \quad (9)$$

となる。式(2)と式(3)にそれぞれ式(4)と式(8)、および式(5)と式(9)を代入すると、

$$q_{bUk} = u_U C_{Uk} h / 2 = \frac{3}{2} u_0 h C_k p_k \quad (10)$$

$$q_{bLk} = u_L C_{Lk} h / 2 = \frac{1}{2} u_0 h C_k (1-p_k) \quad (11)$$

となる。2層を合わせた粒径階  $k$  の単位幅流砂量は、

$$q_{bk} = q_{bUk} + q_{bLk} = u_0 h C_k \left( \frac{1}{2} + p_k \right) \quad (12)$$

となるので、濃度の偏りに応じて流砂量が0.5~1.5倍に変化することが分かる。この流砂量を用いて各粒径階ごとの土砂の連続式を解けば、上層に多く存在する粒径階ほど、流砂量が増えることになる。

上層と下層間の粒子の入れ替わりについては、ダイナミックシービングがその主たる要因であるとするならば、下層の平均的な隙間の大きさより小さい粒径階についてはある速度(割合)で上層から下層へと粒子が移動すると考えることができよう。

下層の平均的な隙間の大きさは、下層の平均粒径を用いて次のように表される。

$$R_m = k_1 \frac{\sum_{k=1}^{k_2} d_k C_{Lk}}{\sum_{k=1}^{k_2} C_{Lk}} = 2k_1 \frac{\sum_{k=1}^{k_2} d_k C_k (1-p_k)}{\sum_{k=1}^{k_2} C_k (1-p_k)} \quad (13)$$

ここに、 $k_1$  は係数である。上層に存在する割合が大きく、かつ、流速が大きいほど隙間に落ち込む割合は大きくなると考えられるので、この割合を  $r_k$  とすると、次のように表すことができよう。

$$r_k = k_2 C_{Uk} |u_0| = 2k_2 p_k C_k |u_0| \quad (14)$$

ここに、 $k_2$  は係数である。ただし、式(14)が適用されるのは、 $d_k < R_m$  を満たす粒径階に限られる。また、 $d_k \geq R_m$  となる粒径階に関しては、上層からの落ち込み分を補償する上向きの移動が生じなければならない(堆積や侵食ではなく、粒子の入れ替わりである)。いま、 $d_{k_0-1} < R_m \leq d_{k_0}$  とすると、上層から下層に移動する総量は次のように表される。

$$r_i = 2k_2 |u_0| \sum_{k=1}^{k_0-1} p_k C_k \quad (15)$$

下層からの上昇量は  $d_k \geq R_m$  なる粒径階に対して次のように与えられる。

$$r_i = k_3 C_{Lk} |u_0| = 2k_3 (1-p_k) C_k |u_0| \quad (16)$$

ここに、 $k_3$  は係数である。上述のように上昇量の総和は下降量の総和と釣り合う必要があるので、次式が成立しなければならない。

$$2k_2 |u_0| \sum_{k=k_0}^{k_2} (1-p_k) C_k = -r_i \quad (17)$$

式(15)と式(17)から係数  $k_3$  は次のように求められる。

$$k_3 = -k_2 \frac{\sum_{k=1}^{k_0-1} p_k C_k}{\sum_{k=k_0}^{k_2} (1-p_k) C_k} \quad (18)$$

全層を対象とした粒径階  $k$  の連続式は、

$$\frac{\partial C_k h}{\partial t} + \frac{\partial q_{bk}}{\partial x} = i_k C_k \quad (19)$$

となる。ここに、 $i_k$  は粒径階  $k$  の河床侵食堆積速度であ

り、 $C_s$  は河床の堆積土砂濃度である。

上層のみを対象とした粒径階  $k$  の連続式は、

$$\frac{\partial C_{U_k} h'}{\partial t} + \frac{\partial q_{bU_k}}{\partial x} = -r_k \quad (20)$$

となる。ここに、 $h'$  は上層の流動深であり、 $h/2$  に等しい。上式に式(8)および式(10)を代入すると、

$$\frac{\partial p_k C_k h}{\partial t} + \frac{3}{2} \frac{\partial p_k u_0 h C_k}{\partial x} = -r_k \quad (21)$$

となる。既存の土石流の1次元モデルに式(21)を追加することにより、 $p_k$  の時間的変動を含む土石流の追跡が可能となる。ただし、係数  $k_1$  と  $k_2$  に関しては、別途実験結果等から決定しなければならない。

### 3. 土石流中の巨礫の分級に関する水路実験

長さ5m、幅11cm、勾配17°の実験水路内に異なる5粒径からなる土石流を発生させ、土石流中の巨礫の分級過程を調べた。図-3に実験に使用した土砂の粒度分布を示している。Case 1においては図-4に示すように水路下流端に長さ50cm、厚さ7cmの堆積層を準備し、十分に飽和させたのち、1000cm<sup>3</sup>/sの給水を行って土石流を発生させた。Case 2においては図-5に示すように水路下流端から3mの地点に堆積層を準備し、Case 1と同じ方法で土石流を発生させた。

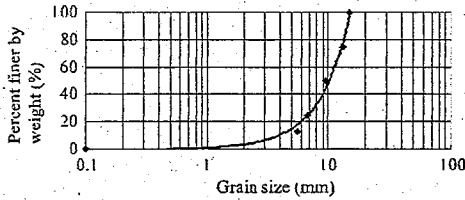


図-3 実験に用いた砂礫の粒度分布

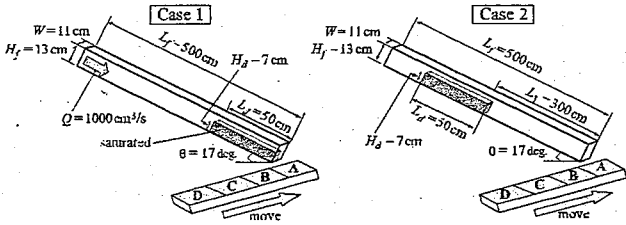


図-4 実験装置 (Case 1) 図-5 実験装置 (Case 2)

水路下流端に流出する土砂を、4つのボックス(A~D)により先端部から後続部までに4分割して採取し、流出土砂量と粒度分布を調べた。流出ハイドログラフとセディグラフを図-6に示し、各ボックスにおける各粒径階の存在率を図-7に示す。

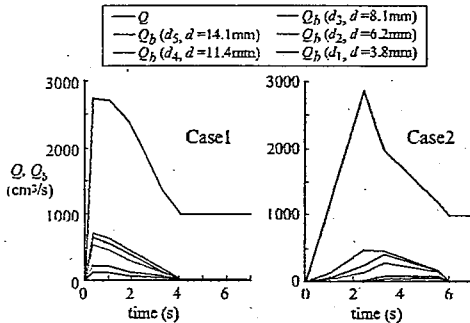


図-6 流出ハイドログラフとセディグラフ

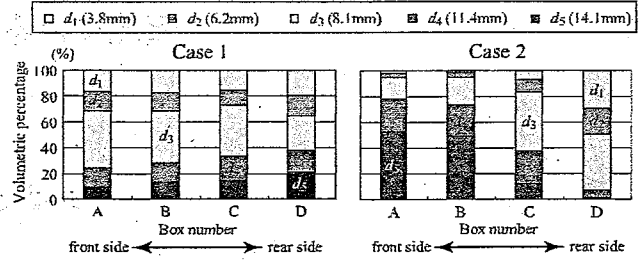


図-7 各ボックス内の土砂の存在割合

図-6と図-7より、3mの区間を流下する間に、土石流の先端部に大きい粒子( $d_4$ と $d_5$ )が集まってくるのが分かる。反対に、土石流の後続部では小さい粒子( $d_1$ と $d_2$ )の存在率が大きくなっている。実験は同じ条件のもと、数回程度繰り返し行っているが、いずれの実験においても、同様の分級現象が確認された。

高速度ビデオを用いた観察によれば、大粒子は河床付近から流動層表面へと流化に伴い移動しており、その上昇速度は土石流の平均流速の3~4%の値となっていた。残念ながら現時点では大粒子が上昇するメカニズムまでは解明できていないが、こういった研究が進展することにより、上昇速度をさらに合理的に評価できるようになると考えている。

### 4. 水路実験への2層モデルの適用

2.に示した2層モデルを3.の水路実験に適用した。図-6のCase 1のハイドログラフとセディグラフを上流端境界条件として与え、3m下流の地点における流量・流砂量を計算した。図-8にその計算値と実験値(Case 2)との比較を示している。計算点間隔は5cm。時間ステップは0.01秒である。 $k_1$ と $k_2$ を種々変化させて計算を行った結果、 $k_1$ が0.75、 $k_2$ が0.01の時、実験値との対応が最も良くなった。この図から、2層モデルにより、大粒径粒子の分級過程がある程度まで再現できることが分かる。今後、さらに大きなスケールの実験への適用を試みたい。

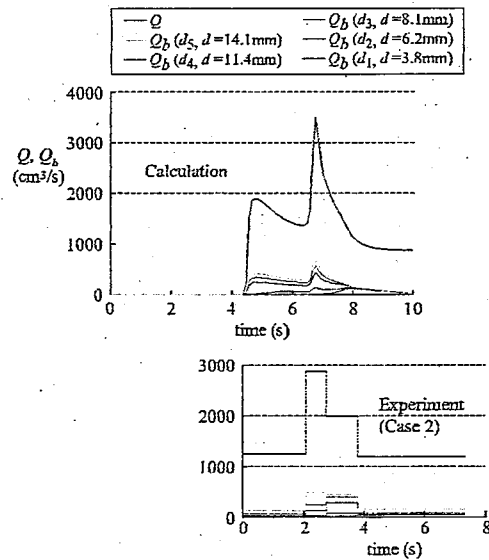


図-8 流出ハイドログラフとセディグラフに関する実験値と計算値との比較