

1. はじめに

任意の降雨を入力条件として、対象流域から流出する土砂の量と質を予測することは、適正な土砂管理を行う上で有効と考えられる。ここでは、土石流から掃流状集合流動、掃流砂までの幅広い土砂移動形態を対象として、河床砂の粒度変化をも考慮できる SERMOW モデル¹⁾を採用し、高原川上流域に適用することにより、豪雨時の土砂移動について考察する。

2. 数値シミュレーションの方法

山地流域からの土砂と水の流出を解析するため、SERMOW モデルでは対象流域を一組の河道網とそれに接続する複数の斜面群とによって表している。各斜面要素においては降雨を入力条件として、雨水の流出過程を kinematic wave 法によって解析し、斜面下流端における流出流量を求めている。河道網においては、斜面からの流入流量を考慮しながら、1 次元の河床変動計算を行っている。なお、本計算においては、深床堆積物のみを土砂の生産源と考え、斜面の新規崩壊などは考慮していない。

2.1 流れの抵抗則

流動層内部の粗粒子濃度によって、以下の様にそれぞれ異なる式を用いている。

$$q = \frac{2}{5d_{mL}} \left\{ \frac{g}{0.02} \frac{\sigma C_L + (1 - C_L)\rho_m}{\sigma} \right\}^{1/2} \left\{ \left(\frac{C_{*L}}{C_L} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{5/2} \tan^{1/2} \theta_w \quad (0.4C_{*L} < C_L) \quad (1)$$

$$q = \frac{0.7\sqrt{g}}{d_{mL}} h^{5/2} \tan^{1/2} \theta_w \quad (0.01 < C_L \leq 0.4C_{*L}) \quad (2)$$

$$q = \frac{1}{n_m} h^{5/3} \tan^{1/2} \theta_w \quad (C_L \leq 0.01) \quad (3)$$

ここに、 q ：単位幅全流量、 d_{mL} ：流砂中の粗粒子の平均粒径、 g ：重力加速度、 ρ_m ：細粒分を含む流体相の単位体積重量、 σ ：砂礫の単位体積重量、 C_L ：流動層中の粗粒子容積濃度、 C_{*L} ：堆積層中の粗粒子容積濃度、 h ：流動深、 θ_w ：水面勾配、 n_m ：マンシングの粗度係数である。

2.2 流砂の粒度分布

粒度の分布範囲を k_e 個の粒径階に分割し、 k 番目の粒径階の代表粒径を d_k とする。特定のサイズより小さい粒子は水と一体となって流体相を形成すると考えられるので、このような粒径成分 ($k=1 \sim k_1$) を「細粒分」と呼び、固体相として挙動する「粗粒分」($k=k_1+1 \sim k_e$) と区別し、前述の流動層中の粗粒子容積濃度 C_L 、ならびに細粒分が間隙流体中に占めている容積濃度 C_F を求める。

2.3 河床のモデル化

河床では粗粒子が骨格構造を形成しており、細粒分は骨格内の空隙に存在すると考え、空隙中に存在する

細粒分の存在割合 C_{*k} を、河床における粒径階 k の粒子の存在率 f_{bk} から求める。ただし、細粒分が空隙に収容されるには、その存在率が 26% を超えないとの条件が必要である。細粒分の存在率が 26% を超える場合には、河床は細粒分が C_{*F} の濃度で堆積している中に、粗粒子が骨格を形成することなく分散して存在していると考えられる。

2.4 連続式

流動層における水と土砂を加えた全容積の連続式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial qB}{\partial x} = i_{sb} K_1 + \frac{q_{in}}{B} \quad (4)$$

$$K_1 = C_{*L} + (1 - C_{*L}) \{ C_{*F} + (1 - C_{*F}) S_b \} \quad (i_{sb} > 0) \quad (5)$$

$$K_1 = 0 \quad (i_{sb} \leq 0) \quad (6)$$

で与えられる。ここに、 B ：水みち幅、 q_{in} ：側方からの単位長さあたりの水の流入流量、 i_{sb} ：水みち底面の侵食・堆積速度、 S_b ：水みち底面から侵食される堆積物の飽和度である。

各粒径階の砂粒の連続式は次のように表される。

$$\frac{\partial (C_k h)}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial (q C_k B)}{\partial x} = i_{sbk} \quad (7)$$

ここに、 i_{sbk} ：粒径階 k の粒子の侵食・堆積速度である。河床変動を表す連続式は、次のように表される。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{B}{B_0} i_{sb} = 0 \quad (8)$$

ここに、 z ：河床位、 B_0 ：河道幅（谷幅）である。

2.5 粒径別侵食・堆積速度

河床が侵食される場合については、河床が平均粒径の大きさをもった一様な粒子で構成されていると考え、次の侵食速度式を用いて侵食速度を求める。

$$\frac{i_{sbo}}{\sqrt{gh}} = K \sin^{3/2} \theta_w \left\{ 1 - \frac{\sigma - \rho_m}{\rho_m} C_L \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta_w} - 1 \right) \right\}^{1/2} \left\{ \frac{\tan \phi}{\tan \theta_w} - 1 \right\} (C_{L\infty} - C_L) \frac{h}{d_{mL}} \quad (9)$$

ここに、 K は定数である。

粒径別の侵食速度については、当該地点の水深が $d_{k2+1} > h > d_{k2}$ であったとすると、移動可能な粗粒子の割合 K_3 は、

$$K_3 = \sum_{k=k_1+1}^{k_2} f_{bLk} \quad (10)$$

と表され、 $i_{sbo} K_3$ がバルクの侵食速度を表すと考えられる。ただし、 f_{bLk} は河床表層における粗粒子のみを対象とした場合の粒径階 k の存在率であり、

$$f_{bLk} = \frac{f_{bk}}{\sum_{k=k_1+1}^{k_e} f_{bk}} \quad (11)$$

と表される。

$d_{k2+1} > h > d_{k2}$ の時の粒径別侵食速度は、

$$\left. \begin{aligned} k_1 < k \leq k_2 & ; i_{sbk} = i_{sbo} K_3 f_{bLk} C_{*L} \\ k > k_2 & ; i_{sbk} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

で与えられ、 $k \leq k_1$ の細粒分に関しては、以下となる。

$$i_{sbk} = i_{sbo} K_3 (1 - C_{*L}) C_{*k} \quad (13)$$

粗礫が河床上に堆積していく場合、堆積速度は、

$$g_{i_{sbo}} = \delta_d \frac{C_{L\infty} - C_L}{C_{*L}} \frac{q}{h} \quad (14)$$

となる。ここに、 δ_d は定数である。したがって、粒径別の堆積速度は次式で与えられる。

$$i_{sbk} = i_{sbo} \frac{C_k}{C_L} C_{*L \max} \quad (k > k_1) \quad (15)$$

細粒分に関しては、以下の式となる。

$$i_{sbk} = i_{sbo} (1 - C_{*L \max}) \frac{C_k}{1 - C_L} \quad (k \leq k_1) \quad (16)$$

平衡土砂濃度 $C_{L\infty}$ については水面勾配に応じて次のように与えている。

$$C_{L\infty} = \frac{\rho_m \tan \theta_w}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \quad (\tan \theta_w > 0.138) \quad (17)$$

$$C_{L\infty} = 6.7 \left\{ \frac{\rho_m \tan \theta_w}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta_w)} \right\}^2 \quad (0.03 < \tan \theta_w \leq 0.138) \quad (18)$$

$$C_{L\infty} = \frac{(1 + 5 \tan \theta_w) \tan \theta_w}{\sigma / \rho_m - 1} \left(1 - \alpha_0^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \alpha_0 \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (\tan \theta_w \leq 0.03) \quad (19)$$

$$\tau_{*c} = 0.04 \times 10^{1.72 \tan \theta_w} \quad (20)$$

$$\alpha_0^2 = \frac{2 \{ 0.425 - (\sigma / \rho_m) \tan \theta_w / (\sigma / \rho_m - 1) \}}{1 - (\sigma / \rho_m) \tan \theta_w / (\sigma / \rho_m - 1)} \quad (21)$$

2.6 河床の粒度分布

侵食の場合、河床表層の粒度分布の時間的変化は、単位時間内における河床表層への土砂の出入りを考えることにより求めている。一方、堆積による粒度分布の変化は $C_* = C_{*L \max} = C_{*F \max}$ として求めている。

2.7 計算条件

河道網および斜面要素のデータは、蒲田川上流の約 70km² を対象とし、足洗谷合流の直上流地点を領域の下流端として作成された（図 - 1 参照）。河床計算点の間隔は 100m、計算点の総数は 1564 個、斜面要素の総数は 843 個となっている。

河床材料の粒度分布には、蒲田川堰堤で計測された結果を使用した。最小粒径は 0.074mm で、最大粒径は 10cm である。0.125mm 以下の 2 粒径を細粒分とし、それ以上の 9 粒径を粗粒分としている。

降雨の入力値には、2006 年 7 月 15 日午前 11 時から 7 月 19 日午前 10 時までの 95 時間の降雨を採用した。

河床の飽和度を 1.0、マニングの粗度係数を 0.03、河床の初期堆積厚さを 2m、河床表層の厚さを 10cm とし、その他の係数については従来の研究において使用したものと同一値を使用した。

3. 数値シミュレーションの結果と考察

図 - 2 に計算領域の下流端において計算された全流出流量の時間的変化を降雨条件とあわせて示している。実測値が得られていないため細かな検証はできないが、

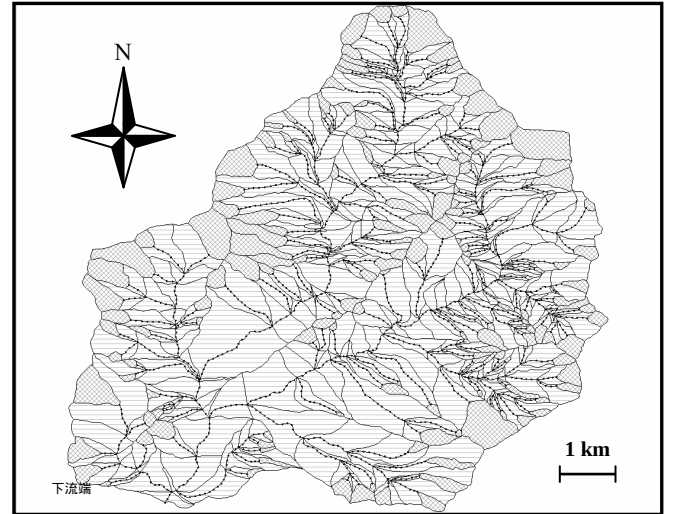


図 - 1 計算に用いた河道網と斜面群

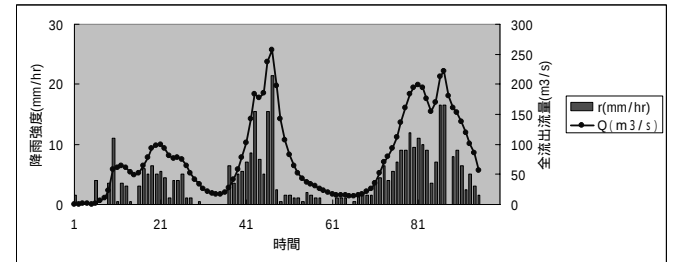


図 - 2 計算に用いた降雨と全流出流量の時間的変化

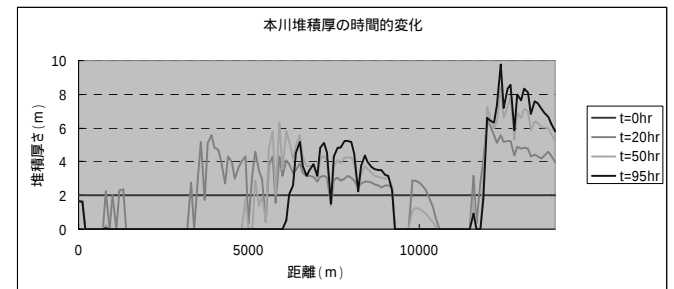


図 - 3 河床堆積厚さの時間的変動

降雨の供給条件と流出流量の保存性は確認できた。図 - 3 に河床堆積厚さの時間的変動を示している。これを見ると、上流域で堆積土砂のほとんどが侵食され、下流に堆積を生じていることが分かる。本計算で使用した土砂の粒度分布が、堰堤に堆積した土砂のものであったことが、大きな土砂侵食の原因と考えられ、この点については今後現地調査等により修正していく必要がある。

4. おわりに

本解析によって蒲田川上流域における豪雨時の土砂移動過程がある程度明らかになったといえる。今後、対象地域を拡大し、河床堆積土砂の厚さや粒度分布といった情報を集積すれば、高原川全体の土砂収支を合理的に把握することが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 高橋 保・井上素行・中川 一・里深好文：山岳流域における土砂流出の予測，水工学論文集，第 44 巻，pp.717-722，2000 年