

細粒堆積土砂の浮遊砂輸送による河床低下過程

東北大学大学院工学研究科 学生員 ○藤井 健司
東北大学大学院工学研究科 正員 泉 典洋
東北大学大学院工学研究科 フェロー 沢本 正樹

1. はじめに

1997年5月，秋田県鹿角市の澄川温泉および赤川温泉付近において大規模な地すべりとそれに伴う土石流が発生した。昨年行った現地調査では，発生から5ヶ月の間に約3/5の堆積土砂が浸食されたことがわかった。これは，土石流堆積物が多量の細粒分を含んでいたためと考えられた。本研究では，大量の土砂が短期間のうちに供給された時の河道形状の変化過程を明らかにすることを目的とする。

2. 土砂堆積量と侵食量

昨年行った調査では，調査区域において5ヶ月の間に約3/5の土砂が浸食されたことがわかった。調査時点河床は粒径数十cmの土砂で構成されていたが河道の側岸には土石流の堆積物がまだ浸食されていない状態で残っており，それらは細かい粒径の粘土分(中央粒径≒0.3mm)を大量に含んでいた(図-1)。このように急速に浸食が進行したのは土石流堆積物中の細粒分が多量に流出したためであると考えられる。

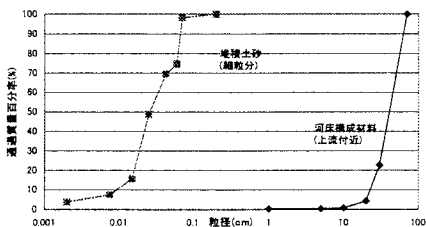


図-1 粒度分布

3. 細粒土砂輸送の理論

(1) 細粒土砂輸送モデル

これまでの河床変動理論は掃流過程を取り扱ったものがほとんどであった。掃流過程が支配的であるとき河床縦断形状は徐々に緩やかになる拡散型の変化をする。しかし，土石流堆積物のように細粒分を多量に含んだ土砂の場合，掃流砂よりも浮遊砂が卓越した流送過程となり短期間において著しい河床低下を示すことが実測の結果より示唆された。

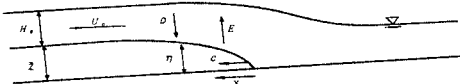


図-2 堆積物の侵食モデル

このプロセスを明らかにするための第一歩として次のような簡単なモデルを考えてみる。図-2に示すように一定勾配 S を有する斜面において流速 U_0 ，水深 H_0 の等流状態にある流れを考える。そこへ，細粒土砂で構成された一定厚さ $\tilde{Z}$ の堆積が生じているとする。流れはこの土砂を主として浮遊形態で輸送するとしよう。このような状況の下では堆積層の上流端(フロント部)は，一定の形状を保ったまま下流

へ移動することが考えられる。ここではそのような堆積層の上流端形状が存在すると仮定して解析を進める。

(2) 支配方程式

図-2に示したような流れの運動を記述する浅水方程式，連続式及び河床高さの時間変化は次のようになる。

$$\tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} = -g \frac{\partial \tilde{h}}{\partial \tilde{x}} - g \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial \tilde{x}} + gS - C_f \frac{\tilde{u}^2}{\tilde{h}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u} \tilde{h}}{\partial \tilde{x}} = 0, \quad \frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial \tilde{t}} = D - E \quad (2,3)$$

ここで図-2に示すように $\tilde{x}$ は流下方向の座標であり， $\tilde{u}$ ， $\tilde{\eta}$ および $\tilde{h}$ はそれぞれ流速，河床高さおよび水深， D 及び E は，堆積量及び巻き上げ量である。また， C_f は抵抗係数であり，ここでは簡単のため定数とする。

ここで考えているような一様流の卓越する状況の下では，移流項にくらべて拡散項は，無視することができるため，水深方向に積分した浮遊砂の移流拡散方程式(一次元)は(4)式で表される。

$$\frac{\partial \tilde{u} \tilde{\zeta}}{\partial \tilde{x}} = E - D, \quad D = \frac{w_s^2}{\varepsilon_z} \tilde{\zeta}, \quad E = 1.0 \times 10^{-3} \left(\frac{u_*}{w_s} \right)^3 \quad (4,5,6)$$

ここで， $\tilde{\zeta}$ は水深方向に積分した浮遊砂濃度であり，堆積量 D ，巻き上げ量 E は式(5,6)のように表すことにする¹⁾。ここで w_s は粒子の沈降速度， u_* は摩擦速度である。

ε_z は鉛直方向の浮遊拡散係数であり次式で表される¹⁾。

$$\varepsilon_z = 0.077 u_* \tilde{h} = 0.077 \sqrt{C_f} \tilde{u} \tilde{h} \quad (7)$$

いま単位幅あたりの流量が流下方向に変化しないと考えているので ε_z は定数となる。

堆積土砂の上流端では土砂は存在しない。また下流無限遠点($x \rightarrow \infty$)においては流れは等流状態へと漸近する。したがって境界条件は次のように書ける。

$$\tilde{\eta} = 0, \quad \tilde{\zeta} = 0 \quad \text{at} \quad \tilde{x} = 0, \tilde{t} = 0 \quad (8)$$

$$\tilde{\eta} = \tilde{Z}, \quad \tilde{\zeta} = \zeta_0, \quad \tilde{u} = U_0 \quad \text{at} \quad \tilde{x} = \infty \quad (9)$$

ここで ζ_0 は等流状態での水深方向に積分した浮遊砂濃度である。

(3) 無次元化

次のような無次元化を導入する。

$$(\tilde{h}, \tilde{\eta}, \tilde{Z}) = H_0 (h, \eta, Z), \quad \tilde{x} = (H_0 / S) x \quad (10a, b, c, d)$$

$$\tilde{\zeta} = \zeta_0 \zeta, \quad \tilde{u} = U_0 u, \quad \tilde{t} = \frac{\varepsilon_z H_0}{w_s^2 \zeta_0} t \quad (10d, e)$$

$$D = D_0 \zeta, \quad E = E_0 u^3 \quad (10f, g)$$

ここで D_0 及び E_0 は，それぞれ下流側における等流状態での堆積量及び巻き上げ量である。

このとき(1)は次式のように表される。

$$F^2 u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial \eta}{\partial x} + 1 - \frac{u^2}{h} \quad (11)$$

ここで $F^2 = U^2 / (gH_0)$ である。さらに等流条件 $C_f U_0^2 = gSH_0$ を用いている。

また、下流で河床の変化がない(巻き上げと沈降が釣り合う)ときは $D_0 = E_0$ となり式(3)および(4)は、次のようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \zeta - u^3, \quad \frac{\partial u \zeta}{\partial x} = \beta(u^3 - \zeta) \quad (12,13)$$

ここで $\beta = w_s^2 H_0 / (SU_0 \varepsilon_s)$ である。

(4) 座標変換

定常解を導くため次のような座標変換を導入する。

$$x^* = x - ct, \quad t^* = t \quad (14a,b)$$

ここで c は、フロントの移動速度である。上記の座標変換は x 方向に速度 c で移動する座標系で見ていることに相当するのであるから、フロントが一定形状を保ちながら一定速度で前進するとすれば、見かけ上フロント部の形状が時間的に変化しないことになる。式(12)にこの座標変換を適用すると(15)の常微分方程式に書き換えることができる。

$$-c \frac{d\eta}{dx} = \zeta - u^3, \quad \frac{du \zeta}{dx} = \beta c \frac{d\eta}{dx} \quad (15,16)$$

ここで表記を簡単にするために $*$ は落としている。そして式(13)、(15)から式(16)が得られる。これを両辺積分して境界条件(8)、(9)を用いると $c = 1/(\beta Z)$ の関係が得られる。つまり、境界条件から c は上式のように決まる。

式(2)、(15)および $c = 1/(\beta Z)$ の関係を用いて(10)-(13)式を書き直すと次のようになる。

$$\frac{du}{dx} = \frac{\beta Z(\zeta - u^3) + 1 - u^3}{F^2 u - u^{-2}} \quad (17)$$

$$\frac{d\zeta}{dx} = \frac{\beta(u^3 - \zeta)}{u} - \frac{\beta Z(\zeta - u^3) + 1 - u^3}{F^2 u^2 - u^{-1}} \zeta \quad (18)$$

$$\frac{d\eta}{dx} = \beta Z(u^3 - \zeta) \quad (19)$$

4. 結果と考察

(1) フロントの形状と前進速度

図-3,4はそれぞれ β が変化した場合の u 、 ζ の流下方向の変化を示したものである。ここで、先にも述べた通り $\beta = w_s^2 H_0 / (SU_0 \varepsilon_s)$ であり、粒子の浮遊しにくさを表すパラメーターである。 β が大きい、つまり粒子が浮遊しにくいとフロントは勾配が大きく、流速及び浮遊砂濃度は短い区間で急激に変化する結果となった。またその時、フロントの前進速度も遅くなる。

(2) 現地への適用

理論の結果を澄川および赤川の場合に適用してみよう。上流部における水深としては実測時における平均的な値として0.5mを用いる。平均的な河床勾配及び堆積土砂の粒径としてはそれぞれ実測値である0.084及び0.3mmを用いる。その時、 U_0 及び u_s は、それぞれ2.0m/s及び0.63m/sとなる。Rubeyの式より w_s は0.04m/sとなるから u_s / w_s は16程度となり十分な浮遊砂が生じていたと考えられる。

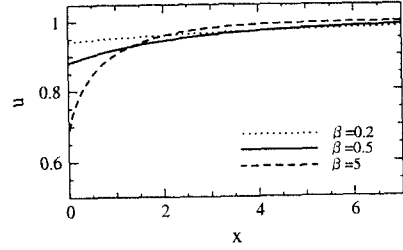


図-3 β による u の分布形状の変化 ($Z=1.0, F=0.9$).

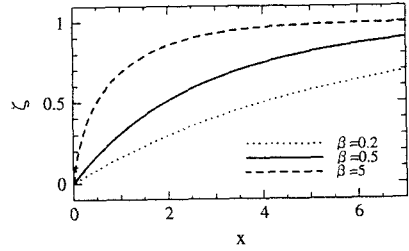


図-4 β による ζ の分布形状の変化 ($Z=1.0, F=0.9$).

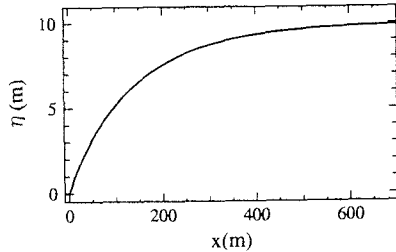


図-5 理論の現地への適用 ($\beta=0.2, Z=20, F=0.9$).

実測の結果によれば平均的な堆積厚さは10m程度で ($Z=20$)であり、上述の値から β は0.2と見積もられるから堆積土砂のフロント形状は図-5のようになる。またその時のフロントの前進速度 c は0.5となり、その次元量は0.21m/sと、非常に速いものとなる。これは、本理論では0.3mmの一樣粒径と仮定したが、実際は粒径分布を有しているためであると考えられる。これら粒径分布の効果を考慮した理論については今後の課題である。

5. おわりに

本研究では、調査結果を踏まえた上で、河道に堆積した細粒土砂が浮遊によって輸送される場合の河床低下過程を説明する簡単なモデルを提案した。それによると上流端形状(フロント部)が一定の速度と形状を維持しながら下流側へ移動するような河床低下過程が存在しうることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Parker, G: Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile beds. Part 1; The sand-silt river, *J. Fluid Mech.*, Vol.89, 109-125, 1978