

土砂の掃流状集合流動について

Sediment Gravity Flow on Relatively Gentle Slopes

九州大学工学部 正 員 橋 本 晴 行

長崎大学工学部 正 員 椿 東一郎

九州大学工学部 正 員 平 野 宗 夫

1. はじめに

急勾配で発生・流下した土石流が緩勾配の渓流出口に達し、堆積すると、後続流は堆積土砂の上を流れ、粒子濃度の薄い水流層と高濃度層の上・下2層に分離したような流れを呈する。この流れは、高濃度層では粒子同士の頻繁な接触によって粒子間応力が発生し、土石流のような挙動を示すが、一方上部の水流層では掃流砂に類似した様相も示す。このような掃流砂と土石流の中間的な土砂輸送形態は掃流状集合流動と呼ばれ、土石流の堆積問題に関連するとともに土石流から掃流砂への遷移現象として重要な問題となっている。これについては従来より若干の研究が行われているが、その特性は十分に明らかにされていない。

本研究では、現象として単純な砂礫粒子の掃流状集合流動を対象とし、まずその流動特性について詳細な実験を行った。ついで、粒子間応力が卓越する高濃度層の上に一様な流速分布の水流層が存在する2層流モデルを提示し、その特性について理論的な検討を加えている。

2. 実験の方法

表-1 河床材料の特性と実験条件

Case	d (mm)	σ (g/cm ³)	C_s	q_{wt} (cm ² /s)	θ_0 (degree)	h/d
SI	4.6	2.59	0.58	200	2~14	6~10
SII	4.4	2.59	0.60	660	2~14	10~16

長さ6.7 m, 幅20 cmの可変勾配水路に表-1に示すような均一な砂礫を厚さ10 cmに敷き、あらかじめ浸透水

で堆積層を飽和させた後、上流端から給水を行い、流れを発生させた。

発生した流れにトレーサーを流し、水路の真上および側方からVTRカメラや16 mm高速度カメラ(100コマ/s)でそれを撮影した。表面流速の測定ではトレーサーとして発泡スチロールを、水流の流速分布の測定では比重が約1の中立粒子(積水化成成品工業製のピオセラン粒子)をそれぞれ用いた。

水位と河床は16 mmフィルムから読み取って求めた。また、下流端では流れを先端から断続的に採取し、全流量や輸送濃度を求めた。このとき、採取時間を正確に測定するため、採取する状態をVTRで撮影した。

3. 実験の結果

(1) 流れの構造と流速分布

撮影された16 mmフィルムから流れを観察すると、流れの上部は砂礫濃度が薄く、追跡可能な粒子は少ないのに対して、下部は比較的粒子濃度が濃く追跡も容易である(図-1)。これらの粒子を追跡してみると、水路傾斜角 $\theta_0 = 2^\circ \sim 4^\circ$ では、粒子は河床と相互作用を及ぼしあいながら移動し掃流砂とみなされるのに対して、 $\theta_0 > 8^\circ$ では移動粒子間で相互作用を及ぼし土石流のような挙動を示している。

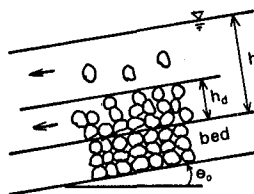


図-1 流れの模式図

このような流れに中立粒子を投入すると、大部分は高濃度の砂礫粒子層に妨げられて上部にとどまり、水流層内を移動する。図-2は、16 mmフィルムにおいて中立粒子や砂礫粒子を追跡して求めた流速分布である。ここに、 η は水深で無次元化した高さである。水流層ではバラツキが大きいものの、ほぼ一様な分布を

示すのに対して、高濃度層ではせん断流的で顕著な速度勾配を示す。このようなせん断層の厚さ h_d を読み取り、水深で無次元化した結果を図-3に示す。勾配の増加につれ、全体的に様な流速分布からせん断流的な分布へ変化していき、 $\theta_0 = 14^\circ$ で土石流のそれに接続することが分る。

(2) 濃度と抵抗則

図-4は単位幅当りの全流量 q_t 、輸送濃度 C_T 、表面流速 u_s 、水位 H および河床高 z の時間的变化を示したものである。この実験では、 q_t や C_T は $t = 10$ 秒～18秒の間ではほぼ定常になっている。しかしデータ解析に当たっては、この時間のなかでも河床侵食の影響が少ない先端に近いデータ (図中の斜線) を用いることにした。

掃流状集合流動では水面流動が激しいのも一つ

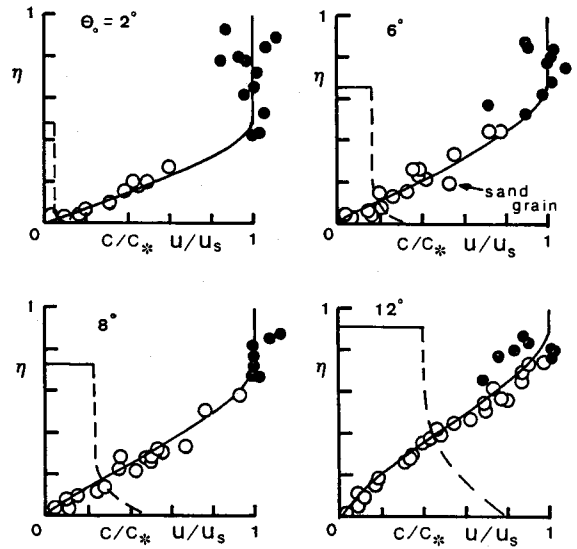


図-2 濃度・流速分布 (Case SII)

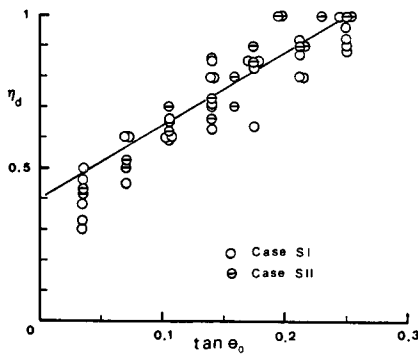


図-3 せん断層の無次元厚さと水路勾配の関係

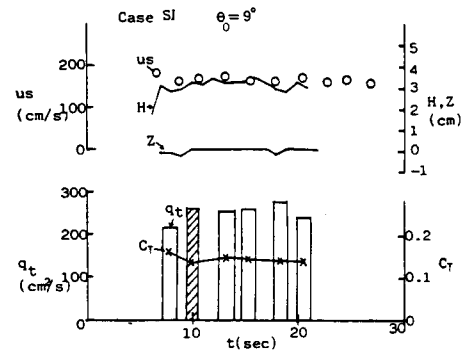


図-4 水理量の時間的变化

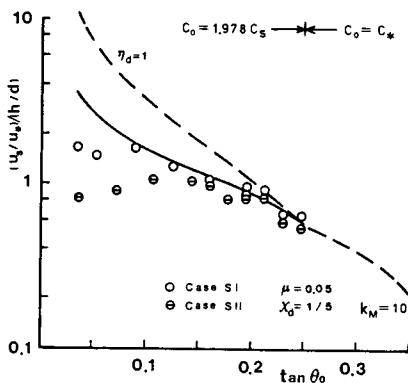


図-5 表面流速の無次元表示と水路勾配の関係

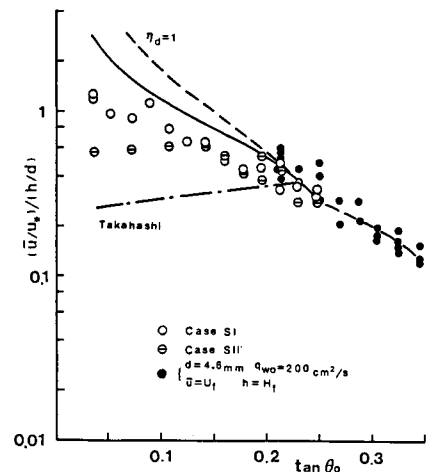


図-6 平均流速の無次元表示と水路勾配の関係

の特徴である。このため、水深としては採用した時間内で40個程度を読み取り平均したものをを用いている。

図-5, 6は表面流速および平均流速 $\bar{u}=q_t/h$ の無次元表示と水路勾配の関係をそれぞれ示したものである。ここに、 $u_*=\sqrt{gh\sin\theta}$ は摩擦速度である。なお図-6には土石流勾配における実験結果も同時に示している。約8°以上の勾配では、無次元表面流速 u_s/u_* も流速係数 $\bar{u}/u_*$ もほぼ h/d に比例すると同時に、勾配の増加に対しては明らかに減少している。これらは土石流と同様な特性であり、高橋が示した理論²⁾とは異なっている。また、図-7は砂礫の輸送濃度 C_T およびせん断層内における輸送濃度 C_{dT} と水路勾配の関係を示している。ここに、一様流速部分の濃度を無視し、 $\bar{u}_d$ をせん断層の平均流速として、 C_{dT} は次式で与えられる。

$$C_{dT} = C_T (\bar{u}/\bar{u}_d) (h/h_d)$$

C_T には実験値を、 h/h_d 、 $\bar{u}/\bar{u}_d$ には図-2の流速分布の測定値から求めたものをそれぞれ用いて C_{dT} を逆算した。 C_{dT} は一定ではなく、勾配とともに増加していることが分かる。

以上の結果、水路傾斜角 θ_0 が約8°以上、せん断層の相対厚さ h_d/h は約0.7以上、輸送濃度 C_T は約

0.1以上するとき、土石流に類似した抵抗特性を示すことが分かった。

図-7 濃度と水路勾配の関係

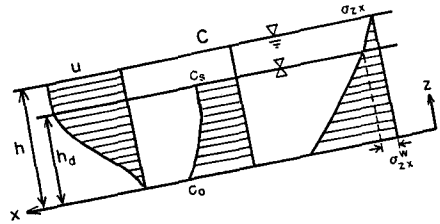
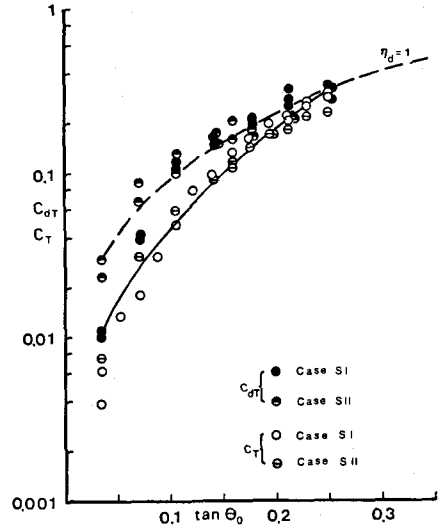


図-8 2層流モデル

4. 流動特性の解析

(1) 2層流モデル

掃流状集合流動では、比較的高濃度の固・液せん断層の上に、濃度が薄く、流速分布はほぼ一様な水流層が現われ、2層流を呈している。そこで、一様流速の部分では濃度 $C=0$ とし、またせん断層では粒子相互の接触により粒子間応力が発生し、従来の土石流における粒子間応力式が拡張して適用できるものとする(図-8)。したがって高濃度せん断層においては、土石流における取り扱いと同様に、流れ方向について固・液両相の、垂直方向については固相の力のつりあい式を立てると

$$x: \{\sigma C + \rho(1-C)\} g \sin \theta_0 + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} = 0 \quad (1) \quad z: -(\sigma - \rho) C g \cos \theta_0 + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

ここに、 σ_{zx} 、 σ_{zz} はそれぞれせん断応力、垂直応力で、粒子濃度を C 、最密充填濃度を C_* 、せん断層表面濃度を C_s 、水流のレイノルズ応力を σ_{zx}^w 、粒子間応力に関する係数を α, K_M, K_P として

$$\sigma_{zx} = K_M \alpha d^2 \frac{(C/C_*)^2}{1-C/C_*} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \sigma_{zx}^w \quad (3)$$

$$\sigma_{zz} = -\frac{1}{\alpha} K_M \alpha d^2 \frac{(C/C_*)^2}{1-C/C_*} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - K_P \frac{C}{C_*} \frac{C - C_s}{C_s} \quad (4)$$

さらに, $\mu=0.05, \beta=1.15$ として

$$\gamma = \frac{0.0762+0.102\mu}{0.0898-0.067\mu} \quad \alpha = \frac{\gamma}{1+\frac{\rho}{2\sigma}} \quad K_M = \frac{\pi}{6}(0.0762+0.102\mu)\beta^2 k_M \quad (5)$$

ここで σ_{zx}^w の評価が問題となる。上部に水流層が存在しない土石流においては σ_{zx}^w の寄与は粒子間応力に比して微少だとし無視されている。粒子間応力式に伴う諸係数値は, σ_{zx}^w を無視して求めた計算式が実験結果に適合するように決定されたものである。一方, 掃流状集合流動の高濃度せん断層においては, σ_{zx}^w は上部水流層の存在のため必ずしも無視することはできないと考えられる。しかしながらその厳密な評価は困難であり, 本論文では従来の土石流の式に接続されるため, $\sigma_{zx}^w = \rho g(h-h_d)\sin\theta_0$ としてせん断層内では一定と仮定することにする。

以上の仮定と式(1)～(4)から濃度勾配を規定する式として

$$\frac{\partial C}{\partial \eta} = - \frac{\Psi C_*}{\chi_d \eta_d} \frac{C-C_\alpha}{2C-C_s} \quad (6)$$

を得る。ここに

$$\Psi = \frac{\alpha - \tan\theta_0}{\alpha} \quad C_\alpha = \frac{\tan\theta_0}{\frac{(\sigma-\rho)}{\rho}(\alpha - \tan\theta_0)} \quad \chi_d = \frac{K_p}{C_s(\sigma-\rho)gh_d \cos\theta_0}$$

である。式(6)を $\eta=0$ で $C=C_0$ の境界条件で解くと

$$\eta = \frac{\chi_d \eta_d}{\Psi C_*} \{ 2(C_0-C) - (2C_\alpha-C_s) \ln \frac{C-C_\alpha}{C_0-C_\alpha} \} \quad (7)$$

底面濃度 C_0 は移動床土の土石流では $C_0=C_*$ である。一方, 掃流砂では $C_0 < C_*$ と考えられる。両者の中間的な流砂形態の掃流状集合流動においては, 土石流との限界勾配で土石流の境界条件に, 掃流砂との限界勾配では掃流砂の境界条件に遷移すると考えられる。そのため $C_0 = \alpha_0 C_s$ とおくことにする。ここに C_{SC} を土石流と掃流状集合流動の限界勾配における表面濃度として $\alpha_0 = C_*/C_{SC}$ である。限界勾配を $\theta_0=14^\circ$ とすると $\alpha_0=1.978$ となる。この境界条件では濃度分布は水路勾配の低下とともに一様化するようになる(図-2の破線)。高濃度せん断層の表面濃度は, 式(7)で $\eta=\eta_d, C=C_s$ において変形すると

$$\frac{C_s-C_\alpha}{C_0-C_\alpha} = \exp \left\{ - \frac{2(C_0-C_\alpha) - \frac{\Psi C_*}{\chi_d}}{2C_\alpha-C_s} \right\} \quad (8)$$

せん断層内の平均濃度は

$$\bar{C}_d = C_s + \int_{C_s}^{C_0} \frac{\eta}{\eta_d} dC = C_\alpha + \frac{\chi_d}{\Psi C_*} C_0 (C_0-C_s) \quad (9)$$

高橋のモデルでの $\bar{C}_d$ は土石流発生限界勾配 $\theta_0=14^\circ$ における濃度を保持するが, 本モデルの $\bar{C}_d$ は水路勾配の低下とともに減少するのが特徴である。

速度分布については, まず式(6)を用いて式(1)を積分した後, σ_{zx} に式(3)を代入すると, 次式

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\eta} \frac{u}{u_*} = & \frac{h}{d} \left(K_M \frac{\sigma \Psi C_*}{\rho \chi_d} \right)^{-\frac{1}{2}} \eta_d^{\frac{1}{2}} \frac{(1-C/C_*)^{\frac{1}{2}}}{C/C_*} \left[(C-C_s) \left\{ \frac{\sigma-\rho}{\rho} (C+2C_\alpha) + 2 \right\} \right. \\ & \left. + (1 + \frac{\sigma-\rho}{\rho} C_\alpha) (2C_\alpha-C_s) \ln \frac{C-C_\alpha}{C_s-C_\alpha} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (10)$$

さらに式(6)を用いて上式を積分し、底面 $\eta=0$ で $C=C_0$, $u=0$ とおくと

$$\frac{u}{u_*} = \frac{h}{d} \left\{ K_H \frac{\sigma}{\rho} \left(\frac{\Psi C_*}{\chi_d} \right)^3 \right\}^{-\frac{1}{2}} \eta_d^{\frac{3}{2}} G(C) \quad (11)$$

ここに

$$F(C) = \frac{2C-C_s}{C-C_a} \frac{(1-C/C_*)^{\frac{1}{2}}}{C/C_*} \left[(C-C_s) \left\{ \frac{\sigma-\rho}{\rho} (C+2C_a)+2 \right\} \right. \\ \left. + (1+\frac{\sigma-\rho}{\rho} C_a) (2C_a-C_s) \ln \frac{C-C_a}{C_s-C_a} \right]^{\frac{1}{2}}$$

として

$$G(C) = \int_C^{C_0} F(C) dC$$

である。せん断層表面流速 u_s は $C=C_s$ において

$$\frac{u_s}{u_*} = \frac{h}{d} \left\{ K_H \frac{\sigma}{\rho} \left(\frac{\Psi C_*}{\chi_d} \right)^3 \right\}^{-\frac{1}{2}} \eta_d^{\frac{3}{2}} G(C_s) \quad (12)$$

無次元流速分布は

$$u/u_s = G(C)/G(C_s) \quad (13)$$

となる。平均流速 $\bar{u}$ は水流層と高濃度せん断層のそれぞれの部分の流速を積分して

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \int_{\eta_d}^1 \frac{u}{u_*} d\eta + \int_0^{\eta_d} \frac{u}{u_*} d\eta \\ = (1-\eta_d) \frac{k_w u_s}{u_*} + \frac{h}{d} \left\{ K_H \frac{\sigma}{\rho} \left(\frac{\Psi C_*}{\chi_d} \right)^5 \right\}^{-\frac{1}{2}} \eta_d^{\frac{5}{2}} G_0(C_s) \quad (14)$$

ここに、 $n=0$ と1の場合に対して次式が定義されている。

$$G_n(C) = \int_C^{C_0} C^n \frac{2C-C_s}{C-C_a} G(C) dC$$

また、 k_w は水流層の流速分布に関する補正係数で、水流層がほぼ一様な分布を示すことから $k_w=1$ である。

式(14)に式(12)を代入して整理すると

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{h}{d} \left\{ K_H \frac{\sigma}{\rho} \left(\frac{\Psi C_*}{\chi_d} \right)^3 \right\}^{-\frac{1}{2}} \eta_d^{\frac{3}{2}} \left\{ (1-\eta_d) k_w G(C_s) + \frac{\chi_d \eta_d}{\Psi C_*} G_0(C_s) \right\} \quad (15)$$

最後に、輸送濃度 C_T は高濃度せん断層内の水の流速を粒子速度に等しいとして次式で求められる。

$$C_T = \int_0^1 C u d\eta / \int_0^1 u d\eta = \int_0^{\eta_d} C \frac{u}{u_*} d\eta / \frac{\bar{u}}{u_*} \\ = \frac{\chi_d \eta_d}{\Psi C_*} G_1(C_s) / \left\{ (1-\eta_d) k_w G(C_s) + \frac{\chi_d \eta_d}{\Psi C_*} G_0(C_s) \right\} \quad (16)$$

以上の諸式において $\eta_d=1$ とおけば土石流の式と一致する。

(2) 計算結果および実験との比較

まず、式(8)において $C_0=1.978C_s$ とおき各水路勾配毎に高濃度せん断層の表面濃度 C_s を計算する。その結果、水路勾配の減少につれ C_s は C_a に接近していき、約8°以下の勾配ではほぼ $C_s=C_a$ となる。同時に濃度分布は底面付近を除いて一様化する。そのため表面付近で計算誤差が過大になったり、特異点が生じて計算不能に陥ったりする。このような難点をさけるため、数値積分のキザミ幅をできるだけ小さくして精度をあげる一方で濃度分布に対して以下のような近似を行う。

高濃度せん断層の表面付近 $\eta_d \geq \eta \geq \eta_\epsilon$ では $C = C_\epsilon$ (一定) とし、これ以下の高さ $\eta_\epsilon \geq \eta \geq 0$ では式 (7) を用いて計算を行う。ここに、 η_ϵ は濃度が $C_\epsilon = (1 + \epsilon)C_s$ となる高さで、 ϵ は $\epsilon = 1.0 \times 10^{-4}$ 程度が妥当である。

その結果、たとえば流速分布は式 (11) において

$0 \leq \eta \leq \eta_\epsilon$ のとき

$$G(C) = \int_C^{C_0} \frac{2C - C_s}{C - C_a} \frac{(1 - C/C_*)^{\frac{1}{2}}}{C/C_*} \left[(C - C_\epsilon) \left\{ 2 + \frac{\sigma - \rho}{\rho} (C + 2C_a - C_s + C_\epsilon) \right\} \right. \\ \left. + (1 + \frac{\sigma - \rho}{\rho} C_a) (2C_a - C_s) \ln \left| \frac{C - C_a}{C_\epsilon - C_a} \right| + \frac{\Psi C_*}{\chi_d \eta_d} \left(\frac{\sigma - \rho}{\rho} C_\epsilon + 1 \right) (\eta_d - \eta_\epsilon) \right]^{\frac{1}{2}} dC \\ \equiv F_d(C) \quad (17)$$

$\eta_\epsilon \leq \eta \leq \eta_d$ のとき

$$G(C) = \frac{2}{3} \left(\frac{\Psi C_*}{\chi_d \eta_d} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{C_*}{C_\epsilon} \left\{ \left(1 - \frac{C}{C_*} \right) \left(\frac{\sigma - \rho}{\rho} C_\epsilon + 1 \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \left\{ (\eta_d - \eta_\epsilon)^{\frac{3}{2}} - (\eta_d - \eta)^{\frac{3}{2}} \right\} \\ + F_d(C_\epsilon) \quad (18)$$

と置き換えればよい。さらに、平均流速および輸送濃度も式 (14), (16) の定義式から求めることができる。

$\theta_0 \leq 9^\circ$ の水路勾配ではこのように近似して求められた式を、 $\theta_0 \geq 9^\circ$ では式 (7) ~ (16) を用いて計算した結果を図-2、および図-5~7に実線で示した。ここに、 η_d は図-3に示した実験曲線より与えている。これらの図には比較のため $\eta_d = 1$ の場合の計算結果も示している。 $\theta_0 = 9^\circ$ においては両者の計算方法による値は一致している。また、表面流速および平均流速の無次元表示の計算では、土石流限界勾配の $\theta_0 = 14^\circ$ において実験結果に適合させるため、衝突における運動量伝達に関する係数を $k_H = 10$ とおいている。 $\theta_0 \geq 8^\circ$ では、実験と理論は概ね一致していることが分る。

5. 結語

以上、掃流状集合流動に対して2層流モデルを考え、濃度、流速分布、平均流速および輸送濃度などの計算式を提示した。その結果、 $\theta_0 \geq 8^\circ$ では計算式が実験結果をかなり良く説明することを示した。しかしながら、本モデルでのレイノルズ応力の考察にはなお検討の余地があり、またせん断層の相対厚さ η_d を実験結果より評価しているなど細部については多くの問題が残されている。今後はこれらについてさらに検討を加えていく予定である。

最後に、実験、データ整理において元野一生 (現・運輸省) および本学院生の榎村康史の両氏に多大の助力を受けた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水山高久：土石流から掃流に変化する勾配での流砂量，新砂防，116号，1980.
- 2) 高橋 保：土石流の停止，堆積機構に関する研究(3)―土石流扇状地の2次侵食―，京大防災研究所年報，25号B-2，1982.
- 3) 椿東一郎，橋本晴行，末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文報告集，第317号，1982.