

京都大学防災研究所

正会員

高橋 保

京都大学大学院

学生員

八木秀樹

〃

〃

加 若史

1. はじめに; 土砂災害地を調査してみると, 比較的細かい砂礫が大量に流出して, 家屋等を埋没している例が多い。このような現象は巨礫が大量に含まれている土石流と区別して土砂流と呼ばれているが, その流動特性や流量式等はよくわかっていない。本研究はこのような土砂流の諸特性を明らかにすることを目的としている。

2. 土砂流の定義; 土石流でも稀流・浮流でもない土砂流が土砂水理学的に定義できるかどうか問題であるが, 高橋は各種土砂移動形態の発生領域を図-1のように与えている。ここで各領域の境界線は(1): 移動限界, (2)稀流を無視した場合の稀流状集合流動の発生限界, (3): 土石流発生限界 等である。したがって, 土砂流の水理学的な定義としては, 現実の土砂流が勾配 θ 程度以上で生じていることも考慮して, 図の一点鎖線より右側で生ずる稀流状集合流動と同義であるとするのが適当であろう。境界線(2)は $r/d = (C_0/C_{00} - 1) \cdots (1)$ で与えられる。ただし, C_0 : 堆積層の粒子濃度, $C_{00} = \rho \tan \theta / \{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)\} \cdots (2)$, r : 水深, d : 粒径, θ : 勾配, ϕ : 堆積層の内部摩擦角, σ : 粒子密度, ρ : 水の密度である。

(1)式は稀流を無視して得られたが, 稀流砂層の濃度を C_0 , 厚さを r_0 として, その影響を考慮すると, $r/d = (C_0/C_{00} - 1) + (C_0/C_{00})(r_0/d) \cdots (3)$ のようになり, 稀流流量式を適用すると図中の(2)曲線のようになる。土砂流の境界線としては(2)よりも(3)の方が適当である。

3. 流動機構; (2)曲線より右側の領域では, 同一水深で移動する粒子層の厚さが勾配が大きくなるほど大きくなり, 境界線(3)を示す $\tan \theta = C_0(\sigma - \rho) \tan \phi / \{C_0(\sigma - \rho) + 2.4\rho\} \cdots (4)$ が満足されるような勾配以上では, 粒子移動層が全水深に分散して土石流となる。したがって, 土砂流の流動形態は図-2のように, 粒子流動層とその上の水流の層が比較的明瞭に分れており, 粒子流動層内では土石流の場合と同様に集合流動となっているのが特徴である。図-2を参照して, 河床面に作用するせん断力 T_0 を求めると, $T_0 = (\sigma - \rho)C_0 r_0 g \sin \theta + \rho g r_0 \sin \theta \cdots (5)$ であり, 平衡状態にあるとすれば,

T_0 は粒子流動層内の粒子同士の接触によって受けとれるせん断力と, 流動粒子間の流体の乱れによって受けとれるせん断力の和と均衡している。平衡状態では, 流体の受けもつせん断力は河床粒子の限界稀流力 T_c に等しいから, 次の式が成立する。 $T_0 = (\sigma - \rho)C_0 r_0 g \cos \theta \tan \phi + T_c \cdots (6)$ 。土石流では, $r_0 = R_d$, $T_c = 0$ が成立し, (5), (6)式から土砂濃度を表わす(3)式が得られる。(3)式は d が小さく C_{00} が小さくなることを示しているが, 土石流発生限界勾配における濃度 C_{0c} よりも小さくならない限り, 粒子は全流動層にわたって分散すること加えず, C_{0c} の濃度を保持しながら粒子流動層の厚さ r_0 が小さくしていくものと考えられる。(2)式に(6)式を入れて, $C_{0c} \approx 0.42 C_0 \cdots (7)$ が得られる。以上から次の関係が得られる。

$r_0/R_d = (C_{00}/C_{0c})(1 - T_c/T_0) \cdots (8)$ 。図-3は $d = 0.114 \text{ cm}$ の均一粒径材料を用いた実験によって, (8)式の妥当性を調べた結果である。ただし, $C_0 = 0.65$, $\tan \phi = 0.8$, $T_c = 0.05$, $\sigma = 2.61 \text{ g/cm}^3$, $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ としている。勾配が小さいときに, おそらく稀流の影響が重要となるため, 少し r_0 が大きめになっているが, ほぼ(8)式は成立している。

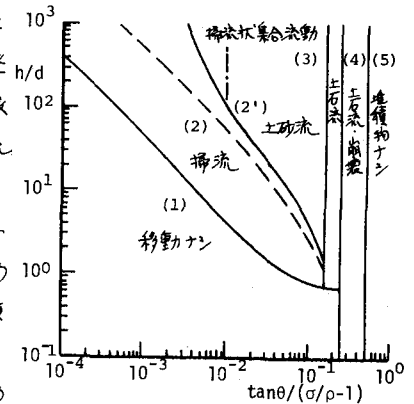


図-1 土砂流の存在領域

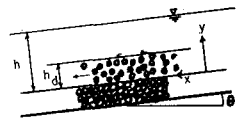


図-2 土砂流の流動形態

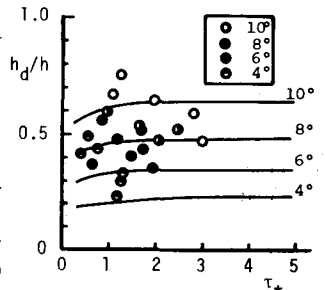


図-3 粒子流動層の厚さ

4. 流速分布：粒子流動層にダイラタント流体モデルを

適用すると、 $y \leq R_d$ および $y > R_d$ に対して、それぞれ、

$$q_{s*}(\lambda d) \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \sin \theta + p \lambda^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 = \{ (r-p) C_c (R_d - y) + p (R - y) \} g \sin \theta \quad \dots (9)$$

$$p \lambda^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 = p g (R - y) \sin \theta \quad \dots (10) \quad \text{が成立する。ただし、}$$

$q_{s*} \sin \theta = 0.02$, $\lambda = \{ (q_{s*}^2 / C_c) - 1 \}^{1/2}$, l : 粒子間空隙における流体表合距離, l' : 水層の表合距離, u : 流速である。

$l = R_d / \lambda$ (K_0 : 定数), $l' = (1/\lambda) d + \kappa (y - R_d)$, κ : カルマン定数,

と仮定すると、(9), (10) 式から流速分布式として、それぞれ、

$$\frac{u}{u_*} = \frac{2}{3} \frac{R}{d} \frac{1}{\left(\frac{R}{\lambda} q_{s*} \sin \theta + \frac{K_0}{\lambda^2} \right)^{1/2} \left(\frac{R}{\lambda} C_c + 1 \right)} \left[\left(\frac{R}{\lambda} C_c \frac{R_d}{\lambda} + 1 \right)^{3/2} - \left\{ \left(\frac{R}{\lambda} C_c \frac{R_d}{\lambda} + 1 \right) - \left(\frac{R}{\lambda} C_c + 1 \right) \frac{y}{R_d} \right\}^{3/2} \right] \quad \dots (11)$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_d}{u_*} + \frac{2}{\kappa} \left\{ \left(1 - \frac{y}{R_d} \right)^{1/2} - \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} \right\} - \frac{1}{\kappa} \left(\frac{d}{R_d \lambda} + 1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} \ln \left| \frac{\left\{ \left(1 - \frac{y}{R_d} \right)^{1/2} + \left(\frac{d}{R_d \lambda} + 1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} \right\} \left\{ \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} - \left(\frac{d}{R_d \lambda} + 1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} \right\}}{\left\{ \left(1 - \frac{y}{R_d} \right)^{1/2} - \left(\frac{d}{R_d \lambda} + 1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} \right\} \left\{ \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} + \left(\frac{d}{R_d \lambda} + 1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} \right\}} \right| \quad \dots (12)$$

を得る。ここは、 u_d は (11) 式において $y = R_d$ としたときの u の値である。図-4 に実験値と $K_0 = 3$, $\kappa = 0.4$ とした理論流速分布を比較している。ほぼ良好な結果である。ただし、白丸は中立粒子、黒丸は砂粒子の流速を示す。

5. 床砂量式：(11) 式から $y < R_d$ における平均流速を求め、これに 100

R_d および C_c を乗ずると床砂量 q_{s*} が求まる。 $q_{s*} = q_{s*} / u_* d$ と書くと、

$$q_{s*} = \frac{2}{3} \frac{R^2}{d} \frac{C_{d0} (1 - \frac{R_d}{R})}{\left(\frac{R}{\lambda} q_{s*} \sin \theta + \frac{K_0}{\lambda^2} \right)^{1/2} \left(\frac{R}{\lambda} C_c + 1 \right)} \left[\left(\frac{R}{\lambda} C_c \frac{R_d}{\lambda} + 1 \right)^{3/2} + \frac{2}{3} \frac{R}{d} \frac{1}{\left(\frac{R}{\lambda} C_c + 1 \right)} \left\{ \left(1 - \frac{R_d}{R} \right)^{1/2} - \left(\frac{R}{\lambda} C_c \frac{R_d}{\lambda} + 1 \right)^{1/2} \right\} \right] \quad \dots (13)$$

のようになる。この式はかなり複雑であるが、 R_d/R の変化範囲が 0 ~ 1 であること、現実の土砂流では $\{ (r-p)/p \} C_c$ の変化範囲が 0.25 ~ 0.55 程度であることを考慮すると、十分な精度で簡理化して、

$$q_{s*} = \frac{2}{3} \frac{(4.2 - 0.75 C_c)}{\cos^2 \theta (\tan \phi - \tan \theta)^2} \tau_*^2 \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right)^2 \quad \dots (14)$$

のようになる。図-5 は着者および水山の実験結果によって (14) 式の適合性を検討したものである。よく合っていると云えよう。

図-5 には図-1 から求められる新床砂量式の適用限界の値より小さい

さい τ_{*c} の範囲について、芦田・高橋・水山の新床砂量式³⁾を実線で示し、

それ以上の τ_{*c} について (14) 式を実線で示している。両者は厳密には連続していないが、接続性は良好である。

6. 抵抗則：上部の水層の層について (12) 式から平均流速を求め、上下

層の平均流速をさらに各層の厚さを用いて加重平均することによって、

全流動層の平均流速を求めることができる。その結果は複雑式となる

が、やはり現実の土砂流で出現するであろう R/d の範囲を重視すれば、

十分な精度で $U/u_* = (0.23 + 0.65 \tan \theta)^{1/2} / d \quad \dots (15)$ のように書くことができる。

図-6 は (15) 式と実験値とを比較したものである。なお、図中には、

upper regime の新床砂に対して成立する $U/u_* = 6.0 + 5.75 \log \lambda (1 + 2 \tau_{*c})$ の関係

を破線で示している。土砂流の抵抗が大きいくことがわかる。

7. おわりに：本研究では土砂流の水理学的な意義を明らかにし、その

流速分布式、床砂量式、抵抗則等を明らかにした。応用例については別の

機会に述べるつもりである。

参考文献：1) 高橋：1980年水工学シリーズ A, 181-17. 2) 水山：新砂防 116, 181-6. 3) 芦田・高橋・水山：新砂防 107, 181-17.

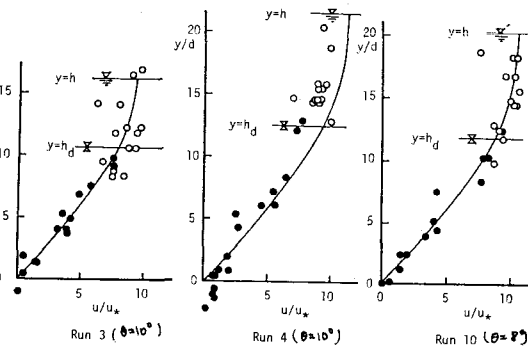


図-4 流速分布の測定結果と理論値の比較

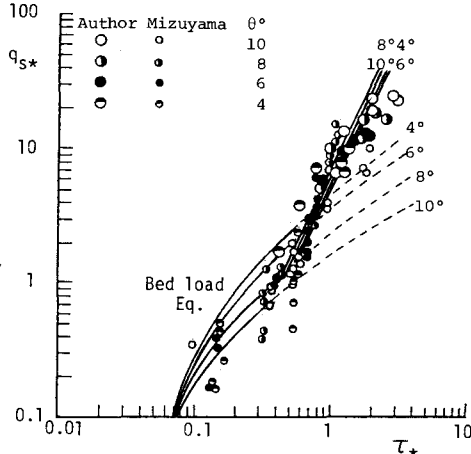


図-5 床砂量式の適合性

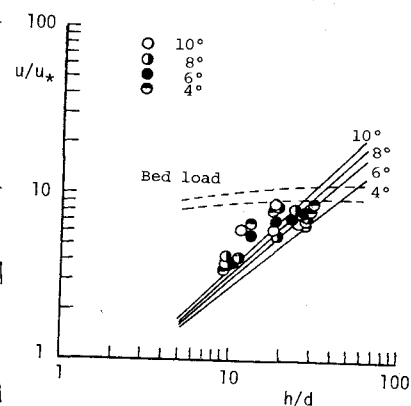


図-6 抵抗則