

II-259 連続体手法による掃流砂量式に関する研究

京都大学防災研究所 正員 江頭 進治 京都大学防災研究所 正員 芦田 和男
 京都大学大学院 学生員 田野中 新 株式会社大林組 正員 高橋 徹也

1. はじめに 著者らは先の研究^{1),2)}において、江頭・芦田らの土石流に関する構成則を適用して掃流砂量式を導いた。これによれば、移動砂層厚が粒径オーダーになる領域において、流砂量が若干小さく算定される。そこで、移動砂層厚における応力構造に若干の修正を行い、それによって導かれる流砂量式について検討する。

2. 流速分布式 図-1のような、砂の層と水の層を持つ2次元等流を考える。ここに h_s は移動砂層の厚さである。砂の層の運動方程式は次のようである。

$$0 = \rho_m g \sin \theta + \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (1)$$

$$0 = -\rho_m g \cos \theta - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2)$$

$$\rho_m = \rho \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) c + 1 \right\}$$

ここに、 ρ は水の密度、 ρ_m は混合物の密度、 c は粒子体積濃度である。ここで、移動砂層における応力分布を図-2のように考える。すなわち、

$$0 \leq z \leq d \quad \text{において} \quad \tau = \tau_y + \tau_g \quad (3)$$

$$d \leq z \leq h_s \quad \text{において} \quad \tau = \tau_y + \tau_g + \tau_f \quad (4)$$

ここに、 d は粒径、 τ_y は降伏応力、 τ_g は非弾性衝突による応力、 τ_f は間隙水の乱れによる応力である。なお、先の研究においては、 $0 \leq z \leq h_s$ において式(4)を適用した。さて、上式に著者らの構成則を適用し、これを式(1)に代入し、 $c(z) = c_s/2$ (c_s : 静止堆積層の濃度) とすれば、流速分布が次のように求められる。

$$0 \leq z \leq d \quad : \quad u'(z') = \frac{2}{3} \frac{A^{1/2}}{\sqrt{f_g}} z'^{3/2} \quad (5)$$

$$d \leq z \leq h_s \quad : \quad u'(z') = \frac{2}{3} \frac{A^{1/2}}{\sqrt{f_f + f_g}} z'^{3/2} + u'_d \quad (6)$$

$$u'_d = \frac{2}{3} A^{1/2} \left(\frac{1}{\sqrt{f_g}} - \frac{1}{\sqrt{f_f + f_g}} \right) \left(\frac{d}{h_s} \right)^{3/2}$$

$$\text{ここに、} f_f = k_f \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}}, \quad \sqrt{k_f} = 0.4, \quad f_g = k_g \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) c^{1/3}, \quad k_g = 0.0828$$

$$A = \frac{h_s}{d^2 g} u_{*w}^2, \quad u_{*w} = \sqrt{g h_w \sin \theta}, \quad u' = \frac{u}{\sqrt{g h_s}}, \quad z' = \frac{z}{h_s}$$

σ は粒子密度、 e は反発係数、 h_w は水流層厚である。上式は、流速に関する近似解であるが、式(1)と(2)の連立解より流速分布と濃度分布の厳密解が得られる¹⁾。

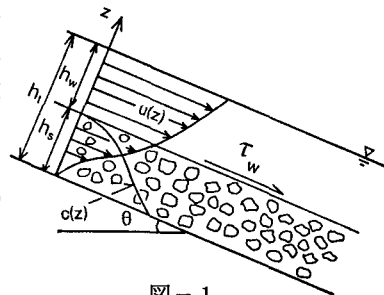


図-1

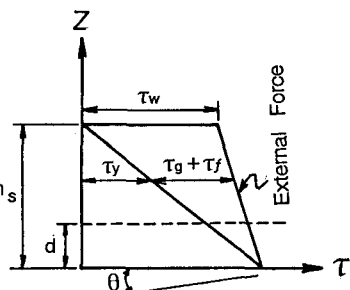


図-2

3. 流砂量式 砂層の単位幅流砂量を q_b とすると、これは次のように定義される。

$$q_b = \int_0^{h_s} u(z) c(z) dz \quad (7)$$

ここで、 $c(z) = c_*/2$ と近似し、式(5),(6)を式(7)に適用すれば、次のような無次元流砂量式が得られる。

$$h_s \leq d : \Phi = \frac{2}{15} \frac{1}{\sqrt{f_g}} \frac{1}{\cos^2 \theta} \frac{\beta^{1/2}}{(\beta + \tan \theta)^{5/2}} (\sigma/\rho - 1)^2 c_* \tau_*^{5/2} \quad (8)$$

$$h_s \geq d : \Phi = \frac{2}{15} c_* \frac{1}{\sqrt{f_f + f_g}} \frac{1}{\cos^2 \theta} \frac{\beta^{1/2}}{(\beta + \tan \theta)^{5/2}} (\sigma/\rho - 1)^2 \tau_*^{5/2}$$

$$\times \left[1 - \frac{3}{2} \left(\sqrt{1 + f_f/f_g} - 1 \right) \left\{ \frac{c_*}{2} \cos \theta \left(\frac{\tan \phi_s}{1 + \alpha} - \tan \theta \right) \right\}^{5/2} \tau_*^{-5/2} \right. \\ \left. + \frac{5}{2} \left(\sqrt{1 + f_f/f_g} - 1 \right) \left\{ \frac{c_*}{2} \cos \theta \left(\frac{\tan \phi_s}{1 + \alpha} - \tan \theta \right) \right\}^{3/2} \tau_*^{-3/2} \right] \quad (9)$$

ここに、 $\Phi = q_b / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)g d^3}$

$$\beta = \frac{\tan \phi_s}{1 + \alpha} (\sigma/\rho - 1) c - \tan \theta \{ (\sigma/\rho - 1) c + 1 \}$$

ϕ_s は粒子摩擦角、 α は係数で 0.25 である。なお、 $h_s = d$ となる無次元掃流力は移動砂層厚に関する推定式より次のように与えられる。

$$\tau_* = \frac{1}{2} c_* \cos \theta \{ \tan \phi_s / (1 + \alpha) - \tan \theta \} \quad (10)$$

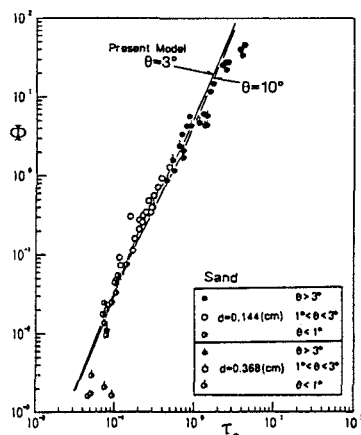


図-3

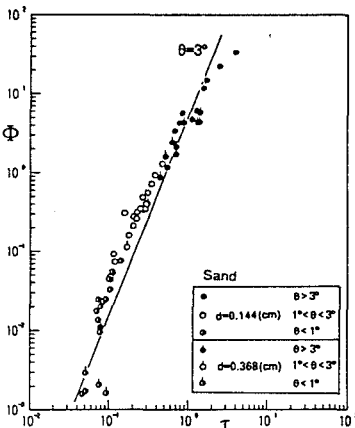


図-4

4. 実験結果との比較

水路実験は比重 $\sigma/\rho = 2.65$ 、 $\phi_s = 38.7^\circ$ の 2 種類のほぼ様な砂 ($d = 0.144, 0.368 \text{ cm}$) を用いて行った。移動床の勾配は $0.28^\circ \sim 16.3^\circ$ で、無次元掃流力の広い領域のデータが得られるよう留意している。図-3 は、流砂量に関する式(8)、(9) ($\theta = 3^\circ, 10^\circ$) と実験値とを比較したものである。流砂量式に含まれる反発係数 e は 0.85 を用い、他のものは前述した値を用いている。図示のように、 $\tau_* > 0.08$ の領域で流砂量式と実験値とはよく一致している。比較のため、先の研究で導いた流砂量式 ($\theta = 3^\circ$) と実験値を図-4 に示している。先の流砂量式は式(9)の [] を 1 とおいたものである。図-3 と図-4 を比較すると、ここで導いた流砂量式は先のものよりもかなり改良されていることがわかる。

5. おわりに 江頭・芦田らの土石流に関する構成式を運動量式に適用して流砂量式を導いた。流砂量式に含まれる係数 k_f, k_g の値は土石流の実験で同定したものをそのまま用いているにもかかわらず、流砂量式は無次元掃流力のかなり広い範囲で実験値をよく説明している。今後、掃流砂にかかわる現象をどこまで連続体として解析できるか検討したい。

参考文献

- 1) 江頭・芦田・高濱・田野中：エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル，京大防災研年報 第 33 号，B-2, 1990, pp293-306.
- 2) 江頭・芦田・高濱・田野中：連続体モデルに基づく流砂量式の誘導，水工学論文集，35，1991.