

II-221

固定床上における流砂機構に関する研究(4)

日本建設コンサルタント 正会員 ○吉栖雅人*
立命館大学理工学部 正会員 江頭進治**
立命館大学大学院 学生員 伊藤隆郭***

1. はじめに 固定床上の流砂を伴った流れは、勾配、給砂量および砂と河床との摩擦角といった条件に支配される。特に、砂粒子と河床との摩擦角と砂粒子同士の摩擦角が異なる場合、河床近傍の応力構造は、それより上方の応力構造とは異なり、摩擦角の違いに起因してスリップが生じる。ここでは、土石流の構成則を適用し、流速分布、濃度分布、応力分布に関して検討するとともに、流砂形態の領域区分を明らかにする。

2. 支配方程式と応力モデル 非圧縮性連続体の2次元等流状態における運動量保存則は、図-1を参考にして、土石流に関する構成則を用いれば、次式で与えられる²⁾。

$$x \text{ 方向: } p_s \tan \phi_s + \rho(f_f + f_d)d^2(\partial u / \partial z)^2 \\ = \int_z^{h_i} \rho \{ (\sigma / \rho - 1)c + 1 \} g \sin \theta dz \quad (1)$$

$$z \text{ 方向: } p_s + \rho f_{pd} d^2 (\partial u / \partial z)^2 \\ = \int_z^{h_i} \rho (\sigma / \rho - 1) c g \cos \theta dz \quad (2)$$

$$p_s / (p_s + p_d) = (c / c_s)^{1/n} \quad (3)$$

$f_f = k_f(1-c)^{5/3}c^{-2/3}$, $f_d = k_d(1-e^2)(\sigma/\rho)c^{1/3}$
 $f_{pd} = k_d(\sigma/\rho)e^2c^{1/3}$ ここに、 ϕ_s : 砂粒子の内部摩擦角、 θ : 水平とのなす角、 ρ : 水の密度、 σ : 砂粒子の密度、 c : 砂粒子の体積濃度、 d : 砂粒子径、 e : 反発係数、 g : 重力加速度、 c_s : 砂粒子の静止堆積濃度、 n : 経験係数、 h_i : 全水深、 k_f, k_d : 実験定数でそれぞれ0.16、0.0828のようである²⁾。

3. 流速分布と濃度分布 砂粒子と固定床の摩擦角を $\phi_{sb}(<\phi_s)$ とする。ここでは、議論を簡単にするために、 ϕ_s は40°程度、 ϕ_{sb} は20°程度のものを考える。河床での応力状態を考慮することにより、流砂形態が shear flow, partial plug flow, 移動床流れの3種類に分けられること¹⁾と、 $z=0$ 近傍における流速の条件が、摩擦角の違いに起因する流動応力から決定できること¹⁾を考慮すれば、流速分布と粒子濃度分布は、式(1),(2)に(3)を適用して数値的に求められる。図-2(a)~(d)に、shear

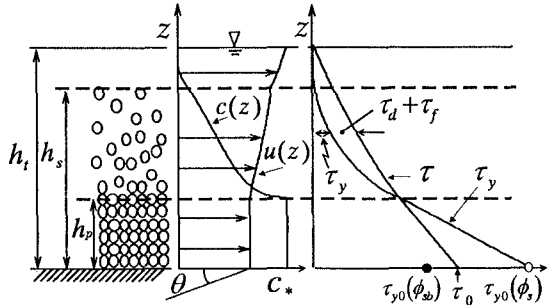


図-1 流れのモデル

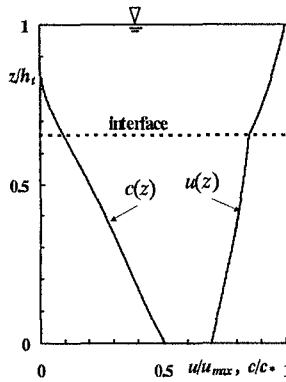


図-2(a) shear flow の流速、濃度分布

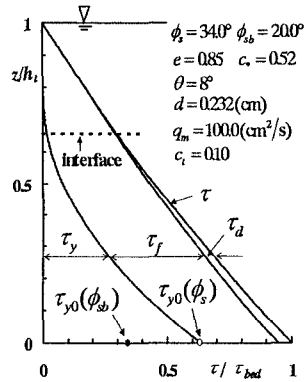


図-2(b) shear flow の応力分布

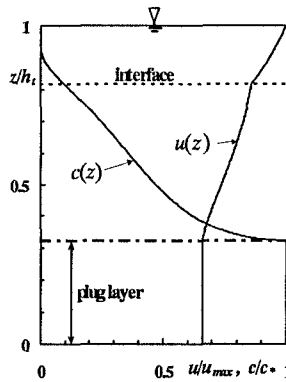


図-2(c) partial plug flow の流速、濃度分布

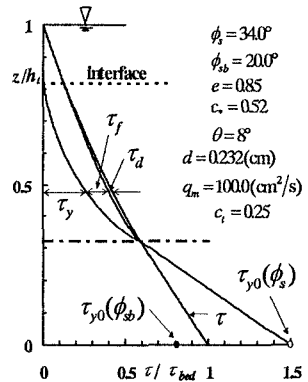


図-2(d) partial plug flow の応力分布

Key words : constitutive relations, massive movement, plug flow, rigid bed, sediment transport mode

* 〒553 大阪市福島区福島 7-20-1

TEL. 06-453-2981

FAX 06-453-3040

** 〒525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1

TEL. 0775-61-2732

FAX 0775-61-2667

*** 〒525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1

TEL. 0775-66-1111

FAX 0775-61-2667

flow と partial plug flow の流速分布と濃度分布の例を示す。計算条件は、図中に示している。ここに、無次元粘性低層厚 δ の値は11.6を用いた³⁾。次に、図-3(a)、(b)に、 $c_i = 0.15$ のときの ϕ_{sb} による流速と濃度の分布形の変化と河床における流動応力の変化を示す。計算条件は、図-2 で用いた値と同じである。これによれば、 ϕ_{sb} の増加とともに河床の流動応力が減少し、これにより、河床におけるスリップ速度が減少して、plug 層が厚くなっている。

4. 砂の移動形態とその領域区分 図-1 を参考にすれば、shear flow と partial plug flow との境界では、河床において $\tau_0 = \tau_{y0}(\phi_s)$ が成り立つ。これより、断面平均濃度に関する条件として次式が導かれる。

$$\bar{c}_{s-p} \equiv \int_0^h c dz / h_i = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)} \quad (4)$$

同様に、partial plug flow と移動床流れとの境界では、 $\tau_0 = \tau_{y0}(\phi_{sb})$ が成り立つことより次式が導かれる。

$$\bar{c}_{p-m} \equiv \int_0^h c dz / h_i = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi_{sb} - \tan \theta)} \quad (5)$$

式(4)、(5)の意味は、次のようである。固定床上的流れは、条件により変化するが、3つの土砂移動形態のそれぞれの境界を表す条件は、砂粒子同士、または河床と砂粒子との摩擦角と勾配のみから一意に決まるということである。図-4 は式(4)、(5)を、 $\theta - \bar{c}$ 平面に示したものである。しかし、外部から与えられる条件に応じた砂の移動形態を知る場合、 $\theta - \bar{c}$ 平面による移動形態の区分は不都合である。そこで、砂の移動形態を $\theta - c_i$ 平面上に表すため、式(4)、(5)に関する輸送濃度 c_i を数値計算によって求めた。その結果を図-5 に示している。ここで、 c_i は、 $c_i \equiv \int_0^h c u dz / \int_0^h u dz$ と定義される。計算条件は、図-2 の計算に用いた諸量と同じである。図の直線、すなわち、勾配を一定に保ち、砂粒子と水の混合物を流し、砂粒子の濃度を増加させる方向に現象をみる。 $0 < c_i < c_{iA}$ において shear flow、 $c_{iA} < c_i < c_{iB}$ において、partial plug flow が形成され、さらに現象を増加させると、異常な堆積が起り、輸送濃度は c_{iC} まで不連続に低下する。これが、移動床の流れに相当する。

5. おわりに 土石流の構成則を適用して、流速、濃度、応力分布の厳密解を導き、流砂形態の領域区分を行った。また、領域を規定する断面平均濃度の条件も検討した。

参考文献 1)江頭・吉栖・伊藤：水工学論文集、第40巻、pp.971-976、1996、2)江頭・宮本・伊藤：水工学論文集、第41巻、pp.789-794、1997、3)吉栖・江頭・伊藤：第51回年次講演会、pp.578-579、1996。

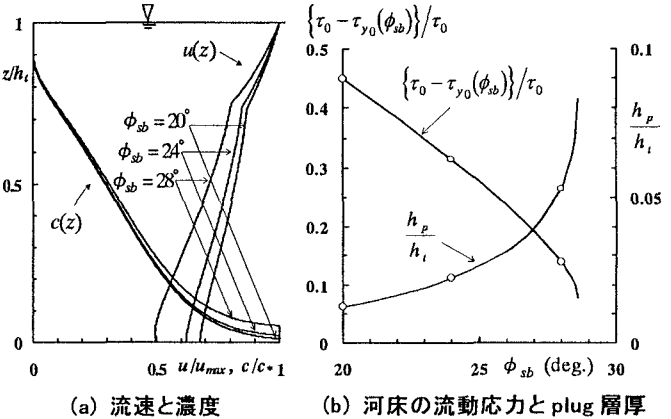


図-3 ϕ_{sb} による分布形の変化 (partial plug flow)

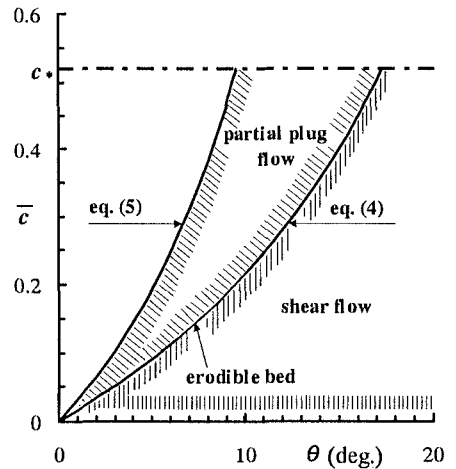


図-4 砂の移動形態の領域区分図

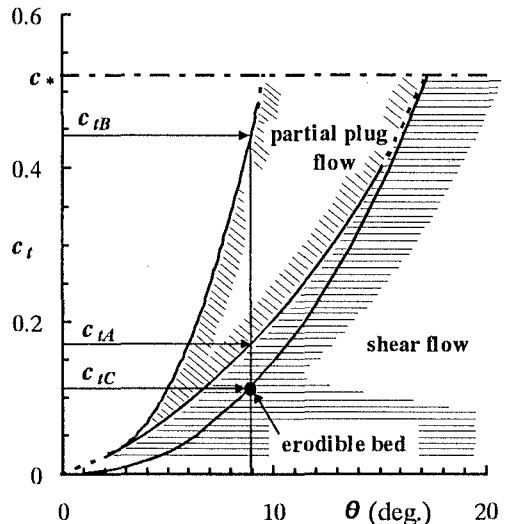


図-5 砂の移動形態の領域区分図