

浮遊砂を伴う開水路流れ

九州工業大学 (学) ○高崎秀一
九州工業大学 (正) 藤崎一裕

1. はじめに

浮遊砂流れの鉛直断面内の流況について調べた。この種の流れについては、これまでに密度流効果の少ない場合に対しては $k-\epsilon$ モデルの有効性を確認したが¹⁾今回は、密度流の影響が比較的大きい場合についてこのモデルの有効性を調べた。特に粒子懸濁によって生じる安定な密度勾配が流れに及ぼす影響について考察した。

2. 解析

図1のように流下方向にX軸、水路底部より鉛直方向にY軸をとり常用の記号を用いると、基礎方程式は無次元表示で次のように与えられる。

$$0 = (1 + D\overline{C_s}) + \frac{d}{dy} \left(\overline{v_t} \frac{d\overline{u}}{dy} \right) \quad (1) \quad 0 = \frac{d}{dy} \left(\frac{\overline{v_t}}{\sigma_t} \frac{d\overline{C_s}}{dy} + \overline{w_0} \overline{C_s} \right) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{\overline{v_t}}{\sigma_k} \frac{d\overline{k}}{dy} \right) + \overline{v_t} \left(\frac{d\overline{u}}{dy} \right)^2 + \frac{1}{F_{dc}^2} \frac{\overline{v_t}}{\sigma_t} \frac{d\overline{C_s}}{dy} - \overline{\epsilon} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{\overline{v_t}}{\sigma_\epsilon} \frac{d\overline{\epsilon}}{dy} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\overline{\epsilon}}{k} \left\{ \overline{v_t} \left(\frac{d\overline{u}}{dy} \right)^2 + (1 - C_{3\epsilon}) \frac{1}{F_{dc}^2} \frac{\overline{v_t}}{\sigma_t} \frac{d\overline{C_s}}{dy} \right\} - C_{2\epsilon} \frac{\overline{\epsilon}^2}{k} = 0 \quad (4) \quad \overline{v_t} = C_\mu \frac{\overline{k}^2}{\overline{\epsilon}} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \langle C_s \rangle, \quad \langle C_s \rangle = \frac{1}{h} \int_0^h \overline{C_s}(y) dy, \quad \overline{C_s} = C_s / \langle C_s \rangle, \quad F_{dc} = u_* / \sqrt{Dgh} \\ \overline{v_t} &= v_t / hu_*, \quad \overline{w_0} = w_0 / u_*, \quad \overline{u} = u / u_*, \quad \overline{y} = y / h, \quad \overline{k} = k / u_*^3, \quad \overline{\epsilon} = \epsilon / (u_*^3 / h), \quad u_* = \sqrt{gR \sin \theta} \end{aligned} \right\} (6)$$

ここで u は流れ方向の平均流速、 u_* は摩擦速度、 C_s は浮遊砂の体積濃度、 k は乱れのエネルギー、 ϵ は乱れの逸散率、 w_0 は浮遊砂の沈降速度、 ρ_* および ρ_0 はそれぞれ浮遊砂、清水の密度である。(1)式は運動方程式、(2)式は浮遊砂の保存式で、渦動粘性係数 ν_t は(3)式の乱れのエネルギー式と(4)式のエネルギー逸散率に関する式とから(5)式で与えられる。数値解は(1)~(5)式を連立させて求めた。このとき流速分布は底部で対数則を仮定し、粒子は底部への沈積がないものとした。分割数は $0 \leq \overline{y} < 0.05$ で100、 $0.05 \leq \overline{y} \leq 1.0$ で200とし、モデル定数は $\sigma_k = \sigma_t = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ 、 $C_{1\epsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\epsilon} = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$ 、 $C_{3\epsilon} = 2.5$ とした。

3. 実験

実験には幅40 cm、長さ10 mのアクリル製開水路を用いた。水路床勾配 $1=1/960$ とし、水中ポンプにより濁水を循環させ、上流端より8 mの地点で流速分布および濃度分布を測定した。流速の測定にはピトー管を用い、粒子濃度はサイフォンによる直接採取で測定した。また、実験条件を表1に、用いた砂の粒度分布を図2に示す。

表1 実験条件

run	h	$\langle u \rangle$	u_*	w_0	$\langle c \rangle \times 10^{-3}$	z	Fdc	κ	ks	記号
1	6.87	34.13	2.28	0.07	0.56	0.08	0.916	0.4	0.149	○
2	6.03	31.77	2.17	0.07	1.36	0.08	0.597	0.4	0.356	△
3	4.96	28.93	2.01	0.07	1.35	0.09	0.612	0.4	0.143	◇
4	6.05	31.17	2.18	0.07	1.12	0.08	0.658	0.4	0.225	●
5	7.03	32.21	2.3	0.07	1.16	0.08	0.635	0.4	0.255	×
6	6.98	29.31	2.3	0.07	1.13	0.08	0.644	0.4	0.548	□
7	4.96	42.17	2.01	-	0(清水)	-	-	0.4	0.008	—

($\langle u \rangle$: 平均流速, $z = w_0 / (\kappa u_*)$, ks : 相対粗度)

(CGS単位)

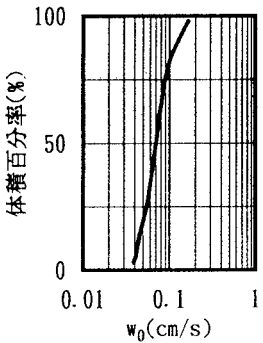


図2 粒度分布

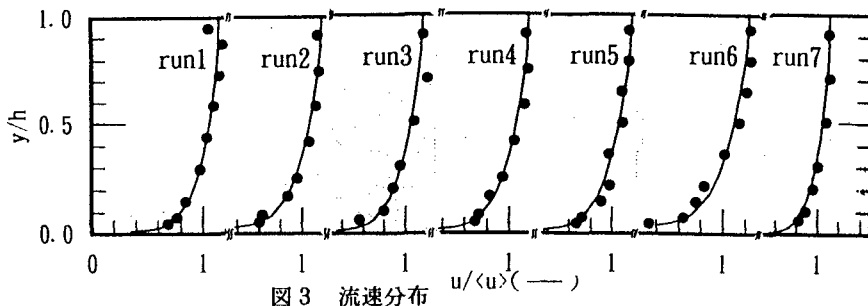


図3 流速分布

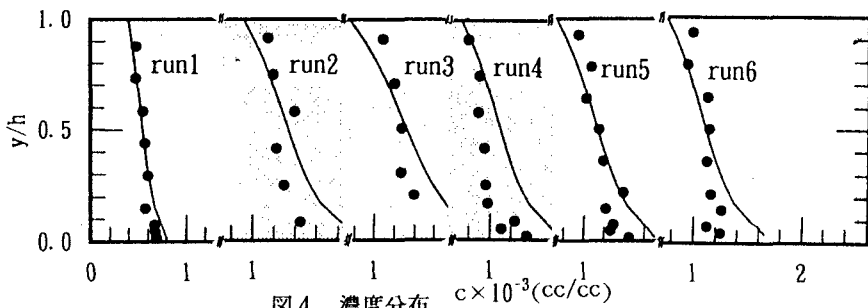


図4 濃度分布

4. 実験及び解析結果

図3、4中の丸印は表1に示す諸条件による実験結果、実線は同条件による解析結果を示す。これらによると計算値はいずれもほぼ全般的に実験値を再現しており、比較的密度流効果の大きい場合においても、このモデルを用いて浮遊砂流れの状況が考察できるものと思われる。

図5には、種々の実験条件におけるこのモデルを用いた ν_t （渦動粘性係数）の分布の計算結果が示されている。この図によると、 Fdc の減少にともなって ν_t が減少しており特に水路上半部においてこの減衰効果が顕著に表れていることがわかる。また図6、7に ν_t の算出の元になる k 、 ε の分布の計算結果を示している。これを見ると、密度勾配の影響が ε に関してはあまり見られないのに対して、 k の方は、比較的顕著に出ている。このことから、先に示した渦動粘性係数 ν_t の減少には主として(5)式の分子 k^2 が影響したものと思われる。

5. おわりに

浮遊砂を伴う開水路流れを $k-\varepsilon$ モデルを用いて検討した。このモデルの有効性を示すとともに、 $k-\varepsilon$ モデルが浮遊砂流れの解析に利用可能なことを確認した。また、このモデルを用いて渦動粘性係数が粒子懸濁による安定な密度勾配の影響を受けて変化する様子を示した。おわりに、本研究に協力された九州工業大学4年次生の高山太郎君に感謝する。

参考文献 1) 藤崎、高崎、水工学論文集、第41巻、1997（発表予定）

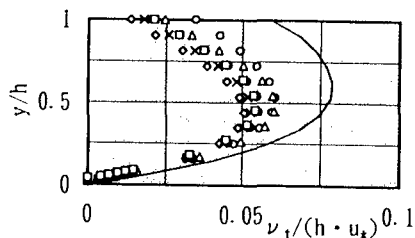


図5 渦動粘性係数 ν_t

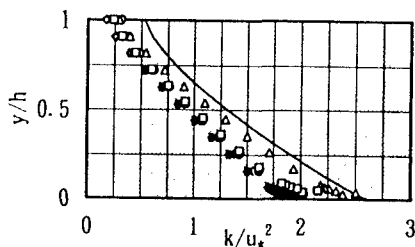


図6 乱れエネルギー k

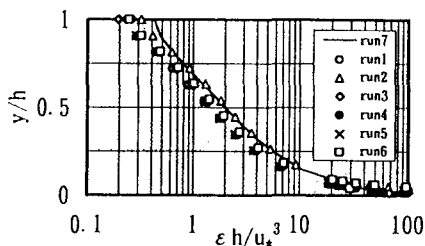


図7 粘性逸散率 ε