

京都大学防災研究所 正会員 直上 正規

1. 緒言 浮遊砂量の予測精度に重要な影響を与える要素は、濃度分布形と河床付近の濃度であると考えられる。前者に關しては、一様砂および混合砂に対して Rouse の式がよく適合することは実験的に明らかにされている。しかし、後者に關しては、i)鉛直方向の速度変動と河床付近の濃度とを関連づける方法(Lane・Kalinske のモデル)と ii)河床付近の濃度を掃流砂濃度に接続させる方法(Einstein のモデル)が提案されているが、まだ検討されなければならない点も多く含んでいる。すなわち、i)の方法では、河床液による河床付近の乱れ特性の変化が考慮されていないので、改善すべき点が残されている。一方、ii)の方法は、細砂やシルトの掃流砂量は現状にありて計測されておらず、このような砂粒に適用できる掃流砂量式が存在するかどうか検討を要する。以上、二つのモデルにおいては、検討されなければならない点が含まれているため、土屋¹⁾によって指摘されたように、Lane・Kalinske 式、Einstein 式および Laursen 式は実験値と適合性が十分でない。したがって、ここでは i)のモデルに準じて、河床液の影響を考慮した河床付近の濃度を考察して、浮遊砂量式を検討する。

2. 河床付近の濃度 河床砂は一様砂で構成されているとして、河床面から粒径の高さにおける砂粒の鉛直方向の速度変動の分布が、次式の正規分布で表わされるものと仮定する。

$$f(w_p) = 1/(\sqrt{2\pi} \sigma_p) \cdot \exp\{-1/2 \cdot (w_p/\sigma_p)^2\} \quad (1)$$

ここに、 σ_p^2 : 砂粒の速度変動の分散である。いま、沈降速度の効果を入れて粒径 d の速度 w_{pg} は、 $w_{pg} = w_p - w_0$ で表わされなければならない。粒径の高さより浮上する砂粒の平均速度は、次式のように表わす。

$$\bar{w}_{pg} = \int_{w_0}^{\infty} (w_p - w_0) f(w_p) dw_p / \int_{w_0}^{\infty} f(w_p) dw_p \quad (2)$$

河床面から単位時間、単位面積当り浮上する量 g_{su} は、単位面積当りの砂粒の露出回数、砂粒の質量、単位時間当りの浮上する回数および河床における浮上する砂粒の相対的割合に比例する。

$$g_{su} = K_1 N (\pi d^3 \sigma / 6) (\bar{w}_{pg} / d) \int_{w_0}^{\infty} f(w_p) dw_p \quad (3)$$

ここに、 N : 単位面積当りの砂粒の露出回数で、 $N = 1/(\pi d^2/4)$ 、 σ : 砂の密度、 K_1 : 比例定数である。

一方、河床付近から河床に沈降する単位面積当りの量は、河床付近の濃度を C_B として、平均的に

$$g_{sd} = C_B w_0 \sigma \quad (4)$$

で表わされる。平衡状態では、 $g_{su} = g_{sd}$ とおき、これから C_B を求め、次のようにする。

$$\left. \begin{aligned} C_B &= K \{ g(\xi_0) / \xi_0 - G(\xi_0) \} \\ \xi &= w_p / \sigma_p, \quad \xi_0 = w_0 / \sigma_p \\ g(\xi_0) &= 1/\sqrt{2\pi} \cdot \exp(-\xi_0^2/2) \\ G(\xi_0) &= 1/\sqrt{2\pi} \cdot \int_{\xi_0}^{\infty} \exp(-\xi^2/2) d\xi \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 K : 砂粒の形状の補正も含め比例定数である。

河床液が形成される場の鉛直方向の乱れ速度は、河床付近では有効摩擦速度で規定され、一方河床からはなれた点では、摩擦速度で規定されることを仮定すれば、 σ_p は次式のように表わす。

$$\sigma_p = \beta_1 u_{*e} \quad (6)$$

ここに、 β_1 : 1に近い比例定数、 $u_{*e} = U/u_{*e} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \{ R/d(1+2\tau_*) \}$ で表わされるものとする²⁾。ただし、 U : 断面平均流速、 R : 径深、 $\tau_* = u_*^2/(\sigma_p - 1)gd$ である。いま、 $\beta_1 = 0.75$ と仮定して、実験値と(5)式の関係から、比例定数 K を決定すると、 C_B は次式のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} C_B &= 0.025 \{ g(\xi_0) / \xi_0 - G(\xi_0) \} \\ \text{ただし、} \xi_0 &= 0.75 w_0 / u_{*e} = 0.75 (w_0 / u_{*e}) (u_{*e} / u_{*e}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(7)式と実験値の比較が図-1, Lane-Kalinske式と(7)式の比較が図-2に示されている。これから明らかなように, Lane-Kalinske式は, (7)式で与えられる濃度よりもかなり小さな値を与え, 従来指摘された傾向と一致している。一方, 混合砂に対しては, Lane-Kalinske式と同様に, 河床付近の濃度は, 対象としている砂粒の河床に与える割合に比例するとして,

$$C_b = 0.025 \Delta F(w_0) \{g(z_0)/z_0 - G(z_0)\} \quad (8)$$

のように書ける。(8)式は, $w_0/u_* \approx 1$ では $C_b \sim u_*^2$, $w_0/u_* \ll 1$ では, $C_b \sim u_*$ の特性を有している。

3. 浮遊砂量 浮遊砂量は次式で表わされるので,

$$Q_s = \int_a^h UC dz \quad (9)$$

流速分布として

$$U/U_* = 1 + 1/K \cdot (\pi\sqrt{g}/h^{1/2}) + 1/K \cdot (\pi\sqrt{g}/h^{1/2}) \ln(z/h) \quad (10)$$

を用い, また, 浮遊砂の拡散領域における濃度分布として, Rouse式

$$C/C_a = \{ (h-z)/z \cdot a/(h-a) \}^Z, \quad Z = w_0/\beta K u_* \quad (11)$$

を用いると, Q_s は次式のように表わされる。

$$Q_s = Q C_b \left(\frac{a}{h-a} \right)^Z \left\{ \left(1 + \frac{1}{K} \frac{\pi\sqrt{g}}{h^{1/2}} \right) \int_{\eta_h}^1 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^Z d\eta + \frac{1}{K} \frac{\pi\sqrt{g}}{h^{1/2}} \int_{\eta_h}^1 \ln \eta \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^Z d\eta \right\} \quad (12)$$

ここに, Q : 単位幅当りの流量, $\eta = z/h$, $C_a = C_b$ としている。また, 他の記号は使用のものを用いている。したがって, C_b の値として, (8)式を用いると, Q_s は次式のように書ける。

$$\frac{Q_s}{g \Delta F(w_0)} = 0.025 \{g(z_0)/z_0 - G(z_0)\} \left\{ \left(1 + \frac{1}{K} \frac{\pi\sqrt{g}}{h^{1/2}} \right) \Lambda_1 + \frac{1}{K} \frac{\pi\sqrt{g}}{h^{1/2}} \Lambda_2 \right\} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Lambda_1 &= \left(\frac{a}{h-a} \right)^Z \int_{\eta_h}^1 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^Z d\eta \\ \Lambda_2 &= \left(\frac{a}{h-a} \right)^Z \int_{\eta_h}^1 \ln \eta \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^Z d\eta \\ Z &= w_0/1.2 K u_* \end{aligned}$$

上式において, a/h といかに与えるかという問題が残されているが, 従来の濃度分布に関する実験資料の整理にあたっては, $a/h = 0.05$ の値がよく用いられていること, および C_b を決定する場合の実験資料として, $a/h = 0.05 \sim 0.1$ の濃度を用いたことから, ここでは, $a/h = 0.05$ として, (13)式と従来の実験値を比較したものが図-3である。ここで検討した資料では, (13)式で与えられる流量量の0.5~3倍の範囲内に入っているようであり, (13)式がほぼ妥当な流量量を与えていると見える。

以上, 河床面付近の濃度に関する考察から, 浮遊砂量式を検討してきたが, 今後, 河床面上の乱れ機構の研究の発展を待ち入れて, より明確な浮遊砂機構を検討していくつもりである。

最後に, 本研究にあたって, 有益な助言をいただいた芦田男教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Tsuchiya, A. and K. Hoshikata: Calculations of suspended load in alluvial channel, I.S. River Med., 1973.
- 2) 芦田・直上: 移動床流の抵抗と浮遊砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, 1972.

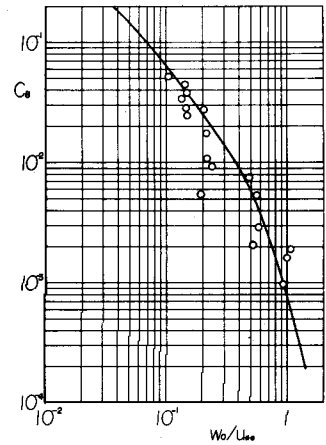


図-1 河床付近の濃度

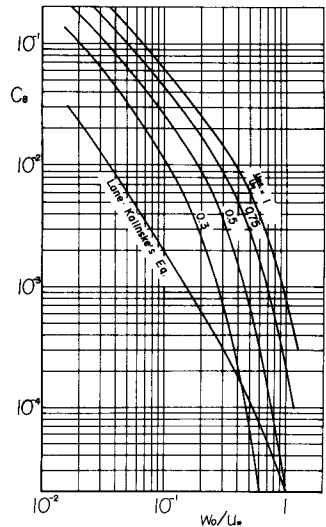


図-2 Lane-Kalinske式と(7)式の比較

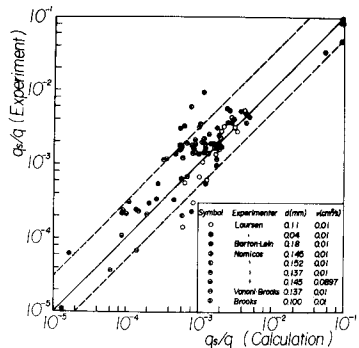


図-3 (13)式と実験値の比較