

浸透滲出流による層流・乱流抵抗の影響を考慮した漂砂モデルに関する一考察

名古屋大学高等研究院

正会員 ○ 中村 友昭

名古屋大学大学院工学研究科

正会員 水谷 法美

1. 緒言：底質表面を出入りする浸透滲出流は底質粒子の有効重量と底質上の境界層厚に影響を与え、浸透流により底質粒子の有効重量が増加することで漂砂量が減少し、逆に境界層が薄くなることで漂砂量が増加する傾向があることが知られている（例えば Butt ら, 2001）. この相反する二つの効果のうち底質内部の流れが関わる有効重量については、Nielsen (1992) と Turner・Masselink (1998) は層流抵抗を考慮して Shields 数を修正することによって、浅野・米永 (2000) は乱流抵抗を考慮して限界 Shields 数を修正することによって浸透滲出流の効果を取り込んでいる. しかし、層流抵抗と乱流抵抗をともに考慮して漂砂への浸透滲出流の効果を評価した研究は見受けられない. そこで、本研究では浸透滲出流による層流抵抗と乱流抵抗をともに考慮した掃流砂モデルを導出する. そして、それを 3 次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデル（中村・水谷, 2010 ; 以下, FSSM と称する）に組み込み、定常流中の漂砂現象を対象にその妥当性を検証する.

2. 浸透滲出流を考慮した掃流砂モデル：本稿では、Roulund ら (2005) を参考に構築されている FSSM の掃流砂モデルに対して、浸透滲出流の効果を考慮できるように改良を行った. 具体的には、浸透滲出流速による層流抵抗と乱流抵抗を考慮するとともに、従来のモデルで考慮していた底面流速による乱流抵抗に加えて揚力の効果も取り込んだ. さらに、底面流速による乱流抵抗と揚力に関しては、他の底質粒子によって遮蔽される効果も取り込んだ. ここでは、まず断面 2 次元現象を考える. 底質粒子は非粘着性で均一の粒子径の球体とする. また、前述したように、底面流速による乱流抵抗と揚力を考慮し、層流抵抗と慣性力は無視する. 一方、浸透滲出流速については、層流抵抗と乱流抵抗による底質粒子の重量の変化を考慮する. さらに、底面流速による乱流抵抗と揚力については、両方で遮蔽係数 ε が等しいと仮定する. 以上より、底質粒子に作用する力の釣り合いから、浸透滲出流速による作用力 F_w が底質粒子の自重 W を下回っているとき、

$$\tau'_{*c} = \frac{1}{C_{vf}^2 (s-1) g d_{50}} \frac{\mu_s \cos \beta - \sin \beta}{\varepsilon (C_{D1} + \mu_s C_L)} \left\{ \frac{4}{3} (s-1) g d_{50} - C_{D1} w |w| - 24 \frac{C_{D2} v_w}{d_{50}} w \right\} \quad (1)$$

となる. ここで、 τ'_{*c} は浸透滲出流を考慮した限界 Shields 数、 g は重力加速度、 v_w は水の動粘性係数、 s は底質粒子の比重、 d_{50} は底質粒子の中央粒径、 μ_s は底質粒子の最大静止摩擦係数、 C_{vf} は摩擦速度の係数、 w は浸透滲出流速（滲出を正）、 C_{D1} は非線形抵抗力係数、 C_{D2} は線形抵抗力係数、 C_L は揚力係数、 β は斜面の傾斜角である. なお、浸透滲出流速 w がゼロのとき、式(1)は中川・辻本 (1986) による滑動形式の式に一致する. また、浸透滲出流がないときの水平面での限界 Shields 数 τ_{*c0} は、式(1)に $w=0$ と $\beta=0$ を代入すると求められる. 一方、 F_w が W を上回っているときは $\tau'_{*c}=0$ であるので、 τ'_{*c} と τ_{*c0} の比は

$$\frac{\tau'_{*c}}{\tau_{*c0}} = \begin{cases} 1 - \frac{3}{4(s-1)gd_{50}} \left\{ C_{D1} w |w| + 24 \frac{C_{D2} v_w}{d_{50}} w \right\} & \text{if } F_w \leq W \\ 0 & \text{if } F_w > W \end{cases} \quad (2)$$

とまとめられる. 続いて、浸透滲出流を考慮した掃流砂量 q' は、底質粒子の平均輸送速度を v'_b 、動摩擦係数を μ_d とすると、

$$q' = \frac{1}{6} \pi d_{50}^3 p'_{EF} v'_b \quad p'_{EF} = \begin{cases} 0 & \text{if } \tau_* \leq \tau'_{*c} \\ 6(\tau_* - \tau'_{*c}) / \pi \mu_d & \text{if } \tau_* > \tau'_{*c} \end{cases} \quad (3)$$

と表される. ここで、 F_w が W を下回っているとき、底質粒子に作用する力の釣り合いより、 v'_b は

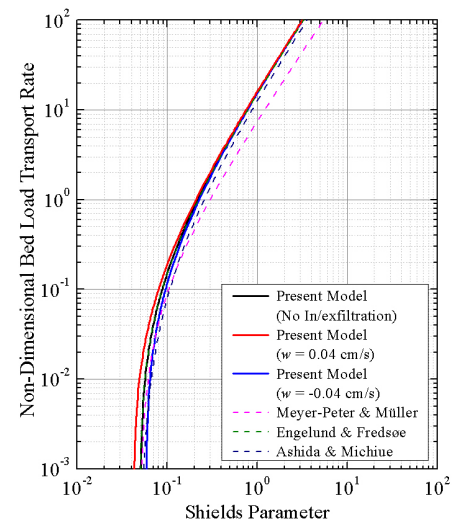


図-1 無次元掃流砂量

$$v'_b = C_{vf} v_f - v'_r \quad v'_r = \sqrt{\frac{\mu_d \cos \beta - \sin \beta}{\varepsilon (C_{D1} + \mu_d C_L)} \left\{ \frac{4}{3} (s-1) g d_{50} - C_{D1} w |w| - 24 \frac{C_{D2} v_w}{d_{50}} w \right\}} \quad (4)$$

となる. ただし, v_f は摩擦速度, v'_r は v'_b に対する相対速度である. 一方, F_w が W を上回っているときは,

$$v'_b = C_{vf} v_f - \text{sign}(\sin \beta) v'_r \quad v'_r = \sqrt{\frac{|\sin \beta|}{\varepsilon C_{D1}} \left\{ C_{D1} w |w| + 24 \frac{C_{D2} v_w}{d_{50}} w - \frac{4}{3} (s-1) g d_{50} \right\}} \quad (5)$$

と書かれる. なお, 浸透滲出流がないときの掃流砂量 q は, $w=0$ を代入した式(3)と式(4)から求められる.

次に, 3次元現象を考える. ここでは, 紙面の都合上, 式は割愛するが, τ'_{*c}/τ_{*c0} と q' は上記と同様にして求められる. なお, 2次元現象で揚力の影響が十分に小さかったことから, ここでは揚力を無視して導いた.

3. 結果及び考察: 図-1 に上述の掃流砂モデルから求めた Shields 数と無次元掃流砂量の関係を示す. ここで, 底質粒子の密度は 2.65 kg/m^3 , 中央粒径 d_{50} は 0.25 mm , 斜面の傾斜角 β は 0 度とし, Roulund ら (2005) より $\tau'_{*c0} = 0.05$, $C_{vf} = 10.0$, $\mu_s = 0.63$, $\mu_d = 0.51$, 水谷ら (1996) より $C_{D1} = 0.45$, $C_{D2} = 25.0$, 中川・辻本 (1986) より $\varepsilon = 0.4$, $C_L/C_{D1} = 0.85$ とした. なお, 同図では Meyer-Peter・Müller 式, Engelund・Fredsoe 式, 芦田・道上式も同時に示した. 図-1 より, 浸透滲出流がないときの本掃流砂モデルは Engelund・Fredsoe 式とほぼ一致していることが分かる. 図-2 に浸透滲出流の有無による無次元掃流砂量の増減率 q''/q^* (浸透滲出流がない場合: q^* ; ある場合: q'') を示す. 同図には, 浸透浸出流速による層流抵抗を考慮しなかった場合 ($C_{D2} = 0.0$) も示した. 図-2 より, 限界 Shields 数の近くでは浸透滲出流が掃流砂量に与える影響が大きい一方で, Shields 数が大きくなるにしたがって浸透滲出流の影響が小さくなる傾向が認められ, 酒井ら (2001) の水理実験結果との傾向の一致を確認した. また, 層流抵抗を考慮しなかった場合には q''/q^* の増減がほとんど認められないことから, 浸透浸出流の影響を検討する上で層流抵抗を考慮することの重要性が示唆される.

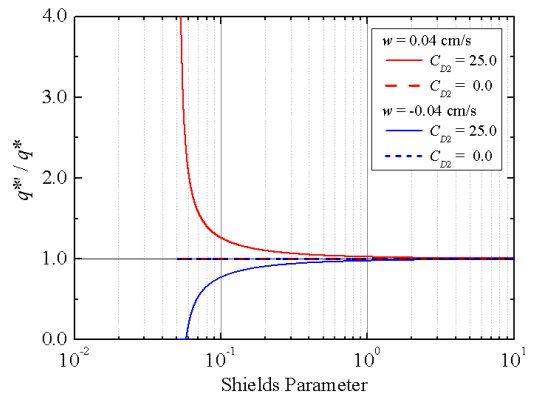


図-2 浸透滲出流の有無による無次元掃流砂量の増減率

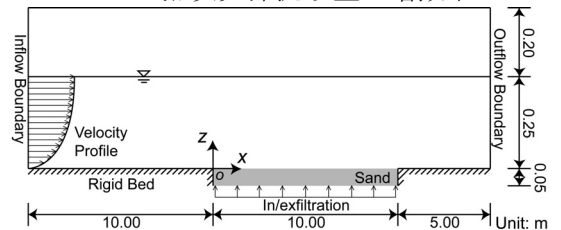


図-3 計算領域の概略図

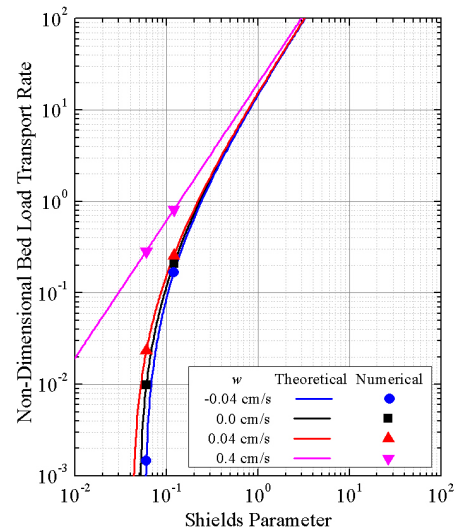


図-4 数値計算モデル FSSM による無次元掃流砂量の再現性

そこで, 3次元に拡張した本掃流砂モデルを数値計算モデル FSSM に組み込んだ際の妥当性を検証するために, FSSM を用いて定常流下での Shields 数と掃流砂量の関係を調べた. 図-3 に計算領域の概略図を示す. ここで, 底質粒子の諸元やパラメータは上記と同じとし, 流入境界からの断面平均流速と底質下面からの浸透滲出流速を変えて計算を行った. 図-4 に $x = 5.0 \text{ m}$ での Shields 数と無次元掃流砂量の関係を示す. 同図には, 式(3)~(5)から求めた掃流砂量も同時に示した. 図-4 より, 浸透滲出流速による作用力 F_w が底質粒子の自重 W を上回っている条件 ($w = 0.4 \text{ cm/s}$) も含めて, FSSM による計算結果は式(3)~(5)による解析解とよく一致していることが分かる. 以上より, FSSM における本掃流砂モデルの妥当性が確認できたことから, 今後, 浸透滲出流に関わるさまざまな漂砂現象に対して適用, 検討していく所存である.

参考文献: [1] 浅野・米永 (2000), 海工論, 47, 511-515. [2] 酒井ら (2001), 海工論, 48, 981-985. [3] 中川・辻本 (1986), 移動床流れの水理, 310 p. [4] 中村・水谷 (2010), 数値流体シンポジウム, 9 p. [5] 水谷ら (1996), 海工論, 43, 131-135. [6] Butt et al. (2001), *Coastal Eng.*, 42, 35-52. [7] Nielsen (1992), *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*, 324 p. [8] Roulund et al. (2005), *J. Fluid Mech.*, 534, 351-401. [9] Turner・Masselink (1998), *J. Geophys. R.*, 103(C13), 30,813-30,824.