平成26年度 基礎水理シンポジウム 2014.12.1

摩擦速度は粗度層の流れを表しているか? - 粗度層を含む河床近傍の流れの非平衡性 を考慮した解析に基づく検討-

中央大学研究開発機構 内田龍彦



摩擦速度(底面せん断応力)に関連する キーワード

流れの抵抗 土砂の掃流力

底面付近の流れ 物質交換

粒度分布 底棲生物

導入: 摩擦速度(底面せん断応力), 粗度とは何か?

摩擦速度(底面せん断応力)とはなにか?



吉川秀夫:水理学, 技法堂出版, 1976.

等流状態の断面平均底面せん断応力: au =
ho g R I明確な定義

底面せん断応力の計測)方法

1) 重力項との釣り合いから勾配と水深(径深)を用いて算出:正しいが平均値が計算され,局所的に成立しない

$$U_* = \sqrt{gRS}$$

2) 対数分布則: 少なくともinnner layer で平衡状態

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln(z^*) + A \quad : inner \ layer \frac{z}{h} < 0.2$$

3) (等流のせん断応力分布から)底面付近のレイノルズ応力(分布)を用いて算出:底面 で平衡状態

$$U_*^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \approx -\overline{u'w'}$$

4) 粘性底層の流速分布から算出:滑面のみ(河川では用いれない)

5) 乱れエネルギー法: 底面近傍で乱れが平衡状態

$$U_* = \sqrt{C_1 k_b} = \sqrt{C_2 w_b'^2}, \quad C_1 \approx 0.2, \quad C_2 \approx 0.9$$

6) 直接計測:実験室でも粗面だと難しい?

参考文献:

- Zezu, I. & Nakagawa, H.(1993) Turbulence in open channel flow, A.A.Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Rowinski, P., Aberle, J. and Mazurczyk, A.(2005) Shear velocity estimation in hydraulic research, Acta Geophysica Polonica 53(4), 567–583.
- Bagherimiyab, F. & Lemmin, U. (2013) Shear velocity estimates in rough-bed open channel flow, Earth Surf. Process. Landforms 38, 1714–1724.



流れの解析におけるせん断応力とは? 粗面抵抗則, 粗面



日野幹雄:明解水理学, 丸善株式会社, 1983.

• •

流速と摩擦速度の関係式を見出す:
$$\frac{U}{U_s} = f(k_s, h, ...)$$

粗面の底面せん断応力の評価方法 (流れの境界条件)

1) 平面二次元解析: 流速鉛直分布が等流

$$\frac{\tau_{bi}}{\rho} = C^2 U_i \sqrt{U^2} \qquad \qquad C = \sqrt{g} \left(\frac{n}{h^{1/6}}\right), \quad \frac{1}{Ar - 1/\kappa + (1/\kappa)\ln(h/k_s)}$$

2) 三次元解析(準三次元解析)1: 流速評価点より下で平衡状態

$$\frac{\tau_{bi}}{\rho} = c_b^2 u_{bi} \sqrt{u_b^2} \qquad c_b = \frac{1}{Ar + (1/\kappa) \ln(z_b/k_s)}$$

流速評価点で乱れの非平衡性を考慮1),2)するもの:

$$\frac{u_b}{{u_*}^2} \sqrt{k_b c_{\mu}^{1/2}} = \frac{1}{\kappa} \ln(E_r z_b \frac{\sqrt{k_b c_{\mu}^{1/2}}}{k_s u_*})$$

仮定:

鉛直方向の流れが無く、流速評価点より下では流れが平衡状態であることを仮定し、底面流速と底面せん断応力の関数を幾何条件、(水理条件)などで表す.

底面せん断応力を底面の境界条件とする場合は、底面近傍で平衡状態の流れを仮定する必要がある. 粗面でそのような平衡状態で表される領域があるのか?

参考文献:

1) Launder, B.E. and Spalding, D.B.(1973) The numerical computation of turbulent flow, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 3, 269-289, 1973. 2) Nicholas, A.P. (2001) Computational fluid dynamics modelling of boundary roughness in gravel-bed rivers: an investigation of the effects of random variability in bed elevation, Earth Surf. Process. Landforms 26: 345-362.

粗面を河床(底面の境界条件)として取り扱わない評価方法





Nikoraら(2007)による開水路粗面流れの領域区分

壁法則を用いた評価方法と透過性の抵抗 体として評価する方法1) RANS方程式を空間平均したダブルアベレージングを用いて樹木などと同じように透過性の抵抗体として評価する方法2)

🔷 具体的にどのように評価,解析するのか?従来の抵抗則,底面せん断応力との関係は?

参考文献:

1) Olsen, N.R.B and Stokseth, S.(1995) Three-dimensional numerical modelling of water flow in a river with large bed roughness, Journal of Hydraulic Research, Vol.33(4), pp.571-581.

2) Nikora, V., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., McEwan, I., Campbell, L., Aberle, J., Clunie, D. and Koll, K. (2007) Double-Averaging Concept for Rough-Bed Open-Channel and Overland Flows: Applications, J. Hydraul. Eng 133: 884-895.

粗面抵抗則と多重粗度スケール性: 粗度と形状の区別



水深全体を考える場合は粗面

河床近傍を考える場合は形状

解析方法: 粗度の多重スケール性を考慮した解析法 (考え方)

粗度のスケール分離と解析領域



粗度の多重スケール性を考慮した解析方法

小さな粗度(SSR):計算で直接評価できない形状⇒抵抗則(壁法則)でモデル化 大きな粗度(形状)(LSR):SSRを滑らかな河床面としたときに現れる形状⇒流体の 運動方程式から直接評価

粗度のスケール分離

大型粗度の抵抗:相対水深が小さいと相対水深に依存する. 大きな粗度を有する浅い流れ:対数分則が適用できない.



水深を用いて粗度のスケール分離



粗度のスケール分離のイメージ

大きな粗度(LSR)の評価方法



主計算領域を細かな計算格子を用いた三次元モデルで計算することは 計算負荷が大きい(水深より少し小さなスケールまで解ければよい) →抵抗則領域の流れの非平衡性を考慮した非静水圧準三次元解析法(底 面流速解析法)

小さな粗度(SSR)の評価方法



LSRによる底面近傍の複雑な流れを評価するためには、 非平衡粗面抵抗則が必要

解析方法: 粗度の多重スケール性を考慮した解析法 (定式化)



主計算領域の解析法: 大きな租度による流速と圧力の鉛直分布を 考慮できる非静水圧準三次元解析法



従来の抵抗則とその問題



渦層、粗度層で平衡状態の流速分布を仮定し、これらを通過するフラックスを無視

底面せん断応力:

$$\tau_b = \rho u_*^2, \quad \frac{u_b}{u_*} = c_b = Ar + \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\delta z_b + \delta z_0}{k_s} \right)$$

渦度の生産項:

$$P_{b\omega i} = C_{p\omega} v_{tb} \frac{\omega_{bei} - \omega_{bi}}{h}, \quad C_{p\omega} = \frac{3\kappa}{\alpha}, \quad \omega_{be} = 2\frac{u_*}{\kappa h} \ln\left(\frac{\delta z_b + \delta z_0 + h}{\delta z_b + \delta z_0}\right)$$
¹⁸

非平衡粗面抵抗則



せん断応力項と流体力項の評価方法

渦層に作用するせん断応力:

$$\frac{\tau_{bi}}{\rho} = \left(v_t \frac{\partial u_i}{\partial z}\right)_b = v_{tb} \cdot A_b \frac{\left(u_{bi} - u_{vi}\right)}{h}$$
平衡状態で対数分布を仮定:

$$\frac{1}{A_b} = \alpha(c_b - c_v)$$

粗度層上面に作用するせん断応力:

$$\frac{\tau_{ti}}{\rho} = \left(v_t \frac{\partial u_i}{\partial z} \right)_b = v_{tt} \cdot A_t \frac{\left(u_{ri} - u_{ri} \right)}{h} \frac{h + \delta z_b}{h}$$
平衡状態で対数分布を仮定:
$$\frac{1}{A_t} = \alpha(c_t - c_r)$$

v_{tt}:水深平均値に換算された粗度層上面の渦動粘性係数

流体力項

$$\frac{D_i}{\rho\delta z_r} = \frac{1}{\rho\delta z_r} \frac{F_i}{A} = \frac{u_{ri}u_r}{c_r^2}$$

$$\frac{F}{\rho} = C_D A_D \frac{u_r^2}{2}, \quad A_D = \frac{\pi d^2}{4}, \quad A = d^2$$

 $c_{b} = \frac{u_{b}}{u_{*}} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta z_{b} + \delta z_{0}}{k_{s}}\right) + Ar, \quad c_{v} = \frac{u_{v}}{u_{*}} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta z_{b}/2 + \delta z_{0}}{k_{s}}\right) + Ar, \quad c_{r} = \frac{u_{r}}{u_{*}} = \sqrt{\frac{8}{\pi C_{D}} \left(\frac{h + \delta z_{r} + \delta z_{b}}{h}\right)}$

基礎方程式から見た主計算領域と 抵抗則領域の流れの非平衡性の大きさ

現象スケールの定義

大スケールの現象(広域)

小スケールの現象(狭域)



水深平均流の運動方程式

水深積分された運動方程式



底面流速の方程式



(底面流速場)=(水深平均流速場)+(<mark>渦度分布の影響</mark>:水面流速,渦度の移流項)+… +(**圧力分布の影響**:鉛直方向流速の場所的変化)



底面流速の方程式



底面流速を用いて従来の抵抗則から求めた 底面せん断応力は河床に作用する力か?







e_s>0.1: 渦層内の流れの非平衡性は無視できない. 相対粗度が小さいほど渦層内の非平衡性は大きくなる. ⇒渦層内の非平衡流れは砂河床の局所洗掘の解析において特に重要となる. (洗掘部では水深が大きく,流れスケールは逆に小さいため)





e_s>0.1: 渦層内の流れの非平衡性は無視できない. 渦層とは逆に相対粗度が大きいほど粗度内の非平衡性は大きくなる. ⇒粗度層は通常河床と定義される面より下であるため, 礫床河川の局所流解析では非平衡粗面抵抗則が必要であることが分かる.

非平衡相面抵抗則を用いた数値解析

孤立化した水没巨石が点在する流れの実験



実験条件	
アスペクト比: h/B	0.21
水路勾配: S	0.003
Fr 数	0.52
相対粗度高さ: d _o /h	0.099
相対巨石高さ: d _c /h	0.28
粗度設置間隔 : I/d _c	6.0

h: 水深, B: 水路幅, Fr²=U²/gh, U: 平均流速, d₀: 河床材料直径, d_c: 巨石直径, I: 巨石対角線間隔



Papanicolaou, A.N., C.M. Kramer, A.G. Tsakiris, T. Stoesser, S. Bomminnayuni, and Z. Chen. 2012. Effects of a fully submerged boulder within a boulder array on the mean and turbulent flow fields: Implications to bedload transport. Acta Geophysica. 60(6):1502-1546.

巨石が無い場合の相当相度の算出



巨石なしの場合の底面粗度:

 k_s =0.9*d*, δz_0 =0.3*d*

粗度を通過する縦断面の流速鉛直分布の比較 (y/D=0)



粗度間の縦断面の流速鉛直分布の比較 (y/D=1)





実験と計算結果の比較:底面流速



BVC法と非平衡粗面抵抗則を導入すること による底面流速場の解析精度向上の効果





Wb(m/s) : -0.2 -0.1 0 0.1 0.2 Uv=1 m/s



底面付近の流れが解析できるために、より実際的な流砂運動の解析法を検討できる.

まとめ

流速鉛直分布を決定する渦度の変形と圧力効果を考慮できる非静水圧準三次 元モデル(BVC法)に底面極近傍と河床表層の流れの非平衡性が解析できる非 平衡粗面抵抗則(DWL)を組み込んだ解析法を開発し、河床に作用する底面せ ん断応力の評価方法について検討した。

運動方程式を無次元化して各項のオーダーを比較することにより,流れの三次元性,非静水圧分布及び非平衡粗面抵抗則がどの程度の流れのスケールから重要となるかを明らかにした.

開発した数値解析法は水没する孤立粗度近傍などの局所流場における底面近 傍絵流速を再現できることを示した。解析結果から、流れの三次元性が強い 局所流においては底面近傍においても流れの非平衡性が強く、抵抗則を適用 する底面流速場と粗度層内の流速場は大きく異なることを示した。