

幅の狭い開水路三次元乱流の平均流と乱れ強度の構造に及ぼす二次元底面粗度の効果

中央大学研究開発機構 正会員 ○高 鉄 裕也
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. はじめに

アスペクト比(b/h)の小さい開水路粗面乱流の平均流や乱れの構造を把握することは、横断構造物が敷設された河岸際の流れ構造・土砂の洗掘を検討するための重要な課題であり、その知見を洪水流解析に考慮していくことが重要である。アスペクト比の小さい開水路滑面乱流に関する実験的・解析的研究は多く実施されているものの¹⁾²⁾、平均流と乱流構造に及ぼす底面粗度の影響に関する研究は少ない。本研究では、開水路粗面乱流($b/h=1.38$)³⁾と開水路滑面乱流($b/h=2.00$)に関する詳細な3次元LES解析を実施し、主流と二次流、乱れ強度の構造に及ぼす二次元底面粗度の効果を明らかにする。

2. 数値解析の概要

図1に開水路粗面乱流(CR-03)の数値解析水路、表1に開水路滑面乱流(CS-01)と開水路粗面乱流の水力条件を示す。開水路粗面乱流では、円柱粗度を縦断的に密に敷設した水路を用いた(相対水深 $h/r=3.63$)。x軸は流れ方向にとり、z軸は平均的な水路床に垂直な方向とした。z軸の座標原点は粗度頂部から粗度高さの1/3低い位置とした。開水路粗面乱流の数値解析の条件と解析法、解析結果の妥当性については文献3)を参照されたい。開水路滑面乱流の水力条件は、林ら²⁾と同様の条件とした。また、SGSモデルに標準Smagorinskyモデルを用い、モデル係数は $C_s = 0.100$ とし、さらに梶島ら⁴⁾に倣い減衰関数を導入した。また、粘性底層を解像するため、無次元最小格子幅($\Delta y_{min}^+ = \Delta y_{min} u_* / \nu, \Delta z_{min}^+$)は1.0とした。開水路滑面乱流と開水路粗面乱流の乱流データの平均化操作は、禰津⁵⁾に倣い、サンプリング間隔はそれぞれ0.0620秒、0.0004秒とし、乱流の平均時間はそれぞれ100秒間、1秒間とした。

3. 主流速と二次流構造、乱れ強度に及ぼす二次元底面粗度の効果

図2に、摩擦速度 u_* で無次元化した主流速度($u^+ = \bar{u}/u_*$)の横断面分布を示す。なお、開水路粗面乱流の横断面分布の縦断位置は、図1に示すように、粗度要素前面で流れが再付着し下降流が発生する断面である。図2に示すように、本研究においても底面粗度の有無に関わらず最大主流速は無次元高さ $z/h \approx 0.7$ で発生すること、また潤辺沿いの主流速分布が歪むことが確認できる。ただし、開水路滑面乱流では水面付近の高速流が側壁側に輸送されるのに対し、開水路粗面乱流ではこの現象は確認出来ない。また、主流速度の鉛直分布に着目すると(図3)、底面近傍($z/h \leq 0.2$)で流速鉛直分布の形状が変化する高さは、横断位置に関わらず、開水路滑面乱流では水深の10%程度、開水路粗面乱流では水深の18%程度である。これらの高さにおける $y/h=0.05$ と 0.10 の主流速度の差の割合は、開水路滑面乱流では約70%、開水路粗面乱流では約15%である。これは、図4(b)に後述するように、開水路粗面乱流では水路中心寄りから底面コーナーに向かう二次流が大きく、水路中心寄りの高速流が底面コーナーに輸送されるためと考えられる。

次に、無次元化した二次流速($sv^+ = \sqrt{\bar{v}^2 + \bar{w}^2}/u_*$)の横断面

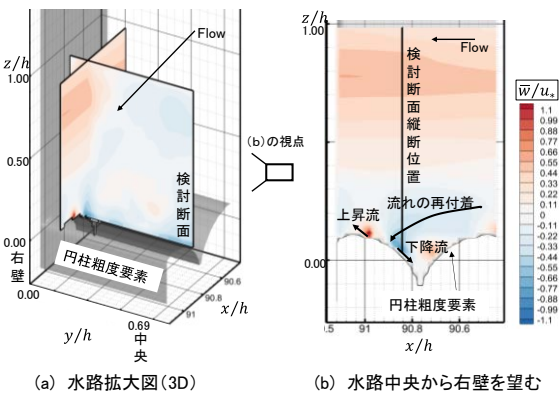


図1 水路の拡大図(CR-03)

表1 水力条件

	水路幅 b [m]	水深 h [m]	b/h [-]	径深 R [m]	粗度高さ r [m]	水路勾配 [-]	摩擦速度 u^* [m/s]	Um/u^* [-]	$Umax/u^*$ [-]	$SVmax/u^*$ [-]	$SVmax/Um$ [-]	$SVmax/Umax$ [-]	Re [-]
CS-01	0.10	0.0500	2.00	0.0250	-	1/6800	0.006	15.81	19.72	0.72	0.045	0.036	9.49E+03
CR-03: 文献3)のケース3	0.02	0.0145	1.38	0.0059	0.004	1/20	0.054	10.93	16.30	1.30	0.119	0.079	1.40E+04

ここに、 Um : 断面平均流速, $Umax$: 最大主流速, $SVmax$: 最大二次流速, $Re(=4UmR/\nu)$: パルクレイノルズ数である。

キーワード アスペクト比, 粗面と滑面, 主流速, 二次流, 乱れ強度

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, 中央大学研究開発機構福岡ユニット TEL03-3817-1615

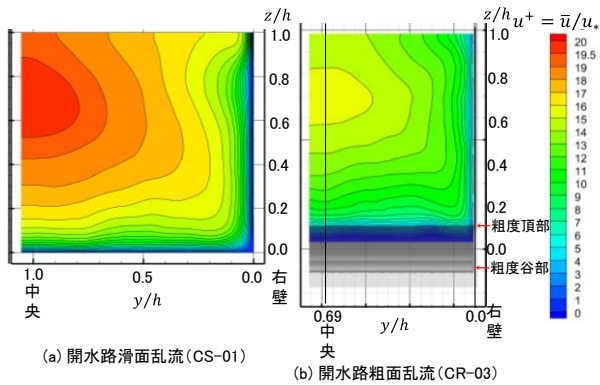


図 2 主流速度の横断面分布

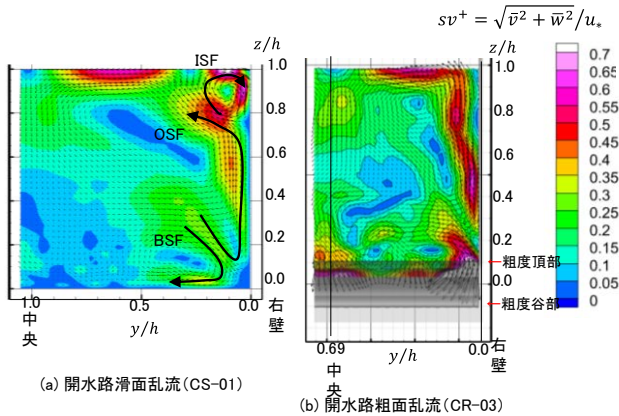


図 4 二次流速の横断面分布

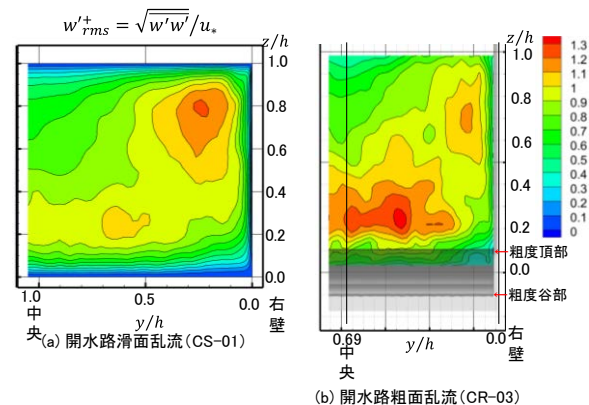


図 5 乱れ強度の横断面分布(鉛直方向成分)

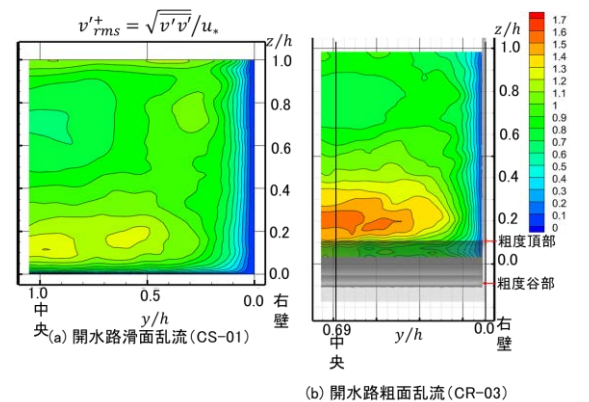


図 6 乱れ強度の横断面分布(横断方向成分)

参考文献

1)Nezu, I. and Nakagawa, H.: IAHR-monograph, CRC Press, Rotterdam, 1993. 2)林ら：土木学会論文集 B, Vol.62, No.1, pp.80-99,2006. 3)高嶺ら：土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.2, pp. I_1087-I_1092, 2020. 4)梶島ら：日本機械学会論文集(B編), 57 巻 540 号, pp.50-57, 1991. 5)禰津：土木学会論文報告集, Vol.261, pp.67-76, 1977.

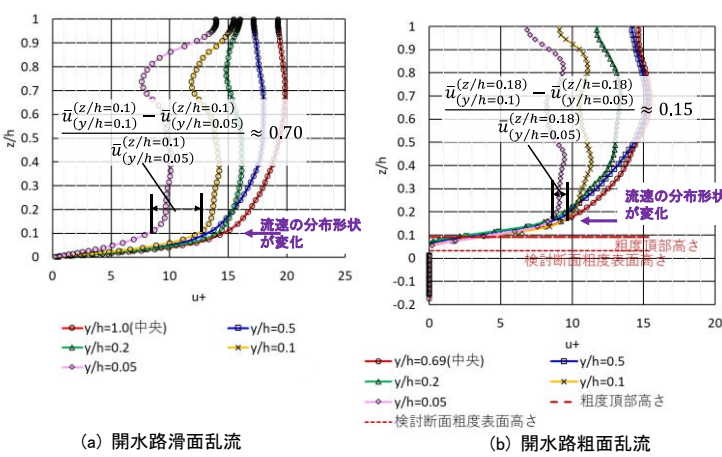


図 3 主流速度の鉛直分布

分布を比較する(図 4). 本研究においても開水路滑面乱流では(図 4(a)), 既往研究²⁾と同様に Bottom Secondary Flow (BSF), Outer Secondary Flow (OSF), Inner Secondary Flow (ISF)の3つの二次流セルが確認された. 一方, 開水路粗面乱流(図 4(b))では, 粗度要素前面の流れの再付着点付近で生じる下降流とBSF とが重なり合い, BSF の下降流が大きくなる³⁾. また, OSF の側壁近傍を上昇する成分が強く水面まで到達するため, ISF は形成されなかった. 二次流速の最大値は, 開水路滑面乱流では水面と側壁で囲まれた領域で発生するのに対し($SV_{max}/U_{max} = 0.036$), 開水路粗面乱流では底面コーナーで発生し, その値は0.079と大きくなった(表 1).

最後に, 乱れ強度($\sqrt{w'w'}/u_*$, $\sqrt{v'v'}/u_*$)の構造を比較する(図 5, 図 6). 二次流の形成と乱れ強度は密接に関係することが分かっており^{1),2)}, 底面コーナーでは, $\sqrt{w'w'}/u_*$ の鉛直方向勾配と $\sqrt{v'v'}/u_*$ の横断方向勾配が大きく, 水路中心寄りから斜め下の底面コーナーに向かう二次流が形成される. 本研究の開水路滑面乱流においても同様の関係が確認できる(図 4(a), 図 5(a), 図 6(a)). 開水路粗面乱流では(図 5(b), 図 6(b)), 底面粗度の存在により, 上述した乱れの非一様性が増しており, 底面コーナーに向かう二次流が開水路滑面乱流と比べて大きくなった一つの要因と考えられる.

以上より, アスペクト比の小さい開水路粗面乱流では, 側壁と底面粗度の存在により, 乱れの非一様性が増し, 底面コーナーで二次流速が増加し, 水路中心寄りの高速流が底面コーナーに強く輸送されることを明らかにした.

今後は, アスペクト比や底面粗度の大きさと縦断間隔の変化に伴う平均流や乱れの三次元構造の変化を明らかにする.