

円柱粗度を有する開水路粗面乱流における形状抵抗と運動量輸送

熊本大学工学部 学生会員 松田健作 熊本大学工学部 学生会員 清田慎太郎
 熊本大学大学院 正会員 大本照憲 熊本大学大学院 非会員 Sukarno Tohirin

1. はじめに

開水路における完全粗面乱流の抵抗則は、水路の縦断および横断形状、河床粗度の形状、配列および大きさ、更には流れの条件に依存しており、従来多くの研究によって重要な知見が積み上げられてきた¹⁾。特に、粗度の代表径が水深に較べて相対的に小さくレイノルズ数が十分に大きい広矩形直線水路の完全粗面乱流域においては、摩擦損失係数は Prandtl-von Karman の対数形式で表現できることが明らかにされている。しかし、粗度径が水深と同程度の流れにおいては、抵抗則について統一的説明は成されておらず、粗度の剥離渦が流れの抵抗に与える影響についても不明である。一方、人工粗度を用いた抵抗則の代表例である、二次元粗度としての浅粗度や溝粗度の抵抗特性が検討されて来た。

礫に較べて相対的に水深が小さい流れは、山地部の砂礫河川、地表や路面上の薄層流れ、急勾配水路流れおよび護岸上の流れ等において観察される。

本研究では、円柱粗度が規則的に路床に最密充填配列された完全粗面の乱流境界層において各粗度径に応じた抵抗特性、粗度近傍の乱流構造および運動量輸送について検討し、その差異を考察した。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した水路は可変勾配型の循環式直線水路である。この計測対象領域の座標系の詳細は図-1に示す。水路床は、直径 5mm, 15mm および 30mm の 3 種類の円柱棒を水路上流端 2m の位置から流下方向に 8m の長さで敷き詰めた。円柱粗度の配列は図-2に示す。円柱粗度の抵抗則の実験条件を表-1に示す。流れは所定の流量を通水し下流端の堰を調節することで等流場を形成し、ポイントゲージを用いて等流水深を計測した。

円柱粗度を用いて粗面乱流を計測した実験条件は、表-1の条件の流量が 4(l/s)のときの等流場での条件である。何れのケースも粗度レイノルズ数は 70 を超え完全粗面である。流速の計測には、非接触型の代表的な画像処理法である PIV(Particle-Image Velocimetry)法を用いた。

計測システムの概要は図-1に示す。測定位置は、円柱棒の粗面先端より 4m 下流位置の等流場で行った。光源には空冷式の赤外線パルスレーザーを用い、シート光の厚さを 1mm, パルス間隔を 500 μ s に設定し、水路上方から底面に垂直下向きに照射した。

表-1 円柱粗度の実験条件(抵抗則)

粗度径(mm)	勾配(I ₀)	流量(l/s)
5	1/500	1~10
	1/300	
15	1/500	
	1/300	
30	1/500	
	1/300	

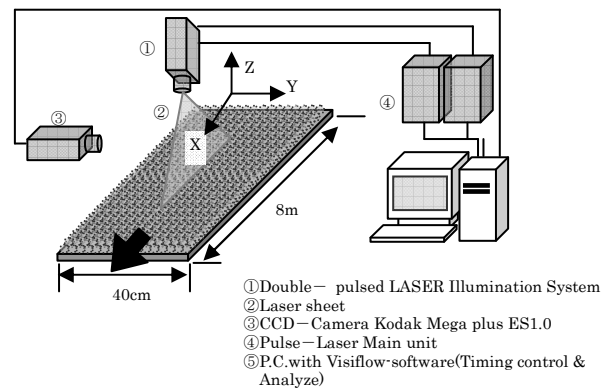


図-1 流れの計測システム

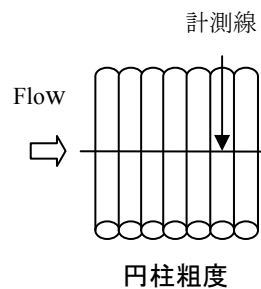


図-2 水路床境界条件

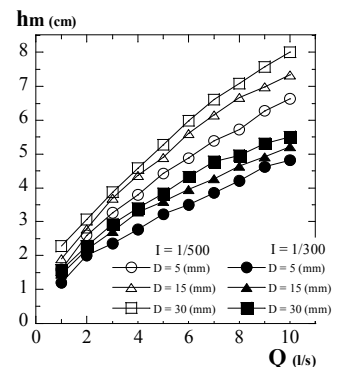


図-3 等流水深と流量

3. 粗面乱流の抵抗特性

円柱粗度の各粗度径に応じた抵抗特性を比較するために、水路勾配 2 種類で流量が同一の条件下で等流水深を計測し、その結果を図-3に示す。等流水深は、水路勾配が緩やかなほど大きく、また粗度径が大きいほど大きく、その傾向は流量 1(l/s)では大差は無いものの、流量の増大に伴い大きくなるのがわかる。

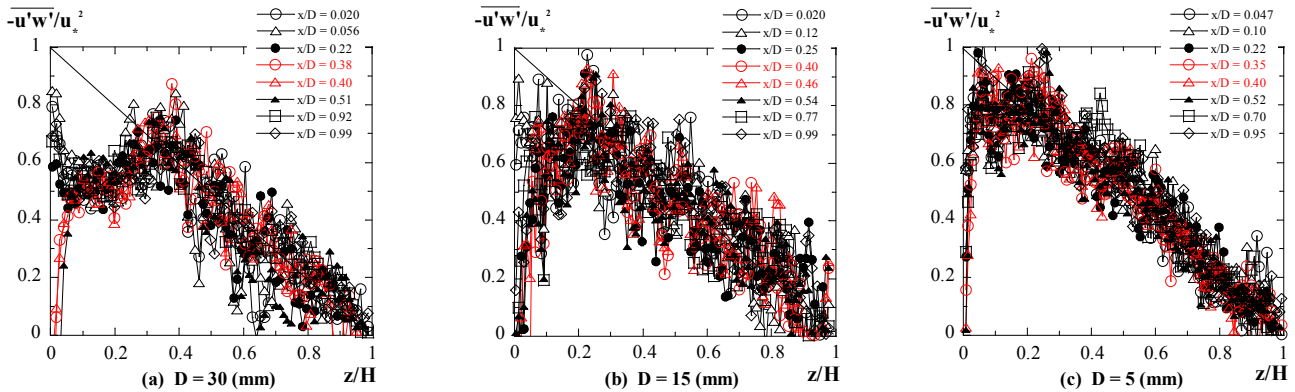


図-4 各粗度に応じたレイノルズ応力の鉛直分布

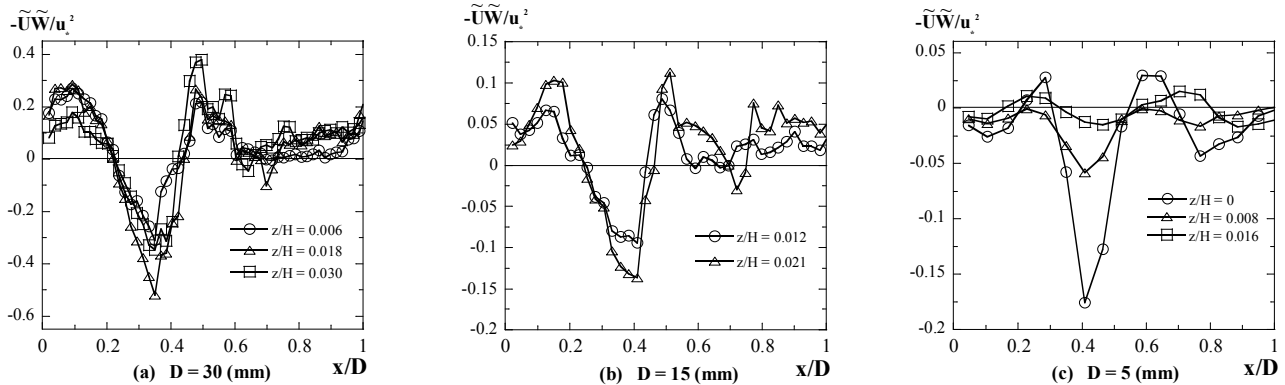


図-5 各粗度に応じた $\tilde{U}\tilde{W}$ の流下方向変化

4. 乱れ特性

図-4 は各粗度径に応じた円柱粗度におけるレイノルズ応力の鉛直分布を示す。流れが等流であってもレイノルズ応力は直線分布から外れていることが認められ、特に底面近傍および粗度径 30mm において顕著である。なお、朱書きのシンボルは粗度頂部近傍に辺り、底面近傍でのレイノルズ応力の落ち込みは著しい。

5. 移流による運動量輸送

Nikora³⁾ によって提唱された等流場の粗面乱流におけるせん断応力 $\tau(z)$ は、水深スケールの二次流が無視できればレイノルズの運動方程式を粗面一波長間に亘って空間積分することにより、次のように与えられる。

$$\rho\phi g I_0 = f_x - \frac{\partial \phi \tau(z)}{\partial z} \quad (1)$$

$$\tau(z)/\rho = \langle v \frac{\partial U}{\partial z} \rangle - \langle \overline{u'w'} \rangle - \langle \tilde{U}\tilde{W} \rangle \quad (2)$$

ここに、 f_x は単位体積当たりに働く物体抵抗で粗度頂部上方ではゼロ、上付バーおよび角括弧は、各々、時間平均および空間平均演算、プライム符号および上付波線は、各々、瞬間値の時間平均からの偏差、時間平均値の空間平均からの偏差を示す。それ故に、主流速の空間偏差 $\tilde{U} = U - \langle U \rangle$ 、 $\tilde{W} = W$ となる。g は重力加速度、 ρ は流体の密度、 I_0 は水路勾配、 ϕ は空隙率で粗度頂部

より上方では $\phi = 1$ である。式(2)の右辺第三項は、Form induce stress と呼ばれ粗度要素によって誘起された時間平均流に依存することが指摘されている。主流速の空間偏差と鉛直方向成分の偏差の粗度近傍での相関図を図-5 に示す。粗度径 15mm, 30mm では全体的に負の相関が見られ、粗度径 5mm ではほぼゼロに近いことがわかる。このため、レイノルズ応力に類似した移流による粗度内部への運動量輸送が形状抵抗を誘起したものと解釈される。

6. おわりに

本研究では以下の知見を得た。

- 1) 円柱粗度が路床に規則的に最密充填配列された完全粗面乱流においては、勾配が緩やかで粗度径が大きいほど抵抗が大きい。
- 2) 粗度近傍におけるレイノルズ応力の直線分布からの欠損量は、粗度径の増大に伴って大きくなる。
- 3) Nikora によって提唱された Form induce stress は、レイノルズ応力の直線分布からの欠損の原因を説明する有力な手掛かりを与えている。

参考文献

- 1) 足立昭平：流水抵抗と安定河道，石原藤治郎編水工水理学，pp.237-263，丸善株式会社，1972
- 2) Vladimir Nikoral et al. ;Double-Averaging Concept for Rough-Bed Open-Channel and Overland Flows, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.133, No.8, ASCE, 2007