

河流流动阻力特征分析

李国栋 武晓杰

山西水务集团建设投资有限公司, 山西省太原市, 030006;

摘要: 采用 2890 组现场实测数据, 检验了水流阻力方程在无率定情况下预测砾石河床平均流速的能力。结果表明, 发现宏观糙率阻力是相对水深的函数, 在 (d/D_{84}) 小于 7 ~ 10 左右时开始变得重要, 随着 (d/D_{84}) 的减小而增大, 大致呈半对数关系; 传统的分离颗粒和形成阻力的概念对于陡峭河流中的浅层流动没有意义。事实上, 在陡峭和粗糙的溪流中, 似乎很难区分颗粒和“形式”阻力; 现场数据表明, 与小尺度粗糙度区域相比, 流动阻力显著增加。

关键词: 河流阻力, 泥沙粒径; 糙率; 特征分析

DOI: 10. 69979/3060-8767. 24. 2. 030

引言

掌握河段平均流速对于河道工程、风险分析、环境调查、数值模型验证、流量计算、推移质输移计算等方面具有重要意义。在某些情况下, 流速可以直接测量(例如, 用电流表), 也可以在流量 Q 和湿截面积 A 都已知的情况下通过连续性方程 $(U=Q/A)$ 确定。但在很多情况下测量是不可能的, 必须使用流动阻力方程。当有额定曲线可用时, 可拟合该场地的流阻方程。几个水流阻力方程是令人感兴趣的, 因为它们不需要校准, 当河段可以被认为是近似均匀的。本文提出使用一个大的现场数据集, 以检验这些方程对均匀砾石河床河段平均流速预测的充分性^[1-4]。

本文使用一个由 2890 个测量数据组成的大数据集。首先, 介绍了数据集。然后, 用于检验阻力方程的适用性。最后, 分析了极低相对水深的流动阻力和流动阻力的现场变化, 以改善具有中尺度和大尺度粗糙度水流条件下的推移质输移计算。

1 基本原理

Chezy、Manning 和 Darcy -Weisbach 方程是最常用的方程, 由下式给出:

$$U = C\sqrt{dS} = \frac{S^{1/2}d^{2/3}}{n} = \sqrt{\frac{8gdS}{f}} \quad (1)$$

其中, U 为平均流速, C 为谢才系数, n 为曼宁系数, f (无量纲) 为 Darcy -Weisbach 摩擦因子, S 为能量斜率, d 为流深, g 为重力加速度。对于窄通道, 通常用水力半径 R 代替 d 。为了得到一个通用的方程, 许多

研究试图将这些系数与床面和流动特性(流量或水深、河宽和比降、床面糙率)联系起来。

由于 f 是一个无量纲系数, 所以大多数方程都是针对 f 推导出来的, Keulegan [1938] 将 Karman-Nikuradse 对数平均流速剖面方程进行积分, 得到了该形式的对数方程:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{u^*} = 6.25 + \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{d}{k_s} \right) \quad (2)$$

式中: $u^*=(gdS)^{0.5}$ 为剪切速度, κ 为卡门系数 0.4, k_s 为床面糙率。

D_{50} 可以表示 k_s , $k_s = cD_x$ (其中 $1 < c < 8$, 下标 x 表示比 D 更细的泥沙的百分数)。Yen^[5] 对流动阻力方程进行了全面的回顾。其中 Darcy -Weisbach 方程也可用相对流深 d/D 的幂函数甚至更复杂的指数形式表示:

然而, 对于野外研究而言, 小而粗糙的溪流中的流量测量通常比流深测量要精确得多。在这些河流中, 经常不规则的床面地形和水面使确定代表性的水流深度变得复杂。这就是为什么一些作者提出了将平均流速与流量联系起来的无量纲水力几何方程的原因, 如方程(3)所示:

$$U^* = kq^* S^{(1-m)/2} \quad (3)$$

式中: k 和 m 由经验确定, $U^*=U/(gD_{84})^{0.5}$, $q^*=q/(gD_{84}^3)^{0.5}$, D_{84} 由 Ferguson^[6] 作为特征粒径。他详细地回顾了陡峭溪流中的流动阻力方程, 他表明, 对于浅水流动, 方程(3)与 d/D 的幂函数是一致的:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = a \left(\frac{d}{D_{84}} \right)^b \quad (4)$$

$$k=a(1-m), m=(2b+1)/(2b-3), b=(3m-1)/(2-2m)。$$

对 $S=0.184$ (得到 $b=1.80$, $m=0.7$) 的床面坡度的现场测量表明, b 和 m 应随 S 的增大而增大。

无论采用何种方法, 流阻方程对于水流深度或水力半径比床面粗糙度大的水流条件都被证明是更可靠的。大尺度糙率(d/D_{84} 为 1.2 时, 粗糙度特征对自由表面的影响较大)、中尺度糙率($1.2 < d/D_{84} \leq 4$)和小尺度糙率($d/D_{84} > 4$, 流动可用边界层理论描述)。

对于大、中尺度糙率的流动阻力模拟仍然非常具有挑战性, 因为在这类流动中, 水流紊动受到较大床面要素的强烈影响。对于这些条件, 由壁定律导出的方程(2)等常规方程可能不再有效。这对于具有阶梯-深潭形态的陡峭山地溪流尤为如此。基于粗糙床面水流空间平均的思想, 提出了高相对水深水流、小相对水深水流和部分淹没粗糙床面水流之间的相似区别。

2 数据和分析

2.1 数据处理

本研究使用的初始数据集由 3942 个测量值组成, 如图 1 所示。

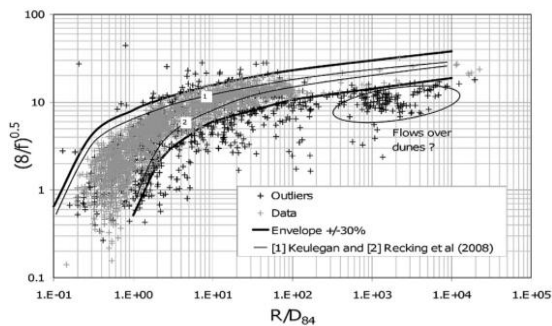


图 1 所用数据

这些数据代表了砾石床水流流速的现场测量, 包括高达 24 % 的渠道坡度和不同的渠道床面形态。在这些研究中, 流速是通过几种技术获得的, 包括已知流量和横截面积($U=Q/A$)的连续性, 以及用流速仪或示踪剂注入的直接测量。如果晶粒尺寸 D_{84} 缺失, 其值大概为 2.2 倍的 D_{50} 。

这种近似是基于 141 对可用的 D_{50} 和 D_{84} 值的中位值, 涉及分析中使用的约 21 % 的数据。如果颗粒大小 D_{90} 缺失, 则用 1.25 倍的 D_{84} 来估计, 其近似值是基于 30 对可用的 D_{84} 和 D_{90} 值的中位值, 涉及分析中使用的

约 78 % 的数据。一些数据可能由于测量误差或数据集纵横等原因而质量不高。由于不可能对所有运行进行仔细检查。

如果 $q=Ud$ 与 $q'=Q/W$ 相差 5 % 以上, R 与 $R'=Wd/(2d)$, 即矩形断面的水力半径相差 5 % 以上, 则该数据被排除。其中 Q 为总流量, W 为流道宽度。基于数据, 对式 (4) 进行率定, 可以得到新的表达式:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 4.416 \left(\frac{d}{D_{84}} \right)^{1.904} \left[1 + \left(\frac{d}{1.283 D_{84}} \right)^{1.618} \right]^{-1.083} \quad (5)$$

2.2 计算结果与分析

通过式 (5) 进行计算, 发现宏观糙率阻力是相对水深的函数, 在 (d/D_{84}) 小于 7 ~ 10 左右时开始变得重要, 随着 (d/D_{84}) 的减小而增大, 大致呈半对数关系。使用 U 和 q 稍加修改的分析可以得到一个非常相似的大尺度粗糙度的流动阻力方程。指数 m 随 q 或 d/D_{84} 的减小而增大, 对于很低的 (d/D_{84}) 值, 如果通道宽度的一部分被较大的颗粒占据。

传统的分离颗粒和形成阻力的概念对于陡峭河流中的浅层流动没有意义。事实上, 在陡峭和粗糙的溪流中, 似乎很难区分颗粒和“形式”阻力。因为较大的颗粒是床层材料、表面粗糙度元素和河岸材料的一部分, 并可能对不同类型的阻力有不同程度的贡献。然而, 在河床荷载输送计算中, 考虑额外能量损失或总流量阻力增加的重要性。使用传统的输沙公式可能会高估陡峭河流中的输沙速率, 因为陡峭河流中的大部分流动能量会失去, 以形成和溢出阻力。床附近的平均流速和湍流强度随相对深度深比的减小而降低, 中等和大尺度粗糙度区域的流动特性, 这可能会有效地减少陡峭和粗糙河流中的床荷载输送。

3 结论

(1) 使用一个由 2890 个现场测量组成的数据集, 该数据集涵盖了广泛的床面坡度、颗粒直径、流量和河流宽度, 用于测试流动阻力。发现宏观糙率阻力是相对水深的函数, 在 (d/D_{84}) 小于 7 ~ 10 左右时开始变得重要, 随着 (d/D_{84}) 的减小而增大, 大致呈半对数关系 (2) 传统的分离颗粒和形成阻力的概念对于陡峭河流中的浅层流动没有意义。事实上, 在陡峭和粗糙的溪流中, 似乎很难区分颗粒和“形式”阻力。 (3) 使用传统的输沙公式可能会高估陡峭河流中的输沙速率, 因为陡峭

河流中的大部分流动能量会失去,以形成和溢出阻力。床附近的平均流速和湍流强度随相对深度深比的减小而降低,中等和大尺度粗糙度区域的流动特性,这可能会有效地减少陡峭和粗糙河流中的床荷载输送。

参考文献

- [1] 罗铭,黄尔,王协康,等. 山区卵砾石河道水流阻力计算[J]. 水科学进展,2020,31(03):404-412. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.03.010.
- [2] 黄才安,严恺. 动床阻力的研究进展及发展趋势[J]. 泥沙研究,2002,(04):75-81. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2002.04.014.
- [3] 李一兵. 内河船舶航行阻力计算方法讨论[J]. 水道港口,2002,(01):7-11.
- [4] 吴修广,王平义. 山区河流二维阻力特性研究[J]. 重庆交通学院学报,2001,(03):102-105+109.
- [5] Yen, B. C. Open channel flow resistance[J]. J. Hydraul. Eng., 2002, 128: 20-38.
- [6] Ferguson, R. Flow resistance equations for gravel and boulder bed streams[J]. Water Resour. Res., 2007, 43, W05427, 1-12.

作者简介: 李国栋, 1983.05, 汉族, 忻州市忻府区, 副高职称, 科技创新中心主任, 太原理工大学研究生, 研究方向: 水库河道清淤, 固废资源生态转化.