

山区松散排列泥沙床面河流阻力特性研究

杨奉广^{1,2}, 毋敏¹, 刘兴年^{1,2}

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:河道阻力决定了河流流速与挟带泥沙的能力。然而与普通河流不同,山区河流的河道阻力比较复杂,床面泥沙排列密度对于河道阻力影响明显。试验资料表明,在低泥沙排列密度时,河道阻力随着排列密度的增大而增大,当达到最大值后,随着排列密度的增大呈现减小的趋势。利用程年生植被糙率尺度的概念,建立了适用于含有松散排列泥沙床面情形的糙率尺度。通过试验数据,确定了糙率尺度表达式中的待定参数,在 $f-r/k_v$ 图上,建立的泥沙颗粒糙率尺度可以使所有的数据点归结到一条曲线上。最后,建立了适用于松散排列泥沙床面河道的达西阻力系数表达式。对于天然河流,本文建立的达西阻力表达式仍然具有较高的计算精度。

关键词:山区河流;达西阻力系数;松散排列泥沙;糙率尺度

中图分类号:TV142.1

文献标志码:A

Flow Resistance Induced by Loose-packed Sediment in Mountain River Flows

YANG Fengguang^{1,2}, WU Min¹, LIU Xingnian^{1,2}

(1. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: By using the roughness height conception developed by Cheng, a representative roughness height for loose-packed sediments was developed. Then, the results were compared with the published experimental data and the coefficient in k_v was determined. By drawing $f-r/k_v$ figure, a new friction formula was proposed. The new relationship is useful for consolidating various measured data including the traditional open channel flow data.

Key words: mountain rivers; Darcy friction factor; loose-packed sediment; roughness height

大量滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖和不稳定斜坡等地质灾害,造成山区江河严重破坏。由此产生的山区河流的洪水漫滩、河道淤堵及清水冲刷等水沙灾害问题极为突出,山区河流修复无疑是治理山区河流水沙灾害的主要任务之一^[1]。在河道修复中,河道阻力系数无疑是一个非常重要的参数,在河道修复模型方案的确定中一个重大的难题也是河道阻力系数的选择。由此可见研究山区河道阻力系数对于山区河流的水沙灾害、河道整治以及河流修复等都是十分必要的。

在紊流粗糙区,达西阻力系数 f 一般可以表示

为水力半径 r 与糙率尺度 k_v 比值的函数^[2-4],即:

$$f = F\left(\frac{r}{k_v}\right) \quad (1)$$

然而,山区河流河床多由卵石、砾石组成,床面泥沙也不是紧密排列的,如图1所示。这时的达西阻力系数是一种怎样的变化方式呢?传统的阻力系数公式是不是仍然能够适用?图2绘制了Sayre^[5]试验数据,从图中可以看出 f 与 r/k_v 关系并不能拟合到一条曲线中,也就是说 f 与 r/k_v 关系并不唯一, f 还应该是泥沙排列密度 λ 的函数。随着 λ 的增大,阻力最初相应地增大,在某一排列密度上达到最大

收稿日期:2015-12-29

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402302);国家自然科学基金资助项目(51279116)

作者简介:杨奉广(1979—),男,副研究员,博士。研究方向:水力学及河流动力学。E-mail:27521656@qq.com

网络出版时间:2016-9-13 16:05:40 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160913.1605.016.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

值,然后 f 呈现减小的趋势。因此,在此种情况下,传统的阻力系数公式也不能适用。



图1 西南山区河流松散排列泥沙床面

Fig.1 Loose-packed sediment bed in mountain rivers

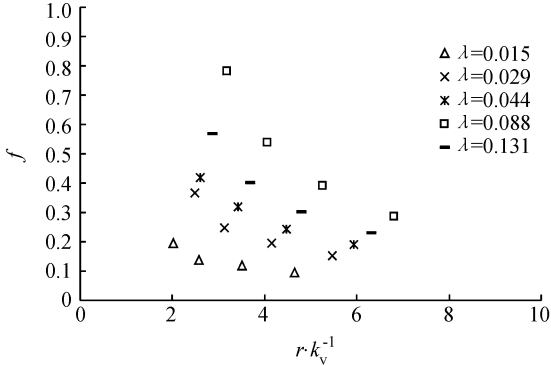


图2 阻力系数 f 随泥沙排列密度 λ 变化曲线

Fig.2 Variation of friction factor f with concentration λ

迄今,有一些学者研究了此类问题,提出了修正的阻力系数经验公式。Koloseus 等^[6]在传统阻力公式基础上,结合实验数据,给出了如下修正的经验公式:

$$f = \left\{ 2 \lg \left[\frac{0.56r/k_v}{\lambda^{0.9}} \right] \right\}^{-2} \quad (2)$$

Bathurst^[7]在野外实测数据基础上,得到了如下公式:

$$f = 0.0716 \left(\frac{r}{k_v} \right)^{-4.68} \left(\frac{B}{h} \right)^{-14(y-0.08)} \quad (3)$$

式中, B 为河宽, h 为水深, k_v 取床面代表泥沙颗粒的高度, y 需要利用下述公式计算:

$$y = 0.139 \lg \left(\frac{1.91}{r/k_v} \right) \quad (4)$$

以上公式皆为经验公式,在物理意义上无法解释此时的能量消耗机理。另外, Bathurst^[7]公式中不含有泥沙排列密度。其实,含有松散排列泥沙床面的河流,床面糙率尺度 k_v 应随泥沙松散排列情况不同而变化。本文从能量消耗原理出发,采用程年生^[8-9]关于植被糙率尺度的概念,得出适用于松散排列泥沙河床的糙率尺度 k_v , 以此为基础,求出达西阻力系数表达式。

1 公式推导

粗糙河床达西阻力系数表示为水力半径 r 与糙率尺度 k_v 比值的函数。一般情况下 k_v 取值为床面泥沙代表粒径 d , 但是对于含有松散排列床沙的河道而言, k_v 取值比较困难。程年生等^[8-9]研究刚性植被阻力时,借助于类似水力半径的概念,将糙率尺度表示为一个长度变量, 即:

$$k_v = \frac{V_s}{A_f} \quad (5)$$

式中, V_s 为植被所占的体积, A_f 为植被迎水面流体所占的面积。由于山区松散排列泥沙与植被有许多相似之处, 所以利用这一概念, 研究含有松散排列泥沙床面河道阻力问题。

图3所示的由立方体模拟的泥沙颗粒在床面上所占的面积比值为:

$$\lambda = \frac{ac}{2x^2} \quad (6)$$

式中, a 、 c 、 x 分别表示泥沙颗粒的厚度、宽度以及间隔距离。

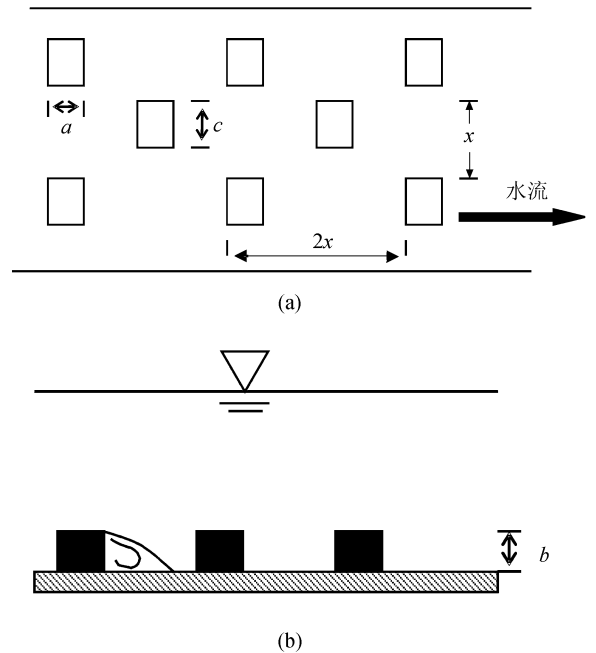


图3 松散泥沙排列示意图

Fig.3 Schematic diagrams of loose packed sediment

如果取单位面积床面进行分析, 则单位面积床面中所含泥沙颗粒的数量为:

$$N = \frac{\lambda}{ac} \quad (7)$$

床面泥沙颗粒的体积为:

$$V_s = \lambda b \quad (8)$$

由于床面水流能量主要消耗在泥沙颗粒上,因此,泥沙颗粒迎水面面积为:

$$A_v = Nbc \quad (9)$$

结合式(6)与(8)可以得到:

$$A_v = \frac{\lambda b}{a} \quad (10)$$

从而泥沙颗粒迎水面水流面积为:

$$A_f = \frac{(1 - \lambda)b}{a} \quad (11)$$

由于在泥沙颗粒后面会产生水流的分离,产生空腔,如图 3(b)所示。因此实际水体面积应该比式(11)表示的要小。可以假设空腔部分所占的面积为:

$$A_k = mA_f \quad (12)$$

式中, m 为待定系数,取值范围为: $0 < m < 1$, m 值可以利用实测数据确定。

因此泥沙颗粒迎水面水流面积为:

$$A_f = A_f - A_k = \frac{(1 - \lambda)b}{a}(1 - m) \quad (13)$$

结合式(5),对于含有松散排列床沙的河道,糙率尺度 k_v 可以表示为:

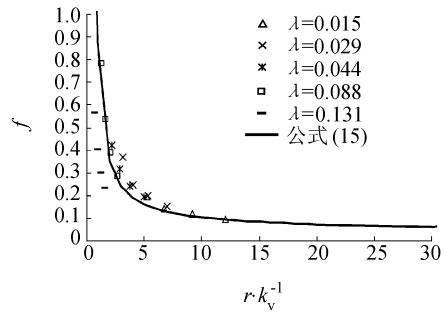
$$k_v = \frac{\lambda a}{(1 - \lambda)(1 - m)} \quad (14)$$

2 模型验证

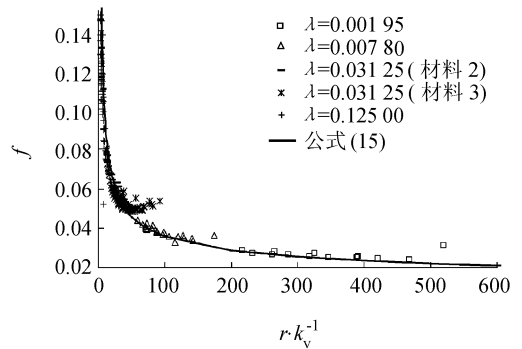
通过分析 Sayre^[5] 试验数据(k_v 范围:17.26 ~ 111.80 mm),可以得到: $m = 0.932$ 。图 4(a) 显示了 f 随着 r/k_v 变化曲线,从图中可以看出所有的数据点都归结到一条曲线中,这说明本文建立的糙率尺度表达式可以很好地描述松散排列泥沙颗粒床面水流能量消耗机理。另外,图 4(b) 显示了式(15)与 Koloseus 等^[6] 试验数据(k_v 范围:0.137 ~ 10 mm)比较效果,从图中可以发现式(15)也与其实测数据很好地拟合在一起。

$$f = 1.28 \left[\ln \left(\frac{4r}{k_v} \right) \right]^{-2} \quad (15)$$

为了进一步比较本文公式与其它公式的计算精度,表 1 列出了他们的计算误差值。从表中可以看出在 3 个计算公式中,本文公式计算精度最高。其中, Bathurst^[7] 公式计算平均误差高达 0.977,这说明其不适合计算含有松散排列泥沙颗粒床面河道的阻力问题。分析发现,这是因为 Bathurst^[7] 当时是分析 River Tees 9 组野外实测数据后,综合各个影响参数拟合得到的计算公式,没有更多的数据进行验证。



(a) 文献 [5] 试验数据



(b) 文献 [6] 试验数据

图 4 阻力系数 f 随 r/k_v 变化曲线

Fig. 4 Variation off with r/k_v

表 1 作者公式与其它公式计算误差比较

Tab. 1 Summary of errors in friction factor predictions

公式	文献[5]试验数据	文献[6]试验数据
文献[6]公式	0.582	0.128
文献[7]公式	0.872	0.977
本文公式(15)	0.270	0.121

3 本文公式在天然河道中的应用

式(14)只适用于长方体形状的泥沙颗粒,而天然河道中泥沙颗粒常常被近似看作为球体颗粒^[10-11],如图 5 所示。设其粒径为 d ,间距仍然为 x 。

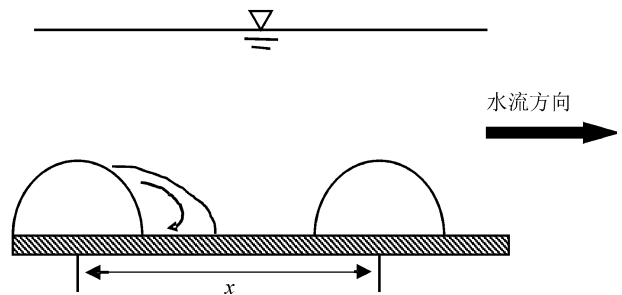


图 5 天然河道球状泥沙排列示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of spherical sediment particles

对于球状颗粒的糙率尺度 k_v 仍然可以仿效以上方法得到。

首先,取 $B \times L$ 床面面积,其中, B 为河宽, L 为沿水流方向代表性床面长度。选取代表性床面面积内泥沙颗粒的数量为:

$$N = \frac{BL\lambda}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (16)$$

在研究区域内泥沙颗粒的体积为:

$$V_s = N \frac{\pi d^3}{12} = \frac{BLd\lambda}{3} \quad (17)$$

与湿周类似,在床面处水流能量主要消耗在泥沙颗粒上,消耗水流能量对应的泥沙颗粒面积为:

$$A_s = \frac{\pi d^2}{8} N = \frac{BL\lambda}{2} \quad (18)$$

此时,对应的水流面积为:

$$A_r = \frac{BL}{2}(1 - \lambda) \quad (19)$$

同样,如图5所示,由于泥沙颗粒后面空腔的存在,水流面积要相应减少,假设空腔部分所占面积为:

$$A_k = mA_r \quad (20)$$

所以:

$$A_f = A_r - A_k = \frac{BL}{2}(1 - \lambda)(1 - m) \quad (21)$$

综合式(5)、(17)以及(21)可以得到:

$$k_v = \frac{2}{3} \frac{\lambda d}{(1 - \lambda)(1 - m)} \quad (22)$$

比较式(22)与式(14)可以发现,在天然河道中利用式(15)计算阻力系数时,只需要将 $2d/3$ 代替长方体泥沙颗粒的厚度 a 即可,在这里, m 仍然取值 0.932。

对于大多数情况下含有紧密排列泥沙河床的普通河流而言, k_v 应该取为河床泥沙代表粒径 d ,图6显示了本文公式(15)与普通粗糙床面河流阻力试验数据(试验资料泥沙粒径 d 范围:4.8 ~ 63.5 mm)对比效果^[12-15],从图中可以看出,本文公式仍然有很高的计算精度。因此,可以说,无论是普通河流还是含有松散排列泥沙床面的山区河流,本文建立的达西阻力系数表达式都有很高的计算精度。

4 结论

1)通过分析已有数据发现,当床面含有松散排列泥沙颗粒时,传统的达西阻力系数计算公式已不适用。这时达西阻力系数随着床面泥沙颗粒排列密度的增大而增大,在某一排列密度上达到最大值,然后达西阻力系数随着排列密度的增大呈现减小的趋势。

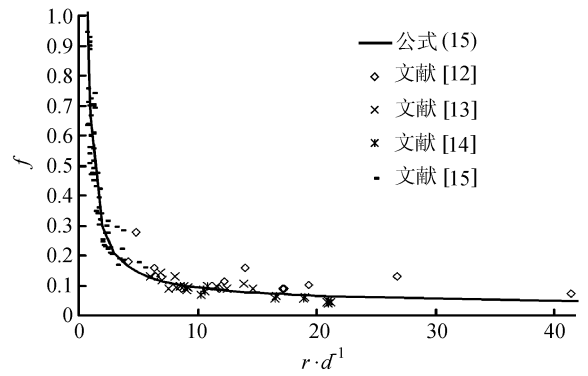


图6 阻力系数 f 随 r/d 变化曲线

Fig. 6 Variation of f with r/d

2)采用程年生研究植被阻力时糙率尺度的概念,研究了长方体泥沙颗粒糙率尺度 k_v 表达式。此时的 k_v 只与泥沙颗粒的排列密度以及厚度有关。由于在泥沙颗粒背面水流形成空腔,因此在作者的 k_v 表达式中含有待定参数,并利用试验数据确定了它的数值。通过 $f - r/k_v$ 图可以发现,所有的试验数据都可以归结到一条曲线中,这说明本文的糙率尺度 k_v 可以很好地用来描述松散泥沙排列床面河道水流能量消耗机理。

3)由于天然泥沙颗粒都近似看做球体,本文导出了球体泥沙颗粒的 k_v 表达式。与长方体颗粒比较发现,球体泥沙颗粒的 k_v 公式中,需要将 $2d/3$ 代替长方体颗粒的厚度,而不是直接替换为粒径 d 。

4)利用实测数据得出了含有松散排列泥沙颗粒床面河流达西阻力系数表达式,对于常见的普通河流而言,本文得到的达西阻力系数公式仍然具有很高的计算精度。

参考文献:

[1] Cao Shuyou, Liu Xingnian, Huang Er, et al. A review of the research on stream corridor restoration in wenchuan earthquake district, Sichuan, China [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 1-9. [曹叔尤,刘兴年,黄尔,等.汶川地震灾区河道修复重建研究综述[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(5):1-9.]

[2] Chow V T. Open channel hydraulics [M]. New York: McGraw-Hill book company, 1959: 3-14.

[3] Cheng N S. Resistance coefficients for artificial and natural coarse-bed channels; Alternative approach for large-scale roughness [J]. Journal of Hydraulic Engineering,

- ASCE, 2015, 141(2): 04014072.
- [4] Nezu I, Nakagawa H. Turbulence in open-channel flows [M]. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1993: 48 – 81.
- [5] Sayre W W. Artificial roughness patterns in open channels [D]. Fort Collins: Colorado Agricultural and Mechanical College, 1957.
- [6] Koloseus H J, Davidian J. Free-surface instability correlations [R]. Washington: USGS, 1966.
- [7] Bathurst J C. Flow resistance of large-scale roughness [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1978, 104(12): 1587 – 1603.
- [8] Cheng Niansheng. Representative roughness height of submerged vegetation [J]. Water Resources Research, 2011, 47: W08517.
- [9] Cheng N S, Nguyen H, Tan S, et al. Scaling of velocity profiles for depth-limited open channel flows over simulated rigid vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2012, 138(8): 673 – 683.
- [10] Marcelo H. Sedimentation engineering, Processes, measurements, modeling, and practice [M]. Reston, Virginia: ASCE Press, 2008: 21 – 146.
- [11] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 科学出版社, 2003: 1 – 50.
- [12] Wang Xianye. Experimental and numerical studies of open-channel turbulence flow over rough bed [D]. Hong Kong: City University of Hong Kong, 2010. [王宪业. 粗糙壁面条件下明渠湍流的实验研究与数值模拟 [D]. 香港: 香港城市大学, 2010.]
- [13] Song T. Velocity and turbulence distribution in non-uniform and unsteady open-channel flow [D]. Lausanne: EPFL, 1995.
- [14] Kironoto B A. Turbulence characteristics of uniform and non-uniform rough open-channel flow [D]. Lausanne: EPFL, 1993.
- [15] Bathurst J C, Li R, Simons D B. Resistance equation for large-scale roughness [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1981, 107(12): 1593 – 1613.

(编辑 张琼)