



大比降卵砾石河流防护结构的冲刷深度研究*

刘勇¹, 杨胜发², 张毅¹, 张帅帅¹

(1. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401174; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要: 大比降卵砾石河流河床形态及水流条件特殊, 治理难度相当大。当遇到较大的洪水时, 堤防工程、公路等临河设施常发生水毁, 而关于此类河流的研究成果较少。针对大比降卵砾石河流河床宽浅、滩槽不分、比降和流速大、枯水期水流分散易形成股流冲刷的特点, 布置了不同床沙组成、冲刷角度、河床比降及流量的概化模型试验。通过对81组室内试验资料进行单因素分析, 得知冲刷深度(H_p)与单宽流量(q)、河道比降(J)、冲刷角度(θ)成正比, 与河床质颗粒组成(D)成反比。采用量纲分析法和多元回归分析法得到了冲刷深度的计算表达式。

关键词: 大比降卵砾石河流; 冲刷深度; 河道治理

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0111-04

Scour depth of preventive configuration of gravel river with high gradient

LIU Yong¹, YANG Sheng-fa², ZHANG Yi¹, ZHANG Shuai-shuai¹

(1. Changjiang Chongqing Harbor and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China;

2. Dept. of River and Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: It is difficult to regulate the high-gradient gravel river due to the special bed form and flow condition. The facilities over the river such as levee engineering and bank protection project are often damaged at serious flood, but the research on it is less. The high-gradient gravel river is characterized by shallow water depth, indistinguishable shallow and channel, steep gradient, large flow velocity and plume easily formed when flow is dispersed in the dry season. According to the scour features, we design the generalized model test about different bed material gradation, different scour angle, different riverbed gradient and different discharge. Based on the single factor analysis, we find out main influential factors with 81 groups of experimental data that the scour depth (H_p) is proportional to the single discharge (q), the channel slope (J), and the scour angle (θ), and it is inversely proportional to the composition of bed material particles (D). By the dimensional analysis and multivariate regression analysis methods, we achieve the simple formulas about scour width and scour depth for the high-gradient gravel river.

Keywords: high-gradient gravel river; scour depth; river regulation

我国西部山区分布着众多的大比降卵砾石河流。这种河流具有河床宽浅(河床宽度一般为300 m以上,水深为3 m以下)、滩槽不分、流向不定、比降和流速大、洪峰历时短、河床覆盖层较厚、河流枯水和洪水流量相差悬殊(枯水流量一般为 $1 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$,特大洪水时超过 $1\ 200 \text{ m}^3/\text{s}$)、

平时水流多集中成股只有在大洪水才布满整个河床等特点。由于河床形态及水流条件的特殊,治理难度相当大。当遇到较大的洪水时,堤防工程、公路等临河设施常发生水毁。河道局部冲刷特性与一般的冲积性河流不同,需经过专门的研究才能确定。

收稿日期: 2014-09-19

*基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAB05B02)

作者简介: 刘勇(1984—),男,硕士,工程师,从事港口、海岸及近海工程设计与研究工作。

1 研究现状

19世纪末期以来,不少国家的学者对临河设施局部冲刷进行了大量的试验研究,获得较为丰富的研究成果^[1-18]。亚罗斯拉夫采夫通过模型试验获得了桥墩冲刷公式,马卡维耶夫建立了丁坝冲刷深度与河床质、冲刷角、流速之间的关系式,沈焕荣^[2]从下降水流的冲刷机理出发建立了丁坝局部冲刷深度的计算公式,杨胜发^[13]提出了股流冲刷的概念,在对新疆宽浅河段设置调制构造物时,总结出洪水对导流堤冲刷主要表现出3种形式:单股股流冲刷、多股股流联合冲刷、投影流量冲刷。GB 50286—1998《堤防工程设计规范》提出了水流斜冲防护岸坡产生的冲刷深度计算公式。

虽然临河设施局部冲刷研究成果较多,但是对于股流众多和河床宽浅、河道比降较大、床沙组成较粗、滩槽难分、小洪水时水流未布满河床的股流冲刷研究成果却较少。

2 试验概况

2.1 股流运动特性

大比降卵砾石河流滩槽不分,枯水期水流主要以股流形式存在^[11],水流往较低地方流动,全河床范围内出现多股水流,由于纵向和横向输沙不平衡,引起股流平面摆动(图1)。

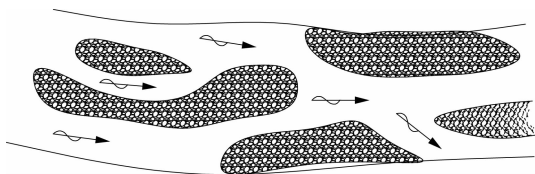


图1 大比降卵砾石河流股流形式

当来流超过股流消失流量后,全断面输沙,滩上泥沙会向槽内输移,槽内逐渐淤积,但是由于大比降卵砾石河流的洪峰持续时间很短,退水过程中淤积的泥沙来不及冲刷,易造成滩槽移位。

在退水过程中,开始仍全断面输沙,当流量小于股流消失流量后,又重新出现股流。由于泥沙颗粒分布、入流边界等均具有较强的随机性,在退水过程出现股流的位置和大小也有较强的随机性。

分析大比降卵砾石河流冲刷过程,流量很大

时,输沙全断面分布,流向与河道走向基本一致;来流较大但小于股流消失流量时,河床横断面仅部分过流,单宽流量大,冲刷角度大,流态紊乱,对河岸及临河建筑物淘刷严重。股流淘刷、切割原有滩面,河床局部地形在短时间内剧烈变化,使得河道主流线经常发生偏离或急剧转向,其中一些股流与岸线成很大角度,甚至直冲岸线,导致岸线崩塌。

2.2 模型设计

在进行股流冲刷试验前,布置了大比降卵砾石河流形成股流的试验(图2)。试验表明,当断面宽深比 $\eta (= \sqrt{B/h}) > 10$,则会形成股流。本试验床面采取平铺的形式,当断面宽深比较大时,断面输沙不均匀,能形成股流冲刷。



图2 大比降卵砾石河流股流形成试验

根据大比降卵砾石河流股流的特性,布置概化模型试验方案。模型长23 m、宽1 m,由定床调整段和动床段组成,定床段保证水流平顺,长6.5 m;动床段包括过渡段、冲刷试验段和出口段,其中过渡段长4 m,冲刷试验段长8 m,出口段长4.5 m(图3)。

流量测控系统布置在水槽的入口,由电磁流量计、电动阀、计算机组成。在小流量(50 L/s)时,流量由三角堰测定,流量误差1%;大流量(50~400 L/s)则采用巴歇尔槽测定,流量误差为2.5%。

为使概化水槽试验结果具有较好的精度,在试验开始前采用“五点法”在进口处对水流流速、水深进行测量,保证实测流量与电磁流量计控制的流量一致。

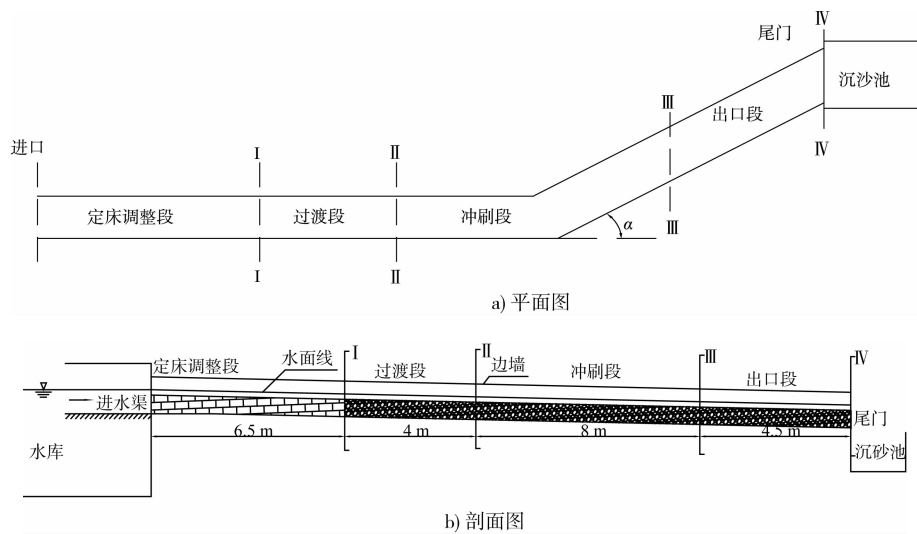


图 3 概化模型

2.3 试验参数控制

试验参数主要包括模型沙的选取、水流冲刷角度、河床比降及流量的控制。模型沙采用无黏性天然均匀沙, 不均匀系数小于 1.3, 平均中值粒径分别为 2、5、9 mm; 水流冲刷角 θ 分别为 45° 、 60° 、 90° ; 河床比降分别为 2‰、6‰、10‰; 流量按单宽流量 q 控制, 选取单宽流量分别为 0.03、0.045、0.06 m^2/s 进行试验。

通过观测, 宽深比 η 变化范围为 10.34 ~ 35.13, 能形成股流。

通过改变不同的参数, 使试验条件有多种组合, 在不同的条件下分别进行相应的冲刷试验。冲刷深度观测采用界面仪跟踪观测, 当冲刷深度保持 3 h 变化在 2 cm 以内时停止试验。

3 试验结果分析

根据实际调查的多条大比降卵砾石河流情况, 概化出了大比降卵砾石河流的一般特征, 包括河相特征和冲刷特征。在特定的条件下(河床质、来水来沙、冲刷角等)会发生最大冲刷, 这样的冲刷特征具有统计意义, 也适用于大比降卵砾石河流的冲刷计算。

对不同模型沙、不同冲刷角、不同比降、不同流量下大比降卵砾石河流进行股流冲刷试验, 发现影响因素较为广泛。通过对室内试验资料的单因素分析, 找出主要影响因素, 然后进行量纲

和多元逐步回归分析, 寻求大比降卵砾石河流股流的冲刷深度的计算关系式。

试验发现, 冲刷深度与单宽流量、河道比降、冲刷角度和河床质颗粒组成关系较为密切。一般, 冲刷深度与单宽流量、河道比降、冲刷角度成正比关系(图 4), 与河床质颗粒组成反比关系。

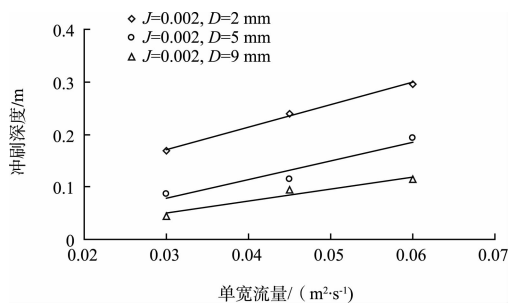


图 4 冲刷深度与单宽流量的关系 ($\theta = 90^\circ$)

利用因次分析原理对大比降卵砾石河流股流冲刷特性进行研究, 分析试验结果可知: 与股流冲刷深度相关的因素包括流量、河床比降、水流冲刷角以及床沙粒径等, 股流冲刷深度关系式可表示为:

$$H_p = F(q, J, D_{50}, \theta) \quad (1)$$

而根据量纲和谐的原理, 引入单宽流量无量纲数 q_* 和冲刷深度无量纲数 H_{p*} 。

单宽流量无量纲数:

$$q_* = \frac{q}{\sqrt{gD_{50}^3}} \quad (2)$$

式中： g 为重力加速度，一般取 9.8 m/s^2 ； q 为单宽流量（ m^2/s ）， $q = \text{流量 } Q/\text{水面宽度 } B$ 。

冲刷深度无量纲数：

$$H_{p*} = H_p/D_{50} \quad (3)$$

对于冲刷角度，可以引入三角函数，分析水流流向与岸坡之间的关系，两者之间的夹角应小于等于 90° ，当水流垂直岸坡时则冲刷最为严重，因此引入正弦函数（ $\sin\theta$ ）作为单因素变量。

由此，式(1)可表示为：

$$H_{p*} = A_0 q_*^{m_0} J^{y_0} (\sin\theta)^{n_0} \quad (4)$$

对试验结果进行多参数相关分析得出各待定参数为： $A_0 = 2.32$ ， $m_0 = 0.9$ ， $y_0 = 0.12$ ， $n_0 = 1.0$ 。式中： q 为单宽流量（ m^3/s ）； D_{50} 为河床中值粒径（ m ）； J 为河道比降； θ 为冲刷角度（ $^\circ$ ）。上式相关系数为 $R^2 = 0.94$ ，见图5。其中 $0.8 \leq B_p/B_c$ （计算值/实测值） ≤ 1.25 的数据占总数据的80%，可见，该式亦具有较高的计算精度。

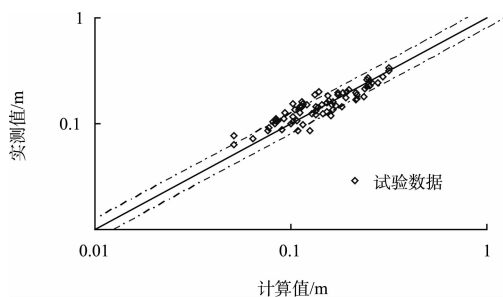


图5 大比降卵石河流冲刷深度试验分析结果

4 结论

1) 大比降卵石河流具有河床宽浅、滩槽不分、比降和流速大、枯水期水流分散易形成股流冲刷的特点。

2) 大比降卵石河流冲刷深度与单宽流量 q 、河道比降 J 、冲刷角度 θ 成正比关系，与河床质颗粒组成 D 成反比关系。

3) 采用多参数最小二乘法拟合得到大比降卵石河流冲刷深度的计算表达式(4)。

但是，本研究是在针对大比降卵石河流特定的河床边界条件情况下进行的，因而只适用于该种河流类似条件下的局部冲刷计算。

参考文献：

- [1] 黄志才, 吴国雄, 程尊兰. 丁坝局部冲刷深度的计算[J]. 水利与建筑工程学报, 2004(6): 13-17.
- [2] 沈焕荣, 陈其慧, 张云, 等. 丁坝局部冲刷深度计算问题探讨[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2001(3): 6-8.
- [3] 方达宪. 堤岸、路基与水流正交情况下冲刷试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 1993(3): 287-293.
- [4] Wang Chuan-yi, Cheng Jen-hao. Ring columns as pier scour countermeasures[J]. International Journal of Sediment Research, 2011, 26(3): 353-363.
- [5] 赵世强. 丁坝的冲刷机理和局部冲刷深度计算[J]. 重庆交通学院学报: 自然科学版, 1989(1): 13-21.
- [6] 林小平, 凌建明, 苏华才, 等. 弯道水流的数值模拟及沿河路基冲刷机理分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007(11): 1492-1496.
- [7] GB 50286—1998 堤防工程设计规范[S].
- [8] 李晓庆, 唐新军. 对《堤防工程设计规范》推荐冲刷深度公式探析[J]. 水资源与水工工程学报, 2006, 17(2): 50-52.
- [9] Hoffmans G J C M, Pilarczyk K W. Local scour downstream of hydraulic structures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(4): 326-346.
- [10] Ansari S A. Influence of cohesion on scour around bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Research, 2002, 40(6): 717-725.
- [11] 勃利兹尼亚克 E B. 河床演变[M]. 水利水电科学研究院, 译. 北京: 科学出版社, 1965.
- [12] 武汉水利电力学院. 河流泥沙工程学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [13] 杨胜发. 新疆宽浅河床、变迁性河流桥涵设计综合技术研究[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2005.
- [14] 杨斌, 杨胜发. 大比降卵石河床水流运动试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2005, 20(2): 207-213.
- [15] 杨胜发, 周华君, 胡江. 内流河宽浅变迁河段水沙运动规律研究[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006: 151-158.
- [16] 杨胜发, 刘勇. 奉节县石马河河道治理工程动床模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [17] 刘勇. 卵石河流稳定河宽研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- [18] 胡江. 新疆宽浅游荡型河段防护工程研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2004.

(本文编辑 武亚庆)