

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.03.009

非恒定流作用下丁坝坝体块石运动特点分析

喻涛^{1,2}, 王平义^{1,2}, 陈里³, 张秀芳³

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 通过水槽概化模型试验, 研究天然河流日均流量过程作用下, 丁坝冲刷及破坏机理及其周围床面变形过程, 模拟丁坝坝头及坝身的坍塌过程, 弄清丁坝坝头、坝身及冲刷坑内块石的运动特点并分析其形成原因, 结果表明坝体块石的运动与来流过程、坝体周围床面及冲刷坑内泥沙运动方式、坝体透水性等有关。

关键词: 非恒定流; 丁坝; 块石运动特点; 模型试验

中图分类号: U617; TV122

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)03-0040-05

Movement Characteristics of Spur Dike Stones under Unsteady Flow

YU Tao^{1,2}, WANG Ping-yi^{1,2}, CHEN Li³, ZHANG Xiu-fang³

(1. National Engineering Research Center for Inland-river Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Water Conservancy and Water Transportation Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Through a flume model test and under the action of the average daily flow process of natural river, the scouring and damage mechanism of spur dike and its bed-surface deformation process were researched, and the collapse processes of the head and dam body of spur dike were simulated. Then the motion characteristics of spur dike stones were figured out, and their reasons were analyzed. The result indicates that the movement of spur dike stones depends on the flow process, the movement way of the sediment around spur dike, and the dam body's permeability of spur dike.

Keywords: unsteady flow; spur dike; movement characteristics of block stone; model test

山区河流散抛石坝水毁机理一直是航道整治工程科研、设计、施工及管理部门关心的问题, 国内外学者对此也进行了大量的研究^[1-5]。张玮等(2003)^[6]根据块石粒径与起动流速的关系, 指出块石稳定重量与起动流速的高次方程成正比, 流速增长 50% 可能导致块石稳定重量接近 40 倍的变化。陈小莉等(2007)^[7]分析了竖轴旋涡对块石颗粒的作用, 并求解了在旋涡吸力及绕流升力作用下颗粒的瞬时起动流速; 计算表明瞬时起动流速比时均情况下起动流速要小的多, 解释了时均情况下难以起动的块体在旋涡瞬时吸力下能被卷走的原因。Parola(1994)^[8]在实验中观察到床面块石会随着尾流旋涡

螺旋上升, 偶尔还会被垂直搬运到自由水面附近。缙元有^[9]通过对河道整治工程根石受力状态的分析, 建立了根石走失的物理模型, 从而导出了天然河道根石走失的力学计算公式, 其计算结果与黄河河道整治工程丁坝根石走失计算结果和实测结果基本相同。毛佩郁等(2000)^[10]将局部冲刷计算式应用到丁坝头和堵口截流冲坑深度的计算, 并引用绕板桩渗流场势流理论计算水流绕坝头的单宽流量(或流速), 进而给出了进占堵口或丁坝坝头护脚抛石的稳定性计算式。苗长运(2001)等^[11]在分析黄河下游丁坝根石失稳条件及走失原因的基础上, 提出了防止根石走失和加固的措施。

收稿日期: 2014-02-21

修稿日期: 2014-04-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51079165); 教育部博士点基金(200806180001); 西部交通建设科技项目(2009328814012)

作者简介: 喻涛(1982—), 男, 河南罗山人, 博士, 实验师, 主要从事航道整治理论与技术方面的工作。

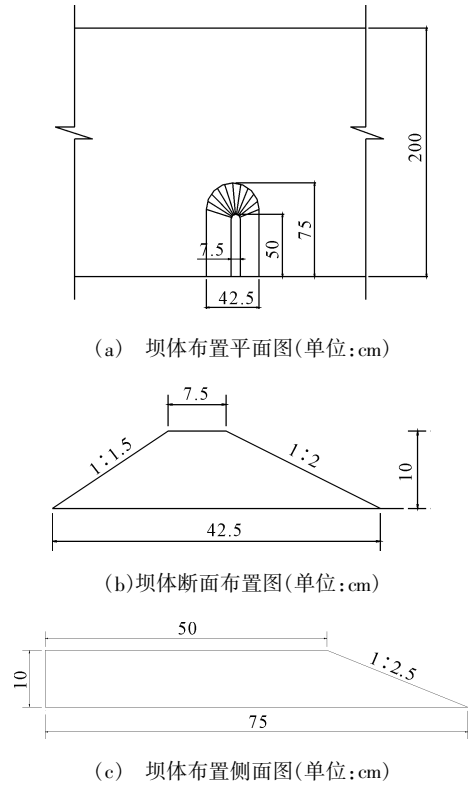
分析目前研究现状,发现对于块石的受力分析及失稳条件研究较多,不同的学者从不同角度给出了块石稳定性计算指标或公式,这些研究多在恒定流作用下分析一定外部条件(从时间上可认为是某一时刻)对块石的作用,没有研究其在非恒定流作用下其失稳运动的过程及运动规律。要弄清丁坝水毁机理,应从组成坝体的块石运动方式及规律入手,由于天然河流水深及坝体等尺度较大,不便于观察坝体块石运动的形式,因此,本文在模拟天然河流来水过程的基础上,观察丁坝坝体块石运动及坝体塌陷的特点,并分析其原因。

1 模型设计及试验方案

我国山区通航河流丁坝常用抛石结构,其平面布置和结构形式均按照《航道整治工程技术规范》中的要求进行设计和施工。由于天然河道水面较宽而试验水槽较窄,故模型丁坝设计主要依据丁坝水毁相当严重的长江上游航道常见的丁坝结构形式进行局部正态概化设计,模型比尺为 1:40。长江上游原型丁坝横断面为梯形断面,一般设计最低水位至坝顶为 2 m,设计最低水位距江床地面平均 2 m,原型丁坝的坝高平均为 4 m,顶宽为 3 m,迎水坡坡度为 1:1.5,背水坡坡度为 1:2,向河坡为 1:2.5,设计模型丁坝见图 1。

试验是在长 30 m、宽 2 m、高 1 m 的矩形玻璃水槽中进行的。水槽中部铺设了 8.0 m 长的动床段,丁坝周围区域铺沙高度 0.22 m,其它区域铺沙高度 0.12 m,模型布置见图 3。根据前期工作经验,选用天然石英砂作为试验用模型沙能够较好的模拟出了丁坝及其周围床面的变形。模型沙中值粒径为 1.0

mm(见图 2),泥沙级配曲线呈“S”型。



(a) 坝体布置平面图(单位:cm)

(b) 坝体断面布置图(单位:cm)

(c) 坝体布置侧面图(单位:cm)

图 1 模型丁坝坝体布置图

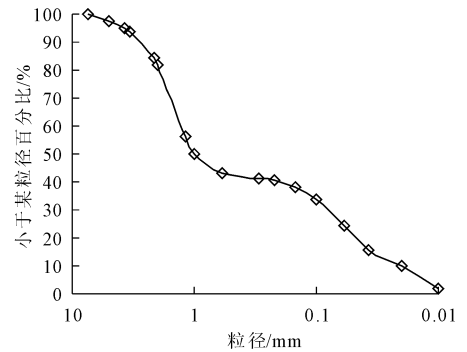


图 2 模型沙级配曲线

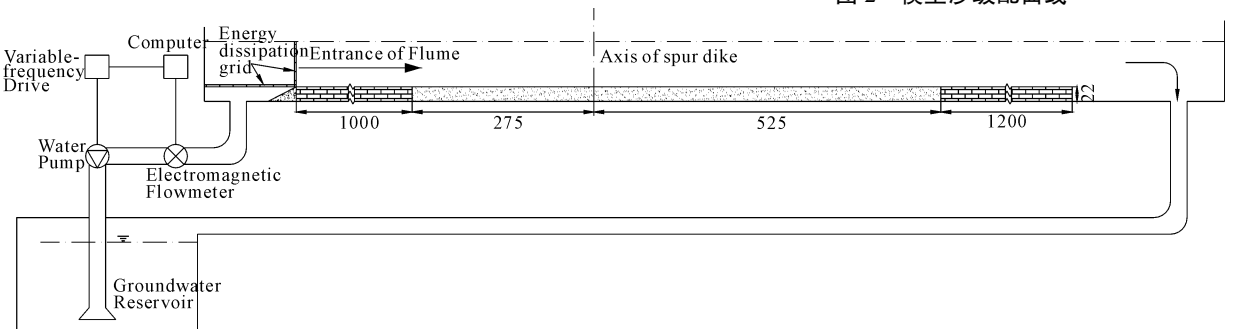


图 3 试验模型布置图(单位:cm)

原型坝体块石粒径根据《航道整治工程技术规范》^[12]10.10.3.1 公式计算,即

$$d = 0.04V^2 \quad (1)$$

式中: d 为块石等容粒径(m); V 为建筑物处的表面

流速(m/s)。

模型坝体块石仍采用天然材料,但须保证与原型块石起动相似,根据流速比尺,确定出模型坝体块石粒径起动流速后,由上式计算出模型坝体的块石

粒径为 0.6 cm ~ 1.2 cm。

根据实际观察,天然河流中水流刚好漫坝至坝顶水深 2 m ~ 4 m 时,流速对坝体的作用力度较大。试验中丁坝上游附近模型水深为 10 cm(水流刚好漫坝)时,行近断面垂线平均流速约为 0.34 m/s,中值粒径为 1.0 mm 天然石英砂起动流速为 0.29 m/s,试验中水深大部分时间内均大于 10 cm,对于本次非恒定流试验过程水深越大流速越大,因此,试验水流条件能够保证泥沙起动,选沙基本合理。

为了真实的模拟丁坝在水流作用下其周围水沙运动及坝体水毁现象,通过分析寸滩水文站 1954 年至 2008 年日平均流量过程,在最大洪峰流量及洪水

作用周期联合概率分布的基础上,应用自回归马尔可夫模型(AR 模型)对天然河流日均流量过程这一非平稳随机过程进行模拟^[13],模拟过程见图 4,图中流量过程括号内数据表示参数出现的频率,如 50 a 一遇(Q30T7.5)表示最大洪峰流量和洪水有效周期发生的频率分别为 30% 和 7.5% 遭遇时洪水重现期为 50 a 一遇。进口流量由清华大学和北京尚水信息技术公司联合研制的 DCMS 流量控制系统控制,模型冲於地形采用北京尚水信息有限公司研制的超声三维地形测量系统(TTMS)完成,该系统采用的是非接触无损测量方式,可以长时间实时跟踪床面变化,测量误差为 ± 1 mm。

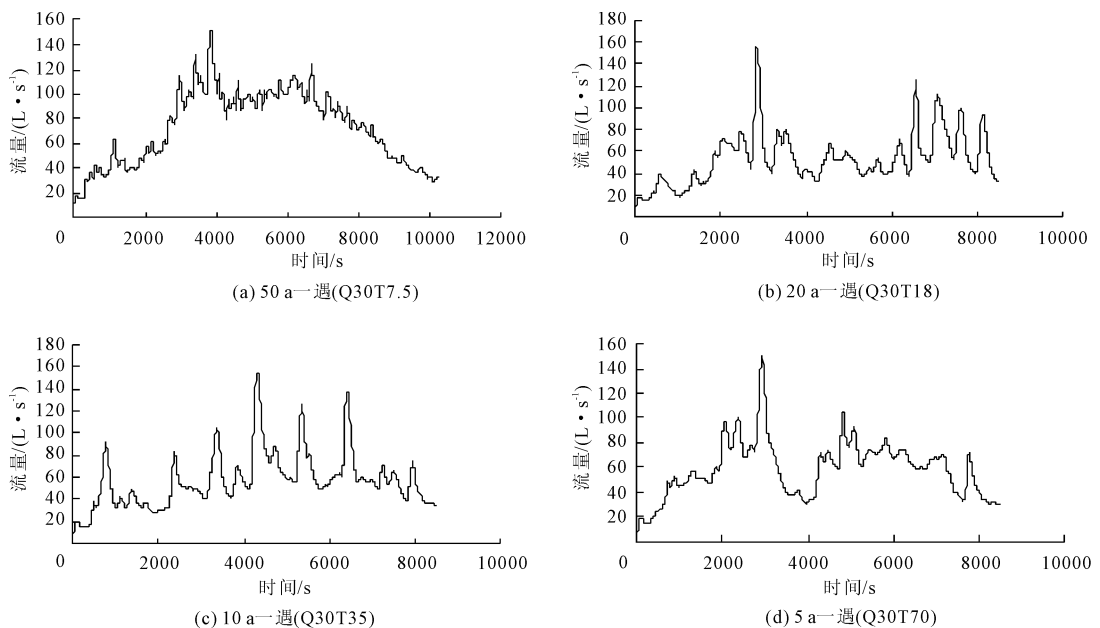


图 4 动床试验流量过程

通过施放图 4 的不同洪水重现期的流量过程,观察丁坝及周围床面变形过程,发现不同洪水重现期下水毁过程基本一致,只是不同过程下丁坝及其周围冲刷坑冲刷程度不同,下文就其共性现象作具体分析。

2 非恒定流作用下丁坝冲刷机理

影响丁坝水毁的因素复杂,坝头附近的下潜水流和绕过坝头的水流相互作用所生成的漩涡系(卡门涡)是形成丁坝冲刷坑的主要因素^[14],非恒定流作用下坝头水毁是周围河床变形与汛期流量增大的适应性反应。当流量较小时,丁坝处于非淹没状态,由于丁坝阻水使得坝头水流收缩,坝头垂向向下流速较大,坝头块石开始滑落,当床面流速大于坝头床

沙起动流速时,在坝头前沿形成冲刷坑;随着流量增大,冲刷坑不断扩展,导致坝头前沿基础逐渐被掏刷,坝头块石大量失稳滑落,在汛期坝头出现突发性坍塌水毁;同时,坝头螺旋流、绕坝水流和主流的综合作用,使坝头松动的块石直接被水流带走,形成坝头溃缺;当洪峰前后,水流越坝,一方面,由于坝头流速增大,冲刷坑扩展迅速,导致坝头基础掏空,坝头出现不均匀沉降;另一方面,坝头螺旋流、绕坝水流和主流的交汇处随着水位上涨沿坝面上移,坝头坝面正好处于该交汇处的下方,坝头涡体随着下潜水流传递到坝头与坝面,然后破碎、撞击、分离形成很大的能量,脉动流速很大,再加上流速大的绕坝水流和主流的综合作用,使坝头坝面块石容易瞬时松动,形成突发性坍塌水毁。

3 丁坝坝体块石运动特点

3.1 坝头块石运动特点

坝头块石从迎水面靠近河床表面处开始发生运动,这是由于底部水流遇到丁坝发生绕射,即沿着丁坝折向丁坝所在一侧对岸,在丁坝坝头处其所受阻力急剧减小,水流动能增大,当流速达到某一临界值时,向河坡靠上游侧块石就开始向下游运动(图5),起先一段距离受到丁坝挑流的影响,运动轨迹指向对岸一侧,越过坝轴线后,由于坝头附近水流紊动剧烈,流速大小近似呈周期性变化,致使一部分块石在越过水流分离区受到主流区较大的指向丁坝一侧作用力后,运动轨迹又指向丁坝一侧,并逐渐进入冲刷坑内,而另一部分块石由于越过水流分离区时受到指向丁坝一侧作用力较小,穿过分离区进入主流区,并随着主流区泥沙颗粒一起向下游行进。



图5 向河坡靠上游侧块石首先起动

随着洪水持续或间断冲刷的不断进行,坝头靠近床面的块石不断地被水流带向下游,达到一定程度之后,由于底部基础不稳,导致坡面上的块石不断滚落至坡脚,同时坡面上的一些块石受到绕过坝头下潜水流的作用也被带至坡脚或下游冲刷坑,造成坝头大面积水毁,这一过程中迎水面块石水毁程度较下游侧严重;当最大洪峰过坝时,坝头水毁迅速,短时间内坝头基本全部水毁(图6);最大洪峰过后,随着冲刷过程的发展,坝头块石有少量会向下游运动,但总体基本趋于稳定。

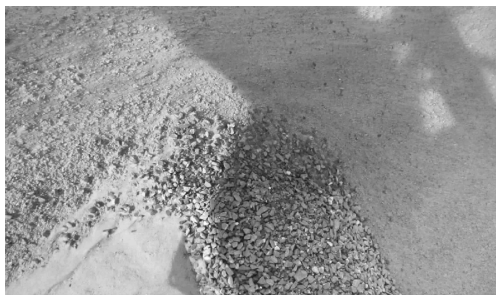


图6 坝头基本全部水毁

3.2 坝身块石运动特点

丁坝处于非淹没状态时,坝身块石基本处于静止状态。水流翻坝时,坝顶及背水坡块石滑落较多,这是由于水流流速大于坝面某些块石的起动流速,另一方面由于坝体由散抛块石组成,表面局部区域凹凸不平,造成在局部区域所受阻力较大,形成竖轴漩涡,块石在竖轴漩涡的作用下更容易起动^[15],影响坝面块石的稳定;背水坡块石受到洪水期下潜水流的作用稳定性下降,也易发生滚落或坍塌现象,这是由于洪水来之前,丁坝前后具有一定的水位差,当洪水来之后坝前水位迅速抬高,而此时坝后水位由于丁坝的遮挡作用,水位增长速率明显小于坝前,造成短时间内丁坝上下游水位落差较大(图7),此时对背水坡及坝下游床面的冲刷力度也最强,坝顶靠下游一侧块石大面积滑动至背水坡(图8)。



图7 洪水陡涨过程中丁坝上下游水位落差



图8 坝顶块石滑落至背水坡

随着冲刷强度的增大和冲刷历时的延长,坝顶及背水坡块石继续呈滑动、滚落方式运动,经过多次的洪水涨落过程后,坝顶块石被冲落较多,坝身横断面由原来的梯形断面逐渐被洪水冲蚀成弧线形断面,坝高减小但坝体宽度增大,且由于散抛石坝具有一定的透水性,局部区域透水率较大,水流在坝体内部紊动较剧烈,在翻坝下潜水流和内部紊动水流的综合作用下,坝体内部块石排列组合方式发生变化,造成坝顶局部区域凹陷和坍塌现象,形成坝顶冲刷坑。受坝后冲刷坑剧烈涡流的作用,背水坡坡脚在

遭受一定程度淘刷后,背水坡的坡面及坡脚块石在自身重力的作用下,开始向下滑落。

4 冲刷坑内块石运动特点

坝体块石脱离丁坝之后,绝大部分块石受坝头竖轴漩涡的作用,会逐渐运动到坝后冲刷坑边缘,这其中一部分块石沿着冲刷坑上游边坡滚入坑底,一部分块石在运动到一定阶段后,外部荷载不足以使其继续向冲刷坑内滑落时就停留在冲刷坑边坡上,在下次洪水到来时,上游补给过来的块石也是一部分运移至冲刷坑底部,另一部分停滞于边坡上,不同的是上一次洪水作用后停留在边坡上的块石,在下次洪水作用时其中一部分也会继续向下游冲刷坑内行进。

散落块石在运移至冲刷坑底部时,由于坝后冲刷坑最深处也即卡门涡中心所在位置,受到卡门涡的作用,漩涡中心的负压强很大,致使冲刷坑内块石一部分可以被带起在水流的作用下,沿着冲刷坑下游边坡攀爬至冲刷坑下游淤积体,此处与卡门涡中心已有一定距离,受漩涡作用大大减弱,一部分大粒径块石就停留在此处,另一部分小粒径块石在水流的带动下继续向下游行进直至滑落到淤积体边缘,受到淤积体的遮蔽作用,这部分小粒径块石也停止运动并逐渐被上游输送过来的泥沙颗粒所包围或淹没;部分停留在冲刷坑内的块石,其边缘泥沙颗粒在漩涡作用下不断被带起并冲至下游形成淤积体,造成其在自身重力作用下逐渐下沉并被冲刷坑内泥沙包围或覆盖。

5 结论

(1) 非恒定流作用下丁坝处于非淹没状态,坝头垂向向下流速较大,坝头块石开始滑落,坝头前沿形成冲刷坑;随着流量增大,冲刷坑不断扩展,导致坝头前沿基础逐渐被掏刷,坝头块石大量失稳滑落,在坝头螺旋流、绕坝水流和主流的综合作用下,洪峰来临前后形成突发性坍塌水毁。

(2) 坝头块石从迎水面靠近河床表面处开始发生运动,随着冲刷的不断进行,底部基础不稳导致坡面上的块石不断滚落至坡脚造成坝头大面积水毁,最大洪峰过坝时,短时间内坝头基本全部水毁。

(3) 水流由未翻坝至翻坝时,坝顶靠下游一侧块石大面积滑动至背水坡,局部透水性较大的区域,在翻坝下潜水流和内部紊动水流的综合作用下,造成坝顶局部区域凹陷和坍塌现象,形成坝顶冲刷坑。

(4) 散落块石在运移至冲刷坑底部时,一部分大粒径块石沿着冲刷坑下游边坡攀爬至冲刷坑下游淤积体并停留在此处,小粒径块石在水流的带动下继续向下游行进直至滑落到淤积体边缘,部分停留在冲刷坑内的块石,在漩涡及自身重力作用下逐渐下沉并被包围或覆盖。

参考文献:

- [1] 潘庆燊,余文畴.国外丁坝研究综述[J].人民长江,1979,(3):51-61.
- [2] 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,2004,2(2):13-15.
- [3] 王平义,李晶,刘怀汉.长江上游泸州段航道整治建筑物水毁统计分析[R].重庆:重庆交通大学,2009:3-10.
- [4] 高桂景.丁坝水力特性及冲刷机理研究[D].重庆:重庆交通大学,2006:82-89.
- [5] Ettema R, Muste M. Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flatbed channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,130(7):635-646.
- [6] 张玮,瞿凌锋,徐金环.山区河流散抛石坝水毁原因分析[J].水运工程,2003,(4):10-12.
- [7] 陈小莉,马吉明.竖轴旋涡对丁坝坝头块石颗粒起动的的影响[J].水力发电学报,2007,26(5):97-101.
- [8] Parola A C. Stability of riprap at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993,119(10):1080-1093.
- [9] 续元有.河道整治工程根石走失的力学分析研究[J].人民黄河,2000,22(4):4-5.
- [10] 毛佩郁,段祥宝.丁坝头冲深和堵口抛石大小的计算[J].水利水运工程学报,2001,(2):46-50.
- [11] 苗长运,郭西方,齐洪海.黄河河道整治工程根石走失及加固研究[J].人民黄河,2004,26(2):25-26.
- [12] 长江航道局.JTJ312-2003.航道整治工程技术规范[S].北京:人民交通出版社,2003:61.
- [13] 喻涛.非恒定流条件下丁坝水力特性及冲刷机理研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [14] 李洪.丁坝水力学特性研究[D].成都:四川大学,2003.
- [15] 陈小莉,马吉明.受漩涡作用的水下块石的起动流速[J].清华大学学报:自然科学版,2005,45(3):315-318.