

文章编号:1001-4179(2012)09-0085-04

# 川江航道整治建筑物损毁原因及维修对策研究

张文江, 曾 涛, 马 李 伟

(长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

**摘要:**川江航道属典型的山区河流航道,水流湍急,流态紊乱,航道整治建筑物水毁现象比较常见。分析了整治建筑物损毁的两个主要原因:筑坝块石直接起动损毁和坝体外侧冲刷坑崩塌造成损毁,并且揭示了造成坝体损毁的内在因素。结合近年来川江航道坝体维修经验,对维修效果较好的混凝土坝面、扭王字块和钢丝石笼等结构进行了总结,分析其应用效果和存在的问题,为今后类似坝体的维修和设计提供参考。

**关键词:**航道整治; 坝体损毁; 坝体结构; 川江航道

中图分类号: TV698 文献标志码: A

## 1 研究背景

川江航道主要是指长江上游宜宾至宜昌河段,全长1 045 km,属大型山区河流航道。目前,川江共建成并仍在发挥作用的航道整治建筑物共104座,主要包括丁坝、顺坝、锁坝和潜坝等类型。坝体建成以后,由于受到水流顶冲、淘刷,河床演变,推移质撞击、磨蚀以及其他外界因素的作用,易发生损坏。2006~2012年,长江上游共计对74座·次坝体进行了维修加固,其中坝体重复维修次数多于1次的有15座。根据损毁维修坝体观测资料,大部分的坝体损坏都是由于水流因素和河床变形作用。早年的维修方式主要是对损坏坝体按照原设计方案进行简单修复,在近年来的维修工作中,不断探索增强坝体稳定性的加固方式,针对坝体损毁情况,加强坝体结构薄弱部位,采用了一批新结构和新材料,积累了许多宝贵的综合整治经验。

## 2 研究现状

目前,针对坝体损毁问题,国内外均开展了相关研究工作,其中唐银安和吴安江就岷江、大渡河、嘉陵江上坝体的损毁现象、损毁原因及防治措施定性地进行了论述<sup>[1]</sup>。王平义等从多相作用耦合角度对坝体损毁机理进行分析研究,取得了一定的理论成果。建立模糊综合评定模型,并进行了模型丁坝实例计算,为更

好地研究坝体水毁问题提供了新的理论方法<sup>[2-3]</sup>。余俊华对坝体的各种损毁形式做了总结<sup>[4]</sup>,朱俊凤在长江上游宜宾至重庆河段整治建筑物新结构研究与应用中提出了4种实验性的坝体结构,取得了较好的效果<sup>[5]</sup>。目前,大部分坝体的维修措施均是按照原设计方案恢复维修,重复维修现象较多。本文主要分析水流因素和河床变形在川江坝体损毁中的作用特性,分析川江坝体的损毁原因和规律,总结针对性的维修方案,并简述近年川江坝体维修中积累的经验教训,旨在为今后坝体物维修提供技术支撑和参考。

## 3 损毁原因分析

### 3.1 单个筑坝块石剥落引起坝体损毁

单个筑坝块石的剥落问题实际就是筑坝表层块石的起动问题。目前,国内外对水中块石的稳定问题的研究成果很多,本文采用目前在工程中较为认可的以起动流速为变量的块石稳定性计算公式进行分析。考虑川江坝体损毁时水位低,流速大等特点,本研究将参考忽略水深影响的伊兹巴什(Isbash)公式<sup>[6]</sup>,结合川江特点进行改进。

$$V_c = K \sqrt{2g \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \left(\frac{1}{\gamma_s}\right)^{\frac{1}{m}} W^{\frac{1}{m}}} \quad (1)$$
$$W = K^{-m} \gamma_s \left(g \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)^{-\frac{m}{2}} V_c^m$$

收稿日期:2012-03-06

作者简介:张文江,男,工程师,硕士,主要从事港口与航道工程科研及设计工作。E-mail: xiong-7@qq.com

式中,  $V_c$  为块石的起动流速;  $K$  为系数, 块石滑动取 0.86, 块石滚动取 1.2;  $g$  为重力加速度;  $\gamma_s$  为块石容重, 对于花岗岩取  $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $\gamma$  为水的容重;  $D$  为块石粒径;  $m$  为修正系数。

参考国内针对山区河流筑坝块石起动试验资料, 对伊兹巴什公式进行修正:

$$V_c = K \sqrt{2g \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} D^{\frac{1}{m}}} \quad (2)$$

由于块石  $W$  满足下式:

$$W = A\gamma_s D^3 \quad (3)$$

式中,  $A$  为体积系数。将式(3)代入式(2)中, 可以得到块石重量  $W$  与块石起动流速之间的关系。

$$W = K^{-m} \gamma_s \left( g \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{-\frac{m}{2}} V_c^m \quad (4)$$

或

$$V_c = K \sqrt{2g \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \left( \frac{1}{\gamma_s} \right)^{\frac{1}{m}} W^{\frac{1}{m}}} \quad (5)$$

式中,  $K$  为综合系数;  $m = 6$ 。

根据式(4)可以看出,  $W$  正比于起动流速的 6 次方, 即流速的微小变化对块石稳定重量影响很大。

从式(5)中可以看出, 起动流速  $V_c$  正比于  $W$  的  $\frac{1}{6}$  次方。当流速达到一定量值后, 再单纯依靠增加块石重量来提高山区河流筑坝块石的稳定性是不经济的。

从图 1 可以看出, 当筑坝块石重量超过 300 kg 时, 重量的增加对起动流速的影响明显减小。单纯的考虑增加筑坝块石重量来解决稳定性问题是不可取的。这也正解释了为什么早年修筑的抛石坝会经常损毁。因此, 在坝体维修过程中, 要加强坝体表面筑坝材料的结构强度, 减小坝体再次损毁的概率。

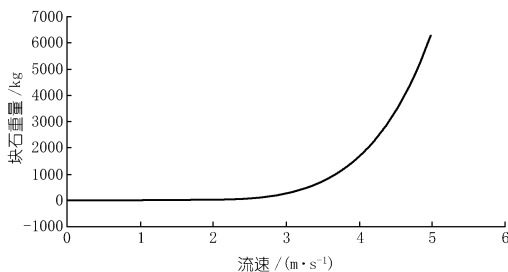


图 1 块石重量与起动流速关系

根据调查资料, 川江筑坝滩险一般流速在 2~3 m/s, 汛期局部滩险流速可达 4 m/s 以上, 按图 1 中要求, 补坝块石理论重量超过 1 000 kg, 理论粒径达到 6 m, 并且这样的块石在开采、运输和抛投施工上也存在一定的困难。

### 3.2 坝体外侧冲刷坑引起坝体损毁

坝体外侧冲刷坑一般以背水坡坝根处和坝头外侧

最为常见。针对坝体外侧冲刷坑形成的原因, 韩玉芳通过研究丁坝周围的水流结构特点, 结合相关试验, 详细的分析了丁坝周围的冲刷坑形成过程<sup>[7]</sup>。叶桢通过三维数值模拟的方式从理论角度揭示了局部冲刷的动力学过程<sup>[8]</sup>。川江筑坝基础河床质一般均为砂卵石, 但由于流速大、水流急, 筑坝后改变局部河势条件, 坝体周围河床冲刷十分常见。

目前, 也有学者提出了一些丁坝冲刷计算的理论公式, 但其精确性目前尚未通过精确验证。本次研究主要采用《航道整治工程技术规范》中推荐的公式进行计算, 并与川江坝体维修中实测的冲刷坑深度进行比较。

规范推荐的计算公式主要增加考虑了非黏性土的冲刷流速  $V_c$  和泥沙颗粒沉降速度  $w$ , 推导出来的半经验公式如下:

$$h_p = \left( \frac{1.84h}{0.5L + h} + 0.0207 \frac{V - V_c}{w} \right) L K_m K_\alpha \quad (6)$$

$$V'_c = 3.6(hd)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

$$K_\alpha = \left( \frac{\alpha}{90} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式中,  $h_p$  为计算水面线冲刷坑的最大水深, m;  $h$  为计算水面下冲刷前坝头处的水深, m;  $L$  为丁坝在过水断面上的有效投影长度, m;  $V$  为丁坝头部水流的垂线平均流速, m/s;  $d$  为泥沙中值粒径, mm;  $V'_c$  为非黏性土的冲刷流速, m/s;  $w$  为泥沙颗粒沉降速度, cm/s, 与  $d$  的关系见表 1;  $K_m$  为与丁坝头部向河坡边坡有关的系数, 按表 2 取用;  $K_\alpha$  为与丁坝轴线和流向之间夹角有关的系数;  $\alpha$  为水流轴线与丁坝轴线的夹角, 当丁坝上挑 ( $\alpha > 90^\circ$ ) 时, 为上挑丁坝。

表 1  $d$  与  $w$  关系

$d /$ mm	$w /$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$d /$ mm	$w /$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$d /$ mm	$w /$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
0.02	0.02	7.0	36	50.0	84
0.1	0.51	8.0	38	60.0	90
0.5	5.1	9.0	40	80.0	100
1.0	10.7	10.0	43	90.0	105
3.0	23	15.0	51	100.0	110
5.0	30	20.0	59	150.0	135
6.0	33	30.0	69	200.0	153

表 2  $m$  与  $K_m$  关系

$m$	$K_m$	$m$	$K_m$	$m$	$K_m$
1.0	0.71	2.0	0.44	3.0	0.32
1.5	0.55	2.5	0.37	3.5	0.28

将式(7)、(8)代入式(6), 可以得到两个公式中的冲刷深度与流速的关系:

$$h_p = \left( \frac{1.84h}{0.5L + h} + 0.0207 \frac{V - 3.6(hd)^{\frac{1}{4}}}{w} \right) LK_m \left( \frac{\alpha}{90} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

从公式(9)的形式上可以看出,冲刷深度与流速的一次方成正比。结合川江维修坝体测量资料,根据以上公式分别计算石硼秤杆碛丁坝和生板堆丁坝冲刷坑深度,并与实际测量资料对比。当流速值介于2~5 m/s时,石硼秤杆碛丁坝冲刷深7 m左右,生板堆丁坝冲刷深度6 m左右。根据秤杆碛丁坝2009年测图和生板堆丁坝2006年测图资料,两坝冲刷坑深度分别为6.6 m和6.1 m。实测冲刷数据与冲刷坑计算深度基本相当。

## 4 新结构和新材料应用

### 4.1 维修思路

根据近年维修资料,坝体损毁主要集中在坡面块石剥落造成坝体连锁破坏和坝体附近冲刷坑引起坝体失稳损毁两种情况。

对于坡面块石剥离破坏的情况,根据对其损毁原因的分析,简单增加补坝块石重量是不科学的,应该增加对筑坝新材料新结构的研究,增加筑坝单元之间的物理链接、咬合力或者在坝体表层覆盖柔性材料来增强坝体稳定性。

对于因坝体附近冲刷坑引起坝体破坏的,应该从优化坝体平面布置、增加护底、添加镇脚等方式来增加坝体稳定性。

### 4.2 维修方法

#### 4.2.1 坝面维修

坝面损毁在川江各类坝体中都是比较常见的,通过对川江维修和设计中常见的坝面结构形式稳定性进行比较,表明插筋混凝土坝面在水流湍急的川江河流上抗冲耐磨效果显著。但由于其成本较高,目前仅限应用于坝体小范围易损毁坝面的维修工程。

#### 4.2.2 坝体坡面维修

对于坡面损坏的坝体进行维修时,主要的加固方式为增大坡面筑坝材料的稳定性和联接力,如在坝体坡面上增加护面,或使用稳定性较好的扭王字块和钢丝石笼修复坝体损毁部位。

(1) 扭王字块结构。一般应用在防波堤、护岸、拦沙堤、导流堤等水工工程的护面结构上,其主要功能是护面和消浪。近年在航道工程中也有使用,主要应用在坝体护面和防冲护底上<sup>[9]</sup>。结构如图2所示。

川江风簸碛坝体采用了扭王字块护面结构,根据

后期运行观测结果,坝体整体状况良好,未出现明显的损坏。扭王字块利用其特有的异形结构,增加的块体与块体之间的咬合力,当水流冲击或推移质撞击局部块体时,整个结构通过咬合作用来分担外力,使坝体整体稳定性大大提高。

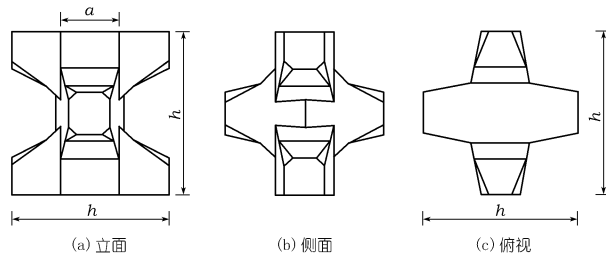


图2 扭王字块结构

(2) 钢丝石笼结构。钢丝石笼结构主要是为了解决单个块体重量过小,不能满足局部流速过大对块石粒径的要求而设计出的一种新型结构,通常应用于坝体受水流顶冲激烈部位,如坝头、坝根、背水坡等。钢丝石笼具有变形适应能力强,施工速度快,材料要求低,不宜坍塌滑落等特点<sup>[10]</sup>。其结构如图3所示。

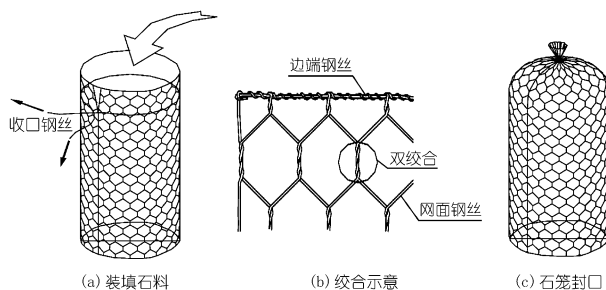


图3 钢丝石笼结构

钢丝石笼在川江坝体维修中应用较多,从其使用效果来看,石笼体较大不易被水流冲走,且钢丝石笼本身均有一定的变形能力,对地形适应能力强,着力范围大,稳定性较好。

#### 4.2.3 坝体外侧冲刷坑维修

近年来,针对坝体外侧冲刷坑引起坝体损坏所采用的主要维修方式有:回填冲刷坑、坝体坡脚设置镇脚体、采用混凝土坝根和铰链排护底等方式。在早期坝体维修工程中,一般是利用与筑坝材料类似或者稍大的块石回填。维修后通常在一定时间内能维持坝体的稳定与安全,但在水流的持续作用下,冲刷坑一般会再次出现影响坝体的稳定。

在坝体边坡外侧设置镇脚体是坝体边坡加固的有效措施之一,目前采用较多。根据以往的维修经验,钢丝石笼镇脚体和扭王字块镇脚体,镇脚效果明显好于块石镇脚体,但对于部分坝体,块石镇脚体足以防止由

冲刷坑等因素引起的坝体边坡损坏。采用何种结构的镇脚体,应根据坝体外侧边坡冲刷强度和边坡材料稳定特性来确定。

对于坝根绕流强烈,翻坝水冲刷严重的坝体,坝根背水坡易形成冲刷坑,威胁坝体稳定,除了可以对坝根采用护面和镇脚外,还可以通过对坝根易损坏部位采用混凝土加固并与护岸相接的方式来提高坝根稳定性,从川江已维修坝体的运行情况来看,混凝土坝根运行保存良好。

护底结构多见于长江中下游航道整治工程,长江上游金钟碛上丁坝进行铰链排护底试验<sup>[4]</sup>,结构如图4所示。从工程实施后运行情况来看,经过一个洪水期后,排体损毁比较严重,主要是川江水流流速大,推移质撞击严重,引起排体破坏。从试验情况来看,目前几种常见铰链排结构在结构强度方面存在一定的弊端,不适合在川江大规模推广使用。

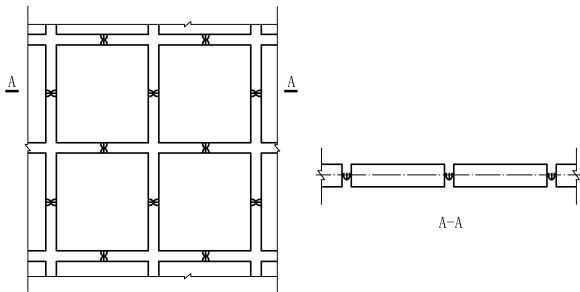


图4 铰链排体结构示意图

### 4.3 经验和教训

结合近年川江坝体维修设计及维护观测资料,钢筋混凝土坝面、扭王字块、钢丝石笼等新型结构在坝体维修中维修效果良好,由于铰链排护底结构难以适应川江流急石撞的水沙环境,还有待进一步对其结构形式进行研究。扭王字块结构脱模困难易损坏,在运输和施工过程中吊装容易引起边棱破坏,连接钢筋易腐

蚀,这些问题都会影响其结构强度和整体稳定性。钢丝石笼在添装、抛投过程中会造成部分石块破碎,影响填充质量,投入使用后钢丝石笼易钩挂漂浮物,影响江河景观等。

## 5 结语

川江坝体的损毁与维修课题涉及内容十分复杂,目前对损毁原因分析、维修标准确定等的认识还有待深入。在今后的川江坝体维修、设计中,应积极总结经验教训,推广维修效果较好的新型结构和材料,并探索解决目前新型结构和材料存在的各种弊病,尝试更多的新结构和新型材料,如采用柔性耐冲击材料构成铰链排体等,减少维修次数,降低坝体维修成本,推进航道维护事业的技术进步。

### 参考文献:

- [1] 唐银安,吴安江.山区冲积性河流整治建筑物水毁原因及防治初探[J].水运工程,1997,(4):37-40.
- [2] 王平义,荣学文,程昌华,等.山区河流航道整治建筑物遭受异相耦合破坏作用的特征及仿真探讨[J].重庆交通学院学报,2001,(增1):109-111.
- [3] 王平义,张继生,程昌华.航道整治建筑物安全稳定性的模糊综合评定[J].水动力学研究与进展(A辑),2004,(3):383-388.
- [4] 余俊华.川江航道整治建筑物新结构研究[D].重庆:重庆交通大学,2006.
- [5] 朱俊凤.长江上游宜宾至重庆河段整治建筑物新结构研究与应用[J].水道港口,2010,31(5):464-467.
- [6] 中国水利学会围涂开发专业委员会.中国围海工程[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [7] 韩玉芳.丁坝的造床作用[D].南京:南京水利科学研究院,2003.
- [8] 叶楨.丁坝附近紊流的三维数值模拟及局部冲刷[D].杭州:浙江大学,2007.
- [9] 叶志伟,何传金,周生利,等.扭王字块在山区河流航道整治中的应用[J].水运工程,2012,(1):148-152.
- [10] 曹波,蒋乃明,熊进.唐嘉山堰塞湖应急处置施工技术和施工组织[J].人民长江,2008,39(22):4-6. (编辑:李慧)

## Damage causes of navigation regulation structures in upper Yangtze River and maintenance countermeasures

ZHANG Wenjiang, ZENG Tao, MA Liwei

(Changjiang Chongqing Survey and Design Institute of Navigation Engineering, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** The navigation channel of Yangtze River from Yibin to Yichang is a typical mountainous channel with rapid and turbulent flow. Therefore, the damage to navigation regulation structure appears frequently. The interior factors of structure damage are discovered as follows, the desquamation of block-stone of dam construction and the scour-holes at lateral side of dam body. The new structures satisfying the maintenance requirements are summarized, including concrete dam surface, accropodes and wire gabion. Their effects and existing problems are analyzed, which will be helpful to the design and maintenance of similar dam bodies in the future.

**Key words:** channel regulation; dam damage; dam structure; Yangtze River channel from Yibin to Yichang