



基于坝头水毁程度判别指标的 抛石丁坝水毁研究*

费晓昕

(中冶华天工程技术有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 抛石丁坝是河道中应用十分广泛的整治建筑物, 能够束水攻沙, 保护岸滩免受水流冲刷, 然而抛石丁坝水毁现象时常发生。针对这一现象, 利用动床水槽物理模型试验对平原河流丁坝的水毁破坏进行了研究, 分析丁坝水毁破坏的常见形式, 认为坝头块石的坍塌流失是影响丁坝整体稳定性的主要因素, 即抛石丁坝稳定性可基于坝头水毁来研究。在此基础上, 定义了坝头水毁程度判别指标, 研究指标的求解方法和坝头水毁程度等级划分方法, 得到了坝头不同水毁程度对应的指标值, 并对丁坝维护时机的选择加以说明。该方法为抛石丁坝的维护提供了解决思路, 有利于抛石丁坝整治效果的持续发挥。

关键词: 抛石丁坝; 水槽试验; 水毁形式; 判别指标

中图分类号: TV 861; U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0104-05

Study on flood damage of riprap spur dike based on evaluation indicators of flood damage at dam head

FEI Xiao-xin

(Huatian Engineering & Technology Corporation, Nanjing 210019, China)

Abstract: The riprap spur dikes are widely used in waterway regulation projects, which can clearing sands with the converging flow, and protect the beach from erosion. However, the damage of riprap spur dike frequently occurs. For this phenomenon, movable-bed physical model tests are conducted on the damage of dikes in plain-river, and the common damage forms of spur dike are analyzed. It is believed that the collapse and loss of the block stones at the dam head are considered as the main factors causing the overall damage of spur dikes. That is, the stability of riprap spur dikes can be studied based on the damage of dam heads. Then, the meaning and solution method of flood damage evaluation indicator, and damage grade at the dam head are put forward. The indicator values of different damage degrees are given in combination with damage grade. As a recommendation, the selection of the maintenance time of the dike is provided. This method provides a new solution for the maintenance of riprap spur, and is conducive to the sustainable development of the regulation effect of riprap spur dikes.

Keywords: riprap spur dike; flume experiment; damage model; evaluation indicator

抛石丁坝是一种传统的河道整治建筑物, 在河道治理工程中广泛应用, 或是用于缩窄浅滩河床以束水攻沙, 或是用于保护岸滩免受水流冲刷。

然而, 丁坝的存在改变了河道水流流场, 丁坝周围复杂的水流结构不仅引起附近河床冲刷, 使坝头附近形成冲刷坑, 且对坝头和坝体块石也产生

收稿日期: 2020-05-21

***基金项目:** 安徽省重点研究和开发计划项目(201904a05020053)

作者简介: 费晓昕(1988—), 女, 博士, 工程师, 从事水力学及河流动力学研究。

直接的冲击作用，使块石流失、坝头坍塌，发生水毁现象。

20 世纪 50 年代初期，国外已经有很多学者对抛石丁坝水毁进行了试验和理论研究^[1]。近年来，丁坝附近绕流、丁坝冲刷、丁坝附近水流紊动及压力分布等问题的研究有了较大进展^[2-6]，丁坝的稳定性及运行可靠度也有一些很好的研究^[7-14]。但由于不同国家、不同地区、不同河流，以及水文、泥沙、地质、气象、设计水平、工程材料等的差异，抛石丁坝水毁现象仍然很严重。

抛石丁坝的稳定，既是确保航道整治效果的重要因素，往往又是有利于航道洲滩格局的前提条件。多严重的水毁程度会影响其功效的发挥，是值得高度关注的工程技术问题。因此，有必要对丁坝的运行状态做出判断，决定是否需要采取修复措施以确保其发挥整治功效。

1 水毁形式

天然河道中，抛石丁坝水毁形式有坝头损毁（坝头下挫、塌陷）、坝身或坝根损毁、整体损毁等，表现为坝头块石不断滚落、坍塌；坝身迎水坡和背水坡边坡裂挫、塌陷；坝体上形成小缺口，并慢慢演变成大缺口，甚至坝身折断，形成整体性破坏。在已知抛石丁坝水毁破坏形式中，坝头因位于河床中部靠近主流，绕流流速最大，破坏最为常见。因此，本文主要研究正挑抛石丁坝坝头破坏对丁坝稳定性的影响。

为充分说明抛石丁坝水毁破坏方式及规律，以平原河流抛石丁坝结构形式设计概化模型，进行动床水槽物理模型试验，比尺为 1:25。试验在直水槽中进行，丁坝为梯形断面结构，迎水坡坡度 1:1.5、背水坡坡度 1:2、坝头向河坡坡度 1:5，水槽中铺设经加工粉碎的石英砂。考虑到水槽尺寸及试验目的，仅模拟丁坝坝身部分长度，试验块石选用不同颜色，以便分析水毁过程中块石的运动轨迹。建筑物模型包括坝头、坝身两部分，靠槽壁的 4 段为坝身，1~7 区为坝头，坝顶为纵向矩形虚线范围（图 1）。



图 1 抛石丁坝试验布置

试验水毁现象见图 2，坝头块石随冲刷坑发展而坍落、流失，冲刷坑范围越大，坍塌块石越多，坝头水毁越严重。坝头坍落的块石有 3 处停留：一是坝头冲刷坑边坡至冲刷坑坑底；二是坝后冲刷坑纵向边坡上；三是坝后淤积体上。后两种部位坍落块石数量较少，坍落块石大部分停留在坝头冲刷坑边坡至冲刷坑坑底之间。



图 2 水槽试验丁坝水毁破坏形式

根据试验现象及天然河道中坝头水毁特征，结合坝头对丁坝的保护机制，研究坝头水毁破坏对丁坝整体稳定性的影响尤为必要。

2 水毁程度判别及维护时机选择

2.1 水毁影响因素

通过试验观察不同水深、行进流速、丁坝长度、块石级配等因素对坝头水毁的影响。坝头及主流区的流速大小及流态对坝头水毁的影响最大，决定着冲刷坑的大小及范围，且丁坝块石坍塌量与冲刷坑大小呈正相关关系。一般情况下，流态好则流速不大，大流速对应的流态相对紊乱，流速越大冲刷坑发展越迅速、冲刷坑体积越大，冲刷坑发展状态与抛石丁坝坝头水毁程度密切相关。

2.2 坝头水毁程度判别指标的定义

由试验现象可知，坝头区的块石坍塌量越多，坝头水毁破坏程度越严重。坝头 1~3 区抛投厚度相对较薄，容易水毁；3~7 区水毁发展相对较慢；当水毁发展到坝头与坝身交界处时，坝身失去向河坡的保护，若床沙和坝体继续遭受水流冲刷，则坝身存在发生垮塌的可能，影响丁坝的整治效果。因此，针对抛石丁坝水毁的特点，在最大范围内保持丁坝整体稳定性及功效的前提下，抛石丁坝的维护须在水毁破坏到达坝身之前进行。

据以上分析，提出以坝头坍塌块石百分比作为判断坝头不同水毁程度的指标。丁坝坝头指丁坝向河坡纵向坡度开始处至抛石边缘之间的部位，即图 3a) 中 l_0 部分的抛石；坝头水毁程度判别指标 P ，指坝头坍塌块石质量或体积占坝头块石总质量或总体积的百分比，即图 3a) 中 $l_{\text{水毁}}$ 对应的抛石质量或体积与 l_0 对应的抛石质量或体积之比。

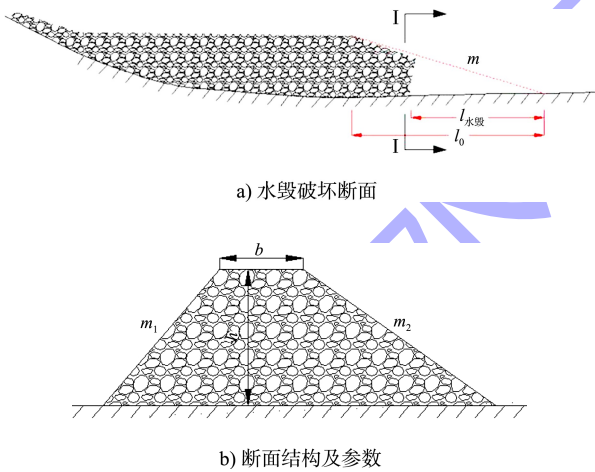


图 3 抛石丁坝结构及水毁破坏示意

令丁坝坝头总质量、总体积为 M_0 、 V_0 ，坝头水毁质量、体积为 $M_{\text{水毁}}$ 、 $V_{\text{水毁}}$ ，则坝头水毁程度判别指标为： $P = M_{\text{水毁}} / M_0 = V_{\text{水毁}} / V_0$ 。

2.3 坝头水毁程度判别指标的求解方法

天然河道中 $M_{\text{水毁}}$ 、 $V_{\text{水毁}}$ 难以估计，本文采用水毁破坏长度 $l_{\text{水毁}}$ 及坝头向河坡长度 l_0 求解。假设图 3a) 中 I-I 断面为某一时刻的水毁破坏的断面，则该断面的面积 $A_{\text{水毁}}$ 为：

$$A_{\text{水毁}} = b h_{\text{水毁}} + 0.5 m_1 h_{\text{水毁}}^2 + 0.5 m_2 h_{\text{水毁}}^2 \quad (1)$$

那么，相应地到水毁断面 I-I 的总水毁体积

$V_{\text{水毁}}$ 为：

$$V_{\text{水毁}} = \int_0^{h_{\text{水毁}}} (b h + 0.5 m_1 h^2 + 0.5 m_2 h^2) dh \quad (2)$$

$$h_{\text{水毁}} = \frac{l_{\text{水毁}}}{m} \quad (3)$$

式中： m_1 、 m_2 分别为迎水坡及背水坡边坡系数，见图 3b)； b 为坝顶宽度； h 为坝高； $h_{\text{水毁}}$ 为水毁断面坝面以下抛石高度，随断面不同而不同，如向河坡边缘处 $h_{\text{水毁}}$ 接近于 0； m 为向河坡坡度系数； $l_{\text{水毁}}$ 为水毁断面距向河坡边缘的距离。一般来说， m 、 m_1 、 m_2 及 b 均已知， $l_{\text{水毁}}$ 可通过测量得到。

水毁程度指标 P ：

$$P = \frac{V_{\text{水毁}}}{V_0} = \frac{\int_0^{h_{\text{水毁}}} (b h + 0.5 m_1 h^2 + 0.5 m_2 h^2) dh}{\int_0^{h_{ab}} (b h + 0.5 m_1 h^2 + 0.5 m_2 h^2) dh} \quad (4)$$

式中： h_{ab} 为抛石丁坝坝高，通过设计图纸或 l_0 求得； V_0 为根据丁坝设计图纸可知的坝头体积。

2.4 坝头水毁程度等级划分

将坝头水毁状态分为零星破坏、轻微破坏、一般破坏、较严重破坏和严重破坏共 5 个等级， P 的大小对应着不同的坝头水毁程度。零星破坏状态是指向河坡抛石边缘处仅有个别零星块石产生位移，此状态为抛石丁坝刚投入使用或周围水流条件好；轻微破坏状态是向河坡边缘处较薄的抛石部位遭到破坏；一般破坏是指冲刷坑已经形成，块石明显塌入坑内；较严重破坏状态是指向河坡边缘较薄处已完全坍塌，向河坡中部破坏；严重破坏状态是指坝头块石基本坍塌入冲刷坑或随水流流失。 P 的量化需要根据水毁的 5 个不同程度判断取值，经试验和实际工程经验予以确定。

通过试验数据及 P 的定义，利用式(2)~(4)计算水槽试验的 P 值。试验中， $m_1 = 1.5$ ， $m_2 = 2$ ， $b = 12 \text{ cm}$ ，坝头 100 cm 分为 7 区，令 1 区与 2 区交界高度为 h_1 、体积为 V_1 ，依次类推， V_n 为第 n 区之前(包括第 n 区)全部水毁时坍塌的块石体积，即 V_7 便是 V_0 ，见图 4，根据相似三角形对应边长比相等的原则，计算 $h_1 \sim h_7$ ，可得 $h_1 \sim h_7$ 的高度。

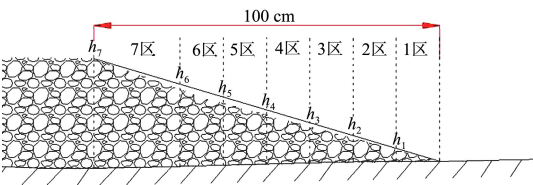


图 4 坝头分区及 h 高度

表 1 为各组次坝头坍塌块石百分比计算值，其中坝头总体积 V_0 为 7 040 cm^3 。由表 1 可知，实测

与计算得出的 P 值相当，说明该计算方法可行。因水槽规模的限制，冲刷试验未达到坝头块石量流失一半或一半以上的状态，但从坍塌比为 0.6%~16.1%的变化趋势可以预测，若冲刷继续发展，冲刷坑会逐渐向坝根侧发展，而坝头水毁也会随着冲刷坑的发展由 1 区、2 区完全坍塌至 6 区甚至 7 区完全坍塌，直到冲刷坑不再继续发展，坝头处达到水沙平衡。

表 1 各组次坝头坍塌块石百分比

组次	坍塌体积/ cm^3							V 水毁/ cm^3	$P/\%$	
	1 区	2 区	3 区	4 区	5 区	6 区	7 区		计算值	试验值
1	47	106	43	30	0	0	0	225	3.2	3.4
2	47	107	72	72	45	0	0	342	4.9	5.0
3	47	127	126	108	76	0	0	482	6.9	7.2
4	30	26	0	0	0	0	0	56	0.8	1.1
5	47	158	198	203	0	0	0	606	8.6	8.6
6	25	9	8	0	0	0	0	42	0.6	0.7
7	22	7	8	0	0	0	0	37	0.6	0.7
8	37	84	36	30	0	0	0	188	2.7	2.8
9	33	72	14	6	0	0	0	125	1.8	2.3
10	47	176	324	299	0	0	0	845	12.0	16.1
11	47	176	252	269	0	0	0	743	10.6	14.3

令每个区块石的体积为 V'_n ，则 $V'_n = \begin{cases} V_n - V_{n-1} & (n \geq 2) \\ V_1 & (n = 1) \end{cases}$ ，统计数据 V'_n/V_0 及 V_n/V_0 见表 2， V_0 为 7 040 cm^3 。试验中，轻微水毁组次的 P 值不超过 5%，坍塌量的概念相当于表 2 中 1~2 区完全坍塌，3 区坍塌 1/3 的块石量；较严重的组次 P 值超过 10%，坍塌量的概念相当于表 2 中 1~3 区完全坍塌、4 区坍塌 1/4 的块石量，与试验现象符合较好。

表 2 各区水毁时坍塌百分比

块石位置	V'_n/cm^3	坍塌百分比/%	
		V'_n/V_0	V_n/V_0
1 区	46.5	0.7	0.7
2 区	176.0	2.5	3.2
3 区	359.7	5.1	8.3
4 区	597.8	8.5	16.8
5 区	890.0	12.6	29.4
6 区	1 237.0	17.6	47.0
7 区	3 733.0	53.0	100.0

结合 P 的计算数据及水毁程度 5 级破坏状态的定义，认为：当 $P < 1\%$ 时，坝头处于零星破坏状态；当 $1\% \leq P < 10\%$ 时，1~3 区块石坍塌，坝头轻微破坏；当 $10\% \leq P < 30\%$ 时，4~5 区抛石坍塌，坝头为一般破坏状态；当 $30\% \leq P < 70\%$ 时，6~7 区抛石坍塌，坝头为较严重破坏； $P = 70\%$ 时，7 区 1/3 的块石坍落；当 $70\% \leq P \leq 100\%$ 时，坝头严重破坏；当 $P = 100\%$ 时，坝头抛石已全部坍塌，坝身失去向河坡保护，丁坝继续遭受水流冲刷易导致整体稳定性受到威胁。

2.5 丁坝维护时机选择

当坝头水毁达到 5 级破坏状态时，抛石丁坝并未失去整治功能，仍然能够导流、束水、护岸，但抛石丁坝的整体稳定性受到威胁，整治功效也减弱。因此，为确保丁坝能够发挥最大整治功效，不影响坝身的整体稳定性，丁坝要在 $P = 100\%$ 之前及时补抛。本文选择 $P = 70\%$ 作为抛石丁坝必须进行修复的指标，否则，坝身失去向河坡的保护

作用,可能会导致出现较大范围水毁。若坝头水沙作用在 $P<70\%$ 时达到平衡,那么不需要补抛,丁坝仍可以维持其自身的稳定性,发挥整治功效。

3 结论

1) 抛石丁坝水毁破坏形式主要表现为块石的流失和坍塌,以坝头块石坍塌为主,坝头块石随冲刷坑发展而坍塌,冲刷坑范围越大则坍塌量越多、坝头水毁越严重。抛石丁坝水毁程度与冲刷坑范围呈正相关关系。

2) 定义了以坝头坍塌块石百分比为标准的坝头水毁程度判别指标 P , 并给出了指标 P 的求解方法。

3) 建立了抛石丁坝坝头水毁程度等级划分方法,得到了坝头不同水毁程度对应的 P 值,并给出了丁坝需要维护的时机。

参考文献:

[1] ROBERT E, MARIAN 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.

[2] SHUTTLEWORTH W J. Terrestrial hydrometeorology[M]. Jersey City: Wiley-Blackwell, 2012.

[3] 李洪.丁坝水力学特性研究[D].成都: 四川大学, 2003.

(上接第 83 页)

参考文献:

[1] 刘儿七.国内外内河航运发展现状和趋势[J].港口科技, 2019(5) : 45-48.

[2] 姚育胜.世界四条通航大河梯级开发航运发展比较研究[J].武汉交通职业学院学报, 2019(1) : 1-13.

[3] 陈虹.欧洲内河航运对发展我国内河航运的启示[J].水运工程, 2002(10) : 39-41.

[4] 黄力, 陈沫, 杨琼.探索莱茵河航运对我国水运绿色发展的启示[J].中国水运(下半月), 2019, 19(3) : 35-36.

[5] 长江航道规划设计研究院.航道工程设计规范: JTS 181—2016[S].北京: 人民交通出版社, 2017.

[6] 长江航道规划设计研究院.长江干线荆江河段航道整

[4] 黑鹏飞.丁坝回流区水流特性的实验研究[D].北京: 清华大学, 2009.

[5] 李冰冻, 李嘉, 李克锋.丁坝水流的水槽试验及数值模拟研究[J].水动力学研究与进展(A 辑), 2013, 28(2) : 176-183.

[6] 陈稚聪, 黑鹏飞, 丁翔.丁坝回流分区机理及回流尺度流量试验研究[J].水科学进展, 2008(5) : 613-617.

[7] 任晶轩, 胡杰龙, 王平义, 等.非恒定流作用下的抛石丁坝可靠度研究[J].水运工程, 2019(4) : 102-109.

[8] 韩林峰, 王平义, 刘怀汉, 等.基于水毁体积比的抛石丁坝安全性判别分析[J].武汉大学学报(工学版), 2014, 47(2) : 201-206.

[9] 江晓一.楠江河道散抛石坝稳定性分析[J].黑龙江水利科技, 2010, 38(6) : 94-95.

[10] 刘临雄.砂质浅滩抛石丁坝结构稳定性分析及防护措施[J].水运工程, 2019(2) : 89-92.

[11] 荣学文.丁坝的水毁机理及其平面二维水流数值模拟[D].重庆: 重庆交通大学, 2003.

[12] 王平义.航道整治建筑物水毁理论及模拟技术[M].北京: 人民交通出版社, 2004.

[13] 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.

[14] 张帆, 王平义, 喻涛, 等.长江上游航道整治建筑物水毁特征及成因分析[J].中国水运(下半月), 2013, 13(12) : 226-227, 314.

(本文编辑 武亚庆)

治工程可行性研究报告[R].武汉: 长江航道规划设计研究院, 2013.

[7] 长江航道规划设计研究院.长江干线武汉至安庆段 6 m 水深航道整治工程可行性研究报告[R].武汉: 长江航道规划设计研究院, 2017.

[8] 中交第二航务勘察设计院.内河航运建设项目环境影响评价规范: JTS 227—2001[S].北京: 人民交通出版社, 2002.

[9] 交通运输部天津水运工程科学研究所.水运工程施工环境监理规范: JTS 252-1—2018[S].北京: 人民交通出版社, 2018.

(本文编辑 郭雪珍)