

过水堆石围堰铅丝笼护面失稳破坏 临界条件试验研究

吴文平, 张晓宏, 刘发全, 李建中

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

[摘要] 从过水堆石围堰护面失稳破坏的工程实践出发,探讨了铅丝笼护面失稳破坏的成因,在模型试验的基础上,分析了影响铅丝笼护面稳定的主要因素及失稳破坏的临界水力条件。并应用水流能量方程和边界层理论,研究了围堰过水时的水流能量转换关系,得到了失稳临界条件的指标和经验判别式。通过模型试验的对比与分析计算,验证了失稳临界条件经验判别式的正确性。

[关键词] 过水堆石围堰;失稳临界条件;铅丝笼护面;模型试验

[中图分类号] TV551.3+6

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2006)03-0157-04

铅丝笼最早是在1894年修复意大利雷诺(Reno)河决口时得到应用的。过水堆石围堰应用铅丝笼护面,主要是由于铅丝笼结构简单、透水性强,产生的扬压力小、适应不均匀沉陷的性能好,可就地取材、造价较混凝土护面低,施工水平要求不高,受气候影响小,损坏后便于修理;料场的块石可以得到充分利用、稳定性较单个块石高,使下游边坡较块石护面的边坡陡,可节省工程方量,加快施工进度,因此被广泛应用^[1]。

从模型试验和工程实践看^[1-2],堆石围堰过水时,铅丝笼护面的破坏有两种类型:一是整体性失稳破坏,如苏丹的露色雷斯(Roseires)、莫桑比克的卡博拉巴萨(Cabora Bassa)及我国柘溪水电站等的铅丝笼护面,其成因主要是由于铅丝笼护面的抗滑力不够,铅丝笼发生滑动或抬动所致;二是局部性失稳破坏,其成因主要是由于铅丝笼内填石不合格,粒径小、石质差,过水时笼内填石被冲走,造成铅丝笼护面局部性失稳破坏。

对于铅丝笼护面的局部性失稳破坏,只要在铅丝笼制作时严格按施工规程要求执行就能防止。铅丝笼护面整体性失稳破坏,由于其影响因素比较复杂,有关失稳破坏的防止,即铅丝笼护面的稳定性分析问题,目前主要依靠模型试验来确定。文献[1]分析了铅丝笼护面在过水时所承受的荷载,利用抗滑

极限平衡原理建立了护面稳定性分析的近似计算式,文献[3-4]对过水堆石围堰混凝土面板及铅丝笼护面的稳定性进行了分析,取得了初步成果。在过水围堰下游护坡稳定性观测资料和模型试验研究的基础上,文献[5-6]提出了衡量下游边坡最不利工况的指标和确定最不利流量的方法。目前,国内外学者已对过水围堰护坡结构水力稳定性问题进行了广泛研究,但这些成果^[1-4,7]大多是针对某一具体的护坡型式,研究其失稳机理、进行受力分析并通过模型试验提出失稳计算模式,对于过水围堰各种不同护坡型式最不利工况及失稳临界条件等关键性问题的研究很少有人涉及^[5-6]。因此,系统地研究过水围堰的溢流工况特性及失稳临界条件判别指标等问题,具有重要的理论意义和现实意义。本文在模型试验的基础上,分析了影响堆石围堰铅丝笼护面稳定的主要因素,探讨了边坡整体性失稳破坏的机理及水力条件关系;应用水流能量方程和边界层理论研究围堰过水时的水流能量转换关系,以期过水堆石围堰铅丝笼护面失稳破坏的防护提供科学依据。

1 模型试验

试验在宽59 cm,高80 cm,长5 m的玻璃水槽中进行。试验中用铁丝网内装粗、中砂模拟铅丝笼。铅丝笼形状为规则六面体,其模型尺寸为2 cm×2

[收稿日期] 2006-01-17

[基金项目] 高速水力学国家重点实验室开放基金项目(106-220147)

[作者简介] 吴文平(1963—),男,陕西铜川人,副教授,硕士,主要从事水工水力学研究。

cm×6.5 cm,重量为 40 g。笼下未设专门排水层。试验中首先关闭下游阀门,使下游充水达到安全高度后,放水过流,在一定流量下,控制下游水位,使其逐渐降低。当水位逐渐降低到某一高程形成上、下游临界落差时,面板被跷翻,随之坝体填料被冲走,模型坝毁坏^[7]。

对堆石围堰边坡进行稳定受力分析可知,造成护坡失稳的主要原因是水流的拖曳力和坝内渗透压力的联合作用。与混凝土土护坡相比,由于铅丝笼透水性较好,不易发生失稳破坏,当其发生破坏时,一般表现为突发性整体失稳。根据试验观测,对于给定的单宽流量,随着下游水位的降低,上、下游水位落差的增大,在水流拖曳力和渗透压力的作用下,一般先是部分铅丝笼凸起,局部失稳,随后凸起部分在动水压力及脉动压力作用下冲离原位置,产生冲刷破坏,随之整个护坡突然整体失稳。

对于给定的堆石围堰下游边坡,在一定单宽流量及上、下游水位差条件下,将铅丝笼部分凸起发生局部失稳时的状态定义为失稳临界状态,相应的水力条件称为失稳临界条件。

根据模型试验发现,在一定的过流流量条件下,缓坡比陡坡的临界落差大;当保持上、下游落差一定时,缓坡比陡坡的临界单宽流量要大。对于同一堆石围堰下游边坡,当过流单宽流量较小时,其临界落差较大;而当过流单宽流量较大时,其临界落差较小。

对 1:1.5, 1:2, 1:2.5, 1:3.4 种不同下游边坡坡比进行了 20 组模型试验,得到相应条件下边坡失稳时临界水力条件的经验公式分别为:

当 $m=1.5$ 时

$$Z = q/(-0.2 + 0.125q), \quad (1)$$

$$0.0262 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}) \leq q \leq 0.1723 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$$

式中, Z 为上、下游水位差; q 为单宽流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

当 $m=2.0$ 时

$$Z = q/(-0.357 + 0.093q), \quad (2)$$

$$0.0661 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}) \leq q \leq 0.4882 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}),$$

当 $m=2.5$ 时

$$Z = q/(-0.438 + 0.085q), \quad (3)$$

$$0.1526 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}) \leq q \leq 0.5741 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$$

当 $m=3.0$ 时

$$Z = q/(-0.462 + 0.077q), \quad (4)$$

$$0.2068 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}) \leq q \leq 0.6337 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$$

对上述 4 种不同边坡坡比的模型试验结果进行进一步分析整理,可得到不同下游边坡失稳临界水力条件的统一经验公式,即:

$$Z = q/(A + B \cdot q), \quad (5)$$

$$A = -0.992 + m/(2.513m - 1.874),$$

$$B = m/(17.78m - 14.67),$$

式中, A, B 为经验回归系数。

2 堰面溢流水力条件分析

过水堆石围堰下游护坡的破坏,可以看作是过堰水流综合作用引起的荷载,超过了护坡所能承受的极限承载能力而导致的。实际观测表明,护坡失稳的部位大多在接近下游尾水位处的坡面上。这是因为下游坡面尾水位处,一般处于水跃前沿部位,水流紊动剧烈,坡面水流到达此处时,水流的势能完全转化为水流动能,该处流速值达到最大^[4],所以应以下游尾水位处的坡面作为研究对象,如图 1 所示。

根据能量方程有:

$$Z = V_0^2/2g = V^2/2g + h_f, \quad (6)$$

式中, V_0 为 1-1 断面平均流速,一般数值不大; $V_0^2/2g$ 近似等于零; V 为 2-2 断面流速; h_f 为 1-1 断面至 2-2 断面间的水头损失。

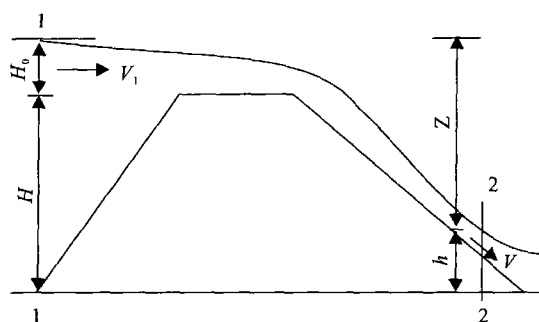


图 1 过水堆石围堰剖面图

Fig. 1 Sectional drawing on overflow rock fill cofferdam

下面应用水流边界层理论,确定沿程水头损失 h_f 。堰面水流的能量损失主要发生在边界层内的水流中,因摩擦作用而使边界层能量的减少可按式求得^[8]:

$$E = \frac{1}{2} \rho \int_0^\delta u(U^2 - u^2) dy. \quad (7)$$

式中, E 为能量损失; ρ 为水的密度; δ 为边界层厚度; u 为边界层内水流流速; y 为沿边界层厚度方向

的坐标; U 为势流流速。

把具有流速 U 的流体层厚度定义为能量厚度 δ_3 ,它代表边界层中的能量损失^[9],则有:

$$\frac{1}{2}\rho U^3 \delta_3 = \frac{1}{2}\rho \int_0^\delta u(U^2 - u^2)dy,$$

$$\delta_3 = \int_0^\delta \frac{u}{U} (1 - \frac{u^2}{U^2}) dy.$$

式中, δ_3 为能量损失厚度。如 δ_3 可以算出,则溢流面上任一点上的能量损失可由下式求得:

$$E = \frac{1}{2}\rho U^3 \delta_3. \quad (8)$$

式(8)除以 γ ,其中 q 为单宽流量, γ 为水容重,则可得用水头表示的能量损失,即:

$$h_f = \frac{\delta_3 U^3}{2gq}. \quad (9)$$

一般认为,沿下游坝面水流边界层内的流速符合指数分布律,即:

$$\frac{u}{U} = \left[\frac{y}{\delta} \right]^{\frac{1}{n}}.$$

式中, n 为边界层内的流速分布指数; δ 为边界层厚度。将流速指数分布律代入能量损失厚度 δ_3 的定义式,得到:

$$\delta_3 = \frac{2n}{(n+1)(n+3)} \delta. \quad (10)$$

根据有关文献^[9]的研究成果,边界层厚度 δ 可由下式求解:

$$\frac{\delta}{s} = P \left[\frac{s}{\Delta} \right]^{-Q}, \quad (11)$$

式中, Δ 为坡面糙度; s 为过流坡面长度; P, Q 为经验公式系数。

考虑到边界层外的势流流速为:

$$U = \sqrt{2gZ}, \quad (12)$$

且 $s \approx Z \sqrt{1+m^2}$. (13)
这时,可将(10)、(11)、(12)和(13)式代入(9)式得

$$h_f = K' \frac{Z^{\frac{5-2Q}{2}} \Delta^Q}{q}, \quad (14)$$

式中, $K' = \sqrt{2g} P (1+m^2)^{\frac{1-Q}{2}} \frac{2n}{(n+1)(n+3)}$ 。

如果忽略堰顶与下游转折处的局部水头损失,由(6)式有:

$$h_v = \frac{V^2}{2g} = Z - K' \cdot \frac{Z^{\frac{5-2Q}{2}} \Delta^Q}{q}, \quad (15)$$

式中, h_v 为下游坡面尾水位处的流速水头。式(15)

考虑了上下游水位差、单宽流量、坡面粗糙度、边坡坡度等影响护面稳定性的主要因素。对于给定的粗糙溢流坝面, P, Q, n 可根据有关研究成果^[9]取值,一般 $Q=1/4 \sim 1/10, P=0.02 \sim 0.08, n=6 \sim 18$ 。这时可由(15)式计算下游坡面尾水位处的流速水头。由于(15)式未考虑边坡上局部水头损失和渗流作用的影响,按该式计算的水头能量损失较实际水头能量损失小很多。

3 失稳临界条件分析

过坝单宽流量和上、下游水位差是影响护面稳定的主要因素。一般认为 q 越大, Z 越大,对护面稳定越不利。但在工程实际中,随着过坝单宽流量的增加,下游水位会抬升,有时还可能出现淹没堰流工况,这时 Z 有可能会减小,这就是过水堆石围堰最危险的流量不一定发生在最大洪水期的原因^[2,5]。

模型试验及实际观测资料表明,护坡最先局部失稳的部位大多位于接近下游尾水的坡面上,此处水流流速达到最大值,因此可以认为,堆石围堰过水最危险工况就是下游尾水位处流速最大时的工况。

如前所述,由于(15)式计算的水头损失值偏小,得到的下游尾水位处坡面流速水头偏大,不能反映实际情况,所以要对其进行修正。笔者的基本判断是,通过对系数 K' 修正后,用(15)式可以计算下游尾水位处坡面的流速水头。将20组失稳临界条件模型试验资料代入(15)式,按有关研究成果^[9]取 $Q=1/5$,整理试验资料得失稳临界状态时的下游临界流速 V_K ,则有:

$$h_K = \frac{V_K^2}{2g} = Z - K \frac{Z^{2.3} \Delta^{0.2}}{(1+m^2)^{0.2} q}, \quad (16)$$

$$0.075 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}) \leq q \leq 0.633 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$$

$$K = 15.61q + 1.22. \quad (17)$$

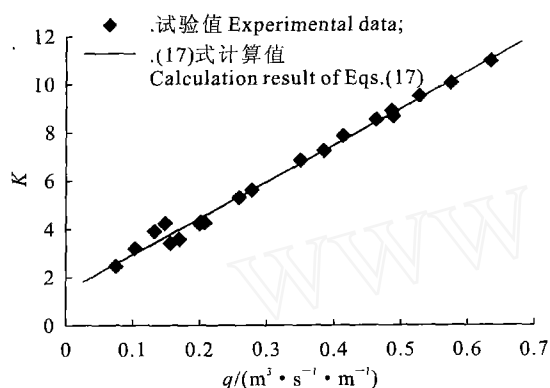
式中, V_K 为失稳临界状态时下游尾水坡面处的临界流速; h_K 为失稳临界状态时的临界流速水头。式(16)、(17)的计算结果见表1及图2,可见式(16)、(17)的计算值与试验值比较吻合。

由表1可以看出,在同一坡度条件下,铅丝笼护面发生临界失稳破坏时,下游坡面尾水位处临界流速理论计算值趋于相同,这说明用临界流速 V_K 、临界流速水头 h_K 作为衡量过水堆石围堰失稳临界条件的指标是可行的。同时可以看出,随着坡度变缓,临界流速增加。

表 1 失稳临界条件试验数据及理论计算值

Table 1 Critical conditions of instability and failure: experimental data and calculation result

$m=1.5$			$m=2.0$			$m=2.5$			$m=3.0$		
$q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	Z/m	$V_K/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	Z/m	$V_K/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	Z/m	$V_K/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	Z/m	$V_K/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0.075 1	0.114 5	1.11	0.155 8	0.150 4	1.27	0.169 4	0.161	1.32	0.206 8	0.18	1.38
0.103 2	0.093 3	1.13	0.200 8	0.154 1	1.31	0.2	0.157 5	1.34	0.412 9	0.146 7	1.42
0.132 4	0.090 8	1.14	0.276 8	0.145 5	1.33	0.258 1	0.151 6	1.36	0.485 1	0.157 5	1.42
0.147 5	0.093 4	1.15	0.384 3	0.122 5	1.35	0.349 5	0.142 8	1.36	0.526 6	0.141 2	1.42
			0.488 2	0.116 2	1.30	0.462 3	0.135	1.36	0.633 7	0.136 9	1.42
						0.574 1	0.131 1	1.36			
$\bar{V}_K=1.13$			$\bar{V}_K=1.30$			$\bar{V}_K=1.35$			$\bar{V}_K=1.41$		

图 2 系数 K 的试验验证Fig. 2 Validate test of coefficient K

由图 2 可以看出,系数 K 与单宽流量相关性较强,二者呈线性关系,经验回归公式(17)式与模型试验结果比较吻合,说明本文应用水流能量方程和边界层理论,在模型试验基础上得到的下游临界流速 V_K 和下游临界流速水头 h_K 的经验计算公式具有较

好的精度,临界流速 V_K 和临界流速水头 h_K 可以作为失稳临界条件的判别指标。

4 结 语

对过水堆石围堰铅丝笼护面的稳定性问题,由于受到堰顶溢流和堰体渗流的联合作用,其受力情况十分复杂,理论分析上存在难度,一般主要依靠模型试验进行研究分析。本文对 4 种不同下游边坡过水堆石围堰的铅丝笼护面进行了水力学模型试验研究,在模型试验的基础上,系统分析了影响过水围堰护面稳定的主要因素,探讨了失稳破坏的临界水力条件,得到了失稳临界条件的经验判别式和指标,可为过水堆石围堰铅丝笼护面的稳定性研究及有关工程实践提供科学依据。本文结论是在模型试验的基础上得到的,由于试验条件所限,试验的模型尺寸及最大单宽流量值偏小,研究成果的一般性还有待于进一步验证。

[参考文献]

- [1] 夏明耀. 过水堆石围堰铅丝笼护面的稳定分析[J]. 武汉水利电力学院学报, 1981(4): 83-89.
- [2] 李世宁, 李长林. 过水堆石[M]. 长春: 吉林出版社, 1983.
- [3] 肖焕雄, 韩采燕. 过水堆石围堰混凝土面板稳定性分析[J]. 水利水运科学研究, 1991(2): 201-212.
- [4] 肖焕雄, 韩采燕. 过水堆石围堰下游边坡护坡铅丝笼稳定性研究[J]. 水电站设计, 1992(3): 20-27.
- [5] 李燕群, 胡志根, 肖群香, 等. 土石过水围堰溢流工况判别模式研究[J]. 水电能源科学, 2003(3): 49-50.
- [6] 胡建明, 胡志根, 杨学红, 等. 土石过水围堰过水期最不利工况及其流量确定[J]. 水动力学研究与进展, 2003(3): 266-270.
- [7] 徐天有, 张晓宏, 吴文平. 过水堆石坝钢筋笼护坡失稳临界条件试验研究[J]. 西北水电, 1998(2): 34-35.
- [8] 美国陆军工程兵团. 水力设计准则[M]. 王洁昭, 张元禧, 译. 北京: 水利出版社, 1982.
- [9] 李建中, 宁利中. 水流边界层理论[M]. 北京: 水利出版社, 1994: 49-52.

(下转第 164 页)

[9] 陈忠购,张天柱. 计算流体力学在温室研究领域的应用[J]. 农村实用工程技术,2004,(6):56-57.

Simulating and analysis of the movement of airflow around a greenhouse with FEA

WANG Jian,DING Wei-min,YANG Hong-bing

(College of Engineering,Nanjing Agricultural University,Nanjing,Jiangsu 210032,China)

Abstract: This paper, based on the theory of FEA in analyzing hydromechanics, simulated the movement of airflow around the greenhouse and analyzed the way of ventilation using ANSYS 9.0 software. The result of simulation shows aeration effect of using roof ventilators and side ventilators was better than using only side ventilators. The movement of airflow around a greenhouse was simulated by using ANSYS 9.0 software with 3D. The result indicates that leeward wind reached 3.260 4—2.905 5 and 2.888 8—2.845 7 meters per second at the distance of 0—3 and 3—12 meters respectively; Windward wind reached 3.120 5—2.698 9 and 2.698 9—2.946 meters per second at the distance of 0—4.2 and 4.2—12 meters.

Key words: greenhouse airflow; movement of airflow; ventilator mode; windward wind speed; leeward wind speed; FEA

(上接第 160 页)

Abstract ID:1671-9387(2006)03-0157-EA

Experimental study on critical instability and failure conditions of wire-caged protective facing of overflow rock fill cofferdam

WU Wen-ping,ZHANG Xiao-hong,LIU Fa-quan,LI Jian-zhong

(College of Water Resources and Hydro-electric Engineering,Xian University of Technology,Xi'an,Shaanxi 710048,China)

Abstract: From the engineering practice in instability and failure of protective facing of overflow rock fill cofferdam, this article discussed the causes of formation of instability and failure of wire-caged protective facing and analyzed the primary factors and critical conditions of instability and failure based on model experiments. Applying the energy equation and boundary layer theory, this article also analyzed the relationship of energy transformation of overflow, and obtained the experience index and formula of instability critical conditions. The result has proved the validity of experience formula.

Key words: overflow rock fill cofferdam; critical instability conditions; wire-caged protective facing; model test