

不同轴压下悬挂式防渗墙堤基渗透坡降试验

詹美礼¹, 闫萍¹, 尹江珊¹, 唐健¹, 踪金梁², 盛金昌¹, 罗玉龙¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省设备成套有限公司, 江苏 南京 210009)

摘要: 为了研究含悬挂式防渗墙的强透水堤坝坝基在不同轴压状态下的渗透特性, 分别开展了3种不同高度防渗墙在不同轴向应力状态下的渗流-应力耦合管涌试验。结果表明: 防渗墙端部位置渗透流速较大, 更易发生渗透破坏; 坝基平均渗透坡降随防渗墙高度增加而减小, 防渗墙渗流轮廓线上, 防渗墙端部的渗流梯度最大, 应力状态对悬挂式防渗墙-砂砾石地基渗透坡降影响显著, 管涌临界渗透坡降与轴压呈抛物线关系, 防渗墙端部的渗透破坏坡降随轴压增大而线性增大。在此基础上, 建立了用轴压表示的防渗墙端部渗透破坏坡降线性经验公式。

关键词: 堤基; 防渗墙; 渗透破坏; 出砂量; 渗透坡降

中图分类号: TV139.16

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2016)03-0036-05

Experimental study on seepage gradient of embankment foundations with suspended cut-off walls under different axial pressures//ZHAN Meili¹, YAN Ping¹, YIN Jiangshan¹, TANG Jian¹, ZONG Jinliang², SHENG Jinchang¹, LUO Yulong¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Complete Equipment Co., Ltd., Nanjing 210009, China)

Abstract: In order to study the permeability of highly permeable embankment foundations with suspended cut-off walls, a series of seepage-stress coupling experiments with cut-off walls of three different heights in different axial stress states were carried out. Results show that seepage failure is more likely to occur at the bottom of cut-off walls because of high seepage velocity there, the average seepage gradient of the embankment foundation decreases with the increase of the height of cut-off walls, and the seepage gradient at the bottom of cut-off walls is always maximum along the seepage contour line. Stress states have large effects on the seepage gradient of sand gravel foundations with suspended cut-off walls. There is a parabolic relationship between critical seepage gradient of piping and axial pressure. The seepage gradient causing seepage failure at the bottom of cut-off walls increases linearly with the increase in axial pressure. Based on these results, a linear empirical formula for the seepage gradient causing seepage failure at the bottom of cut-off walls, denoted by the axial pressure, is established.

Key words: embankment foundation; seepage failure; cut-off wall; amount of sand production; seepage gradient

在水利工程中,堤基的渗透变形严重影响着堤防工程的稳定性和大坝的安全运行,这其中又以管涌破坏形式最为常见^[1-4]。对堤基渗透破坏及防渗处理的研究一直是个重要的课题。毛昶熙等^[5]通过试验研究提出了堤基渗流的无害管涌概念,认为管涌有害与否与沿程承压水头分布的不断调整和渗流量变化密切相关。刘杰等^[6-7]将复杂的堤基归纳概化为3种类型,分别进行了模拟试验,指出砂基的抗渗强度主要决定于砂土本身的抗渗强度,并对堤基砂砾石层的管涌破坏危害性进行了试验研究,指出在发生管涌破坏后,土骨架的结构不会产生明显变化,但渗透系数会显著增大。陈建生等^[8]利用室内试验模拟得出,双层堤基发生管涌破坏后砂层破坏位置主要位于顶部,并与上覆黏土层的破坏过程

相互影响。

防渗墙作为有效的防渗加固工程被广泛应用,其中悬挂式防渗墙相较于半封闭和全封闭式防渗墙而言防渗效果并不显著,但对险情的扩展有一定的控制作用^[9]。从生态角度考虑,悬挂式防渗墙不影响内外水力联系,有效避免了对下游生态环境的不利影响^[10]。对于实际工程的一些深厚覆盖层,在现有技术的限制下防渗墙的插入深度通常不能做成封闭式,因此对悬挂式防渗墙的研究仍有很大的现实意义。张家发等^[11]通过对砂槽试验进行数值模拟进一步验证了悬挂式防渗墙的贯入深度对堤防安全有一定改善。王保田等^[12]对上层为低液限黏土、下层为低液限粉土的二元结构堤基进行了渗流模拟试验,论证了悬挂式防渗墙有阻滞其渗透变形发展的

重要作用,可以有效控制渗透破坏的发生条件。王晓燕等^[13]以稳定渗流有限元分析方法为基础,从安全和时效角度出发,对某水电站围堰工程中悬挂式防渗墙深度进行了优化研究。罗玉龙等^[14]开展了不同围压状态的悬挂式防渗墙-砂砾石堤基管涌的临界坡降试验研究,基于实验结果提出了由围压表示的管涌临界渗透坡降经验公式。

本文拟从防渗墙的插入深度及堤基所受轴向应力两个变量着手,对悬挂式防渗墙-强透水地基的渗透破坏机制进行进一步试验研究,以便为工程建设和运行管理提供科学依据。

1 试验模型与方案设计

1.1 试验装置及原理

试验使用的装置为河海大学渗流实验室自主研发设计,见图1。

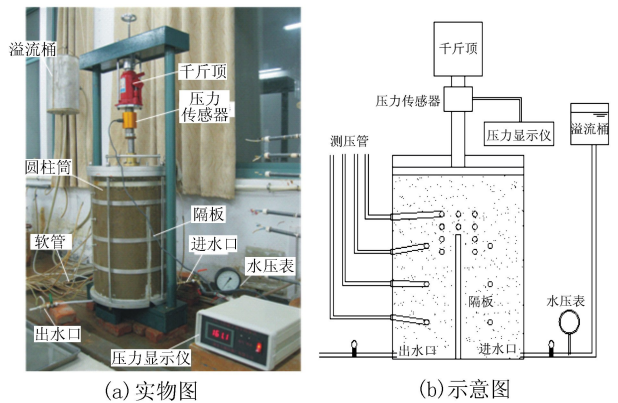


图1 堤基渗流-应力耦合试验装置

图1中,加压千斤顶的量为200 kN,压力显示仪灵敏度为0.1 kN。为方便装填砂试样,选择了高80 cm、内径46 cm的大圆柱筒。圆筒内壁设卡槽,用来放置不同高度的隔板,隔板厚度1 cm。桶壁四周垂直钻了4排圆孔,用来安置细管以测定桶内堤基模型中不同位置的测压管水头,由于测点较多,在示意图中只画出了一侧的4个测压管。除此之外,在进水口和出水口位置也分别连接了测压管,图中标注的软管与测压管相连。溢流桶可以供给0~3.0 m的进水水头,通过人工调节溢流桶的高度来改变进水口处水头大小;当需要供给3.0 m以上较大水头时,可以利用实验室自来水管的水压,通过控制阀门开关来调节水头。数值大小通过水压表读出,水压表最小分度值为2 kPa。

在堤坝上下游水头差作用下,堤基内颗粒受到渗透力、浮力、颗粒间内聚力和内摩擦阻力的共同作用,当水力坡降达到一定程度时,即能够克服颗粒间内聚力及内摩擦阻力时,颗粒或颗粒群就会发生悬

浮、移动。通常把颗粒刚好发生移动时的瞬时水力坡降称为临界水力坡降。当堤基中的细颗粒在达到临界水力坡降后,堤坝内的细颗粒就会沿着骨架颗粒所形成的孔隙管道移动或被渗流带走,即发生渗透变形。土的渗透变形的发生和发展过程主要取决于两个因素:一是土颗粒的组成和结构,即通常说的几何条件;二是水动力条件,即作用在土体上的渗透力。在堤基施加较大的压力时,堤基内土颗粒之间的固结度会不同程度地增大,进而改变土颗粒的几何条件。因此施压后,堤基内土体受到渗流场和应力场的共同作用,并发生变化。

1.2 试验设计

1.2.1 几何条件设计

为使试验砂试样在一定渗流力下发生渗透变形,在参考相关文献^[15]的基础上,设计适当的颗粒级配如图2所示。

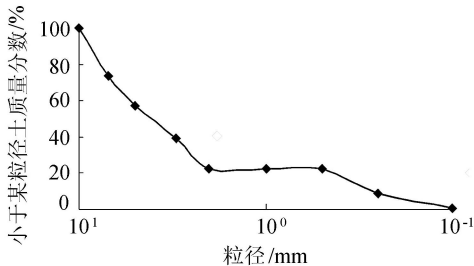


图2 试验用砂粒径分布曲线

1.2.2 试验模型设计

为模拟不同防渗墙高度对堤防安全性影响,设计进行56 cm、43 cm和30 cm共3种隔板高度的试验,不同隔板高度代表不同防渗墙高度。3种隔板高度对应的试验装置断面见图3。

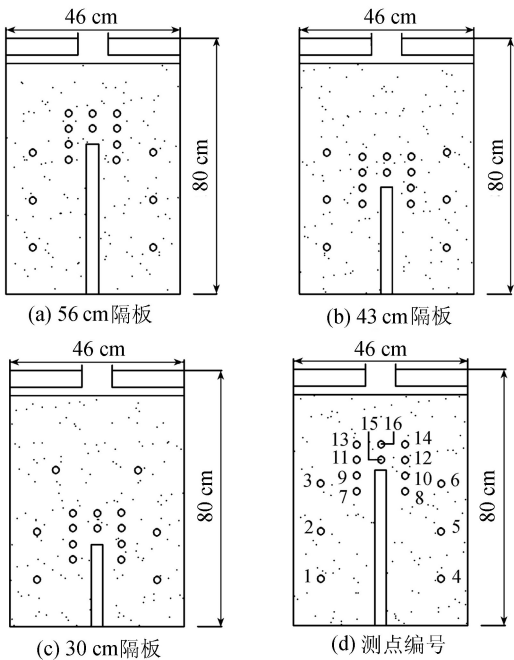


图3 坝基模型断面及测点布置

由图3可以看出,为便于测量防渗墙端部的测压管水头,各测点主要布置在各级隔板顶端的附近。3种不同隔板高度的试验装置统一的测点编号如图3(d)所示。

1.2.3 压力组合设计

为研究渗流场-应力场的耦合作用,在3种隔板高度下,依次进行了从不加压状态到逐级加压状态下的试验,各级压力组合见表1。

表1 压力组合		
压力级别	法向应力 P/MPa	实际加压 F/kN
不加压	0.0	0.00
一级加压	0.2	33.22
二级加压	0.4	66.44
三级加压	0.6	99.66
四级加压	0.8	132.88
五级加压	1.0	166.11

2 试验成果及分析

对上述3种隔板高度分别进行不同轴向应力状态的缺级配砂砾石强透水地基的渗流-应力耦合试验。鉴于篇幅所限,在此以43 cm隔板为例加以论述,并将分析结果与56 cm隔板和30 cm隔板对比。

2.1 堤基渗透坡降与出砂量及应力状态的关系

由于采用的是缺级配砂砾石模拟堤坝的强透水地基,因此在渗透坡降达到临界渗透坡降时,就会有一定数量的细砂被水流带出。试验中收集一定时间内流出的细砂,并根据平均流量得到此段时间内流出的水量,将细砂与水的质量比值定义为出砂的含砂率,可以得出各级轴向应力状态下出砂的含砂率与渗透坡降的对应关系,试验成果如图4所示。

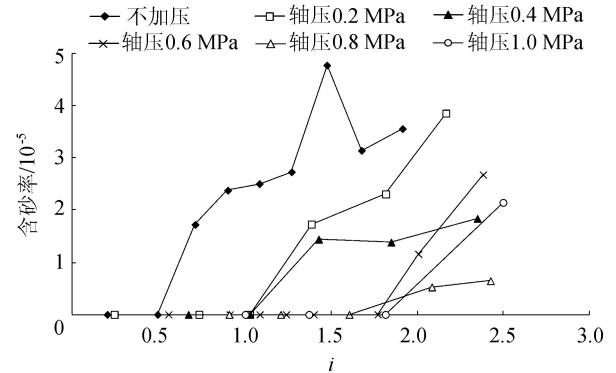


图4 不同应力状态下出砂量与渗透坡降的关系

由图4可知:

a. 不加压状态下,即轴向应力为0 MPa时,当渗透坡降达到0.712时开始出砂,即发生了渗透破坏。随着渗透坡降逐渐增大,出砂量也逐渐增大,当渗透坡降达到1.476时出砂量有明显的增幅;继续增大渗透坡降到1.677,出砂量开始下降,随后又随

着渗透坡降继续增大。分析认为,这是由于部分颗粒发生运移后,其空隙被附近的颗粒填充,形成暂时的阻塞,所以出现了出砂量下降的现象,而随着渗透坡降的进一步增大,颗粒继续进行运移,于是出砂量又继续上升。

b. 各组出砂量均是在渗透坡降逐渐增大至稳定时测量得到的,每一组的渗透坡降增幅不大,因此圆柱筒内的砂试样受到的渗透冲击力也比较小,每组出砂量的变化不显著。为了进一步研究在较大渗透冲击力作用下的出砂量变化,在不加压状态下将溢流桶重新降低至渗透坡降为0.75,待渗流稳定之后,把收集细砂的滤网放在出水口处,然后将渗透坡降一次性增大到1.96。观察到出水口处水流流速骤然增大,大量细砂被水流冲出,水流颜色也较为浑浊,只60 s就收集到41.318 g细砂。可见,水位骤升带来的渗透坡降突增对堤基的渗透破坏较大。一级加压状态下,即轴向应力为0.2 MPa时,渗透坡降从0.244逐渐增大到2.166,渗透坡降增大了1.922,出砂量增加了0.57 g。再次进行渗透坡降骤然增大的试验:降低溢流桶至渗透坡降为0.776,待渗流稳定之后,把收集细砂的滤网放在出水口处,然后将渗透坡降一次性增大到3.058,60 s内收集到7.15 g细砂,渗透冲击力的破坏作用十分明显。

c. 由于试验过程中渗透坡降是逐渐递增的,无法准确观测到每组试验颗粒起动瞬间的情况,在此认为当含砂率为此次试验中可检测到最小含砂率的一半(即 0.3×10^{-5})时颗粒开始起动,定义此时的渗透坡降为管涌临界渗透坡降。参考试验数据和图4,得到轴向应力与临界渗透坡降关系,见图5。

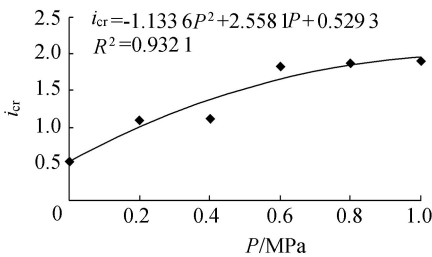


图5 轴向应力与临界渗透坡降关系

由图5可知,管涌临界渗透坡降随着轴向应力的增大而逐渐增大,由此拟合出轴向应力与临界渗透坡降的经验公式为

$$i_{cr} = -1.1336P^2 + 2.5581P + 0.5293 \quad (1)$$

式中: i_{cr} 为防渗墙的临界渗透坡降; P 为轴向应力,MPa。拟合的相关系数为0.9321。

需要说明的是,该经验公式是在图2砂粒级配、试样的孔隙率为22%、隔板高度为43 cm、渗透坡降在0.2~3.8之间、轴向应力为0~1.0 MPa等条件

下得到的。

2.2 堤基模型内测压管水头分布情况

监测坝基模型内 16 个测点在不同渗透坡降、不同应力状态下的测压管水头分布,并对比 3 个不同防渗墙高度的坝基模型试验结果,用 surfer7.0 绘制测压管水头分布图,不加压状态下的测压管水头分布如图 6 所示。可以看出,3 种防渗墙高度下,整体

的渗流趋势是相似的,即防渗墙的上游侧与下游侧渗透水流较为稳定,渗透水流的测压管水头从上游到下游逐级递减。总体上看,防渗墙上游侧水头损失大于下游侧水头损失,防渗墙端部水头降幅明显大于其他位置,并在端部附近区域形成了绕流区,可以推断,该区域渗流速度也较大。

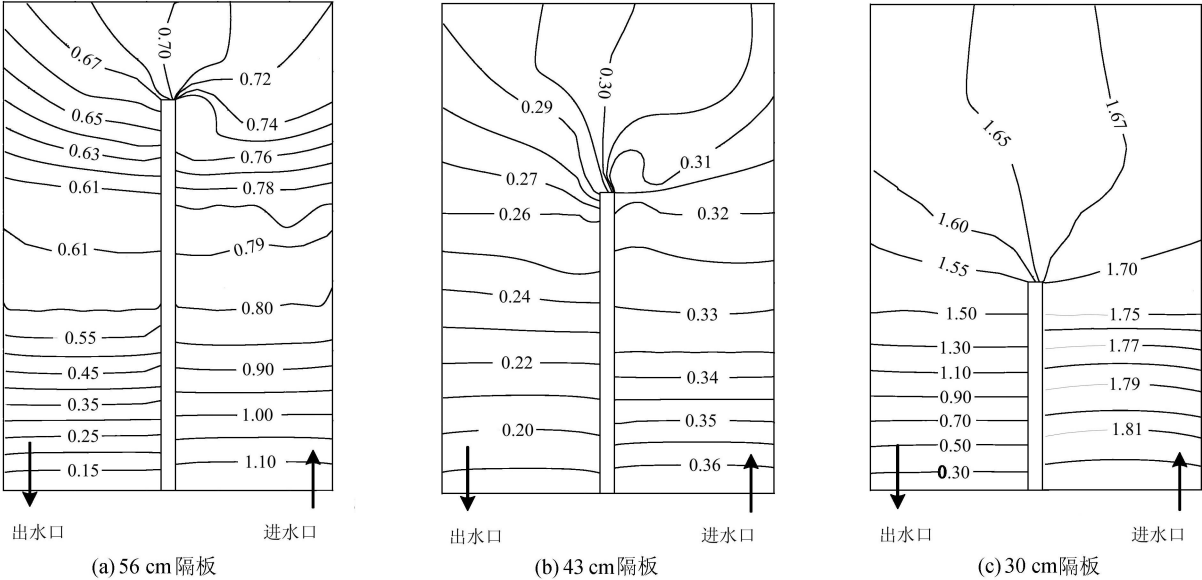


图 6 不同防渗墙高度的坝基模型测压管水头分布(单位:m)

不同隔板高度下端部梯度与平均梯度比较分析见表 2。这里平均梯度为图 6 中进水口和出水口水头差与渗径的比值,防渗墙端部梯度为隔板端部水头差与隔板厚度的比值。可以看出,端部梯度远大于平均梯度,即端部水头差所占比重较大。随着防渗墙高度的增加,这种比重有些微的降低,但保持在同一数量级内。防渗墙端部始终存在着水头等值线密集现象,并不因防渗墙高度的增大而消失。

表 2 防渗墙端部梯度与平均梯度的对比

防渗墙高度/ cm	水头差 $\Delta h/\text{cm}$	平均梯度 J_{cp}	端部梯度 J_{QB}	梯度比 J_{QB}/J_{cp}
56	105.0	0.93	10.0	10.75
43	18.5	0.21	2.5	11.90
30	173.0	2.84	15.0	12.16

2.3 堤基防渗墙端部破坏比降与应力状态关系

由上文可知,堤基防渗墙端部的渗透速度明显大于其他位置,同等条件下,防渗墙端部土体更易发生局部渗透破坏,进而诱发堤坝的整体破坏。因此,有必要进一步研究应力状态与防渗墙端部渗透破坏坡降的关系。

定义试验过程中检测到的出砂量骤增时端部水力坡降为端部破坏坡降,测量此时防渗墙端部 9 号和 10 号测点的水头值(见图 3),可以计算出水头差 H ,渗径 L 为 9 号 10 号测点之间的距离,这里将 H/L

近似认为是防渗墙端部附近较小范围内的平均坡降。在不同轴压状态下进行测量计算,可得到轴向应力与防渗墙端部破坏坡降的关系,见图 7。由图 7 可知,防渗墙端部的破坏坡降较大,轴向应力与防渗墙端部的破坏坡降呈线性关系,拟合出的端部破坏坡降与轴向应力的经验公式为

$$i = 10.136P + 2.2638 \tag{2}$$

式中 i 为防渗墙端部的破坏坡降。拟合的相关系数为 0.9976。

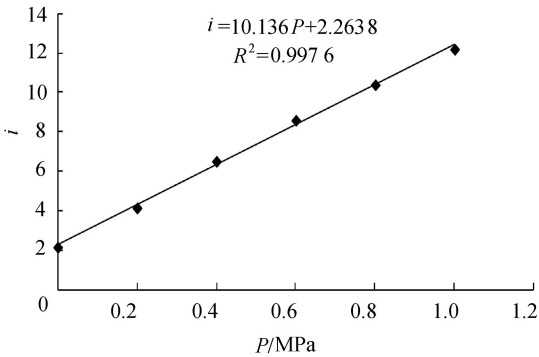


图 7 轴向应力与防渗墙端部破坏坡降的关系

需要说明的是,该经验公式是在图 2 砂粒级配、试样的孔隙率为 22%、渗透坡降在 0.2 ~ 3.8 之间、隔板高度为 43 cm、轴向应力为 0 ~ 1.0 MPa 等条件下得到的。

3 结 论

a. 随着渗透坡降逐渐增大,出砂量并不随之线性增长,而是呈现逐渐增大—短暂减小—继续增大的趋势,说明伴随着颗粒的运移—堵塞—堵塞被冲开—再运移的运动过程,堤基管涌反复递增地发展。另外,水位骤升引起的渗透坡降突然增大会产生极大的渗透冲击力作用,并对堤基渗透破坏产生很大影响。

b. 堤坝缺级配砂砾石强透水地基模型的临界渗透坡降随着轴向应力的增大而逐渐增大。

c. 在上游高水头的作用下,渗透水流的测压管水头从上游进水口到下游出水口逐级递减,而堤基防渗墙端部的测压管水头梯度明显大于其他位置。由此可以推断,同等条件下,防渗墙的端部位置的渗流速度较大,更容易发生渗透变形破坏。

d. 在整个防渗墙渗流轮廓线上,防渗墙端部的渗流水头梯度最大。对于防渗墙整体来说,渗流通道增长,平均渗透坡降减小。而端部局部的破坏坡降较大,普遍大于实际工程中的允许坡降。从总体上看,适当增加防渗墙高度对于控制渗透破坏的发生有着积极意义。

e. 应力状态对防渗墙端部渗透坡降影响很大,轴向应力 P 与防渗墙端部的渗透破坏坡降 i 呈线性关系,轴压越大,端部的渗透破坏坡降就越大。因此,在研究坝基深厚覆盖层垂直防渗体端部的渗透稳定性时,考虑其上覆压力对提高抗渗能力的有利作用效应是有必要的,也是客观合理的。同时,也充分印证了对于修建在深厚覆盖层上的堆石坝或堤防,坝脚下游侧设置一定范围的压重物,同样具有提高覆盖层渗流出渗部位的抗渗能力之功效。

参考文献:

[1] 顾淦臣. 国内外土石坝重大事故剖析:对若干土石坝重大事故的再认识[J]. 水利水电科技进步, 1997, 17(1): 13-20. (GU Ganchen. Dissection of significant incidents of embankment dams in the world: re-recognition of their causes[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1997, 17(1): 13-20. (in Chinese))

[2] 葛建. 堤坝渗透变形及稳定性分析[J]. 水科学与工程, 2005(6): 48-50. (GE Jian. Analysis of dikes seepage deformation and stabilization[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2005(6): 48-50. (in Chinese))

[3] 姚秋玲, 丁留谦, 刘昌军, 等. 堤基管涌破坏特性研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(4): 349-357. (YAO Qiuling, DING Liuqian, LIU Changjun, et al. Overview on the research of the mechanism of backward

erosion piping in dike foundations[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(4): 349-357. (in Chinese))

[4] 谷跃辉, 崔豪. 堤防渗透破坏形式与实例分析[J]. 吉林水利, 2015(4): 13-15. (GU Yuehui, CUI Hao. Analysis of seepage failure modes and failure cases of dike[J]. Jilin Water Resources, 2015(4): 13-15. (in Chinese))

[5] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金傍, 等. 堤基渗流无害管涌试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 46-53. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, CAI Jinbang, et al. Experimental study on harmless seepage piping in levee foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 46-53. (in Chinese))

[6] 刘杰, 崔亦昊, 谢定松. 江河大堤均匀砂基渗透破坏机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 643-645. (LIU Jie, CUI Yihao, XIE Dingsong. Failure mechanism of seepage in uniform sand foundation of river levee[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 643-645. (in Chinese))

[7] 刘杰, 谢定松, 崔亦昊. 江河大堤堤基砂砾石层管涌破坏危害性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1189-1191. (LIU Jie, XIE Dingsong, CUI Yihao. Destructive tests on piping failure of sandy gravel layer of river dikes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1189-1191. (in Chinese))

[8] 陈建生, 何文政, 王霜, 等. 双层堤基管涌破坏过程中上覆层渗透破坏发生发展的试验与分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1778-1783. (CHEN Jiansheng, HE Wenzheng, WANG Shuang, et al. Laboratory tests on development of seepage failure of overlying layer during piping of two-stratum dike foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1778-1783. (in Chinese))

[9] 张家发, 吴昌瑜, 朱国胜. 堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J]. 水利学报, 2002, 33(9): 108-111. (ZHANG Jiafa, WU Changyu, ZHU Guosheng. Experimental study on seepage deformation propagation control using impervious wall of suspension type[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9): 108-111. (in Chinese))

[10] 毛昶熙. 悬挂式防渗墙的优越性[J]. 中国水利, 2010(8): 41-42. (MAO Changxi. The superiority of suspended cut-off wall[J]. China Water Resources, 2010(8): 41-42. (in Chinese))

[11] 张家发, 朱国胜, 曹敦倡. 堤基渗透变形扩展过程和悬挂式防渗墙控制作用的数值模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(6): 48-50. (ZHANG Jiafa, ZHU Guosheng, CAO Dunlu. Numerical simulation of seepage deformation propagation in dyke foundation and effects of cut-off wall of suspension type[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(6): 48-50. (in Chinese))

(下转第 46 页)

小开度范围以内,并且随开度的增减变化很快,闸门动水启闭的最不利开度在小开度范围内。

b. 与前人的常见潜孔式闸门底主梁开孔研究成果对比发现,在潜孔式闸门底主梁开孔能够显著降低闸门启闭力,而对于长输水隧洞中段的有压平面闸门,当底主梁开孔增大到 27% 时闸门最大动水启闭力分别只降低 5.7% 和 7.8%,降幅不大,底主梁开孔对最大启闭力降低作用不明显。

c. 设计底缘形式的闸门闸下水流平顺,脉压时均值在小开度内变化较大,脉压均方差在整个开度范围内变化较小,闸门结构干、湿模态的基频与水流脉动主频相差较大,发生共振的可能性不大。模型试验表明该工程闸门门底水流的下曳力变化不大且数值较小,底缘压力对启闭力影响较小。但平面闸门运行中水流诱发闸门结构弹性变形振动因素有很多,例如水封漏水引起的闸门整体自激振动,而这个问题在模型试验中无法模拟,因此,对于长输水隧洞下的深孔闸门水流诱发闸门结构振动问题还有待于进一步深入研究。

参考文献:

[1] 余俊阳,易春,罗文强,等.小湾拱坝放空底孔闸门设计研究[C]//水电 2006 国际研讨会论文集.北京:中国水利水电出版社,2006;126-134.

[2] 龙朝晖.溪洛渡水电站深孔事故闸门和工作闸门的设计[J].水电站设计,2003,19(1):12-18. (LONG Zhaohui. Design of deep hole accident gate and working gate of Xiluodu Hydropower Station[J]. Electromechanical Technology of Hydropower Station,2003,19(1): 12-18. (in Chinese))

[3] 刘永胜,严根华,赵建平.电站进水口快速闸门振动特性研究[J].固体力学学报,2011,10(增刊1):382-387. (LIU Yongsheng, YAN Genhua, ZHAO Jianping. Study on vibration characteristics of stop gate[J]. Acta Mechanica Solida Sinica,2011,10(Sup1):382-387. (in Chinese))

[4] 练继建.黄河积石峡水电站工程中孔泄洪洞进口水力学及闸门振动试验报告[R].天津:天津大学,2006.

[5] 郝鑫,黄海燕,王海军,等.高水头平面闸门小开度的数值模拟与试验对比[J].南水北调与水利科技,2012,10(1):30-34. (HAO Xin, HUANG Haiyan, WANG Haijun, et al. Comparison of numerical simulation and experimental measurements on bulkhead gate with high head and small opening [J]. South to North Water Transfers and Water Science&Technology, 2012, 10 (1) : 30-34. (in Chinese))

[6] 张文远.溪洛渡水电站泄洪洞事故闸门启闭力及流激振动试验研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2006.

[7] 章晋雄,吴一红,张东,等.基于改造底缘的水电站事故平面闸门启闭力优化试验研究[J].水利水电技术,

2013,44(7):134-137. (ZHANG Jinxiong, WU Yihong, ZHANG Dong, et al. Experimental study on optimization of hoisting force of emergency plane gate for hydropower station based on improvement of its bottom edge [J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2013, 44 (7) : 134-137. (in Chinese))

[8] 练继建,林继铺,叙利亚迪什林水电站底孔事故闸门持住力实验报告[R].天津:天津大学,1995.

[9] 李洪波,韩平.闸门水力特性综述[J].南水北调与水利科技,2005,3(2):56-58. (LI Hongbo, HAN Ping. Summarization of hydraulic characteristic of the sluice gate [J]. South to North Water Transfers and Water Science&Technology, 2005, 3 (2) : 56-58. (in Chinese))

[10] 周通.高压平面闸门水力特性及流激振动研究[D].天津:天津大学,2006.

[11] 肖兴斌,王业红.高水头平板闸门水力特性研究[J].水利水电科技进展,2001,21(4):29-32,46. (XIAO Xingbin, WANG Yehong. Study on the hydraulic characteristic of plane gate with the high water head [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21 (4) : 29-32, 46. (in Chinese))

[12] 刘鹏,高振海,严根华,等.大跨度上翻式拱形钢闸门振动特性及抗振优化[J].水利水电科技进展,2011,31(3):74-79. (LIU Peng, GAO Zhenhai, YAN Genhua, et al. Vibration characters and anti vibration optimization of long span flip arch steel gates [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (3) : 74-79. (in Chinese))

(收稿日期:2015 - 04 - 18 编辑:郑孝宇)

+++++
(上接第 40 页)

[12] 王保田,陈西安.悬挂式防渗墙防渗效果的模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):2767-2771. (WANG Baotian, CHEN Xian. Research on effect of suspended cut-off wall with simulation test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (1) : 2767-2771. (in Chinese))

[13] 王晓燕,党发宁,田威,等.大渡河某水电站围堰工程中悬挂式防渗墙深度的确定[J].岩土工程学报,2008,30(10):1565-1568. (WANG Xiaoyan, DANG Faning, TIAN Wei, et al. Determination of depth of suspended cut-off walls in cofferdam of a hydraulic power station in Dadu River [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (10) : 1565-1568. (in Chinese))

[14] 罗玉龙,吴强,詹美礼,等.考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界界降试验研究[J].岩土力学,2012,33(增刊1):73-78. (LUO Yulong, WU Qiang, ZHAN Meili, et al. Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (Sup1) : 73-78. (in Chinese))

[15] SKEMPTON A W, BROGAN J M. Experiments on piping in sandy gravels[J]. Geotechnique, 1994, 44(3):449-460. (收稿日期:2015 - 05 - 27 编辑:郑孝宇)