

除险加固水闸的消能防冲措施

韩成银¹, 刘红军¹, 傅宗甫², 崔 贞²

(1. 江苏省洪泽湖大堤高良涧闸加固工程建设处, 江苏 淮安 223199; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:基于某除险加固工程水力学模型试验,通过对闸下水流流态、流速分布、特征断面垂向最大平均流速以及冲刷特性的观测,分析了设计方案条件闸下水流流态恶化及冲刷严重的原因,即下游翼墙加固改变了水流的边界条件,导致出闸水流受到边界挤压而主流集中,局部流速增大,冲刷加剧。通过不同消能防冲方案的试验比较,提出了利用分隔墩消除出闸水流集中的现象;分隔墩消除了主流受边界挤压现象,起到了改善闸下水流流态,均化闸下水流流速分布,降低河床最大流速,减轻闸下冲刷的作用,且体型结构简单,易于施工。

关键词:除险加固;水闸;消能防冲;分隔墩

中图分类号:TV653 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)04-0042-05

Energy dissipation and scour prevention measures of reinforced sluices//HAN Chengyin¹, LIU Hongjun¹, FU Zongfu², CUI Zhen²(1. *Construction Division of Reinforcement Project of Gaoliangjian Sluice in Hongze Lake Embankment, Huai'an* 223199, China; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, China)

Abstract: Based on hydraulic model tests of a reinforcement project, the water flow pattern, velocity distribution, maximum depth-averaged velocity of a typical section, and scouring characteristics downstream of the sluice were measured, and the cause of water flow pattern deterioration and scour severity under the design scheme were analyzed. The cause is considered to be the change of the flow boundary condition after reinforcement of the downstream wing wall, which concentrates the main flow downstream of the sluice, increases the velocity locally, and intensifies scouring. Through comparison of different energy dissipation and scour prevention schemes, the method of using partition piers to eliminate the flow accumulation is put forward. Partition piers can eliminate the main flow extrusion by the boundary, improve the flow pattern downstream of the sluice, homogenize the velocity distribution downstream of the sluice, reduce the maximum velocity of the river bed, and decrease scour downstream of the sluice. The partition piers have a simple structure and construction.

Key words: reinforcement; sluice; energy dissipation and scour prevention; partition pier

平原水闸的闸下消能防冲关系到水闸结构自身的稳定性以及闸下河道、堤防的安全。根据全国水闸安全普查工作的不完全统计,水闸的各类安全隐患中,闸下游消能防冲设施严重损坏占 42% 左右^[1]。水闸工程属于低水头控制建筑物,大多采用底流消能方式。关于底流消能的相关研究已经积累了丰富的经验,主要集中在水跃的水力特性、跃后水流的紊动特性、水跃消能率、消力池形式和辅助消能工的研究上。张挺等^[2]通过试验分析了 F 形反坡水跃的水力特性,根据试验结果确定了水跃剖面面积修正系数的值,用以分析确定水跃参数与弗劳德数等之间的关系。周玉香等^[3]通过试验找出了低

弗劳德数水跃消能与一般水跃消能规律的本质区别,得出了低弗劳德数水跃在跃后段随着弗劳德数的减小而出现的水面波动能、断面流速分布、跃后段长度、底流速等水力要素的变化特点,分析了低弗劳德数水跃消能的一些工程措施。王海云等^[4]基于水力学模型试验对于具有低水头、大单宽流量、低弗劳德数、深尾水以及下游水位落差变幅大等特点的泄洪消能问题,提出了采用淹没式宽尾墩消力池联合消能方式,较好地解决了下游河床的消能防冲问题。Hasan 等^[5]提出了利用断面突然收缩或扩散产生局部范围内的水流紊动从而进行消能的手段。Kashefipour 等^[6]分析了突扩角对空间水跃共轭水

深、水跃长度及消能率等特性的影响。Ludovic 等^[7]采用模型试验以及数值仿真的方法探讨了闸门大开度淹没条件下水跃区的流速分布及紊动特性,认为高淹没度条件下闸后水流收缩系数随闸门开度的增加而增加。李占松等^[8]基于模型试验资料绘制了闸门控制运行曲线图,继而制定了满足消能防冲要求的闸门控制运行方式。笔者曾经针对超低弗劳德数低尾水条件提出在下游护坦设置梅花形布置的墩群辅助消能工的消能方式,对于解决闸下的二次跌落,增加海漫段水深,减小流速的效果明显^[9]。对于建设年代久远的水闸,往往存在局部混凝土老化、粗骨料外露、钢筋锈蚀,致使岸墙、翼墙、闸室闸墙等存在裂缝等安全隐患^[10-12]。在对水闸进行除险加固时往往需要对闸墩增设支撑体,对翼墙新建钢筋混凝土 L 形墙翼墙加固体等处理^[13-14]。

水闸除险加固对闸墩及翼墙的处理虽然增加了结构的稳定性,但诸如翼墙新建钢筋混凝土 L 形墙等改变了水闸泄洪时水流的出流边界,容易产生偏流、主流集中等不良流态,加剧闸下河道与岸坡的冲刷,影响水闸的安全运行。本文结合实际除险加固水闸工程的消能防冲设计开展研究,该工程水闸共 16 孔,每孔净宽 4.2 m,闸室总宽 81.24 m,闸顶高程 19.5 m,闸底高程 7.5 m,采用消力池消能,消力池底高程 5.0 m。闸门为平板直升钢闸门。上游翼墙圆弧半径为 50 m,下游翼墙为重力式浆砌块石结构,圆弧半径为 40 m。该水闸建成于 1952 年,之前共进

行过 4 次较大规模的加固和 3 次大修,主要是对消力池底板、斜坡段、下游齿坎以及下游翼墙底部进行了加固及改造(图 1)。试验中针对由于下游翼墙加固导致出闸水流受到边界挤压而主流集中、局部流速增大、冲刷加剧等现象,分析了水流流态恶化的原因,并通过不同方案的试验比较提出了利用分隔墩消除出闸水流偏流、主流集中以减轻冲刷的方法。

1 模型设计及试验参数

1.1 模型设计

模型按重力相似准则设计,兼顾阻力相似,几何正态,几何比尺为 1 : 40。分定床和防冲槽下游局部动床模型两种,局部动床模型沙依据原型防冲槽下游附近河床质颗粒级配按泥沙起动流速相似准则进行选择,比选后模型沙选用中值粒径为 1.1 mm 的黑电木粉。为了全面观测闸下的水流流态、流速分布特征,在水闸下游布置了 4 个流速测量断面(从上游往下游依次编号为 D01 ~ D04),其中 D02 号测速断面应对应防冲槽末端,流速测量断面位置桩号见图 2。

试验中水闸水位采用测针量测,测针的测量精度为 ± 0.1 mm,水流流速采用光电旋桨式传感器进行测量,旋桨式传感器测量精度 ± 2.5 cm/s,由水工混合模拟测控系统对各测点流速进行实时、同步测量。闸下冲坑深度采用缓慢停水后利用水准测量的方法进行测量,水准测量的精度为 ± 0.5 mm。

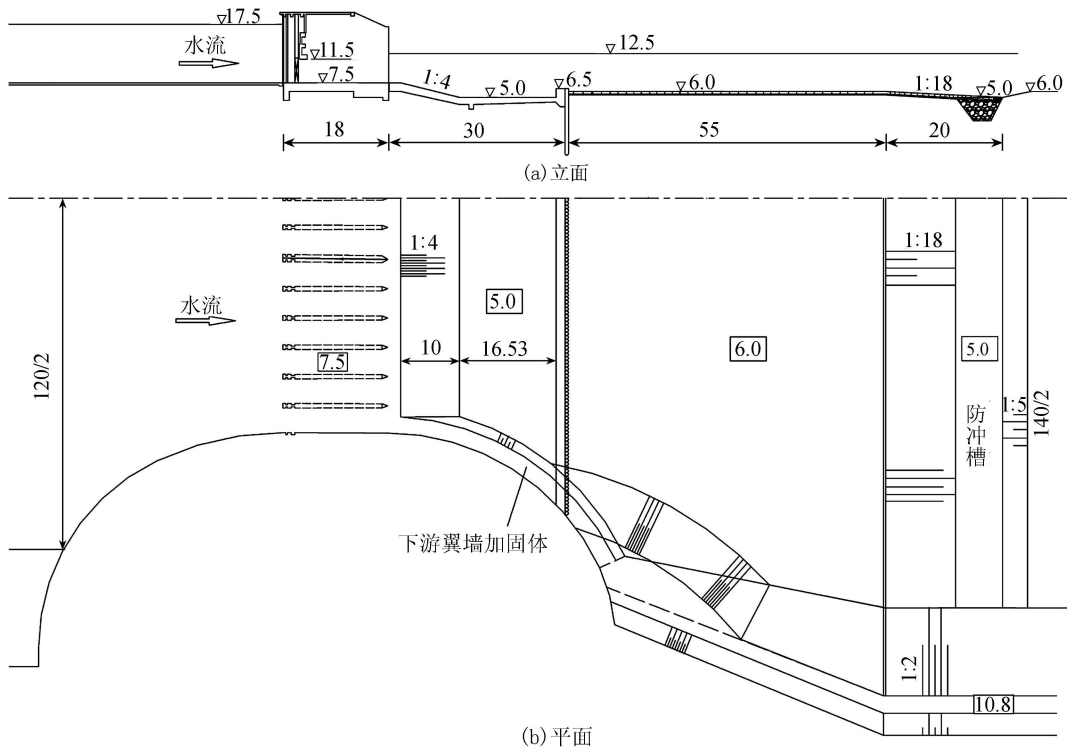


图 1 除险加固水闸布置示意图(单位:m)

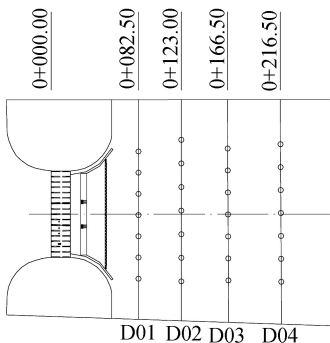


图2 闸下流速断面布置示意图(桩号单位:m)

1.2 试验参数组合

过闸水流的流动结构与上下游水位以及流量等参数密切相关,选择的依据是其组合应该具有广泛的代表性,而且参数范围具有外包络特性。试验中根据水闸运行的上下游水位及流量范围,选择了4个运行频率较高的上下游水位流量参数组合(表1),分别代表高水位大流量、中水位中流量以及低水位小流量的消能防冲试验。

表1 试验水位流量参数组合

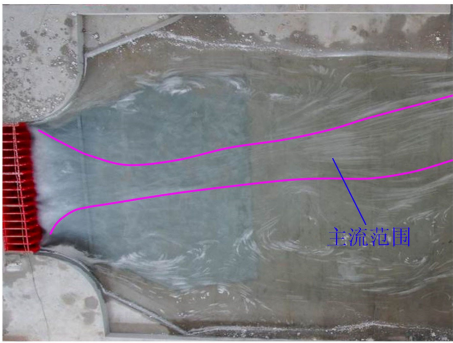
工况	上游水位/m	下游水位/m	过闸流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	17.0	11.0	1000
2	16.0	11.0	800
3	13.5	10.8	600
4	14.0	9.0	350

2 试验结果分析

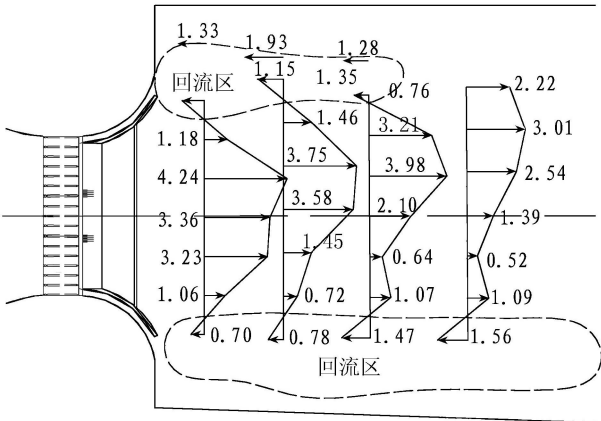
2.1 设计方案试验

a. 闸下水流流态及流速分布。试验观测表明,受消力池两侧加固体平台的影响,两边孔出闸水流不能在消力池内形成水跃,水流主流位于水体表面,并斜向越过消力池尾坎,消力池两侧形成强烈的回流,回流区对出闸水流的挤压作用明显,消力池尾坎处的主流宽度约为50 m(相当于中间10孔闸孔的宽度)。刚出消力池的水流主流基本位于河道中部,之后沿程主流不稳定而左右摆动,偏于河道左侧的几率较大,主流的两侧为较大的回流区(图3(a))。试验观测到河道断面流速分布不均匀,4种工况条件下防冲槽末端断面(D02)的最大垂线平均流速分别为3.75 m/s、3.08 m/s、1.22 m/s和1.61 m/s(图3(b))。

b. 闸下冲刷特性。设计方案闸下冲刷试验综合考虑定床模型闸下水流垂向平均流速的大小以及水深等因素,进行工况1(上游水位17.0 m,下游水位11.0 m,过闸流量1000 m^3/s)和工况4(上游水位14.0 m,下游水位9.0 m,过闸流量350 m^3/s)的冲刷试验。试验观测到,工况1虽然闸下水深较大,但是因为过闸流量大使得防冲槽后流速也比较大,对闸



(a) 流态



(b) 流速分布(单位:m/s)

图3 设计方案闸下水流流态及流速分布(工况1)

下河床的冲刷较为严重,试验测得防冲槽后河床冲坑最深点高程为-3.50 m(冲刷深度达9.5 m),而且冲刷范围也较大;而工况4虽然闸下水深比较浅,但是过闸流量小使得防冲槽后的流速也较小,对闸下的冲刷较轻,防冲槽后河床冲坑最深点高程约2.94 m(冲刷深度为3.06 m),而且冲刷的范围相对较小。

c. 闸下水流流态恶化及冲刷严重原因分析。从图1可以看出,设计方案由于水闸闸室水平段末端开始沿翼墙底部设置了顶宽约2.8 m(占2/3闸孔宽度)、顶高程为7.5 m(与闸底板高程相同)的加固体,加固体的高度从闸底板末端的0.0 m渐变到消力池斜坡末端的2.5 m,之后保持2.5 m高度不变。由于闸底板下游翼墙加固体的存在,水闸泄流时边孔下泄水流约2/3的出流宽度被翼墙加固体侵占而受到约束,从而迫使该部分水流改变流向,向中部斜向流向下流,造成消力池内主流集中,两侧出现回流,并进一步挤压主流,使得出池水流主流集中,最后导致下游防冲槽后河道局部流速增大,河床冲刷加重,而且下游河道岸脚附近也遭受回流的淘刷。

2.2 比较方案试验

针对设计方案闸下出现偏流、回流、主流集中、断面流速分布不均匀、局部流速大等不良的水流流态,尝试通过对闸下消能工体型的优化来抑制闸下主流集中,消除闸下两侧回流,均化下游河道断面流

速分布,从而减轻闸下冲刷。优化的主要出发点是通过改变消力池尾坎的高度、尾坎的平面布置形式以及在消力池内设置辅助设施等方法,对闸下水流进行调整,各方案体型见图4。

比较方案试验基于工况2(上游水位16.0 m,下游水位11.0 m,过闸流量800 m³/s)进行,主要比较闸下的水流流态及流速分布,试验观测到,相比设计方案,方案1至方案3消力池内流态改善不明显,出池后的水流流态有不同程度的改善。方案4则对包括消力池在内的整个闸下的水流流态均有大幅改善,完全消除了消力池内的斜流流态,消力池后主流集中及不稳定现象消失,均化了断面的流速分布。工况2各比较方案闸下的主要水流特性列于表2,为了比较,将该工况设计方案也列于其中。

2.3 优选方案选择

优选方案的选择需要结合闸下消力池及下游河道的水流流态、流速分布、河床及岸脚冲刷、构筑物体型结构简单等因素综合考虑。从比较方案的试验

结果中可以看出:方案1虽然对闸下河道的流速分布具有一定的均化作用,一定程度上减小了闸下河道断面最大垂线平均流速和近岸回流流速,但是消力池内流态较差,对下游河道及岸脚的防冲改善效果不理想;方案2和方案3对于均化闸下河道的流速以及降低河道断面最大垂线平均流速效果显著,但是消力池内的水流流态较差,下游河道的近岸流速仍然较大,对减轻河床的防冲效果明显,但是岸脚仍然存在冲刷风险;方案4在两边孔闸墩下游增设分隔墩,隔离了消力池内受翼墙加固体挤压斜向流动的水流,对整个闸下(包括消力池)的水流流态均有大幅的改善,完全消除了消力池内的斜流流态,消力池后主流集中及不稳定现象消失,断面的流速分布也得到了有效均化,防冲槽断面最大垂线平均流速及近岸流速均大幅度减小,既大幅减轻了闸下河床的冲刷,又较大程度地缓解了对岸脚的冲刷。另外,方案4还具有体型结构简单、施工方便、工程量小等特点,因此综合考虑认为方案4可以作为解决

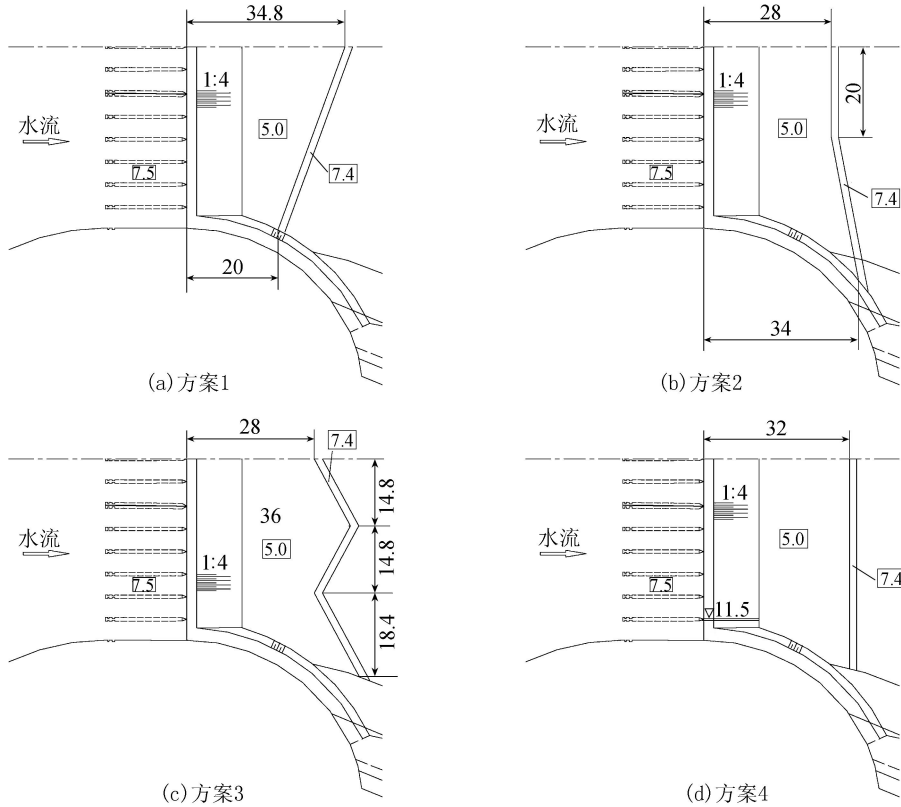


图4 各比较方案体型(单位:m)

表2 设计方案及工况2各比较方案闸下主要水流特性

方案	消力池内流态	消力池后河道流态	D02断面垂线平均流速/(m·s ⁻¹)	
			最大	近岸
设计方案	存在斜流和回流,主流集中	主流不稳定,河道左右侧存在回流,河道断面流速分布不均匀	3.08	-1.44
方案1	存在斜流和回流,主流集中	主流较稳定,河道右侧有回流,河道断面流速分布较不均匀	2.65	-1.29
方案2	存在斜流和回流,主流集中	主流稳定,河道两侧无回流,河道断面流速分布较均匀	1.33	0.91
方案3	存在斜流和回流,主流集中	主流稳定,河道两侧无回流,河道断面流速分布较均匀	1.01	1.22
方案4	无斜流、回流和主流集中现象	主流稳定,河道两侧无回流,河道断面流速分布较均匀	1.56	0.76

该类除险加固水闸泄洪消能防冲问题的优选方案。

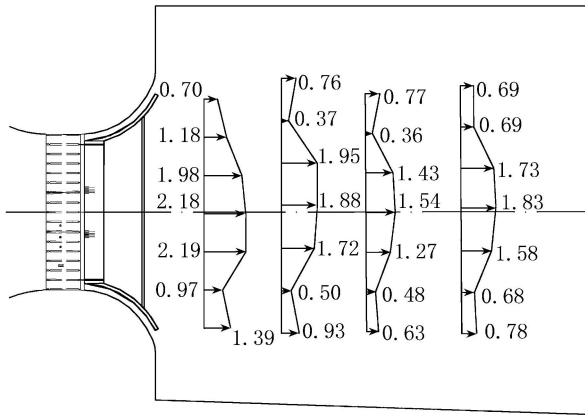
2.4 优选方案试验

为了进一步了解优选方案的适用范围,对试验水位流量组合各工况进行了全面的试验。

a. 闸下水流流态及流速分布。优选方案在闸墩后的水平段及斜坡段增加了分隔墩,将两边孔与相邻闸孔进行了隔离,各种水位流量组合工况下,消力池内无斜向水流集中和回流现象。出消力池后的水流扩散状况良好,河道两侧没有出现回流,闸下水流的主流稳定。河道内横断面流速分布得到了很大程度的均化,实测闸下防冲槽末端断面最大垂线平均流速分别为 1.95 m/s、1.56 m/s、0.98 m/s 和 1.00 m/s (设计方案分别为 3.75 m/s、3.08 m/s、1.22 m/s 和 1.61 m/s),水流流态及垂线平均流速分布见图 5。



(a) 流态



(b) 流速分布(单位: m/s)

图 5 优选方案闸下水流流态及流速分布(工况 1)

b. 闸下冲刷特性。与设计方案对应,优选方案的闸下冲刷试验进行了工况 1(上游水位 17.0 m,下游水位 11.0 m,过闸流量 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$)和工况 4(上游水位 14.0 m,下游水位 9.0 m,过闸流量 $350 \text{ m}^3/\text{s}$)两种试验。试验观测结果表明,由于优选方案均化了闸下河道的断面流速分布,消除了主流集中现象,减小了河道的最大垂线平均流速,因此相较于设计方案,优选方案两种工况下防冲槽后的冲刷均比较轻,冲刷范围较小,下游河道岸脚未出现冲刷现象。两种工况防冲槽后冲坑最深点高程分别为 2.74 m 和

3.02 m,相应的冲刷深度分别为 3.26 m 和 2.74 m (设计方案分别为 9.50 m 和 3.06 m)。

3 结 论

a. 除险加固水闸的消能防冲设计往往由于以往对闸墩及翼墙局部加固处理等改变了水闸泄洪时水流的出流边界,容易产生偏流、主流集中等不良流态,加剧对闸下河道与岸坡的冲刷,影响水闸安全运行。

b. 水闸翼墙根部的加固平台对水闸出流影响显著,消力池内产生斜流,并在两侧形成强烈的回流,回流区对出闸水流的挤压作用明显,出消力池的主流集中,流速分布不均匀,下游河道两侧近岸回流严重,容易造成闸下河床及岸脚的严重冲刷。

c. 通过对消力池尾坎体型(高度及平面形态)的调整可以不同程度地改善出池水流的流态及流速分布,但对于消力池内的斜流无明显的改善效果。

d. 采用在水闸两侧边孔与相邻闸孔间闸墩后增加分隔墩与调整消力池尾坎相结合的方法,可以大幅改善由于翼墙加固平台造成的水流流态恶化现象,有效减轻闸下河床冲刷,避免岸脚淘刷。

参考文献:

- [1] 水利部水利建设与管理总站,黄河水利科学研究院,河南黄河勘测设计研究院. 病险水闸除险加固技术指南[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009.
- [2] 张挺,许唯临,伍超,等. F 型反坡水跃特性实验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2011,39(2):239-297. (ZHANG Ting, XU Weilin, WU Chao, et al. Study on characteristics of F-shape hydraulic jump in adverse-slope channel[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2011, 39(2):239-297. (in Chinese))
- [3] 周玉香,翟召华,季新民,等. 低 Fr 数消能规律研究[J]. 山东大学学报(工学版),2005,35(4):80-84. (ZHOU Yuxiang, ZHAI Zhao-hua, JI Xinmin, et al. Experimental study on low Froude number flow[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2005,35(4):80-84. (in Chinese))
- [4] 王海云,戴光清,杨庆. 低水头、大单宽流量泄洪消能方式研究[J]. 水力发电,2006,32(8):25-26. (WANG Haiyun, DAI Guangqing, YANG Qing. Research and test for energy dissipation form of low head, large-unite discharge flood discharging[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 32(8):25-26. (in Chinese))
- [5] HASAN R, MATIN A. Experimental study for sequent depth ratio of hydraulic jump in horizontal expanding channel[J]. Journal of Civil Engineering, 2009(1):1-9.

(下转第 62 页)

- evaluation of the effect of nano-organosilane anti-stripping additive on the moisture susceptibility of HMA mixtures under freeze-thaw cycles [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48(11): 1009-1016.
- [5] WEI J M, ZHANG Y Z, ZHANG Y, et al. Effect of anti-stripping agents on surface free energy of asphalt binders [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(2): 162-165.
- [6] HESAMI S, ROSHANI H, HAMED G H, et al. Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47(5): 935-941.
- [7] HAO P, LIU H A. Laboratory study of the effectiveness of various additives on moisture susceptibility of asphalt mixtures [J]. ASTM Journal of Testing and Evaluation, 2006, 34(4): 261-268.
- [8] 张应波, 王为标, 兰晓, 等. 土石坝沥青混凝土心墙酸性砂砾石料的适用性研究 [J]. 水利学报, 2012, 43(4): 460-466. (ZHANG Yingbo, WANG Weibiao, LAN Xiao,

- et al. Research on the suitability of acidic gravels for asphalt core of embankment dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4): 460-466. (in Chinese))
- [9] 何建新, 朱西超, 杨海华. 采用砾石骨料的心墙沥青混凝土水稳性能试验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2014(11): 109-112. (HE Jianxin, ZHU Xichao, YANG Haihua. Experimental research on the gravel aggregate water stability performance of asphalt concrete core wall [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(11): 109-112. (in Chinese))
- [10] 杨耀辉, 何建新, 王怀义. 心墙沥青混凝土配制中砾石骨料酸碱性判定方法的探讨 [J]. 水电能源科学, 2015(9): 117-120. (YANG Yaohui, HE Jianxin, WANG Huaiyi. Discussion on the method of determining the acidity and alkalinity of the gravel aggregate to confect core wall asphalt concrete [J]. Water Resources and Power, 2015(9): 117-120. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-07-27 编辑: 骆超)

(上接第 46 页)

- [6] KASHEFIPOUR S M, BAKHTIARI M. Hydraulic jump in a gradually expanding channel with different divergence angles [C]//33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment. Vancouver, Canada: [s. n.], 2009: 91-98.
- [7] LUDOVIC C, GILLES B. Experimental and numerical investigation of flow under sluice gates [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012(4): 367-373.
- [8] 李占松, 高双聚, 杨玲霞. 平原区水闸闸下消能防冲与闸门控制运行 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 46-48. (LI Zhansong, GAO Shuangju, YANG Lingxia. Energy dissipation and scour prevention and control operation of sluice gates in plain regions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 46-48. (in Chinese))
- [9] 王海阳, 傅宗甫. 超低弗劳德数闸下消能试验 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 73-76. (WANG Haiyang, FU Zongfu. Experiments on under sluice energy dissipation at ultra-low Froude number [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(6): 73-76. (in Chinese))
- [10] 张羽. 浅析上海市水闸安全鉴定 [J]. 浙江水利科技, 2016(3): 67-69. (ZHANG Yu. Analyses the safety appraisal of sluices in Shanghai [J]. Zhejiang Hyrotechnics, 2016(3): 67-69. (in Chinese))
- [11] 蔡新. 水利工程安全隐患与病害特点 [J]. 小水电, 2004(6): 35-37. (CAI Xin. Water conservancy engineering safety hazard and damage characteristics [J]. Small Hydropower, 2004(6): 35-37. (in Chinese))

- [12] 秦毅, 顾群. 全国病险水闸成因分析及加固的必要性 [J]. 水利水电工程设计, 2010, 29(2): 25-26. (QIN Yi, GU Qun. Causes and necessity of reinforcement to gates with potential risks in China [J]. Design of Water Resources and Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 56-59. (in Chinese))
- [13] 康立荣, 徐文俊, 吝江峰. 江苏大中型病险水闸概况及主要加固措施探讨 [J]. 水利建设与管理, 2014(3): 56-59. (KANG Lirong, XU Wenun, LIN Jiangfeng. Overview of Jiangsu large and medium-sized sluice and discussion of main reinforcement measures [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2014(3): 56-59. (in Chinese))
- [14] 周逢强, 何文浩. 芦埠港闸工程安全评价及除险加固设计浅探 [J]. 江苏水利, 2015(6): 10-12. (ZHOU Fengqiang, HE Wenhao. Briefly explore of safety assessment and consolidation design for Lubugang sluice engineering [J]. Jiangsu Water Resources, 2015(6): 10-12. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-06-27 编辑: 骆超)

