

水跃掺气池的掺气特性

吴建华, 韩东旭, 周 宇

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对大单宽流量下传统阶梯溢洪道因流动水深增加, 掺气不足, 导致极易发生空蚀破坏和消能率降低的问题, 提出了一种通过水跃掺气池对阶梯溢洪道流动提供掺气的水跃掺气阶梯溢洪道, 采用物理模型试验方法, 详细研究了水跃掺气池的掺气特性, 包括来流条件、掺气池长度、掺气池尾坎高度、水跃流态对掺气特性的影响。结果表明: 在现在的研究范围内, 在掺气池内和掺气池尾坎后的区域, 无论是底板还是边墙淹没水跃流态都有较好的掺气效果; 前述流动参数和结构参数通过影响水跃流态影响掺气效果, 在利用水跃掺气池对阶梯溢洪道水流掺气时, 流态的控制是重要的。

关键词: 水跃掺气池; 阶梯溢洪道; 掺气特性; 流态; 模型试验

中图分类号: TV135.2⁺9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2016)03-0031-05

Air-entrainment characteristics of hydraulic jump aeration basin//WU Jianhua, HAN Dongxu, ZHOU Yu(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: With a focus on the problems of cavitation damage and the decrease of the energy dissipation rate caused by increasing flow depth and decreasing aeration for traditional stepped spillways under a large discharge rate, a hydraulic jump-aeration stepped spillway was developed, producing aerated flow on the stepped spillways by means of hydraulic jump aeration. Through a physical model test, the air-entrainment characteristics of the hydraulic jump aeration basin were studied, including the effects of the approach flow condition, the length and end sill height of the aeration basin, and hydraulic jump flow regime on air entrainment characteristics. The results demonstrate that the submerged jump shows a better air entrainment effect for the bottom and walls within the aeration basin and the region behind the end sill, and the hydraulic and geometric parameters affect the hydraulic jump flow regime and then affect the air concentration. It is crucial to present a suitable flow regime for air entrainment into the flow on the stepped spillway using the hydraulic jump aeration basin.

Key words: hydraulic jump aeration basin; stepped spillway; air-entrainment characteristics; flow regime; model test

阶梯溢洪道因结构简单且消能率高而应用广泛^[1-2]。然而,工程实践表明,当单宽流量大于 50 ~ 60 m³/(s · m) 时,由于水深大幅增加,掺气起始断面下移,致使流动掺气不足,溢洪道的阶梯面极易发生空蚀破坏,并且消能率降低^[3-5]。

阶梯溢洪道上的流动通常有 3 种流态,随着流量的增加,依次表现为:跌落流动(nappe flow)、过渡流动(transition flow)和滑行流动(skimming flow)^[6]。在大单宽流量(大于 60 m³/(s · m))下,一般呈滑行流动流态。

为了减轻大单宽流量下流动掺气不足引起的空蚀破坏,提高消能效果,近十年来在阶梯溢洪道流动掺气方面开展了一系列的研究工作。主要包括 3 个方面:①在首级阶梯之前,利用折流器形式的前置掺

气坎对流动进行预掺气^[3-4,7-8];②在首级阶梯的立面加设辅助装置,对流动掺气^[9-10];③在首级阶梯之前,加设挑流装置,利用掺气池的漩涡滚动使流动掺气,为阶梯溢洪道提供掺气水流^[5,11]。前 2 种掺气方法对流动有明显的掺气效果,掺气起始断面有一定的上移;但是,在大单宽流量下,前级阶梯上的流动仍然存在一定的掺气盲区。第 3 种掺气池掺气方法,可以有效地减少前 2 种方法的掺气盲区,从阶梯溢洪道第 1 级阶梯开始,就可以获得充分的掺气水流,但是,掺气池结构和水流流态相对复杂。

笔者提出了一种水跃掺气阶梯溢洪道结构(图 1),利用水跃掺气为阶梯溢洪道提供掺气水流。水跃掺气阶梯溢洪道包括进流段、掺气池和阶梯溢洪道 3 个部分,在进流段和掺气池,通过水跃漩滚使流

动掺气,对后续阶梯溢洪道提供掺气水流。通过物理模型试验,重点研究这种水跃掺气池的掺气特性,包括不同来流条件(单宽流量、弗劳德数)、不同掺气池长度和不同掺气池尾坎高度对掺气池内水流和出池水流掺气特性的影响。

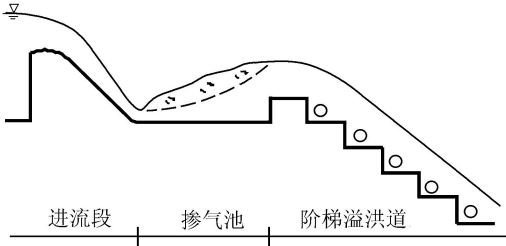


图1 水跃掺气阶梯溢洪道结构原理示意图

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验在河海大学高速水流实验室进行。试验装置包括地下水库、水泵电机、阀门、进水管、水平矩形水槽、出水管、电子流量计和水跃掺气池。模型由有机玻璃制作。水槽长 25.00 m,宽 0.50 m,高 0.60 m。试验最大来流流量 $Q_M = 115.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,单宽流量 $q_M = 230.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。按照重力相似准则设定模型比尺为 1 : 70,则原型最大流量 $Q_p = 4714.58 \text{ m}^3/\text{s}$,最大单宽流量 $q_p = 134.70 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

图 2 是水跃掺气池模型试验流动平面示意图,试验模型由 WES 型溢流堰、水跃掺气池和水平出池段组成。坐标系原点位于 WES 型溢流堰的最低点位置, x 轴沿流动方向水平布置。图中 P 为溢流堰高, $P=0.36 \text{ m}$, l_p 为掺气池长度, s_p 为掺气池尾坎高度, H 为堰上水头, h_0 和 v_0 分别是溢流堰下最低点位置处的流动水深和平均流速。水流在高度为 H 的水头作用下,通过溢流堰进入水跃掺气池,在水跃漩滚的作用下,通过表面掺气为出池流动提供掺气水流。在本文的研究中,尽可能减薄水跃掺气池尾坎的厚度,不考虑尾坎厚度对掺气特性的影响。

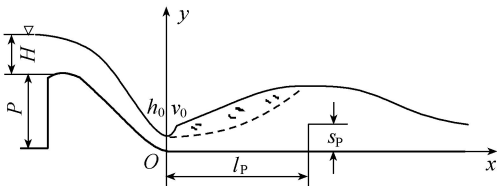


图2 流动平面示意图

1.2 试验方法

表 1 是掺气池的结构参数,包括 2 个系列 5 个方案。方案 M21、M22 和 M23 研究不同掺气池长度的影响,方案 M23、M13 和 M33 研究不同掺气池尾坎高度的影响。试验在 5 种不同流量下进行, $Fr =$

4.50 ~ 1.88,相应原型的单宽流量 q_p 有 5 级,分别为 $60.00 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 、 $90.00 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 、 $110.00 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 、 $120.20 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 和 $134.70 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

表 1 掺气池结构参数 m

方案名称	l_p	s_p
M21	0.5	0.065
M22	0.6	0.065
M23	0.7	0.065
M13	0.7	0.050
M33	0.7	0.080

采用 CQ-2005 型掺气浓度仪,测量不同来流条件、不同结构参数时,掺气池内和掺气池后底板及边墙的掺气浓度。对不同的掺气池结构,以掺气池尾坎为基准,在掺气池内底板和边墙上各布置 4 个掺气测点,在掺气池后的底板和边墙各布置 5 个掺气测点,间距均为 0.10 m,底板上测点位于水槽的中线位置,边墙上的测点距底部高度为 0.05 m。在测量掺气浓度时,分别记录 5 次,取其平均值作为该测点的掺气浓度值。

2 试验结果与讨论

2.1 流态描述

水跃区由于强烈紊动和漩滚,具有良好的消能和掺气特点^[12-13]。图 3 给出了在不同来流弗劳德数下水跃掺气池流态变化的典型情况(以方案 M23 为例)。随着水头 H 的增加, Fr 从 4.33 逐步减小到 1.96,单宽流量 q_p 从 $60.00 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 增加到 $134.70 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,流态呈淹没水跃、临界水跃、远驱水跃和波型流动变化。

当 $Fr = 4.33$ 时,掺气池内呈淹没水跃(图 3(a)),此时水深 h_0 较小,除溢流堰堰脚局部位置,水跃漩滚掺气基本可以达到掺气池的底部,水体呈白色,掺气池内和池后掺气效果较好。

当 $Fr = 3.34$ 时,跃首大致位于收缩断面,呈临界水跃(图 3(b)),此时水深 h_0 略有增加,在水跃跃首底部局部区域,主流下潜至池底,出现清水底层;水跃漩滚区域向后移动。

当 $Fr = 2.34$ 时,出现远驱水跃(图 3(c)),水跃漩滚区越过掺气池尾坎向下游推移,主要掺气水流发生在尾坎之后。

当 $Fr = 2.10$ 时,出现波型流动(wave-type flow)^[14](图 3(d)),掺气池内基本呈清水状态(水体透明),水跃区越过尾坎,在强烈掺气的同时,伴有波浪的出现。当 $Fr = 1.96$ 时,流态仍然是波型流动,水跃区略向下游移动(图 3(e)),其他特征基本与 $Fr = 2.10$ 的情况类似。

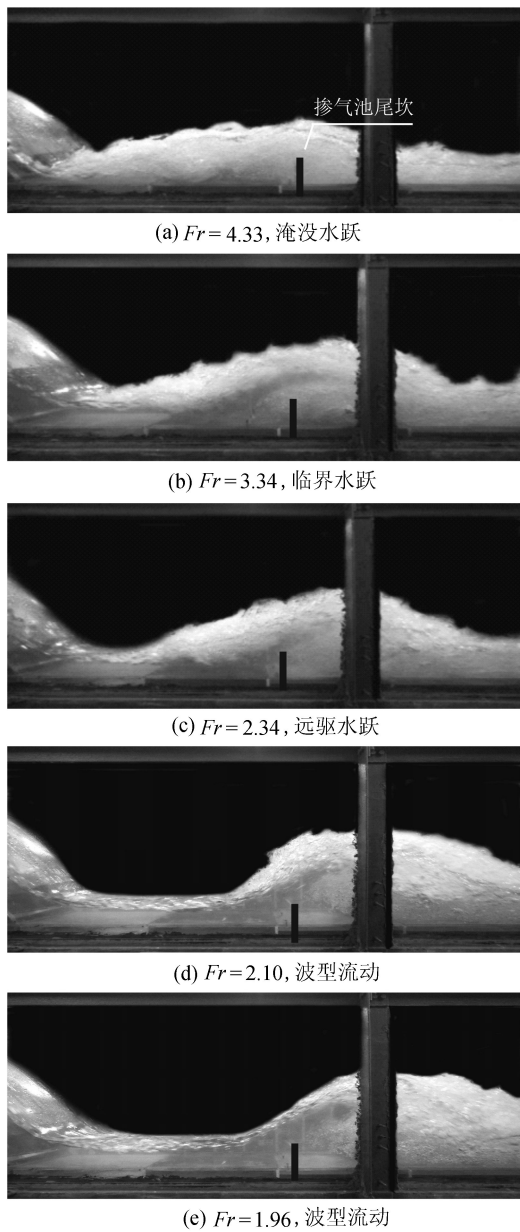


图3 掺气池水跃流态(方案 M23)

2.2 来流 Fr 对掺气浓度的影响

图4显示了不同来流 Fr 条件下,掺气池内和尾坎后底板及边墙的掺气浓度沿程分布(以方案 M23 为例)。图中,定义无量纲测点的位置 $X = \frac{x-l_p}{x_{\max}-l_p}$, 其中 $x_{\max}$ 表示尾坎后最远的测点(即第9点)的坐标值。 $X=0$ 代表尾坎位置, $X<0$ 和 $X>0$ 分别表示掺气池内测点和尾坎后测点的位置。

从图4(a)可以看到,随着水头的增加,来流 Fr 降低,流态由淹没水跃逐渐发展为波型流动(图3),底板各个位置处的掺气浓度逐渐降低。总体来说,掺气池尾坎后的掺气浓度大于池内浓度,在某一位置达到较大值。就不同流态的掺气效果而言,相比其他流态,淹没水跃有较好的掺气效果。当 $Fr \leq 2.34$, 出现明显的远驱水跃或波型流动,水跃区向下

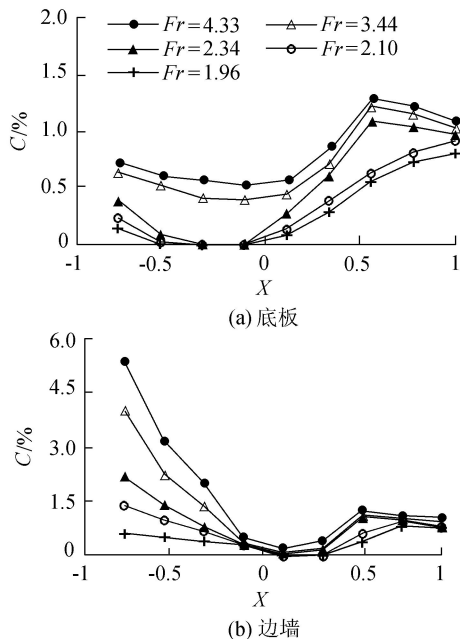


图4 不同 Fr 时掺气浓度沿程分布(方案 M23)

游发展,池内底板掺气较弱,但尾坎后的流动中仍有良好的掺气效果。

就边墙掺气而言(图4(b)),与底板掺气类似,随着水头的增加,来流 Fr 降低,各个位置处的掺气浓度逐渐降低。然而,在掺气池内,当 $Fr=4.33$ 和 3.44 时,由于边墙掺气测点的位置均处于水跃的漩滚区(测点距底部 0.05 m),掺气强烈,掺气浓度较高。在尾坎下游,各点的掺气浓度大致与底板掺气浓度相当。

由图3和图4可知,相比其他流态,淹没水跃流态下,无论是底板还是边墙,掺气池内和尾坎后均有较好的掺气效果。图5给出了方案 M33 在不同来流 Fr 下的流态,与图3中方案 M23 相比,方案 M33 的尾坎高度由 $s_p=0.065\text{ m}$ 增加到 0.080 m ,使得在各作用水头下,均能形成淹没水跃的流态。图6是不同 Fr 时掺气池内和尾坎后底板及边墙的掺气浓度沿程分布。总体而言,由于流动处于淹没水跃流态,即使在 $Fr \leq 2.42$ 时,掺气池内底板上都有良好的掺气效果;在尾坎后,掺气浓度也有明显的增加。

2.3 掺气池长度对掺气浓度的影响

设置水跃掺气池的目的是希望为其后的阶梯溢洪道提供良好的掺气水流,以提高阶梯溢洪道在大单宽流量下的消能率和避免空蚀破坏,因此,掺气池尾坎后流动的掺气特性是研究关注的重要方面。图7给出了不同掺气池长度时掺气池尾坎后底板和边墙掺气浓度的变化($q_p=110.00\text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$)。可以看到,无论是底板还是边墙,随着距离 X 的增加,掺气浓度逐步增大,在 $X=0.56 \sim 0.78$ 时,掺气浓度达到最大值。此外,在掺气池长度 $l_p=0.5 \sim 0.7\text{ m}$

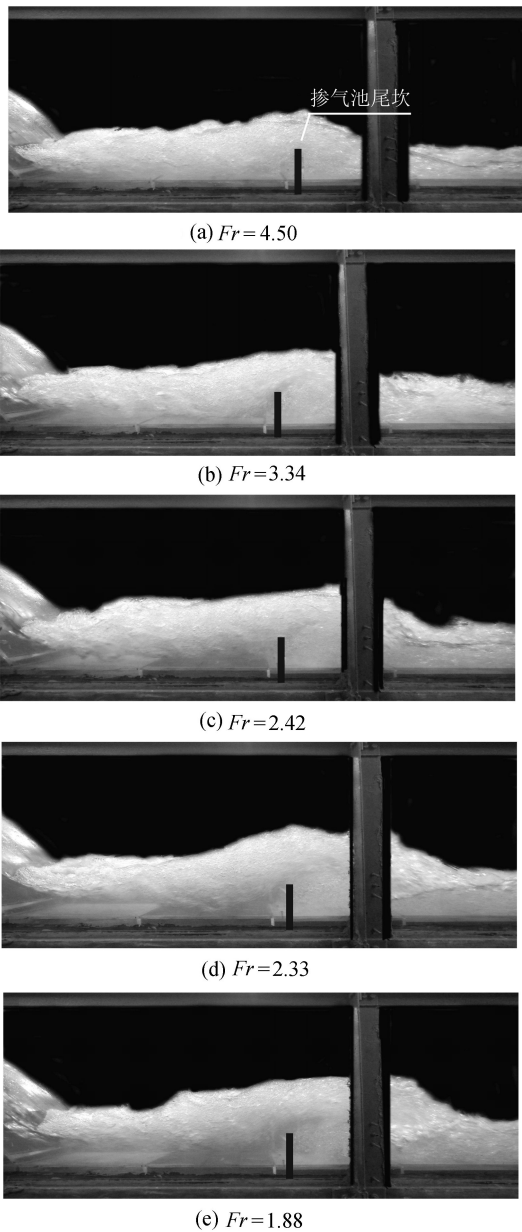


图5 掺气池水跃流态(方案 M33)

的范围内,在 $q_p=110.00\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 时,试验观测到流动属于淹没水跃或远驱水跃,但掺气池尾坎后流动在底板和边墙上仍然具有较好的掺气效果。

同时也注意到,随着掺气池长度的增加,底板同一位置处的掺气浓度略有增加;而在边墙处,较短的掺气池有略高一点的掺气浓度。尾坎后底板和边墙的掺气浓度特性与掺气池的水跃流态有密切的关系。

2.4 尾坎高度对掺气浓度的影响

图8给出了掺气池尾坎后底板和边墙处掺气浓度随尾坎高度的变化($q_p=110.00\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$)。可以看到,在 $l_p=0.7\text{ m}$ 的条件下,增加尾坎高度无论对于底板还是对于边墙,都可以有效地增大尾坎后流动的掺气浓度,从流态照片(图5)也可以看到,此时,不仅在池内有良好的淹没水跃流态,尾坎后也有良好的掺气效果。

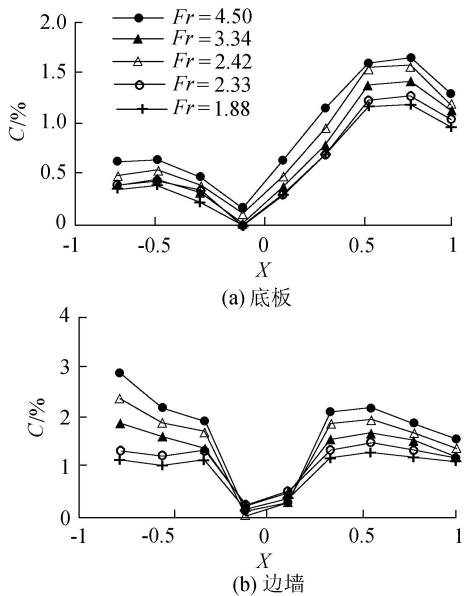


图6 不同 Fr 时掺气浓度沿程分布(方案 M33)

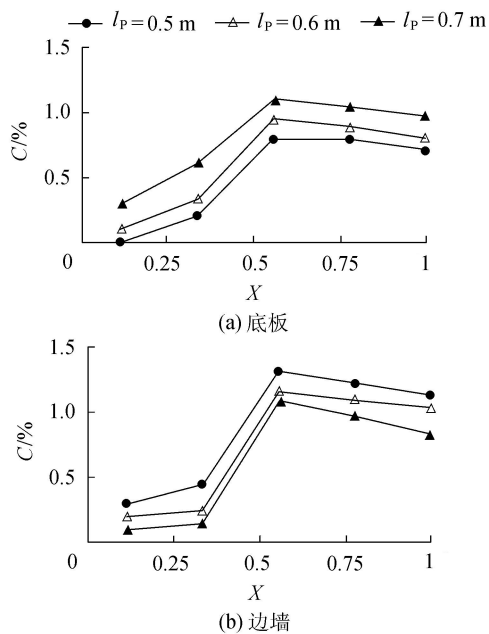


图7 掺气浓度随掺气池长度的变化
($q=110.00\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$)

3 结 论

为拓宽阶梯溢洪道的单宽流量,同时使阶梯溢洪道既有较高的消能率,又能有效避免空蚀破坏,提出了一种通过前置水跃掺气池为流动提供掺气的水跃掺气阶梯溢洪道结构形式。

结果表明,在本文的研究范围内,在大单宽流量条件下($q_p\geq 110.00\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$),无论在掺气池内还是在尾坎后,无论是底板还是边墙,相比其他流态,淹没水跃流态均具有较好的掺气效果。掺气池长度、尾坎高度以及来流条件对水跃掺气池的流态有决定性的作用,合理的水跃掺气池流态对阶梯溢

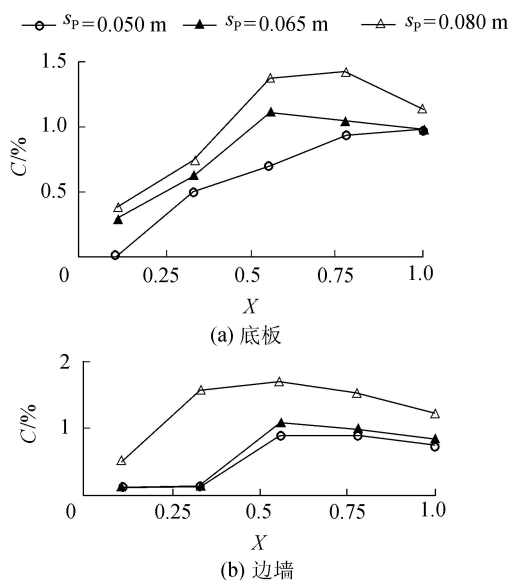


图8 掺气浓度随尾坎高度的变化
($q = 110.00 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$)

洪道上流动的掺气是重要的。

参考文献:

[1] ZARE H K, DOERING J C. Energy dissipation and flow characteristics of baffles and sills on stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 2012, 50(2): 192-199.

[2] CHANSON H. Stepped spillway flows and air entrainment [J]. Journal of Civil Engineering, 1993, 20(3): 422-435.

[3] PFISTER M, HAGER W H, MINOR H E. Bottom aeration of stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(8): 850-853.

[4] 吴守荣, 张建民, 许唯临, 等. 前置掺气坎式阶梯溢洪道体型布置优化试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(3): 37-42. (WU Shourong, ZHANG Jianmin, XU Weilin, et al. Experimental investigation on hydraulic characteristics of flow in the pre-aerator stepped spillways[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(3): 37-42. (in Chinese))

[5] QIAN S T. Ski-jump-step energy dissipators [C]// Proceedings of the 35th IAHR World Congress. Madrid: [s. n.], 2013: 1-6.

[6] CHANSON H. The hydraulics of stepped chutes and spillways[M]. Lisse: A A Balkema Publishers, 2002.

[7] 彭勇, 张建民, 刘善均, 等. 前置掺气坎式阶梯溢洪道掺气水深及消能率的计算[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 63-68. (PENG Yong, ZHANG Jianmin, LIU Shanjun, et al. Calculation of aerated water depth and energy dissipation rate of a pre-aerator stepped spillway [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(1): 63-68. (in Chinese))

[8] 刘善均, 朱利, 张法星, 等. 前置掺气坎阶梯溢洪道近壁掺气特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 401-406.

(LIU Shanjun, ZHU Li, ZHANG Faxing, et al. Aeration characteristics for skimming flow along the pre-aerator spillways[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 401-406. (in Chinese))

[9] PFISTER M, HAGER W H, MINOR H E. Stepped chutes: pre-aeration and spray reduction[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32(2): 269-284.

[10] ZAMORA A S, PFISTER M, HAGER W H, et al. Hydraulic performance of step aerator [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(2): 127-134.

[11] QIAN S T, WU J H, MA F. Ski jump jet in the ski-jump-step energy dissipater [C]//E-proceedings of the 36th IAHR World Congress. Hague, Netherland: [s. n.], 2015: 1-5.

[12] GUALTIERI C, CHANSON H. Experimental analysis of Froude number effect on air entrainment in the hydraulic jump[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2007, 7(3): 217-238.

[13] CHANSON H. Hydraulic jumps: turbulence and air bubble entrainment [J]. La Houille Blanche, 2011(3): 5-16.

[14] HAGER W H, LI D M. Sill-controlled energy dissipator [J]. Journal of Hydraulic Research, 1992, 30(2): 165-181.

(收稿日期: 2015-10-12 编辑: 骆超)

(上接第30页)

[13] 徐少曼. 饱和黏性土地基沉降量计算的规一化曲线法 [J]. 岩土工程学报, 1987, 9(4): 70-77. (XU Shaoman. The normalized curve method for the deformation of the saturated clay foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(4): 70-77 (in Chinese))

[14] 施建勇, 杨立昂, 赵维炳, 等. 考虑土体非线性特性的一维固结理论研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(1): 1-5. (SHI Jianyong, YANG Li'ang, ZHAO Weibing, et al. Research of one-dimensional consolidation theory considering nonlinear characteristics of soil [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001, 29(1): 1-5. (in Chinese))

[15] 张磊, 孙树林. 变荷载下双曲线模型修正土体一维固结理论 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊2): 4306-4310. (ZHANG Lei, SUN Shulin. One-dimensional consolidation theory based on hyperbola model under time-dependent loading for saturated soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup2): 4306-4310. (in Chinese))

[16] ZHU G, YIN J H. Consolidation of soil under depth-dependent ramp load [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(2): 344-350.

[17] RAHAL M A, VUEZ A R. Analysis of settlement and pore pressure induced by cyclic loading of silo [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(12): 1208-1210.

(收稿日期: 2015-04-23 编辑: 熊水斌)