

# 阶梯式泄水道竖井流态特征研究

任炜辰, 吴建华, 马飞

(河海大学水利水电学院, 南京, 210098, Email: renweichen@hhu.edu.cn)

**摘要:** 阶梯式泄水道竖井是近年来出现的一种新型竖井结构设计形式, 目前对其研究还较少。为了充分了解其水力特性, 以期对其设计和应用提供参考, 本研究设计了阶梯式泄水道竖井物理模型并进行了系统性试验, 对阶梯式泄水道竖井的泄流流态特征进行了观察研究。研究表明: 整体上, 阶梯式泄水道竖井泄流平稳顺畅; 受离心力作用影响, 竖井阶梯泄水道上水面外高内低, 不同于传统阶梯泄水道上的二维流态, 呈现出三维流态特征; 随着泄流流量的变化, 可分为跌落、跌落-滑行、滑行 3 种流态, 每种流态均对应着不同的水流消能和掺气机理。

**关键词:** 深隧排水系统; 竖井; 水力特性; 阶梯; 流态

## 1 引言

随着城市的发展速度逐渐加快, 城市的基础服务配套设施也应该跟上发展脚步。近年来, 受全球气候变化影响, 暴雨等极端天气频发, 导致很多城市面临着洪涝灾害的威胁, 严重影响了人们正常的工作和生活, 给社会发展和人民生命财产造成了巨大损失<sup>[1-2]</sup>。城市深层隧道排水系统, 作为浅层排水管网的重要补充, 可对降水径流起到分流、削峰和错峰等作用, 有效地缓解了城市内涝。就世界其他国家和地区的发展情况来看, 城市深层隧道排水系统已经成为城市暴雨内涝防治的重要手段, 如以引流排放为主要目的的墨西哥城深层隧道排水系统、香港荔枝角雨水排放隧道, 为了减少溢流污染的伦敦深层隧道工程、芝加哥隧道和水库方案以及用于污水输送的新加坡深层隧道系统<sup>[3-4]</sup>。

竖井结构是城市深层隧道排水系统中的重要组成结构, 主要负责将地表或浅层管网内的雨洪水集中排入地下深层隧道中, 同时深层隧道中的气体也可经由竖井结构排出。在多年的工程实践中, 针对不同的工程需求, 已经出现了多种竖井设计结构形式, 主要包括跌落式竖井(Plunging dropshaft)<sup>[5]</sup>、旋流式竖井(Vortex dropshaft)<sup>[6-7]</sup>、螺旋滑道式竖井(Helicoidal-ramp dropshaft)<sup>[8]</sup>和折板式竖井(Baffle dropshaft)<sup>[9]</sup>。针对我国一些城市规划设计的竖井结构呈现出泄水落差高、泄流流量大, 消能和防空蚀问题突出的特点, 出现了一种

阶梯式泄水道竖井的新型竖井结构设计形式<sup>[10]</sup>。通过对其基本水力性能的初步研究,阶梯式泄水道竖井设计的有效性和安全性得到了验证<sup>[11-12]</sup>。然而对这一新型结构形式的研究还很少,对其各项水力特性的理解还不够充分。

本研究设计并进行了系统的物理模型试验,对阶梯式泄水道竖井泄流时的水流流态进行了观察。根据观察到的三维流态特征,对竖井泄水道上的流态进行全新的定义和分类,并对各流态下消能和掺气的机理进行了初步讨论。

## 2 试验装置与方法

本试验在河海大学高速水流实验室进行。试验装置包括水泵电机、平水塔、进水管、电磁流量计、引水渠、竖井物理模型、出流明渠和地下水库等。竖井模型系统水平长度约 10.0 m,高约 4.0 m。模型主要采用有机玻璃制作,材料透明,便于观察水流流态和测量水力参数,包括进水箱,来流渠道、竖井和深层隧道(图 1)。

进水箱的作用是为竖井提供稳定的水流。随后水流自由溢流进入一长为 2.5 m,宽为 0.15 m 的来流渠道后进入竖井。竖井模型的直径  $D=0.5$  m,泄水道宽度为  $b=0.15$  m,排气通道直径  $d_a=0.2$  m。竖井泄水道共 6 层,每层 6 个台阶,共计 36 级台阶。每级台阶高度  $h=0.0525$  m,层高  $H_1=6h=0.315$  m,竖井泄水高度  $H=6H_1=1.89$  m。

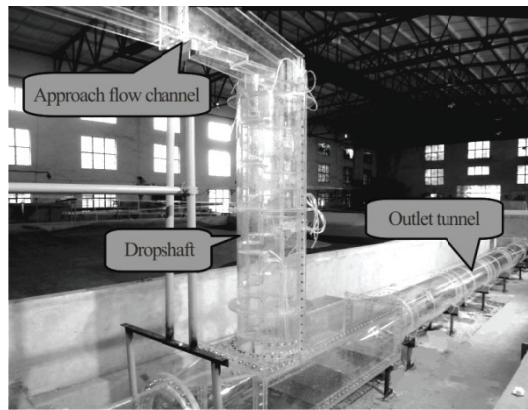


图 1 试验模型示意图

## 3 结果与讨论

### 3.1 整体流态观察

试验首先对阶梯式泄水道竖井的泄流过程进行了观察(图 2)。从整体而言,从小流量到

大流量条件下，阶梯式泄水道竖井泄流是相似的。水流始终沿阶梯泄水道螺旋下泄，水流流速沿程未发生明显突变，确保了整个泄流过程平稳且顺畅。

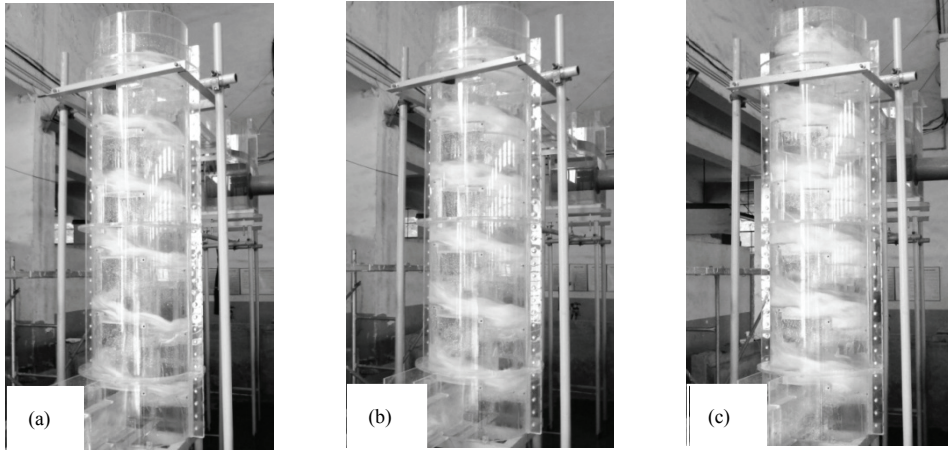


图2 不同泄流流量  $Q$  下阶梯泄水道竖井整体流态图  $Q=(a) 5.0 \text{ l/s}; (b) 10.0 \text{ l/s}; (c) 14.0 \text{ l/s}$

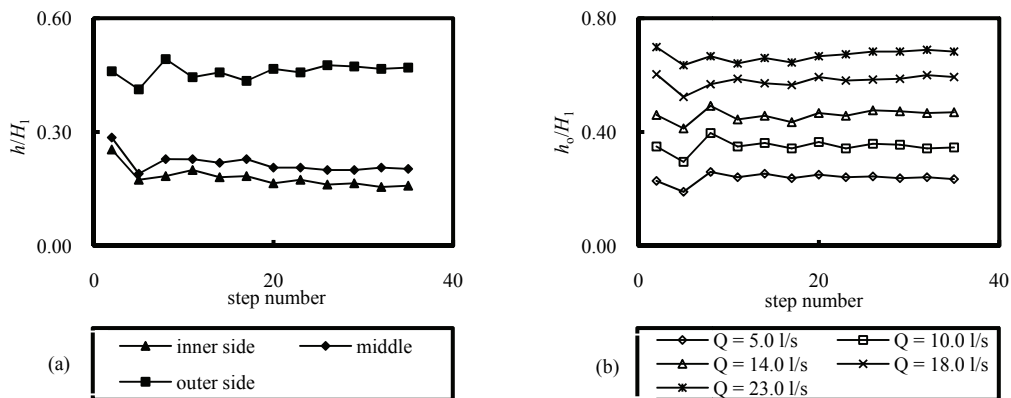


图3 竖井内螺旋阶梯泄水道上的水深: (a)  $Q = 14.0 \text{ l/s}$  时的横断面分布; (b) 不同流量下泄水道外侧水深

图3展示的是竖井阶梯泄水道沿程水面线变化情况。理论上，由于离心力的存在，泄水道上的水流沿半径方向会出现外侧高内侧低的现象，试验中对各流量下水流的观察也验证了这一现象。以图3(a)在  $Q = 14.0 \text{ L/s}$  时全断面水面线测量的结果为例，泄水道中部和内侧的水深差距较小，而泄水道外侧水面线远高于中部及内侧的水面线。另一方面，从图3(b)中各流量下外侧水面线的变化情况可以看出，随着流量的增加，泄水道外侧水面线平稳上升。从竖井进口起，由于进口水翅现象的存在，水面线波动较大。竖井进口的水翅特征及控制在另一篇文章中进行了系统性的研究讨论<sup>[15]</sup>。随着水流的继续下泄，水面线逐渐平稳。而且即使在试验最大流量  $Q = 23.0 \text{ L/s}$  时，外侧水深  $h_0$  仍小于  $0.7H_1$ ，泄水道余幅充分。

## 3.2 流态分类与定义

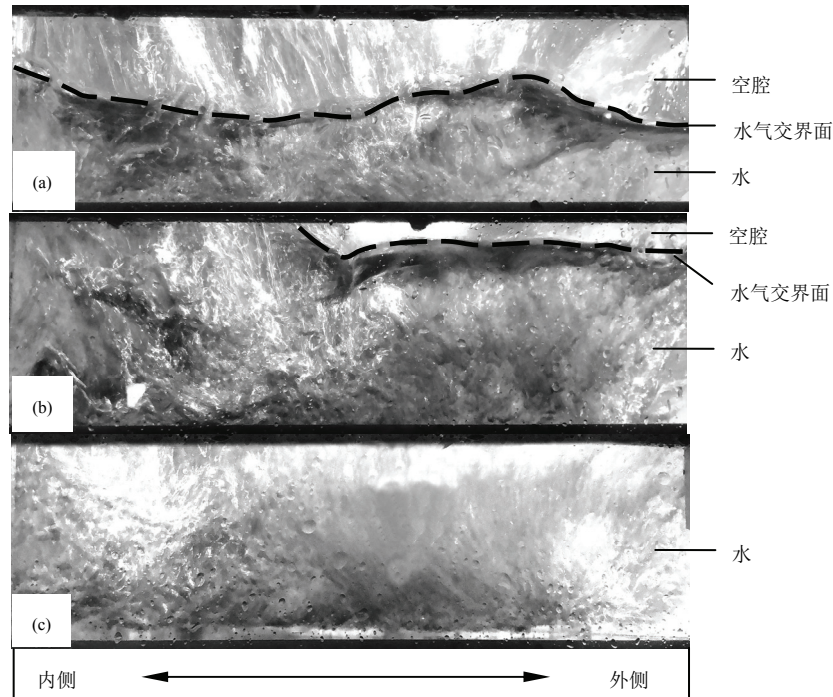


图4 不同流态下阶梯立面流态示意图: (a) 照片拍摄示意; (b) 跌落流态; (c) 跌落-滑行流态; (d) 滑行流态

试验中观察到, 由于竖井内螺旋阶梯泄水道结构本身具有三维特征, 泄水道上的水流也呈现出了三维流态特征。图4是不同泄流流量下, 泄水道阶梯立面流态照片。可以看到, 在小流量下, 如图4(a)所示, 阶梯立面上由内向外全断面有清晰且明显的水—气交界面, 阶梯三角区内存在稳定的全断面空腔。随着泄流流量的增大, 由于螺旋阶梯泄水道底坡沿半径方向不同且水流受离心力影响沿半径方向呈不均匀分布, 泄水道阶梯一侧的空腔首先被填满, 而另一侧空腔仍然存在。此时如图4(b)所示, 阶梯立面上的水—气交界面与顶面相交于一点而消失。随着泄流流量的进一步增大, 阶梯三角区内全断面空腔均被水填满, 如图4(c)所示, 阶梯立面上无水—气交界面。

基于以上流态观察结果, 可将螺旋阶梯泄水道上的水流流态分为3种, 分别是: ①跌落流态, 其主要特征为: 此时, 水流在每一级阶梯全断面上末端弯曲形成水舌, 自由跌落于下一级阶梯的水平面上, 跌落水舌的内缘未填满回水, 形成相对稳定的空腔; ②跌落-滑行流态, 其主要特征为: 竖井泄水道阶梯内侧空腔完全被水充满而消失, 支撑主流向下滑掠; 而此时竖井泄水道阶梯外侧仍保持与原有的跌落流态, 即每个台阶的跌落水舌内缘仍保持着稳定的空腔; ③滑行流态, 其主要特征为: 泄水道各阶梯内外侧空腔均完全被水

充满而消失，支撑主流向下滑掠。

参考传统阶梯泄水道的研究成果，可知竖井内螺旋阶梯泄水道上发生的上述 3 种流态均对应着不同的消能和掺气机理。

发生跌落流态时，在每一级阶梯上，跌落水流的能量主要通过自由跌落水舌在空中的裂散、与空气的掺混、水舌冲击阶梯水平面及水舌与水平面回水的掺混而消耗。同时，跌落水舌下游形成的完全及不完全发育的水跃也消耗了部分水流能量。掺气方面，在空气中自由跌落水舌的内外缘自由表面与空气的相互作用、阶梯水平面上水舌冲击溅射以及下游水越均促使空气掺入水体，形成掺气水流。发生滑行水流时，水流能量主要通过形成并维持阶梯三角区内的水流旋滚以及部分主流冲击阶梯水平面而沿程消耗。阶梯三角区内水流漩涡与主流的相互作用极大地促进了水流边界层的发展，加剧了水流紊动强度，紊流边界层发展到水流自由表面后，促使大量空气经自由表面卷吸进入水流，形成明显掺气水流。在跌落-滑行流态下，由于每个阶梯上实际兼具了水流跌落及滑行的水流流动特征，因此此种流态下水流消能和掺气同样兼具了上述两种流态下的消能和掺气机理。

## 4 结论

本文设计进行了阶梯式泄水道竖井物理模型试验，对阶梯式泄水道竖井整体流态及竖井内螺旋阶梯泄水道上的流态特征进行了观察和讨论。研究主要结论如下：

①整体上，阶梯式泄水道竖井泄流时水流沿泄水道螺旋下泄，水流流动沿程未发生明显突变，平稳且顺畅；②水流在螺旋下泄的过程中会受到离心力影响，泄水道上的水流沿半径方向呈现出外高内低的特点，呈现出三维流态特征；③随着泄流流量的增加，根据阶梯三角区内空腔的变化情况，竖井螺旋阶梯泄水道上水流可分为跌落、跌落—滑行和滑行三种流态。④每种流态均对应了不同的水流消能和掺气机理，其中跌落与滑行流态下的消能和掺气机理与传统阶梯泄水道上相似，而跌落-滑行流态下水流则兼具了上述两种流态的消能和掺气机理。

## 参 考 文 献

- 1 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491.
- 2 辛玉玲, 张学强. 城市内涝的成因浅析[J]. 城镇供水. 2012(05): 92-93.
- 3 门绚, 李冬, 张杰. 国内外深隧排水系统建设状况及其启示[J]. 河北工业科技, 2015, 32(5): 438-442.
- 4 林忠军. 深层隧道排水系统在城市排水规划中的应用[J]. 城市道桥与防洪. 2014(5): 143-147.
- 5 Ma Y, Zhu D Z, Rajaratnam N. Air entrainment in a tall plunging flow dropshaft [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2016, 142(10): 04016038.

- 6 Jain S C. Free-surface swirling flows in vertical dropshaft[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1987, 113(10): 1277-1289.
- 7 Zhao C H , Zhu D Z , Sun S K , et al. Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2006, 132(1):61-68.
- 8 Kennedy J F, Jain S C, Quinones R R. Helicoidal-ramp dropshaft[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1988, 114(3): 315-325.
- 9 Odgaard A J, Lyons T C, Craig A J. Baffle-drop structure design relationships[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2013, 139(9): 995-1002.
- 10 吴建华, 任炜辰. 台阶旋转泄水道竖井 [P]. 中国专利, ZL201620104789.X, 2016-8-31.
- 11 吴建华, 杨涛, 沈洁艺, 任炜辰, 马飞. 大旋转角阶梯泄水道竖井水力特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2018(2): 176-180.
- 12 Shen J Y , Wu J H , Ma F . Hydraulic characteristics of stepped spillway dropshafts[J]. Science China Technological Sciences, 2019:1-7.
- 13 Wu J H , Ren W C , Ma F . Standing wave at dropshaft inlets[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2017, 29(3):524-527.

## Flow observation in helical-stepped spillway dropshafts

REN Wei-chen, WU Jian-hua, MA Fei

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, HoHai University, Nanjing 210098, Email: renweichen@hhu.edu.cn)

**Abstract:** A helical-stepped spillway dropshaft is a flow conveyance structure that can be used for transport of urban storm water down to underground storage tunnels. To have a better understanding about hydraulic characteristics of helical-stepped spillway dropshaft, the dropshaft is physically modeled and experimented in this study and its flow regimes are observed and discussed. The results show that, in general, flow can be discharged smoothly and steadily by the dropshaft and there is a water surface difference observed in radial direction because of the present of the centrifugal force. With the increasing flow discharges, flow in the dropshaft is clarified as three different flow regimes, namely nappe flow, nappe-skimming flow and skimming flow. The corresponding mechanisms for energy dissipation and flow aeration are also discussed.

**Key words:** Deep tunnel drainage system; Dropshaft; Flow regimes; Hydraulics; Stepped spillway