

跌落射流冲击竖井底部水池实验研究

刘虹, 刘甲春*

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 在跌落式城市排水竖井中, 水流跌落一定距离后, 通常携带着大量能量. 当它冲击竖井底部时, 会产生明显压力脉动, 对竖井结构安全产生风险. 本文建立排水竖井物理实验模型, 研究跌落射流对竖井底部消能池的冲击作用, 分析竖井底部的压力脉动与分布以及竖井跌落高度和底部水池深度对冲击压力的影响. 结果表明: 水平射流冲击竖井井壁后, 分为沿竖井壁向下的环形流和自由落体的射流. 当跌落水流流量较小时, 竖井底部高压区域集中在靠近下游管道一侧; 随着流量逐渐增加, 环形流面积持续增大, 高压区域逐渐由下游侧向上游侧过渡. 增加下游管道水深可有效降低竖井底部的平均冲击压力, 增加水垫层深度可有效降低竖井底部冲击压力脉动. 当水流在竖井中达到最终速度后, 继续增加竖井跌落高度将不会产生更大冲击压力.

关键词: 跌落式竖井; 冲击压力; 水垫层; 跌落高度; 最终速度

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 03-0072-07

排水竖井作为连接深层排水系统与浅层排水系统的重要组成部分, 其内部高流量和高落差的水流往往具有很大能量. 为减少水流对构筑物的破坏, 需对其进行消能处理. 一般来说, 竖井中的消能过程包括(1)入流过程中的自由跌落^[1]; (2)入流后, 冲击在对面竖井边壁上^[2]; (3)沿竖井边壁向下流动产生摩擦^[3]; (4)跌落水流冲击在竖井底部水池上, 产生能量损失^[4].

竖井中的水流在跌落一定高度后, 可能会分解成直径 2 mm 的小水滴^[5]. 这些水滴会受到更强烈的空气阻力, 使得流动的部分机械能转化为周围空气和水滴自身的热能^[6]. Ma 等^[7]使用物理模型研究了液滴的大小和速度, 在动量守恒方程基础上, 建立了一个数值模型来预测竖井中水流所拖拽的空气量. 入流量迅速增加所导致的湍流还会引起管道内流动的不稳定性^[8]. 通过改变入流方式, 从而在竖井中形成湍流或涡区来耗散能量^[9-11].

影响竖井消能效果因素有很多, 包括竖井体型结构^[12-14]、消能室的设置^[15]、进水管入流流量^[8]和入流特性^[1,16]、内部水力特性^[17-19]、水流破碎情

况^[20]. 为防止跌落射流对竖井底板造成冲击破坏, 通常会在竖井底部设置水垫层. 跌落射流冲入竖井底部的水垫层时, 会消耗自身大部分能量, 形成剧烈湍流^[21-22]. 自由射流产生的冲击力可由射流的运动方程^[23]和射流角度^[24]来计算, 并且水垫层厚度等^[25]对冲击力大小有着重要影响.

因此, 研究跌落竖井的消能机理和结构优化设计具有重要意义. 目前对射流冲击机理的研究多为大坝中自由射流对水垫层的冲击^[17], 而对于深层竖井内射流冲击机理的研究较少. 本文建立跌落高度为 1.88 m 的物理模型, 利用水垫层及挡板研究不同竖井底部水池深度对冲击射流的缓速影响以及对竖井底部冲击压力变化的影响, 并分析不同跌落高度下竖井的冲击压力, 以期可为不同高度下跌落竖井的设计和提供保护提供相关依据.

1 方法论

1.1 模型设计安装

实验装置建立在宁波大学可持续排水与安全实验室, 如图 1 所示. 模型由加拿大埃德蒙顿市使

收稿日期: 2022-06-21.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(60874083); 浙江省教育厅科研项目(Y200907622); 宁波大学科技学院预研项目(003-21021003).

第一作者: 刘虹(1996-), 女, 浙江衢州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 排水管道输移规律及冲击机理. E-mail: liuhong2724@163.com

*通信作者: 刘甲春(1961-), 男, 山东济宁人, 博士/讲师, 主要研究方向: 城市管网水力学、竖井消能与空气卷吸. E-mail: liujiachun@nbu.edu.cn

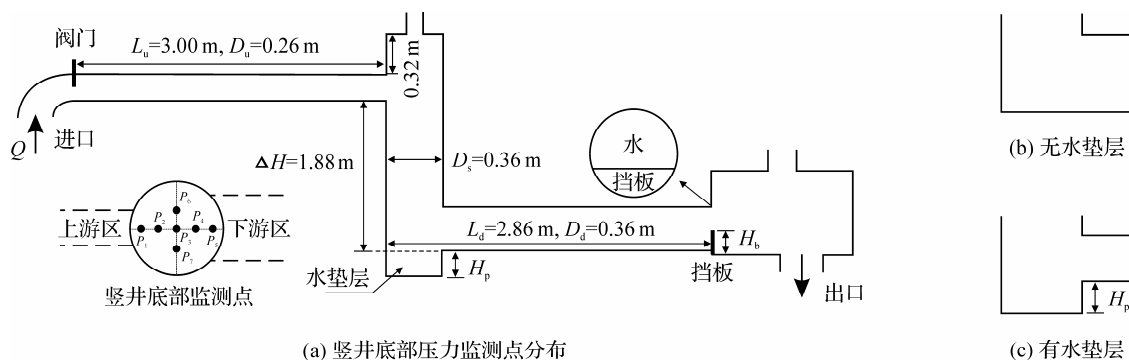


图1 跌落式竖井试验模型

用的典型尺寸竖井模型按照 1:3 比例设置^[3,5]. 上游管道直径为 $D_u=0.26\text{ m}$, 长度为 $L_u=3.00\text{ m}$, 下游管道直径为 $D_d=0.36\text{ m}$, 长度为 $L_d=2.86\text{ m}$. 竖井直径 $D_s=0.36\text{ m}$, 上游管道底部和下游管道底部之间的高差 $\Delta H=1.88\text{ m}$, 竖井顶部设置直径为 0.10 m 进气孔. 在下游管道末端安装可升降挡板, 控制下游的出水能力和水面高度. 竖井底部安装压力传感器 (OMEGA PX409), 位置如图 1(a)所示, 用以观察射流对底部冲击的压力分布; 压力数据通过 NI 数据采集板采集. 上游管道的入流流量采用电磁流量计 (KROHNE OPTIFLUX 2300F) 测量. 通过摄像机 (Canon EOS 90D) 以 $25\text{ fps}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度拍摄竖井底部的冲击射流情况.

具体实验过程如下: 水流从进水口进入上游管道, 流入竖井. 水平射流撞击在对面竖井井壁之后, 分为沿井壁向下的环形流和自由跌落的射流. 环形流沿竖井内壁经过短距离扩散后覆盖竖井的内表面, 流量越大, 环形流的覆盖范围越大. 当跌落射流到达竖井底部水池时, 可产生较大的速度. 跌落射流与水池内的水流混合后, 在竖井底部形成强烈的湍流. 当下游管道末端未设置挡板时, 水流通过下游管道从出水口顺利排出; 当在下游管道末端安装挡板时, 水流会先在下游管道内积聚, 当增加到一定深度后, 以溢流形式排出.

表 1 列示了本文所有的实验工况. 工况中水流的入流流量控制在 $0.005\sim 0.060\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 总共包括 12 个流量值, 流量梯度为 $0.005\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. 工况 A 系列的目的是研究水垫层和下游挡板对水流冲击竖井底部的减缓作用, 如图 1(a)、1(b)、1(c)所示, 水垫层深度 (H_p) 分别为 0.0 、 0.1 、 0.2 m , 挡板高度 (H_b) 分别为 0.0 、 0.1 、 0.2 m . 工况 B 系列采用设置水垫

层和下游挡板的组合措施, 研究不同增加水深方案对冲击压力的缓解效果. 工况 A3、A5 和 B1 分别增加下游管道中水深和水垫层的深度, 研究相同水深情况下不同措施对冲击压力的影响; 工况 B2、B3、B4 主要分析设置水垫层与下游挡板的组合措施对缓解冲击压力的影响.

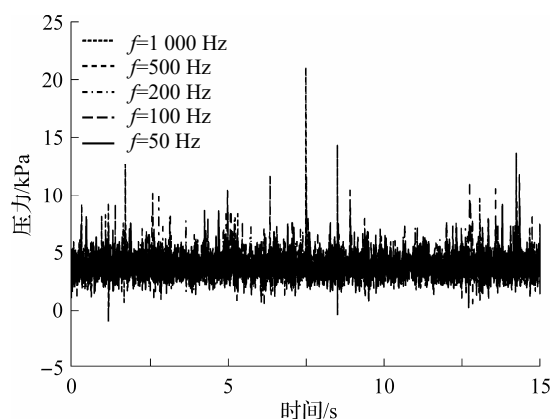
表 1 模型实验工况列表

工况	H_p	H_b	H
A1	0.0	0.0	0.0
A2	0.0	0.1	0.1
A3	0.0	0.2	0.2
A4	0.1	0.0	0.1
A5	0.2	0.0	0.2
B1	0.1	0.1	0.2
B2	0.1	0.2	0.3
B3	0.2	0.1	0.3
B4	0.2	0.2	0.4

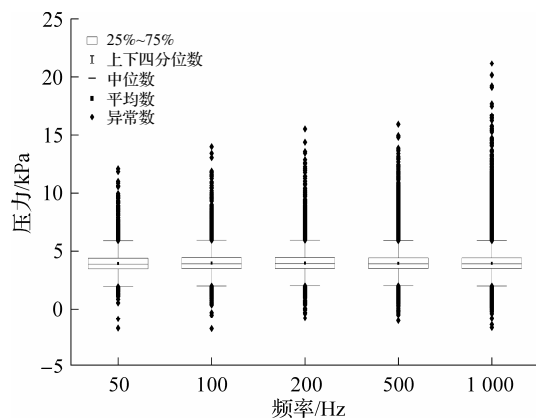
注: 流量(Q)为 $0.005\sim 0.060\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

1.2 数据采集及频率灵敏度分析

由于竖井底部水与空气的剧烈相互作用, 导致较大的压力脉动, 但由于压力传感器在低频情况下可能无法采集到完整的压力脉动范围. 因此, 采用在不同频率 $f=50$ 、 100 、 200 、 500 、 $1\,000\text{ Hz}$ 情况下收集数据, 研究频率对实验结果的影响. 不同频率下竖井底部的压力脉动如图 2(a)所示. 当 $Q=0.030\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $f=1\,000\text{ Hz}$ 时的最大压力为 21.2 kPa , 而 $f=50\text{ Hz}$ 时的最大压力为 12.1 kPa , 相差 75.2% . 采集频率越大, 则收集到的数据能更好地反映出竖井底部的压力脉动. 图 2(b)为不同频率下竖井底部冲击压力的箱形图. 可以看出在每个频率处, 箱体的高度与平均值一致. 随着频率的增加, 压力异



(a) 不同频率下竖井底部的压力脉动



(b) 不同频率下竖井底部冲击压力的箱型图

图2 频率敏感性分析

常值增大, 压力分布呈右偏状态, 即异常压力分布在较大一侧. 采集频率对平均压力影响不显著, 最大压力随采集频率的增加而不断增加. 因此, 本文中所有工况都在 $f=1000$ Hz的频率下进行数据采集,

以确保冲击压力实验数据的可靠性.

2 结果与讨论

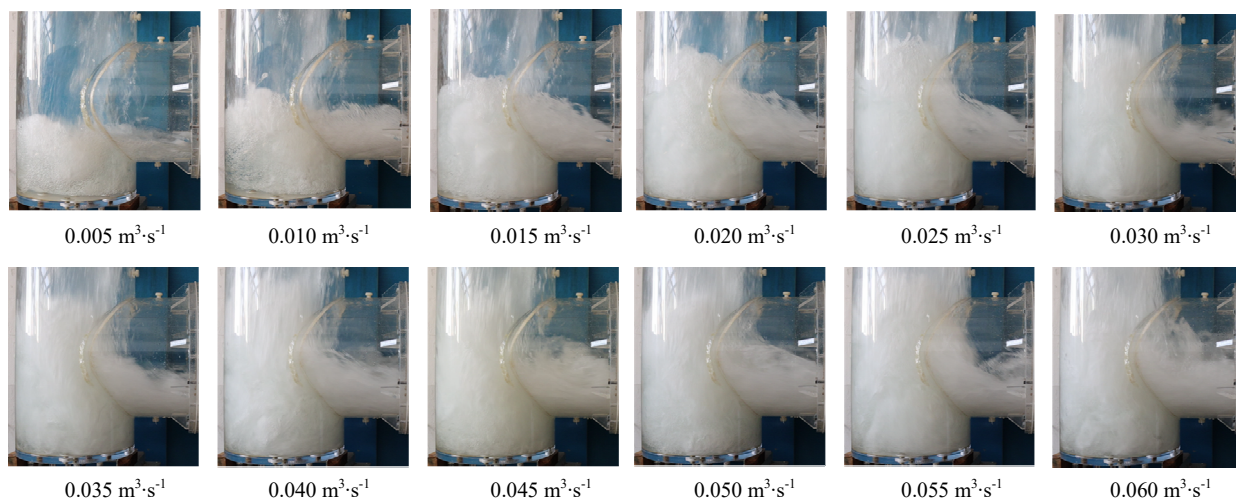
2.1 竖井底部冲击压力分布

图 3(a)为不同流量下竖井底部水池内的水流流态. 跌落射流在撞击竖井底部水池后发生转向, 在竖井底部形成上下循环流, 其中大部分水流回卷, 沿井壁上升, 并与下降水流相互碰撞, 被消去大量冲击能量, 同时被输送到下游. 流量越大, 射流冲击造成的水流回卷高度越高. 在跌落高度为 1.88 m 竖井中, 射流冲击竖井侧壁后, 形成沿着竖井壁流动的环形流. 流量越大, 环形流范围越大.

图 3(b)和图 3(c)为不同流量下各监测点的平均冲击压力和最大冲击压力. 由图可见, 各监测点平均冲击压力随着流量的增加逐渐增大. 在小流量($Q < 0.030 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)时, 环形水流未得到充分发展. 竖井底部下游侧的冲击压力大于上游侧, 下游侧出现较大的压力峰值. 而在大流量($Q \geq 0.030 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)时, 增大流量的主要发展为环形流, 直至完全覆盖竖井的内表面. 相对少的水以跌落射流形式冲击在靠近下游的竖井底部位置, 因此在竖井底部下游侧, 冲击水流的影响相对较小. P_6 和 P_7 点的压力由于环形流的扩散而增大. 在所有流量下, 上游侧 P_1 处的平均压力和峰值压力最小, 下游侧 P_4 和 P_5 处的脉动最大且更强烈.

2.2 水深对射流冲击压力的影响

通过在竖井底部设置水垫层和下游管道末端设置挡板增加竖井底部水深, 来研究两种措施对

(a) $0.005 \sim 0.060 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 流量下竖井底部流态变化

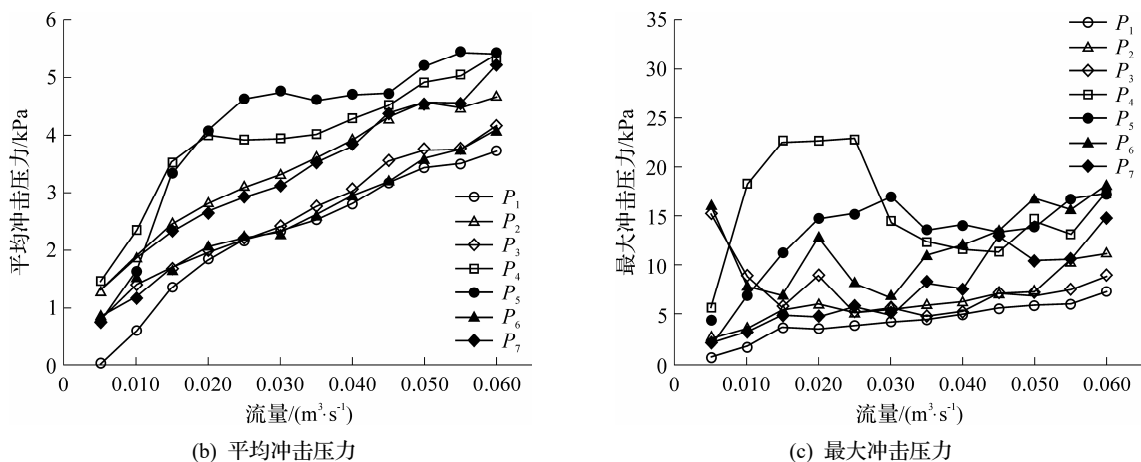
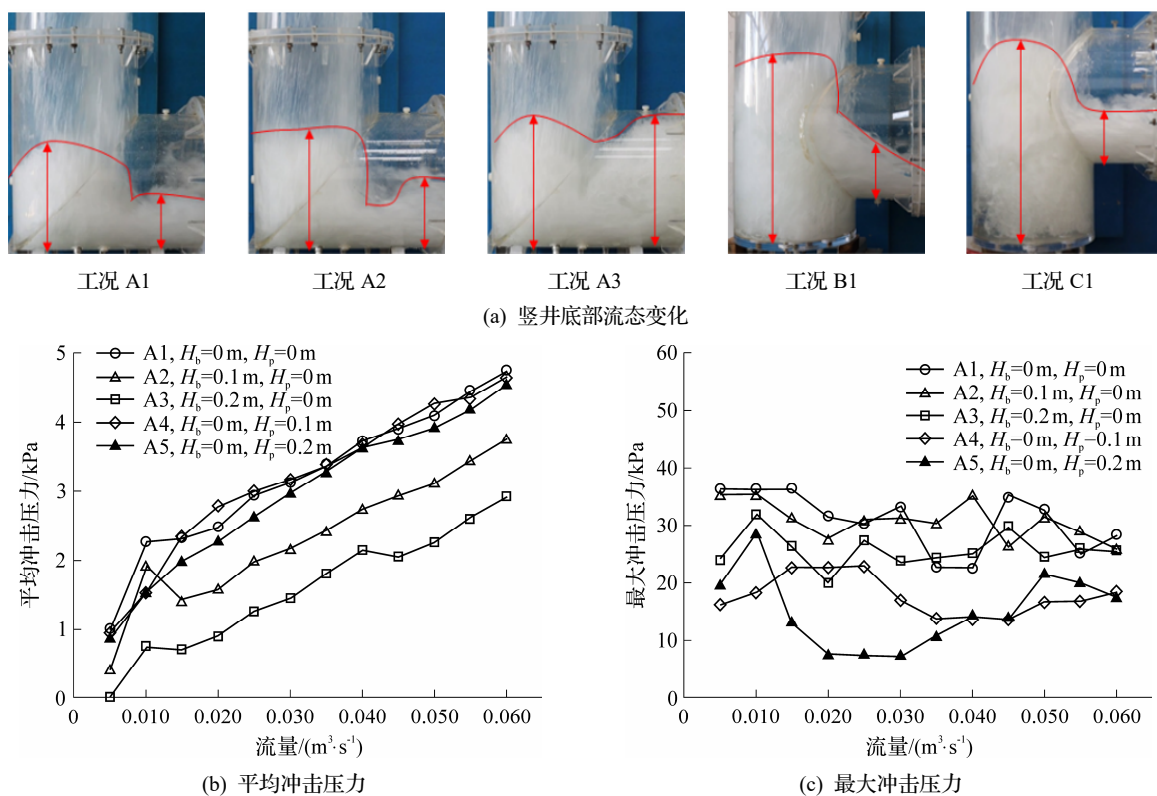
图3 $P_1 \sim P_7$ 点的压力分布

图4 水垫层和挡板的消能效果

射流冲击压力的影响,如图4(a)所示. 工况A系列通过增加挡板以增大水深. 在小流量下,下游管道的上部有很大空间,此时竖井内水流携带的空气流入出水管不受挡板影响(工况A1). 在 $Q=0.030 m^3 \cdot s^{-1}$, 挡板高度为 0.2 m 时,下游管道中的水深达到 0.35 m,此时在下游管道末端,挡板前部水汽充分混合,使得挡板上部空气通道被涌浪堵塞(工况A3).

图4(b)和4(c)为不同水垫层深度和挡板高度下

的竖井底部冲击压力变化. 竖井底部的压力由两部分组成,一部分是水深产生的静压,另一部分为射流产生的冲击压力. 在流量 $Q=0.050 m^3 \cdot s^{-1}$ 时,无挡板、0.1 m 挡板和 0.2 m 挡板情况下(工况A1、A2和A3)的冲击压力分别为 4.1、3.1 和 2.2 kPa. 水深增加了竖井底部的静水压强,但减缓了水流的冲击. 由于增加水深减缓的冲击压力小于增加水深带来的静水压强,因此竖井底部总压力随着水深的增加而增加.

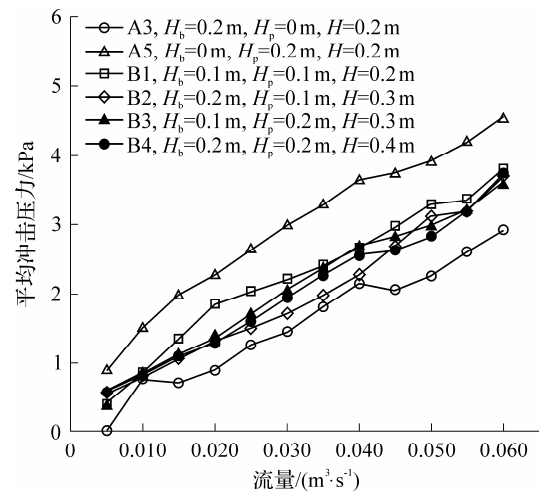
在工况 A5 中, 流量 $Q=0.030 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 消能水池内的水深为 0.2 m, 此时竖井底部受到的最大冲击压力为 7.7 kPa. 相较于无水深情况(工况 A1), 最大压力减少了 78.6%, 且压力脉动最平稳. 消能水池水深越大, 对最大冲击压力的缓解效果越好. 当流量 $Q=0.025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 0.1 m 和 0.2 m 水深的消能水池内的最大冲击压力差值达到了 66.1%; 而当 $Q \geq 0.035 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 最大压差只有约为 10%. 其原因是最大冲击压力受竖井底部流态影响, 当大流量下射流形成的向上回卷的水流与跌落环形流碰撞时, 消耗了较大的能量, 因而继续增加竖井底部水池深度对缓解最大压力影响不大.

向上或向下增加水深能在一定程度上缓解跌落射流的冲击压力. 在此分析当竖井底部总水深分别为 0.2、0.3 和 0.4 m 时, 底部受到的冲击压力. 水垫层和挡板总共有 6 种组合, 图 5(a)给出了 6 种工况下竖井底部的平均冲击压力. 通过对比竖井底部总水深为 $H=0.2 \text{ m}$ 的各种工况, 可以看出设置 0.2 m 挡板所产生的平均冲击压力要小于单独设置 0.2 m 水垫层或设置 0.1 m 水垫层和 0.1 m 挡板组合措施所产生的平均冲击压力. 增加下游管道内的水深可有效降低竖井平均冲击压力, 而增加消能池深度可有效降低竖井底部受到的最大冲击压力.

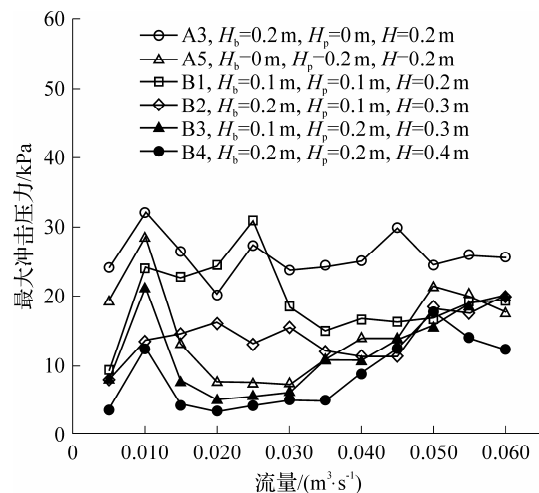
图 5(b)为竖井底部的最大冲击压力. 竖井底部最大冲击压力随着水深的增加而不断减小, 而平均冲击压力不随水深的增加而减小. 这是由于水深越大, 产生的静水压力就越大. 虽然射流产生的最大冲击压力随总水深的增加而减小, 但静水压力随总水深的增加而增大. 因此, 增加水深并不一定会降低竖井的平均冲击压力, 但可以有效降低竖井底部的最大冲击压力.

2.3 跌落高度对底部射流冲击力的影响

在竖井进口处, 当水平水流冲击到对面竖井井壁后, 将形成贴壁向下流动的环形流和自由跌落的射流, 其中自由落体射流所占比例较小, 一般不超过 0.2. 环形流沿竖井壁面下降时, 其速度不断增加. 如果竖井的跌落高度足够大, 环形流向下移动一定距离后, 即可达到最终速度. 竖井底部冲击压力大小与跌落射流的最终速度和水深有关^[19], 而环形流达到最终速度的相应时间可由非线性方程求得^[19]. 由于竖井壁的摩擦和水流相互影响, 环



(a) 平均冲击压力



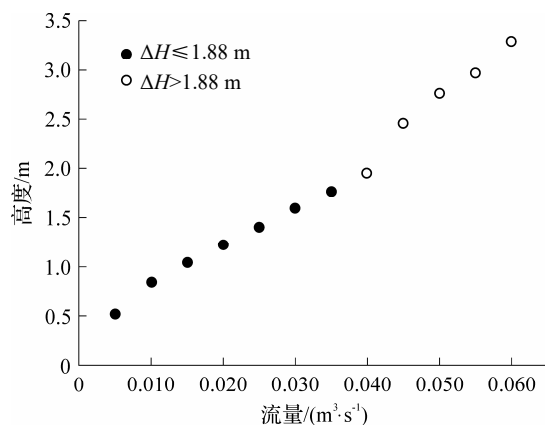
(b) 最大冲击压力

图 5 水垫层与挡板组合的消能效果

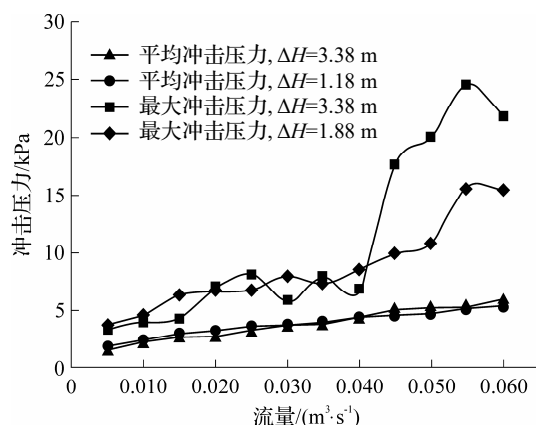
形流的加速度小于重力加速度, 因此跌落射流的跌落高度可以粗略地由末端速度和达到末端速度所需的时间来推算.

如果竖井总高度小于跌落射流达到最终速度的高度, 射流对竖井底部的冲击压力则随跌落高度的增加而增大. 当跌落高度大于该高度时, 继续增加跌落高度也不会增加竖井底部的最大冲击压力. 不同流量下的跌落高度如图 6(a)所示. 当 Q 在 $0 \sim 0.040 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 跌落射流达到最终速度的跌落高度小于 1.88 m. 进一步增加竖井的跌落高度并不能产生更大的冲击压力, 因而冲击压力变化不显著. 当 $Q=0.040 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 跌落射流达到最终速度所需的跌落高度约为 1.95 m, 超过了上下游管道的落差. 因而流量越大, 达到最终速度所需跌落高度越高,

产生冲击压力越大. Liu 等^[22]对 1.88 m 和 3.38 m 两个跌落高度的冲击压力进行了实验研究, 如图 6(b) 所示. 结果表明: 在小流量时, 1.88 m 和 3.38 m 落差处的平均压力和最大压力相对接近; 当 $Q > 0.040 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 3.38 m 落差处的平均冲击压力约为 20.0 kPa, 显著高于 1.88 m 落差处的冲击压力.



(a) 跌落射流达到最终速度时的跌落高度



(b) 两个跌落高度下的冲击力

图 6 跌落高度分析

3 结论

基于物理试验方法, 研究了竖井底部水池对跌落射流冲击压力的减缓作用, 分析 1.88 m 跌落高度下, 竖井内冲击压力的变化规律及增加跌落高度分析对冲击压力的影响, 得到以下结论:

(1) 当排水竖井的跌落高度为 $\Delta H = 1.88 \text{ m}$, 小流量工况下, 跌落射流产生得到冲击压力主要位于靠近下游管道侧. 随着流量的增加, 贴井壁的环形流流量扩大, 冲击区域逐渐由下游侧向上游侧移动, 因而高压区域逐渐移动至上游侧.

(2) 增加竖井底部水池深度可以有效减小竖井

底部的压力脉动和最大冲击压力. 但由于水深增加, 导致静水压力也在增加, 所以竖井底部的平均压力并没有随着水深的增加而降低.

(3) 增加下游管道中的水深可以有效减轻竖井底部受到的平均冲击压力, 而增加竖井底部消能池深度可有效缓解竖井底部的冲击压力脉动.

(4) 竖井底部的冲击压力与跌落射流的末端速度有关. 如果竖井总高度小于射流达到最终速度的跌落高度, 则压力随跌落高度的增加而增大; 当跌落高度大于此高度时, 跌落射流的末端速度达到最终速度后不再增加.

参考文献:

- [1] Chanson H. Hydraulics of rectangular dropshafts[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(6):523-529.
- [2] Granata F, de Marinis G, Gargano R, et al. Hydraulics of circular drop manholes[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, 137(2):102-111.
- [3] Rajaratnam N, Mainali A, Hsung C Y. Observations on flow in vertical dropshafts in urban drainage systems[J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, 123(5):486-491.
- [4] Ma Y Y, Zhu D Z, Rajaratnam N, et al. Energy dissipation in circular drop manholes[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143(12):04017047.
- [5] Ma Y Y, Zhu D Z, Rajaratnam N. Air entrainment in a tall plunging flow dropshaft[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(10):04016038.
- [6] Vischer D L, Hager W H. Energy dissipators[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, 1995, 32(8):403A.
- [7] Ma Y Y, Zhu D Z, Rajaratnam N, et al. Experimental study of the breakup of a free-falling turbulent water jet in air[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(10):06016014.
- [8] Guo Q, Song C C S. Dropshaft hydrodynamics under transient conditions[J]. Journal of hydraulic Engineering, 1991, 117(8):1042-1055.
- [9] Liu Z P, Guo X L, Xia Q F, et al. Experimental and numerical investigation of flow in a newly developed vortex drop shaft spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(5):04018014.
- [10] Zhang W C, Wang J X, Zhou C B, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics in a vortex drop shaft[J]. Water, 2018, 10(10):1393.

- [11] Yang Z, Yin J B, Lu Y L, et al. Three-dimensional flow of a vortex drop shaft spillway with an elliptical tangential inlet[J]. *Water*, 2021, 13(4):504.
- [12] Rajaratnam N. Skimming flow in stepped spillways[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990, 116(4):587-591.
- [13] Jalil A. Experimental and numerical study of plunging flow in vertical dropshafts[D]. Edmonton: University of Alberta, 2009.
- [14] 何贞俊, 王斌, 杨聿, 等. 市政排水系统中竖井研究及应用进展[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(10):49-53.
- [15] Rajaratnam N, Johnston G A, Barber M A. Energy dissipation by jet diffusion in stormwater drop shafts[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1993, 20(3):374-379.
- [16] Camino Z G A. Hydraulics of plunging drop structures in urban drainage systems[D]. Edmonton: University of Alberta, 2011.
- [17] Camino G A, Rajaratnam N, Zhu D Z. Choking conditions inside plunging flow dropshafts[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2014, 41(7):624-632.
- [18] 徐剑乔. 基于 FLUENT 的排水深隧入流竖井三维湍流仿真[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(21):125-131.
- [19] 陈琚, 陆迎香, 唐洪武, 等. 新型对称折板式竖井水力特性[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2022, 37(1):73-83.
- [20] Bohrer J G, Abt S R, Wittler R J. Predicting plunge pool velocity decay of free falling, rectangular jet[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 124(10):1043-1048.
- [21] Puertas J, Dolz J. Plunge pool pressures due to a falling rectangular jet[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 131(5):404-407.
- [22] Liu J C, Huang B, Zhu D Z. Jet impinging in plunging dropshafts of medium and short height[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 148(12):002027.
- [23] Cola R. Diffusione di un getto piano verticale in un bacino d'acqua d'altezza limitata[M]. Istituto di Idraulica, 1966.
- [24] Jalil A, Rajaratnam N. Oblique impingement of circular water jets on a plane boundary[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2006, 44(6):807-814.
- [25] Irvine D A, Falvey H T, Withers W. Pressure fluctuations on plunge pool floors[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1997, 35(2):257-279.

Experimental study on the falling jet impinging on the plunge pool in the dropshaft

LIU Hong, LIU Jiachun*

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In the plunging drop shaft, the water flow usually carries a large amount of energy after falling a certain distance. When it impinges the bottom of the dropshaft, it generates significant pressure pulsation, which poses a risk to the structural safety of the dropshaft. In this paper, an experimental model of a plunging dropshaft was constructed. The impact of the fall jet on the plunge pool at the bottom of the dropshaft was studied, and the pressure pulsation and distribution as well as the effect of the drop height of the dropshaft and the depth of the pool on the impact pressure were analyzed. The results show that the horizontal jet impacting the shaft wall is divided into a downward annular flow along the dropshaft wall and a free-falling jet. When the falling water flow is small, the high-pressure area at the bottom of the shaft is concentrated on the side near the downstream pipe; as the flow gradually increases, the annular flow area continues to increase and the high-pressure area gradually transitions from the downstream side to the upstream side. Increasing the water depth of the downstream pipe can effectively reduce the average impact pressure at the bottom of the shaft and increasing the depth of the water cushion can effectively reduce the impact pressure pulsation at the bottom of the shaft. When the water flow reaches its terminal velocity in the shaft, continuing to increase the drop height of the shaft will not generate more impact pressure.

Key words: dropshaft; impinge pressure; water cushion; drop height; terminal velocity

(责任编辑 章践立)