

基于FLOW-3D软件的水文站井筒基础水动力数值模拟研究

沈 印, 云 澍

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 水文测站为水利工程中用来观测水位、流量等水情的水利设施。由于其特殊的作用, 一般采用井筒式基础布置在河道岸边。在河道流速较大、水深较深的地方, 井筒基础所受的水动力将成为结构控制可变荷载。对于此种水流力的计算有相应规范作为参考, 但这些规范均未考虑水面壅高的影响, 从而使得水流力计算值偏小, 不利于结构安全。为此, 基于Flow-3D软件, 对井筒基础所受的水动力进行数值模拟计算, 根据计算结果进一步分析研究水流力与结构尺度、流速及水深的相对关系, 并提出建议的计算方法。

关键词: 水流力; 圆筒基础; 数值模拟

中图分类号: TV135

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0281-04

Numerical Simulation Research on Flow Force of Shaft-type Foundation of Hydrological Station Based on Flow-3D Software

SHEN Yin, YUN Shu

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Hydrological stations are the water conservancy facilities used in hydraulic engineering to observe the water conditions such as water level and flow rate. Due to the special role, the shaft-type foundation is generally arranged on the riverbank. In areas where the river flow velocity is high and the water depth is deep, the water flow force acting on the shaft-type foundation will become the variable load controlled by the structure. There are corresponding norms for the calculation of this kind of water flow force as a reference, but these norms do not consider the impact of water surface elevation, which makes the calculated value of the water flow force too small, and is not conducive to structural safety. Therefore, based on Flow-3D software, the water flow force acting on the shaft-type foundation is numerically simulated and calculated. Based on the calculation results, the further analysis and research are conducted on the relative relationship between the water flow force and structural scale, the flow velocity and water depth, and a recommended calculation method is proposed.

Keywords: water flow force; cylindrical foundation; numerical simulation

0 引 言

水文测站为水利工程中经常布置的用来观测水位、流量等水情的水利设施。由于其特殊的作用, 一般采用井筒式基础布置在河道岸边。一般情况下, 河道滩地较高, 深泓较深, 故井筒基础埋置深度较深, 出露滩面的高度较小, 水流力对结构的影响较小。但若遇到河道洪水位超过滩面较高的情况, 再碰到该处河道坡降较大、流速较高, 则此时水流力对井筒基础的作用将大大增加, 水流力将成为起控制

作用的可变荷载。在《港口工程荷载规范》(JTS 144-1—2010)、《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)、《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中均有相关的水动力计算公式, 且各规范中的计算方法基本类似, 仅在水流阻力系数上略有区别。在这些计算公式中, 主要考虑的是流速与接触面积的影响, 而未考虑结构迎水面雍水及背水面降水的影响, 从而使得水流力计算值偏小, 不利于结构安全。实际情况下, 结构一旦露出水面, 就将在迎水面及背水面侧产生自由液面高差, 该水头差也将产生一定的水压力作用在结构上。本文将利用Flow3D计算软件, 对水文站井筒结构所受的水动力进行分析研究。

收稿日期: 2024-07-23

作者简介: 沈印(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事市政水利设计研究工作。

1 数学模型

1.1 控制方程

Flow-3D 软件采用基于结构化矩形网格的 FAVOR 方法及真实的 3 步 Tu-VOF 方法,控制方程中含有体积和面积分数参数。本次模拟采用单相流体模拟水流流动,应用 GMRES 方法求解离散方程。控制方程采用 N-S 方程,建立消能池三维水流 RNG k 紊流数学模型。控制方程包括连续性方程、动量方程、紊动能方程、紊动能耗散率 ε 方程^[1]。

1.2 自由表面的处理

VOF 法是 Hirt 等于 1981 年提出的处理复杂自由表面的有效方法,也是目前应用非常广泛的一种追踪自由表面的数值方法。该方法定义流体体积函数 $F=F(x,y,z,t)$ 为计算区域内流体的体积占据计算区域的相对比例^[2]。VOF 法只用一个函数就可描述自由表面的各种复杂变化,在具有 MAC 方法优点的同时,克服了 MAC 法所用计算机内存较多和计算时间较长的缺点,也克服了标高函数法无法处理自由表面是坐标多值函数的缺点,因此是解决水力学带自由表面水流问题比较理想的方法。在 Flow-3D 中关于流体体积函数 F 的输运方程同样需要考虑体积和面积分数参数:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial (FA_x u)}{\partial x} + \frac{\partial (FA_y u)}{\partial y} + \frac{\partial (FA_z u)}{\partial z} \right] = 0 \quad (1)$$

式中: $F=F(x,y,z,t)$, 为计算区域内流体的体积占据计算区域的相对比例; u, v, w 分别为 x, y, z 方向上的流速分量, m/s; A_x, A_y, A_z 分别为 x, y, z 方向上可流动的面积分数, m^2 ; V_F 为可流动的体积分, m^3 ; t 为时间, s。

2 数值模拟算例

某水文站位于山区性河道城区段,站址处河口宽约 60 m。水文站位于河道左岸,站址距离岸边 10.25 m。水文站采用井筒式独立基础,基础位于中风化岩石基础上,基础底高程为 297.3 m。水文站楼面高程 306.6 m,高于洪水位 305.44 m,确保梁底标高高于洪水位 0.5 m。井筒基础外直径 2.2 m,壁厚 0.3 m,高 8.3 m,超出设计滩地高程 6.0 m,处于洪水冲刷范围的高度为 4.8 m。由于该段河道属于山区性河流,河道纵坡达 0.8%,经计算得到站址处洪峰流速为 4.5 m/s。水文站纵断面图见图 1。

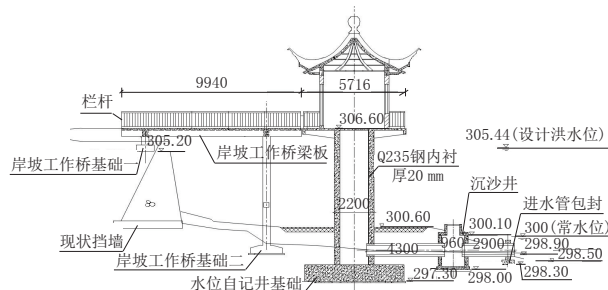


图1 水文站纵断面图(单位:mm)

2.1 模型范围及网格划分

按 1:1 建立圆柱实体模型,模型范围取圆柱上游 20 m 至圆柱下游 50 m。计算区域采用自由网格法,圆柱上下游及两侧 2 m 范围网格加密,网格单元尺寸取 0.1 m,其余范围网格单元尺寸取 0.5 m,网格总数约 15.6 万,见图 2。由于沿程水位会有坡降,流速及水深均会与边界位置有差异,因此,为更精确得到井筒基础处的水流条件,同时为避免圆柱前雍水影响,于圆柱前 3 m 范围设置水力探针点及流量监测面。

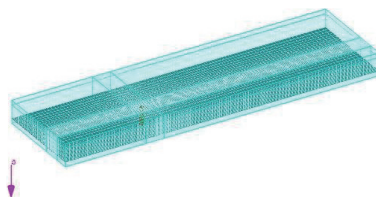


图2 模型网格划分图

2.2 模型参数选定

边界条件: x 轴(沿水流方向)上游侧为流量边界,流量取 $400 \text{ m}^3/\text{s}$,初始水位取 4.0 m, x 轴下游侧为出流边界; y 轴(垂直水流方向)两侧均为墙面边界; z 轴(高度方向)底部为墙面边界,顶部为自由空气边界。

为获得圆筒基础内力,激活实体压力及弯矩输出选项;物理模型激活重力选项,重力加速度取 9.8 m/s^2 ;激活黏性流并选取 RNG 湍流模型,确定紊流水力粗糙壁面的圆柱体表面粗糙度取 0.007 m;初始步长为 0.1 s,最小步长为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}$,总计算时长为 180 s。

2.3 模型计算结果

Flow3D 软件计算的某一时刻水面三维动态结果见图 3。根据计算结果可知,圆筒结构所受水平水流压力最大值为 157 kN。利用探针获取圆筒前 3 m 位置处的水深为 4.74 m,断面平均流速为 4.79 m/s,根据《港口工程荷载规范》和《铁路桥涵设计规范》,计算得到圆筒基础所受水动力为 79.4 kN;根据《公路桥涵设计通用规范》,计算得到圆筒基础所受水动力

为 87 kN。由此可见,利用 Flow3D 软件计算分析得到的圆柱水水力明显大于规范计算结果,两者比值为 1.8~1.97。笔者分析,上述规范中假定所受水流力的结构为全部淹没在水下,故未考虑由于阻水导致的结构迎水面侧自由水面壅高和背水面侧自由水面下降,而结构两侧的压力水头差将产生额外的水压力。根据水位壅高能量公式(见式(2))可知,壅高值与流速、水深及圆筒直径有关,因此该部分的压力大小将随着流速增加或圆筒断面增加而不断增加。

$$\Delta Z = \frac{\alpha V^2}{2g} \left[\left(\frac{B}{\varepsilon \sum b} \right)^2 - \left(\frac{h}{h + \Delta Z} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中: α 为动能校正系数; ε 为过水面积收缩系数; b 为墩柱建设后的水面宽度; B 为无墩柱时的水面宽度; V 为断面平均流速; h 为断面平均水深; ΔZ 为水位壅高值。

为验证笔者猜想,采用不同流速、水深及圆筒直径,对水水力模型计算值与规范计算值进行分析比较。

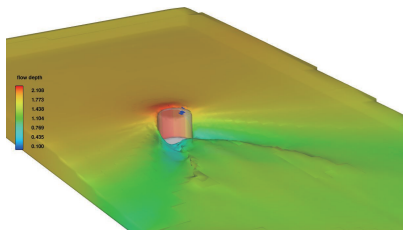


图3 水面三维动态结果($t=156\text{ s}$)

3 水流流速及水深的影响

由于水流流速及水深的大小会影响圆柱体前雍水高度,而雍水高度又会影响结构所受的水水力,因此为研究流速对水流力的影响,拟改变原计算工况边界流量,从 50.0 m³/s 逐级增加至 370.0 m³/s,每级增加 80 m³/s;其余条件均不变。井筒基础在各流量边界下的水水力计算结果与规范计算结果(考虑到各规范间仅水流阻力系数不同,本文拟采用计算值偏大的《公路桥涵设计通用规范》进行比较)的比较见表 1;井筒基础在边界水流流量为 50.0、370.0 m³/s 下的两侧水位见图 4。

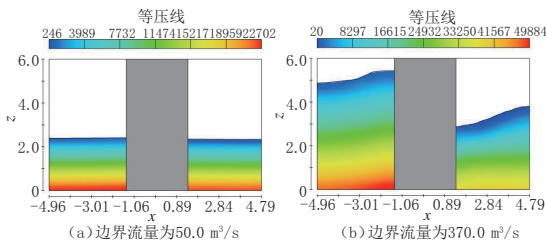


图4 不同边界流量下水位壅高图($t=60\text{ s}$)

由计算结果可知,在水流流速较小、水深较浅的情况下,水位壅高并不明显,此时模型计算结果与规范计算结果差别较小,差距在 10% 以内。而当水流流速及水深不断增加的情况下,井筒前雍水高度不断增加,此时数值模型计算结果与规范计算结果的差距也不断增加,最大甚至超过规范值的 2 倍。由此可知,结构前水位壅高对结构所受水水力影响非常大,在设计过程中应充分重视,不能盲目采用规范计算值。

表 1 不同流速下水水力比较结果

工况	测点处水深/m	测点处平均流速/(m·s ⁻¹)	圆柱所受水水力/kN		两者比值
			规范结果	模型计算结果	
1	2.40	1.06	3.24	3.5	1.08
2	2.86	2.31	18.31	30.0	1.64
3	3.51	3.05	39.18	76.2	1.94
4	4.13	3.58	63.52	136.4	2.15
5	4.82	3.91	88.43	193.5	2.19

4 井筒基础直径的影响

由于井筒基础直径的大小会影响井筒前的雍水高度,而前述已证实雍水高度对水水力影响较大,因此为研究井筒基础直径对水流力的影响,拟改变井筒直径 D ,将 D 自 1.0 m 逐级增加至 3.0 m,每级增加 0.5 m;每个直径下的边界流量仍从 50.0 m³/s 逐级增加至 370.0 m³/s,每级增加 80 m³/s;其余条件均不变。井筒直径在 1.0、2.5 m、边界流量为 320 m³/s 情况下的雍水情况见图 5;井筒基础在不同直径下的水水力模型计算结果与规范计算结果比较见图 6。

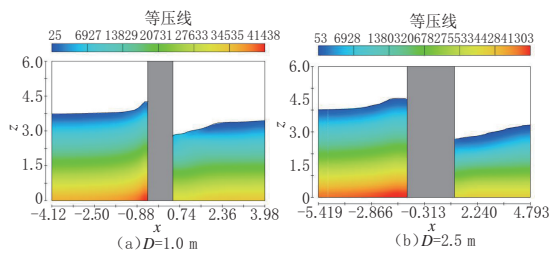


图5 边界流量为 320.0 m³/s 下不同直径井筒水位壅高图($t=60\text{ s}$)

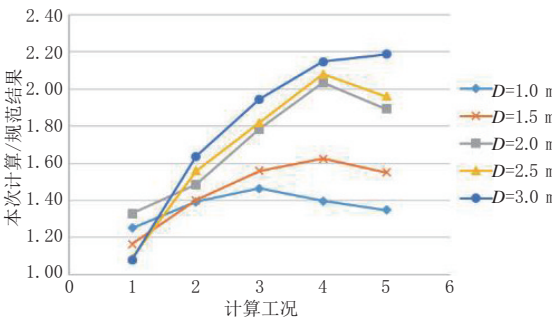


图6 不同井筒直径下的水水力模型计算结果与规范计算结果比较

由计算结果可知,在水流速度较低的工况下,不同直径井筒前壅水高度差别不大,且易受水深等其他因素影响,因此所受水动力大小相对趋势不明显。在流速逐渐增加的情况下,井筒直径对筒前水位壅高的影响逐渐增加,从而导致水动力模型计算结果与规范计算结果的比值呈现明显增大趋势。在流速超过一定范围后,该增大趋势又逐渐放缓甚至缩小,说明随着流速的增大,流速等其他因素又成为影响该值的控制要素。

5 壅高值与水动力增加值的关系

由上述可知,影响井筒前水位壅高的3个因素水深、流速、井筒直径均对水动力产生了同样趋势的影响。为进一步验证水位壅高与水动力模型计算值偏大的相对关系,本次采用多个计算工况根据式(2)分别计算其水位壅高值,并通过壅高前后水位的比值与模型和规范计算的比值进行比较分析,两者相对关系的散点分布图见图7。由图7可知,除了个别散点偏差较大外,两者的关系基本呈线性分布,即在水位壅高较大的情况下,水动力也增加较大,且可以认为模型计算值较规范计算值增加的部分即是水位壅高导致的。根据分布点位拟合线性公式可得模型计算值相对于规范计算值的放大倍数近似等于 $8.05 \times (\text{壅高后水位}/\text{计算水深}) - 7.0$ 。在设计中可采用此公式对规范值进行修正,以此修正值进行设计可保证结构安全稳定。

6 结 语

(1)模型计算得到的水动力数值较规范计算值

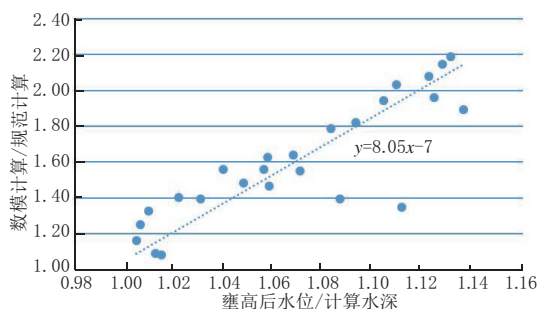


图7 水位壅高与水动力的相对关系

偏大,最大差距可达2倍多,因此如果仅按照规范计算的水动力进行设计将不利于结构安全。

(2)水动力模型计算结果与规范计算结果的比值随着水深及水流流速的增加而变大,随着圆筒直径的增加而变大。

(3)模型计算值较规范计算值增加的部分即是水位壅高导致的。根据分布点位拟合出了模型计算值相对于规范计算值的比值与壅高前后水位比值的线性公式。

根据以上结论可知,在圆筒基础设计过程中可优先计算分析水位壅高的情况,并根据其修正规范计算数值,以此修正值进行设计可保证结构安全稳定。

参考文献:

- [1] JTS 144-1—2010,港口工程荷载规范[S].
- [2] TB 10002—2017,铁路桥涵设计规范[S].
- [3] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [4] 王月华,包中进,王斌.基于Flow-3D软件的消能池三维水流数值模拟[J].武汉大学学报(工学版),2012,45(4):454-457.
- [5] 包中进,王月华.基于Flow-3D软件的溢洪道三维水流数值模拟[J].浙江水利科技,2012(2):5-9.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

