

东淝河船闸深基坑深井降水设计与应用

柴昶昶¹ 俞沛然²

(1. 安徽省中兴工程监理有限公司, 安徽 合肥 230011;

2. 中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241060)

【摘要】在船闸施工过程中, 深基坑降排水设计与成效直接关系到船闸主体结构施工工期效益、经济效益及结构安全。在面临四面环水、砂层、风化岩层等特殊地质环境下, 如何经济、高效的布设深井降水, 实现船闸底板等结构干地施工条件等显得至关重要。

【关键词】深基坑; 深井; 降水

一、依托工程概况

引江济淮东淝河船闸主体工程基坑位于东淝河老船闸与节制闸之间河床以及滩地, 船闸位置四面环水, 地形起伏较大, 地面高程一般为 12.72 ~ 28.82m。场地主要由农田、少许房屋建筑及砂场码头组成。东淝河河底高程在 12.72 ~ 16.50m 左右, 东淝河船闸上闸首基坑底高程 7.6m, 闸室基坑底高程 8.54m, 下闸首基坑底高程 7.69m, 基坑最大深度达到 17.4m。由于基坑位于老船闸与节制闸之间, 上闸首基坑中心线距节制闸 92m, 闸室中心线距老船闸中心线 70m, 为尽量减少基坑开挖对节制闸与老船闸的影响, 基坑采用钻孔灌注桩支护。

本工程基坑底部位于砂层及强风化岩层, 砂质胶结区胶结程度较松散, 富水性及渗透性相对较强, 渗透性等级属中等透水, 基坑排水采用深井降水方案。

二、场地工程地质及水文地质条件

(一) 地层分布及特征

根据收集的资料、现场调查测绘、野外记录、原位测试和室内土工试验成果, 在勘探深度范围内揭露的地层主要为第四系全新统人工填土(Q4m1)、第四系全新统冲积层(Q4a1)、第四系上更新统冲积层(Q3a1)、第四系上更新统洪积层(Q3p1)、第四系上更新统残积层(Q3e1)及白垩系上统张桥组(K2z)砾岩、泥质砂岩。

(二) 水文地质条件

勘察期间, 拟建场区钻探深度范围内见有稳定分布的地下水, 地下水综合水位埋深 0.40 ~ 9.20m, 水位标高 16.21 ~ 23.69m, 地下水类型主要为上层

滞水和潜水, 主要含水层为上部填土、⑦层粉土、⑧1层粉砂、⑧2层细砂、⑧3层中砂、⑨角砾以及⑩卵石, 水量丰富, 地下水主要接受大气降水及东淝河河水补给, 地下水水位略高于东淝河河水水位。

三、降水方案设计

(一) 降水工程特征

1. 本工程主要含水层为⑦层粉土和⑧层粉砂, 下部强风化、中风化砂岩风化裂隙水是次要含水层。在强风化层的上部应该有一层全风化层, 由于风化砂岩为泥质胶结, 所以全风化层透水性将会很差, 从而导致主要含水层与次要含水层之间的水力联系差, 所以降下部砂岩次要含水层的水可能不能有效疏干上部砂层的水。

2. 由于主要含水层⑦层粉土和⑧层粉砂的位置位于基坑开挖底板下 1~4m, 含水层的降水空间小, 不易把地下水降到开挖底板下 0.5m。

3. 对于灌注桩围护内的基坑, 若不能有效地疏干并把地下水降到开挖底板下 0.5m, 将会导致基底施工困难, 甚至由于地下水的毛细作用影响底板混凝土的防水效果。因此坑内疏干降水井的密度可能会加大。

4. 地下连续墙可能还会有渗漏; 且止水墙止水进入强风化层仅仅只有 1.5m, 没有对强风化进行止水, 强风化裂隙水虽然少量, 但是在止水墙外侧高压水压的作用下, 还是会源源不断地补充进来。由于围护桩外侧没有设计止水, 桩间渗水会造成流沙现象, 严重时会影响边坡安全。所以边坡降水井应该考虑一定的密度。

5. 对于老船闸的保护, 应该加强监测, 必要时

可以考虑设置回灌井保护。

6. 本项目降水工作除了受地层的特殊性影响, 还受围护止水效果的影响, 降水设计不能一次完成, 需要通过多次试验确定。

(二) 降水目的

根据上述分析, 本工程主要降水目的为:

1. 降低下部砂层及基岩裂隙水水位, 保证边坡及开挖安全,

2. 疏干开挖底板附近砂层及裂隙间的地下水, 方便基坑内作业施工。

(三) 边坡井布置

由于止水结构渗漏、基岩裂隙水补给, 可能导致边坡失稳、灌注桩间漏水漏砂等事故, 因此边坡降水井需布置有一定的密度, 形成截水效果, 将水位控制在开挖面以下。本次可考虑按 15~30m 一口井布置, 约布置 42~81 口边坡井。具体布井间距应根据试验结果确定。

(四) 疏干井布置

虽然地连墙理论上隔断了⑧ 2 层细砂, 但由于地连墙可能存在渗漏, 同时裂隙水不断的补给, 开挖到底后很可能出现大面积的积水, 难以施工。在较厚的砂层中往往布置少量的降水井即可, 但本工程砂层较薄, 下部基岩又接近开挖底面位置, 因此需要一定密度的疏干井进行疏干, 可暂按 500m² 一口布置, 具体根据试验确定。

坑内降水井的数量根据下式进行计算:

$$n = A / a_{\text{井}}$$

式中: n —井数(口); A —基坑疏干面(m²);
 $a_{\text{井}}$ —单井有效抽水面积经验值

表 3-1 疏干井数量计算表

序号	计算位置	基坑总面积(m ²)	单井有效疏干面积(m ²)	降水井数(口)	井深(m)	备注
1	坡底及灌注桩内基坑范围	21181	500	42	15~20	

(五) 降水井结构

根据《建筑与市政工程地下水控制技术规范》JGJ 111-2016 降水井的深度可按下式确定:

$$H_w = H_{w1} + H_{w2} + H_{w3} + H_{w4} + H_{w5} + H_{w6}$$

式中: H_w ——降水井深度(m);

H_{w1} ——基坑深度(m);

H_{w2} ——降水水位距离基坑底要求的深度(m),

本次取值 1m;

H_{w3} —— ir_0 ; i 为水力坡度, 在降水井分布范围内宜为 1/10~1/15;

r_0 为降水井分布范围内的等效半径或降水井排间距的 1/2(m); 1m;

H_{w4} ——降水期间的地下水位变幅(m), 取 1m;

H_{w5} ——降水井过滤器工作长度(m), 取 3~6m;

H_{w6} ——沉淀管长度(m), 取 1.0m。

降水井深度需满足上述要求, 此外由于本工程基岩面埋深浅, 开挖过程中受到裂隙水影响明显, 因此降水井至少深入强风化岩层。

对于中风化岩层相较强风化岩其渗透性更受裂隙发育影响, 有限数量的降水井很难提前针对性降水; 且中风化岩强度高施工困难、收益小。因此是否进入中风化岩层, 可由试验确定降水井深度。

(六) 模型分析

数值法通过程序化运算可模拟不同复杂条件下的地下水流状况。本次利用《Visual ModFlow》软件, 建立地下水三维渗流数值模型, 初步对布井方案给出建议。

1. 水文地质概念模型。本次根据场地地质条件, 将⑧ 1 粉砂、⑧ 2 细砂层及下部风化岩层作为主要含水层; 其余粘土、粉质粘土层作为弱透水层考虑, 垂直方向上概化为 6 层。

2. 地下水运动数学模型。求解地下水运动问题, 可以利用下述地下水流连续性方程及其定解条件式来描述地下水的三维非稳定渗流规律。根据场地地质及水文地质条件, 建立了下列与之相适应的地下水三维非稳定渗流数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + W = \frac{E}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

其中 $E = \begin{cases} S & \text{承压含水层} \\ S_y & \text{潜水含水层} \end{cases}$; $T = \begin{cases} M & \text{承压含水层} \\ B & \text{潜水含水层} \end{cases}$; $S_s = \frac{S}{M}$

式中: K_{xx} , K_{yy} 和 K_{zz} 为平行于主轴 x , y 和 z 方向的渗透系数(L/T); W 为单位体积流量, 用以代表流进或流出的源汇项(m³/d); h 为点(x , y , z)在 t 时刻的水位(m); S_s 为储水率(1/m); S 为贮水系数; S_y 为给水度; M 为承压含水层厚度(m); B 为潜水含水层厚度(m)。

初始条件: $H(x, y, z, t) = H_0(x, y, z, 0)$ (x, y, z) $\in \Omega$

边界条件: 第一类边界条件:

$$H(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1$$

第二类边界条件： $K \frac{\partial H(x,y,z,t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x,y,z,t)$

其中： Ω 为立体时间域； $H_0(x,y,z,0)$ 为研究区各层初始水头值； $H_1(x,y,z,t)$ 为研究区各层第一类边界 Γ_1 上的已知水头函数（L）； $q(x,y,z,t)$ 为第二类边界 Γ_2 上的单位面积法向流量 [L^2T^{-1}]；对于隔水边界， $q = 0$ 。

3. 模型剖分。模型采用六面体网格剖分，在水平方向上采用非等距矩形网格剖分（基坑开挖区域附近网格加密），模拟区平面上剖分为 148 行、458 列，加密区最小单元格的面积为 $1 \times 1m^2$ ，非加密区域单元格面积约为 $25 \times 25m^2$ ；垂向上根据地层及围护结构深度共剖分为 5 层。

4. 模型参数。（1）地层渗透系数。地下水流数学模型涉及的模型参数主要为渗透系数（ K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} ），其值的大小直接决定概念模型与实际水文地质模型的拟合程度以及基坑涌水量预测的大小。结合降水工程资料、地层经验参数、地勘资料等，充分考虑地层的各向异性，渗透系数取值见表 3-2。

表 3-2 模型参数取值表

序号	地层	含隔水层划分	$K_{xx}=K_{yy}$ (m/d)	K_{zz} (m/d)	备注
1	1-2 填土、4、5、6 粉质粘土	弱透水层	0.01	0.005	
2	8-1 粉砂、8-2 层细砂	含水层	12	6	
3	12-1 强风化砾岩	含水层	1.5	1.5	
4	12-2 中风化砾岩	弱透水层	0.5	0.5	

（2）止水帷幕。混凝土地连墙在模型中可利用 Wall 模块表示，可设置墙的厚度及渗透性能，本次考虑截渗墙平均为 $0.001m/d$ 的渗透最为可能的渗漏量。（3）边界条件。本次降水设计时下部含水层水位标高按 18.54m 计算（4）降水井。在《Visual Modflow》中，可设置抽水井过滤器长度、层位、抽水量等参数，与实际数据具有很强的对比性，见图 3-6，随抽水时间延长，单井水量逐渐减少。

5. 模拟结果。根据计算结果，水位降至开挖底面附近位置标高 $6 \sim 8m$ 时，基坑总涌水量约为 $5120m^3/d$ ，主要考虑为截渗墙的渗漏及下部基岩补给量，相应的由于降水井后期抽水能力有限，需适当加密布置降水井，考虑后期降水井出水能力大大

减小约为 $72 \sim 96m^3/d$ 。故建议边坡按 15m 一口间距布置降水井，坑内暂按 $500m^2$ 有效影响面积布置疏干井。

四、应用效果

（一）数据分析

在进行现场深井降水后，对相关采集数据进行现场整理和室内整理，编制流量、降深与时间的关系曲线图，分析判断异常现象，以便及时采取相应处理措施。同时，室内同步开展包括抽水孔位置图，水文地质综合柱状图，抽水试验技术资料表， Q 、 s 、 t 、 (lgr) 间各种关系图表，试验数据记录表，最大涌水量等资料及分析，均能满足深基坑深井降水相关设计及规范要求。

（二）实际应用效果

东淝河船闸在正式施打试验井开始深基坑降水，根据抽水试验最终确定整个船闸主体区域降水井布置，井深及井间距设置合理，水位处于基坑底部以下，基本达到稳定状态。降水效果良好，基坑施工处于干燥无水环境，保证基坑安全及边坡稳定，施工期顺利度过 3 个汛期。

五、结论

船闸工程建设成败关键环节之一在于深基坑施工阶段。在特殊地理地质环境下，结合相关支护帷幕体系设计，应深入分析和设计深基坑降排水形式，避免因降水不当造成船闸出现管涌、流沙等问题，或因过度降低地下水位，造成周边支护结构体系、其他构筑物等变形破坏。通过地质排查、方案设计、建模分析、抽水试验等，船闸深基坑深井降水施工具有良好的安全性，也在船闸施工建设中带来了工期效益和经济效益，具有较高的推广应用价值。

参考文献：

- [1] 朱启. 船闸深基坑开挖支护与降水施工分析[J]. 珠江水运, 2023(8):103-105.
- [2] 徐义. 深井降水在深基坑中的应用研究[J]. 冶金丛刊, 2019,004(018):53-54.
- [3] 王涛, 陈永红. 深井降水配合明沟排水工艺在无支护深基坑施工中的应用[J]. 中国水运: 下半月, 2020(5):3.

作者简介：柴昶昶，男，1984 年 11 月生，汉族，籍贯：安徽霍邱，学历：本科，职称：高级工程师，研究方向：大型船闸、码头、航道工程等施工。