

长距离输水管道系统中高位水池设计方案研究

杨书统 周志平

河南省水利勘测设计研究有限公司 河南 郑州 450003

摘要：水是经济社会发展的基础性、先导性、控制性要素，水资源配置格局影响和决定着经济社会发展布局。随着国家水网战略、南水北调工程后续高质量发展战略的实施，供水范围将进一步扩大，供水管网将进一步延伸。在铺设新的供水管网时应分析对已建管道的影响，采取相应的措施至关重要。本文以河南省周口市某引调水工程为例，从高位水池的作用、位置设置、结构设计等方面，研究长距离输水系统高位水池的设计技术，为类似工程提供一定的借鉴。

关键词：长距离输水；高位水池；设计技术

1 工程概况

南水北调中线一期总干渠全长1432km，其中河南省境内长731km，途径南阳、平顶山、许昌、郑州、焦作、新乡、鹤壁和安阳共计8个省辖市、21个县（市）。总干渠在河南段设有41座分水口门，向河南省45座受水城市的85座水厂进行供水。

总干渠10号辛庄口门位于平顶山市叶县保安镇辛庄西北总干渠右岸，主要向漯河市、周口市供水，管道总长度约175km，其中主管道长度145km，支管道长度29.95km。项城市南水北调供水工程水源为南水北调水，通过在10号口门周口输水主管道设置取水口引水至项城南水北调水厂，管道长度41.42km。

2 设计原则

目前南水北调供水配套工程10号口门输水线路主要向漯河市、舞阳县、周口市、商水县供水。项城市南水北调供水工程实施以后，增加向周口市项城、沈丘供水，运行条件发生较大改变，不应影响原10号口门供水配套工程的运行安全、工程安全、供水安全及运行管理。

10号口门输水线路已建成并投入运行。项城市南水北调供水工程的建设需充分考虑后期不同产权单位的运行管理范围划分，将10号输水管道与新建输水管道通过高位水池分隔，便于做到管理范围划分明确，管理单位责权明晰。高位水池的设置同时需满足国家及行业现行标准、规范的相关要求^[1]。

3 工程地质

工程区位于黄淮河冲积平原，地势较平坦、开阔。勘探深度范围内地层主要为第四系全新统冲积物，岩性主要为杂填土、轻粉质壤土、重粉质壤土、砂壤土、粉细砂，属粘砂多层结构，地层分布较稳定。场区地下水类型为第四系松散层孔隙水，下部砂壤土层中地下水具

承压性。

建基面位于第④层重粉质壤土层中，施工边坡高度约7m，存在施工边坡稳定问题。地下水具动态变化特征，地下水位变幅一般1~3m，施工前应复测地下水位，并采取相应合适的降排水措施保证干地施工。该层承载力标准值 $f_k = 90\text{kPa}$ ，如不能满足需要，可采取相应的地基处理措施。

4 高位水池布置

高位水池距离分水口越近，连接工程线路短，后期对已建输水管道的影响小；同时需考虑地形地貌，附近村庄分布等。经方案比选，本次规划设计将高位水池位于唐庄村南侧，距分水口约1.3km。

高位水池采用圆形、开敞式结构，内径9.0m，壁厚1.3m~1.6m，池底高程42.10m，井顶高程72.10m，池深30m，管道进口中心线高程44.00m，管道出口中心线高程43.60m。池底设置放空管，放采用DN400钢管。池顶设置溢流管，溢流高程与高位水池最高水位一致，均为68.90m。水池基础采用C30灌注桩承台，桩径1.0m，间距3.0m，环形布置，桩深30m(如图1)。

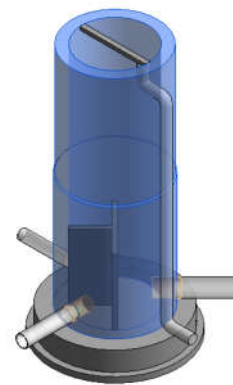


图1 高位水池结构示意图

5 高位水池设计

5.1 高位水池水位设计

根据现状管道直径及供水条件,总干渠10号口门设计水位为135.325m、进水池设计水位为135.225m的边界条件下,项城分水口处水位64.723m,高位水池处水位为63.88m。经复核项城输水工程末端出水口水位43.16m,满足末端调蓄水池水位要求^[2]。

5.2 最小淹没深度计算

为了保证项城输水管道进水口为有压式,其进口最小淹没深度按《水利水电进水口设计规范》(SL285)要求确定。

$$S = CVd^{1/2}$$

式中: S—最小淹没深度;

d—输水管道管径(m);

V—输水管道平均流速,本次取 $1.6\text{m}^3/\text{s}$;

C—系数,对称水流取0.55,边界复杂和侧向水流取0.73;

经计算,进水口最小淹没深度为2.253m,设计取2.3m,因此高位水池内满足输水管道有压流的控制水位为47.7m。

5.3 高位水池容积计算

当主管道发生故障检修停止向项城供水时,项城输水管线存在一定反应时间以关闭阀门。根据水锤计算分析,本工程末端水厂前阀门关闭采用线性关闭,时间为600s。管道设计流量为 $1.6\text{m}^3/\text{s}$,关闭时间内共需要水量为 960m^3 。

考虑到目前输水主管道未到达设计流量的运行工程,为了尽可能的利用管道的富裕税收,本次高位水池的最高水位仍采用初设批复的68.90m。

$$V_{\text{设计}} \geq V_{\text{关闭}} + V_{\text{淹没}}$$

$$V_{\text{最大}} = V_{\text{有效}} + V_{\text{淹没}}$$

式中: $V_{\text{设计}}$ —设计水位时水体容量,设计水位为63.88m;

$V_{\text{关闭}}$ —阀门关闭600s内管道的需水量,取 960m^3 ;

$V_{\text{淹没}}$ —满足管道最小淹没深度水位时水体容量,淹没控制水位为47.7m;

$V_{\text{最大}}$ —最高水位时水体容量,最高水位为68.90m;

$V_{\text{有效}}$ —最高水位与最小淹没深度控制水位之间的水体容量。

经计算,高位水池采用圆形,内径为9m时满足要求。高位水池最大容量为 1705m^3 ,有效容量为 1495m^3 。

5.4 高位水池稳定计算

高位水池稳定计算包括抗滑稳定计算、抗浮计算以及地基承载力计算等。作用在高位水池上的荷载有:自重、水重、静水压力、扬压力、土压力、风压力、雪荷

载、地震荷载等。

高位水池扬压力根据地基的防渗和排水设施布置,以及地基渗流特性,进行渗流计算求得。高位水池距入渗点较远,抗渗满足要求,因此扬压力中的渗透压力可以忽略不计,而只计算地下水位引起的浮托力。

a) 计算参数

自重:钢筋混凝土容重取 $25\text{kN}/\text{m}^3$;

土重:分为土体湿容重、饱和容重,见地质报告;

水重:水体容重取 $10\text{kN}/\text{m}^3$;

土压力:按回填中、重粉质壤土,综合内摩擦角考虑;

顶板活荷载:按 $1.50\text{kN}/\text{m}^2$ 计算;

风压力:根据《荷载设计规范》中基本风压计算;

地震力:按塔址处地震烈度,根据地质报告,工程区地震烈度为VI度。

b) 高位水池荷载组合

① 完建期:进水池完建初期,尚未投入运行,地下水位还未恢复到原始状态。② 设计水位:高位水池中水位为设计水位。③ 检修期:运行过程中,高位水池无水检修。④ 最高水位+地震:高位水池中水位为最高水位,地震烈度为VI度。

将上述计算工况分为基本工况和特殊工况,相应的荷载组合分为基本组合和特殊组合。

c) 抗滑稳定计算

$$K_c = \frac{f \sum G}{\sum H} \geq [K_c]$$

式中: K_c —抗滑安全系数;

$\sum G$ —作用于基础底面上的所有竖向荷载的总和(kN),包括基底扬压力;

$\sum H$ —作用于基础底面上所有水平向荷载的总和(kN);

f—基础底面与地基间的摩擦系数,取0.3。

d) 抗浮稳定计算

采用《给排水工程结构设计手册》的水池整体抗浮稳定计算公式:

$$\frac{G}{W} \leq [K_w]$$

式中: G—井室自重(kN);

W—地下水浮力(kN);

$[K_w]$ —抗浮稳定安全系数允许值,设计情况取1.1,校核情况取1.05。

e) 抗倾覆验算

高位水池抗倾覆按下式计算:

$$\frac{M_N}{M_E} \geq 1.5$$

式中： M_E —水平推力对转动点的倾覆力矩；

M_N —垂直力对转动点的抗倾覆力矩；

f) 基底应力计算

各种运行工况下的基底应力计算公式如下：

$$P_k \leq [P]$$

$$P_k = G_k + G_c + G_w + G_t$$

式中： P_k —基础底面处的平均压力设计值，(kPa)；

G_k —顶板单位面积竖向活荷载；

G_c —水池单位面积自重，包括顶板、池壁、底板自重，(kPa)；

G_w —池内水重，(kPa)；

G_t —水池顶板单位面积覆土重量，(kPa)；

[P]—地基承载力允许值，(kPa)。

g) 计算结果

可知计算结果显示：各种工况下，高位水池抗滑、抗浮、抗倾稳定安全系数均满足规范要求。高位水池底板座于第⑤层重粉质壤土上层，地基承载力标准值为 $f_k = 90\text{kPa}$ 。根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007)，对地基承载力进行修整，修整后的地基承载力为 126.40kPa ，地基承载力均不满足要求，需对地基进行加固处理。

5.5 灌注桩地基加固

本次地基加固采用灌注桩基础加固处理方案。桩基础采用C30钢筋砼钻孔灌注桩，桩径 1m ，桩间距 3m ，桩长 30m 。桩顶设有C30钢筋砼承台，厚 1m 。灌注桩结构计算参照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94)的要求进行，计算工况：按最不利工况进行计算，即高位水池内满水工况。

① 桩基础结构安全性复核：

单根桩承载力特征值：

$$R_a = (F_k + G_k) / n$$

式中： F_k —承台顶面竖向力，单位kN；

G_k —承台和承台上层土重，单位kN；

n —承台下桩基础根数，本工程取 $n = 50$ 。

计算得： $R_a = (F_k + G_k) / n = 104658.74 / 50 = 2093.18\text{kN}$

考虑承台效应的复合基桩竖向承载力特征：

$$R = R_a + \eta_c f_{ak} A_c$$

式中： η_c —承台效应系数，根据《建筑桩基技术规范》表5.2.5确定，取 0.06 ；

f_{ak} —承台下 $1/2$ 承台宽度且不超过 5m 深度范围内各层土的地基承载力特征值按厚度加权的平均值，为 100kPa ；

A_c —计算基桩所对应的承台底净面积，为 39.27m^2 。

计算得： $R = R_a + \eta_c f_{ak} A_c = 2093.18 + 0.06 * 100 * 39.27 = 2328.79\text{kN}$

② 拟定桩极限承载力标准值：

$$Q_{uk} = U \sum q_{sik} L_i + q_{pk} A_p$$

式中： U —桩身周径，单位m

q_{sik} —桩侧第 i 层的极限侧阻力标准值，根据地勘资料，桩基础共穿6层土层，自上往下依次为：⑤重粉质壤土，层厚 2.24m ；⑥砂壤土，层厚 6.9m ；⑦重粉质壤土，层厚 5.7m ；⑧轻粉质壤土，层厚 5.8m ；⑨粉质粘土，层厚 5.4m ；⑩轻粉质壤土，层厚 4.06m 。根据《建筑桩基技术规范》表5.3.5-1，各土层极限侧阻力标准值自上往下依次取值为 72kPa 、 53kPa 、 76kPa 、 80kPa 、 77kPa 、 56kPa 。

L_i —第 i 层桩长(m)；

q_{pk} —桩的极限端阻力标准值，根据《建筑桩基技术规范》表5.3.5-2，位于⑩轻粉质壤土层极限端阻力标准值为 750kPa 。

A_p —桩底截面积(m^2)。

计算得： $Q_{uk} = 7963.43\text{kN}$

安全系数： $K = Q_{uk} / R = 7527.07 / 2328.79 = 3.42 > 2$ ，满足规范要求。

6 水力过度过程复核

10号口门输水系统属于长距离多支复杂重力流输水系统，输水系统设置了多个阀门操作系统，需要对阀门操作规律进行复核，确保阀门操作过程中系统管道压力在控制范围之内，设置高位水池能够及时有效的隔断水锤波传递路线^[1]。

经复核增加项城供水目标后，通过对10号口门重力流输水系统水力过渡过程进行复核计算可知，在新老输水管道之间增设高位水池，原输水管道系统的开关阀过程中产生的最大压力、最小压力均在控制范围内，末端水厂阀门的启闭规律与原输水系统调度运行方案一致。

结论：在复杂的长距离输水系统中，新建输水管道的实施和运行，不能影响原输水系统的运行安全、工程安全、供水安全及运行管理。同时需充分考虑后期不同产权单位的运行管理范围的划分。在连接工程末端设置高位水池，可及时有效的各段水锤波传递路线，充分保护已建输水管道的供水安全。同时在高位水池之前部分纳入到原输水系统进行有效管理，保证原有输水系统的运行管理安全。

参考文献

- [1]李燕慧.长距离重力流输水管道系统水锤防护设计[J].中国水能及电气化,2024(03):36-40,56.
- [2]杨华.长距离输水管线设计与运行技术分析[J].工程建设与设计,2023(20):35-37.
- [3]李江云,周飞.长距离输水系统水锤影响因素及防护措施探究[J].给水排水,2023(08):112-118.