

南京长江江心洲超大直径盾构接收井明挖段 超深基坑降水技术研究

李洪财

(中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 210031)

摘要:南京长江隧道盾构接收井地处江心洲上,开挖地层以粉细砂层和砾砂层为主,降水施工中成功地克服了强透水地层分布厚、受承压水影响大、基坑开挖深度深、民房离基坑边沿距离近、降水技术复杂、地表沉降控制难等一系列技术难题。本文对基坑降水方案设计、施工工艺及地表沉降控制等方面进行了研究和总结。

关键词:盾构接收井;深基坑;降水技术;地表沉降;南京长江隧道

中图分类号:U455.49 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)05-0087-06

Study on Dewatering Technology of Ultra-deep Foundation Pit in Opening Cut Section of Super-large Diameter Shield Receiving Well in River Island of Nanjing Yangtze River/LI Hong-cai (Large Diameter Shield Co., Ltd. of China Railway Bureau 14 Group, Nanjing Jiangsu 210031, China)

Abstract: The shield receiving well in Nanjing Yangtze tunnel is located at the river island; the excavation is mainly in fine sand layer and gravel sand layer. In the dewatering construction, a series of difficulties are successfully overcome, such as thick strong permeability formation, great influence of confined water, deep excavation depth, close distance from civil house to foundation pit, complex dewatering technology and difficult ground settlement control. In this paper, the study and summary are made on the design of foundation pit dewatering, construction process and ground settlement control.

Key words: shield receiving well; deep foundation pit; dewatering technology; surface subsidence; Nanjing Yangtze River tunnel

1 工程概述

南京长江隧道工程是采用盾构工法施工的双向六车道城市快速通道工程,该隧道开挖直径 14.96 m,管片外直径 14.5 m,管片内径 13.3 m。盾构接收井工程位于南京市江心洲上,江心洲四面环绕江水,洲上沉积了连续 43 m 左右厚的砂层,周围民房密集,降水工程既要保证降水效果,又要保证周围房屋的安全,降水难度较大。

接收井开挖深度 26.5 m,长 26 m,宽 49.4 m;明挖段长 330 m,宽 45 m,开挖深度斜坡状,即 0~18.5 m。接收井及明挖段采取连续墙和钻孔灌注桩加旋喷桩止水帷幕,围护结构的深度接收井最深,达 42.5 m,但没有插入含水层底板,因此,围护结构没能把基坑内外的含水层隔开,基坑内外的含水层是互通的。

2 水文地质条件

该地段地层上部 0~4 m 为填土和粉质粘土,4

~47 m 为粉细砂,47~51 m 为砾砂,51 m 以深为红色砂岩。地下水水位埋深约 1.2 m,据抽水试验资料显示,含水层渗透系数 K 取 18 m/d,影响半径在 450~500 m,本次取 450 m。

3 工程特点、难点及对策

3.1 工程特点及技术难点

根据工程实际现状调查,本工程具有如下特点及技术难点。

(1)基坑开挖深度大且呈斜坡状,最深达 26.5 m,最浅到 0,长度达 330 m。

(2)含水层分布厚,层厚达 47 m,含水层颗粒细,多为粉细砂,在深井抽水时很容易带走地层中的粉细砂颗粒,将会给周边环境带来危害。

(3)围护结构没有插入到含水层的底板,没有把围护结构的内外含水层隔开,因此,围护结构的内外含水层形成互通。

收稿日期:2017-12-20;修回日期:2018-03-21

作者简介:李洪财,男,汉族,1973 年生,土木工程专业,主要从事超大直径盾构及隧道地下工程技术研究与管理工,江苏省南京市浦口区新浦路 120 号,894094264@qq.com。

(4)工程的基坑位于江心洲上,四面环水,地下水直接得到长江水的补给,且洲上沟塘密布,沟塘与长江水沟通,部分沟塘的深度已切穿到了含水层,故其可直接补给含水层。

(5)周围的民房众多,民房为2~3层的砖混结构,房屋基础较差,降水产生的不均匀沉降将会给房屋带来很大的破坏。

图1为南京长江隧道降水井平面布置示意图。

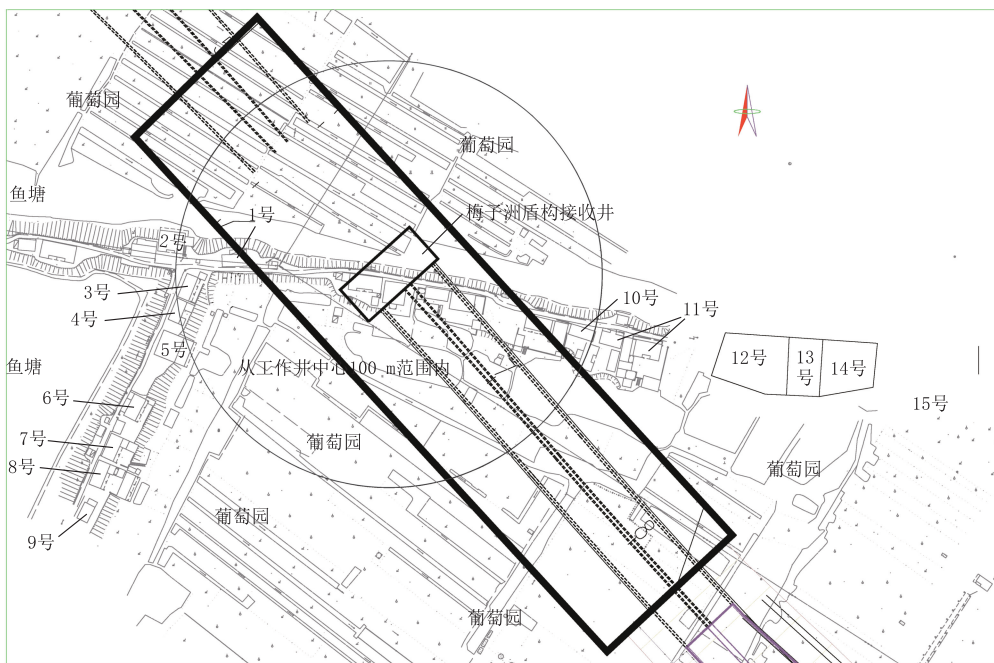


图1 南京长江隧道降水井平面布置图

3.2 对策

根据上述特点,通过反复分析研究,确定了如下对策。

(1)根据开挖深度的特性,把降水井主要集中布置在接收井周边,只要把接收井范围的地下水位降到位,其它各点的水位也就达到了要求的降深。

(2)根据含水层的颗粒细,施工中采取生活饮用水的标准进行施工,保证深井抽出的水含砂量 $<1/20$ 万。

(3)由于围护结构没有隔断围护结构内外的含水层,为便于施工,把降水井主要布置在基坑外侧。

(4)通过抽水试验,确定综合渗透系数、抽水影响半径,以及单井抽水量和抽水含砂量。

(5)根据勘察报告的地层资料,计算预测该地层的不均匀沉降量,确定对周边房屋的保护处理措施。

必须通过抽水试验验证上述对策是否能满足要求。

4 抽水试验

本次抽水试验布置水井3口,井深为40 m,孔

径800 mm,井管采用外径500 mm、内径400 mm的无砂混凝土管,滤料为中粗砂,成井结构如图2所示。观测井距离抽水井的距离分别为49.09和132.42 m。抽水试验确定了水文地质参数,获得了单井抽水能力和检验了抽水含砂量,这些数据为后面的布井设计提供了有力的依据。

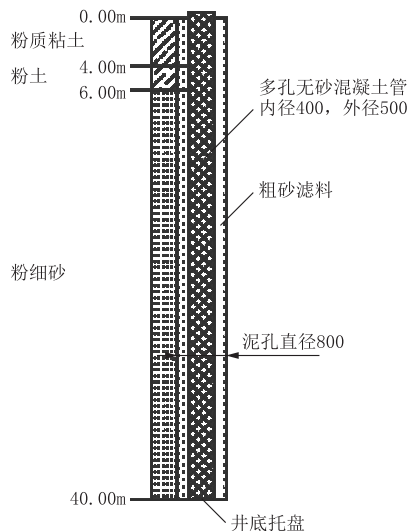


图2 成井结构图

抽水试验共进行了 3 个落程,3 个落程的抽水量分别为 1302.48、2580.96、3717.84 m³/d。对应主井水位降深分别为 3.19、7.06、10.6 m。参见图 3、图 4。

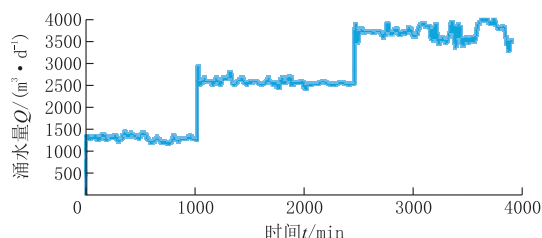


图 3 涌水量和时间关系曲线

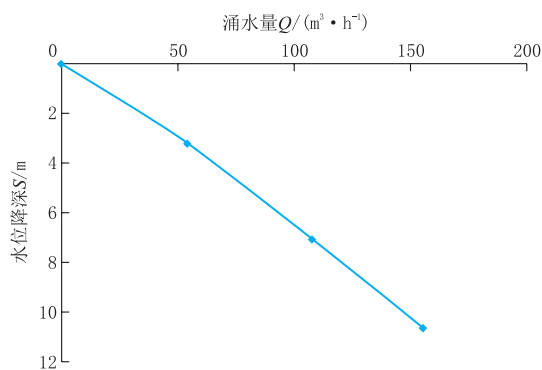


图 4 涌水量和降深关系曲线

利用下式计算渗透系数,结果见表 1。

$$K = \frac{0.32Q[\ln(r_2/r_1) + 0.5(\xi_1 - \xi_2)]}{(S_1 - S_2)(2H - S_1 - S_2)}$$

式中: K ——渗透系数, m/d; Q ——抽水量, m³/d; r_1 、 r_2 ——观测井 1、2 到抽水井的距离, m; ξ_1 、 ξ_2 ——修正参数; S_1 、 S_2 ——观测井 1、2 的水位降深, m; H ——含水层厚度, m。

表 1 渗透系数计算结果(用 2 个观测井求参数 K)

落程	Q	r_1	r_2	H	S_1	S_2	ξ_1	ξ_2	K
第一落程	1302.48	49.09	132.42	47	0.64	0.44	0.0091	0	22.3574
第二落程	2580.96	49.09	132.42	47	1.34	0.85	0.0089	0	18.2996
第三落程	3717.84	49.09	132.42	47	2.02	1.23	0	0	16.4672

以上计算表明,渗透系数 K 在 16~23 m/d 时,选取 18 m/d。

根据 2 个观测井求影响半径 R 。

$$\lg R = \frac{S_w(2H - S_w)\lg r_1 - S_1(2H - S_1)\lg \gamma_w}{(S_w - S_1)(2H - S_w - S_1)}$$

式中: S_w ——去掉水跃值后的水位降深; γ_w ——水的重度。

计算结果见表 2、表 3。

表 2 观 1 井影响半径计算结果

落程	H	S_w	γ_w	S_1	r_1	$\lg R$	R
第一落程	47	2.456	0.2	0.64	49.09	2.55603	359.772
第二落程	47	5.498	0.2	1.34	49.09	2.50979	323.438
第三落程	47	8.190	0.2	2.02	49.09	2.54992	354.752

表 3 观 2 井影响半径计算结果

落程	H	S_w	γ_w	S_2	r_2	$\lg R$	R
第一落程	47	2.456	0.2	0.44	132.42	2.75423	567.844
第二落程	47	5.498	0.2	0.85	132.42	2.67019	467.936
第三落程	47	8.190	0.2	1.23	132.42	2.66875	466.393

故影响半径为 350~570 m,应在 200 m 以上,但作为参数参与计算的影响半径,其对降水影响比较大的只有几百米,选取 450 或 500 m。

5 降水对周边环境的影响

降水会引起周围的地面沉降,地面沉降分破坏性的和非破坏性的,为防止降水对周围环境产生破坏性的影响,首先要对因降水引起的地面沉降量进行预测,其次再对沉降量进行分析,研究是否产生破坏性。

5.1 模型建立

本次采用数值法对降水方案进行设计。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,能有效解决止水帷幕、各类边界等对地下水流造成的影响。进行地下水数值模拟时,一般包括建立研究区域的水文地质概念模型和相应的数学模型、模型预测等几个步骤。其中水文地质概念模型的建立是确定模拟模型(二维模型、准三维模型或三维模型,参见图 5)和数学模型的前提。本次在分析工程地质、水文地质条件及围护结构设计等相关资料基础上,拟借助 Visual ModFlow 软件进行计算。

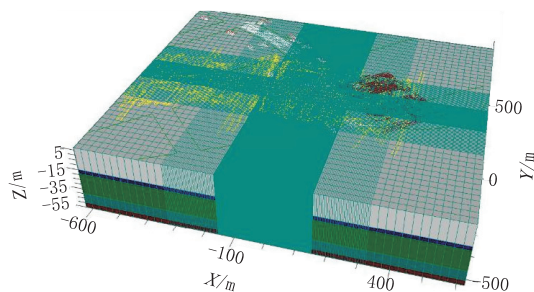


图 5 三维模型含、隔水层概化图

因模拟范围较小,场地离水文地质自然边界较远,为了克服边界的不确定性对计算结果造成的影响,根据相关资料,本次以场地各方向向外扩展 500 m,人为设定为定水头补给边界,即模拟区范围为

1250 m×1050 m。根据勘察资料,潜水含水层初始水位标高取值 5.5 m,承压含水层定水头边界值标高取值 0.1 m。

按隔水边界处理,考虑深部地墙施工质量难以控制,适当考虑接缝渗漏,45 m 以下深度地墙按 0.02 m/d 的透水性考虑。

5.2 地下水流模型

根据以上建立的概念模型,在不考虑水的密度变化的前提下,可以给出相应的地下水流数学模型:

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

$$E=\begin{cases} S_{\text{承压含水层}} \\ S_{\text{y潜水含水层}} \end{cases}; T=\begin{cases} M_{\text{承压含水层}} \\ B_{\text{潜水含水层}} \end{cases}; S_s=\frac{S}{M}$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} ——平行于主轴 x 、 y 和 z 方向的渗透系数, m/d; W ——单位体积流量,用以代表流进或流出的源汇项, m^3/d ; h ——点 (x, y, z) 在 t 时刻的水位, m; S_s ——储水率, L/m; S ——贮水系数; S_y ——给水度; M ——承压含水层厚度, m; B ——潜水含水层厚度, m。

初始条件:

$$H(x, y, z, t) = H_0(x, y, z, 0) \quad (x, y, z) \in \Omega$$

边界条件:

(1)第一类边界条件:

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

(2)第二类边界条件:

$$K \frac{\partial H(x, y, z, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t)$$

式中: Ω ——立体时间域; $H_0(x, y, z, 0)$ ——研究区各层初始水头值; $H_1(x, y, z, t)$ ——研究区各层第一类边界 Γ_1 上的已知水头函数(Γ_1); $q(x, y, z, t)$ ——第二类边界 Γ_2 上的单位面积法向流量(Γ_2),对于隔水边界, $q=0$ 。

5.3 降水引起的地面沉降计算

在降水期间,降水面以下的土层通常不产生明显的固结沉降,而降水面至原始地面的土层因排水条件好,会在所增加的自重应力下产生快速沉降。因此,可以用公式进行估算降水引起的沉降值。

对于粘性土类:

$$S = \frac{\alpha \Delta P \Delta H}{1 + e_0} = \frac{\alpha \Delta H^2 \gamma_w}{1 + e_0}$$

对于砂土类:

$$S = \frac{\Delta P \Delta H}{E} = \frac{\Delta H^2 \gamma_w}{E}$$

式中: S ——降水所引起的沉降值; α ——计算土层的压缩系数; e_0 ——计算土层的孔隙比; ΔP ——降水产生的自重附加应力; ΔH ——降水深度; γ_w ——水的重度; E ——降水深度范围内土层的压缩模量。

以接收井附近的 J_2 -III05-19 孔资料为依据,计算结果见表 4(表中孔隙比等数据取中间值)。

表 4 地层最大沉降量

层序	层厚/m	孔隙比	压缩系数	压缩模量/MPa	最大沉降量/mm
② ₃	0.2	1.133	0.58		0.053
④	2.5	1.140	0.72		10.304
④ ₂	3.8	0.903	0.33	7.29	9.706
⑦ ₁	10.1	0.742	0.15	12.63	39.576
⑧	9.4	0.686	0.14	13.14	32.950
合计	26.0				92.589

由表 4 可以看出,当地下水降深达 26 m 时,其地面的最大沉降量为 92.6 mm,根据表 4 及把 ⑦₁ 层和 ⑧ 层再化分分层计算其沉降量,得到地面沉降与地下水降深之间的关系曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,地面沉降量与地下水水位降深之间的趋势线呈直线关系,平均每米地下水水位降深引起的地面沉降量为 3.547 mm。

计算本工程降水最大深度在工作井,民房离开工作井的距离在 50 m 以上,根据计算分析,50 m 以外的水位降深 < 20 m,从图 6 看其对应的地面沉降量在 60 mm 左右。

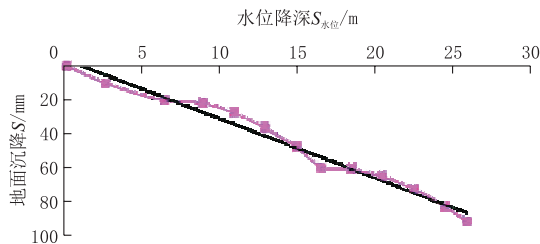


图 6 地面沉降量与地下水降深关系曲线

5.4 降水对周边环境不良影响的防范措施

为把降水引起的地面沉降量控制在周围环境可以承受的范围之内,必须做好以下工作:

(1)防范抽水带走地层中的细颗粒。在成井时滤料选用中粗砂,不宜选择“绿豆”砂;在降水抽水时要随时注意抽出的地下水含砂量是否达到标准,若达不到标准应采取措施。特别是发现抽水变混浊,应立即停泵,报废该降水井。

(2)在 50 m 范围内特别是 35 m 范围内的建筑民房,是重点监测对象,必要时对这些建筑采取浅层

回灌防范措施。50 m 以外的建筑特别是 100 m 以外的建筑民房注意监测即可,一般不会引起不良问题,不需要采取处理措施。

6 降水设计

根据上述工程的特点、抽水试验获得的参数以及降水将对周边环境的影响的分析,设计了降水方案:降水将围绕工作竖井进行,只要把竖井的地下水水位降到设计高程,其他各点地下水水位均能降到设计高程。为方便施工,保证施工安全,降水井主要

布置在基坑外侧,基坑内部少量布置,在降水初期协助降水、疏干地层中的地下水,适当时候停水观测地下水水位,降水后期当作水位观测井。

6.1 基坑涌水量

因工作井与后续段之间无止水帷幕,整体水位降深需满足工作井降水。

经过模型运行分析,水位降至设计要求时,本段总涌水量约 $6480 \text{ m}^3/\text{d}$,共布置 6 口降压井(含 1 口观测兼备用井),坑外水位下降约 0.6 m(参见图 7)。

本段模型计算基于止水帷幕隔水性能良好的

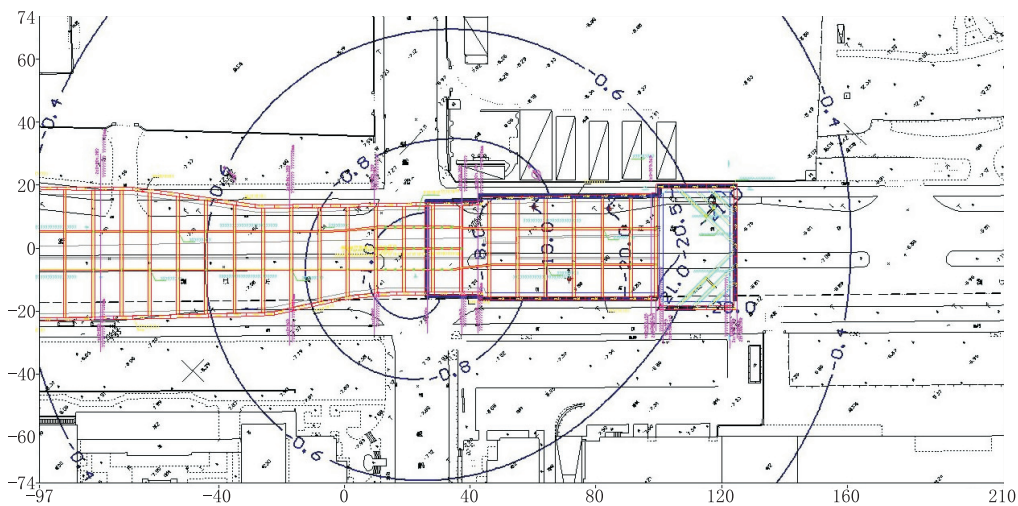


图 7 水位下降示意图

假设前提,考虑到卵石层含水层透水性好、工作井水位降深大,为防止围护结构缺陷造成坑内水位无法降至设计要求,本次安全系数按 50% 考虑,坑内布置 8 口降压井(3 口观测兼备用井),采用直径 325 mm 的钢管,根据原望江路试验段降压井抽水资料,单井出水量能达到 $4800 \text{ m}^3/\text{d}$,本段降水井最大可满足约 $4 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的总涌水量需求。

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。根据地勘资料及附近工程基坑降水资料,模型地层参数取值见表 5。

表 5 各模型概化层渗透系数取值

概化层	主要地层	K_{xx}	K_{yy}	K_{zz}	备注
第 1 层	⑥层上部的填土及粉、砂性土地层	8	8	3	潜水含水层
第 2 层	⑥层、⑨层粉质粘土	0.001	0.001	0.001	相对隔水层
第 3 层	⑫ ₄ 圆砾、⑫ ₁ 卵石	54	54	54	承压含水层
第 4 层	基岩风化层	0.05	0.05	0.05	基岩裂隙水

在 Visual Modflow 中,降水井可以设置过滤器长度、出水量等参数,与实际工程有较好的对比性。根据原试验段降压井降水资料,单井最大出水能力可达 $4800 \text{ m}^3/\text{d}$,本次考虑围护结构封闭止水影响,封闭段取单井水量约 $960 \sim 2400 \text{ m}^3/\text{d}$;敞开段单井水量约 $2000 \sim 3600 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

6.2 水位降深预测

用潜水含水层完整井稳定流公式检验最终水位降深,公式为:

$$S = H_0 - \sqrt{H_0^2 - \frac{Q}{1.366K} \left[\lg R_0 - \frac{1}{n} \lg(r_1 r_2 r_3 \cdots r_n) \right]}$$

式中: S ——水位降深; Q ——基坑涌水量; K ——渗透系数; H_0 ——自然水位; $r_1 r_2 r_3 \cdots r_n$ ——各井距基坑中心或各井中心处的距离; n ——降水井数量。

计算结果见表 6。

当涌水量达 $50000 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,除泵房外,基坑开挖范围内地下水水位都能降到设计高程,对于泵房,另外再布置 2 口井。

表6 特征点水位降深预测

基坑涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	特征点	预测水位 降深/m	设计水位 降深/m	降水效 果评价
40000	AA1	21.869	27.5	不满足
45000		26.159		不满足
50000		31.599		满足
40000	AA2	22.679	17.1	满足
45000		27.269		满足
50000		33.321		满足
40000	AA3	16.801	13.5	满足
45000		19.616		满足
50000		22.757		满足
40000	AA4	12.301	10.5	满足
45000		14.553		满足
50000		16.597		满足
40000	AA5	8.324	12.0(水泵房),其它点	泵房处不能满足,在旁边加2口井
45000		9.495		
50000		10.703		
40000	AA6	5.331	3.8	满足
45000		6.046		满足
50000		6.774		满足

6.3 降水井深度

设计井深由下式确定:

$$H_{\omega} = H_{\omega 1} + H_{\omega 2} + H_{\omega 3} + H_{\omega 4} + H_{\omega 5} + H_{\omega 6}$$

式中: H_{ω} ——降水井深度; $H_{\omega 1}$ ——基坑深度,本基坑深度26.5 m; $H_{\omega 2}$ ——降水后要求水位距离基坑底的距离,本次降水要求2 m; $H_{\omega 3}$ —— $H_{\omega 3} = ir_0$, i 为水力坡度,在降水井分布范围内为1/10~1/15, r_0 为降水井排间距的1/2 m,井间距为2 m, $H_{\omega 3}$ 取1 m; $H_{\omega 4}$ ——降水期间地下水位的变化幅度,取0 m; $H_{\omega 5}$ ——过滤器工作部分长度,取10 m; $H_{\omega 6}$ ——沉淀管长度,设计0.5 m。

故: $H_{\omega} = 26.5 + 2 + 1 + 0 + 10 + 0.5 = 40$ m。

7 降水施工

(1)成井质量是降水设计方案成败的关键。

本次施工选用8QZJ-160型正循环回转钻机进行钻进成孔,成孔孔径800 mm。

(2)采用泥浆护壁,严格控制泥浆密度和粘度,密度1.2~1.6 g/cm³,粘度控制在17~18 s。

成孔后,一定要认真换浆。换浆后泥浆密度<1.10 g/cm³。防止泥浆过浓影响出水,泥浆过稀则易造成塌孔事故。

(3)本次降水,从上到下全部采用无砂混凝土管作为井管,井管质量从严把关,确保成井的正常使用。

(4)严格按照含水层颗粒分析资料选择滤料,并满足填砾石数量要求,保证充盈系数 ≥ 1.2 。

(5)采用水泵洗井,反复进行,直到满足洗井前后两次涌水量差值<10%,水中含砂量<1/20万。出现井内涌砂现象时,应立即报废。

(6)严格按照降水设计方案施工,生产过程中发现抽水效果良好,各项指标均达到规范要求。

8 结论

(1)施工过程通过观测井测量记录,验证抽水试验的参数选取比较符合实际,可以满足施工,为降水设计奠定了基础。

(2)基坑抽水量的预测合理,即预测基坑侧向补给涌水量在41316 m³/d,基坑静储量按30日抽水计算每天35979 m³,合计77295 m³/d,即初期基坑涌水量8万 m³/d,后期在5 m³/d,与实际抽水量(7.5 m³/d)比较接近,少走了弯路。

(3)成井工艺是关键,成井工艺保证了单井出水量大,保证了抽水含砂量小,保证了地层中砂不被带走,保证了周边的环境安全。

(4)沉降预测比较接近实际,避免了为保护环境问题而花费不必要的费用,节省了工程造价。

参考文献:

- [1] 陈健.某临江超深基坑工程降水计算与设计分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(S1):1355-1360.
- [2] 范永芳.地下水回灌在基坑工程周边环境保护中的应用[J].中国科技信息,2014,(11):85-88.
- [3] 代洪波.南京长江隧道到达井基坑降水设计与施工[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(10):77-79.
- [4] 耿会勇.长江沿岸深基坑长期降水条件下周围建筑物沉降控制技术[D].山东青岛:青岛理工大学,2015.
- [5] 徐运达.软土区深大基坑降水对支护及周边环境的影响研究[D].江苏南京:南京大学,2015.
- [6] 张兴立.某下穿隧道工程基坑降水方案研究[J].公路交通科技(应用技术版),2013,(2):167-171.
- [7] 徐强,李春辉.临近江河超深基坑降水方案设计及施工技术[J].价值工程,2011,30(13):109-111.
- [8] 刘静.城际铁路新郑机场站基坑工程降水设计与施工[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(12):62-67.
- [9] 杜志昌.真空疏干与井点复合降水技术在地铁工程中的应用[J].21世纪建筑材料居业,2011,(10):93-96.
- [10] 侯延强.软土深基坑承压水治理施工技术[J].山东交通科技,2015,(4):51-55.
- [11] 刘清文,车灿辉.长江漫滩复杂地层条件下超大超深基坑降水设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):54-59.
- [12] 何春林,杨国芳,雪彦宏.中关村科技大厦深基坑降水工程[J].地质装备,2004,5(2):8-11.