

高富水、强透水卵石地层深基坑降水设计与实践

时 钟

(中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211800)

摘要:以常德沅江过江隧道江南工作井作为工程实例,通过对周边地层、水文特性的了解分析,从抽水试验、井位布设、抗突涌验算、沉降分析、坑外回灌等各方面进行了初步的分析,对降水相关的各项技术措施进行了梳理,通过工程实践对降水方案的可行性进行了论证,对类似高富水、强透水卵石地层条件下的深基坑降水施工具有一定的借鉴意义。

关键词:强透水性;卵石地层;基坑降水;抗基底突涌;模拟验算;坑外回灌

中图分类号:U455.49 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)05-0078-06

Dewatering Design and Practice of Deep Foundation Pit in High Water-rich and Strong Permeable Cobble Stratum/SHI Zhong (China Railway 14th Bureau Group Shield Engineering Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 211800, China)

Abstract: Taking the example of Jiangnan working shaft of Changde Yuanjiang river-crossing tunnel, based on the obtained hydrological characteristics and the surrounding strata conditions, the paper makes a preliminary analysis on various aspects such as pumping test, well location layout, anti-inrush checking, settlement analysis and recharge surrounding the foundation pit, and the technical measures related to dewatering are reviewed. The feasibility of the dewatering scheme has been demonstrated through the engineering practice, which will be meaningful to the deep foundation pit construction in the similar high water-rich and strong permeable cobble stratum.

Key words: strong water permeability; cobble stratum; foundation pit dewatering; anti-basement burst; simulation checking; recharge surrounding the foundation pit

在大型市政工程中,深基坑多采用降水干开挖的方式进行,其中降水工艺多以管井降水为主,其施工工艺也日趋成熟。但在常德沅江边的强透水卵石地层中,因地层渗透系数大、地下水补给丰富等原因,该工艺应用极少,当地工程多采用浅基础结构,最大开挖深度不足10 m,基本上没有成熟的经验可以借鉴,其施工难度相对较大。为了保质、保量、高效地完成常德沅江过江隧道施工任务,基坑降水的施工进度和施工成效是关系整个工程能否顺利进行的重要因素。

1 工程设计概况

常德沅江过江隧道工程位于湖南省常德市,线路基本呈南北走向,横穿江底连接鼎城区与武陵区。隧道全长2240 m,其中过江盾构段长1680 m,采用大直径泥水盾构施工;两岸工作井长度共计560 m,均采用明挖顺筑法施工。

其中江南工作井为盾构始发井,基坑最大开挖

深度21 m,最大基坑宽度36.4 m,基坑总长度294 m,基坑围护结构采用地下连续墙+内支撑的组合形式。

考虑沅江特殊水情及地层强透水性,以及当地施工经验,工作井基坑原设计采用水下开挖工艺,即通过射水冲击反循环等专用设备对基坑内土体进行抽取、筛分、外运,以实现基坑开挖施工。由于基坑工程规模大、施工任务重,考虑工期及施工质量的影响,水下开挖工艺将无法实现项目预期目标。结合公司原有施工经验,工程将采用降水+干开挖工艺进行优化设计并组织施工。

2 工程地质及水文概况

2.1 地质情况

根据地质详勘报告,工作井施工范围的地层依次包括:杂填土①(Q_4^{ml})、粉质粘土②₁(Q_4^{al})、圆砾②₄(Q_4^{al})、卵石②₆(Q_4^{al})、粉质粘土③₁(Q_3^{al})、粉细砂③₃(Q_3^{al})等,地层起伏变化明显。基坑开挖范围

收稿日期:2017-01-13; 修回日期:2017-03-19

作者简介:时钟,男,汉族,1984年生,常德沅江隧道项目总工程师,土木工程、工商管理双学位,长期从事城市轨道交通及其他大型市政工程的技术管理工作,湖南省常德市鼎城区隆阳路396号,175583374@qq.com。

内卵石层分布较广,该地层顶部覆土约 10 m,厚度为 15~20 m,其中卵石颗粒含量约占 70%,粒径尺寸 5~10 cm,最大粒径达 30 cm,其中细颗粒含量少,级配较差。根据地勘成果测算,该地层渗透系数约为 51 m/d,属于强透水地层。

卵石层下方分布有一层粉质粘土 $③_1(Q_3^{al})$ 层,平均层厚 3~10 m,硬塑状态,干强度及韧性中等,层底埋深约 35 m,可作为相对隔水层。

现场地连墙成槽开挖采集的卵石及粉质粘土如图 1 所示。



图 1 现场采集的地层照片

2.2 水文情况

基坑周边属沅江岸边阶地,松散岩类孔隙水主要赋存于下部粉细砂、中粗砂、圆砾及卵石中,含水量丰富—极丰富,给水性及透水性相对良好,属强透水地层。含水层在河床部位直接与沅江水接触,产生水力联系。

地下水主要接受大气降水补给,亦和周边地表水体呈互补关系,枯水期时,地下水由两侧向沅江径流,以侧向渗流运动方式向河流排泄;汛期时,河流水位抬升,河水向两侧补给地下水。水位和水量随季节性变化,地下水动态变化较大。

经设计核算,江南工作井及明挖段,预计涌水量达到 51000 m³/d,属高富水地层。

3 主要降水思路

(1)施工范围内卵石地层厚度大,透水性强,地下水极其丰富,是本工程的主要风险源。

(2)正式施工前,应进行现场抽水试验,复核水文地质参数,为降水井正式施工提供依据。

(3)基坑设计时,充分利用基坑底部的粉质粘土 $③_1(Q_3^{al})$ 地层,并对该地层进行水泥—水玻璃双液注浆加固,提高其抗突涌能力。加大地连墙底部埋深,保证墙体完全穿过该地层,在基坑底部形成相对隔水层。

(4)基坑内设置若干浅层疏干井,其深度不得进入已加固的粉质粘土地层,防止成井钻孔破坏地层原有隔水性能,功能是抽排基坑内部滞水。

另外,在基坑外侧设置若干深层减压井,其深度必须进入已加固的粉质粘土地层,并对其上方井管进行封闭,使其只能抽排隔水层以下承压水,减少基底承压水压力,防止基底突涌的发生。

(5)根据地层情况模拟周边地层沉降变化,采取坑外回灌措施,减少大规模降水对周边环境的影响。

4 基坑降水技术

4.1 施工前抽水试验

4.1.1 试验目的

(1)通过抽水试验,复核水文地质参数(渗透系数、影响半径等);

(2)实测单井涌水量、水位下降及恢复速率,确定降水井深度,推测水位降深与总涌水量关系;

(3)判断相对隔水层的隔水性能;

(4)为后续基坑降水设计及施工提供指导性依据。

4.1.2 试验井布设

在工作井的西侧共布置 4 口试验井,其中 2 口浅井位于相对隔水层上部(SY01、SY02,井间距 15 m),2 口深井进入相对隔水层下部(SY03、SY04,井间距 15 m)。

抽水试验分 2 个阶段进行,具体设计工况见表 1。

表 1 试验工况安排

试验阶段	抽水井	观测井	预估时间/d	备注
第一阶段:浅井抽水	SY01	SY02、SY03、SY04	3	3 个降深
第二阶段:深井抽水	SY03	SY04、SY01、SY02	2	1 个降深

4.1.3 抽水试验

4.1.3.1 第一阶段:浅井抽水

本阶段试验的主要目的:通过对浅井抽水,观测深、浅井水位变化,判断相对隔水层的隔水性能,复核含水层水文地质参数(渗透系数、影响半径)。

现场选取 SY01 为抽水井,预计进行 3 个降深试验,最大静止水位降深 S_3 预计为 3 m, $S_1 = S_3/3$ 、 $S_2 = (2/3)S_3$,分别对 SY02、SY03、SY04 进行水位观测,3 个降深结束后进行水位恢复观测。

各降深试验持续时间预计 12 h, 共计 3 天时间。

4.1.3.2 第二阶段: 深井抽水

本阶段的主要目的为: 观测深井抽水对浅井的影响, 进一步判断相对隔水层的隔水性能。

拟进行单降深抽水试验, 选取 SY03 为抽水井, 观测 SY04、SY01、SY02 水位变化, 抽水结束后, 进行水位恢复观测。预计 2 天时间。

4.1.4 试验数据采集

本次主要采用稳定流方法进行试验, 同时结合非稳定流法计算要求进行观测。

4.1.4.1 静止水位观测

在正式抽水前, 观测静止水位。观测时间间隔: 每 30 min 或者 1 h 观测一次, 4 h 内变幅 ≥ 2 cm, 且无持续上升或下降趋势, 即为静止水位。

4.1.4.2 动水位及水量的观测

对抽水井水位的观测在正式抽水试验开始后第 1、2、3、4、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120 min 各测一次, 以后每隔 30 min 测一次, 直到水位稳定。

对抽水井出水量和观测井水位, 在正式抽水试验开始后第 5、10、15、20、30、40、50、60 min 各观测一次, 以后每隔 30 min 观测一次, 当水位趋于稳定后, 延长至 60 min 观测 1 次。

4.1.4.3 恢复水位观测

抽水试验结束, 立即进行恢复水位观测。观测井的观测时间一般为停抽后第 1、3、5、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120 min 各测一次, 以后每隔 30 或 60 min 观测一次, 直至完全恢复。

4.2 降水井布设及抗突涌验算

4.2.1 抗突涌稳定性分析

当基坑底部含水层覆土自重不足以抵消两侧水头压力时, 将在基坑底部产生突涌。

工作井施工时, 上部含水层水位需降低至基底以下 1 m。由于基底下部存在相对隔水层, 在基坑开挖过程中, 下层含水层有可能造成基底突涌, 需对该层进行底板抗突涌验算。基坑底板抗突涌稳定条件: 基坑底板至承压含水层顶板间的土压力应大于承压水的顶托力, 见图 2。即:

$$D\gamma / (h_w \gamma_w) \geq K_h$$

式中: D ——承压含水层顶面至坑底的土层厚度, m, $D = H_a - H_b$; H_a ——基坑开挖底板高程, m; H_b ——含水层顶板高程, m; γ ——承压含水层顶面至坑底

土层的天然重度, 对多层土, 取按土层厚度加权的平均天然重度, 本次取 19.5 kN/m^3 ; h_w ——承压含水层顶面的压力水头高度(承压水位至承压含水层顶板距离), m; γ_w ——水的重度, 取 10 kN/m^3 ; K_h ——突涌稳定安全系数, $K_h \leq 1.1$, 本次取 1.1。

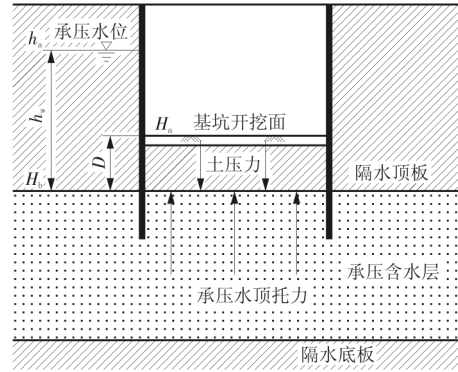


图 2 基坑底板抗突涌验算示意图

可以根据上式, 得出承压含水层安全水头高程计算公式:

$$h_a \leq H_b + (H_a - H_b) \gamma / (K_h \gamma_w)$$

式中: h_a ——承压水头安全水位高程, m。

则根据承压含水层初始水位标高即可求得水位降深:

$$S \geq H_{\text{初始水位}} - H_a$$

本次计算, 初始水位标高取值 30 m。

经过计算, 江南工作井处安全水位高程为标高 21.69 m, 下部水头需降低 8.31 m; XK2 + 092.4 ~ 111.1 范围安全水位高程为标高 26.04 ~ 27.38 m, 需降低 2.62 ~ 3.96 m, 具体详见表 2。

表 2 基底抗突涌验算

位置	开挖底标高 H_a/m	含水层顶标高 H_b/m	土重力/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	承压 水顶托 力/ kN	土重/ 顶托 力	安全水 位高 程/ m	水位 降深 S/m
工作井	12.1	1.55	221.55	284.5	0.78	21.69	8.31
XK2 + 092.4	14.378	1.55	269.39	284.5	0.95	26.04	3.96
XK2 + 111.1	15.082	1.55	284.17	284.5	1.00	27.38	2.62

基坑外需要通过减压井将坑外水位降低至安全水位以下, 根据水位理论降深设计坑外减压井。

4.2.2 降水井布置

4.2.2.1 模型建立

根据基坑围护结构形式, 建立三维立体模型, 本次渗透系数依据地勘资料选取(见表 3), 注浆加固体的渗透系数按 1.5 m/d 考虑。

4.2.2.2 模型运行结果

表 3 岩土力学参数推荐

地 层	承载力 特征值 $F_{ak}/$ kPa	重度 $\gamma/$ ($kN \cdot m^{-3}$)	粘聚 力标 准值 c/kPa	内摩擦 角标 准值 $\varphi/$ ($^{\circ}$)	渗透系 数 $K/$ ($m \cdot d^{-1}$)	泊 松 比 μ	静止 侧压 力系 数 K	基床系 数 $K/$ ($MPa \cdot m^{-1}$)
杂填土①		19.5	12	8	1.25	0.35	0.54	3.5
粉质粘土② ₁	200	19.2	26	12	0.02	0.35	0.50	5.0
粉土② ₂	180	18.5	10	14	0.05	0.40	0.67	4.5
粉细砂② ₃	180	19.0	5	18	5.00	0.30	0.43	12.0
卵石② ₀	350	22.0	3	38	120.00	0.30	0.35	25.0
圆砾② ₄	320	21.0	5	35	120.00	0.28	0.39	25.0
粉质粘土③ ₁	260	19.5	22	12	0.02	0.32	0.30	35.0
粉土③ ₂	250	18.5	12	14	0.05	0.40	0.67	4.5
粉细砂③ ₃	250	19.0	5	18	5.00	0.30	0.43	12.0
中粗砂③ ₄	300	19.5	5	28	10.00	0.35	0.54	15.0
圆砾③ ₅	350	21.0	3	40	28.50	0.28	0.47	54.0

考虑江南工作井与明挖段同时施工,基坑内安全水位需降至标高 11 m、加固体下部含水层水头需降至标高 21.69 m。

通过模型计算,工作井及明挖段共布置 40 口降水井,其中工作井内布置 12 口,明挖段内布置 22 口,工作井外侧布置降压井 6 口。另外按照总量 20% 布设备用兼观测井,防止沅江水位突然上涨抬升地下水水位。坑外降压井与坑内疏干井同时开启时基坑总涌水量约 62980 m^3/d ,等水位线图见图 3。降水井布置形式见图 4。

4.3 降水井结构及施工运行要求

4.3.1 降水井结构

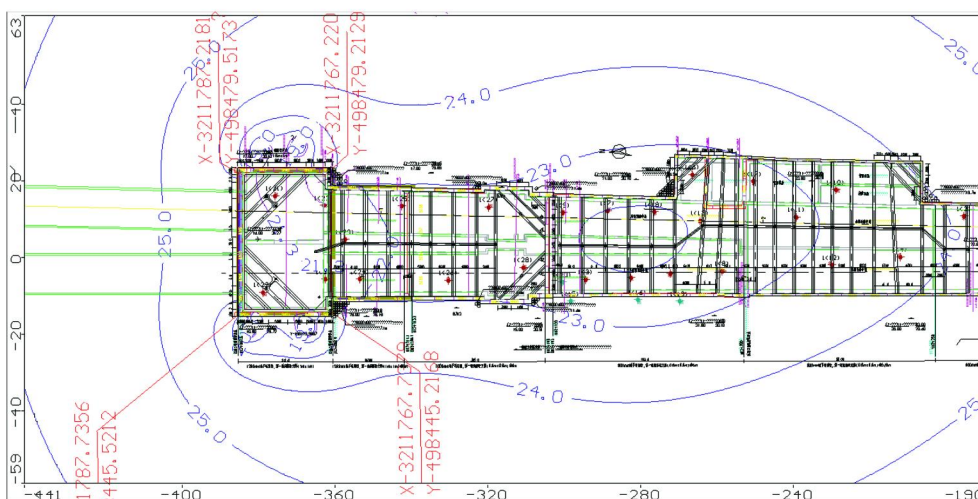


图 3 工作井及明挖段下部坑外减压降水水位标高等效图

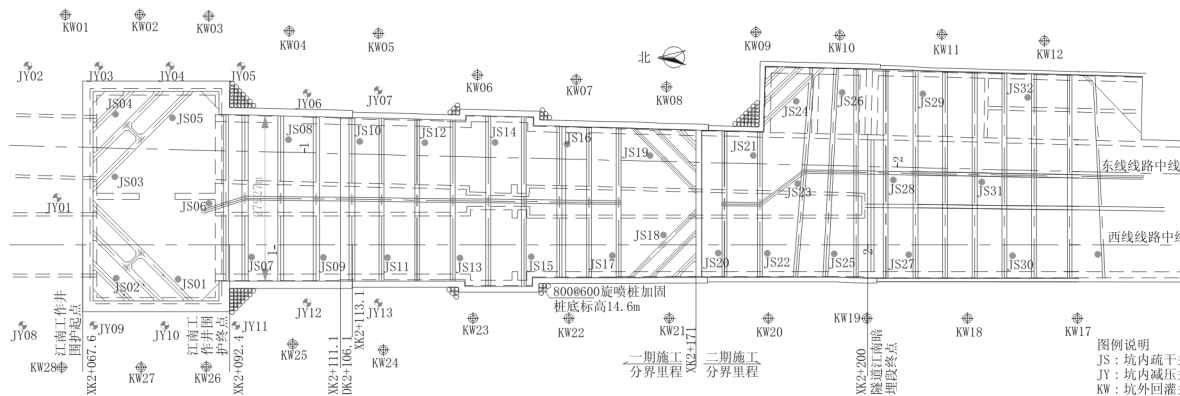


图 4 江南工作井及明挖段降水井平面布置图

降水井成孔直径 600 mm,其中疏干井、回灌井采用 $\varnothing 273 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 钢管,坑外降压井采用 $\varnothing 325 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 钢管,滤水管为同规格桥式滤管,外包 40 ~ 60 目滤网,降水井结构形式见图 5。

4.3.2 降水施工技术要求

- (1) 井口高度:井口应高于地表以上 0.20 ~ 0.50 m,以防止地表污水渗入井内。
- (2) 回填滤料:井管安装完成后,及时进行填砾,

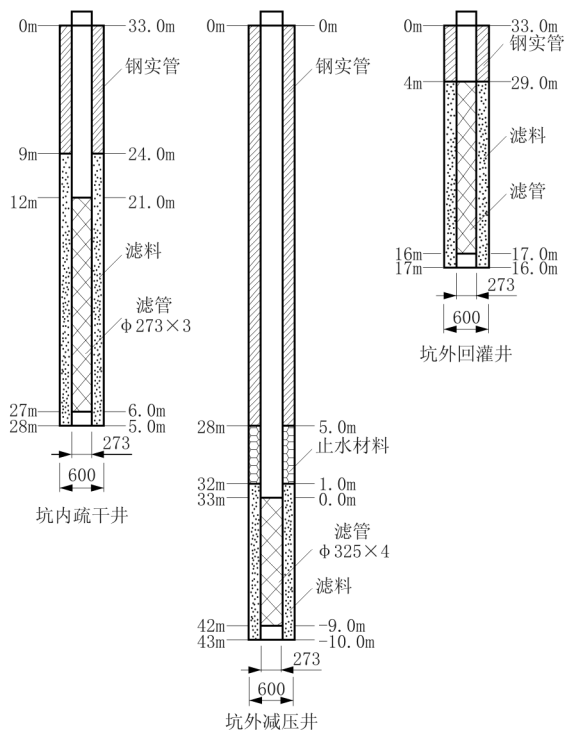


图5 降水井、回灌井结构示意图

砾料粒径规格符合设计要求,砾料应纯净,不含泥土和杂物。填砾时,砾料应沿井(孔)管四周均匀连续填入,随填随测。

(3)粘土封孔:降水井应严格做好隔水止水措施,防止人为造成潜水和承压水之间水力联系。

(4)成孔偏差:井孔的平面误差 ≤ 1.0 m,井深(孔深)偏差 $\leq \pm 0.50$ m;井孔应圆正。

(5)井管偏差:井身应圆正,上口保持水平,井管的顶角及方位角不能突变,井管安装倾斜度 $\geq 1^\circ$;井管截面尺寸偏差 $\leq \pm 0.20$ mm,井管长度偏差 $\leq \pm 20$ cm。

(6)出水含砂量:抽水稳定后,出水含砂量不得超过10万分之一(体积比)。

4.3.3 降水井运行保证措施

(1)在正式开挖前,进行生产性抽水试验,确保水位能够降至安全水位以下。

(2)降水运行过程中,必须预留备用电源,以防停电造成水位上涨,确保抽水持续运行。

(3)降水运行期间,由专业监测单位对附近建(构)筑物及地面进行沉降监测。

(4)施工过程中,必须加强对降水井的保护。

(5)随时注意出水含砂量情况,若发现抽水变混浊,应立即停泵,启用备用井。

(6)应急仓库中需备足备用水泵及电缆等物资,以便及时更换,保证连续、平稳作业。

4.4 基坑周边沉降控制

施工场地以卵石层为主,其中卵石含量约70%,地层中细颗粒含量少,属于强透水性、低压缩性地层。勘察期间,地下水位最低高程约+28 m,即标高28 m以上地层处于地下水位季节变动范围内,不存在压缩固结沉降问题。在自然压密状态下,结构致密,即使抽大量的地下水,增加了颗粒的有效应力,也不会引起明显的沉降。但从地质图上看,部分钻孔上部存在②₂粉土层,压缩模量6.73 MPa,且分布不均匀,最大厚度约10 m(钻孔BZK03),降水过程中该地层可能会产生地面沉降。

根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012),降水引起的地层压缩变形量可采用以下计算公式:

$$S = \psi_w \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_{zi}' \Delta h_i}{E_{si}}$$

式中: S ——计算剖面的地层压缩变形量,m; ψ_w ——沉降计算经验系数; $\Delta\sigma_{zi}'$ ——降水引起的地面下第*i*层土的平均附加有效应力,kPa; Δh_i ——第*i*层土的厚度,m,土层的总计算厚度应按实际土层分布情况确定; E_{si} ——第*i*层土的压缩模量,kPa。

本次仅考虑标高+28 m以下地层的沉降,根据等水位线图,预测最大地面沉降量18.6 mm,基坑外侧30 m处的地面沉降量8~10 mm,外侧50 m处的地面沉降量4~6 mm,满足设计规范要求。由于地层水平分布不均匀,将可能产生一定的不均匀沉降,基坑降水过程中,应加强周边沉降及地下水位监测。

为减小大规模降水对周边造成的影响,在基坑外侧布置回灌井进行浅层回灌,回灌井间距按照20 m/口布置,基坑四周共布置22口回灌井,井深17 m,回灌井结构形式如图5所示。由于地层透水性强,现场采用常压回灌方式。施工过程中,重点关注地下水位及周边沉降监测情况,若沉降变化明显加大,现场可采用带压回灌方式,回灌压力需通过现场试验确定。

4.5 方案实施情况

方案实施过程中,坑内疏干井与坑外减压井均运行良好,且现场布设双电源配置,满足连续不间断运行。现场抽水施工阶段,坑内疏干井抽水量较小,补给量有限,且基坑周边地下水无明显变化,证明围

护结构及基底加固施工效果良好,能够保证基坑在无水状态下进行开挖施工。坑外减压井抽水量较大,地下水补给丰富,通过群井抽水能够满足降低水头的要求,减压井间距基本合理。由于基坑采用分段开挖,降水施工同样采取分区域梯度降水,单日排水总量约 6000 m^3 。

另外,通过现场地下水回灌施工,基坑周边建筑物及地面地表沉降效果良好。根据目前施工监测数据显示,地面沉降值控制在 15 mm 范围内,建筑物沉降控制在 12 mm 范围内,满足施工安全要求。

在施工过程中,存在如下问题需要引起重视和注意。

(1) 沅江流域卵石地层松散,且前期抗拔桩施工存在地层扰动问题,现场降水井施工过程中多次出现塌孔问题,影响施工进度和质量。后续施工中应合理选择降水井位置,严格控制成孔施工泥浆质量。

(2) 由于基坑围护结构及基底注浆隔水效果良好,坑内疏干井数量可适当减少,但坑外减压井必须按照设计要求严格施工,防止基底突涌。

(3) 基坑支护体系中,钢支撑布置间距小,在降水井施工定位中,需注意避让,防止因降水井结构冲突,无法实现支撑体系施工。

(4) 基坑开挖过程中,注意对降水井的保护,建议在支撑结构处设置临时支架,固定井管结构,待主体结构全部封顶后,再废除降水井,防止出现因地下水位突然上涨造成结构上浮等险情。

5 结语

管井降水具有设备简单、降深大、适用性强等优

点,降水干开挖与水下开挖相比也有着施工便利、可靠性高、工期快等优势,在工程实践中正在越来越广泛的使用。本工程所采用的降水设计方案,从抗突涌稳定性验算、单井抽水量以及沉降预测等方面均进行模拟计算分析,技术要求和保证措施较为得当,在现场实际施工中也得到了良好的验证,证明了方案的合理性和可实施性,这对沅江流域等类似地层的工程施工,都有着较好的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 王玉喜. 砂卵石地层地铁车站降水施工技术[J]. 国防交通工程与技术, 2014, (3).
- [2] 魏劲松, 黄建石. 长江漫滩地貌单元上的深基坑施工技术[J]. 建筑施工, 2014, 36(9): 1033 - 1035.
- [3] 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.
- [4] 孙晓锋, 方忠强. 南京长江漫滩区地铁车站基坑降水方案研究[J]. 市政技术, 2013, 31(2): 75 - 78.
- [5] 王锐, 张世瑞, 曲祖光. 深基坑工程施工中的降水技术应用[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2002, 3(4): 50 - 52.
- [6] 章昕. 深基坑降水技术浅析[J]. 岩土工程学报, 2010, (S2).
- [7] 田梅青. 淤泥地层中深基坑降水影响范围及地层变形稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(31).
- [8] 梁成华. 哈尔滨松花江边超深基坑降水实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(6): 81 - 83.
- [9] 王文明, 李芳. 傍河深基坑降水技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(4): 78 - 80, 84.
- [10] 王守慧. 邻近江河深基坑降水对周围环境的影响及防治[J]. 山西建筑, 2008, 34(22).
- [11] 龙绍章. 复杂地质条件下的深基坑降水技术[J]. 建筑施工, 2012, 34(2): 99 - 100.
- [12] 黄运标, 司马军, 张晓宇. 深基坑降水试验分析[J]. 江苏建筑, 2014, (3): 73 - 75.