

# 某强透水承压含水地层基坑工程降水方案比较分析

王林, 高程鹏

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘要:** 通过结合实际工程案例,分析了承压含水层降水后,承压水位的变化趋势,及降水对地面沉降与现状道路沉降的影响。通过数值模拟建立了存在局部深坑的综合基坑的降水方案模型,分析结果表明:通过在局部深坑处设置止水帷幕可将深坑内降水井数目减少一半,坑边地面沉降值减少约53%,现状路面沉降减少约23%;同时,止水帷幕进入坑底以下10 m后,坑底水位方可满足降水要求;但该深度大于10 m后再加深止水帷幕对坑底及坑边承压水位降深影响逐渐减小。因此,推荐降水方案为在局部深坑处设置止水帷幕,帷幕进入坑底以下10 m。

**关键词:** 承压含水层;基坑降水;地下水位;地面沉降

**中图分类号:** TU46+3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2024)08-0195-05

## 0 引言

基坑降水一直是基坑工程中的重点分项工程,而承压水降水则是基坑降水工程中的难点之一。随着我国经济建设的不断发展,越来越多的大规模深基坑工程会遇到坑底承压水突涌问题,此时承压水降水成为基坑工程建设的必要环节。

根据以往工程经验,承压水降水引起的临近地面沉降影响范围远大于开挖卸载作用,不仅会危害周边现状工程结构的安全,还可能会导致区域性地面沉降等工程事故的发生<sup>[1]</sup>。以往学者对在基坑降水影响的解析解与数值模拟方面做了大量工作。骆冠勇等<sup>[2]</sup>推导了弱透水下卧强透水承压含水层中减压引起的土中应力变化及地面沉降的解析计算公式。马昌慧等<sup>[3]</sup>借助于有限差分法分析降水后基坑周边渗流场分布及止水帷幕深度对降水效果的影响。娄荣祥等<sup>[4]</sup>通过单孔和群孔抽水试验确定承压水层水文地质参数,建立三维数值模型模拟降水期间坑内外地下水的分布规律并与监测数据进行了对比分析。

以往工程中的承压水含水层往往为弱透水层以下埋深较深的下卧层,而对于浅埋且透水性较强的承压水含水层,承压水降水问题更加成为影响工程

安全的重要因素。本文主要以常德市某净水厂工程的基坑承压水降水工程为例进行了有限差分法数值计算,该工程中承压水含水层埋深仅2.5~3.0 m。针对不同深度的基坑,通过合理设置降水井数目、布置及止水帷幕的深度,分析降水后承压水位的变化趋势,及降水对周边现状道路的沉降影响,以达到优化降水设计,形成合理降水方案的目的。本文为类似的基坑承压水降水优化设计提供了参考与借鉴。

## 1 工程概况

本文的分析对象为拟建常德市某净水厂工程中的吸水井、二级泵房及清水池综合基坑。吸水井、二级泵房及清水池之间距离较近,采取共坑开挖;但各单体开挖深度不同,故形成了有局部深坑的综合基坑。该基坑中包含的各单体平面尺寸及最大开挖深度见表1。如图1所示,基坑东侧为现状道路,距离道路最小距离约12 m;基坑北侧、西侧及南侧均为本工程拟建的建筑物。因本工程基坑周边环境条件较好,具备放坡开挖的条件,因此本工程二级泵房和吸水井基坑、清水池基坑均采用放坡开挖的支护形式,坡面采用插筋结合喷射混凝土支护,吸水井及二级泵房基坑局部深坑范围内采用双排 $\phi 800@600$ 高压旋喷桩止水帷幕。

根据地勘资料得知,拟建场地的主要土层为①层耕土,②层填土,⑤层粉土,⑦层粉砂,⑧层圆砾,各土层的分布厚度见表2。其中,①层耕土及②层填土的

收稿日期: 2023-11-16

作者简介: 王林(1978—),男,学士,高级工程师,从事结构设计工作。

表1 基坑参数汇总表

序号	单体名称	单体平面尺寸/ (m × m)	基坑最大开挖 深度 /m
拟建 基坑	二级泵房和 吸水井	11.6 × 41.6	7.15
	二级泵房	13.4 × 50.0	4.45
	清水池	130.8 × 84.2	3.75~5.75

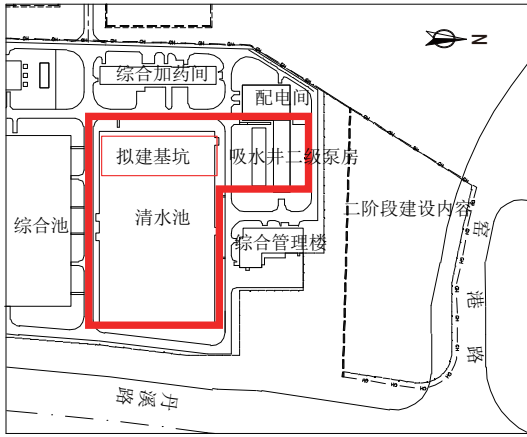


图1 基坑平面布置图

主要组成成分为黏土,局部混有植物根茎,尚未完成自重固结,其渗透系数较低,为 $(5.0\sim 8.0)\times 10^{-5}\text{ cm/s}$ 。⑤层粉土为稍密~中密状,其中含黏土及粉质黏土,因此渗透系数也较低,仅为 $9.0\times 10^{-5}\text{ cm/s}$ 。⑦层粉砂以石英、长石等为主,⑧层圆砾以粗砾砂、黏性土和卵石为主,这两层土的渗透系数较高,为承压水含水层。因此,①层~⑤层土为弱透水层,同时也是下卧承压水含水层的相对隔水层;⑦层~⑧层土为下卧强透水承压水含水层。潜水位埋深在0.3~2.0 m之间,变化幅度约2 m。承压水的水量较大,受大气降水及区域地下水补给,与沅水有水力联系,其承压水头的稳定水位埋深为2.50~7.40 m。故基坑在开挖前及开挖过程中需要持续降水。

表2 各土层渗透系数与释水系数汇总表

土层	渗透系数 $K_x(K_y)/$ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	释水(储水)系数 $S/(10^{-4}\cdot\text{m}^{-1})$	土层平均 厚度 /m
①层耕土	$5.0\times 10^{-5}$	1	0.74
②层填土	$8.0\times 10^{-5}$	1	1.75
⑤层粉土	$9.0\times 10^{-5}$	4	2.0
⑦层粉砂	$8.0\times 10^{-3}$	5	2.5
⑧层圆砾	$1.27\times 10^{-1}$	8	$\geq 10$

## 2 数值模型

根据渗流的连续性方程和达西定律,对本基坑

工程建立了与地下水水文地质概念模型相对应的三维非稳定数值模型<sup>[5]</sup>,如下式所示:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_{xx}\frac{\partial h}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(k_{yy})+\frac{\partial}{\partial z}(k_{zz}\frac{\partial h}{\partial z})+W=u_s\frac{\partial h}{\partial t}$$

$$h(x,y,z,u)|_{r_1}=h_1(x,y,z,t)$$

$$h(x,y,z,t)=z(x,y,z,t)$$

$$k=\frac{\partial h}{\partial n}|_{r_1}=0$$

$$h(x,y,z,u)|_{t=t_0}=h_0(x,y,z,t_0)$$

式中: $k_{xx},k_{yy},k_{zz}$ 分别为 $x,y,z$ 坐标轴方向的渗透系数; $h$ 为点 $(x,y,z)$ 在 $t$ 时刻的水头值, $h_1(x,y,z)$ 为点 $(x,y,z)$ 在 $t$ 时刻的边界已知水位; $u_s$ 为点 $(x,y,z)$ 处的储水率; $u$ 为点 $(x,y,z)$ 处的重力给水度; $W$ 为源汇项; $\Gamma_1,\Gamma_2$ 为第一类边界和第二类边界; $h_0(x,y,z,t_0)$ 为点 $(x,y,z)$ 处的初始水位。

基于以上数值关系,本文利用 Visual Modflow 数值分析软件建立了基坑降水的数值模型。模型东西向长度为160 m,南北向宽度为145 m。为尽量减小数值模拟的边界效应,数值分析模型从基坑边往东西向延伸520 m,往南北向延伸527 m,模型深度50 m,形成 $1\ 200\text{ m}\times 1\ 200\text{ m}\times 50\text{ m}$ 的立方体。基坑平面网格划分图如图2所示。在划分三维计算网格时,在基坑周边区域加密网格,以着重分析基坑内水头的变化规律。模型在垂直方向上分为5层,各层渗透系数、释水系数及厚度见表2。数值模拟计算的主要过程为:(1)建立模型,布置降水井及止水帷幕,进行网格划分;(2)设置初始水位,进行模型初始的应力位移平衡;(3)降水井抽水,分析降水后模型水位及地面沉降的变化。

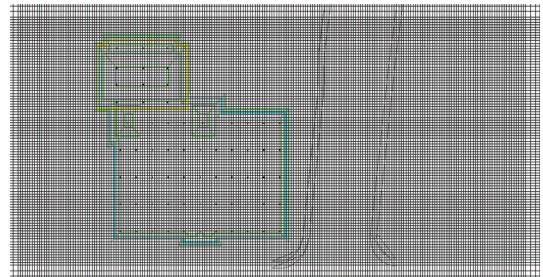


图2 基坑细部平面网格划分图

在模型边界处,可认为抽水对边界水位没有影响。故上面3层的水头边界为潜水位,下面2层的水头边界为承压水位。根据地勘报告,潜水位为地面以下-0.5 m,承压水位为地面以下-2.0 m。对坑内抽水井设定单日抽水流量,吸水井及二级泵房基坑内抽水井的抽水量为 $-1\ 300\text{ m}^3/\text{d}$ ,清水池基坑内抽水井的抽水量为 $-500\text{ m}^3/\text{d}$ ,抽水时间共持续100 d。

### 3 承压水降水设计方案

拟建基坑中包含三个单体:吸水井的开挖深度最大,达到7.15 m;二级泵房与清水池的开挖深度较浅,分别为4.45 m与5.75 m。若在保证基坑底部不发生突涌,需在基坑开挖前将承压水水位降低至坑底以下。针对承压水降水的要求,比选了不设止水帷幕及局部深坑内设置止水帷幕两种方案。

#### 2.1 方案一:不设止水帷幕

该方案中,不设置封闭式止水帷幕,采取坑内布设降水管井的措施,将承压水位降低至坑底以下。通过试算,为满足承压水降水要求,吸水井及二级泵房基坑内需设24口管井;清水池基坑内需设53口管井。基坑降水平面布置图如图3所示。

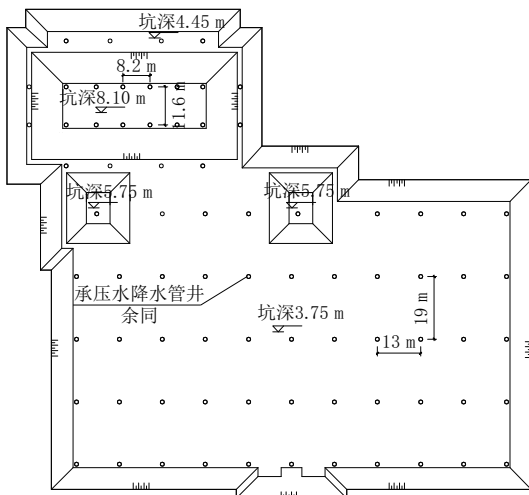


图3 方案一降水井平面布置图

降水后的承压水位埋深等值线如图4所示。从图中可以看出,吸水井基坑坑内的最低承压水位已降至-8.5 m以下,清水池基坑坑内的承压水位已降至-4.2 m以下。但因未设置封闭式止水帷幕,坑内外的承压水相互连通,导致坑底承压水形成了由坑外向坑内缓慢且连续降低的趋势。承压水降水产生的影响范围较大。

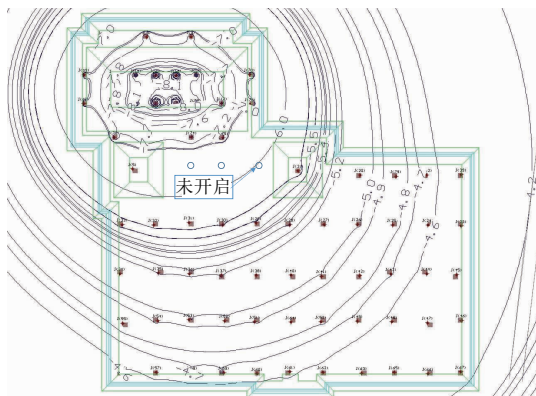


图4 方案一承压水位埋深等值线(单位:m)

在降水过程中,靠近吸水井的一排管井中有三口管井全程没有开启,承压水的降深也满足了要求,故这三口井可改为备用兼观测井。

降水后地面沉降等值线如图5所示。从图中可以看出,基坑东侧的现状丹溪路的地面沉降值约为22.4 mm,基坑边的地面沉降值约为51.6 mm,降水导致地面沉降量较大。

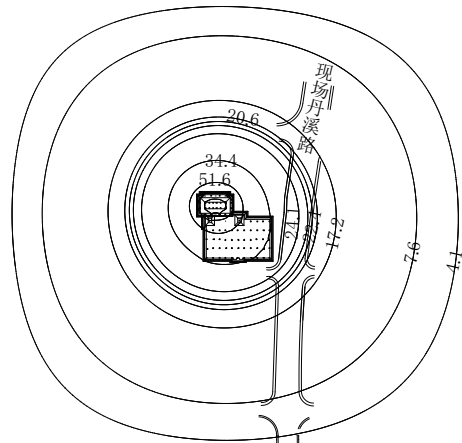


图5 方案一地面沉降等值线(单位:mm)

#### 2.2 方案二:局部深坑采用封闭式止水帷幕

因方案一未设置封闭式止水帷幕,导致坑外承压水降深较大,地面沉降量较大。因此,方案二采用在吸水井处及二级泵房采用封闭式止水帷幕的方式,止水帷幕进入坑底以下10 m。通过试算,吸水井及二级泵房基坑内共设12口管井,仅为方案一坑内管井数量的一半;清水池基坑内共设53口管井,可满足承压水降水要求。基坑降水平面布置图如图6所示。

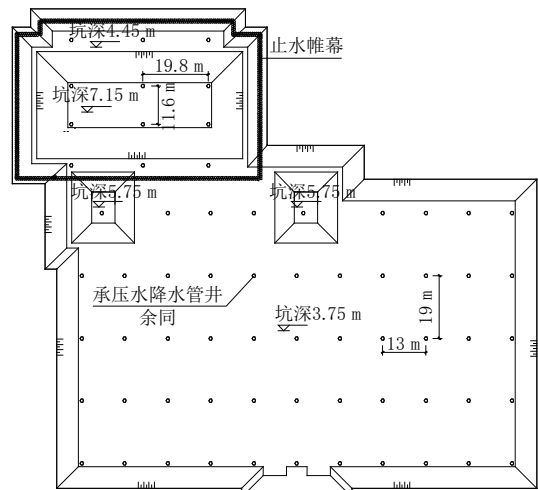


图6 方案二降水井平面布置图

降水后的承压水位埋深等值线如图7所示。从图中可以看出,吸水井基坑坑内的最低承压水位已降至-7.65 m以下,清水池基坑坑内的承压水位已

降至-3.9 m以下。吸水井及二级泵房基坑内外的水位埋深等值线在止水帷幕处断开且快速降低,没有形成连续的承压水位等值线,说明止水帷幕形成隔水边界,有效隔断了坑内外承压水之间的水力联系,在止水帷幕处产生的较大的水头损失,止水帷幕发挥了有效的隔断作用。

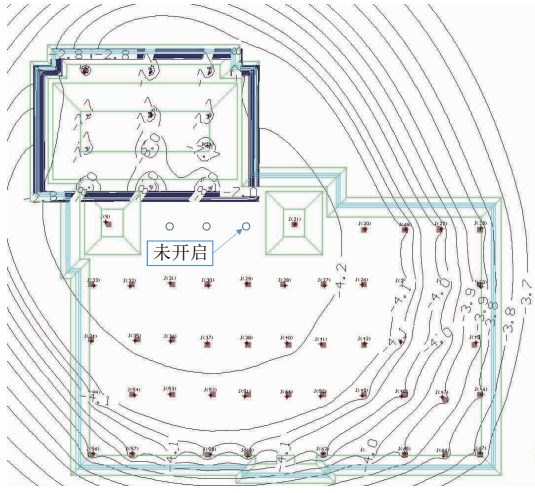


图7 方案二承压水位埋深等值线(单位:m)

与方案一类似,在降水过程中,靠近吸水井的一排管井中有三口管井全程没有开启,可改为备用兼观测井。

降水后地面沉降等值线如图8所示。从图中可以看出,基坑东侧的现状丹溪路的地面沉降值约为17.2 mm,基坑边的地面沉降值约为24.1 mm。离基坑越远,地面沉降值越小;在距离坑边300 m处,地面沉降值已经降至4.1 mm。与方案一相比,丹溪路的地面沉降减少了23%,坑边的地面沉降减少了53%,说明设置封闭式止水帷幕可以有效控制地面沉降量。

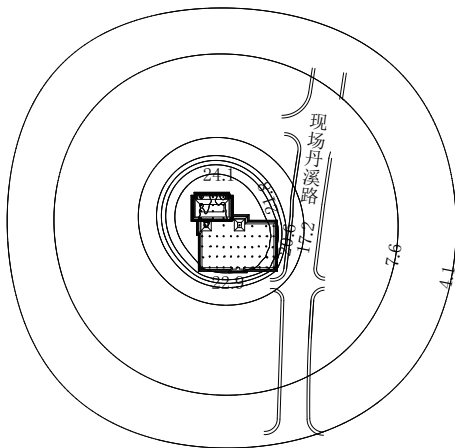


图8 方案二地面沉降等值线(单位:mm)

因此,由方案一及方案二的对比分析可知,局部深坑处不设置止水帷幕也能满足承压水降水要求,但是坑内降水井数目需要增加一倍,由此带来坑边地面沉降和现状路面沉降量较大。而局部深坑处设

置止水帷幕后,局部深坑内的坑内降水井数量可减少一半,同时现状道路的地面沉降减少了23%,坑边的地面沉降减少了53%。故降水效果受到止水帷幕与降水井数目的共同影响。同时,强透水地层中的基坑降水井工作时间长,抽水量大,基坑施工过程中的持续经济投入量大,与设置止水帷幕+降水井的组合措施相比,经济性较差。

故对本工程而言,通过经济性及适用性比选,方案二为优选方案,即在局部深坑处采取止水帷幕+降水井的组合降水措施。

#### 4 止水帷幕深度影响分析

在方案二中,在保持降水井布置方案不变的前提下,只改变止水帷幕的深度,分析得到止水帷幕的深度对降水结果的影响,得到方案二中的最佳止水帷幕深度。

图9所示为方案二中坑底A点的承压水位 $h_u$ 与止水帷幕进入坑底以下深度 $h_w$ 的变化曲线。从中可以看出,随着 $h_w$ 逐渐加深,坑底A点的承压水位 $h_u$ 逐渐下降,即坑内承压水降水效果越显著。当 $h_w < 10$  m时,坑底承压水位高于降水要求限值;当 $h_w \gg 10$  m时,坑底承压水位低于降水要求限值。故在方案二的降水井布置前提下,止水帷幕须进入坑底以下10 m方能满足承压水降水要求。同时,当 $h_w < 10$  m时,坑底水位 $h_u$ 与止水帷幕深度 $h_w$ 之间的拟合斜率为-0.25;当 $h_w > 10$  m时,坑底水位 $h_u$ 与止水帷幕深度 $h_w$ 之间的拟合斜率为-0.035。说明说明 $h_u > 10$  m后,坑底水位的变化已趋于平稳,再加深止水帷幕对抗底承压水位降深的影响较小。

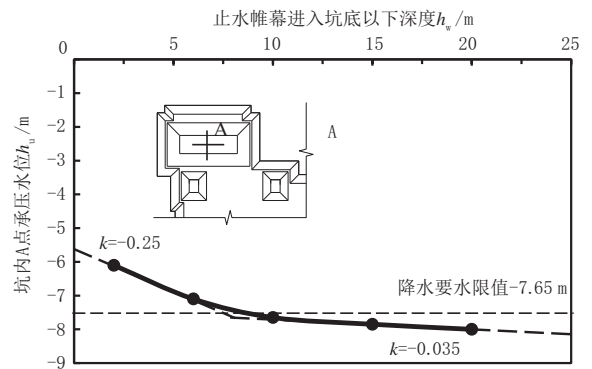


图9 吸水井基坑底承压水位与止水帷幕深度的关系

#### 5 工程降水效果

本工程按照上述方案二的降水方案,即局部深坑采用了封闭止水帷幕后降水开挖的方式进行施

工。止水帷幕采用了双排  $\phi 800@600$  高压旋喷桩,止水帷幕进入坑底以下 10 m。降水后,通过坑外水位观测发现水位降低幅度小于 2 m,基坑东侧现状丹溪路的地面平均沉降量小于 10 mm。基坑内承压水层降水对周边的环境影响得到有效控制。

### 6 结 语

本文以某净水厂工程中的吸水井、二级泵房及清水池综合基坑为例,通过建立有限差分法数值模型,比选了设置止水帷幕+降水井和仅设降水井的承压水降水方案,分析了承压含水层降水后,承压水位的变化趋势,及降水对地面沉降及现状道路沉降的影响,得出以下结论。

(1)通过在局部深坑处设置止水帷幕,可将局部深坑内的降水井数目减少一半,同时现状道路的地面沉降减少了 23%,坑边的地面沉降减少了 53%,可有效控制基坑降水对周边环境的影响。

(2)在降水井数目不变时,局部深坑止水帷幕进入坑底以下 10 m 后,坑底水位方可满足降水要求;但该深度大于 10 m 后,再加深止水帷幕对坑底及坑边承压水位降深影响逐渐减小。

(3)针对埋深较浅的强透水承压水地层,设置止水帷幕能形成隔水边界。针对本工程而言,其进入坑底以下 10 m 后可形成有效的阻隔效应。

#### 参考文献:

[1] 刘帅君.深基坑降水开挖引发的地面沉降及其控制措施研究[D].上海:上海交通大学,2015.

[2] 骆冠勇,潘泓,曹洪,等.承压水减压引起的沉降分析[J].岩土力学,2004(增刊2):196-200.

[3] 马昌慧,毛云,黄魏,等.帷幕在降水条件下对基坑周边渗流及变形影响的研究[J].岩土工程学报,2014,36(增刊2):294-298.

[4] 娄荣祥,周念清,赵姗.上海地铁 11 号线徐家汇站深基坑降水数值模拟[J].地下空间与工程学报,2011,7(5):908-913.

[5] 杨强,丁伟翠,王洪德,等.Visual Modflow 在基坑降水设计中的应用[J].中国给水排水,2009,25(20):97-101.

(上接第 194 页)

[8] 魏纲,俞国骅,洪文强.地面堆载引起下卧盾构隧道剪切错台变形计算研究[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(7):1775-1783.

[9] 薛子轩,夏洪春,朱训国,等.考虑土仓压力作用下的既有盾构隧道沉降变形研究[J/OL].西安理工大学学报,1-13[2024-04-15].http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20240304.1345.004.html.

[10] 罗青峰.道路施工对地铁隧道的沉降影响研究[D].南昌:华东交通大学,2022.

[11] 李筱旻.新建道路工程对下卧软土双圆盾构隧道影响的数值分析[J].浙江水利水电学院学报,2018,30(3):58-64.

[12] 韩国俊,刘洋,邢如飞.道路施工对下方地铁隧道的沉降影响分析[J].铁道标准设计,2012(增刊1):97-100.