

## 第22章 降排水设计与施工

### 22.1 概述

随着我国经济的持续快速发展,全国各地工程建设如火如荼,呈现出欣欣向荣的景象。在各种工程建设中,特别是地铁、高层、超高层建筑、越江管线、跨江大桥等建设,涌现出愈来愈多的基坑工程。基坑开挖的安全性成为目前研究的重点,对于城市区域的深、大基坑而言,基坑降排水已成为必不可少的施工措施之一。

降水历史已愈百年。起初用竖井;随着工业发展而采用管井,30年代采用双阀自冲式井点,以后又实行配套化,在建造大坝时已采用四层甚至五层轻型井点;50年代,喷射井点加入到降水的行列。轻型井点和管井相配合,用管井作为下卧承压水层的减压降水井,也不乏其例。近年来,由于采用机械化连续挖土,常交叉采用轻型井点、喷射井点和管井。

在城市建设过程中,由于场地工程地质与水文地质条件的复杂性以及基坑开挖规模与深度的不断增加,对基坑降排水的要求也越来越高。目前因降排水不当造成的工程事故时有发生,这就要求我们对基坑降排水技术不断地进行改进和改革。

节约、保护水资源是我国的基本国策之一。在水资源匮乏地区,尤其地下水资源紧缺地区,建设工程中应谨慎采用基坑降排水措施,以避免浪费、破坏宝贵的地下水资源。当经过技术与经济论证,不得不采用基坑降排水措施,设计与施工应遵循“按需抽水”、“抽水量最小化”的原则,以保证在满足建设工程基本需求的前提下,达到节约、保护地下水资源的根本目的。另外,应采取有效措施,对建设工程中抽、排出的地下水加以回收利用,减少地下水资源的浪费。

#### 22.1.1 降排水的作用与常用方法

基坑施工中,为避免产生流砂、管涌、坑底突涌,防止坑壁土体的坍塌,保证施工安全和减少基坑开挖对周围环境的影响,当基坑开挖深度内存在饱和软土层和含水层及坑底以下存在承压含水层时,需要选择合适的方法进行基坑降水与排水。降排水的主要作用为:

- (1) 防止基坑底面与坡面渗水,保证坑底干燥,便于施工。
- (2) 增加边坡和坑底的稳定性,防止边坡或坑底的土层颗粒流失,防止流砂产生。
- (3) 减少被开挖土体含水量,便于机械挖土、土方外运、坑内施工作业。
- (4) 有效提高土体的抗剪强度与基坑稳定性。对于放坡开挖而言,可提高边坡稳定性。

对于支护开挖,可增加被动区土抗力,减少主动区土体侧压力,从而提高支护体系的稳定性和强度保证,减少支护体系的变形。

- (5) 减少承压水头对基坑底板的顶托力,防止坑底突涌。

目前常用的降排水方法和适用条件,如表22-1所示。

常用降排水方法和适用条件

表 22-1

适用范围 降水方法	降水深度 (m)	渗透系数 (cm/s)	适用地层
集水明排	<5	$1 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-4}$	含薄层粉砂的粉质黏土,黏质粉土,砂质粉土,粉细砂
轻型井点	<6		
多级轻型井点	6~10		
喷射井点	8~20		

砂(砾)渗井	按下卧导水层性质确定	$>5 \times 10^{-7}$	
电渗井点	根据选定的井点确定	$<1 \times 10^{-7}$	黏土, 淤泥质黏土, 粉质黏土
管井(深井)	$>6$	$>1 \times 10^{-6}$	含薄层粉砂的粉质黏土, 砂质粉土, 各类砂土, 砾砂, 卵石

### 22.1.2 工程事故案例分析

基坑工程中, 由于工程降排水不当造成的基坑失稳事故时有发生。从失败的工程事故中吸取经验教训是十分重要的。

#### 1. 上海某引水工程塌方

上海某引水工程, 基坑设计开挖深度约 9.0m, 采用三级放坡开挖措施, 要求采用井点降水, 以 1: 1.5(垂直: 水平)的坡度开挖并设置两个 3.0m 宽的平台。由于施工单位来自外地, 对上海地质情况不熟悉, 且无井点设备, 竟以 1: 1.75 的坡度直接下挖(中间不设置挖土平台, 不采用井点降水措施, 仅在坑内采取明排水措施)。施工现场地表下 5.0m 处有一粉质黏土层, 当时因雨停工, 天晴后采用三班制抢工浇筑混凝土, 由于在粉质黏土层中的地下水渗出, 突然有大半个篮球场面积的土坡从 4.0m 以上的高度塌下, 造成 10 人埋入土中、3 人死亡的惨重塌方事故。

上海地区的经验是: 在表土层中开挖基坑, 地下水位以上可垂直开挖, 地下水位以下的边坡坡度可采用 1: 0.5~1: 1.1。当基坑开挖深度小于 3.0m, 无流砂现象时边坡坡度可采用 1: 1~1: 1.5, 如预见流砂现象发生, 须采用板桩等基坑围护措施以及采用降排水措施。

#### 2. 浙江省某自来水厂滤池及综合泵房基坑工程事故

该工程位于钱塘江岸边, 基坑面积约 5000m<sup>2</sup>, 开挖深度约 10.5m。1994 年初, 基坑开挖至深度约 7.0m 时, 坑底发生突水涌砂, 无法继续开挖。当时曾先后用水泥、水玻璃和化学注浆等多种方法封堵地下水, 耗资甚巨, 奈何效果甚微, 坑内积水似池塘一般被迫停工。

建设场地下伏地层为钱塘江海陆交互沉积层, 地面下 0-3m 深度内为新吹填砂土; 3-12m 深度内为砂质粉土、粉砂和细砂, 富水; 12-18m 深度内为砾砂和卵石层, 极富水; 以下地层依次为淤泥质黏土、粉细砂与砾砂、卵石层。以上地层属同一潜水含水层, 其地下水与钱塘江水力联系密切。

本基坑工程事故主要是由于坑内地下水水力联系密切, 未采取有效地下水控制措施(包括隔水帷幕偏浅、基坑降水失效等)引起的。在充分了解场地水文地质条件、分析事故原因之后, 在基坑周围加强基坑降水力度, 即在基坑周围布置 14 口深度为 20.0m 的管井, 其井管内径为 250mm, 井径为 600mm, 井群总流量为 4300m<sup>3</sup>/d。从 1994 年 5 月 5 日开始至 12 月 1 日结束, 经过 211 天的抽水, 总抽水量达 75 万吨, 基坑中心最大水位降深为 4.8m。基坑内水位降深随基坑开挖深度增加而增加, 使基坑地面始终保持干开挖, 最后达到干封底, 完成基坑工程施工。

#### 3. 上海黄浦江过江管道竖井基坑工程事故

竖井基坑围护结构采用壁厚为 800mm 的钢筋混凝土地下连续墙, 其深度与竖井深度相同。竖井直径为 18.0m, 深度为 34.0m。当基坑开挖深度达到约 24.0m 时, 坑底发生突涌, 大量泥砂涌入坑内, 基坑周边出现不均匀沉降, 围护地下连续墙下沉约 20cm, 相距仅 10.0m 处的防洪墙见有细小裂缝。事故发生后, 立即停止基坑开挖, 并将黄浦江水迅速贯入基坑内, 使坑内水位与地下水位基本平衡, 避免了事态的发展, 保护了基坑及周边环境遭受更大损失。

建筑场地下伏地层为黄浦江畔的标准地层, 即: 地面下 0-3.6m 深度内为①层素填土和吹填土; ②层缺失; 3.6-5.6m 深度内为③<sub>1</sub>层灰色粉质黏土; 5.6-14.5m 深度内为③<sub>2</sub>层灰色粉砂; ④层缺失; 14.5-28.37m 深度内为⑤层黏土、粉质黏土; 28.37-30.0m 深度内为⑥层暗绿色粉质黏土; 30.0-33.0m 深度内为⑦<sub>1</sub>层粉质黏土; 33.0-40.75m 深度内为⑦<sub>2</sub>层黄色粉砂(承

压含水层, 初始水位埋深 4.7m); 40.75-45.25m 深度内为⑧层黏性土, 勘探孔未钻穿该层。

本工程事故主要是由于深层承压水顶托力引起的, 事故类型属于基坑突涌(坑内突水、涌砂)。由于围护地下连续墙深度仅有 34.0m, 未穿越⑦<sub>2</sub>层黄色粉砂(承压含水层, 初始水位埋深 4.7m), 当基坑开挖深度大于 17.3m 时, 基坑开挖面至承压含水层顶板之间的土层自重已小于承压水压力, 即水土压力已失去平衡; 由于未采取有效的减压降水措施降低承压水位, 导致承压水位埋深远小于安全承压水位埋深, 必然导致坑底产生突涌, 大量地下水和泥砂涌入坑内, 砂层流动失稳, 竖井随之下沉, 坑外地面沉降严重。幸好及时采取坑内灌水措施, 使坑内外水、土压力保持平衡, 制止了事故的纵深发展。

在充分了解场地地质条件与基坑工程性质、仔细分析与弄清事故原因之后, 制定了有效的承压水减压降水方案并付诸实施, 即: 在基坑周围布置 5 口深度为 44.0m 的管井, 其井管内径为 200mm, 井径为 450mm。自 1985 年 8 月开始设计、凿井、抽水试验至次年 1 月竣工, 通过有效的减压降水, 消除了承压水的不良作用, 达到了基坑干开挖、干封底的目的, 保证了基坑工程的顺利施工。从此, 在黄浦江上游引水工程的 2#、4#、5#、7#竖井基坑工程以及后续上海市大量深基坑工程中, 承压水减压降水措施与方法得到了广泛应用。

## 22.2 抽水试验与水文地质参数

水文地质参数是反映含水层或透水层水文地质性能的指标, 是进行各种水文地质计算时不可缺少的数据, 是基坑降水设计中不可缺少的因子, 它的性质直接影响到基坑降水设计的准确性、合理性与可靠性。

### 22.2.1 抽水试验类型与目的

抽水试验的类型与目的如表 22-2 所示。

抽水试验类型与目的

表 22-2

试验类型	试验目的	适用范围
单孔抽水试验 (无观测孔)	测定含水层富水性、渗透性及流量与水位降深的关系。	方案制订与优化阶段。
多孔抽水试验 (观测孔数≥1)	测定含水层富水性、渗透性和各向异性, 漏斗影响范围和形态, 补给带宽度, 合理井距, 流量与水位降深关系, 含水层与地表水之间的联系, 含水层之间的水力联系。进行流向、流速测定和含水层给水度的测定等。	方案优化阶段, 观测孔布置在抽水含水层和非抽水含水层中。
分层抽水试验 (开采段内为单一含水层)	测定各含水层的水文地质参数, 了解各含水层之间的水力联系。	各含水层水文地质特征尚未查明的地区。
混合抽水试验 (开采段内含水层数量>1)	测定含水层组的水文地质参数。	各含水层水文地质特征已基本查明的地区。
完整井抽水试验	测定含水层的水文地质参数。	含水层厚度不大于 25~30m。
非完整井抽水试验	测定含水层水文地质参数、各向异性渗透特征。	含水层厚度较大的地区。
稳定流抽水试验	测定含水层的渗透系数, 井的特性曲线, 井损失。	单孔抽水, 用于方案制订或优化阶段。
非稳定流抽水试	测定含水层水文地质参数, 了解含水层边界条	一般需要 1 个以上的观测孔, 用于

验	件, 顶底板弱透水层水文地质参数、地表水与地下水、含水层之间的水力联系等。	方案优化阶段。
阶梯抽水试验	测定井的出水量曲线方程(井的特性曲线)和井损失。	方案优化阶段。
群孔(井)抽水试验	根据基坑施工工况, 制订降水运行方案。	制订降水运行方案阶段。
冲击试验 (slug test)	测定无压含水层、承压含水层的水文地质参数。	含水层渗透性相对较低, 或无条件进行抽水试验。

### 22.2.2 抽水试验技术要求

#### 1. 稳定流抽水试验

一般进行 3 次水位降深的抽水试验。水位降深顺序, 基岩含水层一般宜先大后小, 松散含水层宜按先小后大逐次进行。最大水位降深值按抽水设备能力确定并应接近设计动水位, 其余 2 次降深值分别为最大降深值的 1/3 和 2/3, 相邻 2 次试验的水位降深值之差不小于 1m。对出水量很小或很大的含水层, 或已掌握较详细水文地质资料, 或参数精度要求不高、研究价值不大的含水层, 也可只进行 1 次或 2 次降深的抽水试验。

##### (1) 试验稳定标准或停止试验的控制条件

- 出水量与动水位没有持续上升或下降趋势(判定时应尽量消除其他干扰因素);
- 如采用水泵抽水, 主孔内水位波动 $\leq 2\sim 3\text{ cm}$ , 流量波动 $\leq 3\%$ ;
- 如采用空压机抽水, 主孔内水位波动 $\leq 10\sim 15\text{ cm}$ , 流量波动 $\leq 5\%$ ;
- 如布设观测孔, 距离最远的观测孔内水位波动 $\leq$ 小于  $2\sim 3\text{ cm}$ 。

##### (2) 试验稳定持续时间

抽水试验稳定持续时间与抽水试验目的、场地和区域水文地质的研究程度和水文地质条件等因素相关。一般在场水文地质研究程度较高, 试验目的单纯为了测定渗透系数, 稳定持续时间可以短一些; 在岩溶地区、水位受潮汐影响的地区、受地表水补给明显导致水位动态变化大的地区, 以及进行群孔抽水试验时, 稳定持续时间可以长一些。

对于不同类型的含水层, 试验稳定持续时间(水位降深由小到大)一般应达到下列要求:

- 卵石、砾石、粗砂含水层:  $4\sim 8\text{ h}$ ;
- 中砂、细砂、粉砂含水层:  $8\sim 16\text{ h}$ ;
- 裂隙和岩溶含水层:  $16\sim 24\text{ h}$ 。

##### (3) 动水位与流量观测

抽水试验开始后应同时观测主孔动水位、出水量和各观测孔的水位。水位观测时间一般在抽水开始后的第 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30min 各测 1 次, 以后每隔 30min 观测 1 次。流量可每隔 60min 观测 1 次。

抽水试验结束或因故停抽, 均应观测恢复水位。一般要求停抽后第 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30min 各测一次, 以后每 30min 观测 1 次, 以后可逐步改为每 50~100min 观测 1 次。

#### 2. 非稳定流抽水试验

一般只进行 1 次水位降深的抽水试验。当需要测定井损失时, 需进行 3 次或 3 次以上的不同水位降深的抽水试验, 取每次抽水的相同累计时间的流量和动水位, 绘制  $Q\sim S$  曲线。

##### (1) 抽水试验延续时间

为满足参数计算的需要, 抽水试验的延续时间应根据观测孔的水位降深与时间的半对数曲线, 即  $s(\text{或 } \Delta h^2)\text{-lgt}$  曲线来判定。当  $s(\text{或 } \Delta h^2)\text{-lgt}$  曲线出现拐点, 抽水试验应延续到拐点以后的曲线平缓段, 并能正确推断出稳定水位下降值时, 即可结束抽水试验; 当  $s(\text{或 } \Delta h^2)\text{-lgt}$

曲线不出现拐点，呈直线延伸，且其直线延伸段在  $\lg t$  轴上的投影不少于二个对数周期时，可以结束抽水试验；当有几个观测孔时应以最远的观测孔的  $s$ (或  $\Delta h^2$ )- $\lg t$  曲线判定。

对于承压含水层抽水试验，采用  $S$ - $\lg t$  曲线判别。对于潜水含水层抽水试验，采用  $\Delta h^2$ - $\lg t$  曲线判别。 $\Delta h^2$  是指潜水含水层在自然条件下的厚度  $H$  和抽水试验时的厚度  $h$  的平方差，即  $\Delta h^2 = H^2 - h^2$ 。

### (2) 动水位与流量观测

所有抽水孔、观测孔的动水位与流量都必须以抽水开始后的同一时间进行观测。主孔与观测孔的动水位观测时间应在抽水开始后的第 1、3、5、7、10、15、20、30、45、60、90min 观测 1 次，以后每 30min 观测 1 次。5 小时后，每 1 小时观测 1 次，使每个观测孔所得的水位观测数据在  $s$ - $\lg t$  曲线上分布均匀。

从停抽时刻起，以上述抽水过程的时间间隔进行水位恢复观测，直到水位恢复到自然水位为止。

要求抽水量基本保持常量，整个试验期间的流量变化  $\leq 1\%$ 。抽水开始后抽水量可按每 5~10min 测量 1 次，3~4 次后可改为 1~2h 测量 1 次。为了保持抽水量稳定，尽量采用深井泵、潜水泵或潜水深井泵进行抽水。

### 3. 群孔干扰抽水试验

群孔干扰抽水试验除按非稳定流抽水要求进行外，还应满足下列要求：

- (1) 干扰孔之间的水平距离，应保证一孔抽水，使另一孔产生一定的水位下降；
- (2) 水位降深次数应根据设计目的而定，一般应尽抽水设备能力做一次最大降深；
- (3) 各干扰孔过滤器的规格和安装深度应尽量相同；
- (4) 各抽水孔抽水起、止时间应该相同；
- (5) 试验过程中，宜同时对泉和可能受影响的地表水点进行水位、流量和水温观测。

### 22.2.3 抽水试验资料的现场整理

在抽水过程中，应根据所测得的资料及时进行现场整理，以便了解试验进行情况，检查有无反常现象并及时纠正处理，为室内整理提供正确可靠的原始资料。

对于稳定流抽水试验，应在现场绘制  $Q$ - $s$ 、 $Q$ - $t$ 、 $q$ - $s$ 、 $s$ - $t$  曲线，如图 22-1~22-3 所示。当观测孔数量不少于 3 个，应绘制  $\lg s$ - $\lg r^2$  曲线，如图 22-4 所示。对于非稳定流抽水试验，应在现场绘制  $\lg s$ - $\lg t$ 、 $s$ - $\lg t$  曲线，随测随绘，以检查实测曲线是否与理论曲线一致。对于多次降深的阶梯试验，应根据每次抽水开始后的相同累计时间的  $Q$  和  $s$  值，绘制  $Q$ - $s$  曲线。

在图 22-1~22-2 中，I 为承压水；II 为潜水或承压水受井管（包括滤管）阻力和三维流、紊流的影响；III 表示水源不足或滤水管过水断面受堵塞；IV 为当吸水龙头置于滤水管部位时，表示受三维流、紊流的影响属正常现象，当吸水龙头至于滤水管以上时，表示抽水有误，为非正常现象，应找出原因，重做试验；V 表示在某降深值以下， $s$  增大，而  $Q$  增加甚微，宜调整抽水流量与减小降深。

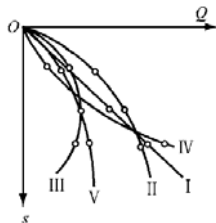


图 22-1  $Q$ - $s$  曲线

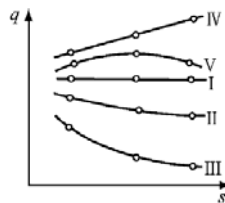


图 22-2  $q$ - $s$  曲线

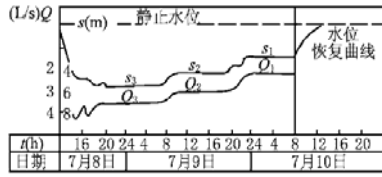


图 22-3 Q-t、s-t 曲线

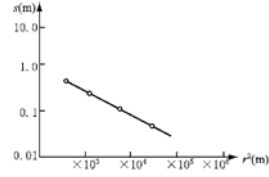


图 22-4 lgs-lgr<sup>2</sup> 曲线

22.2.4 根据抽水试验资料计算含水层水文地质参数

1. 根据稳定流抽水试验计算水文地质参数  
水文地质参数计算可以采用 Dupuit 公式和 Thiem 公式。

(1) 只有抽水孔观测资料时的 Dupuit 公式

a. 承压完整井

$$k = \frac{Q}{2\pi s_w M} \ln \frac{R}{r_w}, \quad R = 10s_w \sqrt{k} \tag{22-1}$$

b. 潜水完整井

$$k = \frac{Q}{\pi(H^2 - h^2)} \ln \frac{R}{r_w}, \quad R = 2s_w \sqrt{kH} \tag{22-2}$$

式中,  $k$  为含水层渗透系数(m/d),  $Q$  为抽水井流量(m<sup>3</sup>/d),  $s_w$  为抽水井中水位降深(m),  $M$  为承压含水层厚度(m),  $R$  为影响半径(m),  $H$  为潜水含水层的初始厚度(m),  $h$  为潜水含水层抽水后的厚度(m),  $r_w$  为抽水井半径(m)。

(2) 当有抽水井和观测孔的观测资料时的 Dupuit 或 Thiem 公式

a. 承压完整井

$$\text{Dupuit 公式: } h_1 - h_w = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{r_1}{r_w} \tag{22-3}$$

$$\text{Thiem 公式: } h_2 - h_1 = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{r_2}{r_1} \tag{22-4}$$

b. 潜水完整井

$$\text{Dupuit 公式: } h_1^2 - h_w^2 = \frac{Q}{\pi KM} \ln \frac{r_1}{r_w} \tag{22-5}$$

$$\text{Thiem 公式: } h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi KM} \ln \frac{r_2}{r_1} \tag{22-6}$$

式中,  $h_w$  为抽水井中的稳定水位(m),  $h_1$ 、 $h_2$ : 分别为与抽水井距离为  $r_1$  和  $r_2$  处观测孔(井)中的稳定水位(m)。稳定水位等于初始水位  $H_0$  与井中水位降深  $s$  之差, 即  $h_1 = H_0 - s_1$ ,  $h_2 = H_0 - s_2$ ,  $h_w = H_0 - s_w$ 。其余符号意义同前。

当水井中的降深较大时, 可采用修正降深。修正降深  $s'$  与实际降深  $s$  之间的关系为:

$$s' = s - \frac{s^2}{2H_0} \tag{22-7}$$

2. 根据非稳定流抽水试验计算水文地质参数

(1) 承压含水层非稳定流抽水试验求参方法

a. 泰斯(Theis)配线法

在两张相同刻度的双对数坐标纸上, 分别绘制 Theis 标准曲线  $W(u)-1/u$  和抽水试验数据曲线  $s-t$ , 保持坐标轴平行, 使两条曲线达到最佳重合, 得到重叠曲线上任意匹配点的水位降深[s]、时间[t]、Theis 井函数[w(u)]及[1/u]的数值, 按下列公式计算参数 ( $r$  为抽水井半径或观测孔至抽水井的距离):

$$T = \frac{0.08Q}{[s]} [W(u)], \quad k = \frac{T}{M}, \quad s = \frac{4T[t]}{r^2 \left[ \frac{1}{u} \right]}, \quad a = \frac{r^2 \left[ \frac{1}{u} \right]}{4[t]} \quad (22-8)$$

以上为降深-时间配线法 (s-t)。也可以采用降深-时间距离配线法 (s-t/r<sup>2</sup>) 或降深-距离配线法 (s-r) 进行参数计算。

#### b. 雅可布(Jacob)直线图解法

当抽水试验时间较长,  $u = r^2/(4at) < 0.01$  时, 在半对数坐标纸上抽水试验曲线 s-lgt 为一直线 (延长后交时间轴于  $t_0$ , 此时  $s=0.00m$ ), 在直线上任取两点  $t_1$ 、 $s_1$ 、 $t_2$ 、 $s_2$ , 则有:

$$T = \frac{0.183Q}{s_2 - s_1} \lg \frac{t_2}{t_1}, \quad s = \frac{2.25Tt_0}{r^2}, \quad a = \frac{r^2}{2.25t_0} \quad (22-9)$$

#### c. 汉图什(Hantush)拐点半对数法

对于半承压完整井的非稳定流抽水试验 (存在越流量,  $k'/M'$  为越流系数), 当抽水试验时间较长,  $u = r^2/(4at) < 0.1$  时, 在半对数坐标纸上绘制抽水试验曲线 s-lgt, 外推确定最大水位降深  $s_{max}$ , 在 s-lgt 线上确定拐点  $s_1 = s_{max}/2$ , 拐点处的斜率  $m_1$  及时间  $t_1$ , 则有:

$$m_1 = \frac{s_2 - s_1}{\lg t_2 - \lg t_1}, \quad \frac{2.3s_1}{m_1} = e^{\frac{r}{B}} K_0 \left( \frac{r}{B} \right) \quad (22-10)$$

进而可得  $e^{\frac{r}{B}} K_0 \left( \frac{r}{B} \right)$  以及  $\frac{r}{B}$  的值, 从而有:

$$T = \frac{0.183Q}{m_1} e^{-\frac{r}{B}}, \quad s = \frac{2Tt_1}{Br}, \quad \frac{k'}{M'} = \frac{T}{B^2} \quad (22-11)$$

#### d. 水位恢复的半对数法

当抽水试验水位恢复时间较长,  $u = r^2/(4at) < 0.01$  时, 在半对数坐标纸上绘制停抽后水位恢复曲线 s-lgt, 在直线上任取两点  $t_1$ 、 $s_1$ 、 $t_2$ 、 $s_2$ , 则有:

$$T = \frac{0.183Q}{s_1 - s_2} \lg \frac{t_2}{t_1}, \quad a = \frac{r^2}{2.25t_1} 10^{\frac{s_2 - s_1}{s_1 - s_2} \lg \frac{t_2}{t_1}} \quad (22-12)$$

#### e. 水位恢复的直线图解法

当抽水试验水位恢复时间较长,  $u = r^2/(4at) < 0.1$  时, 在半对数坐标纸上绘制停抽后水位恢复曲线 s-lgt, 直线段的斜率为  $B$ , 则有,

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi B}, \quad B = \frac{s_r}{\lg \frac{t}{t'}}, \quad t' = t - t_0 \quad (22-13)$$

式中,  $t_0$  为停止抽水时的累计抽水持续时间, 其余符号意义同前。

#### (2) 潜水非稳定流抽水试验求参方法

潜水含水层水文地质参数计算可采用仿 Theis 公式法。

对于潜水完整井流, 仿 Theis 公式为:

$$H_0^2 - h_w^2 = \frac{Q}{2\pi k} W(u), \quad u = \frac{r^2}{4at} = \frac{r^2 \mu^*}{4Tt} \quad (22-14)$$

式中,  $T = kh_m$  (m/d<sup>2</sup>),  $h_m$  为潜水含水层的平均厚度(m);  $a$  为含水层的导压系数(1/d);  $\mu^*$  为潜

水含水层的重力水释水系数,  $\mu^* = \mu \cdot h_m$ ,  $\mu$  为潜水含水层的给水度; 其余符号意义同前。

具体计算时, 可采用类似前述的配线法、直线图解法、水位恢复法等。

#### 3. 根据冲击试验(slug test)计算水文地质参数

冲击试验又称定容积试验，即在井内水位达到稳定后，瞬间注入或取出一定体积的水，随后根据井内水位的恢复计算水文地质参数。通常将一定长度的实心金属圆柱体沉入井内静水位以下，待井内水位恢复到稳定后，瞬间将金属圆柱体提出孔外，同时将该时刻作为试验的起始时间，其瞬间的井内最大水位降深  $H_0$  可由金属圆柱体体积换算。自试验起始时刻起，测定不同时间的水位上升高度至水位恢复稳定止。同样，当水位恢复稳定后，可瞬间向孔内放入一定长度的金属实心圆柱体，水位瞬间上升，其高度  $H_0$  可用金属圆柱体体积换算求得，然后测定不同时间水位下降的高度，直到水位恢复稳定。该方法可反复进行，具有快速简便、节约经济等特点，得到广泛应用。对透水性好的砂性土，由于水位恢复速度快，可采用水位传感器和数据自动采集仪来测定水位。对透水性差的黏性土，在很难进行抽水试验的情况下，可用手工的方法测定孔内水位并较方便正确的测定参数。

(1) 承压含水层中的冲击试验

如图 22-5 所示，容积为  $V$  的水瞬间注入孔内或从孔内取出后，井内水位突然高出或低于静止水位的高度为：

$$H_0 = V / \pi r_c^2 \tag{22-15}$$

随后，水位逐渐向初始水位逼近，恢复过程中某一时刻的水位为  $H(t)$ ，按下式计算：

$$H / H_0 = (8\alpha / \pi^2) \int_0^\infty e^{-\beta u^2 / \alpha} du / (u \Delta u) \tag{22-16}$$

根据式(22-16)，在半对数纸上可绘制一组簇不同  $\alpha = S r_s / r_c$  的  $H/H_0 \sim \lg(Tt/r_c^2)$  标准曲线簇(如图 22-6 所示)。根据冲击试验测得的水位恢复资料，可绘制  $H/H_0 \sim \lg t$  曲线(半对数纸模数相同)。将试验曲线  $H/H_0 \sim \lg t$  与标准曲线  $H/H_0 \sim \lg(Tt/r_c^2)$  叠合，保持横坐标重合，左右移动，找到最佳配合曲线，在其上可确定任意匹配点的坐标值  $[Tt/r_c^2]$ 、 $[t]$ ， $[\alpha]$  等一组数据，然后根据下式计算  $T$  和  $S$ ：

$$T = \frac{r_c^2}{t}, \quad S = \frac{r_c^2 \alpha}{r_s^2} \tag{22-17}$$

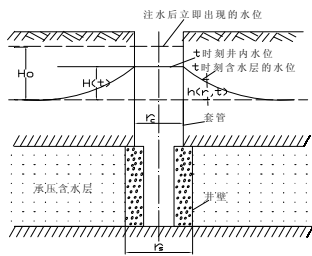


图 22-6 定容积水突然注入井内后的示意图

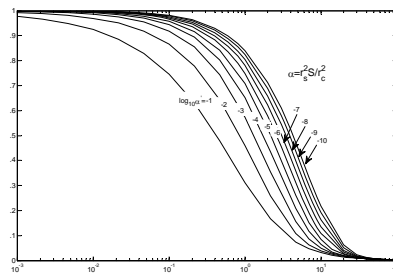


图 22-6 H/H0-lg(Tt/rc2)标准曲线簇

(2) 无压含水层中的冲击试验

试验方法与上述承压水层中的冲击试验方法相同，现场试验如图 22-7 所示。根据 Thiem 公式，有：

$$Q = 2\pi kL \frac{Ht}{\ln(R_c / r_s)} \tag{22-18}$$



式中,  $R_c$  为水位下降  $H_0$  全部消散所影响的范围的半径, 其余符号意义同前。

水位上升的速率为:

$$dH/dt = -Q/\pi r_c^2 \quad (22-19)$$

将式(22-18)与式(22-19)联立求解, 可得到:

$$\frac{1}{H} dH = \frac{-2kL}{r_c^2 \ln(R_c/r_s)} dt \quad (22-20)$$

对式(22-20)积分后得:

$$k = \frac{r_c^2 \ln(R_c/r_s)}{2L} \frac{1}{t} \ln \frac{H_0}{H_t} \quad (22-21)$$

$$T = \frac{Mr_c^2 \ln(R_c/r_s)}{2L} \frac{1}{t} \ln \frac{H_0}{H_t} \quad (22-22)$$

利用式(22-21)、式(22-22)计算时, 可根据冲击试验水位恢复资料绘制  $t\text{-}lgH_t$  曲线, 在曲线的直径段上 (或该直线的延长线上) 任选一个  $t$ , 可得到一个  $H_t$ 。

$$\text{当 } M > y, \quad \ln(R_c/r_s) = \left[ \frac{1.1}{\ln(y/r_s)} + \frac{A + B \ln[(M-y)/r_s]}{L/r_s} \right]^{-1};$$

$$\text{当 } M \gg y, \quad \ln[(M-y)/r_s] > 6 \text{ 时则以 } 6 \text{ 代替};$$

$$\text{当 } M = y, \quad \ln(R_c/r_s) = \left[ \frac{1.1}{\ln(y/r_s)} + \frac{C}{L/r_s} \right]^{-1}$$

系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  与  $L/r_s$  有关, 可按图 22-8 查得。

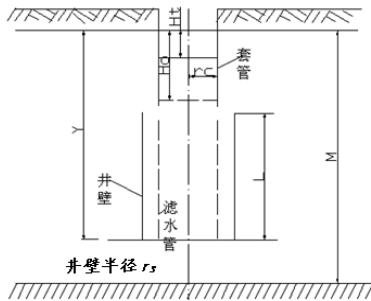


图 22-7 无压含水层中冲击试验示意图

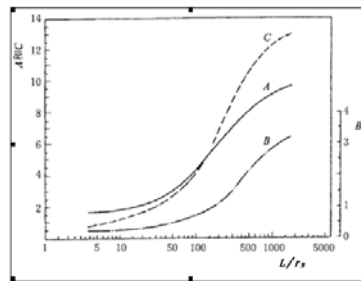


图 22-8  $L/r_s$  与系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的关系曲线

## 22.3 集水明排设计与施工

### 22.3.1 集水明排

#### 1. 集水明排的适用范围

- (1) 地下水类型一般为上层滞水, 含水土层渗透能力较弱;
- (2) 一般为浅基坑, 降水深度不大, 基坑或涵洞地下水位超出基础底板或洞底标高不大于 2.0m;
- (3) 排水场区附近没有地表水体直接补给;
- (4) 含水层土质密实, 坑壁稳定 (细粒土边坡不易被冲刷而塌方), 不会产生流砂、管涌等不良影响的地基土, 否则应采取支护和防潜蚀措施。

#### 2. 集水明排设施

集水明排一般可以采用以下方法：

(1) 基坑外侧设置由集水井和排水沟组成的地表排水系统,避免坑外地表明水流入基坑内。排水沟宜布置在基坑边净距 0.5m 以外,有止水帷幕时,基坑边从止水帷幕外边缘起计算;无止水帷幕时,基坑边从坡顶边缘起计算。

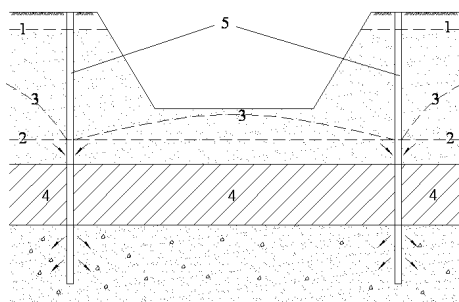
(2) 多级放坡开挖时,可在分级平台上设置排水沟。

(3) 基坑内宜设置排水沟、集水井和盲沟等,以疏导基坑内明水。集水井中的水应采用抽水设备抽至地面。盲沟中宜回填级配砾石作为滤水层。

排水沟、集水井尺寸应根据排水量确定,抽水设备应根据排水量大小及基坑深度确定,可设置多级抽水系统。集水井尽可能设置在基坑阴角附近。

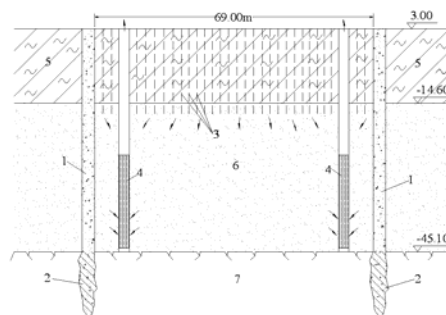
### 22.3.2 导渗法

导渗法又称引渗法,即通过竖向排水通道——引渗井或导渗井,将基坑内的地面水、上层滞水、浅层孔隙潜水等,自行下渗至下部透水层中消纳或抽排出基坑。在地下水位较低地区,导渗后的混合水位通常低于基坑底面,导渗过程为浅层地下水自动下降过程,即“导渗自降”(如图 22-9 所示);当导渗后的混合水位高于基坑底面或高于设计要求的疏干控制水位时,采用降水管井抽汲深层地下水降低导渗后的混合水位,即“导渗抽降”(如图 22-10 所示)。通过导渗法排水,无需在基坑内另设集水明沟、集水井,可加速深基坑内地下水位下降、提高疏干降水效果,为基坑开挖创造快速干地施工条件,并可提高坑底地基土承载力和坑内被动区抗力。



1-上部含水层初始水位; 2-下部含水层初始水位;  
3-导渗后的混合动水位; 4-隔水层; 5-导渗井

图 22-9 越流导渗自降



1-厚 1.20m 的地下连续墙; 2-墙下灌浆帷幕;  
3- $\phi$  325 导渗井(内填砂, 间距 1.50m); 4- $\phi$  600 降水管井;  
5-淤泥质土; 6-砂层; 7-基岩(基坑开挖至该层岩面)

图 22-10 润扬长江大桥北锚锭深基坑导渗抽降

#### 1. 导渗法适用范围

(1) 上层含水层(导渗层)的水量不大,却难以排出;下部含水层水位可通过自排或抽降使其低于基坑施工要求的控制水位。

(2) 适用导渗层为低渗透性的粉质黏土、黏质粉土、砂质粉土、粉土、粉细砂等。

(3) 当兼有疏干要求时,导渗井还需按排水固结要求加密导渗井距。

(4) 导渗水质应符合下层含水层中的水质标准,并应预防有害水质污染下部含水层。

(5) 由于导渗井较易与淤塞,导渗法适用于排水时间不长的基坑工程降水。

(6) 导渗法在上层滞水分布较普遍地区应用较多。

#### 2. 导渗设施与布置

导渗设施一般包括钻孔、砂(砾)渗井、管井等,统称为导渗井。

导渗管井:宜采用不需要泥浆护壁的沉管桩机、长臂螺旋钻机等设备成孔或采用高压套管冲击成孔。成孔后,内置钢筋笼(外包土工布或透水滤网)、钢滤管或无砂混凝土滤管;

滤管壁与孔壁之间回填滤料。本方法形成的导渗管井多用于永久性排水工程。

导渗砂(砾)井：在预先形成的 $\phi 300-600\text{mm}$ 的钻孔内，回填含泥量不大于0.5%的粗砂、砾砂、砂卵石或碎石等。本方法形成的导渗砂(砾)井又称之为导渗盲井。

导渗钻孔：对于成孔后基本无坍塌现象发生的导渗层，可直接采用导渗钻孔引渗排水。

导渗井应穿越整个导渗层进入下部含水层中，其水平间距一般为3.0-6.0m。当导渗层为需要疏干的低渗透性软黏土或淤泥质黏性土，导渗井距宜加密至1.5-3.0m。

### 3. 导渗设计计算

对于导渗自降(如图22-9所示)，导渗井的流量可按式(22-23)计算。对于兼有疏干作用的导渗井(如图22-10所示)，其导渗流量应计入满足疏干要求的疏干排水量。导渗井群的总流量应满足基坑排水量和疏干水量的要求。

$$q = k'FI \quad (22-23)$$

$$Q = nq \quad (22-23-1)$$

式中， $Q$ 为导渗井群的总流量( $\text{m}^3/\text{d}$ )； $q$ 为导渗井的流量( $\text{m}^3/\text{d}$ )； $n$ 为导渗井总数； $k'$ 为导渗井的垂向渗透系数( $\text{m}/\text{d}$ )； $F$ 为导渗井的水平截面积( $\text{m}^2$ )； $I$ 为渗透坡降，对于均质填料， $I=1.0$ 。

完成导渗任务后，对于基坑开挖范围之外的导渗井或位于基坑开挖深度以下的导渗井残留段，应及时采取有效措施予以封闭，以达到阻断上下含水层之间的联系通道、恢复或保持自然环境下的水文地质条件。

## §22.4 疏干降水设计

### 22.4.1 疏干降水概述

#### 1. 疏干降水的对象、类型

疏干降水的目的，除有效降低开挖深度范围内的地下水位标高之外，还必须有效降低被开挖土体的含水量，达到提高边坡稳定性、增加坑内土体的固结强度、便于机械挖土以及提供坑内干作业施工条件等诸多目的。疏干降水的对象一般包括基坑开挖深度范围内上层滞水、潜水。当开挖深度较大时，疏干降水涉及微承压与承压含水层上段的局部疏干降水。

当基坑周边设置了隔水帷幕，隔断基坑内外含水层之间的地下水水力联系时，一般采用坑内疏干降水，其类型为封闭型疏干降水，如图22-11(a)所示。当基坑周边未设置隔水帷幕、采用大放坡开挖时，一般采用坑内与坑外疏干降水，其类型为敞开型疏干降水，如图22-11(b)所示。当基坑周边隔水帷幕深度不足、仅部分隔断基坑内外含水层之间的地下水水力联系时，一般采用坑内疏干降水，其类型为半封闭型疏干降水，如图22-11(c)所示。

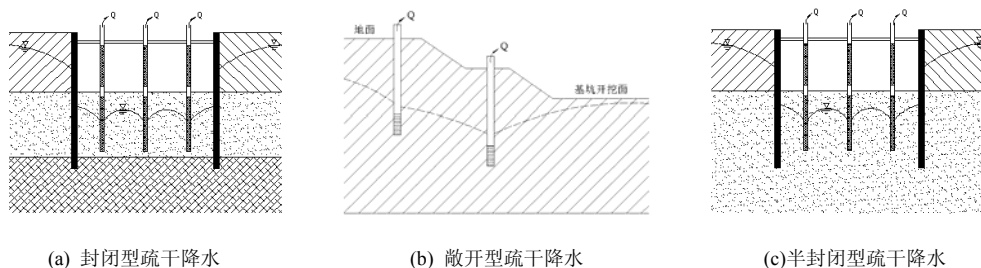


图 22-11 疏干降水类型图

#### 2. 常用疏干降水方法

常用疏干降水方法一般包括轻型井点(含多级轻型井点)降水、喷射井点降水、电渗井点

降水、管井降水(管材可采用钢管、混凝土管、PVC硬管等)、真空管井降水等方法。可根据工程场地的工程地质与水文地质条件以及基坑工程特点,选择针对性较强的疏干降水方法,以求获得较好的降水效果。

### 3. 疏干降水运行控制

疏干降水效果可从两个方面检验。其一,观测坑内地下水位是否已达到设计或施工要求的埋深;其二,通过观测疏干降水的总排水量或其它测试手段,判别被开挖土体含水量是否已下降到有效范围内。上述两个方面均应满足要求,才能保证疏干降水效果。

通过疏干降水,短期内不可能将被开挖土体完全“疏干”,只能部分降低土体的含水量。为保证疏干降水效果,以淤泥质粘性土和粘性土为主的土体含水量的有效降低幅度不宜小于8%,以砂性土为主或富含砂性土夹层的土体含水量的有效降低幅度不宜小于10%。

疏干降水运行可从以下几个方面进行控制:

(1) 在正式开始降水之前,必须准确测定各井口和地面标高,测定静止水位,安排好抽水设备、电缆及排水管道,进行降水试运行。其目的为检查排水及电路是否正常以及抽水系统是否完好,保证整个降水系统的正常运转。

(2) 抽出的地下水应排入场外市政管道或其他排水设施中,应避免抽出的地下水就地回渗,影响降水效果。

(3) 降水运行应与基坑开挖施工互相配合。基坑开挖前应提前进行预降水,一般在开挖前须保证有2周左右的预降水时间。在基坑开挖阶段,坑内因降雨或其他因素形成的积水应及时排出坑外,尽量减少大气降水和坑内积水的入渗。

(4) 对于基坑周边环境要求严格、坑内疏干含水层与坑外地下水水力联系较强的基坑工程,应严格执行“按需疏干”的降水运行原则,避免过量降低地下水位。

(5) 在基坑内、外,均应进行地下水位监控。条件许可时,宜采用地下水位自动监控手段,对地下水位实行全程跟踪监测。

(6) 降水运行阶段,应对毁坏的抽水泵及时更换。疏干井管可随基坑开挖进程逐步割除。

(7) 当基坑开挖至设计深度后,应根据坑位地下水的补给条件或水位恢复特征,采取合适的封井措施对疏干井进行有效封闭。

## 22.4.2 疏干降水设计

### 1. 基坑涌水量估算

对于封闭型疏干降水,基坑涌水量可按下述经验公式进行估算。

$$Q = \mu As \quad (22-24)$$

式中,  $Q$  为基坑涌水量(疏干降水排水总量,  $\text{m}^3$ );  $\mu$  为疏干含水层的给水度;  $A$  为基坑开挖面积( $\text{m}^2$ );  $s$  为基坑开挖至设计深度时的疏干含水层中平均水位降深( $\text{m}$ )。

对于半封闭型或敞开型疏干降水,基坑涌水量可按下述大井法进行估算。

$$\text{潜水含水层: } Q = 1.366k(2H_0 - s)s / \log \left( \frac{R+r_0}{r_0} \right) \quad (22-25)$$

$$\text{承压含水层: } Q = 2.73kMs / \log \left( \frac{R+r_0}{r_0} \right) \quad (22-26)$$

式中,  $Q$  为基坑涌水量( $\text{m}^3/\text{d}$ ),  $r_0$  为假想半径,与基坑形状及开挖面积有关,可按下式计算:

$$\begin{cases} r_0 = \sqrt{\frac{A}{\pi}}, & \text{圆形基坑} \\ r_0 = \xi(l+b)/4, & \text{矩形基坑} \end{cases} \quad (22-27)$$

式中,  $Q$  为基坑涌水量( $\text{m}^3/\text{d}$ );  $r_0$  为假想半径, 与基坑形状及开挖面积有关;  $l$  为基坑长度( $\text{m}$ );  $b$  为基坑宽度( $\text{m}$ );  $\xi$  为基坑形状修正系数, 可按表 22-3 取值。其余符号意义同前。

表 22-3 基坑形状修正系数计算表

$b/l$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$\xi$	1.0	1.12	1.16	1.18	1.18	1.18

## 2. 岩层内降排水设计

岩层内的降排水(疏干或减压), 可将地下水位降低到边坡或坑底中的潜在破坏面以下, 是防止岩质边坡及坑底内的断层或软弱夹层内的充填物因遭受冲刷作用产生流土、灌淤等渗透变形, 改善边坡稳定性及坑内建筑物的抗浮稳定性的有效措施。岩层内的降排水系统一般由浅层排水孔、深层排水孔、减压排水孔组成, 岩质基坑的降排水系统由地表截水沟、排水沟、集水井以及岩层内的降排水系统共同组成。

### (1) 浅层排水孔

浅层排水孔用于引排、疏干水平裂隙承压水以及坡面附近的裂隙水, 沿岩质边坡设置于地下水位以下、隔水层顶板以上。排水孔的孔径为  $\phi 45-75\text{mm}$ , 孔深为  $1.5-3.0\text{m}$ (全风化层中孔深取小值, 弱风化及微风化层中孔深取大值), 孔距  $2.0-4.0\text{m}$ (岩层透水性愈小, 孔距愈小)。排水孔倾斜方向与边坡一致, 其轴线与水平线之夹角为  $5^\circ-10^\circ$  (不宜大于  $15^\circ$ )。

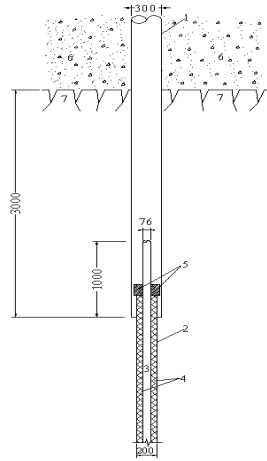
### (2) 深层排水孔

深层排水孔主要用于降低岩层内的裂隙水压力, 其孔径为  $60-120\text{mm}$ (较完整岩层中孔径取小值; 坍塌和堵塞地段孔径取大值, 并内置带滤层滤管或透水软管); 孔深一般为  $8.0-15.0\text{m}$ , 应穿越临界破坏区, 一般不小于岩质边坡高度的一半; 孔距为  $4.0-6.0\text{m}$ (弱风化、微风化岩层的透水性差, 疏排缓慢, 但裂隙水压力传递迅速, 孔距宜取小值; 强风化、中风化岩层中孔距取大值); 排水孔方向以穿越断层、裂隙的数量最多为最佳, 并宜与主要发育的裂隙倾向呈较大角度相交。

### (3) 减压排水孔

当基坑底面位于基岩面或基岩内, 可在岩层内的断层、软弱夹层以及节理裂隙发育部位设置减压排水孔。减压排水孔内置入带有紧贴孔壁滤层的减压排水管(如图 22-12 所示), 通过洩排或抽排, 使岩层内裂隙水呈开放流动状态, 以降低裂隙承压水压力, 确保坑底岩层稳定及坑内结构物抗浮稳定, 且可防止裂隙水携带断层、裂隙内的碎屑充填物流入坑内, 确保坑底抗渗稳定。

减压排水孔呈垂向布置, 孔底位于基岩面以下  $4-10\text{m}$ 。基坑开挖面未至基岩面时, 护孔管内可置入潜水泵抽水。当基坑开挖至基岩表面时, 可拆除基岩面以上的护孔管。



- 1-护孔管(可内置潜水泵);
- 2-钻孔;
- 3-减压排水管(外包 60 目尼  
龙网);
- 4-多孔聚氨酯泡沫透水塑  
料滤层;
- 5-封口板;
- 6-需挖除的砂砾层;
- 7-风化岩层

图 22-12 减压排水孔设置示意图(单位: mm)

#### (4) 岩层内降排水设计原则

- a. 只有与透水的裂隙、断层相连通的排水孔才具有降排水作用。因此, 排水孔应穿越裂隙、断层。
- b. 裂隙水从排水孔中集中排除, 缩短了渗透路径, 加大了渗透比降、渗透速度, 容易从裂隙、断层及软弱夹层中夹带出细小颗粒。因此, 应严格控制排水孔的滤层质量。
- c. 排水出口处应为低压渗流区。排水孔与出口处之间不应有凹陷和扭曲, 以防淤塞。
- d. 围护结构及基坑底部以下的溶洞宜事先充填或布设排水孔引流。

#### 3. 轻型井点降水设计

##### (1) 轻型井点设备

轻型井点设备主要由井点管(包括过滤器)、集水总管、抽水泵、真空泵等组成。

- a. 井点管: 一般采用直径为 38-50mm 的钢管制作, 长度为 5.0-9.0m, 整根或分节组成。
- b. 过滤器: 采用与井点管相同规格的钢管制作, 一般长度为 0.8-1.5m。
- c. 集水总管: 采用内径为 100-127mm 的钢管制作, 长度为 50.0-80.0m, 分节组成, 每节长度为 4.0-6.0m。每个集水总管与 40-60 个井点管采用软管连接。
- d. 抽水设备: 主要由真空泵(或射流泵)、离心泵和集水箱组成。

轻型井点系统如图 22-13 所示。

##### (2) 轻型井点降水设计

- a. 每根井点管的最大允许出水量  $q_{\max}$

$$q_{\max} = 120r_w L \sqrt{k} \quad (22-28)$$

式中,  $q_{\max}$  为单根井点管的允许最大出水量( $\text{m}^3/\text{d}$ );  $r_w$  为滤水管的半径(m);  $L$  为滤水管的长度(m);  $k$  为疏干层的渗透系数(m/d)。

- b. 井点管设计数量  $n$

$$n \geq Q/q_{\max} \quad (22-29)$$

- c. 井点管的长度  $L$

$$L = D + h_w + s + l_w + \frac{1}{\alpha} r_q \quad (22-30)$$

式中,  $D$  为地面以上的井点管长度(m);  $h_w$  为初始地下水埋深(m);  $l_w$  为滤水管长度(m);  $r_q$  为井点管排距。单排井点  $\alpha = 4$ ; 双排或环形井点  $\alpha = 10$ 。井点其余符号意义同前。



$$\text{半封闭或敞开型疏干降水: } n = \frac{Q}{q_w} \quad (22-32)$$

式中,  $q_w$  为单口管井的流量( $\text{m}^3/\text{d}$ );  $t$  为基坑开挖前的预降水时间( $\text{d}$ ); 其余符号意义同前。

#### b. 管井深度

管井深度与基坑开挖深度、场地水文地质条件、基坑围护结构的性质等密切相关。一般情况下, 管井底部埋深应大于基坑开挖深度 6.0m。

#### c. 管井的最大允许出水量 $q_{\max}$

根据中华人民共和国行业标准《建筑与市政降水工程技术规范》(JGJ/T111-98)的规定, 可按下列式计算管井的最大允许出水量:

$$q_{\max} = \frac{24l'd}{\alpha'} \quad (22-33)$$

式中,  $l'$  为过滤器淹没段长度( $\text{m}$ );  $d$  为过滤器外径( $\text{mm}$ );  $\alpha'$  为经验系数, 如表 22-4 所示。

经验系数  $\alpha'$  的取值

表 22-4

含水层渗透系数 $k$ ( $\text{m}/\text{d}$ )	$\alpha'$	
	含水层厚度 $\geq 20\text{m}$	含水层厚度 $< 20\text{m}$
2-5	100	130
5-15	70	100
15-20	50	70
30-70	30	50

在降水设计中, 必须保证  $q_w < q_{\max}$ 。

### 6. 真空管井降水设计

对于以低渗透性的黏性土为主的弱含水层中的疏干降水, 一般可利用降水管井采用真空降水, 目的在于提高土层中的水力梯度、促进重力水的释放。

在降水过程中, 为保证疏干降水效果, 一般要求真空管井内的真空度不小于 65.0kPa。真空管井疏干降水设计与普通管井疏干降水的方法相同。

### 7. 电渗井点降水设计

在渗透系数小于 0.1m/d 的饱和粘土、粉质粘土中进行疏干降水, 特别是淤泥和淤泥质粘土中的降水, 使用单一的轻型井点或喷射井点降水, 往往达不到预期降水的目的, 为了提高降水效果, 除了利用井点系统的真空产生抽汲作用外, 还可配合采用电渗法, 在施加电势的条件下, 利用粘土的电渗现象和电泳作用, 促使毛细水分子的流动, 可以达到较好的降水效果。

#### (1) 电渗井点降水系统

所谓电渗井点, 一般与轻型井点或喷射井点结合使用, 即利用轻型井点或者喷射井点管本身作为阴极, 以金属棒(钢筋、钢管、铝棒等)作为阳极, 通入直流电(采用直流发电机或直流电焊机)后, 带有负电荷的土粒即向阳极移动(即电泳作用), 而带有正电荷的水则向阴极方向移动集中, 产生电渗现象, 如图 22-15 所示。在电渗与井点管内的真空双重作用下, 强制粘土中的水由井点管快速排出, 井点管连续抽水, 从而地下水位逐渐降低。



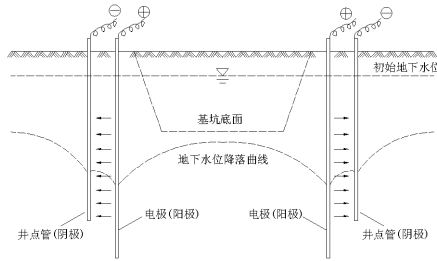


图 22-15 电渗井点降水示意图

## (2) 电渗井点降水设计

电渗现象是一个十分复杂的过程，在电渗井点降水设计与施工前，必须了解土层的渗透性和导电性，以期达到合理的降水设计和预期的降水效果。

### a. 基坑涌水量计算与井点布置

基坑涌水量的计算、井点布置与轻型井点降水和喷射井点降水相同。

### b. 电极间距

电极间距，即井点管(阴极)与电极(阳极)之间的距离，可按式(22-34)确定：

$$L = \frac{1000V}{I\rho\varphi} \quad (22-34)$$

式中， $L$  为井点管与电极之间的距离(m)； $V$  为工作电压，一般为 40~110V； $I$  为电极深度内被输干土体的单位面积上的电流，一般为 1~2A/m<sup>2</sup>； $\rho$  为土的比电阻( $\Omega\cdot\text{cm}$ )，宜根据实际土层测定； $\varphi$  为电极系数，一般为 2~3。

### c. 电渗功率

确定电渗功率常用的公式为：

$$N = \frac{VIF}{1000}, \quad F = L_0 \cdot h \quad (22-35)$$

式中， $N$  为电渗功率(kw)； $F$  为电渗幕面积(m<sup>2</sup>)； $L_0$  为井点系统周长(m)； $h$  为阳极深度(m)。

## 22.5 承压水降水设计

### 22.5.1 承压水降水概述

在大多数自然条件下，软土地区的承压水压力与其上覆土层的自重应力相互平衡或小于上覆土层的自重应力。当基坑开挖到一定深度后，导致基坑底面下的土层自重应力小于下伏承压水压力，承压水将会冲破上覆土层涌向坑内，坑内发生突水、涌砂或涌土，即形成所谓的基坑突涌。基坑突涌往往具有突发性，导致基坑围护结构严重损坏或倒塌、坑外大面积地面下沉或塌陷、危及周边建(构)筑物及地下管线的安全、施工人员伤亡等。基坑突涌引起的工程事故是无可挽回的灾难性事故，经济损失巨大，社会负面影响严重。

在深基坑工程施工中，必须十分重视承压水对基坑稳定性的重要影响。由于基坑突涌的发生是承压水的高水头压力引起的，通过承压水减压降水降低承压水位(通常亦称之为“承压水头”)，达到降低承压水压力的目的，已成为最直接、最有效的承压水控制措施之一。在基坑工程施工前，应认真分析工程场地的承压水特性，制定有效的承压水降水设计方案。在基坑工程施工中，应采取有效的承压水降水措施，将承压水位严格控制在安全埋深以下。

#### 1. 承压水降水概念设计

所谓“承压水降水概念设计”，是指综合考虑基坑工程场区的工程地质与水文地质条件、基坑围护结构特征、周围环境的保护要求或变形限制条件等因素，提出合理、可行的承压水降水设计理念，便于后续的降水设计、施工与运行等工作。

在承压水降水概念设计阶段,需根据降水目的含水层位置、厚度、隔水帷幕的深度、周围环境对工程降水的限制条件、施工方法、围护结构的特点、基坑面积、开挖深度、场地施工条件等一系列因素,综合考虑减压井群的平面布置、井结构以及井深等。

### (1) 坑内减压降水

对于坑内减压降水而言,不仅将减压降水井布置在基坑内部,而且必须保证减压井过滤器底端的深度不超过隔水帷幕底端的深度,才是真正意义上的坑内减压降水。坑内井群抽水后,坑外的承压水需绕过隔水帷幕的底端,绕流进入坑内,同时下部含水层中的水垂向经坑底流入基坑,在坑内承压水位降到安全埋深以下时,坑外的水位降深相对下降较小,从而因降水引起的地面变形也较小。

如果仅将减压降水井布置在坑内,但降水井过滤器底端的深度超过隔水帷幕底端的深度,伸入承压含水层下部,则抽出的大量地下水来自于隔水帷幕以下的水平径向流,不但使基坑外侧承压含水层的水位降深增大,降水引起的地面变形也增大,失去了坑内减压降水的意义,成为“形式上的坑内减压降水”。换言之,坑内减压降水必须合理设置减压井过滤器的位置,充分利用隔水帷幕的挡水(屏蔽)功效,以较小的抽水流量,使基坑范围内的承压水水头降低到设计标高以下,并尽量减小坑外的水头降深,以减少因降水而引起的地面变形。

满足以下条件之一时,应采用坑内减压降水方案:

a. 当隔水帷幕部分插入减压降水承压含水层中,隔水帷幕进入承压含水层顶板以下的长度  $L$  不小于承压含水层厚度的  $1/2$  (如图 22-16(a)所示),或不小于  $10.0\text{m}$  (如图 22-16(b)所示),隔水帷幕对基坑内外承压水渗流具有明显的阻隔效应;

b. 当隔水帷幕进入承压含水层,并进入承压含水层底板以下的半隔水层或弱透水层中,隔水帷幕已完全阻断了基坑内外承压含水层之间的水力联系(如图 22-16(c)所示)。

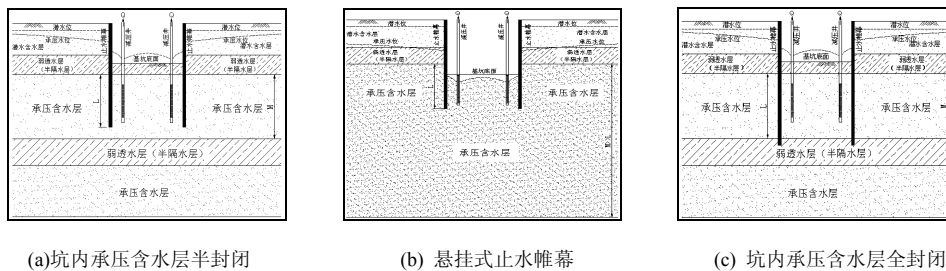


图 22-16 坑内降水结构示意图

如图 22-16 所示,隔水帷幕底端均已进入需要进行减压降水的承压含水层顶板以下,并在承压含水层形成了有效隔水边界。由于隔水帷幕进入承压含水层顶板以下长度的差异以及减压降水井结构的差异性,在群井抽水影响下形成的地下水渗流场形态也具有较大差别。地下水运动不再是平面流或以平面流为主的运动,而是形成为三维地下水非稳定渗流场,渗流计算时应考虑含水层的各向异性,无法应用解析法求解,必须借助三维数值方法求解。

### (2) 坑外减压降水

对于坑外减压降水而言,不仅将减压降水井布置在基坑围护体外侧,而且要使减压井过滤器底端的深度不小于隔水帷幕底端的深度,才能保证坑外减压降水效果。

如果坑外减压降水井过滤器埋藏深度小于隔水帷幕深度,则坑内地下水需绕过隔水帷幕底端后才能进入坑外降水井内,抽出的地下水大部分来自于坑外的水平径向流,导致坑内水位下降缓慢或降水失效,不但使基坑外侧承压含水层的水位降深增大,降水引起的地面变形也增大。换言之,坑外减压降水必须合理设置减压井过滤器的位置,减小隔水帷幕的挡水(屏蔽)功效,以较小的抽水流量,使基坑范围内的承压水水头降低到设计标高以下,尽量减小坑外水头降深与降水引起的地面变形。

满足以下条件之一时,隔水帷幕未在降水目的承压含水层中形成有效的隔水边界,宜

优先选用坑外减压降水方案：

- 1) 当隔水帷幕未进入下部降水目的承压含水层中(如图 22-17(a)所示)；
- 2) 隔水帷幕进入降水目的承压含水层顶板以下的长度  $L$  远小于承压含水层厚度，且不超过 5.0m(如图 22-17(b)所示)。

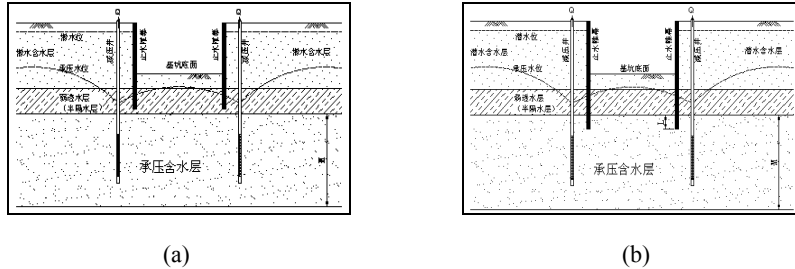


图 22-17 坑外降水结构示意图

(a) 坑内外承压含水层全连通

(b) 坑内外承压含水层几乎全连通

如图 22-17 所示，隔水帷幕底端未进入需要进行减压降水的承压含水层顶板以下或进入含水层中的长度有限，未在承压含水层形成人为的有效隔水边界。换言之，隔水帷幕对减压降水引起的承压水渗流的影响极小，可以忽略不计。因此，可采用承压水井流理论的解析解公式，计算、预测承压水渗流场内任意点的水位降深，但其适用条件应与现场水文地质实际条件基本一致。

### (3) 坑内-坑外联合减压降水

当现场客观条件不能完全满足前述关于坑内减压降水或坑外减压降水的选用条件时，可综合考虑现场施工条件、水文地质条件、隔水帷幕特征以及基坑周围环境特征与保护要求等，选用合理的坑内-坑外联合减压方案。

## 2. 承压水降水运行控制

承压水降水运行控制应满足两个基本要求：其一，通过承压水降水运行，应能保证将承压水位控制在安全埋深以下；其二，从保护基坑周边环境的角度考虑，在承压水位降深满足基坑稳定性要求的前提下，应避免过量抽水、水位降深过大。

降水运行控制方法简述如下：

(1) 应严格遵守“按需减压降水”的原则，综合考虑环境因素、安全承压水位埋深与基坑施工工况之间的关系，确定各施工区段的阶段性承压水位控制标准，制定详细的减压降水运行方案。

(2) 降水运行过程中，应严格执行减压降水运行方案。如基坑施工工况发生变化，应及时调整或修改降水运行方案。

(3) 所有减压井抽出的水应排到基坑影响范围以外或附近的天然水体中。现场排水能力应考虑到所有减压井（包括备用井）全部启用时的排水量。每个减压井的水泵出口应安装水量计量装置和单向阀。

(4) 减压井全部施工完成、现场排水系统安装完毕后，应进行一次群井抽水试验或减压降水试运行，对电力系统（包括备用电源）、排水系统、井内抽水泵、量测系统、自动监控系统等进行一次全面检验。

(5) 降水运行应实行不间断的连续监控。对于重大深基坑工程，应考虑采用水位自动监测系统对承压水位实行全程跟踪监测，使降水运行过程中基坑内、外承压水位的变化随时处于监控之中。

(6) 降水运行正式开始前 1 周内应测定环境背景值，监测内容包括基坑内外的初始承压水位、基坑周边相邻地面沉降初值、保护对象的初始变形以及基坑围护体变形等，与基坑设计要求重复的监测项目可利用基坑监测资料。降水运行过程中，应及时整理监测资料，绘制

相关曲线, 预测可能发生的问题并及时处理。

(7) 当环境条件复杂、降水引起基坑外地表沉降量大于环境控制标准时, 可采取控制降水幅度、人工地下水回灌或其他有效的环境保护措施。

(8) 停止降水后, 应对降水管井采取可靠的封井措施。

### 22.5.2 承压水降水设计与计算

#### 1. 基坑内安全承压水位埋深

基坑内的安全承压水位埋深必须同时满足基坑底部抗渗稳定与抗突涌稳定性要求, 按下式计算:

$$D \geq H_0 - \frac{H_0 - h}{f_w} \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w}, \dots \begin{cases} h \leq H_d \\ H_0 - h > 1.50 \text{ m} \end{cases} \quad (22-36a)$$

或

$$D \geq h + 1.0, \quad (H_0 - h \leq 1.50 \text{ m}) \quad (22-36b)$$

式中,  $D$  为坑内安全承压水位埋深(m);  $H_0$  为承压含水层顶板埋深的最小值(m);  $h$  为基坑开挖面深度(m);  $H_d$  为基坑开挖深度(m);  $f_w$  为承压水分项安全系数, 取值为 1.05~1.2;  $\gamma_s$  为坑底至承压含水层顶板之间的土的天然重度的层厚加权平均值( $\text{kN/m}^3$ );  $\gamma_w$  为地下水重度。

#### 2. 单井最大允许涌水量

单井出水能力取决于工程场地的水文地质条件、井点过滤器的结构、成井工艺和设备能力等。承压水降水管井的出水量可按式估算:

$$Q = 130\pi r_w l \sqrt{k} \quad (22-37)$$

式中,  $Q$  为单井涌水量( $\text{m}^3/\text{d}$ );  $l$  为过滤管长度(m);  $r_w$  为过滤管半径(m); 其余符号意义同前。

#### 3. 渗流解析法设计计算

在井点数量、井点间距(排列方式)、井点管埋深初步确定后, 可根据以下公式预测基坑内抽水影响最小处的水位降深值  $s$ :

$$s = \frac{0.366Q}{kM} \left[ \lg R - \frac{1}{n} \lg(x_1 x_2 \cdots x_n) \right] \quad (22-38)$$

式中,  $Q$  为基坑涌水量( $\text{m}^3/\text{d}$ );  $n$  为管井总数(口);  $x_1 x_2 \cdots x_n$  为计算点到各管井中心距离(m)。

#### 4. 渗流数值法设计计算

由于天然含水层厚度往往是不均匀的, 含水介质往往是多层的非匀质的和各向异性的, 地下空间中存在着复杂的障碍物, 以及水文地质天窗的存在, 使得解析法不适用(得不到解析解), 常用数值分析方法求得近似解。虽然数值法只能求出计算域内有限个点某时刻的近似解, 但这些解完全能满足工程精度要求。渗流数值法主要包括有限差分法、有限元法等。

渗流数值分析的第一步, 需要建立降水影响范围内的三维非稳定地下水渗流数学模型。渗流数学模型通式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = \frac{E}{T} \frac{\partial h}{\partial t}, & (x, y, z) \in \Omega \\ h(x, y, z, t)|_{t=0} = h_0(x, y, z), & (x, y, z) \in \Omega \\ h(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z, t), & (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = \varphi(x, y, z, t), & (x, y, z) \in \Gamma_2 \\ \frac{\partial h}{\partial n} + \alpha h \Big|_{\Gamma_3} = \beta, & (x, y, z) \in \Gamma_3 \end{cases} \quad (22-39)$$

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

$S$  为储水系数;  $S_y$  为给水度;  $M$  为承压含水层厚度(m);  $B$  为潜水含水层的地下水饱和厚度(m);  $k_{xx}$ 、 $k_{yy}$ 、 $k_{zz}$  分别为各向异性主方向渗透系数;  $h$  为点(x,y,z)处  $t$  时刻的水位值(m);  $W$  为源汇项(1/d);  $h_0$  为计算域初始水位值(m);  $h_1$  为第一类边界的水位值(m);  $S_s$  为储水率(1/m);  $t$  为抽水累计时间(d);  $\varphi$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  为已知函数;  $\Omega$  为计算域;  $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$ 、 $\Gamma_3$  分别为第一、第二、第三类渗流边界。

渗流数值分析的第二步, 采用有限差分法或有限元法, 将上述渗流数学模型转换为渗流数值模型, 以此为依据, 编制计算程序(形成计算软件), 计算、预测降水引起的地下水位时空分布。

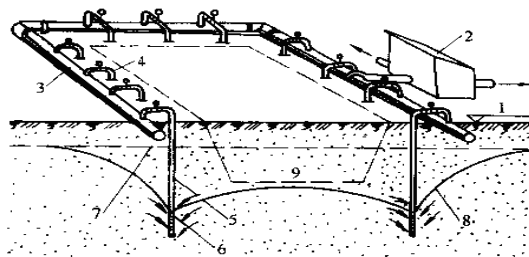
渗流数值分析的第三步, 对整个渗流区进行离散, 即建立降水影响区域的物理模型。

渗流数值分析的第四步, 应用渗流数值分析计算程序或软件, 输入相关计算参数, 对所建立的研究区域的物理模型进行渗流计算、分析、预测。

## §22.6 基坑降水井施工

### 22.6.1 轻型井点施工

轻型井点系统降低地下水位的过程如图 22-18 所示, 即沿基坑周围以一定的间距埋入井点管(下端为滤管), 在地面上用水平铺设的集水总管将各井点管连接起来, 在一定位置设置真空泵和离心泵。当开动真空泵和离心泵时, 地下水在真空吸力的作用下经滤管进入管井, 然后经集水总管排出, 从而降低水位。



1-地面; 2-水泵房; 3-总管; 4-弯联管; 5-井点管; 6-滤管; 7-初始地下水位; 8-水位降落曲线; 9-基坑

图 22-18 轻型井点降低地下水位全貌图

#### 1. 井点成孔施工

(1) 水冲法成孔施工: 利用高压水流冲开泥土, 冲孔管依靠自重下沉。砂性土中冲孔所需水流压力为 0.4~0.5MPa, 粘性土中冲孔所需水流压力为 0.6~0.7MPa。

(2) 钻孔法成孔施工: 适用于坚硬地层或井点紧靠建筑物, 一般可采用长螺旋钻机进行成孔施工。

(3) 成孔孔径一般为 300mm, 不宜小于 250mm。成孔深度宜比滤水管底端埋深大 0.5m 左右。

#### 2. 井点管埋设

(1) 水冲法成孔达到设计深度后, 应尽快减低水压、拔出冲孔管, 向孔内沉入井点管并在井点管外壁与孔壁之间快速回填滤料(粗砂、砾砂)。

(2) 钻孔法成孔达到设计深度后, 向孔内沉入井点管, 在井点管外壁与孔壁之间回填滤料(粗砂、砾砂)。

(3) 回填滤料施工完成后, 在距地表约 1m 深度内, 采用粘土封口捣实以防止漏气。

(4) 井点管埋设完毕后, 采用弯联管(通常为塑料软管)分别将井点管连接到集水总管上。

### 22.6.2 喷射井点施工

#### 1. 井点管埋设与使用

(1) 喷射井点管埋设方法与轻型井点相同, 为保证埋设质量, 宜用套管法冲孔加水及压缩空气排泥, 当套管内含泥量经测定小于 5% 时下井管及灌砂, 然后再拔套管。对于深度大于 10m 的喷射井点管, 宜用吊车下管。下井管时, 水泵应先开始运转, 以便每下好一根井点管, 立即与总管接通(暂不与回水总管连接), 然后及时进行单根井点试抽排泥, 井管内排出的泥浆从水沟排出, 测定井管内真空度, 待井管出水变清后地面测定真空度不宜小于 93.3kPa。

(2) 全部井点管沉没完毕后, 将井点管与回水总管连接并进行全面试抽, 然后使工作水循环, 进行正式工作。各套进水总管均应用阀门隔开, 各套回水管应分开。

(3) 为防止喷射器损坏, 安装前应对喷射井管逐根冲洗, 开泵压力不宜大于 0.3 MPa, 以后逐步加大开泵压力。如发现井点管周围有翻砂、冒水现象, 应立即关闭井管后进行检修。

(4) 工作水应保持清洁, 试抽 2d 后, 应更换清水, 此后视水质污浊程度定期更换清水, 以减轻对喷嘴及水泵叶轮的磨损。

#### 2. 施工注意事项

(1) 利用喷射井点降低地下水位, 扬水装置的质量十分重要。如果喷嘴的直径加工不精确, 尺寸加大, 则工作水流量需要增加, 否则真空度将降低, 影响抽水效果。如果喷嘴、混合室和扩散室的轴线不重合, 不但降低真空度, 而且由于水力冲刷导致磨损较快, 需经常更换, 影响降水运行的正常、顺利进行。

(2) 工作水要干净, 不得含泥砂及其它杂物。尤其在工作初期更应注意工作水的干净, 因为此时抽出的地下水可能较为混浊, 如不经过很好的沉淀即用作工作水, 会使喷嘴、混合室等部位很快地磨损。如果扬水装置已磨损应及时更换。

(3) 为防止产生工作水反灌现象, 在滤管下端最好增设逆止球阀。当喷射井点正常工作时, 蕊管内产生真空, 出现负压, 钢球托起, 地下水吸入真空室; 当喷射井点发生故障时, 真空消失, 钢球被工作水推压, 堵塞蕊管端部小孔, 使工作水在井管内部循环, 不致涌出滤管产生倒涌现象。

#### 3. 喷射井点的运转和保养

喷射井点比较复杂, 在其运转期间常需进行监测以便了解装置性能, 进而确定因某些缺陷或措施不当时而采取的的必要措施。在喷射井点运转期间, 需注意以下方面:

(1) 及时观测地下水位变化。

(2) 测定井点抽水量, 通过地下水量的变化, 分析降水效果及降水过程中出现的问题。

(3) 测定井点管真空度, 检查井点工作是否正常。出现故障的现象包括:

a. 真空管内无真空, 主要原因是井点蕊管被泥砂填住, 其次是异物堵住喷嘴;

b. 真空管内无真空, 但井点抽水通畅, 是由于真空管本身堵塞和地下水位高于喷射器;

c. 真空出现正压(即工作水流出), 或井管周围翻砂, 这表明工作水倒灌, 应立即关闭阀门, 进行维修。

常见的故障及其检查方法包括:

- (1) 喷嘴磨损和喷嘴夹板焊缝裂开;
- (2) 滤管、蕊管堵塞;
- (3) 除测定真空度外, 类同于轻型井点, 可通过听、摸、看等方法来检查。

排除故障的方法包括:

- (1) 反冲法: 遇有喷嘴堵塞、蕊管、过滤器淤积, 可通过内管反冲水疏通, 但水冲时间不宜过长;
- (2) 提起内管, 上下左右转动、观测真空度变化, 真空度恢复了则正常;
- (3) 反浆法: 关住回水阀门, 工作水通过滤管冲土, 破坏原有滤层, 停冲后, 悬浮的滤砂层重新沉淀, 若反复多次无效, 应停止井点工作;
- (4) 更换喷嘴: 将内管拔出, 重新组装。

### 22.6.3 降水管井施工

#### 1. 现场施工工艺流程

降水管井施工的整个工艺流程包括成孔工艺和成井工艺, 具体又可以划分以下过程: 准备工作→钻机进场→定位安装→开孔→下护口管→钻进→终孔后冲孔换浆→下井管→稀释泥浆→填砂→止水封口→洗井→下泵试抽→合理安排排水管路及电缆电路→试抽水→正式抽水→水位与流量记录。

#### 2. 成孔工艺

成孔工艺也即管井钻进工艺, 指管井井身施工所采用的技术方法、措施和施工工艺过程。管井钻进方法习惯上一般分为: 冲击钻进、回转钻进、潜孔锤钻进、反循环钻进、空气钻进等。选择降水管井钻进方法时, 应根据钻进地层的岩性和钻进设备等因素进行选择, 一般以卵石和漂石为主的地层, 宜采用冲击钻进或潜孔锤钻进, 其他第四系地层宜采用回转钻进。

钻进过程中为防止井壁坍塌、掉块、漏失以及钻进高压含水、气层时可能产生的喷涌等井壁失稳事故, 需采取井孔护壁措施。可根据下列原则, 采用护壁措施:

(1) 保持井内液柱压力与地层侧压力(包括土压力和水压力)的平衡, 是维系井壁稳定的基本方法。对于易坍塌地层, 应注意经常维持和调整压力平衡关系。冲击钻进时, 如果能以保持井内水位比静止水位高 3~5m, 可采用水压护壁。

(2) 遇水不稳定地层, 选用的冲洗介质类型和性能应能够避免水对地层的影响。

(3) 当其他护壁措施无效时, 可采用套管护壁。

(4) 冲洗介质是钻进时用于携带岩屑、清洗井底、冷却和润滑钻具及保护井壁的物质。常用的冲洗介质有清水、泥浆、空气、泡沫等。钻进对冲洗介质的基本要求是:

- a. 冲洗介质的性能应能在较大范围内调节, 以适应不同地层的钻进;
- b. 冲洗介质应有良好的散热能力和润滑性能, 以延长钻具的使用寿命, 提高钻进效率;
- c. 冲洗介质应无毒, 不污染环境;
- d. 配置简单, 取材方便, 经济合理。

#### 3. 成井工艺

管井成井工艺是指成孔结束后, 安装井内装置的施工工艺, 包括探井、换浆、安装井管、填砾、止水、洗井、试验抽水等工序。这些工序完成的质量直接影响到成井后井损失的大小、成井质量能否达到设计要求的各项指标。如成井质量差, 可能引起井内大量出砂或井的出水量大大降低, 甚至不出水。因此, 严格控制成井工艺中的各道工序是保证成井质量的关键。

### (1) 探井

探井是检查井深和井径的工序，目的是检查井深是否圆直，以保证井管顺利安装和滤料厚度均匀。探井工作采用探井器进行，探井器直径应大于井管直径，小于孔径 25mm；其长度宜为 20~30 倍孔径。在合格的井孔内任意深度处，探井器应均能灵活转动。如发现井身质量不符要求，应立即进行修整。

### (2) 换浆

成孔结束、经探井和修整井壁后，井内泥浆黏度很大并含有大量岩屑，过滤管进水缝隙可能被堵塞，井管也可能沉不到预计深度，造成过滤管与含水层错位。因此，井管安装前，应进行换浆。

换浆是以稀泥浆置换井内的稠泥浆的施工工序，不应加入清水，换浆的浓度应根据井壁的稳定情况和计划填入的滤料粒径大小确定，稀泥浆一般黏度为 16~18s，密度为 1.05~1.10g/cm<sup>3</sup>。

### (3) 安装井管

安装井管前需先进行配管，即根据井管结构设计，进行配管，并检查井管的质量。井管沉设方法应根据管材强度、沉设深度和起重设备能力等因素选定，并宜符合下列要求：

- a. 提吊下管法，宜用于井管自重（或浮重）小于井管允许抗拉力和起重的安全负荷；
- b. 托盘（或浮板）下管法，宜用于井管自重（或浮重）超过井管允许抗拉力和起重的安全负荷；
- c. 多级下管法，宜用于结构复杂和沉设深度过大的井管。

### (4) 填砾

填砾前的准备工作包括：1)井内泥浆稀释至密度小于 1.10（高压含水层除外）；2)检查滤料的规格和数量；3)备齐测量填砾深度的测锤和测绳等工具；4)清理井口现场，加井口盖，挖好排水沟。

滤料的质量包括以下方面：1)滤料应按设计规格进行筛分，不符合规格的滤料不得超过 15%；2)滤料的磨圆度应较好，棱角状砾石含量不能过多，严禁以碎石作为滤料；3)不含泥土和杂物；4)宜用硅质砾石。

滤料的数量按下式计算：

$$V = 0.785(D^2 - d^2)L\alpha \quad (22-40)$$

式中， $V$  为滤料数量(m<sup>3</sup>)； $D$  为填砾段井径(m)； $d$  为过滤管外径(m)； $L$  为填砾段长度(m)； $\alpha$  为超径系数，一般为 1.2~1.5。

填砾的方法应根据井壁的稳定性和冲洗介质的类型和管井结构等因素确定。常用的方法包括静水填砾法、动水填砾法和抽水填砾法。

### (5) 洗井

为防止泥皮硬化，下管填砾之后，应立即进行洗井。管井洗井方法较多，一般分为水泵洗井、活塞洗井、空压机洗井、化学洗井和二氧化碳洗井以及两种或两种以上洗井方法组合的联合洗井。洗井方法应根据含水层特性、管井结构及管井强度等因素选用，简述如下：

- a. 松散含水层中的管井在井管强度允许时，宜采用活塞洗井和空压机联合洗井。
- b. 泥浆护壁的管井，当井壁泥皮不易排除，宜采用化学洗井与其他洗井方法联合进行。
- c. 碳酸盐岩类地区的管井宜采用液态二氧化碳配合六偏磷酸钠或盐酸联合洗井。
- d. 碎屑岩、岩浆岩地区的管井宜采用活塞、空气压缩机或液态二氧化碳等方法联合洗井。

### (6) 试抽水

管井施工阶段试抽水主要目的不在于获取水文地质参数，而是检验管井出水量的大小，



确定管井设计出水量和设计动水位。试抽水类型为稳定流抽水试验，下降次数为1次，且抽水量不小于管井设计出水量；稳定抽水时间为6~8h；试抽水稳定标准为，在抽水稳定的延续时间内井的出水量、动水位仅在一定范围内波动，没有持续上升或下降的趋势，即可认为抽水已经稳定。

抽水过程中需考虑自然水位变化和其他干扰因素影响。试抽水前需测定井水含砂量。

#### (7) 管井竣工验收质量标准

降水管井竣工验收是指管井施工完毕，在施工现场对管井的质量进行逐井检查和验收。

管井验收结束后，均须填写“管井验收单”，这是必不可少的验收文件，有关责任人应签字。根据降水管井的特点和我国各地降水管井施工的实际情况，参照我国《供水管井技术规范》(GB50296-99)关于供水管井竣工验收的质量标准规定，降水管井竣工验收质量标准主要应有下述四个方面：

a. 管井出水量：实测管井在设计降深时的出水量应不小于管井设计出水量，当管井设计出水量超过抽水设备的能力时，按单位储水量检查。当具有位于同一水文地质单元并且管井结构基本相同的已建管井资料时，新建管井的单位出水量应与已建管井的单位出水量接近。

b. 井水含砂量：管井抽水稳定后，井水含砂量应不超过1/10000~1/20000（体积比）

c. 井斜：实测井管斜度应不大于1°。

d. 井管内沉淀物：井管内沉淀物的高度应小于井深的5‰。

#### 22.6.4 真空管井施工

真空降水管井施工方法与降水管井施工方法相同，详见前述。真空降水管井施工尚应满足以下要求：

(1) 宜采用真空泵抽气集水，深井泵或潜水泵排水。

(2) 井管应严密封闭，并与真空泵吸气管相连。

(3) 单井出水口与排水总管的连接管路中应设置单向阀。

(4) 对于分段设置滤管的真空降水管井，应对开挖后暴露的井管、滤管、填砾层等采取有效封闭措施。

(5) 井管内真空度不宜小于0.065Mpa，宜在井管与真空泵吸气管的连接位置处安装高灵敏度的真空压力表监测。

#### 22.6.5 电渗井点施工

电渗井点埋设程序一般是先埋设轻型井点或喷射井点管，预留出布置电渗井点阳极的位置，待轻型井点降水不能满足降水要求时，再埋设电渗阴极，以改善降水性能。电渗井点(阴极)埋设与轻型井点、喷射井点埋设方法相同。阳极埋设可用75mm旋叶式电钻钻孔埋设，钻进时加水和高压空气循环排泥，阳极就位后，利用下一钻孔排出泥浆倒灌填充孔，使阳极与土接触良好，减少电阻，以利电渗。如深度不大，亦可用锤击法打入。钢筋埋设必须垂直，严禁与相邻阴极相碰，以免造成短路，损坏设备。电渗井点施工方法简述如下：

1. 阳极用 $\phi 50\sim 70\text{mm}$ 的钢管或 $\phi 20\sim 25\text{mm}$ 的钢筋或铝棒，埋在井点管内侧，并成平行交错排列。阴阳极的数量宜相等，必要时阳极数量可多于阴极数量。

2. 井点管与金属棒，即阴、阳极之间的距离，当采用轻型井点时，为0.8~1.0m；当采用喷射井点时，为1.2~1.5m。阳极外露于地面的高度为200~400mm，入土深度比井点管深500mm，以保证水位能降到要求深度。

3. 阴、阳极分别用BX型铜芯橡皮线、扁钢、 $\phi 10$ 钢筋或电线连成通路，接到直流发电机或直流电焊机的相应电极上。

4. 通电时, 工作电压不宜大于 60V。土中通电的电流密度宜为  $0.5 \sim 1.0\text{A}/\text{m}^2$ 。为避免大部分电流从土表面通过、降低电渗效果, 通电前应清除井点管与金属棒间地面上的导电物质, 使地面保持干燥, 如涂一层沥青绝缘效果更好。

5. 通电时, 为消除由于电解作用产生的气体积聚于电极附近、土体电阻增大、增加电能消耗, 宜采用间隔通电法, 每通电 24h, 停电 2—3h。

6. 在降水过程中, 应对电压、电流密度、耗电量及预设观测孔水位等进行量测、记录。

## 22.7 减小与控制降水引起地面沉降的措施

基坑开挖过程中, 因降水不当造成周边环境破坏的案例屡见不鲜: 小则延误工期, 增加造价; 严重时可能引起重大伤亡事故。例如, 上海地铁 M8 号线某基坑工程, 其围护地下连续墙厚 800mm、深 27.3m, 基坑开挖深度 16.0m, 承压含水层顶板埋深 29.7m~32.0m, 初始承压水位埋深 3.4m。因受降水等施工作业影响, 部分地下管线监测点、水位监测点的监测值相继超过报警值, 基坑开挖后水位持续下降, 最大水位降深达 4.37m, 地表监测点处的最大累积地面沉降达 93mm, 并引起基坑周围较大范围的地面沉降。又如上海市东湖商务楼工程, 地处老城区, 基坑紧邻某电影院, 开挖施工时虽只在一边设井点管, 并在影院旁增设回灌井, 但由于井点降水效果差, 回灌水量小且不理想, 井点出水浑浊带走大量粘粒, 致使影院发生严重沉降, 累计沉降量达 66mm, 砖砌墙体破损断裂, 影院被迫停映进行加固修复, 直接工程费 10 余万元, 商务楼施工亦被迫停工, 损失巨大。因此有必要减小与控制降水引起的地面沉降。

### 22.7.1 减小与控制降水引起地面沉降的措施

基坑降水导致基坑四周水位降低、土中孔隙水压力转移、消散, 不仅打破了土体原有的力学平衡, 有效应力增加; 而且水位降落漏斗范围内, 水力梯度增加, 以体积力形式作用在土体上的渗透力增大。二者共同作用的结果是, 坑周土体发生沉降变形。但在高水位地区开挖深基坑又离不开降水措施, 因此一方面要保证开挖施工的顺利进行, 另一方面又要防范对周围环境的不利影响, 即采取相应的措施, 减少降水对周围建筑物及地下管线造成的影响。

1. 在降水前认真做好对周围环境的调研工作

(1) 查明场地的工程地质及水文地质条件, 即拟建场地应有完整的地质勘探资料, 包括地层分布, 含水层、隔水层和透镜体情况, 以及其与水体的联系和水体水位变化情况, 各层土体的渗透系数, 土体的孔隙比和压缩系数等。

(2) 查明地下贮水体, 如周围的地下古河道、古水池之类的分布情况, 防止出现井点和地下贮水体穿通的现象。

(3) 查明上、下水管线, 煤气管道、电话、电汛电缆, 输电线等各种管线的分布和类型, 埋设的年代和对差异沉降的承受能力, 考虑是否需要预先采取加固措施等等。

(4) 查清周围地面和地下建筑物的情况, 包括这些建筑物的基础型式, 上部结构型式, 在降水区中的位置和对差异沉降的承受能力。降水前要查清这些建筑物的历年沉降情况和目前损伤的程度, 是否需要预先采取加固措施等等。

2. 合理使用井点降水, 尽可能减少对周围环境的影响

降水必然会形成降水漏斗, 从而造成周围地面的沉降, 但只要合理使用井点, 可以把这类影响控制在周围环境可以承受的范围之内。

(1) 首先在场地典型地区进行的相应的群井抽水试验, 进行降水及沉降预测。做到按需降水, 严格控制水位降深。

(2) 防范抽水带走土层中的细颗粒。在降水时要随时注意抽出的地下水是否有混浊现象。抽出的水中带走细颗粒不但会增加周围地面的沉降, 而且还会使井管堵塞、井点失效。

为此首先应根据周围土层的情况选用合适的滤网,同时应重视埋设井管时的成孔和回填砂滤料的质量。如上海地区,粉砂层大都呈水平向分布,成孔时应尽量减少搅功,过滤管设在砂性土层中。必要时可采用套管法成孔,回填砂滤料应认真按级配配制。

(3) 适当放缓降水漏斗线的坡度。在同样的降水深度前提下,降水漏斗线的坡度越平缓,影响范围越大,而产生的不均匀沉降就越小,因而降水影响区内的地下管线和建筑物受损伤的程度也愈小。根据地质勘探报告,把滤管布置在水平向连续分布的砂性土中可获得较平缓的降水漏斗曲线,从而减少对周围环境的影响。

(4) 井点应连续运转,尽量避免间歇和反复抽水。轻型井点和喷射井点在原则上应埋在砂性土层内。对砂性土层,除松砂以外,降水所引起的沉降量是很小的,然而倘若降水间歇和反复进行,现场和室内试验均表明每次降水都会产生沉降。每次降水的沉降量随着反复次数的增加而减少,逐渐趋向于零,但是总的沉降量可以累积到一个相当可观程度。因此,应尽可能避免反复抽水。

(5) 基坑开挖时应避免产生坑底流砂引起的坑周地面沉陷。如图 22-19 所示,在基坑底面下有一薄粘性土不透水层,其下又有相当厚度的粉砂层。若降水时井点仅设在基底以下,未穿入含水砂层,那么这层薄粘土层会承受上、下两面的水压力差  $\Delta P$ ,作用于粘土层下侧,产生向上的压力,若此压力大于该土层重量,便会造成坑底涌砂现象。对于该种情况,需将降水井管穿入粘土层下面的含水砂层中,释放下卧粉砂层中的承压水头,保证坑底稳定。

(6) 如果降水现场周围有湖、河、浜导贮水体时,应考虑在井点与贮水体间设置挡土帷幕,以防范井点与贮水体穿通,抽出大量地下水而水位不下降,反而带出许多土颗粒,甚至产生流砂现象,妨碍深基坑工程的开挖施工。

(7) 在建筑物和地下管线密集等对地面沉降控制有严格要求的地区开挖深基坑,宜尽量采用坑内降水方法,即在围护结构内部设置井点,疏干坑内地下水,以利开挖施工。同时,需利用支护体本身或另设挡土帷幕切断坑外地下水的涌入。要求挡水墙具有足够的入土深度,一般需较井点滤管下端深 1.0m 以上。这样即不妨碍开挖施工,又可大大减轻对周围环境的影响。

### 3. 降水场地外侧设置隔水帷幕,减小降水影响范围

在降水场地外侧有条件的情况下设置一圈隔水帷幕,切断降水漏斗曲线的外侧延伸部分,减小降水影响范围,将降水对周围的影响减小到最低程度,如图 22-20 所示。

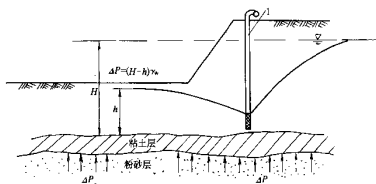
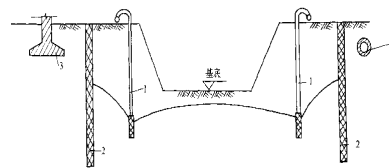


图 22-19 坑底下伏承压含水层引发坑底涌砂



1-井点管; 2-隔水帷幕; 3-坑外浅基础、地下管线

图 22-20 设置隔水帷幕减小不利影响

常用的隔水帷幕包括深层水泥搅拌桩、砂浆防渗板桩、树根桩隔水帷幕、钻孔咬合桩、钢板桩、地下连续墙等。

### 4. 降水场地外缘设置回灌水系统

降水对周围环境的不利影响主要是由于漏斗形降水曲线引起周围建筑物和地下管线基础的不均匀沉降造成的,因此,在降水场地外缘设置回灌水系统,保持需保护部位的地下水位,可消除所产生的危害。

回灌水系统包括回灌井以及回灌砂沟、砂井等。

## 22.7.2 地下水回灌技术

### 1. 回灌井点

在降水井点和要保护的地区之间设置一排回灌井点，在利用降水井点降水的同时利用回灌井点向土层内灌入一定数量的水，形成一道水幕，从而减少降水以外区域的地下水流失，使其地下水位基本不变，达到保护环境的目的。

回灌井点的布置和管路设备等与抽水井点相似，仅增加回灌水箱、闸阀和水表等少量设备。抽水井点抽出的水通到贮水箱，用低压送到注水总管，多余的水用沟管排出。另外回灌井点的滤管长度应大于抽水井点的滤管，通常为2~2.5m，井管与井壁间回填中粗砂作为过滤层。

由于回灌水时会有  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  沉淀物、活动性的锈蚀及不溶解的物质积聚在注水管内，在注水期内需不断增加注水压力才能保持稳定的注水量。对注水期较长的大型工程可以采用涂料加阴极防护的方法，在贮水箱进出口处设置滤网，以减轻注水管被堵塞的对象。回灌过程中应保持回灌水的清洁。

### 2. 回灌砂沟、砂井

在降水井点与被保护区域之间设置砂井、砂沟作为回灌通道。将井点抽出来的水适时适量地排入砂沟，再经砂井回灌到地下，从而保证被保护区域地下水水位的基本稳定，达到保护环境的目的。实践证明其效果是良好的。

需要说明的是，回灌井点、回灌砂井或回灌砂沟与降水井点的距离一般不宜小于6m，以防降水井点仅抽吸回灌井点的水，而使基坑内水位无法下降，失去降水的作用。砂井或回灌井点的深度应按降水水位曲线和土层渗透性来确定，一般应控制在降水曲线以下1m。回灌砂沟应设在透水性较好的土层内。

### 3. 回灌管井

回灌管井的回灌方法主要有真空回灌和压力回灌两大类。后者又可分为常压回灌和高压回灌两种。不同的回灌方法其作用原理、适用条件、地表设施及操作方法均有所区别。

#### (1) 真空回灌法

真空回灌适用条件为：1) 适用于地下水位较深(静水位埋深>10m)、渗透性良好的含水层；2) 真空回灌对滤网的冲击力较小，适用于滤网结构耐压、耐冲击强度较差以及使用年限较长的老井；3) 对回灌量要求不大的井。

#### (2) 压力回灌法

常压回灌利用自来水的管网压力(0.1~0.2MPa)产生水头差进行回灌。高压回灌在常压回灌装置的基础上，使用机械动力设备(如离心泵)加压，产生更大的水头差。

常用回灌利用自来水管网压力进行回灌，压力较小。高压回灌利用机械动力对回灌水源加压，压力可以自由控制，其大小可根据井的结构强度和回灌量而定。因此，压力回灌的适用范围很大，特别是对地下水位较高和透水较差的含水层来说，采用压力回灌的效果较好。由于压力回灌对滤水管网眼和含水层的冲击力较大，宜适用于滤网强度较大的深井。

#### (3) 回灌水质要求

如果回灌水量充足，但水质很差，回灌后使地下水遭受污染或使含水层发生堵塞。地下水回灌工作必须与环境保护工作密切相结合，在选择回灌水源时必须慎重考虑水源的水质。

回灌水源对水质的基本要求为：1) 回灌水源的水质要比原地下水的水质略好，最好达到饮用水的标准；2) 回灌水源回灌后不会引起区域性地下水的水质变坏和受污染；3) 回灌水源中不含使井管和滤水管腐蚀的特殊离子和气体；4) 采用江河及工业排放水回灌，必须先进行净化和预处理，达到回灌水源水质标准后方可回灌。

## §22.8 基坑降水工程实例

## 【实例 1】上海五月花生活广场深基坑工程降水(疏干降水以及承压水降水)

## 1. 工程概况

上海五月花生活广场位于普善路以东、普善横路以北、芷江西路以南、大统路以西所围地块内。基坑开挖面积 15851m<sup>2</sup>，开挖深度为 11.75~16.50m，局部开挖深度达 19.42m。围护结构由地下连续墙(埋深 33.00m)以及钻孔灌注桩组成(桩长 23m，其外侧为三轴水泥土搅拌桩止水帷幕，深度 29.00m)。

## 2. 场区工程地质与水文地质条件

工程场地的地基土分布如表 22-4 所示。

地基土特征简表

表 22-4

土层序	土名	层底标高(m)	土层序	土名	层底标高
①	填土	2.63~0.86	⑥	粉质粘土	-25.52~
② <sub>3-1</sub>	粘质粉土	0.74~-0.40	⑦ <sub>1</sub>	砂质粉土	-31.46~
② <sub>3-2</sub>	砂质粉土	-2.37~-4.02	⑦ <sub>2</sub>	粉砂	-38.62~
② <sub>3-3</sub>	砂质粉土	-8.36~-15.41	⑧ <sub>1</sub>	粘土	-50.06~
④ <sub>1</sub>	淤泥质粘	-13.36~-15.20	⑧ <sub>2</sub>	粉质粘土	-69.76~
④ <sub>2</sub>	砂质粉土	-18.31~-23.14	⑨	中粗砂	-85.59
⑤ <sub>1</sub>	粉质粘土	-21.32~-23.66	⑩	粉质粘土	(未钻穿)
⑤ <sub>2</sub>	砂质粉土	-28.34~-43.06			

备注 场地自然地面标高为+3.30m。

本场地地质条件复杂，浅部和深部土层均有较大变化，其土层分布特性大致可以分为 3 个区 (A、B、C 区)，如图 22-21 所示。

A 区：古河道分布区，缺失⑥及⑦层。②<sub>3</sub>砂质粉土、④<sub>2</sub>砂质粉土及⑤<sub>2</sub>砂质粉土层连通。⑤<sub>2</sub>砂质粉土层底板埋深约为 43.00m。

B 区：古河道分布区，缺失⑥层。④<sub>2</sub>砂质粉土、⑤<sub>2</sub>砂质粉土、⑦<sub>2</sub>粉砂层连通，且上部有较厚②<sub>3</sub>砂质粉土层，局部地区②<sub>3</sub>砂质粉土与④<sub>2</sub>砂质粉土连通。⑦层底板埋深约为 43.00m 左右。

C 区：正常地层分布区，局部地区含④<sub>2</sub>砂质粉土，⑦<sub>1</sub>层砂质粉土顶板埋深约为 28.00m，⑦<sub>2</sub>粉砂层底板埋深约为 43.00m。

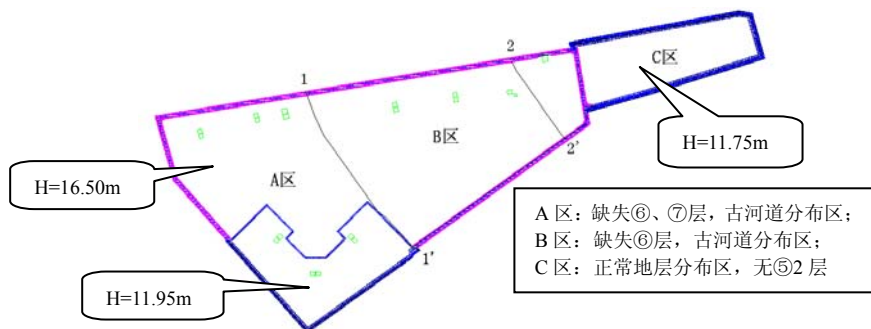


图 22-21 地质分区图

## 3. 降水设计

根据基坑工程特点和场区地质条件，以及周边环境对降水的严格要求，经过三维地下水非稳定渗流与地面沉降的计算与预测分析后，采用坑内降水方案，具体内容如下：

- (1) 正常地层分布区、基坑开挖深度 16.50m：布置 3 口减压井，4 口疏干井；
- (2) 古河道分布区、基坑开挖深度 11.95~16.50m：布置 47 口混合井，29 口疏干井；

(3) 正常地层分布区、基坑开挖深度 11.75m：布置 12 口疏干井。减压井及混合井结构参数详见表 22-5。

降水井结构参数

表 22-5

降水井类别	数量	井径(mm)	管径(mm)	滤管埋深(m)	井深(m)
减压井	3	600	219	30-38	39
混合井 1	39	600	219	4-14, 18-25	26
混合井 2	5	600	219	4-10, 13-25	26
混合井 3	3	600	219	4-14, 18-27	28

#### 4. 地下水控制效果

基坑内微承压水位一直控制在安全埋深以下，保证了基坑施工安全。开挖面以上土体干燥，保证坑内施工的顺利进行。

本工程将大部分减压井与疏干井合并为混合井，达到浅层疏干降水与下伏承压水减压降水的目的，既节约造价，又便于坑内施工作业，其工程经验为：

- (1) 当浅层潜水与下伏承压水相互连通时，可采用混合井降水；
- (2) 当下伏承压水水位设计降深不小于浅层潜水水位设计降深时，可采用混合井降水；
- (3) 过滤管分段设置以避免基础底板，便于后期封井及保证封井质量。

### 【实例 2】上海地铁 4#董家渡隧道修复深基坑工程降水(承压水降水)

#### 1. 工程概况

上海市地铁 4#董家渡隧道修复工程，南侧紧临 22 层临江花苑大厦，北侧为董家渡路，西部为中山南路，东侧为黄浦江。深基坑总长约 263.0m，宽为 21.0~22.5m，开挖深度为 38.0~40.9m。整个基坑由内隔墙分割为东、中、西三个基坑（如图 22-22 所示），采用地下连续墙作围护结构兼止水帷幕，地下连续墙深度为 65.00m，厚度为 1.20m。

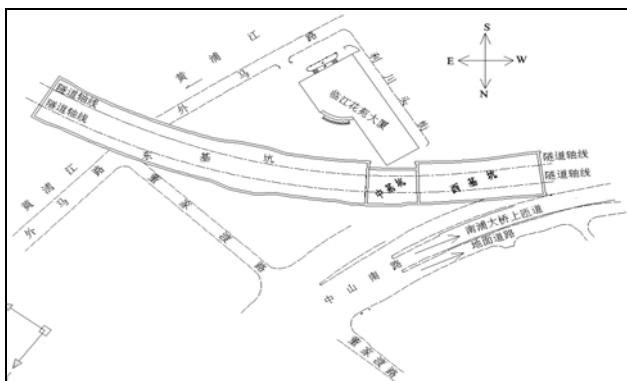


图 22-22 基坑平面位置图

#### 2. 场区工程地质与水文地质条件

工程场地的地基土分布如表 22-6 及图 22-23 所示。

本工程场地地下伏⑦、⑨、(11)层分别为上海地区的第I、II、III承压含水层。由于缺失第⑧、⑩层粘性土，在本场地内及其周围的第I、II、III承压含水层相互连通，形成1个总厚度达118.2m的复合承压含水层组，其渗透性及地下水贮量极为丰富。

地基土特征简表 表 22-6

层序	土名	层底埋深
①	填土	3.30
②	粘质粉土	16.10
④	淤泥质粘	18.90
⑤	粉质粘土	24.20
⑥	粉质粘土	27.70
⑦ <sub>1</sub>	砂质粉土	37.00
⑦ <sub>2f</sub>	粉细砂	68.40
⑨ <sub>1f</sub>	粉细砂	84.00
⑨ <sub>2x</sub>	含砾细砂 (未钻穿)	
(11)	含砾中粗	

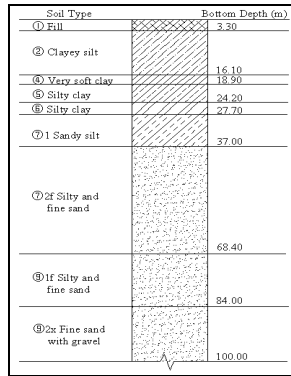


图 22-23 地质柱状图

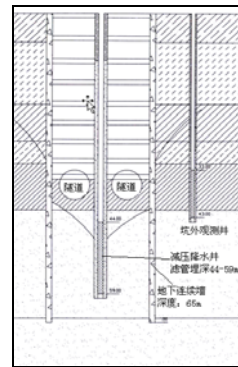


图 22-24 降水井结构剖面

### 3. 承压水减压降水设计

根据基坑工程特点和场区地质条件，以及周边环境对降水的严格要求，经过三维地下水非稳定渗流与地面沉降的计算与预测分析后，采用坑内减压降水方案，具体内容如下：

- (1) 基坑内布置 56 口井(东坑内 28 口，中坑内 6 口，西坑内 12 口)，其中 46 口为抽水井，10 口为备用井兼坑内承压水位观测井。
- (2) 降水井深度为 60.0m，过滤器长度为 15.0m，其顶端埋深为 44.0m，底端埋深为 59.0m，过滤器底端埋深小于地下连续墙脚埋深 6.0m，井结构如图 22-24 所示。
- (3) 坑内井群以较小抽水量抽水，预测坑内承压水位降低到设计要求的 42.0m 深度处，水位降深达到 33.0m；预测坑外承压水位降深约为 5.0m，预测基坑外侧降水引起的最大地面沉降量小于 20mm。

### 4. 承压水降水与地面沉降控制效果

上海地铁 4#董家渡隧道修复工程始于 2005 年 01 月，至 2007 年 12 月结束。基坑降水始于 2006 年 3 月，至 2007 年 7 月结束，承压水降水与地面沉降效果如下：

- (1) 基坑内承压水位一直控制在基坑开挖面以下，保证了基坑施工安全。当基坑开挖深度达到 38.0-40.9m，坑内最大承压水位埋深达到 44.0m，水位降深达到 35.0m。
- (2) 根据承压水位监测资料，当基坑内承压水位降深达到 35.0m 时，基坑外观测井内的最大承压水位降深约为 4.0m。设计阶段预测坑外最大承压水位降深约为 5.0m，计算结果与实际水位降深基本一致。
- (3) 根据地面沉降监测资料，基坑外侧相邻地面沉降量较小。部分监测点处的地面沉降监测值如表 22-7 所示。基坑周围地面沉降的预测计算值与监测值较为接近。

地面沉降监测数据

表 22-7

监测点平面位置	地面沉降量(mm)	监测时间
中山南路	12.11	2006.7.18
董家渡路	10.25	2006.7.28
临江花苑大厦	14.22 (已扣除工程修复前沉降量)	2006.6.22

### 【实例 3】武汉国际会展中心地下商场深基坑工程降水(疏干降水以及承压水降水)

#### 1. 工程概况

武汉国际会展中心地下商场深基坑北临解放大道，南临京汉大道，东临游子乡大厦，西邻武汉商场。基坑周长为 920.60m，开挖面积为 40173m<sup>2</sup>，开挖深度为：四周 11.50~12.85m，

中部 15.70m。基坑采用连锁灌注式地下连续墙及锚束支护。

2. 场区工程地质与水文地质条件

场区位于长江一级冲洪积阶地，地基土分布如表 22-8 所示，具有明显的二元结构特征。上层滞水储存于填土层中，承压水储存于砂、砾及砂卵石层中。

地基土特征简表 表 22-8

土层序	土名	层底埋深	土层序号	土名	层底埋深
①	填土	1.90	④ <sub>2a</sub>	粉质黏土	40.60
③ <sub>2</sub>	黏土、粉质黏土	7.70	④ <sub>3</sub>	中粗砂夹砾卵	51.00
③ <sub>5</sub>	粉质黏土、粉土、粉砂	17.80	⑤	砂卵石	54.00
④ <sub>1</sub>	粉细砂	39.60	ZD <sub>a-1</sub>	泥质页岩	

3. 隔水帷幕与基坑降水设计

(1) 隔水帷幕为地下连续墙。墙深比较了 23.00m、38.00m 及 54.00m 三个方案，基坑渗水量相应为 21000m<sup>3</sup>/d、18500m<sup>3</sup>/d 及 554m<sup>3</sup>/d。地下连续墙深度 23.00m 为维持基坑支护体系稳定所需深度，已大于③<sub>5</sub>层的层底埋深，与地下连续墙深度为 38.00m 相比，相应的基坑渗流量仅增加了 13.5%。基于上述分析与比较，最终采用平均埋深为 24.50m、厚度为 0.80m 的地下连续墙，作为基坑围护墙兼隔水帷幕。

(2) 当基坑底部至承压含水层顶板之间的土层重量不足以抵抗坑底突涌时，需采用减压降水措施，降低承压水水位。本基坑最终开挖面已进入承压含水层顶板以下，则需采用疏干降水与减压降水措施。在基坑内挖除隔水层(③<sub>2</sub>层)、开挖面进入承压含水层前，采用提前抽降地下水位方法，疏干③<sub>5</sub>层中的层间承压水，并采用减压降水方法降低下部承压水位，防止坑底产生突涌。

(3) 降水管井按非完整井设计，有利于减少抽水量及对周边环境的影响。基坑内周边布置了 47 口深度为 38.00m 的降水管井(滤水管位于粉细砂④<sub>1</sub>层内)，单井抽水量为 43.2m<sup>3</sup>/h；基坑中部布置了 8 口深度为 45.00m 的降水管井(滤水管位于中粗砂夹砾卵石④<sub>3</sub>层内)，单井抽水量为 59.4m<sup>3</sup>/h。另布置 16 口观测井，用于监控基坑降水效果。

4. 地下水控制效果

基坑降水分两个阶段进行。当基坑开挖深度为 11.90~12.85m，基坑降水处于第一阶段，开启坑内周边的 47 口降水管井降水。当继续开挖、基坑深度为 15.70m(局部挖深达 19.00m)，基坑降水处于第二阶段，开启坑内的 55 口降水管井降水。降水持续时间为 24 个月，维持期地下水位分布如图 22-25 所示，实测基坑周边地面的最大沉降量为 40mm。

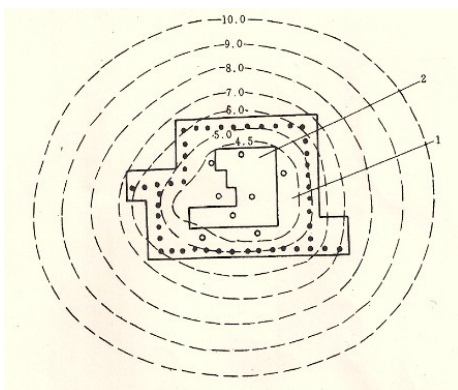


图 22-25 武汉国际会展中心深基坑降水维持期地下水位等值线图  
(地面高程 21.50m)

- 深度为 38.00m 的降水管井 47 口    ○ 深度为 45.00m 的降水管井 8 口
- 1—基坑开挖深度 11.90~12.85m; 2—基坑开挖深度 15.70m



**【名词术语】**

- 抽水试验 pumping test  
水文地质参数 hydrogeologic parameter  
稳定流 steady groundwater flow  
非稳定流 transient groundwater flow  
潜水 phreatic groundwater  
潜水含水层 phreatic aquifer  
承压水 confined groundwater  
承压含水层 confined aquifer  
隔水层、不透水层 impermeable layer, impervious bed  
半隔水层、弱透水层 Aquitard  
基坑降水 dewatering for deep excavation  
疏干降水 dewatering to decrease the water content of excavated soils  
减压降水 dewatering to decrease the water head of confined aquifers  
降水井点 dewatering well point  
降水管井 dewatering well, deep well  
地面沉降 land subsidence  
地下水回灌 groundwater recharge

**【参考文献】**

- [1] 朱恒银, 张文生, 王玉贤. 控制地面沉降回灌井施工技术研究 [J]. 探矿工程. 2005 年增刊: 200-205
- [2] 姚天强, 石振华. 基坑降水手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- [3] 吴林高. 工程降水设计施工与基坑渗流理论 [M]. 北京: 人民交通出版社 2003.6
- [4] 薛禹群, 地下水动力学原理 [M]. 地质出版社 1986
- [5] 赵志缙. 简明深基坑工程设计施工手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000
- [6] 石振华, 李传尧. 城市地下水工程与管理手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993
- [7] 供水水文地质勘察规范 (GB50027-2001) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2001
- [8] 供水管井技术规范 (GB50296-99) [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999
- [9] 建筑与市政降水工程技术规范 (JGJ/T 111-98) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
- [10] 张育芾等. 供水管井设计施工指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984
- [11] 缪俊发, 吴林高, 王璋群. 大型深井点降水引起地面沉降的研究 [J]. 岩土工程学报, 1991, 13 (3): 60-64
- [12] 缪俊发, 吴林高. 抽水与注水引起的变形机理 [J]. 上海地质, 1996(1):10-15.
- [13] 缪俊发, 吴林高. 抽水与注水引起的土层变形特征及其应力应变本构律 [J]. 岩土工程技术, 1994(3):37-42
- [14] 供水管井设计、施工及验收规范 CJJ10-86[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986
- [15] 建筑基坑支护技术规程 (JGJ120-99) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
- [16] 曹剑峰 迟宝明 王文科等. 专门水文地质学 (第三版) [M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [17] 常士骠. 工程地质手册 (第三版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992
- [18] 水文测井工作规范 (DZ/T0181-1997) [S]. 中华人民共和国地质矿产部, 1999
- [19] 骆祖江, 刘昌军, 瞿成松等. 深基坑降水疏干过程中三维渗流场数值模拟研究 [J]. 水文地

- 质工程地质, 2005.5: 48-53
- [20] 骆祖江,李朗,曹惠宾等.复合含水层地区深基坑降水三维渗流场数值模拟-以上海环球金融中心基坑降水为例 [J]. 工程地质学报,2006.01.
- [21] 冯晓腊,熊文林,胡涛等.三维水-土耦合模型在深基坑降水计算中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (7): 1196-1202
- [22] 陈幼雄.井点降水设计与施工 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2004.1