

第三篇 地下工程施工降水

第 8 章 地下水赋存及运动的基本理论	4
8.1 岩土中水的存在形式.....	4
一、气态水.....	4
二、结合水.....	4
三、重力水.....	5
四、毛细水.....	5
五、固态水.....	6
六、矿物水.....	6
8.2 岩土的水理性质.....	6
一、容水性.....	6
二、持水性.....	6
三、给水性.....	7
四、透水性.....	7
五、毛细性.....	7
8.3 地下水的赋存	8
一、包气带与饱水带.....	8
二、含水层与隔水层.....	8
三、不同埋藏条件的地下水	9
四、水文地质单元与水文地质边界	10
五、不同岩土介质中的地下水.....	12
六、【实例】北京城近郊区水文地质概况	14
8.4 地下水的运移	16
一、地下水的渗流.....	16
二、渗流的基本定律.....	18
8.5 流向井的地下水运动.....	20
一、地下水的稳定井流.....	20
二、地下水的非稳定井流	22
三、地下水流向直线边界附近完整井的运动	32
四、井群干扰的计算.....	37
8.6 地下水的渗透破坏作用	38
一、流砂.....	38
二、管涌.....	38
三、突涌.....	39
第 9 章 地下水对地铁等地下工程施工的影响.....	39
9.1 设置有止水帷幕的情况.....	40
9.2 不设置止水帷幕的情况.....	40
第 10 章 地下工程施工降水方案与设计计算	44
10.1 施工降水的特点、作用、原则和方法.....	44
一、施工降水的特点.....	44
二、施工降水的作用.....	46
三、施工降水方案制定的原则.....	46

四、施工降水方法的选择	46
10.2 制定施工降水方案应掌握的资料	46
一、地质、水文地质资料	47
二、基坑支护结构设计资料	47
三、工程场地周边的环境状况资料	47
10.3 水文地质勘察的内容及要求	47
一、勘察孔布置	48
二、抽水试验	48
三、水文地质参数计算	49
10.4 施工降水设计计算	52
一、降水参数的确定	52
二、基坑涌水量计算	53
三、单井出水能力计算	57
四、降水井数量及间距的确定	57
五、水位降深检验	58
第 11 章 地下工程施工降水技术	59
11.1 管井降水	59
一、管井降水及自渗降水的工作特性及适用条件	59
二、管井设计	60
三、管井施工	61
四、管井降水维护管理	66
五、工程实例	66
11.2 辐射井降水	71
一、辐射井降水原理及特点	71
二、辐射井设计	71
三、辐射井施工	72
四、工程实例	77
11.3 轻型井点降水	81
一、轻型井点降水原理及适用条件	81
二、轻型井点种类及特点	81
三、轻型井点布置	82
四、轻型井点施工	82
五、轻型井点降水维护管理	85
11.4 喷射井点降水	85
一、喷射井点降水原理及适用条件	85
二、喷射井点施工	86
11.5 真空管井降水	88
一、真空管井降水系统的工作原理及适用条件	88
二、真空管井降水设计	88
三、施工工艺	88
四、抽水系统的自动控制	89
五、工程实例	89
11.6 明排降水	93
一、明排降水的特点及适用条件	93

二、明排降水施工	93
11.7 降水监测与管理	93
一、水位观测	93
二、水量观测	94
三、出水含砂量监测	94
四、建构筑物及地面沉降监测	94
第 12 章 地下工程施工降水引起的环境问题及对策	96
12.1 施工降水引发的地面沉降	96
一、地面沉降的发生机制	96
二、地质环境模式与地面沉降	97
三、地层的固结特性与地面沉降	98
四、地面沉降预测计算	98
五、降水引发地面沉降的一般规律	100
12.2 地下水回灌	100
一、回灌井的布设	100
二、回灌水质要求	101
三、管井回灌技术	101
四、回灌过程中经常出现的问题及处理方法	103
12.3 降水与水资源的再利用	105

第8章 地下水赋存及运动的基本理论

8.1 岩土中水的存在形式

地下水是赋存于地表以下岩土空隙中的水，主要来源于大气降水、冰雪融水、地表水等，经土壤渗入地下而成。地下水与大气水、地表水是统一的，共同组成地球水圈，地下水在岩土空隙中运移，参与全球性陆地、海洋之间的水循环。

地下水是地质环境的组成部分之一，能影响环境的稳定性，它往往是滑坡、地面沉降和地面塌陷发生的主要原因。地下水对地下工程的影响也很大：地基土中的水能降低土的承载力，基坑涌水会威胁工程的安全施工，地下水对地下工程结构有渗透、侵蚀作用，因而需进行结构防水处理。

岩土空隙中的水，根据其存在形式可分为气态水、结合水、重力水、毛细水和固态水。

一、气态水

气态水即水蒸汽，它和空气一起分布于包气带岩土空隙中。它来源于大气中的水汽与地下水的蒸发。气态水可随空气一起流动，也可独自由绝对湿度大的地方向绝对湿度小的地方迁移。夏季白天的气温高于岩土的温度，于是水汽将由大气向岩土空隙中运动、聚集、并凝结成为凝结水，夜晚则相反。此外，在年常温带以下，深部的温度总是高于上部，水蒸发成气态水后总是向上运动，然后聚集凝结成为液态水。气态水在一定的温度、压力下与液态水相互转化，二者保持动平衡，因而对岩土中水的重新分配有很大意义，但气态水不能被直接利用，也不能被植物吸收。

二、结合水

由于静电引力作用而吸附在岩土颗粒上的水称结合水。岩土颗粒及裂隙表面均带有电荷，水又是偶极体，由于静电吸引，颗粒表面能够吸附水分子，形成结合水。根据库伦定律，电场强度与距离平方成反比，离颗粒越近、吸附的水分子越多，而随着距离的增大，吸附的水分子将越来越少，以至到达某一距离，水分子将不受静电引力作用，而只受重力的作用，水便由结合水变为重力水或毛细水。由于颗粒表面对水分子的吸引力自内向外减弱，结合水的物理性质也自内向外发生变化。其中最靠近颗粒表面、受静电引力最大的那部分结合水称强结合水，其外层受静电引力较小的叫弱结合水。

强结合水又称吸着水，是最靠近颗粒表面的结合水，其厚度相当于几个到几百个水分子厚度。水分子和颗粒表面之间的静电引力很大，可达 $1.01325 \times 10^5 \text{ pa}$ ，故结合水分子排列紧密整齐，具有与固体相似的性质，其平均密度为 2 g/cm^3 ，冰点为 -78°C ，具有较大的粘滞性、抗剪强度和弹性，不能溶解盐类，不能被植物吸收，不能自由运动，只有加热到 $105 \sim 110^\circ\text{C}$ ，使其成为气态水时才能将它与岩土分开。

弱结合水又称薄膜水。处于强结合水的外层，其厚度说法不一，从几十到几千个水分子厚。特点是排列不如强结合水规则和紧密，密度约 $1.3 \sim 1.774 \text{ g/cm}^3$ ，冰点仍低于 0°C ，其粘滞性、抗剪强度和弹性均小于强结合水，且越往外层相差越大，外层有少量溶解盐类的能力，能被植物吸收，一般不受重力作用，不能自由移动，但可由水膜厚处向水膜薄处移动，直到两者相等为止。弱结合水的这一性质对岩土中地下水的分布有一定的意义，它能使水分由湿度大处向湿度小处转移。

弱结合水在某些情况下能够传递静水压力。弱结合水在包气带分布不连续，故不能传递静水压力，但在饱水带中，若对其施加一个外力，使之大于其抗剪强度，便能够传递静水压力。如粘土是不透水层，但在一定的水头差下，若所受的静水压力大于其抗剪强度，粘土层也能发生越流渗透变为透水层。

结合水的含量决定于所受静电引力的大小，静电引力又决定颗粒表面积的大小，即岩土颗粒的大小，岩土颗粒越细小，表面积就越大，吸附的结合水就越多。如细颗粒的粘土所含强结合水与弱结合水量分别达到18%和45%，而粗颗粒的砂，分别只有0.5%和2%。可见，含水介质粒径越大，所含结合水量越少，大都为重力水。

三、重力水

岩土空隙全部被充满，在重力作用下运动的液态水称为重力水。结合水层以外的水分子，其自身重力大于颗粒表面的吸引力，便可凝聚成液态水滴充满岩土的空隙，在自身重力影响下运移。重力水可以被植物所吸收，可以被人类利用，是水文地质学研究的主要对象，对土木工程的影响也非常大。

位于结合水外层，靠近固体颗粒的那部分重力水，仍然要受静电引力的影响，水分子排列比较整齐，运动比较规则，水流表现为层流运动，空隙中央远离颗粒表面的那一部分水分子，完全不受静电引力的作用，只受重力的作用，流速比较快，水分子的运动轨迹比较杂乱，可以出现紊流运动。

四、毛细水

由于毛细力的作用而充满岩土毛细空隙中的水称毛细水。岩土的毛细孔隙直径小于1mm，毛细裂隙宽度小于0.25mm，就如同细小的玻璃管一样，可以发生毛细现象。即在表面张力作用下水可沿重力水面上升一定的距离，形成毛细上升带。

毛细上升最大高度与毛细孔隙大小有关，毛细孔隙越大，毛细上升高度越小。在砾石中实际上不存在毛细上升高度，而粘土的毛细上升高度最大，可达6~12m。岩土的矿物成分也能影响毛细上升高度，因为不同的矿物与水之间联系的力量不同，若颗粒的粒径相同，都是0.25~0.1mm，在云母砂中，水能够上升65.8cm，石英砂上升56cm，而长石砂只能上升49.2cm。此外温度可以使水的粘滞性减小，故温度升高，将使最大上升高度减小。

毛细水充满了全部孔隙，能作垂直方向的运动，能够有条件地传递静水压力，能被植物吸收，按其性质来说接近于重力水。同时，它又有结合水的某些性质，如冰点较低，必须低于0℃才能冻结等。毛细孔隙的直径越小，其冻结温度越低。

毛细水按其形成特点，可以分为以下三种类型：

1、支持毛细水。由于毛细力的作用，水沿毛细孔隙上升一定高度，形成毛细水带，其下部有地下水面支持，故称支持毛细水（图8-1a）。

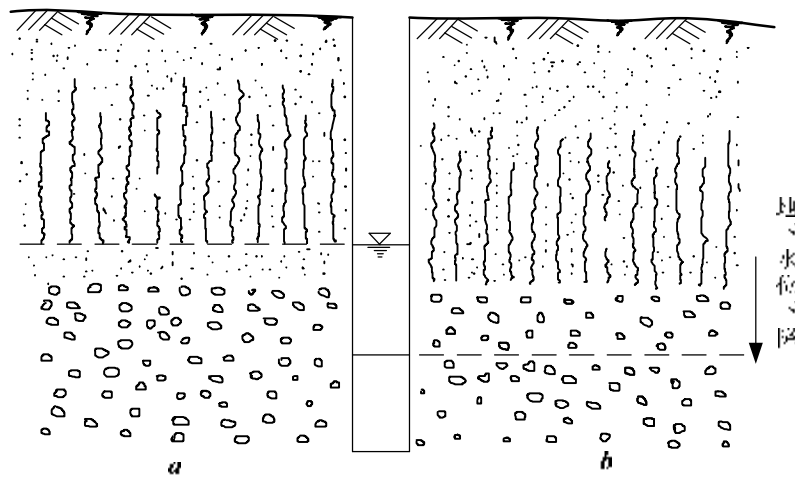


图 8-1 支持毛细水和悬挂毛细水

2、悬挂毛细水。呈悬挂帷幕状。砾石和细砂交互成层时，当接受补给后地下水位可上升到细砂层中形成支持毛细水。如果一段时间内，没有补给，水位将下降到下面的砾石层中，砾石孔径大于毛细孔隙，在其中不能形成毛细水，使保留在细砂层中的毛细水与砾石层中的重力水面不连接，因而形成悬挂毛细水（图8-1b）。

3、孔角毛细水。在颗粒和颗粒之间的接触处或狭窄地带，孔隙直径小于毛细孔隙，也可形成弯曲液面，将水滞留在孔角间，呈个别点滴状态，这种水叫孔角毛细水。

毛细水对岩土中地下水的分布有很大意义，土壤盐渍化与毛细作用密切相关。对于气候炎热、蒸发强

烈的干旱地区，地下水补给较少且埋藏不深时，水分不断被蒸发带走，盐分不断积聚沉淀而形成土壤盐渍化。此外，土木工程也需要考虑防止毛细水造成的破坏作用。

五、固态水

以固体冰形式存在于岩土空隙中的水称固态水。当岩土温度低于水的冰点0℃时，岩土空隙中的重力水便冻结成为固态冰。冻结岩土中并非所有的水都呈固体状态，结合水尤其是强结合水，其冰点较低仍可保持液态。固态水分布于多年冻结区或季节冻结区。我国内蒙、黑龙江与青藏高原的某些地区，可形成多年冻土和季节性冻土，其岩土含有固态水。

六、矿物水

矿物水是存在于矿物晶体内部或晶格之间的水，又称化学结合水，包括沸石水、结晶水和结构水等。矿物水只有当高温加热以后，才能从矿物中析出。

8.2 岩土的水理性质

岩土的水理性质是指与水分的储容和运移有关的岩土性质，指水进入岩土空隙后，岩土空隙所表现出的与地下水的贮存和运移有关的一些物理性质。在岩土的孔隙中，依次分布着强结合水、弱结合水和重力水。空隙大小不同，各种形式水所占的比例不同。空隙越大，重力水所占比例越大，空隙越小，结合水所占比例便越大。当空隙的半径小于结合水的水层厚度时，则空隙中全是结合水，不含重力水。而在砂砾石，大裂隙或大溶穴等大空隙中，结合水的数量甚微，几乎全部为重力水占据。因此水渗入岩土后，因空隙大小不同，岩土中水的存在形式也不同，岩土能够容纳、保持、释放或允许水透过的性能也有所不同，而具有不同的容水性、持水性、给水性与透水性等水理性质。

一、容水性

容水性是指岩土能够容纳一定水量的性能。衡量岩土容水性大小的指标叫容水度，即岩土所能容纳的水的体积和岩土总体积之比，用小数或百分数表示。岩土所以能够容纳水，是由于岩土具有空隙。岩土的孔隙体积即岩土所能容纳水的体积，故在数值上容水度等于松散沉积物的孔隙度、基岩的裂隙率和碳酸盐岩的溶穴率。但对于具有膨胀性的粘土矿物，如蒙脱石等，因其结晶格架为层束结构，层与层之间活动性很大，水进入层间，体积要膨胀若干倍，故其容水度将大于孔隙度。

二、持水性

持水性是指重力释水后，岩土能够保持住一定水量的性能。在重力作用下，岩土能够保持住的水，主要是结合水和部分角毛细水或悬挂毛细水。衡量岩土持水性的指标叫持水度，它是指在重力作用下，岩土能够保持住的水的体积与岩土总体积之比，可以小数或百分数表示。

根据岩土保持水的形式不同，可分为毛细持水度和结合持水度，通常说的是指结合持水度。结合持水度又称最大分子持水度，是岩土所能保持的最大结合水的体积或重量和岩土总体积或重量之比。结合持水度的大小取决于颗粒大小。颗粒越小，其表面积越大，表面吸附的结合水越多，持水度也越大。松散岩土持水度数值见表8-1。

表8-1 松散沉积物持水度数值表

岩土名称	粗砂	中砂	细砂	粉砂	粘质粉土	粘土
颗粒大小mm	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.002	<0.002

持水度, %	1.57	1.6	2.73	4.75	10.8	44.85
--------	------	-----	------	------	------	-------

三、给水性

给水性是指饱水岩土在重力作用下,能自由给出一定水量的性能。当地下水位下降时,饱水岩土在重力作用下,其中所含的水将自由释出。衡量岩土给水性指标叫给水度。给水度是地下水位下降1个单位深度时,单位水平面积的岩土柱体在重力作用下释放出的水的体积,以小数或百分数表示。例如:当水位下降1m时,在重力作用下,1m²水平面积的岩土柱体释放出的水的体积为0.1m³,则其给水度为0.1或10%。

给水度的大小取决于岩土空隙的大小,其次才是空隙的多少。松散岩土的给水度数值见表8-2。

表8-2 松散沉积物给水度数值表

岩土名称	粘土	粉土	粉砂	细砂	中砂	粗砂	砾砂	细砾	中砾	粗砾
平均给水度%	2	7	8	21	26	27	25	25	23	22

粘土虽然孔隙度大,可达60%,但因其颗粒细小,所含的几乎都是结合水,重力不能将结合水排出,故粘土的给水度很小,只有2%左右。随着颗粒的增大,给水度也增大。其中中砂和粗砂的给水度最大,分别达到26%和27%。这是因为粗、中砂既有较大的孔隙度,又有较大的孔隙,在大孔隙中结合水所占比重极少,故给水度几乎等于其孔隙度。砾砂和砾石类岩土,给水度略有减小,这是因为颗粒虽更粗大,但易被小颗粒充填而使孔隙和孔隙度减小。坚硬岩土粗大裂隙和溶穴中的地下水也和粗粒松散岩土的情况相似,结合水、毛细水所占比例非常小,故它们的孔隙度或容水度可近似地看作是给水度。

对于的松散土层,给水度值还与地下水位埋藏深度及水位下降速度有关。如果地下水位埋深小于毛细上升最大高度,当水位下降时,总有一些重力水转为毛细水,而不能给出,从而使给水度偏小。特别当地下水位下降速度较快,重力释水速度往往滞后于水位下降速度。同时大小孔隙的释水速度也不相同,因而在小孔隙中保留一部分悬挂毛细水,使给水度偏小。可见岩土空隙特点不同,其重力给水过程也不同。

四、透水性

透水性是指岩土允许水透过的能力。评价岩土透水性的指标是渗透系数。岩土的透水性取决于岩土中空隙的大小、多少和连通程度。一般说来,岩土中空隙大得多、连通程度好的,则具有良好的透水性;空隙小而少,连通程度差的,则透水性弱或不透水。颗粒越细小,孔隙就越小,透水性就越差。因为细小的空隙大都被结合水占据,水在细小的空隙中流动时,空隙表面对其流动产生很大的阻力,水不容易从中透过。例如粘土虽有很高的孔隙度,可达50%以上,但因其孔隙细小,重力水在其中的运动很困难,故粘土称为不透水层。《地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范》(GB50307—1999)根据渗透系数大小,对岩土透水性进行了划分(表8-3)。

表8-3 岩土透水性划分(m/d)

类别	特强透水	强透水	中等透水	弱透水	微透水	不透水
K值	$K > 200.000$	$10.000 \leq K \leq 200.000$	$1.000 \leq K < 10.000$	$0.010 \leq K < 1.000$	$0.001 \leq K < 0.010$	$K < 0.0010$

五、毛细性

岩土的毛细性指的是在地下水面上,岩土中的水在毛细张力作用下,沿毛细孔隙向上运动的性能。

毛细水的形成是由于两种力的作用。一是上凹的弯液面产生向上的表面张力,可以把水上拉一定的距离,二是自身的重力使水滴向下运动。当二者达到平衡时,水位便稳定不变,形成毛细水带。各类岩土毛细水的上升高度见表8-4。不同的岩土其毛细上升高度不同,毛细水上升的高度可用下式计算。

$$H_k = \frac{0.003}{D} \quad (8-1)$$

式中 H_k ——毛细上升高度 (cm) ;
D——孔隙直径或裂隙宽度 (mm) 。

表8-4 各类岩石毛细上升最大高度表

岩石名称	粗砂	中砂	细砂	粉土	粘质粉土	粘土
毛细上升最大高度 (cm)	2~4	12~35	35~120	120~350	350~650	650~1200

对粉土、粘质粉土等细颗粒弱含水层采用管井方法进行降水,效果往往较差,基坑或隧道开挖出临空面后,还有水缓慢渗出,其主要原因就是弱含水层的孔隙度大,毛细孔隙小,毛细作用强,仅靠重力作用地下水难以形成井流。而采用真空方法降水,对弱含水层施加负压,相当于人为加大水力梯度,就能达到比较理想的降水效果。

8.3 地下水的赋存

一、包气带与饱水带

地下水面一般在地面下一定深度内形成。地下水面以上称包气带,地下水面以下称为饱水带。

在包气带中,空隙壁面吸附有结合水,细小空隙中含有毛细水,未被液态水占据的空隙中包含空气及气态水。空隙中的水超过吸附力和毛细力所能支持的量时,空隙中的水便以过路重力水的形式向下运动。以上述几种形式存在于包气带中的水统称为包气带水。

包气带水来源于大气降水入渗,地表水体及地下管线渗漏,由地下水面通过毛细上升输送的水分,以及地下水蒸发形成的气态水。包气带水的赋存与运移受毛细力与重力的共同影响。重力使水分下移,毛细力则将水分输向空隙细小与含水量较低的部位,在蒸发影响下,毛细力常将水分由包气带下部输向上部。在雨季,包气带水以下渗为主,雨后,浅表的包气带水以蒸发及植物蒸腾形式向大气圈排泄,一定深度以下的包气带水则继续下渗到饱水带。

包气带的含水量及包气带水的运动受气象因素影响极为显著,植被对其影响也很大。包气带又是饱水带与大气圈、地表水圈联系必经的通道。饱水带通过包气带获得大气降水和地表水的补给,又通过包气带蒸发与蒸腾排泄到大气圈。

饱水带岩石空隙全部为液态水所充满。饱水带中的水体是连续分布的,能够传递静水压力,在水头差的作用下,可以发生渗流。饱水带中的重力水是地铁工程施工降水和结构防水的主要对象。

二、含水层与隔水层

含水层是指能够透过并给出相当数量水的岩土层。因此含水层应是空隙发育的具有良好给水性 and 透水性的岩土层。如各种砂土、砾石、裂隙和溶穴发育的坚硬岩石。隔水层则是不能透过并给出水或只能透过与给出极少量水的岩土层。因此隔水层具有良好的持水性,而其给水性 and 透水性微弱。隔水层可以含水,甚至饱水,如粘土层,也可以不含水,如致密的岩石。

含水层是透水层中位于地下水位以下经常为地下水所饱和的部分,上部未饱和部分则是透水不含水层。故一个透水层可以是含水层,如冲洪积砂卵石含水层,也可以是透水不含水层,如河流阶地上部的粉土层。同一岩性的岩土层,还可以部分是含水层(位于水面以下部分),部分是透水不含水层(位于水面以上部分)。

含水层的形成应具备的条件:①岩层具有储存重力水的空间。岩土的空隙越大,数量越多,连通性越好,储存和通过的重力水就越多,越有利于形成含水层。②具备储存地下水的地质结构,即一个含水层的形成必须要有透水层和不透水层组合在一起,形成储水空间,以便地下水汇集不致流失。③具有一定的补

给水源，形成含水层的透水岩层应部分地或全部地出露地表以便接受大气降水和地表水的补给，或在顶部及底部的隔水层中存在透水天窗或导水断裂等通道，通过这些通道，含水层可以得到其他含水层补给。

含水层在空间分布的几何形态是多样的，但多为层状，故称之为含水层，如冲积平原的砂砾石含水层。此外，有些含水层还呈带状、脉状和透镜状分布，此类含水层宜称为含水带，如断层含水带。

三、不同埋藏条件的地下水

1、上层滞水

当包气带中存在局部隔水层时，局部隔水层之上会积聚具有自由水面的重力水，这便是上层滞水。上层滞水分布最接近地表，接受大气降水的补给，以蒸发形式或向隔水底板的边缘下渗排泄。上层滞水雨季补给补充，积存一定水量，旱季水量逐渐耗失。因而上层滞水水量小，动态变化大。

另外，地下管线渗漏也可能形成上层滞水，由于有渗漏水常年补给，其动态较稳定。这类由地下管线渗漏形成的上层滞水对工程建设危害很大，常突然涌入基槽给施工造成安全隐患。

2、潜水

饱水带中第一个具有自由表面的含水层中的水称为潜水。潜水没有隔水顶板，或只有局部隔水顶板。潜水的表面为自由水面，称潜水面。潜水面到隔水底板的距离为潜水含水层的厚度，潜水面到地面的距离为潜水埋藏深度。

潜水面是向排泄区倾斜的曲面，起伏大体与地形一致而较缓和。潜水面上任一点的高程称为该点的潜水位。将潜水位相等的各点连线，即得潜水等水位线图(图8-2)。该图能反映潜水面形状。垂直等水位线由高到低为潜水流向。相邻两条等水位线的水位差除以其水平距离即为潜水水力梯度。利用同一区域的潜水等水位线图与地形图可以判断潜水与地表水体的相互补给关系。潜水面的陡缓一般能反映潜水含水层厚度与渗透性的变化情况。

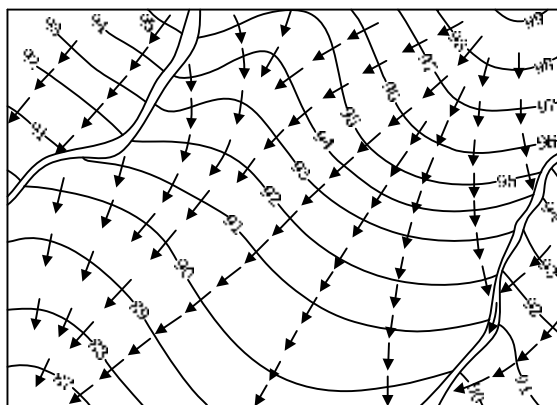


图 8-2 潜水等位线图

由于潜水含水层与包气带直接连通，因而在潜水分布范围内都可以通过包气带接受大气降水和地表水的补给。潜水在重力作用下由水位高的地方向水位低的地方径流。自然状态下，潜水的排泄，除了流入其它含水层以外，还向大气圈蒸发排泄，还可以以泉、泄流等形式向地表或地表水体排泄。

潜水动态受气候影响较大，具有明显的季节性变化特征。如北京地区每年7~9月份为大气降水的丰水期，地下水位从7月份开始上升，9~10月份达到当年最高水位，随后逐渐下降，至次年的6月份达到当年的最低水位，平均年变幅约2~3米。

3、承压水

充满于两个隔水层之间的含水层中的水叫承压水。承压含水层上部的隔水层称隔水顶板，下部的隔水层称隔水底板。隔水顶、底板之间的距离为承压含水层厚度。承压性是承压水的重要特征，由于来自出露区地下水的静水压力作用，承压区含水层不但充满水，而且含水层顶面的水承受大气压强以外的附加压

强。当钻孔揭穿隔水顶板时，钻孔中的水位将上升到含水层顶部以上一定高度才静止下来。钻孔中静止水位到含水层顶面之间的距离称为承压高度。井中静止水位的高程就是承压水在该点的测压水位。测压水位高于地表的范围是承压水的自流区。

承压水和潜水一样，主要来源于大气降水与地表水的入渗。当顶底板隔水性能良好时，它主要通过含水层出露于地表的补给区获得补给，并通过范围有限的排泄区，以泉或其它径流方式向地表或地表水体泄出。当顶底板为弱透水层时，还可以从上下部含水层获得越流补给，也可向上下部含水层进行越流排泄。承压水参与水循环不如潜水积极。因此，气象、水文因素的变化对承压水的影响较小，承压水动态比较稳定。

将某一承压含水层测压水位相等的各点连线，即得等水压线图。根据等测压水位线可以确定承压水的流向和水力梯度。承压水的测压水面只是一个虚构的面，并不存在这样一个实际的水面，只有当钻孔穿透上覆隔水层达到含水层顶面时，钻孔中才能见到水，孔中水位上升到测压水位高度后静止不动。

在接受补给或进行排泄时，承压含水层对水量增减的反应与潜水含水层不同。潜水获得补给或进行排泄时，随着水量增加或减少，潜水位抬高或降低，含水层厚度加大或变薄。承压含水层接受补给时，由于隔水顶板的限制，不通过增加含水层厚度而容纳增加的水量。获得补给时测压水位上升，一方面，由于压强增大含水层中水的密度加大。另一方面，由于孔隙水压力增大，有效应力降低，含水层骨架发生少量回弹，空隙度增大，使含水层厚度也有微量增加。这就是说，增加的水量通过水的密度加大及含水介质空隙的增加而容纳。承压含水层排泄时，减少的水量表现为含水层中水的密度变小及含水介质空隙缩减。

关于承压含水层的给水性，可以比照潜水含水层给水性，用贮水系数（也称弹性给水性）进行表征。承压含水层贮水系数是指其测压水位下降(或上升)一个单位深度，单位水平面积含水层释出（或储存）的水的体积。

可以看出，在形式上，潜水含水层的给水性与承压含水层的贮水系数非常相似，但是在释出或储存水的机理方面是不同的。水位下降时潜水含水层所释出的水来自部分空隙的排水。而测压水位下降时承压含水层所释出的水来自含水层体积的膨胀及含水介质的压密。显然，测压水位下降时承压含水层释出的水，远较潜水含水层水位下降时释出的为小。一般，承压含水层的贮水系数比潜水含水层小1~3个数量级。

由于上部受到隔水层或弱透水层的隔离，承压水与大气圈、地表水圈的联系较差，水循环也缓慢得多。

四、水文地质单元与水文地质边界

地下水体系按其储存系统和交替系统，分为一系列独立的或半独立的单元，这些单元称为水文地质单元。一个水文地质单元可以是一个或几个联合的蓄水构造，或是完整的地下水域，也可是二者结合的水文地质体。

约束地下水储存和运动的水文地质单元的边界称为水文地质边界。任何一个水文地质单元都有它本身的边界。这个边界决定了水文地质单元的大小、几何形态及封闭程度。因此要了解一个地区的水文地质单元应首先弄清水文地质边界条件。

1、蓄水构造边界

(1)、隔水边界：由隔水层和隔水围岩所构成的边界，边界两侧不产生水量交换。包括：①含水层与隔水层或阻水体之间的分界面；②含水带与隔水围岩之间的分界面；③断层阻水边界。

(2)、透水边界：由透水岩层构成的边界，边界两侧会发生水量交换。

①给水边界

给水边界是对地下水起补给作用的边界，包括：河湖、渠道、水库等地表水体的渗漏补给段(图8-3)；基岩含水层接受松散层孔隙水补给时，其与第四系地层的界面即为基岩含水层的给水边界(图8-4)；回灌井或其它形式的人工补给地段。

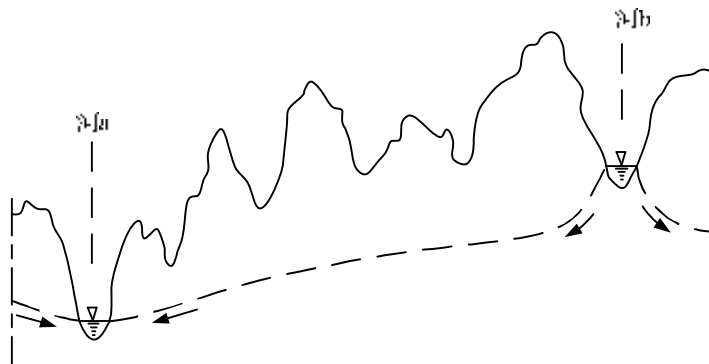


图8-3 作为给水边界的失水河流（b）和作为排泄边界的得水河流（a）

②排泄边界

排水边界是对地下水起排泄作用的边界，包括：泉水溢出带；河流或排水渠道排泄地下水的地段(图8-3)；基岩地下水排入第四系松散地层时，基岩含水层与第四系的界面（图8-5）；沼泽、湿地、盐碱地为垂向蒸发排泄边界；人工开采地下水排泄地段。

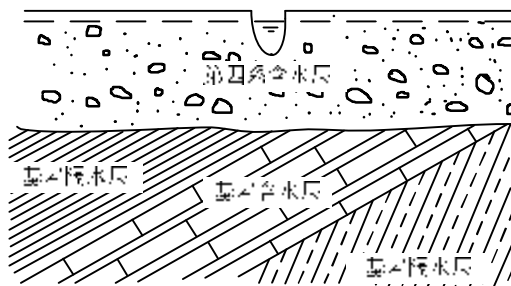


图 8-4 作为给水边界的基岩含水层与第四系含水层的界面

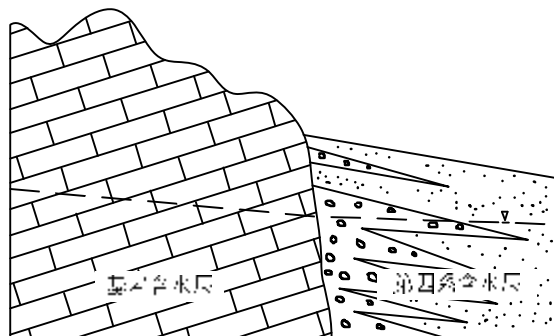


图 8-5 山前地带基岩地下水排入第四纪松散地层时的排泄边界

2、地下水域边界

地下水域边界是包围或区分地下水渗流系统的界面，包括：

（1）、可动边界(自由边界)

可动边界位于透水层中，其位置随着渗流场强度变化而移动。包括：相邻地下水流之间的分水面，即地下水分水岭；非承压地下水的自由水面。

（2）、固定边界(约束边界)

由隔水层或隔水围岩构成，它的位置是固定的，对地下水渗流场的分布起约束作用，对地下水域的扩展起限制作用。地下水域的固定边界主要包括含水层与隔水层、隔水围岩、阻水体、阻水断层之间的分界面。

3、水文地质边界的表现形式

（1）、地形边界

当地下水分水岭与地表分水岭一致时,地形分水岭就是水文地质单元在地表的边界。山区与平原的交界线是基岩与第四系沉积物分界线,这种地形分界线常是基岩地下水在地表的排泄边界。

(2)、地质边界

地质边界包括地层岩性边界和地质构造边界。

(3)、水文边界

水文边界包括与地下水有联系的河流、湖泊,泉水溢出带和地下水分水岭。

(4)、人工边界

地铁等地下构筑物修建后,在地下含水层中起阻水作用,也即构成人工边界。

(5)、水文地质数值计算中水文地质边界的设定

①第一类边界(水头边界):水头变化规律为已知,又分为定水头边界和变水头边界。

②第二类边界(流量边界):流过边界的流量或流量的变化规律为已知,隔水边界属第二类边界,因流过边界的流量为零。

五、不同岩土介质中的地下水

1、孔隙水

孔隙水广泛分布于第四纪松散沉积物中,其赋存规律主要受沉积物的成因类型控制。特定沉积环境中形成的成因类型不同的松散沉积物,形成时受到不同的水动力条件控制,从而呈现岩性与地貌有规律的变化,决定着赋存于其中的地下水的特征。

孔隙水最主要的特点是其水量空间分布连续性好,且相对均匀。孔隙水一般呈层状分布,同一含水层中的水有密切的水力联系,具有统一的地下水面,在自然状态下呈层流运动。

(1)、洪积扇中的地下水

洪积扇形成于干旱半干旱地区的山前地带。其形成过程是:暴雨形成流速极大的洪流,山区洪流沿河槽流出山口,进入平原或盆地,洪流不再受河槽的约束,加之地势突然转为平坦,集中的洪流转为辫状散流,水的流速顿减,搬运能力急剧降低,洪流所携带的物质以山口为中心堆积成扇形。在山前平原或盆地处常常形成一系列大大小小的洪积扇,扇间为洼地。

从洪积扇顶部到边缘地形由陡逐渐变缓,洪水的搬运能力逐渐降低,因而沉积物颗粒由粗逐渐变细。洪积扇的顶部、中部和下部(图8-6)表现出不同的水文地质特征。

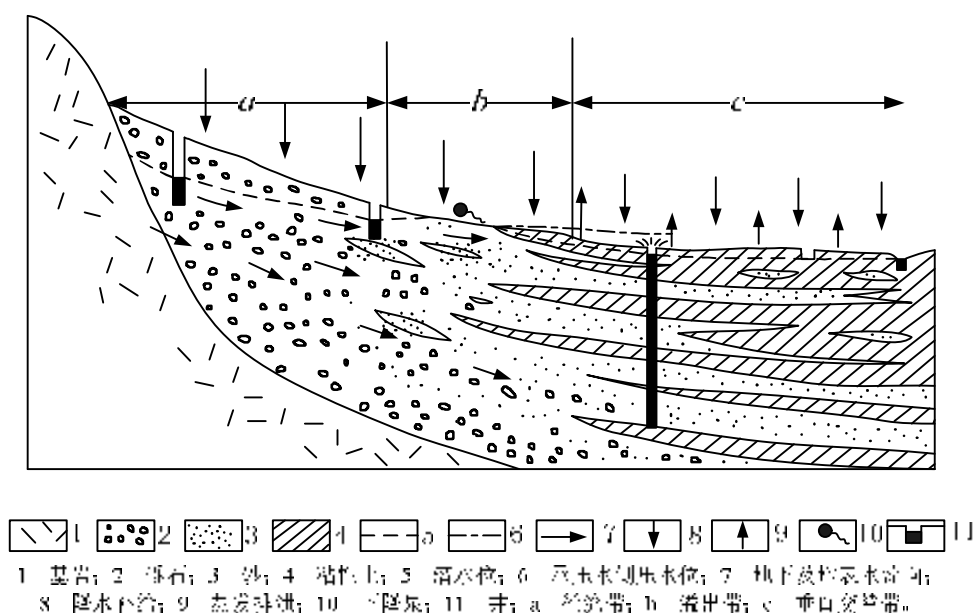


图 8-6 洪积扇水文地质剖面图

洪积扇顶部地形较陡, 沉积物颗粒粗, 卵石、粗砂直接出露地表, 十分有利于吸收降水及山区汇流的地表水, 是主要补给区。该部位潜水透水性强, 厚度大, 径流条件好, 水位埋藏深, 水量丰富, 水质好。在洪积扇的轴部, 水量更为丰富。

洪积扇中部地形变缓, 由粗、细沉积物交错组成, 潜水径流条件逐渐变差, 水位埋深变浅, 富水性变小。当潜水运移受前方粘性土沉积物阻挡, 水面上台逐步贴近地面, 形成沼泽或溢出成泉。该部位上部为潜水, 下部为承压水。在区域地下水开采强度很小的情况下, 此部位打井, 承压水甚至可以形成自流。

洪积扇下部处于洪积扇边缘与平原的交接处, 地形平缓, 沉积物由粉土、粘性土与细粉砂互层组成, 潜水埋藏变深, 富水性差, 径流缓慢, 土壤盐碱化。

洪积扇的形成往往也伴随有河流的冲积作用, 因而在我国很多文献中也称冲洪积扇。

(2)、冲积平原中的地下水

冲积平原中流速较大的河床堆积着砂砾石, 河床外围则以淤积粘性土为主。因而构成冲积平原主要含水层的砂沿河道呈条带状分布。随着河流决口改道, 形成不同时期的古河道。除了决口处前后期古河道的砂层连通外, 后期的河道砂带也可能在某些地方直接叠置在原有河道砂带之上。因此, 剖面上看来似乎是孤立透镜体的砂, 在三维空间实际上是相互联系的网络状砂带(图8-7)。砂层含水层正是这样相互联通, 以及通过粘性土弱透水层的越流相互发生水力联系。

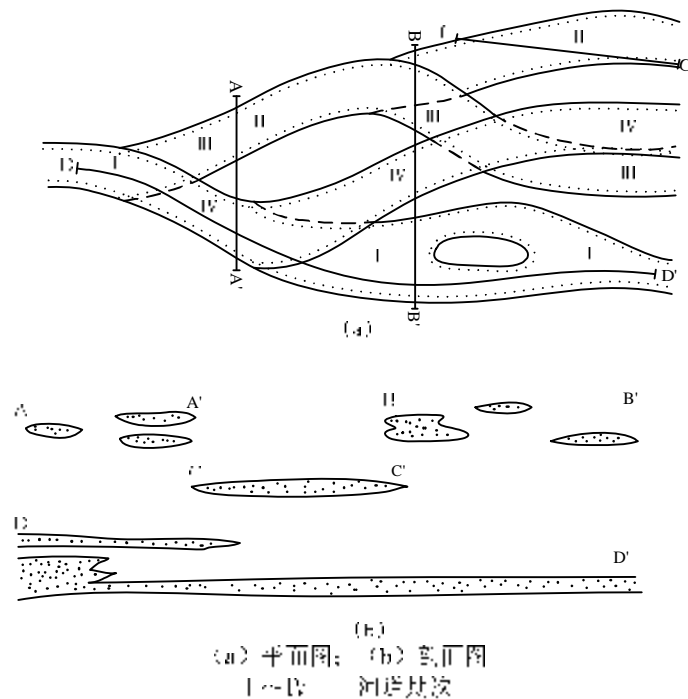


图 8-7 冲积平原中的河道变迁及砂层的几何形态

现代河道与古河道沉积物的颗粒粗, 渗透性好, 利于接受地表水与降水的入渗补给, 地下水埋藏深度较大。自两侧向河间洼地, 渗透性变差, 地下水位变浅。

河流下游为下沉积区, 常形成滨海平原, 松散沉积物很厚, 常在100m以上。滨海平原上部为潜水, 埋藏很浅。滨海平原下部常为砂层与粘土互层, 存在多层承压水。

2、裂隙水

贮存并运移于基岩裂隙中的裂隙水具有与孔隙水不同的特点。某些情况下, 打在同一岩层中相距很近的钻孔, 水量悬殊, 甚至一孔有水而邻孔无水; 有时在相距很近的井孔测得的地下水位差别很大, 水质与动态也有明显不同; 在裂隙岩层中开挖隧道, 通常涌水量不大的岩层中, 局部也可能大量涌水。在裂隙岩层中抽取地下水往往发生这种情况: 某一方向上离抽水井很远的观测孔水位已明显下降, 而在另一方向上离抽水井很近的观测孔水位却无变化。这些现象表明, 裂隙水的赋存具有不均匀性和各向异性的特点。

松散沉积的地层中，空隙分布连续均匀，构成具有统一水力联系、水量分布均匀的层状含水系统。但裂隙岩层只有在一些特殊的条件下才能形成水量分布比较均匀的层状含水系统。例如，夹于厚层塑性岩层中的薄层脆性岩层、规模比较大的风化裂隙岩层等。这些岩层中裂隙往往密集均匀，使整个含水层具有统一的水力联系。

基岩的裂隙率比较低，通常比松散岩土的空隙率低一到两个数量级，裂隙在岩层中所能占有的赋存空间很有限；这一有限的赋存空间在岩层中分布很不均匀；裂隙通道在空间上的展布具有明显的方向性。因此，裂隙岩层一般并不形成具有统一水力联系、水量分布均匀的含水层，而通常由部分裂隙在岩层中某些局部范围内连通构成若干带状或脉状裂隙含水系统。岩层中各裂隙含水系统内部具有统一的水力联系，水位受该系统最低出露点控制。各个系统与系统之间没有或仅有微弱的水力联系，各有自己的补给范围、排泄点及动态特征，其水量的大小取决于自身的规模。规模大的系统贮容能力大，补给范围广，水量丰富，动态比较稳定。规模小的系统贮存和补给有限，水量小而动态不稳定。带状或脉状裂隙含水系统一般是由一条或几条大的断层带、侵入岩与围岩接触带等构成。地下工程开挖通过这类裂隙含水带时往往会大量涌水，给安全施工造成极大威胁。

3、岩溶水

赋存并运移于岩溶化岩层(石灰岩、白云岩)中的水称岩溶水。岩溶常沿可溶岩层的构造裂隙带发育，通过水的溶蚀，常形成管道化岩溶系统，并把大范围的地下水汇集成一条地下河系。因此，岩溶水在某种程度上带有地表水系的特征，其空间分布极不均匀，动态变化大，流速快，排泄集中。

由于介质的可溶性以及水对介质的差异性溶蚀，岩溶水在流动过程中不断扩展介质的空隙，改变其形状，改造着自己的赋存与运动的环境，从而改造着自身的补给、径流、排泄与动态特征。岩溶水系统是一个能够通过水与介质相互作用不断自我演化的动力系统。处于不同演化阶段的岩溶水具有不同特征，处于演化初期的岩溶水系统往往与裂隙水系统没有很大的不同。处于演化后期的岩溶水系统，管道系统发育，大范围内的水汇成一条完整的地下河系。

六、【实例】北京城近郊区水文地质概况

1、地形地貌

北京市区主要位于西山东麓永定河冲洪积扇的中上部（图8-8），地势西北高，东南低，地形坡降为1~3‰。其西北、西、西南边缘为海拔200~700m的丘陵、低山；山前有老山、玉泉山、万寿山、石景山等海拔在100m左右的基岩残山孤丘，相对高差不超过50m；平原海拔自80m逐渐降为20余米。市中心海拔43m左右。

2、第四纪沉积物特征

北京市平原区第四纪沉积物的分布主要受基岩地质构造、气候变化和永定河、潮白河为主的河流作用控制。主要表现为以下特征：

（1）第四系厚度由西向东逐渐加厚，但局部变化显著，主要受古地形及地质构造影响。八宝山至东直门以南地区变化均匀，西部厚约20多米，向东渐增到100余米；但在八宝山以北地区，局部沉积厚度在200m以上。东部来广营、酒仙桥、高碑店以东地区第四系厚度更大，达300m以上。而在西部公主坟、白堆子和北郊龙王堂一带，因基底凸起，厚度仅有10~40m。

（2）市区冲洪积层主要受永定河河流作用控制。永定河现代河道与近期古河道分布地段在衙门口、芦沟桥、丰台一带，第四系厚度较薄。中期古河道分布地段在城区和丰台以南地区，第四系厚度较大。早期古河道分布地段在西黄庄、廖公庄、闵家庄一带，第四系沉积厚度大。一般来说，河流作用的时间长短和频繁程度决定了冲积层的厚度和沉积物颗粒的粗细分布，并且因地制宜。

（3）除沿山麓一带形成的宽度不等的坡积、坡积~洪积层外，广大平原均以冲洪积相为主。冲洪积层由西向东，岩性由粗变细，层次由少变多。西部地区以单一砂卵石层组成，而东郊地区岩性以砂砾石与粘性土互层，渐变为以粘性土为主，层次由一层逐渐增多到十余层，地下水类型由潜水转变为承压水。

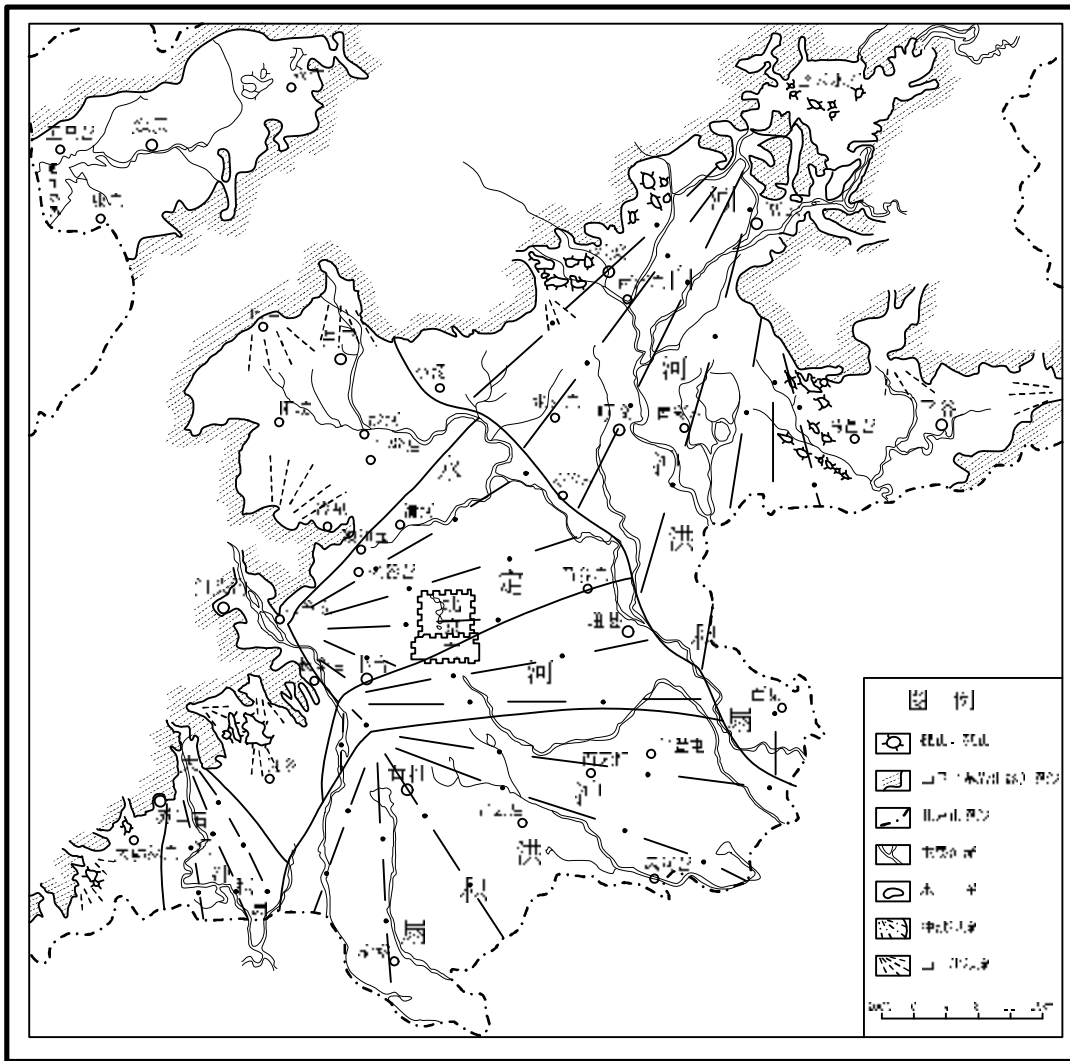


图 8-8 北京平原区冲洪积扇分布图

3、含水层特征

根据含水层岩性、含水层结构特征及富水性进行归类划分，北京城近郊区含水层具有如下特征：

(1)、单层砂卵砾石含水层：主要分布在西部，即海淀、八里庄、广安门以西地区，含水层主要由单一的厚层砂卵石、砂砾石组成，局部有粘土夹层。八宝山、公主坟以南含水层主要埋藏在50m以上，厚度10~30m之间，西薄东厚，第三系半胶结风化砾岩是它的底板。八宝山以北，即古城、西黄村、廖公庄、闵家庄一带，含水层埋藏在150m以上，厚度为20~100m，西薄东厚，廖公庄、闵庄是凹陷的中心，沉积最厚，水井单位涌水量 $>3000\text{m}^3/\text{d.m}$ ，渗透系数 $300\sim 500\text{m/d}$ 。第四系冰积泥砾层构成它的相对隔水底板。

(2)、多层（2~3层）砂卵砾石含水层：分布于海淀、八里庄、广安门以东，大屯、天安门、小红门以西地带，含水层由2~3层砂卵砾石组成，与粘性土互层，单层厚度10~20m，累计厚度15~45m不等，其底板埋深一般70~80m，水井单位涌水量 $2000\sim 3000\text{m}^3/\text{d.m}$ ，渗透系数 $200\sim 300\text{m/d}$ 。第三系砾岩、砂页岩构成它的隔水底板。

(3)、多层（4~5层）砂及砂砾石含水层：分布在大屯、天安门、小红门以东，南湖渠、六里屯、左安门以西地区，含水层由4~5层砂及砂砾石组成，与粘性土互层，单层厚度一般小于10m，累计厚度30~45m，含水层底板主要是第三系砂页岩，埋藏深度100~200m，主要含水层一般埋藏在100m以上，水井单位涌水量 $1000\sim 2000\text{m}^3/\text{d.m}$ ，渗透系数 $100\sim 200\text{m/d}$ 。

(4)、多层(4~5层)砂含砾石含水层:分布在南湖渠、六里屯、左安门以东地区,含水层由4~5层或更多层的砂层及砂含砾石层组成,呈层状或透镜状分布于粘性土之间。单层厚度一般小于10m,累计厚度和主要含水层埋藏深度各地不一,变化较大,累计厚度一般30~60m。埋深150m以上,水井单位涌水量 $500\sim 1000\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$,渗透系数 $50\sim 100\text{m}/\text{d}$ 。

(5)、多层砂含水层:分布于本区东南十八里店、大羊坊附近。含水层主要由4~5层中细砂组成,呈薄层状或透镜体状夹于粘性土层之间,单层厚度一般3~6m,累计厚度20m左右,主要含水层埋深在50~120m之间,水井单位涌水量 $<500\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$,渗透系数 $<50\text{m}/\text{d}$ 。

北京的地铁降水工程一般只涉及上述含水层中埋深40m以上的部分,如考虑降水→回灌,则可选择埋深50~100m的含水层为回灌层。

4、地下水位动态

地下水的动态是地下水补给量和排泄量随时间动态均衡的反映。当地下水的补给量大于排泄量时,地下水位上升;反之,当地下水的补给量小于排泄量时,地下水位就下降。各层地下水的动态各有其特点。

(1)、上层滞水的动态随季节大气降水及管道渗漏的变化而变化,在古河道水文地质单元,上层滞水几乎不存在,不具有明显的多年连续升降趋势。在河间地块水文地质单元,随着地面环境的变化,农田变为住宅小区,地面硬化,大气降水垂直渗入补给量迅速减少,上层滞水的水位逐年下降。在仍为农田的地区,上层滞水水位仍然较高,不具有明显的多年连续升降趋势。在北京城区,上层滞水水位动态完全受地下管线渗漏情况控制。

(2)、潜水的动态与大气降水关系密切。每年7~9月份为大气降水的丰水期,地下水位自7月份开始上升,9~10月份达到当年最高水位,随后逐渐下降,至次年的6月份达到当年的最低水位,平均年变幅约为2~3m。一般情况下,潜水的动态受农田供水开采的影响,不直接受城市供水开采的影响,但由于潜水与承压水具有密切的水力联系,当承压水头降低时,越流补给量增大,潜水水位也随之下降。一九七〇以前,北京市的城市规模和工农业生产规模发展速度较慢,地下水位下降速度缓慢。上世纪七十年代以来,北京市开始大规模打井开采地下水,潜水水位逐年下降。

(3)、承压水的动态比潜水稍有滞后,当年最高水位出现在10~11月,最低水位出现在6~7月,年变幅约为1~2m。自上世纪七十年代以来,随着工农业生产的迅速发展和城市的扩大,地下水开采量逐年增加,地下水位不断下降,已经形成分布面积达数千平方公里的区域性地下水位降落漏斗,漏斗中心位于城区东北方向的天竺一带,水位埋深大于30m。

8.4 地下水的运移

一、地下水的渗流

地下水在岩土空隙中的运动称为渗流。由于受到介质的阻滞,地下水的流动比地表水缓慢得多。为了使渗流符合渗透的真实情况,它必须满足条件:①对于同一过水断面,渗流的流量等于通过该断面的实际渗透流量;②渗流在任意体积内所受的阻力和实际渗透水流所受的阻力相同。

渗透是岩土中实际存在的水流,由于岩土空隙的大小、形状和连通情况极不相同,从而形成大小不等、形状复杂、弯曲多变的通道(图8-9a)。在不同空隙或同一空隙中的不同部位,地下水的流动方向和流动速度均不相同,空隙中央部分流速最大,而水流与颗粒接触面上的流速最小。真实渗透水流的特点是在整个含水层过水断面上不连续。通常根据生产实际需要,对地下水流加以概化,即用假想的水流模型去代替真实的水流,一是不考虑渗流途径的迂回曲折,只考虑地下水的流向,二是不考虑岩土的颗粒骨架,假想岩土的空间全被水流充满(图8-9b),渗流就是这样的假想水流。

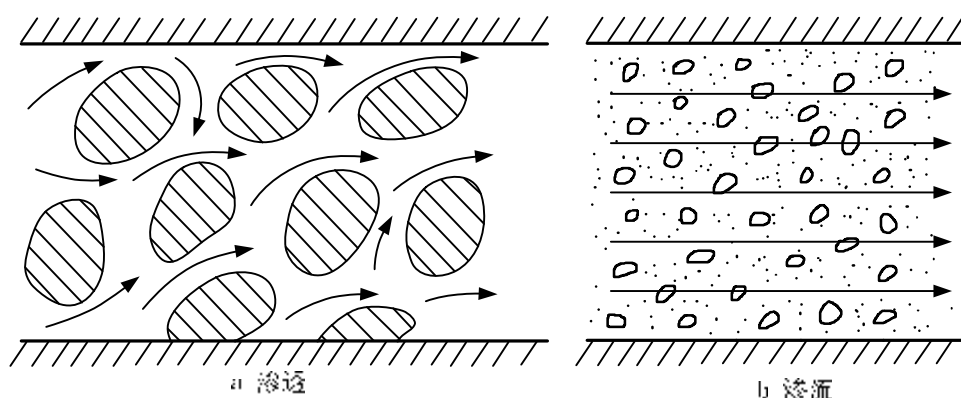


图 8-9 渗透与渗流示意图

在岩土空隙中渗流时，水的质点作有秩序的、互不混杂的流动，称作层流运动。在狭小空隙的岩土中流动时，重力水受介质的吸引力较大，水的质点排列较有秩序，故均作层流运动。水的质点无秩序地、互相混杂的流动，称为紊流。紊流运动的水流所受阻力比层流状态大，消耗能量多。在宽大的空隙中(如大的溶穴、裂隙)，水的流速较大时，容易呈紊流运动。

水在渗流场内运动，水位、流速、流向等运动要素不随时间改变时，称作稳定流。运动要素随时间变化的水流运动，称作非稳定流。严格来说，自然界中地下水都属于非稳定流，但为了便于分析和运算，也可以将某些运动要素变化微小的渗流，近似地看作稳定流。

发生渗流的区域称为渗流场。通常采用一些物理量描述渗流场的特征，如渗流速度，渗流量，渗流压强、水头等。这些表示渗流特征的物理量，称为渗流的运动要素。

渗流场内的水头及流向是空间的连续函数，因此可作出一系列水头值不同的等水头线和一系列流线，由一系列等水头线与流线所组成的网络称为流网。在各向同性介质中，地下水必定沿着水头变化最大的方向——即垂直于等水头线的方向运动，因此，流线与等水头线构成正交网格。显然，此时的等水头面与过水断面是一致的。渗流场内的流网分布，形象地刻画了渗流的特征，同时也反映形成此种渗流特征的水文地质背景。因此，正确地绘制渗流区的流网对分析该地区的水文地质条件，了解地下水运动规律，进行水文地质计算都具有重要意义。下面简要介绍各向同性岩土介质中的稳定流网。

作流网图时，首先根据边界条件绘制容易确定的等水头线或流线。边界包括定水头边界、隔水边界和地下水面边界。地表水体的断面一般可看作等水头面，因此，河渠的湿周必定是一条等水头线(图8-10a)。隔水边界无水流通过，而流线本身就是零流量边界，因此，平行隔水边界可以绘出流线(图8-10b)。

地下水面边界比较复杂，当无入渗补给及蒸发排泄，有侧向补给并作稳定流运动时，地下水面是一条流线(图8-10c)当有入渗补给时，既不是流线，也不是等水头线(图8-10d)。

如果流网图的线间距是按等值绘制的，即相邻两根流线之间的流量相等，相邻两根水头线的水头差相等，则根据流网图上等水头线的疏密变化，可判断渗流场内不同部位渗流强度的差异。也可以根据等水头线(浸润曲线)与流网的关系来判断潜水的补给条件。

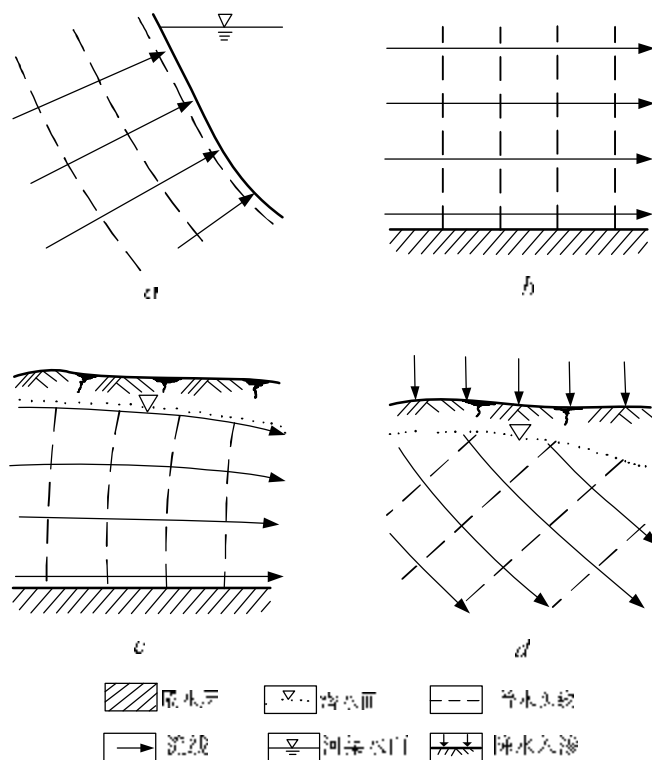


图 8-10 等水头、流线与各类边界的关系

二、渗流的基本定律

法国水力学家达西(Darcy)通过大量试验, 于1856年总结出了线性渗流定律。

实验是在装有砂的圆筒中进行的(图8-11)。水由圆筒的上端加入, 水流经过砂柱由下端流出。上下游用溢水设备控制水位, 使实验过程中水头始终保持不变。在圆筒的上下端各设一根测压管, 分别测定上下两过水断面的水头。从下端出口处测定流量。根据实验结果, 得到下列关系式:

$$Q = Kw \frac{H_1 - H_2}{L} = KwI \quad (8-2)$$

式中 Q ——渗流量, 出口处测得的流量, 水位稳定后即等于通过砂柱各断面的流量;

ω ——过水断面, 在实验装置中相当于砂柱横截面积;

H_1 、 H_2 ——两测压管水位;

L ——渗流长度, 即两过水断面之间的距离;

I ——水力梯度;

K ——渗透系数, 常用单位是m/d或cm/s。

公式(1-2)即是达西公式。从水力学已知, 通过某一断面的流量 Q 等于流速 v 与过水断面 ω 的乘积, 即:

$$Q = wv \quad (8-3)$$

由此得到达西定律的另一种表达形式

$$v = KI \quad (8-4)$$

式中 v ——渗流速度, 其余各项意义同前。

它说明渗流速度等于渗透系数与水力梯度的乘积。 v 与 I 的一次方成正比, 故称达西公式为线性渗透定律。

在实际的地下水流中, 水力梯度往往各处不同, 因此可以把达西定律写成更一般的表达式, 即:

$$v = -K \frac{dH}{dl} \quad (8-5)$$

式中 dH/dl ——水力梯度。

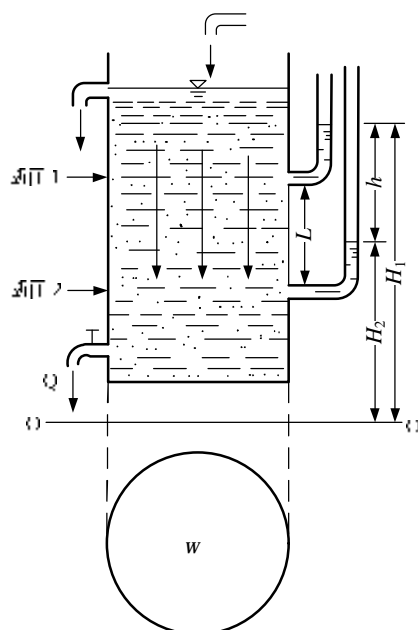


图 8-11 达西试验装置图

天然条件下大多数地下水流是符合达西定律的。下面把达西定律中各项物理涵义及一些有关的问题说明如下：

(1) 渗流速度 v

式(8-2)中的过水断面 ω 系指砂柱的横断面积。在该横断面积中包括砂颗粒所占据的面积与孔隙所占据的面积，而水流实际通过的是孔隙实际过水的面积 ω' ，即 $\omega' = n_e \omega$ ，其中 n_e 为有效空隙度，即实际参与流动的那部分水所占的空隙体积(不包括结合水所占据的体积)与岩土总体积之比。如令通过实际过水断面 ω' 时的渗透流速为 u 。

$$\text{则 } Q = wv = w'u \quad (8-6)$$

$$\text{则得到: } v = n_e u \quad (8-7)$$

(2) 水力梯度 I

水力梯度为沿渗透途径水头损失与相应渗透长度的比值。水质点在空隙中运动时，为了克服水质点之间的摩擦阻力，必须消耗机械能，从而出现水头损失。所以，水力梯度可以理解为水流通过单位长度渗透途径为克服摩擦阻力所耗失的机械能。

(3) 渗透系数 K

渗透系数是表征含水层透水性能的一个重要的水文地质参数。从达西定律 $v=KI$ 可以看出当 $I=1$ 时， $v=K$ 。这说明渗透系数值相当于水力梯度为1时的渗流速度。当水力梯度一定时， K 愈大则 v 就愈大。当渗流速度一定时， I 与 K 成反比， K 愈大则 I 愈小，说明渗透系数大时，岩土透水性好，水头损失小。

岩土的渗透系数可以通过如抽水、注水试验、井间示踪等现场试验测定，也可室内按达西实验测定。松散沉积物渗透系数的常见值见表8-5。

表8-5 松散沉积物渗透系数经验值 (m/d)

松散岩土名称	渗透系数	松散岩土名称	渗透系数
粘质粉土	0.001~0.10	中砂	5.0~2.00
粉土	0.10~0.50	粗砂	20.0~50.0
粉砂	0.50~1.0	砾石	50.0~150.0
细砂	1.0~5.0	卵石	100.0~500.0

根据渗透系数在空间位置变化情况，可将地下水含水介质划分为均质各向同性，均质各向异性，非均质各向同性和非均质各向异性介质。

8.5 流向井的地下水运动

地铁工程降水要确定降水井的布设，要计算基坑涌水量，要预测降水水位分布及其变化规律。本节为这些问题提供理论基础。按照地下水运动要素是否随时间变化分为稳定井流和非稳定井流。

一、地下水的稳定井流

1、均质含水层中地下水流向完整井的稳定井流

裘布依 (J.Dupuit) 是最早研究稳定井流的学者，裘布依公式是在下列假设基础上建立起来的：

- ①含水层是水平的，均质各向同性的；
- ②水流呈轴对称的径向流运动；
- ③在距井轴一定距离R上，水位下降为零；
- ④水流运动符合达西定律。

$$\text{承压完整井：单井 } Q = 2.73 \frac{KM s_w}{\lg \frac{R}{r_w}} \quad (8-8)$$

$$\text{多井 } Q = 2.73 \frac{KM (s_w - s_1)}{\lg \frac{r_1}{r_w}} \quad (8-9)$$

$$\text{潜水完整井：单井 } Q = 1.366K \frac{(2H_0 - s_w) s_w}{\lg \frac{R}{r_w}} \quad (8-10)$$

$$\text{多井 } Q = 1.366K \frac{(H_2^2 - H_1^2)}{\lg \frac{r_2}{r_1}} \quad (8-11)$$

式中符号见图 8-12 和图 8-13。

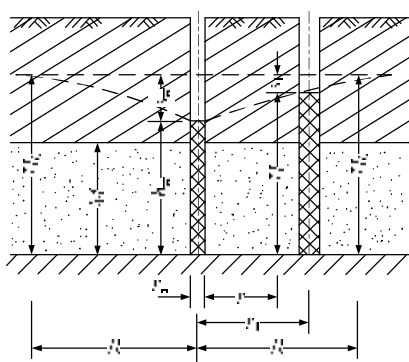


图 8-12 地下水向承压水井运动

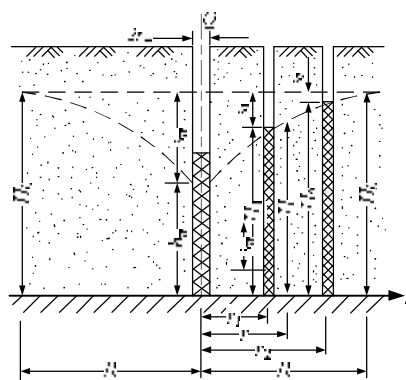


图 8-13 地下水向潜水井运动

2、裘布依公式存在的问题

按裘布依公式可以看出流量与水位降 $Q-s$ (承压水) $Q-(H_0^2 - h_w^2)$ (潜水) 均为线性关系；潜水井的最大流量应在 $s_w = H_0$ 时；井径与流量呈对数关系；在距抽水井R处水位降为零等。实际上并非如此。

(1)、降落漏斗曲线方程

裘布依公式未考虑到地下水流入井时流速很高，造成水头损失；入井后由水平运动转为垂直运动也有损失，这些损失统称为井损失。因此， $Q-s$ 或 $Q-(H_0^2-h_w^2)$ 呈线性关系只是在降深很小时才出现，大部分情况下呈曲线关系，不论是抛物线型、幕函数曲线型都可以用 $\frac{s}{Q}=a+bQ^{(n-1)}$ 这一通式来表示，因此存在

$\lg(\frac{s}{Q}-a)=\lg b+(n-1)\lg Q$ 关系，在 n 次抽降得到 n 对 $s-Q$ 值后经多次试算，在双对数纸上总可以找到一根直线，其截距为 $\lg b$ ，斜率为 $(n-1)$ ，从而求得该曲线的方程式。根据该方程式来推算降深适当加大时的出水量与实际的偏离不会太大。

(2)、井的最大出水量

由于裘布依公式在潜水泵公式中忽略了渗透速度的垂直分量，以 $\frac{dH}{dr}=tgq$ 代替 $\frac{dH}{ds}=\sin q$ (q 为降落漏斗曲线的坡角)，造成了当 $s_w=H_0$ 时会出现最大出水量的错觉，可以看出当 $s_w=H_0$ 时只有渗透速度的垂直分量， $\sin q=1$ ，而 $\tan q=\infty$ 。因此裘布依的潜水泵公式只有在降深与含水层厚度相比很小时才有较高的准确性。

(3)、井径与出水量的关系

井损失与井径有关，裘布依公式只考虑了出水量与渗透系数的关系，而忽视了与井损有关，在降深相同的情况下，出水量与井径并非对数关系，一般井径的变化对出水量的影响要比对数关系大得多，渗透性好的含水层井径变化对出水量很敏感，反之，井径与出水量的关系比较接近于裘布依公式；而井径增大到一定程度后其变化对出水量就不敏感了。

(4)、关于影响半径R

裘布依公式中的 R 只有在圆形的孤岛或河心洲中心打井抽水时才能出现，这种情况下是极个别的。一般在井内抽水随着时间的推移，影响半径必然要扩展到边界，裘布依公式的影响半径只不过是当井抽水量较小，水位下降较小，到一定距离以后很难用一般的方法测量到，或在这个距离外因抽水而引起的水位降可忽略不计而已，而且这距离并非是一个对称圆，显然这个影响半径的大小与含水层透水性的好坏有关，与补给边界的距离等因素有关。因此有人建议将影响半径改称为引用影响半径，其大小是反映区域地下水补给强度的综合性参数。

尽管如此，由于计算简便，计算结果基本能达到工程精度要求，裘布依公式在工程上还是得到了广泛应用。但在应用过程中，我们要充分认识到裘布依公式存在的问题。

2、非均质含水层中层状构造地下水流向完整井的运动

(1)、对承压完整井（图 8-14）：

$$Q=2.73K_m \frac{MS_w}{\lg(R/r_w)} \quad (8-12)$$

式中 $K_m = \frac{K_1M_1+K_2M_2+L+K_nM_n}{M_1+M_2+L+M_n}$

(2)、对潜水完整井（图 8-15）：

$$Q=1.366K_m \frac{H^2-h_w^2}{\lg(R/r)} \quad (8-13)$$

式中 $K_m = \frac{K_{mw}h_w+K_{m0}H_0}{H_0+h_w}$

M ——含水层总厚度 (m)， $M=M_1+M_2+L$

K_{mw}, K_{m0} ——分别为井壁和井壁到影响边界上岩土层渗透系数的加权平均值 (m/d)。

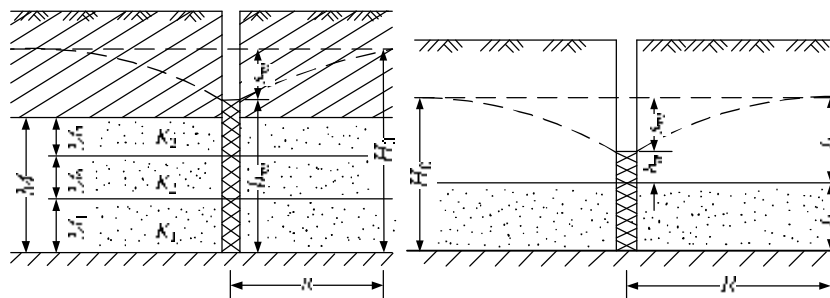


图 8-14 层状非均质层中的承压水井 图 8-15 层状非均质层中潜水井

二、地下水的非稳定井流

1、承压水流向完整井的非稳定流运动

(1)、基本微分方程

假设条件：①含水层是均质、各向同性、在平面上的扩展是无限、没有越流补给和水平的；②从完整井中抽水时，在水头降低的瞬间，水立即从含水层的储存中释放，流入井内的水量全部来自含水层自身储存水的释放；③水头 H 不随 q 的大小而改变；④水头 H 随深度 Z 的变化很小，可以忽略不计。

这样 H 只是径向距离 r 和时间 t 的函数，以柱坐标表示的微分方程：

$$\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (8-14)$$

(2)、抽水流量不变时，单井非稳定流计算

假设从完整井抽水流量是固定的，抽水前承压水水面是水平的，水头为 H_0 ；井的半径为无限小，8-14 式相应的边界条件为：

$$H(\infty, t) = H_0 \quad t > 0 \text{ 时}$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} (r \frac{\partial H}{\partial r}) = \frac{Q}{2\pi T} \quad t > 0 \text{ 时}$$

初始条件为：

$$H(r, 0) = H_0 \quad t = 0, \quad r_w < r < \infty \text{ 时}$$

式 (8-14) 的解为：

$$s = H_0 - H = \frac{Q}{4\pi T} \int_{\frac{r_w^2}{4\pi T}}^{\frac{r^2}{4\pi T}} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (8-15)$$

在地下水动力学中常用井函数代替指数积分函数：

$$W(u) = \int_{\frac{r_w^2}{4\pi T}}^{\frac{r^2}{4\pi T}} \frac{e^{-u}}{u} du = -0.577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots$$

这个级数可以从表 (8-6) 中查得。

式 (8-15) 可写成：

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) = \frac{0.08Q}{T} W(u) \quad (8-16)$$

该式就是著名的泰斯公式。

当 u 相当小时, $W(u) \approx -0.577216 - \ln u$ 则

$$s = \frac{Q}{4pT} \left[\ln \frac{1}{u} - \ln 1.78 \right] = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (8-17)$$

(3)、抽水流量呈阶梯状变化时单井非稳定流计算

可以将抽水流量呈阶梯状变化时经时间 t 后的水位降看作为用流量 Q_1 抽水, 经时间 $(t-t_1)$ 后产生的下降 s_1 ; 用流量 (Q_2-Q_1) 抽水, 经时间 $(t-t_2)$ 产生的下降 s_2 , 用流量 (Q_3-Q_2) 抽水经时间 $(t-t_3)$ 后产生的下降 s_3 等等的叠加, 即:

$$s = \sum_{j=1}^n s_j = \frac{1}{4pT} \left[Q_1 W(u_1) + \sum_{j=2}^n (Q_j - Q_{j-1}) W(u_j) \right] \quad (8-18)$$

$$\text{式中 } u_1 = \frac{r^2 S}{4T(t-t_1)}, \quad u_2 = \frac{r^2 S}{4T(t-t_2)} \cdots \cdots u_j = \frac{r^2 S}{4T(t-t_j)}$$

2、潜水流向完整井的非稳定运动

由于潜水含水层上部界面为一自由表面 (图 8-16), 故潜水含水层中的非稳定运动与承压含水层不同。主要表现在: ①导水系数 $T = kh$ 是随降深而变化的, 不同的距离 r 和时间 t 出现不同的 T 值。②井的附近是三维流, 需要考虑渗透速度的垂直分量。③潜水井抽出的水因水位下降释放的弹性储量与整个抽水量相比只占了很少的一部分, 并随着抽水时间增加愈来愈微不足道, 而抽出的水主要来自含水层孔隙水的疏干, 它不是瞬间完成的, 而是逐渐被释放出来的。

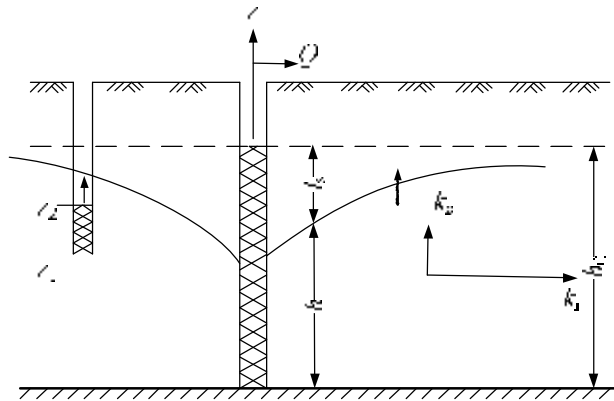


图 8-16 潜水含水层示意图

同时考虑上述三种情况的解还没有很好的办法, 目前一般采用均质含水层考虑各向异性和滞后反应的纽曼法来计算潜水含水层中完整井抽水的地下运动。

假设: ①水平隔水层上的含水层侧向延伸是无限的; ②含水层是均质、各向异性的; ③完整井的抽水流量不变; ④从储存中释放出来的水由含水介质的压缩、水的膨胀和自由面的重力排水两部分组成; ⑤潜水面没有入渗水补给; ⑥降深与含水层厚度相比小得多。

表 8-6 $W(u)$ 数值表(根据费里斯, 诺尔斯, 布朗和斯托尔曼 1962)

$u \backslash N$	$N \times 10^{-15}$	$N \times 10^{-14}$	$N \times 10^{-13}$	$N \times 10^{-12}$	$N \times 10^{-11}$	$N \times 10^{-10}$	$N \times 10^{-9}$	$N \times 10^{-8}$	$N \times 10^{-7}$	$N \times 10^{-6}$	$N \times 10^{-5}$	$N \times 10^{-4}$	$N \times 10^{-3}$	$N \times 10^{-2}$	$N \times 10^{-1}$	N
1.0	33.9616	31.6590	29.3564	27.0538	24.7512	22.4486	20.1460	17.8135	15.5409	13.2383	10.9357	8.6332	6.3315	4.0379	1.8229	0.2194
1.1	33.8662	31.5637	29.2611	26.9585	24.6559	22.3533	20.0507	17.7482	15.4456	13.1430	10.8404	8.5379	6.2363	3.9436	1.7371	0.1860
1.2	33.7792	31.4767	29.1741	26.8715	24.5689	22.2663	19.9637	17.6611	15.3586	13.0560	10.7534	8.4509	6.1494	3.8576	1.6595	0.1584
1.3	33.6992	31.3966	29.0940	26.7914	24.4889	22.1863	19.8837	17.5811	15.2785	12.9759	10.6734	8.3709	6.0695	3.7785	1.5889	0.1355
1.4	33.6251	31.3225	29.0199	26.7173	24.4147	22.1122	19.8096	17.5070	15.2044	12.9018	10.5993	8.2968	5.9955	3.7054	1.5241	0.1162
1.5	33.5561	31.2535	28.9509	26.6483	24.3458	22.0432	19.7406	17.4380	15.1354	12.8328	10.5303	8.2278	5.9266	3.6374	1.4645	0.1000
1.6	33.4916	31.1890	28.8864	26.5838	24.2812	21.9786	19.6760	17.3735	15.0709	12.7683	10.4657	8.1634	5.8621	3.5739	1.4092	0.08631
1.7	33.4309	31.1283	28.8258	26.5232	24.2206	21.9180	19.6154	17.3128	15.0103	12.7077	10.4051	8.1027	5.8016	3.5143	1.3578	0.07465
1.8	33.3738	31.0712	28.7686	26.4660	24.1634	21.8608	19.5583	17.2557	14.9531	12.6505	10.3479	8.0455	5.7446	3.4581	1.3089	0.06471
1.9	33.3197	31.0171	28.7145	26.4119	24.1094	21.8068	19.5042	17.2016	14.8990	12.5964	10.2939	7.9915	5.6906	3.4050	1.2649	0.05620
2.0	33.2684	30.9658	28.6632	26.3607	24.0581	21.7555	19.4529	17.1503	14.8477	12.5451	10.2426	7.9402	5.6394	3.3547	1.2227	0.04890
2.1	33.2196	30.9170	28.6145	26.3119	24.0093	21.7067	19.4041	17.1015	14.7989	12.4964	10.1938	7.8914	5.5907	3.3069	1.1829	0.04261
2.2	33.1731	30.8705	28.5679	26.2653	23.9628	21.6602	19.3576	17.0550	14.7524	12.4498	10.1473	7.8449	5.5443	3.2614	1.1454	0.03719
2.3	33.1286	30.8261	28.5235	26.2209	23.9183	21.6157	19.3131	17.0106	14.7080	12.4054	10.1028	7.8004	5.4999	3.2179	0.0009	0.03250
2.4	33.0861	30.7835	28.4809	26.1783	23.8758	21.5731	19.2706	16.9680	14.6654	12.3628	10.0603	7.7579	5.4575	3.1763	1.0762	0.02844
2.5	33.0453	30.7427	28.4401	26.1375	23.8349	21.5323	19.2298	16.9272	14.6246	12.3220	10.0194	7.7172	5.4167	3.1365	1.0443	0.02491
2.6	33.0060	30.7035	28.4009	26.0983	23.7957	21.4931	19.1905	16.8880	14.5854	12.2828	9.9802	7.6779	5.3776	3.0983	1.0139	0.02185
2.7	32.9683	30.6657	28.3631	26.0606	23.7580	21.4554	19.1528	16.8502	14.5476	12.2450	9.9425	7.6401	5.3400	3.0615	0.9849	0.01918
2.8	32.9319	30.6294	28.3268	26.0242	23.7216	21.4190	19.1164	16.8138	14.5113	12.2087	9.9061	7.6038	5.3037	3.0261	0.9573	0.01686
2.9	32.8968	30.5943	28.2917	25.9891	23.6865	21.3839	19.0813	16.7788	14.4762	12.1736	9.8710	7.5687	5.2687	2.9920	0.9309	0.01482
3.0	32.8629	30.5604	28.2578	25.9552	23.6526	21.3500	19.0474	16.7449	14.4423	12.1397	9.8371	7.5348	5.2349	2.9591	0.9057	0.01305
3.1	32.8302	30.5276	28.2250	25.9224	23.6198	21.3172	19.0146	16.7121	14.4095	12.1069	9.8043	7.5020	5.2022	2.9273	0.8815	0.01149
3.2	32.7984	30.4958	28.1932	25.8907	23.5880	21.2855	18.9829	16.6803	14.3777	12.0751	9.7726	7.4703	5.1706	2.8965	0.8583	0.01013
3.3	32.7676	30.4651	28.1625	25.8599	23.5573	21.2547	18.9521	16.6495	14.3470	12.0444	9.7418	7.4395	5.1399	2.8668	0.8361	0.008939
3.4	32.7378	30.4352	28.1326	25.8300	23.5274	21.2249	18.9223	16.6197	14.3171	12.0145	9.7120	7.4097	5.1102	2.8379	0.8147	0.007891
3.5	32.7088	30.4062	28.1036	25.8010	23.4985	21.1959	18.8933	16.5907	14.2881	11.9855	9.6830	7.3807	5.0813	2.8099	0.7942	0.006970
3.6	32.6806	30.3780	28.0755	25.7729	23.4703	21.1677	18.8651	16.5625	14.2599	11.9574	9.6548	7.3526	5.0532	2.7827	0.7745	0.006160
3.7	32.6532	30.3506	28.0481	25.7455	23.4429	21.1403	18.8377	16.5351	14.2325	11.9300	9.6274	7.3252	5.0295	2.7563	0.7554	0.005448
3.8	32.6266	30.3240	28.0214	25.7188	23.4162	21.1136	18.8110	16.5085	14.2059	11.9033	9.6007	7.2985	4.9993	2.7306	0.7371	0.004820
3.9	32.6006	30.2980	27.9954	25.6928	23.3902	21.0877	18.7851	16.4825	14.1799	11.8773	9.5748	7.2725	4.9735	2.7056	0.7194	0.004267

续表

$\mu \backslash N$	$N \times 10^{-15}$	$N \times 10^{-14}$	$N \times 10^{-13}$	$N \times 10^{-12}$	$N \times 10^{-11}$	$N \times 10^{-10}$	$N \times 10^{-9}$	$N \times 10^{-8}$	$N \times 10^{-7}$	$N \times 10^{-6}$	$N \times 10^{-5}$	$N \times 10^{-4}$	$N \times 10^{-3}$	$N \times 10^{-2}$	$N \times 10^{-1}$	N
4.0	32.5753	30.2727	27.9701	25.6675	23.3649	21.0623	18.7598	16.4572	14.1546	11.8520	9.5495	7.2472	4.9482	2.6813	0.7024	0.003779
4.1	32.5506	30.2480	27.9454	25.6428	23.3402	21.0376	18.7351	16.4325	14.1299	11.8273	9.5248	7.2225	4.9236	2.6576	0.6859	0.003349
4.2	32.5256	30.2239	27.9213	25.6187	23.3161	21.0136	18.7110	16.4084	14.1058	11.8032	9.5007	7.1985	4.8997	2.6344	0.6700	0.002969
4.3	32.5029	30.2004	27.8978	25.5952	23.2926	20.9900	18.6874	16.3884	14.0823	11.7797	9.4771	7.1749	4.8762	2.6119	0.6546	0.002633
4.4	32.4800	30.1774	27.8748	25.5722	23.2696	20.9670	18.6644	16.3619	14.0593	11.7567	9.4541	7.1520	4.8533	2.5899	0.6397	0.002336
4.5	32.4575	30.1549	27.8523	25.5497	23.2471	20.9446	18.6420	16.3394	14.0368	11.7342	9.4317	7.1259	4.8310	2.5684	0.6253	0.002073
4.6	32.4355	30.1329	27.8303	25.5277	23.2252	20.9226	18.6200	16.3174	14.0148	11.7122	9.4097	7.1075	4.8091	2.5474	0.6114	0.001841
4.7	32.4140	30.1114	27.8088	25.5062	23.2037	20.0011	18.5985	16.2959	13.9933	11.6907	9.3882	7.0860	4.7877	2.5268	0.5979	0.001635
4.8	32.3929	30.0904	27.7878	25.4852	23.1826	20.8800	18.5774	16.2748	13.9723	11.6697	9.3671	7.0650	4.7667	2.5068	0.5848	0.001453
4.9	32.3723	30.0697	27.7672	25.4646	23.1620	20.8591	18.5568	16.2542	13.9516	11.6491	9.2465	7.0444	4.7462	2.4871	0.5721	0.001291
5.0	32.3521	30.0459	27.7470	25.4444	23.1418	20.8392	18.5366	16.2340	13.9314	11.6289	9.3263	7.0242	4.7261	2.4679	0.5598	0.001148
5.1	32.3323	30.0297	27.7271	25.4246	23.1220	20.8194	18.5168	16.2142	13.9116	11.6091	9.3065	7.0044	4.7064	2.4491	0.5478	0.001021
5.2	32.3129	30.0103	27.7077	25.4051	23.1026	20.8000	18.4974	16.1948	13.8922	11.5896	9.2871	6.9850	4.6871	2.4306	0.5362	0.0009086
5.3	32.2939	29.9913	27.6887	25.3861	23.0835	20.7809	18.4783	16.1758	13.8732	11.5706	9.2687	6.9659	4.6681	2.4126	0.5250	0.0008086
5.4	32.2752	29.9726	27.6700	25.3674	23.0648	20.7622	18.4596	16.1571	13.8545	11.5519	9.2494	6.9473	4.6495	2.3948	0.5140	0.0007198
5.5	32.2568	29.9512	27.6516	25.3491	23.0465	20.7439	18.4413	16.1387	13.8361	11.5336	9.2310	6.9289	4.6313	2.3775	0.5034	0.0006409
5.6	32.2388	29.9362	27.6336	25.3310	23.0285	20.7259	18.4233	16.1207	13.8181	11.5155	9.2130	6.9109	4.6134	2.3604	0.4930	0.0005708
5.7	32.2211	29.9185	27.6159	25.3133	23.0108	20.7082	18.4056	16.1030	13.8004	11.4978	9.1953	6.8932	4.5958	2.3437	0.4830	0.0005085
5.8	32.2037	29.9011	27.5985	25.2959	22.9934	20.6908	18.3882	16.0856	13.7830	11.4804	9.1779	6.8758	4.5785	2.3272	0.4732	0.0004532
5.9	32.1866	29.8840	27.5814	25.2789	22.9763	20.6737	18.3711	16.0685	13.7659	11.4633	9.1606	6.8588	4.5615	2.3111	0.4637	0.0004039
6.0	32.1698	29.8672	27.5646	25.2620	22.9595	20.6569	18.3543	16.0517	13.7491	11.4465	9.1440	6.8420	4.5448	2.2953	0.4544	0.0003601
6.1	32.1533	29.8507	27.5481	25.2455	22.9429	20.6403	18.3378	16.0352	13.7326	11.4300	9.1275	6.8254	4.5283	2.2797	0.4454	0.0003211
6.2	32.1370	29.8344	27.5318	25.2293	22.9267	20.6241	18.3215	16.0189	13.7163	11.4138	9.1112	6.8092	4.5122	2.2645	0.4366	0.0002864
6.3	32.1210	29.8184	27.5158	25.2133	22.9107	20.6081	18.3055	16.0029	13.7003	11.3978	9.0952	6.7932	4.4963	2.2494	0.4280	0.0002555
6.4	32.1053	29.8027	27.5001	25.1975	22.8949	20.5923	18.2898	15.9872	13.6846	11.3820	9.0795	6.7775	4.4906	2.2346	0.4197	0.0002279
6.5	32.0898	29.7872	27.4846	25.1820	22.8794	20.5768	18.2742	15.9717	13.6691	11.3665	9.0640	6.7620	4.4652	2.2201	0.4115	0.0002034
6.6	32.0745	29.7719	27.4693	25.1667	22.8611	20.5616	18.2590	15.9564	13.6538	11.3512	9.0487	6.7467	4.4501	2.2058	0.4036	0.0001816
6.7	32.0595	29.7569	27.4543	25.1517	22.8491	20.5465	18.2439	15.9414	13.6388	11.3362	9.0337	6.7317	4.4351	2.1917	0.3959	0.0001621
6.8	32.0446	29.7421	27.4395	25.1369	22.8343	20.5317	18.2291	15.9265	13.6240	11.3214	9.0189	6.7169	4.4204	2.1779	0.3883	0.0001448
6.9	32.0300	29.7275	27.4249	25.1223	22.8197	20.5171	18.2145	15.9119	13.6094	11.3068	9.0043	6.7023	4.4059	2.1643	0.3810	0.0001293

续表

$\mu \backslash N$	$N \times 10^{-15}$	$N \times 10^{-14}$	$N \times 10^{-13}$	$N \times 10^{-12}$	$N \times 10^{-11}$	$N \times 10^{-10}$	$N \times 10^{-9}$	$N \times 10^{-8}$	$N \times 10^{-7}$	$N \times 10^{-6}$	$N \times 10^{-5}$	$N \times 10^{-4}$	$N \times 10^{-3}$	$N \times 10^{-2}$	$N \times 10^{-1}$	N
7.0	32.0156	29.7131	27.4105	25.1079	22.8053	20.5027	18.2001	15.8976	13.5950	11.2924	8.9899	6.6879	4.3916	2.1508	0.3738	0.0001155
7.1	32.0015	29.6989	27.3963	25.0937	22.7911	20.4885	18.1860	15.8834	13.5808	11.2782	8.9757	6.6737	4.3775	2.1376	0.3668	0.0001032
7.2	31.9875	29.6849	27.3823	25.0797	22.7771	20.4746	18.1720	15.8694	13.5668	11.2642	8.9617	6.6598	4.3636	2.1246	0.3599	0.00009219
7.3	31.9737	29.6711	27.3685	25.0659	22.7633	20.4608	18.1582	15.8556	13.5530	11.2504	8.9479	6.6460	4.3500	2.1118	0.3532	0.00008239
7.4	31.9601	29.6575	27.3549	25.0523	22.7497	20.4472	18.1446	15.8420	13.5394	11.2368	8.9343	6.6324	4.3364	2.0991	0.3467	0.00007364
7.5	31.9467	29.6441	27.3415	25.0389	22.7363	20.4337	18.1311	15.8286	13.5260	11.2234	8.9209	6.6190	4.3231	2.0867	0.3403	0.00006583
7.6	31.9334	29.6308	27.3282	25.0257	22.7231	20.4205	18.1179	15.8153	13.5127	11.2102	8.9076	6.6057	4.3100	2.0744	0.3341	0.00005886
7.7	31.9203	29.6178	27.3152	25.0126	22.7100	20.4074	18.1048	15.8022	13.4997	11.1971	8.8946	6.5927	4.2970	2.0623	0.3280	0.00005263
7.8	31.9074	29.6048	27.3023	24.9997	22.6971	20.3945	18.0919	15.7893	13.4868	11.1842	8.8817	6.5798	4.2842	2.0503	0.3221	0.00004707
7.9	31.8947	29.5921	27.2895	24.9869	22.6844	20.3818	18.0792	15.7766	13.4740	11.1714	8.8689	6.5671	4.2716	2.0386	0.3163	0.00004210
8.0	31.8821	29.5795	27.2769	24.9744	22.6718	20.3692	18.0666	15.7640	13.4614	11.1589	8.8563	6.5545	4.2591	2.0269	0.3106	0.00003767
8.1	31.8697	29.5671	27.2645	24.9619	22.6594	20.3568	18.0542	15.7516	13.4490	11.1464	8.8439	6.5421	4.2468	2.0155	0.3050	0.00003370
8.2	31.8574	29.5548	27.2523	24.9497	22.6417	20.3445	18.0419	15.7393	13.4367	11.1342	8.8317	6.5298	4.2346	2.0042	0.2996	0.00003015
8.3	31.8453	29.5427	27.2401	24.9375	22.6350	20.3324	18.0298	15.7272	13.4246	11.1220	8.8195	6.5177	4.2226	1.9930	0.2943	0.00002669
8.4	31.8333	29.5307	27.2282	24.9256	22.6230	20.3204	18.0178	15.7152	13.4126	11.1101	8.8076	6.5057	4.2107	1.9820	0.2891	0.00002415
8.5	31.8215	29.5189	27.2163	24.9137	22.6112	20.3086	18.0060	15.7034	13.4008	11.0982	8.7957	6.4939	4.1990	1.9711	0.2840	0.00002162
8.6	31.8098	29.5072	27.2046	24.9020	22.5995	20.2969	17.9943	15.6917	13.3891	11.0865	8.7840	6.4822	4.1874	1.9604	0.2790	0.00001936
8.7	31.7982	29.4957	27.1931	24.8905	22.5879	20.2853	17.9827	15.6801	13.3776	11.0750	8.7725	6.4707	4.1759	1.9498	0.2742	0.00001733
8.8	31.7868	29.4842	27.1816	24.8790	22.5765	20.2739	17.9713	15.6687	13.3661	11.0635	8.7610	6.4592	4.1646	1.9393	0.2694	0.00001552
8.9	31.7755	29.4729	27.1703	24.8678	22.5652	20.2626	17.9600	15.6574	13.3548	11.0523	8.7497	6.4480	4.1534	1.9290	0.2647	0.00001390
9.0	31.7643	29.4618	27.1592	24.8566	22.5540	20.2514	17.9488	15.6424	13.3437	11.0411	8.7386	6.4368	4.1423	1.9187	0.2602	0.00001245
9.1	31.7533	29.4507	27.1481	24.8455	22.5429	20.2404	17.9378	15.6352	13.3326	11.0300	8.7275	6.4258	4.1313	1.9087	0.2557	0.00001115
9.2	31.7424	29.4398	27.1372	24.8346	22.5320	20.2294	17.9268	15.6243	13.3217	11.1910	8.7166	6.4148	4.1205	1.8987	0.2513	0.000009988
9.3	31.7315	29.4290	27.1264	24.8238	22.5212	20.2186	17.9160	15.6135	13.3109	11.0083	8.7058	6.4010	4.1098	1.8888	0.2470	0.000008948
9.4	31.7208	29.4133	27.1157	24.8131	22.5105	20.2097	17.9053	15.6028	13.3002	10.9976	8.6951	6.3934	4.0992	1.8791	0.2429	0.000008018
9.5	31.7103	29.4077	27.1051	24.8025	22.4999	20.1973	17.8948	15.5922	13.2896	10.9870	8.6845	6.3828	4.0887	1.8695	0.2387	0.000007185
9.6	31.6998	29.3927	27.0946	24.7920	22.4895	20.1869	17.8843	15.5817	13.2791	10.9765	8.6740	6.3723	4.0784	1.8599	0.2347	0.000006439
9.7	31.6894	29.3868	27.0843	24.7817	22.4791	20.1765	17.8739	15.5713	13.2688	10.9662	8.6637	6.3620	4.0681	1.8505	0.2308	0.000005771
9.8	31.6792	29.3766	27.0740	24.7714	22.4688	20.1663	17.8637	15.5611	13.2585	10.9559	8.6534	6.3517	4.0579	1.8412	0.2269	0.000005173
9.9	31.6690	29.3664	27.0639	24.7613	22.4587	20.1561	17.8535	15.5509	13.2483	10.9458	8.6433	6.3416	4.0479	1.8320	0.2231	0.000004637

在上述情况下，可近似列出基本方程和定解条件：

$$\begin{aligned}
 K_r \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{K_r \partial s}{r \partial r} + K_z \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} &= S_s \frac{\partial s}{\partial t} \quad 0 < z < h_0 \\
 s(r, z, 0) &= 0 \\
 s(\infty, z, t) &= 0 \\
 \frac{\partial}{\partial z} s(r, 0, t) &= 0 \\
 K_z \frac{\partial}{\partial z} s(r, h_0, t) &= -S_g \frac{\partial}{\partial z} s(r, h_0, t) \\
 \lim_{r \rightarrow 0} \int_0^{h_0} \frac{\partial s}{\partial r} dz &= -\frac{Q}{2pK_r}
 \end{aligned} \tag{8-19}$$

式中 K_r, K_z ——分别为潜水含水层的径向和垂直渗透系数；

S_s ——潜水储水率；

S_y ——潜水给水度。

求得上述定解问题的解对完整观测孔来说为：

$$\begin{aligned}
 s(r, z, t) &= \frac{Q}{4pt} \int_0^\infty 4y J_0(yb^{\frac{1}{2}}) \left[w_0(y) + \sum_{n=1}^\infty w_n(y) \right] dn \\
 w_0(y) &= \frac{\{1 - \exp[-t_s b(y^2 - n_0^2)]\} \text{ch}(n_0 z_d)}{\{y^2 + (1+S)r_0^2 - [(y^2 - n_0^2)^2 / S]\} \text{ch}(n_0)} \\
 w_n(y) &= \frac{\{1 - \exp[-t_s b(y^2 + n_n^2)]\} \cos(n_n z_d)}{\{y^2 + (1+S)n_n^2 - [(y^2 + n_n^2)^2 / d]\} \cos(n_n)}
 \end{aligned} \tag{8-20}$$

其中 n_0, n_n 为下列方程式的根：

$$sn_0 \text{sh}(n_0) - (y^2 - n_0^2) \text{ch}(n_0) = 0 \quad n_0^2 < y^2$$

$$sn_n \sin(n_n) + (y^2 - n_n^2) \cos(n_n) = 0$$

$$\text{此处 } (2n-1)\frac{p}{2} < n_n < np \quad n \geq 1$$

$$s_y = \frac{S}{S_y}, \quad K_d = \frac{K_z}{K_r}, \quad Z_d = \frac{Z}{h_0}, \quad t_s = \frac{Tt}{Sr^2},$$

$$b = \frac{K_d}{h_d^2} = \frac{r^2 K_z}{h_0^2 K_r}, \quad h_d = \frac{h_0}{r}$$

由解析解所描述的时间-降深曲线与实测的是一致的。整个曲线分为三部分，在早期，符合与弹性储存有关的泰斯解，抽水开始的瞬间，水主要来自含水层的弹性释放，随着时间的推移，重力水逐步释放，曲线偏离泰斯解。与有越流补给相似，出现了一种水位暂时稳定现象，随着时间的进一步增大，弹性释放显得微不足道，而水量主要来自孔隙水的疏干，曲线又再一次和与给水度有关的泰斯解一致(图 8-17)。

在距抽水井不同的径向距离上，时间-降深曲线形状有不同，径向距离增大，弹性储存和地下水面的滞后反应现象逐渐减弱，在一定距离后，时间-降深曲线的前半部消失，曲线只遵循与给水度有关的泰斯曲线。各向异性含水层中， k_d 越小（即垂直渗透系数相对较小），则弹性储存和滞后现象越明显。

潜水完整井绘制标准曲线 A 的 s_d 数值见表 8-7。潜水完整井绘制标准曲线 B 的 s_d 数值见表 8-8。

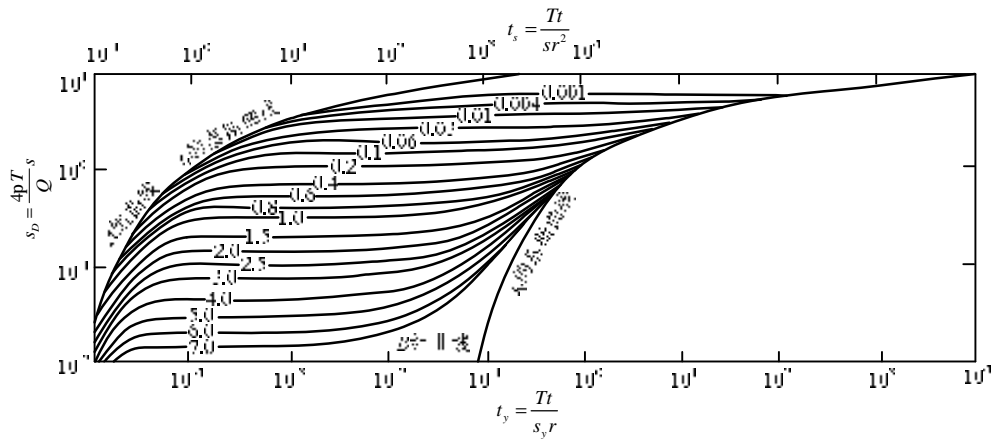


图 8-17 潜水含水层中完整井定流抽水时的标准曲线（据纽曼）

表 8-7 潜水完整井绘制标准曲线 A 的 s_d 数值表

t_s	$\beta=0.001$	$\beta=0.004$	$\beta=0.01$	$\beta=0.03$	$\beta=0.06$	$\beta=0.1$	$\beta=0.2$	$\beta=0.4$	$\beta=0.6$
1×10^{-1}	2.48×10^{-2}	2.43×10^{-2}	2.41×10^{-2}	2.35×10^{-2}	2.30×10^{-2}	2.24×10^{-2}	2.14×10^{-2}	1.99×10^{-2}	1.88×10^{-2}
2×10^{-1}	1.45×10^{-1}	1.42×10^{-1}	1.40×10^{-1}	1.36×10^{-1}	1.31×10^{-1}	1.27×10^{-1}	1.19×10^{-1}	1.08×10^{-1}	9.88×10^{-2}
3.5×10^{-1}	3.58×10^{-1}	3.52×10^{-1}	3.45×10^{-1}	3.31×10^{-1}	3.18×10^{-1}	3.04×10^{-1}	2.79×10^{-1}	2.44×10^{-1}	2.17×10^{-1}
6×10^{-1}	6.62×10^{-1}	6.48×10^{-1}	6.33×10^{-1}	6.01×10^{-1}	5.70×10^{-1}	5.40×10^{-1}	4.83×10^{-1}	4.03×10^{-1}	3.43×10^{-1}
1×10^0	1.02×10^{-1}	9.92×10^{-1}	9.63×10^{-1}	9.05×10^{-1}	8.49×10^{-1}	7.92×10^{-1}	6.88×10^{-1}	5.42×10^{-1}	4.38×10^{-1}
2×10^0	1.57×10^0	1.52×10^0	1.46×10^0	1.35×10^0	1.23×10^0	1.12×10^0	9.18×10^{-1}	6.59×10^{-1}	4.97×10^{-1}
3.5×10^0	2.05×10^0	1.97×10^0	1.88×10^0	1.70×10^0	1.51×10^0	1.34×10^0	1.03×10^0	6.90×10^{-1}	5.07×10^{-1}
6×10^0	2.52×10^0	2.41×10^0	2.27×10^0	1.99×10^0	1.73×10^0	1.47×10^0	1.07×10^0	6.96×10^{-1}	
1×10^1	2.97×10^0	2.80×10^0	2.61×10^0	2.22×10^0	1.85×10^0	1.53×10^0	1.08×10^0		
2×10^1	3.56×10^0	3.30×10^0	3.00×10^0	2.41×10^0	1.92×10^0	1.55×10^0			
3.5×10^1	4.01×10^0	3.65×10^0	3.23×10^0	2.48×10^0	1.93×10^0				
6×10^1	4.42×10^0	3.93×10^0	3.37×10^0	2.49×10^0	1.94×10^0				
1×10^2	4.77×10^0	4.12×10^0	3.43×10^0	2.50×10^0					
2×10^2	5.16×10^0	4.26×10^0	3.45×10^0						
3.5×10^2	5.40×10^0	4.29×10^0	3.46×10^0						
6×10^2	5.54×10^0	4.30×10^0							
1×10^3	5.59×10^0								
2×10^3	5.62×10^0								
3.5×10^3	5.62×10^0	4.30×10^0	3.46×10^0	2.50×10^0	1.94×10^0	1.55×10^0	1.08×10^0	6.96×10^0	5.07×10^0

表 8-8 潜水完整井绘制标准曲线 B 的 s_d 数值表

t_s	$\beta=0.001$	$\beta=0.004$	$\beta=0.01$	$\beta=0.03$	$\beta=0.06$	$\beta=0.1$	$\beta=0.2$	$\beta=0.4$	$\beta=0.6$
1×10^{-4}	5.62×10^0	4.30×10^0	3.46×10^0	2.50×10^0	1.94×10^0	1.56×10^0	1.09×10^0	6.97×10^{-1}	5.08×10^{-1}
2×10^{-4}									
3.5×10^{-4}									

6×10^{-4}										
1×10^{-3}									6.97×10^{-1}	5.08×10^{-1}
2×10^{-3}									6.97×10^{-1}	5.09×10^{-1}
3.5×10^{-3}									6.98×10^{-1}	5.10×10^{-1}
6×10^{-3}									7.00×10^{-1}	5.12×10^{-1}
1×10^{-2}									7.03×10^{-1}	5.16×10^{-1}
2×10^{-2}							1.56×10^0	1.09×10^0	7.10×10^{-1}	5.24×10^{-1}
3.5×10^{-2}					1.94×10^0	1.56×10^0	1.10×10^0		7.20×10^{-1}	5.37×10^{-1}
6×10^{-2}				2.50×10^0	1.95×10^0	1.57×10^0	1.11×10^0		7.37×10^{-1}	5.57×10^{-1}
1×10^{-1}				2.51×10^0	1.96×10^0	1.58×10^0	1.13×10^0		7.63×10^{-1}	5.89×10^{-1}
2×10^{-1}	5.62×10^0	4.30×10^0	3.46×10^0	2.52×10^0	1.98×10^0	1.61×10^0	1.18×10^0		8.29×10^{-1}	6.67×10^{-1}
3.5×10^{-1}	5.63×10^0	4.31×10^0	3.47×10^0	2.54×10^0	2.01×10^0	1.66×10^0	1.24×10^0		9.22×10^{-1}	7.80×10^{-1}
6×10^{-1}	5.63×10^0	4.31×10^0	3.49×10^0	2.57×10^0	2.06×10^0	1.73×10^0	1.35×10^0		1.07×10^0	9.54×10^{-1}
1×10^0	5.63×10^0	4.32×10^0	3.51×10^0	2.62×10^0	2.13×10^0	1.83×10^0	1.50×10^0		1.29×10^0	1.20×10^0
2×10^0	5.64×10^0	4.35×10^0	3.56×10^0	2.73×10^0	2.31×10^0	2.07×10^0	1.85×10^0		1.72×10^0	1.68×10^0
3.5×10^0	5.65×10^0	4.38×10^0	3.63×10^0	2.88×10^0	2.55×10^0	2.37×10^0	2.23×10^0		2.17×10^0	2.15×10^0
6×10^0	5.67×10^0	4.44×10^0	3.74×10^0	3.11×10^0	2.86×10^0	2.75×10^0	2.68×10^0		2.66×10^0	2.65×10^0
1×10^1	5.70×10^0	4.52×10^0	3.90×10^0	3.40×10^0	3.24×10^0	3.18×10^0	3.15×10^0		3.14×10^0	3.14×10^0
2×10^1	5.76×10^0	4.71×10^0	4.22×10^0	3.92×10^0	3.85×10^0	3.83×10^0	3.82×10^0		3.82×10^0	3.82×10^0
3.5×10^1	5.85×10^0	4.94×10^0	4.58×10^0	4.40×10^0	4.38×10^0	4.38×10^0	4.37×10^0		4.37×10^0	4.37×10^0
6×10^1	5.99×10^0	5.23×10^0	5.00×10^0	4.92×10^0	4.91×10^0	4.91×10^0	4.91×10^0		4.91×10^0	4.91×10^0
1×10^2	6.16×10^0	5.59×10^0	5.46×10^0	5.42×10^0	5.42×10^0	5.42×10^0	5.42×10^0		5.42×10^0	5.42×10^0

(据纽曼)续表

$\beta=0.8$	$\beta=1.0$	$\beta=1.5$	$\beta=2.0$	$\beta=2.5$	$\beta=3.0$	$\beta=4.0$	$\beta=5.0$	$\beta=6.0$	$\beta=7.0$
1.79×10^{-2}	1.70×10^{-2}	1.53×10^{-2}	1.38×10^{-2}	1.25×10^{-2}	1.13×10^{-2}	9.33×10^{-3}	7.72×10^{-3}	6.39×10^{-3}	5.30×10^{-2}
9.15×10^{-2}	8.49×10^{-2}	7.13×10^{-2}	6.03×10^{-2}	5.11×10^{-2}	4.35×10^{-2}	3.17×10^{-2}	2.34×10^{-2}	1.74×10^{-2}	1.31×10^{-2}
1.94×10^{-1}	1.75×10^{-1}	1.36×10^{-1}	1.07×10^{-1}	8.46×10^{-2}	6.78×10^{-2}	4.45×10^{-2}	3.02×10^{-2}	2.10×10^{-2}	1.51×10^{-2}
2.96×10^{-1}	2.56×10^{-1}	1.82×10^{-1}	1.33×10^{-1}	1.01×10^{-1}	7.67×10^{-2}	4.76×10^{-2}	3.13×10^{-2}	2.14×10^{-2}	1.52×10^{-2}
3.60×10^{-1}	3.00×10^{-1}	1.99×10^{-1}	1.40×10^{-1}	1.03×10^{-1}	7.79×10^{-2}	4.78×10^{-2}		2.15×10^{-2}	
3.91×10^{-1}	3.17×10^{-1}	2.03×10^{-1}	1.41×10^{-1}						
3.94×10^{-1}									

(据纽曼)续表

$\beta=0.8$	$\beta=1.0$	$\beta=1.5$	$\beta=2.0$	$\beta=2.5$	$\beta=3.0$	$\beta=4.0$	$\beta=5.0$	$\beta=6.0$	$\beta=7.0$
3.95×10^{-1}	3.18×10^{-1}	2.04×10^{-1}	1.42×10^{-1}	1.03×10^{-1}	7.80×10^{-2}	4.79×10^{-2}	1.14×10^{-2}	2.15×10^{-2}	1.53×10^{-2}
					7.81×10^{-2}	4.80×10^{-2}	3.15×10^{-2}	2.16×10^{-2}	1.53×10^{-2}
				1.03×10^{-1}	7.83×10^{-2}	4.81×10^{-2}	3.16×10^{-2}	2.17×10^{-2}	1.54×10^{-2}
				1.04×10^{-1}	7.85×10^{-2}	4.84×10^{-2}	3.18×10^{-2}	2.19×10^{-2}	1.56×10^{-2}

3.95×10^{-1}	3.18×10^{-1}	2.04×10^{-1}	1.42×10^{-1}	1.04×10^{-1}	7.89×10^{-2}	4.78×10^{-2}	3.21×10^{-2}	2.21×10^{-2}	1.58×10^{-2}
3.96×10^{-1}	3.19×10^{-1}	2.05×10^{-1}	1.43×10^{-1}	1.05×10^{-1}	7.99×10^{-2}	4.96×10^{-2}	3.29×10^{-2}	2.28×10^{-2}	1.64×10^{-2}
3.97×10^{-1}	3.21×10^{-1}	2.07×10^{-1}	1.45×10^{-1}	1.07×10^{-1}	8.14×10^{-2}	5.09×10^{-2}	3.41×10^{-2}	2.39×10^{-2}	1.73×10^{-2}
3.99×10^{-1}	3.23×10^{-1}	2.09×10^{-1}	1.47×10^{-1}	1.09×10^{-1}	8.38×10^{-2}	5.32×10^{-2}	3.61×10^{-2}	2.57×10^{-2}	1.89×10^{-2}
4.02×10^{-1}	3.27×10^{-1}	2.13×10^{-1}	1.52×10^{-1}	1.13×10^{-1}	8.79×10^{-2}	5.68×10^{-2}	3.93×10^{-2}	2.86×10^{-2}	2.15×10^{-2}
4.12×10^{-1}	3.37×10^{-1}	2.24×10^{-1}	1.62×10^{-1}	1.24×10^{-1}	9.80×10^{-2}	6.61×10^{-2}	4.78×10^{-2}	3.62×10^{-2}	2.84×10^{-2}
4.25×10^{-1}	3.50×10^{-1}	2.39×10^{-1}	1.78×10^{-1}	1.39×10^{-1}	1.13×10^{-1}	8.06×10^{-1}	6.12×10^{-2}	4.86×10^{-2}	3.98×10^{-2}
4.27×10^{-1}	3.74×10^{-1}	2.65×10^{-1}	2.05×10^{-1}	1.66×10^{-1}	1.40×10^{-1}	1.06×10^{-1}	8.53×10^{-2}	7.17×10^{-2}	6.14×10^{-2}
4.83×10^{-1}	4.12×10^{-1}	3.07×10^{-1}	2.48×10^{-1}	2.10×10^{-1}	1.84×10^{-1}	1.49×10^{-1}	1.28×10^{-1}	1.13×10^{-1}	1.02×10^{-1}
5.71×10^{-1}	5.06×10^{-1}	4.10×10^{-1}	3.57×10^{-1}	3.23×10^{-1}	2.98×10^{-1}	2.66×10^{-1}	2.45×10^{-1}	2.31×10^{-1}	2.20×10^{-1}
6.97×10^{-1}	6.42×10^{-1}	5.62×10^{-1}	5.17×10^{-1}	4.89×10^{-1}	4.70×10^{-1}	4.45×10^{-1}	4.30×10^{-1}	4.19×10^{-1}	4.11×10^{-1}
8.89×10^{-1}	8.50×10^{-1}	7.92×10^{-1}	7.63×10^{-1}	7.45×10^{-1}	7.33×10^{-1}	7.18×10^{-1}	7.09×10^{-1}	7.03×10^{-1}	6.99×10^{-1}
1.16×10^0	1.13×10^0	1.10×10^0	1.08×10^0	1.07×10^0	1.07×10^0	1.06×10^0	1.06×10^0	1.05×10^0	1.05×10^0
1.66×10^0	1.65×10^0	1.64×10^0	1.63×10^0	1.63×10^0	1.63×10^0	1.63×10^0	1.63×10^0	1.63×10^0	1.63×10^0
2.15×10^0	2.14×10^0	2.14×10^0	2.14×10^0	2.14×10^0	2.14×10^0	2.14×10^0	2.14×10^0	2.14×10^0	2.14×10^0
2.65×10^0	2.65×10^0	2.65×10^0	2.64×10^0	2.64×10^0	2.64×10^0	2.64×10^0	2.64×10^0	2.64×10^0	2.64×10^0
3.14×10^0	3.14×10^0	3.14×10^0	3.14×10^0	3.14×10^0	3.14×10^0	3.14×10^0	3.14×10^0	3.14×10^0	3.14×10^0
3.82×10^0	3.82×10^0	3.82×10^0	3.82×10^0	3.82×10^0	3.82×10^0	3.82×10^0	3.82×10^0	3.82×10^0	3.82×10^0
4.37×10^0	4.37×10^0	4.37×10^0	4.37×10^0	4.37×10^0	4.37×10^0	4.37×10^0	4.37×10^0	4.37×10^0	4.37×10^0
4.91×10^0	4.91×10^0	4.91×10^0	4.91×10^0	4.91×10^0	4.91×10^0	4.91×10^0	4.91×10^0	4.91×10^0	4.91×10^0
5.42×10^0	5.42×10^0	5.42×10^0	5.42×10^0	5.42×10^0	5.42×10^0	5.42×10^0	5.42×10^0	5.42×10^0	5.42×10^0

3、地下水流向非完整井的非稳定流运动

在承压水层中非完整井抽水是属于三维流问题，在不完整井附近要考虑渗透速度的垂直分量。对于无越流补给的承压含水层中的非完整井（图 8-18），假设滤水管安装在含水层的底部（或顶部），滤水管顶部与隔水顶（底）板距离为 m_d 。观测孔滤水管位置与抽水孔一致，离抽水孔的距离 $r < 1.5M$ （ M 为含水层厚度），其他假设条件与泰斯解假设条件一样。

渗流的微分方程式：

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (8-21)$$

定解条件：

$$s(r, z, 0) = 0$$

$$s(\infty, z, 0) = 0$$

$$\frac{\partial s(r, z, 0)}{\partial z} = \frac{\partial s(r, M, t)}{\partial z} = 0$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} (L_r \frac{\partial s}{\partial r}) = \begin{cases} 0 & 0 < z < m_d \\ -\frac{Q}{2pK}, & m_d < z < M \end{cases}$$

则离抽水井 r 处观测孔中的水位降为：

$$s = \frac{Q}{4pT} \left\{ \int_0^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy + \frac{2M^2}{p^2 L^2} \sum_{n=1}^\infty \frac{1}{n^2} \sin^2 \left(\frac{np m_d}{M} \right) \right\}$$

$$\int_u^{\infty} \frac{1}{y} \exp \left[-y - \frac{\left(\frac{np r}{M} \right)^2}{4y} \right] dy = \frac{Q}{4pT} W \left(u, \frac{r}{M}, \frac{l}{M} \right) \quad (8-22)$$

式中 $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$

M ——含水层厚度 (m);

l —— $M - m_d$, 即滤水管长度 (m);

m_d ——含水层顶 (底) 板到滤水管顶 (底) 部的距离 (m)。

$W \left(u, \frac{r}{M}, \frac{l}{M} \right)$ ——无越流补给的均质各向同性承压含水层中非完整井的井函数, 见表 8-9。

在 $r > 1.5M$ 处, 由于承压含水层的流线已接近水平, 渗透速度的垂直分量可以忽略不计, 因此, 利用 $r > 1.5M$ 处的观测资料就可以不考虑非完整井的影响而符合泰斯解。

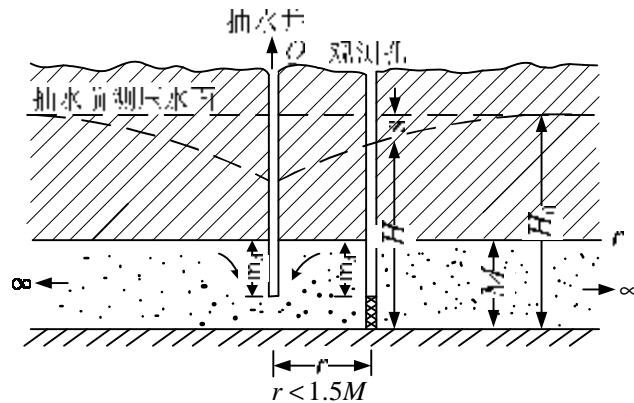


图 8-18 无越流补给承压含水层中不完整井

表 8-9 $W(u, r/M, l/M)$ 数值表 (据沃尔顿)

l/M ur/M	0.25						
	1.00	0.75	0.20	0.10	0.03	0.01	0.001
10^{-6}	13.3385	13.9367	16.2123	18.9845	25.1707	31.4176	44.9718
10^{-5}	11.0359	11.6341	13.9097	16.3794	22.8681	2.1150	40.7960
10^{-4}	8.6334	9.3316	11.6072	14.3794	30.5656	26.7666	33.5338
10^{-3}	6.4317	7.0299	9.3055	12.0777	18.2045	22.6026	24.9428
10^{-2}	4.1381	4.7363	7.0119	9.7382	13.8971	15.3684	15.9702
10^{-1}	1.9231	2.5213	4.4451	5.7545	6.8298	7.1101	7.1913
1	0.2981	0.4959	0.7160	0.7856	0.8493	0.8549	0.8531
2	0.0806	0.1271	0.1675	0.1794	0.1900	0.1875	0.1893

3	0.0245	0.0366	0.0454	0.0472	0.0501	0.0481	0.0481
---	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

续表

$\begin{array}{c} l/M \\ ur/M \end{array}$	0.50					
	0.5	0.2	0.1	0.03	0.01	0.001
10^{-6}	13.5665	14.4689	15.4989	17.6358	19.7506	24.2954
10^{-5}	11.2639	12.1663	13.1963	15.3332	17.4498	21.1506
10^{-4}	8.9614	9.8638	10.8938	13.0307	15.1224	17.0340
10^{-3}	6.6597	7.5621	8.5921	10.6994	11.9812	12.5845
10^{-2}	4.3661	5.2685	6.2757	7.4555	7.8851	8.0462
10^{-1}	2.1511	2.8822	3.2620	3.5305	3.6050	3.6304
1	0.0334	0.3986	0.4185	0.4319	0.4349	0.4353
2	0.0808	0.0910	0.4942	0.0964	0.0966	0.0968
3	0.0223	0.0247	0.0252	0.0254	0.0254	0.0255

续表

$\begin{array}{c} l/M \\ ur/M \end{array}$	0.75		
	0.1	0.01	0.001
10^{-6}	13.8767	15.2580	16.7637
10^{-5}	11.5741	12.9554	14.2530
10^{-4}	9.2716	10.6478	11.3995
10^{-3}	6.9699	8.1392	8.3991
10^{-2}	4.6712	5.2967	5.3635
10^{-1}	2.2597	2.4103	2.4193
1	0.2823	0.2898	0.2898
2	0.0634	0.0643	0.0645
3	0.0167	0.0169	0.0169

三、地下水流向直线边界附近完整井的运动

含水层在侧向延伸不是无限的，其侧面在一定范围内会受到直线补给边界（如河流）或隔水边界（如含水层突然尖灭）的限制，这必然会影响地下水运动。解决这类问题可以采用“汇点源点映射法”来处理。

直线边界就象一面镜子，有一个实体就有一个映像，如当有二个或二个以上的直线边界组成一定的形状（如矩形等）时，实体与映像的多次反射可形成若干个映像。如一条补给边界，假设补给边界上在抽水过程中水头保持不变，这就必须在边界另一侧有一个与实井到边界距离相等的虚井同时以相同的流量注水，这个假设才能实现这个注水井表示水流沿径向流出（图 8-19），渗透理论中把这种直径无限小的注水井称为源点。相反在隔水边界上为了保持其流量为零，就必须在边界另一侧也有一个与实际边界相等的虚井同时以相同的流量在抽水，在边界形成一个分水岭才能实现这个抽水井表示水流沿径向被吸收（图 8-20），渗流理论中将这种直径无限小的抽水井称为汇点。将这些虚设的抽水井或注水井分别代表隔水边界或补给边界的存在。则在直线边界附近抽水对含水层中任意点引起水位降应为所有实井与虚井对该任意点引起的水位降的叠加。

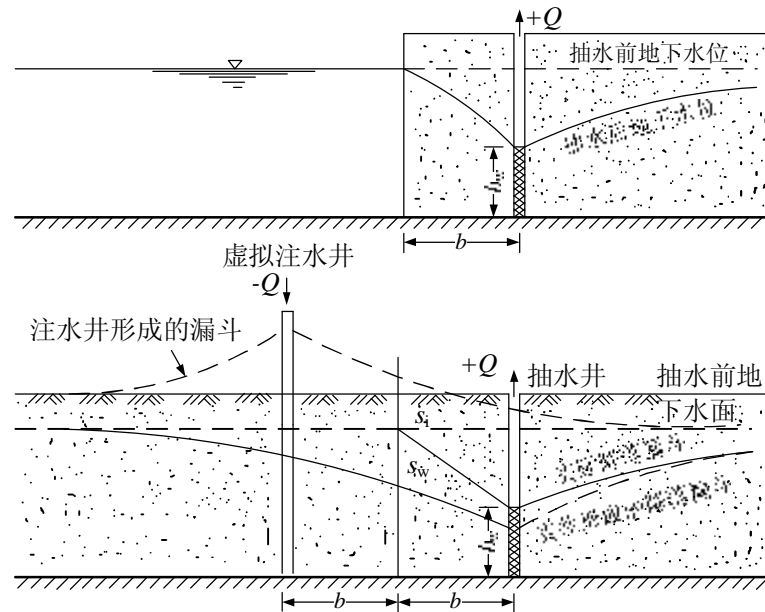


图 8-19 一条直线补给边界附近的抽水井

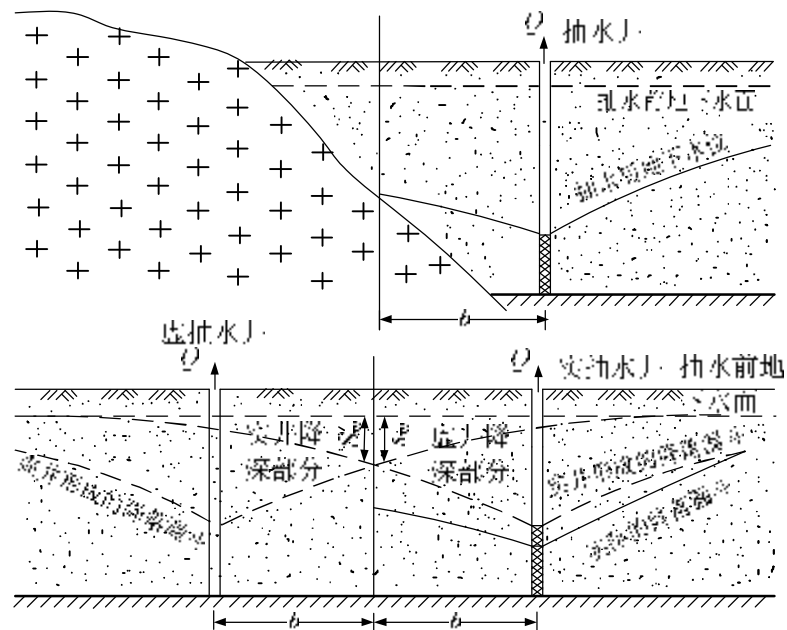


图 8-20 一条直线隔水边界附近的抽水井

1、半无限含水层

半无限含水层是指含水层有一条直线边界。

(1)、直线补给边界 (图 8-19): 相当于受等流量的一个汇点和一个源点的共同作用, t 相当大时:

$$\text{抽水井的水位降: } s_w = \frac{Q}{4pT} \left(\ln \frac{2.25at}{r_w^2} - \ln \frac{2.25at}{(2b)^2} \right) = \frac{Q}{2pT} \ln \frac{2b}{r_w} \quad (8-23)$$

$$\text{任意点的水位降: } s = \frac{Q}{2pT} \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (8-24)$$

式中 r_2 ——虚井到任意点的距离 (m);

r_1 ——实井到任意点的距离 (m);

b ——虚井到补给边界的距离 (m);

r_w ——实井的半径 (m);

a ——导压系数 (m^2/d)。

(2)、直线隔水边界 (图 8-20): 相当于受二个等流量的汇点的共同作用, t 相当大时:

$$\text{抽水井的水位降: } s_w = \frac{Q}{4pT} 2 \left(\ln \frac{\sqrt{2.25at}}{r_w} - \ln \frac{\sqrt{2.25at}}{2b} \right) = \frac{Q}{2pT} \ln \frac{2.25at}{2r_w \cdot b} \quad (8-25)$$

$$\text{任意点的水位降: } s = \frac{Q}{2pT} \ln \frac{2.25at}{r_1 \cdot r_2} \quad (8-26)$$

式中 b ——实井到隔水边界的距离 (m)。

2、象限含水层

含水层受二条相互垂直的直线边界所限。

(1)、一条补给边界, 一条隔水边界 (图 8-21)

相当于等流量的两个汇点, 二个源点共同作用, t 相当大时:

$$\begin{aligned} \text{抽水井的水位降: } s_w &= \frac{Q}{4pT} \left(\ln \frac{2.25at}{r_w^2} + \ln \frac{2.25at}{r_2^2} - \ln \frac{2.25at}{r_3^2} - \ln \frac{2.25at}{r_4^2} \right) \\ &= \frac{Q}{2pt} \ln \frac{r_3 \cdot r_4}{r_w \cdot r_2} \end{aligned} \quad (8-27)$$

$$\text{任意点的水位降: } s = \frac{Q}{2pT} \ln \frac{r_3 \cdot r_4}{r_w \cdot r_2} \quad (8-28)$$

式中 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 ——实井和虚井到计算点的距离 (m);

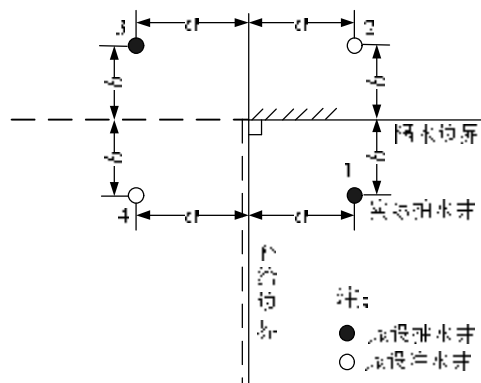


图 8-21 相互垂直的直线补给边界和隔水边界附近的完整井

(2)、二条补给边界 (图 8-22)

相当于二个抽水井与二个注水井等流量注水的共同作用, t 相当大时:

$$\text{抽水井的水位降: } s_w = \frac{Q}{2pT} \ln \frac{r_2 \cdot r_4}{r_w \cdot r_1} \quad (8-29)$$

$$\text{任意点的水位降: } s = \frac{Q}{2pT} \ln \frac{r_2 \cdot r_4}{r_1 \cdot r_3} \quad (8-30)$$

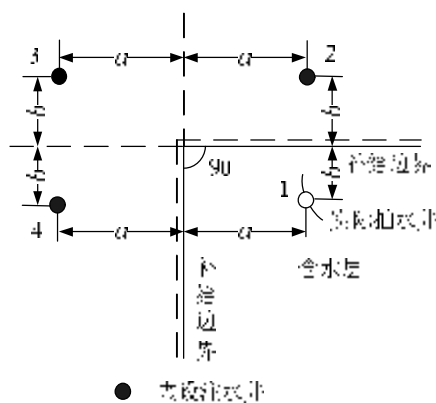


图 8-22 两条相互垂直的直线补给边界附近的抽水井

(3)、二条隔水边界 (图 8-23)

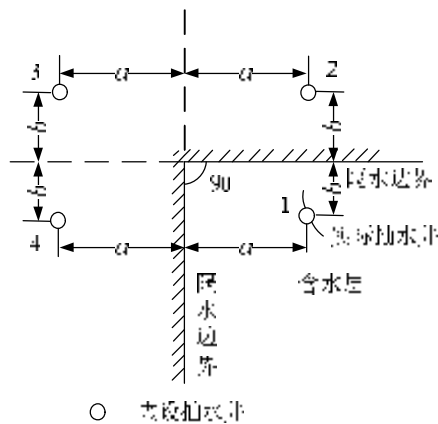


图 8-23 两条相互垂直的直线隔水边界附近的抽水井

相当于 4 个等流量抽水井的共同作用, t 相当大时:

$$\text{抽水井的水位降: } s_w = \frac{Q}{2pT} \ln \frac{(2.25at)^2}{r_w \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4} \quad (8-31)$$

$$\text{任意点的水位降: } s = \frac{Q}{2pT} \ln \ln \frac{(2.25at)^2}{r_w \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4} \quad (8-32)$$

3、条形含水层

位于平行边界内的含水层, 称为条形含水层, 它形如两面平行的镜子, 抽水孔位于其间, 会出现无数次映射, 得到一个无限长的流量抽水的井排, 根据边界性质不同, 这些源点与汇点和抽水井对于任意点产生的水位降的叠加之和, 即为条形含水层中抽水井对于任意点引起的水位降。见图 8-24 和图 8-25。

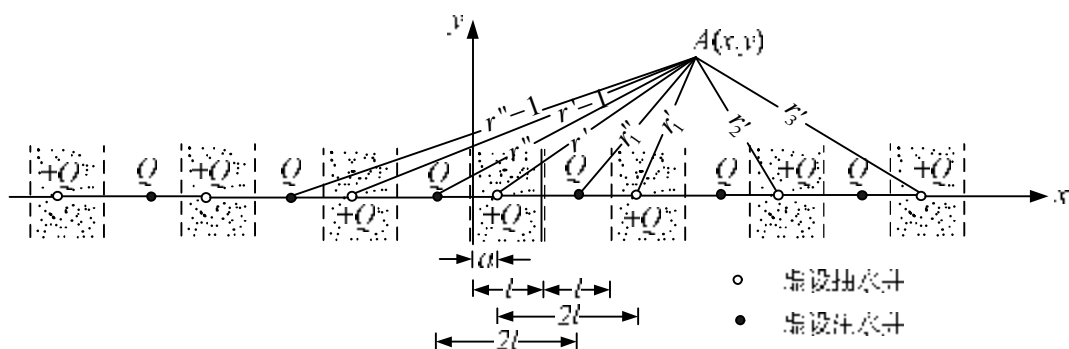


图 8-24 两条平行直线补给边界附近的抽水井

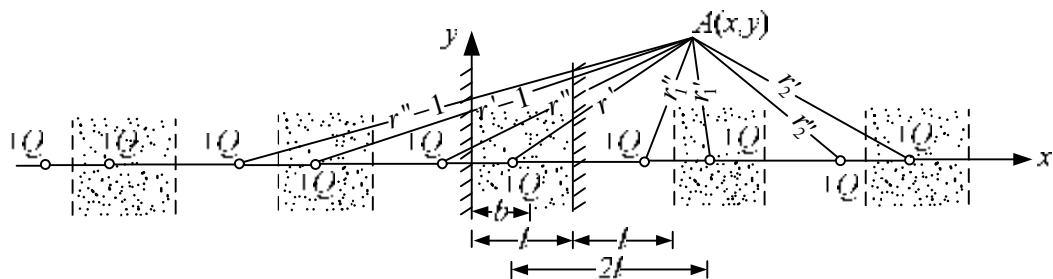


图 8-25 两条平行直线隔水边界附近的抽水井

4、矩形含水层

含水层为二组正交的断层所分割, 形成矩形含水层, 可以看作条形含水层出现的无数次映射, 形成一个无限长的等流量抽水井排的再一次映射, 得到二个无限长井排, 根据边界性质不同, 将所有的源点与汇点以及抽水井抽水对任意点产生的水位降叠加之和, 即为在矩形含水层中抽水井对任意点引起的水位降 (见图 8-26)。

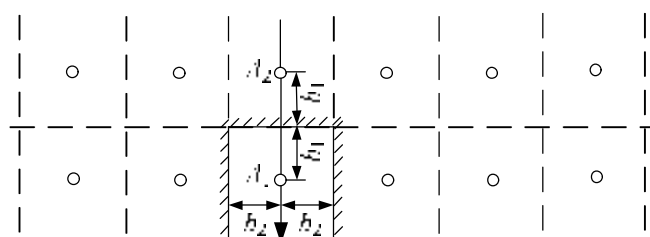


图 8-26 矩形含水层中的抽水井

四、井群干扰的计算

群井降水时对含水层任意点所引起的水位降，等于各个井对于该点引起的水位降的叠加，这就是叠加原理。降水设计一般要检验不同地段含水层的水位降深是否符合要求，因而涉及井群干扰计算问题，一般应验算基坑最不利点的水位降。

1、稳定流完整井井群干扰水位计算

有 n 个降水井，按任意方式布置互相干扰，其流量分别为 Q'_1 、 Q'_2 、…… Q'_n ，若 A 点为井群影响范围内的任意点，它至各井的距离依次为 x_1 、 x_2 、…… x_n 。

承压井群

$$H = H_0 - \frac{1}{2pKM} \left(Q'_1 \ln \frac{R_1}{x_1} + Q'_2 \ln \frac{R_2}{x_2} + \dots + Q'_n \ln \frac{R_n}{x_n} \right) \quad (8-33)$$

潜水井群

$$H = \sqrt{H_0^2 - \frac{1}{pK} \left(Q'_1 \ln \frac{R_1}{x_1} + Q'_2 \ln \frac{R_2}{x_2} + \dots + Q'_n \ln \frac{R_n}{x_n} \right)} \quad (8-34)$$

如各井流量相等，影响半径相等，则可简化为

承压井群

$$H = H_0 - \frac{1}{2pKM} \left[\ln R - \frac{1}{n} \ln(x_1 x_2 \dots x_n) \right] \quad (8-35)$$

潜水井群

$$H = \sqrt{H_0^2 - \frac{Q}{pK} \left[\ln R - \frac{1}{n} \ln(x_1 x_2 \dots x_n) \right]} \quad (8-36)$$

式中 H ——含水层任意点的动水位 (m)；

H_0 ——含水层静水位 (m)。

2、非稳定流井群干扰降深计算

含水层中有 n 口井降水，抽水量分别为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、…… Q_n 各井离观测点的距离为 r_1 、 r_2 、 r_3 、…… r_n ，则观测点引起的水位降为各井单独抽水时在该点引起的水位降 s_1 、 s_2 、 s_3 、…… s_n 的和。则

$$s = \sum_{i=1}^n s_i = \frac{Q_1}{4pT} W(u_1) + \frac{Q_2}{4pT} W(u_2) + \dots + \frac{Q_n}{4pT} W(u_n) = \frac{1}{4pT} \sum_{i=1}^n Q_i W(u_i) \quad (8-37)$$

$$\text{式中 } u_1 = \frac{r_1^2 s}{4Tt}, \quad u_2 = \frac{r_2^2 s}{4Tt}, \quad \dots, \quad u_i = \frac{r_i^2 s}{4Tt}, \quad \dots, \quad u_n = \frac{r_n^2 s}{4Tt}$$

当各个井的抽水量呈阶梯状变化时，共有 m 个阶梯，则在任一观测点的水位降为：

$$s = \frac{1}{4pT} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[Q_{i,j} W(u_{i,j}) + \sum_{i=1}^n (Q_{i,j} - Q_{i,j-1}) W(u_{i,j}) \right] \right\} \quad (8-38)$$

式中 $Q_{i,j}$ ——第 i 口井，第 j 个阶梯的抽水量 (m^3/d)

$$u_{i,j} = \frac{r_i^2 s}{4T(t-t_j)};$$

$W(u_{i,j})$ ——与 $u_{i,j}$ 相对应的泰斯井函数。

8.6 地下水的渗透破坏作用

渗透破坏是指岩土体在地下水渗流作用下土颗粒发生移动和土的结构发生改变的现象，主要形式有流砂、管涌和突涌，这些破坏作用常常发生在基坑开挖或隧道掘进过程中。其发生都与地下水的渗透压力密切相关。

地下水在渗流过程中对土骨架的作用力叫渗透压力，单位为 KN/m^3 。地下水渗流时受到土骨架的阻力，其值与渗透压力相等，方向相反。渗透压力与水力梯度有如下关系：

$$G_D = g_w i \quad (8-39)$$

取水的容重 $g_w = 1$ ，则渗透压力 G_D 的大小与水力坡度的绝对值相等。在渗流过程中，如水自上而下渗流，则渗透压力的方向与重力方向相同，加大了土粒之间的压力；若水自下而上渗流，则渗透压力的方向与重力方向相反，将减少土粒之间的压力。当渗透压力等于土的浮容重 g' 时，土粒之间就没有压力，理论上处于悬浮状态，土粒将随渗流水一起流动，造成渗透破坏。

一、流砂

流砂是指松散细颗粒土被地下水饱和后，在渗透压力的作用下，产生的悬浮流动现象。流砂多发生在颗粒级配均匀而且比较细的粉、细砂等砂性土中，有时在粉土中亦会发生。其表现形式是所有颗粒同时从一近似于管状的通道中被渗透水流冲走。流砂发展的结果是使基础发生滑移或不均匀下沉，基坑坍塌，隧道侧壁、掌子面塌方等。流砂通常是由于工程活动而引起，在有地下水出露的斜坡、岸边或有地下水溢出的地表面也会发生。流砂破坏一般比较突然，尤其是在管道渗漏水严重的地段，往往防不胜防，对工程危害很大。流砂形成的基本条件是：

1、岩性条件：土层由粒径均匀的细颗粒组成，一般粒径在 0.01mm 以下的颗粒含量在 $30\% \sim 35\%$ 以上，并含有较多的片状、针状矿物(如云母、绿泥石等)和附有亲水胶体矿物颗粒，从而增加了岩土的吸收水膨胀性，降低了土粒重量。在不大的水流冲力下，细小土颗粒即会发生悬浮流动。

2、水动力条件：水力梯度较大，流速增大，渗透压力超过了土颗粒的重量时，就能使土颗粒悬浮流动形成流砂。基坑或隧道侧壁表面由里向外水平方向受地下水渗透作用时，流砂破坏的临界水力梯度为：

$$\text{砂性土 } i_{cr} = G_w(\cos\theta \tan\varphi - \sin\theta) / \gamma_w \quad (8-40)$$

$$\text{粘性土 } i_{cr} = (G_w(\cos\theta \tan\varphi - \sin\theta) + c) / \gamma_w \quad (8-41)$$

可按单位土体进行计算。

式中 G_w ——土的浮重，即土的浮容重乘以土的体积（KN）；

φ ——土的内摩擦角；

c ——土的粘聚力；

γ_w ——水的容重（ KN/m^3 ）；

θ ——基坑或隧道侧壁坡度。

二、管涌

地基土在具有一定渗流速度的渗透水流作用下，其细小颗粒被冲走，岩土的空隙逐渐增大。慢慢形成一种能穿越地基的细管状渗流通道，从而掏空地基，使地基、基坑边坡或隧道侧壁变形、失稳，此现象称为管涌。管涌通常是由于工程活动而引起的，但在有地下水出露的斜坡、岸边或有地下水溢出的地带也有发生。

管涌发生在非粘性土中，其特征是：颗粒大小差别较大，往往缺少某种粒径，空隙直径大而且互相连通。颗粒多由比重较小的矿物组成，易随水流动，有较大和良好的渗流出路。

管涌发生的条件包括:

- (1) 土中粗细颗粒粒径比 $D/d > 10$;
- (2) 土的不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10} > 10$;
- (3) 两种互相接触的土层渗透系数之比 $k_1/k_2 > 2 \sim 3$;
- (4) 渗流水力梯度大于土的临界梯度。

对于管涌的防治措施,一方面是通过降水降低水力梯度,同时在水流溢出处设置反滤保护层。

三、突涌

当基底下有承压水存在,基坑或隧道开挖减小了含水层上覆不透水层的厚度,在厚度减小到一定程度时,承压水的水头压力能顶裂或冲毁基坑底板,造成突涌现象。基坑突涌将会破坏地基强度,并给施工带来很大困难。基坑突涌主要有三种形式:

- ① 基底顶裂,出现网状或树枝状裂缝,地下水从裂缝中涌出,并带出下部土颗粒;
- ② 基坑底发生流砂现象,从而造成边坡失稳和整个地基悬浮流动;
- ③ 基底发生类似于“沸腾”的喷水冒砂现象,使基坑积水,严重扰动地基土。

关于基坑突涌产生条件,如图8-27所示,基坑底不透水层厚度与承压水头压力的平衡条件如下式:

$$H < \frac{\gamma_w h}{\gamma} \quad (8-42)$$

式中 H ——基坑开挖后不透水层的厚度(m);

γ_w ——水的容重(kN/m^3);

γ ——不透水层土的容重(kN/m^3);

h ——承压水水头高于含水层顶板的高度(m)。

为防止基坑突涌,首先应查明基坑范围内不透水层的厚度、岩性、强度及其承压水头高度,承压水含水层顶板的埋深等,然后按式(8-42)验算基坑开挖到预计深度时基底能否发生突涌。若能发生突涌,应采取降水措施把承压水头降低到某一许可值。

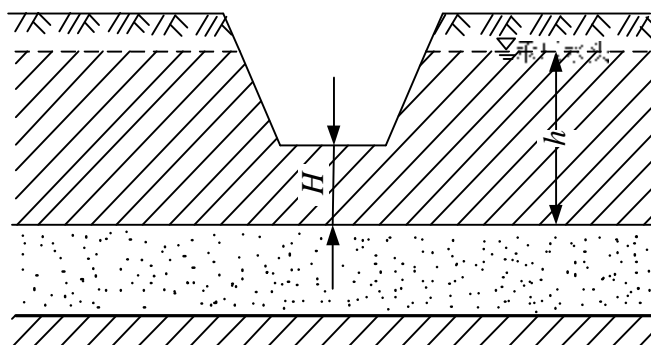


图 8-27 基坑突涌验算示意图

第 9 章 地下水对地铁等地下工程施工的影响

根据地铁线路所处位置不同的水文地质条件和地铁结构与地下含水层的相对关系,以及结构设计是否设置止水帷幕(包括地下连续墙),地下水对地铁工程施工的影响程度各有不同。

9.1 设置有止水帷幕的情况

为了能够在最大限度上减小降水施工对环境的影响，滨海、滨江城市的地铁明、暗挖施工一般都设置有止水帷幕。地下水对地铁工程施工的影响大致有以下两种情形：

1、止水帷幕深入到含水层下部的隔水层中（图 9-1a），止水帷幕将基坑内、外的地下水完全分隔开来，基坑内、外地下水失去水力联系，且下部含水层水头对基坑底板土层的顶托力在安全范围内。这种情形地下水对地铁工程施工的影响程度最小，只需在基坑内设置疏干井把含水层疏干。降排水量即含水层给水度与含水层体积之积。如采用真空方法降水，还可以排出一部分弱透水层的毛细水和弱结合水，降低土体含水量。

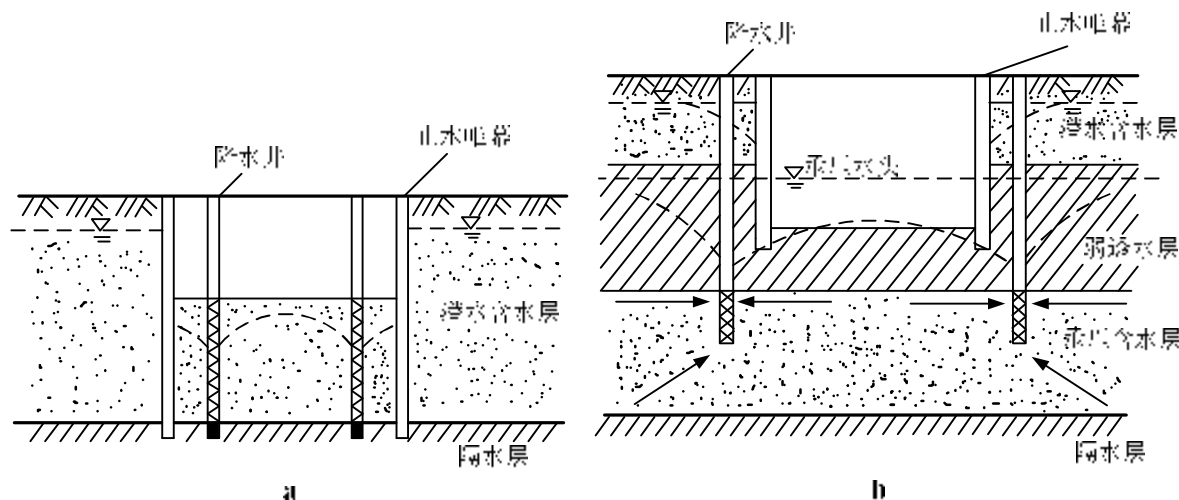


图 9-1 基坑设置有止水帷幕情况下地下水影响示意图

2、止水帷幕深入到地铁结构所处含水层以下的隔水层中（图 9-1b），没有封闭对基底土层构成顶托作用的下部承压含水层，止水帷幕将基坑内、外的地下水完全分隔开来，基坑内、外的潜水及层间水失去水力联系，但下部承压含水层水头对基坑底板土层构成突涌威胁。这种情形除需在基坑内设置疏干井把含水层疏干外，还需在基坑外设置降压井把承压水头降低到安全范围内。

9.2 不设置止水帷幕的情况

位于冲洪积扇上的城市修建地铁，一般都不设置止水帷幕，如北京、沈阳、成都等城市。一方面是降水引起的地层压缩量很小，对建构筑物的影响较小；另一方面是含水层颗粒粗且厚度大，止水帷幕施做到地铁结构所处含水层以下隔水层的难度很大，而且止水帷幕的工程造价也很高。地下水对地铁工程施工的影响大致有以下几种情形：

1、潜水影响

单一受潜水影响的地段主要位于冲洪积扇的中部和中上部，含水层岩性主要是砂卵石、砂砾石，由于地层透水性好，富水性强，因而对地铁结构施工影响较大。

(1)、地铁结构底板处于潜水含水层中部时（图 9-2），根据降深要求和潜水厚度大小采用潜水完整井或非完整井降水可达到无水作业要求，但如果潜水含水层透水性很强，厚度又比较大时，涌水量很大，需加强构筑排水系统。如沈阳地铁二号线工程主要受巨厚的潜水影响，降排水量极大。

(2)、地铁结构底板处于潜水含水层底部或已进入潜水含水层底板时(图 9-3)，需疏干地铁结构范围的潜水，这种情况的降水难度较大，一般可采用潜水—承压水混合降水井，以抽渗结合的方式降水。

如果降水井的密度不足，则潜水层底板上的界面水将持续影响地铁掘进施工，这时还需在洞内进行辅助排水措施。

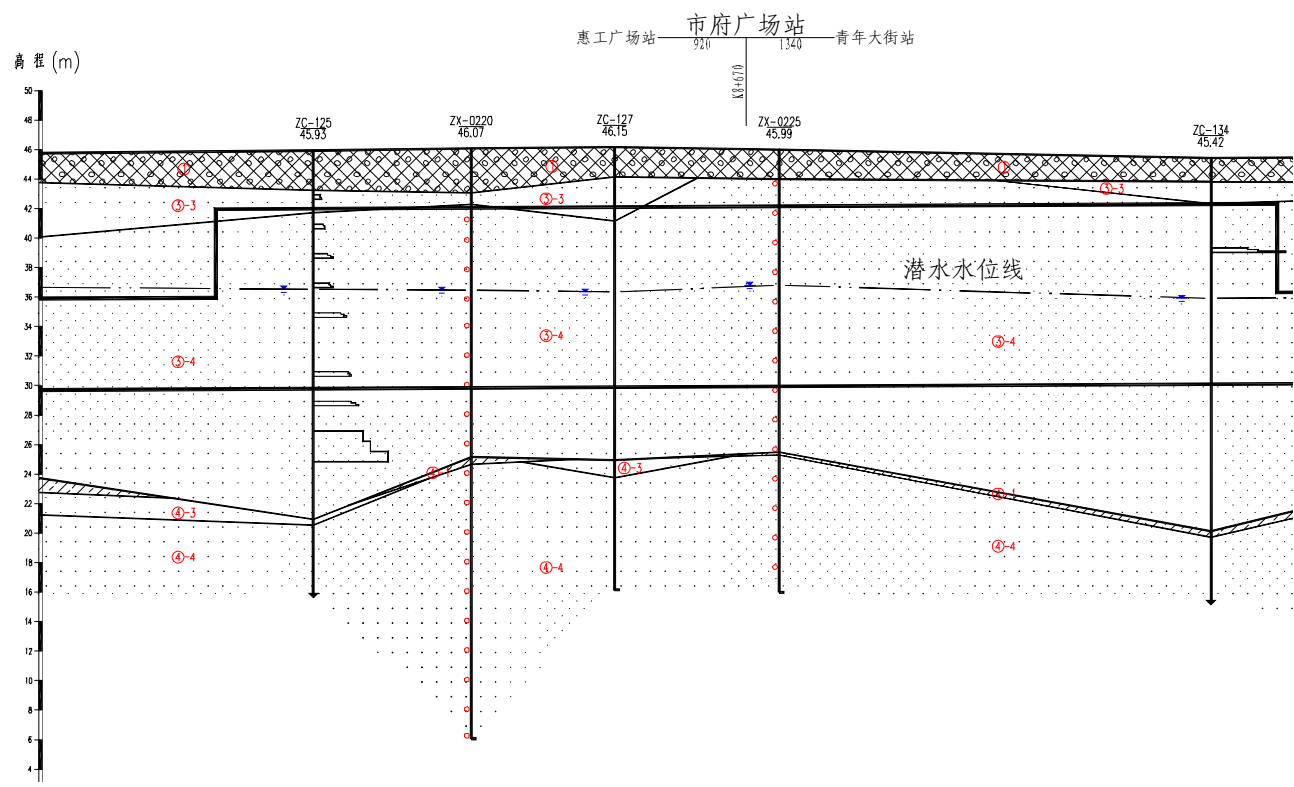


图 9-2 沈阳地铁二号线市府广场站结构与地下水关系图

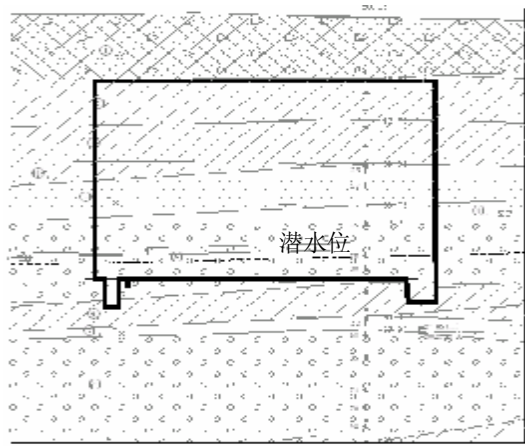


图 9-3 北京地铁四号线西四站结构与地下水关系图

2、承压水影响
地铁工程单纯受承压水影响在以下两种情况下存在：

(1)、在冲洪积扇中部，潜水层已趋于疏干，但承压水水头较高（图 9-4）。

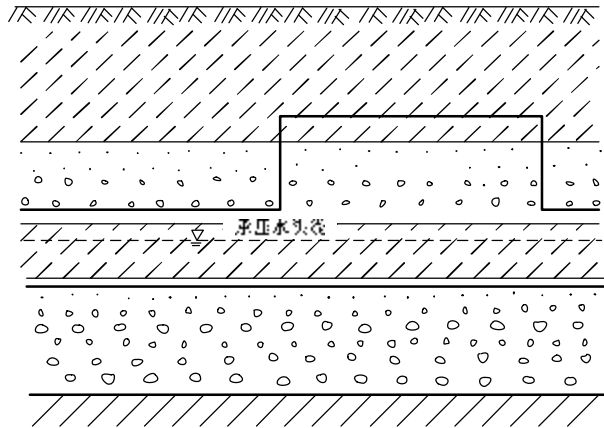


图 9-4 北京地铁复八线天西站结构与地下水关系图

(2)、地铁隧道只在承压含水层中掘进，承压含水层顶板为硬塑粘性土，厚度大于 3m，且平面上分布稳定。这种情况下，一般可不考虑上部潜水的影响，而根据降深要求和承压含水层厚度大小采用承压完整井或非完整井降水即可。在井的结构处理上应封闭好上部潜水含水层。

3、潜水和承压水共同影响

地铁结构埋深较大，受潜水和承压水共同影响的情况很常见，主要有以下两种情况。

(1)、地铁结构底板处于承压含水层顶板之上(图 9-5)，由于压力水头较高，基础底板下的土层厚度不能满足抗突涌的要求。降水需疏干潜水并降低承压水头，降压只要达到地铁开挖满足抗突涌要求即可，无须将承压水头降到槽底以下。一般可采用潜水—承压水混合降水井，以抽渗结合的方式降水。

(2)、地铁结构底板处于承压含水层中(图 9-6)。降水不仅要疏干潜水并降压，还必须将水位降到结构底以下 0.5m，才能满足地下结构施工的要求，此时承压水层由承压过渡到无压状态。一般可采用潜水—承压水混合降水井，以抽渗结合的方式降水。

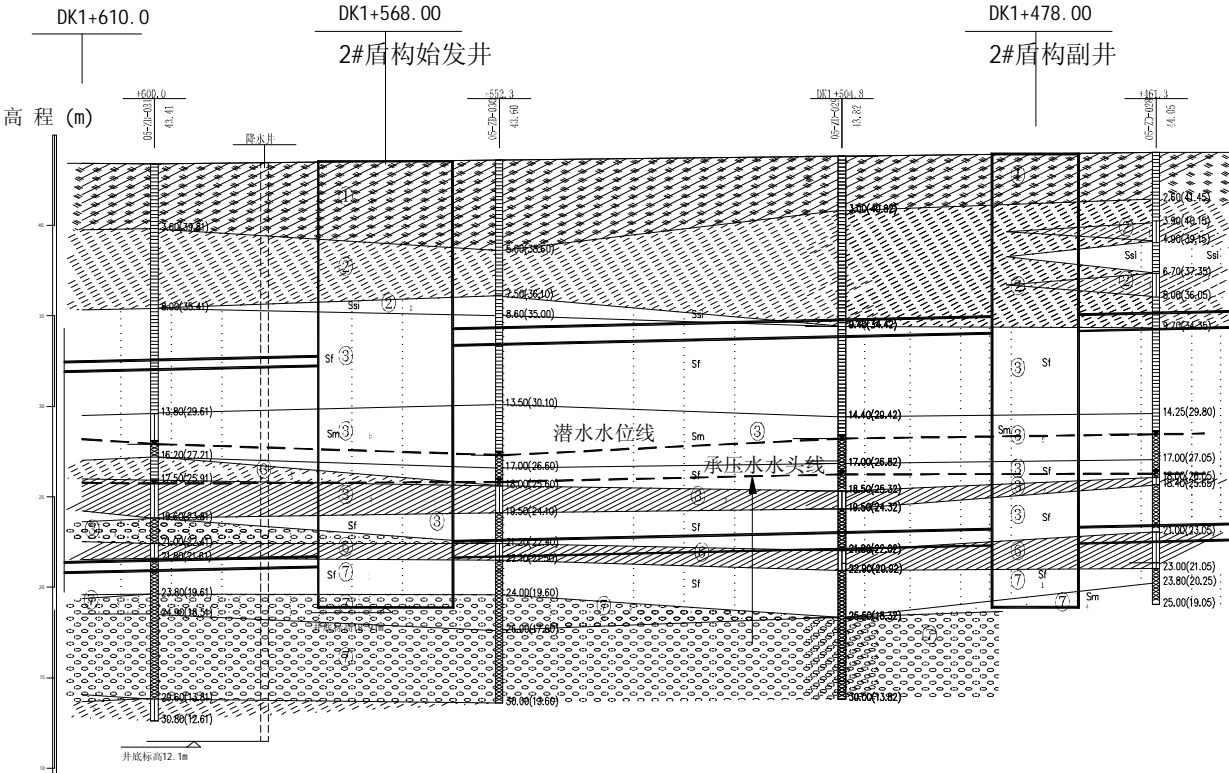


图 9-5 北京地铁直径线 2#盾构竖井结构与地下水关系图

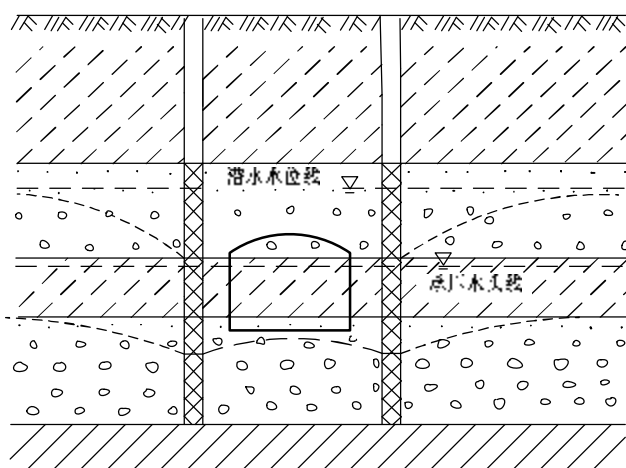


图 9-6 北京地铁复八线王府井站～东单站区间隧道结构与地下水关系图

4、上层滞水影响

城市的地下管网密集，受管道渗漏补给，地铁沿线的很多地段可能存在上层滞水。上层滞水水量不稳定，分布无规律，当补给源位于降水井的外侧时，上层滞水影响一般会得到有效控制。而当补给源存在于地铁结构的顶部时，则很难采取有效的降水措施。这种情况下，上层滞水往往是诱发掌子面塌方的主要原因。对于隧道拱顶上方的上层滞水和补给源，只能在地铁隧道掘进过程中加强对上层滞水水情的探测，进而在洞内或地面采取有效的防范措施。

第 10 章 地下工程施工降水方案与设计计算

地铁工程降水一般针对采用明挖、暗挖方法施工的车站和区间隧道，包括其附属的风井、风道，以及盾构法施工的区间隧道的盾构始发井、接收井和横通道等。

不同地域城市的地铁工程采用的降水方案有着很大差别，甚至截然不同。有时，由于地铁结构施工方法的不同，也会造成降水方案的差异。采用何种降水方案，应认真进行经济和技术论证。我国地域辽阔，大城市所处不同的地质单元，各有特点。如北京、沈阳、成都等城市坐落在山前冲洪积扇上，上海、天津、广州、南京、武汉等滨海、滨江城市，坐落在三角洲或冲积平原之上，而山城重庆则处在河流侵蚀作用强烈的山地。各地的水文地质条件千变万化，三角洲或冲积平原地下含水层颗粒细，含水层多而薄，地下水水位高而不丰富；粘性土隔水层的孔隙比大，固结程度低，抽取地下水会引起严重的地面沉降，修建地铁大多要采用地下连续墙或止水帷幕把外围地下水隔开，然后在槽内降水，或同时在槽外降压，排水量往往不大。山前冲洪积扇地下含水层颗粒粗，透水性强，水量大；粘性土隔水层孔隙比小，固结程度高，降水施工一般不会产生大的环境问题，在基坑或隧道外围实施封闭降水后采用浅埋暗挖方法，或护坡桩、土钉墙支护即可安全进行地铁结构施工，但排水量往往很大，如沈阳地铁某些车站的日排水量甚至超过了 10m^3 。一般来说，建在山前冲洪积扇上的城市采用基坑外围降水方案，无需修筑很厚、很深的地下连续墙，无论是在经济上还是在技术上，都是合理、可行的。

10.1 施工降水的特点、作用、原则和方法

一、施工降水的特点

由于地铁隧道及车站埋深大、线路长，部分地段穿越城市复杂地区，因而降水施工是地铁明、暗挖施工的一项极为重要的技术保障措施。与其它工民建工程的基坑降水相比，地铁工程降水的特点在于：

1、降水范围大

地铁工程降水范围一般都很大，例如：北京地铁复八线全部采用浅埋暗挖法施工，位于地下水位以下的车站和区间总长约 8.5km ，除国贸桥区局部地段管道渗漏严重，采用冷冻法施工外（不足 100m ），全部采用降水法施工，降水范围大体上纵贯了永定河冲洪积扇轴线的中部；北京地铁五号线、十号线、四号线的大部分车站及一半以上的区间隧道采用降水法施工，降水范围横贯了永定河冲洪积扇中上～中下部；沈阳市地处浑河冲洪积扇，由于潜水含水层巨厚，地下连续墙难以封闭含水层，因而全部地铁车站不得不采用降水法施工。

2、降水深度大

地铁工程降水大多为超深降水，例如：北京地铁复八线地面下埋深一般为 $20\sim 23\text{m}$ ，五号线蒲黄榆站～崇文门站埋深为 $20\sim 26.5\text{m}$ ，十号线工体北路站～国贸站埋深为 25m 左右，机场线东直门站埋深为 28m 左右，施工竖井深度达到 33.5m ，北京南站交通枢纽的地铁十四号线预埋深度超过了 30m ；天津站交通枢纽预埋的天津地铁2号线、3号线、9号线的深度接近 30m ；沈阳地铁埋深也达到了 20m 。由于地铁结构埋深大，实际降水深度从几米到二十余米。

3、降水时间长

降水工程需配合土建主体结构施工，延续到二衬结构施工结束，不能因故停止或间断降水。地铁工程降水周期一般都超过2年，至少要历经2个地下水丰、枯水期。对于丰、枯水期地下水动态变化大的地区，应认真分析地下水动态变化对地铁施工的影响。

4、施工难度大

地铁线路大多顺城市主干道延伸，降水工程场地主要位于城市道路上，路面交通繁忙，地下各种管线纵横交错，有的紧临高楼大厦或居民住宅区，有的站体位于大型立交桥下方，施工场地狭窄，施工难度很大。

二、施工降水的作用

- 1、防止基坑和隧道侧壁、基底和掌子面渗水，保持隧道开挖无水作业，便于施工。
- 2、消除地下水渗透压力的影响，防止地层颗粒流失，保证隧道围岩的稳定性。
- 3、减少土体含水量，提高土体物理力学性能指标。对于放坡开挖而言可提高边坡稳定度；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度，减少支护体系的变形；对于浅埋暗挖施工，可提高隧道拱顶和掌子面的稳定性。
- 4、减少土中孔隙水压力，增加土中有效应力，提高土体固结程度，增加隧道围岩抗剪强度，防止塌方发生。
- 5、降低基底下部承压水水头，减小承压水头对基底土层的顶托力，防止基坑和隧道底板突涌。

三、施工降水方案制定的原则

- 1、降水方案制定应符合相关规范、招标文件和地铁结构设计要求。如降水可能影响到市政设施，还应符合相关市政管理部门的具体要求。
- 2、应根据水文地质条件和土建施工工法制定降水方案，并慎重分析降水对周边环境的影响，必要时采取应对措施，以消除影响。
- 3、降水方案应进行经济、技术论证，以符合土建结构施工对安全、质量、进度的要求，做到经济合理。
- 4、降水方案应充分考虑区域上已完工地下工程和可能造成大量补给的地表水体的影响作用。

四、施工降水方法的选择

降水方法选择时需综合考虑工程场地水文地质条件、现场施工条件、施工对周边环境影响等因素，并结合当地降水施工的经验进行，无经验时可参考《建筑与市政降水工程技术规范》（JGJ/T111-98）选择降水方法（表10-1）。

表10-1 降水方法及适用范围

降水技术方法	适合地层	渗透系数(m / d)	降水深度(m)
明排井(坑)	粘性土、砂土	<0.5	<2
轻型井点	粘性土、粉质粘土	0.1~20.0	单级<6 多级<20
喷射井点	砂土	0.1~20.0	<20
电渗点井	粘性土	<0.1	按井类型确定
引渗井	粘性土、砂土	0.1~20.0	根据水文地质条件综合确定
管井	砂土、碎石土	1.0~200.0	>5
大口井	砂土、碎石土	1.0~200.0	<20
辐射井	粘性土、砂土、砾砂	0.1~20.0	<20
潜埋井	粘性土、砂土、砾砂	0.1~20.0	<2

一般来说，针对山前冲洪积扇、冲积平原和基岩地区地铁工程降水，可以采用以管井为主的降水方法。对于穿过建、构筑物的地段，可以考虑采用辐射井方法降水。对于滨海、滨江等含水层颗粒细的地区，可考虑在止水帷幕内采用真空方法降水，减压井一般都采用管井形式。

10.2 制定施工降水方案应掌握的资料

由于地铁结构埋深不一，明、暗挖的施工方法不同，明挖基坑支护结构型式多样；工程场地水文地质

条件和复杂程度不同；场地周围的环境要求的差异等，使得降水方案因地制宜，个别地段甚至非常复杂。因此，在制定降水方案前，应对相关资料进行收集、分析和整理，以免造成不必要的损失。

一、地质、水文地质资料

1、区域的地质、水文地质资料、包括区域的地层、地质构造、第四纪地质和地貌，地下水的类型、含水层分布及边界条件、地下水的补给、径流和排泄、地表水和地下水的水力联系以及场地处于区域地质、水文地质单元等。

2、场地的岩土工程详细勘察报告。其中应包括有估算降水引起的地面变形应掌握的参数：孔隙比(e)、压缩系数(a_v)、压缩模量(E_s)等。

3、工程场地降水涉及范围内的含水层及隔水层的水文地质参数，包括：渗透系数(K)、给水度(μ)弹性释水系数(S)、导水系数(T)、导压系数(a)、越流参数(B)、自然状态下地下水水力坡度(i)等。

二、基坑支护结构设计资料

基坑的支护结构设计对基坑的降水设计关系密切，基坑的开挖和支护，对相关的含水层和隔水层来说，除天然的边界条件外又增加了一个人工的边界。这个人工边界的形状、大小、插入深度和阻水条件等，与降水井布置共同影响着地下水渗流场。因此，在降水设计前必须掌握支护结构设计和各个施工工况的详细资料，包括：

- 1、基坑形状、大小、开挖深度、开挖方法。
- 2、基坑支护结构形式，包括采用放坡开挖、重力式挡墙、土钉墙、排桩、止水帷幕、地下连续墙等。
- 3、支护结构设计对各个工况的要求。
- 4、各个工况条件下，可能引起的支护结构的变形和周围地面的变形预测资料。

三、工程场地周边的环境状况资料

1、地下管线资料。包括上水管、煤气管、输油管线、供电线路管沟、电信管沟、雨污水等管线离基坑或隧道的距离、埋深、管径及重要程度的资料。特别应加强对隧道结构上方地下管线资料的收集和整理。

2、基坑周边的建筑物，包括建筑的基础埋深、基础形式和上部结构形式，以及这些建筑物的沉降和变形的现状。

3、市政设施情况，包括地铁沿线地下隧道、立交桥、高架道路等的规模、范围、深度、走向、基础形式及其使用现状。

- 4、不同建、构筑物允许的最大变形量。

10.3 水文地质勘察的内容及要求

针对地铁工程降水开展的水文地质勘察是岩土工程勘察的重要部分，目的是查明地下水类型，含水层与隔水层的空间分布，地下水渗透性，地下水水位动态，地下水的补给、径流、排泄条件，以及地下水与地表水之间的补排关系，为降水设计和降水施工提供依据。

水文地质勘察应与不同岩土工程勘察阶段的工作内容和要求相一致，并同时进行。具体的勘察内容和工作量应根据水文地质条件的复杂程度和设计要求而定。条件复杂时可以1个车站或1个区间为勘察单元，条件简单时可以某个里程段（包括几个车站和几个相邻区间）为勘察单元。水文地质勘察成果可以单独形成专项报告，也可以与岩土工程勘察成果一并形成统一的岩土工程勘察报告。

一、勘察孔布置

勘察孔的布置以查明降水范围内的水文地质条件为原则。不同勘察单元的每个含水层不少于一个勘察孔、一个抽水试验井、一个观测孔。条件复杂时，勘察孔数量应适当增加。勘察孔可以与其它岩土勘察孔相结合，勘察孔布置应能控制降水范围内地层的平面分布，并查明基底以下的含水层，勘察孔孔径不宜小于90mm，深度应大于降水深度的2倍，冲洪积扇地区的勘察孔深度可适当减小。

二、抽水试验

抽水试验是水文地质勘察的重要试验方法。其目的是测定含水层参数，评价含水层的富水性，确定井的出水量和特性曲线，了解含水层之间的水力联系和含水层的边界条件，为制定降水方案提供依据。根据不同需要，分为单井、多井、群井抽水，稳定流与非稳定流抽水，完整井或非完整井抽水，定流量或定降深抽水，分层或混合抽水等。以求取含水层参数为目的的抽水试验一般都用水泵以固定流量抽水，同时测定抽水主井及观测井随时间而变化的水位值的方法进行。

1、抽水试验的布置原则

(1) 抽水试验的主井可以布置在预计会布置降水井的位置上，抽水试验结束后该井可留作以后工程施工降水所用。抽水试验井应深入降水目的层或减压目的层，具体深度可视目的层厚度而定，井管直径在松散层中不小于200mm，在基岩中不小于150mm，下泵深度位于降水深度下不少于2m。

(2) 根据抽水试验的目的与要求的不同，观测井的布置也不同，但应尽可能满足计算水文地质参数所采用公式的需要，并与降水运行时作为观测井相结合。对于均质无限大含水层，可在垂直与平行地下水流向的方向上布置观测井。对于有界含水层主要应垂直和平行边界布置观测井，必要时在边界附近增设观测井。对于非稳定抽水，用 $s-lgt$ 或 $lgs-lgt$ 曲线计算时，布置1~2个观测井即可；用 $s-lgr$ 曲线计算时，应布置3个或3个以上观测井。对于承压含水层的抽水试验，可考虑在上、下弱透水层和上、下越流补给含水层中也布置观测井。观测井一般应避开因主井抽水在抽水井附近形成的三维流和紊流的影响。多个观测井的距离由近到远应由密到疏。在与抽水含水层相邻的越补含水层和弱透水层中的观测井应离主井近一些。

稳定抽水试验时观测井的距离 r ，一般应控制在： $1.5M \leq r \leq 0.187R$

式中 M ——含水层厚度（m）；

R ——引用影响半径（m）。

2、抽水试验要求

抽水试验前，抽水井和观测井均应按降水管井设计与施工的要求达到降水管井的质量要求，已进行彻底洗井。每个抽水井和观测井在抽水试验开始前应测量自然水位，一般1小时测一次，连续三次测得的数字相同或4小时内水位相差 $<2\text{cm}$ 时，可作为抽水前的自然水位。对于地下水位受动态变化明显的地区应有一天以上的观测记录，观测时间可每间隔30~60min一次。需要时应在抽水试验影响区外同一水文地质单元内设观测井，掌握试验期间地下水位的天然变化。抽水结束或因故停止抽水时应测恢复水位。抽水试验过程中，应采取必要的措施防止抽出的水又回渗到含水层中。

(1) 稳定流抽水试验

一般要进行3次降深抽水，最大的一次降深应接近设计水位降深，其余二次分别为最大降深值的1/3和2/3，每次下降值之差不小于1m。对出水量较小的含水层或已掌握较详细水文地质资料的含水层也可只作1次或2次降深的抽水试验。当出水量与动水位没有持续上升或下降趋势，水位波动2~3cm，流量波动 $<3\%$ 时，抽水试验可认为达到稳定。稳定延续时间要求：卵石、砾石、粗砂含水层为8h；中砂、细砂、粉砂含水层为16h；基岩含水层（带）为24h。

抽水试验开始后，应同时观测抽水主井动水位、出水量和各观测井的水位，观测时间一般在抽水开始后的第5、10、15、20、25、30min各观测一次，以后每间隔30min观测一次，流量可每间隔60min观测一次。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、2、3、4、6、8、10、12、15、20、

25、30min各观测一次，以后每间隔30min观测一次。

(2) 非稳定流抽水试验

抽水试验前应精确测量主井与观测井的距离。非稳定抽水试验一般只作一次降深抽水，但如果需要测定井损，一般也要进行3次降深抽水，每次抽降开始前应测静止水位，试验过程中应取每次抽降开始相同的累计时间的流量和动水位，绘制Q-s曲线。

为满足求参计算需要，非稳定抽水试验的延续时间应根据观测井的水位下降与时间的半对数曲线，即s-lgt曲线来判定。当s-lgt曲线可以出现拐点时，抽水试验应延续到拐点以后，曲线出现平缓段，并能正确推出稳定水位下降值时试验即可结束；当s-lgt曲线不出现拐点，呈直线延伸时，其直线延伸段在lgt轴上的投影不少于二个对数周期时可以结束试验；当有几个观测井时，应以最远的观测井的s-lgt曲线进行判定。

所有抽水主井、观测井的动水位与流量都必须以抽水开始的同一时间作为起始时间进行观测。主井与观测井的动水位观测时间应在抽水开始后的第1、2、3、4、5、6、8、10、12、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120min观测一次，以后每30min观测一次，5小时后每1小时观测一次，为的是使每个观测所得的数据在s-lgt曲线上分布均匀。停抽或因故停抽后应测抽水主井和观测井的恢复水位，其时间间隔以停抽时间起算，以上述抽水开始时的时间间隔进行观测，直到水位恢复到自然水位为止。

非稳定抽水要求抽水量保持常量。整个试验期间流量Q的变化≤1%。抽水开始后抽水量的观测可间隔5~10min一次，3~4次后可改为每间隔1~2h一次。为了保持抽水量稳定，应采用深井泵或潜水泵进行抽水。空压机抽水一般难以达到稳定流量的抽水要求。

三、水文地质参数计算

利用抽水试验资料计算水文地质参数，应该在分析勘察区水文地质条件的基础上，合理地选用公式。这里给出一些常用的计算公式。

1、渗透系数

(1)、单井稳定流抽水试验，当利用抽水井的水位下降资料计算渗透系数时，可采用下列公式：

①承压水完整井：

$$K = \frac{0.366Q}{s_w M} \lg \frac{R}{r_w} \quad (10-1)$$

②承压水非完整井：

$$K = \frac{0.366Q}{s_w M} \left(\lg \frac{R}{r_w} + \frac{M-l}{l} \lg \frac{1.12M}{pr_w} \right) \quad (10-2)$$

③潜水完整井：

$$K = \frac{Q}{p(H^2 - h^2)} \ln \frac{R}{r_w} \quad (10-3)$$

④潜水非完整井：

$$K = \frac{Q}{p(H^2 - h^2)} \left(\ln \frac{R}{r_w} + \frac{\bar{h}-l}{l} \lg \frac{1.12\bar{h}}{pr_w} \right) \quad (10-4)$$

式中 K——渗透系数(m/d)；

Q——出水量(m³/d)；

S——水位下降值(m)；

M——承压水含水层的厚度(m)；

H——自然情况下潜水含水层的厚度(m)；

\bar{h} ——潜水含水层在自然情况下和抽水试验时的厚度的平均值(m);

h ——潜水含水层在抽水试验时的厚度(m);

l ——滤水管长度(m)

r ——抽水井滤水管半径(m);

R ——影响半径(m)。

(2)、单井稳定流抽水试验,当利用观测井的水位下降资料计算渗透系数时,可采用下列公式:

①承压水完整井

$$\text{有一个观测井: } K = \frac{0.366Q(\lg r_1 - \lg r_w)}{(s_w - s_1)M} \quad (10-5)$$

$$\text{有两个观测井: } K = \frac{0.366Q(\lg r_2 - \lg r_1)}{(s_1 - s_2)M} \quad (10-6)$$

②潜水完整井

$$\text{有一个观测井: } K = \frac{Q}{p(h_1^2 - h_w^2)} \ln \frac{r_1}{r_w} \quad (10-7)$$

$$\text{有两个观测井: } K = \frac{Q}{p(h_2^2 - h_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (10-8)$$

(3)、单井非稳定流抽水试验,在没有补给的条件下,利用抽水井或观测井的水位下降资料计算渗透系数时,可采用下列公式:

①配线法

承压水完整井:

$$\left\{ \begin{aligned} K &= \frac{0.08Q}{sM} W(u) \end{aligned} \right. \quad (10-9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} u &= \frac{S}{4KM} \cdot \frac{r^2}{t} \end{aligned} \right. \quad (10-10)$$

潜水完整井:

$$\left\{ \begin{aligned} K &= \frac{0.08Q}{hs} W(u) \end{aligned} \right. \quad (10-11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} u &= \frac{m}{4Kh} \cdot \frac{r^2}{t} \end{aligned} \right. \quad (10-12)$$

式中 $W(u)$ ——井函数;

S ——承压水含水层释水系数;

μ ——潜水含水层给水度。

②直线法

当 $\frac{S}{4KM} \cdot \frac{r^2}{t}$ 或 $\frac{m}{4Kh} \cdot \frac{r^2}{t} < 0.01$ 时,可采用下列公式:

承压水完整井:

$$K = \frac{Q}{4pM(s_2 - s_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (10-13)$$

潜水完整井:

$$K = \frac{Q}{2p(\Delta h_2^2 - \Delta h_1^2)} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (10-14)$$

式中 s_1 、 s_2 ——观测井或抽水井在 $s \sim \lg t$ 关系曲线的直线段上任意两点的纵坐标值(m);

Δh_1^2 、 Δh_2^2 ——观测井或抽水井在 $\Delta h^2 \sim \lg t$ 关系曲线的直线段上任意两点的纵坐标值(m²);

t_1 、 t_2 ——在 s (或 Δh^2) $\sim \lg t$ 关系曲线上纵坐标为 s_1 、 s_2 (或 Δh_1^2 、 Δh_2^2) 两点的相应时间(min)。

(4)、稳定流抽水试验或非稳定流抽水试验, 当利用水位恢复资料计算渗透系数时, 停止抽水前, 若动水位没有稳定, 仍呈直线下降时, 可采用下列公式:

①承压水完整井

$$K = \frac{Q}{4pMs} \ln(1 + \frac{t_k}{t_T}) \quad (10-15)$$

②潜水完整井

$$K = \frac{Q}{2p(H^2 - h^2)} \ln(1 + \frac{t_k}{t_T}) \quad (10-16)$$

式中 t_k ——抽水开始到停止的时间(min);

t_T ——抽水停止时算起的恢复时间(min);

s ——水位恢复时的剩余下降值(m);

h ——水位恢复时的潜水含水层厚度(m)。

如恢复水位曲线直线段的延长线不通过原点时, 应分析其原因, 必要时进行修正。

2、影响半径

当利用稳定流抽水试验观测井中的水位下降资料计算时, 可采用下列公式:

①承压水完整井

$$\text{有一个观测井: } \lg R = \frac{s_w \lg r_1 - s_1 \lg r_w}{s_w - s_1} \quad (10-17)$$

$$\text{有两个观测井: } \lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2} \quad (10-18)$$

②潜水完整井

$$\text{有一个观测井: } \lg R = \frac{s_w(2H - s_w) \lg r_1 - s_1(2H - s_1) \lg r_w}{(s_w - s_1)(2H - s_w - s_1)} \quad (10-19)$$

$$\text{有两个观测井: } \lg R = \frac{s_1(2H - s_1) \lg r_2 - s_2(2H - s_2) \lg r_1}{(s_1 - s_2)(2H - s_1 - s_2)} \quad (10-20)$$

3、给水度和释水系数

潜水含水层的给水度和承压水含水层的释水系数, 可利用单井非稳定流抽水试验观测井的水位下降资

料计算确定。

10.4 施工降水设计计算

一、降水参数的确定

水文地质参数的确定是降水设计计算的重要环节。采用的降水参数正确与否，直接影响到降水设计方案的合理性及可靠程度。降水设计计算常用水文地质参数有含水层的渗透系数、影响半径、给水度和释水系数。这些参数的取得有实测和经验两种途径，可根据不同设计阶段选取。

1、经验值

在降水初步设计阶段，应充分搜集已有的地质、水文地质资料，一般可采用区域或邻区已有的水文地质资料，也可以采用经验值。渗透系数经验值见表 8-5。给水度(μ)经验值见表 8-2。影响半径(R)经验值见表 10-2。

表10-2 根据颗粒直径确定影响半径(R)经验值

	地层颗粒		R(m)
	粒径(mm)	占重量(%)	
粉砂	0.05~0.10	<70	25~50
细砂	0.10~0.25	>70	50~100
中砂	0.25~0.5	>50	100~300
粗砂	0.5~1.0	>50	300~400
砾砂	1~2	>50	400~500
园砾	2~3		500~600
砾石	3~5		600~1500
卵石	5~10		1500~3000

影响半径(R)计算的公式:

①潜水含水层: $R = 2S\sqrt{KH}$ (10-21)

②承压含水层: $R = 10S\sqrt{K}$ (10-22)

式中 R —降水影响半径 (m);

S —基坑水位降深 (m);

K —渗透系数 (m/d);

H —含水层厚度 (m)。

2、实测值

实测值一般是在工程场地通过单孔抽水并布置有一个或多个观测孔的稳定和非稳定流抽水试验获取的含水层参数，是在充分整理、分析水文地质试验数据后计算而得，不同条件下各种含水层参数的计算公式见式 10-1~式 10-20。特别是在水文地质条件复杂的地段，应以实测值作为降水施工设计依据。

3、基坑等效半径(r_0)的确定

对于圆形基坑，基坑半径 r_0 即为圆形布置的井点系统的半径；当基坑不规则时，为简化计算，常把它简化成一个理想的大圆，按一个大井来考虑并计算基坑涌水量，其半径即为基坑等效半径。

(1)、当 $L/B > 2.5$ 时按下式计算

$$r_0 = h \frac{(L+B)}{4} \quad (10-23)$$

(2)、不规则基坑的等效半径

$$r_0 = \sqrt{\frac{A}{p}} \quad (10-24)$$

式中 r_0 ——基坑等效半径(m);
 L ——基坑长度(m);
 B ——基坑宽度(m);
 η ——概化系数, 由表 10-2 查得;
 A ——基坑面积(m²)。

表 10-2 矩形基坑的等效半径概化系数 η

B/L	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.6	0.6~1.0
η	1.00	1.12	1.14	1.16	1.18

二、基坑涌水量计算

1、均质含水层潜水完整井基坑涌水量计算

计算简图见图 10-2。

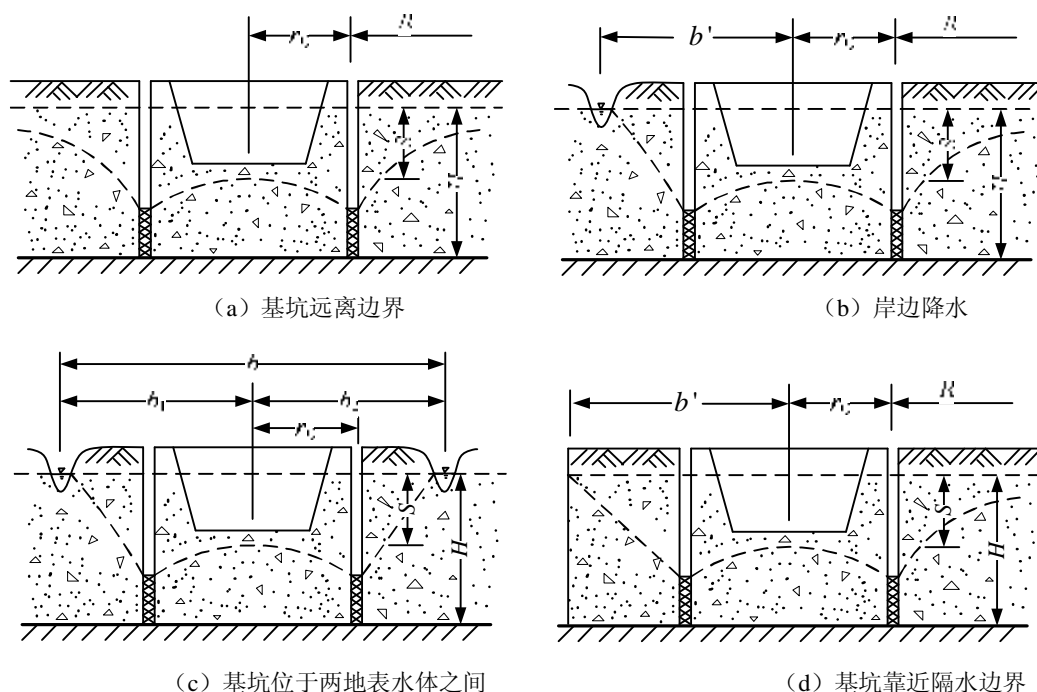


图 10-2 均质含水层潜水完整井基坑涌水量计算简图

(1)、当基坑远离边界时 (图 10-2a), 涌水量可按下式计算:

$$Q = 1.366K \frac{(2H - S)S}{\lg \left(1 + \frac{R}{r_0} \right)} \quad (10-25)$$

(2)、岸边降水时 (图 10-2b), 涌水量可按下式计算:

$$Q = 1.366K \frac{(2H - S)S}{\lg \frac{2b}{r_0}} \quad b < 0.5R \quad (10-26)$$

(3)、基坑位于两个地表水体之间或位于补给区与排泄区之间时 (图 10-2c), 涌水量可按下式计算:

$$Q = 1.366K \frac{(2H - S)S}{\lg \left[\frac{2(b_1 + b_2)}{p r_0} \cos \frac{p(b_1 - b_2)}{2(b_1 + b_2)} \right]} \quad (10-27)$$

(4)、基坑靠近隔水边界时 (图 10-2d), 涌水量可按下式计算:

$$Q = 1.366K \frac{(2H - S)S}{2\lg(R + r_0) - \lg r_0(2b' + r_0)} \quad b' < 0.5R \quad (10-28)$$

式中 Q —基坑涌水量(m^3);

K —渗透系数(m);

H —潜水含水层厚度(m);

S —基坑水位降深(m);

R —降水影响半径(m);

r_0 —基坑等效半径(m)。

2、均质含水层潜水非完整井基坑涌水量计算

计算简图见图 10-3。

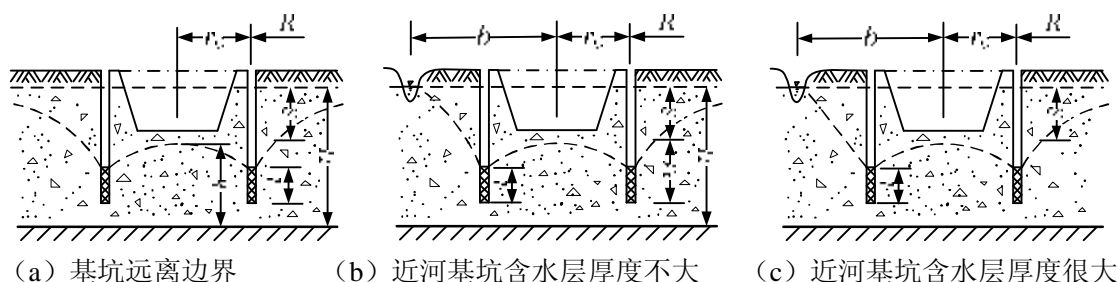


图 10-3 均质含水层潜水非完整井基坑涌水量计算简图

(1)、当基坑远离边界时 (图 10-3a), 涌水量可按式计算:

$$Q = 1.366K \frac{H^2 - h_m^2}{\lg\left(1 + \frac{R}{r_0}\right) + \frac{h_m - l}{l} \lg\left(1 + 0.2 \frac{h_m}{r_0}\right)} \quad (10-29)$$

式中 $h_m = \frac{H + h}{2}$

(2)、近河基坑降水, 含水层厚度不大时 (图 10-3b), 涌水量可按式计算:

$$Q = 1.366KS \left(\frac{l + S}{\lg \frac{2b}{r_0}} + \frac{l}{\lg \frac{0.66l}{r_0} + 0.25 \frac{l}{M} \lg \frac{b^2}{M^2 - 0.14l^2}} \right) \quad b > \frac{M}{2} \quad (10-30)$$

式中 M ——由含水层底板到滤水管有效工作部分中点的长度(m)。

(3)、近河基坑降水, 含水层厚度很大时 (图 10-3c), 涌水量可按式计算:

$$Q = 1.366KS \left(\frac{l + S}{\lg \frac{2b}{r_0}} + \frac{l}{\lg \frac{0.66l}{r_0} - 0.22 \operatorname{arsh} \frac{0.44l}{b}} \right) \quad b \geq l \quad (10-31)$$

$$Q = 1.366KS \left(\frac{l + S}{\lg \frac{2b}{r_0}} + \frac{l}{\lg \frac{0.66l}{r_0} - 0.11 \frac{l}{b}} \right) \quad b < l \quad (10-32)$$

3、均质含水层承压水完整井基坑涌水量计算

计算简图见图 10-4。

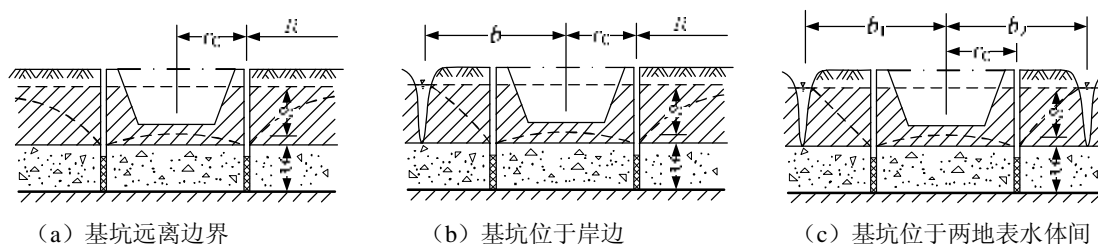


图 10-4 均质含水层承压水完整井基坑涌水量计算简图

(1)、当基坑远离边界时 (图 10-4a), 涌水量可按式计算:

$$Q = 2.73K \frac{MS}{\lg \left(1 + \frac{R}{r_0} \right)} \quad (10-33)$$

式中 M ——承压水层厚度(m)。

(2)、当基坑位于河岸边时 (图 10-4b), 涌水量可按式计算:

$$Q = 2.73K \frac{MS}{\lg \frac{2b}{r_0}} \quad b < 0.5R \quad (10-34)$$

(3)、基坑位于两个地表水体之间或位于补给区与排泄区之间时, (图 10-4c) 涌水量可按式计算:

$$Q = 2.73K \frac{MS}{\lg \left[\frac{2(b_1 + b_2)}{pr_0} \cos \frac{p(b_1 - b_2)}{2(b_1 + b_2)} \right]} \quad (10-35)$$

4、均质含水层承压水非完整井基坑涌水量计算

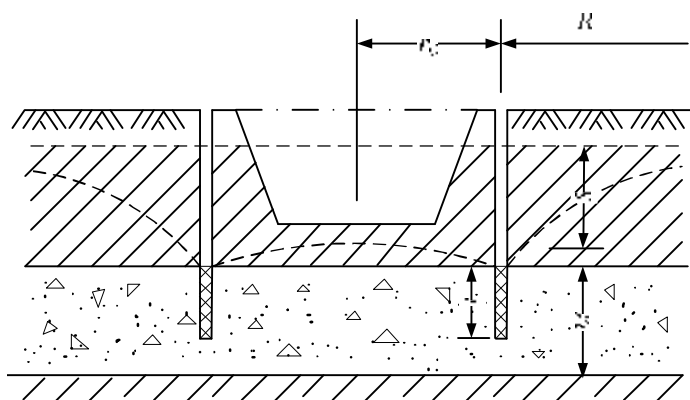


图 10-5 均质含水层承压水非完整井基坑涌水量计算简图

计算简图见图 10-5, 涌水量可按式计算:

$$Q = 2.73K \frac{MS}{\lg \left(1 + \frac{R}{r_0} \right) + \frac{M-l}{l} \lg \left(1 + 0.2 \frac{M}{r_0} \right)} \quad (10-36)$$

5、均质含水层承压-潜水完整井基坑涌水量计算

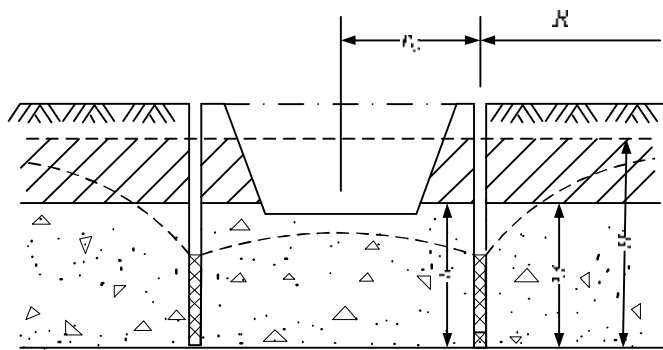


图 10-6 均质含水层承压-潜水完整井基坑涌水量计算简图
计算简图见图 10-6，涌水量可按式计算：

$$Q = 1.366K \frac{(2H - M)M - h^2}{\lg \left(1 + \frac{R}{r_0} \right)} \quad (10-37)$$

6、狭长条形基坑

(1)、潜水完整井

$$Q = KL \frac{H^2 - h^2}{R} \quad (10-38)$$

$$q = \frac{pK(2H - S)S}{\ln \frac{d}{pr_w} + \frac{pR}{2d}} \quad (10-39)$$

(2)、承压完整井

$$Q = \frac{2KM L}{R} \quad (10-40)$$

(3)、承压—潜水完整井

$$q = \frac{pK[(2H - M)M - h^2]}{\ln \frac{d}{pr_w} + \frac{pR}{2d}} \quad (10-41)$$

式中 Q ——基坑涌水量 (m^3/d)；

q ——干扰单井涌水量 (m^3/d)；

K ——渗透系数 (m/d)；

R ——降水影响半径 (m)；

S ——降深 (m)；

H ——潜水含水层厚度 (m)；

H ——降水后剩余含水层厚度 (m)；

L ——降水长度 (m)；

$2d$ ——降水井间距 (m)；

$2r_w$ ——降水井排距 (m)；

M ——承压含水层厚度 (m)

三、单井出水能力计算

单井出水能力取决于降水场地的水文地质条件、滤水管结构、成井工艺和抽水设备能力。

1、轻型井点和喷射井点单井出水能力

就目前常用的抽水设备与井点结构在渗透系数较小地区，轻型井点出水能力的经验值为1.5~2.5m³/h；喷射井点单井出水能力见表 11-1。实际使用过程中，经常出现的情况是地层出水能力远小于抽水设备的抽水能力。因此，在进行降水设计时，应根据具体情况慎重选择抽水设备。

2、管井出水能力

管井出水能力可按式（10-42）和式（10-43）进行计算。

$$q = \frac{ld}{a} \times 24 \quad (10-42)$$

式中 q——管井出水能力(m³/d)；
l——滤水管工作部分长度(m)；
d——滤水管外径(mm)；
α'——与含水层有关的经验系数，见表 10-3。

表 10-3 经验系数 α' 值

含水层渗透系数 K(m/d)	α'	
	含水层厚度≥20m	含水层厚度<20m
2~5	100	130
5~15	70	100
15~30	50	70
30~70	30	50

$$q = 2p \cdot r \cdot l' \cdot \frac{\sqrt{K}}{15} \quad (10-43)$$

式中 q——管井出水能力(m³/s)；
l'——滤水管工作部分长度(m)；
r——管井半径(m)；
K——渗透系数(m/s)。

四、降水井数量及间距的确定

$$n = 1.1 \frac{Q}{q} \quad (10-44)$$

$$a = \frac{L}{n} \quad (10-45)$$

式中 n——降水井数量
Q——基坑涌水量(m³/d)；
q——单井出水能力(m³/d)；
a——降水井间距(m)；
L——沿基坑周边布置降水井的总长度(m)。

式（10-45）得出的是降水井间距初值，并应大于15d(d为滤水管外径)。对于轻型井点和喷射井点，井间距应尽可能与井点设备总管的接口相对应。对于管井，还需经过在满足降深条件下，群井干扰抽水时管井出水能力的检查验算。

五、水位降深检验

在井数、井间距及布井方式初步确定后，一般还要检验不同地段的水位降深是否符合要求，特别应验算基坑最不利点的降深。可以根据情况参照式（8-33~8-38）进行检验。当计算出的降深不能满足降深要求时，应重新调整井数、井间距及布井方式。

第 11 章 地下工程施工降水技术

11.1 管井降水

一、管井降水及自渗降水的工作特性及适用条件

管井的口径和深度供选择的幅度很大，降水管井口径一般为200~500mm，井深可从10m到100m以上，单井抽水量可从1m³/h到80m³/h以上。管井常采用一井一泵抽水，含水层富水性很强时，如降水井口径够大，也可一井多泵抽水。降水深度小到1~2m，大到几十米，能够满足对地下水来源比较丰富的砂、砾、卵石和基岩裂隙含水层的工程降水需要。管井降水工艺成熟，设备简单，维护管理便利，故广泛应用于各类工程的降水施工中。目前，全国大部分地铁降水施工，都采用了管井方法降水。

当上、下含水层存在较大天然水头差时，管井也可以不下泵抽水或少下泵抽水就能达到降水目的，不下泵的管井称自渗井。这种情况大多在冲洪积扇地区存在，城市建设大量开采深层地下水后，深层地下水位低于浅层地下水位，这时用管井将上下两个含水层连通，上部含水层的水便通过管井下渗到下部含水层中，因而形成自渗降水（图11-1）。有时自渗井也可不下管而在钻孔中直接回填砾料，形成勾通上下含水层的垂向导水通道，这种井称砂砾自渗井（图11-1a）。

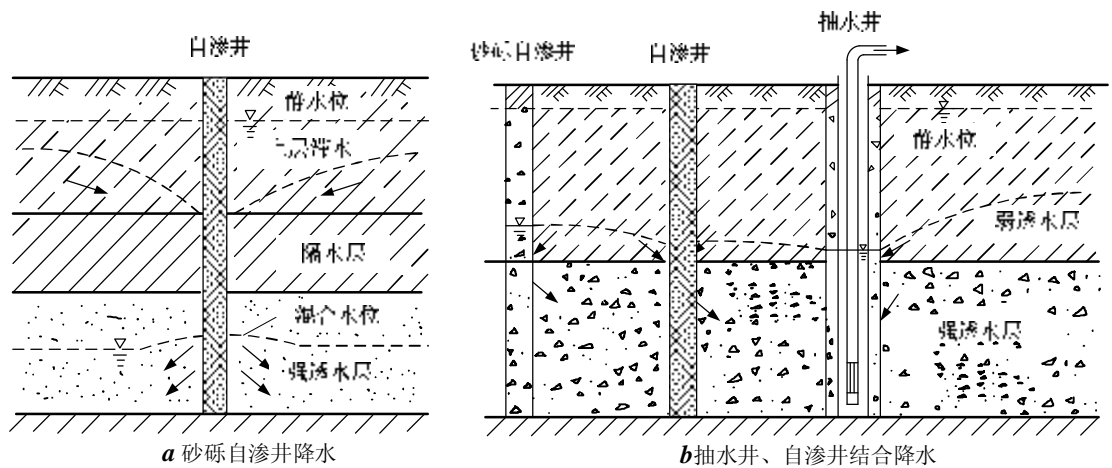


图 11-1 自渗降水示意图

自渗降水一般用于浅层降水，用以疏导上层滞水和潜水，必要时辅以少量抽水井抽水，形成抽水井、自渗井结合降水形式（图11-1b）。该方法操作简便，耗能低，动用抽水设备少，成本低，但受条件限制，只能是有针对性应用，其适用条件是：

- ①降水范围由2个以上含水层和隔水层互层组成，下部含水层的透水性强于上部含水层，水位低于上部含水层，如低于基槽需要降低的地下水位，水量又不大的情况下，则可能形成完全自渗降水。
- ②下部含水层具有一定厚度，消纳能力大于上部含水层的排泄能力，否则需辅以部分抽水井。
- ③上部含水层水质无污染，上部含水层水质的主要指标与下部含水层水质基本相同。
- ④受成井方法和井结构的限制，以及可能渗入浑浊水的影响，砂砾自渗井的时效性较差，一般不超过3个月就会逐渐淤塞而实效。地铁工程施工周期较长，可采用下管的自渗井，淤塞后可洗井处理，以恢复其自渗能力。

北京城区处于永定河冲洪积扇中部，存在4~5个含水岩组，受城市生产、生活用地下水开采影响，含水层水位由下而上一层比一层低，很多浅基坑都可以采用自渗降水，或把上层滞水通过自渗井渗到潜水含水层中，或把埋深15~18m的潜水通过自渗井渗到20余米的第一承压含水层中。地铁工程由于结构埋深较

大，很多地段都可采用抽水管井与渗水井相间布置的抽渗结合降水形式，抽水井主要用于降低承压含水层水头，渗水井则主要用于疏导上层滞水和潜水向下渗入承压含水层中。

二、管井设计

1、降水管井的设计要求

降水管井的目的在于人工降低地下水位，以使基坑和隧道开挖达到无水安全作业要求，工程施工结束后，降水管井也就完成使命而报废，因而降水管井是临时的抽水构筑物。供水管井是以供水为目的而建造的地下水取水构筑物，使用寿命较长，一般要求使用期达到20年以上。两者的使用目的不同即决定了两者的设计要求也有所不同。

降水管井结构与供水管井结构是相同的，允许其设计要求可以有所不同的主要理由是：①降水管井的布置是以形成一定“干扰降深”为目的进行布置，降水井之间干扰程度比供水井大得多。②一般土建工程降水井使用期限在1年以内，地铁工程降水井延续使用2~3年也够了，因而降水管井设计使用寿命不要求很长。③为发挥最大单井降水效果，降水管井应在满足质量标准前提下，要求管井的出水量尽可能大一些，井损尽可能小一些。因而降水管井允许进水流速可大一些，在滤水管和滤料用材方面的标准与供水管井相比可降低一些，但出水含砂量不能放宽，应达到工程降水规范要求。

2、降水管井的布置

降水管井平面布置，应符合下列要求：

(1)、对于长宽比不大的地铁车站和施工竖井，宜采取环形封闭式布置。

(2)、对于长宽比很大的地铁隧道，应在隧道两侧布置双排井，隧道两端应延长布置降水井，外延长度宜为基坑宽度的2倍。

(3)、降水管井一般布置在基坑或隧道的外侧，距基坑外缘线不小于2m，以防遭受隧道开挖背后填充注浆破坏。当降深要求很大，中间部位的水位降深难以满足要求时，也可在基坑内部布置降水管井，但井管强度要高一些，通常可采用钢管，以防基坑开挖时被破坏。

(4)、基坑或隧道邻近地下水补给边界时，应在地下水补给方向一侧适当加密降水井。

(5)、降水管井的井位，可根据场地地下管线的实际情况适当调整，当井位移动较大时，应验算不利点的水位降深值。

3、管井结构设计

(1)、井身结构

①降水管井的井深，应根据降水或降压目的层位置、干扰计算得出的设计动水位深度、井损大小、滤水管工作部分长度及沉淀管的长度确定。

②供水管井井径设计包括井身各段井径设计，即开口井径、安泵段井径、变径段井径、开采段井径及终孔井径的设计。降水管井一般都不太深，大多一径到底。应注意安泵段井径要比选用的水泵泵体直径大50mm，否则无法顺利将水泵下入井中。

(2)、井管配置

井管是井壁管和滤水管的总称。井壁管是支撑和封闭井壁的无孔管，俗称“死管”，降压井的降压目的层以上部位或降水管井水位以上部分一般下入井壁管，沉淀管通常也是井壁管；过滤管通常也称滤水管，起护壁、挡砂和过滤作用，一般下入与含水层对应的位置。

降水管井是临时抽水构筑物，井又比较浅，对井管的要求相对于供水管井来说可低一些，管材选用范围也较宽，选用井管应符合下列要求：

①井管应具有足够的抗压、抗拉、抗弯强度，以保证井管能够承受井壁地层和滤料的侧向压力及井管的全部重量。

②井管应无缺损、裂缝、弯曲等缺陷，两端面与管轴线垂直，保证井管连接后垂直。

③井管材质应无毒，对地下水水质不构成污染。

④井管内径应满足下入抽水设备的要求。

⑤滤水管应有较大的孔隙率，以尽可能增加降水管井的出水量。

作为降水施工用途的井管类型有水泥管（包括水泥砾石滤水管和水泥砂石井壁管）、铸铁管、钢管、钢筋笼包滤网制作的井管等。我国北方地区的农田灌溉井普遍使用水泥管，水泥砾石滤水管是将砾石和水泥按一定配比加水拌和后入模制成，壁厚50mm，管径400或500mm，孔隙率可达15%以上。同样，调整材料配比并加入砂子即可制成水泥砂石井壁管。这种管每节管长1m，排管灵活，只一次性使用，非常经济，但强度较低，易损坏，不宜在超过50m深的降水井或回灌井中使用。

地铁工程中结构内的降水井应下入强度较高的井管，以防土建施工破坏，钢板卷管是较为经济合理的选择，其滤水管是模压孔滤水管，模压孔呈桥形的称桥式滤水管。这种滤水管是采用钢板经冲压成孔后，卷焊并经防腐处理制成。其优点是：无需在钢管上钻孔或切削，也无需垫筋缠丝，加工简便，成本较低，由于进水缝隙是侧向开孔，不容易被含水层颗粒或滤料堵塞，因此有效孔隙率较高，这种管在北方地区应用十分广泛。

河南省第一水文地质工程地质队滤水管厂生产的桥式滤水管的主要技术指标见表11-1。

表11-1桥式滤水管主要技术指标(单位mm)

公称规格	108	127	146	159		168		219		273		325		377		426	
内径	92	111	130	140	138	150	148	200	198	254	250	305	300	357	350	406	400
壁厚	4	4	4	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
接箍外径	108	127	146	160	162	170	172	220	226	274	278	325	328	377	378	426	428

钢筋笼制作的井管强度较高，可重复使用，我国南方一些地区也广为应用。这种井管的滤网包扎质量要求很高，否则井内容易进砂而影响使用。

铸铁缠丝滤水管材料费用昂贵，多在供水井中采用，很少用于降水工程中。

4、滤料填入位置及滤料规格

滤料是充填于井管与井壁环状间隙中有一定规格要求的砾石。在没有封闭止水要求时，往往全孔回填滤料，以便上层滞水顺着滤料下渗。有封闭止水要求时，滤料应与降水或降压目的层部位对应。

降水管井滤料规格可参照下述规则给定。

①砂土类含水层

$$D_{50}=(8\sim12)d_{50} \quad (11-1)$$

②碎石土类含水层

当 $d_{20}\leq 2\text{mm}$ 时， $D_{50}=(8\sim12)d_{20} \quad (11-2)$

当 $d_{20}\geq 2\text{mm}$ 时，可不填滤料或充填10~20mm的砾石。

滤料的不均匀系数 C_u 应小于2， $C_u=d_{60}/d_{10}$ 。

式中 D_{50} ——滤料筛分样颗粒组成中，过筛重量累计为50%时对应的最大颗粒直径。

d_{50} 、 d_{20} 、 d_{60} 、 d_{10} ——分别为含水层筛分样颗粒组成中，过筛重量累计为50%、20%、60%、10%时对应的最大颗粒直径。

砂土类含水层不均匀系数大于10时，应除去筛分样中部分粗颗粒后重新筛分，直至不均匀系数小于10时，取其 d_{50} 代入式(11-1)确定滤料规格。

5、封闭止水位置及材料

对于降压井，其降压目的层以上部位应封闭止水，通常用粘土进行封闭。即用粘土做成球状，大小宜为20~30mm，在半干状态下缓慢填入。

三、管井施工

1、施工设备

(1)、钻井设备

一般采用冲击钻机、回转钻机钻井。常用型号有：YKC-30型冲击钻机、GZ50型泵吸反循环钻机和迁安正反循环钻机等。旋挖钻机也可用于降水井施工，但钻井口径较大，在细颗粒地层中使用不经济。

(2)、洗井设备

一般采用空压机洗井，工作压力不小于 0.7MPa，排风量大于 6m³/min。空压机洗井的风管、出水管装置有同心式和并列式两种形式，下端配有混合器，出水管应为钢管，风管用高压胶管为宜。

(3)、抽水设备

根据单井出水量大小、水位埋深、井管内径及水位降深选择不同型号的潜水泵。

2、施工方法的选择

针对地铁工程的降水井深一般在 40m 之内，降压井可能稍深一些，钻井通常是采用全面钻进，一径到底。对于粒径小于 150mm 的第四系松散地层宜采用泵吸反循环钻井工艺，该法的钻进效率较高，是降水井施工的首选钻井工艺；对于粒径大于 200mm 的地层可以采用冲击钻机或旋挖钻机施工。正循环钻井工艺由于钻井效率较低，又大量使用泥浆护壁，建议不要采用。

(1)、泵吸反循环钻井工艺的优点

①该法是采用清水水压钻进，依靠水的静压力与地层压力达成平衡，保持井壁稳定，而不是采用泥浆护壁，避免了泥浆对含水层的淤堵，洗井比较容易，一般该法施工的水井只需用空压机洗井即可，不必配合化学洗井及其它方法洗井，成井后出水量较大，成井质量高。

②该法冲洗液上升速度快，钻进时排除岩屑能力强，岩屑一般不受重复破碎，钻进效率高。从北京地铁复八线、五号线、十号线施工的数千口降水井来看，该法施工井深 35m 左右的降水井，大部分钻进时间仅约 4 小时，一口井从钻井开始到具备抽水条件，只需 2~3 天。

③该法具有井底换浆功能，钻到设计深度后就可及时换浆，使得孔底沉渣较少，下管到位。

(2)、冲击钻井工艺的优点

①当钻进地层有较大直径的卵石、漂石时，使用冲击钻井方法较其它方法效率高，但洗井难度相对较大，一般要配合化学洗井或其它方法洗井。

②钻进时孔内不需要冲洗液循环排渣，水量消耗小，适用于缺水场地的降水井施工。

3、工艺流程

定井位→挖(围)泥浆池→钻机就位→钻井→换浆→下管→回填滤料→洗井→下泵→铺设排水管线→试抽、验收→降水维护管理

4、操作方法

(1)、定井位

①根据降水设计井位图以及地下管线分布图，参照车站或区间隧道中线控制点施放降水井井位，正常情况下井位偏差宜不大于 0.5m，当因障碍物影响而偏差过大时，应验算不利点降深。井位应设立显著标志，必要时用钢钎打入地面以下 300mm，并灌石灰粉作标记。

②在施放好的井位上人工挖探井，探井直径一般为 800mm，深度以见原状土为准，确认无地下管线及地下构筑物后下入护筒，护筒外侧填粘土封隔好表层杂填土层，以防止钻井冲洗液漏失，必要时随挖随做混凝土护壁。如遇地下管线，应调整井位，重挖探井。

(2)、挖(围)泥浆池

泥浆池的大小按该泥浆池计划共用的打井数量和排渣量综合确定。在柏油路面及人行步道为不破坏地面，应采用“围”的方式，对于拆迁场地则可“挖”可“围”，围泥浆池可用挖探井的弃土，泥浆池底部及侧壁宜铺垫塑料布，以防跑浆污染环境。一般每 2~3 口井共用一个泥浆池。必要时可采用砖砌泥浆池。

(3)、钻机就位

钻机就位时需采用水平仪找平，做到稳固、周正、水平，以保证钻进过程中钻机稳定。起落钻塔必须平稳、准确。钻机对位偏差应小于 20mm，钻塔垂直度偏差小于 1%。

(4)、钻井

①泵吸反循环钻进

先启动砂石泵形成反循环再钻进。砂石泵启动有两种方式，一是用真空泵将砂石泵进水管段抽吸成真空，然后启动；二是用注水副泵给砂石泵进水管注满水，再开启砂石泵。

泵吸反循环钻进过程中，岩屑经钻头→钻杆→主动钻杆→水龙头→砂石泵吸口排入泥浆池中。钻进过

程中要随时观察冲洗液的流损变化，水的补充应随冲洗液的流损情况及时调整，一般应保持冲洗液面不低于井口下1m，当钻遇卵石层，冲洗液大量漏失时，应加大补水量，必要时投入适量粘土，形成一定粘度的泥浆以控制冲洗液漏失，防止塌孔事故。在以粘性土为主的地层中钻进时，由于钻井自造浆较稠，钻进效率降低，此时可排走一部分泥浆，补充清水，调整泥浆密度到适宜状态。

每次下入钻具前，应检查钻具，如发现脱焊、裂口、严重磨损等情况时，应及时焊补或更换。钻机转速以不整车、岩屑排除正常为宜，一般应保持在10-15r/min，钻井每进尺1m在排水管口捞砂样鉴别地层岩性。

钻进过程中如遇到个别较大粒径卵石，可提出钻具，更换上筒状钻头，捞出卵石。如在普通地层中钻进，发现钻具回转阻力增加、负荷增大等反常现象时，应立即停止钻进，查明原因。

钻进过程中要经常观察排渣口的排渣状况及返水量大小。发现钻渣突然减少或水量减少时，应及时串动钻具，减小钻压，控制进尺或暂停钻进，待排渣正常后再继续钻进。

泵吸系统的连接要做到严密、牢固、通顺。每次加接钻杆前，应使反循环延续1~2分钟，待吸到钻杆内的钻渣全部排出地表后再关停砂石泵。应防止因停泵过早，钻杆内钻渣回落到钻头吸口处造成堵塞。

②冲击钻进

下钻前，应对钻头的外径和出刃，抽筒肋骨片的磨损情况以及钻具连接丝扣和法兰连接螺栓松紧度进行检查，如磨损过多应及时修补，丝扣松动应及时上紧。

下钻时，应将钻头垂吊稳定后，再导正下入井孔。进入井孔后，不得全松刹车、高速下放。钻具进入井孔后，应盖好井盖板，使钢丝绳置于井盖板中间的绳孔中，并在地面设置固定标志，以便钻进中用交线法测量钢丝绳位移。

钻进中，发现塌孔、斜孔时，应及时处理。发现缩孔时，应经常提动钻具修扩孔壁，每次冲击时间不宜过长，以防卡钻。抽筒应配合钻进及时捞取岩屑，减少重复破碎。

提钻时，应缓慢提离孔底数米并确认未遇阻力后，再按正常速度提升，如发现卡钻，应将钻具下放，转动钻头方向后再提，不得强行提拉。提钻时，还应注意观察或测量钻进钢丝绳的位移，如偏差较大时，应查明原因，及时纠正。

在卵石层中钻进，井壁不稳定时，可向井内投入粘土，使粘土充填于卵石间的孔隙。钻遇大的漂砾而发生井斜时，应填入一些较软的石块或废砖头，然后加强钻具回转向下钻进，可纠正井斜。在粘土层中钻进，应常修孔，慢进尺，防止缩径或井壁不圆正。

冲击钻进应掌握好悬距，放绳要少而勤，冲击次数和冲击高度要配合适当，以减小钻具抖动。

(5)、换浆

钻孔至设计深度后(一般应大于设计深度0.5~1.0m)，反循环钻进应将钻头提高0.5m左右，然后注入清水继续启动反循环砂石泵替换泥浆；冲击钻进则用抽筒将孔底稠泥浆掏出，并加清水稀释，直到泥浆密度接近1.05g/cm³，粘度为18~20s为止，现场观察一般以换浆后泥浆不染手为准。替浆过程中，应安排好泥浆的清运或排放工作。

(6)、下管

降水井井深较浅，井管重量不大，一般均采用直接提吊法下管。

①井管为水泥管时，用钢丝绳兜住预制混凝土管鞋底部，将一节井管放置在管鞋上，并缓慢置于井口，包缠滤网，然后松动钢丝绳将井管缓缓下放，当管口与井口相差20cm时，接下节井管，接头处用尼龙网裹严，以免挤入泥砂淤塞井管，井管竖向用4条30mm宽、长2~3m的竹条用2道8#铅丝固定井管。井管下到孔底后，抽出钢丝绳。

②井管为钢管时，一般利用钻机绞车或三脚架吊住井管分段下入。先吊起第一节井管置于孔口，包缠滤网，然后缓缓下放，用夹板夹住井管上口，将夹板承落在井口架上，然后起吊下节井管与第一节井管焊接，松开夹板，将第二节井管放入孔中，再用夹板夹住第二节井管上口，如此分段下入井管，直至下到孔底。下管过程中应做到夹板上紧，接头焊牢，以防跑管。

吊放井管时应垂直，并保持在井孔中心。井管要高出地面200mm以防止异物落入井中。操作绞车或三脚架应稳拉稳下，严禁猛墩。

(7)、回填滤料

井管下入后应立即填入滤料。填料时，应随填随测滤料填入高度，当填入量与理论计算量有较大出入时，应及时查找原因。应使用铁锹沿井壁四周均匀连续填入，不得用装载机或手推车直接倒入，以防填料不均匀或滤料冲击井管造成井管歪斜，如滤料发生蓬堵可向井内注水冲填。

(8)、洗井

冲击成孔的降水井一般都采用了泥浆钻进，洗井应在下管填砾后8h内进行，以免时间过长，影响洗井效果。泵吸反循环成孔的降水井洗井间隔可适当放长一些。降水施工简单、有效、经济的洗井方法是压缩空气洗井(通常称空压机洗井)。

对一般的降水施工来说，上部潜水层及层间水层是洗井的重点部位，应由上而下分段洗井，如沉没比不够时，应注清水洗井，洗井过程中应观测水位及出水量变化情况。洗井后应达到上下含水层串通并形成合理的混合水位。

采用并列式装置洗井时，风管每2米要用铅丝捆绑固定在出水管上，以避免橡胶风管抽打井管造成破损。风管入水沉没比一般应大于40%，风管没入水中部分的长度，不应超过空气压缩机额定最大风压相当的水柱高度。

冲击成孔的降水井如使用粘土过多，应加入焦磷酸钠洗井液浸泡软化泥皮后再用空压机洗井。洗井液浸泡时间一般为4~8h，焦磷酸钠洗井液的配置浓度一般为0.6~1.0%，洗井液配制量可按静水位以下井孔容积计算。洗井后若发现滤料下沉应及时补填滤料至设计高度。

(9)、下泵

下泵前应检查泵的放气孔、放水孔、放油孔和电缆接头处的封口是否松动，如有松动，必须拧紧。然后用摇表检查水泵绝缘电阻，如绝缘电阻低于规定值，应打开放水孔和放气孔，进行烘干处理。检查全部电路和开关，然后空转3~5min，检查电动机旋转方向是否正确。必要时可在水池或水箱中试运转。

下泵时不得使电缆受力，应用绳索将电缆拴在水泵耳环上缓慢下放。如设计没有要求，水泵一般应下入到距孔底1~2m的位置，然后将水泵用钢丝绳吊住(泵管为塑料管)或用夹板夹牢(泵管为钢管)放置在井管上口。水泵安装应做到单井单控电源，并安装漏电保护系统。

(10)、铺设排水管线

排水管线一般布置在降水井的同一侧，通常采用PVC管、混凝土管或钢管作为排水主管路，若干降水井抽出的水汇入主管排走。也可采用单井直排方式，即单根排水管与泵管相连直接排入市政排水管道。排水管宜埋入地下，也可在地面架设。地面架设时，每隔5~8m用设砖砌托台，托台高度应根据排水坡度确定。场地允许时，排水系统也可采用排水沟，排水沟通常采用砖砌而成，并做防渗处理。

排水系统接入市政排水管道前，应设沉淀池，沉淀池可按市政雨污水管线的检查井规格砌成，周围及底部应作防渗处理。

(11)、试抽、验收

上述工序完成后，应及时进行试抽水，检验井深、单井出水量、出水含砂量等情况是否符合要求。试抽正常后应组织现场验收。

5、季节性施工

(1)、冬季施工技术措施

①不能用冻土块围泥浆池，必要时用塑料布围裹池壁，严禁泥浆外泄。

②采用明排水的集水管、泵管必须采取保温措施，施工用的排水管、洗井管、各类水泵、泥浆泵、砂石泵等使用后应及时放水，以防冻裂。

③开钻前应对钻机进行检查，防止机械受冻。施工中对机械传动部位应加强检查，如有问题，及时维修、调整。

(2)、雨季施工技术措施

①雨季施工到来之前，料场、仓库地基要垫高，防止被雨水浸泡，排水管道、雨污水井等要随时检查疏通，防止排水不畅影响正常降水。

②所有的配电箱、机电设备必须要搭防雨棚，要经常检查接零、接地保护，机械设备要防水、防漏电，

随时检查漏电装置功能是否灵敏有效。

③钻机井架等高空设备应安装好避雷装置，并进行摇测检查。

④对杂填土较厚的施工地段，应做好地面防渗处理，以防地面因雨水浸泡产生塌陷。

6、应注意的质量问题

(1)、钻孔时，应根据水文地质条件和土层物理力学性质，合理选择凿井设备，正确制备泥浆，控制好孔内冲洗液面的高度和钻进速度，以防塌孔。

(2)、下管时，井管要正中垂直、连接牢固，严禁井管强行插入沉淀的孔底。滤水管强度应符合要求，缠绕滤网应严实，以防出水含砂量超标。滤料粒径不得过大，填料厚度不得小于设计要求。

(3)、当泥浆比重大，井壁泥皮厚，洗井方法不当，洗井达不到要求时，应对已完成的管井重新洗井直至符合要求。

(4)、降水过程中，当发现存在井间距过大，水泵流量小或水泵扬程不足，不明外来水补给等问题时，应采取相应措施，保证降水深度达到要求。

(5)、排水管之间应连接紧密，排水沟沟底部应铺设防渗材料，以防渗漏水回补基槽，并随时检查清理管道，确保排水管路畅通。

(6)、应采用双路供电或常备发电机，特别是当降水目的层为强透水层时，必须保证停电时能及时切换电源连续降水。

7、成品保护

(1)、为防止异物掉入井中，井口应加盖保护。地面上降水井影响车辆行驶时，应做检查井并加盖承重井盖，排水方式为铺排水管暗排。

(2)、在土方开挖时，应注意对坑内降水井的保护。当采用锚杆或土钉进行边坡支护时，应在井位处做明显标记并引到基坑上口开挖线，以防锚杆或土钉施工破坏井管或注浆液渗入井内滤料。

(3)、降水维护阶段应有专人值班，对降排水系统进行巡查，防止停电或其他外界因素影响降排水系统运行。

7、安全环保措施

(1)、安全操作要求

①在进行安装钻机、拆卸钻机、钻进、下井管、故障排除等工作时，必须明确分工，统一指挥，避免忙乱。钻机的各防护罩都应固定在正确位置，并经常检查牢固程度。

②钻进时，应随时检查钻机及钻塔的支承情况，以防钻机和钻塔倾斜，钻杆上各法兰必须连接牢固，密封可靠，如遇蹩钻，可停止给进，情况严重时，应停钻并提升钻具。

③提升和下降钻具时，钻台工作人员不得将脚踏在转盘上面，工具及附件也不得放在转盘上。拧卸钻具扣时，离合器应慢慢结合，旋转速度不得太快。用扳手拧卸时，应注意防止扳手回冲打人。

④配电盘、配电柜要有绝缘垫，并要安装漏电保护装置。各类电气开关和设备的金属外壳，均要设接地或接零保护。

⑤洗井时，送风管路接头处除应用卡子卡紧外，还应用铁丝拧紧，以防胶管脱出伤人。上提或下放风管、水管时，不得猛墩猛放，以防管子脱节或损坏井管。

⑥降水维护过程中，应经常观测动水位的变化，适时调整水泵的下入深度，必要时更换适当流量的水泵。水泵不得露出水面，也不得陷入淤泥中运转。

(2)、技术安全措施

①开工前应现场踏勘。查清场地及附近地上、地下管网，必要时进行管线探测，确保地下管线的安全。

②凿井前应认真研究地质勘察报告，当上部为松散填土时，应进行必要的土层加固，以保证钻机稳固，并防止塌孔。

③提拔钻具应尽量平稳，避免钻具刮蹭孔壁造成塌孔。

④泵吸反循环钻进到粉细砂地层时，宜慢速钻进，以减小对地层的搅动，同时应适当加快给进速度，以快速通过粉细砂地层，避免在这个部位孔径扩大。在砾卵石层中钻进时，钻速和给进速度都不可太快，以免排渣速度跟不上，发生堵泵甚至埋钻事故。

⑤用活环钢丝绳连接冲击钻具，必须用钢丝绳导槽，钢丝绳卡子不得少于3个，相邻卡子应对卡。

(3)、环保措施

①对于钻井形成的泥浆，要及时清运，严禁直接排入市政雨污水管线，清运时应杜绝泥浆遗洒。降水井抽出的水，含砂量达到规范要求，水清砂净的才可排入市政雨水管线。对于基槽明排的浑水，排水口处应设沉淀池，以防泥砂堵塞市政管线，影响城市环境。

②施工场地邻近居民区时，钻机成孔或空压机洗井应避免在夜间进行。

③加强降水动态监测，根据水位变化情况调整开泵地段和开泵数量，控制地下水抽取量，减少地下水资源无谓排放，工程场地邻近地表水体时，应给河湖补水。

④做好周边建(构)筑物的调查工作，并加强对建(构)筑物的变形监测，发现问题及时处理。

四、管井降水维护管理

降水工程施工结束后，是较长时间的维持降排水阶段，一般延续降排水要到二衬施工结束，降排水维护与动态观测是该阶段的工作重点。

1、定时巡视降排水系统的运行情况，及时发现和处理系统运行的故障和隐患，如水泵抽水出水情况，是否需要检修；供电线路是否正常；排放水的含砂情况及排水联络管道是否畅通。

2、在更换水泵前应量测井深，确定水泵下入的安全深度，以防埋泵，必要时重新洗井。

3、检查井口的防护情况，防止杂物、行人掉入井内。

4、当发生停电时，应及时接通备用电源，尽量缩短因断电而停抽的时间，备用发电机应保持良好的，随时处于准备发动状态。

5、进行地下水动态监测，对监测记录应及时整理，绘制s~t的过程曲线，分析水位下降趋势，预测地铁隧道掘进掌子面的地下水位。

五、工程实例

1、工程概况

北京地铁五号线05标崇文门站位于崇文门外大街与前门东大街的交叉路口，车站长约208m，宽约24m，附属结构主要有东南风井风道和西北风井风道。车站从既有环线地铁和盖板河下方穿过，周边高大建筑物有崇文门饭店、新桥饭店、哈德门饭店和同仁医院。车站基底大部开挖深度约24.7m，两端开挖深度约27m，是地铁五号线土建结构施工和降水施工难度最大的车站之一，地铁结构与地层、地下水的关系见图3-2。

2、地质及水文地质条件

(1)、地层

按照地层的形成年代、成因类型及岩性，自上而下依次为：

①、人工填土层(Q^{ml}):

杂填土①₁层：杂色，松散~稍密，湿~饱和，表层为沥青水泥路面及混凝土路面，其下以房渣土为主，含砖渣、灰块和少量炉灰，局部地段为卵石回填土、炉灰渣等；粉土填土①层：褐黄~黄褐色，稍密，湿~饱和，含少量砖渣、白灰渣。

②、第四纪全新世冲洪积层(Q₄^{al+pl}):

粉土③层：褐黄~黄褐色，湿~很湿，中密~密实；粉质粘土③₁层：灰黄~褐黄色，可塑~硬塑；粘土③₂层：棕黄色，可塑，呈透镜体分布；粉细砂③₃层：褐黄色，饱和，中密。

粉质粘土④层：褐黄色，可塑~硬塑，呈透镜体分布；粉土④₂层：褐黄色，湿，密实，呈透镜体分布；粉细砂④₃层：褐黄色，饱和，中密~密实；中粗砂④₄层：褐黄色，饱和，密实。

③、第四纪晚更新世冲洪积层(Q₃^{al+pl}):

圆砾卵石⑤层：杂色，饱和，密实，亚圆形，最大粒径120mm，一般粒径5~40mm，粒径大于20mm，颗粒的质量占总质量约55~65%，砾石成份以辉绿岩、砂岩和玄武岩为主，褐黄色中粗砂充填，局部夹粉质粘土薄层和粉土薄层；中粗砂⑤₁层：褐黄色，饱和，密实，呈透镜体分布；粉细砂⑤₂层：褐黄色，

饱和，密实。

粉质粘土⑥层：褐黄～黄褐色，硬塑，呈带状分布，局部尖灭；粘土⑥₁层：棕黄色，硬塑，呈透镜体出现；粉土⑥₂层：褐黄色，湿，密实，局部尖灭；细中砂⑥₃层：褐黄色，饱和，密实，含少量云母，呈透镜体局部出现。

卵石圆砾⑦层：杂色，饱和，密实，亚圆形，最大粒径 140mm，一般粒径 15～40mm，砾、卵石含量约占全重的 55%，中粗砂充填，砾、卵石成份以辉绿岩、砂岩为主，级配良好；中粗砂⑦₁层：褐黄色，饱和，密实；细中砂⑦₂层：褐黄色，饱和，密实，呈透镜体分布；粉土⑦₃层：褐黄色，湿，密实，呈透镜体局部分布；粉质粘土⑦₄层：褐黄色，密实，呈透镜体局部分布。

粉质粘土⑧层：褐黄色，硬塑，局部尖灭；粘土⑧₁层：褐黄色，呈透镜体局部分布；粉土⑧₂层：褐黄色，湿，密实；细中砂⑧₃层：褐黄色，饱和，密实。

卵石圆砾⑨层：杂色，饱和，密实，亚圆形，最大粒径 120mm，一般粒径 10～65mm，砾、卵石含量约占全重的 65%，中粗砂充填，砾、卵石成份以辉绿岩、砂岩为主，级配良好；中粗砂⑨₁层：褐黄色，饱和，密实；粉细砂⑨₂层：褐黄色，饱和，密实。

粉质粘土⑩层：褐黄色，硬塑。

(2)、地下水

①、上层滞水

仅局部赋存于粉土填土①层、粉土③层的孔隙中，实测水位标高分别 35.09～38.06m（水位埋深为 4.41～8.00m），主要补给来源为管线渗漏与大气降水，排泄方式为蒸发和垂直向下越流补给下层潜水。

②、潜水

潜水赋存于圆砾卵石⑤层，粉细砂④₃层、中粗砂④₄层、中粗砂⑤₁层、粉细砂⑤₂层，含水层厚度为 6.0～7.0m，渗透系数 50m/d。水位标高为 30.15～31.29m，埋深为 12.10～13.63m，底板埋深 18.0～20.0m，局部埋深达 21.0m。其下隔水层为粉质粘土⑥层和粘土⑥₁层，厚度约为 3m。

③、承压水

承压水赋存于中粗砂⑦₁层、粉细砂⑦₂层及卵石圆砾⑦层，含水层厚度为 7.3m，渗透系数 75m/d。水头标高为 21.33～25.54m，埋深为 18.33～22.30m，水头高出承压含水层顶板 2m 左右。车站南部，卵石圆砾⑨层与⑦层串通，含水层厚度加大。

3、降水方案

(1)、降水要求

崇文门站结构底板处于承压含水层中，不同部位水位降低要求见表 11-2。

表 11-2 崇文门站不同部位水位降低要求

降水部位	结构底板标高/埋深(m)	水位标高/埋深 (m)			降深要求 (m)		
		上层滞水	潜水	承压水	上层滞水	潜水	承压水
站体	19.3-17.0/24.7～27	38.80/4.41	30.55/12.85	23.38/20.03	疏干	7（疏干）	5
东南竖井	18.62/25.06		31.05/12.53	23.29/19.8		6（疏干）	6
西北竖井	19.18/24.76		30.28/13.53	25.54/18.33		6（疏干）	7

(2)、降水方案

工程场地处于交通要地，有辐射井和管井两套降水方案可供选择，辐射井方案可减小施工对道路交通的影响，但辐射井竖井口径较大，部分辐射井竖井受地下管线影响无法落实井位，因而最终采用了以管井抽渗结合为主的降水方案，车站东北角因场地具备条件，布设了一口辐射井(图11-3)。管井设计井深31.5m，井径655mm，井间距5～6m，抽水井与渗水井相间布置，过环线地铁一段为向两侧延长布井。

4、降水施工情况

降水井施工时间为2003年3月～10月，共施工降水井175眼，其中抽水井110眼，自渗井65眼。全部采用泵吸反循环钻机成井，钻井效率很高，单井钻进时间仅3～4小时，采用空压机洗井。抽水泵型以

175QJ20-40、175QJ32-39型潜水泵为主，下泵深度29.5m。降水初期高峰开泵数80台，降水维持期减少到30~40台，主站体降水于2005年4月结束。

5、降水效果

在降水初期，该站东南风井风道和西北风井风道开挖表明，承压水头较快达到了设计深度，但潜水底板以上还有0.2~0.5m残留水。为此采取了洞内打 $\Phi 200\text{mm}$ 小口径砂砾自渗井，引渗潜水残留水到下部承压含水层的补救措施。待站体开挖时潜水彻底疏干，说明潜水疏干需要较长时间和形成较大范围降水。降水的成功实施，为该站暗挖穿过环线地铁和盖板河创造了先决条件。

地铁崇文门站施工期间，由于降水层颗粒较粗，尽管降深较大，降水时间较长，降水对周边的高大建筑物及环线地铁的影响极小。

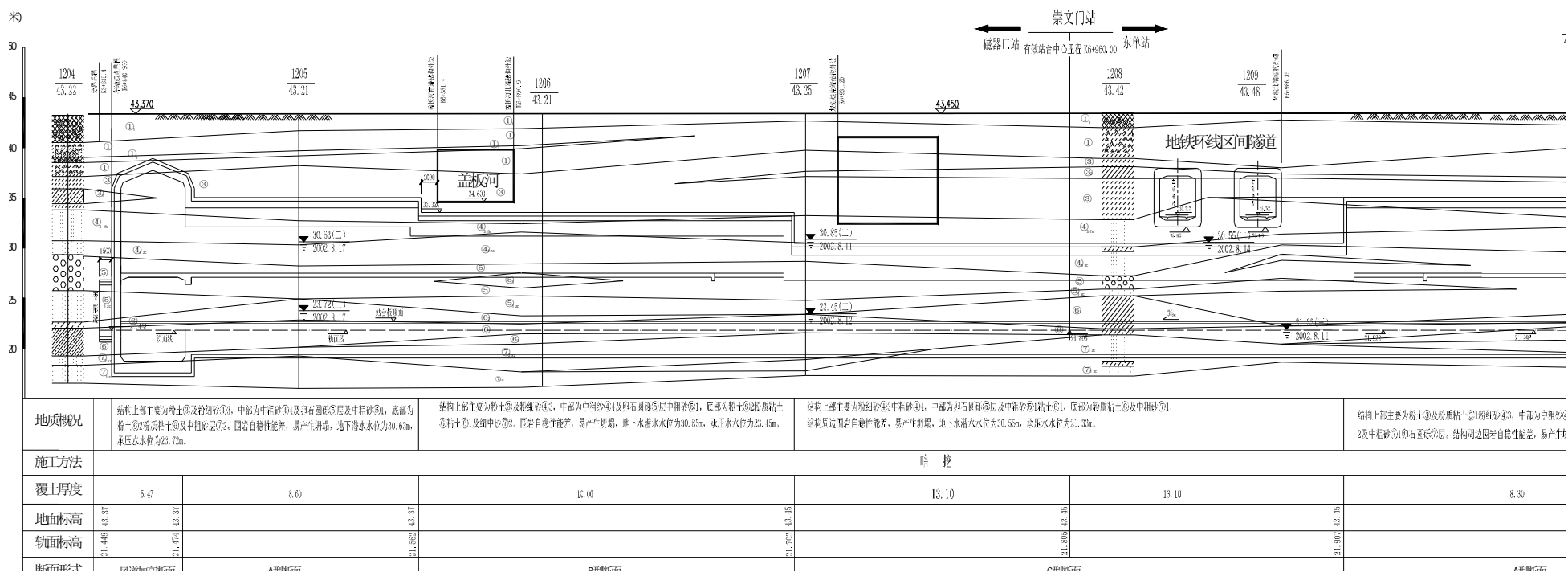


图 11-2 北京地铁五号线崇文门站纵断面图

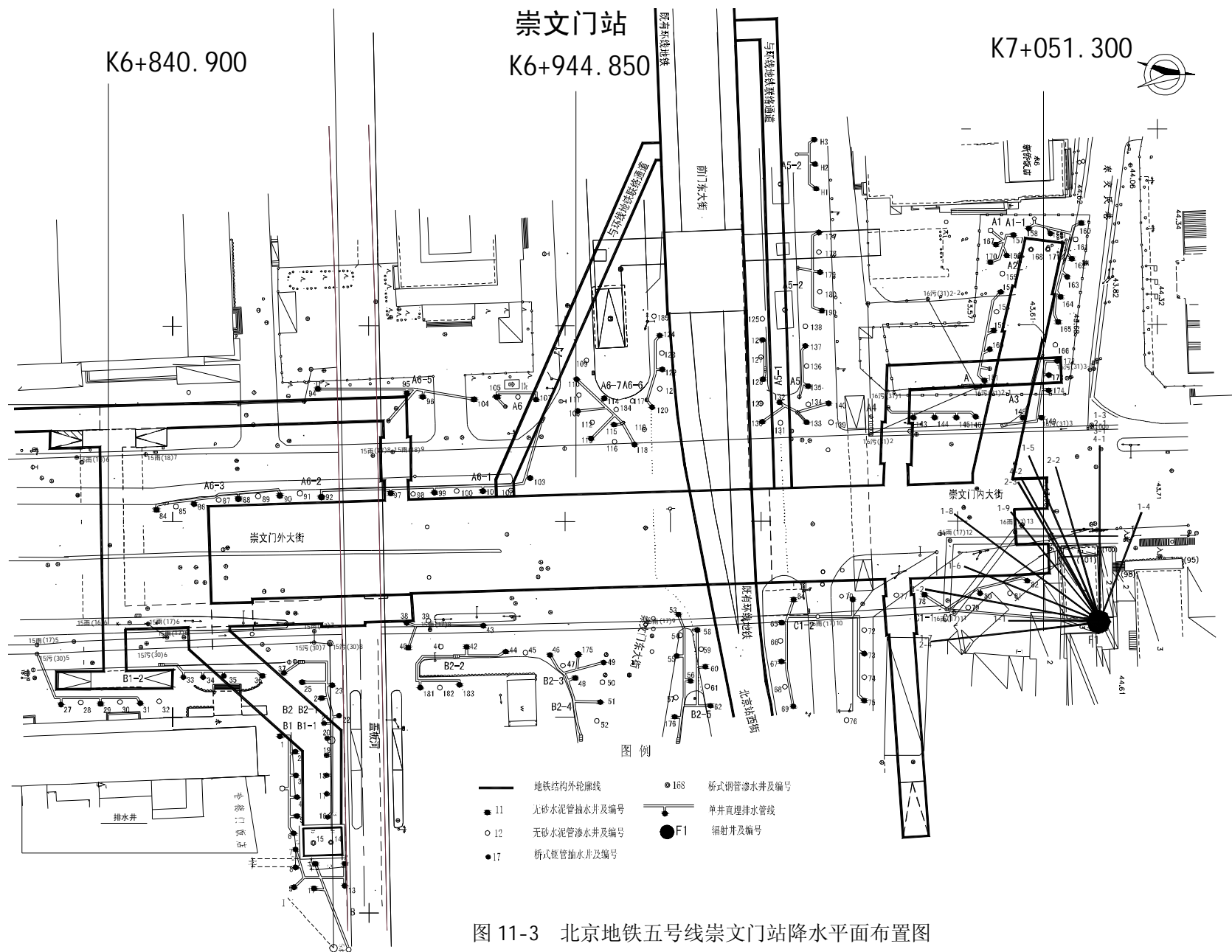


图 11-3 北京地铁五号线崇文门站降水平面布置图

11.2 辐射井降水

中国水利水电科学研究院自二十世纪70年代末开始辐射井技术的科学研究,取得了丰硕成果。特别是在粉细砂、粉土等弱透水含水层中成井工艺的研究成功,以及水平井管用柔性PVC波纹管代替原来的钢管的开发成功,大大降低了辐射井造价,把辐射井的研究和应用向前推进了一大步。2003年北京市轨道交通建设管理有限公司和北京地矿奥通建设工程有限公司在北京地铁五号线03标段的蒲黄榆站至天坛东门站暗挖区间,进行了辐射井降水技术在地铁工程中的应用与研究,有效地解决了地铁隧道下穿南二环路、玉蜓桥、京山铁路及南护城河的技术难题。

一、辐射井降水原理及特点

辐射井是由一口大直径的集水竖井和自竖井向周围含水层一定方向、一定高程打进的水平井所组成,由于水平井是以竖井为中心向外呈辐射状,故称为辐射井。水平井的设置缩短了地下水渗流途径,十分有利于截取、疏导和采集地下水。通过水平井截取从外围流入基坑和隧道的地下水,并汇集到竖井中,从而达到降水的目的。根据目前水平井施工的技术水平,辐射井主要适用于针对粉土~园砾粒级含水层的工程降水。

辐射井降水的主要特点是:①水平井伸展范围广,控制降水面积大,一般一口辐射井单线单排控制长度可达到100m,即向两侧施打的水平井长各50m。②辐射井竖井占地面积少,适合于在城市复杂地带布设,能较好地解决降水施工与地面交通、占地的矛盾,尤其是地铁穿越建筑物、铁路、繁华道路等情况,采用常规降水技术根本无法实施,而辐射井降水会是较好的解决方案。③对于挖透多个含水层的深基坑,沿含水层底板打设水平井后,疏干含水层的效果比其它降水方法显著。

二、辐射井设计

1、集水竖井

(1)、集水竖井布置应综合考虑场地条件、地铁线路走向而定,以不侵犯隧道结构,且距隧道结构外不小于3m为宜。辐射井之间的距离以它们的水平井辐射范围能够相互影响到一定程度为准,其间距一般小于水平钻机进尺能力的两倍。确定集水竖井位置前,对现场要充分踏勘,确保集水竖井井位不与地下管线冲突。必要时,地铁临时施工竖井也可以作为集水竖井。

(2)、集水竖井形状一般采用圆形,这样便于提供水平钻机钻进和拔管的反力,并方便水平井施工定位,竖井内径应满足水平钻机对施工作业面的要求,一般不小于2.6m。

(3)、集水竖井深度根据含水层位置及基坑深度综合确定,一般有以下几种情况:

①降水目的层底板位于基底以下时,竖井应比最下一层水平井孔口位置深不小于2.0m。

②降水目的层底板位于基底附近时,竖井应达到基础底以下不小于2.0m。

③当降水目的层底高于基底时,竖井深度可按降水目的层底界下2.0m考虑。

(4)、集水竖井成井方式

常用的辐射井集水竖井成井方式有三种,即沉井、人工挖井和钻井。实际施工中可针对不同的施工场地条件和地质条件,采用不同的方式成井。

2、水平井

(1)、平面上,一般情况下水平井应在地铁结构外侧呈扇形布置,水平井之间的入射角为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。当降水目的层为弱透水层时,这时降水往往以疏干弱透水层的饱和水为主,由于这类地层渗透性较差,预降水时间较长,为加快降水速度,水平井也可以穿插到结构内弱含水层中,结构初衬施工时做封堵处理即可。

(2)、垂向上,水平井布设一般应低于基坑或隧道开挖底板下1m,如降水要求疏干含水层,即含水层底板位于基础底板以上时,含水层底板界面必须布设一层水平井。含水层厚度较大时,可设置多层水平

井。

(3)、水平井的长度要充分考虑钻进地层岩性情况和水平钻机的能力，两者应兼顾，以确定适宜的水平井长度。目前水平钻机在细颗粒地层中钻进长度可达60~70m，但下管成井长度一般在50m左右。

(4)、水平井管材质

常用的水平井井管有三种：波谷处缠丙纶丝的Φ60PVC波纹管、外缠80目纱网Φ50打眼钢管和Φ58钢丝骨架缠土工织布管。设计采用何种井管，要综合考虑场地地质情况和出水情况而定。

打眼缠网钢管孔隙率较大，出水量大，且便于在孔内安装，适用于强透水地层，如中、粗砂、砂砾石地层；波谷缠丙纶丝的PVC波纹管和钢丝骨架缠土工织布管适用于细砂、粉细砂、粉砂、粉土等弱含水层。

(5)、水平井数量

水平井数量根据水位降深、含水层厚度和透水性综合确定。单个水平井出水量可按式估算。计算简图见图11-4。

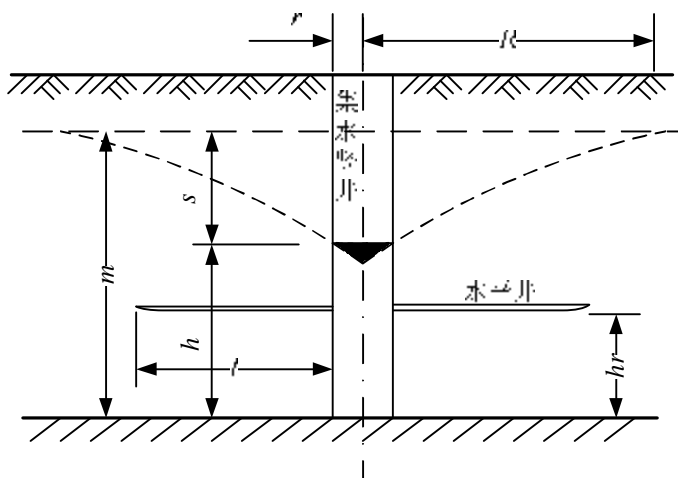


图 11-4 辐射井计算简图

$$q = \alpha \times 1.36K \frac{m^2 - h^2}{\lg \frac{R}{0.75l}} \quad (11-3)$$

式中 q ——为水平井单井出水量 (m^3/d)；

α ——水平井干扰系数；

R ——影响半径 (m)，一般取 $R = l + 10$ ；

l ——水平井长度 (m)；

m ——含水层厚度(m)；

h ——动水位以下含水层厚度(m)；

ξ ——折减系数，根据含水层底板起伏情况确定，当水平井位于含水层底部时，含水层底板起伏变化很小，取0.8~0.9；含水层底板起伏变化较小，取0.6~0.8；含水层底板起伏变化较大，取0.4~0.7；含水层底板起伏变化很大，取0.2~0.4；当水平井位于含水层中部时，取1.0。

上式适用于远离补给源的潜水，竖井底部不进水的情况。也可该式估算辐射井总出水量。

三、辐射井施工

1、施工设备

(1)、集水竖井成井设备：钻机法成井时采用反循环钻机钻孔，钻机就位及下管采用汽车吊。沉井法或人工挖孔成井时采用龙门吊提土。

(2)、水平井成井可以采用 PD-50A 型水平钻机和 MGY-100 改进型全液压钻机。钻具配备有：Φ89mm 正循环钻杆和帽式钻头，Φ114mm 双壁反循环钻杆和双通道钻头。

(3)、抽水设备应根据辐射井出水量大小、水位埋深及水位降深选择不同型号的潜水泵。如出水量很大，集水竖井中可下入多台潜水泵。

2、材料和质量要求

(1)、竖井井管

①钻机法成井下入的预制钢筋混凝土管：井管外径 $\Phi 3000\text{mm}$ ，内径 2700mm ，长 1m ，壁厚 150mm ，底节管座的底板厚 200mm ，混凝土强度等级 C20。要求井管内外壁光滑平整，不露钢筋，井管迭上后接缝严实。井管预制必须在集水竖井开凿前完成，检验合格后运到现场，堆放有序。

②沉井法成井下入的预制钢筋混凝土管：底节为刃脚节，整节高 2000mm ，内径 3000mm ，混凝土强度等级 C25，含筋率不小于 2%。刃脚踏面宽度 60mm ，采用钢筋加固并包以角钢，内斜坡角为 45° ，刃脚内壁 500mm 处有凹槽，为封底用密封槽。刃脚外径 3500mm ，高 1000mm ，应采用钢模板制作沉井刃脚。底节以上为标准管节，内径不变，外径缩为 3400mm ，管节顶部沿井壁留有环状梯形凹槽，为上下节对接用密封槽。刃脚节和标准节均对称设置 4 个注浆孔和 4 个吊装插孔。

上述竖井井管的内、外径可根据水平钻机对操作空间的要求稍作调整。

(2)、水平井井管

① $\Phi 50\text{mm}$ 钢滤水管：适用于强透水地层，如中、粗砂、砂砾石、卵砾石地层，用钢管加工而成，孔隙率不小于 10%，外缠 80 目尼龙网。

② $\Phi 60\text{mm}$ PVC 波纹管：适用于细砂、粉细砂、粉砂、粉土、粉质粘土等弱含水层，在管的波谷处打眼，孔隙率不小于 3%，缠丙纶丝，丙纶丝要全部覆盖波谷处的孔眼。

③ $\Phi 58\text{mm}$ 钢丝骨架缠土工织布管：适用于粉砂、粉土、粉质粘土等弱含水层，要求弹性好。

一般情况下 $\Phi 60\text{mm}$ PVC 波纹管较为经济实用。

(3) 造浆材料

钻井法施工集水竖井需造浆护壁，沉井法施工集水竖井需采用触变泥浆减小管壁与土层的摩阻力，泥浆采用膨润土、羧甲基纤维素钠(CMC)增粘剂、纯碱(Na_2CO_3)分散剂配制。

3、施工方法的选择

(1)、集水竖井施工方法的选择

常用的辐射井集水竖井施工方法有沉井、人工挖井和钻井三种。实际施工中可针对不同的施工场地条件和地质条件，采用不同的或相组合的施工方法。

①沉井法适用于地层比较均匀，无影响沉井下沉的大块石或障碍物，如地层以饱和粘性土为主，可采用明排水措施开挖下沉；若在砂砾石含水层中沉井则应采取辅助降水措施。沉井法施工的主要优点是适用于狭小场地；缺点是沉井容易倾斜、突沉、超沉，施工效率较低，对土体扰动较大，需辅助降水。

②人工挖井法是靠人工开挖支护成井，优点是适用于各种地层，可用于狭小场地。缺点是施工效率低，成井深度有限，需辅助降水，遇局部渗漏水时，对地层扰动较大，一般上部回填土层采用人工挖井法施工比较稳妥，而后可采用钻井法或其它方法接力成井。

③钻井法采用机械钻进成井，优点是适用于粒径不大于 150mm 的各种第四系松散沉积地层，对土体扰动小、施工效率高，安全可靠。缺点是围泥浆池需要较大场地，排除泥浆量比较大。

(2)、水平井施工方法的选择

①水力正循环钻进方法

水力正循环钻进方法是在钻具旋转并液压顶进钻杆的同时，配合高压水冲钻进，高压水通过中空钻杆直抵钻头喷射地层，岩屑从钻杆与孔壁的间隙排出。钻至设计深度后，从钻杆中插入滤水管装备成井。其优点是钻杆较轻，操作方便；在粘质粉土~粉细砂地层中钻进效率较高。缺点是对于砂土地层，有水土流失。

②水力双壁钻杆反循环钻进方法是采用双通道水龙头、双壁钻杆和孔底双壁钻头，钻进时冲洗液经水泵、高压胶管、双通道水龙头、双壁钻杆到达孔底，与钻头破碎下来的岩屑混合，经孔底喷射钻头进入钻杆中心通道，并排出孔口之外。其优点是：①冲洗液不经过孔壁返出，对孔壁没有冲刷作用，孔径不扩大，不会造成空洞；②适应地层较广，尤其适用于中粗砂层、砾石层，对于粒径小于 60mm 的小卵石层也适用，能保证成井质量。缺点是：钻杆较笨重，在粒径较大的卵石层中钻进容易堵管，水平井管下入难度较大。

4、工艺流程

集水竖井井位施放→人工挖探井→集水竖井施工→下入工作平台→水平井定位→水平井施工→下泵抽水

5、操作方法

(1)、钻井法施工集水竖井

施工工艺流程：上部回填土部分竖井分段开挖、钢筋砼护壁→围(挖)泥浆池及泥浆循环槽→钻机安装、

就位→泥浆制备→钻孔→“漂浮法”下入井管→充填固井

①上部回填土部分竖井分段开挖、钢筋砼护壁

由于上部杂填土多为房渣土，土质疏松，直接采用钻机钻井将会漏失泥浆，严重时甚至造成塌孔，因而杂填土深度内需采用人工挖井法施工。做法是：开孔直径 3.7~4.0m，每下挖 1m 绑筋，支模现浇或喷射砼护壁，厚 150mm。肋筋 $\Phi 12@300$ ，箍筋 $\Phi 8@300$ ，人工开挖护壁深度以见原状土为准。在井口处做钢筋混凝土井字地梁，作为稳固钻机的基础。地梁中预埋钢管，以备“漂浮法”下管时穿钢丝绳，用于扶正井管。

②围(挖)泥浆池及泥浆循环槽

泥浆池的做法可挖可围，但对城市的硬化地面应采用围泥浆池的办法，这样可避免成井后修补路(地)面，有利于保护环境。泥浆池尽量远离孔口，以便于钻机操作，并减小泥浆池对井壁的侧压力，防止泥浆回渗造成塌孔。泥浆池容积最好略大于计算出渣量，否则容积过小就要边钻进边清渣，影响施工连续性。泥浆循环槽宽不小于 1m，高 0.5m，连接竖井和泥浆池。

③钻机安装、就位

先将钻头悬吊于孔口，然后安装钻机，转盘中心要采用十字标线铅锤对中，严格对准钻孔中心，以防钻头刮蹭、破坏上部人工开挖做好的孔壁。

④泥浆制备

开钻前一般要制备不少于 100m³ 泥浆，泥浆密度为 1.05~1.15g/cm³，粘度为 20~28s。水位越低，含水层粒径越大，则泥浆密度和粘度应大一些。制备方法：在泥浆循环槽内逐袋倒入粘土粉，并向泥浆池中注水，开动钻机用钻头在孔内搅拌，通过泥浆循环槽和泥浆池循环造浆。如果钻进地层以粘性土为主，含水层粒径小，水位又比较高，可降低对钻井泥浆的要求，甚至可清水钻进，靠钻进地层自然造浆。

⑤钻井

钻进过程中，要随时观察泥浆液流损变化，若泥浆损耗大，则应边向孔内加粘土粉边加注清水，严禁只加清水，否则容易破坏孔壁泥皮，造成塌孔事故。在钻进过程中遇到卵石时要适量加大泥浆密度和粘度。在钻进粘土地层时泥浆不宜过稠，否则钻进效率将大大降低，这时要排走一部分稠浆，补充清水，调整泥浆密度到适宜状态。钻进过程中应始终保持泥浆液面不低于地面下 1m。

钻机转速一般应保持在 10-20r/min，钻进进尺每小时不大于 0.5m。应在水平井设置标高的 3m 范围内，每进尺 0.5m 在砂石泵的排渣管口捞砂样鉴别土层岩性。

⑥“漂浮法”下管

将钻机吊离孔位，吊开钻头，在四个方向上打入钢管地锚，并将钢丝绳缠绕在地锚和预埋在井字地梁内的钢管上。将底节井座(带底板的井管)吊入并漂浮于井孔中，在井座入水前，在四个方向上用钢丝绳固定底节井座，绷紧钢丝绳。然后吊车起吊下一节井管，与井座对接。此时，四个方向上的钢丝绳应紧紧绷住，以防井管倾斜。

接管时，先在井座上口抹一层厚约 5cm 的水泥砂浆，再吊上一节井管对接，外缝用掺水玻璃的素水泥浆勾抹严实；然后在接口部位上下 15cm 范围用改性沥青防水卷材包裹并用喷灯烤粘三层，以防接口处漏水涌砂。

井管对接完后，均匀放松钢丝绳，并向井管内注水，使井管缓慢下沉到有利于下一节井管对接的位置，然后重复上述操作到下完最后一根管。下管过程中要保持井管下沉力和浮力的平衡，钢丝绳的放松和收紧应协调一致，否则会出现井管歪斜现象，造成井管不能正常下沉。下管过程必须保证连续作业，严禁无故中断，下管速度要均匀、平稳。

⑦充填固井

由于井座底部为沉淀的泥浆和少量钻渣，当全部井管下完后，应向井管内注满水，使井管充分下沉(不小于 24h)。然后将井管外围与地层间的空隙用 $\Phi 3-10\text{mm}$ 石屑充填密实，目的是使井壁与地层连为一体，防止井管上浮，并且上部地层的水可通过砾料下渗，从水平井中流出，使集水井本身也起一定降水作用，因而出于降水目的的辐射井一般不宜采用水泥浆固井。

(2)、沉井法施工集水竖井

施工工艺流程：井口护筒埋设→沉井下沉→上下管节连接→封底

①井口护筒埋设

上部回填土埋设钢护筒，钢护筒口径 3800mm，用 4~8mm 厚钢板制作，埋设深度根据地表回填土厚度确定，护筒顶部高出地面 0.3m。护筒周边场地用混凝土硬化。

②沉井下沉

将刃脚节吊置于护筒内，从井中部取土使管节下沉，当底节沉入土中剩余 0.3~0.5m 时，将上部管节凸牙朝下吊起并和底节凹槽对接，预埋钢板对齐并做防水，然后将上下预埋对接件里外焊牢后继续取土沉

井。

当刃脚节沉入土中上接管节后，必须在井中安装安全罩，安全罩位于沉井第二节和第三节焊接钢板处。先在管节预埋钢板上焊接牛腿，再把安全罩钢骨架安装在牛腿上，钢骨架上置钢筋罩。安全罩外径 2900mm，中间开直径 1000mm 的圆孔作为施工通道

为减小管壁与土层的摩阻力，沉井施工应采用触变泥浆减小磨阻力，即在沉井外壁设置 10cm 厚泥浆槽。泥浆用膨润土、羧甲基纤维素钠(CMC)配制，一般地层保持密度为 $1.05-1.15\text{g/cm}^3$ ，卵石层则加大泥浆密度和粘度。用泥浆泵通过预设在井管上的压浆孔和设置在井管内壁上的压浆管压浆，根据需要可在刃脚节或标准节管路上压浆，射口处设一短角钢防护，沉井到射口以下 1.5m 处即可启动压浆。随着井管下沉而不断补浆，使泥浆面保持在钢护筒底面之上 0.5m 处。为防止漏浆，可在刃角台阶上钉一层 2mm 厚的橡胶皮，同时在挖土时注意不使刃角底部脱空，当泥浆泄漏时，要及时补充。当沉井下沉到设计深度时，泥浆槽内泥浆需及时处理，一般可采用水泥浆或水泥砂浆通过泥浆泵压入泥浆槽内置换出泥浆。

③下沉辅助措施

纠偏：入土不深的沉井，可在刃脚高的一侧除土，使高的一侧逐渐下沉，即偏除土纠偏。也可在井顶强加水平牵引纠偏，同时在井内配合除土纠偏，即加压纠偏。也可在沉井偏斜的一侧刃脚底挖坑，将千斤顶置于刃脚底部，将管节顶正纠偏，然后在另一侧除土，逐步恢复正常取土，即千斤顶纠偏。

压重下沉：当沉井不能靠自重下沉或下沉速度很慢时，可用铁块、钢梁或用袋装砂土，以及沉井管接高增加荷载等方法加压配重，特别要注意均匀对称加重，使沉井均匀下沉。

④封底

沉井到预定标高后，应进行封底，特别是当开挖底板有突涌可能时，应及时进行封底处理，即沉井到底后安装底板格栅，浇筑或喷射混凝土封底。

设计不要求封底时，则在沉井达到设计标高后，应清干净沉井底部。为防止井底涌砂，井底应铺垫 20~30cm 厚，粒径 2~4mm 的滤料，并预埋几节滤水管，作为安放水泵位置，滤水管外围回填滤料。

(3)、人工挖井法施工集水竖井

施工工艺流程：土方开挖→安装格栅及钢筋网片→喷射或浇筑混凝土→封底

①土方开挖

采用跳跃式开挖土方，开挖范围依据水平格栅的尺寸进行，开挖步距依据水平格栅的竖向间距确定，一般为 0.5~0.75m。土方严禁竖向超挖，水平方向超挖不大于 50mm，利用吊线坠和尺量控制开挖标高。

②安装格栅及钢筋网片

安装格栅时，应将格栅下虚土及杂物清理干净。施工时要通过在井壁设置的吊线坠控制格栅的平整度通过测量控制线控制水平偏差。格栅节点借连接板用螺栓连接或满焊。格栅竖向之间采用纵向连接筋和钢筋网片连接，连接顺序为：先在格栅近土侧放置钢筋网片，再将格栅与纵向连接筋焊接，每个交叉点满焊，同时将近土侧钢筋网片与格栅绑扎牢固，最后安装另一侧钢筋网片，并与格栅绑扎牢固。竖向连接筋及网片的搭接长度应符合规范要求，钢筋网片搭接长度不小于一个网格长度。

③喷射或浇筑混凝土

喷射作业应分段分片依次进行，喷射顺序应自下而上。喷混凝土一次喷射厚度为 30~50mm。分层喷射时，后一层喷射应在前一层混凝土终凝后进行，若终凝 1h 后再进行喷射时，应先用水清洗喷层表面。混凝土终凝到下一循环开挖时间不应小于 3 小时。

如土层有渗水，则在喷射混凝土前应适当处理。渗水呈线状时，应插入导水钢花管将渗水集中排出。渗水呈面状缓慢渗出时，应挂钢丝网，施喷 30mm 厚的混凝土将土层护住。

对于稳定性较好且无水的地质，也可采用支模、分层浇筑混凝土的方法护壁。竖井落底封闭后，按上节要求及做法封底。

(4)、水平井施工

施工工艺流程：下入工作平台→水平井定位→用合金钻头开孔→钻进至设计深度→安装滤水管→封堵井口

①将工作平台吊放至集水井内设计水平井标高下 0.5m 并固定。工作平台下放到位后，在竖井口用 4 根钢丝固定，再用预留钢丝绳与锚具固定在井壁管或锁口上，最后将平台与管壁的间隙用 4 个木楔固定，防止平台左右晃动。

②将水平钻机吊放至工作平台上，按设计方位角对准孔位，并固定试机。

③在水平钻机上安装合金钻头，在竖井井管壁上开孔。

④开孔完成后，迅速卸掉开孔钻头，换上双壁钻杆及钻头钻进，此间速度一定要快，否则容易流砂，

酿成事故。开孔钻进应采用小水量、低转速、轻压慢进，注意孔口返渣情况，观察形成反循环的情况。如果孔口坍塌得厉害，还需要下入口径大一级的钢套管来保护孔口。

⑤打开高压水，开动钻机和高压水泵，将第一根钻杆钻进含水层，再接上下一根钻杆，如此循环操作，直至达到设计孔深。

典型地层的钻进工艺：在粘土层中钻进时要注意糊钻、堵塞水眼等，为此要断续给进，一般以 5—20cm 串动一次钻具为宜，水量水压大一些，待柱状粘土芯排出后再进尺，转速为中高速即可，切不可贪图进尺，造成糊钻堵塞。在砂层中钻进时要注意抱钻，此时水量水压中等，断续给进，视返水含砂量适当调整。在卵砾石层中钻进时，水量水压大一些，转速为中速，及时注意孔口返渣情况和倾听卵砾石对钻具的撞击声，断续给进，确认钻机内卵砾排净再给进。如遇较大卵石，可采用反复串动钻具，使其松动靠边。钻进过程中，应特别注意孔口返渣情况。

⑥水平孔钻进到预定深度，可以超打一根钻杆后停止钻进，这时水泵应继续送水，直到孔口返水清洁，表明内管已清洗干净，退回卸下一根钻杆后可下入滤水管。将滤水管从钻杆中插入，直至钻头部位，滤水管接口部位要连接平整牢固，避免刮蹭钻杆。

⑦从滤水管中间插入顶杆，将滤水管顶住，以防拔钻杆时将滤水管带出。如采用水力正循环钻杆钻进，则用顶杆顶掉帽式钻头。

⑧启动油缸逐段拔出钻杆，将滤水管留在含水层中。

⑨钻杆拔出后，迅速用蛇皮袋、棕树皮等材料封住滤管外的空隙，并在孔口安装封堵器，让水从滤水管中自动流出，防止砂子从未封严的孔壁流出。

每个水平井钻进必须连续施工，如发生故障需停钻时，则把钻杆全部拔出，以免埋钻。

6、下泵抽水

辐射井施工结束后，在集水竖井中下入潜水泵进行抽水，下入的潜水泵数量和泵量根据水平井出水情况确定。

7、应注意的质量问题

(1)、沉井下沉过程中，发现沉井倾斜或偏移，应及时采取相应纠偏措施，控制竖井垂直度偏差在允许范围内。

(2)、人工开挖现浇或喷射混凝土成井，遇松散土层时，应采取注浆等加固等辅助措施，以防井壁坍塌。

(3)、钻井法成井时，泥浆池尽量远离孔口，以减小泥浆池对井壁的侧压力，防止泥浆大量回渗造成塌孔，泥浆池与孔口的距离不得小于 5m。钻机开钻前要备有足够的施工供水水源、粘土或粘土粉。当钻进到原始水位较低的砂卵石层时，要加强对孔内泥浆液面的观察，一旦孔内液面下降，泥浆严重漏失，应立即注水，并加大泥浆密度，保持液面高度不低于孔口下 1m。

(4)、水平井施工应避免在涌砂严重的含水层中开孔，实际施工中可在该含水层底部一定范围的粘土层中开孔，钻孔时调整钻机上仰 1~3°。由于含水层通常都是凹凸不平的，水平井钻孔标高的略微调整，一般不会影响降水效果，反而是保障施工质量和安全的技术措施。

(5)、采用水力正循环工艺施工水平井时，如钻进地层为干砂层或粉土层，如钻机给进和高压水力控制不当，则很可能形成空洞。当通过钻井时大量排砂等迹象反映出来时，应及时注浆充填处理。

8、成品保护

(1)、非承重井盖保护

非承重井盖保护主要用于位于绿地内的辐射井，做法：

①用MU7.5粘土砖将竖井口与地面找平，并略高出地面5cm，以防雨水流入辐射井。

②用角钢做成略大于井口直径1m的圆，作为井盖的外边。然后用Φ16的钢筋焊接成骨架，钢筋间距15cm，在钢筋骨架上焊接扁铁，然后铺上2.5mm厚铁板，并用铆钉连接在扁铁上。

③在井盖上开一个30×30cm的方孔，并加盖保护，以便更换水泵和日常检查维护。

(2)、承重井盖保护

承重井盖用于水泥路面、沥青路面的地面恢复，地面恢复后可以承受重车碾压。做法：

①竖井口架设I25a工字钢，间距50cm，并在两根工字钢之间砌砖防止工字钢侧移。

②在工字钢上面铺8mm厚钢板，钢板之间的连接为焊接，钢板铺上后与地面平齐，在盖板上开一个30×30cm的方孔，以便日常检查维护，方孔盖用防盗铁链与工字钢连接。

③在井口与周围路面的接缝处用水泥砂浆找平，如果接缝太大应用细石混凝土充填。

9、安全措施

(1)、安全操作要求

①挖井人员要戴好安全帽，挖土时要从上而下环状逐层开挖。作业时出现坍塌、涌水事故，立即封闭开挖面后，井下人员撤离到安全地方。

②挖井时井上井下人员要互相配合，禁止往井下扔工具或其他物品。挖出的土石应堆离孔口边 1.5 米以外，并及时运走。

③人员乘罐笼上下井时，罐笼要安装牢固，安设定绳并系好安全带。罐笼提升人员到井口时，人员必须在罐笼停稳后进出罐笼，禁止装有物料的罐笼载人。罐笼允许搭乘人数和最大载重量，应在井口挂牌明示，严禁超载。

④井内施工时井口应有专人监护，如井内出现异常情况应及时将作业人员提升到地面，排除险情后再施工。

⑤提升机升降时，井底、井口和提升机房应设有电铃，进行联系。没有取得联系或联络讯号不清时，一律禁止升降。提升机应由专人操作，其他人员不得擅自操作提升机。

⑥提升容器装土不得过满，禁止工具与土方混装提升，桶、筐悬吊在井筒中时，禁止装卸物件，以防坠落伤人。

⑦由于集水竖井中工作平台很小，工具、钻具不能随意乱放，应设置工具架，随用随取，用完放回，钻具一律放在井口固定位置，用时吊下，吊放位置为固定位置。

(2)、技术安全措施

①竖井井口应设置护栏及警示牌，停止作业确认井下无人时，应将井口盖好。

②竖井井内应设爬梯供人员上下，爬梯必须牢固、防滑，并经常检查、接长。

③从井内挖出的土方应装在专用出渣桶内，用电动葫芦提升，提升用的吊钩应有自锁装置，升放出渣桶时，井底人员应站在安全地方，提升大石块时井内人员应先上到地面。

④压注触变泥浆时应控制好注浆压力，以免从井孔中喷出伤人。

⑤“漂浮法”下井管前，应根据集水竖井的深度，土质，环境条件等，确定吊车距井边的距离和井管排放位置。下井管时，起吊井管的吊索应准确置于吊点，吊具应安装牢固，井管起吊应平稳，吊速应均匀，回转应平稳，下落应低速轻放，不得突然制动。

⑥水平井施工时，竖井口设置钢筋焊制的安全罩，并加强井内通风换气，井下照明应采用低压照明电路。施工人员必须穿防水绝缘鞋和防水工作服，佩戴安全帽。

四、工程实例

1、工程概况

北京地铁五号线03标段的蒲黄榆站至天坛东门站区间全长1705m，采用浅埋暗挖法施工，在K3+480~K3+900段，地铁隧道需下穿南二环路、玉蜓桥、京山铁路及南护城河，而且在南护城河底，区间左线需进行桥桩托换，对降水效果要求很高。为把对城市环境、交通等影响降低到最低限度，采用常规的降水或堵水方法几乎无法实现，经认真分析比选，采用了辐射井方法降水。

2、地质及水文地质概况

(1)、地层

按照地层的形成年代、成因类型及岩性，自上而下依次为（图 11-5）：

①、人工填土层（ Q_4^{ml} ）：

粉土填土①层：黄褐色，稍湿，松散~稍密，湿，含少量砖渣、灰渣；杂填土①₁层：杂色，稍湿，松散~稍密，表层为沥青、水泥路面，以房渣土为主，含砖渣、灰块和少量炉灰；圆砾填土①₃层：杂色，稍湿，稍密。

②、第四纪全新世冲洪积层(Q_4^{al+pl})：

粉土③层：褐黄色，湿，硬塑为主局部软塑，中密~密实；粉质粘土③₁层：褐黄色，硬塑为主局部软塑；粘土③₂层：褐黄色，软塑；粉细砂③₃层：褐黄色，湿，局部饱和，中密。本层中各亚层分布层不连续，厚变化大。

粉细砂④₃层：褐黄色，湿~饱和，中密，厚度 0.5~5.7m；中粗砂④₄层：褐黄色，湿~饱和，中密。

③、第四纪晚更新世（ Q_3^{al+pl} ）

粉质粘土⑥层：褐黄色~棕黄色，硬塑为主局部软塑；粘土⑥₁层：棕黄~棕红色，硬塑；粉土⑥₂层：褐黄色，很湿，密实。粉质粘土⑥层和粉土⑥₂层交互分布，粘土⑥₁层呈透镜体状局部分布。

卵石圆砾⑦层：杂色，饱和，密实，一般粒径 15~25mm，最大粒径 130mm，亚圆形为主，卵砾石成

分主要为辉绿岩、砂岩，充填物为褐黄色中粗砂；中粗砂⑦₁层：褐黄色，饱和，密实；粉细砂⑦₂层：褐黄色，饱和，密实；粉质粘土⑦₄层：褐黄色，硬塑。

粉质粘土⑧层：褐黄色，硬塑；粘土⑧₁层：褐黄色，硬塑局部软塑；粉土⑧₂层：褐黄色，很湿，密实。粉质粘土⑧层、粘土⑧₁层和粉土⑧₂层交互分布。

卵石圆砾⑨层：杂色，饱和，密实，一般粒径15~25mm，最大粒径130mm，亚圆形为主，卵砾石成分主要为辉绿岩、砂岩，充填物为褐黄色中粗砂；中粗砂⑨₁层：褐黄色，饱和，密实；粉细砂⑨₂层：褐黄色，饱和，密实。

粉质粘土⑩层：褐黄色~棕黄色，硬塑；粉土⑩₂层，褐黄色，很湿，密实；细中砂⑩₃层：褐黄色，饱和，密实。

卵石圆砾⑪层：杂色，饱和，密实，一般粒径15~30mm，最大粒径130mm，亚圆形为主，卵砾石成分主要为辉绿岩、砂岩，充填物为褐黄色中粗砂。

(2)、地下水

潜水赋存于④₄层中粗砂层中，含水层底板埋深约18m，水位埋深14.0~15.0m，含水层厚度3m左右，渗透系数20m/d。第一层承压水赋存于⑦层卵石圆砾和⑦₁层中粗砂中，含水层底板埋深约23m，水头埋深17.0~18.4m，含水层厚度2~3m，渗透系数70m/d。第二层承压水赋存于⑨层卵石圆砾中，水头埋深27.5m。地铁隧道开挖深度为22~24m，须疏干潜水含水层和第一承压含水层。

3、降水方案

针对施工现场条件，共布设了9口辐射井（图11-6）。辐射井竖井设计井深26~28m，井径3000mm；水平井设置两层，分别设置于潜水含水层底板和第一承压含水层底板，水平井设计长度20~50，井径114mm。水平井在平面布置上完全截取并控制了从外围流入隧道的地下水。

4、降水施工情况

辐射井施工时间为2003年3月~11月，竖井上部6~7m回填土段采用人工挖井法施工，下部采用钻井法施工，施工钻机为GPS-20泵吸反循环钻机，“漂浮法”下管。水平井施工采用了为适应本工程钻进地层要求而专门研制的PD-50A型水平钻机，对于穿过砂卵石层的水平井采用水力双壁钻杆反循环方法钻进，对于穿过粉土等弱含水层的水平井采用水力正循环方法钻进。

5、降水效果

实际开挖证实潜水含水层和第一承压含水层彻底疏干，辐射井单井涌水量由成井初期的50~60m³/h衰减为10m³/h左右，体现出了含水层逐步疏干的过程。辐射井降水的成功实施，为暗挖隧道通过城市复杂地区创造了无水施工条件，使得隧道掘进及桥桩托换进展顺利。

辐射井降水过程中，经对京山铁路路基、玉蜓桥桥桩和邻近高大建筑物的沉降监测表明，降水引起的地面沉降量小于7mm，降水引起的桥桩沉降小于4mm，并属均匀沉降。

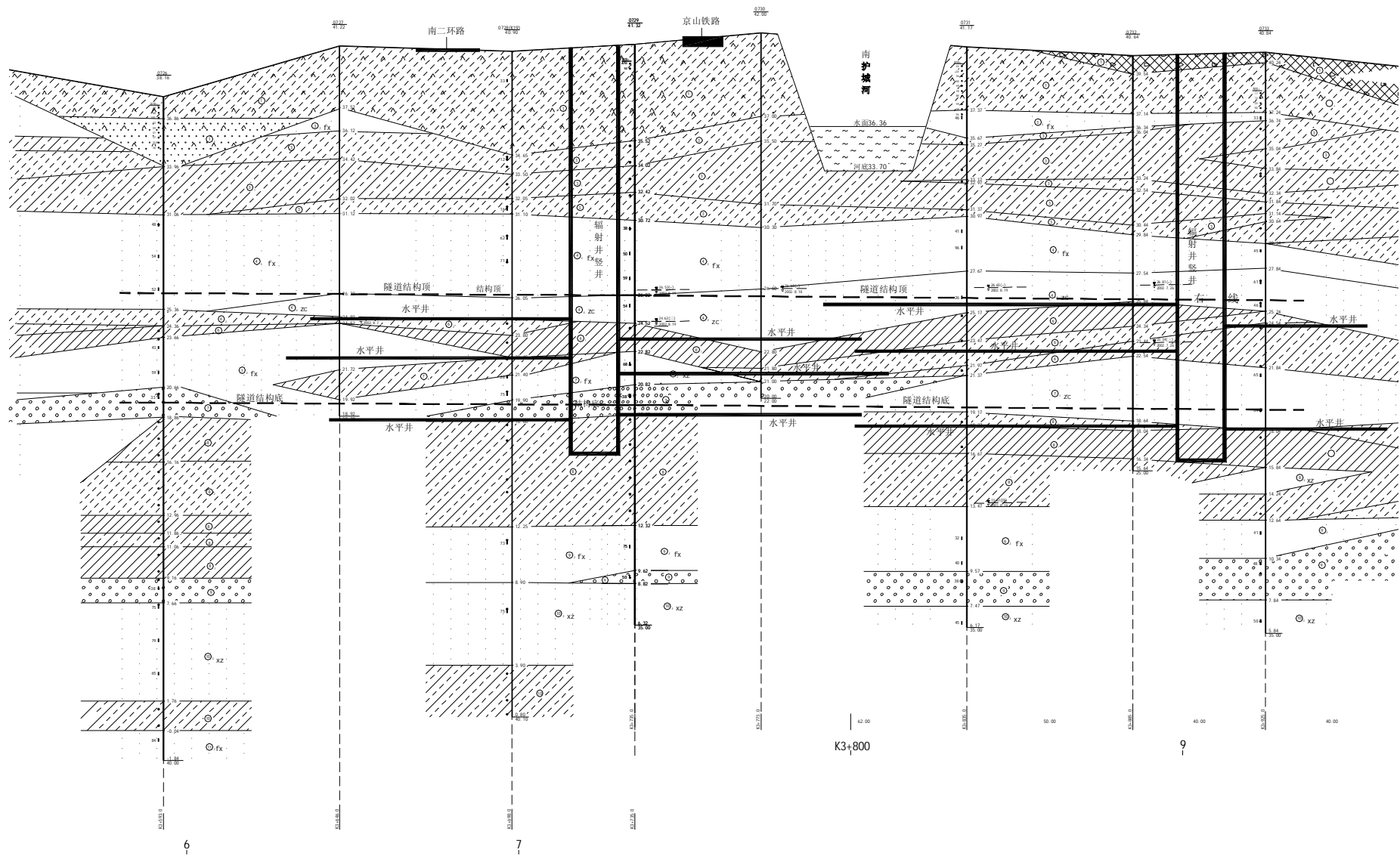


图 11-5 北京地铁五号线玉蜓桥段地质剖面图

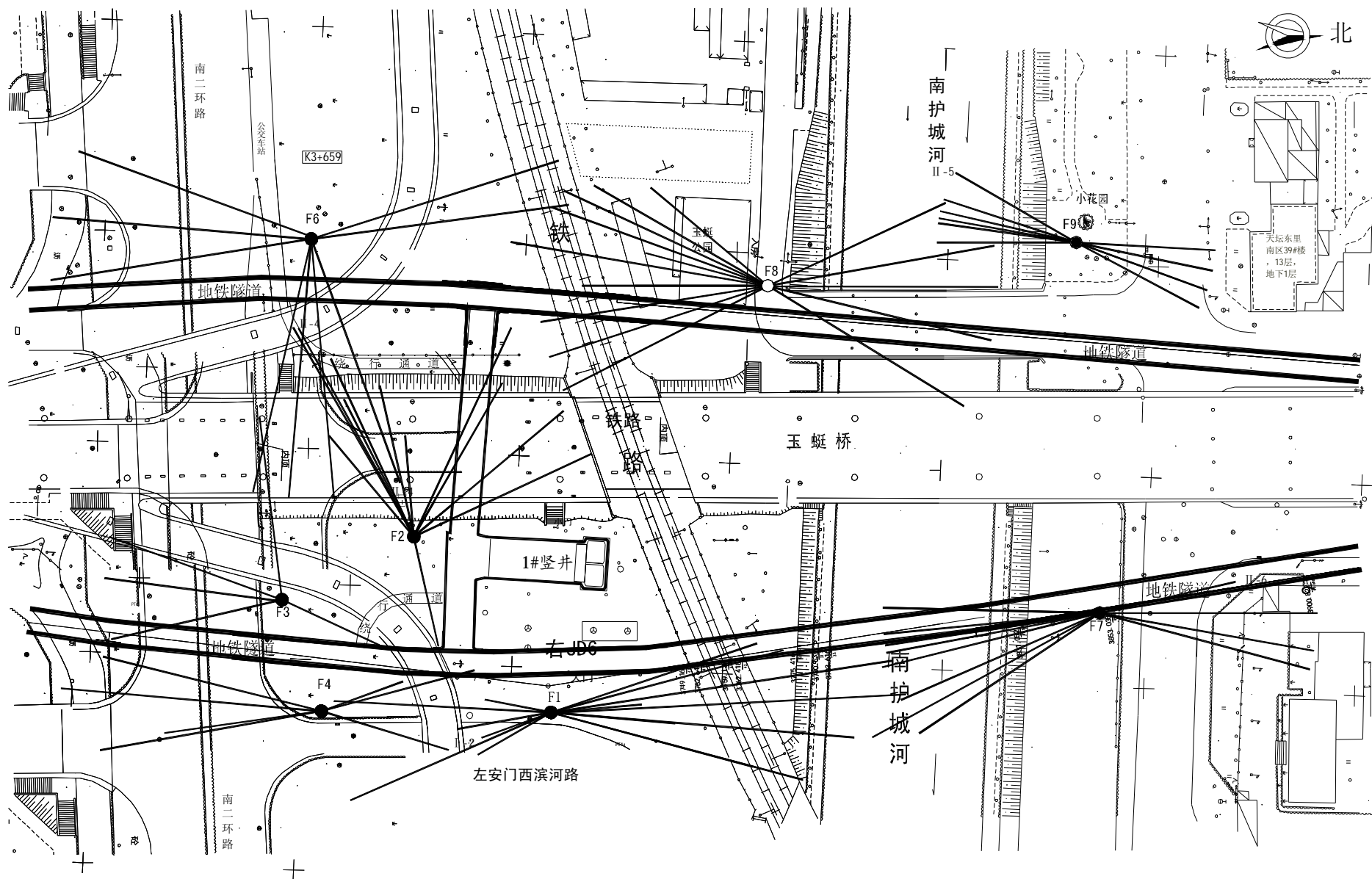


图 11-6 北京地铁五号线下穿玉蜓桥段辐射井降水平面图

11.3 轻型井点降水

一、轻型井点降水原理及适用条件

轻型井点主要由井点管、连接管、集水总管和抽水装置组成。其抽水原理是：启动抽水装置后，井点管、集水总管内空气被吸走，形成一定的真空度。由于管路系统外部地下水承受大气压力，为了保持平衡状态，地下水流向负压区，地下水被吸至井点管内，经总管至储水箱排走，从而达到降水目的。抽水装置产生的真空度一般达不到绝对真空，轻型井点吸水深度按下式计算：

$$H = \frac{H_v}{0.1\text{Mpa}} \times 10.3 - \Delta h \quad (11-4)$$

式中：H_v——抽水装置所产生的真空度(MPa)；

Δh——管路水头损失(取 0.3m~0.5m)；

0.1Mpa——为绝对真空度，相当于一个大气压(换算水柱高为 10.3m)。

吸水深度是表示井点管内吸水高度，并不代表基坑水位降低深度。为充分发挥了吸水能力，达到最大的降水深度，应尽量把井点抽水系统向下放置。

轻型井点主要适用于地下水位较高的弱透水层的降水，一级井点降水深度为 5~6m，二级井点降水深度为 6~9m，多级可到 12m。此外，中铁隧道集团在隧道内实施轻型井点降水方面也有很多成功的经验。

二、轻型井点种类及特点

根据抽水装置的不同，轻型井点分为干式真空泵、射流泵和隔膜泵轻型井点。

1、干式真空泵轻型井点

干式真空泵轻型井点的抽水设备是由一台干式真空泵、一台离心式水泵和气水分离箱组成。干式真空泵抽水的优点是：安装方便，抽气能力较大，带动井点数较多，排水能力强，形成真空度较稳定。缺点是：设备多，耗电量大，机械磨损发热量高，维修困难。干式真空泵轻型井点设备技术性能参见表 11-3。

表 11-3 W 型抽水设备主机性能

名称	规格型号	数量(台)	性能	用途	备注
真空泵	W4	1	真空度 99.992kPa，抽气速率 379m ³ /h，功率 10kW。	真空抽水	
离心泵	3BL-9或3BA-9	2	流量 45m ³ /h，扬程 326m，功率 7.5kW。	排送主水气分离器中的水	备用一台
	1—BL-6	1	流量 11m ³ /h，扬程 17.4m	供真空泵冷却水	
电动机	J0316 OS-6L	1	额定输出 11kw，转速 970r/mln	带动真空泵	
	J02-42-2	2	功率 75kW，转速 2900r/min	带动离心泵 3BL-9	其中一台备用
	J03-902	1	功率 2.2kW，转速 2880r/min	带动离心泵	

2、射流泵轻型井点

射流泵由射流器、离心泵和循环水箱组成，系利用射流技术在管路中产生真空。其工作原理是：启动离心泵驱动工作水运转，水流经喷嘴进入混合室时，由于流速突然增大，在周围产生负压(真空)，把地下水吸出。射流泵的关键设备是射流器，射流器主要由喷嘴和混合室组成。射流泵能产生较高真空度，可高达 600~700Hg(80~92.5kPa)，一般真空度不低于 400Hg(52.6kPa)。射流泵与干式真空泵相比，具有结构简单、加工容易、造价低廉、耗电量少、体积小、重量轻、使用方便等优点。但射流泵排气量小，稍有漏气则真空度就会下降，因而带动的井点根数较少，一般能带动 10m 长的井点 25 根左右。由于射流泵的喷嘴易磨损，故工作时要求水质洁净。常见射流泵技术性能见表 11-4。

表 11-4 常用射流泵的技术性能

项目	射流泵型号			
	QJD4-5	QJD-60	QJD-90	JS-45
抽吸深度(m)	9.6	9.6	9.6	10.26
排水量(m ³ /h)	45	60	90	45

工作水压力(MPa)	≥0.25	≥0.25	≥0.25	>0.25
电机功率(kW)	7.5	7.5	7.5	7.5
外型尺寸(mm) (长×宽×高)	1500×1010×850	2227×600×850	1900×1680×1030	1450×960×760

3、隔膜泵轻型井点

隔膜泵是借助隔膜在活塞中作往返运动获得的真空、压力而工作的，隔膜泵的结构特性：板式进口阀及球形出口阀，阀体均依靠水封保证气密与真空，可以获得较高的真空度，由于出口阀采用球阀，也可以获得压力。隔膜泵井点采用双缸隔膜泵，为两套工作泵体，用轴杆、齿轮传动泵体内隔膜上下运动，一只向上，另一只向下，当胶质皮碗向上时，泵腔内产生真空，出水口阀口关闭，进水口阀口打开，地下水被吸入至腔内；当皮碗向下运动时，进水口阀口关闭，出水口阀口打开，地下水被压出泵体流走，两者交替、反复循环地进行，达到连续抽水的目的。如 400 型隔膜泵，真空度可达 92.2kPa 的泵，可带动井点 40 根左右，真空度保持在 52.6kPa 以上，功率 3kW，吸取地下水流量为 10m³/h 左右。隔膜泵构造简单，加工容易，耗电少，功效高，是单根井点平均消耗功率最少的井点。但隔膜泵的安装质量要求严格，其底座安装应平稳牢固，泵出水口的排水管亦应平接，否则将影响泵功能。隔膜泵内皮碗容易磨损，修理频繁，其安装质量直接影响水泵的运行质量。

三、轻型井点布置

轻型井点的平面布置主要取决于基坑的平面形状和地下水降深要求，一般把井点布置成封闭状进行降水。对于长条形基槽可按线状布置井点，如基坑宽度小于 6m，其降水深度不超过 5m 时，可采用单排井点线形布置在基坑一侧。井点沿基坑外缘 0.5~1.0m 布置，井间距 1.0~2.5m。井点管长 7~10m，滤水管长 1.0~1.7m，沉淀管长 0.3~0.5m。不能封闭降水时，在基坑两端井点应适当外延，外延长度为槽宽的 2 倍。如降水基坑面积很大，降水浸润曲线在基坑中心不能满足降深要求时，可在基坑中部布置一排或数排井点。当降水深度较大，超过单层井点降水深度要求，应采用双层或多层井点，构成阶梯状井点接力降水，每层井点降深以 4~5m 为宜。

由于轻型井点降水的计算受很多不确定因素的影响，设备的排水量往往远大于地层出水能力，理论计算不够准确，一般不必进行计算，而根据当地经验布置实施。

四、轻型井点施工

1、施工设备

(1)、成孔设备

①钻孔法成孔时，采用长螺旋钻机，或小型正循环钻机。

②冲孔法成孔时，使用吊车和水冲机具。

吊车：用于起吊冲水机具，起吊高度不小于10m，额定起重量不小于3t。

冲管：用于水冲土层成孔，为直径50~70mm，长度7~10m的钢管，底部安装喷嘴。

高压胶管：用于连接高压水泵和冲管，长度为15~20m，直径与冲管和高压水泵相匹配。

高压水泵：额定压力不小于1.5MPa

(2)、洗井设备

采用小型空压机，工作压力0.5MPa，排风量2~3m³/min

(3)、降水设备

①井点管：上部为钢管，下部滤水管，底部为沉淀管。分节组装的井点管直径应一致，钢管直径一般为38~55mm。滤水管与钢管用螺纹套头连接，滤水管上滤孔呈梅花形分布，直径为10mm，滤管长度为1.5m，孔隙率不小于15%，外壁垫筋缠镀锌铅丝后包尼龙网或土工布滤网，用铅丝捆扎牢固。沉淀管长度一般为0.5m，底部封死。

②连接管：为加筋胶皮管或加筋透明塑料管，直径为38~55mm，直径与井点管和集水总管连接接头相匹配，长度为1~2m。

③集水总管：根据出水量大小选用直径75~150mm的钢管，在管壁一侧每隔1.2~2.0m设一个与井点管的连接接头，两根管之间用法兰连接。

④抽水机组：可选用射流泵、干式真空泵或隔膜泵机组。

2、施工方法的选择

(1)、当工程场地地层以粘性土、粉土为主，地层不易塌孔、缩孔时，可优先选用长螺旋钻机沉设井点管，这种工艺施工效率较高，日沉设井点管可达40根，而且不存在泥浆排放问题。与其它成孔方法相比，施工成本较低，且便于管理。

(2)、采用冲孔法成井时泥浆排放量较大，需解决泥浆排放问题。

(3)、当工程场地地层以砂层为主时，可选用小型正循环钻机和小型冲击钻机沉设井点管，日沉设井点管12根左右。

3、工艺流程

测设井位→钻机就位→钻冲井孔→沉设井点管→回填滤料→洗井→封填孔口→连接集水总管→安装抽水机组→安装排水管或开挖排水沟→试抽、验收→降水维护→井点系统拆除

4、操作方法

(1)、测设井位

根据降水设计井位图以及地下管线分布图，参照车站或区间中线控制点施放井位。

(2)、钻机就位

当采用长螺旋钻机成孔时，应使钻杆轴线垂直对准钻孔中心位置，孔位误差不得大于150mm，并使用双侧吊线坠校正钻杆垂直度，钻杆倾斜度不大于1%。当采用冲孔法成孔时，起重机应安装在测设的孔位旁，用高压胶管连接冲管与高压水泵，起吊冲管对准钻孔中心，冲管倾斜度不大于1%。

(3)、钻(冲)井孔

①长螺旋钻机成孔

螺旋钻进应根据地层情况选择和调整钻进参数，并通过电流表控制进尺速度，电流值增大时，说明孔内阻力增大，应降低钻速。开始钻进及穿过软硬土层交界处时，应保持钻杆垂直，控制钻速，缓慢进尺。钻进到含有砖头瓦块卵石的土层时，应控制钻杆跳动与机架摇晃，以免孔径扩大并增加孔底落土。钻进中如遇到卡钻、不进尺或钻进缓慢情况时，应停机检查原因，及时处理。遇孔内渗水、塌孔、缩径等异常情况时，可采取调整钻进参数、投入适量粘土、上下串动钻具等措施。钻到预定的深度后，应原地空转清土，然后起拔钻杆。

②冲孔法成孔：用吊车将冲管吊起对准井点位置，开启高压水泵，并将冲管上下左右摆动，边冲边沉。冲水压力根据土层的坚实程度确定：砂土层水压0.5~1.25MPa；粘性土水压0.25~1.50MPa。冲孔深度应低于井点管底0.5m，以弥补沉淀后孔深不足。冲孔达到预定深度后降低水压，拔出冲管，下入井点管，回填滤料，以防止孔壁坍塌。

(4)、沉设井点管

沉设井点管应缓慢、保持井点管位于井孔正中位置，禁止刮蹭井壁和插入井底，出现上述现象时应提出井点管，检查滤水管及滤网有无损坏，合格后重新沉设。井点管应高于地面200~300mm。管口应用尼龙网扎好，以免杂物落入井管。

(5)、回填滤料

回填滤料应均匀地从四面围填，保持井点管居中，并随时探测滤料深度，以免堵塞架空。滤料回填至地面下1m为止。

(6)、洗井

回填滤料后应及时洗井，洗井可用清水反冲法和空压机法。应注意采取措施防止洗出的浑水回流入孔内。洗井后如果滤料下沉应补填滤料。

①清水反冲法洗井：将供水胶管插入距井底1m处，打开水龙头或水泵，将清水注入井点管，浑水从滤料层返出，水清后停止。

②空压机洗井：采用直径20~25mm的风管将压缩空气送入井点管底部滤水管位置，将滤料层中的泥浆洗出，应视地层出水能力间隔送风洗井，必要时也可注入一定量清水再洗。

(7)、封填孔口

洗井后应用粘性土将孔口填实封平，防止地表水、雨水顺滤料流入孔内。

(8)、连接集水总管

井点管施工完成后应使用加筋软管与集水总管连接，接口必须密封严实。各集水总管宜稍向管道水流下游方向倾斜。为减少管内负压损失，集水总管的放置标高应尽量降低。

(9)、安装抽水机组

抽水机组应稳固地设置在平整、坚实、无积水的地基上，水箱吸水口与集水总管处于同一标高。机组宜设置在集水总管中部，接口必须密封严实。

(10)、安装排水管

排水管可在地面或地下敷设，应连接严密。也可以开挖排水沟将抽出的水排出场地之外，排水沟应做好防渗处理，以防抽出的水回渗到基槽。

(11)、试抽、验收

每组井点系统安装完后，应及时进行试抽水，检验水位降深、出水量、管路连接质量、井点出水和泵组工作水压力、真空度及运转情况等。试抽后应组织现场验收，当发现出水浑浊时，应查明原因，及时处理，严禁长时间抽吸浑水。

5、季节性施工

(1)、雨期施工

①雨期降水时，集水总管平台地面应硬化处理，并平整好场地地面，确保雨期场地内无积水。抽水机组应架设防雨设施。

②应采取措施防止地表水渗入或流入基坑，遇大雨或暴雨必须及时排除基坑内积水。

③进入现场的设备和材料避免堆放在低洼处，露天存放的要垫高加苫布盖好。

(2)、冬期施工

①冬期降水时，应对硬化的集水总管平台地面做防滑处理，并及时排除井孔周围的积水，防止结冰。

②抽水机组应有避风、防冻的保温措施。

③停泵时应及时放掉集水管和水泵内的存水。

6、应注意的质量问题

(1)、真空度是判断井点系统好坏的尺度，一般真空度不应低于55~66kpa，如真空度不够，通常是由于管路漏气，可通过听、摸、看等方法检查。

听——有上水声音的是好井点，无声的可能是井点已被淤塞，可用高压水反冲洗通。

摸——手摸连接软管有震动，冬热夏凉的为好井点。

看——夏天湿，冬天干的井点为好井点。

(2)、在同一组泵带动的井点系统中，沉设后井点管口应在同一高程上。

(3)、应采用双路供电或备用发电机，以备停电时也能保证正常降水。

(4)、井点抽水时应保持要求的真空度，除降水系统做好密封外，还应采取保护坡面的措施，以避免随着开挖的进行使坡面因暴露造成漏气。

7、成品保护

(1)、降水期间应对抽水设备的运行状况进行维护检查，并做好记录。发现有地下管线漏水、地表水入渗时，应及时采取断水、堵漏等措施进行治理。

(2)、检查抽水设备时，除观察仪器仪表外，还应采用听、摸、看等方法检查并结合经验对井点出水情况逐个进行判断。

(3)、当发现井点管不出水时，应判别井点管是否淤塞。发现井点失效，影响降水效果时，应及时处理。

(4)、应注意对井点系统的保护，施工机械、车辆不得刮蹭井点系统。当采用锚杆或土钉进行边坡支护时，应在井位处做明显标记并引到基坑上口开挖线，以防锚杆或土钉施工破坏井点。

8、安全措施

(1)、钻(冲)井孔时，应及时排除泥浆，清除弃土，保持地面平整坚硬，防止人员跌伤。

(2)、长螺旋钻机成孔作业中, 电缆应有专人负责收放, 钻机行走时应专人提电缆同行。如遇停电, 应将控制器置于零位, 切断电源, 将钻头接触地面。

(3)、吊装或起拔井点管时, 应遵守起重设备操作规程, 注意避开电缆或照明电线, 防止触电。

(4)、集水管和抽水设备的安装必须平稳、牢固, 保证降水期间设备的正常运行。

五、轻型井点降水维护管理

(1)、正式抽水后应对井点系统运转状况进行定时巡视, 不能时抽时停, 否则容易抽出浑水, 造成地层颗粒流失, 孔底沉淀加厚, 淤死井点滤水管。

(2)、降水期间应按规定观测记录地下水的水位、流量、降水设备的运转情况以及天气状况。对水位、水量监测记录应及时整理, 绘制水位降深值 s 与时间 t 的过程曲线图, 分析水位下降趋势并查明降水过程中的不正常状况及其产生的原因, 及时采取调整补充措施, 确保降水顺利进行。

(3)、当基坑中的基础结构高出降水前静止水位高度时, 降水可以停止, 停止降水前, 必须验算基础结构的抗浮稳定性, 当不能满足要求时不得停泵。

(4)、多层井点系统拆除应从低层开始, 逐层向上进行, 在下层井点拆除时, 上层井点应继续抽水。可使用倒链或撬杠拔出井点管, 井点管拔除后, 应及时用砂子将井孔回填密实。

11.4 喷射井点降水

一、喷射井点降水原理及适用条件

喷射井点系统由高压水泵、进水总管、井点管、喷射器、测真空管、排水总管及循环水箱所组成, 如图11-7。

喷射井点是采用高压水泵将高压工作水经供水管通过喷射器两边的侧孔流向喷嘴, 压入井点与供水管之间环形空间。由于喷嘴截面的突然变小, 喷射水流加快(一般流速达30m/s以上), 这股高速水流喷射之后, 在喷嘴喷射出水柱的周围形成负压, 从而将地下水和土中空气吸入并带至混合室。这时地下水流速度得以加快, 而工作水流速逐渐变缓, 二者流速在混合室末端基本上混合均匀。混合均匀的水流射向扩散管, 扩散管截面是逐渐扩大的, 目的是减少摩擦损失。当喷嘴不断喷射水流时, 就推动着水沿内管不断上升, 混合水流由井点进入回水总管, 再进入循环水箱。部分作为循环用水, 多余的水溢流排出, 从而达到降水目的。

喷射井点主要适用于粉土、粉细砂等渗透系数较小的含水层, 对于渗透系数大的含水层, 采用管井降水会更为经济一些。喷射井点降水深度8~20m, 降深大体上能满足地铁工程需要。缺点是井点管构造较复杂, 且井点系统分别有进水总管和排水总管与各井点管相连, 地面管网敷设复杂, 对地面交通影响大。

不同型号喷射井点的工作特性及适用于不同渗透性地层情况见表11-5。喷射井点布置形式与轻型井点基本相同。

表11-5 不同型号喷射井点的工作特性与渗透系数的关系

型号	外管直径 mm	喷射器		工作水压力 (MPa)	工作水流量 (m ³ /h)	吸入水流量 (m ³ /h)	渗透系数 (m/d)
		喷嘴(mm)	混合室直径(mm)				
1.5型(并列式)	38	7	14	0.6~0.8	4.7~6.8	4.22~5.76	0.1~5
2.5型(同心式)	68	7	14	0.6~0.8	4.6~6.2	4.30~5.76	0.1~5
4.0型(同心式)	100	10	20	0.6~0.8	9.6	10.80~16.20	8~10
6.0型(同心式)	162	19	40	0.6~0.8	30	25.0~30.0	20~50

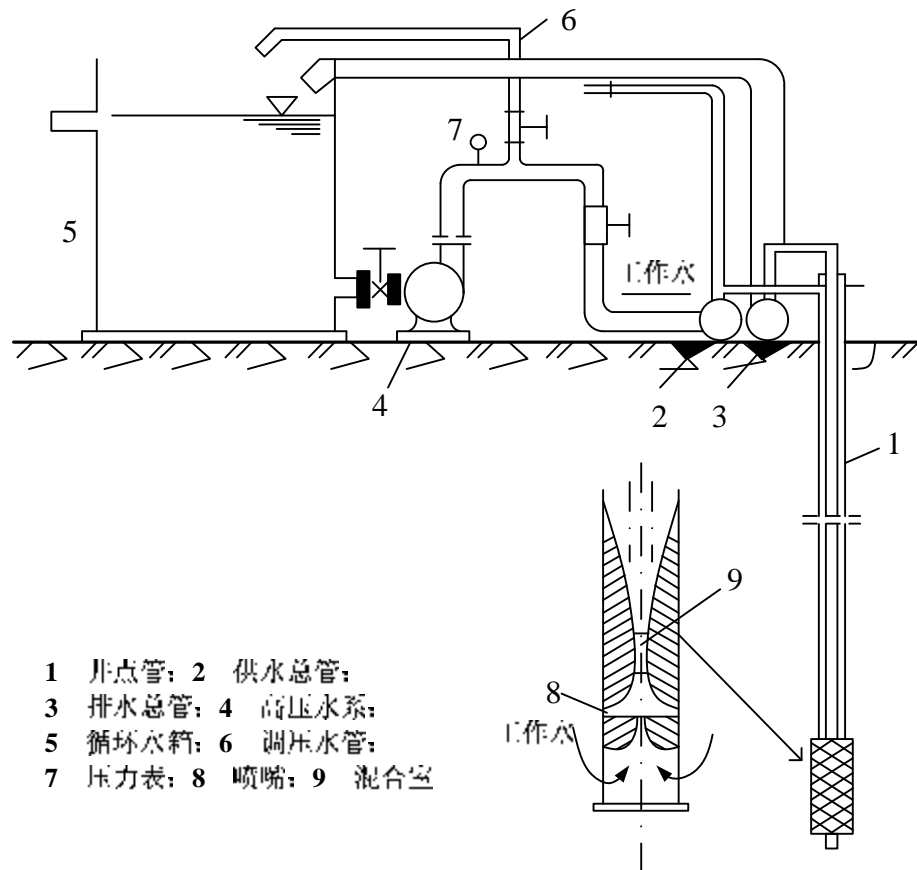


图 11-7 喷射井点降水系统

二、喷射井点施工

1、施工设备

(1)、成井设备

钻井法成孔时，一般采用正循环、反循环或长螺旋钻机，冲孔法成孔时，使用吊车和水冲机具。

(2)、降水设备：主要有井点管、喷射器、高压水泵、进水总管、排水总管、循环水箱等。

①井点管：常采用同心式井点管。同心式井点管由内管和外管组成，其内管一般为直径50~73mm的钢管，其外管一般为直径68~127mm的钢管。

②喷射器：由喷嘴、混合室、扩散室组成。

③高压水泵：为井点系统提供工作水，常采用流量50~80m³/h的多级高压水泵，水压宜大于0.75MPa，每泵组约能带动20~30根井管。

④进水总管与排水总管：一般采用直径75~100mm，每根长度6m的钢管，在管壁一侧每隔1.5~3.0m设一个与井点管的连接接头，两根管之间用法兰连接。

⑤连接管：为加筋胶皮管或加筋透明塑料管，直径为38~55mm，直径与井点管和排水总管连接接头相匹配，长度为1~2m。

⑥高压胶管：用于连接进水总管和井点管，长度为1~2m，直径与井点管进水接头和进水总管连接接头相匹配。

⑦循环水箱：与排水总管和进水总管相连接，为井点系统运行提供循环水，抽出地下水经溢流口排出。

2、施工方法的选择

一般采用正循环、反循环钻机成孔，由于反循环钻井工艺效率高，成井质量好，应优先选用泵吸反循环钻机施工。对于不易产生塌孔、缩孔的地层，可采用长螺旋钻机成孔。对于以较为软弱的粘性土为主的地层也可采用冲孔法成孔。

3、工艺流程

测设井位→安装抽水设备→钻机就位→钻冲井孔→沉设井点管→填滤料→封填孔口→井点管与进水、排水总管连接→洗井→连接循环水箱→试抽、验收→降水维护→井点系统拆除

4、操作方法

(1)、测设井位

根据设计要求标高平整场地，实地测放井位和进、排水总管排放位置。

(2)、安装抽水设备

抽水设备包括进排水管路、高压水泵和循环水箱。先敷设进水、排水总管的目的是利用其提供施工和洗井水源。进排水总管的接头位置与井点的布置应相互适应。抽水设备应稳固地设置在平整、坚实、无积水的地面上。高压水泵出水管必须安装压力表和调压回水管路。水箱吸水口应与进水、排水总管和井点管口标高一致，各接口须严格密封。

(3)、钻机就位

当采用正循环或反循环钻机成孔时，钻机就位需采用水平仪找平，做到稳固、周正、水平，钻机对位偏差应小于20mm，钻塔垂直度偏差1%。当采用长螺旋钻机成孔时，应使钻杆轴线垂直对准钻孔中心位置，孔位误差不得大于150mm，并使用双侧吊线坠校正调整钻杆垂直度，钻杆倾斜度不得大于1%。当采用冲孔法成孔时，起重机应安装在测设的孔位旁，用高压胶管连接冲管与高压水泵，起吊冲管对准钻孔中心，冲管倾斜度不得大于1%。

(4)、钻冲井孔

参见轻型井点一节中的内容。

(5)、沉设井点管

沉设井点管应缓慢、保持井点管位于井孔正中位置，禁止刮蹭井壁和插入井底，发现有上述现象发生时提出井点管对过滤器进行检查，合格后重新沉设。

(6)、回填滤料

回填滤料应均匀地从四面围填，保持井点管居中，并随时探测滤料深度，以免堵塞架空填料至距地面1m时停止。滤料填好后应用粘性土将孔口填实，以防止地表水流入孔内。

(7)、井点管与进水、排水总管连接

井点管与进水、排水总管连接的所有接头应严密。各井点管的连接管及进水高压胶管应分别安装阀门，以便井点检修。

(8)、洗井：喷射井点安装完成后，应及时开泵对井点管逐根清洗，泵压控制开始要小一些(不大于0.3mpa)，而后逐步开足，如发现井点管周围有翻砂冒水现象，应立即关闭该井点管并进行检修。洗井水浑浊时，不能进入循环水箱，应做好洗井水的排放问题。

(9)、试抽、验收

各组井点系统安装完后，应及时进行试抽水，当发现出水浑浊时，应查明原因，及时处理，直至水清砂净后方能将排水总管与循环水箱连接。此前应用清水持续补充入循环水箱作为工作用水。试抽后对降水系统应组织现场验收，全面检查水位降深、抽水量、管路连接质量、井点出水情况和泵组工作水压力、真空度及井点系统运转情况，一切正常后方可验收合格。

(10)、井点系统拆除

降水结束后，一般使用吊车拔出井点管，井点管拔除后，应及时用中粗砂将井孔回填密实。

5、应注意的质量问题

1、抽水过程中，应视工作水浑浊程度定期更换清水，并清理循环水箱中沉淀的泥砂，以减轻对喷射器喷嘴和水泵叶轮的磨损。

2、应确保喷射器的加工质量，如果喷嘴直径加工尺寸偏大，则工作水流量需增大，否则真空度降低，将影响降水效果。如果喷嘴、混合室、扩散室的轴线不重合，则会降低真空度，而且由于水力冲刷，喷射器磨损较快。为防止工作水反灌入地层，应在滤水管下端设置逆止球阀。

3、井点管和总管在安装前必须清除铁屑、泥砂和焊渣等杂物，如安装后出现喷嘴堵塞或芯管、过滤器淤积，可通过内管或出水管(并列式)施加高压水反冲疏通。

4、为避免井点管淤积堵塞，在沉设井点管、回填滤料、接通进水总管后，应及时针对单井进行试抽。

11.5 真空管井降水

一、真空管井降水系统的工作原理及适用条件

一般情况下，管井降水对各类透水性强的砂、砾、卵石含水层十分有效，对于粘质粉土、粉土、粉砂等弱透水层效果较差，其主要原因是弱透水层的毛细作用较强，仅靠重力作用地下水难以形成井流。真空管井降水是在管井基础上，对井管抽真空，在以井管为中心的一定范围的含水层中施加负压，迫使弱透水层中地下水流入井中，再通过潜水泵抽水的一种降水方法。这种真空管井复合降水技术能够较好地解决弱透水层的疏干问题，降水深度可达 30m 以上。

真空管井相较单一管井来说，多了一套抽真空系统，相当于加大了地下水流向井的水力梯度，因而真空管井降水能缩短针对弱透水层的预降水时间，并提高降水效果。本节只表述与管井降水的不同之处。

二、真空管井降水设计

1、井管

真空管井的井管可以采用 HDPE 双壁波纹管、水泥管和钢管，在需要密封的井段下入井壁管，对应需要降水的含水层部位下入滤水管。HDPE 双壁波纹管 and 钢管的接头少，密封性比较好；水泥管 1m 一节，排管灵活，非常经济，但每节管间接头的密封处理较复杂。

2、真空管井的密封

真空管井的密封处理是真空管井降水的关键，包括井口密封和井段密封。

(1)、井口密封

井管口一般可采用法兰密封。法兰密封套件由套桶、上法兰盲板、下法兰、密封橡皮圈和固定螺丝等组成。可根据井管管径和材质的不同，确定法兰密封套件的尺寸，下法兰与套桶之间为焊接，在上法兰盲板应设置电缆线孔、水位观测孔、泵管排水孔、抽真空孔和真空表孔，组装时这些孔洞同样要做好密封。对于丝扣连接件在连接处用生胶带进行密封，对于电缆和出水管孔的密封在穿电缆线和排水管后用防水密封胶密封。

(2)、井段密封

井段密封主要针对不需降水的含水层和地表下与大气的隔离段，大气隔离段一般不小于 5m，可采用预制风干粘土球密封。

3、真空泵选取

真空泵的选择需根据管井真空系统的真空度要求来确定。

当泵所需的真空度或气体压力不高时，可优先在单级泵中选取。如果真空度或排气压力较高，单级泵往往不能满足，或者，要求泵在较高真空度情况下仍有较大气量，即要求性能曲线在较高真空度时较平坦，可选用两级泵。如果只作真空泵用，则选用单作用泵比较好。因为单作用泵的构造简单，便于维护，且在高真空情况下抗汽蚀性好。初步选定了泵的类型之后，对于真空泵，还要根据抽真空系统所需的抽气量来选择泵的具体型号。

一般来说，水环式真空泵可作为真空管井降水的首选泵。其优点是结构紧凑，操作方便，泵体与电动机直联，转速较高，用较小的结构尺寸，可以获得较大的排气量，泵腔内没有金属摩擦表面，无须对泵内进行润滑。如 SK-3 水环式真空泵抽气速率为 $3\text{m}^3/\text{min}$ ，极限真空度 -0.093Mpa ，电机功率 5.5kW ，根据管井内真空度要求，一台可带 1~3 口降水管井。

三、施工工艺

1、工艺流程

定井位→挖(围)泥浆池→钻机就位→钻井→换浆→下入滤水管→下入井壁管(井壁管接头密封)→下部回填滤料→上部井段粘土球密封→洗井→井口密封→潜水泵、真空系统安装→铺设排水管线→试抽、验收→降水维护管理(下划线部分是真空复合增加的流程，其余与管井降水流程一致)。

2、操作方法

(1)、井壁管接头密封

在接头周围均匀涂抹一层厚约 1cm 掺速凝剂素水泥浆,对接后将接口外缝用的素水泥浆勾抹严实;然后在接口部位的 30cm 范围裹缠改性沥青防水卷材,并用汽油喷灯烘烤后粘贴压实。如为钢管,则两节管间进行焊接。

(2)、上部井段密封

在填滤料过程中,随时测量滤料回填深度,当滤料填至设计封井位置时,沿井管四周均匀填入直径为 20~30mm 的粘土球,并应在粘土球处于半风干状态下缓慢填入,直至距地面 1m 时停止。

(3)、井口密封

以降水井为中心将井室范围内的土体挖除。将高出的井管切除并保持其高出井室底约 10cm。适当补充或挖除井管外充填的粘土,形成一定宽度的环状间隙,底部低于井管上口 40cm,然后灌入 M10 的水泥砂浆 30cm 高,再将已加工好的带下法兰的钢套桶套在井管外,并插入到水泥砂浆中,之后将钢套桶外侧间隙浇筑水泥砂浆与井室底取平。

(4)、真空系统安装

应根据真空泵的抽速和管井容积确定一台真空泵带一口或若干口管井。安装真空管路前应对管路应进行清洁处理,以免碎片、碎屑焊渣被吸入泵内,造成损坏;进气管路管径应不小于泵进气口直径,管道宜短,接头宜少,否则影响井管真空度。排气管路管径不应小于真空泵体排气口直径,排气管口应朝下,以避免雨水及杂物进入泵内。

(5)、抽真空系统调试及运行

①试车前检查各接口处的紧固情况,检查好电气线路,检查冷却水管路是否畅通。

②用手缓慢转动皮带轮,检视传动部份是否正常,不可直接开动电机,以防造成损坏。

③打开进气管上的放空阀。

④启动电机,注意转动方向应与泵转动方向一致。

⑤开泵 5 分钟后缓慢打开进气阀,注意真空表是否指向正确工作压力。如管井较深,井管容积较大,则进气阀开小一点,使其真空保持在 -0.05MPa 左右,待抽真空系统都在 -0.05MPa 以上时开足进气管道总阀。

⑥真空系统运行中,应定期检查真空泵的运行情况,关停真空泵之前应先关闭真空系统的进气阀,然后关闭电动机,并打开放空阀让空气进入泵内。

四、抽水系统的自动控制

由于真空管井复合降水系统主要用于弱透水层中,很难配备合适流量的潜水泵,地层出水与抽水不易达成平衡,故还应配备高低水位感应自动控制装置,以控制潜水泵间歇启动,即当水位上升接触到高水位感应探头(一般设置在开挖底板以下 1m)时,潜水泵启动;当抽水到低水位感应探头(一般设置在潜水泵吸水口以上 1m)时,潜水泵停止工作。这样既可避免潜水泵无效运转而浪费能源,也可延长水泵使用寿命。

五、工程实例

1、工程概况

北京地铁十号线 18 标段劲松站~折返点区间隧道断面变化大,断面最宽约 15m,最高约 11m,开挖底板深度约 26m,隧道东侧距多层住宅楼仅 7m 左右,暗挖施工难度较大。从北侧劲松站已实施的管井降水施工情况看,对于砂层效果良好,而对于粉土等弱透水层则效果较差,该站全面降水半年后,开挖粉土层断面时仍有水渗出,给暗挖施工造成了一定困难,因而决定在劲松站南侧折返线进行真空管井降水试验。

2、地质及水文地质概况

(1)、地层(图11-8)

按照地层的形成年代、成因类型及岩性,自上而下依次为:

①、人工堆土层 (Q^m)

杂填土①₁层:稍湿~湿,以碎石填土的路基为主,含砖块、混凝土块等;粉土填土①层:稍湿~湿,含砖渣、灰渣。

②、第四纪全新世冲洪积层 (Q_4^{al+pl}):

粉土③层:湿~很湿,含多量云母、少量氧化铁;粉质粘土③₁层:可塑,含少量云母、多量姜石;粉细砂③₃层:饱和,含多量云母、少量氧化铁。

粉质粘土④层:可塑,含少量云母、氧化铁;粘土④₁层:可塑,含少量云母、氧化铁;粉细砂④₃层:饱和,含多量云母、少量氧化铁;中粗砂④₄层:饱和,含多量云母、少量氧化铁。

③、第四纪晚更新世冲洪积层(Q₃^{al+pl}):

圆砾⑤层: 饱和, 最大粒径 70mm, 一般粒径 10-20mm, 粒径大于 2mm 的颗粒约占总质量的 60%, 中粗砂填充, 砾石成分以砂岩、辉绿岩为主; 中粗砂⑤₁层: 饱和, 含多量云母、少量氧化铁、个别砾石。

粉质粘土⑥层: 可塑, 局部硬塑, 含少量云母、多量氧化铁; 粘土⑥₁层: 可塑, 含少量云母、多量氧化铁; 粉土⑥₂层: 饱和, 含少量云母、多量氧化铁; 细中砂⑥₃层: 饱和, 含多量云母、少量氧化铁。

粉质粘土⑧层: 可塑, 含多量姜石、少量氧化铁; 粘土⑧₁层: 硬塑, 含多量姜石、少量氧化铁; 粉土⑧₂层: 很湿, 含多量云母、少量氧化铁; 细中砂⑧₃层: 很湿, 含多量云母、少量氧化铁。

中粗砂⑨₁层: 饱和, 含多量云母、少量氧化铁; 粉细砂⑨₂层: 饱和, 含多量云母、少量氧化铁。

粉质粘土⑩层: 硬塑, 含氧化铁; 粉土⑩₂层: 很湿, 含云母。

粉细砂⑪₂层: 饱和, 含云母。

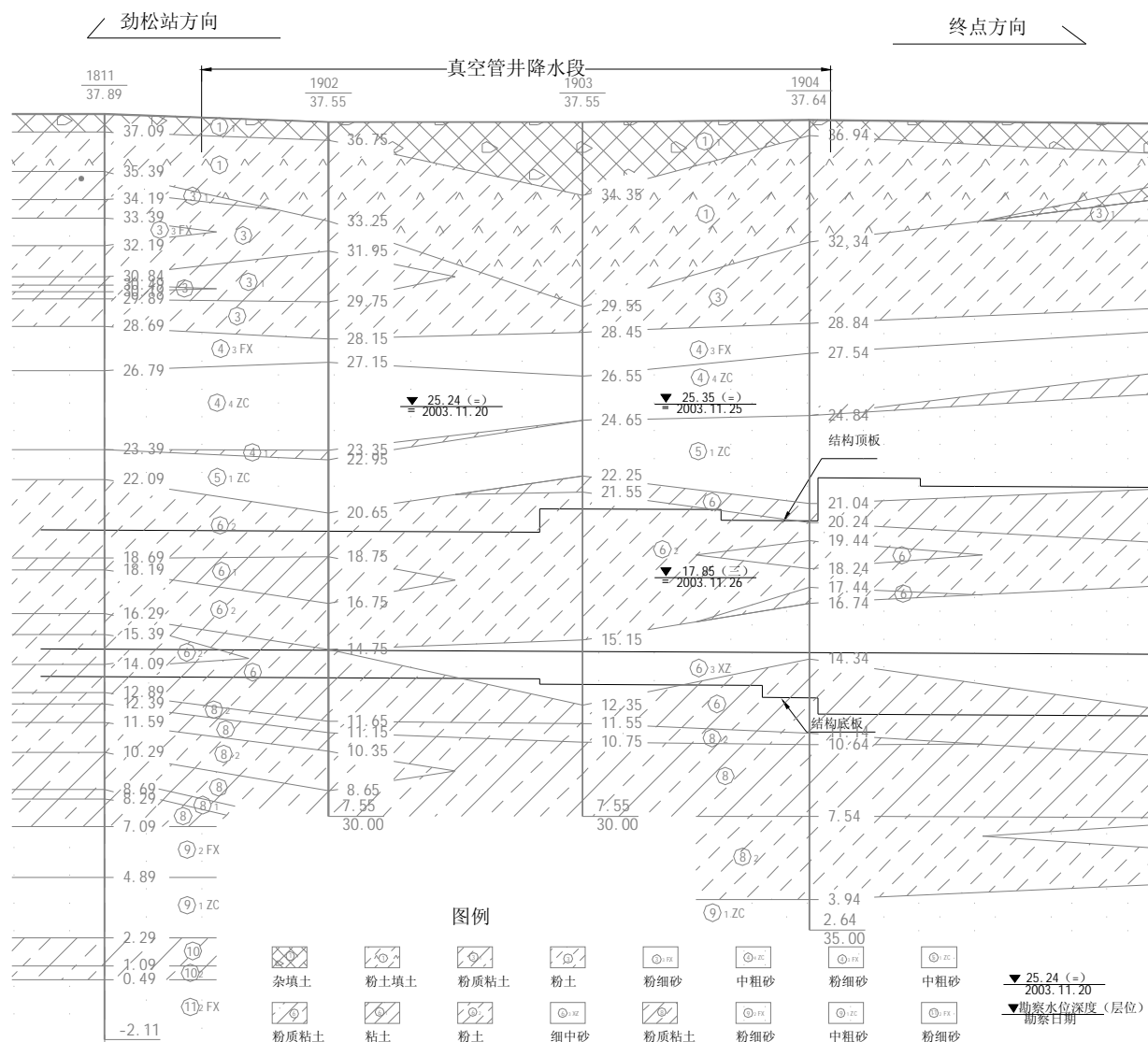


图 11-8 北京地铁十号线劲松~终点折返线地质剖面图

(2)、地下水

①、上层滞水

水位标高 32.33m, 埋深 5m 左右, 赋存于粉土③层中, 其主要接受管沟渗漏及大气降水补给, 以蒸发和向下补给潜水的方式排泄。

②、潜水

水位标高为 25.24~25.35m, 埋深 12m 左右, 赋存于中粗砂④₄层和中粗砂⑤₁层, 主要接受大气降水和侧向径流补给为主, 以侧向径流、向下越流补给承压水及人工排水的方式排泄。

③、层间潜水

水位标高为 17.58~17.85m，埋深 20m 左右，赋存于粉土⑥₂层和细中砂⑥₃层，主要接受上层潜水越流补给，以向下越流补给承压水的方式排泄。

④、承压水

水位为标高 6.91m，埋深 30m 左右，赋存于中粗砂⑨₁层和粉细砂⑨₂层。

地下水流向总体方向为自北向南。根据地铁隧道开挖要求，降水需疏干层滞水、潜水和层间水。

3、降水方案

试验段共布真空管井 22 口（图 11-9），其中无砂水泥管井 12 口，井深为 39m，结构大样见图 11-10；钢管井 10 口，井深为 38m。抽水采用扬程 45m 的 Q3-45/3-1.1 型潜水泵。由于地面交通条件限制，真空系统必须暗埋于地下井室，因而选择了体积较小的 2X-15 旋片式真空泵，其抽气速率为 0.9m³/min，极限真空度 -0.06Mpa，电机功率 1.5Kw，可安装于管井的地下检查井室中，适于一台带 1 眼降水井。由于抽水量与地层出水量不能匹配，而设置了自控装置控制潜水泵间歇启动。

4、降水效果

2005 年 8 月~9 月完成真空管井降水施工，10 月全面启动降水。由于真空泵抽吸量较小，井管内真空度一般只达到 0.015Mpa。尽管如此，真空管井降水系统运行后，从土建隧道开挖情况来看，真空管井降水试验段部位的粉土层开挖断面无水渗出，而在试验段南侧的普通管井降水段，开挖粉土层时不断有渗出水。

通过对土层含水量的测定表明，真空管井降水段开挖出的粉土⑥₂层的含水量比管井降水段粉土⑥₂层含水量平均小 12.4%，粘土⑥₁层含水量平均小 27.45%（表 11-6），说明了真空管井降水除了疏干重力水外，对岩土中的毛细水和弱结合水的析出也起了作用，从而有效降低了弱透水层的含水量。

通过对受真空管井降水影响的地层中真空度的测定表明：粉土⑥₂层真空影响范围在水平方向上可达到 13m，有效影响距离为 6m；垂直方向的真空影响与地层岩性有关，在粘性土和粉土等透水性较差的地层中形成的真空度明显比在砂层中形成的真空度高。

通过对真空管井与普通管井出水流量的测定，真空管井的出水量也明显大于普通管井。

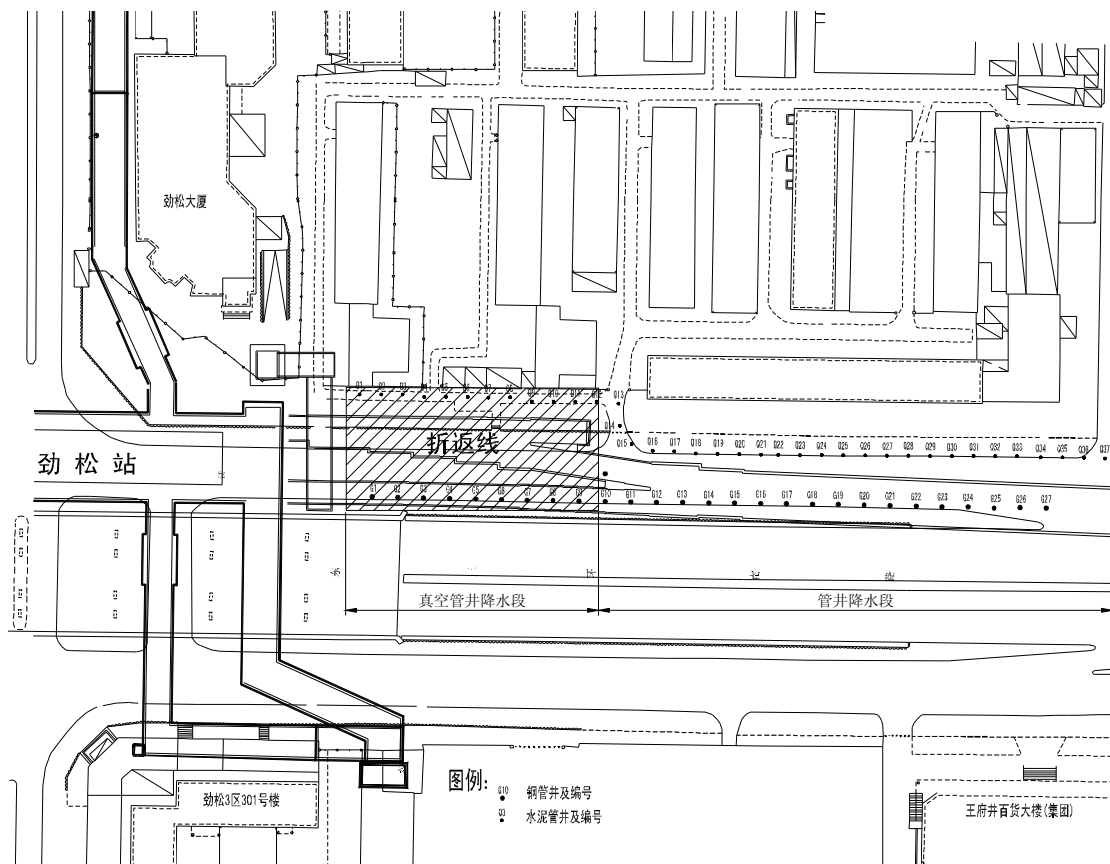


图 11-9 北京地铁十号线劲松~终点折返线降水平面图

表 11-6 真空管井降水与普通管井降水后开挖土层含水量对比

土样号/含水量(%) 降水方法	粘土⑥ ₁ 层			粘土⑥ ₂ 层		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#
真空管井降水 (左线)	18.9	19.9	19.6	21.7	25.0	23.3
普通管井降水 (右线)	25.8	27.6	27.1	25.7	28.3	25.8

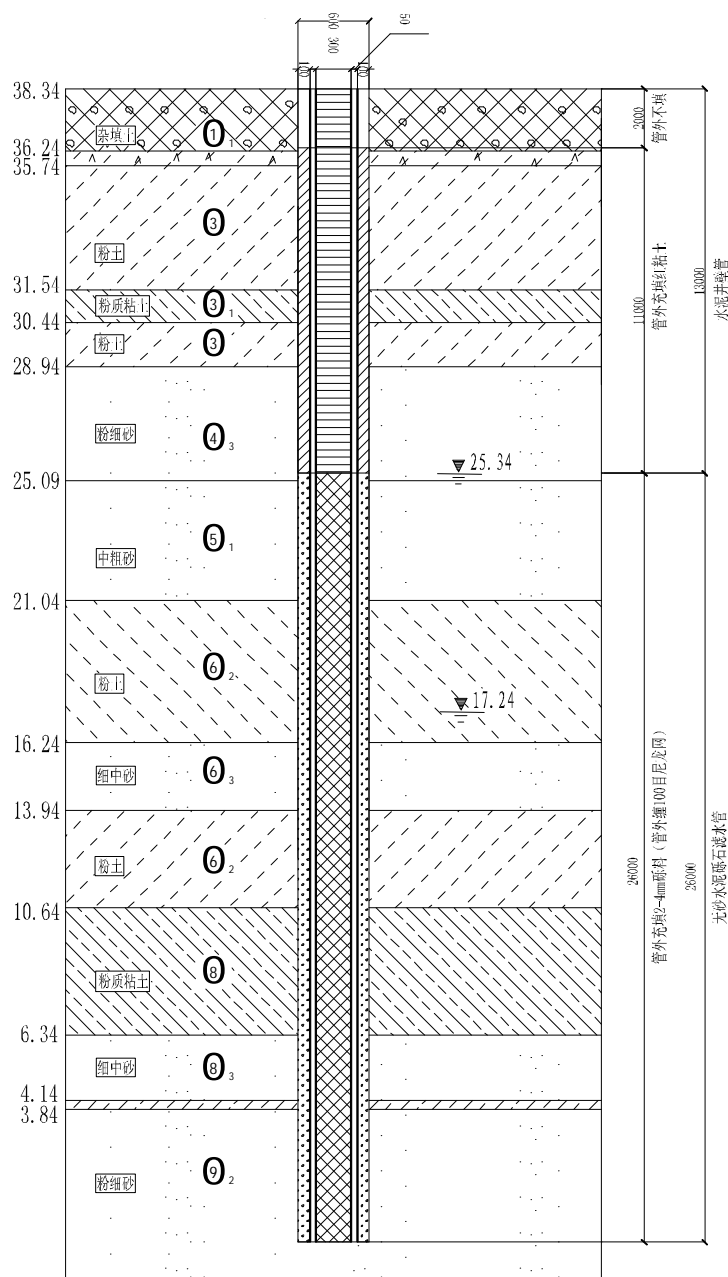


图 11-10 真空管井结构大样图

11.6 明排降水

一、明排降水的特点及适用条件

基坑明排降水是指基坑开挖过程中，在基坑周边开挖排水沟并设置一定数量集水井，然后从集水井中抽出地下水，从而达到降水目的。这种降水方法设施简单，成本低，管理方便，但使用的限制条件较多。

明排降水适用条件：①地下水类型一般为上层滞水或薄层潜水，含水层渗透性能较差。对于渗透性较强的含水层，通常不能采用明排降水方法。②一般适用于浅基坑降水或隧道内排除残留水，降水深度不宜大于 2m，降水时间不宜太长。③含水层土质密实，坑壁稳定，不会产生流砂、管涌等渗透破坏。

二、明排降水施工

一般采用人工开挖排水沟和集水井。排水沟底比基坑深 0.3~0.5m，沟底宽大于 0.3m，坡度为 1/1000~1/5000；在基坑四角或每隔 30~40m 间距设一口直径为 0.6~0.8m 的集水井，集水井底比排水沟深 1m 左右，下入水泥砾石滤水管或钢护筒，四周及井底 0.3m 左右填入砂砾石形成反滤层。

当基坑及隧道内排水沟不便裸露时，可将排水明沟做成盲沟或盲管。盲沟即在排水沟内填入级配砂石，表层铺一层粗砂，以防施工时被粘土堵塞，影响盲沟滤料的渗透能力，盲管是在排水沟内埋入滤水管，再填入级配砂石，滤水管的选择与管井中的滤水管相同，材质多为水泥管、塑料管和钢管，管外包缠滤网。排水沟(盲沟)完成降水后，可直接采用级配砂石回填密实。

明排降水方法局限性较强，但由于地质条件千变万化，地铁工程降水在个别地段难免会用到明排降水，有时明排降水也会作为补救措施不得已而为之。因此对明排降水要有正确认识：对于明排降水，地下水是沿基槽坡面、坡脚或隧道掌子面渗出，容易造成基底土质软化，降低表层地基土的强度，若降水地段夹有粉细砂薄层，还易造成地下水潜蚀，造成隧道拱角土颗粒流失。因而，明排降水地段应加强对拱角的注浆加固处理。

11.7 降水监测与管理

一、水位观测

地下水水位观测是检验降水施工是否达到目的的主要手段，特别是采用管井方法降水时，水位观测尤为重要。一般来说，水位只需降到槽底之下 0.5m，而往往在很多情况下，地下水补给与抽排水能力不能达成平衡，或者说它们之间的平衡是动态平衡，需要通过对地下水位的实时观测，调整降水管井的开启与关停，使降水深度或降压深度维持在满足土建安全施工要求的一定水平。由于地铁工程施工周期较长，降水维护要经过一两个地下水丰、枯水期的水位自然升降，抽水井或水泵的调整是必然的。

降水范围内的观测井应均匀布置，观测井距离不宜大于 20m。除降水设计布置的专门水位观测井外，水文地质勘察孔、试验孔，以及降水井（特别是自渗井）都可以作为观测井。一般应选定降水管井总数的 20% 作为观测井，其位置均匀分布于降水区域内。当在设置了止水帷幕的基坑内降水时，应在基坑外围布置一定量的观测井，观测基坑外围地下水位，如发现水位下降幅度较大，应及时采取措施，以防周边建、构筑物安全受到影响。

通常采用电测水位计观测地下水位。水位观测周期：降水开始后，水位未达到设计降深之前，每天观测 1 次；水位达到设计降深后，每 5 天观测 1 次。应及时整理水位观测资料，绘制降深与时间的水位变化过程曲线，分析水位下降趋势，预测掘进掌子面的地下水位，并根据水位变化情况调整开泵地段和开泵数量，在保证地铁隧道无水掘进的同时，减小地下水资源浪费。

降水过程中观测静水位是必要的，对抽水井动水位的观测同样重要。动水位太深或水位已到潜水泵的吸水口时，水泵抽水通常是一股股出水，这种情况说明井损较大，或含水层出水能力比预计要小，应及时更换流量小一级的水泵，以节约电能并避免水泵损坏。真空方法降水时，抽水能力在多数情况下大于地层出水能力，但更换井点管和抽水系统难度太大，一般都维持持续抽水。

二、水量观测

对于降水工程，一般对抽排水量进行粗略观测即可，目的是核实降水设计计算与实际情况的差异。如差异很大，则很有可能是水文地质参数确定有误，应及时调整降水方案。通常采用堰测法测量比较简单实用，堰板可以使三角堰、梯形堰或矩形堰，堰板设置见图 11-10，流量的计算式分别见式 11-5~11-7。观测频率和观测时间可根据具体情况确定。

$$\text{三角堰: } Q = 0.01343H^{2.47} \quad (11-5)$$

$$\text{梯形堰: } Q = 0.0186BH^{\frac{3}{2}} \quad (11-6)$$

$$\text{矩形堰: } Q = 0.01838(b - 0.2H)H^{\frac{3}{2}} \quad (11-7)$$

式中 Q ——流量 (L/s);

H ——堰口零点以上水位高 (cm);

B ——梯形堰的堰口底边宽 (cm);

b ——矩形堰的堰口宽 (cm)。

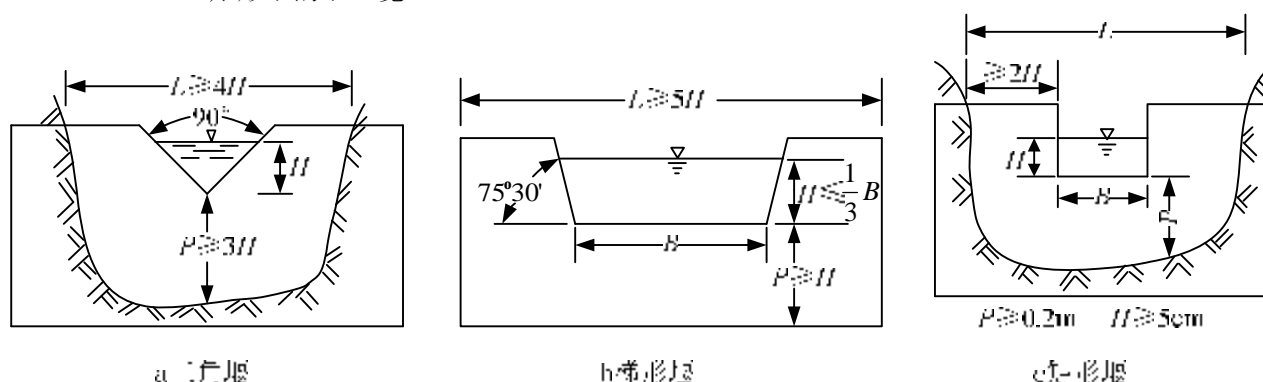


图11-10 堰测法测定流量时堰板设置示意图

三、出水含砂量监测

降水管井出水含砂量的大小直接关系到管井的正常运行和使用寿命，影响含砂量大小的主要因素是滤料、滤网规格和管井施工质量。正常情况下在抽水开始初期含砂量会出现峰值，而后逐步下降，并随着水位的稳定而稳定下来。因而对于降水管井只需在抽水稳定后测定一次即可。降水施工的抽排水含砂量（砂水体积比）应达到《建筑与市政降水工程技术规范》（JGJ/T111-98）中的有关要求，即：粗砂含量应小于 1/5 万；中砂含量应小于 1/2 万；细砂含量应小于 1/1 万。对于出水含砂量过大的降水井应妥善处理，使其达到规范要求，或将其改变为渗水井或观测井。当然在降水设计和施工过程中，也不必刻意把含砂量控制得很小，否则会影响井的出水能力。通常采用过滤法测量出水含砂量比较准确。

四、建构筑物及地面沉降监测

1、基准点、监测点布置与设置方法

针对一条地铁线路的降水工程，至少应设置 2~3 个深埋水准基点和多个工作基点，使其形成高程控制网，并定期联测，以检验其稳定性。

为避免降水影响，水准基点埋深一般应略深于降水井，或深入到密实（或基岩）地层，距降水区域的距离不小于 100m。宜采取钻孔埋设钢管水准基点方法设置，水准基点由标杆、保护管、扶正器、标头和标底五部分组成。

工作基点标石，可选择浅埋钢管水准标石或混凝土普通水准标石。设置数量和位置以便于一测站施测监测点为好，但应避开交通干道，而设置在稳定、安全不易遭损坏且便于观测的地点。

2、沉降观测点布置与设置方法

(1)、建构筑物沉降观测点

建构筑物沉降观测点的布置应根据建构筑物的体型与结构型式、工程地质条件、降水和土建施工引起的沉降规律等因素综合考虑，要求布置在便于观测且不易遭到损坏处。沉降观测点一般可布设在建构筑物

的角点和周边中点上，如果是立交桥桩，应把测点设置在桥桩或承台之上。测点布设前先与各建构筑物的产权单位进行协调，布设时采用冲击电锤在建构筑物墙体上钻孔，孔径 28mm，孔深 20cm，离地面约 30cm。然后将直径 22mm 的“L”型测点插入孔内，再用水泥砂浆填实。

(2)、地面沉降观测点

地面沉降观测点的布置可顺地铁走向布置，观测点位置及间距以能直观上反映地铁工程降水引起的沉降范围为宜。一般做法是：在地铁沿线地面每隔 100m 布设一个观测点，每隔 200~300m 布设一排横向地面观测点，每排布设 5 个点，横向观测点应分别与地铁结构对称或与降水井排的中心线对称，间距宜为 20~30m。测点应深入到地表硬壳层，一般不小于 80cm。

3、观测方法

各观测点的沉降量是以两次测得各观测点的高程值之差计算得出，各沉降观测点的高程以起算水准基点和各工作基点与沉降观测点组成的闭合水准路线来测定。

(1)、基点联测

降水工程开始前水准基点与各工作基点应进行两次联测，确定工作基点的起始数值。之后，基点联测应每三个月进行一次，以检查工作基点的稳定性。基点联测按一等水准精度要求执行。

(2)、监测点测量

降水工程开始前，利用已联测过的工作基点（或水准基点）对建构筑物及地面的监测点连续进行两次测量，取得监测点的首次高程。在降水工程开始初期，每周测量一次，如果日沉降量 $\leq \pm 0.04\text{mm}$ ，则改为每两周测量一次。如发现沉降速率突然加大，应加密监测频次。降水工程结束时，沉降观测应推后 2 个月结束，以观察水位恢复对已发生沉降的影响。监测等级按二等水准精度要求执行。

4、监控测量预警预报

在降水工程及地铁隧道掘进开始前，应根据建构筑物的基础型式、结构型式、建设年代和地基条件确定不同建构筑物绝对沉降和差异沉降的预警值和报警值，当累计沉降量达到预警值时，应提请业主、监理以及建构筑物产权单位等商讨针对沉降可能产生后果的对策，并制定处理措施。当累计沉降量达到报警值时，应及时采取处理措施。

第 12 章 地下工程施工降水引起的环境问题及对策

地铁工程降水对环境的影响主要体现在：①降水影响范围内会引发一定量的地面沉降，对周围建构筑物的正常使用构成威胁；②地铁工程降水历时较长，抽水强度较大，会影响地下水环境，特别是对一定时期的地下水均衡有影响。这是地铁工程降水必须面对并要解决的问题。相应对策是：①对地铁沿线重要建构筑物进行安全评估，必要时预先进行加固处理；②在邻近建构筑物一侧施做止水帷幕或采取回灌措施，以控制建构筑物地基土的地下水位不受降水影响；③对抽排的地下水采取回灌措施或加以利用，以减少地下水资源浪费；④制定合理的降水方案和土建施工方案，尽可能缩短降水时间。

12.1 施工降水引发的地面沉降

一、地面沉降的发生机制

由于地下水位下降而引发地面沉降的机制研究已较为深入，对其的认识也逐渐清楚。最初对其进行研究源于大规模开采地下水作为供水水源而引发的地面沉降。地铁工程降水主要针对浅层地下水，与供水水源地的长期开采相对而言，地铁施工降水总体来说还是局部的、短暂的，引发的地面沉降具有范围小、持续时间短、恢复快等特点，它不同于农业灌溉、城市供水需要常年大量、大范围开采地下水，造成地下水位持续下降，引发持久的地面沉降，并造成一系列灾害现象。

地下水位下降造成地面沉降发生的根本原因是土中的应力变化，研究土中应力的目的是为了研究土体受力后的变形和强度问题，但是土的体积变化和强度大小并不是直接决定于土体所受的总应力，这是因为土是一种由三相物质构成的松散材料，受力后存在下列问题：①外力如何由三种成分来分担？②它们是如何传递与相互转化的？③它们和材料的变形与强度有什么关系？

含水层是由固体颗粒构成的骨架和充满其间的水组成的两相体，当外力作用于土体后，一部分由土骨架承担，并通过颗粒之间的接触进行应力的传递，称为粒间应力（有效应力）；另一部分则由孔隙中的水来承担，水虽然不能承担剪应力，但却能承受法向应力，并且可以通过连通的孔隙中的水传递，这部分水压力称为孔隙水压力。

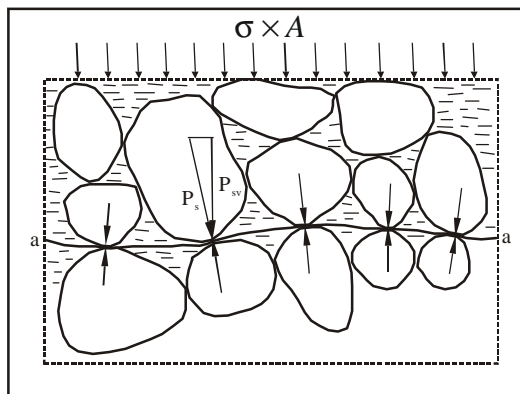


图 12-1 有效应力的概念模型示意图

图 12-1 表示饱和土体中某一放大的横截面 a-a，面积为 A，假设土颗粒较小，a-a 面都通过了土颗粒的接触点。由于颗粒接触点所占面积 A_s 很小，故面积 A 中绝大部分都是孔隙水压力所占据的面积 $A_w = A - A_s$ 。若在该截面每单位面积上作用有垂直总应力 S，则在 a-a 面上的孔隙水处将作用有孔隙水压力 u，在颗粒接触处将存在粒间作用力 P_s 。 P_s 的大小和方向都是随机的，现将其分解为竖直向和水平向两个分力，竖直向分力为 P_{sv} 。考虑 a-a 面的竖向力平衡可知：

$$SA = \sum P_{sv} + uA_w \quad (12-1)$$

两边均除以面积 A，则

$$s = \frac{\sum P_{sv}}{A} + u \frac{A_w}{A} \quad (12-2)$$

上式中，右端第一项 $\sum P_{sv} / A$ 为全部竖直向粒间作用力之和除以横断面面积 A ，它代表全面积 A 上的平均竖直向粒间应力，并定义为有效应力，习惯上用 s' 表示。右端第二项中的 A_w / A ，由于颗粒接触点面积 A_s 很小，据有关研究不超过 $0.03A$ ，故 $A_w / A \approx 1$ 。由此，上式可简化为：

$$s = s' + u \quad (12-3)$$

式中， s ——作用在土中任意面上的总应力（自重应力与附加应力）；

s' ——有效应力，作用于同一平面的土骨架上，也称粒间应力；

u ——孔隙水压力，作用于同一平面的孔隙水上。

上式即为饱和土有效应力原理的表达式。这意味着引起土的体积压缩和抗剪强度发生变化的原因，并不是作用在土体上的总应力，而是总应力与孔隙水压力之间的差值——有效应力 s' 。孔隙水压力本身并不能使土发生变形和强度的变化，这是因为水压力各方向相等，均衡地作用于每个土颗粒周围，因而不会使土颗粒移动，导致孔隙体积变化。它除了使土颗粒受到浮力外，只能使土颗粒本身受到静水压力，而固体颗粒的压缩模量 E 很大，本身的压缩可以忽略不计。另外，水不能承受剪应力，因此孔隙水压力自身的变化也不会引起土的抗剪强度的变化，正因为如此，孔隙水压力也被称为中性应力。但是应当注意，当总应力 s 保持常数时，孔隙水压力 u 发生变化将直接引起了有效应力 s' 发生变化，从而使土体的体积和强度发生变化。

由抽取地下水而引起土层压缩的力学效应符合太沙基的有效应力原理。当承压水头降低时，向上作用的水头压力也随之减少，使原土层中的压力平衡受到破坏，在含水层与粘土层之间产生水力梯度，造成易压缩的粘土层中的孔隙水外流，在空隙水压力减少情况下，要保持总应力不变，必然增大有效应力，相当于地层颗粒之间增加一个外压力，从而使土层进一步固结和压缩。对砂、砾、卵石类含水层而言，随着水位下降，水的浮托力减小，使其压密，由于这类岩土压缩模量很大，压缩变形一般很小，而且砂砾卵石层压密属弹性变形，待孔隙水压力恢复后，此类岩土大体上仍能恢复原状。对于弱透水层来说，由于是塑性变形，粘性土释水压密时结构发生了不可逆转的变化，即使孔隙水压力恢复，粘性土基本上仍保持压密状态。

由于砂层和粘性土层透水性能的显著差异，上述讨论的孔隙水压力减小，有效应力相应增大的过程，在砂层和粘性土层中的表现是截然不同的。在砂层中，这一过程可以认为是“瞬时”完成，因而砂层压密也是“瞬时”完成的。然而在粘性土中它却进行得十分缓慢，所需时间往往需要几个月、甚至几年，时间长短主要取决于粘土层的厚度和透水性。也就是说，粘性土层固结压缩的开始时间与抽水所引起的水位下降同步，但沉降过程的结束则要滞后于地下水位下降期。

二、地质环境模式与地面沉降

目前已认识到，并非所有位于第四纪松散沉积层之上的城市都因抽取地下水而引起显著的地面沉降。北京是大量开采地下水作为生活及工农业用水的城市，城区潜水位多年累计下降了十余米，承压水位甚至下降了二十余米。从上世纪六十年代修建地铁一号线开始，到近年来修建地铁五、四、十号线，也都采用了降水措施，而没有发现北京城区，特别是东二环路以西出现较明显的地面沉降。工程监测表明北京地铁复八线降水沉降最大不足 6mm。这是由于北京城区坐落在冲洪积扇中上部，含水层密实，隔水层固结程度高的缘故。然而，在冲洪积扇下部或扇间地带，如在北京市东四环外，由于工业生产大量、长期开采地下水，形成了以东郊化工和棉纺织工业区为沉降中心的地面沉降区，多年累计沉降超过了 500mm。

大量实例证明，较大幅度地面沉降一般产生于岩土层未完全固结、具有多层粗细交错沉积结构模式的环境中。这就反映了较大幅度地面沉降的产生对地质环境有选择性，尤其是选择未完全固结的土层。明确这一点，也就明确了一座城市地铁工程降水方案的选取，能否在采取降水措施后进行明、暗挖施工，或是需在帷幕止水后，再降帷幕内的水，还是降水与回灌同时实施，然后进行开挖。

能够出现较大范围未完全固结状态土层的环境主要有现代冲积平原模式、三角洲平原模式和断陷盆地模式。

1、冲积平原模式

包括未固结的所有冲积平原地区。这种地质环境范围比较大，新近沉积、富水而固结程度不高的土层占有一定比例。

2、三角洲平原模式

这种模式内，尤其是现代冲积三角洲平原地区，坐落其上的城市区域往往是地面沉降灾害广泛发育的地区。如我国长江三角洲主体部分属于建设性三角洲，该三角洲自 6000 年前的最近一次冰期后开始向海面方向推进。至公元 8 世纪时，包括上海、南通等的三角洲平原已初步形成。14 世纪时，其海岸线已大致和现代相似。三角洲平原的形成过程与漫长的地质历史过程相比，只是匆匆一瞬，浅部沉积层的固结程度都还处于很低的水平。至目前为止，长江三角洲的主体部分还继续向外淤积扩充，并形成以南汇为代表的耳状建设性三角洲。常州靠近三角洲的上部，无锡、苏州位于三角洲以南的太湖河网冲积湖沼平原，上海位于三角洲前缘，而嘉兴、肖山、宁波位于滨海平原。认清城市所处地质环境，对城市的地面沉降研究和预测是极有意义的。

3、断陷盆地模式

它可分为近海式和内陆式两类，近海式主要是滨海平原，而内陆式则为河湖冲积相。

三、地层的固结特性与地面沉降

岩土物质经过搬运、沉积后，在各种因素的作用下，地层将逐渐排水、固结，压密。地层在地质历史上所承受的最大垂直有效应力称为地层前期固结压力 P_c 。根据 P_c 与 P_o （自重应力）的相对大小，可将地层分为欠固结，正常固结及超固结三种固结状态。

1、欠固结地层 $P_c / P_o = OCR < 1$ （见图 12-2a）。这类地层在地质历史中，在自重应力作用下，固结尚未完成，仍将继续排水固结，产生压密变形。这种地层最容易产生地面沉降，即使不抽水，仍会产生一定量的地面沉降。

2、正常固结地层 $P_c / P_o = OCR = 1$ （见图 12-2b）。这类地层中，如果不抽水，地层内应力处于平衡状态，不会产生地面沉降。但如果抽水，引起水位下降，则破坏了地层内的原有应力状态，使地层内孔隙水压力降低，有效应力增加，将出现一定量的压缩变形。

3、超固结地层 $P_c / P_o = OCR > 1$ （见图 12-2c）。这类地层的前期固结压力 P_c 要大于现有地层自重压力。对于超固结地层，当抽水引起水位下降，水位下降值在地层内引起的附加荷载，只要不超过图 12-2c 中的 A2 点，就不会出现明显压缩变形。

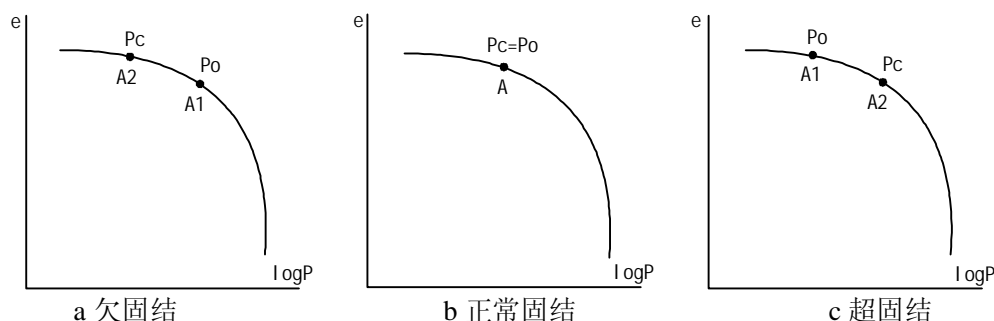


图 12-2 地层固结状态曲线

可以看出，三种类型固结状态土层与地面沉降的关系是不同的，在同样的地下水开采条件下，欠固结土层最容易发生地面沉降，正常固结土层次之，超固结土层沉降的可能性最小。

四、地面沉降预测计算

关于地面沉降的计算方法较多，归纳起来大致有：理论计算方法、半理论半经验方法和经验方法。由于地质条件和各种边界条件的复杂性，经实践证明，采用半理论半经验方法是较简单实用的计算方法。此外，运用灰色系统理论、模糊数学和数值分析等方法进行地面沉降计算的方法近年来也得到较多的应用。

这里介绍几种常用的地面沉降计算方法。

1、分层总和法

地下水位下降引起的地面沉降的预测计算包括含水层变形计算和粘性土层的变形计算。

①含水层变形采用弹性公式计算：

$$S_{\infty} = \frac{\Delta P \cdot H}{E} \quad (12-4)$$

②粘性土或粉土按下式计算：

$$S_{\infty} = \frac{a_v}{1 + e_0} \Delta P \cdot H \quad (12-5)$$

式中 S_{∞} ——最终沉降量 (cm);
 a_v ——粘性土或粉土的压缩系数或回弹系数 (Mpa^{-1});
 H ——计算土层厚度 (cm);
 E ——含水层的弹性模量, 压缩时为 E_c , 回弹时为 E_e (Mpa);
 ΔP ——水位变化施加于土层上的平均荷载 (Mpa)。
 总沉降量等于各土层沉降量的总和, 即:

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (12-6)$$

2、单位变形量法

单位变形量法也称比拟法。以已有的地面沉降实测资料为根据, 计算在某一特定时段(水位上升或下降)内, 含水层水头每变化 1m 的相应的变形量, 称单位变形量, 可按下列公式计算:

$$I_s = \frac{\Delta S_s}{\Delta h_s} \quad (12-7)$$

$$I_c = \frac{\Delta S_c}{\Delta h_c} \quad (12-8)$$

式中 I_s 、 I_c ——水位升、降期的单位变形量 (mm/m);
 Δh_s 、 Δh_c ——同时期水位升、降幅度 (m);
 ΔS_s 、 ΔS_c ——相应于该水位变幅下的土层变形量 (mm)。

为反映地质条件和土层厚度与 I_s 、 I_c 参数的关系, 将上述单位变形量除以土层的厚度 H (mm) 称为该土层的比单位变形量, 按下列公式计算:

$$I'_s = \frac{I_s}{H} = \frac{\Delta S_s}{\Delta h_s \cdot H} \quad (12-9)$$

$$I'_c = \frac{I_c}{H} = \frac{\Delta S_c}{\Delta h_c \cdot H} \quad (12-10)$$

式中 I'_s 、 I'_c ——水位升、降期的比单位变形量 (L/m);
 在已知水位升降幅度和土层厚度的情况下, 土层预测回弹量或沉降量按下式计算:

$$S_s = I_s \cdot \Delta h = I'_s \cdot \Delta h \cdot H \quad (12-11)$$

$$S_c = I_c \cdot \Delta h = I'_c \cdot \Delta h \cdot H \quad (12-12)$$

式中 S_s 、 S_c ——水位上升或下降 Δh (m) 时, 厚度为 H (mm) 的土层预测沉降量 (mm)。

3、粘性土固结过程计算

为预测地面沉降的发展趋势, 在水位升降已经稳定的情况下, 土层变形量与时间变化关系可按下列公式计算:

$$S_t = S_{\infty} \cdot U \quad (12-13)$$

$$U = 1 - \frac{8}{p^2} (e^{-N} + \frac{1}{9} e^{-9N} + \frac{1}{25} e^{-25N} + \mathbf{L}) \approx 1 - 0.8e^{-N} \quad (12-14)$$

$$N = \frac{p^2 C_v}{4H^2} \quad (12-15)$$

式中: S_t ——预测 t 月以后的土层变形量 (mm);
 S_{∞} ——最终沉降量 (mm);
 U ——固结度 (%);
 t ——时间 (月);
 N ——时间因素。
 C_v ——固结系数, 压缩时为 C_{vc} , 回弹时为 C_{vs} ($\text{mm}^2/\text{月}$);
 H ——土层计算厚度, 两面排水时取实际厚度的一半, 单面排水时取全部厚度 (mm)。

五、降水引发地面沉降的一般规律

根据预测计算和实测结果分析,降水引发的地面沉降具有一定的规律性。

1、与降水漏斗形状相吻合,降水中心区沉降值最大,但差异沉降最小。处于降水漏斗坡线位置的沉降值自内向外逐渐减小,且降水中心区与降水漏斗坡线的过渡带部位的差异沉降最大。所以,有时为了减小建构物的差异沉降,可以把降水范围扩大一些,把对差异沉降明感的建构物整体置于降水范围之内,北京地铁十号线东三环段的各个立交桥区基本都采用了这一做法。

2、对于多层或厚度较大的细颗粒含水层,经降水疏干后,降水影响范围较小,总沉降量偏大,易形成较为明显的差异沉降。针对此类含水层降水,应同时制定预防地面沉降的配套措施,如施做止水帷幕或降水与回灌结合应用等。

3、对于粗颗粒含水层,经降水疏干或减压后,降水影响范围较大,但总沉降量较小,差异沉降不明显,沉降量一般都在建构物允许沉降的范围内,不会引起灾害性后果。

4、根据对北京地铁复八线及在施的北京地铁五号线、十号线、机场线等的降水沉降实测资料判断,北京地铁降水沉降的一般规律是:

①中砂以上的粗颗粒含水层,多为中上密~密实状态,颗粒间接触紧密,水位下降后的地层压密属弹性变形,降水中心区的总沉降量一般 $<5\text{mm}$ 。

②北京城区东南部和东北部,饱和粉土层多为中密~密实状态,降水疏干后引起的沉降较明显,降水中心区的总沉降量一般为 $10\sim 15\text{mm}$ 。

③北京城区的原状粘性土,早已完成自重固结,基本都达到硬塑状态。在降水施工的持续时间段内,粘性土层的释水固结不明显,因而在降水沉降预测计算中,一般可不考虑硬塑以上粘性土层的释水固结问题,否则会严重失实。

12.2 地下水回灌

地铁降水工程采取回灌措施的目的和意义在于:①控制由于降水引发的地面沉降,在最大程度上减少对邻近建构物的影响,这类回灌一般为浅层回灌;②为减少地下水资源浪费而把抽排出的地下水回补到下部含水层或工程场地外围的含水层中。

一、回灌井的布设

1、控制降水引发地面沉降的回灌井布设

为控制降水引发地面沉降的回灌井应布置在需要保护的建构物一侧,以使建构物所处位置地下水位不致因降水而降低。回灌井与降水井的间距不小于 5m (图12-3),回灌井深度可与降水井深度一致。回灌井的结构可以采用管井结构,也可以采用与降水井点(轻型井点或喷射井点)一致的井点结构,这种类型的回灌井一般靠设置高位水箱来提高回灌水头。回灌井布设数量应根据水文地质条件和建构物的地基条件而定,回灌井之间的距离一般为 $10\sim 15\text{m}$ 。

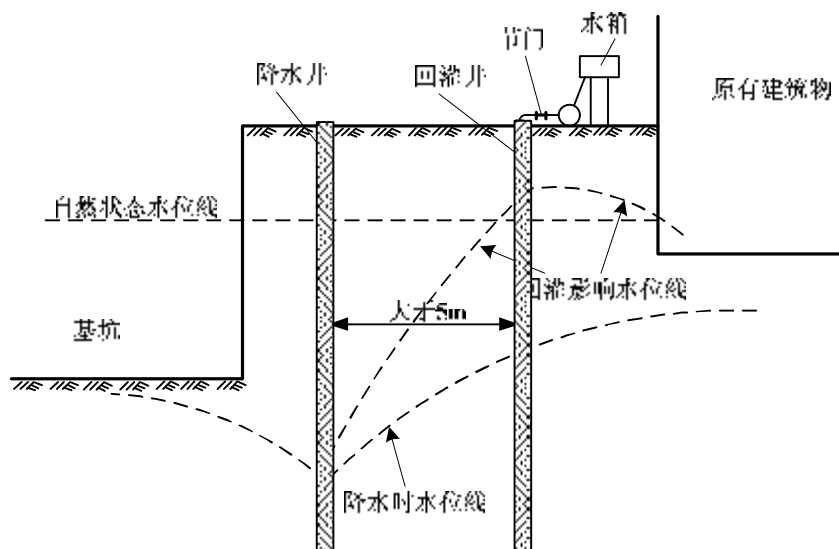


图 12-3 地下水回灌控制建筑物沉降示意图

2、回补地下水资源的回灌井布设

回补地下水资源的回灌井一般都比较深，宜采用管井结构。回灌井结构和抽水管井大同小异，不同之处在于回灌井要将上部非回灌层用粘土封住。回灌井的布置应考虑尽量减少回灌水对降水目的层的影响，即把回灌井布置在降水场地的下游或邻近工农业用水的集中开采区。为减小回灌井之间的回灌干扰，回灌井之间的距离宜大于30m。

二、回灌水质要求

地铁工程降水一般只涉及40m以上的浅层地下水，对很多城市来说，浅层地下水都受到了不同程度的污染，因而抽出的水能否作为回灌水源，应作检测并视回灌目的而定。一般情况下，控制降水引发地面沉降的回灌井的回灌层位就是降水目的层，因而抽出的水可直接作为回灌水源，其回灌水质应着重从回灌效果方面考虑，应注意浑浊度、总铁、溶解氧和耗氧量等物理—化学指标，如这些指标过高将严重影响回灌效果。对于浅层回灌，一般要求回灌水质指标不低于浅层水水质现况。

降水工程抽出的水能否作为深部含水层的回灌水源，应通过检测确定。在向可作供水的含水层中回灌时，回灌水质必须达到回灌水水质标准。如果水质不良的水灌入地下，就会使地下水遭受污染和水质变坏，还可能堵塞含水层和滤水管。一般可按下述原则确定回灌水源：①回灌水的水质最好能达到生活饮用水标准，但考虑到水在岩土中的自净作用，因而可稍低于饮用水水质标准；②回灌后不会引起地下水的水质变坏和受到污染；③回灌水不会堵塞回灌井和地下含水层；④回灌水不含有能腐蚀滤水管的特殊离子和气体。

1、回灌水的物理性质指标

(1)、嗅味

回灌水不得有异嗅异味，通常受人畜粪便污染或混入工业废水后容易产生异嗅异味。

(2)、色度

回灌水应为无色，色度不超过20度。

(3)、浑浊度

浑浊度是评价回灌水质的指标，水中因含有悬浮物和胶体而产生浑浊现象。浑浊度大的水往往会滤水管和含水层产生堵塞，降低回灌效能，因而要求回灌水的浑浊度不超过10度。

2、回灌水的化学性质指标

一般降水回灌常需考虑的化学性质指标有 pH 值、氯化物、溶解氧、耗氧量和铁。

(1)、pH值

回灌水的pH值以6.5~7.5为宜。水的pH值过低会加强水对铁和铅的溶解，腐蚀回灌井的井壁管和滤水管，过高又会析出溶解性盐类。

(2)、氯化物

回灌水的氯离子含量不宜超过250mg/l，含量过高对铁质井管的腐蚀性较强。

(3)、溶解氧

溶解氧也是评价回灌水质的指标，回灌水的溶解氧含量不宜超过7mg/l，含量过高会与地下水中的亚铁离子作用产生高价铁的沉淀物而堵塞含水层。

(4)、耗氧量

回灌水的耗氧量不宜超过5mg/l，水的耗氧量大一般也反映了水中腐殖质、微生物和有机物含量大，耗氧量增加时会有异嗅异味产生。

(5)、总铁

回灌水的总铁离子含量不宜超过0.5mg/l，最好在0.3mg/l以下。铁离子含量过大，有利于铁细菌繁殖。

三、管井回灌技术

目前我国应用较多的管井回灌方法有自流(无压)、真空(负压)、加压(正压)三种，可根据回灌层条件、

井的结构和设备条件进行选择。

1、自流回灌

自流回灌是将水直接灌入回灌井中，又称无压回灌，适用于地下水位较低，透水性强，含水层厚度大的情况。这种回灌方式的管路无需密封，设备装置比较简单，为避免回灌时将大量空气带进含水层，造成气相堵塞，进水口要安置在井管中水位之下。

2、真空回灌

(1)、真空回灌的适用条件

真空回灌又称负压回灌，回灌水位与回灌层的水头差在地面之下，适用于地下水位埋藏较深，回灌层静水位埋深大于10m，透水性强的地段，滤水管、滤网强度较低的降水井改为回灌井时，也可以采取这种回灌方式。

(2)、真空回灌原理

在具有密封装置的回灌井中开泵扬水时，泵管和管路内充满了水。停泵并立即关闭控制阀门和出水阀门，此刻由于重力作用，泵管内的水体迅速向下跌落，在泵管内的水面与控制阀门之间造成真空。由于大气压作用在地下水面上，为保持泵管内外的压力平衡，泵管内的水柱只能下跌至静水位以上10m的高度。在这种真空状况下，开启进水阀门和控制阀门，因真空虹吸作用，回灌水就能迅速进入泵管，流入回灌井中，形成真空回灌。其实质是利用大气压力抬高井内水头，与井周围的地下水位产生水头差，使回灌水克服渗流阻力向含水层中渗透。

(3)、真空回灌的管路

回灌管路由输水管路、进水管路和排水管路组成。

输水管路一端连接泵管，另一端连接进水管路和排水管路，输水管路上应安装控制阀门、出水水表和真空表，控制阀门用于拉真空并调节回灌量。进水管路一端连接输水管路，另一端连接回灌水来源管，管路上应安装进水水表和进水阀门，进水水表用于计量回灌量。排水管路主要用于回扬，一端连接输水管路，另一端连接至排水管道，管路上应安装出水阀门。

密封好坏是真空回灌成败的关键。密封不好就不能形成真空，就无法利用虹吸原理产生水头差进行回灌，甚至会将空气吸入含水层中造成气相堵塞。对于用潜水泵回扬来说，真空回灌需密封的部位主要有输水管与泵管的接头、管路接头和控制阀。

3、压力回灌

(1)、压力回灌的适用条件

压力回灌又称正压回灌，是在真空回灌装置的基础上，把井管也密封起来，使回灌水不能从井口溢出，并用水泵加压产生高出地面的回灌水头差，机械加压的大小可根据井的结构强度和回灌量而定，因而压力回灌适用范围较广，特别是地下水位较高、回灌层透水性差、回灌量要求大的地段采用压力回灌效果较好。

(2)、压力回灌的管路

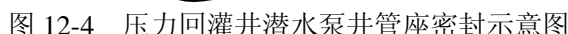
压力回灌的管路与真空回灌大体相同，不同点是：

①真空回灌只能从泵管内进水，而压力回灌不仅可以从泵管内进水，还可以从井管里进水。因而在进水管路中还要设置回流管路装置，回流管路一端与输水连接，另一端与井管连接中间用阀门控制。

②压力回灌需要放气。由于开泵回扬时井内水位下降，空气也随之进入井内，停止回扬后地下水位回升，井内空气被排出，因而需要在井口基座上安装放气阀。

(3)、压力回灌的密封

压力回灌的密封是在真空回灌密封的基础上，在井口把井管与泵管之间的间隙也进行了密封，由于潜水泵的电机和泵体都在水下，因而密封做法相对深井泵来说较为简单。井口密封一般采用井管座（图12-4），在进水法兰与泵管的接头可采用橡皮垫圈密封，潜水泵下入的电缆可采用压兰密封。



1、回灌井的堵塞

(1)、物理堵塞

①气相堵塞

②悬浮物质堵塞

(2)、化学堵塞

① 氢氧化铁沉淀堵塞

②碳酸鈣沉淀堵塞

103

（3）、生物化学堵塞

生物化学堵塞与微生物活动有关，如回灌水中含有微生物或能助长含水层内微生物繁殖的物质，当微生物死亡后它的残骸会堵塞含水层的有效空隙。

2、回灌井堵塞的处理

处理回灌井堵塞的方法，主要是进行回扬和化学处理。在回灌初期，一般以物理堵塞为主，常出现气相堵塞和悬浮物质堵塞。中期则逐渐转化为以化学堵塞为主，因为气体在含水层中的增加，气体中的氧大部分溶解于水中，促使水的化学成分发生变化。后期化学堵塞不断发展，含水层周围氢氧化铁等铁质盐类的大量沉淀，为铁细菌的繁殖提供了良好条件，造成生物化学的铁细菌堵塞。为了防止各种堵塞现象发生，在回灌过程中应经常检查回灌装置的密封效果，发现漏气要及时处理。

（1）、回扬处理

由于回灌方法的不同，回扬方式也不相同。真空回灌的回扬方法较简单，只要关闭进水阀门，开启出水阀门及控制阀门，即可开泵扬水。

压力回灌的回扬方法较复杂，随回扬方法的强度不同，所适用的井结构强度和用以处理的问题也有所不同。

①真空回扬

加压回灌时，因井内充满水体，当开泵回扬时，若不打开放气阀门，则井内水位下降，在水面以上的井管内就处于真空状态，真空度可达600~700mm汞柱。这种回扬对地层的吸力大，消除井内砂层里的沉淀物能力也大，因此适用于堵塞严重的回灌井，也可用于井管结构强度较大的回灌井。

②吸气回扬

开泵回扬时，同时打开放气阀门，当井内水位下降时，空气就从放气阀门进入井管内。此种回扬对地层的吸力中等，适用于一般回灌井。当停泵回灌时，应先从泵管内进水，待水位恢复后进行放气，放气阀门溢水时，才能关紧放气阀门，再开回流阀门，从井管内进水。

③回流回扬

开泵回扬时，同时打开回流阀门，并调节回流阀到许可值，使回扬水部分地回流到井管内，以减少单位降深出水量。此种回扬，切勿打开放气阀门，否则空气会随回流水被带入井内，造成堵塞。回流回扬对地层的吸力较小，回扬时间要长，才能清除浑浊水，适用于出砂的回灌井或老井。

若回灌井堵塞较轻、滤网强度较小时，采用回流回扬效果较好；若堵塞较重，滤网强度又比较大时，可用真空回扬及间隙反冲的方法进行处理。所谓间隙反冲，是指开泵3~5分钟后，再停泵3~5分钟；反复数次，视井的堵塞程度而定，但反冲必须在回扬水清后进行，否则，堵塞物被冲入含水层反而加重堵塞。

回扬时出现回扬水混浊并夹带杂质和泥，或呈乳白色，夹有大量微小气泡，就是物理堵塞的表现。回扬水呈黄褐色，含有铁锈色的氢氧化铁絮状物，就是化学堵塞的表现。若是生物化学堵塞，回扬时可见水中含有大量棕红色胶体状粘着物，并带有臭味。

（2）、化学处理

如果井下沉淀的碳酸钙和铁的氢氧化物在滤管上形成坚硬水垢时，用回扬方法是无法处理的。一般可采用盐酸处理。在用酸处理之前，必须掌握井的结构、井的材料和井内静、动水位等。为了避免盐酸对井管产生腐蚀作用，可采用浓度为10%的低浓度盐酸，并加入2%酸洗抗蚀剂。

3、回灌井出砂

在回扬抽水时，有时会发现出砂现象，出砂常有以下几种情况：

（1）、少量出砂。在回灌初期，回扬时出少量粉细砂是较为常见现象，一般经过一段时间后，即可恢复正常，但要加强观测，控制好回灌压力和回灌量。

（2）、大量出砂。如出大量粉细砂并夹有中粗砂，这种现象可能是回灌压力过大，使水流速加快，部分滤料随同回灌水被带到含水层，在滤网附近形成空洞，引起填砾高度不断降低，当高度降至滤水管顶端以下时，回扬时就会涌砂。这时必须暂停回灌，及时补填滤料。

12.3 降水与水资源的再利用

任何工程降水，都不同程度地改变了自然状态下地下水的均衡状态，通过回灌来保护地下水资源固然十分重要，但不是所有排放的地下水都能回灌，而且回灌的成本较高，回灌量有限。把宝贵的地下水资源白白地浪费掉十分可惜，如能加以利用，对本来就缺水的城市开发和建设将起到不可估量的作用。一般可以从以下两方面考虑降水工程的水资源再利用问题：

①制定降水方案前即与农林部门、水务管理部门进行探讨，研究抽出的地下水用于农林灌溉并向灌渠、河湖景观水体补水的可行性，争取把降水工程排出的地下水利用起来。

②在降水工程的维护运行过程中，其它土建工程也在进行，土建施工也需要用水，如施工现场混凝土养护、施工现场降尘、现场搅拌混凝土和清洁卫生用水等，在水质符合要求的情况下，工程降水排出的地下水可用做这些用途。