

饱和黄土地区浅埋隧道降水及控制技术

范志坤

中铁建大桥工程局集团第五工程有限公司 四川 成都 610015

【摘要】：高位水黄土隧道施工常常需要先进行地层降水工作，而饱和黄土地层降水容易引发地层沉降过大等一系列工程问题，对黄土地铁隧道施工带来了极大困扰。本文依托西安地铁4号线工程，针对饱和黄土地层降水引起的地层沉降问题开展研究，并提出针对性控制技术，研究结果可为实际工程施工提供借鉴。

【关键词】：高水位黄土；降水；地层沉降；控制技术

引言

地下水是关乎工程安全的重要因素之一，地下水对黄土隧道的结构受力问题也有明显影响。目前对地下水研究按时间顺序分为以下三个阶段：第一阶段：以工程一试验方法为主要研究手段的初始阶段，比如1856年法国工程师Henry和Darcy通过长期试验得出水流通过均质砂的渗流规律，即著名的Darcy定律。第二阶段：以严格定量的解析数学方法为主要研究阶段的发展阶段，比如1904年J.Boussinesq提出了地下水非稳定流的偏微分方程式，由此开创了现代地下水运动理论的新纪元。第三阶段：以数值模拟技术为主要研究手段的深化阶段，比如1965年，Zienkiewicz将有限元法引入地下水渗流分析领域，为有限元求解渗流问题奠定了坚实的基础。

黄土地层是一种水敏性明显的地层，地下水对黄土地层的力学性质影响极其明显，而对于高水位黄土地层中的工程建设都需要首先进行降水工作，黄土地层降水工作不仅对黄土的力学特性改变明显，还容易引发一系列工程问题，比如降水不充分达不到施工要求、降水过大引起地表沉降过大威胁地面安全等，因此饱和黄土地层降水问题是需要得到工程技术人员关注的重点问题之一，目前关于黄土地层降水也有一些研究，比如，安刘生等研究了黄土地层中降水工作引起的沉降对高层建筑安全的影响；亢佳伟采用室内试验方法系统研究了饱和软黄土降水前后物理力学特性的变化规律；胡长明等分析了黄土地区中深基坑降水诱发地面沉降的规律，并提出了成熟的计算方法；张亚龙等研究了饱和软黄土高水位核心区的基坑降水问题，并提出了对应的降水技术；岩晓莹等研究了黄土地层降水对土壤水分的影响规律。

高水位黄土地铁隧道施工常常需要进行降水工作，但目前关于黄土地层降水引起的一系列工程研究不足，本文以此为切入点，开展黄土地层降水问题研究，并提出针对性控制对策，以期工程实际提供一些参考。

1 饱和黄土隧道降水作用下地表沉降分析

1.1 降水施工引起的地表沉降

降水施工过程中人工降水方式会疏干开挖区域土体所含有的地下水位后，开挖区域土体中孔隙中的水会逐渐被排出，那么在开挖区域上覆土体自重压力作用条件下，土体的孔隙体积会发生逐渐减少的趋势，这一趋势的变化过程也即是土体在压力作用下的土体压缩过程。压缩系数 a_v 经常用来表示土的压缩性，图1为土的孔隙比和应力的关系曲线（ $e-p$ 曲线），图1中 a_v 所对应的为压缩曲线上一点的切线坡度，即：

$$a_v = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} = - \frac{\Delta e}{\Delta p} \quad (1)$$

公式1中 e_1 ， e_2 分别对应着压缩曲线上 p_1 ， p_2 时的土体的孔隙比，公式中 Δe ， Δp 分别表示为土体在压缩过程中孔隙比和应力的增量值。

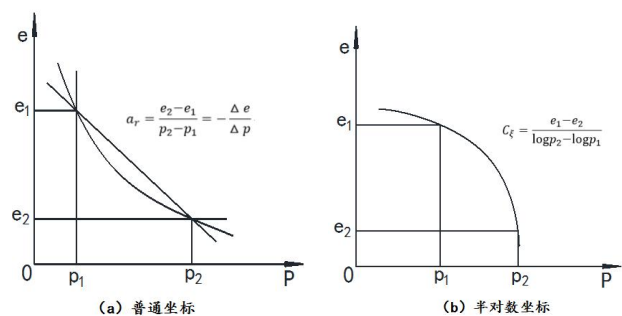


图1 土的压缩曲线

当开挖降水区域地层尚未降水时，选取的土体微元体所受到的总应力只有上覆土层累加的重力作用，可用公式(2)表示：

$$P = H_0 \gamma_0 + (Z - H_0) \gamma_f \quad (2)$$

式中： γ_0 —地下水位线以上岩土体容重(kN/m^3)；

γ_f —地下水位线以下饱和水岩土体容重(kN/m^3)

微元体 $dx dz$ 处孔隙水应力为 P_w ，则：

$$P_w = (Z - H_0) \gamma_w \quad (3)$$

推倒获得岩土体单元所受到的有效应力为：

$$\delta = H + \gamma_0 + (Z - H_0)(\gamma_f - \gamma_w) \quad (4)$$

施工土层所取单元的深度 Z 处微元土体中的孔隙水在被人工机械抽疏干之后，土体内因此会受到应力改变，且这一变化较为明显，产生这一明显变化的现象主要是在降水条件下土体中孔隙水所承担应力发生了转移，导致了土体颗粒上的应力增大了，也正是这一转移过程的发生在一定程度上增加了研究区域单元岩土体颗粒上的有效应力。

假设 e_0 为研究区域单元降水前土体的初始孔隙比的大小， Δe 为研究区域降水施工前后所研究土体孔隙比的变化量，微元段 dz 因降水施工而产生的单元竖向压缩固结 ds 可用公式 (5) 表示：

$$ds = \frac{a_v \Delta p}{1 + e_0} dz \quad (5)$$

此外，将公式 (4) 计算的 ΔP 相关参数代入到公式 (5) 可以得到：

$$ds = \frac{a_v (Z - H_0) \gamma_w}{1 + e_0} dz \quad (6)$$

上述所得的公式 (6) 即为微单元在降排水施工过程由应力变化导致的土体竖向压缩固结变形的计算公式。地表特征点 x 处地表沉降可以用下列公式 (7) 来描述：

$$w_1 = \int_{H_0}^{f(x)} a_v (Z - H_0) \gamma_w dz \quad (7)$$

式中： $w_1(x)$ —地表 x 处由于降水地层产生体积压缩导致的地表沉降；

$f(x)$ —地表 x 处地下水位的降深即降水漏斗曲线与原地下水位线的竖向距离。

1.2 渗流作用引起的地表沉降

地铁隧道的开挖降水施工在一定程度上会导致隧道影响区域围岩体孔隙中地下水的流动，隧道降水开挖区域孔隙

中水的流动现象会导致流动区域围岩体土颗粒受到一个沿孔隙水渗流方向的动水压力也即是渗透力，这样一来，渗透力的产生也会改变岩土体中土体的有效应力变化。如果隧道施工区域岩土体中有效应力在一定程度上数值将增加，土体有效应力的增加必然造成孔隙水流动区域的岩土体的附加沉降。对于降水施工所产生的渗降漏斗曲线以下围岩体中，单位体积岩土体在由孔隙水流动所受到的单位渗透力可用下列公式 (8)：

$$D = \gamma_w i \quad (8)$$

式中： i 为渗降漏斗曲线下部的水力坡降， $i = dz/dL$ ， L 为沿渗流方向的距离。

考虑平面情况下，由孔隙水渗流所造成的动水压力在渗流作用方向的附加渗透有效应力增量 $\Delta p'$ 可用公式 (9) 表示：

$$\Delta p' = DV/A = \gamma_w i L \quad (9)$$

式中： V —渗流过程通过的相关岩土体体积；

A —渗流通过的岩土体的截面面积。

L 取为横向渗流距离。

在降水施工时微单元在渗流作用下竖向压缩变形公式：

$$ds = \frac{a_v r_w i (R - x)}{1 + e_0} dz \quad (10)$$

式中： R 为降水影响半径， x 为微单元到降水井中心的距离长度。

因为降水施工所引起的降水漏斗曲线以上的土体所包含的地下水几乎被排完，故而在降水漏斗曲线以上区域土体单元不会出现降水施工引起的渗流效应，也就是说渗流效应只会发生在隧道底部区域。假定研究对象微单元在降排水施工过程中地下水流动产生的渗流作用下仅考虑会竖向变形，而忽略侧向变形的基础上，那么地表 x 处地表沉降的程度取决于降水漏斗曲线以下不同深度处微单元的竖向位移所构成的，可用下列公式 (11) 来求得：

$$w_2(x) = \int_{f(x)}^{H_0 + h_0} \frac{a_v r_w i (R - x)}{1 + e_0} dz \quad (11)$$

公式 (11) 中： R 为降水漏斗曲线中所对应的降水影响半径， x 为单元到降水井中心的距离。

1.3 降水过程引起的总地表沉降

在确定降水漏斗曲线之后,即可通过式(7)和式(11)计算得出因隧道降水施工过程中降水固结以及渗流作用所导致的地表沉降数值。在降水固结和渗流固结叠加得到的地表沉降公式如下:

$$w_{\text{降水}}(x) = w_1(x) + w_2(x) \quad (12)$$

2 降水施工方案分析及施工建议

西安地铁四号线绝大部分基坑和隧道埋深在 17m 左右,个别暗挖竖井基坑开挖深度达到 24m 左右;全线水位降深大部分在 6~12m,最深达到 18 米;含水层厚度计算值在 13~32m,含水层渗透系数平均值一般在 5~12m/d,只有最北端两个站取 50m/d;车站降水影响半径大部分在 120~520m 范围变动,最大的降水影响半径分别为 870m 和 754m;车站涌水量差别较大,从 3000~18000m³/d 不等;布井方式除北大街、小寨、南稍门站采用桩间旋喷止水帷幕+坑内管井降水外,其于车站均采用坑外管井降水;竖井均采用井外封闭管井降水,暗挖区间基本采用在隧道外侧布置管井降水,并辅以洞内降水;全线单井抽水量基本在 600m³/d 上下,只有 F2、F3 地裂缝处理段在 900~1000m³/d;井径为Φ700 居多,均采用Φ500 滤水管;井深差别较大,从 25~40m 不等,其中北大街二号线、F9 地裂缝井深达到 55m;井间距 15~30m 不等。

2.1 降水方案比选

地铁区间暗挖施工一般都要求“无水作业”,因此在施工前也需要降水。由于区间线路一般较长,无法达到封闭降水的效果,如沿线降水井布置过多,不但降水费用很高,而且对沿线环境及周边建筑物影响很大,因此要与车站降水区别对待。目前区间施工降水的方式有三种,一是只在洞内降水,适合于水量不大,围岩较好地段;二是洞外提前降水,适合于水量较大、围岩松软、裂隙发育,特别是有砂层的地段;三是洞外设止水帷幕,洞内进行少量降水。

西安地铁二号线基本在黄土层及古土壤中穿过,围岩自稳性好,渗透系数小,因此在地下水位较低的地段地下水对开挖影响不大,采用洞内降水就可以满足要求,如尤南区间就没有布置坑外降水。但在水位较高时,开挖掌子面围岩经水浸泡后强度会大大降低,自稳能力下降,容易造成坍塌,因此必须提前在洞外降水,如南方区间等。但如果水量较大,洞外降水又没有足够场地时,可以在洞外适当布一定数量的降水井,同时在洞内每隔 10m 左右挖一口小井,进行辅助降水,草小区间就采用了这种形式,降水效果良好。但应注意

的是,如果隧道穿过砂层,必须提前在洞外降水,施工中作好超前探测,严防突然涌水。在穿越地裂缝段要特别注意,加强超前探测,做好应急抢险准备,谨防突然涌水。由于对地裂缝段涌水的原因还不十分清楚,接下来还需做大量研究。

2.2 降水对周围环境的影响与防治

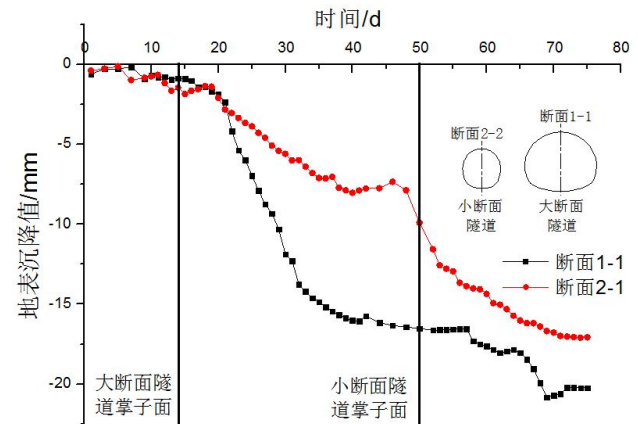


图2 地表沉降—时间曲线

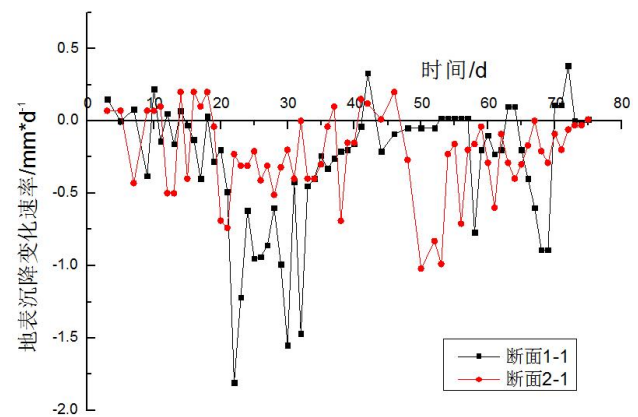


图3 地表沉降变形速率—时间曲线

图2、图3是隧道开挖施工引起的纵向地表沉降曲线图以及纵向地表沉降变化速率显示图,图中断面1-1、2-2依次为大、小断面隧道的中心线。由图2和图3可知:在黄土地层双线大断面小净距隧道开挖施工过程中,伴随着大断面隧道施工进度逐渐动态临近监测特征断面,地表沉降逐渐发生,但整体监测量测数据显示沉降值较小。在此段隧道施工期间,大断面隧道上方地表沉降的变化率基本维持在 0.3mm/d。当大断面隧道开挖面临近埋设的监测断面时以及要进一步推进时,大断面隧道上方地表沉降会发生较大的沉降,在这一施工阶段时期,地表沉降的位移变形速率几乎最大,其中地表沉降数值最大值变化速率达到 1.8mm/d;当大断面隧道开挖施工经过监测特征断面时,隧洞洞内的初始支

护便开始施做并能起到支护效果，在这之后随着初期支护结构的强度和支护刚度的增强，特征监测地表沉降也逐渐趋向于稳定，变化率基本上为零。此外，当小断面隧道开始进行施工开挖工序时，当台阶法施工的小断面隧道施工开挖洞室掌子面慢慢临近监测特征断面，此时小断面隧道上方土层地表沉降会有一些的发展。

在降水期间，降水面以下的土层通常不可能产生较明显的固结沉降量，而降水面至原地下水水面之间的土层因排水固结，会在所增加的自重应力条件下产生较大沉降。因此通常降水所引起的地面沉降即以这一部分沉降量为主，可采取如下预防措施：

(1) 防止抽水带走土层中的细颗粒。降水井施工所用的滤料必须认真按级配配制，在正常抽水过程中如有混浊现象立即停止抽水，采取相应措施予以补救。

参考文献：

- [1] 张玉伟,宋战平,翁效林,段宇昕.黄土地铁隧道湿陷性基底地基处治优化模型试验[J].岩石力学与工程学报,2020,39(09):1912-1920.
- [2] 张玉伟,宋战平,翁效林,谢永利.大厚度黄土地层浸水湿陷对地铁隧道影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(05):1030-1040.
- [3] 安刘生.黄土区域地铁降水引发高层建筑过度沉降的处理技术[C]//中国土木工程学会 2021 年学术年会论文集.2021:201.
- [4] 亢佳伟.饱和软黄土降水前、后物理力学性质研究[D].西安理工大学,2021.
- [5] 胡长明,林成.黄土深基坑潜水区降水诱发地面沉降的简化算法[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(03):76-83+139.
- [6] 张亚龙,张玉峰,宋奇昱,张书敏.西安饱和软黄土高水位核心区基坑降水技术[J].施工技术,2021,50(04):91-94.
- [7] 岩晓莹,马理辉,刘铮,柯增鸣,李娟娟,杨金贵,胡宇美.降水增加对黄土高原深层土壤水分的影响[J].土壤通报,2020,51(03):614-620.

(2) 保持抽水过程的连续性。尽量避免间歇性和反复性的不连续抽水。

(3) 必要时在基坑外边线稍远处布设回灌井。

3 结论

降水工程方案选择要在充分掌握和分析工程结构特征和水文地质条件的前提下，参照本地区类似工程经验，充分进行经济技术比较后选择合理降水方案。降水工程的专业性很强，地域性非常明显，类似工程经验非常重要，因此建议选择本地区经验丰富的设计单位进行方案设计，选择专业的降水队伍进行降水施工，规避降水工程本身以及降水不到位给地铁施工带来的风险；同时要在以后的降水实践中加强经验积累和科研试验，早日攻克降水难关，保证地铁施工安全、顺利推进。