

沈阳地铁矿山法隧道穿越滞水层关键技术研究

王吉华

(中铁十八局集团第五工程有限公司, 天津市 300450)

摘要:为解决矿山法隧道穿越滞水层造成的涌水坍塌问题,以沈阳地铁九号线某区间工程为例,进行技术研究。首先,分析滞水产生的原因,并对影响因素逐一排查与处理,引出要解决的核心问题;其次,结合滞水层分布与隧道的位置关系,将影响施工的地质区段划分为4种差异性类别,研究得出“引水”与“阻水”两项关键技术;最后,对“阻水”技术重点分解,得出“局部深孔注浆”、“上半断面深孔注浆”、“上半断面轮廓外深孔注浆”3种针对性加固措施,并应用于矿山法隧道穿越滞水层设计与施工中,取得了成功。

关键词:沈阳地铁; 矿山法; 隧道; 滞水层; 深孔注浆

在矿山法地铁隧道施工中,地下水是制约施工成败的关键因素,需要采取降水、注浆等措施进行治理,方可施工。在各种类型的地下水处理中,对于滞水的处理最为棘手,难度也更大。随着科技的进步,施工方法的增多,中国学者及工程师不断研究出处理滞水的实用技术,得到了一些成功案例。韩占波等^[1]采取洞内井点真空降水解决了上层滞水和管线渗漏水对隧道施工的危害;张卫星^[2]采用管井加真空降水的复合降水工艺,解决了存在隔水层的降水难题;邵明利^[3]采用针对性的隧道内“井点降水法”治理方案,从根本上解决了地下水水位过高导致的隧道水害问题;刘厚朴^[4]通过深孔注浆法解决了北京地铁矿山法施工区间隧道层间滞水问题。

同时,隧道施工中一些治理涌水涌砂的成功经验,也为处理滞水打开了思路。例如:翁敦理^[5]、杨建新^[6]运用深孔注浆法改善了地层,创造了安全的暗挖环境;张金夫等^[7]针对隧道高压富水断层,总结出高压动水分段引排,超高压聚合注浆施工技术;阳云等^[8]针对现场不均匀软弱围岩,采取了以“减少钻孔、配套优化”为主的注浆优化措施,降低了涌水量,确保了安全质量,节约了施工成本。

与前述工程相比,该文案例工程几乎囊括了矿山法隧道穿越滞水层的所有类型,分析研究需更加全面系统,该文针对性地提出“引水”和“阻水”两项关键技术。以“阻水”技术为母体,细化得出3种分支技术,对

差异地层“对症下药”,将疑难问题各个击破,效果将更加明显。关键技术应用后,可达到止水防塌的目的,确保隧道的正常开挖,直至区间贯通。

1 工程概况

1.1 设计简介

沈阳地铁九号线某区间隧道采用矿山法施工,左线长1 233.274 m,右线长1 259.984 m,左右线均为单洞单线隧道,复合式衬砌,马蹄形断面(图1)。区间线路纵向呈“V”字形,最大纵坡2.5%,隧道覆土厚度6.6~17.2 m,最小平曲线半径300 m。区间设1[#]、2[#]两处施工竖井及横通道(兼联络通道),一处区间渡线。其中穿越滞水层区段为标准断面隧道,穿越长度822 m,占区间隧道总长度的33%。

1.2 工程地质与水文地质

根据地质勘察报告,地层结构由第四系全新统人工填筑层、第四系全新统浑河高漫滩及古河道冲积层、第四系全新统浑河新扇冲洪积层、第四系上更新统浑河老扇冲洪积层组成。自上而下依次为杂填土、中粗砂(局部细砂、圆砾)、粉质黏土、中粗砂。地下水类型为孔隙潜水,稳定水位埋深为6.80~8.90 m。区间隧道主要穿越中粗砂(局部细砂、圆砾)、粉质黏土层,其中粉质黏土层上方与中粗砂交界位置富含滞水。

拱部 120°范围内设置超前小导管:φ32@300 mm, <i>l</i> =3.25
<i>L</i> =1.8 m,每榀一打,注水泥水玻璃浆液
双层钢筋网 φ6@150 mm×150 mm
纵向联结钢筋 φ22,环向间距 1.0 m,内外双排
钢格栅间距 0.5 m
C25 喷射混凝土
模筑钢筋混凝土 C40,P10

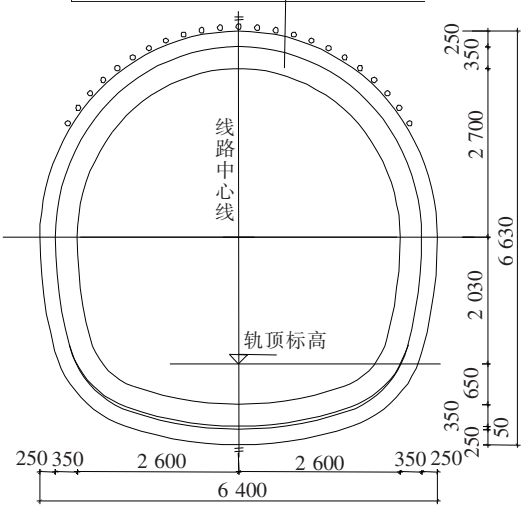


图1 标准段结构横断面图(单位:mm)

2 施工遇上层滞水

某年5月3日,沈阳地铁九号线某区间自1[#]竖井左线向小里程方向施工至里程A(某年5月4日,自1[#]竖井右线向小里程方向施工至里程B)突遇涌水涌砂,项目部立即停止施工,并封闭掌子面,加强地面、洞内监测与巡视。同时,召开专家论证会,研究解决方案。经分析判断,此处隧道拱部为透水性极差的粉质黏土层,上方富含滞水,施工时挖穿粉质黏土层导致滞水流出。由于滞水较大,开挖存在施工风险,专家一致认为需对上层滞水采取处理措施,避免出现安全事故。

3 滞水产生原因分析

开挖面遇较大滞水,分析原因为以下3种:

(1) 局部降水不到位,未能将地下水位降至指定标高,存在降水井抽水不畅或降水井数量不足等因素。

(2) 外来水源补给,周围存在地下暗河、水囊、市政管线渗漏等因素。

(3) 自然形成的上层滞水,指包气带内局部隔水层之上积聚的具有自由水面的重力水,由雨水、融雪水等渗入时被局部隔水层阻滞而形成,消耗于蒸发及沿隔水层边缘下渗^[9]。

4 影响因素排查及处理措施

4.1 影响因素排查

- (1) 降水效果排查
- 经检查降水井完好、水泵运行正常,通过预留水位观测井测量,以及挖探粉质黏土夹层下方原状砂层,探明地下水位已在隧道底部1 m以下,满足正常降水要求。
- (2) 外来水源排查
- 经排查发现,距离隧道右线约5 m(左线约11 m)位置道路下方的一条DN800混凝土雨水管道由于年久失修管节接缝处存在渗漏,渗漏水沿孔隙较大的杂填土层流入隧道内,此处渗漏需要处理。
- (3) 地表水(自然形成的上层滞水)下渗排查
- 勘察报告及降水井钻孔揭露的地面以下杂填土主要由碎砖块、建筑垃圾、纺织布条、腐殖质生活垃圾、灰黑色粉质黏土等组成,结构疏松,孔隙较大,欠压密^[10]。地表水下渗通畅,且易形成大范围的“海绵状”存储水囊。

4.2 处理措施

3种因素排查后,得出初步结论:地表水、管线渗漏水以及部分潜水被阻隔在粉质黏土层上方,降水井穿越粉质黏土隔水层区域,不能形成有效降水漏斗,存在降水盲区,水流不能被彻底降排,存留在粉质黏土层上方形成滞水。决定采取以下处理措施。

4.2.1 切断外来水源补给

对渗漏的DN800混凝土雨水管道内水流进行临时导排,管内淤泥清理,对管节接缝进行了水泥砂浆勾缝封堵处理,之后施做了柔性防水内衬^[11],内衬材料选用PVC涂塑高强涤纶防水布。同时,对检查井裂缝进行了水泥砂浆封堵,并整体抹面处理。对渗漏管线进行内衬处理后,隧道内左右线滞水流量均有不同程度减少,但剩余滞水仍制约开挖。

4.2.2 降低滞水水头压力

① 选取掌子面前100 m作为试验段加密降水井,将降水井间距由12 m调整为6 m,数量增加1倍;② 施做透水井,即降水井穿透粉质黏土层,促使上方滞水通过透水井流入下方砂砾层;③ 在隧道两侧增加浅井,即降水井底部嵌入粉质黏土层且不穿透该层,下水泵进行滞水抽排。

新增降水井、透水井、浅井正常工作后,经水位观测井测量,水位有所下降,但下降缓慢。尝试破除掌子

面开挖,开挖过程中滞水并没有明显减小,制约施工安全。之后,尝试了地面真空降水、洞内自吸泵抽排滞水弥补管井降水盲区,也未取得成功。要想彻底解决滞水对开挖的影响,必须在隧道内采取其他技术措施。

5 关键技术

结合隧道线形、断面设计与地层起伏变化的关系,进行滞水层地质素描,并根据滞水层素描线,判断其对隧道开挖的影响程度。经素描后,将隧道穿越滞水层分为 4 种差异区段类型,采取“引水”与“阻水”两种针对性技术措施。

5.1 “引水”技术

5.1.1 滞水层位置在起拱线以下范围内

当粉质黏土层在隧道作业范围内,滞水层位于隧道开挖起拱线以下时(图 2),由于滞水层距离拱部较远,且滞水层以上的圆砾及中粗砂层具有一定的自稳性,拱部开挖时几乎不受滞水影响,可按原设计方案施工。侧墙及仰拱开挖时受到滞水影响,当滞水层位于侧墙开挖位置时,受滞水持续冲刷的粉质黏土层槽壁成片状层层滑落,使上部砂体垮塌,形成流砂造成塌方。当滞水层位于仰拱开挖位置时,造成开挖槽内积水,影响仰拱钢格栅安装及焊接,长时间浸泡会使槽底粉质黏土层变软,影响支护强度。

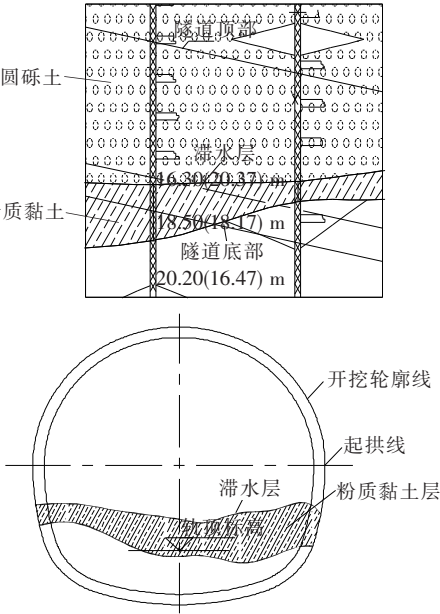


图 2 滞水层位置在起拱线以下范围地质示意图

采取措施:① 在侧墙位置埋设引排管,将水流引排至临时集水坑,集中抽排至洞外;② 开挖仰拱基槽

时,在仰拱前方靠近掌子面侧施工临时集水坑,深度低于仰拱基槽,将水流引排至临时集水坑内集中抽排至洞外;③ 迅速进行洞身开挖与支护;④ 初期支护封闭成环后及时进行背后注浆,封堵隧道外水流通

道。在已施工完成的初期支护侧墙上布设临时排水管,或在隧道仰拱侧角砌筑临时排水沟,排水管(排水沟)沿隧道长度方向布设,一端连接掌子面附近临时集水坑,一端连接至施工竖井内集水坑。隧道拱部、侧墙部位的滞水通过引排管,引排至掌子面附近临时集水坑(仰拱部位的滞水直接抽排至临时集水坑),再通过集水坑内的水泵将水流泵送至排水管(排水沟),输送进施工竖井内的集水坑,最终抽排至地面指定排水系统里。

5.1.2 滞水层位置在起拱线至拱部以下 1 m 范围内

滞水层位于拱部开挖范围内(图 3),对拱腰、拱脚位置开挖产生影响,开挖暴露时间过长,水流持续冲刷,会使粉质黏土层拱壁片状滑落形成流砂,影响范围沿拱部逐渐向上扩大,引发塌方。

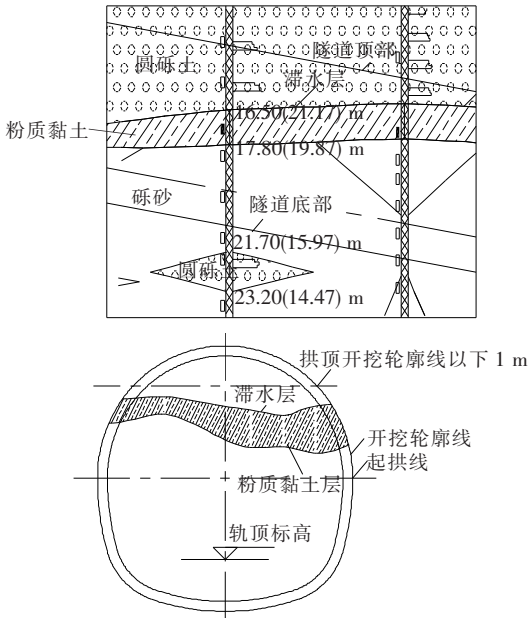


图 3 滞水层位置在起拱线至拱部以下 1 m 范围地质示意图

采取措施:① 在拱腰、拱脚滞水层位置埋设引排管,将水流引排至临时集水坑,集中抽排至洞外,减小水流冲刷的影响;② 为防止流砂形成时对拱部的影响,在拱部施工时,提前采用双排小导管注浆加固地层,增强加固措施;③ 为缩短拱部土体开挖暴露时间,将拱部分两次开挖,即在拱腰位置增设一处连接板(连接板进入粉质黏土层),开挖至拱腰位置及时进行钢格栅安装及喷射混凝土隐蔽,之后再向下开挖至拱脚,完

成整个拱部施工;④及时施做初期支护,待仰拱跟进封闭成环后及时进行背后注浆,封堵隧道外水流通道。

5.2 “阻水”技术

5.2.1 基本原理

在粉质黏土层上方富存滞水的砂层内钻孔注浆,将地层颗粒间的滞水强迫挤出,取而代之的是注入的浆液,浆液充填于颗粒间隙中,将颗粒胶结成整体,增加了地层的黏结强度及密实度,使地层的透水性降低,从而形成相对隔水层。同时,通过注浆,堵塞了远处水源的补给通道,阻止了水源向注浆加固区补给^[12]。

5.2.2 注浆方式

浆液对地层的加固状况主要表现为填充挤压和剪切劈裂两种方式。采用填充挤压为主、辅以剪切劈裂注浆方式。主要在砂层与粉质黏土层的界面位置进行填充挤压注浆,其次浆液在较高压力下形成劈裂脉,以脉状扩散形式形成网状加固结构^[13]。

5.2.3 “阻水”设计

(1) 滞水层位置在拱部以下 1 m 开挖可见范围内
滞水层位于拱部开挖范围内(图 4),对拱顶位置开挖产生严重影响,会直接形成流砂,造成拱部坍塌。

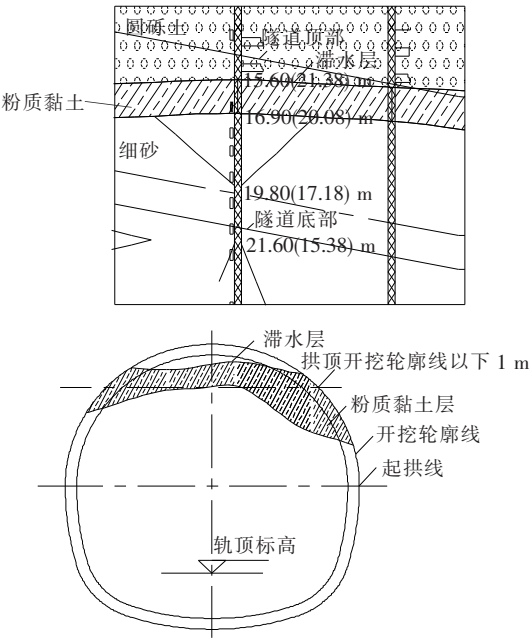


图 4 滞水层位置在拱部以下 1 m 开挖可见范围地质示意图

当滞水主要集中在隧道开挖面两侧拱肩位置(隧道开挖面左上角与右上角的地层交界面)时,采用“双排小导管+洞内局部深孔注浆”加固措施。首先采用双排小导管注浆加固砂砾石地层,提前预防流砂形成时对拱部的影响;其次在拱肩进行局部深孔注浆,形成阻水屏障,暂时切断两侧外来水源的补给,为开挖提供

时间上的支持。

局部深孔注浆加固范围为地层交接处左右两侧各 1 m × 1.4 m 范围(图 5),注浆处必须咬合至少 200 mm 粉质黏土层,以保证交界面不漏水。注浆深度为 3~4 m,每开挖 2 m 进行一次注浆。

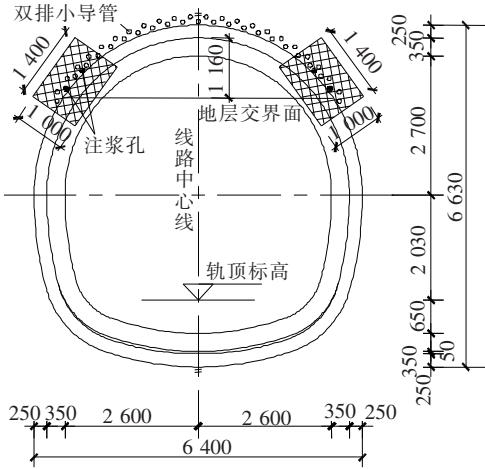


图 5 局部深孔注浆加固(单位:mm)

当滞水布满隧道开挖面内整条地层交接线,并冲刷下方粉质黏土流入洞内时,采用“洞内上半断面深孔注浆”加固措施。对隧道上半断面及开挖轮廓外 3 m 范围进行注浆加固(图 6),形成一道较厚的阻水墙,将滞水阻隔在墙外,为拱部开挖赢得充裕时间。注浆沿隧道掘进方向 10 m 一循环段,一个注浆段完成后,开挖 8 m,预留 2 m 作为下一循环的止浆岩盘。

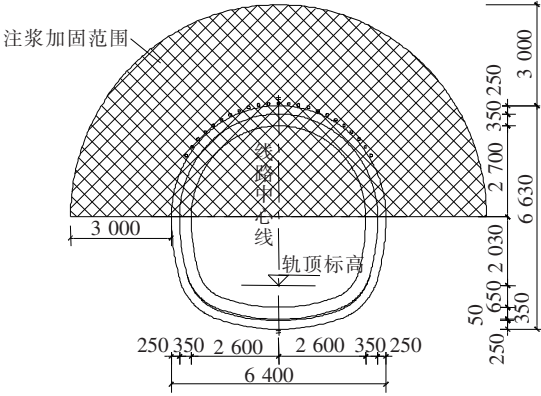


图 6 上半断面深孔注浆加固(单位:mm)

(2) 滞水层位置在拱部以上 1 m 开挖不可见范围内

滞水层虽未在拱部开挖范围内(图 7),但对拱顶位置开挖产生严重影响,极易造成粉质黏土隔层被挖穿,形成流砂,造成拱部坍塌,采取“上半断面轮廓外深孔注浆”加固措施。

召开一次阶段性会议,对该区段施工进行技术总结,并指导下一区段施工。

7 经济分析

在矿山法隧道穿越滞水层施工处理中,通常根据滞水层勘察及影响程度,并结合技术可行性、经济可行性等因素,制定最优解决方案。一般解决方案分两类,

第一类为“大手术”,即改变原有施工工法,如将矿山法改为明挖法、盾构法;第二类为“小疗法”,即在现有矿山法基础上,增加补强辅助措施。

针对该工程特点,若采用“大手术”改变工法,将对周边环境、工期、费用等产生较大影响,尤其经济投入加大,同时增加了新的施工风险和社会影响,“性价比”差,不建议采取。该工程滞水处理主要集中在“阻水”阶段,对拟采取的阻水措施进行了综合比选(表 1)。

表 1 阻水措施综合比选

项目	管棚	超前 小导管	高压旋喷桩		深孔注浆	
			洞内水平	地面垂直	洞内水平	地面垂直
可操作性	较难操作,需要专门挑高段或较大操作空间	简单,易操作	较难操作,对洞内操作空间要求较大	易操作,但需要较大操作空间,且受地面环境限制较大	较易操作,需要较小的操作空间	易操作,受地面环境限制较大
施工风险	较大	较小	较大	较小	较小	较小
止水效果	一般	较差	好	较好	较好	一般
工艺与方案拟合度	相近	一致	一致	相近	一致	相近
工期	较长	短	长	较长(不占用洞内工期)	较长	较长(不占用洞内工期)
造价	高	低	高	高	较高	高

由表 1 可知:通过对 6 个比对项的综合比选,最终选定洞内水平深孔注浆为最佳处理方案。

8 结论与建议

在上层滞水存在的差异地质区段下采取的多种技术措施,创造了“开挖稳定,过程可控”的施工环境,确保了暗挖隧道安全穿越滞水层,进而顺利实现区间贯通。区间贯通后,监测数据显示地面最大累计沉降 23.24 mm,拱顶最大沉降 8.96 mm,结构最大收敛 5.96 mm,各项监测数据均在设计及规范允许范围内。一定程度上,为后续类似工程设计与施工提供了借鉴与参考。得到的结论与建议如下:

(1) 滞水处理首要任务是切断市政管线渗漏补给途径,管线渗漏造成滞水流量加大,增加暗挖施工风险。同时,由于管线渗漏使管底水土流失,造成管线沉降过大,极易发生管线断裂,出现涌水事故,进一步加剧施工风险,引发大范围坍塌。

(2) 每循环的超前探测工作十分重要,是指导注浆施工的重要依据;注浆过程监控与注浆效果检查十

分关键,是安全开挖的重要保障;开挖过程中仍需密切观察掌子面渗漏水情况,发现异常及时封闭;每循环留置的止浆岩盘必须满足深孔注浆压力要求,必要时再次进行网喷混凝土补强。

(3) 继续采取“动态设计与施工”的理念,对实际揭露的地质情况进行素描,并与勘察情况进行比对,更好地反馈及指导设计与施工,优化方案。

(4) 洞内深孔注浆方式与洞内开挖作业产生交叉影响,一定程度上增加了施工工期。以“上半断面深孔注浆”加固措施为例,每循环注浆长度 10 m,注浆时间 7~10 d(含开挖过程中出现盲区时的补充注浆),每循环开挖 8 m,开挖时间 8~10 d,工效较正常地层暗挖施工减少一半。地面具备施工条件时,可尝试在地面钻孔进行深孔注浆方式,并辅以洞内注浆加固,该注浆方式不占用洞内正常施工工期。

(5) 严格控制开挖进尺,合理留置台阶长度(3~6 m),及时封闭成环,防止未成环部分的“悬臂”过长及悬空搁置时间过久,使“悬臂”开裂折断,造成严重安全事故。