

基于现场监测及数值分析的隧道双导洞超前施工 优化研究

宋战平^{1,2}, 张强¹, 赵克明¹, 张学钢^{1,3}, 张学文², 王娟娟¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300;

3. 陕西铁路工程职业技术学院 陕西 渭南 714099)

摘要: 依托新建兰渝高铁桃树坪富水弱胶结粉细砂隧道工程, 基于现场监测和数值模拟分析相结合的方法, 对大断面富水砂地层条件下的隧道施工方案进行了优化和分析, 研究了大断面隧道 CRD 法、双侧壁导坑法和三台阶七步法三种施工方案的优缺点, 改进了大断面隧道双侧壁导坑法施工技术, 提出了“底部双导洞超前施工”的新工法。跟踪桃树坪隧道 3# 斜井施工工区底部双导洞超前工法试验段进行的现场围岩压力、拱顶沉降和水平位移的现场监测, 验证了工法的安全、可行性; 基于数值模拟分析, 确定了施工中上半断面的最佳开挖高度 5.4 m, 超前导洞 1 部与上半断面 5 部间合理步距 25 m, 优化了底部双导洞超前施工工法的技术参数, 为富水弱胶结粉细砂地层隧道的施工提供了技术保障。

关键词: 隧道工程; 弱胶结粉细砂; 底部双导洞超前法; 现场监测; 数值模拟

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0654-08

Optimization study of advanced double-drift tunnel construction based on on-site monitoring and numerical analysis

SONG Zhanping^{1,2}, ZHANG Qiang¹, ZHAO Keming¹, ZHANG Xuegang^{1,3},
ZHANG Xuwen², WANG Juanjuan¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China;

3. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714099, China)

Abstract: Taoshuping tunnel in the newly constructed Lanzhou-Chongqing railway, has a complicated geological condition of rich water and weak cemented fine sand. Combined with the method of in-situ monitoring and numerical simulation, the large cross-section tunnel construction scheme under the geological condition of rich-water and fine sand are analyzed and optimized. On the basis of comparing the advantages and disadvantages by CRD method, double-side-drift method and three steps seven footwork excavation method, the double-side-drift method for large cross-section is improved and a new method of bottom advanced double-drift method is proposed. The security and feasibility of the new method are proved by in-situ monitoring the surrounding rock pressure, vault settlement and horizontal convergence of Taoshuping tunnel 3# inclined shaft's test section. Based on the numerical simulation, the technical parameters for the new method is optimized. The simulation results show that the optimum excavation height of upper section is 5.4 m and the most reasonable step distance between the 1st part (advanced double-drift) and the 5th part (upper section) is 25 m. The research results provided a technical support for tunnel construction under the condition of rich and weak cemented fine sand stratum.

Key words: tunnel engineering; weak cemented fine sand; bottom advanced double-drift method; in-situ monitoring; numerical simulation

在软弱围岩条件下开挖大断面隧道, 经常遇到围岩变形严重等一系列问题^[1], 其中富水弱胶结粉细砂地层下隧道更是软弱围岩隧道施工的典型^[2-4]。弱胶结砂土地层胶结性较差, 遇水没有自

稳能力, 施工困难, 处理不当就会造成一系列工程事故^[5-8]。因此, 基于现场监测和数值分析, 选取合适的施工工法对工程的施工意义重大^[9]。针对砂层隧道存在的问题, 国内外学者进行了大量的

收稿日期: 2017-05-12

修改稿日期: 2018-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578447); 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2017-K4-032); 渭南市科技计划基金项目(2015KYJ-3-1)

第一作者: 宋战平(1974—), 男, 教授, 博导, 主要研究岩土工程设计理论。E-mail: songzhpyt@xauat.edu.cn

研究. LEE I M, BRACHMAN R W 和 LEE S W 等^[10-13]采用室内试验、理论分析和数值计算方法相结合,对含水砂层隧道进行了大量的研究工作,分析了地下水对隧道围岩稳定性与支护结构的影响.国内张建斌等^[14]以富水软岩隧道为背景,分析了施工过程中现场的监测数据,结合现场施工情况,认为掌子面间距、循环进尺和合理的台阶长度对围岩稳定至关重要,施工中要严格控制以上的三参数.王秀英等^[15]对含水弱胶结砂岩隧道地层特性进行研究,基于水平收敛变形控制标准,提出了采用CRD法开挖隧道变形小的结论.韩现民等^[16]采用数值模拟方法对关角隧道浅埋砂层段三台阶和四台阶施工方案进行了分析,认为四台阶施工方案更适合浅埋砂层段的施工.苏秀婷^[17]以富水砂层段隧道为研究对象,分析了采用水平旋喷桩及水平旋喷桩与降水相结合施工方案,认为对富水砂层隧道的开挖,降水或超前预加固堵水是施工顺利的保证措施.以上对富水砂层隧道施工技术的研究为隧道的安全施工提供了必要的技术支撑;但对于超大断面的富水弱胶结粉细砂地层,其施工工法及施工技术还需要进一步深入研究.

兰渝铁路桃树坪隧道为典型的大断面富水弱胶结粉细砂隧道,以桃树坪隧道3#斜井正洞段工程为依托,在对比分析CRD法、双侧壁导坑法和三台阶七步开挖法基础上,综合三种工法的特点,提出了适用于富水弱胶结粉细砂地层“底部双导洞超前施工”工法,跟踪试验段进行的现场监测验证了“底部双导洞超前施工”工法的可行性.为进一步优化工法参数,采用数值分析方法,分析了“底部双导洞超前施工”不同的上、半断面开挖高度及不同的上、下断面间距时隧道支护结构的变形及受力特点;基于数值分析和隧道施工的特点,建议了工法合理、可行参数,指导了依托工程的施工,取得了良好的效果.

1 工程概况

桃树坪隧道是兰渝铁路线建设的重点隧道,位于兰州东车站端,隧道起讫里程DK3+435.0~DK6+655.0,全长3220.0m,为单洞双线铁路隧道.隧道洞身最大埋深229.0m,最小埋深6.0m,平均埋深在60m左右;设5座施工斜井,斜井合计长度1886.0m.隧道主要穿越地层为砂泥质弱胶结状的粗圆砾土层及桔黄色泥钙质胶结粉细砂层.围岩以粉细砂层为主,胶结性与成岩

性较差,见图1所示;隧道洞身所处的地下水位较高,日排水量较大,正洞每天排水达到1000m³左右,定义为Ⅵ级软岩.

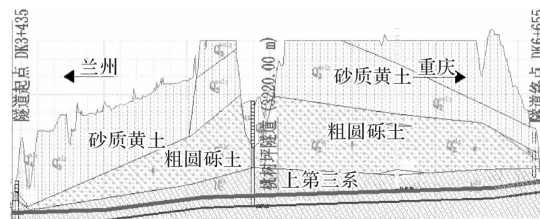


图1 桃树坪隧道地质纵断面图

Fig. 1 The geological profile of Taoshuping tunnel

桃树坪隧道3#斜井长度325.0m,承担正洞里程DK5+040~DK6+630段施工任务.该段隧道正洞开挖跨度达到14.8m,高度为13.3m,开挖断面积180.0m²,为典型的大断面富水弱胶结粉细砂隧道.在此种地质条件下修建大断面客运专线隧道,施工过程中各个工序之间的影响比较大,施工风险比较高,在施工过程中主要存在以下问题:

(1)隧道洞身含水量较大,砂层与水流动性极强(见图2所示),造成施工降、排水施作困难.



图2 桃树坪隧道施工中涌水现象

Fig. 2 The water burst phenomenon during the construction of Taoshuping tunnel

(2)Ⅵ级弱胶结粉细砂围岩,开挖后没有自稳能力,在开挖扰动时极易出现富水微交接砂层的振动液化,出现流沙现象(见图3所示),造成围岩滑塌,初支开裂变形.



图3 桃树坪隧道施工中涌沙现象

Fig. 3 The sand inrush phenomenon during the construction of Taoshuping tunnel

(3)隧道断面大,围岩自稳性差,采用CRD、双侧壁等软弱围岩的分块式施工工法,施工工序繁多,工效低。

(4)在隧道边墙开挖时,开挖高度超过1.0 m时就可能发生砂层的流动滑塌;隧道开挖步距过大时,支护结构变形大,易造成坍塌,无法实现大断面隧道的安全快速施工。

2 隧道施工方案确定及现场试验

2.1 施工方案的确定

国内外对于大断面软岩隧道的施工,宗旨就是变大断面为若干个小断面进行开挖,及时施做支护结构,对类似的软岩隧道,通常采用的方法有台阶法、CRD法、双侧壁导坑法等方法或者几种工法的组合。从桃树坪隧道的地质条件出发,结合现场实际情况和国内外修建大断面隧道的施工经验,初步提出了CRD法、双侧壁导坑法和三台阶七步开挖法三种比选施工方案:

(1)CRD法又称交叉中隔壁法,主要应用于浅埋或偏压隧道,通过分部开挖,分块分环,达到减小开挖跨度和降低开挖高度的效果,最终形成全断面初期支护封闭结构的施工方法。

(2)以新奥法的原理为根据的双侧壁导坑法,把大断面分为左中右三个断面进行开挖,采用台阶法对左、右导洞先行开挖,快速施做临时支护,形成隧道地基上的扩大基础,实现初期支护拱脚的落地生根;然后开挖中间的拱部大断面,将拱部支护结构的围岩压力传递到以生根的扩大基础上,进而形成初支仰拱的封闭成环;其后再分部拆除临时支护,进行永久二次支护。双侧壁导坑法主要应用于地基软弱,承载力不足的大断面软弱围岩隧道。

(3)三台阶七步开挖法,是适用于IV级、V

级土质隧道的台阶法隧道施工工法,是以弧形导坑开挖预留核心土为基本模式,分上、中和下三个台阶的七步序隧道施工方法;为保证先行支护的拱部初期支护的稳定性,防止掉拱事故,中台阶和下台阶施工时,要求各部位的开挖与支护沿隧道的纵向错开,平行推进;为保证掌子面的稳定性,限制掌子面的挤出变形,上台阶开挖采用弧形导坑开挖预留核心土措施。

桃树坪隧道正洞开挖断面面积180.0 m²,开挖跨度达到14.8 m,高度为13.3 m,为典型的大断面富水弱胶结粉细砂隧道。根据断面大,地下水位高的特点,开挖的方案应满足以下原则和要求:

(1)易于降水。由于隧道内地下水位较高,弱胶结粉细砂遇水没有自稳能力,所以施工过程中必须保证隧道内能够顺利降水。

(2)地层软弱,需要先行施工隧道的下部,解决基础承载力不足,拱部支护结构无法生根,易掉拱问题。隧道施工过程中,要保证围岩的变形和应力的变化处于合理范围内,确保支护结构的安全。

(3)尽快采用大断面,保证机械施工,实现快速成环封闭。由于围岩的自稳性差,采用分部开挖,隧道断面小,施工步序多,不易于快速施工和尽快封闭成环。

隧道拟采用的CRD法、双侧壁导坑法和三台阶七步开挖法的对比如分析见表1所示。从对比结果可以看出,CRD法和双侧壁导坑法在控制围岩变形方面有较好的效果,但是进度较慢,成本极高,并且CRD法也不容易降水;从施工进度和成本方面来看,三台阶七步开挖法比CRD法和双侧壁导坑法有优势,但是从变形和降水来看,此种方法沉降较大,降水也较困难。

表1 隧道开挖方案对比表

Tab. 1 The comparison of tunnel excavation scheme

施工方案	降水难易	沉降	造价	施工进度 / m·月 ⁻¹	适用地层	优缺点	
						优点	缺点
CRD	难	小	极高	25	软弱地层,浅埋、偏压及洞口段。	兼有台阶法与双侧壁导坑法的优点,利于围岩的稳定。	降水困难,开挖断面较小,只能人工或使用小型机械开挖。
双侧壁导坑	易	小	极高	20	粘性土、砂层、砂卵层等。	控制地表下沉有较好效果,利于掌子面的稳定,施工安全。	断面多,空间小,扰动大,进度较慢,成本较高。
三台阶七步	难	大	较高	50	黄土、强风化岩层等。	中部核心土的支撑作用保证掌子面不易坍塌,分台阶施工,工序简洁。	台阶净空较小,变形较大,仰拱与开挖面距离较远,封闭成环不及时。

对于桃树坪隧道的富水未胶结粉细砂而言,根据开挖的方案应满足的原则和要求,需要研究一种合适的开挖方法,既有CRD、双侧壁导坑和三台阶七步开挖法这三种工法的优点,又能舍弃其不利方面是很重要的。基于现场双侧壁导坑的施工实践,在双侧壁导坑施工技术的基础上,借鉴三台阶七步开挖法的工法特点,提出了大断面富水未胶结粉细砂地层的新的施工工法:底部双导洞超前施工工法;并进行了现场100 m的试验段试验。

2.2 底部双导洞超前施工工法及技术要点

借鉴双侧壁导坑的工艺原理和桃树坪隧道富水未胶结粉细砂地层边墙开挖易滑塌的特点,降低双侧壁边墙的高度,先行台阶法施工底部导洞;在底部导洞内设置大口井降水,通过重力作用降排上部断面地下水;其后采用三台阶法进行中间断面的开挖支护。桃树坪隧道3#施工斜井工区双导洞超前法工艺及施工参数见图4所示,其施工技术特点如下:

(1)对正洞下半断面两侧导洞先行施工,利于降水,先开挖1部土体,初期支护及临时支护要快速施做,设置临时仰拱,并且安装锁脚锚管来稳定。距离1部施工适当长度后,开始开挖2部,钢架要接长,同第一步一样也要封闭成环。

(2)3部和4部的开挖与1部和2部的开挖顺序相同,支护的施做顺序也相同。

(3)接着开挖上半断面,利用前几步的循环首先施做超前支护,开挖上半断面时采用弧形导坑预留核心土法来施工,首先开挖5部土体,拱部一次开挖到位,上部初支钢架一次拼接到位封闭成环,减少多次拼接对围岩的扰动。待5部施工3~5m的安全距离后,开始施工6部,临时仰拱和中隔壁也要做好。初支背后采用径向回填注浆。根据现场实际情况和量测数据来分析,当围岩处于稳定状态后,开始开挖7部。

(4)当7部开挖合适的距离之后,开始开挖8部土体,及时施做初期支护,最终封闭成环。

2.3 底部双导洞超前施工方案试验段施工监测

2.3.1 监测方案

针对桃树坪隧道的地质情况,施工工艺和结构特点,为了满足桃树坪隧道大断面及围岩特殊性的设计与施工的验证要求,结合现场的实际情况,在3#斜井工区双侧壁导坑法施工改进基础上,在DK5+100.0~DK5+200.0段进行底部双导洞超前施工试验段试验,试验段典型照片见图5

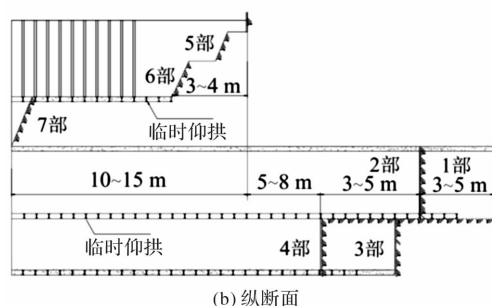
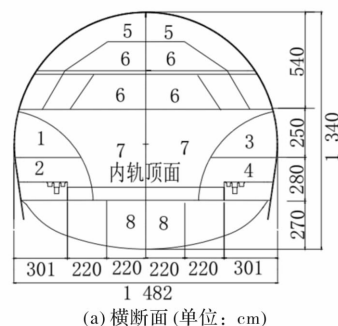


图4 隧道施工横、纵断面设计图

Fig. 4 The vertical and cross section of tunnel construction 所示;跟随试验段施工,进行了现场的山岩压力、支护结构的变形监测。

2.3.2 围岩压力监测结果及分析

桃树坪隧道双导洞超前法试验段典型断面的围岩压力分布特性如图6所示,五个测点处的压力值差别较大。就典型断面的围岩压力值而言,最大值出现在隧道的拱顶位置,为123.21 kPa,由拱顶到拱肩再到边墙逐渐减小,边墙围岩压力值,左侧为46.46 kPa,右侧为43.64 kPa,约为拱顶围岩压力的1/3;这是典型的以自重应力为主的沙土质隧道围岩压力的典型特点。采用底部导洞施作基础和边墙支护,将隧道顶部支护结构上的山岩压力传递到底部导洞先行施作的拱部基础上,实现了顶部结构的落底生根,确保了支护结构的安全。



图5 试验段工法转化

Fig. 5 The construction method transition of the test section

2.3.3 围岩变形监测结果及分析

图7给出了底部双导洞超前法隧道施工中典型

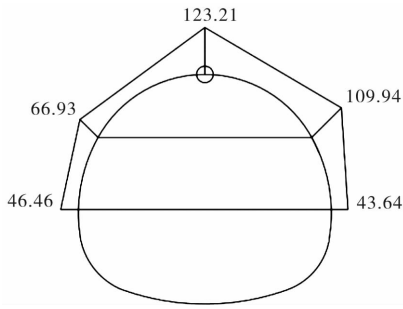


图 6 围岩压力最大值分布/kPa

Fig. 6 The distribution of maximum surrounding rock pressure/kPa

断面隧道的拱顶下沉及左右和顶部 5 部(见图 4 所示)边墙水平位移时程变化曲线,由图 7 可见,底部左右导洞开挖引起顶部出现先期位移,随着顶部 5 部的开挖,拱顶沉降变化明显,在隧道 5 导洞施工结束之后,拱顶沉降增幅较大,达到 32 mm;随着 6 部和 7 部的开挖支护,拱顶沉降先后出现大的变化;但就变化量而言,5 部影响最大,其次为 6 部;6 导洞施工完毕后,沉降量达到 45 mm,占总沉降量的比例最大,达到 75%以上,所以拱部的开挖是施工过程中的关键控制技术;影响较小的为 7 部和 8 部的开挖。由图 7 中隧道底部左右导洞和顶部 5 部(见图 4 所示)边墙的水平位移时程变化曲线可知,左右导洞的收敛值变化趋势一致,差别不大,右下导洞的收敛值略微大于左下导洞,在 4 mm 左右,说明右导洞的开挖对左导洞有轻微的影响,拱肩的净空收敛值较大,由于 5 部施工对上半断面的影响较大,所以导致拱肩收敛值较大,最终稳定在 40 mm 左右。

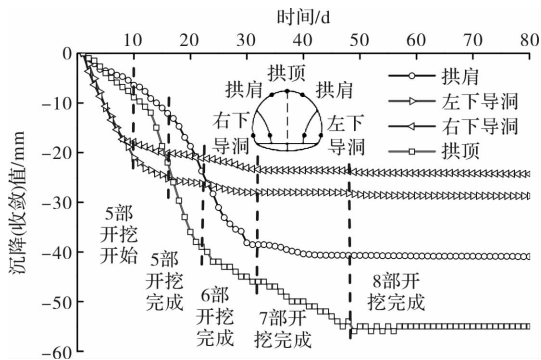


图 7 隧道拱顶、拱肩及导洞位移时程曲线

Fig. 7 The time-history curve of tunnel vault, arch feet and heading pilots displacement

跟踪施工进行的围岩压力、拱顶沉降和 5 部断面、底部导洞的水平位移监测数据及分析可见,底部双导洞超前施工方案,围岩的应力和变形趋于稳定的时间较长,但是变化都在合理范围内,保证了围岩的稳定性和支护结构的安全。

底部超前导洞先行施工,并在导洞中设置排水井,中部 5 部、6 部和 7 部的地下水在重力作用下排顺畅,保证了中部断面的开挖。因此,采用底部双洞超前的施工方案适合富水弱胶结粉细砂地层隧道的特点,是合理、可行的施工方案。但就隧道拱顶沉降和水平位移的时程曲线的变化而言,5 部和 6 部的影响的最大,且持续时间较长;为进一步控制拱顶的沉降及水平位移,需要对底部双洞超前施工方案的技术参数进行进一步优化,确定合理的 5 部、6 部(上半断面)的开挖高度和底部先行导洞(1 部)与上半断面 5 部的距离。

3 数值模拟研究

3.1 隧道模型及参数

利用 Midas GTS NX 有限元软件来对双导洞超前工法进行数值模拟分析,模型采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。根据桃树坪隧道所处工程地质和水文地质条件,同时查阅相关规范以及相似工程经验,确定了桃树坪隧道数值模型中的相关参数,如表 2 所示;开挖模型如图 8 所示,模拟开挖进尺定为 0.5 m,模型大小为 100 m×80 m×60 m,模型采用四面体单元,共计 81 840 个单元。隧道超前支护采用 $\varphi 42$ 超前小导管,长度为 2.6 m,环向间距 0.1 m,初支采用全环 I25a 型钢,间距 0.5 m,全环喷射 35 cm 厚的 C30 早高强混凝土,采用 60 cm 厚的 C45 钢筋混凝土来施做二次衬砌拱墙及仰拱,采用 20 cm 厚的混凝土来填充仰拱。

表 2 围岩及各种支护参数

Tab. 2 Parameters of surrounding rock and support

	弹模 /MPa	泊松 比	容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	粘聚力 /kPa	摩擦角 / $^{\circ}$
砂质黄土	21.0	0.3	19.0	18	22
粗圆砾	44.0	0.3	21.5	0	28
弱胶结砂岩	36.0	0.32	21.3	150	27
初期支护	35 880	0.2	24.0	2 000	45
临时支护	34 510	0.2	24.0	—	—
二衬	35 270	0.2	25.0	—	—

3.2 基于数值分析的施工参数优化

3.2.1 上半断面开挖高度研究

采用双导洞超前法开挖过程中,如果上半断面开挖高度过大,则隧道中部空间较小,不利于施工;如果上半断面开挖高度过小,则会导致左右双洞较小,不利于降水,掌子面容易失稳,同时会对拱部一次开挖到位增加困难。为了得出上

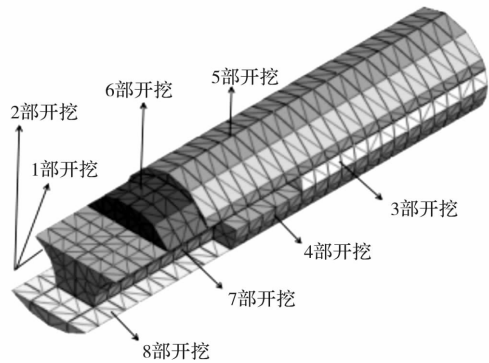


图 8 隧道开挖顺序

Fig. 8 The excavation sequence of tunnel

半断面最佳开挖高度，选择三种方案：

- (1)方案 1：上半断面开挖高度 5.4 m；
- (2)方案 2：上半断面开挖高度 5.8 m；
- (3)方案 3：上半断面开挖高度 6.2 m.

表 3 不同上半断面高度施工引起的拱顶位移对比

Tab. 3 Comparison of vault displacement caused by different upper section construction height

方案	$\Delta L/\text{mm}$	$\Delta S/\text{mm}$	$\Delta L/L$	$\Delta S/S$
1	21	14	0.003 9	0.004 0
2	25	18	0.004 3	0.005 1
3	32	26	0.005 2	0.005 7

注： ΔL 、 ΔS 分别为上半断面竖向变形量和水平变形量， L 、 S 分别为上半断面高度和拱肩宽度， S 为 3.5 m.

经过模拟，三种方案下围岩的位移如表 3 所示。从表 3 可以看出，上半断面的竖向变形量随开挖高度的增加而增加，上半断面开挖高度为 6.2 m 时的竖向变形量达到 32 mm，远大于开挖高度为 5.4 m 时的变形量，约大于 34%。水平变形量随开挖高度的减小而减小，开挖高度 6.2 m 时水平变形量达到最大，达到 26 mm，较开挖高度为 5.4 m 时的变形量大 46%。由以上分析可以得出，上半断面开挖高度的减小有利于控制竖向和水平变形量，另外考虑到底部双洞超前降水，实际开挖采用方案 1，即上半断面开挖高度为 5.4 m.

3.2.2 1 部与 5 部之间的开挖步距研究

1 部与 5 部之间的步距是施工中的关键问题，如果导洞过长，步距过大，则洞内施工条件进一步严重恶化，通风十分困难，增加开挖出砂工序作业时间，导洞加长导致喷射混凝土易堵管，作业时间加长；如果 1 部与 5 部之间的步距过小，左右导洞还没有达到稳定，开始开挖 5 部，则很容易导致隧道坍塌。为了探索 1 部与 5 部之间的最佳步距，选择三种开挖方案：

- (1)方案 1：1 部与 5 部之间的步距为 20 m；
- (2)方案 2：1 部与 5 部之间的步距为 25 m；
- (3)方案 3：1 部与 5 部之间的步距为 30 m.

1 部与 5 部之间不同步距下的围岩变化如表 4 所示。从拱顶沉降和拱肩收敛可以看出，拱顶沉降和拱肩收敛随 1 部与 5 部开挖步距的增大而减小，呈线性变化，方案 3 的拱顶沉降和拱肩收敛仅为方案 1 的 58%和 53%。从围岩压力来看，三种方案的共同点是右拱肩的压力都大于左拱肩的压力，但是方案 2 的左右拱肩的压力最小，并且左右相差不大。从三种方案的结果对比来看，不同的开挖步距对围岩的应力和变形有较大的影响，综合考虑施工环境和围岩的稳定等多方面因素，1 部与 5 部的开挖步距宜介于方案 2 和方案 3 之间，因此 1 部与 5 部之间的最佳步距介于 25 m 和 30 m 之间。

表 4 不同的开挖步距引起围岩压力及位移的对比

Tab. 4 The comparison of surrounding rock pressure and displacement is caused by different excavation steps

方案	拱顶沉降 /mm	拱肩收敛 /mm	围岩压力/kPa	
			左拱肩	右拱肩
1	48	17	56	367
2	35	14	48	324
3	28	9	52	327

根据底部双导洞超前法的模拟结果，在隧道开挖过程中，上半断面的最佳开挖高度为 5.4 m，不仅可以保证双导洞可以顺利的降水，还能有效的控制围岩的变形。综合考虑导洞内施工作业环境、综合工效及施工均衡性等因素，按设计规范施工并采取合理安全措施，1 部与 5 部之间的合理步距范围为 25~30 m。考虑到大断面隧道的特点，要求支护结构尽可能快封闭，因此，确定 1 部与 5 部的距离取 25 m 为宜。

3.3 优化施工方案的稳定性分析

为进一步确定优化参数后的底部双导洞超前法施工的稳定性，确保施工安全、支护结构变形量可控，对优化参数后的施工方案进行了数值模拟分析，分析了隧道施工中围岩位移、支护结构受力及围岩塑性区的特点，研究了优化参数后施工方案的稳定性。

3.3.1 围岩位移

图 9 为开挖方案数值模拟沉降曲线，由此可以看出，在双导洞超前法开挖过程中，拱顶的沉降速率比左右两侧拱肩的沉降速率略大。左侧拱肩与右侧拱肩的变化趋势较为一致，最终的沉降量

也相差不大,在 30 mm 左右,而拱顶在开挖到 20 步以后,也就是 5 部开始开挖,沉降速率急剧增大,一直到 7 部开挖结束,沉降速率趋于稳定,最终沉降达到 37 mm。

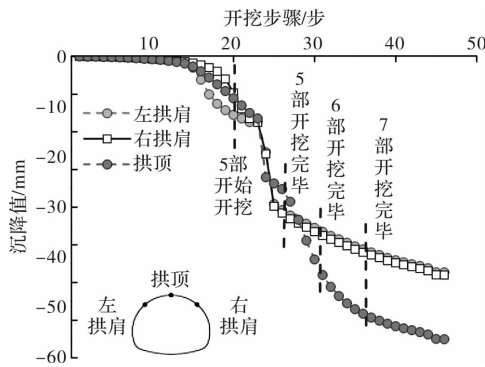


图 9 数值模拟沉降曲线

Fig. 9 Numerical simulation results of the settlement

图 10 为数值模拟收敛曲线,可以看出,左下导洞与右下导洞的收敛变化趋势基本一致,并且数值不大,稳定在 15 mm;然而拱肩的收敛值则较大,由于受 5 部开挖的影响,收敛变形相对来说较大,施工时要引起重视。

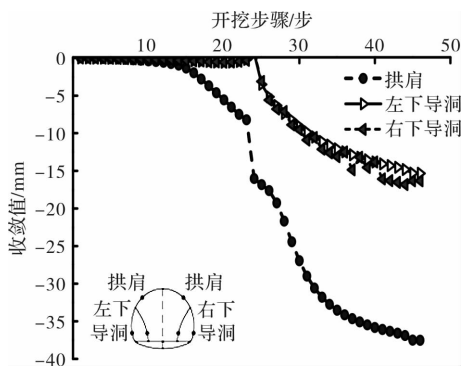


图 10 数值模拟收敛曲线

Fig. 10 Numerical simulation results of the convergence

3.3.2 支护结构受力

隧道支护结构受力云图如图 11 所示,可以看出,右侧拱肩处出现正弯矩的最大值,达到 $35.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$,负弯矩的最大值出现在边墙处,达到 $31.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。图 12 给出了临时支护拆除前后初支的应力变化图,由图可见:左拱腰处的支护应力增长最大,增值达到 7.4 kPa ,占比 37.7% ,其他部位的增值也较大,最小的也有 17.7% ,由此可以看出,拆除临时支撑对支护的影响较大,是施工中的关键步骤,所以施工时要严格控制拆除临时支撑的长度。同时,考虑现场施工的情况,对于隧道的开挖,由于下断面双导洞超前,如上断面分部施工将造成初支钢架分多次拼装,安装困难,钢架受力不好,影响整体支护质量。而且粉细砂围岩施

工不宜按从上到下顺序分多次接腿开挖,每接一次腿,流一次砂,拱架沉降变形一次,应尽量减少拱架接腿次数。

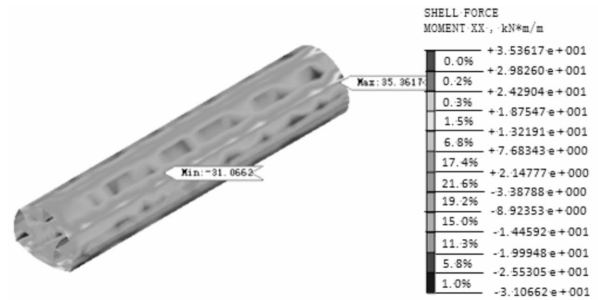


图 11 支护结构受力云图

Fig. 11 Stress nephogram of support structure

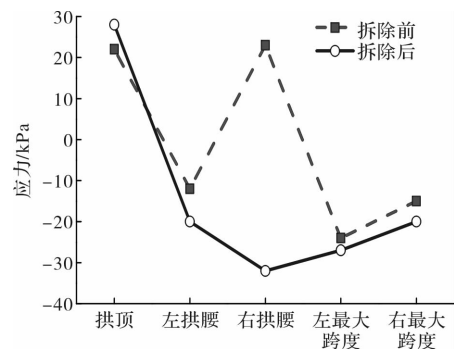


图 12 临时支护拆除前后支护应力变化

Fig. 12 The variation of support stress before and after remove the temporary support

3.3.3 塑性区

随着隧道施工的逐步推进,地应力在施工过程中不断释放,隧道围岩部分区域会发生塑性变形,由此说明,由于开挖导致地应力不断变化,最终部分围岩慢慢超过其屈服强度,从弹性变形进入了塑性变形阶段。隧道开挖引起的塑性区分布如图 13 所示,通过分析可知,塑性区主要集中在拱脚区域,桃树坪隧道为双线隧道,跨度比较大,此种工法开挖产生的塑性区较大。因此开挖时要对围岩重视,选取合适的支护措施,及时施做二衬,同时注意加强监测来观察围岩的变化。

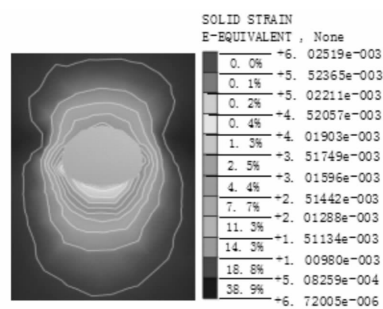


图 13 围岩塑性区

Fig. 13 Plastic zone of surrounding rock

4 结论

结合桃树坪隧道工程,通过现场监测和数值模拟优化对富水弱胶结粉细砂隧道的施工技术进行研究,得到以下结论:

(1)从降水、施工工序、施工难易程度等方面出发,对提出的施工方案进行比选,提出了一种新的适合富水弱胶结粉细砂地层隧道施工方案,即底部双导洞超前施工工法。

(2)从现场监测数据来看,围岩右拱肩处的压力偏大,这是受到隧道右侧存在围岩外挤的现象和隧道内水量较大的综合影响,导致隧道内各观测点的围岩应力分布不太均匀,所以施工过程中,右侧的支护强度要加强;从围岩的位移来看,变形都在合理范围内。

(3)数值模拟分析表明隧道开挖5部、6部和7部产生的沉降占总沉降比例达到75%以上,同时拆除临时支撑对支护的影响较大,所以要严格控制拆除临时支撑长度,通过施工方案优化,确定了上半断面的最佳开挖高度为5.4 m,1部与5部之间的合理步距范围为25~30 m。

(4)基于数值模拟和现场监测结果的综合分析,底部双导洞超前的施工方法适合富水弱胶结粉细砂隧道的施工,能够保证围岩的稳定性,确保施工安全。

参考文献 References

- [1] 宋战平,张丹锋,曲建生,等.承压富水砂土地层桩洞法施工变形控制研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(1):33-38.
SONG Zhanping, ZHANG Danfeng, QU Jiansheng, et al. Study on the deformation control of PBA construction method in pressure water sand stratum[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 33-38.
- [2] 易小明,张顶立,陈铁林.厦门海底隧道地层变形监测与机制分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(11):2302-2308.
YI Xiaoming, ZHANG Dingli, CHEN Tielin. Stratum deformation monitoring and mechanism analysis of Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2302-2308.
- [3] 吉小明,吕纬.含水砂层隧道围岩失稳破坏机制及控制研究现状综述[J].岩土力学,2009,(S2):291-296.
JI Xiaoming, LÜ Wei. Review of research on instability failure mechanism and stability control of tunnel surrounding rock in water-bearing sandy ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 291-297.
- [4] 何珺,张成平,杨公标.砂卵石地层小净距隧道渐进性破坏过程试验研究[J].土木工程学报,2015,48(S1):362-367.
HE Jun, ZHANG Chengping, YANG Gongbiao. Test study on progressive failure of closely spaced tunnel in sandy cobble ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 362-367.

- [5] 何川,曾东洋.砂性地层中地铁盾构隧道管片结构受力特征研究[J].岩土力学,2007,28(5):909-914.
HE Chuan, ZENG Dongyang. Research on mechanical characteristics of metro shield tunnel segment in sandy strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 909-914.
- [6] 张旭东.土压平衡盾构穿越富水砂层施工技术探讨[J].岩土工程学报,2009,31(9):1445-1449.
ZHANG Xudong. Construction technology of earth pressure balance shield in watery sandy stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1445-1449.
- [7] 罗平.含水弱胶结砂岩隧道地层特性及施工技术研究[D].北京:北京交通大学,2011.
LUO Ping. Research on the engineering properties and tunnelling construction technologies of poorly cemented sandstone aquifer [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [8] 郭振超.穿越富水饱和粉细砂地层双线客专隧道综合施工技术研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
GUO Zhenchao. Through the research on construction technique of saturated water rich sand stratum double passenger tunnel[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [9] SONG Z P, YANG T T, JIANG A N, et al. Experimental investigation and numerical simulation of surrounding rock creep for deep mining tunnels[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining & Metallurgy, 2016, 116(12): 1181-1188.
- [10] LEE I M, NAM S W. The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(1): 31-40.
- [11] LEE I M, NAM S W, AHN J H. Effect of seepage forces on tunnel face stability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2): 342-350.
- [12] BRACHMAN R W, MARTIN C D, GILLISS S A. Grout field trials in outwash sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(1): 1-11.
- [13] LEE S W, JUNG J W, NAM S W, et al. The influence of seepage forces on ground reaction curve of circular opening[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2007, 22(1): 28-38.
- [14] 张建斌.厦门翔安海底隧道陆域段CRD法位移监测分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S2):3653-3658.
ZHANG Jianbin. Displacement monitoring analysis of Xiamen Xiang'an subsea tunnel in landside section constructed with CRD method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 3653-3658.
- [15] 王秀英,谭忠盛,王永红,等.兰渝铁路含水弱胶结砂岩隧道地层特性试验研究[J].土木工程学报,2015,48(S1):191-195.
WANG Xiuying, TAN Zhongsheng, WANG Yonghong, et al. Experimental investigation on the formation characteristics for weakly cemented sandstone aquifer tunnels in Lan-Yu Railway Line[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 191-195.
- [16] 韩现民.西格二线关角隧道浅埋砂层段施工技术及其力学效应研究[J].岩土力学,2010,31(S2):297-302.
HAN Xianmin. Study of construction technology and mechanical effect of Guanjiao tunnel in shallow-buried sandy stratum in Xining-Golmud 2nd Line[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 297-302.
- [17] 苏秀婷.青岛地铁富水砂层隧道开挖施工风险与变形规律研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
SU Xiuting. Research of tunnel excavation risk and settlement in water-enriched soil layers of Qingdao metro[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.

(编辑 沈波)