

文章编号: 1674—8247(2023)06—0007—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.06.002

浅埋超大跨隧道洞口段围岩稳定性研究

张 军¹ 麻建飞² 刘夏冰^{2,3} 吴 瑞² 王胜虎¹

(1. 中铁大桥局集团第四工程有限公司, 南京 210031;

2. 北京交通大学, 北京 100044;

3. 广东华路交通科技有限公司, 广州 510420)

摘 要:为保证浅埋超大跨高速铁路隧道洞口段施工稳定性,采用数值模拟和现场实测研究了浅埋超大跨高速铁路隧道洞口段施工时的围岩稳定性,结果表明:(1)浅埋超大跨隧道洞口段施工中导洞核心土的开挖是控制围岩变形的关键工序,洞口段偏压会导致围岩拱脚局部应力集中;(2)施工引起的围岩沉降大致分为左右导洞开挖阶段、中导洞核心土开挖阶段和拆撑阶段,其中,中导洞核心土开挖 30 d 内是施工危险期;(3)洞口段采用的超前大管棚、超前小导管、超前预应力锚杆等措施,成功解决了洞口段围岩变形控制困难的问题,拱顶沉降最大值为 34.5 mm,水平收敛最大值为 12.5 mm。研究成果可为类似浅埋超大跨山岭隧道施工提供参考。

关键词:浅埋超大跨隧道;洞口段;围岩稳定性;监控量测

中图分类号: U451.2 **文献标志码:** A

A Study on Rock Stability in Portal Section of Shallow Extra-large-span Tunnel

ZHANG Jun¹ MA Jianfei² LIU Xiabing^{2,3} WU Rui² WANG Shenghu¹

(1. The Fourth Engineering Co., Ltd. of China Railway Major Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanjing 210031, China; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, China)

Abstract: In order to ensure the stability of construction in the portal section of a shallow extra-large-span tunnel of high-speed railway, numerical simulations, and on-site measurements were conducted to study the rock stability during the construction of the tunnel portal. The results indicate the following: (1) Excavation of the core soil of the center pilot tunnel is the critical process for controlling rock deformation during the construction of the portal section of the shallow extra-large-span tunnel. Imbalanced pressure at the portal section can cause localized stress concentration in the rock arch springing. (2) The rock settlement caused by construction can be roughly divided into three stages: the excavation of the left and right pilot tunnels, the excavation of the core soil of the center pilot tunnel, and the dismantling of supports. Among them, the first 30 days after the excavation of the core soil of the center pilot tunnel represent a critical period for construction. (3) Measures such as advanced large pipe sheds, advanced small guide pipes, and advanced pre-stressed anchor rods used at the tunnel portals have successfully addressed the difficulty of controlling the rock deformation. The

收稿日期: 2022-09-05

作者简介: 张军(1983-),男,工程师。

基金项目: 中铁大桥局集团第四工程有限公司资助基金项目(C19048530)

引文格式: 张军,麻建飞,刘夏冰,等. 浅埋超大跨隧道洞口段围岩稳定性研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 7-12.

ZHANG Jun, MA Jianfei, LIU Xiabing, et al. A Study on Rock Stability in Portal Section of Shallow Extra-large-span Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 7-12.

maximum settlement at the crown is 34.5 mm, and the maximum horizontal convergence is 12.5 mm. The findings can provide a reference for the construction of similar shallow extra-large-span mountain tunnels.

Key words: shallow extra-large-span tunnel; portal section; rock stability; monitoring measurement

随着我国交通建设的快速推进,越来越多的多线隧道开始出现在工程实践中,且隧道开挖跨度有不断增大的趋势^[1]。开挖跨度 25 m 以上的铁路隧道近年来时有出现,如开挖跨度超过 25 m 的乌蒙山 2 号隧道、新考塘隧道过渡段开挖跨度超过 30 m^[2]。

超大跨隧道因其更具扁平化的特点,一般采用分步开挖工法,这导致了支护结构的受力复杂反复、围岩稳定性控制困难,给隧道的施工安全带来了巨大挑战。龚彦峰^[3]等以新考塘大跨隧道为背景,制定了支护参数和施工方法;魏龙海^[4]等研究了拱北隧道的施工及其支护结构力学行为;庄金波^[5]等对曾家坪大跨车站隧道的施工技术进行了总结研究;崔光耀^[6]等以天坪大断面铁路隧道为依托,研究了支护加固技术。目前,超大跨隧道支护结构和施工设计常以工程类比法为主,国内外尚未形成系统的特大断面隧道施工规范和标准。此外,受地形布局的影响,超大跨隧道的洞口段经常出现覆土浅、围岩条件差等问题,导致超大跨隧道围岩变形和施工稳定控制愈加困难。近年来,随着锚喷支护技术和分步开挖施工技术的快速发展,CD 法、CRD 法和钢架岩墙组合法已在超大跨隧道中成功应用,双侧壁导坑法就是目前超大跨隧道的常用分步开挖工法之一。然而,考虑到超大跨隧道洞口段工程地质条件复杂,高速铁路隧道施工控制条件苛刻,目前针对超大跨四线高速铁路隧道洞口段施工控制和围岩稳定性的研究仍需依托具体工程进行。

综上所述,本文依托开挖跨度达 26.3 m 的下北山四线高速铁路隧道,采用数值模拟和现场监测的方法对浅埋超大跨四线隧道施工控制技术和围岩稳定性进行了研究,研究成果可为类似浅埋超大跨四线高速铁路隧道的施工提供参考。

1 概况

1.1 工程概况

新建杭台高速铁路下北山隧道紧邻台州车站,南北方向穿越台州市下北山,设计为单洞四线隧道,1 号、2 号隧道长度分别为 107 m 和 412 m,覆土厚度为 6~57 m,开挖跨度达 26.3 m,开挖面积达 361.4 m²,是国内外较为少见的超大跨四线高速铁路隧道。隧道大部分断面的覆跨比不足 2.0,施工时对围岩变形控制的要求极为苛刻。

1.2 地质概况

下北山隧道地表覆盖为第四系全新统冲洪积质黏土,厚度 2~4 m,下覆地层为侏罗系上统西山头组凝灰岩。受风化作用,隧道洞口段围岩节理极为发育。岩块直径为 2~30 cm,节理裂隙间局部有 1~5 cm 厚的黏土层。围岩初始地应力场较为简单,勘察及施工中均未发现断层、褶皱等地质构造。围岩地下水较不发育。

1.3 支护结构及开挖方法

下北山隧道出口段的覆土小于 15 m,且变化大,施工时易产生坍塌等风险。下北山高速铁路隧道Ⅳ级围岩的支护结构如图 1 所示(以 2 号隧道为例)。

下北山四线高速铁路隧道拟采用双侧壁导坑法施工,具体的开挖工序如下:先开挖左导洞上、下台阶,台阶长度约 10~30 m,随后开挖右导洞(分上、下台阶),中导洞的 3 个台阶最后按序开挖(即图 1 中 5 部、6 部和 7 部、8 部),开挖 7 部、8 部后及时封闭整个初支并拆除临时支撑,随后分别施工二次衬砌仰拱、拱墙结构。

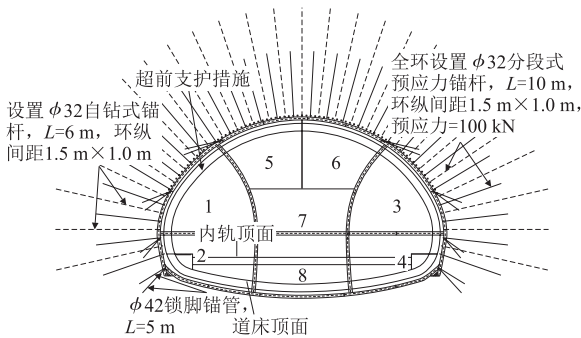


图 1 下北山隧道Ⅳ级围岩工法及支护参数图

2 拟采用的围岩变形控制技术

下北山高速铁路隧道洞口段的覆土极浅、围岩整体较差、开挖跨度超大,多步爆破开挖势必会对围岩产生施工扰动,因此,必须有合理的围岩变形控制措施,以保证超大跨高速铁路隧道施工的顺利进行。以下对下北山高速铁路隧道洞口段拟采用的施工的围岩变形控制技术及其施作工艺进行分析研究。

2.1 超前大管棚支护技术

下北山隧道洞口段覆土变化大,围岩节理发育密

集,拟施打 $\phi 159$ mm 的长钢管为超前支护,用以控制围岩超前变形及开挖面挤出变形。

洞口段 $\phi 159$ mm 长管棚的打设长度为 25 ~ 33 m, 钢管采用壁厚 8 mm 的热轧无缝钢管, 环向间距 40 cm, 施工时应先预留部分核心土作为施打管棚的平台, 且应设置由 I20a 钢架及 C30 混凝土浇筑组成的导向墙。施工时先打设钢花管并注浆, 后打设钢管, 以便检查钢花管的注浆质量。钢花管上钻注浆孔, 孔径 10 ~ 16 mm, 每个截面设置 4 个注浆孔, 纵向间距 12.5 cm, 呈梅花形布置, 尾部留不钻孔的止浆段 110 cm; 钢管外插角为 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 。

2.2 超前小导管支护技术

下北山隧道洞口段拟采用单排 $\phi 42$ mm 小导管对围岩进行超前加固, 用以保证初期支护安装时的围岩稳定性, 超前小导管的设计参数如图 2 所示。

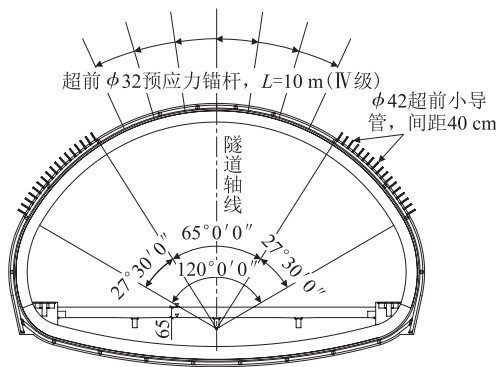


图2 超前小导管设计参数图

超前小导管的参数如下: 孔径为 50 mm, 外露 20 cm 支撑于开挖面后方的钢架上, 与钢架组成预支护体系; 根据围岩级别每环 34 ~ 36 根, 外径 42 mm, 壁厚 3.5 mm; 环向间距 40 cm, 外插角 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$, IV 级围岩地段超前小导管长 5.0 m, 尾部留不小于 100 cm 为止浆段, 注浆前先喷射混凝土封闭掌子面, 形成止浆盘, 再进行注浆。

2.3 超前预应力锚杆支护技术

为了进一步控制中导洞(拱部)开挖带来的围岩荷载, 围岩拱部(部分)采用超前预应力锚杆进行支护。IV 级围岩的中的预应力锚杆长度为 10 m, 环向间距为 1.0 m, 每榀钢架处设 7 ~ 9 根, 约为拱部 $50^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 范围, 如图 3 所示。

超前预应力中空锚杆采用 $\phi 32$ 涨壳式中空锚杆, 外插角均为 45° , 锚杆尾部与钢拱架牢固连接, 安装完成后锁紧螺母施加预应力, 预应力设计值为 100 kN。锚杆安装后要及时注浆避免塌孔堵塞浆液, 导致注浆

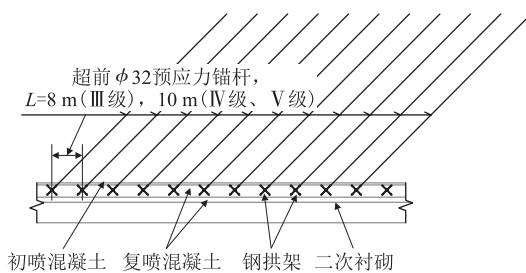


图3 超前预应力锚杆图

不饱满。

2.4 锚杆支护技术

下北山浅埋超大跨隧道还拟以预应力锚杆配合常规注浆锚杆主动控制围岩变形。锚杆施加预紧力可起到减跨作用, 随着围岩变形的增加, 靠近隧道的一侧会产生较大的拉应力。施作混凝土喷层可对围岩承载区起到强化作用, 保持整个支护体系的稳定性。

长度为 6 m 的短锚杆采用 $\phi 32$ 中空注浆锚杆, 长度 10 m 的长锚杆采用 $\phi 32$ 涨壳式预应力锚杆。施工时将涨壳式锚杆安装入孔后, 采用专用锚固剂锚固, 待一定时间达到锚固强度后, 施加预应力 (100 kN), 随后进行预应力监测。

3 洞口段开挖围岩稳定性分析

3.1 数值计算模型

基于 FLAC3D 程序建立三维数值模型对洞口段的围岩稳定性进行分析, 如图 4 所示(以下北山 2 号隧道洞口段里程 DK 215 + 430 ~ DK 215 + 450 为例)。该段为 IV 级围岩, 采用 Mohr-Coulomb 本构模型描述围岩力学行为, 初期支护采用实体单元和弹性模型模拟, 锚杆采用 Pile 单元模拟, 超前支护采用加固圈模拟。隧道开挖工序参照图 1 确定, 各导洞的台阶长 15 m, 开挖进尺 1 m。隧道开挖时约束模型四周法向位移和底部法向和切向位移, 收敛准则采用不平衡力收敛准则, 即不平衡力达到 $1e-5$ 时停止运算。围岩和支护结构的力学参数如表 1、表 2 所示^[7-9]。

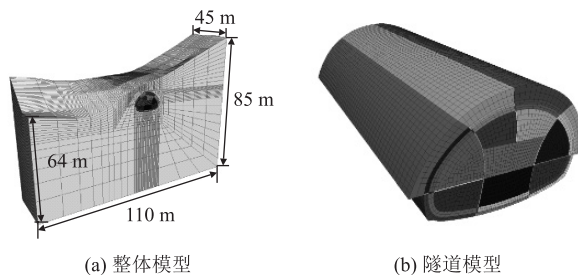


图4 数值计算模型图

表 1 围岩及支护结构力学计算参数表					
类型	E/Mpa	μ	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
Ⅳ级围岩	925	0.27	263	44.8	25.4
初支	28 000	0.2	—	—	23
二衬	29 500	0.25	—	—	23
临时支撑	200 000	0.3	—	—	78.6

表 2 锚杆计算参数表					
类别	弹性模量/GPa	切向粘结强度/(Pa·m)	切向刚度/Pa	法向粘结强度/(Pa·m)	法向刚度/Pa
锁脚锚杆	112.7	5.0e5	1.75e7	3.5e6	2.0e8
预应力锚杆	38.3	3.75e5	2.42e7	1.75e6	2.5e8

3.2 结果分析

3.2.1 围岩沉降分析

下北山浅埋超大跨四线高速铁路隧道洞口段施工完成后围岩沉降分布如图 5 所示(以左拱顶、右拱顶和拱顶为例),图中虚线 1~8 表示开挖顺序。

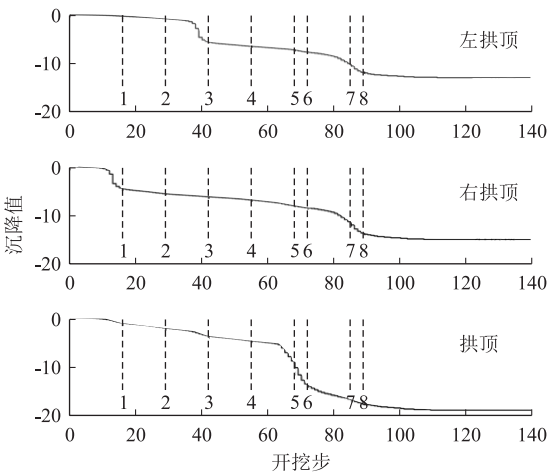


图 5 沉降分布图(mm)

由图 5 可知,隧道最终开挖完成、初期支护封闭时隧道拱顶围岩的最大竖向沉降值为 19.4 mm,且右侧围岩变形较大,这与隧道存在一定的偏压有关。根据计算结果,围岩变形与施工过程密切相关,对于拱顶沉降,中导洞 5 部、6 部的开挖使中导变形急剧增大,由于围岩变形与施工过程密切相关,是施工过程中影响最大的一步,且临时支撑拆除后,左、右导洞的顶部沉降仍会受到一定影响。

3.2.2 围岩塑性区发展

下北山浅埋超大跨四线高速铁路隧道采用双侧壁导坑法开挖后围岩塑性区分布如图 6 所示(以左右导洞开挖完成和隧道开挖完成为例)。

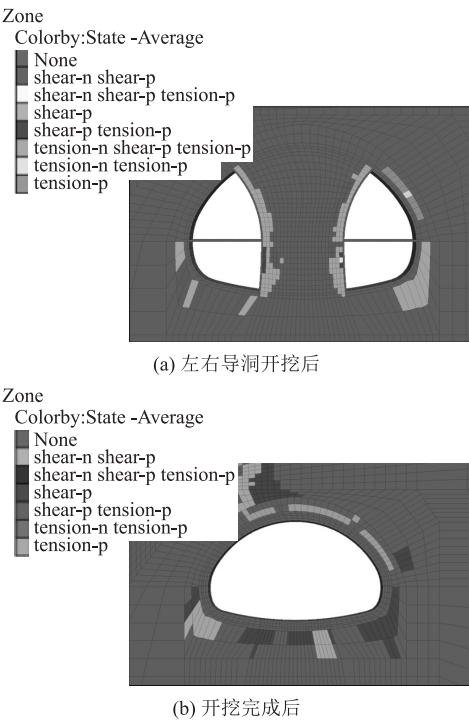


图 6 围岩塑性区分布图

由图 6 的计算结果可知,当左侧导洞开挖后,围岩塑性区沿着墙腰、墙脚等位置向围岩深部延伸,当右侧导洞开挖后,右侧顶部、拱脚围岩均出现了围岩塑性区,且左侧墙脚处围岩出现了受剪破坏。中导洞开挖前隧道拱部已出现剪切破坏区域,中导洞开挖后,拱顶围岩产生的剪切破坏区域较大,已经接近贯通地表,因此,施工中控制中部核心土开挖是控制围岩稳定性的关键。中导洞开挖完成后,随着拱顶围岩变形的增加,围岩产生应力重分布,拱脚应力产生集中,剪切破坏区域不断增加。

以上分析结果表明,施工时要防止中导洞(尤其是导洞 5 部、6 部)的开挖而造成拱顶围岩变形过大甚至坍塌,需要提前做好超前支护措施,严控其施工质量;拱脚处 4~6 m 范围处的围岩易处于剪切破坏状态,应防止发生破坏性失稳;临时支撑拆除后,存在偏压的全段容易产生不稳定性,应极力消除控制临时支撑拆除带来的不利影响。

3.2.3 围岩应力状态分析

下北山浅埋超大跨高速铁路隧道施工完成后围岩应力状态如图 7 所示(以 3 部、4 部开挖后和隧道整体开挖完成后竖向应力为例)。

由图 7 可知,下北山浅埋超大跨隧道洞口段在开挖过程中围岩拱顶会出现一定的拉应力,当开挖完成时拱顶最大拉应力为 0.3 MPa,此拉应力会随着中导

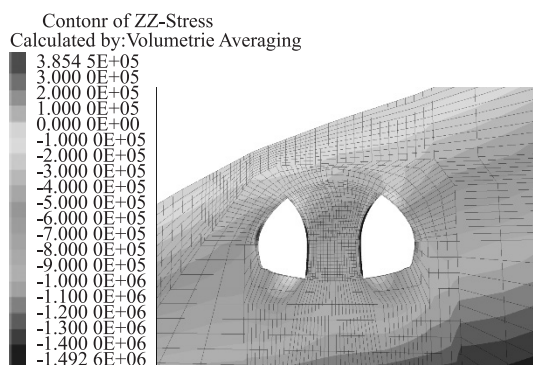
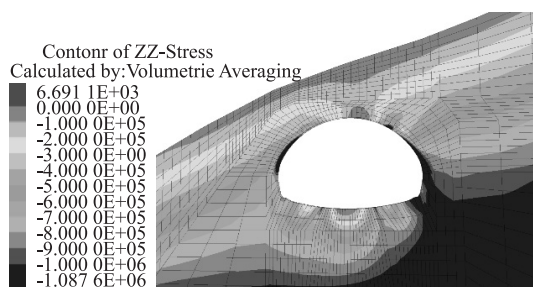
(a) 导洞3部、4部开挖后围岩 σ_{zz} 应力状态(b) 最终 σ_{zz} 应力状态

图7 围岩的应力分布图

洞上台阶的开挖而急剧增加。同时,由于该洞口段存在偏压,施工过程中,右侧拱脚处围岩会出现明显的应力集中。施工时可通过施打锁脚锚管、注浆等措施加强控制右侧拱脚围岩的稳定性。

3.2.4 开挖进尺及导洞间隔的影响

当开挖进尺分别为1 m、2 m、3 m时,导洞4部、5部间隔为5 m和10 m时,取模型 $y=25$ 的横断面作为监测断面,得到的拱顶围岩沉降曲线如图8所示。

由图8可知,当导洞4部、5部间隔为5 m时,拱顶累计沉降为14.6 mm,间隔为10 m时累计沉降为10.8 mm,表明导洞之间的间隔越大,拱顶累计沉降越小;当隧道开挖进尺为1 m、2 m和3 m时,拱顶累计最大沉降分别为14.5 mm、13.6 mm和10.8 mm,表明隧道开挖进尺越小,拱顶累计沉降值越小。

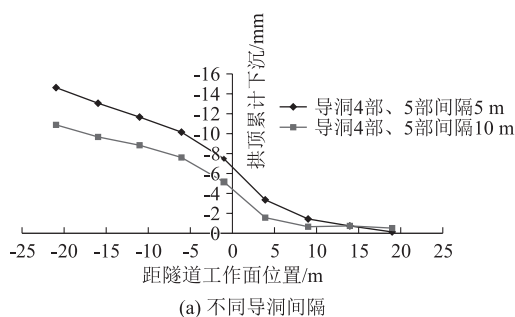
4 现场实测分析

4.1 现场监测点布置

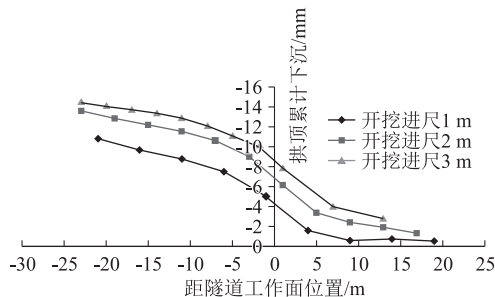
在下北山隧道施工过程中,对围岩的拱顶沉降、水平收敛等进行了现场监测,监测点布置如图9所示,共设置3条水平收敛线(SL1~SL2、SL3~SL4、SL5~SL6)。

4.2 监测结果分析

下北山隧道洞口段 DK 215 + 435 断面的围岩拱顶沉降、水平收敛变化曲线如图10所示,图中IV阶段



(a) 不同导洞间隔



(b) 不同开挖进尺

图8 拱顶围岩沉降曲线图

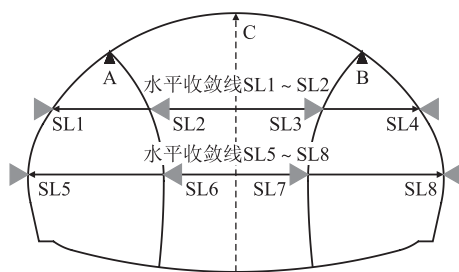


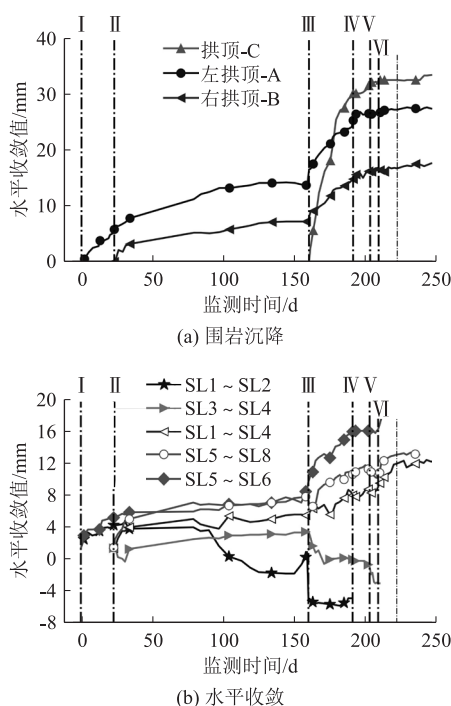
图9 监测点布置示意图

为拆撑阶段,考虑到7部、8部开挖、临时支撑的拆除工序间隔时间短,均合并考虑为IV阶段。

由图10的实测结果可知:

(1) 围岩沉降的发展大致可分为3个阶段。左右导洞开挖阶段:1部、3部开挖后围岩沉降开始增大,并在5部、6部开挖前基本稳定;中导洞核心土开挖阶段:左、右导洞上台阶开挖后立即施作初期支护与临时支护结构,保证5部、6部开挖后左、右导洞的围岩变形无明显突变,但是,该步开挖后,A点、B点的沉降值增大了6~10 mm,左、右导洞顶部观测点的围岩沉降值分别约为27.4 mm和16.4 mm;拱顶沉降监测值在开挖后30 d内急剧增大,该阶段是施工的危险期,在拆撑阶段施工时围岩变形已处于基本稳定阶段。

(2) 拱顶沉降的监测值大于模拟结果,但沉降在二衬施工前围岩变形已稳定,小于设计文件中的预留变形量(100~150 mm),比常规双线铁路V级围岩变形值更小,可见本文提出的施工技术有效抑制了洞口



注: I 为 1 部开挖, II 为 3 部开挖, III 为 5 部、6 部开挖, IV 为 2 部开挖, V 为 4 部开挖, VI 为拆撑阶段

图 10 围岩变形曲线图

段拱顶下沉,保证了施工安全。

(3) 水平收敛方面,在 5 部、6 部开挖前,导洞的 3 条水平收敛测线(SL1~SL2、SL3~SL4、SL5~SL6)在变形至一定阶段保持稳定;该步开挖后,水平收敛均有突变现象发生,最大幅度为 8.2 mm,测线 SL1~SL2 的测值为负值,这表明临时支撑在该步开挖后向导洞外侧产生了变形,此时临时支撑体系开始产生应力转换;SL1~SL4、SL5~SL8 水平收敛线在该步开挖后增加值分别为 3.7 mm 和 6.9 mm,核心土的开挖对墙腰位置(SL5~SL8 收敛线)的水平收敛影响更大;在拆撑阶段,整个断面的水平收敛变形已趋于稳定。

(4) 初期支护的及时封闭对隧道稳定十分重要,双侧壁导坑法中临时支撑的受力在上台阶成拱后逐步开始转移至初期支护,现场初期支护也未出现异常开裂现象,这表明本文采用的锚杆支护、超前支护等围岩变形控制技术是有效的。

5 结论

(1) 数值模拟结果表明,对于开挖跨度达 26.3 m 的浅埋超大跨隧道洞口段,中导洞核心土的开挖是围岩变形控制的关键工序,洞口段的偏压会导致隧道围岩拱脚局部应力集中。

(2) 浅埋超大跨隧道洞口段采用的超前大管棚、超前小导管、超前预应力锚杆等围岩变形控制措施,

提高了围岩稳定性,施工期支护结构状态稳定,解决了洞口段围岩变形控制困难的问题。

(3) 现场监测结果表明,双侧壁导坑法施工引起的围岩沉降大致分为 3 个阶段:左右导洞开挖阶段、中导洞核心土开挖阶段、拆撑阶段。其中,中导洞核心土开挖阶段是影响最大的施工阶段,该步开挖 30 d 内是施工危险期,拆撑阶段围岩变形已经基本进入稳定阶段。

(4) 实测拱顶沉降最大值为 34.5 mm,变形量小于预留变形量(100 ~ 150 mm),水平收敛最大值为 12.5 mm,临时支撑的受力在上台阶成拱后逐步转移至初期支护,现场初期支护也未出现异常开裂现象,采用的围岩变形控制技术是行之有效的。

参考文献:

- [1] 张俊儒,吴洁,严丛文,等. 中国四车道及以上超大断面公路隧道修建技术的发展[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 14-31.
ZHANG Junru, WU Jie, YAN Congwen, et al. Construction Technology of Super-large Section of Highway Tunnels with Four or More Lanes in China [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 14-31.
- [2] 章慧健,龚伦,仇文革,等. 隧道分部开挖的围岩松动区演变分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2323-2329.
ZHANG Huijian, GONG Lun, QIU Wenge, et al. Evolution of Loosened Zone of Surrounding Rock for Tunnels Constructed by Multi-partition Excavation Method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2323-2329.
- [3] 龚彦峰,张俊儒,徐向东,等. 全风化花岗岩富水地层超大断面隧道设计技术[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(10): 79-85, 92.
GONG Yanfeng, ZHANG Junru, XU Xiangdong, et al. Design Technology for Super Large Cross Section Tunnel in Stratum of Completely Weathered Granite with Abundant Water [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(10): 79-85, 92.
- [4] 魏龙海,程勇,刘继国. 超浅埋大断面滨海软土隧道施工工法研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1141-1149.
WEI Longhai, CHENG Yong, LIU Jiguo. Construction Method of Ultra-shallow Super-large Cross-section Tunnel in Coastal Soft Soil Strata: Case Study on Gongbei Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(11): 1141-1149.
- [5] 庄金波,薛书琢,张玉杰. 曾家坪 1# 大跨车站隧道施工技术[J]. 隧道建设, 2000(4): 37-42.
ZHUANG Jinbo, XUE Shuzhuo, ZHANG Yujie. Construction Technology of Zengjiaping 1# Large Span Station [J]. Tunnel Construction, 2000, (4): 37-42.
- [6] 崔光耀,朱建伟,姜冲,等. 富水岩溶大断面铁路隧道超前支护加固方案研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(1): 27-31.
CUI Guangyao, ZHU Jianwei, JIANG Chong, et al. Study on Advance Support Reinforcement Scheme for Large-section Railway Tunnel in

(下转第 18 页)

(4) 桩端土体处于三维应力状态, 桩基的破坏和承载机理不同于浅基础, 随着竖向荷载的不断增大, 桩端土体具有多次弹-塑性转化的特征, 承载力会很快恢复并进一步提高。

参考文献:

[1] 吕福庆, 吴文. 桩的垂直静载试验极限承载力判定方法综述[J]. 岩土力学, 1995, 16(4): 85-93.
LV Fuqing, WU Wen. A General Introduction on Determining the Limit Bearing Capacity in Static-load Experiment for Piles Depth of Pile-top Descent [J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(4): 85-93.

[2] 董天文, 郑颖人, 唐晓松. 强度折减法判定桩基础极限荷载的尖点突变条件[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(3): 373-378.
DONG Tianwen, ZHENG Yingren, TANG Xiaosong. Cusp Point Condition for Estimating Ultimate Load of Pile Foundation Based on Strength Reduction Method [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(3): 373-378.

[3] 董天文, 郑颖人. 桩基础双折减系数有限元强度折减法极限分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3148-3154.
DONG Tianwen, ZHENG Yingren. Strength Reduction of Limit Analysis Finite Element Method for Pile Foundation by Two Reduction-factors [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3148-3154.

[4] 刘祥沛, 董天文, 郑颖人. 桩基础承载力室内试验与数值计算研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 719-728.
LIU Xiangpei, DONG Tianwen, ZHENG Yingren. Research on

the Failure Characteristics of Pile Foundation by the Laboratory Experiment and Numerical Calculation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 719-728.

[5] 刘祥沛, 董天文, 郑颖人. 有限元荷载增量法在判定桩基础极限荷载的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(5): 144-148, 172.
LIU Xiangpei, DONG Tianwen, ZHENG Yingren. Application of Incremental Load Method of FEM in Determining the Ultimate Load of Pile Foundation [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(5): 144-148, 172.

[6] JGJ 106-2014 建筑基桩检测技术规范[S].
JGJ 106-2014 Technical Code for Testing of Building Foundation Piles[S].

[7] 史永跃, 王奎华, 董天文, 等. 真空负压静力试桩方法关键技术试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1699-1708.
SHI Yongyue, WANG Kuihua, DONG Tianwen, et al. Study of Key Technologies of Vacuum Negative-pressure Static Pile Load Test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1699-1708.

[8] 张忠苗, 辛公锋, 夏唐代. 深厚软土非嵌岩超长桩受力性状试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 64-69.
ZHANG Zhongmiao, XIN Gongfeng, XIA Tangdai. Test and Research on Unrock-socketed Super-long Pile in Deep Soft Soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4): 64-69.

[9] 陈子文. 郑西客运专线桥梁桩基摩阻力试验研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(3): 42-48.
CHEN Ziwen. Experimental Study on Frictional Resistance of Bridge Pile Foundation of Zhengzhou-Xi'an Passenger Dedicated Line [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(3): 42-48.

(上接第12页)

Water-rich Karst Area [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 27-31.

[7] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S].
TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnels [S].

[8] 王文谦. 大跨度隧道围岩压力拱效应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
WANG Wenqian. Study on Pressure Arch Effect of Surrounding Rock

of Long-span Tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[9] 于清浩, 郭庆昊, 王文谦, 等. 浅埋超大跨四线高铁隧道开挖力学特性研究[J]. 能源与环保, 2019, 41(7): 298-303.
YU Qinghao, GUO Qinghao, WANG Wenqian, et al. Study on Excavation Characteristic of Shallow-buried Super-span Four-line High-speed Railway Tunnel [J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(7): 298-303.