

引用本文:李大军,何鹏飞,宋克志,等.复杂硐室交叉口转向挑顶施工力学行为研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(2):172-182.

LI Dajun, HE Pengfei, SONG Kezhi, et al. Research on construction mechanical behavior of turning overhanging at intersection of complex chamber[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 172-182.

DOI:10.19815/j.jace.2022.11120

复杂硐室交叉口转向挑顶施工力学行为研究

李大军¹, 何鹏飞², 宋克志³, 王森巍⁴

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 264038; 2. 中交一公局第八工程有限公司, 天津 300171;
3. 鲁东大学 土木工程学院, 山东 烟台 264025; 4. 烟台市政府投资工程建设服务中心, 山东 烟台 264030)

摘要:长大隧道的辅助坑道与正洞交叉段施工工序繁多, 围岩易受到开挖扰动, 进而产生失稳破坏。以伏牛山隧道为工程背景, 借助有限元软件 PLAXIS3D 构建三维数值模型, 模拟了辅助坑道进入正洞的施工过程, 研究了小导洞转向挑顶施工及正洞反向台阶法开挖的施工力学行为与三维空间效应, 分析了施工过程中围岩应力、拱顶沉降、洞周横向收敛位移及围岩塑性区演化规律。结果表明: 横向通道交叉口段施工会导致交叉口附近风机房正洞围岩产生应力重分布, 在正洞拱顶及右拱腰处形成拉应力, 沿风机房纵向影响范围约为 1 倍洞径; 风机房拱顶最终沉降量为 3.7~3.9 mm, 在交叉口及其附近, 以小导洞爬坡挑顶阶段和风机房正洞反向开挖通过时引起的拱顶沉降量最大, 小导洞转向挑顶施工引起的拱顶总沉降量相对较小; 联络通道左侧进洞使得正洞左侧横向位移增加, 进而导致正洞左右两侧横向位移呈现不对称分布; 交叉口处联络通道与风机房产生了连续的塑性区, 塑性点主要在开挖侧壁, 拱腰处最为集中, 向上延伸至拱肩, 拱脚处向下发展至一定深度; 针对小导洞扩挖施工过程中交叉口、上台阶侧壁、底面出现的少量受拉破坏点, 施工中应对这些部位予以重点关注, 及时施作初期支护, 防止局部掉块。

关键词:隧道工程; 交叉口; 转向挑顶; 施工力学行为; 三维空间效应

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)02-0172-11

Research on construction mechanical behavior of turning overhanging at intersection of complex chamber

LI Dajun¹, HE Pengfei², SONG Kezhi³, WANG Senwei⁴

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 264038, Shandong, China;
2. The Eighth Engineering Co., Ltd. of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Tianjin 300171, China;
3. School of Civil Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China; 4. Investment Project Construction Service Center of Yantai Government, Yantai 264030, Shandong, China)

Abstract: The construction processes of the intersection parts of the auxiliary tunnel and the main tunnel are complex, easily causing damage to the surrounding rock mass. On the background of the Funiushan Tunnel, a three-dimensional numerical model was built, and the construction processes of the auxiliary tunnel into the main tunnel was simulated using the finite element software PLAXIS3D. The construction mechanical behavior and three-dimensional space effect of

收稿日期: 2022-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978322)

作者简介: 李大军(1979-), 男, 高级工程师, E-mail: ytytskz2007@163.com。

通信作者: 宋克志(1970-), 男, 工学博士, 教授, E-mail: ytytskz@126.com。

the excavation of the intersection parts of the auxiliary tunnel and the main tunnel were studied. The evolution laws surrounding rock mass status, roof settlement, displacement around the tunnel and rock plastic zone were investigated in the construction process. The results show that the construction of the intersection section of the transverse channel will affect the stress distribution of the surrounding rock mass and generate tensile stress near the intersection section. Moreover, the main influence range is about twice the diameter of the tunnel. The final settlement of the vault of the fan room is 3.7-3.9 mm. In the vicinity of the intersection section, the settlements caused by the construction stage of the small guide hole climbing and the reverse excavation of the main hole of the fan room are greater than that caused by the construction of small guide hole. The construction of the contact channel in the left side causes large lateral displacement on the left side of the main hole, resulting in asymmetrically distribution of the displacement. Continuous plastic zones are formed in the fan room and contact channel at the intersection. The plastic points are concentrated in the neighbored of the arch waist and arch foot on both sides of the main tunnel. In view of a small number of tensile failure points at the intersection, the side wall of the upper step and the bottom surface during the expansion of the small pilot tunnel, these parts should be paid attention to in the construction, and the initial support should be applied in time to prevent local falling blocks.

Key words: tunnel engineering; intersection section; turning overhanging; construction mechanical behavior; three-dimensional space effect

0 引言

长大隧道通常设置斜井或横洞等辅助坑道进入正洞,以增加工作面、提高效率^[1-2]。辅助坑道与正洞交叉段支护结构和施工工序复杂多变,围岩经历多次扰动,围岩应力分布和支护结构变形规律复杂,易出现应力集中现象,不利于围岩稳定^[3-4]。因此,有必要探明交叉口转向挑顶施工的力学行为,以保证隧道施工安全。

挑顶进洞是辅助坑道与正洞交叉口处施工的常用工法^[5-8],具体方案有多种形式,如大包法、小包法、小导洞垂直挑顶等,许多学者对挑顶进洞的工程应用进行了研究。薛平等^[9]分析了软弱围岩隧道交叉段施工的围岩变形特性,提出采用“小导洞方式”开挖斜井与正洞交叉口,并通过加强支护及紧跟二衬施工的方式以保证围岩三维受力的稳定性。薛模美等^[10]在斜井转正洞施工中进行了小导洞法与大包法的对比,首次将大包法运用到客运专线隧道斜井转正洞实际工程中,并给出了斜井转正洞开挖时初期支护方案的调整结果;高地应力软岩条件下斜井进正洞的挑顶施工受力状态更加复杂。于家武等^[11]提出“以索代撑”的施工方法,即小孔径预应力锚索代替托梁和支撑梁,现场围岩变形监测效果证明了此方法是安全可靠的。为保证软弱围岩大跨地

铁隧道斜井段施工变形量在合理范围内,刘毅等^[12]介绍了适用于城市地铁隧道的垂直挑顶方法的施工要点及流程,并结合数值模拟对提出的工法进行了合理性验证。闫自海等^[13]以杭州紫之隧道为依托,提出了一种导洞扩挖,而后横向开挖,最后反向开挖的施工方案,并采用有限元数值模拟验证了该方案的可行性,分析了隧道不同位置的受力情况,结果表明,采用该方案围岩所受拉应力主要集中在拱顶、拱底及中间岩柱部分,所受压应力则主要位于拱腰附近。宋金贵^[14]依托成兰铁路平安隧道横洞进正洞三岔口工程比较了增加支洞施工、横洞断面不同比扩大垂直进正洞挑顶设计、横洞断面同比例扩大垂直进正洞挑顶设计3种施工方案,并从围岩稳定性、开挖量、施工断面、施工进度与安全性等方面进行了评价。安永林等^[15]在浏阳河隧道工程中采用了竖井转正洞的施工方案,研究表明采用该方案能够有效解决正洞开挖过程中存在的作业平台过高的问题,隧道正洞初期支护各点受力均能满足安全需求。某山岭大断面隧道斜井进洞三岔口段受力情况复杂,斜井末段采用上下台阶法开挖,主洞采用三台阶法开挖,焦华喆等^[16]利用ABAQUS软件分析了隧道开挖后的围岩应力状态,并对围岩及支护变形进行了监控量测。针对软弱地层中斜井进正洞传统挑顶施工工序复杂、受力转换频繁的问题,张洪达^[17]

研究了一种新的上联洞+门架法挑顶施工方法,解决了斜井衬砌和正洞挑顶施工过程相互干扰的问题,在保障施工安全的条件下大大加快了施工进度。刘毅等^[18]依托深圳地铁工程对纵向爬坡导洞法和同心圆曲拱墙扩挖法两种施工方法进行数值模拟,发现纵向爬坡导洞法在应力大小、净空收敛、沉降方面均优于同心圆曲拱墙扩挖法。

斜井进洞段围岩受力转换频繁,易出现应力集中现象^[19],因此对斜井进洞段隧道施工力学行为及受力特征进行研究尤为重要。章剑等^[20]借助有限差分软件模拟了八苏木隧道斜井段“小包法”施工过程中围岩应力重分布的影响以及塑性区的发展规律。王景春等^[21]对比了青秀山地铁隧道施工通道与站台隧道三岔口采用“大包法”和“小包法”施工的不同力学行为特征,并对数值模拟结果中出现的部分位移较大或出现拉应力的位置提出了针对性措施,结果表明“小包法”在围岩位移、应力、塑性区范围等方面均优于“大包法”。陈佳玮等^[22]分析了大跨度地铁隧道挑顶施工过程中的围岩力学行为,结果表明斜井开挖以及正洞开挖顺序均会对另一方拱腰处的应力分布产生影响,挑顶施工会导致斜井段和正洞段塑性区贯通,需要加强支护。罗彦斌等^[23]借助现场监测和数值模拟相结合的方法分析了斜交横通道对主洞衬砌结构的变形和受力规律,锐角一侧的衬砌变形和应力集中现象的影响范围要大于钝角一侧,主动衬砌结构变形主要体现在拱部下沉。饶军应等^[24]利用弹塑性理论圆形孔口应力计算方

法对辅助通道进入隧道主洞口处围岩稳定性进行了理论探讨,并计算了辅助通道修建跨度的安全范围。

综上所述,现阶段辅助通道进隧道正洞三岔口段方面的研究多以施工方法应用为主,相关力学行为的研究也多针对某一特定的施工方法,而综合考虑隧道施工全过程的力学行为的研究鲜有报道。本文以伏牛山隧道双龙端联络通道与风机房交叉施工为工程背景,通过 PLAXIS3D 软件构建三维数值模型,模拟了联络风道小导洞进入正洞后,转向爬坡挑顶扩挖及后续正洞反向台阶法施工过程,研究了联络风道与风机房交叉口段小导洞转向挑顶施工及正洞反向台阶法开挖的施工力学行为与三维空间效应。相关研究成果不仅有助于加深对隧道施工力学行为的认识,同时可为现场施工方案的优化提供参考。

1 依托工程

1.1 工程概况

伏牛山特长公路隧道位于栾川县庙子镇附近,隧道左线全长 9 161 m,右线全长 9 183 m。在桩号 K84+918.3 处设置 1 处通风斜井,在桩号 K88+425.5 处设置 1 处送风斜井,在桩号 K88+462.7 处设置 1 处排风斜井,3 处斜井在施工时作为施工辅助通道使用,后期用于运营通风,具体平面布置见图 1。

伏牛山隧道地下风机房长 130 m,净宽 10 m,净高 13 m。2[#]斜井设 2 处送风联络风道贯穿地下

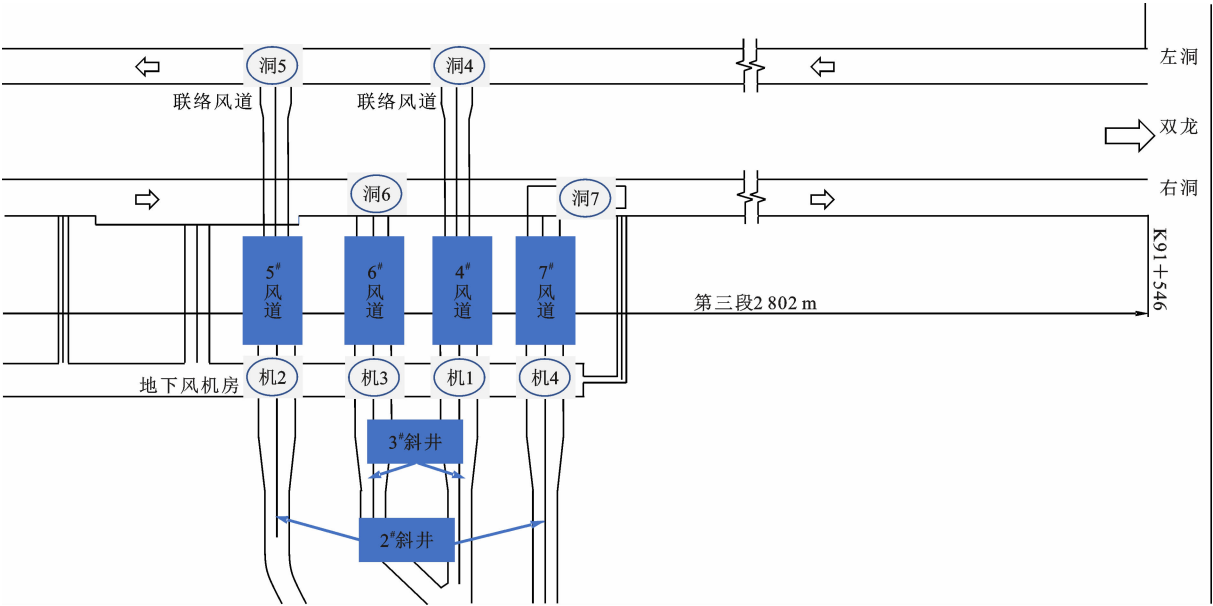


图 1 联络风道及风机房平面位置

Fig. 1 Plan location of connecting air duct and fan room

风机房与主洞左右洞连接,3[#]斜井设 2 处排风联络风道贯穿地下风机房与主洞左右洞连接;另外地下风机房与右幅主洞间设置 1 处运输通道及 2 处疏散通道。

风机房横断面采用直墙拱形断面,内轮廓设计高程距拱顶高度 13.002 m,净宽 10 m。采用台阶法施工,初支采用 $\phi 22$ 早强砂浆锚杆,拱部锚杆长度 3.0 m,边墙锚杆长度 5.0 m,100 cm(纵向) \times 80 cm(环向)梅花形布设, $\phi 6.5$ 钢筋网 25 cm \times 25 cm,18 工字钢拱架,纵向间距 0.8 m,喷射混凝土 C25 厚 24 cm;二衬采用 60 cm 厚 C30 模筑混凝土,衬砌结构断面如图 2 所示。

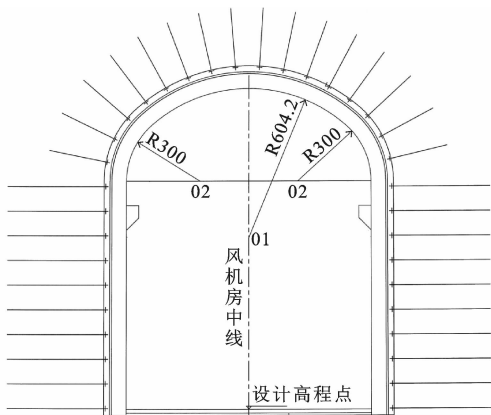


图 2 地下风机房衬砌结构断面

Fig. 2 Lining structure section of underground fan room

设排风联络风道横断面采用直墙拱形断面,半径为 3.38 m 的单心圆,内轮廓设计高度距拱顶 4.5 m,净宽 6 m。采用全断面开挖,初支采用 $\phi 22$ 早强砂浆锚杆,长度 2.5 m,120 cm(纵向) \times 100 cm(环向)梅花形布设, $\phi 6.5$ 钢筋网 25 cm \times 25 cm, I 16 钢拱架,纵向间距 1.0 m,喷射混凝土为 C25,厚度 22 cm;二衬采用 40 cm 厚的 C30 模筑混凝土,衬砌结构断面如图 3 所示。

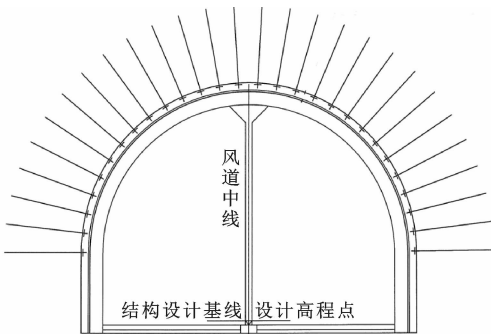


图 3 联络风道衬砌结构断面

Fig. 3 Lining structure section of connecting air duct

1.2 围岩岩性

地下风机房和联络风道均处于Ⅲ级围岩范围内,围岩岩性以中~微风化花岗岩为主,块状构造,节理裂隙发育,岩石完整且硬度大,局部石英含量较高,围岩稳定性较好。由于交叉口处结构复杂,受累计开挖扰动的影响,隧道侧壁极易发生掉块及小规模坍塌。

1.3 地下风机房与交叉口施工方案

联络风道与风机房交叉在施工过程中存在挑顶距离长、坡度大、施工风险高的问题,是本工程的难点之一。联络风道由交叉口进入地下风机房先向大里程方向进行挑顶施工,扩挖出地下风机房上台阶断面后,采用反向台阶法向小里程方向扩挖,直至交叉口完成,施工过程如图 4 所示。

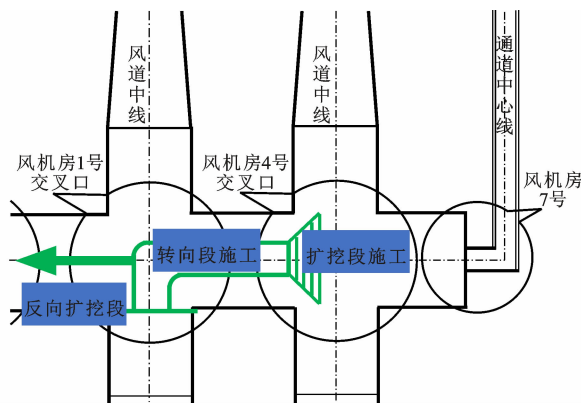


图 4 风机房交叉口施工方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of construction scheme for intersection of fan room

具体施工方案如下:

(1) 交叉口小导洞转向挑顶施工

联络风道施工至风机房交叉口处,设置加强拱及门架,然后喷射混凝土封闭掌子面。在掌子面下方开挖 6 m(宽度) \times 5 m(高度)小导洞进入风机房进行转向挑顶施工。小导洞采用喷锚支护, $\phi 6.5$ 单层钢筋网,10 cm 厚喷射混凝土,3 m 长砂浆锚杆,1.0 m \times 1.0 m 梅花形布设。小导洞转向段长度为 24.9 m,拱顶逐步抬高至正洞洞顶标高。

(2) 小导洞正洞内喇叭口扩挖施工

小导洞拱顶抬高至风机房顶洞标高后采用喇叭口扩挖出风机房上台阶断面。喇叭口扩挖后采用 I 14 型钢进行初支支护,扩挖长度 6.4 m,共设 8 榀型钢钢架,间距 0.8 m,第 8 榀钢架扩挖至正洞上台阶正常断面。

(3) 正洞上台阶开挖

形成风机房正洞上台阶后,在有条件的情况下,

继续施工至风机房大里程端终点后停止施工,喷混凝土封闭掌子面,进行反向扩挖施工。

(4)交叉口段初支拆换施工

交叉口段初支拆换主要在小导洞喇叭口段,总体长度约 6.4 m。拆换型钢钢架应采用“弱爆破、短进尺、快封闭、勤量测”的原则。每次拆换 1 榀钢架,采用弱爆破结合人工风镐拆换,确保交叉口段施工安全。拆换时勤量测,对拆换前的钢架和正洞拆换后的钢架一同监测,预防交叉口段拱顶大面积坍塌。

(5)正洞反向施工

正洞采用台阶法施工至风机房大里程端终点后进行反向施工,避免双向掌子面同时施工相互干扰,影响施工进度。反向施工可先施工上台阶,施工 30~50 m 后停止上台阶掘进,喷混凝土封闭掌子面,然后下台阶跟进。下台阶跟进至上台阶位置 5 m 左右,开始采用台阶法进行风机房施工。

2 数值模型与计算工况

2.1 数值模型与边界条件

依托现场实际工况,采用有限元软件 PLAX-IS3D 建立数值计算模型,以分析交叉口开挖的施工力学行为。模型在伏牛山隧道风机房横断面方向(X 方向)取 45 m,风机房隧道纵向(Y 方向)取 65 m,隧道垂直方向(Z 方向)取 160 m,隧道埋深 130 m,上边界取至地表,如图 5 所示。模型采用 10 节点四面体单元划分围岩网格,在隧道周边局部加密网格,共划分 19 784 个单元、28 175 个节点。模型四周设置法向约束,底部边界固定,上表面自由。

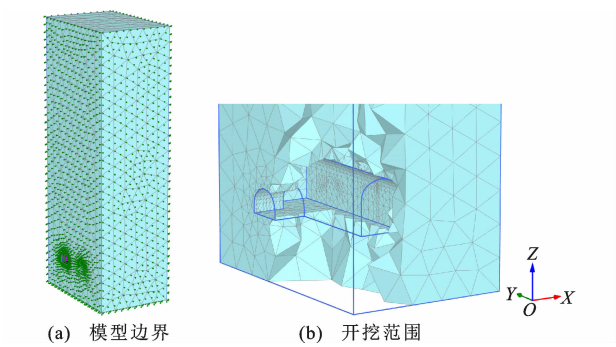


图 5 有限元模型网格

Fig. 5 Finite element model mesh

2.2 材料模型与参数

将隧道围岩视为理想弹塑性材料,遵循 Mohr-Coulomb 屈服准则^[25]。围岩等级Ⅲ级,材料计算参数如表 1 所示。初期支护喷射混凝土和钢拱架视为线弹性材料,喷射混凝土采用 6 节点板单元模拟,钢

表 1 围岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock

Ⅲ级围岩类型	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E/GPa	ν
花岗岩	25.5	1 100	44.5	16	0.275

注: γ 为围岩重度; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; E 为弹性模量; ν 为泊松比。

拱架采用 3 节点梁单元模拟,两种结构单元均能够考虑初支结构的抗拉、抗压、抗弯、抗剪力学性能^[26],计算参数如表 2 所示。初支中的钢筋网及系统锚杆视为保证围岩整体性、防止局部掉块的强度储备,在计算模型中不予考虑。

表 2 初期支护计算参数

Table 2 Calculation parameters of initial support

支护位置	厚度 t/m	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	ν
联络风道(C25)	0.25	25.0	28	0.2
风机房(C30)	0.10	25.0	30	0.2
I16/I18 钢拱架		78.5	210	0.2

2.3 施工过程模拟

根据小导洞转向爬坡挑顶扩挖及正洞反向分台阶开挖施工工序,将整个施工过程划分为 19 个施工步,主要施工步如图 6 所示。在开挖模拟之前,先计算初始应力场,记为施工步 0。

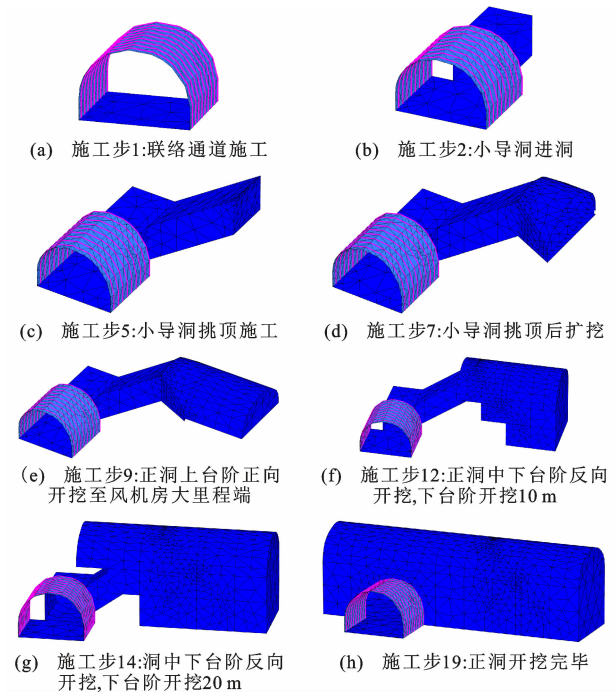


图 6 交叉口小导洞进洞及主洞开挖工序

Fig. 6 Excavation process of small pilot tunnel and main tunnel at intersection

风机房正洞上台阶开挖至风机房大里程端后按三台阶法反向开挖,各台阶步距 5 m,考虑Ⅲ级围岩

整体性较好、岩体参数较强的特点,数值模拟中作一定简化,每步开挖进尺亦取为 5 m,初期支护随挖随支。

2.4 监测剖面

考虑联络通道与风机房交叉口处小导洞进入正洞转向挑顶施工对正洞的影响,选取 3 个剖面用于提取计算结果,如图 7 所示。剖面 1 与联络通道纵向中心线重合,剖面 2 距联络通道右侧 2 m,剖面 3 距联络通道右侧 12 m,约为风机房 1 倍洞径。

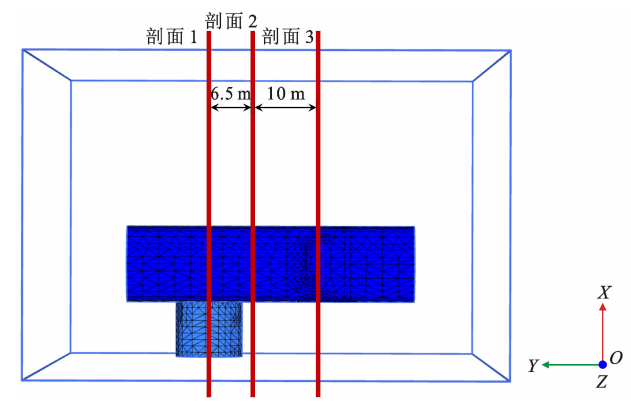


图 7 监测剖面示意图

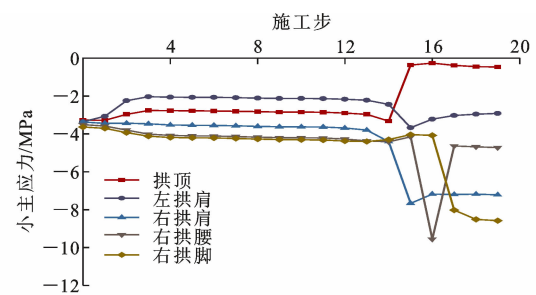
Fig. 7 Schematic diagram of monitoring profile

3 结果分析

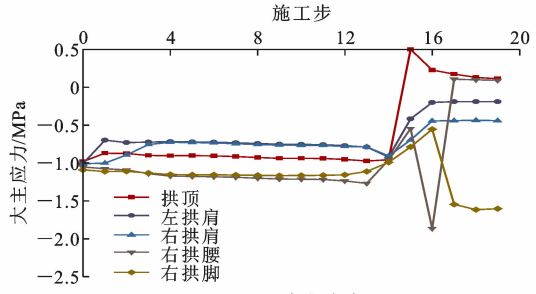
3.1 围岩应力

提取 3 个剖面上拱顶、拱肩、拱腰、拱脚等特征点处的主应力,绘制其随施工过程的变化曲线,如图 8~10 所示,其中负值表示受压,正值表示受拉,风机房左侧为联络通道小导洞进洞一侧,另一侧为风机房右侧。

剖面 1 位于联络通道与风机房交叉口处,从图 8 可以看到:①在施工步 14 之前,剖面 1 上主洞洞周各特征点的主应力变化幅度较小,表明正洞反向开挖尚未到达剖面 1,该处正洞洞周各特征点还未开挖揭露,此后正洞开挖逐步通过剖面 1,各点主应力均发生显著变化,在掌子面通过后应力略有回落,并逐渐趋于平稳;②剖面 1 正洞左右拱肩最大主应力变化趋势及幅度基本一致,左拱肩位于联络通道与风机房交叉口上方,在小导洞进洞时其应力得到小幅释放,在正洞开挖过程中最小主应力变化幅度较小,右拱肩的最小主应力则在开挖后增长了 1 倍左右,达到 -7.7 MPa ;③剖面 1 拱顶随正洞开挖逐渐从受压转为受拉状态,最大拉应力 0.5 MPa ,在施工中需特别关注,及时支护,防止开裂、掉块等情况发生;④剖面 1 在正洞开挖后右拱脚处应力总体呈增

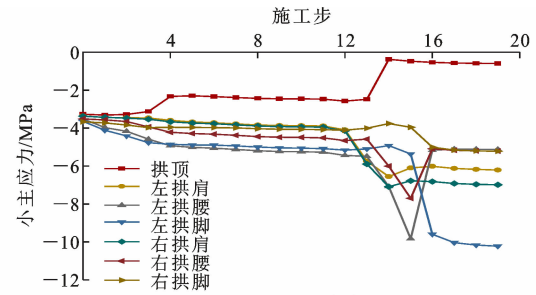


(a) 小主应力

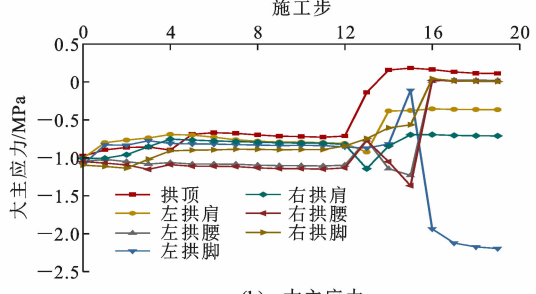


(b) 大主应力

图 8 剖面 1 监测点主应力随施工过程的变化曲线
Fig. 8 Variation curves of main stress of monitoring point at section 1 with construction process



(a) 小主应力



(b) 大主应力

图 9 剖面 2 监测点主应力随施工过程的变化曲线
Fig. 9 Variation curves of main stress of monitoring point at section 2 with construction process

大趋势,说明拱脚处会产生一定的应力集中,相对而言,右拱腰处的主应力变化较为剧烈,在正洞开挖通过时右拱腰最大主应力从 -0.5 MPa 陡增至 -1.9 MPa ,随后迅速转至接近受拉状态,最大拉应力约为 0.1 MPa ,最小主应力则从 -4.2 MPa 增至 -9.6 MPa ,随后迅速回落至此前状态,各特征点主应力的变化情况均说明了及时支护的必要性。

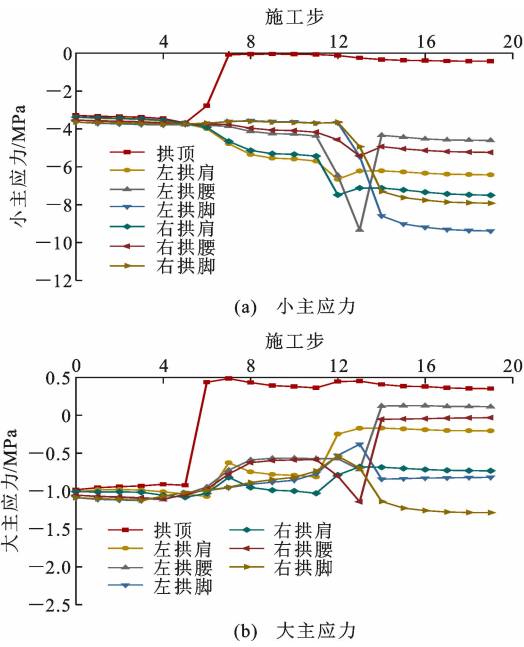


图 10 剖面 3 监测点主应力随施工过程的变化曲线
Fig. 10 Variation curves of main stress of monitoring point at section 3 with construction process

剖面 2 距离联络通道与风机房交叉口比较近,从图 9 可以看到:①在各级台阶反向开挖刚到达剖面 2 时,剖面 2 主应力发生显著变化,当全断面通过剖面 2 后,剖面 2 主应力很快趋于稳定;②剖面 2 正洞应力呈非对称分布,左右两侧拱脚应力差别相应较大,两侧拱脚最小主应力(压应力)差值达 5 MPa,两侧拱肩应力差值次之,两侧拱腰应力差值较小;③正洞反向开挖到达剖面 2 之前,剖面 2 各特征点最大、最小主应力均处于受压状态,正洞开挖通过后,剖面 2 上的左拱腰、右拱腰和右拱脚处的最大主应力(沿正洞洞周径向)接近于 0 MPa,拱顶最大主应力达到 0.2 MPa,左拱脚和左右拱肩的最大主应力则仍为负值。剖面 2 的应力非对称分布状态表明联络通道进洞施工会对交叉口附近围岩应力分布产生一定的影响。

剖面 3 距离联络通道右侧 12 m,从图 10 可以看到,剖面 3 正洞应力变化规律与剖面 2 类似,应力分布仍表现出一定的非对称性,但两侧应力差值比剖面 2 有所减小,以剖面 3 左右拱脚最小主应力为例,差值为 1.5 MPa,比剖面 2 处的左右拱脚最小主应力差值降低 70%,说明距离交叉口 1 倍洞径外风机房围岩应力分布受交叉口施工的影响大幅减弱。

上述结果表明,在交叉口及其附近正洞施工效应分析中,若仅取剖面进行二维计算,难以反映交叉口施工对正洞的影响,应根据实际围岩分布及交叉

隧洞空间相对位置构建三维数值模型,按实际开挖工序进行模拟计算,充分考虑三维空间效应的影响。

3.2 拱顶沉降

3 个剖面的拱顶沉降曲线如图 11 所示,负值表示下沉。可以看出,剖面 1 和剖面 2 拱顶最终沉降量基本相同,约为-3.9 mm。由于剖面 2 距离联络通道较近,剖面 1 和剖面 2 拱顶沉降随施工过程的变化基本一致,在小导洞转向爬坡挑顶阶段(施工步 2~5)和正洞反向开挖通过时(施工步 13~16)拱顶沉降增长较快,沉降增量分别为 0.7 mm 和 1.7 mm,分别占总沉降的 18%和 44%,其他施工步则缓慢增加。

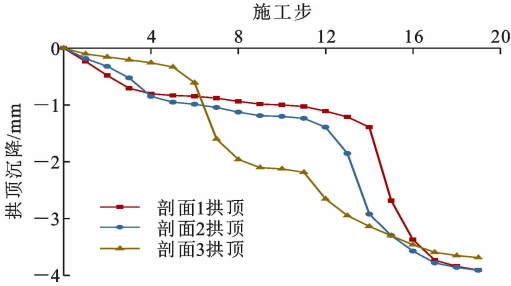


图 11 拱顶沉降随施工过程的变化曲线
Fig. 11 Variation curves of vault settlement with construction process

剖面 3 拱顶最终沉降比剖面 1 和剖面 2 略小,约为-3.7 mm。剖面 3 拱顶沉降随施工过程的变化规律与剖面 1 和剖面 2 有所不同,由于剖面 3 在距离交叉口 12 m 以外,前期交叉口小导洞转向挑顶施工阶段并未到达剖面 3,剖面 3 只产生很小的拱顶沉降。当小导洞挑顶后扩挖(施工步 6~8)时,剖面 3 拱顶沉降从-0.6 mm 增至-2.0 mm,达到最终沉降的 54%,此后逐渐趋于平稳;当正洞分台阶反向开挖通过剖面 3(施工步 11~13)时,剖面 3 拱顶沉降再次快速从-2.2 mm 增至-2.9 mm,达到最终沉降的 78%,并在正洞开挖通过后很快趋于稳定。

3.3 洞周横向位移

3 个剖面的左右拱腰横向位移变化曲线如图 12 所示,正值与负值均表示相应左侧或右侧向洞内方向的横向位移。剖面 1 左侧为联络通道,只有右侧拱腰的横向位移。由图 12 可知,3 个剖面的横向位移随施工过程的变化规律基本一致,在正洞中下台阶开挖通过(施工步 13~15)时剖面 2 和剖面 3 横向位移的变化相对明显,但横向位移总量较小。3 个剖面右侧拱腰的最终横向位移基本相同,约为-0.7 mm。剖面 2 和剖面 3 的左侧拱腰最终横向

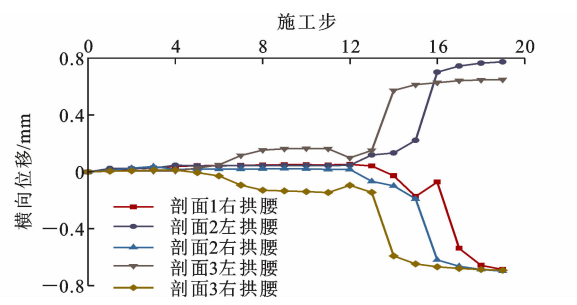


图 12 横向位移随施工过程的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of lateral displacement with construction process

位移则有一定差异,分别为 0.77 mm 和 0.65 mm,相差约 16%,剖面 2 和剖面 3 的横向位移分别为 1.47 mm 和 1.35 mm,相差 8%。上述结果表明,靠近联络通道的剖面 2 横向位移受到交叉口施工的影响相对较大,横向位移也相对略大。联络通道自正洞左侧进洞,对正洞左侧横向位移产生一定影响,导致正洞左右两侧横向位移并不完全对称,剖面 2 和剖面 3 左右两侧的横向位移存在 7%~10% 的差

异,正洞横向位移总体很小。

3.4 围岩塑性区

图 13 为施工步 7、9、12、14、19 围岩塑性区发展情况。可以看出:①围岩塑性区随着开挖施工的推进不断扩展,交叉口处联络通道与风机房围岩塑性区连通;②塑性点主要分布在开挖侧壁,拱腰处最为集中,向上延伸至拱肩,拱脚处向下发展至一定深度,表明拱腰、拱脚附近围岩达到抗剪强度极限;③小导洞挑顶扩挖阶段和正洞反向台阶法施工阶段,扩挖端面和底面、台阶角部产生一定塑性区;④小导洞转向挑顶及正洞反向台阶法施工过程中,交叉口处零星出现受拉破坏点,小导洞扩挖后正洞上台阶正向施工过程中,上台阶侧壁和底面也出现少量受拉破坏点,在施工过程中应注意及时施作初期支护。

4 结 语

(1)联络通道与风机房交叉口施工对交叉口附近风机房正洞围岩应力分布产生一定影响,在正洞

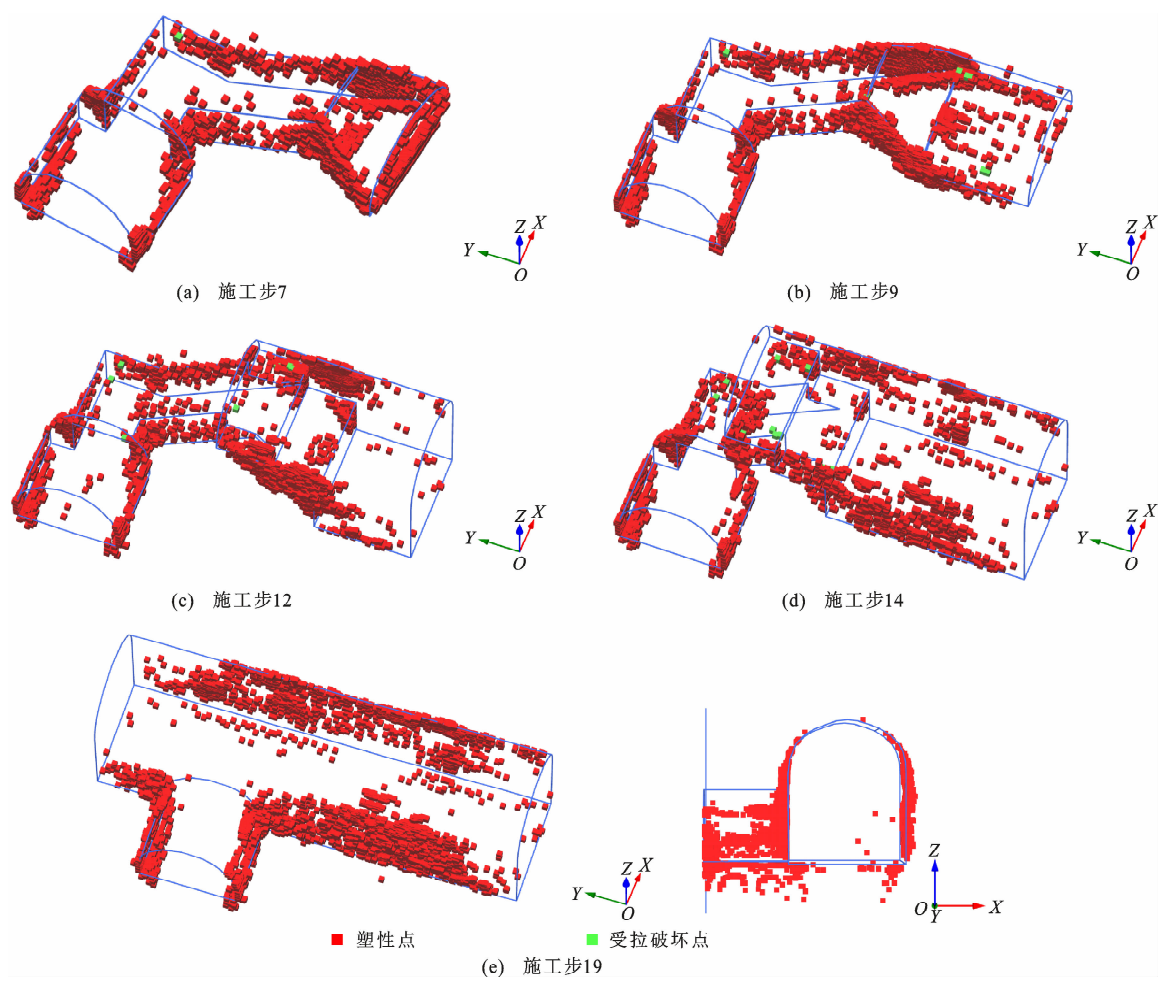


图 13 围岩塑性区随施工过程的变化

Fig. 13 Variation of plastic zone in surrounding rock with construction process

拱顶及右拱腰处形成拉应力,沿风机房纵向主要影响范围约为 1 倍洞径。

(2)风机房拱顶最终沉降量为 3.7~3.9 mm,在交叉口及其附近,小导洞爬坡挑顶阶段和风机房正洞反向开挖时引起的拱顶沉降增量较大,而小导洞转向挑顶施工引起的拱顶总沉降量相对较小。

(3)小导洞挑顶扩挖及风机房正洞台阶法施工过程中,交叉口处联络通道与风机房围岩塑性区连通,正洞拱腰处产生大片塑性区,拱脚处塑性区向下发展至一定深度。此外,交叉口处零星出现受拉破坏点,施工中对这些部位应予以重点关注,及时施作初期支护,防止局部掉块。

参考文献:

References:

- [1] 徐 飞,张同晓,石少帅,等. 铁路隧道横洞进主洞关键技术及施工方案优化[J]. 科学技术与工程,2016,16(32):288-295.
XU Fei,ZHANG Tongxiao,SHI Shaoshuai,et al. Key technique and construction scheme optimization for the intersection of the horizontal adit and main tunnel of railway tunnels[J]. Science Technology and Engineering,2016,16(32):288-295.
- [2] 邵珠山,赵 鑫. 基于隧道施工诱发地表沉降随机介质理论预测模型的拓展[J]. 长安大学学报(自然科学版),2021,41(6):73-81.
SHAO Zhushan,ZHAO Xin. Based on extension of stochastic medium theory prediction model for surface subsidence induced by tunnel construction[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2021,41(6):73-81.
- [3] 杨晓华,赵滨京,吴 昊,等. 千枚岩深埋隧道支护参数对结构受力与变形的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(3):108-117.
YANG Xiaohua,ZHAO Binjing,WU Hao,et al. Influence of supporting parameters of phyllite deep tunnel on structural stress and deformation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2020,37(3):108-117.
- [4] 罗彦斌,陈建勋. 黏弹性条件下大跨度公路黄土隧道二次衬砌施作时机[J]. 长安大学学报(自然科学版),2021,41(5):86-95.
LUO Yanbin,CHEN Jianxun. Construction time of secondary lining of large span loess tunnel under viscoelasticity condition[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2021,41(5):86-95.
- [5] JONEIDI M,GOLSHANI A,NAEIMIFAR I. Pro-

gressive deformation and mechanical behaviour of intersecting tunnels in soft ground[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement,2019,172(4):285-296.

- [6] BIAN K,LIU J,XIAO M,et al. Cause investigation and verification of lining cracking of bifurcation tunnel at Huizhou pumped storage power station[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2016,54:123-134.
- [7] 邓 碧,张俊伟,诸葛绪松,等. 软土地层并行曲线隧道施工顺序对既有隧道的影 响[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(6):170-176.
DENG Bi,ZHANG Junwei,ZHUGE Xusong,et al. Influence of construction sequence of parallel curved tunnels on existing tunnels in soft soil stratum[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2021,38(6):170-176.
- [8] 张立鑫,陈丽俊,陈建勋,等. 单斜构造软硬互层围岩隧道变形特征及控制对策[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(6):186-196.
ZHANG Lixin,CHEN Lijun,CHEN Jianxun,et al. Deformation characteristics and treatment measures of tunnels in soft and hard interbedded surrounding rock with tilted stratum[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2021,38(6):186-196.
- [9] 薛 平,王长帅. 某输水隧洞斜井进入主洞挑顶施工关键技术[J]. 现代隧道技术,2019,56(增 2):688-692.
XUE Ping,WANG Changshuai. Key roof ripping construction technology for the transition section from the inclined shaft to main tunnel:case study of a water conveyance tunnel[J]. Modern Tunneling Technology,2019,56(S2):688-692.
- [10] 薛模美,胡恒福. 客运专线隧道斜井转正洞施工技术研究[J]. 铁道标准设计,2008,52(4):90-93.
XUE Momei,HU Hengfu. Study on construction technology of inclined shaft turning into positive tunnel in passenger dedicated line tunnel[J]. Railway Standard Design,2008,52(4):90-93.
- [11] 于家武,龙文华,郭新新,等. 预应力锚索支护技术在地应力大跨径隧道挑顶施工中的应用——以渭武高速公路木寨岭隧道为例[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(8):1392-1398.
YU Jiawu,LONG Wenhua,GUO Xinxin,et al. Application of prestressed anchor cable supporting technology in roof ripping construction of long-span tunnel with high geostress:a case study of Muzhailing tunnel of Weiyuan-Wudu expressway[J]. Tunnel Construc-

- tion,2021,41(8):1392-1398.
- [12] 刘毅,张勇,彭振,等.大跨地铁隧道斜井进洞垂直挑顶施工关键技术[J].现代隧道技术,2020,57(4):201-207.
- LIU Yi,ZHANG Yong,PENG Zhen,et al. Vertical roof ripping construction techniques for excavation of main tunnel from inclined shaft:a case study of the large-span metro tunnel in soft surrounding rock[J]. Modern Tunnelling Technology,2020,57(4):201-207.
- [13] 闫自海,章立峰,路军富,等.城市地下立交隧道交叉口施工方法研究[J].现代隧道技术,2019,56(1):176-184.
- YAN Zihai,ZHANG Lifeng,LU Junfu,et al. Study on construction method of the intersection of the urban underground interchange tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology,2019,56(1):176-184.
- [14] 宋金贵.横洞进正洞交叉口设计优化方案研究[J].隧道建设,2017,37(增1):168-173.
- SONG Jingui. Study of optimization scheme of design of connection section between horizontal gallery and main tunnel[J]. Tunnel Construction,2017,37(S1):168-173.
- [15] 安永林,欧阳鹏博,彭立敏,等.深大竖井及转隧道正洞施工技术与安全分析[J].现代隧道技术,2018,55(2):164-173.
- AN Yonglin,OUYANG Pengbo,PENG Limin,et al. Construction techniques and safety analysis for a deep vertical shaft and vertical shaft shifting to main tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology,2018,55(2):164-173.
- [16] 焦华喆,董腾飞,陈新明,等.大断面隧道三岔口段施工技术及围岩变形规律[J].公路交通科技,2019,36(8):100-107.
- JIAO Huazhe,DONG Tengfei,CHEN Xinming,et al. Construction technology for fork road of large section tunnel and deformation rule of surrounding rock[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2019,36(8):100-107.
- [17] 张洪达.软弱地层辅助坑道进隧道正洞上联洞+门架法挑顶施工技术[J].隧道建设(中英文),2021,41(12):2150-2156.
- ZHANG Hongda. Construction technology of roof lifting using portal frame method of auxiliary tunnel entering main tunnel in soft stratum[J]. Tunnel Construction,2021,41(12):2150-2156.
- [18] 刘毅,贺祖浩,王志敏,等.破碎围岩条件下隧道挑顶施工技术研究[J].现代隧道技术,2020,57(6):200-206.
- LIU Yi,HE Zuhao,WANG Zhimin,et al. Research on roof-ripping construction technology for tunnels under fractured surrounding rock conditions[J]. Modern Tunnelling Technology,2020,57(6):200-206.
- [19] 杨晓华,曹扬帆,肖靖,等.开挖方式对跨基覆界面浅埋偏压隧道变形的影响分析[J/OL].建筑科学与工程学报:1-14[2023-03-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1442.tu.20211230.1338.024.html>.
- YANG Xiaohua,CAO Yangfan,XIAO Qing,et al. Analysis of the influence of excavation methods on the deformation of shallow-buried unsymmetrical loaded tunnels across the base and cover interface[J/OL]. Journal of Architecture and Civil Engineering:1-14[2023-03-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1442.tu.20211230.1338.024.html>.
- [20] 章剑,高波,周佳媚,等.软弱围岩斜井转正洞工法动态施工力学行为分析[J].现代隧道技术,2013,50(2):46-51.
- ZHANG Jian,GAO Bo,ZHOU Jiamei,et al. Analysis of dynamic mechanical behavior during construction from an inclined shaft to the main tunnel in soft surrounding rock[J]. Modern Tunnelling Technology,2013,50(2):46-51.
- [21] 王景春,张天陆,王炳华,等.施工通道与站台隧道三岔口段施工方法及力学行为研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(10):2694-2702.
- WANG Jingchun,ZHANG Tianlu,WANG Binghua,et al. Research on construction method and dynamic mechanical behavior of three-fork section of construction passage and station tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2021,18(10):2694-2702.
- [22] 陈佳玮,李元海,刘毅.地铁大跨度隧道垂直挑顶施工中的围岩力学分析[J].城市轨道交通研究,2022,25(7):192-196,202.
- CHEN Jiawei,LI Yuanhai,LIU Yi. Analysis of surrounding rock mechanical behavior of metro large-span tunnel vertical propping construction[J]. Urban Mass Transit,2022,25(7):192-196,202.
- [23] 罗彦斌,陈建勋,王梦恕.隧道斜交横通道施工对主隧道衬砌结构的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增2):3792-3798.
- LUO Yanbin,CHEN Jianxun,WANG Mengshu. Study of influence of skew horizontal adit tunnel construction on main tunnel lining structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(S2):3792-3798.
- [24] 饶军应,谢财进,赵霞,等.深埋隧洞三岔口围岩稳

定性计算理论[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019,50(8):1949-1959.

RAO Junying,XIE Caijin,ZHAO Xia,et al. Theoretical stability calculation of surrounding rocks in divergence of deep tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(8): 1949-1959.

[25] 李连祥,张永磊,扈学波. 基于 PLAXIS 3D 有限元软件的某坑中坑开挖影响分析[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(增 1):254-261,266.

LI Lianxiang,ZHANG Yonglei,HU Xuebo. Finite element analysis of a pit-in-pit excavation based on PLAXIS 3D[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2016,12(S1):254-261,266.

[26] 牛方义. 钢纤维喷射混凝土的数值建模及其在隧洞支护衬砌中的应用[D]. 北京:北京交通大学,2020.

NIU Fangyi. Numerical simulation for steel fiber reinforced shotcrete and its application to tunnel lining [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2020.