文章编号:1673-0291(2026)02-0091-12 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250054

隧道交叉口挑顶施工动态力学响应分析研究与现场试验

聂亚伟[1,2],王 星[1,2,3],黄 帅[1,2],涂 鹏[1,2]

(1.中交第二公路工程局有限公司,西安 710065;2.中交集团山区长大桥隧建设技术研发中心,西安 710199;3.长安大学 公路学院,西安 710064)

摘 要:针对西成铁路群科隧道2号横洞与正洞交叉口段施工工序繁多、受力复杂且围岩变形不易控制等问题,开展挑顶技术方案及力学研究.首先,提出一套"横洞爬坡+加强环支护+临时-永久支撑+对称开挖支护"的挑顶开挖支护方案.然后,采用Midas有限元软件建立数值模型精细化分析挑顶施工过程中支护结构及围岩的动态力学响应特性与三维空间效应.最后,结合现场实时监测数据,重点分析了隧道交叉口段支护结构及围岩受力变化特征、拱顶沉降及洞周横向收敛变形规律.结果表明:施工过程中初支结构应力整体保持在0.15 MPa~0.76 MPa范围内,钢拱架结构受力最大为343 kN;该支护结构有效降低了围岩应力作用下隧道初支的受力及沉降变形,交叉口施工导致加强环附近围岩应力重分布,此处易产生应力集中现象;剖面1~3拱顶最大沉降量为1.12 mm,拱腰最大横向位移量为1.06 mm,拱顶沉降及拱腰横向位移量相对较小,整体处于稳定可控范围;交叉口左侧上台阶开挖支护过程中,左、右拱腰及右拱肩出现受压转为受拉状态,施工中应对这些部位予以关注,及时支护,防止出现局部掉块现象,确保整个施工过程处于安全稳定状态.研究成果可以为类似复杂条件下隧道横洞与正洞交叉口的挑顶施工、支护结构设计及围岩稳定性控制提供重要参考.

关键词:隧道工程;交叉口;动态力学响应;三维空间效应;现场施工

中图分类号:U45 **文献标志码**:A

Dynamic mechanical response analysis and field testing of roof-breaking excavation at tunnel intersections

NIE Yawei[1,2], *WANG Xing*[1,2], *HUANG Shuai*[1,2], *TU Peng*[1,2]

(1.CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd.,Xi'an 710065, China;2.CCCC Research and Development Center on Construction Technology of Long Bridge &. Tunnel in Mountain Area, Xi'an 710199, China;3.School of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To address the challenges of numerous construction procedures, complex stress conditions, and difficulty in controlling surrounding rock deformation at the intersection of the No. 2 cross-tunnel and the main tunnel of the Qunke Tunnel on the Xi'an-Chengdu Railway, a roof-breaking excavation

收稿日期:2025-04-15;**修回日期**:2025-07-31

基金项目:国家自然科学基金(52278328);中交第二公路工程局科技研发项目(GHTJ-07-QT-046)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (52278328); China Communications Second Highway Engineering Bureau Science and Technology Research Project (GHTJ-07-QT-046)

第一作者:聂亚伟(1994—),男,河南永城人,工程师,硕士.研究方向为岩土与隧道工程.**email**:3103660638@qq.com.

通信作者:王星(1989—),男,陕西华县人,高级工程师,博士后.**email**:1548622258@qq.com.

引用格式:聂亚伟,王星,黄帅,等.隧道交叉口挑顶施工动态力学响应分析研究与现场试验[J].北京交通大学学报,2026,50(2):91-102.
NIE Yawei, WANG Xing, HUANG Shuai, et al.Dynamic mechanical response analysis and field testing of roof-breaking excavation at tunnel intersections[J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(2): 91-102.(in Chinese)

scheme and associated mechanical analysis are investigated. First, a comprehensive roof-breaking excavation and support scheme consisting of "cross-tunnel climbing + reinforcing ring support + temporary-to-permanent support + symmetrical excavation and support" is proposed. Subsequently, a numerical model is established using Midas finite element software to finely analyze the dynamic mechanical response characteristics and three-dimensional spatial effects of the support structure and surrounding rock during the roof-breaking construction process. Finally, combined with field real-time monitoring data, the analysis focuses on the stress variation characteristics of the support structure and surrounding rock at the tunnel intersection, as well as crown settlement and lateral convergence deformation patterns around the tunnel periphery. The results show that during construction, the stress of the primary support structure remains within the range of 0.15 MPa to 0.76 MPa, and the maximum axial force in the steel arch frame is 343 kN. This support system effectively reduces the stress and settlement deformation of the primary support induced by surrounding rock pressure. Construction of the intersection induces stress redistribution in the surrounding rock near the reinforcing ring, making this area prone to stress concentration. The maximum crown settlement at Sections 1-3 is 1.12 mm, and the maximum lateral displacement at the arch springline is 1.06 mm; both values are relatively small, indicating that the intersection remains in a stable and controllable state overall. During the excavation and support process of the left-side upper bench at the intersection, the left and right arch springlines and the right arch shoulder transition from compression to tension. These locations should be closely monitored during construction, and timely support should be provided to prevent local rockfalls, ensuring that the entire construction process remains safe and stable. The research findings can provide important references for roof-breaking construction, support structure design, and surrounding rock stability control at tunnel cross-tunnel and main tunnel intersections under similar complex conditions.

Keywords: tunnel engineering; intersection; dynamic mechanical response; three-dimensional spatial effect; filed construction

随着我国交通基础设施建设的快速发展,越岭长大隧道的工程规模与埋深条件日趋复杂.在此背景下,长大隧道为满足施工通风、运输及工期要求,通常需设置斜井或横洞等辅助坑道以增加开挖工作面.针对此类交叉口段复杂的受力与变形特性,许多学者围绕围岩应力分布、支护结构受力机制、空间变形规律及施工扰动影响等方面开展了大量研究.文献[1-4]针对隧道三维异形开挖断面,论证了该类支护结构及围岩受力状态复杂多变,易产生失稳变形、垮塌、衬砌开裂以及应力集中现象.因此,探明横洞转正洞三维异形交岔口段施工过程中围岩及支护结构的受力及变形规律,采取合理的开挖支护方案及防护措施,对保障隧道施工安全具有重要意义.

针对隧道辅助坑道转正洞交叉口段的施工难题,国内外学者开展了大量研究.文献[5]针对不同地质条件、不同工况下横洞转正洞施工场景,总结了大包法、小包法、小导洞垂直挑顶等施工工法;文献[6-8]针对软弱围岩自稳能力差、易引发坍塌或变形现象,提出了不同的新型支护结构和施工工艺工法,加强了应力集中部位的支护强度与稳定性;文献[9-10]针对断层破碎带围岩的破碎性、非均质性特点以及破碎围岩由于纵向挤压易造成初期支护变形开裂现象,通过优化现场施工方案并结合数值模拟提高施工质量并降低施工风险;文献[11]针对隧道三维交叉口剪切失稳破坏和变形效应,通过实际的无量纲绘图对不同应力状态交叉口段进行建模分析,评估了隧道交叉口结构的稳定性;文献[12-14]针对隧道交叉口三维模型,分析了围岩及支护结构空间变形、应力分布及塑性区分布,研究了隧道衬砌的内力分布及可能破坏的位置;文献[15-16]针对深部岩体高地应力隧道挑顶施工,基于数值模拟及现场监测研究了交叉段结构的变形与偏压特征,揭示了极高地应力破碎地层群洞效应的力学机制以及影响因素;文献[17-18]针对引水和输水小断面隧洞工程,提出以小导洞方式进行主支洞交叉口的开挖,并对施工工艺进行优化,分析了隧洞不同区域的围岩变形规律及隧洞施工的不利影响区域;文献[19]针对小孔径预应力锚索支护技术,解决了高地应力软岩环境下斜井进正洞交叉口挑顶施工难题;文献[20]针对隧道主线与横通道交叉的结构数值模型,通过调整峰值加速度和入射角度,构建多种

工况并从概率角度对层状围岩铁路隧道交叉口结构地震入射角度敏感性进行了动力分析,该成果对于隧道选线具有重要意义.

综上所述,现阶段针对辅助坑道进正洞的研究主要集中于不同特殊围岩条件下施工工艺的适用性,以及交叉口围岩与支护结构的力学响应及变形规律.然而,目前对隧道交叉口段施工方案的安全性评估多依赖同步现场监测,难以在施工前对方案进行定性与定量的风险评估,施工过程中易突发失稳破坏.此外,现有数值模拟常聚焦于施工的某一特定时刻,未能全面反映施工全过程中不同部位关键指标的时空演变规律.为此,本文依托西成铁路群科隧道 2 号横洞进主洞工程,提出一套“横洞爬坡+加强环支护+临时-永久支撑+对称开挖支护”的施工方案,并利用 Midas 有限元软件建立施工全过程动态数值模型,分析挑顶施工对围岩及支护结构力学行为及变形规律的影响.研究成果旨在验证该方案的可行性与适用性,提出针对性防护加强措施,为类似工程提供参考借鉴.

1　工程实际问题

群科隧道位于青海省化隆县群科镇境内,为黄河北岸中山区,进口位于黄河左岸山尕滩,地表覆盖有冲积砂质黄土、砂砾土以及碎石土,地形局部起伏较大,自然坡度约 53°;出口位于来让堂与下介什古之间的科学沟左岸岸坡,地表覆盖有粗、细角砾土,坡面较平顺,自然坡度约 36°;洞身主要穿越黄河左岸尕吾山—鲁满山西南侧中山区,地形复杂,山势陡峻,山顶多由松散堆积物所覆盖,地面高程 2 100～2 890 m,相对高差为 790 m.山梁地段地形较破碎、沟谷深切、冲沟密集,呈树枝状展布.沟谷多呈“V”字形,深度 200～400 m,最深处达 500 m 以上,冲沟沟脑附近及沟岸滑坍体有类似黄土喀斯特的漏斗、天生桥和陷井等分布,隧道最大埋深约为 508 m.2 号横洞位于拉脊山南麓黄河左岸中高山区,山体起伏较大,通过的地层依次为第四系全新统冲积细圆砾Ⅲ级围岩、古近系上统马哈拉沟组粉砂质泥岩夹泥质粉砂岩夹石膏Ⅳ级围岩、中统洪沟组砂岩夹砾岩Ⅳ级围岩.

横洞爬坡扩挖段断面内轮廓由三心圆构成,三心圆半径 $R1$～$R3$ 分别为 485.01 cm、549.93 cm、900.17 cm,洞内净宽为 980.98 cm,净高为 786.52 cm,隧道断面面积约为 79.73 m^2,采用台阶法施工,初支采用 ϕ42 系统锚杆,锚杆长度 2.0 m,100 cm(纵向)×120 cm(环向)梅花型布设,ϕ6.5 钢筋网 25 cm×25 cm,I18 工字钢拱架,纵向间距 1.0 m,初期支护喷射 24 cm 厚 C25 混凝土,二衬采用 40 cm 厚 C40 模筑混凝土,底部 20 cm 厚 C25 素混凝土,衬砌结构断面见图 1.图 1 中,D 为隧道临时道路混凝土厚度.

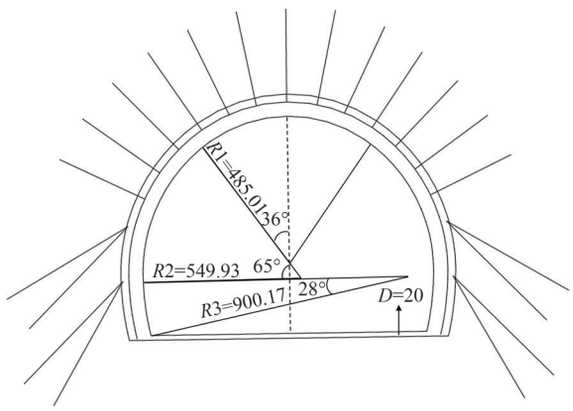


图 1　横洞衬砌结构断面(单位:cm)

Fig.1　Cross section of tunnel lining structure(units:cm)

主洞横断面内轮廓由四心圆构成,四心圆半径 $R1$～$R4$ 分别为 614 cm、606 cm、297 cm、1 346 cm,洞内净宽为 1 253.62 cm,净高为 1 034.77 cm,隧道硐室面积约为 79.73 m^2,隧道硐室面积约为 134.27 m^2,初期支护喷射混凝土 C25 厚 24 cm,采用 122a 型钢拱架,纵向间距 1.0 m,ϕ8 钢筋网 20 cm×20 cm,拱部边墙采用 ϕ22 系统锚杆长度 L=2.0 m,ϕ42 锁脚锚杆 L=4.0 m,二衬采用 C40 模筑混凝土厚 40 cm,衬砌结构断面见图 2.

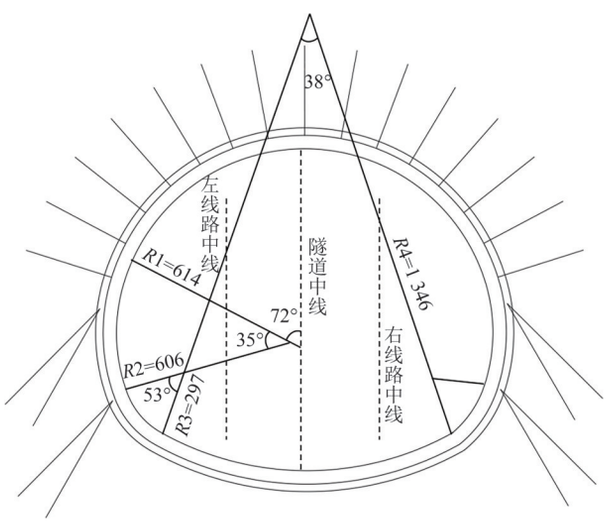


图 2　主洞衬砌结构断面(单位:cm)

Fig.2　Main tunnel lining structure section (units: cm)

在横洞与正洞相交处,采用棚洞进入正洞,棚洞钢架采用 I18 型钢,间距 120 cm,净宽 600 cm,每处钢架脚设置 2 根长度 3.0 m 的 ϕ42 锁脚锚杆.其他临时支护参数:ϕ22 砂浆系统锚杆,长度 3.0 m,间距 1.0 m×1.0 m 梅花型布置,喷射 25 cm 混凝土,临时+永久棚架结构断面见图 3.

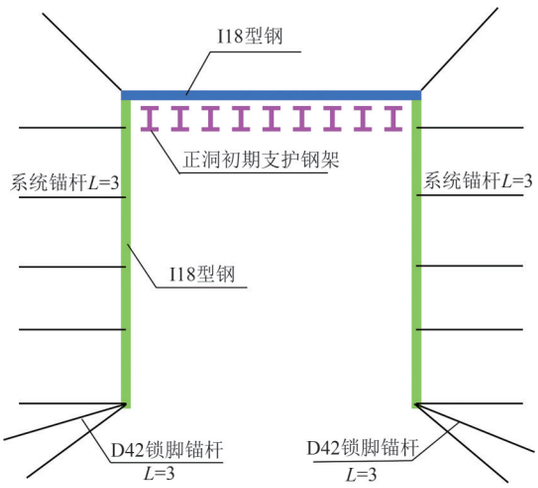


图 3　临时+永久棚架结构断面(单位:m)

Fig.3　Temporary and permanent shed structure section (units:m)

2　横洞与正洞交叉口施工方案

根据辅助坑道与正洞之间的高差,确定辅助坑道拱顶的扩挖起始里程,辅助坑道与正洞交接处设置加强环门架,辅助坑道垂直于正洞线路采用棚洞支护以上坡方式开挖到正洞中线位置,然后再向前平坡开挖至正洞外侧上导坑拱脚位置处,棚洞钢架临时支护及时跟进,施工示意见图 4.

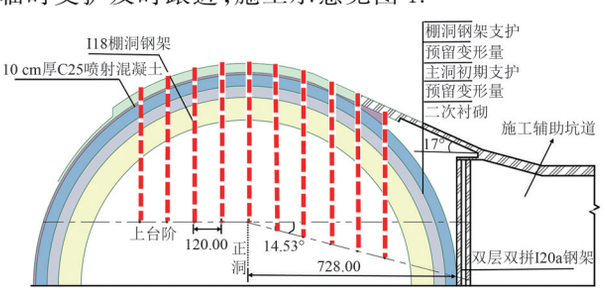


图 4　横洞与正洞交叉口施工方案示意图(单位:cm)

Fig.4　Schematic diagram of construction plan for the intersection of horizontal tunnel and main tunnel(units: cm)

具体施工方案如下:

1) 横洞扩挖段爬坡进主洞.施工辅助坑道掘进接近正洞相交里程时,逐渐抬高施工斜井拱顶高程,拱顶抬高坡度控制在 17°以内,横洞掘进至正洞开挖轮廓线后,在交叉口处施作加强环门架,加强环门架为双层双拼 I20b 型钢钢架,相邻钢架采用 ϕ22 纵向钢筋连接.

2) 临时+永久棚架施工.在横洞进正洞施工阶段,按垂直于正洞走向以上坡方式开挖至正洞中线位置,然后再向前平坡开挖至正洞外侧上导坑拱脚位置处,整个过程采用 I18 门子形棚洞钢架作为支护结构,I18 棚洞钢架间距 120 cm,净宽 600 cm.

3) 正洞钢架施工.棚洞钢架施工完毕,在棚洞钢架的保护下,为正洞钢拱架施工提供工作面后,施作正洞上台阶钢拱架及初期支护,正洞段设计采用 122a 型钢拱架,为保证正洞拱架与加强环连接效果,正洞钢拱架与加强环采用连接板十螺栓方式连接.

4) 正洞双向开挖支护.沿隧道正洞大里程方向拆除一侧竖向 I18 棚洞钢架,棚洞钢架支护体系中的顶部横梁 I18 棚洞钢架位于正洞初期支护里侧,施作正洞初支时横梁 I18 棚洞钢架作为永久结构不再取出,施作正洞初期支护并开挖上台阶,向前开挖 10 m 后,喷射混凝土封闭掌子面暂停该方向开挖,掉头拆除另一侧竖向 I18 棚洞钢架.施作正洞初期支护并开挖上部弧形导坑,向前开挖 10 m 后,喷射混凝土封闭掌子面、暂停该方向开挖.

5) 正洞两侧下台阶及仰拱施工.待施工空间满足后,施作正洞下台阶及仰拱开挖支护,随后两侧同时施工正洞落底,及时进行正洞下台阶及仰拱施工,以便初期支护与仰拱尽早成环、确保施工安全.

3　数值模型与计算工况

3.1　材料模型与参数

根据隧道几何尺寸及开挖支护方案,基于 Midas 软件建立有限元数值模型,分析交叉口挑顶段施工力学行为,模型为 80 m×60 m×65 m(长×宽×高),隧道埋深 35 m,上边界取至地表,模型四周设置法向约束,底部边界固定,上表面自由,隧道局部加密网格,共划分 163 854 个单元,118 620 个节点,隧道挑顶整体模型及支护结构模型分别见图 5、图 6.

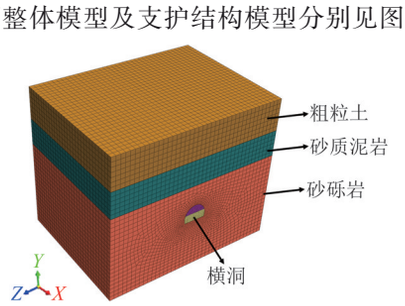


图 5　数值计算模型

Fig.5　Numerical calculation model

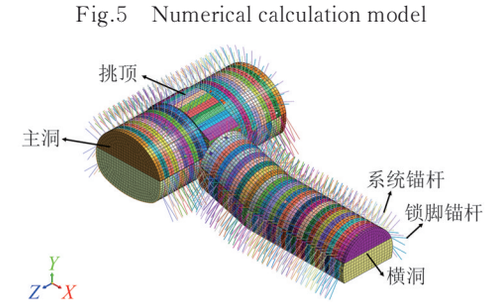


图 6　支护结构模型

Fig.6　Supporting structure model

将隧道围岩视为理想弹塑性材料,遵循Mohr-Coulomb屈服准则,围岩等级为Ⅳ级,其他材料均视为线弹性材料.

3.1.1　钢材本构模型

锚杆、钢架等钢材线弹性阶段拉压段本构方程为

$$\sigma_s = E_s \times \varepsilon_s \qquad 0 \leqslant \varepsilon_s \leqslant 0.001 \tag{1}$$

式中:σ_s为钢材应力;ε_s为钢材应变;E_s为钢材弹性模量.

锚杆、钢架应力-应变关系曲线见图7.

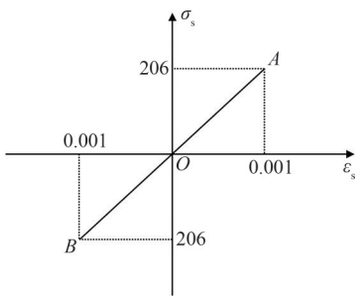


图7　锚杆、钢架应力-应变关系曲线

Fig.7　Stress-strain curve for anchor rod and steel frame

3.1.2　混凝土本构模型

根据GB/T 50010—2010《混凝土结构设计标准》[21],C25混凝土弹性模量为E_c为2.8×10^4 N/mm^2.

C25混凝土线弹性阶段受拉状态本构方程为

$$\sigma_t = E_c \times \varepsilon_t \qquad 0 \leqslant \varepsilon_t \leqslant 6.4 \times 10^{-5} \tag{2}$$

C25混凝土线弹性阶段受压状态本构方程为

$$\sigma_c = E_c \times \varepsilon_c \qquad 0 \leqslant \varepsilon_c \leqslant 2.0 \times 10^{-4} \tag{3}$$

混凝土应力-应变关系曲线见图8.

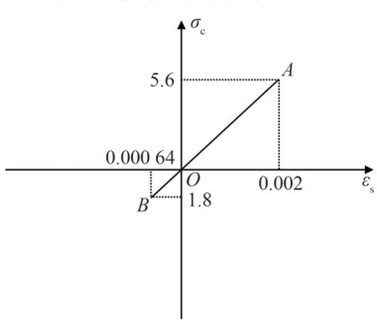


图8　混凝土应力-应变关系曲线

Fig.8　Stress-strain curve for concrete

3.1.3　岩体在π平面的屈服面

岩土体Mohr-Coulomb屈服准则主应力形式计算表达式为

$$F(\sigma) = \sigma_1(1-\sin\varphi) - \sigma_3(1+\sin\varphi) - 2c\cos\varphi \tag{4}$$

式中:$F(\sigma)$为屈服强度极限;φ为初始内摩擦角;c为黏聚力.

Mohr-Coulomb屈服准则应力不变量形式计算表达式为

$$F(\sigma) = \frac{\sin\varphi}{3} I_1 + \sqrt{J_2}\left(\cos\theta - \frac{1}{\sqrt{3}}\sin\theta\sin\varphi\right) - c\cos\varphi \tag{5}$$

式中:θ为膨胀角;I_1为应力张量第1不变量;J_2为应力偏量第2不变量.

I_1、J_2的计算式分别为

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{6}$$

$$J_2 = \frac{1}{6}\left[(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2 + (\sigma_3-\sigma_1)^2\right] \tag{7}$$

式中:σ_1、σ_2 σ_3分别为第一、第二、第三主应力,$\sigma_3 \leqslant \sigma_2 \leqslant \sigma_1$.

一般应力分量形式下J_2为

$$J_2 = \frac{1}{6}\left[(\sigma_{XX}-\sigma_{YY})^2 + (\sigma_{YY}-\sigma_{ZZ})^2 + (\sigma_{ZZ}-\sigma_{XX})^2\right] + \tau_{XY}^2 + \tau_{YZ}^2 + \tau_{ZX}^2 \tag{8}$$

式中:σ_{XX}、σ_{YY}、σ_{ZZ}分别为X、Y、Z方向正应力;τ_{XY}、τ_{YZ}、τ_{ZX}分别为XY、YZ、ZX面的切向应力.

岩体在π平面的屈服面见图9.

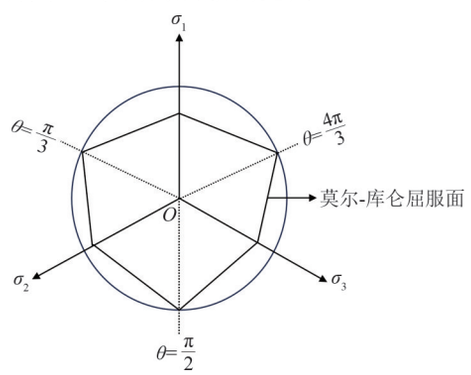


图9　岩体在π平面的屈服面

Fig.9　Yield surface of rock mass in π plane

喷射混凝土采用板单元,钢拱架采用梁单元,锚杆采用桁架单元,初支钢筋网、连接筋等视为围岩一体设置,临时支撑锚杆与临时棚架结构视为一体设置,在计算模型中不单独设置,挑顶施工开挖支护材料计算参数见表1.

表1　数值计算参数

Tab.1　Numerical calculation parameters

材料	密度/(kN·m^{-3})	弹性模量/GPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
粗粒土	20.0	0.036	23	28	0.30
砂质泥岩	23.0	1.500	170	32	0.30
砂砾岩	28.0	3.200	560	38	0.22
初支混凝土	24.0	28	—	—	0.20
系统锚杆	78.5	206	—	—	0.20
锁脚锚杆	78.5	206	—	—	0.20
钢拱架	78.5	206	—	—	0.30
棚洞钢架	78.5	206	—	—	0.30

3.2　施工步序模拟

按照现场施工工序进行开挖支护精细化模拟，每循环进尺为 50 cm，开挖施工共 60 m，整个挑顶施工工序为：横洞上台阶开挖初期支护→横洞下台阶开挖初期支护→横洞上下台阶循环开挖初期支护→施作加强环→正洞中上台阶开挖初期支护（临时棚架＋初喷混凝土）→一次施作正洞中上台阶钢拱架＋初喷混凝土支护→正洞中上台阶左侧临时棚架依次拆除＋左侧临时初喷混凝土依次钝化→正洞中左侧上台阶开挖支护→正洞中上台阶右侧临时棚架依次拆除＋右侧临时初喷混凝土依次钝化→正洞中右侧上台阶开挖支护→正洞中下台阶开挖初期支护→正洞中仰拱开挖初期支护→正洞中两侧下台阶开挖初期支护→正洞中两侧仰拱开挖初期支护．各部分一次初期支护包含钢拱架＋喷砼＋系统锚杆＋锁脚锚杆，临时棚洞钢架包含 I18 型工字钢＋喷砼，该计算模型共计 98 步施工步序，从第 89 步施工步序可以看出，正洞中上台阶、正洞中左侧上台阶及正洞中右侧上台阶均已开挖支护完成，该步序为所有施工步序中三维可视效果较为具有代表性的施工序，具体第 89 步施工步序模型见图 10．

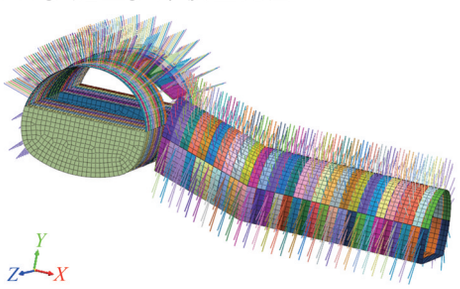


图 10　第 89 步施工步序模型

Fig.10　Model of the construction sequence in the 89th step

3.3　计算结果分析

初期支护应力分布云图见图 11．由图 11（a）、11（b）可见，挑顶开挖施工过程中，周边围岩的应力不断释放并作用到初支结构上，拱顶和拱腰处应力较大．由图 11（c）可见，隧道主洞及左右两侧上台阶开挖完成后，主洞上台阶分岔口中间段及两侧段外边缘分别承受较大的拉应力和压应力．由图 11（d）可见，初支结构施工完毕后，隧道主洞左右侧临时支撑处存在较大的应力集中，初支结构应力整体保持在 0.15 MPa～0.76 MPa，满足 C25 混凝土强度要求．可见，初支结构可在一定程度上控制断面隧道围岩变形．

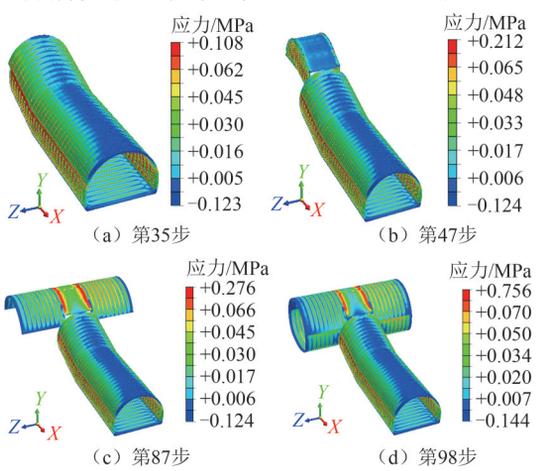


图 11　初期支护应力云图

Fig.11　Initial support stress cloud map

初支钢拱架内力分布云图见图 12．由图 12 可见，随着开挖施工逐步推进，钢拱架内力整体处于压应力状态，横洞拱顶、拱腰处压力明显较大，加强环及正洞中部钢拱架出现较小拉力．钢拱架结构最大拉、压力分别为 43、343 kN，结构整体稳定性良好，钢拱架结构有效降低了围岩应力作用下支护结构的沉降变形．

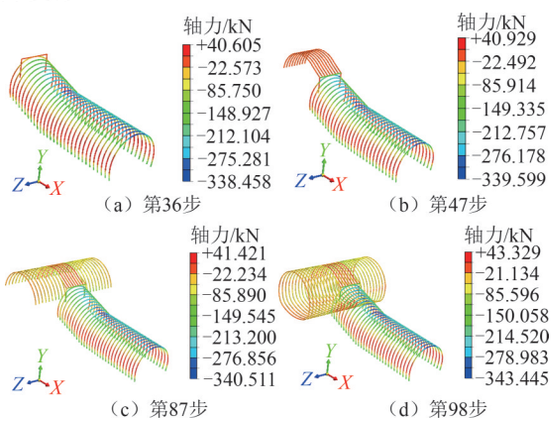


图 12　钢拱架内力云图

Fig.12　Cloud diagram of internal force for steel arch frame

系统锚杆内力分布云图见图 13．由图 13 可见，隧道拱顶及拱肩锚杆承受压应力相对明显，两侧拱腰及拱脚区域锚杆呈现拉压结合的受力状态，系统

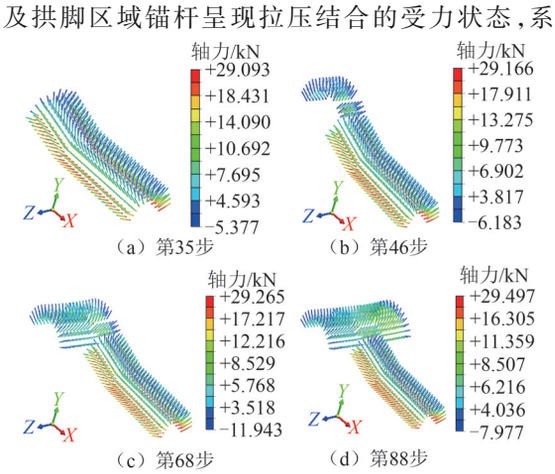


图 13　系统锚杆内力云图

Fig.13　Cloud diagram of internal force for system anchor rod

锚杆最大拉、压力分别为 29.4、11.94 kN,随着开挖支护逐步推进,主洞中部拱顶及拱肩所受压应力逐步减小,挑顶施工过程系统锚杆整体内力较为稳定.

锁脚锚杆内力云图见图 14.由图 14 可见,锁脚锚杆内力整体呈对称性分布,横洞锁脚锚杆底端随着施工步的推进,由拉力转化为压力状态,主洞处锚杆在初支结构的沉降挤压下,锚杆上拉下翘形成弯折结构,受力呈拉压组合状态,锚杆最大拉、压力分别为 64.98、8.72 kN,保持了支护结构的整体稳定.整体来看,随着掌子面推进,锁脚锚杆内力远小于该结构极限强度,隧道整体稳定性较好.

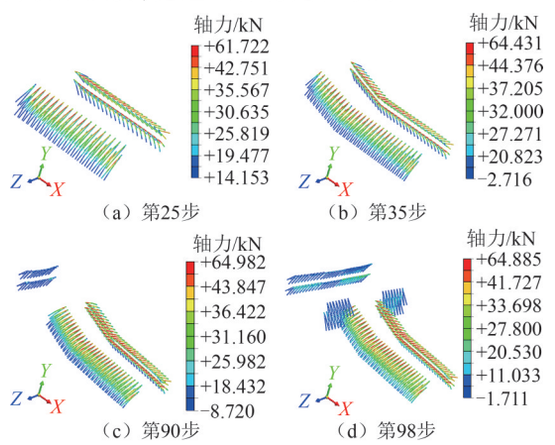


图 14　锁脚锚杆内力云图

Fig.14　Cloud diagram of internal force for locking anchor rod

临时＋永久棚洞钢架内力云图见图 15.由 15 图可见,两侧临时支撑曲率最大处所受拉力水平较高,最大拉应力为 65.58 kN,临时钢支撑两端所受压力水平较高,最大压力 168.64 kN.随着隧道不断开挖,门字形棚洞钢架支撑承担了初支结构部分沉降及横向变形,进一步巩固支护结构的防护作用,提高了隧道断面结构整体稳定性.

横洞转主洞施工过程中,考虑局部交叉口段及

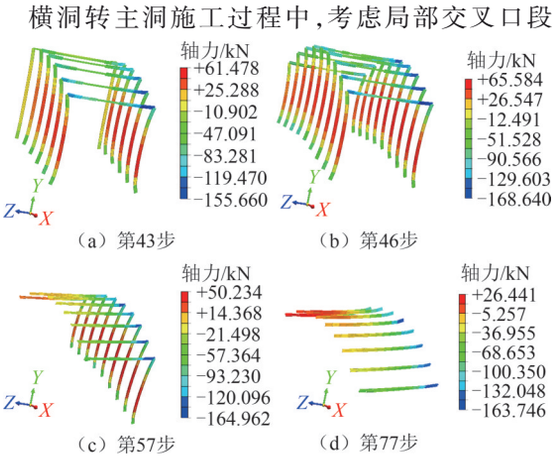


图 15　临时+永久棚洞钢架内力云图

Fig.15　Internal force contour plot of temporary and permanent shed steel frame

两侧双向开挖支护过程中土体受力变化幅度大,选取 3 个相互平行的特征剖面作为特征指标的现场监测与数值模型提取位置,剖面 2 与横洞中心线重合,剖面 1、3 分别为沿横洞进主洞方向的左、右两侧,剖面 1、3 与剖面 2 距离均为 8 m.提取 3 个剖面上拱顶、拱腰、拱脚等位置特征点上岩体的大小主应力,剖面 1～3 监测点主应力随施工过程的变化曲线见图 16～图 18,图中竖向虚线表示代表性施工步数,负值代表受压,正值代表受拉.

剖面 1 位于交叉口左侧 8 m 处,应力监测点布置见图 16(a).由图 16(b)、16(c)可见,横洞上台阶开挖到主洞前,剖面 1 上各个特征点应力几乎不发

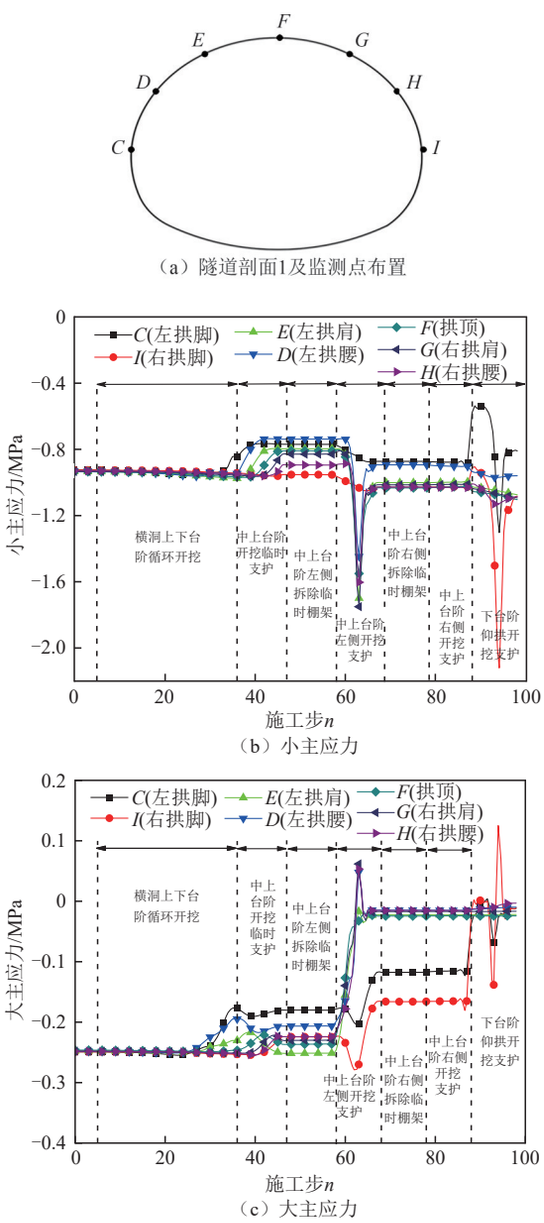


图 16　剖面 1 监测点主应力随施工过程变化曲线

Fig.16　Curves of principal stress variation with construction process at monitoring point 1 of profile

生变化，应力表现为受压状态，表明该正洞及周围土体还未开挖揭露；施工步进行主洞中上台阶开挖及临时支护过程中，剖面1各特征点小主应力均发生明显减小的变化；左拱脚、左拱腰处大主应力出现小幅增长，随后拱顶、右拱肩、右拱脚出现明显的降低；中上台阶左侧拆除临时棚架阶段剖面1各特征点大、小主应力基本保持不变；在施工步进行中上台阶左侧开挖支护过程中，剖面1各特征点的大小主应力发生明显的改变，其中小主应力表现为：左右拱脚的压力小幅增长，其他各点压力发生突增现象，此阶段最大压应力处于1.15 MPa～1.75 MPa之间，大主应力表现在左、右拱脚处压力出现先增大后减小的变化，其他各点压力不断减小，左、右拱腰及右拱肩出现受压转为受拉状态，最大拉应力为0.06 MPa，在此阶段应及时支护，防止出现开裂掉块现象，随后施工步在中上台阶右侧拆除临时棚架时，剖面1各特征点应力基本保持不变，施工步在下台阶仰拱开挖支护过程中，大、小主应力表现为左右拱脚处压力出现先增大后减小而后趋于稳定状态，其他各点变化幅度较小.

剖面2位于交叉口处，应力监测点布置见图17(a). 由图17(b)可见，在横洞开挖临近交叉口段施工过程中，剖面2加强环处小主应力受压急剧增加，此时交叉口处因开挖揭露岩体而发生明显的应力变化，此处易发生应力集中，影响范围波及到左拱肩处；在主洞中上台阶开挖临时支护过程中，剖面2各监测点小主应力所受压应力均呈不同程度的增加，其中加强环处压应力达到1.96 MPa，其他各点最大压应力为1.51 MPa，相差23.0%；在交叉口处主洞左、右临时棚架拆除过程中，剖面2各监测点所受压应力基本保持稳定状态；在交叉口处主洞左、右反向开挖过程中，剖面2各监测点应力状态发生变化，各点所受压应力均呈不同程度的减小；在交叉口主洞下台阶及仰拱开挖支护过程中，各监测点所受压应力均表现为先略微减小后保持不变的稳定状态. 由图17(c)可见，在横洞开挖至交叉口段施工过程中，剖面2各特征监测点仅加强环所受最大主应力发生变化，所受压应力增大，最大压应力为0.43 MPa，在交叉口处主洞开挖支护过程中，除右拱脚外，剖面2其他特征监测点所受压应力急剧减小，在主洞左右上台阶反向开挖支护过程中，仅右拱脚所受压应力受整个施工过程影响，表现为阶梯式减小，在交叉口主洞下台阶及仰拱开挖支护过程中，各特征点应力基本保持稳定不变状态.

剖面3位于交叉口右侧8 m处，应力监测点布置见图18(a). 由图18(b)、18(c)可见，在横洞上下

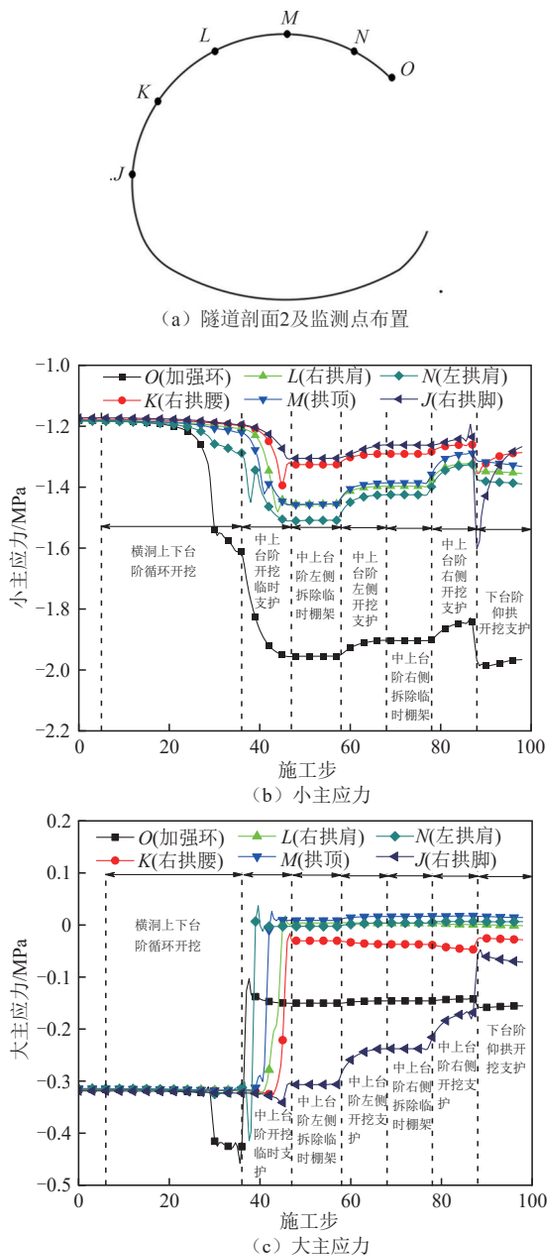
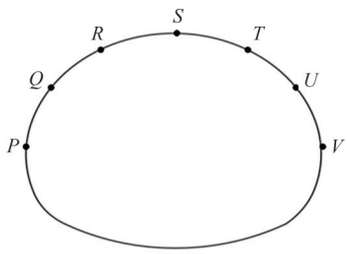


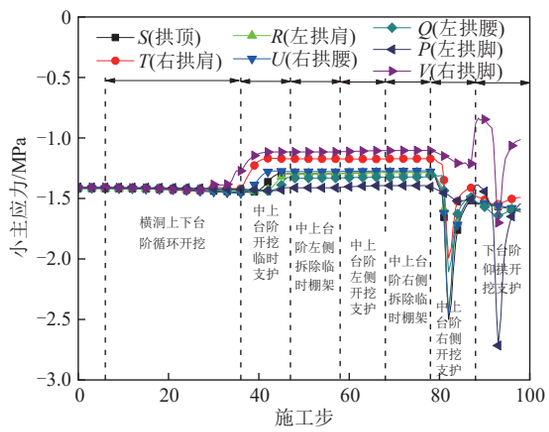
图17 剖面2监测点主应力随施工过程变化曲线

Fig.17 Curves of principal stress variation with construction process at monitoring point 2 of profile

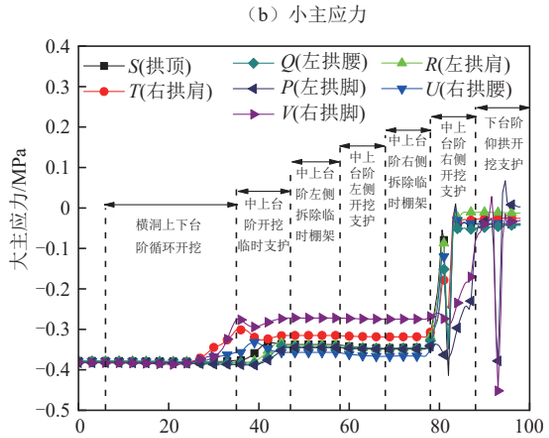
台阶开挖至交叉口段过程中，剖面3各特征点的大、小主应力基本保持稳定不变，随后在主洞中上台阶开挖支护阶段，各特征点大、小主应力所受压应力呈不同程度的减小状态；在主洞中上台阶左侧反向开挖支护过程中，各特征点的大、小主应力基本保持稳定不变状态，在主洞中上台阶右侧开挖支护过程中，剖面3各特征点的应力发生不稳定的上下波动现象，其中拱顶、左右拱腰小主应力所受压力出现先增大后减小现象，左拱脚在此阶段压应力达到2.7 MPa，在主洞下台阶及仰拱开挖支护过程中，剖面3各特征点(除右拱脚1.01 MPa)最大主应力范围位于0～



（a）隧道剖面3及监测点布置



（b）小主应力



（c）大主应力

图 18　剖面 3 监测点主应力随施工过程变化曲线

Fig.18　Curves of principal stress variation with construction process at monitoring point 3 of profile

0.05 MPa,最小主应力范围位于 1.54 MPa～1.6 MPa,处于受压状态.

4　现场施工效果

西成铁路群科隧道 2 号横洞转正洞现场采用“横洞爬坡＋加强环支护＋临时-永久支撑＋对称开挖支护”开挖支护方案,基于现场监测数据及精细化数值模拟,分析了整个施工过程中的围岩应力、拱顶沉降、横向收敛的变化规律,交叉段挑顶现场施工见图 19.

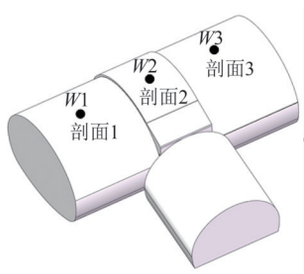
3 个剖面的拱顶沉降位移监测点布置图及拱顶沉降随施工过程变化曲线见图 20,图中负值表示下



（a）棚架爬坡进正洞　　（b）正洞上台阶初期支护

图 19　交叉段挑顶施工仰视图

Fig.19　Top view of the construction for cross section overhead



（a）拱顶沉降监测点布置

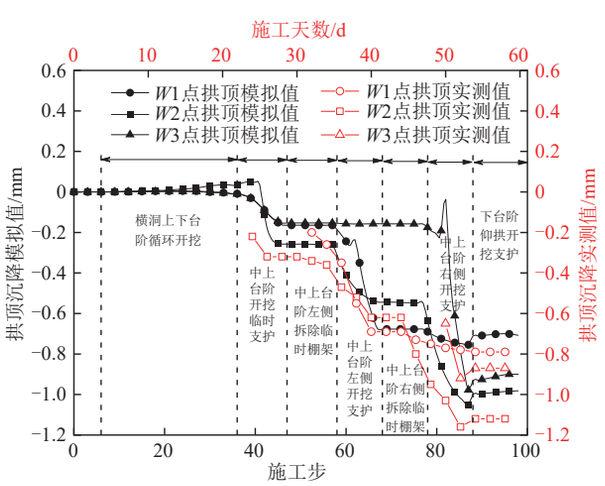


图 20　隧道拱顶沉降监测点布置及拱顶沉降随施工过程变化曲线

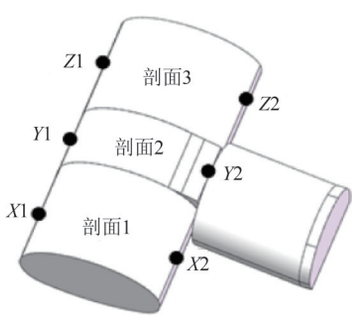
Fig.20　Layout of crown settlement monitoring points and the evolution curves of crown settlement during construction

沉.由图 20 可见,整个施工工序模拟值与相同工况不同施工天数现场实测值变化趋势较为吻合,其中剖面 2 的最终沉降值最大,拱顶模拟、实测值分别为 0.98、1.12 mm,吻合度达到 87.5%,由于施工工序导致主洞剖面 1～剖面 3 拱顶处的沉降变化规律有所不同,在横洞开挖阶段,主洞各个剖面均未开挖揭露,拱顶处位移均未发生变化,在正洞中上台阶开挖支护过程中,主洞各个剖面拱顶处开始发生不同程度的沉降,此时剖面 2 拱顶沉降值最大,随后在主洞中上台阶左、右侧临时棚架拆除过程中,各剖面拱顶基本不发生沉降,在主洞左上台阶开挖支护过程中,剖面 1 受到开挖揭露影响,沉降值最大,影响范围达

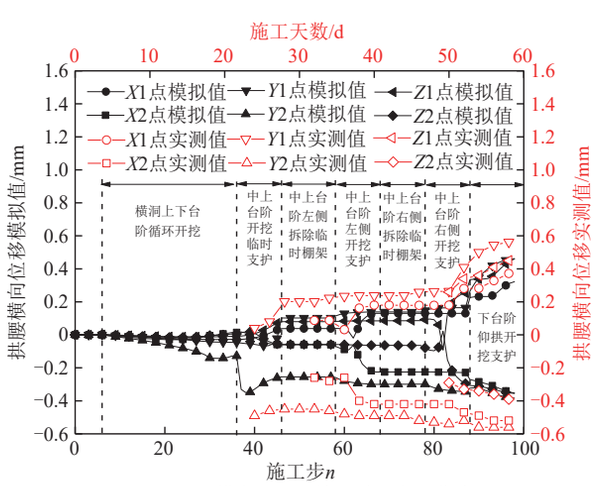
到剖面2处，剖面3此时基本未发生沉降变化，此阶段剖面1、剖面2的模拟沉降量分别为0.62、0.53 mm，分别占总沉降的88.6%、54.1%，实测沉降量分别为0.55、0.52 mm，吻合度依次可达88.7%、98.0%.

剖面3拱顶主体沉降相对比较滞后，因前期开挖剖面2及剖面1并未达到剖面3，仅临近开挖剖面2时发生较小沉降，在主洞右上台阶开挖支护过程中，剖面3发生快速沉降，此阶段模拟、实测沉降量达到最大，分别为0.92、0.87 mm，吻合度达到94.6%，剖面2在整个施工过程沉降呈阶梯式变化，分别在主洞中上台阶开挖支护、主洞左侧上台阶开挖支护、主洞右侧上台阶开挖支护发生不同程度的沉降，最后下台阶、仰供开挖支护过程中发生微小沉降后趋于稳定状态.

3个剖面的左右拱腰横向位移监测点布置图及横向位移随施工过程的变形曲线见图21，图中正值和负值分别表示相应左侧和右侧内方向的横向位移.由图21可见，整个施工工序模拟值与对应不同施工天数现场实测值变化趋势较为吻合，3个剖面



（a）拱腰横向位移监测点布置



（b）拱腰横向位移随施工过程变化曲线

图21　隧道拱腰横向位移监测点布置及横向位移随施工过程变形曲线

Fig.21　Layout of lateral displacement monitoring points at the springline and the evolution curves of lateral displacement during construction

的横向位移随施工过程的变化规律基本一致，每个剖面整个施工工序与对应不同施工天数现场实测值变化趋势较为吻合，每个剖面横向位移的总量较小，在正洞中上台阶开挖支护过程中，剖面2的横向位移变化相对明显，由于交叉口施工依次经过剖面2加强环及右拱腰处，且加强环与右拱腰相对于正洞中心线不对称，两侧的横向位移量非对称且大小不同，此阶段横向位移模拟值、实测值分别为0.35、0.54 mm，在主洞左侧上台阶开挖支护过程中，由于剖面1左、右拱腰同时开挖且相对于主洞中心线对称分布，此时左、右拱腰横向位移保持同步变化，剖面1在此阶段的横向位移量模拟值、实测值分别为0.34、0.56 mm.同理，在主洞右侧上台阶开挖支护过程中，剖面3在此阶段左、右拱腰横向位移保持同步变化且剖面3的横向位移量为0.63 mm，实测值为0.67 mm，最后在正洞下台阶及仰供开挖支护过程中，剖面1～3横向位移均有所增加后逐渐趋于稳定状态，最终横向模拟位移量分别为0.67、0.84、0.82 mm，实测值分别为0.89、1.06、0.84 mm，可以看出，正洞洞身的横向位移量在整个施工过程中变化较小，且保持在1 mm之内.

5　结论

1）提出“横洞爬坡＋加强环支护＋临时-永久支撑＋对称开挖支护”技术方案，该方案明显提高挑顶围岩稳定性，整个施工期间初期支护结构拉压应力始终保持在0.12 MPa～0.76 MPa.

2）整个施工期间钢拱架所受拉力、压力保持在43.33 kN～343.45 kN，系统锚杆、锁脚锚杆所受拉力、压力分别稳定在7.98 kN～29.50 kN、1.71 kN～64.98 kN，临时支撑所受拉力、压力保持在26.44 kN～168.64 kN，以上支护结构受力均处于安全可控范围内.

3）交叉口段正洞开挖支护过程中，加强环处围岩应力快速增长，相对于剖面2其他各特征点应力，相差23.0%以上，加强环处易发生应力集中，施工时应及时支护.

4）正洞剖面1～3拱顶最终沉降量为0.79～1.12 mm，整体处于稳定可控范围，交叉口拱顶沉降受整个施工阶段开挖支护影响，呈阶梯式增长变化，正洞剖面1～3横向位移量为0.84～1.06 mm，整体处于稳定可控范围.

本文通过数值模拟及现场试验论证了该挑顶开挖支护方案的可行性，未来将利用智能算法，以围岩变形控制、施工效率、经济成本为施工目标，对台阶长度、进尺距离、钢拱架间距等参数进行多目

标优化,形成适用于不同地质条件的标准化施工工艺.

参考文献(References):

[1] 刘佼,贾连辉,范磊,等. 异形断面隧道掘进机复合地层开挖盲区处理关键技术研究[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(2):345－353.
LIU Jiao,JIA Lianhui,FAN Lei,et al. Key technologies of excavation blind area treatment for non-circular tunnel boring machine in composite strata[J]. Tunnel Construction,2023,43(2):345－353.(in Chinese)

[2] 张成平,尚祎凡,李巍,等. 考虑流-固耦合效应的异形盾构开挖面稳定性极限分析[J]. 中国公路学报,2023,36(11):345－357.
ZHANG Chengping, SHANG Yifan, LI Wei, et al. Limit analysis of face stability of special-shaped shield tunnels considering solid-fluid coupling effect[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(11):345－357.(in Chinese)

[3] JONEIDI M,GOLSHANI A,NAEIMIFAR I. Progressive 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.

[4] 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]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,54:123－134.

[5] 章剑. 软弱围岩斜井转正洞工法动态施工力学行为分析[D]. 成都:西南交通大学,2013.
ZHANG Jian. Dynamic construction mechanical behavioral analysis of construe-tion method from inclined shaft to main tunnel in soft surrounding rock[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2013.(in Chinese)

[6] 杜传球,李馨芳,张博,等. 软弱富水地层大断面隧道挑顶施工技术研究[J].工程地质学报,2023,31(3):1116－1123.
DU Chuanqiu, LI Xinfang, ZHANG Bo, et al. Roof-Ripping construction technology for Large cross-sectional tunnel in soft and water-rich stratum[J]. Journal of Engineering Geology,2023,31(3):1116－1123.(in Chinese)

[7] 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.(in Chinese)

[8] 皮圣,范晓锋,王明年,等. 极软岩大变形隧道交叉口段主被动支护技术应用[J]. 铁道科学与工程学报,2025,22(1):221－234.
PI Sheng,FAN Xiaofeng,WANG Mingnian,et al. Active and passive support technologies applied at intersection of soft rock tunnel with large deformation [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(1): 221－234.(in Chinese)

[9] 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.(in Chinese)

[10] 杨瑞,折帅,王博,等. 邻近破碎带地层斜井进正洞挑顶施工关键技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(16):50－54.
YANG Rui, ZHE Shuai,WANG Bo,et al. Key technology of inclined shaft into main tunnel roof-jacking construction in adjacent fracture zone stratum[J]. Construction Technology, 2024, 53(16): 50－54.(in Chinese)

[11] MICHAEL A. Tunnel intersection mechanics:Closed-form pseudo-3D approximations for deformation modeling and shear-failure prediction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2025,158:106394.

[12] 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.(in Chinese)

[13] LI Y Y,JIN X G,LV Z T,et al. Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016,56:22－33.

[14] LIU H L,LI S C,LI L P,et al. Study on deformation behavior at intersection of adit and major tunnel in railway[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(6):2459－2466.

[15] 胡辉,田浩晟,杨文波,等. 高地应力挤压性围岩隧道交叉段变形及结构力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2024,43(8):1952－1965.
HU Hui,TIAN Haosheng,YANG Wenbo,et al. Study on deformation and structural mechanics characteristics of intersection sections in high stress ground squeezing surrounding rock tunnels [J]. Chinese Journal of Rock

Mechanics and Engineering, 2024, 43(8): 1952－1965. (in Chinese)

[16] 周嵩,潘岳,刘永胜,等. 极高地应力破碎地层斜井进正洞力学行为分析及施工优化研究[J]. 现代隧道技术,2024,61(4):142－150.
ZHOU Song, PAN Yue, LIU Yongsheng, et al. Mechanical behavior analysis and construction optimization for inclined shaft transitioning to main tunnel in extreme-highly stressed and fractured strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(4): 142－150. (in Chinese)

[17] 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 Tunnelling Technology, 2019, 56(S2): 688－692. (in Chinese)

[18] 张学军,吴慧林,胡正祥,等. 引水隧洞大坡度斜井车场与主洞交叉段施工技术探析[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(增1):382－390.
ZHANG Xuejun, WU Huilin, HU Zhengxiang, et al. Construction technology for intersection of large slope inclined shaft, shaft station, and main tunnel in water diversion tunnel[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(S1): 382－390. (in Chinese)

[19] 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 Construction, 2021, 41(8): 1392－1398

[20] 陈政,郭春,谌桂舟,等. 层状围岩隧道交叉结构地震方向敏感性分析[J]. 地震工程与工程振动,2022,42(1):154－168.
CHEN Zheng, GUO Chun, CHEN Guizhou, et al. Sensitivity analysis of seismic direction of intersecting structure of tunnel in layered surrounding rock[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(1): 154－168. (in Chinese)

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准:GB/T 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)