

DOI: 10.11779/CJGE20230722

不等跨十车道四连拱隧道施工全过程支护结构受力特征 现场测试研究

阳军生¹, 汤 冲¹, 柏 署^{1,2}, 谢亦朋^{*1}, 李雨哲¹, 杨 磊³

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200; 3. 中铁二十五局集团有限公司,
广东 广州 542814)

摘要: 多连拱隧道开挖洞室多、跨度大, 施工过程中荷载转换频繁, 支护结构受力特征复杂, 对多连拱隧道支护结构受力开展现场测试研究具有重要意义。依托长沙观音岩不等跨四连拱隧道工程, 选取典型断面对各洞室初支钢拱架、二次衬砌结构进行施工全过程应力监测, 以获得复杂施工步序下支护结构受力特征。测试结果表明: 观音岩隧道施工中, 先行主洞较后行洞室承担的围岩压力更大, 右主洞、左右辅洞开挖顺序居后, 施工扰动次数较少, 支护结构内力较小; 各洞室中, 初支钢拱架内力整体均呈“左小右大”的非对称分布特征, 其最大轴向压力 402.71 kN、最大弯矩 7.97 kN·m 出现在左主洞的右拱脚处, 二衬内力整体非对称程度较低, 只以左主洞呈显著非对称分布, 其余洞室呈整体对称分布; 先行左主洞支护结构的内力扰动主要由受后行邻洞的开挖影响所产生, 后行右主洞、左辅洞开挖支护阶段, 左主洞初支钢拱架、二衬结构绝大部分位置其内力增量超过总增量的一半; 采用“先主后辅, 左主先行”施工方案, 施工全过程支护结构的安全性均满足规范要求, 支护结构设计和施工措施合理。研究成果可为复杂条件下多连拱隧道的设计与施工提供借鉴。

关键词: 四连拱隧道; 支护结构; 现场测试; 受力特征; 安全性评价

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)10-2030-11

作者简介: 阳军生(1969—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事隧道与地下工程方面的研究工作。E-mail: jsyang@csu.edu.cn。

Field tests on stress characteristics of support structures of unequal-span ten-lane four-arch tunnel during whole construction process

YANG Junsheng¹, TANG Chong¹, BAI Shu^{1, 2}, XIE Yipeng¹, LI Yuzhe¹, YANG Lei³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China; 3. China Railway 25th Bureau Group Co., Ltd., Guangzhou 542814, China)

Abstract: The excavation of multi-arch tunnels with large chambers and spans leads to frequent load transfers and complex stress characteristics on the support structures, and the field tests allow for a more accurate study on the stress distribution characteristics of this kind of support structures. Based on the Guanyinyan unequal span four-arch tunnel project in Changsha, the strain gauges are used to monitor the stress characteristics in typical sections during the whole construction process of the steel arches and secondary linings. The test results reveal that the main advance tunnel experiences greater pressure of the surrounding rock compared with the subsequent tunnels. The excavation of the right main tunnel and the left and right auxiliary tunnels occurs later, resulting in fewer disturbances and smaller internal forces of the support structures. The overall distribution of internal forces of the steel arches is asymmetrical, with higher forces at the right side. The maximum axial pressure of 402.71 kN and the maximum bending moment of 7.97 kN·m are observed at the right foot of the left main tunnel. The secondary linings exhibit low asymmetry, only with the left main tunnel showing significant asymmetrical distribution. The internal force disturbances in the support structures of the left main tunnel are primarily influenced by the excavation of the subsequent adjacent tunnels. During the excavation and support stages of the subsequent right main tunnel and left auxiliary tunnel, most positions in the left main tunnel experiences the internal force increment exceeding half of the total increment. In summary, the construction plan of “first main and then auxiliary, left main first” is found to be reasonable, and the support structures meet the specification requirements. The research findings can

基金项目: 湖南省交通运输厅科技项目 (201915)

收稿日期: 2023-07-31

*通信作者 (E-mail: ypxie2020@csu.edu.cn)

provide references for the design and construction of multi-arch tunnels under complex conditions.

Key words: four-arch tunnel; support structure; field test; stress characteristic; safety evaluation

0 引言

近年来, 连拱隧道结构凭借占地面积少、线形流畅、空间利用率高等优越性, 被广泛运用于高速公路和市政道路的建设之中, 尤其适用于展线困难、地形条件复杂、周边环境保护要求高等特定条件下的隧道工程^[1]。连拱隧道因其独特的结构体系, 导致施工工序复杂, 荷载转换频繁, 尤其是对于多连拱隧道, 其先行洞的支护结构多次受到后行洞室开挖卸荷所带来的施工扰动, 其复杂的受力与变形特征是施工、设计人员所关注的重要课题。

目前, 国内外已有较多的连拱隧道工程实践, 而针对隧道支护结构的现场监测是掌握其力学行为的直接方法。目前对于双连拱隧道, 已有较多学者通过现场监测获得其支护结构受力和变形的规律性结果, 如: 周丁恒等^[1]等通过现场监测研究了不同开挖工序下隧道支护体系的受力特点, 指出上台阶开挖引起支护体系应力分布变化最大; 张春洪等^[2]、Xue 等^[3]研究了开挖步序对大跨度双连拱隧道结构力学特性的影响, 指出后行洞施工使先行洞围岩发生多次应力重分布导致其支护体系应力变化复杂且受力更大; 邱明明等^[4]研究了浅埋偏压连拱隧道在不同开挖方案下围岩和支护结构的力学行为, 指出埋深较大侧围岩变形更为显著; 赖金星等^[5]对连拱隧道支护体系受力进行了监测, 发现初期支护和二次衬砌均承担较大荷载, 结构受力稳定期较长。梁庆国等^[6]、姜成业等^[7]对连拱隧道围岩压力进行了监测与统计, 发现先开挖洞室支护结构的围岩压力均大于后开挖洞室, 并指出围岩压力具有明显的时间效应。白家设等^[8]、刘俊等^[9]、郭洪涛等^[10]分析了浅埋大跨双连拱隧道的围岩与支护结构变形特征, 指出支护结构的变形以竖向沉降为主, 及时封闭支护结构可以改善结构受力并抑制变形发展。上述研究多聚焦于双连拱隧道, 而对于多连拱隧道而言, 其力学行为与变形规律目前多来自于数值计算^[11-13]与模型试验研究^[14-15], 鲜有依托实际案例的现场监测结果。与双连拱隧道相比, 多连拱隧道具有更大的施工跨度, 施工工序更加繁复, 围岩扰动范围更大, 支护结构力学行为更为复杂, 因此, 有必要对真实施工环境下多连拱隧道支护结构的力学响应进行监测分析。

鉴于此, 依托观音岩四连拱隧道工程, 对不等跨连拱隧道的三道中隔墙、主辅4个洞室支护结构体系开展了系统的现场实测, 其中有关中隔墙结构受力测试分析已于另文介绍^[16], 本文主要分析各洞室初支钢拱架、二次衬砌随全过程施工步序的变化规律, 以期

进一步完善对复杂条件下多连拱隧道支护结构体系受力特征的认识, 为类似工程的设计与施工提供借鉴。

1 工程背景

1.1 工程地质与隧道结构设计

观音岩隧道地处长沙市望城区, 隧址经过地段为丘陵地貌区, 地表剥蚀较强烈, 山顶最大高程为 124 m。隧道设计里程为 K0+377.5~K0+874.5, 全长约 497 m, 隧道埋深 3.11~50.89 m, 隧道洞身主要穿越强-中风化板岩, 围岩级别为 IV~V 级, 岩体破碎, 节理裂隙发育, 围岩稳定性较差。主线隧道工程地质纵断面图如图 1 所示。

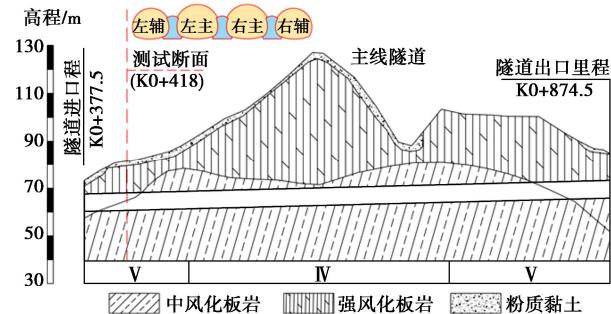


图 1 主线隧道地质纵断面图^[17]

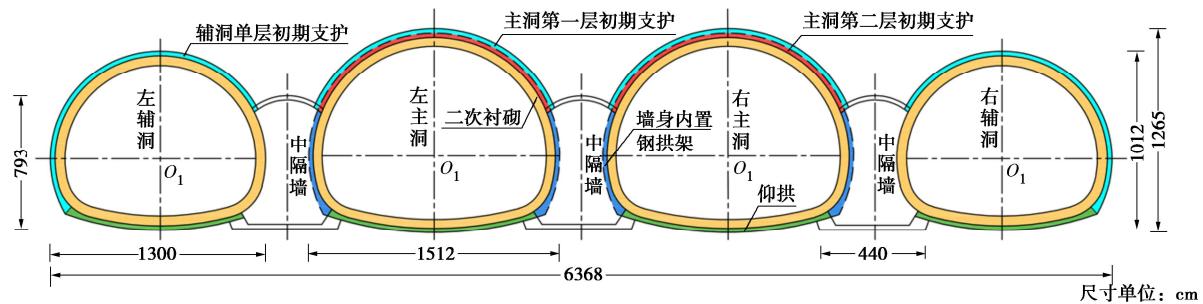
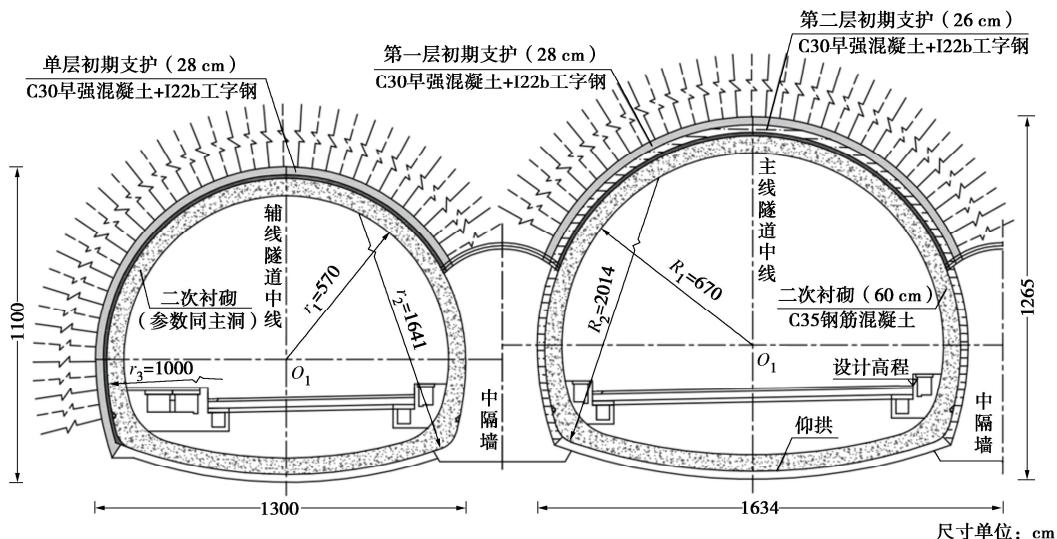
Fig. 1 Geological profile of main line tunnel^[17]

观音岩隧道采用不等跨四连拱隧道结构形式, 共包含 3 个导洞, 2 个主线隧道(单洞跨度 15.12 m)、2 个辅线隧道(单洞跨度 13.00 m), 总开挖宽度达 64 m, 为国内首个双向十车道四连拱公路隧道^[18]。隧道总体结构设计如图 2 所示。

观音岩不等跨四连拱隧道开挖洞室多, 工序复杂, 施工中围岩扰动频繁, 为降低隧道各正洞施工扰动的相互影响, 中间两条主线隧道采用双层初期支护+二次衬砌复合支护结构形式; 两侧辅线隧道由于其跨度较小, 受到的施工扰动次数较少, 采用单层初期支护+二次衬砌复合式支护结构。隧道在 V 级围岩段主洞、辅洞分别采用 LGZ-V、LGF-V 型复合衬砌设计(图 3), 在 IV 级围岩段采用 LGZ-IV、LGF-IV 型复合衬砌, 具体支护参数见表 1。

1.2 隧道施工工序

隧道采用导洞法施工, 先开挖 3 个导洞并施作中隔壁, 再开挖 2 个主洞和 2 个辅洞, 采用“先主后辅, 左主先行”的施工工序: 先开挖中间主洞, 再开挖两侧辅洞, 并以左主洞为先行洞; 主洞开挖完成后依次开挖左辅洞、右辅洞。现场各洞室施工工序如图 4 所示。

图 2 观音岩隧道结构设计图^[17]Fig. 2 Structural design of Guanyinyan tunnel^[17]图 3 V 级围岩下左辅洞 (LGF-V)、左主洞 (LGZ-V) 复合衬砌设计图^[17]Fig. 3 Design of composite linings of left auxiliary and main tunnels under surrounding rock of grade V^[17]表 1 观音岩隧道复合支护设计参数表^[17]Table 1 Parameters of composite linings of Guanyinyan tunnel^[17]

衬砌类型	层数	喷射混凝土厚度/cm	工字钢钢拱架(型号, 间距/cm)	钢筋网	二次衬砌厚度/cm	中空注浆锚杆	预留变形量/cm
LGZ-V	第 1 层	C30, 28	I22b, 50	20 cm×20 cm	C35, 60	$\phi 25 \text{ mm}$, 长度 4 m, 间距 100 cm×50 cm (环×纵)	12
	第 2 层	C30, 26	I20b, 50				
LGF-V	—	C30, 28	I22b, 50	$\phi 8 \text{ mm}$	C35, 55	$\phi 25 \text{ mm}$, 长度 3.5 m, 间距 100 cm×75 cm (环×纵)	10
	第 1 层		I20b, 75				
LGZ-IV	第 2 层	C30, 26	I20a, 75				8
	—		I20b, 75				
LGF-IV	—						7

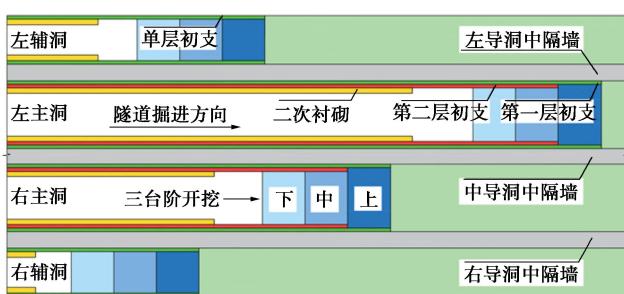


图 4 观音岩隧道各洞室施工工序示意图

Fig. 4 Diagram of construction sequences for Guanyinyan tunnel

2020 年 10 月 20 日, 隧道的 4 个正洞开始施工, 施工中对入口端 K0+418 断面支护结构开展全过程应力监测。各洞室在通过该断面时, 其上台阶开挖-支护完成的施工时间段如图 5 所示。

先行洞的支护结构将受到自身和后行邻洞施工带来的直接扰动, 以及非邻洞施工的间接扰动。4 个洞室的交替开挖会对该断面已施作的支护结构造成频繁的施工扰动, 支护结构内力在各工序转换时会发生较大变化, 尤其以左主洞最为突出, 左主洞第一层初支、第二层初支、二次衬砌均受到 3 个后行洞室开挖的施工扰动影响, 支护结构内力变化复杂。

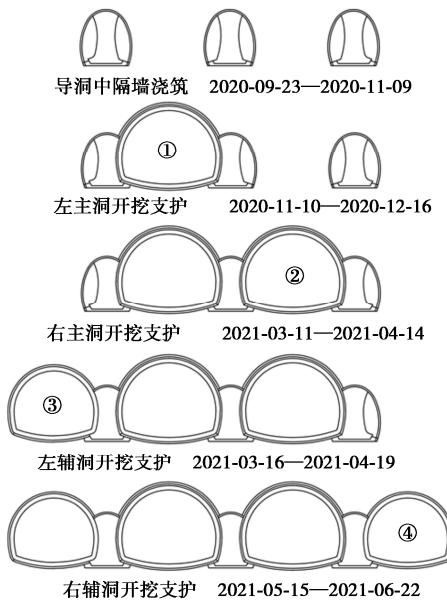


图 5 K0+418 断面典型施工阶段示意图

Fig. 5 Typical construction stages of section K0+418

2 现场监测方案

选取 K0+418 断面对支护结构内力进行监测, 该断面位于进口端 V 级围岩段, 地势北高南低, 存在一定地形偏压, 隧道埋深 13~21 m。开挖面上部为强风化板岩, 下部为中风化板岩, 断面为典型上软下硬的复合地层(图 6), 选取进口端 K0+418 典型断面进行测试可得到施工全过程此断面支护结构的受力特征, 在此围岩条件较差的地层开展内力测试具有较强的研究意义和代表性。

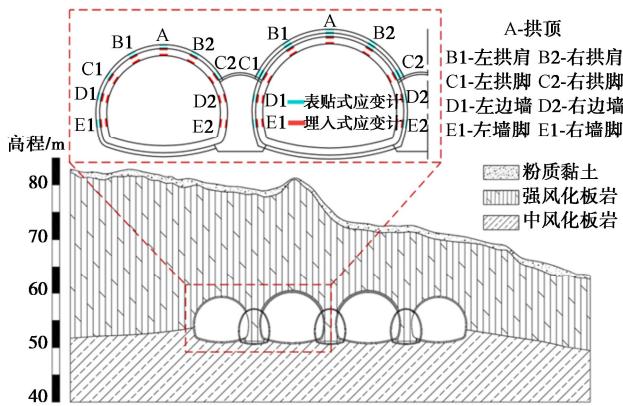


图 6 测试断面地层剖面及应变计布置示意图

Fig. 6 Profile of test section and layout of strain gauges

采用弦式应变计环向埋设于主、辅 4 个正洞开展支护结构受力实测工作, 监测内容包括初支钢拱架应力和二次衬砌应力。在初支钢拱架两翼缘内侧布置 JMZX-212A 型表贴式应变计进行受力监测, 主洞第一层钢拱架布设 5 组, 第二层钢拱架布设 9 组; 辅洞单

层钢拱架布设 7 组。二次衬砌采用 JMZX-215A 型埋入式应变计进行受力监测, 主洞和辅洞各布设 9 组。测试断面地质剖面图及左主洞、左辅洞测点布设情况如图 6 所示(左主洞和右主洞、右辅洞和左辅洞应变计呈对称布置)。

3 初支钢拱架受力监测结果与分析

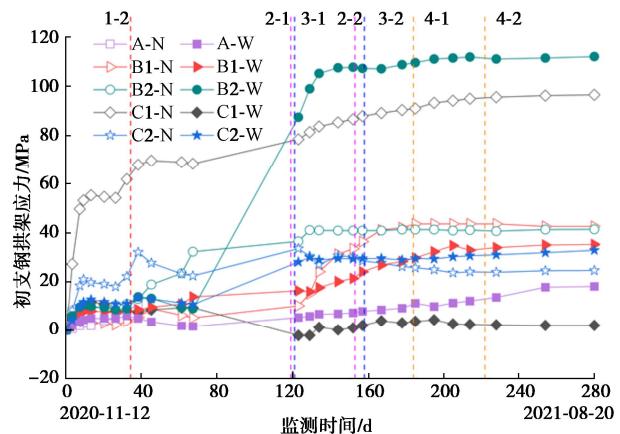
3.1 初支钢拱架应力变化时程规律

K0+418 测试断面左右主洞、左辅洞初支钢拱架应力监测结果如图 7~9 所示, 部分损坏测点处数据已剔除。图中以压应力为正, 拉应力为负, 并在图中标注代表性的施工节点, 施工节点编号如表 2 所示, 详细施工步序已于另文^[18]介绍, 故不再赘述所有工序。

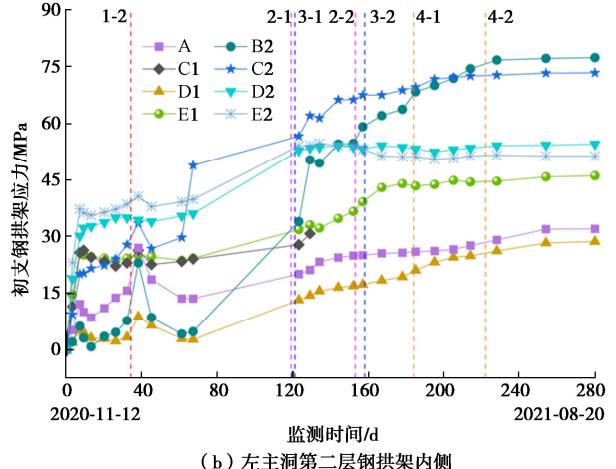
表 2 典型施工节点编号

Table 2 Number of typical construction nodes

编号	典型工序	时间节点
1-1	左主洞上台阶开挖	2020-11-10
1-2	左主洞二衬施作完成	2020-12-16
2-1	右主洞上台阶开挖	2021-03-11
2-2	右主洞二衬施作完成	2021-04-14
3-1	左辅洞上台阶开挖	2021-03-13
3-2	左辅洞二衬施作完成	2021-04-19
4-1	右辅洞上台阶开挖	2021-05-15
4-2	右辅洞二衬施作完成	2021-06-22



注: 各测点后缀-N 和-W 分别代表内侧和外侧测点(后图同)
(a) 左主洞第一层钢拱架



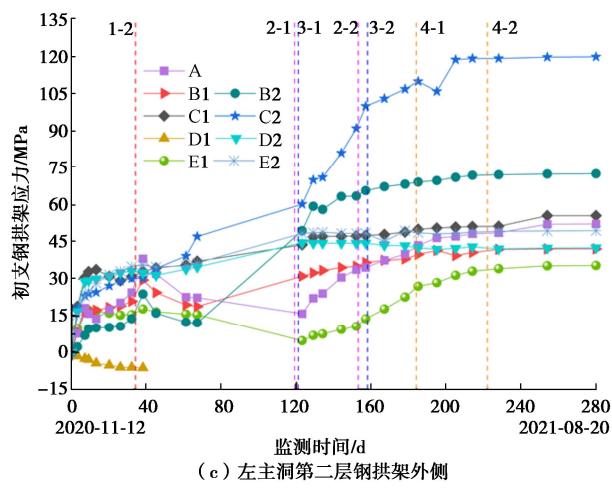
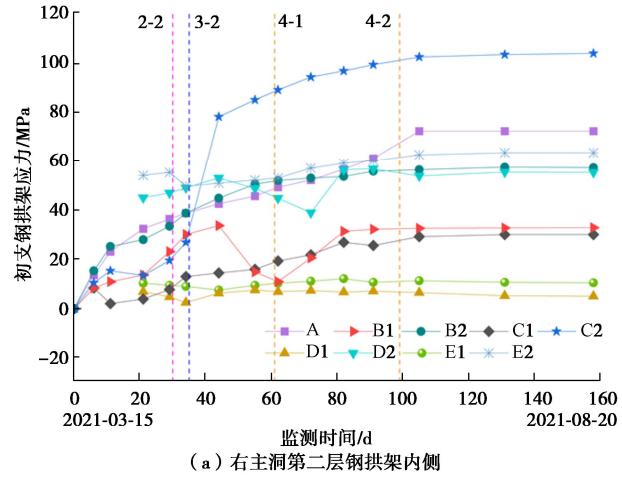
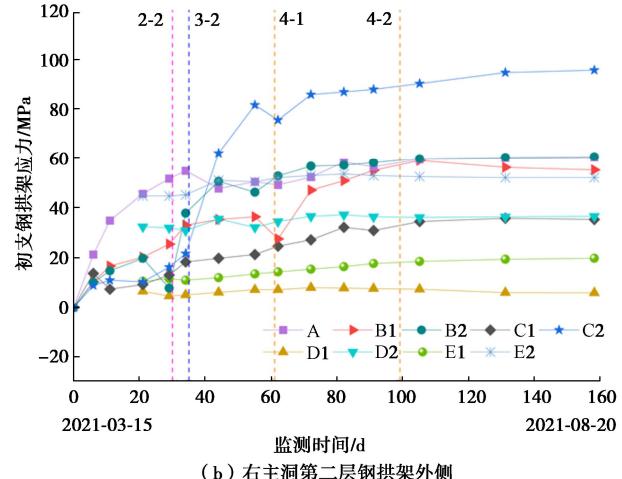


图 7 左主洞初支钢拱架应力时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of stress of steel arches of left main tunnel



(a) 右主洞第二层钢拱架内侧



(b) 右主洞第二层钢拱架外侧

图 8 右主洞初支钢拱架应力时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of stress of steel arches of right main tunnel

对监测断面左主洞钢拱架的应力时程曲线(图7)进行综合分析,得到各施工阶段的应力特性如下:

(1) 左主洞上台阶开挖至测试断面并施作初支后,钢拱架各测点压应力急剧增大,随着掌子面前推

和中、下台阶相继开挖,初支形成闭环且与中隔墙共同承载,各测点压应力增长减缓。

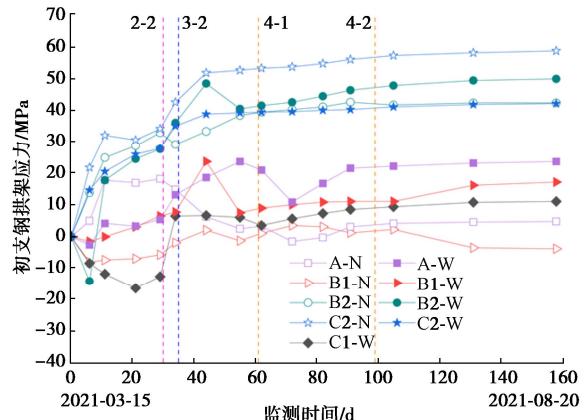


图 9 左辅洞初支钢拱架应力时程曲线

Fig. 9 Stress-time curves of steel arches of left auxiliary tunnel

(2) 监测第70~110天隧道未有施工,但左主洞钢拱架大部分测点应力保持缓慢增长,可见结构稳定期较长。

(3) 右主洞和左辅洞开挖错距较近,两个洞室在相近的时间施工至测试断面,施工扰动导致左主洞钢拱架应力再次发生显著增长,其中拱肩和拱脚处应力增量较大,拱顶处增量较小。不相邻右辅洞施工阶段,左主洞钢拱架应力基本保持稳定。

(4) 施工全过程中,左主洞第一层初支钢拱架最大压应力为112.32 MPa,出现在右拱肩外侧处,第二层初支钢拱架最大压应力为120.13 MPa,出现在右拱脚外侧处,出现时间均为右辅洞开挖完成后第59天(监测第280天)。

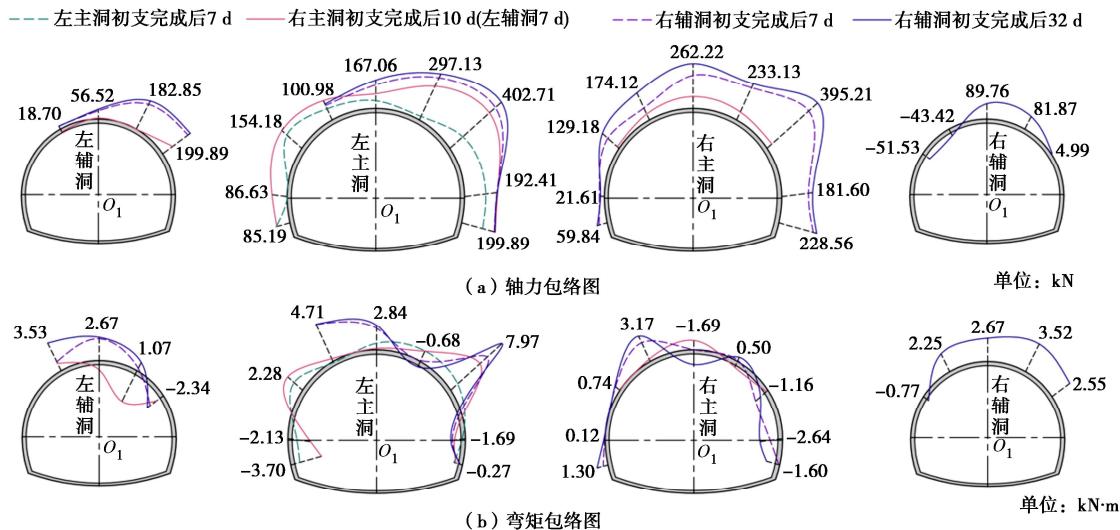
对监测断面右主洞钢拱架的应力时程曲线(图8)进行综合分析,得到各施工阶段其应力特性如下:

(1) 右主洞开挖至测试断面并施作初支,钢拱架各测点压应力迅速增长,且以拱顶应力增长最快。至二衬施作完毕后,各测点应力增幅减小并逐渐趋于稳定。

(2) 在右主洞开挖支护阶段,对比左、右主洞钢拱架受力,左主洞钢拱架应力更大。以二衬施作完成时的应力值为例,右主洞钢拱架最大压应力为51.66 MPa,位于拱顶处;左主洞最大压应力为68.44 MPa,位于拱脚处。说明先行洞开挖可释放更多的围岩压力,相邻后行洞开挖支护结构受力偏小。

(3) 相邻右辅洞开挖至测试断面后,右主洞钢拱架拱顶、左拱肩、右拱脚等测点处压应力再次显著增长,其中右拱脚处应力值较大。

(4) 施工全过程中,右主洞第二层初支钢拱架内侧、外侧最大压应力分别为103.95, 95.76 MPa,均出现在右拱脚处,出现时间均为右辅洞开挖完成后第59天(监测第160天)。



注: 左主洞左拱脚、左边墙处部分测点应力数据缺失, 故未能给出相应位置的轴力、弯矩, 但局部数据的缺失并不影响整体规律的反映

图 10 K0+418 断面典型施工步序下初支钢拱架内力包络图

Fig. 10 Distribution of internal force of steel arches of section K0+418

表 3 K0+418 断面初支钢拱架安全系数表

Table 3 Safety factors of steel arches of section K0+418

位置	左主洞第一层(K_{gy})	左主洞第二层(K_{gy})	右主洞第二层(K_{gy})	左辅洞(K_{gy})	右辅洞(K_{gy}/K_{gl})
左墙脚	—	6.21	14.52	—	—
左边墙	—	9.97	48.76	—	—
左拱脚	2.98	<u>6.10</u>	8.13	<u>25.75</u>	18.20(K_{gl})
左拱肩	6.72	6.80	5.19	16.65	14.48(K_{gl})
拱顶	<u>16.07</u>	5.48	3.97	12.08	8.92
右拱肩	2.56	3.70	4.72	5.73	8.64
右拱脚	8.98	2.41	2.76	4.88	27.86
右边墙	—	5.25	5.19	—	—
右墙脚	—	5.58	4.53	—	—

注: 加下划线数据为元器件破坏前最后一次测得应力数据。

对监测断面左辅洞钢拱架的应力时程曲线(图9)进行综合分析, 得到各施工阶段其应力特性如下:

(1) 左辅洞开挖至测试断面并施作初支, 钢拱架大部分测点压应力增长较快, 但左拱肩和左拱脚处出现短暂的拉应力, 拉应力最大值为 16.38 MPa, 但远小于钢拱架极限抗拉强度。随着二衬施作完毕, 受拉测点逐渐转为受压。

(2) 左辅洞跨度较小且开挖顺序居后, 所受施工扰动次数少。由于左、右辅洞相距较远(45.6 m), 在右辅洞施工扰动下, 左辅洞钢拱架各测点应力基本保持稳定。

(3) 施工全过程中, 左辅洞初支钢拱架右拱肩、右拱脚处压应力较大, 其余测点压应力均较小且相差不大, 钢拱架应力整体上较相邻的左主洞更小。左辅洞钢拱架内侧最大压应力为 58.80 MPa, 出现在右拱脚处, 外侧最大压应力为 49.98 MPa, 出现在右拱肩处, 出现时间均为右辅洞开挖完成后第 59 天(监测第 160 天)。

右辅洞开挖顺序居后, 其初支钢拱架应力基本不

受其余洞室的施工扰动影响, 测试结果显示其钢拱架内侧最大压应力为 13.23 MPa, 出现在拱顶处; 钢拱架外侧最大压应力为 33.18 MPa, 出现在右拱肩处, 出现时间为右辅洞开挖完成后第 59 天(监测第 97 天)。

综合以上监测结果可知, K0+418 断面各洞室初支钢拱架最大压应力出现在左主洞第二层右拱脚外侧, 最大值为 120.13 MPa, 小于 Q235 工字钢抗压强度极限值 235 MPa, 初支结构应力满足要求。

3.2 初支钢拱架内力分布与变化特征

根据 K0+418 断面钢拱架应力时程曲线, 假设钢拱架同一截面高度应力呈线性分布, 按压弯组合偏心受压构件计算钢拱架各部位的轴力 N 和弯矩 M (左右主洞以第二层钢拱架为例)。选取各洞室初支施作完成后 7 d 以及右辅洞二衬施作完成后 32 d 作为关键施工节点, 分析钢拱架内力变化特征。典型施工步序下初支钢拱架轴力、弯矩包络图如图 10 所示, 规定钢架轴力受压为正, 受拉为负, 弯矩绘制于结构受拉一侧。

左主洞初支施作完成初期, 钢拱架轴力和弯矩均较小且各部位相差不大, 受力较为均匀; 右主洞和左

辅洞初支施作完成后, 围岩压力释放导致左主洞钢拱架内力明显增大, 其中以右拱脚处增长最多(轴力增大 209.03 kN, 增量占最终稳定值的 70.35%; 弯矩增大 3.46 kN·m, 增量为 43.41%), 同时由于右主洞开挖跨度更大, 且测试断面存在一定北高南低的地形偏压, 致使左主洞钢拱架左侧的轴力和弯矩小于右侧。右辅洞开挖时, 左右主洞、左辅洞钢拱架内力显著增长, 各正洞轴力整体呈“左小右大”的非对称分布特征。

由图 10 可知, 各洞室轴力、弯矩最大值多集中于拱脚处, 即与中隔墙的连接处, 施工应重点考虑此处初支结构的安全性。右辅洞二衬施作完成后, 各正洞钢拱架内力基本保持稳定, 轴力最大值为 402.71 kN, 弯矩最大值为 7.97 kN·m, 均出现在左主洞右拱脚处。

取右辅洞施工完成后各初支钢拱架的应力稳定值, 根据规范^[19]计算得出钢拱架安全系数如表 3 所示。可见测试断面各洞室钢拱架安全系数均大于 2.0, 初支安全性满足规范^[19]要求, 最小安全系数(2.41)位于左主洞第二层钢拱架右拱脚处。

4 二衬受力监测结果与分析

4.1 二衬应力变化时程规律

由初支钢拱架结构受力特征分析可知, 观音岩四连拱隧道中的左、右主洞初支钢拱架内力更大, 且在邻洞施工影响下的变化显著, 而左、右辅洞初支钢拱架的内力监测值及其变化幅度都比较小。因此, 认为四连拱隧道中主洞结构受到的扰动程度更高。考虑主洞二衬结构施作完成后仍存在邻洞施工的工序, 因此本节重点分析左、右主洞二衬结构的受力特征及时程规律。K0+418 测试断面左、右主洞二衬应力的时程曲线分别如图 11, 12 所示, 其不同施工阶段的应力特性如下:

(1) 左主洞二衬施作完成后, 各测点压应力有一定增长, 但二衬受力总体较小; 右主洞及左辅洞相继开挖至测试断面时, 左主洞二衬各测点应力有明显增幅, 其中左墙脚处压应力最大, 最大值为 10.17 MPa; 在后续施工阶段, 应力均保持缓慢增长直至右辅洞施工完成后, 二衬应力基本稳定。

(2) 右主洞二衬各测点均受压。二衬施作初期, 衬砌压应力增长较快, 在相邻右辅洞开挖支护阶段, 其增长速度有所减缓, 至右辅洞二衬施作完成后, 各测点压应力基本保持稳定。

(3) 施工全过程中, 左主洞二衬最大压应力为 15.65 MPa, 出现在左墙脚外侧处, 右主洞最大压应力为 7.40 MPa, 出现在左边墙内侧处, 出现时间均为右辅洞开挖支护完成后第 59 天, 主洞二衬应力满足规范要求。

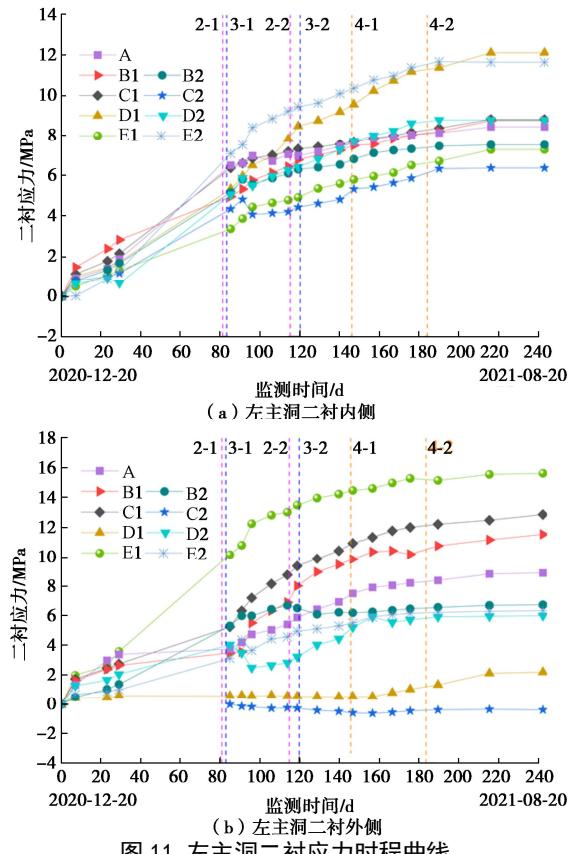


Fig. 11 Time-history curves of stress of secondary linings of left main tunnel

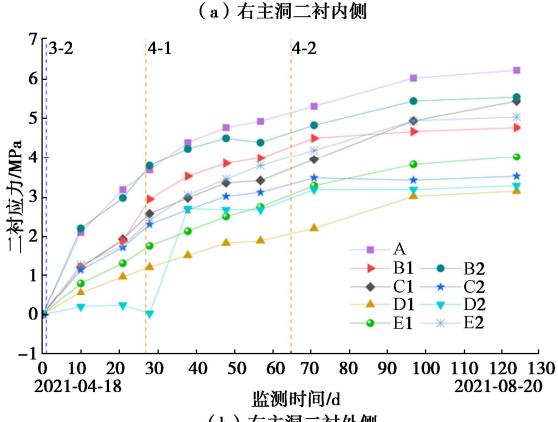
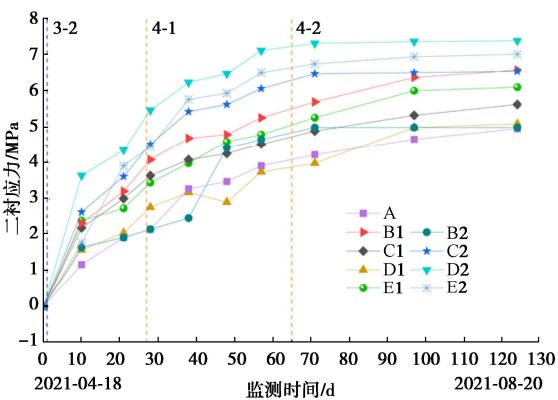


Fig. 12 Time-history curves of stress of secondary linings of right main tunnel

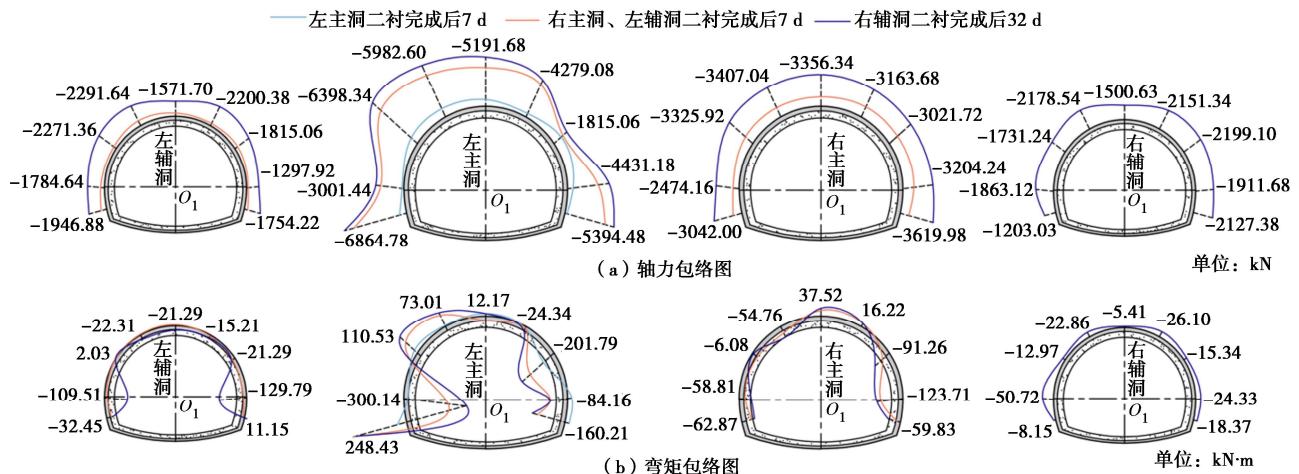


图 13 K0+418 断面典型施工步序下二衬内力包络图

Fig. 13 Distribution of internal force of secondary linings of section K0+418

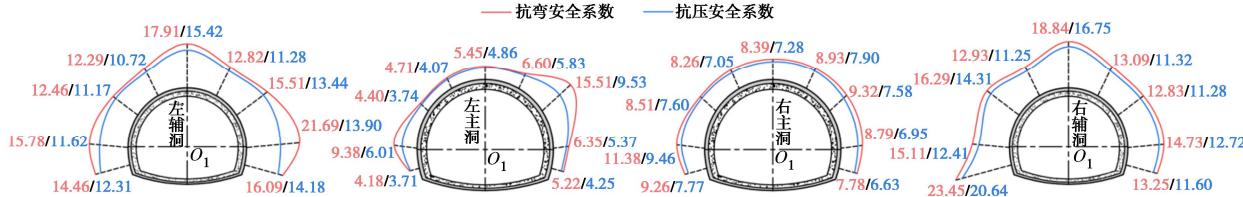


图 14 K0+418 断面各洞室二次衬砌安全系数包络图

Fig. 14 Safety factors of secondary linings of section K0+418

4.2 二衬内力分布与变化特征

根据 K0+418 断面二衬应力时程曲线, 计算二衬各部位的轴力 N 和弯矩 M 。选取各正洞二衬施作完成后 7 d 以及右辅洞二衬施作完成后 32 d 作为关键施工节点, 分析二衬内力变化特征。典型施工步序下钢拱架轴力、弯矩包络图如图 13 所示, 符号规定同钢拱架内力。

各洞室二衬内力分布变化特征为: 左主洞的二衬轴力增量主要集中于右主洞和左辅洞开挖支护阶段, 其中拱部和墙脚处增长最为明显。至右辅洞二衬施作完成后, 左主洞二衬内力已基本稳定, 呈“左侧大右侧小”的非对称分布特征, 原因是右主洞先于左辅洞开挖至测试断面, 左主洞右侧围岩压力率先释放, 而由测试结果可知(如图 10 所示)其右侧初支钢拱架轴力明显大于左侧, 在二衬施作之前便已承担了更多的围岩压力。

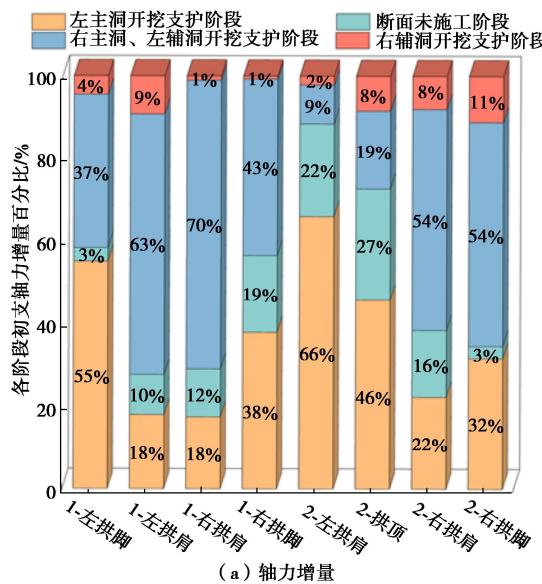
右主洞和左辅洞相继开挖, 其二衬轴力逐渐增大且各部位受力较为均匀, 弯矩则主要集中增长于边墙处, 其他部位增长较少; 至右辅洞二衬施作完成后, 各洞室二衬内力已趋于稳定, 且内力值呈现出“左主洞>右主洞>左右辅洞”的整体分布模式, 可见相同开挖跨度下先行洞将会承担更大的围岩压力, 其支护结构内力更大; 3 个后行洞二衬内力均呈对称分布形态, 衬砌结构受力良好。正洞二衬轴力最大值为 6864.78 kN, 出现在左主洞左墙脚处; 最大弯矩为 300.14 kN·m, 出现在左主洞左边墙处。

取右辅洞施工完成后二衬内力稳定值, 根据规范^[20]计算得出正洞二次衬砌安全系数, 得到其安全系数包络图如图 14 所示。可见测试断面施工完成后, 左主洞二衬安全系数呈“左小右大”非对称分布, 其余洞室二衬安全系数基本呈对称分布, 且辅洞的安全系数较主洞更大, 说明开挖跨度小、施工步序居后的洞室其支护结构有更高的安全余量; 安全系数最小值(3.71)位于左主洞左墙脚处, 此部位需要在后续监测中引起关注, 施工过程中各洞室二次衬砌安全系数均满足规范^[20]要求。

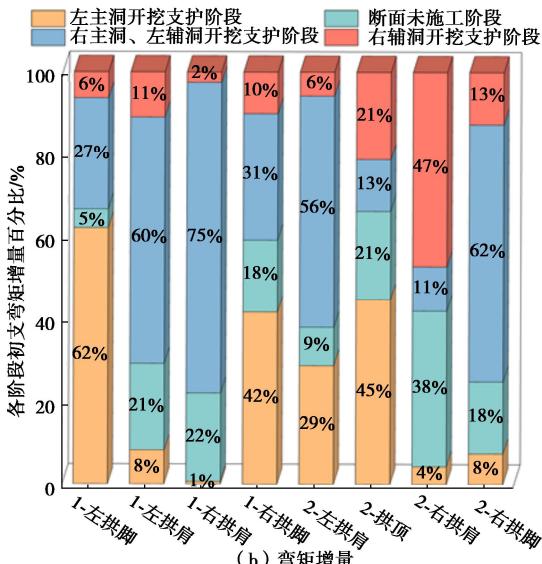
5 复杂施工步序下支护结构受力时空特征分析

由内力计算结果可知, 在多洞交替开挖的复杂施工步序下, 支护结构受力时空特征变化频繁。以受施工扰动最多的先行左主洞为例进行分析, 各施工阶段初支钢拱架、二次衬砌的结构内力增量统计分别如图 15, 16 所示。

由图 15, 16 可知, 各施工阶段左主洞初支钢拱架轴力和弯矩增量关系为: 右主洞、左辅洞开挖支护阶段>左主洞开挖支护阶段>断面施工停滞阶段>右辅洞开挖支护阶段, 二衬轴力和弯矩增长主要集中于右主洞、左辅洞开挖支护阶段, 可见邻洞开挖对先行主洞的支护结构内力影响最大, 非邻洞开挖影响较小。



(a) 轴力增量



注：各测点前缀1-和2-分别代表第一层和第二层初支

图 15 各施工阶段左主洞初支钢拱架结构内力增量

Fig. 15 Increments of internal force at various stages of steel arches of left main tunnel

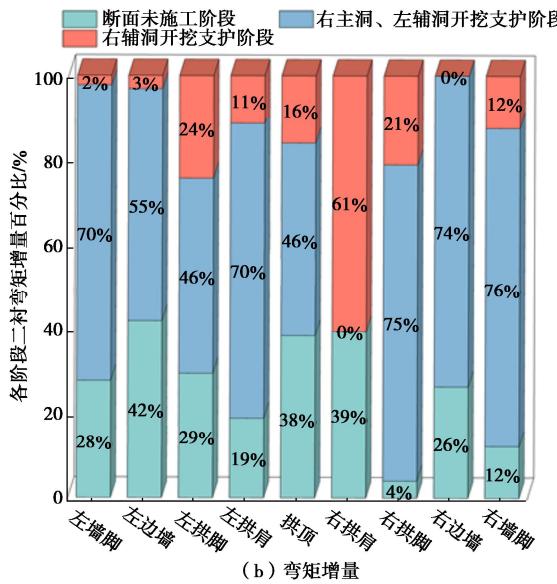
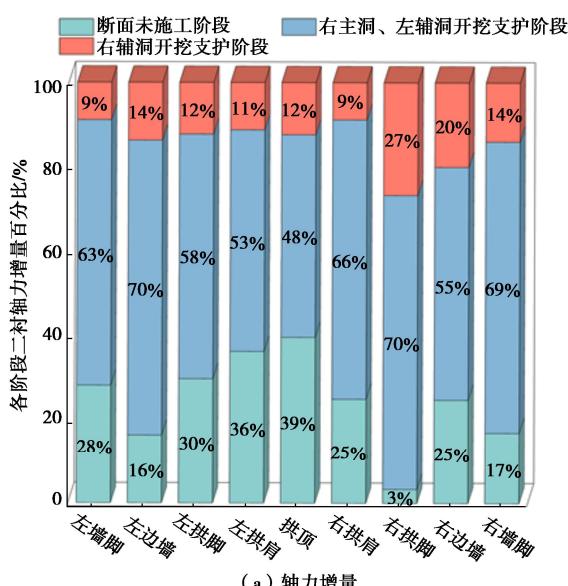


图 16 各施工阶段左主洞二次衬砌结构内力增量

Fig. 16 Increments of internal force at various stages of secondary linings of left main tunnel

左主洞自行开挖支护阶段，其初支钢拱架轴力主要集中于左侧，具体位于 2-左拱肩（增长 66%）和 1-左拱脚（增长 55%），弯矩也主要集中于 1-左拱脚（增长 62%）处。而在右主洞、左辅洞开挖支护阶段，初支钢拱架轴力和弯矩增长多集中于右侧，具体位于 1-右拱肩（轴力增长 70%，弯矩增长 75%）、2-右拱脚（轴力增长 54%，弯矩增长 62%）；二衬轴力和弯矩增长多集中于右拱脚（轴力增长 70%，弯矩增长 75%）、右墙脚（轴力增长 69%，弯矩增长 76%）等部位，分析原因为：测试断面北高南低，存在一定地形偏压；右主洞的跨度和高度均大于左辅洞，故右主洞开挖释放的围岩压力更多，造成的施工扰动更大，导致左主洞围岩压力重分布后右侧轴力和弯矩增量更大。

6 结 论

选取 V 级围岩段典型测试断面对观音岩不等跨四连拱隧道各正洞支护结构进行了现场应力测试，得到不同施工阶段支护结构应力分布特征，分析了支护结构在多洞开挖、频繁施工扰动下的受力时空特征，主要得到以下 4 点结论。

(1) 观音岩四连拱隧道在导洞法施工的基础上采用“先主后辅，左主先行”施工工序，施工中各洞室初支钢拱架、二衬结构内力值排序为：左主洞 > 右主洞 > 左、右辅洞，先行洞支护结构承担的围岩压力较后行洞室更大。

(2) 各洞室初支钢拱架内力整体呈“左小右大”的非对称分布形态，左右主洞初支钢拱架内力分布不

均, 以右拱肩、右拱脚处内力较大, 最大轴力值为 402.71 kN, 弯矩值为 7.97 kN·m; 各洞室二衬内力非对称程度较低, 仅以左主洞呈显著非对称分布, 左边墙、左拱脚处内力较大, 最大轴力值为 6864 kN, 弯矩值为 248.43 kN·m。

(3) 邻近洞室的开挖对先行左主洞支护结构受力影响最大, 右主洞、左辅洞开挖支护阶段, 左主洞初支钢拱架、二衬结构绝大部分位置其内力增量超过总增长量的一半, 施工应重点关注该阶段结构安全。

(4) 依托实测的安全性验算表明, 隧道施工全过程中, 各洞室支护结构均满足安全性要求; 观音岩隧道采用的支护结构型式及其设计参数和正洞施工工序合理可行, 可为今后多连拱隧道建设提供参考。

参考文献:

- [1] 周丁恒, 曹力桥, 王晓彤, 等. 浅埋大断面大跨度连拱隧道支护体系现场监测试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1573-1581. (ZHOU Dingheng, CAO Liqiao, WANG Xiaoxing, et al. In-situ tests on lining system of double-arch tunnel with shallow large section and span[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1573-1581. (in Chinese))
- [2] 张春洪, 李世鑫, 王元森, 等. 软弱地层浅埋大跨双连拱隧道支护结构受力现场监测试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 2): 51-57. (ZHANG Chunhong, LI Shixin, WANG Yuansen, et al. Study on structure stress of large-span shallow-buried double-arch tunnel in weak stratum by in-situ monitoring test[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 51-57. (in Chinese))
- [3] XUE Y G, GONG H M, KONG F M, et al. Stability analysis and optimization of excavation method of double-arch tunnel with an extra-large span based on numerical investigation[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2021, 15(1): 136-146.
- [4] 邱明明, 杨果林, 张沛然, 等. 浅埋偏压对连拱隧道施工力学效应的影响及处治措施[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(5): 2061-2068. (QIU Mingming, YANG Guolin, ZHANG Peiran, et al. Construction mechanical effect of multi-arch tunnel and treatment measures under shallow unsymmetrical loading[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(5): 2061-2068. (in Chinese))
- [5] 赖金星, 余德强, 冯志华, 等. 黄土连拱隧道支护结构力学特性现场试验[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(5): 180-191. (LAI Jinxing, YU Deqiang, FENG Zhihua, et al. Mechanical characteristics of a multi-arch tunnel support structure in loess[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(5): 180-191. (in Chinese))
- [6] 梁庆国, 房军, 贺谱. 基于现场监测统计的隧道围岩压力特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(2): 555-566. (LIANG Qingguo, FANG Jun, HE Pu. Analysis on tunnel surrounding rock pressure characteristics based on field measured statistics[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(2): 555-566. (in Chinese))
- [7] 姜成业, 汤华, 邓琴, 等. 深埋无中导洞连拱隧道围岩压力计算方法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 1168-1177. (JIANG Chengye, TANG Hua, DENG Qin, et al. Calculation method of surrounding rock pressure of deeply buried double-arch tunnel without middle drift[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 1168-1177. (in Chinese))
- [8] 白家设, 赵绍鹏, 齐兵, 等. 软弱地层浅埋大跨双连拱隧道支护结构变形研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 2): 45-50. (BAI Jiashe, ZHAO Shaopeng, QI Bing, et al. Study on the structure deformation of large-span shallow-buried multi-arch tunnel in soft stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 45-50. (in Chinese))
- [9] 刘俊, 刘新荣, 赖勇, 等. 不同覆跨比下浅埋软弱隧道的破坏模式[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 1744-1751. (LIU Jun, LIU Xinrong, LAI Yong, et al. Failure mode of shallow-buried weak tunnel under different thickness-span ratios[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(5): 1744-1751. (in Chinese))
- [10] 郭洪涛, 马甲宽, 代家宝, 等. 黄土地区地铁双连拱隧道浅埋暗挖施工变形特征研究: 以西安地铁 5 号线停车场出入场线工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(10): 1417-1425. (GUO Hongtao, MA Jiakuan, DAI Jiabao, et al. Research on deformation characteristics of shallow-buried mined double-arch metro tunnel in loess area: a case study on parking lot entrance and exit line project of Xi'an metro line no. 5[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(10): 1417-1425. (in Chinese))
- [11] LUO J W, ZHANG D L, FANG Q, et al. Mechanical responses of surrounding rock mass and tunnel linings in large-span triple-arch tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103971.
- [12] LI R, ZHANG D L, FANG Q, et al. Mechanical responses of closely spaced large span triple tunnels[J]. Tunnelling and

- Underground Space Technology, 2020, **105**: 103574.
- [13] YOO C, CHOI J. Effect of construction sequence on three-arch tunnel behavior-numerical investigation[J]. Geomechanics and Engineering, 2018, **15**(3): 911-917.
- [14] 李围, 何川, 陈晓婷. 配合盾构法建成三连拱地铁车站模型试验研究[J]. 工程力学, 2010, **27**(增刊2): 245-248. (LI Wei, HE Chuan, CHEN Xiaoting. Model test of three-bore metro station constructed with the method of expanding sectional shield tunnels[J]. Engineering Mechanics, 2010, **27**(S2): 245-248. (in Chinese))
- [15] CHEN G X, CHEN S, QI C Z, et al. Shaking table tests on a three-arch type subway station structure in a liquefiable soil[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, **13**(6): 1675-1701.
- [16] 李雨哲, 柏署, 杨雄, 等. 不等跨四连拱隧道中隔墙结构受力现场测试与分析[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(10): 2201-2208. (LI Yuzhe, BAI Shu, YANG Xiong, et al. Field mechanical tests and analyses of partition walls in unequal-span four-arch tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(10): 2201-2208. (in Chinese))
- [17] 湖南省交通规划勘察设计有限公司. 银星路观音岩隧道施工图[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计有限公司, 2019. (Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co, Ltd. Yinxing road Guanyinyan Tunnel Construction Drawing[R]. Changsha: Hunan Transportation Planning, Survey and Design Institute Co, Ltd, 2019. (in Chinese))
- [18] 柏署, 杨雄, 李雨哲, 等. 不等跨双向10车道四连拱隧道设计及施工方法[J]. 隧道建设(中英文), 2022, **42**(3): 478-486. (BAI Shu, YANG Xiong, LI Yuzhe, et al. Design and construction method of two-way ten-lane four-arch tunnels with different spans[J]. Tunnel Construction, 2022, **42**(3): 478-486. (in Chinese))
- [19] 公路隧道设计细则: JTGT D70—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (Guidelines for Design of Highway Tunnel: JTGT D70—2010[S]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [20] 公路隧道设计规范(第一册)土建工程: JTGT 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. (Specifications for Design of Highway Tunnels (Section 1) Civil Engineering: JTGT 3370.1—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese))

第二届环境、地质与岩土工程国际研讨会（第1号通知） (中国·杭州 2024年11月9日)

地球岩土体是重大工程承载体，矿产资源赋（储）存体和人类废弃物处置场所。地质环境与重大工程相互关联和制约，特别是全球气候变化导致其关联性更为复杂，若干新兴交叉学科或研究方向应运而生，以保障重大工程安全和保护生态地质环境。本研讨会旨在为这些领域的科学家、工程师及相关专业人员搭建一个交流平台，以促进环境、地质、岩土工程等学科的交叉融合、助力岩土工程与地质环境的可持续发展！本年度论坛主题聚焦深地工程、深海工程和岩土地震工程。

论坛主题：深地工程、深海工程、岩土地震工程。

交流议题：①环境、地质与岩土工程相互作用机制；②环境、地质与岩土工程超重力物理模拟；③废弃物深地处置；④深地能源开发与储存；⑤海洋岩土工程与地质灾害；⑥深海天然气水合物开采及灾变防控；⑦西部重大工程岩土地震灾害防控；⑧其它。

主办单位：浙江大学超重力研究中心；软弱土与环境土工教育部重点实验室。

组织方式：本论坛大会报告以邀请报告和现场讨论方式交流，按论坛议题设置10个大会报告，报告之后设置讨论环节，会后整理形成论坛交流成果。并设有四个平行分会场，针对深地工程、深海工程、岩土地震工程等开展交流。

会议注意事项：报名网址: <https://www.zjuyh.com/2024ISEGGE/n1>, 会议费：正式代表2000元/人，学生代表1500元/人。线上付款支持微信、支付宝，本次会议费委托杭州启真会展服务有限公司收取并开具增值税普通电子发票，对公转账户名：杭州启真会展服务有限公司，开户行：中国农业银行（杭州紫金港支行），银行账号：19042201040001616，对公汇款时请务必在附言中注明“参会人姓名+第二届岩土工程”。

联系方式：学术服务徐文杰 13656810920, wenjiexu@zju.edu.cn; 会议服务联系人严倩倩 0571-88177983, 15905817050, qizhenhz@zjuyh.com; 财务咨询（付款查询，票据服务等）联系人程文秀 0571-88177983, 15990153584, qizhenhz@zjuyh.com。

(会议组委会 供稿)