

DOI: 10.11779/CJGE20220809

不等跨四连拱隧道中隔墙结构受力现场测试与分析

李雨哲¹, 柏署^{1,2}, 杨雄², 阳军生^{*1}, 傅金阳¹

(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)

摘要: 依托长沙观音岩不等跨四连拱公路隧道工程, 选择典型断面对主、辅 4 个正洞施工全过程中隔墙墙身内力进行现场监测分析, 获得其在多洞室开挖、频繁扰动下的力学特征, 并验算其安全性。结果表明: 四连拱隧道中隔墙结构受力受到相邻的先行洞室开挖影响最大, 不相邻洞室开挖对其影响较小; 中间位置的中隔墙所承受荷载较两侧的更大, 正洞开挖对其影响更明显; 施工全过程各中隔墙结构的安全性均满足要求, 说明其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; 中隔墙; 现场测试; 力学特征; 安全性评价

中图分类号: TU429.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)10-2201-08

作者简介: 李雨哲(1997—), 男, 硕士研究生, 从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: liyuzhecsu@163.com.cn。

Field mechanical tests and analyses of partition walls in unequal-span four-arch tunnels

LI Yuzhe¹, BAI Shu^{1,2}, YANG Xiong², YANG Junsheng¹, FU Jinyang¹

(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)

Abstract: Based on the Guanyinyan unequal-span four-arch highway tunnel project in Changsha, a typical section is selected to test and analyze the internal forces of the partition walls during the whole construction process of two main caverns and two auxiliary caverns so as to obtain their mechanical characteristics under frequent disturbances caused by excavation of multiple caverns. The results show that the stresses of the partition walls of the four-arch tunnel are most affected by the excavation of adjacent firstly-excavated caverns, and less influences on them are caused by the excavation of non-adjacent caverns. The partition wall in the middle is subjected to greater loads than those at both sides, and it is more obviously affected by the construction disturbances. The safety of each partition wall structure during the whole construction process meets the specification requirements, indicating that its structural design and construction measures are reasonable. The research results provide reference for the design and construction of multi-arch tunnels under complex conditions.

Key words: four-arch tunnel; partition wall; field test; mechanical characteristic; safety evaluation

0 引言

连拱隧道施工工序繁多, 荷载转换频繁, 特别对于其中隔墙结构, 受到两侧洞室开挖支护带来的多次扰动, 施工力学特性复杂。

目前国内外双连拱隧道的工程实践较多, 学者们通过解析计算^[1]和有限元模拟^[2-3]对中隔墙的受力特征等进行了研究, 通过现场监测手段分析也有部分成果: 曾胜等^[4]、雷金山等^[5]通过监测不同施工阶段中隔墙受力, 指出上台阶施工对中隔墙的受力影响最大; 荀德明等^[6]测出复合式曲中墙的最不利状态在主洞开挖后二衬施作前; 周丁恒等^[7]分析了不同开挖工序带来的空间影响, 并给出了上、下台阶开挖对中隔墙受力的纵向影响范围; 丁智等^[8]分析了中隔墙各部位的

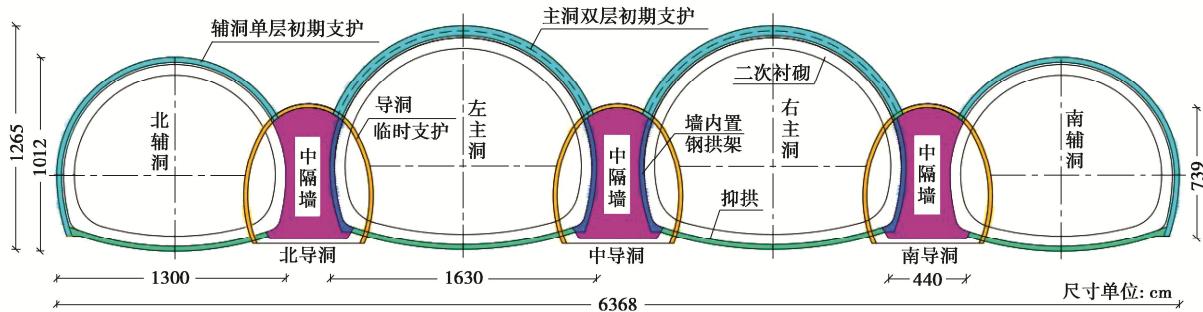
三向应力状态; 瞿永等^[9]指出中隔墙主要受到竖向应力, 且有向后开挖洞室一侧偏转的趋势; Shen 等^[10]、杨果林等^[11]总结了中隔墙在受多次施工扰动下的偏压特征。然而对于多连拱隧道, 尤其是不等跨四连拱隧道, 尚未见相关测试成果。由于四连拱隧道开挖洞室多、跨度大、施工扰动更频繁, 开展中隔墙结构受力的现场测试非常必要。

本文以长沙观音岩不等跨四连拱隧道为背景, 对其中隔墙结构进行现场应力测试, 获得其受力特征并验算其安全性, 同时评价其结构设计和施工工法。结

基金项目: 湖南省交通科技项目 (201915)

收稿日期: 2022-06-28

*通信作者 (E-mail: jsyang@csu.edu.cn)

图 1 观音岩隧道结构设计图^[13]Fig. 1 Schematic diagram of Guanyinyan tunnel structures^[13]

论可为复杂条件下多连拱隧道设计与施工提供借鉴。

1 工程背景及隧道结构

观音岩隧道长 497 m, 中间主线单洞跨度 16.3 m, 两侧辅线单洞跨度 13 m, 总开挖跨度达 64 m, 埋深 3.11~50.89 m, 为国内首创双向 10 车道四连拱公路隧道^[12]; 洞身穿越强一中风化板岩, 为 IV~V 级围岩, 岩体较破碎, 节理裂隙发育。隧道总体结构设计如图 1 所示。

观音岩隧道在 3 个导洞开挖、3 道中隔墙施作的基础上进行主辅 4 个正洞施工, 采用“先主后辅”的施工工序: 先开挖中间主洞, 后开挖两侧辅洞, 并以左主洞作为先行洞; 在主洞开挖后, 先开挖左侧北辅洞。现场正洞施工工序如图 2 所示。

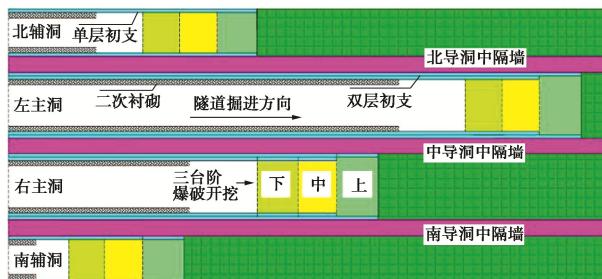


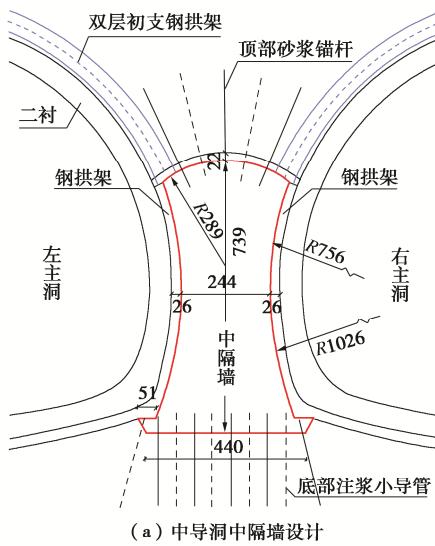
图 2 观音岩隧道正洞施工工序

Fig. 2 Construction procedure of Guanyinyan tunnel

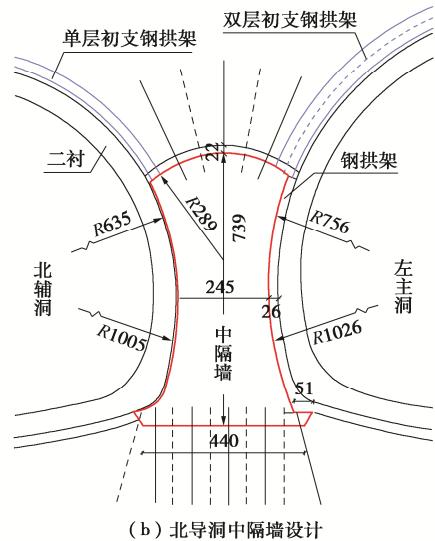
观音岩不等跨四连拱隧道开挖总跨度远大于一般双连拱隧道, 其施工会产生更大范围的围岩扰动; 尤其是中间两条主线隧道开挖时, 其围岩荷载完全由中隔墙承担, 对其中隔墙结构的承载能力有着更高的要求。

3 道中隔墙均采用曲中墙结构型式, 由于主辅隧道跨度不同, 不同部位中隔墙设计存在一定差异: 主线隧道间(中导洞)中隔墙采用对称设计; 主线与辅线隧道间(北、南导洞)中隔墙采用不对称设计; 各

型中隔墙墙底宽度均为 440 cm, 墙高 739 cm, 靠主洞侧埋置钢拱架。对于 V 级围岩段, 不同部位中隔墙设计如图 3 所示(北、南导洞中隔墙对称); 主洞及辅洞的结构设计如图 4 所示。

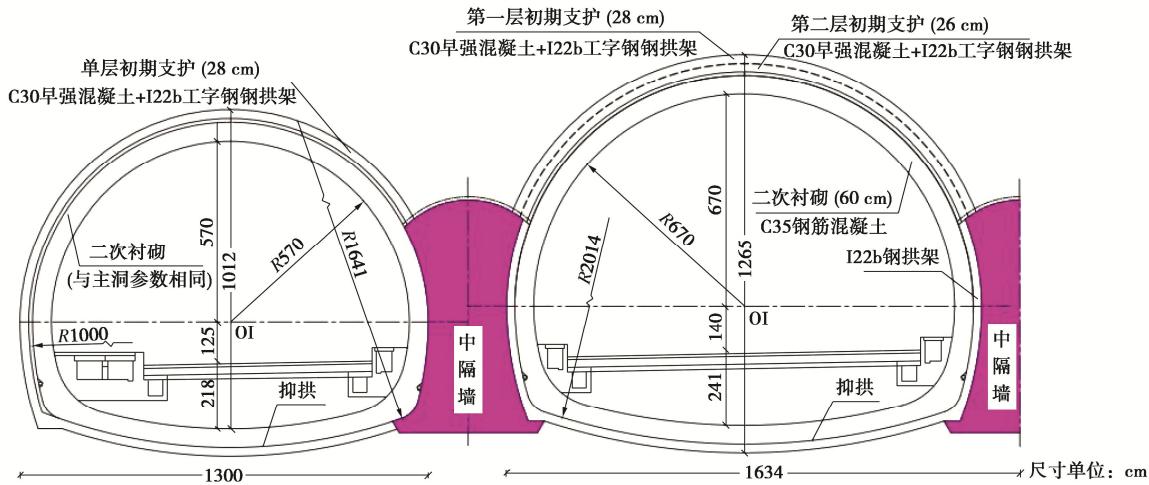


(a) 中导洞中隔墙设计



(b) 北导洞中隔墙设计

图 3 不同部位中隔墙结构设计^[13]Fig. 3 Structural design of partition wall in different parts^[13]

图4 主、辅正洞结构设计^[13]Fig. 4 Design of main and auxiliary tunnel structures^[13]

4个洞室交替开挖支护对3道中隔墙结构带来了数十次的施工扰动。作为重要受力结构, 分析中隔墙在不同施工阶段的受力特征和扰动影响, 对不等跨四连拱隧道设计和施工具有特殊指导意义。

2 中隔墙受力现场监测

2.1 监测断面情况

选取位于V级围岩段的K0+418断面(图5)进行墙身内力系统测试, 该断面埋深13~22 m, 存在一定地形偏压。开挖揭露掌子面围岩状况如图6所示, 左右主洞上部为强风化板岩, 岩质软弱、节理裂隙极发育, 下部为中风化板岩, 岩质较坚硬; 南北辅洞大部分围岩为强风化板岩; 断面位于典型的上软下硬地层中。

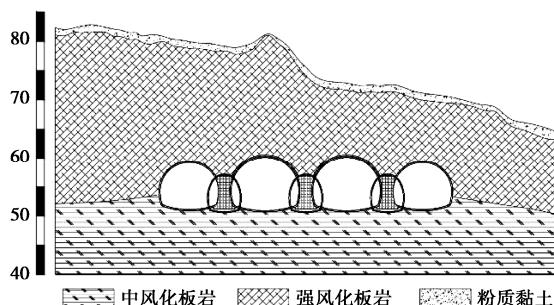
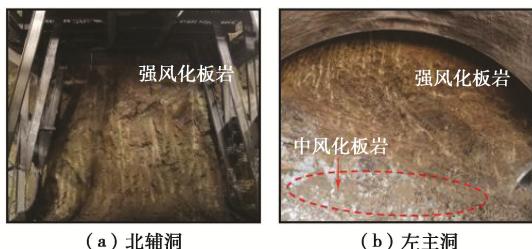


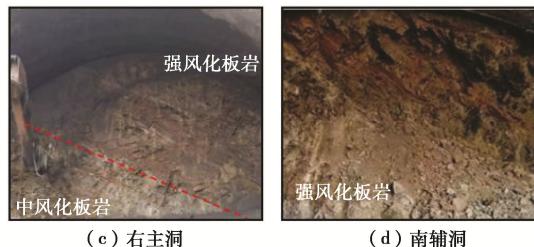
图5 K0+418断面地质剖面图

Fig. 5 Geological profile of section K0+418



(a) 北辅洞

(b) 左主洞



(c) 右主洞

(d) 南辅洞

图6 K0+418断面掌子面围岩揭露情况

Fig. 6 Exposure of surrounding rock of section K0+418

采用5组混凝土应变计竖向等间距埋设于中隔墙墙身不同高度, 对其进行受力监测。布设位置及编号如图7所示。

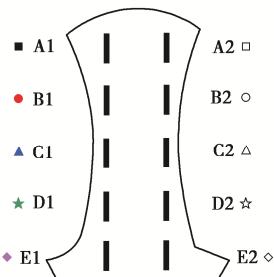


图7 测试元器件布设位置及编号

Fig. 7 Layout position and number of test components

2.2 隧道施工过程和多次扰动分析

观音岩隧道于2020年10月20日开始4个正洞施工, 各洞施工进度如表1所示。

表1 观音岩隧道正洞施工进度表

Table 1 Construction schedule of Guanyinyan tunnel

典型施工节点	日期
左主洞开挖/贯通	2020-10-20/2021-03-10
右主洞开挖/贯通	2021-01-02/2021-05-14
北辅洞开挖/贯通	2021-01-13/2021-05-20
南辅洞开挖/贯通	2021-04-12/2021-07-13

对K0+418断面中隔墙的受力监测贯穿正洞施工

全过程。以上台阶开挖至该断面为起始时间，二衬施工完成作为结束时间，断面 4 个正洞施工阶段如图 8 所示。

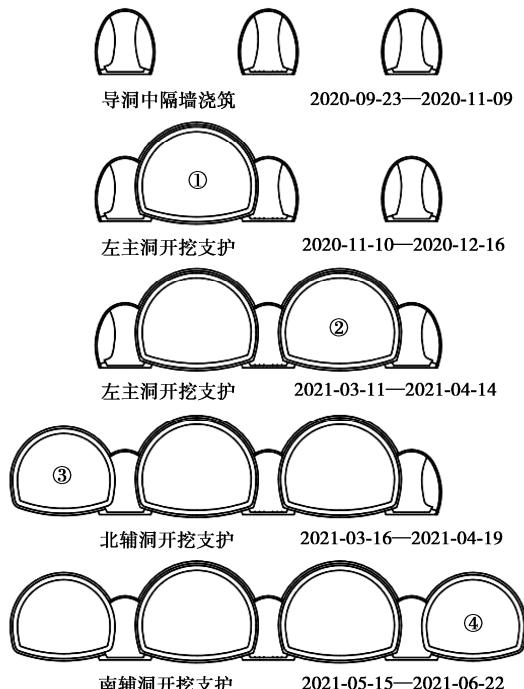


图 8 K0+418 断面典型施工阶段

Fig. 8 Typical construction stage of section K0+418

3 道中隔墙均不同程度地受到邻近正洞施工带来的直接扰动和非邻近正洞施工的间接扰动。以左主洞为例, 其具体施工工序经过测试断面情况如表 2 所示。

表 2 左主洞各工序经过 K0+418 断面具体时间

Table 2 Time of each procedure of left main tunnel passing through section K0+418

步骤	工序	日期
1	上台阶开挖、导洞破除	2020-11-10
2	第一层初支施作	2020-11-10
3	第二层初支施作	2020-11-15
4	中台阶开挖	2020-11-27
5	下台阶开挖	2020-12-08
6	仰拱施作	2020-12-12
7	二衬施作	2021-12-16

可见仅左主洞各工序经过测试断面就对中隔墙结构带来了 7 次施工扰动。由于现场四洞施工先后顺序的选择, 断面 3 道中隔墙受到扰动次数各有不同, 统计结果如表 3 所示。现场典型的施工扰动如图 9 所示。

表 3 3 道中隔墙所受施工扰动次数统计

Table 3 Statistics of disturbance times of 3 partition walls

部位	直接扰动/来源	间接扰动/来源	总计
北导洞	13/ (左主、北辅洞)	13/ (右主、南辅洞)	26
中导洞	14/ (左主、右主洞)	12/ (北辅、南辅洞)	26
南导洞	13/ (右主、南辅洞)	6/ (北辅洞)	19

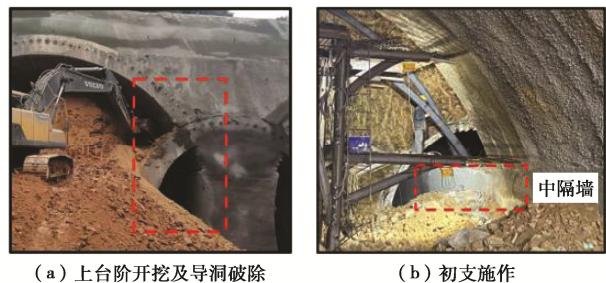
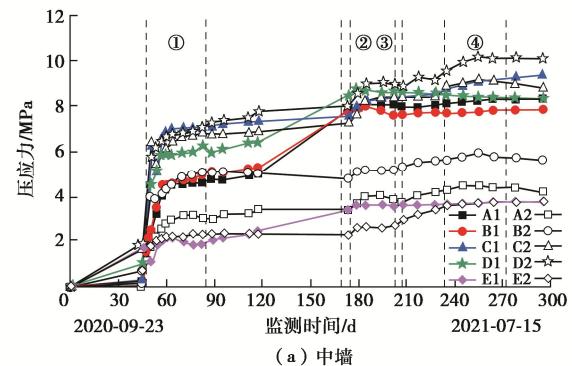


图 9 现场典型施工扰动

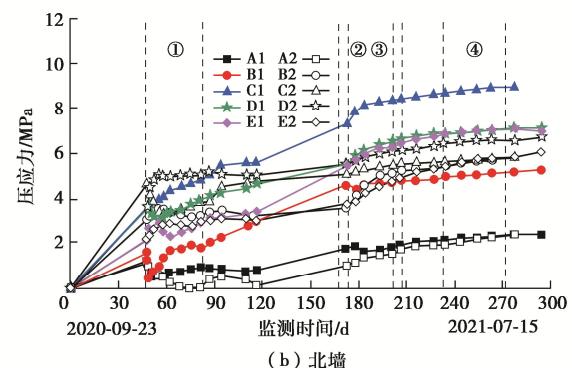
Fig. 9 Typical construction disturbance on site

2.1 墙身应力监测结果

本文选取受扰动次数最多的中导洞中隔墙(后文简称中墙)、北导洞中隔墙(后文简称北墙)进行墙身应力监测结果分析。给出两墙的监测结果如图 10 所示。规定以压应力为正, 拉应力为负。



(a) 中墙



(b) 北墙

注: ①左主洞 (48~84 d); ②右主洞 (169~203 d); ③北辅洞 (174~208 d); ④南辅洞 (234~272 d) 下图同

图 10 中、北两墙应力时程曲线

Fig. 10 Time-history curves of stress of middle and north walls

得到不同阶段中隔墙的墙身应力特性如下:

(1) 所有测点均受压。监测第 48 d, 左主洞上台阶开挖至测试断面, 两墙各测点压应力急剧增大, 表明中隔墙在断面开挖后立即起了承压作用。随着左主洞掌子面前推、仰拱和二衬相继施作, 压应力增长缓慢, 部分测点压应力出现下降。

(2) 断面在第 120~160 d 期间未有施工, 但中墙大部分测点及北墙各测点应力仍保持增长, 可见结构稳定期较长。

(3) 右主洞与北辅洞相继开挖至测试断面时, 两墙压应力增幅变大, 但不及左主洞施工阶段, 后行洞施工带来的墙身应力增长明显小于先行洞室; 不相邻的南辅洞施工阶段两墙各处应力增长缓慢。以中墙墙身中部 C 截面为例, 左侧主洞开挖支护阶段, 墙身左侧应力增量占其最终稳定值 80.58%, 墙身右侧应力增量占 62.88%; 其右侧主洞开挖支护阶段, 墙身左侧增量占其最终稳定值 12.95%, 右侧增量占 18.83%。墙身靠近开挖洞一侧的应力增长要大于远离侧。

(4) 墙身中部应力大于上下两端, 符合曲中墙两端宽中间窄的截面特征。墙身两侧应力变化存在差异, 可见中隔墙受力不均, 存在一定程度偏压。

断面 4 洞开挖支护完成后, 各测点应力趋稳。墙身的应力极值及对应测点与时间如表 4 所示, 均小于规范规定的 C35 混凝土抗压强度设计值 16.7 MPa^[14]。

表 4 中、北两墙压应力极值

Table 4 Extreme stresses of middle and north walls

部位	最大压应力值/ MPa	出现测点	出现时间/d
中墙	10.17	D2	255
北墙	8.92	C1	278

注: 255 d 对应具体时间为南辅洞下台阶开挖期间; 278 d 对应南辅洞完成支护后。

3 中隔墙结构内力分布特征

3.1 墙身内力计算

根据中、北两墙墙身应力时程曲线, 按压弯组合偏心受压构件(图 11)计算墙身不同高度(A~E 截面)轴力 N 和弯矩 M(以向左偏转为正)。

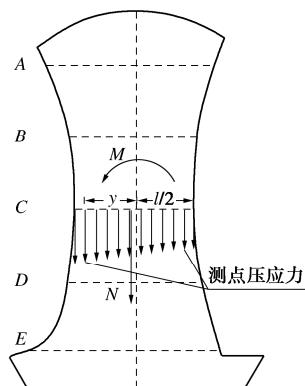


图 11 中隔墙内力计算示意图

Fig. 11 Calculation of internal force of partition wall

(1) 中隔墙轴力

计算得到的中、北两墙各高度截面(A~E)的轴力时程曲线如图 12, 13 所示。

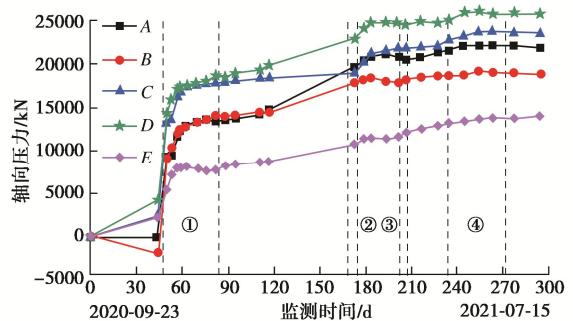


图 12 中墙轴力时程曲线

Fig. 12 Time-history curves of axial force of middle wall

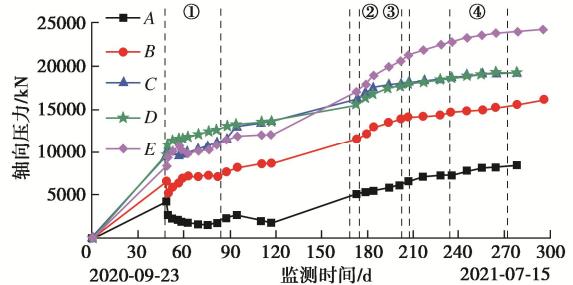


图 13 北墙轴力时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of axial force of north wall

中墙轴力最大值为 26026 kN, 出现在南辅洞中下台阶开挖阶段(255 d)截面 D 处; 北墙轴力最大值为 24199 kN, 出现在全断面开挖完成后(295 d)截面 E 处。正洞施工阶段各截面轴力均不断增长, 中墙下部轴力较小, 而北墙上部轴力较小。考虑到可能存在的端部效应, 墙身中部 C 截面的轴力能更好反应中隔墙结构受到的竖向荷载大小。隧道贯通后, 中墙 C 截面轴力达 23596 kN, 北墙 C 截面轴力达 19158 kN。

(2) 中隔墙弯矩

计算得到的中、北两墙 A~E 截面的弯矩时程曲线如图 14, 15。

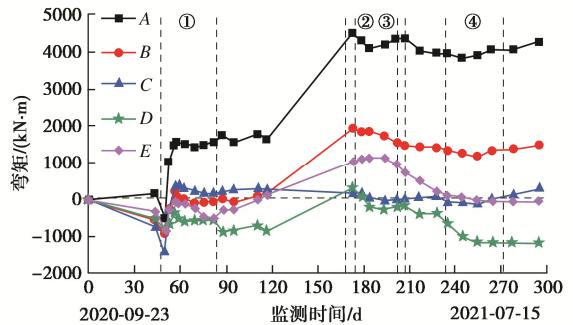


图 14 中墙弯矩时程曲线

Fig. 14 Time-history curves of bending moment of middle wall

两墙各处弯矩均在其邻洞的初支施作期间发生剧烈变化, 在仰拱及二衬施工时有回调趋势。中墙最大正弯矩出现在右主洞上台阶开挖阶段墙身 A 截面, 达 4485 kN·m, 最大负弯矩出现在左主洞上台阶开挖阶

段墙身 C 截面, 达 $-1409 \text{ kN}\cdot\text{m}$; 北墙最大正弯矩出现在北辅洞上台阶开挖阶段墙身 E 截面, 达 $2082 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 最大负弯矩出现在左主洞上台阶开挖阶段墙身中 B 截面, 达 $-1788 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

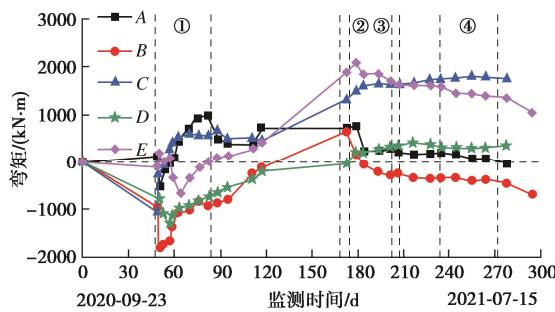


图 15 北墙弯矩时程曲线

Fig. 15 Time-history curves of bending moment of north wall

3.2 多洞开挖下中隔墙受力的时空特征

以 C 截面轴力为例, 中隔墙各施工阶段轴力增长量统计如图 16 所示。

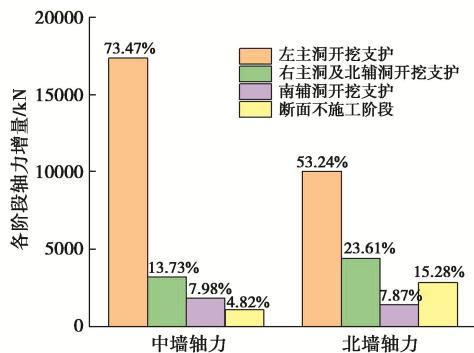


图 16 各阶段中隔墙轴力增量 (C 截面)

Fig. 16 Increment of axial force of partition walls at each stage
(Section C)

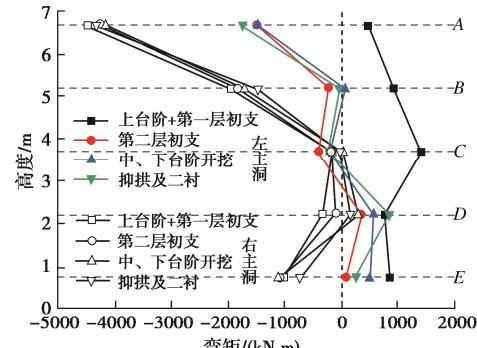
先行邻近洞室的开挖支护阶段中隔墙内力增长量最多, 后行邻洞次之; 两墙均在邻洞开挖支护时完成了大部分的内力增长。南辅洞施工阶段的轴力增量较小, 且结合时程曲线来看其带来的瞬时扰动不明显, 非邻洞施工扰动主要由围岩缓慢传递。四连拱隧道作为整体受力结构共同承受不断释放的围岩应力。

中墙在其先行洞开挖阶段的轴力增长占比 (73.47%) 要大于北墙 (53.24%), 且在断面未施工阶段的增长量很小, 跨中位置中隔墙受施工扰动影响要比两侧中隔墙要大。

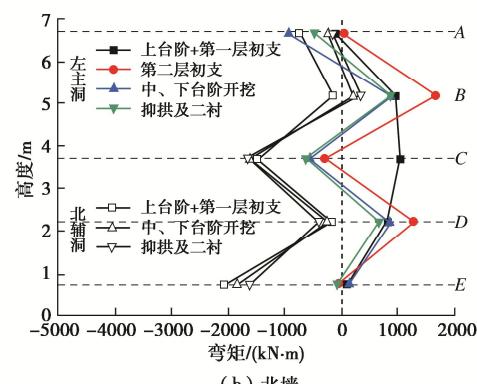
给出邻洞施工阶段典型工序下中、北两墙不同高度的弯矩变化如图 17 所示。

中墙在左主洞开挖后, 墙身上部存在向左偏转的趋势。右主洞上台阶开挖时, A, B 截面的正弯矩达到极值, 可见断面停工期间墙身向开挖侧偏转的趋势在

不断发展。随着右主洞进一步开挖支护, 弯矩有所回调, 但墙身上部仍存在较大正弯矩, 这种现象可能由于左主洞埋深大于右主洞, 地形的偏压引起。墙身中部仅在左主洞上台阶开挖阶段存在较大的负弯矩, 其余各阶段均较小, C 截面接近轴心受压。



(a) 中墙



(b) 北墙

图 17 邻洞开挖阶段中隔墙不同高度弯矩

Fig. 17 Bending moments of partition walls at different heights during excavation of adjacent caverns

北墙在其右侧的左主洞开挖后墙身不同高度的弯矩分布较复杂; 但在左侧的北辅洞开挖阶段, 各处均出现正弯矩变大或负弯矩变正的现象。可见随后行洞开挖, 北墙墙身产生了一定的偏向后行洞的趋势。

对于邻洞施工阶段具体工序对中隔墙受力的影响, 结合轴力时程曲线可见: 在邻洞的上台阶开挖、初支施作时, 各处弯矩剧烈变化, 轴力急剧增大; 而随着中、下台阶开挖, 仰拱和二衬施作, 弯矩有所回调, 轴力增长放缓; 支护结构提供的闭环支撑作用在一定程度上改善了中隔墙的受力。

4 中隔墙安全性评价和实施效果

按钢筋混凝土矩形截面的小偏心受压构件对中隔墙强度验算^[4], 各截面安全系数 K 可按下式计算:

$$K = \frac{0.5R_a d l_0^2 + R_g A'_g (l_0 - a')}{N e_i} \quad (1)$$

当轴力 N 作用于受拉钢筋与受压钢筋之间时还应符合:

$$K = \frac{0.5R_a d l_0^2 + R_g A_g (l_0 - a)}{N e_2} \quad (2)$$

式中: l_0 为截面有效宽度; e_1, e_2 分别为拉、压区钢筋重心至轴力等效作用点距离; a, a' 为左右钢筋保护层厚度; R_a 为 C35 混凝土抗压极限强度; R_g 为钢筋计算强度; A_g, A'_g 分别为拉、压区钢筋面积。

得到 K0+418 断面施工全程中、北两墙不同高度的安全系数 K , 并绘制其时程曲线如图 18 所示。

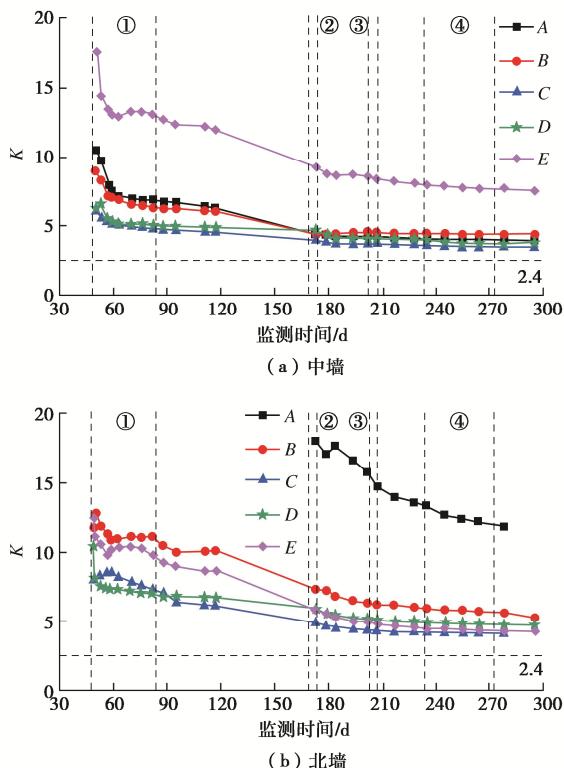


图 18 中、北两墙 K -T 曲线

Fig. 18 K -T curves of middle and north walls

可见隧道在正洞施工过程中, 两墙安全系数不断减小, 最终趋于稳定。中墙、北墙安全系数最小值分别为 3.45, 4.13, 均出现在全断面开挖后的墙身中部 (C 截面), 大于规范^[15]要求的强度安全系数 2.4。同时两墙各高度截面在各施工阶段均为小偏心受压, 其发生侧倾的风险低。施工全程中隔墙结构均处于安全稳定的状态。

对比中、北两墙受力, 北墙两侧洞室不等跨但其弯矩相较中墙要小且更均匀, 引起中隔墙偏压的主要因素是地形因素。可见两侧洞室不等跨时采用不对称中隔墙设计, 靠大跨主洞侧设置钢拱架等措施, 从自身结构角度改善了中隔墙的受力情况, 降低了不对称开挖的影响。中隔墙在先行主洞开挖阶段完成了大部分内力增长, 后行洞开挖支护一定程度改善了中隔墙的偏压状况。现场采用的“先主后辅”开挖工序能将围岩应力及早释放, 可将安全控制和处置的时机尽可

能提前, 是合理可行的。

现场针对墙身上下应力分布不均的现象, 提出严格控制墙顶周围围岩超挖, 打设连接槽固定初支钢拱架落点等一系列措施来改善墙顶与围岩及初支间的荷载传递。从现场施工效果来看, 施工全过程 3 道中隔墙全长均未出现墙体开裂、沉降不均、偏斜等不良现象, 施工效果良好。

5 结 论

选取典型断面对观音岩不等跨四连拱隧道的中隔墙结构受力进行现场实测, 得到了不同施工阶段的墙身应力分布特点; 分析了跨中位置的中墙、左侧的北墙在多洞开挖、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) 邻近洞室的开挖对中隔墙受力影响最大, 尤其在先行的邻近主洞开挖阶段的内力增长超过总增长量一半 (53%~74%), 施工应重点关注该阶段的结构安全。

(2) 不对称施工带来的影响会随后续洞开挖支护降低, 但地形因素带来的偏压影响难以消除。不相邻的洞室开挖对中隔墙造成的瞬时扰动不明显, 但内力仍保持缓慢增长, 结构稳定期较长。

(3) 中墙相较北墙承受的荷载更大, 正洞施工对其影响更明显。不等跨四连拱隧道在设计施工阶段须特别重视跨中位置中隔墙结构, 以及墙身靠大跨主洞侧的补强; 不对称曲中墙结构型式在不等跨洞室之间具有很好的适用性。

(4) 依托实测的安全性验算表明, 在正洞施工的全过程中, 中隔墙结构均满足安全性要求; 观音岩隧道采用的曲中墙结构型式及其设计参数和正洞施工工序是合理可行的, 可为今后多连拱隧道建设提供参考。

参 考 文 献:

- [1] YANG S, DAI R, AI Z, et al. Analytical solutions for the mechanical responses of shallow double-arched tunnel subjected to symmetric loads[J]. Advances in Civil Engineering, 2021: 8867536.
- [2] 张志强, 何川. 连拱隧道中隔墙设计与施工力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1632-1638.
(ZHANG Zhiqiang, HE Chuan. Study on mechanical behaviours of designing and construction for center pillar of double-arched tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1632-1638. (in Chinese))
- [3] LI S C, YUAN C, FENG X D, et al. Mechanical behaviour of a large-span double-arch tunnel[J]. Ksce Journal of Civil

- Engineering, 2016, **20**(7): 1-9.
- [4] 曾 胜, 覃庆通, 阳军生. 大跨度连拱隧道直中墙受力现场监测分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(9): 2537-2541. (ZENG Sheng, QIN Qingtong, YANG Junsheng. In-situ monitoring behaviors of middle wall of large-span multi-arch tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(9): 2537-2541. (in Chinese))
- [5] 雷金山, 阳军生, 杨 峰, 等. 大跨度偏压连拱隧道现场监测与受力分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, **7**(4): 31-36. (LEI Jinshan, YANG Junsheng, YANG Feng, et al. In-situ monitoring and mechanical analysis of large-span unsymmetrical loading multi-arch tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, **7**(4): 31-36. (in Chinese))
- [6] 苟德明, 阳军生. 连拱隧道复合式曲中墙力学特征分析[J]. 中外公路, 2009, **29**(4): 153-156. (GOU Deming, YANG Junsheng. Analysis on mechanical characteristics of composite curved middle wall of multi-arch tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, **29**(4): 153-156. (in Chinese))
- [7] 周丁恒, 曹力桥, 王晓形, 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))
- [8] 丁 智, 何佳威, 陈春来, 等. 连拱隧道中隔墙应力实测分析[J]. 现代隧道技术, 2014, **51**(5): 129-133, 138. (DING Zhi, HE Jiawei, CHEN Chunlai, et al. Stress-monitoring analysis of the intermediate rock pillar in a double-arched tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, **51**(5): 129-133, 138. (in Chinese))
- [9] 瞿 永, 郭 博, 杨果林, 等. 连拱隧道中隔墙主应变监测方案分析研究[J]. 公路, 2019, **64**(12): 304-307. (QU Yong, GUO Bo, YANG Guolin, et al. Research on main strain monitoring scheme of middle partition wall in multi arch tunnel[J]. Highway, 2019) ,**64**(12): 304-307. (in Chinese))
- [10] SHEN Y S, GAO B. Site monitoring and analytical research on mechanical characteristics under construction partial press in double-arch tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(11): 2061-2065.
- [11] 杨果林, 葛云龙, 彭 伟, 等. 连拱隧道复合式曲中墙受力现场监测分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, **47**(1): 55-59. (YANG Guolin, GE Yunlong, PENG Wei, et al. In-situ testing analysis of compound curved middle wall of multi-arch tunnel[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, **47**(1): 55-59. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 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院有限公司, 2019. (Hunan Provincial Communications Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd. Yinxing Road Guanyinyin Tunnel Construction Drawing[R]. Changsha: Hunan Transportation Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., 2019. (in Chinese))
- [14] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [15] 公路隧道设计规范 第一册 土建工程: JTJ 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. (Specifications for Design of Highway Tunnels Section 1 Civil Engineering: JTJ 3370.1—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese))