

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2025.02.020

# 浅埋偏压黄土连拱隧道中导洞及中隔墙力学特性

张 建<sup>1</sup>, 陈星宇<sup>\*2</sup>, 李超杰<sup>1</sup>, 樊纯坛<sup>2</sup>, 郭子润<sup>2</sup>, 孙纬宇<sup>2</sup>

(1. 保利长大工程有限公司, 广东 广州 511431; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**【目标】为研究浅埋偏压黄土连拱隧道中导洞及中隔墙施工力学特性,以卓合高速公路捏业隧道为工程背景,采用现场监测的方法对其中导洞及中隔墙施工时的内力分布及发展规律进行研究。【方法】通过分析监控测量数据,研究中导洞围岩压力和支护结构应力、中隔墙墙底压力、钢筋轴力及混凝土应力在施工过程中的分布发展规律及影响因素。【结果】中隔墙的存在使得正洞施工对中导洞稳定性几乎没有影响。中导洞右拱肩处钢架应力最大,为330.9 MPa;正洞上台阶施工对中隔墙应力状态影响最大,右洞上台阶开挖10 d后中隔墙钢筋轴力达到峰值43.4 kN,混凝土应力亦开始快速增长并达到峰值25.9 MPa;正洞中台阶及仰拱部分的施工对中隔墙力学状态造成的影响较小;中隔墙底部右侧压力最大值为536.2 kPa。【结论】对中隔墙及隧道地基进行加固处理可有效减小中隔墙及隧道结构的沉降变形,同时可优化中隔墙受力状态。

**关键词:**隧道工程;力学特性;现场监测;中隔墙;中导洞

中图分类号:U45

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2025)02-0188-08

## Mechanical properties of middle pilot tunnel and middle diaphragm wall in shallow-buried loess multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure

ZHANG Jian<sup>1</sup>, CHEN Xingyu<sup>\*2</sup>, LI Chaojie<sup>1</sup>, FAN Chuntan<sup>2</sup>, GUO Zirun<sup>2</sup>, SUN Weiyu<sup>2</sup>

(1. Poly Changda Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511431, China;

(2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** [Objective] To find out the construction mechanical properties of middle pilot tunnel and middle diaphragm wall in shallow-buried loess multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure, the Nieye tunnel on Zhuoni-Hezuo expressway was taken as the study object. The internal force distribution and development rules of middle pilot tunnel and middle diaphragm wall during construction were studied by applying the in-situ monitor. [Method] The distribution development rules and influencing factors (i. e., middle pilot tunnel surrounding rock pressure and support structure stress, middle diaphragm wall bottom pressure, reinforcement axial force, and concrete stress) during construction were studied by analyzing the monitoring data. [Result] Due to the existence of middle diaphragm wall, the construction on main tunnels has little influence on the middle pilot tunnel stability. The steel frame stress at right arch shoulder of middle pilot tunnel is the maximum, which is 330.9 MPa. The construction on top step in main tunnels has the greatest influence on middle diaphragm wall stress state. The peak axial force of middle diaphragm wall appears in 10 days'

收稿日期:2022-11-27 修改日期:2024-12-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51968041);中国博士后科学基金项目(2021M693843)

作者简介:张建(1986-),男,安徽淮北人,硕士,高级工程师,研究方向为高速公路施工管理。(94634400@qq.com)

\*通讯作者:陈星宇(1998-),男,内蒙古包头人,硕士,研究方向为连拱隧道支护结构稳定性。(717-chen@163.com)

引用格式:张建,陈星宇,李超杰,等.浅埋偏压黄土连拱隧道中导洞及中隔墙力学特性[J].公路交通科技,2025,42(2):188-195.

ZHANG Jian, CHEN Xingyu, LI Chaojie, et al. Mechanical properties of middle pilot tunnel and middle diaphragm wall in shallow-buried loess multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42 (2): 188-195.

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

excavation on top step of right tunnel, which is 43.4 kN. Simultaneously, the concrete stress increases rapidly and peaks at 25.9 MPa. In addition, the construction on middle step and inverted arches in main tunnels has little influence on the mechanical state of middle diaphragm wall. The peak pressure of middle diaphragm wall right bottom is 536.2 kPa. [Conclusion] The reinforcement of middle diaphragm wall and tunnel foundation can effectively reduce the settlement deformation of middle diaphragm wall and tunnel structure. The middle diaphragm wall stress state can be optimized at the same time.

**Key words:** tunnel engineering; mechanical property; in-situ monitor; middle diaphragm wall; middle pilot tunnel

## 0 引言

连拱隧道是公路隧道中较为特殊的一种结构形式,具有埋深浅、偏压、线形流畅及地下空间利用率高特点。由于连拱隧道开挖跨度大,施工工序多且施工工艺复杂,施工过程中支护结构受力状态不断发生变化<sup>[1]</sup>,故研究连拱隧道支护结构的力学特征具有重要的理论与实践意义。由于岩土理论分析方法具有一定的局限性,现场监测是研究隧道工程较为可靠的方法<sup>[2]</sup>。众多学者针对连拱隧道采用现场监测法开展了很多研究。Sui等<sup>[3-4]</sup>利用分布式光纤监测研究了双连拱隧道初期支护力学特征及衬砌结构的变形规律;Liu等<sup>[5]</sup>针对软弱围岩连拱隧道拱顶沉降、地面位移、围岩内部位移、支护结构应力应变及中隔墙受力进行监测并指导施工;Zhang等<sup>[6]</sup>结合现场调查与数值模拟确定某连拱隧道衬砌结构发生破坏的原因;Yan等<sup>[7]</sup>在江口隧道各类岩体中选取典型断面,分析了围岩位移及衬砌动态演化规律及空间分布特征;Cai<sup>[8]</sup>通过对初期支护拱顶沉降数据的回归分析,确定三层衬砌支护中二衬的合理安装时间;何丹等<sup>[9]</sup>针对某偏压连拱隧道采用现场监测的方法研究了连拱隧道施工过程中地形偏压对连拱隧道支护结构及周边围岩的影响,结果表明:对于偏压连拱隧道,先开挖深埋侧洞室有利于控制支护结构的变形与受力,保证结构稳定性。

中隔墙作为连拱隧道支护结构的重要组成部分,其稳定性决定了隧道支护结构整体的安全性。杨果林等<sup>[10]</sup>针对某连拱隧道利用钢筋应力计与土压力盒进行监测,分析认为强度并非中隔墙设计控制参数,最不稳定状态出现在主洞非对称开挖时;邱军领等<sup>[11]</sup>开展中隔墙力学特征现场测试与分析,总结出中隔墙基底压力分布规律和锚杆轴力分布规律等;万飞等<sup>[12]</sup>结合现场监测数据与数值模拟结果针对施工引起的中隔墙不均匀沉降进行研究,认为单侧施工向双侧施工过渡时对中隔墙受力最不利;瞿永

等<sup>[13]</sup>以某连拱隧道中隔墙应变监测为基础,介绍了一种混凝土主应变及主应变方向的监测方法;Min等<sup>[14]</sup>针对连拱隧道中隔墙顶部脱空下的力学行为进行了研究;Gao等<sup>[15]</sup>以厦门市某特大跨径超浅埋双连拱隧道为依托,研究了中隔墙的力学响应和变形规律;Li等<sup>[16]</sup>开展了CRD法施工时的中隔墙力学性能研究;柏署等<sup>[17]</sup>基于太沙基理论及其活动门试验相关结果,分析了大跨度四连拱隧道围岩压力的作用模式,推导了考虑施工扰动对中隔墙顶部岩体承载能力影响的四连拱隧道围岩压力的计算公式,并基于现场实测数据对公式进行验证;Li等<sup>[18]</sup>针对下穿既有建筑物的连拱隧道中隔墙应力分布规律进行了研究。

中导洞作为施作中隔墙的临时结构,其支护结构稳定性决定了中隔墙施工安全及质量,因此开展中导洞支护结构力学特征相关研究亦十分重要。余元全等<sup>[19]</sup>针对黄土连拱隧道中导洞支护结构进行了比选研究;李志勇等<sup>[20]</sup>利用数值模拟对中导洞塌方进行了研究;赖金星等<sup>[21]</sup>、陈建勋等<sup>[22]</sup>针对黄土隧道支护结构力学特性及变形规律开展了相关研究,但目前有关浅埋偏压黄土连拱隧道中导洞及中隔墙施工过程中受力特征的研究还很少,因此开展相关研究具有重要理论与实践意义。

本研究以卓合高速公路捏业隧道为依托,在中导洞及中隔墙典型断面处理设监测仪器进行全施流程监测,着重分析中导洞围岩压力、支护结构应力及中隔墙钢筋轴力、墙底压力与混凝土应力的发展过程与变化规律,以期类似黄土双连拱隧道的设计施工提供有益的参考。

## 1 工程背景

卓合高速公路起点位于卓尼县西北角,路线起点位于卓尼县城西,与县城河堤路顺接,终点顺接羊永互通收费站。捏业隧道为其重要组成部分,该隧道为双向四车道整体式连拱隧道,全长为232 m,其中明洞长为122 m,暗洞长为110 m,最大埋深为41.38 m,

具有偏压、浅埋等复杂性特点。

隧道全段皆为V级围岩,隧道进口段62 m及出口段30 m围岩为黄土和碎石土互层,承载力基本容许值为130 kPa,隧道中部170 m围岩为碎石土及强风化板岩。隧道围岩主要为黄土,开挖时所见板岩与碎石土含量极少。洞室埋深浅,且黄土稳定性差,侧壁易失稳,洞室开挖时拱部容易发生坍塌,对支护结构要求较高。全段地基皆进行加固处理,围岩分布情况如图1所示。

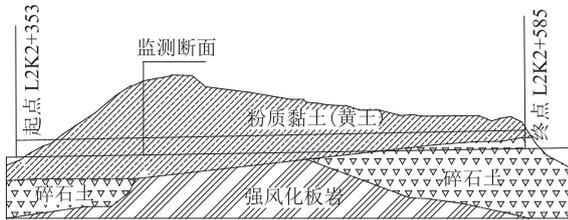


图1 捏业隧道地质纵断面

Fig. 1 Geological profile of Nianye tunnel

捏业隧道采用新奥法施工,利用机械双向开挖,出口端先进洞。中导洞全断面开挖,主洞采用三台阶法开挖,先开挖右洞,左、右隧道错距施工,最大错距大于35 m。施工流程为:中导洞预支护—中导洞开挖及支护—旋喷桩加固中隔墙地基—浇注中隔墙—左、右主洞超前小导管预支护—左、右主洞上部开挖及支护—左、右主洞中部开挖及支护—旋喷桩加固主洞地基—左、右主洞下部开挖、施工仰拱初支、二衬及回填层—全断面模筑左、右主洞二次衬砌。中导洞及中隔墙支护结构参数如表1所示。

表1 支护结构参数

Table 1 Support structure parameters

支护结构	用材	详情
初期支护	Φ8 钢筋网	间距 20 cm×20 cm
	I18 钢拱架	中导洞初支, 间距 50 cm
中隔墙	模筑混凝土	Φ20 钢筋, 纵向 Φ12 钢筋, 拉结筋 Φ8 钢筋, C30 混凝土浇注

## 2 监测内容及方案

选取 L2K2+412.635 作为监测断面,该断面为黄土与板岩交界面,开挖时掌子面及围岩主要为黄土,可见极少板岩,埋深约为31 m。地下水不发育,受雨季影响较大,施工时洞室微潮,监测断面处地表平均坡度约为30°,隧道处于偏压状态。

采集自中导洞监测断面开挖至整个隧道完工全施工过程监测数据。利用 YT-200A 型振弦式双膜土压力计(0~1 600 kPa)监测中导洞围岩压力及中隔

墙底部压力;利用 YT-100A 型钢筋计(拉0~80 kN,压0~40 kN)监测中隔墙钢筋轴力;利用 YT-500D 型振弦式表面应变计(拉0~1 200  $\mu\epsilon$ ,压0~1 800  $\mu\epsilon$ )监测中导洞初期支护应力;利用 YT-500B 型混凝土应变计(拉0~1 200  $\mu\epsilon$ ,压0~1 800  $\mu\epsilon$ )监测中隔墙混凝土应力。所用监测仪器皆采用频率采集仪采集其频率后计算压力、轴力及应变,频率采集精度为0.1。在中导洞监测断面的拱顶、拱肩、拱脚5个点安装压力盒与表面应变计,在中隔墙左、右两侧上、中、下3个位置安装钢筋计与混凝土应变计,在中隔墙底部左、中、右3个位置安装压力盒,仪器安装方案如图2所示。

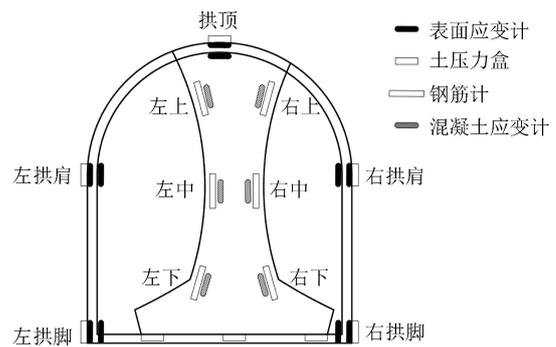


图2 仪器安装方案

Fig. 2 Instruments installation procedure

测得中导洞钢拱架及中隔墙混凝土微应变后,利用式(1)即可计算出二者应力。

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1)$$

式中, $\sigma$ 为计算所得应力; $E$ 为弹性模量,钢拱架弹性模量取206 GPa,C30混凝土弹性模量取30 GPa; $\varepsilon$ 为应变。

为研究全施工过程中导洞钢架应力、围岩压力及中隔墙应力发展规律,安装仪器后测量初值并归零,安装后12 h采集一次数据,此后每24 h采集一次数据,直至隧道完工,重要施工工序时间节点如表2所示。

## 3 监测结果分析

### 3.1 中导洞

中导洞围岩压力时程曲线如图3所示,中导洞围岩压力分布如图4所示。由图3可见,在中导洞监测断面施工后的前20个监测日内围岩压力波动较大;在右洞开始施工后,中导洞监测断面处围岩压力发展开始趋于稳定;当正洞开挖到监测断面时,中导洞处的围岩压力略有波动,故正洞施工对中导洞围岩压力影响较小。

表 2 重要施工工序时间节点

Table 2 Important construction process time nodes

日期	工序
2020-11-16	中导洞开挖
2021-05-22	右洞出口开挖进洞
2021-06-10	左洞出口开挖进洞
2021-07-11	右洞开挖至监测断面, 中导洞右侧支护拆除
2021-07-29	左洞开挖至监测断面, 中导洞支护全部拆除
2021-09-20	左洞监测断面二衬施工
2021-09-22	右洞监测断面二衬施工
2021-09-29	左洞完工
2021-10-05	右洞完工
2021-11-15	监测结束

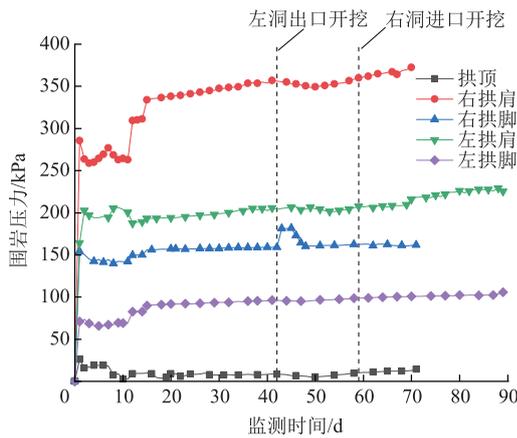


图 3 中导洞围岩压力时程曲线

Fig. 3 Time-history curves of surrounding rock pressure in middle pilot tunnel

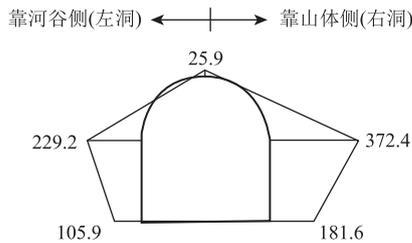


图 4 中导洞围岩压力分布 (单位: kPa)

Fig. 4 Surrounding rock pressure distribution in middle pilot tunnel (unit: kPa)

由图 4 可知, 中导洞围岩压力为各测点所出现的最大值, 拱顶处围岩压力最小, 测得拱顶处围岩压力最大值为 25.9 kPa; 其次是右拱肩处围岩压力最大, 达到 372.4 kPa, 再次是左拱肩, 测得围岩压力最大值为 229.2 kPa; 最后是右拱脚和左拱脚, 测得围岩压力最大值分别为 181.6 kPa 和 105.9 kPa。由于该隧道为超浅埋大偏压隧道, 故中导洞右侧围岩压力明显大于左侧。中导洞与正洞施工时间间隔较长, 此时中导洞围岩压力释放已完成, 同时中导洞开挖断面较小, 影响范围也相对较小, 因此正洞施工时仅右侧拱肩及拱脚处接触应力出现轻微波动, 中导洞

围岩压力整体处于稳定状态。

中导洞钢拱架应力时程曲线如图 5 所示, 钢拱架应力分布如图 6 所示 (图中的拉应力为正值, 压应力为负值)。由图 5 可见, 中导洞钢拱架各位置最大应力值为安装仪器后的第 1 次测量值, 这是因为安装仪器时钢拱架才开始承载, 变形较大, 且安装仪器时焊接、施作锚杆等施工行为对钢拱架受力及仪器有一定影响。在为期 90 d 的监测时间内, 各位置监测数据呈“三台阶”式发展规律, 各“台阶”落差较小, 且随时间发展, 各位置应力值均呈减小趋势。出现“三台阶”规律的原因是监测时间存在间隔, 仪器安装后第 2~11 d 监测数据变化较小, 表现为图中的第 1 个“台阶”; 图中第 2 个“台阶”为仪器安装第 12~14 d 的监测值, 与第 1 “台阶”整体相比数值略有降低; 第 3 个“台阶”为仪器安装第 46 d 起至钢拱架拆除期间, 在此期间, 除拱顶处应力有轻微波动外, 其余各位置应力已稳定, 可以认为围岩应力重分布已基本完成。

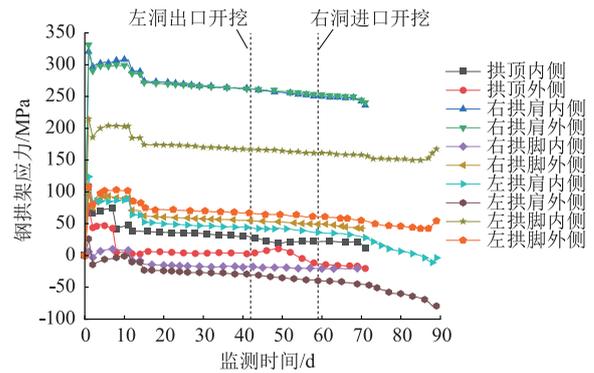


图 5 中导洞钢拱架应力时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of steel frame stress in middle pilot tunnel

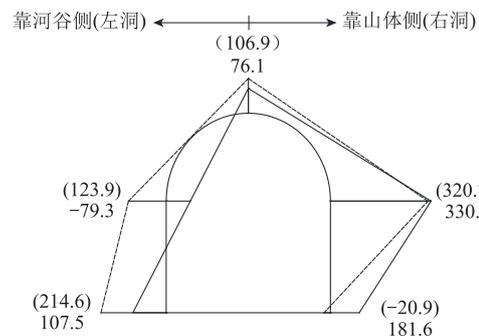


图 6 中导洞钢拱架应力分布 (单位: MPa)

Fig. 6 Steel frame stress distribution in middle pilot tunnel (unit: MPa)

在右洞开挖至监测断面前 3 d, 右拱肩处应力出现减小直至拆除, 该现象是由于正洞的开挖使中导洞上部覆土被挖除, 中导洞支护结构所承受的围岩

压力等荷载减小。中导洞右侧支护结构拆除后,受力体系的改变致使左拱肩内侧及左拱脚内、外侧应力皆有减小的趋势,左拱肩内侧几乎减小至无应力,左拱肩外侧压应力增速较快。正洞施工会导致中导洞围岩松动,此时中隔墙可承担由围岩松动产生的荷载,使中导洞支护结构受到的影响大幅减弱。中导洞支护结构的应力变化是由其上覆土挖除与支护结构拆除引起的。

由图6可见,中导洞左拱肩外侧、右拱脚内侧受压,拱顶内侧在右洞监测断面开挖前15 d开始受压,其余各位置均受拉,其中左拱肩外侧压应力最大,右拱肩处拉应力最大,外侧最大拉应力达到330.9 MPa。这主要是由于中导洞处于偏压状态,支护结构右侧埋深更深,荷载更大;倾斜边坡有向下滑移的趋势,边坡对中导洞支护结构会产生推力,这也导致了左拱脚处应力偏大,峰值达到214.6 MPa,仅次于右拱肩处。

钢拱架内侧整体处于受拉状态,外侧大部分位置处于受拉状态,仅左侧边墙至拱顶部分区域受压。在中隔墙施作并开始承载后,中导洞顶部围岩压力值大部分位于0.9~1.4 MPa区间,拱顶钢架内侧应力值稳定于20.1~38.1 MPa区间,外侧应力大部分位于2.4~10.1 MPa区间,相对于其他位置,拱顶处的围岩压力及钢架应力最小。由此可见,中隔墙的存在不只是承担正洞的荷载,对中导洞的稳定性亦起到十分积极的作用。

### 3.2 中隔墙

关于中隔墙的研究内容主要为内力及墙底压力发展与分布规律。利用钢筋计测得的主筋轴力与混凝土应变计测得的混凝土应力数据,综合分析中隔墙内力随施工进行的发展及分布规律。在中隔墙浇注前,黄土地基采用 $\Phi 600$  m旋喷桩进行加固处理,加固后地基承载力达到250 Pa以上。自2021年6月10日中隔墙安装仪器后每24 h采集一次数据。

中隔墙钢筋轴力时程曲线如图7所示。安装在左侧中部的钢筋计于2021年9月9日损坏,其后数据缺失。图中轴力以拉为正,压为负,将时程曲线划分为7个发展阶段。

阶段1。图7中的第0~28 d,即中隔墙浇注后开始承载的前28 d。此阶段内中隔墙主筋轴力持续增长,第15 d时增长速度开始放缓,此时中隔墙施工造成的围岩应力重分布基本完成。第15~28 d,中隔墙右侧中部及下部主筋轴力相较其他位置更小,这表明中隔墙正承载向左倾倒的弯矩,考虑是由边坡下滑趋势而产生的推力造成的。

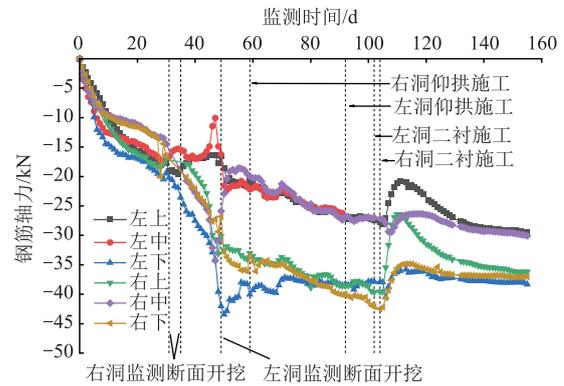


图7 中隔墙钢筋轴力时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of middle diaphragm wall reinforcement axial force

阶段2。第28 d至右洞开挖至监测断面(第31 d),此阶段内左侧中部及上部主筋轴力出现波动,其余位置主筋轴力增速加快。第28 d时,右洞出口端开挖掌子面距监测断面6 m,此时开挖造成中导洞周围围岩松动,作用于中导洞支护结构的荷载变大,导致中隔墙右侧主筋轴力增速加快。

阶段3。右洞监测断面开挖至左洞监测断面开挖(第49 d)。第31 d时,右洞监测断面上台阶开挖,初期支护结构与中隔墙连接,右洞围岩应力开始释放,并经右洞拱顶初期支护结构传递至中隔墙,右侧及左下方主筋轴力开始快速增长,而左侧中部及上部主筋轴力有一定程度的减小。由此可知,中隔墙在这一阶段处于较大的偏压状态。

阶段4。左洞监测断面开挖至右洞仰拱施工(第59 d)。左洞监测断面上台阶开挖,初期支护结构与中隔墙连接,中隔墙开始承载左洞围岩应力,左侧主筋轴力开始继续增长。左洞监测断面开挖1 d后,主筋轴力出现整个施工过程中的最大值,达到43.4 kN,位于左侧下部。在此之后中隔墙左侧主筋轴力开始减小,右侧主筋轴力小幅度减小或平稳,中隔墙所受弯矩变小。

阶段5。右洞仰拱施工至右洞二衬施工(第102 d)。这一阶段内中隔墙主筋轴力继续增长,但增速较为缓慢,这表明主洞围岩应力还没有完全释放,应力重分布未完成,支护结构未达到稳定状态。

阶段6。右洞二衬施工至第130 d。由于二次衬砌施工时台车承担了部分荷载,中隔墙主筋轴力减小,台车撤离后又开始增大,故时程曲线出现小波峰。

阶段7。第130 d至监测结束。此阶段内隧道衬砌结构已全部完工,监测数据已稳定,证明主洞围岩应力完全释放,应力重分布完成,此时中隔墙等隧道支护结构处于稳定状态。

中隔墙混凝土应力时程曲线如图8所示。受施工

影响,第2~6 d无法采集数据,故图中数据从第7 d起采集,右侧上部仪器在监测59 d后损坏,其后数据缺失。中隔墙钢筋与混凝土共同受力,故施工过程中二者发展规律类似,不再分阶段讨论。

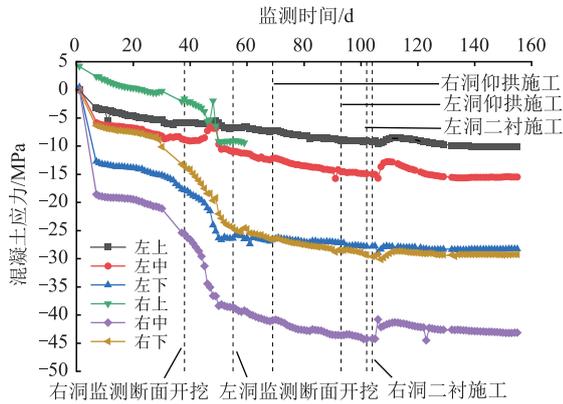


图8 中隔墙混凝土应力时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of middle diaphragm wall concrete stress

由图8可知,中隔墙上部混凝土应力较小,因为正洞初期支护与中隔墙的连接方式是钢拱架与中隔墙钢筋铆接,中隔墙上部主筋承担了较多正洞初期支护传递的荷载。右侧上部在右洞监测断面开挖前出现拉应力,考虑是由混凝土干缩变形引起的,右洞掌子面距监测断面16.5 m时拉应力开始减小。在右洞监测断面上台阶开挖后,初期支护与中隔墙相连,此时拉应力变为压应力,随后压应力开始增长。

中隔墙左侧上部及中部混凝土压应力在正洞施工过程中增速较慢,时程曲线较为平缓,这是因为左洞相对右洞埋深较小,左洞拱顶传递到中隔墙的荷载较小。

从时程曲线中不难看出,中隔墙右侧混凝土应力相较左侧大很多,这说明中隔墙处于偏压状态。中隔墙右侧中部混凝土所受压应力最大,达到25.91 MPa。虽然实测值很大,但并未超过C30混凝土抗压强度标准值且现场并无异常,该位置没有出现裂缝,数值较大可能是由于混凝土应变计安装的局部应力集中造成的,中隔墙整体是安全的。

综合以上中隔墙主筋轴力及混凝土应力时程曲线分析可得,浅埋偏压连拱隧道中隔墙受力并不均匀,中隔墙始终处于偏压状态,在正洞开挖时承受偏压更大。最不利状态出现在右洞上台阶开挖后的第12 d,此时中隔墙所承受的弯矩较大,虽然承载结构不会破坏,但存在倾覆的风险,因此左右两洞开挖错距不宜过大,需要保持在一个合理的区间内。正洞上台阶开挖支护对中隔墙受力状态的影响最大,中台阶、仰拱及二衬施工对中隔墙几乎没有影响。此外,

该隧道中隔墙地基进行旋喷桩加固,地基刚度更大,承载能力更强,有效抑制了中隔墙可能发生的沉降与倾覆,也使得中隔墙完全处于受压状态。

中隔墙底部压力盒安装于2021年5月30日,采集数据至2021年11月15日,共166 d,中部压力盒采集122 d后损坏,其后数据缺失。中隔墙基底压力时程曲线如图9所示。由图可见,中隔墙基底压力在中隔墙浇筑完成后基本保持平稳,此时正洞掌子面距离监测断面较远,正洞开挖并没有影响中隔墙受力,中隔墙主要承担中导洞拱顶初期支护所传递的荷载。

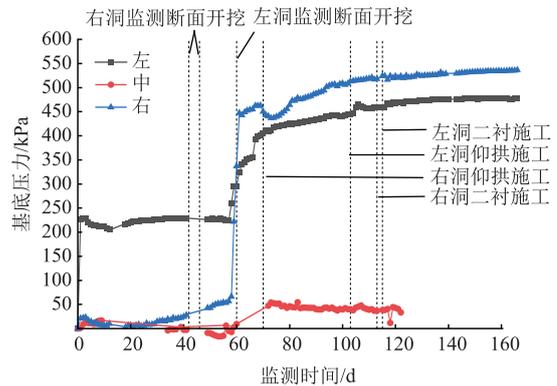


图9 中隔墙基底压力时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of middle diaphragm wall basement pressure

从监测之日起至第60 d,基底左侧压力比右侧大很多,中隔墙明显处于偏压状态,这可能是由于中导洞存在偏压,拱顶处初期支护传递给中隔墙水平力,使中隔墙承受向左的倾倒地矩。右洞监测断面开挖后,墙底右侧压力开始增长,左侧保持稳定;左洞监测断面开挖前2 d时,墙底压力突增,右侧墙底压力增速最快,3 d增长近400 kPa。在左洞监测断面开挖初期支护施作后,增速放缓。正洞二次衬砌施工完成后墙底压力基本稳定。

墙底压力稳定后呈对称分布,墙底中部压力最小,最终稳定在33.4~47.9 kPa范围内;右侧压力最大,其值稳定在525.3~536.2 kPa;左侧压力稳定在471.1~477.6 kPa范围内。

中隔墙钢筋轴力、混凝土应力及墙底压力分布如图10所示。图中数值取各位置施工过程中出现的最大值。由图可知,中隔墙右侧内力及基底压力均大于左侧,这与隧道处于偏压状态且右侧埋深更大相契合。由于中隔墙底部地基进行了加固,沉降变形较小,故其底部压力偏大。中隔墙下部钢筋轴力最大,其中左侧最大值为43.4 kN,右侧最大值达到42.5 kN,峰值超过仪器标定量程,但其后稳定值处于量程内且发展趋势正常,故认为仪器并未损坏。

中隔墙右侧中部混凝土应力最大可达 25.91 MPa, 虽然中隔墙设计控制条件并非材料强度, 结构也没有出现明显破坏, 但设计与施工时仍需避免上述位置应力过大而造成材料破坏。

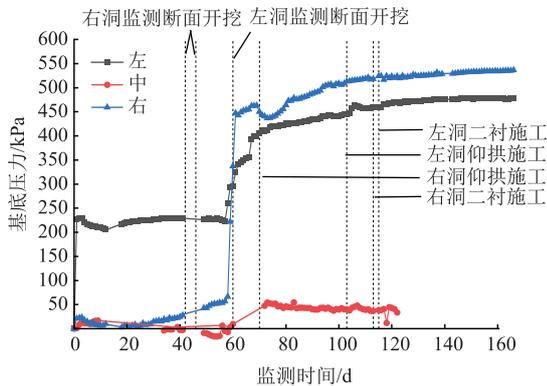


图 10 中隔墙钢筋轴力、混凝土应力及墙底压力分布  
Fig. 10 Distributions of reinforcement axial force, concrete stress, and bottom pressure of middle diaphragm wall

中隔墙底部压力呈中间小、两端大的对称分布, 左、右两端压力约是中部的 10 倍, 出现这一现象的原因是地基在加固处理后, 其刚度、地基土黏聚力增大, 故地基土不易发生土粒的侧向挤出, 因此呈现两边大、中间小的分布规律。墙底压力值远大于黄土地基承载力容许值, 所以必须进行地基加固处理。

#### 4 结论

采用现场监测的方法, 分析了浅埋偏压黄土连拱隧道中导洞围岩压力、中导洞支护结构应力、中隔墙墙底压力、钢筋轴力及中隔墙混凝土应力在施工过程中的发展变化规律及其影响因素。

(1) 中隔墙承担了大部分作用于中导洞支护结构上的荷载以及正洞施工所产生的荷载。中导洞围岩压力及支护结构应力最大值出现在右拱肩处, 分别为 372.4 kPa 和 330.9 MPa, 施工时应特别注意此位置。正洞的施工对中导洞围岩压力及支护结构内力几乎没有影响, 中隔墙的存在使得中导洞支护结构稳定性更强。

(2) 中隔墙右侧中部混凝土应力最大, 在上部二衬施工时达到峰值 25.91 MPa, 施工时应加强监测。对于浅埋偏压黄土连拱隧道, 中隔墙及中导洞支护结构始终处于偏压状态。施工时若两洞开挖时掌子面错距太大, 中隔墙存在倾覆的风险, 在施工时两洞开挖错距不宜过大, 应当保持在一个合理的区间内。

(3) 采用三台阶法开挖正洞时, 上台阶开挖支护对中隔墙内力发展及分布影响最大, 左洞上台阶开挖

1 d 后钢筋轴力达到施工过程中的峰值 43.4 kN; 中台阶及仰拱部分的开挖施工对中隔墙内力影响不大。在施工时需要特别注意上台阶开挖后支护是否及时, 支护结构与中隔墙连接是否牢固可靠, 同时避免开挖时操作不当导致中隔墙出现损坏。

(4) 中隔墙所承担的荷载较大, 对地基的要求较高, 中隔墙墙底右侧压力达到 536.2 kPa, 因此针对黄土等承载力较低的粉质黏土地基必须进行加固处理。

(5) 中隔墙及隧道地基进行加固处理能有效地减小中隔墙及隧道结构的沉降变形, 同时使中隔墙完全处于受压状态, 受力更加合理, 亦可一定程度上减小中隔墙倾覆的风险。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 胡志平, 刘佳琪, 任翔, 等. 黄土地区浅埋暗挖地铁连拱隧道合理错距研究 [J]. 铁道工程学报, 2020, 37 (9): 60-65.  
HU Zhiping, LIU Jiaqi, REN Xiang, et al. Research on the reasonable staggered distance of tunnel in shallow excavated metro arch tunnel in the loess area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37 (9): 60-65.
- [2] 邱长林, 刘彬, 何林生, 等. 整体式中隔墙连拱隧道模型试验及现场监测 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (9): 2625-2631.  
QIU Changlin, LIU Bin, HE Linsheng, et al. Model test and in-situ monitoring of double-arch tunnel with integrated middle wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (9): 2625-2631.
- [3] SUI Y, CHENG X H, WEI J X. Distributed fibre optic monitoring of damaged lining in double-arch tunnel and analysis of its deformation mode [J/OL]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2021, 110: 103812. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103812>.
- [4] SUI Y, CHENG X H, LIU K J, et al. Analysis of mechanical behavior of primary lining in double-arch tunnel based on distributed fibre optic monitoring [J/OL]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 787: 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/787/1/012035>.
- [5] LIU T, DONG Z C, YANG H Y. In situ test and mechanical analysis of multi-arch tunnel with large section in soft and weak rock mass [J]. Advanced Materials Research, 2011, 250/251/252/253: 1262-1265.
- [6] ZHANG Y X, SHI Y F, ZHAO Y D, et al. Determining the cause of damages in a multiarch tunnel structure through field investigation and numerical analysis [J/OL]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31 (3):

04016104. (2016-11-08) [2022-11-11] [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000981](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000981).
- [7] YAN Q X, ZHANG C, LIN G, et al. Field monitoring of deformations and internal forces of surrounding rocks and lining structures in the construction of the Gangkou double-arched tunnel: A case study [J/OL]. *Applied Sciences*, 2017, 7 (2): 169. (2017-02-11) [2022-11-11] <https://doi.org/10.3390/app7020169>.
- [8] CAI J. Determination of the installation time of secondary liner during excavation of large cross-section double-arch tunnels [J/OL]. *Advances in Civil Engineering*, 2020. (2020-12-18) [2022-11-11] <https://doi.org/10.1155/2020/8852181>.
- [9] 何丹, 郭亚林, 林宇亮, 等. 地形偏压对连拱隧道支护结构及围岩的影响 [J]. *公路交通科技*, 2024, 41 (11): 167-177.  
HE Dan, GUO Yalin, LIN Yuliang, et al. Influence of terrain bias on multi-arch tunnel supporting structure and surrounding rock [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2024, 41 (11): 167-177.
- [10] 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.
- [11] 邱军领, 赖金星, 郭春霞, 等. 黄土连拱隧道中墙力学特征现场测试与分析 [J]. *现代隧道技术*, 2019, 56 (2): 134-142.  
QIU Junling, LAI Jinxing, GUO Chunxia, et al. In-situ test and analysis of mechanical behaviors of the mid-wall of multi-arch loess tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2019, 56 (2): 134-142.
- [12] 万飞, 郑鹏武, 谭忠盛. 双连拱隧道中墙监测及受力特性研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9 (6): 1355-1361, 1367.  
WAN Fei, ZHENG Pengwu, TAN Zhongsheng. Site monitoring and analytical research on mechanical behaviour of middle-wall in double-arched tunnel [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9 (6): 1355-1361, 1367.
- [13] 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. Analysis and research on main strain monitoring scheme of middle partition wall in multi-arch tunnel [J]. *Highway*, 2019, 64 (12): 304-307.
- [14] MIN B, ZHANG X, ZHANG C P, et al. Mechanical behavior of double-arch tunnels under the effect of voids on the top of the middle wall [J/OL]. *Symmetry*, 2018, 10 (12): 703. (2018-12-03) [2022-11-01] <https://doi.org/10.3390/sym10120703>.
- [15] GAO H D, LI G, GUO Y B, et al. Stability analysis of the middle wall in process of double-arch tunnel construction [J/OL]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 558: 032046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/558/3/032046>.
- [16] LI J, WANG Z L. Force analysis of the middle wall in multi-arch tunnel under central hole + CRD method [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 580/581/582/583: 1188-1191.
- [17] 柏署, 张寅初, 傅金阳, 等. 四连拱隧道围岩压力计算方法研究 [J]. *公路交通科技*, 2023, 40 (12): 163-171, 196.  
BAI Shu, ZHANG Yinchu, FU Jinyang, et al. Study on calculation method for surrounding rock pressure of four-arch tunnel [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40 (12): 163-171, 196.
- [18] 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): 2737-2745.
- [19] 余元全, 刘小琳, 张学富. 黄土连拱隧道中导洞临时支护的比选分析 [J]. *现代隧道技术*, 2014, 51 (1): 138-143.  
YU Yuanquan, LIU Xiaolin, ZHANG Xuefu. Comparison and analysis of temporary support schemes for the middle pilot heading in a multi-arch loess tunnel [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2014, 51 (1): 138-143.
- [20] 李志勇, 晏莉, 阳军生. 浅埋偏压连拱隧道中导洞坍方数值分析与处治 [J]. *岩土力学*, 2007, 28 (1): 102-106.  
LI Zhiyong, YAN Li, YANG Junsheng. Numerical analysis and treatment of a collapsed middle drift for shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28 (1): 102-106.
- [21] 赖金星, 王开运, 来弘鹏, 等. 软弱黄土隧道支护结构力学特性测试 [J]. *交通运输工程学报*, 2015, 15 (3): 41-51.  
LAI Jinxing, WANG Kaiyun, LAI Hongpeng, et al. Mechanical characteristic test of tunnel support structure in weak loess stratum [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 15 (3): 41-51.
- [22] 陈建勋, 王梦恕, 轩俊杰, 等. 两车道公路黄土隧道变形规律 [J]. *交通运输工程学报*, 2012, 12 (3): 9-18.  
CHEN Jianxun, WANG Mengshu, XUAN Junjie, et al. Deformation rule of loess highway tunnel with two lanes [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2012, 12 (3): 9-18.