

文章编号:1673-9469(2024)04-0067-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.04.009

公路黄土隧道仰拱结构力学特性现场试验研究

何信¹, 孙旭亮², 宿钟鸣^{1,2}, 朱谭谭^{1,2*}, 朱焕焕²

(1. 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西太原 030006; 2. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064)

摘要: 为研究公路黄土隧道仰拱结构受力特性, 以丰收岭公路黄土隧道为工程背景, 选取两个不同埋深隧道断面, 通过埋设压力盒、混凝土应变计、钢筋计、表面应变计等传感器, 研究了公路黄土隧道仰拱围岩压力、喷射混凝土应力、钢架应力、初期支护和二次衬砌间接触压力、二次衬砌混凝土应力、钢筋应力等的演化规律, 分析了黄土隧道仰拱结构受力特性。试验结果表明: 不同埋深条件下黄土隧道仰拱结构受力特征存在显著差异; 埋深较大断面的仰拱围岩压力明显大于埋深较浅断面的仰拱围岩压力; 不同埋深条件下, 相同横断面形式和相同围岩条件的黄土隧道仰拱结构受力特征不同, 但拱脚位置均易出现拉应力; 埋深较大的隧道仰拱结构易呈现上部受压下部受拉状态; 黄土隧道仰拱地基承载力对仰拱受力特征影响显著。

关键词: 黄土隧道; 仰拱; 受力特征; 试验研究; 演化过程

中图分类号: U456

文献标识码: A

Field Test Study on Mechanical Characteristics of Arch Structures in Highway Loess Tunnels

HE Xin¹, SUN Xuliang², SU Zhongming^{1,2}, ZHU Tantan^{1,2*}, ZHU Huanhuan²

(1. Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region, Taiyuan, Shanxi 030006, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: To study the mechanical characteristics of the inverted arch structure of highway loess tunnel, taking the Fengshuilong highway loess tunnel as the engineering background, two tunnel sections with different embedded depths were selected. By embedding pressure boxes, concrete strain gauges, rebar gauges, surface strain gauges and other sensors, the evolution laws of surrounding rock pressure, shotcrete stress, steel frame stress, contact pressure between primary support and secondary lining, secondary lining concrete stress, and reinforcement stress of the highway loess tunnel invert were studied, and the mechanical characteristics of the loess tunnel invert structure were analyzed. The experimental results show that the stress characteristics of the inverted arch structure of the loess tunnel are significantly different under different embedded depths. The pressure of the inverted arch surrounding rock in the section with a larger embedded depth is obviously greater than that in the section with a smaller embedded depth. Under different embedded depths, the stress characteristics of the inverted arch structure of the loess tunnel with the same cross section form and the same surrounding rock condition are different, but the position of the arch foot is prone to the tensile stress. The tunnel invert structure with a large embedded depth is easy to show the states of upper compression and lower tension. The bearing capacity of the foundation of the loess tunnel invert has a significant effect on the mechanical characteristics of the invert.

Key words: loess tunnel; inverted arch; stress characteristics; experimental research; evolution process

收稿日期: 2023-12-07

基金项目: 山西省基础研究计划项目(20210302123359)

作者简介: 何信(1984-), 男, 新疆伊犁人, 硕士, 高级工程师, 从事隧道工程方面的研究。

* 通信作者: 朱谭谭(1989-), 男, 山东泰安人, 博士, 讲师, 主要从事隧道和地下工程方面的研究工作。

随着我国“交通强国”战略的稳步推进,我国隧道建设规模和速度居世界第一。黄土在我国中西部地区分布广泛,隧道建设中穿越黄土地层不可避免。由于黄土具有遇水软化、承载力低等物理力学特性,黄土隧道仰拱结构常出现开裂、沉陷甚至底鼓等病害,给黄土隧道结构安全和长期服役性能带来严峻挑战。黄土隧道仰拱结构力学行为成为隧道工程领域的研究热点^[1-3]。

黄土围岩区域由于差异性大、水敏性强,地表易产生裂缝,衬砌支护结构易产生变形,而仰拱作为隧道重要的支护结构,对提高隧道结构的承载力,抑制围岩塑性区的发展,提高衬砌结构的安全性等具有非常重要的作用^[4]。关于仰拱底鼓、拱脚沉降等病害的原因及处治措施^[5-9]、仰拱结构受力和变形等方面目前已有大量的研究^[10-13]。

综上所述,仰拱病害成为制约黄土隧道建设、影响黄土隧道寿命的重要因素。基于此,以丰收岭两车道公路黄土隧道为工程背景,通过现场试验,分析了黄土隧道仰拱围岩压力、喷射混凝土应力、钢架应力、接触压力、二次衬砌混凝土应力和钢筋应力的变化规律,揭示了黄土隧道仰拱初期支护和二次衬砌受力特性。

1 工程概况

丰收岭隧道位于山西省吉县屯里镇。隧道围岩由第四系中更新统冲洪积物(Q_2^{al+pl})粉土及下更新统冲洪积物(Q_1^{al+pl})粉质黏土构成,粉土呈硬

塑状态,小孔隙发育,具有垂直节理,松软结构,属Ⅱ级普通土。粉质黏土呈硬塑状态,局部呈半胶结状,失水易干裂,属Ⅲ级硬土。黄土隧道围岩自稳能力差,开挖易产生中、大塌方,成洞困难。夏季气温较高,降雨集中,秋季多连阴雨,冬季寒冷干燥,年平均降雨量约为500 mm。丰收岭隧道纵断面如图1所示,围岩物理力学性质如表1所示。

2 监控量测方案

为研究初期支护围岩压力、喷射混凝土应力、钢架应力、接触压力、二次衬砌混凝土应力和钢筋应力的变化规律,如图1所示,在丰收岭隧道选取桩号为K90+036和K90+226的两个隧道断面埋设压力盒、混凝土应变计、表面应变计、钢筋应力计等传感器。其中,K90+036和K90+226测试断面埋深分别为47 m和93 m,两个断面仰拱处围岩均为粉质黏土,属V1级围岩。两个断面传感器埋设位置相同,监测点布置方案和传感器现场埋置方式如图2所示。

3 仰拱结构力学行为

3.1 初期支护受力特性

3.1.1 围岩压力

丰收岭隧道仰拱围岩压力变化规律如图3所示。K90+036断面仰拱初期支护施作完成后,仰拱围岩压力快速增大,初期支护浇筑完成2~5 d

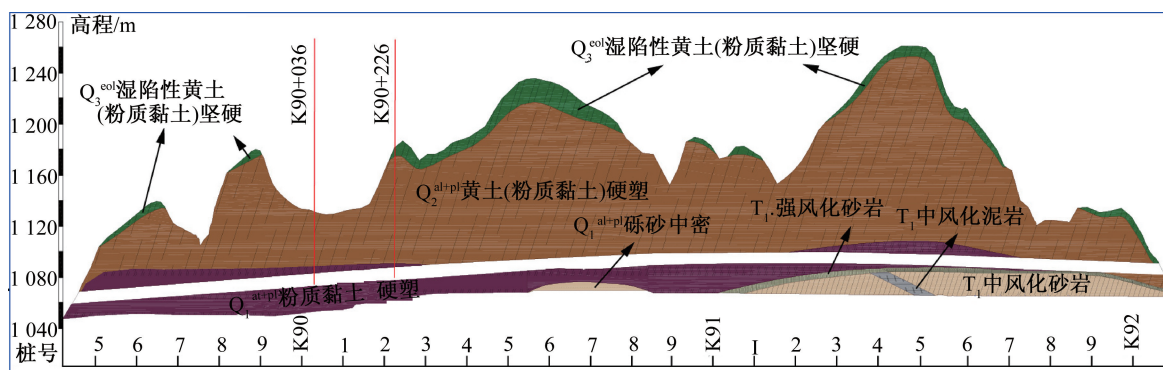


图1 丰收岭隧道纵断面图

Fig. 1 Longitudinal section diagram of the harvest ridge tunnel

表1 丰收岭隧道围岩物理力学性质

Tab. 1 Physical and mechanical properties of the surrounding rock in the harvest ridge tunnel

围岩名称	含水量/%	容重/($kN \cdot m^{-3}$)	液限/%	塑限/%	液性指数	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
Q_2^{al+pl} (黄土)	20.20~21.30	17.90~19.20	30.40~31.30	18.50~18.90	0.18	21.00~38.00	23.90~36.00
Q_1^{al+pl} (黄土)	20.60~21.80	18.50~19.00	28.50~31.40	17.90~19.10	0.21	25.00~40.00	20.70~29.20

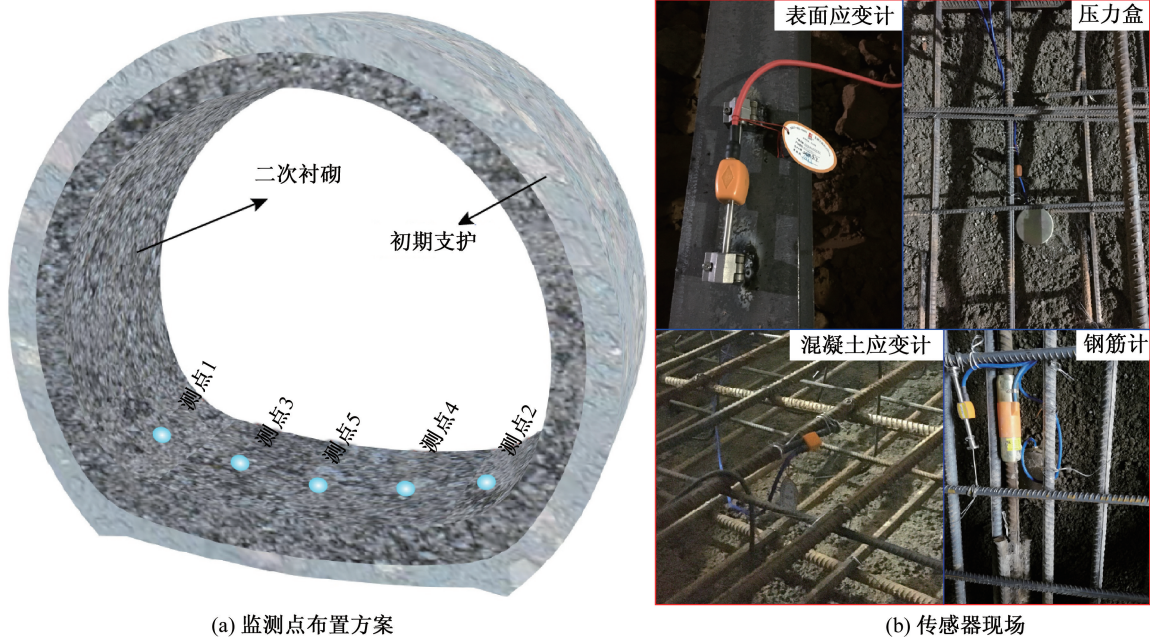


图 2 仰拱监测点布置方案及传感器现场布设

Fig. 2 Arrangement scheme of monitoring points for the inverted arch and deployment of sensors on site

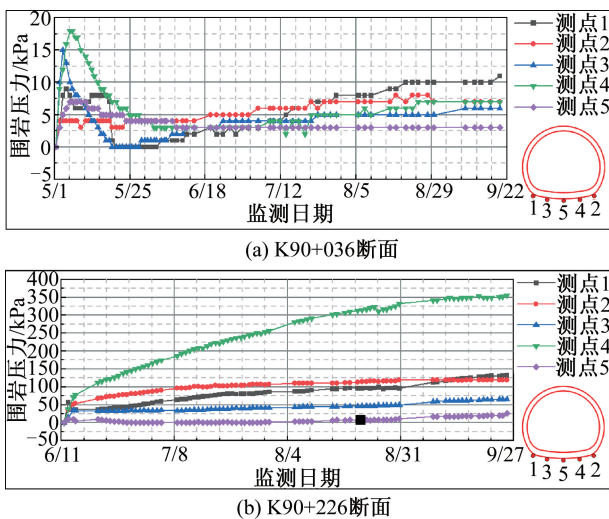


图 3 仰拱围岩压力

Fig. 3 Pressure of inverted arch surrounding rock

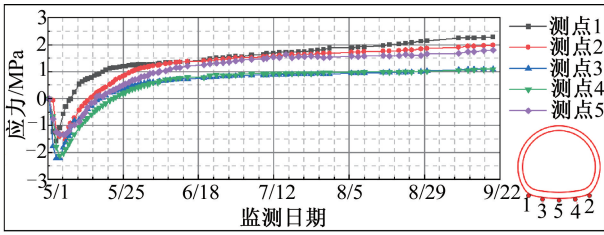
围岩压力达到最大值。随后围岩压力逐渐减小,初期支护浇筑约 18 d 后,围岩压力进入缓慢增长阶段。与 K90+036 断面不同,K90+226 断面没有明显的围岩压力减小阶段。K90+226 断面仰拱围岩压力逐渐增大,可以分为快速增大阶段、缓慢增大阶段和基本稳定阶段。仰拱围岩压力逐渐增大的原因主要是:①起拱线以上支护结构发生下沉,自身重力作用在仰拱上;②随着围岩应力的不断调整,拱底围岩发生变形,仰拱和围岩间的作用力增大。通过对 K90+036 和 K90+226 两个断面仰拱围岩压力测点的长期监测可知,仰拱围岩压力基

本表现为两侧围岩压力大,中间围岩压力小,在围岩压力基本稳定后表现尤为明显。这主要是因为土质围岩抗变形能力弱,随着时间的推移仰拱产生不均匀受力,导致仰拱两侧围岩压力大于仰拱中间围岩压力。另外,隧道埋深大的断面仰拱围岩压力大于埋深浅的断面仰拱围岩压力。以测点 1 和测点 2 为例,K90+036 断面两个测点最终围岩压力平均值仅为 9.0 kPa,K90+226 断面两个测点最终围岩压力平均值为 126.5 kPa。

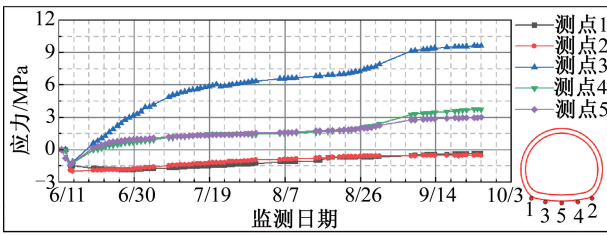
3.1.2 喷射混凝土应力

仰拱喷射混凝土应力变化如图 4 所示。喷射混凝土施作完毕后,混凝土表现为受拉,混凝土应力逐渐增大。喷射混凝土施作完毕后 1~4 d (K90+036 断面 2~4 d,K90+226 断面 3~4 d) 混凝土拉应力达到最大值。随后初期支护混凝土应力随时间变化逐渐增大。其中,K90+036 断面仰拱初期支护混凝土五个测点最终应力均为压应力。而 K90+226 断面仰拱初期支护混凝土在测点 1 和测点 2 位置最终表现为拉应力,其余测点位置表现为压应力。混凝土初期承受拉应力,主要是因为喷射混凝土施作初期,仰拱初期支护与围岩之间存在间隙,且土质围岩不够密实,上部荷载传递给初期支护后,导致初期支护拱形结构有张开的趋势。因此,仰拱喷射混凝土初期表现为拉应力。随着时间的推移,仰拱与围岩逐渐密贴,仰拱受力重分布,拉应力逐渐减小,最终表现为受压。由于 K90+

226 断面隧道埋深大于 K90+036 断面, K90+226 断面围岩地应力高, 仰拱喷射混凝土应力整体大于 K90+036 断面仰拱喷射混凝土应力。



(a) K90+036断面

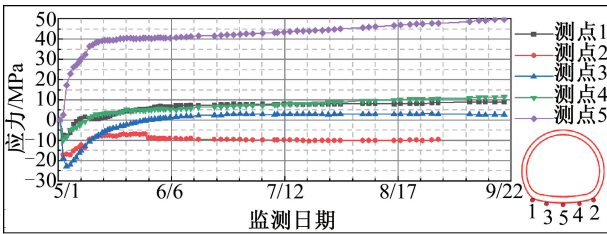


(b) K90+226断面

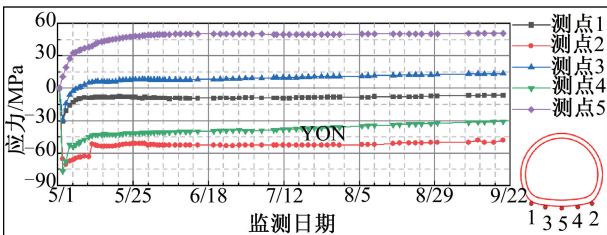
图4 喷射混凝土应力
Fig. 4 Stress in shotcrete

3. 1. 3 钢架受力特性

两个断面仰拱钢架内外侧受力特征如图5和图6所示。其中, 靠近围岩一侧为外侧, 靠近二次衬砌一侧为内侧。



(a) 内侧应力



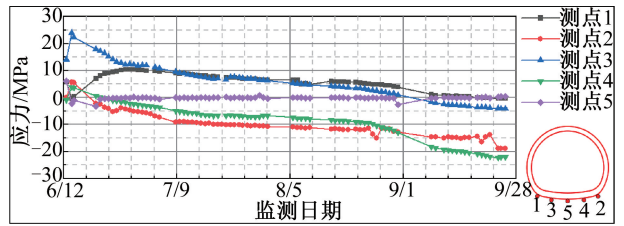
(b) 外侧应力

图5 K90+036 断面钢架内外侧应力

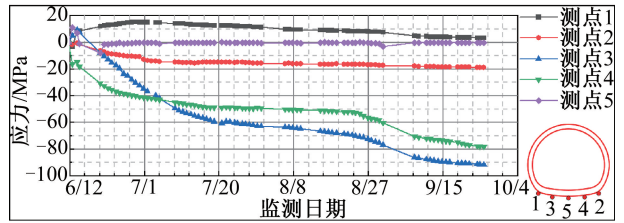
Fig. 5 Inner and outer stresses of K90+036 section steel frame

如图5所示, 钢架内外侧受力变化规律基本相同。在初期支护施作完毕后, 除测点5位置外, K90+036 断面钢架内外侧均处于受拉状态, 拉应力快速增大。随着喷射混凝土强度增大, 钢架拉应力逐渐减小, 并逐渐进入稳定状态。在钢架应力稳定阶段, 部分测点位置钢架承受压应力(钢架

内侧:测点1、3、4、5, 钢架外侧:测点3、5), 部分测点位置钢架承受拉应力(钢架内侧:测点2, 钢架外侧:1、2、4)。如图6所示, K90+226 断面钢架应力变化规律与 K90+036 断面钢架应力变化规律存在较大差异。在初期支护施作初期, K90+226 断面钢架内侧以受压为主, 钢架应力先增大后减小, 在初期支护施作三个月后, 测点2、3、4位置钢架内侧受力由压应力逐渐转变为拉应力, 测点1、5位置钢架内侧应力基本为零。初期支护施作初期, K90+226 断面测点1、3、5位置钢架外侧承受压应力(测点3位置钢架外侧应力很快转变为拉力), 测点2、4位置钢架外侧承受拉应力。



(a) 内侧应力



(b) 外侧应力

图6 K90+226 断面钢架内外侧应力

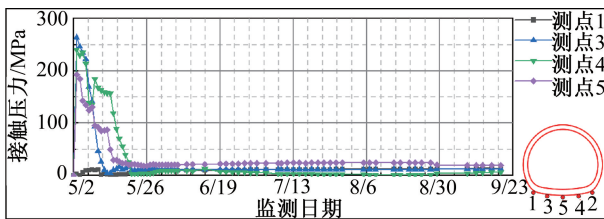
Fig. 6 Inner and outer stresses of K90+226 section steel frame

3. 2 二次衬砌受力特性

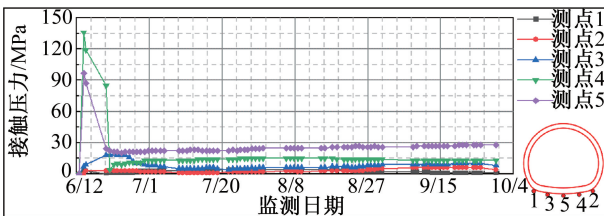
3. 2. 1 初期支护与二次衬砌间接触压力

仰拱初期支护与二次衬砌间接触压力变化规律如图7所示。在 K90+036 断面, 测点2处的压力盒损坏, 未能监测到初期支护与二次衬砌间的接触压力。在二次衬砌施工完成后, 初期支护与二次衬砌间的接触压力迅速增大。主要原因是二次衬砌浇筑后, 二次衬砌混凝土的重力直接作用在初期支护上, 导致初期支护与压力盒中的压力增大。此外, 在二次衬砌模板台车拆除之前, 模板台车与二次衬砌间存在挤压作用, 这种作用力经由二次衬砌作用在初期支护上, 从而导致初期支护与二次衬砌间的接触压力增大。随着二次衬砌混凝土逐渐凝固, 二次衬砌逐渐具备一定的承载能力, 能够承受部分衬砌结构自身重力。此外, 模板台车拆除后, 模板台车与二次衬砌间的作用力消失。这两个因素导致初期支护与二次衬砌间的

接触压力迅速减小,最终进入稳定阶段。由于 K90+226 断面隧道埋深大于 K90+036 断面隧道埋深,因此 K90+226 断面仰拱围岩受到更大压力,导致 K90+226 断面初期支护与二次衬砌间的接触压力整体上大于 K90+036 断面的接触压力。以测点 5 为例,K90+036 断面初期支护与二次衬砌间的接触压力稳定后约为 0.19 MPa,而 K90+226 断面初期支护与二次衬砌间接触压力稳定后约为 0.28 MPa,即 K90+226 断面接触压力为 K90+036 断面接触压力的 147.37%。



(a) K90+036 断面



(b) K90+226 断面

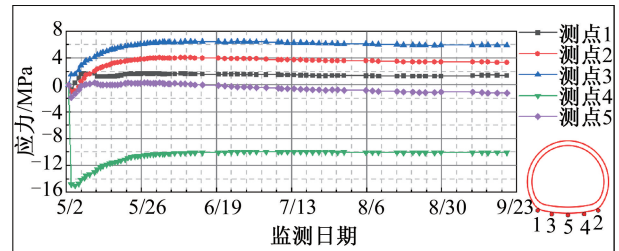
图 7 初期支护与二次衬砌间接触压力

Fig. 7 Contact pressure between primary support and secondary lining

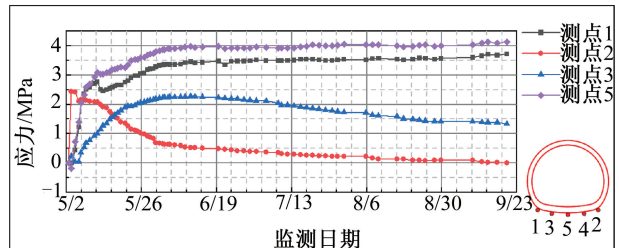
3.2.2 二次衬砌混凝土应力

仰拱二次衬砌混凝土内外侧应力变化规律如图 8 和图 9 所示。其中,二次衬砌混凝土靠近隧道内临空面一侧为内侧,靠近初期支护一侧为外侧。K90+036 断面处监测点 4 位置表面应变计损坏,未能监测到数据。K90+036 断面二次衬砌混凝土施作完毕后,除测点 5 外,其余测点在初期均为受拉状态(图 8)。随着应力的不断调整,测点 1、测点 2、测点 4 位置二次衬砌混凝土逐渐由受拉状态,变为受压状态,并逐渐进入稳定阶段。测点 5 位置二次衬砌内侧混凝土在第 5 天由受拉状态转为受压状态后,在第 39 天又变为受拉状态,且拉应力呈现出缓慢增大的趋势。而二次衬砌外侧混凝土在二次衬砌施作完毕后,基本呈受压状态,然后快速增大。测点 1 和测点 5 位置二次衬砌外侧混凝土随着应力的增大逐渐进入稳定状态,而测点 2 和测点 3 位置二次衬砌外侧混凝土应力出现了明显减小,其中测点 2 处二次衬砌外侧混凝土应力逐

渐趋向于零。与 K90+036 断面不同,二次衬砌混凝土施作完毕后,K90+226 断面测点 1、3、5 位置二次衬砌内侧混凝土承受拉应力,测点 2、4 受压应力。随着混凝土的逐渐凝固,强度逐渐提高,混凝土应力逐渐增大并进入稳定阶段。除测点 5 位置外,二次衬砌内侧混凝土均承受压应力。二次衬砌施作完毕后,测点 5 位置二次衬砌外侧混凝土承受拉应力,且拉应力逐渐减小。其他测点位置二次衬砌外侧混凝土承受压应力。



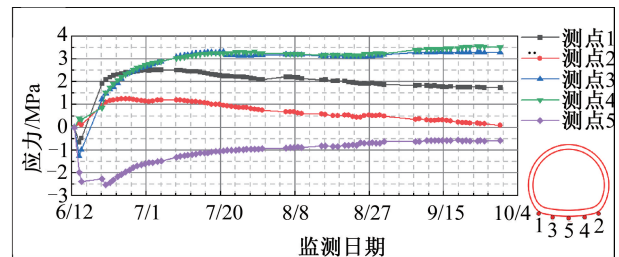
(a) 内侧应力



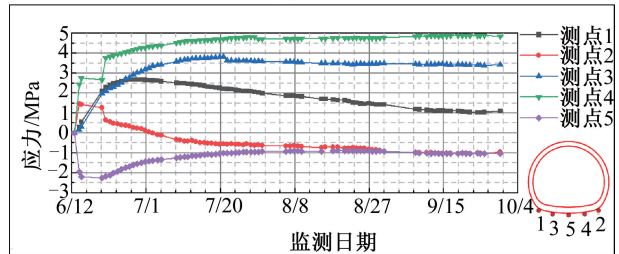
(b) 外侧应力

图 8 K90+036 断面二次衬砌混凝土应力

Fig. 8 Stress of concrete in secondary lining of K90+036 section



(a) 内侧应力



(b) 外侧应力

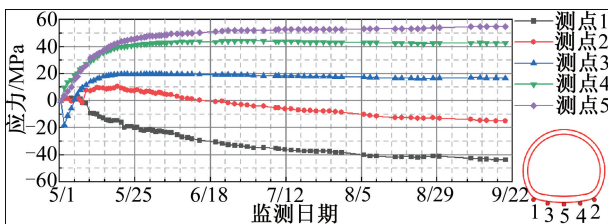
图 9 K90+226 断面二次衬砌混凝土应力

Fig. 9 Stress of concrete in secondary lining of K90+226 section

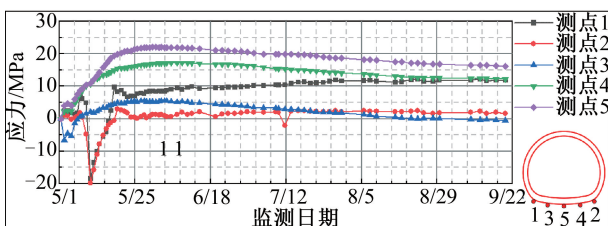
3.2.3 二次衬砌钢筋受力特征

仰拱二次衬砌内外侧钢筋受力演化规律如图 10 和图 11 所示。其中,靠近隧道临空面一侧为内

侧,靠近初期支护一侧为外侧。二次衬砌施作完毕后,K90+036断面除测点3位置二次衬砌内侧钢筋承受拉应力外,其余测点位置二次衬砌内侧钢筋均承受压应力。然而,随着仰拱应力的不断调整,测点3位置二次衬砌内侧钢筋逐渐转变为承受压应力,而测点1、2位置二次衬砌内侧钢筋转变转变为承受拉应力。对于K90+226断面,仰拱二次衬砌施作完毕后,二次衬砌钢筋以承受拉应力为主,随着仰拱应力的调整,部分钢筋转化为承受压应力(内侧钢筋:测点3、4、5,外侧钢筋:测点4、5),另一部分钢筋仍然承受压应力(内侧钢筋:测点1、2,外侧钢筋:测点1、2、3)。



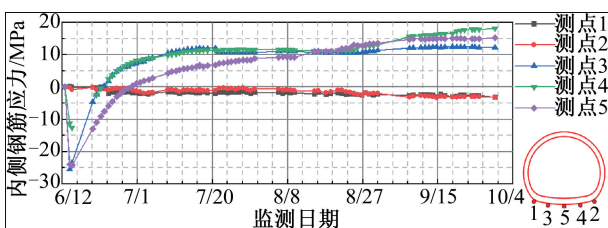
(a) 内侧钢筋应力



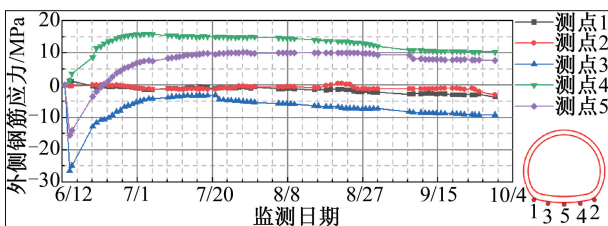
(b) 外侧钢筋应力

图 10 K90+036 断面二次衬砌钢筋应力

Fig. 10 Stress of reinforcement in secondary lining of K90+036 section



(a) 内侧钢筋应力



(b) 外侧钢筋应力

图 11 K90+226 断面二次衬砌钢筋应力

Fig. 11 Stress of reinforcement in secondary lining of K90+226 section

4 讨论

黄土隧道围岩强度低,遇水易软化,仰拱地基承载能力弱,易出现不均匀沉降,仰拱结构受力复杂。将仰拱喷射混凝土应力、钢架应力、二次衬砌混凝土应力、二次衬砌钢筋应力最终受力状态绘制云图如图 12 所示,其中红色表示受拉状态,黄色表示受压状态。如图 12(a)所示,K90+036 断面仰拱在拱脚处表现出明显的受拉,而在仰拱底部表现出受压。K90+226 断面在拱脚位置受拉更为明显,仰拱下表面整体承受拉应力,上表面整体承受压应力。由此可以看出,K90+036 断面和 K90+226 断面的仰拱结构受力状态存在显著差异,存在这种差异的原因可能是:

(1)隧道埋深不同。K90+226 断面隧道埋深大于 K90+036 断面隧道埋深,两个断面仰拱底部围岩压力不同,上部结构传递给仰拱的荷载也不相同,导致仰拱结构的应力状态不同。

(2)地基不均匀沉降。由于仰拱围岩压力不同,且黄土承载力较弱,易导致仰拱受力状态存在差异而出现不均匀沉降的现象。

(3)施工过程扰动。仰拱施作完毕后,在后续隧道施工过程中,会对仰拱结构形成扰动,特别是拱脚以上二次衬砌施作及后续应力调整过程中有外荷载施加在仰拱结构上,施工过程对仰拱结构受力特征的影响不可忽视。

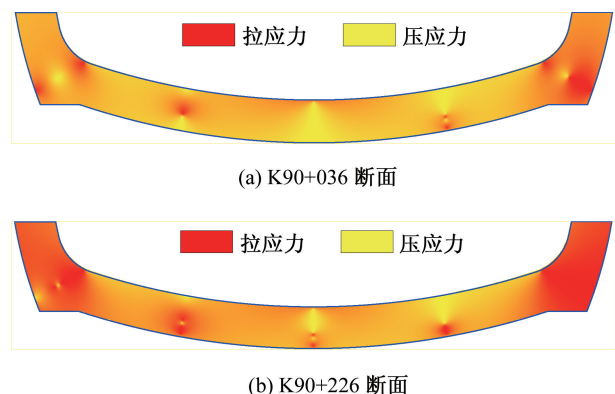


图 12 仰拱结构受力状态

Fig. 12 Load-bearing state of the inverted arch structure

5 结论

以丰收岭公路黄土隧道为工程背景,通过在仰拱埋设压力盒、混凝土应变计、表面应变计、钢

(下转第 81 页)

- 状影响的数值分析[J]. 公路, 2019(12): 286-292.
- [2] 丰土根, 况梦祥, 沈正伟, 等. 双线盾构隧道侧穿既有桥桩影响分析及加固优化[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(3): 55-62.
- [3] 黎春林, 张际鑫. 盾构隧道施工临近建筑物风险等级评估方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 40-45.
- [4] 冯慧君. 新建地铁隧道近距离下穿运营地铁线路施工及安全管控[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 220-226.
- [5] 扈萍, 马梁, 李萌, 等. 小净距隧道后行洞开挖对先行洞的变形影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 246-251.
- [6] 李志南, 潘珂, 王位赢, 等. 双隧道开挖对地表沉降及埋管的影响研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(3): 588-597.
- [7] 夏梦然. 城市浅埋小净距隧道开挖诱发地表沉降及控制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [8] 金大龙, 袁大军, 韦家昕, 等. 小净距隧道群下穿既有运营隧道离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1507-1514.
- [9] 方勇, 何川. 平行盾构隧道施工对既有隧道影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1402-1406.
- [10] 江华, 殷明伦, 江玉生, 等. 深圳地铁盾构隧道近距离上跨既有有线引起的结构变形研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 94-202.
- [11] 司海宝, 化西婷. 南水模型在ABAQUS中的实现及在工程中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 52-55.
- [12] 秦网根, 蔡正银, 关云飞, 等. 不同地基处理方式下组合式板桩码头结构的受力变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 158-162.
- (责任编辑 周雪梅)

(上接第72页)

筋应力计等传感器开展了现场试验, 研究了公路黄土隧道仰拱初期支护和二次衬砌力学特性, 得到主要结论如下:

1) 黄土隧道仰拱受力状态受黄土隧道埋深影响显著。埋深较小的隧道仰拱拱底主要承受压应力, 而埋深较大的隧道仰拱拱底主要承受拉应力。

2) 黄土隧道仰拱受力特征受埋深、地基沉降和施工扰动的影响。黄土隧道埋深较小时, 仰拱结构受力状态复杂, 受压和受拉区域没有显著规律。隧道埋深较大时, 仰拱结构表现出上部受压下部受拉。

3) 黄土隧道仰拱施作完毕后, 仰拱结构受力不断调整, 最终逐渐趋于稳定。二衬施作完毕后一个月左右, 仰拱结构应力基本进入稳定状态。

参考文献:

- [1] 刘耿仁, 龙称心. 甜永高速公路某黄土隧道仰拱开裂原因分析及处置措施[J]. 路基工程, 2020, (03): 230-234.
- [2] 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(05): 180-191.
- [3] 王明年, 翁汉民, 李志业. 隧道仰拱的力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 1996, (01): 46-53.
- [4] 张双苗. 浅埋黄土隧道塌方破坏模式及处置技术[J]. 河北工程大学自然版, 2024, 41(01): 62-71.
- [5] 柳锐锋, 范祺. 新建黄土隧道仰拱开裂原因与处治技术[J]. 山西交通科技, 2022, (02): 90-92.
- [6] 孔恒, 王梦恕, 张德华. 隧道底板隆起的成因、分类与控制[J]. 中国安全科学学报, 2003, (01): 33-36.
- [7] 杨川福, 陈铖. 黄土隧道仰拱填充层致裂原因及处治措施研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(4): 151-159.
- [8] 宋建强. 隧道仰拱及二衬拱脚渗水的处置技术[J]. 中国公路, 2021, (07): 114-115.
- [9] 李林毅, 阳军生, 王立川, 等. 强降雨作用下高速铁路隧道仰拱隆起原因分析及整治[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 27-36.
- [10] 李健. 大断面黄土隧道初支作用机理及变形控制技术[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [11] 任越, 祝华杰. 黄土公路隧道仰拱曲率对结构受力的影响分析[J]. 山西交通科技, 2023, (03): 104-106+114.
- [12] 季伟伟, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 软塑黄土地区隧道仰拱热力响应特性现场试验[J]. 岩土力学, 2021, 42(02): 558-564.
- [13] 王传武, 陈丽俊, 陈建勋, 等. 大跨度软岩公路隧道仰拱承载性能及安全性研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 203-215.
- (责任编辑 周雪梅)