

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.09.066

仰拱曲率对浅埋大断面隧道衬砌结构 承载力的影响研究

陈星州

(四川路桥华东建设有限责任公司, 四川 成都 610200)

摘要: 仰拱曲率对三车道大断面隧道的承载能力影响较大,分别从二次衬砌弯矩、轴力及安全系数等方面对仰拱曲率对三车道大断面隧道的承载能力进行定量分析。研究表明:过渡圆弧半径与仰拱半径的比值 R^* 存在临界值,当仰拱曲率在临界值以下时,弯矩和安全系数变化相对较大,当仰拱曲率超过临界值时,弯矩和安全系数变化相对较小;结构越趋于圆形,安全系数越大,承载力越高。

关键词: 山岭隧道;仰拱曲率;承载力;二衬

中图分类号: U451⁺.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)09-0282-03

0 引言

山岭隧道衬砌断面支护形式以曲墙拱形和直墙拱形为主,其中公路隧道一般断面较大,荷载和变形均较大。特别是近年来城市快速路主要采用三车道断面形式,其跨度均在15 m以上,且曲墙^[1]拱形衬砌较直墙拱形衬砌结构受力^[2]更合理,因此曲墙拱形衬砌应用范围较广。曲墙拱形衬砌中仰拱设置对维护隧道稳定性作用明显,尤其是针对侧压力大或者膨胀性围岩产生仰拱底鼓病害等。为了提高结构承载能力,通常采用改变仰拱曲率的方案。

为此,王明年等^[3]对隧道仰拱力学行为通过模型试验和数值模拟验证的方法进行了研究,得出仰拱对改善结构受力情况作用明显。吕治刚、刘强等^[4-8]研究了隧道底部鼓起、路面开裂的原因。杜明庆等^[9]通过现场测试分析了仰拱结构中混凝土和钢筋的受力特征和应力变化规律。朱星汁^[10]以站前东路隧道工程为背景,研究了不同埋深情况下有仰拱与无仰拱的隧道结构的抗震性能。

以上研究以隧道断面相对较小的两车道衬砌受力特性为主,对大断面隧道研究较少。由于隧道大断面尺寸效应明显,结构力学特性区别于一般断面隧道,为此,本文结合隧道三车道断面对仰拱曲率对结构的承载能力进行研究,对相关软岩大变形隧道工

程设计、施工等提供借鉴和定量参考。

1 工程概况与数值模型的建立

1.1 工程概况

一般认为,圆形断面受力承载能力较马蹄形断面更好,但隧道三车道断面较大,为保证设计内轮廓与建筑限界安全界限,若采用圆形断面,空间使用率不足,造价相对较高。为此,一般工程情况均采用马蹄形断面。马蹄形断面通过改变仰拱半径 R_4 来调整衬砌受力状态,提高其承载能力。

文中 $R^*=R_3/R_4$ 为过渡圆弧与仰拱半径的比值,研究工况设计参数见表1,衬砌断面图如图1所示。

表1 衬砌几何参数

工况	R_1 /m	R_2 /m	R_3 /m	R_4 /m	$R^*=R_3/R_4$
1	9.17	5.50	1.5	10	0.15
2	9.17	5.50	1.5	15	0.10
3	9.17	5.50	1.5	20	0.075
4	9.17	5.50	1.5	25	0.06
5	9.17	5.50	1.5	30	0.05

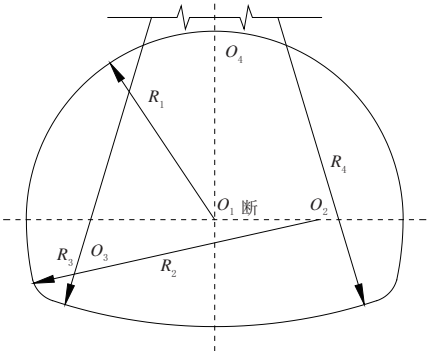


图1 二次衬砌断面几何参数示意图

收稿日期: 2023-03-14

作者简介: 陈星州(1990—),男,硕士,工程师,主要从事桥隧施工技术研究工作。

1.2 计算模型

根据规范^[11]相关条文要求,计算^[12-14]采用“荷载-结构”法对衬砌结构受力情况进行分析,将二次衬砌简化为弹性平面梁单元,用布置于各节点上的弹簧单元来模拟围岩与初期支护、衬砌的相互约束,假定弹簧不承受拉力,即不计围岩与衬砌间的黏结力,弹簧受压时的反力即为围岩对衬砌的弹性抗力,有限元计算时选取弹簧只能承受压力荷载。荷载-结构模型如图 2 所示。

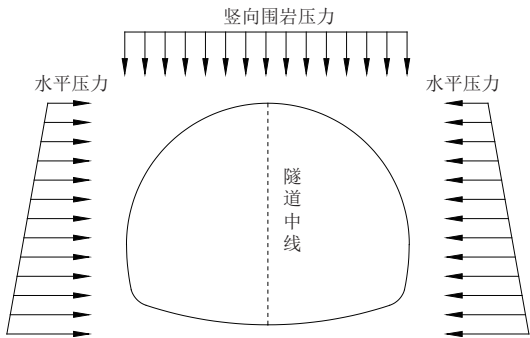


图 2 荷载-结构模型示意图

本文计算隧道为浅埋隧道,计算埋深选取为 30 m,其隧道围岩计算参数见表 2,围岩浅埋荷载见表 3,二次衬砌采用厚度 65 cm 的 C30 混凝土,环向钢筋采用 $\phi 25@150$,其混凝土物理力学参数见表 4。

表 2 隧道围岩计算参数

衬砌类型	容重 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	计算内摩 擦角 / ($^{\circ}$)	侧压力 系数	弹性抗力系数 / ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)
V 级围岩	21	30	0.4	200

表 3 隧道围岩荷载值 单位: kN/m^2

工况	荷载类型		
	垂直荷载	水平荷载 q_1	水平荷载 q_2
1	403.48	202.58	284.28
2	403.48	202.58	274.83
3	403.48	202.58	272.13
4	403.48	202.58	270.03
5	403.48	202.58	268.95

表 4 隧道混凝土计算参数

混凝土标号	容重 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	变形模量 / GPa	泊松比
C30	21	30	0.2

2 计算结果分析

本文主要从不同曲率半径下二次衬砌弯矩、轴力及结构安全系数方面对大断面隧道仰拱曲率对承载力的影响进行研究分析。

2.1 二衬弯矩对比分析

二次衬砌关键点位置在不同工况下的弯矩统计见表 5,弯矩随 R^* 的变化规律如图 3 所示。

表 5 二衬弯矩关键点位置统计 单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$

工况	关键点				
	拱顶	拱肩	拱脚	仰拱	拱底
1	699.64	-749.78	-326.16	367.26	-21.98
2	743.5	-806.13	-602.84	537.27	-40.08
3	770.8	-845.94	-696.09	626.37	-41.48
4	784.84	-864.87	-732.07	672.98	-40.52
5	794.15	-877.61	-750.63	703.06	-38.92

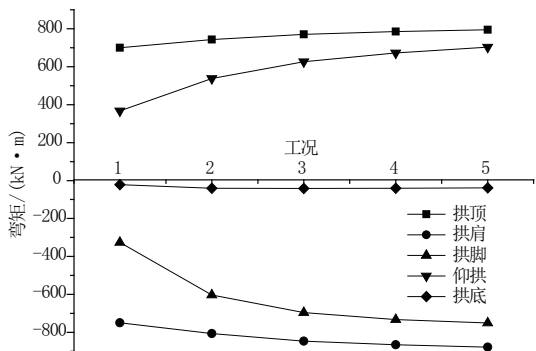


图 3 工况 1~工况 5 二衬弯矩变化

从表 5 和图 3 可以看出,随着仰拱曲率半径增大,衬砌关键点弯矩呈现增大趋势,其中工况 1 曲率半径最小,弯矩亦最小,工况 5 曲率半径最大,弯矩亦最大,表明公路隧道马蹄形断面在相同受力荷载条件下越接近圆形断面时其弯矩较小;另外,虽然工况 2 相对于工况 1 曲率半径差值与其他相邻工况一样,但拱脚和仰拱位置弯矩增量相对其他工况较大,仰拱位置工况 2 相对于工况 1 弯矩增大 170 $\text{kN}\cdot\text{m}$,工况 3 相对于工况 2 弯矩增大 89.1 $\text{kN}\cdot\text{m}$,表明曲率半径存在临界值,即 $R^*=0.1$,当处于临界值以下时,弯矩变化相对较大,超过临界值弯矩变化相对较小。

2.2 二衬轴力对比分析

二次衬砌关键点位置在不同工况下的轴力统计见表 6,轴力随 R^* 的变化规律如图 4 所示。

从表 6 及图 4 可以看出,衬砌关键点轴力随曲率半径变化相对于轴力整体量级变化较小。其中,仰拱工况 2 相对与工况 1 减小 82 kN ,减小 2%;工况 3 相对于工况 2 减小 110 kN ,减小 2.5%。拱底工况 2 相对于工况 1 减小 360 kN ,减小 7.5%;工况 3 相对于工况 2 减小 190 kN ,减小 4.3%。可见,仰拱衬砌轴力随曲率变化较小,其他衬砌关键点位置轴力规律类似。

表 6 二衬轴力关键点位置轴力统计 单位:kN

工况	轴力				
	拱顶	拱肩	拱脚	仰拱	拱底
1	3 032.85	3 718.4	3 994.98	4 167.77	4 760.08
2	3 000.19	3 748.6	4 080.89	4 085.91	4 399.62
3	2 978.44	3 735.35	4 053.83	3 995.77	4 209.49
4	2 967.66	3 674.57	4 059.99	3 938.41	4 104.61
5	2 960.49	3 669.74	4 154.33	3 898.79	4 035.01

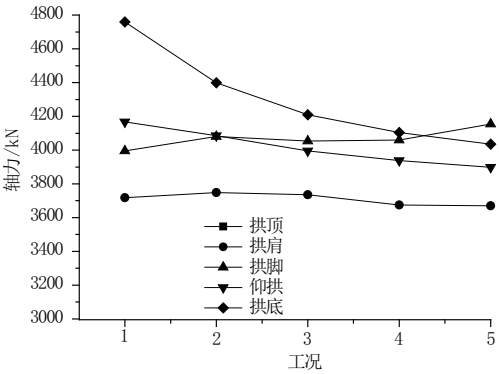


图 4 工况 1~工况 5 二衬轴力变化

2.3 二衬安全系数对比分析

衬砌关键部位在不同工况下的安全系数随 R^* 的变化规律见表 7。

表 7 二次衬砌安全系数统计

工况	安全系数				
	拱顶	拱肩	拱脚	仰拱	拱底
1	3.65	3.17	3.98	3.74	4.30
2	2.81	3.05	3.27	3.40	4.58
3	2.70	2.99	3.11	3.26	4.77
4	2.64	2.43	3.04	3.20	4.89
5	2.60	2.40	2.97	3.17	4.98

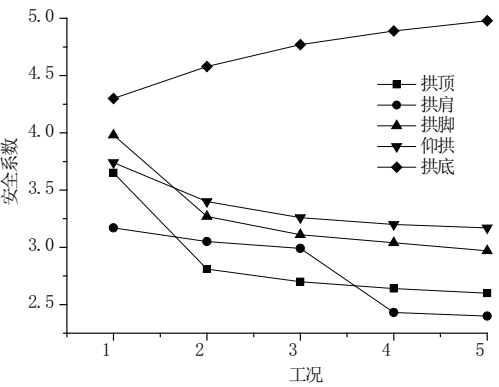


图 5 工况 1~工况 5 安全系数变化

从表 7 及图 5 中可以看出,随着曲率半径的增大,二次衬砌关键点安全系数呈现变小的趋势。其中,工况 1 曲率半径最小,安全系数最大;工况 5 曲率半径最大,安全系数最小,表明公路隧道马蹄形断

面在相同受力荷载条件下越接近圆形断面时,安全系数越大。另外,虽然工况 2 相对于工况 1 曲率半径差值与其他相邻工况一样,但拱顶、拱脚和仰拱位置安全系数减少量相对其他工况较大,拱脚位置工况 2 相对于工况 1 减少 0.6,工况 3 相对于工况 2 减少 0.16,表明曲率半径存在临界值。当处于临界值以下时,安全系数相对较大;超过临界值,安全系数变化相对较小。

3 结 语

通过对仰拱曲率对三车道大断面隧道的承载能力进行定量分析,得出如下结论,可为侧压力大或者膨胀性围岩产生仰拱底鼓病害等采用改变仰拱曲率提高结构承载能力的处治方案提供必要的理论依据。

(1)二次衬砌弯矩随曲率半径增大呈逐渐增大趋势。曲率半径存在临界值,即 $R^*=0.1$ 时。当处于临界值以下时,弯矩变化相对较大;超过临界值,弯矩变化相对较小。马蹄形断面越趋向圆形,弯矩相对越小。

(2)二次衬砌轴力随仰拱曲率半径变化相对于轴力整体量级变化较小。

(3)二次衬砌安全系数随曲率半径增大呈逐渐减小趋势,曲率半径存在临界值,即 $R^*=0.1$ 时。当处于临界值以下时,安全系数变化相对较大;超过临界值,安全系数变化相对较小。马蹄形断面越趋向圆形,安全系数相对越大,承载力越高。

参考文献:

[1] 何川,张志强,李讯,等.高速公路隧道结构安全与健康状态标识系统研究[C]//2007 年全国公路隧道学术会议论文集.重庆:重庆大学出版社,2008.

[2] 伍超,黄磊,陈中天,等.大断面公路隧道二次衬砌受力特性模型试验[J].隧道建设(中英文),2018,38(6):977-985.

[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,1996,18(1):46-53.

[4] 高峰,王猛,胡蓉,等.隧道抗震仰拱形式优化分析[J].交通科技与经济,2014,16(2):5.

[5] 吕治刚,张万涛.基于隧道荷载模式的仰拱力学分析[J].山西建筑,2007,33(20):328-329.

[6] 侯彬.铁路泥岩隧道仰拱上拱变形机制与控制研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2022.

[7] 刘强.运营高铁隧道仰拱隆起灾害分析及整治措施研究[J].铁道建筑技术,2023,358(1):170-172,190.

[8] NATSUME T et al. Rational design concept for inverted arch structure for mountain tunnel[J]. IOP Conference Series: Earth and Envi-

预留钢筋均与顶板、中板、底板的受力钢筋连接方式。具体连接形式如图12所示。

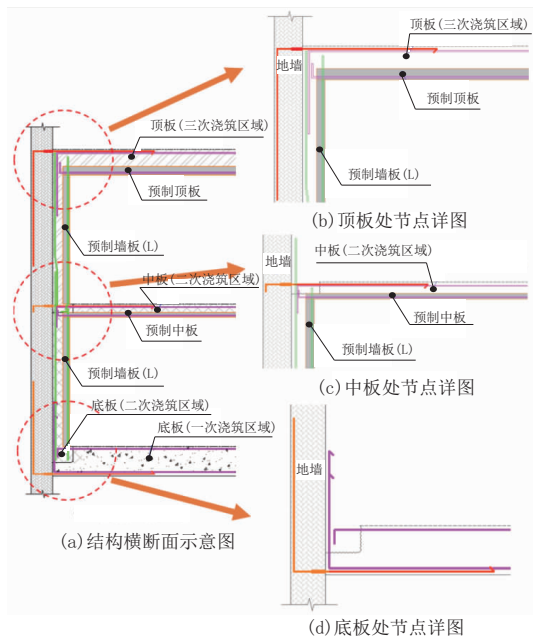


图12 地墙叠合墙内预留钢筋均与顶板、中板、底板的受力钢筋连接方式

顶板处节点为放置预制顶板后,将地墙内的钢筋接出。中板处节点为放置预制中板后,将地墙内的钢筋接出。底板处节点为地墙内的钢筋接出后,将底板

预制钢筋笼放置到位,再浇筑底板(一次浇筑区域)。

4 结 语

整体装配式结构是地下隧道工程的发展的一个方向,制定相应的技术标准,进而逐步推广是行业发展的一个趋势。在武宁路快速化改建工程Ⅱ标整体装配式结构试验段的应用过程中,通过各环缝接头以及纵缝接头的设计,实现了装配整体式结构的受力体系,能较好满足密闭性、耐久性、整体性的功能要求。通过武宁路工程的实践,研究装配整体式结构接头形式,为以后类似工程提供技术指导。同时,推动配整体式结构在其他明挖隧道工程中的应用。

参考文献:

- [1] 周鹏华.叠合墙板结构在地下综合管廊施工中的应用[J].施工技术, 2017,46(19):118-121.
- [2] 邓建军,梁智岳,张友林.预制叠合(装配)式地下综合管廊施工技术[J].广东土木与建筑,2019,26(11):65-69.
- [3] 魏奇科,王宇航,王永超,等.叠合装配式地下综合管廊节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(2):246-254.
- [4] 郭福能. 预制装配整体式混凝土综合管廊构件受力性能试验研究[D].长沙:湖南大学,2018.

(上接第284页)

- [9] 杜明庆,张顶立,张素磊,等.高速铁路隧道仰拱结构受力现场实测分析[J].中国铁道科学,2017(5): 53-61.
- [10] 朱星汁.公路隧道仰拱抗震性能研究及其形式优化[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [11] JTG 3370.1—2018,公路隧道设计规范第一册土建工程[S].

- [12] 朱栋梁,李成学,徐干成,等.别岩槽隧道注浆加固圈及二次衬砌厚度的确定[J].铁道建筑,2006(11):3.
- [13] 刘宽富,冯勇,金明亮,等.基于荷载-结构法的黄土隧道结构静力计算分析[J].中国建材科技,2021,30(6):63-67.
- [14] 韩峰.软岩隧道衬砌内力计算与开挖过程数值模拟[J].铁道建筑技术,2022,353(8):149-153.