

矿山法铁路隧道装配式仰拱对拱墙二衬结构安全性影响

刘梓萱^{1,2}, 高新强^{1,2}, 赵晓勇³, 郭显所⁴, 孔超⁵, 王晨星^{1,2}

- (1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043;
4. 中铁二十二局集团第一工程有限公司, 哈尔滨 150001;
5. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 绵阳 621010)

摘 要: 为研究矿山法铁路隧道装配式仰拱对拱墙二衬结构安全性影响, 基于现场试验测得拱墙二衬的内、外侧钢筋应力与混凝土应力, 通过分析拱墙二衬的安全系数和 $e_0 \geq 0.55h_0$ 处的裂缝宽度, 评价装配式仰拱对拱墙二衬的安全性影响规律。试验结果表明: 采用装配式仰拱施工的拱墙二衬结构安全系数为 2.46~12.38, 最大裂缝宽度为 0.07 mm; 安全系数随着弯矩的增大而减小; 隧道左右两侧拱墙二衬安全系数并不对称, 除墙脚外, 覆土厚度大的右侧安全系数普遍大于覆土厚度小的左侧; 左侧安全系数从边墙→墙脚→拱顶→拱腰逐渐减小, 右侧安全系数从拱腰→边墙→拱顶→墙脚逐渐减小。总体来看, 采用装配式仰拱对拱墙二衬安全性影响较小, 安全系数与最大裂缝宽度均能符合规范要求。

关键词: 矿山法隧道; 装配式仰拱; 拱墙二衬; 安全系数; 裂缝宽度

中图分类号: U25 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 05-0147-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.022

The Influence of Prefabricated Invert on the Safety of the Secondary Lining Structure in Railway Tunnels Constructed by the Mining Method

LIU Zixuan^{1,2}, GAO Xinqiang^{1,2}, ZHAO Xiaoyong³, GUO Xiansuo⁴, KONG Chao⁵, WANG Chenxing^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China;
4. China Railway 22nd Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Harbin 150001, China;
5. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

项目来源: 中铁二十二局集团有限公司哈尔滨分公司科技项目 (CR2201-TL-TL01-ZX-2023-027); 河北省省级科技计划资助 (225676162GH)。

作者简介: 刘梓萱 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 隧道结构力学特征。

通信作者: 高新强 (1970—), 男, 博士研究生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 隧道围岩稳定机理。

收稿日期: 2025-03-13

道桥技术

Abstract: To investigate the influence of prefabricated invert on the safety of the secondary lining structure in railway tunnels constructed by the mining method, based on the field test measurements of the internal and external steel reinforcement stresses and concrete stresses of the arch wall secondary lining. The safety factor of the secondary lining and the crack width at locations where $e_0 \geq 0.55h_0$ were analyzed to evaluate the influence of the prefabricated invert on the safety of the secondary lining. The results show that: the safety factors of the secondary lining structure constructed with prefabricated invert segments ranges from 2.46 to 12.38 and maximum crack width of 0.07 mm. The safety factor decreasing as the bending moment increases. The safety factors of the secondary lining on the left and right sides of the tunnel are asymmetrical; except for the wall foot, the safety factor on the right side, where the soil cover is thicker, is generally higher than on the left side, where the soil cover is thinner. On the left side, the safety factor gradually decreases from sidewall $\rightarrow$ wall foot $\rightarrow$ the crown $\rightarrow$ arch waist, while on the right side, it decreases from the arch waist $\rightarrow$ sidewall $\rightarrow$ crown $\rightarrow$ wall foot. The influence of prefabricated inverted arches on the safety of the arch wall secondary lining is minimal, both the safety factor and maximum crack width meet the code requirements.

Key words: mining method tunnel; prefabricated inverted; secondary lining; safety factor; crack width

0 引言

目前矿山法铁路隧道中,大部分采用的仍是“仰拱+拱墙二衬均为现浇”的复合式衬砌结构^[1],采用“预制装配式仰拱+拱墙二衬现浇”的工程案例较为少见,因此需要评价矿山法铁路隧道装配式仰拱对拱墙二衬结构的安全性影响。

分析隧道结构安全性的主要方法包括现场试验与数值模拟^[2]。周成嵩等^[3]、何泉等^[4]采用现场监测的方式,研究了支护结构的受力变化特征,得到隧道开挖后变形与支护结构受力相互影响的规律,进而分析支护结构的安全性;侯峰等^[5]通过现场实测对隧道初期支护结构进行了安全性分析,并发现初期支护安全系数随着隧道施工推进而逐渐降低并趋于稳定;王飞^[6]通过足尺试验,研究了预制仰拱块在施工荷载作用下的相关受力特征;王嵩等^[7]采用数值计算分析研究拱部装配式衬砌结构的系列设计参数,研究了隧道衬砌结构安全性;张胜龙^[8]利用“荷载-结构”有限元模型,研究了不同围岩等级、不同接头刚度和不同分块方法对结构受力与安全系数的影响;吕刚等^[9]采用数值模拟,分析了预制轨下结构的强度、变形和稳定性;李煊栋^[10]通过对整体模型和预制仰拱单块模型的对比研究,分析了预制仰拱在施工机械荷载下的安全性与稳定性;Wang等^[11]研究了隧道双层衬砌结构管片和二次衬砌共同分担超载条件下,不同节理面对衬砌结构力学行为和破坏特征的影响;刘建红^[12]提出了将“预制装配式仰拱+拱墙二衬现浇”的结构用于矿山法隧道,并使用数值模拟的方法对处于V级围岩地层的

一体化结构进行安全性计算;赵晓勇等^[13-14]提出纵向分块鱼腹式结构可以更有效的降低结构内力,满足结构的受理与变形要求,分析了仰拱块与边墙连接处采用不同凸起长度的V型接头时,仰拱块及二次衬砌拱墙的受力特征和安全系数;张育锦等^[15]建立“接触摩擦-梁-接头”计算模型,分析了隧道初支与二衬之间的接触压力与二衬内力,并讨论了6种二衬拼装方案及预制块接头位置与接头抗弯强度对二衬内力的影响。

综上所述,目前对通过现场试验验证装配式仰拱衬砌结构隧道安全性的研究较少。基于此,依托于国内首座采用装配式仰拱的矿山法单线铁路隧道——天陇铁路腰坡村隧道,通过现场试验得到隧道拱墙二衬钢筋应力与混凝土应力,分析隧道拱墙二衬安全性,得出装配式仰拱对隧道拱墙二衬结构安全性的影响规律。

1 工程概况及测点布置

1.1 工程概况

天陇铁路腰坡村隧道为矿山法单线铁路隧道,起止里程:DK207+698~DK207+852,全长154 m,隧址处地面高程1380~1417 m,相对高差37 m,地层主要为第四系上更新统风积砂质黄土、冲积粉质黏土及上第三系泥岩夹砂岩,隧道洞身穿越的地层岩性主要为上第三系泥岩夹砂岩。其中DK207+705.85~DK207+785.98采用“预制装配式仰拱+现浇拱墙衬砌”施工,隧道位于R-1600曲线及缓和曲线上,洞内纵坡154 m/17.7‰的单面下坡。隧道纵断面如图1所示。

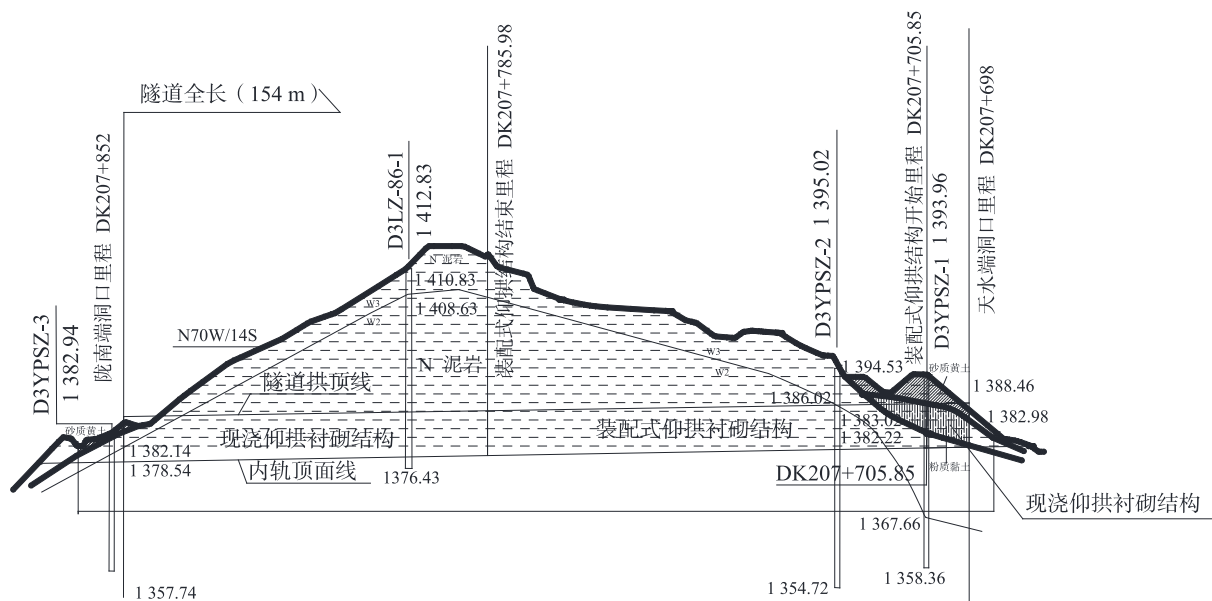


图1 腰坡村隧道纵断面图

Fig. 1 Profile diagram of Yaopocun tunnel

1.2 装配式仰拱参数

预制仰拱底部为弧形结构，长×宽×高为 5.744 m×1.5 m×1.334 m，单个重量 16.12 t。底部铺设厚度为 15 cm 级配良好的 3~5 cm 碎石或者豆砾石，作为预制仰拱基底垫层。

1.3 测点布置

在隧道装配式仰拱衬砌结构段选取了 DK207+767.896、DK207+775.448、DK207+784.480 三个测试断面，采用钢筋计和埋入式应变计分别测试拱墙二衬钢筋应力和混凝土应力。断面上测点布置如图 2 所示。

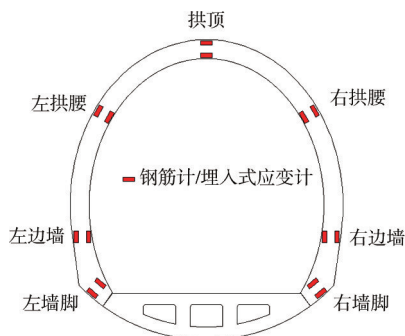


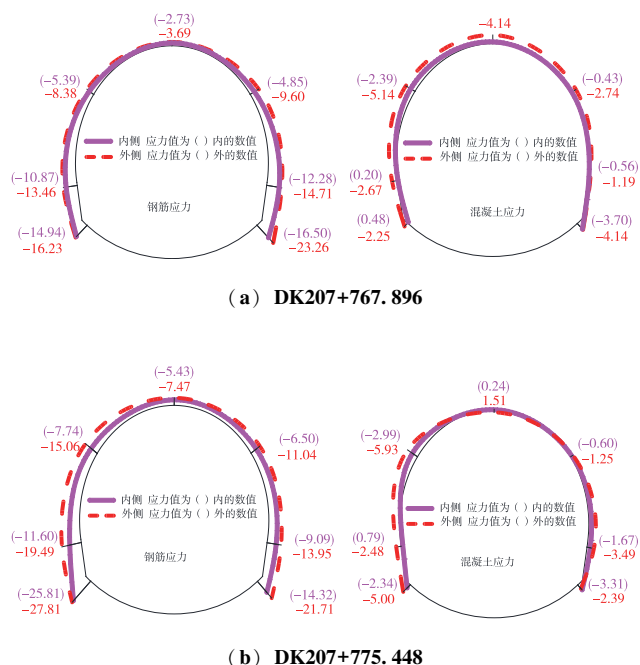
图2 装配式仰拱断面测点布置图

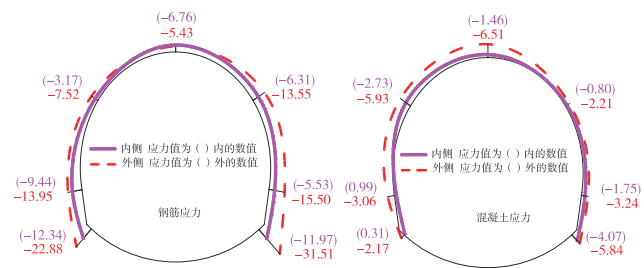
Fig. 2 Section measuring point layout diagram of prefabricated inverted arch structure

注：确定进行测试时，装配式仰拱已经预制完成，未能在仰拱内部埋设钢筋计与埋入式应变计，因此装配式仰拱中的钢筋应力与混凝土应力未测试，待以后工程完善。

2 现场测试结果

现场试验测得 DK207+767.896、DK207+775.448、DK207+784.480 的拱墙二衬内、外侧混凝土应力与钢筋应力，如图 3 所示，正值表示拉应力，负值代表压应力。





(c) DK207+784.480

图3 拱墙二衬钢筋应力与混凝土应力 单位: MPa

Fig.3 The reinforcement stress and the concrete stress of the secondary lining

3 安全系数分析

对装配式仰拱衬砌段隧道的拱墙二衬进行强度验算,选取隧道的左右墙脚、左右边墙、左右拱腰

表2 拱墙二衬安全系数计算参数

Table 2 Calculation parameters of steel bars and concrete

纵向受拉、纵向受压钢筋的截面面积 $A_g=A_g'/\text{mm}^2$	自钢筋的重心分别至截面最近边缘的距离 $a=a'/\text{mm}$	截面高度 h 与截面有效高度 h_0/mm	截面计算宽度 b/mm	钢筋的抗压计算强度 R_g/MPa	钢筋的抗拉、抗压强度设计值 $f_y/(N/\text{mm}^2)$	钢筋弹性模量 E_s/GPa	混凝土弯曲抗压极限强度 R_w/MPa	混凝土抗压极限强度 R_a/MPa
1 570	60	450、390	1 000	400	360	200	36.9	29.5

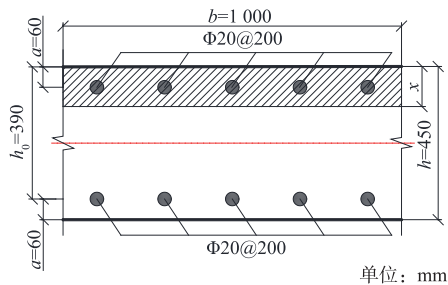


图4 计算截面

Fig.4 Diagram of the calculation section

3.2 二衬轴力与弯矩计算

根据现场试验测得拱墙二衬内、外侧混凝土应力与钢筋应力,拱墙二衬各部位轴力 N 按照公式(1)计算,其中混凝土轴力 N_1 、钢筋轴力 N_2 分别按照公式(2)、(3)计算;弯矩 M 按照公式(4)计算。计算结果如图5所示,轴力正值代表拉力(隧道内侧),负值代表压力(隧道外侧),弯矩正值代表二衬内侧受拉(隧道内侧),负值代表二衬外侧受拉(隧道外侧)。

$$N = N_1 + N_2 \tag{1}$$

以及拱顶7个典型位置,按照破损阶段法进行隧道二衬安全系数计算^[16~17],钢筋混凝土结构在主要荷载作用下的安全系数最小值见表1。

表1 钢筋混凝土结构的强度安全系数

Table 1 The strength safety factor of reinforced concrete structures

破坏原因	安全系数
钢筋达到计算强度或混凝土达到抗压或抗剪极限强度	2.0
混凝土达到抗拉极限强度	2.4

3.1 计算截面参数

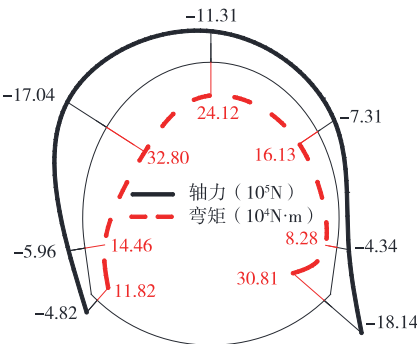
隧道二衬采用 C40 混凝土、直径为 20 mm 的 HRB400 钢筋,对称配筋,截面上下各布置 5 根钢筋。隧道拱墙二衬安全系数计算所需具体参数见表2。计算截面如图4所示。

$$N_1 = \frac{\sigma_3 + \sigma_4}{2} \times (A - A_g - A_g') \tag{2}$$

$$N_2 = \sigma_1 \times A_g + \sigma_2 \times A_g' \tag{3}$$

$$M = \sigma_1 \times A_g \times (h_0 - a') + N_1 \times (d - a) \tag{4}$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 分别为内侧钢筋应力、外侧钢筋应力、内侧混凝土应力、外侧混凝土应力,MPa; A 为计算截面面积, mm^2 。 d 为混凝土轴力作用点至距受拉钢筋距离较近一侧边缘的距离, mm。



(a) DK207+767.896

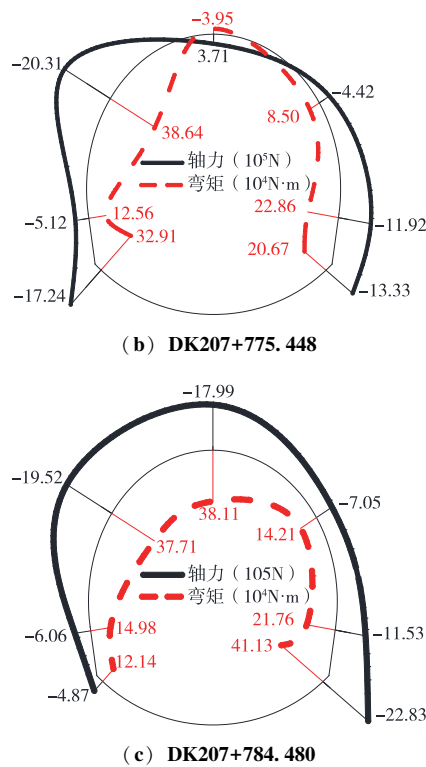


图 5 拱墙二衬轴力与弯矩
Fig. 5 Axial force and bending moment of the secondary lining

3.3 二衬安全系数计算

大偏心受压部位按照公式 (5) 计算安全系数，

小偏心受压部位按照公式 (6) 计算安全系数，其中初始偏心距 e_0 、截面偏心距 e 、混凝土受压区高度 x 、相对界限受压区高度 ξ_b 、相对受压区高度 ξ 分别按照公式 (7) ~ (11) 计算。计算结果见表 3，拱墙二衬各部位安全系数在断面上分布特征如图 6 所示。

$$KN = R_w bx \tag{5}$$

$$KNe = 0.5R_a bh_0^2 + R_g A_g' (h_0 - a') \tag{6}$$

$$e_0 = \frac{M}{N} \tag{7}$$

$$e = \eta e_0 + h/2 - a \tag{8}$$

$$R_g (A_g e_1 + A_g' e_1') = R_w bx (e - h_0 - x/2) \tag{9}$$

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{f_y}{\varepsilon_{cu} E_s}} \tag{10}$$

$$\xi = \frac{x}{h_0} \tag{11}$$

式中： η 为偏心距增大系数，取 1.0； e_1 、 e_1' 为受拉与受压钢筋重心至轴向力作用点的距离，mm； β_1 为系数，C40 混凝土 β_1 取 0.8； ε_{cu} 为正截面的混凝土极限压应变，取 0.003 3。

由表 3 与图 6 可知：拱墙二次衬砌各部位安全系数在 2.46~12.38 之间，均大于表 1 中所规定的安

表 3 二衬安全系数

Table 3 The safety factor of secondary lining							
断面里程	位置	初始偏心距 e_0/mm	偏心距 e/mm	混凝土受压区高度 x/mm	偏心情况	安全系数 K	安全性
DK207+767.896	左墙脚	245.05	410.05	87.81	大偏心	6.72	安全
	左边墙	244.58	409.58	88.20	大偏心	5.46	安全
	左拱腰	192.47	357.47	143.39	大偏心	3.10	安全
	拱顶	213.94	378.94	117.62	大偏心	3.85	安全
	右墙脚	170.03	335.03	174.36	大偏心	3.55	安全
	右边墙	190.70	355.70	145.69	大偏心	12.38	安全
	右拱腰	219.64	384.64	111.48	大偏心	5.63	安全
DK207+775.448	左墙脚	191.14	356.14	145.12	大偏心	3.11	安全
	左边墙	244.59	409.59	88.19	大偏心	6.36	安全
	左拱腰	190.27	355.27	146.27	大偏心	2.66	安全
	拱顶	106.39	271.39	170.00	大偏心	6.91	安全
	右墙脚	154.81	319.81	197.31	大偏心	5.48	安全
	右边墙	191.71	356.71	144.37	大偏心	4.48	安全
	右拱腰	192.53	357.53	143.32	大偏心	11.98	安全
DK207+784.480	左墙脚	248.46	413.46	85.09	大偏心	6.44	安全
	左边墙	245.09	410.09	87.78	大偏心	5.34	安全
	左拱腰	193.12	358.12	142.56	大偏心	2.69	安全
	拱顶	211.90	376.90	119.89	大偏心	2.46	安全
	右墙脚	180.22	345.22	159.84	大偏心	2.58	安全
	右边墙	189.04	354.04	147.88	大偏心	4.75	安全
	右拱腰	201.11	366.11	132.53	大偏心	6.94	安全

道桥技术

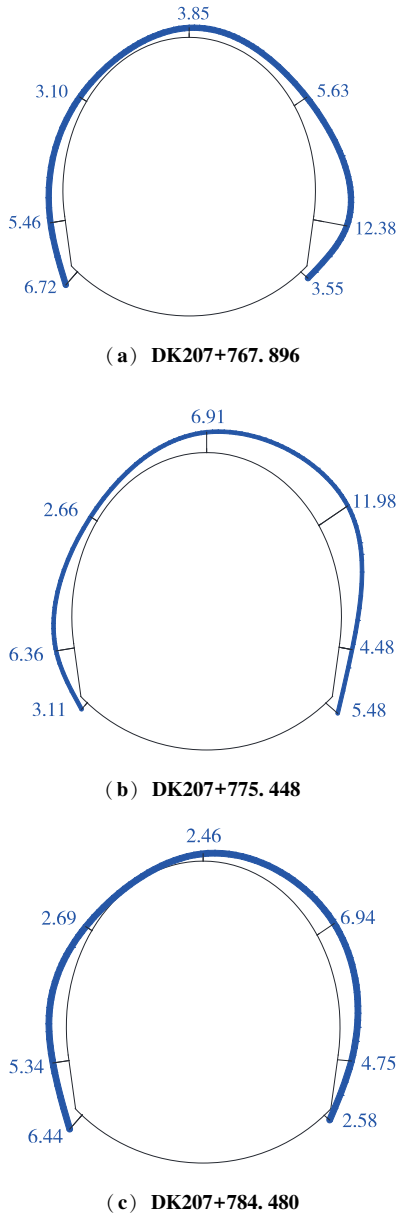


图6 安全系数在断面上分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of safety factor on section

全系数最小值,其中受压部位安全系数大于2.0,受拉部位大于2.4,说明装配式仰拱对拱墙二衬结构的安全性影响较小。安全系数最大的部位为DKDK207+767.896右边墙,最小的部位为DK207+784.480拱顶。安全系数与弯矩存在负相关关系,安全系数随着弯矩的增大而减小。安全系数在断面上存在左右分布不均匀的情况,除墙脚外,覆土厚度大的右侧安全系数普遍大于覆土厚度小的左侧;左侧安全系数从边墙、墙脚、拱顶、拱腰逐渐减小,右侧安全系数从拱腰、边墙、拱顶、墙脚逐渐减小。

3.4 裂缝宽度验算

当钢筋混凝土偏心受压构件,在长期荷载作用下应进行裂缝宽度验算,将初始偏心距 e_0 与 $0.55h_0$ 进行比较,若 $e_0 < 0.55h_0 = 214.5 \text{ mm}$,则无需进行裂缝宽度验算^[16]。

由表3可得,DK207+767.896左墙脚、左边墙与右拱腰、DK207+775.448左边墙、DK207+784.480左墙脚与左边墙需要进行裂缝宽度验算。

最大裂缝宽度 $\omega_{\max}$ 按照公式(12)计算。轴力为压力时,纵向受拉钢筋应力 σ_s 按照公式(13)计算,其中轴向压力作用点至纵向受拉钢筋合力点之间的距离 e_1 、纵向受拉钢筋合力点至截面受压区合力点的距离 z ,分别按照公式(14)、(15)计算;当轴力为拉力时,纵向受拉钢筋应力 σ_s 按照公式(16)计算。有效受拉混凝土截面面积的纵向受拉钢筋配筋率 ρ_{te} 、裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数 φ 分别按照公式(17)、(18)计算,当 $\varphi < 0.2$ 时,取 $\varphi = 0.2$;当 $\varphi > 1$ 时,取 $\varphi = 1$ 。计算结果如表4所示。

$$\omega_{\max} = \alpha \varphi \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d}{\rho_{te}} \right) \quad (12)$$

$$\sigma_s = \frac{N(e_1 - z)}{A_s z} \quad (13)$$

$$e_1 = \eta_s e_0 + y_s \quad (14)$$

$$z = \left[0.87 - 0.12 \left(\frac{h_0}{e} \right)^2 \right] h_0 \quad (15)$$

$$\sigma_s = \frac{Ne_1'}{A_s(h_0 - a_s')} \quad (16)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}} \quad (17)$$

$$\varphi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_s} \quad (18)$$

式中: α 为结构受力特征系数,取 $\alpha = 1.9$; c_s 为最外层纵向受拉钢筋边缘至受拉区底边的距离,取 $c_s = 50 \text{ mm}$; d 为受拉区纵向钢筋的直径,取 $d = 20 \text{ mm}$; y_s 为截面重心至 A_g 合力点的距离,取 $y_s = h/2 - a = 165 \text{ mm}$; η_s 为轴向力偏心距增大系数,当 $b/h \leq 14$ 时,取 $\eta_s = 1.0$,该截面 $b/h = 2.2 < 14$,取 $\eta_s = 1.0$; e_1' 为轴向拉力作用点至受压区受拉较小边纵向钢筋合力点的距离; A_{te} 为有效受拉混凝土截面面积,

$A_{te}=0.5bh$ ； f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值，C40 混凝土取 2.39 MPa。

由表 4 可知，需要进行裂缝宽度验算的 6 处部位，裂缝宽度均小于裂缝计算宽度限值 0.2 mm，处于安全范围内，DK207+784.480 左边墙、右拱腰与 DK207+784.480 左边墙裂缝宽度较大，为 0.07 mm。

表 4 裂缝宽度验算
Table 4 Crack width checking calculation

断面里程	位置	z/mm	σ_s/MPa	φ	ω/mm	安全性
DK207+767.896	左墙脚	296.96	0.12	-0.23	0.06	安全
	左边墙	296.87	0.14	0.02	0.07	安全
	右拱腰	291.19	0.15	0.06	0.07	安全
DK207+775.448	左边墙	296.87	0.12	-0.15	0.06	安全
DK207+784.480	左墙脚	297.66	0.12	-0.19	0.06	安全
	左边墙	296.97	0.15	0.04	0.07	安全

4 结论

以天陇铁路腰坡村隧道为研究背景，通过现场试验研究装配式仰拱对拱墙二衬安全性的影响规律，得到以下结论：

(1) 通过现场试验测得的数据进行安全系数计算与裂缝宽度验算，安全系数为 2.46~12.38，最大裂缝宽度为 0.07 mm，安全系数与最大裂缝宽度均能符合规范要求，证明了采用装配式仰拱对拱墙二衬的安全性影响较小。

(2) 安全系数与弯矩存在负相关关系，安全系数随着弯矩的增大而减小。

(3) 隧道拱墙二衬左右两侧安全系数并不对称，除墙脚外，覆土厚度大的右侧安全系数普遍大于覆土厚度小的左侧。

(4) 左侧安全系数从边墙→墙脚→拱顶→拱腰逐渐减小，右侧安全系数从拱腰→边墙→拱顶→墙脚逐渐减小。

(5) 左墙脚、左边墙处 $e_0 \geq 0.55h_0$ ，需要进行裂缝宽度验算，且裂缝宽度均满足规范要求。

参 考 文 献

[1] 赵有明，王志伟，王子洪. 铁路隧道预制装配式建造技术研究

与展望 [J]. 中国铁路, 2020 (12): 51-60.

[2] 迟德超, 王怡凡, 李祥, 等. 基于平截面假定的隧道初期支护综合安全系数计算方法 [J/OL]. 湖南交通科技, 2025, 51 (4): 1-6.

[3] 周成嵩, 杨鹏飞, 张红东, 等. 深埋隧道软岩大变形与支护结构受力监测分析 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51 (22): 120-125, 131.

[4] 何泉, 陈真, 杨义, 等. 新型装配式衬砌在矿山法施工铁路隧道中的应用研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (8): 1491-1498.

[5] 侯峰, 章慧健, 司君岭, 等. 硅藻土地层隧道初期支护力学行为现场试验研究 [J]. 北京交通大学学报, 2022, 46 (6): 93-99.

[6] 王飞. 隧道装配式仰拱施工荷载受力特征试验研究 [J]. 铁道工程学报, 2023, 40 (6): 74-81.

[7] 王嵩, 谢运来, 卿伟宸, 等. 矿山法隧道拱部装配式衬砌结构设计研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (增刊 1): 360-368.

[8] 张胜龙. 铁路隧道预制装配式衬砌接头力学性能及选型研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020.

[9] 吕刚, 刘建友, 赵勇, 等. 京张高铁清华园隧道轨下结构预制拼装技术 [J]. 隧道建设 (中英文), 2019, 39 (8): 1357-1364.

[10] 李焯栋. 隧道装配式预制仰拱结构选型研究 [J]. 铁道建筑技术, 2024 (8): 149-152, 196.

[11] Wang Shimin, Ruan Lei, Shen Xingzhu, et al. Investigation of the mechanical properties of double lining structure of shield tunnel with different joint surface [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 404-419.

[12] 刘建红. 钻爆法单线铁路隧道装配式仰拱结构形式研究 [J]. 铁道标准设计, 2021, 65 (8): 101-106.

[13] 赵晓勇. 单线铁路隧道预制装配式仰拱方案探讨 [J]. 铁道标准设计, 2021, 65 (9): 127-132, 147.

[14] 赵晓勇, 秦哲麟, 高新强, 等. 隧道装配式仰拱 V 型接头衬砌结构受力特征研究 [J]. 国防交通工程与技术, 2022, 20 (6): 11-16, 60.

[15] 张育锦, 周晓军, 喻炳鑫, 等. 基于“接触摩擦-梁-接头”模型的矿山法隧道预制拼装二次衬砌分块方法研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (3): 35-44.

[16] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范 [S].

[17] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范 [S].