

基于参数化建模思想的四心圆公路隧道洞形优化

朱磊¹, 郭萌³, 郭金勇², 沈才华², 张涵怡²

(1. 中交隧桥(南京)技术有限公司, 江苏 南京 211800; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098;

3. 河北水利电力学院 河北省数据中心相变热管理技术创新中心, 河北 沧州 061001)

摘要:合理的四心圆公路隧道断面形式有助于改善衬砌结构的受力状态,减少复合式衬砌的开裂病害,提高隧道结构的耐久性。该文通过Ansys软件APDL参数化编程平台,基于“曲率连续”的设计思想,构建了拱脚区局部洞形几何尺寸参数化建模方程,建立了锚杆加固区等效力学参数计算方法及数值模拟模型,揭示了四心圆公路隧道拱脚区域局部洞形参数设计对衬砌结构内力的影响规律,结合实际工程研究显示:隧道拱脚弧与中墙弧的半径和长度对于隧道复合式衬砌结构内力的影响较明显,增大拱脚弧半径对于抑制衬砌结构内塑性区发展的效果最为明显;为了减小衬砌结构的开裂风险,提出采用衬砌拉应力为控制目标进行局部形状优化思想,通过中墙弧圆心角 θ_2 、拱脚弧圆心角 θ_3 及中墙弧半径 R_2 对衬砌结构内力极值的敏感性及影响规律分析为皮家岭隧道洞形优化提供了理论依据。

关键词:四心圆公路隧道;参数化建模;复合式衬砌;第一主应力;塑性区

中图分类号:U456

文献标志码:A

Research on Shape Optimization of Four-Center Circular Highway Tunnel Based on Parametric Modeling Idea

ZHU Lei¹, GUO Meng³, GUO Jinyong², SHEN Caihua², ZHANG Hanyi²

(1. CCCC Tunnel and Bridge (Nanjing) Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211800, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering,

Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098 China; 3. Hebei Technology Innovation Center of Phase Change Thermal Management of Internet

Data Center, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou, Hebei 061001, China)

Abstract: The rational cross-sectional form of the four-center circular highway tunnel contributes to enhancing the stress state of the lining structure, reducing cracks in the composite lining, and enhancing the durability of the tunnel structure. Utilizing the Ansys APDL programming platform and guided by the design principle of continuous-curvature, a parametric modeling equation for the geometrical dimensions of local tunnel shape in arch foot area was established. The calculation method and numerical simulation models for the equivalent mechanical parameters of the anchor reinforcement area were also developed. The study revealed the impact of the local tunnel shape parameter design in the arch foot area on the internal forces of the lining structure in the four-center circle highway tunnel. It is demonstrated through practical engineering research that radii and lengths of the tunnel's arch foot arc and middle wall arc significantly affect the internal forces of composite lining structure, with increasing the radius of the arch foot arc most prominently restraining plastic zone development in lining structure. It is recommended to prioritize controlling lining tensile stress for local shape optimization to mitigate the risk of lining structure cracking. This approach provides a theoretical basis for the shape optimization of the Pijialing Tunnel, analyzing the sensitivity and influence rules of the extreme values

收稿日期:2022-09-21(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(编号:41830110);中交养护集团2020年重大科技研发项目(编号:27100020Y251, 27100020Y249)

作者简介:朱磊,男,硕士,高级工程师.E-mail:278558693@qq.com

of inner forces on the lining structure concerning the central angle of the middle wall arc (θ_2), central angle of arch foot arc (θ_3), and the radius of middle wall arc (R_2).

Keywords: four-center circular highway tunnel; parametric modeling; composite lining; first principal stress; plastic zone

0 引言

四心圆洞形是公路隧道设计中常用断面形式^[1],由左右对称的八段四心弧组成,分别为拱顶弧、中墙弧、拱脚弧及仰拱弧4部分。断面的主要控制参数为4个圆心位置 O_i 、圆弧半径 R_i 及所对圆心角 θ_i 。这些参数设计的合理性与围岩特性、地应力场分布以及开挖方式等复杂因素有关^[2-4],如何优化这些参数,使得作用在衬砌上的围岩压力分布更加均匀,减小衬砌开裂等病害成为设计的难点^[5-8]。谢东武^[9]针对破碎围岩区,从工程经济角度出发研究了特大断面隧道的几何设计方案;陈卫忠等^[10]在参数化数值仿真基础上对不同高跨比设计下结构变形、应力及塑性区发展规律,建立层次分析法提出合理的高跨比;金星亮等^[11]针对超大断面浅埋扁平隧道进行参数化设计,获得了不同的最优高跨比;张俊儒等^[12-13]汇总中国典型四车道及以上超大断面公路隧道案例,总结了超高扁平隧道扁平率的研究且提出了最佳扁平率的概念。可见目前针对扁平公路隧道形状优化的研究成果还不是很^[14-16],特别是针对容易开裂的拱脚区局部形状优化研究成果更少^[17-19]。通过 Ansys 软件的 APDL 参数化模块,建立参数化的数值模型,进行形状参数的敏感性分析可以对复杂地质条件下四心圆隧道的优化提供参考。本文结合皮家岭公路隧道实际工程,采用参数化建模技术,针对四心圆隧道衬砌拱脚区域容易开裂的特点,对局部几何形状进行系统优化分析,揭示主要形状参数对衬砌结构安全性的影响规律,为隧道形状优化设计提供参考,并为进一步实现形状设计的系统优化提供新的途径。

1 基于 Ansys 软件 APDL 参数化模块的四心圆隧道形状优化模型构建

1.1 几何形状的参数化编程实现

根据对四心圆洞形每个弧段的相关性分析,4个弧段组成一个有机整体,相互影响,因此以仰拱弧几何参数为控制点,建立其他参数的相关性函数,即

$R_4 = f_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, R_1, R_2, R_3)$, $\theta_4 = f_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, $O_4 = f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3, R_1, R_2, R_3)$ 。净空断面控制参数如图1所示。其中待求参数以蓝色标注(O_4 、 R_4 、 θ_4),其余以红色标注,本文参数化控制方程:

$$\theta_4 = \pi - \theta_1 - \theta_2 - \theta_3$$

$$R_4 = |B + i_2 \cos \theta_4 R_3| / \cos(\theta_3 + \theta_4) + R_3$$

$$O_4 = [0, |B + i_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) R_3| \tan(90^\circ - \theta_4) + C - i_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) R_3]$$

式中: $B = -\sqrt{A} \cos[(-1)^{i_1}(90 - \theta_1 - \alpha)]$; $A = R_2^2 + |R_1 - R_2|^2 - 2|R_1 - R_2|R_2 \cos[(-1)^{i_1}\theta_2]$; $\alpha = \arcsin(\sin \theta_2 R_2 / \sqrt{A})$; $C = \sqrt{A} \sin[(-1)^{i_1}(90 - \theta_1 - \alpha)]$; 若 $R_1 > R_2$, 则 $b=1$, $i_1=1$, 否则 $b=2$, $i_1=-1$; 若 $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 > 90^\circ$, 则 $i_2=1$, 否则 $i_2=-1$ 。

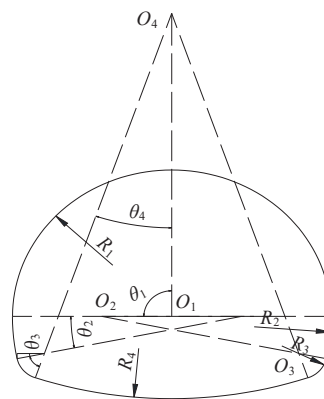


图1 四心圆断面参数化控制示意图

Figure 1 Schematic diagram of parameterized control for four-center circular section

1.2 锚杆加固层的等效数值模拟方法

皮家岭隧道采用 S5b 型衬砌设计,包括锚杆加固层、初期支护层及二次衬砌层。其中锚杆加固层采用 D25 中空注浆锚杆进行锚固;锚杆长 $L=300$ cm,以 100 cm \times 75 cm (环 \times 纵)梅花形布置。模拟时采用等效原理,在 Indraratna 等^[20]、Pelizza 等^[21]、孟强等^[22]提出的普通锚固等效方法基础上,进一步考虑 D25 中空注浆锚杆特点,对全长黏结锚杆的锚杆密度参数 α 进行修正^[23],计算公式如下:

$$\alpha = \frac{2\pi r_b \eta}{s_l s_r} = \frac{2\pi r_b \rho \eta}{s_l \theta (r_0 + 0.5l)} \quad (1)$$

考虑全长黏结锚杆存在中性点,表现为剪力为零而轴力在该点达到最大,中性点至隧道中心的径向距离为 ρ 。计算首先根据修正的Fenner塑性区半径公式进行预测:

$$R_p = r_0 \left[(1 - \sin \varphi) \cdot \frac{p_0 + c \cot \varphi}{P_i + c \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (2)$$

根据表1,围岩内摩擦角 $\varphi=36^\circ$ 、黏聚力为0.6 MPa。为简化分析,假定开挖净空断面为一开挖半径 $r_0=5.7+0.26+0.45=6.41$ m的圆形,得塑性半径为8.55 m,故整个塑性区均处于锚杆加固层内,所以可以忽略原圆形开挖断面假设所导致的不适用情况。保守考虑锚杆加固效应,可按式(3)计算中性点位置。

$$\rho = \frac{l}{\ln(l/r_0 + 1)} \quad (3)$$

式中: l 为锚杆长度; r_0 为隧道开挖半径; θ 为锚杆环向夹角, s_r 为锚杆环向间距; s_l 为隧洞轴向锚杆排距; r_b 为锚杆半径; η 为锚杆和岩石之间的摩阻系数,与锚杆表面的粗糙程度有关,使用非螺纹锚杆时,取 $\eta = \tan\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)$,使用螺纹锚杆时取 $\eta = \tan \varphi_0$, φ_0 为锚固黏结材料的内摩擦角。

等效材料的弹性模量受岩石弹性模量和锚杆弹性模量的共同影响,等效材料的弹性模量可表示为:

$$E^* = \frac{E_b \pi r_b^2 + E(s_l s_r - \pi r_b^2)}{s_l s_r} \quad (4)$$

式中: E_b 为锚杆的弹性模量,其他参数意义同前文。

假定锚杆在围岩—锚杆复合体中的影响相同,即锚杆密度因子不随径向距离 r 发生变化。其中复合体等效力学参数表达式为^[20]:

$$\varphi^* = \sin \left[\frac{(1 + \sin \varphi) \alpha + 2 \sin \varphi}{(1 + \sin \varphi) \alpha + 2} \right];$$

$$c^* = \frac{c(1 + \alpha)(1 - \sin \varphi^*) \cos \varphi}{(1 - \sin \varphi) \cos \varphi^*} \quad (5)$$

文献[24-28],D25锚杆弹性模量 E 可取Q345钢筋弹性模量 $E=206$ GPa。考虑在锚固过程中,钻孔—清孔—安装锚索—注浆施工工艺最终使得加固区的围岩重度变化可以忽略,即 $\gamma^* = \gamma$ 。参数汇总表1。

表1 围岩及衬砌物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and lining

项目	E/GPa	ν	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/MPa	$\varphi/(\circ)$
初期支护层	26.50	0.22	23.9	1.96	53.46
二次衬砌层	28.00	0.20	22.0	2.13	50.60
锚杆加固层	5.13	0.31	23.0	0.72	43.87
穿越围岩层(原岩)	5.00	0.31	23.0	0.60	36.00
锚固后岩体等效参数	5.13	0.31	23.0	0.72	43.87
下卧围岩层	2.00	0.35	21.0	0.30	28.00
弹性层	0.50	0.31	23.0	0.60	36.00

1.3 皮家岭四心圆公路隧道参数化编程有限元模型构建

皮家岭隧道分析段平均埋深197.997 m,纵向长30 m,垂直轴向断面的地表略有坡度4.4%,为了简化模型,隧道影响区外采用施加等效自重荷载(等效153 m上覆地层)模拟初始应力场的影响,有限元模型长、宽、高为30 m \times 90 m \times 90 m。隧道穿越地层相对均匀,因此参考环形分层法,将模型放射至边界,底边固定约束,四周为滑移边界。皮家岭隧道实际设计几何参数见表2。隧道采用钻爆法施工,采用位移释放率模拟围岩的应力释放过程,位移释放率取70%。围岩及衬砌的物理力学参数见表1。采用线性流动法则的EDP弹塑性本构模型,本构参数由黏聚力 c 、内摩擦角 φ 表达,压力敏感参数: $\alpha=6 \sin \varphi / (3 - \sin \varphi)$,材料屈服应力: $\sigma_y(\hat{\epsilon}_{pl})=6c \cos \varphi / (3 - \sin \varphi)$,流动敏感性系数: $\alpha_\psi=0.8$,最终设计断面的有限元模型见图2。

表2 隧道参数化设计参数

Table 2 Tunnel parametric design parameters

R_1/m	R_2/m	R_3/m	R_4/m	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
5.7	8.2	1.0	15	90°	11°34'21"	59°26'46"	18°58'53"

2 四心圆隧道拱脚区洞形对复合式衬砌结构内力影响规律

2.1 皮家岭四心圆隧道复合式衬砌内力分析

隧道初期衬砌结构的最大拉应力约0.099 MPa,

小于 C25 喷混凝土结构的设计抗拉强度 1.96 MPa; 最大压应力 13.57 MPa, 小于 C25 喷混凝土结构的设计抗压强度 18 MPa。二次衬砌内拉应力和压应力最大值分别为 0.92 MPa 和 22.6 MPa, 均小于设计值。计算结果显示: 由于地表坡度很小, 隧道左右两侧复合式衬砌内的应力分布差异很小。初期衬砌和二次衬砌的等效应力最大值、压应力最大值、塑性区均位于拱脚区域, 最大拉应力都分布在仰拱内, 但中上部到拱脚区域的二衬内壁也存在 0.2 MPa 左右的拉应力, 这也是导致目前隧道该区域裂纹较多的一个主要原因。

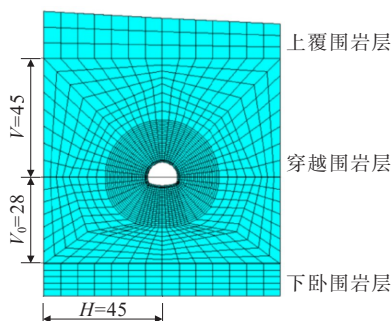


图2 皮家岭隧道有限元模型(单位:m)

Figure 2 Finite element model of Pijialing tunnel(unit:m)

2.2 四心圆隧道洞形设计参数优化研究

洞形设计虽然主要受使用空间需求的约束, 但局部的线形优化也可以改善衬砌结构的内力。因此结合试算采用单因素敏感性分析法, 分别开展中墙弧圆心角 θ_2 、拱脚弧圆心角 θ_3 及拱脚弧半径 R_3 的设计对衬砌结构安全性的研究。

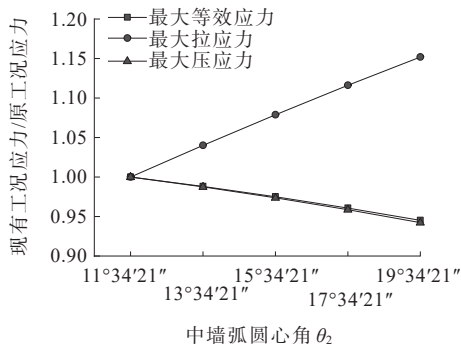
2.2.1 中墙弧圆心角 θ_2 的设计对隧道复合式衬砌结构内力的影响

采用单因素敏感性分析法, 假设其他参数不变, 对中墙弧圆心角 θ_2 的不同工况(表3)进行分析, 计算结果(图3)显示: 参数 θ_2 对于复合式衬砌结构应力分布位置并无明显影响, 但对复合式衬砌内力的集中程度有较大影响, 基本呈线性关系; 其中对拉应力最大值影响最明显, 二次衬砌内的最大拉应力增加率为 2.5%/°, 初期衬砌内的最大拉应力增加率为 10%/°; 初期衬砌和二次衬砌内的最大等效应力和压应力随着参数 θ_2 的增加而减小; 总体抗压强度和等效抗剪强度的安全度明显比较大, 因此现有设计以拉应力为主要控制参数进行设计是合理的。

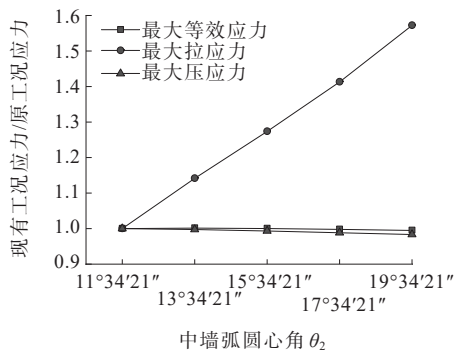
表3 不同中墙弧圆心角 θ_2 的设计工况

Table 3 Design working conditions of different θ_2

工况	θ_2	R_4/m	工况	θ_2	R_4/m
1	13°34'21"	16.404 1	3	17°34'21"	20.427 2
2	15°34'21"	18.159 0	4	19°34'21"	23.489 2



(a) 二次衬砌层



(b) 初期支护层

图3 θ_2 对隧道开挖后复合式衬砌内应力极值的影响

Figure 3 Influence of θ_2 on the extreme value of internal stress in composite lining after tunnel excavation

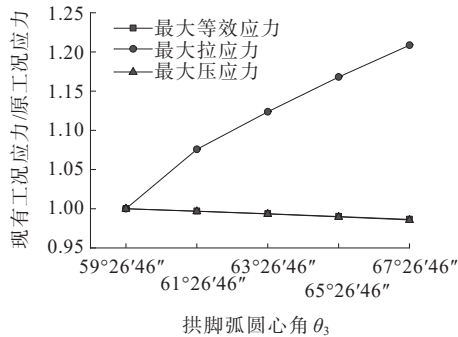
2.2.2 拱脚弧圆心角 θ_3 的设计对隧道复合式衬砌结构内力的影响

采用单因素敏感性分析法, 假设其他参数不变, 对拱脚弧圆心角 θ_3 的不同工况(表4)进行分析, 计算结果(图4)显示: 参数 θ_3 对于复合式衬砌结构应力分布位置无明显影响, 对复合式衬砌内力的集中程度影响更大, 但也基本呈线性关系; 其中对拉应力最大值影响最明显, 二次衬砌内的最大拉应力增加率为 3.67%/°, 初期衬砌内的最大拉应力增加率为 17%/°; 初期衬砌和二次衬砌内的最大等效应力和压应力随着参数 θ_3 的增加而减小, 减小率均小于 1%/°; 总体抗压强度和等效抗剪强度的安全度明显比较大, 因此现有设计以拉应力为主要控制参数

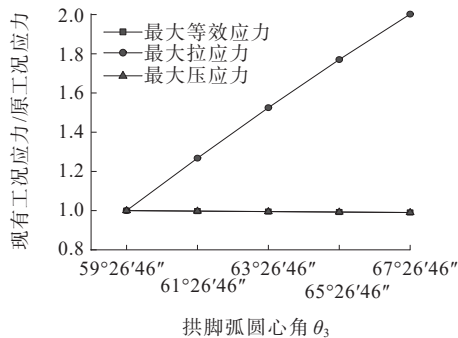
进行设计是合理的。

表 4 不同拱脚弧圆心角 θ_3 的设计工况
Table 4 Design working conditions of θ_3 of different arch foot arcs

工况	θ_3	R_4/m	工况	θ_3	R_4/m
1	61°26'46"	16.591 4	3	65°26'46"	21.271 3
2	63°26'46"	18.615 3	4	67°26'46"	25.354 8



(a) 二次衬砌层



(b) 初期支护层

图 4 θ_3 对隧道开挖后复合式衬砌内应力极值的影响

Figure 4 Influence of θ_3 on the extreme value of internal stress in composite lining after tunnel excavation

2.2.3 拱脚弧半径 R_3 的设计对隧道复合式衬砌结构内力的影响

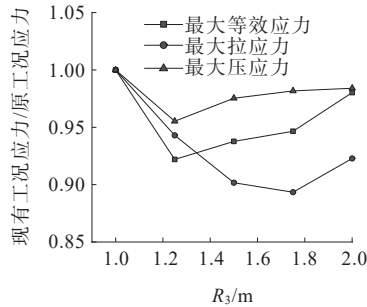
采用单因素敏感性分析法,假设其他参数不变,对拱脚弧半径 R_3 的不同工况(表 5)进行分析,计算结果(图 5)显示:① 拱脚弧半径 R_3 的设计对衬砌层内部的应力场空间分布规律有一定影响;随着参数 R_3 的增大,拱脚处的等效应力极值(应力集中现象最显著的位置)在左右两侧之间转移;第一主应力极值的分布不止有向左右两侧拱脚处转移,而且会向偏压侧拱脚附近转移;第三主应力极值的空间分布基本不变;② 二次衬砌内力与参数 R_3 的变化呈非线性相关性,呈现凹曲线形状,当拱脚弧半径 R_3 为 1.25 m 时

等效应力和压应力极值最小,当拱脚弧半径 R_3 为 1.75 m 时拉应力极值最小;初期衬砌内力随参数 R_3 的变化呈线性相关性,等效应力和压应力极值的变化很小,拉应力变化非常明显,半径增加 1 m,初期衬砌内拉应力减小近 90%。综合二次衬砌的拉应力分布特征,建议的拱脚弧半径 R_3 为 1.75 m。

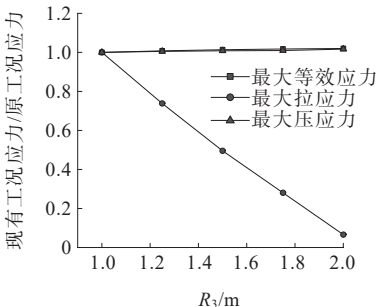
表 5 不同拱脚弧半径 R_3 的设计工况

Table 5 Design working condition table of R_3 with different arch foot arc radius

工况	R_3/m	R_4/m	工况	R_3/m	R_4/m
1	1.25	14.497 0	3	1.75	13.490 9
2	1.50	13.994 0	4	2.00	12.988 0



(a) 二次衬砌层



(b) 初期支护层

图 5 R_3 对隧道开挖后复合式衬砌内应力极值的影响

Figure 5 Influence of R_3 on the extreme value of internal stress in composite lining after tunnel excavation

定义各参数对衬砌结构内力的影响相对变化率即相对敏感性指标 $\delta = \frac{\Delta y/y}{\Delta x/x}$,各形状参数对衬砌结构安全性的影响程度见表 6。

表 6 结果显示:等效应力与压应力极值对于参数 θ_2 、 θ_3 及 R_3 的敏感性排序为 $R_3 > \theta_3 > \theta_2$;根据拉应力极值的敏感性排序为 $\theta_3 > \theta_2 > R_3$ 。初期支护层内拉应力极值对于参数的设计敏感程度明显高于二次衬砌

层,而其余参数敏感程度低于二次衬砌层,因此对于初期衬砌应更多考虑其抗拉设计。

表 6 三参数单位变化率对应的衬砌层内应力平均变化率
Table 6 Average change rate of stress in lining layer corresponding to the unit change rate of three parameters

参数	二次衬砌层/%			初期支护层/%		
	σ_{cr} — max	σ_1 — max	σ_3 — min	σ_{cr} — max	σ_1 — max	σ_3 — min
中墙弧 圆心角 θ_2	-7.40	22.59	-7.79	-0.06	80.86	-2.02
拱脚弧 圆心角 θ_3	-9.63	182.53	-10.05	-7.15	770.88	-7.32
拱脚弧 半径 R_3	-13.19	3.14	-16.10	2.55	-98.73	1.65

2.3 形状参数 θ_2 、 θ_3 、 R_3 对于衬砌结构塑性区范围的影响分析

基于弹塑性理论分析的塑性区实际上反映了结构内屈服的程度和范围,对于脆性明显的衬砌结构,本质上可以视为等效的开裂风险。不同形状参数下二次衬砌结构内塑性区范围分布见图 6~8。

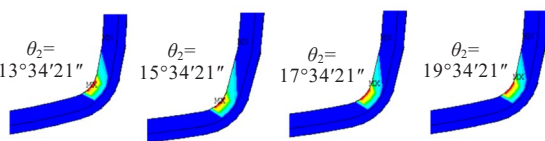


图 6 θ_2 对塑性区发展的影响示意图

Figure 6 Influence of θ_2 on the development of plastic zone

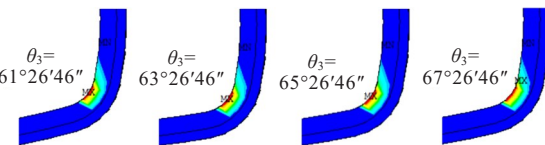


图 7 θ_3 对塑性区发展的影响示意图

Figure 7 Influence of θ_3 on the development of plastic zone

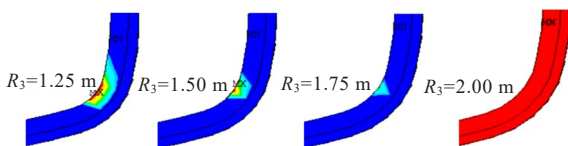


图 8 R_3 对塑性区发展的影响示意图

Figure 8 Influence of R_3 on the development of plastic zone

图 6~8 显示:3 个参数对衬砌结构塑性区的影响规律差异明显。随着 θ_3 、 θ_2 的增大,二次衬砌内塑性

区范围变化不大, R_3 的变化对拱脚塑性区的影响较大,当 R_3 大于 1.75 m 后基本无塑性屈服区。可见降低拱脚部曲率半径的设计有利于减小塑性区的发展。

3 结论

四心圆隧道几何形状参数对衬砌结构内力影响具有明显的局部性,结合实际初始应力状态和围岩力学特性,构建参数化模型,对局部尺寸的优化有利于控制衬砌结构的应力空间分布及极值,对减小衬砌的开裂风险和提高耐久性具有重要实际意义。本文结合皮家岭公路隧道,分析获得了最优断面形状,得到以下主要结论:

(1) 四心圆拱脚处容易产生应力集中效应,建议以拉应力极值为控制目标进行断面形状的优化,皮家岭隧道设计参数 R_3 优化为 1.8 m 不仅可以使拱脚区的最大拉应力最小,而且可以使复合式衬砌拱脚区域的塑性区消失,大大提高了衬砌结构的耐久性。

(2) 参数 θ_2 、 θ_3 对衬砌结构内的应力极值分布位置影响不大,大小变化与极值近似线性相关,但参数 R_3 的增加并没有与参数 θ_2 及 θ_3 体现出“同步性”,对于初期支护层内拉应力具有利好倾向,对等效应力及压应力的影响具有消极性,与二次衬砌内最大拉应力呈现凹曲线非线性相关性,具有理论上的最优设计值。

(3) 根据等效应力与压应力极值对于参数 θ_2 、 θ_3 及 R_3 的敏感性排序为 $R_3 > \theta_3 > \theta_2$; 根据拉应力极值的敏感性排序为 $\theta_3 > \theta_2 > R_3$ 。研究方法和结论对扁平公路隧道形状优化具有重要参考价值。

参考文献:

References:

- [1] 尹成斐,赵海军.重载列车对四心圆隧道结构受力的影响研究[J].铁道建筑技术,2014(11):27-30,80.
YIN Chengfei,ZHAO Haijun.Research on the influence of heavy-haul train on the stress of 4-centre circular tunnel structure[J]. Railway Construction Technology, 2014(11): 27-30,80.
- [2] 沈才华,童立元.钢拱架柔性支撑稳定性预测判别方法探讨[J].土木工程学报,2007,40(3):88-91.
SHEN Caihua,TONG Liyuan.Discussions on predicting the stability of flexible shotcrete and steel arch frame

- support for tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2007,40(3):88-91.
- [3] 王忠伟,念培红,金飞.断面形状对浅埋隧道抗震力学性能影响研究[J].中国水运(下半月),2019,19(9):205-206.
- WANG Zhongwei, NIAN Peihong, JIN Fei. Study on the influence of section shape on seismic mechanical properties of shallow tunnel[J]. China Water Transport, 2019,19(9):205-206.
- [4] 高峰,黄磊,张龙潇,等.城市小半径浅埋螺旋连拱隧道安全施工优化[J].中外公路,2022,42(6):157-161.
- GAO Feng, HUANG Lei, ZHANG Longxiao, et al. Study on optimization of rapid and safe construction of urban super-small radius shallow buried spiral arch tunnels[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6):157-161.
- [5] 沈才华,刘松玉,童立元.拓扑优化在隧道工程中的运用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(12):70-74.
- SHEN Caihua, LIU Songyu, TONG Liyuan. Application of topology optimization in tunnel engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008,35(12):70-74.
- [6] 余世根,刘文玉,沈刚,等.龙潭湾大跨径隧道断面形状优化设计研究[J].现代隧道技术,2012,49(5):104-109,116.
- YU Shigen, LIU Wenyu, SHEN Gang, et al. On optimized cross section design of the Longtanwan highway tunnel with a large span[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(5):104-109,116.
- [7] 宋向荣,杨海生.京雄城际铁路明挖隧道施工关键技术[J].中外公路,2021,41(1):178-181.
- SONG Xiangrong, YANG Haisheng. Key construction technology on open cut tunnel of Jingxiong intercity railway[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1):178-181.
- [8] 袁崇洋,彭飞,詹伟,等.公路隧道洞口浅埋段初支位移控制基准研究[J].中外公路,2021,41(4):242-245.
- YUAN Dongyang, PENG Fei, ZHAN Wei, et al. Study on control benchmark of primary support displacement in shallow buried section of highway tunnel entrance[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4):242-245.
- [9] 谢东武.特大断面大跨隧道断面形式与支护参数优化[D].上海:同济大学,2007.
- XIE Dongwu. Optimization of the forms and supporting parameters of large cross section tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [10] 陈卫忠,王辉,田洪铭.浅埋破碎岩体中大跨隧道断面扁平率优化研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(7):1389-1395.
- CHEN Weizhong, WANG Hui, TIAN Hongming. Study of flat ratio optimization of large-span tunnel section in shallow broken rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(7):1389-1395.
- [11] 金星亮,梁斌,焦雷,等.浅埋扁平超大断面隧道断面优化设计研究[J].郑州大学学报(理学版),2017,49(4):112-118.
- JIN Xingliang, LIANG Bin, JIAO Lei, et al. On optimized super cross section design of tunnel with shallow flat[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2017,49(4):112-118.
- [12] 张俊儒,吴洁,严丛文,等.中国四车道及以上超大断面公路隧道修建技术的发展[J].中国公路学报,2020,33(1):14-31.
- ZHANG Junru, WU Jie, YAN Congwen, et al. Construction technology of super-large section of highway tunnels with four or more lanes in China[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020,33(1):14-31.
- [13] 张俊儒,马凯蒙,方钱宝,等.基于层状围岩变形特征的高地应力陡倾板岩隧道合理洞型研究[J].中国公路学报,2020,33(9):215-224.
- ZHANG Junru, MA Kaimeng, FANG Qianbao, et al. Study on reasonable tunnel types of steeply dipping slate tunnels with high geostress based on deformation characteristics of layered surrounding rock[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020,33(9):215-224.
- [14] 张建国,张营,陈允斌,等.基于FLAC^{3D}在不同断面形状下隧道围岩的稳定性分析[J].建筑技术开发,2021,48(6):136-138.
- ZHANG Jianguo, ZHANG Ying, CHEN Yunbin, et al. Stability analysis of tunnel surrounding rock under different cross-section shapes based on FLAC^{3D}[J]. Building Technology Development, 2021,48(6):136-138.
- [15] 文明.浅埋非圆形隧道开挖引起的力学响应解析解[J].西南交通大学学报,2023,58(1):202-209.
- WEN Ming. Analytical solution of mechanical response in shallow non-circular tunnels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023,58(1):202-209.
- [16] 董捷,杨博,李成献.耦合动荷载作用下重载铁路路基下部穿越隧道动力响应分析[J].中外公路,2022,42(6):18-24.
- DONG Jie, YANG Bo, LI Chengxian. Dynamic response of tunnel under-crossing heavy-duty railway subgrade based on coupled load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6):18-24.
- [17] 陈军浩,陈笔尖,庄言,等.不同截面形状隧道格栅拱架竖

- 向承载能力对比[J].隧道建设(中英文),2020,40(3):364-370.
- CHEN Junhao, CHEN Bijian, ZHUANG Yan, et al. Comparison of vertical bearing capacity of tunnel grille arch frame with different cross-section shapes[J]. Tunnel Construction,2020,40(3):364-370.
- [18] YU H L, LIU S Y, ZHENG C, et al. Mutual influence of long-span urban highway tunnel and rail transit construction[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering,2022,22(1):41-55.
- [19] FENG J Q, WANG X M, ZHOU Y X, et al. Study on the supporting time of the secondary lining of the highway tunnel with weak surrounding rock[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 643(1): 012042.
- [20] INDRARATNA B, KAISER P K. Analytical model for the design of grouted rock bolts[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1990, 14(4):227-251.
- [21] PELIZZA S, KIM Sang-hwan, KIM Jong-soo. A study of strength parameters in the reinforced ground by rock bolts [C]//Proceedings of the World Tunnel Congress and 32nd ITA Assembly. Seoul, Korea, 2006.
- [22] 孟强,赵洪波,茹忠亮. 锚杆支护圆形隧洞的等效强度参数及可靠性分析[J]. 岩土力学,2014,35(S1):437-442.
- MENG Qiang, ZHAO Hongbo, RU Zhongliang. Equivalent strength parameters and reliability analysis of bolt supporting circular tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(S1):437-442.
- [23] 朱永全,张素敏,景诗庭. 铁路隧道初期支护极限位移的意义及确定[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(9):1594-1598.
- ZHU Yongquan, ZHANG Sumin, JING Shiting. Significance and determination of ultimate displacement of initial support in railway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(9):1594-1598.
- [24] 李术才,朱维申,陈卫忠,等. 弹塑性大位移有限元方法在软岩隧道变形预估系统研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(4):466-470.
- LI Shucai, ZHU Weishen, CHEN Weizhong, et al. Application of elasto-plastic large displacement finite element method to the study of deformation prediction of soft rock tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(4):466-470.
- [25] 徐帮树,杨为民,王者超,等. 公路隧道型钢喷射混凝土初期支护安全评价研究[J]. 岩土力学,2012,33(1):248-254.
- XU Bangshu, YANG Weimin, WANG Zhechao, et al. Study of initial support safety evaluation about shape steel reinforced shotcrete in highway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(1):248-254.
- [26] 和晓楠,周晓敏,徐衍,等. 深埋隧道全长黏结锚杆加固等效方法研究[J]. 铁道建筑,2021,61(1):65-68.
- HE Xiaonan, ZHOU Xiaomin, XU Yan, et al. Study on equivalent analytical method for reinforcement of full grouted anchor bolt in deep-buried tunnel[J]. Railway Engineering,2021,61(1):65-68.
- [27] 铁道部经济规划研究院,中铁二院工程集团有限责任公司,中铁第四勘察设计院集团有限公司,等. 中空锚杆技术条件:TB/T 3209—2008[S]. 北京:中国铁道出版社,2008.
- China Railway Economic and Planning Research Institute, China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., et al. Technical regulations for hollow bolt: TB/T 3209—2008 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [28] 厦门市建筑科学研究院集团股份有限公司,厦门特房建设工程集团有限公司. 喷射混凝土应用技术规程:JGJ/T 372—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- Xiamen Academy of Building Research Group Co., Ltd., Xiamen Special Room Construction Engineering Group Co., Ltd.. Technical specification for application of sprayed concrete: JGJ/T 372—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.