

# 全断面装配式隧道明洞结构分块设计及受力特征研究

Research on Block Design and Stress Characteristics of Full-section Assembled Tunnel Open-cut Structure

朱开成<sup>1,2</sup>, 蔡 东<sup>3</sup>, 许白杨<sup>3</sup>, 罗 龙<sup>3</sup>, 王 元<sup>3</sup>

(1. 西华大学 建筑与土木工程学院, 成都 610039; 2. 四川西星公路工程质量检测有限责任公司, 成都 611730;  
3. 四川省交通建设集团有限责任公司, 成都 610047)

**摘 要:** 为推广铁路隧道全断面装配式明洞结构, 基于荷载-结构法分析明洞结构内力, 结合装配式分块方法, 对受力扰动较小的最小弯矩位置分块法与主动调整结构受力模式的最大弯矩分块法进行比较, 建立螺栓-弹簧模型分析结构力学性能。结果表明: 最大弯矩分块法的位移和应力高于最小弯矩分块法, 安全系数略低于后者; 接头数量的增加会导致明洞结构位移和应力增大, 安全系数降低。其中, 按照明洞结构最小弯矩位置进行分块设计, 将边墙分为 2 块, 全环共计 6 块, 该方案位移与内力最小, 安全系数最高, 富余量达 1.18。装配式明洞在减小对原有结构受力扰动的前提下, 选择最小弯矩位置进行分块设计, 在减少分块数量的同时降低对原结构受力的扰动, 从而提高装配式明洞结构的安全性和稳定性。

**关键词:** 铁路隧道; 装配式明洞; 设计选型; 螺栓-弹簧模型; 安全系数

中图分类号: U455.4 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 06-0109-08

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.019

ZHU Kaicheng<sup>1,2</sup>, CAI Dong<sup>3</sup>, XU Baiyang<sup>3</sup>, LUO Long<sup>3</sup>, WANG Yuan<sup>3</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;  
2. Sichuan Xixing Highway Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Chengdu 611730, China;  
3. Sichuan Communications Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610047, China)

**Abstract:** In order to promote the full-section assembled open-cut tunnel structure of railway tunnel, the internal force of the open-cut tunnel structure is analyzed based on the load-structure method. Combined with the assembled block method, the minimum bending moment position block method with less stress disturbance is compared with the maximum bending moment block method of actively adjusting the stress mode of the structure, and the bolt-spring model is established to analyze the mechanical properties of the structure. The results show that the displacement and stress of the maximum bending moment block method are higher than those of the minimum bending moment block method, and the safety factor is slightly lower than the latter. The increase of the number of joints will lead to the increase of the displacement and stress of the open-cut tunnel structure and the decrease of the safety factor. Among them, the third scheme is based on the minimum bending moment position of the open-cut tunnel structure, and the side wall is divided into 2 blocks, with a total of 6 blocks in the whole ring. The displacement and internal force of the scheme are the smallest, the safety factor is the highest, and the surplus amount is 1.18. In the case of reducing the disturbance to the original structure, the minimum bending moment position is selected for

作者简介: 朱开成 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 隧道与地下空间。

通信作者: 许白杨 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 路桥施工及管理。

收稿日期: 2025-01-17

## 道桥技术

block design, which reduces the number of blocks and reduces the disturbance to the original structure, so as to improve the safety and stability of the assembled open-cut tunnel structure.

**Key words:** pipe jacking; soft soil subgrade; numerical simulation; bridge head jumping; gradual replacement method

### 0 引言

近年来,随着我国铁路隧道建设的快速发展,对复杂线路的运营安全、环境保护与全生命周期成本管控提出了更高要求<sup>[1]</sup>。明洞作为一种有效的解决方案,其工程应用实现了快速增长<sup>[2]</sup>。传统明洞建设大多采用整体现浇式工艺施工,存在结构刚性差、施工周期长、结构防护能力较弱等缺点,给隧道施工和后期运营造成了较大影响。为提高隧道建设的施工效率和工程质量,装配式技术逐渐应用于铁路隧道建设<sup>[3]</sup>,其具有造价低、施工周期短、结构拼装精度高等优点,能够较好地解决整体式现浇混凝土结构存在的问题。

目前国内外学者在装配式结构设计方面取得了一系列的研究成果。赵东平等<sup>[4]</sup>系统分析了落石冲击作用下的装配式明洞动力响应,发现回填土厚度对装配式结构极限承载力所产生的影响弱于拱圈厚度。计中彦等<sup>[5]</sup>提出了弧形预制块与后浇混凝土相结合的施工方法,发现后浇带连接更适用于隧底平整度较差的公路隧道。王志伟等<sup>[6]</sup>通过建立车辆-轨道-装配式明洞耦合动力有限元模型,发现列车荷载作用下的装配式明洞结构安全性仍满足设计要求。马自强<sup>[7]</sup>从隧底仰拱结构、拱墙结构等方面系统介绍了装配式拱形明洞结构。王嵩等<sup>[8]</sup>提出了采用装配式预制管片结构进行矿山法隧道拱部施工的新思路。Huang等<sup>[9]</sup>通过开展静载作用下的无螺栓和有螺栓节点力学性能研究,发现增加装配式隧道接头的轴力能够显著提升其承载性能。张胜龙<sup>[10]</sup>系统研究了铁路隧道装配式衬砌接头的力学性能及选型。马伟斌等<sup>[11]</sup>基于荷载-结构模型,分析了不同围岩等级及接头刚度条件下衬砌结构的受力变形特征。杨秀仁<sup>[12]</sup>对装配式结构进行了深入研究,形成了从装配式车站结构整体到局部力学特性的全方位理论与实践成果。唐伟<sup>[13]</sup>针对高速单线盾构隧道,提出了全块预制、全块预制+两侧增加纵梁、隧底仰拱分块预制3种不同方案。赵晓勇<sup>[14]</sup>从隧道防排水、

施工工序和结构受力方面进行了装配式仰拱选型比较,发现箱型装配式仰拱结构更优。付兵先等<sup>[15]</sup>采用有限元法分析了列车驶过明洞结构的动力学特性,研发了一种轻质装配式明洞。周晓军等<sup>[16]</sup>采用时程分析法,系统分析了装配式明洞结构的地震响应,确定其薄弱部位。

上述研究主要是针对装配式明洞结构的施工、构造、变形和受力特性等方面进行研究,而针对全断面装配式隧道明洞结构分块设计方案的研究还较少。因此,基于荷载-结构法分析全断面明洞结构弯矩分布情况,依据最小弯矩位置和最大弯矩位置进行明洞分块设计,建立螺栓-弹簧模型,对设计的四种装配式明洞结构分块方案的位移、应力和安全系数进行对比分析,选出最优的装配式明洞结构分块方案,为类似结构的设计提供参考。

### 1 明洞结构分块方案

分块接头是整个装配式结构的薄弱部位,在承受较大弯矩时易发生较大变形,严重时甚至会引发安全事故。装配式结构分块不宜过大或过小,分块过大会增加运输和拼装的难度,分块过小则会使接头数量增加而提高接头漏水的风险。在施工条件允许的情况下,分块尽量做到少而大,在减少接头数量和拼装作业量的同时,降低接缝漏水的可能性。因此,装配式明洞结构的分块数量和接头位置应当合理设置。

基于荷载-结构法分析全断面明洞结构弯矩分布情况,依据最小弯矩位置和最大弯矩位置进行明洞分块方案设计。其中明洞结构所受围岩压力参照TB 1003—2016《铁路隧道设计规范》<sup>[17]</sup>(以下简称“规范”)中的浅埋隧道计算公式进行计算。竖向压力计算式为:

$$q = \gamma h \left( 1 - \frac{\lambda h \tan \varphi}{B} \right) \quad (1)$$

式中:  $q$  为结构所受的竖向压力, Pa;  $\gamma$  为围岩重度,  $\text{kN/m}^3$ ;  $h$  为隧道开挖的跨度, m;  $\varphi$  为顶板土

柱两侧摩擦角,°, 通常依据经验取值;  $\lambda$  为围岩侧压力系数;  $B$  为隧洞顶部离地面的高度, m。明洞所受的水平侧压力计算公式为:

$$e_i = \gamma h_i \lambda$$

(2)

式中:  $e_i$  为结构所受的竖向压力, Pa;  $h_i$  为隧道围岩内任意一点距地面的距离, m。

围岩参数见表 1, 假定明洞埋深为 2 m。由式 (1) 和式 (2) 计算可得, 明洞所受最小竖向压力  $q_1 = 37.76$  kPa, 最大竖向压力  $q_2 = 136.30$  kPa, 最小水平侧压力  $e_1 = 32.73$  kPa, 最大水平侧压力  $e_2 = 232.69$  kPa。明洞结构所受到的围岩压力分布情况如图 1 所示。

表 1 围岩参数

Table 1 Surrounding rock parameters

围岩	$E/\text{GPa}$	$P/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$\mu$	$\varphi/^\circ$	$C/\text{MPa}$
V 级	2	2 000	0.45	27	0.2

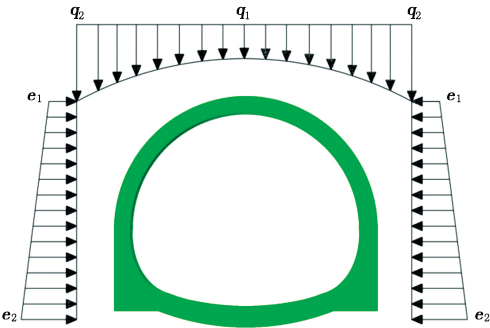


图 1 围岩压力分布情况

Fig. 1 Distribution of surrounding rock pressure

采用荷载 - 结构法计算明洞结构内力时, 仅考虑明洞自重、明洞所受的围岩压力、地层对明洞产生的弹性抗力。围岩与明洞之间的耦合作用采用弹性曲面弹簧模拟。明洞混凝土强度等级设置为 C50, 弹性模量为 34.6 GPa, 密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>, 泊松比为 0.2。采用梁单元模拟明洞结构, 模型高 12.22 m, 宽 14.9 m, 梁截面  $B = 1.6$  m,  $H = 0.8$  m。全断面明洞结构弯矩计算结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 明洞结构最大弯矩分布在明洞拱顶部、拱腰、拱脚和仰拱, 最小弯矩分布在明洞拱肩、仰拱边缘, 因此, 明洞结构采用两种分块方式: 一种是在明洞结构弯矩最大位置进行分块, 相较于原结构, 在相同围岩特征和荷载状态下, 结构轴力和变形均会有不同程度增加, 而最大弯矩值有所降低, 分块后的装配式结构会形成新的稳定状态; 另

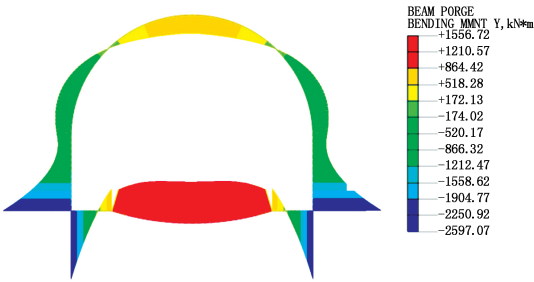
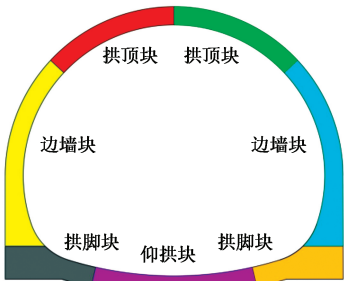


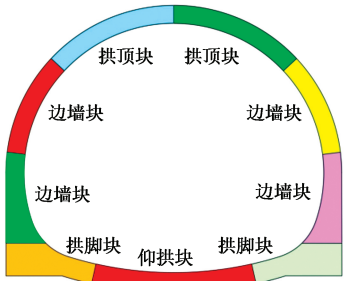
图 2 明洞结构弯矩分布云图

Fig. 2 Bending moment distribution cloud diagram of open-cut tunnel structure

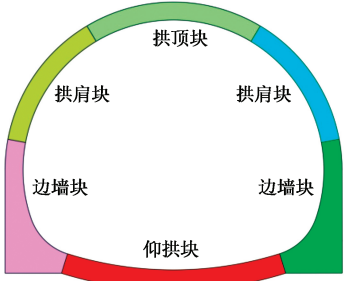
一种是在明洞结构弯矩最小位置进行划分, 能够尽可能保持原明洞结构的受力特性。为便于装配式明洞结构分块的运输和拼装, 在方案设计时, 将部分体积过大的分块划分为 2 块。因此, 提出 4 种不同的装配式明洞分块方案, 如图 3 所示。方案一: 将明洞结构全环共划分为 7 块; 方案二: 考虑到方案一分块



(a) 方案一

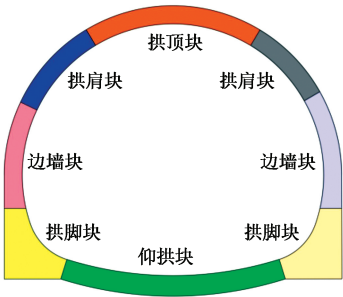


(b) 方案二



(c) 方案三

道桥技术



(d) 方案四

图3 装配式明洞结构分块方案

Fig. 3 Block scheme of assembled open-cut tunnel structure

时边墙块体积过大，在方案一的基础上将边墙块分为2块，明洞结构全环共划分为9块；方案三：按照明洞结构最小弯矩位置进行分块，考虑到边墙块体积过大，将其划分为2块，明洞全环共划分为6块；方案四同样按照明洞结构最小弯矩位置进行分块，将体积过大的边墙块分为3块，全环共划分为8块。

2 数值模拟

2.1 模型建立

通过 Abaqus 有限元软件进行数值模拟，单元类型采用六面体八节点的减缩积分单元（C3D8R）。明洞混凝土强度等级设置为 C50，泊松比为 0.2，弹性模量为 34.6 GPa，密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>，混凝土本构关系采用理想线弹性模型进行模拟。整个模型网格结点总数 71 961，单元总数 61 440，数值模型如图 4 所示。

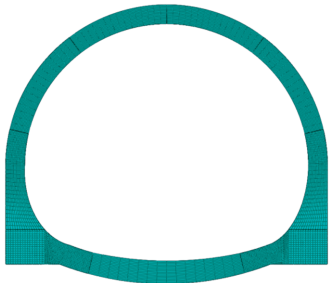


图4 数值模型

Fig. 4 Numerical model

2.2 接头设置

装配式明洞结构由接头将多个分块连接而成的典型多体结构，因此，在对明洞结构受力特性进行分析时，需考虑其接头力学行为。每环明洞由若干分块拼接形成，分块之间则用螺栓进行连接。为了

减少建模工作量，简化模型计算，避免连接螺栓复杂的模型网格划分和接触关系设置，用等效的螺栓-弹簧模型替代三维实体连接螺栓模型模拟明洞分块之间的接头效应。每个分块之间设置2个连接螺栓，将每个连接螺栓简化为9个弹簧（8个正常弹簧和1个剪切弹簧），以模拟接头的旋转和剪切力学行为<sup>[18-19]</sup>。如图5所示，8个正常弹簧依据连接螺栓的直径进行对称分布，将唯一的剪切螺栓放置在连接螺栓中心。相较于传统的梁-弹簧模型<sup>[20]</sup>和壳-弹簧模型<sup>[21-23]</sup>，螺栓-弹簧模型能够更精准地捕捉螺栓与衬砌构件之间的相互作用力、螺栓预紧力以及屈服过程。明洞分块之间的接触关系通过设置硬接触单元模拟，这种接触类型可以防止两个接触的结构构件在压缩过程中不会产生穿透现象，在构件受拉时可以相互分离。

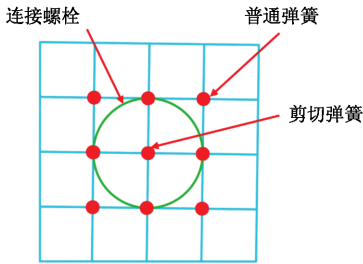


图5 螺栓-弹簧模型

Fig. 5 Bolt-spring mode

2.3 地层-明洞结构耦合作用

对地层-明洞结构耦合作用进行分析。将围岩简化为一组具有恒定刚度的整体层状弹簧（即切向弹簧和径向弹簧）<sup>[17]</sup>，如图6所示。土弹簧单元刚度可通过式（3）由弹性模量转换而来<sup>[11]</sup>。

$$\begin{cases} K_t = K_r/3 \\ K_r = E_s/R \\ E_s = E(1-v)/(1+v)(1-2v) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $K_t$  为切向土弹簧刚度； $K_r$  为径向土弹簧刚度； $E_s$  为土体的侧限压缩模量； $R$  为隧道外半径； $E$  为土体的杨氏模量； $v$  为土体的泊松比。

为模拟明洞结构上方土体回填与极限承载情况，加载分两步进行：先在明洞外侧施加等效换算后的围岩压力，而后在明洞外侧施加 1 MPa 的均布压强模拟超载情况。

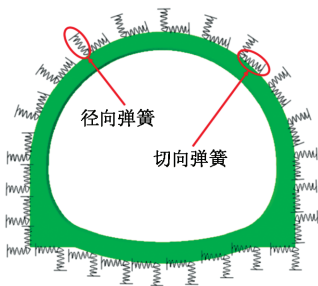
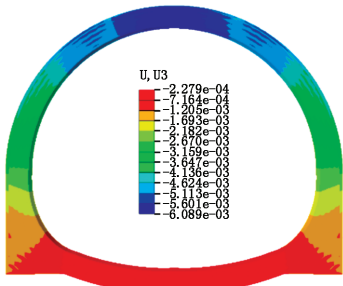


图 6 地层 - 明洞结构耦合模型  
Fig. 6 Stratum - cut tunnel structure coupling model

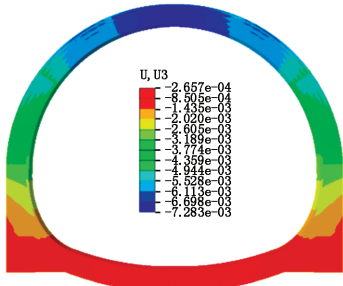
3 结果与分析

3.1 竖向位移

由图 7 可知，荷载作用下，4 种明洞分块方案结构最大竖向位移分别为 7.96、8.19、6.09、7.28 mm，均发生在拱顶。方案二相较于方案一的明洞结构多出 2 个分块接头，最大竖向位移增大了 2.89%；方案四相较于方案三的明洞结构多出 2 个分块接头，最大竖向位移增大了 19.54%，这说明接头数量的增加会使装配式明洞结构最大竖向位移增大。采用最大弯矩位置进行分块的明洞结构（方案一和方案二）整体竖向位移略大于采用最小弯矩位置进行分块的明洞结构（方案三和方案四），这说明采用最小弯矩位置进行分块的明洞结构更稳定。4 种明洞分块方案结构竖向位移的变形形式未发生改变，从拱顶向仰



(c) 方案三



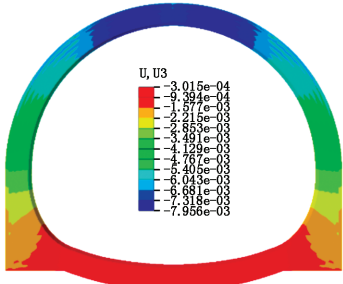
(d) 方案四

图 7 明洞结构竖向位移云图  
Fig. 7 Vertical displacement cloud diagram of open - cut tunnel structure

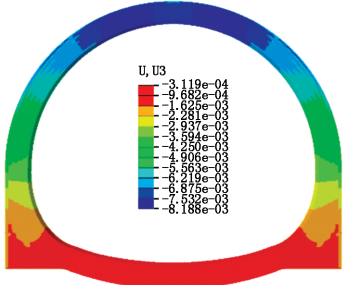
拱逐渐减小，其中拱顶块竖向变形最大，仰拱块竖向变形最小。

3.2 水平位移

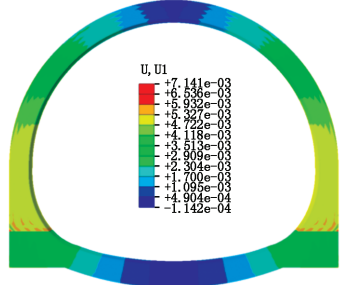
由图 8 可知，荷载作用下，4 种明洞分块方案结构最大水平位移分别为 7.14、7.98、5.83、6.44 mm，均发生在边墙块。方案二相较于方案一最大水平位移增大了 10.50%，方案四相较于方案三最大水平位移增大了 10.46%，这说明接头数量的增加会使装配式明洞结构最大水平位移增大。采用最大弯矩位置进行分块的明洞结构（方案一和方案二）整体水平位移略大于采用最小弯矩位置进行分块的明洞结构（方案三和方案四），这说明采用最小弯矩位置进行分块的明洞结构更稳定。4 种明洞分块方案结构的水



(a) 方案一

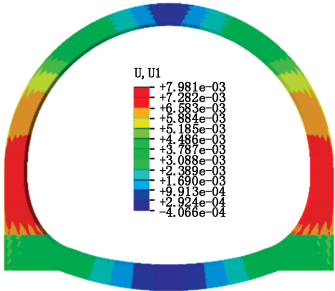


(b) 方案二

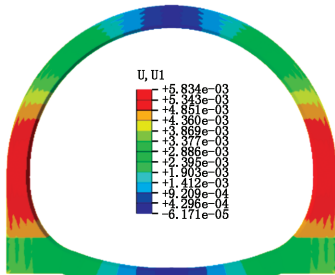


(a) 方案一

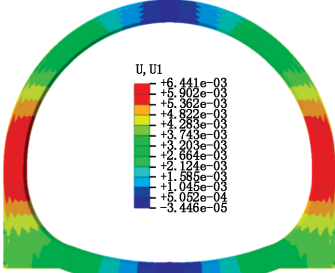




(b) 方案二



(c) 方案三



(d) 方案四

图 8 明洞结构水平位移云图

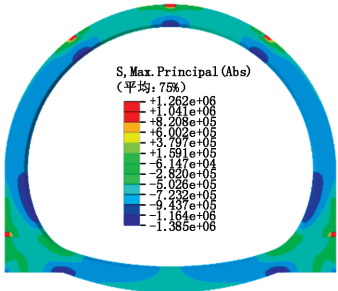
Fig. 8 Horizontal displacement nephogram of open-cut tunnel structure

平位移变形形式并未发生改变，整体上从左右侧墙向明洞中心水平收缩，呈现出侧墙块水平变形最大，并向拱顶块和仰拱块逐渐减小的趋势。

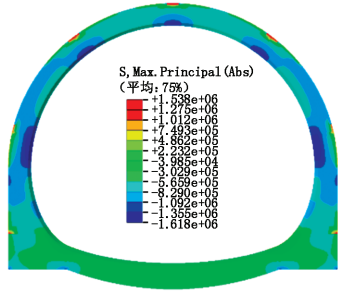
3.3 应力

由图 9 可知，4 种明洞分块方案结构的最大压应力均分布在分块接头内侧，分别为 1.39、1.62、1.18、1.22 MPa。方案二相较于方案一的明洞结构多出 2 个分块接头，最大压应力增大了 16.55%；方案四相较于方案三的明洞结构多出 2 个分块接头，最大压应力增大了 3.39%，这说明接头数量的增加会使装配式明洞结构最大压应力增大。4 种明洞分块方案结构的最大拉应力值均分布在分块接头外侧，分别为 1.26、1.54、1.08、1.23 MPa。方案二相较于方案一最大拉应力增大了 22.22%，方案四相较于方

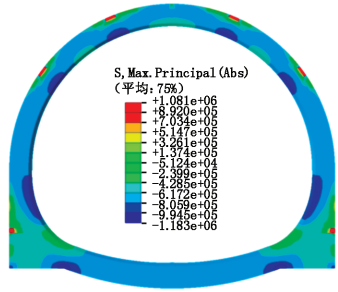
案三最大压应力增大了 13.89%，这说明接头数量的增加会使装配式明洞结构最大拉应力增大。采用最大弯矩位置进行分块的装配式明洞结构（方案一和方案二）应力略大于采用最小弯矩位置进行分块的装配式明洞结构（方案三和方案四）。



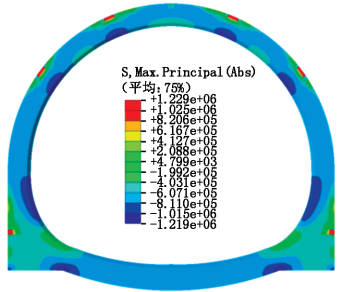
(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三



(d) 方案四

图 9 明洞结构应力云图

Fig. 9 Stress cloud diagram of open cut tunnel structure

## 4 结构安全性评价

为了研究采用最小弯矩位置分块和最大弯矩位置分块对整个明洞结构所产生的影响,通过计算4种分块方案各部位的安全系数,对明洞结构进行安全性评价,选取的位置和相应的编号如图10所示,计算方法参照《规范》所规定的安全系数计算方法。

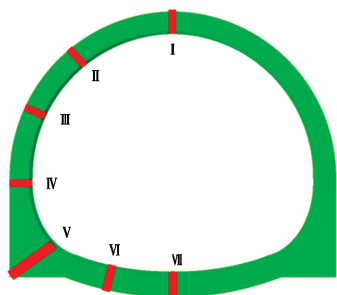


图10 安全系数选取部位示意图

Fig. 10 Safety factor schematic diagram of selected parts

依据明洞受力特性,将截面分为受拉或受压进行计算。依据轴力的偏心距  $e = M/N$  的大小分布可具体分为2种情况:

(1) 受拉强度判定 (当  $e > 0.2h$  时)

若截面受拉控制,则:

$$KN \leq \phi \frac{1.75R_1bh}{\frac{6e_0}{h} - 1} \quad (4)$$

式中:  $K$  为安全系数;  $N$  为荷载设计值产生的轴向力;  $R_1$  为混凝土的抗拉极限强度,按照《规范》, C50 混凝土  $R_1 = 3.1 \text{ MPa}$ ;  $b$  为截面宽度, m;  $h$  为截面厚度, m;  $e_0$  为截面偏心距, m;  $\phi$  为结构构件的纵向弯曲系数: 对于铁路隧道明洞拱圈及墙背紧密回填的边墙,可取  $\phi = 1.0$ 。

(2) 受压强度判定 (当  $e \leq 0.2h$  时)

若截面受压控制,则:

$$K \leq \frac{\phi R_a b h \alpha}{N} \quad (5)$$

式中:  $R_a$  为砌体或混凝土的抗压极限强度,按照《规范》, C50 混凝土  $R_a = 36.5 \text{ MPa}$ ;  $\alpha$  为轴力的偏心影响系数,参照《规范》取值。计算结果如图11所示。采用最小弯矩位置进行分块的明洞结构安全系数均大于采用最大弯矩位置进行分块的明洞结构。方案一~方案四的最小安全系数分别为3.10、2.99、

3.43 和 3.26, 均高于《规范》规定的混凝土达到抗压极限强度的安全系数2.4。4个方案的平均安全系数分别为3.24、3.13、3.58、3.42, 表明在采用相同的分块方式情况下,明洞平均安全系数会随分块数量的增多而减小。而采用最大弯矩位置进行分块的明洞结构平均安全系数略小于采用最小弯矩位置进行分块的明洞结构。其中,方案三的平均安全系数富余度最大,为1.18;其次是方案四和方案一,分别为1.02和0.84;而方案二的安全系数富余度最小,为0.73。此外,方案三的装配式分块数量最少,极大地提高了施工效率。因此,方案三为最优方案。

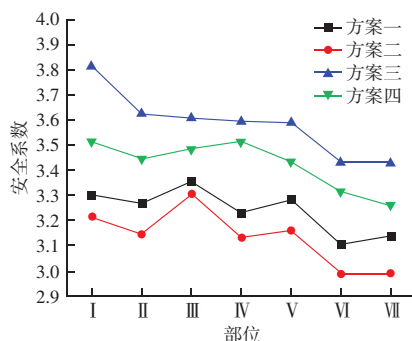


图11 不同分块方案安全系数对比图

Fig. 11 Safety factor comparison diagram of different block schemes

## 5 结论

通过建立螺栓-弹簧模型,对全断面装配式隧道明洞结构分块设计及受力特性进行研究,得出以下结论:

(1) 铁路隧道装配式明洞分块设计可以从主动调整明洞受力模式和降低对明洞受力扰动的设计理念出发。

(2) 采用相同分块方式的装配式明洞结构位移和应力随接头数量的增加而增加,安全系数随接头数量的增加而减小。

(3) 方案三基于明洞结构最小弯矩位置进行分块设计,将边墙分为2块,全环共计6块,该方案整体位移、应力和分块数量均处于最低水平,安全系数富余度最大,为1.18。因此,装配式明洞应当在减小对原有明洞结构受力扰动的情况下,选择在最小弯矩位置处进行分块,分块尽量少而大。

## 道桥技术

## 参 考 文 献

- [1] 付钧福. 干湿循环作用下石膏质岩隧道衬砌结构受力特征及安全性研究 [D]. 成都: 西华大学, 2023.
- [2] 冯天炜, 孟庆余, 张青波, 等. 高填深挖地基厚填土高铁明洞设计关键技术 [J]. 隧道建设 (中英文), 2024, 44 (增刊 2): 406–415.
- [3] 管鸿浩, 周晓军, 王春梅, 等. 高速铁路大跨度预制装配式明洞分块模式和建造方法研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2023, 52 (20): 66–74, 121.
- [4] 赵东平, 彭岳雷, 王凤, 等. 落石冲击下装配式明洞动力响应及承载性能研究 [J]. 现代隧道技术 2024, 61 (增刊 1): 601–612.
- [5] 计中彦, 张学民, 陈进, 等. 高速公路隧道装配式仰拱结构施工技术研究 [J]. 铁道科学与工程学报 2021, 18 (4): 983–990.
- [6] 王志伟, 马伟斌, 王子洪. 全断面预制装配式隧道明洞设计施工关键技术 [J]. 铁道建筑. 2022, 62 (6): 11–15.
- [7] 万自强. 铁路隧道预制装配式拱形明洞结构设计 [J]. 铁路技术创新. 2020 (6): 64–67.
- [8] 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.
- [9] HUANG Z, BAI H, MA S, et al. Large-scale testing of the mortise and tenon joint performance of the tunnelling of prefabricated frame tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 131: 104828.
- [10] 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.
- [11] 马伟斌, 王志伟, 张胜龙, 等. 基于结构受力模式主动调整的高速铁路双线隧道预制装配式衬砌的设计选型 [J]. 铁道建筑. 2020, 60 (10): 56–59.
- [12] 杨秀仁. 明挖地铁车站预制装配结构理论与实践 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [13] 唐伟. 高速铁路单线盾构隧道装配式隧底回填结构设计研究 [J]. 铁道标准设计. 2020, 64 (11): 99–103.
- [14] 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.
- [15] 付兵先, 马伟斌, 邹文浩, 等. 轮轨振动与气动荷载耦合作用下轻质装配式明洞动力学特性 [J], 铁道建筑 2023. 63 (11): 92–96.
- [16] 周晓军, 管鸿浩, 王春梅, 等. 高速铁路预制装配式大跨度明洞衬砌地震响应的数值分析 [J]. 建筑技术开发, 2024, 51 (2): 125–129.
- [17] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016 [S]. 北京: 中国铁路出版社, 2016.
- [18] LI Z, SOGA K, WRIGHT P. Behaviour of cast-iron bolted tunnels and their modelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2015, 50: 250–269.
- [19] LI Z, SOGA K, WANG F, et al. Behaviour of cast-iron tunnel segmental joint from the 3D FE analyses and development of a new bolt-spring model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2014, 41: 176–192.
- [20] 魏立新, 杨春山, 陈奕臻, 等. 基于改进梁-弹簧模型的沉管隧道反应位移法研究 [J]. 公路. 2022, 67 (2): 329–333.
- [21] 苏宗贤, 何川. 盾构隧道管片衬砌内力分析的壳-弹簧-接触模型及其应用 [J]. 工程力学. 2007 (10): 131–136.
- [22] 谢俊. 基于壳-弹簧模型大断面盾构隧道管片衬砌设计参数灵敏度及取值研究 [J]. 中国铁路. 2019 (5): 88–95.
- [23] 焦明伟, 高祎, 杨忠, 等. BFRPC 盖梁模壳结构参数数值分析 [J]. 公路交通技术, 2024, 40 (2): 157–163.
- [24] ARNAU O, MOLINS C. Three dimensional structural response of segmental tunnel linings [J]. Engineering Structures. 2012, 44: 210–221.

E-mail: fmhzhly@163.com