

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.006

# 矿山法隧道装配衬砌主动调整内力设计方法

高鑫<sup>1</sup>, 王雪磊<sup>1</sup>, 李清菲<sup>2</sup>, 任硕莹<sup>1</sup>, 沈奕轩<sup>1</sup>

(1. 青岛黄海学院 智慧城市工程学院, 山东 青岛 266427;

2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308)

**摘要:** 利用预制装配技术革新现有原位现浇工艺, 可以长足推动地下工程绿色、低碳、环保建造理念, 社会、工程与经济效益非常显著。依托单洞双线矿山法铁路隧道, 提出主动调整内力的装配衬砌设计方法, 通过数值分析方法研究预制接头转动刚度取值、装配衬砌环向分块方案以及纵向拼装方式。研究结果表明: 主动调整内力设计方法具有显著改善装配衬砌内力分布形态与提高危险截面安全系数的双重优点, 随着接头转动刚度的不断增大, 危险控制截面从仰拱转移至拱顶, 保证受力安全的接头转动刚度上限值为  $50 \text{ (MN} \cdot \text{m)/rad}$ ; 综合考虑吊装运输便利与接缝防水质量可靠, 隧道环向宜优先采用“3+3”对称分块方式; 装配衬砌沿着纵向采用通缝方式拼装时, 安全性能优于错缝拼装方式, 隧道变形与接头转角控制劣于错缝拼装方式, 从运营稳定与工程耐久性角度出发, 优先选择错缝拼装方式。

**关键词:** 装配衬砌; 主动调整内力; 转动刚度; 分块方案; 拼装方式; 安全系数

中图分类号: U451<sup>+</sup>.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0042-06

## Design Method for Actively Adjust Internal Force of Tunnel Assembly Lining Constructed with Mining Method

GAO Xin<sup>1</sup>, WANG Xuelei<sup>1</sup>, LI Qingfei<sup>2</sup>, REN Shuoying<sup>1</sup>, SHEN Yixuan<sup>1</sup>

(1. Qingdao Huanghai University, Qingdao, Shandong, 266427, China;

2. China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

**Abstract:** The use of prefabricated assembly technology to innovate the existing in-situ casting process can significantly promote the concept of green, low-carbon, and environmentally friendly construction in underground engineering, with significant social, engineering, and economic benefits. Based on the single-hole double-line railway tunnels with mining method, an innovative assembly lining design method that actively adjusts internal forces is proposed. Through numerical analysis, the values of the rotational stiffness of prefabricated joints, the circumferential block scheme of the assembly lining, and the longitudinal assembly method are deeply analyzed. The research results show that the active adjustment of internal force design method has the dual advantages of significantly improving the distribution of internal forces in the assembly lining and increasing the safety factor of dangerous sections. With the continuous increase of joint rotational stiffness, the dangerous control section shifts from the inverted vault to the vault top, and the upper limit of joint rotational stiffness that can ensure force safety is  $50 \text{ (MN} \cdot \text{m)/rad}$ ; Taking into account the convenience of lifting and transportation as well as the reliable quality of joint waterproofing, it is advisable to prioritize the use of a "3+3" symmetrical block method in the circumferential direction of the tunnel; When assembling the lining along the longitudinal direction using the through seam method, the safety performance is superior to the staggered seam assembly method, and the control of tunnel deformation and joint angle is inferior to the staggered seam assembly method. From the perspective of operational stability and engineering durability, the staggered seam assembly method is preferred.

**Keywords:** prefabricated lining; actively adjust internal force; rotation stiffness; block divided scheme; assembling method; safety factor

收稿日期: 2025-11-16

修稿日期: 2026-01-21

基金项目: 青岛黄海学院科技类重点项目(2024KJ24); 青岛地铁集团科研项目(M4-ZX-2018-17)

作者简介: 高鑫(1988—), 男, 高级工程师, 副教授, 主要从事隧道方面的设计与研究工作。E-mail: 352110640@qq.com

我国属于交通隧道建设大国,无论是现役、在建还是规划、待建隧道的规模普遍居世界首位<sup>[1-3]</sup>,目前绝大多数的公路、铁路隧道修建方式仍然以矿山法为主,支护形式采用复合式衬砌,二次衬砌利用原位现浇工艺构筑形成,通常受模筑水平、养护条件、施工管控以及材料供应等因素的综合影响,隧道衬砌频现多种病害现象<sup>[4-8]</sup>,诸如开裂、漏水、脱空、腐蚀、冻害、掉块等,十分不利于行车安全与运营稳定,归根结底是落后的原位现浇工艺管控水平严重阻碍衬砌施工质量的提升与改善,久而久之便陷入建设-修复-再建设-再修复的恶性循环,长期以来难以破局。近年来,预制装配技术在地下工程中不断推广与成功应用,如青岛地铁明挖装配车站与胡家沟隧道拱部预制衬砌的顺利实施<sup>[9-13]</sup>,其显著优点是衬砌质量(强度、厚度、耐久性)易于保证、机械化作业程度提升、劳动力依赖程度降低、企业降本增效等,完全可以消除前述原位现浇衬砌病害,进而释放隧道后期运维压力,符合国家倡导的绿色、低碳、环保、智能建设主题,是今后矿山法隧道建设的重点与热点研究方向。

基于此,以单洞双线矿山法铁路隧道作为依托研究对象,基于主动调整衬砌内力分布特征的设计原则,针对全环预制构件接头转动刚度、构件分块模式以及环间拼装方式展开研究,以期弥补矿山法隧道建设领域预制装配技术的不足与空白,相关研究结果可为后续类似工程提供参考。

## 1 工程概况

根据国家现行《高速铁路隧道设计规范》第8.2.5条款规定可知,不同时速的铁路隧道内轮廓形态基本一致,时速250 km/h与时速300 km/h、350 km/h单洞双线隧道内轮廓尺寸相差不足50 cm且后者略大一些,在相同的围岩等级与埋深条件下,衬砌内力整体分布特征与形态基本相同,有利于推动预制构件生产标准化、批量化与规模化的实现,进而提高其在不同相近隧道工程的推广性、复制性与普适性,因此,本文以内轮廓尺寸稍大的时速300 km/h、350 km/h单洞双线设置仰拱的铁路隧道作为研究对象,具体如图1所示。

我国铁路隧道沿线穿越地质条件复杂多变,揭露围岩等级多以Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级别为主,宜选择具有包容性设计特点的Ⅴ级围岩作为基础地质条件,相关物理力学参数如下:容重23 kN/m<sup>3</sup>、侧压力系数0.4、围岩弹性抗力150 MPa/m、配筋规格Φ18@150

mm、土压力荷载计算公式自行参阅《铁路隧道设计规范》附录D,限于文章篇幅不再赘述,经计算竖向与水平土压力分别是309.672、123.869 kPa,考虑最不利受力情况,认为围岩压力全部由二次衬砌承担。

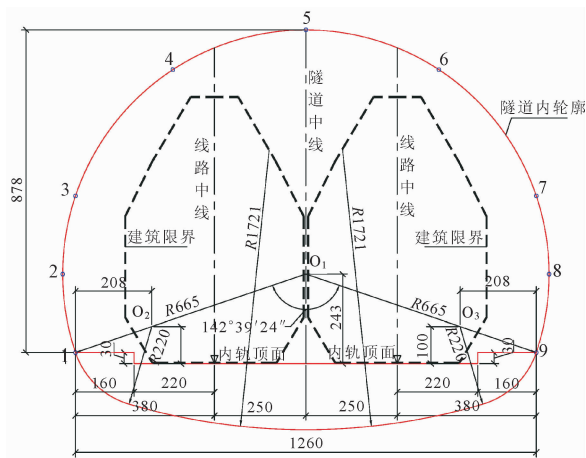


图1 单洞双线隧道内轮廓(单位:cm)

## 2 主动调整内力设计思路

所谓主动调整内力的设计方法是针对原位现浇整体衬砌的内力分布特征而言的,预制衬砌的最大特点在于存在若干个“相对较柔”的接头,接头的存在必然会降低衬砌的整体刚度,致使其传递内力的能力必然会低于现浇整体衬砌,进而影响自身内力的分布特征与形态,尤其以传递弯矩效应的接头转动刚度对衬砌内力的影响更为显著,以近似铰接传力模式<sup>[14]</sup>的最不利转动刚度1.0 (MN·m)/rad为例,图2分别是原位现浇整体衬砌、弯矩0点预制接头衬砌、最大弯矩点预制接头衬砌三个方案的内力分布特征。

从图2可以看出,方案1与方案2衬砌内力分布形态几乎完全相同,两者内力量值相差不足1.5%;相比之下,方案3弯矩分布形态及其量值变化显著,所有接头位置弯矩基本为0,再次印证预设接头转动刚度确实不具备传递弯矩的作用;轴力分布形态未发生明显变化,但其作用量值增大约9.01%~15.79%,因此,弯矩0点接头预制衬砌具有维持自身内力分布形态与作用量值不变的优点,仅将预制接头布设在最大弯矩位置才能发挥主动调整衬砌内力的作用,而且在拱部形成的是机构力学中受力较为稳定的三铰拱,图3是三种衬砌方案的安全系数变化曲线。

对比分析图3分布曲线可知,方案1与方案2衬砌最小安全系数2.626、2.686均位于拱顶位置,

方案 3 安全系数变化曲线明显新增多个极值点,最小安全系数则由拱顶转移至仰拱弯矩最大点位,其值 4.319 约是方案 1 的 1.645 倍,说明主动调整内力设计方法显著改善衬砌内力分布形态的同时还能提高危险截面安全系数,并使其位置转移至即便发生病害也相对便于修复的仰拱位置,因此,合理的预

制装配衬砌宜优先遵循主动调整内力的设计思路,而并非是弯矩 0 点接头预制衬砌方案,青岛地铁明挖装配车站即是 将 预 制 接 头 以 错 缝 拼 装 方 式 设 置 在 拱 顶 的 成 功 案 例, 详 见 图 4, 经 现 场 施 工 检 验 构 件 接 头 承 载 效 果 良 好。

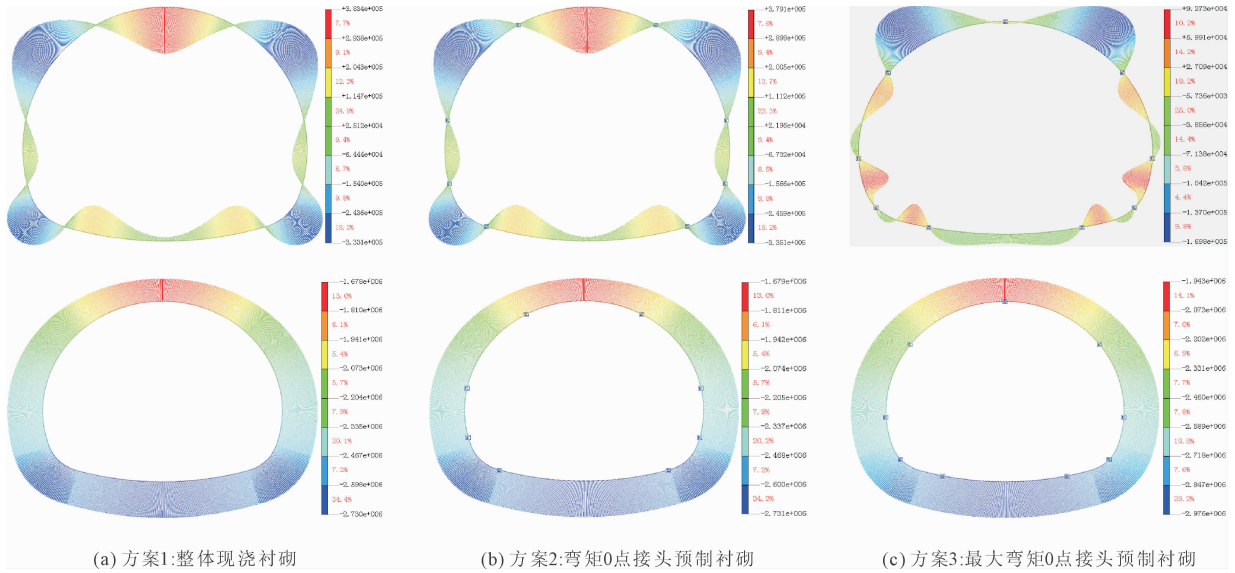


图 2 不同衬砌方案内力分布特征

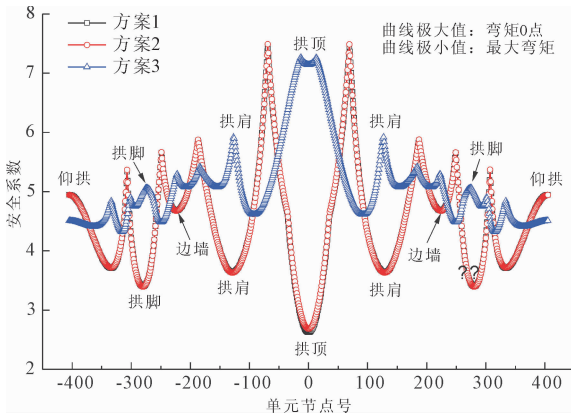


图 3 不同衬砌方案下安全系数变化曲线

### 3 接头转动刚度分析

预制构件接头可以传递剪力、轴力与弯矩,前两者通常易于保障,现有成品高强螺栓接头的抗剪与抗压(拉)性能几乎不会影响衬砌内力,仅对弯矩传递能力起决定性作用的转动刚度可以显著改变衬砌内力的分布形态与作用量值<sup>[15]</sup>,利用数值软件建立梁-弹簧单元有限元分析模型,图 5 是不同接头转动刚度下隧道衬砌安全系数的分布曲线。

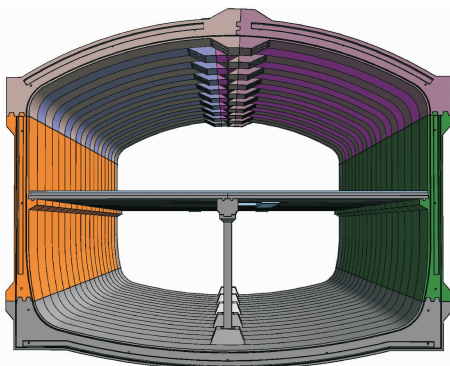


图 4 明挖地铁装配车站三维效果展示

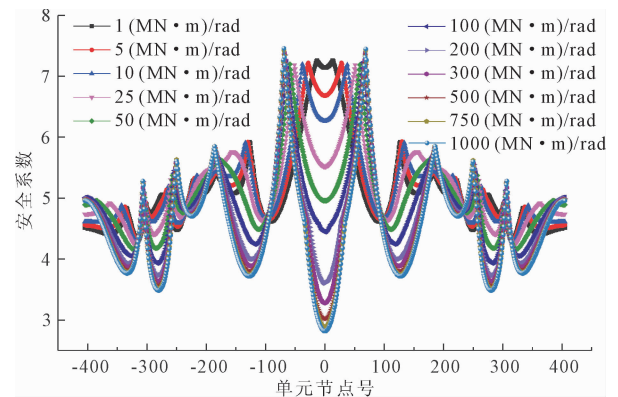


图 5 不同转动刚度下安全系数分布曲线

从图 5 可以看出,随着接头转动刚度的增加,其传递弯矩的能力越来越强,衬砌安全系数分布曲线

不断向现浇整体衬砌方案过度,最小安全系数所在位置也逐渐由仰拱最大弯矩点转移至拱顶位置,其量值逐渐由 4.319 降低至 2.818,降幅可达 34.75%,基于控制最不利危险截面的原则,可以认为衬砌安全性能不断降低,理论上应该会有一个合理的接头转动刚度上限,一旦超过这个上限安全系数则迅速下降,除非将设计思路再次回归到基于维持衬砌内力不变的原则上来,如此一来便会严重削弱预制装配衬砌高安全性的显著优点,势必会采取提高混凝土等级、增加衬砌厚度、加强钢筋配置等增加工程投资的不利措施,因此,十分有必要寻找工程综合性价比相对较高的接头转动刚度上限值,图 6 是衬砌最小安全系数随着接头转动刚度的变化曲线。

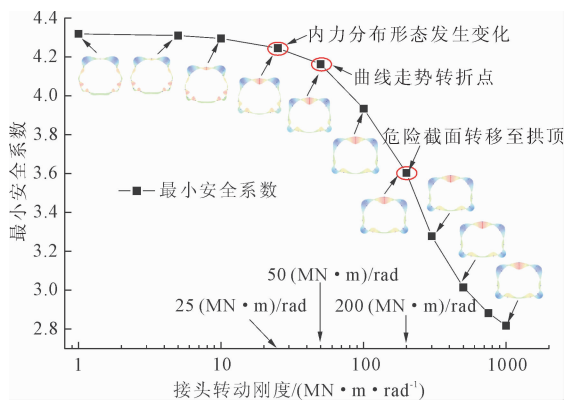


图 6 最小安全系数随着转动刚度变化曲线

从图 6 可以看出,衬砌最小安全系数随着接头转动刚度的增大而持续降低,根据内力分布形态、曲线变化走势以及危险截面位置,可以将其划分为以下三个关键阶段:①于刚度值 25 (MN·m)/rad 时衬砌内力分布形态发生明显变化,拱顶部位受力由近似纯压的状态转变为压弯状态,即弯矩值由 8.896 kN·m 上升至 141.376 kN·m,增幅高达 1489.21%,但危险截面所在位置尚未发生变化;②于刚度值 50 (MN·m)/rad 时曲线变化速率加快,最小安全系数迅速降低,危险截面更加容易发生压弯破坏,该刚度

值即属于合理的接头转动刚度上限值;③于刚度值 200 (MN·m)/rad 时,最小安全系数所在位置发生转变,危险截面最终转移至更加不利的拱顶部位;说明合理的接头转动刚度上限值是 50 (MN·m)/rad,过度提高转动刚度容易降低拱部衬砌安全进而威胁行车安全与运营稳定。

### 4 预制构件分块优化

预制衬砌作为设置于弹性地基上的无限次超静定结构,调整构件分块方式对自身内力的影响是十分有限的,接头转动刚度取上限值 50 (MN·m)/rad,鉴于图 2 方案 3 构件分块数量过多以及图 5 安全系数分布曲线特点,可以进一步优化边墙位置以下的构件接头位置以期减少接缝数量,具体的优化方案及其安全系数计算结果详见图 7。

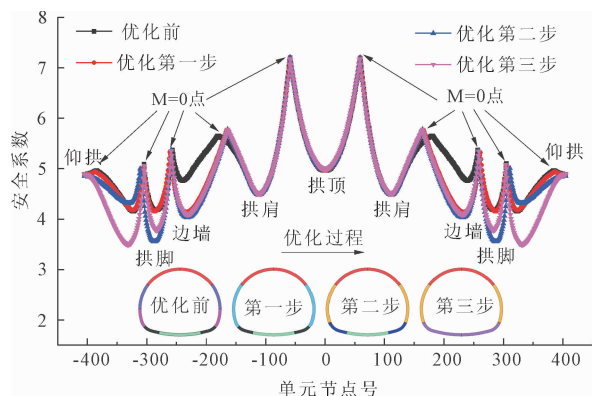


图 7 不同分块方式安全系数分布曲线

从图 7 可以看出,拱墙交界弯矩  $M = 0$  点以上位置安全系数不随构件分块方式发生变化,这表明接头位置调整仅影响自身所属两块构件的安全系数;分块方式从第一步优化至第三步,边墙以下关键位置安全系数整体上呈现出下降的变化趋势,但最大降幅仅有约 15.87%,最小安全系数仍然是位于优化第三步仰拱最大弯矩点位的 3.50,较图 2 现浇整体衬砌最小安全系数 2.626 尚且还有 33.28% 的储备余量。不同分块方式的预制构件信息如表 1 所示。

表 1 不同分块方式下预制构件基本信息

分块方案	构件数量	分块方式	构件分块转角 / (°)	最小/最大单块质量/t	关键位置安全系数				
					拱顶	拱肩	边墙	拱脚	仰拱
优化前	9	4 + 1 + 4	52.71 + 37.29 + 41.98 + 36.19 + 23.67	6.67/15.98	4.96	4.49	4.76	4.18	4.16
第一步	7	3 + 1 + 3	52.71 + 79.26 + 36.19 + 23.67	6.67/19.17	4.97	4.49	4.14	4.16	4.18
第二步	7	3 + 1 + 3	52.71 + 58.71 + 56.74 + 23.67	8.88/17.01	4.98	4.49	4.03	3.55	4.31
第三步	6	3 + 3	52.71 + 58.71 + 68.59	15.98/17.86	5.00	4.50	4.09	3.78	3.50

基于表 1 构件统计信息,整个优化过程中最大

与最小构件单块质量不断均化,最终步的分块方式

关于隧道中线完全对称,环向不同块间接缝数量较优化前由 9 处减少至 6 处,可以显著提升构件接缝防水效果;同时,参考胡家沟单洞双线铁路隧道拱部预制构件质量重达 20 t 以上的成功案例<sup>[16]</sup>,完全具备实现“3+3”分块方式构件顺利运输吊装的机械配置,由于最大质量 17.86 t 构件位于仰拱位置,其拼装难度显然低于其它构件,况且构件质量相对均化的分块方式有利于充分发挥机械设备的运输吊装能力,统筹考虑构件受力安全、运输吊装便利以及接缝防水效果等因素,建议工程优先采用“3+3”对称分块方式。

## 5 环间拼装方式

矿山法铁路隧道预制构件拼装方式包括通缝拼装与错缝拼装两种,其拼装成型效果如图 8 所示,其中错缝拼装可以通过旋转通缝拼装的预制接头位置予以实现,即将相邻两环管片各自的 6 处接头分别沿着顺时针与逆时针旋转 8.0°、8.0°、3.0° 便可达到图 8 所示的错缝拼装效果,且无需新增构件类型。

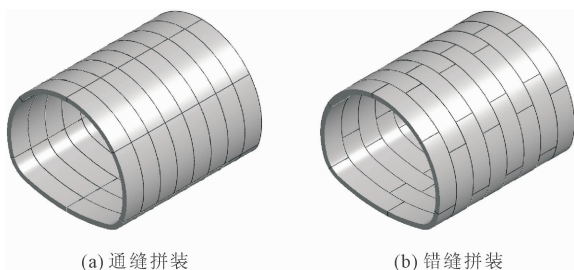


图 8 预制衬砌拼装方式

建立基于图 8 两种拼装方式的三维梁-弹簧数值分析模型,环间螺栓作用利用弹簧单元实现,其它非螺栓位置设置仅受压弹簧模拟其环间接触力学行为,图 9 是两种拼装方式下的衬砌安全系数分布曲线。

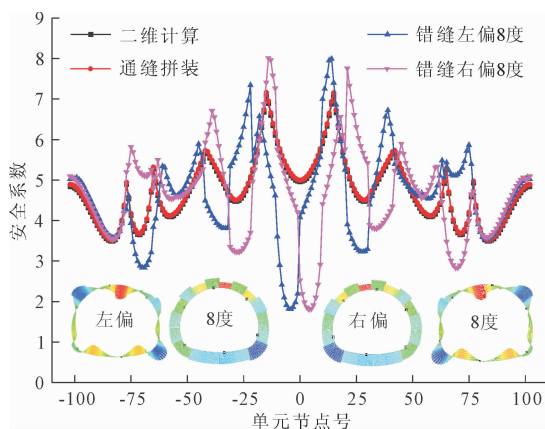


图 9 不同拼装方式下衬砌安全系数分布曲线

图 9 所示通缝拼装方式衬砌安全系数分布曲线与二维计算结果基本保持一致,其原因是各环管片荷载分布、边界条件、螺栓设计均是对称方式布置,环间弹簧连接的相邻两环管片点位的变形与内力同步变化且量值相等,以致于环间弹簧并未发挥作用;相比之下,错缝拼装方式因相邻两环管片块间螺栓错位布置及其不再关于中线对称的特点,环间螺栓发挥加强纵向刚度的作用,刚度越强、内力越大,以弯矩增大效应最为显著,进而引起最小安全系数降低,其总是位于拱部左偏或右偏 8 度点位,危险截面数量有所增加,衬砌内力于环间弹簧点位存在明显突变,但相邻两环衬砌的内力分布与安全系数却呈现出关于中线对称的特点。表 2 是不同拼装方式下构件变形与不同弹簧点位最大转角。

表 2 不同拼装方式管片变形与最大转角

拼装方式	拱顶沉降 /mm	水平收敛 /mm	接头最大转角/( $\times 10^{-3}$ rad)	
			内侧	外侧
通缝	22.476	6.599	4.064	-2.745
错缝	20.138	5.816	1.989	-1.351

结合图 9 曲线与表 2 数据可知,通缝拼装方式衬砌整体表现出受力小变形大的柔性特征,因环间弹簧的纵向加强作用,错缝拼装方式衬砌变形与接头最大转角均在减小,因此,通缝拼装方式衬砌受力要优于错缝拼装方式,但在变形控制与防水效果方面却远不如错缝拼装方式,基于提高隧道长期服务功能与工程耐久性的角度考虑,宜优先选择错缝拼装方式,通过加强配筋规格可以解决衬砌安全度不足的问题,经过验算只需将仰拱配筋规格由  $\Phi 18@150$  mm 微调至  $\Phi 20@150$  mm 便可使衬砌受力转危为安,最小安全系数上升至 2.57,若考虑仰拱素砼回填与轨道结构自重的有利反压作用,这个安全系数只会更高,完全可以满足衬砌受力安全的需求。

## 6 结论

依托矿山法单洞双线铁路隧道,针对全环预制装配衬砌设计的合理性设计展开深入的研究与分析,得出结论与建议如下:

(1) 主动调整内力设计方法遵循最大弯矩点位设置预制接头的思路,兼具显著改善衬砌内力分布形态与提高危险截面安全系数的双重优势。

(2) 切勿一味追求接头转动刚度取极值,以免与主动调整内力设计原则相悖,保证二次衬砌最小

安全系数满足要求兼顾危险截面位于仰拱的合理转动刚度上限值是  $50 (\text{MN} \cdot \text{m})/\text{rad}$ 。

(3) 预制构件宜优先采用“3+3”对称分块方式,同时具备衬砌受力安全、吊装运输便利以及接缝防水可靠等诸多优点。

(4) 通缝拼装衬砌受力优于错缝拼装,变形控制与接头转角劣于错缝拼装,基于运营稳定与工程耐久性的角度考虑,宜优先选择错缝拼装方式。

#### 参考文献:

[1] 严金秀. 中国隧道工程技术发展 40 年[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(04):537-544.

[2] 赵勇,田四明. 截至 2018 年底中国铁路隧道情况统计[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(02):324-335.

[3] 田四明,王伟,杨昌宇,等. 中国铁路隧道 40 年发展与展望[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(11):1903-1930.

[4] 张民庆,韩静玉,王水善,等. 隧道拱部衬砌混凝土浇筑结束控制标准研究[J]. 铁道工程学报,2021,38(09):29-33,47.

[5] 王丹. 拱顶脱空对隧道衬砌结构力学特性的影响分析[J]. 铁道建筑技术,2021(09):38-41,57.

[6] 宁小宝. 浅谈隧道衬砌脱空的成因与处治[J]. 建筑机械化,2022,43(02):47-50.

[7] 项一恒. 隧道拱顶衬砌脱空及欠厚对结构安全性影响

研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2022.

[8] 李乐乐,郝艳广,韩劲龙,等. 高速铁路隧道衬砌厚度不足对隧道结构安全性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2021,52(01):105-108.

[9] 周晓军,宁远思,杨昌宇. 矿山法施工双线铁路隧道二次衬砌拱部预制拼装结构的设计与工程应用[J]. 现代隧道技术,2022,59(04):204-217.

[10] 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(S1):360-368.

[11] 周晓军,郭建,杨昌宇,等. 钻爆法双线铁路隧道预制拼装二次衬砌分块方式研究[J]. 现代隧道技术,2021,58(06):46-58.

[12] 杨宝,刘保林,曹林卫,等. 矿山法铁路隧道拱部预制衬砌接头选型设计研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(10):179-183,204.

[13] 杨秀仁. 我国预制装配式地铁车站建造技术发展现状与展望[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(11):1849-1870.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 林志,郝理,李玉文,等. 钻爆法公路隧道装配式衬砌结构关键技术研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(03):107-112.

(上接第 41 页)

[10] 朱利明,王成龙,蓝天,等. 地铁运行引起的南京鼓楼振动测试与分析[J]. 建筑结构学报,2018,39(S1):291-296.

[11] 宗刚,郑玉琴,任晓崧,等. 建筑物对地铁引发场地振动影响的实测分析[J]. 工程力学,2018,35(S1):287-292.

[12] 张亚彬,秦学波,韩旭. 地铁运行引起上方建筑振动的现场实测与规律分析[J]. 河南科技,2020,39(29):119-121.

[13] 陈璠. 环境激励下的场地振动衰减规律试验研究[D]. 北京:北京建筑大学,2019.

[14] 许暮迪,张辉,花雨萌,等. 空间框架式客运车站振动舒适度分析[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17

(10):2635-2641.

[15] 张新豪,孙昊,孙继梅. 基于车致振动响应的双层钢桁梁桥行人舒适性评价[C]//2023 世界交通运输大会(WTC2023)论文集(上册). 中国科学技术协会、交通运输部、中国工程院、湖北省人民政府,中国公路学会,2023:7.

[16] GB/T 7031—2005 机械振动 道路路面谱测量数据报告[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[17] Wang Hongzhen, Zhang Chunsheng, Jiang Jianqun. Vibration characteristics and isolation in vibration-sensitive areas under moving vehicle load[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022,153(02):107077.