

# 公路隧道装配式仰拱拼装设备与工艺初步研究

李强<sup>1</sup>, 朱佳佳<sup>2,3</sup>, 张孝伟<sup>1</sup>, 黄云<sup>4</sup>, 叶福生<sup>2,3</sup>, 徐剑<sup>1</sup>, 张俊儒<sup>2,3</sup>, 杨跃飞<sup>5</sup>, 冷彪<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>中铁长江交通设计集团有限公司, 重庆

<sup>2</sup>交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都

<sup>3</sup>西南交通大学土木工程学院, 四川 成都

<sup>4</sup>西南石油大学机电工程学院, 四川 成都

<sup>5</sup>中铁九局集团有限公司, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年4月19日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月20日

## 摘要

本文针对钻爆法公路隧道现浇仰拱施工效率低、质量控制难的问题, 设计了一种装配式仰拱拼装设备并提出了配套施工工艺。通过三行车梁与单行车梁方案的技术经济对比, 确定采用单梁门式框架与轨道行走系统方案。建立设备力学模型开展多工况静力学有限元分析, 明确了各关键构件的应力分布与变形特性。以安全系数不低于2.0、最大变形量不大于10 mm为设计准则, 确定了构件尺寸与材料选型, 其中框架下梁安全系数2.02, 最大变形量9.99 mm。施工工艺涵盖基底垫层处理、预制块吊装就位、预应力张拉及拱底注浆等环节。该设备在拼装期间可保持隧道中部通行, 对初期支护无额外要求, 为钻爆法公路隧道装配式仰拱施工提供了技术参考。

## 关键词

隧道, 装配式衬砌, 钻爆法, 拼装设备

# Preliminary Study on Equipment and Techniques for Installing Prefabricated Inverted Arches in Highway Tunnels

Qiang Li<sup>1</sup>, Jiajia Zhu<sup>2,3</sup>, Xiaowei Zhang<sup>1</sup>, Yun Huang<sup>4</sup>, Fusheng Ye<sup>2,3</sup>, Jian Xu<sup>1</sup>, Junru Zhang<sup>2,3</sup>, Yuefei Yang<sup>5</sup>, Biao Leng<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>China Railway Changjiang Transportation Design & Research Group Co., Ltd., Chongqing

\*通讯作者。

文章引用: 李强, 朱佳佳, 张孝伟, 黄云, 叶福生, 徐剑, 张俊儒, 杨跃飞, 冷彪. 公路隧道装配式仰拱拼装设备与工艺初步研究[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 238-248. DOI: 10.12677/hjce.2026.155134

<sup>2</sup>Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Chengdu Sichuan

<sup>3</sup>School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

<sup>4</sup>School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

<sup>5</sup>China Railway Ninth Bureau Group Co., Ltd., Shenyang Liaoning

Received: April 19, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 20, 2026

## Abstract

This paper presents a prefabricated invert assembly equipment and proposes a corresponding construction process to solve the low efficiency and difficult quality control of cast-in-place invert construction in drill-and-blast highway tunnels. The single-beam gantry frame with rail traveling system is selected after comparing the three-beam and single-beam schemes. A mechanical model is built and static finite element analysis under multiple working conditions is performed, showing the stress distribution and deformation characteristics of key components. With the design criteria of safety factor not less than 2.0 and maximum deformation not greater than 10 mm, the component dimensions and material types are determined. The safety factor of the lower frame beam is 2.02 and the maximum deformation is 9.99 mm. The construction process includes base cushion treatment, prefabricated block hoisting and positioning, prestressed tensioning, and invert grouting. The equipment maintains passage through the tunnel center during assembly and imposes no extra requirement on the primary support, providing a technical reference for prefabricated invert construction in drill-and-blast highway tunnels.

## Keywords

Tunnel, Prefabricated Lining, Drill-and-Blast Method, Assembly/Erection Equipment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在当前我国交通基础设施持续发展的背景下，隧道工程日益朝着经济、低碳、环保与安全的方向转型，对施工技术提出了更高要求。传统矿山法隧道中广泛采用的全现浇衬砌结构，由于存在施工机械与人员投入大、成本高、现场作业环境污染等问题，其局限性逐渐凸显。相比之下，在盾构隧道中采用的圆形断面装配式衬砌技术凭借工厂化生产所带来的高质量、高精度，以及现场拼装所实现的高效率与低环境影响，得到大量应用，可考虑在当前山岭隧道马蹄形断面二次衬砌施工中，进行借鉴，弥补传统模筑式混凝土衬砌带来的不足。

在装配式衬砌技术领域，国内外研究各有侧重。国外研究更早地开展了高性能混凝土、碳纤维复合材料等新型材料的应用探索，并引入数控加工、激光切割等先进制造工艺，显著提升了构件尺寸精度和表面质量。例如，Antonio Confort [1]等人提出在地铁隧道衬砌中采用宏观合成纤维替代传统钢筋，并在实践中验证了其可行性；Aggarwal Vivek [2]等研究了增强纤维树脂复合材料在预制衬砌销钉中的应用。在装配式隧道衬砌技术领域，日本开展了较多研究与工程实践。例如，多家日本企业曾于2018年联合开展铁路隧道装配式衬砌的模拟试验，验证了其在装配、运输及安装阶段的整体可行性。而近期，Rabiei [3]

等人在蒙特利尔 REM 机场隧道中,成功应用预制钢纤维混凝土单元建造隧道内部结构的设计与施工实践,进一步证明了预制装配技术在提升施工速度、保障工程质量和实现低碳环保方面的综合优势,为隧道装配式衬砌的工程化应用提供了重要参考。

装配式衬砌国内研究以盾构隧道为主,主要聚焦于预制构件的材料创新与制造工艺优化,通过探索新型掺合料和外加剂的应用,不断提升盾构隧道管片的力学性能与耐久性,同时有效控制成本并降低裂缝风险。近年来,装配式衬砌技术在我国地铁车站施工中得到一定的应用,已积累了较为成熟的经验。例如,长春地铁二号线的袁家店站作为国内首个明挖装配式地铁车站已成功建成[4];上海地铁 15 号线吴中路站采用预制拼装叠合拱壳工艺顺利完工[5];青岛地铁 6 号线富春江路站亦采用了装配式结构[6]。在铁路隧道方面,京张高铁清华园隧道采用了轨下预制结构[7];西康铁路秦岭 I 号隧道则实施了仰拱整体预制技术[8];张胜龙则对隧底新型预制装配式结构接头进行了研究[9]。然而,针对装配式衬砌在矿山法隧道中的施工技术,国内外系统研究仍较为有限。胡瑞青[10]在矿山法隧道相关研究中,针对超小净距穿越既有地铁结构的影响展开分析,也对隧道结构相关设计的探讨;赵晓勇等[11]针对隧道装配式仰拱 V 型接头衬砌结构,开展了其受力特征的研究,为矿山法隧道装配式衬砌的力学性能分析提供了参考;张金伟[12]等基于矿山法隧道装配式衬砌结构特点,提出了撑靴式与机械手式两种拼装机工艺,并通过试验验证了其适用性,为相关技术推广提供了有益参考。在预制构件运输吊装方面,西秦岭隧道全国首次引入仰拱预制块液压起吊翻转机,以解决长期以来真空吸吊翻转机不适用于预制仰拱块翻转且地面翻滚预制仰拱块技术落后带来的问题[13][14]。清华园隧道利用边箱涵吊机将实现了箱涵的快速对位安装[15]。

鉴于此,本文以铁峰山公路隧道为工程背景,结合其实际工况与技术要求,重点研究适用于该工程的装配式仰拱拼装工艺及配套设备的结构设计与性能验证。在充分调研国内外类似工程实践的基础上,借鉴盾构与 TBM 隧道的成熟设计经验,综合运用方案比选、力学建模与有限元仿真分析方法,提出了适用于钻爆法公路隧道的装配式仰拱拼装设备方案与施工工艺,以期为相关工程实践提供技术支撑。

## 2. 依托工程概况

万开高速公路铁峰山隧道为分离式与小净距组合的特长隧道,左洞长 8635 m,右洞长 8614 m。隧道地处四川盆地东部,地形起伏大,相对高差逾 800 米,区域地质构造复杂,以 NNE 至 EW 向褶皱为主,发育有断层构造,隧址区穿越三叠系、侏罗系等多套地层,工程地质条件复杂。隧址区属亚热带季风气候,雨量充沛,地表河流对隧道直接影响较小,洞身水文条件主要受构造和岩性控制。

该隧道遵循我国公路隧道通用设计规范,其横断面设计充分考虑了复杂地质条件下的围岩稳定性、防水防渗及结构承载需求。以该隧道为依托工程开展研究,可确保研发的拼装设备、预制构件及施工工艺无需大幅调整即可适配其他具有相似断面特征的钻爆法公路隧道,有效降低技术推广的适配成本,让研究成果具备更广泛的工程实用价值与推广前景。

## 3. 装配式衬砌分块

隧道二次衬砌采用全环预制方案,为便于后续管片设备安装,分别对隧道仰拱与拱墙结构进行分块。本文聚焦隧道仰拱部分,以铁峰山隧道为工程实例,对隧道仰拱结构的预制分块方法进行研究。通过从长度、重量、整体性、施工、运输方便等角度综合分析,最终确定采用装配式仰拱与装配式填充层一体化结构形式。从运输效率、拼装精度、施工工序及接缝控制等角度考量,将仰拱沿环向划分为 3 块,环向宽度依次为 3.56 m、4.96 m、3.56 m,纵向长度取 1.5 m,同时在构件上预留孔洞,用于减轻结构重量和作为排水通道;各预制块主要结构尺寸见图 1 所示。

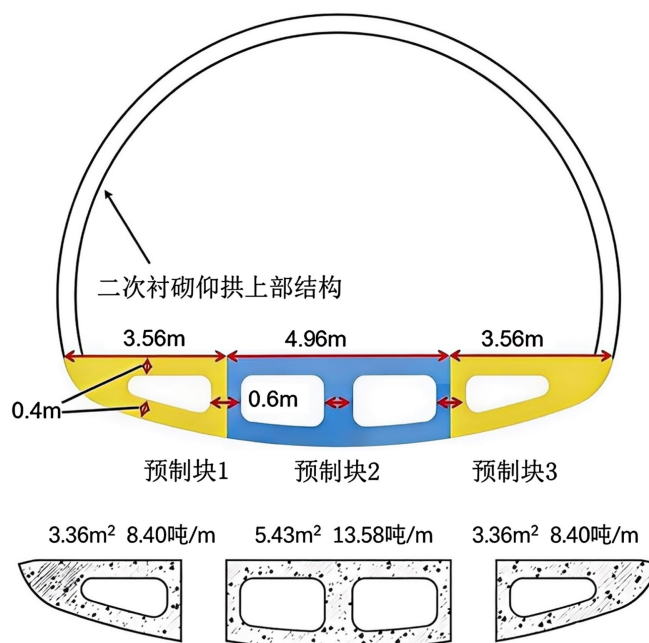


Figure 1. Precast segment blocks of the assembled invert  
图 1. 装配式仰拱预制分块

#### 4. 仰拱拼装设备设计方案比选

根据仰拱预制分块，对配套拼装设备进行设计，适配铁峰山隧道复杂地质与有限断面空间，满足三块仰拱预制块的吊装、就位与拼装需求，同时兼顾施工通行与多工序协同作业。设备整体以门式框架-滑轨-行车梁-吊装系统为核心架构，设计承载可靠、操作便捷、空间适配、成本可控的仰拱拼装设备。设备主体采用门式框架作为支撑，行车梁通过滑轨可进行纵向与横向移动，从而精准覆盖仰拱各分块的安装位置。其吊装系统由电动提升机、机械臂及配重模块组成，负责完成预制块的起吊、姿态调整与最终对接。整套设备通过框架、行车梁、滑轨及吊装部件的协同作业，实现仰拱拼装的全流程操作，设备细节详见图 2 所示。

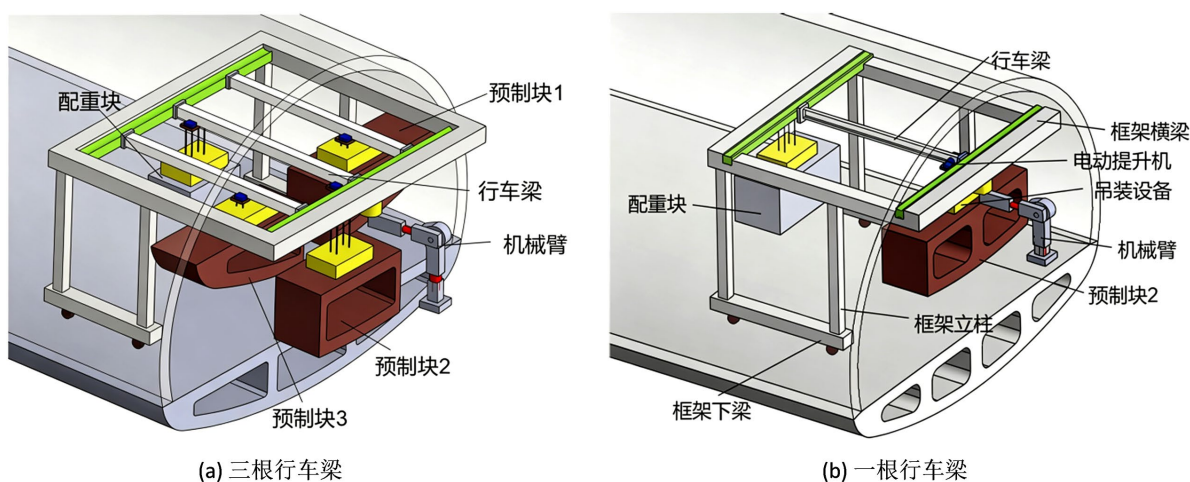


Figure 2. Design scheme of the invert installation equipment  
图 2. 仰拱设备设计方案

基于此结构，研究提出两种可行方案进行比选。方案一采用三根独立行车梁，虽可提供充足的承载能力与作业空间，并能在一个作业循环内完成整环安装，但其结构占用空间较大，显著影响隧道内其他设备通行与施工组织，且多梁协调与反复定位导致操作流程复杂。

相比之下，方案二采用单根行车梁设计，结构布局更为简洁。通过滑轨移动满足不同分块的安装覆盖需求，配合辅助机械完成定位校准；通过加长底座扩大支撑范围，并将配重集成于上部框架，优化了设备受力传递路径，提升了整体稳定性与安全性。

综合技术适配性、施工效率、空间利用率等因素，方案二在设备操作精度、多工序协同性上更具优势，最终优选方案二作为仰拱拼装设备的实施方案。

## 5. 仰拱拼装设备应力及变形分析

对仰拱拼装设备选型结果，建立力学数值仿真模型，分析关键承重构件在不同工况下的应力分布、变形特性及安全系数，为设备结构优化与材料选型提供理论支撑，确保设备在隧道有限空间内实现安全、稳定的仰拱拼装作业。

### 5.1. 模型参数

#### (1) 核心参数选定

仰拱设备的主体结构材料主要选用 Q345 低合金高强度结构钢。该钢种具有较高的强度与塑性，同时成本适中、焊接性能良好，能够满足设备在施工环境下的承载需求与结构可靠性要求。行车梁则采用 32b-50b 型工字钢，材料同样为 Q345，以适应仰拱预制块吊装的受力特点、隧道空间条件及结构刚度要求，确保施工安全与工程适配性。主要材料的力学与物理参数如下：Q345 钢的屈服强度为 345 MPa，弹性模量为  $2.06 \times 10^2$  GPa，泊松比为 0.3，密度为 7850 kg/m<sup>3</sup>。

#### (2) 网格划分

仰拱设备模型分析时简化了机械臂、仰拱、配重，采用 ansys 软件开展静力学有限元分析，为确保计算精度，网格划分选用 8 节点 6 面体单元。分析模型涵盖设备主体结构及仰拱预制块，总节点数 1,176,224，单元数 373,094，网格如图 3 所示。

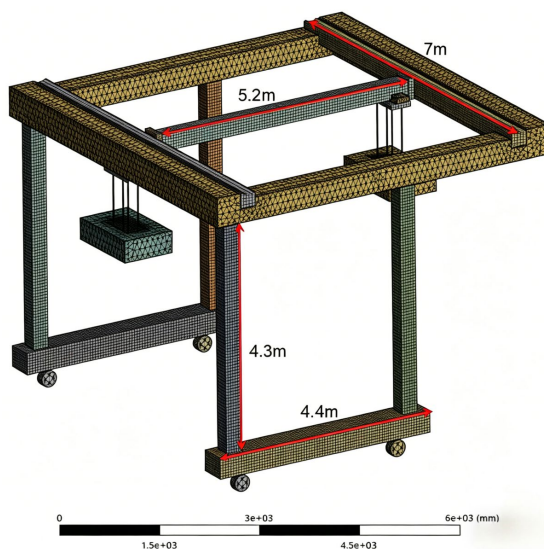
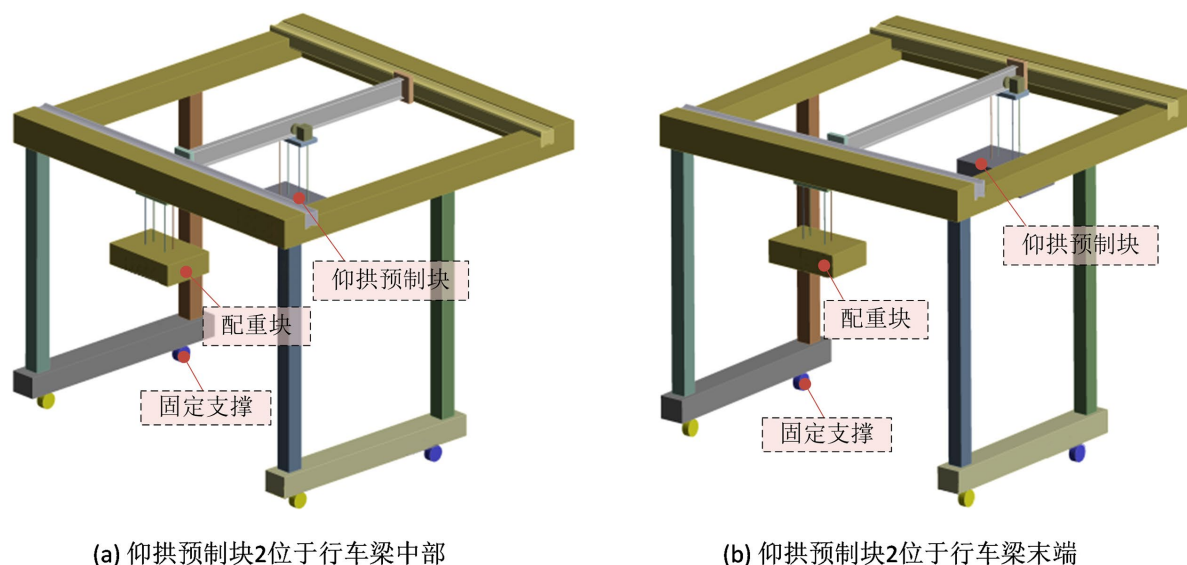


Figure 3. Mesh generation diagram

图 3. 网格划分图

## 5.2. 静力学有限元分析结果

本次分析以最不利工况为原则,以设备需安装的最重仰拱预制块 2 为基准,根据力矩平衡计算得出配重块荷载为 72088.8 N。选取代表性工况开展研究,具体为:行车梁在框架横梁中部、仰拱预制块 2 在行车梁中部及末端;行车梁在框架横梁端部,仰拱预制块 1、3 在行车梁末端。分析各构件在不同截面尺寸、不同工况下的结构安全性。以仰拱预制块 2 为例,其在设备上从行车梁靠配重块端吊运至中间位置和末端位置时,边界条件及载荷如图 4 所示。



**Figure 4.** Loads and boundary conditions for the invert assembly equipment at different positions  
**图 4.** 不同位置时仰拱拼装设备受力边界条件及载荷图

对特定构件在不同截面尺寸条件下进行分析时,其余构件的截面尺寸保持不变,各组合中构件截面尺寸或型号如表 1 所示。

**Table 1.** Combinations of cross-sectional dimensions or model types for each component  
**表 1.** 各构件截面尺寸或型号组合

序号	框架下梁	框架横梁	框架立柱	行车梁(型号)	滑轨
1	多种截面尺寸	50 × 55 cm	30 × 30 cm	36b	35 × 30 cm
2	50 × 40 cm	多种截面尺寸	30 × 30 cm	36b	35 × 30 cm
3	50 × 40 cm	50 × 55 cm	多种截面尺寸	36b	35 × 30 cm
4	50 × 40 cm	50 × 55 cm	30 × 30 cm	多种截面尺寸	35 × 30 cm
5	50 × 40 cm	50 × 55 cm	30 × 30 cm	36b	多种截面尺寸

### (1) 应力分析结果

综合各构件在不同截面尺寸、不同工况下的计算结果,建立不同截面尺寸下的安全系数曲线图(见图 5)。本研究将安全系数不低于 2.0 作为结构设计的关键准则,图中红色虚线对应这一安全系数合格阈值。

由图 5 可知,各构件在不同工况下的安全系数均存在安全系数大于 2.0 的截面尺寸,其中,框架下梁的安全系数相对较低,最大为 2.1。

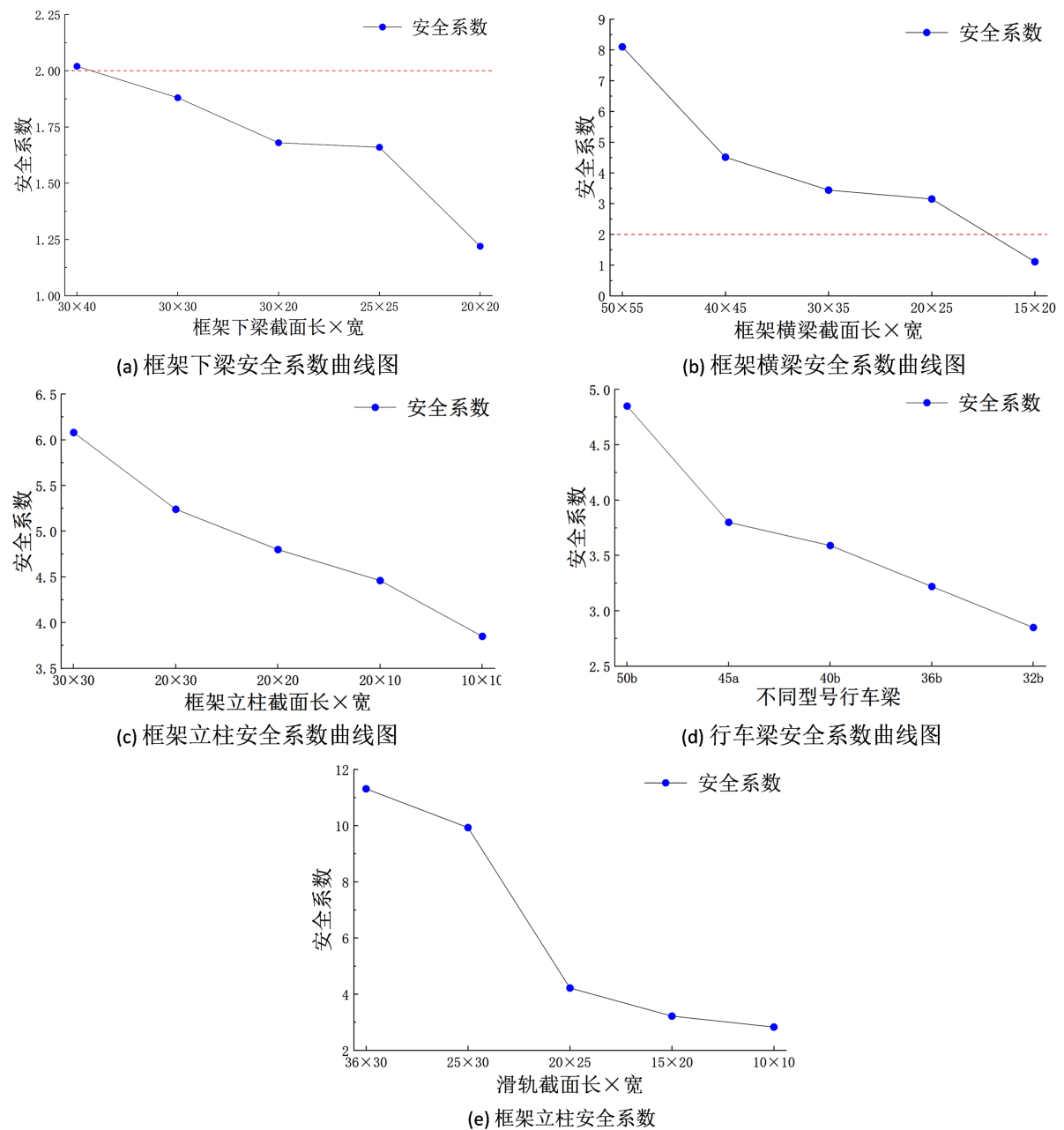


Figure 5. Safety factor curves of components under different cross-sectional dimensions

图 5. 不同截面尺寸下的构件安全系数曲线图

## (2) 变形分析结果

结合不同截面尺寸下的构件安全系数曲线图及安全合格阈值, 各工况核心构件暂定采用以下尺寸: 框架下梁 30×40 cm、框架横梁 20×25 cm、框架立柱 10×10 cm、行车梁选用 32b 型工字钢、滑轨 10×10 cm, 均遵循安全系数不低于 2.0 的设计准则。基于此开展不同工况下的结构变形分析, 设备变形分布特征如图 6 所示。

仰拱预制块 2 安装工况最大变形处为吊装装置, 最大变形量 4.85 mm, 最小变形处为车轮, 变形量接近 0; 仰拱预制块水平吊运工况最大变形位置仍为吊装装置, 最大变形量 9.99 mm, 最小变形处为车

轮, 变形量接近 0; 仰拱预制块 1、3 安装工况最大变形处为电动提升机, 最大变形量 4.04 mm, 最小变形处为车轮, 变形量接近 0。

变形分析结果表明, 各工况下设备变形均集中于吊装装置、电动提升机等直接受力构件, 变形分布与结构受力逻辑相符, 且核心构件安全系数均满足设计准则要求, 可保障拼装作业的设备稳定性。其中仰拱预制块 2 水平吊运工况下, 设备最大变形量为 9.99 mm, 位于行车梁中部, 未超过 10 mm 的变形控制值, 满足变形使用要求。

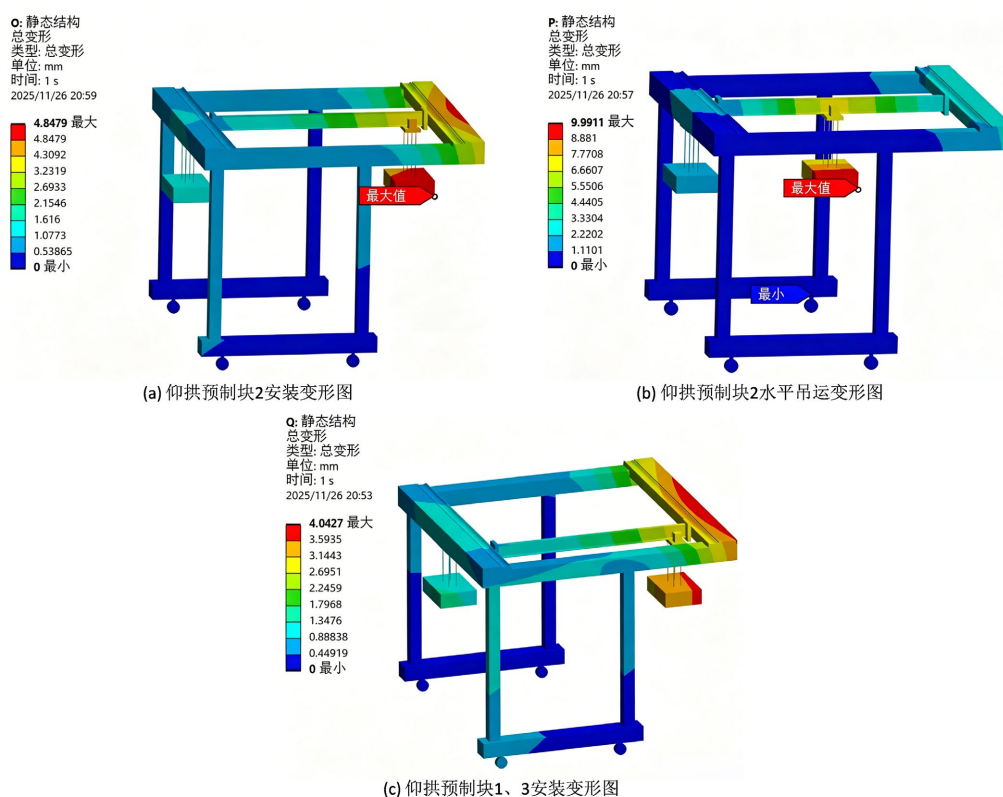


Figure 6. Deformation diagrams under various working conditions  
图 6. 各工况变形图

### 5.3. 设备最终设计参数确定

本研究以安全系数不低于 2.0 为关键设计准则, 同步完成应力与变形分析, 其中应力分析结果符合设计准则, 变形分布满足作业稳定性要求, 最终确定仰拱拼接设备的关键性能参数如表 2 所示:

Table 2. Design parameters of key components for the invert assembly equipment  
表 2. 仰拱拼装设备关键构件设计参数表

构件名称	截面尺寸/型号	高度	最大应力	安全系数
框架下梁	30 × 40 cm	根据上框架尺寸选择为 4.4 m	170.6 MPa	2.02
框架横梁	20 × 25 cm	据隧道长度及工作情况选择为 7 m	109.4 MPa	3.15
框架立柱	10 × 10 cm	根据隧道高度选择为 4.3 m	89.6 MPa	3.85
行车梁	32b 型号工字钢	根据配重块和仰拱力矩平衡选择 5.2 m	121.13 MPa	2.85
滑轨	10 × 10 cm	根据框架横梁尺寸定为 7 m	121.95 MPa	2.83

## 6. 装配式仰拱施工工艺

装配式仰拱施工需适配隧道工况与拼装设备,涉及多道关联工序,工艺合理性直接影响拼装质量、效率及结构安全。隧道装配式仰拱与不规则开挖面的连接核心通过“开挖面整形 + 装配式螺栓调平锚固 + 回填注浆密贴传力”的工序,解决开挖面不规则带来的力传递不均、缝隙漏浆/沉降问题,同时满足隧道结构抗剪、抗浮、整体协同的要求。

### 6.1. 拼装前基底处理

钻爆法施工的隧道底部,受开挖精度影响,开挖面易出现凹凸不平和超欠挖,直接放置预制块将影响拼装精度与受力均匀性,通过欠挖爆破、超挖回填和基底置换等方法进行处理。

仰拱开挖不应出现欠挖,石质坚硬时个别突出部位(每  $1 \text{ m}^2$  不大于  $0.1 \text{ m}^2$ )隆起量应小于  $5 \text{ cm}$ ;欠挖部位采用风镐/小药量爆破修凿,确保装配式仰拱放置尺寸足够。较大超挖部位,采用不低于仰拱混凝土强度的喷射混凝土进行回填,混凝土需喷射密实,避免空洞。如果仰拱基底为软弱土层,或膨胀土等不良地质,需进行换填浇筑不低于仰拱强度的混凝土,达到承载力要求后再进行施工。喷射混凝土平整度控制标准为:使用  $2 \text{ m}$  尺检测局部凹凸度限值  $\leq 3 \text{ cm}/2\text{m}$ 。

### 6.2. 仰拱预制件就位与拼装固定

仰拱基底处理完成后对仰拱预制块进行拼装。仰拱预制块采用底部锚固方式进行固定,预制块间采用螺栓连接,并预留止水带安装槽,预制块定位偏差应满足设计要求,轴线偏移允许偏差  $\leq 2 \text{ mm}/\text{m}$ 。锚固方式如下:

预制仰拱底面预埋抗剪键(凸榫) + 预埋钢筋接驳器,垫层施工时预留钢筋孔,现场将  $\Phi 22$  带肋钢筋一端插入接驳器、一端锚固在仰拱基岩或混凝土中,形成抗剪抗拔锚固点;灌注强度  $\geq \text{M50}$  的高强无收缩灌浆料。

### 6.3. 张拉控制与回填注浆

仰拱拼装完成后,按照设计要求分段张拉纵向预制块。张拉前需复核仰拱预制块标高,确保受力条件均匀。张拉控制应力取值应满足设计及规范要求,采用应力控制与伸长值双控方法,实测预应力筋伸长值与理论计算值的偏差不超过  $\pm 6\%$ 。张拉顺序遵循对称原则,从中部预制块开始逐步向两侧扩展,避免偏载受力。

张拉力稳定后,立即通过预留注浆孔向仰拱块与基底之间的空隙实施拱底注浆,以消除施工残余空隙,实现基底密贴与整体承载,同时增强抗浮能力。注浆材料选用高强无收缩灌浆料,压力控制在  $0.3\sim 1.0 \text{ MPa}$ ,由低向高逐级加压,以排气孔连续出浆且稳压  $2 \text{ min}$  作为终止条件。注浆完成后采用小锤敲击法检查密实度,发现空洞及时补注。

周边间隙回填时,构件与围岩、边墙间的缝隙灌注同种灌浆料,注浆方向从中间向两侧推进,排气孔出浆后封堵以确保密实。预制块拼装缝内填塞遇水膨胀止水条,含螺栓处防水垫圈、注浆孔封堵后的防水砂浆抹面的所有连接节点均纳入隧道整体防水体系。单环拼装完成后,设备沿轴线前移,进入下一循环施工。

### 6.4. 施工质量保障

装配式仰拱施工涉及预制、吊装、拼装、锚固、注浆等多道工序,存在多项潜在技术风险。为保证施工质量,应在施工前进行风险识别并制定相应的防控措施。

### (1) 预制块破损防控

在吊装、运输及拼装过程中，大体积的整体式仰拱块易在边角部位发生损伤或结构开裂。应在关键受力部位及吊点处设置加强钢筋网或箍筋；严格检查吊具、吊钉及连接件的完好性；运输阶段采用柔性垫层减小振动与冲击；拼装时确保平稳放置，严禁磕碰与硬碰。

### (2) 定位偏差防控

基底平整度不足或拼装精度控制不当，易造成预制块轴线偏移、标高偏差及缝隙超限，影响拼装精度与传力路径。基底处理完成后，应依照设计要求进行全站仪与水准仪的逐点复核；在拼装阶段应用激光测距仪及定位导向架进行辅助定位，实施过程性监测，发现偏差时及时纠正。

### (3) 注浆不密实防控

注浆压力不足或注浆顺序不当，可能导致间隙填充不密实、形成空洞，进而影响传力、防渗功能及防水效果。在施工前应开展工艺性试验以确定最佳注浆压力与浆液配比；注浆过程中采用流量计与压力表进行实时监控，采用由低向高、由远及近的注浆顺序；完成注浆后利用地质雷达或敲击等无损检测方法评估密实度，发现空洞时及时补注。

### (4) 张拉控制

张拉应力控制不准确或张拉顺序不合理，可能导致预制块受力分布不均，产生局部过载或结构损伤。应对张拉设备进行现场标定，确保油压读数准确；按照设计应力等级分级张拉并以伸长量对照核验，预应力筋偏差若超过 $\pm 6\%$ ，应暂停张拉并查明原因；张拉顺序需严格遵循对称原则，避免产生非对称受力。

## 7. 结论

本文针对钻爆法公路隧道提出的装配式衬砌仰拱拼装设备及工艺，通过仰拱块预制与机械化拼装的有机结合，解决传统工艺的固有缺陷。主要成果如下：

(1) 针对隧道模块化仰拱，研发了一种仰拱模块拼装设备。该设备在仰拱拼装期间可保持隧道中部通行功能，实现“拼装与通行同步”，有效避免传统施工造成的交通中断问题。同时，设备用钢量少、造价低且维护便捷，在确保功能达标前提下，显著降低了材料与运维成本。

(2) 通过对不同尺寸及仰拱模块在不同行车梁位置的数值模拟，明确了各工况条件下的结构受力、变形和安全系数，据此确定了仰拱模块拼装设备的各结构构件的材料与尺寸。

(3) 根据仰拱模块拼装设备，提出了一种装配式仰拱模块施工工艺。

本研究成果为装配式衬砌提出了一种隧道仰拱模块装配设备及施工方法，可为钻爆法公路隧道装配式衬砌的推广应用提供参考。后续可结合现场开展试验研究，进一步验证研究结果，推动隧道装配式衬砌装备技术的发展。

## 致 谢

本文依托万开高速公路铁峰山隧道工程开展研究，研究工作由中铁长江交通设计集团有限公司、西南交通大学、西南石油大学及中铁九局集团有限公司共同协作完成，在此谨向各单位致以诚挚谢意。

衷心感谢冷彪副教授、张俊儒教授、黄云副教授在研究方法与设计方面给予的悉心指导；感谢李强、张孝伟、叶福生、徐剑、杨跃飞等同仁在工程背景与现场数据方面提供的宝贵支持。在研究思路凝练、数据分析与文稿整理过程中，各位合作者给予了充分信任与帮助，使本文得以顺利完成，谨一并表示由衷感谢。

最后，感谢文中引用文献的所有作者，前人的研究成果为本研究提供了重要参考与启发。

## 参考文献

- [1] Conforti, A., Trabucchi, I., Tiberti, G., Plizzari, G.A., Caratelli, A. and Meda, A. (2019) Precast Tunnel Segments for Metro Tunnel Lining: A Hybrid Reinforcement Solution Using Macro-Synthetic Fibers. *Engineering Structures*, **199**, Article ID: 109628. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109628>
- [2] Aggarwal, V. and Singla, M. (2016) Lining Prefabricated Dowel(s) with Fibre Reinforced Resin Composite. *Australian Endodontic Journal*, **43**, 23-28. <https://doi.org/10.1111/aej.12160>
- [3] Rabiei, M. and Bakhshi, M. (2023) Design and Construction of Internal Structures of Montreal REM Airport Tunnel Using Precast Steel Fiber Reinforced Concrete Units. In: Anagnostou, G., et al., Eds., *Expanding Underground—Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*, CRC Press, 870-877. <https://doi.org/10.1201/9781003348030-105>
- [4] 李红成. 明挖法装配式地铁车站施工技术研究[J]. 绿色环保建材, 2021(9): 125-126.
- [5] 周铮, 徐文玮, 周蓉峰等. 预制+现浇叠合拱壳工艺及其在轨道交通地下车站中的应用[J]. 隧道与轨道交通, 2021(S1): 35-37.
- [6] 青岛首个装配式地铁车站开工[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(3): 425-425.
- [7] 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.
- [8] 杨书江. 秦岭 I 线隧道仰拱预制块施工技术[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2003, 30(5): 65-66.
- [9] 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]. 中国铁道科学研究院, 2020.
- [10] 胡瑞青. 矿山法隧道超小净距穿越既有地铁结构影响分析[J]. 铁道标准设计, 2025, 69(8): 142-151.
- [11] 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.
- [12] 张金伟, 罗富荣, 杨斌斌, 王宁, 徐骞. 地铁矿山法隧道装配式二次衬砌配套拼装需求条件研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(3): 364-371.
- [13] 张龙, 高菊茹, 张博. 铁路隧道仰拱衬砌施工技术研究综述[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S1): 164-171.
- [14] 刘清泉. 空中翻转技术在仰拱预制块生产中的应用[J]. 隧道建设, 2011, 31(5): 629-633+642.
- [15] 章远方. 预制仰拱边箱涵吊机设计及应用研究[J]. 国防交通工程与技术, 2020, 18(6): 23-25+19+33.