

文章编号: 1005-0523(2024)06-0043-07



## 公铁立交铁路槽形梁桥改扩建方案研究

薛飞

(中国铁路南昌局集团有限公司, 江西 南昌 330002)

**摘要:**【目的】为探究复杂工况下铁路槽形梁的合理建设方案, 针对梁桥改扩建工程展开研究。【方法】以跨越某高速公路的铁路槽形梁桥改扩建工程为研究对象, 在面临改扩建前后主梁空间位置重合、保通等复杂工况下, 从主梁结构受力、施工技术及交通导改3个方面, 对原址高位现浇后落梁和异位预制顶推2种方案进行了详细的对比分析与研究。【结果】研究表明: 主梁的各项安全系数及应力验算指标均低于相应限值, 满足规范要求, 其中, 异位预制顶推方案的应力储备相对较高。原址高位现浇后落梁方案存在落梁高度大、施工技术要求高的问题, 而异位预制顶推方案则具有施工风险低、对桥下交通影响小的优势。在顶推过程中可充分利用既有框架边墙作为临时墩, 实现对既有结构的最大化利用。在施工过程中, 2种方案均需采取交通导改措施, 但理论上不用中断桥下交通。【结论】2种方案均能满足保通要求, 但异位预制顶推方案在应力储备、安全系数及施工风险方面相较于原址高位现浇后落梁方案表现出明显优势。

**关键词:** 铁路槽形梁桥; 改扩建工程; 保通; 顶推法; 高位落梁

中图分类号: U448

文献标志码: A

本文引用格式: 薛飞. 公铁立交铁路槽形梁桥改扩建方案研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(6): 43-49.

## Study on the Reconstruction and Expansion Scheme of Railway Trough Beam Bridges for Road-Railway Overpass

Xue Fei

(China Railway Nanchang Group Co., Ltd., Nanchang 330002, China)

**Abstract:** 【Objective】 In order to deeply explore the reasonable construction scheme of railway trough beam bridges under complex construction conditions, this paper conducted a systematic study on reconstruction and expansion scheme for such bridges. 【Method】 Taking the reconstruction and expansion project of a railway trough beam bridge overpassing an expressway as the research object, and facing the complicated construction conditions such as the overlap of the main beam spatial position before and after the reconstruction and the need to maintain traffic, this study conducted a detailed comparative analysis of the structural load-bearing capacity, construction techniques, and traffic diversion for the high-level cast-in-place followed by beam lowering method and the off-site precast incremental launching method. 【Result】 The research results indicate that the safety factors and stress calculation indicators for the trough beams are all within the acceptable thresholds, meeting the standards. Particularly, the off-site precast incremental launching scheme exhibits higher stress reserves. The high-level cast-in-place followed by beam lowering scheme has a greater beam lowering height and stricter construction requirements, while the off-site precast incremental launching method has lower risks during construction and less impact on the traffic under the bridge. The segmented incremental launching method can effectively

收稿日期: 2023-02-28

solve the problem of jacking difficulty for variable height girders. During the incremental launching process, the side walls of existing frames can be utilized as temporary piers, maximizing the use of existing structures. Both schemes require the implementation of traffic diversion measures during the construction process, but theoretically, there is no need to interrupt the traffic under the bridge. **【Conclusion】** Both schemes can meet the requirements for maintaining traffic, and the off-site precast incremental launching method demonstrates significant advantages over the high-level cast-in-place followed by beam lowering method in terms of stress reserves, safety factors, and construction risks.

**Key words:** railway trough beam bridge; reconstruction and expansion engineering; traffic maintenance; incremental launching method; high-level lowering beam

**Citation format:** XUE F. Study on the reconstruction and expansion scheme of railway trough beam bridges for road-railway overpass[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(6): 43–49.

**【研究意义】**槽形梁作为下承式桥梁,具有建筑高度低、截面空间利用率高等显著优点。在桥下净空受限的情况下,槽形梁仍能满足铁路和环境的综合要求,具有较强的竞争力,并在既有铁路桥梁的改扩建工程中展现出良好的应用前景<sup>[1-3]</sup>。然而,槽形梁的结构受力复杂,建设技术要求高,在实际改扩建工程中常面临保通、原址施工条件受限等复杂工况,槽形梁的改扩建方案研究具有重要意义。

**【研究进展】**目前学界主要采用有限元法分析槽形梁的空间力学特性<sup>[4]</sup>。田杨等<sup>[5-6]</sup>利用 ANSYS 等软件建立三维实体模型分析槽形梁空间力学行为,结果表明,三维实体有限元模型可准确反映槽形梁的纵、横向应力分布,但计算量大且建模复杂。魏亮道等<sup>[7-9]</sup>采用 Midas Civil、BSAS 等软件建立杆系模型对槽形梁进行分析,结果表明,采用杆系模型在横向分析方面存在不足。在保通、改建前后主梁空间位置重合等复杂工况下,槽形梁桥的施工工艺同样备受关注,传统施工方案有原址支架现浇法<sup>[10-11]</sup>、架桥机法<sup>[12]</sup>。原址支架现浇法的模板会侵占道路净空,而架桥机法需要架梁(槽)机等大型设备,导致桥下安全压力大,不利于保通。曹虹等<sup>[13]</sup>提出了大跨连续槽形梁的单 T 构悬臂工艺,在施工过程中确保了桥下轨道交通的正常运营。梁月胜<sup>[14]</sup>提出了简支槽形梁原址高位现浇后落梁工艺,通过顶升系统将主梁模板顶起至高于设计标高位置现浇,再利用顶升系统将主梁逐级落梁至原位,此法可满足桥下保通、限高要求,但高位落梁施工技术要求较高,安全压力大。顶推施工属于无支架施工

技术<sup>[15-18]</sup>,在台后预制场地浇筑梁体,再利用步履式千斤顶、滑道等顶推设备将梁体顶推就位,顶推过程对于桥下线路影响小,在跨线槽形梁桥改扩建中具有广阔的应用前景。

**【创新特色】**公铁立交铁路槽形梁桥改扩建工程建设条件复杂,直接拆除既有桥梁获得原址施工条件较为困难,而异位施工方案在桥梁改扩建工程中具有较强竞争力。本文提出了原址高位现浇后落梁和异位预制顶推方案,并从受力、施工技术等角度研究异位施工方案在桥梁改扩建工程中的应用的可行性。**【关键问题】**本文以某上跨高速公路的铁路槽形梁改扩建工程为研究对象,在保通、改扩建前后主梁空间位置重合等工况下,对比分析原址高位现浇后落梁和异位预制顶推 2 种方案的主梁受力性能、施工特点,以及交通导改措施,旨在得出合理的桥梁改扩建方案,以为国内类似工程提供借鉴和参考。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

某高速公路为双向 4 车道,采用  $2 \times 14.2$  m 框架桥下穿矿业专用铁路。改扩建后,高速公路为双向 8 车道,路基宽度达到 41 m,原框架桥孔宽度无法满足扩建要求,需拆除框架桥,并在原址新建 1 孔铁路槽形梁桥。如图 1 所示,新建铁路桥为 1 孔 56 m 预应力混凝土简支等高槽形梁,梁高 4.8 m,支点处道床板局部加厚梁高 5.6 m,桥宽度 9.5 m,腹板内侧净宽 7.7 m,桥下最小净空 5.7 m,下部结构采用重力式

桥台, 钻孔灌注桩基础。本项目征得铁路管理部门许可, 临时拆除、移运既有桥上及两侧部分铁路, 待桥梁改扩建完成后恢复铁路。

从图1(a)中可知, 新建槽形梁道床板与原框架顶板空间位置重合, 不存在原址现浇施工条件。为满足充分利用既有结构、保证桥下交通要求, 提出原址高位现浇后落梁和异位预制顶推2种主梁建造方案。

### 1.2 主要设计标准

矿业专用线为内燃机车牵引铁路, 单线、有砟轨道, 设计通行速度 80 km/h, 铁路槽形梁设计使用年限为 100 a。主梁跨径  $L$  为 56 m, 采用 C60 混凝土, 其抗压极限强度  $f_c$  和抗拉极限强度  $f_a$  分别为 40, 3.5 MPa, 梁体自重按实际断面计, 梁体容重 26 kN/m<sup>3</sup>, 桥上二期恒载按 87 kN/m 计算。列车竖向静活载采用客货共线铁路列车荷载图式(ZKH, Z为中国, K为客运列车, H为货运列车), 活载动力系数为 1.118。混凝土温差应力按《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(TB 10092—2017) 计算, 纵向温度荷载按道床板升温 5 ℃ 考虑, 整体按升降温 25 ℃ 考虑。

## 2 原址高位现浇后落梁方案

### 2.1 原址高位现浇后落梁方案设计

本方案通过落梁支架、顶升装置、临时支撑等将槽形梁现浇模板位置抬升, 使得槽形梁在设计标高上方、高于框架顶板的位置完成浇筑。待主梁浇筑完成后, 再逐孔拆除既有框架桥, 之后利用顶升装置将主梁逐级落架至设计位置, 施工过程示意图见图2。

槽形梁高位现浇过程中, 既有框架桥未拆除, 桥下交通维持双向4车道限速通行, 如图2(a)。既有框架逐孔拆除过程中需要临时组织疏导交通车辆, 如图2(b)。拆除一孔框架桥时, 将交通车辆导改至另一孔框架, 由原来双向4车道压缩为双向2车道通行, 单孔框架拆除时间为24~48 h, 拆除第二孔框架时, 交通导改至框架已拆除完成的路面通行, 仍为双向2车道, 待2孔框架拆除工作完成, 即可在原位恢复双向4车道通行, 施工过程不中断交通。既有框架桥拆除后, 通过主梁两端的顶升装置将槽形梁逐级落放至设计高程, 再进行槽形梁桥面及桥下路面改造等工程, 如图2(c), 图2(d)。

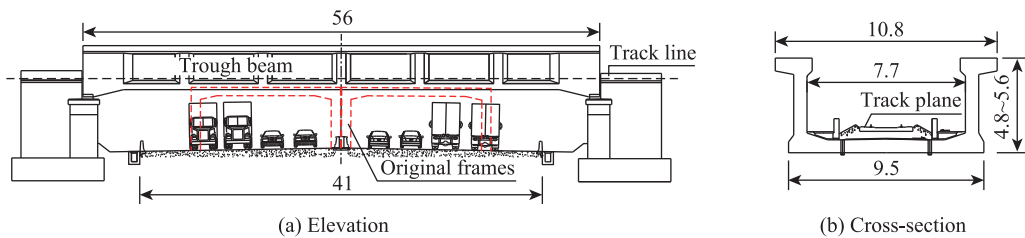


图1 铁路槽形梁桥(单位:m)  
Fig. 1 Railway trough beam bridge (Unit: m)

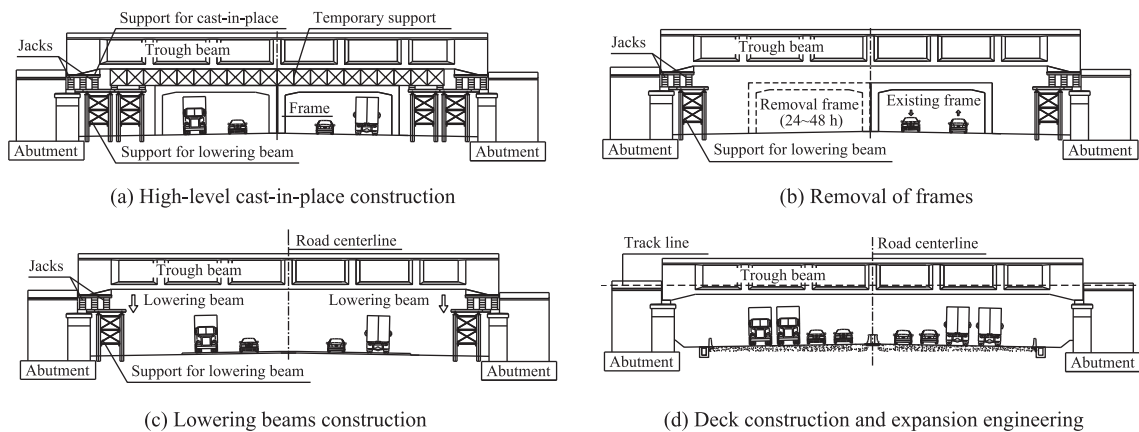


图2 原址高位现浇后落梁施工过程示意

Fig. 2 Schematic illustration of the construction process of high-level cast-in-place followed by beam lowering technique

## 2.2 结构计算分析

槽形梁纵向计算分析采用Midas Civil有限元软件,利用梁单元建立全桥结构离散模型,共计34个单元,35个节点。在施工阶段,通过临时约束模拟现浇支架,成桥后拆除。对全桥有限元模型进行施工、运营阶段验算,采用主力、主力+附加力荷载组合,按最不利荷载组合进行验算。运营阶段主梁截面的最小安全系数如表1所示,主梁各项安全系数均符合规范要求。

最不利荷载组合下主梁各阶段应力及变形结果见表2。由表2可知:在施工及运营阶段全截面均未出现拉应力,满足全预应力混凝土构件设计要求;剪应力、主应力均小于各自的限值,说明主梁应

力验算满足规范要求;ZKH静活载作用下主梁跨中位移和梁端转角均小于变形限值,主梁刚度符合规范要求。

表1 运营阶段截面最小安全系数  
Tab.1 Minimum safety factor of sections in the service stages

Checking items	Load combination	Factor	Threshold
Bend strength safety factor	Main force	2.67	$\geq 2.2$
	Main & other force		$\geq 1.98$
Shear strength safety factor	Main force	2.49	$\geq 2.2$
	Main & other force		$\geq 1.98$
Crack resistance safety factor	Main force	1.52	$\geq 1.32$
	Main & other force		

表2 主梁各阶段应力及变形结果

Tab.2 The stress and deformation results of the trough beam at different stages

Strain	Checking items	Result	Threshold
Concrete stress	Maximum compressive stress during construction phase/MPa	10.4(Top), 6.3(Bottom)	$\leq 0.75 f_c$
	Minimum compressive stress during construction phase/MPa	2.8(Top), 2.2(Bottom)	$\geq 0$
	Maximum compressive stress under service load/MPa	15.4(Top), 0.5(Bottom)	$\leq 0.5 f_c$
	Minimum compressive stress under service load/MPa	2.8(Top), 0.5(Bottom)	$\geq 0$
	Maximum shear stress under service load/MPa	2.18	$\leq 0.17 f_c$
	Maximum principal tensile stress under service load/MPa	1.5	$\leq 0.5 f_{ct}$
	Maximum principal compressive stress under service load/MPa	16.7	$\leq 0.6 f_c$
Deformation	Mid-span deflection of trough beam under ZKH static live load/mm	8.43(L/6 643)	$\leq 37.3 (L/1 500)$
	Rotation angle at trough beam end	0.46‰	$\leq 3‰$

## 2.3 方案特点

在施工技术方面,本方案现浇施工方便,槽形梁整体性能良好,但本方案需要进行高位落梁作业。主梁两端共设置4个顶升点及4个转换点,单个顶升点计算理论反力值高达6 000 kN,需采用相应吨位的千斤顶将槽形梁逐级卸落至设计高程,此过程施工难度大,整个落梁过程都应进行施工监控,对超出允许偏差的部分及时采用千斤顶进行调整。在交通导改方面,逐孔拆除框架桥时需进行交通导改,车道数量由原双向4车道压缩至2车道,限速通行,但满足保通要求。

## 3 异位预制顶推方案

### 3.1 异位预制顶推方案设计

在台后设置预制场地浇筑主梁,再通过顶推法将主梁顶推就位,可最大限度降低对桥下高速公路交通车辆的影响,施工风险低。预应力混凝土槽形

梁跨径56 m,对全桥顶推存在顶推力过大、临时设施多等问题,同时为利用既有结构,本方案沿桥纵向将主梁分为顶推段和后浇段,顶推段在预制场地现浇,张拉部分预应力钢筋,安装导梁后进行顶推,既有待拆框架边墙可作为临时墩;主梁顶推就位后,拆除导梁,在既有框架两侧搭设支架浇筑后浇段,待后浇段达到设计强度后,将主梁支承于桥台,再拆除现浇支架、逐孔拆除框架桥边墙,最后进行桥面施工、桥下既有路线改扩建。

本方案施工过程大致如图3所示。既有框架桥分两阶段拆除,如图3(a),图3(d)。顶推前逐孔拆除框架桥顶板,待拆框架桥边墙保留并作为临时墩,该过程中可调整既有框架边墙顶标高,使步履式千斤顶顶面标高接近于成桥后梁底设计标高,从而降低落梁高度或无须落梁工序。顶推完成后再逐孔拆除框架桥边墙,两个阶段均需要进行交通导改,高速公路由双向4车道压缩成双向2车道通行,

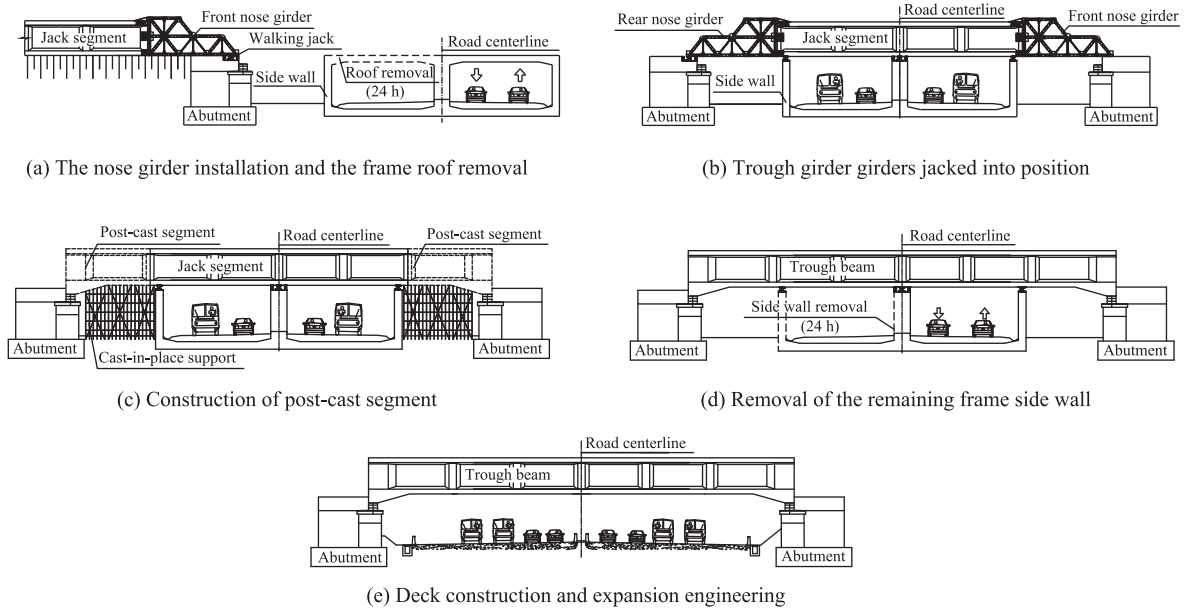


图3 异位预制顶推施工过程示意

Fig. 3 Schematic illustration of the construction process of the off-site precast incremental launching method

其余施工阶段高速公路为双向4车道通行,框架顶板、边墙拆除持续时间约24 h。相对于原址高位落梁方案,异位预制顶推方案施工未涉及落梁工序,降低施工风险,同时利用既有框架桥边墙,可减少临时结构工程量。

### 3.2 结构计算分析

本梁为56 m预应力混凝土简支梁,其中顶推段长度为35.6 m,两侧后浇段长度各为10.2 m,桁架式钢导梁长度为12.6 m。顶推施工过程中,主梁沿桥纵向的空间位置不断变化,边界条件也相应发生改变,通过改变支座位置来模拟主梁顶推过程。为保证槽形梁顶推段在施工期间上、下缘均处于受压状态,在主梁上缘增设6束临时预应力钢筋,顶推完工后抽除并对管道灌浆。结构分析时对主梁进行施工、运营阶段的验算,采用主力、主力+附加力荷载组合,按最不利荷载组合进行验算。槽形梁在顶推过程中,截面压应力极值如图4所示。

由图4可知,在整个顶推过程中,槽形梁均处于受压状态,上缘最大压应力值为8.5 MPa,符合要求。下缘压应力在顶推起始阶段压应力为0.3 MPa,原因是在施工阶段计算模拟时,仅在梁端设置了临时支座,导致计算结果偏保守。实际施工时,应根据步履式千斤顶的位置考虑临时支座。运营阶段主梁截面的最小强度、抗裂安全系数如表3所示。

由表3可知,各安全系数均大于控制条件,说明

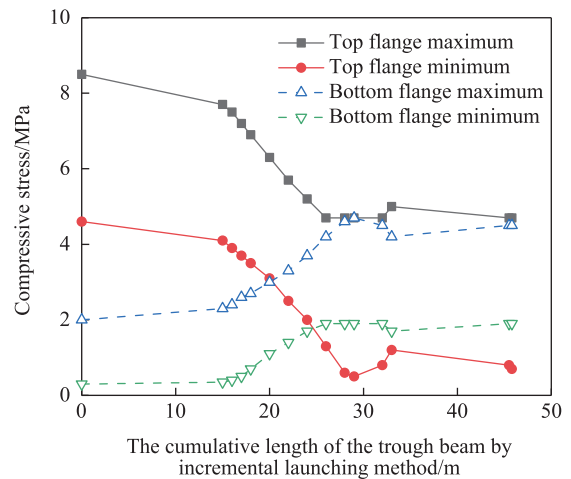


图4 施工阶段槽形梁截面最大/最小压应力

Fig. 4 The maximum/minimum compressive stress of trough beam section during construction phase

表3 运营阶段截面最小安全系数

Tab.3 Minimum safety factor of sections in the service stages

Checking items	Load combination	Factor	Threshold
Bend strength safety factor	Main force	2.94	$\geq 2.20$
	Main & other force		$\geq 1.98$
Shear strength safety factor	Main force	3.10	$\geq 2.20$
	Main & other force		$\geq 1.98$
Crack resistance safety factor	Main force	1.59	$\geq 1.32$
	Main & other force		

主梁安全系数符合规范要求。运营阶段主梁应力及变形结果见表4。

由表4可知,主梁全截面处受压状态,符合全预应力混凝土构件的设计要求;剪应力、主应力均

小于各自的控制条件,主梁抗剪、抗裂性能均满足规范要求;在ZKH静活载作用下主梁跨中挠度和梁端转角位移小于控制条件,主梁刚度符合规范要求。

表4 主梁各阶段应力及变形结果

Tab.4 The stress and deformation results of the trough beam at different stages

Strain	Checking items	Result	Threshold
Concrete stress during operation phase	Maximum compressive stress/MPa	13.6 (top), 9.7 (bottom)	$\leq 0.5 f_c$
	Minimum compressive stress/MPa	2.30 (top), 1.8 (bottom)	$\geq 0$
	Maximum shear stress/MPa	2.18	$\leq 0.17 f_c$
	Maximum principal tensile stress/MPa	1.5	$\leq 0.5 f_{ct}$
	Maximum principal compressive stress/MPa	16.7	$\leq 0.6 f_c$
Deformation	Mid-span deflection of trough beam under ZKH load/mm	9.64(L/5 809)	$\leq 37.3 (L/1 500)$
	Rotation angle at trough beam end	0.52‰	$\leq 3‰$

### 3.3 方案特点

本方案在分阶段拆除框架顶板、边墙时需要进行交通导改,桥下交通由4车道变为2车道通行,而主梁的顶推过程并不影响桥下交通,且施工风险低,故本方案也不用中断桥下交通。顶推施工过程中,梁体承受交替变化的正、负弯矩,需布置临时预应力筋、前导梁和临时墩等临时措施,导致用钢量相对增加。但是,临时墩可由既有待拆框架桥边墙充当,从而减少临时结构工程量。

## 4 结论

1) 在改建前后主梁空间位置重合、保通等复杂工况下,原址高位现浇后落梁和异位预制顶推方案都能够有效建设槽形梁。

2) 经有限元软件建模分析,2种方案的槽形梁在强度、刚度、抗裂性能等指标均符合规范要求。其中异位预制顶推方案主梁的应力储备和安全系数相对较高。

3) 原址高位现浇后落梁方案的施工技术要求高,高位落梁作业存在难度大、风险高的特点,而异位预制顶推方案落梁高度小,安全性能高。

4) 异位预制顶推方案可充分利用既有框架桥边墙作为临时墩,减少临时结构工程量。在异位预制顶推方案中,若在主梁顶推段两端设置劲性骨架,则劲性骨架不仅具备导梁功能,同时也可作为承力结构,参与主梁后浇段、成桥及运营阶段的受力,从而避免设置落地支架、减少临时设备,节约工期。

### 参考文献:

- [1] 刘全民, 张智凯, 饶露, 等. 铁路连续槽形梁桥静力特性分析[J]. 桥梁建设, 2023, 53(4): 70-77.  
LIU Q M, ZHANG Z K, RAO L, et al. Analysis of static property of continuous trough girder railway bridge[J]. Bridge Construction, 2023, 53(4): 70-77.
- [2] 薛飞, 张智凯, 黄梁, 等. 铁路连续槽形梁桥剪力滞效应分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15649-15655.  
XUE F, ZHANG Z K, HUANG L, et al. Analysis of shear lag effect in railway continuous channel girder bridge[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36), 15649-15655.
- [3] CHEN S G, DIAO B, GUO Q Q, et al. Experiments and calculation of U-shaped thin-walled RC members under pure torsion[J]. Engineering structures, 2016, 106: 1-14.
- [4] 吴天群, 张智凯, 朱华中, 等. 轨道交通槽形梁桥静动力特性研究综述及展望[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(11): 83-86.  
WU T Q, ZHANG Z K, ZHU H Z, et al. A review and prospect of static and dynamic characteristics of rail transit channel girder[J]. Railway Standard Design, 2023, 67 (11): 83-86.
- [5] 田杨, 邓运清, 黄胜. 双线铁路曲线简支槽形梁的空间分析[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(7): 24-28.  
TIAN Y, DENG Y Q, HUANG S Q. The spatial analysis of curved simple trough girder with two-lane railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(7): 24-28.
- [6] 梁岩, 毛瑞敏, 李杰, 等. 城市轨道交通高架工程中槽形梁吊装施工过程的力学特性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(8): 1-5.

- LIANG Y, MAO R M, LI J, et al. Analysis of mechanical properties in the hoisting construction process of groove beam for urban rail transit viaduct[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(8):1-5.
- [7] 魏亮道. 青岛市红岛—胶南城际轨道交通先张U梁设计[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(7): 101-107.  
WEI L D. The design of pre-tensioned U-girder of Red-island to Jiaonan intercity rail transit in Qingdao[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(7): 101-107.
- [8] 刘红绪. 青岛蓝色硅谷城际轨道交通U形梁的设计[J]. 铁道建筑, 2016, 56(2): 23-26.  
LIU H X. Design on U-shaped girder of blue silicon valley[J]. Railway Engineering, 2016, 56(2): 23-26.
- [9] 李洪志. 珠三角城际铁路32 m双线简支槽形梁方案研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(12): 62-66.  
LI H Z. Scheme research on 32 m double track simply supported trough girder of Pearl River Delta intercity railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 53(4): 70-77
- [10] 胡国伟. 大跨度薄壁槽形梁支架现浇质量控制技术研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(7): 52-57.  
HU G W. Research on the quality control technology in support cast-in-place of large span thin-walled channel[J]. Journal of railway engineering society, 2018, 35(7): 52-57.
- [11] 徐海钦. 高速铁路预应力混凝土槽形梁落架过程研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.  
XU H X. Analysis of removing temporary supports for prestressed trough girder of high-speed railway[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [12] 刘宏达. 简支钢桁梁桥面板及槽形梁架设结合施工技术[J]. 世界桥梁, 2022, 50(3): 25-31.  
LIU H D. Techniques to install simply-supported steel truss girder and connect concrete deck slabs and trough beam with steel trusses[J]. World Bridge, 2022, 50(3): 25-31.
- [13] 曹虹, 孙九春, 薛武强. 复杂工况下大跨度U形梁悬臂拼装关键技术研究[J]. 公路, 2022, 67(4): 141-146.  
CAO H, SUN J C, XUE W Q. Research on the key technology of cantilever assembly of large span U-shaped beam[J]. Highway, 2022, 67(4): 141-146.
- [14] 梁月胜. 槽型梁跨既有高位道路起顶现浇及落梁施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2014(5): 74-77.  
LIANG Y S. Construction technology on jacking and cast-in-situ and beam landing across the existing higher road and groove beam[J]. Railway Construction Technology, 2014(5): 74-77.
- [15] 赵人达, 张双洋. 桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 32-43.  
ZHAO R D, ZHANG S Y. Research status and development trend on incremental launching construction of bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(2): 32-43.
- [16] 徐春东, 胡洲, 关俊锋, 等. 跨线铁路转体桥施工技术发展综述[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(6): 54-60.  
XU C D, HU Z, GUAN J F, et al. Review on construction technology development of cross-line railway swivel bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 54-60.
- [17] 卫星, 古兴宇, 戴李俊, 等. 轨道交通W型槽梁在顶推施工中时变剪力滞效应[J]. 中国测试, 2021, 47(6): 91-94.  
WEI X, GU X Y, DAI L J, et al. Time-varying shear lag effect of rail transit W-shaped channel girder in incremental launching construction[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(6): 91-94.
- [18] 伍彦斌, 吕茂丰, 殷齐家, 等. 大跨简支钢箱梁顶推及高位落梁施工关键技术[J]. 中外公路, 2024, 44(1): 147-154.  
WU Y B, LU M F, YIN Q J, et al. Key construction techniques for incremental launching and high-level falling of long-span simply supported steel box girder[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1): 147-154.



通信作者: 薛飞(1984—), 男, 研究方向为桥隧结构与路基支挡施工控制。E-mail: 33244932@qq.com。

(责任编辑: 姜红贵)