

适应工业化建造的全预制拼装桥梁设计探索

鲁传安

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 以乌鲁木齐市东进场高架项目为背景, 结合工程特点和工业化建造要求, 探索了预制拼装桥梁的设计优化方法。主要内容包括小箱梁取消跨中横隔板、底板通长等厚设计、顶底板平坡设计以及采用网片化钢筋骨架笼, 桥墩高度模数化设计及截面规格归并、花瓶独柱墩折线形过渡设计、加宽段盖梁标准化设计等。通过采取这些优化措施, 实现了预制构件标准化和生产效率提升。结果表明, 设计优化显著提升了构件预制和装配效率, 为工业化建造在桥梁工程中的应用提供了重要参考。

关键词: 工业化建造; 预制拼装桥梁; 小箱梁; 桥墩; 设计优化

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0119-05

Design and Exploration of Fully Prefabricated and Assembled Bridges for Industrialized Construction

LU Chuanan

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking the Urumqi East Access Elevated Project as the background, combined with the engineering characteristics and industrial construction requirements, the design optimization method of prefabricated and assembled bridges is explored. The main contents include the elimination of mid-span diaphragms in small-box girders, the equal length and thickness design of the bottom slab, the flat-slope design of top and bottom slabs, and the use of mesh-reinforced steel cage structures. The modular design of bridge pier height and the consolidation of section specifications, the zigzag-shaped transition design of flower-vase single-column piers and the standardized design of bent cap in widened sections are carried out. These optimization measures realize the improvement in the standardization and production efficiency of prefabricated components. The results show that the design optimizations greatly enhance the efficiency of component prefabrication and assembly, providing the valuable references for the application of industrialized construction in bridge engineering.

Keywords: industrialized construction; prefabricated and assembled bridges; small box girders; piers; design optimization

0 引言

近年来,随着国家大力提倡绿色低碳高质量发展之路,工业化预制拼装桥梁技术以其高效、环保、低碳的特点,已成为桥梁建造技术发展的重要方向^[1]。

工业化建造核心思想是将桥梁的主要构件如梁、柱、盖梁、防撞护栏等在工厂内预制完成,并通过机械化装配实现快速施工^[2]。这一方式不仅显著缩短了施工工期,还有效提高了工程质量,减少了对环

境的负面影响^[3]。该技术强调模块化、标准化设计和流水线化生产,从而实现桥梁建设的高效和低碳环保目标。本文以乌鲁木齐市东进场高架项目为案例,深入探讨工业化建造在全预制拼装桥梁设计中的应用,以期类似预制拼装桥梁工程实现工业化建造提供设计参考。

1 工程概况

乌鲁木齐市东进场高架道路工程位于乌鲁木齐市新市区一城北片区,西起规划安宁渠路,东接东二环,工程路线总长度约12.9 km,桥梁主线总长约12.7 km。全线设有1座全互通立交、2座部分互通立交以及8对平行匝道。高架主线为城市快速路,设计速度为80 km/h;地面道路为城市主干路,设计速

收稿日期: 2024-12-17

基金项目: 新疆维吾尔自治区‘2+5’重点人才计划资助项目,新疆装配式桥梁设计与施工关键技术研究

作者简介: 鲁传安(1983—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计及工程管理工作。

度为60 km/h。工程所处场地地震基本烈度为8度,地震动峰值加速度为 $0.2g$ 。

该项目采用了全预制拼装桥梁技术,以模块化构件和标准化设计为基础,结合工业化建造理念,实现了桥梁建设的高效和低碳环保目标。主要预制构件包括钢箱梁、小箱梁、盖梁、立柱和防撞护栏,预制装配率超过90%。

2 预制拼装桥梁总体设计

2.1 总体布置

主线高架桥梁标准段采用先简支后连续预应力混凝土小箱梁,标准跨径30 m,小箱梁跨径布置范围为26~31 m,2~4跨1联;主线跨越横向道路节点采用40~50 m左右的简支叠合梁或连续叠合梁。立交匝道大跨径桥梁采用连续钢箱梁结构。为适应工业化预制,提高预制拼装效率,总体布置通过调整跨越道路路口节点跨径,将小箱梁28、29、30 m这3种主要跨径布置占比设计为不低于90%。

高架主线采用标准横断面宽度为24.5 m的快速路设计,双向6车道;地面为双向6车道。高架道路标准横断面布置图见图1。平行匝道标准横断面宽度为8.0 m;立交匝道标准横断面宽度为8.5 m,单向2车道。

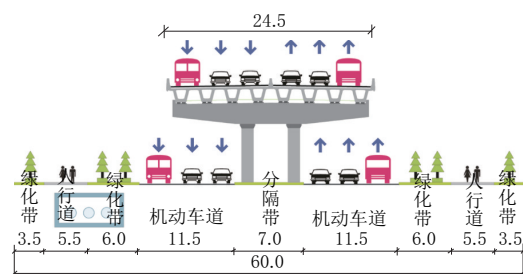


图1 高架道路标准横断面布置图(单位:m)

2.2 上部结构

主线标准段小箱梁宽24.5 m桥由8榀小箱梁组成(见图2),梁距3.056 m,预制梁顶板宽2.806 m。主线高架变宽段由8~14片小箱梁组成,预制梁为变宽梁,通过挑臂变宽,梁距2.5~3.4 m。平行匝道和立交匝道由3榀小箱梁组成,梁距分别为2.65、2.816 m,预制梁顶板宽分别为2.4、2.566 m。小箱梁梁高统一为1.6 m,采用C50混凝土。顶板厚0.2 m,底板厚0.2 m;腹板跨中厚0.19 m,支点处加厚至0.25 m。

主线标准桥宽叠合梁采用多箱单室结构,24.5 m标准桥宽共由6榀箱梁组成,梁距3.94 m,梁高随跨径不同设为2.12~2.74 m。叠合梁端部横梁设置上牛腿,牛腿高度取为与相邻跨小箱梁平齐,以保证桥梁

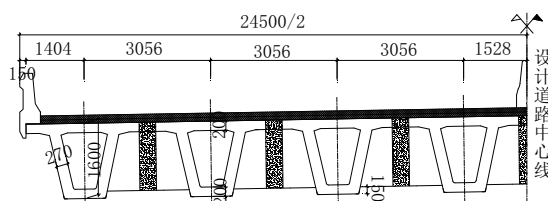


图2 主线标准段小箱梁支点横断面(单位:mm)

立面线形平顺过渡,从而提升景观效果。

立交匝道8.5 m标准桥宽连续钢箱梁采用单箱单室斜腹板结构,箱室宽5.52 m。从景观效果角度考虑,斜腹板斜率保持与相邻混凝土箱梁外腹板轮廓一致。根据跨径不同,梁高随跨径不同设为1.8~2.6 m。

小箱梁与钢结构梁均采用工厂集中预制加工制作,通过平板车运输至现场安装。单榀小箱梁最大吊装重量约112 t,采用双台180 t履带吊机抬吊安装,局部安装条件困难区域采用单台350 t履带吊机单机吊装。钢结构梁采用分段加工制作、运输至现场安装,因运输长宽尺寸控制,单节最大重量约50 t,运至现场采用少支架安装方法。

2.3 下部结构

主线标准段下部结构为双柱式大悬臂盖梁桥墩,加宽段采用3柱或4柱框架墩。其中4柱框架墩为降低温度内力,在设计道路中心处设断缝,将其分为左右2幅门架墩。匝道采用独柱墩,对应上部结构为小箱梁及叠合梁的独柱墩设置盖梁,其余独柱墩为花瓶墩。

主线盖梁为预应力混凝土结构,为减小结构截面尺寸、降低构件重量,采用C60混凝土;匝道盖梁为钢筋混凝土结构,采用C50混凝土。桥墩立柱为钢筋混凝土结构,采用C40混凝土,矩形截面。基础采用 $\phi 1.2$ m钻孔灌注桩。

桥墩立柱和盖梁均采用预制拼装施工工艺。考虑预制厂龙门吊高度限制,单节预制立柱高度控制为12 m,超过12 m立柱采用分节预制拼装,预制立柱最大吊装重量120 t。主线标准段盖梁长23.33 m,宽2.2 m,高2.5 m,重量258 t,采用整体预制拼装;主线加宽段盖梁采用分段预制,通过湿接带连接成整体。主线盖梁因重量较大,采用双台350 t履带吊机抬吊安装(见图3);桥墩立柱采用单台260 t履带吊机吊装。

2.4 预制构件连接

预制构件连接技术是发展全预制拼装桥梁的关键。目前国内预制小箱梁连接主要有普通混凝土连接、高强度钢纤维混凝土连接和超高性能混凝土连



图3 盖梁双台履带吊机吊装

接这 3 种技术^[1]。

普通混凝土连接即湿接缝采用与预制梁同等标号混凝土连接,接缝宽度一般约为桥面板主筋直径的 30 倍,同时钢筋需焊接连接;高强度钢纤维混凝土连接即湿接缝采用混凝土标号高于预制梁的钢纤维混凝土,接缝宽度约为桥面板主筋直径的 15~20 倍,钢筋无须焊接,但相邻预制梁预埋钢筋需采用 U 形钢筋并搭接形成环形;超高性能混凝土连接即湿接缝采用超高性能混凝土(UHPC)连接,接缝宽度约为桥面板主筋直径的 10 倍,且钢筋无须焊接和 U 形钢筋搭接,仅交错搭接即可。综合比选,东进场高架预制小箱梁采用 UHPC 连接(见图 4)。UHPC 湿接缝宽度 250 mm,根据新疆地标《超高性能混凝土检验标准》(DB65/T 8014—2024)^[4],小箱梁连接用 UHPC 采用 UC120 级,其抗拉性能为应变硬化 UT II 型。

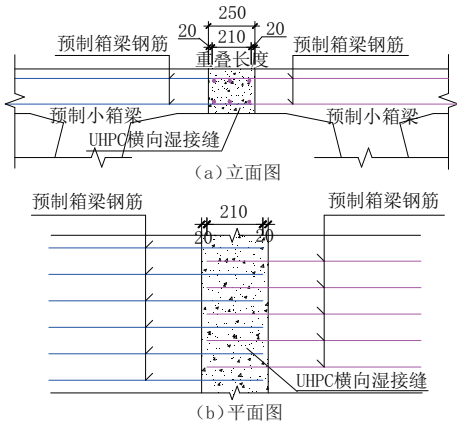


图4 采用 UHPC 技术连接预制小箱梁(单位:mm)

桥墩预制构件连接目前国内主要有灌浆套筒、灌浆金属波纹管 and 超高性能混凝土这 3 种连接技术。

灌浆套筒和灌浆金属波纹管连接技术是将预制构件预留受力主筋插入待连接构件预埋的钢筋套筒或金属波纹管中,然后灌注高强无收缩水泥灌浆料来实现连接。灌浆套筒长度一般不小于 20 倍被连接钢筋直径,金属波纹管长度一般不小于 24 倍被连接钢筋直径。在国内工程案例中,这 2 种连接

方式均适用于受力主筋为单筋的状况,且对预埋钢筋、套筒及金属波纹管精度要求高,一般不得超过 $\pm 2\text{ mm}$ 。超高性能混凝土连接是将预制构件受力主筋搭接连接,然后灌注超高性能混凝土来实现构件间的连接。其中钢筋搭接长度根据钢筋直径不等,一般不小于 10~12 倍被连接钢筋直径。这种连接方式适用于受力主筋为束筋的状况,且对预埋钢筋精度要求相对较低,容错精度可达 $\pm 2\text{ cm}$ 。

桥墩预制构件 3 种连接方式比选表见表 1。

表 1 桥墩预制构件 3 种连接方式比选表

比选项目	构件连接方式		
	灌浆套筒	灌浆金属波纹管	超高性能混凝土
连接锚固长度	中	长	短
是否适用束筋	否	否	是
施工速度	快	快	快
钢筋预埋精度/mm	不大于 ± 2	不大于 ± 2	不大于 ± 20
经济性	1.05	1.03	1.00

乌鲁木齐市东进场高架位于地震基本烈度 8 度区域,抗震性能要求高。桥墩立柱采用束筋配筋方式,根据超高性能混凝土连接预制拼装桥墩抗震性能试验结果^[5],该连接技术拼装桥墩抗震性能良好,最终破坏模式为非超高性能混凝土连接区弯曲破坏,因此该工程桥墩预制拼装采用超高性能混凝土连接。桥墩立柱与承台及盖梁采用扩头形式^[6];高度大于 12 m 的立柱分节段拼装连接采用环缝形式^[6]。

3 适应工业化建造设计要点^[7]

桥梁工业化建造的内涵是指通过标准化、模块化和信息化的设计施工手段,将传统的桥梁建造方式转变为类似工业生产的流水线作业模式,以实现高效、精准、绿色和智能化的建造过程。该工程设计在满足结构受力安全可靠的基础上,以适应工业化建造为宗旨,通过设计优化,力求预制构件施工标准化、模块化和信息化,从而达到工效提升、安全、质量可靠以及经济合理的目的。

3.1 预制小箱梁

3.1.1 取消跨中横隔板

常规小箱梁设计通常设置跨中横隔板(见图 5(a)),以增强横向刚度、提升抗扭能力、均匀活载横向分配。但这种设计需要复杂的模板体系,增加了预制生产难度;另外,在现场架设完成后,横隔板湿浇带施工困难,最终施工完成后的外观和质量往往得不到保证。东进场高架通过优化设计,取消了跨

中横隔板(见图5(b)),从而简化了预制构件生产流程,减少了模板种类,提高了生产效率和质量,降低了生产成本。通过采用体现空间效应的梁格法计算分析,取消跨中横隔板后,小箱梁跨中恒载弯矩减小5%~10%,跨中活载弯矩增大10%~20%,总荷载弯矩增大6%~12%。通过适当调整截面尺寸和优化预应力配筋设计,可以满足取消跨中横隔板后的受力要求。



图5 跨中横隔板的优化设计对比图

3.1.2 底板通长等厚及横断面平坡设计

常规小箱梁设计采用底板变厚度设计,即靠近支点区域底板相对于跨中区域加厚设计,以满足横向受力要求及提高刚度。例如,交通部预制小箱梁的跨中底板厚180 mm,支点区域底板厚200 mm。该设计方式增加了模板种类和预制难度,不利于工业标准化生产。因此,东进场高架对小箱梁底板厚度设计进行了优化,通过计算分析,采用通长底板厚度为200 mm的设计方案,有效提升了工业标准化生产效率。

另外,常规小箱梁横断面一般采用底板平坡、顶板取与道路横坡一致的设计方案(见图6(a))。该设计方案因两侧腹板高度不同,导致两侧腹板模板不能通用,且增加了预制难度。东进场高架小箱梁为此进行了改进设计,横断面顶底板采用平坡设计(见图6(b)),最终成桥横坡通过调整支座垫石来实现。该方案有效提升了预制效率。

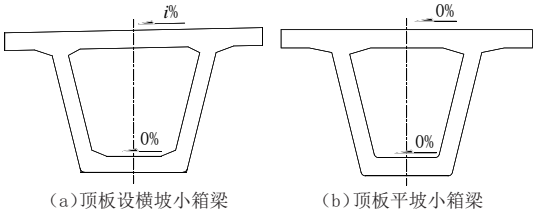


图6 横断面顶底板的优化设计

3.1.3 采用网片化钢筋骨架

常规小箱梁钢筋采用单根钢筋弯折加工制作,再通过绑扎各单根钢筋形成整体钢筋笼。绑扎一般采用人工方式,施工工效低,钢筋笼制作质量得不到有效保证。为了适应工业化建造,东进场高架小箱梁采用网片化钢筋骨架笼设计(见图7),即在前述构造优化设计基础上,钢筋骨架笼根据构造截面分段

采用模块化钢筋网片组合而成。钢筋网片由纵向、横向2个方向的钢筋组成,根据设计弯折角度将其整体弯折成型。平面钢筋网片加工及其整体弯折成型均采用成套自动钢筋网片机加工,具有施工效率高、环境污染低、人工劳动强度低等优点。为验证网片化钢筋笼受力能力,进行了足尺承载力试验,试验结果表明,其承载能力与传统配筋形式的小箱梁承载力相当,满足受力要求。

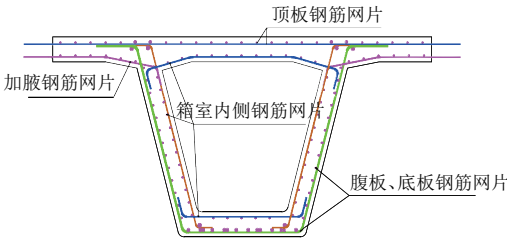


图7 小箱梁网片化钢筋笼断面图

3.2 预制桥墩^[8-11]

3.2.1 墩柱模数化高度设计及截面规格合并

常规设计中,承台顶标高取整至米或分米级,而导致墩柱高度往往是毫米级的非整数,不利于工业化预制。该项目预制墩柱高度以0.5 m为模数进行标准化设计,所有墩柱高度均为模数的整数倍。同时,为减少预制墩柱规格数量,加大墩柱截面以适用不同柱高级差。以立交区无盖梁花瓶独柱墩为例,墩柱截面尺寸共分为3种规格,对应适用柱高见表2。模数化高度设计和截面规格合并使得墩柱规格种类减少,且统一了生产流程,提高了模板的重复利用率,降低了模板成本。

表2 墩柱截面规格适用表

序号	墩柱截面尺寸		适用柱高H/m
	横桥向/m	纵桥向/m	
1	2	1.5	$H \leq 12$
2	2	1.8	$12 < H \leq 18$
3	2	2.0	$18 < H \leq 25$

3.2.2 花瓶独柱墩折线形过渡设计

常规花瓶独柱墩设计通常采用墩顶加宽段与直线等截面段通过曲线过渡设计(见图8(a))。由于模板复杂,难以满足快速预制需求,该项目采用折线形过渡替代曲线过渡设计(见图8(b))。折线形过渡设计显著简化了模板结构,便于工厂快速制作,缩短生产周期。

3.2.3 主线加宽段盖梁标准化设计

主线加宽段随桥面宽度不断变化,致使盖梁长度不断变化,因此常规设计盖梁一般为非标准结构,不利于工业化预制建造。东进场高架项目通过优化

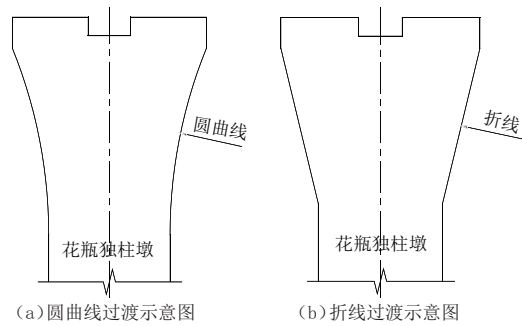


图8 花瓶独柱墩线形设计示意图

设计参数,诸如统一悬臂斜率、固定预应力钢束端部位置以及调整预制盖梁拼接湿接带宽度等措施,使得模板通用性加强,预制效率提高。以该工程某一加宽段4柱桥墩左幅盖梁为例(见图9)。

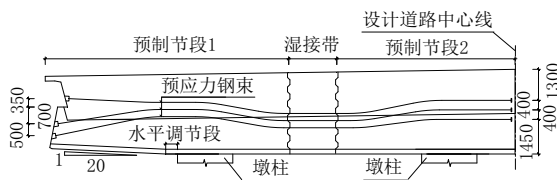


图9 4柱墩左幅盖梁图(单位:mm)

盖梁因重量较大,分为2个节段在工厂预制,运输至现场安装后通过湿接带连接成整体。为提升模板通用性,采取了以下措施:

(1)预制节段1挑臂斜率统一设置为1:20,不同悬臂长度通过水平调节段进行调整,从而可实现底模通用。

(2)统一钢束端部锚固位置,预制节段1左端钢束间距分别为1.05、0.5 m;预制节段2右端钢束间距为0.4 m,从而实现端模通用。

(3)在满足湿接带钢筋锚固长度基础上,通过适当调整湿接带宽度,使得预制节段墩柱中心至湿接带接缝处尺寸统一。

通过上述措施,最终实现了用1套模板预制了10个4柱墩盖梁。

3.3 BIM技术应用^[12]

东进场高架项目建立了基于BIM技术并包含设计和施工全过程协同管理平台,同时预留了运营阶段管理接口。其中为匹配桥梁工业化建造,专门在管理平台中设置了预制构件管理模块,该模块可进行预制构件的台账管理、预制厂商管理、订单管理和进度管理。现场管理人员可进行预制构件库管理,动态掌握构件生产情况,关联BIM模型进行可视化。支持上传构件清单和订单(见图10),管理预制构件的采购进度和实际生产进度,控制预制构件的生产质量。

【20210908】订单生产构件详情			
订单内容	完成情况	开始时间	完成时间
高架主线预制/箱梁(Pm125-Pm126)-05	已完成	2021-08-30	2021-08-31
高架主线预制/箱梁(Pm119-Pm120)-05	已完成	2021-08-30	2021-08-31
高架主线预制/箱梁(Pm119-Pm120)-06	制作中	2021-08-27	-
高架主线预制/箱梁(Pm117-Pm117A)-07	未开始	-	-
高架主线预制/箱梁(Pm109-Pm110)-03	已完成	2021-08-28	2021-08-29

图10 预制构件管理模块构件生产查询

4 结 语

乌鲁木齐市东进场高架为适应工业化建造技术,对预制拼装桥梁的设计进行了深入优化。目前项目一阶段8.9 km已建成通车,成功实现了高效、低碳和经济的桥梁建造目标。在小箱梁设计中,通过取消横隔板、底板等厚设计及钢筋优化,大幅提高了构件标准化生产效率;在桥墩设计中,通过高度模数化和截面归并,简化了构件生产和现场装配的复杂性;在盖梁设计中,通过模板通用化措施,降低了预制成本。这些优化措施提升了项目建设效率,为工业化建造桥梁的推广提供了宝贵经验。

未来,随着新材料、新技术的广泛应用,工业化建造桥梁将在标准化、智能化和绿色化方向上取得进一步突破,为我国基础设施建设的高质量发展提供更多可能性。该项目的实践表明,工业化建造技术在桥梁工程中的应用前景广阔,对提升行业竞争力和技术水平具有重要意义。

参考文献:

[1] 卢永成,袁慧玉.城市桥梁预制拼装技术应用[J].上海公路,2023(2):46-51.

[2] 周良,闫兴非,张凯龙,等.工业化全预制桥梁设计施工关键技术研究及应用[J].建设科技,2018(2):53-55.

[3] 金国海.城市桥梁预制拼装快速化施工关键技术[J].城市道桥与防洪,2023(2):146-153.

[4] DB65/T 8014—2024,超高性能混凝土检验标准[S].

[5] 莫金生,马磊,张洁,等.UHPC连接节段拼装桥墩拟静力试验[J].结构工程师,2018,34(2):88-95.

[6] DG TJ 08-2401—2022,桥梁工程超高性能混凝土应用技术标准[S].

[7] 黄国清,孙向东,邱志雄.高速公路工业化预制拼装桥梁总体设计[J].交通世界,2023(35):131-133.

[8] 王磊.全预制拼装技术在市政高架工程上的应用及思索[J].城市道桥与防洪,2020(6):151-153.

[9] 乔丰.预制拼装技术在东大道桥梁中的应用[J].城市道桥与防洪,2021(11):138-141.

[10] 鄢芳华,曹海顺.下部结构预制拼装技术在平原区高速公路桥梁中的运用[J].公路,2020,65(9):137-140.

[11] 王彬.桥梁下部结构预制拼装关键技术[J].天津建设科技,2021,31(5):17-19.

[12] 孙衍,杨光强.桥梁预制拼装技术在城市密集区的应用与思考[J].上海公路,2021(4):62-65;77.