

大挑臂复合截面节段梁总体设计研究

郭 济

[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: 为解决宽桥面节段梁运输吊装困难、传统多箱断面施工复杂等问题,提出了大挑臂复合截面节段梁结构。该设计将整体断面分解成预制核心箱梁与后装挑臂两部分,采用“核心先行、挑臂后装”的分阶段施工方法;同时通过系统参数分析,明确了该结构在40~70 m跨径的适用性,确定双6车道断面为最优方案,并建立了基于墩高与跨径组合的结构体系选用准则。有限元精细化分析结果表明:大挑臂复合截面节段梁在偏载等关键工况下受力性能良好,其截面尺寸仍具优化潜力;采用该结构可显著降低核心梁段吊重,减少大型设备投入,为宽桥面桥梁的工业化建设提供了一种有效的轻量化解决方案。

关键词: 节段梁;大挑臂;复合截面;总体设计;有限元分析

中图分类号: U443.35; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)02-0184-04

Research on Overall Design of Large-cantilever Composite Cross-sectional Segment Beam

GUO Ji

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

Abstract: To address the challenges of transporting and hoisting wide-deck segment beams and the construction complexity of traditional multi-cell sections, a large-cantilever composite cross-sectional segment beam structure is proposed. In this design, the overall cross-section is divided into two parts of precast core box girder and post-installed cantilevers, and the phased construction method of “core girder first, cantilevers second” is adopted. Through systematic parameter analysis, the applicability of the structure within the 40-70 m span range is clarified, the dual six-lane cross-section is identified as the optimal scheme, and a criterion selected for structural systems based on pier height and span combination is established. The results from refined finite element analysis demonstrate that the large-cantilever composite cross-sectional segment beam has good mechanical performance under key working conditions such as eccentric loading, and its cross-sectional dimensions still have potential for optimization. The use of this structure can greatly reduce the hoisting weight of core girders, and decrease the investment of large-sized equipment, which provides an effective lightweight solution for the industrialized construction of wide-deck bridges.

Keywords: segment beam; large cantilever; composite cross-section; overall design; finite element analysis

0 引 言

当前,我国建筑业正朝着“绿色化、工业化、信息化”的方向深度转型。在此背景下,装配式建筑因符合绿色可持续发展理念,得到了国家政策的大力推动和广泛应用^[1-4]。

节段预制拼装混凝土桥梁技术作为建筑工业化在桥梁工程领域的典型代表,集成了工厂化生产的高品质、现场施工的高效率以及对周边环境的低影响等突出优点。近年来,该技术在国内外铁路、公路、

轨道交通及市政工程中取得了显著的实践成果,展现出良好的技术经济效益与应用前景^[5-10]。

然而,对于桥面宽度较大的工程,常规预制节段箱梁往往面临着挑战。窄桥可采用单箱单室断面,而宽桥为控制单件吊重,多采用分离式多箱断面^[11-12]。后者虽解决了吊重问题,却带来了设备投入倍增、墩顶构造复杂、工期延长、造价攀升及景观效果欠佳等一系列新问题。

为从根本上破解宽桥幅节段梁的困境,本文提出了“大挑臂复合截面节段梁”这一创新设计方案。该方案的核心思路是将宽大断面进行功能分解,形成“核心箱梁”与“预制挑臂”两大模块化预制部件。其中核心箱梁作为主要承重骨架,优先采用架桥机

收稿日期: 2025-09-21

作者简介: 郭济(1986—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

拼装,预制挑臂则作为桥面系在后序阶段安装。由于该结构体系在国内尚属首创,其设计理论与施工方法均缺乏现成规范指导,因此,开展针对其总体设计原则、合理构造形式及力学性能的系统性研究,具有重要的工程指导价值。

1 结构特点与工程借鉴

大挑臂节段预制的复合截面混凝土桥在国内的工程实践尚属空白,而国际上已有若干成功先例可供借鉴,其中马来西亚槟城双溪桥(Sungai Prai Bridge)便是一个典范^[2](见图1)。



图1 马来西亚槟城双溪桥施工照

该桥建于2006年,总长1.85 km,其引桥部分采用标准跨径50 m,桥宽达27.8 m,梁高3 m,断面形式为单箱3室。该桥创新性的施工流程是:先逐跨拼装作为“脊骨”的核心梁,再以悬臂方式向两侧横向拼装预制挑臂。挑臂单元通过底部插销初步定位,顶部临时预应力锚固,最终与核心梁及相邻挑臂之间通过现浇湿接缝连成整体。该桥在面对变宽度断面时,通过核心梁与挑臂的标准化组合及适度调整,实现了设计施工的模块化,有效控制了工程成本。

除槟城双溪桥外,还有2003年建成的新加坡机场路高架桥(Viaduct at Airport Road)(见图2)、印尼雅加达-芝甘北二号高速高架桥(TOL JAKARTA--CIKAMPEK II)(见图3)等。

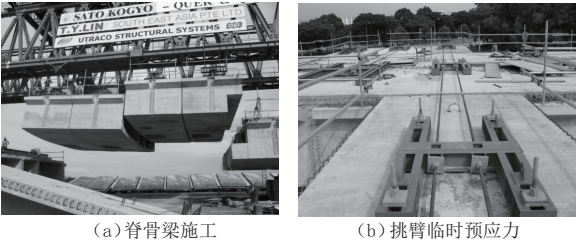


图2 新加坡机场路高架桥施工照

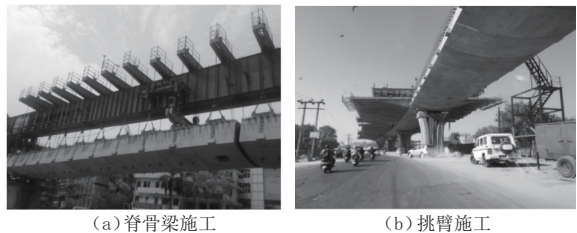


图3 印尼雅加达-芝甘北二号高速高架桥施工照

新加坡机场路高架桥的脊骨梁采用单箱3室且外腹板内倾的设计,通过预留钢筋实现与挑臂的湿接缝连接,未设置下部支撑。其预制挑臂板在根部预留槽口,翼缘板接缝则预埋混凝土底模,各肋板独立预制,仅依靠横向临时预应力保持稳定。

印尼雅加达-芝甘北二号高速(TOL JAKARTA--CIKAMPEK II)的高架桥采用了单箱双室脊骨梁(跨径45 m,桥宽20.8 m),节段长度3 m,并创新性地使用专用设备实现了两侧预制挑臂的整孔快速拼装。

综合分析上述国际工程案例,可以总结出预制拼装复合截面混凝土桥的核心优势:构件吊重显著减轻、部件组合灵活多变、对复杂断面适应性强。这使其成为一种高效且颇具应用潜力的结构体系。同时,也应认识到该体系在构件构造(如脊骨梁形式、腹板倾角)、连接方式(干接、湿接)及施工方法(逐跨、悬拼)等方面存在多样化的选择。因此,在实际工程中,必须结合项目具体条件,进行有针对性的精细化设计。

2 总体设计关键参数研究

2.1 设计理念与施工时序

本结构的设计遵循“核心先行,挑臂后装”的基本原则。具体施工流程为:首先,利用架桥机完成“预制核心段箱梁”的运输、吊装与纵向拼装,形成桥梁的主要承重框架;待核心段成型后,再分阶段安装“预制大挑臂翼缘板”。核心段与挑臂之间通过现浇湿接缝连接,并施加横向预应力,确保断面整体受力性能与结构安全可靠。

大挑臂复合截面节段梁拆解图见图4。

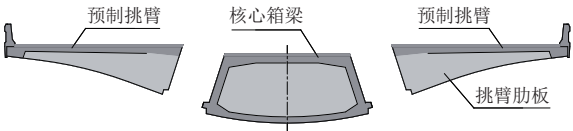


图4 大挑臂复合截面节段梁拆解图

2.2 断面适用性与经济性分析

大挑臂复合截面设计的根本目的,在于通过结构分解,实现材料性能的优化利用和施工吊重的大幅降低,从而减少大型设备投入,提升施工效率。

基于城市高架主流断面形式(双向4、6、8、10车道),结合工程经验与挑臂/核心梁的合理宽度比例,对不同桥宽下的单位延米吊重进行了估算,结果见表1。

分析可知:桥宽增加导致混凝土用量及吊重上

表 1 各桥宽类型单位跨度吊重估算

桥宽类型	桥宽/m	单位跨度吊重/(t·m ⁻¹)		
		混凝土	核心箱梁	挑臂
双向 4 车道	17.5	31.0	17.3~20.1	10.9~13.7
双向 6 车道	25	38.1	18.6~22.9	15.2~19.5
双向 6 车道	33	45.7	19.9~25.2	20.5~25.8
双向 10 车道	40	52.4	21.1~27.5	24.9~31.3

注:挑臂与核心箱梁的合理宽度比例范围取值为 1/0.7~1/1.4。
升,桥宽超过 25 m 后,吊重控制成为制约因素,对架桥设备能力和施工精度提出了更高要求。此外,宽桥面下经济跨径范围收窄,往往需减小跨径,从而导致桥墩与基础数量增加,对工程造价和施工周期产生不利影响。

另一方面,对于双向 4 车道等窄桥,挑臂减重效果(最低仅占 35%)相对有限,经济性不突出。

综合评判,大挑臂复合截面节段梁最适用于标准双向 6 车道整幅断面(桥宽 25 m);双向 4 与双向 8 车道断面可根据具体情况酌情应用。

2.3 基于设备能力的最大适用跨径

为确定合理的跨径上限,对市面主流架桥机的吊装能力进行了调研,得到各型号架桥机吊重参数,见表 2。

表 2 各型号架桥机吊重参数

型号	架设跨径/m	额定起吊重量/t	最大吊装重量/t
TJ1200	30~50	100	1 200
TP48	≤48	180	1 700
HZP1600	≤50	140	1 600
TPZ80/2700	≤80	220	2 700
LG	80	240	3 000

通过对不同跨径整跨重量的估算(见表 3)并与设备能力对比发现,80 m 跨径重量(3 048 t)已超出多数架桥机承载极限(3 000 t)。因此,建议最大适用跨径控制在 70 m 以内。

表 3 各型号架桥机吊重参数

跨径/m	每跨重量/t
30	1 143
40	1 524
50	1 905
60	2 286
70	2 667
80	3 048

2.4 基于构造与受力性能的最小适用跨径

跨径下限主要受后装挑臂的构造尺寸、最小梁高要求及合理高跨比制约。为保证施工便捷与经济性,核心梁段与预制挑臂的长度和重量应相匹配。经计算,当挑臂长度约 8 m 时,其单侧重量约 35 t,与

核心梁段(约 75 t)处于同一量级,便于运输和吊装。

从受力角度看,挑臂肋板倾斜角度会影响截面横向刚度。为保证车辆偏载下箱室顶板的受力性能,经分析^[13],主梁梁高取 2.8~3.5 m 时性能最佳。梁高低于 2.8 m 时,挑臂在活载作用下挠度偏大;梁高超过 3.5 m 后,结构自重显著增加,预应力效率下降,经济性降低。按等高度连续梁常用高跨比(1/16~1/26)反算,最小适用跨径可设定为 40 m。

2.5 结构体系选择

通过建立不同墩高(5~25 m)与跨径(40~60 m)组合的有限元模型,系统分析了主梁与桥墩在恒载、活载及温度作用下的受力性能^[14]。综合考虑主梁与桥墩的应力状态及裂缝控制要求,推荐的结构体系见表 4。

表 4 结构体系选用推荐表

跨径/m	墩高/m				
	5~10	10~15	15~20	20~25	>25
40	连续梁	连续梁	半固结	半固结	半固结
50	连续梁	连续梁	半固结	半固结	全固结
60	连续梁	连续梁	半固结	全固结	全固结

2.6 典型设计方案

提出一个典型设计方案:结构采用单箱单室带肋大挑臂截面,单幅桥宽 25 m,标准跨径 50 m,3 跨 1 联。翼缘板长 8.2 m,厚度从端部 23 cm 变化至根部 55 cm。箱室内顶板跨度 7.5 m,厚 35 cm;底板厚度为 30 cm;梁高 3.3 m。采用连续梁体系与混合配束预应力,施工方法为逐跨拼装。

典型设计方案的标准横断面见图 5。

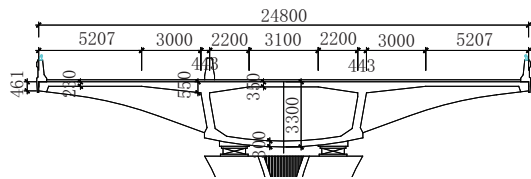


图 5 标准横断面(单位:mm)

3 关键设计优化方向

3.1 构造尺寸优化

采用 ANSYS 建立精细化实体有限元模型(1.5 跨,50 m+25 m)进行分析。边界条件模拟实际支座约束。计算结果表明(见图 6):结构应力满足《节段预制混凝土桥梁技术规范》(CJJ/T 111—2023);在偏载下,因挑臂-肋板-腹板整体刚度大,最大拉应力出现在箱室内顶板近腹板处,而非挑臂根部,结构受力合理。

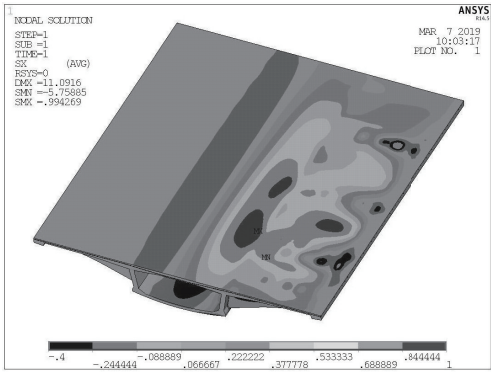


图6 车辆偏载应力云图(单位:MPa)

基于分析,提出以下优化方向:截面可进一步减薄,挑臂顶板 23 cm、箱室顶板 30 cm 在频遇组合下基本无拉应力;肋板厚度可优化至 30~40 cm,此时其下缘压应力处于合理水平;横向预应力钢束线型有待优化,以消除肋板下缘在频遇组合下的残余拉应力。

3.2 预应力布置优化

核心纵梁采用常规的混合配束预应力体系^[15]。设计关键在于确保后装挑臂的纵向受力性能。由于先张束张拉时挑臂未安装,后装挑臂的预应力主要依赖于核心段的后张束。

分析表明:设置于墩顶的顶板体内后张束对挑臂的预应力传递效率更高,长束效果优于短束,且与挑臂成桥应力状态匹配良好;当需增强边跨挑臂受力时,可考虑后张拉通长顶板体内束或设置双跨体外束作为补充;为改善挑臂端部受力,可在其外侧小纵梁内配置少量纵向体内束,以弥补核心段后张束的不足。

4 结 语

(1)该结构在 40~70 m 跨径、双向 6 车道整幅断面条件下技术经济性最优,实现了轻量化与施工便捷性的统一。

(2)通过有限元分析,验证了结构在偏载等不利工况下的受力合理性,并给出了截面尺寸与预应力配置的优化方向。

(3)该体系能显著降低吊装重量和大型设备投入,为宽桥面桥梁的工业化建设提供了一种切实可行且高效的新型解决方案。

参考文献:

[1] 卢永成.桥梁预制拼装技术[M].北京:人民交通出版社,2021.

[2] 张鹏,薛伟辰.工业化桥梁结构体系研究与应用进展[J].建筑结构学报,2022,43(6):1-13.

[3] 吴刚,王景全,刘钊.预制混凝土桥梁结构创新发展与研究进展[J].中国公路学报,2023,36(5):1-20.

[4] 刘安双,马振栋.预制节段拼装桥梁在轨道交通中的应用[J].桥梁建设,2022,52(4):86-92.

[5] 黄虹,许树壮,卢永成.上海长江大桥 60 m 跨预制拼装主梁设计[J].世界桥梁,2009(1):10-13.

[6] 朱希同.铁路节段拼装悬臂梁受力性能试验[J].铁道建筑,2025,45(1):87-92.

[7] 张门哲,涂光亚,王双喜,等.短线拼装法施工的宽幅多节段混凝土箱梁的预制控制[J].中外公路,2018,38(2):150-154.

[8] 黄运林,杨聪,万和安,等.石首长江公路大桥宽幅短线预制混凝土箱梁横向受力有限元计算模型分析[J].中外公路,2019,39(1):115-119.

[9] 徐光兴,李朝红,梁亮,等.平潭海峡公铁两用大桥北东口水道桥两孔连做节段拼装技术[J].桥梁建设,2018,48(4):98-103.

[10] 卢永成,邵长宇,王天华.上海长江大桥跨江段桥梁设计[J].桥梁建设,2008(4):1-4;8.

[11] 吴东升,卢永成,任才.城市高架变宽预制节段梁结构设计与关键技术研究[J].桥梁建设,2021,51(6):99-105.

[12] 吴东升,卢永成,齐新,等.南昌市洪都大道高架桥节段梁结构设计[J].城市道桥与防洪,2020(5):1-5;10.

[13] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.大挑臂复合截面预应力混凝土节段梁关键技术研究[R].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2024.

[14] 王猛.大挑臂复合截面节段梁总体布置与结构体系研究[J].城市道桥与防洪,2025(7):93-97.

[15] 严搏,郭济,卢永成.大挑臂复合截面节段梁后装挑臂纵向预应力效应研究[J].城市道桥与防洪,2021(10):110-113.