

复杂截面箱梁悬臂浇筑内模支架设计及受力特征

赵 鑫¹, 王熙溪², 应世明¹, 张镇东¹, 袁阳光³

(1. 中交路桥建设有限公司,北京 100027;2. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘要:为研究复杂截面箱梁悬臂浇筑施工内模支架设计方法及其施工阶段受力特征,依托西拉沐沦特大桥,提出了适用于箱梁边室和中室的内模支架设计方法,并完善了相应的复杂截面箱梁悬臂浇筑工艺流程。通过 Midas Civil 软件建立了内模支架的有限元模型,在考虑施工期荷载作用的情况下,分析了内模支架的受力特征,并结合材料强度分析与稳定性分析,验证了所提出内模支架设计方法的可行性。研究结果表明:边室支架与中室支架中心区域杆件受力水平明显高于边缘区域,因此,建议在内模支架优化设计时,适当增加中心区域杆件截面尺寸或加密布置以提高承载力。为进一步提升施工安全性,可对中室支架横梁布置形式进行适当增强。同时,在条件允许的情况下,建议通过支架预压的方式,最大限度地减少支架竖向变形对立模精度的影响。本研究结果可为复杂截面箱梁悬臂浇筑施工中内模支架的设计及优化提供参考。

关键词:复杂截面箱梁;内模支架;设计方法;受力分析;悬臂浇筑

中图分类号:U44

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)07-0069-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.07.091

Design and stress characteristics of cantilever pouring inner mold holder for box girders with complex cross-sections

ZHAO Xin¹, WANG Xixi², YING Shiming¹, ZHANG Zhendong¹, YUAN Yangguang³

(1. China Communications Road and Bridge Construction Co.,Ltd.,Beijing 100027,China;

2. School of Highway,Chang'an University,Xi'an 710064,Shaanxi,China;

3. School of Civil Engineering,Xi'an University of Architecture and Technology,Xi'an,710055,Shaanxi,China)

Abstract: In order to study the design approach of the inner mold holder for the cantilever pouring construction of box girder with complex cross-section and the stress characteristics of the construction stage, relying on the Sila Murong Bridge, the design approach of the inner mold holder suitable for the side chamber and the middle chamber of the box girder is proposed, and the corresponding cantilever pouring process of the box girders with complex cross-sections is improved. The finite element model of the inner mold holder is established by Midas Civil software, and the mechanical characteristics of the inner mold holder are analyzed under the condition of considering the load during construction, and the feasibility of the proposed design approach of the inner mold holder is verified by combining the material strength analysis and stability analysis. The results show that the stress level of the members in the center area of the side chamber holder and the middle chamber holder is significantly higher than that in the edge area, so it is suggested that the cross-sectional size or infill arrangement of the members in the center area should be appropriately increased to improve the bearing capacity when the inner mold holder is optimized. In order to further improve the construction safety, the arrangement of the middle room holder beam can be appropriately enhanced. At the same time, if conditions permit, it is recommended to minimize the

收稿日期:2024-03-26

作者简介:赵 鑫(1985—),男,工程师,从事复杂桥梁建造技术方面的研究。

通信作者:王熙溪(2000—),女,博士研究生,从事桥梁工程方面的研究。

influence of vertical deformation of the holder on the accuracy of the vertical mold by preloading the holder. The results can provide a reference for the design and optimization of the inner mold holder in the cantilever pouring construction of box girders with complex cross-sections.

Key words: box girders with complex cross-sections; inner mold holder; design approach; force analysis; cantilever pouring

悬臂浇筑是现阶段大跨混凝土桥梁主梁建造中最为常用的一种施工方法,已广泛应用于连续梁、连续刚构以及混凝土斜拉桥等大型桥梁工程的建设。该方法通过具有行走功能的挂篮进行施工,具备效率高、质量可控的优点^[1-2]。对于单箱单室箱梁,其悬臂浇筑施工工艺已十分成熟。然而,对于宽幅桥梁,由于主梁横向宽度较大,通常采用单箱多室截面设计,并沿桥梁纵向进行变截面设计。此外,为提高宽幅箱梁的抗扭性能,通常还需要设置横隔板。这种复杂的截面形式使得悬臂浇筑施工不仅需要挂篮,还需借助内模支架来搭设箱梁的顶模和侧模。因此,复杂截面箱梁的内模支架设计及其力学分析成为保证施工安全性和节段浇筑质量的关键环节。

结合悬臂浇筑施工方法的特点与工程实践,国内研究人员对此开展了深入研究。孙宗磊等^[3]探讨了悬臂浇筑法在一座深水库区铁路多塔矮塔斜拉桥建设中的应用,提出了将悬臂浇筑与造桥机方案相结合的技术方案;余海兵^[4]则针对曲线连续刚构桥悬臂浇筑施工控制技术进行了研究;戴利平^[5]进一步分析了连续刚构箱梁悬臂浇筑过程中节段混凝土的开裂成因及控制方法。在现有的悬臂浇筑施工案例中,受挂篮行走条件的限制,多数桥梁采用变截面单箱单室或单箱双室截面设计^[6]。例如,近期建成的培森柳江特大桥主梁顶板宽度为 29 m,采用了单箱双室布置形式^[7]。然而,随着大跨混凝土桥梁设计水平的提升,变截面单箱多室箱梁的应用日益增多。为了确保截面扭转刚度,这类桥梁通常会在箱梁内部增设横隔板。这种复杂的截面形式给主梁悬臂浇筑施工带来了较大显著的挑战。目前,关于悬臂浇筑施工技术的研究主要集中在单项但是或单箱双室截面形式上,对变截面、单箱多室且带横隔板的复杂截面箱梁的研究尚显不足。为解决上述复杂截面箱梁的悬臂浇筑施工中的难题,需引入内模支架作为关键技术支撑。值得注意的是,主梁悬臂

施工大多属于高空作业,而内模支架的性能直接影响整个施工过程的安全性^[8]。

基于此,本文依托西拉沐沦特大桥建设过程中所遇到的复杂截面箱梁悬臂浇筑施工问题,重点探讨内模支架设计方法、采用内模支架的悬臂施工工艺流程以及施工过程中内模支架的受力特征,以期同类桥梁施工时内模支架的设计提供参考。

1 工程概况

1.1 大桥总体信息

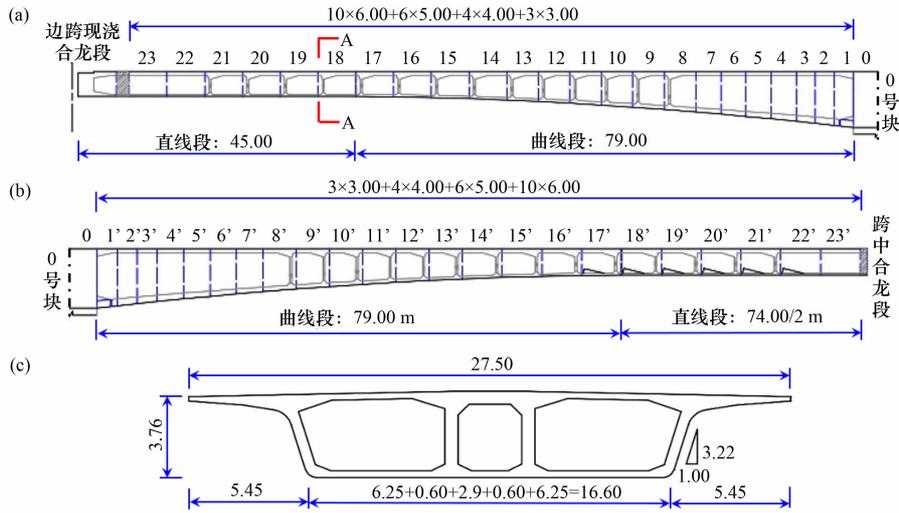
西拉沐沦特大桥是丹锡高速公路克什克腾至承德联络线经棚至乌兰布统段的控制性节点工程(图 1)。主桥上部结构为一座主跨为 240 m 的变截面预应力混凝土矮塔斜拉桥,引桥则采用单孔跨径为 40 m 的预应力混凝土连续 T 梁桥,全桥桥跨布置为 $(4 \times 40) + (3 \times 40) + (128 + 5 \times 240 + 128) + 2 \times (4 \times 40) = 2\ 056\ \text{m}$ 。



图 1 西拉沐沦特大桥

1.2 主梁悬臂浇筑施工节段划分

西拉沐沦特大桥主梁边跨及 1/2 中跨的施工节段划分如图 2(a)、2(b)所示,主梁典型横断面如图 2(c)所示。由图 2 可知:大桥主梁为变截面、单箱三室、带横隔板的复杂箱形截面。根据图 2(a)、2(b),主梁自 8# 块和 8' # 块起开始增设横隔板,这导致悬臂施工中挂篮内模无法采用内滑梁作为支撑。为解决这一问题,施工中采用承插型盘扣式满堂支架支撑内模板。在 8# ~ 23#、8' # ~ 23' # 块段施工时,内模采用钢制模板。为提高经济性,在各块段施工过程中最大限度地重复利用钢制模板。由于施工过程中对模板进行了切



(a) 主梁边跨施工节段划分; (b) 主梁 1/2 中跨施工节段划分; (c) A-A 主梁断面

图 2 主梁施工节段划分及典型横断面

割, 自 11[#]块和 11'[#]块之后无法继续使用的钢模板改用木模板代替。

2 内模支架设计

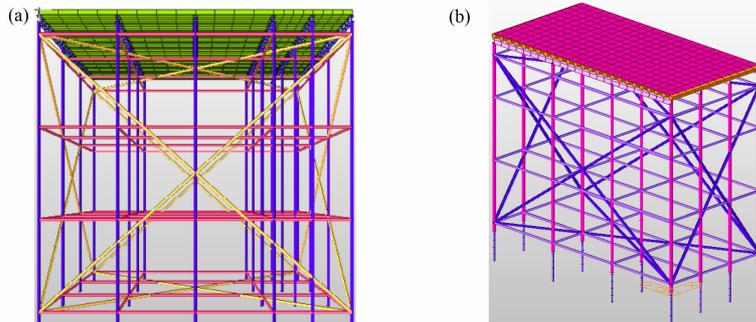
内模支架设计时, 根据施工现场就地取材的原则, 充分考虑施工过程中荷载作用特征以及支架强度、刚度与稳定性的要求, 并结合箱室空间尺寸确定支架杆件的间距。内膜支架设计时, 主要构件的材料类型、截面尺寸、连接及支撑方式如表 1 所示。

根据箱梁内部空间尺寸, 主梁边室无倒角段的支架纵向间距、横向间距和水平步距分别设置为

1.20、1.20、1.50 m。对于中腹板倒角段, 考虑到该段顶板承受的荷载较大, 横向间距加密为 0.60 m, 腹板倒角段第三步距调整为 1.0 m。鉴于斜腹板倒角段无法实现稳定支撑, 采用钢管扣件做组合支撑形式, 边室支架如图 3(a)所示。箱梁中室无倒角段顶板支架的纵向间距和横向间距分别取 1.2、0.6 m, 水平三步步距依次为 1.5、1.5、1.2 m。下层两步横杆向中腹板增设 0.5 m 横杆, 并与腹板模板支顶固定, 以防止支架在横桥向发生倾覆。由于中室两侧模板中腹板倒角段角度较大, 支架顶端无法实现支撑稳定, 采用钢管扣件做组合支撑形式, 边室支架布置如图 3(b)所示。

表 1 材料选择及连接支撑方式

构件名称	构件材料类型	截面尺寸/mm	连接方式	支撑方式
杆件	钢管	∅48 × 3.5	满堂盘扣	一般支撑 + 钢管扣件组合支撑
纵梁	工字钢	100 × 68 × 4.5	满堂盘扣	一般支撑 + 钢管扣件组合支撑
分配梁	方木	80 × 80	满堂盘扣	一般支撑 + 钢管扣件组合支撑



(a) 边室内模支架; (b) 中室内模支架

图 3 内模支架设计方案

3 施工工艺

采用内模支架的复杂截面箱梁一个节段的悬臂浇筑施工流程如图 4 所示。由图 4 可知：与传统悬臂浇筑施工工艺的区别在于内模支架的逐层搭设及后续拆除。内模支架搭设时，底部采用直径为 28 mm 的钢筋作为支撑，钢筋顶端两侧焊接直径为 28 mm 的帮条钢筋，焊缝长度不小于 10 cm，如图 5(a) 所示。每根支撑钢筋与底板钢筋的连接点不少于 3 个，自由端长度不超过 25 cm。支架搭设过程中，采用盘扣式节点实现所有杆件的连接，搭设完成的边室支架如图 5(b) 所示。承重模板和支架应在混凝土强度能够承受其自重及其他可能的施工荷载时拆除。参考临时结构拆除时的安全性要求，内模支架的拆除遵循“后支先拆、先支后拆”的顺序，从顶层开始逐层向下进行。

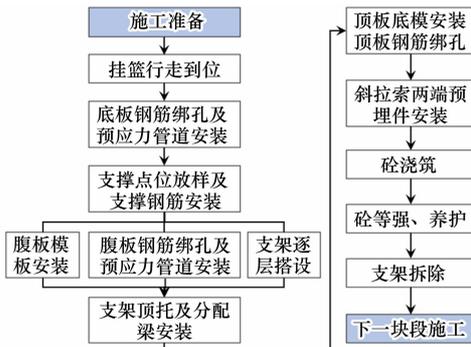
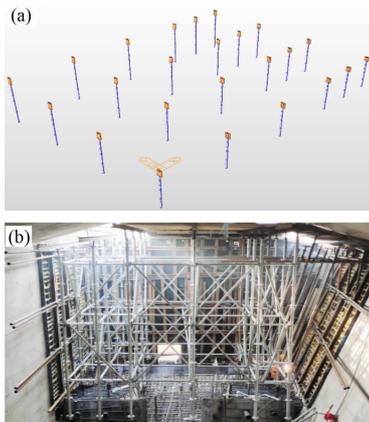


图 4 一个节段施工流程



(a) 支架底部支撑钢筋；(b) 搭设完成的边室内模支架

图 5 内模支架搭设

4 内模支架受力特征

4.1 有限元建模方法

采用 Midas Civil 建立内模支架的有限元分析

模型，各杆件均采用梁单元模拟，支架顶部采用板单元模拟，以便施加面荷载。支撑钢筋与支架底部立柱之间采用弹性连接模拟，支撑钢筋深入底板部分采用固定约束模拟，释放横向、纵向水平杆之间的两端约束，立柱顶托、分配梁、板单元之间采用弹性连接模拟。以边室内模支架为例，图 6 给出了有限元模型的局部边界条件处理情况。

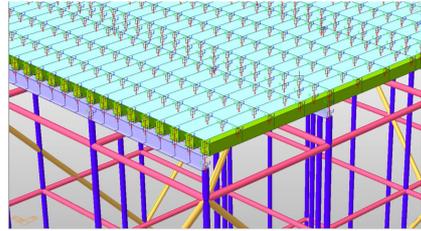


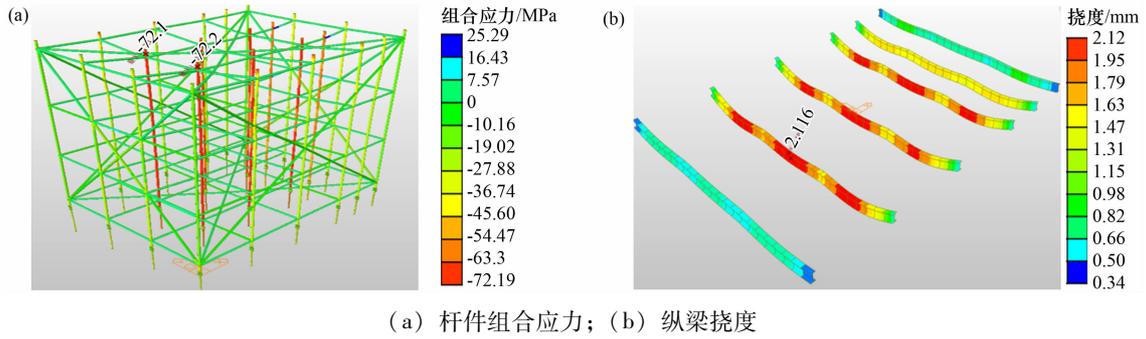
图 6 有限元模型边界条件

为分析施工过程中内模支架的受力特征，考虑以下荷载：1) 支架自重；2) 混凝土荷载，根据浇筑混凝土体积计算，顶板无倒角段混凝土面荷载为 7.4 kN/m^2 ，中腹板倒角段混凝土面荷载为 19.8 kN/m^2 ；3) 混凝土振捣产生的附加荷载，取值为 2 kN/m^2 ；4) 模板荷载，取值为 1.2 kN/m^2 ；5) 人机荷载，取值为 2.5 kN/m^2 。为进一步考虑施工过程中各类荷载施加的不均匀性及不确定性，荷载效应组合确定为 $1.2 \times \text{自重} + 1.2 \times \text{模板荷载} + 1.3 \times \text{混凝土荷载} + 1.3 \times \text{人机荷载}$ 。

4.2 边室支架受力

在荷载效应组合下，边室支架杆件组合应力如图 7(a) 所示。由图 7(a) 可知：支架中间区域竖杆的组合应力明显高于边缘区域竖杆。在对该类型支架进一步的优化设计时，可考虑适当增加中部竖杆的尺寸或进行加密布置。各构件的组合应力水平平均明显低于材料强度，最大拉应力为 25.3 MPa ，最大压应力为 72.2 MPa ，且稳定性满足《建筑施工碗扣式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 166—2016) 的要求，具体分析结果如表 2 所示。由表 2 可知：所设计的边室支架受力能够满足规范要求。

在荷载效应组合下，边室支架杆件纵梁挠度如图 7(b) 所示。由图 7(b) 可知：边室支架纵肋最大挠度为 2.1 mm 。该值虽满足容许变形的相关规定。但在后续工艺优化时，可考虑对支架受力的中间区域进行加劲处理。同时，考虑到有限元分析无法考虑非弹性变形的影响，在工期允许的



(a) 杆件组合应力; (b) 纵梁挠度

图 7 边室支架受力分析

情况下, 可以进行适当的支架预压, 以最大限度地消除非弹性变形对模板空间位置的不利影响。

表 2 边室支架材料强度分析

构件(材料)	分析项	最大值	容许值
支架(Q235)	组合应力/MPa	72.2	190.0
	剪切应力/MPa	1.7	110.0
	稳定性/kN	33.9	51.2
钢筋(Q235)	组合应力/MPa	65.5	190.0
	剪切应力/MPa	0.1	110.0
纵梁(方木)	组合应力/MPa	57.7	190.0
	剪切应力/MPa	36.1	110.0
横梁(方木)	组合应力/MPa	4.6	12.0
	剪切应力/MPa	0.4	1.5

4.3 中室支架受力

在荷载效应组合下, 中室支架杆件组合应力如图 8(a) 所示。由图 8(a) 可知: 与边室支架类似, 中间区域各杆件受力水平明显高于边缘区域。各构件材料强度分析结果如表 3 所示。由表 3 可知: 所设计的中室支架受力性能满足规范要求。需要指出的是, 尽管所设计的中室支架已经在大桥施工中顺利应用, 但通过表 3 可以发现, 横梁组合应力的冗余度非常小, 在后续类似项目应用时, 有必要对中室支架的横梁强度予以提高, 以

保证施工安全。在荷载效应组合下, 中室支架杆件纵梁挠度如图 8(b) 所示。由图 8(b) 可知: 中室支架纵肋最大挠度为 1.3 mm, 低于边室支架。虽然已经很好地控制了弹性变形, 但仍有必要通过混凝土浇筑前的预压, 消除支架非弹性变形对模板空间位置的不利影响。

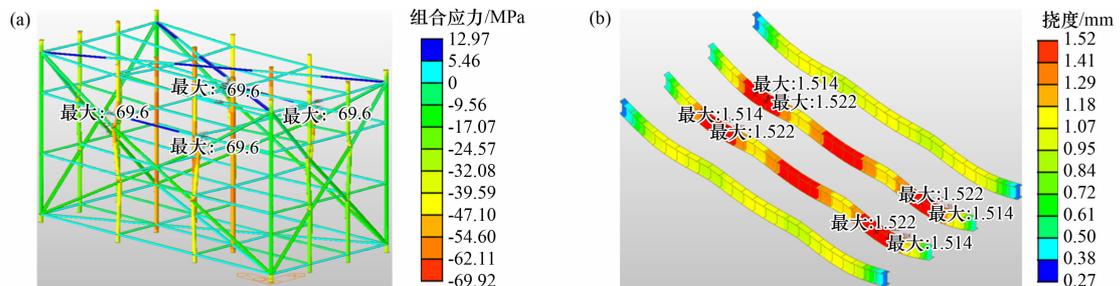
表 3 中室支架材料强度分析

构件(材料)	分析项	最大值	容许值
支架(Q235)	组合应力/MPa	82.6	190.0
	剪切应力/MPa	1.5	110.0
	稳定性/kN	24.5	51.2
钢筋(Q235)	组合应力/MPa	44.8	190.0
	剪切应力/MPa	0.1	110.0
纵梁(方木)	组合应力/MPa	41.2	190.0
	剪切应力/MPa	21.4	110.0
横梁(方木)	组合应力/MPa	11.6	12.0
	剪切应力/MPa	0.9	1.5

5 结 论

(1) 针对宽幅复杂截面箱梁, 完善了基于内模支架的悬臂浇筑施工工艺, 并通过西拉沐沁特大桥主梁施工的应用, 验证了施工工艺的可行性。

(2) 提出了适用于复杂截面箱梁悬臂施工的



(a) 杆件组合应力; (b) 纵梁挠度

图 8 中室支架受力分析

边室和中室内模支架设计方法,明确了支架在施工过程中的搭设及拆除要点。

(3) 分析并明确了所设计内模支架在施工过程中的受力特征;支架中心区域杆件的受力水平明显高于边缘区域。建议在后续支架优化设计时,可考虑增加中心区域杆件的截面尺寸或进行加密布置。

(4) 所设计的内模支架在施工中的强度和稳定性均满足要求。建议在后续应用中,对中室支架横梁予以加强处理。内模支架纵梁的变形在容许范围内,但在条件允许的情况下,可通过支架预压的方式消除非弹性竖向变形对模板架设精度的影响。

参考文献:

- [1] 尉静. 桥梁工程主桥箱梁悬臂浇筑施工关键技术[J]. 交通世界,2023(13):137-139.
- [2] 杨辉. 钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑倒三角挂篮设计与施工[J]. 施工技术,2017,46(3):102-106.
- [3] 孙宗磊,陈怀智,潘湘文,等. 深水库区铁路多塔矮塔斜拉桥设计施工关键技术研究[J]. 铁道建筑技术,2022(7):6-10;26.
- [4] 余海兵. 曲线连续刚构桥悬臂浇筑施工控制技术[J]. 建筑施工,2022,44(7):1646-1649;1653.
- [5] 戴利平. 连续刚构箱梁悬臂浇筑节段混凝土裂缝成因及控制研究[J]. 北方交通,2023(7):24-29.
- [6] 史隽健. 预应力砼变截面连续箱梁挂篮悬臂浇筑与支架现浇施工设计对比分析[J]. 价值工程,2022,41(35):77-79.
- [7] 黄建喜,潘晓,李锡汉. 培森柳江特大桥宽幅箱梁挂篮悬浇施工关键技术[J]. 西部交通科技,2022(4):119-122.
- [8] 折文刚. 连续刚构桥梁0#块现浇支架受力安全分析[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报,2023,22(3):22-26.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。