

多矮塔斜拉桥边跨现浇段无配重托架设计与施工*

应世明¹, 张镇东¹, 田连民¹, 赵鑫¹, 陈浩然¹, 赵勃¹, 袁阳光²

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

[摘要] 为研究多矮塔斜拉桥边跨现浇段无配重托架设计方法, 并进一步完善与之匹配的施工程序, 首先, 依托西拉沐沦河特大桥边跨现浇段构造特征, 提出无配重托架设计方法。其次, 考虑无配重托架在边跨现浇施工过程中的外部荷载, 通过有限元模拟, 研究无配重托架受力性能, 包括变形及材料强度冗余度情况, 并明确了无配重托架局部构造的受力控制要点。最后, 结合西拉沐沦河特大桥工程实践, 总结完善了基于无配重托架的边跨现浇段施工程序, 并明确了与无配重托架相关的施工注意要点。结果发现: 所设计无配重托架在施工荷载下的最大变形为 3.14mm, 满足变形控制要求。无配重托架材料强度冗余度 $\geq 29.6\%$, 安全储备良好; 局部构造的材料强度冗余度 $\geq 65.5\%$, 安全储备更高。西拉沐沦河特大桥工程应用效果显示, 所设计无配重托架适用性良好。建议后续应用时, 对箱梁中部对应的托架中间区域作进一步加劲处理。

[关键词] 桥梁工程; 斜拉桥; 矮塔斜拉桥; 边跨现浇; 无配重托架; 设计; 施工技术

[中图分类号] U448.27; U445.4 [文献标识码] A [20232542]

Design and Construction of Unbalanced Bracket for Side Span Cast-in-site Segment of Multi-low-tower Cable-stayed Bridge

YING Shiming¹, ZHANG Zhendong¹, TIAN Lianmin¹, ZHAO Xin¹, CHEN Haoran¹, ZHAO Bo¹, YUAN Yangguang²

(1. China Communications Road and Bridge Construction Co., Ltd., Beijing 100027, China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: To investigate the design method of unbalanced bracket for side span cast-in-site segment of multi-low-tower cable-stayed bridge, and meanwhile develop the corresponding construction process. The design method of unbalanced bracket was firstly proposed according to the structural features of side span cast-in-site segment of Xila Mulun River Bridge. Secondly, by considering the external loads of unbalanced bracket during construction of side span cast-in-site segment, the mechanical properties of unbalanced bracket were researched through finite element simulation, including the deformation and material strength redundancies. The mechanical control points for the local structures of unbalanced bracket were also provided. In the last, the construction process of side span cast-in-site segment based on unbalanced bracket was summarized according to the engineering practice of Xila Mulun River Bridge, and the construction precautions related to unbalanced bracket were pointed out. The results show that the maximum vertical deformation of the designed unbalanced bracket under construction loads is 3.14mm, which can meet the requirement of deformation control. The redundancies of material strength are greater than 29.6%, which can meet the safety requirement. The redundancies of material strength of local structures are greater than 65.5%, which has a higher safety redundancy. The engineering application in Xila Mulun River Bridge indicates that the designed unbalanced

bracket has a good applicability. It is suggested that in the following engineering practices, the central region of bracket corresponds to the central of box girder can be further reinforced.

Keywords: bridges; cable stayed bridges; low-tower cable-stayed bridges; side span cast-in-site; unbalanced bracket; design; construction

0 引言

高墩大跨混凝土桥梁边跨合龙时,需首先施工一定长度的现浇段,该现浇段通过合龙段与悬臂施工段相连接,进而形成稳定的受力体系^[1]。边跨现浇段施工是高墩大跨混凝土桥梁的关键施工环节,主要由于:①该作业场景多为高空作业,安全性要求较高;②边跨现浇段的施工质量直接影响边跨合龙效果;③边跨现浇段施工质量同时影响成桥后的体系受力性能^[2-3]。

针对如何提升高墩大跨混凝土桥梁边跨现浇段施工质量,已有研究结合实际工程案例开展了深入探索。谭龙梦等^[4]在乌江特大桥边跨合龙施工时,研究了基于挂篮的边跨现浇段施工技术。章林^[5]、潘柚材^[6]研究了采用搭设支架法进行边跨现浇段施工时的支架优化设计方法及施工难点。支架法虽架设技术成熟,但在边墩较高时适用性较差。除支架法外,部分学者也依托实际工程研究了吊架法^[7]、不平衡梁段法^[8]、托架法^[9]等在边跨现浇段施工中的应用。在近年来的山岭峡谷区高墩大跨桥梁施工中,托架法应用频率越来越高。但现有研究多针对左、右幅分离的连续刚构桥梁,多进行平衡配重。对于多矮塔斜拉桥宽幅箱梁的边跨现浇段施工,托架法的应用案例相对较少,其施工技术成熟度仍需进一步完善提升。

依托西拉沐沦河特大桥施工过程,探索无配重托架法在多矮塔斜拉桥宽幅箱梁边跨现浇施工中的应用,研究无配重情况下的

宽幅箱梁托架设计方法。通过有限元模拟,分析施工荷载下托架受力性能,并通过材料强度冗余度分析,验证托架设计方法可行性。最后,结合西拉沐沦河特大桥边跨施工,形成基于无配重托架的边跨现浇段施工流程,并明确施工过程要点。研究成果可为同类桥梁边跨现浇段无配重托架设计及施工提供借鉴。

1 工程概况

西拉沐沦河特大桥是丹锡高速公路经棚—乌兰布统段的控制性节点工程,主桥上部结构为多矮塔斜拉桥,主梁为单箱三室变截面箱梁,引桥上部结构为单孔跨径为40m的连续T梁,主桥与引桥的2个过渡墩墩高均为93.2m,西拉沐沦河特大桥跨径布置如图1a所示。主梁采用悬臂浇筑法施工,边跨施工节段划分如图1b所示,边跨现浇段长度为6.12m,现浇段箱梁断面如图1c所示,箱梁顶板宽度为27.5m。

由于西拉沐沦河特大桥过渡墩墩高达到93.2m,难以采用支架法进行边跨现浇段施工。综合对比吊架法与托架法,前者施工方案较复杂,且更适用于现浇段与合龙段累计长度较长情况。托架法施工时的弊端在于需进行高空平衡配重,但在西拉沐沦河特大桥建设过程中,若提前将引桥架设完成,可避免平衡配重问题。基于以上考虑,选择无配重托架法施工。

*陕西省自然科学基金基础研究计划-面上项目(2023-JC-YB-321)

[作者简介] 应世明,高级工程师, E-mail: 375152397@qq.com

[通信作者] 袁阳光,博士,讲师, E-mail: yuanyg31@163.com

[收稿日期] 2023-11-21

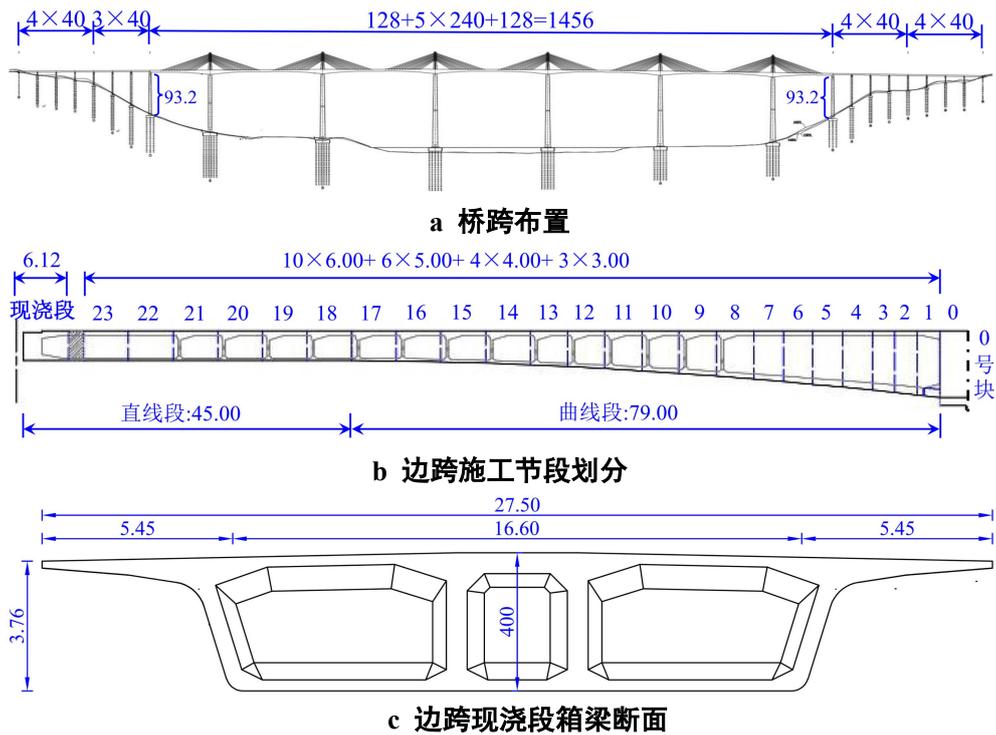


图 1 西拉沐沦河特大桥关键信息(单位:m)

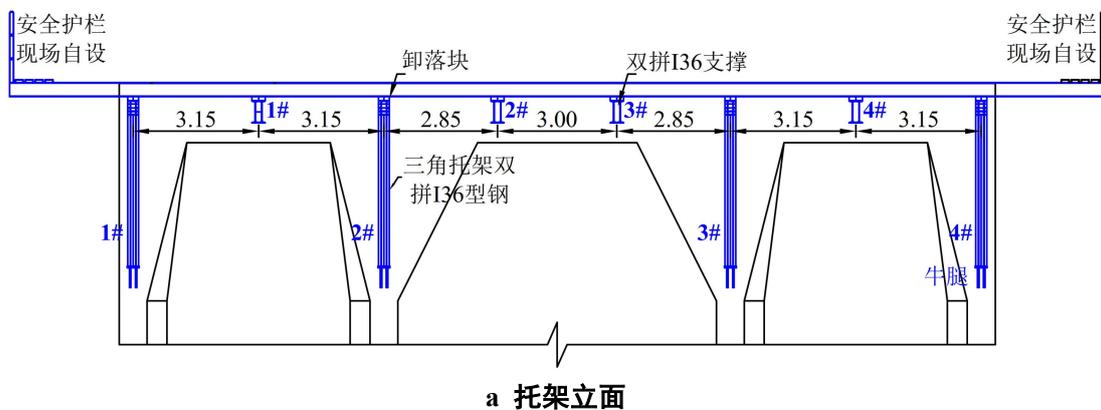
Fig.1 Key information of Xila Mulun River Bridge (unit: m)

2 无配重托架设计

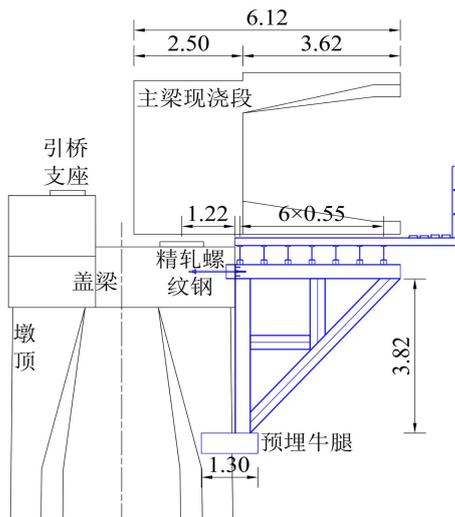
依托西拉沐沦河特大桥主梁边跨现浇段及过渡墩墩顶构造,进行无配重状态下的托架设计,托架立面及侧面分别如图 2a, 2b 所示。如图所示,托架自底部向上的构件组成依次为:三角托架(或预埋支撑)、卸落块、I36 承重梁、I20 分配梁、边长 0.10m 方木、16mm 厚模板。具体采用双拼 I36 制作托架及预埋横撑,中间设置支撑并在支撑处加劲;托架下支撑点采用预埋牛腿支撑,上支点采用预埋精轧螺纹钢固定;通过[20 成对

扣成箱形制作卸落块;承重梁放置于卸落块上并作限位处理,方木布置间距为 15cm。

托架设计时,型钢采用 Q235 钢,其抗拉、抗弯、抗压强度设计值为 190MPa,厚度 < 16mm 时抗剪强度设计值为 110MPa,厚度 > 16mm 时抗剪强度为 105MPa。方木抗拉、抗压、抗弯强度设计值为 12MPa,抗剪强度为 1.5MPa。采用 PSB830 级精轧螺纹钢,抗拉强度设计值为 770MPa。根据所提出的设计方法,现场搭设完成的无配重托架如图 2c 所示。



a 托架立面



b 托架侧面



c 搭设完成的托架

图 2 无配重托架设计(单位:m)

Fig.2 Design of unbalanced bracket (unit: m)

3 无配重托架受力性能分析

3.1 总体受力分析有限元建模

为明确无配重托架在施工期间的受力性能,并初步验证第 2 节所述无配重托架设计方法的可行性。采用 MIDAS Civil 建立无配重托架整体有限元模型,采用梁单元模拟托架中各构件受力,所建立的有限元模型如图 3 所示。有限元模型中考虑以下荷载:①结构自重;②混凝土自重,现浇箱梁超灌系数考虑为 0.05;③混凝土振捣附加荷载 2kN/m^2 ;④人员与机具荷载 2.5kN/m^2 。材料强度分析时,构件自重及混凝土自重的荷载组合系数取 1.2,人机荷载、振捣荷载的组合系数取 1.4。

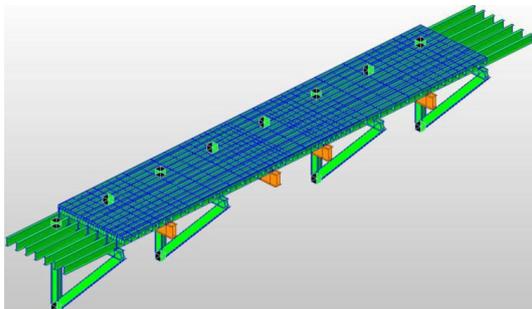
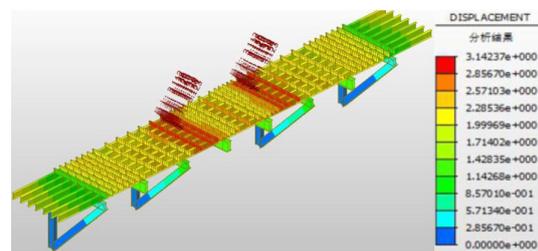


图 3 无配重托架有限元模型

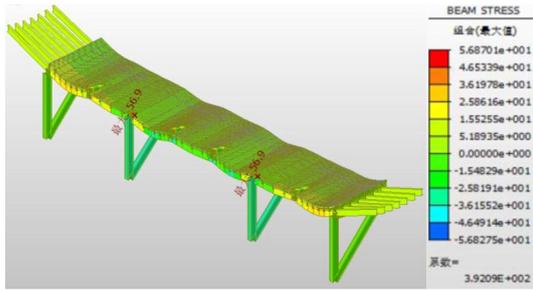
Fig.3 Finite element model of unbalanced bracket

3.2 构件受力特征及材料强度

荷载组合下的竖向变形如图 4a 所示,可见在施工荷载作用下,无配重托架最大变形位置位于 2 号三角托架与 2 号预埋支撑的中间位置,以及与之对称的 3 号三角托架和 3 号预埋支撑的中间位置。最大竖向变形达到 3.14mm ,但并未超过竖向变形容许值,即 $L/400$ 。荷载组合下无配重托架的材料组合应力如图 4b 所示,可见材料应力最大位置位于 2, 3 号三角托架的上弦杆。无配重支架所用各类材料的最大应力水平及对应的强度容许值如表 1 所示。可见,各类材料的强度冗余度均 $\geq 29.6\%$ 。



a 变形(单位: mm)



b 组合应力(单位: MPa)
图 4 无配重支架受力特点

Fig.4 Stress characteristics of unbalance bracket

表 1 材料强度冗余

Tab.1 Redundancy of material strength

| 材料类型 | 应力类型 | 最大 /MPa | 容许 /MPa | 冗余度 /% |
|--------|------|---------|---------|--------|
| Q235 钢 | 组合应力 | 56.9 | 190.0 | 70.1 |
| | 剪应力 | 77.4 | 110.0 | 29.6 |
| 精轧螺纹钢 | 拉应力 | 152.5 | 770.0 | 80.2 |
| 方木 | 组合应力 | 7.2 | 12.0 | 40.0 |
| | 剪应力 | 0.5 | 1.5 | 66.7 |

3.3 局部受力控制要点

对于无配重、非平衡受力的托架, 不仅需要关注托架的整体受力性能, 同时需严格控制局部构造受力。除用于固定上支点的精轧螺纹钢外, 需重点关注的局部构造包括: ①锚杆抗拔性能, 可根据《建筑施工计算手册》确定抗拔安全储备; ②混凝土局部承压性能可按 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015 年版) 相关条文进行控制; ③预埋牛腿强度。无配重托架局部构造的强度冗余分析结果如表 2 所示, 可见冗余度最小为 65.5%。其冗余度水平高于托架整体材料强度冗余水平。

表 2 局部构造强度冗余

Tab.2 Redundancy of strength of local member

| 构造 | 控制项 | 最大 | 容许 | 冗余度/% |
|----|-----------|-------|-------|-------|
| 锚杆 | 正应力/MPa | 152.5 | 190.0 | 70.1 |
| | 抗拔力/kN | 122.6 | 887.0 | 86.2 |
| | 混凝土承压 /kN | 122.6 | 441.0 | 72.2 |

| | | | | |
|----|-----------|-------|--------|------|
| 牛腿 | 正应力/MPa | 65.6 | 190.0 | 65.5 |
| | 剪应力/MPa | 26.3 | 105.0 | 75.0 |
| | 混凝土承压 /kN | 700.3 | 3237.0 | 78.4 |
| 支撑 | 混凝土承压 /kN | 927.6 | 2700.6 | 65.7 |

3.4 应用效果及优化

无配重托架在西拉沐沦河特大桥边跨现浇段施工过程中的应用场景如图 5 所示, 通过观察施工过程中无配重托架的工作状态, 并结合材料强度冗余分析及局部构造强度分析结果, 可验证所设计无配重托架的适用性。结合受力特征分析结果, 建议在后续参考应用时, 对中间 2 个三角托架间的区域做进一步加劲处理。



a 方木铺设



b 部件间距检查

图 5 无配重托架施工场景

Fig.5 Construction scene of unbalanced bracket

4 边跨现浇段施工流程

根据西拉沐沦河特大桥边跨现浇段施工过程实践, 总结完善基于无配重托架的施工工艺流程, 如图 6 所示。施工过程中与托架相关的注意要点包括: ①搭设前应做好安全及技术交底, 现场需 25t 汽车式起重机配合施工, 汽车式起重机站位于引桥桥面; ②

三角托架安装时若出现托架倾斜较大情况,可通过下支点与牛腿间的垫板调平;③托架搭设过程中,应同步进行安全通道搭设,以保证作业人员安全;④托架预压荷载可取为梁段自重的1.1倍,分四级加载,即60%,80%,100%,110%。

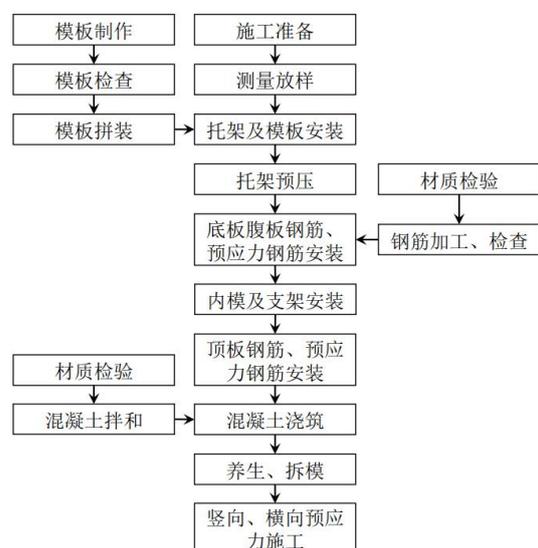


图6 基于无配重托架的边跨现浇施工流程

Fig.6 Construction process for side span cast-in-site based on unbalanced bracket

5 结语

1)依托西拉沐沦河特大桥,提出了无配重托架设计方法。

2)无配重托架在施工荷载作用下的最大竖向变形为3.14mm,钢材及方木的材料强度冗余度均 $\geq 29.6\%$ 。

3)明确了无配重托架局部构造的受力控制要点,发现所设计无配重托架材料强度最低冗余度为65.5%。

4)通过在西拉沐沦河特大桥边跨现浇段的应用,验证了无配重托架的适用性,同时明确了基于无配重托架的边跨现浇段施工工艺流程及注意要点。

5)建议后续参考应用时,对箱梁横截面中心区域对应的托架部位做进一步加劲处理。

参考文献:

[1] 张常轩.高墩大跨刚构桥边跨现浇段施工技术研究[J].铁道建筑技术,2020(2):68-70,107.

ZHANG C X. Construction technology research on site pouring section at the edge of high pier large-span rigid bridge[J].Railway construction technology, 2020(2): 68-70,107.

[2] 赵建祥,张虎.高墩刚构桥边跨现浇段非对称施工技术研究[J].中外公路,2017,37(2):121-125.

ZHAO J X, ZHANG H. Research on asymmetric construction technology for side span cast-in-place section of high pier rigid bridge[J]. Journal of China & foreign highway, 2017, 37(2): 121-125.

[3] 赵东海.连续刚构桥边跨和中跨同时合龙施工技术[J].施工技术,2014,43(16):89-91.

ZHAO D H. Continuous rigid frame bridge side span and middle span closure construction technology at the same time[J]. Construction technology, 2014, 43(16): 89-91.

[4] 谭龙梦,于海,刘冬冬,等.利用挂篮进行PC斜拉桥边跨合龙技术[J].施工技术,2018,47(12):158-160.

TAN L M, YU H, LIU D D, et al. Application of hanging basket for PC cable-stayed bridge side span closure technology[J]. Construction technology, 2018, 47(12): 158-160.

[5] 章林.桥梁边跨现浇段支架优化设计[J].四川建筑,2022,42(5):126-128,132.

ZHANG L. Optimization design of cast-in-place support for bridge side span[J]. Sichuan Architecture, 2022, 42(5): 126-128,132.

[6] 潘柚材.刚构桥边跨现浇段支架施工技术重难点分析[J].运输经理世界,2023(2):94-96.

PAN Y C. Analysis of the key and difficult points in the construction technology of side span cast-in-situ support of rigid frame bridge[J].

-
- Transport business China, 2023(2): 94-96.
- [7] 徐艳珊.桥梁工程 T 构边跨现浇和合拢吊架法施工方法探讨[J].鄂州大学学报,2020,27(6):102-104.
- XU Y S. Discussion on construction method of cast-in-situ and closed hanger method for T-shaped side spans in bridge engineering[J]. Journal of Ezhou University, 2020, 27(6): 102-104.
- [8] 陈诚,杜磊,杜晶.山区连续刚构桥边跨现浇段施工技术 [J]. 中外公路,2021,41(3):151-155.
- CHEN C, DU L, DU J. Construction technology of side span cast-in-place section of continuous rigid frame bridge in mountain areas[J]. Journal of China & foreign highway, 2021, 41(3): 151-155.
- [9] 张磊. 悬空托架在连续刚构桥边跨现浇段施工中的应用[D]. 西安:长安大学, 2012.
- ZHANG L. Construction application of the hanging bracket in continuous rigid frame bridge edge across cast-in-site segments[D].Xi'an: Chang'an University, 2012.