

考虑焊接残余应力下的 索梁锚固结构主焊缝受力性能分析

王家悦¹, 盛兴旺²

(1. 长沙市规划设计院有限责任公司, 湖南 长沙 410005; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:赣江特大桥主桥为跨度 300 m 的双塔混合结合梁斜拉桥, 该桥型系首次在高速铁路上应用, 主跨的钢混结合梁索梁锚固系统采用新型锚拉板式结构, 其结构形式和施工工艺都进行了较大改进。索梁锚固结构采用焊接工艺, 锚固位置受力较为复杂, 施焊后焊接残余应力较大。为研究该区域主焊缝受力性能, 采用有限元软件 ANSYS 分别建立锚拉板结构的节段模型和主要受拉焊缝的热-结构耦合模型, 对该锚拉板结构连接部位进行考虑焊接残余应力下的受力性能分析。结果表明, 焊缝中间区域的最大残余应力未达到屈服, 其两侧区域的应力值较小而能够承担较大的外力, 焊缝的整体处于弹性工作状态, 具有一定的安全储备, 但是在设计施工与后期运营中应予以特别重视。

关键词:混合结合梁斜拉桥; 索梁锚固结构; 焊接残余应力; 有限元法

中图分类号: U24 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)02-0024-07

斜拉桥索梁锚固结构的形式多种多样, 有耳板式、锚管式、锚拉板式和锚箱式等, 不同的索梁锚固结构的受力状态各不相同^[1-2]。锚拉板式索梁锚固结构在结构和受力上较为简单, 近年来在公路、铁路斜拉桥上得到了更多的运用^[3-4]。索梁锚固结构一方面承受着斜拉索巨大的索力; 另一方面, 由于锚拉板结构的组成构件多, 构件之间都以焊缝进行连接, 这样势必在焊缝冷却之后产生焊接残余应力, 极大缩减了构件的使用寿命, 降低安全性能。目前, 国内学者已经对索梁锚固结构进行了大量试验研究和理论分析^[5-7], 其中, 张清华等^[8-9]分别对苏通长江公路大桥和安庆长江公路大桥的索梁锚固结构进行了研究分析, 索梁锚固区局部应力大、传力途径复杂, 应力集中现象明显, 是斜拉桥设计的关键部位。国外关于索梁锚固结构的专题研究文献比较少, 其中远藤武夫对多多罗大桥主跨 890 m 的索梁锚固结构钢锚箱进行荷载试验, 研究了结构的破坏形态和受力状态, 并根据试验结果对设计钢锚箱的结构形式进行了优化。国外各专家学者对于焊缝数值模拟的研究主要集中于造船、石油领域^[10-13], Cao^[14]研究了多道焊缝的焊接过程, 模拟了其中的三维热流过程, 并借助有限元软件分析了复杂结构中多道焊接过程的焊接残余应力与变形。锚拉板由不同钢板焊接而成, 而焊缝的焊接过程是不均匀的热过程, 导致在焊缝及其焊接区域内存在较大的焊接残余应力, 使得锚拉板在焊缝区域的受力更为不利^[15-17]。现阶段的设计与研究主要考虑斜拉索力作用下的结构分析, 对焊接残余应力综合作用下的结构受力状态研究相对较少。为深入探索考虑焊接残余应力下的索梁锚固结构受力性能, 以赣江特大桥为工程背景, 基于生死单元技术和热-结构耦合有限元分析方法^[18-19], 对锚拉板结构主焊缝连接部位进行考虑焊接残余应力下的受力性能分析, 为同类结构的设计计算提供参考。

1 工程背景

赣江特大桥, 全长 2 155.440 m, 是跨越赣江的控制性工程。赣江特大桥主桥是一座双塔混合结合梁

收稿日期: 2020-12-16 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20200184

基金项目: 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(2017zzts155); 中国铁路总公司科技研究开发计划(2015G001-G)

作者简介: 王家悦(1992—), 男, 工程师, 研究方向为大跨度桥梁科研与设计。E-mail: 18684670373@163.com

王家悦, 盛兴旺. 考虑焊接残余应力下的索梁锚固结构主焊缝受力性能分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(2): 24-30.

斜拉桥,分孔布置为(35+40+60+300+60+40+35)m,如图 1 所示,其中边跨主梁采用混凝土箱梁,中跨主梁采用钢箱-混凝土板结合梁。中跨主梁索梁锚固结构采用新型锚拉板式结构,相比于传统锚拉板有所改进,增加了承压板,取消了加劲板,将边腹板与锚拉板直接对焊等。赣江某特大桥主梁的锚拉板式索梁锚固结构主要由主板、上盘、锚管、加劲肋、承压板、锚垫板等组成。结构尺寸和各组成部件分别见图 2 和图 3。

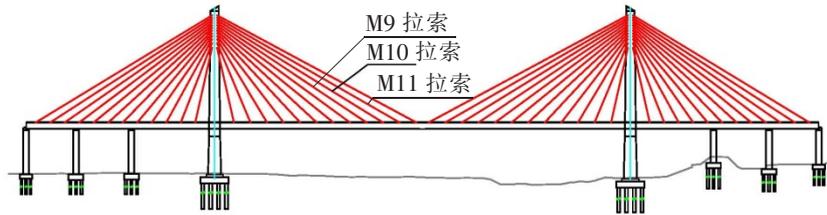


图 1 赣江特大桥主桥布置图

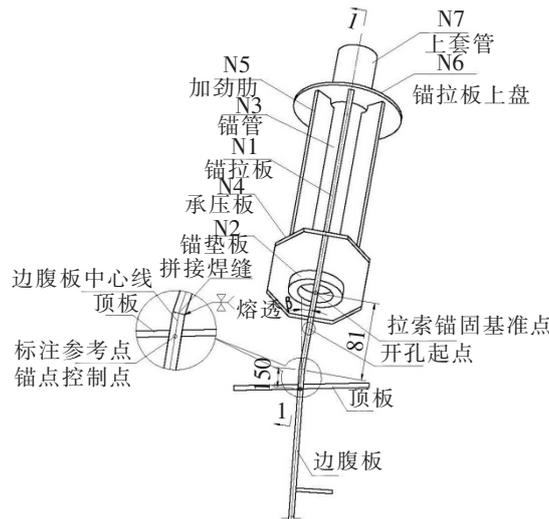


图 2 锚拉板的组成部件(单位:mm)

锚拉板结构的主要焊缝有主梁边腹板与锚拉板主板的连接焊缝、承压板与主板之间的连接焊缝、锚筒与承压板的连接焊缝等。锚拉板索梁锚固结构通过开坡口的对接焊将其主板与钢箱梁边腹板整体焊接,拉索力通过锚垫板传给承压板,再传至锚拉板其他构件,最后通过焊缝均匀传递到主梁边腹板上。钢箱梁边腹板(Q345qD)与锚拉板主板(Q420qE)的连接焊缝为锚拉板主要受力焊缝,焊缝形式采用双 V 形坡口焊缝(长约 3.9 m),焊缝结构如图 3 所示。

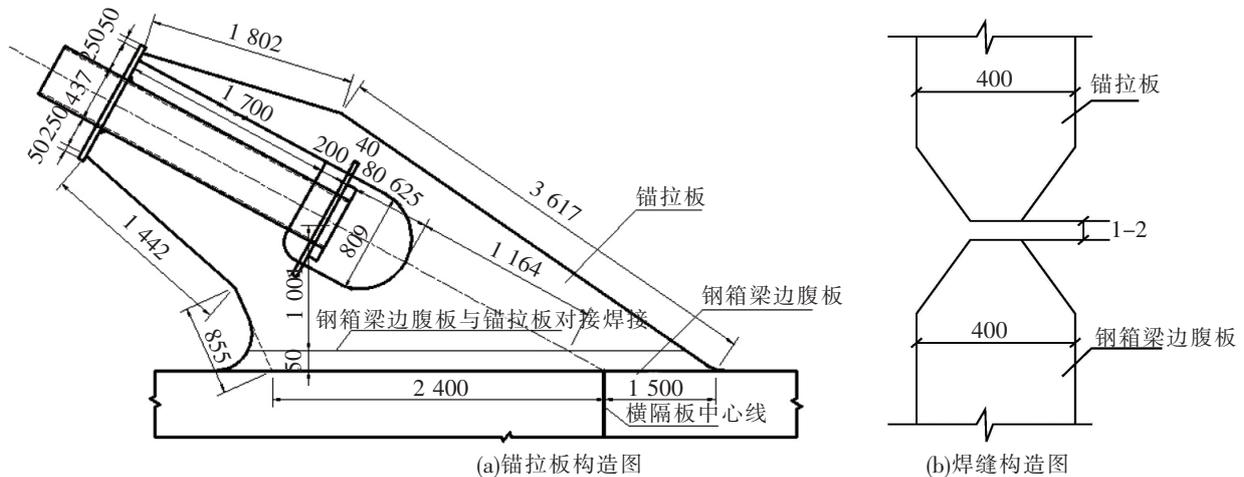


图 3 锚拉板构造与焊缝结构(单位:mm)

2 全桥有限元模型与索梁锚固结构有限元模型

本文主要研究索梁锚固结构的受力特性,选取其中索力最大的拉索的索梁锚固结构进行节段模型分析,对主梁边腹板与锚拉板主板连接部分焊缝进行热-结构耦合模型分析。

2.1 全桥有限元模型的建立与合理成桥状态分析

基于 Midas Civil 建立全桥有限元模型,其中,主梁、主塔采用梁单元,拉索采用杆单元,横隔板仅考虑质量,索梁和索塔之间、主梁和主塔之间采用主从约束连接,主梁和辅助墩之间、主塔与大地采用一般约束。确定主桥合理施工成桥状态的原则是保证每段钢箱梁在安装完毕后(即桥面板浇筑完成后的施工阶段)线型基本水平,并在最终合龙阶段实现无曲率合龙,荷载工况包括结构自重、二恒、索力、预应力和最不利静活载等。全桥有限元模型如图 4 所示,斜拉桥合理成桥状态索力汇总见表 1,以此为基础选择中跨最大索力的节间进行索梁锚固结构的节段模型分析。

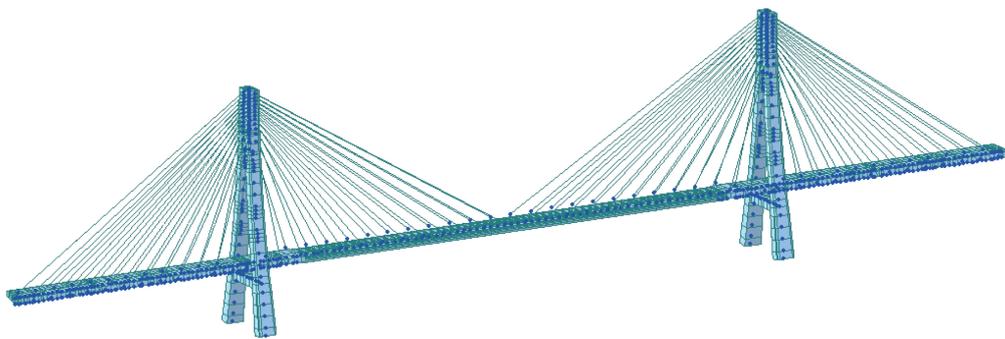


图 4 全桥有限元模型

表 1 赣江桥合理成桥状态中跨斜拉索索力汇总

斜拉索编号	合理成桥状态索力/kN	斜拉索编号	合理成桥状态索力/kN
M1	3 589.3	M7	4 037.2
M2	3 435.6	M8	4 302.8
M3	3 496.8	M9	4 391.5
M4	3 449.4	M10	4 396.9
M5	3 713.6	M11	4 294.6
M6	3 872.2	M12	4 210.9

2.2 索梁锚固结构有限元模型

在斜拉桥结构中,索梁锚固结构将斜拉索的索力安全、均匀地传递到主梁,索梁锚固结构刚度变化大、局部受力复杂,是控制设计的关键部位^[2]。为充分研究锚拉板结构的受力状态,明确结构的应力分布情况,建立包含完整锚拉板结构的精细化有限元模型进行分析。根据最不利受力的原则,选取索力值最大的中跨 M10 拉索对应的索梁锚固结构进行重点研究。

根据圣维南原理,为有效消除 M10 拉索对应钢箱梁节段两端的应力集中对其锚拉板的影响,选取 M9、M10、M11 3 对拉索对应的钢混结合梁(拉索编号见图 1),建立节段有限元模型,节段模型长 36 m,其中仅建立 M10 拉索对应位置的锚拉板,M9、M11 拉索对应位置的锚拉板不再建立,节段有限元模型如图 5 所示。从全桥梁单元模型中提取出节段模型对应的梁段端部和各拉索处的节点位移,将其作为位移边界条件施加到节段模型上。

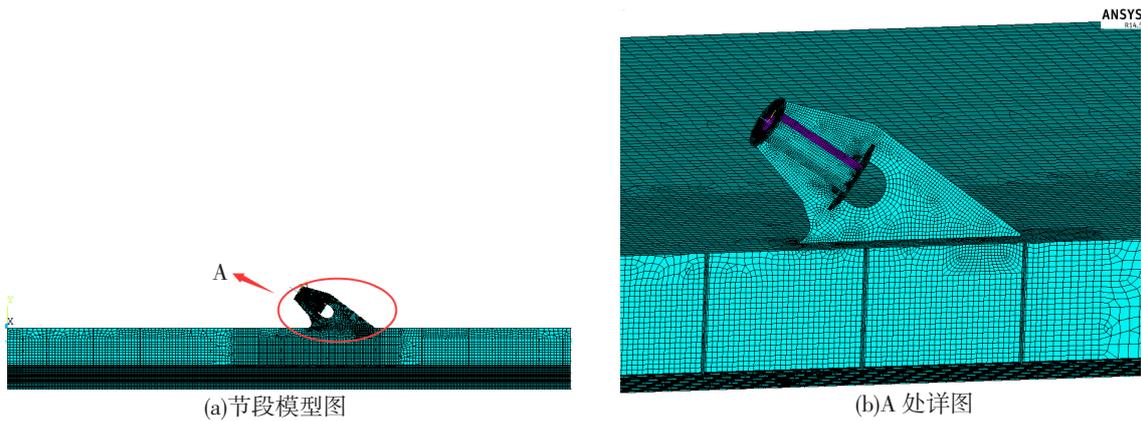


图 5 节段模型

2.3 焊接过程有限元分析

焊接过程的模拟基于 ANSYS 热-结构耦合模块,焊缝位置选择边腹板与锚拉板主板的连接部位。在分析过程中热分析单元采用 solid70 单元,结构分析采用 solid185 单元,热对流效应采用表面效应单元 surf152 单元进行换热模拟^[3]。考虑到焊缝长度对焊接残余应力影响不大^[3],本文焊缝有限元模型在纵向和竖向分别选取长度为 20 cm 和 15 cm 的钢结构进行焊接过程的数值模拟。为减少计算工作量和防止计算结果不收敛,在远离焊缝的区域采用单元尺寸较大的网格,在靠近焊缝的位置选取较密的单元网格。如图 6 所示,在焊接有限元模拟过程中,假设焊缝由无填充焊料状态向有填充焊料状态转变是一次成型的过程。

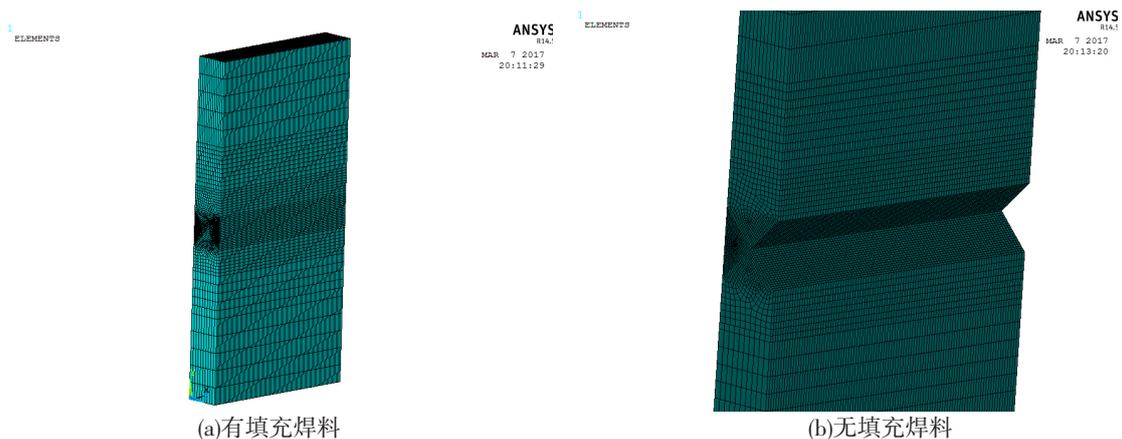


图 6 焊缝有限元模型

ANSYS 中对焊接过程的数值模拟方法主要采用热-结构耦合方法和生死单元技术。焊缝的焊接模拟过程主要有焊接热源的施加、焊接热对流、热辐射和焊缝的冷却过程等热传递过程。焊接热源以生热率的形式施加于焊缝单元,焊接热对流和热辐射以对流荷载的形式施加于焊缝单元^[3]。

假设焊接热源作用长度为 8 mm,最终冷却温度达到环境平均温度 20 °C,整个焊接过程分为温度荷载的施加、热对流和热辐射 3 个阶段。热分析过程中施焊时的对流系数和冷却时对流系数分别取 100 W/m² 和 70 W/m²。在温度场计算分析后,将有限元模型中的热分析单元转化为结构分析单元,同时将温度场计算得到的温度以体荷载的形式施加到结构单元上,得到焊接应力场^[3]。考虑到焊接热应力过程的复杂性,同时为了计算结果的准确性,将焊接过程的分析看作是材料非线性瞬态分析问题,选用理想弹塑性力学模型进行分析与求解。

3 考虑焊接残余应力下的索梁锚固结构主焊缝受力性能分析

3.1 锚拉板主板主焊缝静力分析

由图 7~图 9 可以看出,锚拉板与主梁边腹板连接处的焊缝主要以受拉力和剪力相互作用为主。正应力和剪应力随着焊缝的延伸都出现了 2 个峰值,正应力和剪应力在拉板的中间开口位置范围内达到谷值,说明锚拉板在这一位置处内力比较小而在两侧较大,符合一般的力学规律。最大拉应力为 57 MPa,最大剪应力为 56 MPa,在不考虑焊接残余应力的条件下均小于规范允许焊缝强度的限值。

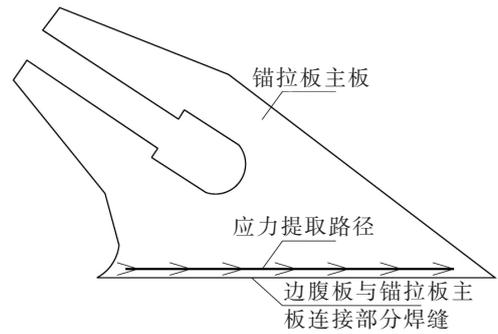


图 7 应力提取路径示意图

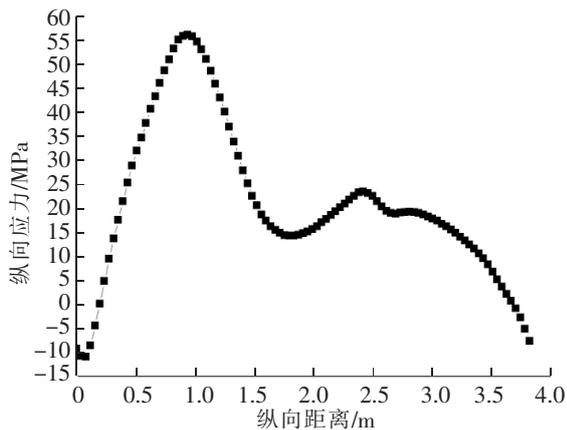


图 8 拉板路径正应力值

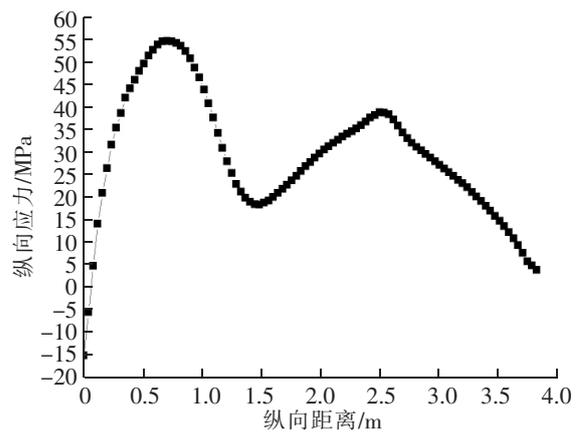
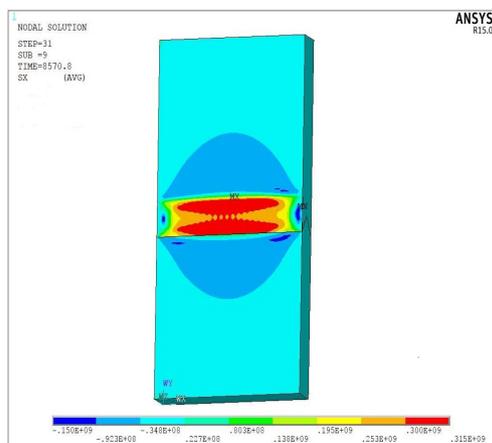


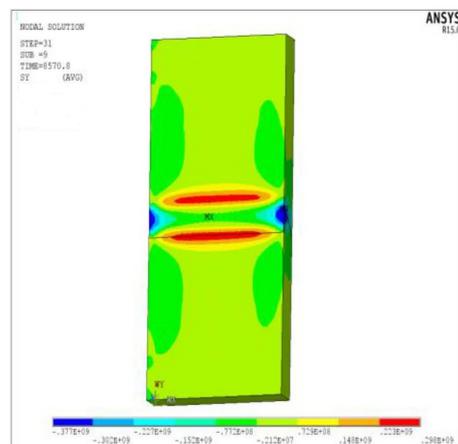
图 9 拉板路径剪应力值

3.2 主焊缝的焊接残余应力分析

由焊缝冷却后残余正应力分布云图(见图 10)可知:焊缝在经过热辐射散热冷却后的最大纵向焊接残余拉应力达 315 MPa,最大应力值接近材料的屈服强度,出现在焊缝与上下结构交界处,且沿焊缝的纵向形成一个稳定的应力场,焊缝的中间位置、锚拉板主板、边腹板焊接残余应力较小。焊缝横向残余应力分布范围较纵向应力小,集中在焊缝与上下结构交界处,最大横向焊接残余拉应力为 289 MPa。



(a)纵向正应力



(b)横向正应力

图 10 焊缝冷却后残余正应力分布(单位:Pa)

3.3 考虑焊接残余应力下的主焊缝应力分析

在考虑最不利恒载和活载组合工况下该处焊缝最大的竖向拉应力为 57 MPa。锚拉板焊缝长度范围内存在着最大为 315 MPa 的竖向残余拉应力,而在最大残余应力的两侧,残余应力逐渐减小。根据文献[20],结构应力与焊接应力叠加达到屈服点后,达到屈服点附近的应力不再增大,转由焊缝两侧未达到屈服点的弹性区域承担,最后直到全截面达到屈服点为止,所以控制焊缝承载能力的关键在于焊缝两端头的应力区域。而由上文可以看出,在考虑焊接残余应力后焊缝的最大应力值为 372 MPa,其两侧的弹性区域应力值更小,焊缝的整体受力仍未达到屈服,且焊缝两侧的弹性区域有较大的承载能力,所以该焊缝结构在考虑焊接残余应力后仍具有一定的安全储备。锚拉板该处焊缝的横向应力主要以横向焊接残余拉应力为主,横向结构受力几乎可以忽略,能够满足结构安全。

4 结论

以国内首座高速铁路混合梁斜拉桥——昌吉赣客专赣江特大桥索梁锚固结构为工程背景,采用有限元数值分析的方法研究了考虑焊接残余应力下的索梁锚固结构主焊缝的应力状态和规律,主要结论如下:

(1)在考虑焊接残余应力后焊缝的最大应力值为 372 MPa,其两侧的弹性区域应力值更小,焊缝的整体受力仍未达到屈服,且焊缝两侧的弹性区域有较大的承载能力,所以该焊缝结构在考虑焊接残余应力后仍具有一定的安全储备。

(2)由于焊缝中存在着三向的残余应力,是容易造成锚拉板焊接位置疲劳破坏的重要原因,建议在设计阶段和施工工艺阶段分别采用相关工艺来减小残余应力对结构焊缝处疲劳性能的影响。在设计阶段应尽量避免突变和尖角构件,减少结构受拉区的焊接接头数量,尽可能使焊缝布置在易于施焊的部位等;在施工工艺上尽量先焊接受力较大的焊缝,焊接过程中施加静载、振动的措施,采用冷焊法等工艺。

参 考 文 献

- [1]么超逸.大跨度铁路钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构行为分析与疲劳性能研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [2]王子健.大跨度钢梁斜拉桥索梁锚固结构空间受力行为及设计优化研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [3]郑纬奇,盛兴旺,王家悦.混合梁斜拉桥锚拉板主焊缝焊接过程数值分析[J].桥梁建设,2018,48(4):68-71.
- [4]张清华,李乔.超大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构试验研究[J].土木工程学报,2011,44(9):71-80.
- [5]陈涛.大跨度铁路斜拉桥受力特性及疲劳试验模型方案研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [6]陈康明,黄汉辉.锚拉板式索梁锚固结构焊缝抗疲劳性能研究[J].福州大学学报,2016,32(44):239-245.
- [7]康玲.正交异性钢桥面板纵、横肋焊接残余应力数值模拟[D].成都:西南交通大学,2016.
- [8]张清华,李乔.锚箱式索梁锚固结构受力特性研究 I:理论模型[J].土木工程学报,2012(7):120-126.
- [9]张清华,李乔.锚箱式索梁锚固结构受力特性研究 II:传力机理[J].土木工程学报,2012(9):100-107.
- [10]Zhang Qinghua, Cui Chuang, Li Qiao. Study on fatigue features of box-shaped cable-girder anchorage for cable-stayed bridges with steel box girders by model test[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2746:1259-1267.
- [11]Qureshi J, Lam D, Ye J. Effect of shear connector spacing and layout on the shear connector capacity in composite beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(4): 706-719.
- [12]Lee Y H, Joo Y T, Lee T, et al. Mechanical properties of constitutive parameters in steel-concrete interface[J]. Engineering Structures, 2011, 33(4): 1277-1290.
- [13]Kim S E, Nguyen H T. Finite element modeling and analysis of a hybrid steel-PSC beam connection[J]. Engineering Structures, 2010, 32(9): 2557-2569.
- [14]Cao Z. Metallo-Thermo-Mechanics application to phase transformation incorporated processes[J]. Engineering Structures, 2011, 32(9): 57-69.
- [15]袁鹏,李德建,李传习,等.四索面钢箱梁斜拉桥合理成桥状态下的空间受力研究[J].桥梁建设,2016,46(1):46-53.
- [16]盛兴旺,郑纬奇,戴劲.考虑整体节点刚域模拟影响的钢桁梁力学效应分析[J].桥梁建设,2016,46(6):78-82.
- [17]么超逸,蒲黔辉,施洲,等.大跨度铁路钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构疲劳性能试验研究[J].铁道学报,2015,37(8):72-79.

- [18] 颜东煌, 李学文, 刘光栋, 等. 用应力平衡法确定斜拉桥主梁的合理成桥状态[J]. 中国公路学报, 2000, 13(3): 50-52.
- [19] 王伟坤, 刘世忠. 钢-砼组合斜拉桥调索计算方法研究[J]. 公路工程, 2017, 42(5): 69-71.
- [20] 沈祖炎, 陈扬骥, 陈以一. 钢结构基本原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

Study on Mechanical Behavior of Main Weld of Cable Beam Anchorage Structure Considering Welding Residual Stress

Wang Jiayue¹, Sheng Xingwang²

(1. Changsha Planning & Design Institute Co. Ltd, Changsha 410005, China;
2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The main bridge of Ganjiang River bridge is a double-tower composite-beam cable-stayed bridge with the midspan of 300 m. It is the first time to apply this bridge type into the high speed railway. A new type of tensile anchor plate is used in the cable-beam anchorage zones of the midspan of main bridge. Obviously, the application of new structure must have many problems to be solved. The cable beam anchorage structure adopts welding technology, the stress of anchorage position is more complex, and the welding residual stress is large after welding. In order to study the mechanical performance of the main weld in this area, the finite element software ANSYS was used to establish the segmental finite element model and the thermal structure coupling model of the main tensile weld. The mechanical behaviors of cable-beam anchorage zones were researched considering welding residual stress. The results show that the maximum residual stress in the middle area of the weld does not reach the yield strength of the steel, the stress value of the two sides of the weld is small and can bear large external force. The whole welding seam is in elastic working state and has certain safety reserve, but it should be paid special attention in the design, construction and later operation.

Key words: steel concrete composite beam; cable beam anchorage structure; welding residual stress; finite element method