

文章编号: 1674—8247(2022)03—0019—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.03.004

矮塔斜拉桥拉索锚固区力学性能研究

李 博

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710000)

摘 要:新建济南至滨州高速铁路济阳黄河公铁两用特大桥主桥为(84+144+228+240+300+120+60) m 矮塔钢桁梁斜拉桥。其索塔锚固区为空间构造,结构和受力相对较为复杂。为研究该桥索塔锚固区锚固结构的力学性能,本文利用有限元分析软件 MIDAS FEA 建立了索塔锚固构造的精细化有限元模型,主要研究在主+附作用下的锚固结构的应力变化规律、斜拉索的索力变化对于锚固结构疲劳特性的影响以及板件厚度对于锚固结构力学性能的影响。结果表明:(1)锚固结构在各类荷载的作用下,各个板件均处于弹性状态,各个板件的等效应力均小于疲劳容许应力幅,满足设计要求;(2)合理增加承压板和锚垫板板厚可以有效提高钢锚箱的力学性能。

关键词:斜拉桥;锚固区;钢锚箱;受力分析;有限元分析

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A

Research on Mechanical Properties of Cable Anchorage Zone of Extra-dosed Cable-stayed Bridge

LI Bo

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: The main bridge of the Jiyang Yellow River Highway-Railway Combined Grand Bridge of the new Jinan-Binzhou High-speed Railway is an (84+144+228+240+300+120+60) m extra-dosed cable-stayed bridge with steel truss girder. The anchorage zone of the cable support tower is a spatial structure with relatively complicated structure and stress. In order to study the mechanical properties of the anchorage structure in the anchorage zone of the cable support tower, a refined finite element model of the anchorage structure of the cable support tower is established by using the finite element analysis software MIDAS FEA to mainly study the stress change law of the anchorage structure under the main + auxiliary action, the effect of the cable force change of the stay cable on the fatigue characteristics of the anchorage structure and the effect of the plate thickness on the mechanical properties of the anchorage structure. The results show that: (1) Under the action of various loads, each plate of the anchorage structure is in an elastic state. The equivalent stress of each plate is less than the allowable stress range of fatigue, which meets the design requirements. (2) Reasonably increasing the thickness of the bearing plate and the anchor plate can effectively improve the mechanical properties of the steel anchor box.

Key words: cable-stayed bridge; anchorage zone; steel anchor box; stress analysis; finite element analysis

矮塔斜拉桥是一种介于连续梁(刚构)与斜拉桥之间的一种刚柔相济的桥型,受力以梁为主,索为辅,

收稿日期:2021-10-30

作者简介:李博(1997-),男,工程师。

引文格式:李博.矮塔斜拉桥拉索锚固区力学性能研究[J].高速铁路技术,2022,13(3):19-23.

LI Bo. Research on Mechanical Properties of Cable Anchorage Zone of Extra-dosed Cable-stayed Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(3):19-23.

在一定程度上看,斜拉索为主梁体外束。通过索的加劲作用,有效降低了支点梁高。对于此类斜拉桥,其索梁锚固区^[1]和索塔锚固区^[2]构造形式一般比较复杂,在较大的索力作用下,应力集中现象极为显著,一向是桥梁设计研究过程中的重难点问题。因此,利用有限元方法对斜拉桥锚固区建立局部模型进行计算分析,明确其应力分布规律和传力路径,对于提高斜拉桥结构的稳定性和可靠性有着重要的作用。

鉴于锚固区存在特有的构造细节,仅仅通过简单的理论分析无法全面地反映锚固区的真实力学性能和相应的破坏特征^[3]。目前国内外学者对于锚固区的研究主要通过试验与有限元相结合的方法来进行。刘庆宽^[4]等人基于缩尺模型与有限元仿真相结合的手段对南京长江二桥的钢锚箱进行了相关的分析研究,明确了其主要构造的应力分布情况;鄢余文^[5]重点研究了钢锚箱主要板件的疲劳性能并对主要焊缝进行了分析;刘旭东^[6]通过有限元软件 ANSYS 对索梁锚固区的局部模型完成了相关静力和动力分析,确定了应力分布规律;毛晓东^[7]利用梁单元和实体单元分别建立了索梁锚固区的局部有限元分析模型,认为两种单元的配合使用对于解决索梁锚固区复杂边界条件方面有着重要的作用;戴晓春^[8]等经过计算分析后认为整体式钢锚箱可有效改善斜拉索索力较大这一不利工况下的索塔锚固问题;蒲黔辉^[9]等通过试验与有限元模拟相结合的方法对一新型的钢锚箱结构进行分析,结果表明此类新型钢锚箱可有效缓解应力集中现象;高建辉^[10]等建立了一单节段索梁锚固模型并对其进行足尺试验,在疲劳荷载作用下,该锚固区性能良好;满洪高^[11]整理分析了各类大跨结构的锚固构造,探究了锚固区板件的力学性能和引起应力集中的原因,并提出了相应的优化设计。

1 工程概述

济阳黄河公铁两用特大桥主桥的孔跨布置为 $(84+144+228+240+300+120+60)$ m 的公铁两用桥梁,采用公路在上、铁路在下的布置形式,主梁采用钢桁梁,主塔采用钢桥塔,结构体系采用塔梁固结、塔墩分离的结构体系。其中 $(228+240+300)$ m 为主跨,由于主跨多,矮塔斜拉桥采用多塔多主跨结构形式,具体为四塔三主跨矮塔斜拉桥结构;其余为边孔,跨度小,不需拉索提供竖向支撑,仅平弦即可满足受力要求。施工时可采用悬臂拼装或顶推进行施工。铁路荷载按照双线“ZK 活载”进行设计,公路按照双向

8 车道公路-I 级活载设计。大桥的总体布置和断面形式分别如图 1 和图 2 所示。

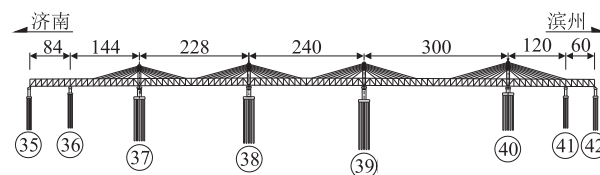


图1 桥跨布置图(m)

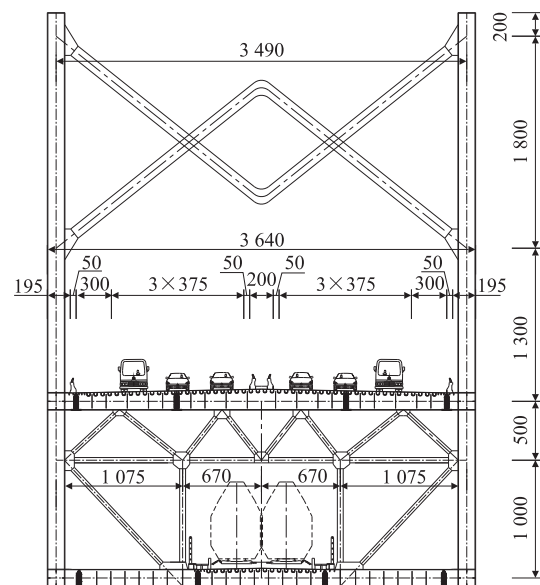


图2 横断面布置图(cm)

目前,国内大跨度的铁路斜拉桥较为常用的索梁、索塔锚固形式主要有钢锚箱锚固、钢锚梁锚固以及预应力锚固三大类。考虑到公铁两用桥荷载重,体量大等特点,济阳黄河公铁两用特大桥采用钢锚箱式锚固形式,在一定程度上增加了锚固区域的力学性能。

2 索塔锚固区有限元分析

2.1 索塔锚固计算分析模型

桥塔采用矩形钢桥塔,桥塔高度受遥墙机场飞机爬升控制面及锥形面内限高控制,37~40号墩塔高分别为28.5 m、31 m、33 m、36.5 m。

桥塔采用箱型截面,内宽1.4 m,纵桥外宽6.0 m,对应主桁腹杆4.0 m,板厚40 mm。锚箱构造如图3所示。

采用有限元分析软件 MIDAS FEA 建立索塔锚固区的精细化模型。考虑到钢桥塔顶部钢锚箱节段所受斜拉索索力最大,且斜拉索与塔柱切角最大,其承受的斜拉索水平分力和边中跨拉索不平衡力均最大^[12],故仅对钢桥塔顶部的钢锚箱节段建立有限元模型,进行

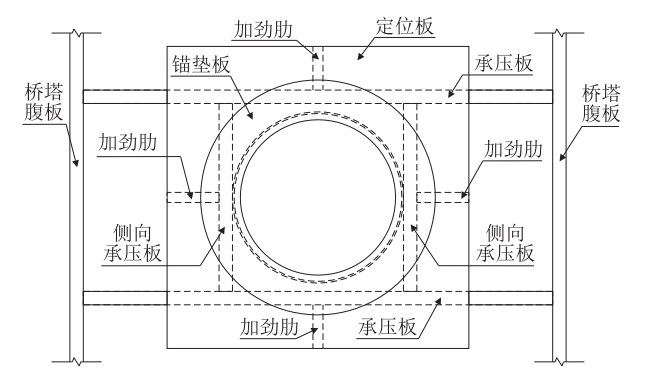


图 3 钢锚箱构造图

计算分析。钢锚箱是通过锚垫板、承压板和加劲板等不同厚度的钢板焊接构成的,考虑到其变形主要以翘曲为主,故采用板单元进行模拟。钢材均采用 Q370qE 钢,弹性模量 $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,泊松比 0.3。模型采用映射 + 自由网格划分,板单元形状为四边形,板单元尺寸取 0.05 m 为控制值,共计约 2.8 万节点、2.8 万单元。其中边界条主要以竖向约束为主,在关键节点处采用三向或双向约束。根据全桥有限元计算结果,荷载采用主 + 附作用组合下斜拉索最大索力 14 714.4 kN,理想状态下索力全部由锚垫板承担,将其转化为锚垫板处的法向面荷载,大小为 59 MPa,加载方式采用对称加载。各个板件的厚度如表 1 所示。

表 1 桥塔锚固区钢锚箱板件厚度表

构件	厚度/mm
钢桥塔腹板	40
承压板	40
侧向承压板	40
加强肋	30
定位板	50
锚垫板	50

2.2 索塔锚固模型的应力计算结果与分析

索塔锚固模型为空间有限元模型,构造复杂,故重点针对其变形和应力分布情况进行研究。在上述加载方式下,计算得到该锚固模型的变形图和应力云图。

其中,该锚固模型的顺方向最大位移为 1.68 mm,位于桥塔腹板顶部中央位置;横方向最大位移 1.45 mm,位于钢锚箱锚垫板顶部;竖向最大位移 0.08 mm,可忽略不计。

从工程实际的角度出发,考虑到钢结构的塑性变形,选择第四强度理论的等效应力即 VON MISES 应力作为主要应力计算结果,此外,还应考虑剪应力的分布情况。该锚固模型在主 + 附作用下的 VON MISES 应力云图和剪应力云图如图 4、图 5 所示。

从图 5 可以看出,钢锚箱在索力作用下整体受力

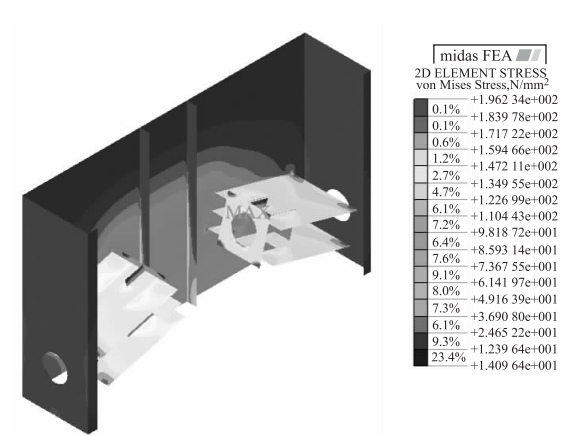


图 4 VON MISES 应力云图

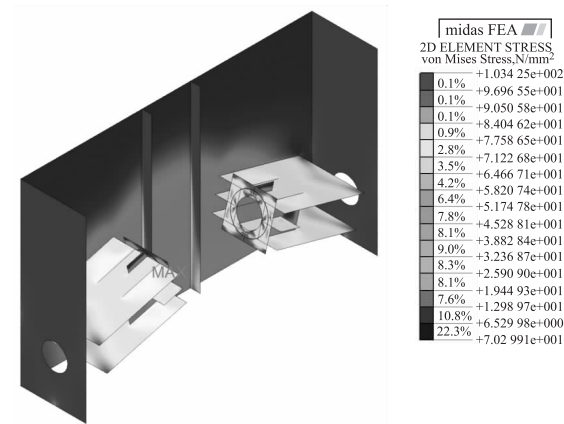


图 5 剪应力云图

较大,在锚箱和钢桥塔腹板的连接处有明显的应力集中现象,其中最大的 VON MISES 应力为 196.2 MPa,位于钢锚箱锚垫板处。同时,对于钢锚箱而言,各个板件的连接处也存在一定范围的高应力区域。钢锚箱各个板件的 VON MISES 应力大小如表 2 所示。

表 2 钢锚箱板件 VON MISES 应力表

构件	VON MISES 应力/MPa
钢桥塔腹板	195.7
承压板	183.6
侧向承压板	175.3
加强肋	163.8
定位板	188.9
锚垫板	196.2

根据 TB 10091 - 2017《铁路桥梁钢结构设计规范》表 A.0.2 的规定,Q370qE 钢的容许应力 $[\sigma] = 210 \text{ MPa}$,屈服强度按照厚板控制,为 360 MPa。计算结果表明,索塔锚固区钢锚箱各个板件的 VON MISES 应力均小于屈服强度,满足设计要求。

从图 5 可以看出,剪应力云图的结果大致与 VON MISES 应力云图较为相似,在各个板件连接处有明显

的的应力集中现象并存在一定范围的高应力区域,其中剪应力的峰值为 103.5 MPa,位于钢锚箱锚垫板处。钢锚箱各个板件的剪应力大小如表 3 所示。

表 3 钢锚箱板件剪应力表

构件	剪应力/MPa
钢桥塔腹板	81.7
承压板	99.6
侧向承压板	86.3
加强肋	92.9
定位板	93.9
锚垫板	101.5

根据图 5 所示结果,部分构件出现应力集中的现象,最大剪应力接近 103.5 MPa,但上述应力集中范围很小。根据 TB 10091 - 2017《铁路桥梁钢结构设计规范》表 3.2.1 规定 Q370qE 钢剪应力容许应力为 125 MPa,同时根据表 3.2.8 考虑主 + 附作用下的提高系数,最终规定控制应力为 162.5 MPa。根据最终计算结果所示,各构件剪应力均小于控制应力,满足要求。

2.3 索塔锚固模型的疲劳计算与分析

疲劳破坏作为钢桥的主要破坏形式之一,严重影响钢桥使用性能,降低了钢桥的整体质量。矮塔斜拉桥索塔锚固区的钢锚箱,长期承受来自于拉索索力的重复作用,极易发生疲劳损害,产生一系列不利的影响。故应对钢锚箱进行相应的疲劳应力幅计算。

基于 2.1 所建立的精细化有限元模型,边界条件和加载方式等保持不变,根据整体模型的计算结果,选取索力变化最大幅值 2 229.1 kN,理想状态下索力全部由锚垫板承担,将其转化为锚垫板处的法向面荷载,大小为 7.7 MPa。计算得到应力云图如图 6 所示。

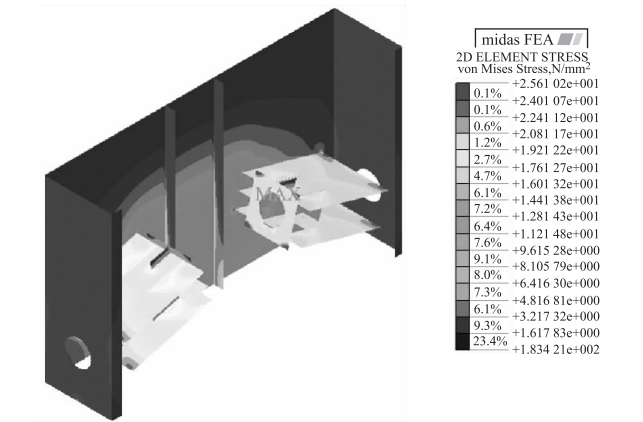


图 6 疲劳应力云图

根据图 6 所示的计算结果,钢锚箱最大 VON MISES应力为 25.6 MPa,位于钢锚箱锚垫板处。在各

个板件的连接处存在应力集中现象和小范围的高应力区域,但整体应力较低。根据 TB 10091 - 2017《铁路桥梁钢结构设计规范》表 3.2.7-1 和表 3.2.7-2 的规定,选取疲劳容许应力幅为 45 MPa。计算结果表明,各个板件的 VON MISES 应力均小于疲劳容许应力幅,满足结构的受力要求。

2.4 参数敏感性分析

一般来说,提升钢锚箱的力学性能主要有两种方法:一是提高钢材等级,二是增加板件的厚度。根据本文选中的桥型的实际情况考虑,优先考虑增加板厚的方法。

基于 2.1 所建立的精细化有限元模型,选取主要受力板件,假定各主要受力板件的基础厚度均为 40 mm。在确保其他板件尺寸不变的情况下,逐一更改某一板件的厚度,计算得到对应的 VON MISES 应力,具体结果如图 7 所示。

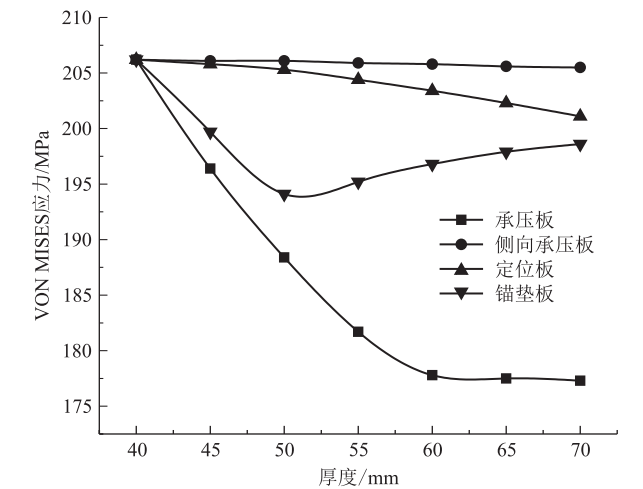


图 7 最大应力与板件厚度关系图

根据图 7 所示结果,不同板件对钢锚箱应力的影响不同。承压板和锚垫板板厚对钢锚箱应力情况影响较为明显,定位板和侧向承压板的板厚对于钢锚箱的应力分布情况影响较小,其中侧向承压板的影响可近乎忽略。

承压板板厚增加至 60 mm 时,钢锚箱应力降低了 13.7%,随后继续增加板厚,钢锚箱应力几乎未发生明显变化;锚垫板板厚增加至 50 mm 时,钢锚箱应力降低了 5.3%,随后随着板厚的增大应力反而出现上升的趋势;定位板板厚与钢锚箱应力的关系大致呈一次函数变化,随着板厚的增加应力水平逐渐降低,板厚为 70 mm 时,应力降低 2.5%;侧向承压板增加至 70 mm 时,应力降低不足 0.5%,在改善钢锚箱应力方面无明显效果。

综上所述,增加承压板板厚在改善钢锚箱应力方面有较为明显的作用,但不能一味的增加板厚,应结合实际情况综合考虑,选取较为经济适用的尺寸;注意控制锚垫板的厚度,本文所参考的济阳黄河公铁两用特大桥的锚垫板板厚为 50 mm,选择较为合适;从经济和受力角度来看,侧向承压板和定位板板厚不宜过厚。

3 结论

本文以济阳黄河公铁两用特大桥为研究对象,利用有限元法建立了钢桥塔锚固区的精细化有限元模型,计算并得到了在主+附作用组合下钢锚箱的变形和应力分布情况并对其进行了相应的疲劳计算和参数敏感性分析。主要结论如下:

(1)钢锚箱受力较大,在板件连接处和锚垫板处存在明显的应力集中现象。在主+附作用下最大 VON MISES 应力为 199.2 MPa,剪应力接近 103.5 MPa,均满足规范要求。

(2)该钢锚箱抗疲劳性良好,在变化索力作用下,疲劳应力幅为 25.6 MPa,满足规范要求。

(3)通过对各个板件厚度的分析,增加承压板和锚垫板的厚度对于提升钢锚箱的力学性能方面具有较为明显的作用。故建议在实际工程中优先考虑采用增加承压的厚度的方法来改善钢锚箱的性能。

(4)由于钢锚箱在连接处存在明显的应力集中现象,故在实际施工中须严格控制焊缝的施工质量。

(5)精细化的有限元建模在解决局部受力问题方面具有极高的精度和效率。本文的建模过程和分析方法可为类似桥型提供参考。

参考文献:

- [1] 李小珍,蔡婧,强士中. 大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构型式的比较研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(3): 73-79.
LI Xiaozen, CAI Jing, QIANG Shizhong. Studies on Models of Cable-Girder Anchorage for Long-Span Cable-Stayed Bridges with Steel Box Girder [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(3): 73-79.
- [2] 王永. 基于有限混合单元法的斜拉桥塔端锚固构造应力分析[J]. 铁道建筑技术, 2011(2): 20-23.
WANG Yong. Anchor Structure Stress Analysis of Cable-Stayed Bridge Tower End with the Mixed Finite Element Method [J]. Railway Construction Technology, 2011(2): 20-23.
- [3] 田宝华. 矮塔斜拉桥索梁锚固结构力学试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(6): 27-30.
TIAN Baohua. Experimental Study on Cable-Girder Anchorage Structure of Low Tower Cable-Stayed Bridge [J]. Railway Construction Technology, 2020(6): 27-30.
- [4] 刘庆宽,王新敏,强士中. 南京长江二桥南汉桥索梁锚固足尺模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 50-54.
LIU Qingkuan, WANG Xinmin, QIANG Shizhong. Full Scale Model Test on Anchorage Zone of the Second Yangtze River Bridge at Nanjing [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(2): 50-54.
- [5] 鄢余文. 安庆长江大桥索锚固结构静载与疲劳试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005: 27-30.
YAN Yuwen. Experimental Investigation on the Static Behavior and Fatigue of Cable-Girder Anchorage Structure of Anqing Yangtze River Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005: 27-30.
- [6] 刘旭东. 大跨度结合梁斜拉桥静动力计算及索梁锚固区详细应力分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
LIU Xudong. Static and Dynamic Calculation of Long-Span Composite Cable-Stayed Bridge and Detailed Stress Analysis of Cable-Girder Anchorage Zone [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [7] 毛晓东. 铁路矮塔斜拉桥索梁锚固区局部应力分析[J]. 兰州交通大学学报, 2018, 37(2): 1-6.
MAO Xiaodong. Analysis of Local Stress on Cable-Girder Anchorage Zone for the Extradosed Cable-Stayed Bridge in Railway [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2018, 37(2): 1-6.
- [8] 戴晓春,王应良,游励晖,等. 跨大型铁路编组站钢-混组合梁斜拉桥体设计[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(5): 48-52.
DAI Xiaochun, WANG Yingliang, YOU Lihui, et al. Overall Design of Steel-Concrete Composite Girder Cable-Stayed Bridge across Large Railway Marshalling Station [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 48-52.
- [9] 蒲黔辉,么超逸,施洲,等. 新型铁路钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构传力机理及应力分析[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(5): 12-18.
PU Qianhui, YAO Chaoyi, SHI Zhou, et al. Load Transfer Mechanism and Stress Analysis of New Type of Cable-Girder Anchorage for Railway Cable-Stayed Bridge with Steel Box Girder [J]. China Railway Science, 2015, 36(5): 12-18.
- [10] 高建辉,杨磊,孙维刚,等. 黑瞎子岛乌苏大桥索梁锚固结构模型疲劳试验研究[J]. 桥梁建设, 2013, 43(6): 7-12.
GAO Jianhui, YANG Lei, SUN Weigang, et al. Test Study of Fatigue of Cable-to-Girder Anchorage Structure Model of Wusu Bridge in Heixiazi Island [J]. Bridge Construction, 2013, 43(6): 7-12.
- [11] 满洪高. 大跨度钢斜拉桥索梁锚固结构试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007: 10-60.
MAN Honggao. Experiment Research for Cable-Girder Anchorage Structure of Long Span Steel Cable-Stayed Bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007: 10-60.
- [12] 梁金宝. 铁路斜拉桥钢锚箱索塔锚固区力学性能研究[J]. 铁道勘测与设计, 2020(3): 35-39.
Liang Jinbao. Study on Mechanical Properties of Steel Anchor Box Tower Anchorage Zone of Railway Cable-Stayed Bridge [J]. Railway Survey and Design, 2020(3): 35-39.