

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.06.061

滑动索鞍的试验研究

莫钊,黄子能,王耀,彭春阳,欧志莲,覃思慧
(柳州欧维姆机械股份有限公司,广西柳州 545005)

摘要:东明黄河大桥的斜拉体系改造工程是介于矮塔斜拉桥和悬索桥之间的一种新型桥体,采用新型钢丝斜拉体系,并在桥塔上设置滑动索鞍,通过索鞍的自适应滑动,使桥塔两侧的索力平衡。滑动索鞍是新型钢丝斜拉体系的关键技术,有必要进行滑动索鞍的模型试验研究。依托东明黄河大桥工程项目,介绍了滑动索鞍性能试验的模型设计以及试验实施方法,并通过智能张拉系统完成了循环耐久试验。试验结果表明,索鞍具有自适应滑动的功能和良好的滑动性能及耐久性,能满足新型钢丝斜拉体系的需求。

关键词:滑动索鞍;试验模型;滑动临界阻力;循环耐久试验;智能张拉系统

中图分类号:U443.38

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2023)06-0234-03

0 引言

东明黄河大桥的斜拉体系改造工程是介于矮塔斜拉桥和悬索桥之间的一种新型桥体^[1],采用新型钢丝斜拉体系,并在桥塔上设置滑动索鞍,通过索鞍的自适应滑动,使两侧索力平衡,减少不平衡力作用下桥塔根部的弯矩影响。

滑动索鞍是东明黄河大桥改造工程新型钢丝斜拉体系的关键技术^[1],主要构件包括鞍盖、鞍体、滚轴组件和索鞍底板等^[1],如图1所示。其中,索鞍通过索鞍体下滑动面、滚轴组件和底板上滑动面组成的滑动副可实现自适应滑动功能。为验证索鞍的自适应滑动功能和受力性能^[2]及滑动副的耐久性能,有必要依托东明黄河大桥工程项目,进行滑动索鞍的试验研究。

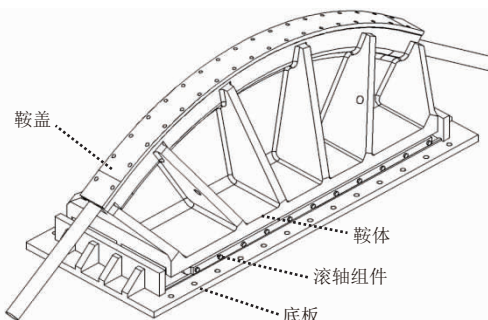


图1 滑动索鞍的构造图

1 试验模型设计

滑动索鞍的试验模型依据东明黄河大桥的实桥

收稿日期:2022-08-19

作者简介:莫钊(1990—),男,硕士,工程师,从事预应力技术的研究及应用工作。

受力工况进行设计,混凝土试验塔基座按实桥1:5比例进行制作。试验模型中,采用实桥同等规格的钢丝拉索作为试验拉索,制作长度为实桥拉索的1/5,在拉索两侧设置张拉设备,结合智能张拉系统来模拟实桥的受力工况^[3],试验模型如图2所示。

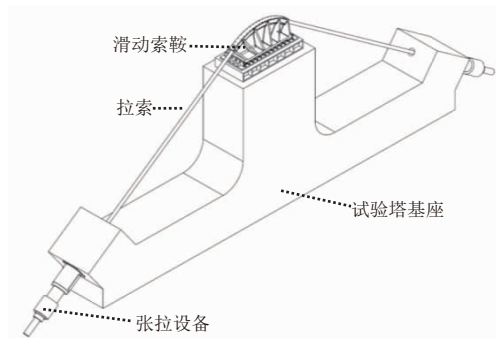


图2 试验模型

索鞍两侧的拉索采用智能张拉系统进行加载,可以模拟实桥的对称加载工况,同时可以模拟实桥在应用过程中存在不平衡力作用下的偏载工况。滑动索鞍的性能试验分为三部分,包括索鞍的静力性能试验和索鞍的滑动临界阻力测试及索鞍的循环耐久试验。

2 试验方法

2.1 试验模型制作与安装

(1)试验样品制作。制作混凝土试验塔基座、钢丝拉索、滑动索鞍、试验工装和张拉设备及检测仪器。

(2)试验测试仪器安装。在滑动索鞍的鞍体重要截面处粘贴应变片^[4],并接好测量电路,调试静态应变仪。应变片布置如图3所示。

(3)试验模型安装。按试验模型设计图,安装滑动索鞍、钢丝拉索和张拉设备,并连接智能张拉系统、检

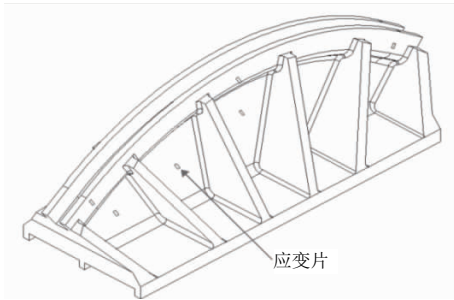


图3 应变片布置图

测设备及仪器等。

2.2 滑动索鞍的静力性能试验方法

通过智能张拉系统将索鞍两端的拉索加载至 500 kN 荷载,同时使滑动索鞍位于试验塔基座的中心位置。首先进行对称加载工况下的索鞍静力性能测试:索鞍两侧的拉索同步进行分级加载,加载过程中保持索鞍始终位于试验塔基座的中心位置,加载至 5 种不同的试验工况 (2 500 kN、3 000 kN、3 500 kN、4 000 kN、4 500 kN)时,通过静态应变仪进行静力数据采集。然后进行施加偏载工况下的索鞍静力性能测试:索鞍两侧的拉索同步加载至 2 500 kN 试验工况后,在一端施加不平衡荷载,由 2 500 kN 逐渐加载至 4 500 kN,通过读取位移计,记录滑动索鞍的滑动位移值。同时,通过安装在拉索两端的压力传感器,读取拉索两端的索力变化值,并通过静态应变仪进行静力数据采集,如图 4 所示。



图4 静态应变仪示意图

2.3 滑动索鞍的滑动临界阻力测试方法

在索鞍底板两侧分别设置位移计,索鞍两侧的拉索同步加载至 5 种不同的试验工况 (2 500 kN、3 000 kN、3 500 kN、4 000 kN、4 500 kN)时,进行静力数据采集。完成后在拉索的一端缓慢施加不平衡荷载,同时观察位移计变化。若位移计读数发生明显变化,则说明索鞍开始滑动,记录位移值和压力传感器的读数。试验重复 5 组不同的试验工况,每组进行 5 次测试,数据取平均值。索鞍滑动过程中,通过摄像监控系统观察并录像滚轴组件的滚动情况,观察是否有滚轴发生脱空现象及滚动不协调现象,如图 5

所示。



图5 摄像监控系统示意图

2.4 滑动索鞍的循环耐久试验方法

将滑动索鞍位于试验塔基座的中心位置,利用拉索两端的两台千斤顶对索鞍两侧的拉索进行同步张拉,达到试验工况 2 500 kN+F 后(F为使索鞍滑动的不平衡力,小于 800 kN),利用智能张拉系统来设置循环程序,控制 A、B 两端千斤顶,使自行走索鞍实现往复滑动。依据东明黄河大桥的实桥偏载工况,试验时设置循环次数为 7 200 次。智能张拉系统布置示意如图 6 所示。循环耐久试验完成后,进行索鞍的滑动临界阻力测试,并观察滑动索鞍滑动副的磨损情况。

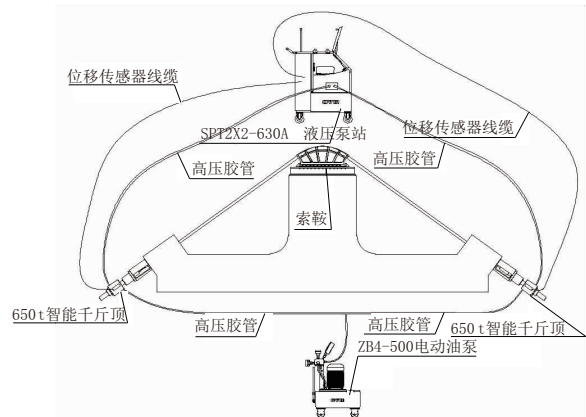


图6 智能张拉系统布置示意图

3 试验结果分析

3.1 滑动索鞍的静力性能试验

(1)对称施加荷载的工况下,进行索鞍的机械性能测试,通过静态应变仪采集到索鞍最大应变值为 296.08 个微应变($\mu\epsilon$),根据胡克定律^[5]($\sigma=\epsilon\times E$),计算得索鞍最大应力 $\sigma_1=296.08 \times 10^{-6} \times 2.02 \times 10^5=59.8 \text{ MPa}$ 。

索鞍材料为 ZG270-480H,依据设计规范,强度设计值 σ 不大于 200 MPa^[6];弹性模量 $E=2.02 \times 10^5 \text{ MPa}$,索鞍最大应力为 59.8 MPa,小于 200 MPa,满足规范要求^[6]。

(2)施加偏载的工况下,通过静态应变仪采集到索鞍最大应变值为 156.24 个微应变($\mu\epsilon$),根据胡克定律^[5],计算得索鞍最大应力 $\sigma_2=156.24 \times 10^{-6} \times 2.02 \times 10^5=32 \text{ MPa}$;索鞍最大应力为 32 MPa,小于 200 MPa,满足规范要求^[6]。

(3)偏载工况下,得到滑动索鞍的滑动趋势、位移值和索力变化值的试验数据(见表 1)。试验数据表明:测试过程中,无论从 A 端或 B 端施加不平衡力至 4 500 kN,拉索两端的索力均在索鞍的自适应过程中逐渐趋向于平衡。索鞍滑动的位移值均在 23 mm 左右,且当不平衡力消除过程,索鞍会逐渐滑动回到原始位置,即索鞍在偏载工况下,可以通过索鞍的自适应滑动功能,使桥塔索鞍两侧的索力平衡。

表 1 索鞍在偏载工况下的试验数据

施加荷载端	荷载值 / kN	A 端传感器读数 / kN	B 端传感器读数 / kN	位移值 / mm
A 端和 B 端	2 500	2 456.7	2 504.2	0.0
B 端	4 500	4 443.5	4 504.4	-23.1
B 端	2 500	2 448.3	2 472.9	-0.1
B 端	4 500	4 449.6	4 513.7	-23.4
B 端	2 500	2 476.2	2 498.3	-0.4
B 端	4 500	4 444.3	4 510.1	-23.4
B 端	2 500	2 482.7	2 504.2	-0.6
A 端和 B 端	2 500	2 482.7	2 504.2	-0.6
A 端	4 500	4 506.3	4 476.8	23.5
A 端	2 500	2 499.6	2 544.5	0.1
A 端	4 500	4 501.3	4 472.1	23.6
A 端	2 500	2 500.8	2 542.6	0.1
A 端	4 500	4 504.9	4 475.5	23.7
A 端	2 500	2 507.3	2 549.2	0.2

注:A、B 两端的中点为索鞍原位置(滑动的原点)。向 A 端滑动时,索鞍位移为正值;向 B 端滑动时,索鞍位移为负值。

3.2 滑动索鞍的滑动临界阻力测试

进行索鞍的滑动临界阻力测试时,索鞍滑动的临界点比较难界定,测试中以位移计的最小读数(读数为 0.10 mm)变化进行判断。试验过程中,测得在不同工况下,索鞍的滑动临界阻力数据,并计算索鞍滑动副的摩擦系数。试验数据见表 2。通过数据分析,滑动索鞍的滑动摩擦系数在 0.012 左右。滑动副具有良好的滑动性能。

3.3 滑动索鞍的循环耐久试验

(1)循环耐久试验后,测得在不同工况下,索鞍的滑动临界阻力数据(见表 3)。对比循环耐久前的数据进行分析:索鞍的滑动临界阻力和摩擦系数,循环试验前后的数值变化较小,表明滑动索鞍进行 7 200

表 2 索鞍的平均滑动临界阻力

加载工况 / kN	滑动临界阻力 / kN	摩擦系数
2 500	61	0.017
3 000	57	0.013
3 500	63	0.012
4 000	67	0.012
4 500	67	0.010

次循环耐久试验后,索鞍的滑动副仍具有良好滑动性能,满足设计的要求。

表 3 索鞍的平均滑动临界阻力(循环耐久试验后)

加载工况 / kN	滑动临界阻力 / kN	摩擦系数
2 500	44.0	0.012
3 000	44.1	0.010
3 500	45.1	0.009
4 000	46.8	0.008
4 500	54.5	0.008

(2)循环耐久试验过程中,通过摄像监控系统观察并记录索鞍各构件的运行情况。在试验过程中,索鞍运行正常,无异常情况发生。循环耐久试验完成后,对滑动索鞍的滑动副进行观察和检测,如图 7 所示。试验数据表明:滚轴的直径均在 $\phi 120 \pm 0.01$ 范围内,无变形现象,无摩擦损伤;索鞍滑动副的滑动面表面光滑,无明显磨痕,证实了索鞍的滑动副具有良好的滑动性和耐磨性。

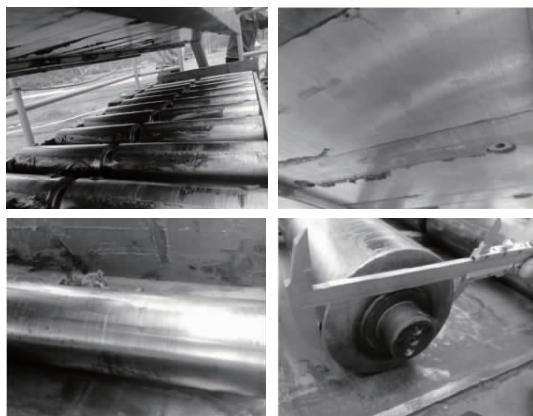


图 7 循环耐久试验后索鞍滑动副的情况

4 结 论

通过对东明黄河大桥的滑动索鞍进行模型试验,对索鞍的受力性能和自适应滑动功能及其滑动副结构的耐久性能进行了试验研究,主要得到以下结论:

(1)在滑动索鞍的静力性能试验中,无论是对称施加荷载还是施加偏载工况下,索鞍重要截面处,最大应力为 59.8 MPa,索鞍结构是安全可靠的。

(下转第 255 页)

- [24] HAN BG, DING SQ, YU X. Intrinsic Self-sensing Concrete and Structures: a Review[J]. Measurement, 2015(59):110-128.
- [25] HAN B, ZHANG L, ZENG S, et al. Nano-core effect in nano-engineered cementitious composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 95(1):100-109.
- [26] 彭玉龙,朱峰伟.3D打印技术在路桥施工中的应用[J].门窗,2018(7):239.
- [27] 李楠楠,弓磊.浅谈3D打印技术在工程建设技术上的应用[J].科技与企业,2016(6):175-176.
- [28] 何小刚,冯宝平,王凯,等.3D打印技术应用于标准粗集料制备的可行性研究[J].公路与汽运,2022(2):47-51,88.
- [29] 冯宝平,何小刚,陈搏,等.基于3D打印技术的粗集料标准模型制备效果研究[J].路基工程,2021(6):10-16.
- [30] Cantisani Giuseppe, D'Andrea Antonio, Di Mascio Paola et al. Materials study to implement a 3D printer system to repair road pavement potholes [J]. Transportation Research Procedia, 2023, 69(2): 91-98.
- [31] 李结义,何凡,石红磊,等.3D打印技术在路面修复工程的应用探讨[J].公路,2019,64(4):51-55.
- [32] YEON Jaeheum, KANG Julian, YAN Wei. Spall Damage Repair Using 3D Printing Technology[J]. Automation in Construction, 2018, 89(2):266-274.
- [33] 肖建庄,柏美岩,唐宇翔,等.中国3D打印混凝土技术应用历程与趋势[J].建筑科学与工程学报,2021,38(5):1-14.
- [34] 3D打印技术在铁路行业的应用[J].现代城市轨道交通,2022(9): 119-120.
- [35] 修磊.基于数值模拟及3D打印的铁路货车闸瓦托工艺技术研究[J].黑龙江冶金,2017,37(2):13-17.
- [36] 张磊,武永亮,刘涛,等.3D打印砂芯(型)在铁路铸钢件中的应用研究[J].特种铸造及有色合金,2017,37(10):1071-1074.
- [37] 杨亮,王树国,肖俊恒,等.一种采用3D打印技术对道岔性能改善的方法:中国,CN106513689A[P].2017.
- [38] CAMÁRA-MOLINA J.C, MOLINER E, MARTÍNEZ-Rodrigo M.D et al. 3D printed energy harvesters for railway bridges-Design optimisation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023(190): 110-133.
- [39] 曹金,祝弘滨,鲍飞,等.3D打印在轨道交通领域的研究现状及展望[J].机车车辆工艺,2018(3):10-11.
- [40] 祝弘滨,刘昱.金属3D打印技术在轨道交通装备领域的应用研究现状[J].现代城市轨道交通,2019(10):77-81.
- [41] 马明明,谭迈之,孙德祥,等.激光选区熔化成形高压接地开关传动件工艺与性能研究[J].电力机车与城轨车辆,2018,41(1):76-80.
- [42] Mona Soodi. Investigation of laser deposited wear resistant coatings on railway axle steels[D]. Melbourne: RMIT University, 2013.
- [43] 李丛辰,陈文静,向超,等.EA4T钢表面激光熔覆Fe314合金熔覆层的微观组织及性能[J].电焊机,2016,46(5):73-77.
- [44] 刘明磊,刘芳,陆兴.激光熔覆Ni30-WC合金粉末修补42CrMo钢的研究[J].大连交通大学学报,2017(4):130-133.
- [45] 岳峥,龙作虹.合金钢辙叉3D打印修复技术关键参数分析[J].价值工程,2020,39(20):199-202.

(上接第236页)

(2)试验研究表明,索鞍滑动副的摩擦系数为0.012左右,具有良好的滑动性能。在偏载工况下,索鞍可通过自适应滑动功能,使桥塔索鞍两侧的索力平衡,符合东明黄河大桥改造工程的应用要求。同时,可以为类似桥梁工程提供参考。

(3)循环耐久试验后,索鞍的整体构造无异常,滑动副的滑动临界阻力无明显变化,滑动面表面光滑,无明显磨痕,进一步证实了索鞍结构是可靠的,滑动副具有良好的滑动性能和耐磨性能。

(4)模型试验中,滑动索鞍的各组件安装简单、操作简便、施工工法可行,可为实桥的施工提供有价值的参考。

参考文献:

- [1] 黄子能,等.滑动索鞍的设计及分析[J].特种结构,2019,165(2): 53-56.
- [2] 沈锐利,等.独塔单跨地锚式悬索桥复合索鞍试验研究[J].桥梁建设,2019,49(5):15-19.
- [3] 武俊彦,等.斜拉加固用滑动索鞍模型静载试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2018(12):136-138.
- [4] 彭春阳,等.双塔单缆斜吊索悬索桥索夹的性能试验[J].预应力技术,2015,108(1):11-13.
- [5] 机械设计手册编委会.机械设计手册[M].3版.北京:机械工业出版社,2004.
- [6] JTG/T D65-05-2015,公路悬索桥设计规范[S].