

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.004

某景区人行玻璃索桥荷载试验及安全评估

代建波¹, 吕刚¹, 张仁猛², 粟海涛², 韩嘉昕²

(1. 西安石油大学, 陕西 西安 710065; 2. 陕西中立检测鉴定有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为保证某景区人行玻璃索桥的安全运营,通过桥梁外观检查,有限元建模分析,荷载工况设计,现场加载测试,对桥梁进行了静载试验。通过桥梁自振特性有限元分析和基于脉动法的桥梁动力特性测试对桥梁动力性能进行了试验和分析,并对桥梁的动力刚度进行了研究。最终根据试验结果对桥梁的安全性进行了评估。结果表明,该人行玻璃索桥在满足设计要求的试验荷载作用下刚度和强度满足规范和设计要求,结构基本处于弹性工作状态,受力和工作性能满足安全使用的要求。

关键词: 索桥;静载试验;动载试验;有限元分析;安全评估

中图分类号: U448.25

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)04-0016-05

Load Test and Safety Assessment of a Pedestrian Glass Suspension Bridge in a Scenic Spot

DAI Jianbo¹, LV Gang¹, ZHANG Renmeng², SU Haitao², HAN Jiixin²

(1. Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Shaanxi Zhongli Testing and Appraisal Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: In order to ensure the safe operation of a pedestrian glass suspension bridge in a scenic spot. The static load test of the bridge was carried out by means of the bridge apparent inspection, finite element modeling analysis, load working condition design and field loading test. The dynamic performance of bridge is tested and analyzed by finite element analysis of bridge self vibration characteristic and dynamic characteristic test of bridge based on pulsating method, and the dynamic stiffness of bridge is analyzed. Finally, the safety of the bridge is evaluated based on the test results. The results show that the stiffness and strength of the glass suspension bridge can meet the specifications and design requirements under the test load, while the structure is basically in the flexible working state, and the stress and the working performance meet the requirement of safe use.

Keywords: suspension bridge; static load test; dynamic load test; finite element analysis; safety assessment

悬索桥结构简单,受力明确,景区采用人行玻璃索桥穿越峡谷,同时具有造型美观,吸引游客的优点^[1-2]。我国目前还没有专门的规范对这类桥梁的检测、评估和验收做出明确的要求,使得这类桥梁缺乏严格的监管,可能存在着安全隐患^[3-5]。因此,需要行之有效的检测评估方法来确保此类桥梁的安全运行,以保障游客的生命财产安全。毛应飞等^[6]对人行索桥荷载试验验证进行了探索与研究,采用人工加载沙袋的简易方式对已建成的人行索桥按照设计荷载进行试验,利用全站仪对索桥跨中产生的垂

度进行测量,在加载到设计荷载后实测跨中最大相对垂度与设计值进行比较,结果表明,桥梁承载能力满足设计要求,结构安全可靠。黄学漾^[7]以某景区人行索桥为工程背景,通过现场勘察、有限元分析和静载试验分析了人行索桥的使用性能。结果表明人行索桥的基本传力路径与传统地锚式悬索桥传力路径完全不同,该桥抗扭刚度过低,在偏载作用下,结构性能不能满足正常使用要求。李万恒等^[8]提出了三塔悬索桥荷载试验的要点需增加中塔扭转工况和最大不平衡缆力工况作为主要工况;提出了三塔悬

收稿日期:2018-04-01

修稿日期:2018-04-29

基金项目:陕西省教育厅专项科研项目(15JK1562);陕西省教育厅重点实验室科研计划访问学者项目(14JS045);榆林市科技计划项目(2016-29)

作者简介:代建波(1983—),男,陕西榆林人,博士,讲师,主要从事结构振动控制及结构性能评估等方面的工作。E-mail: d_jianbo@foxmail.com

索桥结构校验系数常值的范围。基于脉动试验,测试了泰州长江大桥和马鞍山长江大桥的自振特性,并利用行车试验测试了两座桥的冲击系数。研究结果为三塔悬索桥荷载试验的实施提供了参考,同时为三塔悬索桥力学性能的研究提供了较好的数据支撑。何旭辉等^[9]对张家界大峡谷玻璃人行桥进行各工况作用下的模拟加载,并建立相应的有限元模型计算,将试验结果和计算结果进行对比,研究结果表明该桥具有足够的刚度和安全储备,为之后该类桥梁的设计和试验评价指标提供参考。

上述文献主要依据试验的方法对索桥的性能进行验证和评估,未系统按照检查、试验、有限元分析和评估的方法对桥梁进行安全评估,理论分析与试验验证结合较少。本文基于现场检查、检测,采用有限元方法进行分析,并与静、动力荷载试验相结合,对该桥梁结构性能进行试验测试,并对其安全性能进行评估。

1 工程概况

某生态旅游区内一座人行玻璃索桥,桥梁总长329.5 m,总宽2.7 m,采用三跨布置方案,主跨286.5 m,两边跨均为21.5 m,主跨矢量高14.8 m。主缆共2根,每根均由3根钢芯钢丝绳组成。主缆鞍座采用筒式鞍座,底座尺寸为1.15 m×0.82 m,由高强螺栓锚固于塔顶桥面。主索为2根钢丝绳,直径均为42 mm,主梁采用纵横梁格构钢结构体系,单根纵梁三跨一联,纵梁与横梁采用焊接连接。人行道板分为玻璃板和防腐木板两种,纵向中间210 m范围内采用玻璃板桥面,全桥纵向每3 m设置一个标准段。索桥平立面示意图如图1、图2所示,现状如图3所示。

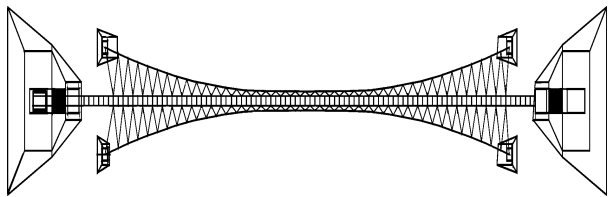


图1 索桥平面示意图

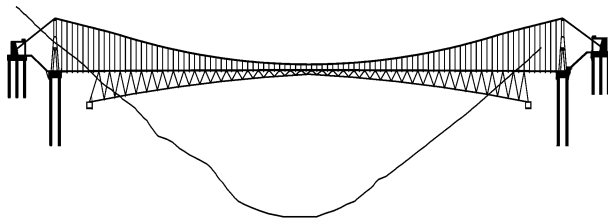


图2 索桥立面示意图

桥梁荷载试验前需对其结构整体状况进行外观检查,并对照设计文件等资料对其结构进行核查,重点检查有无造成安全隐患的结构质量缺陷并进行记录,以便在荷载试验和安全评估时能够合理的对试验现象进行分析^[10]。



图3 索桥现状图

2 桥梁静载试验

桥梁进行静载试验的主要目的是通过静力荷载的施加,检测其各控制截面的受力和变形情况,并确定其工作状态是否满足设计要求^[11-12]。

2.1 试验荷载

该试验悬索桥为行人桥,桥面宽度仅2 m,选用水箱进行加载。加载值根据式(1)等效换算而得^[12]:

$$0.95 \leq \eta_q = S_{\text{state}}/S(1 + \mu) \leq 1.05 \quad (1)$$

式中: η_q 为静力试验荷载效率; S_{state} 为某工况在试验荷载作用下的最大效应值; S 为某试验工况的最不利计算效应值; μ 为按规范取用的冲击系数。

一般的静载试验, η_q 值可采用0.95~1.05。其取值根据桥梁的调查、检查、验算资料是否齐全、完整来定^[13]。

2.2 理论计算分析

(1) 桥梁为主跨长286.5 m的双塔单跨悬索桥,矢跨比为1:19.2,采用MIDAS/Civil有限元分析软件进行模型的计算分析,如图4所示。

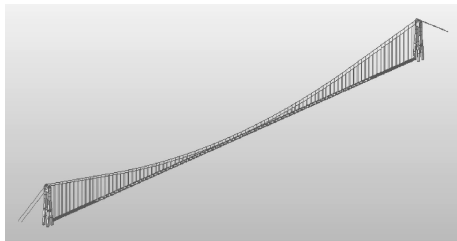


图4 桥梁分析模型

(2) 根据设计图纸及现场检查,模型中主梁采用钢结构,由横梁和纵梁组成,分别由两片 $\Phi 22$ 槽

钢及 $\Phi 16$ 槽钢焊接而成。桥面板中间 210 m 采用 3.6 cm 厚的钢化玻璃, 两侧其余部分采用 5 cm 厚木方铺就。主缆采用双索面布置, 索面横向间距 2.4 m, 每根主缆由 3 股 $\Phi 70$ 的钢丝绳组成, 钢丝绳弹性模量为 1.2×10^5 MPa。吊杆纵桥向间距为 2.4 m, 吊杆均采用中 $\Phi 20$ mm 钢丝绳。

(3) 设计荷载作用下, 主要构件主缆内力计算结果显示, 恒载作用下主缆内力为 4 292.4 kN, 活载作用下主缆内力为 3 597.6 kN。

2.3 荷载工况

对索桥的主跨进行荷载试验以考察桥梁的力学性能, 并评定其承载能力。桥梁设计人群荷载效应为 0.35 kN/m^2 (满足承载 200 人要求), 本次试验拟加载的总重量按 200 kN 控制, 大于 200 人总重, 加载长度为 90 m。采用水箱加载, 水箱长度 90 m, 放水深度 10 cm ~ 12 cm。根据桥梁的特点, 其控制内力和变形如下:

工况 1: 跨中对称加载, 该工况作用下, 测试中跨中截面桥面最大挠度、主塔变位、主缆索力、吊杆索力。

工况 2: 3/8 偏载加载, 主要目的考察桥梁在偏载情况下 1/4、3/8 跨截面桥面最大挠度、主塔变位、主缆索力、吊杆索力。

2.4 测点设置

本次静载试验的主要测试内容及测点布置如图 5 所示, 主要有: 桥面挠度: $F_2 \sim F_6$ 右侧, 纵梁上粘贴反光片; 主塔纵向变位 F_1 ; 吊杆应力: D_1/D_2 左右侧; 跨中主缆索力 T 。

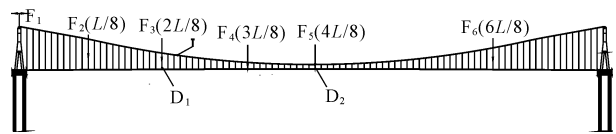


图 5 测点布置图

桥面挠度变形、主塔变位倾斜等采用全站仪检测。吊杆索力和主缆索力采用粘贴表面应变片的方式采集, 辅以频率索力仪校核。

2.5 加载分级

参考相关规范要求, 本次试验采用分级加载模式, 具体分级标准为: 试验加载时, 采用分级加载, 分级测试的方法。90 m 水箱纵向 30 m 一节, 分为 3 节加载, 每加满一个水箱为 1 级加载, 每一级为 10 cm ~ 12 cm 水高。

2.6 试验结果

(1) 表观观测结果。在整个荷载试验过程中,

桥梁由于结构体系较柔, 跨度较大, 存在桥面向一侧扭转现象, 表现在原吊杆与栏杆间距两侧较为对称, 加载后一侧间距变小, 甚至靠死, 另一侧间距张开加大 5 cm ~ 10 cm 现象, 相应的一侧水深 6 cm ~ 8 cm, 另一侧水深 12 cm ~ 14 cm。

(2) 挠度测试结果。各荷载工况下挠度测试结果及主要测点挠度校验系数见表 1 和表 2, 表中符号规定“-”表示向下挠, “+”表示向上挠。

表中计算值系根据各荷载工况实际加载位置和荷载量进行计算得到, 挠度校验系数取各截面实际测试值均值与理论计算值比较得到。

挠度及相对残余变形计算方法如式(2)所示:

$$f_P^1 = (f_p/f_i) \times 100\% \quad (2)$$

式中: f_p 和 f_i 分别为残余变形和实测变形。

表 1 工况 1 挠度测试结果及检验系数

位置/ 测点	挠度/cm			校验 系数	残余 值 /cm	相对 残余 /%
	测试值	弹性值	计算值			
墩顶水平 测点	0.3	0.3	0.6	0.50	0.0	0.0
L/8	3.5	3.2	4.2	0.76	0.3	8.6
L/4	-6.8	-6.2	-7.5	0.83	-0.6	8.8
3L/8	-23.6	-22.2	-38.1	0.64	-0.4	1.6
L/2	-35.1	-33.0	-53.8	0.63	-2.1	5.8
3L/4	-6.7	-6.3	-7.5	0.84	-0.4	6.0

由表 1 可知: 工况 1 跨中截面实测最大挠度为下挠 -35.1 cm; 主要测点校验系数位于 0.50 ~ 0.84 区间; 最大竖向挠跨比 $L/816$; 测点挠度的相对残余变形最大值为 8.8%。

表 2 工况 2 挠度测试结果及检验系数

位置/ 测点	挠度/cm			校验 系数	残余 值 /cm	相对 残余 /%
	测试值	弹性值	计算值			
墩顶水平 测点	0.3	0.3	0.6	0.50	0.0	0.0
L/8	-11.3	-10.8	-15.0	0.72	-0.5	4.4
L/4	-35.4	-33.6	-47.1	0.71	-1.8	5.1
3L/8	-37.6	-35.5	-55.1	0.64	-2.1	5.6
L/2	-23.3	-22.4	-31.3	0.72	-0.9	3.9
3L/4	11.5	10.5	16.5	0.64	1.0	8.7

由表 2 可知: 工况 2 跨中截面实测最大挠度为下挠 -37.6 cm; 主要测点校验系数位于 0.50 ~ 0.72 区间; 最大竖向挠跨比 $L/762$; 测点挠度的相对残余变形最大值为 8.7%。

2.7 索力测试结果

各荷载工况下桥梁索力测试结果、索力校验系数及相对残余见表 3 和表 4,表中“-”表示索力减少,“+”表示索力增加。此处索力测试结果是综合应变和索频率后的计算结果,吊杆和主缆弹性模量均取值为 1.2×10^5 MPa。

表 3 工况 1 索力增量及校验系数

位置/ 测点	索力/kN			校验 系数	残余 值 /cm	相对 残余 /%
	测试值	弹性值	计算值			
L/2 左侧 主缆	2565.0	2433.0	2825.2	0.86	132.0	5.1
L/2 右侧 主缆	2234.0	2122.0	2825.2	0.75	112.0	5.0
23 # 左侧 吊杆(L/4)	7.5	7.0	7.9	0.89	0.5	6.7
23 # 右侧 吊杆(L/4)	6.4	6.1	7.9	0.77	0.3	4.7
47 # 左侧 吊杆(L/2)	9.5	9.2	10.7	0.86	0.3	3.2
47 # 右侧 吊杆(L/2)	7.8	7.5	10.7	0.70	0.3	3.8

由表 3 可知:工况 1 吊杆索力增量最大测试值为 9.5 kN,对应应力增加 30.3 MPa。吊索索力校验系数位于 0.70 ~ 0.89 区间,左侧索力比右侧索力大。工况 1 吊索索力相对残余最大值为 6.7%。主缆索力增加 2 565 kN,对应应力增加 222.3 MPa。

表 4 工况 2 索力增量及校验系数

位置/ 测点	索力/kN			校验 系数	残余 值 /cm	相对 残余 /%
	测试值	弹性值	计算值			
L/2 左侧 主缆	2532.0	2411.0	2795.0	0.86	121.0	4.8
L/2 右侧 主缆	2210.0	2122.0	2795.0	0.76	88.0	4.0
23 # 左侧 吊杆(L/4)	8.5	7.9	10.7	0.74	0.6	7.1
23 # 右侧 吊杆(L/4)	7.3	6.8	10.7	0.64	0.5	6.8
47 # 左侧 吊杆(L/2)	8.1	7.6	9.2	0.83	0.5	6.2
47 # 右侧 吊杆(L/2)	7.4	7.0	9.2	0.76	0.4	5.4

由表 4 可知:工况 2 吊杆索力增量最大测试值为 8.5 kN,对应应力增加 27.1 MPa。吊索索力校验系数位于 0.64 ~ 0.83 区间。工况 1 吊索索力相对残余最大值为 7.1%。主缆索力增加 2 532 kN,对应应力增加 219.4 MPa。

3 桥梁动载试验

3.1 桥梁动载试验内容

桥梁的动力荷载试验的目的是研究桥梁结构的振动特性。这些测试结果数据是判断桥梁结构承载能力的重要指标。桥跨结构某振型的振动周期与结构的刚度有着确定的对应关系,因而可以通过振动频率判断桥梁结构的刚度^[14-15]。

3.2 自振特性理论分析

采用 MIDAS/Civil 有限元分析软件对该桥梁建立模型进行计算分析,并与脉动测试结果进行比较,对其动力性能进行分析和评估,经计算分析得到的该桥梁结构一阶振型如图 6 所示。

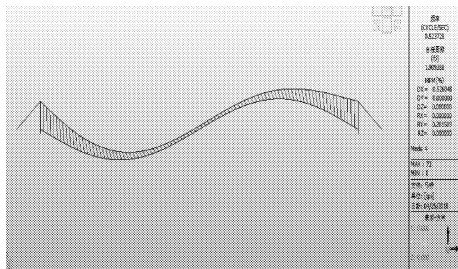


图 6 结构一阶振型图

3.3 桥梁自振特性测试

本次悬索桥自振特性测试采用脉动法。主要通过通过在桥上布置的传感器,对该桥梁结构在环境激励下振动时程进行记录和信号处理,并对其自振频率、振型和阻尼比等动力特性进行分析。

(1) 时域波形及功率谱曲线。对该桥进行脉动试验,分别在该桥 L/4 布置竖向传感器,全桥面共布置 2 个竖向传感器。实测本桥时域波形如图 7 所示。

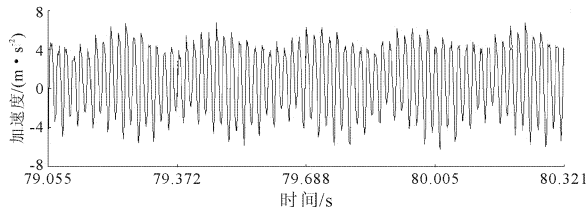


图 7 1# 传感器时域波形

(2) 自振频率测试结果。由于本桥较柔,在风荷载作用下本桥即产生有感振动,但振感并不强烈。脉动测试及分析表明,本桥竖向一阶振动周期 1.55 s,对应基频为 0.645 Hz。根据有限元软件分析得到的该桥梁结构一阶振型图可知该桥基频为 0.523 Hz。实测基频/理论基频 = 1.23,满足规范要求,数

值计算结果与理论计算结果相符。

4 桥梁安全性能评估

通过桥梁的表观检查结果,静、动力荷载试验结果和有限元分析结果,可以对桥梁的承载能力和结构安全性能做出合理评估。

4.1 表观观测结果分析

该桥梁表观检测未发现病害。荷载试验过程中结构未发生异响,结构由于跨径较大,结构柔度较大,加载过程中,桥面向一侧扭转,该侧挠度及吊索索力等均比另一侧大,但未超过规范要求。因此,其整体稳定性符合使用要求,但使用过程中应尽量避免人群单侧集中。

4.2 静载试验结果分析

(1) 结构刚度。所测试两工况最大下挠 - 37.6 cm,最大竖向挠跨比 $L/762$ 。各测试截面的挠度校验系数在 0.50 ~ 0.84,相对残余变形最大值为 8.8%。

(2) 结构强度。所测试两工况吊杆索力最大增加 9.5 kN,对应应力增加 30.3 MPa;主缆索力增加 2 565 kN,对应应力增加 222.3 MPa;吊索索力校验系数在 0.64 ~ 0.89 之间,卸载残余在 3.2% ~ 7.1%;主缆索力校验系数 0.75 ~ 0.86,卸载残余 4.0% ~ 5.1%。

以上测试数据表明桥梁结构刚度和强度满足规范和设计要求,结构处于弹性工作状态。

4.3 动载试验结果分析

本桥实测竖向基频大于理论计算基频 0.523 Hz,这说明该桥的实际动力刚度大于规范值,该桥动力性能较好。

4.4 安全性能评估

经过对试验桥梁的静动力性能的系统测试,获得了结构整体受力性能的测试数据,经对相关测试结果的分析可知,该人行玻璃索桥在设计荷载作用下其安全性能满足使用要求,桥梁使用过程中应尽量避免人群单侧集中,并采取措施对桥面扭转现象进行校正。

5 结 论

(1) 通过对该景区人行索桥的经动力性能系统测试可知其整体稳定性、结构刚度、结构强度和动力

性能均满足设计要求,工作性能正常。

(2) 通过工程案例较为系统的介绍了此类人行玻璃索桥的荷载试验和安全评估过程,可为同类工程问题提供一定的借鉴作用。

(3) 景区人行索桥的荷载试验和安全评估工作是结桥梁安全使用的前提和依据,只有通过科学的试验和评估,确定桥梁的各项性能,才能消除运行的安全隐患。

参考文献:

- [1] 周 波,黄 嘉.某大跨景观桥结构参数化设计及分析[J].建筑结构,2017,47(19):48-52.
- [2] 刘箬霖,梁仁鸿.悬索桥发展概述及展望[J].交通世界(运输车辆),2015(5):98-100,103.
- [3] 周玉龙.山区人行悬索桥初步设计研究[D].杭州:浙江大学,2010:1-5.
- [4] 陈政清,雷 旭,华旭刚,等.大跨度山区悬索桥的悬架技术应用与研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(1):1-10.
- [5] 黄祖华.某地锚式悬索桥施工监控研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(5):194-197.
- [6] 毛应飞.人行索桥荷载试验验证探索与研究[J].黑龙江交通科技,2013,36(9):161-163.
- [7] 黄学漾.景区人行索桥检测方法研究[J].福建交通科技,2017(3):71-75.
- [8] 李万恒,王元丰,李鹏飞,等.三塔悬索桥荷载试验研究[J].公路交通科技,2017,34(1):61-66.
- [9] 何旭辉,周 蕾,邹云峰,张家界大峡谷玻璃桥静载试验研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(4):970-978.
- [10] 辛付开,韩依璇,张国荣.某在役悬索桥平行钢丝主缆检查及腐蚀规律研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(3):119-122.
- [11] 胡帮义,许 波,袁向荣.基于 Midas 的人行天桥静动力分析及试验检测评估[J].黑龙江交通科技,2015,38(5):73-75.
- [12] 祁志刚.多塔悬索桥静动力特性及结构体系适宜性研究[D].北京:北京建筑大学,2014:21-22.
- [13] 周君嵩,陈 晟.景区人行索桥的检测和评估[J].世界桥梁,2013,41(3):81-84.
- [14] 可 路,王达磊,陈艾荣.景区大跨径人行索桥人致振动响应研究[J].公路交通科技,2013,30(3):101-105.
- [15] 余加勇,邵旭东,孟晓林,等.基于自动型全站仪的桥梁结构动态监测试验[J].中国公路学报,2014,27(10):55-63.