

地锚式人行悬索桥维修改造后试验研究

赵明哲

(山东高速工程检测有限公司, 山东 济南 250002)

【摘要】某地锚式人行悬索桥根据桥梁检测报告及现场调查, 主要病害为桥道系结构锈蚀严重, 维修改造方案为桥面桁架体系、索夹铰及索鞍等构件除锈、防腐涂装和更换夹具、锚固螺栓及桥面铝合金板。为验证实桥改造效果, 开展桥梁静、动载试验进行研究。结果表明: 改造后桥梁静载试验分析结果与仿真计算值吻合良好; 该前三阶频率实测值均大于理论值, 实测振型与理论振型吻合良好; 该桥维修改造后强度及刚度均达到设计使用要求。

【关键词】悬索桥; 力学性能; 有限元法; 荷载试验; 应用效果

一、引言

人行悬索桥多建于景区山峰峡谷之间, 主要承受人群荷载及风荷载作用, 采用钢结构减轻自重提升跨径的同时, 久之会出现相应结构锈蚀问题, 需要对结构进行加固改造维修^[1]。验收性静动载试验是检测维修改造设计理想与否、施工质量是否安全的直接手段, 本文以某地锚式人行悬索桥为工程背景, 通过仿真计算及试验分析, 研究静动载试验的步骤及关键技术, 评价实桥维修改造效果。

二、工程概况

某地锚式人行悬索桥跨径 98 m, 主缆主跨采用跨径 98 m, 垂跨比 1/15, 两岸锚链段锚索斜度均为 22° , 按对称结构处理; 跨中预拱度值 52 cm, 其余截面预拱度均以二次抛物线由跨中分配至索塔; 每侧 16 根 $\Phi 30$ 钢丝绳, 钢丝直径 3mm, 极限强度为 1960MPa; 索鞍为钢筋混凝土结构, 吊杆为钢索, 索塔塔身为 C30 砼, 基础 C25 砼; 桥面护栏采用钢管护栏焊接至桥面槽钢, 桥面铺装为 3mm 铝合金花纹板, 桥型布置图如图 1 所示。主要维修改造方案为桥面桁架体系、索夹铰及索鞍等构件除锈、防腐涂装和更换夹具、锚固螺栓及桥面铝合金板。

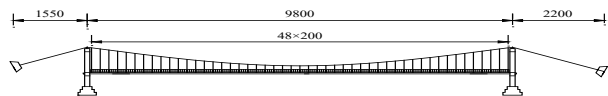


图 1 桥型布置图 (单位: cm)

三、试验模型及试验内容

(一) 建立有限元模型

根据桥梁设计文件, 利用桥梁空间分析程序 Midas/Civil 进行建模分析, 其中主塔、主梁纵梁

及横梁采用梁单元模拟, 主缆及吊杆采用只受拉桁架单元模拟, 护栏荷载采用梁单元荷载添加, 人群荷载面荷载施加于主梁, 塔底及锚碇采用固结约束, 主梁梁端简支约束^[2]。本桥的设计荷载为人群荷载: 全桥 3 kN/m^2 , 局部 5 kN/m^2 , 通过对该桥的有限元分析, 桥梁在设计活载作用下位移等值线图如图 2 所示。

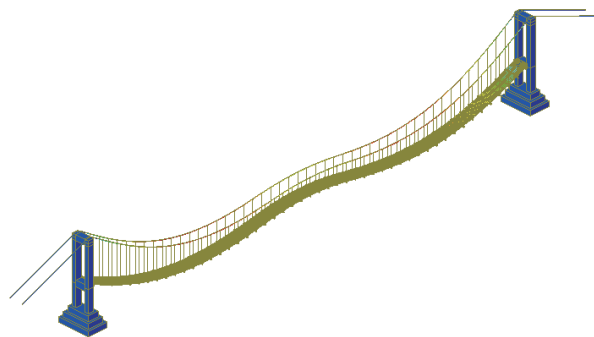


图 2 活载作用下位移等值线图

(二) 试验内容

通过静载试验, 了解桥跨结构在试验荷载作用下的工作状态, 验证实桥维修改造效果。静载试验现场测试的主要内容有:

1. 主梁控制截面在试验荷载下的应变;
2. 主梁控制截面在试验荷载下的挠度^[3];
3. 吊杆控制截面在试验荷载下的索力;

动力测试主要测定桥梁的固有频率、振型分析, 并将其与理论值进行比较, 以对该桥动力性能进行评价。动载试验的主要内容有:

脉动试验: 利用桥梁在各种随机环境激励或人行荷载激励下引起的振动响应, 采集加速度信号, 分析得到桥梁结构的固有频率和结构振型^[4]。

四、试验研究

(一) 静载测试截面及试验工况

本次静载试验选择主桥 1/2 跨、1/4 跨进行测试，通过分析计算，确定 2 个主要测试截面 J1、J2 截面。工况 1：J1 截面是人群荷载作用下主梁 1/2 跨最大挠度控制截面；工况 2：J2 截面是人群荷载作用下主梁 1/4 跨最大挠度控制截面。

为了保证试验的有效性，根据各测试截面的内力、挠度与索力影响线，按最不利位置加载，经计算确定静载试验加载区域及加载重量。本次人行悬索桥荷载试验共需 2t 水袋 12 个，静载试验用水袋如图 3 所示，根据加载水的重量分级进行加载。



图 3 现场水袋加载图

试验加载区域示意图如图 4 及图 5 所示。

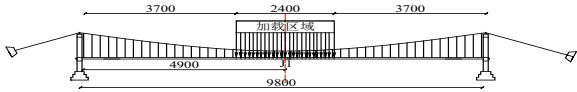


图 4 工况 1 加载示意图

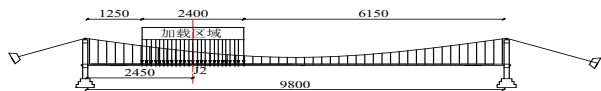


图 5 工况 2 加载示意图

(二) 静载试验效率

上述各工况中试验荷载对测试截面产生的挠度效应和标准活载挠度效应的最大值汇总如表 1 所示，试验荷载效率系数介于 0.98 ~ 1.00 之间，满足相关规范要求^[5]。

表 1 试验效率汇总

序号	控制截面	测试项目	设计值 (mm)	试验值 (mm)	试验效率
工况 1	J1 截面 (1/2 跨中载)	最大挠度	-198	-198	1.00
工况 2	J2 截面 (1/4 跨中载)	最大挠度	-301	-294	0.98

(三) 动载试验测试截面及试验工况

本次动载试验在桥梁四分点布置加速度传感器，桥梁结构动力特性采用环境激励为主的激励方式拾振。

(四) 测点布置

应变测点布设于测试截面位置处，在主梁左右两侧对称布置，每个测试截面布置 4 个应力测点，其具体布设如图 6 所示，1、3# 点为左侧，3、4# 点为右侧。

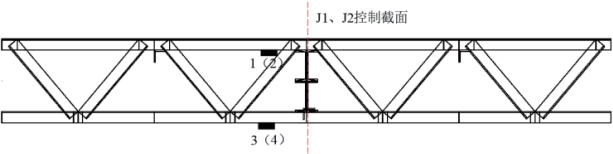


图 6 应力测点布设图

挠度测点布设于测试截面位置处，吊杆和主梁、吊杆和主梁交接处，左右侧对称布置，每个测试截面布置 4 个挠度测点，其具体布设如图 7 所示，1、3# 点为左侧，3、4# 点为右侧。

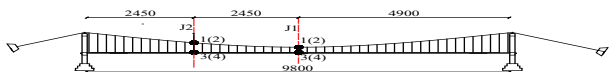


图 7 位移测点布设图

吊杆索力测点布设于测试截面对应的吊杆跨中位置处，主梁左右两侧对称布置，共布置 4 个测点位置，1# 点为左侧，2# 点为右侧。其具体布设如图 8 所示。

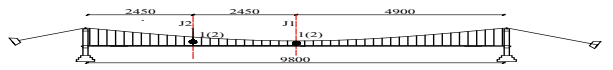


图 8 吊杆索力测点布设图

五、试验结果分析

(一) 静载结果及分析

在各静载试验工况下，主梁各控制断面的应变校验系数介于 0.88 ~ 0.97 之间，主梁各测点的应变实测值均小于理论计算值，卸载后主梁应变相对残余介于 2.1% ~ 8.2% 之间，表明桥跨结构在试验荷载作用下，主梁的强度满足设计要求，结构始终处于弹性工作状态^[6]。试验测试结果见表 2 所示。

在各静载试验工况下，主梁各控制断面的挠度校验系数介于 0.91 ~ 0.94 之间，主梁各测点的挠度实测值均小于理论计算值，卸载后主梁挠度相对残余介于 0.36% ~ 0.77% 之间，表明桥跨结构在试验荷载作

用下，主梁的刚度满足设计要求。

在各静载试验工况下，吊杆各控制断面的索力增量校验系数介于 0.78 ~ 0.88 之间，吊杆各测点的索力增量实测值均小于理论计算值，表明桥跨结构在试验荷载作用下，吊杆索力满足设计要求。

表 2 应变测试数据表

工况	编号	满载弹性应变 ($\mu\epsilon$)	残余应变 ($\mu\epsilon$)	相对残余 (%)	计算应变 ($\mu\epsilon$)	校验系数
J1 截面	1#	-58	-5	7.9%	-63	0.92
	2#	-57	-3	4.8%	-63	0.91
	3#	593	15	2.5%	611	0.97
	4#	544	13	2.1%	611	0.89
J2 截面	1#	-44	-1	2.1%	-48	0.91
	2#	-44	-4	8.2%	-48	0.91
	3#	436	16	3.3%	485	0.90
	4#	451	14	2.9%	485	0.93

表 3 挠度测试数据表

测点部位		弹性变形 f_e (mm)	残余变形 f_P (mm)	相对残余变形	计算值 f_s (mm)	校验系数
J1 截面	1#	181	2	1.10%	198	0.91
	2#	185	1	0.54%	198	0.93
	3#	185	3	1.64%	200	0.92
	4#	183	2	1.09%	200	0.92
J2 截面	1#	279	1	0.36%	301	0.93
	2#	281	4	1.42%	301	0.93
	3#	284	5	1.77%	304	0.94
	4#	282	3	1.06%	304	0.93

表 4 索力增量测试数据表

测点部位		实测值 f_e (kN)	计算值 f_s (kN)	校验系数
J1 截面	1	6.5	7.7	0.84
	2	6.8	7.7	0.88
J2 截面	1	6.4	7.9	0.81
	2	6.2	7.9	0.78

(二) 动载结果及分析

通过有限元软件特征值计算，得到全桥结构前 3 阶振型及频率，并对实测加速度时程曲线联合基于傅立叶变换的谱峰值法、随机子空间法以及随机减量法进行振动特性参数分析，测试数据见表 5，实测振型与理论振型对照图见图 9。

表 5 桥梁基频实测值

振型	振型特点	实测频率 f_{mi} (Hz)	理论频率 f_{di} (Hz)	f_{mi}/f_{di}
1	一阶反对称竖弯	0.64	0.56	1.14
2	一阶正对称竖弯	0.88	0.85	1.04
3	二阶正对称竖弯	1.42	1.32	1.08

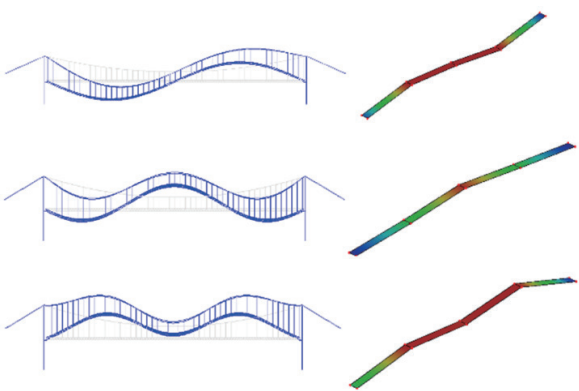


图 9 理论振型与实测振型对照图

从上述图表可以看出，该桥的频率实测值均大于理论值，其中 1 ~ 3 阶基频实测值与理论值的比值均大于 1，实测振型图与理论振型图吻合良好，表明结构整体刚度大于理论设计刚度^[7]。

六、结论

本文以某地锚式人行悬索桥维修改造项目为工程背景，开展桥梁静动载试验研究实桥改造效果。经过对改造完成后的桥体结构进行了相关的试验后，得到以下的结论：

1. 改造后桥梁静载试验分析结果与仿真计算值吻合良好，主梁控制截面应变及挠度介于 0.88 ~ 0.97 之间，符合规范要求且在正常取值范围之内。
2. 动载试验表明，该前三阶频率实测值均大于理论值，实测振型与理论振型吻合良好。
3. 综合静动载试验结论分析，该桥维修改造后强度及刚度均达到设计使用要求。

参考文献：

[1] 周水兴，向中富. 桥梁工程（上册）[M]. 重庆大学出版社，2001.

[2] 葛俊颖. 桥梁工程软件 midas Civil 使用指南 [M]. 人民交通出版社，2013.

[3] JTG/T J21-01-2015, 公路桥梁荷载试验规程 [S],2015.

[4]JTG/T J21-2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程 [S],2011.

[5]CJJ/T 233-2015, 城市桥梁检测与评定技术规范 [S],2015.

[6] 苏强. 基于荷载试验和健康监测系统的桥梁安全状态评估 [J]. 中国公路, 2019(17):42.

[7] 范立础，胡世德，叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计 [M]. 人民交通出版社，2001.