

文章编号:1001-4888(2009)04-0334-07

# 基于静载试验钢桁梁悬索桥承载能力评估分析<sup>\*</sup>

孙昊, 钱永久, 张方

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 早期修建的小跨径钢桁梁悬索桥大部分已接近设计年限, 正确评估其承载能力是桥梁维修、加固和技术改造的基本依据。本文首先简单介绍了桥梁承载能力评估的静载试验方法。同时结合城南大桥的实例, 分析了现有桥梁结构存在的主要病害及产生的原因。在充分考虑分析现场检测资料和原有设计荷载等级的基础上, 建立了考虑结构损伤的有限元模型, 制定了静载试验的加载方案。通过试验结果与修正后有限元模型结果的比较, 评估了桥梁结构现有承载能力状况, 并针对该桥提出了恢复承载能力的加固措施和建议。

**关键词:** 桥梁工程; 悬索桥; 钢桁梁; 静载试验; 承载能力评估; 比较

**中图分类号:** U448.25; U445.7      **文献标识码:** A

## 0 引言

我国西南地区的大渡河上修建了相当多的小跨径钢桁梁悬索桥, 这些悬索桥的跨度大致在 130~200 米。这些早期设计的悬索桥一般采用人工手算, 同时设计荷载等级较低, 桥面较窄。近年来随着国家经济水平的突飞猛进和大渡河流域水电梯级开发的加快, 区域交通量增加很快, 且重型车量越来越多, 接近设计年限的小跨径钢桁梁悬索桥已经成为制约当地交通畅通的主要因素。因此, 检测评估这些悬索桥的现有状况, 通过科学、合理的试验方法对现有桥梁结构的承载能力进行评估是十分必要和迫切的。

## 1 基于静载试验的承载能力评估方法

桥梁承载能力评估是考虑结构损伤的实际运营状态, 并以整个结构体系(上部结构和下部结构)为对象, 对桥梁的可靠性(安全性、使用性、耐久性)进行分析评价并作出决策(如正常使用、限制使用、维修加固、拆除重建等)的过程<sup>[1]</sup>。

桥梁结构静载试验的最大优点是直观、可靠。既有桥梁结构的静载试验是以现场检测结论、工程经验判断和现行设计规范相结合为基础, 按照桥梁的设计荷载等级, 根据桥梁结构的控制内力来确定布置载重汽车的大小及位置。通过现场的荷载试验, 获得所关心截面的静态应变、静态位移和静态的转角等桥梁结构的响应, 进而推断桥梁结构在荷载作用下的工作状态和估计桥梁结构的承载能力。静载试验能直接获得运营多年的桥梁结构在荷载作用下的情况, 验证现场检测对结构损伤的判断, 评估桥梁结构的实际承载能力。通过静载试验可以获得结构在设计荷载下的响应值与理论计算值的比较, 得到相应响应的校验系数值, 结合相关规范评估桥梁的结构性能<sup>[2,3]</sup>。

\* 收稿日期: 2009-03-25; 修订日期: 2009-05-26

基金项目: 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划(A0110719950102)

通讯作者: 孙昊(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事桥梁结构设计与评估加固技术研究。E-mail:sunhaoylz2003@163.com

## 2 现场初步检测结果

### 2.1 城南大桥概况<sup>[4-5]</sup>

泸定县城南大桥位于泸定县城的南边,原泸定桥的下游3.5km红军纪念碑处,是连接新老城区的主要通道。桥梁结构形式为钢缆钢桁架悬索吊桥,桥梁全长280m,其中沙坝岸引道为浆砌保坎,柏秧林岸引桥设3×11m现浇T梁桥。桥梁主跨计算跨径150m,主缆垂度15.842m,桥梁净宽4.54m,吊杆和人行道总宽1.5m,桁架上拱度1.2m。设计荷载等级为:汽-10重车,人群3.5kN/m<sup>2</sup>,风荷载80kN/m<sup>2</sup>。泸定县城南大桥于1992年建成通车,设计使用年限为20年,现在已运营了17年。城南大桥总体布置情况见图1。

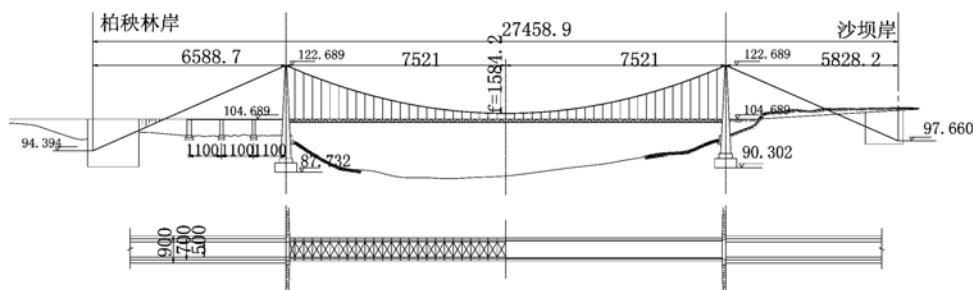


图1 城南大桥总体布置图(单位:cm)

Fig. 1 The general plan of the Chengnan bridge (unit:cm)

### 2.2 桥梁的实际状态检测

#### (1) 主缆线形

主缆的实际线形在现场用Leica全站仪(精度1mm)进行测量,通过测量上、下游索夹上缘的坐标,进一步换算成主缆中心坐标,实测主缆线形与设计实测主缆线形的比较见图2(左边为上游主缆)。主缆线形实测表明,实测值与理论值吻合情况较好。理论线形与实测线形的偏差,分析是由于缺少原桥面沥青铺装层导致恒载减轻,同时部分吊杆松动引起临近吊杆所承担的力增加所导致。

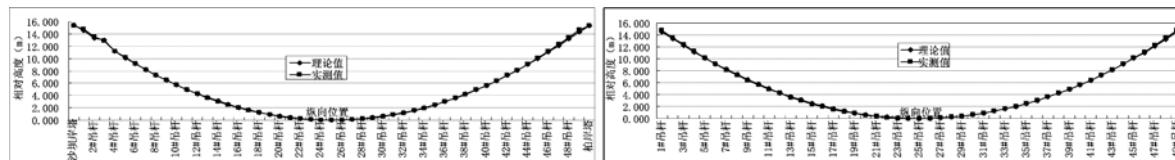


图2 上、下游主缆理论值线形与实测线形比较图

Fig. 2 The comparison of curve mode for the suspension cables

#### (2) 桁架梁

全桥绝大部分吊杆下端横桁架梁杆件的防锈漆大面积脱落,锈蚀严重,部分吊杆处的横桁架梁上淤泥堆积;部分横桁架中间部位的杆件由于桥面钢板焊缝处开裂,导致雨水渗入、侵蚀杆件,引起杆件防锈漆剥落,杆件发生锈蚀;同时桁架横梁与纵梁交接处连接钢板锈蚀严重,影响结构的耐久性和安全性。沙坝岸桁架端横梁移位达20cm,影响结构的正常行车安全。全桥大部分上、下桁架纵梁连接处的上、下连接锚栓均有松动,且连接螺栓和钢垫板大部分发生锈蚀,影响结构的整体变形能力。

#### (3) 吊杆与索夹

大部分吊杆下端均有泥水侵蚀现象,吊杆下端锈蚀严重;桥面以上部分吊杆由于车辆等其他原因的碰撞,防锈漆部分脱落,产生锈斑和轻微锈蚀;部分索夹螺帽缺失;部分吊杆被车辆撞弯,尤其上游侧第13根吊杆已严重变形;上游侧第23根吊杆由于吊杆下端锚栓松动,导致吊杆起不到承力作用。

#### (4) 锚碇与鞍座

锚碇处的钢索防护较好,钢索上黄油层较为完好,未产生锈蚀,但锚碇部位有积水。锚碇处的钢索

锚固螺栓防护较为完好,防护黄油层较厚,未发生锈蚀现象。

索鞍的钢外罩太重无法移开,本次检测仅从旁边的观测洞观看了索鞍的工作状况,情况基本完好,只是滚轴连接钢板由于雨水侵入产生较为严重的锈蚀。

### (5) 桥面系

由于全桥未做桥面铺装层,原设计桥面泄水管和人行道泄水管均高出现在的桥面钢板和人行道钢板,从而失去泄水功能,导致桥面排水混乱;路缘石混凝土损伤严重,大部分出现了裂缝,部分混凝土破碎,出现露筋,钢筋锈蚀严重;人行道钢板锈蚀严重,部分钢板由于锈蚀而出现空洞;栏杆下部焊接角钢锈蚀严重,锈蚀最深可达3~4mm,栏杆钢构件锈蚀严重。

## 3 验证结构性能的静载试验

### 3.1 静载试验的内容与加载方案<sup>[2,4,6]</sup>

根据现场检测情况,在建立有限元模型时考虑结构损伤的影响,选取的试验荷载工况的选择应反映悬索桥结构的最不利受力状态,进行荷载布置时,根据计算分析得到的截面内力(或变形)的影响线进行,主要测试工况有:①加劲梁跨中最大正弯矩工况;②加劲梁截面最大正弯矩工况;③主塔塔顶纵桥向最大水平变位与塔脚截面最大弯矩工况。其中工况③和工况②在加载时可以合并进行。根据原桥设计图纸及现场检测资料,考虑结构一定损伤折减,采用MIDAS/CIVIL建立的模型和汽车荷载的控制位置见图3,图4所示。



图3 桥梁有限元模型

Fig. 3 The finite element model of the Chengnan bridge

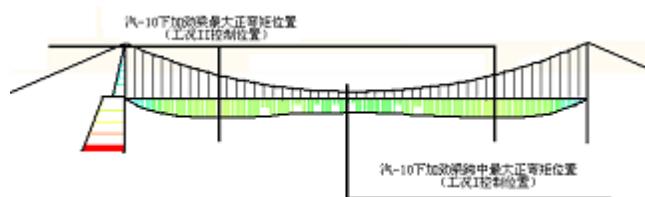


图4 荷载试验的控制断面位置图

Fig. 4 The controllable section diagram of load test

试验采用4辆约重230kN的两轴载重汽车,所有工况载重汽车均居中布载。以加劲梁弯矩为控制指标,工况I和工况II的荷载效率均为0.98,满足《大跨径混凝土桥梁的试验方法(1982)》<sup>[6]</sup>的要求。载重汽车具体的加载位置见图5,图6所示。

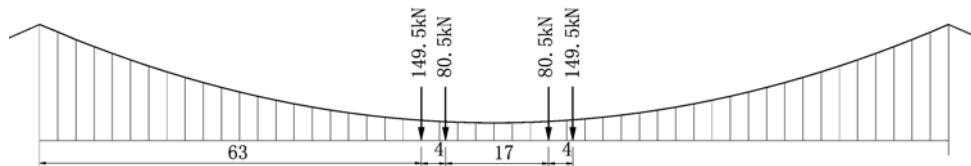


图5 工况I车辆纵向位置图(单位:m)

Fig. 5 The longitudinal position of vehicles for case I

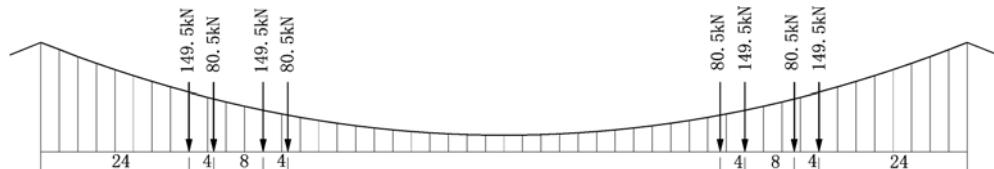


图6 工况II车辆纵向位置图(单位:m)

Fig. 6 The longitudinal position of vehicles for case II

### 3.2 观测项目及其量测方法

(1) 控制截面应力采用粘贴阻值  $120\Omega$  的箔式应变计,由静态应变采集仪 BZ2205C 电阻应变测量系统测量,温度补偿用搁置在测点附近事先贴好应变片的钢板或混凝土块实现补偿。

(2) 主塔塔顶水平变位采用测距标准差为( $1\text{mm}+2\text{ppm}$ ),测角标准差 $\pm 2''$ 的全站仪进行极坐标四测回观测,并辅以光学测定东西两塔塔顶指定点到固定基准点的距离加以检验。

(3) 加劲梁的竖向挠曲变形,是在桥面上、下游边缘线采用两台测距标准差为( $1\text{mm}+2\text{ppm}$ ),测角标准差 $\pm 2''$ 的全站仪进行观测。

(4) 结构温度,用温度枪对主缆、加劲梁、主塔在现场进行点温度测量。

### 3.3 测试断面及测点布置

荷载试验控制截面为跨中截面和  $1/4$  截面;应力测点布置在跨中截面  $1/4$  截面的桁架梁和相对应位置的吊杆上,挠度测点布置在全桥的八分点和两岸桥塔的顶部,具体应力测点布置见图 7 所示。

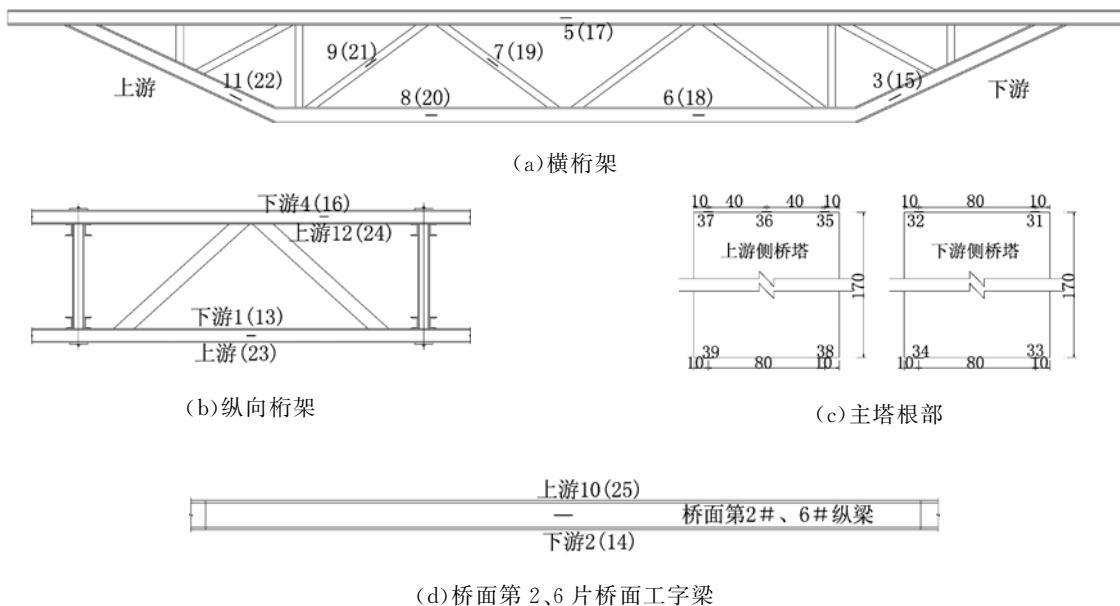


图 7 应变片布置图(应变片编号括号外为  $1/2$  截面)

Fig. 7 The position of stress gauges (the position of the numbers for stress gauges in parentheses are at midspan)

### 3.4 测试结果

#### 3.4.1 挠度测试结果(表 1)

表 1 控制截面挠度试验值与计算值的比较(cm)

Tab. 1 Comparision results of deflections for key sections between tests and calculatations

工况	测点位置	实测值	计算值	校验系数	工况	测点位置	实测值	计算值	校验系数
I	柏岸塔	1.4	0.9	1.56	II	柏岸塔	1.6	1.2	1.33
	1/8L	7.4	5.6	1.32		1/8L	-23.4	-21.2	1.10
	1/4L	-2.62	-9.5	0.28		1/4L	-30.44	-28.2	1.08
	3/8L	-31.8	-22.4	1.42		3/8L	-2.36	-3.5	0.67
	1/2L	-45.16	-33.4	1.35		1/2L	12.54	11.7	1.07
	5/8L	-25.8	-22.4	1.15		5/8L	0.24	0.35	0.69
	3/4L	2.76	9.5	0.29		3/4L	-24.66	-28.2	0.87
	7/8L	11.45	5.6	2.04		7/8L	-22.8	-21.2	1.08
	沙岸塔	-1.1	-0.9	1.22		沙岸塔	1.44	1.2	1.20

从表1可以看出,工况I和工况II下桥梁结构的挠度校验系数偏大,大部分在1.08~1.56之间,说明现有结构的刚度偏低,结构存在一定的安全隐患,需要进行一定的维修加固。

### 3.4.2 应力测试结果

表2 桁架梁测点应力试验值与计算值的比较(MPa)

Tab. 2 Comparision Results of stresses for truss beams between tests and calculations

工况	测点编号	试验值	计算值	校验系数	工况	测点编号	试验值	计算值	校验系数
I	13	15.31	21.35	0.72	II	1	-11.54	-26.61	0.43
	14	-3.25	-3.32	0.98		2	22.56	21.35	1.06
	15	2.94	4.16	0.71		3	17.92	48.83	0.37
	16	-11.52	-26.61	0.43		4	-11.54	-26.61	0.43
	17	-7.75	-8.73	0.89		5	-34.61	-50.64	0.68
	18	7.21	7.23	1.00		6	28.63	71.32	0.40
	19	4.96	4.92	1.01		7	16.69	24.58	0.68
	20	6.19	7.23	0.86		8	37.90	71.32	0.53
	21	-8.97	-9.04	0.99		9	-74.37	-77.06	0.97
	22	4.18	4.16	1.00		11	18.95	48.83	0.39

从表2可以看出,工况I桁架梁关键点的应力校验系数在0.43~1.01之间,大部分实测值与理论值的吻合比较好;工况II桁架梁关键点的应力校验系数在0.37~1.06之间,极个别应力大于理论计算值约6%,但总体而言,理论与实测值吻合较好,说明桁架结构在运营16年后的现有强度还能够满足设计要求。

表3 吊杆应力试验值与计算值的比较(MPa)

Tab. 3 Comparision results of stresses for skips between tests and calculations

工况	吊杆编号	试验值	计算值	校验系数	工况	吊杆编号	试验值	计算值	校验系数
I	12	1.20	1.27	0.94	II	12	8.59	8.77	0.98
	13	1.32	1.48	0.89		13	7.93	7.95	1.00
	24	5.76	5.91	0.97		24	1.25	1.38	0.91
	25	5.38	5.76	0.93		25	1.17	1.27	0.92

从表3可以看出,工况I和工况II下吊杆应力的校验系数在0.89~1.00之间,说明实测值与理论值的吻合较好,吊杆工作状况比较好。

表4 主塔混凝土应力试验值与计算值的比较(MPa)

Tab. 4 Comparision results of stresses for bridge towers between tests and calculations

工况	测点编号	试验值	计算值	校验系数	工况	测点编号	试验值	计算值	校验系数
I	31	-0.95	-1.12	0.85	II	31	-0.90	-1.76	0.51
	33	0.72	0.97	0.74		33	1.03	1.22	0.84
	35	-0.89	-1.12	0.79		35	-1.65	-1.76	0.94
	38	0.68	0.97	0.70		38	1.20	1.22	0.98

从表4可以看出,工况I和工况II下主塔混凝土的应力的校验系数在0.51~0.98之间,说明实测值与理论值的吻合较好。

## 4 结论及建议

城南大桥运营时间已接近设计年限,由于各种原因导致存在一定的损伤和结构缺陷,这些损伤和缺陷已经降低了桥梁的承载能力、使用性能和耐久性。从静载试验结果来看,结构的整体刚度降低较多,必须采取一定的维修整治措施,恢复和提高桥梁的承载能力,增强桥梁的使用性能,延长桥梁的使用寿命。

根据现场检测结果及原因分析,结合静载试验评估分析结论,为恢复原桥的承载能力提出如下加固维修措施<sup>[5]</sup>:

- (1) 为了提高桥梁的耐久性,对全桥锈蚀部位进行彻底的除锈后,再涂刷新的防锈漆。
- (2) 为了提高加劲梁的整体性,对上、下纵梁连接处不平整之处,采用塞填铁皮的方法进行垫平,之后再拧紧连接螺栓;对桥面纵梁与横桁架梁接触面支垫缺少处,采用填塞角钢并焊接的方式进行整治处理。
- (3) 对全桥主缆打油并重新进行表面防护处理,对鞍座存在锈蚀的连接钢板进行维修处理。
- (4) 原桥缺少桥面铺装层导致桥面排水困难,建议重新铺设原设计的沥青混凝土铺装层,并重新设置泄水孔,做好桥面排水设施。
- (5) 为了提高桥梁的安全性,对主桥上锈蚀严重的人行道构件进行更换,对锈蚀较轻的构件进行维修处理,对破损的引桥栏杆等构件进行更换。
- (6) 对部分有问题的吊杆进行校正或更换处理,同时调整结构的线形达到原设计的要求。
- (7) 对锚碇部位进行整治与维修,防止锚碇部位积水长期浸泡导致结构损伤。
- (8) 在进行彻底加固维修之前,本桥应限载限速通行,具体为单车重量不得大于10吨,靠中间行驶且行车速度不得大于10km/h。

## 参考文献:

- [1] Melcher R E. Assessment of Existing Structure Approaches and Research Needs [J]. Journal of Structures Engineering, ASCE, 2001, 127(4), 406—411.
- [2] 公路桥梁承载力检测评定规程(报批稿)[S]. 北京:人民交通出版社, 2009 (Specification for Inspection and Evaluation of Load-bearing Capacity of Highway bridge (on Trial) [S]. Beijing: China Communications Press, 2009 (in Chinese)).
- [3] Manual for Condition Evaluation and Loading Rating of Highway Bridges Using Load and Factor Philosophy(Final Report) [S]. Prepared for National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Submitted by Lichten Consulting Eng., 2001.
- [4] 泸定县城南大桥竣工图纸. 1992 (The Completed drawings of Chengnan Bridge in Luding county, 1992 (in Chinese))
- [5] 泸定县城南大桥检测及评估报告[R]. 西南交通大学, 2007 (Inspection and Evaluation Report of Chengnan Bridge in Luding county[R]. Southwest Jiaotong University, 2007 (in Chinese))
- [6] 大跨径混凝土桥梁的试验方法(1982)[S]. 北京:人民交通出版社, 1982 (Load Test Methods of Long-span Concrete Bridge[S]. Beijing: China Communications Press, 1982 (in Chinese))

## Load-Bearing Capacity Evaluation of a Suspension Bridge with Steel Truss Beam Based on Static Load Test

SUN Hao, QIAN Yong-jiu, ZHANG Fang

(School of Civil Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Most of Minisize span suspension bridges with steel truss beam constructed in early age will approach its designed working life. Correctly evaluateing its load-bearing capacity is the basic foundation of maintaining, strengthening and technical reconstruction. First, load-bearing capacity evaluation based on static load test was briefly introduced in this paper. Taking Chengnan bridge as an example, the main existing damages and their causations were summarized and analyzed. Adequately considering the field detection datum and original design load rating, a finite element mode with some damages was established. Then, though analyzing the calculatation results, the scheme of static load test was confirmed. Through comparing the static load test results with the results of upgraded finite element, the load-bearing capacity conditions of existing bridge structure were evaluated. In order to resume its load-bearing capacity, some of strengthening measurements and suggestions were proposed.

**Keywords:** bridge engineering; suspension bridge; steel truss beam; static load test; load-bearing capacity evaluation; comparison