

基于二级横张法的PC桥梁高强钢丝有效张拉力测试

侯炜¹, 贺拴海¹, 韩智强², 栾娟¹

1. 长安大学公路学院, 西安 710064
2. 太原科技大学运输与物流工程学院, 太原 030024

摘要 为了检测PC桥梁高强钢丝的有效张拉力值,采用自主研发的预应力钢索张力测试仪(LCZL-50),在WED系列电子万能试验机上进行了试验测试研究。首先通过试验机将高强钢丝张拉到不同预应力值,应用二级横张原理对高强钢丝进行有效张拉力测试,然后基于最小二乘法对试验测试数据进行分析处理,通过回归计算得出高强钢丝的有效张拉力。将该方法用于实桥测试和计算,结果显示, $\phi 5$ mm高强钢丝在较小横张力作用下,横张力与横张位移成线性变化,且满足小变形条件,其有效张拉力实测值与理论值的误差小于5%,表明该方法的测试精度满足实际工程需要,可为PC桥梁的维护、加固或改造提供技术依据。

关键词 PC桥梁;高强钢丝;有效张拉力;二级横张法

中图分类号 U 446.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.08.007

Test of Effective Tension of High-strength Wire in PC Bridge Based on Transverse Tensioning Method

HOU Wei¹, HE Chuanhai¹, HAN Zhiqiang², LUAN Juan¹

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. School of Transportation and Logistics Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China

Abstract To test the effective tension of high-strength steel wire of PC bridge, experiments were carried out on a WED electronic universal testing machine using a tensioned tension tester (LCZL-50) that is developed independently. First, the high-strength steel wire was stretched to different tension values using a testing machine, then the effective tension of it was tested by transverse tensioning method, and the experimental data were analyzed based on the least squares method. The above method was used in practical bridge test and calculation. The results of comparative analysis of the theoretical value and measured value of PC bridge show that when the $\phi 5$ mm high-strength steel wire was under relatively small transverse tension, the variation of transverse tension and transverse displacement had a linear relationship, and conditions of small deformation were satisfied. The error between the measured value and theoretical value was smaller than 5%, indicating the test precision of this method meets the demands for practical engineering, and may provide technical basis for the maintenance, strengthening or modification of PC bridges.

Keywords prestressed concrete bridge; high-strength wire; effective tension; two cross transverse tensioning method

经过长期发展,高强钢丝已被广泛应用于公路混凝土桥梁中。早期PC桥梁多采用预应力高强钢丝,且施工技术落后,伴随交通量不断增加等因素,这种PC桥^[1]梁逐渐出现承载力

不足的现象,对桥梁安全运营造成重大隐患^[1]。因此,对采用预应力高强钢丝的PC桥梁进行有效张拉力检测研究是必要的。目前,工程上检测所采用的无损和局部破损方法^[2,3],均存

收稿日期:2013-09-26;修回日期:2014-01-29

项目基金:交通运输部西部交通建设科技项目(2011 318 812 970)

作者简介:侯炜,博士,研究方向为桥梁结构理论分析,电子邮箱:houwei831012@163.com;贺拴海(通信作者),教授,研究方向为桥梁结构理论分析、安全评价、可靠度及加固理论,电子邮箱:heshai@chd.edu.cn

引用格式:侯炜,贺拴海,韩智强,等.基于二级横张法的PC桥梁高强钢丝有效预应力测试[J].科技导报,2014,32(7):49-52.

在各种各样的不适宜性,如磁通量法只能应用于施工中的桥梁,超声波检测法测量精度较低,应力释放法试验较为繁琐且存在安全性问题等。本文采用自主研发的预应力钢索张力测试仪(LCZL-50)^[4],基于二级横张原理对PC桥梁高强钢丝进行有效张拉力测试研究。

1 二级横张法

1.1 静力横张平衡原理

预应力钢丝的有效张拉力检测,是对测量长度为 L 的目标钢丝施加不同的横张力 T ,得到钢丝对应的横张位移 δ ,并通过力学平衡原理确定 T 、 δ 之间的相互关系来实现的。力学平衡原理^[5,6]如图1所示。

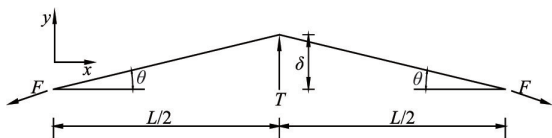


图1 静力平衡原理

Fig.1 Principle of static force balance

由力学平衡原理^[5,6]可知

$$T = 2F \sin \theta \quad (1)$$

式中, T 为预应力钢丝的横张力,kN; F 为预应力钢丝的有效张拉力,kN; θ 为预应力钢丝的横张变位角,(°)。

由于预应力钢丝的有效张拉力 F 很大,横张力 T 作用很小,对应的横张位移 δ 也较小,则近似地有

$$\sin \theta = \tan \theta = 2\delta/L \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得

$$F = \frac{TL}{4\delta} \quad (3)$$

式中, δ 为预应力钢丝横张时的横向位移,mm。

1.2 二级横张原理

实际测试过程中,在同级横张力下,将同一目标钢丝束获取的多级横向位移及横张力数据,采用线性条件下二级间增量和级差法^[7]消除测试过程中仪器产生的误差影响。二级横张原理如图2所示,其计算方法如下:

$$\Delta T = T_{i+1} - T_i \quad \Delta \delta = \delta_{i+1} - \delta_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

由式(3)得横张力

$$T = \frac{4F\delta}{L} \quad (5)$$

由式(4)得横张力二级间增量

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{4F}{L}(\delta_2 - \delta_1) = \frac{4F}{L}\Delta\delta \quad (6)$$

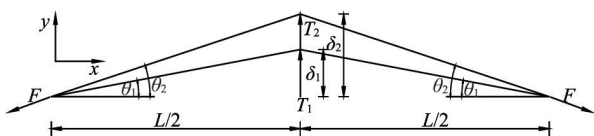


图2 二级横张原理

Fig. 2 Two cross transverse tensioning method

从而得到有效张拉力计算公式为

$$F = \frac{L\Delta T}{4\Delta\delta} \quad (7)$$

1.3 最小二乘法回归

最小二乘法是通过试验数据最小化误差的平方寻找数据的真值^[8-10]。在采用自主研发的预应力钢索张力测试仪对目标钢丝进行静力法检测的过程中会产生测量误差,从而对测试结果精度产生较大的影响。本文利用最小二乘法对 T - δ 原始数据曲线进行修正得到新的 T - δ 曲线,使得修正后的曲线与原始数据逼近,再对 T - δ 曲线采用级差法(即斜率)消除测试误差,以求解目标钢丝的有效张拉力。首先在同一级张拉力 F_i 下,对某次试验数据用最小二乘法拟合回归后求得斜率 K_i ,然后采用加权平均法求出相应的 \bar{K}_i 。在实际工程中,应进行多次重复性试验,并采用加权平均方法进行处理,即可得出目标钢丝的有效张拉力值。

2 室内试验

本试验利用WED系列电子万能试验机对目标钢丝施加横向加载后,采集横张力和横向位移的原始数据,然后采用最小二乘法对试验数据进行处理,最终回归得出高强钢丝的有效张拉力计算回归公式。

2.1 试验仪器

在试验室内主要采用以下大型试验设备。

1) WED系列电子式万能试验机,最大载荷为500 kN,拉伸夹头间最大距离为900 mm,试验机由主机和测力系统两部分组成,两者通过高压软管联接。

2)自主研发的预应力钢索张力测试仪(LCZL-50),主要由加载部分和数显部分组成。

2.2 测试钢丝

试验采用桥梁结构中常用的单根 $\phi 5$ mm 预应力高强钢丝,其抗拉强度标准值为1670 MPa。

2.3 试验过程

1)将目标钢丝竖直放置在WED系列电子式万能试验机上,对钢丝两端分别用拉伸夹头加以固定。

2)按照试验要求在WED系列电子万能试验机上进行操作设定,具体步骤为:①设定试验类型为抗拉试验;②输入试样编号;③输入试样根数;④输入品种编号;⑤输入试样形状编号;⑥进入检测界面,按“清零”键使力值和位移初始值归为零,开始进行试验。

3)由主机高压油泵对高强钢丝进行张拉,分别在 $F_i = 60, 80, 100, 120, 150, 170, 200$ kN初始张拉力下,通过预应力钢索测试仪记录横张位移 δ_i 及横张力 T_i ($i=1, 2, \dots, 8$)的变化值。

4)采用LM型数字(液晶)式测力仪,读取不同工况下对应目标钢丝的张拉力真实值,并记录每一工况下的横张位移和横张力值,完成数据采集。试验数据如表1所示,试验仪器如图3所示。

表1 试验数据
Table 1 Test Data

横张力 T_i / kN	张拉力 F_i / kN							横张位移 δ_i / mm
	60.2	77.4	101.1	120.0	150.5	170.2	200.0	
T_1	0.03	0.03	0.02	0.14	0.20	0.22	0.24	1.00
T_2	0.08	0.11	0.08	0.27	0.41	0.45	0.50	3.00
T_3	0.17	0.21	0.22	0.43	0.63	0.69	0.77	5.00
T_4	0.25	0.33	0.36	0.59	0.87	0.95	1.03	7.00
T_5	0.32	0.46	0.52	0.75	1.12	1.22	1.30	9.00
T_6	0.41	0.58	0.68	0.91	1.39	1.48	1.59	11.00
T_7	0.51	0.72	0.83	1.07	1.69	1.75	1.86	13.00
T_8	0.62	0.85	0.99	1.23	1.97	2.00	2.16	15.00



图3 测试仪器

Fig. 3 Test equipment

3 试验数据分析

通过最小二乘法对试验数据进行分析处理,结果如图4所示。可以看出,目标钢丝在同一级张拉力 F_i 作用下,当钢丝张拉力大于77.4 kN时,钢丝的横张力 T_i 与横张位移 δ_i 基本成线性关系。因此采用张拉力 $F_i \geq 77.4$ kN 进行数据分析处理,求得其斜率 \bar{K}_i ,结果如表2所示。

目标钢丝的有效张拉力值的拟合公式为

$$F = k \frac{\Delta T}{\Delta \delta} + b \quad (8)$$

或 $F = k \times \bar{K}_i + b \quad (\bar{K}_i = \Delta T / \Delta \delta) \quad (9)$

采用最小二乘法进行处理,最终得出高强钢丝的有效张拉力回归计算公式为

$$F = 121.09 \frac{\Delta T}{\Delta \delta} + 1.0475 \quad (10)$$

回归计算公式适用的标准测试条件:

- 1) 预应力钢索张力测试仪两支撑点之间的距离 $L = 0.8$ m;
- 2) 测试单根 $\phi 5$ mm 预应力高强钢丝,其抗拉强度标准值为 1670 MPa。

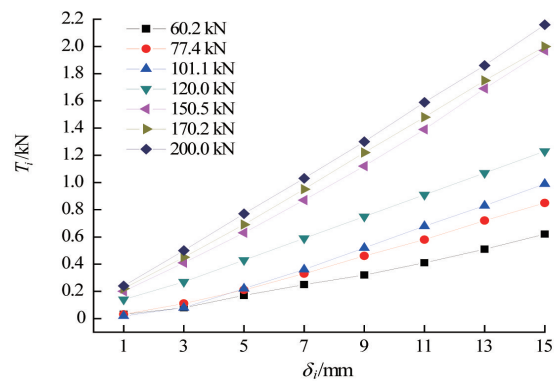


图4 试验数据回归

Fig. 4 Linear regression of experimental data

表2 张拉力及其斜率数据
Table 2 Tension and slope data

张拉工况	张拉力 F_i / kN	斜率 \bar{K}_i
1	60.2	0.0440
2	77.4	0.0603
3	101.1	0.0725
4	120.0	0.0789
5	150.5	0.1326
6	170.2	0.1342
7	200.0	0.1432

4 实例分析

4.1 工程概况

应用自主研发的预应力钢索张力测试仪(LCZL-50),对中山沙口大桥、惠州龙桥东江大桥和胶州湾高速洋河桥等多座PC桥梁进行了实桥检测,并应用上述计算方法进行数值模拟分析。

桥梁上部结构主跨为预应力钢筋混凝土T型刚构,跨径组合为(52.5+2.0 m)×(80+52.5 m);桥梁分左右两幅,单幅桥宽11.5 m;桥梁设计荷载为汽车-20,挂车-100;桥梁上部结构是单箱单室箱梁,并采用 $\phi 5$ mm预应力高强钢丝,其物理性能符合YB255-64,且标准强度为1670 MPa。

4.2 数据处理

选择主桥墩顶板钢丝束(测点1~3)进行测试。每个测点的测试对象为一束预应力钢丝,由24根高强钢丝组成。对各测点进行局部开槽,用专用工具剥离出一根高强钢丝,进行有效张力检测分析,每根钢丝重复进行5次测试,利用回归法得到测试值,并采用数值模拟进行分析得到相应的理论值。实测值与理论值对比如表3所示。

表3 高强钢丝有效张力实测值与理论值比较

Table 3 Comparison of the measured value and theoretical value of effective tension of high-strength steel wire

测点	检测次数	实测值 F_1 /kN	平均值 \bar{F}_1 /kN	理论值 F_2 /kN	误差/%
1	1	165.0	164.1	172.3	4.76
	2	171.0			
	3	156.2			
2	1	162.1	168.7	172.3	2.09
	2	172.1			
	3	172.0			
3	1	154.3	165.3	172.3	4.06
	2	171.4			
	3	170.2			

从表3可以看出,实测值与理论值的误差在5%以内,说明本文方法能满足工程上常用的 $\phi 5$ mm预应力高强钢丝有效张拉力的测试要求。

本文方法同样适用于预应力钢绞线及其他直径的高强钢丝,只是回归公式中的系数 k 、 b 不同,例如 $\phi 15.2$ mm预应力钢绞线为 $k=178.65$, $b=-14.728$ ^[11]。

5 结论

采用自主研发的预应力钢索张力测试仪对 $\phi 5$ mm高强钢丝进行有效张力检测,提出了基于二级增量法实测预应力高强钢丝张拉力的试验回归模型,并采用最小二乘法进行处理。应用该方法,对实桥进行高强钢丝的张力检测,对比其实测值和理论值,相对误差小于5%,表明其测试精度满足实际工程需要,可为PC桥梁的维护、加固或改造提供技术依据。该方法既适用于无黏结预应力高强钢丝,也适用于有黏

结预应力高强钢丝。

参考文献(References)

- [1] 李国平. 预应力混凝土结构设计原理[M]. 北京:人民交通出版社, 2009.
Li Guoping. Prestressed concrete structure and design principle[M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [2] 郭琦. 复杂预应力体系式结构有效预应力预测理论与方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
Guo Qi. Theory and methodology of prediction on effective prestress for beam structures with complicated prestressing systems[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [3] 谢功元. 在役混凝土梁永存预应力试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
Xie Gongyuan. The research on the structural evaluation of in-service prestressed concrete bridges[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [4] 长安大学. 预应力钢索张力测试仪: 中国, ZL200710018562.9[P]. 2009-07-08.
Chang'an University. Prestressed cable tension tester. China: ZL200710018562.9[P]. 2009-07-08.
- [5] Vimalanandam V, Sai B S, Sreenath H G, et al. Estimation of residual prestress in uninstrumented prestressed concrete structures using SSRHT in wires[J]. Indian Concrete Journal, 2000, 74(11): 631-636.
- [6] Waldron C J. Investigation of long-term prestress losses in pretensioned High Performance Concrete Girders[D]. Virginia: The Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [7] 李世安, 贺拴海, 姜诚, 等. 基于横张增量法的PC梁桥现存应力测试与评估[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(2): 70-81.
Li Shian, He Shuanhai, Lou Cheng, et al. Detection and assessment on existing stress of PC girder bridge based on horizontal tension-increment method[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(2): 70-81.
- [8] Chen Hongliang, HeYidong, Gangarao H V. Measurement of prestress force in the rods of stressed timber bridges using stress waves[J]. Materials Evaluation, 1998, 56(8): 977-981.
- [9] Roger H L., Komwut W. An ultrasonic method for measuring tensile forces in a sever 2 wire prestressing strand[J]. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, 2002, 21: 1295-1301.
- [10] 刘龄嘉, 贺拴海, 赵小星. 在役混凝土简支梁永存预应力计算[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 47-51.
Liu Lingjia, He Shuanhai, Zhao Xiaoxing. Effective prestress computation of existing PC simply-supported beam[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 47-51.
- [11] 周勇军, 韩智强, 赵煜, 等. 基于横张法有效预应力测试仪的计算方法研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2013, 36(2): 248-252.
Zhou Yongjun, Han Zhiqiang, Zhao Yu, et al. Computing method for the effective pre-stress tester based on the transverse tensioning method[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 36(2): 248-252.

(责任编辑 韩星明)