

文章编号 :1002-0268 (2006) 07-0104-04

润扬大桥悬索桥全站仪法挠度变形观测

朱小华 , 胡伍生

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210018)

摘要 : 为科学评价桥梁结构体系的实际使用性能, 大型桥梁竣工验收时必须进行静载试验。针对润扬大桥悬索桥静载试验工程项目, 研究了利用全站仪进行桥梁挠度变形观测的方法。论文介绍了全站仪法测量桥梁挠度的原理和计算公式, 并对全站仪法观测桥梁挠度变形值的测量精度进行了分析。通过到润扬大桥实地踏勘, 制订了全站仪法挠度变形观测的具体方案。通过对全站仪实测数据和理论计算数据的比较和分析, 证明了全站仪法大型桥梁挠度变形测量结果可靠, 观测效率高。

关键词 : 润扬大桥; 挠度变形观测; 全站仪; 三角高程测量

中图分类号 : U448.25

文献标识码 : A

The Method of Deflection Deformation Survey with Total Station Instrument for the Suspension Bridge of Runyang Bridge

ZHU Xiao-hua, HU Wu-sheng

(Transportation College of Southeast University, Jiangsu Nanjing 210018, China)

Abstract : In order to evaluate the practical performance of the structural system of a large-sized bridge scientifically, a plate-loading test for the bridge must be done when it is completed. Based on the project of plate-loading test program for the suspension bridge of Runyang Bridge, the article studied on the method of the deflection deformation survey for a large-sized bridge with total station instrument. The theory and the formula of the deflection deformation survey with total station instrument were introduced, and the survey accuracy was analyzed. The steps of the method with total station instrument for survey deflection deformation were drawn after the scene of Runyang Bridge being looked around. By comparing the survey data from the total station instrument with those from theoretical calculating, it is proved that the results by the new method are reliable, and that the method of deflection deformation survey of the large-sized bridge with total station instrument is efficient.

Key words : Runyang bridge ; deflection deformation survey ; total station instrument ; trigonometric leveling

0 引言

随着经济建设的发展, 我国的交通事业的发展也日新月异, 而其中大型桥梁在跨径、规模、工程造价上的记录也不断刷新。在大型桥梁进行竣工验收时都要进行静载试验, 目的是为了测定桥梁控制截面在试验荷载作用下的应力和挠度变形, 以了解整个结构体系的实际工作状态, 为评价结构体系的使用性能提供科学的依据, 同时可以为评价工程的

施工质量、设计的可靠性和合理性以及竣工鉴定提供可靠依据^[1,2]。

润扬长江公路大桥是我国目前刚建成的规模最大的索支承结构, 它由特大型悬索桥、斜拉桥组成, 是一座组合桥梁, 其中斜拉桥为主跨 406 m 的 (3 跨 176+406+176 m) 双塔双索面钢箱梁桥, 悬索桥为主跨 1 490 m 的单跨双铰筒支钢箱梁桥, 悬索桥跨度为中国第一, 世界第三。作为我国建桥史上规模空前的特大型桥梁, 对其建设和运营期间的健康监测、

收稿日期 : 2005-03-29

作者简介 : 朱小华 (1975-), 男, 江苏建湖人, 讲师, 从事工程测量领域的教学、研究和工程实践。(zhuxiaohua520@sohu.com)

诊断以及各种灾害影响下的损伤预测和损伤评估, 具有重要的现实意义, 这也是润扬大桥进行静载试验的主要目的^[3,4]。

1 挠度变形观测方法介绍

目前桥梁挠度变形观测的方法有很多种, 大体可以分为两类: 一类为接触式的, 即仪器或仪表与被观测变形点直接接触以产生形变进行读数。常见的有: 简易挠度计法、挠度仪法、百分表法等。这几种方法的优点是设备简单、精度可靠、可以多点检测, 但都具有准备工作时间过长, 人力、物力耗费大, 布设繁杂, 安装不方便, 如桥下有水或遇到跨线桥、跨越峡谷等的高桥则无法采用的缺点。因此, 目前这几种方法在实际工程中的采用已逐渐减少; 另一类为非接触式的, 即仪器或仪表与被观测变形点之间不直接接触, 通过仪器观测安置在变形点上的目标装置从而间接测出变形量的方法。比较常见的有: 连通管法、桥梁动挠度惯性测量法、激光图像挠度测量法、倾角仪法、水准仪法、全站仪法等, 其中, 桥梁动挠度惯性测量法和激光图像挠度测量法基本上还处于试验与研究阶段, 在目前的实际工程中还较少采用; 连通管法、倾角仪法、水准仪法、全站仪法则由于测点布设方便、操作简单、精度可靠而被广泛采用。

2 润扬大桥挠度变形观测实例

2.1 测试方案的比选

本项目组在此次静载试验中的主要任务是对主跨为 1 490 m 的悬索桥进行挠度变形观测。根据悬索桥的实际情况, 本项目组进行了测试方案的比选: 接触式的 3 种挠度变形观测方法在此次项目中都是不可行的; 非接触式的方法中, 由于桥梁 $L/2$ 分点到索塔的高差达 8 m, 对连通管法来说太大, 因此只能考虑用此法在进行偏载试验时用来测量桥梁同一分点处左右两侧的挠度变形区别; 桥梁动挠度惯性测量法和激光图像挠度测量法以及倾角仪法由于技术原因无法实行; 水准仪法也因纵坡较大和测程太远而无法采用, 因此, 只剩下全站仪法可以考虑^[5]。

2.2 全站仪法挠度变形观测介绍

全站仪法是目前针对中大型桥梁挠度变形观测采用得较为广泛的方法之一, 它的测量原理是利用全站仪内置的三角高程测量程序, 直接观测测站点和目标点之间的高差, 由于测站点保持不动, 则加载前后的两次高差之差即为目标点的挠度变化量。

顾及地球曲率和大气折光影响的全站仪高差计算的公式为

$$h_1 = D_1 \tan \alpha_1 + i_1 - v_1 + (1 - K_1) \frac{D_1^2}{2R} \quad (1)$$

$$h_2 = D_2 \tan \alpha_2 + i_2 - v_2 + (1 - K_2) \frac{D_2^2}{2R} \quad (2)$$

式中 D 为平距 α 为竖直角 i 为仪器高 v 为棱镜高, K 为大气折光系数 R 为地球曲率半径。由于加载前后仪器和棱镜都未移动, 则有 $i_1 = i_2$, $v_1 = v_2$, $D_1 = D_2$; 又因在桥梁静载测试时的时间间隔一般为 10~20 min, 可近似认为气象条件变化不大, 即 $K_1 = K_2$, 则由式 (1) 和式 (2) 可知挠度变化量 Δh 为

$$\Delta h = h_2 - h_1 = D(\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1) \quad (3)$$

对式 (3) 全微分, 利用误差传播定律可得

$$m_{\Delta h} = \sqrt{2 \tan^2 \alpha m_D^2 + \frac{D^2 \sec^4 \alpha}{\rho^2} m_\alpha^2} \quad (4)$$

对式 (4) 分析可知, 全站仪法挠度测量精度受竖直角 α 大小的影响较小, 受测程远近的影响较大。如采用测角精度 $\pm 2''$, 测距精度 $\pm 2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm} \cdot D$ 的全站仪进行桥梁挠度测量时, 经试验得知, 当 $\alpha = 5^\circ$, 其精度如表 1 所示^[6]。

表 1 全站仪法挠度测量精度试验结果

Tab.1 The test results of the accuracy of deflection surveying with total station instrument

距离 D/m	精度/mm	距离 D/m	精度/mm
40	± 0.6	200	± 2.8
80	± 1.1	260	± 3.4
120	± 1.6	320	± 3.9
160	± 2.2	400	± 4.5

全站仪法同水准仪法一样, 具有准备工作简单, 操作方便的优点, 此外, 全站仪法同水准仪法比较, 不受纵坡大小的影响, 测程也比水准仪法测量要远。因此, 全站仪法比较适合一些挠度变形量较大的大桥或特殊大桥的挠度测量。

2.3 全站仪法挠度变形观测精度分析

根据项目组以往的经验, 当测程达 400 m 时观测精度约为 $\pm 4.5 \text{ mm}$, 分析可知, 测程越远精度越差, 且目标观测也越困难。在本次项目中, 如果将仪器架设在相对固定的两索塔处观测时, 最远目标点的测程将达到 750 m, 其测试结果是很难满足精度要求的。经研究, 项目组决定改变以往把仪器架设在静止点的一贯做法, 而将 4 台全站仪分别架设在桥梁 $L/4$ 分点处和 $3L/4$ 分点的上游一侧和下游一侧 A、B、C、D 处 (如图 1 (b) 所示), 分别观测基准点 X_a 、 S_a 和 S_b 、 X_b , 如此最远目标点的测程则变

为原来的一半，观测精度可以大大地提高。推算可知， S_4 点和 X_4 点为精度最弱点，以 S_4 点为例

$$H_{S_{41}} = H_{B1} + D_{S_4} \tan \alpha_{S_{41}} + i - v_{S_4} + (1 - K_1) \frac{D_{S_4}^2}{2R} \quad (5)$$

$$H_{S_{a1}} = H_{B2} + D_{S_a} \tan \alpha_{S_{a1}} + i - v_{S_a} + (1 - K_1) \frac{D_{S_a}^2}{2R} \quad (6)$$

$$H_{S_{42}} = H_{B2} + D_{S_4} \tan \alpha_{S_{42}} + i - v_{S_4} + (1 - K_2) \frac{D_{S_4}^2}{2R} \quad (7)$$

$$H_{S_{a2}} = H_{B2} + D_{S_a} \tan \alpha_{S_{a2}} + i - v_{S_a} + (1 - K_2) \frac{D_{S_a}^2}{2R} \quad (8)$$

式(5)、(6)中 $H_{S_{41}}$ 、 $H_{S_{a1}}$ 为加载前目标点 S_4 、基准点 S_a 高程， H_{B1} 为加载前测站点 B 高程 D_{S_4} 、 D_{S_a} 为 S_4 、 S_a 点至测站点 B 的平距 $\alpha_{S_{41}}$ 、 $\alpha_{S_{a1}}$ 为加载前 S_4 、 S_a 点竖直角， i 为仪器高， v_{S_4} 、 v_{S_a} 为 S_4 、 S_a 点棱镜高， K 为大气折光系数；式(7)、(8)则分别对应加载后的数据。由式(5)、(6)、(7)、(8)可知 S_4 点挠度变形量为

$$\Delta h_{S_4} = H_{S_{42}} - H_{S_{41}} = D_{S_4} (\tan \alpha_{S_{42}} - \tan \alpha_{S_{41}}) - D_{S_a} (\tan \alpha_{S_{a2}} - \tan \alpha_{S_{a1}}) = \Delta h_{BS_4} - \Delta h_{S_aB} \quad (9)$$

式中， Δh_{S_4} 为加载前后 S_4 点的实际挠度变形量， Δh_{BS_4} 为加载前后 S_4 点与 B 点的相对挠度变形量， Δh_{S_aB} 为加载前后 B 点与 S_a 点的相对挠度变形量。若设 $m_{\Delta h_{BS_4}} = m_{\Delta h_{S_aB}} = \pm 4.4 \text{ mm}$ ，则由误差传播定律可推得： $m_{\Delta h_{S_4}} = \sqrt{2} m_{\Delta h_{S_aB}} = \pm 6.22 \text{ mm}$ ，由此可知，其测量精度是可以满足测试要求的。

2.4 具体挠度变形观测方案

经过现场踏勘，全站仪测试组在悬索桥钢箱梁伸缩缝的外测，即相对固定的索塔所在处布设了 4 个基准点 (S_a 、 S_b 、 X_a 、 X_b)，具体位置见图 1 (b)。在静载试验之前，先用全站仪测量出 4 点之间的高差，以资检核 (S 表示上游，X 表示下游)。在桥梁 $L/4$ 分点处和 $3L/4$ 分点的上游一侧和下游一侧 A、B、C、D 处设置固定的测站点。根据润扬大桥静载

试验方案，在大桥上游一侧和下游一侧的桥梁 $1/8$ 分点各布设 7 个点，记为 S_1 、 S_2 、...、 S_7 ； X_1 、 X_2 、...、 X_7 。其中 S_4 和 X_4 为桥梁中分点 (如图 1 (b) 所示)。在设计位置上，用强力胶将金属纽扣粘贴在桥面上，观测时，棱镜对中杆直接放置在金属纽扣孔中。金属纽扣粘贴好后，应注意检查，确保其牢固、不会松动。利用全站仪内置的三角高程测量程序进行观测。

2.5 挠度变形观测结果分析

项目组用有限元程序对各种加载情况下的桥梁挠度值进行了推算。理论计算模型的几何尺寸和有关参数按设计文件取用，加载量按现场实际加载的大小和位置进行了计算。取其中 4 个工况的全站仪实测值与理论计算值进行比较，其结果见表 2^[6]。由表 2 可以看出，实测值与理论计算值还是基本吻合的，说明了全站仪观测结果的可靠性。

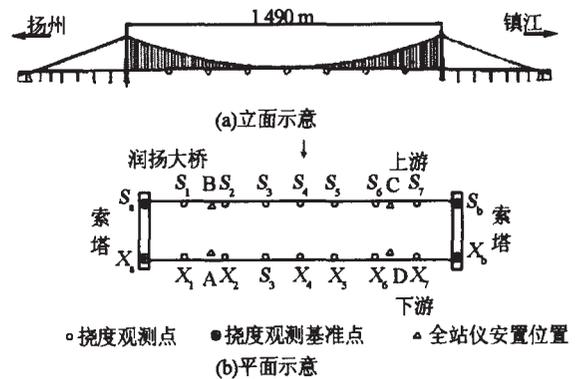


图 1 润扬大桥全站仪法挠度变形观测点位布设示意图

Fig.1 The position of the points laid for the deflection deformation survey with total station instrument for the Suspension Bridge of Runyang Bridge

表 2 主梁竖向挠度 - 全站仪检测结果与理论计算值的对照表 /m

Tab.2 The comparison of the data surveyed by total station instrument and the data calculated theoretically on the primary girder in vertical direction (unit:m)

工况	1# 测点		2# 测点		3# 测点		4# 测点		5# 测点		6# 测点		7# 测点	
	实测	理论												
1	-1.4415	-1.382	-2.8465	-2.828	-1.4790	-1.539	0.1060	0.074	1.0175	1.000	1.2855	1.247	0.9350	0.885
2	0.4225	0.418	0.0615	0.058	-1.1565	-1.071	-2.4160	-2.414	-1.1470	-1.076	0.0820	0.054	0.4605	0.417
3	0.8825	0.885	1.2110	1.247	0.9720	1.001	0.0815	0.076	-1.4200	-1.535	-2.8045	-2.828	-1.4390	-1.386
4	0.3245	0.316	0.0610	0.043	-0.8370	-0.814	-1.7995	-1.831	-0.8465	-0.817	0.0745	0.040	0.3425	0.315

(注：挠度以向下为正。)

3 结论与建议

(1) 全站仪法同其它桥梁挠度变形观测方法比较，效率高、施测方便，不受纵坡大小的影响，测程也比水准仪法要远^[8,9]。因此，全站仪法比较适合一些挠

度变形量较大的中大桥或特殊大桥的挠度测量。

(2) 根据精度分析可知，利用全站仪法进行桥梁挠度变形观测须采用精密全站仪进行，其实测精度对于挠度理论变形量在 100 mm 级以上的特大型桥梁或特殊结构形式的桥梁来说尤为合适。

(3) 为提高全站仪法桥梁挠度变形观测的精度, 须控制好测程; 为减小瞄准误差, 观测竖直角时需加设觇牌, 可根据需要对觇牌自行加工和处理。

(4) 在大型桥梁的挠度变形观测中, 应尽量考虑将仪器架设在相对稳定的测站上进行观测。

参考文献:

- [1] 胡伍生. 水准测量法观测桥梁挠度的应用[J]. 华东公路, 1996(2).
- [2] 胡伍生, 马翥, 等. 全站仪桥梁挠度观测实例分析 [J]. 中国交通研究与探索, 2001.
- [3] 润扬大桥静载试验项目负责组. 润扬大桥静动载试验方案 [R]. 2005.

- [4] 赵翔, 李爱群, 缪长青, 等. 润扬大桥结构健康监测系统传感器测点布置[J]. 工业建筑, 2005, 35 (1) .
- [5] 润扬大桥静载试验桥梁挠度测量全站仪组. 全站仪法润扬大桥静载试验桥梁挠度测量方案[R]. 2005.
- [6] 朱小华, 胡伍生, 马翥. 桥梁挠度变形观测方法的可行性分析与研究 [R]. 数字测绘技术与数字交通建设 (第二届全国交通工程测量学术研讨会论文集选编), 2005.
- [7] 润扬大桥静载试验桥梁挠度测量全站仪组. 全站仪法润扬大桥静载试验桥梁挠度测量研究报告[R]. 2005.
- [8] 胡伍生. 水准测量法观测桥梁挠度的应用[J]. 华东公路, 1996(4).
- [9] 梁小勇, 胡伍生, 陈刚. 电子水准仪在桥梁挠度观测中的应用 [R]. 江苏省测绘学会 2003 学术年会专刊, 2003.

(上接第 99 页)

力, 这说明在高寒地区应考虑温度自应力; 日照辐射, 即指数变化温度梯度对 FS 加固混凝土矩形截面构件和未加固构件的混凝土温度自应力影响程度接近 (本文算例偏差小于 5%), 但碳纤维布 (FS) 中仍然产生可观的温度自应力。

(3) FS 厚度、热胀系数、弹性模量和混凝土强度等级、截面高度等因素对 FS 加固混凝土矩形墩柱温度自应力均产生较大的影响。

(4) 可将 FS 加固矩形、箱形桥梁墩柱温度自应力分析方法推广至 FS 加固的圆形或圆端形等截面墩柱, 或其他 FS 加固构件 (如矩形梁、箱形梁、乃至烟囱、屋顶等) 的计算。进一步精细研究可考虑 FS 与混凝土间接触滑移, 外包 FS 圆形截面核心混凝土性质等。

参考文献:

- [1] 刘兴法. 预应力箱梁温度应力计算方法 [J]. 土木工程学报,

- 1986, 19 (1) : 31-42.
- [2] 范立础. 桥梁工程 (第二版,上册) [M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [3] 范立础. 预应力混凝土连续梁桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [4] 贺拴海. 桥梁结构理论与计算方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [5] 赵彤, 谢剑. 碳纤维布补强加固混凝土结构新技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
- [6] J.B.唐纳特, R.C.班萨尔 [法]. 李仍元, 过梅丽, 译. 碳纤维 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [7] 于天来, 逯彦秋, 王润建. 碳纤维加固混凝土构件温度应力的研究 [J]. 公路, 2004 (3) : 97-99.
- [8] 铁路工程设计技术手册. 桥梁墩台 [S].
- [9] F.凯尔别克著. 刘兴法, 等译. 太阳辐射对桥梁结构的影响 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1981.
- [10] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].

(上接第 103 页)

明压浆对灌注桩承载力的提高有着显著的效果。

6 结语

通过苏通大桥超大规模群桩基础后压浆的成功实践, 运用 U 管循环闭合压浆后, 经取芯、超声波 CT 扫描和承载力对比试验的检验, 浆液分布达到了预期的效果, 承载力明显提高, 为设计提供了有力的依据, 取得了可观的经济效益, 值得在桥梁工程中作进一步的推广应用。

参考文献:

- [1] 东南大学. 苏通大桥桩底压浆技术与工艺研究[R]. 2004.

- [2] 江苏省苏通大桥建设指挥部. 苏通大桥桩端后压浆工法 [S]. 2004.
- [3] 东南大学. 苏通大桥试桩研究总报告[R]. 2004.
- [4] 江苏省地震工程研究院. 苏通大桥桩端压浆效果 T 检测报告 [R]. 2004.
- [5] 廖小青, 谢仲屏. 钻孔灌注桩后压浆工程实例及机理分析[J]. 华东建工勘察, 2002 (4) .
- [6] 沈保汉. 后注浆桩技术[J]. 工业建筑, 2001, 31.
- [7] 李小青. 竖向荷载下后压浆桩承载性状的数值分析 [J]. 探矿工程, 2000 (6) .
- [8] 杨顺, 高庆新. 桩端后压浆技术及在工程中的应用 [J]. 工程质量, 2002 (2) .