

GPS在润扬大桥悬索桥挠度变形观测中的应用

李传君^{1,2}, 王庆², 刘元清¹, 吴向阳², 王慧青²

(1. 江苏大学, 江苏 镇江 212013; 2. 东南大学仪器科学与工程学院, 南京 210096)

摘要: 为检验大型桥梁设计和施工质量, 确保工程的可靠性, 在大型桥梁竣工验收必须进行静载实验。挠度变形观测作为静载实验必要内容之一, 其观测数据的可靠性、观测方法的合理性、方案的经济高效性直接影响工程验收工作。基于润扬大桥悬索桥静载实验项目实例, 本文介绍了利用 GPS 测量桥梁挠度变形的办法, 对比分析了 GPS 测量方案的优点和测量数据的可靠性。实验结果表明, 利用 GPS 进行桥梁挠度变形观测方法简单、结果可靠、且受环境干扰小, 在大型桥梁变形监测中有较好的应用前景。

关键词: 润扬大桥; 静载实验; GPS; 挠度变形观测; 可靠性

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

The application of deflection deformation survey with GPS for the suspended bridge of Runyang large bridge

Li Chuanjun^{1,2}, Wang Qing², Liu Yuanqing¹, Wu Xiangyang², Wang Huiqing²

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to evaluate the design and construction quality of a large-scale bridge and verify the project safety, a dead-load test must be done at the time of its completion. As one of the necessary jobs of the test, the deflection deformation survey should be very important to the bridge project acceptance. Besides, its observation data's reliability, survey method's rationality and project's economic effectiveness can affect the implement of project acceptance directly. Based on the dead-load test program for suspended bridge of Runyang large bridge, this paper introduces the way of the deflection deformation survey with GPS and analyzes its advantages and survey accuracy. The result of the experiment shows that the method is simple, accurate and reliability with little environmental impacts. Therefore, it has good application prospects in large bridge deformation measurement.

Key words: Runyang bridge; dead-load experiment; GPS; deflection deformation survey; reliability

0 前言

交通是区域经济发展的重要基础, 桥梁作为交通枢纽的关节, 随着我国经济的快速发展, 其建设在数量、跨径、规模以及工程造价上的记录也不断被刷新^[1]。为确保大型桥梁建成后安全运行, 及时掌握其健康状况, 避免出现灾难性的后果, 必须在竣工验收时进行静载试验, 其主要目的方面是为了检验本桥设计和施工质量, 确定工程的可靠性, 为竣工验收提供技术依据, 并为今后类似桥梁的设计积累资料; 第二是为直接了解桥跨结构的技术性能和实际工作状态, 掌握桥梁结构的实际承载能力, 评价其在设计使用荷载下的工作性能; 同时,

静载实验的数据也是为大桥将来的运营管理与养护决策提供依据^[2]。

润扬长江公路大桥是我国建成不久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 406m 的双塔双索面钢箱梁桥, 悬索桥为主跨 1490m 的单跨双绞

收稿日期: 2009-05-16; 修订日期: 2009-06-22

基金项目: 科技部“十一五”国家科技支撑计划重点项目 (2008BAJ11B01); 科技部“十一五”国家科技支撑计划点项目 (2008BAJ11B02); 国土资源部公益性行业基金项目 (HY08115039)。

作者简介: 李传君 (1976 -), 男 (汉族), 湖北京山人, 讲师, 博士生。

简支钢箱梁桥, 悬索桥跨度为中国第一, 世界第三^[3]。作为我国建桥史上规模空前的特大型桥梁, 对其施工和设计质量进行客观评估, 确保桥梁投入运营的安全性和可靠性, 具有非常重要的现实意义, 这也是润扬大桥进行静载实验的主要目的。本文以润扬大桥悬索桥挠度变形观测为例从测点布置、方案确定、数据处理以及结果分析等方面介绍了 GPS 在大型桥梁挠度变形观测中的应用方法, 并印证了 GPS 测量方法的可靠性和实用性。

1 桥梁挠度变形观测方法

当前桥梁挠度变形观测的方法有很多种, 传统方法大体上可分为接触式和非接触式两类。前者以仪器或仪表与被观测变形点直接接触产生形变进行读数获取形变量, 常见的有简易挠度计法、挠度仪法、百分表法等。这类方法的优点是设备简单、精度可靠、可以多点检测, 但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, 目前这类方法在桥梁挠度变形观测的实际工程中的采用已逐渐减少。后一类方法以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的应用还比较少; 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^[1], 但连通管法对于相对高差较大的挠度变形测量难度较大, 全站仪法容易受到大雾等天气环境影响难以保证通视而无法测量, 水准仪法对于纵坡较大和测程太远等情况无法适应。随着 GPS 技术的发展, GPS 以其在静态相对定位中的高精度、高效率、全天候、不需通视等优点^[4], 在桥梁、堤坝等大型构件变形监测以及地表沉降观测等领域得到越来越广泛的应用, 并逐渐取代了常规的三角、三边、边角等传统测量方法^[5], 在理论和实践中取得了可喜的成果。为了更好地对润扬大桥工程进行全面的、客观的评价, 分析各种技术的优劣, 在润扬大桥的静载试验中分别采用了全站仪法和 GPS 法对桥梁挠度变形进行了实地测量。本文主要介绍了 GPS 法挠度变形观测, 全站仪法挠度变形观测参见文献 [1]。

2 润扬大桥 GPS 挠度变形测量实验

2.1 实验方案

(1) 测点布置

通过传感器准确采集到大桥静载挠度变形量是真实地反演出大桥的结构工作状况和健康状况的前提之一, 不仅可作为识别出结构可能发生的损伤程度及部位的依据, 而且可作为印证桥梁结构设计可靠性和施工质量的重要依据。在此基础上, 才能对大桥竣工验收及投入使用的安全可靠性进行客观评估。所以, 测点布置是利用 GPS 观测大桥挠度变形主要解决的问题之一。

从理论上讲, 桥梁挠度变形观测使用的传感器越多, 对桥梁挠度变形的描述就越准确, 实测结果也就越精确, 但考虑到传感器设备的费用, 一般只能使用有限数量的传感器。所以, 如何兼顾有效性和经济性, 即用尽可能少的传感器获取全面的、准确的结构参数信息, 是本试验要解决的关键问题之一^[3]。在本试验中, 首先, 针对润扬大桥南汉悬索桥的结构设计特点、环境状况和运行工况等进行了分析研究, 在此基础上利用 ANSYS 软件建立了一个科学地、能够较为真实地反映大桥工作状况的三维有限元模型, 通过对理论模型进行静、动力分析, 确定了结构应力集中点、位移幅值点等关键部位位置, 从而初步确定了 GPS 测点布置的最优方案。

然后, 考虑到实验的有效性和经济性, 通过到实地踏勘, 结合桥梁结构理论分析以及建模分析确定的初步方案, 对 GPS 观测点布置进行了进一步优化, 确定最终的 GPS 测点布置方案, 在南汉桥上共选择 8 个 GPS 观测点。各测点具体分布情况如图 1 所示。在南汉桥的南、北桥墩顶部中间各布置一个 GPS 点 (第一组和第五组点); 在南汉桥 3L/4 跨处, 左右两侧对称各布置一个 GPS 点 (第二组点); 在南汉桥悬中 L/2 跨的附近, 左右两侧各布置一个 GPS 点 (第三组点); 在南汉桥 L/4 跨处, 左右两侧各布置一个 GPS 点 (第四组点); 桥面上 GPS 测点距离人行道不小于 2m。其中, L 为悬索桥为主跨长度 (1490m)^[5]。

(2) 基准站布置

在利用 GPS 进行桥梁挠度变形观测中, 为了提高观测精度, 达到实验精度要求, 必须利用 GPS 差分技术, 故基准站的布置相当重要, 其是一项关系到测量成果能否准确、可靠地反映桥梁静载状态下变形情况的工作。利用全站仪等常规的测量手段对

桥梁进行变形测量时，由于仪器和周围环境等诸多因素的制约，使得测量网的基准点不能离变形测量区域太远，但太近又要受到自身变形的影响，不能准确反映变形数值，在测量上比较困难。由于 GPS 基准站和测点间不需通视，只需保证各 GPS 接收机能接受到 4 个以上卫星信号、GPS 基准站和测点间距离不超过 10km，通过事后差分技术就可以保证

较高测量精度（平面精度： $1\text{mm} + 0.5\text{ppm}$ ）^[6]，能满足桥梁静载挠度变形观测精度需求。故可以把 GPS 基准站选在远离桥梁的地方，从而保证数据的准确度。在润扬大桥静载挠度变形观测中，根据实地踏勘，GPS 基站选择在大桥下游约 3km 处长江南岸一空旷场地上，确保基站位置不受周边环境影

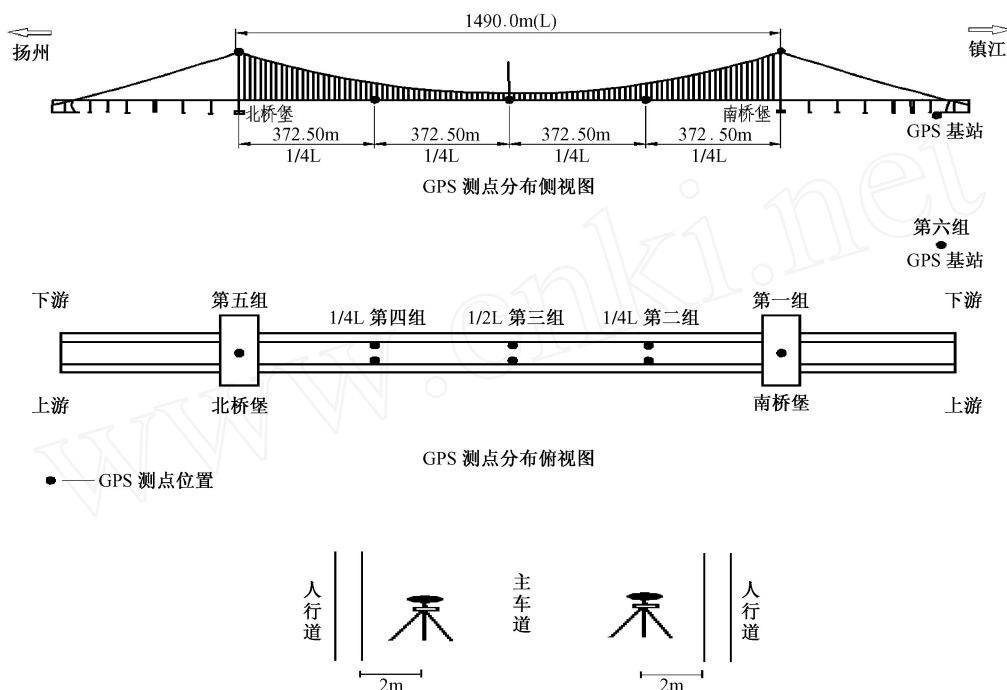


图 1 润扬大桥静载实验挠度变形 GPS 观测点分布示意图

2.2 数据采集

在润扬大桥南汊桥挠度变形观测实验中共采用 9 套 GPS 接收机，其中 NOVA TEL 接收机 3 套、LEICA 接收机 6 套，分别布置在 8 个测点和 1 个基准点上，共由六组人员负责数据采集。设置的 8 个测点和 1 个基准点周边环境较好，无明显遮挡和干扰源^[7]，GPS 天线用三脚架架设，能够完全反应桥梁的挠度变形。

整个静载实验（数据采集）于 2005 年 1 月 5 日晚 8 点至 1 月 6 日凌晨 7 点间进行。根据实验要求，首先是 26 辆（第二次是 52 辆）满载 30t 砂石的卡车并排由南堡桥向北堡桥行驶，分别到达第二、第三、第四组测点位置时停车 30min 用于数据采集，然后车队到达北岸后车辆调头，再由北堡桥向南堡桥行驶，分别到达第四、第三、第二组测点位置停车 30min 进行数据采集，期间需利用 GPS 观测 12 个工况的桥梁挠度变形。实验进场后，按照事先确定的观测点位，负责基准站的小组将 GPS 基

站接收机架设到设定位置，其余各测量小组分别将 GPS 接收机架设在桥面主车道上，并做好点位标志。整个测量过程为：在加载测试车队进入桥面前，以 GPS 静态测量的方式测定各点的初始坐标值，同步观测时间为 40min；随后加载测试车队从桥南（镇江）出发分别达到第二、第三、第四组测点，在每个位置停留 30min，其中 10min 为桥梁稳定过程，20min 为测点同步观测数据采集过程；随后，加载车队调头，从桥北（扬州）出发，重复前面的工作，由于北堡桥电梯问题，只观测到 11 个工况的数据，整个实验历时 9 个小时。

2.3 数据解算及分析

(1) 数据解算

事后把实验测得的初始数据及在各种静态工况下测得的数据利用 waypoint 软件进行后差分处理，并通过坐标转换求得润扬大桥南汊桥在静载实验不同工况下的各测试点平面坐标及高程变化量，图 2 为 26 辆卡车静载情况下前三个工况南汊桥挠度变

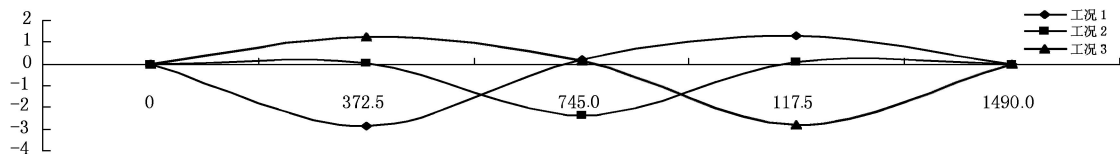


图 2 前三工况桥梁挠曲线图

形图。

(2) 观测结果分析

项目组用 ANSYS 软件对悬索桥在各种加载工况下的桥梁挠度值进行了分析。有限元计算模型的几何尺寸和有关参数的选取采用桥梁设计文书内容，各工况静力加载量和分布根据现场实际加载情况进行设置，利用软件对各工况下各测点的挠度变

形进行了计算。为了印证 GPS 在大桥挠度变形观测精度和可靠性，取其中 4 个工况的 GPS 实测值与全站仪以及理论计算值进行比较，其结果见表 1。从表 1 可以看出，除去理论模型误差和全站仪测试系统误差，GPS 实测值与理论计算值以及全站仪观测值基本一致，其结果有着较高的精度和可靠性，能很好地反应桥梁挠度变形^[5]。

悬索桥竖向挠度 (GPS 观测值与理论计算值以及全站仪检测值对比表, 单位: m)

表 1

工况	1 - 1号测点 (L3/4)			2 - 1号测点 (L/2)			3 - 1号测点 (L/4)		
	实测	理论	全站仪	实测	理论	全站仪	实测	理论	全站仪
1	- 2. 814	- 2. 828	- 2. 8465	0. 189	0. 074	0. 1060	1. 274	1. 247	1. 2885
2	0. 052	0. 058	0. 0615	- 2. 343	- 2. 414	- 2. 4160	0. 075	0. 054	0. 0820
3	1. 252	1. 247	1. 2110	0. 161	0. 076	0. 0815	- 2. 804	- 2. 828	- 2. 8045
4	0. 022	0. 043	0. 0610	1. 519	- 1. 831	- 1. 7995	0. 030	0. 040	0. 0745

3 结论

GPS 在润扬大桥挠度变形观测实验中的应用表明：GPS 法同其他桥梁挠度变形观测方法相比，有着效率高、施测方便，不受天气、通视等环境的影响，测程范围大。GPS 法比较适合挠度变形量较大的大型桥梁的挠度测量。利用 GPS 事后差分技术观测挠度形变精度均匀，在 GPS 基线长为 5km 范围内基站能满足桥梁挠度变形观测精度 (10mm) 要求，尤其适合挠度理论变形量在 100mm 以上的特大型桥梁；为提高 GPS 观测精度，须选择好 GPS 参考站架设位置，尽量考虑将 GPS 设备架设在周边空旷、位置稳定、不受周边环境干扰且离 GPS 观测点位置较近的地方。利用 GPS 进行桥梁挠度形变观测精度较高、可靠性好，在桥梁及其他大型构件形变监测中有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 朱小华, 胡伍生. 润扬大桥悬索桥全站仪法挠度变形观测 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (7): 104 ~ 107.
- [2] 刘静, 李传君, 高成发. GPS 定位技术在大型构件变形监测中的应用 [J]. 舰船电子工程, 2006, 26 (6): 62 ~ 64.
- [3] 赵祥, 李爱群, 韩晓林等. 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): 82 ~ 85.
- [4] 过静琚, 戴连君, 卢云川. 虎门大桥 GPS (RTK) 实时位移监测方法研究 [J]. 测绘通报, 2000, (12): 4 ~ 6.
- [5] 润扬大桥静载试验桥梁挠度测量 GPS 组. 润扬大桥南汉悬索桥静载试验 GPS 测量成果报告 [R]. 2005.
- [6] 韦汉金, 李红祥. GPS 技术在工程变形监测中的应用研究 [J]. 广西水利水电, 2004, (4): 82 ~ 85.
- [7] 黄声亨, 刘星, 杨永波等. 利用 GPS 测定大型桥梁动态特性的实验及结果 [J]. 武汉大学学报, 2004, 29 (3): 198 ~ 200.