

# 测定既有拱桥拱圈线形的改进悬高测量法

陈顺超<sup>1,2</sup>, 黄平明<sup>1</sup>, 孙胜江<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院 陕西 西安 710064; 2. 西南林业大学 交通机械与土木工程学院 云南 昆明 650224)

## Improved Method of Total Station Remote Elevation Measurement for Surveying the Shape of In-Service Arch Bridge's Ring

CHEN Shunchao, HUANG Pingming, SUN Shengjiang

**摘要:**提出一种测量既有拱桥拱圈线形的改进悬高测量法,根据测量误差传播定律,推导Z坐标测量中误差的计算公式,并讨论影响测量精度的主要因素,分析测量时的注意事项。理论分析和工程实例表明,改进的悬高测量法具有观测精度高、操作简便、适应性强等优点,是拱圈线形测量的一种较好方法。

**关键词:**拱圈线形;全站仪;悬高测量;精度分析

### 一、引言

拱桥是我国公路上常用的一种桥梁型式,由于种种原因,大量既有拱桥已出现不同程度的病害,急需进行检测评估和维修加固。既有拱桥在荷载、基础变位和环境条件等因素的长期作用下,拱圈(拱肋)的轴线不可避免地要发生变化,而拱轴线形状的改变又直接影响拱圈内力及截面应力的分布。因此,准确测定拱圈(拱肋)线形,是既有拱桥检测和评定的基础<sup>[1-3]</sup>。

拱圈线形测量的麻烦之处在于,人工难于抵近拱圈(拱肋)安置棱镜或水准尺。常规的悬高测量一般在待测目标点的天底安设棱镜,利用三角高程测量的原理推求待测目标点的高程<sup>[4-5]</sup>。对于拱桥来说,桥面容易安设棱镜,且桥面标高能通过水准测量精确获得。因此,对常规悬高测量稍加改进,则能容易地完成拱圈线形测量。

### 二、改进的悬高测量法

改进的悬高测量法,是将棱镜置于待测目标点的天顶(桥面),利用三角高程测量原理,根据桥面标高推求拱圈标高,如图1所示。具体的操作步骤为:

1) 建立局部坐标系,找到拱圈测点在桥面上的投影点。以桥面纵轴线为X轴,垂直方向为Y轴,竖向为Z轴,建立局部坐标系。拱圈线形一般需要测量拱脚、 $L/8$ 、 $L/4$ 、 $3L/8$ 和拱顶等特征截面。测点

纵向位置利用钢尺或全站仪测定,横向位置利用拱桥的对称性确定,如图1所示,用钢尺量得桥面和拱圈宽度分别为 $a$ 和 $b$ ,由于桥面悬出部分左右对称,则测点距桥面边缘的距离为 $(a-b)/2$ 。

2) 采用水准测量测得桥面点的高程 $Z_0$ 。

3) 在河流两侧适当位置架设全站仪,在桥面测点安置棱镜,棱镜上安设照准用的觇板,用钢尺量出觇板顶部距测点的垂直距离 $h$ 。

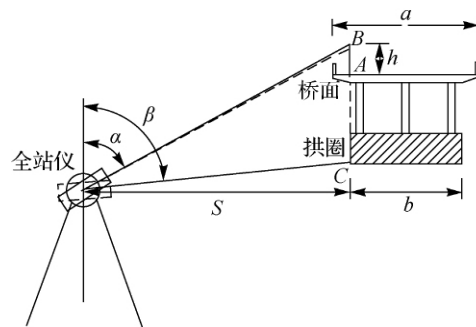


图1 改进的悬高测量法示意图

4) 测出测站点至桥面测点的平距 $S$ ,然后向上转动望远镜,照准觇板顶缘 $B$ ,测得竖直角为 $\alpha$ ,保持全站仪水平制动,向下转动望远镜瞄准拱圈下缘 $C$ ,测得竖直角为 $\beta$ ,假设桥面测点和拱圈下缘点在同一条铅垂线上,则 $C$ 点高程为

$$Z = Z_0 + h - S [\tan(90^\circ - \alpha) - \tan(90^\circ - \beta)] \quad (1)$$

5) 将全站仪倒镜,重复步骤4),再次得到 $C$ 点高程,两次测量取平均值作为 $C$ 点的 $Z$ 坐标。

对于拱圈线形,拱圈下缘 $X$ 、 $Y$ 坐标即为桥面测

收稿日期: 2010-12-28

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(50908016)

作者简介: 陈顺超(1979—),男,土家族,湖北长阳人,讲师,主要从事桥梁检测与评定的研究工作。

点的  $X$ 、 $Y$  坐标  $Z$  坐标通过上述方法得到。下面以徕卡 TCR802 全站仪为例,对  $Z$  坐标的测量精度进行分析。

### 三、 $Z$ 坐标的测量精度分析

#### 1. 测量误差来源

式(1)默认桥面测点与拱圈下缘点在同一铅垂线上,实际上二者肯定存在水平偏离。如图2所示,实际拱圈下缘点为  $C$ ,  $C'$  为桥面测点  $A$  在拱圈平面上的投影,两点水平偏离为  $\Delta S$ 。不考虑桥面测点水准测量的误差,则  $Z$  坐标的测量误差来源主要有:

1) 棱镜觇板高量测误差  $m_h$  可取为  $\pm 1$  mm。

2) 仪器误差,主要由仪器测角、测距误差引起,TCR802 全站仪测角误差为  $\pm 2''$ ,测距误差为  $\pm (2 \text{ mm} + 2 \times 10^{-3} S)$  ( $S$  的单位为 m),实际测量时,平距  $S$  较小,大气折光系数误差可以忽略。

3) 望远镜瞄准觇板上缘和拱圈下缘时的照准误差,可近似取为  $\pm 2''^{[6]}$ 。

4) 偏离值  $\Delta S$  所产生的误差  $\Delta S$  可偏大地取为 2 cm。

#### 2. $Z$ 坐标的测量中误差公式

考虑  $\Delta S$  的影响,拱圈下缘点  $C$  的高程为

$$Z = Z_0 + h - l \sin \gamma [\tan(90^\circ - \alpha) - \tan(90^\circ - \beta)] + \Delta S \tan \beta \quad (2)$$

式中  $l$  为全站仪到棱镜中心的斜距;  $\gamma$  为全站仪到棱镜中心的竖角。根据测量误差传播定律<sup>[7]</sup>可得  $Z$

的测量中误差计算公式为

$$m_z = \pm \sqrt{m_h^2 + (\sin \gamma \cdot \tan \alpha - \sin \gamma \cdot \tan \beta)^2 m_l^2 + [\cos \gamma (\tan \alpha - \tan \beta)]^2 \left(\frac{m_\gamma}{\rho}\right)^2 + \tan^2 \beta \cdot m_{\Delta S}^2 + \left(\frac{l \sin \gamma}{\sin^2 \alpha}\right)^2 \left(\frac{m_\alpha}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{l \sin \gamma + \Delta S}{\sin^2 \beta}\right)^2 \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2} \quad (3)$$

式中  $m_l$  为测距误差;  $m_\gamma$  为竖角测量中误差,取值为  $\pm 2''$ ;  $m_\alpha$ 、 $m_\beta$  为竖角测量中误差,包含了测角误差和照准误差两项独立误差的影响,取值为  $\pm (\sqrt{2^2 + 2^2}) \approx \pm 3''$ ; 其余取值同上。

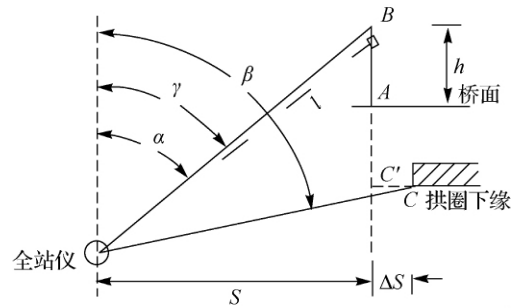


图2 拱圈下缘高程计算示意图

#### 3. $Z$ 坐标的测量精度分析

假设平距  $S$  分别为 50 m、100 m、150 m,  $\alpha$  分别为  $70^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $80^\circ$  和  $85^\circ$ ,  $\beta$  分别为  $95^\circ$ 、 $100^\circ$ 、 $105^\circ$  和  $110^\circ$ ,由式(3)计算  $Z$  坐标的测量中误差,结果如表1所示。

表1  $Z$  坐标的测量中误差计算结果

平距 $S/m$	$\gamma$ $l(^{\circ})$	$\alpha$ $l(^{\circ})$	$\beta$ $l(^{\circ})$	$m_h$ /mm	测距 $l$ 引起误差 /mm	测角 $\gamma$ 引起误差 /mm	$\Delta S$ 引 起误差 /mm	$\alpha$ 角引 起误差 /mm	$\beta$ 角引 起误差 /mm	总误差 /mm
50	90	90	95	$\pm 1.0$	$\pm 0.2$	$\pm 0.0$	$\pm 1.7$	$\pm 0.7$	$\pm 0.7$	$\pm 2.3$
	90	90	100	$\pm 1.0$	$\pm 0.4$	$\pm 0.0$	$\pm 3.5$	$\pm 0.7$	$\pm 0.7$	$\pm 3.8$
	90	90	105	$\pm 1.0$	$\pm 0.6$	$\pm 0.0$	$\pm 5.4$	$\pm 0.7$	$\pm 0.8$	$\pm 5.6$
	90	90	110	$\pm 1.0$	$\pm 0.8$	$\pm 0.0$	$\pm 7.3$	$\pm 0.7$	$\pm 0.8$	$\pm 7.5$
100	90	90	95	$\pm 1.0$	$\pm 0.2$	$\pm 0.0$	$\pm 1.7$	$\pm 1.5$	$\pm 1.5$	$\pm 2.9$
	90	90	100	$\pm 1.0$	$\pm 0.4$	$\pm 0.0$	$\pm 3.5$	$\pm 1.5$	$\pm 1.5$	$\pm 4.2$
	90	90	105	$\pm 1.0$	$\pm 0.6$	$\pm 0.0$	$\pm 5.4$	$\pm 1.5$	$\pm 1.6$	$\pm 5.9$
	90	90	110	$\pm 1.0$	$\pm 0.8$	$\pm 0.0$	$\pm 7.3$	$\pm 1.5$	$\pm 1.6$	$\pm 7.7$
150	90	90	95	$\pm 1.0$	$\pm 0.2$	$\pm 0.0$	$\pm 1.7$	$\pm 2.2$	2.2	$\pm 3.7$
	90	90	100	$\pm 1.0$	$\pm 0.4$	$\pm 0.0$	$\pm 3.5$	$\pm 2.2$	$\pm 2.2$	$\pm 4.8$
	90	90	105	$\pm 1.0$	$\pm 0.6$	$\pm 0.0$	$\pm 5.4$	$\pm 2.2$	$\pm 2.3$	$\pm 6.4$
	90	90	110	$\pm 1.0$	$\pm 0.8$	$\pm 0.0$	$\pm 7.3$	$\pm 2.2$	$\pm 2.5$	$\pm 8.1$
50	85	85	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.2$	$\pm 0.0$	$\pm 0.0$	$\pm 0.7$	$\pm 0.7$	$\pm 1.4$
	80	80	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.4$	$\pm 0.0$	$\pm 0.0$	$\pm 0.7$	$\pm 0.7$	$\pm 1.5$
	75	75	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.5$	$\pm 0.0$	$\pm 0.0$	$\pm 0.8$	$\pm 0.7$	$\pm 1.6$
	70	70	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.7$	$\pm 0.1$	$\pm 0.0$	$\pm 0.8$	$\pm 0.7$	$\pm 1.7$

续表 1

平距 $S/m$	$\gamma$ $/(^\circ)$	$\alpha$ $/(^\circ)$	$\beta$ $/(^\circ)$	$m_h$ $/mm$	测距 $l$ 引起误差 $/mm$	测角 $\gamma$ 引起误差 $/mm$	$\Delta S$ 引 起误差 $/mm$	$\alpha$ 角引 起误差 $/mm$	$\beta$ 角引 起误差 $/mm$	总误差 $/mm$
100	85	85	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.2$	$\pm 0.0$	$\pm 0.0$	$\pm 1.5$	$\pm 1.5$	$\pm 2.3$
	80	80	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.4$	$\pm 0.0$	$\pm 0.0$	$\pm 1.5$	$\pm 1.5$	$\pm 2.3$
	75	75	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.6$	$\pm 0.1$	$\pm 0.0$	$\pm 1.6$	$\pm 1.5$	$\pm 2.4$
	70	70	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.8$	$\pm 0.1$	$\pm 0.0$	$\pm 1.6$	$\pm 1.5$	$\pm 2.5$
150	85	85	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.2$	$\pm 0.0$	$\pm 0.0$	$\pm 2.2$	$\pm 2.2$	$\pm 3.3$
	80	80	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.4$	$\pm 0.0$	$\pm 0.0$	$\pm 2.2$	$\pm 2.2$	$\pm 3.3$
	75	75	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.6$	$\pm 0.1$	$\pm 0.0$	$\pm 2.3$	$\pm 2.2$	$\pm 3.4$
	70	70	90	$\pm 1.0$	$\pm 0.8$	$\pm 0.2$	$\pm 0.0$	$\pm 2.5$	$\pm 2.2$	$\pm 3.5$

由表 1 可见,  $\Delta S$  是引起测量误差的最重要因素,但从理论上讲,只要使  $\beta$  角为  $90^\circ$ ,则能完全消除此项误差;平距  $S$  也是影响测量精度的重要因素。因此,实际测量中,应使  $\beta$  尽量接近直角,并减小测程。通过合理选择测站位置,将测量误差控制在  $5\text{ mm}$  以内,是容易实现的。

#### 四、工程实例

某两孔  $16\text{ m}$  净跨实腹式石拱桥,由于山体滑坡,致使一侧桥台向河中心移动,并使该桥孔主拱圈产生较严重变形,另一孔主拱圈则无明显变形和破损,如图 3 所示。为制定修复方案,采用本文方法实测了拱圈下缘坐标,实测结果采用最小二乘法拟合,得到现状拱圈线形,并与原设计拱圈线形比较得到拱圈竖向变形值。为验证本文方法的精度,将拱顶标高实测值与水准测量值进行了比较,结果如表 2 所示。

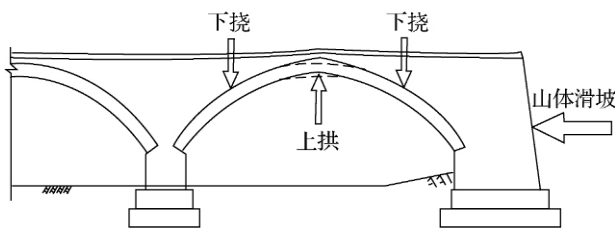


图 3 工程实例示意图

表 2 拱圈下缘 Z 坐标实测值  $m$ 

位置	设计值	本文方法 实测值	水准测量 实测值	差值	拱圈竖向 变形
跨中拱脚	94.354	94.349	-	-	-0.005
$L/4$	97.519	97.418	-	-	-0.101
$L/2$	98.354	98.551	98.555	0.004	+0.197
$3L/4$	97.519	97.441	-	-	-0.078
桥台拱脚	94.354	94.343	-	-	-0.011

由表 2 可见,采用本文方法测得的拱顶标高与

水准测量值相差  $4\text{ mm}$ ,说明本文方法具有较高的精度,能满足工程测量的需要。主拱圈跨中上拱  $0.197\text{ m}$ ,四分点分别下降  $0.101\text{ m}$ 、 $0.078\text{ m}$ ,均远大于  $L/600$ 。结合裂缝开展情况,将该桥的总体技术状况评定为 V 类,并对加固与拆除重建两个方案进行了综合比较,最终推荐采用拆除重建方案。

#### 五、结论

1) 改进的悬高测量法测量拱圈线形,测量精度高,操作简便,适应性强,是拱圈线形测量的一种较好方法。

2) 点位偏差是引起测量误差的最重要因素,但通过保证  $\beta$  角尽量接近  $90^\circ$ ,可基本消除其影响,另外测程也是重要的影响因素。因此,现场合理选择测站点至关重要。

3) 跨径较大的拱桥,由于车辆荷载作用会产生振动,实测时应尽量避免,同时通过增加测回数、上下游拱圈测量取平均值等方法尽量减小测量误差。

#### 参考文献:

- [1] 温庆杰,叶见曙. 缺失技术资料的旧拱桥现场调查方法研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(4): 62-65.
- [2] 仲爱宝,任国旭. 旧拱桥拱肋及拱轴线形确定方法[J]. 中外公路, 2004, 24(4): 94-98.
- [3] 钟正强,罗纪彬,彭振斌. 拱轴线形激光断面仪的测试方法[J]. 中外公路, 2009, 29(3): 126-128.
- [4] 刘庆金. 特殊悬高之测量方法[J]. 测绘通报, 2006(3): 43-45.
- [5] 姚冬青,张健雄,李庆勇,等. 悬高测量方法的再探讨[J]. 测绘科学, 2008, 33(6): 92-93.
- [6] 周洪华. 关于全站仪照准误差的测试实验与初步分析[J]. 辽宁科技学院学报, 2007, 9(1): 15-17.
- [7] 聂让,施锁云,聂泳,等. 测量学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004: 128-129.