

大型斜拉桥高塔墩施工中的变形观测

李宝桂 吴栋材 (武汉测绘科技大学 武汉 430070)

【提要】 在高层建筑物施工中, 变形观测是指导施工和相应测量工作的重要依据。本文结合武汉长江二桥施工实践, 论述了适合斜拉桥主塔墩施工中变形观测的方案与方法。实践证明, 根据本方案进行变形观测精度可达1.0~1.5mm, 有力地指导了主塔墩的施工。

【关键词】 斜拉桥 主塔墩 变形观测 天顶基准法

【Abstract】 Deformation observation is an important work for directing construction and its measurements of high building. In view of the experiences in the construction of Wuhan No.2 Changjiang River Bridge, the deformation observation method which can be used for installation of the main pylon piers is presented here and the example shows that the accuracy can be reached to 1.0-1.5mm.

【Key words】 the cable-stayed bridge, main pylon piers, deformation observation, zenith datum approach

斜拉桥是一种跨度大、净空高的新颖美观的桥梁, 它的主体结构由主塔、主梁及斜拉索三大组成部分。随着现代科学技术的发展, 使得这种桥梁的跨度越来越大, 与此相应, 主塔墩也越来越高。为了满足高塔柱的垂直度要求, 以及确定施工中索力作用下引起的塔柱偏移, 在整个塔墩施工中, 必须测定外界条件影响下塔柱的变化规律, 用以指导施工与测量工作。本文将结合武汉长江二桥主塔墩施工测量实践, 阐述其施工中变形观测的方案、方法等有关问题。

1 工程概况

武汉长江二桥位于万里长江第一桥—武汉长江大桥下游6.8公里处的江面上。该桥是一座主跨为400米的双塔、双索面预应力钢筋混凝土公路斜拉桥。正桥长1876米, 共17个墩台; 桥面斜拉部分宽29.4米, 设6股车道; 通航净空为通航水位以上24米, 可过万吨巨轮。该桥在目前国内、外同类型桥梁中名列前茅。

武汉长江二桥有两个主塔墩, 塔高190

米, 位于主河道附近(见图1)。为固定缆索及其通道, 两墩的上塔柱及上横梁上共设有392根定位精度要求高达 $\pm 5\text{mm}$ 的缆索管。由于主塔墩远离岸区, 故施工放样的基准及控制线全部位于塔墩上。基准传递自 $\nabla 28$ 米平台通过观测孔直达下横梁及上横梁(见图2), 以此作为建立各塔柱缆索管定位线架的依据。定位线架是固定在塔柱上的钢构架(见图3)通过投点与竖向扫描, 可

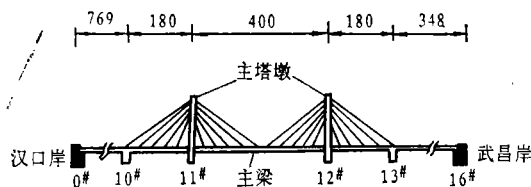


图1

把基准控制以竖直面的形式固定在线架上, (图中以 a_i 、 b_i 、 c_i 表示)。再用弦线法便可把缆索管的顶口及底口中心调整到设计位置上。由此可见, 据基准点向线架投点以建立基准面是缆索管精密定位的关键。

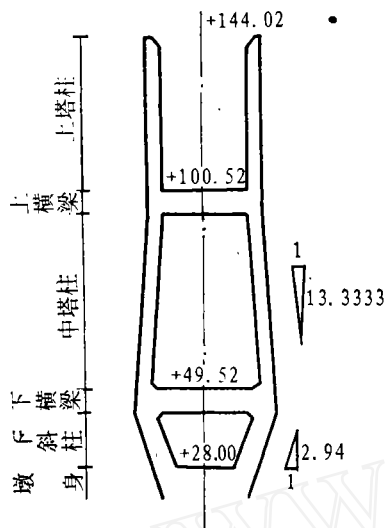


图 2

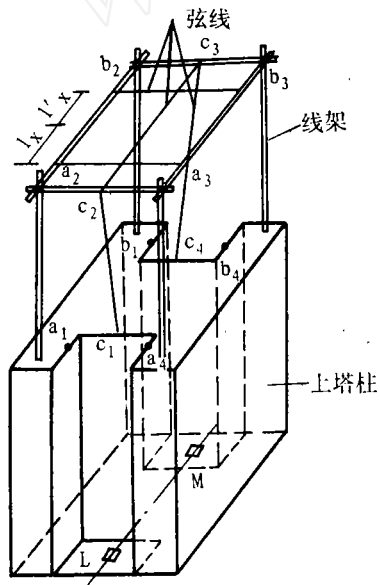


图 3

注: l_x 、 l_y 分别为双索管底口或顶口中心坐标

由于线架固定在塔柱上,塔柱在日照及温度变化等因素的影响下会产生扭转,从而带动线架产生相应的变化。因此,同一的基准面在不同的外界条件下投点,在线架上有不同的位置。这样,就需要研究与掌握塔柱在自然状态下扭转变形的规律,以确定塔柱的平衡位置时刻和为上塔柱调试缆索管所进行的最有利的投点与扫描时间,为此,在中塔柱竣工后,对其顶部进行摆动观测。另

外,为满足日后主梁施工中挂索的要求,也需要了解塔柱在索力作用下偏移平衡位置的大小和跟索力的关系等,为此,必须掌握塔柱在自然状态下的摆动幅度、摆动的平衡位置及其时刻。因此,在上塔柱竣工后,即对上塔柱进行摆动观测。除此以外,高塔墩施工中变形观测还体现在塔墩在不同时期的垂直位移、水平位移观测及上、下横梁混凝土浇筑前、后膺架受力变形测定等。下面重点阐述塔柱的摆动观测。

2 变形观测方案布置

由于主塔墩远离岸区,欲在岸边设置稳定基准点测定塔柱的绝对变形,这无论在精度、速度还是观测现场的环境等,难度都极大,鉴于塔柱观测目的的需要,可测定其相对变形。基准点与变形观测点均可布设在主塔墩上。然而,在堆满施工原料与构件的墩面上,在钢架林立的有限空间里,如何科学地安排各种测点,也不是一件容易的事。在本工程的观测方案中,却有一定新意。它分为铅直面布点与铅直线布点两种。

图 4 为中塔柱变形观测布置示意图,其

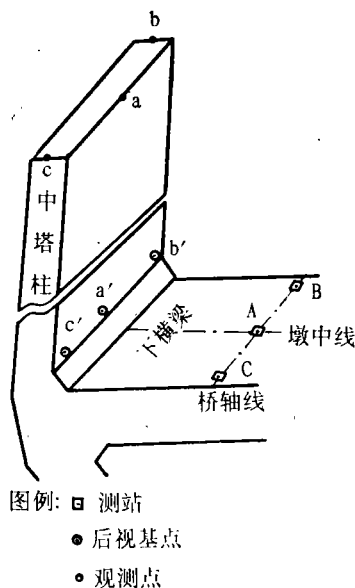


图 4

中, A 、 B 、 C 为设置在下横梁顶面桥轴线上的相对稳定基点(即测站点); a 、 b 、 c 为中塔柱上部观测点; a' 、 b' 、 c' 为对应观测点的后视基点。每测站相应各点(如 A 、 a 、 a' 点)大致位于同一铅直面上。

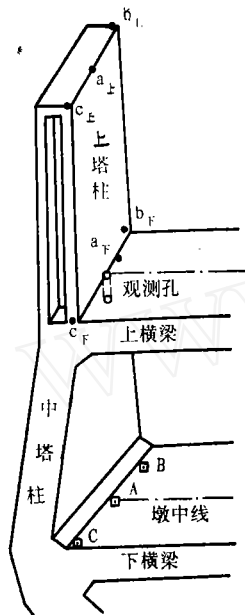


图 5



图 6

图 5 为上塔柱观测布置示意图。其中, A 、 B 、 C 是位于下横梁顶面的测站点; $a_{上}$ 、 $b_{上}$ 、 $c_{上}$ 及 $a_{下}$ 、 $b_{下}$ 、 $c_{下}$ 均属设在上塔柱顶部与下部的观测点。这时, 同一测站相应的各点(如 A 、 $a_{上}$ 、 $a_{下}$)大致处于同一铅直线上。

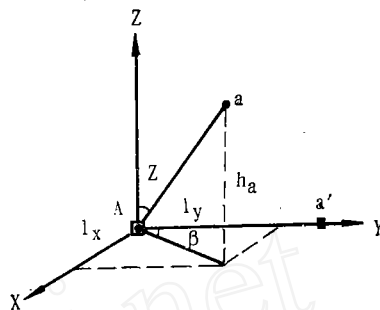
观测点的标志采用特制的有机玻璃墙上活动标牌结构。观测任务结束后, 可取下保存(见图 6)。

为了便于在同一铅直线上的点的透视观测, 玻璃板上的十字线的位置应该经过计算, 并用不同的颜色标记, 以确保通视与辨认。

3 观测方法

与上述布点方法相适应, 观测方法分为“水平角和天顶距同测法”及“精密天顶基

准法”。其实质是精确测定水平角和天顶距, 从中求取塔柱观测点的变形观测量。



图例: □ 测站点
■ 后视基点
● 观测点

图 7

3.1 水平角与天顶距同测法(方法1)

该法的原理如图 7 所示。建立以测站 A 为坐标原点, 沿桥轴线方向为 X 轴, 与其垂直方向为 Y 及 Z 轴的空间坐标系。 A 与后视基点 a' 为固定在某轴线(或其平行线)上的两点。

在作周期观测时, 在 A 点置镜, 精确测定 a 的天顶距 Z 及其对于 a' 点的水平角 β 。顾及到 β 为微小角度, 则 a 点在水平方向上的两维坐标为

$$\left. \begin{aligned} l_x &= h_a \cdot \tan Z \cdot \beta / \rho \\ l_y &= h_a \cdot \tan Z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, h_a 为 a 点对于 A 站上经纬仪横轴高度。这时, 两周期间 a 点的坐标变化值即为变形观测量,

$$\left. \begin{aligned} \Delta l_x &= l_{x_2} - l_{x_1} \\ \Delta l_y &= l_{y_2} - l_{y_1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3.2 精密天顶基准法(方法2)

本法适用于测站点与观测点近于一铅直线的布置方案。它是以仪器的纵轴为基准线, 通过精确测定各观测点的天顶距 Z 从而求得它们相对于基准线的偏距。

图 5 中, 为了测定观测点 $a_{上}$ (或 $a_{下}$) 相对于测站点 A 在纵方向上的位置, 可在 A 点置镜, 把望远镜视准轴置于顺桥向的方向上, 固定照准部后, 借助于望远镜上的折射

目镜测得其天顶距 Z_x , 这时相应的偏距为

$$l_x = Z_x \cdot h_{a上} / \rho \quad (3)$$

将照准部转动 90° , 同法测得横桥向的天顶距 Z_y , 得

$$l_y = Z_y \cdot h_{a上} / \rho \quad (4)$$

同理, 按式(2)可求得变形观测值 Δl_x 及 Δl_y 。

4 方案实施

以图4、图5布设的方案, 按上述两种相应的观测方法, 采用具有精密的竖盘补偿器及折射目镜装置的 T_2 经纬仪4测回分别对两主塔墩的中塔柱及上塔柱的摆动作30~36小时的周期性观测。在测回间严格整平仪器, 以减少纵轴倾斜误差对水平角观测的影响, 为了提高观测精度与速度, 还使用了固定仪器、固定仪器高及观测员等措施。同时, 为研究与掌握日照及大气温度对塔柱变化的影响, 在角度观测的同时, 还同步观测日照方向; 用点温计及普通温度计分别测定混凝土表面及大气温度。现以11#墩上塔柱观

测为例说明之。

表1列举了该墩的上游塔柱上、下两层观测点连续17周期的观测成果。表2及图8记录了与角度观测同步的混凝土温度及日照方向的观测结果。为研究温度变化对塔柱摆动的影响, 按表1、表2分别绘制 a_i 、 b_i 、 c_i 点的纵向变形与温度变化过程线(见图9)。由上述资料分析可得如下结论:

1) 塔柱在日照温度等外界条件的影响下, 具有周期性的摆动规律, 其周期为24小时;

2) 塔柱的摆动幅度随塔柱高度的增高而增大, 即上点变形大于下点变形;

3) 综合塔柱各点随时间的摆动情况, 可得塔柱摆动的平衡位置时刻为13h~15h与5h~7h。因此, 无论是为调整缆索管对线架投点的最有利时间还是为测定塔柱仅受索力影响而产生的偏离的最有利的观测时间均应在上述时间段内选择, 一般以上午七时前为宜。这结论与中塔柱观

11#墩上塔柱变形观测资料

表 1

| 周期 | 时 间 | $a_{下}$ | | $a_{上}$ | | 时间 | $b_{下}$ | | $b_{上}$ | | 时间 | $c_{上}$ | | $c_{下}$ | |
|----|---------|---------|------|---------|------|-------|---------|------|---------|------|-------|---------|------|---------|------|
| | | 纵 | 横 | 纵 | 横 | | 纵 | 横 | 纵 | 横 | | 纵 | 横 | 纵 | 横 |
| | 94-5-28 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 8:50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9:15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 11:15 | -4.2 | 2.1 | -0.4 | -0.4 | 11:00 | -2.9 | 0.4 | 0.7 | 0.9 | 10:50 | -2.1 | 0 | 0.6 | 0.4 |
| 3 | 12:40 | -4.6 | 1.2 | -0.9 | -0.4 | 12:50 | -3.3 | 1.2 | -0.6 | -1.1 | 13:00 | -0.4 | 0 | 0.2 | 0.7 |
| 4 | 15:30 | -0.8 | 0.4 | 0.5 | -1.4 | 15:00 | -1.6 | -1.3 | -0.2 | -1.8 | 15:15 | 3.7 | 0.4 | 0.9 | -0.5 |
| 5 | 17:15 | 0.8 | 0 | +1.4 | -0.9 | 17:35 | 2.5 | -2.1 | 1.2 | -2.3 | 17:00 | 6.6 | 0.8 | 3.1 | -3.2 |
| 6 | 20:30 | 2.9 | -0.4 | +1.4 | -1.6 | 19:45 | 2.1 | -2.1 | 1.0 | -1.4 | 19:35 | 8.7 | 1.2 | 3.4 | -3.2 |
| 7 | 22:10 | 2.1 | -0.8 | 1.6 | -0.9 | 21:35 | 1.2 | -1.3 | 0 | 1.6 | 22:20 | 6.6 | -1.3 | 1.6 | -0.9 |
| | 94-5-29 | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 1:20 | 1.2 | 0.4 | 0.7 | -1.4 | 23:25 | 1.2 | -1.3 | 0.5 | -0.5 | 0:45 | 5.4 | -1.3 | 1.8 | -0.7 |
| 9 | 2:40 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | -1.4 | 2:10 | 0.4 | -0.3 | 0 | -1.1 | 3:00 | 5.8 | -1.7 | 2.0 | -0.7 |
| 10 | 5:35 | -0.4 | 0 | -0.9 | -1.4 | 4:50 | -0.8 | -2.1 | -0.2 | -1.4 | 5:15 | 2.9 | -2.1 | 0.2 | -0.9 |
| 11 | 7:15 | -1.3 | 0 | 0 | -1.8 | 7:00 | -1.2 | -1.7 | -0.2 | -1.8 | 7:25 | 1.7 | -1.7 | 0.2 | -0.9 |
| 12 | 9:20 | -4.6 | 0.4 | -0.6 | -1.6 | 9:10 | -5.4 | 4.5 | -1.8 | 1.1 | 9:00 | -0.4 | 1.6 | -0.3 | -0.2 |
| 13 | 11:00 | -6.2 | 0.8 | -1.1 | -1.8 | 11:10 | -7.9 | 4.9 | -3.8 | 1.4 | 11:20 | -4.1 | 1.6 | -0.9 | -0.5 |
| 14 | 13:20 | -4.6 | 1.2 | -0.4 | -1.4 | 13:10 | -7.4 | 2.9 | -3.6 | 1.6 | 13:00 | -2.1 | 0.8 | -0.3 | 0 |
| 15 | 14:50 | -2.9 | 0.4 | 0.7 | -1.6 | 15:05 | -5.0 | 2.0 | -2.7 | 1.4 | 15:15 | 2.9 | 0.4 | 0.6 | -0.9 |
| 16 | 16:55 | -0.8 | -0.4 | 0.7 | -1.8 | 16:45 | -2.1 | 2.4 | -1.3 | 1.1 | 16:35 | 3.3 | -0.8 | 0.2 | -0.7 |
| 17 | 17:50 | 0.4 | -0.4 | 0.5 | -2.3 | 18:10 | 0.8 | 1.0 | -0.4 | 0.5 | 18:00 | 5.8 | -0.4 | 1.1 | -1.4 |

测基本一致;

4) 塔柱摆动有明显的滞后现象。塔柱是庞大的钢筋混凝土结构物, 无论是受日照还是温度的影响都有个“由表及里”的过程。因此, 尽管各点的变形过程线中均能获得塔柱摆动方向与太阳的转动方向基本一致的结论, 但滞后现象明显。从图9变形曲线与温度曲线的对照分析中, 这种现象一目了然。

混凝土温度统计(单位: °C) 表2

| 点 位 时 间 | a _上 | b _上 | c _上 | a _下 | b _下 | c _下 |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 94-5-28 | | | | | | |
| 9:00 | 24.2 | 24.3 | 26.0 | 24.4 | 25.1 | 30.2 |
| 11:00 | 27.2 | 27.7 | 31.0 | 27.0 | 27.1 | 32.2 |
| 12:30 | 29.4 | 28.6 | 29.3 | 27.7 | 28.4 | 29.9 |
| 15:15 | 30.0 | 34.0 | 28.9 | 30.1 | 33.5 | 29.4 |
| 17:15 | 29.1 | 32.7 | 29.6 | 29.3 | 35.7 | 29.4 |
| 19:15 | 28.1 | 29.3 | 27.6 | 28.3 | 30.2 | 28.2 |
| 22:00 | 27.4 | 27.4 | 27.0 | 27.4 | 27.4 | 27.1 |
| 94-5-29 | | | | | | |
| 24:00 | 26.4 | 26.3 | 26.2 | 26.4 | 26.3 | 26.2 |
| 2:10 | 25.5 | 25.1 | 25.3 | 26.0 | 25.7 | 25.9 |
| 5:00 | 25.5 | 25.0 | 25.3 | 25.4 | 25.2 | 25.5 |
| 7:00 | 26.0 | 25.5 | 27.0 | 25.3 | 25.1 | 27.9 |
| 9:00 | 26.7 | 27.0 | 28.0 | 27.0 | 27.3 | 34.0 |
| 11:00 | 28.0 | 28.0 | 30.6 | 28.2 | 28.2 | 34.0 |
| 13:00 | 32.0 | 33.2 | 31.1 | 29.8 | 33.6 | 31.1 |
| 14:45 | 38.0 | 35.2 | 33.9 | 32.3 | 37.0 | 31.8 |
| 16:45 | 34.3 | 37.1 | 32.9 | 33.7 | 38.3 | 32.0 |
| 18:05 | 31.9 | 34.1 | 31.7 | 31.3 | 33.8 | 31.1 |

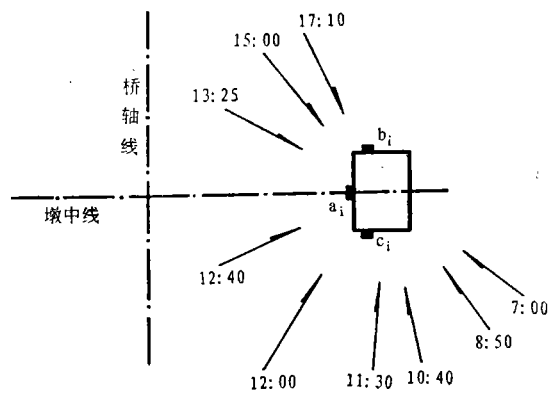


图8

12#墩的塔柱摆动观测的结论与上述一致。

在观测方案实施的过程中, 一个值得注意的问题是通视条件要求较高。在点位布设中应尽量避免钢结构物, 以减少折光影响。在制订变形观测方案时, 要充分阅读有关施工设计图纸, 在预计无法通视的情况下, 要超前设计观测预留孔方案。如视线必须通过6米厚的上横梁时, 施工中一定要预留并确保其观测孔的铅直度(见图5)。

在观测中采用了固定仪器等措施, 不仅使大量的偶然误差影响系统化, 以便在其周期观测值之差中得到相当的抵消; 同时大大提高了工作效率。在上塔柱观测中, 上、下两层观测点, 两个坐标方向, 每周期4测回, 共24测回的工作量仅花20分钟的时间。

以上观测方案的实施目的在于测定塔柱对于下横梁基准点的相对变形。若欲测定其绝对变形, 可利用岸上稳定基点检测主塔的基准点即可。如两个主塔墩▽28米及▽49.52米中心点的沉陷观测, 就是为了获得施工中整个墩子的绝对沉陷信息而进行的。观测的结果认为两墩均没有明显的下沉现象。

5 精度分析

根据上述的观测方案与方法对塔柱作摆动观测, 其理论上的预期精度可以通过式(1)、式(3)及式(4)进行分析。它们相应的精度公式为

方法1:

$$m_{1x}^2 = \left(\frac{l_x}{h}\right)^2 \cdot m_i^2 + \left(\frac{2l_x}{\rho \sin 2Z}\right)^2 \cdot m_z^2 + \left(\frac{l_x}{\beta}\right)^2 \cdot m_\beta^2$$

$$m_{1y}^2 = \left(\frac{l_y}{h}\right)^2 \cdot m_i^2 + \left(\frac{2l_y}{\rho \sin 2Z}\right)^2 \cdot m_z^2 \quad (5)$$

方法2:

$$m_{1x}^2 = \left(\frac{h}{\rho}\right)^2 \cdot m_{Zx}^2 + \left(\frac{Z_x}{\rho}\right)^2 \cdot m_i^2$$

$$m_{1y}^2 = \left(\frac{h}{\rho}\right)^2 \cdot m_{Zy}^2 + \left(\frac{Z_y}{\rho}\right)^2 \cdot m_i^2 \quad (6)$$

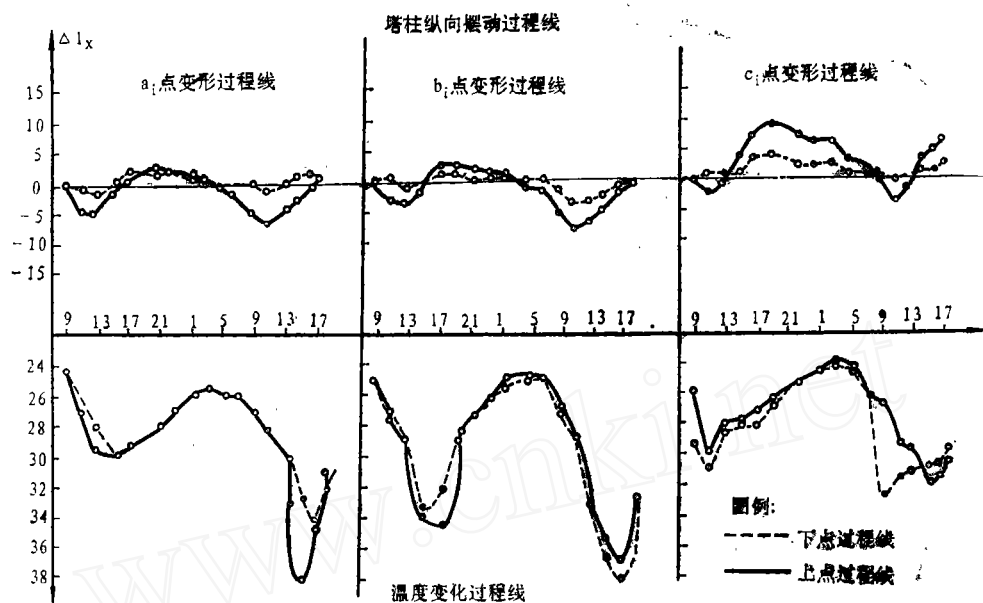


图 9

现结合工程的实际代入上式计算, 结果见表 3。

表 3

| 方 法 | l | l_y | h | $\frac{Z}{Z \cdot Z_y}$ | β | m_l | m_z | m_β | m_{l_x} | m_{l_y} |
|------|-------|-------|-----|-------------------------|---------|-------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| | | | | $m_{\Delta l_x}$ | | | | | $m_{\Delta l_y}$ | |
| 方法 1 | m | m | m | ° | ' | mm | " | " | mm ± 0.3 | mm ± 0.8 |
| | 0.010 | 14.5 | 45 | 20 | 1 | ± 2 | ± (1.5~2) | ± 2 | ± 0.4 | ± 1.1 |
| 方法 2 | 0.010 | 0.010 | 90 | 0.03 | — | ± 2 | ± (1.5~2) | ± 2 | ± 0.8 | ± 0.8 |
| | | | | | | | | | ± 1.1 | ± 1.1 |

从表 3 可见, 按照所设计的观测方案与方法进行观测, 其精度可达到 (1~2) 毫米。在实际作业中, 采用的固定仪器及仪器高等措施, 实际精度可望进一步提高。

应该指出的是, 由于方法 1 必须测定水平角, 而在塔柱摆动观测中, 观测点的高度角都很大, 故仪器纵轴倾斜对水平角观测的影响极为严重。若使用水准管格值为 20″ 的 T_2 经纬仪观测, 即使在测回间严格整平仪器的精度达 1/4 格, 这时, 纵轴倾斜为 ± 5″。它对水平角观测的影响值为

$$\Delta\beta = \pm 5'' \times \text{ctg} Z / \sqrt{n} = \pm 6.9''$$

(n 为测回数)

由此产生 $m_{\Delta l_x}$ 为 ± 1.6mm。若整平精度仅有 1/2 格, 则误差影响超过 3mm。由此可

见, 若使用该法实测, 除了严格整平仪器外, 最好直接读定跨水准器或照准部水准管气泡的偏离值, 以便对水平角施加改正; 在设备条件允许时, 可使用具有双轴补偿器的电子全站仪, 它能直接测出纵轴倾斜量, 并对观测值自动施加改正。

综上所述, 尽管武汉长江二桥主塔墩的变形观测难度很大。但由于紧密结合了工程的实际, 采用了合理的观测方案与方法, 从而创造了高精度与高速度, 有效地指导了施工实践。

参 考 文 献

- [1] 李青岳主编:《工程测量学》, 测绘出版社, 1984年6月。