

索塔周日变形特性研究及其应用

黄 腾 ,岳东杰 ,赵 刚

(河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :根据南京长江第二大桥 195.41 m 高的斜拉桥索塔柱的实测变形值 ,研究了温度、日照和风速等因素作用对塔柱变形的量值 .利用 GPS 定位系统动态监测塔柱在风荷作用下的振动特性 .对大桥钢箱梁的定位和安装起到一定的指导意义 .
关键词 塔柱变形 ,动态监测 ,振动特性 ,钢箱梁定位
中图分类号 :TB22 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2001)06-0036-05

特大跨距的斜拉桥、悬索桥等现代新型桥梁建有高大塔柱 .通过拉索的联系 ,塔柱承担全部的静、动荷载 ,它是整座桥梁的关键部位 .塔柱体因日照及温度变化而产生周日变形 ,因脉动风荷的作用而产生振动现象 ,研究塔柱体的动态形变特性及规律 ,对桥体钢箱梁的精密定位安装、缆索张紧的拉力调整、确保大桥桥面设计的线型 ,均有重要的作用和指导意义 .

南京长江第二大桥的南汊桥 ,为钢箱梁形式的双塔双索面斜拉桥 ,其主跨距达 628 m ,是目前国内在建的最大跨度斜拉桥 .每个塔柱体不同高度的上、下游面均布置 20 对斜拉索 ,钢箱梁分段安装时 ,前 11 对斜拉索对应的梁段采用以塔柱为中心的边跨和江心跨对称安装 .在边跨合拢后 ,原来主梁钢箱的对称吊装变为江心侧的单悬臂吊装施工 ,这时的施工影响塔顶的稳定性 .

塔柱顶部的水平位移 ,直接影响主梁标高的位置 .在南京长江第二大桥的南汊桥钢箱梁的安装中 ,专门研究了塔柱周日变形的规律 ,研究了风压对塔柱体水平位移的动态特性 ,以便正确地指导钢箱梁的调整 .

1 量测系统及精度预估

1.1 测量系统

南京长江第二大桥南汊桥南端塔柱 ,在塔顶埋设三个强制对中底盘 A_1, A_2, B_1 .其中 A_1, A_2 放置全站仪棱镜 ,供 TC2003 全站仪测量 ; B_1 放置 ASHTECH Z₁₂ GPS 接收机扼颈圈天线 .在离江岸约 150 m 处的三层高楼顶布置基准站 A_0, B_0 . A_0 点架设 TC2003 , B_0 点架设 Z₁₂ 固定站 ,且 A_0, B_0 均由高精度施工控制网测定点位坐标 .

由 A_0 点每隔 1 h 以 TC2003 极坐标法测定 A_1, A_2 点的坐标 . B_0 点和 B_1 点上的 GPS 定位仪采用静态跟踪观测 .采样间隔 0.2 s ,接收到卫星不小于 5 颗 ,分 4 个观测时间段 ,即 4 月 5 日 18:00 ~ 20:00 ,4 月 6 日 4:00 ~ 6:00 ,11:00 ~ 13:00 ,16:00 ~ 18:00 .此外 ,每半小时观测一次气温及一分钟风速平均值和风向 .

1.2 精度预估

按极坐标计算公式 ,可得 A_1, A_2 两点 x, y 方向坐标的精度为

$$m_x = \pm \sqrt{(m_s \cos \beta)^2 + (S \sin \beta)^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}} \tag{1}$$

$$m_y = \pm \sqrt{(m_s \sin \beta)^2 + (S \cos \beta)^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}} \tag{2}$$

桥轴线方向为 X 轴 , $\beta \approx 32^\circ$, $S = 400$ m , $m_\beta = \pm 1.0''$, $m_s = 1$ mm + $1 \times 10^{-6} \cdot S$,则 A_1, A_2 两点 x, y 方向坐标的中误差约为 : $m_x = \pm 1.6$ mm , $m_y = \pm 1.9$ mm .可见 ,观测 A_1, A_2 两点的 x, y 坐标中误差不会大于 ± 2.6 mm .

收稿日期 2000-12-01
作者简介 黄腾 (1957—) ,男 ,江苏南京人 ,高级工程师 ,硕士 ,主要从事精密工程测量研究 .

GPS 定位精度的估计比较复杂,每个时段的观测值中,不仅包含本身的定位误差,而且受到风振及日照周日变形的影响.为了有效分离风振及日照对观测值的影响,在评价 GPS 定位精度时,选取风速很小的时段,如 4 月 6 日 4:00 至 6:00,观测到的平均风速在 0.2~0.8 m/s.此外,在此时段内,塔柱顶部的位移,每小时大约 2~3 mm.取此时段为准,以 3 min 为一节,计算每节平均值,求出对应的定位值中误差,从而极大地减弱风振及周日变形的影响.经大量的数据分析,可估计出此值约为 $m = \pm 3.4$ mm.

2 塔柱周日变形分析

2.1 数学模型

塔柱体的周日变形主要是由于气温的变化、日照的半周日变化、塔体热辐射的周日变化及随机的风压作用共同影响的结果.

$$F(x,y)=F(T)+F(V)+F(t)$$

式中: $F(T)$ ——气温分量; $F(V)$ ——风压分量; $F(t)$ ——日照及热辐射分量.对应于 x,y 坐标方向:

$$x=a_0+a_1T+a_2(v\cos\theta)+a_3(v\cos\theta)^2+a_4\sin G+a_5\cos G+a_6\sin^2G+a_7\cos G\sin G$$

$$y=b_0+b_1T+b_2(v\cos\theta)+b_3(v\cos\theta)^2+b_4\sin G+b_5\cos G+b_6\sin^2G+b_7\cos G\sin G$$

$$G=\frac{2\pi}{24}t_i$$

式中: θ ——风向与 x 轴的夹角; T ——气温,℃; V ——风速, m/s; t_i ——观测的时刻.

由于

$$a_4\sin G+a_5\cos G+a_6\sin^2G+a_7\sin G\cos G=A_1\cos(G+\varphi_1)+\frac{1}{2}A_2\cos(2G+\varphi_2)=A_1\cos(\frac{2\pi}{24}t_i+\varphi_1)+\frac{1}{2}A_2\cos(\frac{2\pi}{12}t_i+\varphi_2)$$

因此,此式考虑了热辐射及日照的周日和半周日作用分量.

2.2 塔柱的周日变形模型

以观测的 A_1,A_2 两点 x,y 坐标值,风速、风向、气温之值,分别以(3)(4)式进行回归分析,建立回归方程并计算出回归中误差 m 、复相关系数 R ,如表 1 所示.

表 1 回归方程系数
Table 1 Coefficients of regressive equation

点号		$a_0(b_0)$	$a_1(b_1)$	$a_2(b_2)$	$a_3(b_3)$	$a_4(b_4)$	$a_5(b_5)$	$a_6(b_6)$	$a_7(b_7)$	m/cm	R
A_1	x	10.32	-0.344 1	0.088 3	-0.043 1	3.905 2	-1.094 0	2.322 4	-0.344 2	0.38	0.95
	y	4.37	-0.025 9	0.014 8	0.010 0	-0.571 4	-0.318 6	-0.712 0	-0.607 4	0.29	0.92
A_2	x	12.64	-0.443 7	0.085 5	-0.048 7	4.566 8	-1.475 5	2.851 3	-0.502 5	0.34	0.95
	y	7.59	-0.052 9	0.032 2	-0.001 4	-0.466 5	-0.427 7	-0.662 9	-0.750 8	0.36	0.90

由分析结果知复相关系数均在 0.9 以上,方程的效果是显著的,由它们描述 A_1,A_2 两点周日变形规律是有效的.回归中误差 m 主要反映了观测误差, m 最大为 3.8 mm.

塔柱 x 方向(南北方向)的 a_4,a_5,a_6,a_7 系数值较大,表明此方向受日照、热辐射作用产生的周日变形明显地大于东、西方向的周日变形.在大桥钢箱梁的安装及缆索张紧时将带来十分不利的影响,施工中应采取必要的措施或尽可能避开变形较大的时间段进行.

2.3 温度与风压

按模型(3)(4)进行最小二乘(LS)处理,求得的协因数阵表明,气温与日照热辐射因子间相关系数显著.而风压与上述两因子间的相关系数很小,这是由于风速的随机分布性,没有周日的变化规律,因此可以认为是一种独立的作用分量.对此,塔柱的变形可分解为两部分,即辐射变化分量(气温、日照等)和风压作用分量.可求得两种分量在各时刻对应之值,如表 2 所示.由表 2 知塔柱周日变形在本次观测时间段内主要是温

度变化所致,大约占变形量的 85%,而风压引起的塔柱变形较小,占 15% 左右.这是由于在观测期间没有出现较大的风速所致,观测到的最大风速为 4.6 m/s,风压作用不很显著.按回归方程预估,当风速达 14 m/s 时,风压作用产生的塔柱变形将与温度产生的变形相当.因此,在钢箱梁的安装定位中,也必须注意不能有较大的风速,如果南北向的风速大于 4 m/s 时,将使塔柱顶部 x 方向变形约为 5 mm 的量值.图 1 所示为测定的风速位移曲线.

表 2 A_1 点不同时刻变形值的分解

Table 2 Decomposition of deformation value at point A_1 at different moments		时 刻	0:00	3:00	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00
风压分量	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		0.3	1.0	0.6	1.8	0.9	4.6	1.6	2.1	4.4	3.9	1.1
	位移/mm		0.02	0.05	0.04	0.11	0.04	0.52	0.09	0.17	0.46	0.36	0.06
温度及热辐射分量	温度/ $^{\circ}\text{C}$		10.6	10.6	10.9	13.8	18.3	22.1	21.0	20.1	18.4	16.0	13.0
	位移/mm		4.72	4.74	5.10	7.56	8.53	9.37	8.92	7.29	6.40	5.62	5.03

图 2 所示为 A_1 点因温度和热辐射产生的周日变形过程线.由过程线可知塔体南北方向因温度变化的位移要比东西方向显著得多.晚上 10:00 到凌晨 6:00 期间,塔体受温度作用而产生的变形甚微,总的变幅仅 3 ~ 4 mm.其它时间段内塔柱顶部位移变化剧烈,每小时的变化量 8 ~ 10 mm.要确保桥轴线方向钢箱梁安装误差不大于 ± 5 mm,则选择晚上 10:00 至凌晨 6:00 期间进行是最佳时间段,在此时间段施工安装,塔柱本身因温度和辐射热产生的变化较小,对施工有利.而在其它时间段,如果没有对塔体随时间变化进行有效的修正,是不宜安装的.

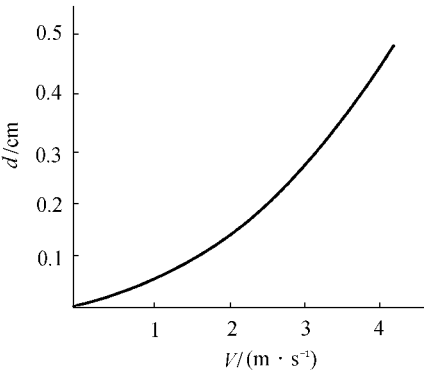


图 1 风速-位移曲线

Fig.1 Wind action vs. displacement

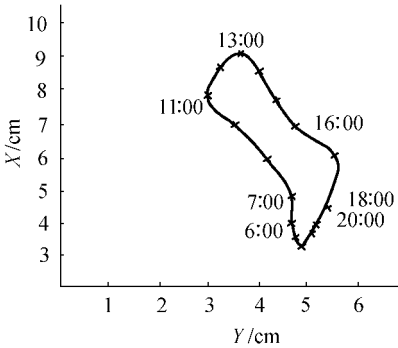


图 2 塔柱热辐射变形曲线

Fig.2 Tower column deformation due to heat radiation

2.4 塔顶扭转变化

设置在塔顶部的 A_1, A_2 两点相距约 5.2 mm.由各观测时刻的实测坐标可反算出这两点的方位角 α ,若以 A_1 为基准,则 A_1 至 A_2 方向的方位角为

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{6}$$

对上式微分并转换成中误差得

$$m_{\alpha}^2 = \rho^2 \frac{\Delta x^2}{S^4} (m_{y_1}^2 + m_{y_2}^2) + \rho^2 \frac{\Delta y^2}{S^4} (m_{x_1}^2 + m_{x_2}^2) \tag{7}$$

取 $m_{x_1} = m_{x_2} = \pm 1.6$ mm, $m_{y_1} = m_{y_2} = \pm 1.9$ mm, $\Delta x = 0.1$ m, $\Delta y = 5.2$ m, 则可得 $m_{\alpha} = \pm 1.5'$.

上式表明,由各观测时刻的点位坐标反算出塔顶转角值的中误差大约 1.5'.图 3 为观测值计算出的塔顶扭转角度变化过程线.由图中可知,塔顶扭角变形在 10:00 ~ 16:00 期间,其扭转变形

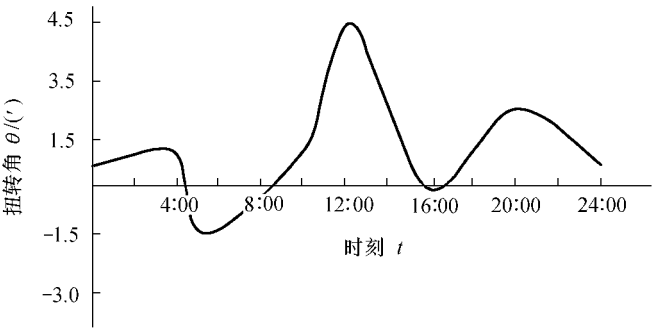


图 3 塔柱顶部扭转变形曲线

Fig.3 Torsional deformation at the top of tower column

的量值和速率均较大.塔顶的扭转变形也主要是因太阳不均匀照射所致,从而引发塔体有较强周日规律的扭转变化特性.

3 塔柱的风振特性

3.1 振动模型

一个周期函数 $f(x)$ 可展开成:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$
 (8)

$$a \cos x + b \sin x = A \cos(x + \phi)$$
 (9)

高阶次的振频由于振幅较小,对塔柱产生的影响作用不大.因此,通常主要研究低阶次振频的作用特性.

$$f(x) = b_0 + \sum_{i=2,4,6} \left[b_{i-1} \cos\left(\frac{i\pi}{T} \cdot x\right) + b_i \sin\left(\frac{i\pi}{T} \cdot x\right) \right]$$
 (10)

3.2 塔柱振频分析

塔柱固有的振频虽然可由有关的计算公式进行估算,但是由于塔柱形体复杂,又经 20 对斜拉索张紧,因此估算精度很差.本文提出,首先把 GPS 观测值经卡尔曼滤波平滑处理,初步确定振动周期的近似值 T' .然后以 $\Delta T_i = 0.02\text{ s}$ 的步长代入观测方程式 (10),计算各步长的系数 $\hat{b}_i$ 及拟合值 $\hat{f}(x)$,并求出各步长对应的拟合中误差 m_i .取 $|m_i|$ 为最小值相对应的 $T' + \Delta T_i$ 作为第一主频,则一次谐频就为 $(T' + \Delta T_i)/2$,相应的振幅为:

$$A_1 = \sqrt{\hat{b}_1^2 + \hat{b}_2^2} \quad A_2 = \sqrt{\hat{b}_3^2 + \hat{b}_4^2}$$
 (11)

风速越大,塔柱振动就越显著.因此,在塔柱振动分析中,选取最大风速对应时刻的 GPS 观测结果进行分析.共 5 个时间段,每个时间段均以 1 min 为限,即基本上覆盖一个风速周期.

以 A_1 点 x 方向为例,首先以 WINPRISM 软件进行滤波处理,再按式 (10) 进行振动分析.在 4 m/s 左右风速时,高塔柱的第一振频 $T_1 = 3.98\text{ s}$,相应的振幅 $A_1 = 6.37\text{ mm}$, $\varphi_1 = 47^\circ 49'$.第二振频 $T_2 = 1.99\text{ s}$,相应的振幅 $A_2 = 4.52\text{ mm}$, $\varphi_2 = 72^\circ 16'$.

可见,本次试验观测的塔柱在 4 m/s 风力作用下,产生的振幅不大,对钢箱梁的安装定位产生的影响较小.

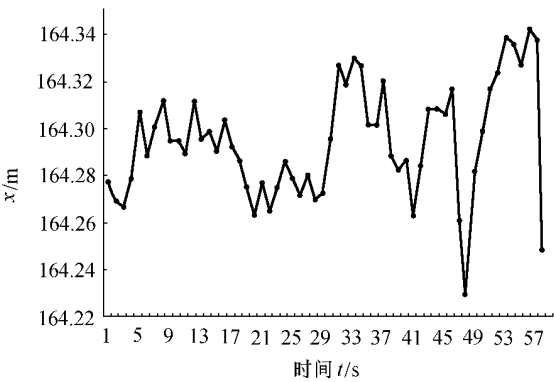


图 4 滤波后的塔柱观测值

Fig.4 Observed data of tower column after filtration

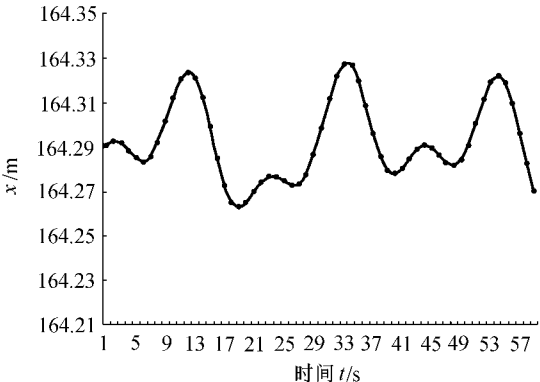


图 5 塔柱振动分析曲线

Fig.5 Analytic curve of tower column vibration

4 钢箱梁安装的应用

塔体变形模型可以计算及预测在不同风速、气温及时间段的塔体位移.

南京长江第二大桥钢箱梁的定位安装,选择从晚上 22:00 到次日凌晨 6:00 的时间段,并注意避免在较大风速下进行.同时采用变形模型进行修正值的计算,加强检核和校验,进一步确保定位准确性.变形模型的校核计算表明,校核值与实际观测值的差异在 $\pm 4\text{ mm}$ 以内.这主要是在晚上气温和风速变化均很小,变形模型的预测值有较高精度和实用价值.

大桥钢箱梁两岸对接的误差 ,经最终测定和验收表明 ,其值不大于 $\pm 2 \text{ mm}$,达到很高精度.

5 结 论

a. 高索塔因气温、热辐射及风荷载作用产生的变形是较显著的. 为提高钢箱梁定位的精度 ,确保桥型曲线 ,研究高索塔的变形模型和特点是十分必要的.

b. 不同塔柱因结构不同而产生的周日变形各有特点. 本文在测试期间测得南京二桥塔柱周日变形达到 50 mm 以上 ,对大桥钢箱梁定位和精确安装会产生显著影响. 因此 ,只有选择合宜的安装环境条件 ,减弱变形量值 ,并随时以变形模型检核 ,才能保证安装精度.

c. 风荷载是一种随机作用分量 ,在强风作用下高塔柱变形可能达到周日变形的量值. 此外 ,在脉动风速不大时 ,塔柱的振幅对定位的影响很小. 本文测试表明 ,在风速不大于 4 m/s 时 ,定位和安装钢箱梁是合宜的.

参考文献 :

[1] 章书寿 ,华锡生. 工程测量[M]. 北京 : 水利水电出版社 ,1998. 47 ~ 50.

[2] 刘大杰. 全球定位系统(GPS)的原理与数据处理[M]. 上海 : 同济大学出版社 ,1996. 83 ~ 84.

Study on Daily Deformation Characteristics of Cable Tower and Its Application

HUANG Teng , YUE Dong-jie , ZHAO Gang

(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Based on the observed deformation of the cable tower of 195.41 m in height on the second Nanjing Yangtze Bridge , the influences of temperature , sunshine , and wind pressure on the deformation of the cable tower are studied. The GPS is applied to dynamic monitoring of the vibration of the tower column under wind action. The research may provide some guidance for the positioning and installation of steel box girders of bridges.

Key words : tower column deformation ; dynamic monitoring ; vibration characteristics ; positioning of steel box girder