



# 海沧大桥悬索桥施工控制测量

鲜正洪<sup>1</sup>, 李建斌<sup>2</sup>, 黄增财<sup>3</sup>

(1. 浙江大学 交通工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 陕西省公路局, 陕西 西安 710068; 3. 中国路桥集团二局二处, 广州 中山 528427)

[摘要] 针对海沧大桥悬索桥的施工特点, 对施工测量控制网的建立、主塔的变形观测及主缆基准索股线形的控制测量方法进行了研究。提出的方法有效地解决了海沧大桥的施工控制测量问题, 具有一定的工程使用价值。

[关键词] 悬索桥; 施工控制测量; 变形观测; 线形

[中图分类号] U 442.3+5 [文献标识码] A [文章编号] 1002-1205(2004)03-0119-04

## Construction Control Survey of Haicang Suspension Bridge

XIAN Zhenghong<sup>1</sup>, LI Jianbin<sup>2</sup>, HUANG Zengcai<sup>3</sup>

(1. Institute of Transportation Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China; 2. Shanxi Bureau of Highway Administration, Xi'an, Shanxi 710068, China; 3. 2nd Bureau of China Road and Bridge Group, Zhongshan, Guangdong 528427, China)

[Abstract] Based on the characteristics of Haicang Suspension Bridge, the control network of construction survey, the observation of main tower deformation, and the control survey of reference strand of main cable were discussed. The approaches presented in the paper were effective in the construction of the bridge with values of reference for future practices.

[Key words] suspension bridge; construction control survey; deformation observation; line shape

厦门海沧大桥位于厦门港港区, 是厦门岛的第二条对外通道, 由东航道桥、西航道桥、东西引道桥、东渡互通立交、石塘立交、东西引道及附属工程组成的大型桥梁工程。其中东航道桥为我国第一座特大型三跨连续流线型扁平闭口钢箱梁悬索桥, 全长 1 108 m, 主跨 648 m, 边跨 230 m, 桥面宽 32 m。

根据悬索桥的施工特点, 施工控制测量一般包括如下的主要内容: ① 根据桥位的地形情况以及施工测量要求, 建立完善的平面和高程施工控制网; ② 基准索股的线形控制测量; ③ 主塔的变形控制测量。

### 1 平面及高程控制网的建立

控制网是施工测量参照的基准, 它的精度直接影响到施工测量结果的精确性, 因此控制网的建立是施工控制测量中极其重要的一环。

#### 1.1 平面控制网的建立

##### a. 布设原则

根据施工控制测量工作要求, 点位应布设在桥位附近, 且点位距离观测点不能太远又不能太近, 过远距离太长, 太近仰角太大, 这些都会给测量精度带来影响, 同时, 在点位布设时必须充分考虑到施工过程中的通视情况。通过对东、西岸进行实地考察, 建立了如图 1 所示的平面控制网。

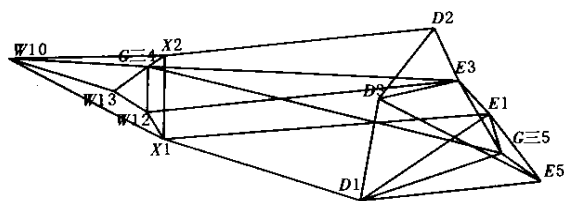


图 1 平面控制网  
Figure 1 Planar control net

**b. 点位埋设** [www.othermap.com](http://www.othermap.com)

施工控制点,虽非永久性控制点,但也必须保证其在施工过程中点位不会发生变化,因此,在点位埋设时,除在永久的建筑物上之外,其余基础作深挖处理,并在个别点位设置强制对中观测墩。

**c. GPS 网观测与数据处理**

该部分工作主要包括以下几个方面：

① 外业观测和数据处理。外业观测用 3 台标称精度为 5 mm + 1 ppm 的 wildGPS200 型双频接收机,采用大地四边形从中间向两端的地毯式滚动观测方案。GPS 网的数据处理分两步进行,首先利用与 GPS 接收机配套的 SKI 软件进行基线处理,再利用 GPS 后处理软件 Geo.NAS/Convert.exe 进行 GPS 网的

约束平差,约束条件以 G 三 4 点坐标( 2 710 545.547 , 455 718.721 )作为坐标约束,以 G 三 4 至 G 三 5 的坐标方位角 ( 104° 41′ 41.93″ )为方位角约束,以桥墩顶面的平均高程 45.5m 为投影面约束,最终得到所需的 GPS 网的平差成果和精度评定。

② 基线处理的外业检核。本次 GPS 测量共组成 9 个同步和异步闭合环,各闭合环的闭合差和相对闭合差如表 1 所示。从表中可以看出,观测精度均高于设计的精度要求,说明外业观测质量优良,可用于后处理平差计算。

③ 平差成果。经过对测量数据进行严密的平差计算,计算成果列于表 2。

以上 GPS 观测的外业检核和内业平差后的主

表 1 GPS 测量闭合环的闭合差列表  
Table 1 Close differences of GPS closed loop

序号	闭合路线名称	路线/km	Wx/m	Wy/m	Wz/m	Wxy/m	相对闭合差
1	E3-E1-G≡5	0.623 2	0.002 0	- 0.000 7	0.002 5	0.003 3	1/190 162
2	E3-E5-G≡5	0.941 4	0.000 4	- 0.001 3	- 0.001 5	0.002 0	1/464 943
3	E3-G≡5-D2	1.031 0	0.003 3	- 0.004 0	- 0.002 1	0.005 6	1/184 275
4	E3-G≡5-D1	1.389 3	- 0.002 0	- 0.002 5	- 0.003 1	0.004 5	1/311 758
5	E3-D2-D1	1.436 3	0.002 8	- 0.000 5	0.000 3	0.002 9	1/502 185
6	D2-G≡5-D1	1.715 5	- 0.002 5	0.001 0	- 0.000 7	0.002 8	1/616 637
7	X1-X2-W10	1.480 5	0.000 5	0.002 7	0.002 6	0.003 8	1/391 511
8	G≡4-W12-G≡5	2.708 4	- 0.001 9	0.003 4	0.006 8	0.007 8	1/345 611
9	E3-G≡4-G≡5	2.683 9	- 0.001 0	- 0.003 7	- 0.003 0	0.004 9	1/551 431

表 2 平差计算结果列表  
Table 2 Results of balancing

序号	点名	X 坐标/m	Y 坐标/m	X 向位差/±( mm )	Y 向位差/±( mm )	点位误差/±( mm )
1	G≡4	2 710 575.547 0	455 718.721 0			起算点
2	E1	2 710 392.979 6	456 916.082 4	1.273	1.278	1.804
3	E3	2 710 513.561 5	456 808.736 4	1.122	1.150	1.607
4	E5	2 710 147.789 1	457 098.045 8	1.322	1.302	1.856
5	G≡5	2 710 249.356 4	456 962.529 7	1.127	1.137	1.601
6	D1	2 710 085.421 2	456 459.284 7	1.488	1.463	2.087
7	D2	2 710 702.759 1	456 723.336 3	1.497	1.479	2.104
8	X1	2 710 313.962 4	455 770.809 8	1.869	1.860	2.637
9	X2	2 710 614.106 8	455 778.193 3	1.596	1.554	2.228
10	W12	2 710 412.184 4	455 714.493 9	1.293	1.254	1.801
11	W10	2 710 610.159 7	455 222.397 2	1.320	1.218	1.796

要精度指标表明该控制网完全达到设计的二等平面控制网的各项技术要求。

1.2 高程控制网

**a. 外业观测。**对本桥的高程控制网的观测采用 2 台 N3 水准仪及配套铟瓦水准尺,按附合水准路线的形式进行往返观测,跨河段仍设置在东渡港码头和火烧屿的东岸之间,跨河路线约 800 m 长,跨河水准按双仪器平行四边形光学测微法,独立观测 8

测回。

**b. 外业检核和精度评。**

① 陆地水准路线各测段往返测高差较差的检核。陆地上 10 个测段往返测实际高差较差及相应的允许误差统计,如表 3 所示。从表中可知各测段的此项指标均小于其相应的允许误差,此项指标合格说明陆地水准测量各测段往返测高差较差达到二等水准的观测精度要求。

表 3 实际高差较差及允许误差统计表  
Table 3 Statistics of actual differences and allowable errors in elevation

序号	测段起点	测段终点	测段长/km	往测高差/m	返测高差/m	高差均值/m	高差较差/mm	允许较差/±(mm)
1	BM6	BM7	0.827 9	- 7.576 08	7.574 95	- 7.575 52	- 1.13	3.64
2	BM7	BM9	0.485 0	1.114 18	- 1.115 96	1.115 07	- 1.78	2.78
3	BM9	BM8	0.581 1	0.325 90	- 0.325 77	0.325 84	0.13	3.04
4	BM8	BM10	0.402 8	8.419 94	- 8.419 07	8.419 51	0.87	2.54
5	BM10	BM11	1.194 9	- 13.344 52	13.346 70	- 13.345 61	2.18	4.37
6	BM10	感光厂	0.705 5	- 9.654 72	9.656 50	- 9.655 61	1.78	3.36
7	BM11	感光厂	0.529 4	3.689 80	- 3.689 87	3.689 84	- 0.07	2.91
8	E	BM6	0.176 7	0.257 25	- 0.258 38	0.257 82	1.13	1.68
9	W	BM≡3	0.043 6	2.296 44	- 2.296 54	2.296 49	- 0.10	0.84
10	BM≡3	BM4	0.333 4	1.778 62	- 1.779 39	1.779 01	- 0.77	2.31

② 跨河水准测量各测回高差互差的检核。二等跨河水准测量各测回高差的允许互差计算公式如式(1):

$$\Delta h_{允} = \pm 4 m_{\Delta} \sqrt{NS} \tag{1}$$

若取 $m_{\Delta} = \pm 1\text{ mm}$ 、 $N = 8$ 、 $S = 0.8\text{ km}$  ,则:

$$\Delta h_{允} = \pm 10.12\text{ mm}。$$

从观测结果来看 ,各测回高差最大最小的较差:

$$\Delta h = - 57.5 - ( 144.41 ) = - 13.09\text{ mm}。$$

$|\Delta h| > \Delta h_{允}$  ,由此可见第 7 测回的观测结果应舍去 ,舍去后各测回高差的较差为:

$$\Delta h = - 53.33 - ( - 44.41 ) = - 8.92\text{ mm}。$$

$|\Delta h| > \Delta h_{允}$  ,说明跨河水准外业观测达到设计精度要求。

③ 陆地实测每公里水准测量往返测高差中误差的计算公式如式(2):

$$M_{\Delta} = \sqrt{\frac{[\Delta\Delta/R]}{4N}} \tag{2}$$

式中: $N$  为测段数 , $N = 8$  , $\Delta$  为各测段往返测高差较差 , $R$  为各测段长度。经计算: $M_{\Delta} = 0.832\text{ 1 mm/km}$ 。  $M_{\Delta}$  小于二等水准的允许限差 $\pm 1\text{ mm/km}$  ,从而说明观测精度达到二等水准的精度要求。

④ 跨河水准一测回高差和高差中误差的计算。计算公式如式(3):

$$M_h = \pm \sqrt{\frac{[VV]}{n(n-1)}} \tag{3}$$

式中, $V_i = h_i - h$  , $i = 1 \sim 7$  , $h_i$  为每测回观测高差 , $h$  为  $n$  测回观测高差的平均值 , $n = 7$ 。因此  $M_h = \pm 1.33\text{ mm} < 2m_{\Delta}$ 。

2 基准索股的线形测量

在悬索桥施工中 ,基准索股的线形实际上就是以后主缆的线形 ,因为主缆中其它索股的线形是参

照基准索股的线形而进行调整 ,因而基准索股的线形测量工作特别重要。基准索股的线形测量分为绝对垂度和相对垂度的测量。

2.1 绝对垂度测量

a. 基本方法。根据海沧大桥悬索桥的实际情况 ,采用单项三角高程中间法 ,即在待测点附近 ,选择外界条件与待测点相似的水准点 ,测量时 ,在测站上分别观测待测点和水准点的竖直角 ,继而求出水准点和待测点之间的高差 ,最后根据水准点的高程求出待测点的高程。此方法由于观测得到的是高差值 ,可认为大气折光的影响在高差的计算中大部分的消除 ,因而待测点的高程可达到一定精度。

b. 现场测量。采用全站仪双测站在气温稳定时进行观测。两台全站仪分别架设在东西岸的控制点上 ,棱镜则分别架设在边跨和中跨跨中的索股的底面 ,跨中位置根据上下游索股底设计坐标 ,由全站仪采用坐标法直接测设(全站仪可直接显示坐标) ,并作划标志。观测时 ,先用两岸的全站仪分别观测中跨跨中的标高 ,当两岸的观测值的差值在测量允许范围时 ,取两者的平均值作为最终观测值 ,并作为中跨垂度调整的依据 ;中跨调整完成后 ,将采用同样的方法再对两边跨进行观测。

2.2 相对垂度测量

当基准索股调整到设计位置后 ,在中跨及两边跨的跨中 ,对上下游两根基准索股进行相对垂度观测 ,常采用液体重力水准测量 ,即连通管测量方法。通过猫道横向通道布设连通管 ,连通管直径大于 20 mm ,测量时 ,一端的液面与基准索股顶面对齐 ,量测另一基准索股顶面与连通管另一端液面的高差值 ,即为两根索股的相对垂度值。

2.3 绝对垂度观测的精度分析

单向三角高程中间法高差的计算公式如式(4):

$h = S \times \tan \alpha + (1 - K) \times S^2 + I - V$  (4)  
式中 : $S$  为水平距离 , $\alpha$  为竖直角 , $K$  为大气折光系数 , $R$  为当地的地球曲率半径 , $I$  为仪器高 , $V$  为目标高。

对式 (4) 取全微分得式 (5) :

$$dh = \tan \alpha \, dS + \frac{S \times \sec^2 \alpha}{\rho} \, d\alpha + \frac{S \times (1 - K)}{R} \, dS - \frac{S^2}{2R} \, dK + dI - dV$$
 (5)

从而得 :

$$m_h^2 = \tan^2 \alpha \, m_S^2 + \frac{S^2 + \sec^4 \alpha}{\rho^2} m_\alpha^2 + \frac{S^2 \times (1 - K)^2}{R^2} m_S^2 + \frac{S^4}{4R^2} m_K^2 + m_i^2 + m_v^2$$
 (6)

对于海沧大桥 , $S$  不大于 600 m , $m_S \leq \pm 4.0$  mm , $m_\alpha \leq \pm 2.5''$  , $m_K \leq \pm 0.4$  , $m_i \leq \pm 2.0$  mm , $m_v \leq \pm 2.0$  mm ,经计算得  $m_h = \pm 5.652$  mm。  
精度分析表明 ,只要测量时严格按照要求进行 ,其单向高差的中误差可控制在  $\pm 5.652$  mm 以内 ,取 2 倍中误差为极限误差 : $\Delta = \pm 11.304$  mm ,显然 ,这个精度完全满足基准索股垂度控制的精度要求。

3 主塔的变形观测

主塔在施工过程中 ,其状态始终处于变化之中 ,为了准确掌握主塔在施工过程中的实际状态 ,必须对主塔进行实时跟踪观测 ,以便及时调整其施工状态。  
a. 测点设置。测点设置如图 2 所示。通过测量各测点的坐标 ,就可得到主塔的纵横向偏移及扭转变形。

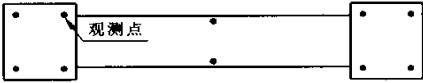


图 2 变形观测点布置图

Figure 2 Layout of measuring points for observing deformation

b. 观测。利用全站仪直接测出各观测点的平面坐标。通过计算各测点的坐标变化值 ,就可得到主塔的纵横向偏移及扭转变形 ,以便根据塔的变形情况及时作出施工调整。  
c. 观测结果。通过对主塔的实时跟踪观测 ,塔的最大纵向偏位为 :东塔 19.8 cm ,西塔 19.2 cm ,满足塔的最大偏位 (20 cm) 允许范围 ;最大扭转为 :东塔 0.8 cm ,西塔 1.0 cm。

4 结语

通过上述的讨论 ,可得到如下结论 :① 在整个施工过程中 ,施工测量控制网是施工控制的基础 ,控制网精度的高低直接影响到成桥的施工精度 ,因此必须按施工技术规范要求 ,建立高精度的控制网 ,同时 ,布设控制点时 ,必须考虑到施测的方便 ,从而达到以较少的控制点 ,得到较高的控制精度和方便的现场施测。② 基准索股的精确定位 ,对主缆的线形和成桥后桥面线形的影响 ,至关重要 ,因此必须选择切实可行且观测精度高的观测方法 ,经对各种方法进行比较分析 ,最后选择单向三角高程中间法 ,该方法完全能满足设计及施工技术规范的要求。③ 在施工过程中 ,由于塔顶的不平衡力 ,塔顶会发生纵向偏移 ,这样会影响塔的结构状态及安全 ,因此必须实时跟踪观测塔的变形。在主缆架设阶段 ,由于临时荷载的影响 ,塔的偏位会影响到基准索股的线形 ,因此对基准索股的调整必须考虑到塔的偏位影响 ;在钢箱梁架设阶段 ,每架设一段钢箱梁 ,塔顶都会发生偏位 ,通过对其进行跟踪观测 ,根据其偏位情况来确定主鞍座的顶推时间和调整钢箱梁的吊装顺序 ,从而保证塔在整个过程中处于安全状态。

[ 参考文献 ]

[ 1 ] JTJ 041 - 2000 ,公路桥涵施工技术规范 [ S ] .