

# 苏通大桥 300 米高塔的设计与施工

罗承斌<sup>1</sup>, 周建林<sup>2</sup>, 田唯<sup>1,3</sup>, 戴捷<sup>4</sup>

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 武汉 430014; 2. 江苏省苏通大桥建设指挥部, 南京 210006;  
3. 交通部长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 武汉 430071; 4. 江苏省交通规划设计院, 南京 210005)

[摘要] 苏通长江公路大桥索塔为世界上建成的最高桥塔。索塔锚固区采用钢混组合结构, 其构造及受力机理复杂, 结构耐久性问题需高度关注; 300 m 塔高使得结构对风和环境因素相当敏感; 高塔施工的抗风安全尤为重要。从索塔锚固区设计、索塔形态控制、抗风安全 3 个方面介绍苏通大桥索塔工程设计与施工的关键技术。

[关键词] 苏通大桥; 索塔的设计与施工

[中图分类号] TU973; TU974 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)03-0051-06

## 1 前言

苏通长江公路大桥为世界上已建桥梁的最大跨度斜拉桥, 索塔采用钢筋混凝土结构, 索塔承台以上高 300.4 m, 索塔的斜拉索锚固是关系到结构安全的重要部分, 采用了钢锚箱锚固方式, 在苏通大桥索塔设计中, 重点进行了索塔锚固区研究。

苏通大桥索塔位于远离江岸的深水区, 因太阳辐射、气温变化、强劲江风等自然因素的作用, 对索塔线形控制精度实现的影响将更为显著; 且索塔施工过程受风影响较大, 索塔和塔吊的风致响应是高塔施工安全重点关注的问题。

## 2 总体方案

索塔全高 300.4 m, 其中上塔柱高 91.4 m, 中塔柱高 155.8 m, 下塔柱高 53.2 m, 塔底面塔肢中心间距 62.0 m, 塔柱采用变截面空心箱形断面, 塔柱底部设实心段。索塔在 64.3 m 处设置横梁, 采用箱形变高结构。索塔锚固区采用钢混结构, 钢锚箱共 30 节, 总高度 73.6 m, 自上而下分为 A, B, C 三种类型, 其中 A 类和 C 类钢锚箱各一节, B 类钢锚箱 28 节, 标准节段高 2.3~2.9 m, 底节钢锚箱高 3.6 m。

钢锚箱端部承压板与混凝土塔壁相连, 表面焊有剪力钉, 剪力钉埋入混凝土塔壁; 底节钢锚箱与混凝土塔柱连接, 用以传递斜拉索竖向分力<sup>[1]</sup>。如图 1 所示。

索塔采用液压爬模进行施工(底部实心段采用支架滑模施工), 共分为 68 个施工节段, 标准节段高 4.5 m。索塔横梁采用支架现浇, 与塔柱异步施工。钢锚箱采用工厂制作、预拼, 现场安装、栓接的施工方法。在中下塔柱, 每隔一定高度设置水平支撑, 施加主动顶撑力, 以消除由于塔柱倾斜产生的变形和应力<sup>[2]</sup>。

## 3 索塔锚固区设计

索塔的斜拉索锚固是关系到结构安全的重要部分, 苏通长江公路大桥采用了钢锚箱锚固方式, 钢锚箱为箱形结构, 构造尺寸如图 2 所示, 苏通大桥钢锚箱共 30 节, 锚固第 4 对~第 34 对斜拉索, 剪切连接件是混凝土与钢锚箱共同受力的关键构造, 采用的剪力钉直径  $\phi 22$  mm, 长度 200 mm, 其极限强度不小于 400 MPa(符合 GB/T 10433-2002), 这种焊钉采用专用焊机焊在钢板上, 施工非常方便, 对钢板本身影响很小。

[收稿日期] 2008-11-07; 修回日期 2008-12-04

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2006BAG04B04)

[作者简介] 罗承斌(1970-), 男, 湖北石首市人, 中交第二航务工程局有限公司高级工程师, 主要从事桥梁施工; E-mail: lcbwh@263.net

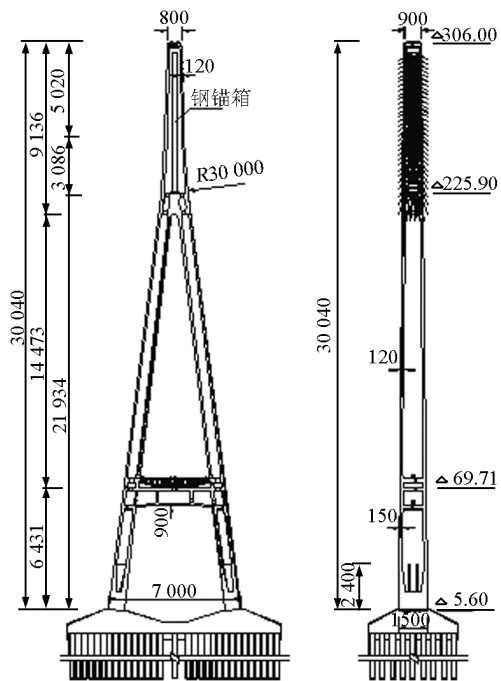


图1 索塔总体设计图(单位:cm)

Fig.1 The general design drawing of the cable tower

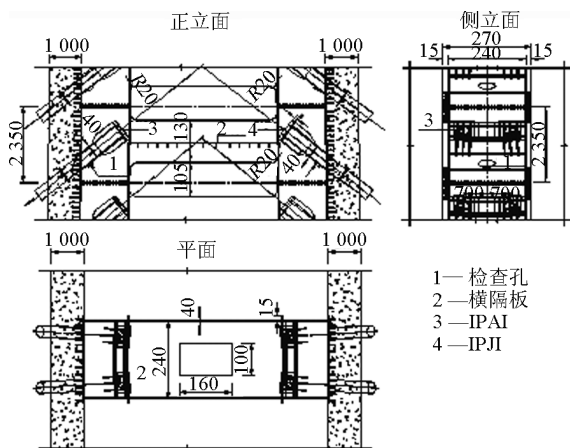


图2 索塔钢锚箱构造(单位:mm)

Fig.2 The structure of the steel anchor box for cable tower

### 3.1 索塔锚固区剪力钉模拟试验

针对钢锚箱端板与混凝土塔壁之间剪力钉所处的受力状态,通过试验研究测定剪力钉的刚度及承载能力,给出用于数值计算分析时需要的剪力钉抗剪刚度以及抗剪强度设计允许值,剪力钉试件照片见图3。

索塔锚固区的整体数值分析得到了钢锚箱与混凝土索塔的竖向应力及剪力钉剪力的分布特点,结果与锚索区结构分析结果较为接近。而剪力钉受力



图3 剪力钉试件

Fig.3 Shear pin sample

试验结果表明:

1) 剪力钉的抗剪承载力以及抗剪刚度随着预加压力增大而增大,设计中不考虑钢锚箱端板与混凝土塔壁之间的摩擦力作用是偏于安全的;

2) 剪力钉抗剪刚度采用抗剪承载力的1/3荷载处所引的割线,如图4所示,基于性能试验所求出的抗剪刚度约为220 kN/mm;

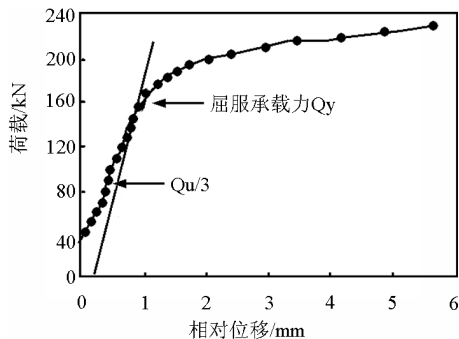


图4 剪力钉荷载-位移曲线

Fig.4 The load - deformation curve of the shear pin

3) 如果将剪力钉相对滑移0.2 mm处所引的与刚度割线平行的直线与曲线相交点对应的荷载设为屈服承载力,用考虑安全系数1.7的屈服承载力作为承载力允许值,剪力钉性能试验所求出的承载力允许值约为89.2 kN。

### 3.2 索塔锚固区模型计算

采用空间有限元建立整个锚索区模型,混凝土采用实体元,钢锚箱采用板壳元,利用弹簧单元模拟混凝土和钢锚箱之间剪力钉的变形特性,在钢锚箱拉索锚固处施加正常使用极限状态下拉索的最大竖向分力,混凝土塔柱底部和钢锚箱底部采用固结约束形式,并考虑混凝土的收缩和徐变。斜拉索竖向

力由钢锚箱通过剪力钉、侧面摩阻、底部支撑3种方式传给索塔混凝土。其中摩阻力在设计中考虑为安全储备,结构分析中暂不计入。竖向力分析的关键是如何准确模拟剪力钉的剪切刚度,计算采用剪切刚度通过模型试验获得,剪切试验得到的剪力钉荷载-位移曲线见图4,由试验推算,单根直径22 mm剪力钉在正常使用荷载下剪切刚度为220 kN/mm。计算模型及结果见图5。

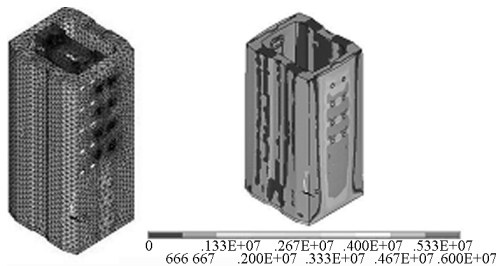


图5 锚固区计算有限元模型及计算结果  
Fig.5 Calculating finite element model and test results of the anchorage zone

### 3.2.1 结构耐久性分析

计算结果表明,混凝土的拉应力已大于混凝土开裂应力,混凝土会发生裂缝,受拉区混凝土一旦开裂,构件进入带裂缝工作阶段,刚度将会有显著的降低,须对混凝土最大拉应力处混凝土的短期刚度进行折减,折减后混凝土塔壁的应力如图5所示,索塔混凝土的最大名义拉应力为5.33 MPa。

根据索塔的名义拉应力,可以计算出索塔的水平内力分布情况并进行极限承载能力和正常使用状态下的结构配筋计算。钢筋计算的结果表明,锚索区混凝土为裂缝控制设计,通过合理的配筋,最终计算裂缝宽度控制在0.2 mm以下。足尺模型试验表明,正常使用荷载作用下裂缝宽度约0.14 mm,1.7倍正常使用荷载作用下裂缝宽度为0.17 mm。

苏通大桥在索塔锚固区设置除湿系统,对钢锚箱、斜拉索锚固结构等提供永久防腐保护。

### 3.2.2 结构合理性分析

计算表明:剪力钉设计满足承载要求,但横向剪力钉受力不均匀。剪力钉的破坏表现为根部剪切断裂,焊接部位不发生破坏;正常使用极限状态下底部混凝土承担的支撑反力是60 MN,约占竖向荷载的20%。混凝土最大压应力是-25 MPa,无过大应力集中发生。

现场监测表明:钢锚箱安装初期,钢锚箱荷载几乎全部由底部混凝土承担;随着施工节段的增加,塔

壁混凝土分担荷载增大,索塔施工达到270 m时,塔壁混凝土约承担总荷载的60%。钢锚箱底部混凝土应力水平较低,约为-14 MPa。这与设计是一致的。

## 4 索塔线形控制

### 4.1 形态控制要求及难点

苏通大桥索塔高度大,且中下塔柱为倾斜构件,空间几何位置、线形和精度控制既是一项日常工作,又是一项重要任务。此外,由于塔柱自重和施工荷载水平分力引起的塔柱根部弯矩和附加应力的积累也需要加以控制。成塔后,在基准条件下,桥塔目标线形必须满足以下误差要求:a.塔柱的倾斜度误差不大于1/3 000,且塔柱轴线偏差不大于30 mm;b.塔顶高程偏差不大于10 mm;c.承台处塔柱轴线偏差不大于10 mm;d.塔柱断面尺寸偏差不大于20 mm。

参数敏感性分析结果表明:a.温度和风荷载对施工精度影响很大。顺桥向塔身温度梯度为10℃时,塔顶偏位达354.3 mm,塔柱顶偏位达159.0 mm;横桥向塔身温度梯度为10℃时,塔柱偏位为160 mm,塔顶偏位为55 mm;即使夜间顺桥向温度梯度只有2℃,塔柱顶顺桥向位移也将会达到33 mm,超出了设计要求。b.当顺桥向风速为15 m/s(桥面标高)时,塔顶偏位37 mm。因此索塔实测线形必须进行温度和风的修正。同时,为满足施工进度,要求能进行全天候测量定位作业。

### 4.2 混凝土节段控制方法

苏通大桥施工测量采用追踪棱镜法。其原理是:已竣工节段上某点(追踪棱镜,作为参照点)与待施工节段上的某点(待测放样点)空间位置关系是确定的,且这种空间相对位置基本不受风、温度等环境因素的影响。在夜间温度梯度和风速较小的环境下,对参照点进行精确测量,并进行风、温度等修正,待施工节段上各个测量点以该参照点为基准,完成全天候的施工测量,测量原理如图6所示。该方法的优点为:

1)可以把必须夜间进行的施工放样工作在白天进行,白天放样、测量不需要进行温度和风的修正,可以延长计算、数据传递等一系列工作的处理时间,大大提高工效;

2)通过相邻节段间相对位置的传递,降低高程传递误差。

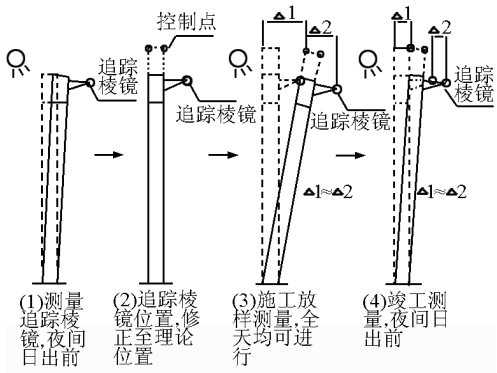
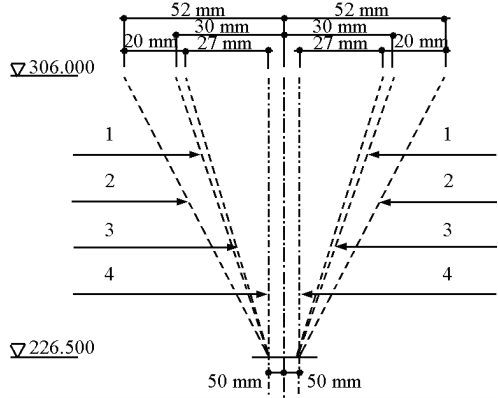


图6 追踪棱镜法原理图

Fig. 6 The principle graph of the tracing prism method

焊接结构,结构刚度不大,在运输、吊装等安装过程中也会产生部分变形,对安装精度产生影响。必须在安装过程中进行误差调整和控制。



1—索塔整体允许误差;2—拼装允许倾斜误差1:4 000;3—首节钢锚箱允许倾斜误差1:3 000;4—首节钢锚箱平面安装误差

图7 索塔施工误差控制示意图

Fig. 7 The diagram of error control of cable tower construction

误差调整措施主要有:对已经安装好的钢锚箱的精度进行测量和评估,并预测后续节段误差趋势,确定调整时机;每隔4个锚箱节段设置一块厚度为12 mm的垫板,根据需要,对垫片进行精美机械加工,调整倾斜度误差。

#### 4.4 索塔施工线形控制结果

现场测量显示,中、下塔柱混凝土节段的轴线偏差和断面尺寸误差均在控制精度内,钢锚箱现场安装出现的误差均控制在误差允许范围内(高程和轴线允许误差均为 $\pm 10$  mm),上部结构斜拉索安装提供了所必需的锚固点位置。上塔柱截面中心的误差和断面尺寸均控制在误差允许范围内(塔柱的倾斜度误差不大于1/3 000,且塔柱轴线偏差不大于30 mm;塔柱截面尺寸允许偏差不大于20 mm)。

### 5 索塔抗风及振动控制

屹立在长江口宽阔水域的300 m高塔抗风安全是桥梁工程师们必须重点关注的问题。设计阶段,在同济大学进行了自立状态下桥塔风洞模型试验,试验表明结构临界风速远大于检验风速,在桥位风场条件下,索塔不会产生发散振动,结构强度和稳定性均得到保障。

施工阶段索塔自立状态风洞试验在西南交通大学进行,主要目的是研究索塔和塔吊、模架系统在施工期的气动特性,评估索塔在施工阶段的抗风安全

施工中,根据不同索塔部位采用了不同的测量方法:

1)中、下塔柱为混凝土结构,高度较小,结构刚度较大,温度梯度引起的塔柱扭转变形在1 mm以内,只需安装一个棱镜就能满足精度控制要求;

2)上塔柱为钢混结构,且高度较大,温度梯度引起的索塔扭转变形较大,温度梯度较大时可达5 mm。因此,在温度梯度方向安装两个棱镜,通过它们对扭转变形进行监测。

#### 4.3 钢锚箱安装控制及线形调整

上塔柱施工步骤是先进行钢锚箱安装,后进行塔壁混凝土浇筑,钢锚箱安装误差控制是上塔柱施工控制的关键。钢锚箱采用螺栓连接,一旦连接形成整体后,很难对索塔线形进行调整。因此,采取了以下两方面措施:

1)严格控制钢锚箱制造精度。每个钢锚箱节段垂直度误差要控制在1/5 000以内,钢锚箱预拼(5节)整体倾斜度误差控制在1/4 000以内,制造误差由预拼装测量进行检测;

2)严格控制首节钢锚箱安装精度。首节钢锚箱倾斜度的容许误差为1/3 000,钢锚箱安装于4个独立的水平承压钢板上,安装时控制承压钢板相对高差不大于0.42 mm。

尽管如此,安装误差调整在所难免。根据计算,首节钢锚箱安装倾斜度1/3 000,对应的塔顶偏移为27 mm;钢锚箱制造总体倾斜度1/4 000,对应的塔顶偏移为20 mm;首节钢锚箱安装平面位置误差为5 mm,对应的塔顶偏移为5 mm,假如这些误差方向一致,叠加后导致的塔顶偏移将达到52 mm,超出30 mm的设计要求,如图7所示。另外,钢锚箱为组

性及风对施工设备、人员作业条件的影响,并根据试验结果研究相应的施工期减振措施。

### 5.1 索塔施工期风洞试验

1) 试验模型。试验模型比例为 1:100 (见图 8)。索塔刚度及质量按相似准则模拟,塔吊只模拟

刚度,水平支撑模拟质量和刚度,其他临时结构只模拟外形。试验参数如下:均匀流场中测试风速取 61.2 m/s,阻尼比分别取 0.5%、0.8% 和 1.6%;紊流场中测试风速达到 45 m/s,紊流度取 5.5%。

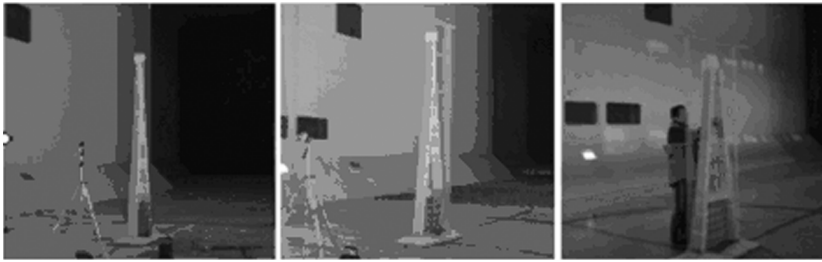


图 8 索塔风洞试验模型

Fig. 8 The wind tunnel test model of the cable tower

2) 试验结果。在均匀流和小紊流场试验中,观察到涡激振动现象,试验结果见表 1。试验表明:a. 在低于施工期设计风速 35.4 m/s 情况下,没有出现发散振幅(颤振或其他振动)现象;b. 在设计紊流场情况下,不会出现重要的抖振响应;c. 在均匀流和紊流条件下,3 种工况下顺桥向都发生了涡激共振现象。

表 1 涡激振动试验结果

Table 1 The results of vortex-excited resonance test

工况	条件 阻尼比/%	均匀流			紊流场(5.5%)		
		0.5	0.8	1.6	0.5	0.8	1.6
	最不利攻角/(°)	0	0	0	0	0	0
工况 1	相应风速/(m·s <sup>-1</sup> )	12.8	13.0	13.6	13.2	12.8	12.4
	振幅/mm	457	82	21	225	48	16
	最不利攻角/(°)	3	3	3	3	3	3
工况 2	相应风速/(m·s <sup>-1</sup> )	13.4	13.2	13.2	13.4	13.2	13.8
	振幅/mm	394	67	15	162	51	13
	最不利攻角/(°)	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
工况 3	相应风速/(m·s <sup>-1</sup> )	27.1	27.4	27.4	25.4	25.4	25.4
	振幅/mm	52	23	14	23	15	4

### 5.2 风洞试验分析评估及减振措施

1) 试验结果分析。根据风洞试验结果,采用特征值分析方法对施工期索塔在 154 m 高度至全塔高的其他 7 个施工阶段气动响应进行研究分析,各施工阶段塔吊、索塔振幅与加速度值如表 2 所示。

表 2 各施工阶段塔吊、索塔振幅与加速度值一览表

Table 2 The amplitude and acceleration value of the crane and cable tower for the construction phase

塔高 /m	风速 /(m·s <sup>-1</sup> )	振幅		加速度	
		塔顶 /mm	塔吊顶	塔顶 /(m·s <sup>-2</sup> )	塔吊顶
1	12.4	137	178	0.106	0.138
	35.3	0	6	0.000	0.035
	12.9	187		0.157	
2	14.3	55	111	0.056	0.114
	17.5	1	1	0.002	0.002
	17.3	11	45	0.013	0.052
3	20.0	10	4	0.015	0.007
	17.1	2	19	0.003	0.023
	21.2	19	129	0.037	0.249
4	21.5	5	51	0.010	0.101
	26.3	33	83	0.099	0.245
	25.4	45		0.125	
5	24.8	1	16	0.001	0.036
	41.0	47	32	0.292	0.199
	42.9	7	71	0.046	0.438
6	54.9	41	103	0.411	1.047
	154.0				

根据索塔风洞试验结果,确定有关重点施工工况条件,对施工期索塔、塔吊的振动进行分析评估,得到如下结论:

a. 结构应力: 涡激振动引起标准节和附着系统(附墙螺栓和连接杆)的应力变化, 低于材料的允许应力;

b. 工作. 舒适度: 塔吊顶可能出现的加速度为  $13.8 \text{ cm/s}^2$ , 小于工作舒适度极限加速度  $30 \text{ cm/s}^2$ ;

c. 工期影响: 全塔高度在风速  $15 \text{ m/s}$  以下可能产生涡激振动, 上塔柱施工期出现  $11 \sim 15 \text{ m/s}$  风速的概率只有  $2.6\% \sim 5.8\%$ , 因此, 施工测量可避开此风速区段, 对工期影响不大。

2) 减振措施。从试验分析结果可以看到, 振动对索塔施工及塔吊操作性不存在较大影响。振动频率低, 采用主动质量阻尼器并不能有效抑振。故索塔及塔吊不需要采用减振措施, 但在施工过程中, 在

大风天气应停止进行顶升爬模和塔吊负荷状态下的操作。

## 6 结语

介绍了世界第一座跨千米的斜拉桥——苏通长江公路大桥  $300.4 \text{ m}$  索塔锚固区的设计计算和上塔柱的线性控制以及施工期抗风 3 个方面的关键技术研究情况, 为同类型桥塔的设计和施工提供了借鉴。

### 参考文献

- [1] 张喜刚. 苏通大桥总体设计[M]. 北京: 中国科技出版社, 2004
- [2] 游庆仲. 苏通大桥工程与关键技术研究[M]. 北京: 中国科技出版社, 2004

## Design and construction of Sutong Bridge tower

Luo Chengbin<sup>1</sup>, Zhou Jianlin<sup>2</sup>, Tian Wei<sup>1,3</sup>, Dai Jie<sup>4</sup>

(1. CCCC - Second Harbour Engineering Company Limited, Wuhan 430014, China; 2. Jiangsu Provincial Sutong Bridge Construction Commanding Department, Nanjing 210006, China; 3. Key Lab of Large-span Bridge Construction Technology, Ministry of Communications, PRC, Wuhan 430071, China; 4. Communications Planning and Design Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210005, China)

[Abstract] Sutong Bridge tower with  $300.4 \text{ m}$  is the highest one in the world. The tower anchor area uses the steel-concrete composite structure; its structure and the stress mechanism are complex, so it must be paid more attention to the structure durable issue. The  $300 \text{ m}$  height makes the tower quite sensitive to the environmental factors such as wind and temperature. The wind-resistance safety of tower in construction stage against the wind is important especially. In this paper, the design of composite structure is introduced. The key technologies of tower geometry control and wind resistance in construction stage are analyzed.

[Key words] Sutong Bridge; tower's design and construction