

# 苏通大桥——主跨 1 088 米的斜拉桥

游庆仲<sup>1</sup>, 何平<sup>1</sup>, 董学武<sup>1</sup>, 张喜刚<sup>2</sup>, 吴寿昌<sup>1</sup>

(1. 江苏省苏通大桥建设指挥部, 南京 210006; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

[摘要] 介绍了苏通大桥设计和施工的工程构思, 着重对群桩基础承载性能、河床冲刷防护及监测、上部结构施工抗风研究、中跨合龙方案及长悬臂结构施工控制方法等的关键技术和创新成果进行了总结和系统阐述。

[关键词] 苏通大桥斜拉桥; 基础; 索塔; 钢箱梁; 斜拉索; 施工控制

[中图分类号] U448.27 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)03-0014-06

## 1 前言

苏通大桥位于上海西北约 100 km 处, 是横跨长江、连接苏州、南通两市的一座桥梁, 是我国沿海高

速公路跨越长江的枢纽工程。该桥主桥是七跨双塔双索面钢箱梁斜拉桥, 跨径布置为  $100 + 100 + 300 + 1088 + 300 + 100 + 100 = 2\,088\text{ m}$  (见图 1), 是世界首座跨径超千米的斜拉桥。

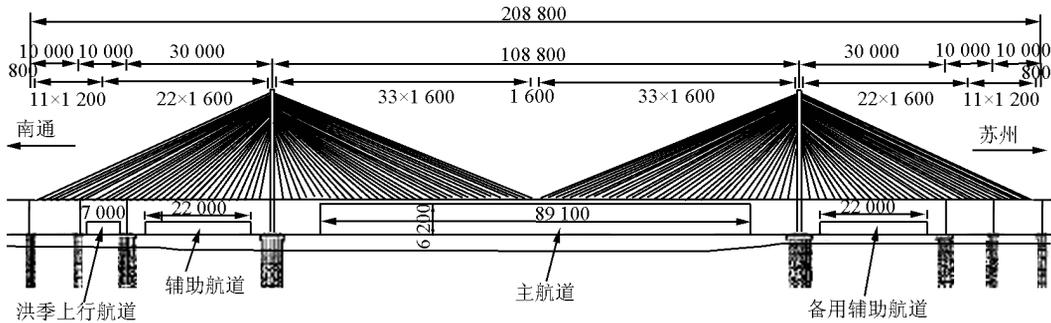


图 1 主桥桥跨布置(单位:cm)

Fig.1 Span arrangement of the main bridge

大桥方案研究始于 1991 年, 当时中国正处于改革开放和上海浦东开发时期, 使长江三角洲地区经济迅速发展, 尽管当时长江上已建造了江阴大桥等通道, 但过江仍成为交通瓶颈, 特别对长江以北地区的经济发展制约作用越来越明显。因为苏通大桥所处长江河段临近入海口, 江面宽达 6 km, 地质和气

象条件复杂, 加之繁忙的水运, 对通航有着很高的要求; 同时工程规模浩大, 技术上面临很多新挑战, 所以直到 2001 年, 国家才批准建设苏通大桥, 经过几轮方案比选后, 2002 年决定修造主跨达 1 088 m 的斜拉桥。

大桥采用双向六车道, 桥面宽度为 34 m, 计算

[收稿日期] 2008-11-01

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2006BAG04B06)

[作者简介] 游庆仲(1957-), 男, 江苏丹阳市人, 江苏省苏通大桥建设指挥部现场总指挥, 高级工程师, 主要从事大型复杂工程建设与管理方面的研究工作; E-mail: yqz@jsed.gov.cn

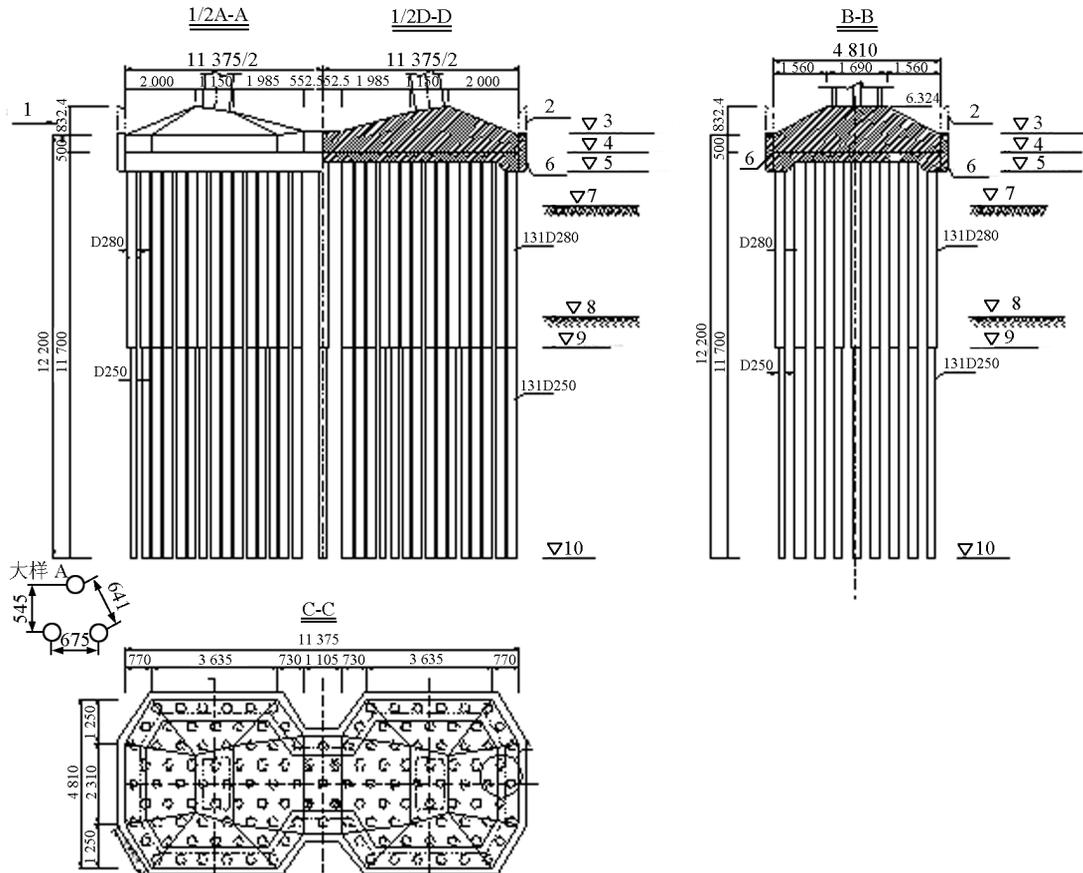
行车速度 100 km/h, 结构设计基准期为 100 年, 通航净宽 891 m, 净高 62 m。

江苏省苏通大桥建设指挥部是苏通大桥的业主, 同时也是大桥建设的总监部门。设计单位以中交公路规划设计院为主体, 江苏省交通规划设计院、同济大学参加的设计联合体, 施工任务分别由中交第二航务工程局、中交第二公路工程局、中铁山桥公司和江阴法尔胜缆索有限公司等承包商承担, 中铁大桥设计院、丹麦 COWI 公司、西南交通大学、香港

茂盛公司和日本新日制铁株式会社等参加了大桥的技术咨询工作。

## 2 基础<sup>[1]</sup>

苏通大桥地处长江三角洲冲击平原, 第四纪地层厚度大, 以砂土为主, 基岩埋深 270 m 以上。设计阶段进行过沉井、桩基等方案比较, 从结构和施工风险等方面考虑, 最终选定钻孔灌注桩群桩基础方案 (见图 2)。



1—行船方向; 2—吊箱切除部分; 3—-1.800 (吊箱切割线); 4—-7.000 (承台底面); 5—-12.500 (封底底面); 6—仓壁混凝; 7—-26.423 (地面线); 8—-52.190 (最大冲刷线); 9—护筒底高程; 10—-124.000

图 2 基础总体布置(单位:cm)

Fig. 2 General arrangement of foundation

由于群桩基础规模巨大, 在设计阶段就进行了模型试验和实桩试验, 研究桩-土共同作用机理, 分析群桩效应和群桩基础的承载性能。在实施过程中, 又进行了群桩基础沉降、承台应力和基桩轴力及其空间分布的连续实测记录, 分析了群桩基础承载力的发挥过程、承载性能和群桩效应, 修正桩-土共同作用模型, 反演基础受力和变形。结果表明, 河床

预防护、高桩浇注时流态混凝土对桩周土的挤密效应以及桩底后压浆的“封底”效应等因素对提高群桩基础的承载性能具有良好的作用, 并使具有强大承台结构的群桩基础具有整体式实体基础的承载性能, 群桩效应并不明显、沉降小于预测值。

河工模型试验表明, 由于流速较大、河床土层抗冲性能差, 在重现期为 300 年的洪水作用下, 桥塔基

础将出现深达 28 m 的冲刷坑,大大削弱了桥墩抵抗船撞的能力,同时对施工平台也存在较大的安全威胁。为此,决定对基础范围内及其周围的河床进行永久性冲刷防护。

河床冲刷防护包括预防护和永久防护两部分。预防护是为了永久防护施工需要而进行的袋装砂抛投防护,同时也是为了保证施工平台的安全。永久防护是在袋装砂上永久性地抛投级配石料和护面块石,从而在河床底面形成一层抗冲性能强的结构物。冲刷防护按区域分为核心区(对应施工平台大小),永久防护区和护坦区,如图 3 所示。根据计算和试验来确定每一区域的尺寸材料规格和层厚,每个基础下冲刷防护材料总数量大约  $55 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

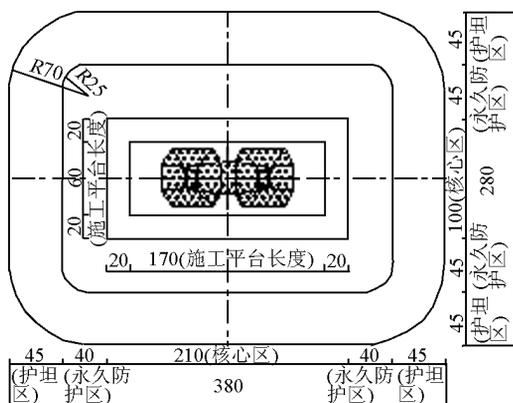


图 3 防护工程平面分区(单位:m)

Fig. 3 Layout of scour protection zone distribution

防护工程开始之初,就同步安排了长期监测计划,截至目前的监测结果表明,基础在冲刷防护工程完工一年内在护坦外缘发生了较为剧烈的局部冲刷,一年后趋于缓和,从 2005 年 10 月至 2007 年 6 月,局部冲刷趋稳并略有回淤,同时也可以看到在防护工程护坦外缘,出现 1:2 ~ 1:2.2 的冲刷稳定边坡,这一稳定边坡值与模型试验结果是一致的,这种冲刷形态也充分证实了当初主墩基础冲刷防护设计理念的正确。

另外,苏通大桥基础还根据试验和计算,解决了用钢护筒搭设施工平台、钢护筒参与永久结构受力、桩基底注浆、6 000 t 有底钢吊箱整体沉放、承台大体积砼浇筑等关键技术问题,从 2003 年 6 月至 2005 年 5 月,历时 24 个月,完成基础和承台施工。

### 3 索塔

在设计阶段,苏通大桥曾进行过钻石形、A 形、“人”字形及有无下横梁等方案比较,最终选定了高耸、轻盈、简洁、隽美的“人”字形桥塔,体现中华民族“天人合一”的和谐思想。索塔全高 300.4 m,采用钢筋砼箱形结构(见图 4),在上塔柱斜拉索锚固区采用钢锚箱,以承受和传递斜拉索拉力。

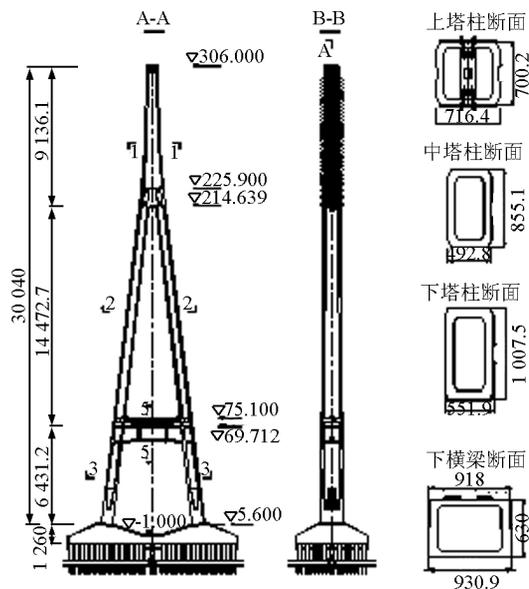


图 4 索塔细部构造(单位:cm)

Fig. 4 Structural details of the pylon

在设计和施工阶段均进行了自立状态下索塔风洞模型试验(见图 5),研究索塔临界风速以及结构的强度、稳定性;同时研究索塔和塔吊、模架系统

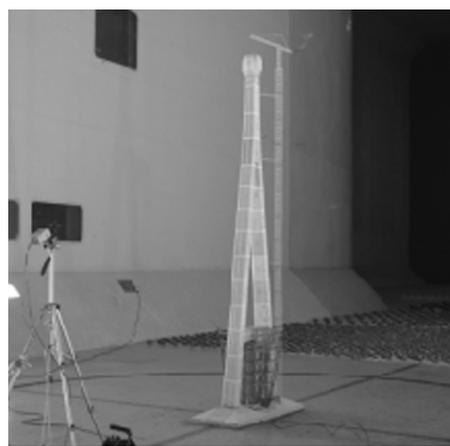


图 5 索塔施工期风洞试验

Fig. 5 Wind tunnel test at free standing pylon stage

在施工期的气动特性,评估施工期的抗风安全性及风对施工设备、人员作业条件的影响,制订相应的减振措施。根据风洞试验结果,苏通大桥索塔能够满足抗风稳定要求,在允许施工风速条件下,也能满足正常可操作性要求。

索塔采用自动液压爬模系统进行施工,共分为68个施工节段,标准节段高约4.5 m。钢锚箱由工厂完成制造、预拼装后,在现场利用塔吊吊装。索塔垂度采用追踪棱镜法进行施工控制<sup>[2]</sup>,同步修正风和温度等环境因素对施工测量的影响,采用相对坐标进行施工放样,从而实现全天候施工(见图6)。完成后的实测结果表明,自立索塔垂直度精度为1/40 000,最大轴线偏差为7 mm。



图6 施工中的索塔  
Fig. 6 Pylon under construction

索塔施工中还研究了索塔高性能砼的制备技术和一级泵送技术、高空砼养护技术、钢锚箱纠偏技术等技术问题。索塔施工从2005年5月开始,至2006年9月结束,历时16个月。

#### 4 钢箱梁、斜拉索

苏通大桥设计风速为100年一遇,10 m高度基准风速为38.9 m/s。由于跨度大、受风和温度的影响显著,塔、梁间采用全漂浮体系或固结体系都不尽合理。经过在风、温度、地震、汽车制动等荷载条件下的结构静、动力分析,选用具有限位功能的黏滞阻尼器构成半漂浮体系(见图7)。

这一体系的优点在于对脉动风、刹车和地震等引起的动荷载具有阻尼耗能作用,但同时它对温度、车辆和静风引起的缓慢位移起到的限位作用则很有限。限位功能就是指纵向上的相对位移在阻尼器设计行程以内,它不约束主梁运动,当相对位移超出阻尼器的设计行程之后,阻尼器为索塔和主梁之间提

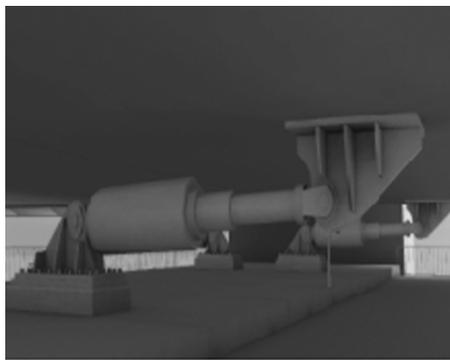


图7 塔梁半漂浮  
Fig. 7 Pylon and deck semi-floating system

供一种固结。

根据中国的生产技术条件和现场安装能力,苏通大桥采用平行钢丝扭绞型斜拉索,1 770 MPa的 $\phi 7.0$  mm镀锌高强钢丝由中国宝钢集团公司生产。斜拉索设计寿命为50年,并经过了疲劳、密水试验检验,此外在塔顶设置了卷扬机预埋固定件,便于今后更换斜拉索施工。

由于苏通大桥整体和拉索结构柔,固有振动频率分布广,在环境激励下斜拉索极易发生涡激振动、风雨激振以及参数振动和线性内部共振。为此,进行了拉索系列风洞试验研究和实索减振试验研究,分析拉索风阻系数,研究减振方案,检验减振效果。确定采取在索面上设置凹坑的气动措施来改善斜拉索风雨激振影响,增设体外阻尼器来提高拉索阻尼,抑制拉索振动,并预留辅助索安装的综合减振方案。

主梁采用带风嘴扁平流线型钢箱梁(见图8)。同济大学和COWI公司分别进行了1:70~1:13.5的不同比例涡激振动风洞模型试验,揭示了苏通大桥主梁存在明显的雷诺效应。在 $+3^\circ$ 攻角,均匀流场下主梁发生明显的涡激共振现象。在详细设计时,结合风洞试验进一步优化梁底检修车轨道位置,将其布置于水平底板并在轨道两侧设置倾斜导流板。

苏通大桥最大单悬臂达540 m,施工期抗风安全是大桥建设的关键课题。为此,进行了全桥和施工期最不利工况条件下的风洞模型试验(见图9),结果表明,成桥状态和最大双悬臂、最大单悬臂状态下,试验临界风速均大于检验风速,结构具有较好的气动稳定性,同时,由于抖振影响,在设计最大风速条件下,箱梁局部底板压应力安全储备稍低。试验还表明,由于结构振动频率低,调质阻尼器难以发挥作用。根据风洞试验及评估意见,采取了以下几项

措施:a.调整实施计划,规避最大悬臂在台风季节施工,并尽可能在台风季来临之前实现中跨合龙;b.制订了详细的抗风安全预案,包括桥面吊机后移、拆除

防护栏杆等挡风结构物、悬臂端拉设抗风缆等临时抗风措施,并进行演习训练;c.对部分钢箱梁底板和斜腹板进行临时局部加强。

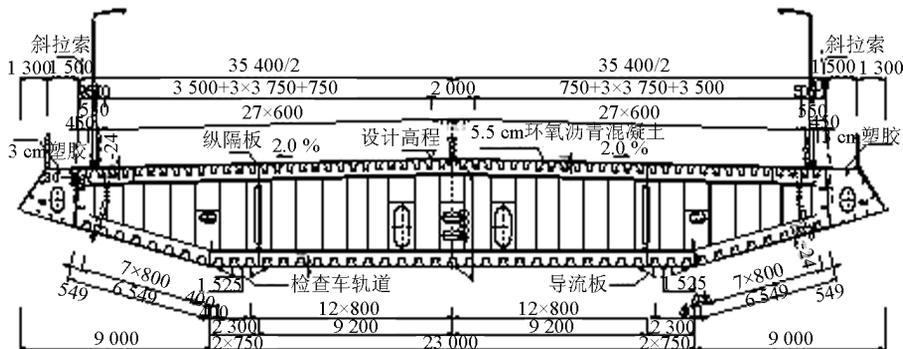


图 8 钢箱梁横截面体构造图(单位:mm)

Fig. 8 General structure of steel box girder cross section

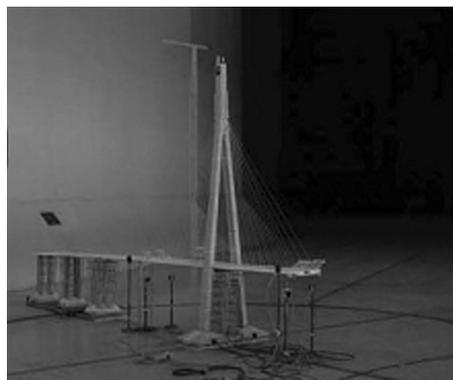


图 9 施工期风洞试验

Fig. 9 Wind tunnel test at maximum cantilever stage

钢箱梁在工厂完成制作后从水路运至现场安装。为加快施工进度,减小最大双悬臂施工长度,边跨部分钢箱梁采用临时墩(托架)支撑、浮吊安装的施工方案(见图 10),力争尽早实现边跨合龙。浮吊安装最大梁段长 60 m,重 1 250 t。标准梁段采用双桥面吊机起吊、配匹、焊接安装。斜拉索在桥面展开后,先安装塔端锚头,在梁端分软、硬三级牵引进入锚箱,最大牵引长度和牵引力分别为 25 m 和 650 t。拉索张拉、调整均在塔端进行。

苏通大桥中跨合龙借助了塔梁临时固结系统。塔梁临时固结系统由顺桥向的水平交叉拉索、竖向拉索和钢支墩以及横桥向为水平抗风支座组成(见图 11)。合龙前,将竖向拉索拉力解除一半,然后通过张拉和放松水平拉索,将半跨(约 1 000 m)钢箱梁向岸侧拉移约 10 cm(预留 12 cm),扩大合龙口,



图 10 边跨大块梁段安装

Fig. 10 Erection of side span large box girder section

提升合龙段进入龙口(见图 12)。在夜间温度变化相对均匀时,再向江侧拉移钢箱梁体,调整匹配端位置,同时打码连接,在次日凌晨温度上升前完成 90% 的焊接工作,并迅速解除塔梁临时固结,实现体系转换。



图 11 塔梁临时固接

Fig. 11 Pylon and deck temporary fixation



图 12 中跨合龙段吊装

Fig. 12 Middle span closure segment lifting

苏通大桥钢箱梁和斜拉索安装从 2006 年 9 月开始,至 2007 年 6 月初实现中跨合龙,历时 10 个月,一对标准梁段安装周期一般为 5 天,吊装时实施封航。

## 5 上部结构施工控制

针对苏通大桥跨度大、悬臂长的结构特点,采用了几何控制法来进行上部结构制造、安装全过程进行施工控制<sup>[3]</sup>。

为了防止重大误差,指挥部组织设计和咨询公司 对承包人的计算进行同步审核。3 个多月研究统一计算参数、边界条件和加载过程等。着重对可能产生误差的各主要结构参数和环境参数进行误差敏

感性分析。结果表明,索塔收缩徐变、钢箱梁重量、钢箱梁长度、斜拉索长度、斜拉索弹性模量等偏差对结构产生的影响较大,是主要控制参数。钢锚箱高度、箱梁截面刚度、拉索重量等对结构产生一定影响,为次要控制参数。索塔砼弹模、钢锚箱垂直度、梁端锚固点高度及梁节段间焊接不均匀收缩等对结构影响较小,可少控制或不控制。同时,理论分析表明,风和环境温度对结构线形影响较大,必须进行修正,并据此规定了施工测量的环境要求。

根据施工控制提供的数据和要求,进行钢箱梁和斜拉索的生产、制造,并在规定的环 境条件下,精确测量每个节段钢箱梁的空间几何形态和重量。每根斜拉索生产完成后,精确测量其工作区间弹性模量和两端锚头间长度。

现场安装以斜拉索索长控制为主。每对钢箱梁、斜拉索安装完成后,都采用正装法和中间阶段预测线形进行比较,测量梁段间局部线形和索力,及时评估安装情况。安装过程中出现的任何误差,都采用“正装纠错法”进行纠错,以避免出现突变或过度补偿。2007 年 6 月中跨合龙时,合龙段与两侧悬臂端轴线完全吻合,中线高程偏差小于 1 mm,成桥线形高于预期线形约 10 cm,全桥总体线型平顺,无任何局部弯折(见图 13),施工控制取得了良好效果。

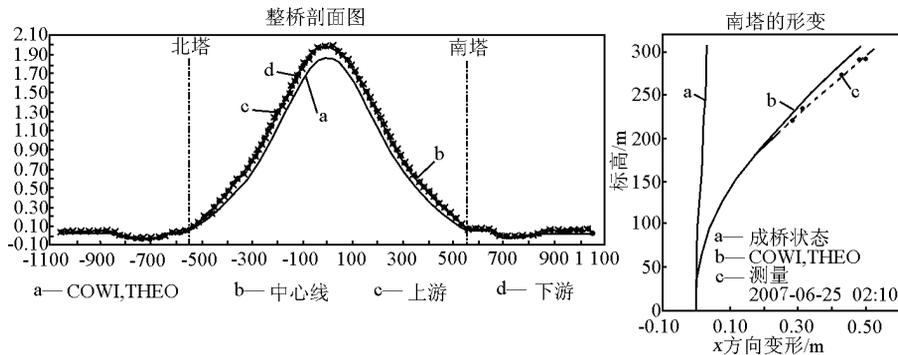


图 13 合龙后塔、梁线形

Fig. 13 Geometry of pylon and deck after closure

## 6 结语

苏通大桥于 2003 年 6 月正式开工,2008 年 5 月建成通车,历时近 5 年,比预定工期提前了 1 年。包括 23 km 接线和 6 km 引桥在内,工程总投资约 12 亿美元。

苏通大桥是一项极具挑战性的大型桥梁工程,它的顺利建成,不仅因为选择了中国最优秀的设计、施工和科研团队,而且广泛集成了国际优秀桥梁技

术咨询力量,进行国际、国内技术联合。苏通大桥的成就值得所有建桥人骄傲。

## 参考文献

- [1] 游庆仲,董学武,吴寿昌,等. 苏通大桥基础工程的挑战与创新[J]. 中国工程科学,2007,6(9):22-26
- [2] 华锡生,黄 腾. 精密工程测量技术与应用[M]. 南京:河海大学出版社,2001
- [3] 向中实. 桥梁施工控制技术[M]. 北京:人民交通出版社,2001

(下转 80 页)