



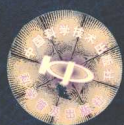
苏通大桥论文集

第三辑

苏通大桥建设指挥部

编

中国科学技术出版社



苏通大桥论文集(第三辑)

苏通大桥建设指挥部 编

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

苏通大桥论文集. 第3辑/苏通大桥建设指挥部编.

北京:中国科学技术出版社,2009.6

ISBN 978-7-5046-5460-1

I. 苏… II. 苏… III. 桥梁工程—文集 IV. U44-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第095347号

自2006年4月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街16号 邮政编码:100081

电话:010-62173865 传真:010-62179148

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本:850毫米×1168毫米 1/16 印张:26.75 字数:773千字

2009年6月第1版 2009年6月第1次印刷

定价:90.00元

ISBN 978-7-5046-5460-1/V·63

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

编委会

主任委员	游庆仲					
副主任委员	何平	吴寿昌	丁峰			
委员	姚蓓	李宪生	方建华	李玉汉	管义军	
	董学武	周建林	胡尧	杨军		
主编	丁峰					
主副编	吴寿昌	董学武				
	冯凌云	万红燕	俞先林	张雄文	曹圣华	

责任编辑	张楠	孙博	
责任校对	韩玲		
责任印制	安利平		

内 容 提 要

苏通大桥作为新世纪我国修建的世界第一大跨径斜拉桥,建设起点高、工程规模大、建设周期长、施工难度高、涉及方面广、管理条件复杂、技术难点多,代表了世界桥梁建设的最高水平。为更好地宣传苏通大桥建设情况,展示大桥科技创新成果,江苏省苏通大桥建设指挥部组织编写的《苏通大桥论文集(第三辑)》,共收录论文 68 篇,约 70 余万字,涵盖苏通大桥设计、施工、管理、耐久性和测控等方面,内容翔实,资料丰富,是公路建设者很好的参考书。

目 录

苏通大桥——主跨 1088m 的斜拉桥	游庆仲 何平 董学武 张喜刚 吴寿昌 (1)
苏通大桥总体设计	张喜刚 袁洪 裴岷山 戴捷 徐麟 (9)
苏通大桥主桥关键技术和设计创新	张喜刚 袁洪 裴岷山 戴捷 徐麟 (17)
覆盖层冲刷后桩基沉降的数值模拟	胡丰 龚维明 戴国亮 单建 (29)
苏通大桥主桥基础设计研究	张喜刚 徐麟 袁洪 高衡 (33)
大型哑铃承台空间桁架模型现场试验研究	龚维明 卢波 过超 戴国亮 (44)
苏通大桥主桥索塔锚固区设计研究	张喜刚 戴捷 周彦锋 (51)
斜拉桥的拉索纵向风荷载计算方法研究	裴岷山 张喜刚 侯斌 刘昌鹏 (58)
国产桥梁斜拉索用 1770MPa 镀锌钢丝制造技术的研究	桑春明 周代义 白柄东 (65)
斜拉索温度场实时监测系统研制和应用研究	赵军 薛花娟 朱建龙 徐文雷 周祝兵 (74)
苏通大桥斜拉索锚具防腐技术研究	薛花娟 陈灵芝 (78)
苏通大桥主桥超长斜拉索安装关键施工参数确定	陈鸣 罗承斌 饶华容 (83)
超长拉索的振动与索力测定	刘剑锋 刘勇 方宁 张启伟 (89)
长大斜拉桥缆索体系减振关键技术介绍	薛花娟 陈灵芝 赵成哲 (97)
拉索动力特性实用计算方法	兰成 马如进 陈艾荣 (102)
斜拉桥拉索弯曲应力及其控制对策探讨	郑万山 郑罡 唐光武 (107)
苏通大桥大块梁段吊装及调位技术	罗承斌 周汉发 刘鹏 何官建 (112)
苏通大桥中跨合拢技术研究	张鸿 周汉发 陈鸣 何官建 (120)
苏通大桥环氧沥青混凝土施工技术	周凯 陈常杰 赵连旨 (129)
数据库管理系统在千米级斜拉桥中的应用	孟庆成 李乔 齐欣 卜一之 (134)
千米级斜拉桥参数敏感性分析	黄灿 卜一之 夏嵩 (141)
苏通大桥施工阶段结构稳定性研究	赵雷 李乔 张鸿 卜一之 (146)
苏通大桥标准梁段安装施工测量方法	曹东威 许昌 (150)
超高索塔自立状态下环境振动试验与分析	刘剑锋 刘勇 高敏 张启伟 (154)
利用全球定位系统 (GPS) 获取桥梁索塔三维动态信息	岳东杰 顾志强 许昌 (162)
全站仪三维坐标法检测点位精度的试验分析	曹操 周西振 张伟 (168)
深水群桩基础钢护筒钻孔平台设计与施工	欧阳效勇 任回兴 贺茂生 汪霞利 (173)
深水群桩基础钻孔平台顶板兼做吊箱底板技术研究	任回兴 贺茂生 聂青龙 白飞阳 (180)
集中制浆分散净化技术在苏通大桥主塔墩钻孔施工中的应用	杨红 任回兴 贺茂生 聂青龙 (185)
变截面超长桩钢筋笼长线匹配法制作安装技术	马峰 孙克强 李松 白飞阳 (190)
特殊水文地质条件下超大规模深水群桩基础施工技术	任回兴 贺茂生 欧阳效勇 张先武 (196)
苏通大桥南塔墩钢吊箱设计	欧阳效勇 任回兴 贺茂生 聂青龙 (205)

苏通大桥南塔墩钢吊箱整体同步下放工艺试验研究	聂青龙 欧阳效勇 任回兴 白飞阳	(214)
苏通大桥南塔墩钢吊箱整体下放导向及定位关键技术	孙克强 张先武 欧阳效勇 杜兵	(220)
苏通大桥南塔墩承台钢吊箱封底砼施工工艺	孙克强 李松 杨红 高安荣	(225)
苏通大桥南主塔墩超大型承台砼施工工艺	聂青龙 任回兴 欧阳效勇 张先武	(232)
苏通大桥南塔墩承台超大体积混凝土温控关键技术	贺茂生 任回兴 聂青龙 朱英华	(239)
大型深水群桩基础施工组织与管理欧阳效勇	任回兴 贺茂生 刘喜田	(246)
GPS RTK 卫星定位技术在苏通大桥主桥施工测量中的应用实践	欧阳效勇 任回兴 杜兵 刘喜田	(256)
大型复杂工程建设项目管理信息化实施的探索	俞春生 姚蓓	(263)
基于综合集成的大型工程建设管理体系研究	许婷 胡尧	(269)
基于系统思想的大型工程项目设计管理分析	刘维波 李迁	(274)
苏通大桥工程文化建设实践与经验	俞春生 王茜	(278)
苏通大桥工程目标系统的复杂性与综合集成	法月萍 李镇	(282)
大型交通工程建设安全管理体系分析与实践	许丽 李迁 姜天鹏	(291)
我国基础设施建设管理模式研究	钱海燕 陈国华	(295)
浅谈苏通大桥安全文化建设	阚有俊	(299)
苏通大桥主跨钢箱梁吊装与通航安全管理研究	阚有俊	(303)
苏通大桥桥面突发环境污染事故预防措施及应急处置对策研究	姚蓓 颜文华 李镇 陆建	(308)
苏通大桥船舶失控后撞桥概率分析	万长征 刘明俊 阚有俊	(314)
苏通大桥危险失控区域分析	刘明俊 肖方亮 姜天鹏	(318)
船舶失控后采取抛锚措施的运动状态模型分析	刘明俊 邓顺江	(322)
苏通大桥船舶通航标准论证新方法的研究与实践	刘明俊 周崇喜 李世刚	(328)
苏通大桥桥区风流作用下船舶运动模型探讨	刘明俊 周崇喜	(334)
二维浅水数值模拟的有限差分 MADI 法	郭玉臣 徐小明 张静怡	(338)
天文潮与风暴潮非线性耦合数学模型——苏通大桥施工期台风暴潮数值模拟	谭亚 张君伦	(343)
我国东南沿海风暴潮预报	谭亚 张君伦	(350)
苏通大桥辅桥 268m 连续刚构桥预应力施工	周新亚 孙黄花	(360)
苏通大桥辅桥 268m 跨连续刚构施工控制	周新亚 文武松	(366)
苏通大桥辅桥高性能混凝土收缩和徐变试验及分析	孟少平 潘钻峰 管义军 冯凌云 王辉 周新亚	(373)
大跨度刚构桥箱梁截面抗剪承载力影响参数分析	李方元 沈殷 李国平 管义军	(381)
大跨连续刚构桥箱梁抗剪性能数值分析	管义军 李国平 李方元	(388)
大跨连续刚构桥温差空间效应研究	田浩 李国平 陈艾荣	(392)
考虑收缩、徐变和松弛相互影响的预应力长期损失计算	潘钻峰 吕志涛 刘钊	(397)
弯拉应力作用下粉煤灰混凝土的 1D 和 2D 碳化研究	张云升 孙伟 陈树东 郭飞 赵庆新	(402)
疲劳荷载作用下超高泵送钢纤维混凝土的耐久性研究	蒋金洋 孙伟 刘加平 王晶	(409)
悬臂施工预应力混凝土梁桥预应力效应分析	李准华 冯凌云 刘钊	(414)
苏通大桥索塔工程混凝土性能及应用	万红燕	(420)

苏通大桥——主跨 1088m 的斜拉桥^①

游庆仲¹ 何平¹ 董学武¹ 张喜刚² 吴寿昌¹

(1. 江苏省苏通大桥建设指挥部 南通 226010; 2. 中交公路规划设计院 北京 100010)

摘 要 苏通大桥采用主跨跨径 1088m 的斜拉桥, 目前为世界第一大跨径斜拉桥。本文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分析、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方面关键技术和创新成果进行了总结和系统阐述。

关键词 斜拉桥 基础 索塔 钢箱梁 斜拉索 施工控制

Abstract Sutong Bridge is the longest cable-stayed bridge in the world with a main span of 1088 meters. In this paper, design and construction concepts are briefly presented. Furthermore, key technologies and innovative achievements are summarized mainly on piled foundation bearing capacity analysis, river bed scour protection and monitoring, superstructure wind-resistance study, mid-span closure method as well as long cantilever structure construction control.

Key words cable-stayed bridge foundation pylon steel box girder cable stay construction control

1 引言

苏通大桥位于中国上海西北约 100km 处, 是横跨长江、连接南北岸的苏州、南通两市的一座桥梁, 是中国沿海高速公路枢纽工程。该桥采用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 = 2088m (图 1), 建成后将作为世界首座跨径超千米的斜拉桥。

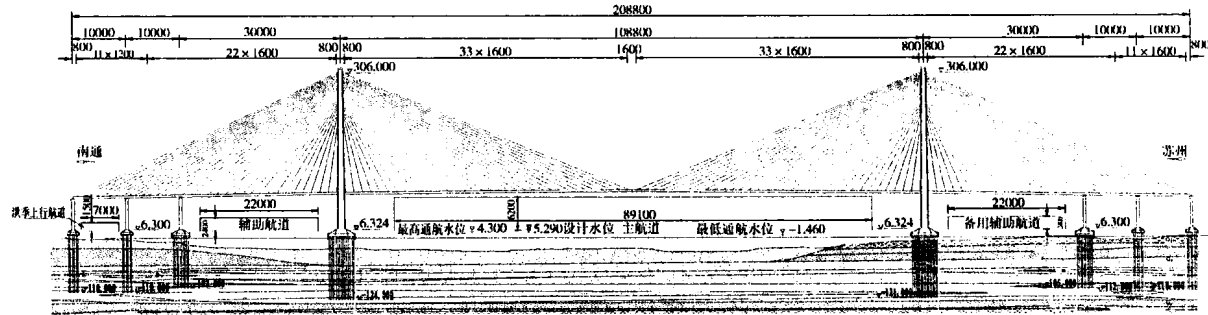


图 1 主桥桥跨布置

苏通大桥的方案研究始于 1991 年, 当时中国改革开放和上海浦东开发, 使长江三角洲地区经济迅速发展, 过江已成交通瓶颈, 特别对长江以北地区的经济发展制约作用越来越明显, 尽管当时长江上已建造了江阴大桥等通道。由于苏通大桥所处长江河段临近入海口, 江面宽达 6km, 地质和气象条件复杂, 加之繁忙的水运有着很高的通航要求, 工程规模浩大, 技术上具有新挑战, 直至 2001 年, 国家才批准

① 本文由国家科技支撑计划项目(2006BAG04B00)资助。

作者简介: 游庆仲(1957—), 男, 高级工程师, 东南大学, 本科。

建设苏通大桥,经过几轮方案比选后,2002 年决定修造主跨达 1088m 的斜拉桥。

大桥采用双向六车道,桥面宽度为 34m,计算行车速度 100km/h,结构设计基准期为 100 年,通航净宽 891m,净高 62m。

苏通大桥的业主是江苏省苏通大桥建设指挥部,它同时也是大桥建设的总监部门,设计单位是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技术咨询工作。

2 基础

苏通大桥地处长江三角洲冲积平原,第四纪地层厚度大,以砂土为主,基岩埋深在 270m 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(图 2)。

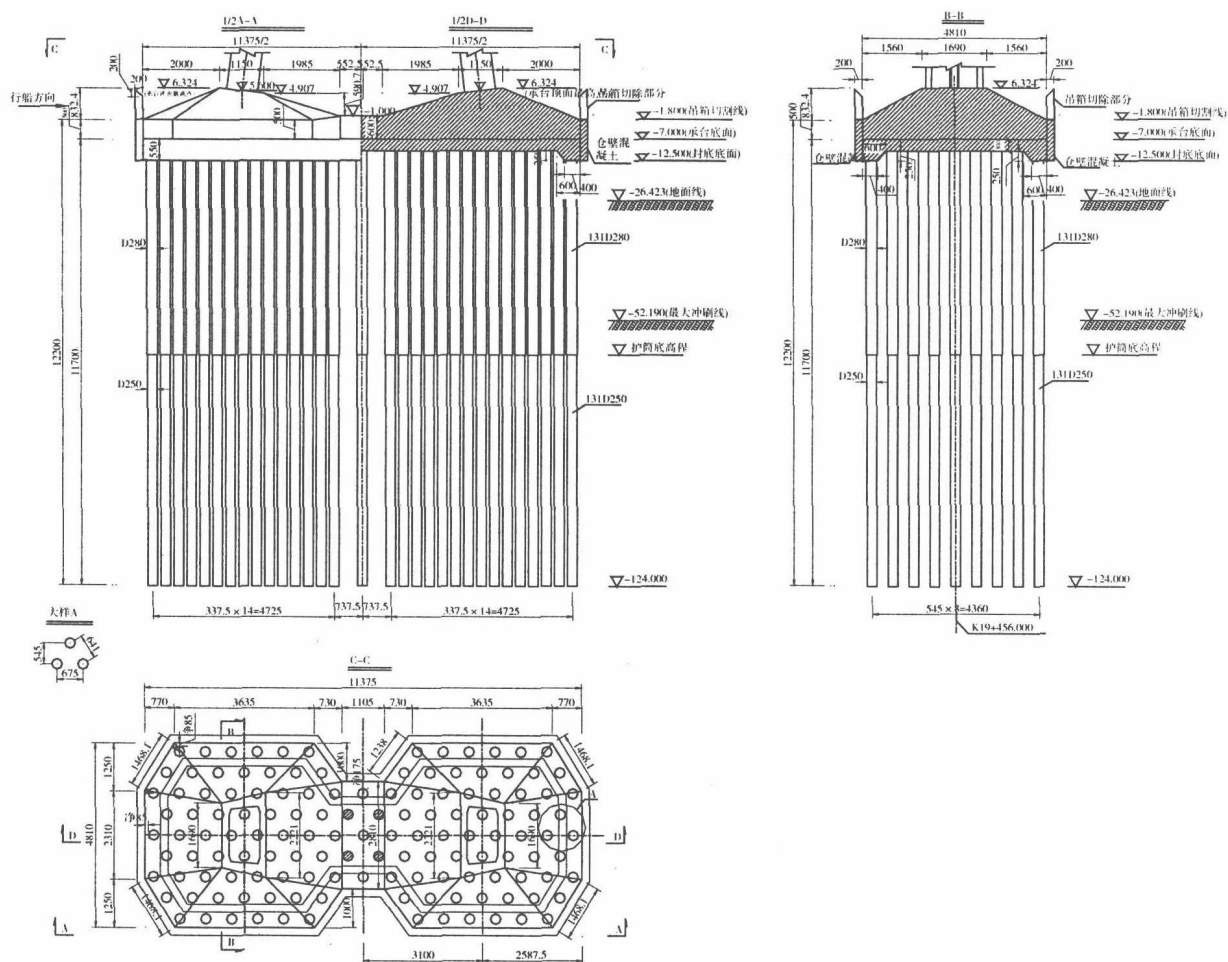


图 2 基础总体布置

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”效应等三种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 28m 的冲刷坑,大大削弱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,决定对基础范围内和周围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。预防护是为了保证施工平台的安全和永久防护施工需要而进行的袋装砂抛投防护。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(图 3)。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 万方。

防护工程开始之初,就同步安排了长期监测计划,到目前为止的监测结果表明,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、6000t 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 型、“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 300.4m,采用钢筋砼箱形结构(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。

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(照片 1),研究索塔的临界风速和结构强度、稳定,同时研究索塔和塔吊、模架系统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,制定相应的减振措施。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 4.5m。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,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(照片 2)。完成后的实测结果表明,自立索塔垂直度精度为 1/40000,最大轴线偏差为 7mm。

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。

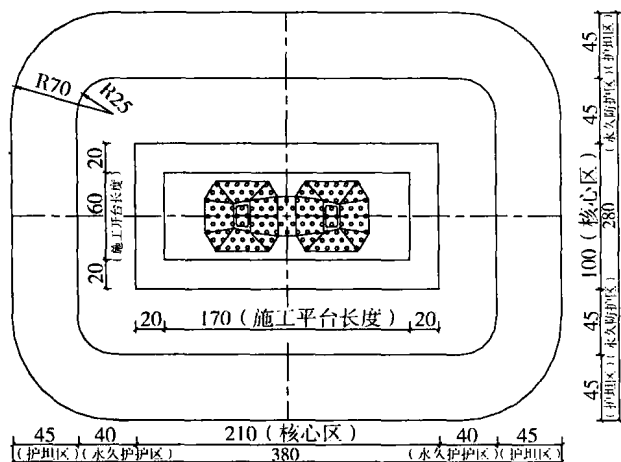


图 3 防护工程平面分区

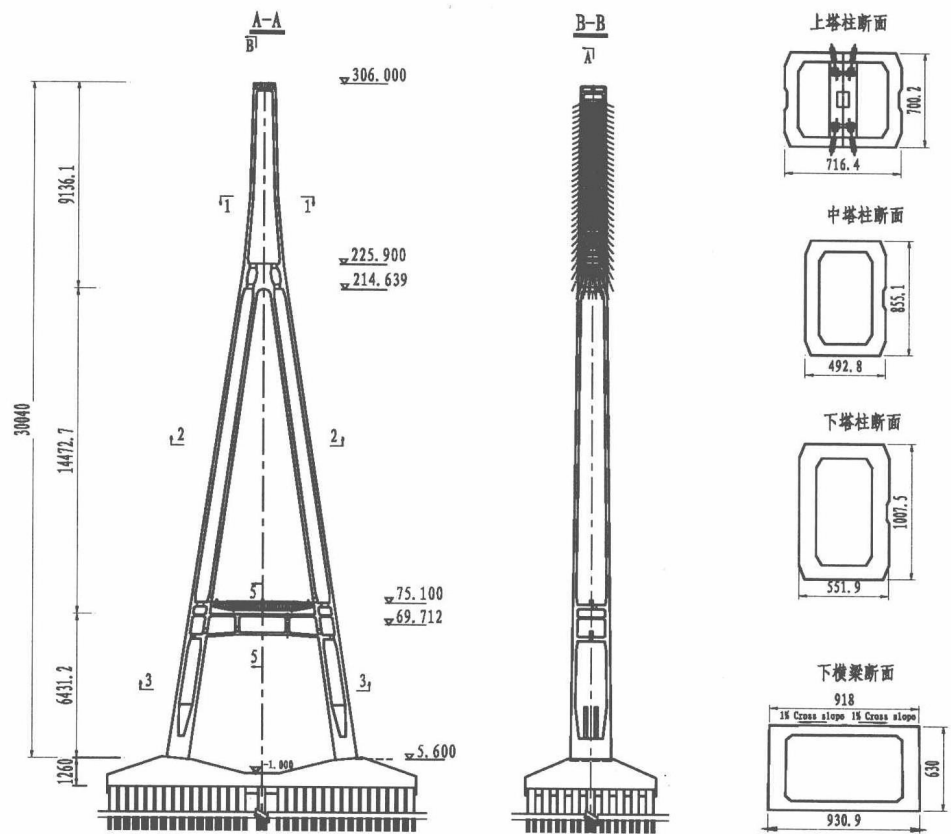
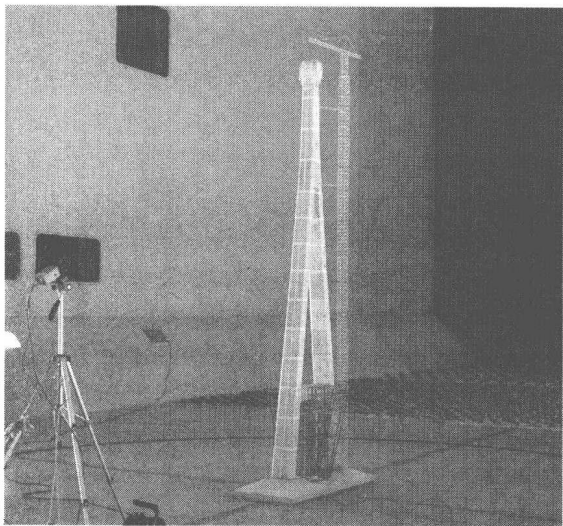
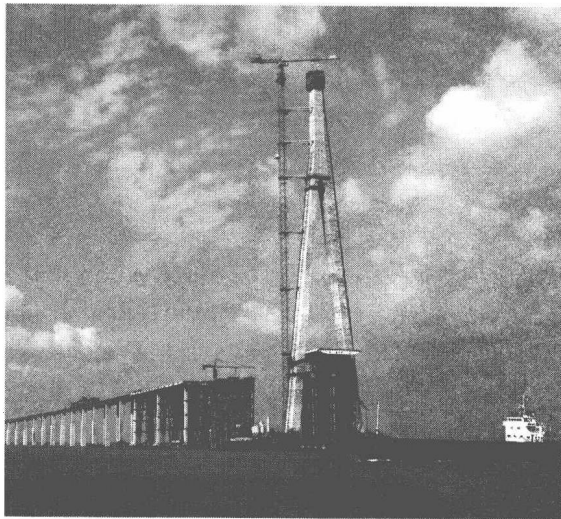


图 4 索塔细部构造



照片 1 索塔施工期风洞试验



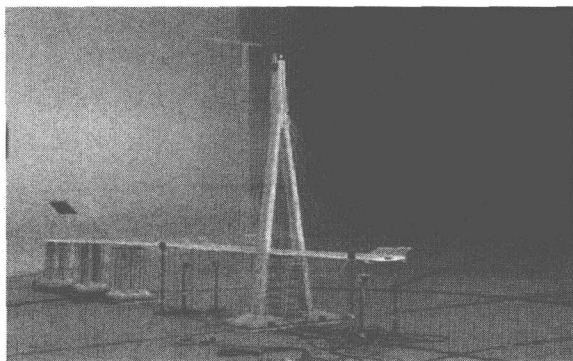
照片 2 施工中的索塔

4 钢箱梁、斜拉索

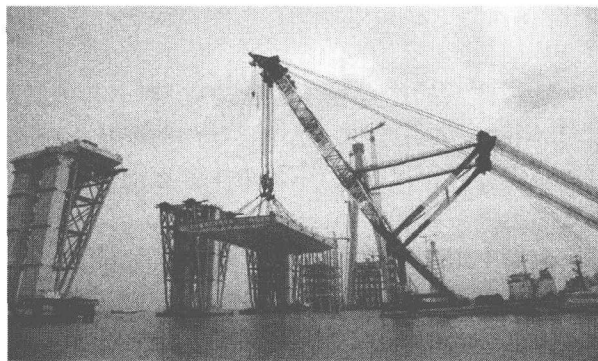
苏通大桥设计风速采用 100 年一遇, 10m 高度基准风速为 38.9m/s。由于跨度大、受风和温度的影响显著, 塔、梁间采用全漂浮体系或固结体系都不尽合理。经在风、温度、地震、汽车制动等荷载条件下的结构静、动力分析, 选用具有限位功能的黏滞阻尼器构成半飘浮体系(照片 3)。

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:①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;②制定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;③对部分钢箱梁底板和斜腹板进行临时局部加强。

钢箱梁在工厂完成制作后水运至现场安装。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(照片5),力争尽早实现边跨合龙。浮吊安装梁段最大尺寸为60m长,重1250t。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25m和650t。拉索张拉、调整均在塔端进行。

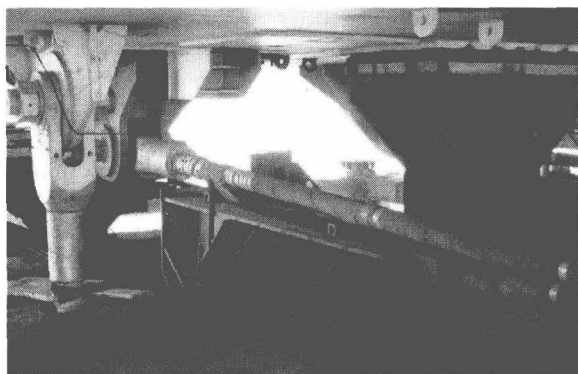


照片4 施工期风洞试验

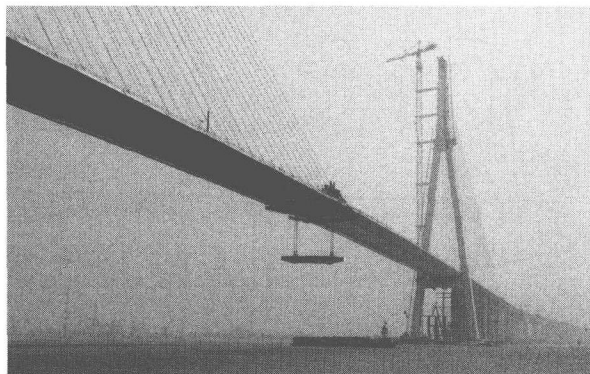


照片5 边跨大块梁段安装

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(照片6)。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1000m)钢箱梁向岸侧拉移约10cm(预留12cm),扩大合龙口,提升合龙段进入龙口(照片7)。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%焊接工作,并迅速解除塔梁临时固结,实现体系转换。



照片6 塔梁临时固接



照片7 中跨合龙段吊装

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、安装全过程施工控制。

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。为此,花了 3 个多月时间研究统一计算参数、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。索塔砣弹模、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,也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 1mm,成桥线形高于预期线形约 10cm,全桥总体线型平顺,无任何局部弯折(图 6),施工控制取得了良好效果。

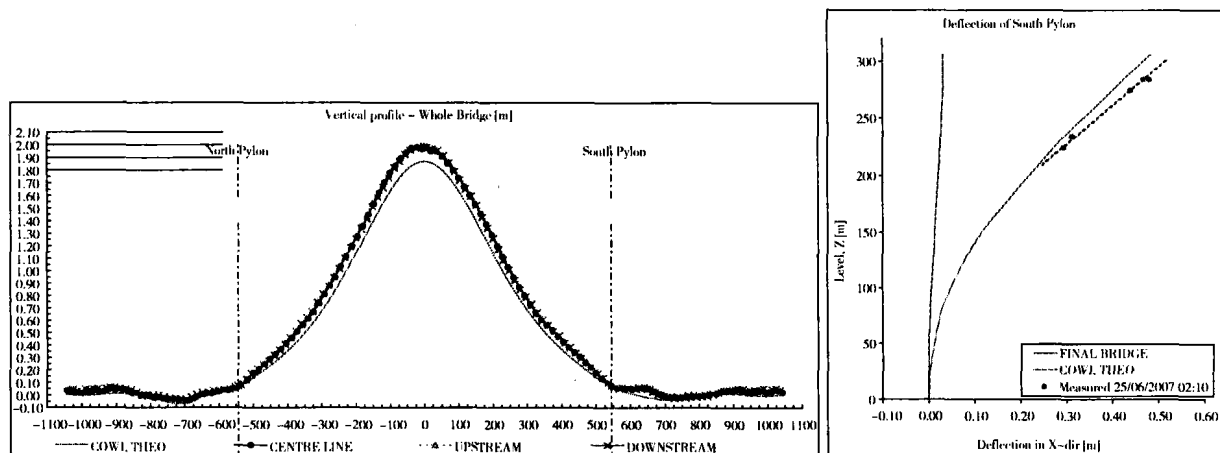
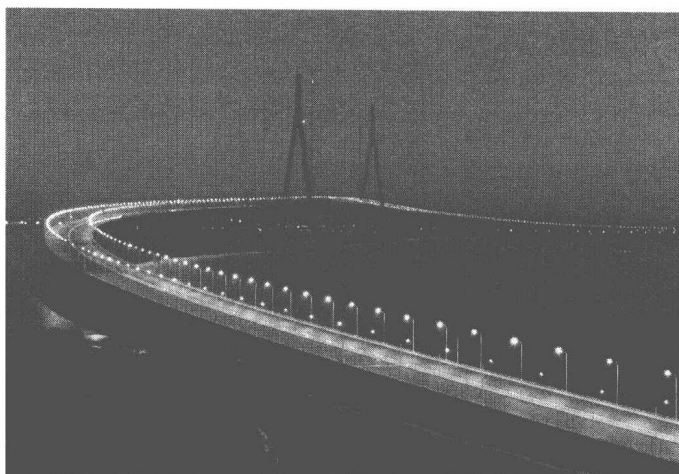


图 6 合龙后塔、梁线形

6 结语

苏通大桥于 2003 年 6 月正式开工,2008 年 4 月建成通车(照片 7),历时近 5 年,比预定工期提前了一年。包括 23km 接线和 6km 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。



照片7 通车前的苏通大桥夜景

参考文献

- [1] 中交公路规划设计院,江苏省交通规划设计院,同济大学建筑设计研究院. 苏通长江公路大桥跨江大桥工程主桥施工图设计,2004
- [2] 中交第二航务工程局苏通大桥项目部. 苏通大桥主桥 C3 标施工组织设计,2005
- [3] 向中实. 桥梁施工控制技术. 北京:人民交通出版社,2001
- [4] 华锡生,黄腾. 精密工程测量技术与应用. 南京:河海大学出版社,2001
- [5] 游庆仲,董学武,吴寿昌,等. 苏通大桥基础工程的挑战与创新. 中国工程科学,2007
- [6] JENSEN, O. J., AND TRUELSEN, C.. 中国苏通大桥冲刷防护冲刷评估和概念设计,2004

苏通大桥总体设计^①

张喜刚¹ 袁洪¹ 裴岷山¹ 戴捷² 徐麟¹

(1. 中交公路规划设计院有限公司 北京 100010; 2. 江苏省交通规划设计院 南京 210005)

摘 要 苏通大桥主桥为主跨 1088m 的双塔双索面钢箱梁斜拉桥,是目前世界上跨径最大的斜拉桥。苏通大桥的建设克服了气象条件差、水文条件复杂、基岩埋藏深、通航标准高等困难,创造了多项新技术新工法并创造了四项世界纪录:超大跨径、超长拉索、超高索塔和超大规模深水基础。本文分别介绍了苏通大桥的结构体系、钢箱梁、斜拉索、索塔、基础等主要构件的设计以及防撞措施、抗风、抗震、结构非线性等关键技术。苏通大桥在 2008 年 IBC 国际桥梁大会上获得乔治·理查德森大奖,成为我国从桥梁大国迈向桥梁强国的重要里程碑。

关键词 斜拉桥 总体设计 结构体系 钢箱梁 斜拉索 索塔 深水基础

Abstract The main span of Sutong Bridge is a double-pylon, double-plane cable-stayed bridge with steel box girder, which has the world's longest central span of 1,088m within cable-stayed bridges. Overcoming problems caused by severe meteorological conditions, perplexing hydrological conditions, deep buried bedrock and higher navigation level, many new technics and methods were created. The super-long span and stayed cables, super-high towers, as well as super-large foundations in deep water are all world records currently. Keys including structural system, steel box girder, stayed cable, tower, pier, tower foundation, collision avoidance system, wind-resistance, seismic-resistance, structural nonlinear response and structural static stability were presented individually in this paper. It achieved George-Richardson Medal of International Bridge Conference (IBC) in 2008. The success of Sutong Bridge is the landmark that denotes China from large bridge country to advanced bridge country.

Key words cable-stayed bridge general design structural system steel box girder stayed cable tower tower foundation

1 概述

苏通长江公路大桥(简称“苏通大桥”)位于江苏省东南部苏州、南通两市境内,下游距长江入海口约 108km,上游距江阴长江公路大桥约 82km,是国家沿海大通道的重要组成部分。

苏通大桥工程由北接线、跨江大桥和南接线三部分组成。路线全长 32.4km,其中北接线长约 15.1km,跨江大桥长约 8.2km,南接线长约 9.2km。跨江大桥全桥总体布置为: $[(12 \times 30) + 3 \times (11 \times 50) + (50 + 9 \times 75) + (10 \times 75)]$ m 预应力混凝土连续梁桥 + $(2 \times 100 + 300 + 1088 + 300 + 2 \times 100)$ m 全钢箱梁斜拉桥 + (5×75) m 预应力混凝土连续梁桥 + $(140 + 268 + 140)$ m 预应力混凝土连续刚构桥 + $3 \times (11 \times 50)$ m 预应力混凝土连续梁桥。

其中,主桥为主跨 1088m 的双塔双索面斜拉桥,是世界上首座跨径超过千米的斜拉桥,创造了超大

① 本项目由国家科技支撑计划资助项目(2006BAG04B00)资助。

作者简介:张喜刚(1962—),男,教授级高级工程师,同济大学,本科。

跨径、超长拉索、超高索塔和超大规模深水基础四项世界纪录。其跨径布置为 $100 + 100 + 300 + 1088 + 300 + 100 + 100 = 2088\text{m}$, 见图 1 所示^{[1][2][3][4]}。

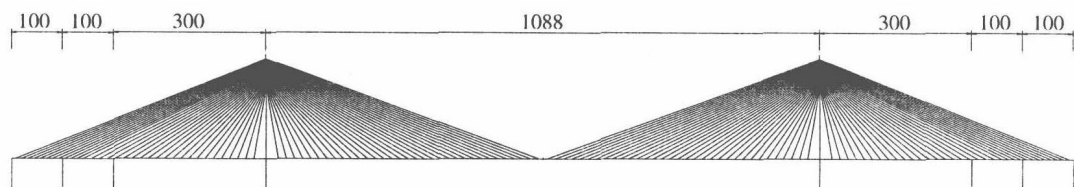


图 1 主桥总体布置

2 主要技术标准

综合考虑当地的建设条件、社会经济发展和桥梁的交通量预测等因素,制定了以下技术标准。限于篇幅仅列主要几条。

- 1) 公路等级 双向六车道高速公路。
- 2) 计算行车速度 100km/h 。
- 3) 桥面净空及标准横断面 桥梁标准宽度 34m 。
- 4) 抗震设防标准 桥位区地震基本烈度 VI 度。
- 5) 抗风设计标准 运营阶段设计重现期 100 年;施工阶段设计重现期 30 年。

桥位 10m 高处 100 年一遇基本风速为 38.9m/s , 30 年一遇基本风速为 35.4m/s , 与汽车荷载组合的风力按桥面风速 25m/s 计算, 超过 25m/s 不与汽车荷载组合。

3 项目技术特点和难点

苏通大桥位于长江口, 受建设条件的制约, 主桥采用主跨超千米的双塔斜拉桥方案, 无论是桥位处的建设条件还是设计施工技术, 都存在很多的技术难题需要克服。

(1) 建设条件的特点与难点

建设条件中的特点和难点主要集中在四个方面, 即气象条件较差、水文条件复杂、基岩埋藏深以及通航标准高。

1) 气象条件较差 一年中江面风力达 6 级以上的有 179 天, 年平均降雨天数超过 120 天, 雾天 31 天, 设计基本风速高达 38.9m/s , 还面临着频繁台风与季风的威胁。

2) 水文条件复杂 江面宽 6km , 一日两潮, 潮差 $2 \sim 4\text{m}$, 浪高 $1 \sim 3\text{m}$; 桥墩处水深达 35m , 水流速度常年在 2.0m/s 以上, 最大流速为 4.47m/s 。

3) 基岩埋藏深 覆盖层厚, 基岩埋藏深达 300m ; 土性软弱, 河床易受水流冲刷, 一般冲刷深度达 25m 。

4) 通航标准高 主孔净高不小于 62m 、净宽不小于 891m ; 桥区通航密度高, 平均日通过船只 2500 多艘, 高峰达 6000 艘, 航运与施工安全矛盾突出。

(2) 设计施工技术特点、难点

随着斜拉桥跨径的增大, 某些常规跨径桥梁反映不明显的因素将会变得更加突出, 设计控制因素更加复杂多样, 更多的技术课题需要深入研究和揭示。因此, 苏通大桥主桥上部结构设计施工均面临着许多新的技术难题, 主要存在以下技术难点: 千米级斜拉桥结构体系问题、千米级斜拉桥非线性影响和分析问题、施工和运营阶段结构抗风稳定性及抗震问题、施工和运营阶段斜拉索的减振问题、上部结构架设与施工监控问题、超大规模深水基础的设计与施工问题、主桥超高索塔的设计与施工问题等方面。

1) 千米级斜拉桥结构体系问题 对于超大跨径的桥梁, 选择合理的桥梁结构体系是保证结构功能和安全的關鍵。不同的结构体系, 会导致桥梁有不同的静力和动力反应, 使结构有不同的受力特性。针

对苏通大桥桥位处风速大、风况复杂、抗震要求高的特点,需要通过选择合适的结构体系改善结构静动力荷载作用下内力和位移反应,减小伸缩缝、支座等装置的位移量和动力磨损,增加桥梁结构极限静动力荷载作用下安全度。

2)千米级斜拉桥非线性影响和分析问题 传统的中小跨径斜拉桥一般采用线性方法进行计算,随着斜拉桥跨度的增大,非线性计算结果与线性计算结果的差别越来越大,对传统设计思路提出了挑战。研究非线性对千米级斜拉桥结构的影响问题,对于完善超大跨度斜拉桥的设计理论、确保苏通大桥结构安全、设计合理具有十分重要的意义。

3)施工和运营阶段结构抗风稳定性及抗震问题 苏通大桥跨径大、施工悬臂长、气动性能将会出现复杂的三维效应,其抗风稳定性问题是决定苏通大桥安全的关键因素之一。深厚软弱场地地震动效应、长柔结构及高桩承台基础的地震反应分析、合理的减震措施的研究是苏通大桥抗震设计需要重点突破的问题。

4)施工和运营阶段斜拉索的减振问题 苏通大桥拉索长度大、刚度小、自振频率较低、阻尼低,在风、雨作用和塔、梁涡激振动的激励下,很容易发生风雨激振、涡激振动、参数振动。而目前斜拉索的致振机理还不是很明确,采取何种减振措施、振动控制标准如何确定、如何保证施工和运营期斜拉索的振动控制在可接受范围之内,还有待进一步深化研究和解决。

5)上部结构架设与施工监控问题 苏通大桥桥面起吊高度达70m以上,主梁标准块件最大起吊重量约450t,边跨大块件最大长度达57.9m、重约1300t,对施工设备提出了很高的要求;安装周期长,全桥桥面起吊块件数量达99个;施工过程单悬臂施工长度将达到540m,结构刚度很小,在风的作用下,主梁极易发生振动,施工过程中还可能遭遇台风的袭击,架设风险很大。

由于超大跨度斜拉桥的受力状态表现为较强的非线性,对施工阶段结构变形应引起充分重视,必须按照非线性理论进行详细分析和施工控制。苏通大桥塔高、跨大、索长的特点决定了施工过程中结构刚度很小、测量工作繁重,也需要认真研究合理的施工控制方法,确保主梁架设过程中应力与线形控制达到设计目标。

6)主桥超大规模深水基础的设计与施工 由于桥梁规模大,加上基础持力层埋置深、船舶撞击力大、河床局部冲刷深,主塔基础是超大规模的深水基础。综合考虑施工受潮汐影响,主桥超大规模深水基础设计与施工的重点和难点包括:软弱土层条件下超长桩的承载力和提高承载力的有效措施,适当考虑桩土共同作用下的大规模群桩基础受力特性和群桩效应,超长钻孔灌注桩施工工艺和质量保证措施,基础防冲刷措施等。

7)主桥超高索塔的设计与施工 苏通大桥300.4m超高索塔在设计与施工方面存在如下技术特点和难点:钢锚箱设计及制造、安装,超高索塔施工阶段抗风稳定问题,超高索塔的施工工艺和施工监控等^[5]。

4 主要创新点

(1)苏通大桥主跨超过千米,达到1088m,是世界上第一座主跨超过千米的斜拉桥,也是目前世界上修建的最大跨度斜拉桥,实现了斜拉桥跨径的千米跨越,使我国及世界斜拉桥建设技术又上了一个新台阶。

(2)苏通大桥塔梁连接采用具有额定行程的刚性限位和动力阻尼抑震的组合装置系统,在主梁发生动力反应时,系统起阻尼耗能、抑制动力反应的作用,在极限风荷载作用时,系统起限位作用,较好地解决了结构位移和受力间的矛盾。

(3)根据流线型扁平钢箱梁不同部位的受力特点,采用了不同材料规格和不同强度等级的钢材。

(4)斜拉索采用高强耐久型平行钢丝拉索体系,其设计寿命为50年,采用自主开发的国产直径7mm平行镀锌钢丝,强度为1770MPa,达到了国际先进水平。

(5)斜拉索在塔上的锚固采用了钢锚箱锚固技术。