

南京长江第四大桥工程建设及关键技术

武焕陵

(南京重大路桥建设指挥部,南京 210033)

[摘要] 南京长江第四大桥是世界上首座主跨1 418 m的三跨连续弹性支承体系钢箱加劲梁悬索桥,首次采用了弹性支承体系以及缆索的分布传力锚固系统,克服了复杂地质条件下超大“∞”形地下连续墙(以下简称地连墙)及超大规模沉井深基础的设计施工技术难题,提出了主缆缆索混编技术及富氩气体保护焊技术,采用了复合浇筑式沥青钢桥面铺装技术,运用综合技术手段严格控制大体积混凝土施工质量。本文从建设管理及关键技术创新方面进行了综述。

[关键词] 建设管理;关键技术创新;复杂地质条件;超大“∞”形地连墙;超大规模沉井

[中图分类号] U442.5;U445.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)08-0004-08

1 前言

南京长江第四大桥位于南京长江第二大桥下游10 km处,距长江入海口约320 km,是国道主干线的重要组成部分,是国务院批准的南京市城市总体规划的“五桥一隧”过江通道之一,也是南京绕越高速公路的过江通道。工程北起六合区横梁镇,接绕城高速公路东北段和宁通(南京—南通)高速公路,南至江宁区麒麟镇,接绕城高速公路东南段和沪宁(上海—南京)高速公路。全线按双向六车道高速公路标准建设,荷载等级为公路-I级,共设横梁、龙袍、栖霞、麒麟4处互通立交,全长28.996 km,其中北接线长约13.078 km,南接线长约10.481 km,跨江大桥长约5.437 km^[1]。概算总投资为68.57亿元,核批建设工期为5年。南京长江第四大桥的地理位置图见图1。

2 工程建设条件

2.1 地形地貌

南京长江第四大桥桥位区域北岸属长江下游冲积平原,从北向南地貌单元由长江高漫滩渐变为长江低漫滩,地势开阔、水网发育,地面高程4.0~5.0 m。南岸紧靠宁镇山脉,为低漫滩地与山前岗地直接衔接的

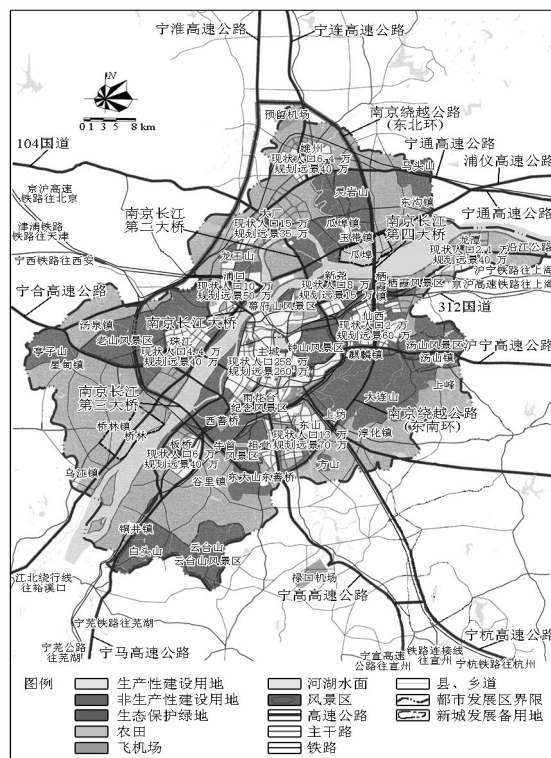


图1 南京长江第四大桥的地理位置图

Fig.1 Geographic location of the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge

[收稿日期] 2013-05-22

[作者简介] 武焕陵(1964—),男,江苏南京市人,研究员级高级工程师,主要从事道路桥梁方面的研究工作;E-mail:njywhl@sina.com

地貌景观。

2.2 气候条件

南京位于江苏省西南部,属北亚热带向中亚热带过渡气候带,其气候具有过渡性、季风性、湿润性的特点。南京地区年平均气温为15.5℃,极端最高气温为43.0℃,极端最低气温为-14.0℃。受台风影响月份为5—11月;历年极大瞬时风速为38.8 m/s,最大10 min平均风速为25.0 m/s。

2.3 河势

南京长江河段属分汊道河形,平面形态宽窄相间呈藕节状。南京长江第四大桥桥位断面位于龙潭水道过渡段的石埠桥附近,该段河床和岸滩相对较稳定。

2.4 水文

南京长江河段位于长江下游,全长65 km,平面形态基本顺直或弯曲,平均河宽为1~1.5 km,水深10~23 m。南京长江第四大桥跨江位置水域受潮汐影响,属感潮河段。年最高潮位多发生在汛期上游来水量最大或较大而又适逢大潮汛的时候,历年最高潮位为8.36 m,历年最低潮位为-0.32 m。

2.5 工程地质

南京长江第四大桥地处长江三角洲冲积平原,第四系土层较厚,持力层分布较深,工程地质情况

较差。

北塔处分布稳定、可作为桩基持力层的基岩埋深约在-105 m,南塔处约在-55 m。北锚处上更新统密实状卵砾石层、砾砂分布稳定,工程地质条件良好,埋深在-53 m左右,可作为锚碇的持力层;南锚处为白垩系葛村组砂岩、砂砾岩,由北向南基岩面起伏在-38~-29 m,岩石强度高,胶结性能好,无明显断裂形成的破碎带,可作为锚碇的持力层。南锚碇处地下水分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水,孔隙水主要为承压水^[2]。

2.6 地震

南京长江第四大桥工程近场区内存在发生5~6级地震的构造背景和发生破坏性地震的潜在震源区。震源深度绝大多数分布在10~20 km的范围内,最深30 km,最浅6 km。

3 主体工程设计

3.1 主桥

3.1.1 总体布置

南京长江第四大桥主桥为主跨1 418 m的三跨连续悬索桥,其中北边跨166.0 m+410.2 m=576.2 m,南边跨118.4 m+363.4 m=481.8 m。中跨矢高157.5 m,矢跨比1/9,见图2。

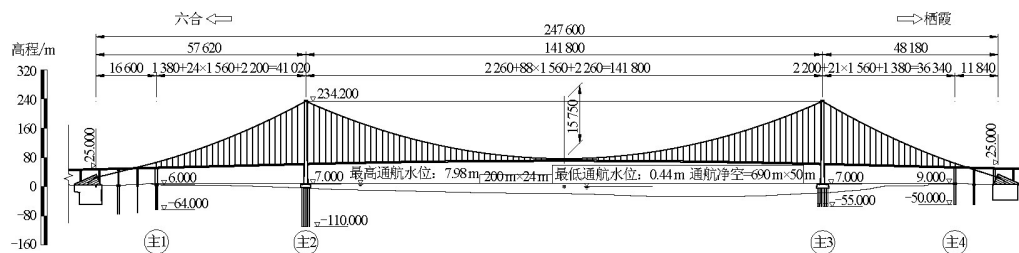


图2 南京长江第四大桥主桥总体布置图(单位:cm)

Fig.2 Span arrangement of the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge main bridge (unit: cm)

3.1.2 结构体系

南京长江第四大桥跨江大桥首次采用弹性支承体系,以改善局部受力条件。索塔下横梁位置纵横均设置支承,其中纵向设置了阻尼器及限位装

置,在释放温度位移的同时限制梁体纵向荡移距离^[1]。过渡墩则设置竖向拉压支座和横向抗风支座。主桥约束系统布置见图3。

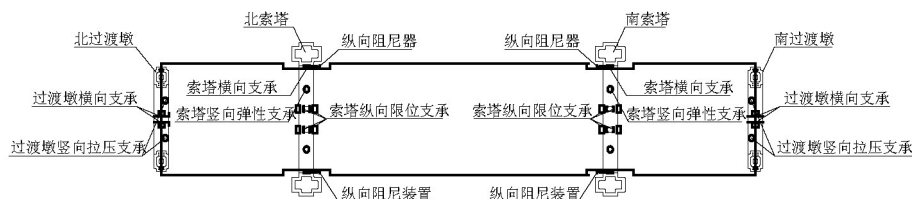


图3 主桥约束系统布置图

Fig.3 Sketch of the main bridge restraint system

3.1.3 加劲梁

加劲梁采用流线型扁平钢箱梁,见图4,梁高3.5 m,宽38.8 m(含风嘴);标准梁段长15.6 m。加

劲梁设置两道通长腹板;为提高结构整体性,索塔附近的加劲梁设置两道纵隔板;吊索通过销轴连接于腹板的吊耳之上。

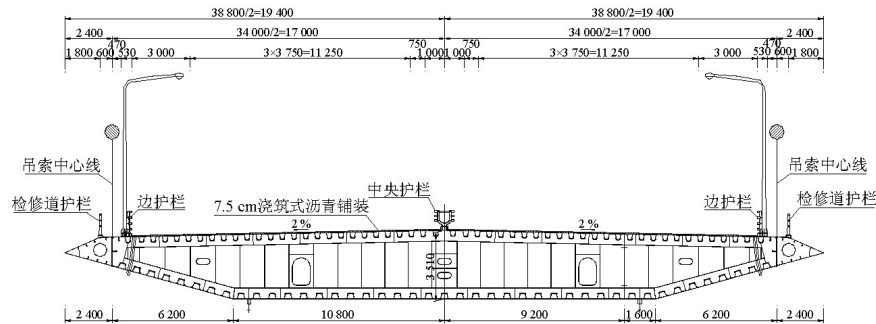


图4 加劲梁标准梁段断面图(单位:cm)

Fig.4 General arrangement of deck girder cross section (unit: cm)

3.1.4 缆索系统

主缆采用预制平行钢丝索股(PPWS)。每根主缆中,从北锚碇到南锚碇的通长索股有135股,北边跨加设6根背索,在北主索鞍上锚固;南边跨加设8根背索,在南主索鞍上锚固。每根索股由127根直径为5.35 mm的高强度镀锌钢丝组成。

吊索采用平行钢丝吊索,每侧吊点设2根吊索。吊索与索夹、钢箱梁为销铰式连接。普通吊索采用直径为5 mm的镀锌高强钢丝,每根吊索含103根钢丝,聚乙烯(PE)保护层厚7 mm。索夹采用上下对合的结构形式,上下两半索夹用螺杆相连并夹紧于主缆上。在接缝处上半索夹的内侧设有凹槽,下半索夹的内侧设有凸出的嵌齿,上下半索夹的外侧嵌填橡胶防水条防水。

主索鞍和散索鞍鞍体均采用铸焊结合的混合结构。主索鞍鞍槽用铸钢铸造,底座由钢板焊成,鞍体下设不锈钢板-聚四氟乙烯板滑动副,以适应施工中的相对移动;散索鞍鞍槽用铸钢铸造,鞍体由钢板焊成。为增加主缆与鞍槽间的摩阻力,并方便索股定位,主索鞍和散索鞍鞍槽内设竖向隔板,在索股全部就位并调股后,在顶部用锌块填平,并进行封水处理,再将鞍槽侧壁用拉杆夹紧。边跨附加索股锚固于主索鞍鞍顶的锚梁上。

3.1.5 索塔及其基础

索塔采用混合式结构形式,混凝土强度等级为C55,见图5。主梁以上为刚构式索塔和优化形,构造呈拱形城门式造型,拱梁高度设在高程174.3 m处,通过竖杆与上横梁连为一体共同受力。主梁以

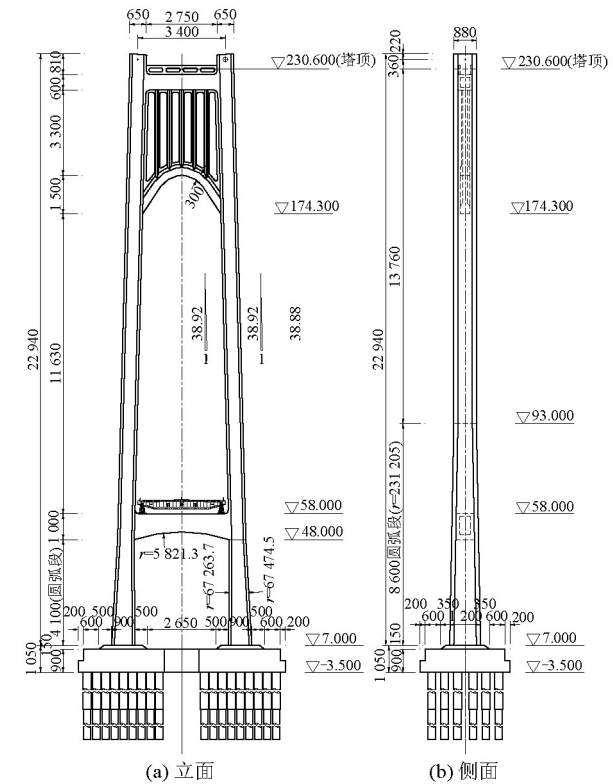


图5 索塔一般构造图(单位:cm)

Fig.5 Detail of pylon (unit: cm)

下设一道下横梁。

塔柱为钢筋混凝土结构,上下横梁为预应力混凝土结构,拱梁、竖杆为钢结构。索塔高229.4 m。南塔基础采用48根直径为2.8~3.2 m的变直径钻孔灌注桩基础,梅花式布置,按端承桩设计,桩底高程为-60 m。承台为哑铃形,平面尺寸为80.5 m×35 m,

厚为9 m。北塔基础采用38根直径为2.8 m钻孔灌注桩基础,梅花式布置,按摩擦桩设计,桩底高程为-110 m。承台同样为哑铃形,平面尺寸为72.5 m×27 m,厚为8.5 m。

3.1.6 锚碇

北锚碇为陆上沉井基础(见图6),共分11节,除第1节为钢壳混凝土沉井外,其余10节均为钢筋混凝土沉井。沉井共分20个井孔,标准节段井孔顺桥向长度14.2 m,横桥向8.68 m;沉井标准井壁厚2 m;隔墙标准壁厚2.4 m;顶板厚7.8~13.8 m;封底厚10 m。锚体地面以上部分整体上呈三角造型,锚体顺桥向全长73 m,锚体地面以上高28.7 m,地面以下13.8 m。

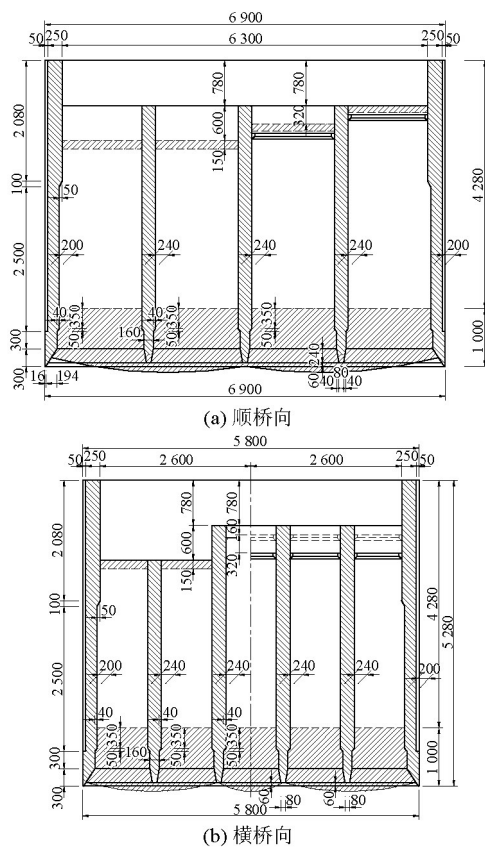


图6 北锚碇沉井基础一般构造(单位:cm)

Fig.6 General layout of caisson foundation for north anchorage (unit: cm)

南锚碇基础为支护开挖深埋扩大基础(见图7),基坑采用地下连续墙(以下简称地连墙)支护结构体系,平面形状为“∞”形,长82 m,宽59 m,由两个外径为59 m的非完整圆和一道隔墙组成,壁厚为1.5 m。地连墙嵌入中风化砂岩约3 m,总深度为40~50 m。

为加强基础底板的整体性,隔墙底部4 m范围设计一道横撑,横撑高2 m,宽2.5 m。锚体地面以上部分整体上呈三角造型,南锚碇锚体与地连墙基础顶板成为一体,锚体顺桥向全长66 m,锚体地面以上高28 m,地面以下15 m。

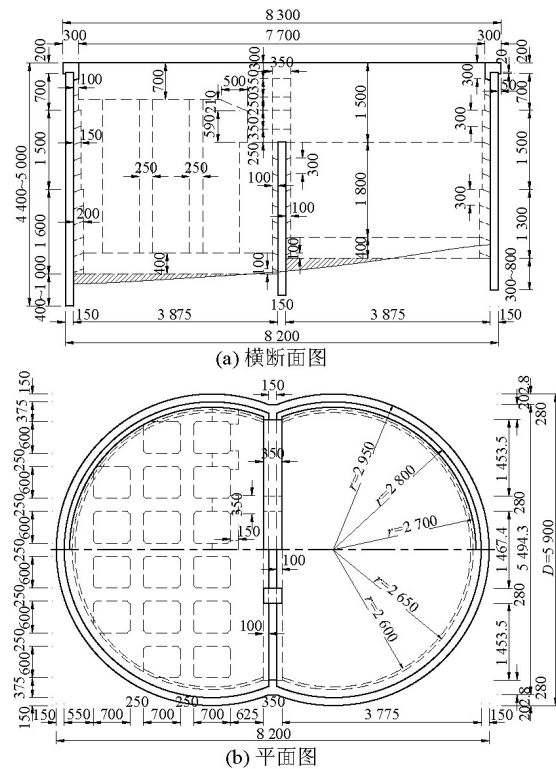


图7 南锚碇地连墙基础一般构造(单位:cm)

Fig.7 General layout of diaphragm wall foundation for south anchorage (unit: cm)

3.1.7 主缆锚固系统

南京长江第四大桥采用分布传力式锚固系统,总体布置见图8(以北锚碇为例)。主缆锚固系统由钢锚箱、锚固板和锚固区域组成,索股通过钢锚箱与锚固板连接,锚固板后端沿板宽方向左右各设一条宽250 mm、厚28 mm的承压板,并设置20 mm厚承压板加劲,以分担部分荷载,同时提供强大的安全储备。锚固区域和混凝土采用混凝土榫剪力键连接^[3]。

除混凝土榫剪力键锚固区域外,混凝土内锚固板均设置钢板防护设施。钢板表面粘贴10 mm厚氯丁橡胶板,外包2 mm厚钢板,边缘用M6螺栓夹紧固定。在螺栓位置每200 mm粘贴一条橡胶板,宽度为200 mm。在靠近锚固区域端将防护钢板弯起并形成封闭止水槽,槽内内设BW遇水膨胀橡胶止水带。

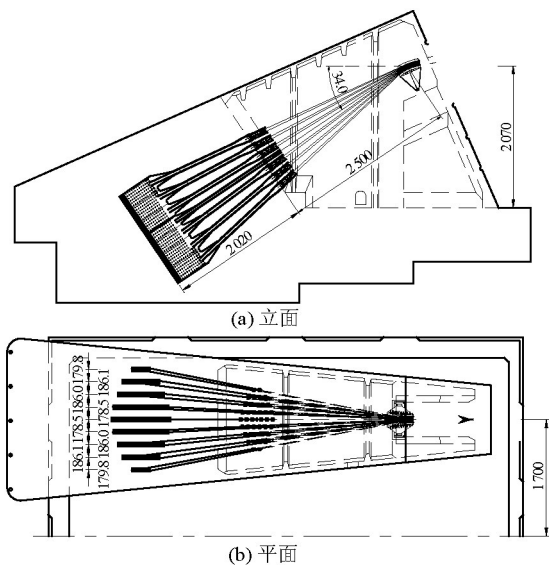


图8 锚固系统总体布置图(单位:cm)

Fig.8 General layout of anchor system (unit: cm)

3.1.8 桥面铺装

南京长江第四大桥主桥的行车道铺装结构见图9。

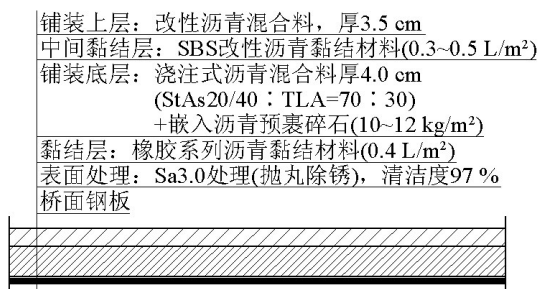


图9 主桥行车道铺装结构示意图

Fig.9 Sketch of carriageway pavement for main bridge

3.2 引桥

3.2.1 北引桥

北引桥采用的跨径布置为:[2×7×30 m]装配式预应力混凝土连续箱梁+[左幅(52+4×65+37) m,右幅(37+4×65+52) m]预应力混凝土连续箱梁+[(3×4×50+3×52+48) m]预应力混凝土筒支梁+[(52+54+54) m]节段预制拼装预应力混凝土连续刚构。北引桥全长1 733 m。

3.2.2 南引桥

南引桥采用的跨径布置为:[(54+54+52) m]节段预制拼装预应力混凝土连续梁+[(40+40) m]预应力混凝土筒支梁+[(2×4×50+2×4×48) m+左幅(48+

48+52+52) m,右幅(50+52+52+46) m]节段预制拼装预应力混凝土连续刚构+[5×52 m]节段预制拼装预应力混凝土连续梁。南引桥全长1 524 m。

3.3 北接线滁河大桥

北接线滁河大桥桥梁全长202 m。桥梁上部结构为主跨96 m的三跨波纹钢腹板预应力混凝土连续箱梁,跨径布置为53 m+96 m+53 m,采用节段悬臂现浇方法施工^[4]。

4 主要关键技术研究

南京长江第四大桥主桥与国内外类似工程相比,既存在建设条件方面的特点,又存在桥梁结构特点所引起的设计、施工等方面的技术难题,其中南锚地连墙深基础设计施工技术、主缆的锚固体体系设计施工技术、复合式钢桥面铺装层设计施工技术、主桥结构体系和超大规模沉井关键技术等多项技术难点属世界级难题。对此,在设计阶段开展了一系列关键技术问题研究^[1]。

4.1 超大“∞”形地连墙深基础设计及施工成套技术研究

南锚碇基坑工程是南京长江第四大桥的关键性工程。“∞”形结构首次应用于桥梁深基础结构,无成功设计及施工经验可借鉴。“∞”形地连墙长82 m,宽59 m,结构受力复杂,地连墙支护结构圆拱效应明显,地连墙轴向受力大,精度要求高;区域水文地质条件极为复杂,离长江防洪大堤只有80 m;周围建有国家粮库和重要输油管线,施工风险大,为确保基坑及周边重要构造物的施工安全,要求基坑日渗水量少,基坑围护结构墙体的累计最大水平位移小于3 cm。

针对“∞”形地连墙深基础设计及施工特点与难点,对超大“∞”形地连墙深基础设计、地连墙施工技术、深基础开挖施工技术、地连墙深基础信息化施工技术和地连墙深基础施工风险预案措施展开了研究,研究成果在深基础施工领域有重大突破和创新,达到国际领先水平,促进了行业技术进步,具有重大的推广及应用价值。

工程于2009年3月开工,8月南锚碇开挖,12月顺利完成底板浇筑。墙体累计最大变形为12 mm,相对位移仅为0.03%,与国内外同类基坑变形相比非常小。围护结构各控制断面的应力和周边土体的沉降也小于预警值,整个开挖过程中围护体系始终处于正常运行状态。地连墙平面位置、垂直度、

铰接头质量及混凝土质量良好,基坑几乎无渗水,基坑封水效果非常好^[5]。

4.2 悬索桥主缆新型分布传力锚固系统设计施工技术研究

主缆是悬索桥的主要承重结构,主缆锚固系统是悬索桥的关键结构之一,其工作性能决定了主缆的正常工作和结构整体安全。南京长江第四大桥主缆拉力约 5.6×10^5 kN,对锚固结构可靠性、耐久性提出了挑战。在南京长江第四大桥的建设中提出了主缆分布传力锚固系统这一全新的锚固结构体系,必须解决新结构设计的理论问题和工程施工成套技术等诸多难题。研究的主要成果包括以下3个方面。

1)首次提出并实践了“以钢筋混凝土樨传剪器群作为主要传力元件,将主缆拉力渐次分布到锚碇混凝土”的悬索桥主缆分布传力锚固系统,经过设计计算、仿真分析、试验验证和施工技术研究及实践,形成了新型分布传力锚固系统设计施工成套技术,有利于提高悬索桥主缆锚固系统的耐久性和维护性,丰富和发展了悬索桥主缆锚固体系。

2)通过足尺模型试验,首次探明了分布传力锚固系统的传力机理,验证了分布传力锚固系统的理念,揭示了深埋钢筋混凝土樨传剪器的承载机理,提出了锚固系统简化有限元分析方法和荷载-滑移变形协调理论计算模型,为分布传力锚固系统的设计和计算提出了新的方法。

3)基于锚固板制造-安装一体化的理念,首次提出了锚固板平面预拼与空间叠层定位技术,解决了锚固板精细化制造和精确定位问题,提出了芯棒钢筋桁架定位和锚固区混凝土的单侧、多层浇筑工艺,解决了密集传剪器群的施工技术难题。

研究成果具有原创性,为悬索桥锚固系统的设计与施工提供了新的理念和构思。采用新型主缆分布传力锚固系统的南京长江第四大桥主桥南北锚于2010年10月优质完成了工程施工,为南京长江第四大桥高质量、高效益建成奠定了坚实的基础。

4.3 复合式沥青混凝土钢桥面铺装设计施工技术研究

选择一种性能优良、施工简便、后期维护简单的新型钢桥面铺装材料和结构成为当前桥面铺装领域的研究重点^[6]。针对南京长江第四大桥的使用条件,分析了桥面铺装受力特点,开展了钢桥面铺装材料、钢桥面铺装试验技术及性能观测、钢桥面

铺装设计、施工工艺及工程质量验收评定、钢桥面铺装养护维修技术等方面的研究。

经过两年室内实验研究、铺装施工工艺研究和试验桥铺装施工,编制了《复合浇筑式沥青混凝土钢桥面铺装专项试验规程》、《复合浇筑式沥青混凝土钢桥面铺装施工指南》等技术标准,为主桥钢桥面铺装施工做了充分的准备工作,并于2012年8月按计划完成了主桥铺装施工,完成了施工工法和养护指南等标准的编制工作,形成了复合浇筑式沥青混凝土钢桥面铺装的设计施工成套技术。

4.4 大跨度三跨连续弹性支承悬索桥上部结构关键技术研究

南京长江第四大桥主桥采用有竖向弹性支承的半漂浮体系。合理选择支承刚度,设置弹性支承,确保结构具有最优的静动力特性是一个值得研究的课题。针对南京长江第四大桥的结构特点,对弹性支承的刚度选择、边跨的地形适应、加劲梁在中塔处有较长的无索区、体系转换与成桥线形及内力一致、梁段吊装顺序、梁段吊装的不对称性、加劲梁的合龙方案以及确定合理的索鞍顶推方案等问题进行了研究。研究成果直接指导了南京长江第四大桥上部结构的设计和安装,2011年1月开始先导索架设,2012年5月完成猫道拆除,实现了上部结构的高精度、高效率架设^[7]。

4.5 超大规模沉井关键技术研究

南京长江第四大桥北锚碇设计采用大型深沉井基础,其平面规模目前位居国内桥梁陆域沉井之首,地质条件复杂,施工难度大。针对超大规模沉井关键技术难点问题,对超大规模沉井基础设计、超大规模沉井下沉关键技术、沉井降排水下沉施工期江堤沉陷量控制技术和超大规模沉井信息化施工监控技术进行深入的研究,研究成果具有显著的创新性、实用性,达到同类技术国际领先水平,已成功应用于南京长江第四大桥北锚碇工程建设中,为确保工程质量达到“精品工程”奠定了坚实的基础。

南京长江第四大桥北锚碇沉井基础终沉姿态的精度远高于设计和规范控制精度要求,且下沉顺利。施工中未出现涌水、涌砂及周边地表沉陷,确保了沉井顺利下沉和长江堤防安全^[8]。

4.6 悬臂施工波形钢腹板组合梁桥力学性能与施工关键技术研究

波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁是一种新型的钢-混凝土组合结构,它充分利用了混凝土抗

压和波形钢腹板质轻、抗剪屈服强度高的优点。

滁河大桥是目前国内跨径最大的预应力波形钢腹板连续箱梁桥,采用的节段悬臂施工方法在国内同类桥梁中的工程实例还很少,在设计与施工中缺乏先导经验与研究成果的积累。依托滁河大桥,对悬臂施工波形钢腹板组合梁桥力学性能与施工关键技术进行了研究,提出了悬臂施工期波形钢腹板混凝土组合箱梁桥扭转和畸变等空间力学性能的分析方法以及波形钢腹板混凝土组合箱梁的横向分析和计算方法;研究了新型抗剪连接件的传力机理,提出了新型的钢-混凝土连接节点设计方法与极限承载力计算方法;总结编制了《波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥悬臂施工技术指南》。研究成果可以为今后同类桥型的建设提供技术支撑,同时对促进组合结构桥梁在我国的推广和应用具有重要意义。

4.7 体内-体外混合配束节段预制拼装箱梁桥关键技术研究

南京长江第四大桥南北引桥的部分梁跨上部结构为节段预制拼装桥梁^[9]。针对节段预制拼装结构特色与技术挑战性,进行深入的理论分析、数值计算和模型试验^[10],对桥梁结构性能及关键部位的构造、施工过程中若干关键技术进行了系统研究,并对桥梁运营期的耐久性、换索及体外预应力的补张拉进行了研究。提出了基于多种性能约束的体内-体外预应力混合配束设计方法和基于压力场理论的键齿接缝抗剪承载力计算方法;完善了体外预应力锚固区的构造及配筋设计方法;形成了运营期体外预应力索的维护与更换工艺指南;开发了可同时满足逐跨悬挂与对称悬拼、陆域与水域等各种架设条件的新型多功能拼装架桥机。

5 结语

南京长江第四大桥2008年12月31日开工建设,2012年12月24日建成通车,历时约4年,比核批建设工期提前1年。作为南京市在长江上的又一座特大型桥梁,南京长江第四大桥是继南京长江第二大桥和第三大桥之后的又一项里程碑式的宏伟工程。它不仅规模宏大,更为重要的是,其建设在技术方面极具挑战性,难度非常大。南京长江第四大桥是我国桥梁建设者向世界最高桥梁建设水平的又一次冲击。

全体参建者坚持科学管理和技术创新,严格质量、安全、节能环保和文明施工管理,强化现场管理,精心组织,注重细节,优质、安全、高效地完成了南京长江第四大桥的各项建设任务。

参考文献

- [1] 南京重大路桥建设指挥部. 南京长江第四大桥工程技术总结[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [2] 肖利, 王连新, 潘霄, 等. 南京长江四桥南锚碇基坑渗流控制方案研究[J]. 长江科学院院报, 2009(S1): 85-88.
- [3] 田欣, 牛亚洲, 郝胜利, 等. 南京长江第四大桥北锚碇钢筋混凝土樁锚固系统施工关键技术[J]. 公路, 2010(6): 54-60.
- [4] 崔冰, 董萌, 李准华. 大跨度变截面波纹钢腹板PC连续梁桥的设计[J]. 土木工程学报, 2011(9): 81-86.
- [5] 杨奉举, 牛小龙. 南京长江第四大桥南锚碇基础地下连续墙施工[J]. 桥梁建设, 2010(6): 77-79, 83.
- [6] 王宏畅, 李国芬. 南京长江四桥浇注式沥青混凝土配合比设计研究[J]. 公路, 2012(8): 50-54.
- [7] 栾昌花. 南京长江第四大桥主缆架设关键技术[J]. 现代交通技术, 2012(5): 45-47.
- [8] 牛亚洲, 田欣, 郝胜利, 等. 南京长江第四大桥北锚碇沉井施工技术方案综述[J]. 公路, 2010(6): 1-6.
- [9] 武焕陵, 崔冰, 李宗平, 等. 南京长江第四大桥预制节段拼装箱梁的技术特色[J]. 现代交通技术, 2011(3): 26-29.
- [10] 刘钊, 武焕陵, 种艾秀, 等. 南京长江第四大桥节段预制拼装箱梁足尺模型试验[J]. 桥梁建设, 2011(3): 9-12, 16.

The construction and key techniques of the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge

Wu Huanling

(Nanjing Major Road & Bridge Construction Commanding Department, Nanjing 210033, China)

[Abstract] The Fourth Nanjing Yangtze River Bridge is the first suspension bridge of three-span steel box girder using continuity and flexible bearing system with a main span of 1 418 m, and makes use of the flexible bearing system and distributional force transmission system with main rope for the first time. It overcomes the deep foundation design and construction technical problems of oversized “∞” shape diaphragm wall and ultra-large well-sinking under complicated geological conditions, proposes the technologies of main rope mixed-knit and argon-rich gas shielded arc welding, and uses the pavement technique of compound gussasphalt at steel bridge deck. Additionally, it utilizes synthetical technique to control construction quality of bulk mass concrete. This text summarizes the construction management and key technical innovation.

[Key words] construction management; key technical innovation; complicated geological conditions; oversized “∞” shape diaphragm wall; ultra-large well-sinking