

文章编号: 0451-0712(2006)03-0001-05

中图分类号: U443

文献标识码: C

东海大桥Ⅳ标、Ⅶ标和杭州湾跨海大桥Ⅳ标的施工概况

李志贤¹, 杨思民¹, 郭主龙², 谢汉林³

(1. 路桥集团国际建设股份有限公司 北京市 100027; 2. 路桥华东工程有限公司 上海市 200135;

3. 路桥华南工程有限公司 中山市 528403)

摘 要: 主要介绍路桥集团国际建设股份有限公司承建的东海大桥和杭州湾跨海大桥有关标段的工程特点和施工方案。

关键词: 东海大桥; 杭州湾跨海大桥; 工程概况; 施工方案

路桥集团国际建设股份有限公司(以下简称“路桥建设”)是中国首批具有公路工程施工总承包特级资质的企业之一。路桥建设有幸参与了东海大桥、杭州湾跨海大桥的建设,共承建了东海大桥Ⅳ标、Ⅶ标和杭州湾跨海大桥Ⅳ标、Ⅲ-B标的施工任务,其中东海大桥Ⅳ标中标合同总价4.58亿元,总工期33个月;东海大桥Ⅶ标中标合同总价4.56亿元,总工期28个月;杭州湾跨海大桥Ⅳ标中标合同总价3.96亿元,总工期28个月;杭州湾跨海大桥Ⅲ-B标中标合同总价2.79亿元,总工期19个月。

为顺利完成跨海大桥建设施工任务,路桥建设投巨资先后购买和建造了打桩船、混凝土搅拌船、起重船、拖轮、交通船、供水船、材料供应船、驳船等海上施工船舶,是中国公路施工行业首家拥有海上施工成套设备的企业。

经过东海大桥及杭州湾跨海大桥的施工,路桥建设积累了较为丰富的海上桥梁施工经验。希望通过总结这些经验,与广大桥梁建设者共同分享与切磋,进一步提高我国海上桥梁的建设水平。

1 工程概况及工程特点

1.1 工程概况

1.1.1 地理位置、建设标准和建设意义

东海大桥工程是上海国际航运中心洋山深水港区一期工程的重要配套工程,为洋山深水港区集装

箱陆路集疏运和供水、供电、通讯等需求提供服务。东海大桥起始于上海市南汇县芦潮港镇客运码头往东约4 km的南汇咀处,跨越杭州湾北部海域,直达浙江省嵊泗县崎岖列岛的小洋山岛。全线可分为2.3 km的陆上段,海堤至大乌龟岛之间25.5 km的海上段,大乌龟至小洋山岛之间3.5 km的港桥连接段,总长约为31.3 km。大桥按双向六车道加紧急停车带的高速公路标准设计,桥宽为31.5 m,设计车速为80 km/h,设计荷载为汽车—超20级,挂车—120,并按集装箱重车密排进行校验。设计基准期为100年。东海大桥于2002年6月26日正式开工建设,2005年年底建成通车。

杭州湾跨海大桥全长36 km,是目前世界上已建和在建中的最长的跨海大桥。大桥北起嘉兴市海盐郑家埭,跨越宽阔的杭州湾海域后止于宁波市慈溪水路湾。大桥建成后将缩短宁波到上海间的陆路距离120余 km。杭州湾跨海大桥按双向六车道高速公路设计,设计时速为100 km/h,设计使用年限100年。大桥的建设直接促进了宁波、嘉兴经济的发展,对进一步提升长三角地区的综合竞争力和国际竞争力将发挥重要作用。

1.1.2 标段工程概况

(1) 东海大桥Ⅳ标。

东海大桥Ⅳ标工程为3座辅航道孔桥梁,桥跨结构采用4跨预应力钢筋混凝土箱形连续梁,跨径

组合分别为:K6桥,70 m+120 m+120 m+70 m (500 t级);K12桥,80 m+140 m+140 m+80 m (1 000 t级);K24桥,90 m+160 m+160 m+90 m (500 t级)。下部结构主墩为 $\phi 250$ cm 钻孔灌注桩基础,桩长100~110 m,高桩承台,空心薄壁墩;上部构造为变高度单箱单室箱梁。

(2)东海大桥Ⅶ标。

东海大桥Ⅶ标一颗珠山大桥位于东海大桥港桥连接段,西起颗珠山岛,东接小城子山港区,分东、西引桥和主桥,全长1 660 m,桥跨组合为 7×50 m+(50+139+332+139+50) m+ 12×50 m。引桥为跨径50 m的等高度预应力混凝土连续箱梁桥。主桥为双塔双索面斜拉桥,主梁采用钢—混凝土叠合梁构造;主塔为Π形钢筋混凝土结构,塔高为100 m;主墩基础采用 $\phi 250$ cm~ $\phi 300$ cm 大直径变截面钻孔灌注桩,承台呈哑铃形布置。

(3)杭州湾跨海大桥Ⅳ标。

杭州湾跨海大桥Ⅳ标工程为北航道桥南段、南航道桥南北两段高墩区非通航孔桥基础及下部构造施工。施工区域全长2 170 m。基础为724根 $\phi 160$ cm的钢管打入桩(各桩均为斜桩),圆形分离式现浇承台。墩身采用矩形倒角实心墩,墩高15.134~42.458 m,浪溅区钢筋采用环氧涂层钢筋。

1.1.3 自然条件

(1)地形、地貌。

东海大桥和杭州湾跨海大桥虽同处于杭州湾上,但杭州湾跨海大桥在湾内,属典型的喇叭河口形地形地貌,河床断面由北滩、北主槽、中滩、南主槽和南滩组成。北航道高墩区河床标高在-9.33~-10.119 m之间,南航道高墩区河床标高在-11.00~-12.23 m之间。

东海大桥处于杭州湾与长江口交界位置。西端芦潮港为砂泥滩地,属潮坪地貌。桥区海域,海势稳定,海床较为平缓,天然水深5~10 m,标高在-7.5~-12.5 m之间。大桥东侧所经岛屿及东端小洋山为一系列面积狭小的岛屿,属鸡爪形地貌。各岛一般基岩裸露,植被稀少,地形陡峭,少平地,岸线曲折,多海湾岬角,岸线为抗冲刷侵蚀能力强的基岩海岸。各岛在地势相对低凹地段一般发育厚20~40 cm的覆盖层,相对植被发育,沿岸海蚀地貌(如海蚀洞、沟)较为发育。

(2)工程地质概况。

2座跨海大桥除其中东海大桥Ⅶ标的颗珠山大

桥外,第四纪覆盖层均较厚,且都存在承压水层,杭州湾跨海大桥海相沉积层内还普遍发育有易喷发燃烧的浅层生物气。东海大桥桥位处第四纪堆积层位相对稳定:下部为早~中更新世堆积的杂色粘土、粉质粘土、中粗砂、碎砾石夹粘性土等;中部为晚更新世堆积的灰黄、灰色粉质粘土、砂质粉土、粉细砂等;上部为全新世堆积的灰黄~灰色粉质粘土、淤泥质粉质粘土、粘性土夹砂、砂夹粘性土、砂质粉土、粉细砂等;表部为现代堆积的灰黄色淤泥。杭州湾跨海大桥第四纪地质构造与东海大桥相类似。但由于基岩起伏和水动力条件不同,2座桥位处第四纪覆盖层的层位、层厚、各层土的粒径组成与物理力学性质都有所不同。总体上看,杭州湾跨海大桥高墩区第四纪覆盖层厚度在74~124 m之间,而东海大桥第四纪覆盖层厚度达160~220 m。

颗珠山大桥受周围岛屿影响,水动力条件复杂,第四纪松散堆积层的成因、岩性特征相应较复杂。其底部为残留的晚更新世坡洪积相及残积相的粘性土、砂性土、粘性土混砂砾和砂砾混粘性土,残留厚度受基底起伏控制,在近岛侧残留厚度相对较薄,中部残留厚度较大。

(3)水文条件。

2座桥梁所处海域的潮汐主要受东海前进潮波控制,潮汐类型属非正规半日浅海潮型,每个潮汐日有2次涨潮和2次落潮的过程。杭州湾为典型的喇叭状强潮河口湾,杭州湾跨海大桥在湾内,潮差大于处于湾口的东海大桥。杭州湾跨海大桥(乍浦站)20年一遇高潮位5.30 m,50年一遇极值低水位-3.56 m,实测最大潮差7.57 m,最大涨潮流速5.16 m/s,最大落潮流速4.18 m/s。

东海大桥实测最大潮差5.14 m,重现期100年一遇的高潮位为3.73 m,低潮位为-3.09 m。推算最大潮流速近3.0 m/s。

杭州湾口外波浪在向口内推进过程中是逐渐衰减的,由于舟山群岛的阻挡,外海波浪不能直接传入湾内。该海区常年以风浪为主,波周期一般为3~4 s。东海大桥(大戢山)1.5 m以上波高(1/10测波频率)出现的频率为10%,而杭州湾跨海大桥只占0.6%。

(4)气候条件。

2座桥梁均位于我国东部沿海地区,属典型的亚热带季风气候区,四季分明,季风明显,总的气候特征是温和、湿润、多雨。该地区属重大灾害天气多发地带,其中杭州湾的喇叭状地形形成的“狭管效

应”,更使该地区的气候条件尤其是风的情况变得十分复杂。桥区常年平均气温在 16°C ,极端最高气温为 $37.5\sim 39.1^{\circ}\text{C}$,极端最低气温为 $-10.6\sim -7.9^{\circ}\text{C}$;平均年降水量 $1\,100\sim 1\,294.6\text{ mm}$,年降水日数为134 d,降雪日数为5 d;实测最大风速 35.0 m/s (风向NNE),一年中,风力大于7级的天数65.8 d,风力大于8级的天数30 d,风力大于9级的天数约为3 d。

1.2 工程施工特点

(1)工程规模大、施工作业面分散。

东海大桥Ⅳ标段为3座独立的辅通航孔桥,每座桥梁相距6 km,合计钢筋混凝土用量 15.4 万余m^3 ;东海大桥Ⅵ标(颗珠山大桥)分为主桥、东引桥和西引桥,距东海大桥Ⅳ标最近处6 km,钢筋混凝土用量总计 10.6 万余m^3 ;杭州湾跨海大桥Ⅳ标分B14~B27、D1~D10、D15~D24(墩)3个施工区段,最远相距12 km,承台、墩身钢筋混凝土用量共 7.7 万余m^3 。

(2)自然条件差、有效施工作业天数少。

2座跨海大桥施工,受台风、雷暴、大雾、高温、严寒气候及潮汐等恶劣自然条件的影响,有效作业时间短。东海大桥年平均有效作业天数为180 d左右,杭州湾跨海大桥Ⅳ标年平均有效作业天数为160 d。

(3)施工组织难度大。

2座跨海大桥工程量大,施工作业面分散,水上作业船舶多,且部分处于航道区域,来往船只频繁,又受自然条件限制,有效作业天数少,施工组织难度大。

(4)技术含量高,施工工艺复杂。

2座桥梁设计使用寿命均为100年。海上工程建设,并无经验可借鉴。海上基础施工、海上桥梁的防腐蚀、海工高性能混凝土施工、海上施工测量以及连续箱梁和斜拉桥大悬臂施工状态的抗风稳定等都是需要研究的新课题。

(5)不确定因素多,安全风险大。

东海大桥和杭州湾跨海大桥施工水域开阔,自然条件恶劣,大型船舶群联合作业,施工作业面分散,不确定因素多,施工安全风险大。

2 施工部署

2.1 总体施工思路

(1)制订施工方案时要尽可能减少水上作业时间,变水上施工为陆上施工。

(2)搭设大型生产生活用海上固定式工作平台,改善海上工作环境。

(3)适应海上施工环境,适当加大投入,确保工

程质量和进度。

(4)大力推广采用新工艺、新技术、新材料、新设备。

(5)根据具体标段工程和海上施工特点,组建年轻化、专业化的项目领导班子并健全质量安全保证体系。项目班子除了要求年轻化、专业化外,还应加强船机管理、安全质量管理和通讯信息管理力量。

2.2 主要工程项目施工方案

2.2.1 搭设固定式海上桥梁施工平台

工作平台主要供基桩成孔使用,拆除部分钻孔平台后继续作为上下部构造施工用平台。平台功能设计时,既要考虑钻机、发电机、起重设备、泥浆循环系统、堆放部分生产用材等生产用场地的布置,还要考虑住房、生活用水储存等生活用地的需要。

根据设备进场时间和工程进度安排,东海大桥Ⅳ标和Ⅵ标的工作平台搭设方法有所不同。Ⅳ标钻孔工作平台采用临时钢管桩作为承重结构,平台横联和上部结构用浮吊安装。而Ⅵ标钻孔工作平台采用海桩8号打桩船直接插打大直径($\phi 320\text{ cm}$)钢护筒,并作为平台主要承重构件的施工。钢护筒既作为钻孔桩施工措施,又作为钻孔施工平台的主要承重结构。

2.2.2 钻孔灌注桩施工

采用全液压转盘式钻机和冲击反循环钻机进行摩擦桩和嵌岩桩的施工。淡水泥浆循环采用由旋流除渣器等组成的反循环封闭系统。钢筋笼采用等强直螺纹连接工艺,用“靠模法”分节段在后场制作。基桩成孔后,钢筋笼用船运至平台再用吊机拼装入孔。成桩用水下混凝土,东海大桥Ⅳ标采用大型水上拌和船泵送浇注,而Ⅵ标除了10号主墩采用在平台上设置拌和站外,其余各墩均通过栈桥由陆上拌和站供应。

2.2.3 打入钢管桩施工

采用海桩8号打桩船及拖轮、锚艇、驳船等配套船机设备进行打入钢管桩施工。钢管桩测量定位采用GPS—RTK测量定位系统。海桩8号打桩船原配D150柴油锤和吊钟式替打,在试桩初期发现施打困难。后经大量研究,改吊钟式替打为套筒式替打,减小了施打能量消耗,提高了沉桩能量传递效率和替打使用周期。新型替打配D180柴油锤,大大提高了沉桩施工效率。

2.2.4 承台施工

(1)套箱施工。

承台以基桩类型分,有打入桩承台和钻孔桩承台;以结构形状分,有圆形、方形和长方形。这几乎包

括了2座桥梁所有承台的结构型式,而且都是高桩承台,都用套箱法施工。

套箱一般由侧板、底板、支承及支撑系统等部分组成。设计工况与内河承台施工用套箱一样,但控制荷载往往是波流荷载。验算套箱强度刚度时按20年一遇风暴潮波流荷载考虑。套箱底标高根据承台底面位置标高加上封底厚度确定。确定套箱顶标高时,套箱内无水施工条件按2年一遇($H=1\%$ 测波频率波浪高度+设计高水位)水位考虑。

杭州湾跨海大桥Ⅳ标系钢管桩承台,群桩基础有12根和10根基桩2种型式,相应承台直径为13.00 m和12.00 m。承台底标高为0.00 m。承台施工采用内设支承骨架的圆形单壁钢套箱。钢套箱直径13 m、高6.5 m、重70 t(12根桩承台),在工厂加工制作,用200 t浮吊整体起吊直接支承在钢管桩顶部。

东海大桥港桥连接段颗珠山大桥主塔是钻孔灌注桩基础,分离式承台用系梁相连。单个承台设14根直径为2.5~3.0 m的变直径钻孔灌注桩。承台底标高为-0.5 m。10号主墩承台采用方形双壁钢套箱施工。钢套箱壁厚2 m,内壁平面尺寸为24.15 m×24.15 m,高7 m、重375 t,在工厂加工制作,用500 t浮吊整体起吊安装。9号主墩承台采用无底双壁钢套箱就地拼装法施工。

东海大桥Ⅳ标3座副通航孔桥的9个主墩均采用2.5 m直径的钻孔灌注桩基础。K6、K12、K24等3座副通航孔桥主墩基桩根数分别为12、14、19根。高桩承台厚4 m,设计有钢结构防撞设施。承台施工采用承台与承台防撞体系一体化施工技术。套箱侧板按防撞与承台施工2种功能设计,承台施工完成后即作为桥墩永久性防撞装置,不再拆除。埋置式桁架底栏连同整个套箱支承于倒挂牛腿上,底栏既作为封底混凝土的承重结构,又与封底混凝土一起作为承台混凝土施工的承重结构。3座副通航孔桥主墩承台施工用防撞套箱重分别为450 t、470 t、570 t,在工厂整体加工制作,用500 t或1 300 t浮吊一次安装就位。

(2)承台混凝土浇注。

承台混凝土,除东海大桥Ⅶ标主要由陆上和平台上拌和站供应外,其余均由水上拌和船泵送浇注。

同内河相比,海上承台混凝土防腐措施更为重要。主要措施有2点:一是增加钢筋净保护层厚度(9 cm),施工时采用高强度塑料垫块(每 m^2 布置4块)来确保施工精度;二是使用大比例掺合料的高性

能混凝土,以提高混凝土密实度。

承台混凝土是易产生裂缝的大体积混凝土,由于高性能混凝土自收缩较大,对于具有防腐蚀要求的海上承台混凝土,必须采取更为严格有效的防裂措施,才能保证混凝土具有防腐蚀功能。一是在承台混凝土内埋设冷却水管;二是采取严格的保湿保温养护措施;三是设置大体积混凝土电脑测温系统对混凝土温度进行有效监控。

2.2.5 墩身施工

墩身几何形状均为带圆角的矩形墩身,除东海大桥Ⅳ标是空心墩外,其余都是实心墩,都采用翻模法施工。翻模有2 m×5 m和3 m×3 m 2种,每节浇注高度为5~6 m。翻模都采用大刚度结构,不设对拉螺栓。翻模面板有木质和钢板2种。

东海大桥Ⅳ标因考虑上部构造施工需要,采用塔吊作为垂直运输设备,其余均采用浮吊或吊车作为垂直运输设备。海域中墩身混凝土,由水上拌和船泵送浇注。

2.2.6 塔柱施工

颗珠山大桥2座主塔采用Doke爬模系统进行施工,塔柱内设置劲性骨架,用于塔柱钢筋的定位安装并兼作防风加固装置。

由于主塔的2个塔柱间距宽达45.8 m,为方便施工,设2部150 t·m塔吊和2部单笼施工电梯。混凝土垂直运输选用高压输送泵,最高垂直输送高度可达250 m。

2.2.7 连续箱梁施工

颗珠山大桥西引桥50 m箱梁采用支架现浇施工,东引桥50 m箱梁采用移动模架逐孔浇注。

东海大桥Ⅳ标3座副通航孔箱梁,塔吊作为垂直运输设备,水上拌和船泵送入模或水上拌和船供应混凝土,卧式泵通过附着式泵管泵送入模浇注。

0号块箱梁采用钢管支架一次立模浇注。箱梁悬浇临时锚固装置也设在钢管支架上。边孔直线段也采用钢管支架立模现浇。为了缩短直线段长度,使支架能直接在边墩承台上搭设,以降低海上支架搭设难度,合拢程序为先中孔后边孔,以便边孔箱梁可以利用挂篮多浇一块非对称梁段。因此,在边孔合拢段施工时,除同中孔合拢段一样设劲性支撑架和临时锚索外,在直线段支架上还设置纵向滑移装置。合拢段在挂篮底模改装的吊架上浇注。其他梁段采用自行研制的菱形和三角形挂篮对称悬臂浇注。

2.2.8 过渡孔箱梁预制安装

颗珠山大桥主桥小洋山侧跨径 50 m 的过渡孔箱梁,既不能直接用移动模架施工,又不宜采用在深海中搭设支架立模现浇的方法,决定该孔箱梁在码头预制,用“奋进号”起重船(2 200 t)整体安装。

2.2.9 斜拉桥叠合梁施工

(1)钢主梁施工。

颗珠山大桥钢主梁为框架式结构,由箱形钢主梁、工字形钢横梁、小纵梁组成。框架钢梁由专业化工厂加工制作,用船运至现场安装。0 号块钢梁采用 500 t 浮吊在支架上安装,钢梁与塔柱、支架临时固接;标准梁段采用自制悬臂吊机对称拼装;尾梁段钢梁采用 500 t 浮吊在托架上安装。边跨合拢段采用尾梁段(含过渡孔箱梁压重)预偏的强制合拢方案,中跨合拢段采用低温自然合拢方案。

(2)桥面板预制安装。

斜拉桥桥面板在预制场提前预制(存放龄期 5 个月),现场用自制龙门吊安装。桥面板内设纵横向预应力束。为了防止桥面开裂,还采取了在桥面板湿接缝混凝土浇注前反顶钢梁的措施。

3 一点体会

跨海工程与内河工程最大的不同,是建设环境的不同。在波涛汹涌的海洋环境里要安全、优质、顺利地完成工程施工任务,需要方方面面的条件和全体参建人员的共同努力。这些“需要”归结起来主要有以下几点。

(1)需要加大投入。

工欲善其事,必先利其器。要战胜恶劣的自然环境,没有手段不行。路桥建设投入 1 亿多元巨资,购置了打桩船、水上拌和船等大型水上施工设备。施工高峰期仅东海大桥Ⅳ标,水上施工船舶多达 40 余艘,船机使用费占总成本 44.9%。杭州湾跨海大桥Ⅳ标船机使用费占总成本高达 55%。海上施工用材也因工艺不同而远大于内河桥梁施工。经统计,东海大桥Ⅳ标施工钢材与结构钢材的比例高达 1.07。

(2)需要加强管理。

管理出效益,管理是生产力,这已是共识。但海上施工更需要管理,因为海上施工风险更大。实践证明,只要管理工作真正做到科学严密、精细到家,作业面分散、自然环境恶劣等困难还是可以克服的。东海大桥Ⅳ标,整个施工过程没有发生过一次重大安全 and 质量事故,提前 3 个月完成了任务。从表 1 主要工程项目平均施工周期可以看到,即使在困难的条件下,

只要通过努力,还是可以达到比较先进的水平的。

表 1 主要工程项目平均施工周期

序号	项 目	平均施工周期	说 明
1	钻孔桩	16 d	(1)序号 1~4 资料取自东海大桥Ⅳ标,序号 5~6 资料取自东海大桥Ⅶ标,序号 7 资料取自杭州湾跨海大桥Ⅳ标。 (2)钻孔桩施工周期指基桩正常施工的平均周期。 (3)承台施工周期包括钻孔平台拆除。 (4)加劲梁悬拼周期包括湿接缝施工。 (5)打桩船平均每天施打桩数是指改进替打以后,打桩船实际作业天数内平均每天施打的钢管桩根数。
2	承台	81 d	
3	箱梁 0 号块	60 d	
4	梁段对称悬浇	9 d	
5	塔身	0.64 m/d	
6	钢加劲梁悬拼	7 d	
7	打入钢管桩	7.5 根/d	

(3)需要创新精神。

科技是生产力,但只有创新才能提高科学技术水平。在中国,跨海工程建设本身就是史无前例的创新。没有创新精神,跨海工程建设就不可能顺利,因为没有现成的规范、没有现成的经验可参考。路桥建设在 2 座跨海大桥的施工中,就是以这种创新精神奋战了 1 000 多个日日夜夜,顺利提前完成了任务,并取得了一系列的丰硕成果。直螺纹连接技术在大直径钢筋笼上应用,解决了 100 余 m 长钢筋笼的安装困难,缩短了安装时间,减少了成桩施工风险;在打入桩施工中,在锤击功率不变的条件下,通过改进替打,降低冲击能量消耗,大大提高了打桩效率;海上桥梁承台与承台防撞设施一体化施工技术,在由北京市科委组织召开的科技成果鉴定会上,鉴定委员会专家一致认为该技术成果达到国际先进水平;固定式海上桥梁施工平台设计与施工技术、海上桥梁基础施工技术,也被北京市科委组织召开的科技成果鉴定会评为国内先进水平。

4 结语

现在东海大桥犹如一条钢铁长龙,为洋山深水港成为东方第一大港,正在发挥着巨大作用。不久的将来,杭州湾跨海大桥也将以世界最长的跨海大桥飞架在具有世界闻名涌潮景观的杭州湾上,发挥它巨大的社会效益。目前已开工的浙江舟山大陆连岛工程,路桥建设也是主要参建单位之一。近几年国内将陆续建设青岛湾大桥、珠港澳大桥、杭州湾三通道等一大批海上桥梁工程,路桥建设正带着成功的经验和饱满的信心准备迎接新的挑战。