

大体积桥墩防撞钢套箱施工仿真分析及关键技术

包龙生¹,陶天阳¹,张远宝¹,赵同宇²

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168; 2. 辽阳市政设施管理处,辽宁 辽阳 111000)

摘要 目的 针对通航水域桥墩防撞问题,对防撞钢套箱的设计与施工展开优化研究,提出大体积防撞钢套箱设计、拼装、整体下放、承台施工重难点工序的技术革新及重难点控制措施。方法 通过研究通航水域桥墩防撞钢套箱施工全过程和相似工程的施工经验发现,防撞钢套箱的重负荷、拼装及下放精度有要求高、施工安全风险大等特点,笔者运用有限元软件对防撞钢套箱施工过程中的重难点进行有限元数值分析。结果 有限元分析结果内支撑最大组合应力为 53.3 MPa,内支撑最大轴力 904 kN,拼装平台最大组合应力 137 MPa,龙门吊承重梁最大应力为 127.2 MPa,承重梁最大剪应力为 39.6 MPa,承重梁最大变形为 7.9 mm。结论 防撞钢套箱施工各关键点均能满足套箱设计、拼装、整体下放的施工设计要求。

关键词 防撞钢套箱;设计;拼装;整体下放;承台施工

中图分类号 U445.55⁺6

文献标志码 A

Simulation Analysis and Key Technology of Crash-proof Steel Box of Large Volume Bridge Pier

BAO Longsheng¹,TAO Tianyang¹,ZHANG Yuanbao¹,ZHAO Tongyu²

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoyang Municipal Facilities Management Office, Liaoyang, China, 111000)

Abstract: Aiming at the problem of anti-collision of bridge piers in navigable waters, the optimization research on the design and construction of anti-collision steel casing is carried out, and the technical innovation and control measures of the design, assembling, overall lowering and construction key and difficult procedures of large-volume anti-collision steel casing are put forward. Through research on navigable waters anti-collision pier steel box construction process and construction of similar engineering experience found anti-collision steel box set of heavy load, assembling and has high precision, great construction safety risk, so the authors using the finite element software to crash on steel box construction difficult point in the process of finite element numerical

收稿日期:2018-10-12

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项基金项目(2018YFC0809600,2018YFC0809606);辽宁省重点研发计划指导计划基金项目(2018416028);沈阳市建委城乡系统科研项目(201804)

作者简介:包龙生(1971—),男,教授,博士,主要从事桥梁及道路工程等方面研究。

analysis. The analysis results support that the maximum combined stress is 53.3 MPa, within the maximum axial force 904 kN, assembling platform maximum combined stress is 137 MPa, gantry crane bearing beam bearing beam maximum stress is 127.2 MPa, maximum shear stress is 39.6 MPa, bearing beam maximum deformation is 7.9 mm. The results can meet the design requirements of the design, assembly, and putting down construction. According to the analysis and calculation results, the optimal construction plan is determined to ensure that the design and construction of the anti-collision steel case meet the construction requirements at all the key point.

Key words: anti-collision steel box; design; assemble; putting down; bearing platform construction

近年来,船撞桥事故在世界上发生的频率越来越高^[1-2].为减少事故损失,桥墩防撞装置得到越来越多学者关注和研究^[3-6].笔者针对通航水域桥墩,将防撞设施与施工承台的钢套箱结合起来,组成双壁防撞钢套箱结构,并对防撞钢套箱的设计与施工展开优化研究,提出大体积防撞钢套箱设计、拼装、整体下放、承台施工重难点工序的技术革新要点及重难点控制措施.结合飞云江跨海特大桥的实际情况,运用有限元软件对防撞钢套箱施工过程中的重难点进行有限元数值分析.通过在拼装下放过程中进行测量复核定位,有效地降低了施工难度,提升拼装搭接精度.并从搭设施工平台、套箱的拼装及下放、

承台施工等方面总结出了一套更成熟的施工工艺,为今后类似工程提供借鉴.

1 工程概况

飞云江跨海特大桥跨度4 816 m,桥梁跨径组成为(35 m + 60 m + 35 m) + 3 × 45 m + 15 × 50 m + (50 m + 110 m + 380 m + 110 m + 50 m + 19 × 50 m + 35 × 30 m + 29 m + 25 m + (30 m + 40 m + 30 m) + 4 × 30 m(见图1).其中50 m、45 m、30 m + 40 m + 30 m跨径为等截面连续梁,35 m + 60 m + 35 m为变截面连续梁,50 m + 110 m + 380 m + 110 m + 50 m跨径为通航孔斜拉桥.

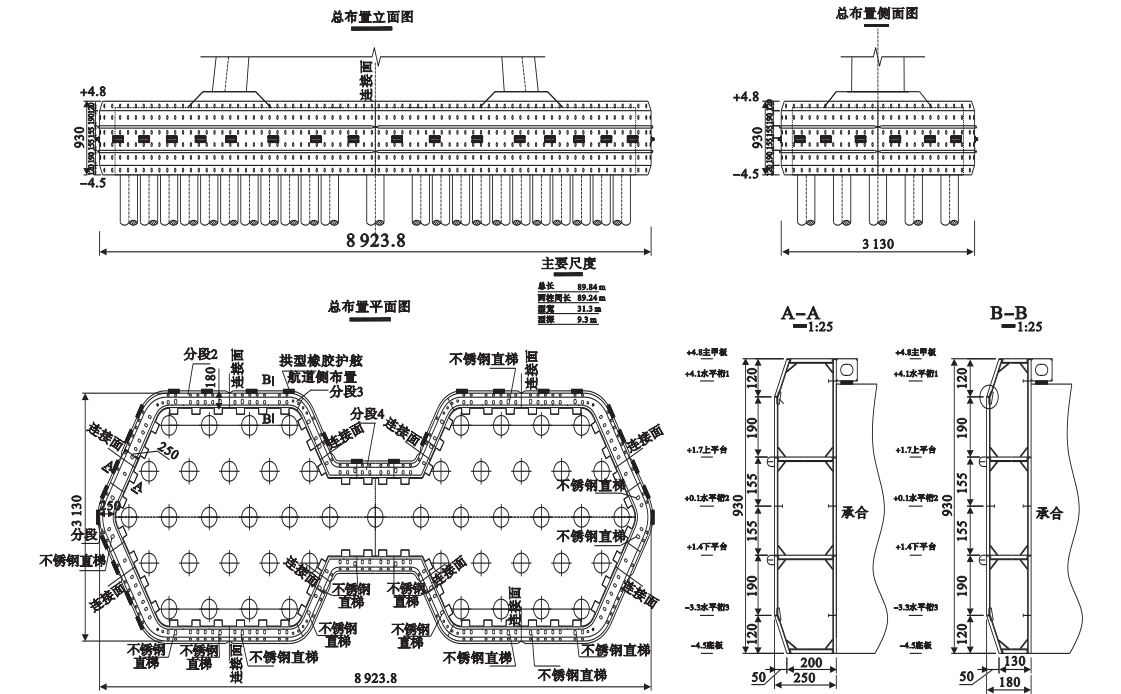


图1 主墩防撞套箱平面立面图

Fig.1 Flat surface elevation of main pier

主墩承台的设计采用哑铃型结构. 承台长 84. 238 m, 宽 27. 7 m, 高 6 m. 桥梁所在水域属于通航水域且过往船舶众多吨位较大, 桥墩有防撞要求, 需要在主墩周围设置钢套箱提高防撞性能^[7-9]. 同时, 将防撞设施与施工承台的钢套箱结合起来, 组成双壁防撞钢套箱结构, 除起防撞作用外, 兼具 23#、24#主墩承台施工的挡水围堰和模板作用.

2 防撞墙钢套箱设计

2.1 防撞套箱构造

(1) 底板

套箱采用侧板包底板的形式, 套箱底板面板采用 6 mm 厚钢板, 桁架作为承重结构. 主桁架、面板间采用连续满焊, 次桁架、加劲肋与面板采用间断焊的焊接方式^[10-11].

(2) 底板提吊系统

封底混凝土浇注阶段, 底板系统通过提吊系统将荷载传递给钢护筒. 钢护筒顶部 60 cm 高度范围内, 在钢护筒外面贴焊 12 mm 钢板, 里面焊接 20 mm 厚环板和加劲板, 在环板上焊接连接型钢进行局部加强.

(3) 增大封底混凝土与钢护筒握裹力设施

为提高封底混凝土承载能力, 在钢护筒周边设置抗剪钢筋, 以增加封底混凝土与钢护筒之间握裹力^[12]. 每根钢护筒周边设置 10 根 $\Phi 32$ 剪力钢筋, 浇注封底混凝土前, 剪力钢筋点焊在水面以上钢护筒上进行固定; 封底混凝土施工完毕, 套箱内抽水后, 剪力钢筋双面连续满焊焊接在钢护筒伸入承台 15 cm 高度范围内外壁上.

(4) 内支撑系统

在套箱顶部设置(逻辑不同)一层内支撑, 采用 $\Phi 1\ 000 \times 10$ mm 钢管, 在套箱吊装前焊接于套箱内侧板, 采用连续满焊, 周边加焊加劲板. 总体模型见图 2, 内支撑组合应力图见图 3, 内支撑轴力图见图 4. 从内支撑组合应力图和轴力图分析可知, 内支撑最大受力部位位于钢套箱中间部位两个短支撑上,

内支撑最大组合应力为 53. 3 MPa, 内支撑最大轴力 904 kN, 均满足施工设计要求.

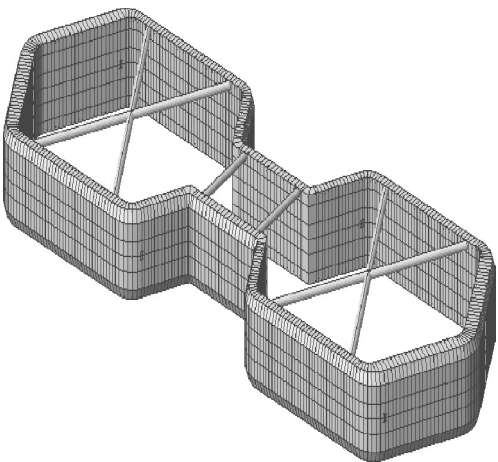


图 2 套箱内支撑模型图
Fig. 2 Supporting model diagram

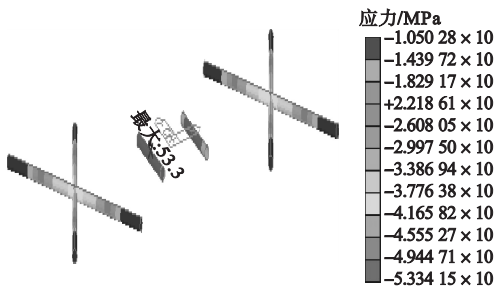


图 3 内支撑组合应力图
Fig. 3 Internal support combined stress plot

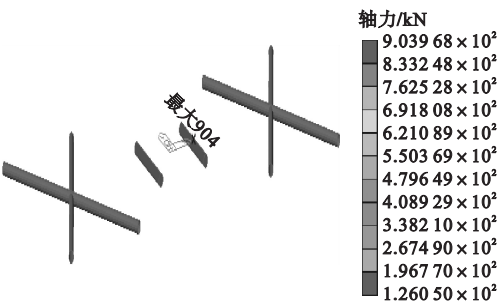


图 4 内支撑轴力图
Fig. 4 Internal support axial force diagram

2.2 防撞套箱拼装及起吊下放设计

(1) 底板

底板整体为桁架结构, 由主次桁架、横竖肋及钢底板组成, 钢底板焊接在底桁架的下面, 并使开孔位置与实测的钻孔灌注桩坐标精准对应. 底板总重 227. 6 t. 在底板制作过

程中,主桁架间距可根据实际的开孔位置进行调整,以便主桁架上吊杆能够锚固在牛腿,桁架高 1.67 m.牛腿大样如图 5 所示.

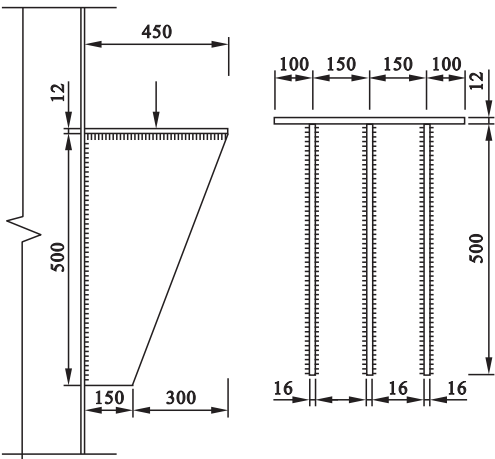


图 5 牛腿大样图

Fig. 5 Detail drawing of bracket

牛腿腹板焊缝计算时,腹板焊缝设计厚度 $\geq 14\text{ mm}$,焊缝计算长度 $l_w = l - 2h_f = 2\ 832\text{ mm}$,焊缝有效截面积 $A = h_e l_w = 27\ 753.6\text{ mm}^2$.计算得 $\tau_f = 21.3\text{ MPa} \leq f_f^w = 160\text{ MPa}$,满足承载力要求.

(2) 拼装平台

钢套箱运至现场后需要在搭设好的拼装平台上进行拼装,拼装平台利用钢护筒以及辅助钢管桩组成承重结构.在拆除主墩钻孔平台过程中,插打辅助钢管桩.在钢管和钢护筒上焊接牛腿,采用 2I45 型钢作为拼装平台承重梁,2I45 型钢与牛腿之间点焊连接,拼装平台顶标高为 +4.0 m,侧板分段共计四块,应力计算结果如图 6 所示.

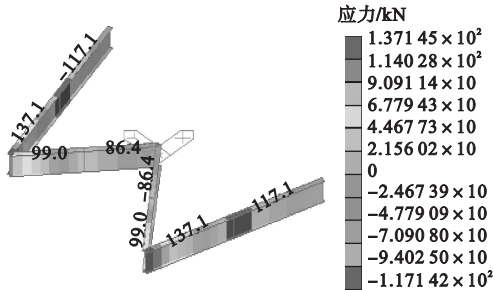


图 6 拼装平台应力图

Fig. 6 The assembly platform stress plot

套箱拼装平台应力分配见表 1.从表中可以看出,侧板的四个分段质量分别为 71.37 t、83.42 t、76.8 t 和 73.44 t,分配梁最大应力为 137.1 MPa,满足施工设计要求.

表 1 套箱拼装平台应力分配表

Table 1 Box assembly platform stress distribution table

数据块段	质量/t	分配梁数量	分配梁最大应力/MPa
分段 1	71.37	4	137.1
分段 2	83.42	5	112.2
分段 3	76.8	5	—
分段 4	73.44	5	—

(3) 起吊下放

起吊下放系统由千斤顶和钢绞线、吊点纵横梁、锚梁组成,共对称布置 8 个吊点.吊点锚梁与钢套箱侧板采用四周围焊进行拼接,构件范围内钢套箱侧板角钢与 T 型加筋肋需割除,钢套箱侧板角钢与 T 型加劲肋与锚梁构件接触部位连续满焊连接.

3 防撞钢套箱施工

3.1 钢套箱的加工及运输

(1) 基桩钢护筒偏位测量

偏位测量包括初始测量和精度测量,初测结果可作为套箱初加工的依据,保证足够的加工精度;精确测量可为套箱主桁架和底板加工预留孔最终位置提供参考.

(2) 防撞钢套箱加工

钢套箱由工厂加工成型后,根据护筒精测数据用全站仪对主桁架位置及底板开孔进行检测和修正.加工好的套箱经检验合格后进行预拼,以发现制作过程中可能的错误、过大的误差、变形以及可能影响到现场安装的缺陷,及时对其修正和调整.套箱预拼装满足要求后立即装船运往施工现场.

(3) 防撞钢套箱运输

主墩防撞钢套箱按照设计图纸加工成块体,分块运至现场组拼后整体下放.主墩钢套

箱共分为 12 个块段,其中最重分块为分段 2,质量 83.42 t,其余分段质量在 70 t 左右。

3.2 钢套箱拼装

(1) 拼装顺序

桩基施工完毕,拆除桩基施工平台,搭设钢套箱拼装工作平台,在拼装工作平台上划出钢套箱平面轮廓线,然后逐块拼装钢套箱。拼装时从上游开始,以钢套箱横桥向结构中心线左右对称拼装,最后在下游圆弧段合龙^[13]。钢套箱吊放在拼装平台上对齐位置后应采取措施临时固定,以免相邻块段拼装时发生碰撞偏位。相邻块段间调整对接好后安装橡胶垫片并进行螺栓的紧固工作。全部块段合龙后进行结构整体尺寸检验,确认结构尺寸符合要求后对称终拧螺栓。

(2) 测量复核

钢套箱吊运至拼装平台之前,首先对套箱分段进行编号,再由测量组在拼装平台上预先测放出钢套箱大样,对单块的编号进行复核,防止误拼。

(3) 吊装钢套箱

每块套箱侧板运至现场后,由龙门吊起吊安装。套箱各块段在装船时按照拼装顺序装船,驳船到达施工现场后驶入龙门轨道延伸段区域,龙门吊吊运钢套箱安放在指定位置。各块段起吊顺序根据安装顺序合理安排,龙门吊起吊前进行各项指标检查。有限元模拟结果见图 7~图 9。

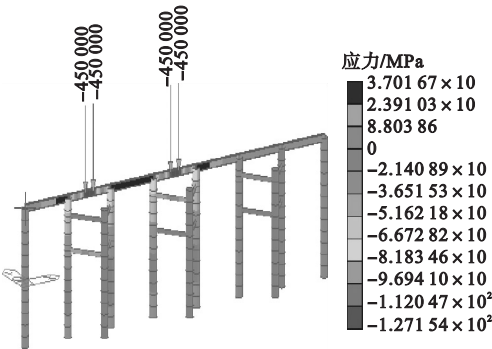


图 7 承重梁应力图

Fig. 7 Bearing beam stress plot

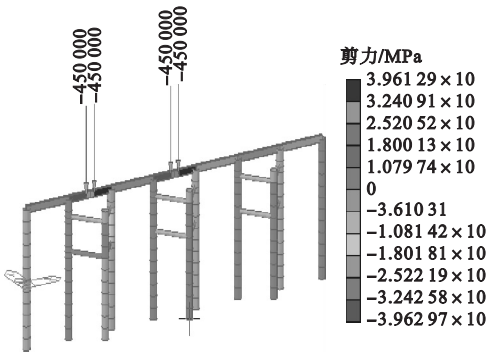


图 8 承重梁剪力图

Fig. 8 Bearing beam shear force diagram

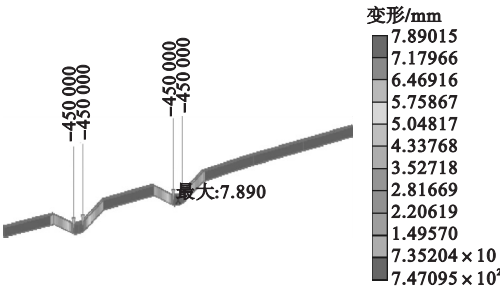


图 9 承重梁变形图

Fig. 9 Bearing beam deformation diagram

本工程龙门吊采用的钢材为 Q235;钢材的允许弯曲应力 $[\sigma] = 145 \text{ MPa}$,临时结构容许应力可提高 1.3 倍,即 $1.3[\sigma] = 188.5 \text{ MPa}$;Q235 钢材的允许剪应力 $[\tau] = 110.5 \text{ MPa}$;容许挠度按 $L/400$ 计算确定。从图 7 可知承重梁最大应力为 $127.2 \text{ MPa} < 188.5 \text{ MPa}$,从图 8 可知承重梁最大剪应力为 $39.6 \text{ MPa} < 110.5 \text{ MPa}$,从图 9 可知承重梁最大变形为 $7.9 \text{ mm} < L/400 = 16.25 \text{ mm}$,均满足施工设计要求。

3.3 钢套箱下放及固定

(1) 施工工艺流程

流程主要分六部,启动控制系统,收紧所有钢绞线,使其受力均匀一致;进行试吊,检查各个起吊构件;拆除阻碍下放的机构;使用千斤顶将钢套箱平稳下放,直至钢绞线自锁;提升千斤顶,到位后,钢绞线开锁;重复上述操作,直到钢套箱入水后收紧钢绞线^[14]。

(2) 初定位及试吊

测量人员在下沉前做好套箱定位工作。

定位装置分下定位和上定位两部分.下定位即套箱底板,通过精确开设底板上预留孔的大小,使套箱底部准确定位.上定位即在钢护筒顶部设置限位装置,分别对套箱的横向和纵向进行定位^[15].在套箱下放时可控制好每个吊点同步,并且在每根吊杆上做好刻度记号.一切准备就绪之后,均匀缓慢提升套箱30 cm,然后测量平面位置、轴线位置以及垂直度,为后续的下放做好基础准备工作;待套箱稳定后检查千斤顶下放系统、吊点纵梁、横梁、吊点锚梁变形情况,如果没有问题则准备进入下一道工序.

(3) 拆除拼装平台

试吊完成后,保持钢套箱悬空,立即安排工作人员移除侧板和底板拼装平台^[16].底板拼装平台的牛腿均焊接的钢护筒内壁,采用反压牛腿结构.侧板拼装平台利用2145做承重梁,一端支撑在辅助钢管桩的牛腿上,另一端支撑在钢护筒内壁的牛腿上,套箱起吊后,利用龙门吊和履带吊从套箱外抽出承重梁.

(4) 正式起吊下放

在试吊时检查各构件的运行情况,如果运行情况良好,立即准备拆除拼装平台.在千斤顶下放系统同一标高标出刻度,以利于各个吊点下沉量相同,确保各个吊点的受力均匀性.要求每次逐步分级下放钢套箱,可以设置为50 cm为一级.测量人员每一级都要复测套箱的平面位置、轴线及垂直度.钢套箱入水之后应缓慢下放,达到设计标高后微调,精准定位后准备下道工序.

(5) 底板吊杆螺栓施拧及检查

每根吊杆下端螺母应提前焊接在底板桁架吊点,并且要注意焊接牢固.安装时,吊杆下端应露出双螺母不少于20 cm.锚垫板应先焊接在牛腿上,吊杆上端穿过牛腿及上端锚垫板,待套箱下放到位后,检查套箱平面位置符合要求后及时收紧悬吊系统并锚固.

(6) 底板堵漏

套箱底板采用“上堵下封”的方式进行,

下方用封堵板,上方使用砂袋^[17].在拼装底板时,提前沿钢护筒下放一内径为2.85 m、壁厚1 cm的钢板环,使用4根 $\Phi 16$ 钢筋将钢板环悬吊在底板桁架上,并高出桁架3~4 m,钢板环随套箱同步下放,钢套箱下放到位后,提起钢板环上的4根悬吊钢筋并焊接在钢护筒上,使钢板环紧贴套箱底板,完成“下封”作业;提前准备直径10 cm、长约9 m的长条形砂袋,潜水员在每个护筒周围将砂袋安装到位并收紧,并将袋口固定,完成“封堵”作业.

3.4 钢套箱施工注意事项

在钢套箱底板加工前,应实测护筒的平面位置和垂直度,底板加工时,护筒周边的底板龙骨按照测定位置进行适当调整,护筒上导向架以实测护筒平面位置和垂直度为依据分别进行设置.钢套箱加工需加强过程控制,通过控制以确保每一构件的精度达到整体精度要求^[18-20].在施工过程中应严格按照安全施工相关规范、规程执行,尤其注意水中作业安全,施工人员配带好水上安全防护用品,潜水工作业严格按规范进行,作业前注意检查潜水服、供氧设备是否完好,以确保工人安全.施工现场应设置现场专、兼职安全员加强施工管理.严禁向河中丢弃废弃物,严格按环保要求进行施工.

3.5 承台施工

主塔承台采用哑铃型承台,横向为尖端,并倒以圆角.承台横桥向84.238 m,顺桥向宽27.7 m,厚6 m,中间系梁宽10 m,单个承台方量10 664.2 m³,属于大尺寸、大体积混凝土.承台下采用49根变截面钻孔灌注桩,按梅花形布置,桩基钢筋伸入承台10 cm;承台左右两个哑铃体上各设一个塔座,塔座高2 m,塔座顶横桥向宽8.5 m,顺桥向宽13.5 m,塔座底横桥向宽13.5 m,顺桥向宽17.5 m.

3.5.1 承台施工

(1) 整体思路

由于承台方量大、面积大,为确保施工组

织有效衔接,确保大体积承台混凝土的施工质量,主墩承台竖向分2层(2.5 m、3.5 m)、平面5个区域进行浇筑,即在系梁中间设置1个2 m宽的后浇段,整个承台分成3个区域进行施工,后浇段两端设收口网。

(2) 钢筋下料及安装

桩顶混凝土处理完成后,报现场监理检验,合格后开始绑扎承台钢筋。钢筋在加工场内制作成半成品,现场按混凝土浇筑工艺分两次绑扎到位。承台作为水下结构物,要求承台钢筋保护层厚度不低于设计要求,因此必须考虑在钢筋下料过程中可能存在的偏差,保证钢筋保护层满足设计要求。因为承台钢筋用量大,需设必要的架立钢筋和劲性钢支撑。架立钢筋作为上部钢筋的支撑结构,应具有一定的刚度,并将其作为冷却管的支撑架。

塔座预埋筋外露部分应错开接头,并安装塑料保护套,防止承台混凝土施工时破坏丝口。由于承台分2层浇筑,先绑扎第一层钢筋,第一层混凝土浇筑完成后,准备第二层钢筋施工。

(3) 承台大体积混凝土施工

承台混凝土由自建拌合站供应,由两台混凝土泵(HBT-80)泵送入模。混凝土泵布置在侧平台上,通过泵管将混凝土泵送入模。一台70 t履带吊及100 t龙门吊作为现场辅助吊装设备。

3.5.2 后浇段施工

在左右两幅承台施工过程中,系梁两端的收口网已经安装完成,先绑扎后浇段系梁钢筋,将混凝土连接面洒水湿润,将系梁后浇段(6 m)一次浇筑成型。

充分利用收口网适应分段浇注混凝土,可作为永久模板,无须拆模或造接缝而作准备便可进行下一次浇注混凝土的特点,实现快速保质保量完成后浇段混凝土施工的目的。浇筑第一层时应将竖向施工缝凿毛并采用洁净水冲洗干净;浇筑第二层时将水平施工缝凿毛并采用洁净水冲洗干净。

施工工艺流程:施工准备→绑扎钢筋→裁剪收口网→安装收口网→固定收口网→浇筑混凝土。该过程与左右幅承台钢筋绑扎同步施工,U型骨架朝向承台方向。

3.5.3 施工要点

预埋件的设置也要严格要求,承台预埋件主要包括塔吊安装所需的预埋件、墩身施工所需预埋件等。在施工过程中,预埋前均应设置安装各预埋件相应的定位框,若定位框与承台钢筋发生重叠,应轻微调节承台钢筋,直至预埋构件能够在准确的位置预埋。

混凝土的养护应采用“内散外蓄”的办法。在承台混凝土的施工过程中,可用篷布盖在钢套箱的顶部作业平台上,其它如洒水、通风、测温、冷却管等施工步骤应严格按设计图纸及相关规范执行。必要时,将套箱侧板在承台高度方向段采取措施进行保温处理,以免承台侧面温差太大。待混凝土浇筑完毕终凝之后,立即蓄热保温养护,上表面应用淡水蓄水养护,蓄水深度不低于30 cm,使混凝土表面水分的流失得到有效缓解。另外为了防止混凝土表面开裂,还应控制混凝土表面与内部中心温度及与外界气温的差值。

4 结 论

(1)运用软件对防撞钢套箱施工过程进行有限元数值分析,内支撑最大组合应力为53.3 MPa,内支撑最大轴力904 kN,拼装平台最大组合应力137 MPa,龙门吊承重梁最大应力为127.2 MPa,承重梁最大剪应力为39.6 MPa,承重梁最大变形为7.9 mm,各部分材料和设备的整体稳定性较好,在极限荷载作用下仍能保持稳定,从各方面保障了钢套箱在施工过程中的安全性和可靠性。

(2)笔者结合飞云江跨海特大桥的实际情况,通过在拼装下放过程中进行测量复核定位,有效地降低施工难度,提升拼装搭接精度。并从搭设施工平台、套箱的拼装及下放、承台施工等方面总结出一套更成熟的施工工

艺,为今后类似工程提供借鉴.

参考文献

- [1] 郭广银. 金塘大桥东通航孔桥主墩防撞钢套箱的设计与施工[J]. 广东建材, 2008(1): 107-109.
(GUO Guangyin. Design and construction of anti-collision steel box for main pier of east navigable pass bridge of jintang bridge [J]. Guangdong building materials, 2008(1): 107-109.)
- [2] 刘华, 唐斌华, 李永重, 等. 椒江二桥主墩防撞钢套箱施工技术[J]. 中外公路, 2012, 32(2): 173-175.
(LIU Hua, TANG Binhua, LI Yongzhong, et al. Construction technology of anti-collision steel box on main pier of jiaojiang no. 2 bridge [J]. Sino-foreign highway, 2012, 32(2): 173-175.)
- [3] 郭广银. 金塘大桥东通航孔桥主墩防撞钢套箱的设计与施工[J]. 广东建材, 2008(1): 107-109.
(GUO Guangyin. Design and construction of anti-collision steel box for main pier of east navigable pass bridge of jintang bridge [J]. Guangdong building materials, 2008(1): 107-109.)
- [4] 刘华, 唐斌华, 李永重, 等. 椒江二桥主墩防撞钢套箱施工技术[J]. 中外公路, 2012, 32(2): 173-175.
(LIU Hua, TANG Binhua, LI Yongzhong, et al. Construction technology of anti-collision steel box on main pier of jiaojiang no. 2 bridge [J]. Sino-foreign highway, 2012, 32(2): 173-175.)
- [5] 蔡邦国, 吴乾坤, 雷栋. 强潮差海域超大哑铃型防撞钢套箱施工关键技术[J]. 公路, 2017(6): 162-165.
(CAI Bangguo, WU Qiangkun, LEI Dong. Key technologies for construction of large dumbbell type crashed-steel casing in strong tidal range [J]. Highway, 2017(6): 162-165.)
- [6] 邱兴友, 王东伟, 王显臣, 等. 乐清湾大桥大体积防撞钢套箱围堰拼装及整体下放施工技术[J]. 公路, 2016(8): 96-102.
(QIU Xingyou, WANG Dongwei, WANG Xianchen, et al. Construction technology of assembly and integral lowering of large-volume crashed-steel cofferdams of yueqingwan bridge [J]. Highway, 2016(8): 96-102.)
- [7] 曹蛟. 黑沟特大桥主桥深水基础施工技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
(CAO Jiao. Research on deep water foundation construction technology of heigou bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.)
- [8] FUKUMOTO Y. Steel bridge construction in Japan [J]. Journal of constructional steel research, 1989, 13(2): 259-267.
- [9] INGHAM T J, RODRIGUEZ S, DONIKIAN R, et al. Seismic analysis of bridges with pile foundations [J]. Computers & structures, 1999, 72(1/3): 49-62.
- [10] BUHAN P D, CORFDIR A. Limit design of axisymmetric shells with application to cellular cofferdams [J]. Journal of engineering mechanics, 1996, 122(10): 921-929.
- [11] BANERJEE S. Design charts for double-walled cofferdams [J]. Journal of geotechnical engineering, 1993, 119(2): 214-222.
- [12] 徐海静. 大型钢围堰的施工安全监测控制 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
(XU Haijing. Construction safety monitoring and control of large steel cofferdams [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.)
- [13] HUI G. Construction diversion and flood season for tankeng hydropower station [J]. Water power, 2007, 33(1): 45-47.
- [14] 梁金华. 有限元法在斜拉桥应力分析中的应用 [J]. 交通运输研究, 2014, 42(7): 110-112.
(LIANG Jinhua. Application of finite element method in stress analysis of cable-stayed Bridges [J]. Transportation research, 2014, 42(7): 110-112.)
- [15] 殷华涛, 张海, 田翠翠. 船舶撞击桥墩防撞钢套箱有限元数值模拟分析 [J]. 北方交通, 2009(12): 33-36.
(YIN Huatao, ZHANG Hai, TIAN Cuicui. Finite element numerical simulation analysis of crash-proof steel casing on ship impact piers [J]. North traffic, 2009(12): 33-36.)
- [16] 刘晓妍. 有底单壁钢套箱围堰施工有限元仿真研究及应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.
(LIU Xiaoyan. Finite element simulation study and application of steel box cofferdam with bottom single wall [D]. Changchun: Jilin University, 2010.)
- [17] 徐成双. 双壁钢围堰技术在北江特大桥深水基础施工中的应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
(XU Chengshuang. Application of double-wall steel cofferdam technology in deep water foundation construction of beijiang bridge [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.)
- [18] SHA Y, HAO H. Nonlinear finite element analysis of barge collision with a single bridge pier [J]. Engineering structures, 2012, 41(3): 63-76.
- [19] IEMURA H, TAKAHASHI Y, SOGABE N. Innovation of high performance RC structure with unbonded bars for strong earthquakes [J]. Journal of structure mechanics and earthquake engineering, 2002(60): 283-286.
- [20] FU W Q, ZHANG C W, SUN L, et al. Experimental investigation of a base isolation system incorporating MR dampers with the high-order single step control algorithm [J]. Applied sciences, 2017(4): 344.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)