

90 m+200 m+90 m 连续刚构钢管拱桥施工 关键技术研究

柯伟鹏¹, 王 博²

(1.浙江交通集团大桥分公司, 浙江 杭州 310051; 2.浙江杭甬复线宁波一期高速公路有限公司, 浙江 宁波 315100)

摘 要: 连续梁钢管拱桥作为我国的主要桥梁结构, 具有施工便捷、安全、可靠, 施工成本造价低等多种优点, 被广泛应用于桥梁建设中。以府河特大桥 90 m+200 m+90 m 连续刚构钢管拱桥施工为例, 对大跨度连续刚构钢管拱桥施工技术进行了详细的阐述分析, 可供类似工程借鉴参考。

关键词: 连续刚构; 钢管拱桥; 关键施工技术; 研究分析

中图分类号: U448.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)09-0129-05

1 工程概况

府河特大桥桥梁全长 5833.65 m, 主桥为 90 m+200 m+90 m 三跨连续刚构系杆拱桥, 见图 1。下部结构 46、49 号边墩承台尺寸: 顺桥向×横桥向×厚度为 9.4 m×12.3 m×2.5 m, 桩基为 12 根直径 1.25 m 的钻孔桩, 顺桥三排, 横桥四排, 横桥向中心间距 3.3 m, 顺桥向中心间距 3.5 m。47、48 号主墩墩上层承台尺寸: 顺桥向×横桥向×厚度为 13.2 m×18.6 m×2.0 m, 四角采用 150 cm 的倒圆弧; 下层承台尺寸: 顺桥向×横桥向×厚度为 18.5 m×25.5 m×4.0 m, 四角以 $R=225$ cm 的圆弧倒圆; 桩基为 12 根直径 2.8 m 的钻孔桩, 顺桥三排, 横桥四排, 桩中心间距 7.0 m, 所有桩均伸入 W2 新鲜岩层。

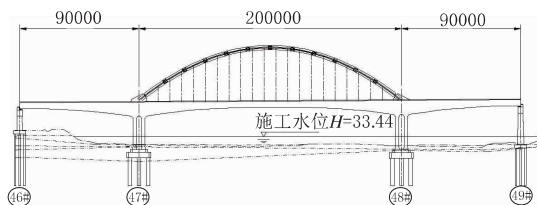


图 1 主桥桥式布置图(单位:mm)

主梁采用单箱双室变高度箱形截面预应力混凝土结构, 梁底按圆曲线变化由中支点处梁高 10.6 m 想向跨中及边支点处梁高 4.6 m 过渡。箱梁顶板宽 14.2 m, 中支点局部顶宽 16.5 m; 箱梁顶板厚 0.44~0.68 m, 中支点处局部顶板厚 1.7 m, 边支点处局部

顶板厚 0.72 m, 箱梁底宽 10.8 m, 中支点处局部底宽 13.8 m; 底板厚度 0.40~2.0 m。

箱梁设计为直腹板, 腹板厚分 0.40 m、0.55 m、0.70 m 三种, 中支点处加厚为 1.00 m, 边支点加厚 0.85 m, 箱梁腹板设直径 10 cm 通风孔。设置横隔板 8 道, 边支点厚 1.5 m, 中支点厚 2.0 m, 中孔位置厚 0.4 m, 横隔板位置设人孔。各吊杆位置共设 20 道吊点横梁, 吊点位置横梁高分 1.76 m、1.52 m、1.42 m 三种, 横梁厚 0.4 m。主梁共分 83 个梁段, 边孔梁段编号 K1'~K18'、K23', 中孔梁段编号 K1~K22。梁拱结合部 0 号梁段长 19 m, 中孔 K20 号合龙梁段长 3.0 m, 边孔 K21' 直线段长 5.75 m, 其余梁段长分 3.0 m、3.5 m、4.0 m、4.5 m 四种。悬浇梁段最重 3 430 kN。

拱肋: 拱肋计算跨度 $L=200.0$ m, 设计失高 $f=40.0$ m, 失跨比 $f/L=1:5$, 拱轴线为二次抛物线设计, 拱肋施工采用施工拱轴线制作和拼装, 高度 3.3 m, 管径 1.2 m, 壁厚为 20 mm 和 24 mm 两种(见图 2)。钢管拱设计采用平行拱双管结构, 拱肋为钢管混凝土结构, 采用等高度哑铃形截面, 截面高 3.3 m。拱肋弦管直径 1.2 m, 弦管之间用 $\delta=16$ mm 厚钢缀板连接, 弦管及缀板内填充微膨胀混凝土。两榀拱肋间横向中心距 11.9 m。拱肋钢管在场内统一加工后运至现场拼装, 每榀拱肋划分 17 运输节段, 运输节段最大长度小于 17.0 m。每榀拱肋上下弦管分别设灌注混凝土隔仓板 1 处和加劲钢箍 36 道; 腹板内设灌注混凝土隔仓板 3 处, 沿拱轴线均匀设置加劲拉筋, 加劲拉筋间距为 0.5 m。两榀拱肋之间共设 11 道横撑, 横撑均采

收稿日期: 2020-11-26

作者简介: 柯伟鹏(1990—), 男, 本科, 助理工程师, 从事道路桥梁工程施工工作。

用空间桁架,各横撑由4根 $\phi 500 \times 14$ mm主钢管和32根 $\phi 250 \times 10$ mm连接钢管组成,钢管内部不填混凝土。全桥共设40组双吊杆,纵向间距9 m。吊杆上端穿过拱肋,锚于拱肋上缘张拉底座,下端锚于吊点横梁下缘固定底座。

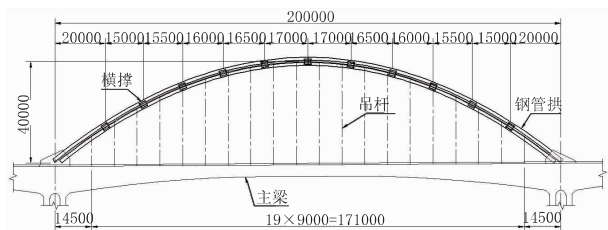


图2 拱肋结构布置图(单位:mm)

2 钢管拱桥主梁施工方案

2.1 主梁施工方案概述

主梁采用菱形挂篮进行施工,在0号块上拼装挂篮,挂篮梁段长分别有3.0 m、3.5 m、4.0 m、4.5 m四种。悬浇梁段最重3 430 kN。挂篮一次走行,底模板通过后下横梁吊挂于导梁上,采用千斤顶拽拉挂篮走行就位。

2.2 挂篮结构

挂篮主桁架的三片主桁由联结系联结形成整体;每片主桁主要包括:上下弦杆、斜撑杆和斜拉;挂篮主桁各杆件之间以及主桁与联结系之间均为铰接。

底模平台由前下和后下横梁、底模纵梁及底模板;前后吊挂系统前上横梁、锚梁、吊带(吊杆)、千斤顶组成;内外侧模包含外侧模排架、内模排架、吊挂、内外导梁及模板;挂篮走行系统由走道梁、后勾板、内外导梁及走行吊挂框组成。后锚固系统包含锚固梁及锚固预应力筋。

2.3 挂篮施工步骤

(1)挂篮主桁架采取散拼,由200 t.m塔吊吊装各菱形桁架、连接系及各杆件等;底模平台在桥位处地面拼装整体后,整体提升至设计位置;完成混凝土浇筑前准备工作。(2)完成主梁节段混凝土浇筑施工。(3)底模平台下放800 mm脱离混凝土底面,完成吊挂系统转换,将后下横梁吊挂至外导梁,解除底模后吊挂,由千斤顶抓拉主桁架走行至设计位置。(4)重复步骤一至步骤三,完成主梁剩余梁段混凝土浇筑施工。

2.4 钢管拱桥0#块施工方案

2.4.1 0#块施工方案概述

0号块梁段为墩梁固结段,长度为19 m,混凝土浇筑量为1 500.03 m³。0#分二次进行浇筑,第一

次浇筑高度为7.5 m,第二次浇筑高度为5.3 m及拱座。第二次浇筑混凝土前,在已浇筑混凝土内施加纵桥向临时预应力。采用钢管支架施工方案,下部结构采用直径800 mm钢管柱,固定于承台的预埋件上,各钢管柱之间采用连接系进行连接。钢管支架上部结构采用分配梁,分层纵横向布置,作为底模板排架的支撑平台。墩身为双薄壁墩,双墩之间连接梁段为拱形。采用拱形支架。外侧模设置模板排架,采用精轧螺纹钢进行对拉。

2.4.2 0#块施工钢管支架结构

钢管支架底模排架单侧共14排,分配梁A、分配梁B及分配梁D采用2HN700×300型钢,分配梁C采用HN700×300型钢。钢管柱最大反力为312 t。底模排架为桁架结构,上弦杆采用2[32a型钢,下弦杆、斜杆采用2[20a型钢,竖杆为 $\phi 297 \times 6$ mm钢管。拱架主拱肋采用2[32a型钢,拱脚采用可调撑杆连接。抄垫高度设计值为 $H=150$ mm,现场拼装时根据实际测量对抄垫高度 H 偏差进行修正。侧模排架为桁架结构,采用精轧螺纹钢对拉侧模排架。底模板及侧模板均采用钢模板,见图3。

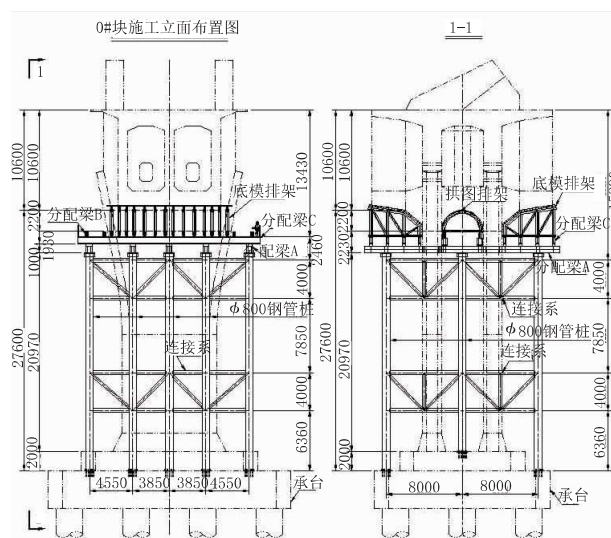


图3 0#块钢管支架结构总图(单位:mm)

2.5 主梁合龙段施工

主梁合龙顺序:先边跨合龙后中跨合龙。

边跨合龙:待边跨现浇段施工完毕,采取沙袋进行配重,对边跨合龙段进行锁定,浇筑边跨合龙段混凝土,逐渐同步卸载边跨合龙段侧沙袋;张拉预应力并压浆完毕,形成简支单悬臂结构,完成体系转换。

中跨合龙:采用吊架合龙方案,两个边跨合龙完毕后,中跨合龙段锁定,浇筑中跨合龙段混凝土,逐渐同步卸载中跨合龙段侧沙袋;张拉压浆完毕,完成体系转换。

合龙吊架利用挂篮底平台、侧模排架及内外侧模板。合龙锁定采用劲性骨架进行体外支撑,采用预应力束作为临时约束。

3 拱肋施工方案

3.1 拱肋施工方案概述

钢管拱肋总重为 774 t, 每侧拱肋分为 17 节, 最大节段重量约 24 t, 每道横撑重量为 11.6 t, 拱肋节段统一厂内加工预拼并检验合格后, 运至现场, 由 130 t 汽车吊吊装至桥面, 通过运输车运至安装位置。

3.2 拱肋提升支架施工

拱肋划分为三段进行施工, 其跨度为 53 m+94 m+53 m。其中两边跨(53 m 段)采用原位拼装, 由 80 t 履带吊吊装, 其最大节段重量 16.5 t; 中跨(94 m 段)先采用 80 t 履带吊分节段吊装至支架上焊接成整体, 再由吊架整体起吊提升至设计位置, 其整体节段重量约 370 t, 共 4 个吊点, 见图 4。

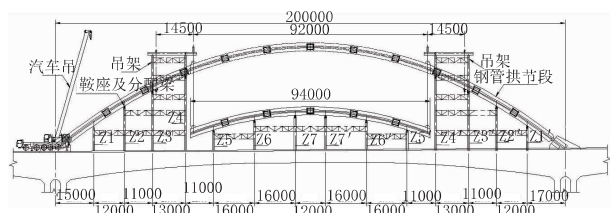


图4 拱肋提升支架施工布置图(单位:mm)

两边跨(53 m 段)其钢管拼装支架顶部分配梁上设置鞍座, 采用千斤顶起顶鞍座对钢管拱节段线形进行调节。

施工步骤 1: 支架拼装完成, 由 80 t 汽车吊吊装两边跨(53 m 段), 采取分节段吊装, 见图 5。

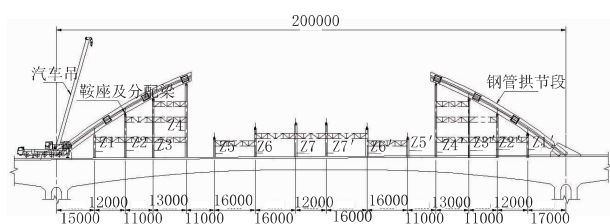


图5 拱肋提升支架施工步骤一布置图(单位:mm)

施工步骤 2: 采用 80 t 汽车吊吊装中跨(94 m 段)拱肋, 将中跨拱肋拼装成整体; 同时采用 200 t.m 塔吊拼装吊架, 见图 6。

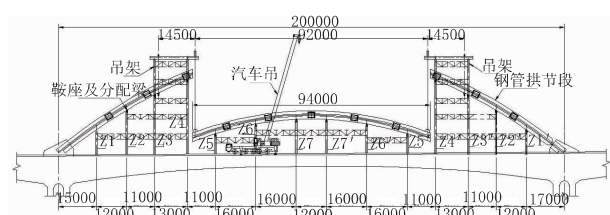


图6 拱肋提升支架施工步骤二布置图(单位:mm)

施工步骤 3: 采用连续千斤顶整体提升中跨(94 m 段)拱肋至设计位置, 焊接合龙, 见图 7。

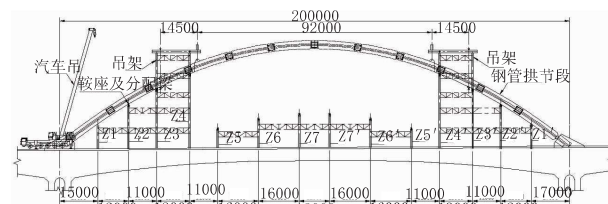


图7 拱肋提升支架施工步骤三布置图(单位:mm)

采用 80 t 汽车吊吊装拱肋, 吊臂长度为 36 m, 其最大吊重为 22 t, 最小吊距为 5.5 m, 可满足最高拱肋节段吊装。整体提升中跨(94 m 段)拱肋施工时, 对主梁主体结构进行计算, 其主梁受力拉应力计算值满足设计要求, 则此方案满足施工要求。

3.3 钢拱肋拼装支架设计与安装

3.3.1 钢拱肋支架设计

拱肋施工分三段: 45.66 m(边跨)+1.6 m(合龙段)+107.08 m(中跨)+1.6 m(合龙段)+45.66 m(边跨), 边跨为原位拼装施工, 中跨为整节段提升吊装施工。拱肋拼装临时支架分为原位拼装支架、整节段拼装支架和提升支架三个部分, 除提升支架采用 $\phi 800 \times 10$ mm 钢管柱外, 其余支架均采用 $\phi 630 \times 8$ mm 钢管柱。

原位拼装支架和整节段拼装的单根钢管支架分为管柱和鞍座两部分, 管柱通过预埋件固定于梁面, 并通过斜撑和连接系与其他管柱连接成整体, 见图 8、图 9。鞍座设置于管柱顶端的横向分配梁上, 通过设置横向和竖向反力座, 利用千斤顶顶起鞍座来调整拱肋拼装时的线型。

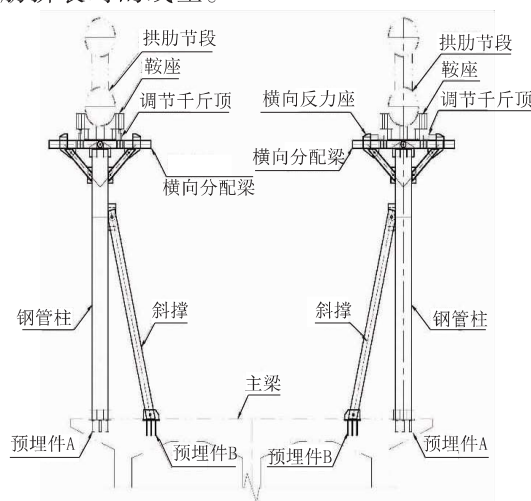


图8 拼装支架结构大样图

提升支架采用对边跨拼装支架接高方案, 待边跨拱肋节段安装完成后, 接高对应位置的钢管立柱, 在钢立柱上设置纵横向钢箱梁, 并安装后锚固系统

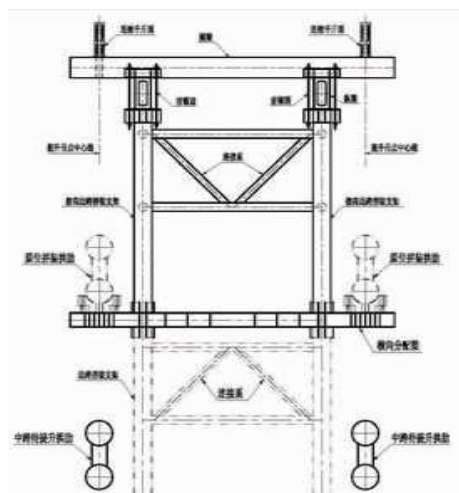


图9 提升支架正面布置图

和提升系统。后锚固系统采用7- ϕ 15.24 mm钢绞线,锚索采用千斤顶张拉至设计吨位,根据需要整体提升的中跨节段荷载,安装4台连续千斤顶。

3.3.2 拼装支架的制造与安装

安装顺序:本桥钢管拱施工临时支架由48号墩向47号墩依次安装,安装程序为:清理、复测预埋件→管桩安装→连接系安装→横向分配梁(鞍座)安装→验收。

支架安装前,应复测预埋件的位置及高程,确定好管桩长度,原则上长度小于12 m的管桩一次安装到位,大于12 m的管桩采用分段安装焊接,管桩上提前设置好平台,以确保管桩对接及连接系安装施工安全。管桩与预埋件焊接时,先在管桩底部放样开槽,在与预埋件钢板进行坡口焊,焊缝等级为二级,管桩应竖直偏差不超过 $L/700$ 。提升支架管桩底部垫梁分三段3 m+6 m+3 m制作安装,施工时先安装两端3 m,抄垫平整,再安装管桩。拱肋提升前,再安装中间6 m垫梁,确保施工过程中桥面畅通。

拱肋拼装和提升支架钢管构件连接采用焊接,在焊接构件制造时,必须不断优化施工工艺,以减小构件加工变形,降低焊接残余应力,同时构件焊接接长时,注意对接焊缝要适当错开。支架体系使用过程中必须定期检查横梁的挠度、钢柱的水平位移、焊缝质量、千斤顶安全性,支撑体系系统的整体稳定性,做好沉降变形记录。拱肋拼装和提升支架钢管立柱制造完毕后,对其应进行必要的防锈防护处理并将各部件进行标识编号。拱肋拼装和提升支架的安装采用汽车吊机吊装,人工辅助配合焊接固定,可由两侧边跨向中跨依次安装。拱肋拼装和提升支架的焊接平台要按照结构设计“三同时”的要求,做好安全防护措施。拱肋施工桥面机械设备、半成品较多,应

注意交通组织及半成品保护。

3.3.3 钢管拱拼装

(1) 拱肋拼装顺序

钢管拱施工由48号墩向47号墩方向进行拼装。主要施工步骤为:钢管拱运输至安装位置→钢管拱吊装→调整拱肋前端坐标→临时连接安装→复测、拱肋焊接→吊装下一节段至边跨钢管拱拼装完成→安装(临时)横撑→吊装提升吊架→拼装中跨拱肋及横撑→拱肋线形、焊缝质量全面检测。

(2) 拱肋安装关键控制要点

施工时,拱肋从桥头路基直接运输上桥至安装位置,利用80 t汽车吊吊装到拼装支架鞍座上,通过千斤顶调整鞍座位置来精准调整钢管拱节段位置。

吊机站位必须对照吊重曲线与拱肋各节段工况一一对应,严格执行一吊一方案。拱肋吊装到位后,先环口采用匹配件临时固定牢固,防止后续节段吊装时发生移位。拱肋对接固定时,先采用码板进行临时连接,待复测精调满足设计要求后再在进行焊接,焊接时设置施工平台,施工平台由槽钢+角钢组成框架结构与拱肋焊接固定,搭设脚手板作为施工平台。吊装由专人指挥,信号准确,起重人员操作熟练,避免吊装时构件碰撞而损伤。

3.3.4 中跨节段整体提升

(1) 拱肋提升系统

中跨采取整节段提升吊装施工,其施工布置见图10、图11。

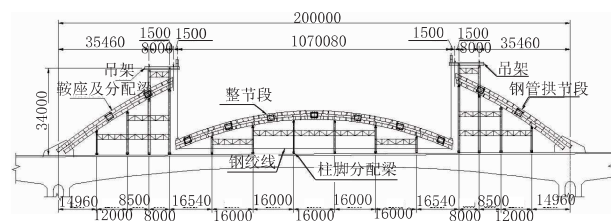


图10 主梁上下缘最大拉应力(单位:mm)

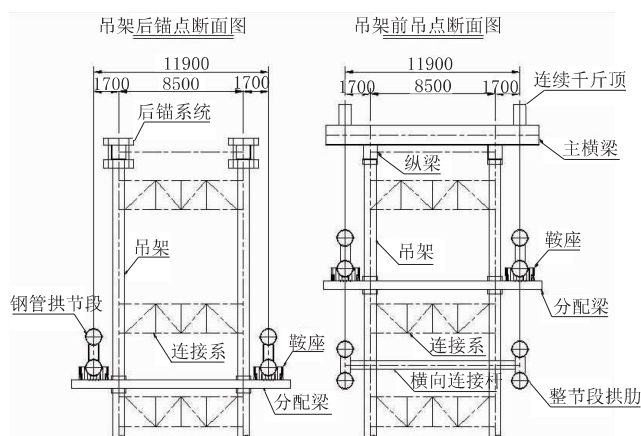


图11 吊架横断面布置图(单位:mm)

中跨(107.08 m段)先采用80 t汽车吊分节段吊装至支架上焊接成整体,再由吊架整体起吊提升至设计位置,其整体节段重量约450 t,共4个吊点,采用19- Φ 15.24钢绞线作为提升索,提升索与拱肋通过转换吊耳连接。

(2)提升设备组成及安装

中跨阶段整体提升设备主要有连续千斤顶、泵站、控制系统传感器及其他附属设备组成,连续千斤顶分为拉索和提升索,其中拉索连续千斤顶设置规格为4台100 t,提升索联系千斤顶设置规格为4台200 t,张拉千斤顶与泵站根据现场情况就近布置,之间通过高压软管互连,液压油路之间相互独立,并在连续千斤顶上安装有液控单项阀,防止油管爆裂产生下滑现象。控制系统将各种传感器同各自的通讯模块连接,再连入计算机控制系统中整体联调,采用1台液晶显示屏控制柜总控各提升设备。

(3)提升施工工艺流程

拱肋整体提升施工工艺流程为:施工准备→试提升加载→支架体系检查→提升系统检查→空中停滞验证结构安全性→正式提升→拱肋临时固定→拱肋合龙段安装

(4)提升准备

a. 拱肋及横撑在桥面拼装完毕,根据提升千斤顶布置图,将提升千斤顶安装到位;b. 提升油管安装,控制设备安装;c. 吊车配合千斤顶泵站吊装和钢绞线安装;d. 用2 t手动葫芦拉钢绞线,使得一束钢绞线的每一根长度基本一致;e. 所有千斤顶正式使用前,应经过负载试验,并检查锚具动作的工作情况;f. 千斤顶就位后的安装位置应达到设计要求,否则要进行必要的调整。

(5)试提升过程

a. 提升加载

正式提升前,按下列程序进行试提升:先对横向拉索按照10%的额定张拉力进行张拉;分级张拉提升索,中跨拱节段与下部支架脱离即可;横向拉索按照100%的设计张拉力进行张拉,并调整拱肋线形至设计要求。

b. 提升支撑结构检查

检查支撑结构结构的焊缝、变形等内容,确保提升安全。

c. 控制系统的检查

通过控制系统检查提升千斤顶的同步情况,必要时对控制参数进行修改或调整。

d. 空中停滞

试提升结束,提升钢管拱脱离支架约50 cm,空中停滞1 h,组织人员重点检查提升支架结构的焊缝、变形情况,及提升油缸、计算机控制柜、液压泵站,验证提升体系的安全性及稳定性,为正式提升提供决策依据。

(6)正式提升

正式提升过程的指令要统一,下达的指令要通过复核确认再下达给控制系统操作人员,提升提升速度控制在4~6 m/h。钢管拱肋初次提升高程应先低于理论标高10 cm,再进一步精准提升至设计位置。提升过程中安排人员对支架结构的后锚索、提升索和拱肋变形等结构关键部位进行观测,对油缸、泵站等提升控制系统进行观测,如有异常及时通知总指挥人员。提升前需要在拱肋四个提升点设置揽风绳,防止提升过程中出现大风气候,造成钢管拱晃动。

(7)拱肋固定

当拱肋提升作业至设计标高后,采用槽钢将中跨节段和边跨节段进行临时焊接固定,避免拱肋受风荷载影响晃动,为合龙段施工做好准备

(8)拱肋合龙施工

当提升拱肋临时固定后,采用汽车吊和20 t倒链配合,提升合龙段至设计位置;合龙段定位完成后,焊接临时固定码板,进行合龙段的焊接施工。

4 拱肋线型控制方案

4.1 测量控制网布设

测量控制网布设不仅要满足拱肋安装,还要满足拱肋安装后的定期观测。整个桥拱肋跨距200 m,设置两个方格控制网用于拱肋的安装定位,高程控制可以依据方格网布设。

4.2 钢拱脚安装定位测量

拱脚安装时,通过全站仪对拱脚安装位置和精度进行调整。

4.3 拱肋、横撑安装测量

拱肋的测量主要包括:边跨原位安装、中跨低位拼装、中跨提升到位,重点是中跨拱肋节段的提升测量。在中跨节段吊装前,测量人员依据测量要求,将反射片贴于标记处,在温度作用下,对拱肋变形进行连续观测,作为合龙温度下拱肋实测线形对计算结果的验证,从而指导张拉索力的调整和合龙段长度的测量。拱肋吊装过程中,采用全站仪对中跨拱肋的

(下转第146页)

由图8可知:地下连续墙上最大弯矩发生截面随着开挖深度的增加逐渐下降,上部和下部两端的弯矩整体上呈现单调减小和增长趋势,中部弯矩变化趋势相对复杂。同时在基坑积极冻结期间和前期开挖阶段,冻结区域墙体负弯矩较大,后期随着基坑自然融化(解冻过程),冻结区域墙体的弯矩不断减小。在实际施工过程中,需要加大对围护墙负弯矩的关注,迎土面同样需满足配筋需求,保证墙体能够抵抗一定的负弯矩,从而保证基坑安全开挖。

5 结 论

本文以上海某地铁车站上跨既有隧道的深基坑开挖工程为例,使用人工冻结法对隧道周边土体进行处理,实现加固土体和防水密封的双重效果。

数值模拟的温度场分布结果与现场实测结果吻合,冻结最薄弱处断面积积极冻结约34 d开始交圈,冻结50 d时冻结壁厚度可满足开挖要求;随着承压水向间隙不断迁移和冻结,其内部体积的膨胀造成围护墙和冻结壁进一步地向坑内和坑外方向移动,开挖完成后冻结土的侧移量约为墙体侧移的3~4倍;通过计算弯矩来评价冻胀对地下连续墙的不利影响,并提出墙体抵抗负弯矩的加固要求,使墙体能

够抵抗一定的负弯矩,保证基坑安全开挖。

参考文献:

- [1] 郭典塔,周翠英,谢琳.紧邻地铁区间隧道基坑开挖对隧道结构的影响浅析[J].现代隧道技术,2014,51(4):88-95.
- [2] Chen J J,Zhu Y F,Li M G,etc.2015. Novel Excavation and Construction Method of an Underground Highway Tunnel above Operating Metro Tunnels[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2015, 28(6): 1943-5525.
- [3] 姚燕明,孙巍.深基坑开挖对共用连续墙的既有车站结构内力影响的空间分析[J].岩土工程学报,2006(S1):1411-1414.
- [4] 田帅.复杂环境下基坑上跨运营地铁隧道的保护方案研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(S2):196-203.
- [5] Fan WH,Yang P.Ground temperature characteristics during artificial freezing around a subway cross passage[J].Transportation Geotechnics, 2019(20):100250.
- [6] 郜新军,李铭远,张景伟,等.富水粉质黏土中地铁联络通道冻结法试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021(40):1-10.
- [7] 于长一.地铁联络通道冻结法施工数值模拟分析[D].天津:天津大学,2014.
- [8] 杨笑.粗粒土地层人工冻结过程中的温度场研究[D].北京:北京建筑大学,2020.
- [9] 李剑.管幕冻结施工工法研究与应用[D].陕西西安:长安大学,2015.
- [10] 钟俊辉,尹培林,滕超,等.福州软土地区地铁车站基坑墙体变形特性分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(S2):821-827.

~~~~~  
(上接第133页)

相对位置进行观测,以控制中跨节段的提升高程,直至拱肋提升至设计位置。

## 5 结 语

连续刚构钢管拱桥在桥梁建设领域广泛应用,其跨度逐步加大,对施工技术提出了更高的要求,为推动拱桥建设事业的发展,有必要从拱桥基本特点入

手,探讨相适应的施工技术,采取行之有效的质量控制措施。

### 参考文献:

- [1] 莫昀锦.大跨度钢筋混凝土箱型拱桥缆索吊装施工技术[J].智能城市,2020(6):194-195.
- [2] 董海军,丁振宇.跨高速公路系杆拱桥钢管拱安装施工技术分析[J].安徽建筑,2020(8):53-54,86.