

武汉阳逻长江公路大桥锚碇工程

孟凡超 徐国平 刘明虎 彭宝华 蔡景旺
刘化图 张克 徐梁 马进

(中交公路规划设计院有限公司 北京 100010)

摘要: 武汉阳逻长江大桥主桥为主跨1280m悬索桥。北锚碇采用放坡大开挖深埋扩大基础实腹式锚体重力式锚;南锚碇采用支护开挖深埋圆形扩大基础框架式锚体重力式锚,其基坑工程采用外径73m、壁厚1.5m、深61.5m、最大挖深45m的圆形地下连续墙加内衬的支护结构型式;在国内首次研究应用了可换式预应力锚固系统。本文概述了锚碇设计总体构造、可换式预应力锚固系统研究及其设计技术特点。

关键词: 阳逻长江大桥 锚碇 可换式预应力锚固系统 圆形地下连续墙

1 工程概况

武汉阳逻长江大桥是京珠、沪蓉国道主干线武汉绕城公路东北段的跨江工程,是国家“十五”重点建设项目。大桥采用计算行车速度为120km/h平原微丘区六车道高速公路标准,工程全长10km,总投资19.6亿元。主桥采用布跨为250+1280+440m悬索桥(图1)。北锚碇采用重

力式深埋扩大基础、实腹式锚体,基坑采用放坡大开挖;南锚碇采用重力式深埋圆形扩大基础、空腹框架式锚体,基坑工程采用外径73m、壁厚1.5m、深61.5m、最大挖深45m的圆形地连墙加内衬的支护结构型式。为从根本上解决悬索桥生命线工程的使用寿命问题,在国内首次研究应用了“无粘结可换式”预应力锚固系统。

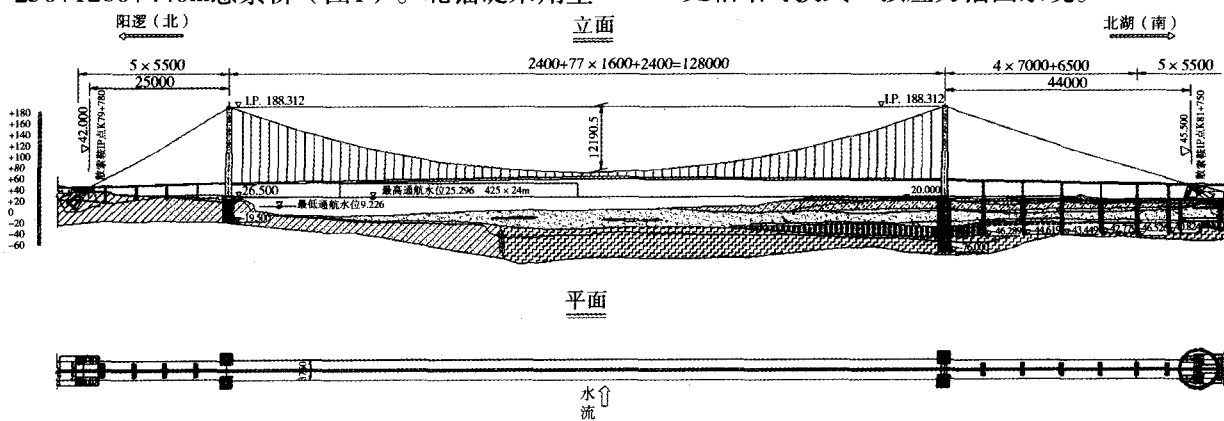


图1 桥型总体布置

索塔采用带剪刀撑的框架结构,设置两道横梁。横梁为预应力混凝土结构,剪刀撑采用钢箱结构。南、北索塔塔柱均为钢筋混凝土箱形结构,高度分别为169.812m和163.312m。

两根主缆中心距为35.0m,主缆矢跨比1:10.5。南边跨及中跨主缆由154股索股组成,北边跨主缆由162股索股组成,其中8股索股锚固于北索塔塔顶的主索鞍上。每根索股由127丝直径5.35mm的镀锌高强度钢丝组成,钢丝极限抗拉

强度1670MPa。

吊索采用平行钢丝吊索,标准间距为16m。平行钢丝为直径5.1mm的高强度平行钢丝,标准强度1670MPa。上、下端均采用销接式,锚头采用热铸锚。鞍座采用铸焊结合的混合结构。

主梁采用流线型扁平钢箱梁。标准梁段长16m,根部梁高3.0m,箱梁全宽38.5m。

北锚碇地处一山丘,锚址区主要为白垩至下第三系东湖群红色砂岩、砂砾岩、砾岩,未发现不良地质现象,场地稳定,水文地质条件相对简

注:《武汉阳逻长江公路大桥锚碇工程》项目获第二届欧维姆预应力技术奖一等奖。

2.2 南锚碇基坑工程

2.1.1 支护结构设计

根据地质条件、防洪要求及上部构造条件,经综合比较,确定采用内径70m、壁厚1.5m的圆形地连墙加内衬的支护结构形式。地连墙嵌入弱风化砾岩1~2.5m,至标高-33~-39m,地连墙总深度54.5~60.5m。地连墙施工完成后,采用逆筑法施工,分层开挖土体、分层施工内衬。内衬及土体分层厚度为3m,各层施工工期由土体开挖控制。采用岛式开挖法进行土体开挖,一层沿圆周分区进行对称开挖及内衬施工。内衬从上向下依次为:6m深度内厚1.5m,6~21m深度内厚2m,21~41.5m深度内厚2.5m。开挖至卵石(圆砾)层表面标高-20.3~-24m,浇筑0.3~4m厚的垫层混凝土,然后浇筑6m厚的钢筋混凝土底板。填芯混凝土施工完成后浇筑8~10m厚的钢筋混凝土顶板。为改善基底应力分布的均匀性,在基础前半部设置26个空隔仓。支护结构总体布置见图4。

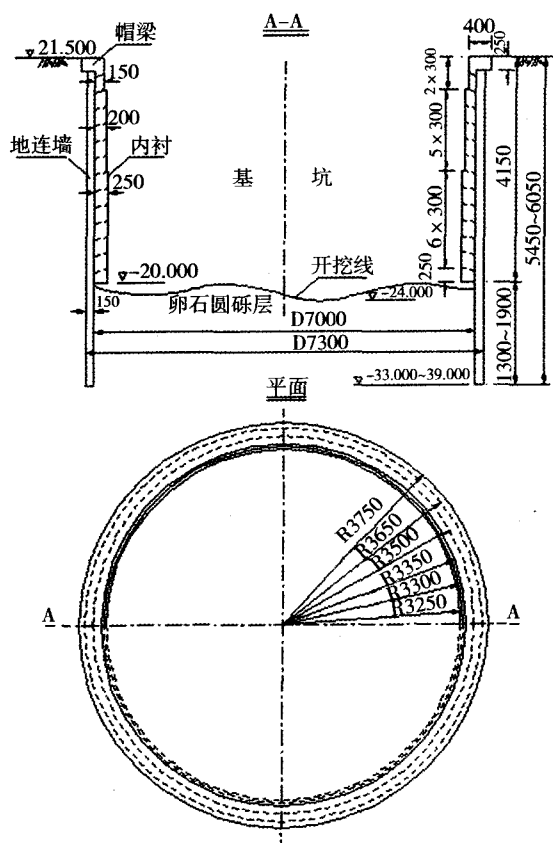


图4 南锚碇支护结构总体布置

2.1.2 封水、降水、排水系统设计

本基坑工程规模庞大,可借鉴经验少,加上其独特的水文、地质条件,其防、排水系统成为基坑开挖施工成败的关键环节;同时,由于锚址处长江Ⅰ级阶地,前缘以北约150m即为长江防洪大堤武昌保护圈一级堤防,其防、排水系统也关系到长江主干堤乃至武汉人民生命财产的安全,作用十分重要。为此,设计对基坑工程采取墙下灌浆帷幕、坑外自凝灰浆挡水帷幕、坑内管井降水、砂砾渗井等层层措施,以及墙段接缝间高压旋喷注浆处理、坑外管井降水、坑底灌浆封底、大堤监测等防洪风险控制措施及施工预案,以确保基坑开挖施工和大堤防洪安全万无一失。基坑封、降、排水系统总体布置见图5。

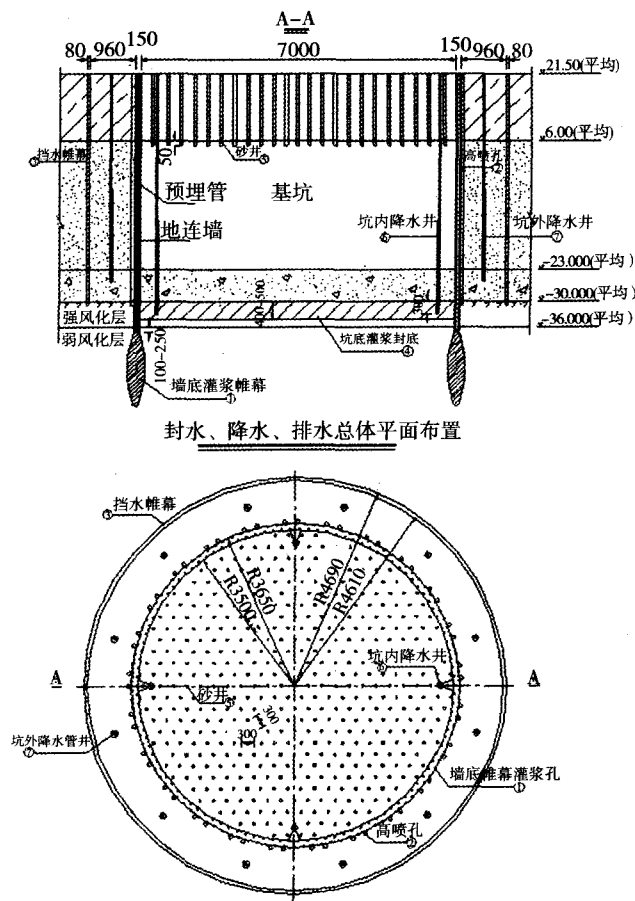


图5 基坑封水、降水、排水系统总体布置

3 可换式预应力锚固系统试验研究与设计要点

3.1 锚固系统现状及发展趋势

悬索桥锚碇锚固系统分为钢框架锚固系统和预应力锚固系统两种类型。国内外早期的悬索桥多采用钢框架锚固系统。钢框架锚固系统全部由型钢构成,主缆索股与型钢拉杆相对应,整个钢框架浇筑在锚块混凝土内,该系统用钢量大,施工复杂,逐步被预应力锚固系统所代替。预应力锚固系统由预应力和索股连接件构成,主缆索股通过连接件与预应力筋相连将力传给锚块,该系统用钢量少,布置灵活,施工方便。近期修建的悬索桥大多采用预应力锚固系统。

预应力锚固系统分为预应力钢绞线和预应力粗钢筋两种体系,两者均通过张拉预应力筋在锚块内部储备预压力,虽然受力机理相同,但由于材料不同,两者在布置、锚具、防腐方面存在一定差异。预应力钢绞线系统布置灵活,施工方便,应用广泛。

预应力结构中材料的防腐和耐久性问题一直是备受关注而棘手的问题。目前采用的预应力锚固系统多为有粘结不可更换的预应力钢绞线锚固体系,钢绞线采用压注水泥浆防腐,在后期运营过程中无法检查、检测和更换。跨越江河的悬索桥,由于桥下通航净空不高,锚碇锚固系统一般都位于地下水位以下,预应力锚固系统长期处于潮湿的环境。国内有一些桥梁因设计或施工原因出现了管道漏灌浆或灌浆后有泌水干缩现象,导致预应力管道出现渗水现象。预应力钢绞线的防腐问题十分突出,已经严重影响到桥梁结构的安全。

锚固系统是悬索桥的生命线工程。预应力锚固系统采用防腐性能好,可检测、更换的无粘结预应力体系,是悬索桥锚碇锚固系统的发展方向。

3.2 研究内容及实现途径

3.2.1 锚固体系

- (1) 可更换新型锚具的开发及研究
- (2) 系统静载、疲劳试验
- (3) 连接器平板变形试验

3.2.2 防腐系统

- (1) 防腐材料性能研究
- (2) 锚固系统施工工艺试验
- (3) 锚固系统防腐油、预应力钢束更换工

艺试验

3.2.3 实现途径

实现途径如下:

产品设计→试验研究→实桥应用→推广使用

3.3 锚固系统构造研究与设计

3.3.1 总体布置

根据锚碇总体布置,锚固系统在水平、竖向两个面内均呈辐射形布置,拉杆方向与其对应的索股方向一致,前、后锚面均为与中心索股垂直的平面,预应力钢束沿索股发散方向布置。拉杆方向误差用球面垫圈和内球面垫圈予以调整。

索股连接构造分单索股锚固单元和双索股锚固单元两种类型。单索股锚固单元由2根拉杆和单索股连接器构成,双索股锚固单元由4根拉杆和双索股连接器构成。单索股采用15~16规格锚具锚固,双索股采用15~31规格锚具锚固。

3.3.2 技术指标

锚固系统锚下采用C30混凝土,锚碇预应力锚固系统分为可更换构件和不可更换构件两部分。不可更换构件按等强度设计原则,与索股有同等的安全系数,可更换的预应力钢束施加的有效力不低于索股拉力的1.2倍。

(1) 拉杆组装件的静载抗拉强度的安全系数 $K \geq 2.5$ 。

(2) 拉杆组装件的疲劳性能在上限荷载 $N_1=977.3\text{kN}$ 、下限荷载 $N_1=804.8\text{kN}$,经200万次周期循环加载后,拉杆、螺母应无裂缝,螺母不松动,螺纹不产生变形;

(3) 连接器在索股设计荷载的120%作用下,最大变形量 $\leq 0.5\text{mm}$ 。

(4) 预应力钢绞线锚具组装件的静载锚固效率系数 $\eta_A \geq 95\%$,破断总应变 $\varepsilon_b \geq 2\%$;

(5) 预应力钢绞线锚具组装件的疲劳性能,在应力上限为 $0.65\sigma_p$,应力幅为130MPa的条件下,经200万次周期循环加载后,预应力钢绞线的破坏面积不大于其总积的5%。

(6) 油脂的指标要求见表1。

(7) 密封试验技术要求:油压上升到2MPa后保压5小时,要求油液无泄漏。

表1 油脂的指标要求

检测项目	标准指标	实验方法
工作锥入度, 1/10mm	—	GB/T 269
水分, % 不大于	0.1	GB/T 512
钢网分油 (100℃, 24h)	8.0	SH/T 0324
腐蚀试验 (45 # 钢片, 100℃, 24h)	合格	SH/T 0331
蒸发量 (99℃, 22h) %, 不大于	2.0	GB/T 7325
低温性能 (-40℃, 30min)	合格	SH 0387
湿热试验 (45 # 钢片, 30d) 级不大于	2	GB/T 2361
盐雾试验 (45 # 钢片, 30d) 级不大于	2	SH/T 0081

3.3.3 锚固系统构造

锚固单元构造见图6。锚固系统主要受力构件为：拉杆、可换式预应力体系、连接器。

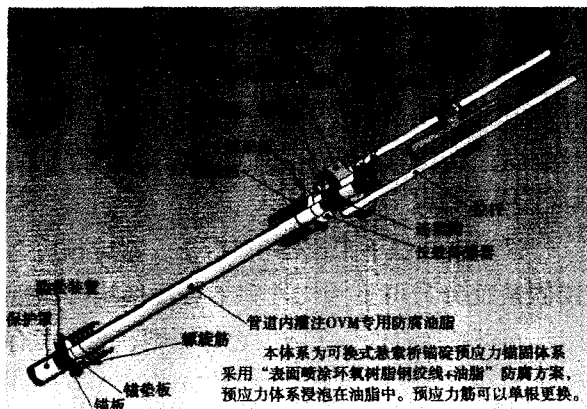


图6 锚固体系效果图

(1) 拉杆组件

拉杆与主缆锚头的连接由拉杆上的锁紧螺母、六角螺母及平垫圈来固定，与连接器平板的连接是通过球面垫圈、球面螺母以及锁紧螺母来固定。

拉杆、螺母的螺纹均采用军用MJ标准，以提高拉杆的疲劳强度，连接器平板处采用球面螺母和球面垫圈，以调节设计、制作、安装上的误差，使拉杆中心与索股轴线在一直线上，以避免由于偏心引起的次应力，为防止螺母在动载下的松动，设计时加设了锁紧螺母。拉杆采用40CrNiMoA，长3.1m，直径85mm，螺母、垫圈采用40Cr。

(2) 连接器

连接器包括连接平板及连接筒，既是预应力锚头下的垫板又起连接拉杆作用，连接器采用45号优质碳素结构锻钢。

(3) 可换式预应力体系

预应力体系由预应力钢绞线、预应锚具、夹片放松装置、预埋钢管、防腐油、防护罩、铜垫圈、油面观察管等组成。采用符合美国ASTM A416-92标准270级，公称直径15.24mm，标准强度1860MPa的低松弛预应力钢绞线，预应力管道采用电焊钢管。预应力钢绞线在必要时可进行单根检测、更换，保证锚碇预应力锚固系统的长期有效性。

3.3.4 锚固系统防腐

首先，在前锚室内设抽湿设备，使锚室内相对湿度不大于50%；此外，还采取如下防腐措施。

(1) 拉杆、螺母、垫圈出厂前均须经法兰防腐处理，到工地后再涂醇溶性无机硅酸底漆一道，干膜厚度20μm，二次表面处理后，涂改性厚浆环氧面漆一道，干膜厚度100μm；连接器出厂前涂醇溶性无机硅酸底漆一道，干膜厚度20μm，到工地后经二次表面处理涂改性厚浆环氧面漆一道，干膜厚度100μm。

(2) 预应力体系的防腐

预应力管道内、锚头保护罩内灌防腐油脂。上锚罩设置观察管窗，可观察到整个预应力体系的防腐状况。

3.4 锚固系统试验

进行了锚具组件静载试验、拉杆组件静载试验、连接器连结平板变形试验、锚具组件疲劳试验、拉杆组件疲劳试验、锚固系统施工工艺试验、防油脂渗漏密封性能试验等。

3.4.1 锚固系统施工工艺

施工工艺流程见图7。

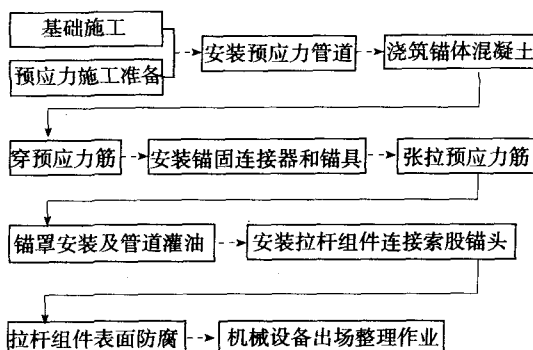


图7 锚碇预应力锚固系统施工工艺流程

3.4.2 预应力系统更换工艺

更换工艺流程见图8。

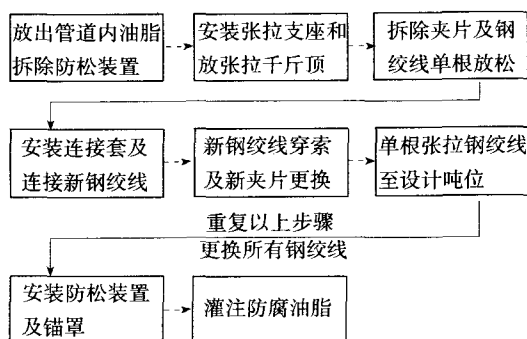


图8 锚碇预应力锚固系统更换工艺流程

模拟施工工艺试验结论：

(1) 预应力锚固系统可进行编束穿索张拉；

(2) 体系内可灌注专用防腐油脂并进行更换油脂；

(3) 预应力束可用连接器进行新旧更换并能单根补张拉，最终完成换束。

3.4.3 防腐油脂渗漏密封性能试验结论

试验介质压力上升至2MPa，保压5小时后，密封处没有出现渗漏现象。

3.5 锚固系统监测

在预应力体系中选取一定比例（5~15%左右）的监测点，安装光栅压力传感器，对预应力体系进行即时或定期检测，监测系统采用计算机控制和采集、分析数据。系统由传感器群、采集系统和浏览系统组成，通过采集线路和数据库将三者有机的结合起来。系统采用web sever client模式，即操作界面基于web网页的方式。软件功能主要包括数据采集方式、数据显示、历史数据查询、告警、远程数据传输日志记录以及系统自检等。

4 可换式预应力锚固系统设计特点

(1) 拉杆及预应力束结构简单、受力明确、用钢量省、安装方便。

(2) 预应力管道内灌注油脂，通过研究，使固态油脂液态化，确保防腐效果，方便油脂的更换。

(3) 预应力钢绞线直线布置，防腐介质为

油脂，可单根更换。

(4) 设置预应力管道油面观察管，施工质量容易保证，检查方便直观。

(5) 预应力管道内防腐油脂及钢绞线性能可随时检测、更换，确保了防腐的长效性。

(6) 预应力锚下混凝土强度由C40降低为C30，方便了锚体施工，节省造价。

(7) 预应力体系设置监测系统，随时监测应力变化。

(8) 索股拉杆组装件采用球面螺母及球面垫圈，可自动调整螺母与垫圈的承力面，保持其有效的接触面积，同时能克服因施工误差引起的拉杆的角度偏差，减少局部应力的集中，有效提高螺纹的使用寿命。

(9) 索股拉杆、螺母、球面螺母均采用军用MJ螺纹标准，相应于普通的螺纹，其特点是牙底较浅，牙底过渡圆角大，牙高降低，螺纹疲劳强度可提高21%~40%。

5 技术创新

可换式无粘结预应力锚固系统属国内外首创。在保证受力机理与传统预应力锚固系统不变的前提下，采用防腐油脂代替水泥浆防腐体系，同时具有“可检测”、“可更换”的特点，确保了锚固系统运营安全，极大地改善了预应力锚固系统的耐久性。

南锚碇基坑工程采用外径73m、壁厚1.5m、深61.5m、开挖深度45m的圆形地下连续墙加内衬的支护结构型式；采用自凝灰浆挡水帷幕，平均深度达52m。工程规模巨大，被业内专家誉为“神州第一锚”。通过该工程，研究和总结出了一套系统的圆形地下连续墙墙段铰接法、环形内衬逆筑法浇注的施工工艺以及基坑开挖、深基坑施工及信息化控制技术，为今后超大深基坑的施工提供很好的示范作用。

研究成果已在武汉阳逻长江公路大桥工程中成功应用，并在舟山西垵门大桥、广州珠江黄埔大桥、贵州坝陵河大桥等大跨悬索桥中得到推广。社会效益和经济效益显著，具有广泛的推广应用前景。