

文章编号: 0451-0712(2004)12-0039-08

中图分类号: U443.24

文献标识码: B

武汉阳逻长江大桥锚碇设计

刘明虎, 徐国平, 刘化图

(中交公路规划设计院 北京市 100010)

摘 要: 武汉阳逻长江大桥主桥为主跨 1 280 m 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, 其基坑工程采用圆形地下连续墙加内衬的支护结构型式; 在国内首次采用“无粘结可更换”预应力锚固系统。本文概述了锚碇的总体构造、基坑工程、锚体及锚固系统的结构设计及技术特点。

关键词: 武汉阳逻长江大桥; 锚碇; 基坑工程; 地下连续墙; 锚固系统; 设计

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 120 km/h, 平原微丘区六车道高速公路标准, 工程全长 10 km, 总投资 19.6 亿元。主桥采用布跨为 250 m+1 280 m+440 m 悬索桥。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, 基坑工程采用外径为 73 m、壁厚 1.5 m、深 61.5 m、最大挖深 45 m 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, 在国内首次采用了“无粘结可更换”的预应力锚固系统。

1 设计条件

1.1 地形地质条件

北锚碇所处地区为一山丘, 锚碇坐落在山坳处。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, 上覆第四纪土层厚度 0.6~4.1 m; 全、强风化带主要为粉砂岩, 天然单轴极限抗压强度 1.6 MPa, 抗剪强度低, 裂隙发育; 弱~微风化砂岩天然单轴极限抗压强度 15.1 MPa, 饱和单轴极限抗压强度 14.0 MPa, 吸水率 4.75, 软化系数 0.87。水文地质条件相对简单, 地下水水量较小。

南锚碇位于长江南岸的 I 级阶地, 覆盖层为厚 50.4~51.6 m 的第四纪冲积层下伏砾岩、砂岩。强风化砾岩岩性破碎, 强度较低; 弱风化砾岩完整性较好,

饱和单轴抗压强度在 12.8~29.4 MPa 之间。估算水位降深 4 m 时, 影响半径为 154 m。地下水埋深上部潜水为 0.4~0.6 m, 下部承压水为 1.05~2.5 m。基岩裂隙水水量不均, 具有一定的承压性。

1.2 上部构造条件

- (1) 上部结构型式: 单跨吊钢箱梁悬索桥;
- (2) 吊索横向间距: 35 m;
- (3) 主缆在散索点处入射角: 北锚碇为 29.32°, 南锚碇为 16.10°;
- (4) 锚碇处主缆拉力: 北锚碇为 610 000 kN, 南锚碇为 550 000 kN;
- (5) 主缆施工方法: PWS 法;
- (6) 主缆断面: 每根主缆由 162/154(北/南)根平行钢丝索股组成。

2 总体设计

2.1 结构形式

2.1.1 北锚碇

北锚碇以弱、微风化砂砾岩作为持力层, 基底地基容许承载力要求不小于 0.8 MPa。为增加锚碇的抗滑动、抗倾覆稳定性, 减小使用阶段地基最大工作应力, 在基础底面设置 2 个台阶, 第 1 个台阶底面标高为 -0.7 m, 第 2 个台阶底面标高为 9.3 m, 中间水平距离 25 m 范围设成斜坡。锚碇总体轮廓尺寸长×宽×高为 70.5 m×54 m×45.7 m。基底设置混凝土垫层, 厚 30 cm。

锚体由锚块、散索鞍支墩、支墩基础、后浇段、前锚室、后锚室等部分组成。对大体积混凝土结构要求进行分层浇筑,每层混凝土内设置冷却水管。大体积混凝土设计龄期为 60 d。采用前锚式预应力钢绞线锚固系统,主缆索股散索长度为 23 m,锚固长度 20 m,散索点理论高程 42.000 m,折射角 48° 。

2.1.2 南锚碇

南锚碇的深埋扩大基础以卵石、圆砾层作为基底持力层。基础直径为 73 m、深 42 m,采用圆形地连墙加内衬的支护结构型式形成基坑。在基坑内浇筑钢筋混凝土底板,回填填芯混凝土,最后浇筑顶板形成基础。锚体尾部设置 16 根直径为 1.2 m 的钻孔灌注桩及 1.5 m 厚的承台,以支撑锚块尾部混凝土自重。锚体总体轮廓尺寸长 \times 宽 \times 高为 70.4 m \times 54 m \times 26.5 m。

锚体为空腹框架式,由锚块、散索鞍支墩、鞍部、后浇段、前锚室、后锚室等部分组成。基础顶板实际也是锚体的一部分,两者相互融为一体。对大体积混凝土结构要求进行分层浇筑,每层混凝土内设置冷却水管。采用前锚式预应力钢绞线锚固系统,主缆索股散索长度为 23 m,锚固长度 19 m,散索点理论高程 45.500 m,折射角 35° 。

为满足桥梁运营期间检修需要,两个锚碇锚体内外均设置了由检修楼梯、平台、检查门、通道构成的通道系统及检修照明、空气除湿系统。

2.2 总体布置

北、南锚碇总体构造见图 1、图 2 所示。

2.3 主要材料及用量

混凝土:锚体除散索鞍支墩顶部采用 C40 混凝土外,其余部位均采用 C30 混凝土;南锚地连墙采用 C35 水下混凝土,帽梁及内衬采用 C30 混凝土,内衬层间接缝处采用 C30 自密实混凝土,导墙采用 C25 混凝土,底板采用 C30 号微膨胀混凝土,顶板采用 C30 混凝土,垫层采用 C20 混凝土,填芯采用 C15 混凝土。

预应力材料:锚固系统梁预应力钢绞线直径为 15.24 mm,标准强度为 1 860 MPa。

钢筋:除地连墙竖向主筋采用 III 级钢筋外,其余采用 I、II 级钢筋。在锚体外露表面设置了 $\phi 5$ 间距为 10 cm \times 10 cm 的带肋钢筋焊网。

钢材:锚固系统拉杆采用 40 CrNiMoA 钢,螺母、垫圈采用 40 Cr 钢,连接器采用 45 号钢,预应力管道采用 20 号无缝钢管。

数量:北锚碇混凝土数量为 87 440 m³,钢筋

1 750 t,预应力钢绞线 126 t,钢材 531 t(不计定位架);南锚碇基础混凝土数量为 172 524 m³,钢筋 6 648 t,钢材 79 t。锚体混凝土数量为 40 259 m³,钢筋 1 144 t,预应力钢绞线 114 t,钢材 382 t(不计定位架)。

2.4 整体验算

对锚碇整体进行了施工和运营阶段的基底应力、抗滑动稳定性、抗倾覆稳定性、沉降及变位验算,验算结果均满足要求。

锚碇整体验算主要结果为:整体抗滑动稳定安全系数 $K_a > 2.0$,整体抗倾覆稳定安全系数 $K_c > 2.0$,成桥后散索鞍散索转点水平位移不大于 20 cm。

2.5 结构计算

采用常规方法和平面有限元法对锚体各部和锚固系统各部的内力、截面强度、变形及裂缝宽度和稳定性进行了计算分析,对锚碇整体、散索鞍支墩顶部受压区和锚固系统连接器还用三维有限元法进行了应力分析。

南锚碇基坑支护结构采用平面有限元杆系程序和基坑专用软件 PAROI2 进行了受力分析,用 ansys 软件对内衬进行了受力分析。

3 北锚碇基坑工程设计

基坑边坡最小坡度为 1:0.75,最大坡度为 1:0.3,基坑底面设计高程为 -1.0 m(后部)~9.0 m(前部),前、后部之间设置 1:2.5 的倒坡。基坑底轮廓尺寸长 65 m、宽 60 m,基底底表面积 4 016 m²,边坡面积 17 357 m²;基坑开挖占地面积 14 435 m²,基坑总开挖土石方约 300 000 m³。基坑开挖施工全过程应达到干作业要求。

边坡采用全面防护与重点防护相结合,边开挖边防护,同时全面布点监控,适时补偿。加强降水和排水以保证基坑干开挖。由于坑顶建筑物和倾向坑侧软弱结构面的存在,对基坑后侧、右侧和左侧边坡采用预应力锚索进行加固。锚索采用规格为 15-4 的岩锚,长 20 m,水平间距 5 m,与水平线夹角 35° 。

在基坑顶设置截水沟和挡水墙,截水沟沟底坡度不小于 0.4%。边坡设置了排水管,以利于边坡喷射混凝土护面后坡体地下水的排除。基坑底四周设置汇水沟和集水井。

4 南锚碇基坑工程设计

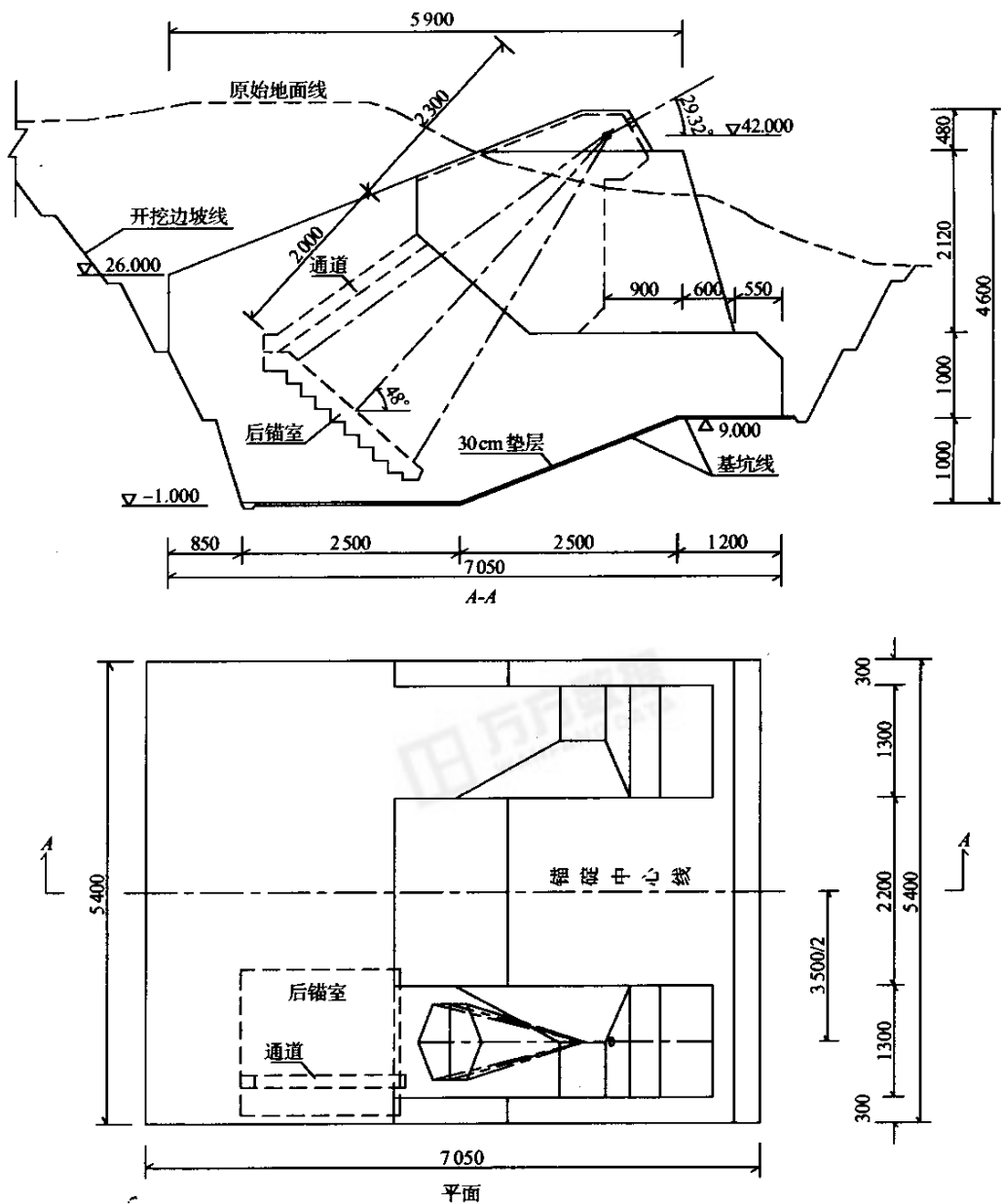
4.1 支护结构设计

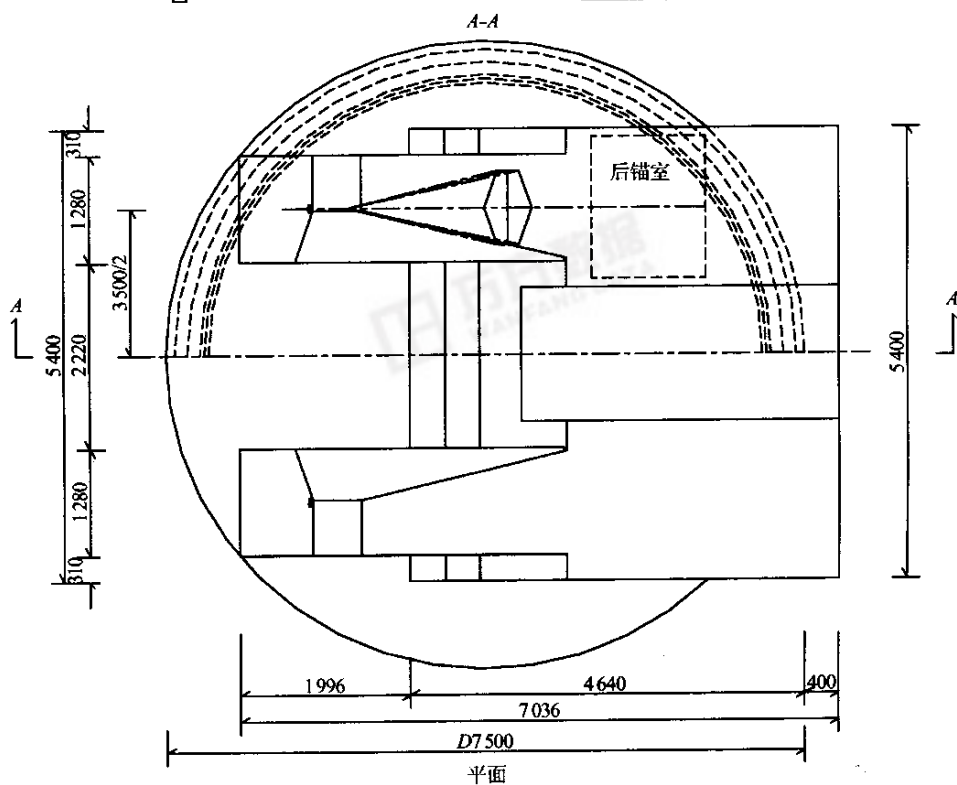
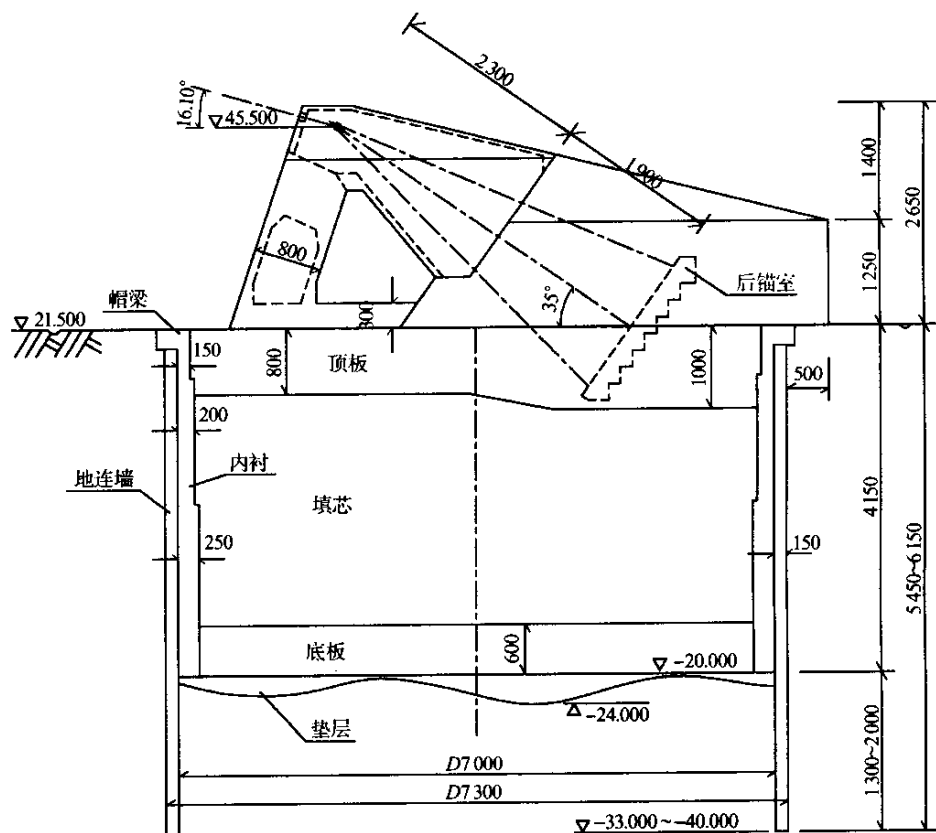
支护结构采用圆形地连墙加内衬的形式。地连墙

嵌入弱风化砾岩 1~2.5 m,至标高-33~-40 m,地连墙总深度为 54.5~61.5 m。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 3 m。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。开挖至卵石(圆砾)层表面标高-20.3~-24 m 后,浇筑 0.3~4 m 厚的垫层混凝土,然后浇筑 6 m 厚的钢筋混凝土底板。填芯混凝土施工完成后浇筑 8~10 m 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 3 所示。

4.1.1 地连墙槽段划分、墙段连接形式及嵌岩深度
地连墙施工槽段分Ⅰ期、Ⅱ期两种,每种槽段各 25 个。Ⅰ期槽段采用三铰成槽,边孔轴线处长 2.8 m,中间孔轴线处长 1.08 m,槽段轴线处长 6.68 m。Ⅰ期槽段由 3 个槽段组成,相邻槽段交角为 176.9°;Ⅱ期槽段长 2.8 m。两种槽段之间交角为 175.9°。Ⅱ期与Ⅰ期槽段在地连墙轴线处搭接长度为 0.25 m。

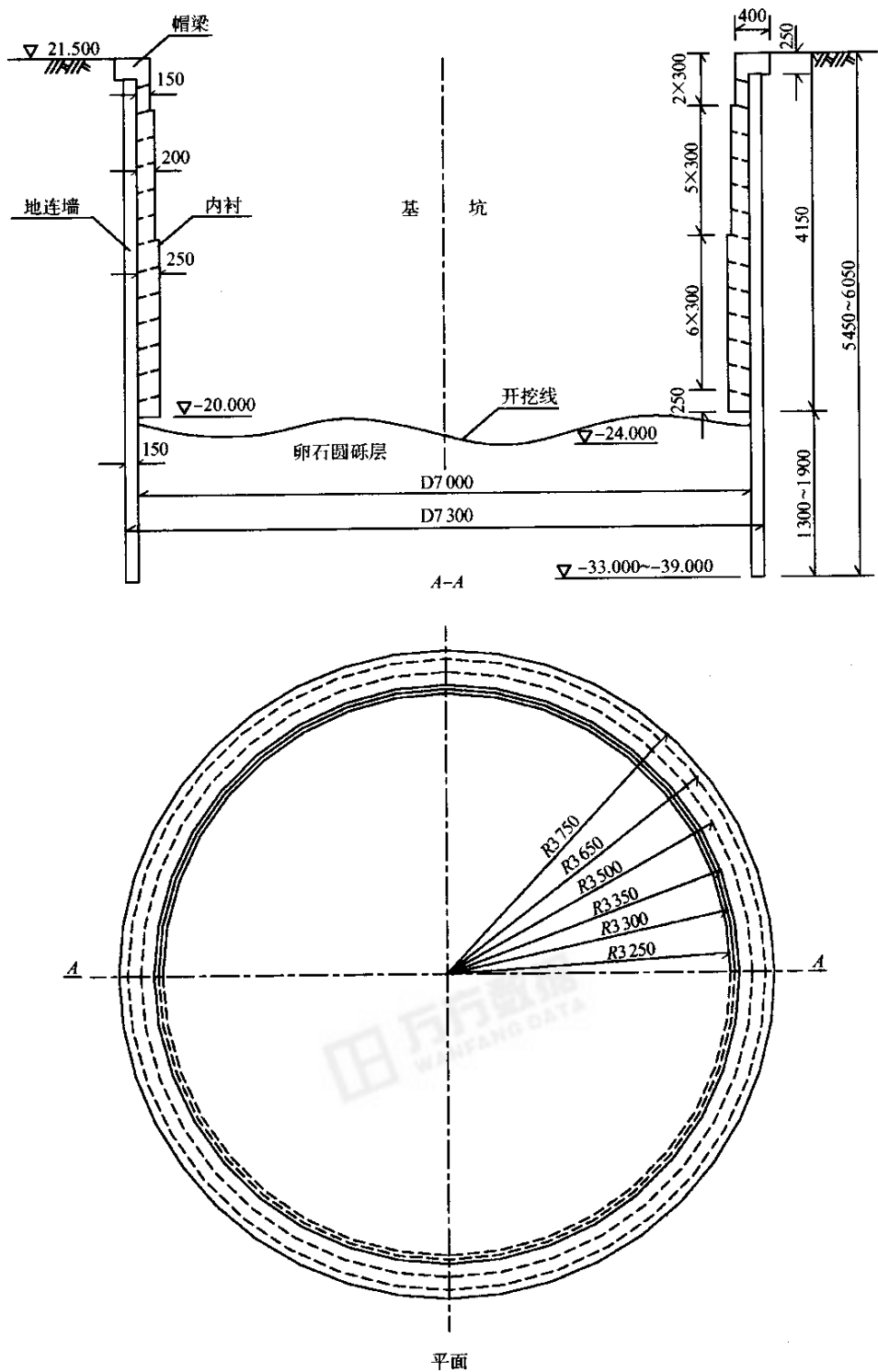




万方数据

单位:cm

图 2 南锚碇总体构造



单位:cm

图 3 南锚碇支护结构总体布置

本地连墙具有墙体深、厚度大、需嵌岩等技术特点,为确保地连墙的施工质量和施工进度,本工程采用 2 台

HF12000 液压铣槽机成槽。通过对 5 种接头方法进行综合经济技术比较,确定采用铣接法连接方式。

- 地连墙嵌岩深度按如下 4 个原则确定：
- (1)当强风化岩层厚度大于 5 m 时,地连墙入弱风化岩 1 m；
 - (2)当强风化岩厚度为 0~5 m 时,地连墙入弱风化岩 1.5 m；
 - (3)当无强风化岩时,入弱风化岩 2.5 m；
 - (4)地连墙开挖建基面以下入土深度不小于 10 m。

4.1.2 导墙、帽梁及内衬

导墙及平台顶面标高为 22.0 m,高出地面 0.5 m。导墙由 2 个 L 形钢筋混凝土墙组成,墙间距离为 1.6 m,墙高 1.6 m,墙宽 1.7 m,墙厚 0.5 m。在地连墙两侧,采用深层搅拌加固淤泥质粘土,加固深度平均为 15 m,宽约 32 cm,净距为 1.6 m。导墙的纵向分段与地连墙的分段接头错开。

地连墙顶面设置帽梁,为钢筋混凝土环形结构,地连墙顶部伸进帽梁 10 cm,帽梁悬出地连墙内侧 1.5 m,外侧 1 m,帽梁总宽度 4 m,高 2.5 m。

内衬作为地连墙的弹性支撑设置在地连墙内侧。

综合考虑地连墙结构受力,减少施工周期和开挖段土体蠕变对地连墙的影响,内衬施工层高取 3 m,厚度 1.5~2.5 m。各层内衬底面设成 15°的斜坡,上、下层内衬结合面采用自密实混凝土。为保证内衬与地连墙间的连接质量及共同受力,在地连墙内设置水平钢筋并预埋直螺纹钢筋连接器,与内衬钢筋相连。各层内衬之间部分竖向钢筋采用钢筋连接器连接。

4.2 封、降、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 150 m 即为长江防洪大堤,其防、排水系统作用十分重要。为此,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、砂砾渗井等多项措施,以及墙段接缝间高压旋喷注浆处理,坑外管井降水、坑底灌浆封底等防洪风险控制措施及施工预案,以确保基坑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 4,主要分项工程见表 1。

表 1 主要分项工程

分类	编号	项 目	布 置 位 置	功 能	备 注
封 水	①	墙底灌浆帷幕	地连墙底	墙底基岩内裂隙封水	
	②	墙间接缝外高喷桩	地连墙墙段接缝处外侧	地连墙铰接头可能存在的缝隙封水	施工预案
	③	外围自凝灰浆挡水帷幕	地连墙外侧 10 m,与地连墙为同心圆	截断两侧覆盖层水联系,确保基坑施工过程中坑内水位不随帷幕外水位变化	防洪风险控制措施
	④	基坑封底灌浆	基坑底强风化层	未按时完成基坑施工情况下汛期施工的基底水平隔水层	防洪风险控制措施 施工预案
降 排 水	⑤	砂井	基坑内软土(粘性土)层内	排出坑内积水及软土中孔隙水,加快软土固结	
	⑥	坑内降水管井	坑内	降低坑内地下水位,保持坑内干作业条件	兼有排水减压作用
	⑦	坑外降水管井	地连墙与外围帷幕之间	降低坑外水位,减小支护结构水压力	施工预案

5 锚固系统设计

采用预应力钢绞线锚固系统。根据国内已建悬索桥锚碇的设计施工经验,预应力锚固系统通常采用管道内灌注水泥浆的防腐方式,成为不可更换的永久结构,而管道压浆施工质量又难以保证,因此严重影响了预应力钢绞线的防腐耐久性。为了确保锚固系统乃至整个桥梁的安全与耐久性,进行了“无粘结可更换”预应力锚固系统的研发和应用。

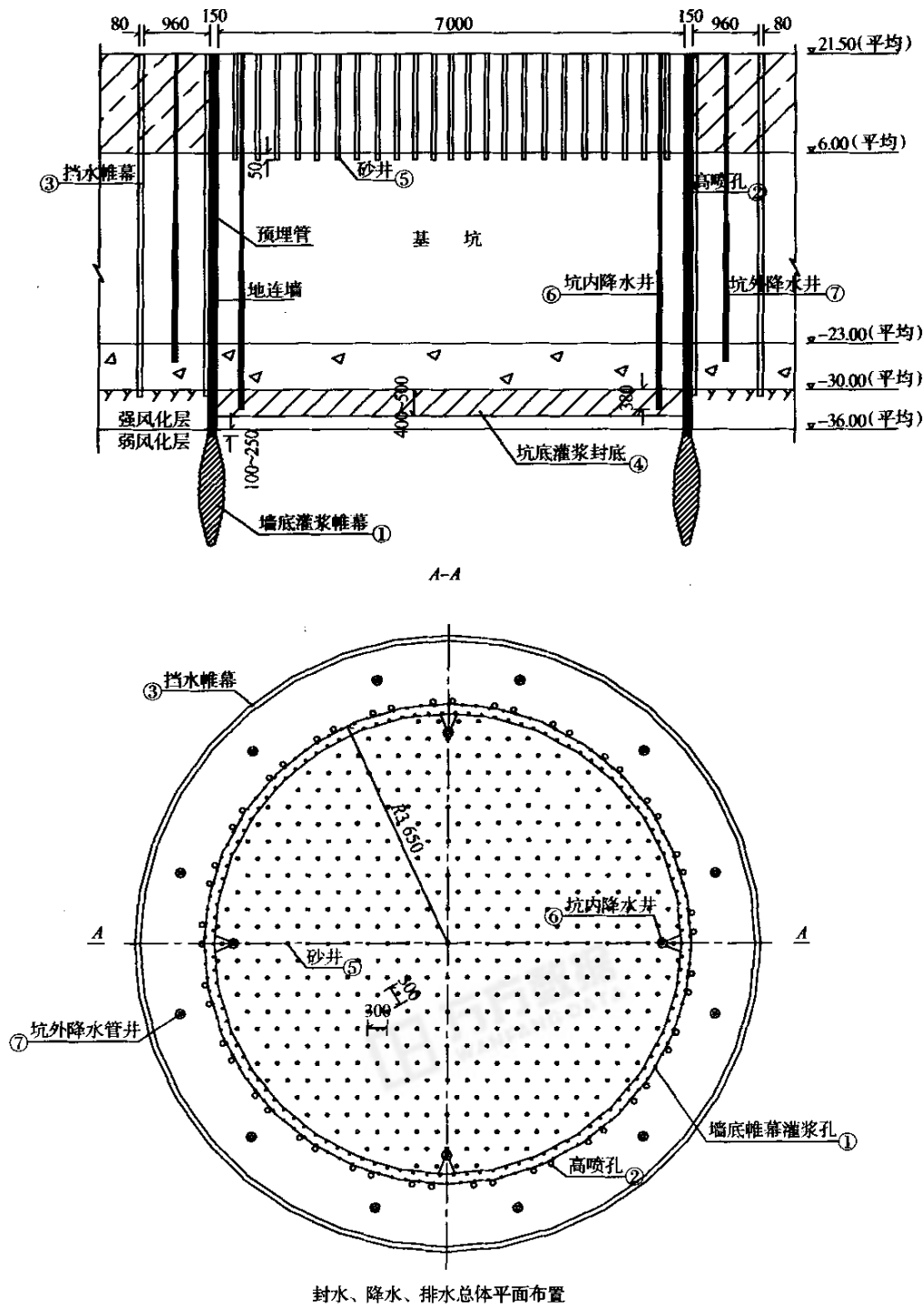
5.1 布置及构造

两锚碇锚固系统在水平、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。

锚固系统由索股锚固连接构造和预应力钢束锚固构造组成。索股锚固连接构造由拉杆及其组件、联结器组成;预应力钢束锚固构造由管道、预应力钢绞线及锚具、防腐油脂、锚头防护帽等组成。拉杆上端与索股锚头上的锚板相连接,另一端与被预应力钢束锚固于前锚面的联结器相连接。

索股锚固连接构造分单索股和双索股锚固单元两种类型,分别采用 15—16 和 15—31 规格的预应力钢束锚固。钢绞线在管道内要求不扭绞,锚头张拉端不封锚并留有换束工作长度,管道内充填防腐油



脂,因此钢绞线为无粘结式,并可更换。在部分锚固单元的锚固连接部位设置压力传感器,运营期间可实时监测索股应力数据

锚固系统锚固单元构造见图 5。

5.2 构件设计

5.2.1 拉杆组装置

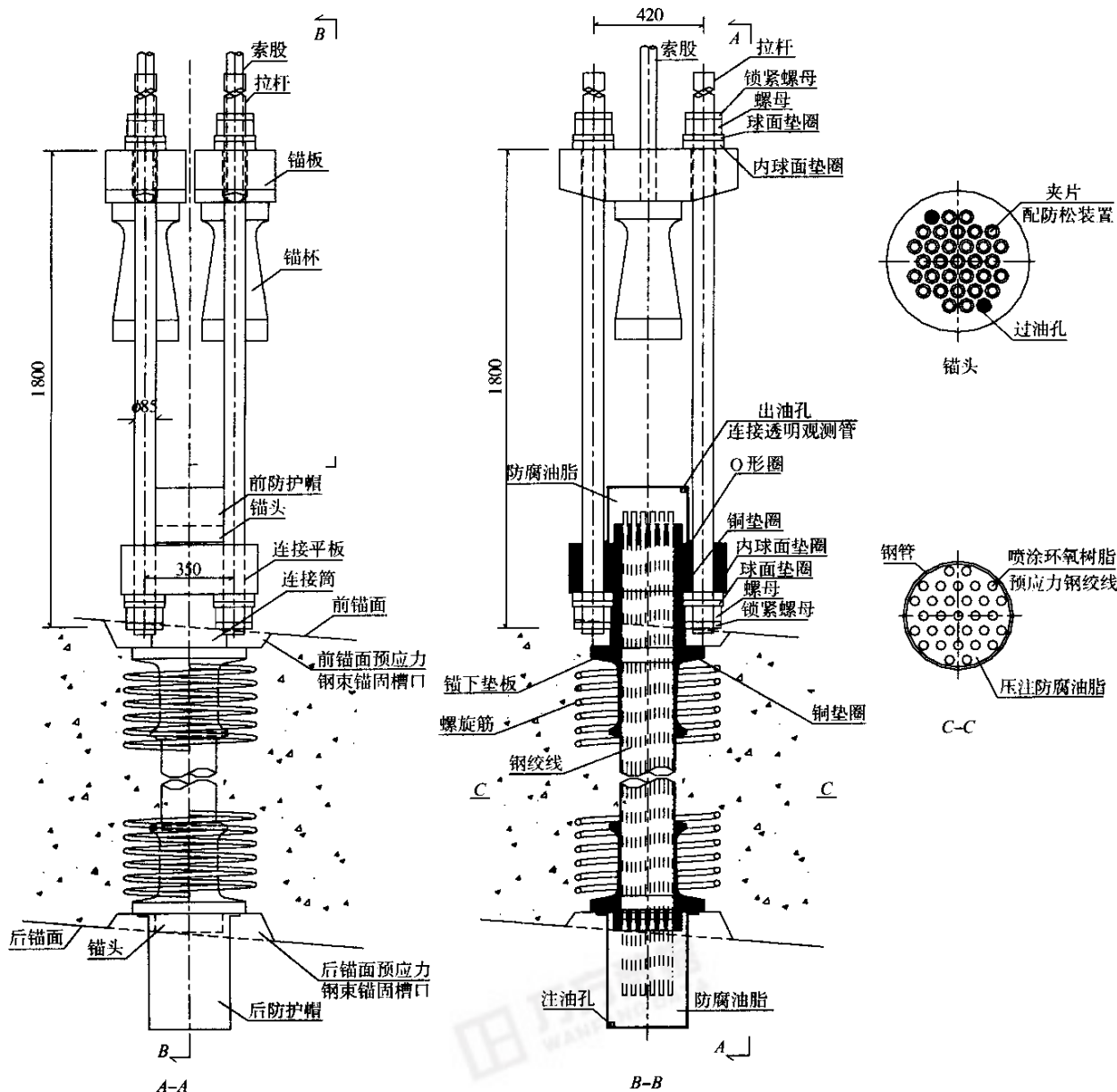


图 5 锚固系统锚固单元构造

拉杆材料采用 40 CrNiMoA, 长为 3.1 m, 直径为 85 mm。螺母、垫圈材料采用 40 Cr。

拉杆、螺母的螺纹均采用《军用 MJ 螺纹标准》, 相对于普通螺纹, 其特点是: 牙底较浅, 牙底过渡圆角大, 牙高降低, 拉杆、螺母、球面螺母的螺纹疲劳强度可提高 20%~40%; 两端采用球面垫圈, 可自动调整螺母与垫圈的承力面, 保持其有效接触面积, 同时能克服因制作、安装误差引起的拉杆角度偏差, 避免因偏载引起拉杆受弯, 减少局部应力集中, 有效提高螺纹的使用寿命。

索股锚头处的拉杆设计有加长螺纹, 以调节主缆索股的制作、安装误差, 最大调节量为 ± 900 mm。为防止螺母在动载下的松动, 设计时加设了锁紧螺母。

5.2.2 连接器

连接器采用 45 号优质碳素结构钢(锻造)。

连接器包括连接平板和连接筒。将连接器设计成分离构造, 受力明确并方便制作、运输和安装。连接平板的设计除须满足本身的强度和刚度要求外, 还须满足拉杆、锚头构造的要求。连接平板既是锚头下的垫板又起连接拉杆作用, 其受力比较复杂, 设计

文章编号: 0451-0712(2004)12-0047-06

中图分类号: U448.255

文献标识码: B

钢筋混凝土自锚式悬索桥施工

陈长明¹, 樊铁石², 石占良¹

(1. 中铁大桥局集团第二工程有限公司 南京市 210015; 2. 抚顺市公路管理处 抚顺市 150015)

摘 要: 抚顺万新大桥为主跨 160 m 的自锚式钢筋混凝土悬索桥, 主梁采用单箱 5 室钢筋混凝土箱梁, 主缆每根索股首尾相连形成环绕闭合结构。介绍了主梁滑动模架施工、鞍座安装、环绕闭合钢丝绳主缆无猫道施工、索股下料误差的解决、体系的转换施工等, 同时还介绍了该桥采用的新技术及对新技术的分析。

关键词: 万新大桥; 自锚式悬索桥; 主梁施工; 鞍座安装; 主缆施工; 体系转换

1 工程概述

抚顺万新大桥主桥为双索面自锚式钢筋混凝土悬索桥, 主跨 160 m, 边跨 70 m, 锚固跨 15 m, 全长 330 m。全桥立面布置见图 1 所示。主梁采用单箱 5 室钢筋混凝土箱梁, 梁体中心高为 2.5 m, 设双向 1.5% 横坡, 纵向设半径 $R=7\ 000$ m 凸形竖曲线。主缆由 85 根 $\phi 54$ mm 镀锌钢丝绳组成, 钢丝标准强度为 1 960 MPa, 主缆直径 546 mm, 主缆中心距 26.5 m, 中跨矢跨比为 1/6。塔顶设可滑动索鞍, 每个锚固跨

主梁内设 2 个滑动索鞍和 1 个固定索鞍, 全桥共 10 个索鞍。单根钢丝绳索股绕过全桥 10 个索鞍后, 在锚固跨梁内通过螺纹连接杆与连接套筒首尾相连形成环绕闭合索股, 每根索股仅 1 个接头, 全桥分 4 个接头区(8 个主要接头断面)对接主缆索股。主梁每 5 m 设一道横梁, 横梁两端设索导管, 吊杆采用 121 $\phi 7$ mm 镀锌高强平行钢丝, 强度为 1 670 MPa, 吊杆穿过索导管, 用螺母锚于横梁下。主缆平面及放索平面布置见图 2 所示。

收稿日期: 2004-07-26

时除按常规法进行锚头下及内球面垫圈下压应力和剪应力及各主要截面的弯曲、剪切应力的验算外, 还采用了三维有限元法进行应力、变形校核计算。

5.2.3 预应力锚固组件件

预应力锚固组件件由钢绞线、锚具、预埋钢管和防护帽组成。锚具由锚头、夹片、锚下垫板、螺旋筋及密封圈等组成。为方便施工, 采取前锚面一端张拉, 张拉控制应力为 $0.7 R_y^b$ 。张拉完毕后, 从后锚面向前锚面方向压注防腐油脂。在后、前防护帽端部设有注油孔和出油孔。

锚具静载锚固效率系数 $\eta_A \geq 95\%$, 破断时总应变 $\epsilon_u \geq 2\%$; 动载性能通过应力上限为 $0.65 \sigma_b$, 应力幅为 130 MPa, 循环次数均为 200 万次的疲劳试验。

预应力管道内径为 158 mm 和 209 mm, 管道及锚头孔眼设计应保证钢绞线不弯曲、不扭绞。锚头设有过油孔。锚下垫板及螺旋筋的设计应满足锚下混凝土为 30 号的受力要求, 通过三维有限元锚下应力分

析, 确定锚下垫板、螺旋筋的构造及尺寸。由于为无粘结式, 为保证安全, 锚头夹片后设置防松装置。

5.3 锚固系统的防腐

在锚室内设抽湿设备使锚室内相对湿度不大于 40%。

钢绞线采用表面喷涂环氧树脂防腐保护层及预应力管道内灌注防腐油脂的双重防腐体系, 在前锚面设置有油脂面观测管, 桥梁运营期间根据油面观测结果决定是否实施补充灌注。

参考文献:

- [1] 刘明虎. 悬索桥重力式锚碇设计的基本思路[J]. 公路, 1999, (7).
- [2] 刘明虎. 桥梁深大基坑工程方案设计[A]. 第五届交通青年学术会议论文集[C], 2003.
- [3] 周山水, 刘明虎, 等. 厦门海沧大桥锚碇设计[A]. 1999 年桥梁及结构工程学会论文集[C].
- [4] 润扬长江大桥南汊桥锚碇投标方案及施工图设计文件.