

厦门海沧大桥锚碇设计

周山水 刘明虎 唐小萍

摘 要 厦门海沧大桥东航道桥是我国建设中的第一座三跨连续钢箱梁悬索桥,其锚碇结构新颖、受力合理、用材经济、轻巧宏伟。本文主要介绍其锚体及预应力锚固系统的设计条件、结构特点、施工要点等。

一、前 言

即将建成通车的厦门海沧大桥系国家重点工程项目,位于厦门市西港中部,是厦门岛的第二条对外通道,是由东航道桥,西航道桥,东、西引桥,东渡互通立交,石塘立交,东、西引道及附属工程等分项工程组成的大型桥梁工程。大桥设双向六车道,全长约 6000m,其中东航道桥为我国第一座特大型三跨连续钢箱梁悬索桥,全长 1108m,主跨 648m,边跨 230m,桥面宽 32m(图 1)。其特点为塔处下横梁不设竖向支座,相对于三跨两铰体系具有体系刚度大,抗风稳定性好,行车舒适等优点。

厦门海沧大桥东航道悬索桥锚碇设计紧密结合了锚碇处的地形地质条件、结构受力的合理性和结构造形的景观效果等条件,采用重力式浅埋扩大基础、空腹三角形框架锚碇形式,力求做到大型结构物力与美的完美结合。

二、设计条件

1. 地质条件

西锚碇区表层为 0~2.0m 坡残积亚粘土,下伏基岩为泥岩夹泥质粉砂岩,中、细粒长石石英砂岩,偶夹铁质砂岩,属软质岩、硬质岩相间地层,风化程度各处不一,地基稳定性一般。其中强风化层厚约 30~80m,持力层性质稍差,容许承载力 $[\sigma_0]=400\sim 500\text{kPa}$;中风化岩层岩质较硬,岩体相对较完整,持力层性质较好,容许承载力 $[\sigma_0]$

$=800\sim 1000\text{kPa}$;微风化岩层埋藏较深,一般在 $-50\sim -90\text{m}$ 。基底岩层均匀性稍差,稳定性较好。

东锚碇区西部(小部)表层为人工填筑土或残积土,厚约 1~6m 不等,下伏基岩为斜长花岗斑岩,上部为全风化带和强风化带,厚 3.5~13.5m,容许承载力 $[\sigma_0]=300\sim 800\text{kPa}$;下部为中风化及微风化岩层,石质致密坚硬,稳定性好,容许承载力 $[\sigma_0]=2000\sim 4000\text{kPa}$ 。锚区东部(大部)地质为流纹质晶屑凝灰熔岩,岩层风化强烈,风化深度大,风化不均匀,在中风化层中夹有强风化软弱带,强风化和全风化带一般厚 20~30m,局部厚 50m 以上,节理发育,容许承载力 $[\sigma_0]=300\sim 500\text{kPa}$ 。其下为中风化~微风化流纹质晶屑凝灰熔岩,石质坚硬,稳定性好,工程地质条件良好,容许承载力 $[\sigma_0]=800\sim 1500\text{kPa}$ 。

2. 上部构造条件

- (1)上部结构型式:三跨连续钢箱梁
- (2)吊索横向间距:34m
- (3)主缆在散索点处入射角:12.4803
- (4)每根主缆拉力:约 12 000t
- (5)主缆施工方法:采用 PWS 法
- (6)主缆断面:每根主缆由 110 根平行钢丝索股组成(图 2)

三、锚碇总体设计概述

1. 结构形式

周山水 中交公路规划设计院 高级工程师
刘明虎 中交公路规划设计院 高级工程师
唐小萍 柳州海威姆建筑机械有限公司 高级工程师

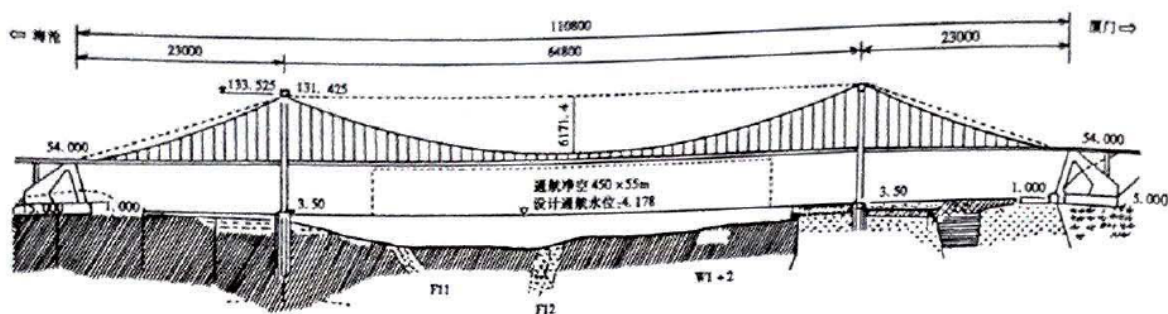


图1 厦门海沧大桥车航道桥桥型布置(尺寸单位:cm)

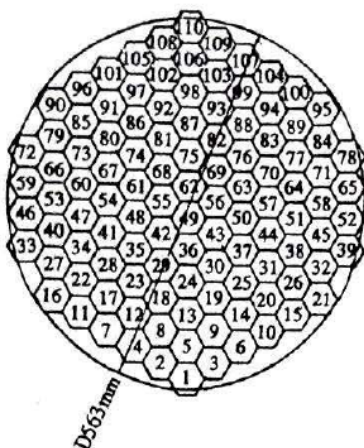


图2 主缆断面(尺寸单位:cm)

根据锚碇所处位置的地形地质条件和上部构造条件,经过综合比较决定采用重力式锚碇。为减小基础施工难度,缩短工期,降低造价,基础采用浅埋扩大基础的结构型式,按基底容许承载力不小于0.5 MPa 进行设计。为减小使用阶段的基底最大工作应力,增加锚碇的抗滑动、抗倾覆稳定性,锚碇采用箱形基础,基底采用向后倾斜的倒坡。

锚体由锚块、基础、前锚室、散索鞍支墩、横梁五部分组成。出于施工和检修的需要,在锚块内

设置了后锚室。同样出于施工需要,在锚块和基础之间的纵、横向设置了2m 宽的混凝土后浇筑带,它是实现锚体“化整为零、集零为整”的关键部位。

锚固方式为前锚式,锚固系统为预应力锚固系统。主缆索股在锚碇前锚室内的散索长度41m,锚固系统的锚固长度18.08m,散索点理论高程54.000m,折射角45°

锚体采用空腹三角形框架结构形式,突破了传统的重力式实体锚碇外观笨重的结构形式,实现了大型结构力与美的和谐统一,并为锚碇内部建筑物提供了所需空间。采用较高的箱形断面散索鞍支墩加横梁连接两支墩既改善了边跨短吊索的受力状况又兼作主引桥的过渡墩,同时改善了地基应力。密闭的钢筋混凝土前锚室既保护了主缆索股和锚固系统又加强了锚块与散索鞍支墩的连接,增强了锚碇结构的整体性。

2. 总体布置

本桥东、西锚碇结构形式基本相同。锚碇一般构造见图3。

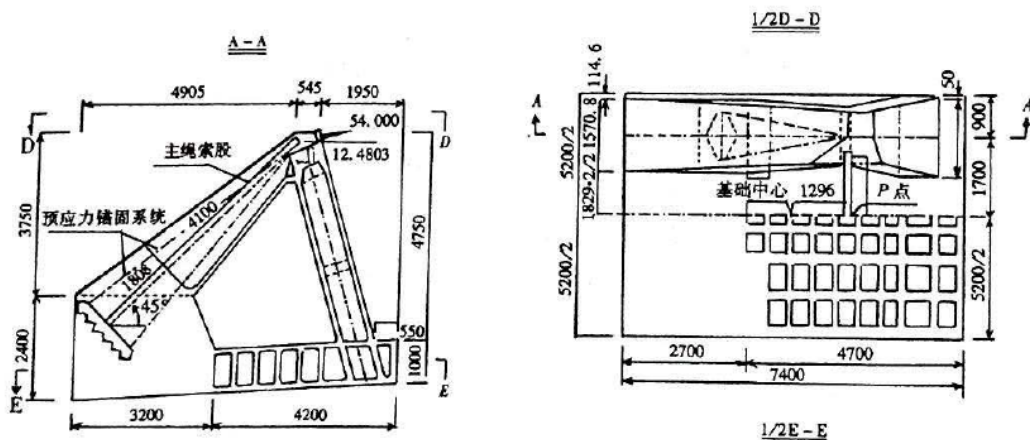


图3 锚碇一般构造(尺寸单位:cm)

3. 主要材料

混凝土:除横梁和散索鞍支墩顶部采用40号混凝土外,其余部位均采用30号混凝土,其中后浇带采用微膨胀混凝土。

预应力材料:锚固系统和横梁预应力钢绞线直径15.24mm,标准强度1860MPa。

普通钢筋:直径大于等于10mm的采用Ⅱ级钢筋,小于10mm的采用Ⅰ级钢筋。

钢材:锚固系统定位支架采用Q235A钢,锚固系统预应力钢束管道及冷却管采用20号无缝钢管。锚固系统拉杆、螺母、垫圈采用40Cr钢,联接垫板采用45号钢。

主要材料数量:一个锚碇混凝土数量为61035m³,钢筋2767t,预应力钢绞线80t,型钢369t,其它钢材约25.7t。

4. 整体验算

考虑了施工和运营阶段两种荷载工况,对锚碇整体进行了基底应力、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。

锚碇整体验算主要技术指标:

抗滑动安全系数: $K_t \geq 2.0$ (平时) $K_t \geq 1.2$ (地震时)

抗倾覆安全系数: $K_o \geq 3.0$

转点变位: $\delta_a < 10\text{cm}$

5. 结构计算

锚体结构采用常规方法和有限元法进行分析计算。采用平面有限元法和常规方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联接垫板还采用三维有限元法进行了应力分析,根据计算分析结果进行结构调整和配筋设计。

由于是第一次采用这种空腹结构锚体形式,设计对由前锚室、散索鞍支墩和横梁组成的空间框架除进行了整体分析计算外,还根据施工方案及流程分析了各种不利荷载工况,进行了详细的分析计算,对前锚室大跨度的顶、底板和腹板还进行局部强度和抗裂验算。空间框架的施工阶段和工况如下:

(1)分层分块浇筑锚块和基础混凝土,浇筑后浇带(部分基坑回填)。锚块和基础组成强大

的刚体承受外部荷载;

(2)满堂支架法或劲性横梁支撑法分节浇筑散索鞍支墩和前锚室混凝土(此时前锚室为槽形断面)。散索鞍支墩和前锚室承受自重、施工荷载、风荷载等;

(3)横梁混凝土浇筑和预应力施工;

(4)散索鞍支墩和前锚室合拢,拆除支架或劲性横梁支撑,空间框架形成;

(5)预应力锚固系统施工,架设猫道。此时猫道拉力作用于框架。

(6)架设主缆,主缆索股锚固,完成猫道力转换。此时,锚碇承受空缆拉力。

(7)前锚室顶板施工,锚碇主体结构施工完成。此后,前锚室成为封闭箱形断面。锚碇成为整体承受外部荷载;

(8)主引桥上部结构施工完成(一期和二期恒载加上)。此时,锚碇整体承受恒载作用下的缆力和横梁顶上部结构传来的垂直和水平力;

(9)投入运营。此后,锚碇整体承受上部结构在恒、活、风、温度等荷载作用下的缆力和横梁处的垂直和水平力。

四、锚体各部的的设计

1. 基础

由于东、西锚碇处岩层风化强烈,风化深度大,为减小基础施工难度,缩短工期,降低造价,经综合比较,摒弃了深基础方案,均采用浅埋扩大基础的结构型式,分别以强风化凝灰熔岩和泥质粉砂岩作为结构持力层。锚碇基底平面尺寸为74m×52m,前部为空心箱式基础和散索鞍支墩,后部实心锚块,结构重心后移,并且采用基底向后倾斜5.4%的倒坡,使其在使用阶段基底应力较小且均匀,增加了锚碇的抗滑、抗倾稳定性,解决了锚碇处全、强风化软岩的厚度大,地基容许承载力小这一难题。箱式基础构造尺寸为:高10m,顶、底板分别厚1.0m、1.2m,纵、横腹板厚2.5m、1.0m。

同时,为了避免基坑开挖时地基泡水和扰动,引起地基承载力的降低,设计要求施工时设置旋喷桩防水帷幕,并采用井点降水和坑内排水来确保基坑干开挖,采用小药量爆破和近建基面人工开挖等措施以减少对地基的扰动。

2. 锚块

锚块,是重力式锚碇最根本的承力部件,也是锚固系统传力的首要部位,靠其自身的巨大重力来承担主缆拉力。锚固预应力系统及其定位钢支架内置于锚块内,为了便于锚固系统的施工及检修,在锚块内设置有后锚室。按常规方法和有限元法进行计算分析,并按其结果布设受力钢筋。在混凝土内部和表面配置一定数量的防裂钢筋,来抵抗混凝土内外应力(主要为温度和混凝土收缩应力),并得以限制混凝土内外开裂。一个锚碇锚块混凝土共 $37\,500\text{m}^3$,含筋率约 $14.4\text{kg}/\text{m}^3$ 。

3. 散索鞍支墩、前锚室、横梁

散索鞍支墩作为散索鞍的支承构造,直接承受由主缆拉力引起的散索鞍传来的巨大压力,并与前锚室组成框架共同承受主缆拉力。散索鞍支墩垂直高度约为 45.4m ,与水平面的夹角 73.6745° 。前、后墙厚 1.0m ,左、右侧墙底部厚 1.5m ,顶部厚 1.0m ,中间设过渡段。支墩箱体内左、右侧墙间设隔墙,厚 1.0m 。各墙体钢筋伸入箱式基础腹板内锚固。在顺桥向支墩截面等宽为 8.0m ,横桥向由底部宽 17m 过渡到顶部宽约 11.6m 。为抵抗散索鞍传来的巨大压力,支墩顶部设计成厚 4.0m 的实心段并配置适量的受力钢筋。实心段与周边墙体之间设 3.0m 的渐变段。

前锚室是防护锚跨内主缆索股及其预应力锚固系统的薄壁箱形结构。前锚室底部截面尺寸由主缆索股的锚固系统在前锚面的布置决定,顶部截面尺寸由散索鞍和支墩顶部构造决定。前锚室顶板厚 0.5m ,底板厚 0.7m ,两侧腹板厚 0.8m 。前锚室各板内受力钢筋分别伸入锚块和散索鞍支墩内锚固。在横向,为保证加劲梁和构造空间,前锚室和散索鞍支墩顶部内侧设置切角。出于施工考虑,前锚室与散索鞍支墩相接处设置了后浇段。另外,前锚室顶板设计有良好的防水构造。

横梁是在上部结构标高较高,做桥墩已不再合适的情况下,在散索鞍支墩之间利用散索鞍支墩而设置的主桥加劲梁和引桥上部结构的支承结构,主要承受自重和上部结构传来的垂直和水平荷载。横梁为预应力混凝土结构,横梁标准断面为 $4\text{m} \times 5\text{m}$,顶底板厚 0.6m ,腹板厚 1.0m 。横梁上设置有主桥加劲梁的竖向支座牛腿、横向抗风挡块、纵向限位挡块和引桥支索垫石等构造。

五、锚固系统的设计

锚碇锚固系统采用了国内研制生产的 OVM MD15-7 预应力钢绞线锚固系统,这种系统采用双拉杆、双预应力钢绞线结构,具有构造简单、受力明确、节省钢材、施工方便等特点,是一种值得推广的新型锚固系统。

1. 锚固系统方案的选定

锚固系统设计中,我们分析研究了现有国内外大型悬索桥的锚固系统的特点,由于预应力锚固系统与型钢锚固系统相比,具有用钢量省(型钢 2000t ,预应力钢筋 900t),构造简单,受力明确,施工方便,安全可靠等优点;同时钢绞线预应力体系与粗钢筋预应力体系相比,具有可供选择的锚具的规格多,工艺成熟,张拉吨位大,定尺长度大等优点,因此我们最终选定了预应力钢绞线锚固系统作为海沧大桥的锚固系统。

2. 技术要求

(1) 锚固系统设计安全系数 $k \geq 2.5$,设计疲劳荷载循环次数 > 200 万次,设计寿命 > 100 年。

(2) 锚固系统锚下混凝土的应力不大于 C30 混凝土的允许值。

3. 锚固系统构造

主缆由 2×110 根索股组成,由 4×110 个锚固单元组成的预应力锚固系统锚固,锚固长度 18.08m 。每个锚固单元由二套拉杆组装件(拉杆、六角螺母、球面螺母及垫圈、锁紧螺母),一块联接垫板、一块辅助垫板和二套预应力钢绞线锚具组装件(钢绞线及与之配套的锚具等)组成。锚固系统索股布置见图 4、图 5,锚固系统锚固单元构造见图 6。

4. 锚固系统各部构件的设计

(1) 拉杆组装件

采用材料: 40Cr
破断应力: $\sigma_b = 980\text{MPa}$
屈服应力: $\sigma_s = 785\text{MPa}$
伸长率: $\delta_s \geq 9.0\%$
直径: $d = 64\text{mm}$

拉杆组装件的静载安全系数 $k \geq 3.0$,疲劳寿命 $N = 10^7$ 次。

为满足安全性和经济性的要求,拉杆、螺母、球

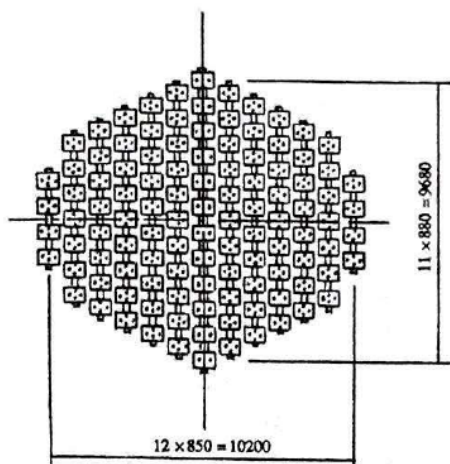


图4 前锚面主缆索股布置(尺寸单位:mm)

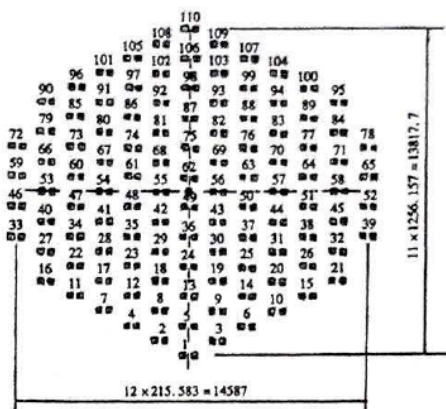


图5 后锚面主缆索股布置(尺寸单位:mm)

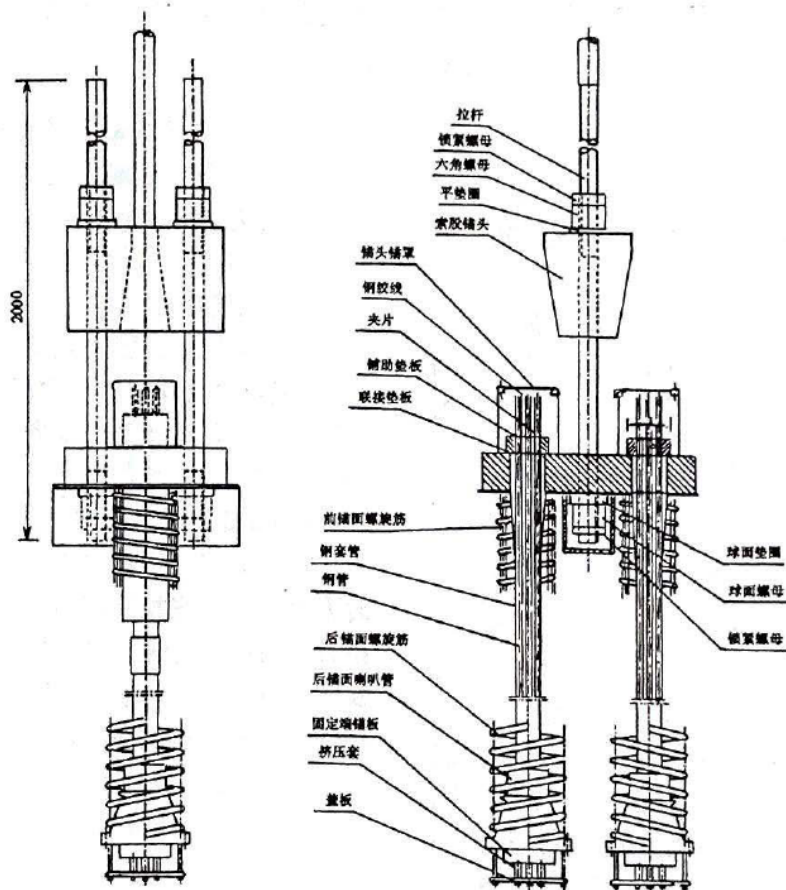


图6 MD15-7 预应力锚固系统构造(尺寸单位:mm)

面螺母的螺纹均采用《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提高 20% ~ 40%;联接垫板处的螺母、垫圈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,保持其有效接触面积,同时能克服因制作、安装上的误差引起的拉杆角度偏差,使拉杆方向与索股的受力方向一致,以避免由于偏载引起

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 ± 400 mm。为防止螺母在动载下的松动,设计时加设了锁紧螺母。经静、动载试验证明拉杆组零件强度满足设计要求。

(2) 联接垫板

采用材料: 45 优质碳素结构钢(锻造)

容许拉应力: $[\sigma] = 210\text{MPa}$

容许剪应力: $[\tau] = 125\text{MPa}$

屈服应力: $\sigma_s = 360\text{MPa}$

联接垫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、锚板构造及锚下混凝土应力的要求。采用平面面积较大的联接垫板,可以减小锚下混凝土的压应力,降低锚体所用混凝土标号。联接垫板设计中考虑了压浆孔、定位孔和安装孔,同时还考虑了吊环螺钉孔,以方便施工。

联接垫板既是锚板下的垫板又起连接拉杆作用,其受力比较复杂,设计时除按常规法进行锚板下及球面螺母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,还采用了三维有限单元法进行应力、应变校核计算。

(3) 预应力钢绞线锚具组装件

预应力钢绞线锚具组装件由预应力钢绞线、锚具和预埋钢管组成。前锚面为张拉端,采用两套 OVM. MD15-7 型群锚锚具,后锚面为固定端锚头,采用两套 OVM. MD15-7P 型群锚锚具。

由于锚固系统与主缆均属于悬索桥的一类构件,具有不可更换性,因此在预应力钢绞线锚具组装件的锚具我们选用了性能优异的 OVM 群锚锚固体系,要求该体系的钢绞线锚具的锚固性能、抗疲劳和低应力下防滑丝性能均优于一般锚具,其锚具静载锚固效率系数 $\eta_A \geq 95\%$,破断时总应变 $\epsilon_u \geq 2\%$;动载性能分别通过应力上限为 $0.65\sigma_b$ 、应力幅为 80MPa 及应力上限为 $0.45\sigma_b$ 、应力幅为 200MPa ,循环次数均为 200 万次的疲劳试验。

采用尺寸较大的垫板、喇叭管,以降低锚体混凝土应力,从而使锚体能采用较低标号混凝土,既能降低造价、又方便了施工;预应力钢绞线标准采用符合美国 ASTM A416-92 标准 270 级,公称直径 $\phi 15.24\text{mm}$ 的低松弛钢绞线,标准破断强度为 1860MPa ;预应力管道采用符合 GB 8162-87 标准的 $\phi 90 \times 5$ 的 20 号无缝钢管。

5. 锚固系统的防腐

除在锚室内设抽湿设备使锚室内相对湿度不大于 40% 外,还进行以下防腐设计:

锚固系统前锚面所有外露钢构件(拉杆组件、联接垫板、辅助垫板)的表面应进行清理,去除油污、浮锈,并涂底漆与面漆进行防腐处理。联

接垫板与辅助垫板的缝隙用环树脂进行密封处理。

预应力体系的防腐共考虑了三种方案:

(1) 环氧树脂全喷涂钢绞线加管道内压注 C40 号水泥砂浆和前锚面锚罩内压注环氧砂浆方案。

(2) 普通钢绞线采用管道和前锚面锚罩内全部压注环氧砂浆方案。

(3) PE 防护钢绞线加管道和前锚面锚罩内灌防腐油脂方案。

考虑到锚固系统是悬索桥的关键部件且难以更换性,因此,我们选择了具有双重保护功能,工艺性较好,防护更可靠的防腐方案一。

六、锚碇施工要点

1. 设计上控制锚体混凝土裂缝的措施

锚块和箱式基础为大体积混凝土结构,为减小温度应力,设计要求施工时限制混凝土入仓温度不高于 28°C ,内外温差不超过 25°C ,并在设计上采取两项措施:

(1) 混凝土分层分块浇筑:锚碇分四块逐层浇筑,块与块之间设置后浇段;

(2) 锚块内设置冷却管,对锚块混凝土进行一次冷却和二次冷却。

2. 锚固系统施工

预应力张拉应在锚下混凝土达到 100% 强度时方可进行。张拉采用前锚面双锚头同步单向张拉,锚面钢绞线张拉应遵循对称张拉的原则;索股长度调节采用专用穿芯千斤顶同步张拉两根拉杆,调节两根拉杆的螺母来完成。

更正:

1、《海威姆预应力技术》2002 年第 3 期首页第 31 行:李唐宁教授的供职单位“铁道部大桥局设计院”应为“重庆大学建筑设计研究院”。

2、《海威姆预应力技术》2002 年第 3 期第 3 页《多跨斜拉桥》一文署名“李青 庄苗”应为“李青 庄苗 编译”。

以上为编辑校对之误,敬请谅解。