

厦门海沧大桥锚碇设计与施工

周山水 刘明虎 唐小萍 谢正元

【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、外观宏伟。本文作者在大桥建设中曾撰文介绍过锚碇预应力锚固系统的设计与结构特点。本文扼要补充施工要点及锚碇基坑开挖和边坡防护的设计要点等。

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。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

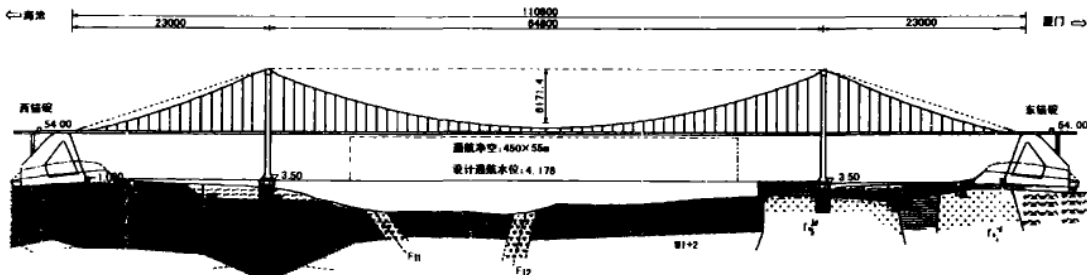
1、地质条件

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30~80米,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~-90米。东锚碇区西部(小部)表层为人工填筑土或残积土,下伏基岩为斜长花岗斑岩,上部为全风化带和强风化带,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 $\sigma_0=2000\sim 4000\text{kPa}$ 。锚碇区东部(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20~30米,局部厚50米以上,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12000t
- (5) 主缆施工方法: 采用PWS法
- (6) 主缆断面: 每根主缆由110根平行钢丝绳股组成(图2)。



周山水 刘明虎 交通部公路规划设计院高级工程师
唐小萍 柳州OVM公司副总经理、高工
谢正元 柳州市建筑机械总厂技术中心主任、工程师

(尺寸单位: cm)

图1 厦门海沧大桥东航道桥桥型布置

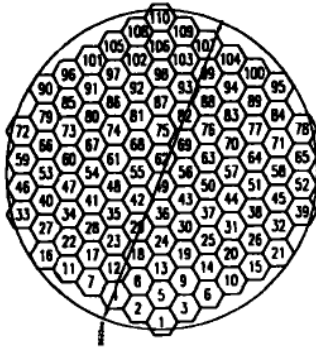


图2 主缆断面 (尺寸单位: mm)

三、设计概述

1、基坑开挖、边坡防护和地基处理

(1) 基坑开挖

东、西锚碇基坑底面设计高程均为-1.60m(前缘)~-5.60m(后缘),设置5.41%的倒坡。基底尺寸长79.5m,宽57m,底面积4532m²。基底设置60cm厚混凝土垫层。为确保基坑干开挖,防止基坑泡水影响地基承载力,设计要求采用井点降水和防水帷幕,并加强坑内排水等措施。施工实践证明以上措施行之有效。

(2) 边坡防护

永久边坡坡度为1:0.75,临时边坡坡度为1:0.3,边坡面积东锚约12400m²,西锚约4530m²。为保证边坡及山体的稳定,边坡防护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。具体措施是边开挖边打锚杆并挂网喷浆进行全面防护,对东锚基坑东侧大高度边坡及其它局部节理发育的不稳定边坡采用预应力锚索进行重点加固。预应力锚索构造见图3。为在保证安全的前提下,尽可能减少挖、填方工程量,对永久边坡设计采用1:0.75的坡度,而对临时边坡设计采用1:0.3的坡度,即临时边坡安全度尽可能取小值的设计思路。实际施工中,只在局部岩性特别差的临时边坡发生了轻微的塌方,后经局部锚索、锚杆加固处理予以解决。实践证明此设计思路既减少了工程量节约了施工费用,又加快了施工进度。

(3) 地基处理

设计要求基底容许承载力不小于0.5MPa,基底各部最大容许沉降不大于2cm。为确保基底承载力满足设计要求,设计备用了旋喷桩和静压注浆加固法处理达不到设计要求的软弱地基的措施。根据现场试验结果,基底土除局部外,大部分区域均满足设计要求。因此施工中仅对局部承载力较低的基底土进行了换填处理。

2、锚碇结构形式

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0.5MPa进行设计。在强风化极软岩地基上锚碇采用浅埋基础型式,减少了基坑开挖工程量及基础施工难度,缩短了工期,大大降低了工程造价。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。

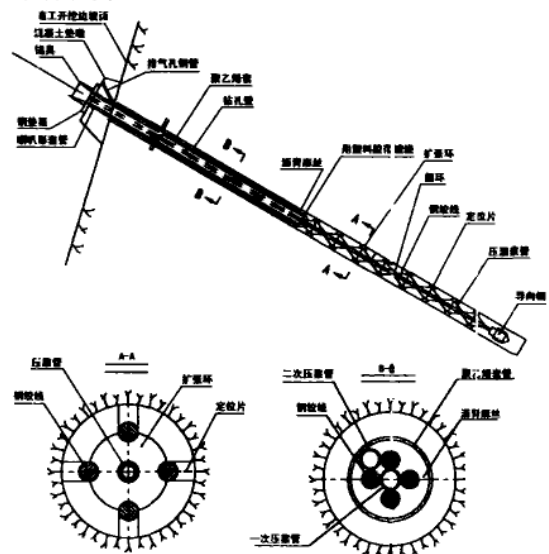


图3 预应力锚索构造

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。

3、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4。

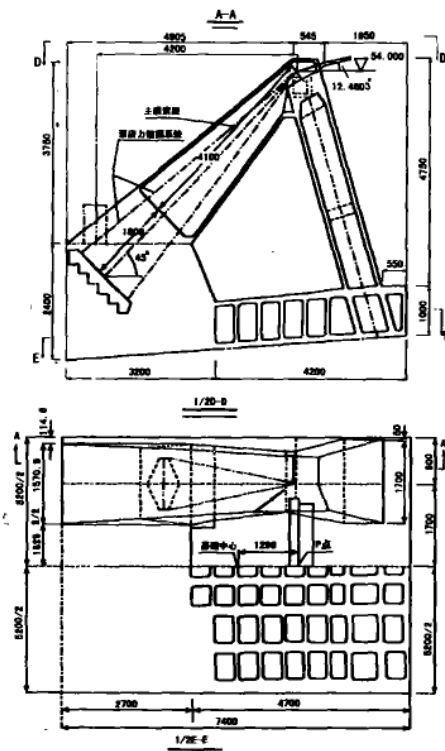


图4 锚碇一般构造(尺寸单位: cm)

4、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 61035m^3 , 钢筋2767t, 预应力钢绞线80t, 型钢369t, 其它钢材约25.7t。

5、整体验算

考虑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: $K_c \geq 3.0$

转点变位: $\delta_s < 10\text{cm}$

6、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。

四、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。主缆锚固系统的国产化, 结束了大型桥梁关键部位的预应力体系依赖进口的历史, 并使主缆预应力锚固系统产品标准化、系列化。

1、方案的选定

锚碇技术

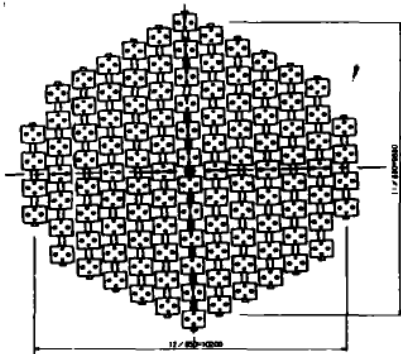
锚固系统设计中,我们分析研究了现有国内外大型悬索桥的锚固系统的特点,由于预应力锚固系统与型钢锚固系统相比,具有用钢量省(型钢2000吨,预应力筋900吨),构造简单,受力明确,施工方便,安全可靠等优点;同时钢绞线预应力体系与粗钢筋预应力体系相比,具有可供选择的锚具的规格多,工艺成熟,张拉吨位大,定尺长度大等优点,因此我们最终选定了预应力钢绞线锚固系统作为海沧大桥的锚固系统。

2、技术要求

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。锚固系统锚下混凝土的应力不大于C30砼的允许值。

3、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5、6,锚固系统锚固单元构造见图7。



尺寸单位: mm

图5 前锚面主缆索股布置

4、锚固系统的防腐

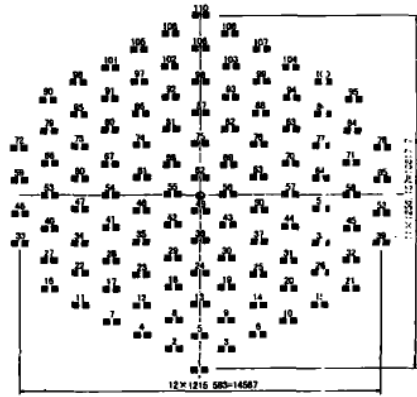
除在锚室内设抽湿设备使锚室内相对湿度不大于40%外,还进行如下防腐设计:

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氧树脂进行密封处理。

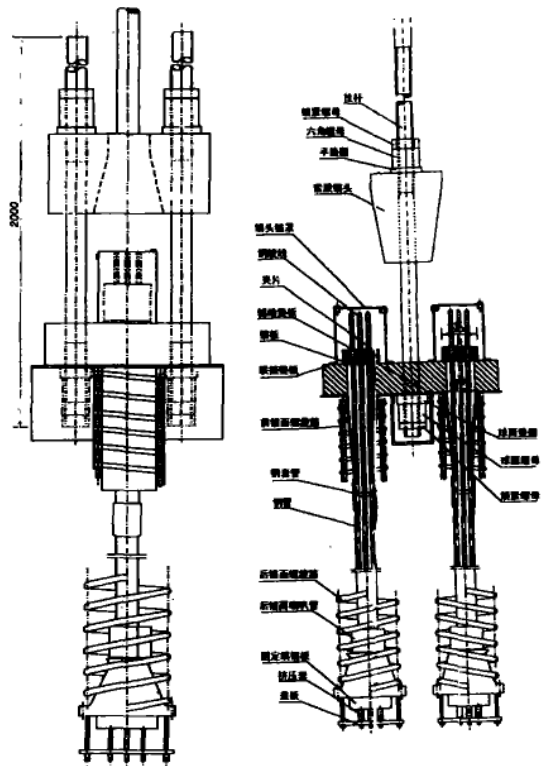
预应力体系的防腐设计共考虑了四种方案:

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



尺寸单位: mm

图6 后锚面主缆索股布置



尺寸单位: mm

图7 MD15-7预应力锚固系统锚固单元构造

(下转第27页)

算成 2×10^6 疲劳寿命的疲劳寿命折算系数)作为疲劳试验的上限应力;恒载的1.1958倍作为下限应力,经过200万次疲劳试验,球面螺母、六角螺母无松动、无裂纹,证明拉杆组件的疲劳寿命大于 10^7 次。

2、连接垫板设计分析

连接垫板在使用过程中,不但要满足强度要求,还要满足刚度要求,设计要求在设计荷载的作用下连接垫板的变形量不能超过0.2mm,为了满足设计要求,我们分析了连接垫板的受力状态,按材料力学的计算方法对连接垫板主要受力面进行了抗弯、抗压、抗剪的强度计算,计算结果表明连接垫板在中心截面处(两束预应力筋的对称面)的变形量为0.0004924mm,考虑到连接垫板所受的是空间力,如果仍按传统的计算方法,将不能准确地反映出连接垫板上各处的实际受力状态及变形情况,因此我们采用了有限元分析方法,对连接垫板进行应力、应变分析(见封

三彩图)。以进一步验证连接垫板的各主要受力面的实际情况。

从封三的彩色图中可以看出:

(1)在连接垫板与锚板接触面处的VON-mises应力最大,局部出现180MPa的压应力,对连接垫板的强度影响不大,且小于45号钢的许用应力 $[\sigma_0]=210\text{MPa}$,其余绝大部分均低于140MPa,小于45号钢的 $[\sigma_0]=360\text{MPa}$ 。因此连接垫板强度是足够的,安全系数完全满足大于2.5的要求;

(2)从连接垫板轴向(Z向)变形分布图上看出连接垫板最大变形为0.19607mm,小于设计要求0.2mm。

四、结论

综上所述,拉杆组件、连接垫板,经材料力学计算、计算机有限元分析、静载动载试验,均证明拉杆组件、连接垫板的设计、加工是合理的,可以满足海沧大桥的使用要求。

(上接第23页)

(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。

(4)管道内压注C40号纯水泥浆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,以及现场的实际施工情况,我们由原设计采用的方案四改用具有双重保护功能,工艺性较好,防护更可靠的防腐方案一(后业主由于费用上的原因虽采用了方案一,但对钢绞线未实施喷涂)。施工实践证明,方案一更符合我国国情,更安全可靠。

五、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。