

厦门海沧大桥预应力锚碇体系设计

孟凡超 袁 洪 彭宝华 周山水 徐国平 王仁贵 刘明虎 刘晓东
(中交公路规划设计院 北京 100010)

摘要: 简述了厦门海沧大桥的工程概况及桥型方案, 着重介绍其预应力锚碇体系的设计要点及特点。
关键词: 三跨连续漂浮体系 预应力 锚碇体系 设计

1. 工程概况

厦门海沧大桥位于厦门市西海域, 连接厦门东渡码头和大陆海沧开发区, 是大陆与厦门本岛第二条重要的进出岛通道。工程包括东航道桥(主桥)、西航道桥、引桥、引道、互通立交等分项工程, 工程主线全长5927.47m, 其中主线工程桥梁长3406.4m, 主线工程道路长2521.007m。大桥按双向六车道设计, 桥梁宽度32m, 计算行车速度为80km/h。

厦门海沧大桥是国家“九五”重点建设项目, 工程总投资28.9亿元。中交公路规划设计院承担了除互通立交桥以外的全部主体工程的设计工作。初步设计于1995年7月至1996年5月完成, 1996年10月至1997年6月完成施工图设计。工程于1996年12月开工, 1999年12月建成通车。

2. 桥型方案

根据以上建设条件, 经综合技术、经济、景观、施工及运营条件, 厦门海沧大桥东航道桥实施采用跨径为230+648+230三跨连续全漂浮钢箱梁悬索桥。桥型总体布置见图1。国内外大跨度悬索桥的统计资料一览表见表1。统计资料表明, 国内外大跨度悬索桥大部分采用单跨简支和三跨简支结构, 1998年建成通车的丹麦STOREBELT桥, 是世界上第一座大跨度扁平钢箱梁三跨连续半漂浮体系悬索桥, 其在索塔处设置了钢箱梁竖向约束装置。

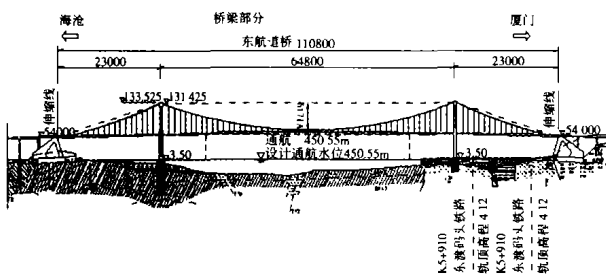


图1 桥型总体布置

表1 国内外大跨度悬索桥统计资料一览表

桥名	国家	完成日期	跨度(m)	加劲梁型式	结构体系	备注
明石海峡大桥	日本	1998	960+1991+960	桁架梁	三跨	公路桥
STOREBELT桥	丹麦	1998	535+1624+535	扁平箱梁	三跨	公路桥
HUMBER桥	英国	1981	530+1410+280	扁平箱梁	三跨	公路桥
江阴长江公路大桥	中国	1999	336.5+1385+309.4	扁平箱梁	单跨	公路桥
青马大桥	中国香港	1997	355.5+1377+300	空腹桁架箱梁	双跨	公路桥+城市轻轨
VERRAZANO-NARRO WS桥	美国	1964	370+1298+370	桁架梁	三跨	公路桥
GOLDEN-GATE桥	美国	1937	343+1280+343	桁架梁	三跨	公路桥
MACINAC-STRAITS 桥	美国	1957	549+1158+549	桁架梁	三跨	公路桥
南备赞濑户桥	日本	1988	274+1100+274	桁架梁	三跨	公铁两用
BOSPORUS II 桥	土耳其	1988	210+1090+210	扁平箱梁	单跨	公路桥
BOSPORUS I 桥	土耳其	1973	231+1074+255	扁平箱梁	单跨	公路桥
GEORGE WASHINGTON 桥	美国	1931	186+1067+198	桁架梁	三跨	公路桥
DE-VINTE-ECINCODE-ABRIL 桥	葡萄牙	1966	483+1013+483	桁架梁	三跨	公铁两用
FORTH-ROAD 桥	英国	1964	409+1006+409	桁架梁	三跨	公路桥
SEVERN 桥	英国	1966	304.8+987.55+304.8	扁平箱梁	三跨	公路桥
西陵长江公路桥	中国	1997	225+900+225	扁平箱梁	单跨	公路桥
珠江虎门大桥	中国	1997	302+888+348.5	扁平箱梁	单跨	公路桥
厦门海沧大桥	中国	1999	230+648+230	扁平箱梁	三跨	公路桥
小贝尔特桥	丹麦	1970	240+600+240	扁平箱梁	三跨	公路桥
大岛大桥	日本	1988	140+560+140	扁平箱梁	单跨	公路桥
西堠门大桥	中国	设计	578+1560+485	扁平箱梁	二跨	公路桥
润杨大桥	中国	在建	470+1490+470	扁平箱梁	单跨	公路桥
阳逻长江大桥	中国	在建	250+1280+440	扁平箱梁	单跨	公路桥

3. 锚碇设计要点

近年来,大跨径桥梁日益增多。悬索桥以其独特的优势,成为跨径在600m以上桥梁的首选方案。作为悬索桥四大件之一的锚碇,无论在设计、施工、科研等各方面,都显示出其不可忽视的重要性。

3.1 锚碇的功能及基本结构形式

锚碇一般是指主缆索的锚固系统,包括锚块、鞍部、缆索防护构造、散索鞍支承及其它附属构造的锚体和基础的总称。锚碇在承受主缆索拉力的竖向分力的同时,更主要的还承受主缆索拉力的水平分力。锚碇的基本功能就是通过锚固系统将主缆索拉力传给锚块,再通过包括锚块在内的锚体将之传给基础,从而达到平衡主缆索拉力,起到锚固作用。

锚碇通常分为自锚式和地锚式两种形式。自锚式是将主缆索锚在加劲梁上,而地锚式则将主缆索锚于重力式混凝土锚块或岩洞中的混凝土锚块上。地锚式通常又分为重力式锚碇和隧道锚碇,悬索桥大多采用重力式锚碇。

3.2 重力式锚碇的结构类型

锚碇的结构类型应根据锚碇位置的地形地质条件和桥梁上部结构条件来构思。对于基础,通常根据施工场地、地形和地质条件等综合因素来决定结构形式。锚体则根据上部结构形式、主缆力大小、理论散索点至基础顶的距离等综合因素来决定其形式。锚碇基础的形式有:①沉井基础,如明石海峡大桥明石岸锚碇、江阴长江大桥北锚等。②地下连续墙基础,如江苏润扬长江大桥北锚碇、明石海峡大桥神户岸锚碇等。③实体式与锚杆组合式基础,如美国新港桥西锚碇。④直接在基岩上设置锚体,如江阴大桥南锚、虎门大桥东锚、汕头海湾大桥南锚。⑤大直径桩基础,如葡萄牙萨拉扎大桥。⑥箱型倒坡扩大基础,本桥首次采用。

锚碇的锚体有实体型锚体和轻型锚体,本桥采用框架式锚体。

3.3 锚碇设计

3.3.1 总体布置

锚碇设计紧密结合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。

本桥东、西锚碇结构形式基本相同,主要由基础、锚体、锚固系统等组成。锚碇总体构造见图2。

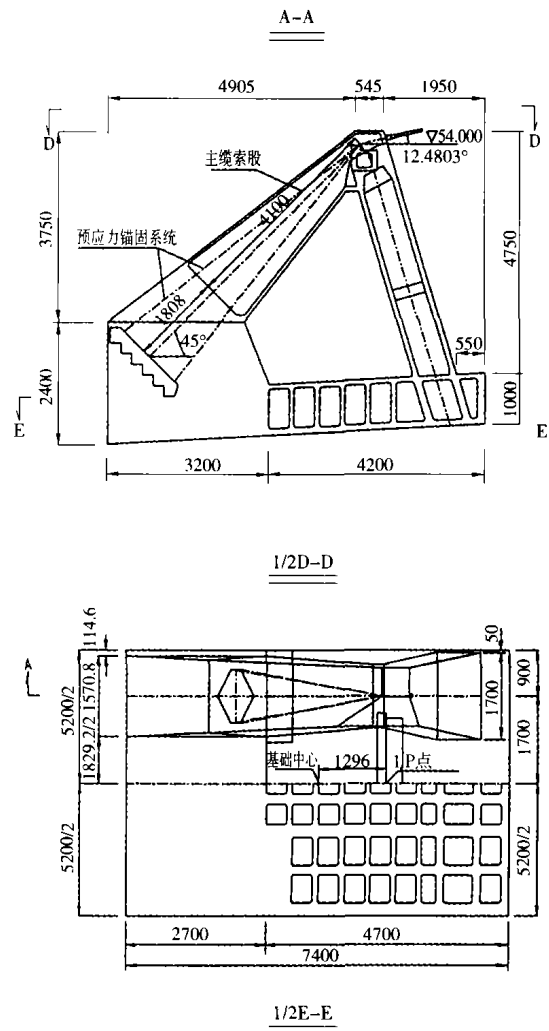


图2 锚碇总体构造(单位:cm)

3.3.2 基础

锚碇基础采用浅埋扩大基础的结构型式,将扩大基础置于容许承载力为0.5MPa的全、强风化基岩上。为减轻重量、均衡基底应力、满足地基承载力要求,基础前部采用空心箱式基础,后部采用实心基础;减轻重量后,为增加锚碇的抗滑动、抗倾覆稳定性,基底采用5.41%的倒坡。锚碇基底平面尺寸为74m×52m,前部箱式基础高10m,顶、底板厚分别为1.0m、1.2m,纵、横腹

板厚分别为2.5m、1.0m。

考虑到锚碇基础比较大，设计中设置了纵、横向2m宽的混凝土后浇筑带，将基础分成四个部分。

3.3.3 锚体

锚体由锚块、前锚室、散索鞍支墩、横梁组成，锚块、前锚室、散索鞍支墩与基础共同组成空腹三角形框架结构，横梁将左右两个三角形框架结构的顶端连接起来。详见锚碇总体构造。

3.3.4 锚固系统

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。

主缆由2X110根索股组成，由4X110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。锚固系统锚固单元构造见图3。锚固系统前、后锚面索股布置见图4、见图5。

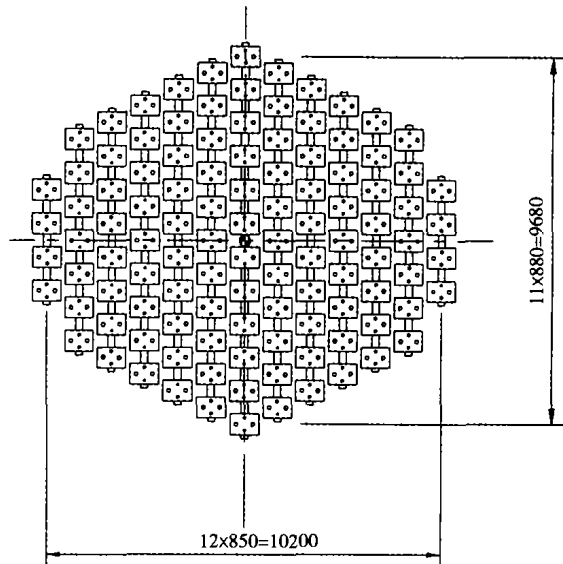


图4 前索面索股布置 (单位: cm)

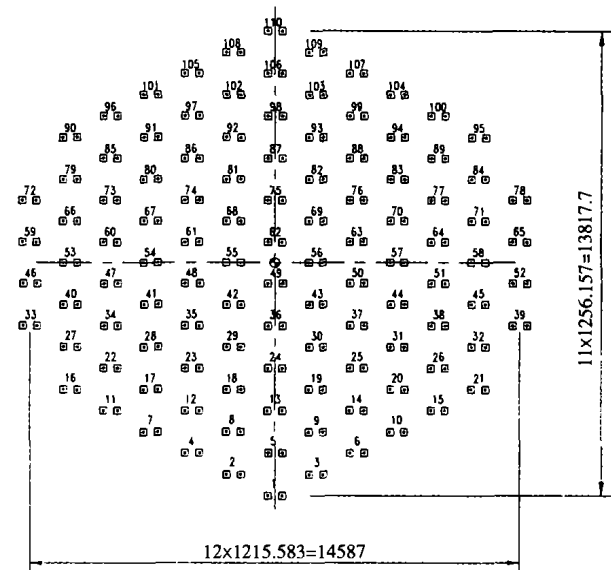


图5 后索面索股布置 (单位: cm)

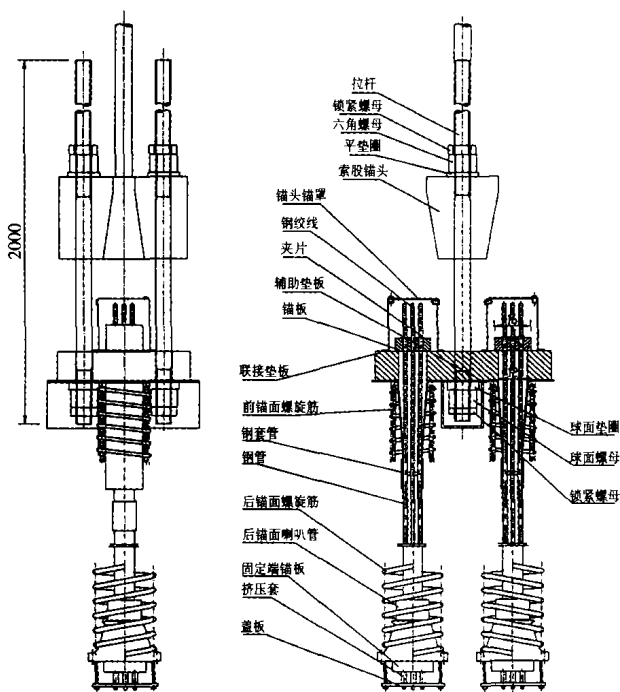


图3 锚碇单元构造 (单位: cm)

3.4 锚碇计算分析

3.4.1 本桥锚碇结构的特点和扩大浅地基应力、变形分析比较论证

由于锚位处岩层风化强烈、风化深度大，全、强风化带厚度达30-80m，微风化基岩埋深在50m以上，如以承载力大的微风化岩层作为锚碇基底持力层，尽管基底可获得较小的变形量和较大的抗滑摩擦系数，但需采用大型地下连续墙深基础，这将加大施工难度，延长施工工期，增加工程数量和造价。鉴于悬索桥为柔性结构体系，锚碇散索点容许有少量的位移。因此，为减小锚碇基础的施工难度，缩短工期，降低造价，锚碇

锚碇采用浅埋扩大基础，基底以全、强风化岩层作为持力层。为降低地基应力，减少锚碇沉降和位移量，锚体采用空腹三角形框架结构，锚碇基础采用平面尺寸较大的（74m*52m）空心箱式基础，结构重心后移，使锚碇在运营和施工阶段基底应力、沉降和散索点的位移、变形量控制在容许范围内，并增大了锚碇的抗滑动、抗倾覆稳定性。本工程的施工实践证明，因地制宜的采用浅埋扩大基础方案，有效地解决了锚碇处全、强风化岩厚度大、承载力低这一难题，是明智之选。根据计算，采用本设计的浅埋扩大基础，地基应力及沉降、位移量的计算结果如下：

地基应力：施工阶段最大前端为275KPa，后端为670KPa；运营阶段最大前端为500KPa，后端为490KPa。

沉降、位移：施工期间基底最大竖向变位差不大于2.5cm，实测为1-2.0cm；运营阶段散索鞍基础最大变位小于1.0cm，实测为0.2-0.5cm。

根据总体计算和国外有关锚碇规范，散索点的容许位移不大于1/6000，本桥最大容许位移为10.8cm，因此无论是沉降或转动均满足要求。

3.4.2 “基底倒坡”对抗滑的有利性能论证

在地基强度满足要求的前提下，基底采用倒坡能充分发挥地基抵抗作用，较大程度地提高锚碇整体抗滑稳定性。

在锚碇基本情况相同的条件下，基底倾斜与基底水平的抗滑稳定性比较如下：

①基底水平情形

$$H_k = cA + \mu V = cA + \mu G$$

$$K_{h1} = H_k / H_0 = (cA + \mu G) / H_0$$

②基底设 θ 倾斜情形

$$V = H_0 \sin \theta + N \cos \theta = H_0 \sin \theta + G \cos \theta$$

$$H = H_0 \cos \theta$$

$$H_k = cA + \mu V + G \sin \theta$$

$$K_{h2} = H_k / H = (cA + \mu V + G \sin \theta) / H_0 \cos \theta = cA / H_0 \cos \theta + \mu \operatorname{tg} \theta + G / H_0 (\mu + \operatorname{tg} \theta)$$

③基底水平与基底设 θ 倾斜的比较

$$K_{h2} - K_{h1} = cA / H_0 (1 / \cos \theta - 1) + G / H_0 \operatorname{tg} \theta + \mu \operatorname{tg} \theta > 0$$

基底倾斜的抗滑安全系数 K_{h2} 大于基底水平的抗滑安全系数 K_{h1} 。

式中： H_0 为水平拉力， G 为锚碇重量， V 为垂直于基底的合力， μ 为摩擦系数， c 为粘结系数， K_h 为安全系数。

3.5 锚固系统经济比较

锚固系统常用有型钢锚固系统和预应力锚固系统两种。预应力锚固系统，采用高强钢材，主动施加预应力于前后锚面，活载作用下预应力体系的应力幅很小；型钢锚固系统，拉杆采用普通钢材制造，与锚块后部的锚梁相接，型钢拉杆与锚块无粘结处理。该系统需要相对庞大的型钢拉杆支承构架，并且活载作用下型钢拉杆应力幅较大。因此，与型钢锚固系统相比，预应力锚固系统具有用钢量省、构造简单、受力明确，施工方便等优点。厦门海沧大桥采用了440套双锚索、双拉杆的OVM. MD15-7型锚固系统，较采用型钢锚固系统可节省钢材约1100吨。

3.6 锚碇结构创新

东航道悬索桥锚碇在锚体、基础和锚固体系等方面进行了关键技术创新设计，包括在国内悬索桥设计中首次采用框架式锚体结构、箱式浅埋扩大基础及预应力锚固系统首次采用国内研制产品。

3.6.1 国内自行设计、研制、生产主缆预应力锚固系统

采用国内首次设计、研制成功的OVM.MD15-7主缆预应力锚固系统，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，推进了我国桥梁事业的发展。

3.6.2 锚体采用框架式结构

为配合三跨连续体系，锚碇散索点必须抬高到桥面以上，使锚体高度增加并裸露，影响大桥

的景观效果,为此,设计在国内首次采用空腹三角形框架式锚体结构,突破了传统重力式实体锚碇外观笨重的结构型式,实现了大型结构物力与美的和谐统一,并为锚碇内部建筑物提供了免费基础和空间。同时,大大减少了锚体结构重量,为在极软岩地基上修建浅埋扩大基础锚碇提供了前提条件。

3.6.3 在极软岩地基上采用浅埋扩大基础

虽然两锚碇所在位置的基岩埋藏较浅,但风化强烈,均匀性差,容许承载力仅为 $[\sigma_0]=400\sim 500\text{kPa}$,且风化深度较大,强风化带厚 $30\sim 80\text{m}$,容许承载力较高的中风化岩层岩埋深在 40m 以下。如果将锚碇放在承载力较大的中风化和微风化基岩上,锚碇将采用深基础,埋深将达到 40m 以上,而采用浅埋基础型式,其基坑开挖深度仅为 $6\sim 10\text{m}$,不但大大降低施工难度、缩短施工工期,也显著降低工程造价,取得明显的经济效益。因此,采用浅埋基础,将锚碇基础置于强风化基岩中,是锚碇设计取得技术经济效益的关键。作为用重力平衡主缆巨大水平力的锚碇,解决好抗水平力和降低地基作用力、成桥前后基底应力偏差大的矛盾是能否在本桥采用既省钱又省工的浅埋扩大基础锚碇的关键。为此,在采用空腹三角形框架式锚体结构适当减轻了锚碇重量的基础上又采取了如下关键性措施:

· 采用箱型扩大基础

通常情况下,由于受到强大的水平力作用,在使用阶段锚碇基础的前趾地基应力较大,将控制锚碇基础设计,为解决该问题,锚碇基础的后部采用实体式,而中前部采用具有较大刚度的箱式基础,这样,既满足了基础要求的刚度,又减少了锚碇前部的重量,降低了锚碇基底应力,增加了锚碇的抗倾覆稳定性,有效地解决了强风化极软岩地基修建大型锚碇的重大技术难题。

· 基底设置倒坡

为进一步提高锚碇结构抗滑、抗倾安全度,在国际上首次采用锚碇基础底面设置倒坡的设计技术。

通过采用箱型基础、基底设置倒坡(5.41%)和三角形框架式锚体结构使扩大基础锚碇在极软岩地基上修建成为可能,使浅埋扩大基础锚碇这种基坑开挖工程量少,基础施工难度小,工程造价低的锚碇形式能够得到更广泛的应用,为极软岩地基修建悬索桥提供了很好的范例,具有极强的推广应用价值。

4. 设计特点

锚碇主缆预应力锚固系统的设计特点如下:

4.1 该锚固系统具有用钢量省(约省1100吨),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。

4.2 本桥主缆由 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,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组成。

4.3 锚固系统的拉杆、螺母、球面螺母的螺纹均采用《军用MJ螺纹标准》,拉杆、螺母、球面螺母的螺纹疲劳强度提高 $20\%\sim 40\%$;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,避免偏载引起拉杆受弯,减少局部应力集中,提高螺纹的使用寿命。

4.4 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 $\pm 400\text{mm}$ 。经静、动载试验证明拉杆组装件强度满足设计要求。

4.5 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,后锚面为固定端锚头。