

# 东海大桥主航道桥斜拉桥总体设计

高宗余

(中铁大桥勘测设计院有限公司 湖北武汉 430050)

**摘要:**东海大桥主航道桥为主跨420m五跨连续的双塔中央索面斜拉桥。主梁为在大跨径斜拉桥上首次采用的钢-混凝土箱形结合梁。重点介绍该桥的总体设计。

**关键词:**钢-混凝土箱形结合梁 斜拉桥 东海大桥 总体设计

## 1 工程概况

东海大桥工程是上海国际航运中心集装箱深水港的重要配套工程,起于上海芦潮港,向南跨越宽阔海面至大乌龟岛登陆,沿大乌龟岛、明珠山岛至小洋山港区一期交接点,全长约31km。

东海大桥海上段共设4处通航孔,其中主通航孔距芦潮岸新大堤的桥线距离约为16.5km,需满足5000吨级船舶通航及部分万吨级船舶在一定水位条件下通航。

大桥所跨东海海底地形较平缓,天然水深8~12m,标高为-7.5~-12.5m。

桥址区为第四系地层所覆盖,海上段基岩埋藏较深,基岩面高程由北向南逐渐抬高,标高为-230~-160m,第四系堆积层厚度约160~220m,层位相对稳定;下部为早~中更新世(Q1~2)堆积的杂色粘土、粉质粘土、中粗砂、碎砾石灰粘土等;中部为晚更新世(Q3)堆积的灰黄~灰色粉质粘土、砂质粉土、粉细砂等;上部为全新世(Q4)堆积的灰黄~灰色粉质粘土、淤泥质粉质粘土、粘性土灰砂、砂夹粘性土、砂质粉土、粉细砂等;表部为现代(QR)堆积的灰黄色淤泥。

本海区的潮汐主要受东海前进潮波控制,潮汐类型属非正规半日浅海潮型。NNE向(包含N、NE向)水域开敞,为该海区的强浪向,每年夏、秋季节SE方向估计会有台风浪传入。潮流运动基本形态为每天日二涨二落,具有明显的往复流特性。

本区位于北亚热带南缘,东亚季风盛行区,

注:《上海东海大桥主通航孔斜拉桥》项目获第三届欧维姆预应力技术奖一等奖。原载《世界桥梁》2004年增刊。

受季风影响冬冷夏热,四季分明,降水充沛,气候变化复杂。实测最大风速35.0m/s(风向NNE)。

## 2 主要技术标准

1) 道路为港区对外集疏运专用通道,按高速公路标准控制设计,双向六车道。

2) 设计行车速度:80km/h。

3) 车辆荷载等级:按汽车-超20级设计,挂车-120验算;并按全桥集装箱重车满布,前、后车辆轴距为10m进行计算复核。

4) 地震烈度

地震基本烈度为6度,大桥按地震烈度7度进行抗震设计。重要性系数为1.7。

5) 通航标准

5000t级通航孔,主墩按10000t级防撞,辅助墩按1000t级防撞,边墩按500t级防撞;

6) 结构计算按50年一遇水位加上50年一遇H1%波浪作用进行设计,按100年一遇水位加上100年一遇H1%波浪作用进行校核。

7) 风:100年一遇10m高度处设计风速 $V_{10} = 42\text{m/s}$ 。

8) 设计基准期:100年。

## 3 总体设计

### 3.1 平、立面布置

主通航孔桥平面位于直线上,纵断面竖曲线半径7000m,纵坡3.0%。主通航孔为全线竖向控制点之一,主通航孔净空高度40m,设计最高通航水位4.02m,通航孔范围内梁底高程在运营情况下不得低于44.02m。

### 3.2 桥梁横断面布置

桥面宽度按六车道+紧急停车带的高速公路标准设计,全宽除考虑行车使用功能要求外,将斜拉索的锚固与管线要求综合考虑确定桥面宽度。具体布置如图1所示。

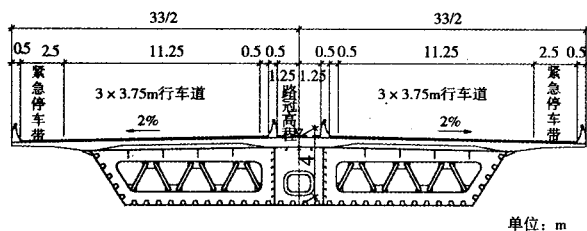


图1 主桥横断面布置

### 3.3 主孔跨径

主通航孔采用单孔双向通航布置,通航净宽不小于321m,考虑到主墩基础及防撞设施的宽度影响,主孔跨径应在400m以上,最适宜的桥型方案为斜拉桥。对于斜拉桥方案,结合主、边跨合理比值及斜拉索布置和主梁构造等结构设计特点,主孔跨径定为420m。

## 4 结构设计

### 4.1 跨径布置

主通航孔桥方案选定为主跨420m钢-混凝土箱形结合梁双塔中央索面斜拉桥方案。由于本桥集卡荷载较大,结构的体系刚度将成为选择边孔布置及跨径时的一个关键因素。根据研究,典型的三跨连续结构的斜拉桥方案在集卡荷载作用下很难满足使用要求,且不经济,而采用五跨连续结构的斜拉桥方案能满足使用要求,结构受力合理。主通航孔两侧相邻引桥为跨径70m的非通航孔高墩区,边孔跨径应能在主孔和引桥之间协调过渡。综合考虑受力性能及景观效果,最终确定斜拉桥采用五跨连续布置,跨径组成为(73+132+420+132+73)m,全长830m。见图2。

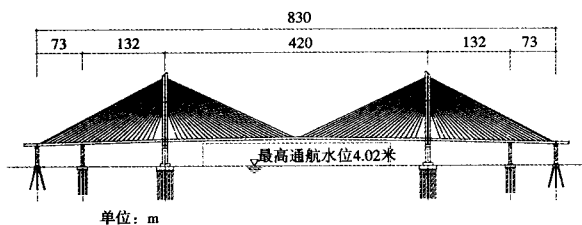


图2 斜拉桥立面布置

### 4.2 支承体系

在主塔墩、辅助墩及边墩处均设置竖向、横向支座,主塔和主梁间纵向采用液压阻尼装置以限制主梁纵向位移及改善行车条件。本桥在解决恒载及活载作用下边墩及辅助墩顶负反力问题时采用压重和体外预应力束相结合的方法。成桥状态下在主梁相应节段布置压重以使各墩在恒载作用下不出现负反力,活载作用下采用预加拉力的体外预应力来平衡上拔力。体外预应力采用钢绞线拉索,如图3所示。

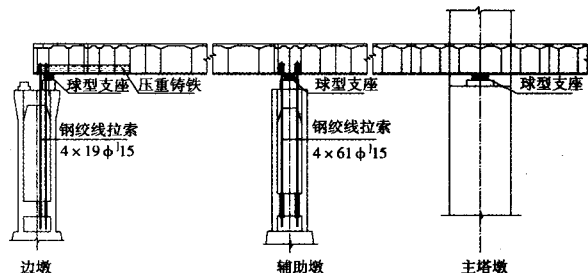


图3 钢绞线拉索布置示意

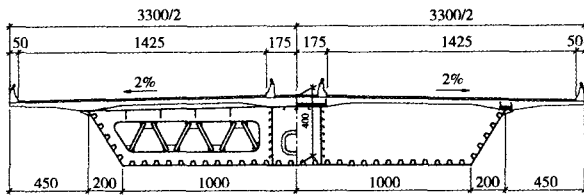
### 4.3 主梁

桥位位于外海,施工环境恶劣,运营要求高,主要表现在:①施工受多变的水文气象条件影响大,作业条件恶劣,全年有效作业天数较少;②全桥施工工期紧,主航道桥作为全桥施工工期控制性工程,需确保工程进度要求;③结构处于腐蚀强烈的海洋环境,对结构的耐久性要求高;④作为港区运输专用通道,运营荷载较一般公路桥高。因此,主梁结构的选择需重点考虑以上因素。经综合比较钢箱梁、混凝土箱梁和传统的工字型结合梁方案,提出采用钢-混凝土箱形结合梁方案,能较好地满足上述因素。

主梁采用单箱三室截面,梁高4.0m,混凝土桥面板宽33.0m,悬臂板宽4.5m,钢底板宽24.0m。主梁混凝土标号为C60级,钢结构部分材质Q345qD。主梁采用较高的4.0m梁高,一是为提供足够的抗扭刚度以满足中心索面斜拉桥主梁的抗风要求,同时与相邻非通航孔高墩区混凝土主梁梁高匹配。主梁一般断面见图4。

主梁标准节段长度结合起吊运输设备、安装控制要求、顶板预应力配置以及加劲梁截面尺寸综合确定为8m,塔下0#节段为减轻吊重共分为

8个长5.0m的节段, 2个边跨梁端节段长6.58m。主梁除在节段两端预留0.5m宽现浇混凝土接缝外, 均在预制场全断面制作完成。主梁运抵桥位吊装后, 拼接钢主梁部分, 随后现浇混凝土顶板接缝。



单位: cm

图4 主梁一般断面

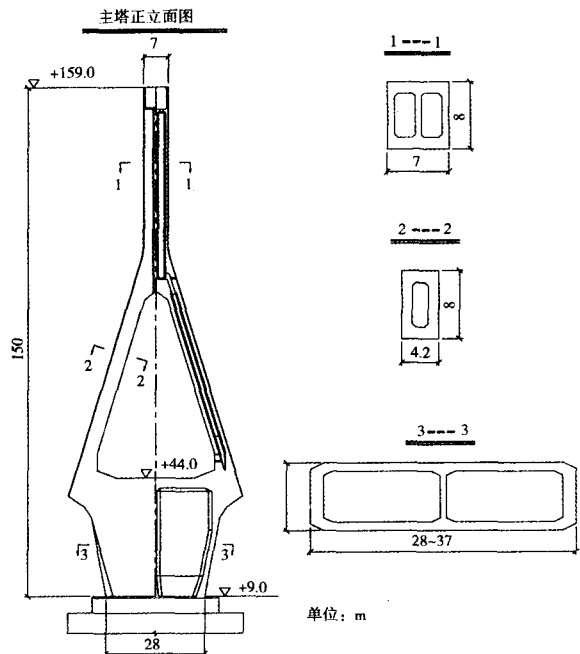
主梁混凝土面板一般厚28cm, 在腹板顶附近加厚至55cm。主梁钢结构部分一般截面底板及斜腹板厚16mm, 竖腹板及腹板上翼缘厚24mm, 塔根及边墩、辅助墩顶附近主梁钢板局部加厚。主梁横隔梁采用桁架形式以利过桥管线的布置。主梁一般截面横隔梁板厚16mm, 上翼缘板厚24mm。主梁钢结构部分和混凝土面板间设置剪力钉以使两者能共同受力。

本桥抗风研究分别进行了节段模型试验与整体模型试验, 研究表明, 施工阶段和成桥阶段斜拉桥在无气动措施的情况下, 颤振临界风速可达80m/s; 采取一定的气动措施, 颤振临界风速可达100m/s以上。本桥最终采用将主梁检修车轨道设置在主梁斜腹板下侧的气动措施, 以确保斜拉桥在施工和运营时的抗风稳定性。

#### 4.4 主塔

主塔为钢筋混凝土结构。在造型上塔身上段为适应中央索面布置采用倒Y形构造, 下段采用实腹宽肩式墩身, 见图5。主塔自塔座以上高度150m, 桥面以上高110m。塔身截面中塔柱为单箱单室, 其余截面为单箱双室。主塔纵向尺寸为8m, 横向尺寸上塔柱7m, 中塔柱4.2m, 下塔柱从37m渐变为28m。主塔采用C50级混凝土。

主塔上塔柱约2/3斜拉索锚固在与塔壁刚接的钢锚梁上, 其余直接锚固在塔壁上。为了平衡斜拉索在塔壁上产生的拉力或边、中跨斜拉索间不平衡水平分力, 在整个上塔柱均布置有环向预应力钢筋。



单位: m

图5 主塔布置图

#### 4.5 斜拉索

斜拉索采用扇形中央平行索面, 索面横桥向间距2.0m, 每塔每索面共24对斜拉索, 梁端索距8m, 塔端索距约2.2m, 全桥共224根斜拉索。斜拉索采用 $\phi 7\text{mm}$ 镀锌平行钢丝, 斜拉索规格共9种, 最小规格121  $\phi 7\text{mm}$ , 最大规格283  $\phi 7\text{mm}$ 。

#### 4.6 下部结构

主塔墩及辅助墩均采用钻孔桩基础, 主塔墩每墩设38根 $\phi 2.5\text{m}$ 钻孔桩, 桩长为110米, 辅助墩设14根 $\phi 2.5\text{m}$ 钻孔桩, 桩长为85米。为提高钻孔桩桩底承载力, 桩底设置注浆盘, 桩身混凝土灌注完毕后利用探测管实施桩底压浆。边墩采用钢管桩基础, 每墩设22根 $\phi 1.5\text{m}$ 钢管桩, 桩长60米。

边墩及辅助墩墩身采用空心墩, 在靠近承台处设置混凝土锚梁以锚固平衡上拔力的钢绞线拉索, 在墩身下部设置部分预应力粗钢筋并伸至承台内锚固。

主塔墩及辅助墩桥轴线两侧设置固定式防撞体系以抵抗船舶的撞击力。承台桥轴线两侧设置独立的防撞墩, 在主塔墩及辅助墩遭遇较大级别的船舶撞击时, 防撞设施破损消能, 以减小对桥墩的碰撞力和船舶破损长度, 同时避免船舶前伸部分触及桥墩上部结构并保护桩基。

(下转第19页)

馆,因此在奥运会召开前一个月提高数据采集频率,一直持续到奥运会结束,为每30分钟采集数据一次,对结构进行实时监测;当出现特殊荷载时,比如出现演出吊挂、地震、大风、大雨、大雪、冰雹等自然灾害时,需要临时设定监测时间及监测频率,基本为特殊荷载发生的期间及前后,以期了解结构的安全状态。

#### 4 结语

国家体育馆是奥运重点工程,其屋盖结构采用了新型的大型预应力结构体系——双向张弦空间网格结构。项目组对该新型结构体系展开了系列研究,解决了国家体育馆屋盖结构设计中的系列关键技术问题,例如新型结构体系的布置、大跨度空间结构的防火计算、新型空间结构的防连续倒塌,新型结构的预应力模态及其张拉相互影响;提出了沿短向累积滑移的施工方法、考虑施工全过程的结构优化方法,另外还结合结构优

(上接第5页)

#### 5 耐久性设计

由于结构处于腐蚀强烈的海洋环境,因而需采取高标准的防腐措施以确保结构在设计使用寿命年限内的安全和满足正常的使用功能。本桥在方案构思时即从设计概念上采用有利于提高耐久性的结构形式和构造细节,并选择合理的施工方法,以使施工容易达到设计要求。

钢-混凝土箱形结合梁钢结构部分外表面采用电弧喷铝长效防腐,其组成为电弧喷铝底层、环氧云铁封闭漆和聚氨酯面漆。钢箱梁内表面采用重防腐涂料涂装体系,同时将钢箱梁封闭起来使其成为一个密封的空间,安装抽湿系统来控制内部湿度,有效阻止钢箱梁内表面的腐蚀。混凝土桥面板同时采用高性能混凝土和保证最外层钢筋净保护层等措施进行防腐。钢和混凝土的结合界面是主梁防腐的薄弱地方,除采用预应力结构和高配筋率等措施提高混凝土板自身的抗裂、抗冲击能力外,在结合界面涂刷环氧涂层以提高结合面钢结构的耐久性,并沿所有结合面周边在混凝土上切缝,填充高强防水密封材料,以确保结合部位的密封。

化,提出了多项施工措施,如支座两阶段固定方法等;开发了适合新型空间结构的新型节点形式;进行了1:10的模型试验,验证了分析理论和设计方法,并且开发了“国家体育馆远程健康监测系统”,对国家体育馆进行健康监测。这一系列研究成果确保了国家体育馆工程的顺利实施,相关研究技术成果达到了国际先进水平。

对于国家体育馆工程的半重型屋面系统,其屋盖结构成功应用了国内外首创的新型双向张弦空间网格结构体系、新型节点以及系列新技术,创造了世界上跨度最大的双向张弦结构,取得了显著的经济效益和社会效益,填补了国内外空白。

国家体育馆是奥运中心区三大奥运场馆中,唯一由国内设计师独立完成的项目。被誉为奥运工程的“争气馆”,代表了我国建筑技术的发展水平,受到国内外各方赞誉,体现了“科技奥运、绿色奥运”的理念和勤俭办奥运的精神。

主塔墩、边墩和辅助墩墩身和承台的防腐采用和混凝土桥面板同样的措施。上塔柱内有锚固斜拉索用的钢锚梁,和主梁内部一样,除自身采用重防腐涂料涂装外,还在上塔柱内采用抽湿防腐。

钻孔灌注桩采取提高混凝土密实性和加大最外层钢筋的混凝土净保护层厚度等措施进行防腐,钢管桩采取牺牲阳极的阴极保护法+环氧重防护涂层+钢管桩富裕厚度+桩内混凝土填芯等措施防腐。

#### 6 结语

东海大桥主航道桥作为我国第一座真正在海外建造的大跨度斜拉桥,其设计及工程实践也就具有了开拓性的意义。为满足东海大桥特定条件而提出的钢-混凝土箱形结合梁,丰富了斜拉桥的结构形式。东海大桥工程已于2002年6月开工,2005年底建成。本桥的实践为今后的跨海大桥工程设计提供了有益的经验。

#### 参考文献

- [1] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都:西南交通大学出版社
- [2] 项海帆. 大跨度桥梁概念设计中的若干问题[C]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十六届年会论文集, 2004.
- [3] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 东海大桥主航道桥抗风性能及颤振控制研究. 2003.