

# 东海大桥70m跨整孔预制吊装混凝土箱梁设计

颜爱华<sup>1</sup> 邵长宇<sup>2</sup> 邓青儿<sup>1</sup> 卫俊<sup>1</sup>

(1 中铁大桥勘测设计院 湖北 武汉 430050 2 上海市政工程设计研究院 上海 200002)

**摘要:** 东海大桥非通航孔上部结构采用等跨70m预应力混凝土连续箱梁。介绍了整孔预制吊装的70m跨预应力混凝土箱梁结构设计、防腐措施、墩顶接头以及结构计算分析和梁体的预制架设。

**关键词:** 70m跨 预应力混凝土箱梁 整孔预制吊装 桥梁设计

## 1. 工程概况

正在建设中的东海大桥工程将连通上海国际航运中心洋山深水港区至大陆。大桥工程总长约31km, 其中水域部分约25.5km。设计车速80km/h, 双向6车道, 双幅桥面, 两侧设置连续紧急停车带。为降低海上施工作业的风险, 提高作业效率, 非通航孔海上段采用154孔70m跨混凝土连续箱梁、钢管打入桩基础、预制墩身和箱梁整孔预制吊装的方案。

70m跨连续梁按总体平面布置分为直线段、标准曲线段 $R=2500$ 、 $4000$ m和曲~直过渡段。除特殊区段外, 两幅桥相互独立, 净距1m。桥面全宽31.5m。标准横断面布置见图1。70m跨连续梁5孔一联, 中间孔支座纵向锁定, 梁端设伸缩缝。按汽车-超20级设计, 挂车-120验算, 并按全桥集装箱重车满布, 车辆轴距为10m进行计算复核。

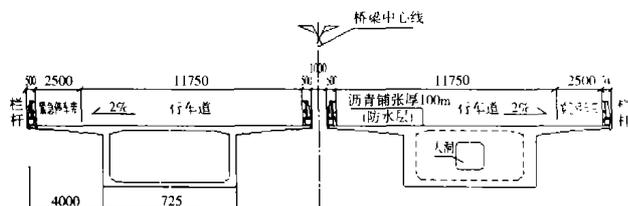


图1 标准横断面

## 2. 结构设计

### 2.1 主梁结构

主梁采用单室箱形梁, C50级高性能混凝土。为便于预制、安装, 70m跨采用等高、等宽度梁。箱梁采用整孔预制、整孔吊装, 先简支、

后连续的施工方法; 边跨端横隔板厚度0.8米, 与边跨梁体一并预制浇筑; 中跨箱梁支座断面设置后浇横隔墙, 与支座尺寸相适应, 中横隔墙厚度1.6m。因与中横隔墙相接的两侧箱梁预制时均无横隔墙, 在箱体移动、起吊的过程中均要求箱梁有足够的抗扭能力, 故对箱梁端部断面予以适当加强。

箱梁中心线处的梁高4.0米, 顶面设2.0%的横坡。顶板全宽15.25米, 其中标准段顶板悬臂4.0米, 顶板外侧0.2米宽的翼缘板与栏杆一并后浇混凝土, 一则可以减轻箱梁吊重, 二则后浇混凝土作为横向预应力的封锚, 在海洋环境中起到很好的防腐作用。顶板厚度0.2~0.55米, 墩顶湿接头附近局部区段厚度0.7米; 腹板厚度0.4~0.7米; 底板0.25~0.4, 墩顶湿接头附近局部区段厚度0.7米。

梁体预制长度综合墩顶湿接头区长度、接头区操作空间、梁体支承空间以及专用浮吊吊装精度等因素确定。中孔预制梁长69.2米, 起吊重量1977吨; 边孔预制梁长69.12米, 起吊重量2015吨。

为了便于预制, 提高制梁台座及模板等通用性, 曲线段及曲~直过渡段预制梁体的设计与标准直线段相同, 仅顶板悬臂长度根据曲率调整, 顶板后浇段带宽度与标准设计不同, 与栏杆基座一并后浇。

主梁采用三向体内预应力体系, 预留体外预应力束管道作后期应力储备。纵、横向预应力束

均采用 $\Phi^j15$ 低松弛高强度钢绞线,  $R_y^b=1860\text{MPa}$ , 夹片锚。纵向预应力束规格两种:  $12-\Phi^j15$ 、 $17-\Phi^j15$ ; 横向预应力束采用 $3-\Phi^j15$ , 扁锚; 竖向预应力采用直径 $32\text{mm}$ 精轧螺纹钢筋。梁体预应力束的配置, 考虑了梁体形成、运输、起吊、架设成简支状态、现浇湿接头转换体系为连续等不同的施工过程及运营状态。

预留体外预应力束采用防腐钢绞线, 每孔梁4束 $12-\Phi^j15$ , 锚固在横隔墙上。每孔梁靠近顶、底板分别布置两束预应力, 预应力合力与梁体轴线基本重合, 为中心配束。因为全桥共154孔308片梁, 制梁的时间跨度在一年以上, 同一联中的箱梁预制时间可能相差很大, 为平衡这种差异, 有必要考虑补偿措施。另一方面, 为跨海大桥的防腐需要, 箱梁采用了高性能混凝土, 高性能混凝土的收缩、徐变较常规混凝土大, 且国内缺乏这方面研究, 为适应这种特性, 亦有必要预留预应力。此外, 在运营期间, 桥面铺装维护、修补可能导致二期恒载发生变化, 需通过预留体外预应力束来适应。体外束具有施工方便、无需压浆、易于更换的优点, 因此, 采用体外防腐预应力作为预留措施。

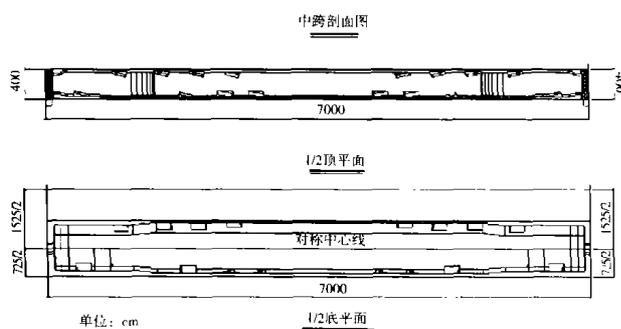


图2 箱梁立面、平面

## 2.2 防腐设计

鉴于外海的强腐蚀环境, 桥梁结构的防腐至关重要, 箱梁按A类预应力混凝土设计; 防腐设计的要点是提高混凝土和钢筋(包括预应力钢筋)的防腐能力。采用高性能混凝土提高密实度及抗渗性能, 氯离子扩散系数不大于 $1.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ , 电通量不大于 $1000 \text{C}$ ; 增加普通钢筋及预应力钢束的保护层厚度, 净保护层厚度在箱梁外侧为

4cm, 因为箱梁内侧相对封闭的环境, 腐蚀作用减弱, 混凝土净保护层厚度为3cm, 预应力成孔管道净保护层为7cm, 预应力管道采用真空压浆技术。

## 2.3 墩顶后浇接头

预制梁体架设后呈简支状态。预制梁体吊装就位后, 先进行墩顶隔板和翼板湿接头的施工, 以尽早形成整体受力状态, 保证梁体稳定, 湿接头的强度达到100%再张拉负弯矩预应力束。

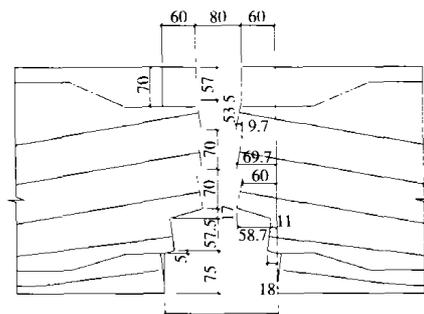


图3 墩顶后浇接头立面

## 3. 结构分析

### 3.1 纵向计算

设计采用极限状态法, 对集装箱车密布排列荷载作为基本可变荷载组合时, 考虑应力适当提高: 在校验荷载(组合II或III)作用下, 砼受弯构件受拉区的法向应力(扣除全部预应力损失)在截面受拉边缘可以出现 $<1.5\text{MPa}$ 的拉应力。对施工阶段进行应力控制, 并考虑制造、运输、安装等阶段工况。施工阶段构件在预加应力及构件重力作用下, 截面边缘砼的法向应力控制 $\sigma_{h1} \leq 0.75R_a^{b'}$ , 预拉区不配非预应力钢筋时 $\sigma_{h1} \leq 0.70R_1^{b'}$ , 预拉区配置非预应力钢筋时 $\sigma_{h1} \leq 1.15R_1^{b'}$ 。

箱梁形成可分以下六个主要阶段: 梁场预制, 施加先期预应力索的预制节段吊装, 完成现浇段, 施加后期索, 施加桥面铺装, 收缩、徐变完成。

#### 3.1.1 施工阶段

(1)箱梁顶底缘施工阶段应力包络情况统计如下表(计算以压应力为正)(取单跨, 单位:  $\text{Kg}/(\text{cm} \cdot \text{cm})$ )

位置	左边端部	左边1/4跨	跨中	右边1/4跨	右边端部
上缘最大应力	14.53	49.94	69.33	76.13	67.81
上缘最小应力	9.46	46.02	68.76	45.44	-4.19
下缘最大应力	79.82	126.63	87.47	118.41	30.82
下缘最小应力	44.54	73.0	42.2	58.82	5.91

(2) 箱梁顶底缘成桥阶段应力包络情况统计如下表(计算以压应力为正)(单位: Kg/(cm\*cm))

位置	左边端部	左边1/4跨	跨中	右边1/4跨	右边端部
上缘最大应力	10.22	58.15	79.51	72.51	40.04
上缘最小应力					
下缘最大应力	76.15	98.48	64.76	114.03	64.04
下缘最小应力					

3.1.2 成桥运营阶段结构组合应力及组合内力(计算以压应力为正)

(1) 正常使用极限状态应力包络情况统计如下表(组合I, 含活载横向不均匀系数1.05)(单位: Kg/(cm\*cm))

位置	左边端部	左边1/4跨	跨中	右边1/4跨	右边端部
上缘最大应力	11.87	79.32	106.54	90.97	52.5
上缘最小应力	9.92	52.40	67.34	52.22	4.39
下缘最大应力	76.56	108.66	86.29	144.71	114.40
下缘最小应力	73.84	61.02	16.94	81.31	46.44

(2) 正常使用极限状态应力包络情况统计如下表(组合II、III, 含活载横向不均匀系数1.05)(单位: Kg/(cm\*cm))

位置	左边端部	左边1/4跨	跨中	右边1/4跨	右边端部
上缘最大应力	28.43	94.14	121.36	105.84	69.21
上缘最小应力	9.92	52.4	67.34	55.22	4.39
下缘最大应力	81.55	114.85	96.71	158.56	127.75
下缘最小应力	73.84	59.62	5.3	72.26	38.01

3.1.3 结构主要断面的应力检查

(1) 施工阶段

上缘包络应力为  $-0.7 \sim 9.9\text{MPa}$

$$\sigma_{\text{压}}^{\text{Max}}=9.9\text{MPa}<[\sigma_{\text{压}}]=0.75R_a^b=21\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{拉}}^{\text{Max}}=0.7\text{MPa}<[\sigma_{\text{拉}}]=0.70R_1^b=1.68\text{MPa}$$

下缘包络应力为  $1.1 \sim 11.6\text{MPa}$

$$\sigma_{\text{压}}^{\text{Max}}=11.6\text{MPa}<[\sigma_{\text{压}}]=0.75Rab^b=21\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{拉}}^{\text{Max}}=0\text{MPa}<[\sigma_{\text{拉}}]=0.70R_1^b=1.68\text{MPa}$$

施工阶段梁体法向应力满足规范要求。

(2) 正常使用极限状态

1) 法向应力检查:

在设计荷载(组合I)作用下, 截面法向应力情况:

$$\text{最大压应力: } \sigma_{\text{上缘}}^{\text{Max}}=12.1\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{下缘}}^{\text{Max}}=15.5\text{MPa}$$

$$\text{均小于 } 0.5R_a^b=17.5\text{MPa}。$$

在校验荷载(组合II或III)作用下, 截面法向应力情况:

$$\text{最大压应力: } \sigma_{\text{上缘}}^{\text{Max}}=12.5\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{下缘}}^{\text{Max}}=15.9\text{MPa}$$

$$\text{均小于 } 0.6R_a^b=21\text{MPa}。$$

$$\text{最大拉应力: } \sigma_{\text{下缘}}^{\text{Min}}=0.8\text{MPa}$$

正常使用极限状态的梁体法向应力满足设计与规范的要求。

2) 主拉压应力检查:

荷载组合I作用下

$$\text{最大主拉应力为 } 0.85\text{MPa}<[\sigma_{\text{拉}}]=0.8R_1^b=2.40\text{MPa}$$

荷载组合II、III作用下

$$\text{最大主拉应力为 } 2.57\text{MPa}<[\sigma_{\text{拉}}]=0.9R_1^b=2.70\text{MPa}$$

主拉、主压应力均小于容许值, 满足规范要求。

(3) 裂缝验算

A类构件拉应力“拉而有限”, 裂缝无需验算。

(4) 刚度检查

汽超-20级荷载引起的最大跨中竖向位移为  $-15.2\text{mm}/+7.8\text{mm}$ ; 集装箱荷载引起的最大跨中竖向位移为  $-20.9\text{mm}/+12.8\text{mm}$ , 满足规范要求。

3.2 横向计算及结构分析

计算分别取跨中截面、支点截面, 对计算荷载进行组合分析计算。计算荷载包括: (1) 自重; (2) 二期恒载; (3) 砼护栏; (4) 横向预应力; (5) 汽车在桥面横向的各种布置; (6) 升温 $20^\circ\text{C}$ ; (7) 降温 $20^\circ\text{C}$ ; (8) 温差 $5^\circ\text{C}$ 。

顶板横向配置预应力束, 采用 $3-\Phi^j 15$ , 扁锚, 每米布置两束; 竖向预应力采用直径 $32\text{mm}$ 精轧螺纹钢筋, 在梁端部附近区域加强竖向预应力布置。横向截面普通钢筋配置保证最不利荷载组合条件下混凝土裂缝宽度小于 $0.1\text{mm}$ 。

4. 梁体预制及架设

为加快施工进度, 适应超大梁体的预制工

作,箱梁底板与腹板钢筋在专用胎架上一次绑扎,并一次吊装就位;顶板钢筋亦采用相同的施工方法。一片箱梁的全部钢筋经两次吊装即可完成,既加快了施工进度,又易于保证质量。

采用滑移法将梁移至下海码头,用2600吨级的“小天鹅”专用吊机起吊;由于一片预制箱梁重达约2100吨,梁体在预制场内的吊运及移至下海码头,采用常规的施工方法几乎是不可能的。为适应这特殊情况,采用滑移法;从预制台座到存梁台座,从存梁台座到下海码头,均采用纵、横相结合的滑移法。

专用吊机起吊落梁后,再采用三作用千斤顶进行微调,梁体精确就位;东海大桥地处外海,风大、浪高、流急、海况条件恶劣;这是跨海大桥区别于常规自然条件的最显著的特点,将给施工带来极大的困难。在落梁时必须考虑一定的允许误差,再采取相应的微调措施将梁体精确就位。结合海况条件及“小天鹅”专用吊机的性能,落梁误差在纵、横两个方向均为 $\pm 15\text{cm}$ ;采用三作用千斤顶微调后,梁体位置最终误差在纵、横两个方向均为 $\pm 1\text{cm}$ 。至于梁体在高程上的误差,可以在架梁前就精确调整好,只需在施工完成后,千斤顶可顺利退出即可。

浇注墩顶处的合拢段混凝土,张拉合拢预应力,形成一联70米跨连续梁。墩顶混凝土接头为典型的新、老混凝土之间的连接。墩顶接头桥梁纵向

长度一般为1.6米,一个接头现浇混凝土数量约60方,必须按大体积混凝土考虑施工。墩顶接头全面连接两侧主梁的顶板、底板、腹板;再加上预应力锚具、有关预埋件;钢筋密集,施工相对困难。必须加强混凝土的振捣工作以保证其密实。

一联7x50米连续梁有4个混凝土接头,为加快施工进度,4个混凝土接头同时施工。合拢预应力张拉时,梁体要压缩,应避免某一跨梁体的预应力张拉过多而引起其它梁体的受拉,故采用循环张拉的方法,允许的差值是两根预应力钢束。



图4 箱梁吊装

## 5. 结语

东海大桥70米整孔预制吊装混凝土箱梁自2003年10月预制、吊装第一片以来,总结经验,不断改进设计、施工,为我国海上大跨度整孔预制混凝土箱梁设计、制造和安装积累了宝贵的实践经验。

## (上接第39页)

3.2.5 P型锚具挤压时一定要在施工现场进行,并先让钢绞线穿过约束环;如果先挤压P型锚具再通过约束环就无法顺利安装,因为约束环有一定的内径要求。

### 4. 挤压机的使用原理和注意事项:

#### 4.1 挤压机的构造:

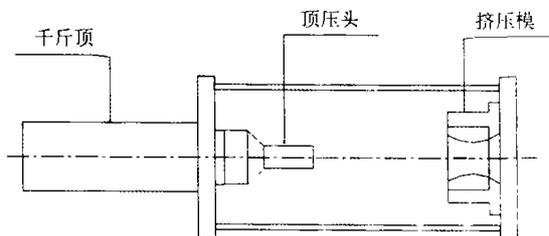


图4 挤压机构造图

#### 4.2 挤压机工作原理

4.2.1 挤压式锚具由挤压套、挤压弹簧及钢绞线组成;

4.2.2 顶压头将挤压套、挤压弹簧及钢绞线从挤压模挤出,这样挤压套、挤压弹簧、钢绞线挤压成整体,作为固定端锚具用。

#### 4.3 注意事项

4.3.1 挤压时,在挤压模和挤压套上涂上二硫化钼或地板蜡;

4.3.2 顶压头一挤压过挤压模应立即回程;

4.3.3 当压力超过规定压力时,仍没挤压过时,应停止挤压,更换挤压模。

## 5. 结语

在景德镇昌江支线II桥的变截面预应力箱梁中,由于正确使用了OVM多孔连接器,各钢绞线之间连接相当顺利。同时,注意了多孔连接器的使用注意事项,在施工中没有出现任何问题。希望通过对多孔连接器的作用和使用方法以及注意事项能够给使用过和没有使用过的同仁们提供一些帮助。