

文章编号: 0451-0712(2006)03-0030-06

中图分类号: U443.26

文献标识码: B

# 海上桥梁承台与承台防撞设施一体化施工

郭主龙, 周先念, 宋伟峰

(路桥华东工程有限公司 上海市 200135)

**摘要:** 海上桥梁承台施工受海洋环境影响最为明显, 选择合理的施工方案和工艺, 并进行合理的施工组织以克服恶劣的海洋环境, 是十分必要的。通过对东海大桥和杭州湾大桥的高桩承台施工特点的分析, 重点介绍了海上桥梁承台与承台防撞设施一体化的施工技术, 而且该技术已在上海长江大桥和舟山连岛工程的承台施工中得到了推广, 该技术对桥梁承台施工具有十分重要的指导意义。

**关键词:** 承台; 防撞设施; 一体化; 施工

## 1 海上高桩承台施工概况

高桩承台是桥梁群桩基础设计中较为常见的结构型式。由于海上基础施工受潮汐、波浪、大风、海水含盐量高等海况影响很大, 自然条件恶劣, 因此, 海上高桩承台的设计与施工具有以下特点。

### (1) 海上承台设计特点。

①海水中含有对钢筋腐蚀性极强的氯离子, 设计时必须考虑承台的防腐蚀问题;

②承台混凝土采用了高强度、高密实性、高耐久性的 C40 高性能混凝土;

③加大了钢筋保护层厚度, 其净保护层厚度达到 90 mm。

### (2) 施工方法。

海上高桩承台同内河承台一样, 也采用套箱法

施工, 但由于海上特殊施工环境的影响, 海上承台施工有以下特点:

①为了克服海上恶劣环境对承台施工的影响, 套箱多采用大型起吊设备进行整体吊装就位, 缩短了海上作业时间, 降低了套箱安装过程中的风险;

②海上承台施工过程中受波浪影响较大, 往往是主要控制荷载;

③套箱内不设悬吊系统和拉杆系统, 而是套箱直接支承在倒挂牛腿或打入桩桩顶, 承台施工时套箱不设对拉拉杆, 避免了产生腐蚀通道;

④承台采用高强度、高密实性、高和易性的高性能混凝土。混凝土配合比设计时需严格控制其电通量与氯离子扩散系数两项指标, 同时必须加强混凝土的养护, 避免产生裂纹, 从而提高承台的耐久性。

收稿日期: 2006-01-18

## Construction of Penetration of Steel Tubular Piles for IV Contract Section of Hangzhou Gulf Crossing Project

HUANG Zeng-cai, WU Jian, LIU Zhen-chuan

(Road &amp; Bridge Southern China Engineering Co., Ltd., Zhongshan 528403, China)

**Abstract:** Some construction technologies for penetration of steel tubular piles at sea are systematically introduced such as formation and type of penetrating piles barge, preparation before penetration, essential skill during penetration, hammer cease standard as well as treatment of high-rise pile cap on the background of penetration work of IV Contract Section of Hangzhou Gulf Crossing Project.

**Key words:** maritime bridge; steel tubular piles; penetrating piles; GPS survey and position; construction technology

### (3) 海上套箱法施工承台的几种套箱形式。

根据海上承台的设计与施工特点,结合常规高桩承台的施工方案,从安全、经济、高效的角度出发,东海大桥和杭州湾两座跨海大桥高桩承台施工中采取了以下方案。

方案一:双壁有底钢套箱整体吊装方案。该方案在东海大桥的颗珠山大桥主塔矩形承台中采用。

方案二:单壁有底钢套箱整体吊装方案。该方案在杭州湾跨海大桥打入桩圆形承台施工中采用。

方案三:防撞钢套箱整体吊装方案,即承台与承台防撞设施一体化施工技术看方案。该方案在东海大桥的3座辅通航孔桥主墩承台施工中采用。

三种方案的套箱均在岸上加工分块加工后拼装成整体,然后利用大型起吊设备起吊装船,船运至施工墩位,利用水上大型浮吊整体吊装就位。其中方案一、方案二在长江上的部分桥梁施工中已有采用,而方案三在国内外尚属首次采用。运用防撞钢套箱法进行承台与承台防撞结构一体化施工技术是我公司在东海大桥辅通航孔桥承台施工中所提出的一种新思路,在实际运用中取得了圆满成功,并积累了宝贵经验。下面对采用防撞钢套箱法进行承台与承台防撞设施一体化施工方法做详细介绍。

## 2 运用防撞钢套箱法进行承台与承台防撞设施一体化施工特点

将承台施工所用套箱与桥墩的防撞钢结构结合起来设计,承台施工完成后,套箱不拆除,继续作为桥墩的防撞结构使用。

## 3 防撞钢套箱法施工承台方案的提出

设计要求东海大桥辅通航孔桥主墩均需设置钢结构防撞设施,因此,套箱设计时考虑与防撞设计相结合,即将套箱设计成防撞钢套箱,套箱侧板在承台施工完成后即为防撞结构,这样既节约材料又可以缩短施工工期。

防撞钢套箱方案必须满足以下要求:

- (1) 桥墩防撞功能要求;
- (2) 施工承台所需的套箱功能。

## 4 防撞钢套箱设计

### 4.1 设计标准

(1) 防撞钢套箱作为桥墩的防撞结构,K6、K24桥主墩按500 t级防撞,撞击速度 $V=4.0$  m/s,墩首

正撞时的撞击力为1 070 t,墩侧斜撞时的撞击力为540 t。K12桥主墩按1 000 t级防撞,撞击速度 $V=4.0$  m/s,墩首正撞时的撞击力为1 520 t,墩侧斜撞时的撞击力为760 t。

(2) 防撞钢套箱作为套箱,其结构强度、刚度按20年一遇风暴潮流荷载验算,套箱内无水施工条件按两年一遇的测波频率波浪高度加设计高水位考虑。

### 4.2 防撞钢结构的防撞设计

#### (1) 防撞钢结构的结构形式。

防撞钢结构设施主要功能是在船舶撞击时,设施破损消能,减少对桥墩的碰撞力,同时减少船舶破损长度,避免船舶前伸部分触及桥墩上部结构,同时保护桩基。

防撞设施的结构设计满足沿海钢质海船的规范要求,防撞设施主体的结构由内围板、外围壁、底板、上甲板、下甲板、纵横舱壁等板架构件组成,主要板厚10 mm,局部加劲板厚14~20 mm,加劲肋用 $L100\times63\times100$ 角钢。侧板分段制作,用高强螺栓连接。内围板上安装防撞橡胶件并加厚壁板。防撞钢结构高5.7 m,内、外围壁厚度为2~3 m,如图1所示。

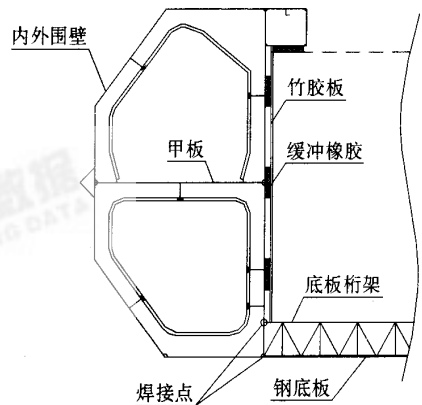


图1 防撞钢套箱示意

#### (2) 防撞钢结构的防腐设计。

处在浪溅区、潮差区,长期受到海浪冲击、海水飞溅以及干湿交替的作用,腐蚀因素相当复杂,是海洋固定式钢结构腐蚀最严重的区域,防腐保护尤为重要,它直接影响到防撞套箱的使用寿命。为此,套箱钢结构防腐采用725L-H53-9环氧重防腐涂料,它是一种适用于海洋环境的超厚膜、无溶剂、高耐磨的重防腐涂料,防腐年限超过30年。

### 4.3 套箱与防撞钢结构的结合设计

套箱与防撞结构的结合设计是一种双向设计,即在套箱设计时就要考虑防撞功能,或者说在防撞设计时就要考虑套箱功能。在提出这个创新性方案设想后,由于国内外没有先例,该设计经长达数月的研讨,最后由上海市船舶运输研究所完成了防撞功能设计,我公司完成了套箱功能设计。

#### (1) 套箱侧模设计。

我们利用防撞钢结构作为承台模板的受力骨架,在缓冲橡胶之间加木肋,木肋与橡胶同高度。木肋与橡胶外安装竹胶板,形成承台施工所需的侧模,如图 2 所示。

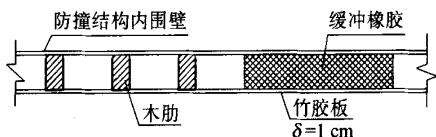


图 2 套箱侧模结构示意图

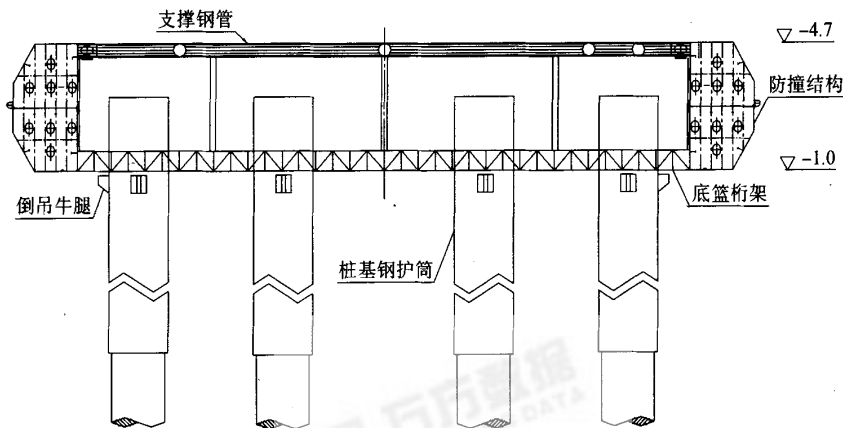


图 3 防撞钢套箱支撑系统示意

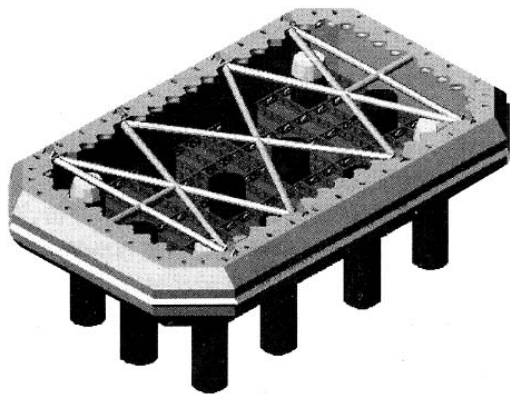


图 4 防撞钢套箱效果

#### (2) 套箱底模设计。

套箱底篮由底板桁架和焊接在桁架下弦杆上的面板组成。底板桁架高 900 mm, 用型钢焊接而成。底篮直接浇在封底混凝土中。因此, 它既是浇筑封底混凝土的承重结构, 也与封底混凝土一起作为承台混凝土的承重结构。

套箱底篮与防撞结构内围壁焊接成整体, 这样, 防撞结构与套箱底板、侧板一起组成了防撞钢套箱 (见图 1)。

#### (3) 套箱支撑支承系统。

套箱由钢制牛腿支承。由于受水位影响, 牛腿做成倒挂形式, 以便与钢护筒有足够的焊接时间。

套箱顶部用直径为 600 mm 的圆钢管支撑, 其作用: 一是平衡侧板水平荷载; 二是作为套箱整体吊装撑架, 平衡吊索水平分力。支架呈 X 形布置, 使套箱上口空间利于承台施工。套箱顶部支撑与底篮之间设有竖向直径为 300 mm 的钢管支撑, 以加强套箱的整体刚度, 见图 3、图 4 所示。

#### (4) 套箱消能设计。

由于防撞钢套箱的外形尺寸较普通钢套箱大, 因此, 作用在套箱上的波浪力也较大, 这对套箱各施工工况均有一定影响。

为了降低波浪对防撞钢套箱的作用力, 设计时在套箱的侧板外围板开设消能孔, 孔径在 300~500 mm 不等。

### 4.4 防撞钢套箱的计算与消能物模试验

#### 4.4.1 计算程序

针对防撞套箱各施工工况, 对防撞套箱采用了如下计算方法:

##### (1) 套箱细部结构设计全部用手工计算;

(2)防撞钢套箱空间分析验算时采用 Ansys 有限元分析软件,波流力分析用三航院的 REPIERL 软件。

#### 4.4.2 消能物模试验

为了验证防撞钢套箱消能设计的合理性,专门委托上海市船舶运输研究所对该方案做了消能物模试验。

通过物模试验表明,理论计算与试验结果的误差为 10%,且理论计算偏于安全。

### 5 防撞套箱施工

#### 5.1 套箱底板桩位预留孔设计

要保证套箱顺利下放,套箱底板桩位预留孔的开孔直径设计十分关键。基桩钢护筒直径为 2.9 m,在考虑施工环境和测量精度的情况下,经综合分析后将套箱底板预留孔直径设计为 3.2 m。

#### 5.2 套箱下放导向装置设计

在承台四角的基桩钢护筒上设计 4 个圆台形导向装置,并在导向装置上涂上醒目颜色。

#### 5.3 套箱固定装置设计

套箱固定包括竖向反压和水平限位两个方向,竖向反压装置由反压牛腿及型钢、螺旋千斤顶等临时反压装置组成,水平限位装置由支撑钢管和螺旋千斤顶组成,套箱就位后可直接通过调节千斤顶加以固定。

由于套箱下放就位后可供套箱固定的时间很短,约 2 h,因此,套箱转运前将竖向反压装置和水平限位支撑架事先放在套箱的相应位置。

#### 5.4 吊装系统设计

500 t 左右的套箱整体吊装即使不是海洋环境,也属大型设施起吊安装作业,起吊方案必须精心设计。吊装方案设计包括选择浮吊、确定起吊高度;吊索、吊具计算选择;吊耳、支撑系统设计以及吊装作业场地布置。

#### 5.5 套箱加工

##### (1)基桩钢护筒偏位测量。

由于套箱底板预留孔位置来源于基桩钢护筒平面位置测量,因此,测量错误直接影响套箱下放就位。为了使测量精度满足设计要求,测量工作分初测和精测两步进行。

①为了不影响承台施工进度,在基桩施工时对基桩钢护筒的偏位进行初测,作为套箱底板初加工的参考。

②基桩施工完毕,拆除钻孔工作平台上的钻孔设备,测量条件相对较好,测量小组再对基桩钢护筒的偏位进行精测,此次测量作为套箱底板加工预留孔位置的修正和最终依据。

##### (2)套箱加工。

钢套箱在工厂整体加工制作。套箱底板桩位开孔以基桩钢护筒初测数据为依据,当基桩施工完成、钢护筒精测数据出来后,再对底板开孔进行修正并用全站仪或经纬仪进行检测。钢套箱转运前按规范对加工质量进行验收并试吊,验收通过后方可转运。

#### 5.6 整体钢套箱安装

##### (1)起重船的选择。

根据套箱设计重量、几何尺寸及起重船的起重参数和施工环境研究分析,决定用 500 t 起重船安装 450 t 和 470 t 套箱,采用 1 300 t 起重船安装 570 t 套箱。

##### (2)选择拖航时间。

钢套箱在加工厂一旦出港,就应从天气上考虑能使后续工序连续施工。如果钢套箱在海上(桥位处)停放时间过长,不但不经济而且不安全。因此,选择拖航时间是件重要而又比较困难的事,要求套箱拖航必须满足以下条件:

①出航时航线所经海域风力小于 7 级;

②中长期天气预报(20 d 以内)无台风等灾害性天气发生;

③从天文潮汐规律方面考虑,套箱应在小汛期接近低平潮时安装就位。

##### (3)拖航。

拖轮两艘,主拖轮马力 3 000 HP,位于驳船前方,用拖缆软拖,副拖轮马力 1 600 HP,位于驳船一侧,除提供辅助拖航动力外,协助主拖轮控制航行方向。

##### (4)锚泊。

船队到达施工墩位附近后,按事前安排的抛锚停泊,浮吊横桥向停泊在安装墩一侧(靠长江口一侧),定位船与驳船横桥向停泊在浮吊前方,与桥墩间保持一定的安全距离。

##### (5)起吊安装。

###### ①准备工作。

指挥人员、测量人员、起重工、电焊工和安装限位支撑架人员,按不同分工,准备进入岗位;浮吊挂上起重绳,准备在高平潮前后开始起吊作业。

###### ②起吊。



一切准备工作就绪后,徐徐吊起钢套箱离开驳船 500 mm 左右,再次检查套箱受力与变形情况及浮吊工作状态,如无异常情况,继续起吊套箱(底部)至标高+4.5 m。

### ③平移定位。

套箱吊离驳船后,定位船及驳船即移至桥轴线的另一侧,浮吊通过收放锚缆,缓慢平稳地平移至墩位上方,瞄准导向架微调对位。

### ④下放就位。

套箱下放工作在落潮水流相对平稳后开始(低平潮前 1 h 左右),争取 0.5 h 内完成。

对位观察人员先在套箱顶部观察对位情况,待套箱下降一定高度后进入箱内,一人一桩观察对位情况,并将观察情况报告指挥员。

指挥员根据仪器观测和肉眼观察情况指挥浮吊正确对位后缓慢下放套箱进入导向架,进而进入护筒顶部(+3.0 m),然后停止下放,观察底板处各桩位就位情况和整体套箱偏位情况。

对观测情况进行分析,如有异常需及时采取相应措施;如无异常情况,以每 500 mm 一级逐级下放套箱,直至离牛腿面 100 mm 处暂停下放。

经纬仪再次测读套箱位置,并尽可能参照测读数据调整套箱位置后继续下放套箱。重复上述步骤,最后将套箱下沉到位,如图 5 所示。

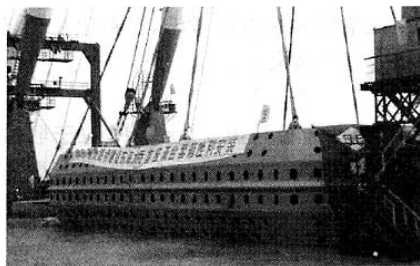


图 5 防撞钢套箱就位示意

### ⑤安装限位装置。

经检查(整体套箱就位精度、支承情况、底板孔位与护筒间相对位置等)套箱就位达到设计要求后,松钩 50%。

观察人员立即分组,快速安装水平限位支撑。待套箱四角的 4 个限位支撑基本就位后完全松钩,全部水平限位及竖向限位装置安装完成后,打开起重浮吊吊索销子,浮吊就地待命。

在安装水平限位支撑的同时,迅速安装竖向临

时反压装置,同时开始焊接竖向反压牛腿,这两项工作必须在潮水上涨至底板上桁前完成。

## 5.7 承台施工

### (1)承台封底。

防撞钢套箱安装就位后,必须尽快封底,以降低海上风浪对套箱的影响,降低施工风险。为了提高封底混凝土的承载力,承台混凝土选择在较低潮位时“干浇”,完成封底施工。

### (2)承台钢筋混凝土施工。

承台混凝土采用海工高性能混凝土,混凝土除强度与和易性必须满足设计和施工要求外,还必须具备在海洋环境条件下防止钢筋锈蚀及抗冻、抗渗性能。与普通混凝土相比,除强度与和易性两项质量指标外,还用电通量与氯离子扩散系数两项指标来衡量混凝土的密实度。一般要求海工高性能混凝土电通量值小于 1 000 C,氯离子扩散系数小于  $1.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

### (3)承台混凝土养护。

承台钢筋混凝土施工与内河基本相同,承台内设冷却水管,混凝土采取“内散外蓄”的养护措施,承台高性能混凝土的养护时间较长,一般要达到 14 d,避免混凝土产生裂纹。

### (4)承台的防腐措施。

为了满足承台的防腐要求,钢筋保护层垫块均采用高标号的混凝土垫块或高强度的塑料垫块,避免形成腐蚀通道。同时还要对承台分次浇注的施工缝做如下处理:

①严格按照规范要求对第一次混凝土进行凿毛和用淡水冲洗;

②缩短前后两次混凝土浇注的时间间隔,以减小两层混凝土间因收缩、徐变的不同而产生的附加内力;

③采用低水化热的高掺合料混凝土;

④第二次混凝土浇注前对凿毛混凝土顶面用淡水润湿至饱和状,并铺一层 1~2 cm 厚的 1:2 水泥砂浆;

⑤平接缝四周设工形橡胶止水带,如图 6 所示。

严格处理施工缝的目的是为了避免形成海水腐蚀通道,以提高承台的耐腐蚀性能。

## 6 防撞套箱施工特点总结

(1)截止 2004 年 2 月 14 日,本项目的 9 个防撞钢套箱全部顺利安装就位,单个套箱的平均安装时间

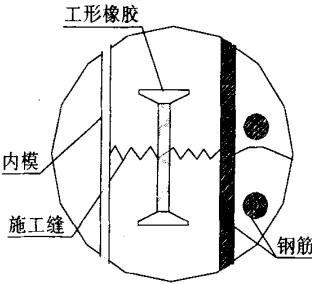


图6 橡胶止水带处理施工示意

为5 h,满足了海洋环境下承台施工的需要,取得了海上高桩承台施工的宝贵经验。

(2)采用承台与承台防撞体系一体化施工的防撞结构,套箱既是桥墩的防撞装置,又是承台的围水结构,二位一体,是一种安全、经济和提高工效的好方法。

(3)在防撞套箱外侧壁开设消浪孔,减轻了施工和运营期间波浪对套箱的冲击作用。

7 防撞套箱施工承台方案与套箱法施工承台方案比较

以东海大桥K12 辅通航孔桥承台施工为例,采用防撞套箱施工承台方案与套箱法施工承台方案比较见表1。

通过比较,防撞钢套箱施工方案具有经济、施工工期短、安全风险小、施工质量更有保障等优点。

表1 防撞套箱施工承台方案与套箱法施工承台方案比较

方案	经济性	工期	施工安全	质量
防撞套箱施工方案	只投入了套箱底板,节省了侧板(单座承台节约侧板约200 t 钢材)	减少了单独安装防撞结构的时间(单座承台节约15 d 工期)	套箱侧板作为防撞结构,降低了在桥梁施工期间船只撞击桥墩的风险	有利于保证新浇混凝土质量及混凝土后期强度的发展
套箱法施工方案	投入了套箱底、侧板(单只套箱投入底板侧板钢材约360 t)	单独安装防撞结构约需15 d 工期	施工过程中存在船只撞击桥墩的风险	由于波浪对套箱侧板的作用力较大,对新浇混凝土质量有一定影响

8 结语

海上承台采用钢套箱整体吊装方案是海洋环境的需要,而波浪力是套箱设计和承台施工中的主要控制因素,采用海工高性能混凝土是海洋环境下承台耐久性的需要。

采用防撞钢套箱进行承台与承台防撞设施一体化设计与施工是一个新课题,与普通套箱法施工承台方案相比,它具有较大的优势。但该方案在国内外尚属首次采用。以下两个问题需进一步完善和再探讨:

(1)防撞钢结构与套箱底板采用焊接工艺连接,不利于防撞结构的拆除或更换,宜改为栓接。

(2)采用防撞钢套箱施工承台,施工完成后承台侧面的表观质量验收存在一定困难,设计时应将对承台表观质量验收方法考虑进去。

Construction of Pile Cap and Facilities Against Dash to Pile Cap Integration for Maritime Bridges

GUO Zhu-long, ZHOU Xian-nian, SONG Wei-feng

(Road & Bridge East China Engineering Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

**Abstract:** It is essential to choose a rational construction scheme and technology and make proper construction arrangement for building of pile cap at sea in order to overcome difficult physical conditions. This paper stresses and presents, after analysis of high-rise pile cap construction characteristics in Donghai Sea Crossing Project and Hangzhou Gulf Crossing Project, offshore construction technology of pile cap and facilities against dash to pile cap integration which has been extended in pile cap building of Shanghai Yangtze River Bridge and Ningbo-Zhoushan Coastal Link Project and has a significant sense.

**Key words:** pile cap; facilities against dash; integration; construction