

# 杭州湾跨海大桥工程简介及若干技术方案探讨

章汉斌<sup>1</sup> 唐明翰<sup>2</sup> 张少俊<sup>3</sup> 郭伟光<sup>3</sup> 朱健<sup>3</sup>

(1.金华市婺城区公路段 321000 2.上海市基础工程公司 200002 3.中国建筑总公司上海公司 200052)

(续接上期)

钢主梁上起重小车顶面的平台上安装LSD提升系统,用于箱梁提升。起重小车的滑移采用滑板式,即在小车两承重梁(与钢主梁垂直)底两端各镶嵌一块聚四氟乙烯板式橡胶支座(450×650mmGJZF4型),在小车滑动范围内的钢主梁顶面用环氧树脂石英细砂浆粘贴一块厚2~3mm、材质为1Cr18Ni9Ti的不锈钢板作为滑道,并在板面均匀涂抹一层不会挥发的型号为5201或295-3硅脂作润滑剂。负荷后的起重小车在不锈钢板上滑移时其摩擦阻力为720×0.06=43.2t,为此在钢主梁设置一台具有100t牵引力的ZLD100型连续千斤顶,千斤顶设在梁端顶面用钢绞线与小车相连。空车倒回时其摩擦阻力最多只有20×0.08=1.6t,采用一台2t卷扬机。

### ③桥面运梁

四台Intel Combi So运梁车分两列行走在已架设桥面的上下行箱梁内侧腹板顶面,将50m箱梁驮运至架桥机处。每台运梁台车由3台长为9m、6轴线、48轮数为基本单位的小车联接而成,4台车总车轮数为576个。

箱梁依靠前后两根 $\square$ 形承托梁将重量均衡分配到左右两侧的运梁车。箱梁在承托梁上的支撑有3点液压装置,前方2支点有液压接管平衡,运用三点支撑平衡原理保证箱梁在运输过程中不出现附加弯矩和应力。每台运梁车上又有一根10.5m长的纵向分配梁将荷载均匀分布到18根轮轴上。每根轮轴与车架底盘之间有液压油缸可以自动调节以适应台车在纵向与横向由于路面倾斜或高低不平带来的影响,保证数量众多的车轴与车轮受力均衡。

4台运梁车被设计成等速行走,四台动力头由集中的控制板操纵,四台运梁车的启动、停

止、变速均同步进行,保持前后两组车之间的车距不变,不会出现通过箱梁传递摩阻力的情况。行动中有自动驾驶系统运作,运梁车最前端和最后端有摄像头自动跟踪标在桥面的设计行车中心线,限制偏差在一定范围内,并自动调整方向,超出限制值后自动减速直至停车。运梁车的计划速度为5km/h,最远处箱梁架设时的所需时间大约为2小时左右。

### 5.2.3 箱梁架设

采用架桥机架设整孔箱梁。架桥机为侧置双主梁式,由两根主梁构成,在两根主梁之间设置前后两个起吊装置,主梁由设置在桥墩上的前方支腿、设置在已架设箱梁上的中间支腿以及后方支腿再加上设置在架桥机尾部的后方临时支腿支撑。整个架桥机的全貌见图11。

## 5.3 实施的50m梁施工方案

### 5.3.1 预制

#### ①预制场

设在南岸桥头陆地,占地20万m<sup>2</sup>,为满足工期,设6个制梁台座,30个存梁台座,每月生产18片梁,台座两端均为Φ1.2m钻孔桩,制梁台座桩长50m,存梁台座长65m,制梁台座中间段为天然地基的“U”形截面砼台座,上铺型钢及钢板作底模。

#### ②模板

根据内孔断面变化,内模由中间段、两端的变截面段和孔口段五段组成,各段均由模板系统、车架系统和液压系统三部份构成(与中建上海公司竞标方案基本相同)。外模为大块钢模组拼结构采用子母铁楔与底模钢横梁楔紧连接,端模和侧底模间用螺栓连接。

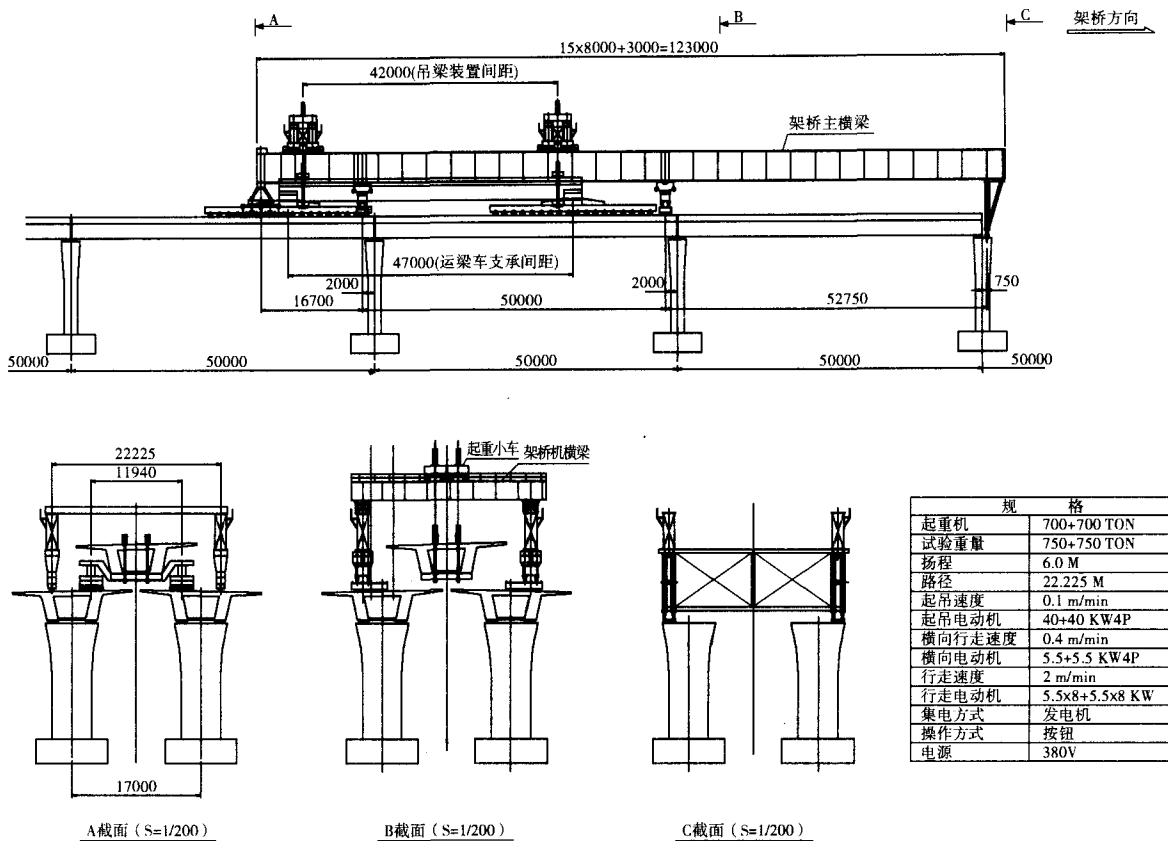


图11 架桥机示意图

### ③钢筋笼

单片梁钢筋笼重105t，配备了顶板钢筋和底板钢筋预扎架各2个和整体吊架1个，以及500kN搬运机2台。

### ④砼

砼配比见“7”节。

预制场配置了4台60m³/h和1台90m³/h砼拌和站，由于海工砼要求拌和时间为120"~150"，故实际生产能力为90m³/h，单片梁砼方量为550方，在6~8小时浇完。

拌和站的砼由五台HBT80砼泵泵送，用4台移动式布料机布料。浇注工艺按由两端向中央和下倒角→腹板→底板→顶板顺序进行，水平分层不大于30cm，斜向分段1:4~1:5。

砼的振捣采用插入式与附着式相结合的方案。

养护：总体方案为保温保湿。即浇注后→养护罩封闭梁体→梁顶覆盖干海绵，静养到初凝（约8h）→梁顶海绵浇水湿透→罩内按10℃/h速度升温到40℃→保温24h→按小于10℃/h速度降温至与环境温度差小于25℃时撤离养护罩。

箱梁内适当通风。

养护过程中对梁体各点面的温度，湿度以及环境温度进行监测。

### ⑤预应力施工

采用PE波纹管成孔，其内穿以直径略小的硬塑管，砼初凝后，适当来回抽动。采用二次张拉工艺，即当砼强度和弹模分别达到85%和80%时进行腹板束和部分底板束张拉，然后运至存梁台座，到100%强度后完成剩余部分预应力束的张拉，张拉时进行双控。

孔道采用真空辅助压浆工艺压浆，其浆体配合比为：

水泥	水	高效减水剂	阻锈剂	微膨胀剂
0.9	0.31	0.015	0.00625	0.1

浆体流动度14~18s，膨胀率<5%，初凝时间>3h，终凝时间<24h。

### 5.3.2 箱梁运输

#### ①场内移梁

由于ML800型轮胎式搬运机具有对地基处理要求低，能双层存梁和工效高等优点，所以选用了两台用于从制梁台座至存梁台座，从存梁

台座再至提梁站的箱梁搬运。

每台搬运机由一条横梁、一付A形支腿，2×12只胶轮，吊梁小车和动力、液压、电气三个系统构成，带梁行走时，轮胎能原地90°转向，自重340t，吊砵梁重的一半，即715t。

行走通道仅将原地基作了一般处理。

## ②提梁上桥

提梁站设于本标段南岸终点即4×50m，现浇连续梁处，提升设备为2台HM800轮轨式提梁机，能跨三片梁。原地将梁提起后，横移到位，安放在已停放在上述连续梁顶面的运梁车上。

每台门式提梁机由横梁（桁架结构）、一

侧的刚性支腿（桁架结构）、柔性支腿（另侧）、吊梁小车、行走台车、电气系统及控制系统等部分构成，吊梁重的一半，即715t，自重550t，单片箱梁提升横移安放共需2小时。

## ③桥面运梁

4台TE1600运梁车组成前后两个车组，通过连接机构和电子控制系统将前后机组连成一个刚性整体，每个车组设一架驾驶室。运梁车从提梁站驮运整孔50m箱梁，沿已架梁面驶至架桥机处。

运梁车共有4×160只轮胎，自重524t，驮重1430t（见图12）。

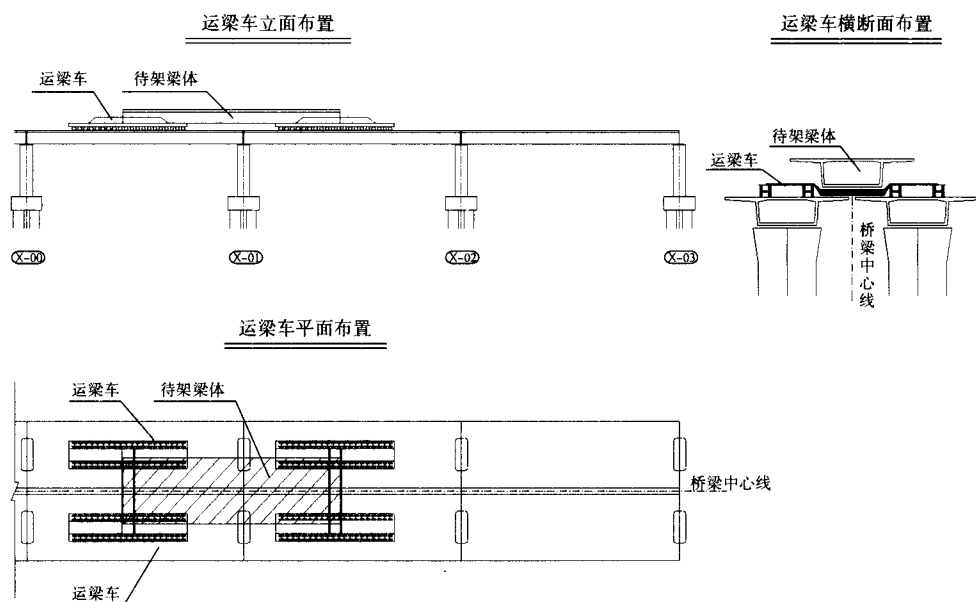


图12 50m跨运梁车方案

### 5.3.3 箱梁架设

采用LGB1600型步履式架桥机，架设整孔箱梁。该机由双主（纵向）梁、吊梁小车、前后支撑、前后支腿以及动力、液压、机械传动、电控等系统构成，它具有将50m长，重1430t的箱梁起吊，纵移、横移就位落梁，自力前移等功能。

架梁时前支撑支于待架孔前半桥墩顶面，后支撑支于已架箱梁前端顶面，后支腿支于后运梁车组顶面，通过运梁车下的轮胎和液压支腿将荷载均匀传给桥面。后支腿可翻转以便运梁车退出。LGB1600架桥机自重1268t，单片梁架

设时间约为4小时。

## 6. 高墩区引桥，中引桥及水中南引桥

本工程范围内总长18.27km，其上部结构均为70m跨先简支后连续的砵箱梁，其中：

①除北航道桥北高墩区引桥，因水深浅为钻孔桩外（见图13），其余均为钢管打入桩，单桩容许承载力为6100~6700kN（见图14）。

②承台均为现浇。

③墩身：高墩区为现浇，其余为预制+现浇墩座。

④墩身均为倒圆角箱形薄壁截面：横桥向均为625cm，顺桥向顶部6m高为曲线段，厚度

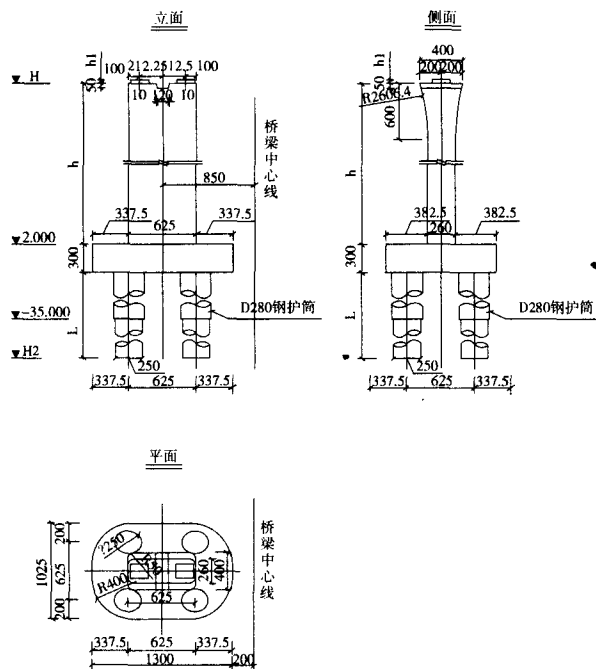


图13 70m跨钻孔桩基础构造 (尺寸单位: cm)

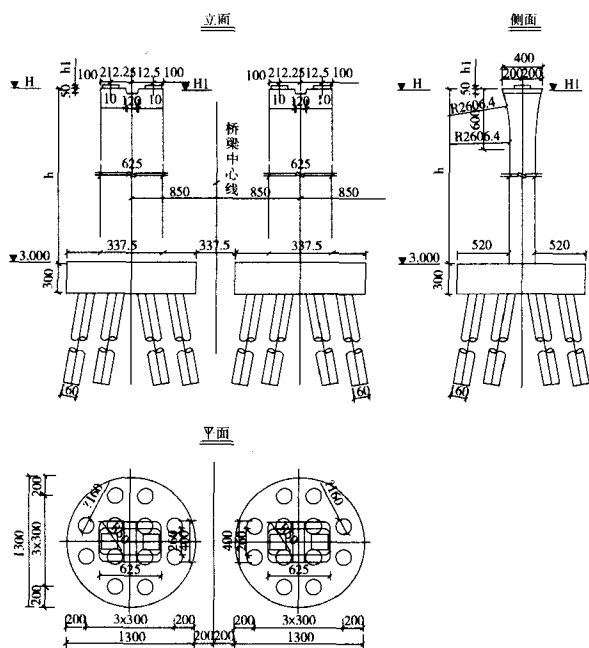


图14 70m跨打入桩基础构造 (尺寸单位: cm)

(顺桥向)从260cm变到400cm(墩顶)。下部直线段厚(顺桥向)260cm。壁厚50cm。

⑤各桥墩曲线段和高为600cm下面直线段高度随桥墩高度不同而变化。北航道南侧高墩区引桥桥墩高33.079~43.538m,南航道桥高墩区引桥墩高15.134~30.781m。

### 6.1 钢管桩

区域	根数/桩径	斜率	平面角	桩长(m)	承台(m)	壁厚(mm)		砼填芯	根数
						22	20		
中引桥	9Φ1.5	最大6:1		71~88	Φ10.5×2.8	桩顶下46m	其余		
水中南引桥	10Φ1.6			78~88	Φ12×3	桩顶下49m	其余		
北航道桥南侧高墩区	10Φ1.6	6:1 8:1 15:1	10°~50°	72~78	Φ12×3			-12m以上	5164
南航道桥两端	12Φ1.6	6:1 10:1 20:1	5°~60°	78~85	Φ12×3				

钢管桩材质为Q345C,单桩最重68t,全桥钢管桩用量37万吨,系武钢生产的宽1490mm,厚20和22mm,热轧钢带卷在宁波卷制成螺旋桩,焊缝按100%超声波,2%X光拍片探伤。

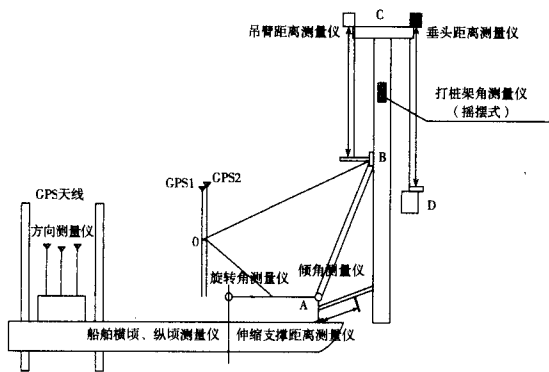
钢管桩的防腐以外表环氧树脂涂层为主,辅以牺牲阳极的联合方案,钢管桩上、中、下三段涂层层数分别为三层,二层和一层,每层厚约300μm。

中引桥与南引桥共投入四艘大型打桩船,其中“海力801”和“天威”号是目前世界上最先进的多功能起重打桩船,能360°旋转起重,其船型为80×30×6m和80×32×6m,吃水2.8m和3.0m,桩架高度为86+18m和90m均可打Φ2.5m直径,长80m+水深的桩。抛锚一次可完成一排二墩20余根钢管桩的施打。桩架可外伸13~17m,上下升降18m,沉桩不受先后影响,可对已成桩群中任一桩进行复打或补桩,高潮位时可打水面下的桩而不需送桩,可升降桩架和液压锤直接打入水中。

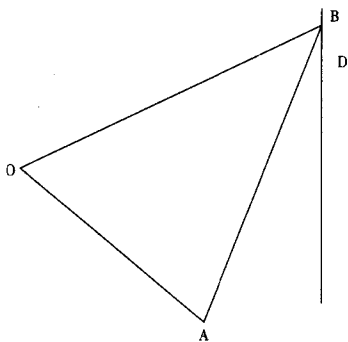
上述二船均配有荷兰S-280液压锤,锤心重13.6t,最大打击能量280kj,它的效率比同能量级的柴油锤高出50~80%。每只锤每天能打8~10根桩。

S-280液压锤可根据土层软硬调节能量,能自动记录每击能量和总能量、贯入度和锤击数。

四条船均配置GPS卫星定位系统,用作对桩顶平面座标,方位角,斜率和桩顶标高进行有效控制。(见图15)



a) 海力801号GPS定位系统布置示意图



b) 船体部位几何示意图

图15 海力801号船GPS定位系统

## 6.2 墩身预制与墩座施工

中引桥和水中南引桥总长15.4km，为了缩短工期，减少海上作业，设计采用预制+现浇墩座方案，共预制墩474个，高7.372~17.383m，重240t~440t，砼总方量6万立方米，重量小于300t的墩柱采用吊重350t的浮吊安装，大于300t以上的桥墩则采用500t固定式扒杆浮吊进行安装。

预制场设在海盐县秦山大件码头北侧，由于主筋从墩底下伸1.2m，故下设钢托架，立式预制，因墩顶封闭故内模采用分节伞形收缩整体内模，为方便内模从墩底拆出，钢托架下又设一段砼托架，钢托架顶板即为底模。

内模安装时由下向上逐节安装一次成型（约半天时间）一次性浇注完毕，拆内模时，自下而上逐节拆出。

预制墩安装时先在承台顶面预留的盆槽内放置一个由6个钢筋砼短柱连成整体的定位支座（见图16），通过锚筋固定在承台上，预制墩就位后，将墩身插筋与承台锚筋用特制卡环或

焊接连接，墩座外模为钢模，超高80cm作挡浪用，砼由搅拌船供应，吊罐布料，人工振捣、养护时间不少于10天，且尽量推迟与海水接触时间。

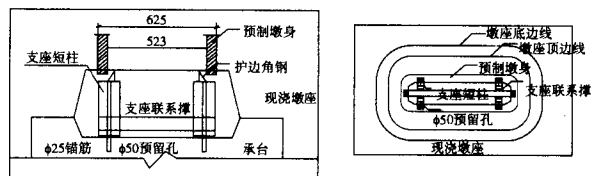


图16 预制墩身安装图

由于承台施工后与墩座施工之间有近半年时间差，为防钢筋锈蚀，用锌粉和树脂调和后涂刷钢筋外表，它不降低砼握裹力，既有防锈又兼有阴极保护与屏障式保护作用。

墩座施工初期，由于施工缝较多、约束较多曾出现不少裂缝，在砼中添加了聚丙烯纤维后，裂缝得到有效控制。

墩座处于腐蚀条件最恶劣的浪溅区，又会因收缩产生裂缝，为确保其耐久性，经过试验选用硅烷对墩座外表喷涂，施工时间宜在天气晴朗，低潮位时间长，风浪比较小的时段时行。

## 6.3 70m箱梁施工

### 6.3.1 设计

箱梁顶宽15.8m，度宽6.25m，外侧高4m，中心线侧高4.316m，双幅中心距17m，按全预应力结构设计，悬臂长3.9m，端部厚20cm，根部厚50cm，顶板厚27cm，底板厚25cm，腹板厚为50cm（见图17），在墩顶附近，顶板，底板及腹板均有所加厚，吊重约2160t，吊高52m。

70m预制箱梁全桥共526片。

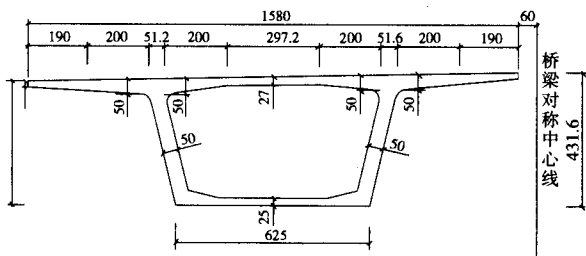


图17 70m箱梁跨中横断面（尺寸单位：cm）

### 6.3.2 箱梁预制

①预制场设在海盐，占地300亩，场地内台座与岸边平行。箱梁通过与岸边垂直的双线栈桥出海，给浮吊喂梁。设8个制梁台座，24个存梁台座和纵横向滑移滑道。两个制梁台座另配一个底腹板钢筋绑扎台座，一个顶板钢筋绑扎台座和一个内模拼装台座。还配置二台120t龙门吊作钢筋笼和内模等物搬运吊放之用，其跨度46m，高24m，自重200t。砼工厂生产能力为200m<sup>3</sup>/h，并配置8台8m<sup>3</sup>搅拌运输车，4台80m<sup>3</sup>/h输送泵，4台布料机。箱梁砼浇注前的工序为：外侧模支立→吊放底腹板钢筋笼（约100t）→吊放内模（220t）→吊放顶板钢筋笼（90t）→绑扎少量未扎入的钢筋和预应力管道→调整。为防钢筋笼变形，其专门吊具重达60t，吊点276个。

#### ②模板

外模在台座上一次拼装好，它与内模不设拉杆，拆模是通过轨道滑轮收放千斤顶来实现。

内模采用全液压折臂收缩式钢模，在拼装台座上拼成整体吊入，根据箱内截面尺寸变化，设计成可二次折臂收缩。能整体下落脱模，内模纵向8~12m一节，铺设临时轨道分节脱出。

#### ③砼及预应力施工

砼为C50海工砼，一片梁约830m，一般8小时可浇注完毕，浇完后，即时用整平机整平，然后用收浆作业平台进行收浆和抹面。收浆、抹面、养护都是防止大面积砼出现裂缝的重要措施。

混凝土早期强度很低，极易因水化热和受到各方面约束而产生温度缝或收缩缝，此时若能通过预应力筋给砼施加一定压应力就可以防止这种裂缝产生。然而由于此时砼强度很低极易使锚下砼被破坏，为此，杭州湾大桥工程师们对70m箱梁纵向预应力束分二次张拉，当砼强度大于25MPa，弹模大于18.8GPa进行初张拉，张拉控制力按腹板设计索力的30%控制，到

100%强度时进行终张拉，按100%设计控制。

二次张拉是防止腹板砼出现裂缝的有效措施。

70m箱梁预应力束孔道采用PE管，用真空辅助压浆工艺，可大大提高浆体密实度。

### 6.3.3 场内移梁

#### ①横移

横移滑道数量有16条，但较短，经试验后最终选用水平千斤顶作动力在滑道上滑移（上/下）磨擦副为MGB/不锈钢。

#### ②纵移

由于利用千斤顶作动力，滑移速度太慢，仅36m/h，不适于预制场内的长距离纵移，施工单位大桥局成功研制出了全液压、全电控2400t悬挂轮轨式台车，它外形尺寸为6.6×7.4×1.2m，有64只φ500mm钢轮，32台张拉力为100t的千斤顶，32个电动机并通过电控技术控制前后台车同步运行。它额定载重量2400t，自重95t。

由于它走行速度可达0~12m/min，大大提高了工效。

### 6.3.4 梁的海上运输与架设

70m箱梁重2200t，施工单位采用“天一号”和“小天鹅号”两艘大型专用起重船来承担杭州湾大桥500余片70m梁的海上运输和架设。小天鹅曾在东海大桥中成功应用。

由于受风力，潮位和水流的影响，起重船安装箱梁时难以准确落到符合设计的位置，其偏差达10cm，超出规范允许范围，为此施工单位研制了一台“墩顶横移精调装置”，可将2200t箱轻松地精调到位。

两条运架一体船主要技术性能见表：

船名	起吊能力(t)	型长(m)	型宽(m)	型深(m)	吃水(m)	航速	起重高度(m)	起吊速度(m/min)
天一号	3000	88.2	40	6.4	3.5	8.2节	53	0.1~0.8
小天鹅	2700	84	46	5.9	3.5	7.3节	40	0.1~0.75

小天鹅号为双体船型（见图18），由连接桥相连，开档可在5~18m间改变，两船均为自航式。

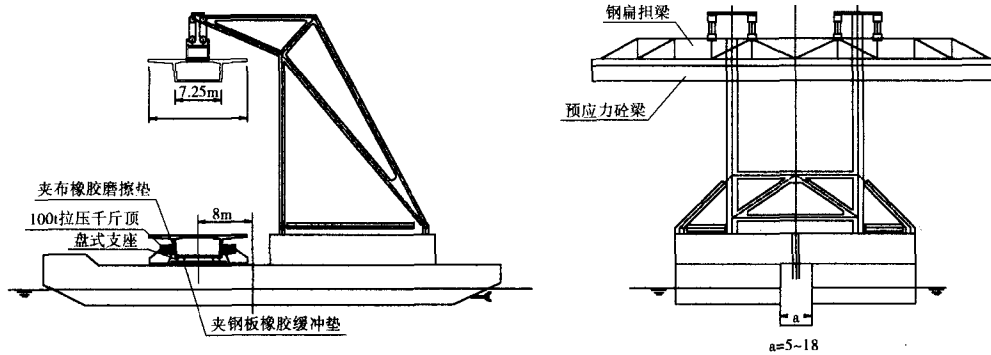


图18 小天鹅起重船

## 7. 大桥结构耐久性设计

### 7.1 结构使用环境分区

环境类别	级别	环境分区	工程部位
海水腐蚀环境	C	浸没于海水的下水区、泥下区	桩基、陆地地区承台
	D	接触空气中盐分，不与海水直接接触的大气区（标高10.21m以上）	箱梁、陆地桥墩、航道桥中上塔柱
	E	水位变化区（-4.56~1.88m）	海中承台
	F	浪溅区（1.88~10.21）	海中桥墩、下塔柱

### 7.2 海工高性能混凝土

#### ①最大水胶比和胶凝材料最小用量

部位	最大水胶比 (W/B)	胶凝材料最小用量 (kg/m <sup>3</sup> )
桩、承台、现浇桥墩台及索塔	0.4	400
预制箱梁、预制桥墩	0.33	450
现浇梁及其他部位砼	0.35	450

#### ②砼抗氯离子渗透要求（12年龄期）

部位	氯离子扩散系数(10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)
钻孔桩	≤3.0
承台	≤2.5
墩身	≤1.5
箱梁	≤1.5
索塔	≤1.5

#### ③混凝土典型配合比设计

部位	强度等级	水胶比	每方混凝土各种材料用量 (kg)							
			水泥	矿粉	粉煤灰	砂	石子	水	减水剂	阻锈剂
陆上桩基	C25	0.36	165	124	124	754	960	146	4.13	-
海上桩基	C30	0.3125	264	-	216	753	997	150	5.76	-
陆上承台、墩身	C30	0.36	170	85	170	742	1024	153	4.25	-
海上承台	C40	0.33	162	81	162	779	1032	134	4.86	8.1
海上现浇墩身	C40	0.345	126	168	126	735	1068	145	5.24	8.4
海上预制墩身	C40	0.309	180	90	180	779	1032	139	5.4	9.0
箱梁	C50	0.32	212	212	47	724	1041	150	1.0	-

水泥为42.5 II型硅酸盐水泥，所有原材料都需符合专门制定的质量标准。

#### ④混凝土各项性能汇总：

部位	强度等级	抗压强度 MPa(28天)	氯离子扩散系数 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s (84天)	坍落度 (cm)	扩展度 (cm)	抗裂性能	凝结时间	
							初凝h	终凝h
陆上桩基	C25	39.3	1.368	21	43	良好	10	13
海上桩基	C30	53.8	1.57	22	55	良好	18	20
陆上承台、墩身	C30	39.3	1.206	21	42	良好	8	11
海上承台	C40	57.4	0.729	18	-	良好	6-8	9-10
海上现浇墩身	C40	56	0.68	18	55	良好	10	15
海上预制墩身	C40	57.6	0.368	18 ± 2	-	良好	6-8	9-10
箱梁	C50	68.8	0.34	18 ± 2	35-45	良好	> 8	12-14

混凝土搅拌机须为强制式，搅拌时间2~2.5min。

混凝土运输时间的限制：气温在5°C~30°C中无搅拌的运输时间为30'~60'，有搅拌的运输时间为90'~120'。

### 7.3 结构耐久性设计

①砼结构一律采用海工耐久砼。

②进行20年使用年限外表涂装设计，全桥总涂装面积多达210万平方米，承台和浪溅区以下部位的表湿区，喷涂湿固化，快速固结涂料，干膜厚400 μm，浪溅区以上墩身和梁部的表干区，采用耐候性保光，色泽度性能良好的涂料，干膜厚350 μm。

#### ③砼结构钢筋保护层按下表设计

结构部位	钻孔桩 (mm)	承台 (mm)		桥墩 (mm)	桥塔 (mm)	箱梁 (mm)
		海上	陆上			
保护层厚度 (mm)	75	90	75	60		40

④ 砼箱梁：按全预应力结构设计，提高砼强度等级，预应力采用PE管成孔，采用真空辅助压浆，并按①②③执行。

⑤ 钻孔桩：钢护筒水位变化区以下保留，并按①③执行。

⑥ 承台：环氧涂层钢筋，砼中加阻锈剂，并按①②③执行。

⑦ 现浇墩座：环氧涂层钢筋，加阻锈剂，加聚丙烯纤维外表喷涂硅烷，并按①③执行。

⑧ 桥墩身：浪溅区环氧钢筋+阻锈剂并按①②③执行。

⑨ 索塔：除按①②③⑥⑧外，对承台及下塔柱用可动态监控的通电流钛阴极保护，以实现持续防腐。

⑩ 钢管桩：其外表进行环氧涂层防腐，顶部即处于浪溅区、潮差区及部份水中区有三层环氧涂层，干膜厚800~1000 $\mu\text{m}$ ，中部即水中区为二层涂层厚600 $\mu\text{m}$ ，下部即泥中区为一层涂层厚300 $\mu\text{m}$ ，桩内-12.0m标高以上砼填芯。并采用牺牲阳极的阴极保护。

⑪ 钢箱梁：外表喷铝+油漆涂装，确保防护年限不小于30年。箱内、南北航道桥分别安装四、八台除湿机，保证箱内相对湿度小于50%。

⑫ 索塔钢锚箱：与砼不粘的表面，笔者建议防腐至少与钢箱梁外表相同。

## 8 探讨

① 笔者等人编写此文旨在让关心杭州湾大桥建设的含笔者等人在内的国内桥梁界对大桥有一全面了解和在日后的桥梁建设中有所借鉴。文中若与实际有所出入，应以实际为准。

② 目前厂制“热挤PE护套半平行钢丝绳”（俗称“成品索”）和“平行钢绞线索”两种索型都在国内斜拉桥中得到应用。成品索两端的冷铸锚为笔者等人于上世纪七十年代末所发明。我国的平行钢绞线斜拉索系从1992年开始由笔者与柳州OVM公司以及同济大学两单位的同志共同开发的成果。两种索型相比，“成品索”尤其是长索运输麻烦，安装难度

大，而钢绞线索是化整为零，现场组索，施工简便，设备轻小；在安全性方面钢绞线索两端不论是无粘结还是有粘结锚具均符合国家“锚夹具技术标准”；在耐久性方面钢绞线索比成品索要久得多。号称可使用30年的成品索，有的桥梁建成后仅十年左右就不得不在外表缠包一层昂贵的美国布朗公司Cableguard热缩防腐带，更有甚者，某座桥建成后仅四五年时间，就有多根拉索的PE护套多处出现环状断裂。可见号称可使用30年的成品索实际年限要短得多。然而钢绞线拉索其绞线外表有多层防护，只有在外护管、内护套均先后老化或损坏情况下，有害物质才能侵蚀绞线，在外护管一旦被发现老化后即可单换外护管。成品索外表面仅主要靠紧裹的PE套，一旦老化或破损将立即波及钢丝。钢绞线索在桥梁100年的设计基准期内全索更换多则一次，少则仅换外护管，然而号称30年的“成品索”恐怕需更换四次以上。

因此笔者建议，今后的跨海大桥和特大跨度的斜拉桥由于换索不易应首选“钢绞线”索为佳。

对于建设中的杭州湾大桥的“成品索”除原材料外若再采取如下措施：a从选用抗老化50年的高品质PE护套料；b锚具外表需具有能保证50年不会锈蚀的热镀锌层厚度；c绕钢盘运输；d精心施工；e定期的检查与维护，则可确保原30年的设计寿命。

③ 国标“斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件”（GB/T18365-2001）中的7.2.1条文为“成品拉索以脱胎成盘或钢盘卷绕形式包装运输，其盘绕内径一般不小于20倍拉索外径，并不小于1.6m最大外形尺寸应满足相应的运输条件。”

实践证明：“脱胎成盘”的拉索运至现场，解开绑扎带后，盘索纹丝不动，毫无弹直之势，挂索时产生扭绞现象，这会否影响索的承载能力，抗疲劳性能和PE护层的耐久性应经试验证明。

④ 东海和杭州湾两座跨海大桥都有相当一部分的预制墩身通过现浇墩座与承台连接。由于墩座为填充式施工，加上砼的收缩特性难免



会在墩座顶与预制墩身底面间存有细微缝隙，将造成隐患。若墩壁内设有 $\phi^{125}$ 精扎螺纹钢，其下端埋于承台内，墩顶张拉压浆后，不但可消除缝隙的存在又可提高墩身的抗弯刚度。

⑤现代砼斜拉桥中，索梁锚固方式均是用一根钢索管理在砼梁的半高处或梁底。拉索从管中下穿后，锚于管端的锚垫板上，由于各种原因，管内积水和处于潮湿状的桥例屡见不鲜，久而久之，索锚结合处将会严重腐蚀。目前生产厂家可生产正常使用50年的拉索会因此大打折扣。因此，笔者建议，设计砼斜拉桥时，设法通过某种埋置式钢结构，将拉索下锚点和一些钢桥一样引至桥面以上。这不但消除了下端的隐患，又方便了拉索的安装和日后的更换。

⑥随着我国的经济迅速发展，规划中的跨海大桥相继在兴建，首座大桥—长达32Km的东

海大桥已于去年建成通车，36Km的杭州湾大桥也在紧张建设中。

跨海大桥长达数十公里，在有航道桥的情况下，非通航孔的总长也约占全桥长的90%以上，为减少海上作业，提高质量和加快进度，国内外桥梁工程师都认同，其上部结构采用预制吊装为最佳选择。据悉国外最大预制梁长已达190m，重8200t，安装梁的浮吊高度超过百米。我国的上述两座大桥中预制梁长为60m和70m（滩涂区为50m），最大吊重2300t。笔者拙见，我国今后的跨海大桥可以从几方面着手：a 将梁的砼标号提高到C60以上；b用液压千斤顶提梁安装；c改悬臂吊机为垂直提升架（以提高吊船起重能力和减轻设备自重）的运架一体船施工，将梁跨提高到90~100m，这一方案可能更为经济合理，仅供参考。

（上接第20页）

### 5.3 关于缩尺锚杆（良好工况）的腐蚀

（1）在各种类型的砂浆保护层中，丙烯酸砂浆防护效果最优，应优先选用；除此之外，试验条件下，只要有足够的砂浆保护层厚度，锚杆表面是否另加防护涂层其效果并不明显。

（2）由于综合因素影响，使用年限为17a的缩尺锚杆试件的破坏起始点和峰值点均显著提前，同使用年限为零的缩尺锚杆试件相比，前者的平均屈服载荷和极限荷载分别要低52.9%~49.2%和18.4~22.2%。这须引起人们高度重视。

#### 参考文献

- [1] Rokhlin, S.L., Kim, J.Y., Nagy, H., et al. Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life[J]. Engineering Fracture Mechanics 1999, 62 (4): 425-44
- [2] Harlow, D.G., Wei, R., Probability modeling for the growth of corrosion pits[A]. In: Chang C. I., Sun C.T., ed. Structural integrity in aging aircrafts[C]. ASME, 1995, 185-194
- [3] Bamforth P. Predicting the Risk of Reinforcement Corrosion in Marine Structures, Corrosion Prevention & Control, Aug, 1996
- [4] S.L. Amey, et al, Predicting the Service Life of Concrete Marine

Structures: An Envirpmental Methodology, ACI Sturctural Journal, March-April 1998

[5] Service-life Prediction, State-of-the-art report, ACI 365. R-00, Reported by ACI Committee 365, April 2000

[6] 刘西拉. 结构工程耐久性的基础研究[A]. 见：陈肇元，钱家茹，谷书娥编. 工程科技论坛：土建结构工程的安全性与耐久性[C]. 北京：清华大学出版社，2001, 200-206.

[7] 王媛俐，姚燕主编. 重点工程混凝土耐久性的研究与工程应用[C]. 北京：中国建材工业出版社，2001, 1.1.

[8] 张弥. 我国铁路隧道结构安全性和耐久性分析[A]. 见：陈肇元，钱家茹，谷书娥编. 工程科技论坛：土建结构工程的安全性与耐久性[C]. 北京：清华大学出版社，2001, 1-4.

[9] 姚燕. 混凝土材料的耐久性——重大工程混凝土安全性的研究进展[A]. 见：陈肇元，钱家茹，谷书娥编. 工程科技论坛：土建结构工程的安全性与耐久性[C]. 北京：清华大学出版社，2001, 266-273.

[10] 陈肇元. 混凝土结构的耐久性与使用寿命[A]. 见：陈肇元，钱家茹，谷书娥编. 工程科技论坛：土建结构工程安全性与耐久性[C]. 北京：清华大学出版，2001, 17-24.

[11] 曾宪明，雷志梁，张文巾等. 关于锚杆“定时炸弹”问题的讨论—答郭映忠教授[J]. 岩石力学与工程学报，2002, 21 (1)：143-147.

[12] 周世峰，董遂成，严东晋. 地下工程水泥砂浆在腐蚀环境下的耐久性试验研究[J]. 防护工程，1998, 6 (1)：43-48.

[13] 曾宪明，陈肇元，王靖涛等. 锚固类结构安全性和耐久性问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报，2004, 23 (13)：2235-2242.