

# 海盐塘自锚式悬索桥上部索结构施工技术

唐建荣 李东平

(柳州欧维姆工程有限公司 柳州 545005)

**摘要:**海盐塘桥为国内首座主缆、吊杆采用光圆钢绞线的自锚式悬索桥,其主缆、吊杆设计构造与普通悬索桥不同。

本文介绍确定主缆、吊杆索力的有效措施及塔帽主缆部分真空压浆技术。

**关键词:**光圆钢绞线 自锚式悬索桥 索力 有效措施

## 1. 工程概况

海盐塘大桥结构形式为自锚式三跨连续梁悬索桥,桥两侧各增设一孔16米跨径的引桥,

大桥桥跨组合为16+30+72+30+16米,全桥长约165米。

主桥立面图见图1。

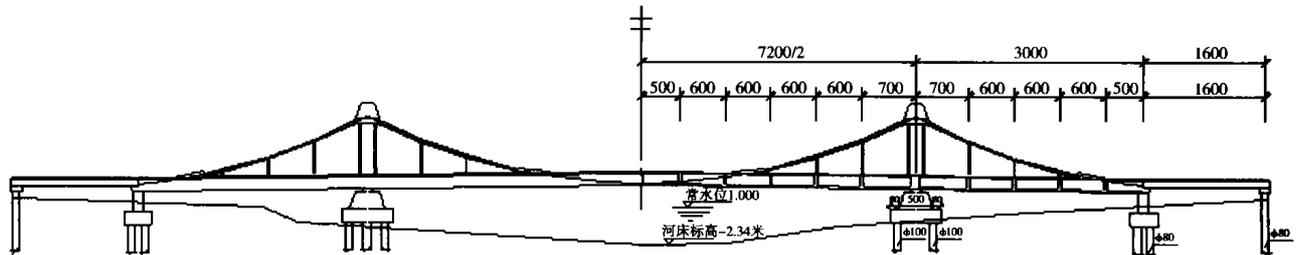


图1 主桥立面图(单位为cm)

主桥由塔柱、主缆、加劲梁、吊杆与桥面铺装等组成。塔柱由四根 $\phi 400 \times 10\text{mm}$ 钢管位于四角,其间用圆弧状凹型弧钢板构成带圆角的矩形截面,钢管、钢板间焊接钢筋加强,形成劲性骨架,然后泵送砼填芯而成。桥面以上塔柱高约9m,塔顶成锥体,便于主缆锚固,塔梁固结成一体。主缆由210根钢绞线组成,三跨布置,分成30束张拉,外套 $\phi 425 \times 12\text{mm}$ 钢管索套,主缆在塔顶张拉锚固后,钢管灌注水泥浆防腐,主缆在梁端及跨中部分与主梁浇注成整体。主梁为带悬挑臂的单箱四室箱形梁,桥宽40米,挑臂长度两侧各为3.0米。横梁为预应力砼结构。吊杆由16根钢绞线构成,外套 $\phi 200 \times 12\text{mm}$ 钢管,张拉成形后灌注水泥浆防腐。吊杆与主缆设专用联结块件,并采用OVM固定锚具,在梁底进行单向张拉。吊杆的间距与横梁的间距相同。

主桥采用先梁后挂索的施工方法,引桥预

制安装施工,梁施工采用在河流中搭设支架,在支架上立模浇筑箱梁砼,待箱梁砼达到设计强度后方可张拉主缆、吊杆,与普通悬索桥比较本桥具有以下的特点:

(1) 桥面梁系为整体现浇预应力砼箱梁,其整体刚度大。

(2) 主缆、吊杆外套有钢管且主缆和吊杆设计专用索夹将二者联为一体,主缆和吊杆单元不纯为受拉,在结点部分还承受剪力。

(3) 上部索结构施工完毕后,桥面线型变化不大,线型不作为唯一的判断主缆、吊杆索力的标准。

(4) 主缆锚固于主梁梁端,利用主缆的水平分力为主梁施加预应力,增加主梁的纵向刚度。

主缆塔顶锚固图见图2。

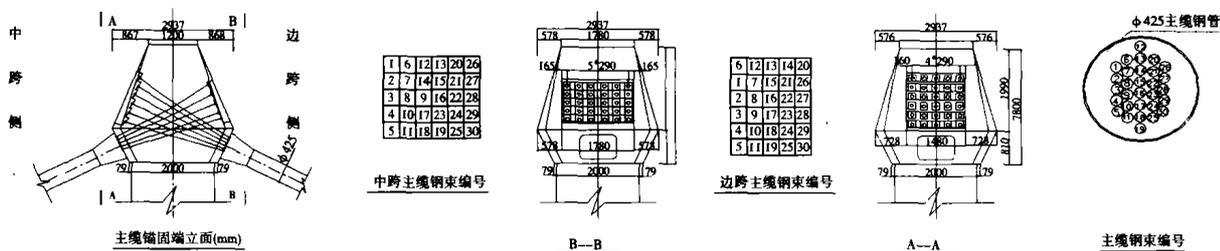


图2 主缆塔顶锚固图

吊杆索夹构造图见图3。

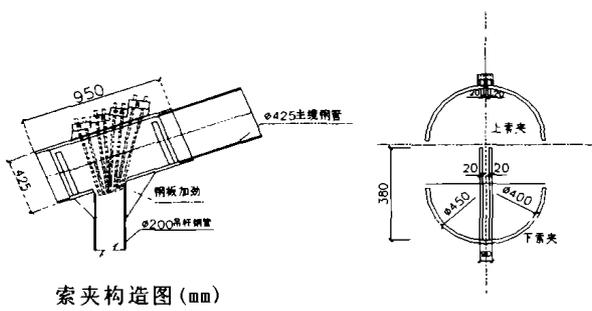
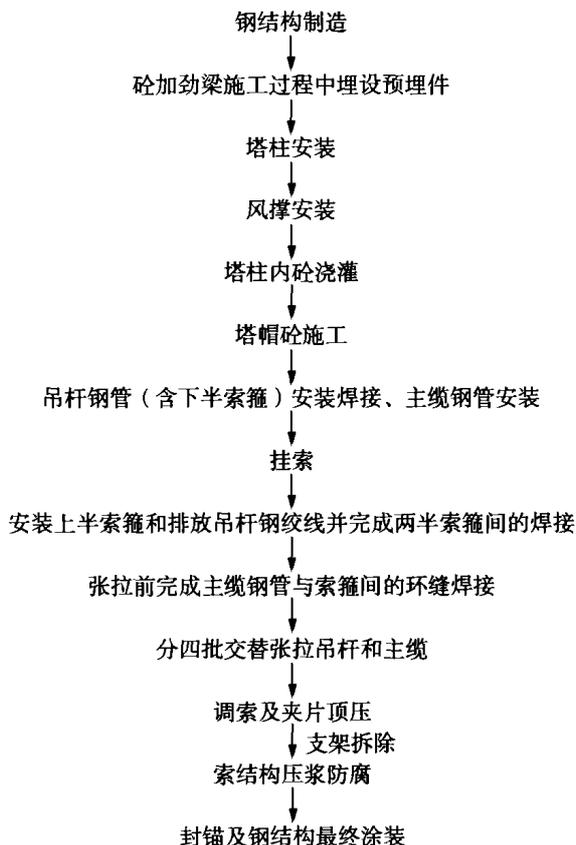


图3 吊杆索夹构造图

## 2. 大桥上部索结构施工流程



## 3. 主要施工技术

### 3.1 主缆、吊杆张拉前的主要施工工序

#### 3.1.1 塔帽模型实验及自密实砼应用

塔顶不设置鞍座，主缆直接锚固在塔顶，

塔为普通钢筋砼结构，形体较少，中跨和边跨主缆锚固于此，无论受力和施工都有难度。在上部结构施工前决定做塔帽1:1的足尺模型实验，针对实验发现的问题采取如下完善和实施手段：

(1) 锚固面内的锚垫板设计尺寸和波纹管曲线调整到能够满足施工的要求，调整的前提是不改变主缆合力的中心点。

(2) 预应力预埋件和钢筋骨架施工的先后顺序。

(3) 主缆力作用于塔帽，防止横桥向塔帽变形过大，对塔帽核心部分作加筋补强，提高其强度和刚度。

(4) 塔帽内钢筋骨架和预应力预埋件之间缝隙较小，砼浇筑困难，用高强自流式砼取代普通高强砼。

#### 3.1.2 钢结构安装

钢结构安装包括主缆、吊杆及索夹的安装，安装定位采用精密水准仪、经纬仪和钢尺配合，同一游两边跨和中跨的主缆和吊杆要求在同一垂面内，误差控制在 $0.2^\circ$ 内；主缆设计控制点的标高误差在10mm内，主缆安装后的线型要求圆顺后方可施焊。

#### 3.1.3 挂索

挂索前按设计钢束编号对锚垫板编号，每根主缆210根绞线分成30束（每束7根）要求穿束后在主缆中不相互缠绞且张拉过程中不相互产生过大的阻力，穿束顺序为先张拉的后穿，后张拉的先穿。

边跨钢束较短（35米）由底向上逐层穿束，事先将 $7\Phi 15.24\text{mm}$ 钢绞线下料，编成一束且尾端挤压成“P”锚，然后按设计顺序在端横梁处与由塔柱内下放的引导绳相连后向上穿入砼梁中的各波纹管中，穿出锚块后，接着该束沿主缆钢管内上穿，直至从塔帽中穿出，放上7孔锚板，用夹片临时固定。

中跨钢束较长(79米),由于七根绞线扎成一束,具有一定刚度并且较重,从桥面提上塔帽工作平台困难,采用“一分二”的办法,将7根分扎4根和3根,一侧塔帽安装一台卷扬机,引线通至另一侧塔帽绞线入口处,人工和卷扬机配合将绞线送到位并安装上锚具,用夹片临时固定。

### 3.2 主缆、吊杆张拉工艺

主缆张拉前,先对钢绞线单根预紧,然后再分级、对称、同步张拉。

#### 3.2.1 预紧

在每根主缆最上排中间一束钢绞线(中跨为12#,边跨为13#)上装一个单孔传感器和一个单孔锚,以30kN/根钢绞线预紧后锚固,其余钢绞线预紧时以当时传感器显示力值进行控制和锚固。

#### 3.2.2 张拉

主缆、吊杆张拉施工分四批进行。吊杆每批4根钢绞线,主缆每批7-8束;3#短吊杆采用可调式锚具,整体张拉,每批张拉力为1/4设计束力。

每根吊杆分批表 表1

批号	第一批	第二批	第三批	第四批
钢绞线编号	高	中高	中低	低

注:钢绞线编号指吊杆上索夹上撑板的位置

主缆分批表 表2

批号	第一批	第二批	第三批	第四批
中跨钢束编号	12、13、6、20、1、26、14、15	7、21、2、27、9、16、8	22、3、28、17、23、10、24、4	29、18、19、11、25、5、30
边跨钢束编号	13、12、14、6、20、15、7、21	1、26、16、8、22、2、27	17、9、23、3、28、18、10、24	4、29、19、11、25、5、30

注:钢束编号见图2。

### 3.2.3 主缆、吊杆张拉力控制:

#### (1) 主缆控制张拉力

主缆设计控制张拉力1080kN/束。

#### (2) 吊杆控制张拉力

首根吊杆钢绞线先张拉至140(145)kN后,再加5mm的回缩量,随后锚固。其余15根钢绞线的张拉力以至单孔传感器显示的压力,再加5mm的回缩量,随后锚固。

### 3.2.4 每批张拉前后的相关对比数据记录

根据本桥索结构的特点,不能仅靠桥面线型、主缆索上的传感器单方面判断张拉是否达到设计要求,还要在各批张拉前后分别记录以下各项(均因主缆、吊杆张拉所致)数值并作分析:钢束伸长值、塔柱偏位、桥面标高、支

架松动情况、塔帽内砧应力、塔根钢管应力、主缆吊杆外套钢管应力。

### 3.3 主缆索力判断

主缆、吊杆四批张拉完成后,主缆索力究竟多大,是否达到设计要求,当时没有直观有效的仪器可以测量和认可,结合各批张拉后施工方、监理方、监控方三方实测到梁主要部位的变位和内力做如下计算和测定。

#### 3.3.1 相关理论值计算

##### (1) 孔道摩阻损失

##### A. 边跨孔道摩阻损失 $\sigma_{l2}$

根据规范,  $\kappa=0.003$   $\mu=0.35$   $\theta=27.7^\circ$

$x=34\text{m}$

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con} (1 - e^{-(\mu\theta + \kappa x)}) = 0.238 \sigma_{con}$$

##### B. 中跨孔道摩阻损失 $\sigma_{l2}$

根据规范,  $\kappa=0.003$   $\mu=0.35$   $\theta=27.7^\circ$

$x=39.4\text{m}$

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con} (1 - e^{-(\mu\theta + \kappa x)}) = 0.243 \sigma_{con}$$

##### (2) 锚具变形和夹片回缩

##### A. 边跨锚具变形和夹片回缩 $\sigma_{l1}$

根据规范,  $\kappa=0.003$   $\mu=0.35$   $\alpha=5\text{mm}$

$E=196000\text{MPa}$   $\sigma_{con}=1102\text{MPa}$   $r_c=67.89\text{m}$

计算反摩擦影响长度  $L_f$

$$L_f = \sqrt{\alpha E / 1000 \sigma_{con} (\kappa + \mu / r_c)} = 10.44\text{m}$$

$\sigma_{l1}=161.1\text{MPa}$  则  $P_{l1}=A * \sigma_{l1}=157.9\text{kN}$

边跨主缆锚下索力:  $P1 = (\sigma_{con} - \sigma_{l1}) * A = 922.1\text{kN}$

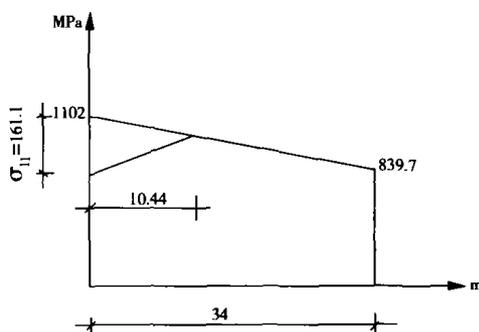


图4 边跨主缆锚下应力损失图  $\sigma_{l1}$

##### B. 中跨锚具变形和夹片回缩 $\sigma_{l1}$

根据规范,  $\kappa=0.003$   $\mu=0.35$   $\alpha=5\text{mm}$

$E=196000\text{MPa}$   $\sigma_{con}=1102\text{MPa}$   $r_c=72\text{m}$

计算反摩擦影响长度 $L_f$

$$L_f = \sqrt{\alpha E / 1000 \sigma_{con} (\kappa + \mu / r_c)} = 10.64m$$

$$\sigma_{11} = 144.6MPa \quad \text{则 } P_{11} = A * \sigma_{11} = 141.7 kN$$

$$\text{中跨主缆锚下索力: } P1 = (\sigma_{con} - \sigma_{11}) * A = 938.2 kN$$

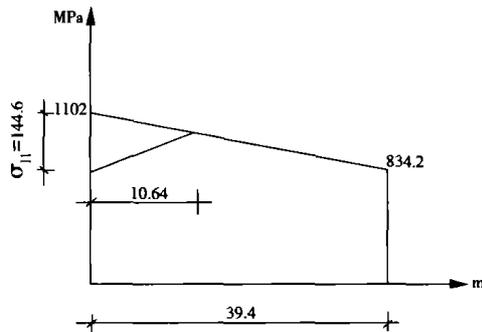


图4 中跨主缆锚下应力损失图  $\sigma_{11}$

(3) 理论伸长量

A. 平均张拉力 $P_p$

控制张拉力 $P=1080kN$

$$P_p = P (1 - e^{-(\mu \theta + \kappa x)}) / (\mu \theta + \kappa x)$$

边跨主缆:  $P_p = 946kN$

中跨主缆:  $P_p = 943kN$

B. 理论伸长量 $\Delta L$

$$\Delta L = P_p L / EA$$

边跨主缆:  $\Delta L = 167.5mm$

中跨主缆:  $\Delta L = 386.8mm$

3.3.2 相应实际值测定

(1) 孔道摩阻损失测定

主缆张拉前, 对西北中跨1#、12#、14#主缆进行了摩阻试验, 试验结果:

$$\sigma_{12} = 0.267 \sigma_{con}, \text{ 即摩阻损失率为 } 26.7\%.$$

(2) 锚下索力测定

主缆张拉后, 采用百分表与千斤顶结合的方法, 对西北边跨20#、28#、17#、6#、3#及西北中跨28#、16#、3#主缆进行了索力测定, 测定结果见下表3:

主缆锚下索力测定值 表3

部位	西北边跨					西北中跨		
	20#	28#	17#	6#	3#	28#	16#	3#
锚下索力(kN)	844	844	923	890	844	914	890	890

本工程吊杆索力, 采用单孔传感器检测,

索力结果见表4。

吊杆索力测定值 表4

部位/吊杆编号	4#	5#	F#	E#
东南(kN)	124.3	133.1	122.8	119.2
东北(kN)	107.3	141.6	142.1	125
西南(kN)	131.3	151	143	126.8
西北(kN)	134.7	141.1	140	130

注: 表中数值为单根钢绞线的索力

(3) 实际伸长量测定 (此文仅列中跨主缆伸长量)

海盐塘桥中跨主缆伸长量统计表(四级) 表5

钢束编号	东南	西南	总伸长量	东北	西北	总伸长量
12	201.5	171.6	373.1	177.6	174.6	352.2
13	147.7	202.9	350.6	219.4	141.8	361.2
6	191	171.6	362.6	173.1	144.7	317.8
20	164.1	95.5	259.6	213.4	123.8	337.2
1	159.7	92.5	252.2	161.2	156.7	317.9
26	128.3	111.9	240.2	173.1	146.2	319.3
14	186.5	192.5	379	214.9	165.6	380.5
15	176.1	185	361.1	220.9	156.7	377.6
7	192.4	173.6	366	138.4	222.9	361.3
21	183.5	176.6	360.1	197.9	164.9	362.8
2	195.4	152.8	348.2	178.5	159	337.5
27	188	170.6	358.6	160.7	151.6	312.3
9	188	191.4	379.4	240	162	402
16	205.4	175.1	380.5	211.3	173.8	385.1
8	192.4	188.5	380.9	193.4	199.1	392.5
22	182	179	361	158	205	363
3	257	125	382	162	172	334
28	203	145	348	192	153	345
17	210	188	398	245	174	419
23	216	147	363	232	169	401
10	260	144	404	204	186	390
24	221	162	383	204	187	391
4	206	137	343	179	168	347
29	214.9	140.3	355.2	179.1	147.7	326.8
18	226.8	164.1	390.9	204.4	176.1	380.5
19	222.3	170.1	392.4	223.8	177.6	401.4
11	213.4	155.2	368.6	216.4	162.6	379
25	225.3	159.7	385	182	164.1	346.1
5	189.5	143.2	332.7	158.2	188	346.2
30	185	156.7	341.7	117.9	188	305.9
合计			10700.6			10793.1
平均伸长量			356.686667			359.77
E*A/L	2437.563					
Pp			869446.221			876962.041

注: 1、此表伸长量取后四级。

2、E: 196000MPa A: 7 × 140mm<sup>2</sup> L: 78800mm

3、伸长量单位为mm; Pp为平均张拉力, 单位为N。

### 3.3.3 理论值与实际测定值比较

海盐塘桥工程主缆摩阻、锚下索力、伸长量、平均索力理论值与实际测定值比较如表6~8:

摩阻损失、锚下索力理论值与实际测定值比较表 表6

项目名称	摩阻损失		锚下索力(kN)	
	边跨	中跨	边跨	中跨
理论值(%)	23.8	24.3	922	93.5
实际测定值(%)	26.7		879.9	

注:摩阻损失、锚下索力实际测定值为平均值

伸长量理论值与实际测定值比较表 表7

项目名称	边跨				中跨	
	东南	东北	西北	西南	南	北
理论值(mm)	167.5				386.8	
实际测定值(mm)	159.5	164.2	160.7	158.7	356.7	359.8

注:实际测定值为伸长量平均值

平均张拉力理论值与实际测定值比较表 表8

项目名称	边跨				中跨	
	东南	东北	西北	西南	南	北
理论值(kN)	946				943	
实际测定值(kN)	901.3	927.8	907.9	896.4	896.4	877.0

注:实际测定值为根据伸长量平均值推算所得

### 3.3.4 桥面线型测量

主缆、吊杆每批张拉施工前后均对桥面标高进行了测量:

测量仪器:采用精密水准仪,水准仪精度为1/100mm。

测量时间:上午5:00—8:00。

桥面测点布置:全桥共布五条纵向测量,桥梁中心线、两条纵向加劲梁中心、两板边缘线,纵向点间距3米,测点用膨胀螺栓栓于梁砧内,且有可靠的保护措施使得测点位置不变。

桥面标高变化情况:

主缆张拉完成后,中跨桥面标高变化比较明显,上升高度约为10mm,说明此时梁体作用在主缆和吊杆上,结构体系实现转换。

### 3.3.5 主缆、吊杆张拉完后支架模板松动情况

本工程箱梁采用支架浇筑,支架待主缆张拉完成,达到设计要求后,进行拆除。在第四批主缆张拉完成后,对梁底支架进行检查,发现中跨支架上的方木,轻轻锤击可以滑移,证

明梁体已基本脱离支架;由于梁体的整体刚度较大,上部索结构张拉完成后变位相对小,除中跨支架其它大部分处于临界状态。

### 3.3.6 索力判断结论

通过对主缆锚下索力、伸长量、摩阻及桥面标高测定数据的分析,以及对理论值与实际测定值的相互比较,支架拆除前业主召集设计、施工、监理、监控方并特邀金成棣教授(本桥设计方案推出人)、易建国教授(设计负责人)、史家均教授(同济大学桥梁系主任)、唐明翰教授级高工等专家作了论证检验,一致认为:主缆索力基本达到设计要求。

### 3.4 索体防腐

本桥设计工作者将耐久性设计达到和按强度设计同等重要的地位,在施工图设计阶段时曾与欧维姆工程公司一起对索体的真空压浆技术做了实验,实验结果表明本结构的防腐采用真空压注水泥浆是可行的。

本桥吊杆、梁内波纹管及主缆钢管内的索体采用普通压力压注水泥浆,全桥四个塔帽波纹管内索体采用真空压浆技术,更有效地保证索体的寿命。

#### 3.4.1 浆体配合比与性能

真空压浆浆体各性能指标表 表9

项目名称	性能
水泥品种	普硅(P042.5)
水灰比	0.36
流动度	200~220mm
JHN-2缓凝高效减水剂	2%
泌水率	少于3%且在24h内被吸收
初凝时间	6h
体积变化率	少于2%
强度	$P_{28} > 40\text{MPa}$

#### 3.4.2 真空压浆技术

(1) 真空灌浆施工设备连接图(如图6)

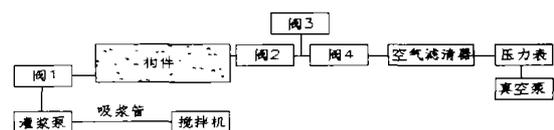


图6 真空灌浆施工设备连接示意图

## (2) 塔帽真空压浆

A. 张拉施工完成后, 切除塔顶主缆外露绞线, 清理塔顶上锚垫板的灌浆孔, 保证灌浆通道通畅, 与引出管接通, 进行封锚, 封锚方式采用无收缩高标号水泥浆封锚, 保证锚头处在抽真空过程无气流跑进管道。

B. 在塔帽下缘钢套管安装时在事先其上开一个的洞口, 并焊上6分螺牙, 作为塔帽内主缆30根管道的入浆口; 选塔帽张拉端最上排一块锚垫板作为抽真空处, 其它29块锚垫板排浆孔拧上阀门并关闭。

C. 搅拌水泥浆使其水灰比、流动度、泌水性达到技术要求指标。

D. 启动真空泵抽真空, 使真空度达到 $-0.06 \sim -0.1 \text{MPa}$ 并保持稳定。

E. 启动灌浆泵, 当灌浆泵输出的浆体达到要求稠度时, 将泵上的输送管接到主缆钢管上端的进浆管向塔帽内30根波纹管开始压浆。

F. 当与抽真空管道相连的透明钢丝网管内流出水泥浆时, 停止压浆工作, 且关上真空泵及该孔道阀门。

G. 灌浆机继续工作, 直至压力达到 $0.5 \sim 0.7 \text{MPa}$ 时暂停; 此时由上排开始向下排逐孔打开阀门检查, 若阀门处没有流出浓浆, 启动灌浆机继续工作, 直至此阀门流出浓浆并关上。

H. 按上述方法压注完后, 启动灌浆机继续工作加压达到 $0.7 \sim 0.8 \text{MPa}$ 时持压5分钟, 待半小时后拆除所有阀门。

## 4. 结束语

海盐塘桥为国内首座用钢绞线作主缆和吊索的自锚式悬索桥, 设计和施工与一般结构比较有其“陌生”的一面, 施工过程中在新工艺、关键工序、重要构件施工前召集设计、施工、监理、监控等方做研讨, 然后做一些仿真或模拟实验, 这样使施工达到设计要求并完善结构细部构造, 全桥于2004年10月31日通过静载实验, 为优良工程。

### 参考文献

- [1] 薛伟辰. <<现代预应力结构设计>>
- [2] BEN C. GETWICK, JR. <<预应力混凝土结构施工>>

(上接第17页)

预应力混凝土简支梁桥, 正桥和引桥均采用相同的4箱单室等高度箱型梁。梁高1.9米。V型托架及上30米主梁采用斜拷式雷支架就地浇注, 托架之间的40米主梁与支梁均采用相同的工艺预制。相同的双导梁架设, 主桥墩采用浮运承台外壳(外壳平面尺寸与承台相同, 但高度大于承台厚度)施工, 施工速度甚快, 工期仅18个月。于1992年11月竣工、见图11、图12。



图11 丰城赣江桥

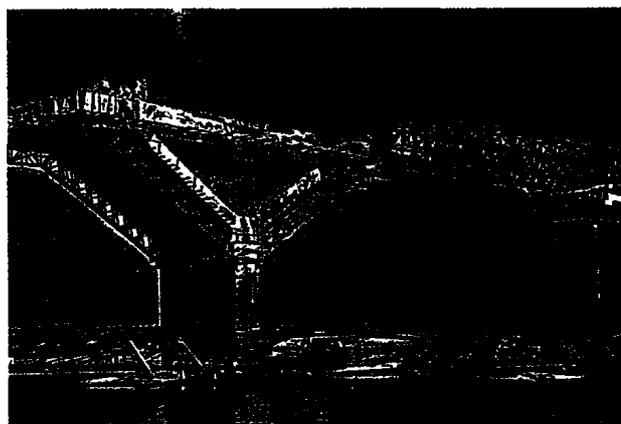


图12a



图12b

图12 双导梁设架4箱单室图