



(1) 三峡大坝建成后, 主跨孔径满足通航宽度400m要求;

(2) 2号主墩避开了河床的陡坎, 设计成扩大基, 施工采用一般围堰施工, 节省了工程造价, 在一个枯水季节完成了2号主墩基础施工, 受到各方面的好评;

(3) 引桥根据泄洪、施工方便、美观等因素选择8孔50m的等高连续梁桥, 与大桥很好协调;

(4) 主桥和引桥梁高均为2.5m, 主梁线条一致, 纤细美观, 加上花瓶形塔, 雄伟挺拔, 使该桥充分展示现代桥梁的美感, 为山城增色添彩, 成为山城的一个景点。

2.2 主桥主跨跨径444m, 在当时, 与同类型双塔双索面预应力混凝土斜拉桥相比, 居国内第一, 世界第二位, 在大跨径双塔双索面混凝土斜拉桥中, 仅次于主跨跨径530m的挪威Skarnsunder桥。该桥和武汉二桥、铜陵长江斜拉桥的相继建成, 标志我国混凝土斜拉桥的设计、上了一个台阶, 处于国际先进水平。

2.3 首次在国内大跨径混凝土斜拉桥中成功地采用了双主梁板断面

随着混凝土斜拉桥的技术进步, 出现了以美国Dame Point桥为代表的第三代混凝土斜拉桥, 它以密索和双主梁板断面取胜, 带来全新的观念。该桥设计中, 曾对箱梁断面, 边箱的梁板断面, 双主梁板断面进行了技术经济比较。双主梁板断面与其他断面具有以下特点: 混凝土用量比边箱梁板断面仅稍多一些, 但边箱梁板断面引起的内模板、横梁钢筋布置及施工困难, 费用增加; 双主梁板断面简单, 施工容易, 悬浇时可纵向滑模, 施工快速; 由于主梁重量减轻, 索塔用量也相应降低, 可降低工程造价。

国内越来越多的双索面混凝土斜拉桥采用了双主梁板断面, 这种断面具有发展潜力, 再加上前支点斜拉组合挂篮的施工方法, 对大跨径的斜拉桥仍是一种经济、合理的桥梁结构型式。

2.4 上塔柱斜拉索锚固区的预应力体系新技术

上塔柱是斜拉桥主塔中最复杂的构件, 除0号索外, 所有的斜拉索均锚固在此段塔柱上, 上塔柱除承受轴向压力和弯曲外, 还承受斜拉索锚固力所引起的水平拉力。由此可见上塔柱的结构安全可靠是非常重要的。为此在1991年1月曾构思、设计多种方案, 主要有: (a) 钢横梁式, 利用钢横梁平衡索的水平分力, 这种方案有用钢量大, 费用高, 施工空间狭小, 张拉千斤顶上、下不方便等缺点; (b) 预应力钢束在上塔柱内形成环向箍, 这种方案缺点是预应力损失大, 钢束用量增加, 施工较复杂; (c) 预应力钢束在上塔柱内形成分散的抱箍式, 见图3。

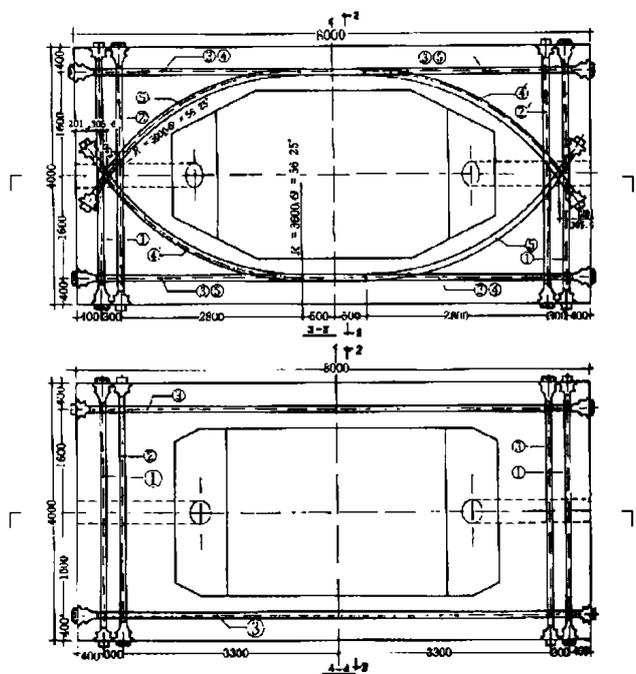


图3 锚固区钢束布置图

该抱箍式布索锚固, 可利用布置在上塔柱的直束和分散抱箍状的预应力束, 抵消斜拉索在上塔柱内引起的水平分力, 并具有预应力损失小, 施工方便等优点, 设计采用了这一方案。施工要点是为充分发挥预应力效果, 要求预应力束在该段斜拉索安装前才张拉, 同时由于上塔柱内钢筋、钢束及劲性骨架纵横交叉, 混凝土浇筑工艺要求高。

为验证设计的可靠性, 对上塔柱的锚固区段进行了试验, 其尺寸和钢束配置与设计一样, 设计承载能力为6000kN, 试验装置见图4。

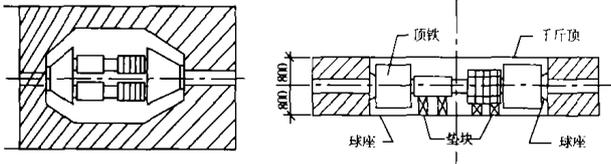


图4 试验装置图

试验时, 预应力钢束张拉力为 $0.75R_y^b$ , 逐级加载至10000kN (加载设备能力到此为止), 检测各阶段的应力、应变。

试验表明, 上塔柱塔体在10000kN力的作用下安全系数1.67倍时无明显裂缝, 实测结果与计算结果基本一致。试验证明上塔柱斜拉索锚固区预应力体系安全可靠。而后国内大跨径斜拉桥相继采用了类似的锚固体系, 取得了良好的效果。

### 2.5 前支点斜拉组合挂篮的构思和应用

传统的混凝土斜拉桥主梁施工方法, 一般采用对称悬臂浇筑或预制拼装。以往悬臂浇筑施工时, 多采用在梁上行走的挂篮, 施工节段长度4~5m, 或采用劲性骨架施工, 但耗钢量较大。这些施工方法都难以达到快速施工的目的。

如何利用现成的斜拉索作为挂篮的承重索, 达到既节省挂篮材料, 又达到混凝土斜拉桥快速施工的目的, 成为桥梁工程师寻求的目标。

该桥在初步设计中在无任何国内外资料的情况下, 提出节支点斜拉组合挂篮的构思, 并进一步细化。

重庆桥梁工程总公司完成了桁架式前支点的斜拉组合挂篮的详细设计, 见图5。

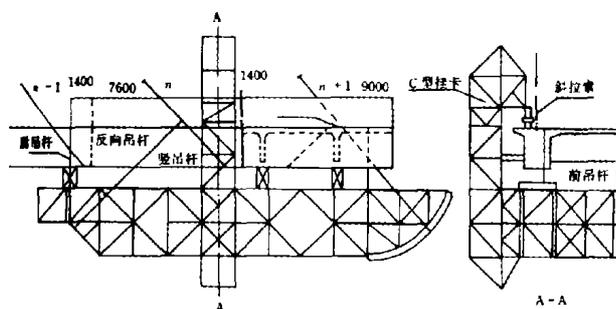


图5 组合挂篮构造图

它的工作原理是: 挂篮设在主梁下面, 用斜拉索作为挂篮的工具索, 通过工具杆接后与挂篮前端弧形梁相连接。挂篮设有C型挂卡, 将挂篮悬挂在已浇好的主梁上, 在浇筑节段混凝土时, C型挂卡和斜拉索作为主要承重杆件。挂篮后设

行走轮, 挂篮移动时, 用C型挂卡和行走轮, 在梁上、下滑行。浇混凝土时, 挂篮后端用预应力垂直吊杆锁住。

浇混凝土时, 为平衡斜拉索产生的水平分力, 可采用反向斜拉杆, 或止推块的构造。

重庆长江李家沱大桥采用此挂篮方案施工, 于1996年2月~11月的10个月完成了61个节段主梁的施工, 相当于主梁工作量的83%以上, 平均9m节段只用8~9天, 最快一个9m节段仅用7天, 达到了混凝土斜拉桥快速施工的预期目标。

### 2.6 斜拉桥边跨梁端设计

受地质、地形、通航等条件制约、边跨与主跨比值为0.38, 接近通常值0.38~0.45的下限, 边跨端部主梁举足轻重。

端部主梁设计成箱形断面, 梁高2.5~7m。

梁高7m的箱形断面形成强大的拉索锚块见图6。由于其刚度大, 整体性好, 足以抵抗尾部6根拉索的集中上拔力, 而且可内填平衡重, 增加压重效果。

平衡重填料采用容重为 $4t/m^3$ 的铁矿砂重混凝土, 每个边跨端部箱梁填料总重1050t, 分布于纵向大小6个箱室内。

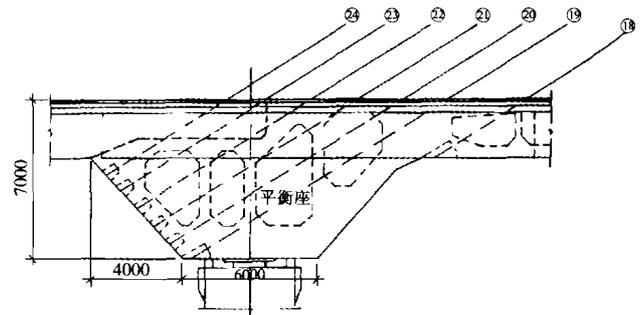


图6 边跨梁端构造图

箱梁顶部做成“抽屉式”, 过渡孔T梁直接伸至边墩支承中心线, 以避免T梁支点作用在箱梁后部, 改善主桥的整体受力性能。

端部箱梁、平衡重、过渡孔T梁三者的重力与拉索恒载竖向拉力相抗衡, 并保持2倍于拉索活载最大竖向拉力的压力。

箱梁与边墩用4根向钢束连接, 以防过渡孔T梁等构件的不利情况发生。

由于箱梁与双主梁最大刚度比达34:1, 两者之间须设刚度过渡段, 改善主梁内力, 即双主梁

伸出底板逐渐加宽至形成完整的箱梁。

### 2.7 主梁临时固结新技术

斜拉桥成桥后为漂浮结构,在塔处用1号索悬吊,但在施工时采用对称前支点挂篮悬臂对称浇筑,因此要将主梁0号块与塔柱下横梁临时固结,以承受施工的不平衡力矩引起的支点反力和水平剪力。设计时曾考虑多种固结方案(包括钢结构),最后选用了简便可行的预应力束临时固结方案。基本构思是在主梁和下横梁之间设混凝土垫块,用预应力钢束锚固连接,压力由垫块承受,拉力由预应力钢束抵抗,水平力侧由主梁和垫块间的摩擦力平衡。具体构造见图7。

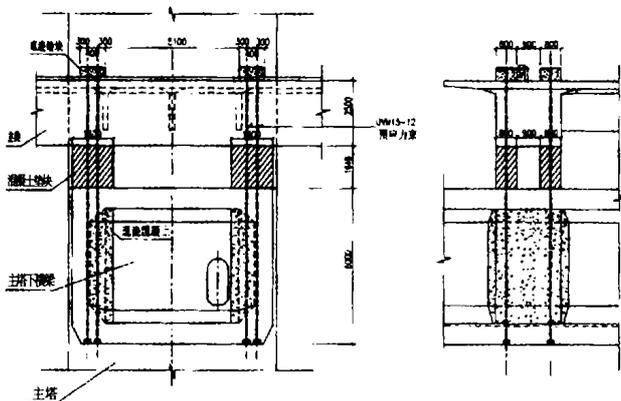


图7 临时固结构造图

## 3. 斜拉桥施工控制技术和边跨、中跨合龙新技术

### 3.1 斜拉桥施工控制技术

主梁节段采用悬臂浇筑方法,首次采用前支点斜拉桥组合挂篮,混凝土一次浇筑2个9m标准段,重 $2 \times 380t$ ,对称施工。

李家沱大桥施工控制的特点是挂篮自重大,主梁施工期间主梁未配临时预应力束,为钢筋混凝土断面,承受施工阶段内力的能力有限,再加上其他因素,施工控制的难度相当大。在施工前拟定了施工方案,并确定斜拉组合挂篮施工控制计算图式。主梁施工控制采用五点(四点)为零法。其计算原则为主梁悬臂端挠度为零,且随后的4(3)个节点的主梁弯矩接近为零。这里的节点是指斜拉索与主梁轴线交点。斜拉索张拉采用多次调索,以使主梁内力处于最优状态。

主梁施工过程中,以线型控制为主,同时兼顾主梁内力,以达到线型光滑流畅、内力理想的

总目标。

实际控制过程中,根据实际反馈情况及现场条件(如气温、日照、混凝土龄期及挂篮前 endpoint 挠度的影响),对主梁标高进行适当调整,标高控制在 $\pm 30mm$ 左右以期达到光滑的目的,同时为边跨、中跨的顺利合龙创造条件。

在桥面铺装及索力的最后一次调整中,为了使铺装上去后梁体内力及塔、墩内力基本上处于最优状态,消除在悬臂快速施工中积累的不利内力,并使标高达到设计值,进行总调索。再根据最优终点控制,即将梁端高度提高15cm,塔顶后倾4.5cm,通过调索,进行了板塔,最后塔顶向岸跨后倾4.0cm,达到了预期目的。

### 3.2 边跨、中跨合龙及施工控制技术

大跨径混凝土斜拉桥边跨、中跨合龙段施工控制技术是大桥顺利建成的关键之一。

#### (1) 边跨的合龙

边跨合龙主要解决以下几个问题:

##### a. 边跨尾部锚固区的稳定

边跨合龙段长3m,距边跨锚固墩12.4m,由于尾部段倾覆力矩达 $45000kN \cdot m$ ,再加上合龙段和施工荷载、温度内力的作用,为确保合龙段及尾部段的稳定性,在合龙段靠尾部一侧设置了临时支墩,临时支墩基础采用钻孔灌注桩,墩身采用粗钢管或万能杆件拼装的支架,以保证支墩的承载力和刚度。见图8。

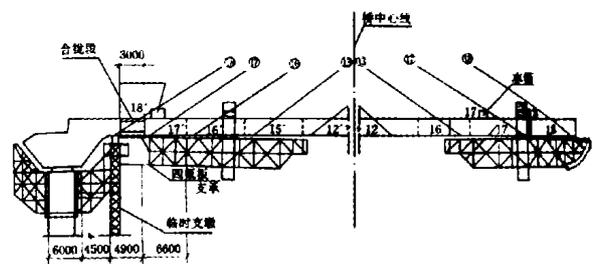


图8 边跨合拢段施工示意图

##### b. 合龙段变形和温度内力等控制

边跨合龙时正处重庆高温季节,最高温度达到 $39^{\circ}C \sim 40^{\circ}C$ ,日夜温差很大,未合龙前边跨合龙段左右侧标高变形差值在10cm以上,为控制边跨合龙时的变形,该桥采用了刚度大的劲性骨架(由40#槽钢组成),劲性骨架先合龙,由劲性

骨架和临时墩的刚度共同约束斜拉桥边跨尾部的温度变形,而施工期间的施工内力和温度内力在 $-5200 \sim -21000 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,由劲性骨架、支墩、临时预应力钢束及梁段承担,为使劲性骨架合龙之后,合龙段左右侧变形控制在 $3 \text{ mm}$ 以内,该桥还在远部采用加水箱改善调整临时支墩的受力状况,同时边跨合龙期间还采取了桥面浇水降温等技术措施。

#### c. 超早强混凝土的采用

边跨合龙时间在晚上11:00点,为使合龙段在第二天白天适应高温天气的温度变化,使合龙段混凝土尽早达到一定的强度并形成刚度参加工作,合龙段混凝土采用了超早强混凝土,12小时的强度实际达到 $20 \text{ MPa}$ 以上,同时早强混凝土也为及时张拉部分纵向预应力束创造了条件。

实践证明,合龙期间变形仅 $3 \text{ mm}$ ,在日照高温下,混凝土未出现裂缝,线形理想,合龙成功。

### (2) 主跨的合龙

主跨的合龙主要解决了以下几个问题:

#### a. 主桥线形控制

主桥合龙前的主梁刚度比较小,主要通过调整边跨及主跨斜拉索,以调整主桥线型和标高,使合龙段左右侧主梁标高达到设计要求,同时考虑合龙段混凝土的自重及施工荷载,主梁标高作了预调,未采用加水箱合龙的方法。

#### b. 合龙段温度内力等控制

根据合龙温度及施工条件进行温度内力变形分析、纵向预应力钢束刚度影响分析、挂篮移动和整体挂篮拆除等分析,主梁主跨合龙采用了与边跨合龙相类似的刚度大的劲性骨架和临时预应力束以约束和承担施工期由施工荷载及温差引起的合龙段变形和内力。见图9。

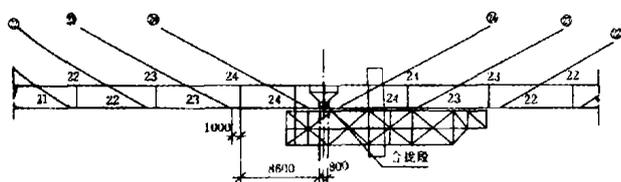


图9 中跨合龙施工示意图

#### c. 超早强混凝土的应用, 同边跨合龙段混凝土。

d. 在劲性骨架焊接后, 拆除一个塔的临时固结, 合龙段混凝土达到强度后拆除另一个塔的临时固结, 与此同时张拉0号索, 主桥成飘浮状态。

主跨合龙之后, 中跨合龙段标高误差在 $10 \text{ mm}$ 以内, 轴线偏差在 $5 \text{ mm}$ 以内, 同时主桥的整体线形也很好。

在中跨合龙前和合龙后, 采用调整斜索内力, 妥善解决了 $240 \text{ t}$ 挂篮的整体拆除, 为大桥施工赢得宝贵的工期, 为大桥如期建成创造了有利条件。

## 4. 大桥荷载试验

大桥在设计和施工中采用了多项新技术和新工艺, 为了解桥梁结构的受力状态和工作特性, 检验大桥设计和施工质量, 由西南交通大学承担大桥的静、动荷载试验。

### 4.1 静载试验

恒载索力测定: 主跨跨中和边跨 $3.6 \text{ m}$ 断面的正弯矩加载, 测梁、塔变形和梁的应力、索力。

每个加载断面, 用12辆 $25 \text{ t}$ 车辆加载, 总重 $300 \text{ t}$ , 荷载效率系数达 $1.08$ 。

主要试验结果如下:

	梁变形 (mm)		塔变形 (mm)	
	实测值	计算值	实测值	计算值
中跨跨中加载	106	137.0	20	26.6
边跨 $3.6 \text{ m}$ 断面加载	55	82.2	20	25.0

卸载后, 梁塔变形和混凝土应变完全恢复, 结构处于弹性状态。

实测索力与计算索力基本一致。

### 4.2 动载试验

主要测斜拉桥的自振特性, 测试结果如下

频率序号	震型说明	频率			
		市政院计算	同济院计算	实测值	阻尼比
1	梁纵飘	0.0871	0.08707		
2	梁竖弯(对称)	0.266	0.2872	0.271	0.007
3	梁侧弯(对称)	0.326	0.3176	0.343	0.009
4	梁竖弯(反对称)	0.341	0.3638	0.402	0.005
5	塔侧弯(反向)	0.458	0.4380		
6	塔侧弯(同向)	0.470	0.4528		
7	梁扭转(对称)	0.478	0.4619	0.496	
8	梁竖弯(对称)	0.572	0.5534	0.541	0.003
9	梁竖弯(反对称)	0.646	0.6167		
10	梁扭转(反对称)	0.654	0.6329		

从各项试验结果得出: 实测值与计算值接近, 大桥动载性能好, 质量符合设计要求。