

攀枝花炳草岗大桥设计与施工

郭晓东 邱学良

【摘要】攀枝花市炳草岗金沙江大桥是四川省攀枝花市内的一座特大型公路、城市两用桥梁，是该市“九五”期间的重点建设项目。桥址位于该市的政治、文化、经济中心——炳草岗；大桥是连接枣子坪与炳草岗的主要通道，同时双兼有国道108线的过境功能。本文主要介绍单塔斜拉桥与T型刚构组成的协作体系的设计与施工。

【关键词】单塔斜拉桥 T型刚构 设计与施工

1、工程概况

1.1 桥位自然状况

桥区位于攀枝花市金沙江河谷地带，河谷大致呈V字型。分布地层主要为“华里西期”辉长岩，其上覆盖有人工填土，残坡积碎块石土，冲积漂卵石。

攀枝花市属亚热带干燥型河谷气候，干湿季节分明，降雨量多集中在6~9月，年平均降雨量760mm；年平均温度20.3℃，最高可达40.7℃，最低为-1.4℃；年平均风速在0.9m/s，最大10分钟风速16.3m/s，极大风速30.3m/s；洪水多发于6~8月，7月最丰，设计水位流量12700m³/s。

1.2 主要技术标准

(1) 主桥总长516.30m；斜拉桥与T构长

434.55m。

(2) 桥面宽度：主桥净宽2×7.5m车行道，2×0.5m防撞护栏，2×3.0m人行道，全宽23.9m。

(3) 道路等级：接弄清线为城市主干道II级，接攀钢厂区为城市次干道II级。

(4) 行车时速：40km/h。

(5) 设计荷载：汽车—超20级；挂车—120；人群3.5KN/m²。

(6) 设计洪水：1%。

(7) 通航等级：IV—2级。

(8) 桥面横坡：行车道1.5%双向横坡。

(9) 地震基本烈度：7度。

(10) 坐标及高程系统：西安坐标系统，黄海高程系统。

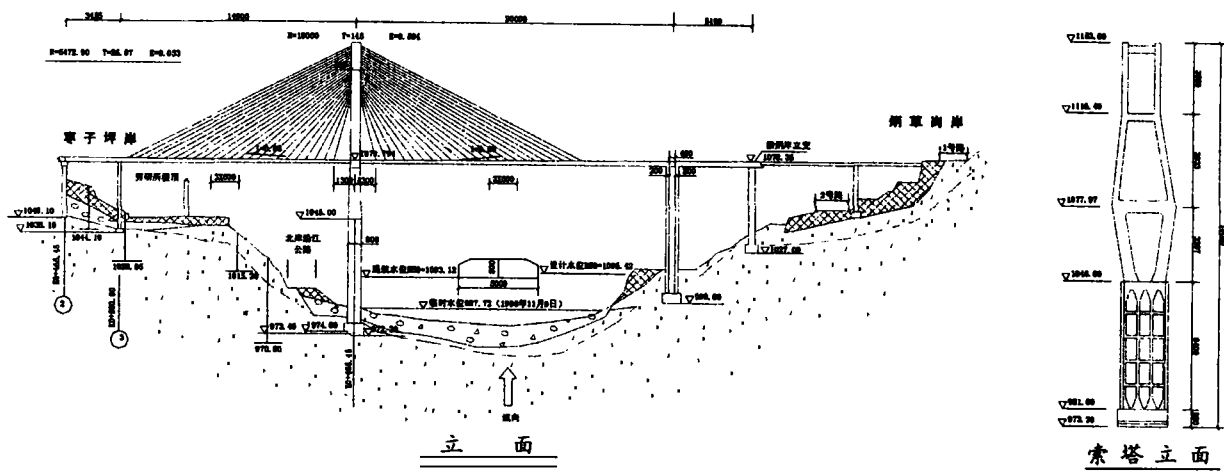


图 1

郭晓东：四川省交通厅公路设计研究院

1.3 主要工程数量:

名称	单位	数量	备注
斜拉索高强钢丝	T	352.131	高强低松弛镀锌钢绞线
预应力材料	T	302.02	
钢材	T	2926.496	其中型材 282.2t, 未含预应力用钢量
土石方	m ³	24330	
混凝土	m ³	18831	

2、设计概况:

2.1 桥跨布置:

主桥为混凝土单塔单索面斜拉桥与 T 构 (炳岸) 组成的联合协作体系, 枣岸设置外伸梁。斜拉桥部分塔、梁、墩固结, 斜拉桥与 T 构形成连续主梁, 桥跨布置为: 34.55+149+200+51m。(见图 1)

纵断面设计综合考虑汛期、通航、两岸连接线, 炳岸立交等因素。最大设计纵坡 0.8%, 并设两道竖曲线, 最大竖曲线半径为 18000m; 并结合二期恒载, 运营阶段的因素分别在斜拉桥的炳岸和枣岸按二次抛物线分布方法设置了 36cm 和 8cm 的预拱度。

2.2 桥墩及基础

斜拉桥桥墩高 64m, 横桥向宽 23.6m, 顺桥向宽 8.0m, 设置了 5.6 × 5.2m 的空心箱, 箱距横桥向 1.0m, 每 10m 设一道隔板, 隔板厚度 1.0m。为防漂木及船舶的撞击, 并考虑对称美观, 在墩身上、下游侧均设置分水尖。考虑到砼内外温差的影响, 在顺桥向设置 $\phi 100$ 的通气孔。基础为明挖扩大基础, 因基岩形态在顺桥向分为三个台阶, 台阶高度 1.2m 和 1.4m, 宽度均为 4.0m, 以保证基础嵌入微风化辉长岩不小于 4m, 地基承载力不小于 1.75MPa, 基础宽为 25.6m, 长 12m, 最高为 8.8m。

斜拉桥部分在枣岸边跨及 14 号和 15 号梁段之间有辅助墩, 均由两片 170 × 100cm 的实心薄壁组成, 墩高分别为 38.8m 和 42m, 墩顶与主梁肋底固结; 中间墩设置了 20 米 7 $\phi 15.24$ 的预应力束与主梁联接。边跨墩采用 $\phi 2.6$ 的挖孔桩基础,

中间墩为锚索加明挖承台基础。

T 构下部为双薄壁墩, 单墩壁厚 2.0m, 高 71.2m, 顶宽 18.4m, 底宽 15m, 两墩顺桥向中距 6.0m, 两薄壁与 T 构 0 号梁段固结形成框架结构; 基础为明挖扩大基础, 横桥向宽 17m, 纵桥向宽 10.0m, 嵌入微风化辉长岩不小于 4.0m。

2.3 斜拉桥上部构造

(1) 主梁: 采用预应力砼双纵肋断面。纵肋外侧各有 2.75m 的悬臂, 顶宽 23.9m。主梁在桥轴线处梁高 2.32m, 板厚 25cm。纵肋底宽 1.7m, 高 2.2m, 双纵肋外侧间距 18.4m, 标准分梁段长 6.0m, 重 2318kN。每隔 6.0m 在距块件端头 37.5cm 处设置一道厚 25cm 的横隔板。砼标号 C50, 主梁除配有一定数量的普通钢筋外, 在纵肋处配有 22 $\phi 15.24$ 钢绞线, 面板位置配置了 24 $\phi 5$ 碳素钢丝, 在横隔板处配有 12 $\phi 15.24$ 和 2 $\phi 15.24$ 的钢绞线, 预应力采用波纹管成孔。

(2) 索塔: 索塔为 H 型, 高 108m, 在桥面以下向桥轴微收。下塔柱长 32.07m, 由两片斜度为 1: 5.288 的空心箱组成, 空心箱横向宽度 5m, 纵向宽从上至下由 6m 渐变到 8m, 纵向壁厚 1.0m, 横向壁厚 0.8m。中塔柱长为 39.33m, 由两片斜度为 1: 6.537 的空心箱组成, 空心箱横向宽度 3.0m, 纵向宽 6m, 纵向壁厚 1.0m, 横向壁厚 0.75m。上塔柱长 36.6m, 属斜拉索锚固区, 箱形断面, 壁厚同中塔柱。设有 24 $\phi 5$ 的环向预应力钢丝。

索塔设三道横梁, 下横梁是塔、梁、墩固结的主梁 0# 块, 为多箱室结构。位于中、下塔柱交界处, 高 5.0m, 顶宽 6m, 底宽 6.16m, 设有横桥向的 $\phi 15.24$ 钢绞线预应力。中横梁位于上、中塔

柱交界处,上横梁位于距塔顶0.6m处,二者均为高3.0m,宽6.0m的钢筋砼空心箱,腹板厚0.7m,顶板厚0.5m,在塔顶设有避雷针及安全护栏,塔柱和横梁均设有劲性骨架。除中塔柱及中横梁采用C50砼外,索塔均采用C40。

(3) 斜拉索与锚具:斜拉索由 $\phi 7$ 镀锌低松驰高强钢丝组成,标准强度 $\sigma_y^b = 1670\text{MPa}$,锚具采用表面喷锌冷铸墩头锚。双面扇形布置,索距6m,索长41.8~147.85m,全桥共92根。有91丝、109丝、121丝、127丝、139丝、151丝6种规格。斜拉索防护采用内层为5~7mm厚的黑色PE,外层为2.5mm厚的桔红色PE,两层一次热挤成型。张拉端设在上塔柱空箱内,锚固端设在距每段端头1.0m的主梁纵肋底部。

(4) 预应力:高强低松驰24 $\phi 5$ 钢丝 $\sigma_y^b = 1600\text{MPa}$, $E_y = 1.97 \times 10^5\text{MPa}$,配备DM锚具。高强低松驰钢绞线 $\phi 15.24$, $\sigma_y^b = 1860\text{MPa}$, $E_y = 1.97 \times 10^5\text{MPa}$,配置OVM锚具。

2.4 T构上部构造:

(1) 主梁:为分离双箱截面顶宽23.9m,底宽各5m,两分离式箱梁外侧间距18.4m。梁高和底板厚按二次抛物线变化;梁高在根部断面和墩顶0#块为5.62m;跨中及炳岸交界处梁高2.32m。底板厚由根部的0.7m变化到端部的0.2m。墩顶0#底板厚为0.8m,顶板厚0.5m,其余各梁段顶板厚分两部分,两分离式和梁宽8.4m厚0.25m,箱内宽5.0m,板厚从0.2cm渐变到0.24cm。墩顶0#箱腹板厚0.5m,3.0m梁段0.36m,4.0m梁段0.25m。墩顶0#段长10.0m,两侧各划分12节对称梁段,1号段长2.0m,2~5号梁段长3.0m,6~12段长4.0m,河心侧有一5.0m过渡段,炳岸侧13号梁段加牛腿长5.2m。共设6道横隔板,5.0m过渡段将分离式箱形截面渐变到斜拉桥双纵肋截面。砼标号为C50。

(2) 预应力体系:主梁为三向预应力体系,

在中跨合拢段主梁桥面板设有高强低松驰 $\phi 5$ 钢丝, $\sigma_y^b = 1600\text{MPa}$,配备DM锚具。主梁纵向、横向及横隔板采用高强低松驰 $\phi 15.24$ 钢绞线, $\sigma_y^b = 1860\text{MPa}$,主梁竖向预应力筋采用 $\phi 32$ 精扎螺纹粗钢筋 $\sigma_y^b = 750\text{MPa}$, $E_y = 2.0 \times 10^5\text{MPa}$,配合YGM锚具。

2.5 桥面系及附属

行车道部分桥面铺装厚10.0cm,为设有一层间距 $0.15 \times 0.15\text{m}$ $\phi 8$ 钢筋网的C40钢纤维砼,人行道表面铺砌装饰地砖,单侧宽3.0m,另有0.7m斜拉索锚管区,高出行车道0.24m。并用砼防撞护栏,将行车道分隔。通讯电缆设在人行道板下面。在行车道板边缘设置铸铁泄水管,均伸至梁底下5cm。炳岸两岸交界墩支座,采用盆式橡胶支座,梁端设大位移量的伸缩缝SSFB240。

2.6 设计计算

本桥整体静力结构分析使用四川省交通厅公路规划勘察设计研究院编写的梁桥静力安装程序、平面杆系及平面梁格程序。将斜拉桥(含外伸梁、辅助墩、枣岸交界墩)与T型刚构(含炳岸交界墩)作为一个整体进行安装阶段和使用阶段的内力、位移等计算。全桥离散为254个结构点,299个杆元。划分了168个施工阶段和12个收缩徐变阶段;程序包括结构体系转换、索力调整、预应力、砼收缩徐变、温度及汽车制动力计算等功能。并利用地震安全性评价报告提供的动参数,用DDJB-W软件进行了地震力的计算。稳定性计算采用“XYJ”稳定分析程序。

3、工程特点

(1) 技术含量高:斜拉桥本身具有较高的技术含量,而本桥采用72.8米空心高墩加108米高的索塔,总高180.8米,在同跨径桥梁中是最高的。结构复杂的高索塔施工技术以及桥梁的线型、索力控制均要求较高,高位砼运输及配合比设计要求高,同时,采用T型刚构与斜拉桥组成协作体

系,在全国也较为罕见。其设计要求、施工工艺均很高。

(2) 质量要求起点高:炳草岗金沙江大桥是跨金沙江第一座大跨径、斜拉加T构的桥梁,是连接炳草岗与枣子坪的枢纽,加之桥区位于攀枝花市的政治、经济、文化中心——炳草岗,是攀枝花市“九五”期间的重点建设项目,也是攀枝花市的标志性建筑。质量上必须达到省部级以上的优质工程。

(3) 安全及环境要求高:索塔及T型刚构薄壁墩均是很高的构筑物,必须解决高位砼在运输过程中不能有坠落现象,在其它工序施工中也须防止坠物伤人现象,同时主梁跨越江河、铁路、公路及居民区,这就要求在施工中不能有扰民和伤民现象,不能出现对生活区及江河污染,由于索塔位于枣岸公路边,还须解决好公路边施工的自身安全问题。

(4) 工期压力大:桥本身具有的复杂性决定了工期较长,而该桥施工只有17个月,还需跨越一个风季和两个雨季,攀枝花雨季较长,在同类桥梁施工中要求较高。同时受拆迁的影响,也将影响施工。主梁施工时间短,必须在风季前实现全桥合龙。

4、主要施工方法

4.1 机具及材料运输:

(1) 斜拉桥和T构施工的材料运输是通过分别在索塔和薄壁墩上各设置的一台FO/23B型自升式塔吊完成的,人员通过设置在索塔下游的SCD200自升式电梯进行上下,塔吊随索塔及薄壁墩升高而升高。在斜拉桥的上游设置一个产量为 $30\text{m}^3/\text{h}$ 的拌和站,通过两台输送泵一泵就位的施工方法进行。在T构炳岸侧设一拌合站,配置一台砼输送泵,并将输送管改为三通的形式一泵就位,保证T构岸侧和河心侧的对称、同步混凝土浇筑。

(2) 辅助墩施工时,施工机具及材料依靠设

于辅助墩的简易起吊设施进行,并设置移动式拌和站进行砼施工。

4.2 索塔施工

(1) 索塔基础采用片石及草袋围堰联合受力抵御洪水,基础开挖采用机械用人工开挖,在进行至岩层施工后,按光面爆破工艺进行,在距基础底1米时采用人工机械开挖,以保证基础岩石的整体性。基础大体积砼采用掺复合外加剂技术,并在砼体内设置散热和覆盖养护措施,防止砼开裂;在有岩石部分进行满浇,在非岩石部分按设计尺寸立模现浇;砼达到强度后,回填砂卵石土,并夯实。

索塔空心墩采用翻模施工,一次施工高度2米,但在墩底及墩顶变断面处(60米高)采用整体现浇,在施工至墩顶时预埋塔柱的钢筋及劲性骨架。

(2) 下塔柱由于斜度较大,选择高度1.5米的自制钢模施工,将特制模板拼为整体,利用塔吊吊装就位。在模板上设置可移式工作平台,便于人员操作,内模采用标准组合钢模拼装而成。由于下塔柱往外倾斜,用32精扎螺纹钢设置5道对拉杆,每道4根,根据塔柱高度分次张拉,以抵抗因两片塔柱外倾造成对塔根部产生的附加弯矩。

由于中塔柱在桥面上,外观质量要求高。施工时利用下塔柱模型进行改造为3米一节,减少节缝,特制转角模保证棱角线型。中塔柱是向桥轴线内倾,施工时在两塔间设置对撑并施力对顶,以保证中塔柱根部受力合理,利用中横梁的现浇托架,在其上安装水平横撑,受力机理为利用N型万能杆件节点板,拼装成桁架梁受力体系。并用千斤顶对称施力,共设2层支撑,每层2根。

上塔柱是斜拉索锚固区,是直立箱型柱,采用3米翻模施工,外模为拼装为整体的钢模,施工内模为利用上塔柱空心箱四周内壁全衬的10mm厚钢板。

(3) 上、中、下横梁的现浇支架为N型万能杆件和碗扣式组合支架, 这样便于拆卸, 在支架设计上改变了传统的万能杆件节点板受力的传统, 使用了将万能杆件作为梁单元的受力设计法。支架弹性变形采用结构有限元静、动力分析程序SAP93计算; 综合卧木的压缩及支架的非弹性变形后, 按三角形设置底模预拱度。除由于下横梁有6米高, 采用了2次浇注外, 中、上横梁均采用一次性浇注。

(4) 劲性骨架是塔柱施工主要的辅助措施, 其施工超前于其他工序。骨架是为钢筋、模板、预埋件提供定位及施工依托。根据模板高度不同, 在上、中、下塔柱分别采用3米及8米一节的桁架就地预制, 再整体吊装就位焊接。主筋的连接采用带肋钢筋套筒冷挤压连接。

(5) 斜拉索预埋钢管定位是上塔柱施工及索塔施工的关键工序, 首先精确加工预埋钢管, 保证长度、顺直度及出口斜截面角度准确, 使钢管上下口与模板良好密贴, 依托于劲性骨架的主钢筋进行精确定位后, 再与骨架焊接。

4.3 辅助墩施工

鉴于基础距公路边较近, 为了不影响正常交通, 将明挖扩大基础改为挖孔扩桩墩基础。在挖孔桩施工中采用控制爆破, 在爆破时用钢木组合材料对孔口进行封闭, 以免伤及行人和车辆。钢筋采用就地加工成笼吊装就位的施工方法施工, 砼采用水下砼施工方法进行施工。

墩柱采用翻模施工, 钢筋采用冷挤压联接, 在施工至距主梁底5米时暂不施工, 留出钢筋待斜拉索张拉后, 再与主梁联结, 并在与主梁交接处设置一条氯丁橡胶条。

4.4 薄壁墩施工

基础采用明挖扩大基础, 由于嵌岩较深, 因此采用控制爆破, 并采用覆盖措施进行安全防护。砼施工采用外掺技术降低水化热, 防止砼开裂。墩

柱施工采用翻模法施工, 高度2米。由于横桥向由下至上变宽, 在模型制作时特别坡板进行准确放样施工。

4.5 主梁施工

斜拉桥共分49个节段, 另含2个合龙段, T构共分27个节段; 斜拉桥0~1号采用万能杆件膺架现浇; T构0~1号采用在薄壁墩上预设牛腿支架现浇, 外伸梁采用万能杆件搭架, 分段现浇; 斜拉桥其他梁段采用根据本桥设计特点的定型加工的三角挂篮对称悬臂灌注法施工, 施工总重345t。T构箱梁其他段采用根据箱梁尺寸定型设计的轻型荡移式菱形挂篮对称现浇, 施工最大重量为163.3t。

主梁的正确施工是确保主桥线型及结构按设计合理受力的关键, 必须严格按设计要求和监理单位提供给定的施工参数进行, 主要施工技术措施如下:

(1) 在施工时, 桥面施工机具材料实行定位化管理, 除按要求设置挂篮、预应力张拉设备、斜拉索安装设备及必要的施工用料外, 不得堆放其他机具及材料, 以确保索力、应力、线型等各项监测数据准确性, 以正确指导施工。

(2) 当主梁砼强度达到80%时, 同时48小时后方可进行预应力张拉工作, 张拉采用全对称张拉。T构张拉顺序为: 纵向预应力→横向预应力→竖向预应力, 斜拉桥张拉顺序为: 纵肋预应力→横隔板预应力→纵向桥面板预应力。预应力张拉控制力及伸长量进行双控, 以张拉控制力为主, 张拉机具定期校核, 并按规定作好张拉记录, 张拉完成后24小时内进行压浆。

(3) 施工时按规定作好防撞护栏钢筋、泄水管、挂篮预埋件等的预埋和设置。

(4) 施工时, 须确保模板有足够的刚度和强度, 严格防止胀模引起主梁重量增大。

(5) 主梁砼按照缓凝、早强、蠕动的原则进

行配合比设计, 砼施工过程中必须按配合比施工, 确保在砼初凝前完成整个梁段的浇注, 砼浇注由前端向后端对称浇注, 两对称梁段的砼浇注误差不得超过 8m^3 。

(6) 在移动挂篮时, 左、右及两端对称移动, 移动最大距离误差不得大于 10cm 。

(7) 为了保证桥下行人及操作人员的安全, 在挂篮底桁平台及操作平台设置全封闭的安全网, 在挂篮四周设置防护栏杆。

4.6 斜拉索

由于受场地的限制, 斜拉索需倒运, 运到施工现场后, 直接放在放线盘上, 在砼等强阶段进行挂索, 主要工艺要点为:

(1) 将预埋索管的砼残渣, 焊接的毛刺进行清除, 制作专用起吊夹具, 中设橡胶等软体填物, 避免损伤斜拉索。

(2) 梁部挂索利用卷扬机牵引, 在滚筒上放盘放入梁端, 塔上挂索利用塔吊, 人工在上塔柱预设的支架上进行辅助, 穿入索管内, 再用设于塔内的牵引设备牵拉到位。

(3) 安装工序: 先将锚固端安装完成, 然后利用顶杆原理将张拉端进步拉出索管, 拧紧螺母。最后在塔上采用 YCW500 千斤顶, 配套 ZB10/320-4/800 油泵, 进行张拉锚固。斜拉索张拉必须等梁部预应力张拉完成再进行同步张拉, 分级平衡加载。

4.7 合拢施工

本桥合拢是协作体系桥梁合拢, 按照低温灌注、又拉又撑、无应力合拢的原则进行, 合拢顺序先边跨合拢, 后中跨合拢。

合拢前进行调索, 确保线型、索力、主梁应力符合设计要求, 然后进行对合拢段顶推, 利用型钢骨架锁定, 将三角挂篮改装为合拢平台支架, 绑扎钢筋, 穿预应力束, 在合拢两端加设换重水箱, 选择在晚 11:00 灌注砼, 凌晨 1:00 完成砼

灌注。

大桥合拢时索塔面岸偏 1.5cm , 边跨两端高差 6mm , 中跨 5mm , 实施顶推力中跨和边跨分别为 80t 、 220t 。达到了高精度合拢的目的, 主要采取了以下技术措施:

(1) 合拢时通过调索力和加设配重确保两端线型一致, 索塔倾斜符合击落要求。

(2) 选择温度相对稳定, 持续时间较长的时段, 以满足临时锁定的要求。

(3) 在斜拉桥与 T 构合拢时应在 T 构另一端适度压重。

(4) 砼浇注选择在当天最低温度, 在升温前砼达到终凝。

(5) 根据合拢段砼浇注情况, 同步减去压重。

4.8 主桥施工控制

斜拉桥是众多桥梁结构中无论是构造, 还是造型上最富于变化的桥型, 属于高次超静定结构。所采用的施工方法、安装程序与成桥后的主梁线型和恒载内力密切相关。同时, 施工的各个阶段, 结构内力与变形随结构体系和荷载状态不断变化。因此需对斜拉桥每个阶段作详尽分析验算, 求得索力、主梁线型、索塔位移等施工控制参数的理论计算值, 在施工中加以有效的控制和管理, 以确保结构的受力状态和变形始终处在安全范围内, 成桥后的线型符合期望值, 结构本身处在最优受力状态。

(1) 在挂篮上桥前测出挂篮变形量、支座反力、应力变化、砼的容重、弹性模量及砼收缩徐变值, 以及施工方案提供给监控组, 监控组根据提供的数据及施工方案, 计算出各施工阶段的应力、索力、变形值与设计对照, 确定下步工作。

(2) 严格按设计要求和监控指令规范各阶段施工目标, 按施工组织施工。

(3) 制定和实施周密的测试方案、线型测量、索力测试、立模标高设定。包括时机、结果判识、

信息反馈等测试方法。

(4) 根据不同时期砼的重量、强度变化、砼的收缩徐变、拉索徐变、温度变化等客观因素的变化, 对立模标高、拉索的张力进行调整。

(5) 严格控制恒载, 挂篮得量。包括砼入模量, 配合比控制和严格控制挂篮及施工梁段附加荷载。

(6) 在全桥合拢前, 采用线型控制为主。

(7) 定期核查挂篮变形量, 使其符合原设计值; 定期校核模型, 防止模板变形, 引起砼增加。从而导致恒载加重, 对内力、索力和线型造成影响。

(8) 在全桥合拢后及二期恒载施工时, 以主梁应力和索力控制为主。

5、工程实施情况

5.1 工程施工进度

自 1999 年 7 月 30 日开工, 索塔于 2000 年 4 月 29 日顺利封顶, 斜拉桥主梁于 2001 年 1 月 6 日完成; 最快 5 天/节段。T 构于 2001 年 2 月 10 日完工; 全桥 2001 年 3 月 13 日顺利合拢。同年 12 月完成全桥的静、动载荷载试验; 并于 12 月 31 日正式通车。

5.2 安全质量与控制

工程质量优良, 安全无事故。

主梁标高与设计高程, 个别误差最大为 2cm, 其余均在 1cm 以下, 索塔无纵向位移, 梁长误差 6mm, 合拢段两端高差边跨 6mm、中跨 5mm。施工索力与设计索力均控制在 3% 以内, 梁部应力均在设计范围内。

6、结束语

斜拉桥具有线型和柔性结合体的景观效果, 在市政工程中的运用尤其应具有都市化与美学的观点, 通过本桥的设计与施工, 得到以下体会:

(1) 斜拉桥的双纵肋与 T 构直腹式分离双箱间, 用 5 米过渡段, 实施连续渐变, 不设剪刀铰。

(2) 64 米空心高墩加 108 米高的索塔连基础, 总高 180.80 米, 在同跨径桥梁中是最高的, 塔梁墩固结与 T 构的 71.5 米薄壁高墩刚度较协调, 有利于整个结构的协调变位。

(3) 枣岸辅助墩墩顶与斜拉桥主梁固结, 其墩顶周边嵌有氯丁橡胶, 使辅助墩的钢筋与砼充分发挥各自材料的特点, 免去了设置拉力摆的复杂构造。

(4) 下横梁施工支架采用了钢木模共存, 固结与漂浮同在的体系, 通过试验和论证突破了传统的万能杆件节点受力设计法, 使用了将万能杆件作为梁单元的受力设计法。

(5) 通过优化配合比方案, 合理的配置机具设备, 解决了砼高位长距离运输的难题。

(6) 通过将索塔柱模型改装为大板加劲钢模, 探索出整体大板翻模法在高墩施工中的应用, 简化了施工工序和模型安拆工作量, 实现了平台施工与模型施工一体化, 节省大量的拉杆材料。

(7) 在上塔柱设计牛腿平台支架, 解决了上塔柱环向预应力张拉和斜面拉索的孔口就位的问题; 替代了传统的由桥面支架到顶的施工方法。

(8) 将受力简单、明确的三角挂篮成功的运用于斜拉桥施工, T 构使用了轻型荡移式菱形挂篮, 在一座大桥中运用了两种不同类型的挂篮, 丰富了大桥施工方法。

(9) 通过协作体系桥梁的索力与线型控制和合拢研究, 对将来桥梁施工有借鉴作用。

