

# 悬索桥主要质量通病及防治技术

宋官保 周昌栋 李 刚

(宜昌长江公路大桥建设开发公司 宜昌 443007)

**摘 要** 结合宜昌长江公路大桥建设实际, 分析大跨度悬索桥质量通病类型和产生原因, 研究减少和消除质量通病的措施和方法。

**关键词** 悬索桥 质量通病 防止技术

宜昌长江公路大桥是国家公路网主骨架沪蓉国道主干线在湖北境内跨越长江的一座特大型桥梁, 是交通部和湖北省“九五”交通重点工程, 桥型为双

塔钢箱梁悬索桥, 主跨 960 m, 全长 1 188 m, 如图 1 所示。桥全宽 30 m, 设计荷载: 汽-超 20, 挂-120, 设计行车速度 80 km/h, 工程于 1998 年 2 月开工。

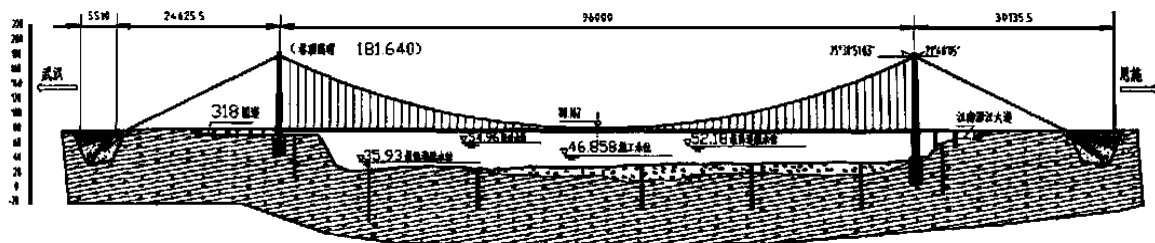


图 1 宜昌长江公路大桥桥型布置立面图(尺寸标注: cm)

本文结合宜昌大桥的特点从以下几个方面介绍攻克质量通病的一些主要做法。

## 1 锚碇及索塔承台大体积砼施工

锚碇和索塔承台均属大体积砼, 众所周知, 由于混凝土内表温差及层间温差产生的温度应力超过混凝土的抗拉强度时, 就会产生大体积混凝土的质量通病——温度裂缝。宜昌大桥单个锚碇砼浇注总方量 42 602 m<sup>3</sup>, 其中 C<sub>25</sub> 砼 13 125 m<sup>3</sup>、C<sub>40</sub> 砼 20 080 m<sup>3</sup>、C<sub>25</sub> 微膨胀砼 9 397 m<sup>3</sup>; 单个承台砼浇注量为 1 216 67 m<sup>3</sup>。针对大体积砼施工中易产生温度裂缝, 我们制定了详细的温控实施细则, 以温控为重点, 辅以其他防裂措施, 控防结合, 实践证明温度裂缝完全可以得到有效控制。

### 1.1 科学制定温控标准, 量化温控指标

采用“大体积砼施工期温度场及温度应力场计

算程序包”对锚碇大体积砼浇注进行了仿真计算, 制定了砼在施工期间不产生有害裂缝的温控标准, 具体内容如下。

1.1.1 砼最大水化热温升 C<sub>25</sub> 砼不超过 28℃; C<sub>40</sub> 砼不超过 35℃。

1.1.2 砼内表温差不超过 25℃, 其中基岩以上第 1~ 第 5 层砼内表温差不超过 20℃。

1.1.3 相邻块体的砼温差不超过 25℃。

1.1.4 砼允许最大降温速率不超过 1.5℃/天。

1.2 精选材料, 采用“双掺”技术优化砼配合比, 降低砼水化热温升

1.2.1 精选材料 通过试验研究, C<sub>25</sub> 砼采用 425 号低热矿渣水泥; C<sub>40</sub> 砼为 525 号中热硅酸盐水泥。两种水泥均为葛洲坝水泥厂生产的水化热较低的大坝水泥, 选择优良级配的砂、石料也是重要环节, 不再赘述。

**1.2.2 采用“双掺”技术, 优化配合比, 降低砼内部水化热绝对温升** 通过试验研究, 掺入Ⅱ级以上粉煤灰可以在保证砼强度的条件下降低水泥用量, 掺入适量缓凝高效减水剂可以在满足施工工艺的前提下延长水化热散发时间, 降低水化热强度, 推迟水化高峰出现时间, 有效避免相邻块砼不利温升组合, 优选配合比如表1。

表1 锚碇大体积砼配合比

设计 标号	配合比 (灰 砂 石)			水灰比	水泥 /kg·m <sup>-3</sup>	粉煤灰 /kg·m <sup>-3</sup>	SF 外加剂 (%)	砂率 (%)
C40	1	1.68	2.69	0.376	307.5	102.5	0.8	38.4
C25	1	2.35	3.6	0.51	224	96	0.6	39.5

表2 锚碇大体积砼控制浇注温度

月 份	1月			2月			3月			4月			5月			6月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
浇注温度/	20.0	20.0	20.0	21.0	21.0	21.0	22.0	23.0	23.0	25.0	26.0	26.5	26.5	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5
月 份	7月			8月			9月			10月			11月			12月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
浇注温度/	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	28.5	26.5	26.0	25.0	24.0	24.0	23.0	21.0	21.0	20.0

在每次砼开盘之前, 试验室要量测水泥、砂石、水的温度, 专门记录, 计算其出机温度。

砼从出机至浇注需经过砼输送泵运输、摊平、振捣等过程, 经过多次测试还要升温 1.5~2.5, 当浇注温度超过上述控制标准时, 必须夜间浇注, 若不能满足要求, 就需要采取砂石料降温, 拌和水加冰等措施, 再不符合控制标准就不得开盘。

#### 1.5 设置冷却水管, 利用冷却水散发砼内部热量

采用冷却水管降低砼内外温差是常用有效途径, 冷却水管采用管径 25 mm、壁厚 1.2 mm 的薄壁钢管, 在每层砼层厚 1/2 处布置一层冷却水管, 水平间距 0.9 m, 利用流量不低于 18 L/min 的冷却水循环带走砼内部热量。

#### 1.6 加强温度现场监测, 及时调整温控措施

根据锚碇结构特点和温度场计算结果, 在有代表性的各层分别布置了温度传感器和应变计, 通过定期观测的数据, 指导确定冷却水管通水流量、通水时间以及进水温度使之符合温控标准。

#### 1.7 控制各层浇注间歇期, 减少层间约束

这是防止砼收缩裂缝的重要措施。温控细则规定砼间歇期应控制在 5 天, 最长不得超过 7 天, 尽量保证锚碇大体积做到短间歇、连续施工。若不能满足上述规定, 应通过验算, 采用调整层厚等措施来满足温控要求。

#### 1.8 控防结合, 主动采用防裂措施

**1.8.1 微膨胀砼的应用** 锚碇后浇段和湿接缝砼浇注直接将平面上的分块连接为一个整体, 砼干缩应力引起砼变形, 严重的就产生干缩裂缝。为此, 湿

根据设计和有关规范要求, 采用 60 天龄期的抗压强度也为降低水泥用量创造了条件。

#### 1.3 合理分块、分层, 化整为零, 降低砼水化热温升

根据仿真计算结果, 将锚碇水平方向分为六大块, 竖向分为 24 层进行浇注, 每层高度 1.4~2.8 m, 最大一次浇注方量为 749.7 m<sup>3</sup>, 平面尺寸减小和层厚的减薄均有利于水化热的散发, 从而降低了温度梯度, 减小了温度应力。

#### 1.4 严格控制砼浇注入仓温度, 切实把好开盘关

通过仿真计算, 不同月份砼浇注温度按表 2 进行控制。

接缝和后浇段采用微膨胀砼以抵消和补偿砼收缩变形, 对防止产生干缩裂缝收效明显。

**1.8.2 施工缝处治** 每层砼浇注完成形成一定强度后, 及时凿毛并冲洗干净, 层与层之间设置了一层 159 mm × 75 mm 的金属扩张网以提高层间结合力, 可防止层面产生裂缝。

### 2 索塔、塔身砼

塔身为 C<sub>50</sub> 高标号砼, 横梁为 C<sub>50</sub> 预应力砼, 均为箱型截面。钢筋砼索塔易产生施工中钢筋锈蚀、砼拆模后表面气孔、蜂窝、麻面、露筋、施工缝错位、错台以及砼开裂等质量通病, 索塔塔身砼外观质量直接影响大桥整体形象, 对此, 可采用以下防治措施。

#### 2.1 防锈蚀

索塔钢筋在横梁施工时, 一般在空气中要暴露 2 个月左右, 若不采取措施, 锈蚀往往难免, 根据这一情况采取的措施是: 除锈后涂刷水泥净浆再用雨布遮盖。

#### 2.2 砼表面气孔、蜂窝、麻面的防治

砼拆模后, 砼表面出现的因气体未排出形成的小坑眼被称为气孔, 大小不一一定数量的坑眼、斑点集中在一起被称为蜂窝、麻面。防治措施: 精选材料 and 外掺剂, 降低水灰比, 优化配合比, 施工前进行模拟试验, 施工中加强振捣控制。

#### 2.3 施工缝错位、错台防治

采用超大模板减少施工缝数量, 加强砼收盘检平、凿毛, 保证接缝砼平顺, 加强模板刚度防止模板

变形和走模

## 2.4 砼开裂防治

调整配合比, 适当增加骨料, 改进养生方式(不间断滴漏式), 保证养生质量, 增加  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 、直径  $6\text{ mm}$  防裂钢筋网等。

## 3 索鞍、索夹制造

主索鞍、散索鞍、索夹是悬索桥受力关键部件, 主索鞍、散索鞍为铸焊结合件, 其工程质量主要受铸件质量和焊接质量的影响。

### 3.1 铸件质量通病的处理

质量通病或缺陷常表现为: 夹砂、裂纹、缩孔、疏松和变形等。采取以下处治方法: 对于较小的缺陷采用打磨、机加工的方法去除, 边去除, 边进行荧光(渗透)检查, 直至缺陷全部去除干净, 对于较大的缺陷, 修复采用局部加热处理和整体加热处理方法进行加热, 至一定温度进行焊补, 焊补后采取局部或整体消除焊接残余应力, 热处理后打磨、探伤, 如仍有超标缺陷, 则重复进行上述工序, 直至缺陷

完全去除。

### 3.2 索鞍焊接质量通病及处治

索鞍焊接质量通病主要包括一般焊接质量通病和索鞍因特殊结构产生的焊接残余应力大、应力集中等。前者一般焊接质量通病类型、产生原因及防治措施可参照钢箱梁对于索鞍焊接及安装, 对焊接残余应力大和应力集中的防治措施; 设计上合理分块, 合理确定焊接部位结构尺寸, 制造中保证对接部位尺寸精度, 焊接时严格按照试验确定的工艺实施; 焊接应力集中一般发生在焊缝交叉处。防治措施: 在次要受力部位割成圆角, 可减少焊缝交叉造成的应力集中。

## 4 钢箱梁制造及安装

宜昌长江公路大桥钢箱梁全宽  $30\text{ m}$ , 高  $3.0\text{ m}$ , 采用鱼鳍式扁平流线形横断面, 为全焊结构, 箱梁共分 80 个节段, 如图 2 所示。钢箱梁制造及安装包括钢箱梁制作、节段匹配、运输、吊装及焊接。现就各阶段的质量通病类型及防治措施分述如下。

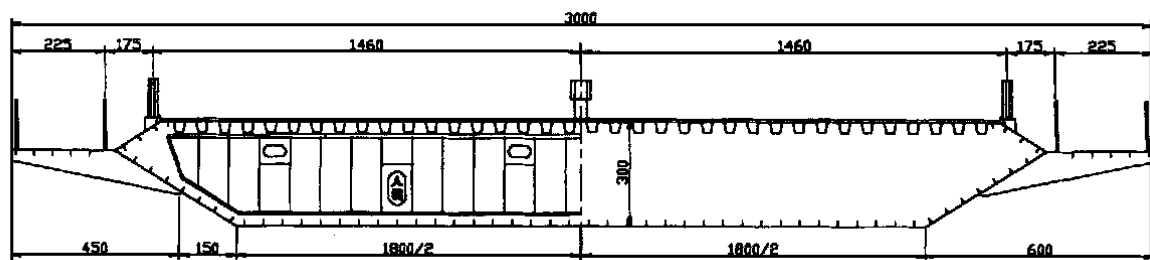


图 2 钢箱梁横断面图(尺寸标注: cm)

### 4.1 钢箱梁焊接质量

钢箱梁单元件焊接, 节段总成焊接和工地现场焊接, 影响因素多, 防治措施采用常规方法即可。

4.2 对接间隙与预拼不一致并超过规定值, 缝宽不一致, 板边平整度超标等, 防治措施如下。

4.2.1 采用无余量精密切割工艺, 保证下料尺寸准确。

4.2.2 单元件制造采用反变形工艺, 减少单元件变形。

4.2.3 将空中工作量提前到地面, 在吊装前实施 3+1 匹配预拼装消除梁段制造误差。

4.2.4 吊装过程中通过千斤顶、手动葫芦或其他手段予以矫正, 并通过匹配件、马板及时固定。

### 4.3 钢箱梁桥面标高及线型

钢箱梁桥面标高及线型是按一期恒载梁内无应力设计的, 其竖向线型通过梁段接缝处顶板与底

板间隙不同形成拱度来实现。其质量通病是桥面标高偏离设计值、线型不匀顺。防治措施: 加强监控的科学性及时予以修正, 严格控制影响因素, 认真执行预拼装确定的控制指标。

## 5 主缆系统制作及安装

宜昌长江公路大桥主缆系两根预制平行钢丝束大缆, 每根由 104 束 127 根直径  $5.1\text{ mm}$  镀锌高强钢丝组成, 每根全长  $1\,574.2\text{ m}$ , 直径  $655\text{ mm}$ 。主缆系统制作及安装包括镀锌钢丝加工、索股编束、猫道架设和索股架设。现就各阶段的质量通病类型、防治措施分述如下。

### 5.1 钢丝制作

钢丝加工制作质量通病一般为: 扭转指标达不到设计的次数、直线性差、弹性模量离散性大、编束所需的粗糙度不够等。防治措施: 一是从原材料选

择上下功夫, 通过大量的实践, 选择了日本产 DLP 盘元, 提高了钢丝抗扭转性能, 满足了设计要求; 二是在试生产期间, 通过大量统计数据研究决定, 采用对直线性要求更严的指标即一米矢高, 代替原合同规定自由圈径和自由翘头, 既减小了检测工作量, 又有效控制了质量; 三是改进工艺, 在钢丝整直工序中减少或不用润滑剂, 提高了钢丝编束所需要的粗糙度; 四是合理确定弹性模量区间和代表值, 通过稳定原材料和生产工艺来减小弹性模量离散性。

## 5.2 钢丝编束

索股编束的质量通病一般有: 索股扭转、鼓丝、呼啦圈(即索股因自身重力的影响出现上盘不紧的现象)。防治措施: 在工艺上狠下功夫, 采用 S 法上盘, 利用上盘紧束装置来减少和消除束股扭转、鼓丝、呼啦圈现象。

## 5.3 猫道架设

猫道是主缆架设的空中走道, 其安全性和线型是施工质量控制的关键, 结合宜昌长江公路大桥实际, 其质量通病主要有: 底板索锚头锚具破损(环状裂纹等), 浇铸合金松动、脱落、裂纹, 上、下游两副猫道面层标高差引起的横向走道倾斜, 同副猫道底板索标高差过大而导致底板索不能均匀受力, 猫道出现偏斜等。

锚具破损, 浇铸合金松动、脱落、裂纹的产生原因主要是宜昌大桥猫道底板索是利用虎门大桥的, 锚头在拆卸、运输过程中容易受损, 而锚头又是猫道重要受力部件, 直接关系到上部结构施工的安全, 为此, 对全部旧锚头逐一探伤检查, 经严格查验共有 15 件不合格, 全部重新制作, 新制作锚头由经验较丰富的单位承担, 新制锚头按规定比例抽检, 直至合格率 100%。

横向走道倾斜、猫道偏斜和底板索不能均匀受力, 主要是承重索下料和架设精度不够造成的, 为此, 除严格控制承重索下料长度外, 还明确规定了两个控制指标, 上、下游两副, 猫道标高差 10 cm, 同副猫道承重索标高差 5 cm, 通过施工严格监控从而保证了施工安全, 满足了施工需要。

## 5.4 主缆索股架设

主缆索股在牵引和架设中出现的质量通病主要有: 索股的扭转、松弛, 钢丝的鼓丝、交叉、磨损和包扎带断裂等, 若不及时处理, 将严重影响主缆架设质量和进度。防治措施: 一是索股上盘采用 S 法减小上盘时产生的内力; 二是利用着色丝(标志丝)及时检查索股扭转情况, 通过控制锚头位置, 入鞍

整形纠扭保证每一跨段内无扭转。

对索股钢丝的鼓丝、交叉、磨损和包扎带断裂采取的措施: 一是增加上盘紧束装置, 减少索股自重形成的“呼啦圈”现象; 二是在放束装置上增加刹车系统以便索股牵引停止时, 速度同步; 三是选择摩擦阻力较小的尼龙滚轮代替橡胶滚轮减少钢丝的错动、磨损和包扎带断裂。

## 6 桥面铺装

钢箱梁沥青铺装的质量通病主要有: 车辙、拥包、横向推移、开裂、脱层等。防治措施如下。

### 6.1 搞好气候环境调查, 合理确定使用温度

调查本地区近几十年来气温、降雨、风速风向和极端气温, 推算钢箱梁的使用温度, 是确定合理的铺装方案的关键。

### 6.2 进行受力分析, 优选试验铺装方案

对桥面铺装的受力状况进行力学分析, 弄清受力特征, 选择遵从性好、适应性强的铺装方案, 并作好钢桥面铺装疲劳性能、层间剪切、高温稳定性分析。

### 6.3 加强试验研究, 选用优质材料

在室内进行多种级配的混合料动态剪切流变、低温弯曲、透水率、浸水马歇尔稳定度、车辙试验等, 选择性能好的基质沥青、改性沥青、石料、纤维和矿粉材料等。对粘结材料不但要求具有防水作用, 还要重点进行不同温度条件下的剪切试验, 以及高温条件下的滑移稳定性试验, 以保证铺装层与钢板之间的粘结牢固。

### 6.4 通过直道试验研究确定推荐铺装方案

经室内试验初拟几种铺装方案后, 主要通过疲劳试验和高温浸水车辙直道试验, 测定各方案的疲劳特性、高温车辙变形和剪切流动变形, 综合分析评价各方案的优劣, 从而确定最佳铺装方案。

### 6.5 制定施工工艺, 严格工艺纪律

认真制定施工工艺, 严格工艺纪律是保证桥面铺装质量的重要环节。合理确定施工工艺流程, 明确规定每道工艺控制参数和技术要求, 通过试验路铺筑, 修改完善施工工艺。施工过程中, 以严格控制拌和、摊铺、碾压温度, 保证层厚为重点, 严格控制工艺参数, 严格技术要求, 保证施工质量。

### 6.6 加强工后观测, 及时处理个别病害

桥面铺装施工完成后, 受其他工程施工、营运环境、排水、养护等不利因素影响, 会出现不同程度的病害, 及时观测、及时处理对维护桥面铺装整体质量十分必要。