

丽君桥主缆、吊杆安装施工技术

甘科 李东平 孙剑飞 赵干明 陆绍辉

【摘要】丽君桥是国内首座自锚式柔性悬索桥，本文主要介绍该桥主缆、吊杆的安装工艺。

【关键词】自锚式悬索桥 主缆 吊杆 索鞍 索夹

1. 工程概况

丽君桥位于广西桂林市市区内，跨越桂湖和丽泽湖，主桥长120米，桥面宽25.5米，双向四车道。上部结构为三跨（25m+70m+25m）自锚式悬索桥，采用“H”字形钢筋砼索塔，桥面为纵横双向钢桁梁，桥面板为200mm厚现浇钢筋砼板，与纵横向钢桁梁共同作用形成结合梁，主缆与吊杆分别采用柳州市建筑机械总厂生产的PES7-451及PES7-61钢丝成品索。

本桥是一座形式独特的自锚式悬索桥，其活载主要由桁架结合梁承受，恒载主要由主缆和吊杆承受，通过吊杆传至主缆，主缆锚固在锚碇横梁上，钢桁架加劲梁亦埋入锚碇横梁内，锚碇横梁通过板式橡胶支座放置在桥台上。加劲梁水平

力与主缆水平力平衡，“自锚式”因此得名，故本桥的锚碇可设计得很小，既经济又美观。

2. 施工计算

2.1. 计算理论

2.1.1 对竖向荷载和温度变化采用平面有限元分析法。即建立平面杆系计算模型，主缆、吊杆为索单元，其它划分为梁单元，主缆与吊杆的刚度不计，进行非线性结构分析。

2.1.2 成桥状态加劲梁假定为只承受轴向力作用，由恒载产生的纵向弯矩比较小，忽略不计；在架设过程中，恒载作用在主缆上。

2.1.3 成桥坐标的计算：假定主缆自重为沿索长方向均匀分布，而其它静荷载为沿水平方向均匀分布，用数值求解法求解坐标。

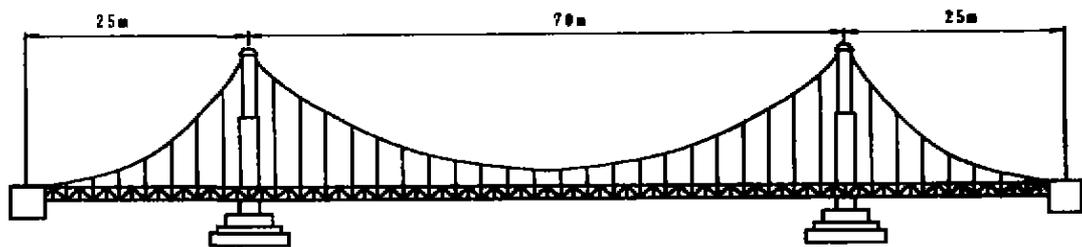


图1 丽君桥总体布置图

甘科、李东平：柳州欧维姆工程有限公司助理工程师



2.2 相关计算结果

2.2.1 成桥状态主缆各跨索长值见表1

2.2.2 成桥状态主缆各跨弹性伸长值见表2

2.2.3 索夹吊点位置

索夹吊点位置以主缆无应力长度形式给出,各单元无应力长度见表3,单元号示意图如图2。

2.2.4 主缆索力

在主缆状态下,主缆索力设计值为43.5

KN,实际索力以使主缆线型符合设计要求为准,在成桥状态下,主缆索力为约9000KN。

2.2.5 吊杆索力

在各种工况下,吊杆索力值设计值见表4。

2.2.6 索夹紧固力

根据设计计算及专门为本桥做的索夹紧固力试验和索夹抗滑动试验,各个索夹的总螺栓紧固力如表5,各索夹编号示意图见图2。

表1

位置	索长计算值 (m)
边跨	30.631
中跨	75.766

表2

位置	弹性伸长值 (mm)
边跨	2 × 66.4
中跨	134.7

表3

单元号	1	2	3	4	5
长度	3609.2	3204.9	3342.6	3508.8	3699.8
单元号	6	7	8	9	10
长度	3912.0	4142.0	5139.5	4247.2	3530.2
单元号	11	12	13	14	15
长度	3435.0	3347.4	3268.2	3198.0	3137.4
单元号	16	17	18	19	20
长度	3087.0	3017.1	3018.4	3001.0	2995.2

表4

序号	工况	吊杆索力
1	钢梁脱架前	中跨: 84 KN
	第一次张拉	边跨: 162 KN
2	钢梁脱架前	中跨: 126 KN
	第二次张拉	边跨: 243 KN
3	钢梁脱架后	中跨: 126 KN
		边跨: 243 KN
4	浇注砼桥面板后	中跨: 200 KN
		边跨: 420 KN
5	二期恒载完成后	中跨: 300 KN
		边跨: 650 KN

表5

索夹编号	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
紧固力(KN)	3960	4320	5280	6160	6440	7360	7360
索夹编号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
紧固力(KN)	1800	1800	1800	2160	2520	2940	2940
索夹编号	A8	A9	A10	A11			
紧固力(KN)	3840	4320	4800	4800			

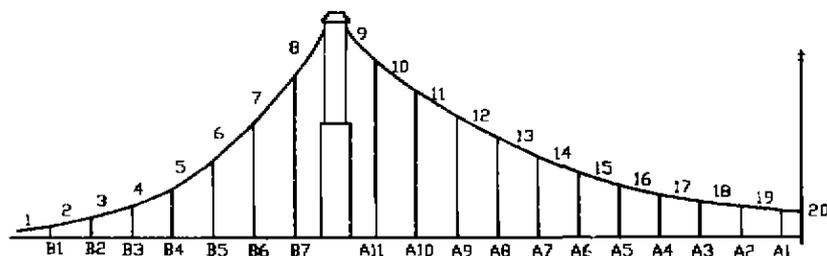


图2 主缆各单元及索夹编号示意图



2.2.7 索鞍预偏量

根据成桥状态进行倒拆计算,每个施工步骤索鞍预偏量计算结果见表6,实际预偏量以保证塔顶偏移量小于设计允许值为准。

表6

工况	状态	索鞍预偏值 (mm)
1	空桥状态	+297.9
2	吊装吊杆后	+247
3	安装钢梁后	-91.5
4	浇注配重梁后	-56
5	浇注桥面板后	-96
6	安装二期恒载后	-20
7	成桥状态	0

注:表中“+”号表示向跨中侧,“-”号反之

3. 施工工艺

3.1 主桥上部结构施工方案

因本桥施工时桥下干涸,且桥面距地面仅约6m,故主桥施工未采用传统的猫道架桥,而采用在桥下搭满堂脚手架来架桥的方案,既方便了施工,又节约了成本。

3.2 主桥上部结构施工步骤

浇注钢筋砼索塔→搭满堂脚手架→在满堂脚手架上组装加劲钢桁梁→安装主缆并调整空缆线型→安装吊杆并反复调整索力,钢梁脱架→分段浇注桥面板→完成二期恒载。

3.3 主缆、吊杆施工工艺

3.3.1 施工工艺流程图(见右图):

3.3.2 施工准备

安装起吊装置,在每个索塔两侧分别用钢管脚手架搭一个长6m、宽4m、高25m的架子,如图3所示,用卷扬机通过索塔与架子之间的起重横梁起吊索鞍及主缆。

3.3.3 安装索鞍

用起吊装置吊装索鞍,安装时用全站仪对索鞍位置进行测量,使其符合设计要求:纵桥向偏差不大于10mm,横桥向偏差不大于5mm,高程偏差不大于5mm。

3.3.4 安装主缆

在已架设好的钢桁梁上沿桥纵向在桥两侧铺两条4米宽的便道作为施工通道,并在便道上沿桥纵向每隔2米设一个导向滚轮支架,以减少主缆放索时与桥面的摩擦,避免刮伤主缆。待主缆运到工地后,用吊车将主缆索盘放到特制放索架

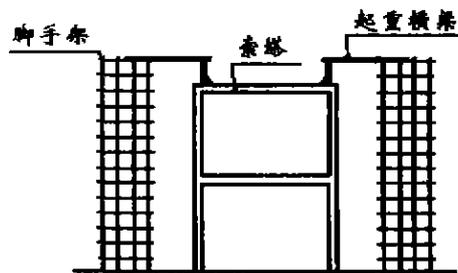
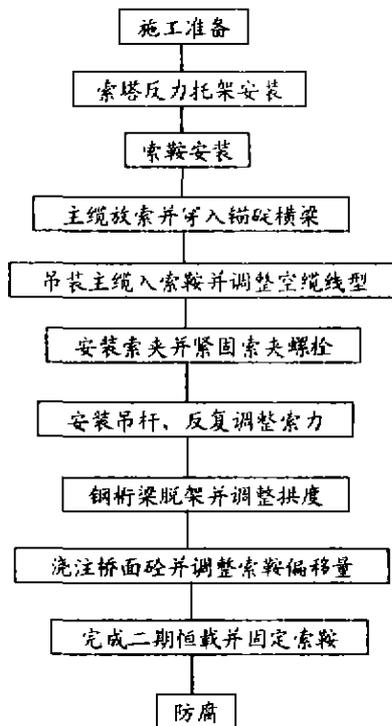


图3 起吊装置示意图

上,用卷扬机通过连接器牵引主缆沿桥纵向直线铺开,并将主缆两端冷铸锚穿入锚碇横梁,旋上螺母,调整锚具位置,使锚具中心与锚垫板中心同轴。在主缆上选择合理的吊点,用卷扬机起吊并放入索鞍槽内。

3.3.5 调整缆线型

在锚碇横梁上安装YCW150-200型千斤顶,如图4所示,按设计要求调整主缆索力,直至主

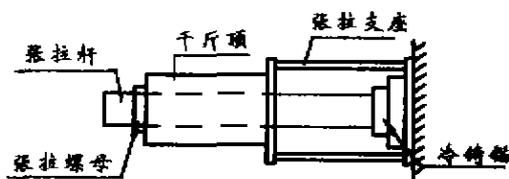


图4 千斤顶工作示意图

缆线型符合设计要求。本桥用4台千斤顶同时对两根主缆进行两端张拉,并要求各个千斤顶同步加压,以保证两根主缆索力一致。

3.3.6 安装及紧固索夹

用脚手架在桥上搭长5m、宽3m、高18m的平台架,并在架底安装轮子,用卷扬机牵引架子在桥面上移动,以便于安装各索夹。利用此架子,根据主缆上已做好的标记点,剥除装索夹位置处的聚乙烯(PE)护套,并在主缆裸露处用 $\Phi 1.0\text{mm}$ 软钢丝紧密缠绕,以增大索夹与主缆钢丝间的摩擦力。用卷扬机将索夹起吊并按设计位置精确定位安装到主缆上,用YDCLLJ500-100A型千斤顶按设计要求给索夹螺栓施加预应力。紧固完一个索夹后,移动架子到下一个待安装索夹位置处,安装另一个索夹,反复如此直至把全部索夹安装完。本桥共需五次紧固索夹,分别为:钢梁脱架前第一次紧固、钢梁脱架后第一次复拧、桥面砼浇注完成后第二次复拧、桥面二期恒载完成后第三次复拧及通车半年后第四次复拧。

3.3.7 安装吊杆

利用安装索夹的架子安装吊杆,先将吊杆下锚头穿过钢桁梁锚孔处,安装偏转矫正装置,并拧上锚具螺母,再将吊杆上锚头通过栓销与索夹连接,移动架子安装另一根吊杆,反复如此直至把全部吊杆安装完。

3.3.8 调吊杆索力

在钢梁下安装YCW150-200型千斤顶,反复、循环调整吊杆索力,直至符合设计要求。为保证索塔的安全及各吊杆索力的均匀性,本桥同时用8台千斤顶在中跨和边跨对称、同步张拉吊杆,一般顺序为:中跨:A5→A4→A3→A2→A1,然后A6→A7→A8→A9→A10→A11;边跨:B4→B3→B2→B1,然后B5→B6→B7。调索过程中,如果索塔顶部偏移量过大,应适当调整顺序,以确保索塔安全。

3.3.9 钢桁梁脱架

待主缆线型符合设计要求后,拆除钢桁梁下的满堂脚手架,使钢梁重量全部由吊杆和主缆承受,再次调整吊杆索力,然后第一次复拧索夹螺栓。

3.3.10 调整索鞍预偏量

用千斤顶调整索鞍位置,同时用仪器测量索塔顶偏移量,防止超过设计允许值。

3.3.11 浇注桥面砼板

分段浇注桥面砼,同时调整吊杆索力及索鞍偏移量,保证索塔的安全。等桥面砼浇注完后,第二次复拧索夹螺栓。

3.3.12 固定索鞍

待二期恒载完成后,第三次复拧索夹螺栓,并将索鞍顶推至使塔偏最小的位置,然后与索塔焊接固定。

3.3.13 防腐



主缆上钢丝裸露处及索夹缝隙处用北京航空材料研究院生产的HM105阻蚀型防腐密封剂防腐。主缆、吊杆安装防水罩，并在锚头外露部份安装保护罩，内在防腐润滑脂。

4. 施工总结

4.1 调索缆线型：由于主缆是利用斜拉索的制造工艺制造的成品索，刚度较大，生产和运输过程中主缆有弯曲和扭曲现象，使主缆安装完成后空缆线形极其不理想（实测值和计算值相差300mm），这给索夹和吊杆的定位带来很大的麻烦；通过反复数值计算和非线形计算，采用无应力长度来控制索夹和吊杆位置。实测值证明，通过吊杆的初张拉和脱架前的第一次和第二次张拉，主缆的线形也越来越接近计算值，第二次张拉完成后线形计算值和实测值只差6mm，随着吊杆拉力和荷载的增大，主缆的线形越来越接近计算值，线形得到了控制。因此用数值求解法求解空缆坐标和主缆长度是能满足精度要求和可靠的。

4.2 调吊杆索力：由于初始状态主缆线形较差，吊杆安装完成后部分吊杆锚端螺母无法装上，以至于无法张拉。根据计算，张拉中跨1/4跨处A6吊杆和A5吊杆时对主缆的线形和其他吊杆的内力影响最小，因此初张拉方案决定先张拉中跨1/4跨处的吊杆（A5），然后以1/4跨处为对称点，分别张拉1/8和3/8跨处的吊杆；边跨以B4为对称点向两侧张拉；此方案效果较好，塔偏适时监测，均控制在5mm以内。

4.3 塔的控制：丽君桥塔顶初期最大允许偏移量为11mm。在吊杆张拉过程中，考虑到诸多因素的影响，塔偏最大偏移量控制在6mm以内，此时控制截面应力为1.8MPa，为了顺利实施这一目标，除了每一工况通过计算严格控制对称张

拉力和塔偏适时监测外（监测包括塔偏和截面应力），在A5和B4吊杆处也安装千斤顶作补拉使用。另外在脱架前最后一次调吊杆索力过程中，主塔鞍座限位装置松开 $\pm 20\text{mm}$ ，以保证主塔的安全（实际施工中，鞍座最大滑移7mm），这一方案不仅能保证安全，同时也减少了工期。

4.4 索夹紧固力损失：钢梁脱架前，主缆只承受主缆自重和索夹、吊杆的重量，索力很小，索内钢丝间的间隙率相对较大；钢梁脱架后，主缆内力增加了约2000KN，钢丝间的间隙率减小，引起索夹紧固力损失约10%。同样道理，在桥面砼浇注完成及桥面二期恒载完成后，索夹紧固力损失分别约为4%和2%。由此可见，随着桥面重量的增加和主缆内力的增加，将导致索夹紧固力的损失，但损失值会越来越小。桥梁通车后，虽然受活荷载的影响，索夹紧固力还会有所损失，但已影响不大，且通车半年后将再次紧固索夹，足以抵消活荷载引起的预应力损失。

5. 结束语

与国内外跨度几百米甚至上千米的悬索桥相比，丽君桥显得较小，但它的独特之处在于采用自锚式和使用钢丝成品索作为主缆，前者使本桥不必做一个硕大的锚碇，后者使本桥的工期大为缩短。通过丽君桥的建成，证明了对于跨度较小的桥梁，采用自锚式悬索桥这种结构形式是可行的。

参考文献

1. 《中国桥梁》 项海帆 同济大学出版社
2. 《现代预应力混凝土施工》 杨宗放 中国建筑工业出版社
3. 《公路桥涵施工技术规范JTJ041-89》 人民交通出版社