

柳州壶西大桥斜拉索更换工程施工控制与监测

周 鹏¹, 黄林根²

(1. 广西柳州市市政设施维护管理处, 广西柳州 545001; 2. 上海市市政工程设计研究总院, 上海市 200092)

摘 要: 该文详细叙述了斜拉桥换索施工过程中的施工控制原则及施工控制、监测的方法, 可供类似工程借鉴、参考。

关键词: 斜拉桥; 斜拉索; 施工控制; 监测

中图分类号: U448.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2007)03-0070-04

1 工程概况

广西柳州壶西大桥(原名柳江四桥)是柳州市区东西向交通干线上的一座重要桥梁。大桥位于柳州市西侧, 在市区西部跨越柳江。壶西大桥为单塔双索面斜拉桥, 采用塔梁墩固结体系。主桥及30 m跨径的引桥采用预应力混凝土结构; 30 m跨径的引桥为预应力混凝土 T 型梁。

壶西桥塔顶标高为 157.88 m, 桥面标高为 97.58 m。主桥跨径 120 m+120 m, 桥跨布置呈对称。桥梁总长约 517 m, 两边引桥长约 277 m。桥宽为 18m(机动车道)+2×2 m(拉索锚固区)+2×2 m(人行道), 总宽 26 m。桥梁设计荷载: 汽超-20, 挂挂-120 验算, 人群荷载 3.5 kN/m²。

壶西大桥的斜拉索为双面扇形索, 每一侧共 26 对拉索, 采用无粘结钢绞线 OVM-200 夹片群锚拉索体系, 梁上索距 4 m。索体采用低松弛、强度等级为 1860 MPa、直径为 $\phi 15.24$ mm 的钢绞线, 注油后热挤压 HDPE 护套而成。拉索共有 13 种规格, 最粗的为 37× $\phi 15.24$, 最小的为 8× $\phi 15.24$, 全桥共有各种规格的拉索 104 根(其中有 92 根斜拉索, 索体呈六边形, 外侧布置有与斜拉索通长但不受力的补位钢绞线, 即所谓假索)。锚具采用 OVM200-15-19 和 OVM200-15-37 两种, 锚腔注防腐润滑脂。拉索固定端设在桥跨结构两侧的主梁上, 张拉端设置在索塔上, 施工时用前卡式千斤顶逐根分索张拉。斜拉索在塔上交叉锚固, 一侧拉索锚固在塔柱中心线上, 另一侧拉索在塔柱中心线两侧锚固。索塔为门式塔, 每根塔柱底宽 6 m, 塔柱顶宽 4 m, 塔腿部分为厚度 2 m 的实心矩形, 塔腿上的拉索锚固段为“H”型断面。

斜拉桥上部结构为板梁式结构, 由主梁、内纵梁、横梁、及桥面板组成。主梁断面为宽 2 m、高 2 m 的矩形, 下缘挖一底宽 0.6 m、高 0.5 m 的梯

形槽, 使斜拉索锚具不露出梁外, 梁高在根部增加到 2.5 m。机动车道与拉索锚固区之间用防撞墙隔开, 人行道与拉索锚固区之间用矮钢栅栏分开。

斜拉桥主桥桥墩位于明水深约 14 m, 覆盖层厚约 8 m, 采用 10 根桩径 $D=2$ m 的转孔灌注桩, 桩尖嵌入新鲜岩基 3 m。墩身采用带分水尖的双柱式桥墩, 墩身高 24.3 m, 墩柱中心间距 20 m。

壶西大桥工程于 1991 年 9 月破土动工, 1994 年 8 月建成通车。

壶西大桥是国内第一次使用多根带 PE 护套的钢绞线组成拉索、并使用钢绞线群锚作为拉索锚具的大型斜拉桥。由于近年来国内在索结构桥梁中采用的拉索陆续出现了一些问题, 个别桥梁发生了断索事故, 甚至造成桥面坍塌。柳州市市政设施维护管理处处于 2001 年对壶西大桥全部拉索及锚具进行了一次全面检查, 结果观察到“索体钢绞线大部分已出现锈蚀, 而且有的已形成严重凹坑”(见图 1)。在检查中已“发现有 8 根钢绞线滑丝和锚夹片脱落失踪的严重现象”, 说明群锚夹片的防松措施已部分失效。另外全桥的锚头螺纹、锚板已全部发生锈蚀, 这将给日后桥梁的安全运营带来很大的隐患。考虑到当今交通的强度和密度都在高速增长, 为安全计, 决定对全桥的钢绞线拉索进行更换。

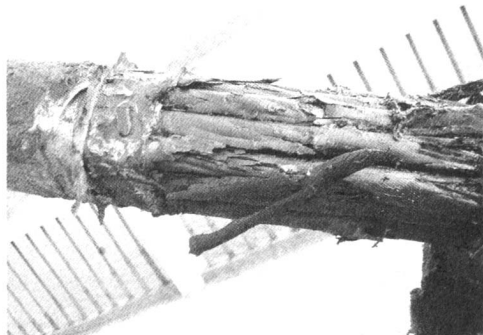


图 1 拉索外包皮破损、钢绞线锈蚀

2 换索施工控制过程

2.1 施工控制的目的

收稿日期: 2007-01-11

作者简介: 周鹏(1957-), 男, 广西柳州人, 高级工程师, 从事桥梁养护技术管理工作。

斜拉桥是由塔、梁、索三大部分组成的空间复杂结构体系。在斜拉索换索施工过程中,由于斜拉桥拉索、主梁、主塔等构件在斜拉索拆卸、安装工程中内力应力会发生改变,对结构的正常使用带来一定的不利影响,需要对换索过程进行监控。同时重新换上的新索索力和原拉索索力之间总是会存在一些差异,也需要对这种差异进行检测,必要时根据检测结果需对拉索索力进行调整,以确保结构处于良好的应力状态。因此在斜拉索换索的整个过程中,进行全方位监控,达到符合设计期望值的基本目的。施工监控是保证斜拉索结构安全可靠的必要手段。

2.2 施工控制原则

(1)施工前由施工单位根据施工图设计文件研究施工技术方案,编制施工组织设计方案,明确施工顺序、施工时间、施工程序等,报业主、监理批准执行。

(2)在施工过程中,按照上述确定的施工顺序和步骤进行施工。每一施工程序是:由施工监控单位提供施工控制指令→施工单位执行相应施工步骤,提交相关数据→监测单位测量主梁位移、索力等项目,并提供相关数据→监控单位分析实测数据,并根据分析结果向施工单位提供新的施工控制指令。

(3)斜拉索换索时,旧索索力和新索张拉索力一般以千斤顶测量值为准,频率法实测索力作为校核。

(4)为了保持结构现有的受力状态,一般情况下,新索张拉控制索力以实测旧索索力为依据,基本保持不变。

(5)施工控制以索力、桥面标高(线形)两项内容作为控制指标,其中以索力为主。

(6)换索施工应严格执行有关施工规范,按施工图设计要求实施各项施工程序和施工操作。

2.3 换索施工流程

根据设计要求,拉索更换必须对称进行,具体的做法是:

每次同时更换同一号的 4 根斜拉索,更换完成后,再进行下一索号的斜拉索更换,交替进行,直至(旧索)全部换完。换索顺序应按先细索后粗索、先短索后长索的原则,并结合参考原检查拉索锈蚀严重程度进行酌情调整,以取得安全、快速、方便的换索效果。

根据计算结果,在换索施工的前期(1~10#索),宜限制交通,并限制 5 t 以上的车辆通行。在换索施工的后期(11~26#索),宜采用部分封闭

交通,除行人和摩托车外,禁止所有机动车辆通行。

根据计算结果及换索经验,拉索的更换顺序详见表 1 所示。

表 1 拉索更换顺序表

序号	索号	序号	索号	序号	索号	序号	索号
1	2	7	7	13	11	19	19
2	1	8	8	14	15	20	22
3	3	9	9	15	16	21	21
4	4	10	10	16	18	22	24
5	5	11	12	17	17	23	23
6	6	12	13	18	20	24	26

每更换一号斜拉索的施工控制流程如下:

(1)旧索卸下前,对所换拉索及相邻索的索力用频率法进行测定,对所换拉索及相邻索所在位置处的桥面竖向位移进行测量,并将结果提交监控。

(2)卸旧索时,用千斤顶测旧索索力,并将索力值提交监控。

旧索卸下后,对所换拉索的相邻索索力用频率法测定其变化情况;测量所换拉索及相邻索所在位置处桥面标高的变化情况;并将结果提交监控。

(3)监控根据实测旧索索力,所换拉索的相邻索索力、桥面标高的变化情况,参考计算值,经综合分析,确定新索的张拉力,并发出相应的指令提交施工。

(4)施工单位根据监控提交的张拉力值将新索张拉到位。

(5)新索张拉后,对所换新索及相邻索的索力用频率法进行测定,对所换新索及相邻索所在位置处的桥面竖向位移进行测量,并将结果提交监控。

(6)按设计要求,千斤顶测旧索索力时,应以螺母与锚垫板之间的间隙不大于 3mm 时的索力为准。测量螺母与锚垫板之间的间隙值与千斤顶油压值,将该状态下的旧索拉力值与间隙值一并提交监控,由监控计算该间隙值引起的索力增量,并对千斤顶实测旧索索力进行修正。

3 监测要求

根据设计与施工控制的要求,施工监测的内容包括:索力、桥面竖向位移、主梁下缘混凝土应力等测试项目。

各项监测项目的监测工况与具体要求如下:

在每批拉索更换前,对全桥所有拉索的索力、

桥面标高、进行全面测量。桥面标高测点应选择有可靠保护、不易损坏的永久标志点。每更换一对拉索前,应首先撤除原有拉索的减震块等附件,使拉索在两锚固端之间没有限位约束。施工时用千斤顶在主塔张拉端量测拉索索力,同时用频率法进行校核。一般以千斤顶测量值作为新索张拉索力依据。

每更换一对拉索,在原有拉索拆除前、拆除后、新索安装后三个阶段,都测试本索号的所有拉索、前后索号拉索中的一根拉索(标准拉索共为3根)的索力,同时应测量本索号、前后索号对应主梁断面桥面竖向位移。

选取换索施工时梁底混凝土弯矩较大的几个断面,在对应位置的拉索拆除前、拆除后、新索安装后三个阶段,测试本索号对应主梁断面梁底混凝土应力。

进行索力、主梁竖向位移、主梁应力等监测时,应在夜间、早晨温度变化较小的条件下进行测量。

千斤顶应采用精度等级为0.4级的油压表,施工前应按规定对千斤顶进行严格标定,以保证索力测量和拉索安装时索力的准确。

4 监测方法

4.1 索力测试

索力测试的方法采用千斤顶张拉测试法和环境随机振动测频法两种,按照设计与施工控制的要求,以千斤顶张拉测试的索力为主,频率法校核。

(1) 千斤顶张拉测试法

用千斤顶张拉测试索力是一种传统的、也是最直接和较为准确的一种索力测试方法。只要经过严格、准确的标定,所测索力基本反映实际索力。本工程施工所用千斤顶为YCW400型穿心式千斤顶,压力表精度等级为0.4级。

(2) 环境随机振动测频法

环境随机振动测频法是20世纪80年代末才开始发展起来的索力测试技术。该方法方便易行,经济实用,且具有较高的测量精度。其测试原理是:测量拉索在环境随机振动激励下的随机振动信号,得到其前 n 阶自振频率,然后应用弦振动方程,即可求得拉索的张力。

拉索的索力与自振频率关系如下。

对于两端铰接的柔性索:

$$T = \frac{4WLf_n^2}{n^2g}$$

式中: T ——索的拉力;

W ——单位长度索重;

L ——索的计算长度

f_n ——第 n 阶自振频率;

n ——振动阶数;

g ——重力加速度。

对于两端铰接的刚性索:

$$T = \frac{4WLf_n^2}{n^2g} - \frac{n^2EI\pi^2}{L^2}$$

式中: EI ——索的弯曲刚度。

在测量索的自振频率时,利用环境随机振动作为振源。索的振动信号由传感器接受后转变成电信号,再经放大器放大。放大后的电信号输入计算机进行FFT分析计算。约2~3 min(时间视采样长度而定),便可在计算机的屏幕上显示测量结果。索的各阶自振频率可以通过显示的功率谱图上的峰值位置来确定,这样,在现场即可确定索的自振频率。

4.2 桥面竖向位移测量

桥面竖向位移监测采用水准仪配合专用水准尺,按技术要求进行测量,测量精度 ± 1.0 mm。每个换索工况(卸索前、卸索后、安装新索后)均对桥面竖向位移进行监测。

4.3 主梁下缘混凝土应力测试

混凝土应力测试采用大连基康工程监测技术有限公司提供的VSM-4 000型钢弦式应变计和配套的测试仪器VW-403型振弦传感器读数仪。

监测时,将钢弦式应变计的两端与配套的支架联结,支架与梁底混凝土粘结固定。于旧索卸下前、旧索卸下后、新索张拉后三个工况各测读一次,其差值即为不同工况产生的梁底混凝土应力值。

5 换索前初始索力测量

对过桥货运车实施限载,一般客车的通行对索力测试结果影响很小,为了减少对桥上交通的影响,索力测试是在不封闭交通的状态下进行的。

测试得到的索力值与换索前千斤顶的实测索力值基本相近。但与原设计索力相比,有些差异,这主要是由于换索时的桥梁荷载状况与设计时不同,以及施工误差、混凝土徐变等因素。

6 换索过程监测

换索施工开始后,根据施工控制的要求,在每换一对索的旧索卸下前、旧索卸下后、新索张拉后等三个施工工序中,对所换索及相邻各索进行索

力监测、对所换索及相邻各索对应位置处的桥面标高位移进行监测。另外在塔的根部设置了2个混凝土应力(应变)的测试点。

6.1 混凝土应力(应变)监测

(1) 梁底混凝土应力

梁底混凝土应力(应变)的测试,根据施工控制的要求,首先对下游东3#、7#拉索更换过程中相应断面处梁底混凝土应力的变化进行了测试,其变化值很小。而后又选择了9#下游断面和计算变化值最大的14#、17#、19#下游断面测试梁底混凝土的应力变化,其实测应力变化很小,小于相应的计算值,且新索张拉后基本恢复到原先的状态。鉴于实测梁底混凝土应力变化很小,和施工控制计算基本相符,在换索过程中能保证结构的安全,在以后各索的更换中未再对梁底应力进行监测。梁底混凝土应力变化测试结果见表2。测试结果表明,卸索时的混凝土应力变化很小,且都处于受压状态。

表2 梁底混凝土应力变化测试结果(MPa)

工况	3#索	7#索	9#索	14#索	17#索	19#索
卸索后	1.95	1.64	0.9	2.65	3.19	3.9
张拉后	-0.14	0.28	1.1	-0.6	0.35	0.16

(注:-表示混凝土受压)。

(2) 塔根部混凝土应力

由于壶西大桥塔的刚度较大,且换索都是对称进行,所以在塔的根部测得的混凝土应力变化很小,塔根两边的应力变化是对称的。在卸2#索时,塔根部混凝土应力变化最大,塔根部混凝土压应力减少1.4MPa,2#索张拉后,基本恢复到原来的应力状态(0.003 MPa)。壶西桥的换索顺序是从短索逐渐向长索进行。塔根部混凝土应力变化呈由大至小的趋势,到12#索时塔根部混凝土应力变化小于0.03 MPa,都小于相应的计算值,且新索张拉后基本恢复到原先的状态。鉴于实测混凝土应力变化很小,在换索过程中能保证结构的安全,在以后各索的更换中(13#~26#)未再对塔根部混凝土应力进行监测。

6.2 索力监测

换索过程中索力监测的结果表明:旧索卸下时,相邻索的索力增量均较小(大多在150 kN以内,个别达200 kN),且新索更换张拉后大多回复至原来索力。频率法实测索力与千斤顶实测索力差异较小,大多在 $\pm 5\%$ 以内,这是由于拉索实际的边界条件与理想状态差异过大造成的。另外在索力监测过程中,发现有个别拉索索力与频率法测量的索力相差较大,在换索结束后,对这些拉索

的索力进行了调整。

6.3 桥面竖向位移监测

每一对拉索在卸索前、卸索后以及新索张拉后,都在其对应的位置进行竖向位移监测。监测结果表明,卸索后拉索位置处主梁的挠度都小于设计计算值,表明换索过程中桥梁结构是安全的。

监测结果还表明:从更换每对拉索的卸旧索前与新索张拉后两个阶段的桥面标高测量值看,换索后的桥面标高基本回复到原先的状态;经过本次换索,桥面线形有所优化。

6.4 拉索加工长度的确定

斜拉索加工长度的准确确定,在斜梁桥拉索施工中十分重要,过长和过短都影响拉索的安装和使用。分批分阶段逐步提供拉索索长,根据施工监控不断修正拉索加工长度。本阶段换索分三批提供索长,最初的5对拉索按原设计,接下来的5对根据前批次的5对长度略作调整。根据前批次积累的数据,对最后一批次11对拉索的长度未作调整。

7 换索施工结束后监测

在104根拉索全部更换张拉完毕后,对全桥的索力、桥面线型进行了测试和测量。

换索前、后索力测试结果表明,斜拉索索力基本保持不变,结构处于原有(换索前)的受力状态。

从换索施工过程中桥面挠度及换索施工结束后的桥面实测线型看,桥面标高大致回复到初始状态,对结构受力状态基本没有影响。基于上述分析,认为大桥受力状态在换索前后基本没有变化,结构是安全的。

8 换索工程控制与监测总结

(1) 壶西大桥的斜拉索卸除一根拉索对周围各拉索的影响较小。同样,由此产生的主梁内力增量也很小。换索过程中的主梁下缘混凝土实测应力增量较小,且均小于相应的计算值。另外该索号张拉后,该位置的混凝土应力基本上恢复到原来的状态。故换索过程对主梁混凝土的应力状态影响较小,主梁是安全的。

(2) 索力测试结果表明:旧索卸下时,相邻索的索力增量均较小(大多在150 kN以内),且新索更换张拉后基本回复至原来索力。频率法实测索力与千斤顶实测索力差异较小,大多在 $\pm 5\%$ 以内,这是由于拉索实际的边界条件与理想状态差异过大造成的。个别索力经过调整,符合换索设计

不对称边跨预应力混凝土连续梁桥施工监控

龚 科

(常州市新北区城市管理与建设局,江苏常州 213000)

摘 要:该文介绍了312国道常州段新武宜运河大桥不对称边跨预应力混凝土连续箱梁施工监控的关键技术,论述了施工监控的目的与意义,阐明了线形控制及应力监测的要求、技术措施等。

关键词:不对称边跨;预应力混凝土连续梁桥;线形控制;应力监测

中图分类号:U445 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2007)03-0074-04

0 前言

施工控制是施工技术的重要组成部分,并始终贯穿于桥梁施工中。任何桥梁施工,特别是大跨径桥梁的施工,都是一个系统工程。在该系统中,设计图纸要求就是施工的目标,在为实现设计目标而必须经历的施工过程中,将受到许许多多确定和不确定因素的影响,对施工状态进行实时识别(监测)、调整(纠偏)、预测,使施工系统处于控制之中,对设计目标安全、顺利实现是至关重要的。

312国道扩建工程常州段新武宜运河大桥主桥为42.4 m+75 m+59.6 m(左幅)和59.6 m+75 m+42.4 m(右幅)的三跨预应力混凝土连续箱梁桥,按挂篮悬臂浇筑施工法设计,采用支架逐段现浇法施工。因其施工方法特殊,结构边跨不对称等特点,施工过程中不确定的影响因素多,为保证工程施工的最终质量,使成桥后的桥面线形达到设计要求,并且使结构的内力分布与设计理想的内力状态吻合,因此在该桥悬臂浇筑施工过程中进行施工控制。

1 桥梁概况

新武宜运河大桥主桥上部结构为三跨预应力混凝土变截面连续箱梁。本桥路线中心线平面位于直线段内,立面位于 $R=12\,500\text{ m}$, $T=158.989\text{ m}$, $E=1.384\text{ m}$ 的竖曲线上。桥梁全宽43.5 m,由上、下行分离的两个单箱双室箱形截面组成。其跨

径布置左幅为42.4 m+75 m+59.6 m,右幅为59.6 m+75 m+42.4 m,箱梁根部梁高4.2 m,跨中梁高2.0 m,箱梁高度以半立方抛物线变化。箱梁顶面设置2%超高,通过箱梁内外侧腹板高度调节。箱梁顶板宽18.25 m,底板宽12.25 m,翼缘板悬臂长为3.0 m。箱梁采用三向预应力体系。桥梁设计荷载等级为:汽车—超20级,挂车—120。主桥总体布置如图1所示。

2 桥梁特点与施工监控内容

2.1 桥梁特点

新武宜运河大桥主桥属连续梁桥中的中等跨径桥梁,但该桥有其自身的特殊性,主要表现为:

(1)施工图设计按挂篮悬臂浇筑的施工方法进行设计,预应力钢束的配置等构造均按上述施工方法进行设计。由于该桥址处河道尚未开挖,地面标高距设计标高较低,且地表土层的承载力较好,因此施工单位采用逐段支架现浇的施工方法进行施工。该施工方法较常规的挂篮悬浇施工方法有较大的区别,地基对支架变形的影响,支架对已浇梁段的影响等不可预测的影响因素较多,理论计算也较难模拟结构的实际受力状况,对每一梁段的变形控制要求较高。

(2)该桥边跨长度与中跨跨中截面不对称,而桥梁施工将经历悬臂施工、边跨合拢、临时固结解除直至中跨合拢等多次体系转换,由于边跨跨径不对称,导致在体系转换过程中对中跨悬臂标高的影响较常规对称连续箱梁桥较为复杂。施工过程中如何准确预测各施工工况下结构的变形,以使最终中跨合拢时悬臂端的相对高差满足要求成

收稿日期:2006-08-01

作者简介:龚科(1981-),男,江苏常州人,从事桥梁建设与施工管理、桥梁施工监控技术研究工作。

要求。

(3)将换索结束后的桥面标高测量值与初始状态的桥面标高值比较,大致回复到初始状态。换索过程中最大挠度值为54 mm,小于设计计算值(72 mm),结构是安全的。

(4)根据整个换索过程的监测结果来看,全桥的受力状态基本保持原有(换索前)状态,对结构受力状态基本没有影响。大桥受力状态在换索前后基本没有变化,结构是安全的。经过本次换索,桥面线形有所优化。