

石潭溪大桥吊杆更换设计与施工

廖松山 李文献 华剑平 李东平

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545005)

摘要:该文重点介绍了石潭溪大桥吊杆的更换工程。由于早期建造的一些拱桥在设计时未考虑到桥梁营运期间吊杆的更换问题,与桥梁吊杆配套的预埋管内径多数偏小,不能满足新型吊杆锚具安装的工艺要求。石潭溪大桥吊杆更换工程通过对新吊杆的结构及施工工艺进行的合理设计,使新吊杆的安装施工达到既不破坏桥梁原有结构又便于施工的效果,为类似的桥梁换索工程提供了可行的解决方案。

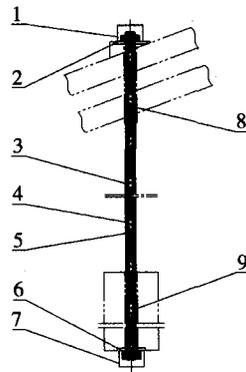
关键词:拱桥 吊杆 热铸锚 环氧涂层钢丝拉索 预埋管

1 工程概况

福州石潭溪大桥是316国道闽清溪口至雄江段公路上的一座大型钢管混凝土中承式拱桥,大桥位于水口电站大坝上游约250m的闽江支流的石潭溪出口处。桥梁设计荷载:汽-20,挂-100。桥面净跨136m,矢跨比1/5,桥梁全长166.84m。主拱肋由四根 $\phi 550 \times 8\text{mm}$ 的钢管组成,钢管内灌C40混凝土。桥面系采用工字型横梁和T型纵梁,横梁间距为8.1m。该桥于1996年10月开始修建,1998年元月竣工通车。2007年,为增强桥道系竖向及横向的刚度,曾对石潭溪大桥采取了增加两道钢桁纵梁进行补强的措施。2011年经现场检测与勘察,发现大桥部分吊索外包材料出现严重老化,吊杆的防水防腐功能受损、拉索索芯锈蚀的问题,存在较为明显的安全隐患,需要对该桥的吊杆进行更换处理,以提高桥梁的整体抗风险能力。

2 原吊杆结构及存在的主要问题

石潭溪大桥的原有吊杆采用上世纪九十年代颇为流行的墩头锚钢丝拉索结构(见图1)。全桥共26根吊杆,吊杆索体采用110丝 $\phi 5$ 的镀锌钢丝束制作,钢丝的抗拉强度为1570MPa,索体外径80mm,破断力为3455kN。吊杆两端的墩头锚分别锚固在拱肋的上缀板及横梁下缘,吊杆墩头锚具为锚杯螺母的组合,上端锚具为可调式(张拉端),用以调节索力和桥面系标高,下端为固定端。



1-拱端保护罩;2-墩头锚(张拉端);3-110丝 $\phi 5$ 镀锌钢丝拉索;4-PE护套;5-铁皮护套;6-墩头锚(固定端);7-梁端保护罩;8-拱端预埋管($\phi 150 \times 10$);9-横梁预埋管($\phi 95 \times 5$)

图1 石潭溪大桥原吊杆结构图

石潭溪大桥修建之时,钢管混凝土拱桥在我国应用的时间还比较短,由于当时吊杆技术的局限,该桥所用的吊杆结构在防腐性能和抗疲劳性能上考虑欠周全:其一、吊杆拉索是通过墩粗钢丝的端部卡在锚板孔上来传递结构的荷载,结构荷载仅依靠墩粗的钢丝端部来承受,钢丝局部处于高应力状态,其抗疲劳性能较差;其二、拉索钢丝端部与大气接触,抗锈蚀的能力较差;其三、拉索钢丝在墩头锚与索体之间的过渡段是裸索,靠施工完成后灌注水泥砂浆来防护,由于热胀冷缩及活载应力的反复作用会使砂浆护层断裂,水从裂缝渗入后钢丝易发生腐蚀,所以这种钢索防腐方式并不可靠。在类似结构的桥梁中,已有因吊杆断裂而发生跨塌的案例,如四川宜宾的小南门桥,经事后检查,导致这起事故的重要原因是吊杆钢索锈蚀。随着拉索技术的发展,现在这种类型的墩头锚具已经很少应用在长期使用的吊杆上。

2011年9月,受福州市公路局的委托,柳州

欧维姆结构检测技术有限公司对石潭溪大桥吊杆进行了专项检测,检测结果表明,该桥吊杆也出现了令人担忧的隐患:吊杆索体外的铁皮护套锈蚀、破损严重,基本丧失保护功能;索体PE护套有较多损伤,部分吊杆PE护套出现横向裂纹;索芯钢丝及拉索锚具锈蚀明显(见图2),防护油脂板结,防腐性能退化严重。

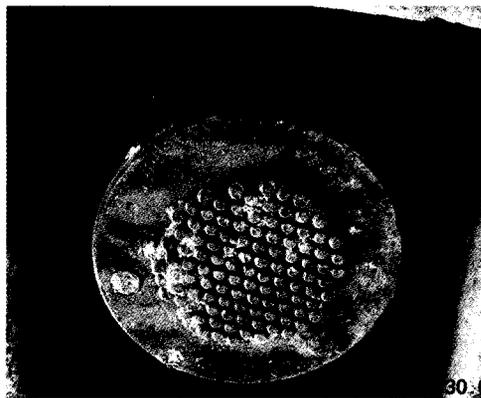


图2 吊杆锚头表面的锈蚀状况

专项检测还发现,该桥部分吊杆的钢丝锚头端面还有不齐的现象,如在雄江岸水库侧的2#下锚头中,有38根钢丝锚头外露,凸出高度5.5~7.5mm,凸出的钢丝占总数的34.86%。钢丝锚头锚端面不平整是由于早期制索工艺所限。由于拉索是通过锚粗钢丝的端部卡在锚板孔上来传递结构荷载的,钢丝锚头锚端面不平整必然会导致各钢丝受力不均,从而影响到拉索的抗疲劳性能。通过振动法测试,该桥在恒载和动载的作用下,雄江岸水库侧1#、山体侧2#吊杆,闽清岸水库侧2#、山体侧1#和2#吊杆以及0#吊杆的索力已超过设计应力的上限($0.4\sigma_b$),其中0#吊杆的测试索力达1743.9kN,超过拉索设计允许应力值(1355.7kN)的28.63%。鉴于石潭溪大桥原吊杆已不能满足现实的荷载水平,在一定程度上影响了桥梁整体结构的安全性和耐久性,《316国道闽清段石潭溪大桥吊杆专项检测与评估报告》给出了立即采取限速限载措施以保证桥梁安全,并尽快实施更换该桥吊杆体系的建议。

3 新吊杆结构设计

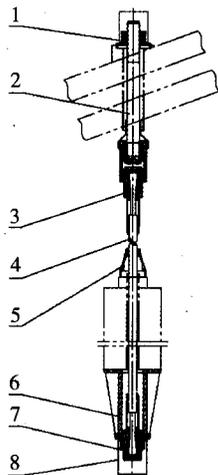
用于石潭溪大桥更换的新吊杆,其结构除了要符合相关规范的规定、满足原设计的要求及便于施工外,设计上还需考虑到以下一些因素:

(1) 新吊杆应具有更大的安全储备,以适应大桥的实际交通现状;

(2) 新吊杆的更换安装不应影响桥梁原结构有不利的影晌;

(3) 新吊杆应有更好的防腐耐久性能。

基于以上因素的考虑,柳州欧维姆机械股份有限公司提出了石潭溪大桥新吊杆的方案并得到业主及设计方的采纳。新吊杆(型号:OVM5-121STX)的结构如图3所示:主要由上端拉杆组件、热铸锚拉索锚具、环氧钢丝索体、支撑架和防护附件构成。



1-拱端保护罩; 2-钢拉杆组件; 3-上端热铸锚;
4-121丝 ϕ 5环氧涂层钢丝拉索; 5-梁端防水罩;
6-支撑架; 7-下端热铸锚; 8-梁端保护罩

图3 OVM5-121STX吊杆结构

3.1 新吊杆索体的选取

吊杆是拱桥上的重要受力件,桥面结构的重量和桥上荷载都要通过吊杆传递到拱肋上,其安全性、耐久性关系到桥梁整体结构的安全与正常使用。尽管目前对柔性吊杆的损伤破坏机理仍在研究之中,锈蚀、疲劳等各种因素对吊杆使用寿命的影响程度还尚不明确,但既往的工程实例表明,柔性吊杆的破坏与钢丝的腐蚀关系密切。因为腐蚀除了削减钢丝的受力面积外,还会使钢丝表面变得凹凸不平,在受拉时钢丝表面便会产生应力集中现象,以致局部拉应力大于钢丝的平均拉应力,从而降低钢丝的抗拉强度和延性。拱桥的耐久性在很大程度上依赖于吊杆拉索的抗腐蚀能力,加强吊杆的防腐能力是提高吊杆使用寿命的有效办法,而钢丝作为吊杆拉索最基本的受力件,其防腐性能自然受到业界的特别关注。

环氧涂层钢丝拉索是柳州欧维姆机械股份有限公司研发的一种新型钢丝拉索。与已有的镀锌钢丝所用的镀层电化学防腐机理不同,它是通过物理涂层来保护钢丝的。与镀锌钢丝相比环氧涂层钢丝具有如下优点:

a、环氧喷涂是一种物理处理，对钢丝的疲劳性能没有影响，而钢丝镀锌之后其疲劳性能有不同程度的降低。

b、环氧涂层的工艺温度约为200℃左右，在这一温度条件不会降低钢丝母材的各种力学性能，而钢丝经热镀锌之后强度一般会有所降低。

c、柳州欧维姆公司完成的一系列耐腐蚀性能对比实验表明（见表1），环氧涂层具有稳定的化学性能，优良的耐酸碱性和耐溶剂性，而且附着力强，能有效地保护钢丝，提高钢丝的防腐耐久性，与镀锌钢丝相比环氧喷涂钢丝的耐腐蚀性能优势明显。

表1 环氧喷涂钢丝与镀锌钢丝的耐腐蚀性能实验结果比较

	环氧涂层高强度钢丝	镀锌高强度钢丝
防腐性能 (盐雾试验)	盐雾试验4000小时，无锈蚀、膨胀、气泡等现象，表面无明显可见变化	盐雾试验1500小时后，表面明显锈蚀
耐干湿性	海水16h/空气8h，30个循环，表层和内部均不发生锈蚀。	表面颜色变暗，有污斑出现。
耐溶剂性	甲基乙基酮擦拭10次，表层无软化和粘着现象。	表层无软化和粘着现象
氢氧化钠溶液	5500h浸泡后，表面无明显可见变化。	1000h后表面颜色变黑
氢氧化钙溶液	5500h浸泡后，表面无明显可见变化。	1000h后表面出现疏松层锈蚀
氯化钙溶液	5500h浸泡后，表面无明显可见变化。	1000h后表面颜色变暗，有污斑出现

d、从理论上分析，镀锌钢丝拉索进水后所引起的电腐蚀是无法隔离的，很快会“传染”到整根拉索上。我们检查、维护及更换过很多这样的拉索，和理论分析是一致的，这也是石潭溪大桥吊杆腐蚀的主因。而环氧涂层钢丝拉索的每根钢丝上都是单独喷涂环氧涂层的，可很好的起到独立防腐的作用，即使有某根钢丝受到腐蚀，也不会蔓延到拉索的其它钢丝上。

由于环氧喷涂钢丝拉索具有上述优点，石潭溪大桥的设计方和业主决定本桥的新吊杆采用环氧涂钢丝拉索替代原来的镀锌钢丝拉索。

早期建造的拱桥，对吊杆的使用寿命估计都比较高，故设计时几乎都没有考虑吊杆的更换问题，加上当时通常采用现场镦头的制索工艺，与吊杆配套的预埋管内径设计一般都偏小，这给后来的吊杆更换工作带来了不少麻烦，因为新型的吊杆拉索与锚具一般都采用在厂内预制成整体，其安装工艺要求预埋管的内径要大一些。石潭溪

大桥的上下预埋管的状况也是如此，若新吊杆采用预制成整体的结构形式，安装时吊杆的锚头将无法穿过预埋管。如果对横梁原导管孔道做扩大处理，横梁内的纵向主筋将被破坏，这不仅会削弱横梁的截面强度，降低横梁的使用性能，同时也会对孔道邻近部位造成损伤，给日后的运营留下隐患；如对拱肋上导管进行扩孔处理，对于原钢制导管而言，这意味着必须切除旧管换用新的大孔径管，这也会导致破坏原结构的完整性，增大工程量并延长工期，同时新管与旧拱肋横杆等构件需要通过焊接连接，焊接过程中产生的高温对老结构也会产生一定的损害，而且要保证新老构件之间焊缝的强度达到设计要求，对焊接施工工艺还有较高的要求，现场难以实现。所以通过扩孔来换索的安装方案并非理想的选择。该桥原有的横梁预埋管内径仅为 $\phi 85\text{mm}$ ，如果不扩孔，新吊杆索体要小于 $\phi 85\text{mm}$ ，才能保证索体可穿过的横梁预埋管。

根据该桥梁管理单位提供的信息及数据，每天经过的货运车辆大多数已超过汽-20，挂-100的桥梁设计荷载。考虑到经过2007年的加固补强改造后桥梁结构的重量有所增加，并结合桥梁实际及交通现状，业主希望新吊杆具有更大的安全储备，安全系数至少要比原设计提高1.2倍。

综合上述因素考虑，在新吊杆中，我们选用121丝 $\phi 5$ 的环氧涂层高强平行钢丝束拉索，索体表面采用双PE护套来保护钢丝束，内层PE为黑色，外层PE为彩色，拉索外径为 $\phi 81$ 。拉索的钢丝强度等级为1770MPa，拉索的破断载荷为4205kN，索体弹性模量 $\geq 1.90 \times 10^5 \text{MPa}$ 。新吊杆拉索的破断载荷与原吊杆拉索相比提高了 $4205/3455=1.217$ 倍。满足了安全系数和索体直径小于 $\phi 85\text{mm}$ 的要求。

3.2 拉索锚具的选择

使钢丝束内各钢丝受力均匀能有效提高拉索整体的抗疲劳性能。冷铸锚和热铸锚是当前应用较多的钢丝拉索锚具，它是通过冷铸填料或合金与钢丝之间的粘结力来传递拉索荷载的，粘结成整体的钢丝束端部可以达到近于同步位移的效果，所以，即使在制索时钢丝束端面镦头有些许不齐，也不会产生钢丝束内各钢丝受力不均的现象，从而改善拉索的抗疲劳性能。由于本桥梁和拱上的预留孔都比较小，如果将拉索预制成型，无论采用何种锚具，施工时都无法将锚头穿过预

埋管,因此,新吊杆的锚具需要留有一端在现场穿索后再制锚。如果拉索锚具采用冷铸锚,现场制索后存在难以对成索进行超张拉检验的问题,这不符合相关规范的要求。因此,新吊杆的拉索锚头采用了热铸锚的结构。热铸锚可以通过顶压的方法来检验其锚固的可靠性,灌铸在热铸锚锚杯内的合金还能起到将钢丝表面与外界腐蚀介质隔开的作用,所以与原吊杆所用的墩头锚相比,新吊杆所用的锚具有更为可靠的锚固性能和防腐性能。

在新吊杆的锚具和成品索体之间的过渡段,设计有密封筒,通过对密封筒内灌注密封材料来对拉索裸露段进行可靠防腐。由于新吊杆锚具的密封筒直径为 $\phi 135\text{mm}$,大于预埋管内径,所以在新吊杆中特别设计了一个支撑架,将密封筒与预埋管分开,吊杆的荷载通过支撑架传递到横梁的锚垫板上,以避免安装时密封筒与预埋管发生干涉现象。

此外,维修施工时还将横梁原有的预埋管向上延伸至桥面 150mm 以上,并在预埋管的上端设置防水罩,用以阻断雨水进入下端预埋管的途径。新吊杆上、下锚头均设置保护罩进行防护,使其免受风雨侵蚀。

3.3 钢拉杆组件的设计

由于石潭溪大桥拱上预埋管的内径只有 $\phi 130\text{mm}$,新吊杆的锚头也不能穿过,所以新吊杆只能采用钢拉杆穿过拱上预埋管,在预埋管下方与拉索锚具连接的组合结构形式。钢拉杆组件由钢拉杆、连接套、球面螺母、球面支座等零件构成,钢拉杆组件通过连接套与拉索热铸锚连接。钢拉杆采用 40Cr 材料制造,直径取 $\phi 120\text{mm}$ 。在新吊杆两端与桥体结构的接触面还设置有球面支座,用以消除由于桥梁上下锚固面的偏斜误差而造成的吊杆局部应力,当在动载作用下主梁产生位移时,吊杆可通过球面支座的适时响应以减少吊杆内力。

4 新吊杆更换的施工步骤

根据业主及福建省交通规划设计院《石潭溪大桥维护验算报告》、《316国道闽清段石潭溪大桥维修工程施工设计图》的要求,石潭溪大桥本次维修的重点是更换吊杆,施工的工艺流程见图4:

各工序的实施步骤如下:

(1) 施工准备

首先,测定恒载状态下各吊杆所处位置拱肋和桥面横梁顶面的标高,作为施工中高程控制的基准。

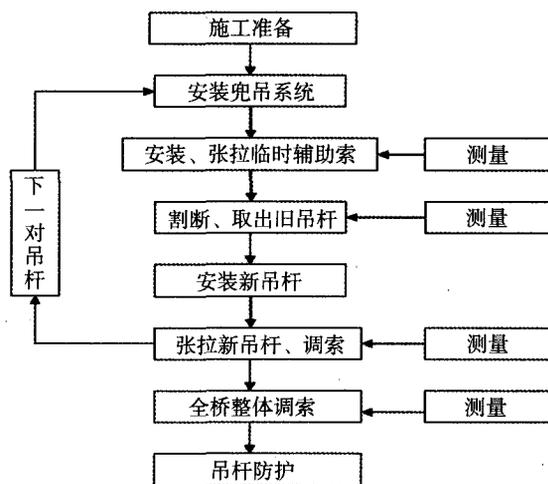


图4 石潭溪大桥吊杆更换工艺流程

(2) 搭设工作平台,分别安装拱上兜吊装置和梁端兜吊装置;兜吊的上、下吊点应保持在铅垂线上,以使临时索竖直受力。

(3) 张拉临时吊索

安装好兜吊系统后,安装并张拉临时辅助索,将横梁及桥面荷载传递到拱肋上,然后进行拆除旧吊杆的工作。在拆除吊杆的过程中,要时刻监测桥面的标高,使桥面标高在原标高值保持在 $\pm 5\text{mm}$ 之间。

(4) 旧吊杆的拆除

吊杆的拆除按对称的原则,从拱肋一侧到另一侧逐对拆除,每拆除一对旧吊杆,则相应的换上一对新吊杆,在拆除吊杆的过程中,应注意保持横梁两侧平衡,防止横梁产生倾斜;注意观测桥面标高变化,应在确认旧吊杆拉力由兜吊系统承担后,方可拆除旧吊杆。

(5) 新吊杆的安装

1) 根据吊杆上下锚点的距离计算出吊杆拉索实际所需的长度并截取索长。

2) 将拉索由横梁下方穿过横梁预埋管,安装好支撑筒及吊杆下端锚具,然后临时固定在兜吊系统上。

3) 将吊杆拉索上端穿出桥面,在现场进行上端热铸锚具的组装施工,对组装完成的锚头进行顶压试验。

4) 将钢拉杆组件穿入预埋管孔道,拱端装上钢拉杆螺母,待吊杆上端热铸施工完成后上提到钢拉杆组件处与钢拉杆组件连接,吊杆上端固定后旋紧吊杆下端螺母。 (下转第38页)

D类指有密集建筑群且房屋较高的城市市区。

本工程中对应A类情况取值，对于高度Z处的风振系数 β_z ，考虑脉动影响的情况下取保险值1.7，风载体型系数 μ_s 取1。

L_f —风荷载力臂，风荷载作用点高度约在预制件在侧倾后垂直高度的3/4H处。

通过以上公式计算结果显示，该工程预制件在陆地滑移运输过程中稳定性是安全的。

5 设备工作流程

当一件完整的预制件预制完成并存放在台座上，横移小车上的小车模块上安装有MGE滑板，通过液压绞车牵引承台横移小车在不锈钢板轨道上滑移至承台构件下方，正确对位后通过两台横移小车的竖向千斤顶顶缸将承台顶升，待竖向顶将承台顶升离开存放台座5cm时，用机械螺母锁紧并预留1cm间隙做运输过程调节，顶推装置启动，通过顶推装置的机械卡紧装置提供反力支点，顶推顶缸带动整辆小车向前推进并运输至纵移轨道的转换台座上。到达纵移转换台座时，横移小车就位后，各竖向顶同时缩缸将构件平稳的落在台座上，通过液压绞车的牵引重新将承台横移小车回归原位，至此，完成了一个构件的横移。纵移小车以同样的工作原理将构件纵移装船，工艺路线如图3所示。

(上接第29页)

(6) 张拉调索

- 1) 安装张拉装置进行张拉预紧。
- 2) 初张拉吊杆至兜吊系统不受力状态，放松兜吊系统。放张过程应注意上下游吊杆同时同步，放松兜吊系统后实测横梁标高。
- 3) 根据计算的调整标高值对吊杆再次张拉，将横梁调整到设计标高。
- 4) 全部吊杆更换完毕后，要求对吊杆进行一次全面的标高和索力的调整，调整原则是以标高控制为主，同时要求同号索上下游索力尽可能一致。

(7) 防护处理

吊杆更换完成后，对吊杆进行相应的防护处理，安装吊杆上下端保护罩、防水罩等防护附件。

5 结束语

早期拱桥吊杆在结构设计及吊索更换等方面存在一些局限性，其中预埋管内径偏小是一个比

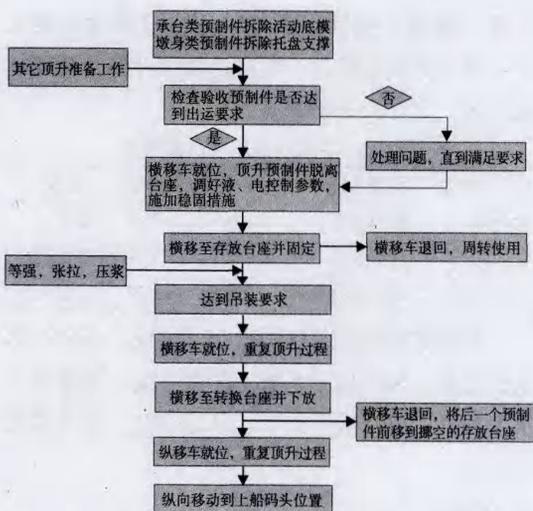


图3 预制件场内运输工艺流程图

6 结语

针对本工程预制件特征，该方案不失为一种滑移出运的有效方法。同时为以后重型、小截面、大质量构件移运提供了参考依据，不再局限于气囊出运构件的方法。

参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. 建筑结构荷载规范[S]. 人民交通出版社, 2006
- [2] 张相庭. 结构风压与风振计算[M]. 同济大学出版社, 1985
- [3] 张相庭. 工程抗风设计计算手册[M]. 中国建筑工业出版社, 1998
- [4] 陈英俊, 于希哲. 风荷载计算[M]. 中国铁道出版社, 1998
- [5] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 同济大学出版社, 2001

较常见的问题。现行新型吊杆的拉索与锚具一般都采用在厂内预制成整体，安装时要求配套的预埋管的内径要大一些，因此，对此类拱桥进行换索施工时，就出现对预埋管的调整问题。如何既不破坏原桥结构的完整性，又能方便吊杆更换施工，在对此类拱桥改造时确实是两难选择。石潭溪大桥吊杆更换工程所采用的吊杆结构及更换工艺，使更换吊杆施工达到既不破坏桥梁原有结构又能使新型拉索锚具得以实施应用的效果，为类似的桥梁换索提供了一个可行的参考方案。

参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准. JTG H11-2004 公路桥涵养护规范
- [2] 柳州欧维姆结构检测技术有限公司. 316国道闽清段石潭溪大桥吊杆专项检测与评估报告. 2011年9月
- [3] 福建省交通规划设计院. 石潭溪大桥维护验算报告. 2011年11月
- [4] 福建省交通规划设计院. 316国道闽清段石潭溪大桥维修工程施工设计图. 2011年11月