

凤凰河大桥施工过程控制

李教生¹ 王德²

1. 六安市重点工程建设管理处; 2. 武汉理工大学

摘要: 结合实际桥梁, 分析了部分斜拉桥施工控制的特点和难点, 对可能出现的问题进行了预判; 在进行材料容重、弹性模量等试验的基础上, 利用MIDAS/Civil软件建立该桥的计算模型, 根据实际的施工工序, 进行了施工全过程受力分析; 重点介绍了主梁挠度合桥塔偏移的计算情况, 给出了部分计算结果。设计了现场监测方案, 根据监测结果与理论计算情况的对比, 进行了计算参数的误差分析, 讨论了预应力管道摩擦损失的影响, 提出了误差修正方法; 结合实际情况, 提出了施工控制措施, 并应用于桥梁施工。通过施工控制, 使桥梁状态符合设计预期和规范要求, 取得了良好的控制效果。

关键词: 部分斜拉桥; 施工控制; 挠度; 塔顶偏移; 预应力损失

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.01.061

引言

斜拉桥是工程中应用较广泛的一种桥型^[1], 由于在实际施工过程中各种结构参数, 不可避免会与设计值存在差异, 加之施工荷载等因素的不确定性, 会导致施工产生结构内力及变位结果与设计预期存在偏差^[2]。为确保成桥后的结构内力、线型与设计预期相符合, 《公路斜拉桥设计规范》(JTG 3365-01-2020)要求, 斜拉桥施工应进行施工控制。普通的斜拉桥施工控制, 人们已做过较多的研究, 技术也比较成熟^[3, 5]。部分斜拉桥^[6]是一种较新型的斜拉桥, 主要受力构件为主梁, 斜拉索的作用相对较小, 工程中多采用矮塔、稀索, 这时常称为矮塔斜拉桥^[6-7], 但有时候塔也较高, 不都是矮塔斜

拉桥。相对于普通斜拉桥而言, 部分斜拉桥的施工控制研究还较少。本文结合安徽省六安市凤凰河大桥的施工, 对部分斜拉桥的施工过程控制进行研究, 探讨相应的控制措施, 为该桥的施工提供技术支持。

一、工程概况

凤凰河大桥是六安市佛子岭西路跨凤凰河的一座桥梁, 全长190m, 分为南北两幅, 是一座拱形桥塔部分斜拉桥。北幅桥跨布置为(47+86+57)m; 南幅桥跨布置为(57+86+47)m。本桥整体采用塔梁固结, 梁墩分离的连续体系。主梁单箱四室预应力混凝土变截面连续梁, 边跨及中跨跨中梁高为2.2m, 中跨墩顶梁高3.6m, 顶板标准段厚25cm, 底板标准段厚25cm, 为增强支点处抗剪能力, 在中支点附近将腹板加厚至90cm, 底板加厚至90cm; 端支点附近腹板加厚至80cm, 底板加厚至50cm。主梁按A类预应力混凝土构件设计, 在底板、腹板、顶板上分别布置纵向通长预应力钢束。桥塔高36m, 宽21.5m, 中间构造尺寸满足15.5m行车道的通行净空要求。桥塔截面纵桥向宽3m保持不变, 横向截面宽度通过椭圆长轴半径的变化从2.5m变化到5m。斜拉索采用双索面布置, 纵向桥设置5对斜拉索, 主跨侧索距12m, 边跨侧索距6.5m, 塔上竖向间距为2.0m。斜拉桥南幅桥型布置见图1所示, 北幅桥与其反对称, 以下仅介绍南幅桥施工控制情况。

施工过程控制主要对上部结构进行。该桥上部结构的施工步骤是: 1) 在桥墩上放置支座; 2) 在主梁部位搭设满堂支架, 浇筑主梁砼; 3) 分别张拉底板、腹板、顶板上的预应力筋; 4) 在桥塔部位搭设满堂支架, 浇筑桥塔砼; 5) 张拉斜拉索; 6) 拆除主梁和桥塔

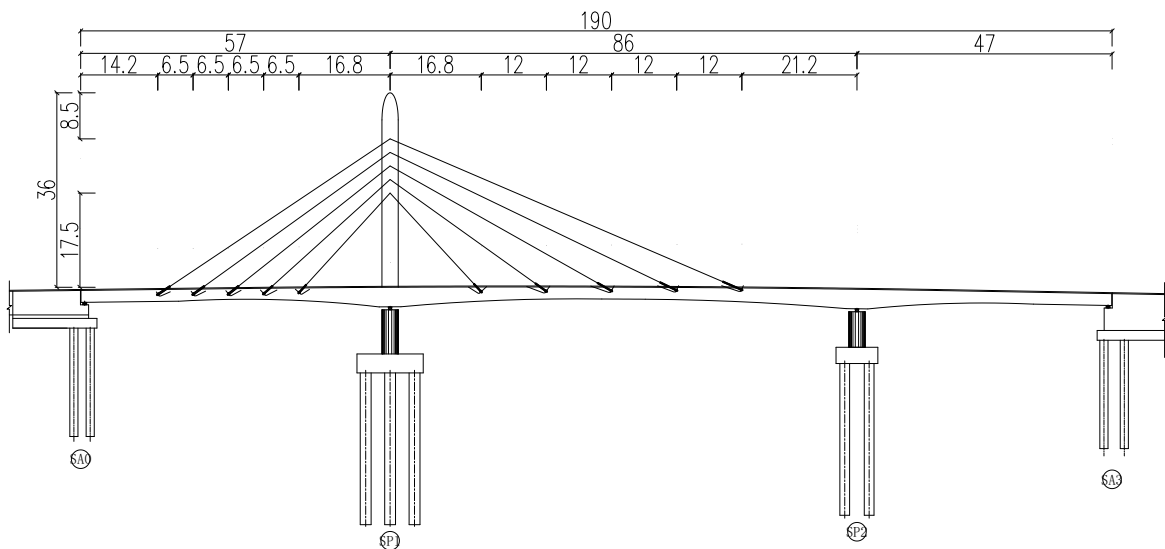


图1 南幅桥型布置图

的施工支架；7) 进行桥面系施工；8) 进行斜拉索二次张拉。

就施工过程控制而言，该桥有以下特点：

(1) 主梁采用支架施工，一次浇筑成型。一般斜拉桥采用分节段悬臂施工，通过对前一节段的监测和分析，可以预判结构尺寸、砼容重、预应力、索力等引起的线形和应力偏差，通过对计算模型的修改进行实时理论分析，根据分析结果调整控制参数，有一个误差逐步修正和参数调整过程。而该桥主梁一次浇筑成型，各种偏差难以通过监测判断出来。若控制不当，主梁有可能出现较大的下挠，砼开裂。

(2) 桥塔固结在主梁上，与桥墩分离。一般斜拉桥的桥塔与桥墩固结，不受主梁线形变化的影响。而该桥桥塔固结在主梁上，主梁产生下挠时会引起桥塔的偏转，加之桥塔较高，若控制不当，桥塔有可能出现较大的纵向偏移。

因此，该桥虽然跨度不大，但施工控制有较大难度。要确保施工质量得到有效控制，应重点做好以下工作：

(1) 进行精细的理论计算。对主梁自重、预应力、索力、桥面系重量作用下的结构受力分别进行计算，重点是计算主梁挠度、应力和桥塔纵向偏移。这些计算，除力学方法外，在材料参数、预应力损失等取值方面，还必须有较丰富的经验。

(2) 尽可能多地获取实测数据。通过监测来判断计算误差，是很重要的。一次浇筑成型，不能像分节段悬臂施工那样获取很多的数据，但通过监测和试验，应尽可能多地获取实测数据，如斜拉索特性、主梁截面尺寸、混凝土容重、弹性模量、预应力管道摩擦损失、温度等。

(3) 研究主梁和桥塔线形的控制措施。虽然通过计算、监测可以防止大的事故的发生，但主梁和桥塔线形仍有可能偏离设计值，出现较大的主梁下挠或桥塔偏移，应研究和制定相应的应对措施。

二、理论计算

(一) 计算模型

采用有限元分析软件Midas/Civil建立该桥的计算模型，全桥共划分为91个节点，79个单元。其中塔、梁采用梁单元模拟，拉索采用只受拉桁架单元模拟。桥塔端和梁端锚点按设计坐标建立，分别与桥塔和主梁在锚点对应的节点处刚性连接。施工过程共划分为17个施工阶段，其中主桥的施工内容主要包括主梁现浇、预应力筋的安装与张拉、主塔现浇、斜拉索的安装与张拉、桥面铺装、二次调索。桥梁有限元模型如图2所示。

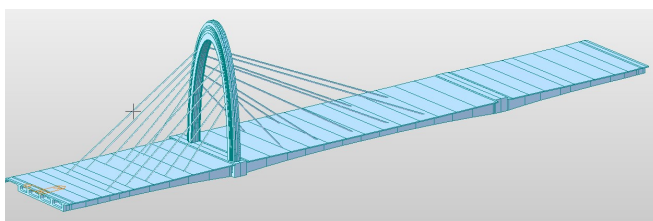


图2 南幅桥梁有限元模型

(二) 材料参数取值

预应力混凝土桥墩墩身、桥台采用C40混凝土，桩基采用水下C30混凝土，主梁及桥塔均采用C50混凝土。经实测，C50混凝土7天弹性模量值为33.5GPa，容重23.6kN/m³。

预应力钢绞线采用高强度低松弛(Ⅱ级松弛)七股型钢绞线，其极限抗拉强度 $f_{pk}=1860\text{MPa}$ ，预应力钢束与波纹管管道的摩擦阻系数规范值 $\mu=0.17$ ，预应力管道的偏差系数 $k=0.00015(1/\text{m})$ ，弹性模量 $E=1.95\times 10^5\text{MPa}$ 。斜拉索也采用钢绞线。

构件尺寸按设计图取值，主梁和桥塔的砼重量由Midas/Civil自动计算，钢筋、钢绞线、锚具的重量按设计图分别计算得出，作为荷载加在结构上。

三、施工过程受力计算

考虑梁体的自重、预应力荷载、斜拉索张拉索力、二期恒载、温度等因素的作用，采用计算各施工阶段的主梁挠度、控制截面结构应力和塔顶偏移。经计算，主梁和桥塔均为压应力，量值在6~15MPa之间，应力安全储备较大，不会开裂，不作为控制重点，而主梁挠度、塔顶偏移有可能出现较大的量值。受篇幅所限，以下仅列出与主梁主跨挠度和桥塔顶端偏移相关的部分计算结果。

(1) 在主梁自重及二期恒载作用下，主跨挠度见图3所示。由图3可知：在桥墩位置到主跨跨中位置范围内，桥梁向下的挠度不断增大，在跨中位置达到最大值29.2cm。塔顶偏移20.5cm，偏向主跨。

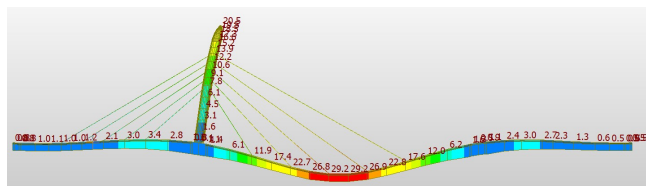


图3 自重及二期恒载作用下主桥中跨挠度

(2) 在施加主梁预应力后，在桥墩位置到主跨跨中位置范围内，桥梁上拱值不断增大，在跨中位置达到最大值22.7cm。塔顶偏移18.1cm，偏向边跨。

(3) 在施加斜拉索张拉索力后，主梁上拱值在跨中位置达到最大值2.6cm。塔顶偏移2.4cm，偏向边跨。

在主梁自重及二期恒载、预应力、索力共同作用下，主跨向下挠度3.9cm，桥塔顶端向主跨偏移0cm。由此可见，主梁挠度和桥塔偏移均不大，但是，前提条件是计算模型正确，参数取值适当，否则，可能出现与理论计算值较大的偏差。因此，应进行必要的监测和试验，尽可能多地获取各参数的准确值。其中材料参数，如钢绞线、混凝土容重、弹性模量等通过试验获得，准确度较高。监控经验表明，主梁截面尺寸、预应力损失，通常与设计值有一定偏差，必须通过监测来进行参数调整。为此，在施工中布置测点，对主梁应力、挠度、桥塔塔顶偏移进行了监测。

四、施工监测分析

(一) 主梁应力监测

主梁的截面应力是对主梁受力的直接反映，为了准

确了解各工况主梁的应力状况,准确判断梁体的受力状态,根据斜拉桥施工过程中的受力特点,主梁共设置10个控制截面,应力监测断面位置见图4所示。

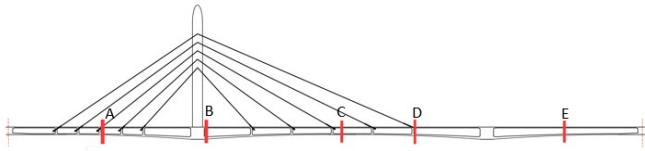


图4 应力测试断面布置图

根据各截面测点布置情况,每个截面设置六个应变计,主梁应变计共计60个。测点位置见图5所示。

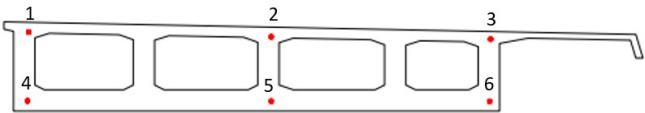


图5 应变测点横向布置图

(二) 主梁挠度监测

根据本桥施工特点,每一浇筑节段均为测试断面,施工时以支座中心线为起点,每5m设置一个测量截面,每个截面设立2个测点,并在各工况完成后对主梁线形进行监测。

(三) 主塔变形监测

在主塔塔顶分设2个永久变位观测点,布置GRZ4棱镜,进行塔顶偏移监测。

(四) 监测结果分析

在施工各阶段,对主梁应力、挠度、桥塔塔顶偏移均进行了监测。结果发现,大部分施工工况下,理论计算值与实测值相差很小,但有以下两个工况差异较大:

(1) 主梁腹板预应力张拉时,梁中应力增量明显偏小,监测点应力平均偏小13%。检查张拉工艺后分析,产生偏差的原因是腹板预应力筋为曲线布置,管道摩擦损失偏大,摩阻系数规范值 $\mu=0.17$ 偏小,经反复测试后,将腹板预应力筋调整为 $\mu=0.192$,重新进行理论计算。

(2) 主梁支架拆除时,梁中应力和跨中挠度增量明显偏大,表明结构尺寸比设计值要大,模板安装有一定偏差或出现了模板变形。

全桥建成,进行二次索力调整前,南幅桥主梁主跨跨中挠度实测值累计为8.3cm,初始理论计算值为3.9cm。桥塔塔顶向主跨偏移实测5.1cm,初始理论计算值为0cm。实测值均比最初的理论计算值要大。

五、控制措施

施工过程中,出现了主梁主跨中挠度偏大、桥塔塔顶纵向偏移较大的情况,有必要采取措施来应对。经分析,施工中可采用的措施如下:

(1) 截面尺寸应尽量与设计一致。模板应准确定位,安装牢固;模板质量要好,确保浇筑时不发生变形。

(2) 适当增大预应力。曲线预应力筋管道摩擦损

失比规范值要大,设计时可按摩擦系数增大10~15%考虑。另外,布置一定数量的备用预应力筋,一旦监测发现预应力偏小,可通过张拉备用应力筋来弥补。

(3) 调整斜拉索成桥索力。一般地,斜拉索索力安全储备较大,可通过计算,适当增大或减小索力来改变桥梁的线形和应力状态,但调整值不宜过大,以控制在10%以内为好。

(4) 结合初始计算情况和监控经验,设置主梁的预拱、桥塔的预偏。

该桥根据实际情况,采取了后面的2条措施:一是对主梁主跨挠度,初始计算总挠度为3.9cm,根据监控经验,在跨中设置了7cm的预拱值,与施工后的实测值8.2cm接近。二是对桥塔偏移,施工塔顶向主跨偏移5.1cm,在以后的车辆和砼徐变作用下,偏移还会增大,有必要减小偏移值,为此,经与设计方商量,采用调整斜拉索成桥索力的办法,按最大调整幅度10%进行计算和二次调索,使塔顶偏移回撤2.4cm。

最后,桥梁的主梁线形与设计基本相同,误差小于2cm,塔顶偏移2.7cm,索力、应力安全储备较大,桥梁状态符合设计预期和规范要求。

六、结语

凤凰河大桥为部分斜拉桥,主梁采用支架施工,一次成形,桥塔较高,且仅与主梁固结,与桥墩分离,与一般斜拉桥施工控制有很大不同,如控制不当,有可能出现主梁下挠过大,桥塔因主梁下挠而发生较大的偏转,主梁出现拉应力并导致砼开裂等事故。本工程进行施工控制时,对桥梁的特点和监控难点进行了分析,对可能出现的问题进行了预判。在进行材料容重、弹性模量等试验的基础上,建立有限元计算模型,通过现场监测,对预应力管道摩擦损失进行了误差分析和修正。对因理论计算模型与实际结构参数的差异而引起的问题,提出了解决措施。该桥的施工控制,使桥梁状态符合设计预期和规范要求,控制方法对类似桥梁施工具有借鉴作用。

参考文献

[1] 杨军宏,沈伟,张亚海.大跨径斜拉桥悬臂施工线型控制技术[J].公路交通科技,2018,35(S1):115-119.

[2] 孙国樑.国外斜拉桥施工仿真技术[J].公路交通科技,2002(05):94-98.

[3] 杨军宏,沈伟,张亚海.大跨径斜拉桥悬臂施工线型控制技术[J].公路交通科技,2018,35(S1):115-119.

[4] 余毅,彭旭民,唐家睿.平塘特大桥施工监控关键技术[J].公路,2019,64(09):131-135.

[5] 拓守俭,文杰.杨泗港快速通道青菱段跨铁路斜拉桥施工控制[J].世界桥梁,2021,49(03):58-63.

[6] 汪学著,孙凤佳.宣城市宛溪河矮塔斜拉桥设计[J].世界桥梁,2012,40(01):11-13+27.

[7] 王凯.高速铁路单索面矮塔斜拉桥的静动力性能[J].铁道建筑,2022,62(05):82-86.