

# 拉萨市纳金大桥桥塔节段足尺模型试验研究

李文献<sup>1</sup> 徐栋<sup>2</sup> 肖军<sup>3</sup> 孙远<sup>2</sup> 宋强<sup>1</sup> 覃巍巍<sup>1</sup>

(1 柳州欧维姆建筑机械有限公司 广西柳州 545005 2 同济大学 上海 200080

3 江苏省规划设计院 江苏南京 210005)

**摘要:**拉萨市纳金大桥主桥为跨径(70+117+117+70)m的三塔矮塔斜拉桥。为对该桥小半径(分丝管半径为2.5m)大索力(斜拉索在索鞍段的最大径向均布荷载为2372kN/m)鞍座所在桥塔节段的性能进行研究,采用ANSYS建立1/4桥塔节段有限元模型进行应力分析并制作该部分桥塔足尺模型进行试验,测试结构应力、斜拉索与索鞍之间的摩阻力、锚固装置内的环氧砂浆对斜拉索的握裹力。研究表明:该桥桥塔采用小半径分丝管是安全可靠的,同时索鞍的摩擦阻力和抗滑力均满足使用要求。通过对有限元分析和试验的总结,提出严格控制转向鞍的加工及定位精度、保证混凝土浇注的密实性、主梁施工时保证两侧对称同步施工等建议。

**关键词:**矮塔斜拉桥 鞍座 分丝管 模型试验 有限元法

## 1 概述

拉萨市纳金大桥是规划的“拉萨市第一大桥”,位于拉萨市的东郊,南起318国道(川藏线),北至纳金路。该桥主桥为跨径(70+117+117+70)m的三塔矮塔斜拉桥,桥面宽34m,主桥立面布置如图1所示。桥梁按城市主干道I级进行设计,设计速度为60km/h,设计洪水频率为1/300,设计汽车荷载标准为公路I级,桥梁抗震设防措施等级为9级<sup>[1][2][3]</sup>。

主梁箱梁主体结构采用C50混凝土。采用单箱五室断面,箱梁高度从跨中无索区2.5m至距主墩中心2m处按圆弧线变化为4.0m。主桥横向单塔,布置在中分带,索塔顺桥向采用变截面,塔形由两道圆弧相切形成,横桥向为2.5m等宽截面。每个索塔共锚固7对拉索。斜拉索采用OVM250AT矮塔斜拉桥拉索体系(OVM250AT-43, OVM250AT-37两种型号),按扇形布置,

索体从塔上鞍座中连续穿过,两端锚固在梁体内,在塔上的间距为1.0m,在梁上的间距为5m。斜拉索采用 $\phi 15.2$ 环氧树脂涂层预应力钢绞线(单丝喷涂),具有多层防护结构。钢绞线力学性能符合《预应力混凝土用钢绞线》GB/T5224-2003标准, $f_{pk}=1860\text{MPa}$ 。每根斜拉索对应1个鞍座,鞍座采用分丝管形式,考虑换索的需要、克服运营阶段索的不平衡拉力,在位于塔两侧拉索出口处设置锚固装置,所有索鞍半径均为2.5m。在拉索和梁段、塔端的连接处采用了全防水结构装置。施工时,斜拉索在梁内对称一次性张拉到位。

由于桥梁因景观的需要,鞍座采用小半径( $R=2.5\text{m}$ )分丝管,且拉索在索鞍段的径向均布荷载较大(最大径向均布荷载为2372kN/m,出现在A7号斜拉索索鞍处),这在国内尚属首次。为对该桥小半径大索力鞍座所在桥塔节段的性能

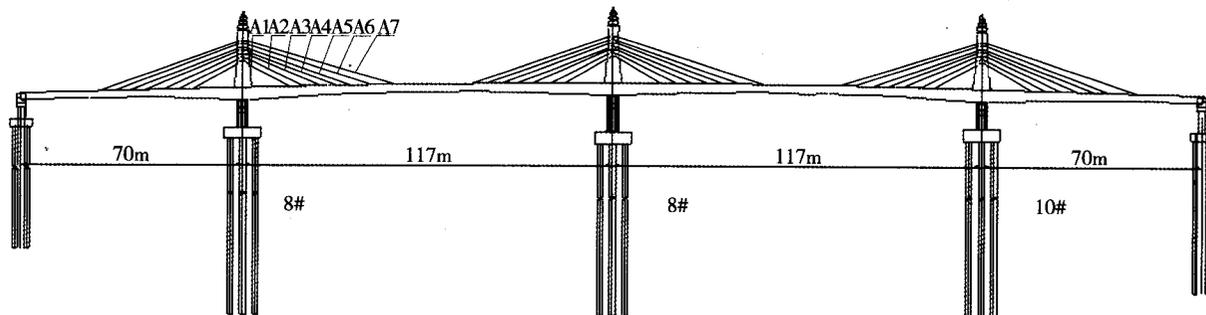


图1 纳金大桥立面布置图

进行研究, 本文对该部分进行有限元分析及桥塔节段足尺模型试验, 并通过对有限元分析和试验的总结, 提出相应的建议。

## 2 试验模型的设计与制作

选取索塔A7号斜拉索对应节段(斜拉索索力最大节段)为试验研究对象, 采用1:1比例设计试验模型。模型取主塔节段高2m, 横截面尺寸与实桥一致(横向宽2.5m、纵向长2.326m)。

由于实桥斜拉索锚固在主梁上, 而试验模型仅截取部分主塔, 因此需设计专门反力台座, 将试验模型支撑在反力台座上。通过理论计算拟定台座的形式和尺寸, 再通过有限元分析进行校核, 最终确定台座的具体形式和尺寸, 即采用倒梯形梁, 梁高3.67m, 横向宽3m, 纵向长10.6m。

试验模型以几何相似、物理相似和边界相似为基础, 采用与实桥相同的材料进行加工制作。试验模型结构见图2。

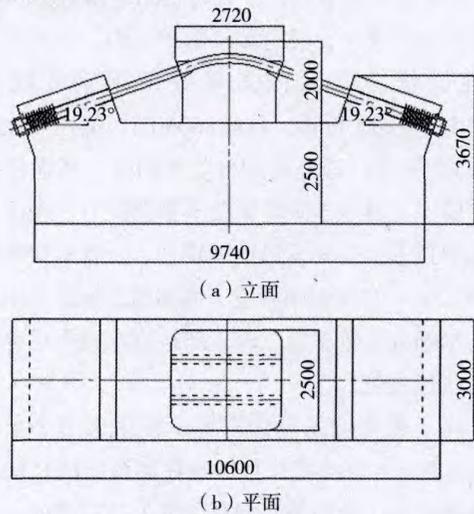


图2 试验模型结构

## 3 有限元分析

### 3.1 有限元模型的建立

根据对称性, 采用ANSYS建立1/4桥塔节段有限元模型。模型中分丝管、分丝管焊缝、混凝土均采用solid95单元模拟<sup>[4]</sup>。分丝管、分丝管焊缝以及附近混凝土均采用六面体进行网格划分, 索鞍外层混凝土采用六面体和四面体相结合的形式进行网格划分, 打开“金字塔”过渡开关, 以使六面体和四面体单元连接时保持连续。分丝管、分丝管焊缝按照Q235钢的材料参数进行取

值, 混凝土按照C50混凝土的材料参数进行取值, 斜拉索索力取为设计张拉力的1.2倍。1/4桥塔节段有限元模型见图3。

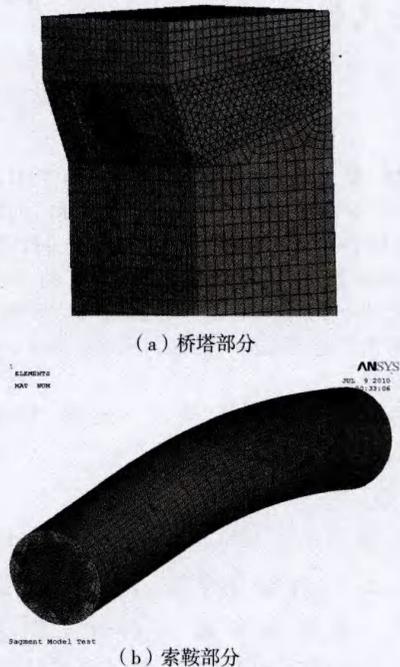


图3 1/4桥塔节段有限元模型

### 3.2 边界条件与加载模式

由于有限元模型是1/4桥塔节段模型, 因此在两个对称面上采用对称约束。此外, 桥塔节段底面考虑两种边界条件: (1) 底面部分固结。对靠近纵向对称面10cm范围内的底面节点进行固结约束, 其余底面节点只进行竖向约束。(2) 底面全固结。对全部底面节点均进行固结约束。

斜拉索索力(1.2P)加载时可看作沿分丝管圆弧施加径向荷载, 认为分丝管沿弧长方向均布荷载 $q$ (根据积分计算, 在数值上 $q=1.2 \times P/R$ ,  $R$ 表示分丝管圆弧半径), 再将均布荷载等效成节点力作用到每个分丝管最底面。<sup>[5][6]</sup>分丝管加载形式见图4。

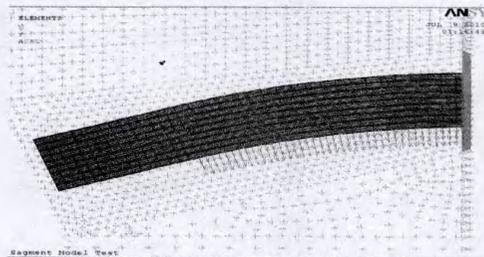


图4 分丝管加载形式



由图5、图6可知:

(1) 斜拉索索力为1.2倍设计张拉力时, 两种边界条件下分丝管所承受的Von Mises应力均不超过60MPa, 因此作为钢材质的分丝管本身在使用过程中足够安全。

(2) 两种边界条件下, 包围分丝管的混凝土最大拉应力均主要集中在混凝土与分丝管接触的尖角处, 属于应力集中; 靠近分丝管的上半部分混凝土均产生较大拉应力, 通过纵剖面竖向应力云图可知该处以竖向拉应力为主, 大小为1.57~3.24MPa, 该区域附近的局部混凝土可能会拉裂, 实际中即与分丝管脱离; 靠近分丝管下半部分混凝土均产生较小拉应力或者受压, 拉应力以横向应力为主, 大小为0.72~1.16MPa, 压应力以竖向应力为主, 大小为6.75~8.41MPa, 均在C50混凝土抗拉和抗压强度安全范围内。因此, 分丝管附近混凝土的受力情况均不会影响到结构安全。

(3) 两种边界条件下, 对于分丝管下方混凝土, 均为离分丝管越远则竖向压应力越小, 横向压应力越大, 但绝大部分压应力大小在0.16~3.24MPa之间, 均在C50混凝土强度安全范围以内。

(4) 两种边界条件下结构各项应力基本相同, 因此, 在实际模型试验中, 为了方便施工, 桥塔节段模型竖向钢筋可伸入台座, 采用全固结的约束方式。

## 4 模型试验

### 4.1 桥塔节段应力测试试验

采用3台型号为3816的静态电阻应变仪进行应变测量, 对每个工况下的所有测点读数进行2次数据采集, 确认测点完好无损。测试主要内容有索塔混凝土内部及外表面应力、鞍座分丝管应力。

#### 4.1.1 测点布置

经有限元分析, 鞍座索孔内管圆弧各部位法向压力基本相等, 由此引起索孔下方应力分布顺管向基本相同, 其下方混凝土除受到竖向压应力外, 索孔圆管下方混凝土横向还受到劈裂拉应力。根据上述受力特点, 在桥塔混凝土内部、外表面以及沿分丝管轴向分别布置5个相同的测试

截面。试验模型共布置钢筋应变计横向36个、竖向60个, 表面应变片竖、横向各20个, 分丝管单向应变片60个<sup>[7][8][9]</sup>。应力测试截面位置见图7。

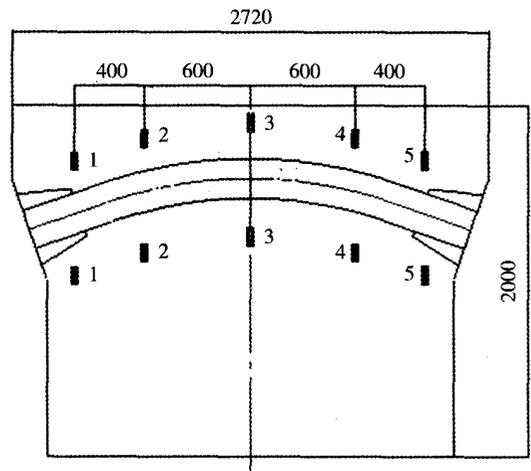


图7 应力测试截面位置

#### 4.1.2 加载方案

由于该桥斜拉索单根最大设计张拉力为593t, 考虑试验设计安全系数, 按照1.2倍设计张拉力即约710t进行加载。加载分5级(分别为120t、175t、350t、593t、710t), A、B两端同步进行, 观察分析应变读数是否有突变和异常变化, 以了解内部混凝土裂缝何时出现, 并仔细观察拉索孔口及周边裂缝的出现及扩展情况。试验模型加载示意图8。正式试验前, 对斜拉索进行预张拉, 张拉吨位为最大设计张拉力的20%, 即120t。

#### 4.1.3 应力数据分析

对各级张拉力下各测点实测应变值进行分析, 分析结果表明: (1) 张拉力增量与应变变化基本成线性关系, 说明结构在设计张拉力下各点处于线弹性工作范围。(2) 在1.2倍的设计张拉力下, 桥塔混凝土表面没有出现裂纹, 最大竖向压应力为4.8MPa, 最大横向劈裂应力为1.5MPa, 分别小于混凝土的极限抗压强度和极限抗拉强度, 满足设计要求, 说明主塔受力安全可靠。(3) 在设计张拉力和1.2倍设计张拉力下, 分丝管的实测纵向受力总和在-6.26MPa和16.79MPa之间, 远小于Q235钢材的屈服应力, 同时通过内窥镜进一步的验证分丝管索鞍无任何损伤及

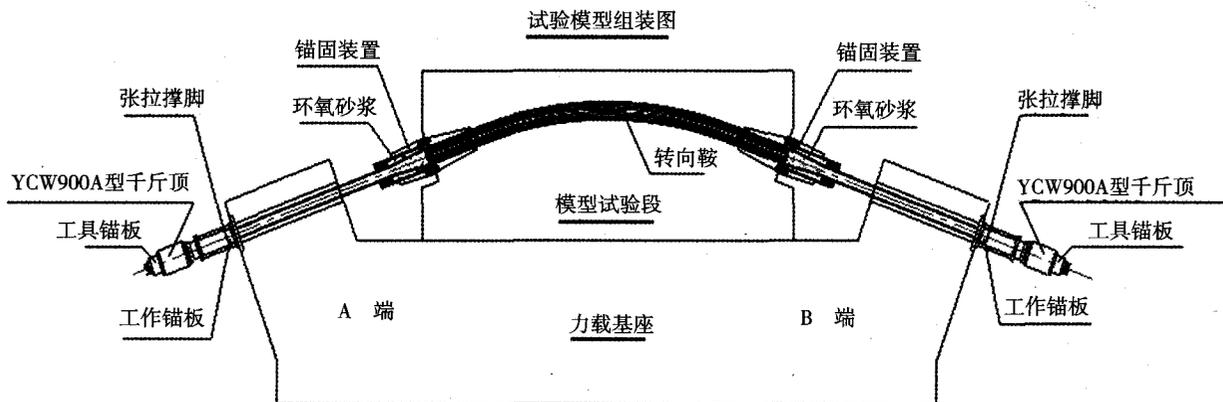


图8 试验模型加载示意

变形,符合设计要求。

将模型应力理论值及实测值进行对比,结果表明:(1)桥塔内部及表面混凝土横、竖向应力的理论值和实测值均比较接近,且全部受压,在张拉力增加过程中均呈线性变化;该部分混凝土横向辟裂应力增量和应力总和的理论值和实测值均非常小,均在C50混凝土抗拉、抗压强度安全范围内。(2)理论与实测结果均表明分丝管底部小区域内应力变化比较剧烈,但此处拉应力不足以对钢管造成破坏。加载完毕后,在分丝管内抽出底部最不利的几根钢绞线,采用内窥镜在管内探视,未发现分丝管和钢绞线受损。

#### 4.2 索鞍摩擦阻试验

索鞍摩擦阻试验是一个静力荷载试验,测试内容是根据两端拉索索力差,得到斜拉索与分丝管索鞍之间的摩擦阻力值。为设计和施工过程中控制斜拉索两侧不平衡力提供依据<sup>[10]</sup>。

##### 4.2.1 试验过程

测试前利用已做好的试验模型,在试验模型A、B两端分别放置一台千斤顶及油泵,调试完毕,分别安装1个百分表在两端锚固筒上,百分表指针接触到锚固筒上裸露的钢绞线上。准备好后,对斜拉索A、B两端同时进行张拉,张拉到设计张拉力。然后,B端索力保持不变,增加A端的张拉力,按每级0.5MPa油表读数进行逐级加载,观测B端的百分表读数变化情况。当百分表读数发生变化时,A端停止加载。

##### 4.2.1 试验结果

为了得到较准确的试验数据,共进行两次加载试验,第一次A端加载到37.35MPa,B端百分表读数开始变化;第二次A端加载到37.30MPa,B端百分表读数开始变化。根据A端千斤顶标定后的一元一次线性回归方程和油表读数的变化值可以计算出钢绞线和分丝管的摩擦阻力值。经计算,斜拉索与索鞍之间的摩擦阻力为33.5t,满足设计要求,施工时要采取适当的措施控制好梁的不平衡力。

#### 4.3 锚固装置抗滑移试验

检测锚固装置内的环氧砂浆对拉索的握裹力的大小是否满足100t抗滑力(设计抗滑力为30t,安全系数为3.3)的要求。

##### 4.3.1 试验过程

在试验台座A、B两端分别放置一台千斤顶及油泵。对斜拉索A、B两端同时进行张拉,张拉到设计张拉力将锚具锚固。在鞍座两侧的抗滑锚固筒内灌注环氧砂浆,灌注后养护7~10天,保证达到标准强度。分别在两端锚固装置尾端安装百分表,用以测量钢绞线在锚固装置区域内的位移情况<sup>[11][12]</sup>。

为测试锚固装置内的环氧砂浆对拉索握裹力的大小,模拟不平衡力的工况,即在设计张拉力的基础上增加斜拉索一端的张拉力,另一端保持不变。先对斜拉索A端进行加载(按照10t、30t、40t、60t、70t、100t逐级加载),B端保持不变,用百分表监测两侧钢绞线位移,并记录每级百分表的数据,加载结束将A端千斤顶卸载到设计张

拉力,观察B端百分表是否复位。然后,A、B端互换,加载方法同上。

#### 4.3.2 试验结果

为得到较可靠的试验结果,加载过程共进行了三次,斜拉索一端总张拉力与钢绞线位移关系见图9。

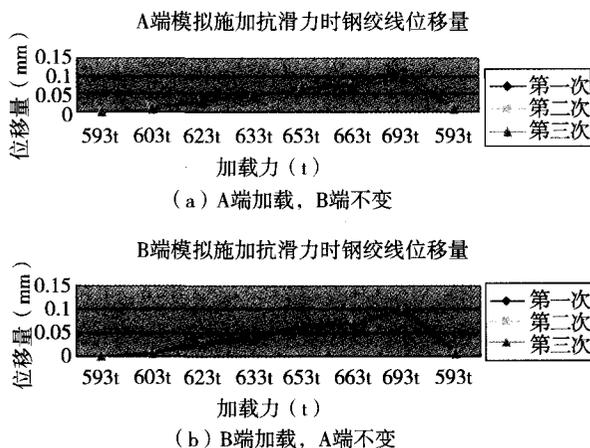


图9 斜拉索一端总张拉力与钢绞线位移关系

由图9可知,在A、B两端分别逐级加载不平衡力时,钢绞线产生的位移成较为均匀的线性发展趋势,且位移量非常小。卸载到设计张拉力593t时,百分表回零较好,未出现抗滑力失效的现象。充分说明锚固装置内环氧砂浆对钢绞线的握裹作用是优异的,锚固装置完全能达到抗滑移力100t的设计要求。

## 5 结论与建议

本文通过对拉萨市纳金大桥主桥小半径大索力鞍座所在桥塔节段进行有限元分析及足尺模型试验得到以下结论:

(1) 单根斜拉索在设计张拉力下桥塔节段各点处于线弹性工作范围;在1.2倍设计张拉力下,桥塔节段混凝土表面没有出现裂纹,桥塔受力安全可靠;在设计张拉力和1.2倍设计张拉力下,分丝管结构安全。

(2) 摩阻试验测得索鞍摩阻力值为33.5t,满足设计要求。

(3) 抗滑试验结果表明锚固装置内环氧砂浆对钢绞线的握裹作用是优异的,当桥塔的一侧拉索不平衡力作用相当于设计抗滑力(30t)的3倍时,仍可保持其对钢绞线的握裹作用,未出现

抗滑移失效的现象,说明锚固装置完全能达到抗滑移力100t的要求。

通过对有限元分析和试验的总结,提出相应的建议:

(1) 严格控制转向鞍的加工精度,并保证施工中转向鞍的精确定位;主塔钢筋较密,应保证施工时混凝土浇注的密实性;在鞍座以内部分钢绞线要保证PE管完好,且PE管外严禁油污污染;

(2) 在进入主梁施工时,一定要保证两侧对称同步施工,尤其要控制施工临时荷载,实桥钢绞线比模型钢绞线要长得多,当钢绞线穿索困难时,严禁在其上面涂抹黄油等可能降低拉索与分丝管摩阻的润滑物。抗滑锚内钢绞线在剥去PE管后,一定要将表面油污清洗干净。

(3) 对于预应力混凝土部分斜拉桥运营阶段鞍座区抗滑能力以及多个鞍座竖向叠加时应力叠加变化等相关问题,建议做更进一步的深入研究和分析。

#### 参考文献

- [1] JTG/TD65-01-2007,公路斜拉桥设计细则[S].
- [2] JTG D62-2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [3] JTJ041-2000,公路桥涵施工技术规范[S].
- [4] 陈小强,徐晓和,周荣贵等.部分斜拉桥鞍座锚固区局部应力分析[J].山西建筑,2009,35(24):319-320
- [5] 朱军.矮塔斜拉桥索鞍受力分析[J].桥隧工程,2006,4(181):44-46
- [6] 张海文,李亚东.矮塔斜拉桥索鞍混凝土局部应力分析[J].铁道标准设计,2009,(1):42-44
- [7] 拉萨市纳金大桥锚索区节段足尺模型试验和塔顶索鞍抗滑试验研究报告[R].同济大学,2011.2
- [8] 官润荣,张俊平,刘爱荣,周明元.部分斜拉桥主塔鞍座节段模型试验研究[J].广州大学学报(自然科学版),2005,4(5):449-453
- [9] 朱廷,王炎,郝超.曹娥江大桥桥塔鞍座锚固区试验研究[J].山西建筑,2008,34(18):310-311
- [10] 广州沙湾特大桥斜拉索鞍座处主塔节段模型试验及斜拉索塔顶抗滑锚试验研究报告[R].中铁大桥局集团武汉桥梁科学研究院有限公司2007.5
- [11] 上虞市三环曹娥江大桥桥塔端拉索抗滑移研究报告[R].广西工学院土木工程检测中心2004.11
- [12] 中山市岐江大桥主塔鞍座处节段模型试验研究报告[R].广州大学路顺道桥工程检测中心2004.5