

# 三官汉江矮塔斜拉桥索塔节段模型试验研究

邱敏<sup>1</sup> 高宁妥<sup>1</sup> 覃巍巍<sup>1</sup> 宋强<sup>1</sup> 李文献<sup>1</sup> 胡隽<sup>3</sup> 邓文琴<sup>3</sup> 谢波<sup>2</sup>

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006 2 柳州欧维姆工程有限公司 广西柳州 545005

3 华中科技大学 武汉 430074)

**摘要:**通过有限元分析与索塔模型试验相结合的方法,对武汉市三官汉江公路矮塔斜拉桥索的塔锚固区进行受力分析及验证索塔锚固区带单侧双向抗滑装置的静载抗滑性能研究,通过试验模拟实桥运营阶段的单根钢绞线换索过程,为设计和施工提供技术支持。试验结果表明,该桥索塔锚固区结构受力安全、索塔锚固区抗滑构造及单根钢绞线换索工艺满足设计和规范要求。

**关键词:**索塔锚固区受力 单侧双向抗滑装置 单根钢绞线换索

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2014.05.003

## 1 引言

矮塔斜拉桥是由法国Mathivat设计师提出的一种桥梁结构形式,是在斜拉桥基础上发展起来的一种新型桥梁结构形式,就其结构而言,矮塔斜拉桥介于连续梁与斜拉桥之间的一种桥梁结构。其特点由主塔索鞍锚固区配筋密集、管道集中,且由斜拉索传递垂直分力较大,应力分布及其传递较复杂。目前比较成熟的索鞍形式为分丝管构造,分丝管构造由多根平行的圆钢管并排组成,拉索中的每一根钢绞线通过索鞍中唯一对应的圆钢管,钢绞线之间不存在相互挤压问题,施工便利。整个索鞍起到分散、均匀传递载荷的作用,索鞍下部混凝土的应力分布相对均匀如图1所示<sup>[1]</sup>。

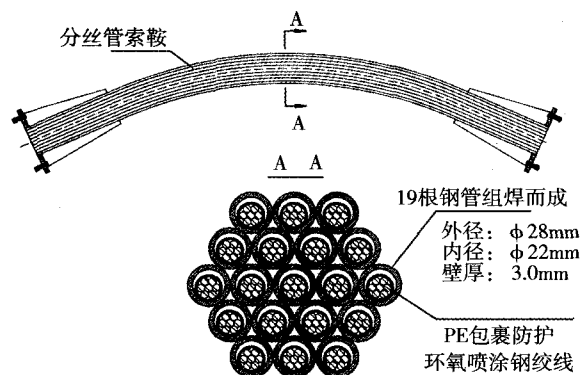


图1 索鞍构造图

本研究以武汉三官汉江公路大桥为对象,利用有限元分析该桥索塔锚固区进行受力模拟分析,对分丝管索鞍配套的单侧双向抗滑装置进行静载抗滑性能研究,通过试验模拟实桥运营阶段

的单根钢绞线换索过程,为设计和施工提供技术支持。

## 2 武汉三官汉江大桥工程概况

武汉三官汉江公路大桥是列入武汉城市圈“两型”社会建设综合配套改革试验区综合交通规划的项目,大桥桥址位于武汉市外环线和三环线之间,上距蔡甸桥约4.2km,下距三环线长丰桥约8km,北岸为武汉市东西湖区胡家台,南岸为武汉市蔡甸区三官。

该桥主跨为190m的双塔单索面预应力混凝土矮塔斜拉桥,如图2所示。项目建设总里程7.024498km,主桥全长430m,全桥跨度组合为21×30m等截面砼连续小箱梁+3×60m连续梁+(120+190+120)m矮塔斜拉桥-刚构组合体系+3×60m连续梁+12×30m等截面砼连续小箱梁。全线采用双向六车道一级公路标准建设,设计速度为80km/h。

武汉三官汉江公路大桥索塔采用独柱形索塔,布置在中央分隔带上,并与主梁固结。索塔有索区设有索鞍,以便斜拉索贯穿。索鞍采用分丝管索鞍技术,该索鞍形式斜拉索与分丝管内壁接触,将拉索力传递给分丝管,分丝管再将力传递给桥塔。拉索力又分为径向压力和纵向不平衡力两种分力,径向力通过分丝管传递给索鞍下方桥塔的混凝土,纵向不平衡力则由拉索与分丝管之间的摩擦力平衡,如摩擦力不足则由索鞍配套的单侧双向抗滑锚固装置来承受。

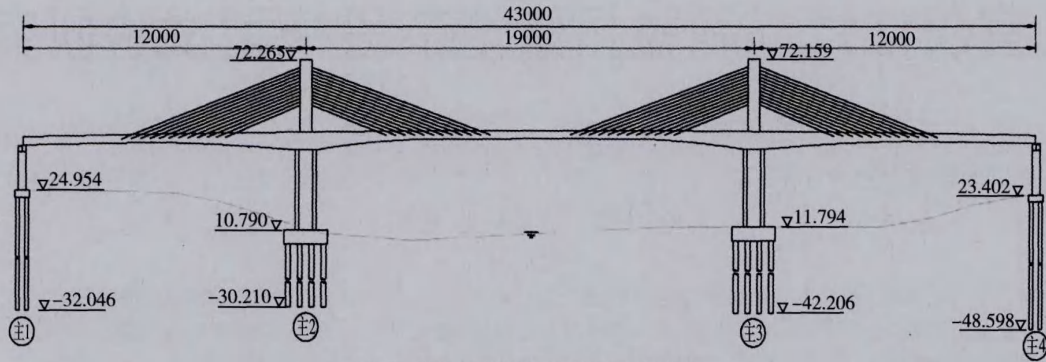


图2 武汉三官汉江大桥立面布置图

主桥共设56根斜拉索，斜拉索采用扇形布置方式，横桥向两排布置，两排索鞍横桥向间距为1.0m，竖向间距为1.9m。索鞍由31根规格 $\phi 28 \times 3$ 的圆形钢管焊接而成，分丝管与单侧双向锚固装置配套使用。斜拉索参照OVMAT系列矮塔斜拉索体系设计，采用OVMAT-31型号。索体采用环氧喷涂钢绞线满足GB/T 25823-2010《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》的标准。单根钢绞线满足直径规格为15.2mm，抗拉强度 $\geq 1860\text{MPa}$ ，屈服强度 $\geq 1580\text{MPa}$ ，疲劳应力幅250MPa（应力上限 $0.45 f_{pk}$ ，200万次脉部加载）。

### 3 索鞍节段模型的研究

#### 3.1 索鞍节段模型的选取

主塔鞍座节段模型采用1:1比例设计。模型截面取主塔高2m，横向宽2.5m，纵向长2.326m，斜拉索采用实桥索力最大斜拉索S1（ $31 \phi s15.2$ ），最大加载为455t，模型混凝土强度为C50级，钢筋采用HRB335，按实桥布置，如图3、图4所示。

#### 3.2 ansys分析时索鞍模型节段的确定

(1) 考察某一节段受到上部传来的最大竖向力的影响

选取最不利的A1（J1）索鞍节段进行计算。

分两种工况进行计算：首先是只施加1.2倍设计

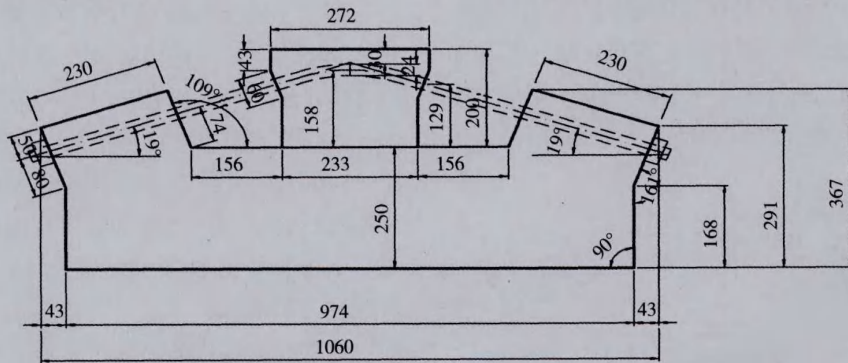


图3 试验模型构造图（立面图）单位：cm

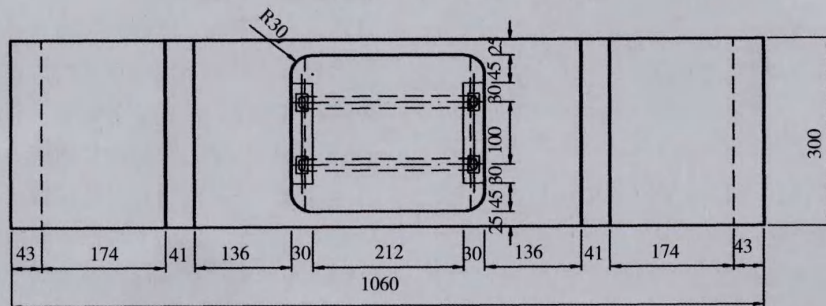


图4 试验模型构造图（平面图）单位：cm



索力的竖向分力, 竖向应力云图如图5所示; 其次是在第一种工况的基础上, 顶面均布A2(J2)~A14(J14)的1.2倍设计索力的竖向分力之和, 竖向应力云图如图6所示。按试验模型进行分析, 两种工况下所得的竖向应力云图分别如图7、图8所示<sup>[2]</sup>。

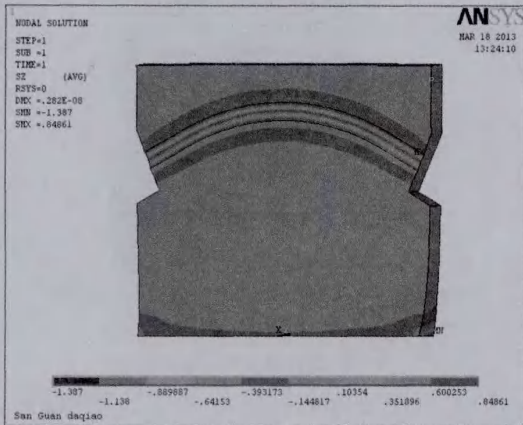


图5 实桥节段模型竖向应力分布云图

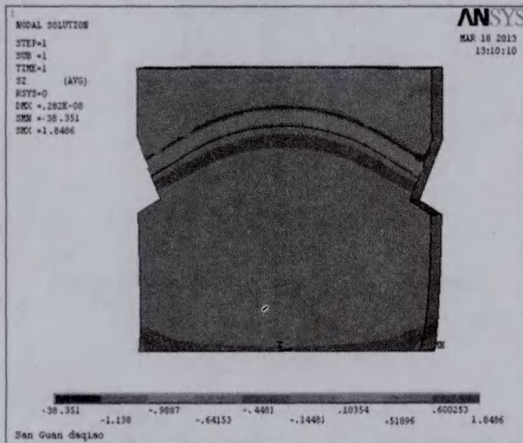


图6 实桥节段模型竖向应力

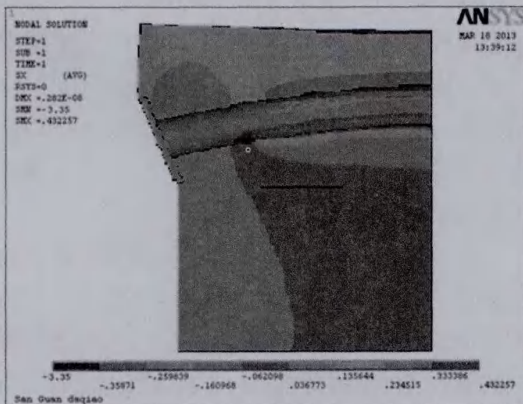


图7 试验节段模型竖向应力

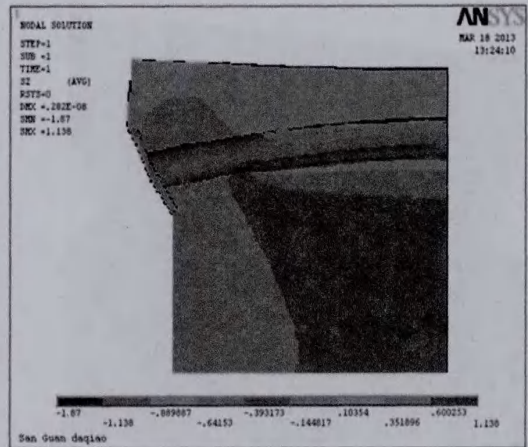


图8 试验节段模型竖向应力

从图5~8可看出, 在模型顶面施加荷载之后, 分丝管上部的混凝土的局部竖向拉应力几乎消失, 转变为较大的压应力。也就是说, 实际模型中A14(J14)索鞍节段分丝管上部混凝土更容易与分丝管脱离, 而随着分丝管顶面竖向压应力的增大, A1(J1)~A13(J13)索鞍节段的分丝管相对A14(J14)而言, 愈难以与分丝管顶部的混凝土脱离。而竖向压应力除去应力集中, 最大也在39MPa, 不超过混凝土的抗压强度。A14(J14)索鞍节段由于设计索力参数最大, 同时出现的竖向拉应力最不利, 故选取A14(J14)索鞍节段作为试验的目标试验模型。

### 3.3 节段模型ansys分析

根据最不利原则, 实际桥塔采用A14(J14)索节段参数。试验模型高度为3.2m, 索力取原设计索力的1.2倍。根据对称性, 取为真实模型的1/2。

主梁采用Solid95实体单元离散, 考虑到节段结构和荷载的对称性, 减少单元数目和计算时间, 取节段模型的1/2进行分析即可。分析模型的坐标系以桥纵轴线为X轴, 横桥向轴线为Y轴, 竖直向上的方向为Z轴, X, Y, Z轴满足右手螺旋法则<sup>[3]</sup>。坐标原点选在索塔中部。建立包含左右索塔交汇点的索塔节段的有限元模型。材料选用C50混凝土, 弹性模量 $3.45 \times 10^{10}$ Pa, 密度 $2300 \text{ kg/m}^3$ 。有限元单元离散模型如图9所示。



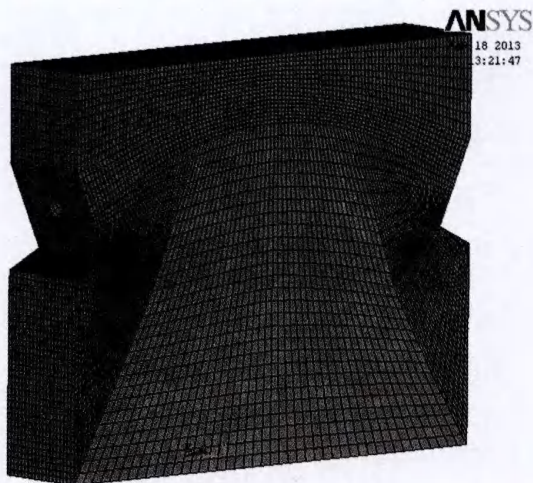


图9 索鞍实验段有限元模型图

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分布有均布荷载 $q$ (根据积分计算,在数值上 $q = 1.2 \times P/R$ , $R$ 为分丝管圆弧半径),再将均布荷载等效成节点力作用到管道最底面,如图10所示。模型边界条件的施加是对其底部进行固结,对处于坐标系 $Y=0$ 的侧面进行对称约束。

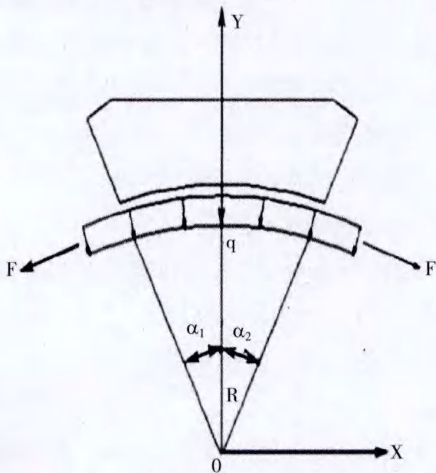


图10 索鞍内壁法向力分布示意图

通过计算分析,得出了模型在两侧对称施加设计荷载3150kN时,其承受的竖向压应力与横向劈裂应力分布规律,具体如图11和图12所示。

从图11和图12可以看出,斜拉索孔道附近应力分布较均匀。可以认为在自重和孔道压力作用下鞍座顺桥向呈压弯的状态,顺桥向最大拉应力为0.334MPa,出现在拉索孔道内壁下缘,靠近拉

索进孔处;横桥向最大拉应力为:0.3467MPa,出现在模型底部外侧。索鞍下方区域混凝土应力分布比较均匀,没出现应力集中现象,故用该模型进行试验是安全可靠的。

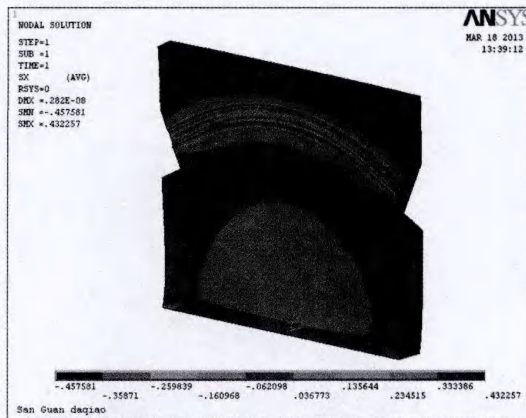


图11 实际桥塔模型纵桥向最大拉应力

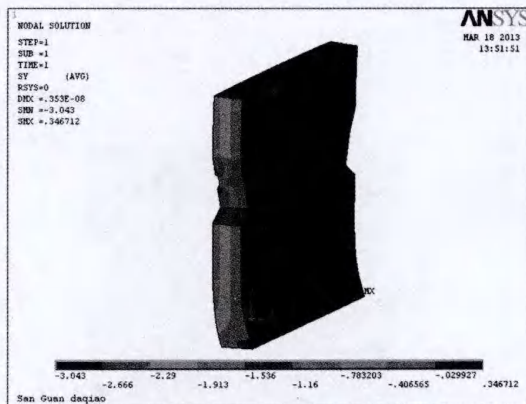


图12 实际桥塔模型横向应力分布云图

从图13可以看出在对索塔两侧同时施加设计荷载3150kN作用下,主塔锚固区的竖向最大压应0.8486MPa,小于规范允许值26.6MPa。索鞍下方区域混凝土应力分布比较均匀,没出现应力集中现象。由试验模型图14可知,结果应力比实际桥塔偏大,且满足应力要求,故该模型进行试验是安全可靠的。

### 3.4 分析结论

首先建立ansys 实体模型进行力学计算,其次通过应力云图考察某个管道拉索竖向分力对相邻管道横向应力的影响以及某一节段受到上部传来的最大竖向力的影响,由于相邻管道间的影响较小,故试验时可以选取单个节段考察横向劈裂



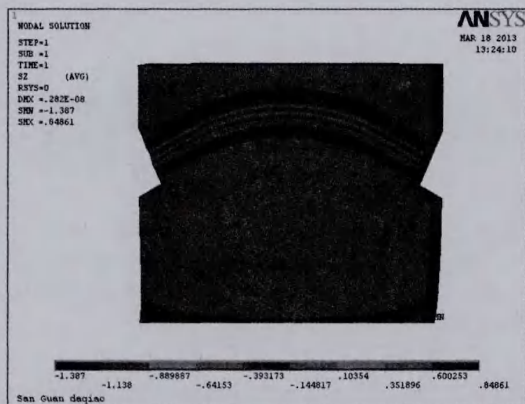


图13 实际桥塔模型竖向应力分布云图

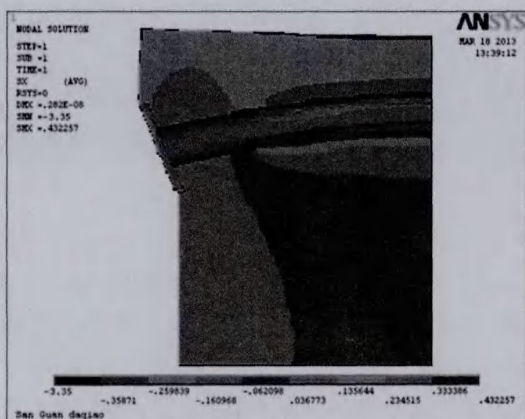


图14 试验模型竖向应力分布云图

应力，而A14（J14）索鞍节段由于所受荷载最不利，同时出现的竖向拉应力最不利，故选取A14（J14）索鞍节段作为试验的目标足尺模型<sup>[4]</sup>。

在考虑包围分丝管附近的混凝土时，根据应力云图可知其最大拉应力主要集中在混凝土与分丝管接触的尖角处，属于应力集中；而较大拉应力则处在靠近分丝管的上半部分，通过竖向应力云图可知该处以竖向拉应力为主，大小为0.45MPa~1.378MPa，受力比较均匀；而分丝管下半部分附近混凝土则拉应力较小或者受压，拉应力以横向应力为主，大小为0.46MPa~3.0MPa，压应力以竖向应力为主，大小为3.46MPa~8.48MPa，均在在C50混凝土抗拉强度和抗拉强度的安全范围内。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。

## 4 节段模型单侧双向抗滑试验

### 4.1 抗滑锚固装置概述

矮塔斜拉桥拉索通过索塔的索鞍连续贯通，锚固在主梁上，并在索鞍两端设置抗滑锚固装置，克服拉索在营运过程中产生的不平衡力，防止拉索在索鞍段的微动磨损。通常在索鞍两端的抗滑锚固装置内灌注高强环氧砂浆对钢绞线产生握裹力，从而达到克服拉索不平衡力的作用。环氧握裹式抗滑锚固装置已通过大量的试验验证，在国内外60多座桥上成功应用，其抗滑性能安全可靠<sup>[5]</sup>。

现阶段矮塔斜拉桥的抗滑形式经过技术研究有了进一步的创新，即基于分丝管索鞍的单侧双向抗滑锚固装置。该锚固装置是设置有固结在单根钢绞线上的抗滑键及具有锁紧结构，抗滑键的一端支承在索鞍端面<sup>[6]</sup>，另一端与抗滑插片的一端紧密接触，抗滑插片的另一端与锁紧螺母紧密接触，螺母与锚固筒螺纹连接，形成两端约束抗滑键滑动。该装置不仅在施工阶段就可以提供足够的抗滑力，而且抗滑能力是持续不变的，大大提高了拉索的使用安全性。即从施工到桥梁营运整个过程都有足够的抗滑力。由于每根钢绞线形成独立抗滑，锁紧结构为可拆分式，解决了环氧握裹式抗滑形式施工中抗滑的问题及无法单根换索的技术难题，为矮塔斜拉桥抗滑技术和单根换索提供了良好的解决方案。

武汉三官汉江公路大桥采用单侧双向抗滑锚固装置，该装置的抗滑性能研究是本试验的重要部分。

### 4.2 试验目的

通过试验模拟桥塔两侧斜拉索的偏载即不平衡力，研究索塔两侧锚固装置在偏载作用下的微动情况，验证抗单侧双向抗滑锚固装置的结构性能及抗滑性能，确保塔端抗滑装置在1.4倍设计荷载作用下能够满足设计抗滑要求（即试验偏载126t），具有可靠的抗滑移性。

### 4.3 试验装置参数

试验装置基本参数的确定根据以下三个原则进行：

（1）武汉市三官汉江公路大桥斜拉索采用



环氧钢绞线,规格为15-31,试验采用15-31规格钢绞线;

(2) 试验主要是检测单侧双向抗滑锚固装置的抗滑移性能,在试验模型的索塔上按照实桥进行安装锚固;

(3) 本试验必须承受试验所需要最大荷载的1.4倍以上。

根据以上原则,综合考虑各方面因素,最终确定试验装置的具体的结构参数。试验装置的基本结构如下,试验装置布置如图15所示。

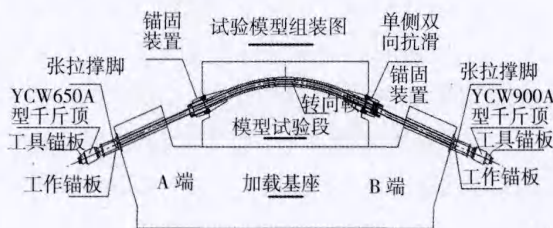


图15 试验装置布置图

#### 4.4 试验加载方案

(1) 安装单侧双向抗滑锚固装置;

(2) 将制作好抗滑键的钢绞线对应穿过索鞍,安装抗滑插片及螺母,抗滑键布置在索鞍单侧双向抗滑锚固装置一侧;

(3) 选取两根钢绞线,在抗滑锚固装置的位置安装百分表座,监测钢绞线的滑移情况;

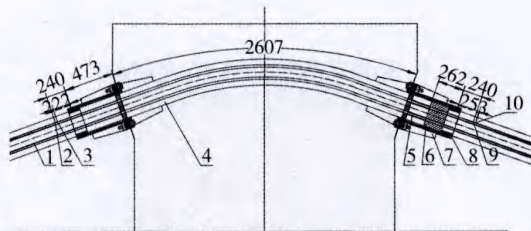
(4) 用千斤顶整体逐级张拉到315t设计载荷;

(5) 无抗滑键一侧千斤顶开始逐级加载,每级20t,有抗滑键一侧千斤顶持荷保持索力不变,共分7级加载,并记录每一级百分表的数据;

(6) 无抗滑键一侧放张到315t设计载荷并且持荷,有抗滑键一侧千斤顶开始逐级张拉,每级20t,共分7级加载,并记录每一级百分表的数据;

(7) 有抗滑键侧放张到315t设计载荷,两侧同时持荷。

根据以上试验方案及步骤,试验中抗滑测点布置如图16所示,实际操作偏载抗滑试验现场如图17所示:



1、索体;2、1号钢绞线W1测试点;3、2号钢绞线W2测试点;4、索鞍;5、抗滑键;6、抗滑插片;7、锚固筒;8、锁紧螺;9、2号钢绞线Y2测点;10、1号钢绞线Y1测点

图16 单侧双向抗滑装置测点布置图



图17 偏载抗滑试验现场

#### 4.5 试验结果

抗滑试验结果表明,在模型索塔的A、B两端分别逐级加载不平衡力时,钢绞线产生的位移成均匀线性发展趋势,且位移量均在理论延伸之间,位移量非常小。在无抗滑键的A端和有抗滑键B端分别加载到140t抗滑力时,抗滑键未产生滑移现象,抗滑锚固装置的最大位移量变化为0.06mm,位移变化量非常小。将载荷卸载至315t设计载荷,百分表能恢复到原数值,未出现抗滑力失效的现象。根据武汉三官汉江公路大桥测试要求单侧双向抗滑锚固装置在1.4倍设计荷载作用下能够满足设计抗滑要求(即试验偏载126t),具有可靠的抗滑移性。实际测试时,偏载力抗滑力达140t,远远高于原设计要求,充分说明该单侧双向抗滑锚固装置内的抗滑键对钢绞线的握裹作用是优异的,在1.4倍设计荷载作用下抗滑力是安全可靠的。

#### 5 单根钢绞线换索试验

##### 5.1 概述

由于单侧双向抗滑装置换索时,需要抽出抗滑插片,而抗滑插片厚度为26.8mm,需用手拉葫芦等工具将抗滑插片以上的索提升,垂直索的方向提高28mm以上的高度,以保证带抗滑键的钢

绞线能顺利抽出。

考虑试验模型梁端锚固区的锚点到塔端锚点的距离仅有4.1m,如图18所示。用手拉葫芦等工具提索时需要较大的力,甚至超出了手拉葫芦的最大承载力,而真正的桥梁由于索长要远大于4.1m,不需要很大的提升力,所以为了模拟实际的桥梁,考虑试验换索时降低索力,减少手拉葫芦的负载,使手拉葫芦的负载和施工时负载相同。拉索角度选取武汉三官汉江公路大桥拉索最短A1(J1)拉索的A1区域,拉索角度为 $25.607^\circ$ ,单边索长为42m。我们在E点进行索的提升,E点距离主塔1m。

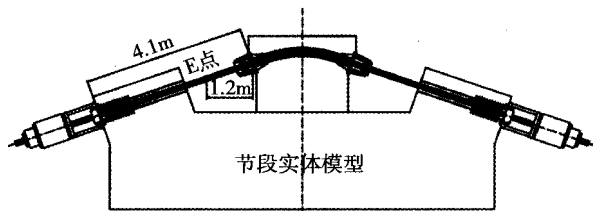


图18 试验模型示意图

## 5.2 索力换算

此次试验是OVMAT-31孔位单侧双向抗滑试验,进行中心绞线换索,根据锚板排布,如图19所示,中心丝是换索过程中最难更换的一根,能够实现对中心丝的更换,其余的钢绞线换索相对简单。手拉葫芦提供最大拉力是在提升第三排索时,三排索垂直索的方向需要提升6根索,提升距离为28mm,第三排索提升时势必会造成对第二排的挤压提升所以我们计算时取7根索力进行计算。

根据试验模型的具体尺寸结构,如图20所示,可以得出以下索力受力公式:

$$F_q = 2 \times F_{1q} \times \cos(89.38) \quad (1)$$

$$F_{1q} = 26.04 \times 0.39 \times 7 = 71.089t \quad (2)$$

$$F_q = 1.54t$$

( $F_{1q}$ : 实桥被提升索的索力,  $F_q$ : 实桥葫芦拉力)

在试验模型中提升索时,由于索的长度很短,当把索提升28mm时,索力和葫芦拉力均增加。 $F_{1q}$ 为试验模型的索力:

$$F_{1q} = 26.04 \times 0.39 \times 7 + R = 71.089t + R \quad (3)$$

$R$ 是由于索在提升时造成索伸长0.5mm,产生应变,索力提高,而实桥中索比较长应变很小,索力的增加可以忽略不计,而试验模型,应变相对而言增加比较大,索力增加很多,根据公式推算每根索增加的力为0.34t,

$$\text{所以, } F_{1q} = 73.489t$$

$$F_y = 2 \times F_{1q} \times \cos(89.1) = 2.31t \quad (4)$$

为了模仿实桥中的葫芦的拉力,  $F_q = F_y$ 且提升距离28mm,所以我们试验模型的索力需要降低。

$$\frac{F_{1q}}{F_{1q}} = \frac{\cos(89.1)}{\cos(89.38)} = \frac{26.04 \times 0.39 \times 7}{26.04 \times N_q \times 7 + R} = 1.452 \quad (5)$$

$N_q$ 为试验模型索力的倍数,  $N_q = 0.26$ ,所以试验模型降为标准载荷的0.26倍,即索力下降为209.88t,即可模拟实桥OVMAT-31拉索标准载荷(设计载荷315t)状态下,拉索向上提升28mm。

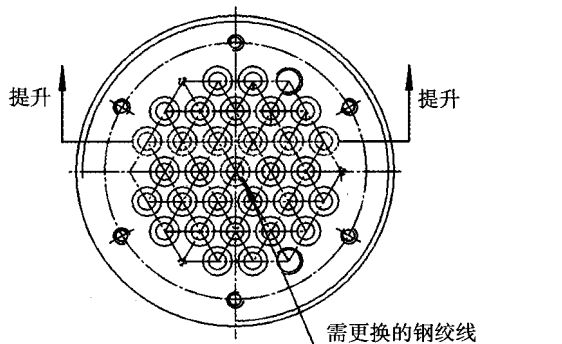


图19 更换钢绞线提升示意图

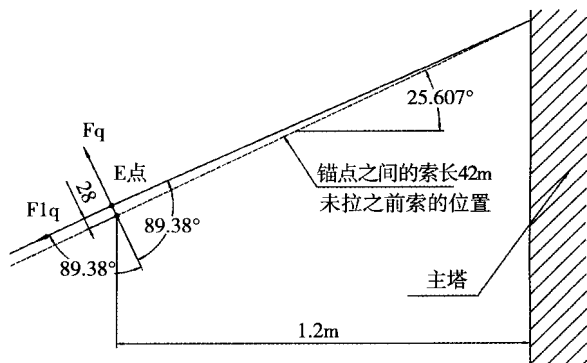


图20 实桥拉索布置示意图

## 5.3 换索步骤

(1) 按照比例降低索力,旋紧拉索锚具的

螺母, 锁定索力;

(2) 放松锁紧螺母, 利用手动葫芦拉紧上排钢绞线, 形成更换空间;

(3) 逐一取下抗滑插片;

(4) 选取一根钢绞线, 用千斤顶放张索力, 取出该根钢绞线的同时牵引一根新的钢绞线更换到原抽出的钢绞线位置;

(5) 通过千斤顶的张拉, 将更换后的钢绞线两端安装夹片, 完成新钢绞线的锚固, 换索完毕。

#### 5.4 试验结果

根据模拟实桥情况进行单根换索试验, 抽取 OVMAT-31 锚具的中心单根钢绞线进行更换, 该换索工艺能实现单根更换, 并且换索便利, 在实桥中需要更换的拉索能在梁面完成抽换步骤, 解决了换索空间问题, 试验中能够抽取最难更换的中心丝进行换索, 具有较强的可操作性和便利性, 完全满足拉索体系在桥梁运营阶段实现拉索的单根换索功能。

(上接第6页)

#### 4.6 吊杆的防腐

该桥所采用的吊杆, 其防腐重点是骑跨式吊杆的U型槽内的防腐, 主要原因是U型槽与钢丝绳的接触容易造成雨水的储蓄, 使钢丝绳处于最易腐蚀的环境中; 此外钢丝绳在U型槽处的受力最大, 易产生应力腐蚀; 最后钢丝绳与U型接触面不好做防腐。针对以上三点原因, 须填充一种常温硫化的防水密封胶, 使钢丝绳与雨水完全隔离, 最后在密封胶表面刷涂面漆。吊杆其余外表面要求分别刷涂底漆、面漆进行防腐, 其防腐要求符合标准要求。

#### 5 总结

通过在成都绕城高速府河桥的加固应用, 证实了该加固方案的可行性, 为今后拱桥旧桥的加固提出了一种新的方案, 以及如何解决在施工中存在的困难, 并针对在应用中所遇到的困难, 提出如下改进意见:

(1) 在加固应用中, 为能选择耐腐蚀较好

#### 6 建议

对于预应力混凝土矮塔斜拉桥节段模型鞍座区拉索的换索试验已经有较多次的试验论证, 据调查统计, 目前在国内的矮塔斜拉桥实桥的施工及后期维护中, 均未尝试过实桥的单根钢绞线抽换, 进行实桥的换索试验具有重大的技术突破, 对今后该桥后期维护具有较高的指导意义, 实桥的单根钢绞线抽换技术及实际操作工艺有待进一步的深入研究。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 陈小强, 徐晓和等. 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.
- [3] 刘钊, 孟少平等. 矮塔斜拉桥索鞍区模型试验及设计探讨[J]. 东南大学学报, 2007, 37(2):291~295.
- [4] 汤少青, 蔡文生等. 漳州战备大桥主塔鞍座处节段模型试验研究[J]. 桥梁建设, 2002, (1):15~18.
- [5] 李文献, 徐栋等. 拉萨市纳金大桥桥塔节段尺寸模型试验研究[J]. 世界桥梁, 2012,40(5):63~68.
- [6] 李文献, 宋强等. 矮塔斜拉桥中交叉抗滑键的研究及应用[J]. 桥梁建设, 2012,42(6):92~96.

的密封钢丝绳, 在加固方案中可以考虑采用两端销接式。这样既可以降低吊索的使用安全系数, 又解决了U型槽内的防腐问题, 从而降低加固费用。

(2) 采用销接式可以减小测量长度的误差, 使测量更方便, 避免返工的可能性。

(3) 采用销接式不用加工制作U型槽, 避免对安装及使用所产生的影响。

今后的桥梁发展中, 可能出现越来越多的旧桥加固, 希望能通过本文的介绍, 为今后的旧桥加固方案提供参考。

#### 参考文献

- [1] 成都绕城高速东段府河大桥维修处治设计说明[S].
- [2] JTJ041-2000[S]. 公路桥涵施工技术规范. 人民交通出版社, 2000.
- [3] 公路悬索桥设计规范(报批稿)[S]. 人民交通出版社, 2002.
- [4] JT/T694-2007[S]. 悬索桥主缆系统防腐涂装技术条件. 中华人民共和国交通部. 2007.