

文章编号:1673-2049(2018)01-0111-08

悬索桥索夹部位主缆钢丝之间非线性关系的 分析模型

沈锐利¹, 何 恺², 黄 振³

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中国中铁二院工程集团有限责任公司,
四川 成都 610031; 3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要:为了简化悬索桥主缆数量庞大的钢丝之间强烈的几何非线性与接触非线性关系,并研究高强螺栓紧固力在钢丝之间的传递规律。借鉴均质化思路,以主缆-索夹紧固系统表现出来的宏观力学性能为基础,利用试验结合有限元分析的方式,建立主缆在柱坐标下纵向、径向和环向三向异性的有限元实体模型,采用三向异性的均质材料代替主缆系统的平均特性,并在 2 组试验上分别进行探索和验证,得到三向异性等效材料的应力-应变关系。结果表明:主缆索夹接触面的摩擦力沿着索夹长度方向呈条带状分布;高强螺栓的紧固力经索夹传递后,在主缆横截面内呈现层状分布,中间小,表面大;对比试验验证了在主缆紧固研究中等效材料具有通适性。

关键词:悬索桥;主缆钢丝;非线性关系;有限元分析;试验研究;分析模型;均质化

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Analysis Model of Nonlinear Relationship of Main Cable Steel Wires in Cable Clip of Suspension Bridge

SHEN Rui-li¹, HE Kai², HUANG Zhen³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;
2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, Sichuan, China;
3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: In order to simplify the strong geometrical nonlinearity and contact nonlinear relationship between the large number of steel wires in the main cable of suspension bridge, and to research the transfer rules of firmly tight forces of high strength bolts in the steel wires, using the idea of homogenization, based on the macroscopic mechanical properties of the main cable and the cable clamp fastening system, the method of combining the experiment with the finite element analysis was used. The three-dimensional anisotropic solid model of the main cable was established under the cylindrical coordinate system with lengthways, radial direction and ring direction. The three-dimensional anisotropic uniform material was proposed to represent the average characteristics of the main cable system and was tested in two experiments to get the stress-strain relationship of three-dimensional anisotropic equivalent material. The results show that the frictional force of the contact surface of main cable clamp distributes in band along the length direction of the cable clamp. The firmly tight forces of high strength bolts show layered

收稿日期:2017-07-14

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2015G002-A)

作者简介:沈锐利(1963-),男,四川华蓥人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:rlshen@163.com。

distribution in the cross section of the main cable after transmitting through the cable clamp, and are smaller in the centre and bigger at the surface. The comparison experiment proves that the equivalent material is suitable for the study of the main cable fastening.

Key words: suspension bridge; main cable steel wire; nonlinear relationship; finite element analysis; experimental research; analysis model; homogenization

0 引言

主缆属于悬索桥的一类构件,其寿命应大于全桥的设计寿命。主缆作为直接受力结构,将全桥恒载及活载传递至桥塔、锚碇,最后作用于基础。悬索桥主缆在设计时需要重点关注的问题包括:影响结构安全性的强度问题、影响结构变形及行车平稳性的结构刚度问题、影响索夹抗滑承载能力的主缆表面接触挤压应力问题、影响索夹高强螺杆受力均匀性的主缆内部钢丝应力传递机理问题^[1-4]。

预制平行索股法架设主缆具有施工速度快等优势^[5],架设完成的主缆由钢丝、绑扎带、空隙所组成。既有研究显示平行钢丝之间相互作用关系复杂,平行钢丝每层钢丝受到的正压力大小不同^[6-11],纵向、径向、环向力学特性差异巨大,主缆紧固过程中几何非线性与接触非线性显著,若想利用有限元精确模拟分析主缆系统钢丝间的力学性能,除工作量巨大外还需要强大的硬件设施支持,显得事倍功半,必要性不强。国外学者曾针对这一问题,以较少层数的平行钢丝作为研究对象总结规律,采用理想的弹塑性弹簧单元来简化接触问题^[12-14],获得了一定的成功。本文引入均质化的思路^[15],利用纵向、径向、环向三向异性体材料替代主缆复杂结构的平均特性,建立三向不同参数的分析模型,通过现场实测来模拟获得材料参数,并用所建立的模型和拟合的参数来研究主缆在紧固过程中的力学特性。

1 主缆截面特点及简化分析思路

主缆截面由离散钢丝、空隙、胶质绑扎带等组成,紧缆时非线性十分明显,主缆系统的径向与环向可看作是非均质材料,非均质材料的宏观性能与微观结构是密切相关的。在经典微观力学中假设宏观材料机械性能是均匀的,而微观水平是非均质的,微观力学的任务就是基于微结构性能来计算宏观均匀材料的机械性能^[16]。寻找材料有效性能的方法称为均质化,其思路为通过均匀化过程和有限元方法,寻找能够等效替代复杂结构平均特性的均匀连续体。针对主缆系统的简化计算思想如图 1 所示。

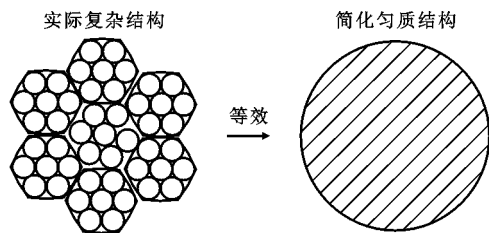


图 1 主缆均质化等效示意

Fig. 1 Schematic Diagram of Main Cable Homogenization

根据主缆系统的受力特点,可以将等效材料视为柱坐标系下的各向异性材料。沿着主缆轴向主要承受拉力,材料表现为高强钢丝的特性;径向主要传递相邻层钢丝(将距离主缆横截面圆心距离相等的钢丝视为同一层钢丝)之间的挤压关系,这种挤压作用随着主缆紧固过程中空隙率的减小越发明显;切向主要表现为相邻层钢丝之间的摩擦与同层钢丝的挤压作用。

在轴向材料参数已知的情况下,探索另外 2 个方向的材料参数至少需要得到 2 组与材料参数相关的数据。实际的悬索桥主缆在设计中索夹内与索夹外的空隙率一般相差 2%,径向和切向在初始阶段较松散,为空隙率接近 20% 的近似圆形,因此主缆在开始受挤压阶段的直径比索夹内直径略大,索夹表面与主缆表面存在缝隙而不能完全贴合,如图 2 所示。随着高强螺杆的张拉,两者间的缝隙越来越小,该过程直接反映在索夹上下半口间距的变化上,可作为一个参数。高强螺杆的紧固还会改变钢丝之间的空隙大小及钢丝排布关系,直接引起索夹上下半口处主缆周长的变化,因此可以将索夹上下半口处的主缆周长作为另一个分析参数。在整个索夹安装紧固过程中,主缆钢丝径向和切向在初始阶段较为松散,高强螺杆紧固前期较小的螺杆力能够使主缆周长及索夹竖向间距改变较为明显。随着高强螺杆力的增加,钢丝之间空隙率减小,钢丝之间逐渐密贴,主缆周长和索夹竖向间距几乎不随高强螺杆轴力的增大而变化,该过程中 2 个参数都与高强螺杆紧固力表现为非线性的关系。索夹安装紧固全过程中起主要影响的为等效材料泊松比和 3 个方向的等效弹性模量。

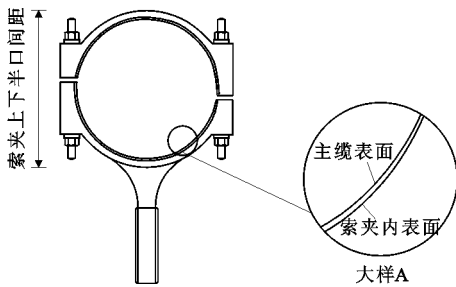
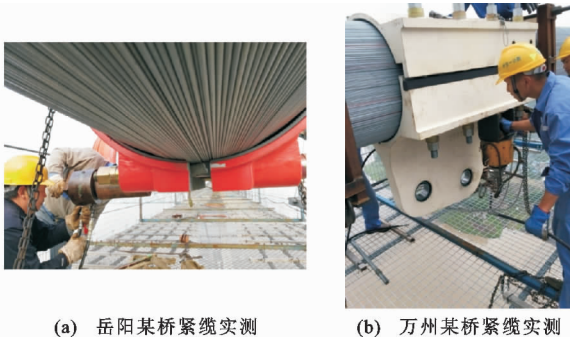


图 2 主缆和索夹相对位置

Fig. 2 Relative Position of Main Cable and Cable Clamp

为了探索用于等效替代主缆进行研究的材料本构关系,本文利用试验结合有限元分析的方式,在实际悬索桥索夹的安装与紧固过程中,测得了分阶段的高强螺栓紧固力与索夹上下端口处主缆直径及索夹上下半口间距的变化关系曲线,现场实测如图 3 所示。该试验旨在通过 2 组实测数据,结合有限元技术,对比实测变形和有限元模拟中的变形情况,调整等效结构的径向和切向材料特性,在有限元模型中拟合出与实测情况一致的高强螺栓内力-主缆周长及高强螺栓内力-索夹上下半口间距的变化关系曲线,若 2 组数据都能一致,则认为此时的材料即可用作主缆紧固简化研究的等效材料。



(a) 岳阳某桥紧缆实测

(b) 万州某桥紧缆实测

图 3 现场实测

Fig. 3 Field Measurement

在有限元软件中,节点应力采用与其相连单元数据的平均值输出,因此通过主缆表面应力对面积的积分得到内力的竖向分力,这可能与高强螺栓内力和存在差异,该差异还受到等效材料与实际主缆相似程度的影响,而实际的平衡关系要求两者应该相等。此时采用应力标定的方式来修正主缆表面应力的分布情况,引入径向应力标定系数 P_n 和切向应力标定系数 P_r 来消除计算差异[式(1)],考虑摩擦时的索夹受力如图 4 所示,其中 F_{ni} 为主缆表面某一微面上的径向挤压力, F_{ri} 为主缆表面某一微面上的切向摩擦力, θ_k 为位置角。

$$NF = P_n \sum [F_{n1} \sin(\theta_1) + \dots + F_{nk} \sin(\theta_k) + \dots +$$

$$F_{ni} \sin(\theta_i)] + P_r \sum [F_{r1} |\cos(\theta_1)| + \dots + F_{rk} |\cos(\theta_k)| + \dots + F_{ri} |\cos(\theta_i)|] = P_n \int_0^\pi \int_0^L \sigma_{n0} r \sin(\theta) d\theta dL + 2P_r \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^L \tau_{r0} r \cos(\theta) d\theta dL \quad (1)$$

式中: N , F 分别为高强螺栓数量和设计张拉力; σ_{n0} , τ_{r0} 分别为索夹与主缆接触面某一点处的径向名义应力和切向名义应力; L 为索夹长度; r 为极坐标系下的极径。

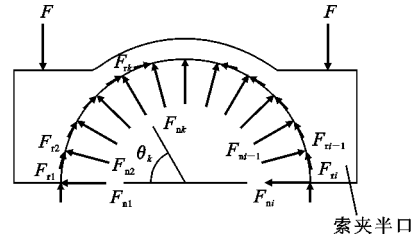


图 4 考虑摩擦时的索夹受力

Fig. 4 Clamp Bearing Forces Considering Friction

由于主缆表面各点处的应力已由等效材料模拟计算获得,理论上如果模拟的材料参数与实际完全一致,式(1)的标定系数应等于 1,比较标定系数与 1 的接近程度来反映计算的精度。得到标定系数后,可以通过标定系数与名义应力的乘积确定应力分布情况。通过这种方式可以获取紧缆过程中主缆表面及内部不同位置钢丝之间的传力规律,达到简化计算的目的,整个研究流程如图 5 所示。

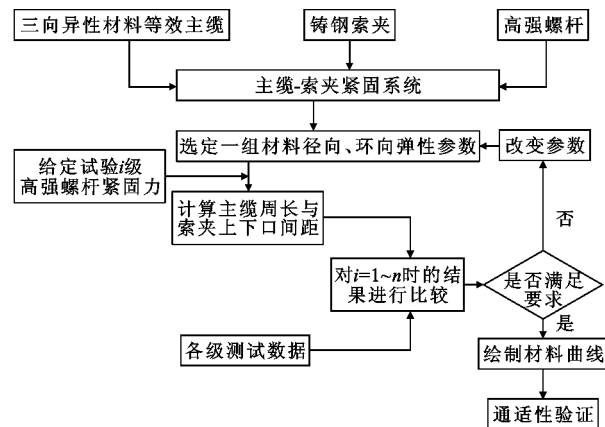


图 5 研究流程

Fig. 5 Research Process

利用大型通用有限元软件 ANSYS 建立主缆-索夹紧固系统的有限元模型。主缆采用实心实体等效替代,其材料本构关系暂时未知,通过结合试验数据试算拟合获得,利用 ANSYS 的材料模型组合来模拟三向异性非线性材料的性质。高强螺栓通过在

梁单元内插入预紧截面数据(Prets179 单元)形成预紧单元,该单元可同时通过力和位移双参量控制高强螺杆,并能实现分级张拉^[17];主缆和索夹表面的相互作用关系采用接触单元模拟,所采用的有限元模型如图 6 所示。

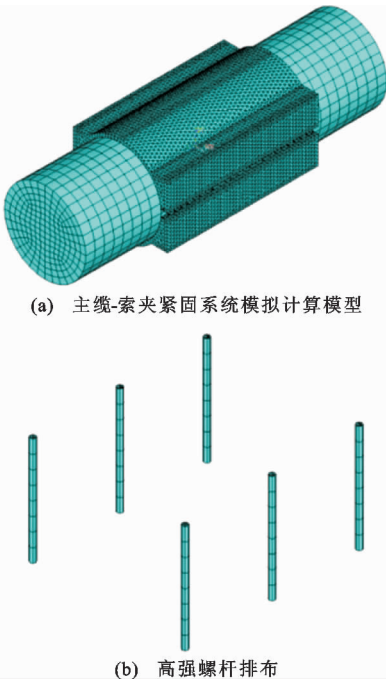


图 6 有限元模型
Fig. 6 Finite Element Model

表 1 高强螺杆紧固与主缆周长关系

Tab. 1 Relations Between Tension of High-strength Bolts and Perimeters of Main Cables

索夹编号	位置	主缆周长/mm				
		紧缆机紧缆	一级紧固	二级紧固	三级紧固	四级紧固
1	上口	749.1(20.9%)	743.0(19.5%)	739.2(18.7%)	736.4(18.1%)	734.5(17.7%)
	下口	749.6(21.0%)	743.4(19.6%)	739.3(18.7%)	737.1(18.3%)	736.0(18.0%)
2	上口	747.7(20.6%)	740.9(19.1%)	736.5(18.1%)	735.3(17.9%)	734.5(17.7%)
	下口	746.7(20.4%)	740.1(18.9%)	736.4(18.1%)	734.1(17.6%)	732.6(17.3%)
3	上口	746.5(20.4%)	739.9(18.9%)	737.9(18.4%)	736.9(18.2%)	735.9(18.0%)
	下口	747.1(20.4%)	741.4(19.2%)	738.2(18.5%)	736.4(18.1%)	734.8(17.7%)
4	上口	748.2(20.7%)	742.3(19.4%)	737.7(18.4%)	735.3(17.9%)	733.5(17.5%)
	下口	750.2(21.1%)	744.0(19.8%)	739.2(18.7%)	736.2(18.1%)	735.5(17.9%)
5	上口	752.6(21.6%)	745.2(20.0%)	742.3(19.4%)	741.5(19.2%)	740.6(19.0%)
	下口	750.8(21.2%)	744.1(19.8%)	740.6(19.0%)	739.1(18.7%)	738.5(18.6%)
主缆周长均值/mm		748.8	742.4	738.7	736.8	735.6
主缆直径均值/mm		238.4	236.3	235.1	234.5	234.2
平均空隙率/%		20.8	19.5	18.7	18.2	18.0

注:括号内数值为主缆空隙率。

结合表 3,4 的结果可知,在径向材料弹性模量随着主缆空隙率的减小不断增大,最终基本保持不变。当材料的应变达到 0.04 以上时,材料弹性模量

2 材料参数拟合与验证

2.1 材料参数拟合

某人行悬索桥主缆截面由 19 股 91φ5.10 钢丝组成,索夹处主缆设计空隙率为 18%,紧缆后主缆直径为 234.2 mm。索夹长度为 460 mm,每个索夹连接 6 根高强螺杆,设计张拉力为 320 kN,实际现场测试时分 4 级紧固,每一级高强螺杆轴力均匀增加 80 kN。试验中在现场分别测量索夹上下端口主缆周长及索夹上下半口间距与高强螺杆紧固力的关系曲线,得到多组数据,表 1 和表 2 分别列出其中 5 组索夹的代表性数据。

紧缆前期,随着螺杆应力的增加等效材料应变增长很快,后期随着螺杆拉力的增加应变增长缓慢,最终的应力-应变关系曲线斜率较大。等效模拟时,主缆抗弯刚度的折减表现在弹性模量的折减上。拟合过程中,高强螺杆张拉力每级增量为 80 kN,分 4 级加载,迭代得到的材料径向、环向弹性模量和泊松比如表 3 所示。实际中径向和环向变形相互影响很小,故泊松比较小,且模拟时发现弹性模量对径向和环向变形起主要控制作用,泊松比几乎不产生影响,故为了研究方便,设定各过程中材料各方向的泊松比保持不变。模拟得到等效材料最终接近常量的参数见表 4。

保持在 22 000 MPa 不变;截面切向材料弹性模量几乎保持线性,其值约为 36 000 MPa;轴向表现为钢丝的特性。材料径向和切向的应力-应变关系分

表 2 高强螺杆紧固与索夹上下半口间距关系

Tab. 2 Relations Between Tension of High-strength Bolts and Spacings of Upper and Lower Halves of Cable Clamp

索夹编号	位置	索夹上下半口间距				
		紧缆机紧缆	一级紧固	二级紧固	三级紧固	四级紧固
1	上口	309.9	307.7	305.6	303.7	303.6
	下口	310.7	306.5	306.7	303.7	304.1
2	上口	308.9	306.4	304.3	303.3	302.3
	下口	307.5	306.7	304.1	303.4	302.7
3	上口	306.5	304.1	302.1	303.1	301.7
	下口	308.5	306.1	303.8	303.9	302.4
4	上口	309.0	307.1	304.8	303.4	302.5
	下口	310.8	307.4	306.4	305.2	304.7
5	上口	311.1	309.4	308.0	304.7	305.6
	下口	310.9	306.1	305.5	304.6	303.7
上下索夹间距均值		309.4	306.8	305.1	303.9	303.3

表 3 拟合过程中的材料参数变化

Tab. 3 Changes of Material Parameters During Fitting Process

分级荷载/kN	E_{NN}/MPa	E_{RR}/MPa	ν_{NR}
80	119	36 000	0.02
160	1 162	36 000	0.02
240	3 321	36 000	0.02
320	6 689	36 000	0.02

注: E_{NN} 为等效材料径向弹性模量; E_{RR} 为等效材料切向弹性模量; ν_{NR} 为等效材料径向-切向泊松比。

表 4 等效材料参数

Tab. 4 Equivalent Material Parameters

E_{LL}/MPa	E_{NN}/MPa	E_{RR}/MPa	ν_{LN}	ν_{LR}	ν_{NR}
195 000	22 000	36 000	0.26	0.26	0.02

注: E_{LL} 为等效材料轴向弹性模量; ν_{LN} 为等效材料轴向-径向泊松比; ν_{LR} 为等效材料轴向-切向泊松比。

别如式(2),(3)所示

$$\sigma=0.03e^{175\varepsilon-0.2}-0.024\ 56\quad(2)$$

$$\sigma=\varepsilon E\quad(3)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; $E=36\ 000\ \text{MPa}$ 。

根据试验数据,试算拟合等效材料的径向与环向参数,在有限元模型中计算得到在各级高强螺杆轴力作用下的变形,计算结果与实测结果对比如图 7,8 所示。

2.2 通适性验证

另一组试验中,主缆截面由 108 股 127 ϕ 5.20 钢丝组成,索夹处主缆设计空隙率为 18%,紧缆完成后主缆直径为 672.5 mm,索夹长度为 1 050 mm。每个索夹连接 6 根高强螺杆,高强螺杆设计张拉力为 600 kN,现场测试时分 3 级紧固,每级高强螺杆轴力均匀增加 200 kN。该组试验结果用于检验等

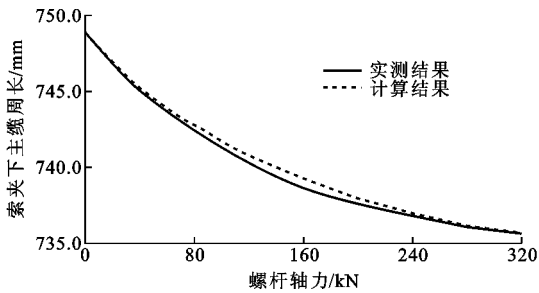


图 7 实测主缆周长与有限元计算结果对比 1

Fig. 7 Comparison 1 Between Measured Perimeter of Main Cable and Finite Element Calculation Result

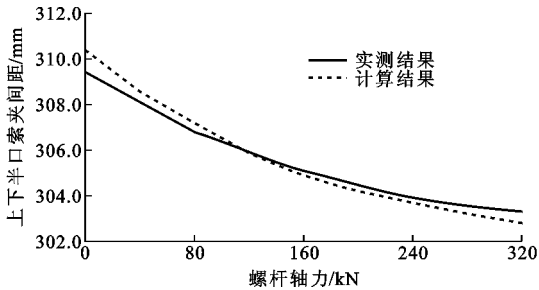


图 8 实测索夹上下半口间距与有限元计算结果对比 1

Fig. 8 Comparison 1 Between Measured Spacing of Upper and Lower Halves of Cable Clamp and Finite Element Calculation Result

效材料是否具有通适性,只有能够适应各种规格主缆的等效材料才具有实际应用价值。该组试验下的实测结果和有限元模拟结果如图 9,10 所示。从图 9,10 可知,拟合得到的等效材料对这 2 种尺寸差异比较大的索夹紧固过程都适用。

3 索夹下主缆截面应力初步分析

以主缆截面 108 股 127 ϕ 5.20 钢丝的数据结果

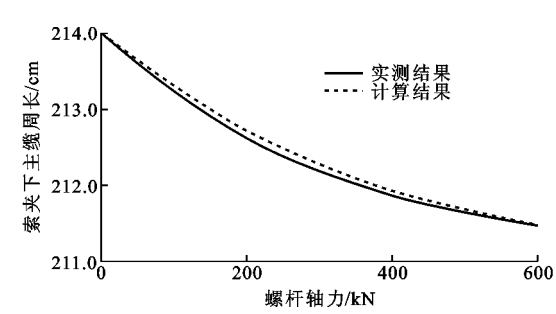


图 9 实测主缆周长与有限元计算结果对比 2

Fig. 9 Comparison 2 Between Measured Perimeter of Main Cable and Finite Element Calculation Result

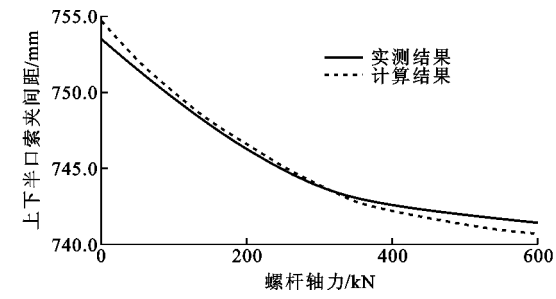


图 10 实测索夹上下半口间距与有限元计算结果对比 2

Fig. 10 Comparison 2 Between Measured Spacing of Upper and Lower Halves of Cable Clamp and Finite Element Calculation Result

进行应力分析,对主缆单元划分采用六面体形式,截取索夹下主缆 1/8 的单元并对节点进行位置编码,如图 11 所示,其中 A 列表示索夹横向对称轴截面位置,K 列表示索夹上端口截面位置,1~8 为索夹上口。

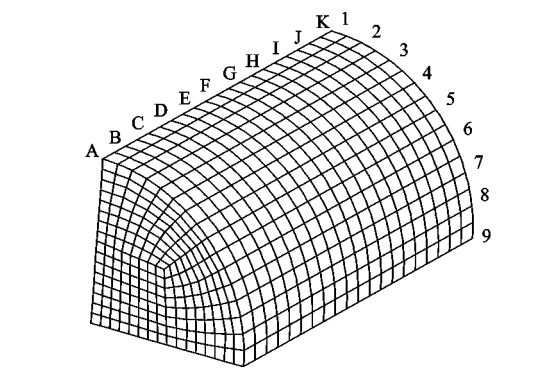


图 11 单元定位

Fig. 11 Orientation of Elements

将图 11 所示的主缆表面展开,绘制主缆索夹接触面的应力等值线(图 12~14),其中图 12 为不考虑主缆与索夹之间摩擦作用时的接触面径向挤压应力,图 13,14 分别为考虑主缆和索夹之间摩擦作用时的径向挤压应力和切向摩擦应力。

编号为 9 的一排节点处于上下半口索夹的对合

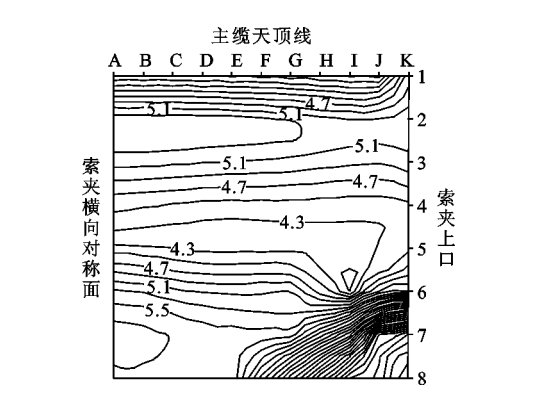


图 12 不考虑摩擦时的径向挤压应力(单位:MPa)

Fig. 12 Radial Extrusion Stress Without Considering Friction (Unit:MPa)

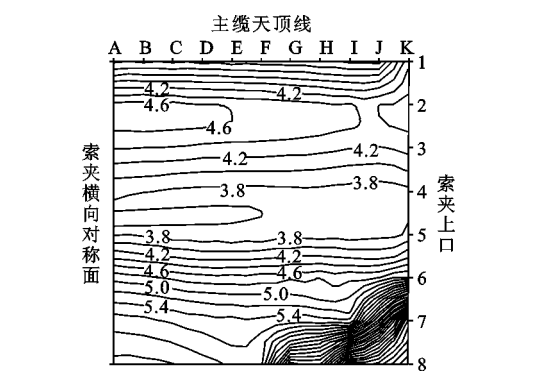


图 13 考虑摩擦时的径向挤压应力(单位:MPa)

Fig. 13 Radial Extrusion Stress Considering Friction (Unit:MPa)

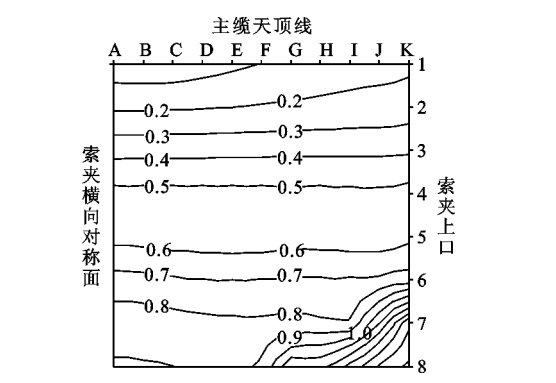


图 14 切向摩擦名义应力(单位:MPa)

Fig. 14 Tangential Friction Nominal Stress (Unit:MPa)

交界处,其节点力不直接作用于索夹上。4 个角点处的应力积分面积为 1 个单元面积,周边边界上的应力积分面积为 2 个单元面积,内部节点应力的积分面积为 4 个单元面积。由于切向摩擦力相对于径向挤压力很小,认为在考虑主缆与索夹之间的摩擦作用前后,径向应力标定系数保持不变,则不考虑摩擦时通过半个索夹 1/4 面积上所有径向应力对面积的积分可得到径向应力标定系数 P_n ,即

$$6 \times 600 \times \frac{1}{4} = P_n \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{L}{2}} \sigma_{n\theta} r \sin(\theta) d\theta dL = 878.2 P_n \quad (4)$$

$$P_n = 1.0248$$

考虑摩擦以后的应力积分为

$$6 \times 600 \times \frac{1}{4} = P_n \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{L}{2}} \sigma_{n\theta} r \sin(\theta) d\theta dL + P_r \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{L}{2}} \sigma_{r\theta} r \cos(\theta) d\theta dL = 773.1 P_n + 107.4 P_r \quad (5)$$

将径向应力标定系数 $P_n = 1.0248$ 代入式(5) 后得

$$P_r = 1.0030 \quad (6)$$

接触面的应力标定系数接近 1,说明等效计算的精度较高。根据名义应力及标定系数的乘积即可得到主缆与索夹接触面的应力分布。由上述内容可知,主缆与索夹接触面产生的挤压应力沿着纵向(定位 A-K)大致均匀分布,在索夹端口处,由于主缆的弯曲变形会造成局部的挤压应力增大。切线方向的应力分布规律主要由主缆索夹横截面的支撑受力特点决定,如图 15 所示的索夹横截面,在索夹受到高强螺杆扭力作用时,整个系统以主缆天顶线位置作为支点,由于索夹横截面的变化,A 位置处有沿着箭头方向向里挤压的趋势,B 位置处则有沿着箭头方向向外扩张的趋势,因此造成主缆索夹接触面处由主缆天顶线至索夹接口处(定位 1-8)的径向挤压应力总体呈现先减小再增大的趋势。

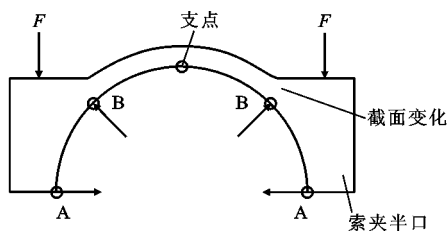


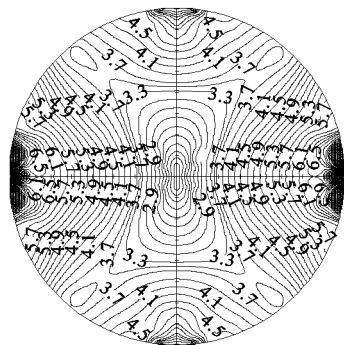
图 15 索夹横截面

Fig. 15 Cross Section of Cable Clamp

主缆与索夹接触面的切向摩擦应力沿纵向与径向挤压应力的分布规律一致,先呈现较长区域的均匀分布,在索夹端口略微增大。由主缆天顶线至索夹接口处(定位 1-8)摩擦应力逐渐增大,在主缆顶部区域 1~4 行,切向应力与径向应力之比小于接触面的摩擦因数(0.15),表现为静摩擦力,即主缆与索夹这段区域的接触面在高强螺杆紧固的过程中没有相对滑动;在主缆中部区域 5~8 行,切向应力与径向应力之比等于接触面的摩擦因数,表现为动摩擦力,即主缆与索夹这段区域的接触面在高强螺杆紧

固过程中产生了相对滑动。

主缆截面内的径向应力呈现如图 16 所示的层状规律分布,表现为内圈层小外圈层大,与文献[6]的规律类似,只是文献[6]中主缆表面的外压力为理想的均匀径向力,且没有考虑主缆与索夹之间的摩擦作用。



- Chengdu:Southwest Jiaotong University Press,2015.
- [3] 马文龙,刘世忠,王苍和,等.刘家峡大桥主缆空隙率及索夹抗滑移试验研究[J].世界桥梁,2014,42(5):59-62.
- MA Wen-long, LIU Shi-zhong, WANG Cang-he, et al. Experimental Study of Main Cable Porosity and Cable Band Slippage of Liujiaxia Bridge[J]. World Bridges,2014,42(5):59-62.
- [4] 赵承新,严敏兰,张安户,等.洪都大桥索夹抗滑试验研究[J].世界桥梁,2013,41(1):64-68.
- ZHAO Cheng-xin, YAN Min-lan, ZHANG An-hu, et al. Experimental Study of Slip Resistance of Cable Clamps of Hongdu Bridge[J]. World Bridges,2013,41(1):64-68.
- [5] 张永福.悬索桥 PPWS 法架设主缆的易发问题及解决方法的研究[J].安徽建筑,2009(6):97-99.
- ZHANG Yong-fu. The Common Questions in the Erection of Main Cables of Suspension Bridge with PPWS Method and the Solutions[J]. Anhui Architecture,2009(6):97-99.
- [6] ZHENG G, LI H. Normal Stress Between Steel Wires in the Stay-cable[J]. Applied Mechanics and Materials Journal,2011,50-51,541-546.
- [7] 陈 璨,郑 罡,燕海蛟,等.拉索高强镀锌平行钢丝摩擦系数的进一步确定[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31(2):188-190,222.
- CHEN Can, ZHENG Gang, YAN Hai-jiao, et al. Further Determination of Friction Coefficients Between High-strength Zinc-coated Steel Wires in Stay Cables[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science,2012,31(2):188-190,222.
- [8] 任洪田,赵立哲,白福军.悬索桥主缆索夹抗滑试验及应力测试分析[J].北方交通,2009(3):74-76.
- REN Hong-tian, ZHAO Li-zhe, BAI Fu-jun. Antiskid Trial of Main Cable of Suspension Bridge and Analysis of Stress Testing[J]. Northern Communications,2009(3):74-76.
- [9] 黎志忠,蒋劲松.悬索桥上、下对合型索夹结构分析研究[J].桥梁建设,2013,43(3):60-65.
- LI Zhi-zhong, JIANG Jing-song. Analysis and Study of Cable Band Structure of Upper and Lower Halves Type for Suspension Bridge[J]. Bridge Construction,2013,43(3):60-65.
- [10] 郑宪政.螺栓竖向紧固型缆索索箍受力特性及设计准则研究[J].桥梁建设,2008,38(2):56-59.
- ZHENG Xian-zheng. Research of Mechanical Properties and Design Criterion for Cable Band with Vertically Tightening Bolts[J]. Bridge Construction,2008,38(2):56-59.
- [11] 卢 伟,马青云,李润哲,等.西堠门大桥主缆缠丝技术[J].桥梁建设,2010,40(1):55-58.
- LU Wei, MA Qing-yun, LI Run-zhe, et al. Wire Wrapping Techniques for Main Cables of Xihoumen Bridge[J]. Bridge Construction,2010,40(1):55-58.
- [12] MONTOYA A, WAISMAN H, BETTI R. A Simplified Contact-friction Methodology for Modeling Wire Breaks in Parallel Wire Strands[J]. Computers and Structures,2012,100-101:39-53.
- [13] WAISMAN H, MONTOYA A, BETTI R, et al. Load Transfer and Recovery Length in Parallel Wires of Suspension Bridge Cables[J]. Journal of Engineering Mechanics,2011,137(4):227-237.
- [14] NOYAN I C, BRUGGER A, BETTI R, et al. Measurement of Strain/Load Transfer in Parallel Seven-wire Strands with Neutron Diffraction[J]. Experimental Mechanics,2010,50(2):265-272.
- [15] 曹礼群,崔俊芝.复合材料拟周期结构的均匀化方法[J].计算数学,1999,21(3):331-344.
- CAO Li-qun, CUI Jun-zhi. Homogenization Method for the Quasi-periodic Structures of Composite Materials[J]. Mathematica Numerica Sinica,1999,21(3):331-344.
- [16] 李明宝.基于有限元理论的木材机械性能建模与仿真研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2007.
- LI Ming-bao. Modeling and Simulation of Wood Mechanical Properties Based on Finite Element Theory [D]. Harbin:Northeast Forestry University,2007.
- [17] 王新敏,李义强,许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M].北京:人民交通出版社,2011.
- WANG Xin-min, LI Yi-qiang, XU Hong-wei. ANSYS Structural Analysis Unit and Application[M]. Beijing:China Communications Press,2011.