

文章编号:1671-8879(2015)06-0091-07

考虑拉扭耦合效应的空间主缆扭转计算方法

齐东春^{1,2}, 沈锐利², 刘章军¹, 陈 舟¹

(1. 三峡大学 湖北省防灾减灾重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 由于钢丝集束体组成主缆的扭转刚度是受多因素影响的变量, 目前空间主缆的扭转还没有可靠的计算方法。分析了影响空间主缆扭转刚度的主要因素, 建立了主缆集束体考虑拉扭耦合效应的解析计算模型, 推导了拉扭耦合引起的抗扭力矩的计算公式。在此基础上, 讨论了主缆半径、主缆张力及扭转角对主缆扭转刚度的影响规律。从施工控制的角度分析了扭转刚度、索夹刚臂、吊索张拉次序及索夹预偏角对主缆扭转角的影响。研究表明: 由于拉扭耦合效应的影响, 在体系转换过程中随着主缆张力和扭转角的增大主缆扭转刚度呈明显的非线性增长; 在施工控制中, 为减小主缆的扭转变形, 可在索夹安装时设置与成桥时索夹扭转方向相同的预偏角, 利用吊索力通过索夹刚臂给主缆施加反向扭矩来实现对主缆扭转的主动控制, 以抵消或减小主缆的扭转变形。

关键词: 桥梁工程; 悬索桥; 空间主缆; 扭转刚度; 拉扭耦合; 扭转控制

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

Torsional calculation method of spatial cable with consideration of tension-torsion coupling effect

QI Dong-chun^{1,2}, SHEN Rui-li², LIU Zhang-jun¹, CHEN Zhou¹

(1. Hubei Provincial Key Laboratory of Hazards Prevention and Alleviation, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Because torsional stiffness of main cable which contains a plurality of steel wire is affected by many factors, there is no reliable calculation method for spatial cable torsion at present. The chief factors influencing torsional stiffness were analysed in this paper. The analytical calculation model with consideration of tension-torsion coupling effect was established, and the formula of resistance torsion moment of main cable caused by tension torsion coupling was deduced. On this basis, the influence law of main cable radius, tension and torsion angle on torsional stiffness was discussed. The impact of torsional stiffness, cable clamp rigid arm, suspender tensioning sequence and cable clamp preformed angle on main cable torsion angle was analyzed from the perspective of construction control. The results show that the torsional stiffness of main cable presents nonlinear growth trend during the system transition with the increase of tension and torsion angel because of the influence of tension-torsion coupling effect. In the construction control, in order to reduce torsion deformation of main cable, the bias angle of cable clamps can be set towards the rotation direction of cable clamp at the stage of finished

收稿日期: 2015-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178396, 51278282); 湖北省自然科学基金项目(2014CFB331)

作者简介: 齐东春(1978-), 男, 湖北宜昌人, 三峡大学讲师, 西南交通大学工学博士, E-mail: qidongchun@163.com。

bridge at the time of assembly. The active control of the main cable torsion can be realized through a reverse torque to the main cable, that is generated by applying the hanger force to the rigid arm of cable clamp. This method can offset or reduce torsional deformation of the main cable. 11 figs, 10 refs.

Key words: bridge engineering; suspension bridge; spatial cable; torsional stiffness; tension torsion coupling; torsion control

0 引言

空间缆索悬索桥是近年来在中国兴起的一种新的桥型,目前已建成或在建的有十多座。空间缆索体系的悬索桥,在从空缆状态到成桥状态的过程中,主缆将发生横向位移,由此产生了主缆扭转问题和吊索夹横向安装角度的问题,主缆扭转的控制及索夹安装定位的时机是空间缆索体系悬索桥监控的重点和难点。空间主缆的扭转将会引起 2 个后果:①已安装索夹的横向倾角发生变化,如果索夹的安装角度不能与吊索的成桥角度一致,超过了吊索横桥向容许转角,将会引起吊索上吊点与索夹耳板在连接处发生挤压,另外吊索上、下吊点的连线可能在横桥向与钢套管相接触而产生弯折,严重时会影响吊索锚固构造的使用寿命;②空间主缆在经历了主索鞍的平弯和竖弯后造成钢丝长度不一而形成鼓丝,而主缆从空缆到成桥的横向摆动又会引起主缆在主索鞍出口处产生扭转集中的现象,这进一步加剧了钢丝受力的不均匀性。对于悬索桥来说,塔顶两侧鞍座出口位置受二次应力影响比较大^[1],如果再加上扭转、鼓丝造成的应力不均匀,则可能使主缆的安全系数大幅度下降。因此,对空间缆的扭转问题一直是困扰设计和施工的难题。关于空间主缆的扭转,国内外可查阅的参考文献很少。文献[2]指出主缆扭转刚度与紧缆效果、吊索张拉顺序、吊索张拉力、约束条件等因素有关。目前,主缆扭转刚度的精确取值还存在困难,影响了扭转角的计算精度,并指出在体系转换过程中,索夹的精确定位时机、安装角度需根据实测结果进行修正调整。文献[3]以猎德大桥 1:10 缩尺试验模型,实测了体系转换中索夹的扭转角,总结了索夹横向扭转角的一些分布规律,指出主缆的扭转可通过设置索夹预偏角予以抵消。文献[2]、[3]在计算模拟时均将主缆离散为普通梁单元,扭转刚度人为取一定值,没有考虑主缆是由多根钢丝集束而成,没有深入研究主缆钢丝集束体的受力模式。按此方法计算得到的主缆扭转变形与实际情况差异较大,而事实上在体系转换过程中,随着主缆张力和扭转角的增加,主缆的扭转刚度也在不

断变化,并不是一个定值。

杭州江东大桥^[4]为双塔大横向倾角空间主缆自锚式悬索桥,空缆时主缆所在的铅垂平面与桥梁纵轴线相平行,而成桥时 2 根主缆的横桥向间距由塔顶的 4 m 变化到跨中的 42 m,横向位移很大,成桥状态吊索与铅垂线的横向夹角约为 19°,采用销铰式吊索,横向容许转角为 ±4°。而韩国永宗大桥^[5-6]成桥时吊索与铅垂线的横向夹角为 11°,吊索采用骑跨式钢丝绳吊索,其横向容许转角为 ±10°,可见江东大桥的主缆扭转更加明显,索夹的安装控制要求更加严格。而由大量钢丝组成且每隔一段距离用索夹箍紧的主缆的扭转刚度没有理论计算方法,索夹的预偏角如何确定,以及如何减小主缆扭转变形,改善索鞍出口处主缆扭转集中的现象,这一系列问题目前都没有很好的解决办法。为此,本文对空间主缆扭转的计算方法进行探讨,建立了主缆集束体考虑拉扭耦合效应的解析计算模型,推导了拉扭耦合引起的抗扭力矩的计算公式,并从施工控制的角度分析了扭转刚度、索夹刚臂、吊索张拉次序及索夹预偏角对主缆扭转角的影响。

1 主缆集束体扭转刚度的取值范围

主缆是由多根钢丝集束而成,全部索股架设完成后,经历了对鼓丝钢丝进行梳理、紧缆、安装索夹及体系转换、主缆缠丝这一过程而形成成桥时的主缆。在体系转换过程中,随着主缆内力增加,横截面钢丝不断地重新排列,取得更为稳定的截面形式,同时主缆集束体的扭转刚度也在不断变化。被索夹包围的主缆节段因索夹强大的紧箍力作用使得该部分集束体钢丝间紧密接触而不能发生相互错动,此处的主缆集束体可当作一个实体截面来考虑。如果主缆集束体钢丝没有张力,则相邻两索夹之间的集束体的扭转刚度应介于主缆钢丝间完全不黏接与完全黏接之间^[7-8],主缆集束体扭转刚度 J 的取值在以下极限值范围之内

$$J_{\min} = n \frac{\pi d^4}{32}, J_{\max} = \frac{\pi D^4}{32}, D = \sqrt{nd} \quad (1)$$

式中: n 为集束体钢丝的总数; d 为钢丝的直径; D

为主缆的直径。

江大桥主缆由37根索股组成,每根索股由91根直径为 $\Phi 5.3\text{ mm}$ 的钢丝组成,共计3367根钢丝。则由式(1)可知扭转刚度的最小值 J_{\min} 与最大值 J_{\max} 的比值为2.97/10 000,可见主缆扭转刚度的变化范围很大,必须对其取值进行深入研究。

2 主缆集束体扭转刚度的计算模型

前面的分析表明,索夹所夹紧的集束体可当作完全黏接处理,而相邻两索夹之间的主缆集束体则介于钢丝间完全不黏接与完全黏接之间。由于钢丝间的相互挤压作用而产生摩擦力,外侧钢丝的扭转变形将受到内侧钢丝的约束,这相当于提高了主缆的扭转刚度。同时,圆柱体主缆在两端索夹截面发生相对扭转后,纵向钢丝将由直线变为螺旋线,钢丝的拉力增加,拉力在主缆横截面内产生的分力形成扭转抗力力矩,即纵向受拉与横截面受扭相互耦合。因此索夹间主缆集束体的扭转刚度可分解为3个部分,即:①集束体钢丝完全不黏接,钢丝间彼此分离无相互作用,此时集束体的扭转刚度取 J_{\min} ;②钢丝的纵向受拉与横截面受扭相互耦合引起集束体扭转刚度的提高;③钢丝间摩擦引起扭转刚度的提高,也称摩擦抗扭效应。

2.1 集束体拉扭耦合分析模型

如图1所示,取两索夹间的主缆集束体来分析。假定在轴力和扭矩共同作用下,钢丝间无相对滑动,钢丝间接触变形忽略不计,集束体根据螺旋钢丝半径分成若干圆柱面,每个圆柱面上的钢丝力学特性完全相同。图1中 F 为钢丝的轴力; F_r 为钢丝轴力在主缆横截面的切向分力; S_0 为钢丝的无应力长度; E 为钢丝弹性模量; A 为主缆截面积。

基于以上假定,扭转前各钢丝平行于主缆中心线,扭转变形后主缆圆柱面的纵向钢丝将由直线变成螺旋线,螺旋线的参数方程可表示为

$$x=L\theta/\phi, y=r\sin(\theta), z=r\cos(\theta) \quad (2)$$

式中: θ 为参数方程的参数; ϕ 为两端截面的相对扭转角; L 为变形后两端截面的间距; r 为计算点到主缆截面圆心的距离。

将该螺旋线沿圆柱面展开,则为一条直线,对每一螺距展开的直线而言,构成以 $2\pi r$ 、 $2\pi/\phi$ 为直角边的三角形。若螺旋线绕过 k 圈(k 可为小数),上升高度为 L ,两直角边变为 $2\pi kr$ 及 L ,则螺旋线的长度为

$$S=\sqrt{(2\pi kr)^2+L^2}=\sqrt{(\phi r)^2+L^2} \quad (3)$$

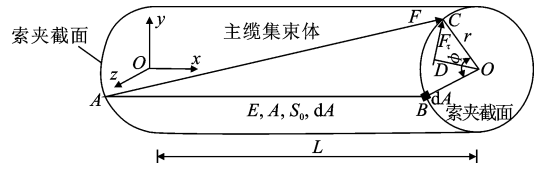


图1 主缆集束体拉扭耦合分析模型

Fig.1 Analysis model of tension-torsion coupling for main cable

对参数方程(2)求导,可得到螺旋线在端点C的切向量为

$$\mathbf{T}=(L/\phi, r\cos(\phi), -r\sin(\phi)) \quad (4)$$

设钢丝的无应力长度为 S_0 ,则扭转变形后钢丝的拉力为

$$F=EdA(S-S_0)/S_0 \quad (5)$$

设主缆的空隙率为 ρ ,则计算点处对应钢丝总的净面积为

$$dA=(1-\rho)rdrd\theta \quad (6)$$

钢丝轴力在主缆横截面的切向分力为

$$F_r=F\cos(\alpha)=F\frac{r}{\sqrt{r^2+(L/\phi)^2}} \quad (7)$$

式中: α 为端点C的切向量与主缆横截面的夹角。

截面圆心到切向分力的扭转力臂为

$$D=r \quad (8)$$

钢丝切向分力在主缆截面产生的扭转抗力力矩为

$$T=F_rD \quad (9)$$

将以上各式代入式(9),对整个主缆截面积分,可得主缆横截面所有钢丝的切向分力产生的扭转抗力力矩,整理后可表示为

$$T_z=\int_A F_r D dA=\int_A \left[\frac{(1-\rho)E\phi}{S_0} \left(1-\frac{S_0}{\sqrt{(\phi r)^2+L^2}}\right) \right] r^3 dr d\theta \quad (10)$$

令 $\phi r/L=\tan(x)$,采用换元法进行积分运算得

$$T_z=\frac{2\pi(1-\rho)E\phi}{S_0}\int_0^R \left(1-\frac{S_0}{\sqrt{(\phi r)^2+L^2}}\right) r^3 dr = \frac{2\pi(1-\rho)E\phi}{S_0} \left[\frac{R^4}{4} - \frac{L^3 S_0}{\phi^4} \left(\frac{1}{3} \left(1+\frac{\phi^2}{L^2} R^2\right)^{\frac{3}{2}} \right) - \left(1+\frac{\phi^2}{L^2} R^2\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3} \right] \quad (11)$$

式中: R 为考虑主缆空隙率影响的形状半径,形状半径 R 满足 $\pi R^2(1-\rho)$ 等于钢丝总净面积。

2.2 集束体扭转刚度的影响因素

从式(11)可以看出,主缆的形状半径、相对扭转角、初始轴力、扭转长度等参数都会影响拉扭耦合引起的扭转抗力力矩。需要说明的,式(11)中并不含有初始轴力项,但钢丝无应力长度 S_0 和两端截面距

离 L 体现了初始轴力的影响,因此,初始轴力也是影响因素之一。下面逐一改变这些参数的大小来考察扭转抗力力矩的变化趋势。

取一段主缆集束体,计算参数取值为: $E=2 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$,空隙率 $\rho=0.18$,形状半径 $R=0.169\ 809 \text{ m}$,相对扭转角 $\phi=0.087\ 266 \text{ rad}$,无应力长度 $S_0=4.995 \text{ m}$,两端截面距离 $L=5.0 \text{ m}$,得到初始轴力 $N=15\ 000 \text{ kN}$ 。

在以上计算参数的基础上,分别改变相对扭转角、形状半径、初始轴力及自由扭转长度的大小,得到扭转抗力力矩的变化曲线,如图 2~图 5 所示。从图中可以看出,随着相对扭转角的增加,扭转抗力力矩也相应增大,且增长趋势越来越快,说明相对扭转角对主缆扭转刚度的影响呈非线性增大的趋势;主缆截面形状半径对扭转抗力力矩的影响近似呈 4 次方的关系;初始内力对扭转抗力力矩的影响基本呈线性关系;扭转长度对主缆扭转刚度的影响呈非线性减小的趋势。

对直径一定的主缆,随着体系转换的进行,主缆内力及两索夹截面的相对扭转角均不断增加,引起主缆集束体的扭转刚度呈明显的非线性增长的趋势,这就是主缆在体系转换初期扭转刚度较小,而在后期扭转刚度大大增加的原因。因此在有限元计算中需考虑因拉扭耦合效应引起的主缆集束体扭转刚度的提高。

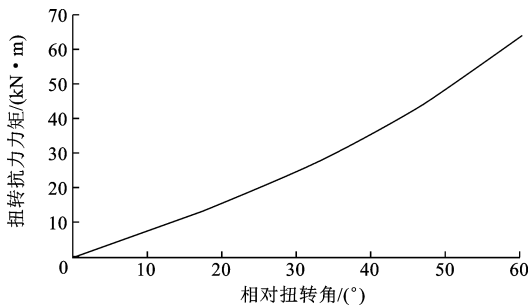


图 2 相对扭转角对扭转抗力力矩的影响曲线
Fig. 2 Influence curve of relative torsion angle on torsion resistance moment

以上分析可以确定主缆集束体扭转刚度的前两部分,对于钢丝间因摩擦、错动引起的扭转刚度的变化则很难采用确定的公式进行计算,需通过现场测试来不断识别。事实上,影响主缆扭转刚度的因素很多,除了主缆半径、相对扭转角、内力状态、两索夹间主缆扭转长度这些主要因素外,索夹的紧箍力、主缆的紧箍质量、钢丝间摩擦因数等都对扭转刚度有一定的影响,可以说主缆的扭转刚度是一个受多因素影响的随机变量。在体系转换的前期,主缆内力、

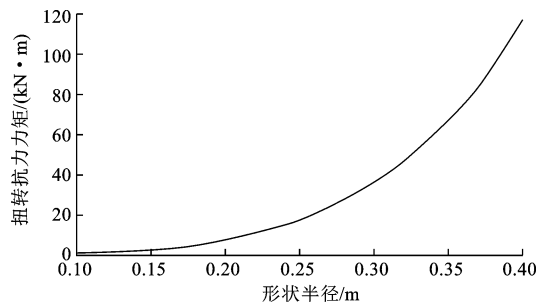


图 3 主缆形状半径对扭转抗力力矩的影响曲线
Fig. 3 Influence curve of shape radius of main cable on torsion resistance moment

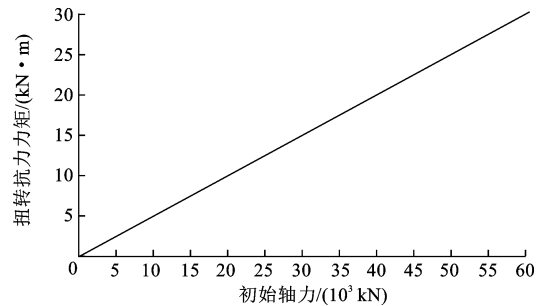


图 4 初始轴力对扭转抗力力矩的影响曲线
Fig. 4 Influence curve of initial axial force on torsion resistance moment

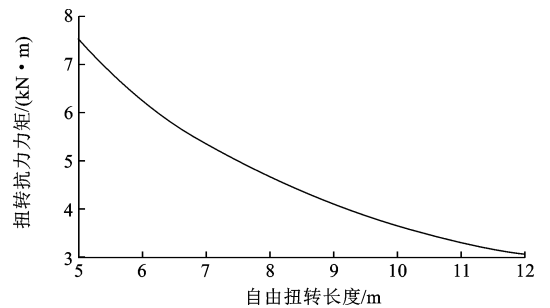


图 5 自由扭转长度对扭转抗力力矩的影响曲线
Fig. 5 Influence curve of free torsion length on torsion resistance moment

扭转角均较小,此时摩擦抗扭起主导作用,在外界扭矩作用下容易引起截面钢丝间的错动而取得更加稳定的截面形式。当主缆内力、扭转角较大时,拉扭耦合效应成为截面抗扭的主导因素,此时主缆集束体扭转刚度的变化呈现明显的非线性。本文重点讨论拉扭耦合效应引起的主缆扭转刚度的提高。

2.3 考虑拉扭耦合效应的主缆有限元计算

将上述拉扭耦合效应引起的扭转刚度的提高在有限元计算中加以考虑。根据式(11),对空间梁单元的杆端扭转抗力力矩和切线刚度矩阵中与扭转角相对应的刚度系数加以修正,便建立了能考虑主缆集束体拉扭耦合效应的空间梁单元。下面通过算例

分析考虑拉扭耦合效应后的主缆扭转角。以江东大桥中跨主缆为例建立单根主缆模型,取对称结构,计算模型如图 6 所示。在吊点处用集中荷载代替吊索的作用,当不考虑拉扭耦合时,主缆的扭转惯性矩取 $2.6\ 082\times 10^{-6}\ \text{m}^4$ (为最小扭转惯性矩的 10 倍)。边界条件为:左支点固结,跨中点取对称边界条件。

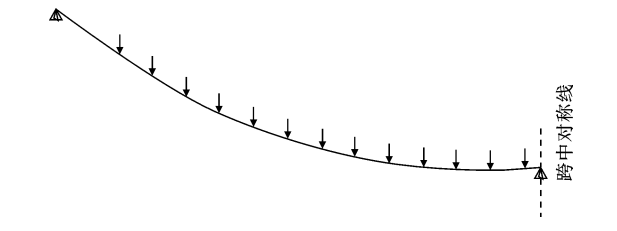


图 6 主缆扭转角计算模型

Fig. 6 Calculation model of torsion angle of main cable

图 7 给出了考虑拉扭耦合效应与否计算得到的主缆扭转角,不考虑拉扭耦合模型的主缆扭转惯性矩取 $2.6\ 082\times 10^{-6}\ \text{m}^4$;考虑拉扭耦合模型主缆的扭转刚度是随扭转角、主缆张力不断变化的,非固定值。可以看出:考虑拉扭耦合效应计算所得的扭转角比不考虑拉扭耦合计算所得的扭转角要小,在扭转惯性矩取最小值的 10 倍时,两者的最大差值约为 10%。分析表明,扭转惯性矩取值越小,两者的差异越明显,当扭转惯性矩取最大值(对应于钢丝间完全黏接的情况)时,拉扭耦合效应对扭转角的计算结果几乎没有影响。

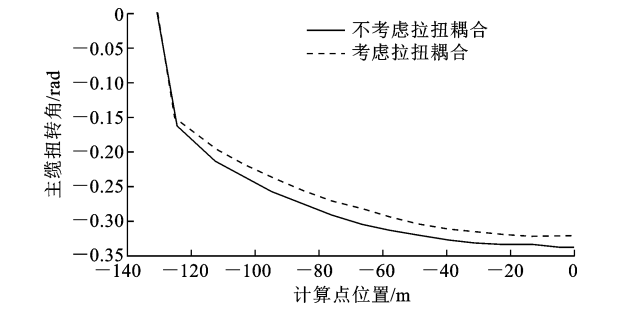


图 7 主缆扭转角的计算比较

Fig. 7 Computation comparison of torsion angle of main cable

3 主缆扭转角控制方法

空间主缆的扭转会引起主缆钢丝的受力不均和索夹的安装定位困难。合理的体系转换方案应兼顾两者,既要保证吊索从安装到锚固的过程中不与索夹和锚管发生挤压,同时也要保证主缆的扭转尽量小。下面分别讨论扭转刚度、索夹刚臂、吊索张拉次序及索夹预偏角对主缆扭转的影响。

3.1 主缆扭转刚度对扭转角的影响

前面分析表明,主缆集束体扭转刚度的变化范

围很大,最小扭转刚度是最大扭转刚度的万分之几,显然扭转刚度的取值是影响主缆扭转角的主要因素。为便于分析扭转刚度的影响,引入扭转刚度系数 k ,表示计算中所用的扭转刚度与最小扭转刚度的比值。仍采用图 6 所示的计算模型,改变主缆扭转刚度的大小来分析扭转刚度对扭转角的影响,计算中考虑了拉扭耦合效应。图 8 给出了主缆扭转角的分布曲线。

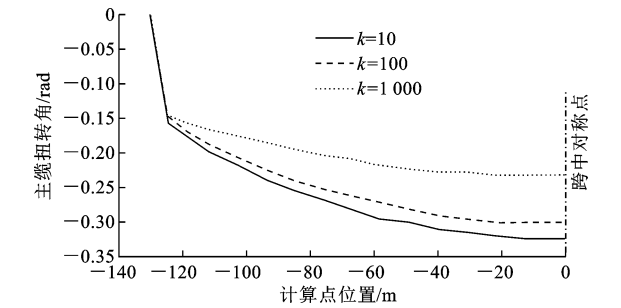


图 8 不同扭转刚度系数对应的主缆扭转角的分布

Fig. 8 Torsion angle distribution of main cable with different torsional stiffness

由图可以看出:在相同的荷载作用下,主缆扭转刚度越大,扭转角就越小;在鞍座出口处主缆发生扭转集中的现象,扭转刚度越小,扭转集中现象越明显,拉扭耦合效应也越明显。

3.2 考虑索夹刚臂对扭转角的影响

空间缆自锚式悬索桥因主缆直径一般较小,故一般采用销铰式平行钢丝吊索。目前用于空间缆索体系的索夹主要有 2 种:一种是可转动索夹,索夹可绕主缆相对转动,索夹耳板总是与吊索轴线的方向保持一致,吊索不会对主缆施加扭矩,这种索夹一般用于主缆横向位移较小的悬索桥中,如天津富民桥^[9];另一种是索夹固定在主缆上,不能相对于主缆转动,吊索索力可通过索夹刚臂对主缆施加扭矩,从而影响主缆的扭转变形^[10]。

下页图 9 给出了将吊索分力直接作用在主缆中心线或施加在索夹刚臂下端点(吊索与索夹的交点)2 种情况计算得到的主缆扭转角。可以看出,索夹刚臂对主缆扭转角的影响较为明显,考虑索夹刚臂时计算所得的主缆扭转角要大于吊索直接通过主缆中心的情况;主缆扭转刚度越小,通过索夹刚臂施加到主缆上的扭矩引起主缆扭转的范围减小,扭转较为集中,而扭转刚度大则扭转角的分布更加均匀,说明扭转刚度的大小反映了扭转角均匀分布的能力。

3.3 吊索张拉次序对扭转角的影响

吊索张拉前,与该吊索对应的索夹可以随主缆

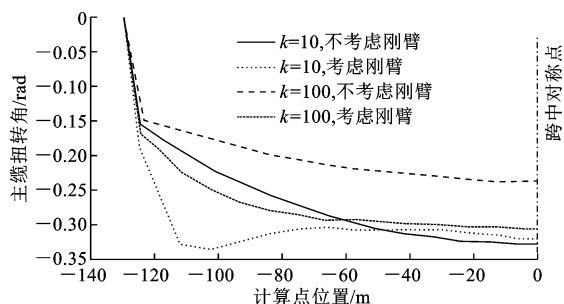


图9 索夹刚臂对主缆扭转角的影响

Fig. 9 Influence of cable clip's rigid arm on torsion angle

自由的发生扭转,一旦吊索安装并张拉,吊索对索夹提供的保向力,将会约束该处主缆发生扭转。如果该保向力很大,且主缆刚度大位移很小,则该吊索会将索夹锁死,后续吊索张拉引起的主缆扭转只能传递到该索夹截面而不能越过该索夹传递到其他截面上。事实上,在空间缆体系转换中吊索力是逐渐增大的,主缆发生的横向位移也相当大,故吊索对索夹的锁定作用不明显。不同体系转换方案对主缆的扭转角几乎没有影响。

图10给出了从桥塔向跨中方向、从跨中向桥塔方向,2种方案张拉吊索时对应的主缆扭转角,计算表明2种方案对应的主缆扭转角是相同的。可见通过改变吊索张拉次序来最终减小成桥时主缆的扭转角是难以实现的。但从另一个角度来说,从跨中向桥塔张拉吊索的方案优于从桥塔向跨中方案。原因在于从跨中向桥塔方向逐步安装索夹并张拉吊索时,随着主缆内力和位移的增加,鞍座出口处鼓丝严重的钢丝不断发生错动和重新排列而受力会趋于均匀。而若先张拉靠近桥塔的吊索,则鞍座出口处鼓丝严重的钢丝只能由第1根吊索和鞍座间的主缆段来消化,减低了主缆安全系数。

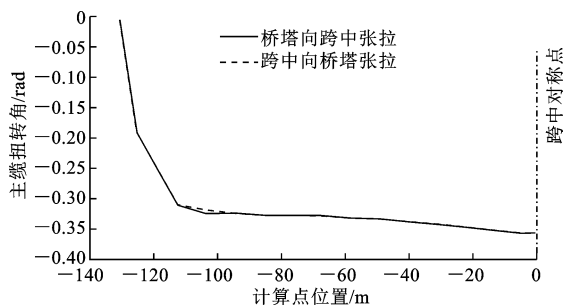


图10 吊索张拉次序对扭转角的影响

Fig. 10 Influence of hangers tensioning order on torsion angle

3.4 索夹预偏角对扭转角的影响

当吊索轴线方向与索夹耳板方向不一致时,吊索分力会对主缆中心施加扭矩从而影响主缆的扭转变形。如果施加的扭矩方向与主缆的扭转角方向正

好相反,则该扭矩将会使主缆反向扭转,从而达到减小扭转变形的目的。如果在索夹安装时设置与成桥时索夹扭转方向相同的预偏角,是否可以抵消或降低主缆的扭转变形呢?

图11给出了索夹在空缆时按图10中的扭转角预偏时计算得到的成桥时主缆的扭转角分布曲线。图10是空缆时索夹竖直(没有预偏)对应的主缆扭转矩角。由图10、图11可知,通过设置预偏角,主缆的扭转大幅度减小,在索夹安装时就设置预偏角是减小主缆扭转的有效方法。从图11可以看出,扭转刚度越大扭转角的分布越均匀,通过设置预偏角来改善主缆扭转就越困难。

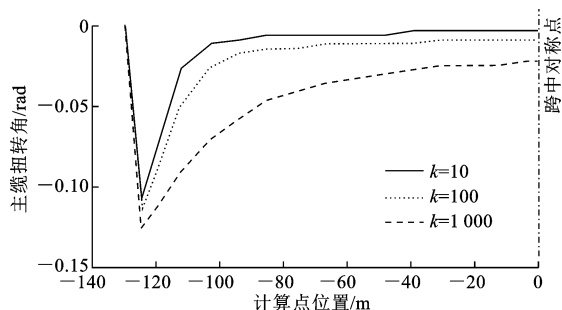


图11 索夹预偏角对主缆扭转变形的影响

Fig. 11 Influence of bias angle of cable clips on torsion angle

4 结 语

(1)主缆钢丝束体的扭转刚度是受多因素影响的变量,在诸多因素中,拉扭耦合效应是引起主缆扭转刚度非线性变化的主要因素,在体系转换过程中,随着主缆张力和扭转角的增大,主缆扭转刚度呈明显的非线性增长。

(2)相对扭转角对主缆扭转刚度的影响呈非线性增大的趋势;主缆截面形状半径对扭转刚度的影响近似呈4次方的关系;初始内力对扭转刚度的影响基本呈线性关系;扭转长度对主缆扭转刚度的影响呈非线性减小的趋势。

(3)考虑拉扭耦合效应计算得到的扭转角比不考虑拉扭耦合(扭转刚度取定值)计算得到的扭转角要小,在扭转惯性矩取最小值的10倍时,两者的最大差值约为10%。在有限元计算中,考虑拉扭耦合效应能提高空间主缆扭转的计算精度。

(4)主缆扭转刚度越小,在鞍座出口处主缆发生扭转集中的现象越明显。不同的体系转换方案对主缆的扭转角几乎没有影响,但从改善鞍座出口处主缆钢丝的受力均匀性来说,从跨中向桥塔方向张拉吊索的方案优于从桥塔向跨中方向的张拉方案。

(5)在施工控制中,为减小主缆的扭转变形,可在索夹安装时设置与成桥时索夹扭转方向相同的预偏角,利用吊索力通过索夹刚臂给主缆施加反向扭矩来实现对主缆扭转的主动控制,以抵消或减小主缆的扭转变形。

(6)除了拉扭耦合效应外,主缆扭转刚度的变化还与钢丝间的摩擦因数和接触应力、索夹的紧箍力等因素相关,这些因素对主缆扭转刚度的影响有待进一步分析研究。

参考文献:

References:

- [1] 严琨,沈锐利,闫勇.大跨度悬索桥鞍座出口处主缆的二次应力[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31(2):191-194.
- YAN Kun, SHEN Rui-li, YAN Yong. Secondary stress of the first segment main cable near the saddles in long-span suspension bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012, 31(2): 191-194. (in Chinese)
- [2] 沈洋.江东大桥空间缆自锚式悬索桥体系转换分析研究[J].上海公路,2009(1):31-35.
- SHEN Yang. Analysis on structure system transformation of Jiangdong self-anchored suspension bridge with spatial cables [J]. Shanghai Highways, 2009, (1): 31-35. (in Chinese)
- [3] 张俊平,黄海云,刘爱荣,等.空间缆索自锚式悬索桥体系转换过程中受力行为的全桥模型试验研究[J].土木工程学报,2011,44(2):108-115.
- ZHANG Jun-ping, HUANG Hai-yun, LIU Ai-rong, et al. An overall bridge model test study on the mechanical behaviors in the process of system transformation of self-anchored suspension bridge with spatial cable system [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 108-115. (in Chinese)
- [4] 柯红军,李传习,张玉平,等.双塔大横向倾角空间主缆自锚式悬索桥体系转换方案与控制方法[J].土木工程学报,2010,43(11):94-101.
- KE Hong-jun, LI Chuan-xi, ZHANG Yu-ping, et al.

System transformation program and control principles of suspender tension for a self-anchored suspension bridge with two towers and large transverse inclination spatial cables [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 94-101. (in Chinese)

- [5] Kim H K, Lee M J, Chang S P. Non-linear shape-finding analysis of a self-anchored suspension bridge [J]. Engineering Structures, 2002, 24(12): 1547-1559.
- [6] 严国敏.韩国的永宗悬索桥[J].国外公路,1998,18(6):16-18.
- YAN Guo-min. Yongzong suspension bridge of South Korea [J]. Journal of Foreign Highway, 1998, 18(6): 16-18. (in Chinese)
- [7] 苏成,徐郁峰,韩大建.频率法测量索力中的参数分析与索抗弯刚度的识别[J].公路交通科技,2005,22(5):75-78.
- SU Cheng, XU Yu-feng, HAN Da-jian. Parameter analysis and identification of bending stiffness of cables during tension measurements by frequency method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(5): 75-78. (in Chinese)
- [8] 齐东春,郭健,沈锐利.悬索桥短吊索索力测试的探讨[J].中国工程科学,2010,12(7):78-83.
- QI Dong-chun, GUO Jian, SHEN Rui-li. Study on tension testing of short hangers in suspension bridges [J]. Engineering Sciences, 2010, 12(7): 78-83. (in Chinese)
- [9] 彭春阳,黄家珍,张日亮.空间缆索结构悬索桥索夹的研发[J].预应力技术,2008(5):24-25.
- PEN Chun-yang, HUANG Jiang-zhen, ZHANG Ri-liang. Research and development of cable clip in spatial cable suspension bridge [J]. Prestress Technology, 2008(5): 24-25. (in Chinese)
- [10] 沈锐利,齐东春,唐茂林.杭州江东大桥全桥模型静力试验研究[J].土木工程学报,2011,44(1):74-80.
- SHEN Rui-li, QI Dong-chun, TANG Mao-lin. Model test study of the static property of the Jiangdong bridge in Hangzhou [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 74-80. (in Chinese)