

文章编号:1673-2049(2010)03-0059-06

悬索桥主缆抗弯刚度引起的二次应力分析

聂利芳¹, 沈锐利¹, 唐茂林¹, 沈 旺²

(1. 西南交通大学 桥梁工程系, 四川 成都 610031; 2. 浙江省舟山连岛工程建设指挥部, 浙江 舟山 316000)

摘要:为了研究悬索桥主缆考虑抗弯刚度引起的二次应力,以一座主跨为 730 m 的双塔单跨悬索桥为例,用索单元与空间梁单元组成的组合单元对主缆进行模拟,采用桥梁非线性分析软件 BNLAS 建立有限元模型,通过改变组合单元中梁单元的抗弯惯性矩,分析了抗弯刚度对主缆边跨和主跨二次应力的影响;比较了加劲梁从跨中向桥塔方向吊装和从桥塔向跨中方向吊装 2 种不同吊装方案下的二次应力,研究吊装过程中二次应力的变化情况;分析了恒载作用下悬索桥的二次应力随跨度的变化,并与有限元结果进行比较。结果表明:主缆抗弯惯性矩对二次应力影响很小;吊装顺序对二次应力有较明显的影响;恒载作用下跨度越小,二次应力越大。

关键词:悬索桥;二次应力;主缆;抗弯刚度;BNLAS

中图分类号:U448.25 **文献标志码:**A

Secondary Stress Analysis of Main Cable of Suspension Bridge Considering Bending Rigidity

NIE Li-fang¹, SHEN Rui-li¹, TANG Mao-lin¹, SHEN Wang²

(1. Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Zhejiang Provincial Construction Headquarters of Zhoushan Islands Link Project,
Zhoushan 316000, Zhejiang, China)

Abstract: In order to study the secondary stress of main cable of suspension bridge considering the bending rigidity, authors took a main-span of 730 m with twin-towers and single-span suspension bridge as example. The main cable was simulated with composite unit of cable unit and spatial beam unit. Then the finite element model was established by using bridge nonlinear analysis software BNLAS. The effects of bending rigidity on the main cable secondary stress of side-span and main-span were analyzed by way of changing the beam unit bending moment of inertia of composite unit. At the same time, the secondary stress was studied when the stiffening girder was lifted from bridge towers to the mid-span, as well as from the mid-span to bridge towers to research the secondary stress during the process of lifting. Finally, the secondary stresses with different levels of long-span suspension bridge under a variety of loads were analyzed theoretically, and compared with the finite element results. Results show that the effect of bending moment of main cable on secondary stress is very small, and the process of lifting has significant impact on secondary stress. The smaller the span is, the greater the secondary stress is under dead load state.

Key words: suspension bridge; secondary stress; main cable; bending rigidity; BNLAS

收稿日期:2010-07-05

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAG07B05)

作者简介:聂利芳(1986-),女,河南安阳人,工学硕士,E-mail:nilifa@163.com。

0 引言

悬索桥是以缆索为主要承重构件的桥梁,一般在设计中是将主缆的安全系数设定比较大(一般取为 2.2~2.7)来确保主缆的安全性,而不考虑主缆二次应力的影响^[1-6]。实际上主缆由钢丝组成,钢丝具有抗弯刚度,索夹和缠丝的夹紧作用约束了钢丝之间的相对滑动,使主缆具有一定的抗弯刚度,当主缆受到横向或竖向荷载作用而变形时,就会引起主缆钢丝的弯曲和不同伸缩,因此产生二次应力^[7]。随着悬索桥跨度的不断增大,主缆截面逐渐增大,采用不计二次应力影响的取较大安全系数的设计方法,不能真实地反映主缆的应力状态,并且取过大的安全系数,会造成较大的浪费。结合施工过程,讨论悬索桥主缆在紧缆后恒载及活载作用下的二次应力,对了解主缆工作状态、确定主缆合适的安全储备很有必要。

早在 20 世纪 30 年代初建造乔治·华盛顿桥时,Dana 等^[8]就对主缆在加劲梁架设过程中的受力和变形进行过研究,并实测了主缆应力;20 世纪 60 年代 Wyatt^[9]曾对主缆在缠丝前和缠丝后的二次应力进行过系统的分析和研究,并提出一套实用的计算公式;20 世纪 60~80 年代,日本学者在进行深入理论研究的同时,还做了很多试验验证和实桥测定等工作;1994 年林长川等^[10]在分析悬索桥主缆二次应力(含局部应力和部分丝股应力超出平均应力的增量)产生原因的基础上,介绍了各项二次应力的计算方法,并通过算例分析了二次应力对主缆安全的影响,同时从降低二次应力出发讨论了设计和施工中的一些问题;2005 年张伟等^[11]对悬索桥的主缆由于丝股长度差异、钢丝弹性模量差异以及钢丝弯曲、缆索角度、缆索形状变化等产生的二次应力进行了计算公式方面的分析与推导;2009 年曲婷等^[12]通过完全无抗弯刚度的链条“主缆”模型与有一定抗弯刚度的铁丝“主缆”模型的对比试验及针对试验情况所进行的有限元分析,初步研究了主缆抗弯刚度的影响问题。

本文中建立了一种能同时反映悬索桥主缆索结构受力特性和空间梁结构受力特性的计算模型,采用这种有限元模型研究了悬索桥主缆建成后加劲梁吊装等后续施工引起的悬索桥主缆的二次应力。

1 计算模型

为反映主缆的抗弯刚度在紧缆施工后由于变形

所产生的弯曲应力,同时又不改变主缆自重的分布特点,本文中建立了一种索梁组合单元:对悬索桥的主缆,将其离散为若干个节点、划分为若干个单元,两节点之间的单元由索单元和梁单元组成;索单元是悬链线单元,无抗弯刚度,梁单元则不考虑轴向刚度,只有抗弯和抗扭刚度。在空缆状态,根据空缆矢高,按悬链线建立起结构计算模型,此时索单元承受张力,梁单元为无应力状态,结构处于有应力的索受力为主的平衡状态。以空缆为初始状态,后续的施工中结构的受力则是索单元承担拉伸与压缩、梁单元承担弯曲变形的影响。在下面的分析中,将索单元中拉应力称之为一次应力,梁单元的弯矩引起的应力称之为二次应力,应力均以受拉为正。

本文中主跨为 730 m 的某双塔单跨悬吊悬索桥为例来研究主缆紧缆后的各项施工产生的二次应力及其特点。该桥梁的总体布置为:主缆跨度为 240 m+730 m+120 m,主跨的矢跨比为 1/10,加劲梁为单跨简支结构,荷载等级为公路 I 级。利用桥梁结构非线性分析计算软件 BNLAS^[13],以空缆状态为最初状态,建立双塔单跨悬吊悬索桥的空间有限元模型,在此基础上安装索夹、吊装加劲梁、施加二期恒载、车辆活载与人群荷载等。

以理论悬链线建立空缆状态的计算模型,在该状态下悬索桥主缆没有弯矩只有轴力,在此基础上随着恒载、活载、温度等荷载的施加,主缆轴力和弯矩逐渐增大。加劲梁吊装完成和桥面铺装后,可得到恒载状态主缆的真实应力,在此基础上再作用温度荷载、活载等,可得到温度变化、活载作用等引起的考虑弯曲影响的主缆实际应力。

为讨论主缆抗弯刚度对二次应力的影响,分析中把组成主缆的丝股当作整体时所具有的惯性矩作为最大惯性矩 I_{zmax} ,钢丝之间完全自由、主缆抗弯刚度为单根钢丝之和的惯性矩作为最小惯性矩 I_{zmin} 。计算结果表明,主缆为索单元、有最大或最小抗弯惯性矩的索梁组合单元时,主缆的成桥状态基本没有差异,与从空缆到成缆的变形梁相比,3 种计算模型的结果差异可忽略,这说明主缆的抗弯刚度大小基本不会影响主缆的最终线形。

边跨主缆恒载、恒载加活载以及恒载加活载加温度荷载作用时的截面最大二次拉应力相差不大,图 1 仅给出组合单元的梁单元惯性矩为最大惯性矩 I_{zmax} 时的结果,其中 L 为跨度。图 2 为恒载状态主缆组合单元梁单元的竖向弯矩。

从以上分析可以得到,恒载作用下主跨最大二

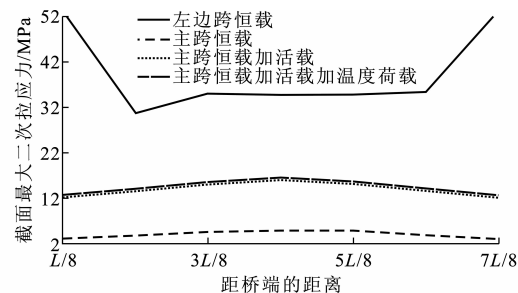


图 1 各级荷载作用下的截面最大二次拉应力
Fig. 1 The Largest Secondary Tensile Stresses of Section Under Different Levels of Loads

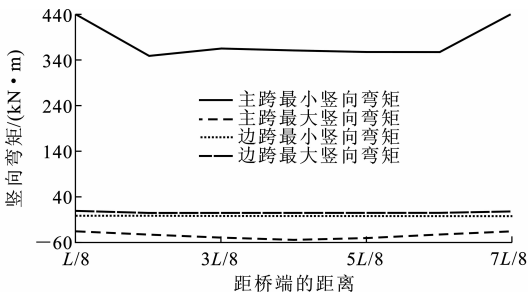


图 2 恒载状态下的竖向弯矩

Fig. 2 Vertical Bending Moments at Dead Load State

次应力出现在跨中位置,大小约 5 MPa,此处的索单元最小应力为 484.2 MPa,最大的二次应力与该处索单元应力的比值为 1.02%。分析表明,抗弯惯性矩的大小对二次弯矩的影响比较大,但对二次应力的影响却很小,二次应力几乎不受抗弯惯性矩的影响。恒载与活载共同作用下,主跨最大二次应力同样出现在跨中位置,大小为 16.1 MPa,此处的杆单元最小应力为 566.1 MPa,最大的二次应力与该处杆单元应力的比值为 2.86%。恒载、活载与温度荷载共同作用下,主跨最大二次应力同样出现在跨中位置,大小为 16.6 MPa,此处的杆单元最小应力为 570.2 MPa,最大的二次应力与该处杆单元应力的比值为2.91%。

通过分析可以发现,恒载作用下由于抗弯刚度引起的主跨二次应力与索单元应力的比值约为 1%,恒载与活载共同作用,以及恒载、活载与温度荷载共同作用下,由于抗弯刚度引起的主跨二次应力与杆单元应力的比值约为 3%;改变主缆梁单元的抗弯惯性矩对二次应力的影响很小,不足 0.5 MPa 的变化。主缆抗弯刚度对边跨的影响比主跨大,特别是靠近鞍座附近,其二次应力可达到主缆按索计算应力的 10% 以上。由于本文算例桥梁边跨没有吊索且比较短,活载与温度荷载共同作用时,边跨的

二次应力变化很小。

2 抗弯刚度对二次应力的影响

对于纯弯曲的梁,设梁的抗弯刚度为 EI_z ,梁上的弯矩 $M(x)$ 与中性层曲率 $\frac{1}{\rho(x)}$ 的关系式^[14]为

$$\frac{1}{\rho(x)}=M(x)/(EI_z) \tag{1}$$

式中: E 为弹性模量; I_z 为截面惯性矩。

悬索桥主缆组合单元中的梁单元可以看成是有初曲率的细长梁,不计剪力对弯曲变形的影响,此时的式(1)仍适用,梁上的弯矩和曲率半径皆是跨度方向 x 位移的函数,即

$$\frac{1}{\rho(x)}=\frac{M(x)}{EI_z}=\frac{d^2\omega(x)}{dx^2} \tag{2}$$

式中: $\omega(x)$ 为挠曲变形。

在第 1 节分析的基础上,把从空缆状态到成桥状态各点的累计竖向位移看成梁的挠曲变形,用曲线拟合法可得出该模型主跨的挠度曲线方程为

$$\begin{aligned} \omega(x)= & -0.238\ 927\ 67\times10^{-10}x^3+ \\ & 0.493\ 934\ 684\ 4\times10^{-4}x^2- \\ & 0.360\ 049\ 122\ 4\times10^{-4}x+ \\ & 0.140\ 448\ 134\ 8 \end{aligned}$$

其二阶导数为

$$\begin{aligned} \frac{d^2\omega(x)}{dx^2}= & -1.433\ 566\times10^{-10}x+ \\ & 0.987\ 869\ 368\times10^{-4} \end{aligned}$$

截面二次拉应力 σ 为

$$\sigma=\frac{M(x)y}{I_z}=\frac{EI_zy}{\rho(x)I_z}=\frac{d^2\omega(x)}{dx^2}Ey \tag{3}$$

式中: y 为计算点到中性轴的距离。

将拟合的曲率代入式(3),可计算出各点的理论二次弯矩。拟合计算结果与有限元计算结果的比较见表 1。

表 1 理论计算结果与有限元计算结果的比较

距桥端的 距离	截面弯矩/(kN·m)		截面最大二次拉应力/MPa	
	理论计算 结果	有限元 计算结果	理论计算 结果	有限元 计算结果
L/8	48.596 51	32.479	4.673 957	3.123 79
2L/8	48.590 14	42.525	4.673 345	4.090 01
3L/8	48.583 80	49.212	4.672 734	4.733 15
4L/8	48.576 75	51.373	4.672 057	4.941 00

由以上分析和讨论可以看出,有限元得到的截面外缘最大二次拉应力由桥塔到跨中逐渐增大,而

理论分析得到的各点结果基本相同,与有限元计算的 $3L/8$ 位置比较接近,造成这种结果的原因是为方便理论分析采用了平截面假定等各种前提条件;理论分析中还得到截面的二次应力与截面惯性矩 I_z 无关,这与上述得到的模型中截面惯性矩变化时对二次应力的影响很小相吻合,原因是主跨各点处的曲率变化量很小,截面惯性矩的改变不足以引起二次应力明显变化。

3 吊装过程中的二次应力分析

随着加劲梁逐步吊装,悬索桥主缆各点的二次应力也随之发生变化,为分析施工过程中主缆由于抗弯刚度影响产生的二次应力,本文中讨论了加劲梁吊装施工过程的影响,即比较了加劲梁从跨中开始向桥塔方向吊装和从桥塔开始向跨中方向吊装 2 种施工方案的不同影响。

由跨中向桥塔方向吊装时,第 1 阶段吊装跨中的梁段,第 2 阶段对称吊装靠近跨中段的 2 个梁段,依次类推直至第 36 阶段对称吊装靠近桥塔的 2 个梁段;由桥塔向跨中方向吊装时,第 1 阶段对称吊装靠近桥塔的 2 个梁段,第 2 阶段对称吊装靠近第 1 阶段梁段的 2 个梁段,依次类推直至吊装第 36 阶段跨中的梁段。图 3 给出了 2 种吊装方案下截面最大二次拉应力的包络图。

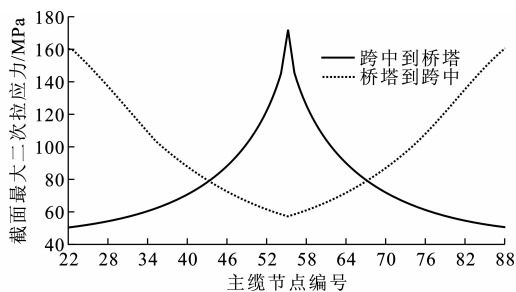


图 3 截面最大二次拉应力包络图

Fig. 3 Envelope Diagram of the Largest Secondary Tensile Stresses of Section

通过对以上数据的分析可以得出,从主跨跨中位置向两桥塔对称吊装加劲梁过程中,吊装跨中梁段时主缆的弯曲二次应力最大,达到 172.2 MPa;从两桥塔向主跨跨中对称吊装加劲梁时,靠近桥塔处的主缆弯曲二次应力最大,最大应力也接近 160 MPa。从施工分析结果看,吊装梁段位置出现如此大的二次应力,是由于该处梁段吊装之后会在主缆吊点处引起很大的折角造成的,随着梁段的逐渐吊装以及应力的重分配,主缆的二次应力变化趋于稳定。

施工过程的分析表明,吊装加劲梁的施工中由于主缆的弯曲,将产生比较大的弯曲二次应力,但随着吊装梁段的增加,主缆线形的曲率逐渐变平缓,弯曲二次应力逐渐减小。桥梁建成后,主缆中残留的弯曲二次应力很小,基本可忽略不计。

4 二次应力与跨度的关系

本文第 2 节中的分析表明,悬索桥主缆的实际线形可近似假定为抛物线线形,计算简图如图 4 所示,其中 f 为矢高。由于成桥时主缆的强度安全系数一般不小于 2.5,可取 2.5 为基准值。设主缆材料的极限抗拉强度为 1 670 MPa,则主缆控制点的最大应力应不超过 670 MPa。在大跨度悬索桥中,主缆活载的应力不超过总应力的 10%,以下讨论活载应力在 5%~20% 变化时,恒载引起的二次应力随跨度的变化。

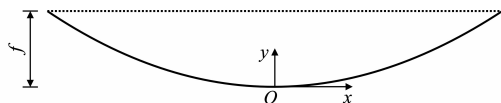


图 4 主缆抛物线线形

Fig. 4 Parabola Shape of Main Cable

在图 4 所示的坐标系中,主缆的抛物线方程及各阶导数分别为

$$y = \frac{4f}{L^2}x^2, y' = \frac{8f}{L^2}x, y'' = \frac{8f}{L^2}$$

主缆线形为二次抛物线时,设 n 为矢跨比,主缆的总长度 S_{total} 可以表示为

$$S_{\text{total}} = L \left(1 + \frac{8n^2}{3} - \frac{32n^4}{5} \right) \quad (4)$$

式(4)所表达的长度是主缆因受恒载而伸长的结果,因此为了得到主缆的无应力长度,应将全缆的这一伸长量算出来从式(4)中扣除。文献[15]中给出了主缆因恒载所致的弹性总伸长量 ΔS 的计算公式,即

$$\Delta S = L \frac{H}{EA} \left(1 + \frac{16n^2}{3} \right) \quad (5)$$

式中: A 为主缆截面面积; H 为主缆缆力水平分量。

文献[15]中还给出了跨度增量 ΔL 与矢高增量 Δf 之间的关系,即

$$\Delta L = \frac{16n(5-24n^2)}{15-40n^2+288n^4} \Delta f \quad (6)$$

在图 4 中,主缆上恒载应力最大的点位于 $x = \pm L/2$ 处,恒载应力最小的点位于 $x = 0$ 处。以成桥矢跨比 n 为 1/10、活载应力占总应力 10% 为例,分析讨论跨度对二次应力的影响。由式(4)可知,此时

主缆总长度 S_{total} 和恒载作用弹性总伸长量 ΔS 分别为

$$S_{\text{total}}=L(1+\frac{8}{300}-\frac{32}{50\,000})=1.026L$$
$$\Delta S=L\frac{559.9\times10^6A}{2.0\times10^{11}A}(1+\frac{16}{300})=0.002\,9L$$

空缆状态主索鞍会向边跨方向有一定距离的偏移,假定偏移量近似为 $0.002L$,则从空缆状态到成桥状态主缆的最大挠度为

$$\Delta f=\frac{15-0.4+0.028\,8}{1.6(5-0.24)}\times0.004\,9L=0.009\,74L$$

假设主缆从空缆到成桥的挠曲变形曲线为矢高 $0.009\,74L$ 的抛物线,其方程为

$$y=\frac{0.038\,957}{L}x^2\tag{7}$$

相应的曲线 $y=f(x)$ 上任意一点的曲率为

$$\frac{1}{\rho(x)}=\pm\frac{y''(x)}{\{1+[y'(x)]^2\}^{3/2}}\tag{8}$$

由式(7)、(8)很容易得到空缆状态变化到成桥状态时恒载引起的曲率变化量。选取主跨分别为 200、400、600、800、1 000、1 200 m 六种不同跨度级别的桥梁,主跨跨中($x=0$)处的曲率变化量见图 5。

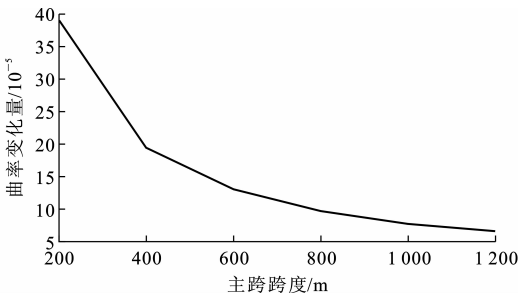


图 5 不同跨度下的曲率变化量

Fig. 5 Curvature Variations Under Different Spans

从图 5 可以看出,随着跨度的逐渐增大,曲率变化量越来越小,也就是说从空缆状态变化到成桥状态时,跨度越大,恒载引起的主缆线形变化越不明显,二次应力的变化也就越小。

200 m 跨度悬索桥主缆直径按 0.3 m 计,800 m 跨度悬索桥主缆直径按 0.6 m 计,1 200 m 跨度悬索桥主缆直径按 0.8 m 计,根据图 5 和式(3),可近似估算出主缆二次应力随跨度的变化:200 m 跨度二次应力为 12.0 MPa,800 m 跨度二次应力为 5.84 MPa,1 200 m 跨度二次应力为 5.19 MPa。

图 6 为按组合单元有限元法计算的恒载作用下 3 种不同跨度级别桥梁截面最大二次拉应力的比较,其中主跨 1 650 m 的大桥采用钢箱梁形式,主跨

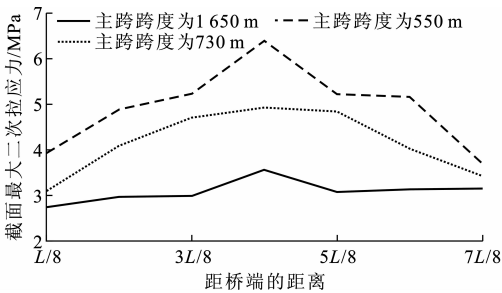


图 6 恒载作用下的截面最大二次拉应力

Fig. 6 The Largest Secondary Tensile Stresses of Section at Dead Load State

730 m 和主跨 550 m 的大桥采用钢桁架加劲梁。结果表明,主跨恒载二次应力大小与近似分析值基本一致,近似计算值为主跨二次应力的上限。

通过上述的近似理论分析和有限元分析可以看出,随着跨度增大,主跨主缆从空缆到成桥主缆线形的曲率变化量减小比较快,虽然主缆截面越来越大,但弯曲二次应力是逐渐变小的,同时上述分析结果表明,对于悬索桥主跨,其恒载弯曲二次应力比较小。

5 结 语

(1)考虑主缆抗弯刚度时,成桥恒载作用下由于抗弯刚度引起的主缆二次应力相对比较小,与主缆索单元的应力相比,增加值约为 1%;恒载与活载共同作用,以及恒载、活载与温度荷载共同作用下,由于抗弯刚度引起的二次应力与主缆索单元应力相比,增加值约为 3%,因此得到由抗弯刚度引起的主跨二次应力增加值与主缆索单元相比,不超过 5%;主缆抗弯刚度惯性矩的大小对二次应力的影响很小。

(2)抗弯刚度引起的二次应力对边跨的影响比主跨大得多,情况也复杂得多,可能达到总体应力的 10% 以上,设计时应注重边跨二次应力的影响。

(3)计算分析表明,加劲梁吊装过程中主缆的二次应力比较大;随着梁段吊装数量的增加,主缆中的二次应力逐渐减小并趋于均匀。吊装施工顺序不同,对施工中二次应力的大小有明显的影响,但对成桥状态没有影响。

(4)由于主缆的抗弯刚度几乎不影响悬索桥主跨主缆从空缆到成桥的挠度变化量,因此可通过简化的理论分析说明二次应力与截面惯性矩无关。

(5)随着跨度的增大,恒载作用下截面最大二次应力逐渐减小,跨度越小恒载状态的二次应力越大。

参考文献:

References:

- [1] 严国敏,周世忠. 现代悬索桥[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
YAN Guo-min, ZHOU Shi-zhong. Modern Suspension Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [2] 雷俊卿,郑明珠,徐恭义. 悬索桥设计[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
LEI Jun-qing, ZHENG Ming-zhu, XU Gong-yi. Design of Suspension Bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [3] 李枝军,韩晓林,李爱群,等. 悬索桥桥塔挂缆前后动态特性分析与测试[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 54-58.
LI Zhi-jun, HAN Xiao-lin, LI Ai-qun, et al. Dynamic Analysis and Test of Bridge Tower of Suspension Bridge Before and After Cable Installed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 54-58.
- [4] 程进,肖汝诚. 基于逆可靠度法的大跨悬索桥主缆安全系数评估[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 58-61.
CHENG Jin, XIAO Ru-cheng. Main Cable Safety Factors Assessment of Long-span Suspension Bridges Based on Inverse Reliability Method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 58-61.
- [5] 狄谨,武隽. 自锚式悬索桥主缆线形计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 38-43.
DI Jin, WU Jun. Calculation Methods for Cable Curve of Self-anchored Suspension Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 38-43.
- [6] 吴建强,彭武,何治学. KLD3700 型跨缆吊机在润扬大桥悬索桥钢箱梁吊装施工中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 25(1): 38-41.
WU Jian-qiang, PENG Wu, HE Zhi-xue. Application of KLD3700 Deck Erection Gantry in Runyang Suspension Bridge[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005, 25(1): 38-41.
- [7] 吉姆辛 N J. 缆索支承桥梁——概念与设计[M]. 2 版. 金增洪,译. 北京:人民交通出版社,2002.
GIMSING N J. Cable Supported Bridges: Concept & Design[M]. 2nd ed. Translated by JIN Zeng-hong. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [8] DANA A, ANDERSON A, RAPP G M. George Washington Bridge: Design of Superstructure[J]. Trans ASCE, 1932, 97: 97-163.
- [9] WYATT T A. Secondary Stresses in Parallel Wire Suspension Cables[J]. Trans ASCE, 1963, 128: 37-59.
- [10] 林长川,许宏亮,罗喜恒. 悬索桥主缆的二次应力[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会. 中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第 11 届年会论文集. 北京:人民交通出版社,2006:392-397.
LIN Chang-chuan, XU Hong-liang, LUO Xi-heng. The Main Cables Secondary Stress of Suspension Bridge[C]//Bridge and Structural Engineering Society of China Civil Engineering Society. Symposium of the 11th Annual Meeting of Bridge and Structural Engineering Society of China Civil Engineering Society. Beijing: China Communications Press, 2006: 392-397.
- [11] 张伟,潘方. 悬索桥主缆的次应力分析[J]. 郑州大学学报:工学版, 2005, 26(4): 29-33.
ZHANG Wei, PAN Fang. Secondary Stress Analysis of the Main Cable of Suspension Bridges[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2005, 26(4): 29-33.
- [12] 曲婷,王焕定,曾森,等. 考虑主缆弯曲刚度后对悬索桥的影响[J]. 低温建筑技术, 2009(7): 35-37.
QU Ting, WANG Huan-ding, ZENG Sen, et al. The Research of Influence on Suspension Bridges After Considering Bending Rigidity of Cable[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009(7): 35-37.
- [13] 唐茂林. 大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D]. 成都:西南交通大学,2003.
TANG Mao-lin. 3D Geometric Nonlinear Analysis of Long-span Suspension Bridge and Its Software Development[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [14] 罗迎社,喻小明. 工程力学[M]. 北京:北京大学出版社,2006.
LUO Ying-she, YU Xiao-ming. Engineering Mechanics[M]. Beijing: Peking University Press, 2006.
- [15] 钱冬生,陈仁福. 大跨度悬索桥的设计与施工[M]. 成都:西南交通大学出版社,1999.
QIAN Dong-sheng, CHEN Ren-fu. Design and Construction of Long-span Suspension Bridges[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1999.