

婺江大桥主桥设计及计算分析

王炜龙¹, 陈紫君², 蒋晓军², 董伟伟¹

(1. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310027; 2. 兰溪市金兰创新城开发建设中心, 浙江 金华 321100)

摘要: 婺江大桥主桥采用(35+200+40+125+35+80+35) m七跨下承式连续钢结构拱桥, 全宽39 m。该桥拱肋设置在中央分隔带位置, 主梁横向悬挑较大, 同时考虑避免慢行交通与互通车行交通相互影响, 将两侧各3.5 m慢行道悬挑在主梁底部。主桥采用高低错落有致, 连续造型近似行云流水、远则山峦连绵的大、中、小三拱肋形式, 寓意: 乘风破浪, 蓄势待发。拱肋采用钢箱截面; 主梁采用正交异性钢桥面整体钢箱梁结构, 梁高2.5~4.2 m, 两侧悬挑慢行道纵横梁结构; 吊杆均采用钢绞线整束挤压吊杆; 下部结构采用实体墩, 钻孔灌注桩基础。同时, 建立该桥空间有限元模型进行静力、稳定、疲劳分析, 结果表明: 主桥整体静力性能、动力稳定性和抗疲劳性能均满足规范要求。

关键词: 下承式连续钢结构拱桥; 特大桥; 静力分析; 稳定分析; 疲劳分析; 桥梁设计

中图分类号: U442.5; U448.22; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0065-05

Analysis on Design and Calculation of Main Bridge of Wujiang River Bridge

WANG Weilong¹, CHEN Zijun², JIANG Xiaojun², DONG Weiwei¹

(1. Zhejiang University Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310027, China; 2. Lanxi Jinlan Innovation Town Development and Construction Center, Jinhua 321100, China)

Abstract: The main bridge of Wujiang River Bridge is a (35+200+40+125+35+80+35) m seven-span through continuous steel structure arch bridge, and its total width is 39 m. The arch ribs of the bridge are set at the position of the medial divider, and the transverse cantilever of the girder is larger. At the same time, it is considered to avoid the interaction effect of slow traffic and interchange traffic, and the 3.5 m slow lanes on both sides will be cantilevered at the bottom of the girder. The large, medium and small three-arch ribbed form with a staggered height, continuous shape resembling flowing clouds and water, and distant mountains stretching on and on is adopted for the main bridge, meaning to ride the wind and break the waves, ready to go. The steel box section is used for the arc rib, and the girder is an orthotropic steel bridge deck integral steel-box girder structure. The girder height is 2.5~4.2 m with a longitudinal and transverse beam structures on both sides of the cantilevered slow lane. All the suspension rods are made of whole bundles of extruded steel strands. The substructure is the solid piers with the bored cast-in-place pile foundations. At the same time, a spatial finite element model of the bridge is established to analyze the static force, stability and fatigue. The results show that the overall static performance, dynamic stability performance and fatigue resistance of the main bridge all meet the requirements of the specifications.

Keywords: through continuous steel structure arch bridge; super-major bridge; static analysis; stability analysis; fatigue analysis; bridge design

1 工程概况

婺江位于浙江省金华市, 是境内的主要水系, 由义乌江、武义江汇合而成。

婺江大桥由东北往西南方向依次需要跨越规划

沿山路、金千铁路、天马线、婺江、防洪堤和防洪抢险道路。其中, 婺江防洪区域全宽约820 m, 主航道按三级通航净空要求控制; 金千铁路需满足7.6 m净空要求。因此, 婺江大桥共分为东引桥、主桥和西引桥三段^[1]。桥址位于浙中盆地, 途经地貌类型主要为冲洪积平原区, 地势稍有起伏。工程区出露地层主要有白垩系及第四系地层。场地地震动峰值加速度为0.05 g, 场地基本地震动加速度反应谱特征周期为0.35 s, 为Ⅱ类场地^[2]。

收稿日期: 2025-03-11

作者简介: 王炜龙(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 董伟伟(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。电子信箱: ujsdongweiwei@126.com

2 主要技术标准^[3-4]

(1)道路等级:一级公路,设计车速 80 km/h。

(2)荷载标准:汽车荷载公路—I级,同时满足城—A级荷载。

(3)设计洪水频率:主桥 1/300。

(4)通航情况:按Ⅲ级通航净空要求控制,双向通航孔净空要求为 110 m×7 m,最高通航水位 27.93 m,最低通航水位 22.5 m。

(5)抗震设防等级:地震设防烈度Ⅵ度,基本地震动峰值加速度 0.05g;主桥抗震设防类别为A类,桥梁抗震措施等级为二级,抗震设计方法为“1类”。

(6)桥梁结构设计基准期:100 a。

(7)桥梁结构设计安全等级:一级。

3 主桥设计

3.1 主桥造型设计

3.1.1 主桥造型设计寓意

主桥选择桥上建筑造型丰富的系杆拱桥结构——三跨下承式拱桥。三拱高低错落有致,连续造型近似行云流水、远则山峦连绵,湖光山色齐聚一桥,实则暗潮涌动,逆风远行。寓意:乘风破浪,蓄势待发——桥梁造型源于千层浪花乘风而上的画面,象征新城势如破竹、蓄势待发^[5]。主桥效果如图1所示。



图1 婺江大桥主桥实景效果

3.1.2 主桥总体布置

婺江大桥全长 1 519.2 m,其中主桥长 550 m,采用(35+200+40+125+35+80+35) m七跨下承式连续钢结构拱桥,主跨需跨越婺江通航航道,如图2所示。

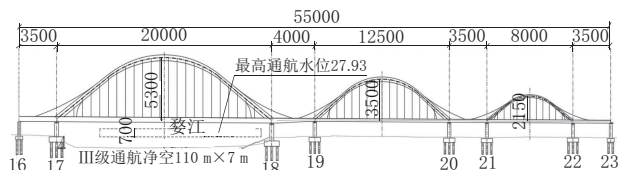


图2 主桥总体布置立面(单位:cm)

主桥横断面布置为 3.5 m(慢行道)+0.5 m(护栏)+13.5 m(机动车道)+4 m(拱肋区)+13.5 m(机动车道)+0.5 m(护栏)+3.5 m(慢行道)=39 m,如图3所示。

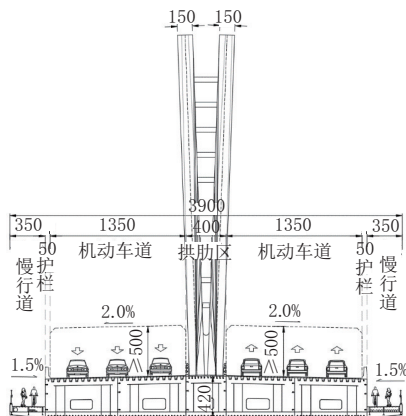


图3 主桥总体布置横断面(单位:cm)

该主桥为中间双铝拱肋组成的单拱肋下承式拱桥结构,主梁两侧悬挑较大。同时,根据全桥总体设计,为减少引桥规模、避免慢行交通与相交互通车行交通之间的冲突,将慢行道设置在主梁两侧梁底,因此主跨主梁梁高采用 4.2 m。

为增强钢桥面整体性,减少桥面伸缩缝,以及减少大跨主梁下挠,在进行桥梁分联时,将大、中、小拱肋及相连形成整体作为整联。通过相邻的配置,对大跨起到非常好的平衡作用。

3.2 结构设计

3.2.1 拱肋

大、中、小拱肋均在中央拱肋区内设置双片钢箱拱肋。考虑主桥造型需要,小拱肋(80 m跨拱肋)、中拱肋(125 m跨拱肋)和大拱肋(200 m跨拱肋)的拱轴线在中间 1/2 跨长度范围内均采用圆曲线,而两侧均采用直线。

小拱肋竖直投影平面内矢高为 21.5 m,矢跨比为 1/3.721;中拱肋竖直投影平面内矢高为 35 m,矢跨比为 1/3.571;大拱肋竖直投影平面内矢高为 53.0 m,矢跨比为 1/3.774。每跨拱肋由两片钢箱梁结构组成,两片钢箱拱肋对称与道路设计中心线分叉倾斜 2° ,两片钢箱拱之间通过拱肋横撑连接。

小拱肋拱顶和拱脚截面尺寸为 2.5 m(高)×1.5 m(宽),1/4 和 3/4 跨中截面尺寸为 1.6 m(高)×1.5 m(宽),中间截面高度线性过渡。

中拱肋拱顶和拱脚截面尺寸为 4.0 m(高)×1.5 m(宽),1/4 和 3/4 跨中截面尺寸为 2.5 m(高)×1.5 m(宽),中间截面高度线性过渡。

大拱肋拱顶和拱脚截面尺寸为 5.0 m(高)×1.5 m(宽),1/4 和 3/4 跨中截面尺寸为 3.5 m(高)×1.5 m(宽),中间截面高度线性过渡。

为增强主桥拱肋的整体稳定性和优化拱脚的应

力分配,对主拱肋拱脚上方 10 m 范围内均灌注混凝土,形成钢混组合截面。

3.2.2 主梁

主梁为直接承受荷载的结构,主桥主梁采用单箱五室整体钢箱梁结构。箱梁两侧设置悬挑慢行道,慢行道位于主梁底缘,慢行道宽度为 3.5 m。小桩号侧(35+200)m 跨主梁中心梁高均为 4.2 m,大桩号侧(125+35+80+35)m 跨主梁中心梁高均为 2.5 m,中间 40 m 梁高线性变化。主梁断面如图 4 所示。

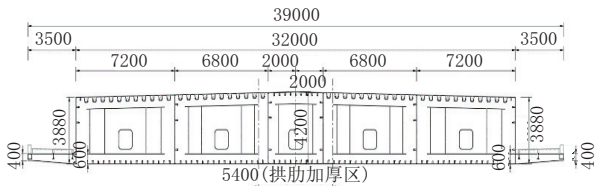


图 4 主梁横断面(单位:cm)

主梁顶板采用正交异性桥面板。跨中钢箱梁顶、底板厚度在拱肋区域附近为 25 mm,腹板厚度为 20 mm。跨中钢箱梁顶、底板厚度在其他箱室区域(125+35+80+35)m 跨范围为 16 mm,(35+200)m 跨范围为 20 mm;腹板厚度均为 14 mm。支点处钢箱梁顶、底板厚度在(125+35+80+35)m 跨范围为 25 mm,(35+200)m 跨范围为 30 mm。

除在支撑位置附近设置横梁外,大、中、小拱肋跨顺桥向分别每隔 8、7 m 和 6 m 在吊杆位置设置一道吊杆横隔板,吊杆处隔板厚度均为 25 mm。顺桥向在吊杆与吊杆之间、横梁与吊杆之间每隔 2.0~3.0 m 设置一道横隔板,横隔板厚度为 14 mm。

慢行道悬挑横梁采用变高度工字钢截面,截面尺寸为(300~600)mm×300 mm×25 mm×20 mm。横梁之间设置三根小纵梁,小纵梁采用 300 mm×150 mm×6 mm×9 mm 的工字钢和 300 mm×300 mm×12 mm×16 mm 的 HW 型钢。为释放主梁纵向位移对慢行道纵横梁应力传递累积作用,小纵梁在大拱肋、中拱肋和小拱肋支点横梁处断开。

为平衡大跨和中跨主梁跨中及支点弯矩,对大跨与中跨相邻两侧的边跨靠近支点两侧各 10 m 范围内的拱肋区箱室灌注混凝土进行压重。

3.2.3 吊杆

主桥主跨、中跨、边跨吊杆顺桥向布置间距依次为 8.0 m、7.0 m 和 6.0 m,横向双排吊杆,分别锚固于两侧拱箱上。

吊杆均采用钢绞线整束挤压吊杆,吊杆成品索采用 1860 级环氧喷涂钢绞线缠包后外挤 PE 制成。

3.2.4 下部结构

主桥下部采用实体式桥墩,过渡墩承台厚度为 3.0 m,采用 6 根直径为 1.6 m 的钻孔灌注桩基础;小拱肋桥墩承台高 3.5 m,采用 9 根直径为 1.6 m 的钻孔灌注桩;中拱肋桥墩承台高 3.8 m,采用 12 根直径为 1.6 m 的钻孔灌注桩;大拱肋桥墩承台高 4.5 m,采用 12 根直径为 2.0 m 的钻孔灌注桩。依据上部支座设置情况对主桥的桥墩墩顶按拉压杆设计设置预应力钢束。桥墩横断面如图 5 所示。

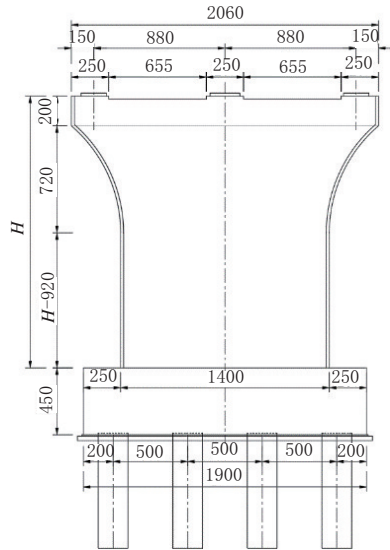


图 5 下部结构横断面(单位:cm)

3.3 施工方案

主桥上部结构采用先梁后拱施工,主要施工顺序见表 1。

表 1 主桥施工阶段划分

步骤	主要施工阶段	边界条件	施工荷载
1	搭设支架,支架上依次拼接第一批箱梁和第二批箱梁	支架、主梁临时支撑	结构自重
2	灌注端横梁混凝土	—	—
3	安装悬挑人行道	悬挑人行道与主梁连接	—
4	安装拱肋支架、拱肋和吊杆	拱肋临时支架	拱肋支架荷载传递给主梁
5	灌注拱肋混凝土	—	—
6	拆除拱肋临时支架	钝化拱肋临时支架	—
7	依次对称分批张拉吊杆	—	吊杆张拉力
8	拆除主梁临时支架	钝化主梁临时支架	—
9	二期铺装、10 年	—	二期

4 结构静力分析

4.1 有限元模型

采用桥梁专业软件 MIDAS Civil 2022 软件建立

空间杆系有限元模型,对结构进行分析计算,其有限元模型如图 6 所示。采用桁架单元模拟吊杆,其他均采用梁单元模拟,全桥共 2 817 个节点,96 个桁架单元,3 505 个梁单元。模型中充分考虑了桥梁各部分结构刚度的模拟和各种荷载的作用过程^[6-7]。

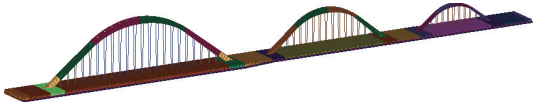


图 6 有限元计算模型

4.2 静力计算结果

对主桥进行整体静力分析,考虑恒载、汽车和人群活载、风载、温度、制动力、支座不均匀沉降等各项组合作用,按规范要求计算不同荷载组合下的强度、变形情况^[8]。

4.2.1 强度验算

主桥主梁和拱肋均按实腹式拉弯、压弯构件进行强度验算。

4.2.1.1 拱肋强度验算

拱肋板厚 $40\text{ mm} < t < 63\text{ mm}$, $f_d=260\text{ MPa}$ 。根据规范,无需考虑有效截面折减,故拱肋最大应力发生在大拱肋 $L/4$ 位置,其值为 -185 MPa ,小于 260 MPa ,因此,拱肋截面强度满足要求。

4.2.1.2 主梁强度验算

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)规定,对主梁截面计算有效截面,出于计算最不利考虑,对各个主梁位置分别计算剪力滞效应和局部稳定效应,最终相同截面取各位置最不利值进行应力放大。

由于部分截面不存在局部稳定折减,故最终得到各计算截面的最大应力放大系数详见表 2。其中,弯曲应力的放大系数中已考虑中性轴位置的变动。

表 2 各计算截面的最大应力放大系数

截面 编号	描述	应力放大系数			
		轴应 力	横向 应力	顶正 应力	底正 应力
B	上部剪力滞,下部局稳剪力滞	1.118	1.128	1.149	1.123
B	上部局稳剪力滞,下部剪力滞	1.127	1.136	1.151	1.141
C	上下剪力滞	1.151	1.158	1.166	1.159
I	上下剪力滞	1.269	1.276	1.287	1.280
J	上下剪力滞	1.235	1.248	1.267	1.255
J	上部剪力滞,下部局稳剪力滞	1.249	1.269	1.274	1.293
M	上下剪力滞	1.396	1.408	1.434	1.414

主梁顶底板板厚 $16\text{ mm} < t < 40\text{ mm}$, $f_d=270\text{ MPa}$,考虑有效截面折减后,主纵梁最大应力发生在大拱肋第一根吊杆位置,其值为 124.64 MPa ,小于 270 MPa ,

因此,主纵梁截面强度满足要求。

4.2.1.3 外挑纵、横梁强度验算

挑臂横梁 $16\text{ mm} < t < 40\text{ mm}$, $f_d=270\text{ MPa}$,挑臂横梁最大应力位于大拱肋支点位置,其值为 248 MPa 。因此,横梁截面强度要求。挑臂纵梁 $t < 16\text{ mm}$, $f_d=275\text{ MPa}$,挑臂纵梁最大应力出现在支点附近,为 269 MPa ,满足规范要求。

4.2.2 吊杆验算

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)第 13.2.1 条规定,缆索构件的受拉承载力应满足下式要求:

$$\frac{\gamma_0 N_d}{A} \leq f_d \text{ 或 } \gamma_0 N_d \leq N_R \quad (1)$$

式中: N_d 为轴向拉力组合设计值; A 为缆索构件的截面面积; f_d 为缆索构件的抗拉强度设计值; N_R 为缆索构件的抗拉承载力设计值。

根据计算,吊杆最大应力值为 804.6 MPa ,小于 $1\,005\text{ MPa}$,吊杆受拉承载力满足要求。

4.2.3 变形验算

根据计算,活载下主梁最大挠度 $D_z=8.33+30.74=39.07\text{ mm}$,小于 $200\,000/500=400\text{ mm}$,满足规范要求。

活载下大拱肋最大挠度 $D_z=20.45+12.68=33.13\text{ mm}$,小于 $200\,000/1\,000=200\text{ mm}$,满足规范要求。

5 结构稳定性分析

5.1 一类屈曲稳定分析

全桥成桥后整体稳定验算中,移动荷载分别按拱顶轴力 N 、拱脚轴力 N 和拱脚面外弯矩 M_z 影响线加载。在有限元模型中采用静力荷载工况加载集中力和均布荷载,使拱脚轴力最大^[9]。

分别在拱脚和拱顶最不利为轴力 N 最大的工况下布载,计算得到前 5 阶弹性稳定系数和失稳形态(见表 3)。从表 3 可以看出,主桥结构整体弹性稳定系数最小为 9.097,大于 4.0,满足要求。一阶弹性失稳状态图如图 7 所示。

表 3 各加载工况下稳定系数

位置	弹性稳定系数		
	拱脚轴力最大	拱底 M_z 弯矩最大	拱顶轴力最大
1 阶	9.097	9.405	9.097
2 阶	9.815	10.270	9.814

5.2 二类屈曲稳定分析

5.2.1 考虑几何非线性的二类屈曲分析

以一类稳定的失稳模态为基础,取主拱的初始缺陷为净跨径 $L/5\,000$ 的初始缺陷,即拱顶最大水

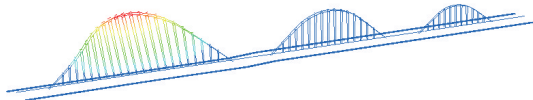


图7 一阶弹性失稳状态图

平位移 4 cm。而后对于一类稳定中考虑的所有荷载,乘以一类稳定系数 9.097 后,分 50 步进行分步加载,绘制拱顶节点的荷载位移曲线,如图 8 所示。通过图形拟合发现,荷载系数为 0.7 时为变形拐点,因此考虑二类稳定的特征值系数为 $7.71 \times 0.7 = 5.397$,大于 2,满足规范要求。

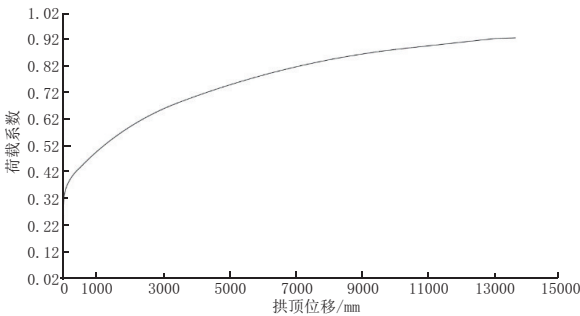


图8 考虑 50 步加载绘制的荷载位移曲线

5.2.2 考虑材料和几何非线性的二类屈曲分析

在考虑几何非线性的基础上,在拱脚位置考虑可能存在的塑性铰。塑性铰采用纤维模型进行模拟,其中钢材的本构采用双线性模型,混凝土本构模型采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)提供的混凝土本构。

乘以一类稳定系数 7.71 后,分 50 步进行分步加载,绘制拱顶节点的荷载位移曲线,如图 9 所示。通过图形拟合发现,在 20 步之后结构变形发散,因此考虑双重非线性情况下,二类稳定的特征值系数为 $7.71 \times 0.4 = 3.084$,大于 2,满足规范要求。

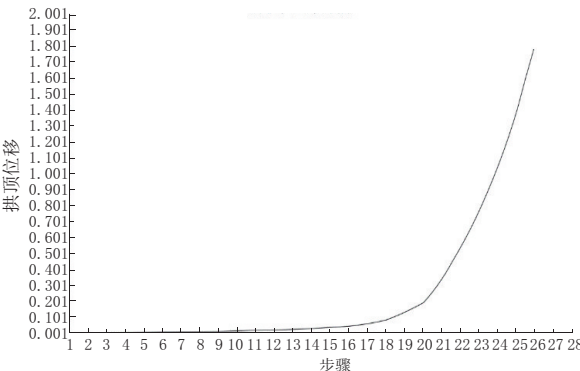


图9 考虑双重非线性的荷载位移曲线

6 结构疲劳分析^[9-10]

6.1 拱肋、主梁、挑臂横梁抗疲劳验算

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)相关条文规定,拱肋、主梁和挑臂横梁的细节

类别均为 100;对应于 2×10^6 次常幅疲劳循环的疲劳应力强度 $\Delta\sigma_c = 100 \text{ MPa}$, $\Delta\tau_c = 100 \text{ MPa}$ 。则正应力幅疲劳极限 $\Delta\sigma_D = 83.25 \text{ MPa}$ 。

根据计算,在疲劳计算模型 I 作用下,拱肋、主梁和挑臂横梁的正应力幅最大值依次为 8.75 MPa、10.95 MPa、13.76 MPa。

取疲劳荷载分项系数 $\gamma_{Fi} = 1$,疲劳抗力分项系数 $\gamma_{Mf} = 1.35$,尺寸效应折减系数 $k_s = 1.0$,放大系数 $\Delta\phi = 0$ 。

拱肋: $\gamma_{Fi} \Delta\sigma_p = \gamma_{Fi} (1 + \Delta\phi) (\sigma_{pmax} - \sigma_{pmin}) =$
 $8.75 \text{ MPa} < \frac{k_s \Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} = \frac{1 \times 83.25}{1.35} = 61.67 \text{ MPa} \quad (2)$

主梁: $\gamma_{Fi} \Delta\sigma_p = \gamma_{Fi} (1 + \Delta\phi) (\sigma_{pmax} - \sigma_{pmin}) =$
 $10.95 \text{ MPa} < \frac{k_s \Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} = \frac{1 \times 83.25}{1.35} = 61.67 \text{ MPa} \quad (3)$

悬挑横梁: $\gamma_{Fi} \Delta\sigma_p = \gamma_{Fi} (1 + \Delta\phi) (\sigma_{pmax} - \sigma_{pmin}) =$
 $13.76 \text{ MPa} < \frac{k_s \Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} = \frac{1 \times 83.25}{1.35} = 61.67 \text{ MPa} \quad (4)$

因此,拱肋、主梁和挑臂横梁正应力抗疲劳设计均满足规范要求。

6.2 吊杆抗疲劳验算

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)相关条文规定,吊杆的疲劳应力强度 $\Delta\sigma_c = 160 \text{ MPa}$,采用疲劳荷载模型 I 时,吊杆的正应力常幅疲劳极限计算得 137.28 MPa。

根据计算,在疲劳计算模型 I 作用下,吊杆正应力幅最大值为 44.83 MPa。

取疲劳荷载分项系数 $\gamma_{Fi} = 1$,疲劳抗力分项系数 $\gamma_{Mf} = 1.35$,尺寸效应折减系数 $k_s = 1.0$,放大系数 $\Delta\phi = 0$ 。

$\gamma_{Fi} \Delta\sigma_p = \gamma_{Fi} (1 + \Delta\phi) (\sigma_{pmax} - \sigma_{pmin}) =$
 $44.83 \text{ MPa} < \frac{k_s \Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} = \frac{1 \times 137.28}{1.35} = 101.69 \text{ MPa} \quad (5)$

因此,吊杆正应力抗疲劳设计满足规范要求。

7 结 语

婺江大桥主桥跨越婺江,需满足三级通航净空要求,防撞要求较高。同时该桥位于新城环线上,在满足一级公路的同时,需兼顾城市道路的功能,因此,对景观要求较高。主桥采用高低错落有致,连续造型近似行云流水、远则山峦连绵的大、中、小三拱肋形式,寓意为“乘风破浪,蓄势待发”。

婺江大桥将慢行道设置在主梁两侧梁底,可以更好地降低引桥规模,避免慢行交通与相交互通车行交通之间的冲突。而通过将大、中、小拱肋及相连