

# 风景区景观桥梁桥型选择与创新设计

刘喆<sup>1</sup>, 马乃轩<sup>2</sup>

1. 中国电建集团核电工程有限公司, 山东 济南 250100; 2. 山东高速工程检测有限公司, 山东 济南 250002

**摘要:**基于景观桥梁与自然环境和谐统一、经济美观的设计理念,以某市文化旅游区内跨河景观桥设计为研究背景,采用斜拉-悬索协作体系连续梁桥,介绍该桥初步设计阶段方案设计的基本思路,采用 AutoCAD 软件建立全桥三维模型,采用有限元分析软件 MIDAS Civil 计算本桥结构整体静力和稳定性,采用 ANSYS 程序分析主塔安装工况的稳定性。结果表明,所选桥型方案设计安全可靠,结构稳定性较高,满足现行规范要求,可为类似工程设计提供借鉴。

**关键词:**景观桥梁;方案设计;三维建模;结构计算;稳定分析

中图分类号:U442.5<sup>+</sup>4

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)04-0061-09

引用格式:刘喆,马乃轩.风景区景观桥梁桥型选择与创新设计[J].山东交通学院学报,2022,30(4):61-69.

LIU Zhe, MA Naixuan. Bridge type selection and innovation design of landscape bridge in scenic area[J].

Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(4): 61-69.

## 0 引言

风景区内的景观桥梁应与四周自然风光和谐统一。桥梁作为室外空间中富有魅力的建筑,设计时多融入当地特色地域文化,是我国新时代对桥梁建设特色品质提升提出的新要求<sup>[1]</sup>。风景区内的景观桥梁不孤立于环境,可起到当地文化和旅游观景平台的作用,如在设计时融入典型徽派建筑风格的马鞍山长江大桥的桥塔,上海黄浦江的外滩大桥也成为黄浦江两岸城市发展的重要平台<sup>[2]</sup>。

选择景观桥梁的设计方案时需注意造型美观、结构安全和造价经济。因此,在景观桥梁方案设计初期阶段,应将风景区景观特点、历史文化内涵与技术、经济、功能、安全等因素和谐配置(如图1所示),优化调整,使本桥在风景区内与周围环境协调共处,既体现当地文化及人文特点,又能作为游人驻足景区、欣赏周围自然风光的观景平台<sup>[3-4]</sup>。

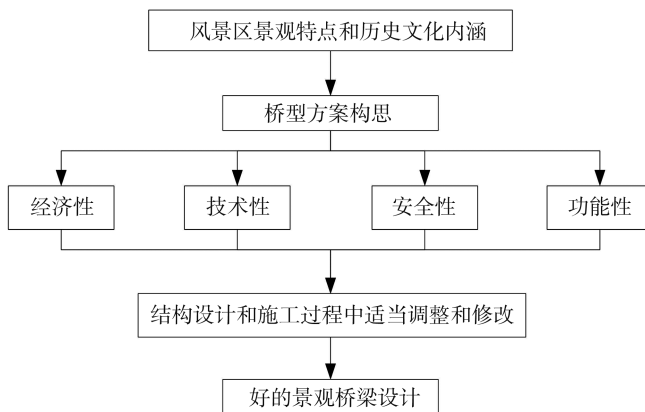


图1 风景区景观桥梁方案构思图解

## 1 方案比选

### 1.1 工程概况

某市文化旅游区内跨河桥位于某风景区内,地表形态较简单,地貌单元为河流漫滩。桥长 51 m,跨

收稿日期:2022-03-07

第一作者简介:刘喆(1989—),男,工程师,一级注册结构工程师,注册土木工程师(岩土),工学硕士,主要研究方向为土建结构设计,E-mail:771807729@qq.com。

径组成为 30 m+15 m, 选用斜拉-悬索协作体系连续梁桥结构, 如图 2 所示。本桥中心线与河道夹角约为  $60^\circ$ , 平面位于直线上, 立面单向纵坡坡度为 3.8%。

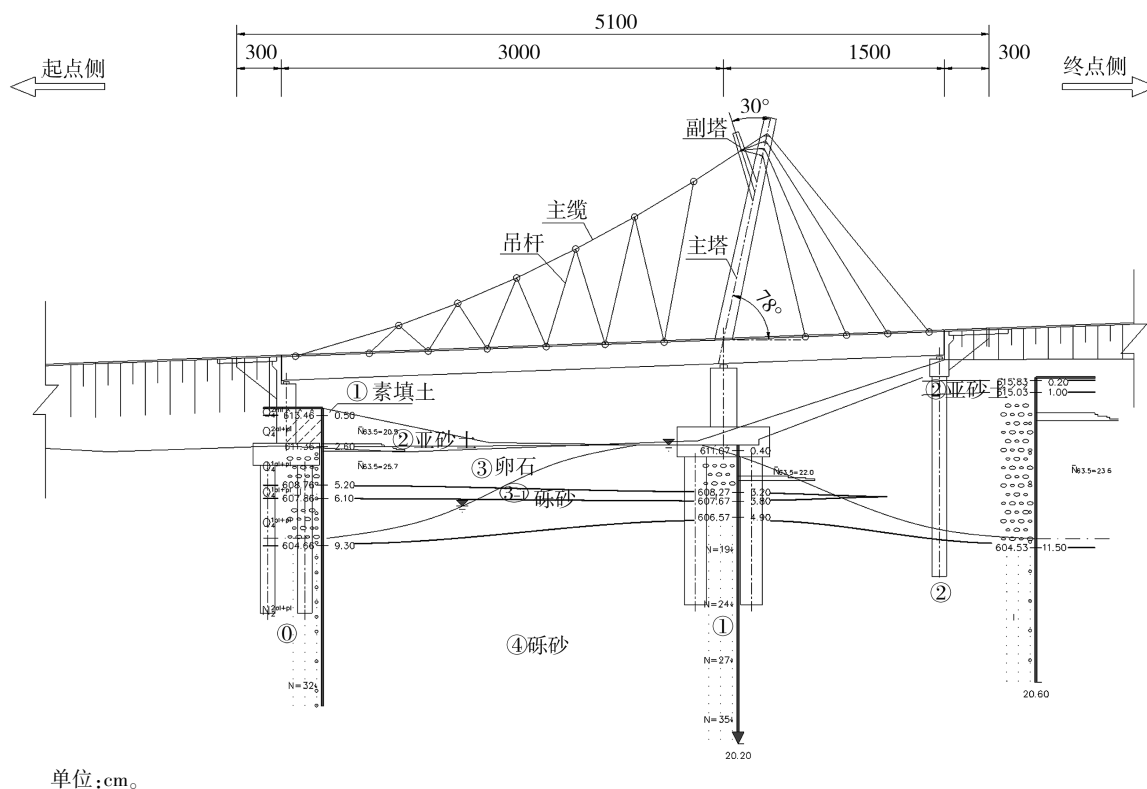


图2 斜拉-悬索协作体系连续梁桥总体布置图

本桥主梁为现浇混凝土箱形梁, 单箱双室结构, 标准断面为 16.6 m, 桥墩处受桥塔预埋段影响加宽至 18.8 m。桥塔由主塔和副塔 2 部分组成, 主塔线型为椭圆形, 主塔向 15 m 跨方向倾斜  $78^\circ$ , 通过主缆及斜拉索保持自身稳定; 副塔与主塔夹角为  $30^\circ$ , 桥塔为钢箱结构, 内部设置加劲肋, 全部采用 Q345qD 钢材。主缆采用 1 束 15-8 填充型环氧涂层钢绞线, 经过副塔分束为 4 股, 每股 2 根, 通过主塔后锚固在主梁上; 采用耳板式连接吊杆与主梁, 通过预埋钢筋连接耳板与主梁, 采用索夹连接吊杆与主缆。本桥主梁采用满堂支架施工, 桥塔为工厂节段制造后现场拼装, 主梁和桥塔施工完成后安装缆索和吊杆。

## 1.2 设计理念

本桥位于整个旅游文化区的中心位置, 周围为盆地地形, 游客观测点多处于高点, 且水面较窄, 不利于形成水与桥的共融景观。方案设计中, 在满足交通需求和桥下河水行洪要求的前提下, 应体现风景旅游区的历史文化底蕴和现代气息, 以简约、美观、适用的结构形式, 力求具有明显的现代风格和个性, 避免“放之四海而皆准”的雷同效果, 建成后成为景区标志性景观<sup>[5-6]</sup>。

## 1.3 桥塔和桥型选择

桥塔可采用钢桥塔结构和混凝土桥塔结构 2 种类型。本桥所处位置地势较低, 需通过梁上的桥塔, 在外观上区别本桥与周围环境, 在区域环境中更好地凸显桥塔的标志性和特征性<sup>[7]</sup>。景区内植被茂盛, 施工运输条件较差。钢桥塔结构自重轻, 能减小下部基础尺寸, 便于工厂加工, 可平行施工, 工期大大缩短, 钢桥塔结构尺寸较小, 桥塔所占桥面宽度和桥面建筑面积较少, 在一定程度上节约成本, 施工质量可控, 进度快, 拼装后可整体吊装, 降低施工风险。混凝土桥塔结构自重大, 下部基础尺寸大, 爬模施工, 需现场搭设支架; 由于工程量小, 单价提高, 性价比低, 混凝土桥塔结构尺寸大, 浪费桥面空间, 工期长, 不能平行施工。

景观桥梁方案设计比选时, 根据桥址条件, 合理选择桥型方案和布跨, 在保证结构合理, 节约成本的前提下, 力争做到造型美观新颖<sup>[8]</sup>。本桥桥型设计提供了 4 种方案: 方案一是斜拉-悬索协作体系连续梁

桥,桥塔采用椭圆形结构,由主塔和副塔组成;方案二是将方案一桥塔改为2个分离式塔,桥塔造型类似青铜宝剑;方案三是将方案一桥塔改为直立桥塔,将原来的斜拉悬索组合体系改为斜拉桥;方案四是将方案一跨径调整为1孔45 m,取消方案一中的副塔,造型仍为椭圆形。4种方案的桥塔和主梁结构及工程造价如表1所示。

表1 桥型方案对比

桥梁类别	方案一	方案二	方案三	方案四
桥塔结构	钢结构	混凝土	混凝土	钢结构
主梁结构	混凝土	混凝土	混凝土	混凝土
工程造价/万元	510	490	470	520

由表1可知:4个方案造价相差不大,其中方案三造价最低。方案一与方案二、三相比,椭圆形桥塔线型美观,混凝土桥塔截面较大,显得笨重,直立的桥塔爬模施工周期较长;与方案四相比,方案一主塔和副塔可将主缆在桥塔位置进行分散,并独立锚固在主梁上,通过主缆、吊杆和斜拉索,比单根主缆在空间上更具有表现力。经对比研究,最终确定方案一提出的30 m+15 m斜拉-悬索协作体系连续梁桥作为本桥最终方案。

#### 1.4 全桥三维表现

依据文献[9]相关规定,在环境要求较高的情况下,借助三维和全景透视图,直观地表现新建桥梁的工程形象<sup>[10-12]</sup>。本桥制作了4种比选方案的三维效果图,方案一效果图如图3所示。

三维效果图立体效果强,但建模时精度较低,且对实际施工指导意义不大。结合施工图,借助AutoCAD的三维技术功能对桥梁进行1:1实体精确建模,将坐标系调整至施工控制点处,可在程序中提取全桥任意1点的设计坐标,可为施工放样、测量自检和内业资料编制等相关工作提供依据,极大地提高测量放样和施工的工作效率,如图4所示。



图3 方案一效果图

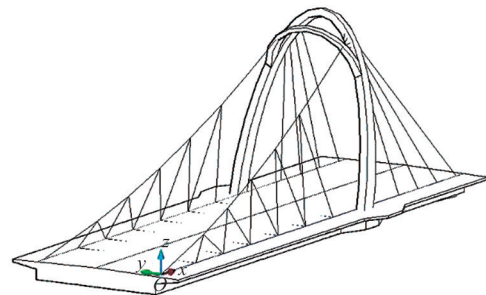


图4 桥梁1:1实体上部结构模型

## 2 设计关键点

### 2.1 低应力水平下拉索结构的锚固可靠性

本桥由主梁承受主要荷载,桥塔仅承受成桥后的风荷载及温度引起的部分荷载,拉索仅起装饰作用,对拉索张拉的锚固力较小。为保证低应力水平下拉索结构的锚固可靠性,本桥拉索采用填充型环氧涂层钢绞线,锚固位置采用三片式夹片,可使钢绞线的环向正压力更均匀。由于填充型环氧涂层钢绞线外表涂层较厚,夹片牙丝采用增加牙高的粗牙,穿透钢绞线的表面并咬入基材,使机械咬合作用得到充分发挥。张拉锚固方法采用“顶压”式,在预应力锚具安装前,应确保锚板的锥孔、夹片的外锥面表面平滑,可在一定范围内选择夹片的锥角<sup>[13-15]</sup>。

### 2.2 桥塔与主梁连接可靠性

桥塔主塔的横断面方向为椭圆形,椭圆长轴方向为竖直方向,长16.2 m;短轴方向为横桥向,长12.8 m。主塔和副塔均为矩形断面,主、副塔夹角为30°,采用焊接连接,主塔立面与主梁水平线夹角为78°,桥塔埋入主梁内深度为1.2 m。为保证桥塔与主梁连接的可靠性,在纵桥向桥塔与主梁混凝土结合面,将已焊接剪力钉的钢板焊接在塔壁上,增大桥塔与混凝土的结合面,提高桥塔抗拔力。在桥塔内

部,混凝土主梁表面以上3 m内灌注C50微膨胀混凝土,增加桥塔根部自身稳定性。由于桥塔预埋段在混凝土箱梁中横梁位置,考虑到若纵、横向预应力均从桥塔穿过,势必削弱桥塔预埋段截面,因此在设计时增大桥塔横桥向跨度,避开主梁内纵向预应力钢筋,仅在桥塔横桥向开孔,穿过和锚固横梁预应力钢筋。在塔壁每60 cm打孔通过1根骨架钢筋,其余骨架钢筋则在塔壁焊接并满足焊接长度要求,使桥塔和主梁得到可靠连接。

### 2.3 主缆散索器设计

本桥主缆在副塔内分束为4股后通过主塔,在主塔内弯折最终锚固在主梁上。在副塔内设置1个散索器,散索器由喇叭形的散索套和定型器2部分组成。主缆在散索套内分散为4股后,穿过定型器进行定向,待主缆安装调整就位后,在主缆与散索套的空隙内填充柔性材料,防止使用过程中主缆因振动在散索套内滑动。考虑到每股钢绞线均具有一定刚度,在主塔内设置转向导引管,因主塔内空间受限,导引管的转向半径需满足每股钢绞线弯折所要求的最小半径,采用圆弧-直线段的方式确保每股钢绞线按照设计角度进行定位,解决了主缆在桥塔上的安装和定位问题。

## 3 结构静力计算

景观桥梁上道路等级为风景区内主干道,设计使用年限为100 a,汽车荷载为公路-II级,人群荷载为3 kPa。标准断面布置为2.2 m(人行道及栏杆)+0.6 m(拉索锚固区)+11.0 m(行车道)+0.6 m(拉索锚固区)+2.2 m(人行道及栏杆)=16.6 m。抗震设防烈度为7度(0.15g,  $g$ 为重力加速度),设计地震分组为第二组,地震动反应谱特征周期0.4 s。温度荷载中升、降温的初始温度为25℃,温度梯度按文献[16]要求取值。基本设计风速为 $v=27.4$  m/s。桥面铺装10 cm厚沥青混凝土铺装层+防水层+6 cm混凝土调平层。

### 3.1 计算模型简介

采用桥梁有限元分析软件MIDAS Civil,以方案一中提出的30 m+15 m斜拉-悬索协作体系连续梁桥设计方案建立空间有限元模型,进行结构整体静力计算分析。其中,空间梁单元用于模拟主梁和桥塔,桁架单元用于模拟本桥中的缆索体系,主梁采用预应力混凝土设计截面,划分为230个节点,194个单元,并在变截面处单独设置节点。景观桥主梁上部结构有限元模型如图5所示。

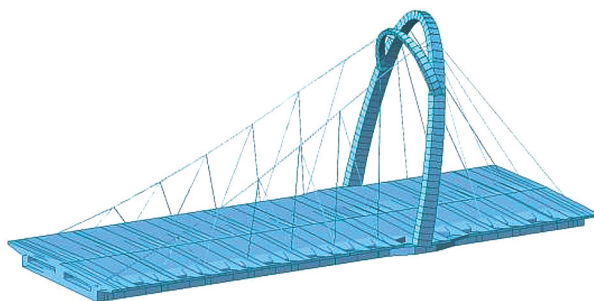


图5 景观桥主梁上部结构有限元模型

### 3.2 主梁静力计算

本桥的主梁通过MIDAS Civil进行截面验算,作用效应组合依据文献[17]要求,验算其承载能力极限状态和正常使用极限状态,计算模型中的主梁上部结构边界约束形式如图6所示。

分别计算主塔结构在自重、汽车和人群荷载作用下的支座反力,中支座反力大于2个边支座,15 m跨的边支座反力小于30 m跨的边支座,计算结果如表2所示。

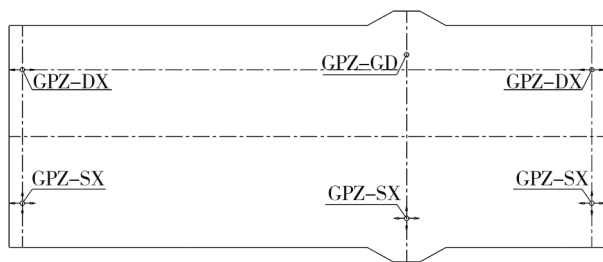


图6 主梁上部结构边界约束示意图

表2 标准组合下主塔应力计算结果 kN

位置	自重	汽车荷载		人群荷载	
		最大	最小	最大	最小
30 m跨边支座	2610	483	-13.75	155.0	-3.39
中支座	5550	700	-17.20	376.5	0
15 m跨边支座	985	427	-152.00	88.0	-65.50

注:-表示压应力。



由表2数据选取盆式橡胶支座,其中,中支座选取7000 kN型,30 m跨的边支座选取4000 kN型,15 m跨的边支座选取2500 kN型,满足计算要求。

### 3.2.1 主梁强度

主梁的混凝土强度等级为C50,梁高1.6 m,标准段宽16.6 m,中支座桥塔位置主梁加宽至17.8 m,主梁悬臂长2.3 m,悬臂尺寸根部为60 cm,端部为20 cm。按全预应力混凝土进行主梁设计,持久状况和短暂状况下主梁上、下翼缘最大、最小应力包络图如图7、8所示。

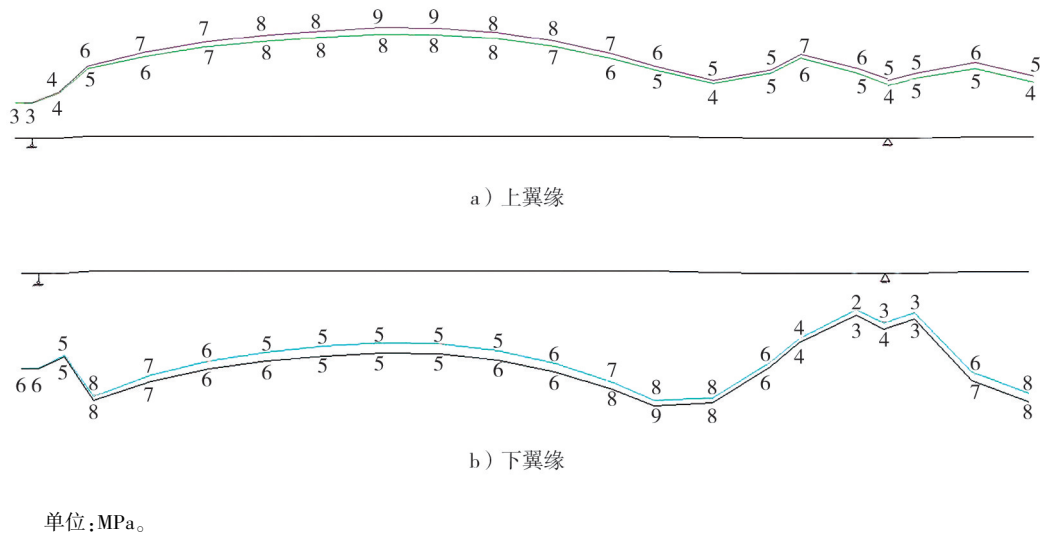


图7 持久状况主梁上、下翼缘最大、最小应力包络图

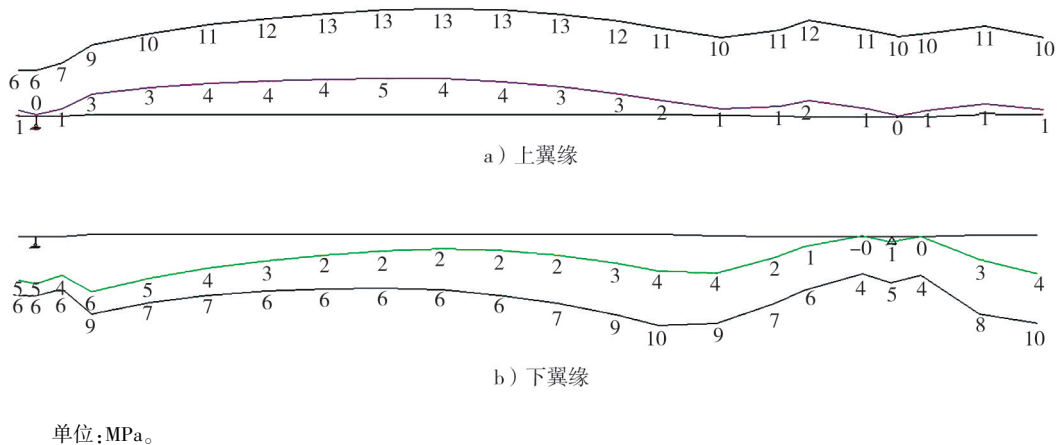
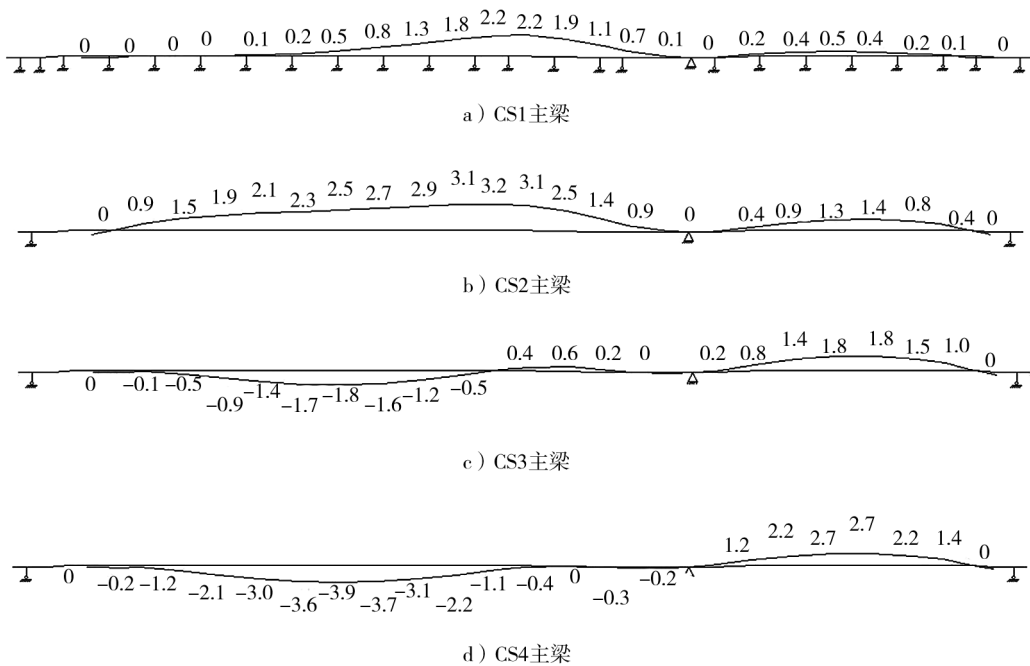


图8 短暂状况主梁上、下翼缘最大、最小应力包络图

由图7、8可知:持久状况下主梁上翼缘和下翼缘最大和最小应力在30 m跨的跨中位置,30 m跨计算结果大于15 m跨;在短暂状况下主梁上翼缘最大应力位于30 m跨的跨中位置,下翼缘最大应力靠近中跨支座处。主梁在持久和短暂效应组合下混凝土应力均低于C50混凝土设计强度,结构具有一定的安全储备。

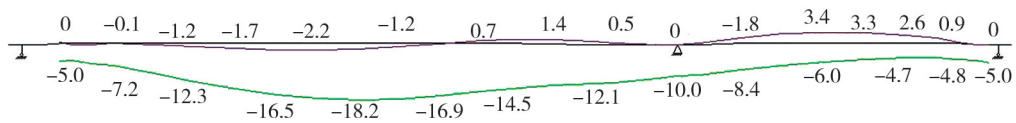
### 3.2.2 主梁变形

按照施工过程和成桥正常使用阶段对主梁进行变形计算,施工过程分为4个施工阶段:CS1为满堂支架,浇筑主梁,张拉预应力;CS2为拆除满堂支架,安装永久支座;CS3为二期铺装;CS4为10 a收缩徐变。各施工阶段主梁变形如图9所示,成桥正常使用阶段主梁变形如图10所示。



单位:mm。

图9 各施工阶段主梁变形



单位:mm。

图10 正常使用状态主梁变形

由图9、10可知:主梁的最大应力及变形计算结果均小于规范限值,主梁受力安全可靠且具有足够的安全系数。

### 3.3 桥塔计算

#### 3.3.1 桥塔应力

采用标准值组合验算钢结构强度。验算主塔塔根和主塔与副塔连接部位两处应力,采用恒载-车辆-人群-温度荷载组合,计算时不考虑主塔的根部浇筑混凝土。

通过计算可知:主塔塔根处的上翼缘压应力为 31.1 MPa,下翼缘拉应力为 19.7 MPa,主塔与副塔交接处的上翼缘压应力为 10.9 MPa,下翼缘拉应力为 18.8 MPa。在各工况下桥塔主塔的应力计算结果如表3所示。

表3 标准组合下主塔应力计算结果

		MPa				
位置		主塔自重	主缆-拉索自重	车辆-人群	温度荷载	总计(包络)
主塔塔根	上翼缘	-9.7	-17.2	-3.5	3.9	-31.1
	下翼缘	6.9	-22.7	3.0	-3.4	19.7
主塔与副塔交接处	上翼缘	-1.8	9.5	-1.8	-1.1	-10.9
	下翼缘	-1.0	-21.6	1.4	1.5	18.8

注:-表示压应力。

### 3.3.2 桥塔抗风计算

本桥所在地区的设计基本风速  $v=27.4 \text{ m/s}$ 。在风荷载作用下,采用恒载-活载-温度荷载-横桥向风荷载(组合一)和恒载-活载-温度荷载-顺桥向风荷载(组合二)模式,计算主塔应力,结果如表4所示。

位置		MPa				
		恒载-活载-温度荷载	顺桥向风荷载	横桥向风荷载	组合一	组合二
主塔塔根	上翼缘	-31.1	-9.7	-60.3	-82.7	-34.3
	下翼缘	19.7	12.4	63.3	68.4	25.6
主塔与副塔交接处	上翼缘	-10.9	6.7	36.3	34.7	10.2
	下翼缘	18.8	-3.8	-32.0	-50.8	-19.0

注:-表示压应力。

由表4可知:主塔在组合一作用下的最大拉应力为 68.4 MPa,最大压应力为 82.7 MPa,组合二作用下的最大拉应力为 25.6 MPa,最大压应力为 34.3 MPa,均满足文献[18]要求。

## 4 结构稳定性计算

### 4.1 全桥稳定性

采用 MIDAS Civil 软件分析成桥阶段的整体稳定性,失稳模态如图11所示。

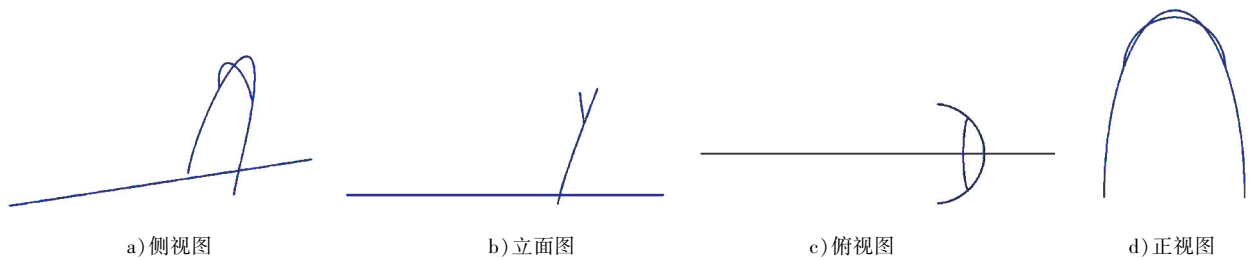


图11 本桥一阶线弹性失稳模态

由图11及MIDAS Civil软件分析可知:本桥一阶静力线弹性稳定系数为20.61,结构在不同状态下的最小稳定系数均大于4<sup>[19]</sup>。

### 4.2 主塔稳定性

采用 ANSYS 软件建模计算主塔稳定性,采用壳单元 shell 143 分析,将结构划分为 45 483 个节点和 45 529 个单元,在桥塔的塔根位置采用固定约束的边界条件。本桥主塔施工时采用阶段拼装、整体吊装的方案,故建模分析时仅考虑桥塔内设置的加劲板,没有考虑主塔根部的内填混凝土,在恒载作用下计算其稳定性,变形结果如图12所示。

由图12可知:主塔在接近24倍的恒载作用下发生一类屈曲失稳,塔根位置首先出现屈曲失稳现象。因此,在主塔吊装就位未灌注混凝土时,主塔具有足够的安全系数;主塔在主梁上的预埋区域内,通过灌注收缩自补偿式微膨胀混凝土可提高主塔的稳定性,

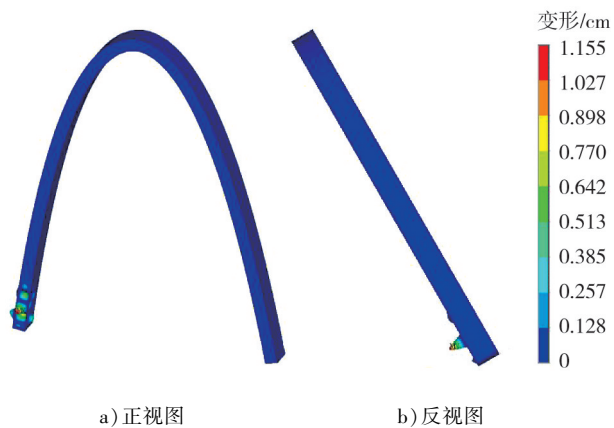


图12 主塔变形结果

保障桥梁的安全性<sup>[20-22]</sup>。

## 5 结论

以某市文化旅游区内跨河景观桥为背景,在方案比选阶段采用三维建模,采用桥梁有限元分析软件 MIDAS Civil 和有限元软件 ANSYS 进行结构分析,并对主塔在整体吊装未灌注柱脚混凝土的施工工况进行整体稳定性计算。

1)与一般的公路桥梁相比,风景区景观桥梁有自身的独特性。设计时应考虑桥梁与整体景观的协调性,在满足基本使用功能的前提下与景区文化特色协调统一。

2)桥塔设计需满足现场施工安装要求,在结构设计阶段需验算施工不利工况。通过 ANSYS 模型计算景观桥变形,矩形桥塔截面稳定性较高。因造型需要,桥塔与主梁成一定夹角的景观桥梁可在桥塔的塔根钢结构位置内部灌注混凝土,防止局部屈曲。

3)因风景区景观桥梁异型桥梁偏多,可借助有限元分析软件对主体结构和特殊工况下的构件进行验算和分析。通过计算可知,本桥主梁结构满足规范要求,桥塔设计满足施工安装要求,整体结构安全可靠。

### 参考文献:

- [1]宋福春,王厚宇,马梓乔.基于地域文化的景观桥梁美学设计[J].公路,2019,64(3):182-186.  
SONG Fuchun, WANG Houyu, MA Ziqiao. Aesthetic design of landscape bridge based on regional culture[J]. Highway, 2019,64(3):182-186.
- [2]齐伟杰.城市桥梁的景观设计现状和发展[J].交通世界,2017(14):100-101.
- [3]戴建国.城市景观桥梁设计中的彰显与融合[J].城市建筑,2021,18(35):192-195.  
DAI Jianguo. Prominence and integration in the design of the urban landscape bridge[J]. Urbanism and Architecture, 2021, 18(35):192-195.
- [4]赵佳男,万杰龙.景观桥梁设计要点研究[J].城市道桥与防洪,2022(2):114-117.
- [5]赖亚平,邓宇,安全星,等.忻州市云中河景观桥方案设计[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(增刊1):690-695.  
LAI Yaping, DENG Yu, AN Jinxing, et al. Design of Yunzhong River landscape bridges in Xinzhou City[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2012,31(Suppl. 1):690-695.
- [6]古金梁.景观桥梁创新设计手法及其应用的研究[J].工程建设与设计,2020(23):109-111.  
GU Jinliang. Research on innovative design methods and application of landscape bridge[J]. Construction & Design for Project, 2020(23):109-111.
- [7]徐利平.城市桥梁美学创作[M].上海:同济大学出版社,2017.
- [8]陈艾荣,盛勇,钱锋.桥梁造型[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [9]公路工程设计文件编制[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [10]曹菲.城市景观桥梁创新设计研究[D].南京:东南大学,2015.  
CAO Fei. Innovative design of urban landscape bridges[D]. Nanjing:Southeast University,2015.
- [11]李勇,汪俊.桥梁工程设计中 BIM 技术的具体应用[J].公路交通科技:应用技术版,2019,15(7):187-189.
- [12]王亚斌.景观桥梁结构造型设计与评价[D].合肥:合肥工业大学,2006.  
WANG Yabin. The structure form design and evaluation of scenic bridges[D]. Hefei: Hefei University of Technology,2006.
- [13]费汉兵,单继安,马伟杰,等.填充型环氧涂层钢绞线锚具的设计与锚固性能试验[J].公路交通科技,2010,27(4):66-72.  
FEI Hanbing, SHAN Ji'an, MA Weijin, et al. Design and anchorage performance test of anchorage of filled epoxy-coated strand[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010,27(4):66-72.
- [14]费汉兵,李洪涛,金平,等.填充型环氧涂层钢绞线涂层厚度均匀性控制研究[J].金属制品,2020,46(4):20-23.  
FEI Hanbing, LI Hongtao, JIN Ping, et al. Research on coating thickness uniformity control of filled epoxy coated steel



strand[J]. Metal Products, 2020,46(4):20-23.

- [15] 江焕宏,费汉兵. 填充型环氧涂层钢绞线锚固特点及张拉顶压技术[J]. 公路,2012(9):130-134.
- [16] 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2016.
- [17] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018.
- [18] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:人民交通出版社,2017.
- [19] 公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [20] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2021.
- [21] 冯绍海,李清. 城市无背索独塔斜拉桥的景观设计理念与选型分析[J]. 城市道桥与防洪,2018(2):69-71.
- [22] 吴小海 林寅. CAD 三维建模在厦漳跨海大桥主塔施工测量中的应用[J]. 公路,2011(10):90-92.

## Bridge type selection and innovation design of landscape bridge in scenic area

*LIU Zhe<sup>1</sup>, MA Naixuan<sup>2</sup>*

1. Power China Nuclear Engineering Company Limited, Jinan 250100, China;

2. Shandong Hi-Speed Engineering Testing Co., Ltd., Jinan 250002, China

**Abstract:** Taking the design of river-crossing landscape bridge in a cultural tourism area of a city as the research background, the continuous beam bridge with cable-stayed suspension cooperative system is adopted based on the design concept of harmony and unity between the landscape bridge and the natural environment, and economics and elegant appearance. The basic idea of the scheme design in the preliminary design stage of the bridge is introduced and three-dimensional model of the whole bridge is established by AutoCAD software. The key points of the bridge design are the anchorage reliability of the cable structure under low stress level, the connection reliability of the bridge tower and the main beam, and the design of the main cable spreader. The overall static and stability of the bridge structure is calculated with the finite element analysis software MIDAS Civil. The stability of the main tower under installation conditions is analyzed with the ANSYS program. The results show that this bridge is safe and reliable, and the structure stability is high, which meets the requirements of the current specifications, and can provide reference for similar engineering design.

**Keywords:** landscape bridge; schematic design; three-dimensional modeling; structural calculation; stability analysis

(责任编辑:王惠)