

聊城跨徒骇河莲花型单塔大跨斜拉桥结构设计

林国伟¹,董俊²,宋晓东³

(1.济南城建集团有限公司,山东 济南 250000; 2.四川建筑职业技术学院,四川 德阳 618000;

3.中铁二院工程集团有限责任公司,四川 成都 610031)

摘 要:聊城兴华路跨徒骇河桥采用100 m+100 m独塔钢箱梁斜拉桥,该桥主塔整体造型采用莲花状结构,由2个主塔柱和1个副塔柱组成,主、副塔柱之间采用空间索面拉索相连,桥塔中轴线为椭圆,主塔和副塔分别高52.211 m、47.65 m,主、副塔柱轴线夹角30°;主梁采用钢箱梁,双箱单室截面,梁宽40 m,中线处梁高3 m;斜拉索为扇形布置的空间双索面,采用标准强度1 770 MPa的平行钢丝斜拉索,全桥共72根斜拉索,斜拉索梁端锚固采用钢锚箱,钢锚箱焊接在主梁钢箱梁边箱室外侧;塔座、承台及桩基础采用混凝土结构,大桥共设置34根 $\phi 1.8$ m的钻孔灌注桩,桩长70 m。莲花造型独塔斜拉桥的造型优美,创意独特,在满足结构各项受力性能要求的同时,很好地体现了聊城莲湖水利风景区的特色文化,使景区成为建筑艺术和谐交融的典范。

关键词:独塔斜拉桥;莲花状结构;主梁;空间拉索;钢桥塔

中图分类号: U448.27; U442.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2023)05-0060-05

1 概 述

聊城兴华路跨徒骇河桥全长800.479 m,市政次干道,设计时速50 km/h。大桥桥面总宽40 m,6车道,远期为8车道,设计车速50 km/h,路面设计标准轴载BZZ-100,汽车荷载等级为城-A级,桥塔基础均采用群桩基础。桥址位于7度地震区,地震PGA=0.15g,按8度设防,设计地震分组为第2组,按甲类桥开展抗震设计。桥梁设计基础期和使用年限均为100 a,环境类别为II类环境,受反复冻融影响。

2 总体设计

2.1 主桥桥型设计

大桥采用独塔斜拉桥,景观造型主要通过主塔来体现。主塔整体造型采用莲花状结构,与莲花水利风景区自然景观相呼应,体现与周围自然环境的和谐。莲花造型的独塔双索面斜拉桥全长200 m。桥塔由2个主塔和1个副塔组成,主副塔之间采用空间曲线索面拉索相连,两侧主塔桥面以上高55.9 m,中间副塔高51.9 m。

聊城兴华路跨徒骇河大桥效果图见图1。

2.2 结构体系

聊城兴华路跨徒骇河大桥主桥长200 m,桥跨



图1 聊城兴华路跨徒骇河大桥效果图

组成为100 m+100 m。本次设计采用半漂浮体系^[1]。塔、梁间设置纵向黏滞阻尼器和横向抗风支座,竖向布设球型钢支座。主塔处安装4个黏滞阻尼器,引桥采用在较低的1个桥墩设置抗震型固定盆式支座,在其余桥墩和桥台设置抗震型滑动盆式支座。

2.3 主梁设计

主梁为钢箱梁,双箱单室截面,顶宽40 m,中线处梁高3 m,悬臂板长5.5 m。标准断面处钢箱梁顶板板厚16 mm,底板板厚16 mm,边腹板(斜拉索腹板)厚32 mm,中腹板厚20 mm。为满足结构受力及构造的需要,索塔位置处主梁横断面顶板加厚到28 mm,主梁横断面底板加厚到30 mm;边支点位置处横断面加厚尺寸与索塔横断面一致。

钢梁桥面板采用正交异性板构造,顶板机动车道范围内纵向为U形肋,高度0.28 m,板厚8 mm,顶板U形肋间距为0.6 m;人行道处纵向加劲肋采用板肋,高度0.16 m,厚度16 mm,顶板板肋间距为0.3 m;箱梁底板机动车道范围加劲肋采用U形肋,高度和板厚与顶板一致,但间距变为0.8 m;中央分隔带范围设置小纵梁,高0.8 m,板厚20 mm,小纵梁底板宽

收稿日期:2022-06-30

基金项目:山东省住房和城乡建设厅科技计划(2019-k4-1)

作者简介:林国伟(1982—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁工程设计工作。

0.5 m,厚度为 24 mm,钢箱梁每隔 9 m 设 1 道拉索区横隔板。主梁断面布置图见图 2。

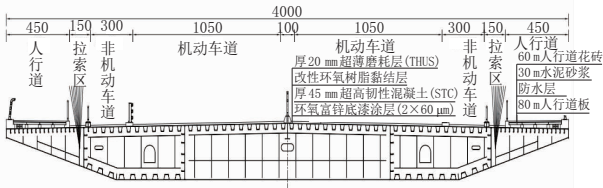


图 2 主梁断面布置图(单位:cm)

2.4 斜拉索设计

斜拉索为扇形空间双索面,采用 1 770 MPa 平行钢丝,全桥共 $4 \times 18 = 72$ 根斜拉索,最长 73.7 m,最大规格为 PES(C)7-163^[2]。斜拉索在主塔上沿主塔轴向索距为 3.8 m,在副塔上的索距为 3.0 m,梁上索距为 9 m;主索在梁端进行张拉,副索在主塔上张拉。斜拉索设计寿命为 30 a。

2.5 主塔与基础

桥塔主体部分采用钢桥塔,塔座、桥墩及主墩基础采用混凝土结构。基础为承台、钻孔灌注桩基础。主塔及基础构造图见图 3。

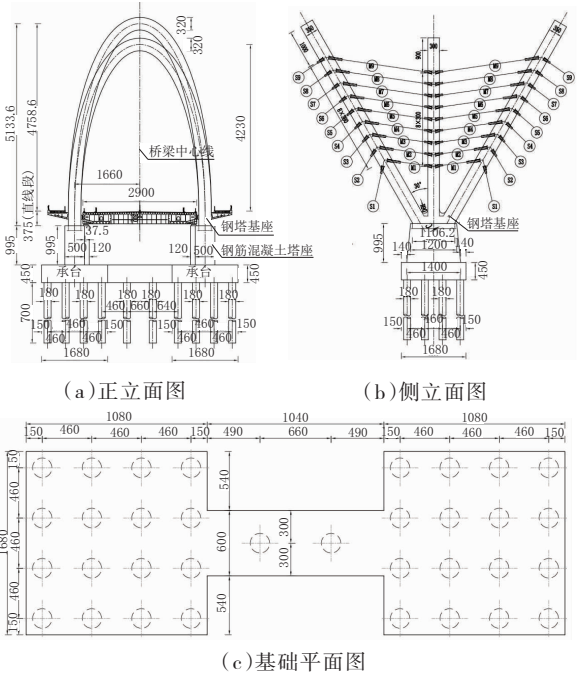


图 3 主塔与基础构造图(单位:mm)

桥塔由 2 个主塔柱和 1 个副塔柱组成,主、副塔柱之间采用空间索面拉索相连,桥塔中轴线为椭圆。两侧主塔高 52.211 m,中间副塔高 47.65 m,竖直设置,主塔柱与副塔柱轴线夹角 30°。塔身采用钢箱截面,主塔柱截面横桥向内侧宽度 3.2 m,顺桥向内侧高度 3.5 m;副塔柱截面横桥向内侧宽度 3.2 m,顺桥向内侧高度 3 m。箱壁板厚由塔顶到塔根部逐渐加厚,塔顶处箱壁厚度 20 mm,塔底处箱壁厚度 50 mm。

截面内侧按 0.5 m 间距设置箱壁纵向加劲肋,沿塔身纵向约 3.0 m 间距设置 1 道横隔板。

塔座采用矩形变截面钢筋混凝土结构,上窄下宽,底部截面 5 m × 14 m。塔座下承台为正方形,单边宽度为 16.8 m,厚度 4.5 m。承台下共布置 34 根钻孔灌注桩,单桩直径 1.8 m,单根桩长度为 70 m,钢筋型号为 HRB400。

3 结构静力分析

3.1 计算模型

采用 Midas 建立了如图 4 所示的三维桥梁结构仿真模型。桥塔、主梁、塔座、桩基采用梁单元模拟,斜拉索采用桁架单元模拟;斜拉索、主梁和主塔考虑恒载几何刚度的影响,二期恒载、横隔梁以集中荷载方式施加在主梁上。采用 Midas 软件中的非线性 Maxwell 模型模拟黏滞阻尼器,采用 M 法计算土对桩基的弹簧刚度^[3]。

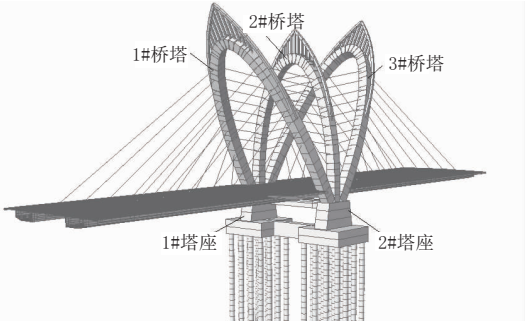


图 4 动力计算全桥模型示意图

3.2 荷载效应

3.2.1 永久荷载效应

(1)结构重力:一期恒载主要为桥梁结构自重,梁按实际断面计重量,横梁及压重按集中荷载考虑。二期恒载取 150 kN/m,作用位置取梁断面的实际位置。

(2)混凝土收缩及徐变作用:按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)计算。

(3)基础变位作用:主墩沉降按照 2.0 cm,同时考虑 5 mm 主塔基础的差异沉降,过渡墩沉降按 1.5 cm 取值。

3.2.2 可变作用效应

(1)汽车荷载:城市 -A 级,按双向 8 车道加载,并考虑横向分布系数和 1.15 的偏载系数。

(2)汽车冲击力:按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)规定的方法计算。

(3)非机动车道及人群:非机动车道及人行道宽度范围按《城市桥梁设计规范》(CJJ11—2011)计算。

人行道宽度为单侧 4.5 m。

(4)温度(均匀温度和梯度温度)作用:均匀温度作用按体系升温 +35.0℃,体系降温 -25.0℃考虑;钢主梁梯度温度按 BS5400 规定取用,包括梯度升温 and 梯度降温。

(5)风荷载:考虑到周边目前的建设实际情况,取 A 类地表,抗风风险区划为 R2,重现期 10 a 的风速值为 26.5 m/s (W1),重现期 100 a 的风速值为 28.9 m/s (W2)。

3.2.3 荷载组合

(1)组合一:恒载(考虑沉降、收缩徐变)+汽车荷载+人行荷载+整体温度(包络)+梯度温度(包络)+构件温差(包络)+W1 风荷载(纵、横向包络)。

(2)组合二:恒载(考虑沉降、收缩徐变)+整体温度(包络)+梯度温度(包络)+构件温差(包络)+W2 风荷载(纵、横向包络)。

3.3 主要计算结果分析

3.3.1 钢箱梁结构验算

(1)钢箱梁主体结构的强度验算。结构总体计算模型中钢箱梁的计算结果即其第一体系计算结果。本设计按照《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)第 5.2.3 条,对结构可能产生的弯矩作用正应力、剪力作用剪应力、扭矩作用剪应力和畸变正应力,以及应力组合进行验算。验算结果为:主梁第一体系上缘最大组合应力为 -59.0 MPa,下缘最大组合应力为 100.8 MPa,远小于材料的设计值,故钢箱梁应力满足规范要求。

(2)总体作用体系和正交异性桥面板的组合验算按照《公路钢结构桥梁设计规范》的要求,将前述总体作用体系计算所得应力与桥面体系计算(第二体系)所得应力迭加,进行正应力和组合应力验算^[4]。桥面系局部加载按城 -A 级车辆荷载施加。钢箱梁顶板所受正应力分为第一体系应力(纵向计算应力)和第二体系应力(顶板纵肋计算应力)两部分,钢箱梁底板仅受第一体系应力作用。综合后钢箱梁应力计算结果见表 1。由表 1 可知,钢箱梁应力满足规范要求。

表 1 钢箱梁应力计算结果

单位:MPa

位置	最大拉应力		最大压应力	
	第一体系	第二体系	第一体系	第二体系
主梁顶板	54.1	19.2	-67.4	-36.2
主梁底板	86.5	26.6	-52.3	-47.8

(3)疲劳应力验算。疲劳应力验算按《公路钢结构桥梁设计规范》第 5.5.4 条进行验算。验算结果为:

主梁在疲劳荷载计算模型 - I 作用下的最大正应力幅为 18.8 MPa,最大剪应力幅为 13.6 MPa。疲劳荷载模型 I 的验算结果表明钢箱梁结构具有无限疲劳寿命,无需进行疲劳荷载模型 II 验算。

3.3.2 斜拉索计算

最不利标准值荷载组合下,斜拉索拉应力小于其极限强度的 40%,安全系数均大于 2.5;8 车道汽车荷载作用下,拉索最大应力幅为 55 MPa。

3.3.3 索梁锚固区钢锚箱结构局部应力分析

分析结果表明,梁锚固钢锚箱构造及钢箱梁边纵腹板在标准值索力作用下其应力水平不高,绝大部分区域折算应力都小于 98.6 MPa,最大折算应力为 156.1 MPa,发生在锚箱钢板与主梁腹板相交处,但区域较小。结构处于弹性工作状态,未出现屈服。主梁钢锚箱在疲劳荷载计算模型 - I 作用下^[4]的最大应力幅为 7.6 MPa,满足规范要求。

3.3.4 主塔结构验算

(1)钢箱主塔结构的强度验算。结构总体计算模型中钢塔的计算结果即其第一体系计算结果。本设计按照《公路钢结构桥梁设计规范》,对结构可能产生的弯矩作用正应力、轴力作用的正应力、剪力作用剪应力、扭矩作用剪应力和畸变正应力,以及应力组合进行验算。由计算可知:主钢塔最大组合压应力为 201.2 MPa,最大组合拉应力为 82.3 MPa,小于钢结构材料强度设计值,钢塔应力满足规范要求。

(2)钢箱主塔结构的稳定性验算。根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020),利用 Midas 计算程序,结构体系第一类稳定,程序计算的活载屈曲系数为 150.3,得出弹性屈曲的结构稳定安全系数 26.2,满足规范要求。

4 桥梁结构抗震性能分析

4.1 地震波输入

根据《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ-166—2011)规定,甲类桥梁应根据专门的工程场地地震安全性评价来确定地震作用。大桥由山东省地震局承担场地地震安全性评价报告,提供了大桥抗震设计所需要的设计地震反应谱及地震加速度时程,E1 和 E2 地震波各 3 条。图 5 给出了地震波反应谱曲线,由于篇幅有限,图 6 仅给出了 E2 第 1 条地震波时程曲线。

4.2 大桥抗震性能分析

本文采用非线性时程分析方法进行全桥的地震

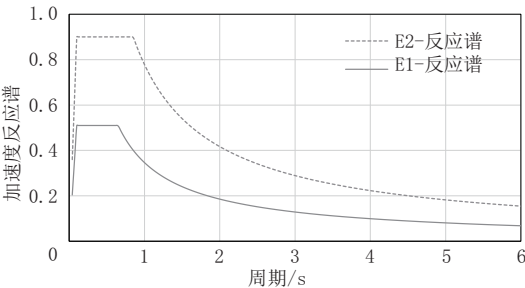


图 5 地震波加速度反应谱

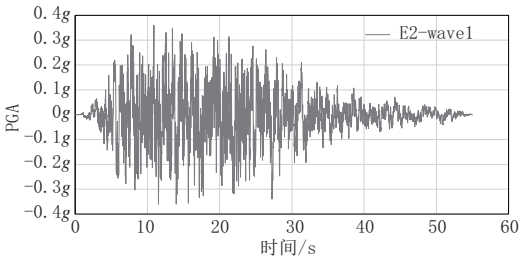


图 6 地震波时程数据

反应分析,在时程反应分析中,地震输入方式采用纵向 + 竖向和横向 + 竖向输入。地震加速度时程由地震安评提供,对于 2 个概率水准,每个概率水准取 3 组地震加速度时程进行地震反应分析,地震反应分析结果取 3 组反应的最大值。

4.2.1 抗震性能验算准则及验算方法

桥梁抗震性能验算需明确桥梁的地震易损部位,并确定相应的性能验算指标和验算方法。根据已有工程抗震设计经验和少量震害资料,斜拉桥的地震易损构件为主塔、支座、桩基础、塔座、横梁。因此,针对聊城兴华路跨徒骇河大桥,本桥设计制定了如表 2 所示的验算内容和验算准则,验算时考虑地震作用效应与永久作用效应的组合。表 2 中: V 、 M 、 Δ 、 σ 分别为地震剪力、弯矩、位移和应力需求; M_d 表示截面相应于最不利轴力及材料设计值的等效屈服弯矩,可按现行公路桥涵设计规范相关规定计算得到; M_y 表示截面相应于最不利轴力及材料标准值的等效屈服弯矩; Δ_e 表示结构或构件的位移能力; σ_e 为截面允许最大应力; V_e 表示构件的抗剪能力。

表 2 大桥抗震性能验算内容及验算准则

设防水平	结构验算内容	验算准则
E1	验算支座的强度和位移、验算桥塔塔座抗弯强度,验算承台横梁强度	承台横梁、桥塔塔座: $M < M_d$ 固定支座: $V < V_e$ 滑动支座: $\Delta < \Delta_e$
	验算辅助墩、过渡墩抗弯屈服强度及抗剪强度,验算主塔截面应力,验算各基础单桩抗弯强度和单轴承载力,验算支座强度或位移,验算承台的强度	桥塔塔座、横梁: $M < M_y$ 且 $V < V_e$ 主塔: $\sigma < \sigma_e$ 基础: $M < M_y$ 固定支座: $V < V_e$ 滑动支座: $\Delta < \Delta_e$

4.2.2 全桥抗震性能分析验算

4.2.2.1 钢桥塔抗震验算

由图 7 可知:在 E2 纵向 + 竖向地震作用下,1# 和 3# 桥塔最大组合压应力出现在塔底,压应力为 202.34 MPa,最大拉应力出现在塔冠构件上,拉应力为 121.53 MPa;E2 横向 + 竖向地震作用下,1# 和 3# 桥塔最大压应力出现在塔冠位置,压应力为 237.09 MPa,最大拉应力也出现在塔冠位置,拉应力为 248.05 MPa。而边塔塔身最大压应力为 206.74 MPa,最大拉应力为 140.45 MPa,塔身和塔冠均小于截面允许最大应力 270 MPa,边塔各截面应力满足抗震设防标准。

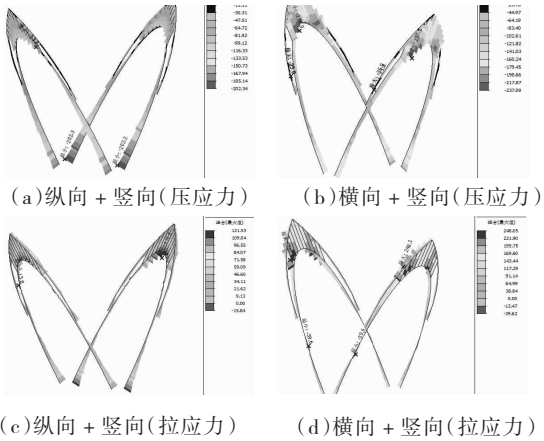


图 7 E2 地震作用下边塔组合应力图(单位:MPa)

在 E2 纵向 + 竖向地震作用下,中塔最大组合压应力出现在塔底,压应力为 105.47 MPa,最大拉应力出现在塔底,拉应力为 102.3 MPa;横向 + 竖向地震作用下,中塔最大压应力出现在塔底,压应力为 77.92 MPa,最大拉应力也出现在塔底,拉应力为 80.42 MPa。塔身和塔冠均小于截面允许最大应力 270 MPa,中塔各截面应力满足抗震设防标准。

4.2.2.2 桥塔桩基础抗震验算

大桥桩基在水平 + 竖向地震力作用下,其轴力变化较大。在纵向 + 竖向地震作用下,桩基轴力的波动范围为 1 607 ~ -21 739 kN,在横向 + 竖向地震作用下,桩基轴力的波动范围为 1 792 ~ -20 489 kN。而轴力的波动对桩基抗弯承载力影响较大,故在大桥的设计过程中,对桩基的检验要考虑轴力的影响,采用截面承载力包络图的形式进行检验,将所有桩基单元的最不利内力结果同时绘制于抗弯承载力强度包络图中,判断是否满足规范要求。如图 8 所示,计算结果表明主塔桩基抗弯强度满足抗震设防标准,E2 地震作用下桩基保持弹性状态。

根据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)第 6.3.3 条,验算单桩承载力。验算结果

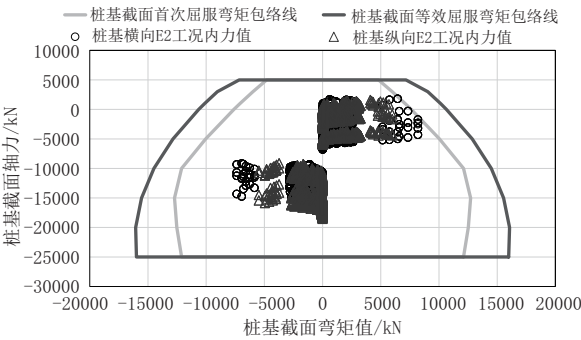


图8 桩基各截面抗弯承载力验算结果(E2地震作用下)

表明,单桩轴向受压承载力容许值 $[R_a]=14\,427.89\text{ kN}$ 。由《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)第4.4.1条可知,E2地震作用下,对于非液化土,单桩的抗压承载能力可以提高至原来的2倍,故此时 $[R_a']=28\,855.78\text{ kN}$ 。在水平+竖向地震作用下,桩基最大轴力为 $21\,739.55\text{ kN}<[R_a']=28\,855.78\text{ kN}$,大桥单桩轴向受压承载力满足抗震设计标准。

4.2.2.3 大桥支座、阻尼器抗震验算

聊城徒骇河大桥边墩均设置双向滑动与纵向活动支座,主塔与主梁相接处设置仅横向固定的抗风支座。

在纵向+竖向E2地震作用下,桥塔黏滞阻尼器的最大阻尼力为 $1\,432\text{ kN}$,最大地震位移为 $255\text{ mm}<[S]=300\text{ mm}$,黏滞阻尼器的受力和变形满足设计要求。

表3给出了大桥采用黏滞阻尼器后,各纵向滑动支座的位移及减震率。由表3可见,其减震率为 $59.8\%\sim 63.0\%$,减震体系发挥了良好的限位作用。支座在E2水准地震作用下的最大位移 $271\text{ mm}<[S]=300\text{ mm}$ 。

4.2.2.4 桥塔塔顶地震位移验算

毫无疑问,地震作用下桥塔会发生剧烈的晃动,各部位均会随之产生或大或小的位移。位移过大不仅会导致桥梁主要结构的损坏和变形,还会导致各种构件的损坏,影响桥梁的正常使用。

表4给出了E2纵向+竖向、横向+竖向地震作用下,中塔塔顶、边塔塔顶、边跨1/2截面各关键节点的位移。

表3 E2纵向+竖向地震作用下支座纵向位移 单位:mm

支座	无阻尼器时	有阻尼器时		容许位移	减震率 $\frac{①-③}{①}/\%$
	①E2地震	②E1地震	③E2地震		
边墩1#支座	708	97.1	263	300	62.9
边墩2#支座	708	97.1	263	300	62.9
桥塔3#支座	692	82	256	300	63.0
桥塔4#支座	692	82	256	300	63.0
边墩5#支座	674	105	271	300	59.8
边墩6#支座	674	105	271	300	59.8

表4 主桥关键位置位移最大值(E2地震作用下) 单位:m

位置	纵向+竖向地震		横向+竖向地震	
	纵向位移	竖向位移	横向位移	竖向位移
边塔塔顶	0.368	0.204	0.207	0.043
中塔塔顶	0.324	0.003	0.083	0.003
1/2边跨跨中	0.253	0.298	0.053	0.137

5 结 语

聊城徒骇河大桥主桥设计时充分重视桥梁景观,力求造型美观,与自然环境和谐,体现聊城市历史人文内涵。主桥采用 $100\text{ m}+100\text{ m}$ 独塔斜拉桥结构形式,主塔设计为莲花状结构。通过科学、先进的设计理念将现代与传统脉络完美结合,使“江北水城”景区成为建筑艺术和谐交融的典范。仿真模拟及验算结果表明,聊城徒骇河大桥静力和抗震性能良好,可为同类型桥梁的建设提供借鉴。

参考文献:

[1] 文望青,林骋,王斌,等.双幅同步转体矮塔斜拉桥设计[J].桥梁建设,2021,51(2):112-117.
[2] 周继,王新国,严定国,等.武汉市杨泗港快速通道跨线斜拉桥总体设计[J].桥梁建设,2018,48(6):87-92.
[3] 董俊.铁路高墩大跨刚构-连续组合体系桥梁近场地震易损性分析研究[D].成都:西南交通大学,2016.
[4] 丁磊,唐彪,华新,等.浦仪公路上坝大桥分离式钢箱梁设计[J].上海公路,2018,1(4):3-38.
[5] 马碧波,马秀君,吕建伟.秀山大桥锚体及锚固系统设计[J].桥梁建设,2017,47(2):89-94.