

宽幅无风撑连续梁拱组合桥设计与计算分析

豆 飞, 范佐银, 保积伟

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 以嘉峪关市金港路上跨清嘉高速公路桥梁为工程背景, 对桥梁造型、结构尺寸和设计参数、设计要点进行阐述, 结合桥梁施工步骤对结构进行研究和计算分析, 主要介绍了宽幅无风撑中承式连续梁拱组合桥结构体系的受力特点, 以及使用过程中各构件的强度、应力和挠度, 并针对桥梁整体稳定性和宽幅横梁进行计算分析, 确保了结构的强度和稳定性。该桥造型独特、受力复杂, 可为类似桥梁设计提供参考。

关键词: 宽幅; 无风撑; 连续梁拱组合桥; 钢箱拱; 计算

中图分类号: U442.5*3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0090-05

Design, Calculation and Analysis of Wide-span Continuous Beam Arch Composite Bridge without Wind Braces

DOU Fei, FAN Zuoyin, BAO Jiwei

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking the bridge spanning the Qingjia Expressway on Jingang Road in Jiayuguan City as the engineering background, the bridge shape, structural dimensions, design parameters and design essentials are set forth. Combined with the bridge construction steps, the structure is studied, calculated and analyzed. The stress characteristics of the wide-span no-wind-brace half-through continuous beam arch composite bridge structure system are mainly introduced including the strength, stress and deflection of each component during usage. The overall stability and wide cross beam of the bridge are calculated and analyzed to ensure the strength and stability of structures. The bridge has the unique shape and complex force, which can provide reference for the design of similar bridges.

Keywords: wide width; no wind brace; continuous beam arch composite bridge; steel box arch; calculation

1 工程概况

该工程位于嘉峪关市中心城区的东部, 在新文路桥及机场南路桥以东, 连接安远沟组团、讨赖河新区组团, 呈南北走向。道路等级为城市主干路, 设计速度为 60 km/h, 桥梁全长 156.4 m, 主桥采用跨径布置 (22+65+22) m 中承式连续梁拱组合桥, 桥梁宽度 36 m, 与道路建设同步实施景观绿化、道路照明、绿化给水等配套工程。

2 主桥总体布置

嘉峪关市金港路上跨清嘉高速公路桥梁主桥为 (22+65+22) m 中承式连续梁拱组合桥, 桥宽 36 m, 桥面系为钢-混凝土组合梁结构, 道路中心线处梁高 2.451 m; 拱肋采用两片平行钢箱拱, 拱肋横向中心间

距为 25.5 m; 吊索间距 4 m。

桥墩采用圆锥形墩, 分离式承台接钻孔灌注桩基础, 桥台采用重力式桥台。施工工法采用部分钢支架施工。主桥总体布置图见图 1, 主桥横断面见图 2。

3 主桥结构设计

3.1 拱肋系统

拱肋主跨径 65 m, 矢高 16.25 m, 矢跨比 1:4。桥梁拱肋材质为 Q345qE。拱肋采用宽 1.5 m, 高 1.7 m 的矩形截面。拱肋标准段顶底板、腹板厚均为 16 mm, 吊索采用销铰方式与拱肋和主梁连接。

3.2 桥面系

桥面系为钢-混凝土组合梁结构, 道路中心线处梁高 2.451 m, 全宽 36 m。组合梁钢梁材质为 Q345qE, 采用双主纵梁梁格体系, 由主纵梁、横梁和小纵梁等组成。其中横梁每间隔 4 m 设置, 小纵梁在横梁之间。桥面板采用厚 25 cm 的 C50 钢筋混凝土预制板,

收稿日期: 2024-03-01

作者简介: 豆飞(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事特殊结构桥梁设计。

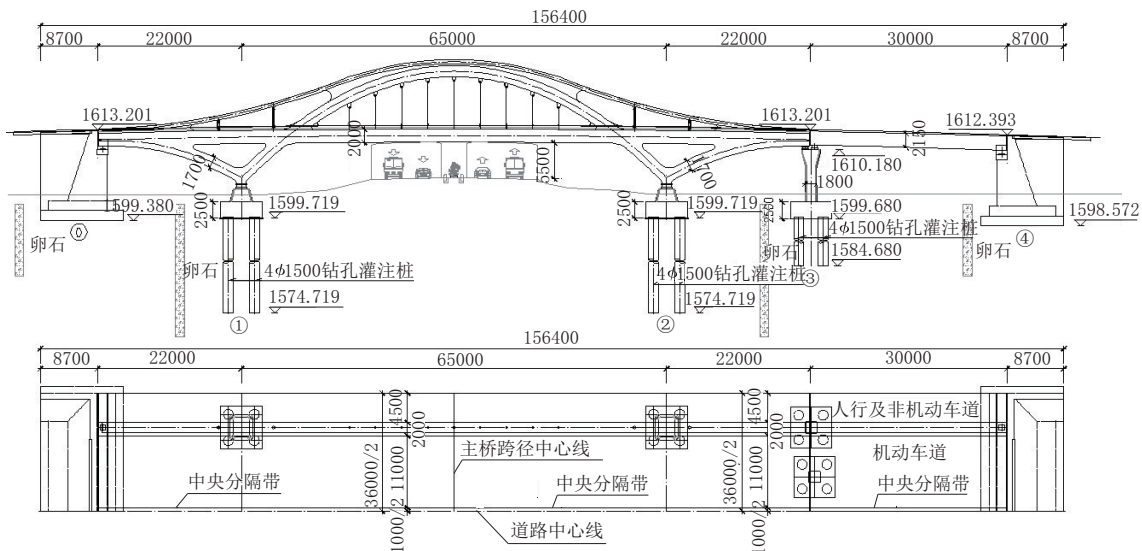


图1 总体布置图(单位:mm)

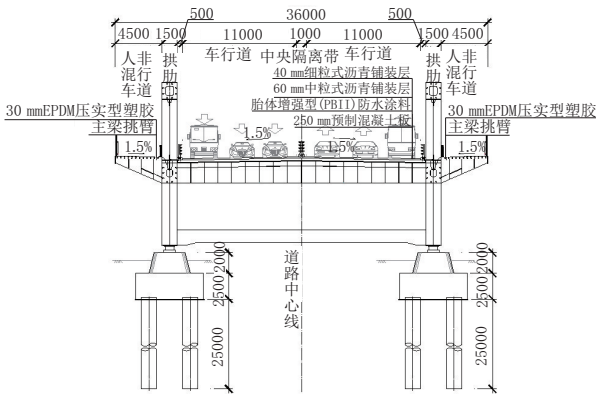


图2 横断面图(单位:mm)

板和板之间用湿接缝连接。

3.3 吊索

梁拱间布设平行吊索,吊索采用 1 860 MPa 级 GJ15-17 钢绞线整束挤压锚固体体系产品,吊索纵桥向 4 m 间距,全桥共 18 根。吊索上下端均采用销轴式耳板锚固,吊索在梁端张拉,吊索总调节量为 100 mm。

3.4 下部结构

主桥桥墩采用墩高 2 m 的锥形实体墩,墩顶外轮廓尺寸 2.5 m(纵)×3.0 m(横),锥形墩承台接群桩基础,承台尺寸 6.5 m×6.5 m×2.5 m,基础采用 φ1.5 m 钻孔灌注桩。

3.5 支承体系

主桥拱脚和边跨梁端支点处均设置摩擦摆减隔震支座。

4 主桥施工方案

主桥施工采用先主梁后架设拱肋的部分支架施工工法,先安装拱脚、中拱梁节点,边跨横梁,然后安装跨中拱肋段,最后跨中横梁安装完成。待拱肋合

龙以后初张拉吊索,混凝土板架设完成后终调吊索力。采用该工法容易控制,施工便利,具体施工步骤如下:

- (1)进行桥台、桩基、承台施工;
- (2)现场预制混凝土桥面板,工厂加工钢梁、钢拱单元,并进行现场组拼;
- (3)搭设部分钢支架,并对部分钢支架进行预压,预压重量一般不小于结构重量的 1.2 倍;
- (4)在支架上进行主桥主纵梁、横梁和拱肋拼装;
- (5)安装吊索并进行第一次张拉,张拉完成后拆除临时支架;
- (6)对称安装预制桥面板;
- (7)第二次张拉吊索;
- (8)桥面板湿接缝按跨中到拱脚顺序逐段浇筑;
- (9)进行全桥附属结构施工;
- (10)调整主桥吊索力至成桥索力;
- (11)进行通车试验。

5 主桥总体计算分析

5.1 主桥模型建立

利用 MIDAS Civil 2021 有限元程序建立三维空间模型。钢拱肋和钢主梁均采用空间梁单元进行模拟,吊索采用桁架单元模拟,见图 3。

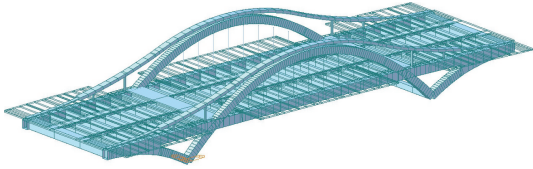


图3 结构计算模型

5.2 材料特性

(1)混凝土:拱座和承台采用C40混凝土,桩基采用C35水下混凝土,预制桥面板采用C50混凝土。

(2)钢材:拱肋、主梁采用Q345qE钢材,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,线膨胀系数为 1.2×10^{-5} ,容重为 78.5 kN/m^3 ,其他主要力学性能按规范规定取值。

(3)吊索:吊索采用型号GJ15-17钢绞线整束挤压锚固体系。全桥索体采用17根 $\phi 15.2\text{ mm}$ 强度1 860 MPa索体。

5.3 荷载组合

成桥阶段承载能力极限状态和正常使用极限状态主要荷载作用组合系数见表1。

表 1 主要荷载作用组合系数表						
组合	恒载	基础变位	汽车荷载	温度	人群荷载	风荷载
组合一 (基本组合)	1.32	0.55	1.54	1.155	1.155	1.21
组合二 (百年风)	1.32	0.55	—	1.155	—	1.54
准永久组合	1.0	1.0	0.4	0.8	0.4	0.75
频遇组合	1.0	1.0	0.7	0.8	0.8	0.75
标准组合	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

5.4 拱肋应力验算

经过计算对比,荷载组合一为最不利荷载工况,中拱截面上缘最大压应力276.2 MPa,位于边跨拱梁结合段;边拱肋截面下缘最大压应力176.9 MPa,位于拱脚区域,拱肋应力值均小于相应钢材的强度设计值,满足规范要求(见图4、图5)。

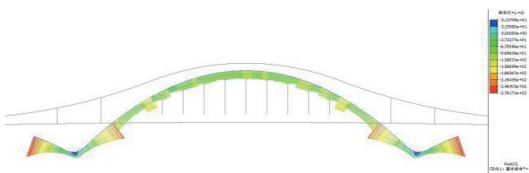


图4 组合一拱肋上翼缘应力(单位:MPa)

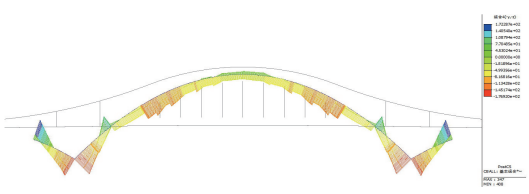


图5 组合一拱肋下翼缘应力(单位:MPa)

5.5 主纵梁应力

经过计算荷载组合一为最不利组合,主纵梁截面上缘最大压应力87.7 MPa,最大拉应力119.5 MPa,位于中拱梁节点结合段区域;主纵梁截面下缘最大压应力164.4 MPa,最大拉应力170.1 MPa,位于中拱梁节点结合段区域,拱肋应力值均小于相应钢材的

强度设计值,满足规范要求(见图6、图7)。

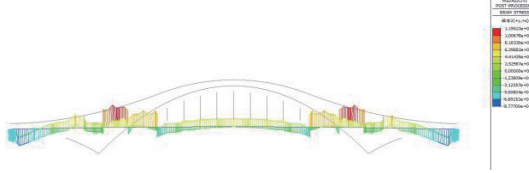


图6 组合一主纵梁上翼缘应力(单位:MPa)

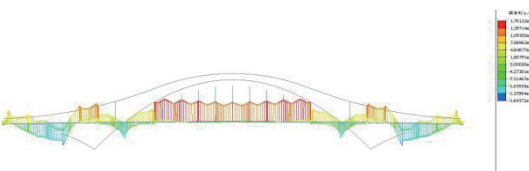


图7 组合一主纵梁下翼缘应力(单位:MPa)

5.6 主纵梁疲劳验算

按钢桥规范采用疲劳荷载计算模型I对主纵梁进行疲劳验算,根据结果可知,上缘正应力幅最大值 $\Delta\sigma_p=9.7\text{ MPa}$,下缘正应力幅最大值 $\Delta\sigma_p$ 为16.1 MPa,疲劳荷载分项系数 $\gamma_F=1.0$,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 $\Delta\varphi=0$,考虑相应疲劳构造细节,取正应力幅疲劳强度 $\Delta\sigma_c=70\text{ MPa}$,正应力常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_D=0.737\Delta\sigma_c=51.59\text{ MPa}$,因此: $\gamma_F\Delta\sigma_p=16.1\text{ MPa}<k_s\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf}=38.2\text{ MPa}$,拱肋疲劳验算满足规范要求(见图8、图9)。

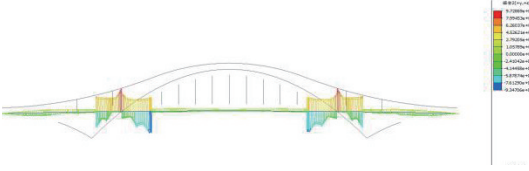


图8 疲劳模型I下主纵梁上翼缘应力(单位:MPa)

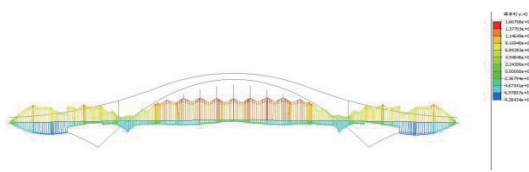


图9 疲劳模型I下主纵梁下翼缘应力(单位:MPa)

5.7 主纵梁刚度

拱肋在汽车荷载(不考虑冲击力)作用下竖向位移见图10、图11。

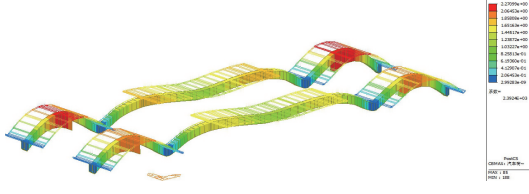


图10 车荷载作用向上竖向挠度(单位:mm)

规范规定在汽车荷载作用下,主纵梁的竖向正负挠度绝对值之和不能超过允许值 $l/500$ 。边跨主梁向下最大挠度2.27 mm,中跨主梁向下最大挠度为11.07 mm,最大挠度均 $<L/500=130\text{ mm}$,主梁竖向刚度亦满足规范要求。

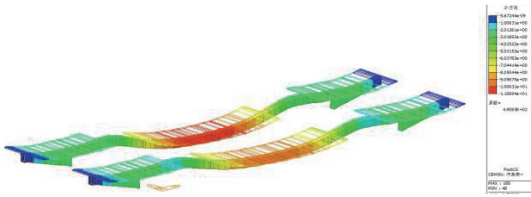


图 11 汽车荷载作用向下竖向挠度 (单位:mm)

5.8 整体稳定验算

本桥整体稳定计算采用 MIDAS Civil 中的屈曲分析模块,将结构自重和二期恒载作为初始荷载形成结构刚度矩阵和几何刚度矩阵,进行弹性稳定验算。按照《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)中第 5.9.1 条,规范规定主拱弹性整体稳定安全系数不应小于 4.0。以成桥阶段恒载+汽车活载+运营风荷载及成桥阶段恒载+百年风进行整体屈曲分析作用下,荷载组合工况见表 1。

考虑施工阶段初始内力对桥梁刚度的影响,失稳模态及稳定特征值 K 见图 12。

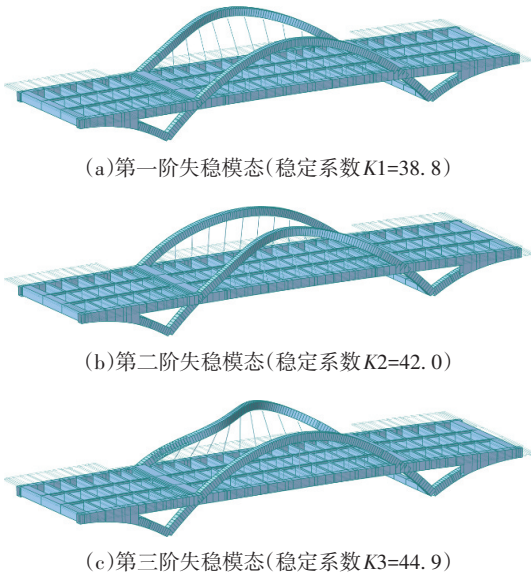


图 12 各阶失稳模态图

经计算其一阶失稳模态主要为拱肋侧向失稳 (见图 12),最不利工况下稳定安全系数为 $38.8 > 4.0$,满足规范要求。

5.9 中横梁验算

5.9.1 构造尺寸及材料说明

中横梁为腹板焊接加劲肋的工字钢截面形式、顶板上方为现浇混凝土桥面板并由剪力钉将两种不同构件的材料连接在一起;中横梁两端焊接于主纵梁上。其主要尺寸如下:长度 24.0 m,高度由端部 1.975 m 逐渐向道路中心线处变高至 2.176 m,工字梁顶板宽度 0.6 m、厚度 24 mm,工字梁底板宽度 0.7 m、厚度 30 mm,工字梁的腹板厚度 24 mm,见图 13。

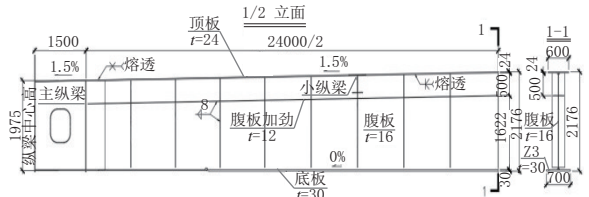


图 13 中横梁一般构造图 (单位:mm)

5.9.2 中横梁计算简化原则

为使计算结果能保证实际结构稳定、使用安全,因此计算模型均按照偏不利的因素进行考虑。具体模型简化情况如下。

(1)约束情况:中横梁两端焊接于主纵梁上,实际上相当于半固结的约束情况,但是在模型中认为横梁的边界条件为简支。

(2)车辆荷载加载方法:中横梁间距为 4 m,车辆荷载则根据《城市桥梁设计规范 (2019 版)》(CJJ 11—2011)中的城-A 车辆模型选用。连续多个横梁间的轴重分配模式为以 3#中横梁为计算横梁,当轴重仅位于 2#—4#横梁之间时,轴重才能有效加载给 3#中横梁、其轴重分配系数见图 14 中的“轮载影响线”。

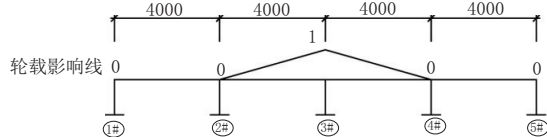


图 14 中横梁轮载影响线图 (单位:mm)

根据上述轴重分配理论,计算横梁 3#的轴重最大加载位置见图 15。

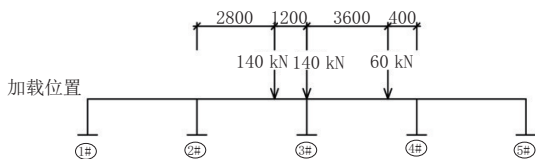


图 15 中横梁轴重最大加载位置图 (单位:mm)

轮载荷载计算过程为 $Q_{1k} = (140 \times 2.8/4.0 + 140 \times 1/1 + 60 \times 0.4/4.0)/2 = 122.0 \text{ kN}$ 。

(3)桥面板有效宽度

按照《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015)中第 7.14 条的相关规定,组合梁翼缘混凝土桥面板跨中和支点处有效宽度计算见表 2 所列。

表 2 桥面板有效宽度表					单位:mm
位置	$L_{c,i}$	b_i	b_0	$b_{eff,i}$	b_{eff}
跨中	25.5	1.85	0.3	1.85	4.0
支点	25.5	1.85	0.3	3.22	3.51

根据上述力学模型简化方法,在 MIDAS Civil 2022 中建立杆单元计算模型,具体见图 16。

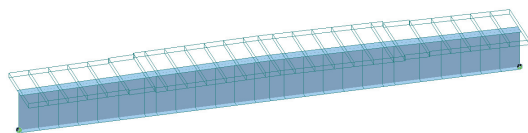


图16 中横梁有限元计算模型

5.9.3 荷载及荷载组合

标准横梁计算荷载主要有:

(1)自重:自重根据混凝土以及钢板容重进行计算。

(2)桥面铺装荷载为: $(0.1 \times 4.0) \times 26.0 = 10.4 \text{ kN/m}$ 。

(3)混凝土湿重: $(0.25 \times 4.0) \times 28.0 = 28.0 \text{ kN/m}$ 。

(4)护栏: $10.6 \times 4.0 = 42.4 \text{ kN}$,按集中力施加。

(5)车辆荷载:轮载见前文计算过程,车道横向分布根据设计车道数以及(CJJ 11—2011)给出的车辆横向间距要求布置为6车道,并且不考虑横向车道折减。轮载为122 kN,考虑1.3冲击系数后轮载为158.6 kN。

(6)温度梯度:按规范要求施加。

(7)荷载组合:中横梁计算属于局部构件计算,其计算荷载采用基本组合,具体为(1.2恒荷载+1.8车辆荷载+1.4温度梯度)。

5.9.4 中横梁承载力验算

基本组合下中横梁下翼缘应力图如图17所示。

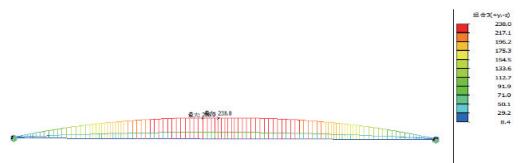


图17 基本组合中横梁下翼缘应力(单位:MPa)

由图18可知:基本组合下,该中横梁最大应力238 MPa,考虑结构重要系数后的应力值为 $1.1 \times 238 = 261.8 \text{ MPa}$,满足规范要求。

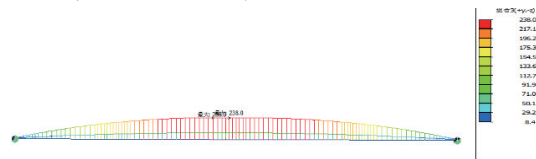


图18 基本组合中横梁上翼缘应力(单位:MPa)

6 结 语

嘉峪关市金港路上跨清嘉高速公路桥结构新

颖,造型优美,结构体系合理。结合桥梁施工步骤对桥梁结构进行研究和计算分析,得出以下结论。

(1)在使用阶段拱肋最大压应力位于边跨拱梁结合段;边拱肋截面下缘最大压应力位于拱脚区域,中承式梁拱组合桥中边跨拱梁节点及拱脚位置是设计强度控制位置,在设计过程中需要重点关注。

(2)在使用阶段主纵梁截面上缘最大压应力均位于中拱梁节点结合段区域;主纵梁截面下缘最大压应力和最大拉应力均位于中拱梁节点结合段区域。中拱梁节点位于负弯矩区,计算过程考虑混凝土板开裂影响,各构件应力控制在规范允许范围内。

(3)以成桥阶段恒载+汽车活载+运营风荷载及恒载+百年风工况下分别进行整体屈曲分析,对于该宽幅无风撑梁拱组合桥拱脚处横撑的设置至关重要,可以明显提高桥梁整体稳定性。

(4)宽幅桥横梁可按简支梁进行简化计算,车辆荷载不考虑横向车道折减,横梁受力满足规范要求。

参考文献:

- [1] 柴生波,杨清华,王秀兰,等.大跨径中承式钢箱系杆拱桥施工阶段稳定性分析[J].科学技术与工程,2022,22(18):8095-8102.
- [2] 王青桥.宁波梅山春晓大桥工程设计关键技术[J].城市道桥与防洪,2016(8):83-90.
- [3] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.嘉峪关市产业园区基础设施连通工程施工图设计[R].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2022.
- [4] 刘新华,冯鹏程,邵旭东,等.海文跨海大桥设计关键技术[J].桥梁建设,2020,262(2):73-79.
- [5] 卢元刚.上飞燕式钢箱拱桥方案比选及整体计算分析[J].工程与建设,2021,35(6):1157-1160.
- [6] 曹发辉,郑旭峰,梁健.海鸥式钢箱拱桥设计关键技术[J].城市道桥与防洪,2021,261(1):71-74.
- [7] 李雪峰,徐辉,孙晨然.异型中承式拱桥设计计算分析[J].城市道桥与防洪,2020(12):81-83.
- [8] 王大千,石春龙,耿文睿.双阳跨石溪河异形交叉拱桥总体设计与计算[J].北方交通,2019(4):30-33.
- [9] 武余波,何杰.城市宽幅组合桥面系钢箱系杆拱桥设计与施工关键技术分析[J].工程与建设,2021,35(4):678-680.
- [10] 黄晓彬.造型独特的钢拱桥拱肋设计与计算分析[J].结构工程师,2022,38(2):162-167.