

斜交多跨连续梁拱组合桥梁设计分析

黄宜,徐德标,赵维贺

(北京市市政工程设计研究总院有限公司,北京市100044)

摘要:总结了梁拱组合桥梁设计现状,并以河北某地一座 $48\text{ m}+5\times 72\text{ m}+48\text{ m}$ 斜交梁拱组合桥梁为例,简要介绍了项目基本情况及整体设计思路,对桥梁结构进行计算分析,阐述了该桥设计难点、创新点及相应的处理措施,包括梁拱组合桥梁景观方案确定,城市钢桥超宽桥面的处理,斜交钢梁节段处理等,以为梁拱组合式桥梁设计提供参考。

关键词:梁拱组合桥梁;设计思路;景观方案;钢桥设计

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2023)06-0070-04

0 引言

自20世纪90年代以来,国内桥梁建设发展突飞猛进,多种类型的桥梁结构得到应用,其中梁拱组合式桥梁的设计构思也应运而生,一批梁拱组合式桥梁应用于京杭运河和太浦河的整治工程中^[1]。随后几十年中,国内外学者和工程师经过不断的总结和创新,使梁拱组合式桥梁得到了长足的发展^[2-3]。

尤其是近年来,城市桥梁设计和建造对景观需求越来越高,需要一种集造型多样、造价合理、易于施工、环保节能的桥梁类型来满足城市桥梁建造需求,而梁拱组合式桥梁正是这样一种能满足多项功能需求的桥梁结构形式^[4]。

本文以河北雄安地区一座 $48\text{ m}+5\times 72\text{ m}+48\text{ m}$ 斜交梁拱组合桥梁为例,对斜交钢结构梁拱组合桥梁的设计思路和设计要点进行阐述,对桥梁结构进行计算分析,针对工程的设计难点、创新点进行总结,并提出相应的解决措施,以为梁拱组合式桥梁设计提供参考。

1 工程概况

河北雄安新区区位优势明显,交通便捷通畅,地质条件稳定,生态环境优良,资源环境承载能力较强;现有地块开发程度较低,发展空间充裕,具备高起点高标准开发建设的基本条件。起步区作为雄安新区的主城区,肩负着集中承接北京非首都功能疏解的时代重任,在深化改革、城市治理等方面发挥着

先行先试和示范引领作用。起步区东西轴线范围全长约24.43 km,建设项目内容是135 m红线内的市政配套工程和铁路工程。

本桥跨越白沟引河,道路定线与河道斜交角度为 70.6° ,桥梁宽度45 m,主桥桥跨组合为 $48\text{ m}+5\times 72\text{ m}+48\text{ m}$,结构形式采用多跨连续梁拱组合桥梁。荷载等级为城-A级^[5],地震基本烈度为8度,设计基本地震动峰值加速度 $0.3g$ 。图1为多跨连续梁拱组合桥效果图。



图1 多跨连续梁拱组合桥效果图

2 结构总体设计

2.1 斜交桥梁景观方案桥型选择

本桥进行景观方案桥型选择时,一方面需要结合新区对于桥梁的整体规划和总体景观设计要求,另一方面应结合本桥为斜交桥梁布局而进行的综合考察要求。

根据一桥一景总体景观布置和景观深化设计方案的具体要求,本桥景观应包含空间、弧线、镂空等元素,且避免出现高耸塔柱式结构,所以在初拟阶段选定类拱桥的桥梁结构形式。相对于正桥,斜桥受力时弯扭耦合作用效应更加明显,结构中若采用柔性构件不利于结构受力。综合以上景观需求和斜桥受力特点,本桥在方案比选阶段共提出3个设计方案:方案

收稿日期:2022-09-05

作者简介:黄宜(1989—),男,硕士,工程师,主要从事桥梁设计工作。

一为多跨连续梁拱组合桥方案;方案二为多跨上承式拱桥方案;方案三为中承式双拱肋拱桥方案。3种方案各有优点,经过比选,方案一采用的多跨连续梁拱组合桥造型优美、层次分明,结构能够很好地与周边环境结合,且主梁与主拱圈均采用钢结构,自重轻,对河道地址条件的要求低,确定为最终方案。

多跨连续梁拱组合桥立面布置见图2。

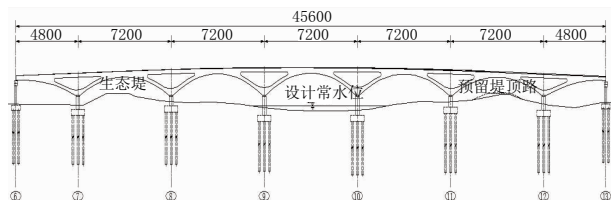


图2 多跨连续梁拱组合桥立面布置(单位:cm)

本桥景观设计中充分吸纳了拱桥元素的景观特点,又充分考虑流线型结构所带来的景观优势,整体结构效果简洁、明快、灵动、柔美,实现了总体需求、现代工艺、城市建设、自然环境4个方面的充分融合。

2.2 多跨连续梁拱桥梁结构特点

相对于其他工程采用的梁拱组合桥,本桥采用的等跨径连续梁拱组合桥具有以下结构特点:

(1)梁拱组合桥梁是一种特殊的结构形式,具有梁受拉受弯与拱受压的结构特点。考虑到现场浇筑对周边环境影响较大,且混凝土结构的拱肋耐久性不好,混凝土桥面又会导致较大的水平推力,需要设置水平系杆的问题,确定上部结构采用钢主梁,如此既能充分利用结构受力优势,发挥材料的力学性能优点,又能减少结构自重,易于施工。

(2)相比常规拱形桥梁,本桥采用等跨径布置方式,中墩拱脚可以实现水平推力的自平衡受力体系,另外拱形结构的水平推力与主梁结构的轴向拉力相互作用,可实现水平内力部分自平衡。

(3)本桥采用的连续梁拱桥梁结构刚度大,针对斜桥受力时弯扭耦合作用效应有较好的抗性,可极大削弱斜桥受力对结构的不利影响。

2.3 结构抗震设计

本桥桥址处场地地震基本烈度为8度,设计基本地震动峰值加速度 $0.3g$ 。地震作用对结构的受力十分不利,且本桥墩柱为计算长度与截面计算方向的尺寸比小于2.5的矮墩,需要计算纵、横向E2地震作用下的桥墩强度。常规采用增加墩柱抗力的方式不仅抗震效果差而且较为浪费,需要设计一种符合本桥的抗震体系。

对本桥结构抗震受力和抗震体系进行比选后,本桥采用设置摩擦摆支座的方式进行减震。设置摩擦摆支座可以延长结构周期、降低地震响应。动力计算结果表明采用此方法能够大幅度减少地震效应对墩柱的作用,使结构设计满足规范的抗震设计要求。篇幅所限,动力计算过程本文不作详述。

2.4 桥梁构造设计

2.4.1 超宽桥面设计

本桥桥面宽度45 m,相对常规桥梁较宽。针对这种情况,设计时从结构受力、经济合理、运输、安装、现场焊接施工等方面进行多角度考量,认为分离多箱室断面较全断面单箱多室具有更高的可行性。另外,分离多箱室断面与拱肋可以一对一组合,能较为契合景观需求。

多跨连续梁拱组合桥主梁断面图见图3。

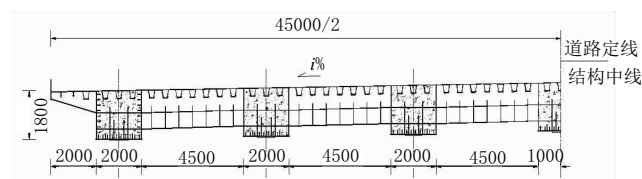


图3 多跨连续梁拱组合桥主梁断面图(单位:cm)

2.4.2 斜交桥梁主梁和拱肋构造设计

本桥主梁设计采用7片纵向钢箱主梁作为纵向主受力构件,钢箱宽度为2 m,标准梁高为1.8 m,箱室间净距为4.5 m,箱室间采用横肋连接。顶板采用正交异性板,顶板加劲肋采用闭口U型加劲肋,底板采用矩形加劲肋加强。主梁箱室内及箱室间采用大隔板间距3 m布置,大隔板间设置小横肋。拱肋采用箱型截面,高度为1.6 m,宽度为2 m。

本桥道路定线与河道斜交角度为 70.6° ,由于纵、横坡的存在对结构设计带来了很大的困难。本桥设计时利用BIM设计的优势,采用CATIA软件进行结构细部设计。本桥设计中箱室的左、右腹板各采用一种尺寸进行设计,即全桥只需要设计2种形式的腹板大样即可满足实际需求。利用CATIA软件进行构件设计,结构尺寸错位差值最大仅为5 mm,满足设计精度要求,大大减少了设计、施工的工作量。

主梁顶板厚16 mm,底板分别厚20 mm、30 mm;腹板底厚16 mm,U肋底厚8 mm;底板加劲肋分别厚22 mm、30 mm,腹板加劲肋厚16 mm;大隔板厚25 mm,小横肋厚14 mm。桥面铺装双层布置,下层采用3 cm ECO改性聚氨酯混凝土,上层采用4 cm高黏高弹改性沥青混凝土。拱肋标准断面顶底板厚22 mm,腹板厚16 mm,箱室内隔板每隔2 m设置1道。

3 结构计算分析

3.1 设计荷载

本桥设计荷载中恒载钢结构容重按 78.5 kN/m³取值,钢梁隔板等按照实际情况进行折算;二期荷载包括护栏荷载单侧 10 kN/m;铺装层按照厚度 7 cm 考虑,容重取 24 kN/m³,人行道铺装按照 20 kN/m³考虑;基础不均匀沉降取 9 mm;活载按照城市-A 级取值;温度荷载等其他荷载按照规范或实际情况选取。

3.2 施工顺序

本桥桥址水域较浅,可采用满堂支架法施工,施工顺序为:(1)基础、墩柱施工;(2)架设支架,吊装中墩拱肋节段,安装拱肋横向联系;(3)吊装梁端梁拱结合段及其横向联系;(4)安装中跨及边跨合拢段,安装横向联系,连接主桥成整体;(5)拆除架设支架;(6)施工附属等二期;(7)成桥。

3.3 整体模型静力计算(第一体系)

本桥采用 Midas/Civil 有限元模型对第一体系进行受力计算。全桥空间梁格计算模型见图 4。

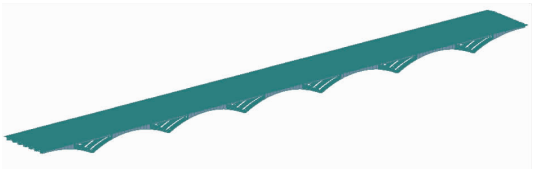


图 4 空间梁格计算模型

根据整桥模型进行静力计算,结果见表 1。

表 1 静力计算结果

位置	板厚 / mm	压应力 / MPa	拉应力 / MPa	剪应力 / MPa	容许值 / MPa
主梁上缘	16	95	86	66	200
主梁下缘	20/30	117	159		200
拱肋上缘	22	166	58	44	200
拱肋下缘	22	94	118		200

由表 1 可知,钢梁第一体系计算结果满足规范要求。

3.4 正交异性板局部验算(第二体系)

本桥桥面板采用正交异性板结构,采用 Midas/Civil 有限元模型板单元模型对第二体系进行受力计算。本桥顶板支承体系采用大隔板加小横肋构造,大隔板间距 3 m,2 道大隔板之间设置小横肋。桥面正交异性板局部模型见图 5。

本模型计算中车轮荷载冲击系数采用 0.4。在车轮荷载作用下,桥面正交异性板局部应力见图 6。

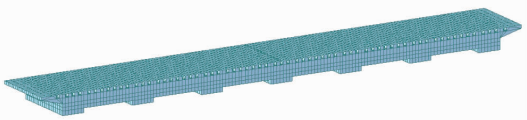


图 5 正交异性板局部模型

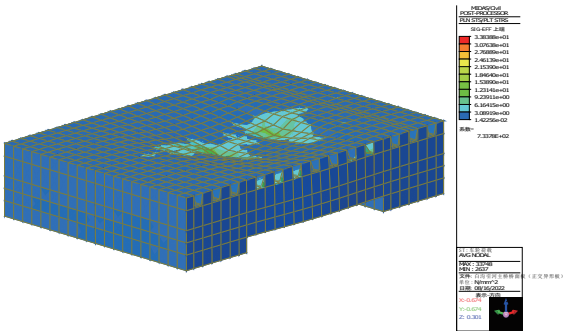


图 6 桥面正交异性板局部应力

顶板应力实际计算结果应为第一体系与第二体系计算结果的叠加。根据《公路桥涵设计通用规范》(CJJ 11—2011(2019 年版)),车辆荷载计算时分项系数取值为 1.8,因此,顶板应力实际计算公式为:1.0×体系一顶板应力+1.8×体系二顶板应力。

钢梁顶板应力计算结果汇总见表 2。

表 2 钢梁顶板应力计算结果汇总

位置	板厚 / mm	压应力 / MPa	拉应力 / MPa	容许值 / MPa
顶板(体系一)	16	95	86	200
顶板(体系二)	16		34	
实际结果	16		147	200

由表 2 可知,钢梁顶板应力计算结果满足规范要求。

3.5 局部构件验算

对于钢结构而言,除了整体计算外,局部构件稳定计算也是结构设计的一项重要内容。本桥中局部构件稳定计算主要内容包括顶底板加劲肋局部稳定计算、腹板局部稳定计算、拱肋受压加劲板局部稳定计算等等。

本文顶板加劲肋采用闭口 U 肋,底板加劲肋采用板肋,均采用常用构造措施,其稳定性计算方法及实际使用结果已得到验证,本文不再赘述。

腹板局部稳定计算根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)第 5.3.3 条规定,验算腹板加劲肋的设置是否满足局部稳定要求。对于梁体等高段与变高段分别计算,经验算腹板加劲肋惯性矩验算、宽厚比验算、间距验算均满足规范要求。

拱肋受压加劲板局部稳定计算根据《公路钢结构桥梁设计规范》第 5.1.6 条规定,验算拱肋加劲肋的设置是否满足局部稳定要求。经过计算,本桥中拱

肋顶板加劲肋、拱肋底板加劲肋、拱肋腹板加劲肋局部稳定折减系数分别为 0.92、1.0、0.9,需要在计算时进行允许值折减,经验算满足规范要求。

3.6 结构疲劳验算

3.6.1 整体疲劳验算(计算模型 I)

根据《公路钢结构桥梁设计规范》第 5.5.2 条规定,按计算模型 I,疲劳荷载采用等效的车道荷载,集中荷载为 $0.7 P_k$,均布荷载为 $0.3 q_k$, P_k 和 q_k 按《公路桥涵通用设计规范》取值。利用 Midas/Civil 有限元程序进行总体疲劳计算分析,计算模型正应力时计入钢筋混凝土桥面板的影响,计算模型剪应力时则不考虑桥面板的影响。正应力疲劳细节按照 70 MPa 选取正应力疲劳极限计算容许值;剪应力疲劳细节按照 80 MPa 选取剪应力疲劳极限计算容许值。在疲劳荷载作用下,主梁的整体疲劳验算结果见表 3。

表 3 整体疲劳验算结果

位置	拉应力 /MPa	容许值 /MPa
疲劳正应力幅 $\Delta\sigma_p$	27.6	51.6
疲劳剪应力幅 $\Delta\tau_p$	14.8	36.6
正应力验算结果	满足	满足
剪应力验算结果	满足	满足

由表 3 可知,整体疲劳验算结果满足规范要求。

3.6.2 桥面板疲劳验算(计算模型 III)

根据《公路钢结构桥梁设计规范》第 5.5.2 条验算正交异性桥面系的疲劳效应。计算使用 Midas/Civil 有限元程序,钢梁顶板、U 肋、隔板、横肋、腹板均采用板单元模拟,对隔板和腹板底部进行固定约束。正应力疲劳细节按照 70 MPa 选取,剪应力

疲劳细节按照 80 MPa 选取。在疲劳荷载作用下,桥面板疲劳验算结果见表 4。

表 4 桥面板疲劳验算结果

位置	拉应力 /MPa	容许值 /MPa
疲劳正应力幅 $\Delta\sigma_p$	45.20	51.8
疲劳剪应力幅 $\Delta\tau_p$	25.20	59.3
正应力验算结果	满足	满足
剪应力验算结果	满足	满足

由表 4 可知,桥面板疲劳验算结果满足规范要求。

4 结 语

(1)多跨连续梁拱组合桥是一种受力合理,兼顾景观性、施工可操作性的桥梁形式,其景观特点能够满足城市景观桥梁的需求,是一种良好的城市景观桥梁选择。

(2)分离多箱室断面可以较好地解决超宽断面的钢结构安装、运输等问题,也能够很好地契合多跨连续梁拱组合桥景观需求。

(3)通过对本结构的计算分析,本桥中结构设计参数的取值可以为同类型桥梁的设计提供参考。

参考文献:

[1] 金成棣. 预应力混凝土梁拱组合桥梁 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[2] 龚子松. 两座连续梁拱组合桥设计分析比较[J]. 城市道桥与防洪, 2021(1):75-79.

[3] 吕向明, 李国宏. 梁拱组合体系桥荷载试验及分析[J]. 城市道桥与防洪, 2009(10):81-84.

[4] 上官兴, 童林, 黄剑虹, 等. 三座梁拱组合桥梁的设计简介[J]. 公路工程, 2003, 28(2):98-102.

[5] CJJ 11—2011(2019 年版), 城市桥梁设计规范[S].

(上接第 65 页)

软件可将偏心距考虑为 0,验算仰斜式挡土墙基底的合力偏心距和墙踵处地基承载力。

参考文献:

[1] 刘建学. 仰斜式挡土墙的优越性[J]. 河北水利水电技术, 2002(3):

36-37.

[2] 何璠. 浅谈仰斜式挡土墙在山路边坡滑坡中的应用[J]. 陕西水利, 2021(7):43-47.

[3] 夏智翼. 仰斜式挡土墙稳定影响因素分析[J]. 水电工程施工、试验及检测, 2016, 4(8):95-101.