

宽幅钢箱梁受力性能与设计参数分析

曹树森¹, 石向东¹, 丁学伟¹, 钱栋栋¹, 王礼武¹, 吴庆雄²

(1. 台州台中轨道交通有限公司, 浙江 台州 318014; 2. 福州大学 木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 宽幅钢箱梁-蝴蝶形钢拱组合桥造型优美, 近年来备受桥梁设计师们青睐。针对实际工程, 开展宽幅钢箱梁受力性能与设计参数分析, 对比分析了纵横梁不同设计参数的变化对宽幅钢箱梁力学性能的影响程度。结果表明: 纵梁的荷载横向分布影响线均因小纵梁道数变化而受到显著影响, 且小纵梁横向分布影响线的影响大于主纵梁; 在最不利车道布载作用下, 小纵梁道数的变化对主纵梁关键截面的内力和挠度影响较大, 而小纵梁道数的增加有助于改善宽幅钢箱梁的受力, 建议采用5道小纵梁的布置方式; 在横向荷载作用下, 横梁间距布置不同对横梁应力有影响, 尤其是在非拱梁结合段跨中截面和拱梁结合段1/4跨截面处, 应力最大值出现在拱梁结合段跨中截面, 而主纵梁应力也仅在非拱梁结合段与拱梁结合段的跨中截面处影响较大; 大桥横梁间距可与吊杆位置对应, 即每隔6m设置一道横梁, 可满足结构横向受力要求。

关键词: 宽幅钢箱; 受力性能; 纵梁; 横梁间距

中图分类号: TU318

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)03-0194-09

Mechanical Performance Analysis and Design Parameters of Wide Steel Box Girder

CAO Shusen¹, SHI Xiangdong¹, DING Xuewei¹, QIAN Dongdong¹, WANG Liwu¹, WU Qingxiong²

(1. Taizhou Taizhong Rail Transit Co., Ltd., Taizhou, Zhejiang 318014, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: The wide steel box girder butterfly steel arch composite bridge has a beautiful shape, which has been widely adopted by bridge designers in recent years. By taking a practical project as the research object, the mechanical properties and design parameters of wide steel box girder are analyzed, and the influence of different design parameters of longitudinal and transverse beams on the mechanical properties of wide steel box girder is compared and analyzed. The results show that the influence lines of transverse load distribution of longitudinal beams are significantly affected by the change of the number of small longitudinal beams, and the influence lines of transverse load distribution of small longitudinal beams are greater than that of main longitudinal beams; Under the most unfavorable lane load distribution, the change of the number of small longitudinal beams has a great impact on the internal force and deflection of the key section of the main longitudinal beam, and the increase of the number of small longitudinal beams is helpful to improve the stress of the wide steel box girder, so it is recommended to adopt the layout of five small longitudinal beams; Under the action of transverse load, different spacing of cross beams has an impact on the stress of cross beams, especially at the mid span section of the non-arch beam junction section and the 1/4 span section of the arch beam junction section, the maximum stress appears at the mid span section of the arch beam junction section, while the stress of the main longitudinal beam only has a greater impact at the mid span section of the non-arch beam junction section and the arch beam junction section. The distance between the cross beams of the bridge can correspond to the position of the suspenders, a cross beam is set every 6 m, which can meet the requirements of the transverse stress of the structure.

Keywords: wide steel box girder; mechanical performance; longitudinal beam; beam spacing

收稿日期: 2023-01-10

修稿日期: 2023-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078137)

作者简介: 曹树森(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通工程管理等各方面工作。E-mail: caoshusen.bj@crcece.com

通讯作者: 吴庆雄(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事钢结构与组合结构桥梁研究。E-mail: wuqingx@fzu.edu.cn

随着城市交通量的不断增长,普通四车道的桥梁已不满足需求,六车道或八车道的桥梁不断涌现,宽幅钢箱梁桥的设计和应用也不断增加^[1-2]。一般来说,当桥面系最大宽跨比超过 0.5,属于宽幅桥梁。宽幅钢箱梁截面形式多样,可采用整幅桥钢箱结构,也可采用小箱梁加纵横梁的梁格体系。后者中的车辆荷载通过小纵梁和横梁传递到主梁中,横桥向宽度的增加使得宽幅钢箱梁设计中纵横梁数量和间距的取值尤为重要^[3-5]。

目前,学者对宽幅钢箱梁受力性能的研究相对较少。张军锋^[6]以某单箱五室四跨连续梁桥为例开展施工过程仿真模拟分析,得到了混凝土浇筑、预应力钢束张拉以及合龙等单个施工步骤在关键截面顶底板正应力的横向分布特征。付坤^[7]建立钢箱梁节段的有限元模型,比较了不同形式过焊孔的结构强度及疲劳性能,结合其局部受力机理及参数化分析,提出了降低宽幅钢箱梁横向受力,避免横隔板与 U 肋过焊孔周边细节构造出现疲劳破坏的措施。贺拴海^[8]建立了空间梁单元模型和板壳精细化模型,以港珠澳工程青州航道斜拉桥为研究对象,探究该桥在施工、成桥及运营阶段的受力性能。王巍^[9]为优化宽幅钢箱梁横断面的构造设计,以上海浏港新桥为背景,建立有限元模型,分析了在活载作用下单索面宽幅钢箱梁在受力复杂区域处设置中腹板、不设中腹板、设置小纵梁三种情况对宽幅钢箱梁的空间受力特性所产生的影响及规律,最后对宽幅钢箱梁的构造设计提出了优化建议。这些研究以整体受力性能和疲劳性能为主,并未开展合理的纵横梁设计方面的研究。

因此,本文以某宽幅钢箱梁桥为研究对象,开展钢箱梁受力性能与设计参数分析,通过数值分析,得到合理的纵横梁设计方案,研究结果对同类型的桥梁设计有借鉴作用。

1 工程概况

工程桥梁总长 407.6 m,主桥采用(35+95+95+35) m 下承式钢拱-连续梁组合桥,主桥为双向六车道,桥面标准宽度 44.0 m~50.4 m,主桥两侧人行道局部范围内设置观景平台,人行道宽度由 2.5 m 变宽至 5.7 m,主梁采用双主梁梁格体系,主纵梁及端横梁采用箱形截面,一般横梁采用工字形截面。主纵梁采用等高度单箱三室截面,中心梁高 2.126 m,底板宽 5.09 m,顶板宽 5.767 m。顶、底板及中腹板厚 24 mm~36 mm,边腹板厚 24 mm,横隔板沿

中心线按间隔 3 m 进行布置。每两道横梁间间距设 3 根小纵梁,小纵梁采用倒 T 形断面,并设有竖向加劲肋。横隔板沿桥面系纵向按间隔 3 m 进行布置,该类横梁为工字钢梁,跨中梁高 2.4 m,工字梁下翼缘宽 600 mm,厚 20 mm,横梁腹板厚 16 mm。拱脚位置设置的横梁采用箱形截面。吊杆采用镀锌(环氧)钢丝拉索,标准强度为 $f_{pk}=1\,770\text{ MPa}$,对应锚具采用冷铸锚。整体布置如图 1 所示,主梁标准断面如图 2 所示。吊杆布置图如图 3 所示。

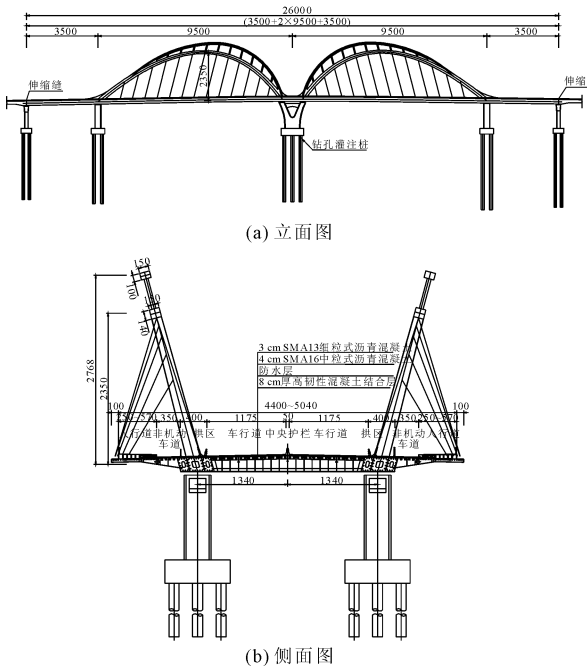


图 1 桥梁立面图(单位:cm)

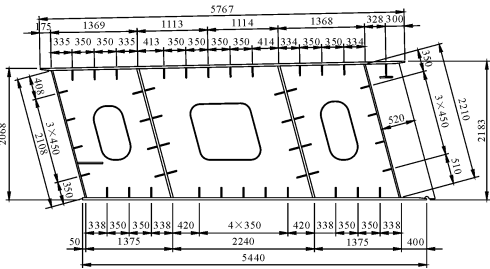


图 2 主纵梁标准断面示意图(单位:mm)

2 有限元模型

2.1 模型建立

采用桥梁专业软件 midas Civil 建立全桥空间杆系有限元模型,如图 3 所示。模型中采用梁单元模拟拱肋、主纵梁、小纵梁、端横梁、一般横梁,采用只受拉桁架单元模拟吊杆,全桥共 1 151 个节点,1 774 个梁单元,84 个桁架单元。模型中充分考虑了桥梁各部分的结构刚度模拟以及各种荷载的作用过程,

模型采用梁格法建模,主纵梁、小纵梁和一般横梁、端横梁形成梁格体系。拱梁组合桥梁,主拱与主梁刚接,与主拱相连处为主纵梁,其余桥面为正交异性钢桥面板。

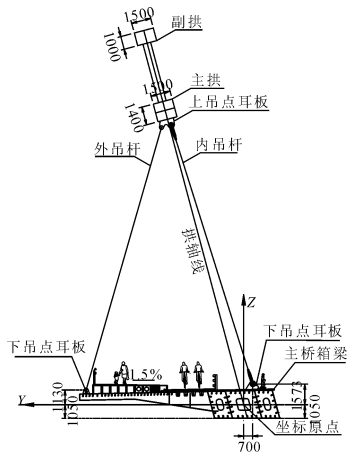


图 3 吊杆断面布置图

2.2 材料特性与边界条件

主桥上部结构除吊杆外,均采用 Q345qD 钢材,具体性能参数如表 1 所示。吊杆采用平行钢丝形式, $f_{pk} = 1\,770\text{ MPa}$, 弹性模量 $E_p = 2.0 \times 10^5\text{ MPa}$ 。模型边界条件设置如图 4 所示。

表 1 有限元模型材料参数

屈服强度 σ_y/MPa	弹性模量 E_s/MPa	剪切模量 G/MPa	泊松比 ν	密度 ρ $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
345	2.06×10^5	0.79×10^5	0.31	7850

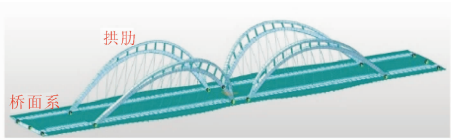


图 4 有限元模型边界约束图

3 小纵梁数量对宽幅钢箱梁受力性能影响

3.1 荷载横向分布系数计算

桥梁当宽跨比超过 0.5,采用纵横梁相交的梁格体系,可按杆件系统的空间结构进行计算,通过 G-M 法计算荷载横向分布系数。以桥面最宽截面为分析对象,采用 G-M 法进行荷载横向分布系数计算,与软件 midas Civil 计算结果进行对比^[10]。G-M 法计算按《公路桥涵设计通用规范》^[11] (JTG D60—2015)中规定的汽车荷载折减系数,考虑多车道折减。同时,在有限元软件 midas Civil 中施加单

位荷载作用于主纵梁最宽截面处,根据有限元计算结果得到各纵梁最宽截面处的挠度值,并根据式 (1) 计算得到各片梁的影响线坐标^[12-13]。

$$\eta_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{\sum_{i=1}^n \delta_{ij}} \tag{1}$$

式中: δ_{ij} 为单位荷载作用于 j 号梁时, i 号梁的跨中截面挠度; η 为荷载横向分布影响线坐标值。

通过对比可以看出, G-M 法与 midas Civil 计算的影响线分布规律一致,且坐标值相差较小,计算得到的主纵梁最宽截面处的汽车荷载横向分布系数分别为 0.647 和 0.567,非机动车荷载横向分布系数分别为 0.294 和 0.296,人群荷载横向分布系数分别为 0.323 和 0.313。说明应用软件 midas Civil 计算的荷载横向分布系数是可行的。

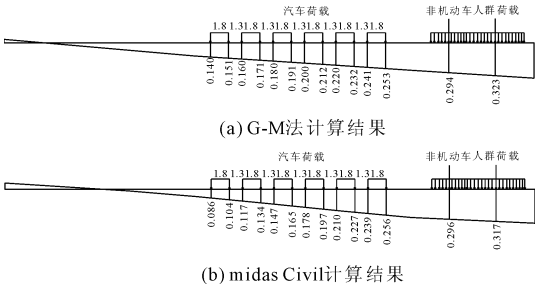


图 5 最宽截面处主纵梁荷载横向分布系数计算结果

3.2 计算参数

在保证主纵梁、横梁和挑臂的结构尺寸及布置形式均不变的情况下,只改变小纵梁的道数及布置形式,结合桥梁实际截面构造形式,选取小纵梁道数为 1、3、5 的情况进行对比分析。当采用 1 道小纵梁时,布置在横桥向跨中;当采用 3 道小纵梁时,按实桥布置方式布置;当采用 5 道小纵梁时,按等间距布置。活载作用下,非拱梁结合段的主纵梁跨中截面和拱梁结合段的主纵梁 1/4 跨截面弯矩较大,因此,选取这两个截面进行分析,对比不同小纵梁道数对关键截面横向分布影响线的变化规律。

3.3 横向分布影响线变化规律

关键截面的横向影响线如图 6 和图 7 所示。其中,主纵梁为偏载侧位置,小纵梁为横桥向跨中位置进行分析。在非拱梁结合段跨中截面和 1/4 跨截面,主纵梁和小纵梁的横向分布影响线数值均随着小纵梁道数的增加而减小,且小纵梁横向分布影响线变化程度大于主纵梁。其中,跨中截面主纵梁的横向分布影响线在挑臂(右侧)、主纵梁(右侧)及小纵梁(跨中)处的竖向值变化明显,分别从 0.422、

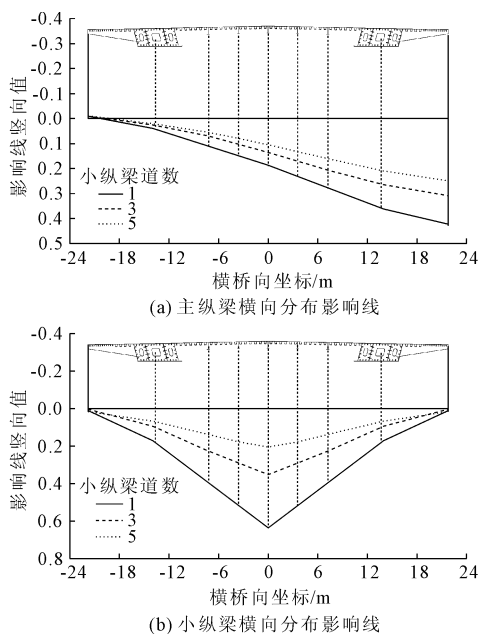


图6 非拱梁结合段跨中截面纵梁横向分布影响线变化

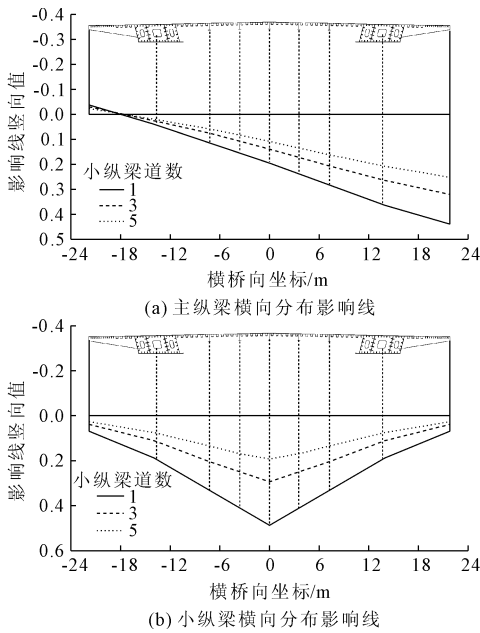


图7 拱梁结合段1/4跨截面纵梁横向分布影响线变化

0.362、0.187 减小至 0.249、0.209、0.105,降低了 41.00%、42.27%、43.85%;小纵梁的横向分布影响线在主纵梁(右侧)及小纵梁(跨中)处的竖向值变化明显,分别从 0.171、0.636 减小至 0.067、0.205,降低了 60.82%、67.77%;1/4 跨截面主纵梁的横向分布影响线在挑臂(右侧)、主纵梁(右侧)及小纵梁(跨中)处的竖向值分别从 0.439、0.364、0.195 减小至 0.251、0.207、0.108,降低了 42.82%、43.13%、44.62%;小纵梁的横向分布影响线在主纵梁(右侧)及小纵梁(跨中)处的竖向值分别从

0.187、0.488 减小至 0.075、0.192,降低了 59.89%、60.66%。

3.4 非拱梁结合段关键截面受力性能分析

对于非拱梁结合段跨中截面主纵梁,横桥向布置 6 车道最不利,布载方式如图 8 所示,而纵桥向在有限元中提取非拱梁结合段跨中截面主纵梁正弯矩最大时的汽车布载方式,如图 9 所示。

如图 10 和图 11 所示,在最不利车道布载作用下,小纵梁道数由 1 道增加至 5 道时,非拱梁结合段跨中截面纵梁的弯矩和挠度均随着小纵梁道数的增加而减小,且相较于挠度,弯矩变化相对较大。其中,主纵梁弯矩值从 6 209.58 kN·m 减小至 5 776.23 kN·m,降低了 6.98%;挠度值从 7.19 mm 减小至 6.76 mm,降低了 5.98%。小纵梁弯矩值从 618.38 kN·m 减小至 191.10 kN·m,降低了 69.10%;挠度值从 13.63 mm 减小至 9.47 mm,降低了 30.52%。

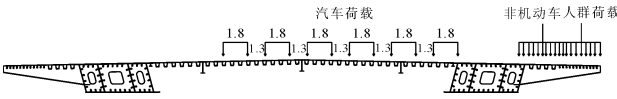


图8 非拱梁结合段跨中截面主纵梁车辆布载示意图

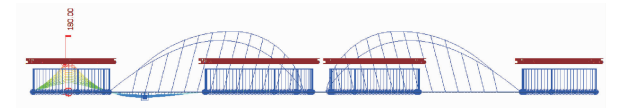


图9 非拱梁结合段跨中截面纵梁汽车纵桥向最不利布载图

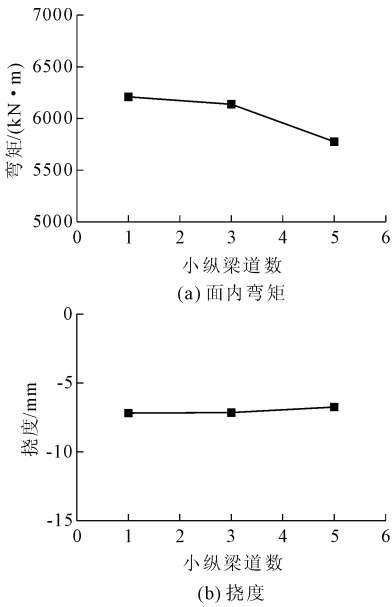


图10 非拱梁结合段跨中截面主纵梁内力和挠度变化情况

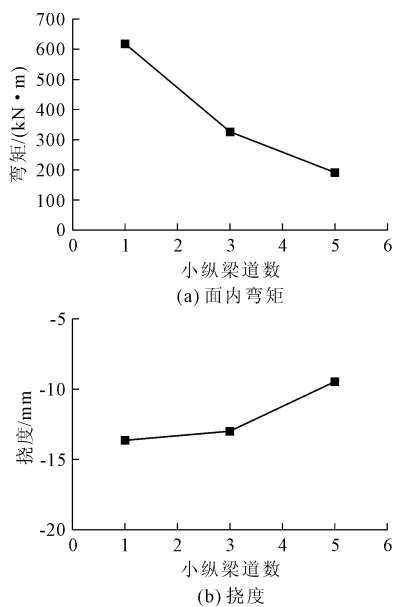


图 11 非拱梁结合段跨中截面小纵梁内力和挠度变化情况

3.5 拱梁结合段关键截面受力性能分析

与非拱梁结合段跨中截面主纵梁相同,拱梁结合段 1/4 跨截面主纵梁横桥向布置 6 车道时最不利,行车道布载如图 12 所示,而纵桥向在有限元中提取拱梁结合段 1/4 跨截面主纵梁正弯矩最大的汽车布载方式,如图 13 所示。

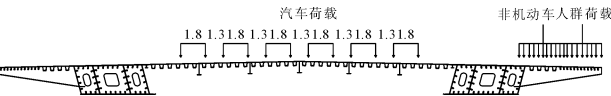


图 12 拱梁结合段 1/4 跨截面纵梁横桥向车辆布载示意图

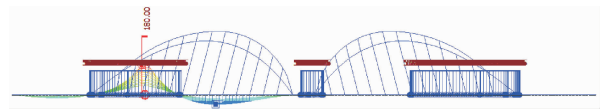


图 13 拱梁结合段 1/4 跨截面纵梁汽车纵桥向最不利布载图

如图 14 和图 15 所示,在最不利车道布载作用下,小纵梁道数由 1 道增加至 5 道时,拱梁结合段 1/4 跨截面纵梁的弯矩和挠度均随着小纵梁道数的增加而减小,但变化较小。其中,主纵梁弯矩值从 4 795.57 kN·m 减小至 4 493.76 kN·m,降低了 6.29%;挠度值从 9.39 mm 减小至 9.05 mm,降低了 3.62%。小纵梁弯矩值从 586.37 kN·m 减小至 180.06 kN·m,降低了 69.29%;挠度值从 14.43 mm 减小至 11.43 mm,降低了 20.79%。

3.6 受力状态汇总

将最不利布载方式下各关键截面的弯矩和挠度

变化量汇总于表 2。在最不利车辆布载方式下,主纵梁在非拱梁结合段跨中截面和拱梁结合段 1/4 跨截面的弯矩减小量随小纵梁道数的增加而增大,而小纵梁弯矩变化趋势相反。但是,无论是主纵梁还是小纵梁,挠度减小值在非拱梁结合段跨中截面和拱梁结合段 1/4 跨截面均随小纵梁道数的增加而增大。因此,在最不利车道布载作用下,小纵梁道数的变化对主梁关键截面的内力和挠度影响较大。其中,拱梁结合段内纵梁的内力和挠度影响程度略小于非拱梁结合段,小纵梁受力性能受到的影响明显大于主纵梁,建议采用 5 道小纵梁的布置方式,有助于改善宽幅钢箱梁的受力。

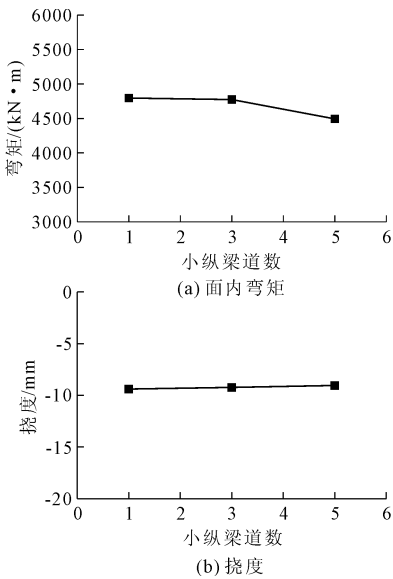


图 14 拱梁结合段 1/4 跨截面主纵梁内力和挠度变化情况

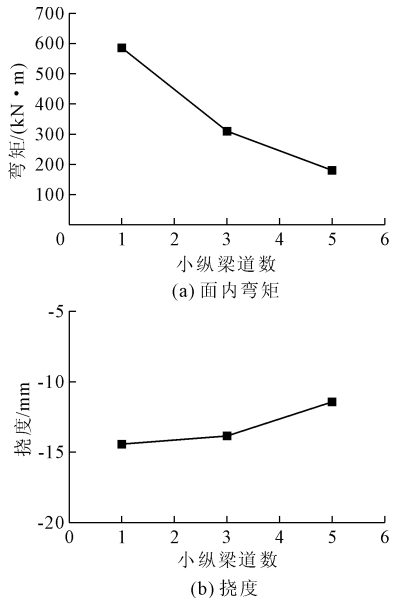


图 15 拱梁结合段 1/4 跨截面小纵梁内力和挠度变化情况

表 2 关键截面弯矩及挠度变化量汇总表					
位置		非拱梁结合段 跨中截面		拱梁结合段 1/4 跨截面	
主 纵 梁	小纵梁道数	1→3	3→5	1→3	3→5
	弯矩变化量 /(kN·m)	-71.33	-362.02	-20.72	-281.09
	幅值/%	1.15	5.90	0.43	5.89
	挠度变化量/mm	-0.035	-0.395	-0.153	-0.189
	幅值/%	0.49	5.53	1.63	2.04
小 纵 梁	弯矩变化量 /(kN·m)	-292.24	-135.04	-292.24	-135.04
	幅值/%	47.26	41.41	47.26	41.41
	挠度变化量/mm	-0.649	-3.517	-0.649	-3.517
	幅值/%	4.76	27.08	4.76	27.08

4 横梁间距对宽幅钢箱梁受力性能影响

4.1 横梁间距布置

宽幅钢箱梁受到水平荷载作用时,其受力受横梁间距影响较大。为探究横梁间距设计对宽幅钢箱梁的影响,在保证拱肋、主纵梁、小纵梁和挑臂等结构尺寸及布置形式均不变的情况下,只改变一般横梁的布置间距进行分析讨论。由于大桥的吊点位置按间隔 6 m 进行布置,以此处的一般横梁为基准,进行等分和三等分,即分别选取了横梁间距为 2 m、3 m、6 m 的布置形式。

4.2 计算参数

为讨论横向间距对宽幅钢箱梁受力性能的影响,需考虑结构受到水平向荷载作用。水平向荷载主要考虑横向地震动对结构的作用,采用反应谱法进行分析,包括 E1 和 E2 强度的横向地震力作用。根据《中国地震动参数区划图》^[14]和《城市桥梁抗震设计规范》^[15](CJJ 166—2011),大桥所在场地的地震动参数如表 3 所示。

表 3 大桥所在场地地震动参数				
抗震 设防类别	抗震 设防烈度	特征周期 T_g/s	场地 类型	阻尼 比
丙	7 度	0.35	Ⅱ类	0.05

水平设计加速度反应谱谱值 S ,由式(2)和式(3)确定。根据大桥所在场地地震动参数和《城市桥梁抗震设计规范》^[15](CJJ 166—2011)中的相关规定,按照式子计算得到 E1 多遇地震作用下水平设计加速度反应谱峰值 $S_{\max}$ 为 0.103 5g,E2 罕遇地震作用下水平设计加速度反应谱峰值 $S_{\max}$ 为 0.495g,因此,可以确定 E1、E2 地震水平向加速度

反应谱如图 16 所示。

$$S = \begin{cases} 0.45S_{\max} & T = 0\text{ s} \\ \eta_2 S_{\max} & 0.1\text{ s} < T \leq T_g \\ \eta_2 S_{\max} \left(\frac{T_g}{T}\right)^\gamma & T_g < T \leq 5T_g \\ [\eta_2 0.2^\gamma - \eta_1 (T - 5T_g)] S_{\max} & 5T_g < T \leq 6\text{ s} \end{cases}$$

$S_{\max} = 2.25A$

(2)

(3)

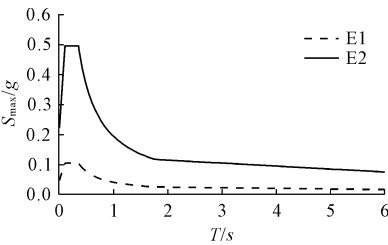


图 16 设计加速度反应谱

4.3 屈曲模态分析

不同横梁间距下桥梁一阶失稳形态如表 4 所示。可以看出,横梁间距不同时,大桥一阶失稳形态均为拱肋面外对称失稳。主要区别在于主梁上各个吊点处的失稳形态不同,随着横梁间距加大,在拱梁结合段内吊点位置的主梁变形愈加显著,结构一阶失稳特征值随横梁间距增加而增大,说明横梁加密对提高结构横向稳定作用不明显,横梁间距可按照主梁吊点间距位置进行布设。

表 4 不同横梁间距下桥梁一阶失稳形态		
横梁 间距/m	弹性稳定 系数	失稳形态
2	23.856	
3	25.171	
6	26.412	

4.4 横梁应力分析

不同横梁间距的桥梁在横向 E1 地震动作用下,横梁最大应力值如图 17 所示,由于结构对称,只表示出 1/2 部分。可以看出,在横向 E1 地震力作用

下,横梁间距由 6 m 减小至 2 m 时,各横梁顶、底缘最大应力值呈逐渐减小的趋势,且拱梁结合段内横梁最大应力值变化幅度大于非拱梁结合段。其中,非拱梁结合段跨中截面和拱梁结合段 1/4 跨截面处的横梁最大应力值变化最为明显,非拱梁结合段跨中截面处横梁顶、底缘最大应力值分别从 1.15 MPa、1.10 MPa 减小至 0.325 MPa、0.308 MPa,分别降低了 71.74% 和 72.00%;拱梁结合段 1/4 跨截面处横梁顶、底缘最大应力值分别从 3.05 MPa、4.40 MPa 减小至 1.44 MPa、1.42 MPa,分别降低了 52.79% 和 67.73%;而拱梁结合段跨中截面处横梁顶、底缘应力达到最大值,分别从 5.10 MPa、4.55 MPa 减小至 4.27 MPa、3.58 MPa,分别降低了 16.27% 和 21.32%。

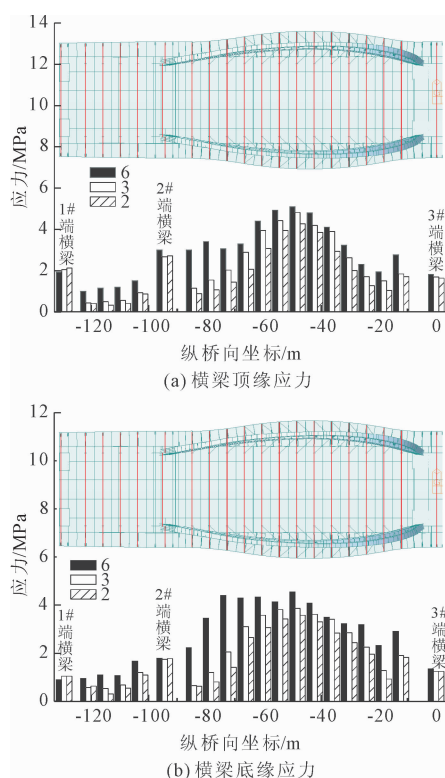


图 17 横向 E1 地震动作用下各横梁应力最大值

不同横梁间距的桥梁在横向 E2 地震动作用下,各横梁最大应力值如图 18 所示。可以看出,当横梁间距由 6 m 减小至 2 m 时,各横梁顶、底缘最大应力值与在 E1 横桥向地震力作用下变化趋势相同,均呈现逐渐减小的趋势,且拱梁结合段内横梁最大应力值变化幅度会大于非拱梁结合段。其中,非拱梁结合段跨中截面处横梁顶、底缘最大应力值变化最为明显,应力值分别从 5.51 MPa、5.28 MPa 减小至 1.56 MPa、1.47 MPa,分别降低了 71.69% 和

72.16%;拱梁结合段 1/4 跨截面处的横梁顶、底缘最大应力值分从 14.6 MPa、21.00 MPa,减小至 6.87 MPa、6.81 MPa,分别降低了 52.95% 和 67.57%;而拱梁结合段跨中截面处横梁顶、底缘的应力达到最大值,分别从 24.4 MPa、21.8 MPa 减小至 20.4 MPa、17.1 MPa,分别降低了 16.39% 和 21.56%。

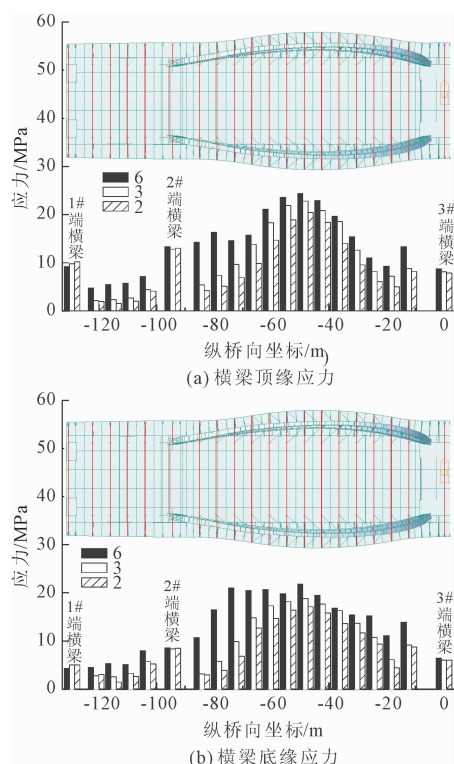


图 18 横向 E2 地震动作用下各横梁应力最大值

4.5 主纵梁应力分析

在横向 E1 地震动作用下,主纵梁底缘内外侧应力值如图 19 所示。当横梁间距由 6 m 减小至 2 m 时,主纵梁的底缘内外侧应力仅在非拱梁结合段与拱梁结合段的跨中位置处变化较明显,其中,非拱梁结合段主纵梁跨中底缘内外侧应力均随着横梁间距的减小而增加分别从 1.18 MPa、1.38 MPa 增加至 1.57 MPa、1.73 MPa,分别增加 24.84% 和 20.23%;而拱梁结合段主纵梁跨中底缘内外侧应力变化趋势不同,当横梁间距由 6 m 减小至 2 m 时,拱梁结合段主纵梁跨中底缘内侧应力从 2.79 MPa 增加至 3.97 MPa,增加 29.72%;拱梁结合段主纵梁跨中底缘外侧应力从 4.31 MPa 减小至 3.67 MPa,降低 17.44%。

在横向 E2 地震动作用下,主纵梁底缘内外侧应力值如图 20 所示。当横梁间距由 6 m 减小至 2 m 时,主纵梁的应力变化,仅在非拱梁结合段与拱梁

结合段的跨中变化较明显,其中,非拱梁结合段主纵梁跨中底缘内外侧应力均随着横梁间距的减小而增加分别从 5.66 MPa、6.61 MPa 增加至 7.50 MPa、8.29 MPa,分别增加 32.51% 和 25.42%;而拱梁结合段主纵梁跨中底缘内外侧应力变化趋势不同,当横梁间距由 6 m 减小至 2 m 时,拱梁结合段主纵梁跨中底缘内侧应力从 13.30 MPa 增加至 19.00 MPa,增加 42.86%;而拱梁结合段主纵梁跨中底缘外侧应力从 20.5 MPa 减小至 16.9 MPa,降低 17.56%。

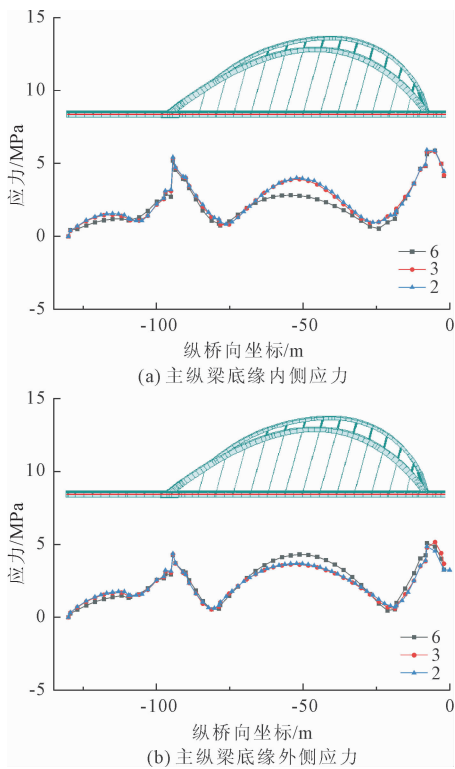


图 19 横向 E1 地震动作下不同横梁间距的主纵梁应力值

综合横梁和主纵梁应力结果分析可知,横梁间距的布置对横梁及主纵梁的受力均有影响,而横梁受到的影响相对更大,主纵梁仅在跨中处影响较大而在其余部位影响较小,当横梁间距按吊杆位置三等分变为等分布置,即横梁间距由 2 m 增加至 3 m 时,结构受到的影响较小,而当横梁间距按吊杆位置三等分变为对应位置布置,即横梁间距由 3 m 增加至 6 m 时,横梁及主纵梁的受力均受到较大影响,而横梁受到的影响相对更大。因此,大桥横梁间距可与吊杆位置对应,即每隔 6 m 设置一道横梁,可满足结构横向受力要求。

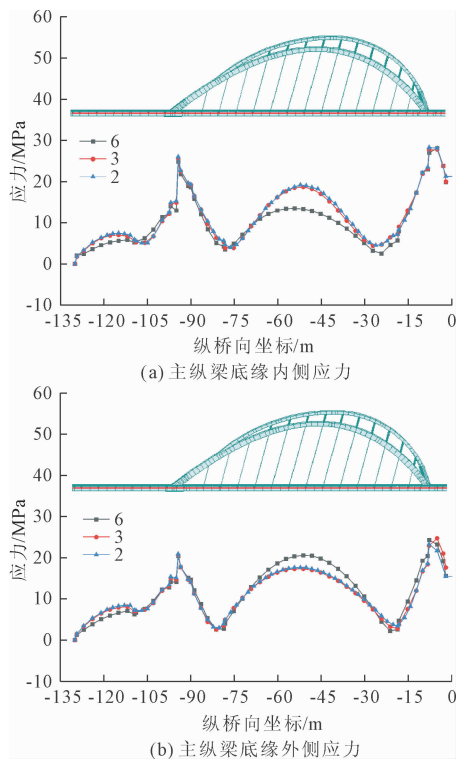


图 20 横向 E2 地震动作下不同横梁间距的主纵梁应力值

5 结 论

- (1) 通过对比 G-M 法与软件 midas Civil 计算得到宽幅钢箱梁的荷载横向分布影响线,两者计算所得的结果规律一致且坐标值相差较小,可用于计算主梁关键截面荷载横向分布系数。
- (2) 纵梁的荷载横向分布影响线均因小纵梁道数变化而受到显著影响,其中小纵梁道数的变化对小纵梁横向分布影响线的影响大于主纵梁。
- (3) 在最不利车道布载作用下,小纵梁道数的变化对主梁关键截面的内力和挠度影响较大。其中,拱梁结合段内纵梁的内力和挠度影响程度略小于非拱梁结合段,小纵梁受力性能受到的影响明显大于主纵梁,建议采用 5 道小纵梁的布置方式,有助于改善宽幅钢箱梁的受力。
- (4) 横向荷载作用下,横梁间距布置不同对横梁应力有影响,尤其是在非拱梁结合段跨中截面和拱梁结合段 1/4 跨截面处,应力最大值出现在拱梁结合段跨中截面。主纵梁应力也受横梁间距不同影响,但仅在非拱梁结合段与拱梁结合段的跨中截面处影响较大,其余位置影响较小。大桥横梁间距可与吊杆位置对应,即每隔 6 m 设置一道横梁,可满足结构横向受力要求。

参考文献:

- [1] 韩若愚,李方元. 蝴蝶拱桥横向受力特性分析[J]. 上海公路,2017(2):58-61,6.
- [2] 彭桂瀚,高伟国,吴庆雄. 蝴蝶型拱桥稳定性参数分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2017,45(4):512-516.
- [3] 涂浩,万能,蔡卓. 大跨径宽幅变宽钢箱梁制造技术研究[J]. 公路,2022(11):142-145.
- [4] 张欢,辛子亨,马海英. 宽幅钢箱梁关键施工技术比较分析[J]. 结构工程师,2021,37(2):200-206.
- [5] 陈银伟. 宽幅钢箱梁大悬臂横梁的设计方法[J]. 工程技术研究,2020,5(7):216-218.
- [6] 张军锋,陈鹤,杨柄楠,等. 单箱多室宽幅箱梁桥施工剪力滞效应[J]. 郑州大学学报(工学版),2021,42(3):105-110.
- [7] 付坤,冯鹏程,陈毅明. 宽幅钢箱梁横隔板与U肋过焊孔构造研究[J]. 桥梁建设,2017,47(3):65-70.
- [8] 贺拴海,梅晓亮,刘鹏,等. 宽幅钢箱梁斜拉桥空间行为数值分析[J]. 中国公路学报,2016,29(4):42-49,58.
- [9] 王巍. 单索面宽幅斜拉桥钢箱梁空间效应参数分析[J]. 城市道桥与防洪,2018(2):94-97,13.
- [10] 陈宝春,苏家战,赵秋. 桥梁工程[M]. 第4版. 北京:人民交通出版社,2022.
- [11] 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [12] 傅立军,李院军,王新伟. 宽幅装配式T梁桥荷载试验及横向分布分析方法研究[J]. 北方交通,2020(3):5-9.
- [13] 李才,孙玉,周广利. 有限元法在T梁荷载横向分布系数计算中的应用[J]. 山东交通科技,2018(2):12-14.
- [14] 中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [15] 城市桥梁抗震设计规范:CJJ 166—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

(上接第 157 页)

- [9] Netinger I, Rukavina M J, Mladenović A. Improvement of post-fire properties of concrete with steel slag aggregate[J]. Procedia Engineering, 2013,62:745-753.
- [10] Yüksel I, Siddique R, Özkan Ö. Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement[J]. Construction and Building Materials, 2011,25(2):967-972.
- [11] Terro M J. Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures[J]. Building and Environment, 2006,41(5):633-639.
- [12] Ling Tung-Chai, Poon Chi-Sun., Kou Shi-Cong. Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures[J]. Cement Concrete Composites, 2012,34(2):265-272.
- [13] Yu Xin, Tao Zhong, Song Tianyi, et al. Performance of concrete made with steel slag and waste glass[J]. Construction and Building Materials, 2016,114:737-746.
- [14] Lecce M, Rasmussen K J R. Distortional buckling of cold-formed stainless steel sections: Experimental investigation[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(4):497-504.
- [15] Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings: BS EN 1994-1-1[S]. Brussels: British Standards Institution, 2004.
- [16] Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360—10[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [17] 福建省住房与城乡建设厅. 钢管混凝土结构技术规程:DBJ-T13-51—2020[S]. 福州,2020.
- [18] Tao Z, Ghannam M. Heat transfer in concrete-filled carbon and stainless steel tubes exposed to fire[J]. Fire Safety Journal, 2013,61:1-11.
- [19] Wang Xingqiang, Tao Zhong, Song Tianyi, et al. Stress-strain model of austenitic stainless steel after exposure to elevated temperatures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014,99(4):129-139.
- [20] Song Tianyi, Han Linhai, Yu Hongxia. Concrete filled steel tube stub columns under combined temperature and loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010,66(3):369-384.