

大跨度钢拱桥顶推过程中的局部受力性能分析

夏伟杰¹, 谢 炜², 陈友生³, 黄赓宇⁴

(1.宁波市城市基础设施建设开发有限公司, 浙江 宁波 315010; 2.同济大学 土木工程学院, 上海市 200092;
3.四川路桥华东建设有限责任公司, 四川 成都 610200; 4.四川公路桥梁建设集团有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 为了明确大跨度提篮式钢拱肋与分离式钢箱系梁形成的钢拱桥整体顶推过程中的结构局部受力性能, 以主跨 213 m 钢拱桥为例, 采用大型通用有限元软件对钢系梁节段进行了三维数值模拟, 计算分析钢拱桥整体顶推施工过程中钢系梁的局部受力情况和板件的局部稳定性能。计算结果表明: 在整体顶推施工过程中结构受力性能良好, 钢系梁腹板和横隔板的最大 Mises 应力分别为 252 MPa 和 243 MPa, 结构的局部稳定系数在 6.14 以上。

关键词: 桥梁工程; 钢拱桥; 整体顶推施工; 局部受力性能

中图分类号: TU311; P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)06-0071-05

0 引 言

顶推施工法是桥梁施工中常用的和重要的施工方法之一, 其具有作业面小、对桥下交通和通航影响小以及不需要大型起重设备等优点。目前, 针对混凝土桥的顶推施工^[1-4], 已经总结出了比较完善的受力计算的方法。近些年来, 随着钢材产量的大幅提升以及施工技术的发展, 顶推法不再局限于混凝土桥, 而是广泛运用于大跨度钢梁桥的施工。如法国 Millau 大桥^[5], 国内的杭州九堡大桥^[6]和淮南孔李淮河大桥^[7]。

和混凝土桥顶推施工不同, 钢箱梁顶推施工中局部应力问题比较突出。目前, 国内外众多学者对钢箱梁顶推局部受力进行了研究。Granath^[8]发现顶推时支承反力的分布是不均匀的。李新华^[9]、李建军^[10]对钢箱梁关键结构参数进行了分析, 提出了改善其局部受力特性的措施。邹宇^[11]提出了使用混凝土进行局部加强的方案, 满足顶推施工的需求, 是比较经济可行。李传习^[12]、黄国红^[13]分析了横向偏移量对钢箱局部受力的影响。

以上研究主要集中在顶推施工过程的钢箱局部受力情况, 关于钢箱局部稳定性的报道较少。宁波新典桥是由大跨度提篮式钢拱肋与分离式钢箱系梁形成的钢拱桥, 其跨径为 213 m。受到通航要求的限制, 此桥采用梁拱整体顶推的施工方案。顶推法施工

的钢拱桥主梁板件的受力与成桥状态下的受力有较大的不同, 在较大的支承反力作用下, 结构极易出现局部屈曲或者钢材屈服的现象, 因此对其进行局部受力性能计算是必要的。本文以宁波新典桥为工程背景, 通过有限元计算得到了整体顶推施工中钢系梁的局部受力情况和板件的局部稳定性能, 成果可为同类型工程的施工提供参考。

1 背景工程

新典桥位于浙江省宁波市中心城区, 主桥采用下承式简支系杆拱桥, 钢箱系梁与钢箱拱肋固结的结构体系, 跨径为 213 m。主桥拱肋矢高 46 m, 矢跨比 1/4.63, 拱轴线为 1.7 次抛物线。两片拱肋向内倾斜 16.928°, 形成提篮状, 如图 1 所示。



图 1 新典桥主桥效果图

拱肋采用六边形钢箱截面, 拱肋高度由拱顶处 3.5 m 线性渐变到拱脚处 5 m, 拱肋宽度为 3.0 m, 拱肋的壁板厚度根据受力情况采用变厚度设置。钢系梁布置于桥面两侧, 分别与两片拱肋对齐, 采用单箱单室断面, 跨中区域截面尺寸为 2.5 m(宽)×2.0 m(高), 拱脚区域截面尺寸为 5.35 m(宽)×3.0 m(高)。钢箱的钢板厚度由两端向跨中逐渐减小, 如图 2 所示。跨中区域系梁内部有规律地设置横隔板、横向以

收稿日期: 2022-03-10

作者简介: 夏伟杰(1982—), 男, 本科, 高级工程师, 从事市政工程项目管理工作。

及纵向加劲肋,如图3(a)所示,其中横隔板间距为1.5 m,横向加劲肋间距为0.5 m。拱脚区域系梁内部隔板众多,方向各异,构造复杂,如图3(b)所示。桥面系由纵梁、横梁和带U形加劲肋的钢桥面板构成。纵、横梁均采用工字形截面。横梁焊接在两条系梁间,纵梁焊接在横梁上形成梁格。横梁间距3.0 m,纵梁间距8.1 m,全桥设置3道纵梁。该桥上部主体结构,即主梁和主拱均采用Q345qD钢材。

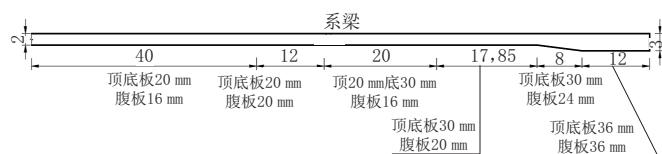
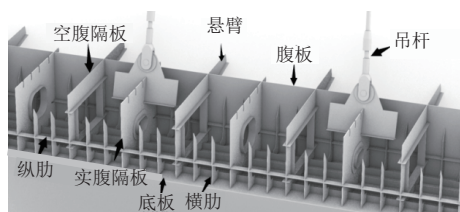
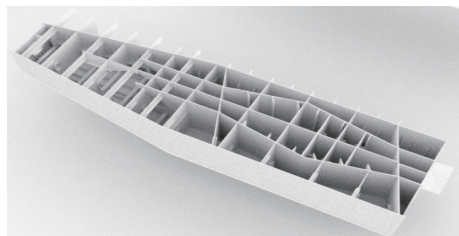


图2 1/2系梁立面图(单位:m)



(a)跨中区域



(b)拱脚区域

图3 系梁内部构造图

受到通航要求的限制,此桥采用梁拱整体顶推的施工方案。首先在东岸支架上拼装钢梁,再在钢梁上搭设主拱安装临时支架,再采用龙门吊在临时支架上拼接拱肋节段,形成梁拱固结体系,最后采用多点步履式自平衡顶推系统将拱桥整体逐步顶推过江,如图4所示。

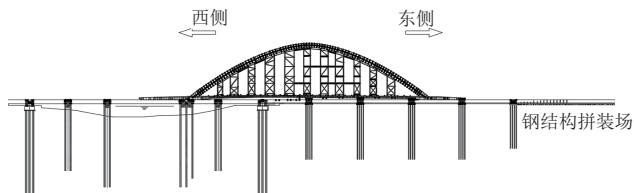


图4 整体顶推示意图

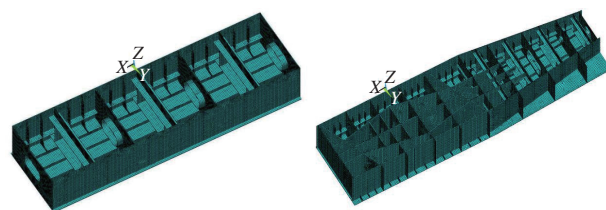
2 计算分析方法

新典桥主桥进行顶推施工时,支承设置在钢系梁的腹板下。在顶推施工过程中,所有支承位置不变,梁体前移,与顶推支承接触的梁段不断发生变化。当钢系梁的薄弱部位通过顶推支承时,较大的支反力极易导致该部位出现局部屈曲或者钢材屈服,因此

有必要对其进行局部受力分析。

为研究整体顶推过程中钢系梁的局部受力情况和板件的局部稳定性能,建立钢系梁局部的板壳有限元模型,详细模拟与顶推支承接触的梁段中的内部结构。为全面分析顶推过程中钢系梁局部受力情况,本文分别建立了跨中区域以及拱脚区域钢系梁局部有限元模型进行计算。

跨中区域钢系梁局部模型纵桥向的长度为9 m,该长度范围内包含7道横隔板。拱脚区域钢系梁局部模型纵桥向长度为11.2 m+9 m,其中11.2 m段为5.35 m×3.0 m箱型截面,9 m段为渐变段,箱型截面尺寸由5.35 m×3.0 m变为2.5 m×2.0 m。钢系梁的顶底板、腹板、横隔板以及加劲肋均采用SHELL93单元模拟。建立的局部板壳模型如图5所示,其中X方向为纵桥向,Y方向为横桥向,Z方向为截面高度方向。局部模型的约束情况为:限制两端顶板相关节点的三个方向平动自由度 U_x 、 U_y 、 U_z 。与两端固结的边界条件相比,底部板件变形更大,受力更不利,更符合实际情况,得到的计算结果更可靠。有限元计算时考虑两项荷载:结构自重以及支承反力。根据整体顶推过程的计算结果可知,顶推过程中墩顶最大支反力为12 800 kN。考虑到钢系梁每片腹板下有垫块与其底板接触,将两侧腹板下的支承反力近似按1:1分配,并以均布荷载的形式作用在底板上。



(a)跨中区域

(b)拱脚区域

图5 系梁局部板壳模型

3 局部静力分析

3.1 跨中区域局部静力分析

在顶推过程中,支承位置在不断改变。钢箱梁受力的情况分为支承反力作用在两相邻横隔板之间和横隔板正下方两种情况。图6为跨中区域钢系梁底平面示意图,其中工况一对应于支承位置在横隔板正下方,工况二对应于支承位置在两相邻横隔板之间。

在较大的支反力作用下,腹板竖向应力水平较高。工况一腹板竖向应力分布如图7所示,中心2.4 m范围内从下到上应力逐渐减小,该区域应力范围大约为80~140 MPa,其余部分应力水平较低。这主要

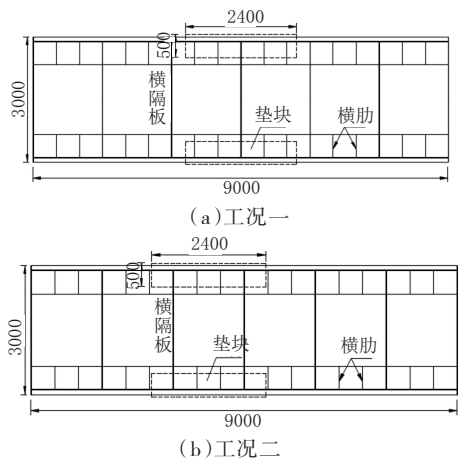


图6 支承位置示意图(单位:mm)

是因为在此工况下,腹板中心直接承受竖直向上的支反力。

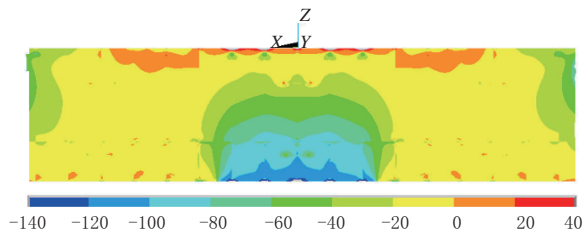
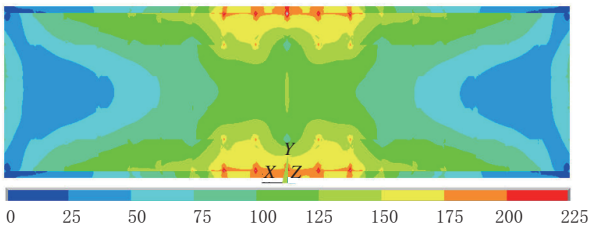


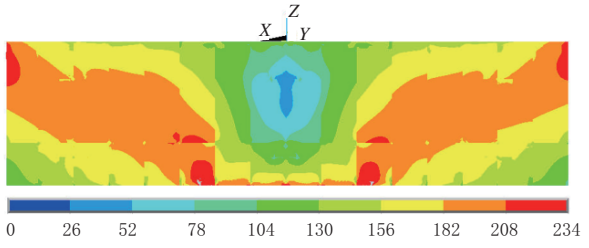
图7 工况一腹板竖向应力分布图(单位:MPa)

当支承反力对称作用在横隔板两侧时,钢系梁主要板件的 Mises 应力如图 8 所示。从图 8(a)中可以看出:钢系梁底板的 Mises 应力大致沿纵桥向呈对称分布。与顶推支承直接接触的钢箱底板的应力较大,大约为 150~225 MPa,并以此为中心向四周扩散。如图 8(b)所示,腹板的 Mises 应力分布情况可分为两个区域。区域一为中心 2.4 m 范围内的腹板,即与支承直接接触的部分,应力不超过 182 MPa,从四周向上侧中心逐渐减小;区域二为去除中心 2.4 m 范围的腹板,该区域应力范围大约在 130~234 MPa 之间,腹板上的橙色部分呈现出倒“八”字形,这表明荷载大致是由中心向两端约束传递。如图 8(c)所示,横隔板两侧在支承反力的作用范围内,直接参与受力,其应力水平较高。横隔板的最大应力为 243 MPa,出现在角点上,这主要是应力集中造成的。图 9 展示了不同视角下与顶推支承直接接触的钢箱 Mises 应力分布,从图中可以看出,在工况一下,结构受力是比较安全的。

当支承反力作用在两个相邻横隔板之间时,钢系梁节段的 Mises 应力如图 10 所示,最大应力出现在腹板上,为 252 MPa。从图 11 可以看出,与工况一相比,横隔板的应力水平有所降低。总的来说,在工况二下,结构仍有较高的安全储备。



(a)底板 Mises 应力分布

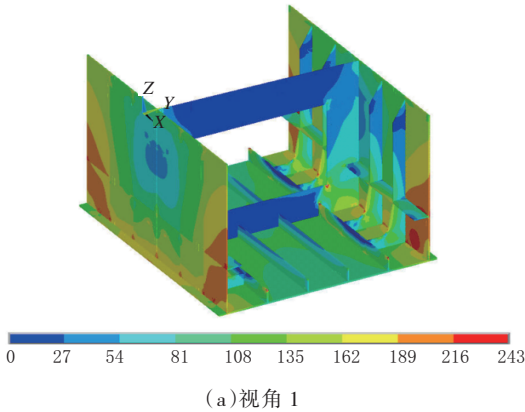


(b)腹板 Mises 应力分布

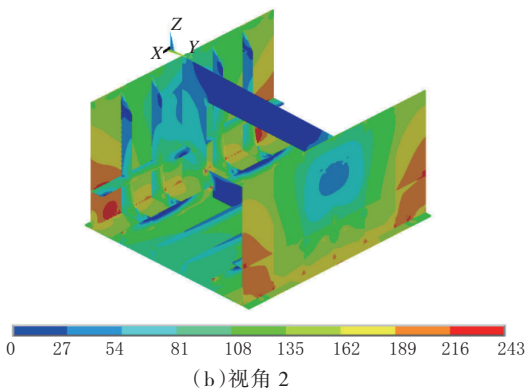


(c)横隔板 Mises 应力分布

图8 工况一主要板件的 Mises 应力分布图(单位:MPa)



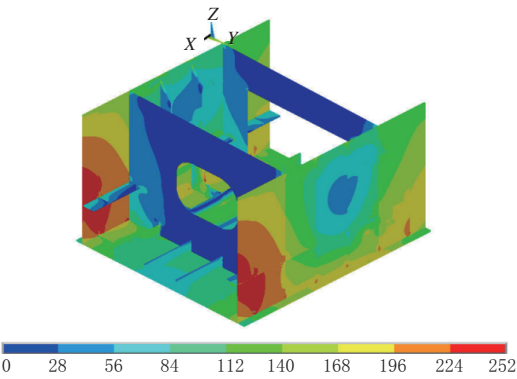
(a)视角 1



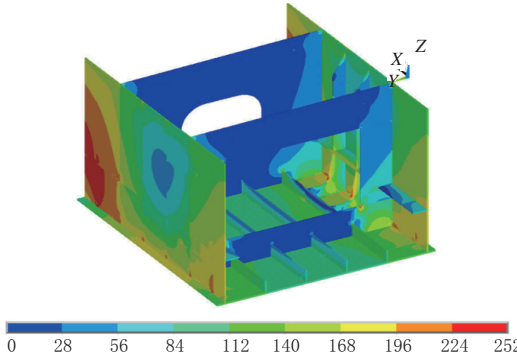
(b)视角 2

图9 工况一支承区域内结构的 Mises 应力分布图(单位:MPa)

不同支承位置下的主要板件的最大 Mises 应力汇总于表 1,从表中可以看出,支承位置会影响钢箱

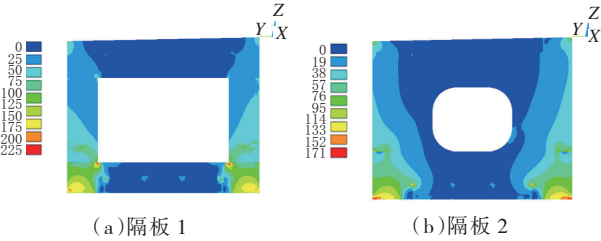


(a) 视角 1



(b) 视角 2

图 10 工况二支承区域内结构的 Mises 应力分布图(单位:MPa)



(a) 隔板 1

(b) 隔板 2

图 11 工况二横隔板的 Mises 应力分布图(单位:MPa)

梁的局部应力分布。当支承反力作用在横隔板正下方时,横隔板受力状态最不利,其局部应力水平较高;当支承反力作用在两个相邻横隔板之间时,横隔板不直接参与受力,此时钢箱腹板应力最大。从表中的数据中可知,顶推施工过程中,跨中区域钢系梁受力性能良好。

表 1 不同支承位置下主要板件的最大 Mises 应力 单位:MPa

名称	底板	腹板	横隔板
工况一	225	234	243
工况二	234	252	225

3.2 拱脚区域局部静力分析

由于拱脚区域钢系梁内部的隔板众多,方向各异,构造复杂,顶推支承位置发生改变时,各板件受力情况也随之发生改变,很难总结出系统性的规律。本节选取了一种荷载工况进行详细介绍。图 12 为拱脚区域 11.2 m 梁段的底平面示意图,此工况对应的

支承位置在图中所示横隔板的正下方。

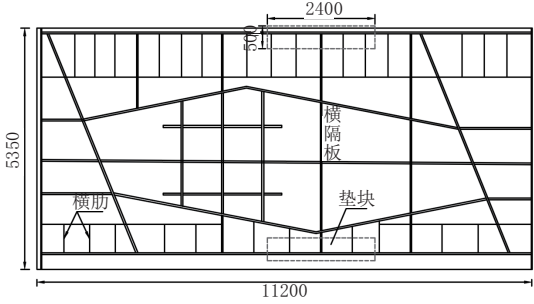


图 12 支承位置示意(单位:mm)

在此工况下,支承区域内板件的 Mises 应力分布如图 13 所示。从图中可以看出,腹板、横肋以及横隔板两侧应力较大,这说明这些板件为主要承力构件。结构最大 Mises 应力为 108 MPa,出现在横隔板上。横隔板上详细的 Mises 应力分布如图 14 所示,最大应力出现在与垫块接触的位置处。此外,与跨中区域的钢系梁节段相比,拱脚区域主要承力板件的厚度有所增加,因此拱脚区域应力水平更低,结构受力更安全。

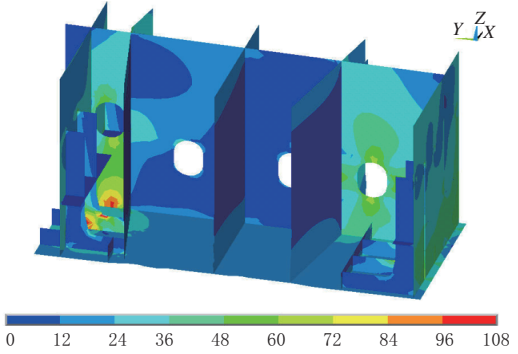


图 13 支承区域内结构的 Mises 应力分布图(单位:MPa)



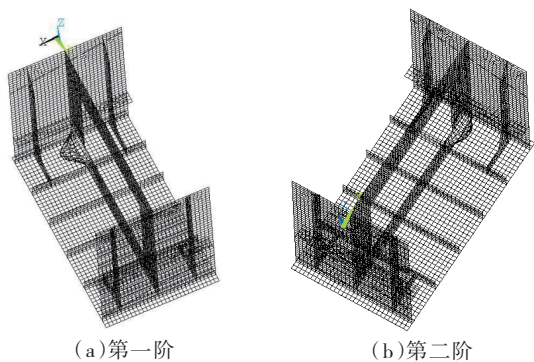
图 14 横隔板的 Mises 应力分布图(单位:MPa)

4 局部稳定分析

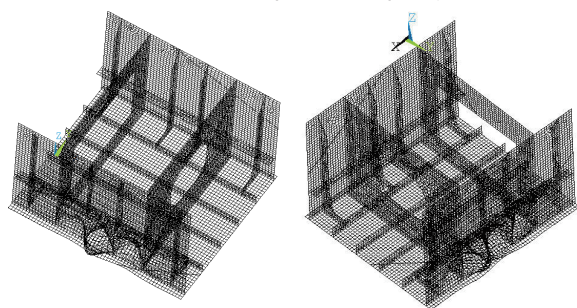
对于钢箱梁来讲,各板件为高强度的薄壁构件,局部稳定问题必须予以足够的重视。顶推过程钢箱梁局部稳定问题主要表现在支承点附近局部的稳定性。由于支承点局部作用复杂,腹板、横隔板等共同作用承担反力,很难准确地简化传力途径。因此建立精细局部模型对支承处局部屈曲状态进行仿真分析

是十分必要的。

当支承反力对称作用在横隔板两侧时,跨中区域钢系梁前两阶模态的屈曲荷载系数分别为 6.20 和 6.35,对应的失稳模态如图 15 所示,均为横隔板局部外凸。当支承反力作用在两相邻横隔板之间时,钢系梁前两阶模态的屈曲荷载系数分别为 6.14 和 6.18。与工况一不同,其失稳模态均为腹板产生波浪变形,如图 16 所示。对比分析工况一和工况二可知,支承位置的改变会引起失稳模态的变化。

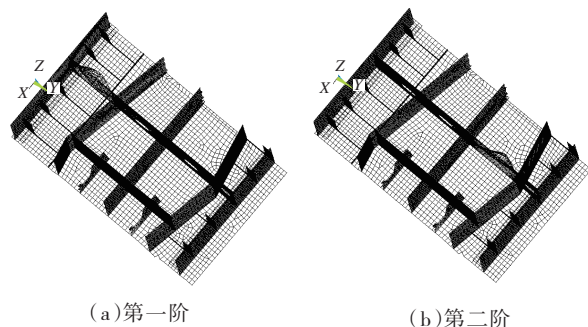


(a) 第一阶 (b) 第二阶
图 15 工况一跨中区域钢系梁失稳模态



(a) 第一阶 (b) 第二阶
图 16 工况二跨中区域钢系梁失稳模态

由于钢拱桥永久支座设置在拱脚处,故此区域板件厚度较厚,且隔板众多。通过有限元计算,拱脚区域钢系梁前两阶模态如图 17 所示,对应的屈曲荷载系数分别为 27.68 和 30.80。这说明在整体顶推施工过程中,拱脚区域钢系梁很难发生局部失稳。



(a) 第一阶 (b) 第二阶
图 17 拱脚区域钢系梁失稳模态

不同区域钢系梁节段前两阶模态的屈曲荷载系数汇总于表 2。表中数据表明:(1)支承位置对结构屈曲荷载系数的影响并不大;(2)拱脚区域钢系梁的屈

曲荷载系数比跨中区域大很多;(3)结构的局部稳定系数在 6.14 以上,大于规范要求的稳定系数。

表 2 钢系梁节段前两阶模态的屈曲荷载系数

屈曲荷载系数	跨中区域		拱脚区域
	工况一	工况二	
一阶	6.20	6.14	27.68
二阶	6.35	6.18	30.80

5 结 论

本文以宁波新典桥主桥为工程背景,分别建立跨中区域和拱脚区域钢系梁局部板壳模型,对钢拱桥整体顶推施工过程中钢系梁的局部受力情况和板件的局部稳定性能进行计算分析,结果表明,在新典桥主桥整体顶推施工过程中:

(1)支承位置会影响钢箱梁的局部应力分布。当支承反力作用在横隔板正下方时,横隔板受力状态最不利;当支承反力作用在两个相邻横隔板之间时,横隔板不直接参与受力,此时钢箱腹板应力最大。

(2)支承位置对结构屈曲荷载系数的影响并不大,但支承位置的改变会引起失稳模态的变化。

(3)钢系梁腹板和横隔板的最大 Mises 应力分别为 252 MPa 和 243 MPa,结构不会发生强度破坏。

(4)桥梁顶推过程中,钢箱系梁结构的局部稳定系数在 6.14 以上。

参考文献:

- [1] Rosignoli Macro. Prestressing schemes for incrementally launched bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 1999(5): 107-115.
- [2] 张永刚. 预应力混凝土连续箱梁顶推施工控制技术研究[J]. 铁道勘察, 2019, 45(2): 37-41, 46.
- [3] 范增国, 高雷雷. 顶推法施工预应力混凝土连续箱梁施工阶段裂缝控制[J]. 施工技术, 2017, 46(S1): 881-884.
- [4] 彭子祥, 姚昌荣, 李亚东, 等. 顶推施工中混凝土箱梁横向支撑不平的局部受力分析[J]. 西部交通科技, 2017(12): 38-42.
- [5] M Buonomo M, Servant C, Virlogeux M, et al. The design and the construction of the Millau Viaduct[J]. Steel bridge 2004, 2004: 165-182.
- [6] 常晨曦, 薛华. 杭州九堡大桥钢拱梁整体顶推技术[J]. 施工技术, 2012, 41(23): 32-33, 46.
- [7] 宋郁民, 郝晋新, 赵志明. 大跨度系杆拱桥顶推施工技术研究[J]. 施工技术, 2017, 46(S1): 858-861.
- [8] Per Granath. Distribution of support reaction against a steel girder on a launching shoe[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 47(3): 245-270.
- [9] 李新华. 大跨度钢箱梁斜拉桥顶推施工中的关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [10] 李建军, 刘冬冬, 王铮. 连续钢箱梁顶推施工局部受力分析[J]. 天津建设科技, 2015, 25(4): 64-67.

(下转第 89 页)

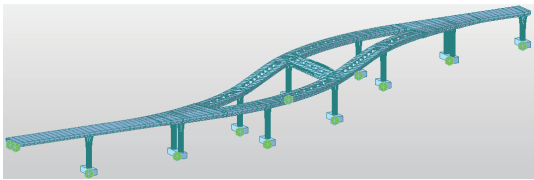


图 4 桥梁结构有限元模型

载、整体升降温、主梁梯度温度(按英标 BS 5 400 计算)、基础不均匀沉降。主梁在基本组合下主梁应力计算结果见图 5。

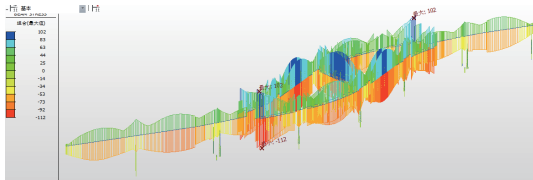


图 5 基本组合正应力包络图(单位:MPa)

控制截面应力见表 1。根据《公路钢结构桥梁设计规范》相关条文,截面受压翼缘应考虑局部稳定影响,受拉或受压翼缘应考虑剪力滞效应的影响。分别对以上截面进行考虑剪力滞效应和局部稳定效应的应力修正,计算结果均满足规范要求。

表 1 控制截面应力修正表 单位:MPa

截面	类别	值	受压板局部稳定折减系数	剪力滞折减系数	正应力
左幅 4#墩顶	上缘最大拉应力	74	1	0.882	83.9
	下缘最大压应力	-85	0.872	0.927	-105.2
右幅 2#~3#跨中-左	上缘最大压应力	-108	1	1	-108.0
	下缘最大拉应力	104	1	1	104.0
右幅 2#~3#跨中-右	上缘最大压应力	-114	1	1	-114.0
	下缘最大拉应力	84	1	1	84.0
连接梁	上缘最大压应力	-75	1	0.992	-75.6
	下缘最大拉应力	94	1	1	94.0

在人群荷载作用下,最大位移发生在第四跨跨中,位移为 -25 mm。根据《公路钢结构桥梁设计规

范》中不大于 $L/500=85\text{ mm}$ 的要求,结构刚度均满足规范要求。

4.2.2 主梁振动分析

《城市人行天桥与人行地道技术规范》中规定,人行天桥竖向振动自振频率应不小于 3 Hz,以避免产生共振,造成行人不安全感和构件的疲劳破坏^[3]。计算时将桥梁自重与二期恒载转化为质量,进行特征值分析,一阶竖向自振频率最低为 3.12 Hz,满足规范要求,结构舒适度满足规范要求。主梁一阶竖向自振振型见图 6。

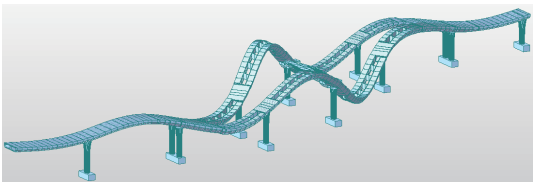


图 6 主梁一阶竖向自振振型

4.2.3 桥梁稳定性计算

将主梁结构自重、桥面铺装、人行栏杆作为常量,将风荷载和人行荷载作为变量,对左幅 4#墩顶支点底板最大受压工况进行屈曲分析,主梁最小屈曲系数为 28.8,大于 4,满足整体稳定要求。

5 结 语

赤壁市东洲人行桥造型独特、线形优美。该桥采用空间曲线造型,具有独特的景观效果。其结构形式以连续梁主体,不同于常规的装饰景观桥,以其独特的线形打造与众不同的景观效果。钢箱梁与 3D 承重玻璃桥面相结合,景观效果得到进一步提升。目前该桥梁已交付使用,社会效益和经济效益良好。

参考文献:

[1] 李英华,关彦超,郝东旭,等.赣州市人行天桥景观造型方案设计探讨[J].城市道桥与防洪,2021(6):133-136.
[2] 袁涛,杨晓,王乙静,等.大跨度全钢结构人行天桥的创新结构和美学设计[J].钢结构,2019,34(1):60-64,73.
[3] 翟志雄,刘勇,卫超.永安广场天桥上部结构验算及舒适度分析[J].城市道桥与防洪,2020(12):78-80.

(上接第 75 页)

[11] 邹宇.基于顶推施工的跨越铁路线钢箱梁的力学性能研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.
[12] 李传习,陈卓,董创文,等.横向四滑道步履式顶推宽幅钢箱梁局部

应力分析[J].公路交通科技,2019,36(4):72-79.
[13] 黄国红,吴波,朱利明,等.步履式顶推分体宽幅钢箱梁横向偏位局部应力分析[J].黑龙江交通科技,2021,44(2):87-90,92.