

拱形空腹连续梁桥结构多尺度分析研究

李军心¹, 胡国华², 王建煌³

(1. 福建铭泰集团有限公司, 福建 厦门 361000; 2. 厦门万路通设计院有限公司, 福建 厦门 361000;
3. 福建省恒基建设股份有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要: 拱形空腹连续梁桥, 作为拱桥和连续梁桥组合而成的一种新型桥型, 结合了梁桥与拱桥的特点, 结构造型美观, 线形优美, 与周边景观及场地适应性较好, 在现代城市景观桥梁中具有较大的应用空间。拱形连续梁桥主墩V形段结构复杂, 尤其梁拱结合三角区横梁的构造形式和受力特征复杂, 基于杆系有限元的结构整体分析难以准确计算其应力分布, 往往还需要进行更细致的实体有限元分析。本文先用杆系有限元法对桥梁结构进行整体分析, 再用实体有限元法对梁拱结合三角区横梁进行局部分析, 通过采用整体和局部结合的多尺度分析方法, 对拱形空腹连续梁桥结构进行详细检算, 为拱形连续梁桥设计优化提供依据, 对该类型的桥梁结构设计具有一定的借鉴意义。

关键词: 拱形; 连续梁; 横梁; 三向预应力; 有限元

中图分类号: U445.4

文献标识码: A

Multiscale Analysis of Arch Hollow Continuous Beam Bridge Structure

LI Junxin¹, HU Guohua², WANG Jianhuang³

(1. Fujian Mingtai Group Co., Ltd., Xiamen 361000, Fujian, China; 2. Xiamen Wanlutong Design Institute Co., Ltd., Xiamen 361000, Fujian, China; 3. Fujian Hengji Construction Co., Ltd., Xiamen 361000, Fujian, China)

Abstract: Arch shaped hollow continuous beam bridge, as a new type of bridge formed by combining arch bridge and continuous beam bridge, integrates the characteristics of beam bridge and arch bridge. It has a beautiful structural shape, and good adaptability to surrounding landscapes and sites. It has a large application space in modern urban landscape bridges. The V-shaped section structure of the main pier of an arched continuous beam bridge is complex, especially the structural form and stress characteristics of the beam arch combined with the triangular crossbeam. It is difficult to accurately calculate the stress distribution based on the overall analysis of the beam system finite element structure, and more detailed solid finite element analysis is often required. This article first conducts an overall analysis of the bridge structure using the rod finite element method, and then conducts a local analysis of the beam arch combined with the triangular beam using the solid finite element method. By using a multi-scale analysis method that combines the whole and the local, a detailed calculation of the arch hollow continuous beam bridge structure is carried out, providing a basis for the design optimization of the arch continuous beam bridge, and has certain reference significance for the design of this type of bridge structure.

Key words: arch shape; continuous beam; cross beam; three way prestress; finite element analysis

桥梁是道路的一部分, 在古代、近代、现代都有着自己的发展。梁桥是以梁为主要承重构件的桥, 是我国最早出现的桥型, 远在殷代即已创

建。拱桥指的是在竖直平面内以拱作为结构主要承重构件的桥梁。拱桥和梁桥的区别, 不仅在于外形不同, 更重要的是两者受力性能有较大差

收稿日期: 2023-09-01

作者简介: 李军心, 高级工程师, 博士, 研究方向为建筑与土木工程

基金项目: 福建省住房和城乡建设行业科学技术计划项目 (编号: 2022-K-132)

别。拱式结构在竖向荷载作用下,两端将产生水平推力。拱桥的优点是跨越能力较大,能充分就地取材,与混凝土梁式桥相比外形美观。此外,拱桥比梁桥标志性更强,更适合作为标志性建筑^[1]。然而,由于拱桥是一种推力结构,与梁桥相比对地基要求较高,增加了工程造价,有一定的局限。拱形连续梁桥,作为拱桥和连续梁桥组合而成的一种新型桥型,同时具有拱桥造型优美和连续梁桥受力明确、对地基要求较低的优点^[2]。拱形连续梁桥造型优美,曲线圆润,富有动感,更能满足人们对景观的要求。因此,拱形连续梁桥在城市桥梁中,特别是城市景观桥梁中的应用越来越广泛^[3]。

拱形连续梁桥主墩V形三角区结构复杂,尤其梁拱结合横梁是结构设计重点、难点,其受力性能对于保证结构的承载能力和跨越能力至关重要^[4]。其由斜腿、空腹段梁及两端连接的上、下横梁构成,设置纵、横、竖三向预应力砼结构^[5]。由于拱梁结合横梁的构造形式和受力特征复杂,空间效应明显,采用杆系有限元的结构整体分析难以准确计算其应力分布,一些专家学者对V形支撑0#块做过实体结构有限元分析。如:胡明^[6]对八渡南盘江特大桥局部计算,在V腿与

主梁形成的上内隅达到5.45 MPa的拉应力。李旺丰^[7]对某V形支撑连续刚构桥进行局部计算,V形支撑边跨根部外侧达到2.3 MPa的拉应力。郁钧晖^[8]对宁波奉化江大桥进行计算,靠边跨侧内表面达到4.68 MPa的拉应力。王国炜^[9]对桂林龙门大桥进行局部计算,桥梁局部达到4.9 MPa的拉应力。综上所述,这种带有V形支撑的0#块结构的某些局部区域会出现较高的拉应力,结构设计需要整体分析和局部分析结合进行详细计算。

1 桥梁概况

本项目中,主桥起点桩号为K16+835,终点桩号为K17+029,主桥全长为194 m,采用(37+60+60+37) m预应力混凝土空腹拱形连续箱梁^[10]。桥梁平面位于道路直线段上,采用左、右幅分离式桥梁;桥梁从起点至K16+950纵面位于0.5%的上坡段,K16+950至桥梁终点位于-1.3%的下坡段,主桥竖曲线半径为12 000 m。主桥结构为变截面预应力混凝土拱形空腹连续箱梁,结构形式属于梁拱组合体系,主梁受弯与拱腿承压共同受力^[11],主桥结构立面布置图见图1。

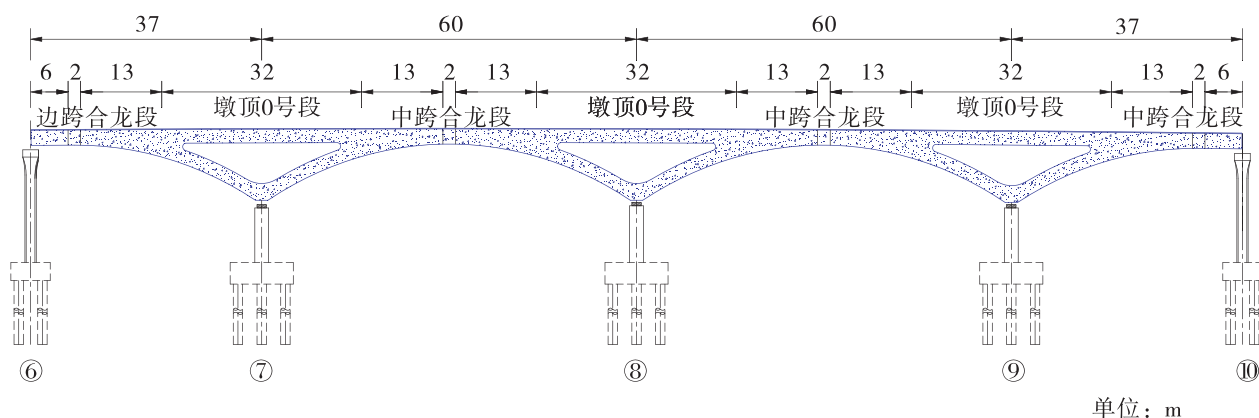


图1 拱形空腹连续梁桥立面图

1.1 主桥上部结构

主桥纵向箱梁0号V形段长37 m,V形空腹箱梁按半径 $R=58.028$ m的圆曲线变化高度,梁拱结合处梁高4.35 m,跨中梁高2.1 m;顶板厚从跨中30 cm,至梁拱结合处箱梁顶板加厚至65 cm;腹板从跨中50 cm变化至根部为70 cm;底板厚从跨中28 cm至根部变化为100 cm。主桥箱梁顶板宽度21 m,箱梁底宽度13 m,箱梁单侧翼缘板悬臂长度4 m。中跨跨中设置一道0.3 m

厚的横隔板,梁拱结合部设置一道2 m厚的横隔板,边跨梁端设置一道1.5 m厚的端横隔梁。主墩墩顶V形段长37 m,拱脚设置临时铰和后浇带,每个“T”构纵向对称划分为1个节段,每个梁段长度均为10.5 m。跨中合龙段长度为2 m,边跨两端现浇段长为7.92 m。

主桥上部构造采用三向预应力,按预应力混凝土A类构件设计。纵、横向及竖向预应力采用满足国家标准《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T

5224—2023)的高强度低松弛钢绞线,其标准强度 $f_{pk}=1860\text{ MPa}$, $E_p=1.95\times 10^5\text{ MPa}$,松弛率小于0.035。纵、横向预应力钢束的每股钢绞线公称直径为15.2 mm纵向预应力钢束采用大吨位群锚体系;顶板横向预应力钢束采用扁锚体系;竖向预应力采用精轧螺纹钢筋。纵向预应力束管道采用预埋塑料波纹管成孔,真空辅助压浆工艺;横、竖向预应力管道采用预埋金属波纹管成孔。

1.2 主桥下部构造

7、8、9号主墩墩身采用梯形实体墩,墩顶截面尺寸为长12.0 m、宽2.2 m,正面墩身设置15:1的坡率,侧面墩身设置10:1的坡率;桥墩承台厚3.0 m,群桩基础采用直径2.0 m的钻

孔灌注桩,纵向按3排布置、横向按2排布置,每个墩共6根钻孔灌注桩。6、10号过渡墩采用实体门形墩,门形墩柱截面尺寸为边长2.0 m的正方形;过渡墩承台厚2.5 m,群桩基础采用直径1.6 m的钻孔灌注桩,纵向按2排布置、横向按2排布置,每个墩共4根钻孔灌注桩。

2 桥梁整体结构分析

2.1 计算模型

主桥整体计算采用有限元程序,按照A类预应力混凝土箱梁标准验算。主桥共划分为136个单元170个节点,桥梁支架采用只受压弹性支撑模拟,支撑布置形式根据设计图纸设置,主桥结构离散见图2。

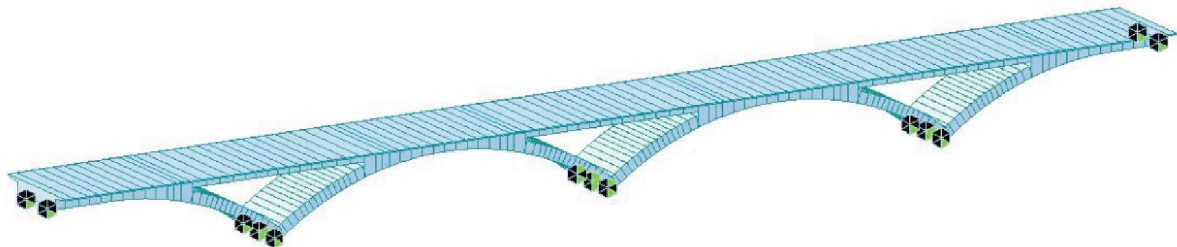


图2 拱形连续梁桥计算模型

2.2 计算内容

预应力混凝土拱形连续梁按施工流程逐阶段计算结构各截面内力、应力和位移;成桥运营计算包括恒载、活载、支点沉降、温度及静风力等工况,按规范进行最不利荷载组合,并据此进行截面的配束设计;模型施工阶段依据施工方案步骤划分如下:

(1) 施工阶段1:浇筑拱腿及拱腿上方0号段梁,持续时间90 d;

(2) 施工阶段2:张拉T1、W1、B1、B2预应力钢束,持续时间7 d;

(3) 施工阶段3:浇筑边跨及中跨主纵梁,持续时间90 d;

(4) 施工阶段4:张拉T2、T3、W2、W3预应力钢束,持续时间7 d;

(5) 施工阶段5:浇筑边跨后浇带并张拉1h1~1h5钢束,持续时间40 d;

(6) 施工阶段6:浇筑合龙段并张拉2h1~2h8钢束,持续时间40 d;

(7) 施工阶段7:成桥运营10年,持续时间

3650 d。

2.3 计算结果

综合考虑短暂状况与持久状况时的各种工况,包括自重、施工荷载、预应力、预应力二次力、收缩徐变次内力、非线性温差、活载、基础变位等作用。对箱梁施工、使用阶段各截面的内力、应力、位移,进行了计算分析,并按规范进行验算,主桥内力、应力、位移等计算结果均满足规范要求,主要计算结果见表1。

3 桥梁三角区实体局部分析

3.1 计算模型

主桥V形段三角区上横梁梁拱结合处为三向预应力构件,受力较为复杂,主桥整体计算结果没有准确反映该部分的局部受力情况,为了更准确地了解该部分的局部受力状态,采用Midas FEA软件对其进行实体建模分析。分析模型如下图,拱腿为边界约束端。采用六面体网格划分,共划分8293个单元,横梁结构离散见图3,横梁钢束布置见图4。

表 1 主要计算表

编号	验算项目	设计荷载	承载能力	最小安全系数
1	正截面抗弯验算	10760.3 kN·m	15387.2 kN·m	1.43
2	正截面抗拉验算	48620.2 kN·m	55880.2 kN·m	1.15
3	斜截面抗剪验算	12785.6 kN	21224.1 kN	1.66
4	抗扭验算	9035.4 kN·m	27106.2 kN·m	3.0
5	正截面抗裂验算	0.29 MPa	≥0 MPa	满足规范要求
6	斜截面抗裂验算	-1.0 MPa	≥-1.06 MPa	满足规范要求
7	正截面压应力验算	14.19 MPa	≤16.2 MPa	满足规范要求
8	斜截面主压应力验算	14.19 MPa	≤19.44 MPa	满足规范要求

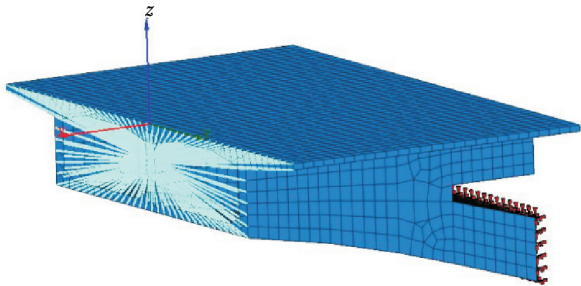


图 3 横梁实体模型

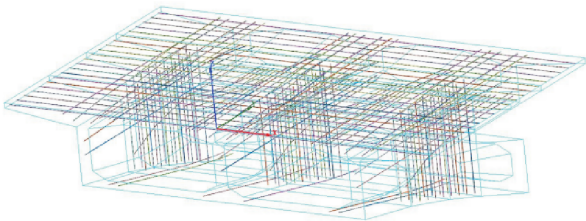


图 4 钢束布置

3.2 正截面拉应力分析

(1) 纵桥梁正应力。荷载频遇组合作用下计算结果见图 5，最大拉应力 $0.56\text{ MPa} \leq 0.5 f_{ik} = 1.855\text{ MPa}$ ，满足 A 类预应力混凝土构件设计水平，主要分布于 B1 和 B2 号钢束张拉端附近。

(2) 横桥向拉应力。荷载频遇组合作用下计算结果见图 6，最大拉应力 $1.46\text{ MPa} \leq 0.5 f_{ik} = 1.855\text{ MPa}$ ，满足 A 类预应力混凝土构件设计水平，主要分布于 B1 和 B2 号钢束张拉端附近。

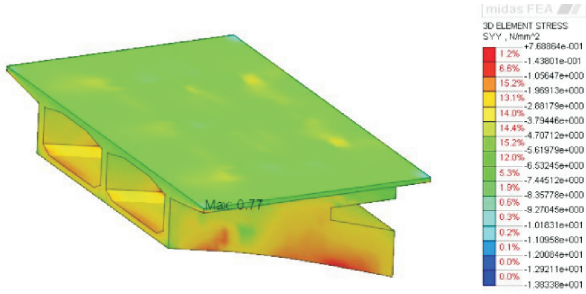


图 5 纵桥向正应力 (S_{yy}) 分布

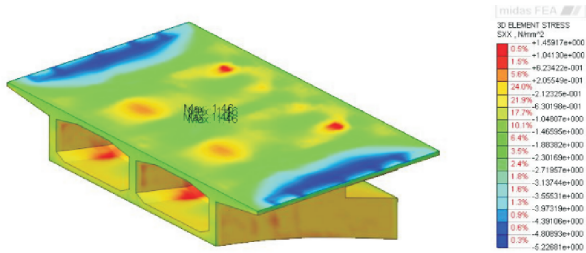


图 6 横桥向正应力 (S_{xx}) 分布

(3) 竖向拉应力。荷载频遇组合作用下计算结果见图 7，最大拉应力 $1.96\text{ MPa} \geq 0.5 f_{ik} = 1.855\text{ MPa}$ ，不满足 A 类预应力混凝土构件设计水平。横梁两侧与箱梁箱室交界面的竖向拉应力较大，建议在横梁内增加竖向预应力筋。预应力筋型号仍采用 JL32 mm 精轧螺纹粗钢筋，横桥向间隔 0.5 m 布置，纵桥向距横梁两侧边缘各 25 cm 单排布置，布置示意图如图 8。

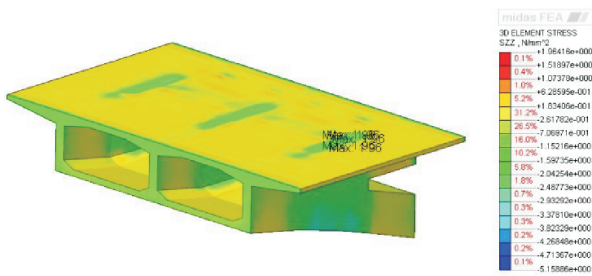


图 7 竖向正应力 (S_{zz}) 分布

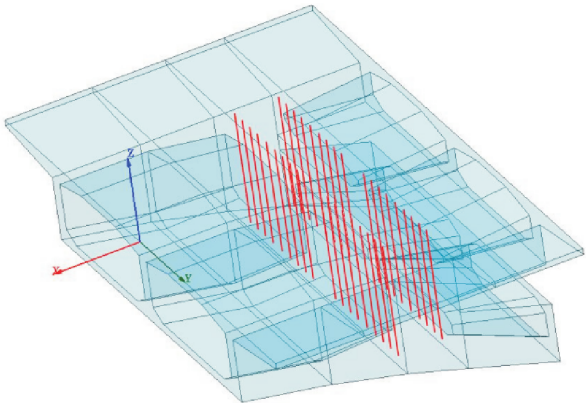


图 8 横梁内新增竖向预应力筋布置示意图

经计算,横梁内增加竖向预应力筋后,竖向最大拉应力为 $1.39\text{ MPa} \leq 0.5 f_{tk} = 1.855\text{ MPa}$,可满足A类预应力混凝土构件设计水平。

3.3 斜截面主拉应力分析

荷载频遇组合作用下,横梁处斜截面主拉应力分布如图9所示,最大主拉应力 2.94 MPa ,主要分布于B1和B2号钢束张拉端附近。由于模型未考虑锚具对张拉端集中应力的释放作用,故模型计算的应力值在钢束张拉端处较实际偏大。横梁其余位置的主拉应力均小于 $0.4 f_{tk} = 1.06\text{ MPa}$,满足全预应力混凝土构件的斜截面主拉应力验算要求。对于横梁张拉端锚固区,按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018) 8.2条后张预应力混凝土锚固区设计,满足设计要求即可。

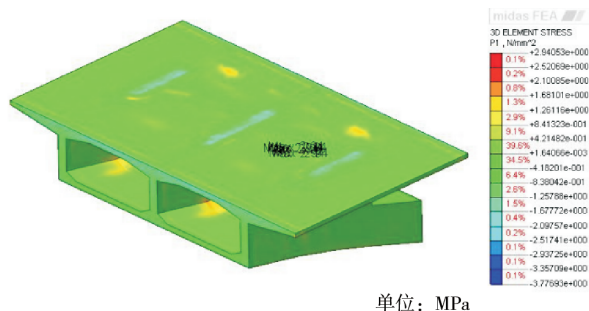


图9 斜截面主拉应力分布

4 结语

拱形连续梁桥采用预应力结构,纵向按全预应力混凝土构件设计。纵向预应力钢束采用大吨位群锚体系,顶板横向预应力钢束采用扁锚体系,竖向预应力采用精轧螺纹钢,三角区上横梁为三向预应力构件,受力特别复杂。本文先采用杆系有限元对桥梁结构进行整体分析,并按规

范进行验算,主桥内力、应力、位移等计算结果均满足规范要求;再用实体有限元对梁拱结合横梁进行局部分析,发现横梁处竖向局部拉应力过大,并针对性地在横梁内增加竖向预应力筋,优化设计后验算结果均满足规范要求;通过采用整体和局部结合的多尺度分析方法,对拱形连续梁桥结构进行详细检算,为拱形连续梁桥设计优化提供依据,对该类型的桥梁结构设计具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 丁立新,陈海泳. 连续拱形梁桥的探索[J]. 桥梁建设, 2007(1):54-56.
- [2] 廖成强. 某拱形连续梁桥的总体设计[J]. 四川建筑, 2012,32(3):162-164.
- [3] 黄骏,师颖嫦. 拱形连续梁的受力分析[J]. 交通科技, 2016(2):44-46.
- [4] 向鑫. 上承式梁拱组合桥中的梁拱结合横梁计算分析[J]. 交通世界,2018(31):88-89.
- [5] 蒋红卫,徐智. 新扬大桥主桥V形三角区施工关键技术[J]. 现代交通技术,2011,8(06):49-52.
- [6] 胡明,张开敬,赵人达. V形支撑局部结构模型空间有限元分析[J]. 桥梁建设,1997(1):31-33,37.
- [7] 李旺丰. V形支撑结构施工阶段的空间应力分析[J]. 北方交通,2008(6):96-99.
- [8] 郁钧晖. V形墩刚构桥有限元仿真与施工监测分析[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [9] 王国伟,亓兴军,张国梁. V形支撑连续梁桥0#块有限元分析及施工控制[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),2022,35(01):40-47.
- [10] 谢贤铭. 大跨度拱形连续箱梁桥设计[J]. 福建建材, 2015(5):62-63.
- [11] 王迎. 东坑湾大桥主桥设计浅述[J]. 四川水泥,2019(4):98-99.