

某三跨连续钢箱系杆拱桥设计分析

饶浩森¹, 杨 林^{1,2}

(1.广州市城市规划勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510610; 2.中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510060)

摘 要: 某特大型跨铁路市政桥为 (121+125+121)m 三跨连续单拱肋钢箱系杆拱桥, 主拱矢高 36 m, 矢跨比 1/3.47, 边跨矢高 20 m 矢跨比为 1/6.05, 拱轴线采用正弦函数, 拱肋创新地采用了变高变宽的空间扭曲设计, 桥梁整体景观效果佳。标准桥面宽度 38 m, 双向 8 车道, 在大里程侧衔接南北侧快速路立交匝道, 主梁加宽至 55.8 m。在同类型桥梁中, 桥梁施工精度要求相对高, 难度大。详细介绍桥梁整体及局部设计及计算情况, 证明了扭曲的拱肋腹板结构可以有效传递结构内力, 能保证结构受力安全, 以期今后类似工程提供有益的设计思路和借鉴经验。

关键词: 系杆拱; 正弦函数; 连续梁拱桥; 扭曲结构

中图分类号: U448.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)11-0108-05

1 工程概况

1.1 既有旧桥

既有旧桥建成至今约 30 a, 原设计执行《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89), 荷载标准采用汽超-20, 桥宽 28 m, 为 (122+62+62+122)m 钢管混凝土拱桥, 桥下通行多股普速列车。随着城市快速发展, 交通量急剧加大, 既有旧桥经过多次维修加固, 但整体状况仍有恶化趋势, 安全形势严峻, 故拆除旧桥, 新建桥梁满足日益增大的交通量需求, 保证市民的行车安全。

1.2 新建桥设计原则

新建桥主要设计原则:

(1) 新建跨铁路桥梁技术方案实施过程中必须最大限度降低桥梁施工对铁路运营的影响, 确保施工期间铁路运营的安全, 且在尽量短的时间内完成桥梁的建设, 并尽快投入使用。

(2) 设计应在满足行车安全、舒适需要的同时, 充分重视景观设计, 力争造型美观和桥跨布置合理。同时, 积极采用当代新型的建筑结构、技术和材料, 兼顾防灾、防风、防震要求。设计方案应具有鲜明时代感和地域特征的结构方案。

(3) 桥梁型式应简洁大方, 结构合理、轻巧, 在满足功能要求的前提下, 提高美观要求, 同时尽量保留

旧桥原有风貌。

综合以上原则并考虑跨越铁路编组站、运营安全、景观及施工便利等要求, 新建桥采用 (121+125+121)m 单拱肋连续钢箱系杆拱桥方案。

2 主要技术标准

(1) 设计基准期: 100 a。

(2) 设计安全等级: 一级。

(3) 道路等级: 城市快速路。

(4) 设计速度: 80 km/h。

(5) 桥面纵、横坡: 1.2% 纵坡、双向 2.0% 横坡。

(6) 荷载标准: 汽车荷载等级为城-A 级。为保证上跨铁路桥梁的使用安全, 取双向各车道的车道荷载值按城-A 级荷载 $\times 1.3$ 安全系数进行设计。

(7) 抗震设防标准: 桥址处的地震动峰值加速度为 0.15g (基本烈度 7 度), 桥梁抗震设防措施等级为 8 度。

3 桥梁方案设计

3.1 桥型布置

主桥为 (121+125+121)m 三跨连续单拱肋钢箱系杆拱桥^[1]。中跨大拱计算跨径为 125 m, 主拱矢高 36 m, 矢跨比 1/3.47, 边跨拱肋计算跨径为 121 m, 矢高 20 m, 矢跨比 1/6.05。支座中心线距梁端 1 m, 主梁长度 369 m, 主桥包括梁缝全长 369.8 m。本主桥主梁大里程端北侧、南侧衔接快速路立交匝道, 主梁桥面加宽至 55.8 m, 以加大匝道转弯半径, 改善行车条

收稿日期: 2024-03-04

作者简介: 饶浩森(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥涵设计工作。

件,主梁东侧北端设置钢箱挑臂跨越辅道,挑臂长 8.72 m,宽 2 m。桥型布置如图 1、图 2 所示。

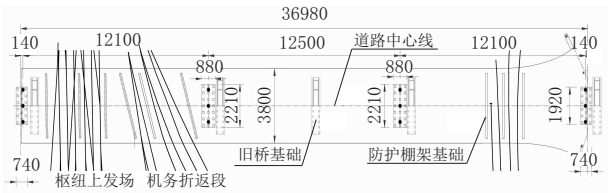


图 1 平面布置图(单位:cm)

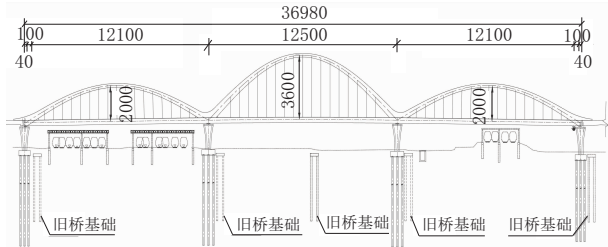


图 2 立面布置图(单位:cm)

3.2 拱肋设计

主拱跨径为 125 m,矢高 36 m,拱轴线采用正弦函数,拱肋高度变化原则为拱脚 5 m 沿拱轴线水平投影按二次抛物线方程渐变至拱顶 2 m,拱肋顶虚宽(顶板与边腹板延长线交点间距)从拱脚 4.127 m 渐变至拱顶 12 m。

边拱跨径 121 m,矢高 20 m,拱轴线采用正弦函数,拱肋高度变化原则为拱脚 4 m 沿拱轴线的水平投影按二次抛物线方程渐变至拱顶 2 m,拱肋顶虚宽从拱脚 4.127 m 渐变至拱顶 8 m。主拱及边拱拱肋截面底板虚宽(底板边腹板延长线交点间距)与均保持 3.5 m 不变。拱肋截面边腹板斜率随截面高度及宽度变化而变化,导致拱肋为空间扭曲结构。拱顶及拱脚附近截面如图 3、图 4 所示。

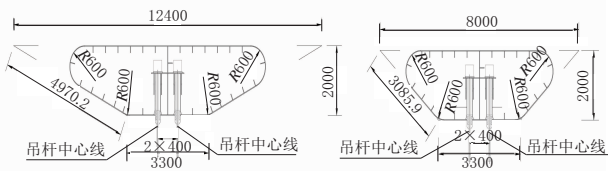


图 3 中跨、边跨拱顶截面图(单位:mm)

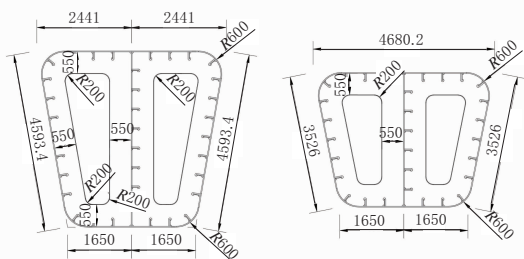


图 4 中跨、边跨近拱脚截面(单位:mm)

拱肋截面采用梯形截面,顶、底板与边腹板以倒圆方式连接半径为 600 mm。拱肋各段截面顶板、底板、中腹板、边腹板厚分别是:边支点、中支点拱肋

连接段钢板板厚 28 mm、边拱、中拱加厚段钢板板厚 24 mm、边拱、中拱标准段钢板板厚 20 mm。

拱肋各段拱轴线的水平投影长度分别是:边支点拱梁连接段 10.5 m,边支点加厚段 12 m,边拱标准段 78 m,中支点边拱加厚段 12 m,中支点拱梁连接段 15.5 m,中支点中拱加厚段 17.5 m,中拱标准段 78 m,如图 5 所示。

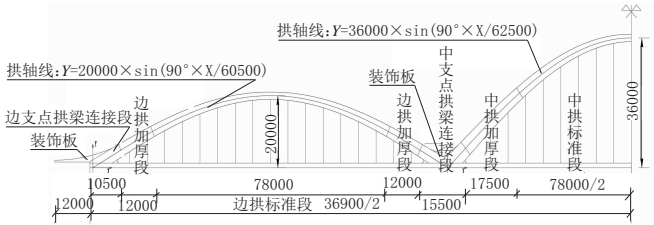


图 5 拱肋总体布置图(单位:mm)

3.3 主梁设计

主梁梁高 3 m,采用正交异性板扁平流线形钢箱梁+挑臂式结构^[2]。拱梁连接段钢箱梁由顶板、底板、中腹板、核心箱斜腹板、次边腹板、边腹板以及挑臂组成。核心箱斜腹板及中腹板与主拱腹板顺接,主拱腹板插入主梁并固结。非拱梁连接段取消核心箱斜腹板。桥下主要为普速铁路,车行道外侧设置一道 HA 级护栏,中央分隔分隔带的护栏采用 SA 级,内外侧均采用金属梁柱式防撞护栏。主梁标准断面布置双向 8 车道,如图 6 所示。

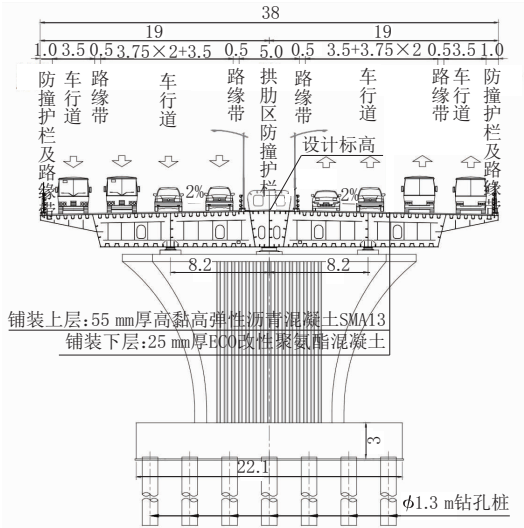


图 6 横断面布置图(单位:m)

主梁标准段顶板厚 18 mm,底板厚 14 mm。主梁加厚段(含拱梁连接范围),顶板中心线横向 5.05 m 范围内加厚至 24 mm。中腹板及斜腹板在加厚段厚度均为 28 mm,中腹板标准段厚 16 mm。边腹板及次边腹板厚度均为 16 mm。标准段强、弱横隔 3 m 一道间隔布置,板厚均为 16 mm。主梁板厚分段如图 7 所示。

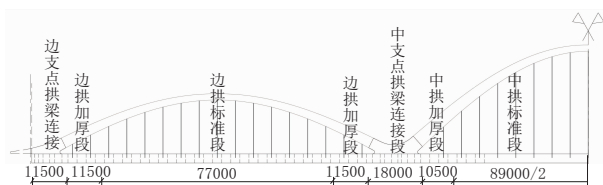


图7 主梁板厚分段图(单位:mm)

3.4 吊杆设计

吊杆采用 PES.E 环氧喷涂钢丝,弹性模量 $E \geq 1.95 \times 10^5$ MPa。吊杆钢丝采用 $\phi 7$ mm 高强钢丝,II 级松弛(低松弛),抗拉强度等级 1 670 MPa。

全桥为空间双索面体系,顺桥向竖直布置,边跨中跨均设置 17 对吊杆;吊杆顺桥向按 6 m 等间距布置,横桥向索距 0.8 m。吊杆规格为 PES(E)7-55、PES(E)7-73。

吊杆上端在拱箱内锚固,冷铸锚头锚于拱箱内中腹板两侧。吊杆下端锚固在钢箱梁内,箱梁内设置钢锚箱,便于施工时在钢箱梁内部张拉吊杆。为抑制吊杆振动,吊杆在梁张拉端、拱锚固端均设置配套内置减震器。

3.5 下部结构设计

主梁桥墩采用花瓶墩,每个支点设置 3 个支座,分别设置在桥面中心线处以及 2 道边腹板下方,此外,主桥东侧因变宽接立交匝道,在北侧增设 2 个支座,在南侧增设一个支座。

BP15、BP16、BP17、BP18 墩高分别为 13、14、15、15.3 m。桥墩墩底纵、横向尺寸分别为 3.2、12.4 m,墩顶纵、横向尺寸分别为 6.4、24.4 m。

中墩基础采用 21 根 $\phi 1.3$ m 钻孔柱桩。承台顺桥向长 8.8 m,横桥向宽 22.1 m,厚 3 m。桩基采用梅花式布置,横桥向间距均为 3.3 m,顺桥向间距为 3.25 m。

边墩基础采用 17 根 $\phi 1.3$ m 钻孔柱桩。承台尺寸为顺桥向长 7.4 m,横桥向宽 19.2 m,厚度 3.0 m。桩基采用行列式布置,横桥向间距 3.4 m、顺桥向间距 2.6 m。

所有桩基均按摩擦桩设计,部分桩基距离既有旧桥桩基较近,新桥桩径 1.3 m,旧桥桩径 1 m,新、旧桥桩中心距离最小约 2.3 m,由于旧桥建成近 30 a,桩基周围土体已经密实,故计算桩基竖向承载力时未考虑折减。

3.6 总体施工方案

主梁、主拱制作采用分板单元在加工厂内加工,小节段运输,运输至北侧空地后,在拼装平台上拼装

成大节段。主桥大节段划分为西侧梁段 129.5 m+中段 110 m+东侧梁段 129.5 m=369 m。

新建桥梁段在北侧平台拼装后,横移至设计线位置,再纵移顶推就位。边跨带拱顶推,中跨拱肋采用支架原位拼装,在南辅道南侧设置塔吊,中跨拱肋节段从南侧进场,通过塔吊吊装到位。本桥钢箱主梁采用支架异位拼装,先整体横移顶推再纵移顶推施工方法架设,主拱随主梁整体顶推,工况复杂,在施工中辅以临时墩、拼装支架等设施。

4 计算分析

为更好的分析桥梁受力状态,采用通用有限元分析程序 MIDAS Civil 对桥梁进行整体分析,采用 ANSYS 进行局部分析^[3]。下部结构较常规,经计算分析,安全储备较高,计算结果未予展示。

4.1 整体分析

整体计算中,主梁、拱肋采用三维梁单元模拟。吊索采用会桁架单元模拟。BP17 桥墩设置固定支座。桩基采用节点弹性支撑考虑桩土弹簧作用。为便于建模,主梁加宽段未按实际模拟,加宽段的自重以及附属结构的重量以外荷载的形式加载于模型对应位置,整体计算模型如图 8 所示。

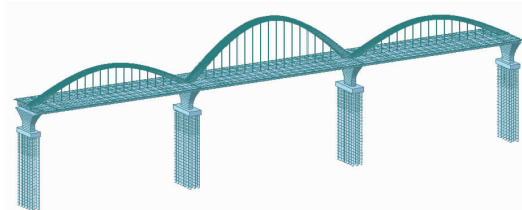


图8 梁单元计算模型

4.1.1 梁、拱应力分析

拱肋及主梁均为钢构件,应采用基本组合对其承载能力极限状态应力进行计算,计算结果如图 9 至图 12 所示。

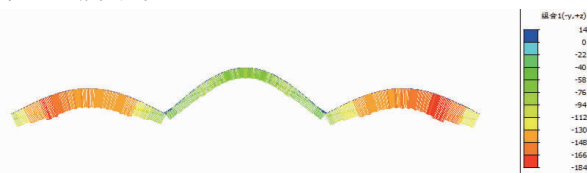


图9 主拱上缘应力图(单位:MPa)



图10 主拱下缘应力图(单位:MPa)

拱肋及钢箱梁采用 Q345qD 钢材,基本组合作用下,拱肋最大压应力 184 MPa,主梁最大拉应力

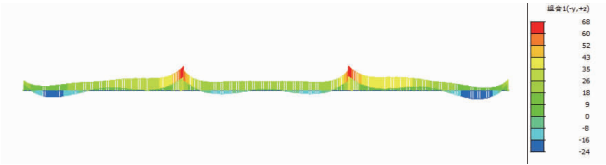


图 11 主梁上缘应力图(单位:MPa)

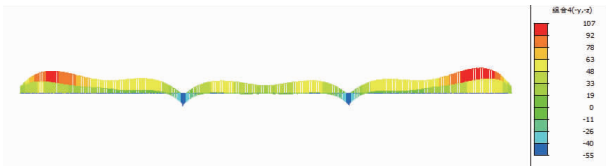


图 12 主梁下缘应力图(单位:MPa)

107 MPa,均满足规范要求,且有一定富余。

4.1.2 整体刚度计算

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中 4.2.3 章节的要求,不计冲击力汽车车道荷载作用下,竖向挠度不大于 $l/500$ (l 为计算跨径)。

活载作用下,中跨主梁正负竖向位移绝对值之和的最大值为 20 mm,挠跨比 1/6 250;边跨主梁正负竖向位移绝对值之和的最大值为 24 mm(见图 13),挠跨比 1/5 042,均满足规范限值要求。

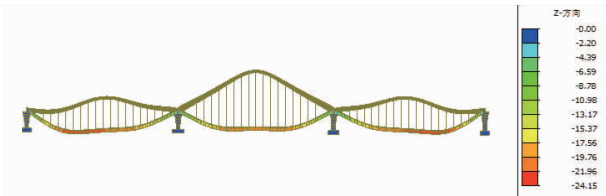


图 13 主梁活载最大位移(单位:mm)

4.1.3 吊索计算

吊索在标准组合作用下,安全系数不应小于 2.5。吊索在标准组合情况最大拉应力为 597 MPa。最小安全系数为 $2.8 > 2.5$,满足要求(见图 14)。

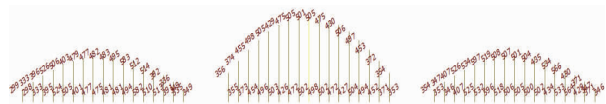


图 14 吊索标准组合应力图(单位:MPa)

4.1.4 稳定计算

钢结构的稳定问题是关系到其安全与经济的主要问题之一,与强度问题具有同等重要作用。

第一阶失稳模态为边跨拱肋面外失稳,稳定安全系数 $35.9 > 4$,满足规范要求(见图 15)。

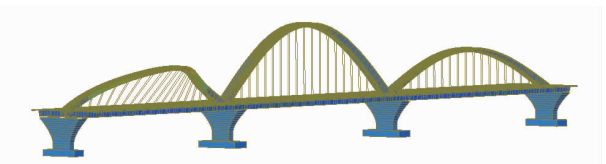


图 15 第一阶失稳模态

4.2 细部分析

拱肋为空间扭曲结构,杆系单元不能完全体现

细部受力特征,为更好了解扭曲拱肋受力状态,建立拱肋标准段板单元模型进行细部分析,从梁单元模型提取基本组合下的内力施加于板单元模型,提取内力时,考虑双向 8 车道满载。几何模型如图 16 所示。

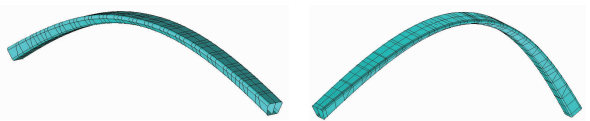


图 16 边拱、中拱标准段板单元几何模型

在基本组合作用下,边拱标准段等效应力云图如图 17 所示。

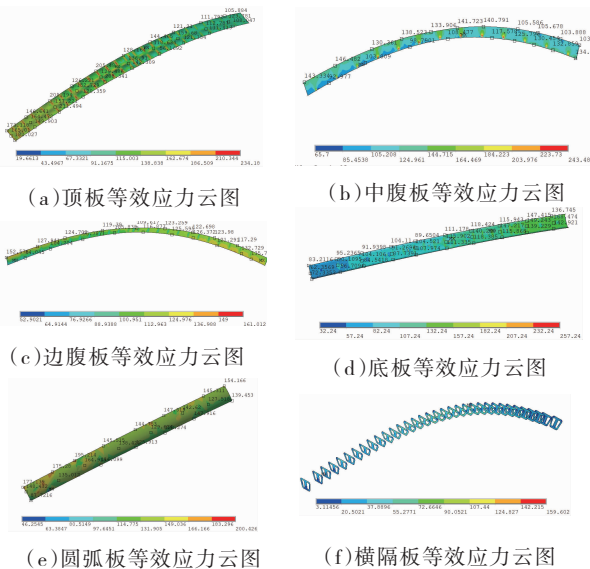


图 17 边拱等效应力云图(部分结果)(单位:MPa)

表 1 边拱标准段等效应力		单位:MPa	
位置	20 mm 板厚范围	24 mm 板厚范围	
		近边墩侧	近中墩侧
顶板	105 ~ 182	141 ~ 150	71 ~ 87
顶板圆弧板	102 ~ 172	127 ~ 195	71 ~ 92
底板	83 ~ 168	51 ~ 82	114 ~ 133
中腹板	98 ~ 143	54 ~ 146	79 ~ 130
边腹板	104 ~ 152	65 ~ 127	79 ~ 125

对比以上图表与梁单元计算结果可以看出,边拱顶板、底板的等效应力值及应力分布规律基本上与梁单元应力计算结果吻合。

竖直中腹板与倾斜边腹板的应力值范围基本接近,都在 90 ~ 140 MPa 范围,且应力分布规律基本一致,说明空间扭曲的边腹板也可以很好的传递内力。

在基本组合作用下,中拱标准段等效应力云图如图 18 所示。

对比以上图表与梁单元计算结果可以看出,边拱顶板、底板的等效应力值及应力分布规律基本上

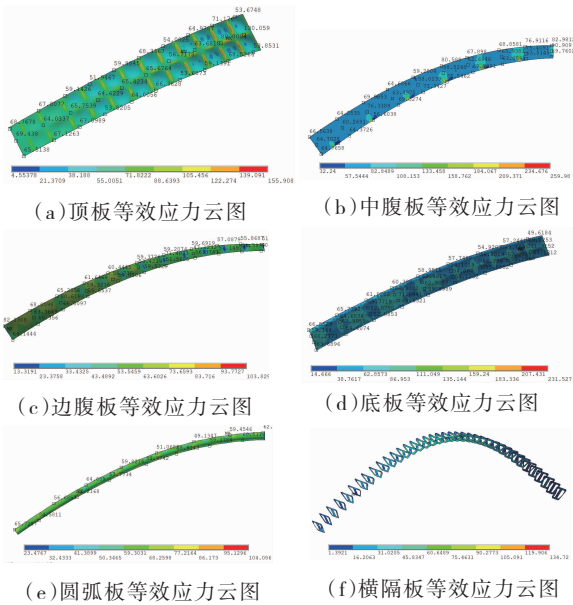


图 18 中拱等效应力云图(部分结果)(单位:MPa)

与梁单元应力计算结果吻合。

中拱的矢跨比大于边拱,中拱各板件的应力值几乎只有边拱相对应位置的一半,中拱的板厚有进一步优化空间。

5 结 语

本文详细介绍了一座(121+125+121)m 三跨连续

表 2 中拱标准段等效应力		单位:mm
位置	20 mm 板厚范围 /MPa	24 mm 板厚范围 /MPa
顶板	53 ~ 68	36 ~ 58
顶板圆弧板	49 ~ 68	50 ~ 72
底板	49 ~ 65	57 ~ 83
中腹板	64 ~ 82	54 ~ 73
边腹板	59 ~ 86	57 ~ 89

单拱肋钢箱系杆拱桥的设计情况,对全桥的整体及局部的主要计算分析结果进行展示,得出以下结论。

(1)全桥各计算指标均能满足规范要求,且有一定富余,结构安全可以保证。

(2)拱肋中腹板为常规的二维面结构,边腹板为空间扭曲结构,二者均可以有效传递结构内力,保证结构受力安全。

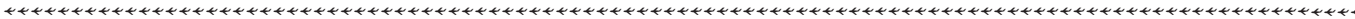
(3)由于中拱矢跨比大于边拱,中拱的应力值有较大富余,在满足整体刚度的前提下,可以对其进行进一步优化以节约板材,减少工程投资。

参考文献:

[1] 陈宝春.钢管混凝土拱桥(第二版)[M].北京:人民交通出版社,2003.

[2] 吴冲.现代钢桥(上)[M].北京:人民交通出版社,2006.

[3] 李国平.连续梁拱组合桥的特性研究[C]//第十三届全国桥梁学术会议论文集.北京:人民交通出版社,2005:222-226.



《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com