

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.027

单跨三肋五索面超宽下承式系杆拱桥总体设计

刘杰,魏立新

(广州市市政工程设计研究总院有限公司,广东广州 510060)

摘要:东莞滨海大道沙涌大桥为单跨120 m的五索面空间异型下承式钢箱系杆拱桥,桥梁标准断面宽80 m。针对城市道路超宽桥面提出一种新型空间异型拱桥,以满足景观及结构受力要求。主梁采用整幅式纵横梁体系,拱肋采用变高变宽倒梯形钢箱结构。中拱肋矢跨比为1/3.05,设计矢高 $f=38.00$ m;边拱肋采用外倾式,矢跨比为1/4.936,竖向投影设计矢高 $f=23.5$ m,中拱与边拱高呈黄金比例关系。为减轻桥面自重、优化主梁及拱肋尺寸、解决正交异性钢桥面板疲劳和耐久性等问题,采用钢-STC超高韧性混凝土轻型组合桥面。该种桥梁具有结构新颖、外形美观、受力合理、工程造价低、结构耐久性好等优点。为城市超宽桥面景观桥梁设计提供了一种新的思路。

关键词:异型拱桥;轻型组合桥面结构;超宽桥面;超高韧性混凝土;正交异性钢桥面板;景观桥

中图分类号:U442

文献标志码:A

1 工程概况

沙涌大桥位于东莞滨海湾新区滨海大道,滨海大道呈东西走向,西起虎门镇滨海大道,东至交椅湾大道,路线全长约5.52 km,道路等级为城市主干路,道路横断面为主线双向八车道+辅道双向四车道。沙涌大桥跨越沙涌河,为单跨120 m下承式空间异形钢箱系杆拱桥,标准断面桥宽80 m,跨中处上下游两侧设置观景台,断面局部加宽至88 m,桥梁采用整幅布置。

沙涌大桥为城市景观桥,桥梁设计难点:①道路宽80 m,桥长120 m,过宽的道路使桥梁纵横比例较常规桥偏大,采用常规的拱桥,如单拱或双拱,会让整座桥呆板臃肿;②桥面与河涌高差较小,在美感上不易把控拱的高度、比例。为了解决以上难点,桥梁设计采用多拱的方式。多拱力学性能好,造型变化丰富,能营造强烈的空间感受^[1-3]。

在方案设计阶段,桥梁设计以“浪淘琢玉,花开有兰”为理念,在运用多拱组合的基础上,提取浪花元素,运用体量对比的多拱呼应浪花的造型,以简洁明快的姿态,展现东莞地区海上丝绸之路的文化。同时对东莞市花——玉兰花进行意向提取,通过形

态组合等方式形成沙涌大桥。桥梁整体造型现代、简洁,同时充分体现了城市文化,展示了城市形象。桥梁方案效果如图1所示。



图1 沙涌大桥效果图

国内外已建成类似桥型有天津大沽桥、广西南宁大桥、山西南中环主桥以及南昌艾溪湖大桥等,该类桥型为拱肋外倾,两侧拱肋可根据景观要求设计为对称型或不对称型。上述桥型均为两片外倾的拱肋,沙涌大桥上部结构由三片拱肋组成,两侧拱肋外倾,中间拱肋直立,拱肋之间无横撑,竖直的中拱与两根外倾的边拱构成了“空间五索面下承式钢箱系杆拱桥”的敞开式空间异型拱桥结构体系。

2 技术标准

(1) 道路等级与设计速度:城市主干路,主线设

收稿日期:2022-12-29

作者简介:刘杰,男,高级工程师.E-mail:361728054@qq.com

计速度 60 km/h。

(2) 设计洪水频率:百年一遇潮水位 4.63 m(85 国家高程系统)。

(3) 设计荷载:城-A级。

(4) 抗震设防标准:地震基本烈度 7 度,地震动峰值加速度为 0.15g(g 为重力加速度)。

(5) 桥梁结构设计基准期:100 年。

(6) 结构设计使用年限:主体结构 100 年,吊索 20 年,栏杆、伸缩缝 15 年。

(7) 桥梁设计安全等级:一级。

(8) 环境类别:Ⅲ类。

3 工程地质条件

根据区域地质资料,对本工程河涌沿线有影响的断裂构造为南坑—虎门断裂。区域内历史上的地震以微震为主,处于构造相对稳定阶段。根据地质勘察钻探亦未发现断裂迹象,场地地质构造稳定性较好。经勘探,按地层成因类型和岩土层性质,场区内的第四系地层自上而下分为:填土层(Q^{ml})、第四系海陆交互沉积层(Q^{mc})、残积土层(Q^{el})、下古生界花岗岩($Pz1$)。桥梁采用钻(冲)孔灌注桩基础,以微风化花岗岩作为桩端持力层。

4 桥梁结构设计

4.1 总体布置

4.1.1 线路平纵设计

桥梁平面位于直线上,桥位处两侧规划防洪堤堤顶标高 5.0 m,桥梁与两侧规划路平交,百年一遇潮水位为 3.46 m,梁底最小控制标高 4.2 m。桥梁纵坡为双向 0.8%,竖曲线半径为 7 500 m。

4.1.2 跨径布置及桥型设计

沙涌桥位于滨海湾新区滨海大道,上跨沙涌河,沙涌河规划宽度 92 m,本桥位于沙涌河尾端,临近珠江入海口,河涌呈喇叭口状态,河涌宽度约 100 m,同时沙涌河与滨海大道斜交,为满足防洪要求,河道内不布置桥墩。考虑防洪、景观等要求,采用一跨过河的桥跨布置。由于桥梁两侧道路及场区高程为 5.0 m,梁高会受到严格限制。因此,综合桥梁跨径、桥梁梁高、桥下净空、景观功能等各方面考虑,由于下承式拱桥桥型本身

具有的曲线美,以及适中的跨径和较小的梁高而成为桥型方案的首选^[4-5]。结合方案设计理念,本桥采用了造型新颖的单跨 120 m 超宽桥面敞开式拱肋的轻型组合桥面异型拱桥桥型。桥型布置见图 2。

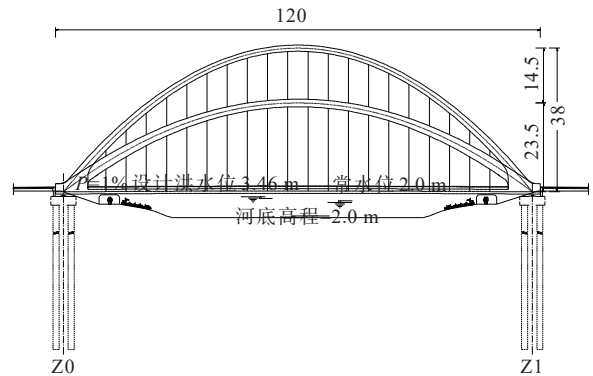


图 2 沙涌大桥立面布置图(单位:m)

桥梁采用整幅布置,桥梁断面标准宽度 80 m: 8.5 m(人行道及非机动车道)+7.5 m(辅道行车道)+5.0 m(侧绿化带)+15.0 m(主路行车道)+8.0 m(绿化带)+15.0 m(主路行车道)+5.0 m(侧绿化带)+7.5 m(辅道行车道)+8.5 m(人行道及非机动车道)。桥梁断面布置见图 3。

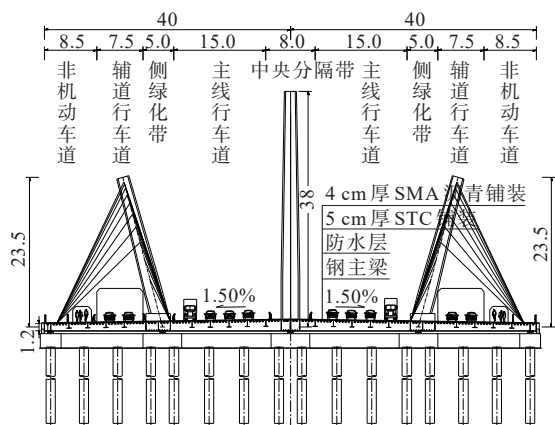


图 3 沙涌大桥横断面布置图(单位:m)

4.2 拱肋设计

拱肋结构包括位于竖直平面内的中拱肋和分设于中拱肋两侧的边拱肋,拱肋两端的拱脚与主梁固结,中拱肋矢跨比为 1/3.05,设计矢高 $f=38.00$ m,边拱肋矢跨比为 1/4.936,竖向投影设计矢高 $f=23.5$ m,中拱与边拱拱高成黄金比例关系;中拱肋与两根边拱肋之间不设置横撑,中拱肋为竖直结构,与主梁通过单排竖直吊杆连接。边拱肋为外倾式结构,边拱肋与竖直面夹角为 15° ,每个边拱与主梁之间通过两排斜吊杆连接。竖直的中拱与两根外倾的边拱构

成了“敞开式空间五索面倾斜拱肋系杆拱桥”的空间异型拱桥结构体系。该体系外形似浪花,又似含苞待放的玉兰花尖,景观性能较好。

中拱肋采用变截面钢箱拱肋,拱脚与钢箱梁腹板采用焊接固结,计算跨度 $L=116.0\text{ m}$,设计矢高 $f=38.00\text{ m}$,矢跨比 $f/L=1:3.05$,拱轴线采用二次抛物线。倒梯形变截面箱形截面,箱高 $1.6\sim 2.2\text{ m}$,箱顶宽 $2.0\sim 3.0\text{ m}$,箱底宽 $1.6\sim 2.45\text{ m}$,标准断面处顶、底板厚均为 20 mm ,腹板厚为 16 mm 。在梁拱结合部,拱肋顶底板加厚为 30 mm ,腹板加厚为 25 mm 。

边拱肋采用变截面钢箱拱肋,拱脚与钢箱梁顶板采用高强螺栓固结,计算跨度 $L=116.0\text{ m}$,竖向投影设计矢高 $f=23.5\text{ m}$,矢跨比 $f/L=1:4.936$,斜拱平面内拱轴线采用二次抛物线。倒梯形变截面箱形截面,箱高 $2.0\sim 3.0\text{ m}$,箱顶宽 $2.0\sim 3.0\text{ m}$,箱底宽 $1.6\sim 2.4\text{ m}$,标准段顶、底板、腹板厚均为 40 mm 。拱肋顶底板加厚为 50 mm ,腹板加厚为 50 mm 。

拱肋均采用Q420qD桥梁结构钢,钢板最大板厚达 50 mm ,需满足厚度方向钢板性能指标。拱肋结构在工厂分节段制作,考虑结构受力及运输吊装能力等因素,每个拱肋分为5个节段制作。拱肋横断面见图4。

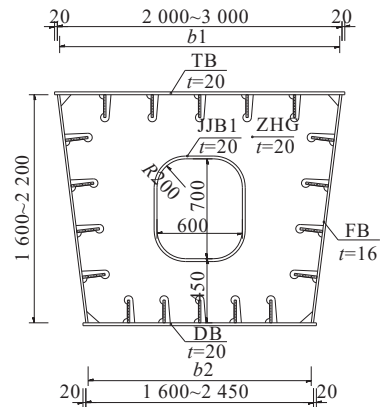
4.3 主梁设计

钢主梁采用正交异性钢桥面板,桥梁宽度 80 m ,桥面系受力由横桥向控制,横桥向每个断面有5根吊杆,桥面系受力为四跨连续梁结构。由于桥梁两侧道路标高限制,主梁梁高较矮,经计算,主梁梁高满足要求。

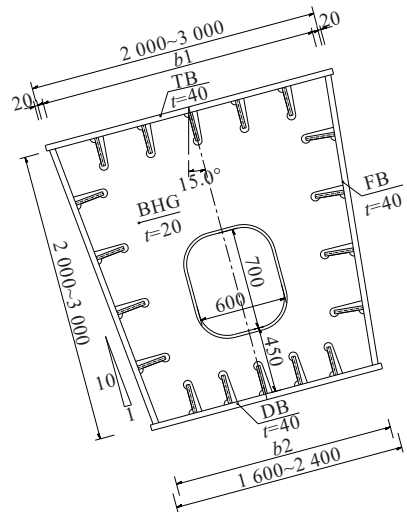
钢主梁采用整体式纵横梁体系,梁端悬出边支点以外 2.0 m ,每孔边支点梁拱结合段梁段长 10.0 m 。主梁标准宽度 80 m ,两边局部各加宽 4.0 m ,横梁底板水平,各纵梁等高,顶板横向倾斜形成 1.5% 的双向横坡,最小梁高 1.2 m ,最大梁高为 1.80 m 。

标准梁段处纵梁顶板厚 16 mm ,采用带U肋的正交异性钢桥面板结构,正交异性整体桥面结构由纵梁、横梁及加劲的钢桥面板组成。中间每隔

$2.0\sim 3.5\text{ m}$ 设1道纵梁,纵梁腹板高 $0.8\sim 1.0\text{ m}$,纵梁底宽 0.4 m ,腹板及底板在标准梁段板厚为 16 mm 。与拱肋及吊杆对应处纵梁采用箱梁结构。



(a) 中拱



(b) 边拱

图4 拱肋横断面图(单位:mm)

钢主梁标准梁段每隔 2.5 m 设1道横隔板,其中与吊杆对应的横隔梁采用箱形截面。截面厚 16 mm ,在局部长度范围内加厚为 20 mm ,其余横隔板采用工字形截面,梁高 0.5 m ,厚为 16 mm 。梁拱结合段端横梁间距为 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 。主梁除端横梁外均采用Q345qD桥梁结构钢。主梁横断面见图5。 $Tn-i$ 表示顶板;FF1表示边拱系梁腹板;ZF1表示中拱系梁腹板,HLG表示横梁隔板;DB表示底板;ZL-1表示纵梁。

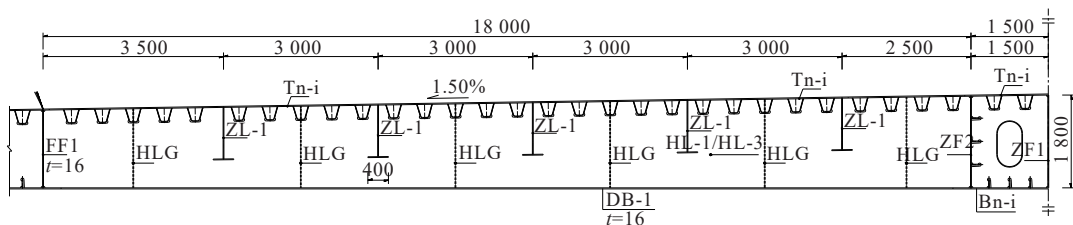


图5 主梁横断面图(单位:mm)

4.4 吊杆设计

中拱肋与钢主梁之间通过间距为 5 m 的竖直吊杆连接,中拱吊杆采用 73 根 $\phi 5$ 高强低松弛镀锌平行钢丝束。边拱肋的内外侧分别与钢主梁之间通过间距为 5 m 的斜吊杆连接,为平衡外侧辅道及人行道侧吊杆对拱肋产生的倾覆力矩,需对主线车行道侧的吊杆与边拱平面之间设置偏心。通过内外吊杆的共

同作用,平衡边拱肋的横向受力,实现两侧的受力均衡性,提高其结构可靠性和整体稳定性。边拱吊杆采用 55 根 $\phi 5$ 高强低松弛镀锌平行钢丝束和 127 根 $\phi 7$ 高强低松弛镀锌平行钢丝束,冷铸镦头锚,索体采用 PES(FD) 低应力防腐索体,并涂装超耐久聚脲材料。吊杆上端采用耳板式锚固锚于拱箱外侧,吊杆下端采用钢锚箱锚固于钢箱梁底面。吊杆构造图见图 6。

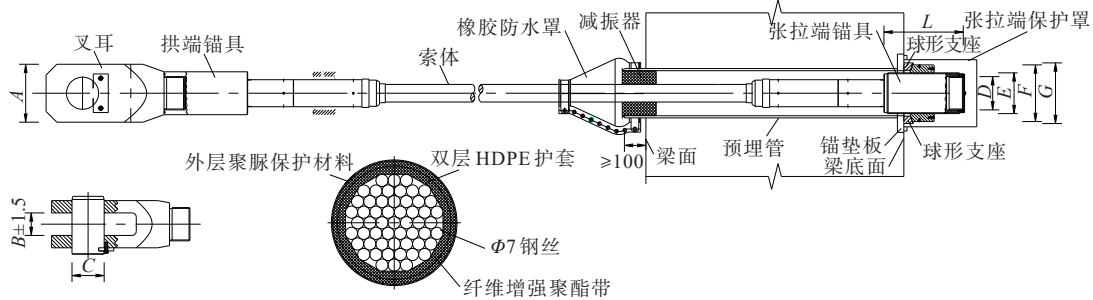


图 6 吊杆构造图(单位:mm)

4.5 拱梁结合段

桥梁采用拱梁固结,中拱拱肋与中纵梁横向等宽,拱肋腹板与伸出顶板的中纵梁腹板对接,拱肋顶底板与主纵梁顶板焊接,并在相应位置设置加强隔板。边拱拱肋与边纵梁顶板采用高强螺栓连接,拱肋拱脚底设置连接法兰,法兰与拱脚焊接,拱脚通过法兰与边纵梁顶板栓接。

4.6 桥面结构

桥梁结构桥面宽 80 m,由于主梁梁高受限,恒载对结构受力起关键作用。根据计算,影响拱肋结构尺寸的关键因素是桥面二期恒载,减轻二期恒载重量可以优化拱肋断面尺寸,获得更优美的线形,因此本桥桥面采用了钢-STC 超高韧性混凝土轻型组合桥面结构,该结构由正交异性钢桥面板与超高韧性混凝土组合而成,在钢主梁顶板上焊剪力钉并浇筑 50 mm 厚 STC(Super Toughness Concrete-STC 超高韧性混凝土)层,再在其上摊铺 40 mm 厚沥青混凝土磨损层。该轻型组合结构具有局部刚度大、重量轻、耐久性能好等优点,综合解决了正交异性钢桥面板固有的疲劳开裂等典型病害问题^[6-10]。同时可增强沥青面层与桥面板的连接能力,延长使用寿命。在全寿命周期内提高了钢桥面耐久性,降低了钢桥运营维护成本,减少了钢桥面维护引起的交通阻断。桥面构造见图 7。

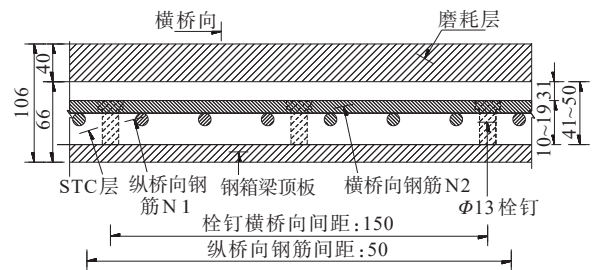


图 7 桥面构造图(单位:cm)

5 结构计算分析

5.1 结构计算模型

桥梁结构采用空间有限元软件 Midas/Civil 建立梁格模型对结构进行整体计算分析,主梁采用梁格模型。主梁、拱肋采用空间梁单元模拟,吊杆采用桁架单元模拟,全桥共 8 324 个节点,10 078 个梁单元,结构计算模型见图 8。

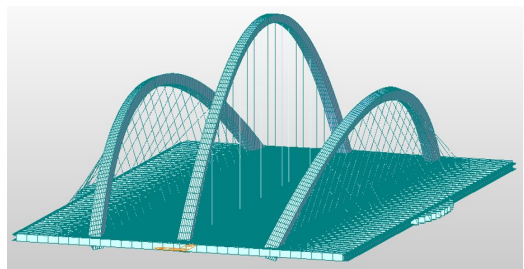


图 8 结构计算有限元模型

5.2 荷载标准

计算荷载考虑恒载、活载、风荷载、温度荷载等。

一期恒载:钢箱梁结构自重。

二期恒载:桥面铺装、钢防撞栏、绿化土等。

汽车荷载:城-A级,按双向十二车道。

人群荷载:按《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)

计算,取 $2.4 \text{ kPa}^{[11]}$ 。

温度作用:按整体温升 $30 \text{ }^\circ\text{C}$,整体温降 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 计。

风荷载:百年一遇强风荷载。

结构重要性系数:1.1。

5.3 主要计算结果

5.3.1 结构静力分析

(1) 主梁

基本荷载组合下,纵梁上缘最大拉应力为 129 MPa ,纵梁下缘最大拉应力为 122 MPa 。横梁上缘最大拉应力为 109 MPa ,横梁下缘最大压应力为 -133 MPa 。纵横梁的强度满足要求。

(2) 拱肋

基本荷载组合下,中拱上缘最大压应力位于拱脚附近,为 -123 MPa ,中拱下缘最大压应力位于拱肋跨中,为 -90 MPa 。边拱上缘最大压应力位于拱脚附近,为 -213 MPa ,边拱下缘最大压应力位于拱肋跨中,为 -178 MPa 。拱肋的强度满足要求。

(3) 吊杆

吊杆采用高强低松弛镀锌钢丝,其抗拉强度 $f_{pk}=1\ 670 \text{ MPa}$ 。由表1可知:吊杆的安全系数均满足规范要求,具有一定的安全储备。

表1 吊杆最大内力

吊杆类型	型号	最大索力/ 破断索力/		安全系数
		kN	kN	
中吊杆	PES(FD)5-73	711	2 393	3.37
边拱内吊杆	PES(FD)5-127	2 491	8 162	3.28
边拱外吊杆	PES(FD)5-55	456	1 803	3.95

5.3.2 结构稳定性分析

施工过程中不利工况为拱肋安装完成,但未张拉任何吊杆,且遭遇百年一遇风速,需验算其稳定性。根据计算结果,首先是中拱面外失稳,整体稳定

系数45.3。运营阶段首先是中拱面外失稳,整体稳定系数12.0,拱肋在施工阶段及运营阶段整体稳定性均满足规范要求。

6 结论

沙涌大桥是超宽桥面空间异型下承式钢箱系杆拱桥,结构形式美观新颖,结构受力合理,采用钢-STC超高韧性混凝土轻型组合桥面。综合桥梁跨径、结构合理性、经济性、景观功能等各方面考虑,该桥在同类跨径超宽桥面拱桥中具有较大竞争力,该桥的设计成果可为同类城市超宽桥面景观桥梁设计提供参考。沙涌大桥是目前世界上在建的最宽桥面的索承式桥梁,工程于2020年10月开工建设,2022年全线贯通。

参考文献:

- [1] 盛洪飞.桥梁建筑美学[M].2版.北京:人民交通出版社,2009.
- [2] 陈艾荣,盛勇,钱锋.桥梁造型[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [3] 金其莉,陈建兵,周晨.外倾单肋曲线人行钢拱桥振动舒适度评价[J].中外公路,2021,41(1):80-86.
- [4] 颜东煌,刘雪锋,田仲初,等.组合体系拱桥的发展与应用综述[J].世界桥梁,2007,35(2):65-67.
- [5] 宋书军.下承式连续拱梁组合体系异型拱桥设计[J].城市道桥与防洪,2019(7):79-82,13.
- [6] 河南省交通运输厅.公路波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计规范:DB 41/T 643—2010[S].郑州:河南省交通规划勘察设计院有限责任公司,2010.
- [7] 易蓓,周桂宾,丁少凌,等.马普托大桥主桥正交异性钢桥面板抗疲劳设计[J].中外公路,2022,42(5):66-71.
- [8] 杨仕力,施洲.我国大跨径钢箱梁桥正交异性板疲劳损伤研究现状[J].桥梁建设,2017,47(4):60-65.
- [9] 林伟南,于东民.正交异性组合桥面板合理构造设计研究[J].中外公路,2022,42(6):122-125.
- [10] 郑清刚,肖海珠.援马尔代夫中马友谊大桥主梁钢箱梁设计[J].桥梁建设,2018,48(3):95-99.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市桥梁设计规范:CJJ 11—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.