

大跨度斜拱曲梁多重组合桥梁原理和应用实践

宁平华,杨燎原,胡会勇

(广州市市政工程设计研究总院有限公司,广东 广州 510060)

摘要:以广州市海心桥为例,阐述大跨度斜拱曲梁多重组合结构设计原理、构造特点和关键技术。其中钢-混凝土组合空间拱肋、UHPC 包裹钢箱混凝土组合拱肋、劲性骨架组合承台、型钢混凝土组合抗推桩和骑跨式组合桥台等创新构造均满足了使用、景观、受力和耐久性等需要。通过分析比较和实际应用,验证了多重组合具有较好的力学特性和使用性能,使该桥成为目前世界上跨度最大、桥面最宽的斜拱曲梁跨江景观人行桥。

关键词:斜拱曲梁;UHPC 包裹钢箱混凝土拱肋;劲性骨架组合承台;骑跨式组合桥台;型钢混凝土组合抗推桩

中图分类号: U441⁺.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)11-0009-04

0 引言

随着国民经济的发展及人民对美学认识的不断提升,桥梁工程也在向大而美的方向发展。在世界各地不断地建造出造型优美的桥梁^[1]。

桥梁跨度的增加,其设计难度也不断的提升;同时结合桥梁美学^[2],对桥梁造型和工艺上的要求也在不断提升。本文结合广州市海心桥,阐述大跨度斜拱曲梁多重组合跨江人行桥结构设计的构造特点和关键技术,为大跨度斜拱曲梁的设计提供了有益参考。

1 工程概况

海心桥位于广州市新中轴线西侧,北岸是广州市珠江新城 CBD 商务区,南岸是广州市地标性建筑——广州塔,由钢拱主桥、南北侧两座 2×40 m 钢箱梁引桥及 4 个亲水平台组成。其主桥为斜拱曲梁桥,拱跨 198.152 m,桥宽 15 m,为目前世界上跨度最大、桥面最宽的斜拱曲梁人行桥;钢拱边跨在平面分枝,分别连接岸边亲水平台与引桥。

人行桥分东、西侧两条步道,其边线在平面上由三个圆弧组成。钢拱主跨及其东侧边跨、引桥、东侧亲水平台共同构成了东侧步道,长度约 500 m,在平面上为一个 $R=129.1$ m 的圆弧;得益于较长的展线长度,其坡度舒缓,满足无障碍人行需求,作为慢行

步道。钢拱主跨以及西侧边跨组成西侧步道,长度约 273 m;采用梯道的形式连接岸边亲水平台并顺接岸边道路。桥下满足 156 m 宽、10 m 高的通航净空要求,实现了与岸边道路平接,与堤岸景观融为一体。

2 设计标准

- (1)人群荷载: 4.0 kN/m^2 。
- (2)桥梁宽度: 15 m。
- (3)主桥最大纵坡: 8.3%。
- (4)设计洪水频率: 200 a 一遇, +8.38 m(广州城建高程系统)。
- (5)最高通航水位: +7.374 m;最低通航水位: +3.694 m。
- (6)通航净空: 156 m(宽) $\times$ 10 m(高)。
- (7)地震烈度: 抗震设防烈度为 7 度,设计地震基本加速度为 $0.10g$,设计地震分组为第一组,建筑场地类别为 II 类,特征周期为 0.35 s。
- (8)设计风载: 桥位 10 m 高度处 100 a 重现期基本风速 $U_{10}=32.2 \text{ m/s}$ 。
- (9)结构设计基准期: 100 a。

3 拱梁刚性组合结构体系

主桥采用超大跨度曲梁斜拱多重组合结构体系,拱梁墩采用全固结方式,中跨主梁在水平面投影的曲线凸出方向与拱肋在水平面投影的曲线凸出方向呈相反设置,并且拱肋通过吊杆与中跨主梁连接,对中跨主梁进行固定,使人行桥结构形成对拉受力,增加结构的稳定性。因采用的梁和拱均是曲线构造,通过拱梁类似呼吸变形能很好地适应温度变化产生的结

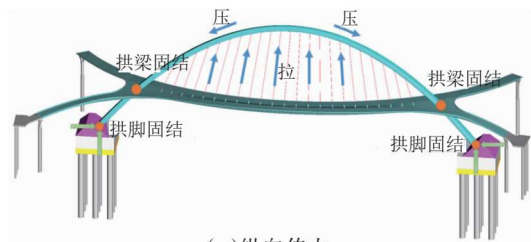
收稿日期: 2024-08-12

作者简介: 宁平华(1963—),男,硕士,教授级高级工程师,广东省勘察设计大师,从事市政道路桥梁设计工作。

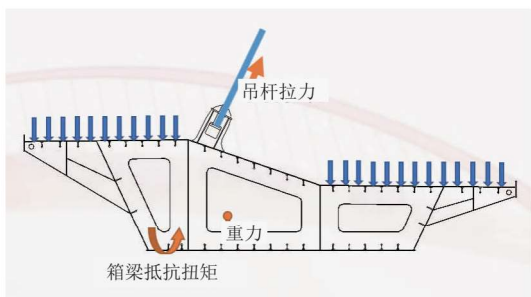
通信作者: 胡会勇(1981—),男,硕士,教授级高级工程师,从事市政道路桥梁设计工作。

构变形。

在自重和人群荷载作用下,桥梁荷载的一部分通过吊杆传递至拱、再由拱传递至基础,另一部分荷载通过梁传递至拱梁结合处及支座、再由拱肋结合处或支座传递至基础。中跨段为整体箱梁,箱梁核心为单箱双室闭口截面,通过钢箱自身抗扭刚度抵抗不平衡荷载产生的扭矩^[3],如图1所示。



(a)纵向传力



(b)横向传力

图1 主桥结构受力体系

4 钢-混凝土组合空间拱肋

拱轴线为二次抛物线,拱跨 198.152 m,矢高 57.95 m,矢跨比 1/3.4。拱肋 10°反向侧倾以平衡弯曲主梁产生的倾覆弯矩,为了保证纤细的外观,并减小阻水面积,断面采用单箱三室的圆端形钢箱拱肋,高 2.6 m,由上至下变宽 4.2~6.5 m(见图2)。拱肋顶、底、腹板板厚为 36~40 mm,并设置板式加劲肋,加劲肋板厚 36 mm,肋高 300~400 mm,按间距 500~882 mm 布置。纵向每隔 2.1~4.0 m 左右设置一道隔板,隔板与拱轴线正交布置,吊杆处加劲隔板与吊杆共平面,采用 Q370qD 钢材。

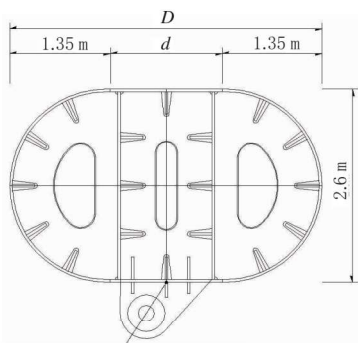


图2 第1根拉索至拱顶断面(单位:mm)

主梁底板以下拱肋外部设置短栓钉,并外覆 10 m STC 层,拱脚至拱梁结合处上方第一道横隔板范围内拱肋全断面灌注 C60 混凝土(见图3)。

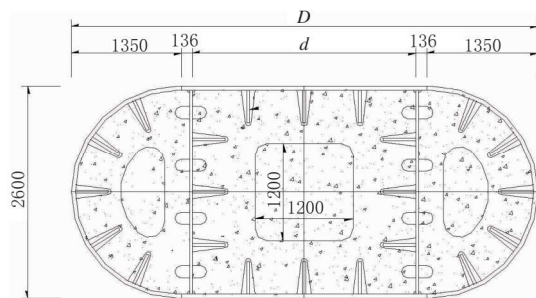


图3 桥面以下受压区组合断面(单位:mm)

拱梁结合处上方第一道横隔板至第1根吊杆隔板范围内仅在西侧受压区圆端截面内灌注 C60 混凝土(见图4)。其他位置不灌注混凝土。

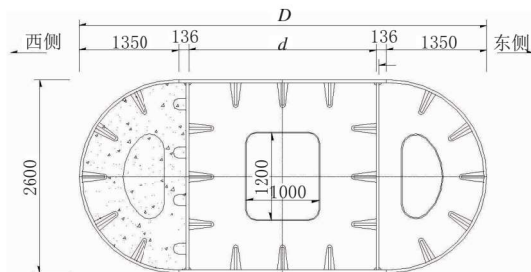


图4 桥面以上至第1根拉索区组合断面(单位:mm)

钢箱拱肋外观纤细且自重小,有利于减小拱脚处的推力,但拱肋提供的刚度有限。在拱肋内灌混凝土可提高刚度,改善上部结构受力,但也增大了拱脚推力,对基础提出更高承载力要求。为寻找二者之间的平衡,进行了大量精细计算和参数化比选,最终采用部分钢-混凝土组合拱肋的方案,即桥面以下的拱肋全断面灌注混凝土,桥面以上受压区箱室内灌注混凝土;在增强拱肋刚度,改善主梁受力的同时,也把拱脚推力控制在合理的范围。

5 UHPC 包裹钢箱混凝土拱肋

桥面以下拱肋外壁包裹 10 cm 超高性能混凝土(UHPC)层,将拱肋钢板与水隔离开,解决水中钢结构防腐问题,提高了耐久性,节省了养护成本(见图3)。

同时,钢拱的外壁与混凝土之间通过等间隔设置若干的连接件进一步地加强钢拱与混凝土层之间的连接强度,防止发生相对位移,同时,连接件还可提高钢拱与混凝土层之间的抗剪能力,降低外界对钢拱的影响,提高防撞能力^[4]。

6 劲性骨架组合承台

拱座为棱台形,高 5 m,顶部平面尺寸为 3.24 ~

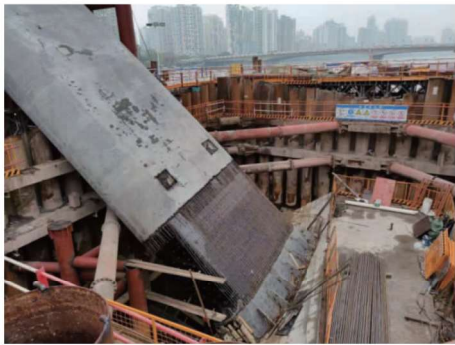


图 5 UHPC 包裹构造图

6.23 m(纵向)×15(横向)m,底部尺寸 13.4~17.39 m(纵向)×20(横向)m;承台高 6.5 m,平面尺寸 20 m×20 m,承台底设置 3 m 厚封底混凝土;主墩桩基采用 9 根直径为 3 m 钻孔灌注桩,行列式布置,桩基纵、横向中心距均为 7.5 m,为减小拱脚弯矩对桩基产生的不平衡轴力,群桩中心相对于拱脚中心在纵向设置 2.0 m 偏心。

承台内设置有由横梁和下弦杆组成的劲性骨架,下弦杆等间隔平行排列,横梁等间隔平行设置,与下弦杆之间采用下弦杆固定连接,通过横梁连接平行的两个下弦杆组成平面稳定的骨架,使承台内部构成用于与桩基锚固的结构,如图 6 所示,解决拱肋抵抗弯矩、剪力和扭矩的问题,同时也可减小承台的体积,适应更为复杂的环境,减小桥梁跨度,可降低承台施工的难度和对周围环境的影响。

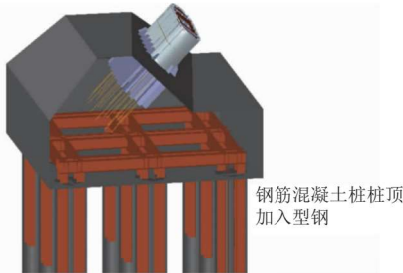


图 6 劲性骨架组合承台及抗推桩示意图

7 型钢混凝土组合抗推桩

桥梁为推力拱结构,桩基直径为 3 m,桩顶将承受巨大剪力,一味地增大桩基直径将导致造价增加、施工困难,本项目创新性地 在钢筋混凝土桩的桩顶加入型钢,以提高桩基抗推能力,保证结构的安全^[5]。

8 骑跨式组合桥台

步道通过现浇混凝土亲水平台与堤岸接顺。亲水平台为厚度 0.75 m 的实心混凝土板,平台下部结构为直径 0.8 m 的钢筋混凝土圆柱墩与直径 1.0 m 的钻(冲)孔灌注桩,平台与墩柱固结,如图 7 所示。

西侧步道通过混凝土梯道与堤岸接顺,固结于主桥桥墩。混凝土梯道为厚度 0.75 m 的变高实心混凝土段,梯道底面形状与主桥钢箱梁外轮廓保持一致,如图 8 所示。

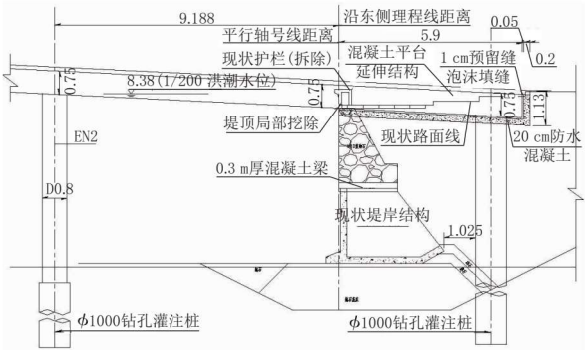


图 7 东北侧梯道立面图

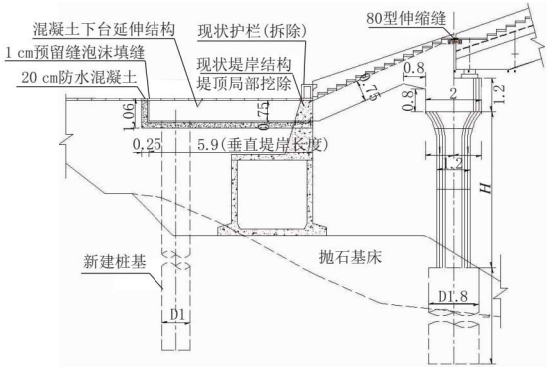


图 8 西南侧梯道立面图

9 多重组合结构受力分析

9.1 计算模型

采用 MIDAS Civil 2019 进行建模分析,并考虑结构的空 间效应。采用板单元模拟主梁及拱肋,并详细地模拟横隔板、内腹板,采用只受拉的桁架单元模拟吊杆,全桥共 7 831 个节点,11 564 个单元。

成桥边界条件如下:

- (1)将拱肋伸出段全部节点与拱轴线、拱座顶面交点处节点刚接;
- (2)将承台底部节点与桩基顶面节点刚接;
- (3)桩基(直径 3 m)采用 M 法进行节点弹性约束;
- (4)边跨梁端的两个支座施加竖向约束,并约束一个支座的横向位移,并设置了节梁端节点局部坐标系;
- (5)采用拱肋与主梁固结位置共节点的方法模拟拱肋固结。

分别对以下几种拱肋组合方式进行全桥受力对比:

方案一:完全不灌注混凝土;

方案二:仅拱脚至拱梁结合处上方第一道横隔板范围内拱肋全断面灌注。

方案三:拱脚至拱梁结合处上方第一道横隔板范围内拱肋全断面灌注,拱梁结合处上方第一道横隔板至第1根吊杆隔板范围内仅在西侧受压区圆端截面内灌注。

方案四:拱脚至拱梁结合处上方第一道横隔板范围内拱肋全断面灌注,拱梁结合处上方全部在西侧受压区圆端截面内灌注。

施工阶段划分见表1。

表 1 施工阶段划分一览表

序号	施工阶段	备注
1	拱两侧节段架设	含拱梁结合段含拱底防撞 STC 层
2	拱底先浇混凝土	全断面灌注拱肋混凝土至拱座上方第 1 道横隔
3~6	拱、梁节段架设	
7	拆除拱临时支撑	
8	灌注拱内混凝土	全部灌注拱内混凝土至指定位置
9~20	对称张吊杆	
21	拆除主梁临时墩	拆除所有临时墩,体系转换
22	二期恒载	

9.2 动力特性

该桥为空间拱梁组合结构,且拱肋为倾斜状、主梁为曲线,结构模态振型复杂,自振频率见表2。

表 2 自振频率计算结果 单位:Hz

方案	振型 1	振型 2	振型 3	振型 4	振型 5
方案 1	0.495	0.737	0.890	1.298	1.746
方案 2	0.534	0.760	0.915	1.354	1.782
方案 3	0.547	0.745	0.911	1.323	1.767
方案 4	0.458	0.666	0.894	1.164	1.694

计算分析表明,结构第一阶振型均为横向位移振型,桥面以下全断面灌注混凝土后结构频率有所增加,桥面以上受压区灌注混凝土结构频率先随着灌注高度的增加而先增加在降低,通过综合比较,最终采用方案3。

9.3 成桥状态结构变形

如表3所列,成桥状态拱肋最大竖向变形出现在拱跨跨中偏南侧;主梁最大竖向变形出现在中跨跨中两侧,为大节段架设累积变形;拱肋最大横向变形出现在拱跨跨中,表现为向西弯曲;主梁最大横向变形出现在中跨,表现为向西变形。

9.4 活载作用下结构变形

人群荷载包络下结构最小竖向变形出现在主梁中跨跨中位置,最大竖向位移出现在拱肋 1/4 跨附近(7#吊杆)表现为上抬;人群荷载包络结构最小横

表 3 成桥状态下结构变形 单位:mm

	拱肋		主梁	
	竖向(max)	横向(max)	竖向(max)	横向(max)
方案 1	54	488	464	27
方案 2	49	488	409	35
方案 3	44	494	376	32
方案 4	21	314	349	11

向变形出现在拱肋 1/4 跨附近(7#吊杆)表现为向东,最大横向变形出现在拱肋跨中位置,表现为向西(见表4)。

表 4 活载作用结构变形

方案	拱肋		主梁	
	竖向(max)	横向(max)	竖向(max)	横向(max)
方案 1	23	182	160	19
方案 2	16	195	110	15
方案 3	18	149	137	13
方案 4	16	137	130	12

9.5 拱脚反力

钢箱拱肋外观纤细且自重小,有利于减小拱脚处的推力,但拱肋提供的刚度有限。在拱肋内灌混凝土可提高刚度,改善上部结构受力,但也增大了拱脚推力,对基础提出更高承载力要求(见表5)。

表 5 恒载下拱脚反力

	纵向推力/kN	竖向反力/kN	拱面内弯矩/(kN·m)
方案 1	29 856	112 378	249 179
方案 2	32 568	121 967	210 383
方案 3	33 255	123 236	207 641
方案 4	38 867	128 330	259 236

10 结 语

通过广州海心桥应用实践表明:斜拱曲梁全固接结构体系和相应的多重组合构造具有良好的受力性能及耐久性。该桥发明的多项和多重组合构造技术在国内外首次应用,取得了良好的社会效益,为大跨度跨江桥梁的建设提供了创新性的解决方案。

参考文献:

[1] 张杰,孙建光.桥梁美学设计方法探讨[J].公路交通技术,2014(1): 150-153.
[2] 和丕壮.桥梁美学[M].北京:人民交通出版社,1999.
[3] 杨勇,胡会勇,乐小刚,等.广州海心桥主桥设计[J].桥梁建设,2023, 53(6):119-126.
[4] 张松涛,乐小刚,胡会勇,等.大跨度城市人行景观桥抗撞能力分析[J].中国市政工程,2022(4):33-37.
[5] 杨勇,杨春山,胡会勇,等.多向荷载作用下超大直径群桩基础方案评价[J].地下空间与工程学报,2023,19(3):973-980.