

株洲清水塘大桥双层钢桁拱桥下部结构设计

蔡梦非, 顾民杰, 吴万忠, 夏睿杰

(西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 结合株洲清水塘双层桁架拱桥工程, 详细分析讨论了主桥下部结构的设计要点, 在水位落差大、阻水率要求高、船舶撞击作用、外形景观美观、拱桥施工工艺等外部条件限制下, 对桥墩桩基承台布置、受力模式、构造细节等进行了深入研究, 介绍了设计的方法和内容, 总结归纳了特大跨径跨江桥梁下部结构设计经验。

关键词: 桥梁下部设计; 基础冲刷深度; 阻水率; 船撞作用力; 桩基布置优化

中图分类号: U44

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)09-0091-04

0 引言

清水塘大桥位于湖南省株洲市, 主桥上跨湘江, 湘江水位涨落差大、泄洪需求高, 且桥位紧邻工业码头, 通航等级高且航线复杂, 对大桥下部结构设计提出较高的要求, 合理的基础形式、合适的标高、以及统筹考虑施工过程的构造设计, 可以有效降低工程造价、减小施工难度、减少对周边环境的影响。

1 工程概况

株洲清水塘大桥跨湘江主桥采用 $L=100+408+100$ m 的双层钢桁架拱桥, 三跨连续结构, 拱脚墩顶设置球钢支座, 上层桥面宽 32 m, 车行道净宽 24.5, 双向 6 车道; 下层布置慢行人非道, 吊杆区净宽 10 m。湘江设计通航标准为 II (3) 级航道 (2 000 吨级船舶), 最高通航水位 41.96 m, 通航净高 10 m, 通航宽度包含码头水域和通航水域, 总宽不小于 377 m。湘江三百年一遇设计水位 44.51 m, 低水位 30.0 m, 主航道河床底标高 22~24 m, 河漫滩标高 30~40 m, 如图 1。

2 下部结构方案比选

2.1 工程地质

拟建桥位出露的岩性为红砂岩, 组成岩性为粉砂岩夹泥质粉砂岩或粉砂岩与泥质粉砂岩互层, 中细砂岩及砂砾岩多以夹层的型式存在, 其中风化带在河床区域直接出露, 岩石结构及层理清晰, 岩质较新鲜, 节理裂隙较发育, 岩体完整性较好, 岩芯钻采芯率较高, 岩芯呈柱状。土、石类别为软石, 土、石等

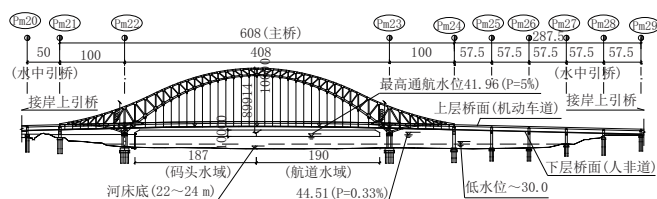


图1 清水塘大桥立面布置(单位:m)

级为 IV 级。层顶高程为 18.37~45.89 m, 厚度为 21.50~37.00 m。中风化红砂岩天然湿度单轴抗压强度标准值 9 MPa。

2.2 主桥下部结构方案比选

2.2.1 桥墩基础冲刷与基础形式选择

根据本桥总体设计, 主桥主墩、边墩和水中引桥桥墩位于湘江河道内, 河床中风化岩层露出, 可作为桥梁基础的持力层, 桥墩基础可以选择扩大基础形式, 同时该岩层抗压强度较低, 根据当地工程经验, 也可采用桩基础形式。考虑到湘江流域泄洪需求高、泄洪流量较大、汛期含沙量高等特点, 按照《公路工程水文勘测设计规范》(JTG C30—2015) 对扩大基础桥墩冲刷深度进行初步估算, 水利参数如下:

(1) 本工程设计河床底标高 24 m, 设计常水位标高 35.0 m, 设计洪水位标高 43.51 m;

(2) 设计流速 V_0 : 2 m/s;

(3) 频率为 P% 的设计流量 Q_p : $P=1\%$, 23 900 m^3/s ;

(4) 多年平均含沙量: 0.09 kg/m^3 , 汛期含沙量 $\rho=0.62 kg/m^3$ 。

主墩冲刷后最大水深约 20 m, 冲刷深度至现状河床底约 10 m, 冲刷深度较深, 若采用扩大基础, 会对基础稳定有较大风险, 因此水中桥墩采用桩基础。

2.2.2 桥墩基础埋深比选

根据株洲水文站观测资料, 湘江每年三至七月为

收稿日期: 2021-12-16

作者简介: 蔡梦非(1989—), 男, 工学学士, 金融硕士, 工程师, 从事桥梁设计和咨询工作。

丰水期,多发生洪水,十至十二月为枯水期,全年水位高差超过 10 m。设计时对低桩承台和高桩承台方案进行了比较。

(1)低桩方案优点:

承台与桩基低于低水位,水位涨落不影响桥梁景观。施工时由钢围堰控制施工条件,受水位涨落影响小。

(2)低桩方案缺点:

施工需采用钢围堰、承台封底混凝土,措施费用较高^[1]。

(1)高桩方案优点:

在河床地形复杂区域具有优势,桥梁下部整体施工措施费用较低,钢护筒桩基施工工艺成熟。

(2)高桩方案缺点:

承台位置较高,受船舶撞击或在地震作用下对桩基不利。施工过程受水位影响较大^[2],尤其承台施工措施较为复杂。

可见两种承台标高方案各有优劣,但本工程从总投资规模和经济效益考虑,主桥仅跨越通航水域,仍有部分引桥布置于水中,共有 7 个桥墩处于泄洪过水断面中。根据桥位处水利规划,本工程实施前百年一遇过水断面河道宽 835 m、面积 14 712 m²,经计算高承台布置阻水率 5.2%;低承台布置阻水率 3.7%。

按照《湖南省涉河桥梁水利技术规定》的规定,长株潭城区阻水率不大于 3.5%,湘江干流城市段不大于 5%,综合考虑阻水率、船舶碰撞和施工工艺等因素,最终设计选择将水中桥墩承台埋入现状河床底。现场需对现状河床爆破开挖后,采用钢围堰施工下部结构。

2.3 主墩钢围堰方案

主墩采用矩形双壁无底钢围堰围护结构,使承台桥墩处于干作业环境进行施工。通过查阅并统计桥位处近十年的水位,高于 36 m 的比率仅占 0.81%,钢围堰顶标高设计值取 37 m,底标高与封底混凝土底齐平,总高 20 m,共分为 4 节。

围堰壁厚 1.5 m,在承台间预留 1 m 施工空间,内壁和外壁板厚均为 8 mm,并设置水平对撑、水平斜撑、水平围檩、竖梁等加劲措施。

3 下部结构防撞设计

3.1 船舶撞击作用计算方法比较

综合考虑拟建桥梁所在航段船舶通航实际状

况、船型规划情况及港口规划和航道发展规划等,根据《内河通航标准》(GB 50139—2014)本工程船舶撞击力标准及防撞方案研究的通航代表船型如表 1 所示。

表 1 通航代表船型尺度表

船型	长/m	宽/m	设计吃水/m
3 000 t 级货船	95	16.2	3.2
2 000 t 级驳船队(1 顶 2 驳)	182	16.2	2.6

船舶撞击力的计算方法包括经验公式计算法、动力数值模拟法、有限元瞬态动力分析法,本工程通过对国内外规范经验值的比较,并参考本工程船撞专题研究中有有限元方法计算的结果如表 2 所示,最终确定合理的撞击力设计值。

表 2 设计船舶撞击力取值比较

桥墩	防撞船型 DWT	设防速度 /(m·s ⁻¹)	横桥向撞击力设计值/MN			
			公规	铁规	AAS- HTO	有限元
计算主桥主墩	3 000 t 级	4.30	19.6	10.0	28.3	36.5
主桥边墩	2 000 t 级	2.50	/	4.7	13.4	16.4
引桥桥墩	2 000 t 级	1.45	/	2.8	7.8	9.6

注:(1)表中规范简称为:《公规》——《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)《铁规》——《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)AASHTO——美国 AASHTO 规范(8th Edition,2017/09)

(2)表中“/”代表规范未给出设计值,宜采取专项论证。

可见,AASHTO 规范的设计值最接近有限元方法模拟得到的结果,可以作为工程设计的近似估算方法。但是,AASHTO 规范的经验公式只规定了横桥向设计值,纵桥向设计值可根据《公规》经验值规律和《铁规》经验公式的计算结果,取横桥向设计值的 0.5~0.8 倍。

3.2 桥墩构造措施

由于湘江水位的大幅涨落差,并且因阻水率将承台埋入河床底,导致水中桥墩立柱高度较高,在船舶撞击作用时,虽然主桥边墩和引桥桥墩在柱顶设置系梁形成了框架结构,但在横桥向巨大的撞击作用下柱底仍会产生较大弯矩设计值,此外在顺桥向作用下,根据桥墩的空间杆系有限元模型分析结果显示,被撞击的单根立柱要承担 70%的作用,相邻立柱只能分担 30%,仅按上述常规构造设计的立柱底两个方向弯矩值都会超过截面承载力设计值。

如图 2 所示,本工程在两立柱底部之间设置了横向连墙,连墙顶标高略高于低水位但低于常水位,

不影响桥梁景观;连墙顺桥向宽度小于立柱宽度,不影响阻水率;但连墙的设置大幅增加了桥墩横桥向的框架刚度,也有效减小了立柱的计算高度,使得撞击作用下柱身和柱底内力都明显改善,如图3所示,在横向撞击力16 400 kN作用下,柱底最大弯矩由92 475 kN/m减小至59 586 kN/m。

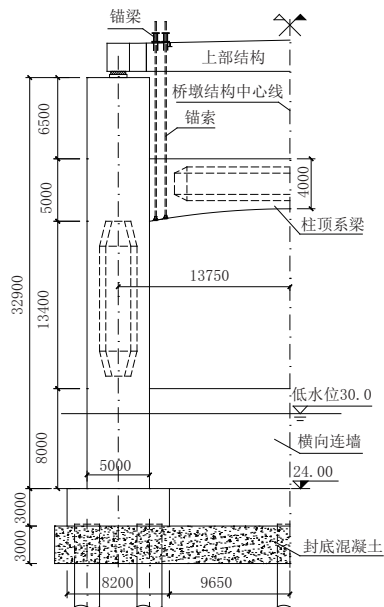


图2 主桥边墩构造横桥向立面(单位:mm)

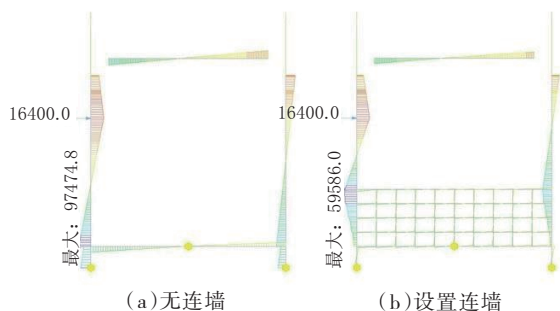


图3 横桥向撞击作用下主桥边墩柱底弯矩值对比(单位:kN/m)

3.3 主桥防撞系统

主桥防撞系统包含主动防撞(技术防撞)和被动防撞(物理防撞)。主动防撞由监控中心、业务现场及应急中心三部分组成预警与碰撞取证系统,系统对过往船舶、工程船舶、靠离泊船舶实施有效监控,防止船舶撞桥事件的发生。

3 000 t级船舶撞击主墩最危险的情况为压载最高通航水位撞击和满载最低通航水位撞击。主墩可能遭受船舶撞击的部位为墩身,整体的撞击范围为26.00 m~49.96 m。

根据桥位处水位变化和桥墩自身结构,被动防撞建议主墩采用浮式释能附体防撞设施,由钢板组成,内部通过型材、板材、肘板等组成骨架,内外部通过焊接形成一个整体附着在桥墩外侧,并填充吸能

材料。防撞设施的保护机理是通过释能附体自身的结构变形屈曲和压溃等来吸收船舶撞击能量,同时改变船撞力的分布,以起到缓冲和消能的作用,以最大限度的减少桥墩、船舶和防撞设施的损伤。

其他水中引桥桥墩自身结构抗撞能力较低,且处于非通航水域,可采用浮体系泊拦截体系进行拦截,由浮体、拦截索、拦截锚链、锚碇沉块等组成,可随水位上下浮动,以阻止失控船舶的撞击。

4 主墩构造设计

4.1 主墩构造

清水塘大桥主桥主墩根据桥梁景观和总体计算采用实体空心墙式墩,如图4所示,桥墩平面呈哑铃形,迎水面采用圆形设计,顺桥向宽8 m,横桥向长34.4 m,总高21 m,标准墩壁厚1 m,顶部支座平台设防浪溅构造和泄水孔。主墩承台尺寸为13.6 m×41.1 m,厚度4 m,桩基嵌入基岩,采用大直径钻孔桩。

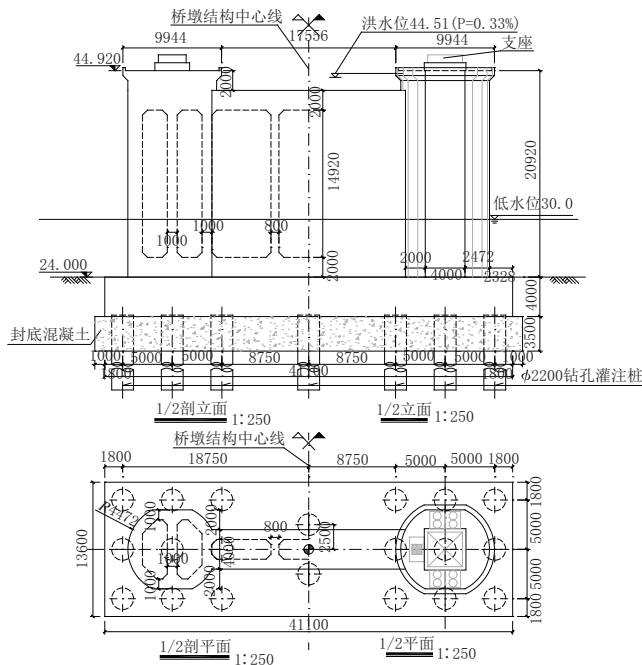


图4 主桥主墩构造(单位:mm)

4.2 主墩与承台有限元模型

主墩桩基根数、布置和桩径的选择与上部支反力在桥墩中的传力机理密切相关,因此将整个主墩与承台建立实体有限元模型,分析比较在标准组合工况竖向支反力作用下,两种不同桩基布置的桩顶反力情况,一种为桩基平面均匀布置,另一种为桩基集中布置于支座下方区域。模型基本参数如下:

- (1)混凝土弹性模量 32 500 MPa,容重 25 kN/m³;
- (2)建模桩长 1 m,桩底平面按固结约束;
- (3)单个支座竖向力 85 000 kN。

4.3 计算结果与桩基比选

通过对计算结果主墩立剖面竖向应力的比较(见图5),虽然本桥主墩较高,但支反力经墩身传递后仍集中作用于支座整下方区域,支座正下方桩顶中心竖向压应力 5.4 MPa、中间桩 3.7 MPa。综合考虑到施工过程中承台需单独承受桥墩恒载,同时桩基在钢围堰抗浮设计中发挥有利作用^[3](见表3),结合嵌岩桩单桩承载力及桩身承载力,最终确定主墩采用 20 根 2.2 m 钻孔桩,桩基集中布置于支座正下方区域,左右各 9 根,承台中心设置 2 根,支座正下方桩顶中心竖向压应力 4.8 MPa、中间桩 4.6 MPa。

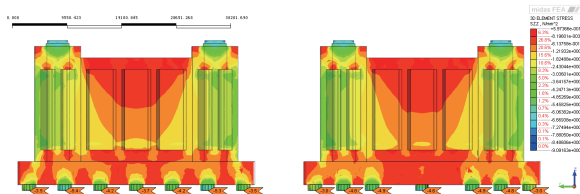


图5 主墩立剖面竖向应力对比(单位:MPa)

表3 主墩钢围堰抗浮安全系数比较

安全系数	1.8 m 桩径	2.0 m 桩径	2.2 m 桩径
18 根桩	0.97	0.99	1.02
20 根桩	0.99	1.02	1.05
22 根桩	1.02	1.05	1.09

注:围堰设计水深 20.5 m,钢围堰自重按 4 kN/m²计,桩基钢护筒与封底粘结力按 0.1 MPa 取值。

4.4 桥墩构造与施工措施

主桥施工拟在主桥三角区支架安装后,进行拱肋、边跨钢桁架吊装,边墩采取临时预降,北岸桁架梁主墩支座往主跨预偏 600 mm^[4]。在后续施工流程吊装拱肋时,逐步在梁端进行配重^[5]。针对这两项关键施工工艺,主墩支座平台设置局部扩头构造,预留施工过程中支座的顺桥向滑动预偏值和施工设备操作空间。边墩系梁端部作局部加强处理,可供施工过程中作为张拉锚点传递临时压重。

在施工图设计阶段充分考虑施工临时措施、钢围堰等主要施工工艺,在永久结构设计中作适当处理,可以进一步提高工程全过程的经济性并降低实施过程中的风险^[6]。

5 结 语

通过对清水塘大桥主桥下部结构设计方法的介绍,为今后类似特大跨径桥梁设计中总结了如下经验:

(1)水位落差较大时,水中桥墩设计应综合考虑基础冲刷、阻水率、桥梁景观、施工方法等限制要求,建议将承台埋入河床底,并可在洪水位以上丰富外形设计,减少对泄洪的影响;

(2)三级及以上等级的内河航道船舶撞击作用设计值《公规》并未给出,可参考 AASHTO 规范中的计算方法确定顺桥向撞击力,横桥向撞击力可根据规范经验折减取值;

(3)大吨位支座反力在桥墩中并不一定均匀扩散至承台底,桩基布置方案应根据传力路径合理选取。此外桥墩构造细节应充分考虑特大桥的施工过程,永久构造若能为施工临时措施提供便利将进一步提高全过程的经济性。

参考文献:

- [1] 蒋建军.深水库区大跨径连续刚构桥梁主墩基础设计[J].四川建筑,2019,39,188(4):178-180.
- [2] 王新丰.松花江特大桥深水围堰施工方案比选[J].工程建设与设计,2012,291(7):184-186.
- [3] 杨红,任回兴,贺茂生,等.苏通大桥承台封底混凝土与钢护筒间握裹力的试验研究与应用[J].公路,2008(10):8-13.
- [4] 刘丹,程多云,王元鑫.大跨钢桁拱桥施工技术与创新[J].中国港湾建设,2015,35,214(12):57-61,70.
- [5] 谭康荣.武广铁路客运专线东平水道桥三主桁钢桁拱架设的技术创新[J].铁道建筑,2010,431(1):71-74.
- [6] 蔡梦非.桥梁工程设计师终身责任风险及职业责任保险的研究[D].上海:同济大学,2020.

(上接第 77 页)

(4)桥梁采用先整体吊装钢拱圈,后现浇拱脚混凝土固定拱脚的施工工法,避免了先固定拱脚钢拱圈后拼装对接困难的问题。

(5)钢拱脚埋入混凝土部分焊接 ML15 材质的 M22×200 圆柱头焊钉,并设置多层钢筋网局部加强,保障了拱脚局部应力较大情况的受力安全与良

好固接。

参考文献:

- [1] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [2] CJJ 69—95,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
- [3] TB 10002—2017,铁路桥涵设计规范[S].