

大跨径连续刚构桥的单薄壁桥墩设计

孙 巍

(上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200232)

摘 要 连续刚构桥因墩顶梁柱固结, 温度效应成为设计重点关注的问题, 为降低温度效应的影响, 下部结构通常采用柔性结构形式, 即在墩身结构形式的设计上, 大都采用双薄壁结构形式墩身, 其抗推刚度并不按整体截面进行计算, 而是分别由两个独立截面抗推刚度叠加, 相对而言墩身柔性好。嘉华嘉陵江大桥为超大跨径连续刚构桥, 其主要特点是跨大、墩高、悬臂施工法。为解决同类桥梁中出现的常见病害, 同时在结构形式上有所创新, 需对桥墩的综合性能进行充分分析。本文就嘉华嘉陵江大桥(超大跨径预应力砼连续刚构桥)的单薄壁桥墩设计做简要介绍, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 大跨径预应力砼箱梁; 单薄壁桥墩; 墩身强度; 稳定验算; 有限元分析

中图分类号: U442

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)09-0001-03

连续刚构由于温度效应, 一般采用高墩的结构形式, 如果墩身不够高, 可以把桩基按柔性地基设计, 以减小下部结构的综合抗推刚度^[1]。墩身大都采用双壁结构形式, 在一定条件下(如墩身特别高, 有一定厚度), 桥墩也可采用独立墩身。

1 工程概况

嘉华嘉陵江大桥是一座主跨为 252 m 的预应力砼连续刚构桥, 桥长 528 m, 全桥宽 $17.8 \times 2 = 35.6$ m; 边跨为 138 m。桥梁为双幅桥面, 桥梁宽度为 0.3 m 防护栏 + 1 m 人行道 + 15 m 机动车道 + 0.5 m 防护栏 + 2 m 中央分隔带 + 0.5 m 防护栏 + 15 m 机动车道 + 1 m 人行道 + 0.3 m 防护栏。

2 柔性墩形式的确定

连续刚构墩柱刚度相对于梁体的刚度比例对两者的弯矩分配起着决定作用, 同时主梁的温度应力、收缩及徐变直接与连续刚构的墩柱的柔性相关^[2], 因此, 设计优先考虑的问题为: 通过连续刚构梁柱刚度比优化, 选用合理的桥墩形式和构造尺寸。

温度内力取决于桥墩的抗推刚度, 桥墩越柔, 温度内力越小。常规连续刚构桥梁适用于高墩(柔性墩)的场合; 如果墩身不够高, 可以把桩基按柔性地基设计, 以减小下部结构的综合抗推刚度。在墩身结构形式设计上, 大都采用双壁结构形式的墩身, 其抗推刚度并不按整体截面进行计算, 而是分别由两个独立截面抗推刚度叠加, 相对而言墩身柔性好^[3]。同时可以适当减小双壁墩墩顶处梁的负弯矩峰值, 其抗弯刚度按双壁形成的合成截面进行计算, 相对也比较大, 不仅可以保持桥面的平整性, 也可以减小悬臂施工时变形。以往双壁墩身大都采用箱形截面的结构形式, 也有采

用工字形截面和矩形截面(在跨径相对较小的连续刚构场合)^[4]。但超大跨径连续钢构桥墩越来越多地采用单箱室的截面形式。

在一定条件下(如墩身特别高, 有一定厚度), 桥墩也可采用独立墩身。例如美国 Houston 运河桥, 就采用比较罕见的单箱室截面的刚性墩身形式^[5]。嘉华大桥桥墩设计结合地形地貌, 考虑到桥墩较高(约 60 m)的有利条件, 对墩柱形式进行方案比较。即单排薄壁墩方案与双排柔性薄墩方案(见表 1)。

表 1 墩柱形式比较表

| 桥墩形式 | 主跨 | 边跨 | 墩身宽度 | 备注 |
|------|-------|-------|-------------------|-------|
| | | | 墩宽 8 m, 厚 0.8 m | |
| 单排墩 | 252 m | 138 m | 墩宽 6.5 m, 厚 0.8 m | 边跨 |
| | | | 墩宽 6.0 m, 厚 0.8 m | 150 m |
| | | | 厚度为 2.5 m, | 比较 |
| 双排墩 | 252 m | 138 m | 中距为 8 m | |

结合跨径组合, 经初步比选, 单排墩选用 138+252+138 m 跨径组合, 墩宽 6.5 m, 墩厚 0.8 m。双排墩选用 138+252+138 m 跨径组合, 墩厚为 2.5 m, 两薄壁墩中距为 8 m。两方案均具有性能优良、可操作性强的特点, 且造价工期接近。但采用单墩方案更具优势, 主要表现在以下几方面: (1) 单墩墩顶偏心矩比双壁墩墩顶偏心矩要小得多, 使得墩身控制截面的受力更为有利, 墩顶钢筋更为宽裕, 有利于混凝土的浇筑; (2) 在抗船只或漂流物撞击和稳定方面, 单墩更为有利, 且单墩的稳定性更好; (3) 单墩施工模板用量相对较小, 无需临时支撑, 且施工简便; (4) 风力对于最大悬臂时的施工安全起着重要影响。单墩矩形空心截面为闭

合截面，其抗扭刚度大，有利于抵抗嘉陵江河谷的局部风力影响。

虽然因抗推刚度稍大，单墩梁体根部温度内力产生的弯矩比双壁墩大，经验算单墩弯矩峰值折减近10%，可认为单墩（高墩）力学性能仍表现为较柔，梁体实际弯矩与双壁墩相近，且温度内力所占全部内力的比重仍较小，可以认为无论单墩（高墩）还是双壁墩受温度影响的力学性能接近。另外，箱型薄壁单墩的造型简洁，与连续刚构桥的整体风格协调一致。单墩形式使嘉华大桥避免了与嘉陵江上已有连续刚构桥梁的雷同感。因此，设计采用单薄壁墩方案。

3 基础构造

主桥桥位处覆盖层厚度变化较大：通航孔桥桥位及其以北覆盖层较薄；通航孔桥以南近250 m范围内覆盖层从几米到二十多米不等，覆盖层为人工填土、亚粘土层和卵石层；南岸斜坡段几乎无覆盖层。基岩为泥岩、泥质砂岩、砂质泥岩和砂岩。

基础设计的基本原则为：

1. 考虑桥梁工程长期运营的耐用性，基础设计要适应河势及冲刷变化条件。

2. 满足主体结构对基础强度、稳定性要求。

3. 满足施工组织及临时荷载的要求。

根据地质报告的资料及重庆地区成熟经验，基础持力层采用弱风化砂岩，设计比较了钻孔灌注桩基础和扩大基础两种形式。扩大基础由于埋深较深，开挖及围护工程量巨大，在技术经济比较中不占优势。

钻（挖）孔灌注桩是国内外桥梁基础中经常采用的形式，应用范围也越来越广泛，积累了许多成功经验。近年来，随着国内施工技术、工艺与设备的不断改进与提高，钻孔灌注桩的桩径、长度及单桩极限承载力得到了很大提高。很多大桥的工程桩径达3.0 m以上，最大单桩极限承载力达60 MN以上。

在比较了直径1.8 m、2.5 m和3.0 m的挖孔灌注桩基础后，综合考虑施工工期、地质条件和经济效益等因素，主墩基础的挖孔桩基直径为2.5 m（24根），双幅整体式承台，承台平面尺寸34.4×19.8 m，厚6.5 m。边墩基础的钻孔桩基直径为1.8 m（12根），双幅分离式承台，承台平面尺寸12.6×7.2 m。弱风化基岩为设计持力层。承台埋入河床以下。经验算，基础能承受船撞（三级航道，顺桥向650 kN，横桥向800 kN）及洪水压力（流速5 m/s）等荷载作用。

4 桥墩构造

4.1 构造比较

桥墩构造的优化着重于墩柱尺寸的比较，在确定薄壁单墩构造时，对桥墩厚度作了比较，即8 m、6.5 m、

6 m厚桥墩（见表2）。

表2 桥墩厚度比较表

| | 8 m厚桥墩 | 6.5 m厚桥墩 | 6 m厚桥墩 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| 恒载+预应力 M (kN·m) | M (kN·m) | M (kN·m) | M (kN·m) |
| 主梁（墩顶） | 1 229 402 | 1 281 466 | 1 383 003 |
| 主梁（跨中） | 187 065 | 197 581 | 202 795 |
| 桥墩 | 451 751 | 282 915 | 254 835 |

以上三种方案结构强度和刚度均满足设计要求，但6.5 m厚桥墩综合性能较好。最终采用7.0 m厚的薄壁单墩方案是为了满足施工阶段的结构强度和刚度的要求。

4.2 桥墩构造

主墩采用高强度C55砼材料。其顺桥向为宽度7.0 m，横桥向（不包括分水尖）宽9.8 m，壁厚分别为0.8 m和1.0 m。上下游分水尖的设置可以起到防撞及导流作用，分水尖与桥墩形成整体。为保持水压力的内外平衡，墩身设泄水孔；墩身内设置横隔板，确保整体稳定。桥墩墩身截面顺水流方向采用流线型，侧面设置用橡胶护舷以减缓可能发生的撞击效应，提升桥墩的抗撞击能力；同时可以有效地隔离水上漂浮物及船舶，避免其撞击桥墩。经验算，桥墩能够承受船舶的局部撞击作用。（见图1）

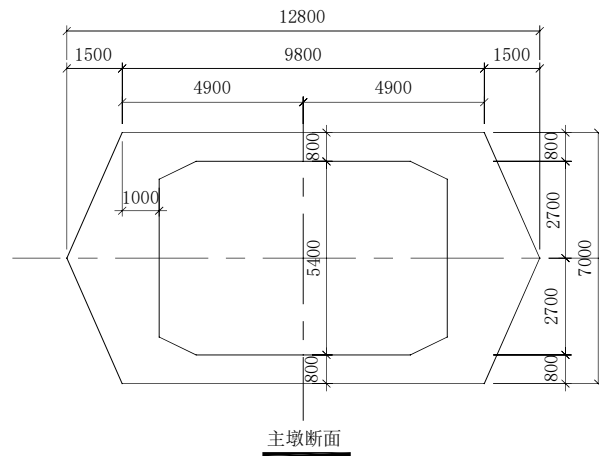


图1 主墩断面图

5 墩身强度和稳定验算

施工方法为悬臂浇筑法（其悬臂时最大悬臂长度为125 m），设计中对最大悬臂状态的最不利工况的稳定性进行了静力分析。

5.1 荷载计算

1. 恒载：已浇节段（4%不均匀性）；浇筑节段（相差半个节段）；挂兰（含挂兰、模板以及其他临时施工设备）≤1 200 kN（设计控制值）；施工荷载（30T不平衡性）。

2. 风荷载: 桥址处 10 m 高度处 10 分钟平均最大风速为 26.7 m/s, 换算到 70 m 高度处 41 m/s。

桥址处 10m 高度处 10 分钟平均最大风速为 26.7m/s, 换算到 70 m 高度处:

$$U_{70}=U_{10} \times (70/10)^{0.22}=41 \text{ m/s}$$

由于纵桥向迎风面积较小, 纵桥向风荷载不控制设计, 可以忽略, 仅计算横桥向风荷载。

迎风面积为:

$$A = \int_0^{121} (4.2 + 0.0006557x^2) dx = 895.4$$

形心位置为:

$$x_0 = 121 - \int_0^{121} (4.2 + 0.0006557x^2) x dx \div A = 47.42$$

$$y_0 = (4.2 \times 121 \times 4.2 \div 2 + \int_0^{121} 0.0006557x^2 (4.2 + 0.0006557x^2 \div 2) dx) \div A = 4.257$$

根据《公路桥涵设计规范》, 横桥向风压: $W=K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot W_0=1940N/m^2$ 尽管最大悬臂状态 (最不利状态) 有一定的延续时间, 我们可以根据气候条件对施工时间作相应调整, 以减小施工阶段的最不利工况下荷载概率, 因此不平衡风荷载最不利工况按单侧为 100% 设计风载, 另一侧为 50% 设计风载的组合, 作为控制结构设计是非常安全的 (其出现的概率已非常小)。同时, 考虑两幅桥的影响, 横向风力取一幅桥的 1.5 倍。

5.2 荷载组合

1. 施工状态: 恒载 (4% 不均匀性、相差半个节段) + 挂兰 +30T 不平衡荷载。

2. 最大悬臂大风状态: 恒载 (4% 不均匀性) + 挂兰 + 横向风载 (产生的竖向风力)。

5.3 墩身强度、稳定验算

荷载组合 $M=207\ 459 \text{ kNm}$, $N=165\ 000 \text{ kN}$, 考虑 $P \cdot \Delta$ 效应 (8%), $M=224\ 055 \text{ kNm}$

安全系数 20.8, 桥梁满足强度和稳定的要求。

6 薄壁空心墩的有限元分析

大桥的桥墩采用的是薄壁空心墩, 因此在计算桥墩两端部分 (0.5R ~ 1.0R) 的应力时需要考虑固端干扰力的影响。以下将对两种结构形式的桥墩加载计算墩底部位的应力, 这两种结构形式为: 墩底设实心段、墩底不设实心段。

顺桥向加载时: 轴力 $P=2.407e8N$, 弯矩 $M=5.278e8 N \cdot m$, 剪力 $Q=1.502e7N$

横桥向加载时: 轴力 $P=2.386e8N$, 弯矩 $M=3.971e8 N \cdot m$, 剪力 $Q=7.240e6N$

6.1 顺桥向荷载的计算

1. 墩底设置实心段: 经计算, 此变化段顶面最大拉应力在受拉侧薄壁外边缘, 为 0.986 MPa; 最大压应力位于受压侧薄壁内边缘, 为 21.89 MPa; 此变化段底面最大拉应力在受拉侧薄壁外边缘, 为 3.33 MPa; 最大压应力为 16.8 MPa。

2. 墩底不设置实心段: 经计算, 此变化段顶面最大拉应力在受拉侧薄壁外边缘, 为 2.037 MPa; 最大压应力位于受压侧薄壁内边缘, 为 22.557 MPa; 此变化段底面最大拉应力在受拉侧薄壁外边缘, 为 5.754 MPa; 最大压应力受压侧薄壁外边缘, 为 29.404 MPa。

6.2 横桥向荷载的计算

1. 墩底设置实心段: 经计算, 此变化段顶面最小压应力在受压较小侧薄壁外角点, 为 2.16 MPa; 最大压应力位于受压较大侧薄壁内边缘, 为 14.09 MPa; 此变化段底面最大拉应力在受拉侧薄壁外角点, 为 0.845 MPa; 最大压应力受压侧薄壁内边缘, 为 11.68 MPa。

2. 墩底不设置实心段: 经计算, 此变化段顶面最小压应力在受压较小侧薄壁外角点, 为 1.8967 MPa; 最大压应力位于受压较大侧薄壁内边缘, 为 14.54 MPa; 此变化段底面最小压应力在受压较小侧薄壁外角点, 为 1.69 MPa; 最大压应力位于受压较大侧薄壁内边缘, 为 19.04 MPa。

7 结束语

嘉华嘉陵江大桥因其超大跨径、高墩及悬臂施工的结构特点, 尽管桥墩采用了单薄壁墩的结构形式, 其力学性能仍表现为柔性墩的特点, 梁体实际弯矩与双壁墩相近, 且温度内力所占全部内力的比重仍然较小, 可以认为无论单墩还是双壁墩受温度影响的力学性能接近。同时, 单薄壁墩无论在施工最不利工况还是成桥后, 以及防撞性能方面, 其稳定性能更好; 施工效率更高, 施工质量更宜保证。今后, 单薄壁墩在超大跨径连续钢构桥 (高墩) 领域会有越来越广阔的应用空间。

参考文献:

- [1] 吴晓如. 高墩大跨度连续刚构桥结构设计: 以桑龙高速公路为例 [J]. 城市建筑, 2024(05):18-20.
- [2] 李旭, 邢应远. 高墩大跨预应力连续刚构桥上部结构施工关键技术 [J]. 建筑机械, 2024(05):109-111.
- [3] 毛远文, 任科. 某高墩大跨连续刚构桥主墩优化设计研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2024(04):75-77.
- [4] 马健. 温度对大跨径连续刚构桥受力性能的影响分析 [J]. 西部交通科技, 2024(03):126-128.
- [5] 张林冲, 庄超, 武学莉. 连续刚构桥墩柱设计优化及计算分析 [J]. 交通世界, 2024(03):125-127.