

单主缆悬索桥 A 形桥塔创新设计

曹发辉¹, 刘振宇¹, 黄焕然², 罗天¹, 谢光辉¹, 李定有³

(1.四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041; 2.南宁纵横时代建设投资有限公司, 广西 南宁 530219;
3.中铁四局集团第五工程有限公司, 江西 九江 230000)

摘要:柳州双拥大桥为国内首座大跨地锚式单主缆悬索桥, 创新性地采用了独特的非相似等腰三角形截面所形成的 A 形钢塔。对该桥塔结构构造和受力行为进行的系统研究表明: 该桥塔结构形式的景观效果和受力性能良好; 塔底采用承压板-拉杆形式的钢混连接结构具有受力明确、施工便利的优点, 塔顶需重点解决不同于双缆悬索桥的索鞍巨大竖向力向 2 个塔柱有效传递的构造问题。

关键词: 悬索桥; 单主缆; 钢塔; A 形桥塔; 钢混连接

中图分类号: U443.38

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)04-0075-03

1 概述

柳州双拥大桥主桥为主跨 430 m 的单主缆钢箱梁悬索桥, 加劲梁采用连续梁结构, 跨径布置为 40 m+430 m+40 m, 桥面宽度 38 m, 梁高 3.5 m。主缆跨中垂跨比为 1/9。吊索设于中跨, 纵向间距 10 m, 靠近桥塔区域的 5 对吊索采用“人”字形吊索以提高结构的抗扭性能, 其余位置均为垂直单索面。

柳州双拥大桥桥型布置见图 1。

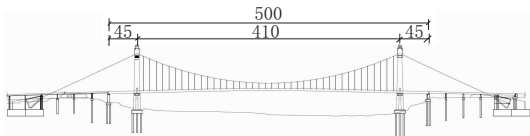


图 1 柳州双拥大桥桥型布置(单位:m)

柳州双拥大桥位于柳州市城区, 考虑城市桥梁对景观的特殊要求, 采用了造型独特的单索面结构, 具有桥型美观、行车视野开阔, 节省锚碇材料等优点。以往单缆悬索桥多采用小跨径的自锚式悬索桥, 该桥为国内首座地锚式的单主缆悬索桥, 且为世界第一跨径。对于传统的双主缆悬索桥, 一般都采用门形框架式的桥塔, 桥塔造型相对固化单一, 而对应单主缆的特点, 桥塔可选择的造型则多种多样。本桥采用了景观效果良好的 A 形桥塔, 该桥实景如图 2 所示。

2 桥塔结构构造

2.1 塔身构造

为适用于单主缆悬索桥并与周围环境融合, 达



图 2 柳州双拥大桥实景

到建筑美学的视觉效果, 该桥首次采用了非相似三角形所形成的 A 形空间扭面桥塔, 桥塔采用全钢结构。

如图 3 所示, 塔高 104.811 m, 塔柱夹角 36.1° , 桥塔高 77.749 m, 设 2 道横梁, 塔柱和横梁均为钢结构, 塔柱底部截面为横桥向宽度 4.859 m、顺桥向宽度 9.842 m 的等腰三角形; 到塔顶主索鞍区域, 尺寸渐变为横桥向宽度 7.628 m、顺桥向宽度 7.0 m 的等腰三角形, 整个塔身呈非相似三角形所形成的空间变截面。主缆通过位置设置圆孔, 主索鞍下部横梁高度为 6.638 m。索塔塔身划分为 15 个节段, T0 节段为塔柱承台连接节段, 设置承压板和拉杆与承台连接; T1、T2 为下塔柱节段; T3 为横梁连接段; T4~T12 为上塔柱节段; T13 为索鞍下承压节段, 节段之间壁板与加劲板均采用焊接连接。塔柱内侧壁板厚度为 42 mm; 外侧壁板为扭曲板件, 在 T0~T4 节段板厚为 36 mm, T5~T13 节段板厚为 28 mm, 采用板肋加劲; 除 T0、T1 节段外其余节段均设置 3 道横隔板。普通横隔板厚 16 mm, T3 节段上下 2 道板厚 24 mm, T13 节段板厚 20 mm。横梁采用变截面箱形, 截面高度为 3~5 m, 宽度为 4.88 m。顶底板钢板厚度均为 32 mm,

收稿日期: 2022-08-04

作者简介: 曹发辉(1978—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事桥梁设计工作。

腹板厚度为 28 mm, 加劲肋为 24 mm × 280 mm; 横梁划分为 5 个节段, 在横梁上设置拉压支座及抗风支座等加劲构造。

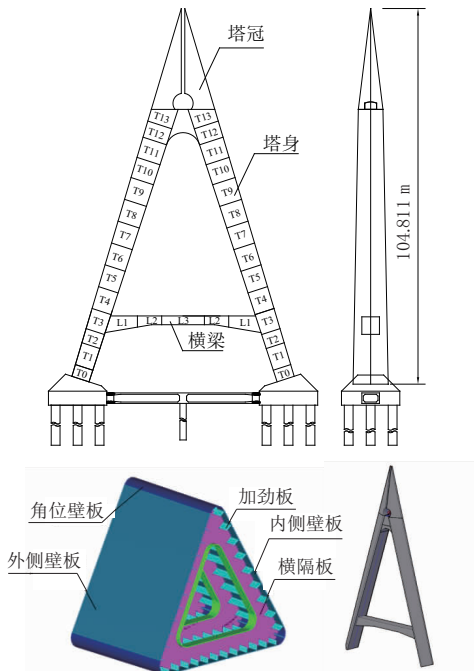


图 3 空间扭面 A 形塔(单位:m)

2.2 塔底构造

钢塔柱与承台的连接是关系到塔柱内力传递至基础的关键构造, 比较常用的处理方式为埋入式^[1-2], 即将钢塔面板进行大范围开洞并穿入钢筋以形成 PBL 剪力键, 并视具体情况在面板上设置剪力钉, 将钢塔底节段埋入承台内部。这种方式可有效确保钢塔柱与承台的连接, 但由于钢塔柱埋入承台内的长度较深, 大量钢筋需穿入钢板开孔中, 会给施工带来诸多不便; 另外以钢板为界将承台混凝土分为内外两部分, 也在一定程度上削弱了混凝土结构的整体性, 因此需开设较多的混凝土流通孔, 但如此一来又削弱了钢板的整体性。

由于钢塔为小偏心受压构件, 在巨大轴压力的作用下, 全截面基本处于受压状态, 只在某些极端情况下会出现截面局部小范围受拉的情况。因此可考虑采用承压板-拉杆形式的钢混连接结构来简化结构, 方便施工。如图 4 所示, 具体构造为在塔柱底部设置厚 70 mm 的承压钢板, 在塔柱内外侧周围设置抵抗塔底弯矩的钢拉杆并直接埋入承台, 拉杆采用 40CrNiMoA 高强度合金钢材质, 直径为 42 mm。安装完后对拉杆施加预应力, 每根拉杆张拉力为 386 kN。为使塔柱底部承压板将压力均匀传递到承台并保证施工精度, 承台顶部也预埋 1 块厚 70 mm 的承压钢板, 钢板下方设置开孔板作为剪力键。上下承压板之间

采用防滑摩擦面涂装, 通过摩擦力来平衡水平剪力。

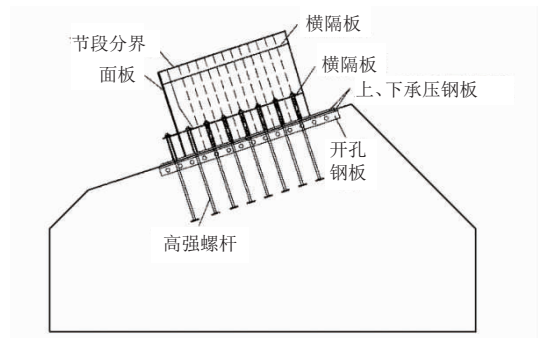


图 4 塔底钢混结合段

通过采用此简单的拉压组合式结构, 既保证了钢塔与混凝土承台之间作用力的有效传递, 又避免了埋入式钢混连接结构施工工序烦杂、结构受力不佳的缺点。

2.3 塔顶构造

与常规的双索面悬索桥主索鞍正对塔柱中心的特点不同, 单主缆悬索桥采用 A 型桥塔时, 索鞍下方巨大竖向力需要通过横梁间接地传递给塔柱^[3], 因此须通过合理的板件设计来保证竖向力流向塔柱中心有效的传递, 另一方面还需考虑各钢结构板件的施焊空间和施工操作的可行性。为此, 采用了如下的塔顶构造:

- (1) 以靠内侧塔柱面板厚 42 mm 的平面直板作为主要受力板件, 塔柱外侧厚 28 mm 的曲板作为次要受力板件;
- (2) 索鞍下方采用厚 70 mm 的承压钢板, 以完成上部荷载的初步扩散;
- (3) 上横梁高 5 m, 内部采用与主索鞍格栅相对应的纵横交错的钢格室, 钢格室大小约为 0.7~0.8 m, 板件厚度 36 mm, 以满足施焊空间和操作空间;
- (4) 在塔柱内部平行于内侧面板的方向增设 1 块竖板, 竖板与 2 个侧板进行连接, 并与内侧面板间设置对应于横梁内部板件的栅格, 以利于荷载向塔柱 2 个侧板传递;
- (5) 塔顶荷载向下扩散过渡一定距离后, 内侧竖板及其与内侧面板之间的板件渐变为面板的 T 形加劲肋, 应力进一步扩散到整个断面后再渐变为常规截面的一字形加劲肋。

采用以上构造成功地实现了单个索鞍的巨大竖向力向 2 个塔柱有效传递的目的。

塔顶构造立面图、平面图见图 5、图 6; 塔柱断面图见图 7。

3 A 形空间扭面桥塔结构力学行为分析

3.1 塔顶集中力的分配与力流传递机制

基于 Ansys 有限元分析软件, 建立桥塔全板壳三

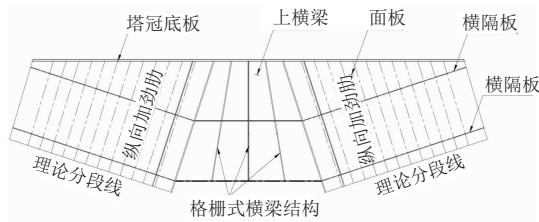


图5 塔顶构造立面图

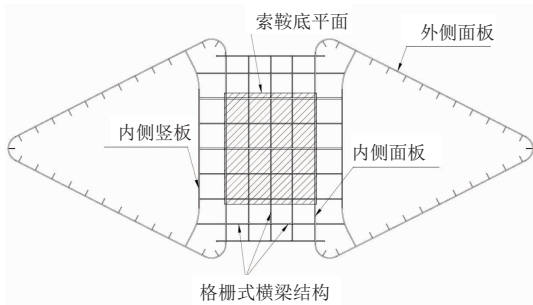


图6 塔顶构造平面图

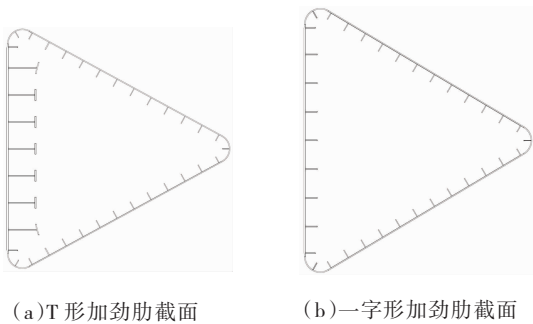


图7 塔柱断面图

维有限元模型(见图8),分析其在塔顶承受1.2万t竖向力作用下的力流传递路径。分别以塔柱三角形截面的3个顶点为测点,提取各顶点沿塔高的竖向应力计算结果。

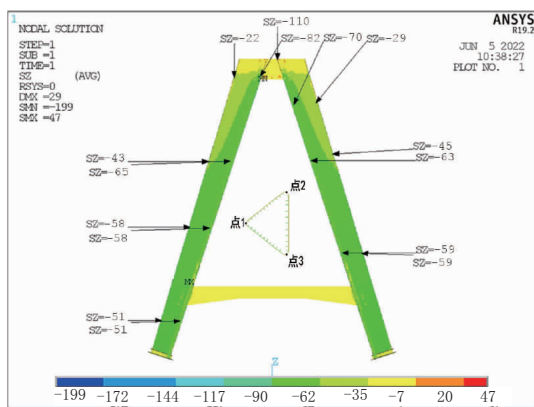


图8 桥塔板壳有限元分析

塔柱关键点竖向应力计算结果见图9。

由应力云图和塔柱3个角点竖向应力沿塔柱高度方向的变化规律可知,在竖向压力作用下,由于角点1离加载区域较远,塔顶附近区域角点1的应力水平低于角点2与角点3,但经过索鞍下方横梁的应力调整,从塔顶向下40m范围内,各横截面应力的

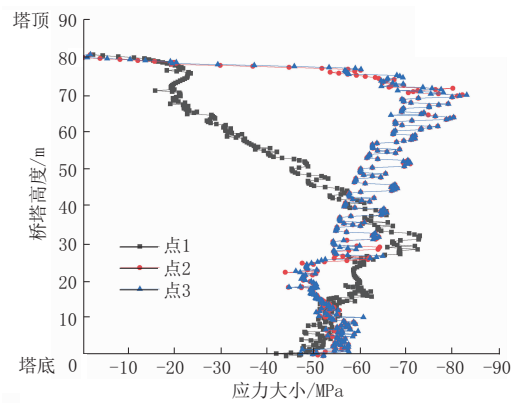


图9 塔柱关键点竖向应力计算结果

分布逐渐均匀,3个角点的应力水平差距逐渐减小。以上有限元分析表明塔顶部位内侧板件受力远大于其他板件,故采用三角形截面比常规的矩形截面更合理,可以减少除内侧板件外其他3块板件的材料浪费。非相似等腰三角形截面所形成的塔柱侧板扭曲度仅为2.5cm/m,经计算对桥塔受力影响可忽略不计,也不增加施工难度。

3.2 A形空间变截面桥塔的塔柱受力分析

常规的桥塔塔柱截面变化规律为纵、横向尺寸均逐渐增加。但本桥存在2个问题:(1)由于下塔柱较矮,纵横向尺寸由塔顶至塔底逐渐增加会导致下塔柱与横梁及基础形成的框架刚度过大,从而导致温度次内力较大;(2)桥塔造型不够美观,缺乏作为城市桥梁的景观协调性。

为此研究了塔柱截面沿塔高变化规律形式对桥塔结构受力的影响,在保持塔顶截面相同的情况下,保持塔底截面面积不变,分别设计塔柱截面从上到下纵横向尺寸均增加的A形相似三角形渐变截面桥塔和从上到下纵横向尺寸变化率不同的非相似三角形的A形空间扭面桥塔,建立2种桥塔的有限元模型,分析其在静力工况下的力学行为。

经计算,在汽车活载作用下,A形空间扭面钢塔塔顶最大纵向位移为85.48mm,A形相似渐变截面桥塔的塔顶最大纵向位移为93.44mm;A形空间扭面桥塔塔底应力为-45.8MPa,A形相似渐变截面桥塔的塔底应力为-56.3MPa。对比可知,A形空间扭面桥塔的纵向刚度更大,汽车活载引起的应力水平更低。

在温度荷载作用下,A形空间扭面桥塔塔底温度次应力为31.4MPa,A形相似渐变截面桥塔的塔底温度次应力为58.9MPa;对比可知,A形空间扭面桥塔的温度次应力大幅降低,改善幅度达46.7%。

(下转第85页)

表 3 桥面板控制截面强度计算结果

荷载组合	钢筋应力 / MPa	容许值 / MPa	裂缝宽度 / mm	容许值 / mm	是否
主力	107.6	210	0.125	0.20	满足
主加附	161.2	270	0.183	0.24	满足

考虑刚度折减后的列车静活载竖向挠度、工后徐变结果如表 4 所示,满足规范要求。静活载梁端转角最大为 0.86%*crad*,小于 2%*o*的规范限值。

表 4 线形控制验算结果 单位:mm

计算项目	边跨变形	挠跨比	中跨变形	挠跨比
静活载竖向挠度	-11.9	1/3 304	-27.6	1/2 178
容许挠跨比		1/1 500		1/1 500
工后徐变	-7.5		-4.2	
容许值		10		12

注:表中位移向上正。

7 结 论

本文对城市轨道交通钢混结合连续梁设计及关

键技术研究,主要得出以下结论:

(1)采取不同措施对改善负弯矩桥面板受力影响不同。顶升落架、支点双结合措施效果最好;正弯矩压重、采用抗拔不抗剪连接件效果次之;桥面板分段浇筑效果较差,可与正弯矩区压重措施配合使用;采用预制桥面板效果并不理想;施加预应力效果较好,但使得桥面板受力复杂,钢束次内力对正弯矩区产生不利影响,不建议作为首选的措施。实际工程设计中可根据需要选用若干种组合措施,以达到理想的控制效果。

(2)(40+60+40)m 钢混结合连续梁各项指标均能满足规范要求,在轨道交通高架中采用本类型桥梁合理可行,可供同类桥梁设计参考。

参考文献:

[1] 聂建国,陶慕轩,聂鑫,等.抗拔不抗剪连接新技术及其应用[J].土木工程学报,2015(4):9.
 [2] TB 10091—2017,铁路桥梁钢结构设计规范[S].
 [3] GB/T 51234—2017,城市轨道交通桥设计规范[S].

 (上接第 77 页)

由以上分析可知,采用具有纵横桥向不同截面变化率的 A 形空间扭面桥塔,受力相对于相同截面变化率的桥塔更加合理。纵桥向尺寸从塔顶至塔底逐渐增加可以保证桥塔纵向刚度,抵抗施工和运营过程的不平衡荷载,也可减少施工阶段索鞍顶推的次数;桥塔横向为一框架结构,当下塔柱较矮时温度次内力较大,横向尺寸从上至下变小可以减小框架侧向刚度(本桥位于 6 度地震区,受地震影响较小),从而大幅减少温度次内力。同时空间变扭面桥塔的景观效果良好,呈现“横看成岭侧成峰,远近高低各不同”的视觉效果,既有巍峨挺拔之雄壮,又具轻盈纤细之秀美,是适合于宽桥面、矮下塔柱的较为理想的城市悬索桥桥塔形式。

4 结 语

柳州双拥大桥为世界最大跨度的单主缆悬索桥,位于柳州市区。对该桥适用于单主缆特点的 A 形非相似等腰三角形截面桥塔构造及其受力进行的分析,可以对类似城市桥梁的设计起到参考和借鉴的作用。

参考文献:

[1] 刘蕾蕾,余强,邱毅,等.钢箱刚架系杆拱桥拱脚钢混结合段构造设计研究[J].公路交通技术,2021,3(37):78-83.
 [2] 崔冰,孟凡超,冯良平,等.南京长江第三大桥钢塔柱设计与加工[J].中国铁道科学,2005(3):42-47.
 [3] 林智敏,蒋劲松.柳州双拥大桥关键结构设计[J].世界桥梁,2016,4(182):1-5.