DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.030

外倾式矮塔斜拉桥墩塔设计实践

李春
（广西交通设计集团有限公司，广西 南宁 530029）

摘要：崇左市崇左大桥为一座(105＋190＋105) m＝400 m外倾式桥塔PC矮塔斜拉桥，墩塔轮廓呈双手托举造型。该桥受到通航及起终点标高限制，为实现桥梁景观造型，在结构设计上采用了塔墩梁固结体系、双肢实体桥墩、钢箱混凝土桥塔等关键技术。为探求墩塔的力学性能，运用Midas/Civil有限元软件建立了全桥的杆系模型，并采用Midas FEA有限元软件对塔墩梁结合部实体结构进行数值模拟。分析结果表明：桥梁结构选型合理、结构受力性能与经济指标良好。对外倾式桥塔斜拉桥墩塔结构进行了有益的探索。

关键词：外倾式矮塔斜拉桥；双肢实体桥墩；墩塔设计；力学性能

1 工程概况

广西崇左大桥是一座城市标志性景观桥梁，该桥为外倾式桥塔PC矮塔斜拉桥，跨径布置为(105＋190＋105) m＝400 m，桥面宽39 m，主梁根部梁高8 m，跨中梁高3.5 m，梁高按1.8次抛物线变化。桥塔景观呈双手托举造型(图1)，桥梁造型优美。但该桥在设计中面临着桥梁跨度大、桥面宽、桥面高程受限、结构受力复杂等技术难题。

针对该桥的技术特点，该文从结构体系选型、墩塔

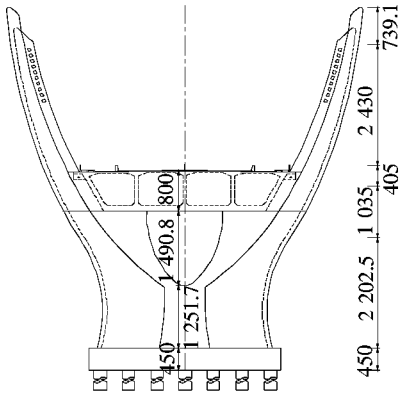


图1 桥塔立面构造图(单位：cm)

为沥青铺装的1.3～1.8倍。

(2) 主梁顶板厚度变化对其温度梯度应力影响很小，且板厚变化值有限，故刚构桥设计中不建议通过改变顶板厚来改善主梁温度梯度应力。

(3) 一定厚度范围内的沥青铺装，主梁温度梯度应力随铺装层厚度增加而减小，厚度增加1 cm其正温差工况温度梯度应力减少0.4 MPa左右，负温差工况温度梯度应力减少0.2 MPa左右。

(4) 沥青铺装层厚度增加，其温度梯度应力减少值较其自重应力增加值要大，单从温度梯度应力方面考虑，较厚的沥青铺装可使主梁应力状态更优，综合考虑施工方便、经济合理等因素，沥青铺装以8～9 cm为宜。

参考文献：

[1] 姚玲森.桥梁工程[M].北京：人民交通出版社，2008.
[2] 武晓宇，杨永清.混凝土连续刚构桥主梁在温度梯度下结构效应研究[J].四川建筑，2018(4).
[3] 李葳.国内外规范关于竖向温度梯度的规定研究[J].中国铁路，2017(9).
[4] 李金云.大跨组合连续梁桥不同温度梯度模式的效应研究[J].公路交通科技：应用技术版，2018(8).
[5] 庞振宇，徐秀丽，邢世玲.城市混凝土曲线梁桥温度场及温度效应分析[J].中外公路，2016(1).
[6] 孙金，冯小青，唐焱.高温沥青摊铺时钢－混叠合梁桥温度场有限元分析[J].中外公路，2018(3).
[7] JTG D60－2015 公路桥涵设计通用规范[S].
[8] JTG 3362－2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

收稿日期：2018－12－28

作者简介：李春，男，大学本科，高级工程师.E－mail:1176036554@qq.com

结构设计、塔墩梁结合部计算分析几个方面对该桥的关键设计技术进行叙述。

2 结构体系选型

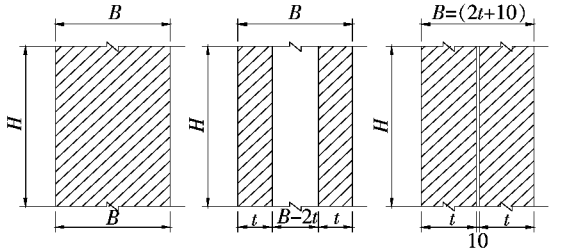
矮塔斜拉桥是从连续梁桥、连续刚构桥发展演变而来的一种独特的桥梁形式。通过矮塔与斜拉索分担主梁所承受的荷载，从而达到降低梁高的目的，因其力学性能优良，经济指标良好，该桥型近年来得到了快速发展。崇左大桥受到道路起终点标高、两岸桥下道路及通航条件的限制，采用矮塔斜拉桥方案有利于降低梁高，桥梁主墩高约 27 m。在设计方案比选阶段，分别对塔梁固结、设置支座和塔墩梁固结两种结构体系进行了全桥分析计算。计算结果表明：采用塔墩梁固结体系，桥梁跨中长期挠度较连续梁体系小18.6%，车道荷载作用下主跨跨中挠度较连续梁体系小36.8%。塔墩梁固结体系无需采用大吨位支座，后期维护成本较低。但该体系桥墩墩高较矮，使得该体系对温度影响较为敏感，同时墩塔结构尺寸受到桥梁外形限制，塔墩梁结合区受力极为复杂，设计难度较大。综合考虑桥梁的正常使用性能、后期维护成本等因素，采用塔墩梁固结体系优于连续梁体系。

3 桥墩结构设计

崇左大桥采用塔墩梁固结体系，墩高较矮，桥墩抗推刚度与体系对温度的敏感性呈正相关趋势。为减少降温工况对结构内力的影响，该桥创造性地提出双肢实体桥墩设计，即把实体桥墩沿顺桥向对称分为两部分，两肢之间留 10 cm 缝隙。利用 Midas/Civil 有限元软件，分别对采用整体式实体桥墩、箱形桥墩以及双肢实体桥墩的桥梁建立空间杆系单元模型，对全桥结构进行有限元分析，探求 3 类桥墩结构与体系温度响应的关系。3 种桥墩侧立面示意如图 2 所示，桥墩截面尺寸详见表 1。

图 3 为 3 类桥墩抗推刚度计算值。可见在结构尺寸一致的情况下，整体式实体桥墩抗推刚度最大，箱形桥墩次之，双肢实体桥墩最小，且远小于前两者。计算结果表明：采用双肢实体桥墩能显著地降低桥墩抗推刚度，且随着结构尺寸的增加，抗推刚度增长率最低。该特点可在不过多增加桥墩抗推刚度的情况下，大幅增加桥墩承载能力与结构稳定性，于设计非常有利。

桥墩抗推刚度与整体降温工况下主梁跨中弯矩关系，如图 4 所示。



(a) 整体式实体桥墩 (b) 箱形桥墩 (c) 双肢实体桥墩

图 2 桥墩侧立面示意图(单位：cm)

表 1 桥墩尺寸参数

整体式实体桥墩		箱形桥墩		双肢实体桥墩	
B/m	t/m	B/m	t/m	B/m	t/m
3.8	—	3.8	1.1	3.9	1.9
4.0	—	4.0	1.1	4.1	2.0
4.2	—	4.2	1.1	4.3	2.1
4.4	—	4.4	1.1	4.5	2.2

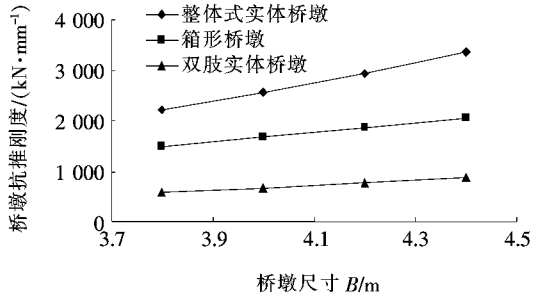


图 3 桥墩抗推刚度计算结果

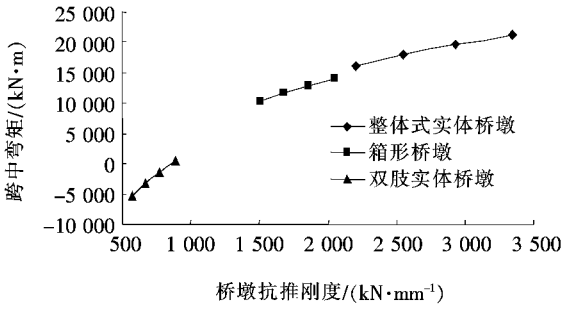


图 4 桥墩抗推刚度与主梁跨中弯矩的关系

桥墩抗推刚度与整体降温工况下墩底弯矩的关系，如图 5 所示。

图 4、5 反映了桥墩抗推刚度与降温工况下主梁跨中与桥墩墩底内力的关系。可以看到：在降温工况下，随着桥墩抗推刚度的下降，主梁跨中弯矩、桥墩墩底弯矩也逐渐减小。可见，采用双肢实体桥墩可显著改善该桥的受力性能。

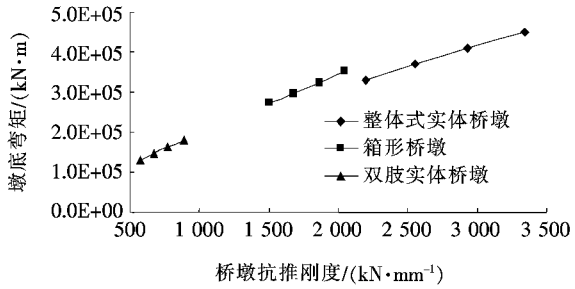


图 5　桥墩抗推刚度与墩底弯矩的关系

双肢实体桥墩应结合桥墩施工阶段的承载能力、施工阶段稳定性、运营阶段承载能力、抗震性能以及构造要求等指标来确定截面尺寸。经迭代试算，崇左大桥单肢桥墩宽取 1.9 m。

4　桥塔结构设计

崇左大桥桥塔采用 Q345 钢结构制作，钢箱内部设置栓钉剪力键，并设置对拉钢筋，内部空间填筑 C50 混凝土，形成钢箱混凝土结构。考虑钢塔内部混凝土受力开裂、收缩影响，塔内混凝土抗弯惯性矩按 15% 折减，混凝土承压截面按全断面考虑。

钢塔内填筑混凝土，增加桥塔整体刚度，减少桥塔变形。计算表明：在车辆与人群荷载作用下，钢箱混凝土桥塔顶部水平位移较钢桥塔减少 6.7 cm，约降低 38%。

桥塔为偏心受压构件，内部填筑混凝土后，不仅解决了钢结构失稳问题，同时钢结构应力也迅速下降。钢箱混凝土桥塔内部填筑混凝土约 1 900 m^3，混凝土部分投资仅占桥梁建安费的 0.7%，利用较小的投入即可显著提高桥塔结构承载能力，经济效益良好。钢箱混凝土桥塔与钢桥塔控制断面的应力对比见表 2。

表 2　桥塔应力比较

部位	钢箱混凝土桥塔/MPa	钢桥塔/MPa
塔底部内侧 1	−52.7	−208.2
塔底部内侧 2	−60.8	−225.3
塔底部外侧 1	−16.5	27.5
塔底部外侧 2	3.3	48.3
塔中部内侧 1	−79.1	−220.1
塔中部内侧 2	−83.3	−233.7
塔中部外侧 1	11.3	34.4
塔中部外侧 2	20.9	52.6

注：表中数值为基本组合应力包络值，压应力为负，拉应力为正。

桥塔采用外倾造型，利用混凝土自重在塔底产生的弯矩，抵消斜拉索的水平分力在桥塔底部产生的弯矩。在成桥状态下，与钢结构桥塔相比，钢箱混凝土塔底横桥向弯矩减少 39 537.5 kN·m，约降低 46%。

该桥采用钢箱混凝土桥塔，其受力性能优良，经济指标良好，是较为合理的结构布置形式。

5　塔墩梁结合部设计

该桥采用塔墩梁固结体系，桥墩、桥塔通过主梁 0# 块结合形成整体，共同参与结构受力。其中桥墩与主梁 0# 块的结合形式与一般连续刚构桥相同，即桥墩钢筋伸入 0# 块内部，并满足一定的构造要求即可。而主梁 0# 块与桥塔的连接，涉及两种材料相互结合，结合部位受力较为复杂，桥面以下 0# 段外侧设置塔梁连接段，连接段底部设置承压钢板，并在承压钢板上设置竖向预应力，以确保承压板始终处于受压状态，主梁 0# 块钢筋伸入连接段钢箱内，并与连接段钢板焊接，0# 块横向预应力伸入连接段钢箱内锚固，确保连接可靠（图 6）。

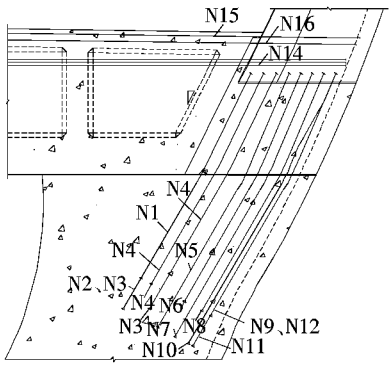


图 6　塔墩梁结合部预应力钢束布置示意

在结构计算方面该结合部位采用空间梁单元模型已不能准确地模拟，因此需利用 Midas FEA 软件对该部位建立实体单元模型（图 7）进行分析计算。考虑到主梁荷载的传递，依据圣维南原理，将主梁 1# ～2# 块也用实体单元建立模型，主梁荷载通过刚臂传至主梁单元上。桥塔荷载也通过刚臂传至桥塔单元。预应力荷载采用预应力钢筋单元模拟。

利用以上实体单元模型，对桥塔与桥墩结合面进行分析。在最不利荷载组合工况下（恒载＋车道荷载＋人群荷载＋制动力＋整体降温＋负温梯＋支座沉降），墩塔结合部混凝土应力计算位置见图 8，详细结果见表 3，表中数据压应力为负，拉应力为正。

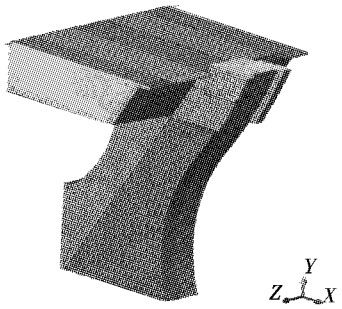


图 7 塔墩梁结合部实体有限元模型

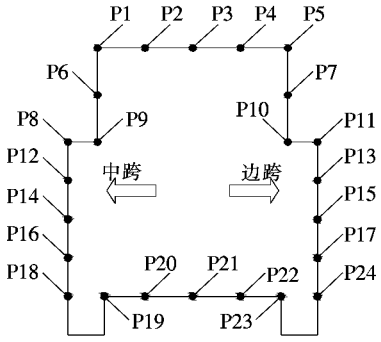


图 8 墩塔结合部混凝土应力计算位置示意

表 3 墩塔结合部混凝土应力计算结果 MPa

位置	竖向应力	第一主应力	第三主应力
P1	−1.42	1.22	−2.83
P2	−1.19	1.07	−2.98
P3	−1.40	0.93	−2.94
P4	−1.21	1.12	−2.91
P5	−1.14	1.43	−3.03
P6	−3.31	1.62	−4.85
P7	−3.33	1.07	−4.19
P8	−2.82	0.36	−3.56
P9	−4.23	1.75	−4.94
P10	−4.01	0.93	−4.36
P11	−1.98	0.24	−2.45
P12	−4.03	0.49	−4.64
P13	−3.03	0.39	−3.45
P14	−3.90	0.29	−4.47
P15	−2.78	0.23	−3.12
P16	−3.85	0.50	−4.24
P17	−2.89	0.36	−3.13
P18	−3.13	0.28	−2.68
P19	−4.05	0.23	−4.54
P20	−4.55	0.48	−4.92
P21	−3.19	0.50	−3.69
P22	−4.29	0.39	−4.21
P23	−2.25	0.24	−2.44
P24	−1.95	0.42	−2.11

由表 3 可知：在最不利荷载组合下，桥塔底部混凝土仍处于全截面受压状态，混凝土边缘压应力为1.2～4.3 MPa。混凝土边缘大部分区域的主拉应力在0.2～1.6 MPa，混凝土边缘主压应力2.1～4.9 MPa，结合部混凝土主拉应力与主压应力均满足规范的要求。

6 结论

依托工程实例，详述了崇左大桥外倾式桥塔的设计关键技术，得到以下结论：

（1）通过优化桥墩布置形式，创造性地提出了双肢实体桥墩结构体系，显著地提升了桥梁的力学性能。

（2）外倾式桥塔采用钢箱混凝土结构，利用较小的投资，不仅解决了钢结构易失稳的问题，同时也有效地增强了桥塔的刚度与承载能力。

（3）塔墩梁结合部位受力复杂，通过空间实体单元模拟分析，较准确地反映了墩塔结合面处的应力状态。同时计算结果表明：在最不利荷载组合作用下，墩塔结合面始终处于全截面受压状态，这与设计目标相一致。

参考文献：

[1] 陈从春，周海智，肖汝诚.矮塔斜拉桥研究的新进展[J].世界桥梁，2006(1).

[2] 陈从春.矮塔斜拉桥设计理论核心问题研究[D].同济大学博士学位论文，2006.

[3] 熊飞，陈从春.矮塔斜拉桥与普通斜拉桥经济特性比较研究[J].中外公路，2016(1).

[4] 潘可明.东莞水道大跨矮墩连续刚构桥的设计实践[J].特种结构，2008(5).