

斜拉桥双曲线桥塔“横撑一对拉”设计受力分析*

王达, 系祖俊

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 盐坪坝大桥为大跨度钢—混组合梁斜拉桥, 桥塔采用双曲线造型, 下塔柱向外倾斜, 中上塔柱向内倾斜, 塔柱重力作用线与塔柱轴线不重合, 在自重和临时荷载作用下会出现不良应力及较大偏位, 需设置临时横撑和对拉措施。文中采用被动撑与主动撑结合, 利用有限元计算软件模拟桥塔施工阶段, 以应力控制为目标对临时横撑进行设计计算, 分析塔柱的应力和位移, 并对受轴压作用的钢管进行稳定性分析。结果表明, 合理设计临时横撑及对拉措施是防止塔柱出现拉应力、塔柱横向位移过大的有效方法。

关键词: 桥梁; 斜拉桥; 桥塔; 横撑; 对拉; 应力分析; 稳定性分析

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)06-0099-03

组合梁斜拉桥以其良好的力学性能和优美的造型已成为大跨度桥梁具有竞争力的桥型, 曲线形桥塔更能体现桥梁优美的造型。由于曲线形桥塔塔柱横向倾斜, 塔柱节段自重及施工临时荷载与塔柱轴线不重合, 塔柱会产生较大横向弯矩, 若不采取有效措施, 在施工阶段塔柱根部易出现拉应力及较大偏位, 当拉应力超过容许值时索塔有开裂风险。为改善索塔在施工过程中的受力状态, 可在下塔柱设置对拉力、中上塔柱设置临时横撑, 临时横撑与塔柱固结, 形成框架结构, 以平衡横桥向弯矩, 增强塔柱的稳定性。

1 工程概况

宜宾市盐坪坝长江大桥为双塔空间双索面组合梁斜拉桥, 跨径为(193+480+193) m, 边跨为预应力砼梁, 中跨为边钢箱组合梁。桥塔总高 182.922 m, 桥面以上高 128.6 m。桥塔采用空心箱形断面, 下塔柱尺寸由 8.5 m(横桥向)×11 m(顺桥向)变化到 6 m×11 m, 塔壁厚 1.6 m; 中塔柱尺寸由 6 m×11 m 变化到 6 m×7 m, 塔壁厚度由 1.6 m 变化到 1.3 m; 上塔柱尺寸为 6 m×7 m, 塔壁厚 1.3 m。桥塔采用 C55 砼, 为预应力砼结构, 在塔柱内部设置 5 组 19 φ^{15.20} 预应力钢束。索塔采用曲线钻石形, 塔柱轮廓由 2 段圆弧线组成, 下塔柱外倾, 中上塔柱内倾, 圆弧线在下横梁处相切; 下塔柱外侧半径 162.875 m, 内侧半径 159.322 m; 中上塔柱外侧半

径 376 m, 内侧半径 370 m。

2 “横撑一对拉”设计原则

2.1 索塔应力控制

下塔柱在施工期为外倾悬臂结构, 塔柱内侧受拉, 通过在下塔柱设置对拉力, 在减小下塔柱根部拉应力的同时, 提供更多压应力储备; 中上塔柱横撑与对拉设计的关键在于中塔柱底部截面应力控制, 对于双向倾斜桥塔, 在 2 段圆弧相切处截面外侧将产生最大拉应力。考虑自重、施工临时荷载等因素对索塔的影响, 采取如下拉应力控制原则:

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y_x + \frac{M_y}{I_y} y_y - \frac{N}{A} \leq KR \quad (1)$$

式中: σ 为控制截面受拉边缘计算拉应力; M_x 、 M_y 分别为顺桥向、横桥向自重及施工临时荷载引起的弯矩; y_x 、 y_y 分别为顺桥向、横桥向截面中性轴到受拉边缘的距离; I_x 、 I_y 分别为塔柱根部横桥向、顺桥向截面惯性矩; N 为自重、施工临时荷载在塔柱根部引起的轴力; A 为塔柱根部控制截面面积; K 为安全系数; R 为砼极限拉应力。

2.2 索塔变形控制

根据设计要求, 墩高 $H \leq 30$ m 时, 其倾斜度不得大于 $H/1\,500$, 且不大于 20 mm; $H > 30$ m 时, 倾斜度不得大于 $H/3\,000$, 且不大于 30 mm。

2.3 “横撑一对拉”设置原则

因索塔刚度较大, 索塔自重和施工荷载所产生的变形量较小, 横撑与对拉设计原则应以应力控制

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878072)

为主、变形控制为辅。临时横撑选用钢管横撑,采用被动横撑与主动横撑结合,并辅以对拉措施,改善桥塔应力。在塔柱出现拉应力前设置横撑与对拉,保证能抵消下一节段不良应力的影响。

3 钢管横撑设计位置及分析计算

采用有限元计算软件 MIDAD/Civil 建立索塔模型(见图 1),共计 30 个爬模施工阶段,按照施工方案建立索塔施工阶段,模拟索塔施工过程。



图 1 桥塔有限元模型

3.1 下塔柱对拉力设计分析

下塔柱根部砼截面应力是整个下塔柱施工的关键控制因素。在施工到 5[#] 节段时,下塔柱根部截面内侧产生 0.58 MPa 拉应力,9[#] 节段(下塔柱顶)拉应力达到 2.0 MPa。根据相关规范,C55 砼的轴心抗拉强度设计值 $f_{td}=1.89 \text{ N/mm}^2$,应在施工完 4[#] 节段时设置对拉力。4[#] 节段施工完成后,在距离承台顶 24 m 处设置 6 000 kN 对拉力,以抵消附加弯矩对索塔的不利影响。以塔底截面应力和当前节段位移为参考,变化情况见表 1。

表 1 下塔柱应力及位移变化对比

工况	下塔柱底应力/MPa		位移/mm	
	内侧	外侧	4 [#] 节段	塔顶
无对拉力	0.58	-1.80	0.90	10
设对拉力	-0.60	-0.89	-1.57	10

下塔柱设置对拉力后,根部位置处截面内侧由 0.58 MPa 拉应力减小为 0.60 MPa 压应力,且内外侧应力接近;下塔柱施工完成后,根部截面拉应力显著减小,由 1.95 MPa 减小至 0.70 MPa,可由预应力钢筋和普通钢筋克服,最大压应力有所减小;而 4[#] 节段横桥向累计位移由外倾 0.90 mm 减小至内倾 1.57 mm,下塔柱顶累计位移 10 mm,可满足线形要

求,施加对拉力可达到预期效果。

3.2 中塔柱横撑设计分析

钢管横撑以保证塔柱根部截面拉应力满足设计要求为原则。同一横撑需选用 2 根尺寸规格相同的钢管,通过在 2 根钢管之间设置水平型钢平联保持钢管稳定。

横撑安装后,上部新浇砼自重和临时荷载对横撑处截面应力影响较大。以新安装横撑位置处截面应力为控制目标确定下一横撑位置高度,并以此类推确定其余横撑位置。中塔柱根部应力变化见图 2。由图 2 可知:施工至 16[#] 节段时,根部截面外侧出现拉应力;施工至 18[#] 节段时,塔底截面产生 0.36 MPa 拉应力。根据索塔应力控制原则,将横撑设置在 16[#] 节段。

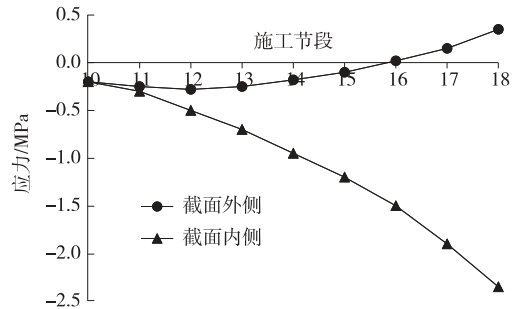


图 2 中塔柱根部应力曲线(无横撑)

在避让爬模工作空间的前提下,在 16[#] 节段距离下横梁中心 40.6 m 高度处设置第 1 道钢管横撑。考察在后续节段施工时第 1 道横撑位置处截面应力变化情况,确定第 2 道横撑位置(见图 3)。由图 3 可知:施工至 20[#] 节段时,第 1 道横撑位置处截面外侧出现拉应力;施工至 22[#] 节段时,拉应力达到 0.7 MPa。因此,在施工完第 20[#] 节段后,距离下横梁中心 55.3 m 处设置第 2 道钢管横撑。

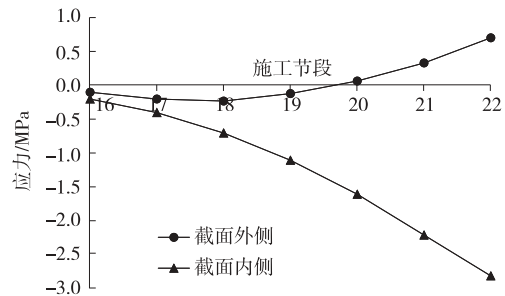


图 3 第 1 道横撑截面应力曲线

以上述横撑布置为原则,在后续施工节段继续考察新增横撑处截面应力情况,提出中上塔柱横撑设计方案。在 24[#] 节段距离下横梁中心 80.5 m 处

设置第3道横撑;在28#节段(塔柱合龙段)距离下横梁中心102.5 m处设置第4道横撑,并进行顶推。经有限元计算模拟,分析顶推前后控制截面应力和附加弯矩数值,确定顶推力大小为3 000 kN。

通过建立中上塔柱钢管横撑施工阶段有限元模

型,对中上塔柱控制截面应力变化和塔顶横向位移进行对比分析,结果见表2。由表2可知:中上塔柱设置临时横撑措施后,下塔柱由拉应力变为压应力,内侧压应力储备增大;中塔柱内外侧均受压,上塔柱顶内外侧应力差减小,塔顶位移减小至13 mm,满

表2 桥塔应力及位移变化对比

工况	中塔柱底应力/MPa		中塔柱顶应力/MPa		上塔柱顶应力/MPa		塔顶位移/mm
	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	
无横撑	4.1	-10.1	0.76	-7.65	-0.8	-3.4	-65
设横撑	-2.6	-6.8	-3.00	-3.90	-1.7	-3.0	-13

足线形要求。

3.3 钢管横撑稳定性验算

在塔顶节段施工完成后,各横撑轴向压力如下:第1道横撑111.4 MPa,第2道横撑91.6 MPa,第3道横撑75.8 MPa,第4道横撑9.7 MPa。为确保钢管横撑设置效果及施工安全性,对钢管刚度及整体稳定进行验算分析。以第1道横撑为例,钢管的惯性矩为:

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$$

钢管截面回转半径为:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{326\ 512.5}{403.9}} = 28.4 \text{ cm}$$

钢管长细比为:

$$\lambda = \frac{L}{i} = 57.8 \leq [\lambda] = 150$$

由轴心受压构件稳定系数表查得钢管稳定性系数 $\varphi = 0.891$,根据GB 50017—2017,轴压构件稳定性验算公式为:

$$\frac{N}{\varphi A} = \frac{\sigma}{\varphi} = 125 \text{ MPa} \leq f = 215 \text{ MPa}$$

同样验证第2道横撑,得:

$$\frac{N}{\varphi A} = 99.1 \text{ MPa} \leq f = 215 \text{ MPa}$$

第3道横撑为:

$$\frac{N}{\varphi A} = 78.6 \text{ MPa} \leq f = 215 \text{ MPa}$$

第4道横撑为:

$$\frac{N}{\varphi A} = 9.7 \text{ MPa} \leq f = 215 \text{ MPa}$$

4道钢管横撑的稳定性均满足要求。

4 结论

(1) 下塔柱对拉力的设置以塔肢根部截面不出现拉应力为原则,通过计算节段自重及临时荷载所

产生的附加弯矩确定对拉力数值。

(2) 中塔柱被动钢管横撑的安装以塔柱根部和前一横撑安装位置处截面不出现拉应力为原则,采用被动撑与主动撑结合,能有效改善桥塔受力,防止桥塔出现较大偏位。

(3) 采用有限元软件模拟分析桥塔施工,以应力为控制目标确定横撑及对拉的位置和数值大小,对桥塔施工具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计规范:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [3] 李毅.斜拉桥双向倾斜桥塔主动横撑设计及施工控制[J].桥梁建设,2013,43(3):109—113.
- [4] 霁建平,李松,王北辰,等.鄂东长江公路大桥桥塔拉杆及支撑系统设计与施工[J].桥梁建设,2009,39(3):74—76.
- [5] 徐登云,孙小猛,赵飞,等.超高钻石型索塔“拉杆一撑杆”优化设计方法研究[J].铁道标准设计,2015,59(4):49—52+57.
- [6] 向学建,孙宪魁,杨响,等.果子沟大桥桥塔施工过程的模拟分析[J].桥梁建设,2010,40(2):69—72.
- [7] 蒋建军,田波,何锋,等.斜拉桥曲线形钻石桥塔抗裂设计研究[J].世界桥梁,2019,47(4):12—16.
- [8] 贺玖龙.斜拉桥异形索塔施工中临时水平横撑的应用研究[D].西安:长安大学,2015.
- [9] 周马生,叶成银,杨小刚.斜塔柱施工主动撑拉杆优化设计[J].施工技术,2019,48(23):37—41.
- [10] 杨志军,杨厚明.钢管临时横撑在斜塔柱施工中的应用[J].山东交通科技,2014(5):78—79.