

# 大斜度塔斜拉桥塔柱施工受力分析

杨吉新, 鲁晓威, 喻桥, 石旷

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 结合某大斜度不对称双斜塔斜拉桥施工, 运用有限元方法, 分析在塔间索初张索力不变的情况下, 塔间索张拉与相应塔柱砼浇筑施工工序改变时塔柱内的应力分布情况。结果表明, 由于塔柱斜度过大, 当塔间索张拉时间滞后于相应塔柱砼浇筑时, 在塔间索以上悬臂段砼自重作用下, 塔柱倾斜向背面会出现较大拉应力; 可通过调整施工工序减小塔柱内拉应力。

**关键词:** 桥梁; 斜塔; 斜拉桥; 应力分析; 塔间索; 悬臂段; 施工工序

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)04-0115-03

外观别致、造型独特的桥梁往往能成为城市的象征, 故斜塔斜拉桥越来越多。一般来说, 桥梁设计越新颖, 受力越复杂。斜塔斜拉桥一般分为有背索和无背索两种类型, 其中无背索斜拉桥桥塔只有一边有拉索, 塔身呈倾斜状态, 由塔身自重来平衡斜拉索产生的力矩, 桥塔相当于在斜拉索索力及自身重力作用下的悬臂梁。与常规直塔斜拉桥相比, 大斜度塔斜拉桥的塔柱是主要受力构件, 对其进行详细受力分析很有必要。安徽六安市寿春西路桥的塔柱倾斜度大, 主、副塔之间存在塔间索且主塔无背索, 是典型的大斜度塔斜拉桥。该文对该桥塔各施工阶段进行理论模型分析, 研究桥塔受力特性, 制订合理的施工方案。

## 1 桥梁概况

六安市寿春西路桥主桥为(108+70)m V形塔双索面斜塔斜拉桥, 桥梁整幅布置, 标准宽度为 47.0 m。主梁采用钢—混混合梁; 塔柱采用矩形塔, 主塔上塔柱高 70 m, 副塔上塔柱高 50 m, 下塔柱高约 18.5 m, 塔柱顺桥向为 V 形、横桥向为  $\Delta$  形, 主跨及边跨侧均设置 8 对斜拉索。其整体效果见图 1。



图 1 安徽六安市寿春西路桥整体效果

上塔柱呈高低塔不对称布置, 塔柱纵、横向均为

倾斜布置, 斜度较大且桥面以上塔间无横梁, 顺桥向主塔无背索, 副塔顶部亦无背索。塔柱顺桥向刚度小, 变形大; 横桥向塔柱无拉索支承, 相当于竖向梁式结构。

斜拉索均为空间索面且主塔无背索布置, 主、副塔之间存在塔间斜拉索, 所有斜拉索均于副塔位置存在锚固端, 纵、横交错布置。为方便分析, 将副塔索从上往下主跨侧编号为 S1~S8、边跨侧编号为 B1~B8, 塔间索从上往下编号为 M1~M8。

主、副塔上塔柱均采用液压爬模施工。结合塔柱结构特点、总高度要求, 将主塔上塔柱分为 24 个节段、副塔上塔柱分为 17 个节段进行施工, 标准施工节段高度为 3.0 m, 个别节段高度根据塔柱上索导管位置及塔柱内预应力位置略作微调。在塔柱节段施工过程中, 相应斜拉索及预应力张拉同步进行。

## 2 有限元分析

### 2.1 材料参数

主、副塔均采用 C50 砼, 塔顶及塔梁固结位置一定长度内采用钢纤维砼以增强抗裂性能, 塔顶及塔梁固结处局部适当增设预应力筋以改善结构局部受力。C50 砼弹性模量为  $3.45 \times 10^4$  kN/m<sup>2</sup>, 泊松比为 0.2, 容重为 26.5 kN/m<sup>3</sup>, 轴心抗拉强度标准值为 2.65 MPa。

### 2.2 MIDAS/Civil 建模

根据该桥结构形式和受力特点, 采用 MIDAS/Civil 建立全桥模型, 对全桥施工阶段的上塔柱进行受力分析。主梁、主塔采用梁单元, 斜拉索采用桁架单元; 主梁与斜拉索, 主、副塔与斜拉索之间采用刚性连接, 塔、梁、墩之间采用主从连接。全桥共建立

717 个节点、676 个单元(见图 2)。

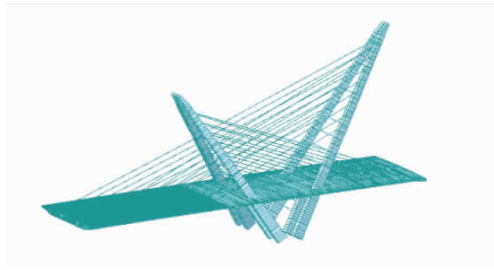


图 2 MIDAS/Civil 分析模型

### 3 各施工阶段下塔柱受力分析

#### 3.1 定义施工阶段

上塔柱单个塔柱施工临时荷载按 400 kN 计算,上塔柱顶部横梁处施工临时荷载按 100 kN 计算,斜拉索张拉索力为平均索力。主塔上塔柱施工过程为主塔 1~11 节段→M8+S8 索张拉→主塔 12~13 节段→M7+S7 索张拉→主塔 14~15 节段→M6+S6 索张拉→主塔 16~17 节段→M5+S5 索张拉→主塔 18~19 节段→M4+S4 索张拉→主塔 20 节段→M3+S3 索张拉→主塔 21~22 节段→M2+S2 索张拉→主塔 23 节段→M1+S1 索张拉→主塔 24 节段。副塔上塔柱施工阶段与主塔相似。主、副塔上塔柱见图 3。

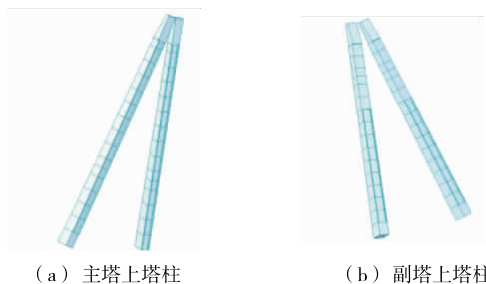


图 3 主、副塔上塔柱示意图

#### 3.2 计算结果与分析

通过 MIDAS/Civil 对主塔上塔柱施工阶段的应力进行计算分析,计算结果见表 1。

从表 1 可以看出:1) 主塔 1~6、7~9 节段施工中,随着塔柱悬臂段长度的增大,其倾斜向背面拉应力增大。2) 主塔 7、10 节段施工完成后,塔柱内拉应力显著减小,这是因为主塔 6 及 9 节段施工完成后,分别在塔柱倾斜向增加一道临时竖向支撑,使塔柱受力由悬臂梁转化为连续梁。3) 塔间索张拉后,塔柱内拉应力显著减小。但 M8+S8 及 M5+S5 索张拉完成后,塔柱内最大拉应力并没有发生太大变

表 1 主塔上塔柱施工阶段应力计算结果

| 施工阶段      | 最大拉应力/MPa | 施工阶段      | 最大拉应力/MPa |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 主塔 1 节段   | 0.16      | 主塔 15 节段  | 1.99      |
| 主塔 2 节段   | 0.28      | M6+S6 索张拉 | 0.00      |
| 主塔 3 节段   | 0.65      | 主塔 16 节段  | 0.46      |
| 主塔 4 节段   | 1.56      | 主塔 17 节段  | 1.45      |
| 主塔 5 节段   | 1.75      | M5+S5 索张拉 | 1.47      |
| 主塔 6 节段   | 1.96      | 主塔 18 节段  | 2.56      |
| 主塔 7 节段   | 0.28      | 主塔 19 节段  | 3.53      |
| 主塔 8 节段   | 1.08      | M4+S4 索张拉 | 0.54      |
| 主塔 9 节段   | 1.28      | 主塔 20 节段  | 2.37      |
| 主塔 10 节段  | 0.36      | M3+S3 索张拉 | 1.64      |
| 主塔 11 节段  | 1.19      | 主塔 21 节段  | 0.63      |
| M8+S8 索张拉 | 1.19      | 主塔 22 节段  | 2.66      |
| 主塔 12 节段  | 1.41      | M2+S2 索张拉 | 1.83      |
| 主塔 13 节段  | 2.53      | 主塔 23 节段  | 1.78      |
| M7+S7 索张拉 | 0.92      | M1+S1 索张拉 | 0.00      |
| 主塔 14 节段  | 1.61      | 主塔 24 节段  | 0.61      |

化,如图 4、图 5 所示,该拉应力出现在斜拉索锚固端附近,斜拉索张拉产生的力矩不会使其发生改变。4) 主塔 19 及 22 节段施工完成后,塔柱内出现较大拉应力,如图 6、图 7 所示,塔间索以上悬臂段超过三节段时,塔柱内拉应力超出设计标准值。因此,要

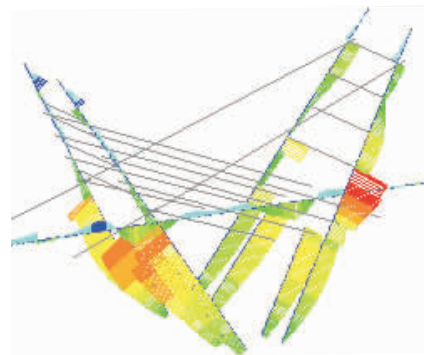


图 4 M8+S8 索张拉后应力云图

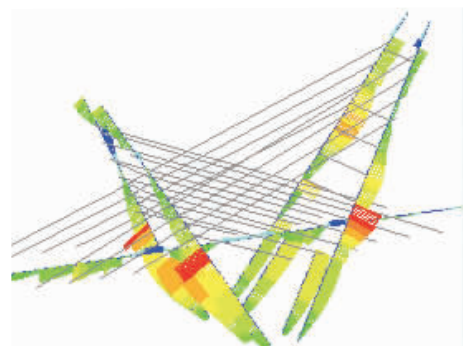


图 5 M5+S5 索张拉后应力云图

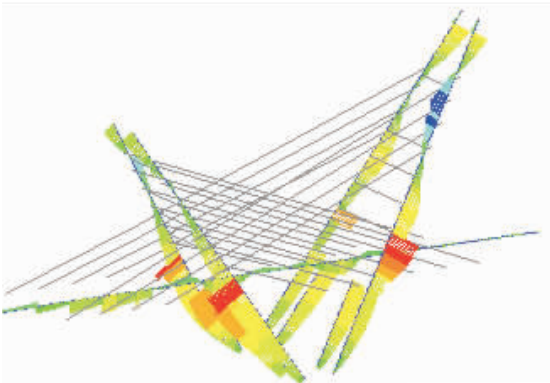


图 6 主塔 19 节段完成后应力云图

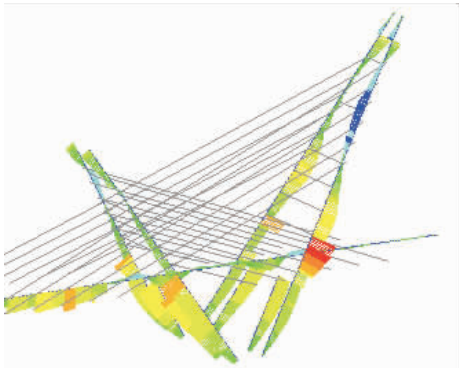


图 7 主塔 22 节段完成后应力云图

想塔柱内拉应力满足设计要求,必须控制塔柱悬臂段长度。

4 方案调整

根据上述分析结果,要想减少上塔柱内拉应力,必须减小塔间索以上悬臂段长度。调整方法有两种:一是在塔柱悬臂段底端位置增加一道临时竖向支撑,使塔柱受力由悬臂梁转化为连续梁;二是对相应的后续塔间索提前进行张拉,减小塔间索以上悬臂段长度。实际施工中这两种方案都有一定难度。其中:方案一中主塔柱较高,用作竖向支撑的钢管长细比过大,钢管自身会产生变形,对塔柱正常受力有一定影响;方案二中爬模装置的存在会阻碍塔间索张拉平台安装,使塔间索不能进行提前张拉,需将爬模装置下面一部分拆除后方可进行。综合施工难度及设计准确性,选择方案二进行设计与施工。

对施工方案进行调整,在主塔 19、22 节段砼浇筑前分别张拉 M4+S4 和 M2+S2 索。施工方案调整后应力计算结果见表 2。

由表 2 可知:施工方案调整后,主塔上塔柱内拉应力满足设计要求,塔间斜拉索提前张拉可有效减

少斜塔柱内拉应力。

表 2 方案调整后主塔上塔柱施工阶段应力计算结果

| 施工阶段      | 最大拉应力/MPa | 施工阶段      | 最大拉应力/MPa |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| M4+S4 索张拉 | 0.00      | 主塔 21 节段  | 0.63      |
| 主塔 19 节段  | 0.54      | M2+S2 索张拉 | 0.63      |
| 主塔 20 节段  | 2.42      | 主塔 22 节段  | 1.83      |
| M3+S3 索张拉 | 1.64      | 主塔 23 节段  | 1.78      |

5 结论

(1) 大斜度塔斜拉桥塔柱上应力分布情况与直塔斜拉桥完全不同。

(2) 塔间索张拉与相应塔柱砼浇筑之间的施工顺序对塔柱受力有较大影响。

(3) 大斜度塔斜拉桥塔柱上悬臂段处于适当的高度,可有效减少塔柱内拉应力的产生,使斜塔柱受力更合理。

参考文献:

[1] 周博.城市混合梁斜塔斜拉桥设计分析[D].成都:西南交通大学,2015.

[2] 谭发茂.新加坡塞夫第林独立式斜塔斜拉桥设计与施工[J].国外公路,1997,17(5).

[3] 邓力文.混合梁有背索斜塔斜拉桥合理成桥状态计算分析及优化研究[D].成都:西南交通大学,2014.

[4] 陈爱军,邵旭东.无背索竖琴式斜拉桥合理结构体系分析[J].中外公路,2009,29(4).

[5] 陈爱军,邵旭东.无背索竖琴式斜拉桥混凝土斜塔结构设计研究[J].公路,2006(8).

[6] 程超.异形斜塔斜拉桥使用阶段受力和桥塔锚固详细应力分析[D].成都:西南交通大学,2016.

[7] 胡海波,邓一峰.武汉青山长江大桥桥塔浇筑至百米高度[J].世界桥梁,2017,45(2).

[8] 朱晓明,王昌喜.千米级斜拉桥主塔横梁先塔后梁施工技术[J].公路与汽运,2018(3).

[9] 关伟.外倾式矮塔斜拉桥主塔上塔柱空间受力分析[J].山西交通科技,2017(5).

[10] 余定军,王吉英,刘勇,等.斜拉桥钻石形主塔下横梁与塔柱异步施工技术[J].公路,2010(11).

[11] 王勤康,任伟新.无背索双斜塔斜拉桥整体稳定性分析[A].第十七届全国现代结构工程学术研讨会论文集[C].2017.