

# 斜拉桥拱形主塔施工过程分析与下横梁 预应力张拉工序优化

杨智文, 来晓理, 黄飞鸿, 易壮鹏\*

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**斜拉桥拱形主塔由于良好的受力性能和美学效果得到了广泛应用,其施工过程的安全性和施工工序的优化值得关注。该文以韶关曲江大道江湾大桥主桥拱形主塔为工程背景,采用 Ansys 和 Midas 两种软件建立拱形主塔施工全过程的有限元模型,并研究下横梁预应力钢筋张拉顺序对主塔根部拉应力的影响规律。主塔施工全过程的应力分析结果显示:下塔柱在某些工况的拉应力偏大,全过程压应力均在安全范围之内。同时,对下横梁预应力张拉工序进行优化之后,主塔根部区域的拉应力得到改善。

**关键词:**拱形主塔;有限元模型;施工过程应力分析;工序优化

近年来,随着桥梁建设规模不断扩大,桥梁美学越来越受到重视。拱形主塔外形美观,具有较好的使用性能与受力特性,在中国城市斜拉桥中开始广泛采用。斜拉桥的关键传力体系为拉索系统,其将力传输至斜拉桥主塔,并通过桥梁基础结构传入地基中。斜拉桥主塔作为整个桥梁的关键受力结构,在桥梁设计和施工中至关重要。由于大跨度斜拉桥拱形主塔结构复杂,受外界因素干扰较大,施工难度较大,因此施工过程需重点关注。近几年有不少学者对此进行了研究,王凯对斜拉桥拱形桥塔施工工艺进行了较为详细概述;谢良等对索塔拱形变截面横梁施工做了较为详细的研究;凌李华对索塔横梁支架施工工序优化进行了比较详细的研究,以上研究表明:斜拉桥拱形塔施工全过程的应力安全值得关注,相关施工工序的优化与调整方面还有许多工作值得开展。中国拱形塔斜拉桥的建设正朝着更大跨径方向发展,但在施工过程控制方面仍缺乏相应的工程经验。

该文以韶关市曲江大道江湾大桥为工程背景,对拱形主塔的施工全过程进行模拟分析。为了保证主塔施工过程中的受力、变形结果的准确并处于安全范围内,采用 Ansys 18.2 和 Midas/Civil 8.65 软件建立拱形主塔的有限元模型并进行施工阶段的对比分析。

## 1 工程概况

江湾大桥主桥采用拱形独塔双索面混合梁斜拉桥,跨径组合  $33+102+183=318$  m。拱形桥塔为预应力钢筋混凝土构件,下横梁布设 44 束预应力钢筋;距横梁顶 5 m 以上的塔柱部分采用 C50 混凝土,其抗拉强度设计值为 1.89 MPa,横梁顶 5 m 范围以下的下塔柱与下横梁均采用钢纤维混凝土 CF50,其中钢纤维混凝土 CF50 抗拉强度设计值根据现场情况取为 2.85 MPa;塔柱顶部高程为 165.274 m,承台顶部高程为 55.774 m,塔高 109.5 m,桥面以上高 92 m,塔上索距 2.0 m。塔柱采用矩形断面,其中上塔柱采用空心箱形截面,下塔柱为增加防撞能力采用壁厚较厚的实心截面(图 1)。

根据现场施工情况,采用节段施工法,自主塔承台顶部往上,将塔柱共分 24 层(图 1),下塔柱分为 3 层,上塔柱分为 21 层,每层高 4.5 m,每 4.5 m 浇筑一次混凝土,下横梁与相连塔柱同步浇筑。根据拱形主塔实际施工过程,将其分为 44 个施工阶段(表 1),起点为承台顶部,每 4.5 m 为一层,塔柱每浇筑完一层混凝土就张拉该层预应力筋。该桥主塔在下塔柱、上塔柱、下横梁处都设置了预应力筋,下塔柱的预应力施加

收稿日期:2019-12-12(修改稿)

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(编号:2018JJ2436)

作者简介:杨智文,男,硕士研究生, E-mail:510562831@qq.com

\* 通信作者:易壮鹏,男,博士,副教授, E-mail:zpyi@csust.edu.cn

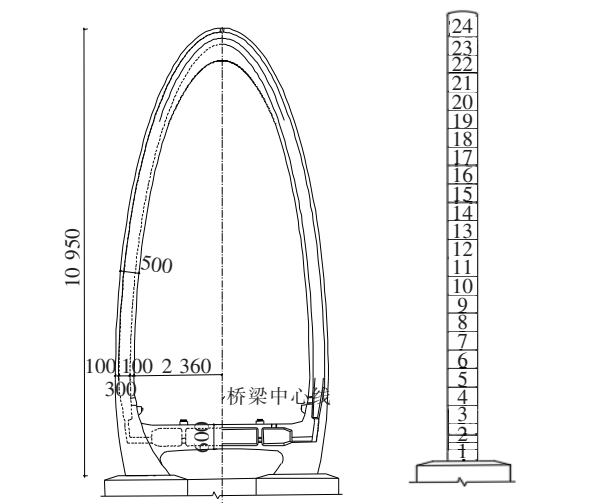


图1 江湾大桥主桥拱形主塔及施工节段划分(单位:cm)

在塔柱内侧标高 55.774~78.274 m 范围内,上塔柱的预应力施加于塔顶内外两侧标高 136.774~165.274 m,下横梁预应力施加在横梁外侧标高 60.274~69.274 m。在拉索区塔柱横断面设置了环向预应力筋,对塔柱起局部加强作用。其中对于拱形塔来说,下横梁的预应力筋在成桥过程中给塔柱提供向内的拉力,该力与斜拉索索力往下的分量保持平衡,起到稳定塔柱的作用。

2 有限元模型与施工全过程结果分析

2.1 有限元模型建立

分别采用 Ansys 和 Midas 软件建立拱形主塔有

表1 江湾大桥主塔施工阶段划分

施工阶段	内容	施工阶段	内容
1	浇筑第1层塔柱混凝土	37~38	张拉塔顶第22~23层预应力筋
2	张拉第1层预应力筋	39	张拉塔顶第23层预应力筋
3	搭设下横梁支架,浇筑第2、3层塔柱混凝土	40	张拉下横梁第2批预应力钢筋
4	张拉下塔柱第2、3层预应力筋	41	浇筑第24层塔柱混凝土
5~15	分别浇筑第4~10层塔柱混凝土并分别张拉各层预应力筋	42	张拉塔顶第24层预应力筋
16~35	分别浇筑第11~21层塔柱混凝土并安装第1~5道横撑	43	拆横撑与塔顶支架
36	浇筑第22层塔柱混凝土	44	施加斜拉索索力

限元模型,如图2所示。在 Ansys 模型中,采用 Beam4 单元模拟塔柱和下横梁、横撑、支架,采用 Link10 单元模拟预应力钢筋,总共 4 513 个节点,8 144 个单元。在 Midas 模型中,采用梁单元模拟塔柱和下横梁,横撑、支架采用  $\phi 820\text{ mm}\times 10\text{ mm}$  钢管支架模拟,总共 249 个节点,261 个单元。两种软件索塔承受的索力用节点荷载等效代替。

2.2 主塔施工过程计算分析

施工作业优化前各个施工阶段下 Ansys 和 Midas 软件的最大拉应力计算结果见表2。

通过对比各个施工阶段下 Ansys 和 Midas 的计算结果发现,所得内力、应力结果基本一致。在张拉下塔柱 60.274~69.274 m 之间(第2、3层)的预应力钢筋阶段,下塔柱出现了较大的拉应力(Ansys, 2.28 MPa;Midas, 2.76 MPa),接近钢纤维混凝土 CF50 抗拉设计强度(2.85 MPa),后续工况塔柱拉应力有所下降。直到张拉下横梁第2批预应力钢筋的施工阶段,下塔柱的根部外侧出现了接近钢纤维混凝土 CF50 抗拉设计强度的拉应力值(Ansys, 2.66 MPa;Midas, 2.42 MPa)。横梁顶 5 m 以上的塔柱在各工况下的最大拉应力(Ansys, 1.56 MPa;Midas, 1.87 MPa)均小于 C50 混凝土的抗拉强度设计值(1.89 MPa)。因此,施工全过程最大拉应力值均在混凝土抗拉强度设计值范围内,但下塔柱位置仍存在拉应力较大(指数值超过 2 MPa)的区域,分布范围从承台顶端至塔柱底部预应力钢筋的顶端,此范围内采用的是钢纤维混凝土 CF50。

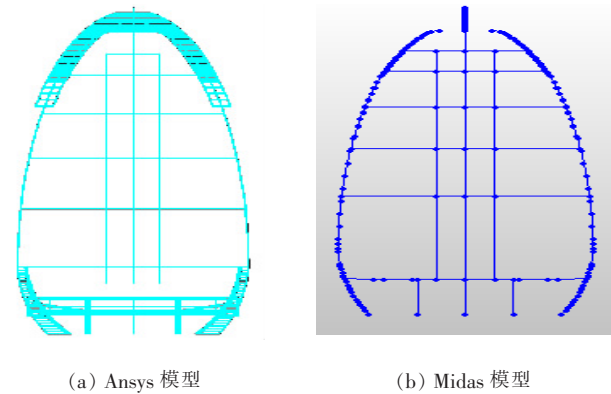


图2 主塔有限元模型正视图

表 2 江湾大桥主塔各施工阶段最大拉应力计算结果

施工阶段	应力/MPa		位置	施工阶段	应力/MPa		位置
	Ansys	Midas			Ansys	Midas	
1	0	0		23	1.28	1.72	第 5 层底端内侧
2	1.44	1.64	第 1 层顶端外侧	24	1.11	1.57	第 5 层底端内侧
3	0.60	1.31	与下横梁顶底连接处内侧	25	0.94	1.42	第 5 层底端内侧
4	2.28	2.76	第 3 层顶端外侧	26	1.03	1.42	第 5 层底端内侧
5	2.13	2.52	第 3 层顶端外侧	27	0.90	1.27	第 5 层底端内侧
6	2.22	2.51	第 4 层顶端外侧	28	0.79	1.11	第 5 层底端内侧
7	2.09	2.32	第 4 层顶端外侧	29	0.79	1.11	第 5 层底端内侧
8	2.09	2.32	第 4 层顶端外侧	30	0.69	0.92	第 5 层底端内侧
9	2.09	2.28	第 4 层顶端外侧	31	0.69	0.92	第 5 层底端内侧
10	1.97	2.17	第 4 层顶端外侧	32	0.64	0.92	第 5 层底端内侧
11	1.86	2.04	第 4 层顶端外侧	33	0.52	0.73	第 5 层底端内侧
12	1.76	1.93	第 4 层顶端外侧	34	0.52	0.73	第 5 层底端内侧
13	1.67	1.82	第 4 层顶端外侧	35	0.52	0.73	第 5 层底端内侧
14	1.60	1.71	第 4 层顶端外侧	36	0.77	0.87	塔顶预应力筋底端截面
15	1.60	1.92	第 4 层顶端外侧	37	0.77	0.87	塔顶预应力筋底端截面
16	1.56	1.86	第 5 层底端内侧	38	0.06	0.51	塔顶合龙截面下端
17	1.37	1.79	第 5 层底端内侧	39	0.45	0.50	塔顶合龙截面下端
18	1.15	1.68	第 5 层底端内侧	40	2.66	2.42	塔柱根部外侧
19	0.91	1.56	第 5 层底端内侧	41	2.38	2.24	塔柱根部外侧
20	0.65	1.44	第 5 层底端内侧	42	2.38	2.24	塔柱根部外侧
21	1.28	1.44	第 5 层底端内侧	43	1.59	1.97	塔顶预应力筋底端截面
22	1.45	1.87	第 5 层底端内侧	44	1.77	0.70	与下横梁中部连接处内侧

Ansys 最大压应力的计算结果为 11.30 MPa,Midas 最大压应力的计算结果为 11.85 MPa,均小于普通混凝土 C50 和钢纤维混凝土 CF50(混凝土的抗压强度标准值为 50 MPa)的设计强度,压应力均处于安全范围。

整体上,下横梁预应力对塔柱会产生向内的拉力,斜拉索索力对塔柱会产生外倾的趋势,根据表 2 中施工阶段 44 的应力计算结果可知:下横梁预应力与斜拉索索力产生的主塔根部区域的应力在整体上是平衡的。由于斜拉索是主塔施工完成之后逐步施工,而在此之前下塔柱已经产生了较大的拉应力,故下横梁预应力筋的张拉工序存在进一步优化的空间。

3 预应力筋的张拉工序优化

拱形塔柱优化前的工序:预应力筋从承台顶部往上每 4.5 m 张拉一次,采用一端张拉;横梁预应力筋分两批张拉,采用两端张拉。结合表 1、2 和施工阶段 40 的计算结果(图 3、4),可知张拉完下横梁的第 2 批

预应力筋后,塔柱根部外侧产生了较大的拉应力。下塔柱过大拉应力的产生是从施工阶段 40 张拉下横梁第 2 批预应力筋开始的,主塔结构在此之后一直处于较危险的状态,因此施工工序的优化应该以下横梁预应力筋的分批张拉为切入点。

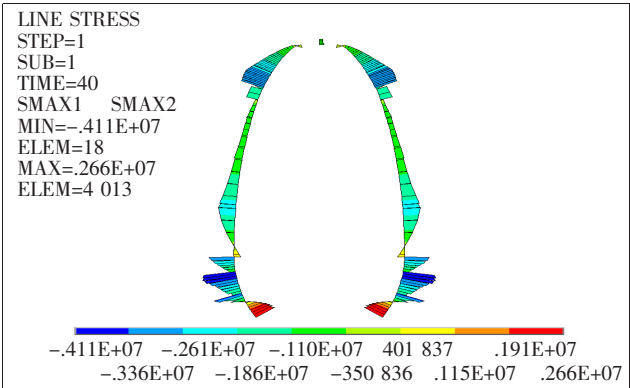


图 3 优化前施工阶段 40 的 Ansys 荷载组合最大应力(单位:Pa)

为了避免主塔根部产生过大的拉应力,将下横梁的预应力筋分 4 批张拉,并将相应的施工工序进行调

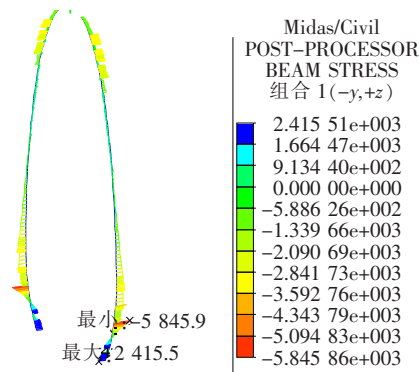


图4 优化前施工阶段40的Midas荷载组合最大应力(单位:kPa)

整优化。塔柱的施工阶段由之前的44个增加为46个。优化后的部分工序及应力结果如表3所示。

由表3可知:施工工序优化后的最大拉应力有了显著的改善,说明下横梁预应力的施加工序对施工过程中主塔的应力值起到了显著的改善作用。

4 结论

该文以韶关曲江大道江湾大桥主桥为工程背景,进行了拱形塔施工全过程的模拟分析以及施工工序的优化调整,得出以下结论:

表3 下横梁预应力钢筋张拉顺序优化后主塔部分工况最大拉应力结果

施工阶段	内容	最大拉应力/MPa		位置
		Ansys	Midas	
40	张拉下横梁第2批预应力钢筋	0.47	1.32	塔底预应力筋顶端截面
41	浇筑第24层塔柱混凝土	0.76	1.04	塔顶合龙截面下端
42	张拉塔顶第24层预应力筋	0.76	1.04	塔顶合龙截面下端
43	张拉下横梁第3批预应力钢筋	1.23	1.44	塔柱根部外侧
44	拆横撑与塔顶支架	1.61	1.13	塔顶预应力筋底端截面
45	张拉下横梁第4批预应力钢筋	1.59	1.93	塔顶预应力筋底端截面
46	加索力	1.77	0.70	与下横梁中部连接处内侧

(1) 两种软件模拟拱形主塔施工全过程的结果吻合,仅存在一些下塔柱位置拉应力偏大的工况,施工过程中压应力均在允许范围之内。

(2) 对下横梁预应力张拉的顺序进行调整,发现下塔柱的拉应力得到了改善,说明斜拉桥拱形主塔施工工序的调整对拉应力分布影响显著,相关施工工序需调整并严格控制。

参考文献:

[1] 辛太康. 拱形斜塔斜拉桥关键问题研究及其风险评估[D]. 同济大学硕士学位论文,2009.

[2] 邵旭东,顾安邦. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2014.

[3] 曹胜飞. 三塔斜拉桥拱形塔空间效应分析[D]. 合肥工业大学硕士学位论文,2012.

[4] 贺拴海,梅晓亮,刘鹏,等. 宽幅钢箱梁斜拉桥空间行为数值分析[J]. 中国公路学报,2016(4).

[5] 汪劲丰. 预应力混凝土斜拉桥施工控制的关键技术研究[D]. 浙江大学博士学位论文,2003.

[6] 高宝峰. 湛江海湾大桥斜拉桥主塔设计[J]. 中外公路,2006(5).

[7] 黄士柏,郝俊峰,徐海军. 拱形塔悬索斜拉组合结构桥梁的设计与施工[J]. 桥梁建设,2010(1).

[8] 张清华,黄灿,卜一之,等. 大跨度钢斜拉桥制造误差的传播及其效应特性[J]. 西南交通大学学报,2015(5).

[9] 王凯. 马鞍山大桥有汉斜拉桥拱形桥塔施工工艺及混凝土品质控制研究[J]. 广东建材,2018(4).

[10] 谢良,赵煜成,戴黎霞. 索塔拱形变截面横梁施工关键技术研究[J]. 中外公路,2016(4).

[11] 凌李华. 索塔横梁支架施工优化研究[D]. 长沙理工大学硕士学位论文,2016.

[12] 李晓龙. 拱形钢塔斜拉桥施工与运营一体化监测方法研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2013.

[13] 朱志辉,徐智伟,程玉莹,等. 基于精细有限元法的车致大跨度斜拉桥整体及局部振动研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018(2).

[14] 阮怀圣,屈爱平,何友娣,等. 大跨度公铁两用钢桁梁斜拉桥结构地震响应特征研究[J]. 桥梁建设,2015(2).

[15] 王永刚,刘毓梁. 桥梁悬臂挂篮施工控制技术的控制[J]. 科技资讯,2015(7).

[16] 黄运林,杨聪,万和安,等. 石首长江公路大桥宽幅短线预制混凝土箱梁横向受力有限元计算模型分析[J]. 中外公路,2019(1).

[17] JG/T 472—2015 钢纤维混凝土[S].

[18] 李伟,冯仲仁. 独塔混合梁斜拉桥合龙控制分析[J]. 中外公路,2018(4).