

钓鱼台大桥缆索吊装系统主塔稳定性分析

湛世华^{1,2}

(1.湖南省湘西自治州公路应急抢险中心, 湖南 吉首 416000; 2.湖南省湘西公路桥梁建设有限公司, 湖南 吉首 416000)

摘要:以钓鱼台大桥为工程背景,运用 MIDAS/Civil 建立塔架空间有限元模型,对拱箱在永顺岸塔前 48 m 起吊(预制场起吊后吊点位置)、拱箱起吊和运输至索跨跨中、石堤西岸拱脚段就位 3 种吊装工况下的塔架受力及稳定性进行计算分析,验证塔架在吊装过程中的安全性。

关键词:桥梁;箱形拱桥;缆索吊装;主塔架;稳定性

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2018)03-0133-04

钢筋砼箱形拱桥缆索吊装施工过程中由于吊装重量较大、运距较远、塔架较高,施工风险较大。主塔架是钢结构,柔性较大,受到吊重、风荷载、温度的共同影响,塔架所受荷载工况复杂。在吊装结构体系中,拱肋的平衡通过扣索悬挂在塔架下实现,同时扣索及纵横向风缆使塔架保持平衡,吊装过程中结构体系处于静力平衡状态。塔架的稳定性不但关系到其自身安全,也会影响拱肋的安装。该文结合湘西钓鱼台大桥,对上承式钢筋砼箱形拱桥缆索吊装系统主塔稳定性进行分析。

1 工程概况

钓鱼台大桥是湖南省道 306 石堤至永顺公路的控制性工程,主桥为上承式钢筋砼箱形拱桥(见图 1),主跨 $L=130$ m, $f=32.5$ m,矢跨比为 1:4,拱轴系数 $m=2.24$,拱上建筑为排架式立柱,桥面采用简支空心板。引桥为 4×25 m 预应力砼连续 T 梁(永顺侧)、 2×25 m 预应力砼连续 T 梁(石堤侧),桥面宽度为 8.5 m。每肋拱箱分 7 段预制,采用无支架缆索吊装法施工。

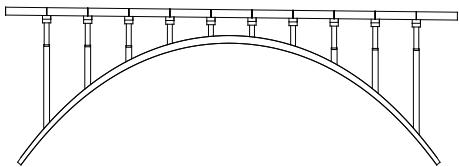


图 1 钓鱼台大桥桥型布置立面图

该桥两岸塔架均采用常用 M 形万能杆件组拼成双柱式刚桁架结构,悬索系统吊装中产生的荷载通过支承于塔架顶部上分配梁的主、扣索座滑轮传递,并按塔顶座滑轮宽度范围进行分配。塔架采用 C25 素砼分离式基础,并埋设 $\phi 32$ 地脚螺栓锚固塔

脚,永顺岸塔架设置于 7# 桥台后,石堤西岸塔架设置于 0# 桥台后。永顺岸主索、3# 扣索、工作索及塔架后风缆锚固于塔后 86.717 m 处的钢筋砼锚桩,锚桩由 4 根容许拉力约 1 300 kN 的钢筋砼锚桩组成,对称于桥梁中心线设置。石堤西岸主索、2# 和 3# 扣索、工作索及塔架后风缆锚固于塔后 79.299 m 处的钢筋砼锚桩,锚桩由 4 根容许拉力约 1 300 kN 的钢筋砼锚桩组成,对称于桥梁中心线设置。

为克服塔架纵横向水平力,两岸塔架各设置 2 组 $6\phi 19.5$ mm 后风缆和两侧各 1 组 $6\phi 19.5$ mm 横风缆。后风缆一端锚固在塔架中间位置的立柱顶部,另一端则进入锚桩锚固。横向稳定风缆一端锚固在下分配梁的端部,另一端则进入地垄锚固,要求其抗拉力不得小于 30 t。塔架两侧横向风缆对称布置,与地面的夹角为 30° 。考虑到风缆安装后有一定的垂度,且拱肋在安装过程中会给塔架产生一定的水平分力,在安装塔架后风缆及横向风缆时对其施加一定张力。两岸塔架立面见图 2。



图 2 钓鱼台大桥塔架立面图

2 塔架稳定性分析

2.1 计算工况

根据实际吊装施工中塔架的受力情况,分 3 种工况进行分析:工况一为拱箱在永顺岸塔前 48 m

起吊(预制场起吊后吊点位置);工况二为拱箱起吊、运输至索跨跨中;工况三为石堤西岸拱脚段就位。

2.2 塔顶荷载

塔架所受荷载包括主索、工作索、起吊及牵引索、扣索及塔架后风缆,计算时按上述3种工况的最

不利效应进行控制。3种工况下永顺岸塔顶索力见表1,石堤西岸塔顶索力见表2。

2.3 索力在上分配梁上的布置

2.3.1 永顺岸

永顺岸起吊阶段塔架垂直力较大,吊运至索跨

表1 各工况下永顺岸塔顶索力

kN

| 位置 | 水平力 | | | 垂直力 | | |
|-----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| | 工况一 | 工况二 | 工况三 | 工况一 | 工况二 | 工况三 |
| 主索 | 93.160 | 211.330 | 204.240 | 1 354.480 | 1 556.140 | 1 238.490 |
| 工作索 | 29.470 | 29.470 | 29.470 | 208.770 | 208.770 | 208.770 |
| 起重索 | -43.842 | -36.329 | -32.145 | 161.472 | 149.739 | 142.550 |
| 牵引索 | -3.137 | -5.166 | -8.162 | 57.090 | 68.551 | 107.048 |
| 扣索 | 36.700 | 36.700 | — | 429.900 | 429.900 | — |
| 风缆 | 55.670 | 55.670 | 55.670 | 50.000 | 50.000 | 50.000 |

表2 各工况下石堤西岸塔顶索力

kN

| 位置 | 水平力 | | | 垂直力 | | |
|-----|----------|----------|---------|---------|-----------|-----------|
| | 工况一 | 工况二 | 工况三 | 工况一 | 工况二 | 工况三 |
| 主索 | -115.620 | -121.580 | -58.590 | 932.350 | 1 371.520 | 1 436.110 |
| 工作索 | -17.240 | -17.240 | -17.240 | 183.610 | 183.610 | 183.610 |
| 牵引索 | 2.870 | 9.009 | 11.793 | 19.933 | 75.902 | 145.762 |
| 扣索 | -20.200 | -20.200 | — | 784.600 | 784.600 | — |
| 风缆 | 55.670 | 55.670 | 55.670 | 50.000 | 50.000 | 50.000 |

跨中阶段有最大向前及横向水平荷载作用,取这2种工况进行计算,每种工况分别按吊运边箱和中箱的不同索力作用位置进行计算,塔架在吊重状态下共计算4种工况。仅风缆初张力对塔架作用单独进行计算,以便控制塔架初位移。

将主索位荷载简化为座滑轮作用宽度范围内的均布荷载,扣索布置在主索两侧1.6 m位置,扣索索力近似看成作用在上分配梁上的集中荷载。主索位荷载如下:竖直力见式(1),换算均布荷载见式(2);纵向水平力见式(3),换算均布荷载见式(4)。

$$V_1 = 1\,354.48 + 208.77 + 161.472 + 57.09 = 1\,781.8 \text{ kN} \quad (1)$$

$$q_{v1} = V_1 / 1.12 = 1\,590.9 \text{ kN/m} \quad (2)$$

$$H_1 = 93.16 + 29.47 - 43.842 - 3.137 = 75.7 \text{ kN} \quad (3)$$

$$q_{h1} = H_1 / 1.12 = 67.55 \text{ kN/m} \quad (4)$$

索位横移后竖直力和纵向水平力大小不变,但后拉索横向倾角发生变化,横向水平力也将发生变化,其大小与主索距锚碇中线的距离 x 的关系见式

(5),换算均布荷载见式(6)。工况一下永顺岸塔架主索位横向力计算结果见表3。

$$H' = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \times \cos \alpha^{-1} \left(\frac{86.717}{x} \right) \times \cos \alpha^{-1} \left(\frac{86.717 \tan 22}{\sqrt{87.717^2 + x^2}} \right) = 2\,410.922 \times \cos \alpha^{-1} \left(\frac{86.717}{x} \right) \times \cos \alpha^{-1} \left(\frac{86.717 \tan 22}{\sqrt{87.717^2 + x^2}} \right) \quad (5)$$

$$q'_{h1} = H' / 1.12 \quad (6)$$

表3 工况一下永顺岸塔架主索横向力

| 位置 | 主索中心与锚碇中心的横向间距 x/m | 横向水平力/kN | 横向水平力 换算均布力/ (kN·m ⁻¹) |
|----|--------------------------------|----------|--|
| 中箱 | 1.01 | 28.08 | 25.07 |
| 边箱 | 3.06 | 85.02 | 75.91 |

扣索荷载如下:竖直力见式(7),纵向水平力见

式(8),外侧横向水平力见式(9),内侧横向水平力见式(10)。工况一下扣索对永顺岸塔架横向力计算结果见表 4。

$$V_3=\Delta V_3/2=429.9/2=214.95\text{ kN}\tag{7}$$

$$H_3=\Delta H_3/2=36.7/2=18.35\text{ kN}\tag{8}$$

$$H'_{21}=\frac{T_3}{2}\times\text{costan}^{-1}\left(\frac{86.717}{x+1.6}\right)\times\text{costan}^{-1}\left(\frac{86.717\tan 22}{\sqrt{87.717^2+(x+1.6)^2}}\right)=\frac{429.9}{2}\times\text{costan}^{-1}\left(\frac{86.717}{x+1.6}\right)\times\text{costan}^{-1}\left(\frac{86.717\tan 22}{\sqrt{87.717^2+(x+1.6)^2}}\right)\tag{9}$$

$$H'_{22}=\frac{T_3}{2}\times\text{costan}^{-1}\left(\frac{86.717}{x-1.6}\right)\times\text{costan}^{-1}\left(\frac{86.717\tan 22}{\sqrt{87.717^2+(x-1.6)^2}}\right)=\frac{429.9}{2}\times\text{costan}^{-1}\left(\frac{86.717}{x-1.6}\right)\times\text{costan}^{-1}\left(\frac{86.717\tan 22}{\sqrt{87.717^2+(x-1.6)^2}}\right)\tag{10}$$

表 4 工况一下扣索对永顺岸塔架横向力计算结果

| 位置 | 索中心与锚碇 中心的横向间 距 x/m | 横向水平力 H_{21}/kN | 横向水平力 H_{22}/kN |
|----|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 中箱 | -0.59 | 1.68 | 7.43 |
| | 2.61 | | |
| 边箱 | 1.46 | 4.16 | 13.26 |
| | 4.66 | | |

同理,运用上述方法可得到工况二、工况三下永顺岸塔架索力计算结果(见表 5~7)。

2.3.2 石堤西岸

石堤西岸拱脚段就位阶段石堤西岸塔架竖直作用力较大,运输至索跨跨中阶段有最大向前及横向水平荷载作用,取这 2 种工况进行计算,每种工况又按吊边箱和中箱的不同索力作用位置分别进行计算,塔架共计算 4 种工况。仅风缆初张力对塔架作用单独进行计算,以便控制塔架初位移。工况二、三下石堤西岸塔架索力计算结果见表 8~10。

表 5 工况二下永顺岸主索位荷载计算结果 kN/m

| 位置 | 竖直力 | 纵向水平力 | 横向水平力 |
|----|---------|--------|-------|
| 中箱 | 1 770.1 | 177.95 | 32.56 |
| 边箱 | 1 770.1 | 177.95 | 98.61 |

表 6 工况二下永顺岸扣索位荷载计算结果

| 位置 | 索中心与锚碇 中心横向间 距 x/m | 横向水平 力/ kN | 横向水平力 换算均布力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$) |
|----|-----------------------------------|------------------------|--|
| 中箱 | -0.59 | 1.68 | 7.43 |
| | 2.61 | | |
| 边箱 | 1.46 | 4.16 | 13.26 |
| | 4.66 | | |

表 7 工况三下永顺岸主索位荷载计算结果 kN/m

| 位置 | 竖直力 | 纵向水平力 | 横向水平力 |
|----|----------|--------|--------|
| 中箱 | 1 515.05 | 172.68 | 40.56 |
| 边箱 | 1 515.05 | 172.68 | 122.81 |

表 8 工况二下石堤西岸主索位荷载计算结果 kN/m

| 位置 | 竖直力 | 纵向水平力 | 横向水平力 |
|----|----------|--------|-------|
| 中箱 | 1 456.28 | -115.9 | 28.60 |
| 边箱 | 1 456.28 | -115.9 | 86.61 |

表 9 工况二下石堤西岸扣索位荷载计算结果

| 位置 | 索中心与锚碇 中心的横向间 距 x/m | 横向水平 力/ kN | 横向水平力 换算均布力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$) |
|----|------------------------------------|------------------------|--|
| 中箱 | -0.59 | 1.68 | 7.43 |
| | 2.61 | | |
| 边箱 | 1.46 | 4.16 | 13.26 |
| | 4.66 | | |

表 10 工况三下石堤西岸主索位荷载计算结果 kN/m

| 位置 | 竖直力 | 纵向水平力 | 横向水平力 |
|----|----------|--------|-------|
| 中箱 | 1 576.32 | -57.17 | 26.51 |
| 边箱 | 1 576.32 | -57.17 | 80.27 |

2.4 建立模型

该桥塔架利用 M 形万能杆件组拼,将其作为空间杆系单元进行计算,塔架根部为主要受力杆件,根部弦杆和塔顶分配梁采用梁单元模拟,其余弦杆采用桁架单元模拟,风缆采用只受拉单元模拟,上分配梁简化为支承于下分配梁的连续梁。有限元分析模型见图 3。

2.5 稳定性分析结果

在有限元模型中建立各工况下的屈曲分析模型进行屈曲分析,结果见图 4~8 及表 11。

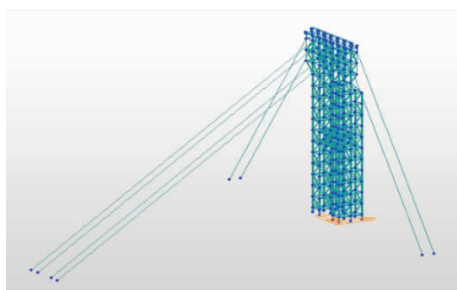
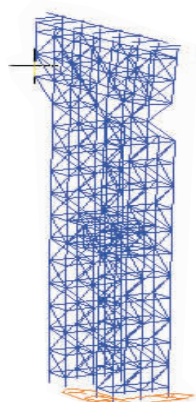


图3 钓鱼台大桥塔架有限元模型



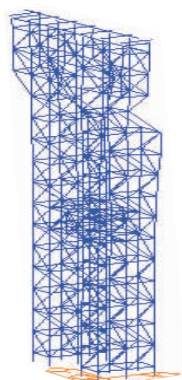
临界荷载
系数=3.194E+001

PostCS
Mode 1

MAX: 106
MIN: 1

表示-方向
X: -0.483
Y: -0.837
Z: 0.259

图4 工况一下永顺岸塔架一阶屈曲模态



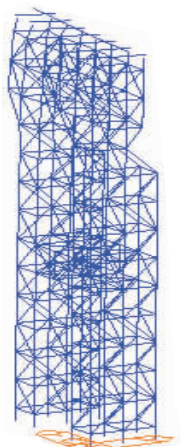
临界荷载
系数=2.150E+001

PostCS
Mode 1

MAX: 95
MIN: 1

表示-方向
X: -0.483
Y: -0.837
Z: 0.259

图5 工况二下永顺岸塔架屈曲模态



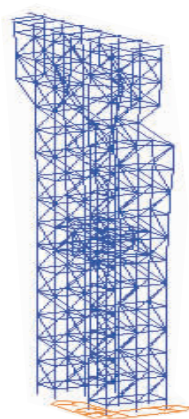
临界荷载
系数=2.861E+001

PostCS
Mode 1

MAX: 150
MIN: 1

表示-方向
X: -0.483
Y: -0.837
Z: 0.259

图6 工况二下石堤西岸塔架屈曲模态



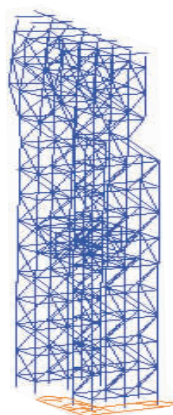
临界荷载
系数=2.930E+001

PostCS
Mode 1

MAX: 95
MIN: 1

表示-方向
X: -0.483
Y: -0.837
Z: 0.259

图7 工况三下永顺岸塔架屈曲模态



临界荷载
系数=3.658E+001

PostCS
Mode 1

MAX: 150
MIN: 1

表示-方向
X: -0.483
Y: -0.837
Z: 0.259

图8 工况三下石堤西岸塔架屈曲模态

表11 各工况下两岸塔架的特征值

| 位置 | 特征值 | | |
|------|-------|-------|-------|
| | 工况一 | 工况二 | 工况三 |
| 永顺岸 | 31.94 | 21.50 | 29.30 |
| 石堤西岸 | — | 28.61 | 36.58 |

从表11可以看出:各工况下两岸塔架屈曲分析的特征值均大于5,满足规范要求,且具有一定的安全储备。

3 结语

该文以钓鱼台大桥为背景工程,对上承式钢筋砼箱形拱桥缆索吊装系统的主要受力构件(主索、扣索、起重牵引索)在各控制工况下的受力进行分析,明确了各部分对塔架的不平衡力的大小,并分析塔架在各控制工况下的稳定性。结果表明该桥塔架稳定性满足要求,可保证施工的安全进行。塔架的稳定性关系到整个吊运的安全,拱肋吊运过程中要用

(下转第147页)

同步张拉,张拉完成后进行真空压浆。

5 结语

嘉鱼长江大桥11[#]南主塔下横梁采用先塔后梁的施工方法,下横梁支架由钢管支架和牛腿托架组成,钢管支撑在承台顶面,托架支撑在下塔柱上。为避免塔柱外倾造成塔肢根部应力过大,在下横梁底部设置拉压体系。拉压体系设计新颖(结合主体结构预应力设计及支架牛腿布置方案),在整个施工过程中塔肢根部拉应力控制恰当,不但保证了下横梁施工质量,且节约了近45 d工期。

(上接第108页)

裂缝处治不适用;市场上的沥青路面裂缝处治密封胶的低温拉伸和弹性恢复指标较差,但其软化点、延伸率、针入度和粘韧性指标较高。根据南方湿热地区的湿热特性和目前材料现状,沥青路面裂缝处治密封胶未来的改善方向主要为抗硬物破坏、浸水低温拉伸、低温拉伸性三方面,使其能适应气候、地质及高速载重环境。

参考文献:

- [1] 宋健民,白鹏飞,管晓晴.半刚性基层沥青路面反射裂缝建模分析[J].公路工程,2017,42(3).
- [2] 丛林,于露,魏强.沥青路面防水抗裂功能层缓解反射裂缝的数值分析[J].公路工程,2014,39(4).
- [3] 李强,倪富健,王文达,等.沥青路面裂缝修补材料技术性能对比研究[J].公路工程,2013,38(6).

(上接第136页)

全站仪对塔架进行全过程监控,并根据观测数据不断调整吊运速度和方向。

参考文献:

- [1] 顾安邦.桥梁工程(下册)[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [2] 向中富.桥梁施工控制技术[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 邓志华.大跨度钢筋混凝土拱桥空间稳定性分析[J].四川建筑,2005,25(1).
- [4] 张奇志,毛生华.吊井岩大桥施工中扣索受力分析及拱肋安装[J].公路与汽运,2008(4).
- [5] 赵朝阳,杨文爽,李传习.缆索吊装主索系统的受力分

参考文献:

- [1] 欧阳晓勇,张建军,崔学涛.苏通大桥主5号墩索塔下横梁施工技术[A].第三届全国公路科技创新高层论坛论文集(下册)[C].2006.
- [2] 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).
- [3] JTG/T F50—2011,公路桥涵施工技术规范[S].
- [4] 李盛泽.闽江大桥主塔下横梁施工方案优化与技术研究[J].公路交通科技:应用技术版,2011(4).

收稿日期:2018-03-04

- [4] 刘浩,黄开宇,邓蓉.考虑半刚性结构层横向贯通裂缝的沥青路面疲劳特性分析[J].公路工程,2012,37(2).
- [5] 马玉成.丘陵地区沥青路面裂缝原因分析及预防对策研究[J].湖南交通科技,2012,38(3).
- [6] 彭鹏.沥青路面反射裂缝的研究现状分析[J].湖南交通科技,2012,38(3).
- [7] 刘畔.高速公路沥青路面裂缝分析与处治措施研究[J].公路与汽运,2016(1).
- [8] 李茂山.沥青路面裂缝深层处治方法的研究与应用[J].公路与汽运,2011(4).
- [9] Ai-Qadi I L.Characterization of bituminous-sextants utilizing modified bending beam rheometer[A].Transportation Research Board 85th Annual Meeting[C].2006.
- [10] JT/T 740—2015,路面加热型密封胶[S].

收稿日期:2017-12-09

析算法与工作性能[J].广西大学学报:自然科学版,2010,35(4).

- [6] 王勃.大跨径拱桥缆索吊装施工系统仿真分析[D].西安:长安大学,2012.
- [7] 王国俊.大跨度钢管混凝土拱桥无支架缆索吊装过程中的仿真计算分析[D].长沙:长沙理工大学,2005.
- [8] 刘兴臣.大跨度箱形拱桥缆索吊装施工过程监控[D].成都:西南交通大学,2008.
- [9] 刘雪峰.钢筋砼拱桥钢拱架现浇施工控制关键技术[J].公路与汽运,2016(5).
- [10] 黄祖华.基于环境振动试验的钢筋砼拱桥有限元模型研究[J].公路与汽运,2015(1).

收稿日期:2017-12-28