

基于卵形拱桥塔的空间索网景观斜拉桥设计

李碧卿¹, 陈凯²

(1.江苏东南特种技术工程有限公司, 江苏 南京 210008; 2.东南大学土木学院, 江苏 南京 211189)

摘要:针对斜拉桥景观性的设计要求,利用卵形曲线的数学方程,提出了一种卵形拱桥塔的空间索面景观斜拉桥。与传统的抛物线拱形桥塔斜拉桥相比,卵形拱桥塔拱脚两腿收拢,减少了基础尺寸,顶部宽阔,分散布置三维空间缆索,斜拉桥的景观效果更佳。结合实际工程,进行工程参数设计,建立 Midas 有限元分析模型,进行静力分析和模态分析研究。结果表明:卵形拱桥塔的空间索面斜拉桥具有良好的空间结构刚度。

关键词:景观斜拉桥;卵形拱桥塔;空间索网;空间结构刚度

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)03-0041-04

0 引言

钢管混凝土抛物线拱形桥塔斜拉桥结构造型漂亮,深受广大工程师喜爱^[1-2]。工业化制作拱形桥塔结构,其运用越来越广泛。但是,抛物线拱形桥塔结构也存在一些不足之处^[3-5]。

其一,抛物线拱形桥塔在拱脚底部两腿向外扒开,导致桥塔基础面积增加^[6]。

其二,抛物线拱形桥塔顶部为尖锥形状,空间斜拉缆索并不能有效地三维散开布置,空间斜拉缆索体系的景观效果不佳^[7-8]。

依据卵曲线方程,采用火焰煨弯制作工艺,弯曲钢管节段,拼装焊接成型,钢管内部灌注高强混凝土,形成钢管混凝土卵形拱桥塔。

卵形拱桥塔结构柔美自然,拱脚底部收拢,有利于减小桥塔的基础尺寸。卵形拱桥塔结构顶部宽阔,有利于空间斜拉索网三维分散布置,可大幅度提高斜拉桥的空间刚度。卵形拱桥塔和三维空间索网两个景观设计元素提升了城市景观斜拉桥结构的人文内涵。

本文结合某主跨 294 m 景观斜拉桥的设计方案,开展钢管混凝土卵曲线拱形桥塔斜拉桥的构形研究,进行工程参数设计,并建立 Midas 有限元模型,开展静力计算分析和动力模态研究,以便验证卵形拱桥塔斜拉桥结构的合理性。

1 构型研究

针对城市景观斜拉桥的设计要求,采用卵形拱桥塔(见图1)代替传统的门式桥塔结构。卵形拱桥塔造型漂亮,三维空间索网的景观效果较佳,可提升城市斜拉桥的景观品位。

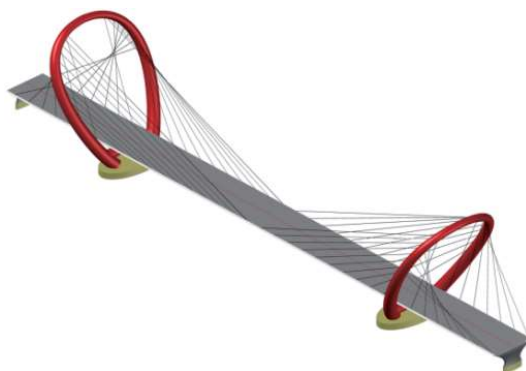


图1 卵形拱桥塔斜拉桥

卵形曲线是数学上的一个重要的几何图形(见图2)。卵形曲线是匀称光滑的曲线。卵形曲线的数学方程如下:

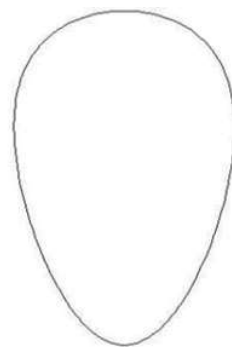


图2 卵形曲线的几何图形

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{(ky+b)^2} = 1 \quad (|k| \leq 1) \quad (1)$$

收稿日期: 2021-07-02

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2012755)

作者简介: 李碧卿(1982—), 女, 本科, 工程师, 从事桥梁结构与加固工作。

式中: x 、 y 为坐标轴尺寸; a 为卵宽度参数; b 为卵高度参数; k 为卵形状参数。

依据卵形曲线方程,采用火焰煨弯制作工艺,加工弯曲变截面钢管节段,顶部钢管直径细,底部钢管直径粗,施工现场焊接拼装成型,形成光滑连接的变截面卵曲线形钢管拱肋,吊装卵曲线形钢管拱肋就位,在钢管内灌注高强混凝土,形成钢管混凝土卵形拱桥塔。

将左右两个向外倾斜的钢管混凝土卵形拱桥塔就位于斜拉桥基础承台之上,在桥塔塔顶位置处布置中跨的空间斜拉索网和边跨的斜拉扭背索网。采用悬臂施工方法安装桥面加劲梁,悬臂拼装,直到桥面合龙,形成一种钢管混凝土卵形拱桥塔的短边跨斜拉桥。

相比于尖塔顶的钢管混凝土抛物线拱形桥塔,钢管混凝土卵形拱桥塔结构受力更加合理,造型独特优美,拱脚处两腿收拢,减少了基础尺寸,顶部宽阔,可分散布置三维空间缆索,景观效果更佳(见图3)。

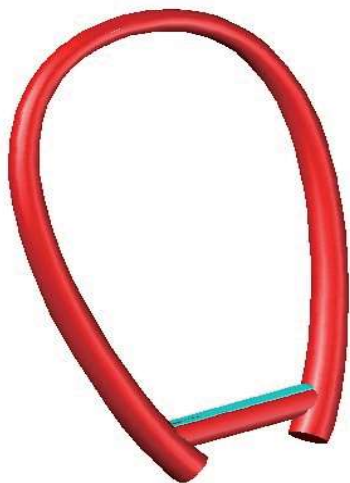


图3 变截面卵形拱桥塔

桥塔拱脚连系梁采用圆形钢管混凝土梁,在圆形钢管之上,焊接倒扣的槽形钢梁,形成组合梁结构形式的横向盖梁。在组合横梁之上,设置活动支座支撑钢箱梁加劲梁,设置限位挡块控制钢箱梁加劲梁左右移动幅度,斜拉桥采用半漂浮结构体系的方案。

由于城市建设用地紧张,城市斜拉桥通常采用短边跨斜拉桥结构方案。短边跨斜拉桥中间跨径大,两边跨径小。短边跨斜拉桥的中跨段采用扁平钢箱梁结构,边跨段钢筋混凝土箱梁,兼顾配重处理。短边跨斜拉桥的桥塔结构采用倾斜的斜拉桥桥塔形式,依靠倾斜塔身的自重力矩来平衡非对称短边跨斜拉桥的倾覆力矩。

斜拉扭背索网分散布置在短边跨斜拉桥的两岸边跨和倾斜状钢管混凝土卵形拱桥塔之间,斜拉扭背索网呈现空间扭曲状,景观效果漂亮。

钢管混凝土卵形拱桥塔斜拉桥结构具有造型漂亮、结构简洁、施工方便、跨越能力大和抗风稳定性好等优点,尤其适合城市景观斜拉桥,可以进一步提升城市斜拉桥结构的景观品位(见图4)。



图4 成桥效果图

2 设计参数

南京某夹江斜拉桥的主桥跨径为 $(98+294+98)$ m三跨斜拉桥,双向6车道,桥面宽33m。由于景观性要求,采用钢管混凝土卵形拱桥塔斜拉桥结构,总体布置见图5。

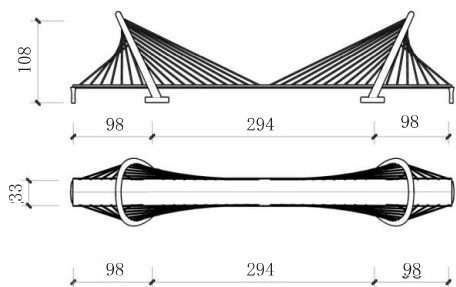


图5 总体布置图(单位:m)

钢管混凝土卵形拱桥塔结构的中心线符合卵曲线几何方程。其中:卵形塔宽度参数 a 为40m,卵形塔高度参数 b 为60m,卵形状参数 k 为0.3。

钢管混凝土卵形拱桥塔竖向高度为108m,斜向高度为120m,桥塔倾斜角度为 25° 。

卵形拱桥塔采用钢管混凝土结构,外部变截面钢管直径为8~12mm,钢管壁厚为25~30mm,内灌注C50混凝土,卵形拱桥塔采用桩基础。

为了提高大直径钢管混凝土拱肋的受力性能,采用内外双重钢管的钢管混凝土拱肋结构形式,在内外钢管之间设置多腔分隔钢板,形成大直径多腔钢管混凝土拱肋,以便提高管内混凝土的三向约束受力性能(见图6)。

内部变截面钢管直径为6~8mm,内部钢管壁厚为14~20mm,内外双钢管之间设置6道钢横隔板,钢横隔板壁厚为12~18mm。

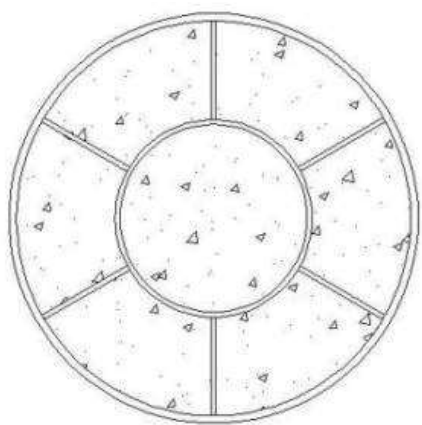


图6 多腔钢管混凝土拱肋

钢管混凝土卵形拱桥塔斜拉桥结构斜拉索的锚固通常采用钢锚箱结构形式,在钢管混凝土卵形拱桥塔结构上,设置对拉钢梁式的钢锚箱,对拉钢梁式的钢锚箱设置在钢管混凝土卵形拱桥塔的内钢管之中;斜拉索张拉端设置在斜拉桥梁端,梁端采用侧壁式钢锚箱构造。

桥塔拱脚处的圆形钢管混凝土横梁的钢管直径为8 m,在其上焊接2.5 m宽度的倒扣的槽形钢梁。槽形钢梁焊接左右两个限位挡块。

全桥加劲梁梁高均为2.5 m,中跨段采用扁平钢箱梁,两个边跨采用扁平预应力钢筋混凝土箱梁(兼顾边跨配重),加劲梁结合段设置在主跨一侧,预应力钢筋混凝土箱梁伸入主跨21 m。

斜拉索的间距为14 m,斜拉索直径为0.20 m,采用2 000 MPa 高强平行钢丝缆索成品,斜拉桥中间主跨设置20对斜拉索,左右边跨均设置7对斜拉扭背索。

本设计采用Midas 软件建模并计算,空间斜拉索采用索单元,卵形拱桥塔、端部桥墩和桥面加劲梁采用梁单元。卵形拱桥塔斜拉桥的Midas 有限元模型见图7。

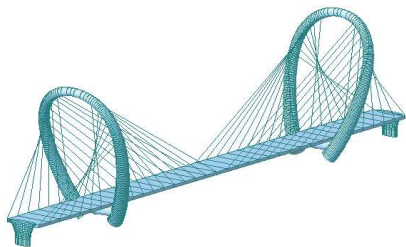


图7 Midas 有限元模型

3 受力性能分析

3.1 竖向荷载作用下的计算结果

本设计桥梁为6 车道斜拉桥,根据《公路桥涵设

计通用规范》,汽车活荷载按照一级公路桥梁荷载取值,桥面附加恒荷载取值为4 kN/m²,两边跨配重恒荷载取值为16 kN/m²

计算结果见图8。

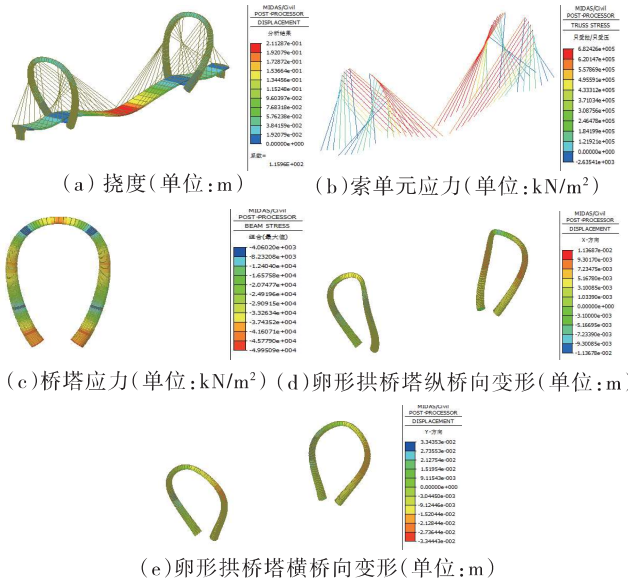


图8 竖向荷载作用下的计算结果(恒+活)

最大竖向位移出现在跨中位置,为0.211 m,满足规范规定 $L/500$ 限值要求;斜拉索最大应力为682.4 MPa,桥塔最大应力为50.0 MPa,结构应力处于安全状态。

卵形拱桥塔纵桥向变形为0.011 4 m,横桥向变形为0.033 4 m,拱形塔的纵横桥向变形均较小。分析表明,在竖向荷载作用下,本设计卵形拱桥塔的空间索面斜拉桥结构具有良好的受力性能。

3.2 卵形拱桥塔屈曲稳定分析

钢管混凝土卵形拱桥塔是一种压弯构件,在结构发生失稳破坏时,一般没有明显的征兆,具有较大的突然性、破坏性。

利用Midas 软件对本设计桥梁拱形桥塔进行屈曲分析,得到结构稳定性系数。表1 中列出前8 阶卵形拱桥塔的屈曲稳定性系数。

表1 卵形拱桥塔的屈曲稳定系数

模态	特征值	容许误差
1	47.437	$1.933\ 6\times 10^{-9}$
2	50.956	$1.244\ 0\times 10^{-8}$
3	125.649	$1.316\ 7\times 10^{-7}$
4	128.354	$1.026\ 3\times 10^{-7}$
5	132.945	$5.490\ 7\times 10^{-8}$
6	163.524	$5.234\ 7\times 10^{-7}$
7	177.729	$2.986\ 4\times 10^{-7}$
8	184.609	$1.823\ 1\times 10^{-6}$

由表1可知,卵形拱桥塔的最小稳定性安全系数为47.437,满足《钢管混凝土拱桥技术规程》(GB 50923—2013)大于4.0的规定。分析表明:本设计的卵形拱桥塔结构具有良好的抗压屈曲稳定性。

3.3 模态计算结果

为了不遗漏任何振型,分析过程中采用子分块法求解特征方程。经过Midas软件计算可得前8阶动力模态,如图9所示。

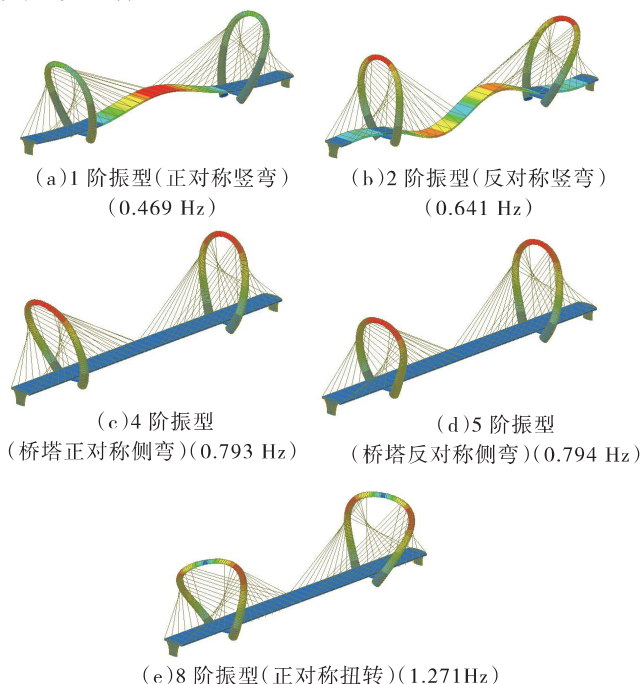


图9 典型模态

由图9中的计算结果可知,第1阶振型为桥面正对称竖弯,频率为0.469 Hz;第2阶振型为桥面反对称竖弯,频率为0.641 Hz;第8阶振型为扭转振型,频率为1.271 Hz。

前7阶振型主要以桥面竖弯、桥塔侧弯振动为主,直到第8阶才出现正对称扭转振型,扭转频率比值较高,为2.71,抗风稳定性较好。

整体来看,振型密集,出现明显的振型分组现象,先出现竖弯振形,后出现桥塔结构的侧弯振动。分析表明:本设计的卵形拱桥塔斜拉桥具有较高的侧向刚度。

4 结 语

(1)相比于抛物线拱形桥塔,卵形拱桥塔造型更

优美,其拱脚两腿收拢,减少了基础尺寸,顶部宽阔,分散布置三维空间缆索,景观效果更佳。

(2)本设计斜拉桥,活荷载作用下,跨中最大竖向位移为0.211 m,满足规范规定 $L/500$ 限值要求。计算表明:斜拉索应力合理,卵形拱形塔的纵横桥向水平变形均较小,卵形拱桥塔斜拉桥结构受力合理。

(3)本桥卵形拱桥塔屈曲稳定分析表明,卵形拱桥塔的最小稳定性安全系数为47.437,远大于规范规定的4.0的要求,钢管混凝土卵形拱桥塔具有良好的抗压屈曲稳定性。

(4)卵形拱桥塔斜拉桥三维布置空间斜拉索,因而结构空间整体性好。本设计前3阶振型为桥面竖弯振型,第4阶振形才出现侧弯振型,卵形拱桥塔斜拉桥的侧向刚度较大。直到直到第8阶才出现正对称扭转振型,扭转频率比值较高,为2.71,表明卵形拱桥塔斜拉桥的抗风稳定性较好。

综上表明:本设计跨径300 m级卵形拱桥塔的空间索面斜拉桥具有良好的受力性能。卵形拱桥塔代替传统的门式桥塔结构具有科学合理性,值得进一步推广应用。

参考文献:

- [1] 徐瑞丰,李正,周彦锋,等.南京青奥跨江景观桥主塔钢混结合段设计[J].现代交通技,2015(4):38-41.
- [2] 张强,徐宏光.马鞍山长江公路大桥设计与创新[J].桥梁建设,2010(6):1-5.
- [3] Cao, Y. S. Research on Development of Arch Tower Cable-Stayed Bridge[C]. Applied mechanics and materials, 2013(2):1245.
- [4] 张西丁,石雪飞.拱塔斜拉桥桥塔钢-混结合段空间受力分析[J].交通科学与工程,2013(2):35-40.
- [5] 王帆,赖亚平,乔云强,等.合川渠江景观大桥三角拱形桥塔设计研究[J].中外公路,2018(2):109-112.
- [6] Li Z L, Xue J. Dynamic Characteristics of Pylon of Cable-Stayed Bridge with Inclined and Arched Tower during Construction[C]. Applied mechanics and materials. 2013(2):1547.
- [7] 杨善红,徐宏光,梅应华,等.马鞍山长江大桥右汊主桥拱形塔斜拉桥设计创意[J].公路交通科技(应用技术版),2009(5):192-193.
- [8] 汪蕊蕊,韩大章,周彦锋.南京青奥景观桥钢与混凝土混合塔受力分析[J].上海公路,2017(4):21-24.