

景观装饰无背索斜拉桥力学性能研究

李绎青¹, 张红显², 王兴正², 常柱刚²

(1. 长沙学院, 湖南 长沙 410022; 2. 长沙市规划设计院有限责任公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 为了研究景观装饰无背索斜拉桥力学性能, 建立了景观桥梁结构有限元模型, 计算了满足景观效果的无背索斜拉桥合理索力, 同时, 结合无背索斜拉桥结构特点, 计算了各类荷载组合作用下无背索斜拉桥各构件应力、竖向挠度及结构动力响应, 并分析了景观索对结构承载力和弹性支撑的贡献。研究表明, 基于梳理提出的景观装饰无背索斜拉桥合理索力确定方法, 可以得出满足景观需求的拉索索力, 同时计算结果显示景观索对桥梁结构承载力贡献较少。进行景观装饰无背索斜拉桥动力计算时, 景观索对结构第一、第二阶振型及振型参与质量方向影响较小, 对于仅关注基频指标的景观装饰无背索斜拉桥动力计算可以不考虑景观索力的影响。

关键词: 景观装饰无背索斜拉桥; 景观索; 合理索力; 承载力; 动力计算

中图分类号: U442.5; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0111-04

Study on Mechanical Properties of Landscape Decoration Cable-stayed Bridge without Backstays

LI Yiqing¹, ZHANG Hongxian², WANG Xingzheng², CHANG Zhugang²

(1. Changsha University, Changsha 410022, China; 2. Changsha Planning and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of landscape decoration cable-stayed bridge without backstays, the finite element model of landscape bridge structure is established to calculate the reasonable cable force of cable-stayed bridge without backstays meeting the landscape effect. At the same time, combined with the structural characteristics of cable-stayed bridge without backstays, the stress, vertical deflection and structural dynamic response of each component of cable-stayed bridge without backstays under various load combinations are calculated. And the contribution of landscape cable to structural bearing capacity and elastic support is analyzed. The research shows that based on the reasonable cable force determination method proposed for landscape decoration cable-stayed bridges without backstays, the cable force that meets the landscape requirements can be obtained. At the same time, the calculation results show that landscape cables contribute less to the bearing capacity of the bridge structure. In the dynamic calculation of landscape decoration cable-stayed bridge without backstays, the landscape cable has a relatively small influence on the first and second order vibration modes of the structure and the mass direction in which the vibration modes participate. For the dynamic calculation of landscape decoration cable-stayed bridges without backstays that only focus on fundamental frequency indicators, the influence of landscape cable force can be disregarded.

Keywords: landscape decoration cable-stayed bridge without backstays; landscape cable; reasonable cable force; bearing capacity; dynamic calculation

0 引言

无背索斜拉桥因其独特的造型仿似中国古典乐器——竖琴, 自引入国内以来, 逐渐受到国内桥梁设计者的青睐, 湖南长沙建成了同类型桥梁跨径最大

的无背索斜拉桥——洪山大桥, 成为当地的地标性建筑^[1]。近年来, 随着国内经济的发展, 各地逐步建设景观类桥梁, 该类型桥梁除满足结构受力需求外, 亦需结合当地文化特色, 满足景观需求。景观装饰无背索斜拉桥通常采用塔梁分离体系, 主塔设置在主梁范围外, 不参与结构受力, 主梁采用简支或连续体系, 拉索施加较小的索力绷紧即可, 避免了锚固端采用大体积锚箱, 降低工程造价, 从而使景观装饰类桥梁适用性大大增加。荀敬川等依托塔梁墩固结无背索斜拉桥, 分析了该结构主塔受力及其抗震性

收稿日期: 2025-03-29

作者简介: 李绎青(1992—), 女, 硕士, 工程师, 从事桥梁工程教学工作。

通信作者: 张红显(1992—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁结构理论及桥梁设计优化研究工作。电子信箱: godnessbl@163.com

能^[2-4];陈双庆等通过建立不同的二维有限元模型,计算了无背索斜拉桥的频率和基频^[5-8];王桢等基于影响矩阵法,计算了斜拉桥成桥状态下的合理索力等^[9-11]。周勇军等依托三亚市海棠湾河心岛景观桥对景观桥斜拉桥斜拉索索力进行了研究^[12]。目前,无背索斜拉桥相关研究多集中在桥塔受力上,且结构多为塔梁墩固结体系,同时,有关景观斜拉桥斜拉索索力的优化多集中在依托工程斜拉索为主要受力构件上,对仅满足景观装饰的无背索斜拉桥研究较少。

本文以某异型景观装饰无背索斜拉桥为依托,分析了仅满足景观效果情况下无背索斜拉桥合理索力,并对景观装饰无背索斜拉桥力学性能进行研究,同时,基于结构动力学基本原理,计算了索力对结构基频的影响,为景观类无背索斜拉桥设计提供参考。

1 工程概况

某异型景观装饰无背索斜拉桥跨越新建河道,连接两侧游道,桥梁与新建河道正交,桥梁总长为44.0 m,桥宽12.0 m,一跨布置(见图1)。主梁横断面采用三个分离的箱型截面,中间通过横梁连接,跨中截面梁高为1.2 m,梁端各箱室设置支座支撑。本桥为单塔双索面装饰无背索斜拉桥,辅以桥面装饰结构,以体现该地区犁垦文化的特色。桥塔位于桥台上,采用1.0 m×1.0 m箱型截面,与主梁分离,桥面以上塔高22.98 m,倾角为114°,本桥共设置拉索7对,拉索锚固于横梁位置,拉索均采用叉耳双向螺杆型 $\phi 5 \times 7$ 高强度热镀锌钢丝,索长为24.2~48.7 m。



图1 景观装饰无背索斜拉桥建成后实景

本桥桥塔、主梁材料为Q355D,其他装饰类材料为Q235A。桥梁下部结构为钢筋混凝土结构,桥台为重力式桥台,基础为桩基础摩擦桩。支座均采用盆式橡胶支座,一个固定支座,三个单向活动支座,两个双向活动支座。

2 装饰无背索斜拉桥合理索力

无背索斜拉桥桥面以上构件以满足景观性效果为主,桥塔、拉索非主要受力构件,因此,满足景观效

果的斜拉索绷紧即可。由于本桥采用塔梁分离体系,拉索一端锚固在主梁上,一端锚固在桥塔上,拉索为柔性索,根据文献^[13],拉索在自重作用下产生一定的垂度,垂度大小与索力有关。拉索作用力见图2。

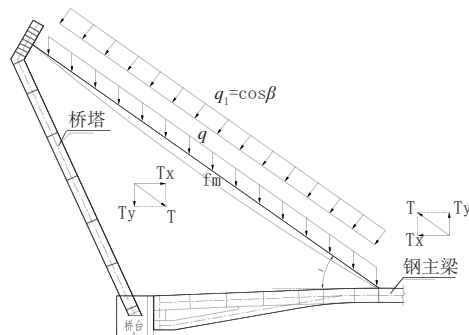


图2 景观无背索拉索体系受力图

由图2可知,拉索作用在主梁上的索力可以分为水平力及竖直向上的力,根据主梁受力特点,竖直力有利于结构整体受力,水平力主要依靠支座与主梁之间的摩擦力来抵抗;由于桥塔为受弯构件,拉索作用力主要由桥塔本身抗弯能力来抵抗。因此,景观装饰无背索斜拉桥合理索力控制因素如下:

(1)考虑拉索水平荷载效应后主梁水平力设计值小于支座承载力设计值;

(2)考虑拉索荷载效应后,桥塔荷载效应设计值小于承载力设计值;

(3)拉索荷载效应产生的垂度满足桥梁景观效果。

本工程桥台基础采用摩擦桩基础,上部结构为简支梁,不受基础沉降的影响,桥塔位于单侧桥台上,考虑1 cm基础沉降后,由于桥塔(桥台)与主梁同步下移,对拉索整体线型影响较小,因此,本工程不考虑基础沉降的影响。

以上第(1)、(2)点可应用下列表达式:

$$\gamma_0 S \leq R \quad (1)$$

式中: γ_0 为桥梁结构重要性系数,取1.1; S 为荷载效应组合设计值; R 为承载力设计值。

第(3)点根据梁端锚固点处索弯矩为零的条件,得到:

$$T \times f_m = \frac{1}{8} q_1 L^2 = \frac{1}{8} q L^2 \cos \beta \quad (2)$$

即:

$$T = \frac{1}{8} q L^2 \cos \beta / f_m \quad (3)$$

根据工程经验并参考文献^[14],对于景观装饰类桥梁,当拉索最大垂度 $L/350 \leq f_m \leq L/300$ 时(L 为拉索两锚固点间直线距离),拉索既满足桥梁景观效果,又

可避免张拉力过大,增加锚固端构造约束,因此,本文拉索垂度暂以 $f_m=L/350$ 进行计算分析。

基于上述分析,本文对装饰无背索斜拉桥合理索力计算流程梳理见图3,并结合确定的索力,进行结构整体静力及动力分析,对该索力进行验证。

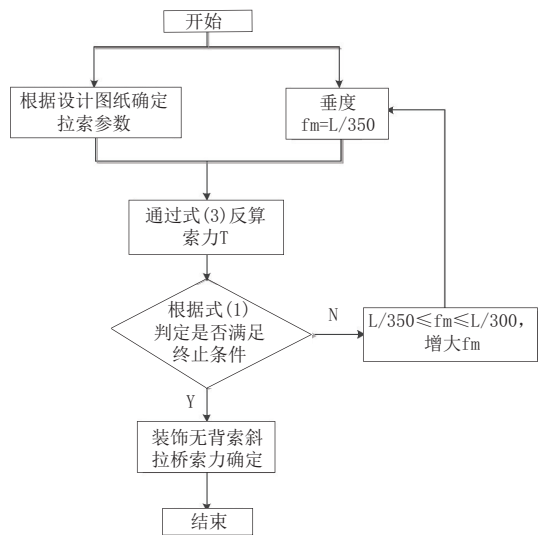


图3 拉索合理索力计算流程图

根据上图确定的合理索力,对主梁、主塔进行结构计算,结果见表1。

由表1可知,拉索垂度以 $f_m=L/350$ 计算索力后,考虑拉索的荷载效应,主梁水平力设计值小于支座承载力设计值,桥塔荷载效应设计值小于承载力设计值,同时,拉索荷载效应产生的垂度满足桥梁景观效果。

3 结构力学性能

利用经授权的大型有限元软件 MIDAS Civil 2021 建立本桥有限元模型,采用梁格法,桥梁共划分节点244个,梁单元284个,桁架单元14个。其中,桁架单元模拟拉索,共计7对。边界条件采用一般支撑约束,设置1个固定支座,3个单向活动支座,2个活动支座。由于上部结构为简支梁,主梁及桥塔施工完成后,一次成型拉索,因此,有限元计算主要针对成

桥阶段,不进行施工阶段模拟。有限元模型见图4。

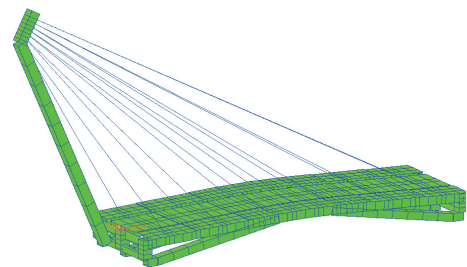


图4 全桥有限元模型

3.1 结构承载力计算

根据第二章索力计算结果,输入有限元模型中,按照规范《公路钢结构桥梁设计规范(JTG D64—2015)》第4.2节进行承载力计算,由于本工程桥塔、拉索主要起装饰作用,主要受力构件为主梁,因此索力作用分项系数定义为对结构承载力有利,取1.0,本桥为简支体系,不考虑支座沉降的影响。荷载组合为:1.2×结构自重+1.2×二期恒载+1.2(装饰物)+1.4×汽车荷载+1.05温度作用+1.0×索力。结构计算见表2。

根据表2可知,承载力极限状态下,结构正应力、剪应力均满足规范要求,同时,汽车荷载作用下结构竖向挠度亦小于规范限值,结构强度、刚度满足要求。

本工程桥面以上构件以满足景观性效果为主,桥塔、拉索非主要受力构件,且塔梁分离,索力较小。为了分析景观无背索斜拉桥合理索力对结构强度、刚度的贡献程度,对比分析了不考虑索力状态下结构力学性能,计算结果见表3,结果表明,不考虑景观无背索斜拉桥索力,结构正应力增大7.6%,剪应力增大8.1%,活载作用下竖向挠度增大7.0%。从受力机理上来说,本桥虽然形式上表现为景观装饰无背索斜拉桥,但实际上并非完全意义上的斜拉桥,拉索对主梁的贡献非常有限。由于景观索荷载作用对上部结构来说属于正向力,计算时不考虑其荷载效应将使结构安全储备增大,利用有限元计算时,为建模高

表1 拉索合理索力计算表

索编号	索长 L/m	倾角/ $^{\circ}$	索体重/ $(kg \cdot m^{-1})$	索力/ kN	水平荷载效应(主梁) γ_s/kN	支座约束抗力 R/kN	荷载效应(主塔) $\gamma_s/(N \cdot mm^{-1})$	主塔抗力 $R/(N \cdot mm^{-1})$
S1	24.16	56.2	1.3	7.6	402.27	800.0	78.98	270
S2	27.92	46.3	1.3	11.0				
S3	31.45	40.28	1.3	13.6				
S4	35.06	35.95	1.3	16.1				
S5	38.93	32.71	1.3	18.6				
S6	43.24	29.94	1.3	21.3				
S7	48.66	27.11	1.3	24.6				

表2 结构静力计算表

结构强度计算/MPa	规范限值/ MPa	挠度计算/ cm	规范限值/ cm
正应力	205.3	270	7.4
剪应力	96.8	155	2.8

效,建议景观无背索斜拉桥静力计算偏安全的不考虑索力对结构的影响。

表3 静力计算对比表

考虑索力/MPa	不考虑索力	考虑索力/cm	不考虑索力/cm
正应力	205.3	220.9	3
剪应力	96.8	104.6	2.8

3.2 结构动力计算

常规无背索斜拉桥由于存在较大的索力,拉索可以为主梁提供横向及竖向的作用力,主梁体系表现为多点弹性支撑体系,根据达朗贝尔原理,结构的振动方程为:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = 0$$

式中:[C]为体系的整体阻尼矩阵。

对常规无背索斜拉桥而言,由于斜拉索提供的多点弹性支撑的原因,整体阻尼矩阵较不考虑索力的景观斜拉桥有很大的差异,进而影响结构自振频率及阵型。景观装饰无背索斜拉桥拉索对主梁的贡献非常有限,因此,本文计算了不考虑索力状态下结构动力特性,并与考虑索力结构进行对比,仅限于篇幅,本文仅罗列了桥梁结构前10阶基频,频率对比见图5,振型参与质量比例见表4。

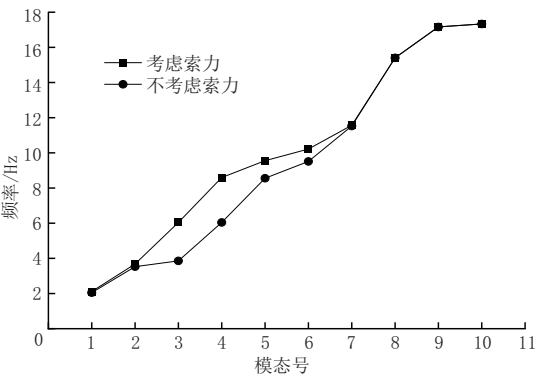


图5 频率对比图

对于桥梁结构,由于高阶振型在实际工程中出现的概率较小,往往把基频作为结构动力性能的主要指标,由图4可知,景观装饰无背索斜拉桥考虑索力后,结构第一、第二阶频率分别增大3.06%、4.3%,索力对结构第一、第二阶频率影响较小,第三~第六阶频率变化区间在7.4%~56.7%,索力对结构频率影响较大,第七~第十阶频率变化较小,均小于0.4%。

表4 振型参与质量比例对比表

模态号	考虑索力			不考虑索力		
	TRAN-X	TRAN-Y	TRAN-Z	TRAN-X	TRAN-Y	TRAN-Z
1	2.1	0	70.15	2.13	0	72.83
2	0	8.5	0	0	8.32	0
3	0	75.82	0	0	0	3.24
4	1.05	0	0.05	0	75.99	0
5	0	0	0	1.04	0	0.02
6	0.01	0	6.65	0	0	0
7	0.1	0	0.14	0.11	0	0.01
8	0.15	0	0	0.14	0	0.01
9	0.47	0	7.12	0.47	0	7.16
10	0	0.03	0	0	0.03	0
合计	3.88	84.35	84.11	3.89	84.34	83.27

由表4,考虑索力后,结构第一、第二阶振型参与质量方向不变,均发生在Z向,且参与质量比例变化较小,结构第三~第六阶参与质量方向发生改变,第七~第十阶频率变化较小。因此,为计算高效,对于景观无背索斜拉桥动力性能,索力提供的弹性支撑有限,建议计算偏安全的不考虑索力对结构动力的影响。

4 结 论

- (1)设定初始垂度进行索力计算,并结合索力荷载效应,与桥梁抗力进行对比,通过迭代计算,使索力荷载效应小于桥梁结构抗力,可以确定满足景观效果的无背索斜拉桥合理索力。
- (2)本文依托的工程项目结构承载力验算满足规范要求,索力对结构承载力的贡献较小,类似项目进行结构有限元计算时,建议景观无背索斜拉桥静力计算偏安全的不考虑索力对结构的影响。
- (3)对于景观无背索斜拉桥动力性能,索力对结构基频影响较小,提供的弹性支撑有限。

参考文献:

[1] 章博.1-32 m独塔无背索实训斜拉桥设计研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2017.

[2] 苟敬川,刘吉成,彭晶蓉,等.无背索斜拉桥主塔受力及抗震性能分析[J].地震工程学报,2019,41(5):1133-1140.

[3] 张紫辰,王根会.混合梁-塔斜拉桥力学特性及参数敏感性[J].兰州交通大学学报,2021,40(4):13-19.

[4] 王勤康.无背索双斜塔斜拉桥静力和整体稳定性分析[D].合肥:合肥工业大学,2017.

[5] 陈双庆,王树英,吕文舒,等.无背索斜塔斜拉桥的模式分析及1:1内共振研究[J].公路交通科技,2021,38(8):75-82.

[6] 邹晓光,陈恒大,郭飞,等.独塔斜拉桥震动基频的实用估算公式[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(6):905-910.

[7] 李志刚,阳霞,任伟新.一座异型斜拉桥的动力有限元模型与验证[J].