

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.029

## 温差对系杆拱桥吊杆索力的影响

靳兆鑫，于天来<sup>\*</sup>

(东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 系杆拱桥是内部高次超静定结构,在成桥之后受温差作用结构会产生温度内力和位移,从而对吊杆索力产生影响。针对该影响,以某系杆拱桥为实例,建立 Midas/Civil 有限元空间模型,分析温差作用对吊杆索力的影响规律。结果表明:温差作用对吊杆索力影响显著,短吊杆比长吊杆所受影响相对小些。升温时索力增大,降温时索力减小;升温 30 ℃ 时吊杆索力最大增量为 59%;降温 45 ℃ 时吊杆索力最大缩量为 88.51%。在系杆拱桥吊杆设计和张拉时,应充分考虑温差影响,使吊杆处于合理的受力范围内,提高吊杆的使用寿命。

**关键词:**温差;系杆拱桥;吊杆索力;有限元分析

## 1 引言

系杆拱桥是内部超静定外部静定结构,既有拱桥跨越能力大,又有梁桥对地基适应能力强的两大特点,整体结构轻巧造型美观,近年来在中国得到了大量的推广应用。但系杆拱桥受力复杂,施工难度大。在季节性温度变化时,系杆拱桥会产生较大内力变化,吊杆索力也会随之变化,特别是在东北等大温差地区,温差对系杆拱桥吊杆力的影响更为显著。

中国相关学者对桥梁温度的影响进行了许多研究。陈宝春、徐爱民等提出钢管混凝土拱桥计算合龙温度的概念,计算温度取日平均温度较为合理;张涛、李东兴以成都某钢箱系杆拱桥为对象,分析了钢箱梁温差变形对主梁线形控制和墩部温差变形对线形控制的影响;王友彪以某主跨 360 m 铁路上承式钢管混凝土拱桥为工程背景,研究了此类桥型的温度场和温度效应;陈宝春、刘振宇提出温度场的简化计算方法,同时研究了温度变化与脱黏的关系;何伟、朱亚飞等基于 Euler—Bernoulli 梁理论建立了变温时吊杆自由振动运动方程。该文以某系杆拱桥为实例,采用 Midas/Civil 有限元模型,分析温差对系杆拱桥吊杆索力的影响,为桥梁施工提供保障。

## 2 工程概况

吉林省延吉市延川桥北连延吉市高铁站,南接州体育馆和延吉机场,主桥为下承式空间提篮拱,拱跨 191 m,拱高 48 m,桥面以上高度为 38 m。提篮拱采用矩形钢拱箱断面形式,外侧主拱拱脚均布置于河岸一侧,内侧副拱拱脚布设于桥面之上(拱脚在桥面固定在滑动支座上),主、副拱最终合并为一道空间合并拱结构。全桥共设 38 根吊杆,布置间距为 8 m,单根吊杆采用 3 根  $\phi 15.2$  mm 环氧喷涂无黏结钢绞线的成品吊杆。其中 DG-1 和 DG-2 吊杆上端固定在副拱上。吊杆立面布置见图 1。

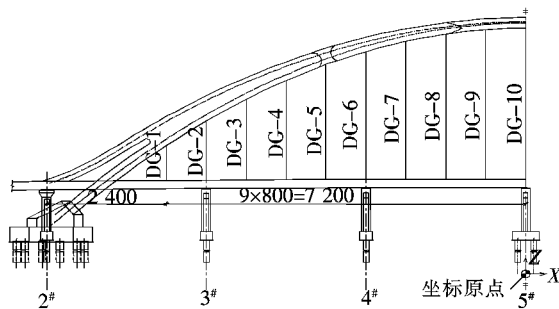


图 1 吊杆立面布置图(单位:cm)

收稿日期:2019-07-11(修改稿)

作者简介:靳兆鑫,男,硕士研究生,E-mail:1138380769@qq.com

\* 通信作者:于天来,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:tianlaiyu@126.com

3 试验数据分析

3.1 现场试验

为了获得吊杆索力,采用 JMM-268 动测仪和 JMM-268-A 加速度传感器进行测试。传感器固定在吊杆距桥面约 2.0 m 处。为了得到吊杆索力在温差作用下的真实变化规律,在封闭交通的情况下,分别在 10 月初和 10 月末测得两次吊杆索力。两次试验桥面

处的大气温度分别为 27、12 ℃,降温 15 ℃。

3.2 实测数据分析

吊杆在铰接边界条件下的索力计算公式:

$$T=4ml^2\left(\frac{f_n}{n}\right)^2-\frac{n^2\pi^2EI}{l^2}$$

式中: $l$  为吊杆拉索的计算长度; $f_n$  为吊杆第  $n$  阶固有频率; $n$  为频率阶次; $(n^2\pi^2EI)$  为考虑抗弯刚度的修正系数。

索力实测值见表 1。

表 1 索力实测数据

吊杆编号	理论计算 长度/m	27 ℃时实测		12 ℃时实测		索力变 化/kN	降温 15 ℃时索 力变化量/%
		索力/kN	频率/Hz	索力/kN	频率/Hz		
DG-1	13.00	215	6.94	178	6.32	-37	17.2
DG-2	17.93	208	4.95	163	4.38	-45	21.6
DG-3	22.27	217	4.07	166	3.56	-51	23.5
DG-4	26.08	187	3.23	132	2.71	-55	29.4
DG-5	29.34	205	3.00	148	2.55	-57	27.8
DG-6	31.99	193	2.67	135	2.24	-58	30.1
DG-7	34.03	208	2.61	147	2.19	-61	29.3
DG-8	35.52	197	2.43	141	2.06	-56	28.4
DG-9	36.39	206	2.43	146	2.04	-60	29.1
DG-10	36.70	218	2.48	157	2.10	-61	28.0

从试验结果看,随着气温的降低,吊杆索力减少,减少幅度为 17%~30%。温差对吊杆索力影响较大,当温度降低时吊杆索力会减小,温度升高时吊杆索力会增加,在吊杆设计和张拉时应考虑温度的影响。

结构整体内力重新分布,因此张拉控制索力不等于目标索力。该模型采用影响矩阵法计算修正得到各吊杆的张拉控制索力。活载作用对吊杆索力的影响较小,证实了主梁刚度较大。

4 有限元模型的有效性

4.1 模型建立

应用桥梁工程有限元分析软件 Midas/Civil 建立有限元模型。全桥共建立节点 457 个;单元 426 个,其中梁单元 388 个,桁架单元 38 个。吊杆模拟为只受拉的桁架单元,其余均为梁单元。根据原桥支座设置形式,在中间桥墩上设置固定铰支座,左右两侧沿桥纵向依次设置活动铰支座。有限元模型见图 2。

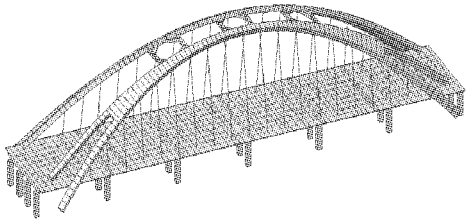


图 2 有限元模型

4.2 施加吊杆初张力

吊杆目标索力为 200 kN。采用 Midas/Civil 预应力荷载中初拉力模拟吊杆张拉索力,从两端向中间对称张拉。由表 2 可知:当按施工顺序完成吊杆张拉后,吊杆索力值均有所变化,这是由于吊杆张拉的过程使

4.3 吊杆计算长度的确定

为了确定吊杆的计算长度,选取了销轴中心之间的长度、耳板中心之间长度和锚杯中心之间长度进行计算。吊杆构造见图 3 所示。计算结果见图 4。

由图 4 可知:取消轴中心计算的吊杆索力、耳板中心计算的吊杆索力和锚杯中心计算的吊杆索力与实测索力的误差分别为 2%、4% 和 16% 左右,可见吊杆长度取消轴中心的计算值与实测值最为接近,故该文吊

杆的计算长度取吊杆销轴中心之间的长度。

表 2 吊杆张力变化值

吊杆编号	理论计算长度/m	各吊杆控制索力/kN	各吊杆目标索力/kN	活载作用下产生的吊杆索力/kN	张拉完成后各吊杆索力的变化量/kN
DG-1	13.00	171.00	191.70	13.51	20.70
DG-2	17.93	166.00	198.71	0.98	32.71
DG-3	22.27	150.00	196.24	8.41	46.24
DG-4	26.08	155.00	199.81	10.41	44.81
DG-5	29.34	166.20	196.99	6.43	30.79
DG-6	31.99	191.00	199.06	0.73	8.06
DG-7	34.03	210.40	196.85	5.76	-13.55
DG-8	35.52	223.00	195.40	7.81	-27.60
DG-9	36.39	221.60	197.29	5.26	-24.31
DG-10	36.70	199.40	199.33	0.54	-0.07

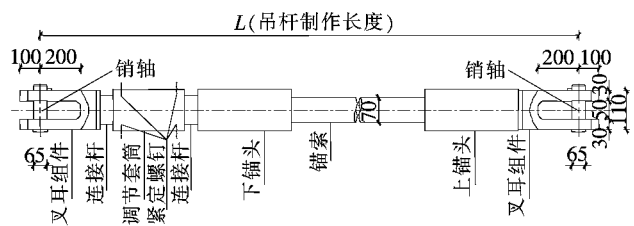


图 3 吊杆构造图(单位:cm)

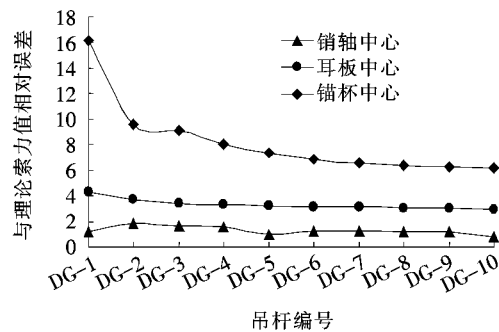


图 4 不同吊杆计算长度索力与实测索力的相对误差

4.4 模型计算与实测数据的对比分析

在降温温差 15 ℃ 时,各吊杆实测索力与有限元模型计算索力见表 3,相对误差见图 5。

由表 3、图 5 可知:短吊杆索力变化量比长吊杆索力变化量相对较小,短吊杆的测量误差最大值为 7.4%,而长吊杆的测量误差最大值在 5% 以内。有限元模型数值和实测数值基本吻合,说明该文有限元模型建立与实际结构相符。

表 3 降温 15 ℃ 吊杆索力变化值

吊杆编号	索力变化量/kN		实测/有限元
	实测	有限元	
DG-1	-37	-34.44	1.07
DG-2	-45	-42.51	1.06
DG-3	-51	-48.32	1.06
DG-4	-55	-52.97	1.04
DG-5	-57	-56.37	1.01
DG-6	-58	-58.22	1.00
DG-7	-61	-58.65	1.04
DG-8	-56	-58.69	0.95
DG-9	-60	-58.85	1.02
DG-10	-61	-59.01	1.03

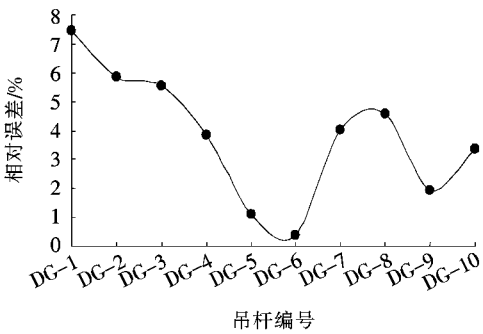


图 5 实测索力与模型计算索力相对误差

5 温差对吊杆索力影响规律研究

为了研究东北地区大温差对系杆拱桥的影响,当系统初始温度为 10 ℃,由于桥梁整体温度计算是线性问题,考虑夏季和冬季极端气温条件下的两种工况:工况 1 为整体升温 30 ℃;工况 2 为整体降温 45 ℃;分析两种工况下的拱肋位移、主梁位移、吊杆长度变化和吊杆索力的变化。拱肋位移节点取吊杆上节点,主梁位移节点取吊杆下节点。

拱肋竖向位移和横向位移如图 6 所示。温差变化时,拱肋的竖向位移相对较大,横向位移相对较小。升温时拱肋位移向上,降温时拱肋位移向下;随温差逐渐变大,拱肋位移也逐渐变大,升温 30 ℃ 时拱顶最大位移为 69.6 mm;降温 45 ℃ 时,拱顶最大位移为 -104.4 mm。大温差作用时,拱肋位移明显,不容忽视。

主梁纵向位移和竖向位移如图 7 所示。当温度变化时,主梁的纵向位移相对较大,竖向位移相对较小。升温时主梁增长,降温时主梁缩短;当温差变大时主梁的位移也随之增大,升温 30 ℃ 时最大位移 21.9 mm,

降温 45 °C 时最大位移 32.7 mm。

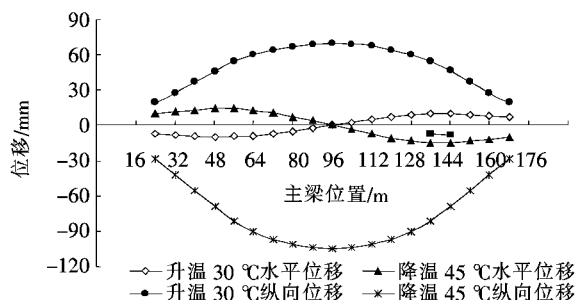


图 6 拱肋位移曲线

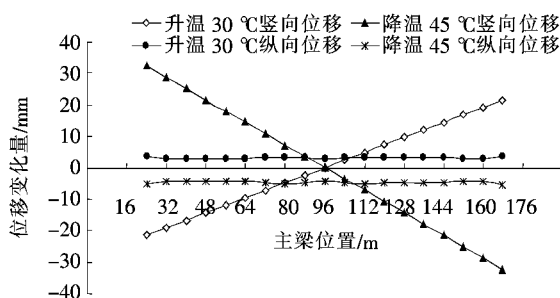


图 7 主梁位移曲线

在温差作用下吊杆自身长度变化如图 8 所示,由图 8 可知:升温时吊杆长度增长,降温时吊杆长度缩短;升温 30 °C 时吊杆长度最大增长量为 13.21 mm,降温 45 °C 时吊杆长度减小量最大为 19.82 mm。

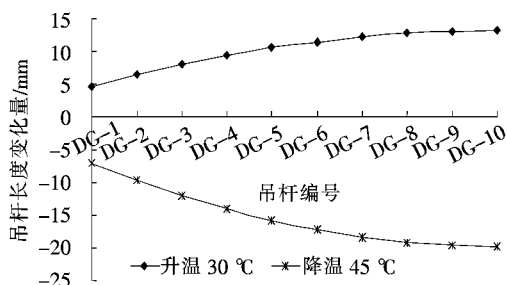


图 8 温差作用下吊杆自身长度变化曲线

吊杆索力变化如图 9 所示。

由图 9 可知:在温差作用时短吊杆索力变化较小,长吊杆索力变化较大;升温时索力增大,降温时索力减小;升温 30 °C 时 DG-1 和 DG-10 索力分别增大了 34.43% 和 59%,降温 45 °C 时 DG-1 和 DG-10 索力分别减小了 51.65% 和 88.51%;温差作用对吊杆索力

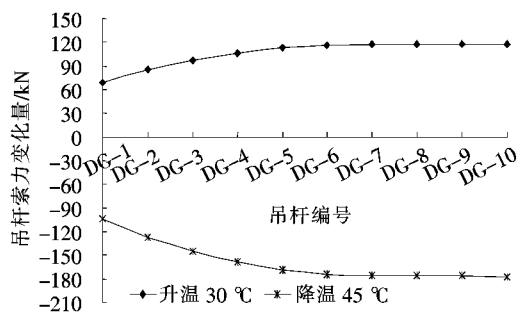


图 9 吊杆索力变化曲线

影响明显,短吊杆比长吊杆所受影响相对较小;在温差较大时吊杆索力会产生较大的变化。

## 6 结语

温差作用对吊杆索力的影响,短吊杆比长吊杆所受影响相对小些。升温时索力增大,降温时索力减小;升温 30 °C 时吊杆索力最大增量为 59%;降温 45 °C 时吊杆索力最大缩量为 88.51%。在系杆拱桥吊杆设计和张拉时,应充分考虑温差作用的影响,使得吊杆处于合理的受力范围内,提高吊杆的使用寿命。

## 参考文献:

- [1] 陈宝春,徐爱民,孙潮.钢管混凝土拱桥温度内力计算时温差取值分析[J].中国公路学报,2000(2).
- [2] 张涛,李东兴.大跨度钢箱系杆拱桥温差变形的规律与控制技术研究[J].公路工程,2017(1).
- [3] 王友彪.大跨度钢管混凝土拱桥温度场及温度效应分析[D].西南交通大学博士学位论文,2013.
- [4] 陈宝春,刘振宇.钢管混凝土拱桥温度问题研究综述[J].福州大学学报(自然科学版),2009(3).
- [5] 何伟,朱亚飞,何容.环境温度对钢管混凝土拱桥吊杆振动影响及张力测定研究[J].地震工程与工程振动,2016(4).
- [6] 代金鹏,王启才,张戎令.频率法测试系杆拱桥吊杆索力影响因素研究[J].施工技术,2014(17).
- [7] 张开银,王道恒.拱桥短吊杆内力识别新方法研究[J].中外公路,2018(3).
- [8] 王晟,颜东煌,宁平华,等.确定钢桁梁斜拉桥合理施工阶段索力的索长迭代法[J].中外公路,2019(3).