

大跨度桥梁健康监测过程中的温度影响研究

姚昌荣, 李亚东

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 大跨度桥梁健康监测是近年来工程界的研究热点,但是由于桥梁结构的复杂性和特殊性,监测变量受环境因素的影响较大,增加了系统评估的难度. 本文分析了大跨度桥梁在不同温度场荷载作用下的结构反应,研究表明结构各构件间的温度差和梯度温度效应对桥梁结构影响较大. 本研究的结果可为桥梁健康监测系统策略的制订提供参考.

关键词: 桥梁; 健康监测; 温度场

中图分类号: U445.4

文献标识码: A

大型桥梁结构的响应量(如应变、挠度、自振频率、振动幅度及振型等)除与结构本身特性及其所受的荷载有关外,还与结构所处的环境条件(如交通荷载、环境温度、湿度、风速、边界条件等)密切相关. 例如,在潮湿的天气,混凝土由于吸收了大量的湿气,这就增加了结构的质量,从而改变结构的自振频率^[1].

对于桥梁结构的整体评估与损伤识别,目前有多种方式. 研究表明:动力参数在数值模拟以及实验室条件下进行的简单结构的损伤识别是成功的,但实际应用则不尽人意. 其主要原因在于:实桥结构的动力参数受非结构因素的不确定性及边界条件等的影响较大,特别是环境因素的干扰,结果导致对反映桥梁结构健康状态较为敏感的参数(如结构刚度、变形以及自振频率、振型、阻尼等)难以准确测量. 因为这些参数本身不仅对结构的损伤较为敏感,对环境条件的变化也是非常敏感的,其中环境温度变化的影响最为明显. 因此,在健康监测过程中,不可忽略环境因素的影响.

本文拟结合四川宜宾金沙江中坝大桥(见图1),探讨健康监测过程中温度的影响. 该桥为252+175 m独塔混凝土斜拉桥,主梁采用边主肋加小纵梁,与横隔板及桥面板一起形成正交异型板混凝土

梁式结构,全桥共设40对斜拉索,桥宽25 m. 计算中采用ANSYS软件建立全桥模型,该模型基于静动载测试数据进行了修正^[2],修正后的有限元模型符合实际结构的静动力性能.

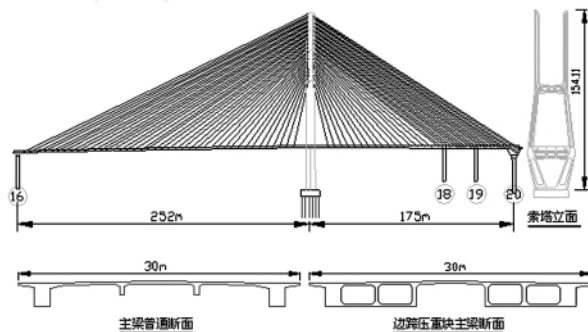


图1 中坝大桥总体布置及断面示意图

1 温度场模拟分析

对于大跨度桥梁结构,特别是斜拉桥、悬索桥等,其温度效应十分显著. 一般来说,桥梁结构的温度场可以分为整体温度差、不同构件之间的温度差以及构件本身的梯度温度影响等三种情况. 整体温度差是指结构基于同一基准温度,各构件的温度变化量相同,包括一天中气温变化以及季节气温变化;不同构件之间的温度差,主要是由于不同的材料热

收稿日期: 2008-02-15

作者简介: 姚昌荣(1974-),男,四川蓬溪人,博士研究生,主要从事大跨度桥梁施工控制及健康监测系统研究.

性能和几何形状等方面的差异造成的;梯度温度则指由于太阳辐射引起的结构表面和内部温度不一致,其与截面所处的位置有关。下面将分别讨论这三种温度场对桥梁结构的影响。

1.1 整体温度差效应

对于桥梁结构的整体温差效应,国内外已有许多学者对此进行了初步研究。Alampalli^[3]对一座小型桥梁两跨之间的连接切断作为模拟故障,同时降低温度以对比观察这两种因素对模态频率的影响,结果发现:当温度变化范围足够大时,温度导致模态频率的变化($\delta f = 40\% \sim 50\%$)比模拟故障($\delta f = 3\% \sim 8\%$)大了一个数量级。Roberts 和 Pearson^[4]对 1 座 9 跨 840 m 长的桥梁进行了长期测试,发现一年中模态频率改变达 3 ~ 4%。Farrar 等对 Alamosa Canyon 大桥在无交通荷载情况下监测的结果表明:该桥 1 阶模态频率昼夜变化的幅度可达 5%,并且采用自适应滤波的方式拟合温度与频率的相关关系用以预报频率。Peeters, Maeck 和 Roeck^[5]等对瑞士 Z24 桥(混凝土预应力桥梁,14 + 30 + 14 m)进行了 216 天的测试,在此期间该桥的 1 ~ 4 阶模态频率的波动范围分别为 14%、18%、16% 和 17%。樊可清^[6]等对香港汀九大桥 600 小时的测试数据进行了分析,结果表明:不仅环境温度波动会引起模态频率的变化,而且大跨度桥梁不同部位的温度分布状况对模态频率也有显著影响,并且提出了运用支持向量机(SVM)的非线性回归模型消除引起模态频率变化的环境温度和温度分布模式因素的影响。其他一些研究资料也表明:环境温度变化对结构的模态频率影响较大,不可忽视^[6,7]。

温度对结构自振频率的影响机理主要有以下几个方面:

(1) 温度变化将引起材料的弹性模量 E 发生变化。当温度升高时,钢筋混凝土材料的弹性模量将有所减小,而结构的自振频率 f 与 $\sqrt{E}$ 成比例关系,因此结构自振频率也会发生相应的变化。

(2) 温度变化引起基础边界条件的变化。例如,土壤的冻融影响桩基的约束条件,这也必然反应在结构的自振频率变化中。

(3) 与结构的受力状态有关。为了说明这点,以两端简支,并承受轴向力的等截面直梁为例,其弯曲振动方程为

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (1)$$

其中, T 是梁横截面的轴向拉力,对于轴向压

力,取 $T < 0$, ρ 是梁的材料密度, A 是横截面面积, EI 是梁的抗弯刚度。可以求出在轴向力 T 作用下第 i 阶自振频率为

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{i\pi}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A} \left(1 + \frac{TL^2}{i^2 \pi^2 EI} \right)} \quad (2)$$

从上式可知,轴向拉力时自振频率升高,反之,压力则使其频率降低。当压力 $T = \frac{(i\pi)^2}{l^2}$ 时,频率等于零,其物理意义是:轴向压力达到临界荷载时,梁不再振动。

对于复杂结构,则必须分析结构在温度荷载作用下产生的是拉力还是压力。比如,对于以压弯为主的斜拉桥结构,在温度升高时,索力有下降趋势,主梁伸长,而轴力变小,因此其自振频率增大;当温度降低时,索力有增大趋势,主梁缩短,轴力变大,其自振频率减小。

为了分析中坝桥在温度荷载作用下的结构反应,以 20℃ 作为基准温度,分别计算温度为 40℃ 和 0℃ 时结构的状况。图 2 表示结构在不同温度情况下,每根拉索的索力变化范围为 -10 ~ 11 kN,由于其恒载索力值较大因此索力的相对变化很小,可以忽略。图 3 表示结构在不同温度下的挠度变化:温度升高时中跨下挠,边跨上拱;反之,则中跨上拱,边跨下挠;其变化值随温度变化量的增大而增大。表 1 列出了结构在不同温度荷载作用下前 6 阶自振频率变化情况,各阶频率均有不同程度的变化,当温度升高时其频率变化幅度为 1.5% ~ 11%,当温度降低时其频率减小 1.8% ~ 12.9%。

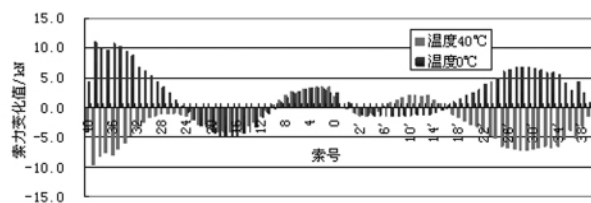


图2 温度荷载作用下索力变化示意图
(以 20℃ 作为基准温度)

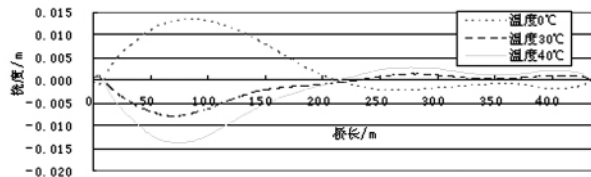


图3 温度荷载作用下主梁挠度变化示意图

上述分析表明:当结构的整体温度发生变化时,对结构挠度以及自振频率都有较大的影响。

表1 不同温度荷载作用下自振频率对比

序号	振型特征	计算频率(Hz)				
		20℃	0℃		40℃	
1	主梁纵漂一阶、塔纵弯	0.369 361	0.351 264	-4.9%	0.376 679	2.0%
2	主梁竖弯一阶	0.376 009	0.369 391	-1.8%	0.391 107	4.0%
3	主梁侧弯一阶	0.442 768	0.426 652	-3.6%	0.449 355	1.5%
4	主塔横弯一阶	0.476 924	0.448 061	-6.1%	0.505 994	6.1%
5	扭转一阶	0.623 042	0.542 827	-12.9%	0.692 083	11.1%

结构的自振频率还与结构的约束情况有关,如果桥头的伸缩缝被卡死,则温度升高轴力变大,频率就减小.当温度下降时,主梁不能自由缩短,轴力变小,因此频率也减小.例如,约束主梁两端,温度降低时(0℃),竖向一阶频率为0.397 48,频率增加5.7%.

1.2 各构件间的温度差

国内已有一些学者研究和观测斜拉索的温度效应^[8,9].文献^[8]对武汉长江二桥的观测资料表明:上午10时,PE外套表面温度比大气温度及PE管内壁温度高10℃左右;中午斜拉索内部温度上升并接近外表面温度;下午16时,拉索表面温度下降,而其内部温度达到一天的最高峰,并高于大气温度10℃以上;晚20时,索内外温度趋于一致,基本接近大气温度.对大佛寺长江大桥温度监测也表明:拉索的温度比梁塔的温度变化大^[9].由此可见,斜拉索与梁塔的温度存在较大的差异.为了定性分析索与梁塔的温度差效应,取基准温度20℃,各构件温差为零,计算了两种工况:工况一,假定气温上升10℃(即梁塔温度均为30℃),索的温度为40℃;工况二,假定气温上升15℃(即梁塔温度均为35℃),索的温度为45℃.计算结果见图4.由计算可知,索与梁塔的温度差对主梁的线形影响较大,在夏季一天中由于温度引起的挠度变化可能达到8.0 cm.

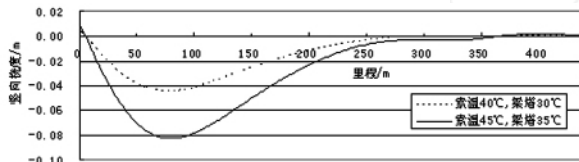


图4 索与梁塔温差产生的主梁挠度示意图
(以20℃作为基准温度)

1.3 梯度温度影响

由于太阳辐射,使结构沿与其轴线正交的方向形成非线性的温度梯度,导致结构产生次应力.在公路桥梁设计规范中,考虑主梁都带有较长的悬臂,两侧腹板受太阳直射的影响较小,梁底则不受日照,因此,不计及横桥向温度梯度作用.中坝桥在施工过程

中,曾于2003年4月对主梁温度场进行了连续观测^[14],测试结果表明:气温29℃时,梁顶30℃,梁顶板底面19℃,主肋底21℃.为了分析梯度温度对结构的影响,假定气温为30℃,梁顶30℃,顶板底面20℃,索温按前述考虑为40℃,暂不考虑塔的梯度温度.计算结果见图5.

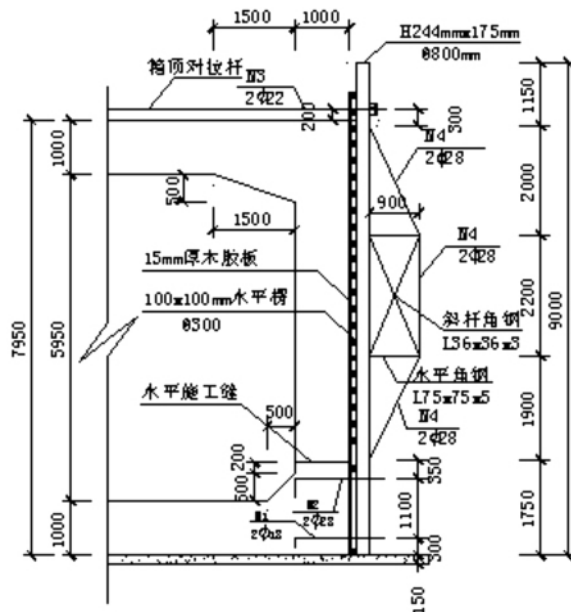


图5 梯度温度作用下主梁挠度示意图

2 结束语

从以上三方面的分析比较可见,对中坝大桥而言,整体升降温对结构挠度变化的影响较小,而构件间的温差对结构的影响则要大得多,如果再考虑梯度温度场的影响,则一天中主梁的挠度变化可能达到8.0 cm(就本桥而言);自振频率主要与结构的整体温度场相关较大,而构件间的温度差和梯度温度场对其影响则较小.这些结论对研究同类斜拉桥的温度效应提供了有用信息.

综上所述,在桥梁健康监测过程中,应对结构的温度场进行监测和分析,甄别监测量的变化是由温度引起的还是由结构损伤所致,从而减少误判,提高

监测的可靠性.

参考文献:

- [1] M. G. Wood. Damage Analysis of bridge structures using vibrational techniques [D]. Birminham: University of Aston, Birminham, UK, 1992.
- [2] 姚昌荣, 李亚东. 基于静动力测试数据的斜拉桥模型修正 [J]. 铁道学报, (已录用).
- [3] Alampalli S. Influence of in-service environment on modal parameters [A]. Proceeding of the 16th International Modal Analysis Conference (IMAC) [C]. Santa Barbara: IMAC, 1998. 111-116.
- [4] Bart Peeters, Johan Maeck, Guido De Roeck. Vibration-based damage detection in civil engineering: excitation sources and temperature effects [J]. Smart Materials and Structures, 2001, (10): 518-527.
- [5] 樊可清, 倪一清, 高赞明. 大跨度桥梁模态频率识别中的温度影响研究 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 67-73.
- [6] Sohn S, Dzonczyk M, Straser EG, Kiremidjian A S, Lay K H and Meng T. An experimental study of temperature effect on modal parameters of the Alamosa Canyon Bridge [J]. Earthquake Eng. Struct. 1999. 28: 879-897.
- [7] Rohrmann R G, Baessler M, Said S, Schmid W and Rücker W F. Structural causes of temperature affected modal data of civil structures obtained by long time monitoring [A]. Proceeding of the 16th International Modal Analysis Conference (IMAC) [C]. San Antonio: IMAC, 2000. 1-7.
- [8] 郭良友, 林一宁, 李文波, 刘虹. 武汉长江二桥的索力、温度和应力测量 [J]. 桥梁建设, 1995, (3): 44-53.
- [9] 符欲梅, 朱永, 陈伟民, 等. 桥梁温度测量系统的设计、开发及应用 [J]. 公路, 2005, (8): 1-6.
- [10] 曹发辉. 斜拉桥施工控制中的温度影响研究(硕士学位论文) [D]. 成都: 西南交通大学, 2004.

Research on Temperature Influences in Long-span Bridges Health Monitoring

YAO Chang-rong, LI Ya-dong

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The health monitoring study for long-span bridges has become a hot topic in civil engineering. However, because of its complexity and particularity in bridge structure, monitoring variables are greatly influenced by environmental factors, which results in more difficulties in evaluation. The paper analyzes structural responses in different temperature fields, and the research results show that effect of temperature difference among members and temperature gradient on bridge structure is remarkable. The results may be of reference for bridge health monitoring strategies.

Key words: bridge; health monitoring; temperature field

(责任编辑: 王建华)