文章编号: 1000-4750(2017)07-0069-10

## 超长复杂基础隔震结构静动力特性 温度相关性研究

杜永峰<sup>1,2,3</sup>,郑文智<sup>2</sup>,李万润<sup>1,2,3,4</sup>,李 慧<sup>1,2,3</sup>,王 浩<sup>4</sup>

(1. 兰州理工大学,甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室,兰州 730050; 2. 兰州理工大学防震减灾研究所,兰州 730050;

3. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 兰州 730050;

4. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘** 要:环境温度变化会引起超长基础隔震结构响应与动力特性发生改变。基于某超长复杂基础隔震结构健康监测系统实测的隔震层温度、隔震支座水平位移及上部结构加速度响应数据,分析了环境温度对隔震支座水平位移及结构动力特性的影响规律。首先,从理论上分析了温度对隔震支座水平位移的影响机理,并对隔震层温度与隔震支座水平位移进行了相关性分析。同时,对环境温度对基础隔震结构动力特性的影响机理进行了理论分析,并结合隔震支座温度相关性试验结果,对结构动力特性与环境温度的相关性分析结果进行了验证。结果表明,环境温度与隔震支座水平位移具有较强相关性;环境温度与隔震结构动力特性的相关性分析结果与隔震支座温度相关性试验所得到的结果具有较好的一致性;最后,通过参数回归分析,给出了超长复杂基础隔震结构隔震支座水平位移、模态频率的温度相关性模型,并给出了温度对超长复杂基础隔震结构模态频率的影响系数曲线,为准确、合理评估隔震结构的性能状态提供依据。

关键词:基础隔震结构;结构健康监测;温度相关性;隔震支座水平位移;模态频率 中图分类号:TU352.1+2 文献标志码:A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.02.0140

## STUDY ON THE DEPENDENCY OF STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS WITH ENVIRONMENTAL TEMPERATURE FOR LONG IRREGULAR BASE-ISOLATED STRUCTURES

DU Yong-feng<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Wen-zhi<sup>2</sup>, LI Wan-run<sup>1,2,3,4</sup>, LI Hui<sup>1,2,3</sup>, WANG Hao<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
 Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The responses (e.g. bearing initial displacement) and dynamic characteristics (e.g. modal frequency) of long irregular base-isolated structures (BIS) vary with environmental temperature variation. Based on monitoring data including the temperature of isolation layers, horizontal displacement of isolation bearings and acceleration response data of the superstructure of a long irregular BIS, the rule of horizontal displacement of isolation bearings and dynamic characteristics affected by environmental temperature variation are investigated.

作者简介:郑文智(1992-),男,甘肃人,硕士生,主要从事结构健康监测研究(E-mail: ce\_wzzheng@163.com);

收稿日期: 2016-02-29; 修改日期: 2016-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578274, 51178211, 51568041)

通讯作者: 杜永峰(1962-), 男, 甘肃人, 教授, 博士, 主要从事结构抗震与减震控制研究(E-mail: dooyf@lut.cn).

李万润(1985-),男,甘肃人,副教授,博士,主要从事结构健康监测研究(E-mail: ce\_wrli@lut.cn);

李 慧(1954-), 女, 甘肃人, 教授, 硕士, 主要从事结构抗震与减震控制研究(E-mail: lihuilanzhou@163.com);

王 浩(1980-), 男, 江西人, 研究员, 博士, 主要从事大跨度桥梁抗风抗震与健康监测研究(E-mail: wanghao1980@seu.edu.cn).

The mechanism of environmental temperature's effects on the horizontal displacement of isolation bearing and dynamic characteristics of BIS is analyzed theoretically. The dependency between the horizontal displacement of isolation bearing and environmental temperature is studied. Meanwhile, combining the conclusion of the dependency experiments of isolation bearing with temperature variation, the results of the dependency analysis of environmental temperature's effects on the dynamic characteristics of BIS are validated. The results show that the environmental temperature and the horizontal displacement of isolation bearing showed relatively strong dependency. The conclusion of dependency analysis using monitoring data is consistent with the dependency experiments of isolation bearings. Finally, the dependency models of the horizontal displacement of isolation bearings and modal frequency with environmental temperature variation and the curves of influence coefficients of environmental temperature affected on modal frequency are proposed. The basis of assessing the performance of BIS reasonably and accurately is laid.

# Key words: base-isolated structure; structural health monitoring; temperature dependency; isolation bearing horizontal displacement; modal frequency

近年来,采用铅芯橡胶隔震支座的结构隔震技 术在土木工程结构中得到了广泛应用,并趋于成 熟,但仍有值得深入研究的问题<sup>[1]</sup>。超长混凝土基 础隔震结构的非载荷(温度)变形导致结构产生较大 的应力,虽然柔性隔震层使得应力得以释放,但隔 震支座在施工期和运营初期会产生较大的初始水 平位移,会对隔震结构的性能产生较大影响<sup>[2-4]</sup>。 与此同时,基于结构健康监测领域振动测试技术的 结构损伤诊断方法也得到了充分的发展, 而温度会 对结构动力特性产生较大影响<sup>[5-6]</sup>,研究环境温度 对隔震结构动力特性的影响规律,建立客观、定量 的数学模型,消除环境的影响,是准确诊断结构损 伤和合理评估结构性能状态的保证。国内外众多学 者对隔震支座在不同温度条件下的力学性能进行 了试验研究,表明温度对铅芯橡胶隔震支座力学性 能有明显影响,特别是在低温条件下,影响更为显 著<sup>[7-12]</sup>。如刘文光等<sup>[8,12]</sup>研究了-40℃~40℃温度环 境条件下 GZY300 型 GZY600 型铅芯橡胶隔震支座 的力学性能,提出了隔震支座屈服后刚度的温度修 正方程;李慧等<sup>[9]</sup>研究了-20℃、-35℃、-50℃低温 环境条件下的隔震支座力学性能,表明铅芯橡胶隔 震支座在低温环境条件下的刚度与常温下有较大 偏差; 李黎等<sup>[10]</sup>对 GZY400 型和 GZY600 型铅芯橡 胶隔震支座进行了-40℃~50℃温度环境条件下的 相关性试验,提出了反映不同温度对隔震支座力学 性能影响程度的近似公式: 庄学真等[11]研究了直径 600 mm的LRB和RB隔震支座在-20℃~40℃温度 环境条件下的力学性能,提出了隔震支座屈服后刚 度的温度修正方程。众多学者的研究结果表明温度

会对隔震支座力学性能产生较大影响,进而引起隔 震结构动力特性产生较大变化。国内外学者通过实 测数据研究了桥梁结构模态频率与环境温度的相 关性,并建立了相关性模型<sup>[13-16]</sup>。而对于环境温度 对隔震建筑结构响应、动力特性的影响研究则相对 较少[17-20],如朱文正等[19]针对某大跨隔震钢结构运 营期的监测数据,分析了隔震支座水平位移随温度 的变化关系。规范[21]关于隔震设计并未考虑温度对 隔震支座的影响,这将对分析结果的合理性产生影 响。因此,为了研究环境温度对超长基础隔震结构 隔震支座水平位移以及动力特性的影响,对一栋超 长复杂的基础隔震结构安装了长期结构健康监测 系统,监测隔震层温度、隔震支座水平位移和上部 结构加速度响应。通过监测数据分析揭示了环境温 度作用下基础隔震结构支座水平位移的变化机理, 研究了支座水平位移随环境温度的变化规律,建立 了温度相关性模型;分析推导了温度对基础隔震结 构动力特性的影响机理,基于动力响应数据,定量 给出了该基础隔震结构动力特性的温度相关性模 型及温度影响系数曲线,并与隔震支座温度相关性 试验结果进行了对比分析。这为正确评估隔震结构 的性能状态提供了依据。

## 1 超长基础隔震结构健康监测系统

该隔震结构分为1、2、3三个塔楼,主体6层, 框架结构,楼盖为梁板体系,平面尺寸分别为 32.7 m×18.6 m、64 m×18.6 m、32.4 m×18.6 m,隔 震层采用大底盘形式。结构健康监测系统等级为二 级,即局部实时在线和定期实时监测相结合的健康 监测系统<sup>[2]</sup>。主要监测内容有隔震层温度、隔震支 座纵向(x向)水平位移、横向(y向)水平位移和上部 结构水平向加速度响应。传感器测点布置如图 1、 图 2 所示,采集设备参数及支座参数见表 1、表 2。







图 2 位移和温度传感器布置示意图

Fig.2 Arrangement plan of displacement and temperature sensors

表1 采集设备参数

 Table 1
 Instrumental parameters of gathering data

设备	型号	数量	量程	采样频率
8通道加速度采集仪	DASP2006	1	_	100 Hz
10 通道位移采集仪	ZTIC	1	—	10 Hz
加速度传感器	941B	6	+/-2 g	—
位移传感器	WPS-S	10	500 mm	_
温度传感器	RC-4HA/C	5	−30°C~60°C	1/h
不间断电源	UPS	1	_	

表 2 隔震支座参数 Table 2 Parameters of isolation bearings

				0	
类别	LRB500	LRB600	LRB700	LRB800	LNR800
有效直径/mm	500	600	700	800	800
竖向刚度/(kN/mm)	1411	2271	3661	4399	3871
100%等效	1 (07	2 004	0.010	2 407	1 500
水平刚度/(kN/mm)	1.697	2.094	2.313	2.497	1.588
橡胶层总厚度/mm	96	110	130	140	140
屈服后刚度/(kN/mm)	1.156	1.484	1.699	1.893	2.251
屈服力/kN	65.4	94.2	128.2	167.5	_

## 2 隔震支座位移-温度相关性分析

## 2.1 温度对隔震支座水平位移的影响机理

非载荷变形在超长混凝土结构中占主导地位, 超长混凝土结构需重点考虑混凝土浇筑后因温度 变化、混凝土收缩等变形引起的结构纵向工作效 应<sup>[20-22]</sup>。超长基础隔震结构在施工期及运营初期, 环境温度、混凝土收缩会使结构产生较大应力,而 柔性隔震层使得混凝土收缩产生的应力得以释放, 使得隔震支座产生较大的初始水平位移,且混凝土 干缩引起的隔震支座水平位移并不能恢复。由于初 始水平位移的存在及支座竖向偏心荷载作用会严 重影响隔震支座的隔震性能,初始水平位移过大会 使支座不能满足罕遇地震作用下的水平位移需求。 以下对隔震支座初始水平位移的产生机理进行 探讨。

自然环境条件下,混凝土收缩应变为:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\Delta T} + \varepsilon_{\rm sh}$$

式中:  $\varepsilon_{\Delta T}$  为环境温度引起的混凝土收缩应变;  $\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{as} + \varepsilon_{cs}$ ,  $\varepsilon_{sh}$  为混凝土收缩应变,  $\varepsilon_{as}$  为自收 缩应变,  $\varepsilon_{cs}$  为干缩应变。对于普通商品混凝土,其 自收缩应变所占比例较小,可以忽略<sup>[22]</sup>。因此,混 凝土收缩主要受环境温度和相对湿度的影响。由温 度引起的混凝土收缩应变可取为:

$$\varepsilon_{\Delta T} = \alpha \Delta T \tag{2}$$

式中:  $\alpha$  为混凝土膨胀系数,取 1.0×10<sup>-5</sup>℃;  $\Delta T$  为 温度变化量。

采用规范 CEB-FIP<sup>[23]</sup>混凝土干缩模型,收缩(膨胀)应变计算式:

$$\mathcal{E}_{\rm cs}(t,t_{\rm s}) = \mathcal{E}_{\rm cs0}\beta_{\rm s}(t-t_{\rm s}) \tag{3}$$

$$\varepsilon_{\rm cs0} = \varepsilon_{\rm s}(f_{\rm cm})\beta_{RH} \tag{4}$$

$$\mathcal{E}_{\rm s}(f_{\rm cm}) = (160 + 10\beta_{\rm sc}(9 - f_{\rm cm} / f_{\rm cm0})) \times 10^{-6}$$
 (5)

$$\beta_{\rm s}(t-t_{\rm s}) = \left[\frac{(t-t_{\rm s})}{350 \times (h/h_0)^2 + (t-t_{\rm s})}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55[1 - (RH / 100)^3], 40\% \leq RH < 99\% \\ 0.25, \qquad RH \geq 99\% \end{cases}$$

(7)

式中:  $\varepsilon_{cs0}$ 为混凝土最大收缩应变;  $\beta_s$ 为混凝土收缩系数;  $\varepsilon_s$ 为混凝土的干燥收缩应变;  $\beta_{RH}$ 取决于环境的相对湿度 RH/(%);  $\beta_{sc}$ 为与水泥类型相关的系数,普通水泥取 5,快硬水泥和高强水泥取 8;  $f_{cm}$ 为混凝土 28 d 圆柱体抗压强度; t/d为混凝土龄期、 $t_s/d$ 为混凝土干缩开始时的龄期、 h/mm 为构件的名义尺寸;  $h=2A_c/u$ ,  $A_c$ 为构件横截面面积, u为构件截面周界长度,  $h_0=100$  mm。

由于柔性隔震层的设置,基础对上部结构的侧 向约束较弱,上部结构的变形最终转化为隔震支座 水平位移,环境温度引起的隔震支座水平位移变化 可表述为:

(1)

(8)

式中, L<sub>0</sub>为结构构件初始尺寸。

2.2 隔震支座水平位移-温度相关性分析

温度与支座位移的相关系数定义如下:

 $\Delta L = \varepsilon_{\Lambda T} L_0$ 

$$R(T,D) = \frac{\operatorname{Cov}(T,D)}{\sqrt{\operatorname{Cov}(T,T)\operatorname{Cov}(D,D)}}$$
(9)

式中: Cov(T,D) 是变量温度T 与位移D之间的协 方差系数;  $R \in [-1,1]$ ,当R的绝对值趋近于1时, 说明温度和隔震支座水平位移具有强相关性,其相 关性可用线性回归函数表示。

2.2.1 施工期隔震支座水平位移-温度相关性分析

该超长基础隔震结构采用 C30 商品混凝土, 主 要考虑温度引起的混凝土收缩变形和混凝土干缩 变形的叠加,对于普通商品混凝土,干燥收缩是主 要成分,且持续到混凝土结构的整个寿命周期,而 干燥收缩变形是不可逆的,由温度引起的混凝土变 形随温度变化可恢复。基于实测 2011 年 8 月~2012 年7月隔震层环境温度与隔震支座水平位移数据<sup>[2]</sup>, 对该超长基础隔震结构<sup>[20]</sup>, 取 $\beta_{sc}$ =5,  $h/h_0$ =2,  $t_s$ =3 d,  $f_{cm0}=10$  MPa。规范 CEB-FIP<sup>[23]</sup>中采用圆柱体试件, 换算为我国采用的 150 mm×150 mm×150 mm 立方 体试件抗压强度,即 fcm=32 MPa,相对湿度 RH 取 60%,则由式(2)~式(7),可求得 $\beta_{RH}$ =-1.215,  $\varepsilon_{s}(f_{cm})$ =4.5×10<sup>-4</sup>,  $\varepsilon_{cs0}$  = 5.47×10<sup>-4</sup>, 2011 年 8 月~2012 年7月的该超长基础隔震结构  $\beta_{s} \in (0.47, 0.58)$ ,则 混凝土平均干缩应变 $\varepsilon_{\rm cs}=2.87\times 10^{-4}$ ,由温度引起 的混凝土平均收缩应变 $\varepsilon_{\Lambda T} = 1.7 \times 10^{-4}$ ,由此可以 看出,温度引起的混凝土收缩变形约占 37.2%,混 凝土干缩变形约占 62.8%。

分离混凝土干燥收缩引起的隔震支座位移,得 到温度引起的隔震支座位移。对实测的隔震层温度 与隔震支座水平位移数据进行相关性分析, A 测点 隔震支座纵向、横向水平位移与隔震层温度的相关 系数分别为-0.96、-0.95, B 测点隔震支座纵向、 横向水平位移与隔震层温度的相关系数分别为 -0.96、-0.99,表示随环境温度升高,隔震支座水 平位移将会降低,如图 3。通过参数回归分析,得 出施工期隔震支座水平位移的温度相关性模型 如下:

|--|

$u_x = -8.75 + 0.33T$ , $R = -0.96$	(10a)
$u_v = -1.35 + 0.05T$ , $R = -0.95$	(10b)

测点 
$$B$$
 支座水平位移:  
 $u_x = 11.53 - 0.46T$ ,  $R = -0.96$  (11a)

$$u_y = 2.41 - 0.064T$$
,  $R = -0.99$  (11b)





#### 2.2.2 运营期隔震支座水平位移-温度相关性分析

基于该超长基础隔震结构健康监测系统,实测 2013 年 9 月~2014 年 4 月隔震层环境温度如图 4, 共有 5 个温度测点。由图 4 可见,该地区的温度分 布具有明显的季节性更替特征,结构中间位置的温 度变化明显滞后于结构端部。





滑动平均处理,对实测温度数据以天为单位取均 值。普通混凝土干缩一年可完成收缩终值的 75%~ 80%<sup>[22]</sup>,该结构运营3年,故运营期主要考虑环境 温度作用引起的隔震支座水平位移。







对运营期实测的隔震层温度与隔震支座水平 位移数据进行相关性分析,如图 6 所示。测点 1 隔 震支座纵向、横向水平位移与隔震层温度的相关系 数分别为-0.86、-0.79,测点 5 隔震支座纵向、横 向水平位移与隔震层温度的相关系数分别为-0.80、 -0.76。通过参数回归分析,得出运营期隔震支座水 平位移温度相关性模型如下:

测点1支座水平位移:

$$u_x = -5.94 + 0.30T , \ R = -0.86$$
 (12a)

$$u_y = -2.20 + 0.11T$$
,  $R = -0.79$  (12b)

测点5支座水平位移:

$$u_x = 4.73 - 0.21T$$
,  $R = -0.80$  (13a)

$$u_v = 3.47 - 0.16T$$
,  $R = -0.76$  (13b)

实测数据分析表明,尽管施工期混凝土干燥收 缩引起的隔震支座水平位移占主要成分,但由于季 节性温差引起的隔震支座不容忽视,且较运营期明 显。由图7可见,结构端部隔震支座水平位移温度 相关系数均明显大于结构中间位置隔震支座水平 位移温度相关系数,隔震支座水平位移受温度影响 显著,但并未表现出明显的线性关系,是由于结构 还受到其他因素的影响,如隔震支座在有初始水平 位移的条件下,竖向荷载偏心、环境激励作用的影 响,短期内对结构的影响并不明显,但长期的影响 不可忽视,在今后研究中,需要基于长期监测数据, 对次要因素的影响进行量化分析。









Fig.7 Dependency coefficients of horizontal displacement with temperature variation of bearing

## 3 结构动力特性-温度相关性分析

#### 3.1 隔震支座-温度相关性试验

铅芯橡胶隔震支座是由叠层橡胶与铅芯组成, 其弹性模量、泊松比以及性能与单一的叠层橡胶或 铅芯大不相同。低温环境对隔震支座的性能有明显 影响,特别是在黑龙江、新疆、西藏及甘肃部分地 区,冬季极端低温对隔震支座力学性能的影响不可 忽略。学者们对建筑用铅芯橡胶隔震支座进行了更 全面的温度相关性试验<sup>[10,12]</sup>,当*T* ∈ (-40,40)℃时, 温度对隔震支座屈服前刚度、等效刚度、屈服后刚 度(γ=100%)的影响系数如图 8。





## 3.2 环境温度对隔震结构模态频率的影响机理

温度影响结构模态频率的主要方式有 3 种: 1) 温度变化会导致结构材料弹性模量产生改 变[24-26],导致隔震支座刚度发生变化,从而引起基 础隔震结构模态频率的改变; 2) 温度变化使得超静 定结构产生温度应力,导致结构发生变形,从而引 起结构模态频率的改变[24]。由温度引起的基础隔震 结构的变形主要在施工期和服役初期,且这部分变 形可通过隔震支座产生水平位移得以释放:3) 温度 变化会引起结构边界条件发生改变,从而引起结构 模态频率的改变[26]。由于隔震支座对上部结构的侧 向约束较弱,使环境温度作用引起的应力释放。因 此,温度导致基础隔震结构模态频率发生变化的最 主要方式是引起隔震支座材料弹性模量的改变,导 致隔震支座刚度的改变,从而引起隔震结构模态频 率的改变。以下探讨温度对基础隔震结构模态频率 的影响机理。

多自由度体系的无阻尼自由振动方程为:

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{\ddot{u}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{u} = 0 \tag{14}$$

式中: *M*、*K*分别为体系的质量矩阵和刚度矩阵; *ü*、*u*分别为体系的加速度响应和位移响应。由 式(14)可得出体系的频率方程:

$$|\boldsymbol{K} - \boldsymbol{\omega}^2 \boldsymbol{M}| = 0 \tag{15}$$

由式(15)可得到基础隔震结构自振频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\rm b}}{M}} \tag{16}$$

式中:  $K_b$ 为隔震层总刚度;  $M = m_b + \sum_{i=1}^{n} m_i$ ,  $m_b$ 为隔震层总质量,  $m_i$ 为上部结构第i层的质量, n为上部结构层数。

环境温度作用下,铅芯橡胶隔震支座的刚度受 温度的影响程度可定量的表述为:

$$K_{\rm b} = R_{\rm K} K_{\rm b}^{20} \tag{17}$$

式中:  $R_{\rm K}$  为温度对隔震支座刚度的影响系数,基于隔震支座温度相关性试验可表示为 $R_{\rm K} = a + b {\rm e}^{-\beta T}$ , T 为隔震支座所处的环境温度, $a \ b$ 、  $\beta$  可依据温度相关性试验取值; $K_{\rm b}^{20} = \sum_{i=1}^{n} K_{\rm bi}^{20}$ 为环境温度 20℃时隔震层总水平刚度, $K_{\rm bi}^{20}$ 为环境温度 20℃时第i个支座的水平刚度,n为支座个数。由 式(16)、式(17)可将结构的自振频率可表示为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_{\rm K} K_{\rm b}^{20}}{M}} \tag{18}$$

进一步可将式(18)表示为:

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_b^{20}}{M}} R_f \tag{19}$$

式中,  $R_{\rm f} = \sqrt{R_{\rm K}}$ , 定义为环境温度对隔震结构模态频率的影响系数。

由式(19)可知,基础隔震结构自振频率的改变 主要由结构质量、刚度及温度影响系数的变化引 起,而通常情况下,结构质量的变化一般较小,由 结构质量变化引起的结构自振频率的改变很小;而 环境温度对隔震支座的力学性能会产生较大的影 响,特别是显著的季节性温差环境条件,会引起隔 震支座刚度的变化,从而引起隔震结构模态频率的 改变。结构在服役的过程中,地震、爆炸冲击、台 风等突发荷载作用下将引起结构不可逆的损伤,模 态频率的改变是不可逆的,而环境温度引起的隔震 结构模态频率的变化是周期性的,有时会掩盖结构 损伤导致的结构模态频率的变化,这将为隔震结构 性能状态评估带来干扰,故获取环境因素作用下结 构模态频率的演变规律,可为合理评价结构的性能 提供依据。

#### 3.3 隔震结构模态频率-温度的相关性分析

基于实测上部结构水平向加速度响应数据识 别的结构一阶纵向、横向模态频率<sup>[2]</sup>。采用参数回





图 9 模态频率-温度相关性



基于一阶横向、纵向频率-温度相关性拟合曲 线,得到常温 20℃时对应的结构一阶横向频率为 2.367 Hz, 一阶纵向频率为 2.74 Hz。由于 2013 年 8 月未测到该结构的响应数据,故依据式(20)和一阶 横、纵向频率-温度相关性拟合曲线,取值 20℃时 该结构的频率值,得到该超长基础隔震结构一阶频 率、环境温度随时间的变化曲线,如图 10。





Fig.10 Curves of modal frequency with temperature variation

通过分析该基础隔震结构模态频率随结构服 役环境温度的变化关系,得出温度越低,温度对基 础隔震结构的模态频率影响越明显。以环境温度 20℃时所对应的基础隔震结构隔震层刚度及模态 频率为基准值,由式(19)可得到温度对该基础隔震 结构的一阶纵向频率、一阶横向模态频率的影响系 数。当温度7∈(-6,22)℃时,温度对结构一阶横向 模态频率的影响系数  $R_{f}^{y} \in (0.998, 1.035)$ , 一阶纵向 模态频率的影响系数  $R_{\rm f}^x \in (0.996, 1.056)$ ,如图 11。 温度T ∈ (-6,22)℃时,该基础隔震结构模态频率的



影响系数可表述为:

 $R_{\rm f}^{x} = 0.974 + 0.062 {\rm e}^{-0.0462T}, R^{2} = 1$ (21a)  $R_{\rm f}^{y} = 0.99 + 0.031 {\rm e}^{-0.0574T}, R^{2} = 1$ (21b)

环境温度作用下,隔震支座处于弹性状态,故 采用温度对隔震支座屈服前刚度和等效刚度的相 关性试验结果进行对比分析。依据已有温度相关性 试验,李黎等<sup>[10]</sup>试验结果表明,当温度*T*  $\epsilon$ (-6,22)°C时,温度对隔震支座屈服前刚度的影响 系数 $R'_{\rm K} \in (0.980, 1.106)$ ,由式(19)可知,当  $T \in (-6, 22)$ °C,对结构模态频率的影响系数  $R'_{\rm f} \in (0.990, 1.052)$ ;刘文光等<sup>[12]</sup>试验结果表明,当  $T \in (-6, 22)$ °C 时,温度对隔震支座等效刚度 ( $\gamma = 100\%$ )的影响系数 $R'_{\rm K} \in (0.996, 1.097)$ ,由 式(19)可知,当 $T \in (-6, 22)$ °C,温度对结构模态频 率的影响系数 $R'_{\rm f} \in (0.998, 1.047)$ ,如图 12。



Fig.12 Comparison of results

对比分析试验与实测结果可以发现,频率影响 系数存在误差的原因主要有两个方面。一方面,温 度对隔震支座刚度影响系数是由各种直径的铅芯 橡胶隔震支座温度相关性试验结果统计分析得出 的,与支座直径、试验条件密切相关,实测温度对 结构一阶横向模态频率的影响系数偏小于温度相 关性试验结果<sup>[10,12]</sup>,一阶纵向模态频率的影响系数 与温度相关性试验结果<sup>[10,12]</sup>吻合较好;另一方面, 环境因素中,温度是影响隔震支座刚度的主要因 素,从而引起模态频率的变化。基于实测分析的结 果,隔震支座刚度还受到其他次要因素的影响,也 会引起基础隔震结构模态频率的变化,需在后续研 究中进行更加深入的研究。

## 4 结论

本文从理论上分析了温度对隔震支座水平位

移、隔震结构模态频率的影响机理,给出了温度影 响系数 *R*<sub>f</sub>,通过对某超长基础隔震结构的实测数据 进行分析,揭示了环境温度对基础隔震结构隔震支 座水平位移、模态频率的影响规律,得出以下结论:

(1)施工期及运营初期混凝土干缩引起的隔震 支座水平位移约占总支座水平位移的 62.8%,且为 永久性水平位移,以混凝土干缩引起的支座水平位 移为依据,建议隔震结构设计时,为隔震支座施加 反向水平位移以抵消混凝土干缩引起的隔震支座 水平位移,平衡隔震支座受力状态,以提高结构运 营期的隔震性能。

(2) 对施工期及运营期隔震支座水平位移与温度数据进行相关性分析,得到隔震支座水平位移与隔震层温度的相关性模型。结果表明,环境温度引起的隔震支座水平位移在施工期较运营期更为显著。

(3) 环境温度影响基础隔震结构模态频率最主要的方式是引起隔震支座材料弹性模量的改变,导致隔震支座刚度的改变,从而引起基础隔震结构模态频率的改变。混凝土收缩引起的隔震支座水平位移较小,对支座水平刚度的影响很小,故对隔震结构模态频率的影响可忽略。

(4) 环境温度作用下,该基础隔震结构模态频率变化呈周期性。提出量化环境温度引起隔震结构 模态频率发生变化的影响系数  $R_f$ ,且实测数据分析 得出的影响系数  $R_f$ 与试验得出的影响系数  $R_f^{t}$ 具有 较好的一致性;并通过分析给出了该结构在  $T \in (-6, 22)^{\mathbb{C}}$ 时的温度对频率的影响系数曲线,为 消除温度因素的影响,合理评估结构隔震性能状态 提供依据。

(5)环境因素中,温度引起隔震结构模态频率 发生较大变化,但还受到次要因素的影响,可基于 长期监测数据,对各处的温度影响系数进行修正, 将由于温度变化引起的隔震结构模态频率变化的 成分与支座损伤引起的模态频率变化的成分分离, 为准确、合理评估隔震结构性能提供依据。

## 参考文献:

 [1] 李万润,郑文智,杜永峰,等.基础隔震结构健康监测 系统的设计与实现(I):系统设计[J].地震工程学报, 2016,38(1):94-102.

Li Wanrun, Zheng Wenzhi, Du Yongfeng, et al. Design and implementation of health monitoring system for base-isolated structure (I): System design [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1): 94–102. (in Chinese)

- [2] 杜永峰,郑文智,李万润,等. 基础隔震结构健康监测系统的设计与实现(II):系统实现[J]. 地震工程学报,2016,38(3):344-352.
  Du Yongfeng, Zheng Wenzhi, Li Wanrun, et al. Design and implementation of health monitoring system for base-isolated structure (II): System implementation [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(3):
- 344-352. (in Chinese)
  [3] 党育,刘营科. 温度及收缩作用下超长隔震结构的变形分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(13): 42-45.
  Dang Yu, Liu Yingke. Deformation analysis of overlong isolated buildings due to temperature and shrinkage effects [J]. Building Structure, 2013, 43(13): 42-45. (in Chinese)
- [4] 董云菲. 考虑支座非载荷初始位移的超长复杂隔震结构抗震性能分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
   Dong Yunfei. Seismic performance analysis of irregularly super-long isolated structure considering initial unloaded displacemental isolators [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [5] 闵志华,孙利民,淡丹辉.影响斜拉桥模态参数变化的环境因素分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(10): 99-105.

Min Zhihua, Sun Limin, Dan Danhui. Analysis of environmental factors influencing modal parameters of cable-stayed bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(10): 99–105. (in Chinese)

[6] 孙君,李爱群,丁幼亮,等. 润扬大桥悬索桥模态频率-温度的季节相关性研究及其应用[J]. 工程力学,2009,26(9):50-55.
 Sun Jun, Li Aiqun, Ding Youliang, et al. Research on

correlation of modal frequency and seasonal temperature of Runyang suspension bridge [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(9): 50-55. (in Chinese)

 [7] 由世岐,刘斌,楼永林. 低温环境对叠层橡胶支座变 形特性影响的试验研究[J]. 东北大学学报: 自然科学 版, 2005, 26(3): 297-299.
 You Shiqi, Liu Bin, Lou Yonglin. Low-temperature

effect on deformation behavior of laminated rubber isolators [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, 26(3): 297–299. (in Chinese)

- [8] 刘文光,杨巧荣,周福霖.建筑用铅芯橡胶隔震支座 温度性能研究[J].世界地震工程,2003,19(2):39-44.
   Liu Wenguang, Yang Qiaorong, Zhou Fulin.
   Temperature properties of lead rubber bearings for building [J]. World Information On Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 39-44. (in Chinese)
- [9] 李慧, 杜永峰, 狄生奎, 等. 叠层橡胶隔震支座的低温
   往复试验及等效阻尼比推算[J]. 兰州理工大学学报,
   2006, 32(5): 116-119.
   Li Hui, Du Yongfeng, Di Shengkui, et al. Cyclic test of

laminated rubber damping bearing at low temperature and calculation of equivalent viscous damping ratio [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2006, 32(5): 116–119. (in Chinese)

 [10] 李黎, 叶昆, 江宣城. 橡胶铅芯隔震支座力学性能的 温度效应研究[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2009, 26(3): 1-3.
 Li Li, Ye Kun, Jiang Yicheng. Thermal effect on the

The Kun, Jiang Yicheng. Thermal effect on the mechanical behavior of lead-rubber bearing [J]. Journal of HUST (Urban Science Edition), 2009, 26(3): 1–3. (in Chinese)

- [11] 庄学真,周福霖,沈朝勇,金建敏. 600 型建筑叠层橡胶隔震装置温度相关性及耐老化性能研究[J].北京工业大学学报,2011,37(7):993-999.
  Zhuang Xuezhen, Zhou Fulin, Shen Chaoyong, Jin Jianmin. Research on temperature dependence and aging rigidity of 600 laminated steel-plate-laminated-rubberbearing isolation bearings for building [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(7): 993-999. (in Chinese)
- [12] 刘文光,秦皇婷,何文福,等.极低温度下 LRB 力学性能及对高层结构地震响应的影响[J].振动与冲击,2012,31(13):85-90.
  Liu Wenguang, Qing Huangting, He Wenfu, et al. Mechanical properties of LRB in low temperature state and its influence on earthquake response of high buildings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(13):85-90. (in Chinese)
- [13] Ding Y L, Li A Q. Liu T. Environmental variability study on the measured responses of Runyang Cable-stayed Bridge using wavelet packet analysis [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(5): 517-528.
- [14] Li H, Li S L, Ou J P. Modal identification of bridges under varying environmental conditions: Temperature and wind effects [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2010, 17(5): 495-512.
- [15] Zhou H F, Ni Y Q, Ko J M. Eliminating temperature effect in vibration-based structural damage detection [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2011, 137(12): 785-796.
- [16] Mosavi A A, Seracino R, Rizkalla S. Effect of temperature on daily modal variability of a steel-concrete composite bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2012, 17(6): 979-983.
- [17] 范雁,张季超,许勇.广东科学中心 E 区隔震支座监测预警指标研究与应用[J]. 工程力学,2010,27(增刊 I):103-107.

Fan Yan, Zhang Jichao, Xu Yong. Study and application of the early-warning index for isolation bearings monitoring in Guangdong Science Center E Area [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Suppl I): 103–107. (in Chinese)

- [18] 陈洋洋, 谭平, 陈建秋, 等. 汶川灾后重建的隔震建筑 远程实时监测[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2013, 52(4): 76-82.
  Chen Yangyang, Tan Ping, Chen Jianqiu, et al. Remote real-time monitoring for seismic isolated buildings in the Wenchuan post-disaster reconstruction [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsen, 2013, 52(4): 76-82. (in Chinese)
- [19] 朱文正,张季超.基于智能传感技术的广东科学中心 隔震系统实时监测研究[J]. 土木工程学报,2014, 47(5):40-45.

Zhu Wenzheng, Zhang Jichao. Real time monitoring of isolation system of Guangdong Science Center based on intelligent sensor technology [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(5): 40–45. (in Chinese)

[20] 杜永峰,赵丽洁,张韬,等.超长复杂隔震结构施工力
 学及全过程监测研究[J].工程力学,2015,32(7):1-10.

Du Yongfeng, Zhao Lijie, Zhang Tao, et al. Study on construction mechanics of long complicated isolated structures and life-cycle monitoring [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 1-10. (in Chinese)

[21] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
 GB50011-2010, Code for seismic design of buildings
 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in

Chinese)

 [22] 彭全敏. 超长混凝土结构收缩裂缝控制研究[D]. 天 津: 天津大学, 2012.
 Peng Quanmin. Research on control of shrinkage cracks
 in average lange accounts attractions [D]. Timiling Timiling

in super-long concrete structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)

- [23] CEB-FIP MC90, Model code for concretes structures [S]. 1990.
- [24] Xu Zhaodong, Wu Zhishen. Simulation of the effect of temperature variation on damage detection in a long-span cable-stayed bridge [J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6(3): 177-189.
- [25] Deraemaeker A, Reynders E, De Roeck G, et al. Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(1): 34-56.
- [26] 滕军, 卢云军, 朱焰煌. 大跨空间钢结构模态频率的 温度影响监测与分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(3): 36-41.
  Teng Jun, Lu Yunjun, Zhu Yanhuang. Monitoring and analysis of temperature's effect on frequency of large

span spatial steel structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(3): 36-41. (in Chinese)

#### (上接第 60 页)

[13] 谢启芳, 杜彬, 张风亮, 等. 古建筑木结构燕尾榫节点 弯矩-转角关系理论分析[J]. 工程力学, 2014, 31(12): 140-146.
Xie Qifang, Du Bin, Zhang Fengliang, et al. Theoretical analysis on moment-rotation relationship of dovetail

joints for Chinese ancient timber structure buildings [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(12): 140 - 146. (in Chinese)

- [14] 潘毅, 王超, 唐丽娜, 等. 古建筑木结构直榫节点力学 模型的研究[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 82-89.
  Pan Yi, Wang Chao, Tang Li'na, et al. Study on the mechanical model of straight-tenon joints in ancient timber structures [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 82-89. (in Chinese)
- [15] 赵鸿铁,薛建阳,隋龑.中国古建筑结构及其抗震[M]. 北京:科学出版社,2011:103-112.
   Zhao Hongtie, Xue Jianyang, Sui Yan. Ancient Chinese

timber structure and its seismic behavior [M]. Beijing: Science Press, 2011: 103–112. (in Chinese)

- [16] 马炳坚. 中国古建筑木作营造技术[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 125-139.
  Ma Bingjian. The building techniques of ancient Chinese timber structure [M]. Beijing: Science Press, 1991: 125-139. (in Chinese)
- [17] 梁思成. 清式营造则例[M]. 北京: 中国建筑工业出版 社, 1981: 87-99.
  Liang Sicheng. Qing-style structure regulations [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1981: 87-99. (in Chinese)
- [18] 陈志勇. 应县木塔典型节点及结构受力性能研究[D].
   哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 184-196.
   Chen Zhiyong. Behaviour of typical joints and the structure of Yinxian Wood Pagoda [D]. Harbin: Harbin

Institute of Technology, 2011: 184-196. (in Chinese)