

## 长期监测中藏式古建筑木梁应变-温度模型分析\*

白晓彬,杨娜<sup>†</sup>

(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

**摘要:**针对藏式古建筑木梁的构造和受力特点,通过在梁端施加非线性弹簧,建立了温度作用下的简化力学模型.该模型考虑了梁端反力对梁的二阶弯矩作用,建立了温度作用下梁底跨中顺纹方向应变的理论模型,并将一年内的温度循环分为四段进行分别计算.以某藏式古建筑监测工程中的木梁为例进行了实例计算,结果表明一年之后应变增量回到了初始值,但升温段和降温段的曲线没有重合而是分成了两部分.将应变的计算值与实测值相对比,二者吻合较好.最后,对影响温度作用下应变增量的各个结构参数进行了参数分析,研究表明,不同温度起点的设定对分析结果没有影响,木材的弹性模量对应变影响最大,燕尾榫的拉压刚度影响最小.

**关键词:**藏式古建筑木梁;温度作用;燕尾榫;二阶弯矩;敏感性分析

**中图分类号:**TU366.2

**文献标志码:**A

## Strain-temperature Model Analysis of Tibetan Ancient Timber Beam in Long-term Monitoring

BAI Xiaobin, YANG Na<sup>†</sup>

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** According to the construction and loading features of Tibetan ancient timber beam, a nonlinear spring was added at the end of the beam and the simplified mechanical model of temperature effect on the timber beam was established. Considering the second order of the counterforce of beam end, a theoretical model of the strain in the grain direction of the mid-span beam bottom under temperature effect was proposed. The strain in a temperature cycle was divided into four parts for calculations. A timber beam of a Tibetan ancient building from a monitoring system was employed as a calculation example. The results show that the strain returns to the initial value in a temperature cycle, while the curves of the temperature rising stage and temperature decreasing stage are not coincident but divided into two parts. The calculated strain curve matches well with the measurement. Finally, the parameter analysis of the structure parameters affecting the strain variations was proceed, and the results show that the different starting temperature makes no difference for the analysis results. Elasticity module is the most sensitive parameter, while the tension and compression stiffness of the dovetail joint is the least sensitive parameter.

**Key words:** Tibetan ancient timber beam; temperature effect; dovetail joint; second order moment; sen-

\* 收稿日期:2017-01-03

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51338001), Key Program of the National Natural Science Foundation of China(51338001);国家自然科学基金优秀青年基金项目(51422801), National Natural Science Foundation of China(51422801);北京市自然科学基金重点项目(8151003), Key Program of the National Natural Science Foundation of Beijing(8151003);国家科技支撑计划项目(2015BAK01B02), National Key Technology R&D Program(2015BAK01B02)

作者简介:白晓彬(1988—),男,山东聊城人,北京交通大学博士研究生

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail:nyang@bjtu.edu.cn

sitivity analysis

藏式古建筑是中国古建筑的重要组成部分,具有极高的历史、科学价值.很多藏式古建筑由于建造年代久远,在其服役过程中,由于受到环境因素、疲劳效应、材料老化等因素的影响,内部结构已存在大量残损现象.结构健康监测可实时监控古建筑结构整体行为,对其服役情况进行评估<sup>[1]</sup>.在长期监测中,温度是影响木构件变形的重要因素,温度对结构变形的影响主要体现在热胀冷缩效应、弹性模量变化、边界条件的变化及由此在结构中引起的附加次应力.王阳<sup>[2]</sup>对木材的热膨胀系数进行了研究,认为温度变化会引起木材的尺寸变化.Green等<sup>[3]</sup>提出了木材弹性模量和温度之间的公式,弹性模量随温度的升高而降低.Yarnold等<sup>[4]</sup>建立了长期监测中的构件简支梁模型,认为温度变化可引起边界条件的变化,分析了位移和温度的变化关系.在长期监测中,温度引起的变形会掩盖结构因局部损伤所造成的变形,干扰对结构状态的正常评估<sup>[4]</sup>,因此研究长期监测中温度对结构应变的影响是十分必要的.西藏地区空气比较干燥,古建筑中木材含水率较低,且湿度变化引起的干缩湿胀主要体现在横纹方向,而本文研究的是顺纹方向的变形,故忽略湿度的影响,只考虑温度的影响.

目前有关藏式古建筑的研究主要集中在其力学性能方面,李鹏<sup>[5]</sup>基于弹簧单元提出了藏式古建筑梁柱节点的简化力学模型,认为梁之间只有转动刚度而拉压刚度为无穷大;Cao等<sup>[6]</sup>提出了古建筑梁柱节点的双层梁模型,将梁与梁之间简化为固结;Wang等<sup>[7]</sup>进行了藏式古建筑木构的抗震性能分析,将梁柱节点简化为6个自由度的半刚性节点.上述研究均无法考虑温度对木材尺寸变化及结构边界条件的影响,因此对于长期监测中温度引起的变形研究并不适用.

本文以藏式古建筑木梁为研究对象,根据其构造特点,考虑温度作用对边界条件的影响,建立了木梁的半刚性简化力学模型,提出了藏式古建筑木梁顺纹应变和温度之间的理论模型,揭示了应变随温度的变化特征,并以某实际监测工程为例进行了应用计算,对各个参数对应变的影响进行了敏感性分析.

## 1 结构分析模型

与汉式古建筑相比,藏式古建筑在构造上具有鲜明的特色.藏式古建筑属于密梁平顶式,墙柱混合承重是其普遍采用的结构.梁柱之间没有榫卯和斗拱,而通过构件间的垂直叠压实现节点的连接,如图1所示<sup>[8]</sup>.在木构排架中,梁与梁在弓木上方以燕尾榫相连,边跨梁的一端插入墙体中.

选取藏式木构排架中间跨的梁(图2)为研究对象,对其进行荷载及约束的简化.梁的两端为燕尾榫连接,由于施工误差等原因,燕尾榫之间存在一定缝隙.基于此假定燕尾榫的2种接触状态:受拉卡紧状态和受压卡紧状态,如图3所示.受拉卡紧时,榫头和卯口的斜面卡紧,燕尾榫处于受拉平衡状态;受压卡紧时,榫头和卯口的直面挤紧,燕尾榫处于受压平衡状态.

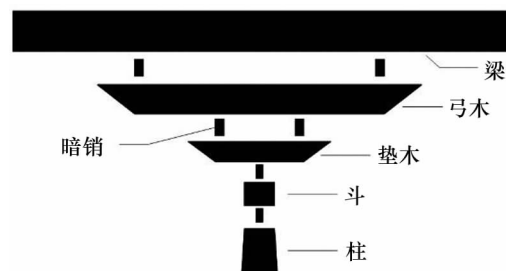


图1 典型节点构造

Fig.1 Construction of typical beam-column connection

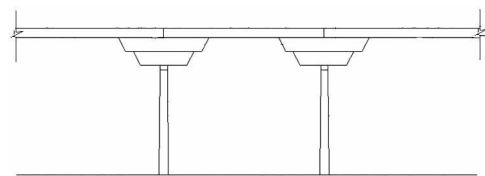


图2 藏式木构排架

Fig.2 Tibetan timber frame

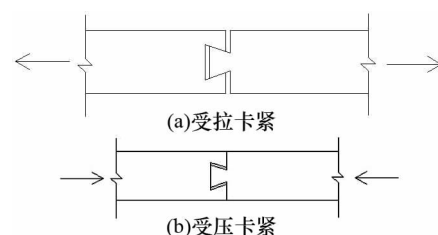


图3 燕尾榫的2种状态

Fig.3 Two status of dovetail joint

1)荷载的简化:梁与上层楼板紧密接触,直接承受上部荷载,故将楼板自重简化为均布荷载施加在梁上.

2)约束的简化:梁的两端为燕尾榫连接,将梁的两端简化为半刚性转动弹簧约束,转动刚度为  $K_r$ . 考虑梁在温度作用下的热胀冷缩变形,在梁的一端增加拉压弹簧约束,弹簧刚度为  $K_s$ .

根据上述简化原则,藏式古建筑木梁温度作用分析的简化力学分析模型如图 4 所示.

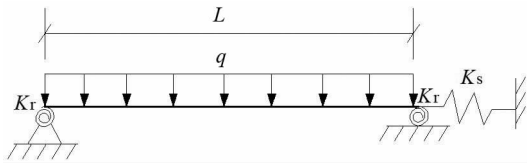


图 4 梁的简化力学模型

Fig.4 The simple mechcial model of the beam

对上述简化模型提出一些假定:

1)只考虑木梁顺纹方向的应变,且材料处于弹性状态.

2)燕尾榫之间存在缝隙,在上部荷载作用下,燕尾榫的初始状态处于受拉卡紧状态.

3)温度变化时,燕尾榫在受拉卡紧状态、相对运动状态和受压卡紧状态之间相互转化.

4)弹簧  $K_s$  定义为非线性弹簧,弹簧的本构定义如图 5 所示. 当燕尾榫处于受拉卡紧或受压卡紧状态时,弹簧  $K_s$  的刚度为无穷大,当燕尾榫处于中间状态时,弹簧  $K_s$  的刚度为  $K_0$ .  $F_1$  为临界支座反力.

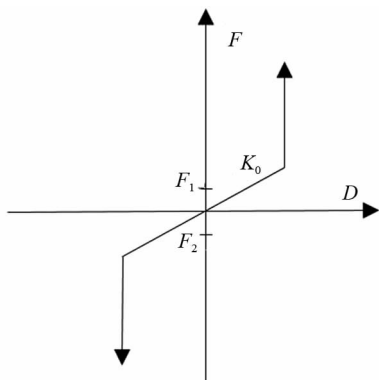


图 5 非线性弹簧的定义

Fig.5 Nonlinear spring definition

## 2 理论推导

基于上述分析模型与假定,对梁底部跨中顺纹方向的应变随温度的变化关系进行研究. 首先温度变化会引起木材的伸缩变形,引起应变的变化. 另

外,温度作用下由于梁端存在约束,会产生支座反力,而木梁在上部荷载作用下会产生一定的挠度,故支座反力会对梁底部产生二阶弯矩作用,从而引起附加应变. 所以,梁底部跨中顺纹方向的应变由 2 部分组成:1)梁在温度作用下的伸缩变形引起的应变  $\Delta\epsilon_1$ ;2)梁端反力对梁底部的二阶弯矩作用引起的附加应变  $\Delta\epsilon_2$ .

### 2.1 $\Delta\epsilon_1$ 的推导

当温度发生变化时,拉压弹簧会抑制梁的自由变形. 与  $\Delta\epsilon_1$  有关的参数包括:木材的顺纹线膨胀系数  $\alpha$ ,顺纹弹性模量  $E$ ,温度增量  $\Delta T$ ,拉压弹簧刚度  $K_s$ ,梁的长度  $l$ ,梁的横截面积  $A$ . 以温度升高时的情况为例进行分析,当温度升高时,梁端的位移平衡如图 6 所示. 图中  $\delta_T$  为梁自由伸缩时的位移, $\delta_U$  为梁在约束下的实际位移, $\delta_R$  为约束位移. 则梁端的位移平衡方程为:

$$\delta_T - \delta_R = \delta_U, \tag{1}$$

$$\alpha\Delta T l - \frac{Pl}{EA} = \frac{P}{K_s}. \tag{2}$$

其中  $P$  为拉压弹簧提供的梁端反力. 应变  $\Delta\epsilon_1$  和梁端反力分别为:

$$\Delta\epsilon_1 = \frac{P}{K_s l} = \frac{\alpha\Delta T}{\frac{lK_s}{AE} + 1}, \tag{3}$$

$$P = \frac{\alpha\Delta T l E}{\frac{l}{A} + \frac{1}{K_s}}. \tag{4}$$

根据假定,当榫卯处于卡紧状态时  $K_s$  为无穷大,则此时  $\Delta\epsilon_1 = 0$ .

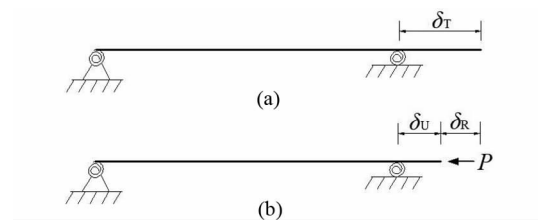


图 6 梁的位移平衡图

Fig.6 Displacement equilibrium of the beam

### 2.2 $\Delta\epsilon_2$ 的推导

梁的两侧搭在弓木上,弓木为梁提供支座反力,所以要首先确定梁在上部荷载作用下的计算跨度. 根据图 1 的节点构造,梁的支座反力由梁端向中间逐渐减小,如图 7 所示. 支座反力的合力点位于距梁端  $1/4$  弓木长度范围内. 假定支座反力的合力点位于距梁端  $1/8$  弓木长度的位置,设梁的净跨为  $l_0$ ,弓木长度为  $l_g$ ,则梁的计算跨度为:

$$l_n = l_0 + \frac{3}{4}l_g \quad (5)$$

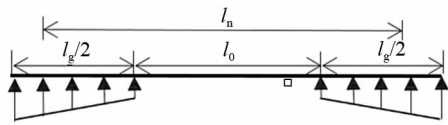


图7 梁计算跨度的确定

Fig.7 The determination of the calculated span of the beam

根据文献[9],半刚性连接梁端弯矩计算公式为:

$$M_A = \frac{M_{FA}(4\mu_B + 1) - 2M_{FB}\mu_B}{4\mu_B + 12\mu_A\mu_B + 4\mu_A + 1} \quad (6)$$

$$M_B = \frac{M_{FB}(4\mu_A + 1) - 2M_{FA}\mu_A}{4\mu_B + 12\mu_A\mu_B + 4\mu_A + 1} \quad (7)$$

$M_{FA}$ 和 $M_{FB}$ 分别为相同荷载下,同尺寸刚性连接梁两端的固端弯矩,其中:

$$\mu_A = \frac{EI}{K_{rA}l_n}, \quad \mu_B = \frac{EI}{K_{rB}l_n} \quad (8)$$

对文中简化模型, $M_{FA}$ 与 $M_{FB}$ 大小相等,方向相反, $K_{rA} = K_{rB}$ ,故 $\mu_A = \mu_B$ .则梁的跨中弯矩为: $M_0 = aql_n^2(1/8 < a < 1/24)$ ,半刚性连接梁的弯矩图如图8所示.

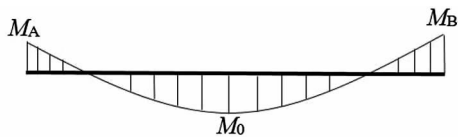


图8 梁的弯矩图

Fig.8 Moment curve of the beam

考虑梁端反力对梁底部的二阶弯矩作用,梁底部的最大弯矩为<sup>[10]</sup>:

$$M_{max} = M_0 + Py_{max} = M_0 \left( \frac{1}{1 - P/P_{cr}} \right) = M_0 A_m \quad (9)$$

式中: $A_m$ 为弯矩放大系数; $P_{cr}$ 为梁临界荷载,

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \quad (10)$$

式中: $\mu$ 为半刚性轴压构件的计算长度系数,且 $0.5 < \mu < 1$ .

下面介绍如何推导计算长度系数 $\mu$ .

图9为长度为 $l$ 的轴心受压梁的隔离体受力平衡图,根据弯矩 $M_x$ 和剪力 $Q_x$ 的平衡可得出平衡微分方程:

$$y^{IV} + k^2 y'' = 0 \quad (11)$$

$$k = \sqrt{\frac{P}{EI}} = \frac{\pi}{\mu l} \quad (12)$$

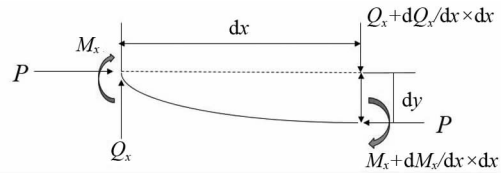


图9 轴心受压梁的受力平衡图

Fig.9 Load balance of the axial compression beam

微分方程的通解为:

$$y = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + C_3 x + C_4 \quad (13)$$

该微分方程的边界条件为:

$$y(0) = 0 \quad (14)$$

$$y(l) = 0 \quad (15)$$

$$M(0) = -EIy''(0) = K_r y'(0) \quad (16)$$

$$M(l) = -EIy''(l) = K_r y'(l) \quad (17)$$

根据边界条件可列出矩阵方程:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ R_A k & -P & K_r & 0 \\ \sin kl & \cos kl & l & 1 \\ P \sin kl - K_r k \cos kl & P \cos kl + K_r k \sin kl & -K_r & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

或 $A_c = 0$ .若要使上式有非零解,应使矩阵系数的行列式为0,即 $|A| = 0$ .

将行列式展开可得半刚性连接梁的屈曲方程:

$$K_r^2(-2k \cos kl + 2k - k^2 l \sin kl) - P^2 l \sin kl = 0 \quad (19)$$

根据式(19)和式(12)即可求出计算长度系数 $\mu$ 的值,从而求得弯矩放大系数 $A_m$ .

当温度升高时,梁底部跨中由于二阶弯矩作用产生的附加弯矩为:

$$\Delta M = (A_m - 1)M_0 \quad (20)$$

附加弯矩在梁底部跨中引起的附加应变为:

$$\Delta \epsilon_2 = \frac{\Delta M h}{2EI} = \frac{M_0 P h}{2EI(P_{cr} - P)} \quad (21)$$

式中: $h$ 为梁的截面高度.则当温度变化为 $\Delta T$ 时,梁底部跨中顺纹方向的应变为:

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon_1 + \Delta \epsilon_2 = \frac{P}{K_s l} + \frac{M_0 P h}{2EI(P_{cr} - P)} \quad (22)$$

### 2.3 温度循环作用分析

在长期监测中,以一年作为一个温度循环,一年内温度经过升温 and 降温后回到起点.假设一年中的最大温差为 $\Delta T$ ,根据假定2)和3),升温段和降

温段均可分为相对运动阶段和卡紧阶段,故一个温度循环过程分为四段: $0 \rightarrow a\Delta T \rightarrow \Delta T \rightarrow b\Delta T \rightarrow 0$  ( $0 < a, b < 1$ ),如图 10 所示.其中  $a\Delta T$  和  $b\Delta T$  为榫卯进入受压卡紧状态和受拉卡紧状态的临界温度值.

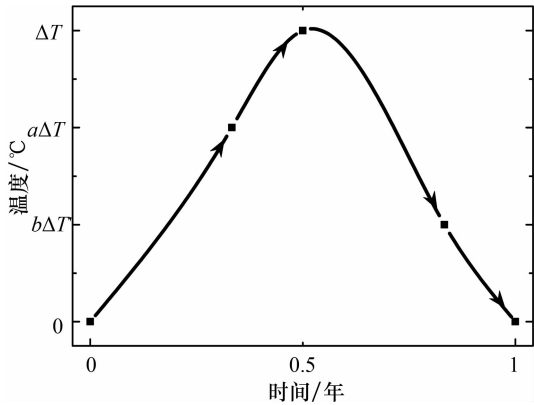


图 10 一年之内的温度循环

Fig.10 Temperature cycle in one year

对四段温度进行分别分析.

1)  $0 \rightarrow a\Delta T$  升温阶段. 燕尾榫从受拉卡紧状态进入相对运动状态,此时拉压弹簧的刚度为  $K_0$ . 应变为:  $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_1 + \Delta\epsilon_2$ .

2)  $a\Delta T \rightarrow \Delta T$  升温阶段. 燕尾榫处于受压卡紧状态,梁端不再有位移,此时拉压弹簧的刚度为无穷大,应变为:  $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_2$ .

3)  $\Delta T \rightarrow b\Delta T$  降温阶段. 燕尾榫从受压卡紧状态进入相对运动状态,此时拉压弹簧的刚度为  $K_0$ . 应变为:  $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_1 + \Delta\epsilon_2$ .

4)  $b\Delta T \rightarrow 0$  降温阶段. 燕尾榫处于受拉卡紧状态,梁端不再有位移,此时拉压弹簧的刚度为无穷大,应变为:  $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_2$ .

升温段和降温段中榫卯的状态改变是对称的,且两段中的相对运动距离相同,所以有  $a + b = 1$ .

### 3 工程应用

#### 3.1 监测系统简介

在某藏式古建筑的回廊结构(见图 11)布置了健康监测系统,在结构的梁和柱上安装了光纤光栅传感器,测试结构的应变和环境温度.回廊中共在 6 根梁上(命名为梁 a~梁 f)安装了传感器,所有梁传感器均位于木构排架的中间跨,安装在梁的底部跨中位置,如图 12 所示.

#### 3.2 实例计算

以回廊中梁 a 为例进行梁底部跨中应变的理论



图 11 回廊排架结构

Fig.11 The frame structure of the corridor



图 12 梁传感器

Fig.12 The beam sensor

计算.在实际监测工程中,结构的材料性能、边界条件等计算参数均具有一定的不确定性,而木结构相对于其他材料具有更大的离散性,故计算参数的取值应在一定的范围内.此木梁的尺寸为:  $b \times h \times l = 140 \text{ mm} \times 220 \text{ mm} \times 3\,662 \text{ mm}$ ,弓木长  $l_g = 2\,392 \text{ mm}$ ;梁的上部荷载  $q = 130 \text{ kN/m}$ ;藏青杨古木材顺纹方向的弹性模量  $E$  的取值范围为:  $4\,400 \sim 9\,350 \text{ MPa}$ <sup>[5]</sup>;转动刚度  $K_r$  的取值范围为:  $265 \sim 550 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ <sup>[8]</sup>;顺纹方向热膨胀系数  $\alpha$  的取值范围为:  $3.9 \sim 4.5 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ <sup>[2]</sup>;拉压弹簧的初始刚度  $K_0$  由榫卯间的摩擦和挤压提供,  $K_0$  的取值范围为:  $16.87 \sim 500 \text{ kN/m}$ <sup>[11-14]</sup>.取 2013-02-01—2014-01-31 的数据作为一个温度循环区间.由于回廊在白天会有大量游客,为了消除人群荷载的影响,取每天 7:00 无人时刻的应变和温度数据,作出一年的数据曲线如图 13 所示.一年中最大温差  $\Delta T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ ,并假定  $a = b = 1/2$ ,则一个温度循环的过程为:  $0 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow$

8 °C → 16 °C → 8 °C → 0 °C.

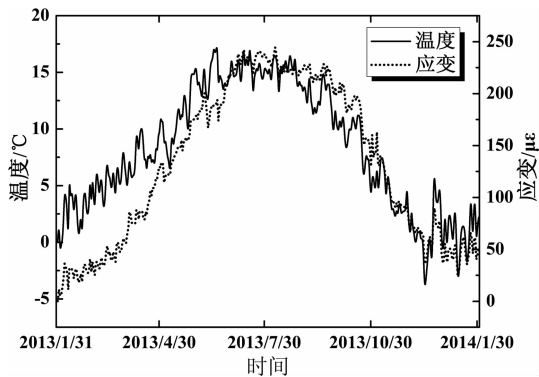


图 13 一个温度循环的数据曲线

Fig.13 The data curve in a temperature cycle

根据梁的参数取值范围,首先取  $E = 5\ 180$  MPa,  $\alpha = 4\ \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ ,  $K_r = 330\ \text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ,  $K_0 = 413\ \text{kN}/\text{m}$  进行实例计算. 可计算出梁的计算跨度  $l_n = 3\ 064\ \text{mm}$ , 跨中弯矩  $M_0 = 0.095ql_n^2$ . 作出应变随温度的变化曲线如图 14 所示. 从图 14 可看出,在一个温度循环结束后,温度和应变均回到了初始值,但升温段和降温段的曲线不重合而是分为两部分.

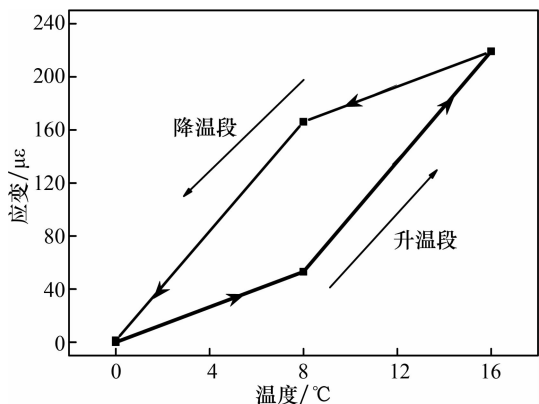


图 14 应变-温度关系曲线计算值

Fig.14 The calculated curve of strain and temperature

若采用已有简化模型计算,将梁与梁之间简化为只有转动刚度的半刚接<sup>[5]</sup>,则计算应变时只有  $\Delta\epsilon_2$  而没有  $\Delta\epsilon_1$ . 一个温度循环中,应变随温度的变化曲线如图 15 所示,升温段与降温段重合而没有分成两部分.

由于传感器在实测过程中会受到外界因素的干扰,将梁 a 实测的应变和温度数据用 SSA 方法<sup>[15]</sup>进行分解,并取其第一阶趋势项,做出实测值的应变与温度的关系图,并与计算值做对比,如图 16(a) 所示,二者吻合较好. 考虑计算参数的离散性,将回廊中每根梁的计算参数均在合理的取值范围内调整取值,并将计算值与实测值做比较,使二者能够

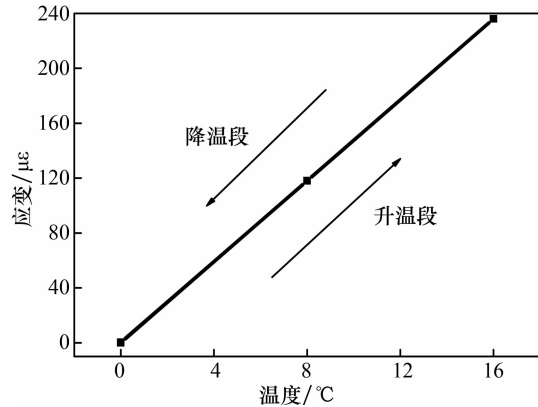


图 15 已有模型应变-温度关系曲线计算值

Fig.15 The calculated curve of strain and temperature for existing model

吻合良好,如图 16 所示. 各梁计算参数的取值如表 1 所示,每根梁的参数取值有所差别,但均在合理的取值范围内. 古建筑中的木材由于存在初始缺陷、材料退化、结构损伤等问题,故同一建筑中相同材料的木梁,其参数也会有所不同. 图 16 中,计算值与实测值的应变-温度曲线的升温段和降温段均分为两部分,且拐点位于温度的最高点. 由于测量误差等原因,实测值的应变没有回到原点. 对比图 15 和图 16,可知已有简化模型无法体现实测数据中的分段性质.

表 1 各梁的参数取值

Tab.1 Parameters value for every beam

参数	梁 a	梁 b	梁 c	梁 d	梁 e	梁 f
$E/\text{MPa}$	5 180	4 800	4 700	5 80	5 000	4 500
$K_r/(\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	330	280	265	280	280	265
$K_0/(\text{kN} \cdot \text{m})$	413	520	500	400	400	530
$\alpha/(\mu\epsilon \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	4	4.2	4.5	4.2	4	4.5

## 4 参数分析

### 4.1 不同温度起点分析

在上述分析中,温度循环起点选在温度最低点,即 0 °C. 而实际工程中,温度起点不一定在最低点. 下面分析温度起点分别为升温段 4 °C,升温段 12 °C 和降温段 12 °C 时的应变-温度曲线.

以起点为升温段 4 °C 为例进行分析,燕尾榫初始处于受拉卡紧状态,当温度循环至 0 °C 时,温度循环可以分为四段:4 °C → 12 °C → 16 °C → 8 °C → 0 °C, 分别为相对运动阶段、受压卡紧阶段、相对运动阶段、受拉卡紧阶段. 即当温度循环至 0 °C 时,燕尾榫

处于受拉卡紧阶段,应变-温度曲线如图 17(a)所示,图中点 A 为温度的起点,点 B 为温度最低点.当进入第二年的温度循环时,初始状态为温度为 0 °C 且燕尾榫处于受拉卡紧状态,与第 3 部分中的假定相同.图 17(b)为前 2 个温度循环的应变-温度曲线,第二年的曲线与图 14 相同.同样可分别作出温度起点为升温段 12 °C、降温段 12 °C 时的应变-温度

曲线,如图 17 和图 18 所示.从图 17~图 19 可看出,无论初始温度为何值,当第一次循环至最低温时,燕尾榫一定处于受拉卡紧状态.从第二个循环开始,应变-温度曲线即和图 14 相同.对于古建筑的监测而言,分析起点选在温度最低点的假定是合理的.

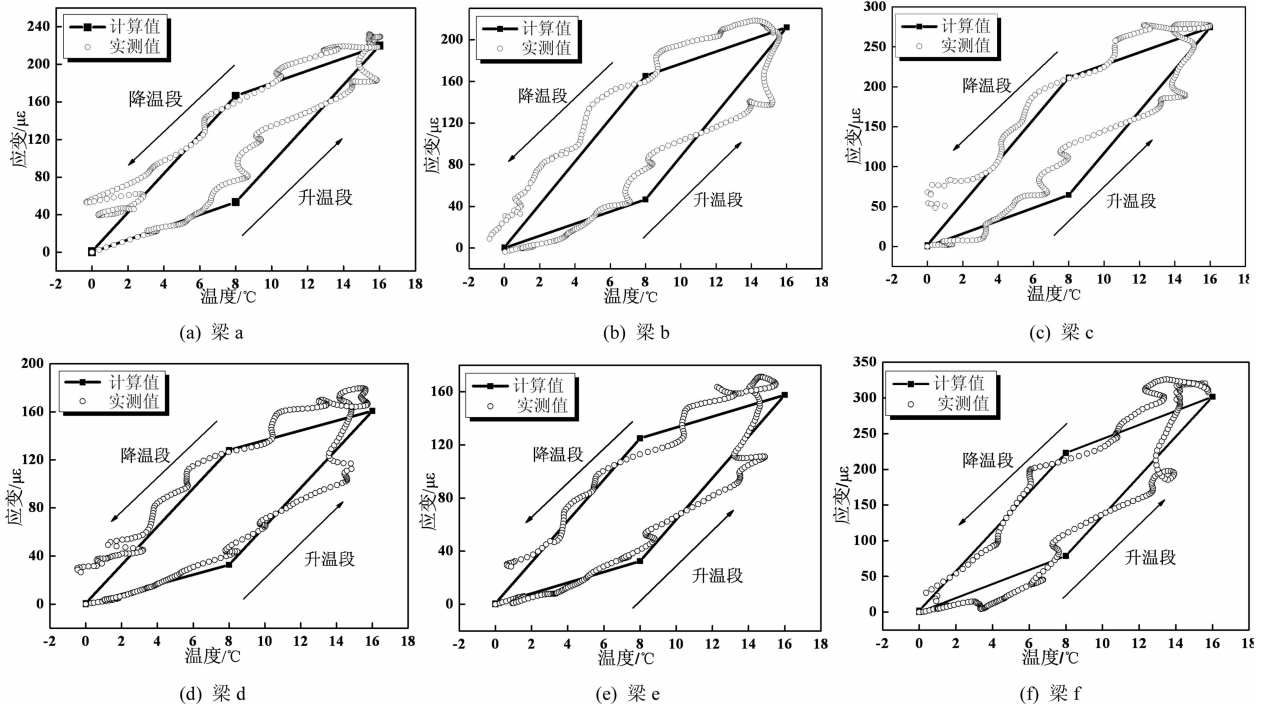


图 16 6 根梁的应变计算值与实测值比较

Fig.16 Comparison of calculated and measured strain for six beams

4.2 参数敏感性分析

在公式(22)中,应变的计算结果会受到各个参数的影响.木材的离散性较大,参数的取值具有一定的不确定性,且各个参数对计算结果的影响程度各不相同.参数的敏感性分析是模型不确定性量化

的重要环节,有助于识别关键参数,减少参数的不确定性影响<sup>[16]</sup>.不确定的参数有:木材热膨胀系数  $\alpha$ ,边界条件( $K_r$ 和  $K_0$ ),弹性模量  $E$ ,温度分段情况等.各个参数的取值均可控制在一定合理的范围内,据此可计算应变对各参数的敏感性.

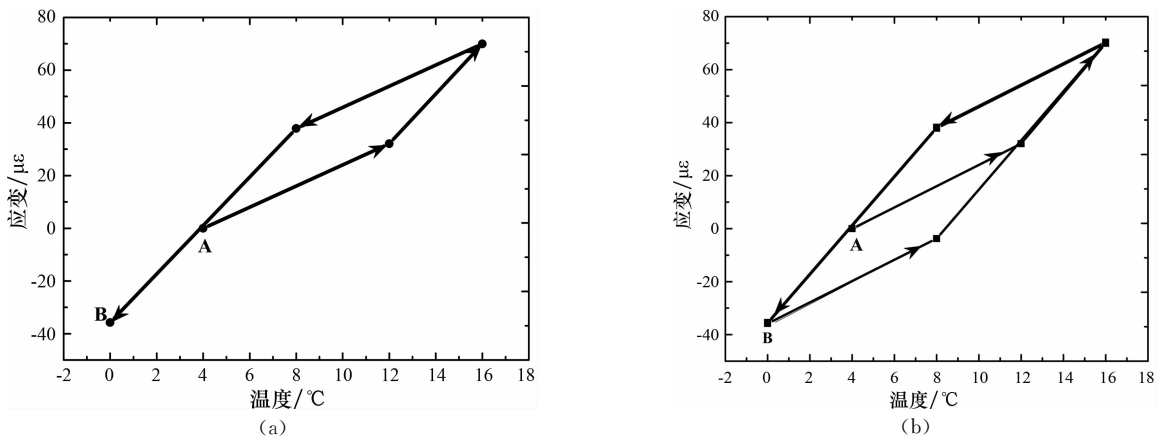


图 17 初始温度为升温段 4 °C 的应变-温度曲线

Fig.17 The strain-temperature curve when the initial temperature is 4 °C at temperature increasing stage

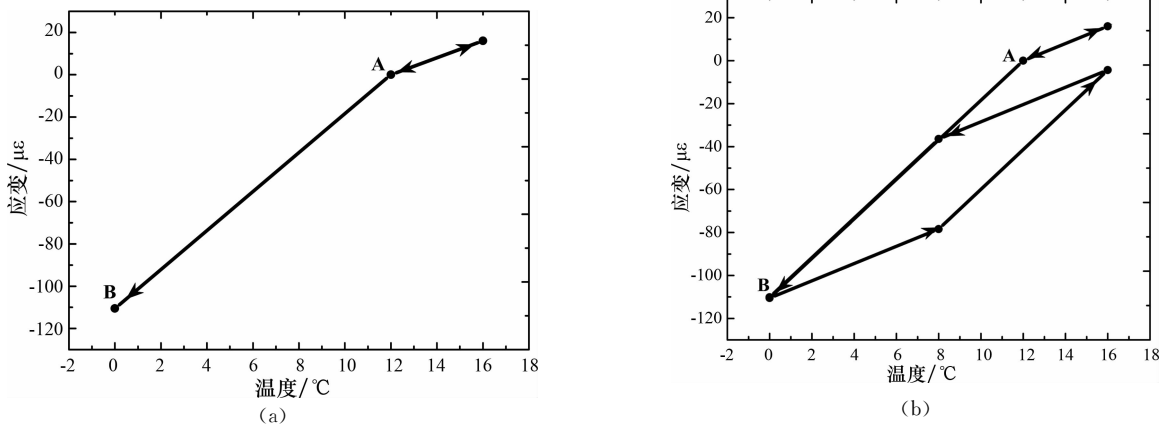


图 18 初始温度为升温段 12 °C 的应变-温度曲线

Fig.18 The strain-temperature curve when the initial temperature is 12 °C at temperature increasing stage

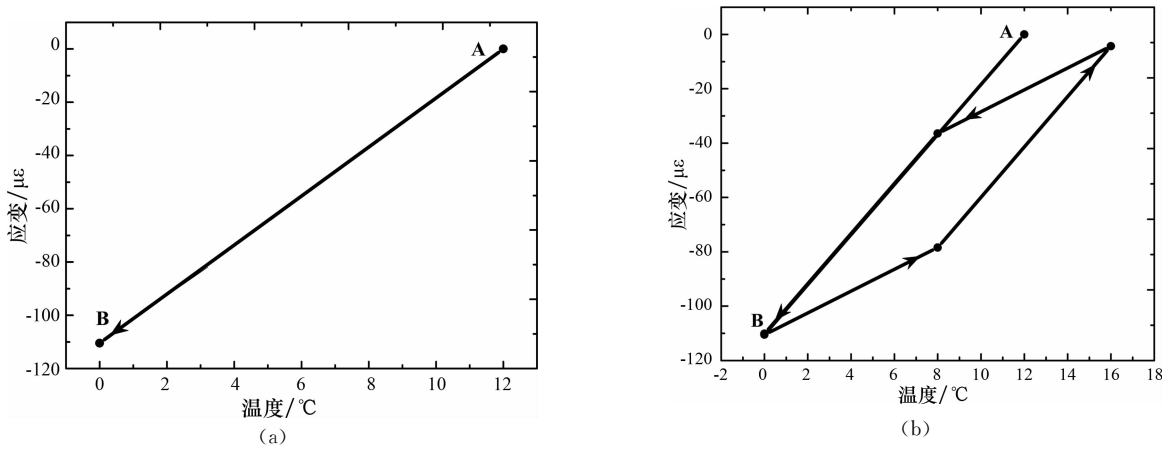


图 19 初始温度为降温段 12 °C 的应变-温度曲线

Fig.19 The strain-temperature curve when the initial temperature is 12 °C at temperature decreasing stage

Morris 方法是一种常用的敏感性分析方法. 其计算原理是选取模型中的一个设计变量  $X_i$ , 其余参数值固定不变, 自变量  $X_i$  以设定好的变幅变化运行模型得到目标函数  $y(x) = y(X_1, X_2, \dots, X_n)$  的值, 用影响值  $S_i$  判断参数变化对输出值的影响程度<sup>[17-18]</sup>.  $S_i$  的计算公式为:

$$S_i = \frac{(y_i - y_0)y_0^{-1}}{\Delta_i}, \tag{23}$$

$$\Delta_i = \frac{X_i - X_0}{X_0}. \tag{24}$$

式中:  $y_i$  为参数变化后的输出值;  $y_0$  为参数变化前的输出值;  $X_0$  为初始参数值;  $\Delta_i$  为参数变化的幅度. 灵敏度判别因子  $S$  取  $S_i$  的平均值, 即:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i. \tag{25}$$

$\alpha, K_r, K_0$  和  $E$  的取值范围见 3.2 部分, 温度分段中以第一段的温度  $\Delta T_1$  为变化参数, 分别取  $\Delta T_1$  的值为: 4 °C, 6 °C, 8 °C, 10 °C, 12 °C. 根据 Morris 方法, 计算得到各个参数对应变最大值的判别因子

的结果见表 2. 结果表明, 应变增量对 5 个参数的敏感性排序为:  $E > \alpha > \Delta T_1 > K_r > K_0$ , 材料的弹性模量  $E$  对应变的影响最大, 燕尾榫的拉压刚度  $K_0$  对应变的影响最小.

表 2 各参数的判别因子

Tab.2 Discriminant factor of parameters

影响因素	$E$	$\alpha$	$K_r$	$K_0$	$\Delta T_1$
$S$	0.648	0.512	0.123	0.064	0.395

## 5 结论

通过本文分析, 可得到以下结论:

1) 根据藏式古建筑木梁构造特点, 提出了藏式古建筑木梁的应变-温度计算模型. 温度作用下, 梁端反力对梁底的二阶弯矩作用会引起梁底的附加应变.

2) 一个循环之内, 升温段和降温段的曲线没有重合而是分成了两部分. 在一个温度循环结束之



后,温度增量和应变增量均回到了初始值。

3) 不同温度起点的设定对分析结果没有影响。

4) 根据敏感性分析结果,在模型各个参数中,材料的弹性模量对应变的影响最大,燕尾榫的拉压刚度对应变的影响最小。

## 参考文献

- [1] 王娟,杨娜,杨庆山. 适用于遗产建筑的结构健康监测系统[J]. 北京交通大学学报,2012,34(1):100-104.  
WANG J, YANG N, YANG Q S. Structural health monitoring system for heritage[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 34(1): 100-104. (In Chinese)
- [2] 王阳. 殿堂式古建筑木构有限元分析与可靠性评估[D]. 北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2014:14-21.  
WANG Y. Finite element analysis and reliability assessment of hall-style ancient wooden structure[D]. Beijing: Scholl of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2014: 14-21. (In Chinese)
- [3] GREEN D W, EVANS J W. The immediate effect of temperature on the modulus of elasticity of green and dry lumber[J]. Wood and Fiber Science, 2008, 40(3): 374-383.
- [4] YARNOLD M T, MOON F L. Temperature-based structural health monitoring baseline for long-span bridges [J]. Engineering Structures, 2015, 86: 157-167.
- [5] 李鹏. 藏式古建筑木构架梁柱节点力学机理研究[D]. 北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2009:62-69.  
LI P. Mechanical mechanism of beam-column joints in wooden frame of Tibetan ancient architecture [D]. Beijing: Scholl of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2009: 62-69. (In Chinese)
- [3] CAO P L, YANG Q S, LAW S S. Nonlinear analytical model of a two-layer wooden beam in a heritage structure[J]. Engineering Structures, 2015, 101: 494-508.
- [7] WANG J, HE J X, YANG N, *et al.* Study on aseismic characteristics of Tibetan ancient timber structure [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017(1): 1-15.
- [8] 闫会春. 藏式古建筑木构梁柱连接力学性能试验研究及有限元分析 [D]. 北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2011:34-44.  
YAN H C. Experimental research and finite element analysis of timber beam-column connection of Tibetan ancient architecture[D]. Beijing: Scholl of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2011: 34-44. (In Chinese)
- [9] 胡习兵. T型钢半刚性连接节点的性能研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院,2004:58-61.  
HU X B. The research on the behavior of T-stub semi-rigid connections [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2004: 58-61. (In Chinese)
- [10] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京:科学出版社,2011:77-82.  
CHEN J. Stability of steel structures theory and design [M]. Beijing: Science Press, 2011: 77-82. (In Chinese)
- [11] 苏军,高大峰. 中国木结构古建筑抗震性能的研究[J]. 西北地震学报,2008,30(3):239-244.  
SU J, GAO D F. Study on the seismic performance of Chinese ancient timber structure[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(3): 239-244. (In Chinese)
- [12] 高大峰,丁新建,曹鹏男. 西安清真寺木牌楼结构特性与抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动,2011,31(2):108-114  
GAO D F, DING X J, CAO P N. Analysis of structural properties and seismic performance of the Pai-lou gateways in Xi'an Great Mosque [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(2): 108-114. (In Chinese)
- [13] 权吉柱. 木结构古建筑殿堂型结构的耗能减震机理分析[D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院,2007:62-65.  
QUAN J Z. Analysis on passive energy dissipation mechanism of ancient timber lifted beam structure [D]. Xi'an: School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 2007: 62-65. (In Chinese)
- [14] SEO J M, CHOI I K. Static and cyclic behavior of wooden frames with tenon joints under lateral load [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(3): 344-349.
- [15] LIU K, LAW S S, XIA Y, *et al.* Singular spectrum analysis for enhancing the sensitivity in structural damage detection [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 33(2): 392-417.
- [16] 张望喜,张勇,易伟建,等. RC 框架结构 pushover 方法定点位移的敏感性分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2014,41(2):14-18.  
ZHANG W X, ZHANG Y, YI W J, *et al.* Sensitivity analysis of the top displacement of the pushover analysis method of reinforced concrete frame structure [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(2): 14-18. (In Chinese)
- [17] FRANCOS A, LORZA F J. Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models; understanding the model behavior in hydrological studies at the catchment scale[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2003, 79(2): 205-218.
- [18] 周冰,黄晓婷,耿元. 基于 Morris 法分析的液压参数对互联悬架的影响[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2016,43(2):70-76.  
ZHOU B, HUANG X T, GENG Y. Influence of hydraulic parameters on hydraulically interconnected suspension based on Morris [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(2): 70-76. (In Chinese)