

叠层橡胶支座串联隔震体系抗火性能研究^{*}

杜永峰^{1,2}, 李 慧², 寇巍巍¹, 寇佳亮¹

(1. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050;

2. 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, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 对叠层橡胶隔震支座在高温作用下的温度场进行数值模拟, 利用小模型试件进行温度传导及温度场分布试验。在叠层橡胶隔震支座经历 420℃ 的高温作用后, 将隔震支座模型试件与钢筋混凝土柱串联, 并对串联隔震体系的力学性能进行压剪往复试验。结果表明, 叠层橡胶隔震支座在高温作用下的性能退化相当明显, 承载状态下的橡胶隔震支座在稍高的温度作用下就开始发生畸变。这表明在实际工程中对叠层橡胶隔震支座采取防火保护措施对保证隔震结构承载力安全非常重要。

关键词: 火灾性能; 隔震; 串联隔震; 温度场

中图分类号: U443.361 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2010)S0-0207-05

0 引言

火灾是给人们生命财产造成巨大危害的一种频发灾害。据统计, 我国 1980 年代平均火灾直接经济损失为 3.2 亿元, 1990 年代损失为 10 亿元, 进入 21 世纪, 火灾损失更为严重^[1-3]。近期发生在世界范围内的几场大火, 比如俄罗斯大火, 更是再一次警人们, 无论是人为因素引起的火灾, 还是自然因素引起的火灾, 如对其发生和发展规律认识上的缺乏, 都可能演变为较大的人为灾难。有关火灾对结构失效的作用过程和机理的研究, 在 1980 年以来是国内外的热门研究议题, 这些研究内容涉及到火灾过程中构件温度发展过程、构件内部温度场、高温下与高温后钢、钢筋和混凝土的力学性能及热工特性、构件与结构在高温下的反应、构件与结构的抗火设计方法、火灾后构件与结构的损伤评估及修复等泛围很广的热点问题^[4-5]。随着隔震结构的大量应用, 有关叠层橡胶支座隔震结构耐火能力及火灾后力学性能的问题逐渐变得越来越重要。众所周知, 橡胶材料受到高温作用会软化, 瞬时强度和刚度损失相当明显, 而叠层橡胶隔震支座在高温作用下也会因为钢板和橡胶之间的粘结被破坏而导致强度和稳定性失效。周福霖等人对普通叠层橡胶支座和铅芯叠层

橡胶支座进行耐火性能试验, 燃烧初期及中期(前 40 min), 两种类型的支座温度变化相近, 但燃烧后期, 铅芯隔震支座温度变化明显增加。燃烧后测试支座的竖向刚度及水平刚度同时降低, 变化率接近 10%, 竖向极限压应力仍有一定的承载力, 不会使结构立即倒塌, 原因是支座外部约 10 ~ 20 mm 左右的橡胶覆盖层, 燃烧时形成的碳化层具有较好的热阻性能, 阻止支座进一步燃烧^[6-7]。

本文作者对叠层橡胶隔震支座在高温作用下的温度场进行数值模拟, 利用小模型试件进行温度传导及温度场分布试验, 并对叠层橡胶支座串联隔震体系在经历高温作用后的力学性能进行压剪往复试验。本文介绍利用有限元软件进行数值模拟和模型试验的主要结果, 就实际工程中对叠层橡胶隔震支座所能采取的防火保护措施提出了建议构造。

1 建筑结构火灾热传导基本理论

1.1 火灾热传导基本方程

在直角坐标系(x, y, z)中, 根据能量守恒原理, 有下列关于三维介质中热传导的一般方程^[7]:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: Q 为单位体积增加的热量; ρ 为质量密度;

^{*} 收稿日期: 2010-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(50778087); 甘肃省科技支撑计划(090-GKCA040)

作者简介: 杜永峰(1962-), 男, 甘肃正宁人, 博士, 教授、博导, 主要从事结构抗震与减震控制研究. E-mail: dooyf@lut.cn

c 为比热; T 为温度; t 为时间; q_x , q_y 和 q_z 是热流矢量的分量(单位面积上的热流量)。在实际应用中,通常将 ρc 的乘积看做材料的一个性能,即体积比热。对于叠层橡胶隔震支座之类的层状复合材料,在用数值方法对热传导问题进行研究时发现在不同方向存在一定的差距,它们的力学性能与温度有关,应考虑其各向异性特征。对于各向异性固体,有

$$\begin{cases} q_x = -\left(k_{11}\frac{\partial T}{\partial x} + k_{12}\frac{\partial T}{\partial y} + k_{13}\frac{\partial T}{\partial z}\right), \\ q_y = -\left(k_{21}\frac{\partial T}{\partial x} + k_{22}\frac{\partial T}{\partial y} + k_{23}\frac{\partial T}{\partial z}\right), \\ q_z = -\left(k_{31}\frac{\partial T}{\partial x} + k_{32}\frac{\partial T}{\partial y} + k_{33}\frac{\partial T}{\partial z}\right). \end{cases} \quad (2)$$

方程(1)和(2)是热传导的基本方程,其中 k_{ij} , ($i, j=1, 2, 3$) 是热传导张量的分量,该张量是对称的。方程(2)左端项代表由于热流和内部热源产生热量造成的增加能量速率的和,右端是储存能量速率。要求解上述热传导方程的解,必须给定导热过程刚开始时固体材料内部温度分布的初始条件和导热过程中边界条件的变化情况。

1.2 建筑火灾热边界条件

初始条件通常假定固体材料内部的温度分布是均匀的,且其值等于周围环境的温度,即

$$T(x, y, z)|_{t=0} = T_e. \quad (3)$$

常用的热边界条件可归纳为 4 种,如图 1 所示,分别表达如下:

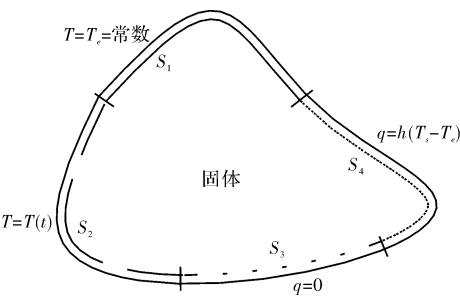


图 1 几种典型边界条件

(1)沿着边界的温度是常数,且等于周围环境温度,如图中的 S_1 部分。即

$$T(x, y, z) = T_e, \text{ 在 } S_1 \text{ 上。} \quad (4)$$

(2)沿着边界 S_2 温度是时间 t 的函数,即

$$T(x, y, z) = T(t), \text{ 在 } S_2 \text{ 上。} \quad (5)$$

(3)沿着边界 S_3 是绝热的,即在 S_3 上没有热流通过,在 S_3 上可以表示成

$$q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = 0. \quad (6)$$

(4)在边界 S_4 上,温度 $T_s(K)$ 为与时间有关的

函数,其以热对流或热辐射的形式与周围环境进行热交换,在 S_4 上

$$q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = h(T_s - T_e). \quad (7)$$

上述 n_x , n_y 和 n_z 分别是边界 S_3 , S_4 法线的方向余弦。 S_1 , S_2 , S_3 和 S_4 共同构成了固体边界 S 。式(7)中, h 为热传递系数,通常由两部分组成

$$h = h_e + h_r, \quad (8)$$

式中: h_e 为自然对流传热系数; h_r 为热辐射传热系数。

1.3 不同表面介质热传递系数

固体表面与周围空气之间自然对流传热传递系数可由如下经验公式计算:

当固体表面垂直时

$$h_e = 1.313 |T_s - T_a|^{1/3}. \quad (9)$$

当固体表面是水平,且热面朝上、冷面朝下时

$$h_e = 1.521 |T_s - T_a|^{1/3}. \quad (10)$$

方程(9)和(10)中的 1.313 和 1.521 是经验系数; T_s 为固体表面温度, T_a 为周围空气温度。灰色表面与非反射介质间的辐射热传递系数为

$$h_r = \sigma \varepsilon_s \frac{T_s^4 - T_{nr}^4}{T_s - T_{nr}}. \quad (11)$$

两平行灰色表面(I和II)之间的辐射热传递系数为

$$h_r = \sigma \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{sI}} + \frac{1}{\varepsilon_{sII}} - 1} \frac{T_{sI}^4 - T_{sII}^4}{T_{sI} - T_{sII}}. \quad (12)$$

方程(11)和(12)中, T_{nr} 为非反射介质的温度。 σ 为 Stefan - Boltzmann 常数,其值一般可取为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。 ε_s 为表面辐射率, T_s 为表面温度。下标 I 和 II 分别为温度传导区的介质编号。

2 隔震支座材料的高温性能

2.1 隔震模型试件的温变关系

本文用于高温性能试验的隔震模型试件置于建材烘烤试验箱之中,一侧为向火面,而另一侧为背火面。考虑到对于构件的背火面来说,热传递是通过自然对流与将热辐射到非发射的空气中来实现的(图 2),参照水平建筑构件(楼板、屋面板等)在受火条件下的温变规律,其温变关系可表达为^[8]

$$h_U = 1.521(T_u - T_a)^{1/3} + \sigma \varepsilon_U \frac{T_U^4 - T_a^4}{T_U - T_a}, \quad (13)$$

式中: T_a 为周围空气的温度; ε_U 为背火面表面辐射率; T_U 为背火面的温度。

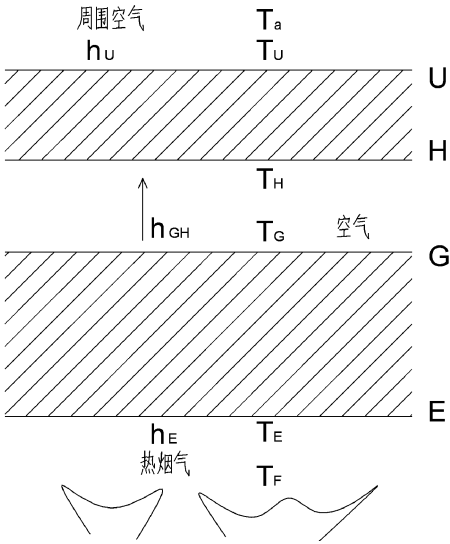


图2 有封闭空气层构件的热量流动

2.2 隔震支座材料高温特性变化

火灾高温对钢材的性能物理和力学性能具有显著的影响。物理性能指标包括热膨胀系数、热传导系数、比热、密度等。力学性能指标包括强度、弹性模量、应力—应变本构关系以及松弛与蠕变效应等。举例说明如下。

2.2.1 高温下钢板的特性变化

(1)热膨胀系数: 钢材温度在 0 ~ 700℃ 左右时, 钢材的热膨胀变形随温度的升高而增大, 但在 800℃ 左右时, 钢材在原有伸长基础上出现缩短现象, 当温度达到 900℃ 左右时, 又膨胀, 即呈现所谓的“相位变换”(Phase Transformation)现象。

(2)比热容: 钢材的比热较小, 并且随温度变化而变化。结构钢在温度 725℃ 左右时, 钢材的内部颗粒成分与结构发生变化, 比热迅速增大, 随后当内部颗粒成分与结构稳定后, 又迅速回落^[9]。

2.2.2 高温下橡胶的特性变化

无论是天然橡胶, 还是丁苯橡胶之类的合成橡胶, 温度升高对力学性能的影响比钢材更为敏感^[10]。橡胶材料受热软化, 在高温作用下, 还会发生化学变化。天然橡胶一般在 130℃ ~ 140℃ 开始流动, 在 200℃ 左右开始分解。尽管叠层橡胶隔震支座构造上采取了防护措施, 支座内部的橡胶层对于高温的作用抵抗力仍然非常薄弱。

3 高温下橡胶支座的有限元模拟

3.1 有限元模拟的单元及边界条件

利用有限元分析软件 ANSYS, 借助于三维 SOLID5 热应力耦合单元对叠层橡胶支座整体模型进行数值模拟。高温下叠层橡胶支座有限元模型的边界条件: ①考虑实际工程中, 叠层橡胶支座固定在柱顶和楼板之间, 所以忽略上下底面受热, 只考虑叠层橡胶支座圆柱体侧面受热; ②考虑叠层橡胶支座多处于建筑底层相对密闭的空间内, 没有空气流动等因素的影响, 所以只考虑自然对流, 而不考虑强制对流; ③在对单层橡胶和单层钢板进行分析时, 只考虑侧面受热, 上下底面不考虑温度荷载; ④在对单层橡胶、单层钢板和整体叠层橡胶支座进行分析时, 约束 $Z=0$ 平面 Z 方向的位移, 时 Z 方向只向 Z 轴正方向发展^[11]。

3.2 叠层橡胶支座热力学分析结果

对高温下叠层橡胶支座整体模型进行了有限元模拟, 得到了叠层橡胶支座整体模型的温度场、三方向的变形和应力分布, 其中温度场结果见图 3。主要规律为: ①加热条件下叠层橡胶支座整体模型, 表面最高温度为温度为 474.393℃, 内部最高温度为 292.321℃。在叠层橡胶支座外表面, 温度呈从中间向两边递减的分布; ②加热条件下叠层橡胶支座整体模型的变形介于单层橡胶和单层钢板变形之间, X 、 Y 方向的最大径向变形才仅有 0.61 mm, Z 方向的变形为 11.5 mm; ③从应力分布图中可以看出(图 4), 加热条件下叠层橡胶支座整体模型主要受拉应力, 呈轴对称分布在同心圆周上。钢板层受到的拉应力相对较大, 最大值为 99.4 MPa, 橡胶层所受拉应力较小, 最大值仅为 0.18 MPa。最大拉应力出现在顶层钢板与橡胶层相交的叠层橡胶支座的中孔圆周上, 大小为 99.4 MPa。

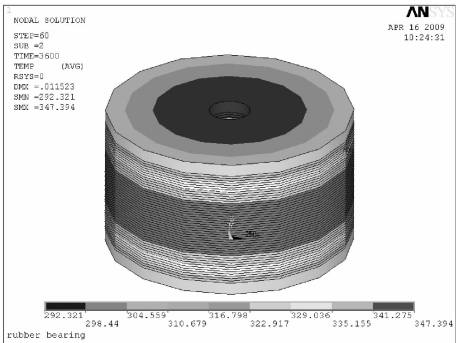


图3 隔震支座整体模型温度场结果

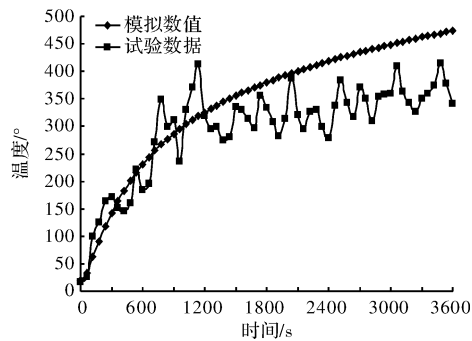


图4 外侧点模拟与试验数据比较

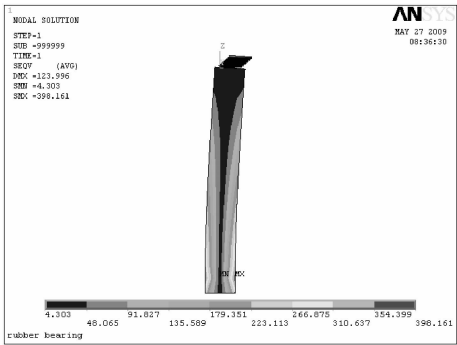


图6 串联隔震体系等效应力图

4 高温下串联隔震体系模拟及试验

针对本文作者承担的由叠层橡胶支座和悬臂柱组成的串联隔震体系力学特性研究课题，本文将经受高温作用后的叠层橡胶支座模型试件分别与两种不同截面尺寸的钢筋混凝土柱串联，组成串联隔震体系(图5)。



图5 串联隔震体系试件

首先利用有限元软件 ANSYS 对所做的高温下叠层橡胶支座及高温后串联隔震体系相关试验内容进行有限元模拟，再利用压剪进行模型试验。这里需要指出的是，试验是在对叠层橡胶支座进行高温处理后，再安装到钢筋混凝土柱悬臂柱顶端的。由于叠层橡胶支座中的橡胶在高于 420℃ 时就开始燃烧，所以橡胶支座加热时控制温度在 420℃ 以下。因此，对串联隔震体系有限元模拟时，由于实际的构件温度处在 420℃ 以下，所以不考虑温度对钢筋混凝土的影响。高温后串联隔震结构的应力云图模拟结果如图 6 所示。由图 6 中可以看出，串联隔震体系破坏时最危险的位置出现在悬臂柱的底部，且橡胶支座的左上角和右下角也接近最大等效应力值，这与文^[12] 试验所呈现的结果较为相符。

未包裹防火棉的叠层橡胶支座与柱组成的串联隔震体系滞回曲线的试验结果如图 7 所示。试验结果表明，经高温的橡胶支座的串联体系开裂荷载、极限荷载均明显降低。

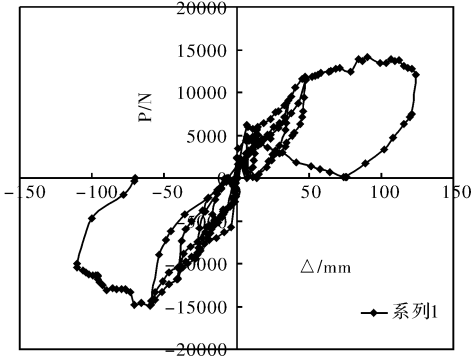


图7 串联隔震体系整体水平力-水平位移关系

包裹了防火棉的叠层橡胶支座性能退化的程度差别不大，主要区别在于橡胶支座分解与燃烧的时间有所推迟。无论是悬臂柱横截面尺寸为 200 × 200 的还是 250 × 250 的串联隔震体系，体系的受力特征是大变形仍然发生在橡胶支座中，而破坏的顺序仍然是钢筋混凝土悬臂柱首先开裂。对于上述两种截面尺寸的悬臂柱，水平力和水平位移的试验值要大于模拟值，主要原因如下：①试验中，裂缝有扩展阶段，而在有限元模拟中，出现裂缝计算就停止；②试验中加载需要克服滚轴与钢板之间的阻力，而模拟中不存在这样的问题。

5 结论

- (1) 未包裹防火棉的叠层橡胶支座，经受 420℃ 高温时形态发生明显变化，有冒黑烟现象。
- (2) 利用在橡胶支座搁置重物的方式，模拟受热的叠层橡胶支座承载一定应力。则叠层橡胶支座在承载条件下，试件内温度小于 400℃ 外形开始发生畸变，橡胶层有从钢板间挤出的趋势。

(3)叠层橡胶支座在经受 420℃ 高温后串联体系的开裂荷载、极限荷载明显降低。

(4)包裹防火棉的叠层橡胶支座,经受高温的保形能力有所上升,但耐热能力不超过 30 min。表明对叠层橡胶支座进行火灾防护非常必要。

参考文献:

[1] 李国强,韩林海,楼国彪. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.

[2] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M]. 北京:科学出版社,2003.

[3] 董毓利. 混凝土结构的火安全设计[M]. 北京:科学出版社,2001.

[4] 吴波,徐玉野. 高温下钢筋混凝土异型柱的试验研究[J].

建筑结构学报,2007,28(5):24-31.

[5] 时旭东,过镇海. 钢筋混凝土结构的温度场[J]. 工程力学,1996,13(1):35-43.

[6] 杨有福,韩林海. 矩形钢管混凝土柱的耐火性能和抗火设计研究[J]. 建筑结构学报,2004,25(1):25-35.

[7] 程选生,杜永峰,李慧. 四边简支钢筋混凝土矩形薄板的热屈曲[J]. 工程力学,2007,24(4):1-6.

[8] 寇佳亮. 高温后叠层橡胶支座串联体系抗震性能试验研究与分析[D]. 兰州:兰州理工大学,2009.

[9] 蒋首超,陆立新,李国强,等. 马钢耐火刚高温下材料性能试验研究[J]. 土木工程学报,2006,39(8):72-75.

[10] 任九生,黄兴. 变温下橡胶材料力学性能的实验分析[J]. 实验力学,2007,22(6):27-29.

[11] 过梅丽,赵得禄. 高分子物理[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.

[12] 寇巍巍. 高温后叠层橡胶支座及串联隔震体系性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2009.

A Study on Fire Resistant Property of Serially Isolated System of Laminated Rubber Bearing and RC Column

Du Yongfeng^{1,2}, Li Hui², Kou Weiwei¹ and Kou Jialiang¹

(1. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Engineering Research Center for Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou 730050, China)

Abstract: This paper presents a numerical analysis of the temperature field of laminated rubber bearing under high-temperature. A heat transfer and temperature field distribution test is performed using a small-scale model rubber bearing. After experiencing a high-temperature of 420℃, the laminated rubber bearing was serially connected on top of RC column, and the serially isolated system is cyclically tested subjected to compression and shear. The result shows that the mechanical performance of laminated rubber bearing under high-temperature degraded seriously, and severe distortion may occur in the loaded rubber bearing when subjected to a relatively high-temperature. A protection measure of rubber bearing against fire seems to be essential for maintaining the load bearing capacity of the bearing in practical engineering.

Key words: fire resistant property; base isolation; serially isolated system; temperature field