



隔震橡胶支座防火保护试验研究

吴波¹, 韩力维¹, 周福霖², 沈朝勇², 谭平²

(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东广州 510640;

2. 广州大学 工程抗震研究中心, 广东广州 510405)

摘要: 隔震橡胶支座的耐火性能通常较差, 威胁着隔震结构(特别是层间隔震结构)的火灾安全。在 ISO 834 标准升温条件下, 通过 2 个采用厚型防火涂料的隔震橡胶支座的明火试验, 对比分析了隔震橡胶支座在火灾前、后的力学性能。利用 ANSYS 软件, 分析了试验支座的内部温度场, 并与实测结果进行了对比。研究表明: 对于采用厚度 50mm 的防火涂料和相应构造措施进行保护处理的隔震橡胶支座, 在持续 3h 的明火试验后, 无铅芯橡胶支座和铅芯橡胶支座的表观特征均无明显变化, 各项力学性能指标与受火前相比变化幅度均小于 8%, 水平极限变形能力满足现行规范要求; 验证了隔震橡胶支座防火保护措施的有效性。

关键词: 隔震橡胶支座; 防火保护; 受火试验; 受火性能

中图分类号: TU352.1 TU317.1 **文献标志码:** A

Experimental study on fire protection of rubber isolation bearings

WU Bo¹, HAN Liwei¹, ZHOU Fulin², SHEN Chaoyong², TAN Ping²

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: Fire resistant capacity of rubber isolation bearings is usually poor, resulting in a poor fire safety of isolation structures (especially story-isolation structures). Two fire-protected rubber isolation bearings were tested under ISO 834 standard heating process. Experiments aiming to compare the mechanical properties of the bearings before and after fire test were conducted. Thermal fields of the specimens were analyzed using the computer program ANSYS, and compared with the measured results. Test results indicate that after 3 hours of fire, the specimens with fire insulation of 50mm thick do not show any visible changes in their appearance. The degradation of their mechanical properties do not exceed 8%. And their lateral ultimate deformation capacities comply with the requirements specified in the Chinese codes. It is demonstrated that the insulation measures proposed in this paper is suitable for fire protection of rubber isolation bearings.

Keywords: rubber isolation bearing; fire protection; fire test; fire performance

基金项目: 国家科技支撑计划子课题项目(2006BAJ03A03-12), 国家自然科学基金项目(90815027, 51025829), 亚热带建筑科学国家重点实验室重点研究项目(2008ZJ10)。

作者简介: 吴波(1968—), 男, 重庆人, 工学博士, 研究员。E-mail: bowu@scut.edu.cn

收稿日期: 2009年11月

0 前言

层间隔震结构是将隔震装置安设在建筑结构相邻两层之间进行地震反应控制的一种结构形式,该类结构发生火灾时隔震装置将直接暴露于明火中,给结构带来安全隐患。为此,有必要开展隔震装置的防火研究。

隔震装置种类较多,其中隔震橡胶支座应用较为广泛。目前,90%以上的隔震建筑均采用该类装置^[1]。研究表明,温度达到420℃时支座表面的保护层橡胶开始起火,保护层剥落^[2]。随后,空气从钢板与橡胶之间的间隙渗入并引起剧烈燃烧,最终支座失去支承能力^[3]。在隔震橡胶支座表面受火氧化燃烧的同时,支座内部不受火的橡胶部分由于温度升高,亦会造成橡胶受热分解、与金属之间粘结失效,以及其它物化性质变化,进而引起支座的力学性能退化^[4]。但文献^[5]研究发现,支座表面保护层橡胶燃烧形成的碳化层具有一定热阻,可延缓支座内部的进一步燃烧。

对于层间隔震结构,文献^[6]明确规定隔震橡胶支座应进行防火处理,即在支座外附加防火材料。文献^[7]采用耐火板材沿隔震橡胶支座的上、下柱进行密封,将隔震支座置于防火区内,以避免其直接暴露于明火中。文献^[8]采用该防火构造对直径700mm的铅芯橡胶支座进行了3h耐火试验,研究表明,火灾后隔震橡胶支座的水平刚度和阻尼性能没有明显变化。但该防火构造较为复杂,成本较高,限制了其在国内的推广应用。国内由于缺少隔震橡胶支座的防火研究,相关标准仅对耐火试验1h之后其力学性能的变化做出了笼统要求^[9],没有对隔震橡胶支座防火提出具体建议或规定。

由于目前厚型防火涂料的防火效果相对较好,价格相对便宜,且不受构件几何外形的限制,本文采用厚型防火涂料开展隔震橡胶支座的防火保护试验研究。针对厚型防火涂料保护的1个铅芯橡胶支座和1个无铅芯橡胶支座,进行了标准升温条件下的足尺明火试验,以及火灾前、后的力学性能对比试验,并就隔震橡胶支座内部温度场的数值分析结果和实测结果进行比较,验证了该防火保护措施的有效性。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计了直径600mm的无铅芯橡胶支座GZP600-1和铅芯橡胶支座GZY600-2各1个。为模拟实际结构中支座的使用情况和受火方式,支座上、下两端各设置一个700mm×700mm×500mm的混凝土墩块。试件具体参数详见表1。

图1所示为试件在炉内的布置示意图。为近似模拟实际结构中支座上柱的热边界条件,在上墩块的上表面铺设3层耐火棉。

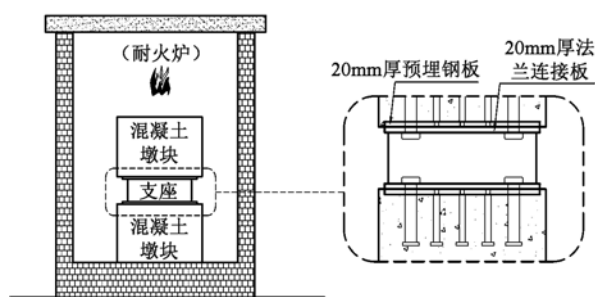


图1 试件布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram for location of specimen

课题组的前期试验结果表明^[10],由于实际工程中隔震橡胶支座所承受的竖向压应力较小(一般小于10MPa),在此应力范围内支座火灾后的残余力学性能与受火过程中支座所承受的竖向荷载关系不大。为此,本文明火试验中试件均未施加竖向荷载。

1.2 防火保护

2个试件的防火保护做法相同,均采用TB厚型防火涂料。首先在隔震橡胶支座的侧面涂抹厚度50mm的防火涂料;随后为减缓支座与上、下混凝土墩块之间的连接钢板及其附近混凝土的传热效应,上、下混凝土墩块侧面靠近支座200mm范围内,以及上墩块下表面和下墩块上表面均涂抹厚度50mm的防火涂料。

防火涂料采取分层涂抹的方法,底层涂料厚度控制在8mm以内,以后各层厚度约10mm,总共涂抹5层。完成底层涂料施工后,涂料表面敷设第1层钢丝网;接下来在完成第3层涂料施工后,涂料表面敷设第2层钢丝网。具体见图2。

表1 试件基本参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	直径/mm	总高度/mm	橡胶总厚度/mm	铅芯直径/mm	第一形状系数	第二形状系数	剪切弹性模量/ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$
GZP600-1	600	192	110	—	28.5	5.45	0.392
GZY600-2	600	192	110	120	30.0	5.45	0.392

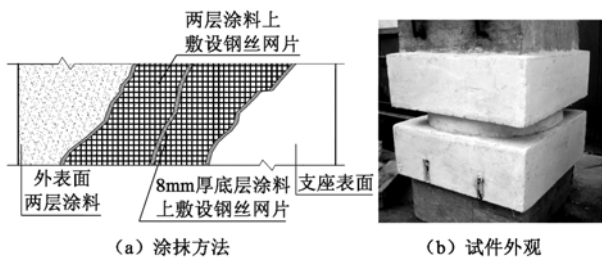
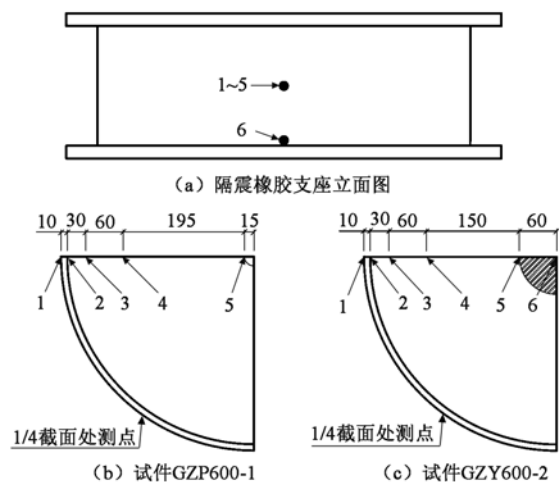


图2 防火保护做法
Fig.2 Insulation scheme

1.3 测点布置

为量测明火试验过程中隔震橡胶支座内部及防火涂料背面的温度,试件 GZP600-1 和 GZY 600-2 分别设置了 5 个和 6 个 WRNK-101 型铠装式镍铬-镍硅热电偶,具体布置见图 3。其中,GZP600-1 的温度测点为 1~5,GZY600-2 的温度测点为 1~6。



注:1~5 为支座中间高度截面测点;6 为铅芯底部中点测点

图3 热电偶布置

Fig.3 Locations of thermocouples

1.4 试验过程

试验过程中,通过对炉内气体温度进行实时控制,使整个升温过程尽量与 ISO 834 标准升温曲线接近。试件 GZP600-1 和 GZY600-2 的受火情况相同,升温时间均为 3h。图 4 所示为试件 GZP600-1 对应的实测炉内平均温度-时间曲线与 ISO 834 标准升温曲线的对比。从图中可以看出,二者吻合很好,符合 GB/T 9978—1999《建筑构件耐火试验方法》的要求^[11]。试件 GZY600-2 对应的实测升温曲线与之类似,在此不再赘述。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

明火试验结束后开炉观察发现,2 个试件表面的防火涂料均出现了分层脱落现象(图 5),这与防火涂

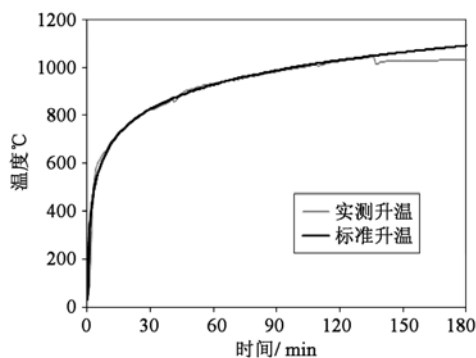


图4 试件 GZP600-1 实测炉内升温曲线与 ISO 834 标准升温曲线的对比

Fig.4 Comparison of measured temperature-time curve in furnace with ISO 834 standard heating curve for GZP600-1

料分层涂抹,致使相邻涂层之间的界面成为薄弱面有关。虽然最外层防火涂料脱落严重,但也有部分区域未出现涂料脱落;与此同时,个别区域的涂料脱落两层,致使第 2 层钢丝网暴露或翘曲,但绝大部分区域的涂料脱落不超过两层,这表明钢丝网的存在对防火涂料的进一步脱落起到了较好抑制作用。

受火后去除试件表面的防火涂料发现,2 个试件的表观特征均较为完好(图 6),与受火前相比无明显变化。

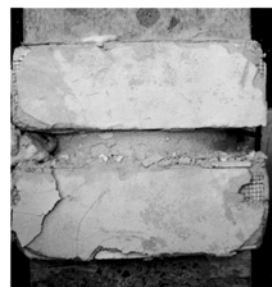


图5 试件 GZP600-1 受火后的破坏形态
Fig.5 Failure mode of GZP600-1 after fire

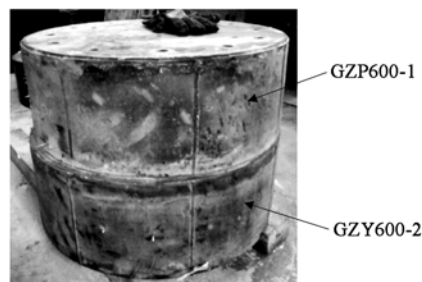


图6 受火后的隔震橡胶支座
Fig.6 Rubber isolation bearings after fire

2.2 内部温度

利用 ANSYS 软件,建立了设置防火涂料的隔震橡胶支座的传热分析模型,由于试件的对称性,仅取对称一侧作为计算模型,具体尺寸见图 7。计算了 ISO 834 标准升温曲线作用下支座的内部温度场,并

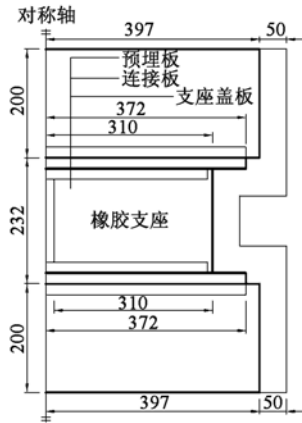


图7 传热分析模型

Fig.7 Model for thermal transfer analysis

与试验实测结果进行对比。计算时采用二维热面单元 PLANE55,每个节点只有温度自由度,网格划分时该类单元为四边形或三角形。

表2为试件GZP600-1部分测点的计算温度与实测温度的对比。从表中可以看出:

(1)在持续180min的明火试验中,除支座表面温度(测点1)接近140℃之外,中部高度截面的内部各测点温度均明显小于140℃。表明本文所采用的防火保护做法对隔震橡胶支座起到了较好的隔热作用,使得支座的材料性质在受火前、后变化不大。

(2)点火后约30~60min范围内支座表面的实测温度较快增长至近100℃,随后进入持续约60min的缓慢上升阶段。这是由于防火涂料含有的自由水和结合水在100℃左右蒸发吸收大量热量,使得支座升温有所减缓^[12]。

(3)计算温度与实测温度总体上吻合较好。180min时测点1、3、4和5的实测温度分别为137.80℃、49.10℃、48.00℃和44.50℃,计算温度分别为146.27℃、52.97℃、48.61℃和42.44℃,相对误差分别为6.2%、7.9%、1.0%和-4.7%。

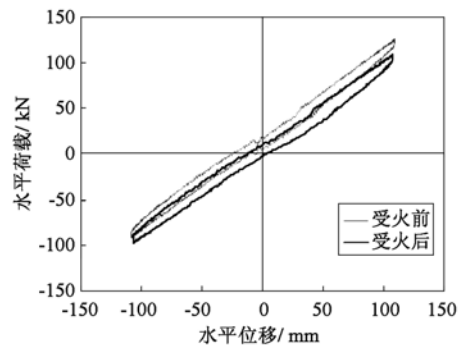
2.3 受火前、后力学性能对比

明火试验后试件自然冷却72h以上,随后对试件GZP600-1、GZY600-2按GB/T 20688.1—2007《隔震橡胶支座:第1部分:隔震橡胶支座试验方法》^[13]分别进行竖向刚度试验和100%水平变形试验,所受竖向荷载均为10MPa。为对比受火前、后的力学性能,明火试验前分别对GZP600-1和GZY600-2进行了相应的力学性能测试。无铅芯橡胶支座试件GZP600-1受火前、后的典型水平荷载-位移滞回曲线和基本力学性能的对比分别见图8a和表3,铅芯橡胶支座试件GZY600-2受火前、后的典型水平荷载-位移滞回曲线和基本力学性能的对比分别见图8b和表4。需特别说明的是,表3和表4中隔震橡胶支座

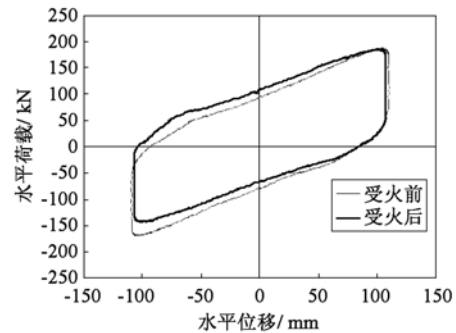
表2 计算温度与实测温度对比

Table 2 Comparison of calculated and measured temperatures

受火时间/min	测点1		测点3		测点4		测点5	
	实测值/℃	模拟值/℃	实测值/℃	模拟值/℃	实测值/℃	模拟值/℃	实测值/℃	模拟值/℃
0	25.40	25.00	26.60	25.00	27.20	25.00	25.40	25.00
30	48.50	45.02	27.80	26.00	27.20	25.51	27.80	25.12
60	95.70	78.40	32.40	29.55	28.90	27.85	28.90	26.05
90	105.60	104.24	39.00	34.74	32.40	31.92	30.00	28.46
120	111.30	122.22	45.20	40.60	35.80	37.02	29.50	32.26
150	125.50	135.51	45.70	46.71	43.50	42.66	41.60	37.04
180	137.80	146.27	49.10	52.97	48.00	48.61	44.50	42.44



(a) GZP600-1



(b) GZY600-2

图8 受火前、后橡胶支座的水平荷载-位移滞回曲线对比

Fig.8 Comparison of horizontal force-displacement hysteretic curves for rubber bearings before and after fire

表3 试件GZP600-1受火前、后基本力学性能对比

Table 3 Comparison of mechanical properties for GZP600-1 before and after fire

力学性能指标	受火前	受火后	变化幅度
竖向刚度/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	2112.0	2046.3	-3.11%
水平刚度/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	0.982	0.954	-2.85%

火灾前、后力学性能指标的确定,均是按照文献[13]的规定,根据第三圈滞回曲线数据计算而得。

从表3、表4和图8中可以看出:①受火后无铅芯橡胶支座的竖向刚度和水平刚度略有降低,但变化幅度不超过4%;②受火后铅芯橡胶支座的竖向刚度、屈服后刚度、100%水平变形对应的水平等效刚

表4 试件 GZY600-2 受火前、后基本力学性能对比
Table 4 Comparison of mechanical properties for GZY600-2 before and after fire

力学性能指标	受火前	受火后	变化幅度
竖向刚度/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	2661.0	2542.0	-4.47%
屈服荷载/ kN	91.1	95.8	5.16%
屈服后刚度/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	0.869	0.807	-7.13%
水平等效刚度/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	1.647	1.566	-4.91%
第三圈能量耗散/ kJ	368.3	366.7	-0.43%
阻尼比	0.306	0.324	5.88%

度、第三圈能量耗散等均有所降低,等效阻尼比随水平等效刚度的衰减有所增大,同时屈服荷载也有所增加,但各物理量的变化幅度均不超过8%。总体上看,采用本文所采取的防火保护措施对隔震橡胶支座进行处理后,其受火后的基本力学性能影响不大。

2.4 水平极限变形能力

在完成了隔震橡胶支座的基本力学性能测试之后,为进一步检验其火灾后的水平极限变形能力(即大震作用下支座抵御大变形的能力),对无铅芯橡胶支座试件 GZP600-1 进行了剪切破坏试验。试验过程中,竖向压应力 10MPa,一次加载至支座水平受剪破坏。

图9所示为试验所得的水平荷载-位移曲线。从图中可以看出,明火试验后无铅芯橡胶支座的水平极限变形达431mm,明显大于GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》^[14]规定的0.55倍支座直径或橡胶层总厚度的3倍,也大于JG 118—2000《建筑隔震橡胶支座》^[9]所规定的橡胶层总厚度350%的要求。这表明采用本文所采取的防火保护措施对隔震橡胶支座进行处理后,即使遭受3h的明火作用,其水平极限变形能力仍能满足规范要求。

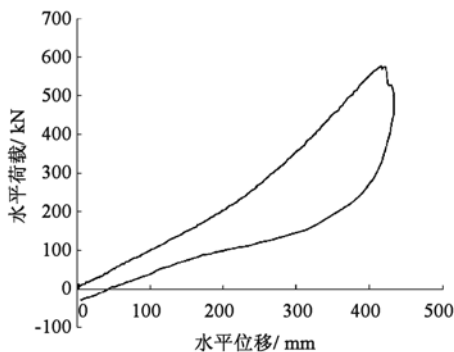


图9 试件 GZP600-1 水平荷载-位移曲线

Fig.9 Horizontal force-displacement curve of GZP600-1

3 结论

通过本文的研究,可以得到如下初步结论:

(1)对隔震橡胶支座进行防火保护措施处理后,

即使遭受3h的明火作用,无铅芯橡胶支座和铅芯橡胶支座的表观特征仍无明显变化,各项力学性能指标与受火前相比变化幅度均不超过8%,水平极限变形能力满足现行规范要求。

(2)防火涂层中钢丝网的存在对抑制防火涂料在高温中的脱落具有明显作用。

(3)在持续180min的明火试验中,除隔震橡胶支座的表面温度接近140℃以外,试件内部各测点温度均小于140℃,表明本文采用的防火保护做法对支座起到了较好的隔热作用。

(4)隔震橡胶支座的计算温度与实测温度吻合较好。

值得指出的是,本文工作只是一个初步尝试,有关隔震橡胶支座防火涂层的最优厚度,以及其他更为经济简便的防火措施,有待今后进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 周锡元,吴育才. 工程抗震的新发展[M]. 北京:清华大学出版社,2002. (Zhou Xiyuan, Wu Yucui. Advances in earthquake engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 加藤朝郎,道越真太郎,大场政章,等. FBR免震設計に関する研究:その28 積層ゴムの載荷加熱試験[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 东京,日本:日本建築学会,1999:1215-1216. (Kato A, Oba M, Michikoshi S, et al. Study on structural design for seismic isolated FBR: part 28: fire test results of rubber bearings[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting AIJ. Tokyo, Japan: Architectural Institute of Japan, 1999: 1215-1216. (in Japanese))
- [3] 堀長生,高橋晃一郎,村岡宏,等. FBR免震設計に関する研究:その16 コーンカロリメータによる免震ゴム材料の燃焼性評価[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 东京,日本:日本建築学会,1997:1047-1048. (Hori N, Takahashi K, Muraoka K, et al. Study on structural design for seismic isolated FBR plant: part 16: combustible evaluation of rubbers using cone calorimeter method[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting AIJ. Tokyo, Japan: Architectural Institute of Japan, 1997: 1047-1048. (in Japanese))
- [4] 戸原春彦. 防振橡胶及其应用[M]. 牟传文,译. 北京:中国铁道出版社,1982. (Tohara Haruhiko. Rubber vibration isolator[M]. Translated by Mu Chuanwen. Beijing: China Railway Publishing House, 1982. (in Chinese))
- [5] 刘文光,杨巧荣,周福霖. 天然橡胶隔震支座温度相关性能试验研究[J]. 广州大学学报:自然科学版,2002,1(6):51-56. (Liu Wenguang, Yang Qiaorong, Zhou Fulin. Temperature properties of natural rubber

- bearings[J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2002, 1(6): 51-56. (in Chinese))
- [6] 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): 40-44. (Liu Wenguang, Yang Qiaorong, Zhou Fulin. Temperature properties of natural rubber bearings[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 40-44. (in Chinese))
- [7] 日本免震构造协会. 免震建築のディテール设计[M]. 东京: 株式会社彰国社, 1999. (Japan Society of Seismic Isolation. The detail design of seismic isolation building[M]. Tokyo: Shokokusha Publishing, 1999. (in Japanese))
- [8] 小山実,長谷川治,横山隆太郎. 耐火被覆を有する積層ゴムの耐火試験[C]// 日本建築学会大会学術講演梗概集. 东京,日本: 日本建築学会,1998: 573-574. (Koyama M, Hasegawa O, Yokoyama R. Fire resistance test of fire-protected laminated rubber bearings[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting AIJ. Tokyo, Japan: Architectural Institute of Japan, 1998: 573-574. (in Japanese))
- [9] JG 118—2000 建筑隔震橡胶支座[S]. (JG 118—2000 Rubber isolation bearings for buildings[S]. (in Chinese))
- [10] Wu Bo, Han Liwei, Zhou Fulin, et al. Experimental study on fire performance and protection of building seismic rubber bearings[C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Structures in Fire. East Lansing, USA: Michigan State University, 2010: 775-783.
- [11] GB/T 9978—1999 建筑构件耐火试验方法[S]. (GB/T 9978—1999 Fire-resistance tests-elements of building construction[S]. (in Chinese))
- [12] Williamsa B, Bisby L, Kodur V, et al. Fire insulation schemes for FRP-strengthened concrete slabs[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(8): 1151-1160.
- [13] GB/T 20688.1—2007 橡胶支座:第1部分:隔震橡胶支座试验方法[S]. (GB/T 20688.1—2007 Rubber bearings: part 1: seismic-protection isolators test methods[S]. (in Chinese))
- [14] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. (GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings[S]. (in Chinese))

(上接第 67 页)

- behaviour of ultra-high strength steel columns by ANSYS [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(1): 113-118. (in Chinese))
- [11] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. (GB 50017—2003 Code for design of steel structures[S]. (in Chinese))
- [12] GB 50205—2001 钢结构工程施工质量验收规范[S]. (GB 50205—2001 Code for acceptance of construction quality of steel structures[S]. (in Chinese))
- [13] GB/T 2975—1998 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. (GB/T 2975—1998 Steel and steel products: location and preparation of test pieces for mechanical testing[S]. (in Chinese))
- [14] GB/T 228—2002 金属材料 室温拉伸试验方法[S]. (GB/T 228—2002 Metallic materials: tensile testing at ambient temperature[S]. (in Chinese))
- [15] 班慧勇,施刚,邢海军,等. Q420 等边角钢轴压杆稳定性能研究(I)——残余应力的试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 14-21. (Ban Huiyong, Shi Gang, Xing Haijun, et al. Stability of Q420 high strength steel equal-leg angle members under axial compression (I): experimental study on the residual stress[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7): 14-21. (in Chinese))
- [16] 《钢结构设计规范》编制组. 中华人民共和国国家标准《钢结构设计规范》应用讲解[M]. 北京: 中国计划出版社, 2003. (Code for Design of Steel Structures Committee. Application construal of code for design of steel structures in China[M]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese))
- [17] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2006. (Chen Ji. Stability of steel structures theory and design[M]. The 3rd Edition. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))