

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

庄学真^{1,2}, 周福霖^{1,2}, 沈朝勇^{1,2}, 金建敏^{1,2}

(1. 广州大学 工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广州大学 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405)

摘要: 采用600型建筑叠层橡胶隔震装置为研究体,系统地研究了其温度为(-20℃~40℃)时的特性;温度为100℃时,恒温时间240h和336h状态下老化特性;老化前后相关性能对比;老化后极限性能及120次反复循环加载后的基准性能.结果表明:温度对叠层橡胶隔震装置的竖向刚度、水平刚度、屈服力及等效阻尼比具有不同程度的影响;其耐老化寿命可达到60a;为隔震技术在建筑领域中推广应用提供了依据.

关键词: 隔震装置; 叠层橡胶隔震支座; 温度相关性; 老化; 刚度; 屈服力

中图分类号: P 315.9

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2011)07-0993-07

中国自1992年将隔震技术应用于建筑结构工程中至今已近20a,尽管隔震技术含有叠层橡胶隔震支座、三维橡胶隔震支座、滑板支座等多种技术,已有的隔震建筑中,80%以上采用叠层橡胶隔震支座^[1-3].

叠层橡胶隔震支座是由薄钢板和薄橡胶片叠合组成,其橡胶材料在光、热、氧、臭氧和机械应力作用下分子链发生断裂,性能降低显现出老化.由于橡胶隔震支座置于建筑物的底部必须考虑各地域气候的差异,如南方要考虑耐热,北方要考虑耐寒,高原地区要考虑耐紫外线辐射等,文献对300型橡胶隔震支座进行过温度相关性及耐热老化探究^[4-5].本文以12个600型橡胶隔震支座为试验体,研究了其性能与温度、热老化的关系,得出60~100a的耐热老化性能,并对橡胶隔震支座的长期耐老化性能进行了评价.

1 实验装置及试验体

研究中试验体性能测试装置如图1所示,图1(a)为20MN电液伺加载系统,其竖向力达20MN,水平方向力达2MN;水平剪切应变试验时,竖向保持恒定的压力,加载速度为3~8mm/s,加载采用正弦波,采样频率为2Hz.其温控箱尺寸为2m×1.5m×1.8m,温度为-22℃~42℃.热老化试验在控制温度为100℃的恒温箱中完成.

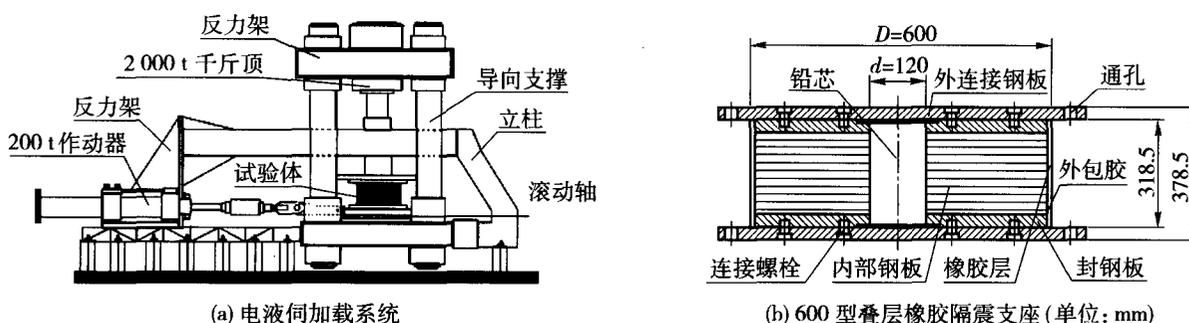


图1 实验装置

Fig.1 Test facility

收稿日期: 2009-06-22.

基金项目: 广东省高等学校科技创新团队基金资助项目(06CXTD007).

作者简介: 庄学真(1959—),女,湖北应山人,高级实验师.

试验体为12个600型叠层橡胶隔震支座,其中LRB型7个、RB型5个。支座采用橡胶剪切弹性模量 $G = 0.39 \text{ N/mm}^2$, 橡胶层总厚度 $T_r = 120 \text{ mm}$, 钢板总厚度 $T_p = 144 \text{ mm}$, 构造如图1(b)所示。

2 试验内容

2.1 基准性能试验

在进行各项试验前对12个试验体(LRB型和RB型)进行竖向设计荷载为15 MPa(4 241 kN)的基准性能试验。

竖向纯压缩试验为确定隔震支座的竖向刚度及竖向变形,是在设计荷载的 $\pm 30\%$ 内循环,循环次数为4次。竖向荷载值由油压力传感器采集,竖向位移通过CLP50型位移传感器采集,采集时间间隔0.5 s。

水平性能试验为确定隔震支座水平等效刚度、屈服后刚度、屈服力及阻尼特性。研究中先试验体竖向施加15 MPa压应力,再对其施加水平剪切应变为100% ($\pm 120 \text{ mm}$)的恢复力,频率为0.02 Hz往复循环4次。

2.2 温度相关性性能试验

对经基准性能试验后的3个LRB型和3个RB型试验体分别在温度为: $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $29 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,进行相关性试验,试验中试验体竖向施加15 MPa压应力,水平施加剪切应变为100%的恢复力,频率为0.02 Hz往复循环4次。

2.3 热老化性能试验

对经基准性能试验后的6个(RB和LRB型)试验体施以温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$,持续时间为240 h和336 h ($20 \text{ }^\circ\text{C} \times 60 \text{ a}$)进行热老化试验,老化后试验体均经停放72 h再次进行基准性能试验。老化试验前,对试验体LRB-600-J支座进行了压应力相关性、剪应变相关性试验;老化后对该试验体再次进行相同内容的试验及单向350%极限变形试验(竖向荷载15 MPa,水平位移 -420 mm),见表1。同时对试验体中RIL-600-L支座经老化基准性能试验后进行了120次反复循环加载试验(竖向荷载:15 MPa,水平应变为100%)。

表1 应力相关性

Table 1 Compression stress dependence

试验步骤	剪切应变/%	循环/次	f/Hz	位移/mm
1	± 50	4	0.02	± 60
2	± 100	4	0.02	± 120
3	± 150	4	0.01	± 180
4	± 200	4	0.008	± 240
5	± 250	4	0.005	± 300
6	350(老化后)	1	0.003	-420

3 试验结果分析

3.1 基准性能

12个试验体基准性能试验结果见表2。其竖向刚度为^[6]

$$K_v = E_{cv} \cdot A_c / T_c \quad (1)$$

式中, E_{cv} 为叠层橡胶支座修正压缩弹性模量, $E_{cv} = E_c \cdot E_v / (E_c + E_v)$;其中, E_v 为橡胶材料体积约束弹性模量; E_c 为叠层橡胶支座压缩弹性模量, $E_c = E(1 + 2kS_1^2)$; E 为橡胶材料标准弹性模量; k 为橡胶材料硬度修

正系数; S_1 为叠层橡胶支座第一形状修正系数. 试验中数据处理分析采取测试数据中第3次循环

$$K_v = (P_1 - P_2) / (\delta_1 - \delta_2) \tag{2}$$

式中, $P_1 = (1 - 30\%)P$; 相应的竖向位移为 δ_1 ; $P_2 = (1 + 30\%)P$, 相应的竖向位移为 δ_2 ; P 为叠层橡胶支座的竖向设计荷载.

水平性能分析采用双线性模型计算分析^[6-7], 如图2所示, K_{eq} 为水平等效刚度; H_{eq} 为等效阻尼比; K_d 为屈服后刚度; Q_d 屈服力; δ_1, δ_2 为水平变形位移

$$K_{eq} = (Q_1 - Q_2) / (\delta_1 - \delta_2)$$

$$H_{eq} = 2 \cdot \Delta W / [\pi \cdot K_{eq} (\delta_1 - \delta_2)^2]$$

$$K_d = \{ [(Q_1 - Q_{d1}) / \delta_1] + [(Q_2 - Q_{d2}) / \delta_2] \} / 2$$

$$Q_d = (Q_{d1} - Q_{d2}) / 2$$

图中曲线是 LRB 支座试验所得双线性恢复力特

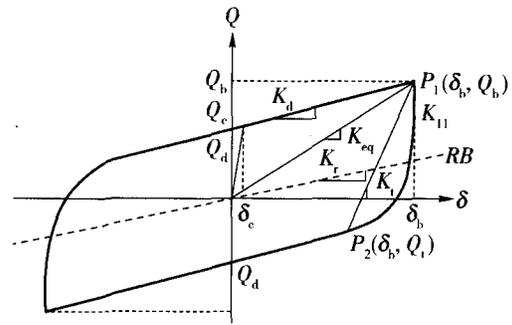


图2 水平性能计算分析方法

Fig. 2 Calculate analysis method of horizontal property

性滞回曲线, 虚线是 RB 支座恢复力特性曲线. 从表2知, 经基准性能试验两种类型支座的竖向刚度试验值分别相近似, 变化区域在 $-21.1\% \sim 3.3\%$; RB 型支座的水平等效刚度很接近; LRB 型支座的水平性能中屈服后刚度、等效刚度、屈服力、阻尼比同样分类相近似, 与设计值偏差在 15% 之内.

表2 基准力学性能

Table 2 Results of datum mechanic properties

试验体	$K_v / (kN \cdot mm^{-2})$	$K_d / (kN \cdot mm^{-2})$	$K_{eq} / (kN \cdot mm^{-2})$	Q_d / kN	$H_{eq} / \%$
RB-600-A	1 964.3	—	838	—	—
RB-600-B	1 944.6	—	842	—	—
RB-600-C	1 913.7	—	841	—	—
LRB-600-D	3 014.2	971	1 399	94.2	31.5
LRB-600-E	3 159.1	961	1 383	94.9	31.9
LRB-600-F	2 955.9	982	1 435	96.2	31.3
RB-600-G	1 954	—	846	—	—
RB-600-H	1 929	—	866	—	—
LRB-600-I	3 039	998	1 535	96.9	31.2
LRB-600-J	2 884	991	1 497	95.8	31.9
LRB-600-K	3 029.7	980	1 563	101.2	32.2
LRB-600-L	2 889.9	972	1 571	100.5	32.1

3.2 温度相关性能

图3给出 RB 和 LRB 型6个试验体支座在竖向载荷 15 MPa 下水平剪应变为 100% (± 120 mm) 时温度相关性的等效刚度、屈服后刚度、屈服力及等效阻尼比的试验结果曲线及竖向性能的结果曲线.

$$Q_d = 1.155 e^{(-0.0072 \cdot T)} Q_{dT_0} \tag{3}$$

$$K = 1.035 4 e^{(-0.0018 \cdot T)} K_{T_0} \tag{4}$$

式中, T_0 为标准常温状态下 20 °C; T 为试验温度; K 为水平刚度.

图3(a)为试验体(RB 和 LRB 型)支座等效刚度与设计式的对比, 知其与设计式曲线趋势相近, RB 型支座 40 °C 时等效刚度偏离设计式为 5.5%, 温度 -20 °C 时偏离设计值为 -3.2%; LRB 型支座 40 °C 时等效刚度偏离设计式达 2.0%, 温度 -20 °C 时偏离设计值为 -0.9%, 阻尼比在 40 °C 时偏离设计式为 -11.5%, 温度 -20 °C 时偏离设计值为 17.8%. 反映出温度对支座的等效刚度及阻尼均具有不同程度的影

响,低温使阻尼增大,支座耗能能力显著上升,高温则使其降低. 图3(b)、3(c)为 LRB 型支座屈服后刚度、屈服力与设计式的对比,知屈服后刚度及屈服力曲线均与其设计式趋势相一致;40 °C 时其屈服后刚度与设计式偏离为 8.5%,温度 -20 °C 时偏离为 10.1%;而 40 °C 时其屈服后力与设计式偏离为 -5.9%,温度 -20 °C 时偏离为 0.4%;图3(d)为 RB 和 LRB 型支座的竖向刚度与温度相关性曲线,低温使其刚度增大,高温则使其减小.

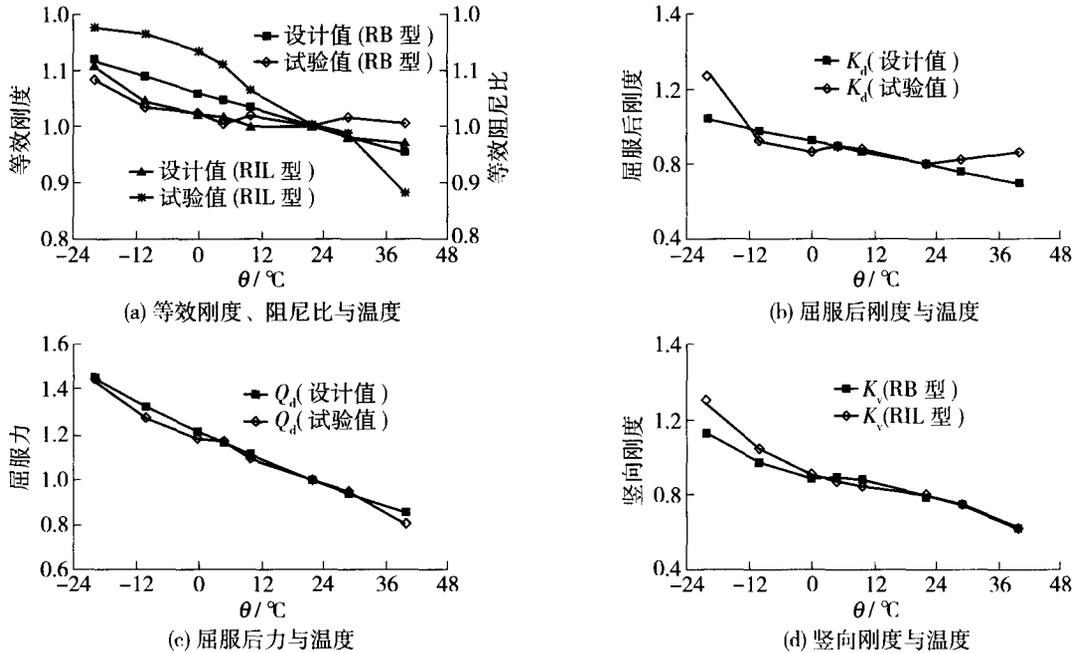


图3 水平性能参数及竖向刚度与温度相关性($\sigma_v = 15 \text{ MPa}, \gamma = 100\%$)

Fig. 3 Relation of horizontal characteristic parameter along with vertical pressure strain and temperature

3.3 热老化相关性能

试验体支座热空气加速老化试验理论依据 Arrhenius 提出的反应速度论进行,其时间为

$$t = t_0 \times 10^{0.434E} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) / R \tag{5}$$

式中, t_0 、 T_0 分别为设计基准期(d)和使用环境的绝对温度(K); t 、 T 分别为试验所需时间(天)和试验所需温度(K); R 为气体常数(= 8.31 J/mol·K); E 为橡胶活化能(= 90.4 KJ/mol). 根据式(5)可计算出相对于某一环境温度和设计使用年限的加速老化温度和时间.

本研究依据规程及现行行业标准^[8]要求,在恒温箱中不仅连续进行 100 °C × 240 h 热老化试验,且完成 100 °C × 336 h 的老化试验,可进一步确定 6 个试验体在 20 °C × 60 a 使用条件下力学性能的变化率. 下述列出试验体热老化前后基准性能(竖向荷载 15 MPa, 水平剪应变 100%)的对比率,知试验体支座竖向性能的变化率小相对稳定,

RB-600-G	$K_v(60 \text{ a 后})/K_v(\text{初}) = 0.967;$	$K_{eq}(60 \text{ a 后})/K_{eq}(\text{初}) = 0.954$
RB-600-H	$K_v(60 \text{ a 后})/K_v(\text{初}) = 1.003;$	$K_{eq}(60 \text{ a 后})/K_{eq}(\text{初}) = 0.918$
LRB-600-I	$K_v(60 \text{ a 后})/K_v(\text{初}) = 0.994;$	$K_d(60 \text{ a 后})/K_d(\text{初}) = 0.981;$
	$Q_d(60 \text{ a 后})/Q_d(\text{初}) = 1.093;$	$K_{eq}(60 \text{ a 后})/K_{eq}(\text{初}) = 0.993;$
	$H_{eq}(60 \text{ a 后})/H_{eq}(\text{初}) = 1.096$	
LRB-600-J	$K_v(60 \text{ a 后})/K_v(\text{初}) = 1.010;$	$K_d(60 \text{ a 后})/K_d(\text{初}) = 1.008;$
	$Q_d(60 \text{ a 后})/Q_d(\text{初}) = 1.082;$	$K_{eq}(60 \text{ a 后})/K_{eq}(\text{初}) = 1.017;$
	$H_{eq}(60 \text{ a 后})/H_{eq}(\text{初}) = 1.053$	

LRB-600-K $K_v(60 \text{ a 后})/K_v(\text{初}) = 1.005$; $K_d(60 \text{ a 后})/K_d(\text{初}) = 0.930$;
 $Q_d(60 \text{ a 后})/Q_d(\text{初}) = 1.039$; $K_{eq}(60 \text{ a 后})/K_{eq}(\text{初}) = 0.946$;
 $H_{eq}(60 \text{ a 后})/H_{eq}(\text{初}) = 1.109$
 LRB-600-L $K_v(60 \text{ a 后})/K_v(\text{初}) = 1.099$; $K_d(60 \text{ a 后})/K_d(\text{初}) = 0.919$;
 $Q_d(60 \text{ a 后})/Q_d(\text{初}) = 1.062$; $K_{eq}(60 \text{ a 后})/K_{eq}(\text{初}) = 0.985$;
 $H_{eq}(60 \text{ a 后})/H_{eq}(\text{初}) = 1.093$

RB 型支座老化后等效刚度降低;LRB 型支座老化后屈服后刚度、等效刚度趋于降低,屈服力、等效阻尼比呈上升趋势. 图 4、图 5 分别给出试验体 LRB-600-J(100 °C × 336 h) 老化前后竖向载荷为 15 MPa, 水平性能与压缩应力相关性和剪应变相关性的比较. 图 4 反应出试验体 LRB-600-J 老化前后随压缩应力的增加,其等效刚度、屈服后刚度变化趋势相近呈递减;而其等效阻尼比、屈服力呈递增趋势. 图 5 反应出

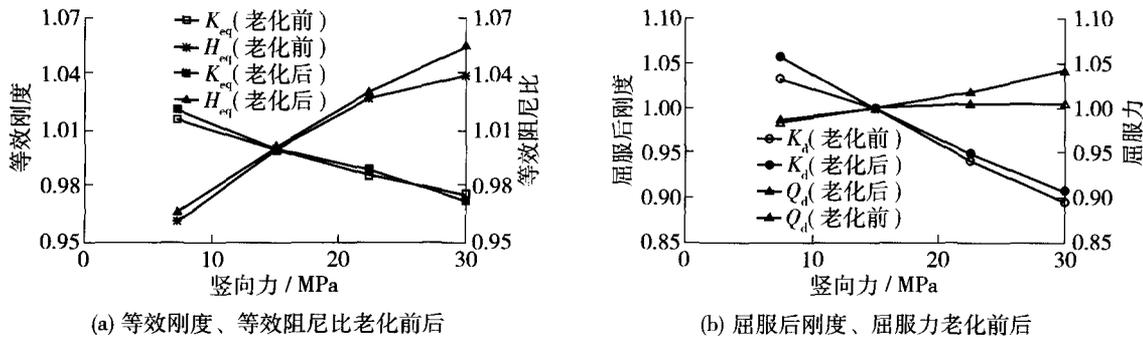


图 4 竖向压缩应力与老化前后水平性能参数的关系 ($\sigma_v = 15 \text{ MPa}$)

Fig. 4 Relation of in front and behind aging horizontal property parameter and vertical pressure strain

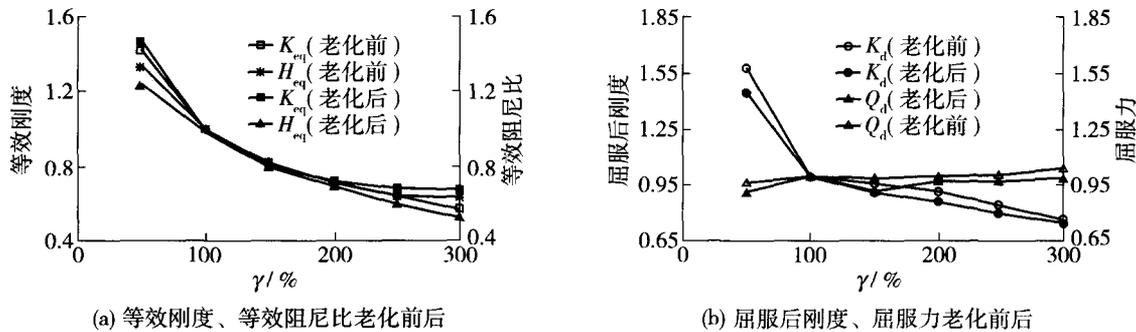


图 5 剪应变与老化前后水平性能参数的关系 ($\sigma_v = 15 \text{ MPa}$, $\gamma = 100\%$)

Fig. 5 Relation of in front and behind aging horizontal property parameter and shear strain

试验体 LRB-600-J 老化前后随剪应变的增大,等效刚度、等效阻尼比及屈服后刚度均呈现减小趋势;其屈服力略显上升. 图 6 为试验体 LRB-600-J 支座老化后竖向载荷为 15 MPa, 水平剪应变为 350% (-420 mm) 极限变形时水平力与水平位移的关系曲线, 试验中未见试验体外观出现异常及龟裂现象. 表 3 列出试验体 LRB-600-J(100 °C × 336 h) 和 LRB-600-L(100 °C × 240 h) 老化前后、经极限变形、120 次反复循环加载后基准性能对比, 反应老化时间的不同, 对试验体支座性能显现一定的差异. 试验体 LRB-600-

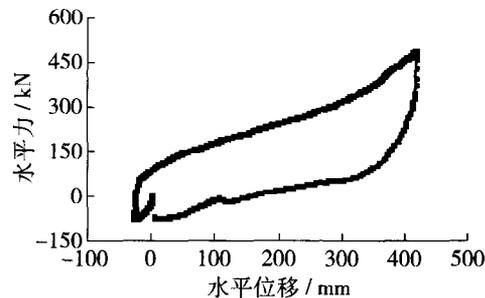


图 6 水平力与水平位移 ($\sigma_v = 15 \text{ MPa}$)

Fig. 6 Relation of horizontal force and displacement

J(经老化) 极限变形后水平基准性能试验显示屈服后刚度、等效刚度要比之前小, 降低 -24.4% 和 -12.96%; 而屈服力、等效阻尼比上升分别为 2.5% 和 17.9%. 试验体 LRB-600-L(经老化) 120 次循环

加载后的水平基准性能试验显示屈服后刚度、等效刚度、屈服力比之前减小,降低-15.7%、-11.96%和-8.7%;等效阻尼比比之前提高了5.6%。揭示了经不同时段的老化,试验体支座的等效阻尼比有不同程度增加,老化促使铅芯支座耗能性增强。

表3 试验体老化前后、极限变形、多次循环后的基准性能对比

Table 3 basing property contrast of in front and behind aging (240 h and 336 h) and after ultimate strain and recycled

试验内容	$K_v/(kN \cdot mm^{-2})$	$K_d/(kN \cdot mm^{-2})$	$K_{eq}/(kN \cdot mm^{-2})$	Q_d/kN	$H_{eq}/\%$	状态
LRB-600-J (336 h)	2 884	991	1 497	95.8	31.9	老化前
	2 913	999	1 522.4	103.7	33.6	老化后
	—	751.8	1 303	98.2	37.6	极限性能后
LRB-600-L (240 h)	2 889.9	972	1 571	100.5	32.1	老化前
	3 176	893.3	1 547.4	106.7	35.1	老化后
	—	819.2	1 384.3	91.8	33.9	反复循环后

4 结论

1) 600型(RB和LRB)叠层橡胶隔震支座温度在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内变化时,竖向刚度变化趋势具有同性,随温度升高刚度下降,低温刚度增大。RB型支座等效刚度与设计式相近似;LRB型支座屈服后刚度、屈服力与设计式趋势相一致,随温度升高而降低;阻尼比随温度升高而减小,显示低温阻尼增大耗能特性强,高温耗能性降低。

2) 600型(RB和LRB)试验体支座老化后,经基准性能试验表明,竖向刚度变化率小具有稳定性。RB型支座经老化等效刚度降低;LRB型支座经老化等效刚度、屈服后刚度趋于降低,而屈服力、等效阻尼比显上升趋势(耗能性增大)。

3) LRB-600型试验体支座老化($100\text{ }^{\circ}\text{C} \times 336\text{ h}$)前后性能对比试验表明:随压缩应力的增加,等效刚度、屈服后刚度变化趋势相近呈递减;而等效阻尼比、屈服力呈递增。随剪应变的增加,等效刚度、等效阻尼比及屈服后刚度均呈减小趋势;而屈服力略显上升。试验体老化后在竖向载荷 15 MPa 水平剪应变变为 350% (-420 mm)极限变形中,未见破坏。

4) LRB-600型试验体支座经 $100\text{ }^{\circ}\text{C} \times 240\text{ h}$ 老化后基准性能与其老化前、120次反复循环加载后基准性能及与经 $100\text{ }^{\circ}\text{C} \times 336\text{ h}$ 支座老化前后 350% 极限变形后的基准性能对比,知老化时间对橡胶支座的基准性能有相当程度的影响。长时间老化导致支座水平基准性能降低,竖向性能有增加趋势;经 350% 极限变形及120次循环后的水平基准性能试验,刚度下降阻尼比提高。

参考文献:

- [1] 刘文光,周福霖,庄学真,等.大直径夹层橡胶隔震装置力学性能试验研究[J].世界地震工程,1999,15(1):62-68.
LIU Wen-guang, ZHOU Fu-lin, ZHUANG Xue-zhen, et al. Research on mechanical characteristics of laminated rubber bearings[J]. World Information on Earthquake Engineering, 1999, 15(1): 62-68. (in Chinese)
- [2] 张荫,姚谦峰.自阻尼叠层橡胶隔震支座阻尼特性及恢复力模型[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2003,35(2):120-126.
ZHANG Yin, YAO Qian-feng. Damping characteristic and force-restoring model of self-damping laminated rubber isolation bearing[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2003, 35(2): 120-126. (in Chinese)
- [3] 庄学真,周福霖,冯德民,等.1200型大直径建筑叠层铅芯橡胶隔震支座性能研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2008,40(3):368-375.
ZHUANG Xue-zhen, ZHOU Fu-lin, FENG De-min, et al. Research on mechanical characteristics of 1200 laminated lead

- steel-plate-laminated-rubber-bearing isolation bearings for building [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(3): 368-375. (in Chinese)
- [4] 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 Yong-feng, DI Sheng-kui, 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)
- [5] 刘文光, 杨巧蓉, 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 Wen-guang, YANG Qiao-rong, ZHOU Fu-lin. Temperature properties of lead rubber bearings for building[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 39-44. (in Chinese)
- [6] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 59-71.
- [7] 日本免震构造协会. 隔震结构入门[M]. 北京: OHM 出版社, 1998: 54-72.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 20688.3—2006, 中华人民共和国国家标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

Research on Temperature Dependence and Aging Rigidity of 600 Laminated Steel-plate-laminated-rubber-bearing Isolation Bearings for Building

ZHUANG Xue-zhen^{1,2}, ZHOU Fu-lin^{1,2}, SHEN Chao-yong^{1,2}, JIN Jian-min^{1,2}

(1. Earthquake Engineering Research Test Center Guangzhou University; 2. Guangzhou University and Guangdong Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technique, Guangzhou 510405, China)

Abstract: In this research, the temperature dependence of laminated rubber damping bearing with temperature from $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ are tested for 600 laminated rubber damping bearing. With the temperature of $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ from 240 to 336 hours, in front and behind aging and 120 times recycled pressurization of laminated rubber damping bearing are compared by property. It is proved that the temperature influence laminated rubber damping bearing with damping ratio and horizontal and vertical stiffness. Its' aging tests are attained to 60 years with the temperature of $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, providing foundation for isolators technique using in the field of architecture.

Key words: mechanism isolators; laminated rubber damping bearing; temperature dependence; aging; rigidity; yield force

(责任编辑 张士瑛)