

文章编号: 0258-0926(2015)05-0037-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.05.0037

针对核电厂三维隔震的厚层橡胶支座 力学性能研究

王 涛, 李吉超, 王 飞

中国地震局工程力学研究所, 河北三河, 065201

摘要: 采用厚层橡胶支座对核电厂反应堆厂房进行竖向隔震, 可以使楼层反应谱峰值向低频移动到约 2~4 Hz 的范围内, 有效地避开大部分设备和管道的固有频率范围(约 10~15 Hz), 降低竖向地震对核电结构内部设备和管道的损伤。对厚层橡胶支座的相关性能进行试验研究, 分别设计制作厚层橡胶支座和普通橡胶支座, 并参考规范对 2 种橡胶支座进行力学性能检测, 包括隔震支座剪切刚度和压缩刚度试验, 比较二者性能之间的差别。结果表明, 厚层橡胶支座具有与普通橡胶支座相近的剪切性能, 在竖向具有大变形能力, 竖向刚度约为普通橡胶支座的 1/8, 可以作为新型三维隔震装置的承载元件。

关键词: 厚层橡胶支座; 竖向隔震; 性能检测试验

中图分类号: TU317.1 **文献标志码:** A

Experimental Study on Thick Rubber Bearings of Three-Dimensional Isolation of Nuclear Power Plants

Wang Tao, Li Jichao, Wang Fei

Institute of Engineering Mechanics, CEA, Sanhe, Hebei, 065201, China

Abstract: The application of vertical isolation technique to nuclear power plants could shift the main frequency of floor response spectra (FRS) to 2~4 Hz, much lower than the operation frequency of the equipment and pipeline, thus reduce the damage to the inner equipment and pipeline due to the vertical earthquake. This paper provides an experimental study on the thick rubber bearings. Mechanical behaviors of two types of rubber-based bearings, normal bearings and thick rubber bearings were tested according to the code, including horizontal shear and vertical compress tests. The tests reveal that the thick rubber bearings possess a similar shear stiffness and smaller compressive stiffness nearly 1/8 compared with the normal rubber bearings. Therefore, the thick rubber bearings are suitable for loading element of new type three-dimensional isolation equipment.

Key words: Thick rubber bearings, Vertical isolation, Performance tests

0 引言

厚层橡胶支座具有与普通橡胶支座相近的剪切刚度和较小的竖向刚度, 在核电厂结构竖向隔震领域具有非常好的应用前景。美国的 SAFR 反应堆采用了 100 个厚层橡胶隔震支座, 形状系数在 3~6 之间^[1]。为避免橡胶层变厚而增加硫化加

工的难度, 日本电力中央研究所设计了多层连接的厚橡胶隔震垫, 形状系数在 4 左右^[2]。目前, 厚层橡胶支座的设计和计算主要存在问题^[3~4]: 力学分析模型不完善, 模型中的基本参数与实际橡胶支座的设计参数(如: 实际支座的平面尺寸、橡胶层厚度、橡胶材料硬度以及铅芯的形状等)

收稿日期: 2014-09-04; 修回日期: 2014-12-20

作者简介: 王 涛(1977—), 男, 博士, 主要从事结构抗震试验方法、被动控制理论和应用、核电厂抗震、隔震等方面研究

之间尚未建立明确的量化关系。何文福等^[3]指出, 厚层橡胶隔震支座在水平方向的基本力学性能良好, 但其竖向刚度试验值与理论值相差较大, 不能单纯仅依靠理论公式, 而应该通过试验确认。邹立华^[6]等提出一种新型预应力厚层橡胶隔震支座, 竖向刚度采用回归分析的方法引入修正系数, 但由于样本较少, 仅适用于具有相似参数的支座。

本文对厚层橡胶支座相关性能进行试验研究。分别设计制作了厚层橡胶支座和普通橡胶支座, 并参考规范《JG 118—2000 建筑隔震橡胶支座》^[7]对2种橡胶支座进行力学性能检测, 包括隔震支座剪切刚度和竖向刚度试验, 并比较了二者性能之间的差别。

1 厚层橡胶支座

厚层橡胶支座由内部夹层钢片和橡胶片叠合而成, 橡胶和钢板之间硫化粘接, 最外层采用较厚的封装钢板封装, 通过内六角螺栓与连接钢板组装(图1), 整体结构构造与普通橡胶支座类似。厚层橡胶支座的橡胶层厚度明显增大, 约为普通橡胶支座的4~6倍, 具有较小的竖向刚度, 可以应用于竖向隔震。厚层橡胶支座橡胶层总厚度保持不变, 因而剪切刚度与具有同样橡胶层总厚度的普通橡胶支座类似, 即水平方向的性能保持不变。厚层橡胶支座中的叠层钢片比普通橡胶支座的钢片厚, 防止因橡胶层厚度不均匀而造成叠层钢片在硫化过程中变形。由于橡胶层厚度增加, 造成橡胶支座第一形状系数大幅度降低, 橡胶支座在工作时的力学性能需要系统研究。

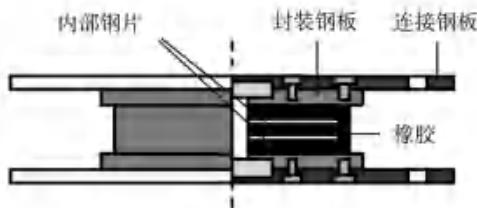


图1 厚层橡胶隔震支座示意图

Fig. 1 Configuration of Thick Rubber Bearing

2 支座性能试验

2.1 试验体设计

为检验厚层橡胶支座的力学性能, 设计制作了4个厚层橡胶支座和4个普通橡胶支座进行试验, 厚层橡胶支座的构造和尺寸为: 有效直径为

250 mm, 中心孔直径为50 mm, 便于硫化工艺。2种支座涉及的主要参数如表1。厚层橡胶支座采用9片厚度为12 mm的橡胶层, 8片厚度为6 mm的内部钢板, 厚度分别是普通橡胶支座的5倍和4.3倍。由于2种支座橡胶层总厚度稍有不同, 设计时采用调整橡胶硬度的方法, 使两者水平方向设计刚度一致。《建筑抗震设计规范GB50011-2010》^[8]建议, 叠层橡胶支座的第一形状系数(S_1)不宜小于15, 第二形状系数(S_2)不宜小于5。由于试验条件的限制, 所设计的橡胶支座直径较小, 而为了反映厚层橡胶支座与普通橡胶支座的区别, 在厚度方向维持较大的尺度。因此, 2种支座的 S_2 均较小, 约2.3。为了防止支座在竖向荷载下失稳, 设计面压为6 MPa左右, 约为300 kN。 S_1 与竖向刚度有关, 厚层橡胶支座的 S_1 为4.2, 远小于普通橡胶支座的 S_1 为22.1, 说明前者的竖向刚度远小于后者。

表1 2种隔震支座设计参数
Table 1 Design Parameters of Two Types of Rubber Bearings

	设计参数	厚层橡胶支座	普通橡胶支座
橡胶	剪切模量 G/MPa	0.5	0.4
	弹性模量 E_e/MPa	1.65	1.26
	体积模量 E_v/MPa	2070	2040
	橡胶修正系数 κ	0.814	0.874
橡胶层	厚度 t_r/mm	12	2.38
	数量 n	9	42
内部钢板	厚度/mm	6	1.4
	数量	8	41
支座有效直径/mm	250	250	
设计轴压/kN	300	300	
设计应力/MPa	6.37	6.15	
第一形状系数 S_1	4.2	22.1	
第二形状系数 S_2	2.3	2.3	

根据《橡胶支座第1部分: 建筑隔震橡胶支座 GB 20688.3-2006》^[9], 天然橡胶支座剪切刚度由式(1)、(2)计算。

$$K_h = G \frac{A}{t_r} \quad (1)$$

$$K_v = \frac{AE_e}{nt_r} \quad (2)$$

$$E_c = \left[\frac{1}{E_{ap}} + \frac{1}{E_\infty} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$E_{ap} = E_0 (1 + 2\kappa S_1^2) \quad (4)$$

式中, A 为支座有效截面面积; n 为内部橡胶层数; t_r 为单层内部橡胶厚度; E_c 为修正的压缩弹性模量; E_∞ 为橡胶体积弹性模量; E_{ap} 为橡胶表观弹性模量; E_0 为橡胶弹性模量; κ 为与硬度有关的弹性模量修正系数。

2.2 加载装置

试验采用电液伺服压剪试验机进行加载, 试验装置如图 2 所示。竖向千斤顶提供轴压, 水平作动器推动上连接板进行循环往复加载, 上连接板与反力装置之间具有摩擦力极低的滚轴。利用该试验机可以进行隔震支座的抗压、抗剪以及复合受力下的力学性能试验。试验机水平、竖向最大输出力分别为 50 t 和 1000 t, 水平最大行程为 ± 200 mm, 水平向最大加载频率 0.05 Hz。

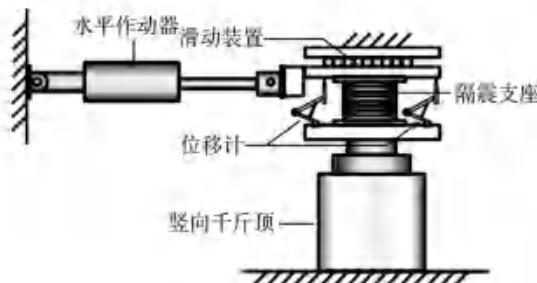


图 2 加载装置
Fig. 2 Load Device

2.3 剪切刚度试验

检测剪切刚度时, 在竖向分别施加 75、150、300 kN 的竖向轴压, 并在每个轴压下分别以 50%、100%、180% 为剪切变形幅值进行正弦波加载。加载频率为 0.05 Hz, 每个幅值下循环 3 圈, 取第 3 圈计算剪切刚度。

为了定量评价厚层橡胶支座和普通橡胶支座的剪切刚度, 研究其剪切刚度与轴压、剪切变形之间的关系, 计算了不同工况下的剪切刚度试验值与设计值的比值。其中剪切刚度试验值取每个幅值下正负方向力极值点连线的斜率, 如图 3。图中 2D 和 3D 分别代表普通橡胶支座和厚层橡胶支座。可以看到, 2 种橡胶支座的剪切刚度试验值与设计值的偏差始终不大于 25%; 在 100% 剪切变形下, 厚层橡胶支座、普通橡胶支座比设计值的分别小 5% 和 20%。2 种橡胶支座的剪切刚度均随着剪切变形和轴压的增大而降低。原因为剪切变形和轴压所引起的钢板面外变形会减小钢板

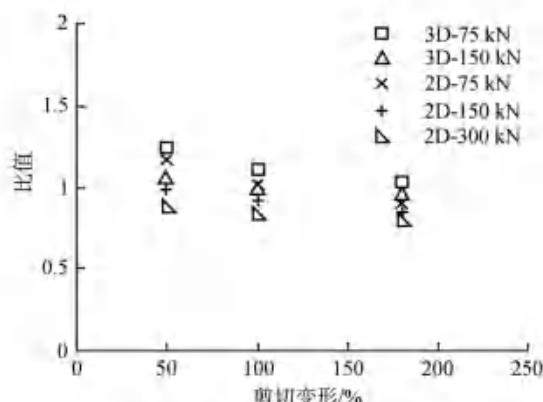


图 3 剪切刚度与轴压、剪切变形之间的关系
Fig. 3 Relationship of Shear Stiffness with Axial Pressure and Shear Deformation

对橡胶水平方向的约束。

2.4 竖向刚度试验

根据 JB118-2000《建筑隔震橡胶支座》检测竖向刚度时, 首先分别对试样施加 75、150、200、300 kN 轴向载荷, 然后以轴向荷载的 30% 为变化幅度做循环加载, 每个轴压加载 3 圈。选择第 3 圈的数据计算竖向刚度。

厚层橡胶支座和普通橡胶支座的竖向刚度设计值分别为 19.32、483.08 kN/mm。计算不同轴压下试验值与设计值之间的关系, 可以得到竖向刚度与轴压的关系曲线, 如图 4。可以发现, 相比于普通橡胶支座, 厚层橡胶支座具有更大的轴压敏感性, 即随着轴压的增大, 厚层橡胶支座的竖向刚度急剧增大。当轴压为 300 kN 时, 约增大 2.5 倍。因为厚层橡胶支座在大轴压下橡胶层厚度减小, 支座 S_1 减小, 并且钢板的约束作用加强, 导致橡胶支座的竖向刚度迅速增加。

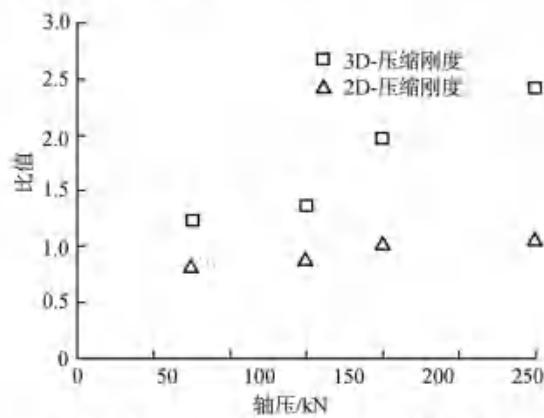


图 4 竖向刚度与轴压、剪切变形之间的关系
Fig. 4 Relationship of Vertical Stiffness with Axial Pressure and Shear Deformation

3 结论与展望

通过对普通橡胶支座及厚层橡胶支座基本力学性能的试验研究, 对比分析厚层橡胶隔震支座的力学性能特点, 主要结论如下:

(1) 厚层橡胶支座水平工作性能良好, 试验值与设计值的偏差在 75 kN 和 150 kN 的轴压作用下始终小于 25%。厚层橡胶支座竖向刚度为普通橡胶支座的 1/8 左右。

(2) 厚层橡胶支座压缩刚度与轴压具有较大的相关性, 达到设计轴压力 300 kN 时约增大 2.5 倍, 其力学性能的确定不能单纯仅依靠理论公式, 而应该通过试验来确认或提出修正公式。对厚层橡胶支座力学性能的相关理论还需要做进一步的研究。

参考文献:

- [1] Tajirian F F, Kelly M J, Aiken D I, et al. Elastomeric bearings for three-dimensional seismic isolation [C]. 1990. ASME PVP. Nashville, Tennessee.
- [2] Kanazawa K, Hirata K, Matsuda A. Shaking table test of three-dimensional base isolation system using laminated thick rubber bearings [C]. 15th SMiRT. Seoul, Korea, 1999.
- [3] 韩强, 刘文光, 杜修力, 等. 橡胶隔震支座竖向性能试验研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25 (2): 217- 219.
- [4] Othman A B. Property profile of a laminated rubber bearing [J]. Polymer Testing , 2001, 20 (2): 159- 166.
- [5] 何文福, 刘文光, 杨彦飞, 等. 厚层橡胶隔震支座基本力学性能试验 [J]. 解放军理工大学学报, 2011 , 12 (3): 258- 263.
- [6] 邹立华, 饶宇, 黄凯, 等. 预应力厚层橡胶支座隔震性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34 (2): 76-82.
- [7] JG 118-2000. 建筑隔震橡胶支座[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [8] GB 50011-2010. 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [9] GB 20688.3-2006. 橡胶支座第 3 部分: 建筑隔震橡胶支座[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

(责任编辑: 杨洁蕾)