

隔震支座用橡胶材料的研究进展

杨静娜¹, 赵秀英^{1,2*}, 卢咏来^{1,2}, 郭长明¹, 张立群^{1,2}

(1. 北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029; 2. 北京化工大学 北京市新型高分子材料制备与加工重点实验室, 北京 100029)

摘要:介绍基础隔震的概念及发展历程, 概述在建筑物中使用隔震支座的必要性以及隔震支座用橡胶材料的研究进展。为了提高橡胶支座的隔震性能, 可采取多种方法提高橡胶支座的阻尼性能。普遍采用的方法是在橡胶支座的中心位置竖直插入纯度为 99.9% 的铅芯以提高支座的阻尼性能, 但该方法有一定局限性, 更多的是通过加入填料或者其他物理化学方法改性来改善支座用橡胶材料的阻尼性能。高阻尼橡胶隔震支座具有更好的抗震能力, 是新一代隔震支座的发展趋势。

关键词:基础隔震; 隔震支座; 橡胶材料; 阻尼性能

中图分类号: TQ336.4+2 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-890X(2014)08-0502-05

地震是一种严重危害人类生命财产安全的自然灾害。中国地处世界上两个最活跃的地震带中间, 东部濒临环太平洋地震带, 西部和西南部是欧亚地震带所经过的地区, 是世界上地震活动最频繁和地震灾害最严重的国家之一^[1]。在地震作用下, 建筑物的破坏是导致经济损失和人员伤亡的最直接原因, 减轻地震灾害的最有效措施就是提高建筑物的抗震能力。

目前世界上大多数国家普遍采用的抗震方法是提高建筑物上部结构的刚度, 也就是通过增大结构和结构构件的刚度来抵抗和消耗地震能量。该方法不但不经济, 而且也很可能满足不了安全性的要求。例如, 1971 年美国旧金山大地震时, 加州西马克电话总机房结构只有轻微破坏, 但内部通讯设备遭到严重损坏, 导致全区信号中断, 以至抗震救灾指挥工作无法进行, 由此带来的损失难以估量。

基础隔震技术在现代建筑物抗震设计中应用越来越广泛, 其原理是在建筑物上部结构与地基间设置具有足够安全可靠的隔震系统, 从而提高结构的变形能力和滞变阻尼, 有效地将地震波能量隔离或消耗, 减小结构地震反应, 保护上部结构

的安全。即使遭受大地震, 上部结构仍可处于弹性工作状态, 能够保证建筑物结构和其中人员、仪器设备的安全和正常使用^[1]。本文综述隔震系统中重要组件隔震支座用橡胶材料的研究进展。

1 隔震支座

1.1 技术进展及作用原理

基础隔震的概念提出和隔震技术的应用可以追溯至 20 世纪初期。早在 1906 年, 德国 J. Bechtold 提出以滚球作为隔震基础并申请了美国专利; 1921 年, 英国 Calantarients 发明了以滑石粉作为隔震材料并申请了英国专利; 同年, 东京帝国饭店采用软土作为隔震基础而建造(1923 年东京大地震中该饭店保持完好); 1969 年, 南斯拉夫一座小学使用了天然橡胶(NR)垫块(无钢板夹层)而建成^[2]。这些建筑物在以后的地震灾害中都取得了令人满意的隔震效果。

现代比较可靠的隔震系统由隔震支座、阻尼器、地基微振动和风反应控制装置等部分组成^[3]。作为关键组件, 隔震支座的主要作用包括: (1) 支撑建筑物的全部重力; (2) 改变结构系统的动力特性, 即延长建筑物自振周期以降低其地震反应; (3) 在保持承载能力的同时能够承受基础与上部结构间预期的相对水平位移。目前, 对叠层橡胶隔震支座的研究和应用较为广泛, 可分为普通叠

作者简介: 杨静娜(1990—), 女, 河南濮阳人, 北京化工大学在读硕士研究生, 主要从事高阻尼橡胶材料的研究。

* 通信联系人

层橡胶支座、铅芯叠层橡胶支座和高阻尼叠层橡胶支座等^[4]。

1.2 应用

1966 年,美国率先在阿巴尼大厦中使用橡胶隔震支座,之后日本、法国、新西兰等也相继在一些重要建筑物中使用隔震橡胶支座。我国近十几年来在建设部门倡导下也开展了层叠橡胶支座的研究开发工作,并在四川成都地区、甘肃、新疆、河北张家口、云南大理和天津等地不同类型建筑上使用了这种支座^[5]。实践证明,这些使用隔震橡胶支座的建筑物具有较好的抗震性能,比如 1994 年的美国洛杉矶大地震和 1995 年的日本神户大地震中,使用层叠隔震橡胶支座系统的建筑物不仅未倒塌,其内部的设施也未破坏,表现出优异的抗震效果^[6]。在现代建成的基础隔震建筑物中,80% 以上的建筑物采用层叠橡胶隔震支座系统抗震^[7]。

叠层橡胶支座由薄橡胶层和薄钢板层交互叠置,经高温、加压并硫化制作而成,橡胶层与钢板紧密结合确保了钢板对橡胶层的变形约束,使其具有较高的纵向受压承载能力、水平变形能力和耐疲劳能力,支座内橡胶层除橡胶材料外,还有补强剂和防老剂等^[8-9]。在地震作用下,橡胶隔震支座可以隔离水平方向的运动分量,但在垂直方向保持不动,这种支座柔度大,但是阻尼性能不佳,实际应用中需要与独立的耗能装置(铅、钢或粘弹性阻尼器)组合使用。

2 隔震支座用橡胶材料

2.1 分类

根据阻尼性能的差异,隔震支座可以分为以下两类^[10]:(1)低阻尼 NR 或合成橡胶支座;(2)高阻尼橡胶支座。普通层叠橡胶支座的橡胶层选用 NR^[5],并且基本不用补强剂补强,只进行化学交联。这也是其阻尼性能不佳的原因。通常高阻尼橡胶支座的制备是通过在共混时向生胶中添加炭黑和其他填料来实现的^[11]。在 100% 剪切应变时,高阻尼橡胶的等效阻尼比(ξ)范围达 10%~20%,而相同情况下低阻尼 NR 支座的 ξ 值为 2%~3%。

橡胶支座的高阻尼性能可以更好地满足高性

能支座的高度耗能减震的要求,橡胶层能有效吸收地震波能量,降低建筑物的加速度反应,减弱地震的破坏力。橡胶的阻尼性能源于其特有的粘弹滞后特性,采用高阻尼特性的橡胶材料制造隔震支座对提高其抗震效果非常重要。为了保障隔震效果,隔震支座用橡胶材料除需具备高阻尼性能外,还需具备高强度、高柔性(即低模量大变形)、高弹性等性能。

2.2 性能要求

橡胶支座较常用的材料为 NR、氯丁橡胶(CR)、聚异丁烯橡胶和丁腈橡胶(NBR)^[12]。其中 NR 的物理性能(撕裂强度、高应变疲劳性能和蠕变性能等)和低温性能均优于大多数合成橡胶,因此 NR 是橡胶支座中应用最频繁的材料。NR 的分子链较为柔顺,具有高弹和低压永久变形性能的特点。更重要的是, NR 具有拉伸结晶特性,其应力-应变曲线呈现中等变形量下的低定伸应力、高变形量下迅速结晶而表现出高拉伸强度的特点,即容易发生大的变形,并具有高的抗破坏强度。这些特点对于隔震支座所需的“竖向刚、横向柔、抗破坏”性能非常重要。但正由于 NR 大分子链柔顺,变形时分子间内摩擦力小,损耗因子($\tan\delta$)小,严重影响了其阻尼效果,因此, NR 支座尽管能够提高结构柔性,减小建筑的地震反应,但不能很好地衰减地震波,控制结构位移。此外, NR 耐候性有待提高,故 NR 支座需经过严格的橡胶涂层处理来改善该性能。而在法国等国家常以 CR 作为支座材料^[13]。CR 虽然耐候性佳,但其滞后损失大而导致其出现蠕变现象,较低温时易结晶变硬,因此总体而言, CR 支座并不常见,而且其高昂的价格也是一大不足。

我国对建筑隔震橡胶支座规定了统一的标准, GB 20688.3—2006《橡胶支座 第 3 部分:建筑隔震橡胶支座》对建筑隔震橡胶支座用的橡胶材料性能有明确要求,如表 1 和 2 所示^[14]。

为了改善 NR 隔震支座的阻尼性能,现在普遍采用在橡胶支座的中心位置竖直插入纯度为 99.9% 的铅芯,借助铅芯的剪切变形来实现吸收耗散振动能量的功能,加入铅芯的支座的临界阻尼比可从 3% 增大到 10%~15%,这样即使不使用其他阻尼器也可满足隔震设计的阻尼要求,具

表 1 NR 支座和铅芯橡胶支座内部橡胶材料的物理性能要求

项 目	剪切模量/MPa						
	0.30	0.35	0.40	0.45	0.60	0.80	1.00
IRHD 硬度/度	30±5	35±5	35±5	40±5	45±5	50±5	65±5
拉伸强度/MPa	≥12.0	≥14	≥14	≥15	≥15	≥20	≥20
拉断伸长率/%	≥650	≥600	≥600	≥600	≥500	≥500	≥500
粘合性能							
橡胶与金属粘合强度/(N·mm ⁻¹)	≥6	≥6	≥6	≥6	≥6	≥6	≥6
破坏类型	橡胶破坏	橡胶破坏	橡胶破坏	橡胶破坏	橡胶破坏	橡胶破坏	橡胶破坏
脆性温度/℃	≤-40	≤-40	≤-40	≤-40	≤-40	≤-40	≤-40

表 2 高阻尼橡胶支座内部橡胶材料的物理性能要求

项 目	剪切模量/MPa		
	0.40	0.60	0.80
IRHD 硬度/度	(60~70)±5	(60~70)±5	(60~70)±5
拉伸强度/MPa	≥8.0	≥8.0	≥10.0
拉断伸长率/%	≥650	≥650	≥650
脆性温度/℃	≤-40	≤-40	≤-40

注:剪切模量的相应剪切应变为 100%。

有价廉的优势^[9]。但同时铅芯的存在也使该隔震体系的自恢复能力大大降低,而且这种支座的缺点就是隔震频带较窄,不能有效地实现多种频率地震波的减震、隔震。

2.3 研究进展

近年来,国内外学者通过采用橡胶共混、共聚、填料改性、有机小分子杂化阻尼、溶液共沉淀和互传聚合物网络等方法来提高支座用橡胶材料的综合性能,尤其是阻尼性能,拓宽阻尼温域,以使橡胶支座能够更好地衰减地震波能量,将结构位移控制在合适的范围内,并降低蠕变及性能对温度的依赖性。

针对普通硫化体系在硫化交联过程中常产生较多不稳定的多硫键,徐文总等^[15]研究了纳米氧化锌作为硫化活性剂对 NR 复合体系硫化反应的影响,结果表明,该体系生成了更多具有耐热稳定性的单硫键,其拉伸强度提高 10% 左右,热老化性能也得到了提高。

在减震材料的研究中,填充剂是除橡胶本身外影响胶料动态阻尼性能的显著因素。赵艳芳等^[16]研究了炭黑并用对 NR/环氧化天然橡胶(ENR)并用胶物理性能及减震性能的影响,发现不同粒径炭黑并用能够使并用胶的储能模量下降,且有利于改善其加工性能和拓宽并用胶的减震范围。赵艳芳等^[17]还研究了炭黑/无机填料对

NR/ENR 并用胶性能的影响,结果表明,炭黑与无机填料并用能使并用胶的阻尼性能提高、减震区域拓宽、加工性能改善。

向丽君等^[18]将环氧树脂加入 NBR/NR 复合材料中,研究发现加入 15~20 份的环氧树脂时,胶片与金属的粘合性能显著提高,硫化性能得到改善,但硫化胶物理性能有一定程度的下降。贾德民等^[19]将少量树脂加入 NR/NBR/ENR 并用胶中,并对其动态力学性能进行了研究,发现树脂主要分布在 NBR/ENR 相中,该相玻璃化温度升高且使其 tanδ 峰值从 0.22 增至 0.32 左右,但树脂对 NR 相的玻璃化温度及其 tanδ 峰值影响不大,而且并用胶在 0℃ 时的 tanδ 值总体较低,低于 0.25。周娟等^[20]研究了 ENR/NBR 的并用比、无机填充剂、增塑剂及防老剂对并用胶硫化特性、物理性能、耐油性能及耐老化性能的影响,结果表明,当 NBR/ENR 并用比为 40/60、白炭黑为填充剂时,并用胶的综合性能提升,拉伸强度大于 8 MPa。

M. S. El-Aasser 等^[21]曾设计出一系列新型的具有核-壳结构的乳胶颗粒,其中核是以聚丁二烯类(A)和丙烯酸类(B)组成的互穿网络高聚物,壳由玻璃态的苯乙烯和丙烯腈(C)组成,研究发现,聚合物的相与相之间越容易混合,则该复合材料的阻尼性能就越好,相的连续性也对材料的阻尼性能有很大的作用,在作者设计的 3 种核-壳结构中(如图 1 所示),由于图(1)(a)的材料 A、B 和 C 在这种结构下相的可混溶性最佳,相连续性较好,因此其阻尼性能最佳。

C. F. Wu 等^[22-23]将有机小分子受阻酚(AO-80)加入氯化聚乙烯(CPE)中,成功制备了具有优异阻尼性能的有机杂化材料,该复合材料的 tanδ-温度曲线如图 2 所示。

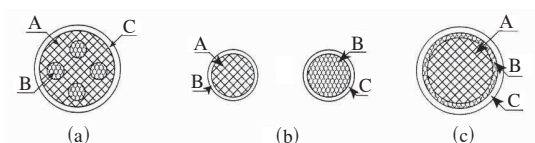
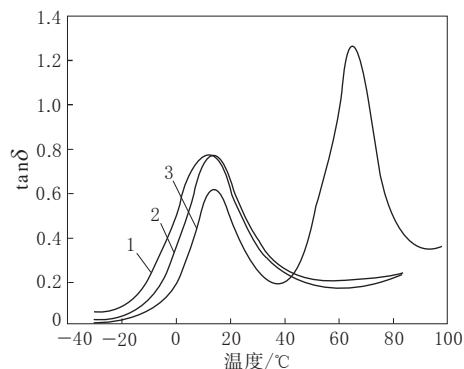


图 1 3 种不同核-壳结构示意图



1—CPE; 2—未硫化 AO-80(50 份)/CPE;
3—硫化 AO-80(50 份)/CPE。

图 2 复合材料的 $\tan\delta$ -温度曲线

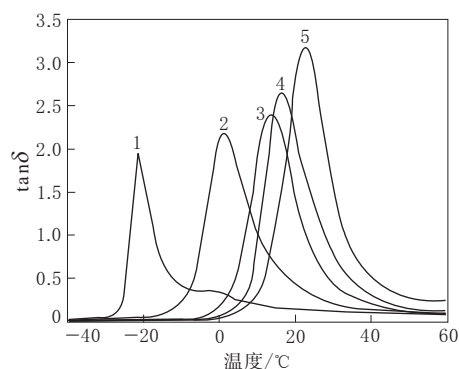
从图 2 可以看出, 硫化 AO-80/CPE 复合材料呈现两个损耗峰, 第 1 个为基体材料的玻璃化转变峰, 第 2 个是 AO-80 小分子与基体之间形成的氢键在较高温度下发生解离而出现的一种新的转变峰。多相体系中氢键的设计和利用成为一个新的亮点, 相对于单一材料, 这种新出现的多相体系能够有效拓宽阻尼温域。

赵云峰等^[24-25]通过特定加工工艺在 NBR 中添加酚醛树脂 (PR) 和 AO-80 制备 AO-80/PR/NBR 三元共混物, 研究发现, 当加入 100 份 AO-80 时, 共混物的 $\tan\delta$ 值最高可达 2.3 左右, 拉伸强度达 12 MPa, 但拉伸伸长率较小。

Y. Tian 等^[26]将磁性纳米颗粒 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 加入 NBR 基体中并添加偶联剂 Si69 制备永磁橡胶复合材料, 该复合材料具有较大的邵尔 A 型硬度 (约 77 度) 和拉伸强度 (约 15.8 MPa), 同时阻尼频域较宽且负荷量也很高, 未来有望作为新型智能材料应用于防震领域。但目前该材料的阻尼性能较差, 在 0~100 Hz 范围内的 $\tan\delta$ 值均低于 0.45, 仍需进一步研究。

X. Y. Zhao 等^[27]将有机小分子 AO-80 通过特定工艺条件混入 NBR 并成功制备出新型高阻尼橡胶材料, 所制备的 AO-80/NBR 纳米复合材料具有单一松弛转变、高拉伸强度和较好的稳定

性, 尤其阻尼性能较好, 其 $\tan\delta$ 值可达到 3.2 左右, 如图 3 所示。



AO-80 用量/份: 1—0; 2—20; 3—40; 4—60; 5—100。

图 3 AO-80/NBR 纳米复合材料的 $\tan\delta$ -温度曲线

B. Qiao 等^[28]通过分子动力学模拟和常规实验方法对 AO-80/NBR 纳米复合材料的微观结构和阻尼机制进行了分析, 研究表明, AO-80/NBR 纳米复合材料中存在两种氢键, 如图 4 所示, 分别为 $\text{O}-\text{H}(\text{AO-80}) \cdots \text{OC}(\text{AO-80})$ 和 $\text{O}-\text{H}(\text{AO-80}) \cdots \text{NC}(\text{NBR})$, 后者占主导地位, 但这种氢键会随着温度的升高而分解, 而前者不随温度的变化而变化。氢键增大了 AO-80 与 NBR 的结合能, 而且 AO-80 小颗粒有效地限制了 NBR 分子链的自由运动, 从而使复合材料的阻尼性能大幅提高。而标准橡胶支座的 $\tan\delta$ 值约为 0.7, 高阻尼橡胶支座的 $\tan\delta$ 值要求达到 2.0^[29]。因此, AO-80/NBR 纳米复合材料有望在高阻尼材料领域得到应用。

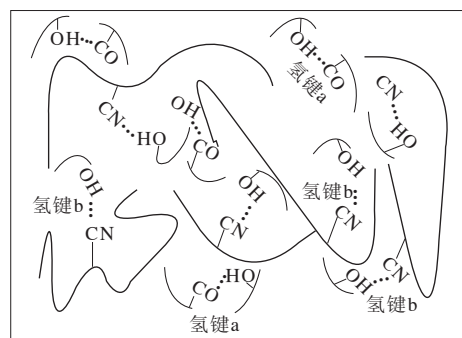


图 4 AO-80/NBR 纳米复合材料分子间相互作用示意

3 展望

提高建筑物的抗震能力, 不仅能够最大限度地保证人类生命财产安全, 还能够最大程度地减

少震后次生灾难。而相对于传统的刚法抗震,基础隔震体系具有无可比拟的优势和更大的发展潜力,橡胶材料因其独特的粘弹性而被广泛应用于隔震支座,并通过几十年使用时间的验证获得了认可。随着人们抗震意识的提高,基础隔震及橡胶支座越来越受到更多研究者的关注,高阻尼橡胶隔震支座因其更好的地震波衰减能力和结构位移控制能力而日益成为新一代隔震支座的发展趋势。

参考文献:

- [1] 刘珍. 基础隔震结构体系地震反应研究[D]. 山东:山东大学, 2008.
- [2] 周福霖. 隔震、消能减震和结构控制技术的发展和运用(下)[J]. 世界地震工程, 1990(1): 7-17.
- [3] 吴彬. 铅芯橡胶支座力学性能及其在桥梁工程中减、隔震应用的研究[D]. 北京:铁道部科学研究院, 2003.
- [4] 王文斌, 赵小霞, 陈玉元. 建筑物基础隔震技术的进展[J]. 内陆地震, 2006, 20(2): 172-177.
- [5] 吕百龄, 李和平. 隔震橡胶支座的特性和应用[J]. 橡胶科技市场, 2009, 7(3): 8-12.
- [6] 梁威, 杨青芳, 薛丹, 等. 减震用橡胶材料及其应用[J]. 合成橡胶工业, 2006, 29(4): 313-316.
- [7] 庾晋, 白杉. 发展中的减震橡胶制品[J]. 橡塑技术与装备, 2002, 28(10): 16-20.
- [8] 刘文光. 橡胶隔震支座力学性能及隔震结构地震反应分析研究[D]. 北京:北京工业大学, 2003.
- [9] 丁攀攀. 国内建筑隔震橡胶支座的研究现状与进展[J]. 橡胶工业, 2009, 56(8): 506-510.
- [10] Gordon P W, Keri L R. A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs[J]. Buildings, 2012(2): 300-325.
- [11] Farzad Naeim, James M Kelly. Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice[M]. New York: John Wiley and Sons, 1999.
- [12] Andrew W Taylor, Albert N Lin, Jonathan W Martin. Performance of Elastomers in Isolation Bearings: A Literature Review[J]. Earthquake Spectra, 1992, 8(2): 279-303.
- [13] Yoshihide Fukahori, Wataru Seki, Toshikazu Yoshizawa, et al. Anti-seismic Rubber Bearing[P]. USA: USP 4 761 925, 1988-08-09.
- [14] GB 20688.3—2006, 橡胶支座. 第3部分: 建筑隔震橡胶支座[S].
- [15] 徐文总, 马德柱, 梁俐. 纳米 ZnO 对天然橡胶交联反应和热稳定性的影响[J]. 应用化学, 2002, 19(12): 1186-1188.
- [16] 赵艳芳, 杨春亮, 廖双泉, 等. 炭黑并用对 NR/ENR 共混胶力学性能及减震性能的影响[J]. 弹性体, 2008, 18(3): 1-4.
- [17] 赵艳芳, 廖双泉, 廖建和. 填料对 NR/ENR 共混胶性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2009(5): 52-55.
- [18] 向丽君, 闵志刚. 丁腈橡胶/天然橡胶/环氧树脂复合材料共混片材制备初探[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2012, 14(4): 93-96.
- [19] 贾德民, 赵旭升, 罗远芳. NR/NBR/环氧化天然橡胶共混物的动态力学性能[J]. 橡胶工业, 2001, 48(2): 80-82.
- [20] 周娟, 赵艳芳. ENR/NBR 共混胶力学性能的研究[J]. 西江月, 2012, 41(14): 180-182.
- [21] El-Aasser M S, Hu R, Dimonie V L, et al. Morphology, Design and Characterization of IPN-containing Cstructured Latex Particles for Damping Applications[J]. Colloids and Surfaces. A. Physicochemical and Engineering Aspects, 1999, 153(1-3): 241-253.
- [22] Wu C F, Yawagishi T, Nakamoto Y, et al. Organic Hybrid of Chlorinated Polyethylene and Hindered Phenol. I. Dynamic Mechanical Properties[J]. Journal of Polymer Science. Part B. Polymer Physics, 2000, 38(17): 2285-2295.
- [23] Wu C F, Yawagishi T, Nakamoto Y, et al. Organic Hybrid of Chlorinated Polyethylene and Hindered Phenol. II. Influence of the Chemical Structure of Small Molecules on Viscoelastic Properties[J]. Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics, 2000, 38(11): 1496-1503.
- [24] 赵云峰, 张继华, 游少雄, 等. 丁腈橡胶/酚醛树脂/受阻酚 AO-80 三元阻尼橡胶的结构与性能[J]. 航空材料学报, 2009, 29(3): 71-77.
- [25] Zhang J H, Wang L F, Zhao Y F. Fabrication of Novel Hindered Phenol/Phenol Resin/Nitrile Butadiene Rubber Hybrids and Their Long-period Damping Properties[J]. Polymer Composites, 2012, 33(12): 2125-2133.
- [26] Tian Y, Liu Y Q, He M H, et al. High Damping Properties of Magnetic Particles Doped Rubber Composites at Wide Frequency[J]. Materials Research Bulletin, 2013, 48(5): 2002-2005.
- [27] Zhao X Y, Xiang P, Tian M, et al. Nitrile Butadiene Rubber/Hindered Phenol Nanocomposites with Improved Strength and High Damping Performance[J]. Polymer, 2007, 48(20): 6056-6063.
- [28] Qiao B, Zhao X Y, Yue D M, et al. A Combined Experiment and Molecular Dynamics Simulation Study of Hydrogen Bonds and Free Volume in Nitrile Butadiene Rubber/Hindered Phenol Damping Mixtures[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(24): 12339-12348.
- [29] Marioni A. The Use of High Damping Rubber Bearings for the Protection of the Structures from the Seismic Risk[A]. Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. Lisboa: 1998-11-25.