

建筑隔震橡胶支座工程应用的可靠性及经济性

刘兴衡, 张志强, 韩绪年

(云南正安橡胶减震技术有限公司, 云南 昆明 650041)

摘要: 根据“基础隔震”概念开发出来的隔震橡胶支座是目前技术最成熟、应用最广泛的隔震元件, 其在工程实践中的可靠性(包括安全性、耐久性)和合理的经济性, 将使人们抗震设防的观念发生重大的变化。

关键词: 建筑; 隔震橡胶支座; 工程应用; 可靠性; 经济性

人类在与突发性自然灾害——地震的斗争中, 积累了丰富的经验, 取得了许多丰硕的成果, 其中尤以“基础隔震”概念开发出来的“叠层橡胶支座”(以下简称“橡胶支座”)的应用是目前世界上最成熟的隔震技术, 但人们对其承载能力、使用寿命、隔震效果以及建筑造价等诸多问题仍存在许多疑虑。本文将对包括安全性、耐久性、应用效果在内的可靠性以及经济性进行讨论、分析。

1 安全性

近40年来, 国内外专家学者对橡胶支座的隔震技术进行了大量的研究, 从理论分析、试验验证到实际地震考验, 证明了这项隔震技术的安全性和有效性。

1.1 极大地降低建筑物上部结构的地震反应

地震对建筑物的破坏, 多数是地面的振动频率与建筑物主要结构构件的自然频率相耦合所致。传统建筑物抗震技术是通过增强建筑物结构构件的抗震性能(强度、刚度和延性)来抵御地震, 但这种通过以刚克刚的“硬抗”途径会形成结构刚度越大, 地震作用越强的恶性循环, 既不经济, 也不一定安全。

而现代“基础隔震”技术是在建筑物上部结构与基础间, 设置具有足够安全可靠的隔震系统(如橡胶支座), 形成柔性底层, 使建筑物与地基隔开, 是一种“以柔克刚”、以隔减震的抗震方法。由于

橡胶的滞后特性和变形时内摩擦的阻尼特性, 使橡胶支座能吸收和反射地震能量, 以集中发生在隔震层的较大相对位移为代价, 地震时建筑物上部结构近似平动。橡胶支座阻止或减轻地震能量向上部结构传递, 并使整个建筑物的自振周期得以延长, 因而上部结构反应仅相当于不隔震情况的 $1/4 \sim 1/8$ (强震观测结果可达 $1/12 \sim 1/16$), 减轻地震对上部结构的损害。

大量的研究表明, 用橡胶支座作为基础隔震系统的元件, 使建筑结构与地震解耦, 以及利用其阻尼、耗能、弹性复位功能, 是一项既科学、又安全的隔震技术。

1.2 具有较大的竖向刚度和承载力

橡胶具有强度高、弹性复原性好, 以及能吸收和隔离来自冲击或震动的能量, 但它毕竟是一种柔性材料, 单独应用难以具有足够的竖向刚度和承载力, 因此必须在柔性的橡胶材料中加入刚性大的骨架。叠层橡胶支座就是由坚硬的薄钢板和柔软的薄橡胶板交叉叠合、模压硫化而成的一种隔震元件, 其中橡胶层与夹层钢板紧密粘结。当橡胶支座受上部结构荷载时, 薄钢板约束了橡胶的横向伸展, 增大竖向刚度, 使支座具有足够的竖向刚度和承载能力, 有利于稳定地支承建筑物所有质量。根据云南省橡胶制品研究所和云南省地震工程研究院的试验, 橡胶支座的极限竖向压应力可达 $14.28 \text{ kN} \cdot \text{cm}^{-1}$, 换算成各种规格的极限承载力见表1。

表 1 橡胶支座的极限承载力、设计承载力及安全系数

橡胶支座规格	Φ300	Φ400	Φ500	Φ600
极限承载力/kN	10090	17940	28030	40360
设计承载力/kN				
甲类建筑物(P= 10MPa)	700	1250	1690	2820
安全系数	14.4	14.4	14.3	14.3
乙类建筑物(P= 12MPa)	840	1500	2350	3390
安全系数	12.0	12.0	11.9	11.9
丙类建筑物(P= 15MPa)	1060	1880	2940	4240
安全系数	9.5	9.5	9.5	9.5

可见橡胶支座的极限承载力极大,即使是Φ300的支座,也可达到1000t。按照GB 50011-2001标准《建筑抗震设计规范》要求,甲类(重要工程结构)、丙类(一般工程结构)、乙类(介于两者间的工程结构)建筑的橡胶支座平均压应力限值分别为10、15和12MPa,按此设计的竖向承载力,其安全系数分别可达14.4、9.5和12,远远大于建筑物竖向安全系数一般应大于6的要求。

1.3 水平刚度可变性及具有较大的水平位移

橡胶支座的水平(剪切)刚度是指橡胶支座上下板面产生单位相对位移时所需施加的水平(剪力)。试验表明,它随剪切应变的增大而降低,当水平剪切变形很小时,水平刚度较大,当水平剪切变形大时(橡胶总厚度的50%~300%),水平刚度较小(见表2)。当剪切变形继续加大时(>300%),水平刚度又有增加的趋势。这种变化过程对橡胶支座作为隔震元件非常有利,即当结构承受风荷或小地震情况下,橡胶支座具有较大的初始水平刚度,建筑结构如同传统结构一样屹立不动;当发生中、大地震时,橡胶支座的水平刚度较小,水平柔性滑移,有效减震;当上部结构与地面之间发生相对位移达到较大值时,橡胶支座的水平刚度又趋向提高,有效地约束结构的水平位移。这正是作为隔震装置所应具备的合理特性。

表 2 橡胶支座不同剪切变形时的水平刚度

橡胶支座规格	Φ300	Φ400	Φ500	Φ600
水平刚度/(kN·mm ⁻¹)				
水平压缩剪切应变 50%	0.76	1.42	1.94	2.6
水平压缩剪切应变 100%	—	—	—	2.1
水平压缩剪切应变 250%	0.49	0.99	1.29	—

注:橡胶支座结构不同,水平刚度值不同

橡胶支座发生侧向变位时,其受荷的有效面积减少。由于橡胶支座的竖向承载力安全系数超过6,可以近似地、侧重安全地推论,橡胶支座剪

压受荷有效面积不小于竖向受荷有效面积的1/6,橡胶支座仍是安全的。破坏试验表明,当橡胶支座承受竖向压应力为10~30MPa,其破坏时的极限剪切应变达到300%~450%。说明其剪压承载力和极限水平剪切变形能力都很大。我国建筑行业标准《建筑隔震橡胶支座》(JG 118 2000)中规定“极限剪切变形不应小于橡胶总厚度的350%”,事实上,目前多数产品都能达到这一要求,而设计时水平剪切变形应同时满足两个条件:(1)剪切变形条件:设计水平剪切变形 $\gamma \leq 50\%$,最大水平剪切变形 $\gamma \leq 250\%$,极限水平剪切变形 $\gamma \leq 350\%$;(2)上下连接板水平相对位移条件:小于或等于有效直径的3/4

说明在竖向压应力10~15MPa情况下,水平剪切应变只要不超过350%,橡胶支座就不会出现剪压破坏。

1.4 工程实用效果显著

在国内外几十个国家、上千栋橡胶支座隔震的建筑物中,有些已经经受过强地震的考验,证明隔震减震效果良好。例如:

(1)美国洛杉矶地震。1994年1月17日洛杉矶发生里氏6.8级北岭地震,震区内31座医院严重破坏,9座医院局部破坏,而建于1991年的一座铅芯叠层橡胶支座隔震的8层南加州大学医院(USC University 医院)经受了强地震的考验,地震时地面记录加速度为0.49g,而屋顶记录加速度仅为0.21g(有的资料为0.27g),衰减系数为2.33(1.8)。不仅建筑物不倒塌,室内各种设施也未损坏,医院功能得以维持,成为震后的救灾中心。而附近一家严格按新抗震规范设计的6层结构Olive view 医院,地震时地面加速度为0.82g,顶层加速度高达2.31g,放大2.8倍,不仅建筑结构轻度受损,室内设施也毁坏,致使医院丧失运作功能。旧的洛杉矶县医院只比南加州大学医院离震中近1km,却遭受严重破坏,使若干侧厅停业。据估计所需的修理费近4亿美元。说明橡胶支座的隔震效果显著。

(2)日本阪神地震。1995年1月17日日本阪神7.2级大地震中,震区内有两座隔震建筑物均未遭破坏,其中一座是6层楼的4000m²邮政省计算中心,离断层16km,主要采用铅芯橡胶支座和钢阻尼器。最大地面加速度为0.40g。而顶

层的最大加速度为 $0.13g$ (有的资料为 $0.12g$) , 衰减系数为 3.1 。该建筑物震后完好, 设备无损, 在救灾中发挥了较大作用, 隔震效果得到充分发挥。此外, 这次地震中采用铅芯橡胶支座的 6 座桥梁均表现极佳, 进一步证明了隔震技术的优越性。

(3) 我国实例。1994 年台湾集集 7.3 级地震, 汕头市烈度为 6 度, 各类房屋摇晃厉害, 居民惊慌失措, 水桶里的水溅出了 $1/3$ 左右, 而陵海路隔震楼上的人无震感或震感甚微, 不知道地震发生。

1995 年云南武定发生 6.5 级地震, 地震发生时, 大理强烈有感, 而橡胶支座隔震建筑大理州交通指挥中心大楼中的大多数人没有感觉, 不知道地震发生。

1996 年, 云南丽江发生 7 级强烈地震。西昌市国税局宿舍楼为 6 层隔震楼, 在楼上居住的职工, 只是感到轻微的晃动, 而相邻的一幢常规抗震楼只有 4 层高, 楼上居住的人摇晃十分厉害, 惊慌失措往外逃跑。

2 耐久性

橡胶支座长期承受荷载作用, 且暴露于大气环境中。因此, 它能否与建筑物使用寿命同步 (一般结构的使用寿命为 50 年以上), 一直是人们关注的问题。

影响橡胶支座耐久性的主要因素有: 使用环境对橡胶物理性能产生的劣化; 反复荷载下产生的疲劳及长期荷载下橡胶的蠕变和应力松弛。国内外的研究分析结果表明, 橡胶支座的使用寿命可达 80 年以上 (JG 118 2000 标准规定不小于 60 年), 有的认为可达 100 年以上, 理由是:

1. 选用优良的防老剂和大体积结构本身是确保橡胶支座具有较长使用寿命的基础。

通过一系列的对比试验, 选用具有抗疲劳和具有协同效应的抗热氧老化的防老剂并用体系, 一般用量达 $2.5 \sim 3.0$ 份, 确保橡胶支座胶料具有优良的抗大气老化性能; 橡胶支座是大体积产品, 其外表面是抗老化性能优异的厚橡胶包覆层, 内部橡胶层与叠层钢板紧密粘合, 使其几乎不受环境降解作用的影响。这些都说明橡胶支座本身具有良好的耐老化性能。

2. 橡胶支座的耐老化性能有保障。

云南省橡胶制品研究所曾对支座胶料和支座

整体在 80°C 热空气进行 50d (相当于在常温下 50a 以上) 老化试验后, 硫化胶拉伸强度为 14MPa , 扯断伸长率为 480% , 回弹性和硬度先高后低, 但变化不大, 说明其胶料仍具有满足使用要求的物理机械性能; 橡胶支座的竖向刚度变化很小 (约减少 11%), 竖向荷载与变形关系曲线偏移不大, 水平荷载与水平位移曲线几乎重叠。华中理工大学在加压下对橡胶支座进行加速热老化试验, 在加热老化的初始阶段, 蠕变量比较大, 而后逐渐减弱, 最终约为橡胶总厚度的 6% , 刚度的最大增大率约为初始刚度的 20% 。从这些试验数据看来, 如果把建筑物的年限定为 60 年左右, 橡胶支座中橡胶劣化问题不会给支座的耐久性构成威胁。

3. 工程应用中橡胶支座耐久效果令人满意。

上述试验室所测得的橡胶支座耐久性的结论仅能作依据之一, 只有对已在实际工程中应用的支座进行长期的调查研究, 才能取得实际可靠的结论。调查实例有:

(1) 英国伦敦 1966 年建成的奥尔班尼 6 层公寓用的天然橡胶支座, 30 年后现场调查检测, 无老化迹象, 预测 100 年后总蠕变量为 $5.4 \pm 0.4\text{mm}$ 。

(2) 日本通过对某建筑物使用 10 年后的天然橡胶支座调查, 确认其具有优异的耐久性, 水平刚度和蠕变几乎没有变化, 竖向刚度只增加 10% , 支座内橡胶无硬化现象。

(3) 日本对 1961 年竣工的国铁东北本线鬼怒川铁路桥使用 17 年后的氯丁橡胶支座进行检查, 拉伸强度和扯断伸长率仍保持在初期值的 $80\% \sim 90\%$, 蠕变量也极小, 推算有效寿命还可再延长 65 年。

(4) 澳大利亚 1889 年建成使用的墨尔本铁路跨线桥, 100 年后检验, 只发现天然橡胶支座表面出现一层 5mm 厚的“破壳”, 其内部橡胶材料无任何老化现象。

(5) 英国 1956 年修建的林肯市北汉 (Pelham) 大桥使用的天然橡胶支座, 16 年后和 40 年后经现场调查未发现表面裂纹和老化现象。

通过这些调查可知, 支座中橡胶的老化只涉及周边部分, 中央内部仍保持原形态, 蠕变、松弛也很小, 且逐渐趋向于一个稳定值。在工程结构的使用寿命内 ($50 \sim 100$ 年), 橡胶支座的老化问

题无需担忧。特别是现在由于配方优化、工艺先进、检验严格,质量比几十年前更加优越,使用寿命在 80 年以上是有保证的。

3 经济性

橡胶支座隔震建筑的造价是开发商和用户十分关心的问题。影响隔震建筑工程造价的因素很多,主要包括:工程所在场地、抗震设防类别、烈度;建筑结构(框架、砌体)、层数、面积及选用材料;是否有地下室;设计水平、施工技术水平、隔震层设计以及特殊用途等。

1. 直接经济效益可观。

采用隔震橡胶支座以后,由于上部结构的地震反应比非隔震建筑大大减小,结构要求降低,上部结构的截面尺寸减小,其用料(如构件配筋等)也减少,因而造价大大降低,同时上部结构自重及地震作用减小,下部结构造价也随之降低。这两部分造价降低完全可以弥补采用橡胶支座所增加的费用。根据某些已建结构计算,工程造价可降低 3%~20%;云南省设计院作出的经济效果比较如表 3 所示。

表 3 橡胶支座隔震经济效果

方案	结构特点	经济效果
A	9°五层隔震橡胶支座建筑,上部砖混 7°	
B	9°五层砖混+抗侧力砼墙柱,不隔震	A/B 节约 0.5%
C	9°五层框架结构,不隔震	A/C 节约 5.1%
D	9°四层砖混,不隔震	A/D 节约 2.33%

从下列出已建成的橡胶支座隔震建筑的个别分析,说明其经济效益可观。

(1) 云南省洱源县振戎民族中学教学楼(无地下室)。该工程需增加:橡胶支座 18 套,折合增加造价 63.3 元·m⁻²;±0.000m 标高处的钢筋混凝土

土梁板及桩。可减少:主体结构用钢量及混凝土。相抵降低工程造价 46.87 元·m⁻²,按当时该地区框架建筑造价 950 元·m⁻²计,节约 4.93%(见表 4)。

(2) 云南抗办综合楼(带地下室)。采用隔震橡胶支座 15 套,折合增加造价 28.57 元·m⁻²,其上部结构抗震烈度 8 度按 7 度设计,主体结构用钢量减少 15.82kg·m⁻²,加上框架混凝土减少及其它抗震措施的差别,直接费用降低 34.58 元·m⁻²,节约 3.46%(见表 4)。

(3) 大理州交警支队指挥中心(无地下室)。该建筑为 7 层,局部 8 层,框架结构。在首层底板与地基之间设置 77 个隔震橡胶支座,土建结构费用节约 113.6 元·m⁻²(见表 5)。扣除隔震橡胶支座的费用(缺此项数据,暂按 60 元·m⁻²计),也能节约 53.6 元·m⁻²。

(4) 下关汽车运输经贸总公司商住楼(无地下室)。该建筑物 1、2 层为框架—抗震墙结构,3~7 层为砖混结构,按 9 度设防的要求布置圈梁、构造柱及墙体连接。总面积 6000m²,使用 Φ400~Φ600 橡胶支座 75 套,折合增加造价 58 元·m⁻²,工程结算后造价约 1000 元·m⁻²,与同地区不隔震框架抗震墙结构建筑相比,主体工程造价节约 10%。

(5) 国内其它个例。除上述 4 例外,表 6 结算的工程造价也可供参考。表中节省造价一栏中数值若为负数,表示是增加造价,因为砌体结构的隔震房屋,如若不增加层数,则工程造价会高一些。这也表明有些建筑根据施工设计要求,造价可能为会增加 3%~5%,这与室内装修相比并不高,但却大大提高了建筑物的抗震性能。

表 4 橡胶支座隔震工程经济效果

	建筑面积 /m ²	层数	结构	设防烈度 /度	钢材用量 /(kg·m ⁻²)		降低造价 /(元/m ²)	节约 /%
					非隔震	隔震		
洱源民中	1163	4	框架	9	79.34	54.12	46.87	4.93
省抗办综合楼	2650	7+1	框架	8	57.26	41.44	34.58	3.46

表 5 橡胶支座隔震工程土建结构节约费用

元·m⁻²

	框架不隔震			框架隔震			差价小计
	数量 /(kg·m ⁻²)	材料费	人工费	数量 /(kg·m ⁻²)	材料费	人工费	
钢材	75	247.5	73.5	60.0	174.9	51.9	94.2
水泥	230	73.6	15.6	180.9	57.6	12.2	19.4
合计							113.6

注:当时钢材按 3300 元·t⁻¹、人工费 980 元·t⁻¹,水泥按 320 元·t⁻¹、人工费 648 元·t⁻¹计。

表 6 橡胶支座隔震工程造价

元·m²

工程名称	建筑面积/m ²	层数	隔震房屋	非隔震房屋	节省造价	节省百分比/%	备注
汕头陵海大路住宅楼	2287	8	727. 13	776 76	49 63	7	8°区框架
云南大理隔震工程	4050	7	622. 18	716	93 82	13	≥9°区框架
四川西昌隔震工程	13352	6	501. 20	569 98	68 78	13 72	≥9 区砌体七栋
云南呈贡县运动员宿舍	4413	(4+ 1) (7+ 1)	811. 6 (779. 46)	800	- 11. 6 (20 54)	- 1. 45 (2 56)	8°区砌体地下一层
汕头金凤坛东北角 F 座	4120	8	1175	1256	81. 31	7	8°区框架
汕头市博物馆	17000	10	960	1018	57. 63	6	8°区框架
广州大学学生宿舍楼	4416	7	1200	1260	59 83	5	7°区框架

2. 间接经济效益显著。

大地震是一种突发性、毁灭性的自然灾害,造成的人员伤亡和财产损失是十分巨大的。采用橡胶支座是一种“以柔克刚”的隔震技术,在大地震时能使建筑结构不损坏或仅仅轻微损坏,体现出显著的社会效益和间接经济效益。

1. 提高建筑物安全度,减轻地震灾害。

世界上破坏性大的强地震平均每年约 16 次,上世纪由地震引发的经济损失达数千亿美元,并导致约 126 万人死亡和近千万人严重伤残。我国 1978 年唐山 7. 8 级大地震,100 多万人的城市几分钟时间便成为一片废墟,伤亡人数达 40 多万人,直接经济损失达数百亿元。使用隔震橡胶支座以后,由于建筑物安全度提高,一旦发生地震可以大大降低人员伤亡和财产损失,也减轻救灾和灾后重建的压力,其产生的社会效益和间接经济效益非常显著的。

2. 保护“生命线工程”和重要建筑工程,确保最后救灾工作的顺利进行。

交通、通信、医院、消防、水电供应设施及粮食加工等涉及国计民生的“生命线工程”,以及地震时要求保证绝对安全的如核电站等重要工程,使用隔震橡胶支座可以起到很好的保护作用。在 1994 年 1 月美国洛杉矶和 1995 年 1 月日本阪神大地震中,南加州大学医院和日本西部邮政省计

算中心均未遭受破坏,在震后救灾工作中发挥了重要作用,其社会效益和间接经济效益无可估量。

3. 节约建设用地。

采用隔震橡胶支座的工程设计,按有关规定,在确保安全的前提下允许有一定的灵活性,建筑物之间的安全距离限制可以适当放宽。此外,在同等抗震设防的条件下,可以增加楼房层数,节约宝贵的建设用地。

由此可见,如果把建筑物本身、内部设施、仪器仪表的地震灾害的估价及建筑物中断使用和内部业务停顿等带来的损失考虑进去,那么隔震建筑的经济效益将是巨大的,甚至是无法用货币衡量的。

4 结语

用橡胶支座隔震技术成熟和可靠性大,经济性较佳,值得大力推广应用,它为人类减轻地震灾害提供了一条更加合理、有效、安全的新途径,将引起建筑结构抗震技术的变革。但这项技术毕竟在国内外仍处于起步阶段,其可靠性和经济性还有待于进一步在实践中积累数据,隔震理论和技术也有待于进一步深化和完善,人们期待着隔震技术的未来发展会呈现越来越宽广的前途。

参考资料:略

RCD- II 型

橡 胶 炭 黑 分 散 度 测 定 仪

北京万汇一方科技发展有限公司 橡胶技术部

电话: 010-68049822 68040705

传真: 010-68016773

E-mail: info@rubberinfo. com. cn