

# 建筑结构隔震技术现状与应用\*

薛彦涛

(中国建筑科学研究院建研科技股份有限公司, 北京 100013)

**[摘要]** 目前, 国内隔震建筑大量采用的是叠层橡胶支座, 其生产工艺和设计方法较为成熟; 旨在提高橡胶隔震支座阻尼的高阻尼橡胶隔震支座仍处在研发中, 还未应用于实际工程; 滑动隔震支座在一些工程中与橡胶支座联合使用构成混合隔震, 隔震效果明显, 但设计缺乏规范的支撑。在隔震设计方面, 借助减震系数, 采用分离式方法, 一方面简化了设计, 另一方面能有效利用现有的设计资源, 为设计人员所接受。隔震结构计算可以采用成熟的软件, 如 ETABS 和 MIDAS, 它们都有适合普通橡胶支座、铅芯橡胶支座和滑动隔震支座的计算单元, 同时还按照规范的要求进行时程分析计算。隔震技术的应用范围逐渐扩大, 已在机场航站楼和高层建筑中得到应用。同时在中小学抗震加固中也成功应用, 为抗震加固提供了一种新方法。未来隔震技术将会获得更广泛的应用。

**[关键词]** 隔震技术; 隔震支座; 高阻尼橡胶隔震支座; 混合隔震; 隔震加固

## Status and application of base-isolation technique of buildings

Xue Yantao

(CABR Technology Co., Ltd., China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Rubber bearing is widely used for its more mature production and design method in base-isolation building. In order to increase the damping of rubber bearing, a high damping-rubber bearing is developed, but it has not been applied in the actual building in China. The sliding bearing has no design code, although it has been used in some projects with rubber bearing and got obvious isolation effect. In terms of isolation design, a separate way of design is adopted by designers with reducing coefficients of earthquake force, which can simplify the design and also make use of existing resources effectively. The sophisticated software, such as ETABS and MIDAS, have all suitable elements for rubber bearings, lead-rubber bearing and slide bearing in base-isolation structure and the time history analysis for base-isolation structure is also demanded by Chinese seismic code. The base-isolation technology has been used in the airport terminal building and high buildings and also in the seismic retrofitting for building of elementary and middle school as a new seismic technology. So it is sure that the base-isolation technology will be used more widely in the future.

**Keywords:** base-isolation technique; isolator; high-damping rubber bearing; hybrid isolation; isolation retrofitting

### 0 概述

正如日本阪神地震后隔震建筑在日本大量兴起, 汶川地震后隔震建筑也受到国人的关注, 隔震建筑大量涌现<sup>[1-3]</sup>。我国建筑隔震技术研究始于 20 世纪 90 年代, 依托国家“八五”科技攻关项目, 完成了隔震技术从产品研制、设计方法到施工技术的研究。1993 年, 汕头建成首幢采用橡胶隔震支座的 8 层钢筋混凝土框架隔震建筑<sup>[4]</sup>。2001 年我国首次将隔震建筑设计纳入抗震规范中, 为隔震建筑的发展奠定了基础。此后又颁布了“叠层橡胶隔震支座隔震技术规程”, 为隔震结构的设计提供了技术依据。

建筑用隔震支座主要分两大类: 橡胶隔震支座和滑动隔震支座。国内大量使用的是橡胶隔震支座。目前国内生产橡胶隔震支座的工艺已经很成熟, 国家制定了相应产品标准“建筑隔震橡胶支座”,

各生产厂商按产品标准进行型式检验, 型检也是产品进入市场的条件之一。国产的橡胶隔震支座质量可靠, 性能优良, 已成功出口到日本。

### 1 规范标准

2001 版抗震规范对隔震结构的设计做了基本规定。其中对隔震结构影响较大的是隔震结构的应用范围: 1) 规定应在 8, 9 度抗震设防的地区使用; 2) 要求结构在非隔震条件下的基本周期小于 1.0s。这两个条件大大束缚了隔震建筑的应用。规范的本意是满足这两个条件, 隔震结构设计能够较为经济。在低烈度区, 结构设计往往按构造要求设计, 隔震结构显示不出优越性。但是, 由于这个规范条文是强制条文, 给很多业主造成了误解。结构周期小于 1s 的规定主要是限于当时的技术条件, 周期大于 1s, 隔震后结构的减震效率不高, 尤其是高层建

筑，当时的规范认为隔震效果不大。

2010 版抗震规范对这两项作了重大修改。首先，规范明确隔震是一种有效减轻地震灾害的技术，适合任何地区使用，当一个地区发生超烈度地震时，隔震建筑往往能够有效起到抗倒塌的效果。其次，取消了对不隔震时的结构基本周期小于 1.0s 的限制，对周期大于 1.0s 的建筑，采用一些先进的隔震方法，如混合隔震（采用橡胶隔震支座和滑动隔震支座），依然能够取得非常好的隔震效果。

基于人们对隔震建筑抗倾覆的担忧，对其高宽比作了限制，规定隔震建筑高宽比不宜大于 4，此时能够基本保证多遇地震下隔震结构基础不出现拉应力。

## 2 橡胶隔震支座

### 2.1 普通橡胶隔震支座（NRB）和铅芯橡胶隔震支座（LRB）

普通橡胶垫支座由薄橡胶板与薄钢板分层交替叠合在高温、高压下整体硫化而成，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和水平变形能力。铅芯橡胶隔震支座则是在普通橡胶隔震支座中开孔注铅而成，具有较高的阻尼，能有效降低结构的地震作用，减小隔震层的位移。橡胶隔震支座的生产工艺基本成熟，但在材料性能方面还有改进和提高的空间。文[5]认为，目前隔震橡胶支座在胶层和钢板的粘合方面仍存在一定问题，压剪破坏多为橡胶片与钢板间的撕裂，因此选择适合的粘合剂和粘合工艺将是今后的研究重点。

隔震橡胶支座的耐久性能取决于橡胶。影响橡胶耐久性能的主要原因是氧化反应和蠕变。根据 100 年前奥斯特拉里亚铁道防震垫的老化检验表明，橡胶的周边有少量氧化，内部的橡胶几乎没有变化。此外，在橡胶中掺入抗氧化剂，以及采用耐久性能好的橡胶作防护层，又大大提高了隔震橡胶支座的耐久性，目前国内生产的隔震橡胶支座的寿命已与建筑物的寿命相当。

隔震技术研究初期，对这两种隔震支座都作了大量充分试验研究。研究内容包括<sup>[6,7]</sup>：竖向刚度、轴向压缩破坏、轴向拉伸破坏、水平向刚度和阻尼、压剪切破坏、加载频率对性能影响、加载次数对隔震支座温度影响，以及低温对性能影响试验等。2010 版抗震规范规定橡胶隔震支座允许受拉，但国内对橡胶隔震支座的拉剪破坏试验少有研究，产品标准中规定的橡胶隔震支座竖向极限受拉应力 1.5MPa 明显偏低。

橡胶隔震支座的分析基于 Haringx 理论<sup>[8]</sup>，该理论假定弹性体不可压缩，适用于小变形分析，不适用于大变形和屈曲等现象，有限元法则弥补了这个不足，因此是目前橡胶隔震支座的通用分析方法。通过有限元分析，可以提高研究的效率和降低试验成本。

叠层橡胶支座的材料和构造机理的特性复杂，有待进一步研究的问题有<sup>[8]</sup>：1) 叠层橡胶支座在复杂应力状态下力学特性的研究，以及各种特性状态的相关性对支座力学性能的影响；2) 拉剪力学术性能的试验研究；3) 大直径、超大直径叠层橡胶支座的力学性能研究；4) 内部加强板力学性能研究。

在建筑隔震设计中很少对橡胶支座进行分析验算，只要求橡胶隔震支座的各项指标满足规范要求，设计人员验算轴向力作用下隔震支座的应力以及变形是否满足限值要求即可。

### 2.2 高阻尼橡胶隔震支座（HDR）

目前国内隔震设计普遍采用铅芯橡胶支座，在大变形阶段，铅芯易被挤压导致不易复位，而且铅对环境也有影响，因此，高阻尼橡胶支座将成为铅芯橡胶隔震支座的替代产品。获得高阻尼橡胶的方法主要有<sup>[9]</sup>：两种不同类型的橡胶共混、橡胶与塑料共混、橡胶与纤维共混、接枝共聚、嵌段共聚、在橡胶中添加填充剂（如石墨、云母、二氧化硅等材料）等等。文[10]采用天然橡胶和合成橡胶的橡胶混合物，加入填充剂、补强剂、可缩剂等外加剂制成高阻尼橡胶，阻尼系数达到 10%~16%。文[11]自主研发的高阻尼橡胶隔震支座阻尼比系数达到 20%~27%。

高阻尼橡胶支座在动态力作用下具有很明显的黏弹性性质，它受温度、频率和应变幅值的影响，国内外专家提出了很多模型来描述这种特性<sup>[8]</sup>。J S Hwang 采用分数导数开尔文模型建立 HDR 的计算模型，并采用修正高斯-牛顿系统识别法进行了对比研究。随后，研究了麦斯威尔模型在 HDR 上的应用、考虑温度影响的分数导数开尔文模型。Y Ohtori 对 HDR 的尺寸效应进行了研究，D N Grant 研究了圆形 HDR 水平双向作用力，建立了一个与水平位移不耦合的宏观模型。M Abe 对方形 HDR 进行了理论和实验的对比研究，建议设计时要考虑三向受力下的耦合作用。目前高阻尼橡胶支座在日本已开始广泛使用，我国尚处于起步阶段。

## 3 滑动隔震支座

滑动隔震在隔震层中设置滑动材料，如低摩擦

系数材料，使基础向上部结构只能传递有限地震作用力，达到保护上部结构的效果。其动力学特点是滑动前整个系统的自振周期与结构周期相同，一旦滑动后，隔震层的刚度为零，整个系统的自振周期变成无穷大，因此滑动隔震能避开任何地震波产生的共振效应。此外，隔震层摩擦力做功能消耗结构的振动能量，增加结构阻尼，降低结构地震反应。

国内早期的摩擦滑移隔震多为沿条形基础设置带状滑移层，所用摩擦材料多为砂粒、石墨、滑石粉等廉价材料，这无疑是经济的，但存在施工找平难、不易复位等诸多问题。为此，国内外学者展开研究，开发出各种滑动隔震支座，其中比较成熟的是滑板式隔震支座和摩擦摆隔震支座。

### 3.1 滑板式隔震支座

滑板式隔震支座见图 1，滑移摩擦面一般采用聚四氟乙烯（PTFE，俗称特氟隆）与不锈钢板接触面、不锈钢板与不锈钢板接触面以及石墨、砂垫层接触面等，而其中又以 PTFE 与不锈钢板接触面的摩擦滑移支座（简称 PTFE 支座）的性能最为稳定。不锈钢摩擦板的表面需经过专门的刨光处理，在其上涂一层热硬化的树脂以提高其耐磨性。文[12]开发了全密封锁位型摩擦阻尼隔震支座，其多层摩擦滑板采用钢板和聚四氟乙烯有机滑板，沿高度叠置，将滑移位移均匀分散到各个摩擦界面上，不预留外露滑移面。

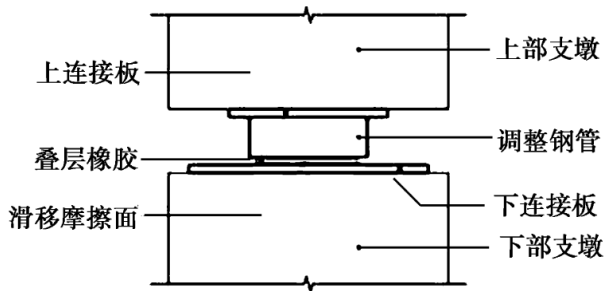


图 1 滑板式隔震支座

滑板式隔震支座属纯摩擦滑动隔震系统，缺点是隔震层变形较大，且不能自动复位，震后大的变形较难处理。文[13]开发了能够自复位的滑板式隔震支座，图 2。

滑板式隔震支座的摩擦系数研究<sup>[14]</sup>表明：1) 正压力越大，摩擦系数越小；压力与摩擦系数存在如下关系： $\mu=0.588\sigma^{-0.4268}$ ；2) 滑动摩擦系数随着摩擦速度的增加而快速提高，一直到速度达到 150mm/s 的时候，滑动摩擦系数才接近为定值；3) 随着环境温度的升高，滑动摩擦系数是降低的；4) 添加润滑剂可以显著降低 PTFE-不锈钢接触面的摩

擦系数。

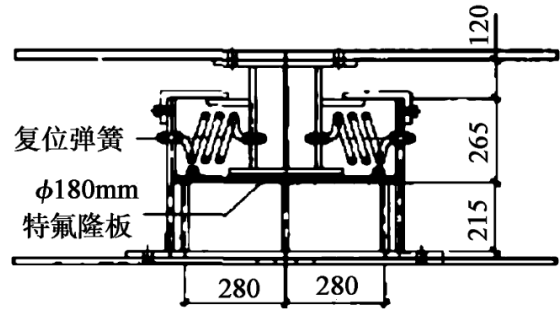


图 2 自复位滑板式隔震支座

滑移隔震结构由于在支座处上下断开，极易产生倾覆失稳问题，若无附加抗倾覆措施，地震下的抗倾覆力矩只由自重提供。判断结构能否保证绝对不倾覆的一个准则是地震倾覆力矩不大于抗倾覆力矩，其中靠自重抗倾覆稳定（或者说抗摇摆振动）的判别条件为  $r \geq \mu H_0$  ( $r$  为结构重心到支座外缘的水平距离， $H_0$  为地震作用合力到滑移支座的竖向距离)。当该条件不满足时，则应采取附加措施对支座或上部结构进行抗倾覆设计。文[15]，[16]对采用滑板式隔震支座的房屋高宽比限值和抗倾覆稳定性判定进行了研究，高宽比取值与滑动面的摩擦系数  $\mu$  的大小相关，当  $\mu$  值在一定范围内时，滑动隔震体系是稳定的。

目前国内在建筑行业还没有滑板式隔震支座在建筑隔震中使用的规范和产品标准，因此在国内的应用受到一定限制。

### 3.2 摩擦摆隔震支座 (FPS)

摩擦摆隔震装置（简称 FPS）是一种具有自复位能力的摩擦隔震体系，1985 年由美国的 Victor Zayas 博士首先提出。其具有良好的工程性质，得到了国内外学者较为深入的研究，并已成功应用于工程中。其支座构造见图 3，其原理是滑块置于一个凹形曲面的底盘中，当水平位移发生后，滑块滑至底盘曲面的高处，其后滑块在上部重力的作用下自动向低处滑动，也就是自动复位。底盘曲面与滑块滑动面具有相同的曲率半径且涂有低摩擦材料，如聚四氟乙烯（PTFE）。滑块上面设计成曲面为使顶板在滑动过程中保持水平。摩擦摆隔震装置产生的复位力的大小取决于底盘曲面的曲率，也取决于支座的刚度。

国外学者对摩擦摆隔震装置作了大量试验研究<sup>[17]</sup>，试验表明：摩擦摆隔震支座具有稳定的滞回性能和优异的耐久性；在温度、长期载荷等影响因素下，同样具有很高的可靠性。国内学者按其原理

研制了一些试验用隔震支座，并进行了结构隔震试验<sup>[18, 19]</sup>。FPS 摩擦摆隔震装置能够有效地延长上部结构的自振周期，减少地震作用对上部结构的影响，上部结构层间位移和加速度大大减少，具有良好的稳定性和限位复位功能，因此不仅可以预防结构的损坏，而且还能够保障结构物内设备及人员的安全，不失为一种有效的隔震消能装置。

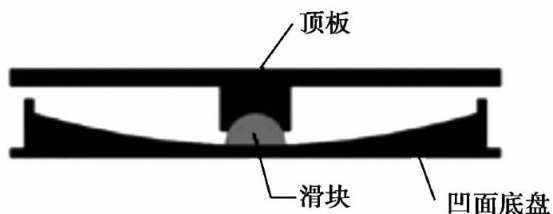


图3 摩擦摆隔震装置示意

#### 4 混合隔震

混合隔震又称为组合隔震或并联复合隔震，由橡胶支座和摩擦滑动支座组成，其中橡胶支座提供系统的弹性复位力。混合滑移隔震系统的自振周期有两个：滑动前为结构自振周期；滑动后则变为橡胶支座隔震结构周期，由于橡胶支座数量可以减少，因此可以控制延长系统的自振周期。对于高层隔震，由于结构周期本身较长，采用橡胶支座能够延长的周期有限，采用混合隔震效果会好得多。图4为日本某高层建筑隔震的隔震支座布置图，其中布置了橡胶隔震支座（圆形标志）和摩擦滑动隔震支座（方形标志）。

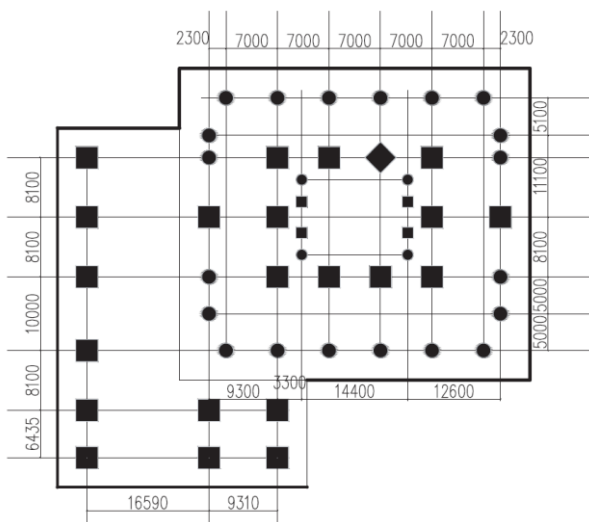


图4 日本某隔震建筑隔震支座布置图

对混合隔震中摩擦系数的研究发现<sup>[20]</sup>，滑移摩擦支座的相对起滑力即滑移系数是影响隔震效果的主要因素之一。滑动系数小时隔震效果好，橡胶隔震支座的竖向拉力最小。摩擦承压比（摩擦隔震

支座承担的竖向荷载与结构总重量的比值）是混合隔震效果的另一个指标<sup>[21]</sup>，摩擦承压比对复合隔震结构的减震效果影响很大，并且存在合理取值范围。合理的摩擦承压比取值可以使混合隔震结构的地震反应比橡胶支座隔震结构小。

### 5 隔震结构设计计算方法

#### 5.1 规范方法

目前隔震结构的设计采用的是分离式计算方法，引入减震系数，即将隔震结构的楼层剪力与非隔震结构的楼层剪力逐层比较，取比值最大者作为减震系数；对高层结构来说，还要对楼层倾覆力矩进行比较，两者取大值。有了减震系数后，隔震结构可按非隔震结构设计。计算时，非隔震结构的地震作用乘以减震系数，考虑橡胶隔震支座的性能，再除以小于1的调整系数，适当放大，这样做设计偏于安全。由于隔震结构承受的地震作用的分布近似均匀或梯形分布，而非隔震结构的分布近似倒三角形或弯曲线形，因此非隔震结构每一层的剪力和弯矩值均高于隔震结构。采用分离式方法后，设计人员可以采用现有的软件完成隔震结构的设计。

#### 5.2 时程分析

计算减震系数时，隔震结构的分析要求采用时程分析法，这样对隔震支座的计算模拟较为准确。目前国内隔震结构的计算软件较成熟，程序都提供了普通橡胶支座、铅芯橡胶支座和滑动隔震支座的计算模型。普通橡胶计算模型为简单弹性模型。当计算需要考虑受拉时，应取折线形弹性模型，见图5，即受拉与受压时的弹性刚度取不同值，受拉刚度 $K_t$ 小于受压刚度 $K_c$ ，比值取1/6~1/10。铅芯橡胶隔震支座采用双剪Wen模型，见图6。滑动隔震支座可采用库仑摩擦滞回曲线或双线性滞回曲线计算模型，见图7。

### 6 典型工程

#### 6.1 成都凯德风尚高层隔震建筑小区<sup>[2]</sup>

成都凯德风尚项目总建筑面积为30万 $m^2$ ，抗震设防烈度7度，由26栋19~20层的高层剪力墙住宅组成。隔震设计将隔震层设置在地下室顶板以上，采用了近4000个 $\phi 500\sim 900$ 的橡胶隔震支座，设置了抗拔装置（图8），提高结构大震下的抗倾覆能力；设计抗风装置，减少风载下建筑的位移。图9为6#楼隔震层布置平面。

设计中验算了7度罕遇地震作用下结构的安全和8度罕遇地震下的结构抗倾覆问题。计算分析表明，采用隔震措施可显著降低上部结构的地震作用，对建筑结构、房屋设施和人员提供全面的保护。

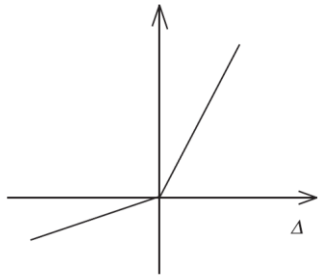


图5 普通橡胶隔震支座计算模型

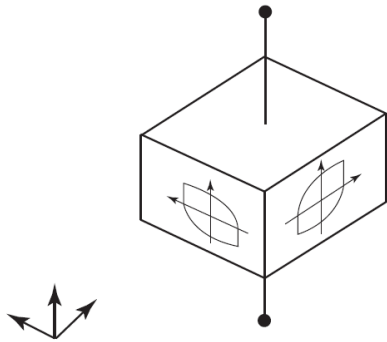


图6 铅芯橡胶隔震支座 Wen 模型

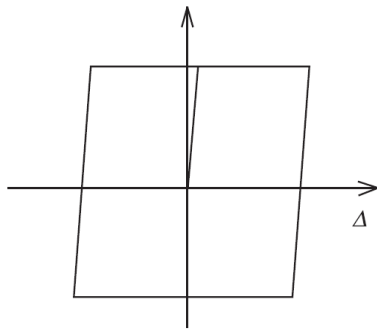


图7 滑动隔震支座计算模型



图8 抗拔装置

## 6.2 昆明机场航站楼<sup>[1]</sup>

昆明新机场航站楼拟建场地位于昆明东北部浑水塘,跨越多个地貌单元,地形起伏不平,多条断层从场区穿过,属于高地震烈度区。航站楼主体结构采用基础隔震技术。整个隔震层共使用 1 800 余个直径为 1 000mm 的叠层橡胶支座,建成后,这座

航站楼将成为目前世界上最大、最复杂的单体减隔震建筑。航站楼的主体结构南北长约 324.0m,东西宽 256.0m,其结构体系非常特殊,下部 5 层是钢筋混凝土框架-剪力墙结构体系,基本柱网 12m×12m,12m×18m,而上部是一个由钢结构飘带支撑的大跨度钢结构双层网架,柱距约 24m×26m。

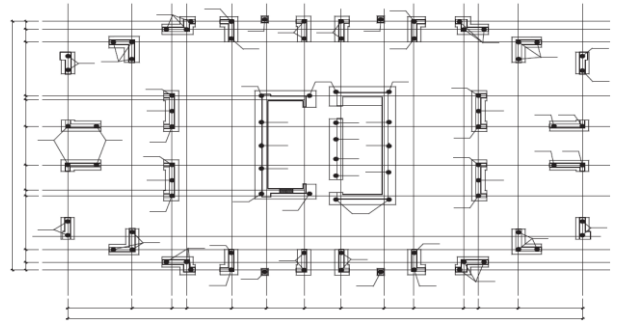


图9 成都凯德风尚6#楼隔震层平面

隔震层布置具体如下: 1) 外围两圈布置 $\phi 1\ 000$ 的铅芯橡胶支座,共 535 个;内部为 $\phi 1\ 000$ 的普通叠层橡胶支座,共 1 177 个,叠层橡胶支座的布置示意图见图 10 (a); 2) 沿结构南北和东西方向各布置 54 个黏滞阻尼器,即总共布置阻尼器 108 个,其阻尼系数为 1 500kN/(m/s),见图 10 (b)。

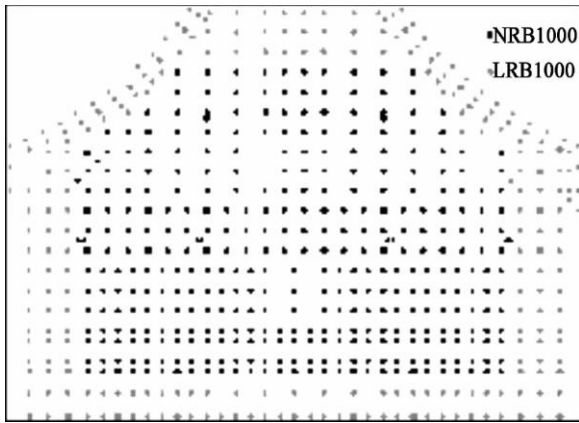
计算与振动台试验表明,各层剪力比最大值均小于 0.35,即水平向减震系数为 0.5,因此可知其隔震效果可以满足降低一度的要求。

## 7 隔震加固

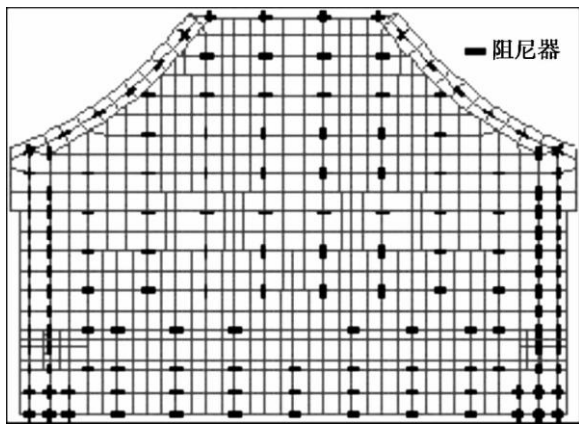
采用隔震技术对已有建筑进行抗震加固最早的是 1989 年进行的美国盐湖城大厦的隔震改造,此后美国的奥克兰、旧金山和洛杉矶市政大楼、联合国大厦等数十栋建筑的抗震加固也采用了隔震技术。在日本,一些办公楼、机场等大型建筑也采用了隔震加固技术,取得了良好的效果。

2010 年中国建筑科学研究院与山西省建筑设计院在山西省忻州市首次采用隔震技术进行了中小学校的抗震加固<sup>[3]</sup>,加固结构类型涉及砖混结构和钢筋混凝土框架结构,如图 11 所示,加固面积共计 10 万  $m^2$ 。表 1 为部分校舍建筑基本信息及减震系数。隔震层设置在建筑 $\pm 0.00$ ,如建筑有地下室,则设置在地下室顶,采用 $\phi 350\sim 500$ 的叠层橡胶支座和铅芯橡胶支座。隔震加固后建筑物达到中小学建筑乙类的要求。隔震设计计算采用 ETABS 有限元分析软件。计算采用振型分解反应谱法和时程分析法对隔震前后的结构进行对比分析,包括结构动力特性分析、多遇和罕遇地震作用下结构楼层剪力对比、多遇和罕遇地震作用下的楼层位移和层间位移比较等,同时对隔震支座在罕遇地震下的应力

和位移进行了分析。经过隔震加固后，建筑物承受的地震力降低了 1/3，可按降一度进行加固设计。

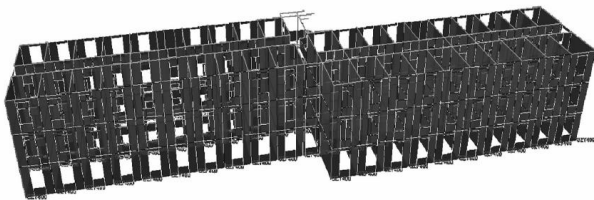


(a) 隔震支座布置平面

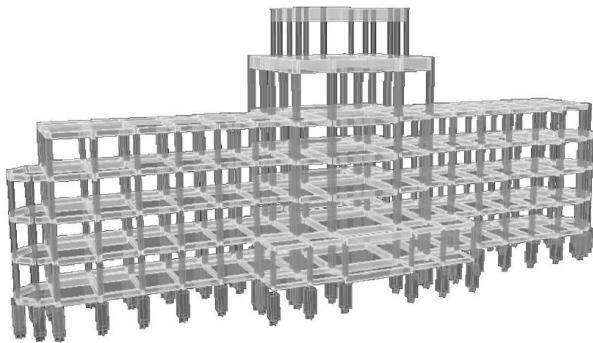


(b) 阻尼器布置平面

图 10 昆明机场航站楼隔震层布置平面



(a) 砖混结构隔震计算模型



(b) 框架结构隔震计算模型

图 11 中小学校舍隔震加固计算模型

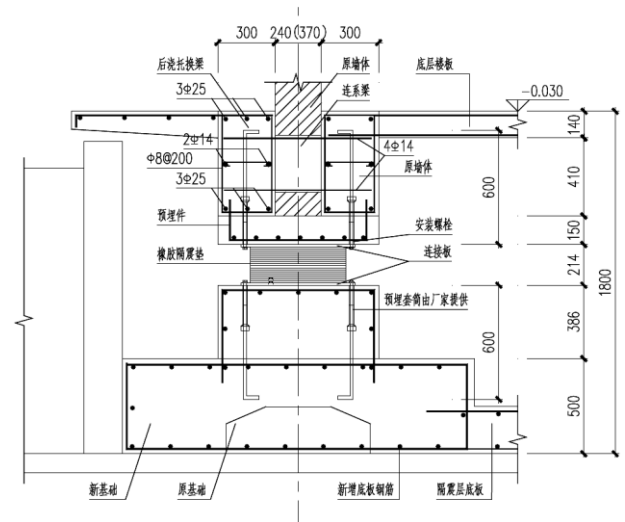
隔震加固的关键是托换，即如何将已建成的建筑物放在隔震支座上。图 12 (a) 为砖混结构隔震加固做法，方法是先留部分墙体，进行隔震支座的

施工，待隔震支震施工完成后，再将墙体切断，建筑自然落在隔震支座上。图 12 (b) 为框架结构的节点施工图，方法是先进行支撑，再切断柱，施工隔震支座，完成后拆除支撑。隔震加固施工不影响上部建筑的使用，对学校正常的教学工作影响较小，加固施工周期较短。

建筑基本信息与减震系数

表 1

建筑功能	结构类型	层数	最大层间剪力比	水平向减震系数
实验小学教学楼	砖混	4	0.345	0.483
学生公寓餐厅	底框	4	0.319	0.447
男生宿舍	砖混	3	0.349	0.489
科研办公楼	框架	6	0.372	0.521
初中教学楼	框架	5	0.347	0.486
高一教学楼	砖混-框架	4	0.349	0.489



(a) 砖混结构隔震节点详图



(b) 施工中的框架结构节点

图 12 中小学校舍隔震加固节点

## 8 结语

隔震技术是一项卓有成效的减震技术，历次地震中隔震建筑的表现良好。目前我国已有越来越多的公共建筑采用这项技术，更多的房地产开发商也开始关注并尝试采用这项技术，相信在未来隔震技

术将获得更广泛的应用。

#### 参 考 文 献

- [1] 卢丽娟, 潘文, 曾聪. 昆明新机场航站楼隔震结构的地震反应分析[J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (15) : 3621-3624.
- [2] 肖从真, 薛彦涛, 曾德民, 等. 成都凯德风尚高层建筑隔震设计与研究[J]. 建筑结构, 2009, 39 (6) : 93-97.
- [3] 常兆中, 薛彦涛, 金林飞, 等. 隔震加固技术在中小学抗震加固中的应用[C]//第二十一届全国高层建筑结构学术交流会论文集, 2010:1194-1197.
- [4] 徐忠根, 周福霖. 我国首栋橡胶隔震住宅楼动力分析[J]. 世界地震工程, 1996 (1) :38-42.
- [5] 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, 56:506-510
- [6] 刘文光, 周福霖. 铅芯夹层橡胶隔震垫基本力学性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19 (1) : 94-99.
- [7] 熊世树, 李黎, 唐家祥. 叠层橡胶隔震器力学性能的试验研究[J]. 工程抗震, 1998 (2) :20-23.
- [8] 苏键, 温留汉, 黑沙, 周福霖. 筑隔震叠层橡胶支座研究进展[J]. 低温建筑技术, 2010 (3) :29-13.
- [9] 陈兵勇, 马国富, 阮家声. 宽温域高阻尼橡胶材料研究进展[J]. 世界橡胶工业, 2004, 31 (11) : 33-37.
- [10] 庄学真, 沈朝勇, 金建敏. 桥梁高阻尼橡胶支座力学性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26 (5) : 208-212.
- [11] 袁涌, 朱昆, 熊世树. 高阻尼橡胶隔震支座的力学性能及隔震效果研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30 (3) : 16-20.
- [12] 张文芳, 贾淑贤, 李国胜. 一种全密封锁位型摩擦阻尼隔震支座的试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26 (11) : 95-101.
- [13] 薛素铎, 李雄彦. 摩擦滑移水平隔震支座的性能试验[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35 (2) : 168-173.
- [14] 曾聪, 陶忠, 潘文. PTFE 不锈钢摩擦滑移隔震支座摩擦系数的影响因素研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31 (1) : 58-63.
- [15] 李宏男, 王苏岩, 贾俊辉. 采用基础摩擦隔震房屋高宽比限值的研究[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17 (3) : 73-76.
- [16] 熊仲明, 王清敏, 丰定国. 多层基础滑移隔震房屋滑动抗倾覆稳定性判定[J]. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30 (3) : 287-300.
- [17] 龚健, 周云. 摩擦摆隔震技术研究和应用的回顾与前瞻 (I) [J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32 (3) : 1-9.
- [18] 杨林, 周锡元, 苏幼波. FPS 摩擦摆隔震体系振动台试验研究与理论分析[J]. 特种结构, 2005, 22 (4) : 43-46.
- [19] 姜婷, 王俊峰, 李大望. 摩擦摆隔震结构振动台试验及结果分析[J]. 华南港工, 2009 (3) : 39-43.
- [20] 朱玉华, 吕西林, 杜芳, 等. 组合隔震系统滑动支座的滑移系数研究[J]. 结构工程师, 2001 (2) :34-44.
- [21] 杨树标, 李旭光, 马裕超. 复合隔震摩擦承压比的振动台试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 22 (2) : 141-145.

\* “十一五” 国家科技支撑计划课题 (2009BAJ28B03)。

作者简介: 薛彦涛, 博士, 研究员, 研究方向: 建筑隔振与减震技术, Email: yantaoxue@sina.com。