

# 建筑结构设计应用隔震技术时须注意的若干问题

郑直

宁夏建筑设计研究院有限公司 宁夏 银川 750001

**前言：**2021年国务院颁发的《建筑工程抗震管理条例》第十六条规定：位于高烈度设防地区、地震重点监视防御区的新建学校、幼儿园、医院、养老机构、儿童福利机构、应急指挥中心、应急避难场所、广播电视等建筑应当按照国家有关规定采用隔震减震等技术，保证发生本区域设防地震时能够满足正常使用要求。同时鼓励在除前款规定以外的建设工程中采用隔震减震等技术，提高抗震性能。将原本的抗震设防目标由“小震不坏、中震可修、大震不倒”提高至“中震不坏、大震可修、巨震不倒”。笔者作为工作在结构设计一线的设计人员，在本文中主要讨论应用最广泛的钢筋混凝土结构隔震技术，通过规范对比、常用软件对比以及隔震构造、产品等方面，提出结构设计应用隔震技术时需要注意的上述方面中较为“隐性”、容易忽视的问题，以期对广大结构设计人员提供一些有益的提醒。

**关键词：**隔震

## 1 结构隔震技术的基本概念及原理

地震灾害是一种突发性的自然灾害，建筑由于地震时地面的运动受到动力作用而产生强迫振动，因而在结构中产生内力、变形和位移造成结构受损甚至倒塌，严重威胁着人民的生命和财产安全。我国幅员辽阔，高烈度地区较多，许多地区经常发生地震，地震灾害的教训相当惨痛。

现在各国普遍采用的是抗震设计理论。地震时建筑物受到的地震作用由底向上逐渐放大，从而引起结构构件的破坏。抗震设计思想是抵御地震作用立足于“抗”，即依靠建筑物本身的结构构件的强度和塑性变形能力，来抵抗地震作用和吸收地震能量。在强震作用下，会产生很大的变形，造成各种破坏，甚至倒塌。所以这种依靠结构构件发生弹塑性变形来消耗地震能量保证结构大震安全的延性结构体系，为了保证建筑物的安全，必然加大结构构件的设计强度，增大构件截面和配筋，而地震力是一种惯性力，建筑物的构件断面大，所用材料多，质量大，其受到的地震作用也相应增大，想要在经济和安全之间找到一个平衡点往往比较困难且非常不经济。另外，地震时，建筑内的人员、设备、装修等损失也往往非常大，甚至超过结构本身。

根据《建筑抗震设计规范》可知，要减小结构的地震作用有两种途径：减小结构的质量或减小水平地震影响系数，对于一个确定的结构方案来说减小结构质量的幅度一般不会太大，故应主要想办法通过减小水平地震影响系数来减小输入结构的地震作用。由地震影响系数曲线和计算公式可知，要减小水平地震影响系数可以有以下措施：1) 减小水平地震影响系数最大值 $\alpha_{max}$ ；2) 增

大结构阻尼比（减小阻尼调整系数）；3) 增大结构的基本周期；4) 减小特征周期 $T_g$ ，在实际项目中可行的措施只有增大结构的阻尼比和延长结构的自振周期，

隔震结构理论上恰好符合以上两个方法，在建筑的某一层（基础顶、地下室顶或裙房顶部）增设由隔震橡胶支座和阻尼等组成的隔震层，延长结构自振周期，增大结构阻尼，通过隔震层的大变形耗散掉输入结构的大部分地震作用，有效地降低了上部结构反应，大大地减小了层间剪力与层间相对变形，从而达到预期防震要求。隔震设计思想是立足于“隔离地震”，与抗震结构相比，隔震结构在遭遇大地震时表现良好，隔震建筑的变形主要集中在隔震层，隔震层以上结构的变形非常小，接近于刚体的平动，住在房屋中的人们似乎感受不到房屋的振动，房屋结构及内部的装修、设备、仪器损伤很小。经济效益方面，相比传统抗震建筑，隔震建筑虽然增加了隔震层以及隔震支座等，但满足底部剪力比时上部结构可按降低一度设计，使得上部结构的构件材料强度、截面尺寸和配筋可大大减小，因《建筑工程抗震管理条例》于2021年发布，仅根据发布以来各地对新建隔震建筑的费效对比，土建投资隔震建筑相比传统抗震建筑7度区节省3~6%，8度区节省8~14%，9度区节省15~20%。因此隔震技术是一种费效比高，减震效能强的技术，值得推广。

2 《建筑抗震设计规范》GB50011-2010(2016年版)与《建筑隔震设计标准》GB/T 51408-2021中需要注意的问题<sup>[1][2]</sup>

2.1 场地类别：结构响应除了与结构的自振周期和阻尼有关外，还与结构所处的场地类别有关，下图表示

了结构在不同场地类别下的反应谱曲线,其中一类为岩石等坚硬场地土,二类为中等坚硬场地土,三类为软弱场地土。这主要是由于土层会使一些与土层固有周期一致的某些频率波群放大通过,而将另一些与土层固有周期不一致的某些频率波群缩小或过滤掉。由于表层土的滤波作用,使坚硬场地的地震动以短周期为主,而软弱场地土的地震动则以长周期为主,对于表层土的放大作用,使坚硬场地土的地震加速度幅值在短周期范围内局部增大,同理使软弱场地土的地震动加速度幅值在长周期范围内局部增大,由于隔震建筑的周期一般都比较长,对于长周期的隔震结构场地土越软弱,地震作用越大,隔震效果越差,所以新《隔标》3.2.2条规定隔震建筑的场地宜为I、II、III类,当场地土为IV类时,应采取有效措施。

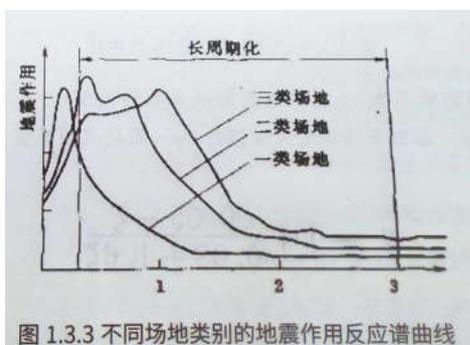


图 1.3.3 不同场地类别的地震作用反应谱曲线

2.2 周期折减系数:由于高层建筑结构整体计算分析时,只考虑了主要结构构件(梁、柱、剪力墙和筒体等)的刚度,没有考虑非承重结构件的刚度,因而计算的自振周期偏长,按这一周期计算的地震作用偏小。因此,在计算地震作用时,对周期进行折减。但是由于隔震结构的动力特性不同与传统的抗震结构,对于基底隔震结构,建议取1.0;对于层间隔震结构,可偏保守的按常规结构取值。

2.3 周期比:隔震结构前三个周期基本由隔震层确定。周期比反应的是扭转共振,由于隔震建筑的周期反应的是隔震层的周期,而隔震层要求按罕遇地震计算变形及隔震层偏心率。橡胶隔震支座方案通过将铅芯支座布置在周边,既提供了大变形能力又提供了比较大的阻尼,能够有效控制结构扭转效应;摩擦摆支座能够自适应控制结构扭转;结构扭转耦联影响已在设计中考虑。因此,一般隔震模型,可不考虑周期比。

2.4 位移比:对于隔震结构,隔震层是刚度最弱的位置,结构不规则带来的扭转变形主要集中在隔震层,而隔震层已经进行了大震下的支座位移及偏心率计算,从而考虑了扭转所带来的不利影响,因此可不考虑位移比。

2.5 高宽比:新《隔标》取消了《抗规》对于隔震结构高宽比限值的要求,直接按照隔震支座拉力小于1Mpa控制隔震结构的抗倾覆问题。

2.6 结构变形限值:《隔标》4.5.1、4.5.2规定了上部结构在设防地震下的弹性层间位移角限值和罕遇地震下的弹塑性层间位移角限值;4.7.3规定了下部结构在设防地震下的弹性层间位移角限值。需要注意的是,当下部结构不全在地下时尚应满足4.7.3在罕遇地震下的弹塑性层间位移角限值,而隔震层以下的全地下室无需满足。对特殊设防类建筑须满足上述各条中极罕遇地震下的弹塑性层间位移角限值。第4.6.2-2条中规定各隔震支座底面宜布置在相同标高位置上,当隔震层的隔震装置处于不同标高时,应采取有效措施保证隔震装置共同工作,且罕遇地震作用下,相邻隔震层的层间位移角不应大于1/1000。又根据21G610-1《建筑隔震构造图集》,在建筑电梯基坑处,经常出现电梯基坑在基础范围内,而悬挂式电梯基坑下要求有不小于800mm净空,这使得局部基础需要深埋,而由于电梯基坑的遮挡,使得为了自由滑动,隔震支座不得不随之降标高而造成局部隔震支座与其他隔震支座不在同一标高上,此时就需要特别注意4.6.2-2条规定。

2.7 《隔标》3.1.3条及条文说明,在设防地震作用下,应进行结构以及隔震层的承载力和变形验算,隔震结构采用“中震设计”,在设防地震作用下进行截面设计和配筋验算以及基础设计;在罕遇地震作用下,应进行结构及隔震层的变形验算,并应对隔震层的承载力进行验算;在极罕遇地震作用下,对特殊设防类建筑尚应进行结构及隔震层的变形验算。对大多数隔震建筑,一般情况下只需要增加特殊设防类建筑极罕遇地震作用下的支座变形验算。但需要注意条文说明“对于特殊设防类建筑和房屋高度超过24m的重点设防类建筑或有较高要求的建筑,应对结构进行极罕遇地震作用下的变形验算”。

2.8 拉应力:《隔标》6.2.1条及条文说明:橡胶隔震支座拉应力限值不应大于6.2.1条规定,且出现拉应力的支座数量不宜过多,限制在不超过支座总数的30%以下。在罕遇地震下,隔震支座将会在重力荷载代表值产生的竖向压应力基础上叠加较大的竖向拉、压应力,因此需要分别设定不同的隔震橡胶支座和弹性滑板支座的竖向压应力限值,以及隔震橡胶支座的竖向压应力限值。摩擦摆支座和弹性滑板支座没有竖向受拉能力,罕遇地震作用下为防止其脱离,必须保持处于受压状态,不允许出现拉应力。

2.9 隔震结构中各类构件的定义和性能目标:

构件性能化类型默认设置表

性能类型	构件类型	说明
关键构件	框支柱, 底层柱 <sup>1</sup> , 剪力墙 <sup>2</sup> , 转换梁, 隔震层主梁	1.属于关键构件的底层柱为框架结构、少墙框架结构的底层柱。 2.加强区内的剪力墙为关键构件。加强区按《隔规》确定。
普通竖向构件	框架柱, 底层柱, 剪力墙	1.非关键构件的底层柱均为普通竖向构件。 2.加强区以外的剪力墙为普通竖向构件。
普通水平构件	框架梁, 连梁, 隔震层次梁	

隔震结构构件性能目标

构件类型		性能目标	“隔标”公式	说明
关键构件	正截面	“中震弹性”	4.4.6-1	设计值复核、考虑地震效应调整
	斜截面			
普通竖向构件	正截面	“中震不屈服”	4.4.6-2, 4.4.6-3	标准值复核、不考虑地震效应调整
	斜截面			
重要水平构件	正截面	“中震不屈服”	4.4.6-2, 4.4.6-3	标准值复核、不考虑地震效应调整
	斜截面			
普通水平构件	正截面	“中震不屈服”	4.4.6-4	标准值复核、不考虑地震效应调整 (考虑超强系数)
	斜截面			
		“中震不屈服”	4.4.6-2, 4.4.6-3	标准值复核、不考虑地震效应调整

2.10 《隔标》4.3.1、4.3.7及条文说明, 计算隔震建筑上部结构的水平地震作用标准值时, 计算基本周期所用的刚度为隔震层等效刚度, 阻尼比为隔震层等效阻尼比; 计算竖向地震作用标准值时, 隔震层阻尼比取上部结构阻尼比, 且不宜大于0.05。因为《隔标》采用的是设防烈度下的竖向地震影响系数最大值, 楼层的竖向地震作用效应不应再考虑增大系数。

### 3 常用 PKPM 和 YJK 结构计算软件在计算隔震结构模型时需要注意的问题

3.1 对于隔震层位于地表以上的层间隔震结构, 不适宜采用基于《抗规》的水平向减震系数法, 应选择直接设计法(整体分析设计法)。

3.2 《隔标》4.1.3-3条中规定的建筑, 以及反应谱分析时显示有隔震支座拉应力超限, 需在反应谱分析基础上采用时程分析进行校核, 这是因为采用反应谱方法计算时, 不能有效考虑上部结构进入塑性状态后的隔震效果, 也不能反应隔震支座的拉压刚度异性。在地震动时程选取时, 需满足《抗规》5.1.2条: 多组时程的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符, 此处“在统计意义上相符”指的是, 多组时程波的平均地震影响系数曲线与振型分解反应谱法

所用的地震影响系数曲线相比, 在对应于结构主要振型的周期点上相差不大于20%。另外, 这里所说的“校核”, 指的是针对计算结果的隔震层剪力、位移、上部楼层剪力和层间位移进行比较, 当时程分析法大于振型分解反应谱法时, 相关部位的部件与构件的内力乘以增大系数, 而不是直接采用时程分析方法的结果。

3.3 在建模时, YJK软件的隔震支座是通过定义上支墩层中上支墩柱的柱底约束来实现的, 在建立非隔震模型时上支墩层柱底须手动设为铰接。PKPM软件单独设置了“隔震支座层”, 非隔震模型将隔震支座层“刚化”, 无需再手动将上支墩层柱底设为铰接。

### 4 隔震构造和产品需要注意的问题

4.1 橡胶类支座不宜与摩擦摆等钢支座在同一隔震层中混合使用, 这是因为一般摩擦摆支座水平滑动时会产生竖向位移, 形成对所支承结构的顶升作用。

弹性滑板支座不具备自复位功能, 故需要配合叠层橡胶支座使用。

4.2 隔震设计时采用的隔震支座外径不宜小于300mm, 这是从构造上防止水平大变形作用下的橡胶受压失稳, 当小于300mm时, 标准设防类建筑中隔震支座压应力限值取为10Mpa。

4.3 橡胶隔震支座的第二形状系数 $S_2$ ： $S_2$ =受压面的最小尺寸/橡胶层总厚度。第二形状系数又称为橡胶层的宽高比，控制支座压屈荷载和水平刚度， $S_2$ 越小，表明支座越细高，刚度越小，容易压屈，竖向承载力随之降低。 $S_2$ 越大，说明橡胶总厚度越薄，刚度越大，稳定性越好，竖向承载力也越大。从隔震效果看要求 $S_2$ 越小越好，但在竖向力作用下隔震支座又容易失稳，在设计中应合理控制 $S_2$ 的大小。《隔标》4.6.3-2，对于橡胶隔震支座，当第二形状系数 $S_2$ 小于5.0时，应降低平均压应力限值：小于5且不小于4时降低20%，小于4且不小于3时降低40%。<sup>[4]</sup>

4.4 当采用21G610-1《建筑隔震构造详图》中悬挂式电梯井穿越隔震层时<sup>[3]</sup>，除满足图集中四周及底部净空外，尚需注意满足《隔标》5.4.3及条文说明：采用悬吊式方案穿过隔震层的电梯井，在罕遇地震作用的相对水

平位移与悬吊部分的高度之比，对于混凝土结构不宜大于1/400，对于钢结构不宜大于1/200。

结书语：以上为笔者总结的结构设计应用隔震技术时需要注意的若干问题，隔震技术在国内近期才大面积推广，限于笔者的工程经验和水平，提出的这些注意点还远不能涵盖隔震结构设计的全过程，只期对广大结构设计人员能提供一些有益的提醒。

#### 参考文献

- [1]《建筑抗震设计规范》GB50011-2010（2016年版）
- [2]《建筑隔震设计标准》GB/T51408-2021
- [3]《建筑隔震构造详图》21G610-1
- [4]《YJK隔震结构设计应用手册》
- [5]《PKPM软件说明书-隔震结构非线性分析软件-PKPM-GZ》