

地震重点监视防御区的建筑减震隔震设计分析

张扬

山西省建筑标准设计研究院

摘要：2021年9月施行的《建设工程抗震管理条例》第十六条，明确要求“两区八类”建筑遭遇本区域设防地震时能够保证正常使用功能，这条规定使以前的小震设计法变为中震设计法，提高了设计地震作用。以前一直执行高烈度设防地区的减隔震设计，现在要同时关注“两区”中地震重点监视防御区的减隔震设计。由于现在地震重点监视防御区划定属于涉密文件，既有低烈度区，又包括高烈度区，做具体工程前需向当地地震有关部门询问确认。通过对一个位于地震重点防御区医疗建筑工程的减隔震设计分析，计算比较选择减震和隔震的可行性，为做类似工程设计提供参考。

关键词：地震重点监视防御区；减震；隔震

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.21.096

一、工程概况

已经查询确认建设地点属于地震重点监视防御区。抗震设防烈度和地震加速度：7度0.15g。一个多层医疗建筑，建筑抗震设防类别为重点设防类（乙类）。地下一层，使用功能为车库、设备用房、射线检查室及楼外侧连带的消防水池，地上六层（局部二层），使用功能为诊室、办公及住院病房等，屋顶有电梯机房及水箱间。地下一层层高5.2m，地上一层层高4.2m，二层层高3.9m，三四层层高为3.7m，五六层层高为3.9m，屋顶电梯机房及水箱间层高为4.5m，室内外高差为0.45m，建筑高度23.75m。建设场地覆盖土层厚度大于50m，地表20m内土的等效剪切波速大于150m/s，场地土类型为中软土，场地类别判定为III类，查规范设计地震分组划分为第二组，可知地震作用设计特征周期值为0.55s。

从建筑使用角度看，因为有地下室，倾向于做减震设计，这样地上地下连续，没有隔震措施需要设置隔震沟、楼梯上下分离、电梯井特殊处理、设备管线柔性连接等要求。所以，首先按减震设计计算分析，看能否满足规范要求，然后再按隔震设计计算分析，对比减隔震方案的可行性。

二、减震设计计算分析

根据《建筑与市政工程抗震通用规范》第2.3.2条和《建筑抗震设计规范》第3.3.3条规定，7度0.15g、III类场地的重点设防类建筑，需要在提高1度采取抗震措施的基础上，再提高抗震构造措施。所以本例，采用框架结构时，框架抗震等级为二级，抗震构造措施等级为一级。采用框架-抗震墙结构时，框架抗震等级为三级，抗震构造措施等级为二级；抗震墙抗震等级为二级，抗震构造措施等级为一级。

首先按常规小震计算方法选择结构形式。选择框架方案时，周期折减系数取0.65，调整构件截面计算分析，框架柱轴压比小于限值；结构前两个振型均为平动，第三振型为扭转，第一扭转和第一平动振型周期

之比小于0.9；地震作用下最大层间位移角为1/448，规定水平力作用下位移比最大为1.47，位移相关指标均不满足要求，可见框架方案不可行。选择框架-抗震墙方案时，周期折减系数取0.75，布置抗震墙调整构件截面计算分析，框架柱和抗震墙轴压比均小于限值；结构前两个振型均为平动，第三振型为扭转，结构抗扭刚度理想，第一扭转和第一平动振型周期比值小于0.9；地震作用下最大层间位移角为1/818，规定水平力作用下位移比最大为1.22，位移相关指标均满足要求，说明框架-抗震墙方案可行。（框架-抗震墙结构模型见图1）。

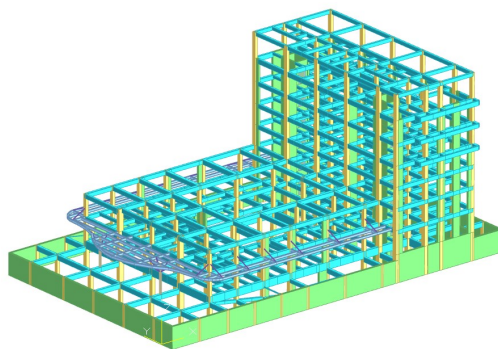


图1 框架-抗震墙结构模型

下一步分析，确定中震正常使用功能下的减震目标。将上一步选中的框架-抗震墙结构模型考虑性能设计，根据《建筑抗震设计规范》附录M.1，承载力按性能2，中震正截面不屈服，斜截面弹性，层间位移略大于弹性位移限制（参考规范取值1/500）。调整结构阻尼比，达到0.23时，地震作用下最大层间位移角才能满足要求，但仍有不少构件超筋。本例目标阻尼比0.23，减去结构固有阻尼比0.05，需要附加阻尼比0.18，根据经验该附加阻尼比不是经济合理的。（对比结构方案的计算结果见表1）

如果减震目标阻尼比合理，可将速度相关型消能器布置在模型里，选取合适的黏滞阻尼器型号，计算前信息需将与阻尼器相连的框架柱、框架梁指定为关键构件。布置阻尼器的结构阻尼比还是取固有阻尼比0.05，直接采用中震法计算减震，不再选取性能设计。第一遍采用输入的阻尼器等效线性属性，定义减震元件有效刚度和有效阻尼为0，采用厂家提供阻尼器的非线性属性，减震附加阻尼比采用能量算法，进行振型分解反应谱计算。计算完成后进行弹性时程分析，初步计算时可只生成一条和反应谱拟合极好的人工波，确定阻尼器型号后可按规范选取2条人工波和5条天然波计算平均值。分析方法采用振型叠加法，主方向峰值加速度按设防烈度定义，次方向和竖方向峰值加速度定义为0。根据

表1 对比结构方案计算结果

计算整体指标		框架小震结果	框架抗震墙小震	框架抗震墙中震23%阻尼
自振周期/s	T_1	1.04	0.72	0.71
	T_2	0.93	0.67	0.67
	T_t	0.80	0.53	0.51
扭转平动周期比		0.77	0.74	0.72
地震作用下最大层间位移角	X向	1/448>[1/550]	1/909<[1/800]	1/552>[1/500]
	Y向	1/478>[1/550]	1/818<[1/800]	1/502>[1/500]
考虑偶然偏心时最大位移比	X向	1.16<[1.40]	1.14<[1.40]	1.14<[1.40]
	Y向	1.38<[1.40]	1.22<[1.40]	1.21<[1.40]
考虑偶然偏心时最大层间位移比	X向	1.21<[1.40]	1.18<[1.40]	1.18<[1.40]
	Y向	1.47>[1.40]	1.18<[1.40]	1.17<[1.40]

《建筑消能减震技术规程》第6.3.2条公式计算，可以得到两个方向的附加阻尼比，选取两个方向的小值为附加给结构的阻尼比。第二遍反应谱计算时，将得到的附加阻尼比加入结构的阻尼比里，进行最终设计计算，最后计算的阻尼比要和目标阻尼比相符。还有一种算法思路，认为不同楼层不同位置的阻尼器出力不同，时程分析时，采用直接积分法求得每个阻尼器的变形耗能。第二遍反应谱计算时，还是采用结构固有阻尼比，减震元件有效刚度和有效阻尼采用弹性时程计算结果。计算完可在设计结果减震器参数中，看到每个减震器的有效刚度和有效阻尼，在周期结果中可以看到结构每个方向的总阻尼比。附加阻尼的计算需要反复调整阻尼器的大小，反应谱和时程分析迭代计算，修改反应谱中减震器的最大附加阻尼比和附加阻尼比折减系数，使两种分析方法计算的地震剪力接近，最终与预期目标相符。

本例的需要附加的阻尼比太高，布置减震器计算很难达到目标，即使接近目标，仍然有不少构件超筋，说明减震方案不可行。假设建筑为两三层，减震方案还是有可行性的。

三、隔震设计计算分析

隔震支座能够很好地减小上部结构地震作用，《建筑隔震设计标准》第6.1.3规定，隔震结构底部剪力比小于等于0.5时，上部结构可以按降低1度的设防烈度确定抗震措施，但是竖向地震作用有关的抗震措施不得降低。布置的隔震系统会增加投资，但减小上部结构地震作用后梁柱墙截面会变小，配筋面积减少，降低上部结构造价，这样相比非隔震结构，工程造价能得到一定平衡。所以，隔震结构的第一目标是底部剪力比不大于0.5，根据经验隔震设计一般都可以达到这个目标。

依据上述目标，初布计算上部结构时按降低1度的设防烈度进行，这样计算的构件截面较小，与隔震后目标构件截面接近，调整幅度较小。计算完成后查看各项指标及配筋基本满足规范要求后，将水平地震影响系数修改为本地区设防地震影响系数，再重新计算非隔震模型，用于隔震模型计算结果对比，确定底部楼层的剪力比，从而确定上部结构的抗震措施。

计算参数中个别选项与传统结构有差异，需注意修改。依据《建筑隔震设计标准》，采用带隔震层下部结构的计算模型直接计算分析，嵌固位置取模型底部，控制下部结构大震弹塑性层间位移角，隔震层上、下楼层的刚度比不再是考察指标。隔震支座不能减小竖向地震作用，而且要计算竖向地震参与下的支座最大和最小压应力，地震作用计算信息可采用计算水平和规范简化方法竖向地震作用。隔震结构的动力特性不同于传统抗震结构，隔震层上部结构近似平动，周期折减对上部结构的地震反应影响很小，为简单起见，对于基底隔震结构，周期折减建议取1.0，对于层间隔震结构，可参考常规结构取值。隔震结构也需考虑偶然偏心、双向地震作用，地震影响系数最大值取设防地震的值，计算罕遇地震作用时，场地特征周期应增大0.05s。

隔震支座的选型和布置是隔震设计的关键，由于每个厂家提供的隔震支座性能参数不尽相同，尤其是屈服力、屈服刚度等，对支座布置影响很大。当项目有意向隔震厂家时，最好选用其提供的支座性能参数计算。计算模型中隔震支座的设计参数中应填入有效直径、橡胶总厚度、支座和连接板总高、二次形状系数、水平和竖向有效刚度、非线性的抗拉刚度、屈服刚度、屈服力等。计算前信息需将隔震层中的支墩、支柱及其相连构件指定为关键构件，地下室顶隔震时，关键构件还包括支撑支座的柱及相连框架梁，层间隔震时，底部的框架柱均属于关键构件。

查看隔震层计算结果，隔震与非隔震模型的隔震层底部剪力比符合预期目标，不大于0.5时，重点关注隔震层偏心率不大于3%，使隔震层刚心与质心接近重合。其次是隔震层屈重比验算，应不小于2%。屈重比和隔震层底部剪力比是相反的结果，当隔震支座总的屈服力大时满足了屈重比的要求时，隔震层底部剪力比可能会达不到目标比值，实现不了上部结构降低烈度设计。因此需要反复调整，才能达到计算结果的平衡。还需关注隔震层抗风承载力验算、总水平力验算，这些验算指标容易满足要求。隔震支座首先要能承受住重力荷载长期的压应力，发生罕遇地震时，隔震支座的最大压应力、

最小压应力和最大水平位移也不超限值。隔震结构在罕遇下，上部结构可能会进入塑性状态，隔震支座可能会出现拉应力或脱离，这时振型分解反应谱方法计算的支座拉应力不再适用。因此，计算隔震支座在罕遇地震下的拉应力，应采用时程分析方法补充计算，拉应力较小时可改用较大的隔震支座，拉应力较大时需增加抗拉或限位装置。控制隔震支座最大水平位移，是为了防止压屈破坏，最大水平位移限值按《建筑隔震设计标准》第4.6.6取值。当隔震支座最大水平位移超限时，应加大支座的直径。

控制结构扭转周期比目的在于把控结构整体布置的合理性，就隔震结构来说，由于相对于上部结构，隔震层的刚度要小很多，结构的扭转周期比取决于支座的布置。一般可通过控制隔震层的偏心率和将刚度大的支座布置在结构四周，能够保证结构的第一阶振型为平动，

且前三阶周期非常接近，扭转周期比小于1.00但通常大于0.90。《建筑隔震设计标准》第4.3.2条规定，给出考虑扭转耦联影响的计算方法，能够有效计算结构扭转的影响。综上所述，隔震结构设计可不考虑扭转周期比。

常规结构的地震变形为上部结构弯曲、扭转，隔震结构则主要表现为隔震层扭转变形，上部结构几乎平动。对于隔震层，不采用扭转位移比去控制隔震层的扭转变形，而是控制设防地震作用下隔震层偏心率，以及控制隔震支座在大震作用下考虑扭转影响的水平位移。隔震层是隔震结构体系中最“柔”的部位，地震中隔震层发生很大的扭转变形。通过补充大震弹塑性非线性分析地震作用，并且隔震层已经充分考虑了结构带来的附加扭转效应的情况下，上部结构本身可不考虑其不规则性带来扭转影响。综上所述，隔震结构不考虑扭转位移

表2 隔震框架结构计算指标

计算整体指标		上部中震结果	隔震层整体指标		隔震层结果
自振周期/s	T ₁	2.64	隔震与非隔震底部剪力比	X向	0.45
	T ₂	2.63		Y向	0.49
	T _t	2.39	隔震层偏心率%	X向	1.44
地震作用下最大层间位移角	X向	1/605<[1/400]		Y向	1.33
	Y向	1/621<[1/400]	屈重比/%		2.13>2
考虑偶然偏心时最大位移比	X向	1.10<[1.40]	隔震层以下计算指标		下部中震结果
	Y向	1.25<[1.40]	地震作用下最大层间位移角	X向	1/1895>[1/500]
考虑偶然偏心时最大层间位移比	X向	1.20<[1.40]		Y向	1/2100>[1/500]
	Y向	1.38<[1.40]			

本例改为隔震措施，选用框架结构，计算调整后，各项指标（见表2）均能满足规范要求，说明采用隔震方案的可行。

比的限值要求。

总结

根据地震作用标准值简化公式： $F_{ek} = \alpha G_{eq}$ ，式中地震影响系数 $\alpha = (T_g/T)^{\gamma} \eta \alpha_{max}$ ， G_{eq} 为结构等效总重力荷载。对于一个工程，场地特征周期（ T_g ）与场地类别和设计地震分组有关，水平地震影响系数最大值（ α_{max} ）与设防烈度有关，这两个值都已经是确定的。可以改变的只有两个方向，延长结构自振周期（ T ），增大结构的阻尼从而减小衰减指数（ γ ）和阻尼调整系数（ η ）。

消能减震措施中的消能器主要分为两大类，都是布置在上部结构中。位移相关型消能器能够控制结构位移和扭转，会同时增加结构刚度和阻尼比，增加的结构刚度导致周期变短，有时候减小结构的地震作用力效果不显著。速度相关型消能器可以有效地增大结构阻尼比，且不提供刚度不改变结构自振周期，可以较好地减小地震作用力，达到减震目标。

隔震措施中的隔震支座布置在结构底部或某一层，使上部结构与地基“柔”连接。发生地震时，隔震支座

会产生很大的水平变形，消耗掉大部分输入上部结构的地震作用，使上部结构的地震反应大大降低。与传统结构振动特性相比，隔震支座使其改变，结构自振周期延长很多，阻尼比也同时增大。从反应谱曲线公式可以得出，地震影响系数显著减小，上部地震作用显著减小，达到减震目标。相比抗震结构，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，住在房屋中的人们几乎感受不到房屋的振动，房屋结构及内部装修、设备、仪器基本无损。但是需要注意的是，目前建筑隔震只能隔离水平地震作用，对竖向地震没有很好的办法，基本和非隔震建筑相同，对于高烈度地区，隔震建筑设计中考虑的竖向地震作用大于传统抗震建筑。

参考文献

[1]GB/T 51408 - 2021 建筑隔震设计标准[S].
 [2]JGJ 297-2013 建筑消能减震技术规程[S].
 [3]GB 50011 - 2010 建筑抗震设计规范[S].

作者简介：张扬（1988.4-），男，汉，山西省忻州市人，本科，职称：工程师，研究方向：结构设计。