

# 基础隔震设计的简化计算<sup>\*</sup>

黄锐

(甘肃省建筑设计研究院, 甘肃 兰州 730030)

**摘要:** 提出采用工程软件实现基础隔震计算分析的多种简化方法, 主要包括计算模型的建立和地震作用效应的计算。对不同方法的适用条件和计算结果差异进行讨论, 并通过算例加以说明, 可供设计人员进行基础隔震设计时参考。

**关键词:** 基础隔震; 隔震计算模型; 隔震分析; 减震系数

**中图分类号:** TV352

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2014)03-0456-06

## 0 引言

基础隔震是指在建筑物的上部结构与基础之间设置隔震装置, 以延长整体结构自振周期, 降低上部结构地震反应的技术。隔震装置一般会配合阻尼材料或阻尼器使用, 以增大结构阻尼, 控制隔震层位移和减小地震作用。目前国内常用的隔震装置为铅芯叠层橡胶支座或普通叠层橡胶支座。

基础隔震技术已经比较成熟, 而且减震效果显著、可靠, 在历次地震中均得到有效验证。国内在抗震设防高烈度区也兴建了大量基础隔震建筑, 特别是“5·12”汶川地震后, 基础隔震技术得到广泛应用。

现阶段在隔震结构的工程设计中, 一般将计算分为两部分(国家标准建筑抗震设计规范管理组, 2010), 第一部分为前期的隔震计算分析, 主要包括减震系数和隔震层层间位移的确定, 该部分内容通常采用专门软件或通用有限元软件完成, 需要模拟隔震支座的非线性特征, 也是隔震设计的核心内容。第二部分为隔震层以上的上部结构内力、位移和配筋的计算, 可根据减震系数采用常规结构计算软件完成, 隔震支座的效果通过减震系数体现, 不再考虑隔震支座, 完全按普通结构进行计算分析, 以方便设计。

本文主要讨论前期的隔震计算分析。从工程设计的实用性和操作的方便性, 提出采用现有软

件实现基础隔震计算分析的不同简化方法, 主要包括计算模型的建立和减震系数的计算, 对不同方法间的适用条件和计算结果差异进行对比, 并通过算例说明。

根据隔震技术在工程中的常用形式, 研究对象选取为基础隔震的多层框架结构。隔震装置采用叠层橡胶支座, 隔震计算分析软件采用通用有限元软件 MIDAS-GEN。

## 1 计算模型的建立

### 1.1 整体结构模型

确定隔震结构的减震系数时, 需要建立两个计算模型, 一个是隔震结构的模型, 另一个是非隔震结构的模型。根据隔震结构模型和非隔震结构模型计算各层剪力和弯矩, 按《建筑抗震设计规范》(2010)第12.2.5条计算水平向减震系数 $\beta$ 和隔震后的水平地震影响系数最大值 $\alpha_{\max 1}$ 。

隔震结构的计算模型包括上部结构构件(含隔震支座顶部梁板和上柱墩)、隔震支座和下部结构构件(含下柱墩), 结构嵌固部位在基础顶面。

对于非隔震结构, 除将隔震支座取消、下支墩延伸至上柱墩外, 其余均同隔震结构计算模型。

当采用简化方法进行隔震分析时, 根据《建筑抗震设计规范》(2010), 对变形特征为剪切型的结构可采用剪切模型; 当隔震层以上结构的质心与隔震层刚度中心不重合时, 应计入扭转效应的影响。对于手算阶段而言, 该简化方法提供了

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-07-31.

很大便利。目前商品化的三维空间结构计算软件,包括通用有限元软件,已较为成熟,且可选择的范围也较多,基于工程项目的复杂性和设计进度的要求,设计单位已经很少采用手工方法进行简化计算,一般都采用专业软件进行考虑扭转耦联的三维空间结构的整体分析,不再局限于剪切型模型的假定或按平面结构进行简化分析。在构件层面,上部结构和下部结构构件采用梁柱单元模拟,隔震支座采用特殊连接单元模拟。

隔震计算分析一般均采用通用有限元软件,如 MIDAS、SAP2000 等<sup>①②</sup>,而上部结构施工图设计时采用 SATEWE、YJK 等专业软件。为保证隔震系数计算的准确性,隔震分析所用的模型与施工图设计所用的模型应保持一致性,特别是在结构抗侧刚度方面,否则会造成减震系数与实际不符。

## 1.2 隔震支座模型

隔震层是指被隔震的上部结构与下部结构(或基础)间的全部隔震装置的总称,包括隔震支座、阻尼器和其它装置。在隔震分析中,隔震支座和阻尼器的力学模型至关重要,也是隔震分析的核心内容之一。

在国内的工程中,较多使用含有阻尼特性的铅芯叠层橡胶支座,本文以其作为讨论对象。铅芯叠层橡胶支座的滞回曲线可通过试验取得,如图 1a 所示。在规定压应力作用下,合格的铅芯叠

层橡胶支座表现出稳定的双线性恢复力特性,一般可近似为双折线模型(图 1b)(党育等,2007;龚思礼,2002)。评价支座特性时,采用弹性刚度、屈服力、屈服后刚度、卸载刚度、等效刚度、等效阻尼比等力学指标。

隔震支座的滞回曲线具有非线性特征,采用常规的弹性假定分析软件无法直接对其进行模拟,一般需采用通用有限元软件。对隔震支座的模拟实质是对其力—位移滞回曲线关系的表达。

根据目前常用的商品化软件,可通过以下两种方式实现。

(1) 采用如图 1b 所示的简化滞回曲线直接描述,以“力—位移”的方式表达其非线性特征。在通用有限元程序中一般使用隔震支座单元或非线性连接(单元)模拟,其中隔震支座单元实质也是一种非线性连接。

例如,在 MIDAS-GEN 程序中,支座两节点间可采用“一般连接”,并通过“模型—边界条件—一般连接特征值”设置有关一般连接的非线性参数,其中既可采用作用类型为“内力”的“铅芯叠层橡胶支座”,也可采用具有双线性—非线性铰特征值的弹簧单元模拟。

由于 MIDAS-GEN 中的“铅芯叠层橡胶支座”的函数并未采用标准双折线表示,而是采用受两个滞回循环参数 $\alpha$ 和 $\beta$ 影响的曲线表示,不同的数值反映不同的滞回饱满程度,需要合理取值。模

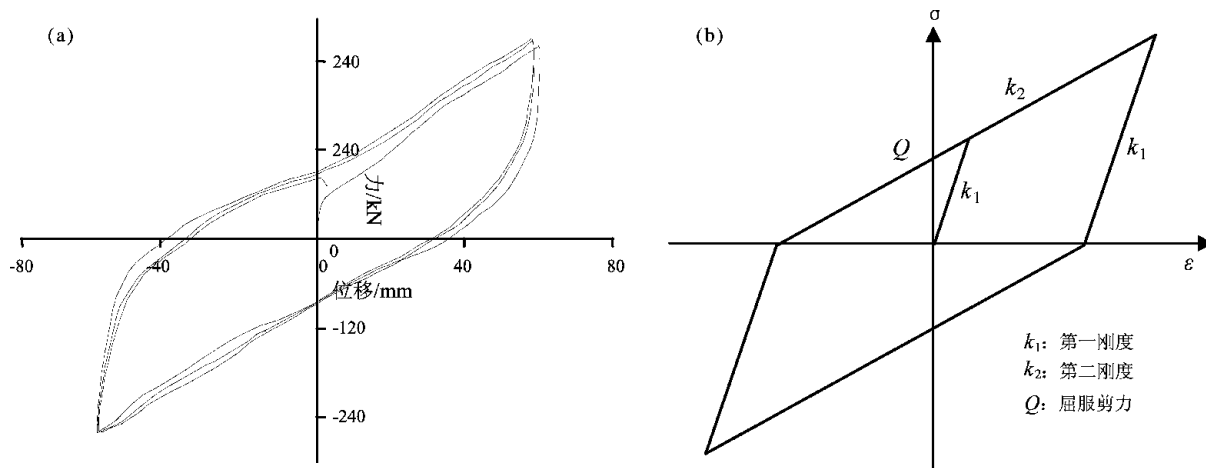


图1 铅芯橡胶支座滞回曲线 (a) 及双折线模型 (b)

Fig. 1 The lead hysteretic curve (a) and bilinear model (b) of rubber bearing

① 北京迈达斯技术有限公司. 2008. MIDAS/Gen 分析与设计原理.

② 北京金土木软件技术有限公司. 2012. SAP2000 中文版使用指南.

型是由 Park (1986) 在 Wen 的单轴塑性模型基础上发展得到的, 模型更接近于铅芯叠层橡胶支座的实际曲线, 且具有双轴相关塑性特征<sup>①②</sup>。对于工程设计而言, 如果不考虑双向地震输入, 模拟良好的双折线模型也可以满足工程精度要求, 因而建议可直接采用较为简单的具有双线性非线性铰特征值的弹簧单元进行模拟。如果考虑双向地震输入, 则需考虑双向塑性相关性, 可按圆形屈服面进行模拟, 具体可参见《隔震结构设计》(日本建筑学会, 2006)。

采用双折线模型模拟铅芯叠层橡胶支座时, 需注意卸载刚度的影响(日本建筑学会, 2006), 过小的卸载刚度会导致计算结果产生较大的误差, 因而需根据隔震垫生产厂家提供的隔震参数合理确定。

(2) 采用等效刚度和等效黏滞阻尼比的等效线性化方法描述。等效刚度和等效黏滞阻尼比是根据试验的滞回曲线, 按结构动力学的有关理论, 以耗能等效为原则换算而来(党育等, 2007, 李爱群, 2007)。支座试验和厂家产品都会提供该等效参数。采用等效线性化的方法可以避免非线性计算的复杂性。

由于上部混凝土结构的阻尼比与隔震支座的等效阻尼比不同, 在结构分析时便会出现非比例阻尼的问题(刘晶波, 杜修力, 2005; 杜永峰等, 2004)。目前可以有两种处理方式: 一种为简化处理方式, 认为当上部结构刚度较大时(与多层砌体结构相当), 隔震结构做整体平动, 可简化为一个单质点模型, 整体结构与隔震层的刚度和阻尼比相同, 《建筑抗震设计规范》(2010)附录 L 即采用这种模型; 另一种为采用实际阻尼比, 即隔震层与上部结构采用不同的阻尼比, 一些程序在动力分析时可处理这种非经典阻尼比的计算问题, 但处理方式各有不同。

当采用不同阻尼比时, MIDAS-GEN 程序通过设置“组阻尼比”来简化处理。对不同阻尼比的构件进行分组, 根据位能等效原则确定整体结构阻尼比, 即振型阻尼比。振型阻尼比是指结构对应于某阶振型的阻尼比。不同构件单元对于结构振型阻尼比的贡献不相同, 与单元变形能有关, 变形能大的单元对振型阻尼比的贡献较大, 反之

则较小。所以可根据某阶振型的单元变形能, 采用加权平均的方法计算对应于该振型的振型阻尼比  $\zeta_j$ , 其表达式为

$$\zeta_j = \sum_{s=1}^n \zeta_s W_{sj} / \sum_{s=1}^n W_{sj} \quad (1)$$

式中,  $\zeta_j$  为结构第  $j$  阶振型阻尼比,  $\zeta_s$  为第  $s$  个单元阻尼比,  $n$  为结构的单元总数,  $W_{sj}$  为第  $s$  个单元对应于第  $j$  阶振型的单元变形能。具体设置时, 可在支座两节点间采用“弹性连接”, 将以上支座连接设置为一个阻尼比不同于主结构的边界组, 采用“应变能因子法”计算阻尼比。

根据《建筑抗震设计规范》(2010), 水平向减震系数计算时, 宜按隔震支座水平剪切应变为 100% 时的性能参数进行计算。因而当实际的支座水平剪切应变小于 100% 时, 有可能会高估隔震支座相应设防水准下的减震效果。

滞回曲线方法与等效线性化方法得出的计算结果有一定差异, 主要是由计算方法和等效标准的不同引起, 在某些情况下, 其误差还比较大, 因而原则上应以滞回曲线的方法为准, 即《建筑抗震设计规范》(2010)的原则。

## 2 隔震结构的动力分析方法

### 2.1 结构动力分析方法的适用条件

在确定减震系数时, 需要计算隔震结构和非隔震结构的地震响应, 主要包括楼层剪力和弯矩。根据《建筑抗震设计规范》(2010)第 12.2.2 条, 一般情况下宜采用动力时程分析法计算, 另外按照附录 L 的简化计算方法, 可认为在一定条件下也可采用反应谱法计算。

隔震结构动力分析的方法与上述隔震支座的计算模型直接相关, 往往根据隔震支座的计算模型决定动力分析的方法。当隔震支座的模型可采用滞回曲线表示时, 一般均采用规范推荐, 且较为准确的动力时程分析法。当支座模型采用等效线性化的方法表示, 且软件提供多质点体系的非比例阻尼求解方法时, 可采用时程分析法。如果

① 北京迈达斯技术有限公司. 2008. MIDAS/Gen 分析与设计原理.

② CSI. 2013. CSI 分析参考手册.

程序按振型阻尼比的方法处理非比例阻尼问题，则也可按简化的反应谱法计算。

为保证计算结果相对的一致性，在确定减震系数时，非隔震结构的分析方法应与隔震结构一致。

2.2 动力时程分析法

对于隔震支座的模型采用滞回曲线表示时程分析时，可采用逐步积分法求解，阻尼采用瑞利阻尼或其它方式构造，一般的通用有限元程序都可以进行处理。

对于隔震支座的模型采用等效线性化表示时程分析法时，程序应具有处理非比例阻尼的功能。例如，对于 MIDAS-GEN 程序，可通过“组阻尼比”的方法计算振型阻尼比，此时时程分析的方法可采用逐步积分法或振型分解法。

鉴于计算模型的简化和地震波选取对计算结果的差异性表现，一般应采用不少于 7 条地震波进行计算。地震波的选取应满足规范的有关要求。另外，如果规范中能根据场地等条件规定若干条必需选择的典型地震波，则会大大降低地震波选取的随意性，改变目前一些根据“需要”选取地震波的不合理现象。

2.3 反应谱法

对于隔震支座的模型采用等效线性化表示的反应谱法，程序也应具有按振型阻尼比处理非比例阻尼的功能。但采用反应谱法计算隔震结构具有较大的近似性。由于我国规范的反应谱已经过人为调整，特别是在高阻尼比的长周期段，计算出的地震响应一般偏大。因而在《建筑抗震设计规范》（2010）附录 L 的简化计算方法中，将隔震后体系的基本周期限定在不大于 2.0 s 和 5 倍特征周期的较大值。

《建筑抗震设计规范》（2010）为推广减隔震技术，相比旧版已适当降低了大阻尼比结构在长周期段的反应谱值，但总体仍会比时程分析的结果偏高，设计时应注意对计算结果的分析。

3 算例

图 2a 所示的结构平面，地上 6 层，层高 3.6 m，抗震设防烈度为Ⅷ度，设计基本地震加速度 0.2 g，设计地震分组为第三组，场地类别Ⅱ类。经分析比较，采用基础隔震技术。隔震器采用铅芯叠层橡胶支座，一柱一支座，预期隔震后的水平地震影响系

数最大值  $\alpha_{\max 1}$  为 0.08，地震作用减小 50%。以下主要介绍减震系数的计算等内容。

（1）根据预期隔震后的水平地震影响系数最大值  $\alpha_{\max 1}$  为 0.08，进行上部结构的初步计算和设计，确定上部构件截面和布置方式，根据柱底内力，计算隔震垫的面积，拉压应力满足规范要求。隔震垫平面布置见图 2b。按隔震垫的面积选用厂家提供的隔震垫型号，得到相应剪切变形 100% 和 250% 时的计算参数，涉及隔震分析用的主要参数见表 1。

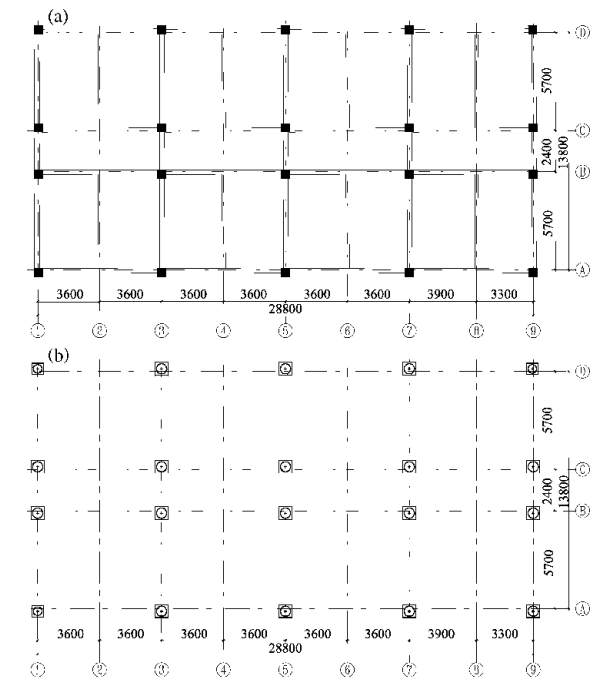


图 2 标准层结构 (a) 及隔震垫支座 (b) 平面  
Fig. 2 The plans of standard floor structure (a) and the isolation bearing dan (b)

表 1 隔震支座参数表（剪切变形 100%）  
Tab. 1 The parameters of isolation bearings (shear deformation 100%)

直径 /mm	$k_1$ kN/mm	$Q$ kN	$k_2$ kN/mm	$k_e$ kN/mm	$\zeta_e$
600	3.57	100	1.076	1.859	0.22

（2）建立隔震结构的计算模型 1（图 3a）和非隔震结构的计算模型 2（图 3b）。隔震垫分别用滞回曲线和等效线性化参数模拟。滞回曲线采用屈服前刚度、屈服力和屈服后刚度控制的双线性表征（Normal Bilinear 折线），将一般连接的弹簧赋予非线性铰特征值。等效线性化采用等效刚度

和等效阻尼比表征，将弹性连接的刚度设置为等效刚度，连接的阻尼比通过边界分组设置为等效阻尼比。

(3) 采用 El-centro (1940NS) 波进行隔震和非隔震结构的动力时程分析示例。计算方法如前所述，并得到隔震结构的基底剪力。表 2 中分别列出采用等效线性化方法和滞回曲线方法得出的计算结果。计算结果以滞回曲线方法为准。

采用“组阻尼比”处理等效线性化方法的阻尼比时，可以得到隔震结构的振型阻尼比，如图 4 所示。其前三个以隔震层变形为主的振型阻尼比并非隔震垫的 0.22，主要是因为这种方法计算出

的振型阻尼比反映隔震层阻尼比和上部混凝土结构阻尼比综合效应的结果。上部结构刚度越小，其阻尼成分所占的比重越大。

从表 2 可以看到，等效线性化方法与滞回曲线方法的计算结果有一定差异，其楼层剪力偏小。如前所述，主要是由于隔震层的计算位移为 59 mm，而隔震垫等效参数是在剪切变形约 115 mm 的条件下换算得到，因而在当前计算位移下，偏高估计了隔震层的阻尼性能，偏小估计了隔震层的等效刚度，致使隔震效应明显。

由于仅采用了一条时程曲线做说明，因而与反应谱法的可比性较差，未再做对比计算。

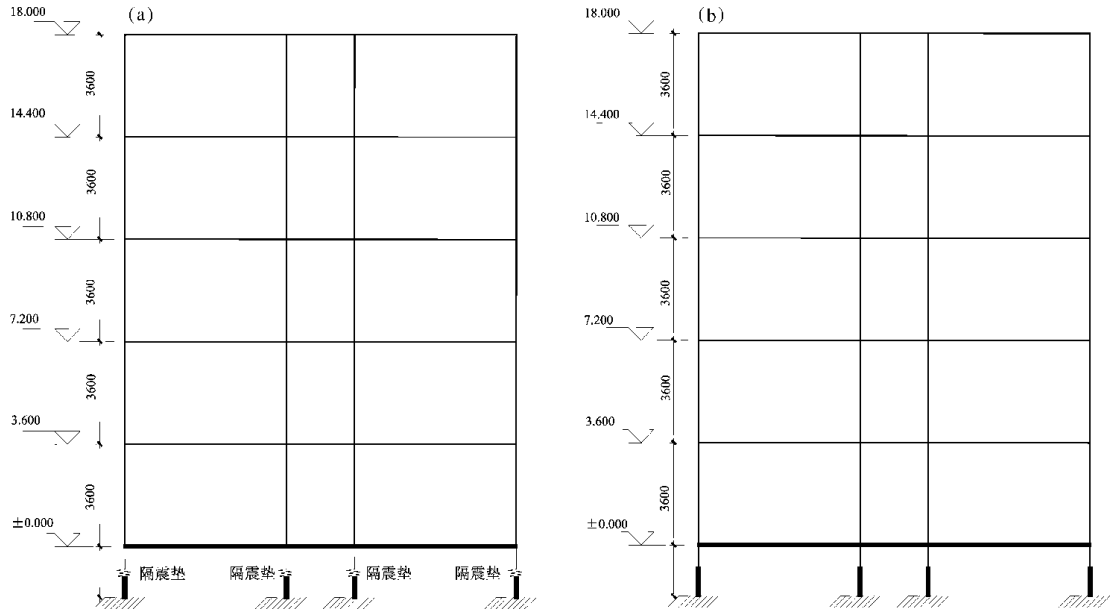


图 3 隔震结构 (a) 和非隔震结构 (b) 计算模型

Fig. 3 Calculation model of isolation (a) and non-isolation (b) structure

表 2 X 向减震系数

Tab. 2 The isolation factors in direction X

楼层	隔震结构楼层剪力/kN		非隔震结构 楼层剪力 $Q$ /kN	减震系数 ( $Q_2/Q$ )
	等效阻尼法 $Q_1$	滞回曲线法 $Q_2$		
6	413	795	2 291	0.34
5	851	1 519	4 212	0.36
4	1 222	2 003	5 640	0.35
3	1 523	2 234	6 403	0.34
2	1 792	2 250	6 882	0.32
1	2 199	2 394	8 879	0.26

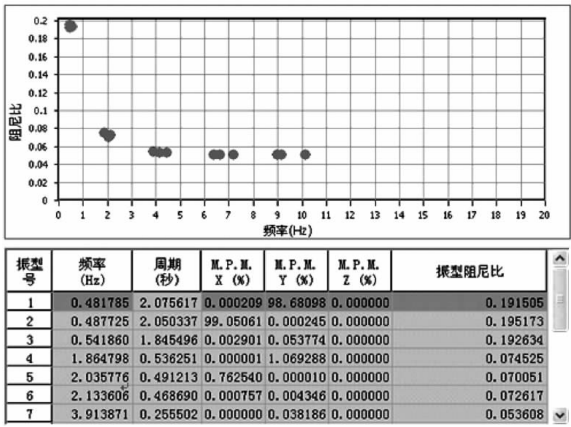


图 4 振型阻尼比

Fig. 4 The damping ratio of modes

(4) 根据表2可得到水平向减震系数为0.36, 根据《建筑抗震设计规范》(2010)第12.2.5式得到隔震后的水平地震影响系数最大值 $\alpha_{\max 1}$ 为 $0.46\alpha_{\max}$ 。

(5) 按多遇地震下的 $\alpha_{\max 1}$ , 进行上部结构的计算分析, 与普通结构相同。

#### 4 隔震计算分析时需注意的相关问题

(1) 根据《建筑抗震设计规范》(2010)进行弹性计算时, 简化计算和反应谱分析宜按隔震支座水平剪切应变为100%时的性能参数进行计算; 当采用时程分析法时, 按设计基本地震加速度输入进行计算。对比旧版规范, 相当于隔震层的等效刚度降低, 等效阻尼比增加, 总体上地震反应减小, 隔震效果加强, 设计时需注意这一变化带来的影响。由于我国采用三水准、两阶段的设计方法, 大震抗倒塌的弹塑性设计是通过小震弹性设计间接体现, 与其它国家的方法(类似于78版规范)有所不同。正是由于这种差异造成目前隔震和消能减震结构的性能不能充分发挥。

(2) 隔震层计算模型采用滞回曲线与采用等效线性化表示的计算结果有一定差异, 笔者认为主要是因为隔震层恢复力的非线性特征通过线性化等效引起。当实际的支座水平剪切变形小于隔震垫等效参数换算时所用的剪切变形时, 有可能会高估隔震支座在预期中、小震下的隔震效果, 另外通过时程分析计算更增加了地震波选取带来的差异性。

#### 5 结论

通过以上的分析和算例, 简要说明了在工程中进行隔震计算的一些简化方法和存在的问题,

具体设计时需要注意以下事项:

(1) 采用工程软件进行隔震计算时, 需充分了解计算程序的模型简化对计算结果带来的影响, 应根据需要, 选择适宜的计算方法。

(2) 隔震支座的力学关系可以采用滞回曲线或等效线性化的方法表示, 动力分析可以采用时程分析法或反应谱法, 根据目前软件和计算手段的普及程度, 建议隔震支座采用滞回曲线表示, 避免等效线性化带来的误差, 动力分析采用时程分析法。

(3) 鉴于计算模型的简化和地震波选取的不同给计算结果带来的离散型, 建议选取7条以上符合场地特征的地震波进行时程分析。同时也建议在条件许可时, 国家规范应根据场地等条件, 规定若干条必需选择的典型地震波, 以降低地震波选取的随意性。

#### 参考文献:

- 党育, 杜永峰, 李慧. 2007. 基础隔震设计及施工指南[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- 杜永峰, 党育, 李慧, 等. 2004. 基于非比例阻尼模型的隔震结构动力分析软件[J]. 建筑结构, 34(6): 32-35.
- 龚思礼. 2002. 建筑抗震设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 国家标准建筑抗震设计规范管理组. 2010. 建筑抗震设计规范 GB50011-2010 统一培训教材[M]. 北京: 地震出版社.
- 李爱群. 2007. 工程结构减震控制[M]. 北京: 机械工业出版社.
- 刘晶波, 杜修力. 2005. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社.
- 日本建筑学会. 2006. 隔震结构设计[M]. 刘文光译. 北京: 地震出版社.
- Park Y. J., Wen Y. K., Ang A. H-S. 1986. Random Vibration of Hysteretic Systems under Bi-directional Ground Motions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 14(4): 543-557.
- GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S].

## Simplified Computation Methods of Base Seismic Isolation Design

HUANG Rui

(Gansu Provincial Architectural Design & Research Institute, Lanzhou 730030, Gansu, China)

#### Abstract

For the base seismic isolation design, the different simplified methods of base seismic isolation computation and analysis are proposed with practical engineering software, which mainly include establishing the calculation model and calculating the seismic effect. The applicable conditions and difference in calculation results by different methods are discussed, which are illustrated by some examples, which could be a reference for the base isolation design.

**Key words:** base seismic isolation; seismic isolation calculation model; isolation analysis; damping factor