

文章编号: 1005—0523(2004)04—0026—04

建筑结构基础隔震体系研究进展

毛利军¹, 李爱群²

(1. 南京航空航天大学 土木系 南京 210018; 2. 东南大学 混凝土与预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京, 210096)

摘要: 综述了基础隔震体系的分类及各类基础隔震体系的特点、常用隔震体系分析模型和隔震层的滞回关系, 并对国内外现有隔震体系结构设计方法进行评析, 指出基础隔震体系有待进一步研究的课题, 及两个研究方向。

关键词: 基础隔震; 计算模型; 滞回曲线; 设计方法; 等效反应谱; 简易分析法

中图分类号: TU317+.1

文献标识码: A

1 基础隔震的分类及其特点

基础隔震结构按隔震层隔震支座的组成可分三类^[1~2]。

1.1 夹层橡胶垫基础隔震

夹层橡胶垫基础隔震是利用夹层橡胶垫水平刚度小的特点, 延长结构第一固有周期, 避开地震波卓越周期, 达到降低结构地震作用的目的。夹层橡胶垫支座可分为以下几类。

1) 普通夹层橡胶垫支座

普通橡胶垫支座由天然橡胶或氯丁二烯橡胶制造。由于其具有良好的线弹性性能, 普通夹层橡胶垫隔震支座不仅能显著降低结构的地震作用, 还能抑止结构的高阶反应。但由于其无阻尼, 大震时隔震支座位移较大, 实际工程中一般与各种阻尼器并行使用。

2) 高阻尼夹层橡胶垫支座

高阻尼夹层橡胶垫支座采用高阻尼橡胶材料制造。高阻尼夹层橡胶垫支座兼有隔震器与阻尼器的作用, 其阻尼比可达 0.25, 可以在隔震系统中单独使用。

3) 铅芯夹层橡胶垫支座

在普通夹层橡胶支座中间开孔部位灌入铅, 形成铅芯夹层橡胶垫支座。铅芯橡胶支座不仅有较高的阻尼比, 还有适当的早期刚度, 提高了控制风反应和抵抗地基微震的能力。铅芯夹层橡胶垫支座兼有隔震器和阻尼器的作用。

4) 其他类型夹层橡胶垫支座

根据夹层橡胶垫中阻尼装置, 还有多种夹层橡胶支座, 如非满高铅芯夹层橡胶垫支座、带限位钢棒夹层橡胶垫支座。这些隔震支座与铅芯夹层橡胶支座有相似的隔震特点, 但在经济性及与其他隔震支座配合使用时又有各自的特点^[3~4]。

1.2 滑移、转动基础隔震

滑移、转动基础隔震是利用上部结构与基础之间的解耦, 控制结构底部剪力, 达到降低结构地震作用的目的, 其支座形式有如下几类。

1) 普通滑移支座

以砂垫层、石墨垫层滑动支座以及用不锈钢板和聚四氟乙烯为滑动材料的支座, 都属于普通滑移支座。这种支座没有明确的自振周期, 对含各频段的地震波都不敏感, 对各类场地地震波都有隔震效果。这种支座的剪力位移滞回曲线为强非线性库仑摩擦曲线, 能激起结构的高频反应。由于支座本身不具位移恢复能力, 隔震层最大位移和残留位移可

收稿日期: 2004—02—15

作者简介: 毛利军(1975—), 男, 山东泗水人, 南京航空航天大学博士后。

能较大,一般要和其他恢复力装置配合使用.

2) 回弹滑移支座(R-FBI 系统)

回弹滑移支座由一组重叠放置又能互相滑动的四氟乙烯薄板和橡胶核组成. 四氟乙烯薄板中央及四周带孔,橡胶核放置其中. 橡胶不承受竖向压力,其作用是防止出现局部过大位移,同时为支座提供恢复力. 四氟乙烯板间的摩擦力对结构起着控制风和抗地基微震动的作用.

3) 滚动支座

滚动支座又包括:双向滚轴加复位消能装置、滚球加复位消能装置、滚球带凹形复位板、碟形和圆锥形支座等几种形式. 研究表明,设计合理的滚动支座具有良好的稳定性、限位复位功能和显著的隔震效果^[5].

4) 支承式摆动隔震支座

支承式摆动隔震支座是结构支承在两端呈球面状可摆动的端柱群上,仿生人体腿骨与肌肉共同作用,支承上部结构. 日本的试验表明该隔震形式可使地震作用降低 60%^[6].

1.3 混合基础隔震

混合基础隔震是充分利用夹层橡胶垫隔震与滑移隔震在经济和技术上的优点,组成的基础隔震系统. 混合基础隔震一般没有独立的隔震支座,按夹层橡胶垫支座的组合方式,混合基础隔震可分为以下两种.

1) 并联基础隔震^[3~4]

滑移支座与橡胶垫支座并列设置,共同承受上部结构的重力荷载,形成并联基础隔震. 在该隔震系统中,滑移支座起到阻尼器的作用,橡胶垫支座可采用普通夹层橡胶垫.

2) 串联基础隔震^[3~4]

在隔震层中将橡胶垫与滑移支座上下设置,形成串联基础隔震. 串联基础隔震在构造形式上又可分为分层式和一体式串联基础隔震. 串联基础隔震体系的隔震层初始刚度小,多遇水平地震作用下隔震效果好;罕遇水平地震作用下,滑移支座滑动,支座最大剪力受到控制,橡胶垫侧移不会过大,隔震层的可靠性得到保障.

2 基础隔震的计算体系

2.1 基础隔震的计算模型

1) 单质点模型

夹层橡胶垫基础隔震体系隔震层刚度一般远

小于上部结构的层刚度,在地震作用下,上部结构可视为整体平动,研究隔震层剪力和位移可采用如图 1 所示的单质点模型.

2) 双质点模型

如图 3 所示的双质点模型也是隔震体系地震反应分析的基本模型之一. 利用该模型可分析隔震体系上部结构与隔震层间的相互作用,研究与单质点模型地震反应的异同.

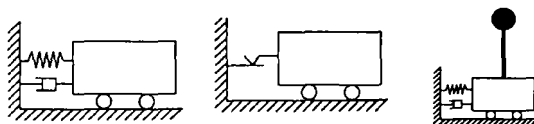


图 1 基础隔震体系单质点模型

图 2 滑移基础隔震体系单质点模型

图 3 基础隔震体系双质点模型

3) 多质点模型

单质点和双质点模型可以给出隔震结构某些地震反应的很好近似,然而,对另外一些反应特性则必须将结构按如图 4 所示多质点模型研究,如隔震结构层间剪力及其分布、层间位移、楼板谱、上部结构高阶振型反应、非线性结构中各振型能量的传递、基础的提高与倾覆等问题^[7].

4) 无限质点模型

一种更复杂的隔震分析模型是如图 5 所示的无限质点模型. 该模型将上部结构视为无限自由度均匀连续的竖向剪切梁结构. 采用该模型可利用解析方法更系统地研究结构参数和隔震系统参数在更大范围内变化时,隔震结构的地震反应特点^[7]. 上部结构均匀或某些特殊光滑变化的质量分布和刚度分布结构也适用该模型进行分析^[8](SU, 1989).

5) 其他模型

除以上分析模型,针对不同情况隔震结构计算和研究还会采用其他分析模型,如考虑结构质量和刚度偏心的多质点扭转模型^[6];考虑隔震结构空间相互作用和隔震支座相互影响的空间隔震结构分析模型^[9].

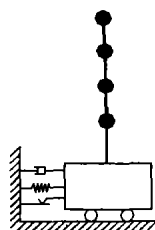


图 4 基础隔震体系多质点模型

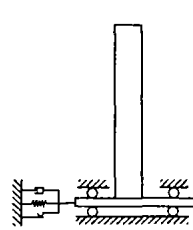


图 5 基础隔震体系无限质点模型

2.2 隔震层的滞回特性

隔震层的滞回特性由隔震支座决定,其简化的滞回曲线有以下几种.

1) 线弹性滞回曲线

弹性曲线是最简单的滞回曲线,线性隔震结构隔震效果好,且高阶反应小,但由于无阻尼参与,隔震层位移较大,一般不宜单独采用.普通橡胶垫支座的滞回曲线为线弹性.

2) 粘滞型滞回曲线

在线弹性隔震层附以粘滞阻尼器,隔震层滞回曲线为粘滞型滞回曲线.阻尼器布置多,滞回曲线越饱满,结构的高阶反应变的越显著.

3) 双线性滞回曲线

在线弹性隔震层附以铅挤压阻尼器、滑移摩擦阻尼器或钢阻尼器,隔震层滞回曲线可简化为双线性滞回曲线.阻尼器的数量可决定滞回曲线的屈服系数和非线性系数.该滞回曲线模型最常用.

4) 库仑摩擦滞回曲线

滑移隔震支座的滞回曲线可视为库仑摩擦滞回曲线.该曲线无恢复力特性,结构残留位移可能较大,由于该曲线的强非线性,结构的高阶反应较大.该类型隔震层一般应附以恢复力装置.

5) 其他类型滞回曲线

普通夹层橡胶支座附以特定阻尼器还会形成其他类型恢复力曲线,如 Ramberg-Osgood 型、刚度硬化型、I 型阻尼器型等滞回曲线.这些滞回曲线在隔震分析中较少用到.

3 基础隔震结构的设计

相对于滑移基础隔震,橡胶垫基础隔震技术已趋于成熟,不少国家的抗震规范都对其作了规定.各国对隔震结构地震反应分析,特别是用拟静力法进行隔震分析,所采用的方法不尽相同.其中比较典型的隔震结构设计方法有等效反应谱法和简易分析法^[1,6,10].

等效反应谱法采用双线性隔震体系分析模型,首先根据设计条件设定双线性基本参数,由初始假定的隔震层最大位移计算隔震结构等效周期和等效阻尼,进而求得结构反应降低系数,由反应谱求出隔震体系的反应.如果求得的隔震层位移与初始假定相差较大,应重新假定隔震层最大位移进行计算,直到两者相差较小.该方法与传统结构计算方法衔接好,概念明确,参数较少使用方便,普遍被各国抗震规范采用.

另一种比较典型隔震结构分析是日本的简易分析法.该方法应用能量守恒来预测隔震结构的反应,每一类场地给出一个能量输入,由此得到的谱曲线是光滑连续的,在原理上不需迭代便可以进行隔震参数的设计.简易分析法给出谱图的另一特点是,一般 5 倍于橡胶隔震器群刚度以上的阻尼器刚度特征没有在谱图上显式表现,而是在建立最大塑性变形倍数与平均累积塑性变形倍数关系时,在统计意义上予以内含^[1].

我国抗震设计规范规定的隔震设计与日本有所不同,但反应谱法仍是其基本分析方法.除了反应降低系数的计算与日本反应谱法不同外,隔震层等效刚度与等效阻尼应按规范规定试验直接获得.

美国统一建筑规范(UBC)和美国加州建筑设计规范对按拟静力法进行隔震结构设计提出了严格的要求,如:结构距活动断层距离、场地条件、隔震结构周期、结构高度和规则性、隔震体系的侧向位移、隔震体系的复位能力等条件.只要其中之一不满足要求,就必须采用动力分析法进行计算设计.

此外,Skinner 等^[7]提出的,对 El-Centro 地震反应谱进行幅值和周期修正的隔震结构初步设计法,在本质上类似于日本的反应谱法,需要对隔震层进行等效线性化,并通过参数迭代计算满足其自身的自恰性.

4 问题及讨论

隔震理论与技术虽取得了长足的进步,但问题仍然不少.我国抗震规范中,隔震层等效刚度和等效阻尼按规范指定加载幅值与频率的试验确定,根据试验确定的参数对隔震结构进行分析,进而得出隔震层位移与剪力.但由此得出的隔震层位移与频率并不一定与试验条件一致.这表明,由于没有考虑隔震层的非线性,导致规范本身的非自恰性.

日本的简易分析法将隔震层简化为双线性模型,由内含的统计关系式保证了规范自身的自恰性.但该方法首先要确定地震输入总能量,且不说输入能力本身就难以确定,实际结构最大反应未必与输入总能量总是相关的.有研究表明,结构最大反应与地震输入瞬时能量有较大的相关性,而这方面的研究还很不够^[11].

反应谱法是隔震结构计算设计的另一简便方法,但该方法简单地采用了等效周期和等效阻尼的

概念,并采用统一的以等效阻尼为参数的结构反应降低系数公式,其应用隔震参数范围和精度值得进一步研究.

在其他领域,建筑结构滑移隔震和竖向隔震的研究相对较少,在规范化方面还有许多工作去做.

结构滑移隔震主要问题在于,由于无位移恢复能力,隔震层位移不宜控制.在规范化方面与现行计算设计方法衔接困难.文^[12]提出用反应谱法进行滑移隔震体系计算的新思路,并通过统计反应谱,对这一方法的可行性与可靠性进行了研究.研究表明:滑移隔震体系参数较少,应用反应谱法比较方便;对在卓越周期反应较大的结构,滑移隔震能显著降低其地震作用,其最大反应由摩擦系数决定,故滑移隔震体系采用反应谱分析方法,表现出比一般结构反应谱计算更高的可靠性.因此,反应谱法可成为滑移隔震体系计算和设计的一种简易方法.

对于竖向隔震体系^[13].在技术方面,竖向隔震的障碍在于,难于在提供有效竖向支承的前提下,大幅提高隔震结构竖向名义周期.研究表明,隔震参数设计不合理反而会导致负作用,竖向基础隔震不能简单采用未经设计的隔震装置.在应用方面,由于竖向地震作用对高耸、大跨结构影响比较显著,而对一般宜采用隔震的底层普通建筑结构影响不显著,竖向基础隔震还没有应用到普通建筑结构中.

由此可见,基础隔震技术可在两个方向进行研究.一个方向是,简化基础隔震措施,提高结构基础隔震的可靠度,降低隔震层造价和上部结构造价,在中低烈度区一般建筑结构中推广使用隔震技术;另一个方向是,不必考虑或较少考虑隔震成本,最

大程度完善和优化包括结构竖向基础隔震在内的基础隔震理论和技术,确保有特殊要求或重要建筑结构在地震作用下的最大安全性和可靠性.

参考文献:

- [1] 唐家祥,刘再华. 建筑结构基础隔震[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1993.
- [2] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社,1997.
- [3] 张文芳. 多层砖房基础滑移隔震的试验理论分析和应用研究[学位论文]. 南京,1999,1.
- [4] 赵世峰. 夹层橡胶垫基础隔震结构的研究与应用[学位论文]. 南京,2001,6.
- [5] 李大望,周锡元,等. FPS 隔震结构的性态和地震反应分析[J]. 工程抗震,1996(3).
- [6] 王松涛,曹资. 现代抗震设计方法[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [7] [新]R. I. Skinner, W. H. Robinson, G. H. Mc very 著,谢礼立 译. 工程隔震概论[M]. 北京:地震出版社,1996.
- [8] L. Su, G. Ahmadi and I. G. Tadjbakhsh, A comparative study of performances of various base — isolation systems : part I : shear beam structures, J. Eng. mech. Div, ASCE, 1989.
- [9] [日]武田寿一 主编,纪晓惠,等 译. 建筑隔震防震与控震[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [10] [日]日本免震协会,叶列平 译. 图解隔震结构入门[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [11] 王亚勇. 关于设计反应谱、时程法和能量方法的探讨[J]. 建筑结构学报,20(1).
- [12] 毛利军,李爱群. 基础滑移隔震体系的地震反应谱[J]. 土木工程学报,2004,2.
- [13] 毛利军,李爱群. 结构竖向震动控制研究[C]. 第六届地震工程会议论文,2002. 11.

Progress of Research for Base Isolation System of Building

MAO Li-jun¹, LI Ai-qun²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing 210018; 2. Key Lab of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education China, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this paper, the characteristics of versatile base isolation methods, the analysis models of base isolation systems in common use and the hysteresis profile of isolation layers were summarized. The current design methods of base isolation structure in home and foreign were reviewed. The subjects of further studies were discussed and two research directions were pointed out.

Keywords: base isolation; compute model; hysteresis profile; design methods; equivalent spectrum; simplified analysis method.