

高层隔震结构体系的研究及展望

杨 芳

(福建工程学院土木工程系,福州 350108)

摘 要:结构振动控制是防震减灾技术中的前沿领域,隔震作为此领域中较为成熟的技术有着广阔的应用前景,高层隔震结构体系的研究和应用代表了现阶段隔震技术的发展方向。阐述了高层隔震结构体系的研究与应用现状,进一步提出了高层隔震结构体系存在的问题,同时对完善高层隔震结构体系要解决的几个问题做了展望。

关键词:隔震技术;高层隔震结构;减震机理

中图分类号:TU375

文献标识码:B

引 言

结构隔震技术是一种发展较快的地震防护技术。隔震的概念早在 20 世纪初就有人提出,但直到 20 世纪 20 年代才开始在工程上尝试应用。它是在建筑物基础与上部结构之间设置一层隔震层,把房屋结构与基础隔离开来,隔离地面运动能量向建筑物的传递。在强风和小震作用下,结构具有足够的水平刚度,上部结构的水平位移和加速度较小,不影响正常的使用要求;而在大震作用下,其水平刚度较小,延长了结构的周期,从地震加速度反应谱可知,结构所受地震作用变小,且隔震层的阻尼不仅限制了隔震层的大变形,还耗散了大量的地震能量,进一步减少了结构的地震作用^[1]。

目前,隔震技术已经较为成熟,成为很重要的一种结构控制技术。采用基础隔震技术建造的现代建筑已经遍布全世界,日本是目前世界上拥有隔震结构最多的国家,1995 年神户大地震后每年约有 150 栋新建隔震结构。美国也有大量的隔震结构,主要集中在加州地区。除了日本和美国,意大利和新西兰也拥有隔震结构,一些发展中国家,如智利、印尼和亚美尼亚等,也新建了具有示范意义的隔震结构。我国自 1993 年在汕头建成首幢橡胶垫隔震建筑以来,橡胶垫隔震装置已先后在西昌、广州、太原、杭州、北京等地的 500 余项工程中得到应用^[2-3]。不少隔震房屋经受了强地震的考验,

表现出良好的抗震性能。我国及欧美一些国家已颁发了隔震结构的技术规程,可以预测的是,基础隔震技术将越来越多地用于不同形式的结构上和越来越高的建筑上,以保证建筑物内的人员安全、财产安全或设施的正常运行。

1 高层隔震结构体系的研究与应用历史及现状

近年来,高层和超高层隔震结构体系的研究和应用在世界各国逐渐得到了重视,也代表了现阶段隔震技术的发展方向,国外在不少高层建筑中也采用隔震技术。在我国,随着大量的高层、超高层建筑不断涌现,也开始了高层建筑隔震的研究和应用。截至 2001 年底,全国 9 层以上高楼超过 4.66 万幢,其中 100 米以上的超高层建筑 850 幢^[4],据中国建筑学会统计,截至 2004 年底,150 米以上超高层建筑 153 幢^[5]。隔震技术在高层建筑中应用的合理性来源于多个方面,其中比较主要的方面在于隔震层同时也是绝好的消能减震层,结构的大部分变形集中在隔震层,使得隔震层中阻尼器的消能作用具有更高的效率。在隔震层造价增加不很显著的情况下,无疑具有更好的经济性,并且不需要外部能源,技术成熟,易于工程实现。

在理论研究上,Kelly 和周锡元等曾对规则型隔震结构,用上部一个自由度和隔震层组成的双自由度模型

收稿日期:2011-09-21

作者简介:杨芳(1972-),女,福建福州人,讲师,博士生,主要从事结构抗震与减隔震方面的研究。(E-mail)wendyyang130@163.com

进行过讨论,给出了必要的计算公式^[6-7]。对各种中低层规则型隔震建筑,应用这些公式可获得满意的结果。近年来,隔震技术逐渐被应用到高层建筑中,对于高层隔震体系,上部结构的高阶振型效应不能忽略,此时上部结构应用单自由度模型将产生较大误差。刘文光等^[8]提出用三质点剪切型简化计算模型,并通过高宽比影响系数对剪切型计算模型得到的剪力系数进行非线性放大。付伟庆等^[9]提出了一种高层隔震结构的三自由度等效模型,这种新的三质点模型,由上部结构等效两质点和隔震层一个质量点组成,考虑了上部结构的高阶效应不能忽略,很好地等效了原结构。

1980年,国外 Kelly 和 Bueuke 等进行了基础隔震房屋模型的地震模拟振动台试验,研究隔震结构可能发生的破坏形态。1994年,AL-Hussai 等对摩擦基础隔震结构模型进行了振动台研究。1999年,猿田正明等对轻量建筑物隔震结构进行了振动台试验研究。坂本功等对2层木结构的隔震结构房屋进行了振动台试验,这是世界上首次对原型隔震结构进行的地震模拟振动台试验^[10]。我国仅完成少量的隔震结构的试验研究。1996年,广州大学周福霖等进行了采用基础隔震的5层混合结构体系的三维地震模拟振动台试验。1999年,同济大学吕西林和日本藤田公司合作完成了小高宽比的3层钢框架结构多向地震模拟振动台试验,试验对比了不同铅芯橡胶隔震支座的隔震效果^[11]。2002年,广州大学刘文光博士与日本藤田技术中心研究人员合作,完成了高宽比为5的5层塔型钢结构隔震模型结构的单向振动台试验^[12-13]。哈尔滨工业大学王铁英等对一幢三楹二跨,高宽比为3:1的六层框架结构进行了振动台试验^[14-15];哈尔滨工业大学付伟庆等对高宽比为5的钢框架进行了振动台试验^[16-17]。他们的试验结果都表明高层隔震结构的减震效果良好,但同时存在一个问题是高层建筑由于高宽比相对较大,倾覆效应明显。

熊仲明,王清敏等^[18]对基础滑移隔震房屋抗倾覆稳定性进行了研究,计算倾覆力矩时用基底摩擦力作为上部结构的惯性力上限并最终给出了滑移隔震结构抗倾覆稳定条件。哈尔滨工业大学颜学渊等^[19-20]开发了一种三维抗倾覆支座并对其进行了试验研究,同时应用这种具有自主知识产权的被动控制装置——碟形弹簧三维隔震抗倾覆支座(3D-BIORD-DS),对一高层钢框架模型结构进行了隔离三向地震动激励的振动台试验。

国外学者对高宽比限值的研究很少,但是对基础隔震结构的位移控制和基础脱离现象做了研究。1990年,澳大利亚的阿德莱德大学的 Griffith, Machael C. 和

Aiken, Jan D 等^[21]研制了限制隔震结构水平位移的装置和抵抗隔震结构基础脱离的装置(装置可以为隔震结构提供自我保护),并进行了地震模拟试验。

国内目前对大高宽比隔震建筑领域的研究没有系统地展开。李宏男、王苏岩等^[22]对基础滑移摩擦隔震结构的高宽比限值进行了探讨,并给出了高宽比时程分析平均值和设计建议值。李宏男、吴香香等^[23-25]在有关文献的基础上,重点分析了竖向地震动对隔震结构高宽比限值的影响,并考虑了场地条件、地震强度等因素和竖向地震动的综合影响,首次给出了考虑水平和竖向地震动、地震强度以及场地条件等因素影响的高宽比限值的定量取值。祁皓等^[26-28]研究发现,当控制条件为支座不产生拉应力时,高宽比限值随隔震结构周期的增加而增加;当控制条件为支座压应力不超过容许值时,高宽比限值随隔震结构周期的增加而减小。存在一个最大的隔震结构周期使高宽比限值等于零或隔震层位移超过容许值。将隔震结构的周期与临界周期和最大隔震周期比较,推导了隔震结构高宽比限值的显式并给出了针对不同建筑类别、不同设防烈度、不同场地条件和不同隔震层阻尼比的高宽比限值,给出了高宽比限值的设计建议值,同时还按设计规范提供的结构周期计算公式计算了隔震结构的高度限值。还提出了在边支座上添加竖向钢筋以提高隔震结构高宽比限值的构造措施。

《抗震规范》^[29]规定,建筑结构隔震设计的计算分析,一般情况下宜采用时程分析法进行计算。时程分析法能计算出结构线性和非线性地震反应随时间的变化规律,但需要借助计算机程序进行计算,设计计算比较繁琐。现在应用的非线性分析程序有 ETABS 和隔震计算程序 3D-BASISTABS1.1 等。在隔震结构的方案设计阶段,对一些特殊的隔震房屋,用简化的计算方法就显得更方便有效,《抗震规范》给出了一种隔震结构的简化计算方法,适用于多层砌体结构及与砌体结构周期相当的钢筋混凝土结构,结构体系规则,变形基本为剪切型,建筑场地土为 I, II, III 类。对工程设计人员而言,概念清晰,计算简单的设计方法更易于为他们接受和使用,但对于高层隔震结构,因结构变形有多阶振型和弯曲变形的参与,显然采用隔震结构的简化计算方法不合适。国内对高层隔震结构设计这方面的研究不成熟。

2 高层隔震结构体系存在的问题

高层隔震建筑的特点是高宽比较大,水平向的地震作用和风荷载将成为其结构体系成型的主导因素,相对于一般中低层隔震结构,其主要存在以下一些问题:

(1) 对于高层隔震结构,上部结构不能满足刚体运动的假定,高阶振型和弯曲的影响不能忽视,不能简单地以纯剪切模型和第一振型为主确定结构反应。

(2) 由于高层、超高层结构的水平地震力产生的倾覆力矩比较大,隔震支座可能会有拉应力的出现,如何保证结构的抗倾覆稳定性和控制隔震支座的拉应力也是一个重要问题。

(3) 高层、超高层结构的自振周期都比较长,通常会到 2-3s,所以必须进一步延长高层、超高层隔震结构的基本周期,以达到更好的隔震效果,这样便要求隔震层的水平刚度和竖向刚度比相对中低层隔震结构要进一步减小,使得对隔震支座的构造和各项力学性能的要求有较大的提高。

3 展 望

建筑结构采用隔震措施后,与相同的非隔震结构相比,将具有较长的周期(通常是原周期的 2~3 倍)。根据反应谱理论,层数较少的非隔震结构周期较短,地震作用较大,而隔震建筑的周期明显延长,使得地震作用显著减小。这是目前对隔震建筑原理的一般解释,并由此认为隔震建筑一般适用于层数不多的建筑。近年来,国内外在不少高层建筑中也采用隔震技术,传统的基于延长周期的隔震原理似乎无法解释隔震技术在高层建筑中应用的合理性,但是经过合理设计的高层隔震结构能够具有明显的减震效果。多振型参与振动是高层建筑的振动特点。因此,对于长周期高层建筑,在利用反应谱进行隔震效果分析时,必须要充分考虑高阶振型影响的修正问题,这就需要对高层建筑减震机理进行系统研究,与中低层结构相比,可能存在多振型减震现象。还需要建立一种新的适用于高层隔震结构的计算模型。

目前,中低层隔震结构的设计已较为成熟并写入《抗震规范》第 12 章“隔震和消能减震设计”,因此应尽快发展基于性能的隔震结构设计方法,主要工作之一是研究隔震建筑绝对加速度响应的计算方法,在理论分析的基础上,结合我国实际情况,提出一套简单实用的高层隔震结构设计方法是需要深入研究的问题。

参 考 文 献:

- [1] 周锡元, 阎维明, 杨润林. 建筑结构的隔震、减振和振动控制[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(2): 2-12, 26.
- [2] 祝 勤. 隔震建筑隔震器的施工[J]. 浙江建筑, 2000, 97: 24-25.
- [3] 孟美莉, 张德强. 我国建筑物隔震与减震研究的现状

与展望[J]. 河北建筑科技学院学报, 2003, 20(1): 62-64.

- [4] 付伟庆. 磁流变智能隔震与橡胶垫高层隔震的理论及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [5] 中国建筑学会建筑结构分会高层建筑结构委员会. 中国大陆 2004 年底已建成的 150m 以上的高层建筑统计[J]. 建筑结构, 2006, 41(4): 103-109.
- [6] Kelly J M. Earthquake Resistant Design with Rubber [M]. Second Edition, Springer Verlag London Limited, 1997.
- [7] Li Zhongxi, Zhou Xiyuan. Vibration property and earthquake response analysis method for regular isolated building[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(2): 33-41.
- [8] 刘文光, 杨巧荣, 周福霖. 大高宽比隔震结构地震反应的实用分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(4): 115-121.
- [9] 付伟庆, 王焕定, 丁琳, 于德湖. 规则型高层隔震结构实用设计方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007(10): 1541-1545.
- [10] Akia Teramura, Tashikazu Takeda, Tomohiko Tsunoda, et al. Study on Earthquake Response Characteristics of Base Isolated Full Scale Building [C]. Proceeding of 9th WCEE. August 2-9, 1988, Tokyo-Kyoto, Japan. 1988(5): 639-698.
- [11] Sajal K Deb, Dilip K Paul. Response of Buildings Isolated by Sliding-Elastomer Bearings Subjected to Bi-directional Motion [C]. Proceeding of 12th WCEE, Auckland, 2000(6): 239-256.
- [12] 刘文光, 何文福, 霍达等. 大高宽比隔震结构双向输入振动台试验及数值分析[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(6): 597-612.
- [13] 刘文光, 闫维明, 霍达等. 塔型隔震结构多质点体系计算模型及振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(5): 64-70.
- [14] 王铁英, 王焕定, 刘文光等. 大高宽比橡胶垫隔震结构振动台试验研究(1) [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(12): 2060-2064.
- [15] 王铁英, 王焕定, 刘文光等. 大高宽比橡胶垫隔震结构振动台试验研究(2) [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(2): 196-200.
- [16] 付伟庆. LRB 隔震结构模型振动台试验研究(1) [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(2): 201-205.
- [17] 付伟庆. LRB 隔震结构模型振动台试验研究(2)

- [J]. 哈尔滨工业大学学报 2007, 39(4): 521-524.
- [18] 熊仲明, 王清敏, 丰定国, 等. 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: 自然科学版, 1998(3): 287-300.
- [19] 颜学渊. 高层结构三维基础隔震抗倾覆试验研究[J]. 建筑结构学报 2009, 30(4): 1-8.
- [20] 颜学渊. 三维隔震抗倾覆结构振动台试验[J]. 工程力学 2010, 27(5): 91-96.
- [21] Ian D Aiken, Douglas K Nims, Andrew S. Whittaker, and James M. Kelly. Testing of Passive Energy Dissipation Systems [R]. EARTHQUAKE SPECTRA, VOL. 9, NO. 3, Earthquake Engineering Research Institute California, August(1993).
- [22] 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.
- [23] 吴香香, 孙丽, 李宏男. 竖向地震动对隔震结构高宽比限值的影响分析[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2002, 18(2): 81-84.
- [24] 李宏男, 吴香香. 橡胶垫支座隔震结构高宽比限值研究[J]. 建筑结构学报 2003, 24(2): 14-19.
- [25] 吴香香, 李宏男. 竖向地震动对基础隔震结构高宽比限值的影响[J]. 同济大学学报 2004, 32(1): 10-14.
- [26] 祁皓, 范宏伟. 基础隔震结构高宽比限值的研究[J]. 建筑结构学报 2004, 25(6): 52-58.
- [27] 祁皓, 范宏伟. 基于结构设计的基础隔震结构高宽比限值的研究[J]. 土木工程学报 2007(4): 13-20.
- [28] 祁皓, 林云腾. 添加钢筋提高隔震结构高宽比限值的研究[J]. 地震工程与工程振动 2005(1): 120-125.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

Research and Prospect of High-rise Isolated Structure System

YANG Fang

(Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The structural vibration control is the frontier field in seismic prevention and mitigation technology. Seismic isolation has broad application prospect as a mature technology in this field. The research and application of high-rise isolated structure system represent the development direction of seismic isolation technology at present stage. The research and application present situation of high-rise isolated structure system are illustrated. The problems existed in high-rise isolated structure system are further discussed. Simultaneously, the problems are made a prospect, which need to be solved to improve the high-rise isolated structure system.

Key words: seismic isolation technology; high-rise isolated structure; seismic dissipation mechanism