

某体育馆隔震结构设计与应用

蒋金梁, 任华时

(浙江大学建筑设计研究院, 杭州 310027)

[摘要] 隔震结构设计属于结构性能设计范畴,通过合理设计隔震层,减少上部结构地震作用,以达到预期设计要求。结合工程实例,选用橡胶(铅芯)隔震支座作为隔震装置,采用简化方法和时程分析方法分析其隔震性能,重点分析了隔震结构减震效果和隔震层位移,均能满足规范要求。

[关键词] 体育馆; 隔震结构; 隔震支座; 简化方法; 时程分析法

中图分类号: TU375.4 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)01-0014-03

Design and application of isolation structure on a gymnasium

Jiang Jinliang, Ren Jianshi

(Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The design of isolation belongs to the performance-based seismic design. The rational isolation layer is required to decrease the seismic action, in order to achieve the expected design requirement. Based on an engineering project, the lead rubber bearing was applied to the seismic isolator. The simplified method and time history analysis were applied to analyze the isolation performance, including the damped effect and isolation layer displacement. The design reveals that they can meet code requirements.

Keywords: gymnasium; isolation structure; isolation bearing; simplified method; time history analysis

0 引言

周期比较短的多层(小高层)建筑,比较适合通过设置隔震体系,以减小其地震作用。在隔震结构中,隔震装置具有变化的水平刚度,在小震及风荷载作用下具有足够的水平刚度,在中大震时,隔震装置的水平刚度变小,使隔震结构自振周期变长,远离上部结构的自振周期和场地卓越周期,从而将部分地震能量“阻隔”,减小输入到结构的地震能量^[1,2]。

某体育馆(图1)是四川省青川县灾后恢复重建项目之一,建筑面积 14 382.54 m² (其中地上 13 294.74m²,局部地下室 1 087.80m²),上部结构共 4 层,局部 2 层,层高均为 4.2m,室内外高差为 0.3m,建筑物高度为 17.1m。主要功能为体育中心,包括球类场馆、健身房和游泳池等。

工程建筑结构安全等级二级,设计使用年限为 50 年。抗震设防烈度为 7 度,第二组,设计基本地震加速度值为 0.15g,建筑场地类别为 II 类,特征周期为 0.40s。结构抗侧体系采用现浇钢筋混凝土框架-剪力墙结构,为了增加结构抗扭刚度,在楼梯间增设剪力墙。主体育馆、游泳馆及屋面构架等大空间场馆屋面采用钢结构网架,其余采用现浇混凝土肋梁楼盖。

为了提高结构的抗震性能,工程采用隔震技术,在上部结构与基础之间设置隔震层。抗震等级:按传统抗震设计,工程属于大跨度体育馆建筑,框架抗



图 1 体育馆效果图

震等级为二级,剪力墙抗震等级为二级;采用隔震结构后,框架抗震等级为三级,剪力墙抗震等级为三级。目前该工程已竣工,并交付使用,期间经历多次余震,从现场反馈情况看,达到了预期效果。

1 采用隔震结构技术的可行性

工程抗震设防烈度较高,按汶川地震的救灾经验,体育馆建筑是抗震救灾时灾民安置的一个重要场所。该体育馆作为“智慧岛”教育园区的一个重要建筑,并兼具青川县体育馆的功能,在当地被赋予特别重要的地位。

工程体型基本规则,平面尺寸为 72.0m × 83.5m,高宽比为 0.238,其变形特征接近剪切变形。采用 SATWE 软件对结构(非隔震)进行分析,结构基本周期为 0.51s,基本周期与场地特征周期接近;风荷载作用时结构底部剪力设计值约占结构总重力的 0.6%,基础采用柱下独立基础(局部筏板)+连

作者简介:蒋金梁,硕士,高级工程师,Email:hzjiangjinl@163.com。

系梁,整体性较好,能确保基础的稳定性,因此工程采用隔震技术是可行的。

2 隔震装置和隔震方法选择

为了满足结构设计的要求,首先,隔震装置要能承受上部建筑物的重量,并且在竖向荷载作用下不能有过大变形;其次,为了延长结构的振动周期,减小上部结构的加速度反应,隔震装置水平向需具有充分的柔度;第三,为了使振动衰减,限制结构的位移,还必须有一定的阻尼^[2]。另外,为了使隔震装置在设计使用年限内正常工作,还需具有规定的耐久性和耐火性等性能要求。国内外几种常用的隔震装置及有无水平恢复力见表 1。

表 1 隔震装置

隔震方法	隔震装置	水平恢复力
叠层橡胶支座隔震	铅芯叠层橡胶支座	有
	高阻尼叠层橡胶支座	有
	普通叠层橡胶支座 + 阻尼器	有
摩擦滑移隔震	摩擦摆支座	有
	石墨、砂石	无
	滚轴支座	无
组合隔震	普通叠层橡胶支座 + PTFE 支座 或滚珠支座 + 阻尼器	有
智能隔震	普通叠层橡胶支座 + 磁流变阻尼	有

目前实际应用的隔震装置基本有三大类,即叠层橡胶支座、摩擦滑移隔震元件以及滚动摆(滚珠、滚轴)元件,此外,还可利用柔性柱等元件来达到隔震的目的。

工程选用叠层橡胶支座隔震,隔震装置选用普通叠层橡胶支座和铅芯叠层橡胶支座。普通叠层橡胶支座不提供阻尼,铅芯叠层橡胶支座可提供阻尼。因结构平面布置基本对称,隔震支座布置亦按对称布置,并将铅芯叠层橡胶支座布置在建筑周边和角部,以提高结构的抗扭刚度。隔震支座平面布置见图 2。

3 隔震支座性能及平面布置

隔震支座需要长期承受竖向荷载,且在竖向荷载作用下不会发生大的竖向变形和失稳。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)(2008 年版)^[1](简称抗震规范)规定橡胶隔震支座的竖向平均压应力限值:乙类建筑为 12MPa,丙类建筑为 15MPa,本工程抗震设防类别为丙类,考虑其屋顶采用大跨度结构,隔震支座竖向平均压应力设计限值取 12MPa(按乙类建筑)。依据厂家提供的橡胶隔震支座的设计竖向承载力和上部柱底设计荷载(非隔震),隔震支座平面布置见图 2。天然橡胶和铅芯橡胶隔震支座数量及力学性能见表 2、3。

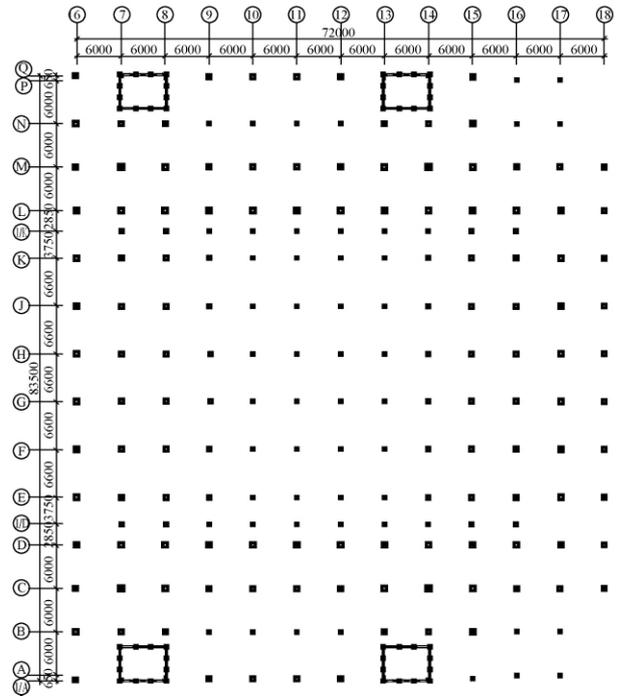


图 2 隔震支座平面布置图

表 2 天然橡胶隔震支座力学性能

型号	设计承载力 /kN	个	水平等效刚度 /kN/m	等效阻尼比
GZP350	1 152	100	789	0
GZP400	1 504	20	1 001	0
GZP500	2 352	40	1 079	0
GZP600	3 392	28	1 357	0

表 3 铅芯橡胶隔震支座力学性能

型号	设计承载力 /kN	个数	水平等效刚度 /kN/m		等效阻尼比 ξ_{eq}	
			$\gamma = 50\%$	$\gamma = 100\%$ ($\gamma = 250\%$)	$\gamma = 50\%$	$\gamma = 100\%$ ($\gamma = 250\%$)
GZY500	2 352	28	2 679	1 152	0.3	0.14
GZY600	3 392	18	3 366	2 247	0.3	0.23
GZY700	4 616	4	3 570	2 424	0.3	0.23

注: γ 为剪切应变; 橡胶剪切模量 $G_r = 0.45 \text{ MPa}$ 。

隔震房屋上部结构的各层重力荷载代表值及层高见表 4。计算隔震层在多遇和罕遇地震情况下的水平等效刚度和等效阻尼比,见表 5。

4 隔震结构分析

4.1 隔震结构分析方法

不少国家(包括我国)的抗震规范都对橡胶垫基础隔震技术做了规定,考虑到我国的隔震技术应用现状,采用简化估算方法和相对较为精确的时程分析方法相结合的两阶段设计方法^[3,4]。隔震结构分析的主要目的是确定水平向减震系数和隔震层位移。本工程先采用简化计算,然后采用 MIDAS/Gen 时程分析法进行补充计算。

隔震房屋上部结构的各层重力荷载代表值 表 4

层号	重量 G_i /kN	层高 H_i /m	$G_i H_i$
1	63 750	4.2	267 750.0
2	42 609	4.2	178 957.8
3	44 653	4.2	187 542.6
4	43 256	4.2	181 675.2
合计	194 268	16.8	815 925.6

隔震层的水平等效刚度和等效阻尼比 表 5

设防水准	水平等效刚度 K_{eq} /kN/m	等效阻尼比 ξ_{eq}
多遇地震	329 956	0.14
罕遇地震	262 474	0.06

4.2 隔震结构简化分析方法

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。本工程结构体型基本规则,变形基本为剪切型,采用抗震规范附录 L 进行简化计算,分别分析隔震层在多遇和罕遇地震作用下的周期、剪力和位移。以下简化计算的公式和字符含义详见抗震规范。

4.2.1 多遇地震作用

隔震结构体系的基本周期 $T_1 = 1.73s \leq 5T_g$,隔震结构的等效阻尼比 $\xi = 0.14$,结构地震影响系数 $\alpha_1 = 0.184$,隔震结构的减震系数 $\psi = 0.404$ 。

4.2.2 罕遇地震作用

隔震结构体系的基本周期 $T_1 = 1.73s \leq 5T_g$,隔震结构的等效阻尼比 $\xi = 0.06$,结构地震影响系数 $\alpha_1 = 0.184$,隔震层水平剪力 $V_c = 35\,745.3\text{kN}$,隔震层水平位移 $u_c = 136\text{mm} < u_{\max}\{0.55d_{\min}, 3t_{\min}\}$ 。

综上所述,隔震结构的减震效果能够满足设计要求。

4.3 隔震结构时程分析

工程选用 MIDAS/Gen 对结构进行弹性时程分析,以进一步求解水平隔震系数。铅芯橡胶隔震支座采用 MIDAS/Gen 提供的一般连接进行模拟,两个剪切弹性支承具有二轴塑性相关特性,其余四个自由度具有线弹性特性,根据其力学特性输入与滞后系统并联的附加线性粘性阻尼器的有效阻尼比。

选取三条地震波: El Centro, Taft 和 San Fernando,分别对非隔震和隔震结构进行时程分析,对比分析结构主方向的基底总剪力平均值,非隔震结构为 13 770kN,隔震结构为 2 807.1kN,后者与前者的比值为 0.204。按抗震规范对应水平向减震系数为 0.38,与简化计算基本吻合,上部结构设计时减震系数取大值,即 0.404。

5 上部结构计算模型的选取

隔震结构与传统的抗震房屋相比,由于设置了

隔震层,隔震层以上的结构构件要与隔震层以下的结构构件完全断开,为了使隔震层能整体协同工作,结构设计时在上部结构底部增加厚度为 150mm 现浇钢筋混凝土楼面,并增加梁板的配筋和截面,以保证其在平面内的刚度足够大。抗震规范要求:隔震层顶部的梁板结构,对钢筋混凝土结构应作为其上部结构的一部分进行计算和设计。

从隔震支座的受力情况分析,隔震支座能传递上部结构的轴力和水平力,但不承担上部结构传来的弯矩;从隔震支座的变形来分析,隔震支座的竖向变形很小,在水平力作用下可发生较大位移。

根据以上分析,可将隔震支座简化为一个较支座和一个水平弹簧的组合,但在 SATWE 系列分析软件中没有水平弹簧可选择,在基础稳定性较好的情况下,隔震层顶

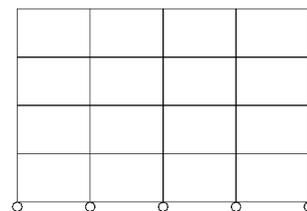


图 3 计算简图

部梁可按与上部结构柱底固接考虑,隔震支座可简化为铰支座。计算简图见图 3。

在确定分析软件和计算简图的情况下,结构的水平地震作用大小可用水平地震影响系数来表示。抗震规范规定:隔震结构的水平地震影响系数的最大值可采用水平地震影响系数的最大值和水平减震系数的乘积,即 $0.12 \times 0.404 = 0.048$,相当于将 7.5 度降为 6.2 度,隔震后上部结构的水平地震作用通过“水平地震作用放大系数”进行调整,将水平地震作用放大系数取 0.404,并复核各楼层的水平地震

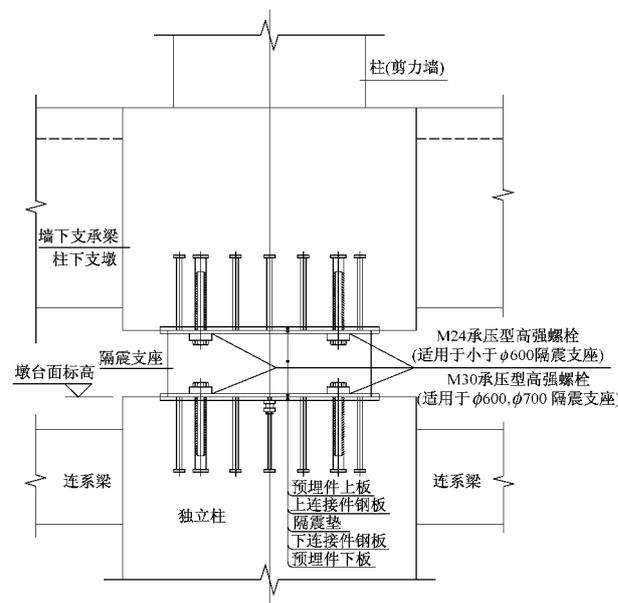


图 4 隔震支座连接示意图

(下转第 32 页)

各级地震作用下结构弹塑性发展情况 表 5

地震作用	小震	中震	6 度大震	7 度大震
层间位移角	1/2 828	1/1 129	1/482	1/218
构件状态	均为弹性	个别连梁屈服	部分连梁、个别墙屈服	多数连梁, 部分墙屈服

作用,结构的抗倒塌验算图见图 10。

6 结论

(1) 最大楼层地震剪力曲线表明,转换层及以下楼层地震剪力一般较大,转换层层高较大时,层地震剪力在转换层处急剧增大。

(2) 高位转换时,框支柱、剪力墙承担的剪力在转换层位置急剧变化,剪力传递不直接,增加转换层及其下一层楼板的负担,应对楼板进行分析并加强,文中给出了转换层楼板配筋计算方法。

(3) 当转换层侧向刚度大,致使转换层下存在刚度软弱层时,可以通过合理布置结构,避免该层同时成为刚度软弱层和承载力薄弱层,以建立合理的屈服机制。弹塑性分析表明,本工程刚度柔软层未出现塑性变形集中现象,结构无明显结构薄弱层。

(4) 结构弹塑性全过程分析可以认识结构最大的抗震能力。在不增加造价前提下,建立合理的屈服机制,既可构架多道防线,又可起到耗能作用。

(5) 宜单独设置设备转换层(兼结构转换层),一般设备转换层层高不高,可以避免在转换层出现

刚度柔软层。

(6) 对于 6 度以上地区存在高位转换时,应进一步进行更加深入的分析、研究。

致谢:衷心感谢陈绩明总工程师在设计过程中的指导。

参 考 文 献

- [1] JGJ 3—2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社 2002.
- [2] 江苏省房屋建筑工程抗震设防审查细则[S]. 北京:中国建筑工业出版社 2007.
- [3] 徐斌,苗启松,王月仙,等. 北京天亚花园框支剪力墙结构体系设计研究[J]. 建筑结构 2006, 36(6): 24-27.
- [4] 贾锋. 常熟华府世家箱形转换层结构设计[J]. 建筑结构 2007, 37(8): 20-22.
- [5] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社 2010.
- [6] DBJ/T 15-46—2005 广东省实施《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002) 补充规定[S]. 北京:中国建筑工业出版社 2005.
- [7] DGJ 08-9—2003 建筑抗震设计规程[S]. 上海:上海市建筑建材业市场管理总站 2010.
- [8] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社 2002.
- [9] SL 191—2008 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社 2009.

(上接第 16 页)

剪力系数是否符合最小地震剪力系数的规定。按抗震规范要求,本工程可不进行竖向地震作用的计算。

6 构造措施

1) 在基础顶面设置隔震支座,在底层增设板厚为 150mm 的梁板式楼盖,双层双向配筋。隔震支座

连接示意图 4; 2) 为了增加隔震层的刚度和隔震支座的稳定性,在支座下适当位置增设连系梁; 3) 在建筑物周围设置隔震沟,楼电梯结构上下脱开,为结构在地震作用下预留变形空间,隔震沟示意图 5; 4) 要求设备管道穿过隔震层时,采用柔性连接。

7 结语

工程在上部结构与基础之间设置隔震层,通过合理选择和布置橡胶(铅芯)隔震支座,有效地减小了建筑物的水平地震作用,达到了预期的设计目标。本工程作为抗震救灾项目,取得了一定的社会效益。

参 考 文 献

- [1] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 2008 年版. 北京:中国建筑工业出版社 2008.
- [2] 党育,杜永峰,李慧. 基础隔震结构设计及施工指南[M]. 北京:中国水利水电出版社 2007.
- [3] 孙相峰,潘文. 叠层橡胶垫基础隔震建筑设计方法与应用[J]. 世界地震工程 2007, 23(4): 39-42.
- [4] 孙相峰,潘文. 多层隔震结构两阶段设计方法[J]. 世界地震工程 2008, 24(3): 25-28.

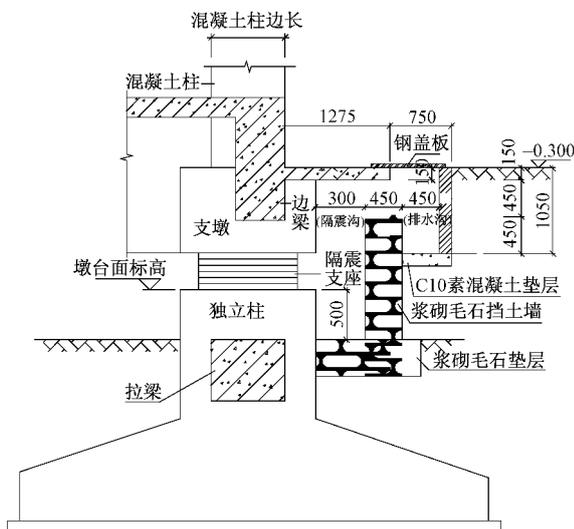


图 5 隔震沟示意图