

# 高烈度地震区建筑隔震方法设计与分析

张玲<sup>1</sup> 资道铭<sup>1</sup> 叶明坤<sup>1</sup> 宋显明<sup>1</sup> 雷珂娜<sup>2</sup>

(1 柳州东方工程橡胶制品有限公司 广西柳州 545005)

(2 陕西省建筑设计研究院有限责任公司 陕西西安 710018)

**摘要:**基于高烈度地震区建筑隔震方法设计与分析,以某一钢筋混凝土框架结构为例,通过有限元分析软件ETABS对采用橡胶支座的减隔震技术进行动力分析,并对时程分析结果进行比较,结果表明:与抗震框架结构相比,底层隔震框架结构的周期延长,层剪力、位移、底层轴力均变小,从理论上验证采用隔震支座能有效地减小地震荷载对结构的不利影响,提高结构的安全性。

**关键词:**隔震支座 时程分析 抗震设计 隔震设计

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2014.04.006

## 1 引言

我国是地震多发国家,也是震灾大国,地震灾害对建筑物的损害都是巨大的,为此我国就城市建筑和抗震标准进行了严格规定,但经历了汶川地震后,我们仍然看到大量建筑物倒塌以及各种程度的不可修复的损坏,特别是部分校舍的坍塌,值得我们深思。如何减轻地震灾害,特别是一些特大、突发性强的地震带来的不可预测的灾害。目前,部分发达地区和一些发达国家较为推广的并且得到验证的有效工程措施就是建筑结构的减隔震技术。因此,对高烈度地震区域的一些建筑结构仅仅局限于抗震设防是远远不够的,进行有效地减隔震保护是非常迫切的。从各国家的建筑减隔震技术应用情况来看,高于抗震设防烈度8度(0.3g)的建筑采用隔震设计,除了改善高烈度区域建筑的整体抗震性能,还可以有效地降低建筑成本。

某钢筋混凝土框架结构采用基层隔震技术,即在上部结构和基础之间设置隔震层来降低传入上部结构的地震力<sup>[1][2][3]</sup>。对该结构进行非线性时程有限元分析,优化该建筑隔震支座的设计参数

和布置,同时检验该建筑在地震作用下能否满足预期的功能要求,从理论上对该建筑的减隔震效果进行研究。

## 2 工程简介

### 2.1 工程介绍

本工程位于四川省攀枝花市盐边县红格镇,为运动员训练基地宿舍。该建筑为7层框架结构,底层层高为4.2m,顶层楼梯间层高为4.5m,其余层层高均为3.9m,总高度为28.15m,高宽比为2,建筑平面长度较大。采用钢筋混凝土框架结构,设计使用年限为50年,属丙类建筑。该建筑场地地震基本烈度为8度、设计基本地震加速度值为0.30g,设计地震分组为第二组,场地类别Ⅱ类;采用50年一遇的基本风压,取 $\omega=0.40$  kN/m<sup>2</sup>,地面粗糙度B类。

本项目隔震设计方案采用基础隔震,支座采用有效直径为600mm、700mm的橡胶隔震支座(其中JZY为无铅型建筑隔震橡胶支座,JZY1Q为铅芯型建筑隔震橡胶支座)。支座布置图如图1所示,支座均为橡胶隔震支座。

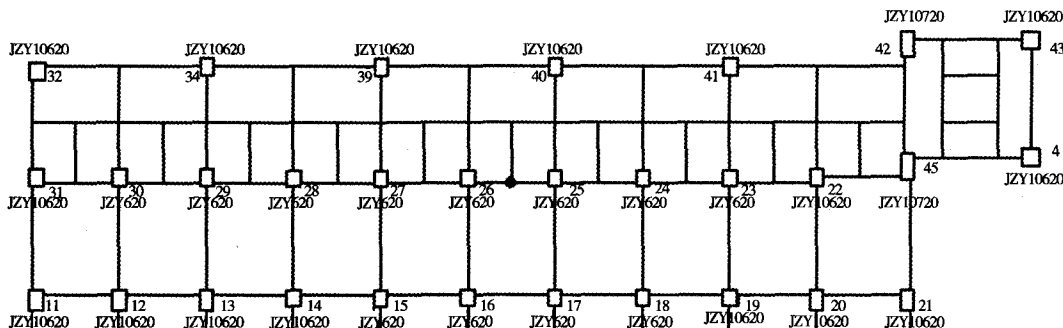


图1 隔震橡胶支座的平面布置图

## 2.2 有限元计算模型

采用有限元程序ETABS对该建筑的结构进行模型建立和动力分析。模型中梁、柱采用杆单元模拟, 楼板采用膜单元模拟, 材料选混凝土C30, 建筑结构抗震设计基础采用6个方向支点约束。建筑结构隔震设计基层支座采用塑性连接单元Isolator1来模拟, 其在ETABS程序中需要定义弹性刚度、屈服后刚度比和屈服荷载。采用空间杆单元模拟梁, 考虑翼缘作用影响, 楼面梁刚度增大系数取1.3~2.0。该结构有限元计算模型简图如图2所示。

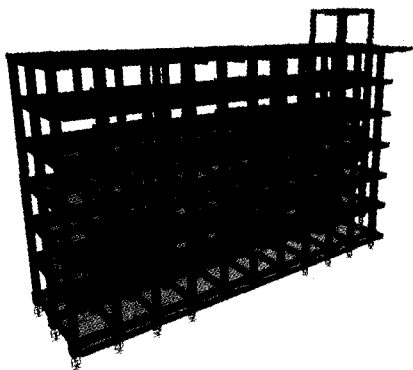


图2 结构有限元计算模型图

## 2.3 模态分析

利用Ritz向量法分别对隔震结构和抗震结构进行动力分析, 分别求出前20阶的阵型和周期, 抗震结构第一扭转周期与第一平动周期之比为0.88, 抗震性能良好<sup>[4,6]</sup>; 比较前三阶周期如表1所示, 多遇地震下隔震结构周期是抗震结构周期的3倍多, 有效避开地震地面运动的主要携能频带范围, 隔震层在罕遇地震时, 变形增大, 刚度减小, 基本周期将进一步延长, 减少传入上部结构的地震响应, 达到很好的隔震效果。

表1 结构周期表对比

振型	抗震	隔震	周期放大倍数
1	0.98	3.00	3.07
2	0.92	2.97	3.21
3	0.87	2.70	3.10

## 3 分析用地震波

在进行该建筑的地震时程响应计算时, 我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)规定, 应采用多条地震波进行计算分析, 在时程分析时地震波的选取必须按照场地类别和设计地震分组选用不少于三组的强震记录, 当取七组及七

组以上的时程曲线输入时, 计算结构可取时程法的平均值。该结构选取7条地震波进行时程分析, 分别是5条天然波: Elcentro波、EUR波、Northbrige波、SAN波和Taft波, 两条人工波: RGB1波和RGB2波。在弹性时程分析时, 每条时程曲线计算所得结构底部剪力均超过振型分解反应谱法计算结果的65%, 结构底部剪力的平均值均达到振型分解反应谱法计算结果的80%以上。

## 4 时程分析结果

### 4.1 多遇地震下的结果分析

结构输入抗震设防烈度为8度, 设计基本地震加速度地震波, 时程分析结果得出抗震结构和隔震结构的地震响应, 比较抗震结构和隔震结构的楼层剪力平均值(如表2所示), 和剪力比值(如表3所示), 从各层剪力比值可以看出, 水平地震影响系数最大值为0.33。由《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010) 12.2.5条中公式可计算出隔震后结构地震作用时的地震影响系数最大值为0.096, 根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010) 12.2.7条可得出采用隔震技术后上部结构的构造措施可降一度设防烈度进行设计<sup>[5]</sup>。

表2 结构地震下各层层间剪力平均值(kN)

楼层	抗震各层剪力		隔震各层剪力	
	X向平均值	Y向平均值	X向平均值	Y向平均值
8	549	416	128	123
7	8224	7858	1744	2003
6	12650	11665	2597	2976
5	15495	14087	3275	3519
4	17934	16771	3979	3973
3	20511	19400	4558	4441
2	22394	21413	5137	5032
1	22475	22001	7141	7137

表3 层间剪力比

楼层	X向平均值	Y向平均值	MAX值
8	0.22	0.29	0.29
7	0.21	0.24	0.24
6	0.20	0.25	0.25
5	0.22	0.25	0.25
4	0.24	0.24	0.24
3	0.24	0.24	0.24
2	0.24	0.24	0.24
1	0.33	0.33	0.33

## 4.2 隔震设计安全性评估

在罕遇地震作用下，隔震层层位移量，如表4所示。

表4 罕遇地震下隔震层支座位移响应 (mm)

地震波	X向位移		Y向位移	
	最大	最小	最大	最小
EL	191	-278	194	-262
EUR	220	-145	208	-138
NOR	243	-193	233	-201
RGB1	492	-288	491	-337
RGB2	526	-324	520	-376
SAN	170	-281	178	-275
TAFT	149	-168	142	-161
平均值	285	-160	281	-250

按照《建筑抗震设计规范》的要求，隔震支座的极限水平变位应小于其有效直径的0.55倍和各橡胶层总厚度3倍二者的较小值进行验算，罕遇地震作用时隔震层最大层间位移为285mm~330mm，可以满足隔震支座高度在罕遇地震作用下的可靠性和稳定性。

罕遇地震作用下，对隔震结构的下部结构进行分析，隔震支座节点标准如图3所示，计算各种工况下最大轴力值（如表5所示）和最小轴力值（如表6所示）。

隔震支座在罕遇地震作用下支座压应力满足隔震设计要求。

通过对隔震支座轴向力进行组合，验算隔震支座是否出现拉力情况，满足《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010）隔震支座在罕遇地震作用下支座拉应力小于1MPa的要求。

隔震支座在罕遇地震作用下支座拉应力小于1MPa，满足隔震设计要求。

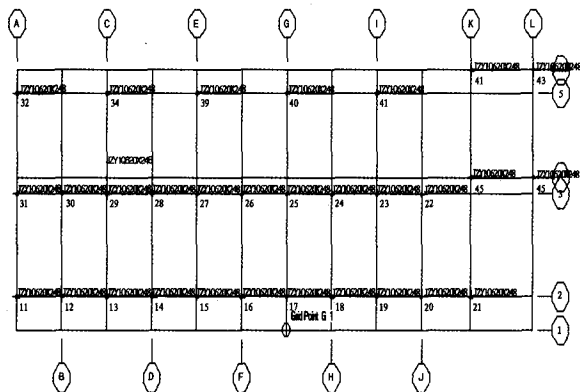


图3 隔震支座节点标注

表5 罕遇地震支座极大值 (kN)

MAX		标准组合	
支座编号	轴压力	支座编号	轴压力
45	-5603	13	-5150
30	-3712	14	-5275
29	-3929	18	-5212
28	-4116	19	-5084
27	-3998	20	-5084
26	-4155	21	-4941
25	-3991	15	-4709
24	-4023	16	-4780
23	-3760	17	-4683
43	-4316	42	-7539
44	-3804	32	-5445
31	-3554	34	-6726
22	-3995	39	-6715
11	-4763	40	-6623
12	-5051	41	-6391

表6 罕遇地震支座极小值 (kN)

MIN		标准组合	
支座编号	轴压比	支座编号	轴压比
45	-2516	13	-746
30	-1353	14	-870
29	-1645	18	-1009
28	-1668	19	-941
27	-1775	20	-747
26	-1752	21	-396
25	-1807	15	-838
24	-1722	16	-885
23	-1747	17	-903
43	-440	42	-510
44	-826	32	2
31	-1557	34	-755
22	-1930	39	-919
11	-314	40	-998
12	-513	41	-1043

## 5 结论

(1) 通过模态分析可得出，隔震结构相较于抗震结构自振周期大大增加，周期越大，结构的基本周期越好地规避了建筑场地的卓越周期，减弱地震对结构的动力响应<sup>[5]</sup>。

(2) 通过依次对抗震结构和隔震结构输入x, y方向的7条地震波进行地震反应分析，得到多遇地震作用下的各层剪力比，隔震结构各楼层间剪力比抗震结构各楼层剪力均较小，橡胶支座隔震结构能较好地降低结构水平地震反应，减小

了地震对结构的动力响应。

(3) 隔震建筑隔震层以上的结构在8度(0.3g)设计地震作用下各楼层地震剪力,均小于未隔震结构在8度(0.3g)设计地震作用下楼层地震剪力的0.33倍。根据《建筑抗震设计规范》GB50011-2010的规定,本工程隔震层以上结构的水平向地震影响系数取为0.096,即隔震层以上结构可降低1度进行抗震设防<sup>[8]</sup>。

(4) 结果给出隔震支座在罕遇地震作用下隔震层最大位移285mm,小于隔震支座的极限水平变位330mm。隔震设防可以满足隔震支座在罕遇地震作用下的可靠性和稳定性。

(5) 隔震支座竖向承载力和受拉情况均满足规范要求。

#### 参考文献

- [1] GB 50011-2010建筑抗震设计规范[S]. 中国建筑工业出版社, 2010
- [2] 李向真, 王铁成, 雷丽. 底部弱层非规则布置隔震结构的计算研究[J]. 世界地震工程, 2006, 22(4): 84-88
- [3] 周福林. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社, 1997
- [4] 郭迅. 汶川大地震震害特点与成因分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(6): 74-87
- [5] 邱法维, 钱稼茹, 陈志鹏. 结构抗震实验方法[M]. 北京:科学出版社, 2000
- [6] 李中锡, 周锡元. 规则型隔震房屋的自振特征和地震反应分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(2): 33-41.
- [7] 党育, 杜永峰, 李慧. 基础隔震结构设计与施工指南[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007

(上接第7页)

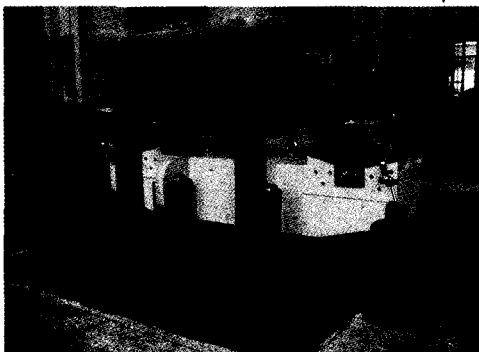


图16 检验安装照片

加载检验压力按两种工况进行,第一种:假设当运梁小车与钢桁梁的重量(340t)由4个吊鞍承受,每个吊鞍压力为85t,三个吊鞍先按此种工况压力的1.5倍,即127.5t进行逐级加压检验,百分表测得最大变形量为4mm;第二种:假设当运梁小车与钢桁梁的重量(340t)由2个吊鞍承受,每个吊鞍压力为170t,选其中一个吊鞍再按此种工况压力的1.25倍,即212.5t进行逐级加压检验,百分表测得最大变形量为7.4mm。当压力试验机缓慢卸压后百分表基本都回到零位。

试验结果表明整个吊鞍变形量较小,销轴和鞍体耳板孔接触面完好,销轴容易拆下,吊鞍结构完好无损。证明吊鞍设计计算正确,吊鞍能在实际工程中安全使用。

## 7 结语

矮寨大桥采用“轨索滑移架梁法”铺设钢桁梁,梁段拼接都在岸上进行,极大地减少了高空拼接风险,施工质量得到保证,钢桁梁架设仅用

了2.5个月,就工期而言大大领先于国内外同类桥梁,创世界最快纪录。在经济效益方面,至少节约了钢材5000t。在运梁过程中运梁小车能平稳、顺利地跨过吊鞍,车轮过吊鞍时能平稳地实现从柔性索过渡到轨道板再从轨道板到柔性索的支承轨道转换,运梁小车通过吊鞍时冲击作用小、时间短,吊鞍前后、左右的变形小,吊鞍的微小偏转变形不影响运梁小车的通过;小车通过后吊鞍能很快地恢复平稳状态,牵引体系平稳、安全、保养容易。

针对矮寨大桥轨索运梁系统各结构及功能要求,确定了吊鞍的结构组成,并根据各个零配件的结构特点,选用整体铸造工艺,关键部位采用五轴联动数控机床加工。加工过程中对重点项目进行了检验,结果均满足设计要求。在矮寨大桥中成功应用,表明吊鞍结构尺寸设计与制作工艺合理,可以为今后类似轨索运梁系统的设计和施工提供宝贵的经验。

#### 参考文献

- [1] 郭友根. 矮寨悬索桥主桁架设计方案研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2009
- [2] 李俊龙. 悬索桥加劲梁轨索移梁架设系统力学特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2010
- [3] 马碧波. 悬索桥轨索运梁系统设计参数与误差影响研究[D]. 成都:西南交通大学, 2011
- [4] 冯剑. 矮寨特大桥悬索桥缩尺模型设计研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2010
- [5] 易继武. 矮寨特大悬索桥钢桁加劲梁架设方案研究[D]. 湖南:湖南路桥建设集团公司, 2013
- [6] 邓年春. 矮寨大桥轨索架梁系统的研制及工程应用[D]. 柳州:柳州欧维姆机械股份有限公司, 2013