

# 混凝土框架结构隔振分析设计

## Analysis and Design of Concrete Frame Isolation Structure

刘建成

Jiancheng Liu

北京新材中筑科技有限公司 中国·北京 100048

Beijing New Material Zhongzhu Technology Co., Ltd., Beijing, 100048, China

**摘要:** 论文介绍了隔振设计原理,以某教学楼隔振设计为例,详细介绍了隔振模型的建立,地震波选取、隔震层设计。根据 GB50011—2010《建筑抗震设计规范》有关规定,进行了结构在中震及罕遇地震作用下的结构响应分析。结果表明,在高烈度区通过采用隔振结构性能设计,可以明显降低结构地震作用反应,与传统结构抗震设计相比具有良好的抗震性能及工程经济性。

**Abstract:** This paper introduces the principle of seismic isolation design, taking the seismic isolation design of a teaching building as an example, introduces in detail the establishment of the seismic isolation model, the selection of seismic waves and the design of the isolation layer. According to the relevant provisions of GB50011-2010 *Code for Seismic Design of Buildings*, the structural response analysis under the action of moderate and rare earthquakes is carried out. The results show that the seismic response of the structure can be significantly reduced by using the performance design of the seismic isolation structure in the high intensity region, and it has better seismic performance and engineering economy compared with the traditional seismic design of the structure.

**关键词:** 隔震设计; 摩擦摆隔振支座; 减震系数; 地震波

**Keywords:** isolation design; friction pendulum isolation bearings for buildings; seismic reduction factor; seismic wave

**DOI:** 10.12346/etr.v3i9.4160

## 1 引言

隔震结构是指在建筑物上部结构的底部与基础面之间设立隔震装置,使之与结构基础分离开来的一种结构体系<sup>[1]</sup>,隔震系统因水平刚度较小,可延长上部结构周期至2~3s以上,工程经验表明,隔震结构一般可使结构的水平地震加速度反应降低60%左右<sup>[2]</sup>。隔震系统同时也能利用隔震支座的非线性变形吸收地震能量以及附加粘滞阻尼器的耗能,提高系统的阻尼比,可降低地震对建筑物的作用力<sup>[3]</sup>。

## 2 工程概况

该工程采用钢筋混凝土框架结构,抗震设防标准为8度,设计基本地震动加速度为0.30g;设计地震分组为第二组,场地类别为III类场地,场地土特征周期为0.55s;抗震设防类别为重点设防类(乙类)。考虑地震动近场效应,地震动

参数考虑1.25的增大系数。多遇地震时程分析加速度峰值为137.5gal,设防地震时程分析加速度峰值为375gal,罕遇地震时程分析加速度峰值为637.5gal。

本工程结构共五层,建筑高度为21.30m,建筑宽度20.0m,结构高宽比1.1,其变形为剪切变形,符合采用隔震设计的规范要求。

本工程通过在隔震层合理布置隔震支座,使隔震结构具备较大的竖向承载力、可变的水平刚度、水平弹性恢复力,并满足抗震、抗风等要求。

## 3 隔震模型

建立可靠的分析模型是进行结构静、动力分析的基础,可靠的分析模型能够真实地反映结构的动力特性,并且能够比较准确地分析结构在弹性及弹塑性阶段的动力响应。本工

【作者简介】刘建成(1978-),男,中国河北献县人,硕士,高级工程师,从事装配式建筑结构研究。

程采用 ETABS 软件建立了弹性隔震结构和非隔震结构的有限元模型。

### 3.1 隔震模型建立

在非隔震结构有限元分析模型的基础上，建立隔震结构有限元分析模型。本工程为基础隔震工程，在隔震有限元分析模型中，增设隔震支座，输入支座参数，本工程隔震设计中选用摩擦摆隔震支座，通过球形滑动表面的运动使上部结构发生单摆运动，隔震系统的周期和刚度通过选取合适的滑动表面曲率半径来控制，阻尼由动摩擦系数来控制。其中，图 1 为摩擦摆隔震支座的示意图。

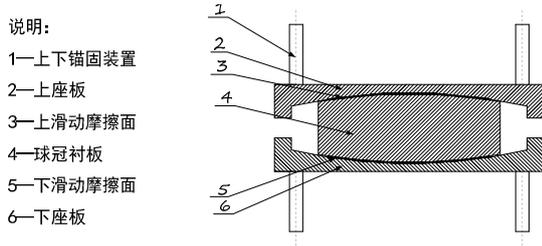


图 1 摩擦摆隔震支座 FPS 组成示意图

摩擦摆隔震支座单元采用 ETABS 软件中的连接单元 Isolator2，其中模型见图 2 所示。

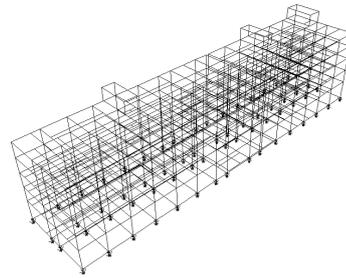


图 2 隔震结构整体模型三维视图

### 3.2 隔震支座平面布置

通过在隔震层合理布置摩擦摆隔震支座，可以使隔震结构具备较大的竖向承载力、可变的水平刚度、水平弹性回复力，并满足抗震、抗风等要求。

本工程共设置摩擦摆隔震支座 64 个，具体布置位置如图 3 所示。控制各个隔震支座的长期面压均在 25MPa 以内(摩擦材料为 PTFE)，摩擦摆隔震支座参数列于表 1、表 2。

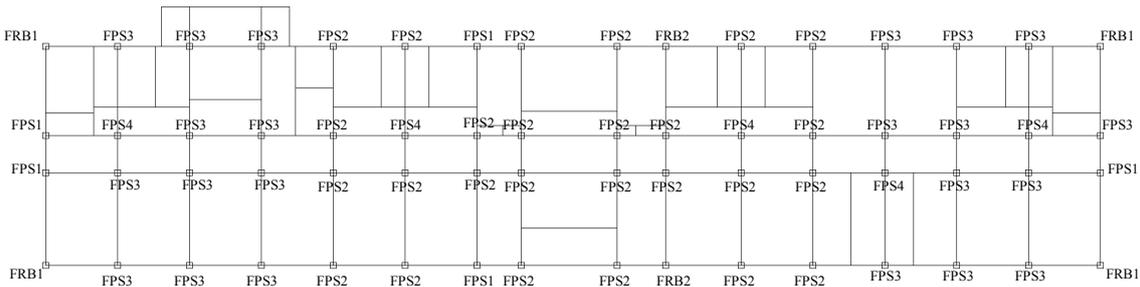


图 3 摩擦摆隔震支座平面布置图

表 1 摩擦摆隔震支座计算参数

型号	竖向刚度 (kN/mm)	屈服后刚度 (kN/m)	摩擦系数 (慢)	摩擦系数 (快)	比率参数 (s/m)	滑动半径 (m)	设计荷载 (kN)	数量 (个)
FPS1	1333	666	0.02	0.05	40	3	2000	5
FPS2	2000	1000	0.01	0.02	20	3	3000	26
FPS3	2000	1000	0.02	0.05	40	3	3000	22
FPS4	2667	1333	0.01	0.02	20	3	4000	5

表 2 抗拉摩擦摆隔震支座计算参数

型号	抗压屈服后刚度 (kN/m)	摩擦系数 (慢, 受压)	摩擦系数 (快, 受压)	比率参数 (s/m)	滑动半径 (m)	抗压设计荷载 (kN)	数量 (个)
FRB1	666	≤ 0.05	≤ 0.1	40	3	2000	4
	抗拉屈服后刚度 (kN/m)	摩擦系数 (受拉)				抗拉设计荷载 (kN)	
	233	≤ 0.1				700	
FRB2	抗压屈服后刚度 (kN/m)	摩擦系数 (慢, 受压)	摩擦系数 (快, 受压)	比率参数 (s/m)	滑动半径 (m)	抗压设计荷载 (kN)	数量 (个)
	1000	≤ 0.05	≤ 0.1	40	3	3000	
	抗拉屈服后刚度 (kN/m)	摩擦系数 (受拉)				抗拉设计荷载 (kN)	
	333	≤ 0.1				1000	2

### 3.3 隔震层回复力计算

隔震层的水平回复力特性由摩擦摆支座组成。为保证隔震支座在多次地震作用后仍具有良好的复位能力,需进行隔震支座弹性水平回复力验算。

隔震层的水平回复力特性由摩擦摆隔震支座组成(见图4),其计算公式为:

$$F = \frac{W}{R}D + \mu W(\operatorname{sgn} D)$$

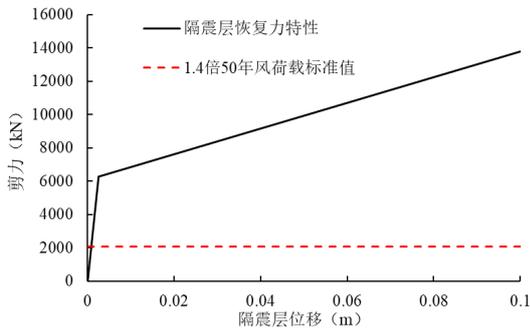


图4 结构回复力曲线

### 4 地震波选取

《建筑抗震设计规范》中5.1.2条规定:采用时程分析法时,应按建筑场地类别和设计地震分组选用实际强震记录和人工模拟的地震加速度时程曲线,其中实际强震记录的数量不应小于总数的2/3,本工程选用5条天然波和2条人工波进行时程分析,取三条时程法的包络值作为最终的计算结果。本工程抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度为0.30g。鉴于本框架结构需要考虑近场地震效应,因此隔震分析所采用的设计基本地震加速度最大值为375cm/s<sup>2</sup>,罕遇地震下地震加速度最大值为637.5cm/s<sup>2</sup>。

计算分析得出,每组时程曲线计算得到的弹性非隔震结构的底部剪力均大于反应谱计算结果的65%,7组时程曲线计算所得结构底部地震剪力的平均值大于反应谱法计算结果的80%,且每组时程结果不大于反应谱结果的135%,7组时程平均结果不大于反应谱结果的120%,均满足规范要求。采用7组时程曲线作用下最大地震响应值作为时程分析的最终计算值,表3和表4分别给出了非隔震结构在8度(0.3g)多遇地震下基底剪力的时程分析和反应谱分析结果。

表3 多遇地震下结构基底剪力时程分析结果(kN)

工况	TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	RG1	RG2	平均值
X向	24384	23210	25990	20603	26312	24186	30179	24981
Y向	32641	34067	35683	28465	35351	32581	37968	33822

表4 多遇地震下结构基底剪力反应谱分析结果(kN)

工况	100%	65%	80%	135%	120%
X向	30750	19987	24600	41512	36900
Y向	28606	18594	22885	38618	34327

从上表可以看到,非隔震结构在时程分析下的基底剪力满足规范对地震波的要求,上述7条地震波可以用来进行隔震分析。

## 5 中震、罕遇地震分析结果

### 5.1 隔震结构与非隔震结构周期

非隔震结构和隔震结构前6阶的周期见表5。

表5 非隔震结构和隔震结构前6阶的周期(s)

振型	非隔震结构 (基础固定)	隔震结构 (中震)
1	0.94	2.12
2	0.90	2.11
3	0.89	2.12
4	0.88	2.11
5	0.82	1.88
6	0.79	1.88

隔震体系结构的周期较原结构增大较多,基本周期由原来的0.94s延长至2.12s。

### 5.2 中震下结构减震系数

在隔震结构的地震响应中,结构在8度(0.3g)设防地震作用下,X向地震剪力平均值为非隔震的0.318倍,Y向地震剪力平均值为非隔震的0.310倍,这表明所设计的隔震系统具有良好的隔震效果。本结构的减震系数可以达到0.318。

### 5.3 中震下结构位移

由计算结果可知,隔震结构在中震作用下的层间位移角为1/429,基本保持弹性,安全储备较大。

### 5.4 大震下结构位移分析

关于罕遇地震下隔震层位移分析见表6。

表6 罕遇地震下隔震层位移

工况	TR1	TR2	TR3	TR4	TR5	RG1	RG2	平均值
X向最大位移(mm)	163.7	199.5	168.3	185.3	108.2	438.8	329.8	227.7
Y向最大位移(mm)	165.7	199.5	171.2	187.2	109.7	444.1	333.9	230.2

隔震结构应进行罕遇地震作用下隔震支座水平位移验算,验算结果如表5.2。隔震层最大平均水平位移为230.2mm,满足GB50011—2010《建筑抗震设计规范》规定。隔震结构在罕遇地震作用下的层间位移角,结构的最大层间位移角为1/208,满足规范要求且具有较大的安全储备。

## 6 结论

论文对本工程的隔震体系进行了计算和分析,得到了以下结论:

①时程分析所选用的地震波合适。

时程分析选用5组天然地震动,2组人工地震动。其中,5组天然地震动是实际的强震观测记录。每组时程曲线计算所得弹性非隔震结构的底部地震剪力均大于反应谱法计算结果的65%,7组时程曲线计算得到的结构底部剪力平均值大于反应谱法计算结果的80%。采用7组时程曲线作用下各自最大地震响应值平均值作为时程分析的最终计算值,结果可靠,可以用于工程设计。

②隔震层设计合理,隔震支座工作状态良好。

隔震支座配置合理,隔震层具有足够的初始刚度保证结构在风荷载、较小地震或其他非地震水平荷载作用下的稳定性,而且隔震层屈服后比屈服前提供了较低的水平刚度,保证结构在较大地震作用下能够很好的减小地震反应。

③隔震层以上结构地震剪力大幅度减小。

隔震层以上结构在8度(0.3g)设防地震作用下各楼层地震剪力,均小于非隔震结构在8度(0.3g)设防地震作用下地震剪力的0.318倍,减震系数为0.318。按照《抗规》要求,上部结构地震作用可按降低1度进行设计。鉴于结构

需要考虑地震动近场效应,水平地震影响系数最大值计算为: $0.24 \times 1.25 \times 0.318 / 0.8 = 0.119$ ,取0.12。抗震措施可降低1度选用。

④隔震方案技术、经济效益以及附加值显著。

常规结构在设防烈度为8度0.3g的地震作用下,很难通过常规的抗震技术措施达到规范要求的三水准设防目标,采用隔震技术后,原有上部结构地震力大幅减小,可以显著减小断面尺寸和配筋量,增强建筑物的抗震安全性能。隔震层以上结构在设防地震作用下,接近平动状态。在罕遇地震作用下,结构可以完全满足“大震不倒”的设防水平。考虑到地震后建筑物损伤修复的费用而言,对地震对应的使用期间总费用来说,隔震方案的具有明显的经济效益。

### 参考文献

- [1] 周福霖.工程结构减震控制[M].北京:地震出版社,1997.
- [2] 马智刚.建筑结构隔震设计简明原理与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [3] 丁洁民,吴宏磊.减隔震建筑设计指南与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.

(上接第18页)

## 4.3 方案优缺点分析

### 4.3.1 从对环境影响分析

西方案绕避了武棚绿水河水源地一级保护区,东方案穿越武棚绿水河水源地一级保护区660m,虽然采用桥梁跨越通过,但施工运营期间不可避免对水源产生影响,对环境的影响大,环保审批困难。从对环境影响角度分析,西方案更优。

### 4.3.2 从与规划适应性分析

西方案绕避了规划区,对规划区无影响;东方案穿越了600m规划农业养殖园、葡萄示范基地及绿地,需对规划进行局部调整,对完整地块进行切割,对规划影响较大。从对规划影响角度分析,西方案更优。

### 4.3.3 从征用土地角度分析

西方案多走行于山边荒地;东方案穿越两处河谷阶地,且穿越地势平坦的星辉省级农业养殖园约350m。项目地处西南低山丘陵区,耕地尤其是平坦的河谷阶地基本农田资源稀缺。故从征用土地角度分析,西方案更优。

### 4.3.4 从拆迁角度分析

西方案绕开了城镇密集居住区拆迁量较小;东方案穿越星辉农业养殖园200m,拆迁钢架温室大棚10座,拆迁量较大。故从拆迁角度分析西方案更优。

### 4.3.5 从长度及投资角度分析

两方案线路长度仅相差100m,东方案线路长度较短。西方案隧道长度略长,东方案桥梁长度略长,经技术经济比较,两方案工程投资相差不大,东方案略贵。

### 4.3.6 从工程条件分析

比较段落地形条件相差不大,两方案隧道个数一致,危

岩落石情况相当,采用相应防护措施进行处理后,工程风险低。两方案均无特殊结构大跨桥梁,桥梁工程条件相当。故两方案工程实施条件差别不大,工程安全可控,技术成熟。从工程条件角度分析,两方案优劣相当。

## 4.4 比选意见

东方案虽线路略短,铁路线型条件稍好,但线路穿越了武棚绿水河水源地一级保护区,对环境的影响大;穿越了武棚乡规划,对规划影响较大;占用适宜种植的土地资源较多;拆迁养殖园温室大棚10座。综合分析,西方案由武棚乡政府西侧通过,绕避了乡镇规划区、企业聚集区和水源保护区,虽然隧道工程稍大,但拆迁建筑物少,对武棚乡规划、企业产业区、水源保护区均无影响,优势显著。研究后推荐采用西方案。

## 5 结语

影响铁路定线的自然条件主要有地形、气候、水文地质、工程地质、土壤及植物等。要做好选线与定线工作,必须综合考虑多方面的因素<sup>[1]</sup>。低山丘陵区线路方案可选择性大,方案的比选需对地形、地质条件、规划、土地资源、环保、拆迁、工程投资、工程实施难度等因素进行多方面深入比选,从而选出最优方案。

### 参考文献

- [1] 中铁第五勘察设计院集团有限公司.新建铁路汉巴南线南充至巴中段初步设计鉴修总说明书[Z].2017.
- [2] 易思蓉.铁道工程[M].2版.北京:中国铁道出版社,2009.