

韩淼,许浒,杜红凯,等.近断层地震下层间隔震结构楼层反应谱[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4):42-49.  
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.007

Han M, Xu H, Du H K, et al. Research on Floor Response Spectrum of Storey Seismic Isolation Structure Sunder Near-fault Earthquake [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(4):42-49. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.007

# 近断层地震下层间隔震结构楼层反应谱

韩淼,许浒,杜红凯\*,孟令帅

(北京建筑大学 北京未来城市设计高精尖创新中心,北京 100044)

**摘要:**近断层地震动富含长周期、大峰值的速度脉冲的特性,而目前对近断层地震动作用下非结构构件动力响应的研究较少.本文对一个5层钢框架结构进行非隔震与层间隔震振动台试验和 ABAQUS 有限元模拟,研究表明:(1)结构设置隔震层,能明显降低屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱谱值,谱值随着隔震层的升高而增大;同时增大了屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱谱值,随着隔震层设置位置的升高,谱值大幅度减小.(2)与抗震和隔震结构的自振周期有相近脉冲周期的地震波能明显增大屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱和屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱谱值;非隔震与隔震结构屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱和楼层位移反应  $\beta_d$  谱主要峰值周期与主体结构基本自振周期接近.(3)近断层地震波与结构周期比值越近,断层距越小,有脉冲作用,屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱和楼层位移反应  $\beta_d$  谱谱值越大.

**关键词:**近断层地震动;振动台试验;层间隔震;楼层反应谱;周期

**中图分类号:**TU352.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2019)04-0042-08

## Research on Floor Response Spectrum of Storey Seismic Isolation Structure Sunder Near-fault Earthquake

Han Miao, Xu Hu, Du Hongkai, Meng Lingshuai

(Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Near-fault ground motions are rich in velocity pulses with long periods and large peak values, and there are few studies on the influence of near-fault ground motions on the dynamic response of non-structural members. The shaking table test and ABAQUS finite element simulation of a five-story steel frame structure with non-isolation and story isolation were carried out. The results show that: (1) the structure with isolation layer can significantly reduce the acceleration response beta spectrum of the roof floor, which increases with the increase of the isolation layer; at the same time, it increases the displacement response beta of the roof floor. With the increase of the location of isolation layer, the spectral value decreases greatly. (2) the seismic waves with similar impulse periods to the natural vibration periods of aseismic and isolation structures can significantly increase the beta spectrum of floor displacement response and acceleration response of the roof; the main peak period of the beta spectrum of floor response of non-isolation and isolation structures is close to the basic natural vibration period of the main structure. (3) the closer the ratio of near-fault seismic wave to structural period is, the smaller the fault distance is, and the impulsive effect is. The greater the beta spectrum of floor acceleration

收稿日期:2019-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378047;51408027)

\*通信作者,E-mail:duhongkai@123.com

response and floor displacement response is.

**Keywords:** near-fault ground motions; shake table tests; inter-story isolation; floor response spectrum; periodicity

楼层反应谱是指把地震动输入建筑结构引起的楼层动力响应作为激励,对楼层上具有不同自振周期和阻尼的单自由度体系所引起的最大响应与相应自振周期的关系曲线。

楼层反应谱是非结构构件抗震设计的重要依据。所谓非结构构件,主要指建筑结构中除了承重骨架体系以外的非结构构件以及附属的机电设备<sup>[1]</sup>。地震来临时,建筑结构的非结构构件和附属设施的完好对于建筑使用功能具有非常重要的意义。对于一些特殊的建筑,重要的仪器设备等非结构构件在地震中受到损坏会造成巨大的经济损失和次生灾害。例如,在核电设施中,非结构构件的损坏可能造成严重的核泄漏;在民用建筑如医院、试验室等,仪器和设施等附属设备破坏会严重影响整个建筑的使用功能;在工业建筑中,设备、管线的破坏会导致整个生产线的全面瘫痪。这些二次结构都迫切地需要具有抗震功能<sup>[2]</sup>。

Kelly 和 Tsai<sup>[3]</sup>完成了5层钢框架结构的抗震和基础隔震振动台模型试验,隔震层为铅芯橡胶支座和橡胶隔震支座,内置单自由度振荡器模拟非结构构件,并在试验的基础上进行了理论分析,结果表明:基础隔震降低了主体结构和非结构构件的动力响应;Fan 和 Ahmadi<sup>[4]</sup>用3层框架作为主体结构,单自由振荡器作为非结构构件,以叠层橡胶支座、滑动支座和摩擦支座等5种不同的力学模型作为隔震层,对不同力学隔震模型和非隔震模型分析,结果表明:设置隔震系统能有效地降低结构的响应峰值,且相较于其他结构而言,叠层橡胶支座能较好地降低非结构构件的响应;Juhn 和 Manolis<sup>[5]</sup>对一个6层3跨的钢框架做了底部隔震和抗震振动台试验,以悬臂单摆作为非结构构件,同时进行模拟分析,试验和模拟的楼层反应谱表明:绝大多数情况下,设置隔震层对非结构构件的动力响应有明显的削弱效果;Isakovic 和 Zevnik<sup>[6]</sup>对单自由度和多自由度模型,采用高阻尼橡胶支座作为隔震支座,研究表明:小震下由于支座变形增加水平刚度,使结构周期接近共振峰区域,降低了隔震效果,楼层反应谱谱值升高;韩森和秦丽<sup>[7]</sup>采用连接区的混合子模态分析法对子结构系统的地震响应进行分析,讨论了主次结构连接区的刚度和阻尼;林均岐<sup>[8]</sup>对3层有机玻璃框架结构做了振动台实验研究,研究表明:不同参数的次结构导致主体结构的反应增大或者减小。

目前,楼层反应谱应用多集中在核电站结构,且对结构基础隔震研究较多,而对近断层地震动作用下层间隔震的非结构构件的动力响应研究较少。本文将对5层钢框架进行抗震与层间隔震的振动台试验,实测楼层动力响应时程,计算楼层反应谱并进行有限元模拟,对楼层反应谱特性进行研究。

## 1 试验概况

### 1.1 试验模型设计与制作

试验原型为单跨5层钢框架结构,平面尺寸为7.2 m×7.2 m,层高3.6 m。由于振动台试验台面最大载重量以及台面尺寸等限制,按照1:8的相似比对结构原型进行缩尺<sup>[9]</sup>,模型相似比如表1所示。根据模型相似比,钢结构模型取平面尺寸0.9 m×0.9 m,层高0.45 m,柱净高0.35 m。柱采用L56×56×8等边角钢,梁采用10#槽钢,模型的层间刚度为5 450 N/mm,装配好的试验模型如图1所示<sup>[10]</sup>。为实现层间隔震,5层框架结构由5个单层框架经螺栓连接而成,且框架带有配重,1~5层每层楼板质量为933.24 kg,屋面质量为916.39 kg。隔震层由4个支座构成,分别位于4根柱子柱脚,通过螺栓与柱脚相连。改变隔震层的位置可实现不同层间隔震。隔震支座选用直径 $D=100$  mm的普通叠层天然橡胶支座GZP100,支座上下钢板为Q235钢,橡胶支座的水平抗剪刚度设计值为100 N/mm,其余设计参数见表2<sup>[11]</sup>。



图1 试验模型

表 1 模型相似比

物理量	长度/m	弹性模量/MPa	时间/s	质量/kg	线位移/m	加速度/g	应力/N	刚度/(N/m)
相似比	1/8	1	1/2.83	1/64	1/8	1	1/64	1/8

表 2 橡胶支座参数

支座总高	支座总直径	中孔直径	内部橡	内部钢	上下封	上下连	橡胶剪切模量
<i>H/mm</i>	<i>D/mm</i>	<i>d/mm</i>	胶/mm	板/mm	板/mm	接板/mm	/(N/mm <sup>2</sup> )
89.4	110	10	1.5×18	1.2×17	10×2	11×2	0.4

1.2 地震波选取

从美国太平洋地震工程中心选取震级 5.5 级以上,峰值加速度 0.1g 以上,断层距 20 km 以内<sup>[12-13]</sup>的 6 条近断层地震波,具体参数见表 3.其中,含方向性效应速度脉冲地震波 4 条(1494fn,1244fn,1503fn 和 1511fn),无速度脉冲地震波 2 条(1488fp 和 1489fp).

表 3 近断层地震波特征参数

地震动特性	编号	地震名称	震级	PGA	PGV	PGD	PGV/PGA	脉冲周期	脉冲持时/s	断层距/km	上下盘
有脉冲	1494fn	Chi-Chi	7.62	1.862	39.55	49.58	0.21	10.0	22.9	5.30	fw
	1244fn	Chi-Chi	7.62	4.430	85.60	57.49	0.19	4.8	29.0	9.96	fw
	1503fn	Chi-Chi	7.62	8.036	127.81	93.23	0.16	5.7	28.0	0.59	fw
	1511fn	Chi-Chi	7.62	2.979	63.43	31.80	0.21	4.0	29.5	2.76	fw
无脉冲	1488fp	Chi-Chi	7.62	1.754	47.76	55.73	0.27	-	34.1	13.55	fw
	1489fp	Chi-Chi	7.62	2.440	57.30	49.01	0.24	-	23.0	3.78	fw

注:fn 为断层法向;fp 为断层平行向;PGA 为峰值加速度,m/s<sup>2</sup>;PGV 为峰值速度,cm/s;PGD 为峰值位移,cm;-为无脉冲;fw 为下盘

将表 3 中的 6 条地震波调幅至 0.4g,地震波持时按 1/2.83 的相似比进行压缩,作为振动台模型试验输入波.脉冲周期也相应压缩 2.83 倍.

对非隔震结构模型以及层间隔震结构模型(基础隔震、1 层隔震、2 层隔震和 4 层隔震)依次输入 6 条地震波,共进行了 30 种工况试验.

对每种模型进行白噪声(0.1g)扫描来测定模型结构自振周期,非隔震结构的自振周期为 0.22 s,基础隔震的自振周期为 0.68 s,1 层隔震的自振周期为 0.57 s,2 层隔震的自振周期为 0.5 s,4 层隔震的自振周期为 0.39 s.

2 楼层反应谱计算

楼层反应谱的计算方法取经典楼层反应谱法,经典楼层反应谱与地震反应谱的计算方法类似,地震反应谱是将地面运动加速度时程作为单自由度体系的激励,楼层反应谱是将某楼层的加速度响应时程作为单自由度体系的激励.

振动台模型试验可实测每一层楼面的加速度时程,进而计算楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱与位移反应  $\beta_d$  谱.根据反应谱理论,按经典方法生成的加速度楼层反应  $\beta_{ac}$  谱的计算公式为

$$\beta_{ac} = \frac{S_{ac}(T)}{\ddot{x}_f(\tau)}$$

$$S_{ac}(T) = \left| \frac{2\pi}{T} \int_0^t \ddot{x}_f(\tau) e^{-\xi \frac{2\pi}{T}(t-\tau)} \sin \frac{2\pi}{T}(t-\tau) d\tau \right|_{\max}$$

式中: $S_{ac}$ 为次结构绝对加速度,m/s<sup>2</sup>;T 为次结构周期,s; $\ddot{x}_f$ 为楼层加速度,m/s<sup>2</sup>; $\xi$ 为次结构阻尼比;t 为楼层加速度响应时间,s.

按经典方法生成的位移楼层反应谱的计算公式为

$$\beta_d = \frac{S_d(T)}{\ddot{x}_f(\tau)}$$

$$S_d(T) = \left| \frac{T}{2\pi} \int_0^t \ddot{x}_f(\tau) e^{-\frac{2\pi}{T}(t-\tau)} \sin \frac{2\pi}{T}(t-\tau) d\tau \right|_{\max}$$

式中: $S_d$  为次结构绝对位移, m.

### 3 有限元模拟

对试验结构进行 ABAQUS 有限元模拟,模拟结构尺寸与试验结构相同,建模过程中采用 B32 梁单元模拟梁柱,用薄壳单元 S4R5 模拟楼板,用点质量模拟楼层配重,用连接单元模拟叠层橡胶支座,有限元建模如图 2 所示.



图 2 ABAQUS 有限元模型

有限元模拟与试验 6 条地震波的楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱和屋面楼层反应  $\beta_d$  谱对比如图 3 所示(楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱值在 2 s 后趋于稳定数值,为方便对比其谱形,周期取 0~2 s,楼层位移反应  $\beta_d$  谱周期取 0~4 s).试验和模拟的楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱和楼层位移反应  $\beta_d$  谱谱形基本吻合,谱峰值误差绝对值在 15% 以内,表明有限元模拟具有较高的精度.

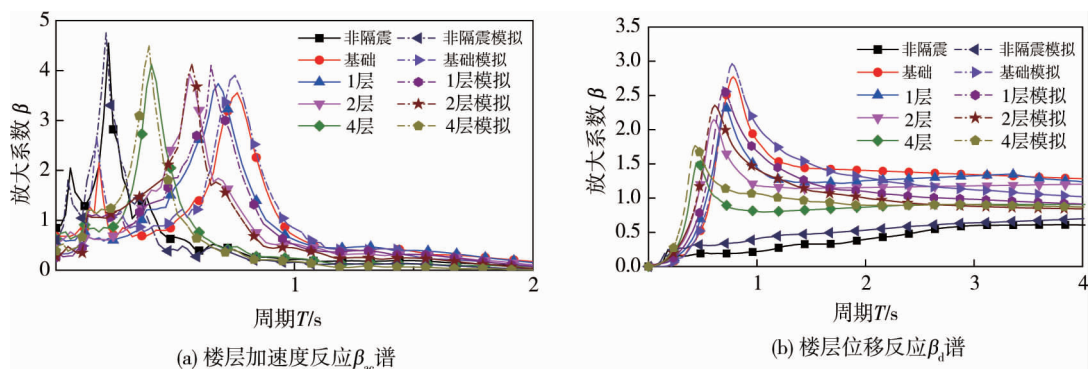


图 3 试验模拟屋面楼层反应  $\beta$  谱对比

### 4 屋面楼层反应谱分析

从太平洋地震工程中心选取震级 5.5 级以上、峰值加速度 0.1g 以上、断层距 20 km 以内的 100 条近断层地震波,地震波分类如表 4 所示.

表4 地震波分类

结构类型	非隔震	基础隔震	1层隔震	2层隔震	4层隔震
周期比1	14	28	23	21	18
周期比2	56	42	47	49	52
断层距1	53	53	53	53	53
断层距2	47	47	47	47	47
有脉冲	70	70	70	70	70
无脉冲	30	30	30	30	30

注:周期比1为周期比0.3~2.5;周期比2为周期比2.5~20.0;断层距1为断层距0~10 km;断层距2为断层距10~20 km

将选取的地震波输入分析模型,可得非隔震与隔震结构的屋面平均加速度响应,进而计算可得相应的屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱与楼层位移反应 $\beta_d$ 谱.

### 4.1 屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱分析

图4~图6给出了屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱,表5为隔震结构与非隔震结构屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱峰值的比值(楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱谱值在2 s后趋于稳定数值,为方便对比其谱形,周期取0~4 s).

图4为不同断层距的地震波作用下的屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱.由图4可知:地震波的断层距为0~10 km,比断层距为10~20 km时的屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱谱值略有增大.由表5可知:与非隔震结构的屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱相比,断层距较小时,隔震对降低屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱的效果更好.

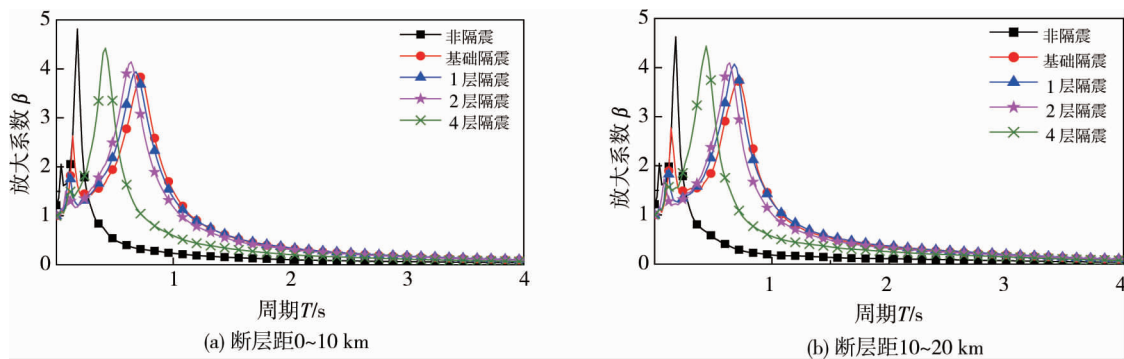


图4 屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱(不同断层距)

图5为有脉冲与无脉冲地震波作用下的屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱.由图5和表5可知:相比于无脉冲地震波,在有脉冲地震波作用下,非隔震结构和隔震结构的屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱谱值均增大,且隔震结构对无脉冲地震波的楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱谱值降低效果显著.

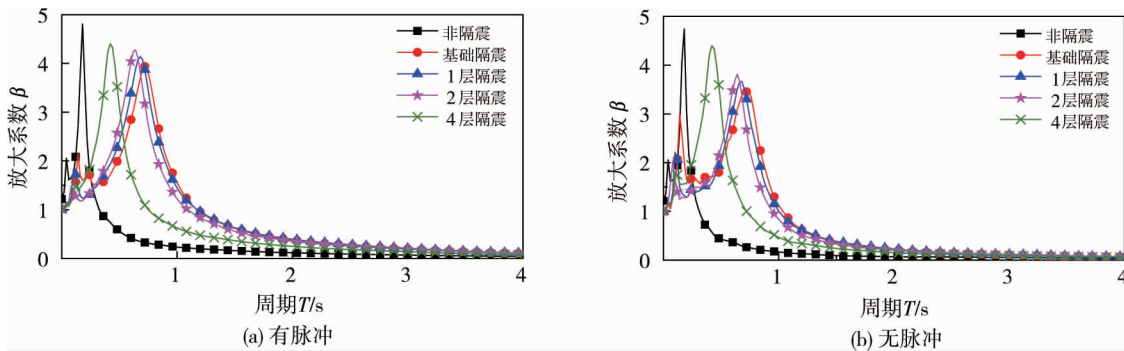


图5 屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱(有无脉冲)

图6为结构在不同周期比(地震波脉冲周期与结构基本周期之比)的屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱,周期比为0.3~2.5时与结构基本自振周期接近.由图6和表5可知:脉冲周期与结构基本自振周期接近时,屋面楼层加速度反应 $\beta_{ac}$ 谱谱值明显增大,是由于脉冲波和结构的共振造成结构动力响应增大从而增大了 $\beta_{ac}$ .

谱谱值.

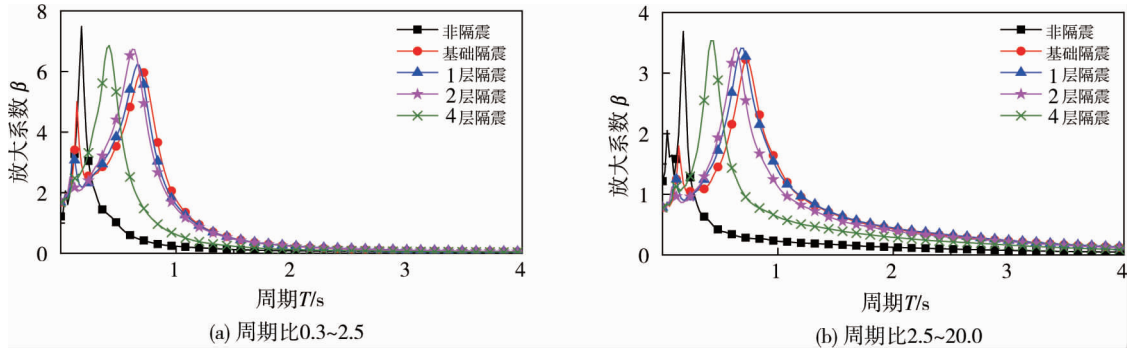


图 6 屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱(不同脉冲周期)

表 5 屋面楼层加速度反应谱谱值比

分类	基础隔震	1 层隔震	2 层隔震	4 层隔震
断层距 1	0.796	0.819	0.861	0.919
断层距 2	0.805	0.880	0.885	0.959
周期比 1	0.803	0.832	0.900	0.916
周期比 2	0.876	0.926	0.927	0.960
有脉冲	0.819	0.860	0.889	0.915
无脉冲	0.731	0.773	0.803	0.927

注:断层距 1 为断层距 0~10 km;断层距 2 为断层距 10~20 km;周期比 1 为周期比 0.3~2.5;周期比 2 为周期比 2.5~20.0

分类地震波作用下的屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱有着相似规律,由表 5 分析可知:

- 1) 设置隔震层,可降低屋面楼层加速度反应谱峰值;隔震层设置在结构下部时,屋面楼层加速度  $\beta_{ac}$  谱值降低更明显.
- 2) 结构隔震可延长屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱峰值出现的周期,该周期随着隔震层设置位置的增高而减小,接近于隔震结构的基本自振周期.

### 4.2 屋面楼层位移反应 $\beta_d$ 谱分析

图 7~图 9 给出了屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱,表 6 为隔震结构屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱峰值与非隔震结构的比值.

图 7 为不同断层距地震波作用下的屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱.由图 7 和表 6 可知:地震波在断层距 0~10 km 比断层距 10~20 km 的屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱谱值总体上增大;与非隔震结构的屋面位移楼层反应  $\beta_d$  谱相比,断层距较小时,结构设置隔震层,屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱谱值增大.

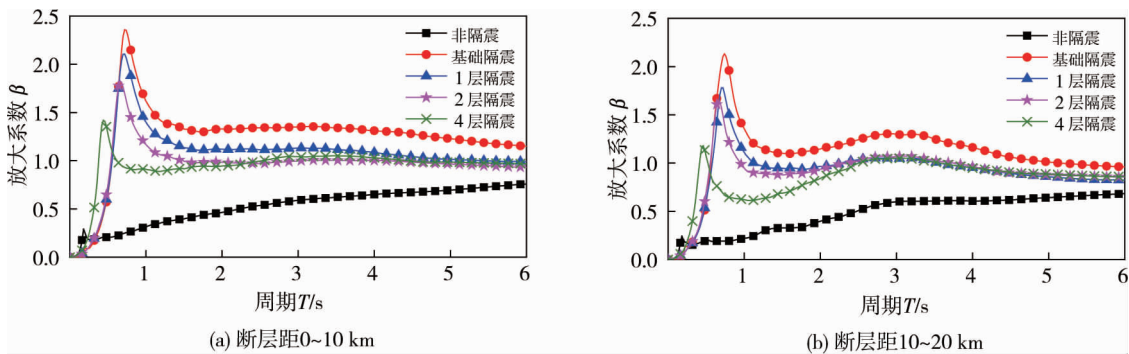


图 7 屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱(不同断层距)

图 8 为有脉冲与无脉冲地震波作用下的屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱.由图 8 和表 6 可知:相比于无脉冲地震波,在有脉冲地震波作用下,非隔震和隔震结构的屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱谱值均增大,且隔震结构对无

脉冲地震波的楼层位移反应  $\beta_d$  谱谱值降低效果显著.

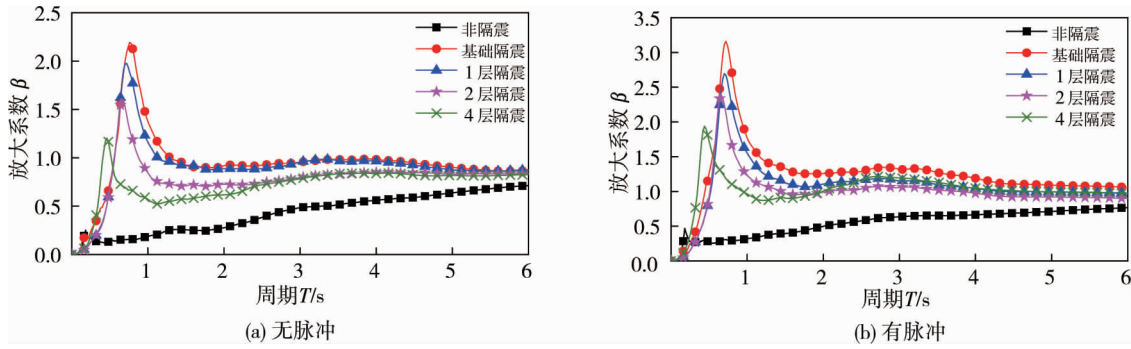


图8 屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱(有无脉冲)

图9为不同周期比(地震波脉冲周期与结构基本周期之比)的屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱.由图9和表6可知:周期比不同的  $\beta_d$  谱谱形有明显不同,脉冲周期与结构基本自振周期接近相比远离的地震波作用下,屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱值有明显增大,在结构基本自振周期处  $\beta_d$  谱值增大显著.

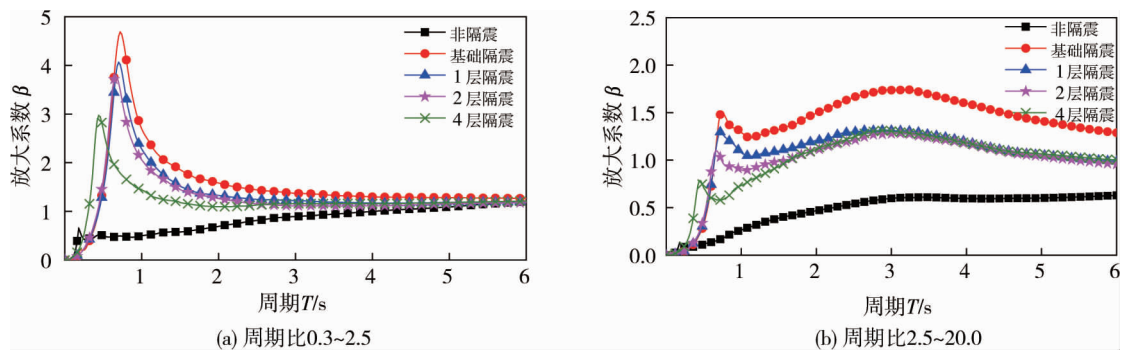


图9 屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱(不同脉冲周期)

表6 屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱谱值比

分类	基础隔震	1层隔震	2层隔震	4层隔震
断层距1	3.206	2.773	2.408	1.868
断层距2	3.123	2.608	2.417	1.728
周期比1	3.903	3.383	3.161	2.475
周期比2	2.769	2.093	2.038	2.086
有脉冲	3.226	2.803	2.455	1.861
无脉冲	3.074	2.770	2.251	1.684

注:断层距1为断层距0~10 km;断层距2为断层距10~20 km;周期比1为周期比0.3~2.5;周期比2为周期比2.5~20.0

分类地震波作用下的屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱有相似规律,由表6分析可知:

- 1) 设置隔震层,结构的屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱的谱值增大,且在短周期段增大明显.
- 2) 结构设置隔震层,增大屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱谱值,随着隔震层设置位置的增高,谱值大幅减小.
- 3) 结构隔震可延长屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱第1次峰值出现的周期,该周期随着隔震层设置的增高而减小,接近于隔震结构的基本自振周期.

### 5 结论

1) 结构设置隔震层,能明显降低屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱谱值.隔震层设置在结构下部比结构上部对谱值减小效果明显.结构隔震可延长屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱最大值出现的周期,该周期随着隔震层设置的增高而减小,接近于隔震结构模型的基本自振周期.

2) 结构设置隔震层,会增大屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱谱值,随着隔震层设置位置的增高,谱值增大幅度减小.结构隔震可延长屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱第1次峰值出现的周期,该周期随着隔震层设置的增高而减小,接近于隔震结构模型的基本自振周期.

3) 断层距较小时相较断层距较大时,屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱和楼层位移反应  $\beta_d$  谱的谱值有小幅值增大.

4) 与无脉冲地震波相比,有脉冲地震波作用下,非隔震和隔震结构的屋面楼层位移反应  $\beta_d$  谱和屋面楼层加速度反应谱  $\beta_{ac}$  谱值均增大;结构隔震对降低无脉冲地震波的屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱与位移反应  $\beta_d$  谱谱值效果明显.

5) 在脉冲周期与结构基本自振周期接近地震波的作用下,屋面楼层加速度反应  $\beta_{ac}$  谱谱值与位移反应  $\beta_d$  谱谱值大幅增大.

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构抗震设计规范(GB 50011—2010) [S]. 2010.
- [2] 黄开繁.层间隔震和基础隔震的二次结构抗震性能的研究[D].江苏:东南大学,2017.
- [3] Kelly J M, Tsai H C. Seismic response of light internal equipment in base-isolated structures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1985, 13(6): 711-732.
- [4] Fan F G, Ahmadi G. Floor response spectra for base-isolated multi-storey structures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, 19(3): 377-388.
- [5] Juhn G, Manolis G D. Experimental study of secondary systems in base-isolated structure [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(8): 2204-2221.
- [6] Isakovic T, Zevnik J, Fischinger M. Floor response spectra in isolated structures subjected to earthquakes weaker than the design earthquake-Part I; Isolation with high-damping rubber bearings [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2011, 18(6): 635-659.
- [7] 韩森,秦丽.连接区独立的多点支撑二次结构抗震分析[J].土木工程学报,2004(4):29-32.
- [8] 林均岐.二级结构地震反应的实验研究[J].地震工程与工程振动,2001,21(3):75-78.
- [9] 沈德建,吕西林.地震模拟振动台及模型试验研究进展[J].结构工程师,2006,22(6):55-58.
- [10] 韩森,孟令帅,杜红凯.近断层地震速度脉冲对层间隔震结构响应影响的振动台实验研究[J].工程抗震与加固改造, 2017(6):68-73.
- [11] 罗楚雄.近断层地震下的层间隔震限位机构实验与模型设计[D].北京:北京建筑大学,2015.
- [12] 孙欢.近断层地震作用隔震层限位振动台实验研究[D].北京:北京建筑大学,2012.
- [13] 段燕玲.隔震结构近断层地震响应振动台实验研究[D].北京:北京建筑大学,2012.