

建筑物高低层地震反应差异研究

夏 坤^{1,2,3}, 张令心⁴, 刘洁平⁴

- (1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国地震局黄土地震工程开放实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000;
4. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:建筑物高低层的地震反应是有差异的。本文对一栋20层钢筋混凝土框架结构进行了平面地震反应分析,并对一栋在汶川大地震中带有器物反应现象的4层钢筋混凝土框架结构进行了三维地震反应分析,得到了各楼层的位移、速度、加速度时程曲线及反应谱曲线。通过对计算结果的分析验证了“随楼层增高,人的感觉和器物的反应越强烈”的现象,初步分析了产生这一现象的原因。

关键词:建筑物高低层; 器物的反应; 时程分析; 反应谱分析

中图分类号: TU311.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)03-0284-07

Study on Difference between Seismic Response of Lower Stories and That of Higher Stories of Building

XIA Kun^{1,2,3}, ZHANG Ling-xin⁴, LIU Jie-ping⁴

- (1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;
2. Open Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, China;
3. Geotechnical disaster prevention engineering technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China;
4. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: The seismic responses of building are different in different stories. The plane seismic response of a reinforced concrete frame structure building with 20 stories and the 3D seismic response of a same structure building with 4 stories, which had objects responses record in rooms during the Wenchuan great earthquake in 2008, are calculated. By analyzing, the seismic responses of two buildings, the time history curves of displacement, velocity, acceleration and acceleration response spectra are obtained. The results prove the phenomenon of "on the higher storey of building, the seismic responses of human and objects are stronger".

Key words: Higher and lower stories of building; Responses of objects; Time history analysis; Response spectrum analysis

0 引言

《中国地震烈度表(1999)》中只给出了地面上人的感觉,但在说明中提到了“在高楼上人的感觉要比地面上室内人的感觉明显,应适当降低评定值”,但并未给出具体如何实施这一条的说明。在制定《中

国地震烈度表(2008)》的过程中,对是否加上高低层人的感觉曾进行过讨论,最终由于高低层人的感觉研究基础不够,所以新烈度表没有作这方面的修改。但实际上,无论是从地震现场调查的种种例子,还是

收稿日期: 2011-03-12

基金项目: 基本科研业务专项项目(2011IESLZ04); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LZ2011042

作者简介: 夏 坤(1985—),女(汉族),黑龙江佳木斯人,助理研究员,主要从事结构抗震研究。

从地震现场资料的统计分析中都能得到这样的结论:“随着楼层的增高,人的感觉和器物的反应也越强烈,即处于中高楼层的人和器物反应要比低楼层的强烈”。本文将从建筑物高低层地震反应差异来进一步验证这一结论,并分析产生这种现象的原因,为烈度表的修改和评定提供可靠依据。

1 分析方法

本文采用有限元数值模拟方法对两个算例进行弹性地震反应分析。分析所用的有限元软件为大型通用分析软件 MSC. Marc^[1]。本文采用二维有限元分析方法对算例1(一栋20层的钢筋混凝土框架结构)进行弹性地震反应分析,应用三维有限元分析方法对算例2(一栋带有器物反应现象的4层钢筋混凝土框架结构)进行弹性地震反应分析。通过对比各楼层的位移、速度和加速度峰值及其各楼层的加速度反应谱,寻找随着楼层变化地震反应差异的规律。

由于地震动的频谱成分会影响结构的地震反应分析的结果,因此本文分析中选取位于坚硬、中等、软弱场地的迁安波、埃尔森特罗波和宁河波作为第一个算例的地震动输入。另外,选取埃尔森特罗波和汶川地震中获取的八角地震波作为第二个算例的地震动输入。四条地震动输入如表1所示,图1为四条地震动的时程曲线。

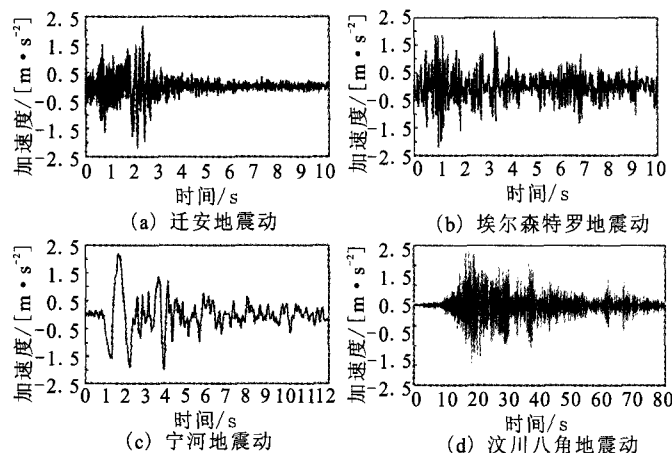


图1 四条地震动的加速度时程曲线

Fig. 1 Four acceleration history curves of ground motion.

为了排除各地震动由于峰值不同对结构反应产生的影响,将算例1中的三条地震动的峰值按照《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)中时程分析所用地震加速度时程曲线的峰值进行调整,选取Ⅶ度罕遇地震动作用下地震加速度时程曲线的峰值220

cm/s²;为了方便与结构的实际震害作对比,将算例2中的两条地震动峰值按八角地震动峰值581.592 cm/s²进行调整。

表1 四条地震动的有关资料

地震记录名称	发生时间	地点	地震动特征周期/s	场地类型
迁安地震动	1976-08-09	河北迁安	0.11	坚硬
El-Centro地震动	1940-05-18	Imperial Valley	0.55	中等
宁河地震动	1976-11-15	天津医院	1.04	软弱
八角地震动	2008-05-12	四川汶川八角	0.10	坚硬

2 算例1分析结果

2.1 算例1简介

算例1为文献[2]中的算例,是一栋20层三跨平面钢筋混凝土框架结构。层高均为3m,跨度均为6m,板厚100mm。材料主要参数见表2。通过自振特性分析得到的结构各阶自振周期如表3所示。

表2 算例1梁、柱尺寸及其它材料参数

构件类型	楼层	截面尺寸/mm		弹性模量 /1×10 ¹⁰	泊松比	密度/ [kg·m ⁻³]
		宽度	高度			
柱	1~5层	990	900	3.0	0.20	2500
	6~10层	880	800	3.0	0.20	2500
	11~15层	770	700	3.0	0.20	2500
	16~20层	660	600	3.0	0.20	2500
梁	1~20层	330	700	3.0	0.20	2500

表3 结构前十阶自振周期

阶次	1	2	3	4	5
自振周期/s	1.523 6	0.518 9	0.296 3	0.202 0	0.148 9
阶次	6	7	8	9	10
自振周期/s	0.122 7	0.116 3	0.098 3	0.092 5	0.076 0

2.2 结构地震反应的对比分析

图2为在迁安、埃尔森特罗和宁河地震动作用下得到的算例1各楼层位移峰值、速度峰值和加速度峰值对比情况。

2.2.1 结构各楼层位移反应峰值

由图2可看出:

- (1) 随楼层增高,位移反应峰值均逐渐加大;
- (2) 在宁河地震动作用下结构各楼层的位移反应峰值最大,其值是埃尔森特罗和迁安地震动作用下结构位移峰值的6~8倍;
- (3) 在埃尔森特罗地震动和迁安地震动作用下,结构的位移反应峰值较接近,但后者稍大些;
- (4) 从位移反应峰值随楼层增高的增大倍数来看,位移反应峰值是2层的10倍出现在5、6层,20倍出现在9、10、11层,屋面的位移反应峰值是2层的30~40倍。

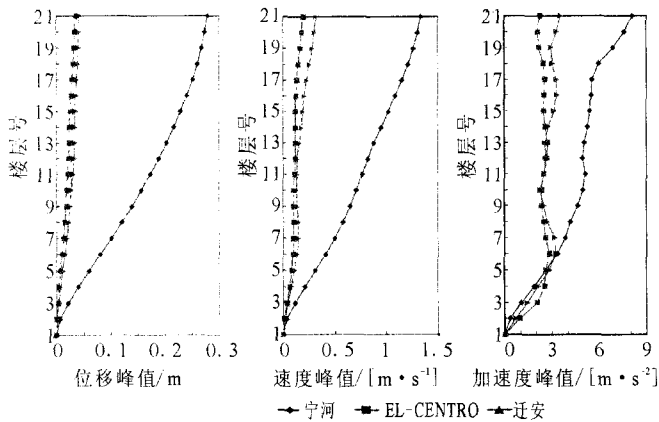


图2 算例1楼层位移、速度和加速度反应峰值对比图

Fig. 2 Reaction peak values of displacement, velocity and acceleration in each story of the structure for example 1.

2.2.2 结构各楼层速度反应峰值

由图2看出:

(1) 随楼层增高速度反应峰值均逐渐加大;

(2) 在宁河地震动作用下结构各楼层的速度反应峰值最大,在埃尔森特罗地震动作用下结构各楼层的速度反应峰值最小,宁河地震动作用下结构各楼层的速度反应峰值是迁安地震动作用下相应楼层速度反应峰值的7倍左右,是埃尔森特罗地震动作用下相应楼层速度反应峰值的4倍左右;

(3) 速度反应峰值随楼层增高的增大倍数没有像位移反应那样有较为一致的结论,但可以指出的是:速度反应峰值在6、7层,11、12、13层,17、18层都有明显的成倍增大现象,屋面的速度反应峰值是2层的15~35倍。

2.2.3 结构各楼层加速度反应峰值

由图2看出:

(1) 总体来说,在宁河地震动作用下,随楼层增高结构各楼层加速度反应峰值逐渐加大,在柱子截面变化(11层)及临近楼层值有小幅度波动;

(2) 在埃尔森特罗地震动和迁安地震动作用下,结构在1~6层随楼层增高各楼层加速度反应峰值逐渐加大,6层以上加速度峰值有波浪似起伏现象,波峰、波谷在柱截面变化附近;

(3) 加速度反应峰值随楼层增高的增大倍数没有像位移反应那样有较为一致的结论,也没有像速度反应那样有较为明显的成倍增长的楼层。

2.2.4 小结与分析

从以上地震反应特征可以看出:

(1) 在长周期、低频成分丰富的地震动(如宁河地震动)作用下,结构的位移、速度、加速度反应最大,这是因为高层建筑的自振周期较长,如算例1的基本振动周期为1.52 s左右,而宁河地震动的卓越周期为1 s左右,二者较接近,容易发生类共振现象,而使得结构的反应较大;

(2) 在短周期、高频成分丰富的地震动(如迁安地震动)和中频成分丰富的地震动(如埃尔森特罗地震动)作用下,结构的反应无论是位移、速度、加速度反应结果都比较相近,前者的结构反应稍大些;

(3) 结构各楼层加速度反应峰值在柱子截面尺寸变化附近往往发生突变,因此在结构设计时应力求结构的刚度均匀变化,以避免应力集中造成的结构破坏;

(4) 随楼层增高结构的反应都随之增大,其中位移反应的增大趋势最明显,加速度反应的增大比例最小,速度反应的增大比例介于二者之间。

从高层建筑各楼层的位移、速度和加速度时程反应分析中看出,位移、速度和加速度反应峰值都随楼层增高而增大。换句话说,对于某高层建筑各楼层中同一器物,它的反应是随楼层的增高而加大的。另外,在不同地震动作用下同一器物的反应强烈程度也不一样,人的感觉也不一样。人和同一器物在不同建筑物内反应程度也不一样,这主要是和建筑物的频谱特性有关。

2.3 结构反应谱的比较

2.3.1 迁安地震动作用下的标准加速度反应谱(图3)

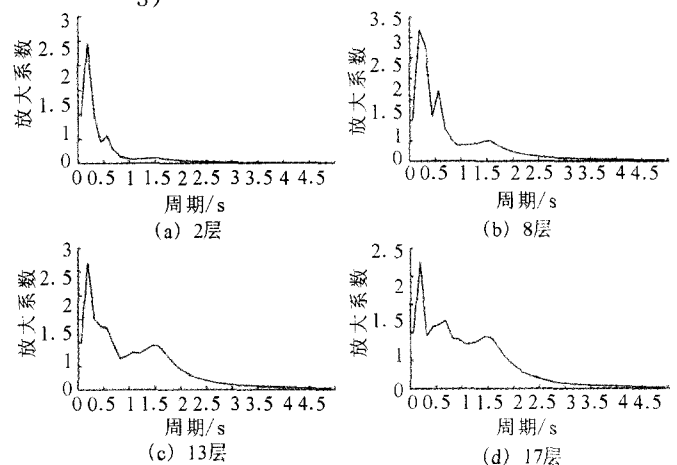


图3 迁安地震动作用下结构典型楼层加速度反应谱

Fig. 3 Acceleration response spectra of typical stories under the Qian'an seismic wave.

(1) 2~7层反应谱的谱形相似,反应谱在周期0.5 s之前放大系数均较大,其卓越周期为0.125 s。此外,反应谱在周期为1.5 s左右的放大系数随楼层的增高不断的增大。因此在这些楼层内固有周期为0.1 s至0.5 s的器物都有较大的反应,对于固有周期为1.5 s左右的器物随着楼层的增高,反应逐渐增大。

(2) 8~12层反应谱的谱形相似,反应谱的平台越来越明显,且随楼层增高逐渐变宽,反应谱在周期为1.8 s之前放大系数均较大。因此在这些楼层内固有周期为0.1 s至1.8 s的器物都有很大的反应。

(3) 13~16层反应谱的谱形相似,反应谱的平台又变得不明显了,但中长周期的谱值却越来越大,即反应谱在周期2 s之前放大系数均较大。在这些楼层内固有周期为0.1 s至2 s的器物都有很大的反应。

(4) 17层~屋面反应谱的谱形相似,反应谱又出现了较为明显的平台,且随楼层增高平台段逐渐变宽,其宽度最大达到0.625 s,而且平台段的放大系数值都较大。此外,2 s内中长周期段的谱值较前面给出的楼层高很多。因此在这些楼层内固有周期为0.1 s至2 s的器物的反应较其它低楼层大很多。

总体来说,在迁安地震动作用下,随着楼层的增高,反应谱的中长周期段谱值逐渐增高,以至于固有周期为0.1 s到2 s的器物的反应随着楼层的增高而增大。

2.3.2 埃尔森特罗地震动作用下的标准加速度反应谱(图4)

(1) 2~8层反应谱的谱形相似,反应谱在周期0.5 s之前放大系数均较大,其卓越周期都为0.125 s。此外,反应谱在周期为0.5 s至1.5 s的放大系数随楼层的增高不断增大。因此在这些楼层内固有周期为0.1 s至0.5 s的器物的反应最大,且固有周期为0.5 s至1.5 s的器物的反应随着楼层的增高逐渐增大。

(2) 9~11层反应谱的谱形相似,反应谱的平台越来越明显,且随楼层的增高逐渐变宽,反应谱在周期为1.8 s之前放大系数均较大。因此,在这些楼层内,固有周期为0.1 s至1.8 s的器物都有很大的反应。

(3) 12~14层反应谱的谱形相似,反应谱的平台又不明显了,且谱值较9~11层似乎变小了。这些楼层是柱变截面以上的楼层,但反应谱在周期为

1.8 s之前放大系数还是比较大的。因此在这些楼层内固有周期为0.1 s至1.8 s的器物都有较大的反应。

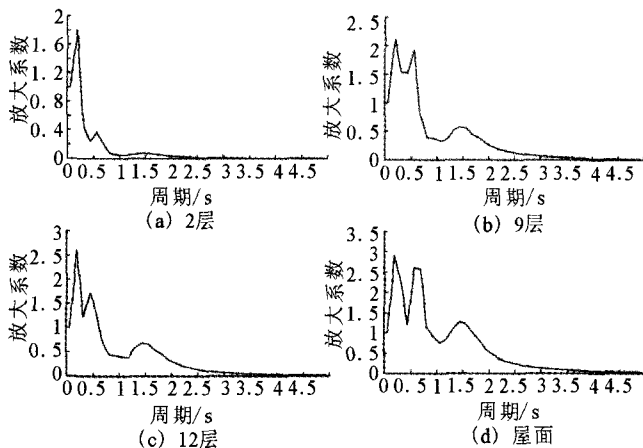


图4 El-Centro地震动下结构典型楼层加速度反应谱

Fig. 4 Acceleration response spectra of typical stories under the El Centro seismic wave.

(4) 15层~屋面反应谱的谱形相似,反应谱的平台又逐渐出现,且随楼层增高逐渐变宽,而且平台段的放大系数值都较大。因此在这些楼层内固有周期为0.1 s至2 s的器物都有很大的反应。

总体来说,在埃尔森特罗地震动作用下,较高的楼层反应谱的平台范围逐渐变宽,以至于固有周期为0.1 s到2 s的器物都有很大的反应。

2.3.3 宁河地震动作用下的标准加速度反应谱(图5)

(1) 2~4层反应谱的谱形相似,出现了两个峰,一个峰在0.5 s附近,另一个峰在1.5 s附近。反应谱在周期为2 s之前放大系数均较大,其卓越周期都为0.5 s左右。因此在这些楼层内固有周期为0.5 s和1.5 s附近的器物均有较大的反应。

(2) 5~10层反应谱的谱形相似,也出现了两个峰,且随着楼层的增高第二个峰的谱值越来越大,反应谱在周期为2.3 s之前放大系数均较大。因此,在这些楼层内固有周期为0.5 s和1.5 s附近的器物都有很大的反应,特别是固有周期为1.5 s附近的器物的反应比2~4层要大,且随着楼层的增高而增大。

(3) 11~13层反应谱的谱形相似,也有两个峰,且第二个峰的谱值逐渐大于第一个峰的谱值,并随着楼层的增高而增加。反应谱在周期为2.5 s之前放大系数均较大。因此,在这些楼层内固有周期为

1.5 s 左右的器物都有很大的反应。

(4) 14~17 层反应谱的谱形相似,反应谱变成了单峰,谱形随楼层增高而逐渐变宽,而且其放大系数也随之增大,卓越周期也后移至 1.5 s 左右。因此在这些楼层内固有周期为 0.1 s 至 2.5 s 附近的器物都有很大的反应。

(5) 18 层~屋面反应谱的谱形相似,出现了较为明显的平台,而且平台段的放大系数值都较大。因此在这些楼层内固有周期为 0.1 s 至 2.5 s 附近的器物都有很大的反应。

总体来说,宁河地震动作用下,随着楼层的增高,反应谱的平台范围逐渐变宽,以至于固有周期为 0.1 s 到 2.5 s 附近的器物都有较大的反应。

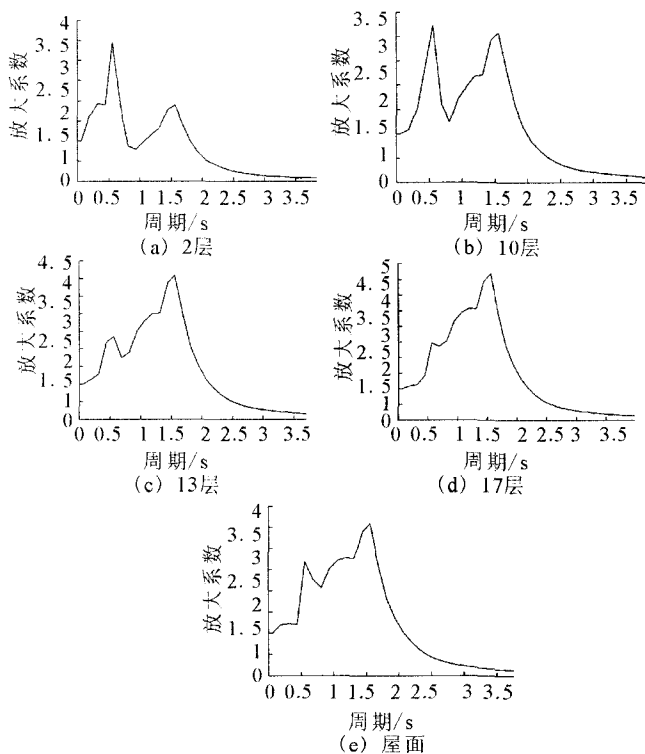


图 5 宁河地震动作用下结构典型楼层加速度反应谱

Fig. 5 Acceleration response spectra of typical stories under the Ninghe seismic wave.

2.3.4 小结与分析

综合以上结果,低频成分丰富的长周期地震动对结构各楼层中长周期的器物影响较大,如宁河地震动,随着楼层的增高反应谱的卓越周期越长,平台宽度越宽,以至于固有周期为 0.1 s 到 2.5 s 的器物都有较大的反应。高频成分丰富的短周期地震动对结构各楼层中短周期的器物影响较大,如迁安地震动,随着楼层的增高反应谱的平台范围逐渐变宽,以

至于固有周期为 0.1 s 到 2 s 的器物都有较大的反应。

除此之外,室内器物比较柔,周期比较长,随着楼层增高反应谱在中长周期越来越卓越,器物的反应必然会增大^[3]。从反应谱放大系数峰值来看,宁河地震动作用下的加速度反应谱放大系数最大,也说明器物的反应也最大。所以从三种地震动的反应谱可以看出,随楼层的增高反应谱的卓越周期越来越长,中长周期段谱值也越来越大,谱形逐渐变宽,导致室内器物的反应也逐渐增大。

3 算例 2 分析结果

3.1 算例 2 简介

算例 2 为在汶川地震现场调查的安县花荪镇移动公司办公大楼,此建筑为 4 层钢筋混凝土框架结构,层高:1 层为 4.5 m;2~4 层均为 3.6 m。算例 2 的梁、柱截面尺寸及其它材料参数见表 4;结构分析模型如图 6 所示;通过自振特性分析得到结构各阶自振周期如表 5 所示。可知:结构的第 1 自振周期为 0.689 s;第 2 自振周期为:0.635 s;第 3 自振周期为:0.600 s。

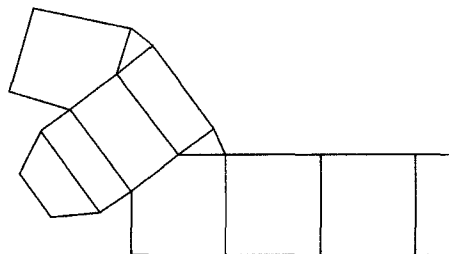


图 6 安县花荪镇移动公司大楼分析模型平面图

Fig. 6 Plan of analysis modal for the Mobile company building in Huagai town, An county.

表 4 算例 2 梁、柱尺寸及其它材料参数

构件类型	截面尺寸/mm		弹性模量 / 1×10^{10}	泊松比	密度/ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
	宽度	高度			
梁	L1	250 300	3.0	0.20	2 500
	L2	300 850	3.0	0.20	2 500
	L3	250 650	3.0	0.20	2 500
	L4	250 400	3.0	0.20	2 500
	L5	350 1 050	3.0	0.20	2 500
	L6	300 400	3.0	0.20	2 500
	L7	250 450	3.0	0.20	2 500
	L8	250 750	3.0	0.20	2 500
柱 1~4 层	500	500	3.0	0.20	2 500

3.2 算例 2 的地震反应分析

3.2.1 结构地震反应的对比分析

图 7 为在八角和埃尔森特罗地震动作用下得到的算例 2 各楼层位移峰值、速度峰值和加速度峰值

对比情况^[4]。

表5 结构前十阶自振周期(秒)

阶次	1	2	3	4	5
自振周期/s	0.688 6	0.634 7	0.599 6	0.520 0	0.404 3
阶次	6	7	8	9	10
自振周期/s	0.350 7	0.327 8	0.294 5	0.210 6	0.180 0

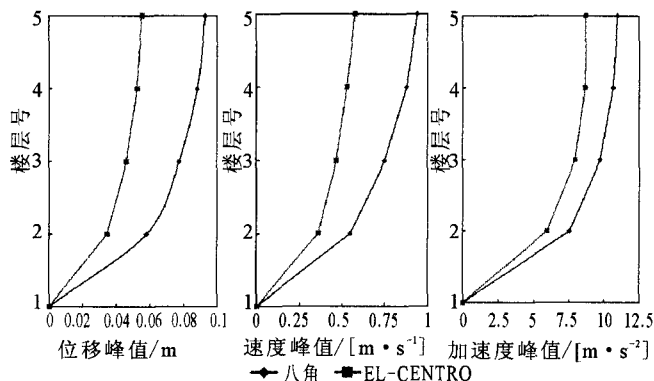


图7 算例2楼层位移、速度和加速度反应峰值对比图

Fig. 7 Reaction peak values of displacement, velocity and acceleration in each story of the structure for example 2.

从图7中可以看出:

(1) 随楼层增高,各楼层的位移、速度、加速度反应峰值都逐渐加大。

(2) 屋面的位移反应峰值和速度反应峰值是2层反应峰值的1.6~1.7倍;屋面加速度反应峰值是2层加速度反应峰值的1.5倍左右。

(3) 在加速度峰值增大的情况中可以看出,随楼层的增高加速度反应峰值的增大幅度逐渐变小。这是因为1层的层高较高为4.5 m,其他楼层层高均为3.6 m。而且在地震现场调查中发现1层反应较轻;2层反应开始加剧,有音箱喇叭倒下的现象;3层东西基本倒掉,空调、文件柜、饮水机倒,文件柜偏离墙体2~3 cm,叠放的两柜相互移位2~3 cm;4层东西也基本倒掉,除空调、文件柜、饮水机倒掉外,有柜子移位3~4 cm,文件匣子摆出,抽屉摆出,电视机、桌子倒掉。可见4层的震害要比3层的震害稍重些,说明计算得到的结果与实际的震害情况相符合^[5]。

3.2.2 结构反应谱的比较

八角地震动、埃尔森特罗地震动作用下结构各楼层标准加速度反应谱见图8和图9。

从图8在八角地震动作用下的标准加速度反应谱可以看出:

(1) 2~3层反应谱的谱形相似,反应谱在周期为1.2 s之前放大系数均较大,其卓越周期都为

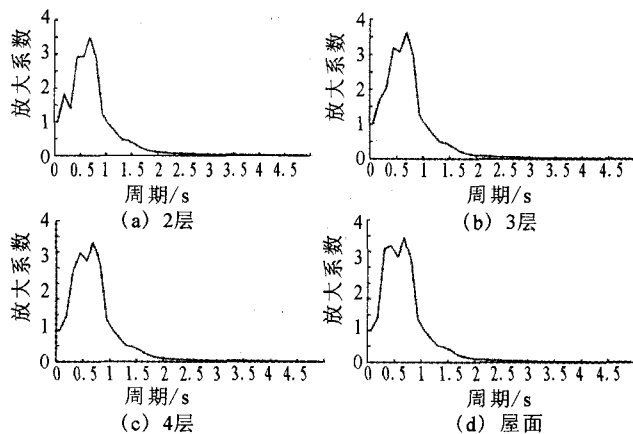


图8 八角地震动作用下各楼层加速度反应谱

Fig. 8 Acceleration response spectra of each story under the Bajiao seismic wave.

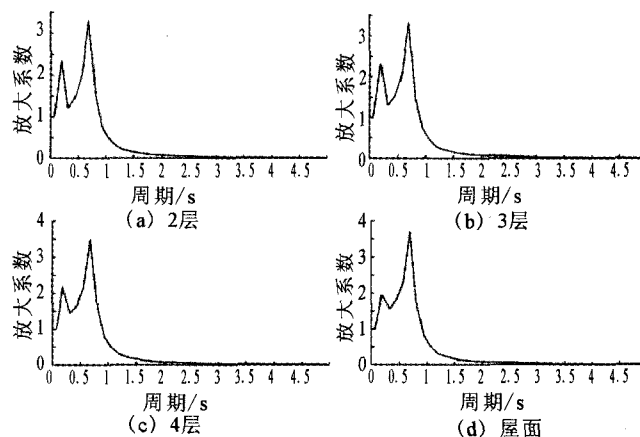


图9 El-Centro地震动作用下各楼层加速度反应谱

Fig. 9 Acceleration response spectra of each story under the El-Centro seismic wave.

0.625 s。因此在这两层内固有周期为0.1 s至1.2 s的器物反应较大。

(2) 4层~屋面反应谱的谱形相似,反应谱的平台越来越明显,且随楼层增高而越来越宽,反应谱在周期为1.5 s之前放大系数均较大。因此在这两层内固有周期为0.1 s至1.5 s的器物都有很大的反应。

总体来说,在八角地震动作用下,随着楼层的增高,反应谱的平台范围逐渐变宽,以至于固有周期为0.1 s到1.5 s的器物都有较大的反应,且反应随楼层增高而逐渐增大。

从图9在埃尔森特罗地震动作用下的标准加速度反应谱可以看出:

(1) 2~3层反应谱的谱形相似,出现了两个峰,一个峰在0.125 s附近,另一个峰在0.625 s附

近。反应谱在周期为 1 s 之前放大系数均较大,其卓越周期都为 0.625 s。因此在这些两层内固有周期为 0.1 s 至 1 s 的器物反应较大。

(2) 4 层~屋面反应谱的谱形相似,也出现了两个峰,第一个峰的谱值较 2~3 层反应谱的值要小,而第二个峰的谱值却较 2~3 层的反应谱的值要大,且随楼层的增高而增大,反应谱的谱形越来越宽,反应谱在周期为 1 s 之前放大系数均较大。因此在这两层固有周期位于第二个峰 0.625 s 附近的器物都有很大的反应。

总体来说,在埃尔森特罗地震动作用下,随着楼层的增高,反应谱的谱形逐渐变宽,以至于固有周期为 0.1 s 到 1 s 的器物都有较大的反应,且随楼层的增高,固有周期位于第二个峰 0.625 s 附近的器物的反应越来越大。

综合以上分析可知,在八角地震动作用下,随着楼层的增高,反应谱的平台范围逐渐变宽,以至于固有周期为 0.1 s 到 1.5 s 的器物都有较大的反应。在埃尔森特罗地震动作用下,随着楼层的增高,反应谱的谱形逐渐变宽,以至于固有周期为 0.1 s 到 1 s 的器物都有较大的反应。八角地震动作用下,反应谱的平台宽度要大于埃尔森特罗地震动作用下的,所以对于相同楼层内的器物,在八角地震动作用下会使更多的器物反应。从反应谱放大系数峰值来看,八角地震动要比埃尔森特罗地震动对器物的反应影响大。所以从两种地震动的反应谱可以看出,随楼层的增高反应谱的谱形越来越明显,范围逐渐变宽,导致对室内器物的影响也逐渐增大。

4 结语

文选取了三条位于不同场地的地震动,对一栋 20 层的钢筋混凝土框架结构进行地震反应分析。

通过分析得到,高层建筑各楼层的位移、速度和加速度反应峰值都随楼层增高而增大。换句话说,对于某高层建筑其各楼层中同一器物,它的反应是随楼层的增高而加大的。另外,随着楼层的增高,各楼层加速度反应谱的平台范围逐渐变宽,以至于固有周期在平台范围内的器物都有较大的反应。这些结论都验证了“随着楼层的增高,人的感觉和器物的反应也越强烈,即处于中高楼层的反应要比低楼层的强烈”的结论。

对另一栋带有器物反应现象的 4 层钢筋混凝土框架结构—安县花荪镇移动公司办公大楼进行了地震反应分析。通过对比各楼层的位移峰值、速度峰值、加速度峰值及其加速度反应谱曲线,得出有限元计算结果与实际的震害情况相符合,也验证了“随着楼层的增高,反应也越强烈”的结论。

通过对两个算例的分析表明,楼层的增加,结构位移峰值、速度峰值和加速度峰值越来越大是器物反应随楼层增高而增大的原因,加速度反应谱随楼层增加其谱形越来越宽,卓越周期后移,中长周期谱值增加是越来越多的不同器物反应越来越强烈的原因。

[参考文献]

- [1] 陈火红,杨剑,薛小香,等.新编 Marc 有限元实例教程[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 吴多太.基于高层结构反应的破坏性地震影响范围研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2009.
- [3] 俞言祥.长周期地震动研究综述[J].国际地震动态,2004,7:1-5.
- [4] 罗光财,丁海平,王绍博.PGV/PGA 和 PGD/PGA 随震级和震中距变化的研究[J].西北地震学报,2010,32(2):112-116.
- [5] 王根龙,刘红帅,张军慧.汶川特大地震之北川县城震害分析[J].西北地震学报,2010,32(2):173-178.