

文章编号:1673-2049(2018)05-0211-06

超高层钢结构地震反应谱特征分析

李 明¹,王浩然¹,徐晓霞²,王元清³,丁大益⁴

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168; 2. 中国石油管道局工程有限公司东北分公司,辽宁 沈阳 110031; 3. 清华大学 土木工程系,北京 100084; 4. 中国五洲工程设计集团有限公司,北京 100053)

摘要:为分析超高层建筑楼面地震反应谱特征,计算了国家金融信息大厦超高层钢结构在不同输入地震动下的楼面地震反应谱。从地震系数、动力放大系数、特征周期和动力放大系数谱谱型 4 个方面对比了楼面和地面地震反应谱的差别。结果表明:楼面地震系数和楼面动力放大系数最大值分别存在大于和小于地面地震系数和地面动力放大系数最大值的情况,最大相差近 1 倍;楼面地震反应谱的特征周期均大于地面地震反应谱的特征周期,最大相差 60% 以上;地面与楼面动力放大系数谱的谱型在某些条件下存在明显不同,楼面动力放大系数谱的第二谱峰值有可能很大,甚至出现接近第一峰值的情况,而地面地震反应谱无此现象;计算楼层附属结构地震作用时,需根据主体结构考虑地震系数、动力系数、特征周期及动力放大系数谱谱型的变化。

关键词:反应谱;地震系数;动力放大系数;特征周期;谱型

中图分类号:TU392 **文献标志码:**A

Analysis of Seismic Response Spectra Characters of Super-high Rise Steel Structure

LI Ming¹, WANG Hao-ran¹, XU Xiao-xia², WANG Yuan-qing³, DING Da-yi⁴

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China;
2. Northeast Branch of China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd, Shenyang 110031, Liaoning, China;
3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
4. China Wuzhou Engineering Group Corporation Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: In order to analyze the floor response characteristics spectrum of super-high rise building, floor response spectrums were calculated by inputting different ground motions to China Financial Information Mansion. The floor and ground response spectrums were compared from the following four aspects: seismic coefficient, dynamic amplification coefficient, characteristic period and shapes of response spectrums. The results show that the floor seismic coefficient and the magnification coefficient are greater or smaller than the corresponding ground one respectively, the biggest difference of which is nearly 1 time; all the floor characteristic periods are greater than those of the ground, the biggest difference of which is over 60%; there are obvious differences between the shapes of floor and ground dynamic magnification factor spectra under some conditions, the second peak of the former may be very large, even near to the first peak, while the latter one has no such phenomenon. Therefore, when the seismic response of floor subsidiary structure is calculated, it is necessary to consider the change of floor seismic

收稿日期:2018-06-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51278312);沈阳市科技计划项目(18-013-0-29)

作者简介:李 明(1979-),男,辽宁沈阳人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:297531635@qq.com。

coefficient, dynamic magnification factor, characteristic period and spectra shape based on the main structure.

Key words: response spectra; seismic coefficient; dynamic magnification factor; characteristic period; spectra form

0 引言

拟建的北京国家金融信息大厦、中国尊和在建的北京奥体南区 3 号地等工程,都将玻璃幕墙设计在结构的顶部,但在计算幕墙的地震作用时,所采用的地震影响系数曲线,即抗震规范中的地震影响系数曲线,是根据地面的加速度时程获得的,而实际输入幕墙的地震动是楼面处的加速度时程。因此,楼面处的加速度地震反应谱与地面处的加速度地震反应谱之间存在何种差别成为幕墙设计师十分关注的

问题。以往有关楼面加速度地震反应谱的研究多针对核反应堆厂房^[1-4],针对一般民用建筑开展的研究较少^[5-7],尤其是针对超高层建筑的研究更少。因此,本文将分析国家金融信息大厦超高层钢结构的地震反应谱特征,探讨其楼面与地面加速度地震反应谱的差别,为幕墙及其他附属于楼面的结构抗震设计提供参考。国家金融信息大厦主体结构总高度约 360 m,总宽度约 55 m,其效果图、剖面图及具有代表性的楼层平面图见图 1。

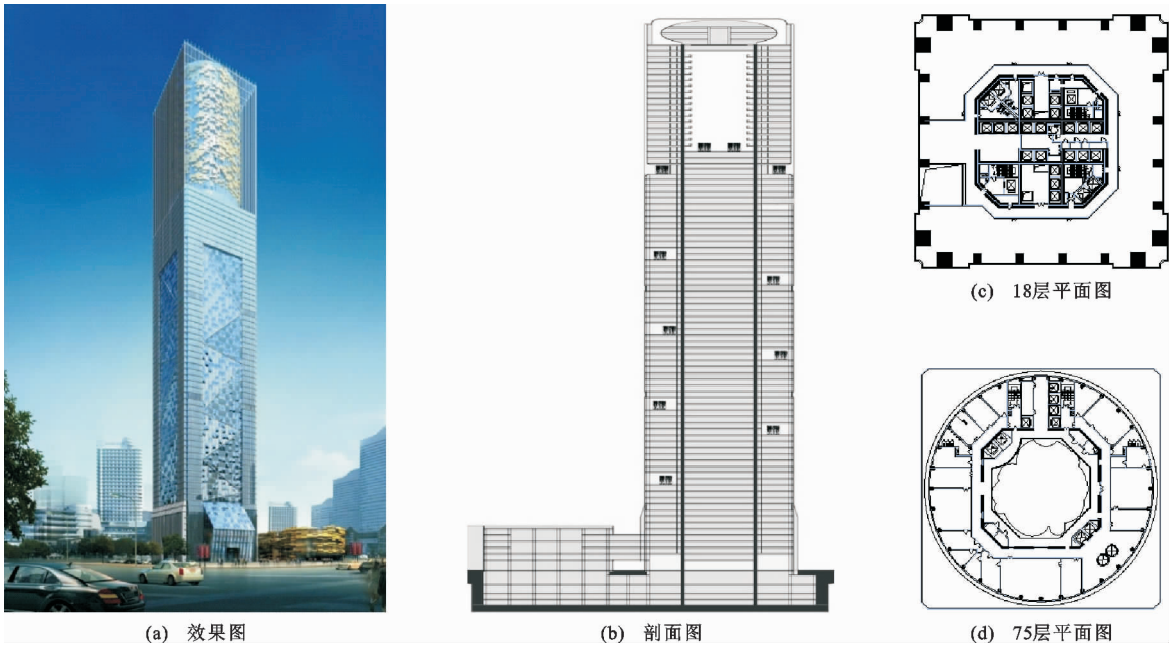


图 1 国家金融信息大厦

Fig. 1 China Financial Information Mansion

1 输入地震动的选择

为分析楼面与地面加速度地震反应谱的差别,选取了 4 条具有一定代表性的地震记录,分别近似于中国抗震规范^[8]规定的Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ类场地。按比例将加速度峰值分别调整为 0.05g,0.1g,0.2g 和 0.4g(g 为重力加速度),调整后的地震记录加速度峰值分别与中国抗震规范烈度 6,7,8,9 度规定的加速度峰值对应。所选择地震记录的主要信息如表 1 所示,其中 A_g 为加速度峰值, T_g 为地震记录加速度地震反应谱对应的特征周期。

表 1 地震记录的主要信息

Tab. 1 Main Information of Ground Motions

地震波	年份	$A_g / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$	持时/s	T_g / s	接近场地
迁安波	1976	132.4	22.02	0.13	Ⅰ类
Emc Fairvi 波	1987	130.4	28.26	0.35	Ⅱ类
El Centro 波	1940	341.7	30.00	0.54	Ⅲ类
天津波	1976	145.8	7.64	1.03	Ⅳ类

2 计算模型概况

国家金融信息大厦主要采用钢结构,在结构顶部标高范围 267~345 m 设有玻璃幕墙。在方案设

计阶段,采用了几种结构方案。本分析所采用的计算模型是依据其中方案之一建立的。由于主要分析楼面与地面加速度地震反应谱的差别,虽然所采用的计算模型与最终计算模型有所差别,但对研究并无影响。该模型前 20 阶振型的自振周期 T 见表 2。

表 2 模型前 20 阶振型的自振周期

Tab.2 Natural Vibration Period of the First 20 Modes of Model

阶次	T/s	阶次	T/s	阶次	T/s	阶次	T/s
1	7.14	6	1.74	11	0.88	16	0.43
2	7.11	7	1.38	12	0.76	17	0.42
3	4.25	8	1.37	13	0.61	18	0.40
4	2.47	9	1.10	14	0.60	19	0.38
5	2.46	10	0.89	15	0.55	20	0.38

3 地震反应谱特征分析

3.1 分析内容

中国抗震规范的设计谱是以地震影响系数 α 的形式给出的^[8-11],即

$$\alpha=k\beta=\begin{cases} (0.45+5.5T)\alpha_{\max} & 0\leq T<0.1\text{ s} \\ \alpha_{\max} & 0.1\text{ s}\leq T<T_g \\ (\frac{T_g}{T})^{0.9}\eta_2\alpha_{\max} & T_g\leq T<5T_g \\ [\eta_20.2^\gamma-\eta_1(T-5T_g)]\alpha_{\max} & 5T_g\leq T<6.0\text{ s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为地震系数,即地面加速度峰值与重力加速度的比值,反映了地震动的强烈程度; β 为动力放大系数,即单质点弹性体系在地震作用下绝对加速度反应与地面加速度峰值之比; α_{\max} 为地震影响系数最大值; η_1 为直线下降段的下降斜率调整系数; γ 为衰减指数; η_2 为阻尼调整系数。

特征周期的计算方法有多种,文献[12]比较了各方法的计算结果。本研究采用目前应用较多的方

法,即

$$T_g=2\pi V_{EP}/A_{EP} \quad (2)$$

式中: V_{EP} , A_{EP} 分别为有效峰值速度和有效峰值加速度。

由于地震影响系数为地震系数与动力放大系数的乘积,因此,分析楼面地震反应谱时,可将楼面反应谱分析分解为地震影响系数和动力放大系数谱分析,而动力放大系数谱的分析,又可分解为动力放大系数谱的最大值、特征周期和谱型分析^[9-12]。因此,以下将从这 4 个方面分析国家融金信息大厦地震反应谱特征,具体方法如下:以所选择的地震记录作为输入地震动,输入计算模型,进行时程反应分析计算;从计算结果中提取各楼层的加速度时程,根据各楼层的加速度时程,计算不同楼层、场地及烈度对应的地震系数、动力放大系数谱的最大值、特征周期和谱型。计算结果见表 3~5。

3.2 地震系数的比较分析

表 3 为不同楼层、场地及烈度对应的地震系数,其中比值为由各楼面加速度时程计算的地震系数(以下简称楼面地震系数)最大值(带下划线的数据)与由地面加速度时程计算的地震系数(以下简称地面地震系数)的比值。从表 3 可以看出,楼面地震系数与地面地震系数二者之间的关系与输入地震动所属的场地类型和楼面所属的楼层有关:①由Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ和Ⅳ类场对应输入地震动计算的楼面地震系数最大值分别出现在 10,70,20,60 层,楼面地震系数最大值出现位置没有明显规律;②楼面地震系数存在大于和小于地面地震系数的情况,其比值最大为 1.63,最小为 0.90。

出现上述情况的主要原因是因为输入地震动的特征周期不同,对结构各阶振型的激发效应也不同,因此输入地震动不同,楼面地震系数最大值及其出

表 3 不同楼层、场地及烈度对应的地震系数

Tab.3 Seismic Coefficients of Different Floors, Site Classifications and Intensities

楼层	Ⅰ类场地不同烈度下的 α				Ⅱ类场地不同烈度下的 α				Ⅲ类场地不同烈度下的 α				Ⅳ类场地不同烈度下的 α			
	6 度	7 度	8 度	9 度	6 度	7 度	8 度	9 度	6 度	7 度	8 度	9 度	6 度	7 度	8 度	9 度
地面	0.05	0.10	0.20	0.40	0.05	0.10	0.20	0.40	0.05	0.10	0.20	0.40	0.05	0.10	0.20	0.40
10	<u>0.05</u>	<u>0.09</u>	<u>0.18</u>	<u>0.36</u>	0.05	0.11	0.21	0.43	0.05	0.10	0.20	0.40	0.05	0.11	0.21	0.43
20	0.03	0.05	0.10	0.20	0.05	0.09	0.18	0.36	<u>0.06</u>	<u>0.12</u>	<u>0.25</u>	<u>0.50</u>	0.06	0.11	0.23	0.45
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60	0.02	0.04	0.08	0.17	0.03	0.06	0.12	0.24	0.05	0.10	0.20	0.40	<u>0.08</u>	<u>0.16</u>	<u>0.33</u>	<u>0.65</u>
70	0.03	0.06	0.11	0.22	<u>0.06</u>	<u>0.12</u>	<u>0.24</u>	<u>0.48</u>	0.05	0.09	0.18	0.37	0.07	0.14	0.29	0.58
80	0.01	0.03	0.05	0.10	0.05	0.09	0.18	0.36	0.06	0.11	0.23	0.46	0.10	0.19	0.39	0.78
比值	0.90	0.90	0.90	0.90	1.20	1.20	1.20	1.20	1.24	1.24	1.24	1.24	1.63	1.63	1.63	1.63

表 4 不同楼层、场地及烈度对应的动力系数谱最大值

Tab. 4 Peak Values of Magnification Coefficient Spectrum of Different Floors, Site Classifications and Intensities

楼层	Ⅰ类场地不同烈度下的 β_{\max}				Ⅱ类场地不同烈度下的 β_{\max}				Ⅲ类场地不同烈度下的 β_{\max}				Ⅳ类场地不同烈度下的 β_{\max}			
	6 度	7 度	8 度	9 度	6 度	7 度	8 度	9 度	6 度	7 度	8 度	9 度	6 度	7 度	8 度	9 度
地面	3.13	3.13	3.13	3.13	3.15	3.15	3.15	3.15	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26
10	2.83	2.83	2.83	2.83	3.43	3.43	3.43	3.43	3.60	3.60	3.60	3.60	3.07	3.07	3.07	3.07
20	4.02	4.02	4.02	4.02	4.28	4.28	4.28	4.28	2.64	2.64	2.64	2.64	2.53	2.53	2.53	2.53
30	<u>4.75</u>	<u>4.75</u>	<u>4.75</u>	<u>4.75</u>	3.54	3.54	3.54	3.54	4.52	4.52	4.52	4.52	3.07	3.07	3.07	3.07
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
70	3.43	3.43	3.43	3.43	<u>6.22</u>	<u>6.22</u>	<u>6.22</u>	<u>6.22</u>	<u>5.51</u>	<u>5.51</u>	<u>5.51</u>	<u>5.51</u>	<u>4.97</u>	<u>4.97</u>	<u>4.97</u>	<u>4.97</u>
80	3.46	3.46	3.46	3.46	4.97	4.97	4.97	4.97	3.08	3.08	3.08	3.08	3.84	3.84	3.84	3.84
比值	1.52	1.52	1.52	1.52	1.98	1.98	1.98	1.98	1.69	1.69	1.69	1.69	1.52	1.52	1.52	1.52

表 5 不同楼层、场地及烈度对应的特征周期

Tab. 5 Characteristic Periods of Different Floors, Site Classifications and Intensities

楼层	Ⅰ类场地不同烈度下的 T_g				Ⅱ类场地不同烈度下的 T_g				Ⅲ类场地不同烈度下的 T_g				Ⅳ类场地不同烈度下的 T_g			
	6 度	7 度	8 度	9 度	6 度	7 度	8 度	9 度	6 度	7 度	8 度	9 度	6 度	7 度	8 度	9 度
地面	0.13	0.13	0.13	0.13	0.35	0.35	0.35	0.35	0.54	0.54	0.54	0.54	1.03	1.03	1.03	1.03
10	0.18	0.18	0.18	0.18	0.35	0.35	0.35	0.35	0.62	0.62	0.62	0.62	0.96	0.96	0.96	0.96
20	0.18	0.18	0.18	0.18	0.41	0.41	0.41	0.41	0.67	0.67	0.67	0.67	1.14	1.14	1.14	1.14
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60	0.24	0.24	0.24	0.24	<u>0.59</u>	<u>0.59</u>	<u>0.59</u>	<u>0.59</u>	0.91	0.91	0.91	0.91	1.41	1.41	1.41	1.41
70	0.21	0.21	0.21	0.21	0.32	0.32	0.32	0.32	0.50	0.50	0.50	0.50	0.61	0.61	0.61	0.61
80	<u>0.37</u>	<u>0.37</u>	<u>0.37</u>	<u>0.37</u>	0.58	0.58	0.58	0.58	<u>0.96</u>	<u>0.96</u>	<u>0.96</u>	<u>0.96</u>	<u>1.58</u>	<u>1.58</u>	<u>1.58</u>	<u>1.58</u>
比值	1.66	1.66	1.66	1.66	1.54	1.54	1.54	1.54	1.40	1.40	1.40	1.40	1.20	1.20	1.20	1.20

现位置也不同。由此说明,计算楼层附属结构的地震反应时,需要考虑地震系数的变化。

3.3 动力放大系数谱最大值的比较分析

表 4 为不同楼层、场地及烈度对应的动力放大系数谱最大值 β_{\max} ,其中比值为由各楼面加速度时程计算的 动力放大系数谱最大值(以下简称楼面动力系数最大值)中的最大值(带下划线的数据)与由地面加速度时程计算的 动力放大系数谱最大值(以下简称地面动力系数最大值)的比值。从表 4 可以看出:①由Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ和Ⅳ类场地对应输入地震动计算的楼面动力系数最大值分别出现在 30,70,70,70 层,楼面地震系数最大值出现的位置并不总是相同,这主要是因为楼面动力系数最大值对应的单自 由体系的频率并不一定是地面加速度峰值对应的 频率,如地面加速度峰值为 0.5g,另一幅值为 0.4g,前者对应的动力系数为 2,后者对应的动力系数为 2.2,在这种条件下,前者的楼面地震系数为 1,而后者的楼面地震系数为 0.88,由此出现了楼面地震系数最大值与动力系数最大值不同时出现的情况;②楼面动力系数最大值存在大于和小于地面动力系数最大值的情况,但比值总是大于 1,比值最大为 1.98,最小为 1.52,出现这种情况的原因与楼面地震系数

相似。由此说明主体结构对地面加速度时程存在放大作用,并且这种放大程度可能较大,出现位置也不固定,因此,在计算附属结构的地震作用时,需要考虑楼面动力系数的变化。

3.4 特征周期的比较与分析

表 5 为不同楼层、场地及烈度对应的特征周期 T_g ,其中比值为由各楼面加速度时程计算的 反应谱特征周期(以下简称楼面特征周期)中的最大值(带下划线的数据)与由地面加速度时程计算的 反应谱特征周期(以下简称地面特征周期)的比值。从表 5 可以看出:①由Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ和Ⅳ类场地对应输入地震动计算的楼面特征周期最大值分别出现于 80,60,80,80 层,虽然没有明显规律,但都出现在较高楼层;②楼面地震特征周期均大于地面特征周期,并且场地类型越高,相差越小,二者的比值最大为 1.66,最小为 1.20。由此说明,楼面特征周期在不同楼层均大于地面特征周期,并且特征周期最大值出现在楼层较高的位置,在计算作用于楼面附属结构的地震作用时,需要考虑楼面特征周期的变化。

3.5 动力放大系数谱的谱型分析

为比较地面和楼面动力放大系数谱的谱型,提取了地面、20 层、40 层、60 层、80 层的楼面动力放大

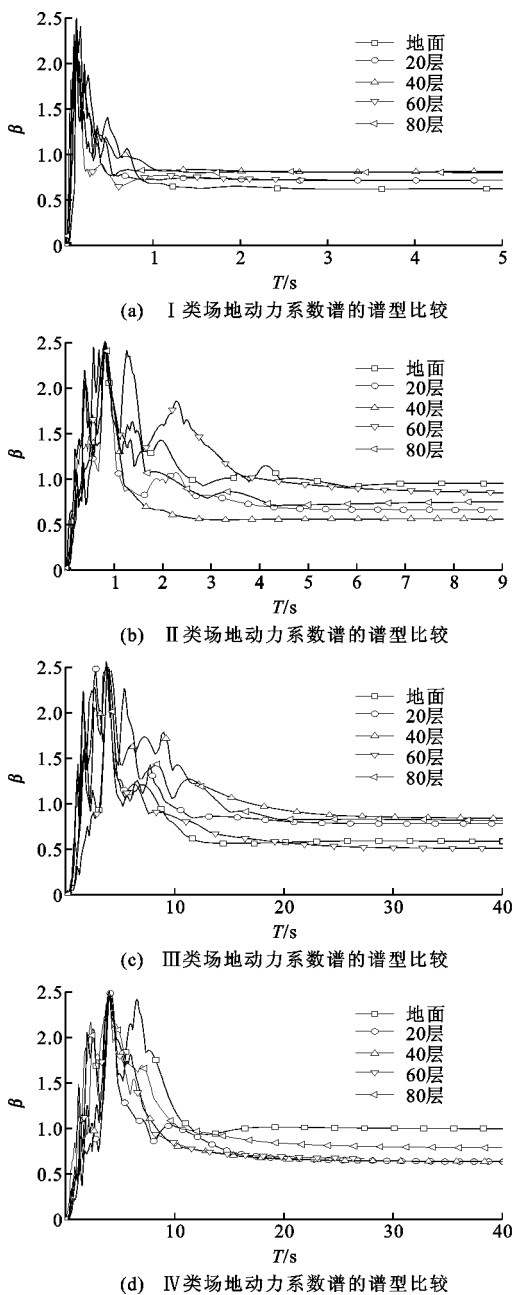


图 2 各类场地动力放大系数谱

Fig. 2 Dynamic Magnification Factor Spectrum of Different Sites

系数谱。由于上述研究已分析了动力系数谱最大值与特征周期的差别,因此在比较动力放大系数谱的谱型时,将同一类型场地下各谱峰值和特征周期按比例缩放,调整到同一值,从而消除谱峰值和特征周期对谱型的影响。具体调整方法如下:

谱的纵坐标 β 调整为

$$\beta = 2.5\beta_a / \beta_p \quad (1)$$

谱的横坐标 T 调整

$$T = T_{\max} T_a / T_c \quad (2)$$

式中: β_a, β_p 分别为谱的实际值和峰值; T_{\max}, T_a, T_c

分别为谱的特征周期最大值、实际周期、特征周期。

通过上述调整方法,将各动力放大系数谱的峰值统一调整为 2.5,将各谱的特征周期统一调整为各谱的特征周期最大值。调整后的动力系数谱如图 2 所示。

从图 2 可以看出:① I 类场地,所有楼面动力放大系数谱的第一峰值明显高于第二峰值,如第 20 层楼面动力放大系数谱的第一峰值为 2.5,第二峰值为 1.4,相差 78%;②随着场地类型的改变,一些楼层楼面动力放大系数谱的第二峰值明显提高,如 II 类和 IV 类场地,第 60 层动力系数谱的第一峰值为 2.5,第二峰值为 2.41,相差不足 4%,III 类场地第 60 层动力系数谱第一峰值为 2.5,第二峰值为 2.25,二者相差 10%。出现这种现象的原因主要是因为输入地震动的高峰值区域越大,引起超高层钢结构低阶振型参与部分的范围越大,即输入地震动存在多个引起超高层发生接近共振的频率。由此说明,地面与楼面动力放大系数谱的谱型可能存在明显不同,楼面动力放大系数谱的谱峰值可能并不惟一,并且这种不同的情况与场地类型有关,因此,在进行楼面附属结构抗震设计时,直接采用地面反应谱的谱型对于某些楼层可能引起很大误差。

4 结 语

(1)楼面地震系数和楼面动力放大系数最大值均存在大于和小于地面地震系数和地面动力放大系数最大值的情况,这种大于和小于的情况与楼层位置和结构所处的场地类型有关,一般 10 层以下变化不大,但在较高的楼层,最大值相差近 1 倍。楼面反应谱的特征周期均大于地面特征周期,在较高的楼层,这种相差程度可能较大,最大相差 60% 以上,但场地类型越高,这种相差的程度越小。因此,计算楼层附属结构的地震反应时,需要考虑地震系数、楼面动力系数和楼面特征周期的变化。

(2)地面与楼面动力放大系数谱的谱型可能存在明显不同,楼面动力放大系数谱的第二谱峰值有可能很大,甚至可能接近第一峰值,这种第二谱峰值的变化也与楼层位置和结构所处的场地类型有关,因此,计算楼层附属结构的地震反应时,需要考虑地震影响系数曲线谱型的变化。

(3)由于楼面地震系数、楼面动力系数、楼面特征周期和楼面动力放大系数谱的谱型均可能随楼层位置和场地类型发生较大变化,因此,在计算该类结构附属结构的地震作用时,应以时程分析法作为辅

助,判断这种影响程度,然后再采用相应的简化地震作用计算方法。

参考文献:

References:

- [1] 朱秀云,潘 蓉,李建波.考虑 SSI 效应的核电站厂房楼层反应谱对比分析[J].核技术,2013,36(4):040610.
ZHU Xiu-yun,PAN Rong,LI Jian-bo. FRS Comparative Analysis of the Nuclear Power Plant Considering SSI Effect[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(4): 040610.
- [2] 逢俊杰,李建波,钟 红.成层地基对核电厂楼层反应谱的影响分析[J].水电能源科学,2010,28(10):67-69.
PANG Jun-jie,LI Jian-bo,ZHONG Hong. Influence Analysis of Layered Foundation on Floor Response Spectrum of Nuclear Power Plant[J]. Water Resources and Power,2010,28(10):67-69.
- [3] 熊 雄,尹春明,张略秋.核电站楼层反应谱后处理方法及程序[J].武汉大学学报:工学版,2012(增):284-286.
XIONG Xiong,YIN Chun-ming,ZHANG Lue-qiu. Post Processing of Floor Response Spectra for Nuclear Power Plants[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2012(S):284-286.
- [4] ASCE 4-98,Seismic Analysis of Safety-related Nuclear Structures and Commentary[S].
- [5] 张 艳.高层结构地震放大作用及反应分析[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2011.
ZHANG Yan. Amplification and Earthquake Response Analysis of High-rise Building[D]. Harbin:Institute of Engineering Mechanics,CEA,2011.
- [6] 秦 权,聂 宇.非结构构件和设备的抗震设计和简化计算方法[J].建筑结构学报,2001,22(3):15-20.
QIN Quan,NIE Yu. Seismic Design and Simplified Analytical Method of Nonstructural Components and Equipment in Buildings[J]. Journal of Building Structures,2001,22(3):15-20.
- [7] 秦 权,李 瑛.非结构件和设备的抗震设计楼面谱[J].清华大学学报:自然科学版,1997,37(6):82-86.
QIN Quan,LI Ying. Design Floor Spectra for Non-structural Components and Equipment in Buildings[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,1997,37(6):82-86.
- [8] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010,Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [9] 李 明,谢礼立,杨永强,等.基于反应谱的近断层地震动潜在破坏作用分析[J].西南交通大学学报,2010,45(3):331-335.
LI Ming,XIE Li-li,YANG Yong-qiang,et al. Potential Damage Analysis of Near-fault Ground Motion Based on Response Spectra[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2010,45(3):331-335.
- [10] 杨永强,谢礼立,李 明,等.汶川地震垂直和平行断层方向地震动特征差异[J].西南交通大学学报,2011,46(2):235-240.
YANG Yong-qiang,XIE Li-li,LI Ming,et al. Differences Between Fault-normal and Fault-parallel Components of Horizontal Ground Motion in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2011,46(2):235-240.
- [11] 公茂盛,谢礼立,欧进萍.基于结构强震记录框剪结构自振周期经验公式[J].土木工程学报,2010,43(12):35-40.
GONG Mao-sheng,XIE Li-li,OU Jin-ping. Empirical Formula for Fundamental Period of Frame-shear Wall Structures Based on Structural Strong Motion Records[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(12):35-40.
- [12] 李 明.近断层地震动对结构抗震设计的影响研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2010.
LI Ming. Study of the Effect of Near-fault Ground Motion on Structural Seismic Design[D]. Harbin:Institute of Engineering Mechanics,CEA,2010.