

文章编号: 1000-4750(2008)07-0125-08

多维地震作用下偏心结构楼板谱分析

*国 巍, 李宏男

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

摘 要: 利用 SIMULINK 仿真工具对水平双向地震输入下偏心结构的楼板谱进行了计算, 研究了影响楼板谱变化的几个重要参数, 最后对现行抗震设计规范中楼板谱计算的 SRSS(Square Root of the Sum of Squares)方法进行了分析, 并指出了它的不足。研究表明: 改变附属结构质量楼板谱峰值区域会有显著的变化, 调谐频率处楼板谱变化最明显, 地震动卓越频率处楼板谱变化相对较小; 改变偏心结构和附属结构阻尼比都会引起楼板谱的变化, 但是二者影响的效果不同; 附属结构所在楼层和层内位置的改变, 使楼板谱发生变化; 偏心结构偏心距对楼板谱有较复杂的影响; 规范楼板谱在非峰值区域比较精确, 在峰值区域存在较大误差, 当偏心结构在地震作用下不同方向耦合效应明显时, 规范楼板谱在非峰值区域也存在一定的误差。

关键词: 偏心结构; 楼板谱; 时程分析; 多维地震; SIMULINK

中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A

FLOOR RESPONSE SPECTRUM OF ECCENTRIC STRUCTURE TO TWO-DIMENSIONAL EARTHQUAKE

*GUO Wei, LI Hong-nan

(State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The floor response spectrum of the eccentric structure subjected to two-dimensional horizontal earthquake input is computed on SIMULINK emulator, and a few influential key parameters are also discussed. In the end the shortcomings of the SRSS (Square Root of the Sum of Squares) method used in the current seismic design code are indicated. The results show that with the subsystem's mass varying the floor response spectrum changes significantly at the tuned frequency, and less significantly at the earthquake dominant frequency. The floor response spectrum is varied with different damping ratios of the eccentric structure and the subsystem. Furthermore, spatial locations of the subsystem influence the floor response spectrum, so does the eccentric distance of the eccentric structure. The latter is more complicated. The floor response spectrum obtained according to the design specifications is not proper in the peak-value region, and it is proper outside the peak-value region if the multi-directional coupling phenomenon is not significant.

Key words: eccentric structure; floor response spectrum; time-history analysis; multi-dimensional earthquake; SIMULINK

随着社会经济和科学技术的发展, 建筑物的附属结构, 如设备、管线和非结构构件的抗震设防得到了人们的广泛关注。在地震工程中它的损坏所造成的损失往往是巨大的, 而一些重要非结构构件的

损坏还将在相当长的时间内影响建筑物的正常使用。在核电站、发电厂等重要工程中, 设备、管线等附属结构的抗震设防还涉及到生命安全、经济恢复等问题。针对这种情况, 一些国家如日本、美国、

收稿日期: 2006-12-03; 修改日期: 2007-07-20

基金项目: 教育部创新团队项目(IRT0518)

作者简介: *国 巍(1982—), 男, 山东人, 博士生, 从事结构和非结构构件的抗震减震研究(Email: ieuwoug8@sohu.com);

李宏男(1957—), 男, 沈阳人, 教授, 博士, 从事结构多维抗震、振动控制、健康监测等研究(E-mail: hnli@dlut.edu.cn).

澳大利亚、新西兰等都给出了简化的抗震设计楼板谱。20 世纪 90 年代中期, 针对核电厂的抗震设防, 我国也制定了相应的规范 GB50267-97, 并给出了楼板谱的求解方法^[1]。

关于楼板谱的求解, 规范假定建筑结构的质量刚度均匀分布, 并忽略了一些次要因素。而实际建筑结构往往是偏心结构, 存在着平-扭耦合效应, 实际地震动也往往是多维地震动, 不同方向的地震动存在着耦合效应, 这些因素都说明了传统楼板谱分析方法的不合理。从 20 世纪 70 年代开始, 国外许多学者针对地震作用下偏心建筑平-扭耦合效应进行了大量的研究, 如 Warburton 等^[2]人。发展到 90 年代, 偏心结构的楼板谱开始引起了人们的广泛关注, Huang 等^[3]研究了考虑扭转效应的附属结构-主体结构动力特性; Yang 等^[4]采用摄动法^[5]计算了附属结构质量较小时系统的动力特性, 并对单向水平地震动输入下偏心结构上附属结构的动力响应进行了研究。

本文采用三类场地的实际地震波, 通过 SIMULINK 仿真工具对具有附属结构的 3 层偏心框架结构进行了水平双向地震动输入下的动力分析, 做出了楼板谱曲线, 并分析了其影响因素, 最后指出了规范中楼板谱求解方法的不足。

1 多维地震作用下偏心结构运动方程

本文对偏心结构做如下假定: 楼板为刚性平板; 框架结构每层质量和转动惯量均集中于楼板处; 每层楼板存在三个自由度, 两个水平向的平动和一个绕竖轴的转动; 剪切刚度与扭转刚度由层间柱剪切刚度提供, 忽略柱子的抗扭刚度; 各层质心位于一个竖轴, 刚心位于另一竖轴。

设偏心结构质量矩阵为 $\mathbf{M}$; 阻尼矩阵为 $\mathbf{C}$, 刚度矩阵为 $\mathbf{K}$, 位移响应用 $\mathbf{U}$ 表示; 地震动输入为 $\mathbf{U}_g$; 位置矩阵为 $\mathbf{E}$, 在水平双向地震动输入下, n 层偏心结构的运动方程如下^[6]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{E}\ddot{\mathbf{U}}_g \quad (1)$$

其中: $\mathbf{U} = \{\mathbf{U}_x, \mathbf{U}_y, \mathbf{U}_\theta\}^T$, $\mathbf{U}_x = \{u_{x1}, u_{x2}, \dots, u_{xn}\}$, $\mathbf{U}_y = \{u_{y1}, u_{y2}, \dots, u_{yn}\}$, $\mathbf{U}_\theta = \{u_{\theta1}, u_{\theta2}, \dots, u_{\theta n}\}$, $\ddot{\mathbf{U}}_g = \{\ddot{u}_{gx}, \ddot{u}_{gy}\}^T$, $\mathbf{E} = [\text{diag}(\mathbf{I}_{1 \times n}, \mathbf{I}_{1 \times n}), \mathbf{0}_{2 \times n}]^T$, $\mathbf{I}_{1 \times n} = \{\underbrace{1, 1, \dots, 1}_n\}$, $\mathbf{M} = \text{diag}(\mathbf{M}_x, \mathbf{M}_y, \mathbf{M}_\theta)$, $\mathbf{M}_x = \mathbf{M}_y = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_n)$, $m_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为

第 i 层质量, $\mathbf{M}_\theta = \text{diag}(J_1, J_2, \dots, J_n)$, $J_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为转动惯量;

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & K_{x\theta} \\ 0 & K_y & K_{y\theta} \\ K_{\theta x} & K_{\theta y} & K_\theta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_x = \begin{bmatrix} k_{x1} + k_{x2} & -k_{x2} & & & \\ -k_{x2} & k_{x2} + k_{x3} & -k_{x3} & & \\ & -k_{x3} & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & -k_{xn} \\ & & & -k_{xn} & k_{xn} \end{bmatrix},$$

$\mathbf{K}_y$ 、 $\mathbf{K}_\theta$ 形式与 $\mathbf{K}_x$ 类似, 只是将下标换为 y 、 θ 、 $\mathbf{K}_{x\theta} = \mathbf{K}_{\theta x}^T = \mathbf{K}_x \mathbf{e}_y$, $\mathbf{K}_{y\theta} = \mathbf{K}_{\theta y}^T = \mathbf{K}_y \mathbf{e}_x$, 阻尼 $\mathbf{C}$ 采用 Rayleigh 阻尼。

假设偏心结构上存在单自由度振荡器, 并与主体偏心结构形成一个动力系统。其质量为 m_s , 阻尼为 c_s , 刚度为 k_s , u_s 为附属结构相对于支撑处的位移, u_c 为支撑处位移, F 为附属结构与主体结构间的相互作用力, 则主体偏心结构的运动方程为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{E}\ddot{\mathbf{U}}_g + \mathbf{E}_s F \quad (2)$$

附属结构的运动方程为:

$$m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s = -m_s \ddot{u}_c \quad (3)$$

其中: $F = k_s u_s + c_s \dot{u}_s$; $\mathbf{E}_s$ 为 F 作用位置矩阵, 当附属结构不在主体结构质心处时存在扭转力矩,

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{e}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad u_c = \begin{bmatrix} u_{cx} \\ u_{cy} \end{bmatrix}, \quad u_s = \begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \end{bmatrix}.$$

2 仿真模型

本文依据理论方程, 利用 MATLAB 工具箱中的 SIMULINK 工具对偏心结构进行了水平双向地震动作用下的仿真分析^[7]。利用 SIMULINK 建立了动力分析模型, 避免了大规模复杂程序的编写, 实现模块化操作, 模型对用户完全透明, 适用性更加广泛。模型中主体结构为偏心结构, 附属结构通过弹簧、阻尼器与主体结构相连接, 并通过相互作用力 F 来传递振动能量。

图 1 为本文建立的动力分析模型。其中主体结构和附属结构分别采用单个模块进行描述, 并通过传递模块连接, 实现二者之间能量的传递。整个模型分为以下几个模块:

激励输入模块：提供地震动输入，本文采用 El Centro 波，Taft 波，迁安波三种地震波。

主体结构模块：对偏心结构进行动力分析，求解偏心结构的动力响应。

传递模块：提取附属结构与偏心结构连接部位

的动力响应。

附属结构模块：对附属结构进行动力分析，求解附属结构的动力响应。

响应输出模块：选择附属结构的位移、速度、加速度三种动力反应进行描述。

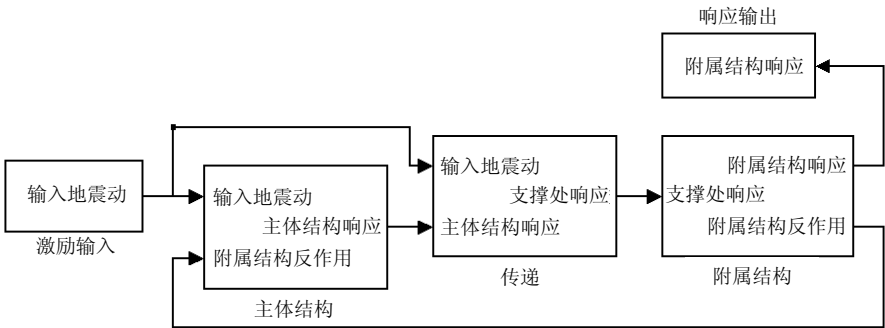


图 1 动力分析模型

Fig.1 Model of dynamic analysis

3 数值分析及影响参数研究

3.1 框架结构及基本参数

一栋 3 层偏心框架结构，如图 2，其几何中心与刚度中心重合，结构重心 X 方向的偏心距 $e_x = 6\text{m}$ ， Y 方向偏心距 $e_y = 2\text{m}$ ，结构长度 L 和宽度

W 分别为 48m 和 16m ，前两阶阻尼比为 $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.05$ ，在第 3 层上有一附属结构，质量 $m_s = 9.216 \times 10^4\text{kg}$ ，阻尼比为 $\zeta_s = 0.05$ 。结构的基本参数列于表 1。水平双向地震波采用分别代表 3 类场地类别的 El Centro 波，Taft 波和迁安波， X 方向、 Y 方向振幅分别调节到 g ， $0.85g$ ($g=9.81\text{m/s}^2$)。

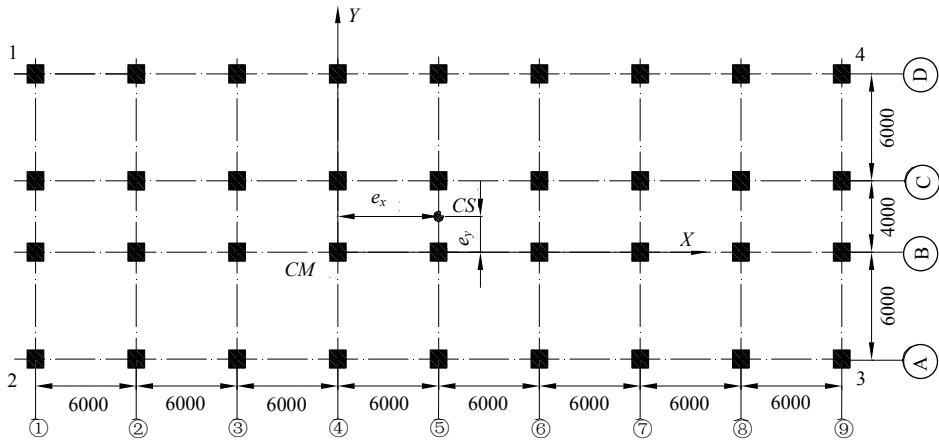


图 2 结构平面图

Fig.2 Structural plane diagram

表 1 结构基本参数

Table 1 Basic parameters of structure

各层质量 $m_i/(10^5\text{kg})$	各层转动惯量 $J_i/(10^8\text{kg}\times\text{m}^2)$	层高/m		各层刚度系数					
				$k_{xi}/(10^9\text{N/m})$		$k_{yi}/(10^9\text{N/m})$		$k_{\theta i}/(10^{11}\text{N}\cdot\text{m/rad})$	
9.216	2.797	底层	其余层	底层	其余层	底层	其余层	底层	其余层
		4.2	3.6	1.021	1.6213	1.021	1.6213	3.1651	5.0261

3.2 偏心结构平-扭耦合分析

如图 2，设 1 轴和 D 轴交点为位置 1，1 轴和 A 轴交点为位置 2，9 轴和 A 轴交点为位置 3，9 轴和

D 轴交点为位置 4。偏心结构在地震作用下存在平-扭耦合效应。将附属结构放置在偏心结构 1 轴与 D 轴相交处，即位置 1。这时附属结构不仅对主体结

构有 X 方向和 Y 方向的水平作用力, 而且还会对主体结构施加一个扭转力矩 M_F , 在动力方程(2)中 M_F 的作用位置通过矩阵 E_s 得以体现。相对于偏心结构的尺寸, 位置 1 的振动响应幅度很小, 可以认为在地震过程中它始终位于距离框架结构刚心 $W/2$ 、 $L/2$ 的位置处。偏心距 $e_x = 6\text{m}$, $e_y = 2\text{m}$, 附属结构位于框架结构第 3 层位置 1 处, 以此作为基本工况来计算附属结构的动力响应。根据规范 GB50267-97 取计算频率点^[1], 可以得到 X 方向、 Y 方向的楼板谱。

3.3 质量对楼板谱的影响

当附属结构质量在 $1/10 M_i - M_i$ (M_i 为附属结构所在楼层质量)变化时, 做出楼板谱曲线, 如图 3 所示。谱线的峰值点 a 、峰值点 b 对应偏心结构的前 2 阶频率, 峰值点 c 对应过滤地震动的频率。经过主体结构滤波之后, 地震动频率对应的能量大大减小, 使得当附属结构质量为 $1/10 M_i$ (M_i 为附属结构所在楼层的质量)时峰值点 c 明显低于峰值点 a 、峰值点 b 。随着附属结构质量的增大, 楼板谱峰值相应减小, 非峰值点区域变化不明显。当附属结构质量增大至所在楼层质量 M_i 时, 峰值点 a 、峰值点 b 下降最明显, 峰值点 c 变化相对较小。同时由于质量增加导致的调谐影响的增大, 使得峰值点 a 、峰值点 b 下降幅度远大于峰值点 c , 当附属结构质量为 M_i 时, 峰值点 a 、峰值点 b 反而低于峰值点 c 。从峰值点变化的幅度可以看出, 附属结构与偏心结构调谐时, 附属结构的响应对质量的变化很敏感。这与非偏心结构楼板谱相类似^[8]。

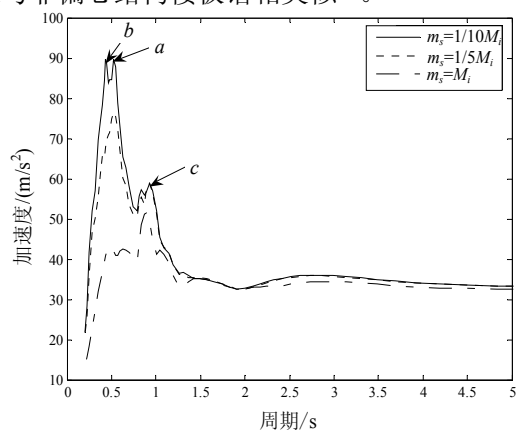
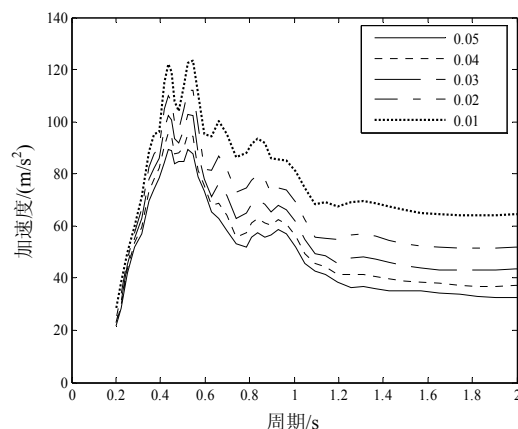


图 3 质量对楼板谱的影响

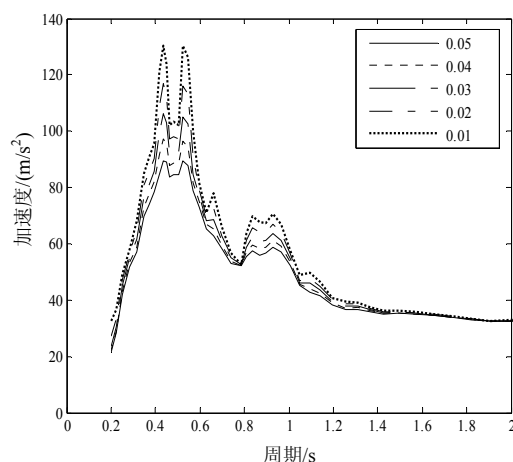
Fig.3 Effect of different mass on floor response spectrum

3.4 阻尼比对楼板谱的影响

分别改变偏心结构和附属结构的阻尼比, 楼板谱曲线如图 4 所示。



(a) 改变偏心结构阻尼比



(b) 改变附属结构阻尼比

图 4 阻尼比对楼板谱的影响

Fig.4 Effect of different damping ratio on floor response spectrum

从图 4(a)中可以看出, 随着偏心结构阻尼比的增加, 在整个频率范围内楼板谱整体降低, 偏心结构阻尼比的增大并不影响楼板谱的曲线形状。从图 4(b)中可以看出, 随着附属结构阻尼比的增加, 楼板谱峰值点区域变化明显, 峰值点附近谱值随阻尼比增大而减小, 非峰值点区域变化很小。

偏心结构和附属结构阻尼比的变化都会引起楼板谱的变化, 但是二者影响的效果不同。跟非偏心结构一样, 阻尼比也是偏心结构楼板谱要考虑的一个重要因素^[9]。

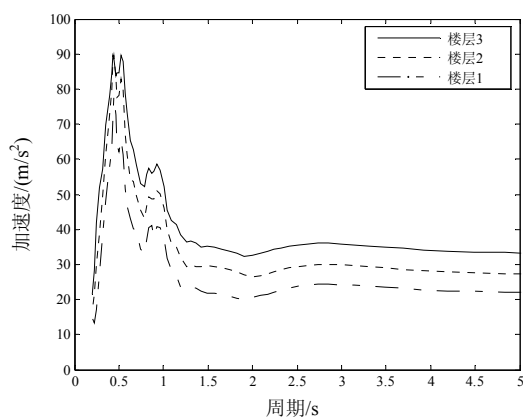
3.5 附属结构所在位置对楼板谱的影响

3.5.1 附属结构所在楼层变化的影响

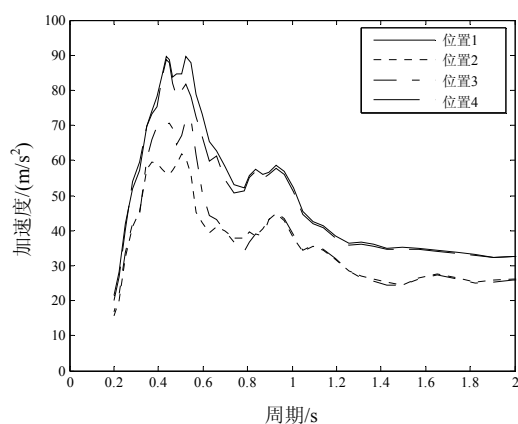
改变附属结构的所在楼层, 楼板谱曲线如图 5(a)。从中可以看出, 随楼层的升高, 楼板谱上各点谱值也相应增大, 但是谱线整体形状并没有变化。这是由于楼层越高偏心结构响应越大, 输入给附属结构的能量越大, 附属结构响应幅值也越大, 对楼板谱曲线有个整体提升的效果。

3.5.2 附属结构层中位置变化的影响

改变附属结构的层中位置,使之分别处于位置1、位置2、位置3、位置4,得到楼板谱,如图5(b)。



(a) 所在楼层变化



(b) 层内位置变化

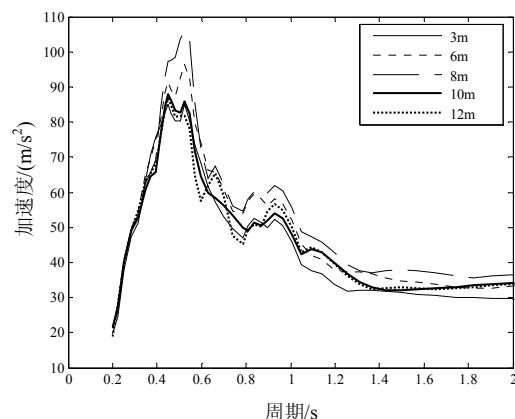
图5 附属结构所在位置对楼板谱的影响

Fig.5 Effect of different position of sub-system on floor response spectrum

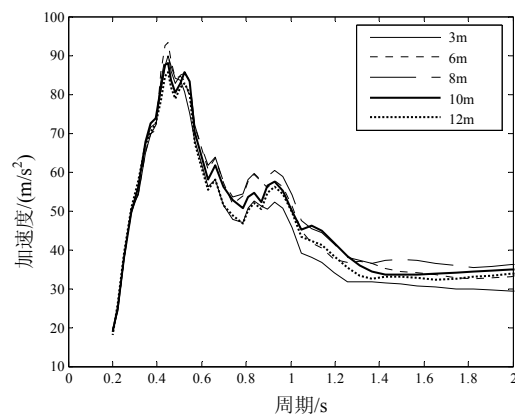
从图5(b)中可以看出,位置1、位置4的楼板谱上各点谱值较大,并且二者在非峰值点区域吻合较好;位置2、位置3相对较小,二者同样在非峰值点区域相吻合。层内位置变化对楼板谱的影响:位置1、位置4在同一横轴上,在X方向上平-扭耦合效应相同,所以非峰值点区域的楼板谱吻合较好,同时由于附属结构在位置1、位置4时对偏心结构的扭转力矩不同,而相互作用力矩的不同在调谐点处对楼板谱影响最明显,所以位置1、位置4的峰值点不相吻合;同理,位置2、位置3也处于同一横轴上,导致了它们在非峰值点区域相吻合,峰值点区域存在一定的差别。此外,由于位置1、位置4在Y向距离重心比位置2、位置3更远,扭转对平动分量的放大效应更明显,因此位置1、位置4处楼板谱高于位置2、位置3处楼板谱曲线。

3.6 偏心距对楼板谱的影响

偏心距是偏心结构楼板谱的一个重要影响因素。随着偏心距的变化,位置1、位置2、位置3、位置4的动力响应相应增大或减小,附属结构的动力响应也将随之发生改变。图6给出了当偏心距 $e_x = 3\text{m}$ 、 $e_x = 6\text{m}$ 、 $e_x = 8\text{m}$ 、 $e_x = 10\text{m}$ 、 $e_x = 12\text{m}$ 时位置1、位置4处的楼板谱。



(a) 位置1



(b) 位置4

图6 X方向偏心距的改变对楼板谱的影响

Fig.6 Effect of different eccentricity distance in X direction on floor response spectrum

从图6中可以看出,随着 e_x 的增加,位置1处的楼板谱变化比较明显,而位置4处楼板谱变化较小;位置1、位置4处的楼板谱并不是随着偏心距的增加而单调增减,随着 e_x 的增加,楼板谱曲线经历了一个先升高后降低的过程。这是因为偏心距的改变使得偏心结构的动力响应发生变化^[10],同时附属结构对偏心结构存在反作用力和作用力矩,在两者共同作用下,楼板谱随着偏心距的改变呈现一个复杂的变化。

偏心结构的偏心变化对楼板谱的影响是个值得研究的问题,目前关于这方面的研究尚少。

4 关于规范 GB50267-97 中楼板谱求解方法的讨论

规范 GB50267-97 给出了楼板谱的近似求解方法^[1]: 对于质量或刚度不对称的支撑体系, 每个方向的楼板反应谱, 均应根据在两个水平向和一个竖向三个地震动分量分别作用下沿该方向地板反应按平方和的平方根法组合的结果确定。从描述中可以看出该方法存在着两个方面的问题: 一是没有考虑附属结构与偏心结构的相互作用, 这会导致峰值处谱值的不合理; 二是采用了 SRSS 法来考虑偏心结构两个方向运动的叠加, 这是一种近似处理方法。图 7 中给出了三类场地地震波对应的规范方法

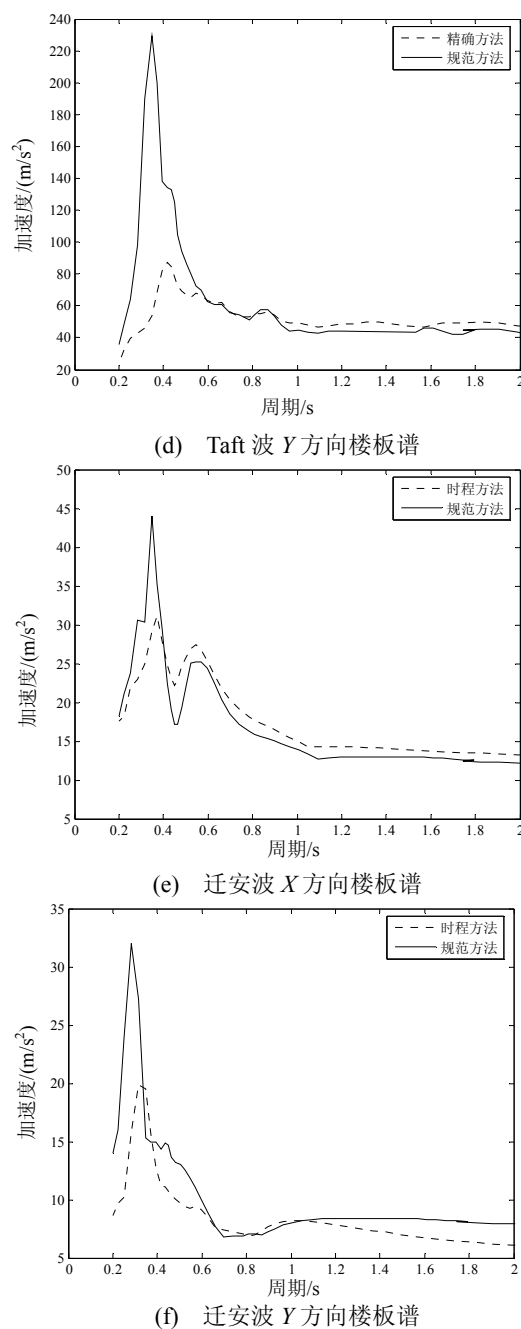
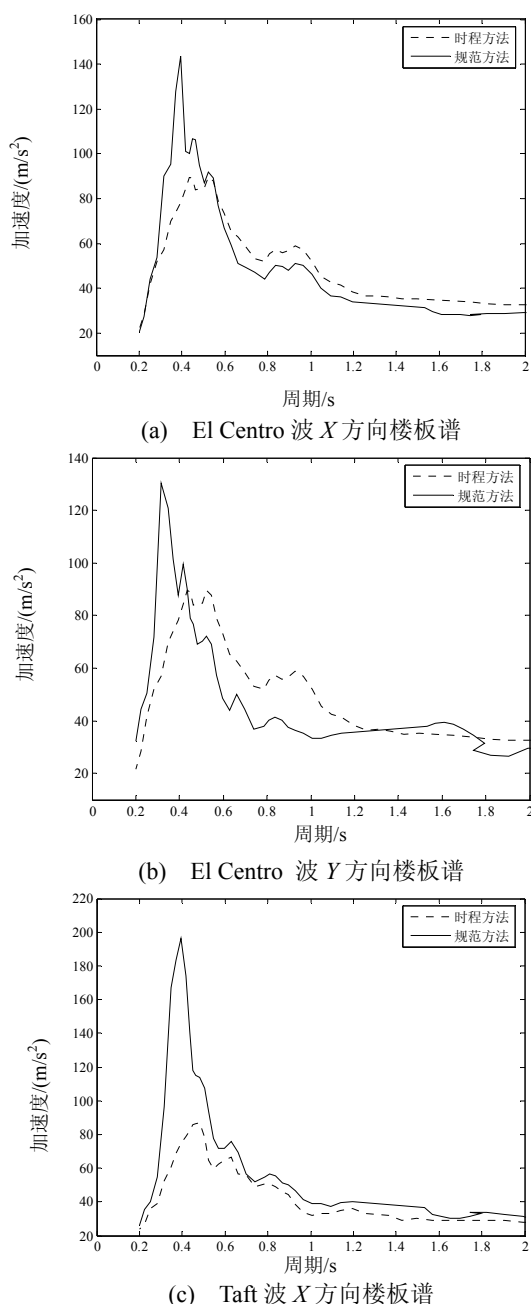


图 7 三类地震波对应的 X 方向、Y 方向楼板谱

Fig.7 Floor response spectrum in X,Y direction of three kind of seismic waves

和时程方法求解的楼板谱(以时程方法楼板谱近似作为精确解)。

本文着重探讨规范楼板谱与时程方法求得的楼板谱在峰值点区域的不同, 以此说明规范方法的误差所在。从图 7 中的规范楼板谱可以看到, 峰值点对应的频率在偏心结构体系的前三阶频率(分别对应 0.48s、0.39s、0.33s)附近, 并可以看出高阶频率对应峰值明显高于基频对应峰值, 即: 不考虑附属结构与偏心结构相互作用时, 偏心结构高阶频率

对附属结构响应的调谐影响更大。

此外, X 向楼板谱最大峰值点对应的周期均在 0.39s 附近, 而 Y 向楼板谱峰值点对应的周期在 0.33s 附近, 也就是说 X 向楼板谱峰值点对应着偏心结构第 2 阶频率, Y 向楼板谱峰值点对应着偏心结构第 3 阶频率。在本文实例中, 这是由于第 2 阶频率对应的振动 X 方向占优, 而第 3 阶频率对应的振动 Y 方向占优。从图 7 中的时程方法求解的楼板谱可以看到, 它的最大峰值点在偏心结构基频附近, 而高

阶频率对应的峰值小于基频峰值。对比规范楼板谱可知, 规范楼板谱过高估计了高频分量的影响, 它所对应的偏心结构高阶频率点处的楼板谱峰值过大, 存在很大的误差。相对而言, 规范楼板谱在基频峰值点处误差较小。

取 0.2513s、0.3142s、0.3927s、0.4488s、0.4833s、0.9666s、1.1970s、1.9950s、2.9920s 九个点比较规范方法和时程方法的结果, 列入表 2。

表 2 规范方法与时程方法的比较
Table 2 Comparison between criterion method and time-history method

地震波 T/s		El Centro 波		Taft 波		迁安波	
		X	Y	X	Y	X	Y
0.2513	规范方法	44.14	50.60	40.05	63.97	23.81	24.03
	时程方法	41.82	41.82	36.35	39.80	21.90	10.21
	误差/(%)	5.5	21.0	10.2	60.7	8.7	135.4
0.3142	规范方法	90.06	130.4	96.37	190.2	30.35	27.24
	时程方法	57.09	57.09	52.57	46.35	24.99	19.91
	误差/(%)	57.8	128.4	83.3	310.4	21.4	36.8
0.3927	规范方法	143.3	87.56	196.1	137.9	29.45	14.92
	时程方法	78.21	78.21	74.53	82.16	27.88	12.74
	误差/(%)	83.2	12.0	163.1	67.8	5.6	17.1
0.4488	规范方法	106.8	78.96	118.2	124.9	17.19	14.67
	时程方法	88.86	88.86	85.55	78.32	22.19	10.76
	误差/(%)	20.2	-11.1	38.2	59.5	-22.5	36.3
0.4833	规范方法	94.76	69.04	113.6	94.20	19.34	13.21
	时程方法	84.51	84.51	86.97	69.10	24.61	10.03
	误差/(%)	12.1	-18.3	30.6	36.3	-21.4	31.7
0.9666	规范方法	50.14	35.2	41.27	44.38	14.34	7.814
	时程方法	57.01	57.01	33.53	49.43	15.46	8.092
	误差/(%)	-12.1	-38.3	23.1	-10.2	-1.11	-3.4
1.1970	规范方法	33.91	35.49	39.95	44.42	12.91	8.382
	时程方法	38.43	38.43	36.24	48.39	14.34	7.856
	误差/(%)	-11.8	-7.7	10.2	-8.2	-10.0	6.7
1.9950	规范方法	29.01	29.58	31.14	43.28	12.16	7.916
	时程方法	32.67	32.67	28.06	47.49	13.22	6.090
	误差/(%)	-11.2	9.5	11.0	-8.9	-8.8	30.0
2.9920	规范方法	29.16	28.50	29.55	39.27	11.08	7.431
	时程方法	35.88	35.88	27.66	44.00	12.06	5.748
	误差/(%)	-18.7	-20.6	6.8	-10.8	-8.1	29.3

从表 2 中可以看出, 规范楼板谱相对于时程解存在一定的误差, 所得结果可能偏于保守也可能偏于危险。在第 2 阶、第 3 阶频率附近区域, 即表 2 中 0.2513、0.3142 和 0.3927 等点对应谱值的误差较大, 甚至会高达几倍误差; 在非峰值点区域, 误差基本维持在 20% 以下, 此时的误差主要是由采用 SRSS 方法近似模拟 XY 方向的耦合效应所导致的。可知, 当偏心结构的动力响应在 XY 方向存在耦合时, 规范方法给出的楼板谱在非峰值区域内存在一定的误差, 大概维持在 20% 范围内; 在峰值区域误差往往很大, 可以达到反应谱的一倍甚至几倍。当偏心结构在 XY 方向耦合程度较小时, SRSS 方法可以近似考虑 XY 方向的耦合效应, 规范方法给出的

楼板谱在非峰值区域内精度较高。规范 GB50267-97 中 8.1.2.3 规定: 在设备设计中应采取避免设备与支承结构发生共振的措施。设备的基本自振频率应选择在支承结构的基本自振频率的 1/2 及以下或 2 倍及以上。鉴于此, 在实际工程中, 多采用规范方法楼板谱非峰值区域的谱值, 这样即使考虑偏心结构的双向耦合效应, 误差仍然可以控制在满意的范围内, 可以满足实际工程的一般精度要求。

同时, 在实际工程中设备的基本自振频率并不都一定满足规范的规定要求, 采用规范方法的楼板谱得到的设备响应的误差会很大, 与实际结果有较大的出入, 如表 2 中 0.2513、0.3142 和 0.3927 等点对应的误差值所示。此时, 利用规范方法楼板谱

进行的工程设计往往会偏于保守, 不满足经济适用性的要求。

5 结论

本文利用 SIMULINK 工具建立了仿真模型, 分析了附加于偏心结构上附属结构在水平双向地震动输入情况下的响应, 给出了楼板谱的时程解, 并研究了楼板谱的几个重要影响参数, 最后指出了规范中楼板谱求解方法的不足。关于多维地震动输入下偏心结构楼板谱, 本文得到的结论如下:

(1) 附属结构质量的变化对楼板谱峰值点区域有显著的影响。调谐频率峰值点对应的楼板谱随着质量的增加而显著降低。同时, 地震动频率对应的峰值点也随着质量增加而降低, 但是变化不大。

(2) 阻尼比是影响楼板谱的一个重要因素。偏心结构和附属结构阻尼比的改变都对楼板谱曲线有显著影响, 但是二者影响的效果不同。偏心结构阻尼比增大, 楼板谱各点谱值均减小, 谱线形状维持不变; 附属结构阻尼比增大, 楼板谱曲线只是在峰值点附近明显降低, 非峰值点区域变化不大。

(3) 附属结构所在楼层和层中位置的改变, 都会使楼板谱曲线发生变化。楼层越高响应越大, 楼板谱谱值也越大; 同一楼层中不同位置的楼板谱曲线也不相同。设一条 X 向楼板谱, 与其垂直的方向为 Y 向, 从本文可知, 随着楼板谱所在位置与重心在 Y 向上的距离越远, 谱值越大; 对于两个不同位置处的 X 向楼板谱, 当位置连线与 X 向平行时, 它们在非峰值点区域吻合较好, 在峰值点附近差异较大。

(4) 偏心距对楼板谱有重要的影响。随着偏心距变化, 偏心结构动力响应的变化规律比较复杂^[10], 相应的, 楼板谱曲线与偏心距之间也存在一个复杂的关系。

(5) 规范楼板谱适用于偏心结构各个方向运动的耦合程度不是很高的情况, 它在非峰值区域比较精确; 当偏心结构的动力响应 X 方向与 Y 方向有明显耦合时, 规范方法给出的楼板谱在非峰值区域内存在一定的误差, 大概维持在 20% 左右。此外, 不管偏心结构各个方向运动的耦合程度大小, 规范楼板谱在峰值区域均存在较大误差, 往往可以达到 1 倍甚至几倍。在实际工程中, 常常多采用规范楼

板谱的非峰值区域谱值, 通过调整附属结构的基本自振频率, 尽量使其避开规范楼板谱误差较大的峰值区域。

参考文献:

- [1] 中国国家地震局. GB50267-97 核电厂抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1997.
China Earthquake Administration. GB50267-97 Code for seismic design of nuclear power plants [S]. Beijing: China Planning Press, 1997. (in Chinese)
- [2] Warburton G B, Soni S R. Errors of torsional coupling on earthquake forces in buildings [J]. Journal of Structural Division ASCE, 1977, 103(5): 805—819.
- [3] Huang W H. Dynamic characteristic of equipment-structure systems with torsional effect [D]. Department of Civil Engineering, National Taiwan University at Taipei, Taiwan, 1991.
- [4] Yang Yeongbin, Huang Weihs. Seismic response of light equipment in torsional buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1993, 22(2): 113—128.
- [5] Sackman J L, Kiureghian A D, Nour-Omid B. Dynamic analysis of light equipment in structures: modal properties of the combined system [J]. Journal of Engineering Mechanics ASCE, 1983, 109(1): 73—89.
- [6] 李宏男. 结构多维抗震理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Li Hongnan. Theoretical analysis and design of structures to multiple earthquake excitations [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [7] 李颖, 朱伯立, 张威. Simulink 动态系统建模与仿真基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
Li Ying, Zhu Boli, Zhang Wei. Modeling and simulation foundation of dynamic system based on Simulink [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. (in Chinese)
- [8] 秦权, 李瑛. 非结构构件和设备的抗震设计楼板谱[J]. 清华大学学报, 1997, 37(6): 82—86.
Qin Quan, Li Ying. Design floor spectra for nonstructural components and equipment in buildings [J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37(6): 82—86. (in Chinese)
- [9] Igusa T, Kiureghian A D. Generation of floor response spectra including oscillator-structure interaction [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1985, 13(5): 661—676.
- [10] 李宏男, 杨浩. 多维地震作用下偏心结构动力反应的 Simulink 仿真分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(4): 355—362.
Li Hongnan, Yang Hao. Dynamic response analysis of eccentric structure to multi-dimensional earthquake motions using Simulink [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(4): 355—362. (in Chinese)