

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.008

考虑土-结构相互作用的安全壳隔震与支座 数量优化^{*}

彭齐驭¹, 刘玉岚¹, 王彪²

(1. 中山大学工学院, 广东 广州 510006; 2. 中山大学中法核工程与技术学院, 广东 广州 510275)

摘要: 为了探究土-结构相互作用 (SSI) 对隔震的核电站安全壳在地震作用下隔震效果的影响, 以及在此基础上对隔震支座数量设置的优化, 选取 CPR1000 建立三维有限元模型, 采用 0.4g 的 LBNS 地震波作用, 通过 ABAQUS 有限元分析软件模拟计算在不同情况下, 考虑 SSI 效应、不考虑 SSI 效应、隔震、非隔震, 以及不同数量设置的铅芯橡胶隔震支座下的安全壳的地震加速度、位移响应。结果表明, 对于非隔震安全壳, 考虑 SSI 效应后最大加速度响应下降 44.39%, 最大位移响应增大了 27.03%; 而对于隔震结构, SSI 效应影响相对较小, 最大加速度及位移响应的变化分别为 3.17% 和 10.73%。但在考虑位移响应下, SSI 效应仍不可忽视。随着隔震支座设置数量增大, 隔震层的刚度和阻尼增大, 在考虑 SSI 效应下, 安全壳的最大加速度响应近线性缓慢增大。而最大位移响应在数量 100~300 阶段迅速减小, 在数量 300~600 阶段减速则趋于平缓。在数量达到 300 后, 继续增加数量位移减小效果不明显, 而加速度将有所增加。因此选取 300 作为较优的隔震支座数量设置。

关键词: 核电站; 安全壳; CPR1000; 地震响应; 土-结构相互作用; 隔震支座

中图分类号: P315.9; TU311.3; TL364 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)03-0372-08

Seismic Response of Base-isolated Nuclear Containment and Optimization for the Number of Isolation Bearings Considering Soil-Structure Interaction

PENG Qiyu¹, LIU Yulan¹, WANG Biao²

(1. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

2. Sino-French Institute of Nuclear Engineering & Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: This paper aims to analyze the behavior of the isolated containment vessel for the nuclear power plant under earthquake considering soil-structure interaction (SSI) and to optimize the number of isolation bearings. Therefore, a three-dimensional finite element model is established for CPR1000, and ABAQUS is used to simulate the seismic acceleration and displacement response under the LBNS seismic wave. The simulation conditions are: analysis with and without SSI, isolated and non-isolated structure, and different number of lead rubber bearings. For non-isolated containment, after considering the SSI effect, the maximum acceleration response decreases by 44.39%, and

^{*} 收稿日期: 2018-05-09; 修回日期: 2018-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11232015; 11572355) 资助

作者简介: 彭齐驭 (1993), 男, 硕士研究生。主要从事核电站的抗震分析。Email: pengqy5@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 刘玉岚 (1962), 女, 教授, 博导, 博士。主要从事工程力学方面的研究。Email: stsllyl@mail.sysu.edu.cn

the maximum displacement response increases by 27.03%. For the isolated structure, the influence of SSI effect is relatively small, and the changes in maximum acceleration and displacement response are 3.17% and 10.73%, respectively. However, the SSI effect cannot be ignored when considering the displacement response. With the increase in the number of isolation bearings, the stiffness and damping of the isolation layer increases. As a result, the maximum acceleration response of the containment increases linearly. The maximum displacement response declines rapidly when the number of bearings decreases from 100 to 300. Then it slows down when the number rises above 300. That means the decrease of displacement response is not obvious at this stage, while the acceleration response will increase. Therefore, 300 is relatively the optimal number for isolation bearings.

Keywords: Nuclear power plant; containment vessel; CPR1000; seismic response; soil-structure interaction; isolation bearing

引言

核电站的安全壳作为核电站反应堆最后的安全屏障,安全要求极高,受到长期的关注与研究。自2011福岛核事故以来,应对超设计基准地震的能力成为了核电站越来越重视的因素^[1]。隔震技术能够大大降低高强地震对核电站的影响,因而近年来学者们也进行了许多关于核电站安全壳的隔震的研究。

一般建筑的隔震技术相对较为成熟,已有确定的规范标准^[2-3],在桥梁、高层建筑和一般建筑抗震加固中都有应用^[4-5]。但在核电站抗震中,由于核电站结构质量重、刚度大、安全要求极高,与一般建筑隔震要求不尽相同。特别在我国,尚未有完全成熟的规范和技术应用^[6-7],需要进行相关的理论分析和试验来进一步探究和完善。

现今核电站隔震的主要研究方向为安全壳隔震后的地震响应分析,涉及隔震效果分析、模型简化、考虑非线性等^[8-11]。同时还有新型隔震支座的制备研发,以及对应的力学性能研究与应用^[12-14]。而对于隔震支座刚度、阻尼等力学性能对安全壳隔震效果的影响,以及考虑到土-结构相互作用(SSI)的相关研究成果较少。现有研究一般为对普通框架结构的分析或使用简化的安全壳模型^[15-17]。因而本文在以往研究基础上^[18],考虑SSI效应,考察不同隔震支座数量设置和对应的不同刚度、阻尼对核电站地震响应的影响,选择较优的隔震支座设置,为核电站隔震的实际应用提供参考。

另外,由于安全壳刚度较大,实际地震破坏程度小。特别在设置隔震系统后,即使在超设计基准

地震下,仍不需要考虑安全壳强度问题,主要应考虑安全壳地震响应对内部设备的作用。因而本文主要分析安全壳地震加速度与位移响应,不作应力应变分析。本文选择CPR1000核电站安全壳建立精细三维有限元模型,采用集总参数法模拟SSI效应,使用ABAQUS有限元分析软件计算不同隔震支座数量设置下的安全壳地震响应。

1 模型与设置

1.1 安全壳模型外观尺寸

图1为安全壳模型的几何剖面图,核电站安全壳为圆筒穹顶结构。安全壳总高度为66.68 m。筒体内径37 m,外径38.8 m,而穹顶半径24 m,壁厚0.8 m。安全壳内壁设置厚度0.006 m钢衬里,底部为筏板基础。筒体中部y方向设置有直径7.4 m设备闸门孔,底部设置有两个直径2.94 m的人员闸门孔。筒体外壁沿水平x、y方向分别各设置两扶壁柱,顶部设环梁。

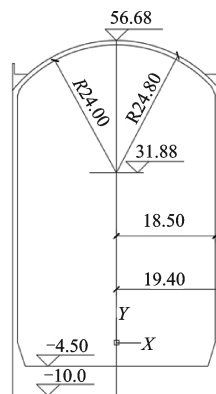


图1 安全壳几何剖面

Fig.1 Geometric profile of the containment

1.2 材料属性

核电站安全壳为预应力混凝土结构,具体材料属性见表1。

表1 安全壳结构各部件的材料特性

Table 1 Material properties of each part of the containment structure

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松 比	屈服强度/ MPa
混凝土	2 500	33 600	0.2	抗拉:2.65 抗压:32.5
钢筋	7 850	206 000	0.3	HRB400:400 HRB335:335
预应力 钢束	7 850	190 000	0.3	1 770
钢内衬 钢材	7 850	206 000	0.3	320

1.3 计算模型

安全壳地震响应分析采用ABAQUS有限元分析软件进行计算。基础混凝土、筒体和穹顶采用用三维八节点的实体单元C3D8R单元模拟。混凝土结构采用线弹性模型。

预应力筋采用T3D2杆单元模拟。预应力采用降温法实现。预应力钢束的空间定位和钢束预应力值的确定参考文献[19],通过对钢束的空间几何曲线方程的推导和数值计算,最终确定预应力钢束如图2所示。



图2 预应力钢束

Fig.2 Prestressed steel cables

普通钢筋采用ABAQUS内置的 rebar surface 层模拟,使用四边形的面单元SFM3D4R单元类型。普通钢筋包括壳体的内中外三层、扶壁内的普通钢筋以及在设备闸门口附近设置的加强筋。

钢内衬结构采用在混凝土内侧模型上设置一层 skin 面模拟,选用壳单元S4R类型。整体三维有限元模型如图3所示。



图3 安全壳三维有限元模型

Fig.3 Three-dimensional finite element model of the containment

1.4 土-结构作用以及隔震支座的模拟

考虑SSI的数值计算方法有几种方式,为了避免巨大的运算量,本文选用集总参数法。将土壤参数集总为连接在阀基底部的具有一定刚度和阻尼的弹簧。弹簧参数采用常数阻抗法,地震荷载由圆形筏板基础底部输入,参照文献[20]中的计算公式。仅考虑水平和竖直的方向,对应的等效刚度和阻尼可以表达如下:

$$k_y = \frac{4Gr_0}{1-\nu}; c_y = \frac{3.4}{1-\nu} r_0^2 \sqrt{G\rho} \quad (1)$$

$$k_x = \frac{32(1-\nu)}{7-8\nu} Gr_0; c_x = \frac{18.4(1-\nu)}{7-8\nu} r_0^2 \sqrt{G\rho} \quad (2)$$

式中, k_y, c_y 分别为土壤弹簧竖直方向刚度与阻尼; k_x, c_x 分别为水平方向的刚度与阻尼; G 为土壤动剪切模量; r_0 为圆形筏板基础半径; ν 为动泊松比; ρ 为土壤密度。

本文采用的土层参数:密度为 2 650 kg/m³,动剪切模量为 9.57×10^9 ,动泊松比为 0.31,阻尼比为 0.03。

而安全壳隔震支座同样设置为弹簧单元。土壤弹簧将串联在隔震弹簧之下。弹簧设置使用ABAQUS有限元软件中的 interaction 的 CONN3D2 单元。所有的弹簧单元将平均分布在筏板基础底部,如图4所示。每个单元的属性为隔震层总刚度与阻尼的 $1/N$ (N 为弹簧单元数量)。弹簧底部设置

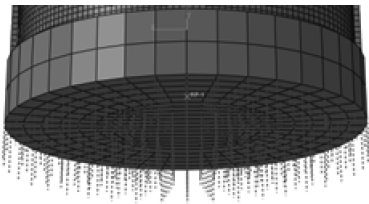


图4 隔震支座模拟

Fig.4 Simulation of isolation bearings

圆形基础作为地震输入。本文初始采用的隔震支座选用直径0.2 m、高度0.1 m铅芯橡胶600个,水平等效总刚度 3.12×10^8 ,等效总阻尼 3.62×10^9 。

1.5 地震荷载

地震荷载采用LBNS人工地震波。根据我国《核电厂的抗震设计与鉴定》^[21],现行的核电站的设计基准地震水平为0.2g。为了应对超设计基准地震,本文采用两倍标准设计强度地震,即水平方向设置为地面峰值加速度为0.4g的地震荷载,竖直方向峰值加速度为水平方向的2/3。

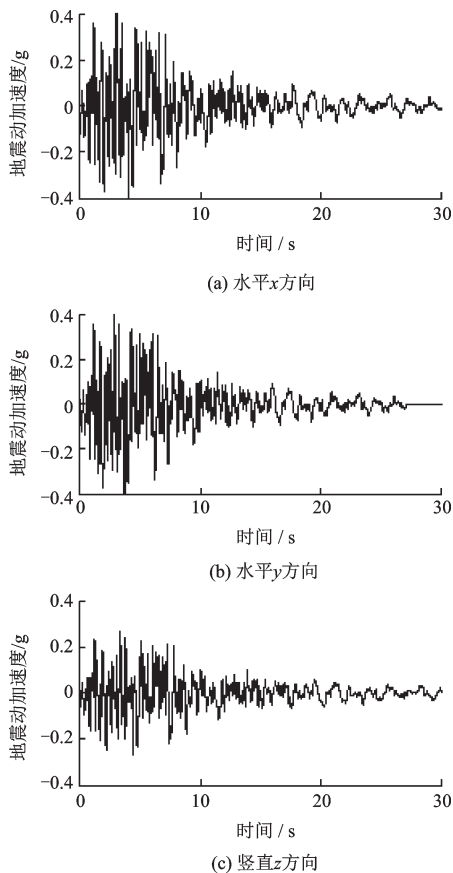


图5 LBNS人工地震波

Fig.5 LBNS artificial seismic wave

1.6 计算假设

计算中不考虑内部设备与安全壳的相互作用,以及外围厂房与安全壳的相互作用。

由模态分析和时程分析可以发现, x 、 y 方向模态和加速度、位移响应结果类似。而 z 方向响应远小于水平方向响应。因而本文仅以 x 方向响应作为考察对象。

一般地震响应计算主要分为时程分析法和地

震反应谱法。对一般的多自由度体系有以下动力方程:

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU(t) = -M\{I\}\ddot{x}(t) \quad (3)$$

式中, M 、 C 、 K 分别为安全壳单元总质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{U}$ 、 $\dot{U}$ 和 U 为单元节点的加速度、速度和位移向量; $\ddot{x}$ 为地震荷载的加速度; $\{I\}$ 为方向向量,在与 $\ddot{x}$ 对应方向为1,其余为0。

通过振型叠加法可以得到解:

$$U(t) = \sum_{j=1}^n \{\phi_j\} q_j(t) \quad (4)$$

$$q_j(t) = -\frac{\gamma_j}{\omega_j'} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi_j \omega_j'(t-\tau)} \sin \omega_j'(t-\tau) d\tau \quad (5)$$

$$\omega_j' = \sqrt{1 - \xi_j^2} \omega_j \quad (6)$$

式中, $\{\phi_j\}$ 为第 j 阶模态, γ_j 、 ω_j 、 ξ_j 分别为第 j 阶模态的参与系数、固有频率和阻尼比。

而地震反应谱法则直接得到第 j 振型在地震下的影响系数 α_j ,得到地震作用力:

$$F_{ji} = \left| F_{ji}(t) \right|_{\max} = \alpha_j \gamma_j \phi_{ji} m_i g \quad (7)$$

最后通过振型叠加得到最终解。

相较于现行规范的反应谱法,为了更精确分析,本文采用时程分析法。最终结果选取安全壳 x 方向安全壳外壁的不同高度各点的在整段地震时长中加速度和位移响应最大值作为安全壳响应代表值。

2 考虑SSI效应的隔震分析

2.1 振型分析

为了探究SSI效应对隔震效果的影响,取四种情况下(非隔安全壳,考虑SSI的非隔震安全壳,隔震安全壳,考虑SSI的隔震安全壳)的核电站安全壳结构作地震时程响应分析。其中隔震系统采用初始隔震参数。四种情况下的模态分析见表2。

由表2可见,对比非隔震安全壳与考虑SSI效应后的非隔震安全壳模态,SSI效应使得安全壳的第一二阶模态频率下降了41.60%和41.75%。而高阶模态频率变化不大。对比隔震安全壳与考虑SSI效应后的隔震安全壳模态,考虑SSI效应使得安全壳第四、五、六阶模态频率分别下降了1.72%,1.72%和1.97%。前三阶模态以及其余高阶模态变化在0.03%以内。

由图6可以看到,隔震结构较非隔震结构增加了前三阶模态,分别为水平平动的两个模态以及转动的模态。

表2 四种情况下安全壳前20阶模态频率

Table 2 20 primary modal frequencies of the containment under four conditions

振型频率/Hz	非隔震安全壳	SSI非隔震	隔震安全壳	SSI隔震
1	4.323 3	2.525 0	0.411 7	0.411 6
2	4.331 6	2.526 8	0.411 7	0.411 6
3	6.285 3	6.147 7	0.510 9	0.510 9
4	6.296 3	6.155 9	2.758 0	2.710 6
5	7.469 0	6.235 1	2.760 5	2.713 0
6	7.560 5	6.811 5	5.055 9	4.956 3
7	7.887 7	7.049 7	6.146 7	6.146 6
8	8.111 5	7.097 9	6.156 2	6.156 1
9	8.842 5	7.866 2	7.033 5	7.032 9
10	11.511 0	8.070 4	7.071 9	7.069 6
11	11.635 0	9.000 2	7.860 4	7.860 4
12	12.199 0	9.013 5	8.069 3	8.069 2
13	12.696 0	11.511 0	11.505 0	11.505 0
14	12.764 0	11.635 0	11.629 0	11.629 0
15	12.960 0	12.019 0	11.719 0	11.718 0
16	13.434 0	12.617 0	12.507 0	12.507 0
17	14.005 0	12.638 0	12.618 0	12.618 0
18	14.084 0	12.827 0	12.657 0	12.657 0
19	14.789 0	14.684 0	12.825 0	12.825 0
20	14.824 0	14.784 0	14.589 0	14.576 0

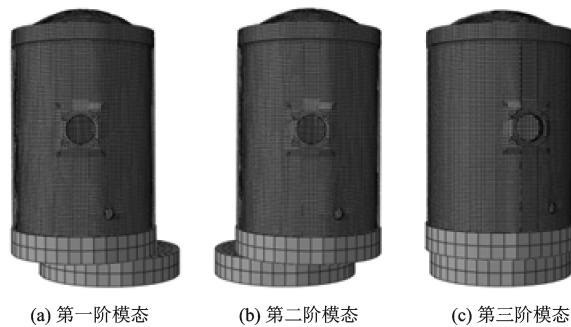


图6 隔震安全壳前三阶模态

Fig.6 First three modes of the isolated containment

由模态分析可以看到,SSI效应使得非隔震结构的前两阶模态的主频率有了显著的降低,即结构整体的刚度下降。地震加速度响应将有所下降,但位移响应将增大。SSI效应对于隔震结构的影响相对于非隔震结构要小。但同样加速度响应将有所下降而位移响应增加。

2.2 SSI效应对隔震的影响

考虑SSI效应、不考虑SSI效应、隔震、非隔震

四种情况下安全壳地震加速度、位移响应如图7、8所示。由图7(高度以筏板基础顶面开始计)可以看到,考虑SSI效应使得非隔震结构的最大加速度响应减小了44.39%。SSI效应使得隔震结构最大加速度响应仅减小3.17%。由模态分析中可以看到,SSI效应对隔震结构的模态影响较非隔震结构要小,因而对最终的加速度响应影响较小。实际上由模态分析可以看到,隔震结构较非隔震结构刚度大大减小,而SSI效应对结构刚度的减小效应在隔震系统中被削弱。

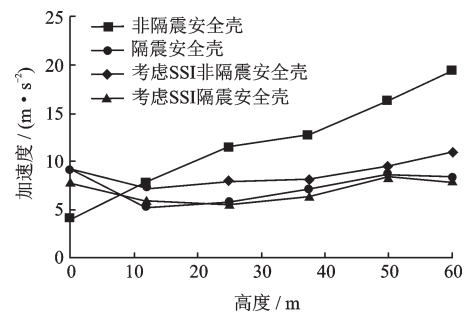


图7 四种情况下安全壳地震加速度响应

Fig.7 Seismic acceleration response of the containment under four conditions

由图8可见,隔震结构相对于非隔震结构的位移大大增加,顶端位移增大155.23%。考虑SSI效应后非隔震结构顶端位移增大了27.03%。考虑SSI后,隔震结构平均位移有所增加,但整体位移响应曲线更加倾斜,顶端位移增大10.73%。在模态分析中,隔震结构的前几阶主模态的频率大大下降,刚度降低,因而位移显著增大。而SSI效应对于隔震与非隔震结构同样有增大位移响应的作用。但对于隔震结构而言,从模态分析中可以看到,第四、五阶模态(此模态为安全壳倾斜而非平动)频率减小程度较大,因而响应曲线较为倾斜,顶端位移响应变化仍然明显。

综上所述,SSI效应对于设置隔震系统的安全壳结构的加速度响应影响较小,但位移影响不可忽略,因而在进行核电站安全壳隔震支座设置的选择时,应考虑SSI效应。

2.3 隔震支座设置的选择

隔震支座主要为铅芯橡胶与高阻尼橡胶。铅芯橡胶隔震技术较为成熟,实际应用较多,而高阻尼橡胶虽然有较好的材料属性,但尚未广泛应用到工程中,因此本文选用铅芯橡胶作为核电站安全壳

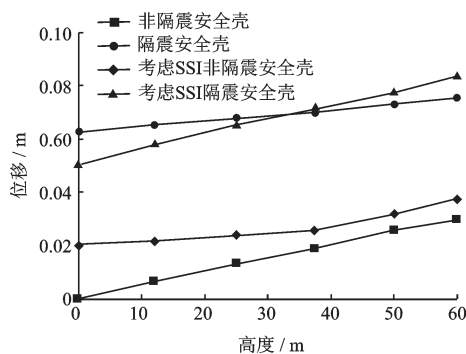


图8 四种情况下安全壳地震位移响应

Fig.8 Seismic displacement response of the containment under four conditions

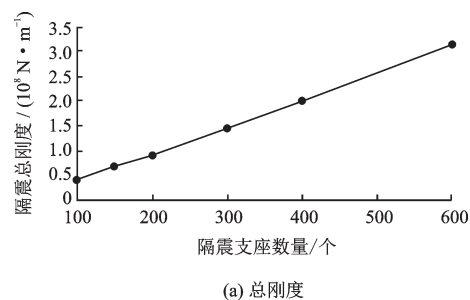
隔震支座材料。其刚度与阻尼属性参照文献[22-23]。隔震支座单元的刚度与阻尼会随着单元所受压强而变化。隔震支座单元数量的最少值由支座所能承受地震和安全壳重力荷载极限所决定,而最大值由安全壳壳底部面积所决定。因此本文选取数量范围在100~600,详细参数见表3。随着隔震支座单元数量的增加,支座个体的水平等效刚度增大而阻尼减小。但由图9可以看到,隔震层的水平等效总刚度和总阻尼却在不断增大。

由于不同数量的隔震支座单元设置隔震层的刚度与阻尼不同,因此本文将探究不同数量隔震支座设置下安全壳的地震响应,并最终选择较优的隔震支座数量设置。

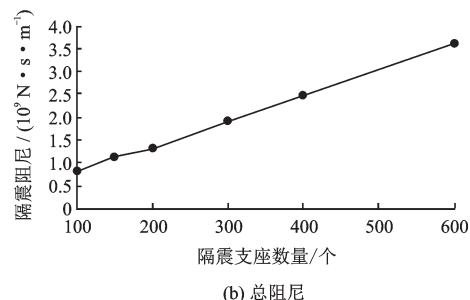
表3 不同数量设置的铅芯橡胶支座参数

Table 3 Parameters of lead rubber bearings with different number

铅芯橡胶支座	1	2	3	4	5	6
安全壳质量/ (10^8N)	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36
支座直径/m	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
支座个数	100	150	200	300	400	600
压力/(10^6Pa)	18.8	12.5	9.38	6.25	4.69	3.13
阻尼比	0.53	0.42	0.37	0.33	0.31	0.29
水平等效刚度/ ($10^5\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	4.00	4.50	4.50	4.90	5.00	5.2
竖直等效刚度/ ($10^8\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	4.80	4.20	3.80	3.40	3.00	2.5
水平等效阻尼/ ($10^6\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	8.48	7.56	6.66	6.37	6.20	6.03
竖直等效阻尼/ ($10^9\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	10.2	7.06	5.62	4.42	3.72	2.9



(a) 总刚度



(b) 总阻尼

图9 隔震层水平总刚度与阻尼变化

Fig.9 Total stiffness and damping of the seismic isolation layer

2.4 响应分析

选取安全壳 x 方向筒体外壁最高处作为代表点考察地震响应。安全壳不同支座设置下最大加速度、位移响应如图10、11所示。

由图10可以看到,随着隔震层刚度的增大,加

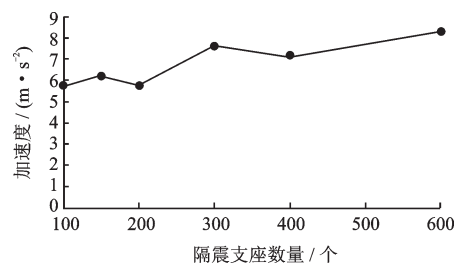


图10 安全壳不同支座下最大加速度响应

Fig.10 Maximum acceleration response of different number of isolation bearings for the containment

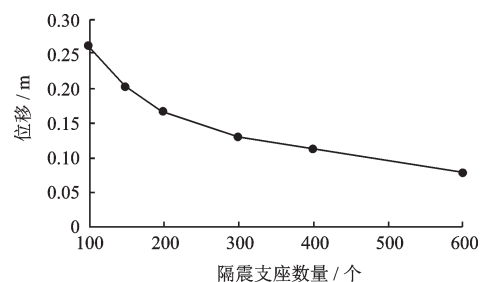


图11 安全壳不同支座设置下最大位移响应

Fig.11 Maximum displacement response of different number of isolation bearings for the containment

速度响应呈线性缓慢上升趋势,由 5.75 m/s^2 增加至 8.27 m/s^2 (由于响应为代表点取值,数据将有所波动)。由图 11 可以看到,位移曲线在 100~300 阶段急速下降,由 25.97 cm 下降为 12.99 cm ;而在 300~600 阶段下降较为平缓,由 12.99 cm 变为 7.79 cm 。

本文软件采用直接积分法,响应结果较难进行理论分析。实际上若将安全壳整体作为质点考虑,地震荷载为简谐激励,则对隔震体系中单质点有以下公式:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = c\dot{x}(t) + kx(t) \quad (4)$$

式中, m 为质点质量; c 、 k 分别为隔震阻尼和刚度; $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 和 u 分别为质点绝对加速度、速度和位移; $\ddot{x}$ 、 $\dot{x}$ 、 x 分别为地面加速度、速度和位移。

地面动加速度 $\ddot{x} = Ae^{i\omega t}$, 则质点稳态加速度响应 $\ddot{u} = AH(\omega)e^{i\omega t}$ 。令 $\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$; $s = \frac{\omega}{\omega_n}$; $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, 则加速度放大系数如下:

$$|H(\omega)| = \sqrt{\frac{1 + (2\xi s)^2}{(1 - s^2)^2 + (2\xi s)^2}} \quad (8)$$

当 $s \geq \sqrt{2}$ 时,随着 ξ 增大,质点加速度响应增大。隔震体系一般符合此条件。另外,随着 k 的增大, s 减小,一般情况亦增大。

对于单质点体系隔震体系,亦有以下公式:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t) \quad (9)$$

地震作用力 $F(t) = F_0e^{i\omega t}$, 则质点稳态位移响应 $u = F_0J(\omega)e^{i\omega t}$ 。同样有:

$$|J(\omega)| = \frac{s^2}{m\sqrt{(1 - s^2)^2 + (2\xi s)^2}} \quad (10)$$

可以看出,随着 ξ 增大,质点位移响应减小。而随着 k 的增大, s 减小,位移响应变化取决于 s 与 ξ 关系。

因而,随着隔震支座单元数量的增加,隔震层整体刚度增大,阻尼增大,加速度响应增大而位移响应减小。

虽然地震波具有一定的频谱特征,但实际较单一频率的简谐激励较复杂,且尚未考虑安全壳内部高阶模态对响应的影响。因而实际响应较理论要相对复杂,但总体趋势应较吻合。实际本次模拟结果亦较符合振动理论。

由图 10、11 中可以看到,隔震支座增加到 300 以后,继续增加隔震支座效果不明显,而加速度响应也会慢慢增大。因此,选取隔震支座单元数量

300 作为较优设置。

3 结 论

(1) 考虑土-结构相互作用后,非隔震的安全壳的加速度响应减小,位移响应增大。考察安全壳的最大响应,得到在 LBNS 地震波作用下, x 方向最大加速度响应减小 44.39%, 最大位移响应增大 27.03%。而对于隔震的安全壳结构,SSI 效应作用效果较小,顶端同方向最大加速度响应仅减小 3.17%, 最大位移响应则增大 10.73%。由模态分析可知,这是由于考虑 SSI 后,结构刚度减小所致。而隔震结构由于本身结构较柔,刚度变化不明显。但在考虑隔震支座时,SSI 对位移响应仍有一定影响,因而不可忽略。

(2) 设置数量为 100~600 的铅芯橡胶支座作为安全壳的隔震层,安全壳筒体最高处的加速度响应随着支座数量增大而近线性上升,由 5.75 m/s^2 增加至 8.27 m/s^2 。位移响应则在支座数量为 100~300 时呈近二次曲线趋势,由 25.97 cm 迅速下降为 12.99 cm ;数量达到 300 以后,由 12.99 cm 变为 7.79 cm ,降速变缓。因此在支座数量达到 300 以后,位移减小有限,而加速度响应有所上升。因而选取 300 作为较优的隔震支座数量设置。

参考文献:

- [1] 毛 庆,吴应喜,张 健,等.福岛核事故后中国广东核电集团核电厂抗震设计和评估进展[J].中国工程科学,2013,15(4):46-51.
Mao Q, Wu Y X, Zhang J, et al. The development on seismic design and evaluation of CGNPC after Fukushima accident[J]. Engineering Science, 2013, 15(4): 46-51. (in Chinese)
- [2] 薛彦涛.建筑结构隔震技术现状与应用[J].建筑结构,2011,41(11):82-87.
Xue Y T. Status and application of base-isolation technique of buildings [J]. Building Structure, 2011, 41(11): 82-87. (in Chinese)
- [3] 朱宏平,周方圆,袁 涌.建筑隔震结构研究进展与分析[J].工程力学,2014,31(3):1-10.
Zhu H P, Zhou F Y, Yuan Y. Development and analysis of the research on base isolated structures[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 1-10. (in Chinese)
- [4] Tubaldi E, Mitoulis S A, Ahmadi H. Comparison of

- different models for high damping rubber bearings in seismically isolated bridges [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 104: 329-345.
- [5] Clemente P, Martelli A. Seismically isolated buildings in Italy: State-of-the-art review and applications [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 119: 471-487.
- [6] 周志光. 核电厂隔震设计相关规范的现状及发展[J]. *结构工程师*, 2013, 29(5): 180-187.
Zhou Zh G. The status and development of design codes for seismic isolated nuclear power plants [J]. *Structural Engineers*, 2013, 29(5): 180-187. (in Chinese)
- [7] 谢礼立, 翟长海. 核电工程应用隔震技术的可行性探讨[J]. *地震工程与工程振动*, 2012, 32(1): 1-10.
Xie L L, Zhai Ch H. A prospective study on applicability of base isolation in nuclear power plants [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012, 32(1): 1-10. (in Chinese)
- [8] 赵春风, 陈健云. 基础隔震系统对核电站安全壳抗震的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(5): 615-621.
Zhao Ch F, Chen J Y. Influence of base isolation system on seismic resistance of nuclear power plant containment [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(5): 615-621. (in Chinese)
- [9] Sarebanha A, Mosqueda G, Kim M K, et al. Seismic response of base isolated nuclear power plants considering impact to moat walls [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 328: 58-72.
- [10] Perotti F, Domaneschi M, De Grandis S. The numerical computation of seismic fragility of base-isolated nuclear power plants buildings [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 262: 189-200.
- [11] Wang D, Zhuang C, Zhang Y. Seismic response characteristics of base-isolated AP1000 nuclear shield building subjected to beyond-design basis earthquake shaking [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 50(1): 170-181.
- [12] 王进, 张保生, 王三孟, 等. 高阻尼橡胶材料研究进展及其在隔振橡胶支座中的应用[J]. *特种橡胶制品*, 2017, 38(3): 69-72.
Wang J, Zhang B Sh, Wang S M, et al. Research progress of high damping rubber material and the application in vibration isolation rubber bearings [J]. *Special Purpose Rubber Products*, 2017, 38(3): 69-72. (in Chinese)
- [13] Markou A A, Manolis G D. Mechanical models for shear behavior in high damping rubber bearings [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 90: 221-226.
- [14] 袁涌, 朱宏平, 资道铭. 高阻尼橡胶隔震支座的力学性能及隔震效果分析研究[J]. *预应力技术*, 2011(1): 20-23, 33.
Yuan Y, Zhu H P, Zi D M. Mechanical properties and isolation analysis of high damping rubber bearings [J]. *Prestress Technology*, 2011(1): 20-23, 33. (in Chinese)
- [15] 杨帆, 邓筠, 王永德. 土-结构动力相互作用对隔震结构的影响分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2013, 39(2): 227-231.
Yang F, Deng J, Wang Y D. Study on base isolated structure considering soil-structure dynamic interaction [J]. *Sichuan Building Science*, 2013, 39(2): 227-231. (in Chinese)
- [16] Krishnamoorthy A, Anita S. Soil-structure interaction analysis of a FPS-isolated structure using finite element model [J]. *Structures*, 2016, 5: 44-57.
- [17] Ashiquzzaman M, Hong K J. Simplified Model of Soil-Structure Interaction for Seismically Isolated Containment Buildings in Nuclear Power Plant [J]. *Structures*, 2017, 10: 209-218.
- [18] 兀琼, 刘玉岚, 王彪. 极限安全地震动下核电站安全壳楼层反应谱[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2018, 57(1): 136-142.
Wu Q, Liu Y L, Wang B. Floor response spectra analysis of the nuclear containment at ultimate safety ground motion [J]. *Acta Scientiarum Naturae Universitatis Sunyatseni*, 2018, 57(1): 136-142. (in Chinese)
- [19] 孟剑, 杨景龙. 安全壳极限承载力中预应力的数值模拟[J]. *工业建筑*, 2011, 41(增1): 127-131.
Meng J, Yang J L. The prestress numerical simulation in the research of the ultimate bearing capability of containment of nuclear power plant [J]. *Industrial Construction*, 2011, 41(Sup1): 127-131. (in Chinese)
- [20] 李忠献, 李忠诚, 梁万顺. 考虑土-结构相互作用和岩土参数不确定性的核电厂结构地震响应分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2006, 26(2): 143-148.
Li Zh X, Li Zh Ch, Liang W Sh. Seismic response analysis of nuclear power plant structure considering soil-structure interaction and uncertainty of soil properties [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, 26(2): 143-148. (in Chinese)
- [21] 核电厂的抗震设计与鉴定: HAD 102/02 [S]. 北京: 中国法制出版社, 1996.
Seismic design and evaluation of nuclear power plants: HAD 102/02 [S]. Beijing: China Legal Publishing House, 1996. (in Chinese) (本文责编: 赵霞)

(下转第 438 页)