DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2018.06.001

软岩地基下 AP1000 核电屏蔽厂房结构地震响应研究*

赵　密，陈　杨，高志懂，孙文达，杜修力，钟紫蓝

（北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室，北京 100124）

摘要： 以 AP1000 核电屏蔽厂房结构为研究对象，进行考虑土-结构相互作用的地震响应分析，探讨不同厚度和不同地表倾斜角度软岩场地对屏蔽厂房结构地震响应的影响。利用 ABAQUS 有限元软件建立了软岩层厚度分别为 25、30、35、40 m 以及地表倾斜角度分别为 0°、3°和 6°的土-结构相互作用模型，实现了地震动输入。对计算所得楼层响应谱进行对比分析可知，软岩层较硬岩层对地震传播有一定的放大效应，软岩层厚度的增加会使峰值频率往低频方向移动；倾斜场地对楼层响应谱高频部分有一定的放大效应。该研究结果对软岩场地下核电厂抗震安全评价具有一定参考意义。

关键词： AP1000 屏蔽厂房结构；土-结构相互作用；软岩场地；结构地震响应

中图分类号： TU352.1　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1672-2132(2018)06-0897-07

Seismic Response of AP1000 Shield Building Structure on Soft Rock Foundation

ZHAO Mi, CHEN Yang, GAO Zhidong, SUN Wenda, DU Xiuli, ZHONG Zilan

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The AP1000shield building structure model is used as the object of this study, and the seismic response analysis is carried out considering soil-structure interaction (SSI). The influence of soft rock thickness and ground surface slope on dynamic response of the containment structure is discussed. The soil-structure models with soft rock thicknessesof 25 meters, 30 meters, 35 meters and 40 meters and ground surface slopes of 0 degrees, 3 degrees and 6 degrees are established respectively using software ABAQUS. The ground motion input is achieved in our models. On the basis of comparison analysis of the calculated floor response spectrum, a certain seismic wave amplification effect can be observed in the soft rock layer than in the hard rock layer. The increase of the soft rock layer thickness will make the peak frequency move to the low frequency direction. The inclined site has a certain amplification effect on the high frequency part of the floor response spectrum. The results in this paper have certain referentialsignificance for the construction of nuclear power plant in the soft rock area.

Keywords: AP1000 shielded building structure; soil-structure interaction; soft rock site; structural seismic response

* **收稿日期：** 2018-05-14；**修回日期：** 2018-06-27
基金项目： 国家自然科学基金项目(51421005，51738001)资助
作者简介： 赵　密(1980-)，男，教授，博导，博士。主要从事重大工程抗震研究。Email：zhaomi@bjut.edu.cn

引　言

核电厂地震安全[1-4]是一个受到国内外广泛关注的重要研究课题。近年来我国核电建设包括选址、设计和建造都处于较快的发展时期。在涉及厂址安全可靠的建筑物地基选择方面，一贯的做法是选择较坚硬的岩石作为地基，在这种情况下核电厂核电机组的静态分析和抗震分析计算中地基可以简化为刚性体。但随着良好硬岩场址的稀缺，核电机组软岩场址地震动响应研究势在必行。AP1000 核电厂是目前在国内投产的主要核电厂类型之一，有必要开展 AP1000 屏蔽厂房结构在软岩地基条件下的地震响应研究。由于 AP1000 屏蔽厂房结构的刚度和质量均较大而软岩地基则相对柔软，故刚性地基假设不尽合理，在抗震分析中需要考虑土-结构相互作用(SSI)。例如西屋公司给出的 AP1000 核电厂设计文件[5]指出，当地基平均剪切波速小于 2 400 m/s^2 时，在结构地震响应分析中需要考虑土-结构相互作用的影响。曹国敖等[6]、刘洁平等[7]分别针对核电厂辅助厂房和安全壳结构在 SSI 下的地震响应进行了研究。王天运等[8]对考虑 SSI 的核电站地震响应分析方法进行了研究。在考虑软岩地基对核电结构地震响应影响方面，现有的研究工作大多以软岩地基参数的不确定性为研究方向[9-10]，不同厚度和不同地表倾斜角度的软岩地基对核电结构地震响应的影响研究较少。

本文以 AP1000 屏蔽厂房结构为研究对象，考虑土-结构相互作用，探讨不同厚度和不同地表倾角软岩地基对核电厂重要位置地震响应的影响。

1　AP1000 核岛厂房和地震动

AP1000 核岛厂房分为三部分：SCV(安全壳外壳)、CIS(内部安全壳结构)、ASB(附属厂房结构)，三部分共同布置在同一筏板基础上。SCV 为圆形筒状斜屋顶结构，外径约为 42.2 m，壁厚为 1 m，下部圆柱部分为钢板混凝土结构，上部组合屋架为型钢混凝土组合结构，CIS 由大型剪力墙结构构成。本文所讨论的屏蔽厂房结构由 SCV 部分以及 CIS 部分构成。屏蔽厂房基础埋深为 12.02 m(以下所有高度都是以基础底面为基准面所得的相对高度)，总高为 81.2 m。维修层位于 31.4 m，运行操作层位于 41.2 m 处，上述 2 个重要位置的地震响应作为结构地震安全评价的指标。

本文分别采用基于 AP1000 反应谱合成的地震动时程以及安县实际地震动记录作为土-结构相互作用模型底部的水平向输入地震动，输入地震动强度取标准设计的地震动值，地震动强度使结构处于弹性工作状态，峰值加速度均调幅为 1.50 m/s^2。人工合成地震动总时长为 20.48 s，安县地震动总时长为 26 s，两者的加速度时程曲线和反应谱如图 1 所示。

2　有限元模型

2.1　AP1000 屏蔽厂房模型

根据西屋公司设计文件[5]，对 AP1000 屏蔽厂房结构进行相应简化，安全壳中内部设备和构造采用增加楼板质量来代替。应用 ABAQUS 软件建立屏蔽厂房结构有限元模型，其中筏板基础、安全壳外壳、组合屋架、内部剪力墙等采用实体单元，屏蔽厂房网格尺寸采用 3 m，剪力墙结构采用 1 m 网格大小，上部组合屋架采用网格细化处理，采用 C3D8R 单元划分，如图 2 所示。考虑到屏蔽厂房的布置和分布方式复杂，主体结构外侧钢板和内部的构造钢筋未单独建模，而是均匀到混凝土结构模型中。混凝土材料密度为 2 500 kg/m^3，弹性模量为 34.5 GPa，泊松比为 0.2。

2.2　软岩地基-结构模型

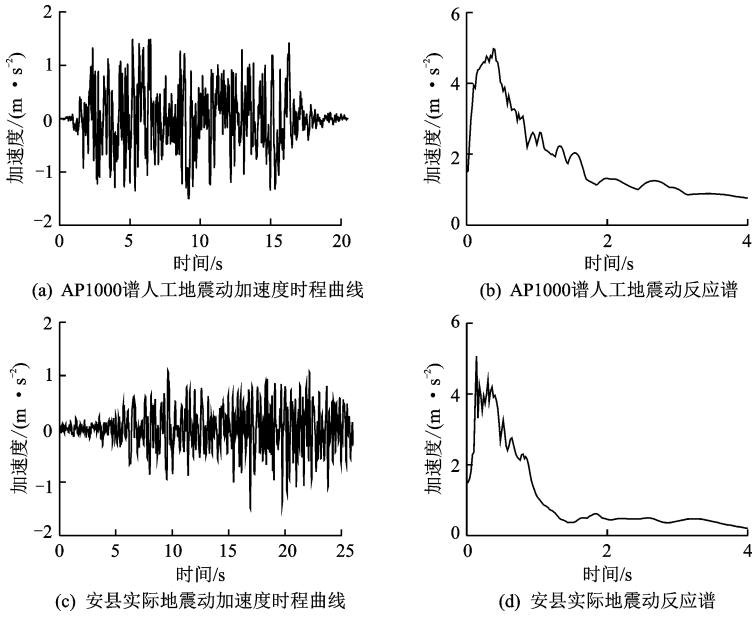
2.2.1　不同厚度的软岩地基

共考虑 4 种不同工况，软岩厚度分别为 25、30、35、40 m。根据工程经验选取的有限域水平尺度为屏蔽厂房水平尺度(41 m)的 10 倍，即选取软岩地基模型长度为 400 m，宽度为 400 m，总高均为 55 m，下层硬岩厚度根据软岩厚度进行相应的调整，屏蔽厂房的墙体侧面与周围软岩之间以及基础底部与软岩之间设立绑定约束。地基物理力学参数见表 1。根据网格划分原则，土体采用 5 m 网格划分尺寸，模型总共 84 416 个单元。35 m 厚软岩层条件下土-结构相互作用模型如图 3 所示。

表 1　软岩地基物理参数

Table 1　Physical parameters of soft rock foundation

土层名称	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/Pa	泊松比	纵波波速/(m·s^{-1})	剪切波速/(m·s^{-1})
软岩	2 200	2.78×10^9	0.25	1 220	700
硬岩	2 300	8.1×10^9	0.20	1 959	1 200

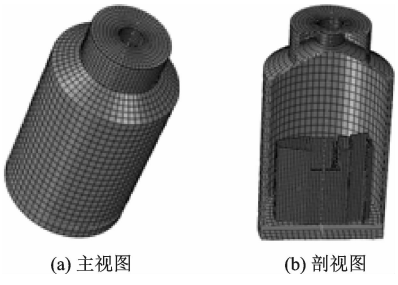


(a) AP1000谱人工地震动加速度时程曲线　(b) AP1000谱人工地震动反应谱

(c) 安县实际地震动加速度时程曲线　(d) 安县实际地震动反应谱

图 1　水平向输入地震波的加速度时程和反应谱

Fig. 1　Acceleration time-history and response spectrum of the input horizontalseismic wave



(a) 主视图　(b) 剖视图

图 2　AP1000 屏蔽厂房结构模型

Fig. 2　Finite element model of AP1000 shield building

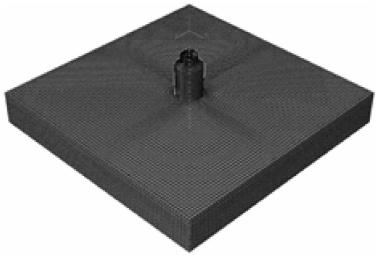


图 3　35 m 厚软岩层条件下土-结构相互作用模型

Fig. 3　Soil-structure interaction model with 35 m thick soft rock layer

2.2.2　不同地表倾斜角度的软岩地基

共考虑 3 种不同的工况，地表倾斜角度分别为 0°、3°和 6°，地基由均匀软岩构成（物理力学参数见表 1），地基模型长度为 400 m，倾斜部分为模型正中间的 100 m 部分，地基模型宽度为 400 m，高度为 55 m（地基左右两侧高度的平均值），6°地表倾角条件下场地地形示意如图 4 所示。土体网格划分尺寸依旧为 5 m，模型总共 83 428 个单元，3°地表倾角条件下土-结构相互作用模型如图 5 所示。

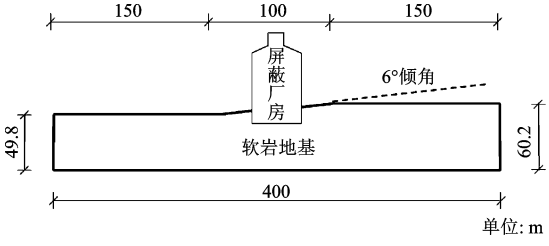


图 4　6°地表倾角条件下场地地形示意

Fig. 4　Sketch map of the site with surface slope of 6°

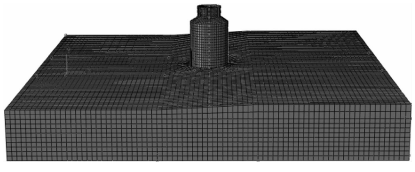


图 5　3°地表倾角条件下土-结构相互作用模型

Fig. 5　Soil-structure interaction model with surface slope of 3°

3　地震动输入方法及验证

杜修力等[11-12]提出了黏弹性边界结合等效地震荷载的地震动输入方法，并验证了其精度[13]，但上述方法只适合于无限域地表高度一致的问题。黄景琦[14]针对隧道洞口地形问题，基于上述方法建立

了一种考虑地表倾斜的地震动输入方法。

借鉴上述成果，本文的具体做法为：如图 6 所示，4 个侧面施加黏弹性边界，底面施加黏性边界，等效地震荷载公式为：

$$F_{li}=L_l(\sigma_{li}^{\mathrm{F}}+K_{li}u_{li}^{\mathrm{F}}+C_{li}\dot{u}_{li}^{\mathrm{F}}) \tag{1}$$

式中，L_l 为人工边界结点 l 处黏弹性边界应力的影响范围；上标 F 表示自由场；K_{li}、C_{li} 分别为人工边界 l 结点 i 方向上的弹簧常数以及阻尼常数（参照文献[12]选取）；σ_{li}^{F}、u_{li}^{F}、$\dot{u}_{li}^{\mathrm{F}}$ 分别为人工边界处场地反应的表面应力、位移、速度。

公式中的输入运动和应力按不同面有不同取法，*YOZ* 面取一维自由场，采用 M. Zhao 等[15]提出的一维有限元人工边界方法进行计算；*XOZ* 面采用入射场；*XOY* 面采用相应二维场地模型计算结果。

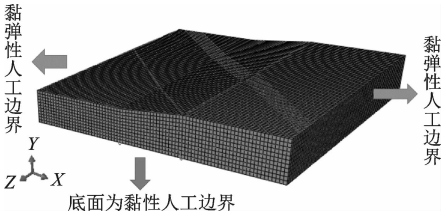


图 6　三维模型示意

Fig. 6　Three-dimensional model

上述处理地表倾斜的地震动输入方法为近似方法，需要进行精度验证。本文通过建立“足够大”的有限元计算模型（简称“大模型”），保证在有限分析时间内，经人工边界反射的散射场不会到达观测点，计算得到的地表反应结果作为参考解。若采用三维大模型，网格数量太多，计算成本过高。而三维模型中间截面反应与相应二维模型反应一致，因此采用二维模型进行地震动输入方法的验证。

首先进行二维模型与三维模型在同一观测点下反应的精度对比。建立地表倾角为 3°、6°工况下的二维模型（软岩参数见表 1），模型长度为 400 m，模型高度为 55 m，网格划分尺寸为 5 m，3°工况模型如图 7 所示，观测点为图中的 601 节点。取模型宽度为 400 m，可建立地表倾角为 3°、6°工况下的三维模型，3°工况模型如图 8 所示，观测点取中间截面上的 37 511 节点。入射波位移时程如图 9 所示，以 SV 波形式进行输入。不同地表倾角条件下二维、三维模型同一观测点下的位移时程曲线对比如图 10 所示，由图可知，不同地表倾角下二维、三维模型位移反应结果能够较好吻合，因此本文采用二维模型的计算结果来验证边界的精度。

建立二维单层水平软岩地基模型，模型长度为 400 m，高度为 55 m。入射波位移时程如图 9 所示。由工程波动理论可知，弹性半空间的自由地表位移的解析解为考虑行波延迟后放大 2 倍的入射位移时程。图 11 为 SV 波输入下地表水平位移时程曲线与解析解对比，由图可知，本文采用的地震动输入方法在水平场地下具有良好的模拟精度。

小模型采用地表倾角为 3°、6°工况下的二维模型，模型长度为 400 m，模型高度为 55 m，3°工况模型如图 8 所示，观测点为图中的 601 节点。采用的大模型宽度为 3 000 m，高度为 350 m，取该计算结果作为参考解。不同倾斜角度下软岩地基表面 601 节点的位移时程曲线如图 12 所示，由图可知，不同地表倾角下小模型位移反应结果与参考解的结果能够有较好的吻合。

综上，可知本文采用的输入方法精度较高，其结果能够较好的满足工程精度要求。

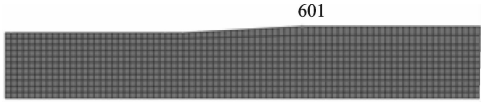


图 7　3°倾角软岩地基二维模型

Fig. 7　2D model ofsoft rock foundation with surface slope of 3°

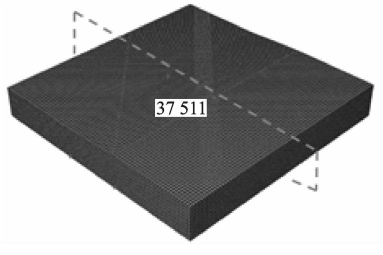


图 8　3°倾角软岩地基三维模型

Fig. 8　3D model of soft rock foundation with surface slope of 3°

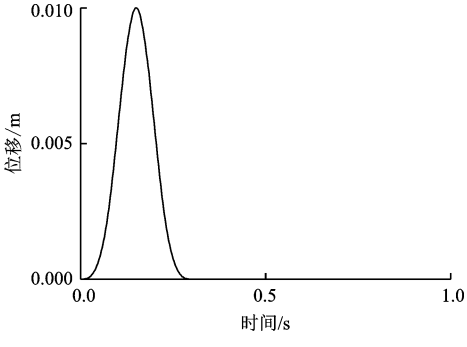
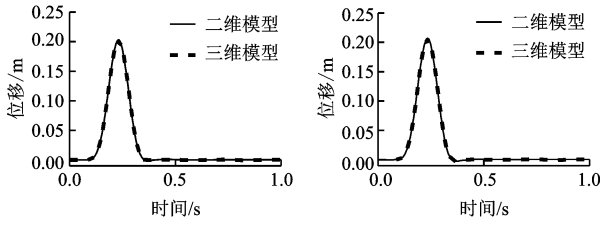


图 9　入射波位移时程

Fig. 9　Displacement of the incident wave



(a) 3°工况位移时程曲线　　(b) 6°工况位移时程曲线

图 10　二维模型与三维模型位移时程曲线对比

Fig. 10　Comparison of displacementtime history curves of 2D and 3D models

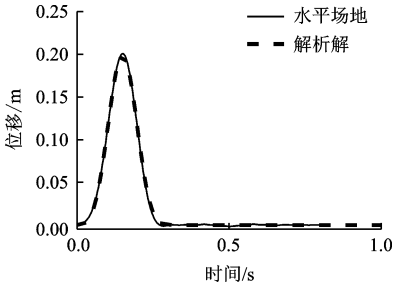
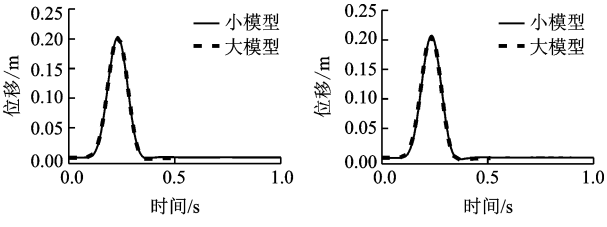


图 11　地表水平位移时程曲线

Fig. 11　Horizontal displacement time history curve



(a) 3°工况位移时程曲线　　(b) 6°工况位移时程曲线

图 12　SV 波输入下地震动输入方法的计算结果

Fig. 12　Calculation result of input method for ground motion under SV wave input

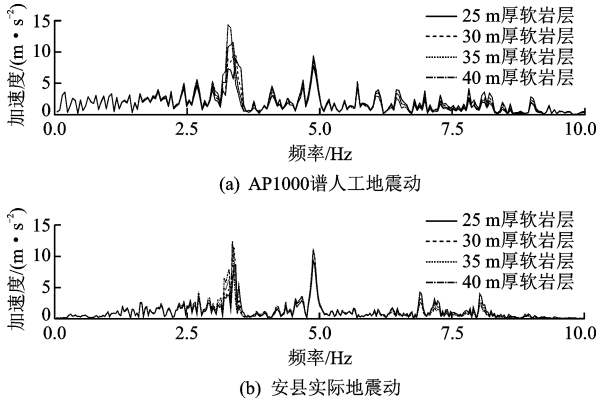
4　计算结果分析

获取核电厂房结构中楼层响应谱的主要目的是进行楼层附近相关核设备的动力响应设计。核电设备的抗震分析一般过程为，先进行核岛主体结构的抗震分析，得到重要位置处楼层的加速度反应谱，然后将其作为楼层震动的输入条件，从而进行相关设备的抗震分析。基于 ABAQUS 软件的计算，分别提取不同水平向地震动输入下维修层和操作层处的加速度时程曲线，并通过傅里叶变换为楼层响应谱。

4.1　软岩层厚度对楼层响应谱的影响

将不同软岩层厚度下维修层水平向楼层响应谱曲线汇于图 13。由图可知，两种地震动作用下楼层响应谱谱形大致相同，都较窄并且存在两个加速度峰值，分别出现在 3 Hz 以及 4.8 Hz 周围，维修层核电设备的基频必需与之错开，避免出现共振现象而造成设备破坏。对于响应谱低频部分（0～5 Hz），随着软岩厚度的增加，楼层响应谱数值呈现增大的趋势；对于响应谱高频部分（5～10 Hz），楼层响应谱数值呈现出随着软岩厚度的增加而降低的趋势。在 3～3.5 Hz 处，随着软岩厚度的增加，楼层响应谱曲线逐渐向低频方向移动，谱形存在扩宽的趋势。维修层楼层响应谱峰值比较见表 2，从中可以看出，峰值频率呈现出随着软岩厚度的增加而降低的现象。响应谱峰值大致呈现出 40 m 厚软岩层＞35 m 厚软岩层＞30 m 厚软岩层＞25 m 厚软岩层的变化规律，产生这种情况的原因主要是因为软岩层在地震作用下的响应要比硬岩层的动力响应更加剧烈，得出的结果基本符合认识。

将不同软岩层厚度下操作层水平向楼层响应谱曲线汇于图 14。由图可知，楼层响应谱同样存在两个加速度峰值，AP1000 谱人工地震动输入下的两



(a) AP1000谱人工地震动

(b) 安县实际地震动

图 13　维修层处不同软岩厚度的水平向楼层响应谱

Fig. 13　Horizontal floor response spectrum of different soft rock thickness at maintenance deck

表 2　不同软岩厚度下维修层水平向楼层响应谱峰值比较

Table 2　Comparison of peakresponse spectrum of horizontal floorat maintenance deckwith different soft rock thickness

软岩厚度/m	AP1000 谱人工地震动		安县实际地震动	
	峰值频率/Hz	加速度峰值/(m·s^{-2})	峰值频率/Hz	加速度峰值/(m·s^{-2})
25	3.42	8.933	3.42	8.562
30	3.42	9.686	3.38	11.558
35	3.36	11.568	3.35	12.098
40	3.27	14.339	3.35	12.430

个峰值分别出现在 3.4 Hz 以及 6 Hz 周围，而安县地震动输入下的峰值出现在 3.4 Hz 以及 4.8 Hz 周围，进行核电设备设计时需要提高重视。操作层楼层响应谱峰值比较见表 3，从表中可以看出，操作层（相对高度 41.2 m）响应谱峰值要比维修层（相对高度 31.4 m）的峰值大，可知相对高度更高的重要楼层处的核电设备所受到的动力响应会更剧烈，设计时需要重视高楼层处核电设备的抗震性能。响应谱峰值大致呈现出 40 m 厚软岩层＞35 m 厚软岩层＞30 m 厚软岩层＞25 m 厚软岩层的变化规律。

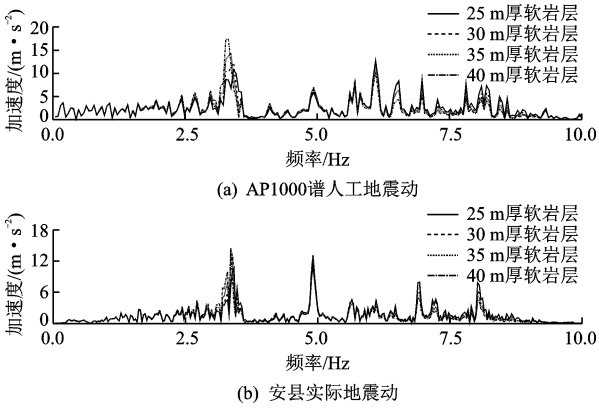


图 14　操作层处不同软岩厚度的水平向楼层响应谱

Fig. 14　Response spectrum of horizontal flooratoperating deckwith different soft rock thickness

表 3　不同软岩厚度下操作层水平向楼层响应谱峰值比较

Table 3　Comparisonof peak response spectrum of horizontal floor at operating deck under different soft rock thickness

软岩厚度/m	AP1000 谱人工地震动		安县实际地震动	
	峰值频率/Hz	加速度峰值/(m·s⁻²)	峰值频率/Hz	加速度峰值/(m·s⁻²)
25	3.42	10.774	3.42	10.633
30	3.42	12.338	3.38	13.092
35	3.37	14.267	3.35	14.277
40	3.27	17.456	3.35	14.507

4.2　地表倾角对楼层响应谱的影响

提取不同水平向地震动输入下维修层和操作层处的加速度—时程曲线，并通过傅立叶变换为楼层响应谱。将不同地表倾角下维修层水平向楼层响应谱曲线汇于图 15。由图可知，由于安县实际强震动记录与 AP1000 谱人工地震动存在频谱特性差异，两种地震动获取的楼层响应谱敏感频段以及峰值差异略大。地表倾角的存在对楼层响应谱低频部分（0～4 Hz）影响较小，3 种工况下的响应谱曲线变化规律保持一致；对于响应谱高频部分，随着地表倾角的增加，楼层响应谱数值呈现出一定的放大效应，地表倾角的存在对于低周期核电设备的抗震性能可能存在不利影响。运行室楼层响应谱峰值比较见表 4，从表中可以看出，两种地震动输入下维修层楼层响应谱的峰值频率都为 4.88 Hz，楼层响应谱峰值大小整体大致呈现出 6°＞3°＞0°的规律，虽然随着倾角的增加，增长幅度不大，但足够表明倾斜场地对维修层高频部分的动力响应有着放大效应。

将不同倾斜角度下操作层水平向楼层响应谱曲线汇于图 16。由图可知，安县地震动输入下楼层响应谱峰值频率出现在 4.9 Hz 周围，AP1000 谱人工地震动输入下的峰值频率出现在 6.1 Hz 周围，因此低周期核电设备在设计时需考虑在不同地震动输入下可能出现的峰值频率改变现象，避免出现共振而造成设备破坏。操作层楼层响应谱峰值比较见表 5，操作层（相对高度 41.2 m）响应谱峰值要比维修层（相对高度 31.4 m）的峰值大，可知相对高度更大的重要位置处核电设备所受到的动力响应会更剧烈。楼层响应谱峰值大小整体大致呈现出 6°＞3°＞0°的规律。

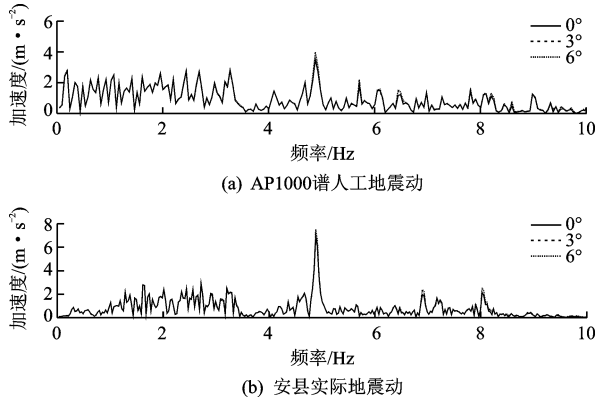


图 15　维修层处不同倾角下的水平向楼层响应谱

Fig. 15　Response spectrum of horizontal floor at maintenance deck with different ground slopes

表 4　不同倾角下维修层水平向楼层响应谱峰值比较

Table 4　Comparison of peakresponse spectrum of horizontal floor at maintenance deckwith different ground slopes

倾斜角度/(°)	AP1000 谱人工地震动		安县实际地震动	
	峰值频率/Hz	加速度峰值/(m·s⁻²)	峰值频率/Hz	加速度峰值/(m·s⁻²)
0	4.88	3.519	4.88	6.912
3	4.88	3.618	4.88	7.046
6	4.88	3.982	4.88	7.487

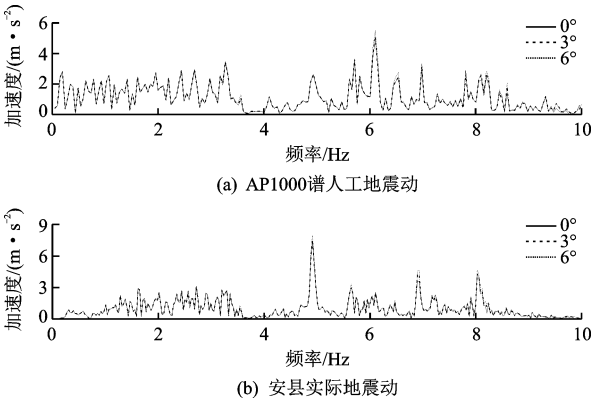


图 16　操作层处不同地表倾角下水平向楼层响应谱

Fig. 16　Response spectrum of horizontal floor at operating deck with differentground slopes

表 5　不同地表倾角下操作层楼层水平向响应谱峰值比较

Table 5　Comparison of peakresponse spectrum of horizontal floor at Operating deckwith different ground slopes

倾斜角度/(°)	AP1000 谱人工地震动		安县实际地震动	
	峰值频率/Hz	加速度峰值/(m·s^{-2})	峰值频率/Hz	加速度峰值/(m·s^{-2})
0	6.10	5.017	4.91	7.333
3	6.10	5.098	4.91	7.539
6	6.10	5.337	4.91	8.032

5　结　语

(1)对于单层均质小角度倾斜场地,采用考虑地表倾斜的地震动输入方法与参考解的结果能够较好吻合,其结果能够较好地满足工程精度要求。

(2)对 AP1000 屏蔽厂房结构在不同软岩厚度地基条件下进行了楼层响应谱分析。结果表明,随着软岩厚度的增加,楼层响应谱呈现一定的放大效应,响应谱曲线逐渐向低频方向移动,峰值频率呈现出随着软岩厚度的增加而降低的现象;响应谱峰值呈现出 40 m 厚软岩层>35 m 厚软岩层>30 m 厚软岩层>25 m 厚软岩层的变化规律。

(3)对 AP1000 屏蔽厂房结构在不同地表倾角软岩地基下进行了楼层响应谱分析。结果表明,随着地表倾角的增加,重要位置楼层响应谱在高频部分存在一定的放大效应,地表倾角的存在对于低周期核电设备的抗震性能可能存在不利影响;楼层响应谱峰值大小整体大致呈现出 6°>3°>0°的规律。

参考文献:

[1]　孔宪京,林　皋. 核电厂工程结构抗震研究进展[J]. 中国工程科学,2013,15(4):62-74.
Kong X J, Lin G. Advanceon engineering structural seismic safety of nuclear power plant[J]. China Engineering Science,2013,15(4):62-74. (in Chinese)

[2]　李忠诚,杨孟嘉. AP1000 抗震分析与设计特点研究[J]. 世界地震工程,2008,24(1):137-142.
Li Zh Ch, Yang M J. Study in the major characteristics of seismic analysis and design of AP1000[J]. World Earthquake Engineering,2008,24(1):137-142. (in Chinese)

[3]　弓振邦,张任妍. 结合 AP1000 谈国内核电厂抗震设计的改进方向[C]//中国核学会 2013 年学术年会论文集. 北京:中国核学会,2013:5.
Gong Zh B, Zhang R Y. Refer to AP1000 for discussing the betterment of seismic design of internal power plant[C]//The 2013 Academic Conference of the China Nuclear Society. Beijing: The China Nuclear Society,2013:5. (in Chinese)

[4]　夏祖讽. 三代核电厂结构的抗震设计分析概论[J]. 南方能源建设,2017,4(1):1-9.
Xia Z F. Introduction to structure seismic design and analysis of the third generation nuclear power plant[J]. Southern Energy Construction,2017,4(1):1-9. (in Chinese)

[5]　Westinghouse. AP1000 design control document, Rev. 17[R]. US: Nuclear Regulatory Commission, 2009.

[6]　曹国敖,李　峰. 核电站辅助厂房结构-地基土相互作用体系的地震响应[J]. 核动力工程,1993,14(4):374-380.
Cao G A, Li F. The dynamic responses of the soil-auxilary buildings interaction system[J]. Civil Engineering Journal,1993, 14(4):374-380. (in Chinese)

[7]　刘洁平,张令心,吴正泓. 核电厂安全壳土-结构相互作用地震反应简化分析方法[J]. 土木工程学报,2014,47(增 1):227-233.
Liu J P, Zhang L X, Wu Zh H. A seismic response simplified analysis method considering soil-structure interaction of inner containment in nuclear power plant[J]. Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup 1):227-233. (in Chinese)

[8]　王天运,任辉启,刘国强,等. 考虑土-结构相互作用的核电站动力分析方法[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(22):3 840-3 845.
Wang T Y, Ren H Q, Liu G Q, et al. Dynamic analytic methods of nuclear power station structure considering soil and structure interaction[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(22):3 840-3 845. (in Chinese)

(下转第 935 页)