

DOI: 10.11779/CJGE2023S20018

# 考虑土-结构动力相互作用的小型核反应堆楼层反应谱

刘浩<sup>1,2</sup>, 李波<sup>\*1,2</sup>, 周孟<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(深圳), 广东 深圳 518055; 2. 广东省土木工程智能韧性结构重点实验室, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 小型核反应堆因其广泛的应用前景而成为研发热点。然而, 小型核反应堆通常部分或完全埋入地下, 这使得土-结构相互作用对其地震响应产生深远的影响。考虑土-结构动力相互作用可更为真实反映非基岩场地核电厂房在地震作用下的响应特性, 进而有助于评估核电设备在地震作用下的安全性, 对确保核电站系统的可靠性和安全性至关重要。采用数值模拟方法, 选取了3个典型场地和1个代表性的小型核反应堆结构作为研究对象, 探讨在不同结构埋深和不同楼层高度等条件下小型核反应堆的楼层反应谱特性。研究结果表明, 考虑土-结构动力相互作用后, 小型核反应堆楼层反应谱的峰值频率会向低频偏移。研究还发现场地土层的刚度对结构楼层反应谱的影响显著。考虑土-结构相互作用后, 楼层反应谱随结构楼面高度减小, 幅值在低频段有减小的趋势, 在中高频段有先减小后增大的趋势。

**关键词:** 小型核反应堆; 地震波动输入方法; 土-结构动力相互作用; 楼层反应谱

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0140-07

作者简介: 刘浩(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事地震工程方面的研究工作。E-mail: 273792506@qq.com。

## Floor response spectra of small nuclear reactor considering seismic soil-structure interaction

LIU Hao<sup>1,2</sup>, ZHOU Meng<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1,2</sup>

(1. Harbin Institute of Technology Shenzhen, Shenzhen 518055, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Small nuclear reactors have become a research hotspot due to their wide range of applications. However, they are usually partially or completely buried, which makes soil-structure interaction have a profound impact on their seismic responses. Considering the soil-structure dynamic interaction can more realistically reflect the response characteristics of nuclear power plant buildings on soil sites under earthquakes, which can help evaluate the safety of nuclear power equipments under earthquakes, and is crucial to ensure the reliability and safety of the nuclear power plant system. By using the numerical simulation methods, three typical sites and a representative small nuclear reactor structure are selected as the research objects, and the floor response spectral characteristics of small nuclear reactors are explored under different structural burial depths and different floor heights. The research results show that after considering the soil-structure dynamic interaction, the peak frequency of the floor response spectra of small nuclear reactors will shift to low frequency. The stiffness of the site soil layer has a significant impact on the floor response spectra. After considering the soil-structure interaction, the amplitudes of floor response spectra decrease with the decrease of the structural floor height, and the amplitude decreases in the low-frequency range and increases first and then decreases in the medium-high-frequency range.

**Key words:** small nuclear reactor; seismic wave input method; dynamic soil-structure interaction; floor response spectrum

## 0 引言

核能发电作为目前新能源技术中相对成熟、发展较快的一种, 在中国和世界的能源布局中占据着重要地位。在“一带一路”和核电“走出去”的国家战略推动下, 中国海内外核电市场发展前景广阔, 其中小型模块化反应堆由于其广泛优势近年来在国内外成为研发热点<sup>[1]</sup>。

核电厂主要由外部厂房(如反应堆厂房、辅助厂

房、汽轮机厂房等)和内部设备(如蒸汽发生器、热传输系统、和热传输泵等)组成。内部设备有如下3个主要特点: ①内部设备是保障核电厂安全有效运行的关键; ②内部设备容易受到地震影响而功能受损; ③内部设备价格非常昂贵, 其经济投入费用占整个核

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目(2023A1515012887); 国家自然科学基金面上项目(52178471)

收稿日期: 2023-11-30

\*通信作者(E-mail: boli@hit.edu.cn)

电厂费用的 80%以上。为确保核电站系统的地震安全性,需要对核电设备进行地震安全评估,而楼层反应谱是核电设备地震安全评估的关键<sup>[2]</sup>。

而小型模块化反应堆通常部分嵌入或完全嵌入地表下。在地震作用下,小型模块化反应堆结构与土体之间的作用是相互耦合的,土与结构之间会产生动力作用并相互影响<sup>[3]</sup>。近几十年来随着有限元软件的开发及应用的普及,土-结构动力相互作用分析方法得到了很大的发展<sup>[4,5]</sup>。目前针对土-结构动力相互作用的动力响应分析时有必要考虑场地的特性。Park<sup>[6]</sup>认为对于位于坚硬场地上的轻型结构,土-结构相互作用对结构响应影响较小;而对于在软到中硬场地上的重型结构(如核反应堆)的影响比较显著。因此,针对小型模块化反应堆,有必要探索土-结构相互作用对反应堆楼层反应谱的影响。

本文将结合小型核反应堆结构埋置地下的特点,建立三维有限元模型,同时考虑土-结构动力相互作用,以核电厂常用的抗震设计谱 RG 1.60 作为目标谱,开展考虑土-结构动力相互作用的小型核反应堆楼层反应谱的研究。

## 1 理论方法

为提高有限元模型计算速度,本研究的场地采用有限域,在截断边界处设置人工边界,模拟真实的地基辐射阻尼效应。同时使用谭辉<sup>[7]</sup>提出的人工边界地震动输入内部子结构法进行地震动的输入。

### 1.1 等效一致黏弹性人工边界

本文选择刘晶波等<sup>[8]</sup>、谷音等<sup>[9]</sup>提出一致黏弹性人工边界及其边界单元,通过在人为截断的边界处设置一层厚度均匀相同的实体单元,并将单元的最外层进行固定,其中,三维模型中黏弹性人工边界的等效单元刚度 $\tilde{E}$ 及等效单元阻尼系数 $\eta$ 为

$$\tilde{E} = \frac{(1+\tilde{\nu})(1-2\tilde{\nu})}{(1-\tilde{\nu})} h K_{\text{BN}} = \alpha_{\text{N}} h \frac{G}{R} \cdot \frac{(1+\tilde{\nu})(1-2\tilde{\nu})}{(1-\tilde{\nu})}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\rho R}{3G} \left( 2 \frac{c_{\text{s}}}{\alpha_{\text{T}}} + \frac{c_{\text{p}}}{\alpha_{\text{N}}} \right). \quad (2)$$

式中: $h$ 为边界单元厚度; $\tilde{\nu}$ 为等效泊松比,三维模型中取 0; $\alpha_{\text{N}}$ 、 $\alpha_{\text{T}}$ 为法向修正系数和切向修正系数; $R$ 为散射波源至黏弹性人工边界节点的距离; $G$ 为土体介质的剪切模量; $\rho$ 为土体介质的密度; $c_{\text{p}}$ 、 $c_{\text{s}}$ 为 P 波和 S 波的波速。

### 1.2 土-结构动力相互作用模型

二维土-结构动力相互作用模型如图 1 所示。图 2 是对应的自由场及内部子结构模型,其中在自由场模型最外层已经建立好等效一致黏弹性人工边界,并且

将整个自由场模型分为 A、B、C、E、I 五个区域。在有限元软件中将图 2 所示的内部子结构模型中的最外层结点 A 进行固定,将计算得到的自由场时程施加在结点 B、C 上,进行动力响应分析得到结点 A、B 处的等效输入地震荷载。再将得到的等效输入地震荷载施加在自由场模型或土-结构动力相互作用模型中结点 A、B 对应的位置上,从而输出自由场模型或土-结构动力相互作用模型中的响应。

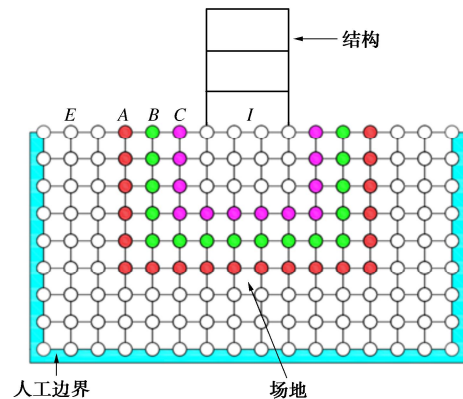


图 1 二维土-结构相互作用模型

Fig. 1 Two-dimensional soil-structure interaction model

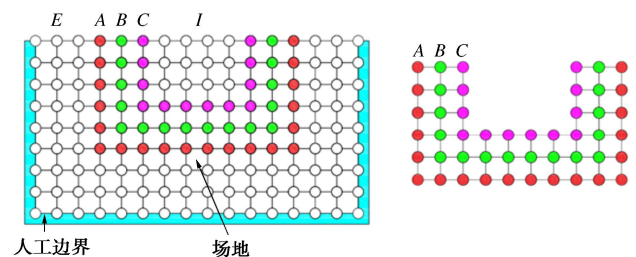


图 2 自由场及对应内部子结构模型

Fig. 2 Free field and corresponding internal substructure model

## 2 模型建立

本文选择的小型核反应堆厂房模型共 4 层,建模数据来自 Lawrence Livermor 国家实验室<sup>[10]</sup>。其中层高高由底层到顶层分别为 12, 12.25, 15.75, 7 m, 总高度 48 m。结构内部的核电设备简化为密度 3670~ $1.3 \times 10^6$  kg/m<sup>3</sup> 不等的杆单元,杨氏模量为 206.87 GPa,泊松比为 0.29。核反应堆容器密度为 17459 kg/m<sup>3</sup>,底部由密度为 7850 kg/m<sup>3</sup> 的环形约束进行固定,杨氏模量为 193 GPa,采用 ABAQUS 进行建模,结构底部设置筏板基础,采用 SHELL 单元对基础进行简化。模型剖面如图 3 所示。

通过场地响应分析,确定场地的等效线性化参数,再依据该参数,计算人工边界的等效刚度及等效阻尼。在进行地震动输入时,根据李述涛等<sup>[11]</sup>的基本思路,

采用刘晶波等<sup>[12]</sup>基于人工边界内部子结构的地震波动输入方法,为便于模型的批量化处理,本文采用统一的内部子结构,其尺寸为 $32\text{ m}\times 32\text{ m}\times 52\text{ m}$ ,略大于结构尺寸 $28\text{ m}\times 28\text{ m}\times 48\text{ m}$ 。如图4为小型核反应堆结构埋深 $0\text{ m}$ 时的土-结构相互作用模型示意图。

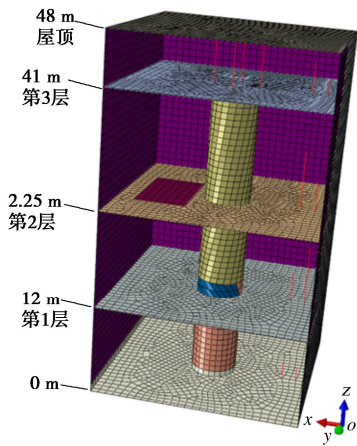


图3 小型核反应堆厂房剖面图

Fig. 3 Cross-sectional view of a small nuclear reactor building

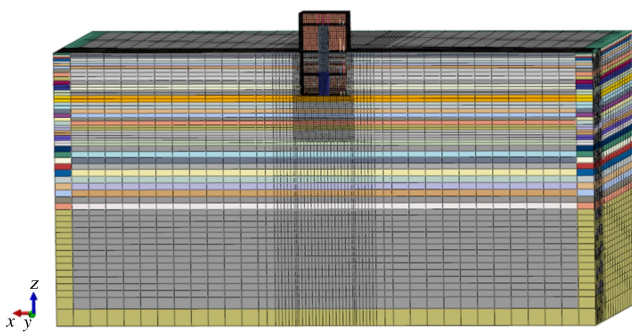
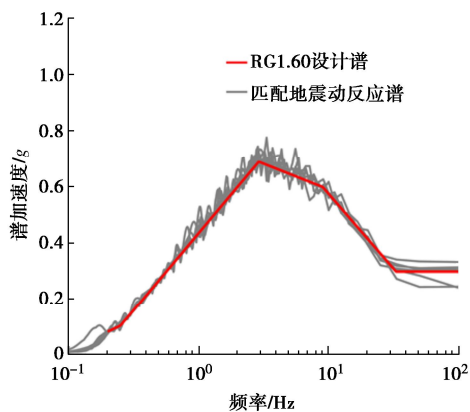


图4 土-结构相互作用模型

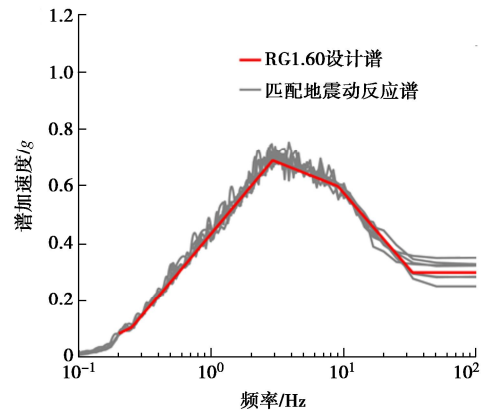
Fig. 4 Soil-structure interaction model

### 3 地震动选取及场地条件

本文选择美国核电抗震设计谱 RG1.60 作为目标谱,生成了7组与目标谱匹配的设计地震动,设计地震动匹配的目标谱见图5。



(a) X水平方向输入地震动加速度反应谱



(b) Y水平方向输入地震动加速度反应谱

图5 X, Y水平方向输入地震动加速度反应谱

Fig. 5 Response spectra of horizontally input motions in X and Y direction

为了考虑地基土对结构楼层反应谱的影响,本文选择了软硬程度不同的3种场地并建模。3种场地的土层剪切波速依次减小:场地一(即切尔纳沃达核电站场地)最硬,场地二(即美国能源部萨凡纳河场地)次之,场地三(拉西涅加场地)最软,如图6所示。其中,场地二土层初始阻尼比均为6.5%,泊松比为0.35,其余土层参数见表1,图7为场地二的土体动剪切模量比和阻尼比曲线,其它场地类似。

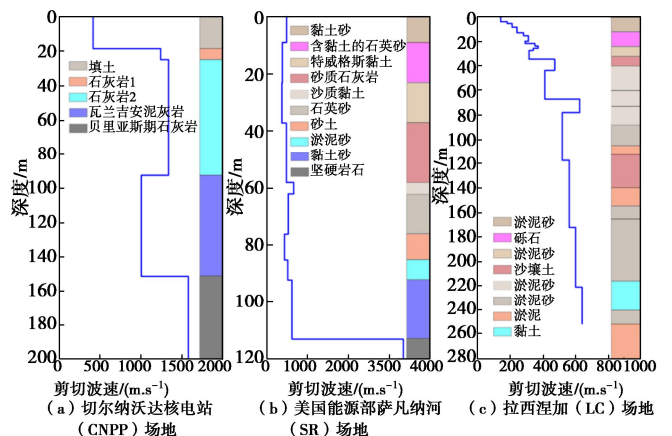


图6 3个场地

Fig. 6 Three sites

表1 场地二的土层参数

Table 1 Layer parameters for Site 2

土层编号	土层厚度/m	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	初始剪切波速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
S1	9	2050	481.6
S2	14	2053.4	378.0
S3	15	2050	365.8
S4	20	1973.2	476.7
S5	4	2117.6	656.2
S6	14	2117.6	524.3
S7	9	2021.3	431.3
S8	7	2117.6	510.5
S9	21	2101.6	614.2

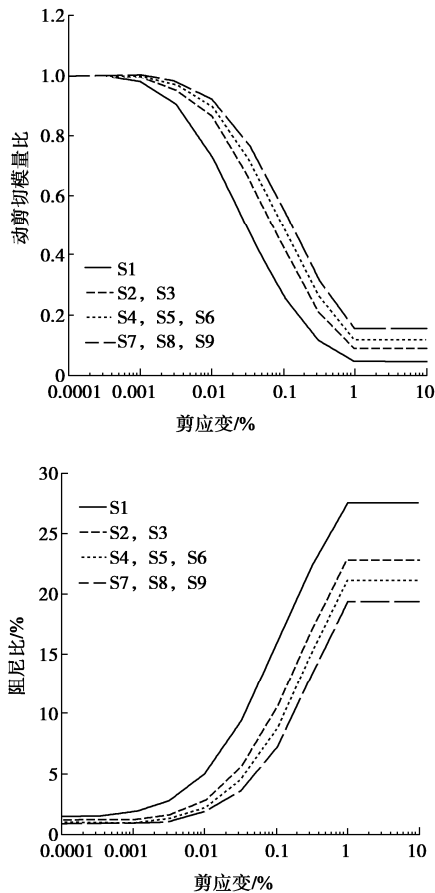


图7 土体动剪切模量比和阻尼比曲线

Fig. 7 Dynamic shear modulus and damping ratios of soil

## 4 固定基础结构楼层反应谱分析

### 4.1 模态分析

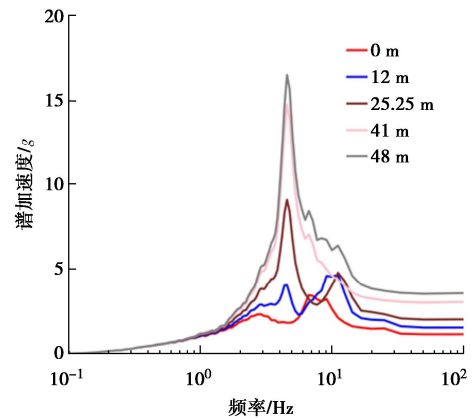
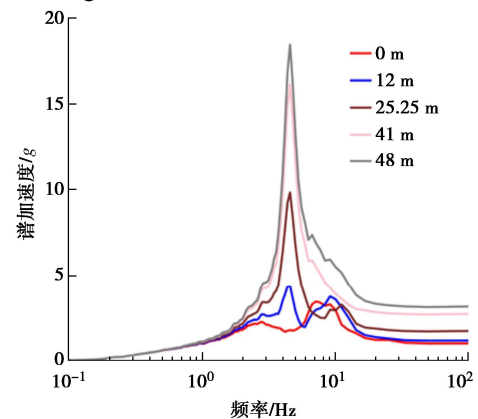
通过 ABAQUS 对小型核反应堆结构进行模态分析, 本文得到计算的结果与 Solberg 等<sup>[13]</sup>的计算结果吻合。结构一、二阶模态对应结构底部简化的一号杆件  $X$ 、 $Y$  方向的振型, 频率为 0.91 Hz, 三、四阶模态则对应整个结构  $X$ 、 $Y$  方向的振型, 频率为 4.57 Hz。

对比结构的前 20 阶模态, 可以发现  $X$  方向在第三阶模态所对应的有效质量为  $3.04 \times 10^7$  kg, 第十四阶模态对应的有效质量为  $6.40 \times 10^6$  kg。已知结构总质量为  $4.93 \times 10^7$  kg, 第三阶模态对应的有效质量占结构总质量的 61.7%, 对该结构的楼面  $X$  方向的振动起到控制作用。 $Y$  方向在第四阶模态所对应的有效质量为  $3.04 \times 10^7$  kg, 对该结构的楼面  $Y$  方向的振动起到控制作用。

### 4.2 固定基础结构楼层反应谱分析

采用固定基础结构进行结构动力响应分析, 输入选取的 7 组设计地震动时程作为结构  $X$ 、 $Y$  方向的地震动输入, 对结构楼面高度为 0, 12, 25.25, 41, 48 m 的每个楼层进行结构动力响应分析, 采用 SRSS 方法

对  $X$ 、 $Y$  方向单独输入的地震动计算得到的响应进行组合得到最后的结果。计算得到的 7 组地震动作用下的楼层反应均值谱如图 8, 9 所示。

图8  $X$  方向固定基础结构楼层反应谱Fig. 8 Fixed-base FRS in  $X$  direction图9  $Y$  方向固定基础结构楼层反应谱Fig. 9 Fixed-base FRS in  $Y$  direction

由于固定基础结构的输入是施加在结构底部, 因此结构底部的输出的结果与输入是一致的, 结构底部 0 m 处的楼层反应谱与输入地震动的反应谱比较接近。在楼面高度为 12 m 及 25.25 m 的楼层反应谱中存在两个明显的峰值, 其中一个峰值对应的频率为 4.545 Hz, 而另一个峰值对应的频率较为接近 12.453 Hz; 楼面高度为 41 m 及 48 m 的楼层反应谱中只存在一个频率为 4.545 Hz 的峰值, 此由于楼面较高, 最大峰值对应的楼层响应偏大, 造成局部频率范围内楼层响应偏大, 因此第二个峰值不明显。分析发现, 对结构楼面响应起到控制作用的模态与其在该阶模态对应的有效质量占总质量的比重相关。

## 5 土-结构动力相互作用对楼层反应谱的影响

在考虑土-结构相互作用与固定基础两种工况下开展小型核反应堆楼层反应谱分析中, 本研究都采用

与核电抗震设计谱 RG1.60 匹配的 7 组设计地震动时程作为地震动输入。

由于小型核反应堆结构在  $X$  方向和  $Y$  方向呈现近似对称, 且  $X$ 、 $Y$  方向的设计地震都与同一目标谱进行匹配得到的, 因此两个方向的加速度楼层反应谱的谱形相似, 且有着一致的变化趋势。以下仅给出结构  $X$  方向的不同楼面高度和场地条件下的楼层反应谱。

图 10, 11 给出固定基础和考虑土-结构相互作用两种工况下, 小型核反应堆结构的楼面高度 25.25 m 和 48 m 处的楼层反应谱均值。通过对比可以发现:

(1) 相较于固定基础模型楼层反应谱, 考虑土-结构动力相互作用的楼层反应谱峰值对应的频率处于低频段, 场地土层刚度越小, 峰值对应的频率越低。

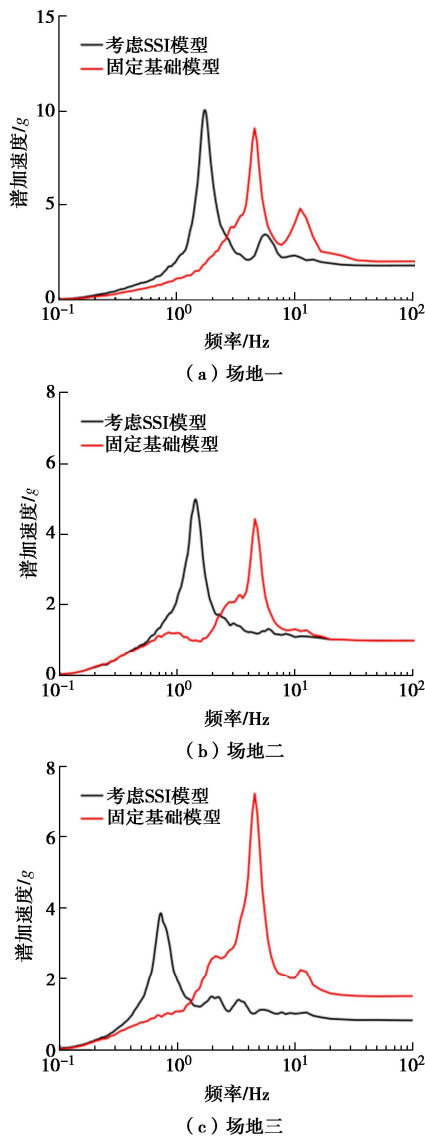


图 10 土-结构相互作用与固定基础结构于楼面高度 25.25 m 处  $X$  方向楼层反应谱

Fig. 10  $X$ -direction FRS of soil-structure interaction model and fixed-base model at floor height of 25.25 m

(2) 针对场地一及场地二此类坚硬场地, 考虑土-结构动力相互作用后, 结构的楼层反应谱峰值是大于固定基础结构的楼层反应谱峰值, 而针对场地三此类较软场地, 考虑土-结构动力相互作用后, 结构的楼层反应谱峰值是小于固定基础结构的楼层反应谱峰值。因此可以得出, 土-结构动力相互作用对结构楼层反应谱的影响与场地条件有很大关系。

因此, 基于不同的场地条件, 在考虑土-结构动力相互作用对结构楼层响应产生影响时, 需要同时考虑由于土-结构动力相互作用对结构响应产生放大效应和抑制作用, 即土-结构动力相互作用造成的响应谱峰值变化趋势与场地条件密切相关。

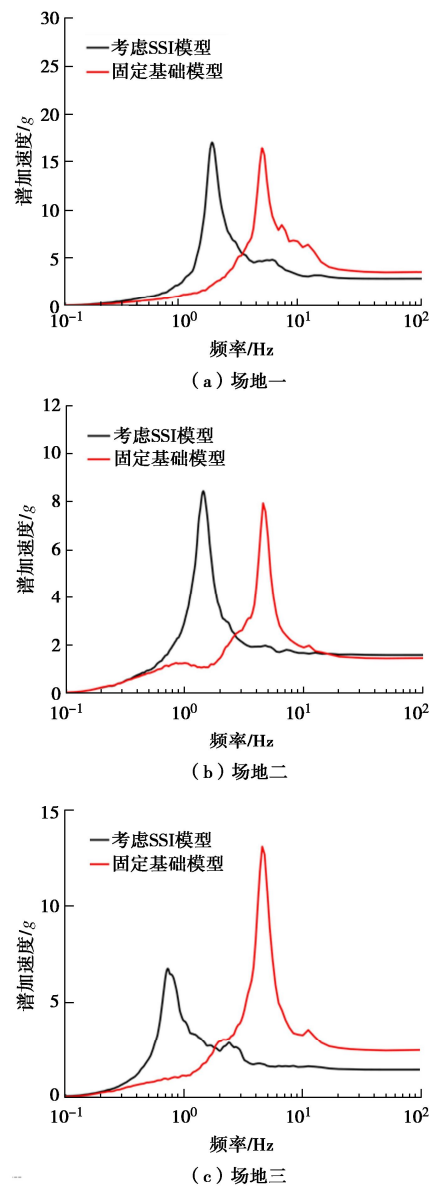


图 11 土-结构相互作用与固定基础结构于楼面高度 48 m 处  $X$  方向楼层反应谱

Fig. 11  $X$ -direction FRS of soil-structure interaction model and fixed-base model at floor height of 48 m

## 6 楼层反应谱随楼面高度的变化规律

### 6.1 25 m 埋深下楼层反应谱随楼面高度变化规律

图 12 为小型核反应堆结构在埋深为 25 m 时, 结构各高度楼面 X 方向的楼层反应谱均值。随着结构埋深的增加, 场地土层对结构侧向约束增强, 分析发现: ①场地一、场地二、场地三分别在频率为 2, 0.8, 0.7 Hz 左右处楼层反应谱形成一个峰值, 该峰值随结构楼面高度的增大而增大, 峰值对应的频率也随之增大。该峰值是由场地自身特性引起的, 这是因为 3 个场地的结构在埋深为 25 m 时, 最大有效质量系数对应的频率分别为 1.750, 0.672, 0.639 Hz。②高楼面的楼层反应谱的第二个峰值很明显, 而低楼面的却不明显, 由于结构埋深较大, 结构底部及侧面受到场地约束更强, 抑制了结构楼面响应。并且在局部范围内存在随着结构楼面高度的减小, 反应谱谱加速度值先减小后增大的现象。

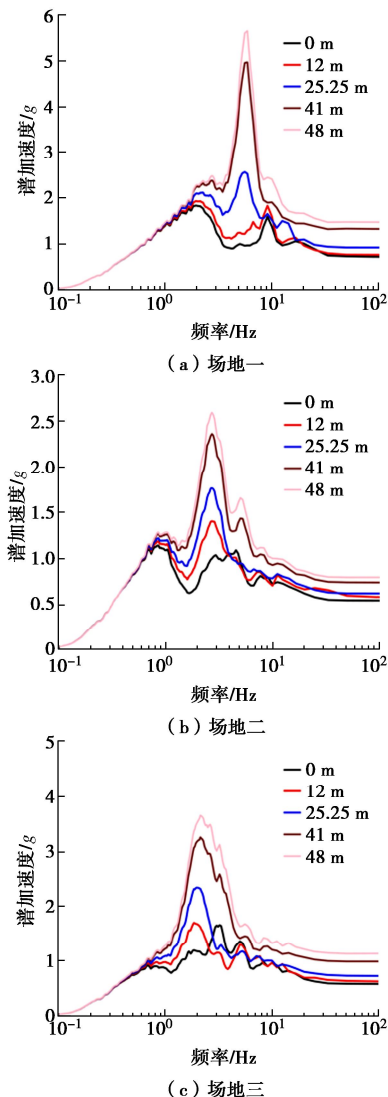


图 12 在结构 25 m 埋深下楼层反应均值谱

Fig. 12 Average FRS under embedment depth of 25 m

### 6.2 48 m 埋深下楼层反应谱随楼面高度变化规律

图 13 为小型核反应堆结构在埋深为 48 m 条件下, 结构各高度楼面 X 方向的楼层反应谱均值。相较于埋深 25 m 时的楼层反应谱均值, 结构埋深 48 m 时各楼面的楼层反应谱值较小, 可以发现: ①在 3 个场地条件下, 频率分别在 2, 0.8, 0.7 Hz 左右处楼层反应谱形成一个峰值, 且随楼面高度增大而增加。该峰值与场地自身特性有关。②3 个场地条件下, 当模型频率分别各自达到 3.333, 1.316, 2.381 Hz 之后, 随着结构楼面高度的增加, 楼层反应谱出现了先减小再增大的趋势, 这说明在考虑土-结构相互作用后, 结构楼层反应谱并非随楼面高度的降低而变小。

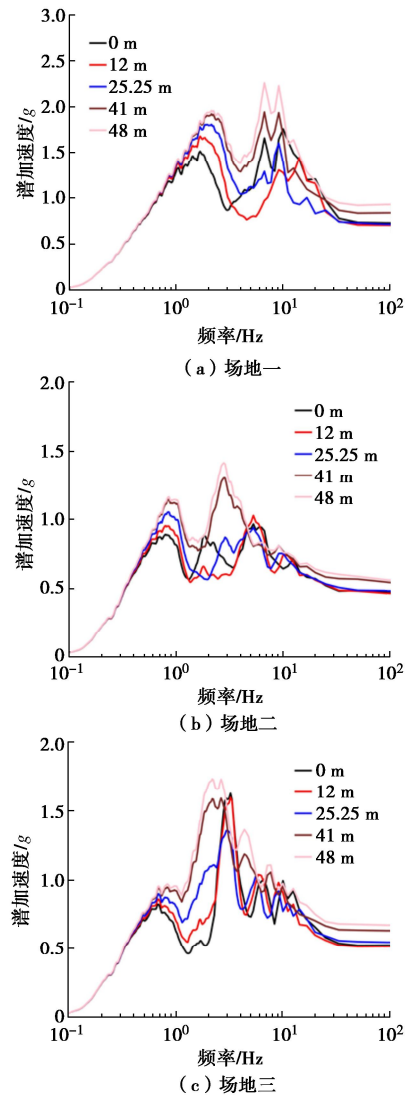


图 13 结构在 48 m 埋深下楼层反应均值谱

Fig. 13 Average FRS under embedment depth of 48 m

对比不同埋深的计算结果, 可以发现: ①在考虑土-结构动力相互作用后, 存在由结构所在的场地起到控制作用的楼层反应谱峰值。即在三类场地下, 结构埋深为 25, 48 m 时, 在结构楼面高度为 0, 12, 25.25, 41, 48 m 的楼层反应谱的较低频段内都存在一个峰

值,且该峰值及其对应的频率都较为稳定。②考虑土-结构相互作用后,结构的楼层反应均值谱都随结构楼面高度的减小,反应谱值在低频段都有减小的趋势,在中高频段有先减小后增大的趋势。由结构特性控制的楼层反应谱峰值会随着结构楼面高度的减小而减小,但该峰值对应的频率较为稳定。

## 7 结 论

本文以小型核反应堆结构为研究对象,建立土-结构动力相互作用模型,探讨在3种不同场地条件下,结构基于结构埋深变化的楼层反应谱的一般性规律。

(1)考虑土-结构动力相互作用的楼层反应谱同时受场地条件及结构自身特性控制。考虑土-结构动力相互作用时,将会导致结构的楼层反应谱峰值向低频偏移,同时影响峰值的大小。

(2)结构的埋深对其楼层反应谱产生显著影响,增大结构埋深会加强结构的侧向约束,从而导致结构刚度变大,结构楼层反应谱的谱值会不断减小。

(3)针对较硬场地,考虑土-结构相互作用后,反应堆的楼层反应谱峰值高于同等条件下固定基础结构的楼层反应谱峰值。针对较软场地,则规律相反。

(4)考虑土-结构相互作用后,结构的楼层反应谱随着结构楼面高度减小,反应谱值在低频段都存在减小的趋势,而在中高频段存在着先减后增的趋势。

### 参考文献:

[1] LOCATELLI G, BINGHAM C, MANCINI M. Small modular reactors: a comprehensive overview of their economics and strategic aspects[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2014, **73**: 75-85.

[2] JIANG W, LI B, XIE W C, et al. Generate floor response spectra: part 1. Direct spectra-to-spectra method[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2015, **293**: 525-546.

[3] DE BORBÓN F, DOMIZIO M, AMBROSINI D, et al. Influence of various parameters in the seismic soil-structure interaction response of a nuclear power plant[J]. *Engineering Structures*, 2020, **217**: 110820.

[4] EL HOSENY M, MA J X, DAWOUD W, et al. The role of soil structure interaction (SSI) on seismic response of tall buildings with variable embedded depths by experimental and numerical approaches[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, **164**: 107583.

[5] TAKEWAKI I, TAKEDA N, UETANI K. Fast practical evaluation of soil-structure interaction of embedded

structures[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, **23**(3): 13-20.

[6] PARK S, SAMADDAR S. Seismic soil-structure interaction analysis of deeply embedded smrs and associated challenges[C]// *The 24th International Conference in Structural Mechanics in Reactor Technology*. Busan, 2017.

[7] 谭 辉. 土-结构动力相互作用分析中地震波输入方法研究及应用[D]. 北京: 清华大学, 2018: 106-112.(TAN Hui. Research and Application of the Seismic Wave Input Method for Soil-Structure Dynamic Interaction Analysis[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018: 106-112. (in Chinese))

[8] 刘晶波, 谷 音, 杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(9): 1070-1075. (LIU Jingbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(9): 1070-1075. (in Chinese))

[9] 谷 音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致黏弹性人工边界及等效黏弹性边界单元[J]. *工程力学*, 2007, **24**(12): 31-37. (GU Yin, LIU Jingbo, DU Yixin. 3d consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, **24**(12): 31-37. (in Chinese))

[10] SOLBERG J, HOSSAIN Q, BLINK J, et al. Development of a Generalized Methodology for Soil-Structure Interaction Analysis Using Nonlinear Time-Domain Techniques NEAMS Program, DOE Office of Nuclear Energy (NE-41)[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), 2013.

[11] 李述涛, 刘晶波, 宝 鑫, 等. 人工边界子结构地震动输入方法在 ABAQUS 中的实现[J]. *自然灾害学报*, 2020, **29**(4): 133-141. (LI Shutao, LIU Jingbo, BAO Xin, et al. Implementation for seismic wave input method based on the artificial boundary substructure in ABAQUS[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, **29**(4): 133-141. (in Chinese))

[12] 刘晶波, 宝 鑫, 谭 辉, 等. 土-结构动力相互作用分析中基于内部子结构的地震波动输入方法[J]. *土木工程学报*, 2020, **53**(8): 87-96. (LIU Jingbo, BAO Xin, TAN Hui, et al. Seismic wave input method for soil-structure dynamic interaction analysis based on internal substructure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, **53**(8): 87-96. (in Chinese))

[13] SOLBERG J M, HOSSAIN Q, MSEIS G Nonlinear time-domain soil-structure interaction analysis of embedded reactor structures subjected to earthquake loads[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, **304**: 100-124.