

贺秋梅, 李小军, 张江伟, 李亚琦, 2014. 某高温气冷堆核电站结构地震反应分析. 震灾防御技术, 9(3): 454—461.
doi: 10.11899/zzfy20140312

某高温气冷堆核电站结构地震反应分析¹

贺秋梅¹⁾ 李小军^{1,2)} 张江伟¹⁾ 李亚琦¹⁾

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2) 北京工业大学, 北京 100022

摘要 以某高温气冷堆核电站结构为原型, 利用有限元软件建立三维结构实体模型, 开展了模态分析和弹性动力时程分析的数值计算, 以探讨某高温气冷堆核电站的结构特性和抗震性能, 并重点分析了在三向地震动作用下高温气冷堆核电站的加速度、位移反应时程和楼层反应谱。总体上看, 高温气冷堆核电站在两个水平向的刚度比较均匀, 楼层反应接近, 布局较为合理; 在三向地震动作用下, 顶层中心点的竖向楼层反应均明显大于两水平方向楼层反应, 因此在高温气冷堆核电站结构设计中, 应关注竖向地震动对核电站地震反应带来的不利影响。

关键词: 核电站 动力时程分析 楼层反应谱 数值计算

引言

随着经济的迅猛发展, 以及煤炭、电力和石油等资源的急剧减少, 核电建设正在快速发展。由于核电站是以放射性物质为燃料的, 因此它的安全性问题, 历来都为社会公众所瞩目。在核电站运行期间, 地震是一个非常重要的潜在灾害。我国是一个多地震国家, 最近发生的几次大地震, 如 1999 年集集 $M_w7.6$ 级地震、2008 年汶川 $M_w7.9$ 地震和 2013 年芦山 $M_w7.0$ 地震等都在警示我们, 目前对地震的了解还是非常有限的, 尽管在核电站选址中已经充分考虑了厂址所处的地震构造环境, 但核电站在未来很有可能遭遇地震灾害的影响 (潘华等, 2007; 林皋, 2011; 谢礼立等, 2012)。因此, 我国核电站的抗震更是一个十分突出的问题。

结构有限元模型的建立及其动力特性的分析是核电站结构地震反应分析的关键前提和重要步骤, 目前, 国内外对核电站结构的模拟大都采用集中质量模型, 即结构的质量和转动惯量均集中在各节点上, 荣峰 (2003)、李忠献等 (2005a; 2005b) 都做过相关的研究, 而建立真实尺寸的三维有限元模型对核电站结构进行抗震动力分析的研究还较少。从理论上讲, 三维有限元实体模型应该比集中质量模型能更加准确地反应结构的动力性质, 更真实地得到结构的地震反应 (陈岩, 2005; 周伯昌, 2007)。新一代的模块式高温气冷堆是核电站的新型代表, 也是目前全球都致力于研究的堆型, 越来越引起国际核能界和工业界的重视。本文以

1 基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (DQJBDB28); 国家科技重大专项 (2011ZX06002-010)

[收稿日期] 2014-07-10

[作者简介] 贺秋梅, 女, 生于 1978 年。博士, 助理研究员。主要研究方向: 地震工程。E-mail: heqiumei06@126.com

某高温气冷堆核电站结构为原型, 利用有限元软件建立三维线性结构实体模型, 并对模型进行模态分析和三方向地震动作用下的动力时程分析, 以探讨高温气冷堆核电站的抗震性能。

1 高温气冷堆核电站计算模型

该高温气冷堆核电站结构原型座落在基岩中, 采用刚性基底边界条件, 即标高 -0.1m 以下外墙全部固接, 高温气冷堆核电站剖面示意图见图 1。该结构主要由厂房和安全壳组成, 分地下和地上两部分, 地下共五层, 从下到上层高分别为 9.00m 、 7.50m 、 2.30m 、 2.55m 、 5.95m , 地上共五层, 从下到上层高分别为 5.00m 、 5.40m 、 5.70m 、 7.30m 、 21.8m 。

模型单元剖面图如图 2 所示, 一共 7780 个节点, 7940 个单元。采用三维梁单元模拟柱, 采用壳单元模拟楼板、墙、钢网格板及安全壳。安全壳采用 C40 混凝土, 材料密度为 $2500\text{kg}/\text{m}^3$, 弹性模量为 $3.25\text{e}10\text{N}/\text{m}^2$, 泊松比为 0.2; 其它构件均采用 C35 混凝土, 材料密度为 $2500\text{kg}/\text{m}^3$, 弹性模量为 $3.15\text{e}10\text{N}/\text{m}^2$, 泊松比为 0.2 (周伯昌, 2007)。

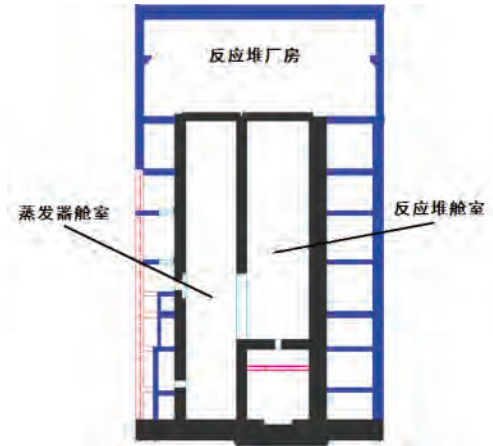


图 1 高温气冷堆核电站剖面示意图

Fig.1 Sketch section of high temperature gas cooled reactor nuclear power plant

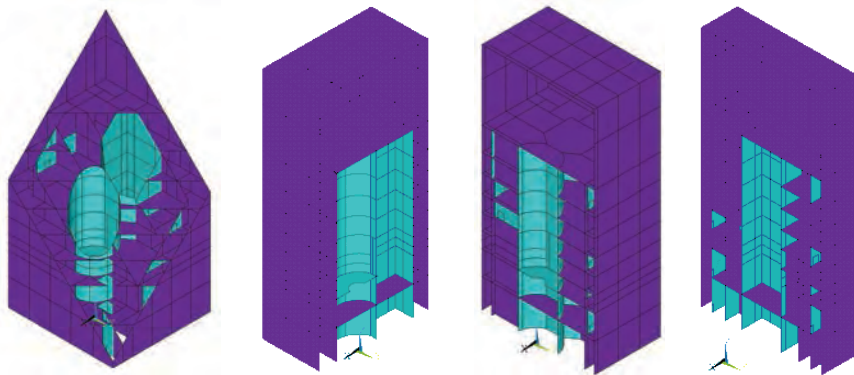


图 2 模型剖面图

Fig.2 Sketch section of the model

2 模态分析

结构在地震作用下的动力响应规律不仅与地震作用有关, 还与结构自振特性紧密相关, 因而对模型的自振特性进行研究, 对分析结构动力响应与抗震性能是十分必要的。模态分析采用无阻尼模态分析方法, 典型的无阻尼模态分析求解的基本方程如下:

$$[K]\{\Phi_i\} = \omega_i^2[M]\{\Phi_i\}$$

式中, $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\Phi_i\}$ 为第 i 阶模态的振型向量 (特征向量); ω_i 为第 i 阶模态的固有频率 (ω_i^2 是特征值); $[M]$ 为质量矩阵。

有许多数值方法可用于求解上面的方程, 本文的求解方法使用子空间迭代技术和广义的 Jacobi 迭代算法。在模态分析中计算、提取和扩展了 100 阶模态, 前 20 阶的自振周期如表 1 所示, 前 10 阶振型图如图 3 所示。

表 1 前 20 阶的自振周期

Table 1 The first twenty order vibration period

| 振型 | 第 1 阶 | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 | 第 5 阶 | 第 6 阶 | 第 7 阶 | 第 8 阶 | 第 9 阶 | 第 10 阶 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 自振周期 (s) | 0.29 | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.13 | 0.12 | 0.12 |
| 自振频率 (Hz) | 3.48 | 4.93 | 5.09 | 6.58 | 7.03 | 7.11 | 7.27 | 7.51 | 8.06 | 8.47 |
| 振型 | 第 11 阶 | 第 12 阶 | 第 13 阶 | 第 14 阶 | 第 15 阶 | 第 16 阶 | 第 17 阶 | 第 18 阶 | 第 19 阶 | 第 20 阶 |
| 自振周期 (s) | 0.12 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.08 |
| 自振频率 (Hz) | 8.55 | 9.32 | 9.58 | 9.85 | 10.96 | 11.12 | 11.61 | 11.63 | 12.52 | 12.84 |

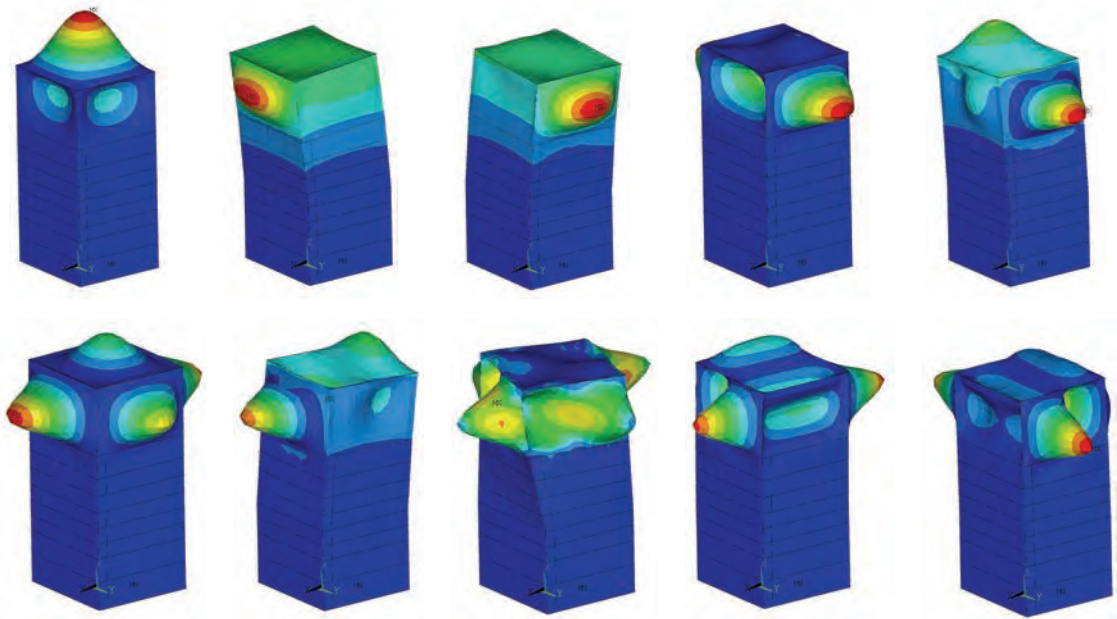


图 3 前 10 阶振型图

Fig.3 The first ten order modal shapes

由图 3 可得出: 结构的第一振型为竖向振动, 对应的自振周期为 0.2870s; 第二振型为 x 向平动, 对应的自振周期为 0.2030s; 第三振型为 y 向平动, 对应的自振周期为 0.1964s; 扭转振型在第 8 阶自振频率处, 对应的自振周期为 0.1332s。由表 1 中自振频率可以看出, 高温气冷堆核电厂的自振周期较短, 结构整体刚度较大。第一自振周期对应的振型为竖向振型, 为高温气冷堆核电厂顶部楼板的竖向变形。两个水平方向的振型对应的自振周期大约在 0.2s 左右, 且最大变形均位于顶层牛腿柱部分的墙体, 两个水平向的自振周

期非常接近, 说明高温气冷堆核电站在两个水平向的刚度比较均匀, 楼层反应接近, 布局较为合理。

3 动力时程分析

动力时程分析方法也称为时间过程法, 该方法将结构作为弹塑性振动体系加以分析, 直接输入地震动, 通过积分运算, 求得结构的内力和变形随时间变化的全过程。抛开实际运用因素, 单纯从理论上讲, 时程分析方法在目前的抗震分析方法中其结果是与结构地震反应的实际情况最为接近的。现行核电站抗震设计规范 (GB50267-97) 中规定: I、II类物项的抗震设计应采用反应谱法和时间过程法。在输入地震动时, 两个水平向的设计加速度峰值应采用相同数值, 竖向设计加速度峰值应采用水平向设计加速度峰值的 $2/3$ 。极限安全地震动应取地震构造法、最大历史地震法和综合概率法确定结果中的最大值, 且其水平加速度峰值不得低于 $0.15g$ 。

在采用动力时程分析方法进行结构地震反应分析时, 选取地震波一般需要考虑的主要参数有: 地震烈度、地震强度参数、场地土类别、卓越周期和反应谱等 (潘宇等, 2010)。本文选取具有代表性且包含两水平向和竖向三分量的两组地震动作为输入, 即 Taft 地震动记录和 El-Centro 地震动记录。Taft 地震动记录是 1952 年 7 月 21 日发生于美国的加利福尼亚州地震 (California Earthquake, 震级 7.4 级), 在加州 Kern County 林肯学校的 No.1095 地震台测得的地震记录, 该记录距震中约 43.5km, 场地类别为 II 类, 该记录最大地震加速度 175.9cm/s^2 , 最大速度 17.7cm/s , 最大位移 9.15cm 。El-Centro 地震动记录是 1940 年 5 月 18 日发生于美国的 Imperial 山谷地震 (Imperial Valley Earthquake, 震级 6.95 级), 在 El-Centro 地震台站测得的地震记录, 该记录距震中约 12.99km, 场地类别为 II 类, 该记录最大地震加速度 253.2cm/s^2 , 最大速度 31.7cm/s , 最大位移 18.0cm 。

计算时将两组地震动的两水平向加速度峰值调整为 $0.3g$, 竖向加速度峰值调整为 $0.2g$, 时间间隔为 0.01s , 图 4 为输入的 Taft 地震动记录和 El-Centro 地震动记录的加速度反应谱。在三个方向地震动作用下对模型进行地震反应动力时程分析, 上部结构的模态阻尼比取为 0.05 。

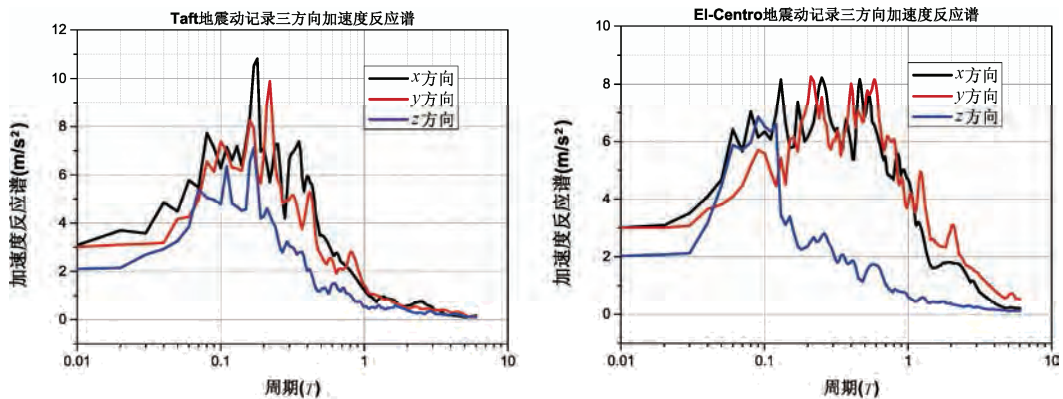
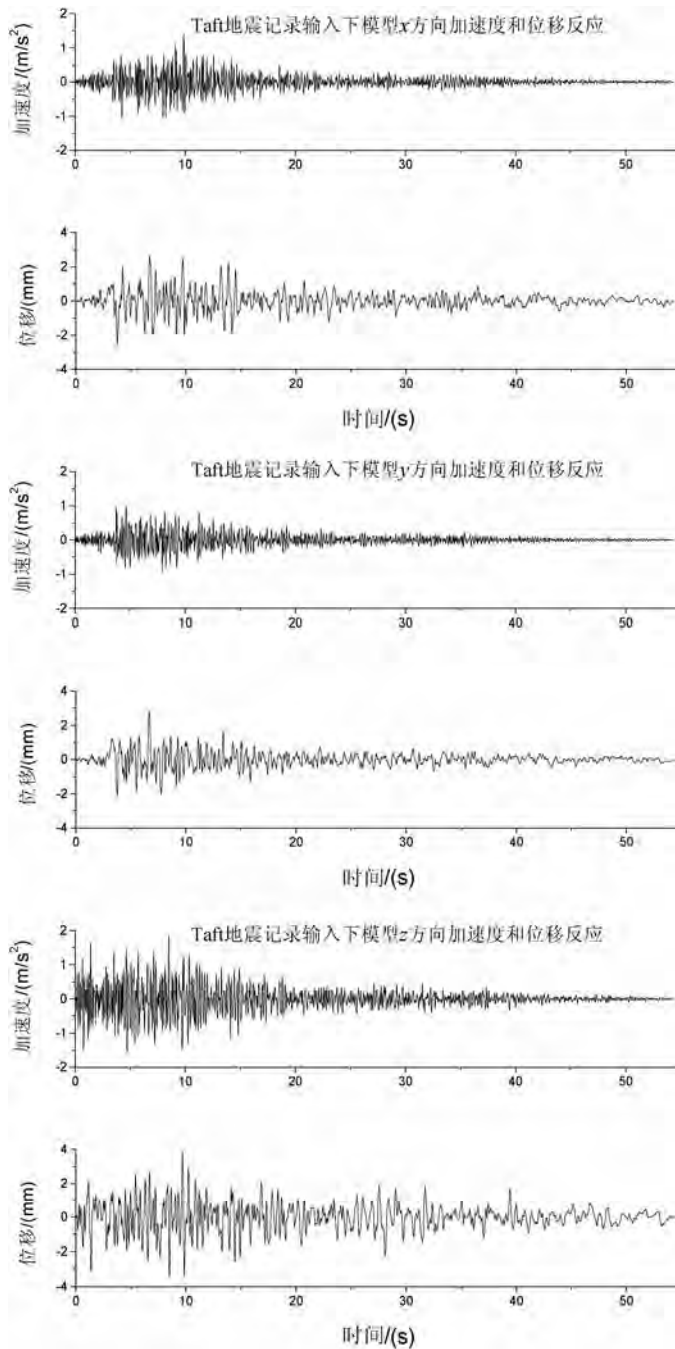


图 4 Taft 和 El-Centro 地震动记录加速度反应谱

Fig.4 Acceleration response spectrums of Taft and El-Centro ground motion records

考虑到高温气冷堆核电站结构在设计地震动作用下要求计算过程中处于弹性状态,且计算结果表明高温气冷堆核电站结构的加速度反应基本上是从下往上依次增大,楼层反应谱形状相似,因此本文仅选取核电站最高楼层在地震动作用下的地震反应进行展示分析。图5为Taft地震动记录和El-Centro地震动记录作用下,顶层中心点 x 、 y 、 z 三个方向的加速度和位移反应时程。



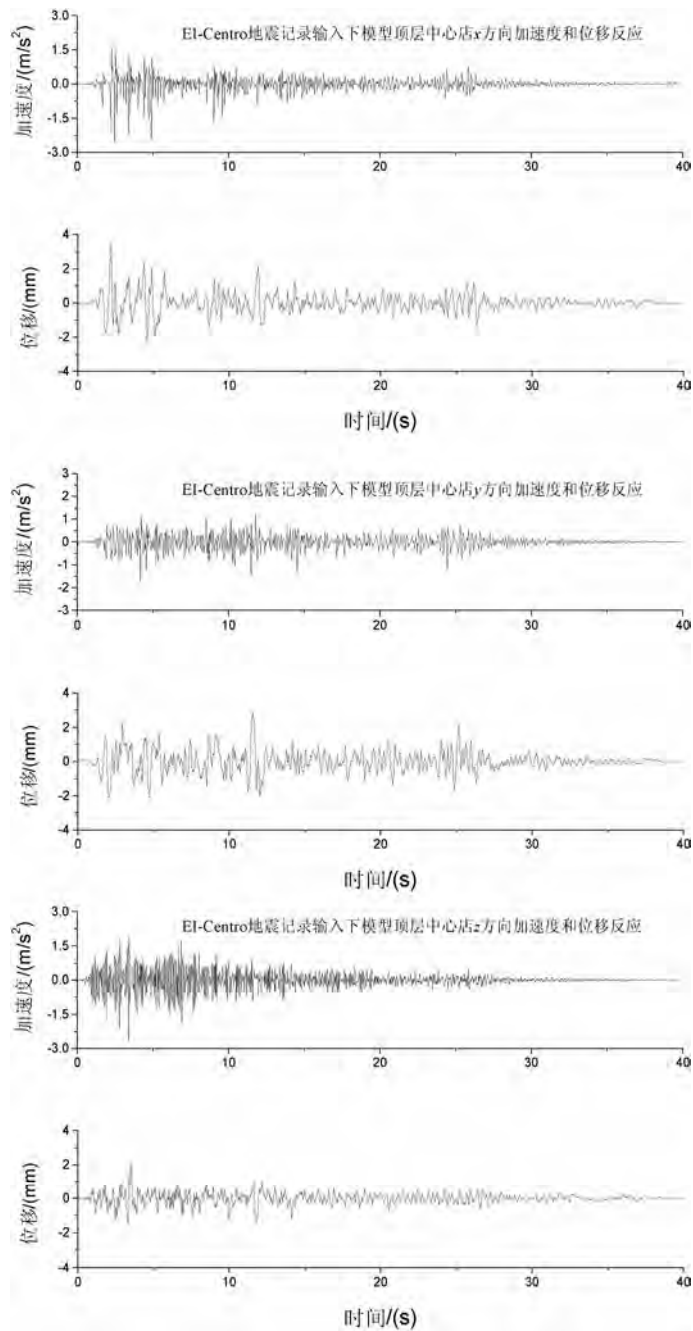


图5 模型顶层中心点加速度反应时程和位移时程

Fig.5 Acceleration and displacement response of top floor center

核电站的许多重要设备安装在核岛厂房中的不同部位上，其所受的地震作用各不相同。为了检验其抗震安全性，一般采用构造楼层反应谱的方法作为其地震动输入以进行子系统的抗震设计。楼层反应谱可以根据厂址的设计反应谱直接计算而得，也可以通过对主厂房结构输入设计地震动时程进行时程分析而求得。前者可称为直接法，后者可称为时程法（朱秀云

等, 2012)。本文采用时程法计算楼层反应谱, 图 6 是在 Taft 地震动记录和 El-Centro 地震动记录作用下模型顶层中心点三个方向的楼层反应谱。

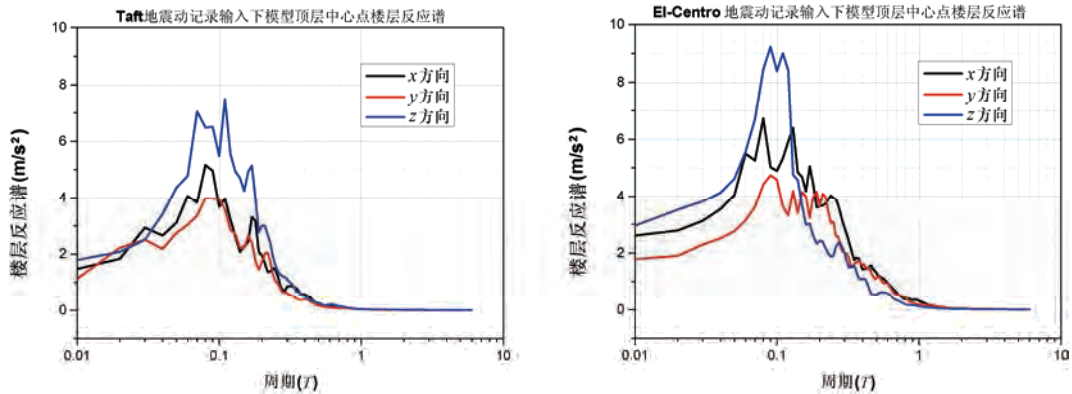


图 6 模型顶层中心点的楼层反应谱

Fig.6 Response spectra of the top floor center

由图 6 可以看出, 在 Taft 地震动记录和 El-Centro 地震动记录作用下, 模型竖向的楼层反应谱明显比水平向楼层反应谱大, 而图 4 中显示输入地震动的竖向加速度反应谱比水平向加速度反应谱小。同时, 图 5 显示在 Taft 地震动记录作用下, 顶层中心点的竖向加速度反应也明显大于两水平向加速度反应。因此, 在进行结构设计时应重点关注竖向地震动对高温气冷堆核电厂地震反应的影响。应该注意的是, 本文所输入的地震动竖向分量是实际的观测地震动记录, 结果显示结构顶层的竖向地震反应非常显著, 因此对于核电厂工程等重要工程, 关于厂址地震反应谱的竖向分量, 应尽可能准确地确定潜在地震的各种参数, 而不应简单地通过水平分量进行换算而给出 (孙造占等, 2011)。

4 结论

本文以某高温气冷堆核电厂结构为原型, 利用有限元软件建立三维线性结构模型, 开展了模态分析和动力时程分析的数值计算, 以探讨某高温气冷堆核电厂的结构特性和抗震性能, 并重点分析了在三向地震动作用下, 高温气冷堆核电厂的加速度、位移时程和楼层反应谱, 主要研究结果如下:

(1) 与传统的分析方法相比, 采用三维有限元实体模型可以更全面地分析各个构件、各个节点的水平、竖向地震反应, 具有更大的优越性。

(2) 高温气冷堆核电厂的自振周期较短, 结构整体刚度较大。两个水平向的自振周期非常接近, 说明高温气冷堆核电厂在两个水平向的刚度比较均匀, 楼层反应接近, 布局较为合理。

(3) 三向地震动作用下, 顶层中心点的竖向楼层反应均明显大于两水平方向楼层反应。因此, 在高温气冷堆核电厂结构设计中, 应重点关注竖向地震动对结构地震反应的影响, 尤其在安装有重要设备的楼层处, 应着重分析竖向地震动带来的不利影响。

参考文献

- 陈岩, 2005. 基于三维实体模型的核电厂结构楼层反应谱分析. 天津: 天津大学.
- 李忠献, 陈岩, 梁万顺等, 2005a. 核电厂结构的楼层反应谱分析. 福州大学学报, **33** (增刊): 62—67.
- 李忠献, 李忠诚, 沈望霞, 2005b. 核反应堆厂房结构楼层反应谱的敏感性分析. 核动力工程, **26** (1): 44—50.
- 林皋, 2011. 核电工程结构抗震设计研究综述 (I). 人民长江, **42** (19): 1—6.
- 潘华, 李金臣, 张志中, 2007. 2006 年 12 月 26 日台湾恒春海外地震及其对核电厂的影响. 震灾防御技术, **2** (1): 11—18.
- 潘宇, 吕令毅, 束磊等, 2010. 三门峡核电站弹塑性时程分析. 建筑与结构设计, (2): 21—24.
- 荣峰, 2003. 核反应堆工程地基—结构相互作用与楼层反应谱. 天津: 天津大学.
- 孙造占, 黄炳臣, 2011. 核安全审评中的竖向地震反应谱. 核安全, (4): 12—17.
- 谢礼立, 翟长海, 2012. 核电工程应用隔震技术的可行性探讨. 地震工程与工程振动, **32** (1): 1—10.
- 周伯昌, 2007. 不同地震环境下核电厂结构地震反应特性分析. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 朱秀云, 潘蓉, 李建波, 2012. 考虑 SSI 效应的核电站反应堆厂房楼层反应谱分析. 见: 第十七届全国反应堆结构力学会会议.

Seismic Response Analysis of High Temperature Gas Cooled Reactor Nuclear Power Plant

He Qiumei¹⁾, Li Xiaojun^{1,2)}, Zhang Jiangwei¹⁾ and Li Yaqi¹⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

Abstract In order to understand the structural characteristics and seismic performance of high temperature gas cooled reactor nuclear power plant, we established a three dimensional finite element model by using the finite element software, carried out the numerical calculation of modal frequency and dynamic elastic time history, and analyzed acceleration, displacement time history and floor response spectrum of nuclear power plant under three directions ground motion. Our results showed that: (1) The structure's stiffness of two horizontal directions is uniformity, so the structure of nuclear power plant is reasonable; (2) The vertical floor response of the top center were much greater than the horizontal floor response under the three-dimensional earthquake's loading. So we should pay more attentions to the disadvantageous influence of the nuclear power plant under the vertical seismic loading in the design.

Key words: Nuclear power plant; Dynamic and time-history analysis; Floor response spectrum; Numerical calculation