DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0799-08

地震动速度脉冲对高温气冷堆核电厂地震反应的影响*

贺秋梅[1],李小军[1,2],李亚琦[1],周伯昌[3],张江伟[1],傅　磊[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;
3.上海金港北外滩置业有限公司,上海 201200)

摘要:为探讨近断层地震动的速度脉冲对结构抗震能力的影响特征,以某高温气冷堆核电厂结构为研究对象,利用有限元软件建立线性三维模型,选择4组具有速度脉冲特性的近断层地震动加速度记录及人工模拟的具有相同加速度反应谱而无速度脉冲的地震动时程分别作为地震动输入,对模型进行动力时程分析,对比在有、无速度脉冲地震动作用下模型的地震反应。研究发现,虽然反应过程中结构仍处于弹性阶段但是地震动的速度脉冲对结构的位移反应具有一定的不利影响,这一点与已有的基本认识不同。因此对于需要安装对位移反应较为敏感设备的高温气冷堆核电厂房,应充分关注地震动速度脉冲对结构反应的影响。

关键词:爆炸力学;速度脉冲;有限元方法;高温气冷堆核电厂;强震动记录;动力时程分析

中图分类号:O382　　**国标学科代码**:13035　　**文献标志码**:A

根据现行核安全法规、导则和技术标准的规定,在核电厂选址中,需要按照相关规定完成地震调查工作,开展地震安全性评价,使核电厂选址尽量避开地震活动区域和地震构造复杂地区[1]。但由于地震活动性存在极大的不确定性,许多被认为不会发生强烈地震的地区,都先后发生了"意想不到的地震"[2]。如2007年7月16日发生的日本新潟6.8级地震,震中距离日本东京电力公司所属的柏崎刈羽核电站仅9 km[3];2006年12月26日发生的台湾恒春海外地震,震中距离台湾第三核电厂(Maanshan NPP)仅16 km[4]。同样,最近发生的几次大地震,如集集地震(1999年,Mw7.6级)、汶川地震(2008年,Mw7.9)和日本311大地震(2011年,Mw9.0)等都在警示我们,人类对地震的了解还是非常有限的,尽管在核电厂选址中已经充分考虑了厂址所处的地震构造环境,但已建核电厂在未来很有可能遭遇近断层地震动的影响。另一方面,由于核电工程对场地的其他环境条件的要求,有时不得不将核电厂选择在地震活动性相对较高的地区[2],工程选址无法实现远离可能的活动断层,这些地区的待建核电厂遭遇近断层地震动的可能性更大。

已有研究表明,近断层地震动的滑冲效应和向前方向性效应均会引起地震动出现明显的长周期速度脉冲[5],很多学者通过建立钢结构、钢筋混凝土框架结构、桥梁结构等计算模型,探讨了近断层的速度脉冲对工程结构地震反应的影响[6-9]。然而,近断层地震动的速度脉冲对核电厂结构地震反应的影响研究开展得较少。K.Galal等[10]对比了近断层地震动记录的弹性反应谱与美国、加拿大现行核设施规范设计谱的差异,结果表明,美国和加拿大目前的核设施规范设计谱应进行调整,以更好地反映近断层地震动特性对核结构的影响。由此说明,近断层地震动对核电厂结构也有一定影响,但近断层地震动的速度脉冲对核电厂结构地震反应具体有什么样的影响,特别是不利影响如何,以及对核电厂抗震子系统输入(楼层反应谱)的影响有多大,还需要进行深入研究。另外还有一个问题值得探讨,选取具有速度脉冲

* **收稿日期**:2014-06-03;**修回日期**:2014-09-17
基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(91215301);国家自然科学基金青年项目(51408560);
中央级公益性科研院所基本科研业务专项(DQJB12B28);国家科技重大专项(2011ZX06002-010)
第一作者:贺秋梅(1978—　),女,博士,副研究员,heqiumei06@126.com。

特性的代表性地震动记录来进行结构反应计算和对比分析，是考虑速度脉冲对工程结构反应影响的基本方式，但所选记录反应谱特性的差异对结构反应必定会带来影响，因此计算结果的差异将不能清楚地反映速度脉冲的影响，从而会影响到对其规律性认识。近年来，针对地震动速度脉冲的模拟研究有了较大的进展，这些为研究地震动速度脉冲特性对工程结构地震反应的影响提供了基础[11-12]。

本文中将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，选取具有速度脉冲特性的近断层地震动加速度记录及人工模拟的具有相同加速度反应谱而无速度脉冲的地震动时程作为地震动输入，对高温气冷堆核电厂结构进行动力时程分析，以探讨近断层地震动速度脉冲对高温气冷堆核电厂结构地震反应的影响，特别是对核电厂内关键设备抗震分析的地震动输入的影响，那些关键设备对地震动十分敏感且抗震要求极高。

1 高温气冷堆核电厂计算模型

新一代的模块式高温气冷堆是核电厂的新型代表，由于它的固有安全性，模块式高温气冷堆已被认为是一种有发展前途的堆型之一。模块式高温气冷堆是我国自主研发设计的核电产品，为完善其厂房结构抗震设计，亟需相关理论研究的支持。因此，本文中选取某高温气冷堆核电厂作为研究对象。该高温气冷堆核电厂结构原型设计基础为基岩场地，可视为刚性地基，即结构计算模型中标高－0.1 m 以下外墙边界全部考虑为固接，高温气冷堆核电厂剖面示意图见图 1。该结构主要由厂房和安全壳组成，分地下和地上 2 部分，地下共 5 层，地上共 6 层（包括牛腿顶）。

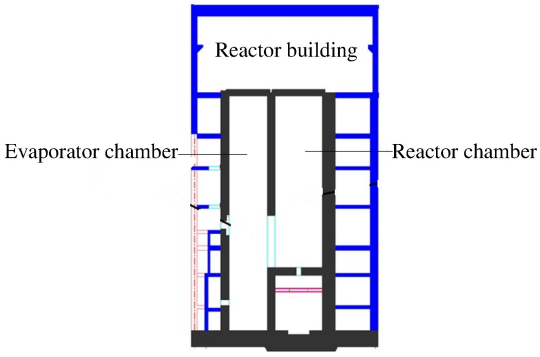

图 1 高温气冷堆核电厂剖面示意图

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

有限元模型用三维梁单元模拟柱，用壳单元模拟安全壳、楼板、墙、钢网格板。安全壳采用 C40 混凝土，其它构件均采用 C35 混凝土。模型剖面图如图 2 所示，一共 7 780 个节点，7 940 个单元[13-14]。

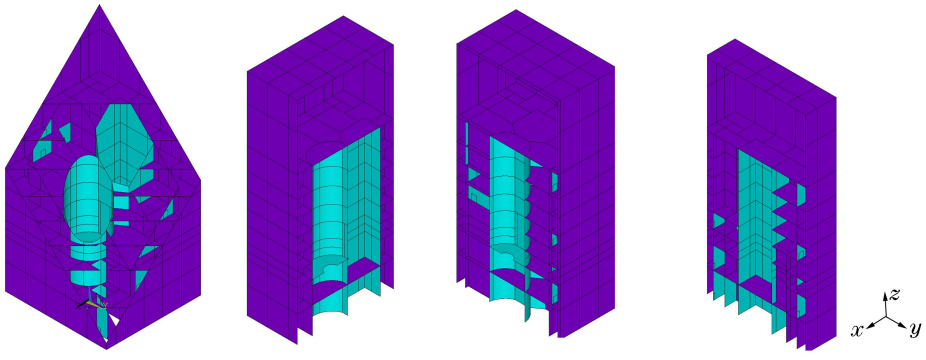

图 2 模型剖面图

Fig. 2 Sketch section of model

使用子空间迭代技术和广义的 Jacobi 迭代算法计算，在模态分析中计算、提取和扩展了 100 阶模态，前 10 阶的自振周期 T 如表 1 所示。

表 1 前 10 阶的自振周期

Table 1 The first ten 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
T/s	0.287	0.203	0.196	0.152	0.142	0.141	0.138	0.133	0.124	0.118

2 地震动输入

一般来说，近断层速度脉冲地震动的加速度、速度和位移时程幅值均较大，低频成分丰富，特征周期延长，持时较短。目前对于速度脉冲地震动似乎没有明确、统一的定义，本文中采用以下判断速度脉冲的标准：如果速度时程中具有急剧的“突起”，并满足以下 3 个条件：(1)速度脉冲持时在 0.5 s 以上，(2)速度时程中最大峰值是第 2 大峰值的 2 倍以上，(3)如果有 2 个峰值较为接近，则二者中峰值稍小者是其余最大峰值的 2 倍以上。参照以上要求，本文中选择 4 条近断层地震动加速度记录作为输入，所选地震动记录参数见表 2，表中 t 表示地震持续时间，相应的加速度时程与速度时程见图 3。

表 2 近断层速度脉冲型地震动记录参数

Table 2 Parameters of the near-fault ground motions with velocity pulse

代号	地震名称	震级	台站	分量	场地	t/s
A1	CHI-CHI(1999)	7.6	36 号台站	compEW	D	40.96
A2	Imperial Valley(1979)	6.5	E04	compSN	B/C	20.48
A3	CHI-CHI(1999)	7.6	TCU75	compEW	D	40.96
A4	CHI-CHI(1999)	7.6	TCU129	compEW	D	40.96

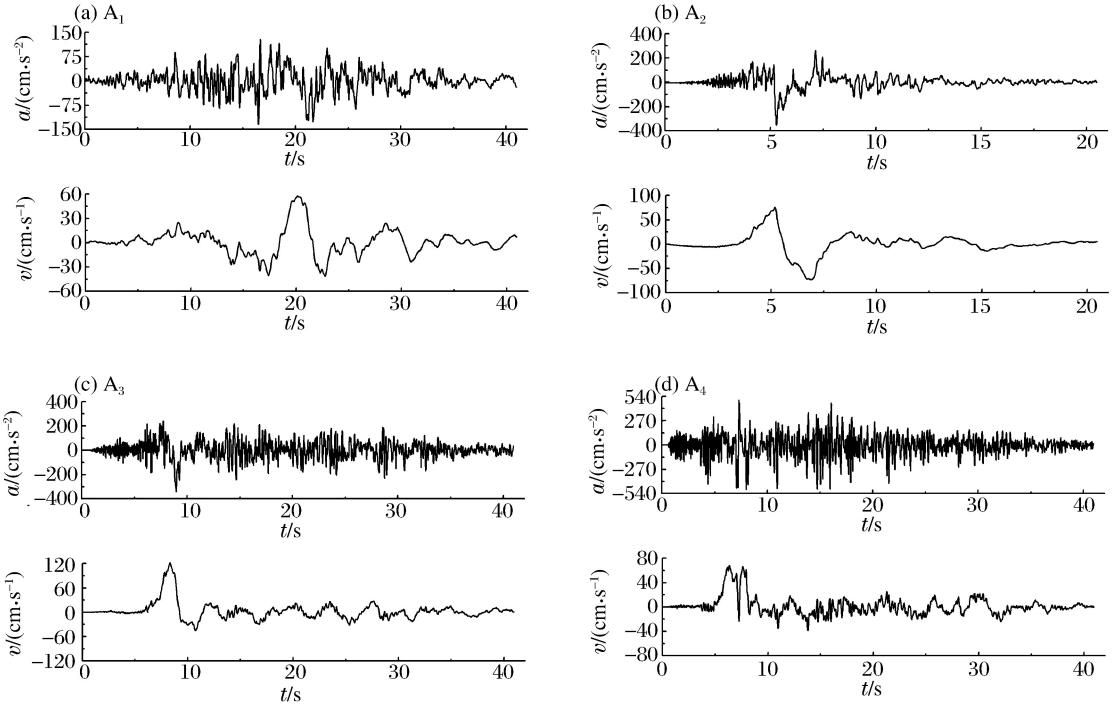

图 3 速度脉冲型地震动记录加速度时程与速度时程

Fig. 3 Acceleration and velocity time histories of the ground motions with velocity pulse

针对表 3 中每一条近断层速度脉冲地震动加速度反应谱，拟合其对应的加速度反应谱分别合成 4 条人工地震动时程曲线，地震动记录 A1 对应的人工地震动记为 aa11、aa12、aa13、aa14，地震动记录 A2 对应的人工地震动记为 aa21、aa22、aa23 、aa24，A3、A4 组同理。人工地震动加速度和速度时程的部分样本如图 4 所示。这些人工地震动时程不具有速度脉冲特性，但具有与近断层速度脉冲地震动相同的加速度反应谱和相近的时程强度包络。将人工地震动时程和对应的近断层速度脉冲地震动作为高温气冷堆模型反应计算的地震动输入，可以在加速度反应谱一致的情况下考察地震动的速度脉冲特性对高温气冷堆核电厂结构的影响。

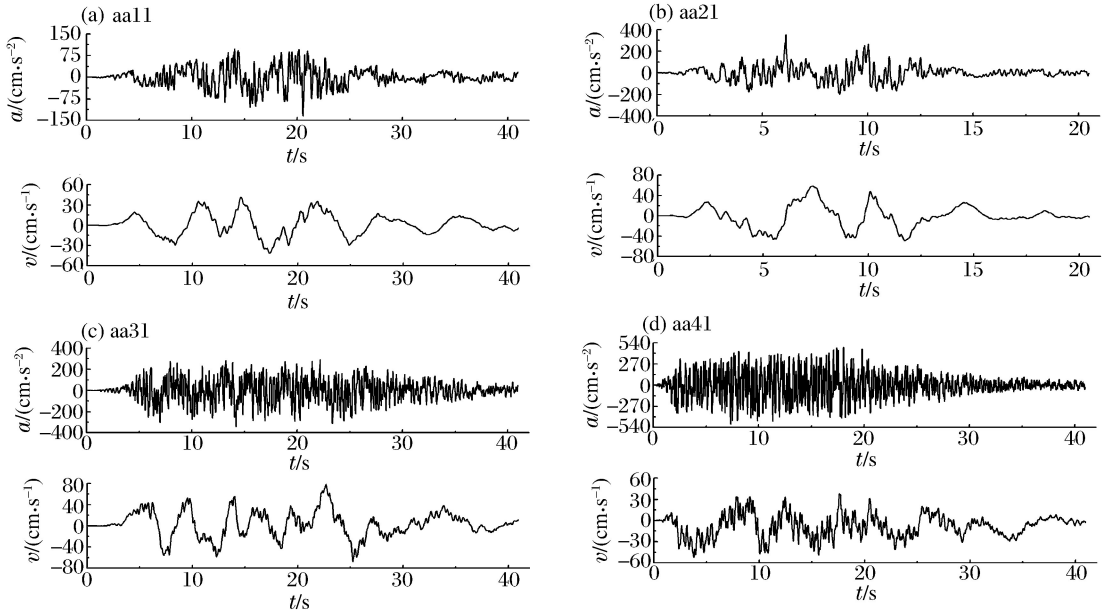

图 4 人工地震动的加速度和速度时程

Fig. 4 Acceleration and velocity time histories of the artificial ground motion

3 计算结果与分析

现行核电厂抗震设计规范中规定，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。本文中将表 3 的速度脉冲地震动时程及相应的人工地震动时程的加速度峰值调整为 0.3g，在模型 x 方向进行输入，对高温气冷堆核电厂进行线性动力时程分析。上部结构的模态阻尼比取为 0.05。计算得到高温气冷堆核电厂各层反应的加速度时程和位移时程。

3.1 楼层反应峰值加速度和谱特性

楼层反应谱是楼层上设备抗震分析的地震动输入确定的重要依据，是核电厂动力分析的关键内容。本文中利用动力时程分析得到的高温气冷堆核电厂各楼层反应的加速度时程，计算得到各层楼层反应谱。考虑到高温气冷堆核电厂结构在设计地震动作用下要求计算过程中处于弹性状态，计算结果表明高温气冷堆核电厂结构反应的加速度基本上是从下往上依次增大，各层的楼层反应谱形状相似，因此仅选取核电厂最高楼层在不同地震动作用下的楼层反应谱进行展示分析。

图 5 为在速度脉冲地震动和相应的人工合成地震动作用下核电厂顶层的楼层反应谱对比，结果显示楼层反应谱在不同周期点有一定差别，但近断层速度脉冲地震动作用下的楼层反应谱与人工合成地震动作用下的楼层反应谱之间没有明显增大或减小的规律。也就是说，当结构地震反应计算采用的输入地震动具有一致的峰值加速度和加速度反应谱时，高温气冷堆核电厂这样的结构在处于弹性反应状态时，结构反应的加速度量也基本一致，输入地震动的速度脉冲特性对反应的加速度量影响较小。

3.2 楼层反应位移特性

为了考察地震动的速度脉冲对高温气冷堆核电厂结构位移反应的影响，现将速度脉冲地震动和人工合成地震动作用下核电厂结构反应各层最大位移进行对比分析。因高温气冷堆地面以下结构位移反应较小，在此只对地上 6 层的最大位移反应进行分析，图 6 为在 4 组地震动作用下高温气冷堆核电厂地上 6 层的最大位移反应。由图 6 可以看出，4 组地震动作用下高温气冷堆核电厂的位移反应具有相同规律，即速度脉冲地震动作用下核电厂各层最大位移反应均大于相应人工地震动作用下的位移反应，而且随着楼层的增加，这种趋势更加明显。在速度脉冲地震动作用下高温气冷堆核电厂顶层位移最大值达到 3～4 mm 左右。

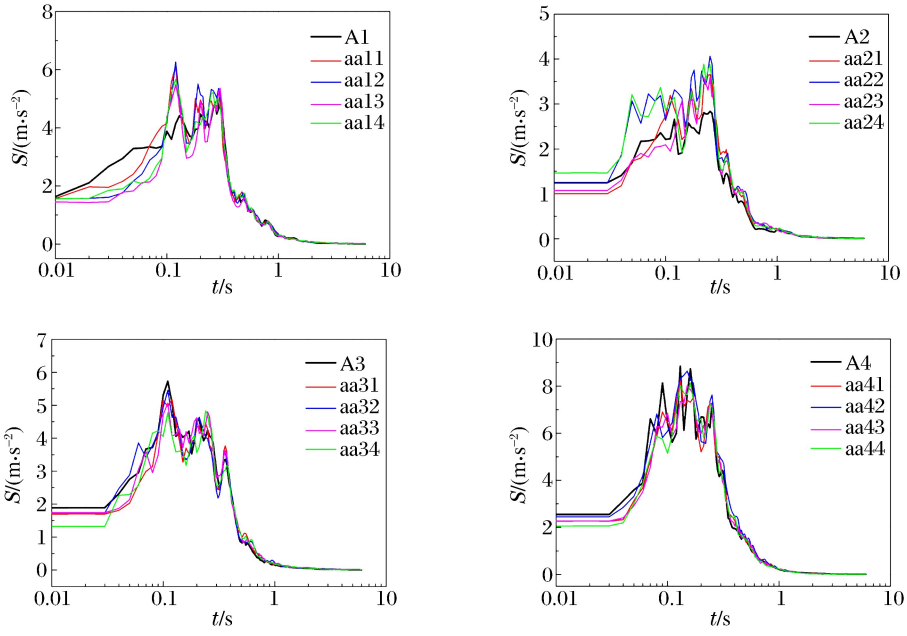

图 5 顶层的楼层反应谱

Fig. 5 Response spectrums of the top floor

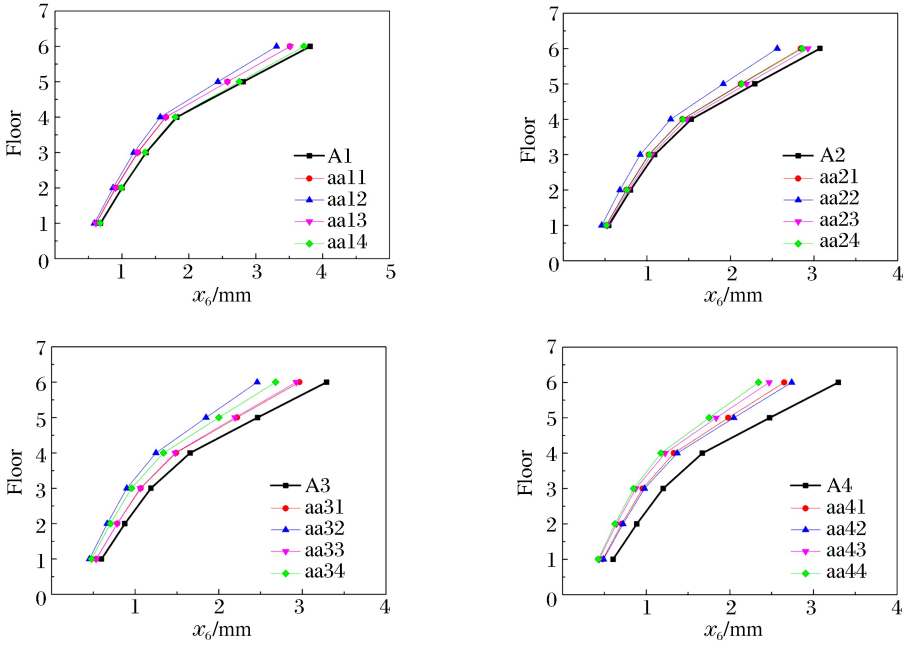

图 6 地上 6 层的最大位移反应

Fig. 6 Maximum displacement response of 6 floors on the ground

层间位移是按弹性方法计算的楼层层间最大位移，是表征建筑结构地震破坏程度的一个重要指标，在建筑抗震设计规范中，层间位移是结构变形验算的主要内容。为了明确在速度脉冲地震动和人工合成地震动作用下高温气冷堆核电厂地上各层的变形，计算各层的层间位移反应，结果见图 7。由图 7 可以看出，4 条近断层速度脉冲地震动作用下核电厂结构各层的层间位移均大于人工合成地震动作用下的层间位移。其中，高温气冷堆核电厂的第 5 层是牛腿层，层高较大，且该层无楼板，水平向约束较小，因此侧向位移和层间位移明显增大，是整个结构变形最大的部位。

为了更好地衡量地震动的速度脉冲对高温气冷堆核电厂结构位移反应的影响，将速度脉冲地震动

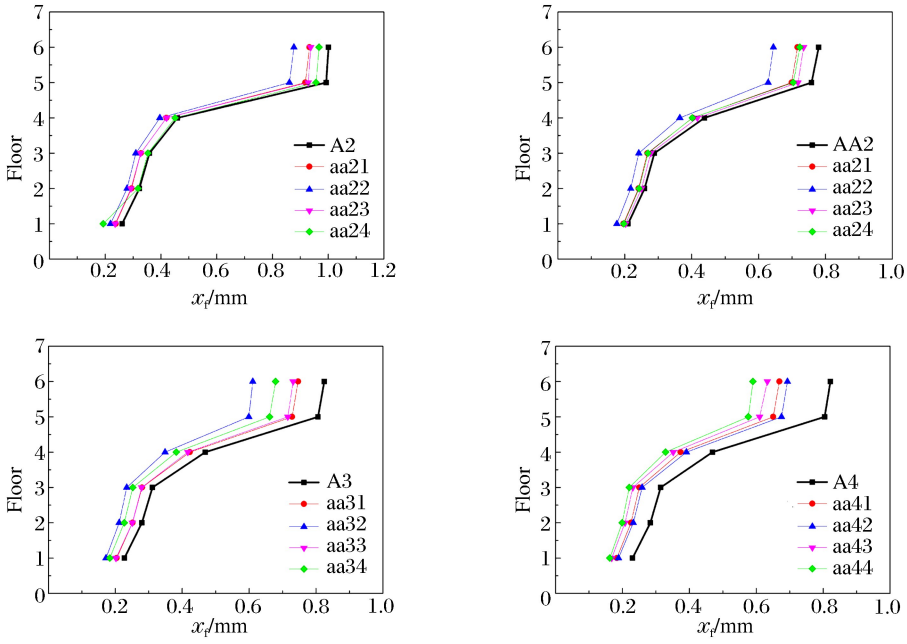

图 7 地上 6 层的层间位移反应

Fig. 7 Story drift response of 6 floors on the ground

及人工合成地震动作用下顶层中心点位移反应最大值进行对比，计算结果见表 3，表中 η 为比值。由表 3 可以看出，人工地震动作用下顶层中心点位移反应最大值平均值为 2.91 mm，速度脉冲地震动作用下顶层中心点的位移反应最大值平均值为 3.37 mm，两者的比例为 86%，即在速度脉冲地震动作用下核电厂顶层中心点的最大位移反应比人工合成地震动作用下的最大位移反应大 14%。由此可以得出，在加速度反应谱一致的情况下，地震动速度脉冲使高温气冷堆核电厂的顶层位移明显增大。这表明，当结构地震反应计算采用的输入地震动具有一致的峰值加速度和加速度反应谱时，高温气冷堆核电厂这样的结构在处于弹性反应状态时，结构反应的位移量仍然可能有很明显的差别，输入地震动的速度脉冲特性会导致结构反应的位移量明显加大。

表 3 顶层位移反应最大值 x_t

Table 3 Maximum displacement response of top floor

人工地震	x_t/mm						η/%
	有速度脉冲	人工合成 1	人工合成 2	人工合成 3	人工合成 4	人工合成均值	
A1 组	3.81	3.51	3.31	3.52	3.72	3.51	92
A2 组	3.07	2.84	2.56	2.93	2.86	2.80	91
A3 组	3.29	2.97	2.46	2.93	2.68	2.76	84
A4 组	3.30	2.65	2.74	2.47	2.34	2.55	77
均 值	3.37	2.99	2.77	2.96	2.90	2.91	86

上面的分析表明，当结构地震反应计算采用的输入地震动具有一致的峰值加速度和加速度反应谱时，高温气冷堆核电厂这样的结构在处于弹性反应状态时，输入地震动的速度脉冲特性对结构反应的加速度量影响较小但会导致位移量明显加大。这一点与人们以往的认识有一些偏差。一般认为，对于结构弹性反应，输入地震动的反应谱值基本上起决定作用，这也是基于反应谱的振型叠加法和动力时程法中以随机相位合成时程作为输入地震动的理论基础。怎么理解这一结果，这要从我们上面说到的“输入地震动具有一致的峰值加速度和加速度反应谱”来分析。一般来说，结构分析依据的地震动加速度反应谱其实只是周期小于一定值(如 6.0 s)范围内的谱值，它对地震动更长周期的频谱成分没有很好地控制，而地震动的位移往往受长周期的频谱成分影响显著。另一方面，具有速度脉冲地震动往往有较丰富

的长周期成分和较大的峰值位移。这就导致了本文计算分析结果的偏差。如果进一步考虑结构的非线性特性,不难想象结构反应的差异会更明显,输入地震动的速度脉冲特性对结构反应的位移量甚至加速度量加大会更明显。这将是我们进一步研究的问题。

4 结 论

选取了4条具有典型速度脉冲特性的近断层地震动加速度时程,并以这些地震动的加速度反应谱为目标人工合成多条无速度脉冲特性的地震动加速度时程作为结构反应分析的输入地震动,以一座高温气冷堆核电厂为实例,建立三维有限元模型,开展了动力时程分析的数值计算,重点分析了在输入地震动峰值加速度和加速度反应谱一致的前提下地震动的速度脉冲对高温气冷堆核电厂结构地震反应的影响。主要研究结果如下:

(1)在近断层速度脉冲地震动和无速度脉冲的地震动作用下高温气冷堆核电厂结构顶层的楼层反应谱在不同周期点有一定差别,但地震动速度脉冲对楼层反应的峰值加速度和加速度反应谱的影响没有明显的规律。

(2)输入地震动的速度脉冲特性对高温气冷堆核电厂结构反应的位移量明显加大,结构顶层最大位移平均值增加约大14%。结果表明近断层地震动的速度脉冲对高温气冷堆核电厂结构位移反应具有一定的不利影响。考虑到对于核电厂抗震设防关心的不仅仅是工程结构本身的抗震性能,而且也关心结构中安装的核相关关键设备特别是位移敏感性设备的抗震问题,应充分关注地震动速度脉冲对高温气冷堆核电厂结构位移反应的影响。

(3)输入地震动的速度脉冲会导致结构弹性反应位移量的明显增大,本文中给出的结果与人们以往的认识有一些偏差,应引起重视。特别是在考虑结构的非线性特性的情况下,输入地震动的速度脉冲特性的影响如何成为更需要研究的问题。

参考文献:

[1] 王中平,戴联筠.我国核电厂选址中地震与地质工作现状分析[J].电力勘测设计,2008(4):66-73.
Wang Zhong-ping, Dai Lian-yun. Status analysis of earthquake and geology about site selection of nuclear power plant[J]. Electric Power Survey & Design, 2008(4):66-73.

[2] 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 Li-li, Zhai Chang-hai. 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.

[3] 潘华,李金臣,吴迪忠.2007年7月16日日本新潟地震对柏崎刈羽核电站的影响[J].国际地震动态,2007,11:21-32.
Pan Hua, Li Jin-chen, Wu Di-zong. The impacts on the Kashiwazaki-Kariwa nuclear power station due to the Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake on 16 July 2007[J]. Recent Developments in World Seismology, 2007,11:21-32.

[4] 潘华,李金臣,张志中.2006年12月26日台湾恒春海外地震及其对核电厂的影响[J].震灾防御技术,2007,2(1):11-18.
Pan Hua, Li Jin-chen, Zhang Zhi-zhong. Taiwan Hengchun offshore earthquake of 26 December 2006 and its effects on safety of NPPs[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2007,2(1):11-18.

[5] 刘启方,袁一凡,金星,等.近断层地震动的基本特征[J].地震工程与工程振动,2006,26(1):1-10.
Liu Qi-fang, Yuan Yi-fan, Jin Xing, et al. Basic characteristics of near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006,26(1):1-10.

[6] Hall J F, Heaton T H, Halling M W, et al. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings[J]. Earthquake Spectra, 1995,11(4):569-605.

[7] Alavi B, Krawinkler H. Strengthening of moment-resisting frame structures against near-fault ground motion effects[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004,33(6):707-722.

[8] 李爽,谢礼立.近场脉冲型地震动对钢筋混凝土框架结构影响:自然科学版[J].沈阳建筑大学学报,2006,22(3):

406-410.

Li Shuang, Xie Li-li. Effects of near-field pulse-like ground motions on reinforced concrete frame structures[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2006,22(3):406-410.

[9] 杨迪雄,赵岩,李刚.近断层地震动运动特征对长周期结构地震响应的影响分析[J].防灾工程学,2007,27(2):133-140.

Yang Di-xiong, Zhao Yan, Li Gang. Influence analysis of motion characteristics of near-fault ground mot ions on seismic responses of long-period structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007,27(2):133-140.

[10] Galal K, Ghobarah A. Effect of near-fault earthquakes on North American nuclear design spectra[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006,236:1928-1936.

[11] 赵凤新,韦韬,张郁山.近断层速度脉冲对钢筋混凝土框架结构地震反应的影响[J].工程力学,2008,25(10):180-193.

Zhao Feng-xin, Wei Tao, Zhang Yu-shan. Influence of near-fault velocity pulse on the seismic response of reinforced concrete frame[J]. Engineering Mechanics, 2008,25(10):180-193.

[12] 李小军,贺秋梅,亓兴军.地震动速度脉冲对大跨斜拉桥减震控制的影响[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(2):272-285.

Li Xiao-jun, He Qiu-mei, Qi Xing-jun. Seismic mitigation control effects of long-span cable-stayed bridges to ground motions with velocity pulse[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012,20(2):272-285.

[13] 周伯昌.不同地震环境下核电厂结构地震反应特性分析[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2007.

[14] 贺秋梅,李小军,张江伟,等.某高温气冷堆核电厂结构地震反应分析[J].震灾防御技术,2014,9(1):454-461.

He Qiu-mei, Li Xiao-jun, Zhang Jiang-wei, et al. Seismic response analysis of high temperature gas cooled reactor nuclear power plant[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014,9(1):454-461.

Influence of near-fault velocity pulse on the seismic response of high temperature gas cooled reactor nuclear power plant

He Qiu-mei[1], Li Xiao-jun[1,2], Li Ya-qi[1], Zhou Bo-chang[3], Zhang Jiang-wei[1], Fu Lei[1]

(1. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing* 100081, *China*;
2. *Beijing University of Technology, Beijing* 100022, *China*;
3. *Shanghai Jingang North Bund Realty Co. Ltd, Shanghai* 201200, *China*)

Abstract: To find out the effect of the velocity pulse of near-fault ground motions on the structural shock resistance, we simulated the seismic responses using three dimensional finite element model for high temperature gas-cooled reactor nuclear power plant, in which four strong motion records with the velocity pulse and the corresponding synthetic time histories with same response spectra and without velocity pulse were used as ground motion inputs. Our test results show that the seismic responses of the high temperature gas cooled reactor nuclear power plant to ground motions with velocity pulse are greater than those without velocity pulse, and the ground motions with velocity pulse can have strong unfavorable effect on seismic displacement responses of the high temperature gas-cooled reactor nuclear power plant. If the installed equipment is sensitive to the displacement response, the designers should focus great concern on the effect of the velocity pulse on seismic displacement responses of the high temperature gas cooled reactor nuclear power plant.

Key words: mechanics of explosion; velocity pulse; FEM; high temperature gas cooled reactor nuclear power plant; strong motion record; dynamic and time-history analysis

(责任编辑　曾月蓉)