

东日本大地震福岛核电厂震动实测数据分析

周志光 孙朝鑫

(同济大学 土木工程学院 结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

摘 要: 核电厂结构在地震作用下实际表现如何, 目前我国鲜有相关方面的报导, 但是它对核电厂的抗震设计有重要意义。日本福岛核电厂在东日本大地震中获得了大量强震记录数据, 为提高坐落于地震危险区的核电厂和其他重要核设施的设计和分析方法提供了重要资料。本文对2011年东日本大地震中福岛核电厂场地和厂房结构的地震响应记录数据进行比较并进行反应谱分析, 通过比较不同场地及结构在本次地震中的表现, 探讨了核电厂在强震作用下的响应特征, 并重点分析了核电厂中采用隔震技术的应急指挥中心在本次地震中的表现。分析结果表明, 福岛第一核电厂基础附近记录到的峰值加速度大于设计基准地震动; 核电厂应急指挥中心的隔震体系能大大减轻水平向地震作用, 具有良好的隔震效果, 而在竖向, 传统的隔震结构仍然会放大地震作用。本文针对地震中福岛核电厂场地和结构的地震动记录进行的分析讨论, 可以为核电厂的规划和设计提供借鉴和参考。

关键词: 东日本大地震; 核电厂; 地震响应; 隔震

中图分类号: TU352; P316; TM623

文献标志码: A

Seismic response analysis of Fukushima nuclear power plants under the 2011 Great Eastern Japan Earthquake

ZHOU Zhiguang, SUN Chaixin

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: There is little report on how nuclear structures perform under earthquakes in China, although it is meaningful to aseismic design for nuclear power plants. Fukushima nuclear power plants recorded a large number of seismic data under the 2011 Great East Japan earthquake, these ground data provided an important opportunity to validate and improve analytical methods and design procedures used for NPP and other critical nuclear facilities located in seismically hazardous regions. Recorded data in site, reactor and turbine buildings and base isolated facility buildings were systematically processed in this study. Acceleration time histories were plot and their response spectra were calculated. Site response behavior of the free-field at the Fukushima site and seismic response behavior of the reactor and turbine buildings at Fukushima Dai-Ichi and Dai-Ni nuclear power plant were studied. Original Design Basis Ground Motion (DBGM) was compared with those of recorded motions at the foundation levels of each unit of the reactor buildings. Emphasis was given on the analysis of isolation effects of the emergency operations buildings. These motion data provided an important opportunity to validate and improve analytical methods and design procedures used for NPP and other critical nuclear facilities located in seismically hazardous regions.

Key words: 2011 Great Eastern Japan Earthquake; nuclear power plant; seismic response; base isolation

收稿日期: 2015-05-28; 修订日期: 2015-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478357); 高等学校博士学科点专项科研基金(20130072120009)

Supported by: National Natural Science Foundation of China(51478357); Doctoral Program of Higher Education of China(20130072120009)

作者简介: 周志光(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事核电厂抗震研究. E-mail: zgzhou@tongji.edu.cn

引言

2011年3月11日14时46分日本东北方向海域发生 $M9.0$ 级大地震并引发海啸。本次地震震源深度为24 km,属浅源地震,震源地点在日本海三陆冲,北纬 $38^{\circ}62'$,东经 $142^{\circ}56'$ ^[1],地震断层为长500 km,宽200 km的大型滑动区域^[2]。这是世界核电发展史上第3次严重事故^[3],也是日本有观测记录以来震级最大、波及范围最广的地震^[4],震害波及日本全国,伤亡人数约2万5千人^[5]。地震时福岛核电厂处地震烈度达6度(日本的烈度分为7度),地震动持续时间超过两分钟,余震600多次。随之而来的海啸,导致福岛第一核电厂发生核泄漏、核爆炸等一系列重大事故,核泄漏事故等级为7级(最高级)^[6]。这次事故不仅造成极大的社会恐慌,更给全球环境造成难以估量的影响。我国地处世界上两个最活跃的地震带中间,是世界上多地震国家之一,加之核能的利用在我国蓬勃发展^[7-9],因此总结本次地震的经验教训,预防此类特大灾害发生对我国防灾减灾工作具有重要意义。

福岛第一核电厂位于北纬 $37^{\circ}25'$,东经 $141^{\circ}2'$,共6台机组;福岛第二核电厂位于北纬 $37^{\circ}19'$,东经 $141^{\circ}1'$,共4台机组,两者相距12 km,地处日本福岛工业区,距离震中130 km^[10]。本次地震中,福岛核电厂获得了大量场地及核电厂房结构内的观测记录,观测点按所在位置不同,共分为以下4类^[11]:(1)自由场地及邻近厂房结构场地观测点;(2)厂房结构观测点;(3)采用了隔震技术的应急指挥中心观测点;(4)地表稠密观测点。图1是福岛第一核电厂场地观测点分布图,其它位置观测点的分布图从略,福岛第二核电厂也布置了类似的观测点。这些数据为了解核电厂场地及结构的地震响应提供了丰富的资料。受篇幅所限,本文选取其中部分数据加以分析,探讨福岛核电厂场地及结构的地震响应特征,并着重分析核电厂隔震结构的地震响应。

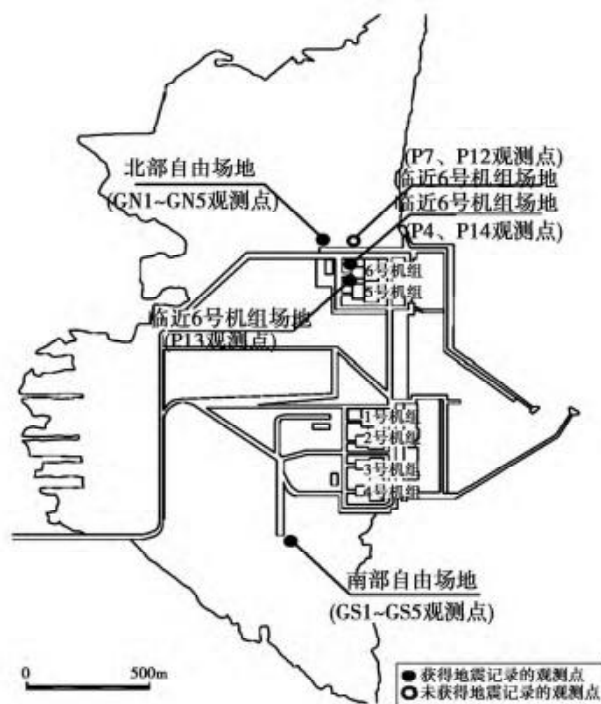


图1 福岛第一核电厂场地观测点分布图

Fig. 1 Recording stations at field sites of Fukushima Daiichi nuclear power plant

1 核电厂自由场地地震响应分析

选取福岛第一核电厂南部自由场地标高 $-300\text{ m} \sim +32.9\text{ m}$ 测点GS1~GS5地震响应记录数据进行分析,其加速度时程和反应谱分别如图2、图3所示(此处的标高O.P.指东京电力公司使用的“小名浜湾平均海面”)。沿不同标高处场地的峰值加速度分布如图4所示。

如图4所示,自由场地响应的水平向峰值加速度约为600 Gal,竖向为326 Gal,且无论是水平向还是竖向,地表测点的峰值加速度都明显大于井下测点,在地下深度 -39.9 m (标高 -5.0 m)以下,峰值加速度变化不大, -39.9 m 以上迅速放大,场地土对地震动的放大效应明显。水平向反应谱峰值约为2500 Gal,竖向约为1500 Gal,标高较高测点GS1处反应谱峰值明显大于其他测点。

地震动持续时间也是结构破坏特征的重要影响因素。持续时间的增大,一方面会在结构中产生累积变形和累积破坏,另一方面也会导致某些结构因低周疲劳而丧失局部强度。地震动持时与多种因素密切相关,本文考虑场地条件对持时的影响。一般来说,土层越软、越厚、弹性波波速越小则持时越长。如图5所示,自由场地持时长度分布在80 s~130 s之间,随着测点标高增大,持时增加,且水平向持时大于竖向持时。在接近地表松软土时,持时急剧增加,结构的潜在破坏可能性增大。

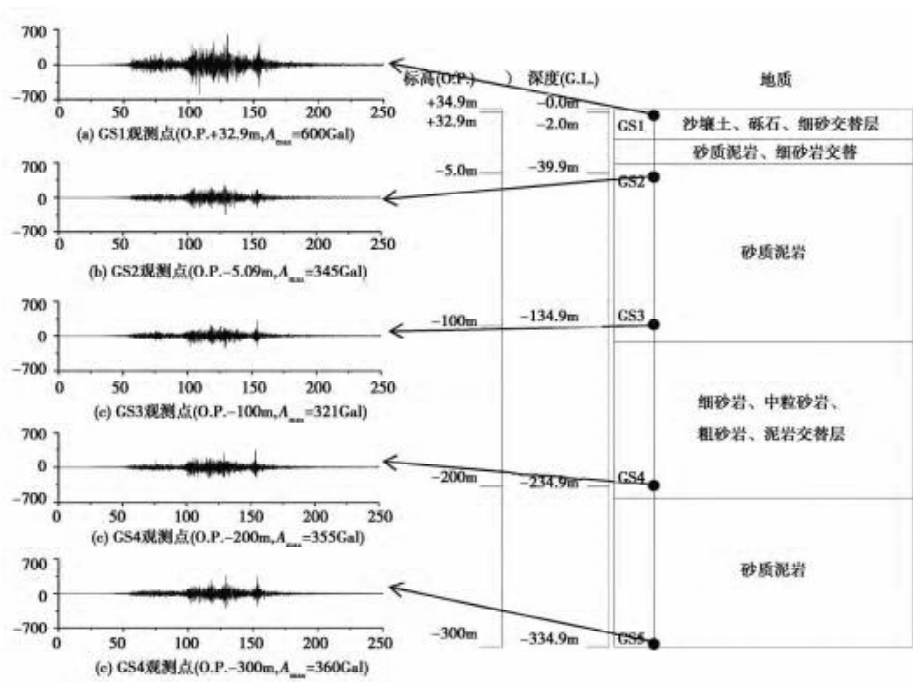


图 2 福岛第一核电站自由场地标高 -300 m ~ +32.9 m 测点 GS1 ~ GS5 东西向地震记录

Fig. 2 Recorded EW motions at point GS1 ~ GS5 (O. P. : -300m ~ +32.9m) in field site of Fukushima Daiichi nuclear power plant

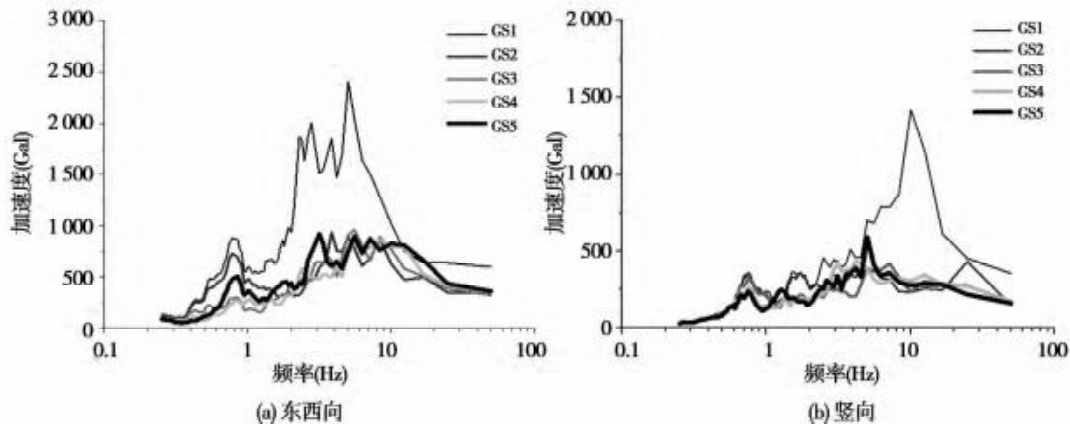


图 3 福岛第一核电站自由场地标高 -300 m ~ +32.9 m 测点 GS1 ~ GS5 地震响应反应谱(阻尼比为 5%)

Fig. 3 Spectral acceleration(damping ratio =5%) at point GS1 ~ GS5 in field site of Fukushima Daiichi nuclear power plant

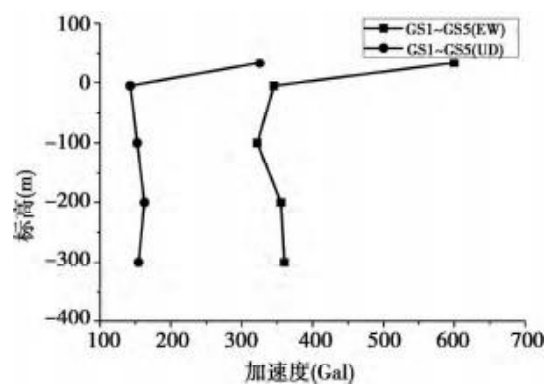


图 4 福岛第一核电站场地测点峰值加速度分布
Fig. 4 Maximum acceleration along elevation in field site of Fukushima daiichi nuclear power plant

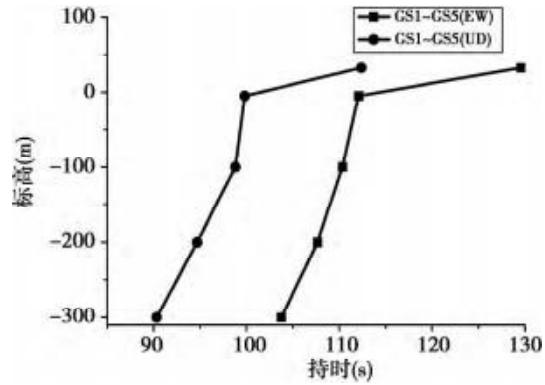


图 5 福岛第一核电站场地测点地震动持时分布
Fig. 5 Motion duration along elevation in field site of Fukushima daiichi nuclear power Plant

表 1 福岛第一核电厂各观测点峰值加速度
Table 1 The Peak acceleration at observation points in Fukushima Daiichi nuclear power plant

观测场所	观测位置	观测点名	峰值加速度(Gal)			
			NS 向	EW 向	UD 向	
南部自由场地	O. P. +32.9 m	GS1	463	600	326	
	O. P. -5.0 m	GS2	250	345	142	
	O. P. -100 m	GS3	249	321	153	
	O. P. -200 m	GS4	242	355	163	
	O. P. -300 m	GS5	242	360	154	
北部自由场地	O. P. +12.2 m	GN1	570	699	239	
	O. P. -5.0 m	GN2	293	456	166	
	O. P. -100 m	GN3	313	258	143	
	O. P. -200 m	GN4	250	220	116	
	O. P. -300 m	GN5	231	248	106	
邻近 6 号机组场地	O. P. -18.0 m	P4	209	387	189	
	O. P. -18.0 m	P13	252	405	194	
	O. P. -130 m	P14	313	302	113	
机组 1	O. P. -1.23 m	1 - R2	460	447	258	
机组 2	O. P. -2.06 m	2 - R2	348	550	302	
机组 3	O. P. -2.06 m	3 - R2	322	507	231	
机组 4	O. P. -2.06 m	4 - R2	281	319	200	
机组 5	O. P. +0.94 m	5 - R2	311	548	256	
厂房结构	机组 6	O. P. +65.5 m	P1	962	661	353
		O. P. +65.5 m	P11	-	-	1 372
		O. P. +51.5 m	P2	575	487	334
		O. P. +51.5m	P10	552	557	293
		O. P. +19.0 m	P8	358	390	209
		O. P. +1.0 m	6 - R2	298	444	171
		O. P. +1.0 m	P3	290	431	163
		O. P. +1.0 m	P5	279	425	244
		O. P. +23.0 m	P9	728	790	262
		O. P. +1.0 m	P6	299	505	211

表 1 为福岛第一核电厂各观测点峰值加速度的数值。可以看出 ,不同位置处各测点三向加速度峰值存在不小的差异 ,表明在震源和震中距近似相同情况下 ,局部小范围场地对地震响应特征影响显著 ,在核电厂等重要结构设计中 ,应充分考虑局部场地条件对结构地震响应的影响。

2 厂房结构地震响应分析

选取福岛第一核电厂厂房结构 6 号机组观测点南北向地震响应记录数据进行分析 ,其加速度时程和反应谱分别如图 6、图 7 所示。由反应谱曲线可以看出 ,随着标高的增加 ,反应谱峰值显著增大且向高频方向移动 ,频率成分主要集中在 1~10 Hz 之间。不同高度处结构的南北向峰值加速度分布和相对于结构基础的位移分布如图 8 所示 ,顶部最大加速度为 0.962 g ,顶部相对于基础的最大位移约为 4 cm。比较图 8(a) 和图 4 ,相比于场地 ,厂房结构的响应更大且对地震动的放大效应明显。

本次地震中 ,福岛核电厂厂房结构获取的最大加速度是福岛第二核电厂 2 号机组标高 +66.5 m 屋顶处记录到的南北向加速度 1.638 g。福岛核电厂几个机组厂房结构的设计基准地震动在 0.424 g~0.461 g 之间 ,表 1 中福岛第一核电厂 2、3、5 号机组基础附近测到的最大加速度 ,分别为 0.550 g、0.507 g、0.548 g ,超过了相应的设计基准地震动 0.450 g、0.458 g 和 0.461 g。

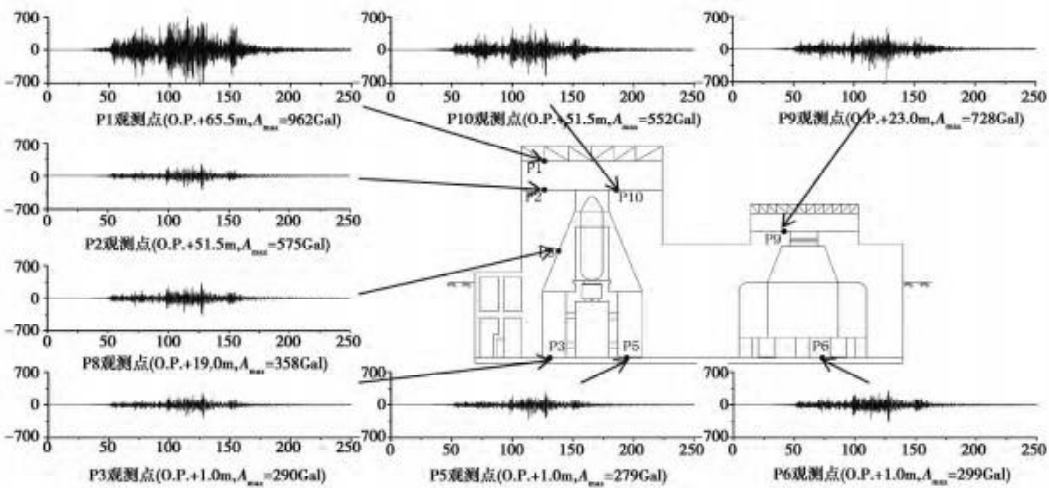


图 6 福岛第一核电厂厂房结构 6 号机组观测点南北向地震响应

Fig. 6 Seismic response of unit 6 structure of Fukushima Daiichi nuclear power plant in NS direction

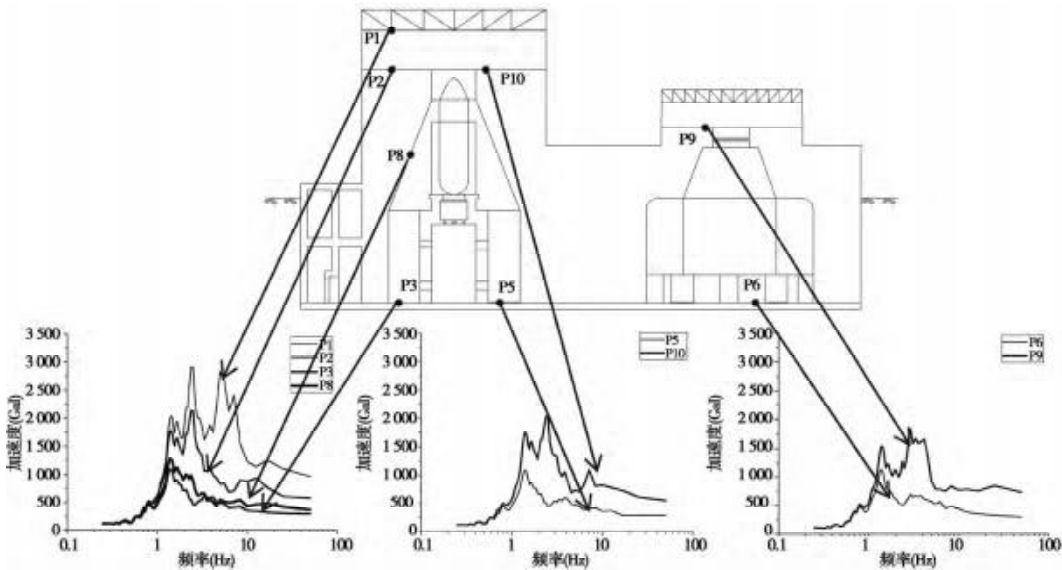


图 7 福岛第一核电厂 6 号机组厂房结构观测点南北向地震响应反应谱

Fig. 7 Spectral acceleration of unit 6 structure of Fukushima Daiichi nuclear power plant in NS direction

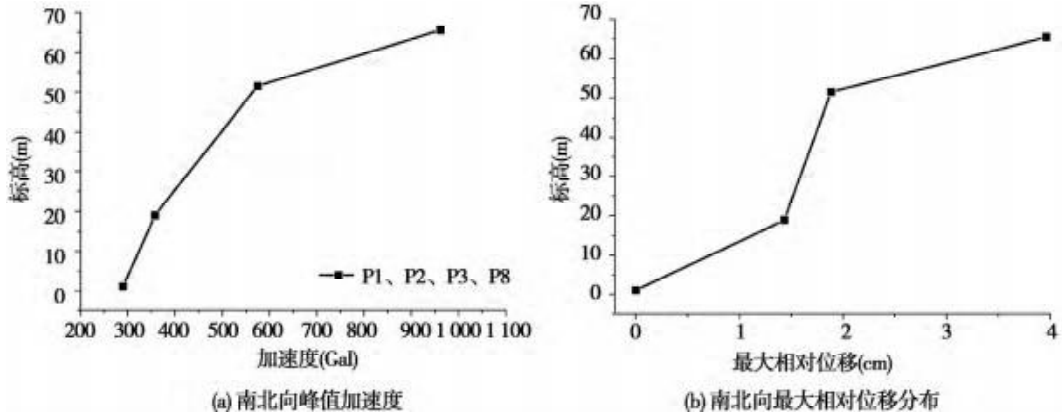


图 8 福岛第一核电厂 6 号机组厂房结构 P1、P2、P3、P8 点地震响应

Fig. 8 Seismic response at point P1, P2, P3 and P8 of unit 6 in Fukushima Daiichi nuclear power plant

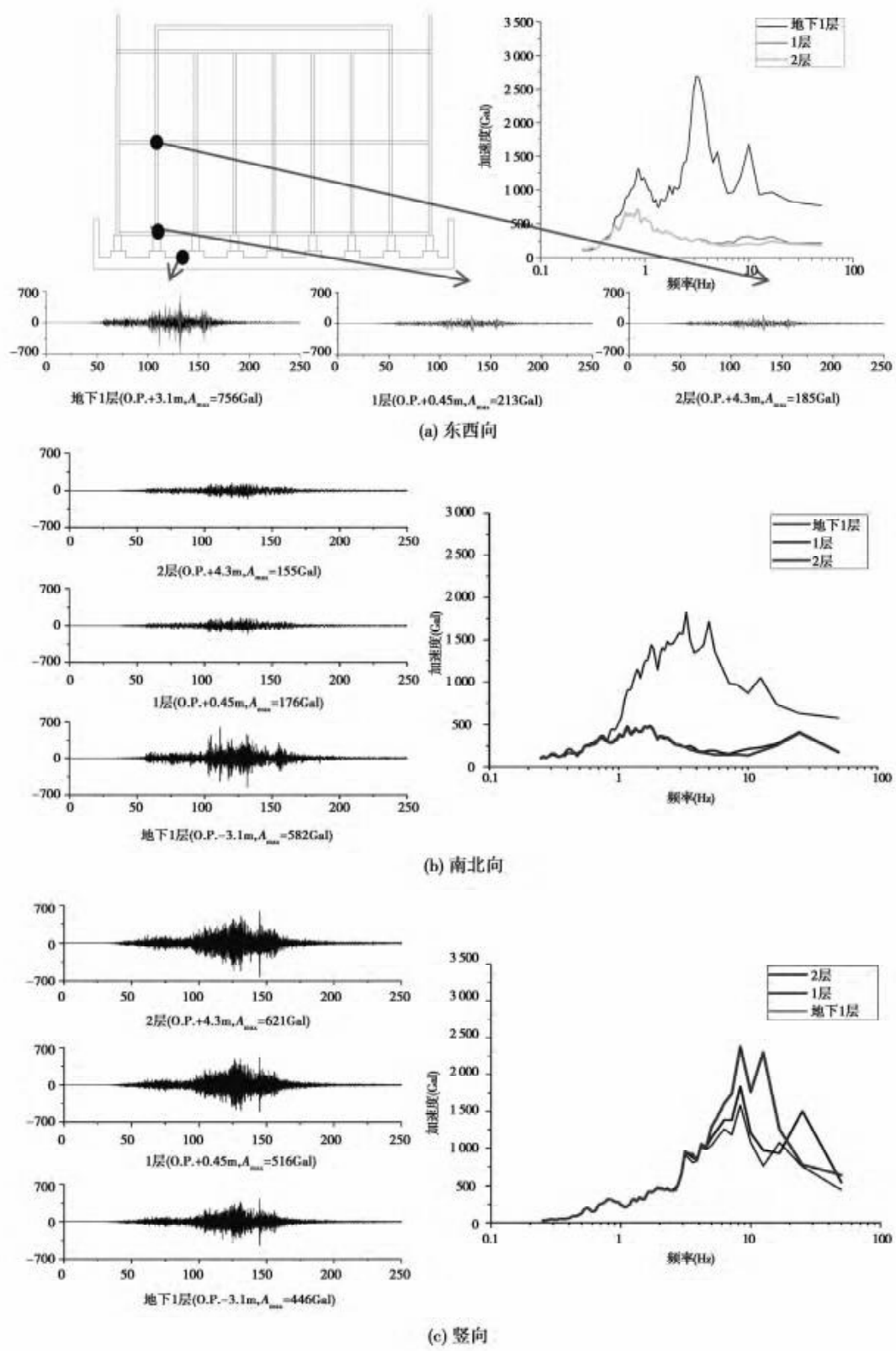


图 9 福岛第一核电厂隔震应急指挥中心地震响应及其反应谱

Fig. 9 Seismic response and spectral acceleration of the emergency operations building in Fukushima Daiichi nuclear power plant

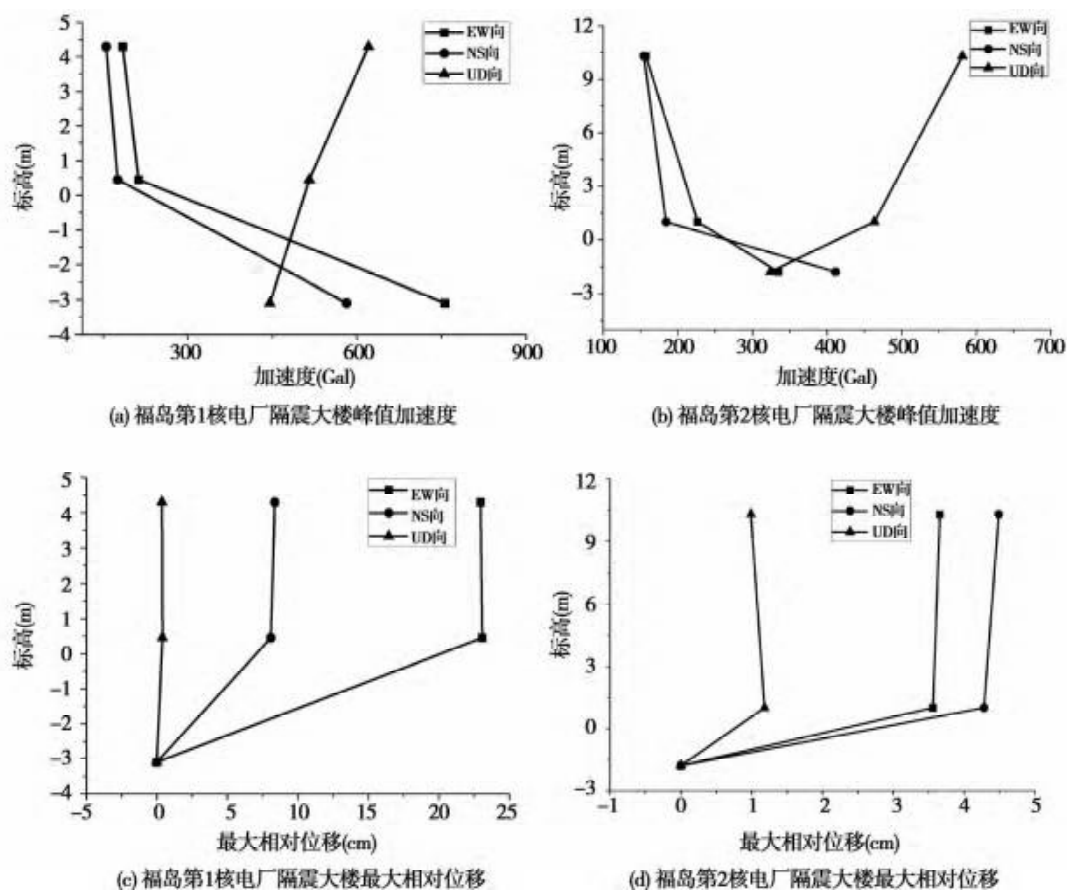


图10 福岛核电厂隔震应急指挥中心地震响应沿高度的分布

Fig. 10 Seismic response along elevation of the emergency operations building in Fukushima nuclear power plants

3 采用隔震技术的应急指挥中心大楼的地震响应分析

2007年日本新潟县中越冲地震发生后,柏崎刈羽核电厂曾受到强烈冲击,应急指挥中心大楼(EOB, Emergency Operations Building)功能无法发挥。为防止此类事件再次发生,东京电力于2010年10月在柏崎刈羽核电厂建成隔震的EOB。福岛第一、二核电厂于东日本大地震前夕建好了隔震的EOB。此外,其它核电厂也修建了或计划修建EOB,如日本东北电力于2011年6月在女川核电厂建好隔震的EOB,日本中国电力也曾计划修建隔震的EOB。在本次地震之前,采用隔震技术的核电厂未曾经历地震作用,本次地震很好的验证了与核电有关的建筑物应用隔震技术的有效性。地震中,隔震系统较大程度的减轻了福岛第一、二核电厂应急指挥中心所受到的地震作用^[12]。

图9是福岛第一核电厂EOB各高度处的加速度时程及其反应谱,图10是两个核电厂EOB地震响应沿高度的分布图。如图10(a)、(b)所示,第一核电厂应急指挥中心1层和2层东西向响应相对于基础分别减小了71.8%、75.5%,南北向分别减小了69.8%、73.4%;第二核电厂1层和3层东西向响应相对于基础分别减小32.3%和53.1%,南北向分别减小了55.1%和62.5%。如图10(c)、(d)所示,结构整体保持一种平动状态,层间相对位移较小,表明隔震层吸收了相当部分能量。本次地震中计算得到的隔震层最大位移为24 cm,隔震支座未出现破坏^[13],设置隔震支座有效降低了结构在地震作用下的响应。

而在竖向,传统的隔震结构仍然会放大地震作用,且随着标高升高,放大效应增大。其中,第一核电厂1层和2层竖向加速度响应相对于基础分别增加了15.7%和39.2%,第二核电厂1层和3层分别增加了43.0%和79.7%。因此在核电厂隔震结构设计中,应充分考虑其对竖向地震动的放大作用。

隔震EOB的地震响应特征亦可从频谱中看出,其中隔震层就相当于一个滤波器,显著改变了地震动的频率成分。在水平向,结构对大于1Hz的成分隔震效果明显。总体来说,核电厂隔震结构在本次地震中表现卓越,隔震效果明显,但在竖向仍然会放大地震作用。

4 结语

本次地震中获得的记录数据为提高坐落于地震危险区的核电站和其他重要核设施的设计和分析方法提供了重要资料,通过分析,得出以下结论:

(1) 福岛核电站场地的峰值加速度在标高 -5.0 m 以下变化不大, -5.0 m 以上迅速放大,场地土对地震动的放大效应明显,同一核电站内不同场地观测点记录到的最大加速度有差异。此外,福岛第一核电站基础附近记录到的某些峰值加速度大于设计基准地震动。

(2) 由核电站厂房结构反应谱曲线可以看出,随着标高的增加,反应谱峰值显著增大且向高频方向移动。

(3) 福岛核电站应急指挥中心(EOB)隔震体系能大大减轻地震作用,具有良好的隔震效果。在水平向,隔震支座上部的加速度峰值相对下部的峰值减小了 $2/3$ 左右。而在竖向,传统的隔震体系仍然会放大地震作用,随着标高升高,放大效应增大。其中,福岛第一核电站EOB1层和2层竖向响应相对于基础分别增加了 15.7% 和 39.2% ,第二核电站EOB1层和3层分别增加了 43.0% 和 79.7% 。因此在核电站隔震结构设计中,应充分考虑其对竖向地震动的放大作用。

参考文献:

- [1] 中日联合考察团(周福霖和崔鸿超等). 东日本大地震灾害考察报告[J]. 建筑结构, 2012, 42(4): 1-20.
ZHOU Fulin, CUI Hongchao. Inspection report of the disaster of the East Japan earthquake by Sino-Japanese joint mission [J]. Building Structure, 2012, 42(4): 1-20. (in Chinese)
- [2] 王巧临. 2011年东日本 $M_w 9.0$ 大地震地震动特征[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2014.
WANG Qiaolin. Ground motion characteristics of the 2011 $M_w 9.0$ Tohoku Japan Earthquake[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2014. (in Chinese)
- [3] 方火浪, 银 鸽. 核电站反应堆厂房基础与地基的抗震稳定性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 1-7.
FANG Huolang, YIN Ge. Seismic stability analysis for reactor building basement and foundation of nuclear power station[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(5): 1-7. (in Chinese)
- [4] 宋晋东, 李山有, 马 强. 高速铁路高架桥破坏与地震动参数的关系: 以日本311地震为例[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 1-5.
SONG Jindong, LI Shanyou, MA Qiang. The relationship between strong motion parameters and damage in viaduct of high speed railway: in the case of the 2011 magnitude 9.0 Tohoku-Oki, Japan, earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 1-5. (in Chinese)
- [5] 吴 浩. 日本东北大地震时强震观测点周边地区地震动估算方法的论证[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 1-5.
WU Hao. A study on the estimation method of ground motions at the target sites near strong-motion stations during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Japan[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 1-5. (in Chinese)
- [6] 王庆红, 龚 婷. 福岛核电事故分析及其启示[J]. 南方电网技术, 2011, 5(3): 17-22.
WANG Qinghong, GONG Ting. Analysis of Fukushima nuclear power accident and its revelation[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(3): 17-22. (in Chinese)
- [7] 尹洪峰, 薄景山, 李 平. 核电站软岩地基地震反应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(1): 44-49.
YIN Hongfeng, BO Jingshan, LI Ping. Study on seismic responses of soft rock subgrade for a nuclear power plant[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(1): 44-49. (in Chinese)
- [8] 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 Lili, ZHAI Changhai. A prospective study on applicability of base isolation in nuclear power plants[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(1): 1-10. (in Chinese)
- [9] 徐龙军, 李 爽, 谢礼立. 核电站抗震设计谱确定方法分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增刊1): 1-8.
XU Longjun, LI Shuang, XIE Lili. Analysis on the construction methods of seismic design spectra for nuclear power plants[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(A1): 1-8. (in Chinese)
- [10] 李洪训. 日本311地震海啸导致福岛第一核电站严重事故的三简[J]. 核安全, 2011(1): 1-12, 27.
LI Hongxun. Three letters about the extraordinarily severe nuclear accident at Fukushima Daiichi nuclear power plant after the March 11 earthquake and tsunami in Japan[J]. Nuclear Safety, 2011(1): 1-12, 27. (in Chinese)
- [11] Japan Association for Earthquake Engineering. Recorded motion for Fukushima Daiichi/Daini nuclear power plants in the 2011 Great Eastern Japan Earthquake[R/CD]. Japan: Tokyo Electric Power Company, 2011.
- [12] Kudama, T. 2012. "Earthquake, Tsunami and the Status of Fukushima Nuclear Power Stations: How We Prevented Widespread Blackouts" [EB/OL]. [2015-03-01]. <http://www.tepco.co.jp>.
- [13] Hijikata K, Takahashi M, Aoyagi T, et al. 2012. Behavior of a Base-Isolated Building at Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant During the Great East Japan Earthquake[C]//Proceedings of International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. Japanese Association for Earthquake Engineering, Tokyo, 2012.