

中国核电工程场地设计地震动参数确定相关问题

李小军^{1,2}, 贺秋梅¹, 侯春林³

(1.中国地震局地球物理研究所,北京 100081; 2.北京工业大学建筑工程学院,北京 100124;

3.国家环境保护总局核与辐射安全中心,北京 100082)

[摘要] 基于中国核电工程选址和建设的实际工作,探讨了核电工程场地设计地震动参数确定几个环节中的关键问题,包括不同地震危险性分析方法的采用、地震动衰减关系的选取和设计地震动参数的综合取值等。分析了地震动衰减关系不确定性和弥散地震衰减关系等问题处理方式的变迁,比较分析了地震危险性分析确定性方法中构造地震、弥散地震的计算结果和概率方法计算结果的差异及对设计地震动参数确定的控制作用。研究表明:a.综合考虑地震危险性分析的确定性方法和概率方法的计算结果已成为中国核电工程场地地震安全性评价中确定设计地震动参数的基本思路,其中弥散地震是一个需要特殊考虑的问题;b.确定性方法和概率方法计算结果对场地设计地震动参数的控制作用受区域地震活动性强弱的影响;c.在地震活动性较弱的地区,确定性方法特别是弥散地震计算结果基本上控制着场地设计地震动参数的取值,而在地震活动性相对较强的地区,更倾向于由概率方法计算结果控制。

[关键词] 核电厂;设计地震动;确定性方法;概率方法;地震动衰减关系;弥散地震;不确定性

[中图分类号] P315.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)04-0075-08

1 前言

近20年来,中国大陆核电工程建设得到了飞速发展,从起步阶段进入了积极发展阶段。1984年第一座由我国自主设计和建造的核电站——秦山核电站破土动工,于1991年底实现运行与并网发电。到目前为止,我国已建成浙江秦山、广东大亚湾和江苏田湾3个核电基地,建成投运核电机组15台,装机容量 1.08×10^4 MW。进入21世纪,中国核电工程建设和规划迈入批量化、规模化的积极发展阶段。截至2010年10月,国家已核准34台核电机组,总装机容量达 3.692×10^4 MW,其中已开工在建机组26台,装机容量为 2.881×10^4 MW,在建规模居世界第一。中国大陆已建和在建核电站分布图如图1所示。现在我国的核电工程建设已开始从沿海向内

陆发展,拟规划建设的内陆核电站包括江西彭泽核电站、湖北咸宁核电站和湖南桃花江核电站等。我国在大规模建设大型商用快堆的同时自主研发了多种型号的先进核反应实验堆,包括高温气冷堆、65 MW快中子实验堆、低温供热堆和中国先进研究堆(高通量的重水反应研究堆)等。

核电工程的安全性问题极为重要,核电工程一旦出现安全事故,造成放射性物质外逸,其后果将十分严重,甚至带来灾难。为了确保核电工程的安全,需要考虑在其运行期间可能遇到的各类意外情况和潜在灾害,如地震、海啸、水灾、泥石流、山坡坍塌、地面沉陷甚至飞机碰撞等,而地震是关键性的灾害因素。苏联切尔诺贝利核电站事故、美国三里岛核电站事故,以及近期的日本“3·11”地震中福岛核电站事故及其灾难性后果进一步提醒人们核电

[收稿日期] 2013-01-21

[基金项目] 国家自然科学基金重大研究计划(91215301);国家科技重大专项(2011ZX06002-010)

[作者简介] 李小军(1965—),男,湖南临湘市人,研究员,博士,主要研究方向为地震工程;E-mail:beerli@vip.sina.com

工程地震安全问题的严峻性。我国是一个多地震国家,强震频繁发生,核电工程的抗震问题更是成为在核电工程建设和运行维护中十分突出的问题。

在积极推进核电工程建设的同时,中国政府各相关部门积极开展相关配套规划的研究和调整工作,但目前,中国尚没有形成一个统一的核电标准体系。中国从法国、加拿大、俄罗斯和美国进口了核电技术,与之一同进入中国的还有这些国家的核电标准。美国机械工程师协会(ASME)和法国压水堆核电站(RCC)的设计标准体系都在我国得到了广泛应用。此外,相关政府部门也颁布了基于RCC设计标准的国家标准和行业标准,如《核电厂抗震设计规范》(GB 50267—97)^[1],但这些标准在实际核电工程中未能很好地推广应用。到目前为止,RCC标准是中国核电工程抗震设计中使用最为广泛的标准,其次就是ASME标准。然而在核电工程选址

的地震问题考虑和结构抗震设计的地震动参数确定方面,中国制定了多个严格且可操作的地震安全性评价管理制度与技术法规,包括《核电厂厂址选择中的地震问题》(HAD 101/01)^[2]、《核电厂工程项目可行性研究地震工作内容与深度规定(试行)》^[3]及《工程场地地震安全性评价》(GB 17741—2005)^[4]等。国家标准《工程场地地震安全性评价》(GB 17741)的编制以1994年编制的地震行业标准《工程场地地震安全性评价工作规范》(DB 001—94)为基础,制定于1999年,并于2005年进行了修订。《工程场地地震安全性评价》(GB 17741—2005)对核电工程及核安全相关工程建设场地的地震适宜性问题和设计地震动参数确定等进行了规范,将这类工程场地地震安全性评价工作纳入I级评价工作,即最高安全等级的评价工作。

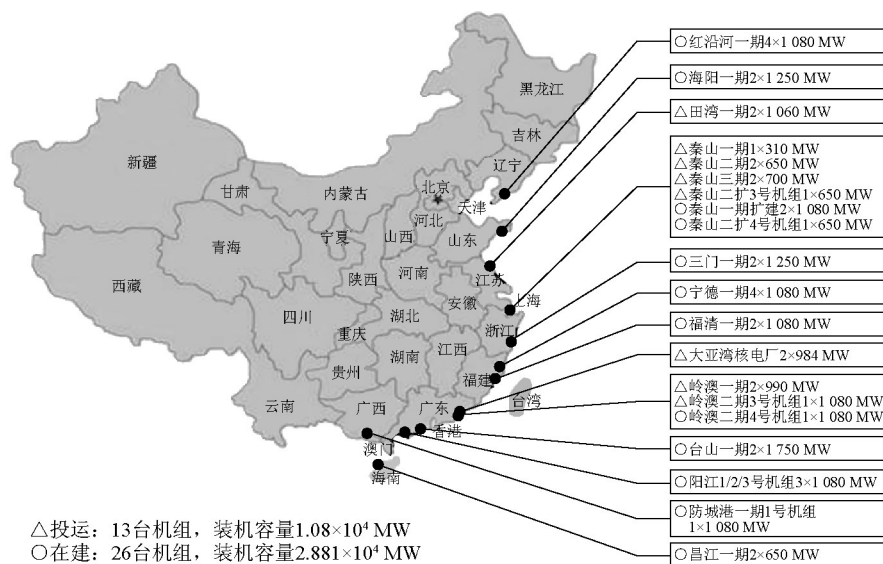


图1 中国大陆已建和在建核电站分布图

Fig.1 Distribution of the existing nuclear power plants and the ones under construction in the mainland of China

注:该图绘制于2010年11月,引自相关报告

本文基于相关法规对核电工程场地地震安全性评价和设计地震动参数确定的要求,结合最近十年来中国核电工程选址和建设中的工程场地地震安全性评价工作实践,分析和讨论了核电工程场地设计地震动参数确定中涉及的问题,包括地震危险性分析方法、地震动衰减关系选取和设计地震动参数取值方法等。

2 核电工程场地地震安全性评价关键环节

依据核安全相关法规^[2-7]要求,核电工程场地地

震安全性评价需要解决3个关键问题:a.厂址附近范围内能动断层的鉴定;b.厂址设计地震动参数的确定;c.厂址区地震引起的其他潜在地质灾害的评价。厂址附近范围(厂址及外延5 km范围)内是否存在能动断层是所选厂址是否适宜的的决定性因素,应确保核电厂厂址附近范围内不存在可能对厂址产生地表断裂影响的能动断层,否则该场地不能作为核电工程建设厂址。厂址设计地震动参数包括SL-2和SL-1水准设计基准地震动峰值加速度和加速度反应谱,其参数值的大小将决定核电工程结构

和设施抗震设防的水平 and 成本,设计地震动参数值过高也可能导致抗震设计难以进行而影响厂址适宜性。厂址区是否存在地震引起的其他潜在地质灾害,如地震动滑坡、崩塌、海啸和湖涌等,其灾害程度及是否可以消除也将影响厂址的适宜性。核电工程场地地震安全性评价工作包括两个阶段:初步可行性阶段和可行性研究阶段。

综合考虑地震危险性分析的确定性方法和概率方法的计算结果,是目前中国核电厂场地地震安全性评价工作中确定设计地震动参数的基本思路。核电工程场地设计地震动参数(SL-2水准)确定中,确定性方法给出构造地震和弥散地震影响的计算结果,而概率方法给出年超越概率为 10^{-4} (即万年一遇)的计算结果。最大历史地震法也作为确定性方法计算中的一个环节,但在实际工作中最大历史地震法计算结果对设计地震动参数的确定没有实质影响,而是被淹没在相应的构造地震的影响中。实际工作中,核电工程场地设计地震动参数的确定方法是取确定性方法和概率方法计算结果的包络值作为SL-2水准设计地震动参数,并要求其水平向峰值加速度值不小于 $0.15g$ 。但在确定性方法

和概率方法的计算结果有明显差异时如何综合确定设计地震动参数值方面,专家之间仍然存在不同的意见。

图2所示为3个典型核电厂场地地震安全性评价工作结果,包括计算地震动及所确定的厂址特定地震动加速度反应谱 $Sa(T)$ 曲线。由图2可以看到,对于特定的工程厂址存在多个可能对厂址特定地震动参数起控制作用的构造地震(以最大潜在地震震级 M 和最近距离 R 表示)和一个弥散地震(厂址所在地震构造区弥散地震,以最大弥散地震震级 M 和计算距离 R 表示)的计算参数及一个概率法计算参数(年超越概率为 10^{-4})。图2a和图2b对应的工程场地特定地震动参数由弥散地震计算结果和概率法计算结果确定,而图2c对应的工程场地特定地震动参数由概率法计算结果和某一构造地震计算结果确定,且基本上是由概率法计算结果所控制。图2b和图2c对应的工程厂址,其特定地震动参数将被确定为厂址设计地震动参数(SL-2水准)。而图2a对应的工程场地,由于其特定地震动峰值加速度小于 $0.15g$,则以峰值加速度 $0.15g$ 标定的特定地震动参数作为厂址设计地震动参数(SL-2水准)。

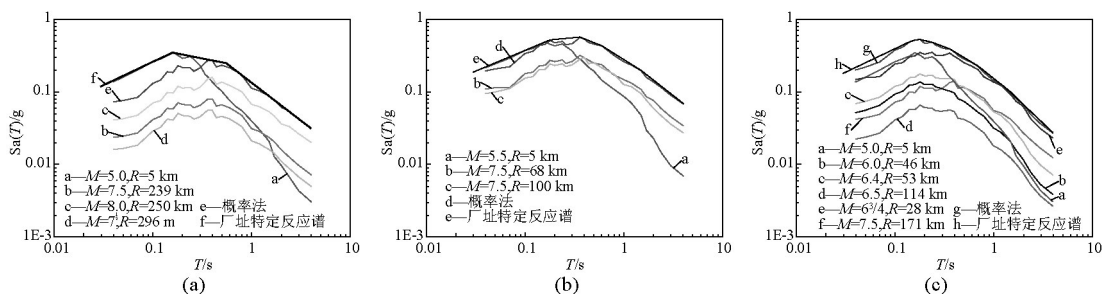


图2 3个典型核电厂场地地震安全性评价工作的计算地震动加速度反应谱曲线

Fig.2 Calculated spectral acceleration curves of ground motions from evaluation of seismic safety for 3 typical engineering sites of nuclear power plants

结合上面的分析,从已有研究和实际工作中还可以看到,不同的地震危险性分析方法的计算结果差异很大,为此在确定核电工程场地设计地震动参数中,采用什么样的方法和如何综合考虑不同方法计算结果至关重要。如何综合考虑确定性方法和概率方法计算结果以确定设计地震动参数,一直是实际工作中探索的问题,其考虑方法也在不断变化。目前,已认可和接受的方法是取确定性方法和概率方法计算结果的包络值以确定SL-2水准设计地震动参数。影响确定性方法计算结果的关键因

素包括发震构造及其最大潜在地震和离厂址最近距离的确定,地震构造区划分及其最大弥散地震和计算距离的确定,地震动衰减关系的确定及其不确定性等。同时这些关键性因素的确定也影响着概率方法中潜在震源区的划分和地震动参数计算结果,并综合影响厂址设计地震动参数的确定。在以往核电工程场地地震安全性评价工作实践中,这些关键性因素的确定呈现较为复杂的状况,既有法规较为明确规定的技术思路和确定方法,又有需要结合具体情况进行专家评判的问题,还有实际工作中

逐渐形成的约定性处理方法。这些将给厂址设计地震动参数的确定带来一定程度的不确定性。充分认识和揭示设计地震动参数的合理性和保守性,评估所建设的核电工程面临的地震风险程度,成为研究者和管理部门特别关注的问题。

3 弥散地震确定及其影响

从上面的分析可以看到,在地震活动性较弱的地区(如图2a对应的厂址地区),场地设计地震动参数主要由弥散地震(diffuse earthquake)的计算结果控制,特别是峰值加速度和低频加速度反应谱值。为此,弥散地震的确定及其影响成为核电工程场地地震安全性评价工作的关键和特殊问题。弥散地震的确定包括最大弥散地震震级和计算距离的确定,还涉及特殊小震地震的动衰减关系的确定问题。

3.1 弥散地震

“弥散地震”一词出自我国核安全导则《核电厂厂址选择中的地震问题》(HAD 101/01)^[2],但源于国际原子能机构的安全导则《核电厂选址中的地震及相关问题》(Safety Series No.50-SG-S1 Rev.1)^[8]中的“diffuse seismicity”(可直译为弥散地震活动)。目前,弥散地震多被理解为地震构造区内与已确认的发震构造不相关的潜在地震,但弥散地震并不是与构造无关的地震,而是基于现有的地质和地震资料还无法确认其发震构造的那部分地震^[9]。实际工作中,人们通常把关注点放在核电厂厂址所在的地震构造区内的弥散地震上,因为一般只有这一地震构造区内的弥散地震对设计地震动的确定有影响。

在现有相关工作中,地震构造区内最大弥散地震需要依据历史地震资料来确定,一般认为最大弥散地震不得低于所在地震构造区内历史上已经发生的被确认为弥散地震中的最大地震,其中包括历史地震和现代仪器地震^[10]。在实际工作中,最大弥散地震多被确认为5.0级或5.5级,其距厂址的最近距离一般确定为5 km。这一最近距离的确认依据包括:a.在厂址附近范围(5 km范围)内开展了详细的地质调查工作,特别是能动断层调查,已确认距厂址5 km范围内不具备发生5.0级以上地震的地质构造条件;b.地震总是发生在距地表一定深度处,根据地震震源深度的统计分析,5.0级左右的地震震源深度一般不小于5 km;c.地震动衰减关系中的距离在近场区应被理解为震源距,且震源距较震

中距更为合适。

3.2 弥散地震的地震动衰减关系

弥散地震的地震动衰减关系作为一个特殊问题,是在中国核电工程场地地震安全性评价的实际工作中提出并予以考虑的,该问题最早是笔者在山东海阳核电厂厂址地震安全性评价项目工作^[11]中提出的。针对该问题,笔者给出了经专家讨论认可的处理建议,其后人们对此问题进行了深入的研究^[9,12],形成了弥散地震的地震动衰减关系的确定原则并建议直接利用美国西部的地震动衰减关系,相应的地震动衰减关系在其后的核电工程场地地震安全性评价工作中被采用。

核电工程场地设计地震动确定中涉及弥散地震的地震动估计,而弥散地震属于中小地震(震级一般为5.0级或5.5级),对厂址而言则属于近场中小地震。因此,弥散地震的地震动估计实际上成为中小震近场地震动估计问题,从而迫使人们关注中小震近场地震动估计的研究。为解决弥散地震的地震动估计问题,人们基于一些中小震近场地震动记录资料,分析和探讨了国内外多种地震动衰减关系对中小震近场地震动估计的适宜性问题,并结合中国核电工程的实践,提出了确定中小震近场地震动衰减关系的思路 and 原则^[9,12]。

1) 应利用中小震近场地震动记录资料,统计确定中小震近场地震动衰减关系,在统计分析时可不考虑记录来源的区域性差异。

2) 应尽可能避免利用通过转换方法获得的衰减关系^[13]作为中小震近场地震动衰减关系。

3) 在采用其他区域的地震动衰减关系时,应利用工程场地相关区域的中小震近场地震动记录资料对所用衰减关系的适用性及保守性进行论证。

基于以上思路和原则,还进一步给出了在我国(特别是东部地区)的工程应用中可直接采用美国西部地区的地震动衰减关系的建议,并对以上思路和原则给出了以下解释。

1) 因影响基岩地震动衰减特性的主要因素为区域地质构造条件。与非近场地震相比,由于弥散地震的地震波传播距离较短,基岩地震动特性衰减受区域地质构造条件的影响相对较小,即弥散地震的基岩地震动衰减特性对地震发生区域的依赖性相对较小。

2) 离震中仅几千米的近场区通常属于地震震中区,严格来讲,常用的地震烈度衰减关系并不能反映地震动强度在这一近场区内的变化。因此难

以确保转换方法所得结果的合理性。

图3所示为两种地震动衰减关系比较结果,包括基于强震动记录资料统计得到的美国西部地区地震动衰减关系和经转换方法得到的中国东部地区地震动衰减关系的比较,以及地震动衰减关系与中小地震强震动记录资料的比较^[12]。美国西部地区的地震动衰减关系为圆函数形式的关系,而中国东部地区的地震动衰减关系为椭圆函数形式的关系。由图3a可以看到,对于弥散地震,美国西部地区地震动衰减关系的计算值较中国东部地区地震动衰减关系(长轴)的计算值明显偏小,但与中国东部地区地震动衰减关系(短轴)的计算值基本一致。这些差异是由两个地区的地震烈度衰减关系的差异所致,然而地震烈度衰减关系统计中,小震近场区没有足够可靠的数据资料给予支持,地震烈度衰减关系差异是由衰减关系在主要统计数据区范围外延伸结果得到的。

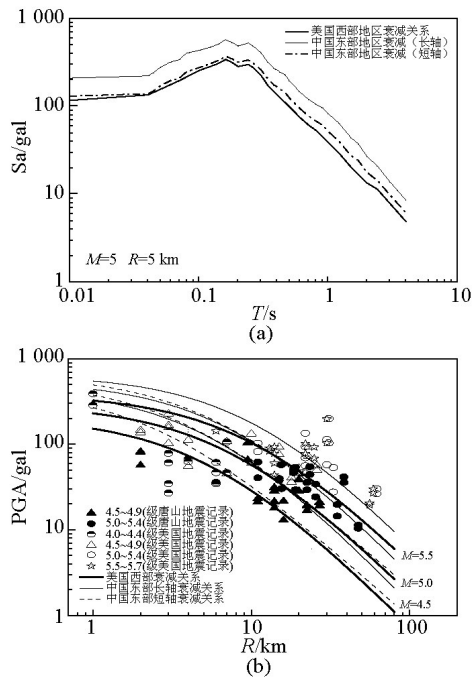


图3 不同的地震动衰减关系比较及与中小地震强震动记录资料比较

Fig.3 Comparison of different ground motion attenuation relations and strong motion records of moderate and small earthquakes

注:PGA为峰值加速度

近年来,关于弥散地震影响的估计出现了一些新的看法,包括弥散地震的地震动参数可否不采用

地震动衰减关系计算,而直接采用基于小震近场强震动记录的分档统计结果,例如,以10 km范围内的4.5~5.5级和5.0~6.0级地震的强震动记录的统计结果分别作为震级5.0级、距离5 km和震级5.5级、距离5 km的弥散地震的地震动参数。

4 地震动衰减关系的不确定性分析

地震动衰减关系的选取是场地设计地震动参数确定中需重点考虑的问题,是决定核电厂厂址设计地震动参数结果的关键因素,而且其对设计地震动参数的影响十分敏感。近20年的工程实践中,地震动衰减关系的选取由确定性方法和概率方法采用同一关系且考虑衰减关系的不确定性影响,发展到确定性方法中不再考虑衰减关系的不确定性,并且在确定性方法中单独采用中小震近场衰减关系分析弥散地震的影响(即上文提到的弥散地震的地震动衰减关系)。但人们一直以来对确定性方法中地震动衰减关系的不确定性处理有不同的看法。

图4所示为我国核电工程场地地震安全性评价工作中采用的典型地震动衰减关系的计算结果,其中图4a对应的是美国西部地震动衰减关系,图4b和图4c分别对应的是中国东部地震动衰减关系的长轴和短轴。可以看到,当考虑地震动衰减关系的不确定性影响时,计算结果有较大的差异。当对数值方差为0.18且考虑加1倍方差影响时,地震动参数(峰值加速度,PGA)的计算结果将为均值的1.5倍。这是在确定性方法中是否考虑地震动衰减关系不确定性影响的专家们意见分歧以及在实践中具体处理方案徘徊的原因。

5 设计地震动参数确定影响因素分析

近十年来,中国核电厂和核工程建设与规划得到了迅速发展,相应的工程场地地震安全性评价工作已开展几十项。充分利用这些地震安全性评价报告资料,可以对厂址设计地震动参数(包括峰值加速度和加速度反应谱)的确定问题进行详细分析,以探讨不同的地震危险性分析方法计算结果对厂址设计地震动参数的控制作用,并进一步分析中国核电厂厂址设计地震动参数取值的合理性和保守性,从而更深入地认识已建设的和将建设的核电工程面临的地震风险程度。

5.1 地震安全性评价报告资料

分析利用的资料为2006—2012年间完成的部

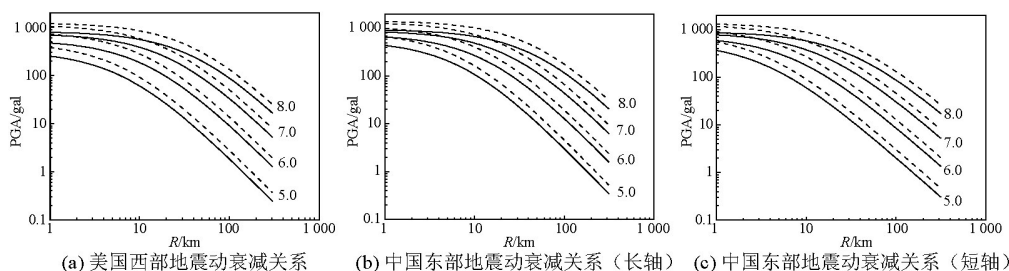


图4 典型地震动衰减关系的不确定性影响

Fig.4 Uncertainty effect of ground motion relations widely used

注:实线为地震动衰减关系均值计算结果,虚线为地震动衰减关系均值加1倍方差计算结果(对数值方差取为0.180)

分核电工程(侯选)厂址的工程可行性研究阶段地震安全性评价报告资料,共45个评价报告和复核报告。厂址主要位于中国东部地区,近一半的厂址为内陆厂址。

5.2 构造地震和弥散地震计算结果比较

本节分析了在厂址设计地震动参数确定中确定性方法对弥散地震的影响和控制作用。图5所示为相关构造地震的计算加速度反应谱(阻尼比5%)的包络值 S_{atf} 和弥散地震加速度反应谱值 S_{adf} 的比较结果。此处相关构造地震的计算加速度反应谱的包络值 S_{atf} 是指地震动PGA和加速度反应谱各周期点的值取所有构造地震对应的计算值的最大值。为绘图方便,PGA在图5及以下各图中均表示在周期0.01s的位置。

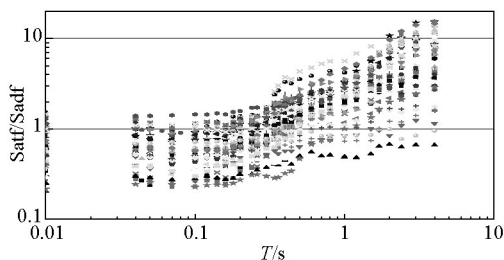


图5 构造地震反应谱包络值 S_{atf} 和弥散地震反应谱值 S_{adf} 比较(反应谱阻尼比5%)

Fig.5 Comparison of spectral accelerations (S_{atf} and S_{adf}) induced by tectonic earthquakes and diffuse earthquakes for different sites (with 5% damping ratio)

注:图中不同符号分别表示不同核电厂厂址的计算结果

由图5可以看到,构造地震和弥散地震的地震动峰值加速度及较高频段反应谱比值 S_{atf}/S_{adf} (周期小于0.3s)对于多数厂址来说小于1.0,甚至小到0.2,而较低频段反应谱比值 S_{atf}/S_{adf} (周期大于0.6s)对于多数厂址来说大于1.0。这表明,在确定性方法分

析中,弥散地震往往控制着地震动的较高频段反应谱值,特别是地震动的峰值加速度,而地震动的较低频段反应谱值主要由较大震级的构造地震控制。

5.3 确定性方法与概率方法计算结果比较

本节分析了在厂址设计地震动参数确定中确定性方法与概率方法计算结果的影响和控制作用。图6所示为确定性方法的计算反应谱(反应谱阻尼比5%)的包络值 S_{af} 和概率方法的计算反应谱值 S_{ap} (年超越概率为 10^{-4})的比较结果。

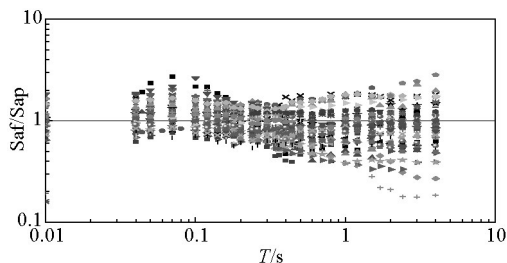


图6 确定性方法计算反应谱包络值 S_{af} 与概率方法计算反应谱值 S_{ap} 比较(反应谱阻尼比5%)

Fig.6 Comparison of spectral accelerations (S_{af} and S_{ap}) induced by the deterministic method and probabilistic method for different sites (with 5% damping ratio)

注:图中不同符号分别表示不同核电厂厂址的计算结果

由图6可以看到,厂址设计地震动参数确定中,峰值加速度和较高频段反应谱值(周期小于0.3s)多为确定性方法所控制,其他周期段的反应谱值是受确定性方法控制还是受概率方法控制与具体的厂址地震环境有关,但总体上较低频段反应谱值(周期大于0.6s)更多为概率方法所控制。在地震活动性较弱的地区,场地设计地震动参数主要由确定性方法的计算结果控制,特别是峰值加速度和高频加速度反应谱值由弥散地震的计算结果控制,而且场地设计地震动参数往往因计算峰值加速度小于0.15g而以0.15g为目标通过放大确定。在地震

活动性相对较强的地区,场地设计地震动参数更易于由概率方法计算结果控制,部分场地地震动的概率方法计算结果远大于确定性方法计算结果,特别是当反应谱周期值较长时。

5.4 厂址设计地震动参数与计算值比较

前文提到,在厂址设计地震动参数确定中,需要综合考虑地震危险性分析的确定性方法和概率方法的计算结果,还要考虑相关法规的限制性要求,因此,设计地震动参数往往取比计算值更高的值。为了展示实际工作结果,下面将分析所确定的厂址设计地震动参数与计算结果之间的关系。图7所示为厂址设计地震动峰值加速度和加速度反应谱 S_{ad} 与计算反应谱值 S_{ac} 的比较结果。此处 S_{ac} 是指地震动PGA和加速度反应谱各周期点的值取确定性方法和概率方法计算值的最大值(见图2)。

由图7可以看到,除个别厂址的个别周期点反应谱外,厂址设计地震动参数的取值均大于厂址地震动计算值。设计地震动参数的取值均具有一定的保守性,且较低频段加速度反应谱的取值更为保守。周期为1s以上的反应谱的取值多数是其计算值的2倍甚至有些已超过10倍,但峰值加速度的取值基本上不大于其计算值的1.4倍。

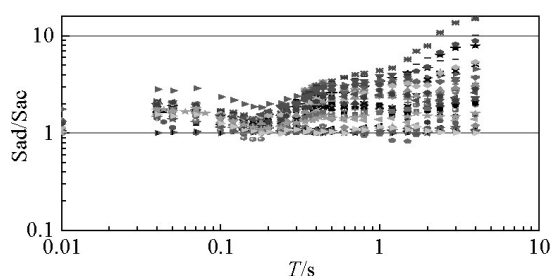


图7 设计地震动反应谱 S_{ad} 与计算反应谱值 S_{ac} 比较
(反应谱阻尼比5%)

Fig.7 Comparison between site specific design spectral accelerations S_{ad} and calculated spectral accelerations S_{ac} for different sites (with 5% damping ratio)

注:图中不同符号分别表示不同核电厂厂址的计算结果

设计地震动加速度反应谱与计算反应谱之间出现如此大的差异是由3个方面的原因造成的:a.采用多折线型反应谱曲线外包络计算反应谱导致不同周期点具有不同的保守性,如图2所示;b.中国相关法规规定,核电厂厂址设计地震动参数的水平向峰值加速度应不小于0.15g,因此对于计算特定地震动峰值加速度小于0.15g的厂址,需要以峰值加速

度0.15g标定的特定地震动反应谱作为厂址设计地震动反应谱(SL-2水准);c.多数厂址直接采用厂址特定地震动参数或将以峰值加速度0.15g标定的特定地震动反应谱作为厂址设计地震动反应谱(SL-2水准),但在一些厂址设计地震动参数确定中考虑到以厂址特定地震动的峰值加速度标定的RG 1.60谱可以完全包络厂址特定地震动反应谱,同时考虑到工程结构设计的方便而直接采用厂址特定地震动的峰值加速度标定的RG 1.60谱作为厂址设计地震动反应谱。

6 结语

通过针对核电工程场地设计地震动参数确定中涉及的几个关键问题的分析与讨论,就地震危险性分析方法应用、地震动衰减关系选取及设计地震动参数确定方法和取值等问题给出了评价意见和建议。

1)综合考虑地震危险性分析的确定性方法和概率方法的计算结果,是中国核电工程场地地震安全性评价工作中确定设计地震动参数的基本思路。目前已接受取两种方法计算结果的最大包络值的设计地震动参数确定方法,但考虑到地震及其影响的不确定性,认为利用概率方法的结果并合理地利用和改进确定性方法是值得关注的发展趋势。

2)弥散地震的考虑是核电工程场地地震安全性评价工作的特殊问题。目前的状况是弥散地震的计算距离的取值、地震动衰减关系的选取及其不确定性等相对于其震级的确定而言存在更大的争议。

3)在地震活动性较弱的地区,场地设计地震动参数更易于由确定性方法计算结果控制,而且往往因计算结果峰值加速度小于0.15g,场地设计地震动参数需以0.15g为目标通过放大来确定,这类地区的核电工程建设将具有更高的地震安全裕度。在地震活动性相对较强的地区,场地设计地震动参数更易于由概率方法计算结果控制,其峰值加速度也往往大于0.15g,而且部分场地地震动的概率方法计算结果远大于确定性方法计算结果,特别是当反应谱周期值较长时。

4)地震动衰减关系的选取由确定性方法和概率方法采用同一关系且考虑衰减关系的不确定性影响,发展到确定性方法中不再考虑衰减关系的不确定性,且单独考虑弥散地震的地震动衰减关系。但近年来,对确定性方法中地震动衰减关系不确定

性的考虑及弥散地震地震动衰减关系的选取又有了不同的认识,成为未来研究和实际工作需要关注的问题。

5)实际工作中,虽然采用了相同的设计地震动参数确定规则和方法,但对于不同地震环境的工程厂址,最终确定的设计地震动参数将具有不同的超越概率水平,也就是基于此进行的工程结构抗震设计将具有不同设防风险水平(或者说是保守程度)。

参考文献

- [1] 国家地震局. GB 50267—97 核电厂抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1997.
- [2] 国家核安全局, 国家地震局. HAD 101/01 核电厂厂址选择中的地震问题[S]. 北京: 中国法制出版社, 1994.
- [3] 电力工业部, 国家地震局, 中国核工业总公司. 核电厂工程建设项目可行性研究地震工作内容与深度规定(试行)(电计【1995】641号)[S]. 北京: 电力工业部, 1995.
- [4] 中国地震局地球物理研究所, 中国地震局地质研究所, 中国地震局地壳应力研究所. GB 17741—2005 工程场地地震安全性评价[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [5] United States Nuclear Regulatory Commission. Regulatory Guide 1.60 design response spectra for seismic design of nuclear power plants[S]. Vienna: IAEA, 1973.
- [6] United States Nuclear Regulatory Commission. Regulatory Guide 1.165 identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion [S]. Vienna: IAEA, 1997.
- [7] International Atomic Energy Agency. Safety Guide No. NS-G-3.3 evaluation of seismic hazards for nuclear power plants[S]. Vienna: IAEA, 2002.
- [8] International Atomic Energy Agency. Safety Series No.50-SG-S1 earthquake and associated topics in relation to nuclear power-plant siting[S]. Vienna: IAEA, 1991.
- [9] 时振梁, 环文林, 张裕明, 等. 核电厂地震安全性评价中的地震构造研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [10] 常向东. 弥散地震评价的原则与方法研究[J]. 中国地震, 2000, 16(2):107-113.
- [11] 中国地震局地球物理研究所. 山东海阳核电厂厂址地震安全性评价报告[R]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 1998.
- [12] 李小军, 阎秀杰, 潘华. 中小震近场地震动估计中地震动衰减关系的适用性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1): 1-7.
- [13] 胡聿贤, 周克森, 阎秀杰. 缺乏地震动加速度记录地区地震动估计的映射法[J]. 地震工程与工程振动, 1996, 16(3): 1-10.

The issues related to determination of site specific design ground motion for nuclear power plants in China

Li Xiaojun^{1,2}, He Qiumei¹, Hou Chunlin³

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 2. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Nuclear and Radiation Safety Centre, Ministry of Environmental Protection of China, Beijing 100082, China)

[Abstract] Based on the recent practical work of evaluation of seismic safety for the nuclear power plant site selection and construction in China, some key issues were discussed involved in the determination of site specific design ground motion for nuclear power plants, including the seismic hazard analysis methods, the ground motion attenuation relations, and the methods of determining design ground motion parameter. The countermeasure change was analyzed to consider the uncertainty of ground motion attenuation relation and the ground motion attenuation relation of diffuse earthquake; the differences were discussed between the computed results from the probabilistic method and the approaches of the diffuse earthquakes and tectonic earthquakes in the deterministic method, and their controlling effects were also discussed on the determination of site specific design ground motion. The results indicated that: a. comprehensive consideration of seismic hazard analysis results from the deterministic method and probabilistic method is the basic ideas of determining design ground motion parameters in the evaluation of seismic safety for nuclear power plant sites, in which the diffuse earthquake is a

(下转90页)