

核设施的设计地震反应谱

潘蓉

(环境保护部核与辐射安全中心,北京 100082)

摘要:通过将 IAEA 技术文件 TECDOC 1347 推荐的核设施标准设计反应谱与 RG 1.60 标准设计反应谱及 GB 50011—2001 规范中推荐的设计反应谱进行对比,分析说明各设计反应谱的特点。本文分析结果为核设施设计中适当选择设计反应谱提供参考。

关键词:核设施;核电厂;设计地震反应谱;超越概率;保守性

中图分类号:TB122

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)S1-0622-08

Design Seismic Response Spectrum Used in Design of Nuclear Facilities

PAN Rong

(Nuclear and Radiation Safety Centre, Environmental Protection Ministration, Beijing 100082, China)

Abstract: The comparison work was conducted among the design spectrum for nuclear facilities recommended in IAEA TECDOC 1347, NRC RG 1.60 standard spectrum and the one recommended in Chinese standard GB 50011—2001. The characteristics of these spectra were studied. The results are useful in the choosing of reasonable design spectrum for the design of nuclear facilities other than nuclear power plants.

Key words: nuclear facilities; nuclear power plant; design seismic spectrum; exceeding probability; conservative

由于核电厂和其他核设施中包含有放射性物质,对社会和环境具有潜在的安全影响。因此,核电厂中建筑结构的设计要考虑比常规建筑物更高的安全裕度,而对于其他核设施也要依据其固有的安全特性采用适当的设计标准,以保证合理的安全裕度。过去,人们一般比较关注核电厂的安全,为核电厂的抗震设计编制了一系列标准规范,而对于除核电厂外的其他核设施的抗震设计无专门的规范可依据,常采

用民用规范进行设计。“5.12”大地震给四川省核设施带来了前所未有的威胁,也提醒人们在今后的核设施设计中应针对核设施的特点,适当对其抗震设计予以考虑,以保证核设施有足够的的能力抵御地震的危害,从而保证人员和环境的安全。

本文结合其他核设施的特点,将国际原子能机构(IAEA)推荐的核设施设计地震反应谱与用于核电厂设计的反应谱及我国“建筑抗震

设计规范”的设计反应谱进行对比,并将 AP1000 标准设计的反应谱与其他设计反应谱进行对比,分析这些反应谱间的差异,以对核设施的抗震设计起到帮助作用。

1 核电厂设计中使用的的地震反应谱

1.1 美国 NRC 的 RG 1.60 反应谱

在我国已建核电厂的设计中,大多采用美国 NRC 的 RG 1.60 反应谱。该设计反应谱是基于核电厂建筑物的持力层一般为较硬场地这一特点,对从强震记录得到的一系列单个反应谱进行分析、评价及组合统计后得出的总体反应谱,是宽带反应谱。这类宽带反应谱一般具有如下特点:1) 不同震级和距离的地震控制不同的频率范围,小震对高频范围的贡献比对低频范围的贡献多;2) 不会有某次地震的频率范围与设计地震反应谱的频率范围完全相同,因此,在使用宽带反应谱确定控制运动时具有一定的保守性;3) 某一次地震可能在某个频率超过设计地震反应谱,超过的可能性取决于设计反应谱的“目标保证率(NEP)”。RG 1.60 反应谱的 NEP 为 84%^[1],即有 84% 的地震动不会超越该反应谱。

1.2 RG 1.60 反应谱的应用

RG 1.60 反应谱于 1973 年提出,在核电厂的设计中已得到广泛应用。

RG 1.60 反应谱也不是适于所有核电厂厂址,其应用受到一定限制。由于在生成该反应谱时,考虑的厂址持力层为基岩或硬土,因此,当持力层为较软弱土层时,不能直接应用,需根据具体情况进行修正。另外,RG 1.60 反应谱不能用于与预期地震震源接近的厂址及对输入运动的谱型有重大影响的地貌特征的厂址^[2]。

应说明的是,RG 1.60 导则中给出了水平和竖直方向两条反应谱。通过对比可发现:在频率低于 0.25 Hz 的区域,竖向谱值为水平谱值的 2/3;在高于 3.5 Hz 的频段,竖向谱值与水平谱相同;在 0.25~3.5 Hz,竖向谱值与水平谱值之比为 2/3~1 时插入;对于 33 Hz 以上的竖向谱值,与最大地面加速度一致。当对某一厂址的竖向反应谱进行标定时,应以厂址水平加速度峰值乘以竖向谱放大系数对竖向谱进行标定,而不是以竖向加速度峰值进行标定。

这一点在实际应用中应予以关注。

在我国已建核电厂对 RG 1.60 反应谱的应用中,均未采用 RG 1.60 导则中提供的竖向反应谱,而是竖向谱选用与水平谱相同的曲线。对某一厂址进行标定时,竖向加速度峰值取水平峰值的 2/3 对水平谱进行标定,得到竖向反应谱。这种做法在厂址附近没有较大发震构造、厂址特定反应谱可被 RG 1.60 反应谱包络的情况下可接受,但在部分频段牺牲了一些保守性(图 1)。这种应用与 RG 1.60 推荐的方法存在差异。

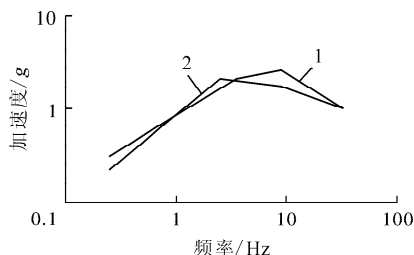


图 1 RG 1.60 导则中 2/3 水平谱与
竖直谱的对比

Fig. 1 2/3 horizontal spectrum compared
with vertical spectrum of RG 1.60

1——竖向谱;2——2/3 水平谱

2 IAEA 推荐的用于其他核设施设计的 地震反应谱

2.1 其他核设施的特点

除核电厂外,其他核设施具有以下特点:1) 与核电厂相比,其项目投资相对有限,用于厂址勘察的费用并不充裕,因此,厂址调查的范围不可能像核电厂那么大;2) 与常规设施相比,其他核设施中包含有放射性物质,对公众和环境具有潜在的威胁;3) 其他核设施种类较多,涉及的范围较广,各种设施的安全特性相差较大。

由于其他核设施具有上述特点,在 IAEA 2003 年颁布的技术文件 TECDOC 1347 “Consideration of external events in the design of nuclear facilities other than nuclear power plants, with emphasis on earthquakes”^[3]中,推荐采用保守与简化的方法进行其他核设施的抗震设计,从而使设计达到经济性与安全性的统一。

2.2 其他核设施的抗震设计方法

考虑到其他核设施种类的多样性,对其抗震设计设防标准进行统一的规定存在一定的困难。因此,在该技术文件中,采用对设施分级、物项分类的方法确定其抗震设计设防要求。具体分级设计过程包括:1) 依据设施的放射性储量进行设施风险分级;2) 根据设施中具体物项在安全上的重要性,对物项进行“抗外部事件分类”;3) 依据以上划分的设施风险等级和物项的抗外部事件分类确定物项的设计等级,最终对不同的设计等级采用不同的抗震设防标准。表1为设施分级、物项分类与设计分级的关系。

表1 设施分级、物项分类与设计分级的关系^[3]

Table 1 Relationship among facility classes, item categories and design classes^[3]

抗外部 事件分类	设施风险设计级别选择			
	高(1级)	中(2级)	低(3级)	常规(4级)
1类	设计1级	设计2级	设计3级	设计4级
2类	设计2级	设计3级	设计3级	设计4级
3类	设计4级	设计4级	设计4级	设计4级

物项的设计等级为4级:设计1级的物项按核电厂的设计标准进行设计;设计4级的物项按民用抗震规范进行设计;设计2、3级物项按技术文件提出的设计要求采用不同的延性系数进行设计。

核设施中物项的设计等级确定后,其设计中考虑的地震水平即可确定。1、2、3、4级设计等级考虑的地震事件平均超越概率分别为 1×10^{-4} 、 5×10^{-4} 、 1×10^{-3} 、 2×10^{-3} 。

2.3 其他核设施设计反应谱的提出

设计等级为1级的核设施,其设计基准地震依据核电厂选址中的相应要求予以确定(表2)。TECDOC 1347中推荐了用于2级及2级以下核设施的设计基准评价要求。对于设计反应谱的确定提出了3种可供选择的方法:1) 基于仪器资料的厂址特定设计反应谱;2) 基于历史地震活动的设计反应谱;3) 缺乏上述两种数据时,技术文件推荐了1组对应于不同烈度和地基情况的标准设计反应谱。下面着重研究此标准反应谱的特性,并与相应的RG 1.60反应谱进行对比。

其他核设施标准设计反应谱引用的是日本“高压石油天然气生产设施抗震设计规范”中的设计反应谱,该规范由东京大学地震研究中心于1981年编制。据负责编制工作的专家介绍,在该规范编制的同时,地震研究中心也参与了日本“建筑物设计规范”的审查。“建筑物设计规范”中的设计反应谱是基于日本建设省咨询委员会的研究成果提出的,主要用于除高层建筑以外的普通建筑物。东京大学地震研究中心将该反应谱引用于“高压石油气生产设施抗震设计规范”并作了局部调整。在1991年出版的JEAG 4601“核电厂抗震设计技术指南”中,对于核电厂B、C级设施的设计,引用了“高压石油气生产设施抗震设计规范”的部分内容。即该设计反应谱在日本也用于核电厂B、C级设施的抗震设计。

2.4 其他核设施设计反应谱的形状

技术文件推荐的设计反应谱是针对3种地震烈度水平和3种场地土情况提出的水平地震反应谱。烈度水平1对应于小于8度的情况;烈度水平2对应于大于等于8度小于9度的情况;烈度水平3对应于大于等于9度的情况(表2)。场地土情况依据剪切波速划分,具体情况列于表3。反应谱基本形状适用于5%阻尼比,对于其他阻尼比,技术文件给出了调整系数。图2为技术文件中给出的烈度水平1、2的设计反应谱和烈度水平3的设计反应谱。

表2 确定最小自由场设计加速度^[3]

Table 2 Assigned minimum free-field design accelerations^[3]

最大历史地震烈度 I_{\max} 的范围	抗震设计 烈度水平指数	选定的硬持力层 设计加速度 a_b/g
$I_{\max} < \text{VIII}$	1	0.1
$\text{VIII} \leq I_{\max} < \text{IX}$	2	0.2
$\text{IX} \leq I_{\max}$	3	0.4

从图2可看出,在相同的烈度水平下,随着场地土剪切波速的增加,反应谱的峰值有所提高,峰值所在频段也随场地土剪切波速的增加向高频方向移动。

2.5 不同烈度水平设计反应谱的比较

对于1类场地土,随地震烈度水平的增加,低频部分的加速度值有所增加,加速度峰值的

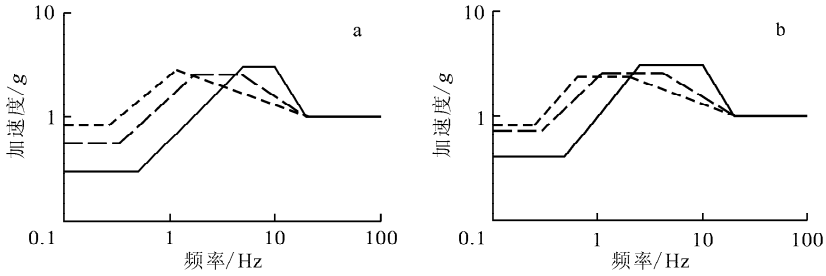


图2 TECDOC 1347 烈度水平 1,2(a)和 3(b)的设计反应谱

Fig.2 Design response spectra for seismic design intensity level 1, 2 (a) and 3 (b) in TECDOC 1347
实线——1类场地土;长虚线——2类场地土;虚线——3类场地土

表3 场地土类型^[3]

Table 3 Soil characterization^[3]

特征	场地土类型		
	1	2	3
描述	硬持力层 (厚度>25 m)	除 1 和 3 类外的 或厚度较小的 其他场地土	厚度超过 25 m 的 冲积层
剪切波速 v_s (m/s)	>1 100	300~1 100	150~300

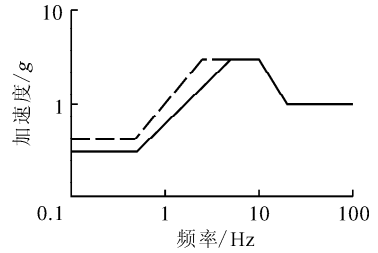


图3 1类场地土不同烈度水平设计反应谱的比较

Fig.3 Design response spectra for soil category 1 of different intensity levels
实线——烈度水平 1,2;虚线——烈度水平 3

频率范围向低频方向扩展(图 3)。

2、3类场地土不同烈度水平设计反应谱的比较示于图 4。

从图 4a 可看出,对于 2 类场地土,随地震烈度水平的增加,低频部分的加速度值有所增加,加速度峰值的频率范围向低频方向明显移动。

从图 4b 可看出,对于 3 类场地土,随地震烈度水平的增加,低频部分的局部加速度值有所增加,加速度峰值的频率范围略向低频方向扩展。

2.6 TECDOC 1347 设计反应谱与 RG 1.60 反应谱的比较

由于 RG 1.60 反应谱是基于坚硬场地提出的,现将 TECDOC 1347 用于 1 类场地土的设计反应谱与 5% 阻尼比的 RG 1.60 反应谱进行比较(图 5)。

从图 5 可看出, RG 1.60 反应谱在大部分频段可包络 TECDOC 1347 设计反应谱,只在 10 Hz 拐点附近的频段 TECDOC 1347 设计反

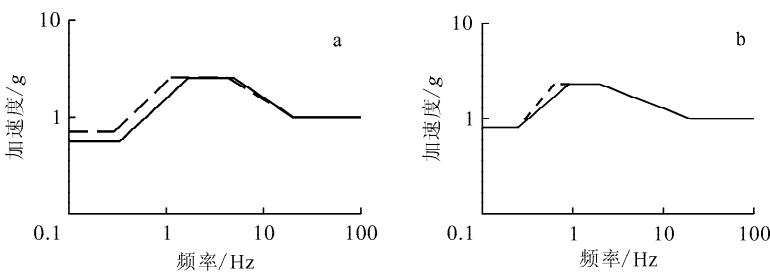


图4 2(a)和 3(b)类场地土不同烈度水平设计反应谱的比较

Fig.4 Design response spectra for soil category 2 (a), 3 (b) of different intensity levels
实线——烈度水平 1,2;虚线——烈度水平 3

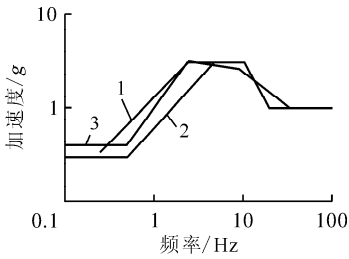


图5 RG 1.60 反应谱与 TECDOC 1347 反应谱的比较

Fig. 5 RG 1.60 design spectrum compared with spectra in TECDOC 1347

- 1——RG 1.6 反应谱；
2——1类场地土，烈度水平 1、2 设计反应谱；
3——1类场地土，烈度水平 3 设计反应谱

应谱有局部超出。在设计地震加速度水平较小时(烈度水平 1、2, 加速度小于等于 $0.2g$), TECDOC 1347 设计反应谱峰值频段较窄;在设计地震加速度水平较高时(烈度水平 3, 加速度等于 $0.4g$), TECDOC 1347 设计反应谱与 RG 1.60 反应谱比较接近。

3 我国《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001^[4]推荐的设计反应谱

在其他核设施的抗震设计中,经常采用对于安全上重要的结构采用民用抗震设计规范的设计防烈度提高 1 度设防的方法进行设计。这种方法对于设计院来说应用起来比较方便,下面通过分析比较说明这种方法的保守性。

3.1 《建筑抗震设计规范》设计基本地震

《建筑抗震设计规范》采用“三水准”设防:小震不坏、中震可修、大震不倒。其中,小震是指 50 a 超越概率为 63% 的多遇地震(重现周期 50 a);中震为 50 a 超越概率为 63% 的基本地震(重现周期 475 a);大震为 50 a 超越概率为 2%~3% 的罕遇地震(重现周期 1 642~2 475 a)。用烈度来衡量,多遇地震即众值烈度比基本烈度低 1.55 度,而大震烈度比基本烈度高 1 度^[4]。

在设计中,通过以多遇地震输入下结构保持弹性性状以实现“小震不坏”;通过关键部位的局部加强和构造措施实现“中震可修”;对于重要建筑物,通过进行罕遇地震下薄弱层验算保证“大震不倒”,进而实现三水准设防目标。

由此可见,常规建筑物抗震分析所输入的

地震动与核电厂抗震 I 类构筑物的输入地震动差异很大:常规建筑物弹性阶段分析中输入的是 50 a 一遇的地震动;倒塌验算中输入的是约 2 000 a 一遇的地震动,而核设施 1 级构筑物准弹性阶段分析中输入的是 10 000 a 一遇的地震动;2 级核设施构筑物分析中输入的是 2 000 a 一遇的地震动,允许结构进入部分非线性;3 级核设施构筑物抗倒塌分析中输入的是 1 000 a 一遇的地震动;4 级核设施构筑物分析中输入的是约 500 a 一遇的地震动,可按常规建筑物方法考虑。表 4 列出各种建筑物的设计要求。

表 4 常规建筑物与各级核设施构筑物的抗震分析要求对照

Table 4 Comparison between design requirements of conventional buildings and nuclear facility buildings

建筑物类别	输入地震动水平	验收准则	实现手段
常规建筑物	50 a 一遇	弹性	计算验证
	约 500 a 一遇	局部非线性	构造措施
	约 2 000 a 一遇	不倒塌	计算验证
核设施 1 级构筑物	10 000 a 一遇	准弹性	计算验证
核设施 2 级构筑物	2 000 a 一遇	局部非线性	计算验证
核设施 3 级构筑物	1 000 a 一遇	不倒塌	计算验证
核设施 4 级构筑物	500 a 一遇	同常规	同常规
		建筑物要求	建筑物要求

应说明的是,《建筑抗震设计规范》中的提高 1 度设计对于甲类建筑物和乙类建筑物的要求是不同的:甲类建筑物考虑的地震作用高于本地区基本烈度,取值按批准的地震安全性评价结果确定,而抗震措施提高 1 度;乙类建筑物考虑的地震作用符合本地区基本烈度,抗震措施提高 1 度。因此,可理解为:甲类建筑物为完全的提高 1 度;乙类建筑物只是构造上提高 1 度。从上述分析可进一步确定:地震作用提高 1 度进行设计可保证建筑物在不小于 500 a 一遇的地震作用下处于弹性状态;在 2 000 a 一遇的地震作用下局部进入非线性。

3.2 《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001 设计反应谱^[4]

《建筑抗震设计规范》的设计地震动是用地震影响系数 α 曲线给出的,是以 g 为单位的反应谱。规范给出的不同阻尼比 ζ 的 α 谱曲线示于图 6。

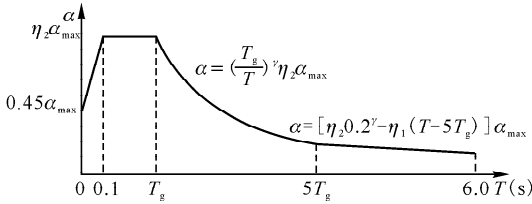


图 6 地震影响系数曲线

Fig. 6 Curve of seismic influence coefficient

η_1 ——直线下降段的下降斜率调整系数;
 γ ——衰减指数; η_2 ——阻尼调整系数; T ——结构自振周期

影响 α 谱曲线的两个重要参数是地震影响系数最大值 α_{max} 和特征周期 T_g 。其中,地震影响系数最大值 α_{max} 依据设防烈度确定;特征周期 T_g 依据场地条件和地震分组情况确定,反映了场地条件和近、中、远地震的影响,也在一定程度上反映了震级的影响。

3.3 《建筑抗震设计规范》^[4] 设计反应谱与 TECDOC 1347^[3] 设计反应谱的比较

将《建筑抗震设计规范》设计反应谱与 TECDOC 1347 设计反应谱进行比较,必须找出同等条件下的反应谱进行比较。考虑到影响《建筑抗震设计规范》设计反应谱的因素主要是地震分组和场地类型,因此,从这两个方面确定用于比较的反应谱。

首先,对于地震分组:考虑到 TECDOC 1347 技术文件中考虑的地震为将厂址周围一定范围的最大观测地震假定放到厂址上,所以,《建筑抗震设计规范》^[4] 中的地震分组相应的取第 1 组;对于场地土的划分《建筑抗震设计规范》^[4] 与 TECDOC 1347 技术文件^[3] 中的场地土划分并不完全对应:《建筑抗震设计规范》中的 1 类场地土为剪切波速大于 500 m/s 的坚硬土或基岩;TECDOC 1347 技术文件中的 1 类场地土为剪切波速大于 1 100 m/s 的硬持力层,两者对于大于 1 100 m/s 的坚硬场地具有部分可比性,因此,选用这两种条件对应的反应谱进行比较(图 7)。

由图 7 可看出,除局部高频部分有局部超出外,TECDOC 1347 反应谱可包络《建筑抗震设计规范》设计反应谱,且反应放大系数最大值比《建筑抗震设计规范》大于 40%。

对于国内设计院通常采用的按《建筑抗震设计规范》提高 1 度进行分析计算的做法,考虑

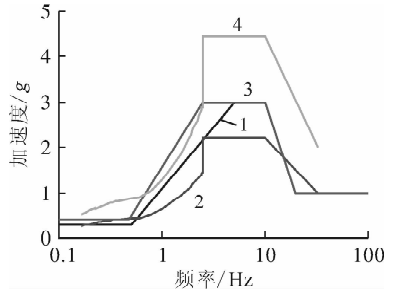


图 7 1 类场地土 TECDOC 1347 反应谱与 GB 50011 反应谱

Fig. 7 Design spectra for soil type 1 of TECDOC 1347 compared with design spectra of GB 50011

- 1——TECDOC 1347 烈度水平 1,2,1 类;
- 2——GB 50011, 1 类场地土, 第 1 组;
- 3——TECDOC 1347 烈度水平 3, 1 类;
- 4——GB 50011 提高 1 度

到烈度提高 1 度,加速度峰值提高 1 倍,将加速度峰值提高 1 度后的《建筑抗震设计规范》反应谱与 TECDOC 1347 反应谱进行比较可发现(图 8),对于 1 类场地土、近震情况,提高 1 度后,《建筑抗震设计规范》反应谱可完全包络烈度小于 9 度时的 TECDOC 1347 反应谱;对于烈度大于等于 9 度的情况,从图形上看,提高 1 度后,《建筑抗震设计规范》反应谱在大部分频段包络 TECDOC 1347 反应谱,超出部分超出量很有限。但由于我国《建筑抗震设计规范》只适用于 6、7、8 和 9 度地区,对于设防烈度大于 9 度的情况不在其适用范围,所以,也不需要对此种情况进行进一步研究。

由于《建筑抗震设计规范》2、3 类场地的划分与 TECDOC 1347 中场地划分不能完全对应,所以,这里分别将《建筑抗震设计规范》的 2、3 类场地反应谱与 TECDOC 1347 技术文件的 2 类及 3 类场地反应谱进行对比(图 9)。

从图 9 可看出,TECDOC 1347 技术文件的 2 类场地反应谱放大系数最大值高于《建筑抗震设计规范》2 类和 3 类场地反应谱的最大值;峰值频率向低频方向移动;大部分频段可包络《建筑抗震设计规范》反应谱。《建筑抗震设计规范》3 类场地、近震反应谱提高 1 度后可完全包络 TECDOC 1347 技术文件 9 度以下 2 类场地反应谱;大部分频段可包络 TECDOC 1347 技术文件 9 度及 9 度以上 2 类场地反应谱。由于《建筑抗

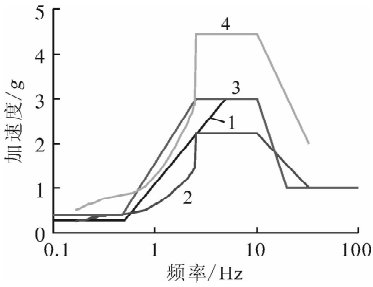


图8 1类场地土 TECDOC 1347 反应谱与 GB 50011 反应谱

Fig. 8 Design spectra of soil category 1 of TECDOC 1347 compared with design spectra of GB 50011

- 1——TECDOC 1347, 烈度水平 1, 1 类;
2——GB 50011, 1 类场地土, 第 1 组;
3——TECDOC 1347, 烈度水平 2, 1 类;
4——GB 50011, 提高 1 度

震设计规范》的适用范围限制,对于 9 度以上的情况可不作进一步研究。

TECDOC 1347 技术文件的 3 类场地反应谱放大系数最大值与《建筑抗震设计规范》2 类和 3 类场地反应谱的最大值相差不大,但峰值频率向低频方向移动很多,峰值频段与《建筑抗震设计规范》反应谱完全错开。《建筑抗震设计规范》3 类场地、近震反应谱提高 1 度后在 1 Hz 以下频段不能包络 TECDOC 1347 技术文件 3 类场地反应谱;反应放大系数是 TECDOC 1347 技术文件 3 类场地反应谱放大系数的 2 倍。

总之,当场地条件满足 TECDOC 1347 技术文件 1 类场地、厂址地震在 9 度以下的情况,采用《建筑抗震设计规范》1 类场地、近震地震

作用提高 1 度对核设施进行抗震设计,其结果的保守性可满足 TECDOC 1347 技术文件的要求;当场地条件为 TECDOC 1347 技术文件 2 类场地、厂址地震在 9 度以下的情况下,采用《建筑抗震设计规范》3 类场地、近震地震作用提高 1 度对核设施进行抗震设计,其结果的保守性可满足 TECDOC 1347 技术文件的要求。当场地条件为 TECDOC 1347 技术文件 3 类场地的情况下,不推荐使用《建筑抗震设计规范》地震作用提高 1 度的做法对核设施进行抗震设计。

3.4 《建筑抗震设计规范》^[4] 设计反应谱与 RG 1.60 反应谱^[1] 的比较

考虑到在核电厂设计中经常遇到与抗震 I 类构筑物相邻的非 I 类厂房设计时,设计者经常采用将《建筑抗震设计规范》地震作用提高 1 度的做法进行非 1 类厂房抗倒塌的抗震验算,现将《建筑抗震设计规范》设计反应谱与 RG 1.60 反应谱进行比较,说明这种做法的保守性。

为使两种反应谱具有对应性,将《建筑抗震设计规范》的 1 类场地、近震设计反应谱与 RG 1.60 反应谱进行比较(图 10)。通过比较可看出,《建筑抗震设计规范》1 类场地、近震反应谱提高 1 度后,虽然反应放大系数峰值比 RG 1.60 大很多,但在 2.4 Hz 以下频段不能包络 RG 1.60 反应谱。而《建筑抗震设计规范》2 类场地、近震反应谱提高 1 度后可完全包络 RG 1.60 反应谱。因此,建议的简化验算方法是,采用《建筑抗震设计规范》2 类场地、近震反应谱提高 1 度的地震作用进行抗震验算,以保

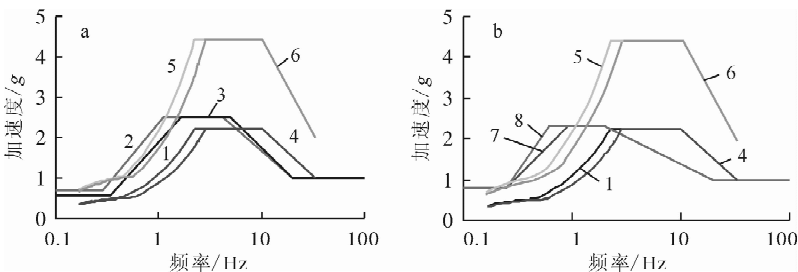


图9 GB 50011 反应谱 2、3 类场地,第 1 组与 TECDOC 1347 反应谱 2(a)、3(b)类场地

Fig. 9 Design spectra of soil category 2 (a), 3 (b) of TECDOC 1347 compared with design spectra of GB 50011

- 1——GB 50011, 3 类场地, 第 1 组; 2——TECDOC 1347, 烈度水平 3, 2 类场地; 3——TECDOC 1347, 烈度水平 1, 2, 2 类场地;
4——GB 50011, 2 类场地, 第 1 组; 5——GB 50011, 3 类场地, 提高 1 度; 6——GB 50011, 2 类场地, 提高 1 度;
7——TECDOC 1347, 烈度水平 1, 2, 3 类场地; 8——TECDOC 1347, 烈度水平 3, 2 类场地, 第 1 组

证输入地震作用具有足够的保守性。

4 结论

1) 在应用 RG 1.60 竖向反应谱作为竖向设计反应谱时,当对竖向反应谱进行标定时,应以厂址水平加速度峰值乘以竖向谱放大系数对其进行标定,而不是以竖向加速度峰值进行标定,这一点在实际应用中应予以关注。

2) RG 1.60 反应谱在大部分频段可包络 TECDOC 1347 的 1 类设计反应谱,只在 10 Hz 拐点附近的频段 TECDOC 1347 设计反应谱有局部超出。在设计地震加速度水平较小(烈度水平 1、2,加速度小于等于 $0.2g$)时,TECDOC 1347 设计反应谱峰值频段较窄;在设计地震加速度水平较高(烈度水平 3,加速度等于 $0.4g$)时,TECDOC 1347 设计反应谱与 RG 1.60 反应谱比较接近。

3) 当场地条件满足 TECDOC 1347 技术文件 1 类场地、厂址地震在 9 度以下的情况,采用《建筑抗震设计规范》1 类场地、近震地震作用提高 1 度对核设施进行抗震设计,其结果的保守性可满足 TECDOC 1347 技术文件的要求;当场地条件为 TECDOC 1347 技术文件 2 类场地、厂址地震在 9 度以下的情况,采用《建筑抗震设计规范》3 类场地、近震地震作用提高 1 度对核设施进行抗震设计,其结果的保守性

可满足 TECDOC 1347 技术文件的要求;当场地条件为 TECDOC 1347 技术文件 3 类场地,不推荐使用《建筑抗震设计规范》地震作用提高 1 度的做法对核设施进行抗震设计。

4) 当采用《建筑抗震设计规范》的方法对那些与核电厂重要物项相邻的构筑物进行抗震分析时,可选用加速度峰值与 SSE 相当的烈度、《建筑抗震设计规范》2 类场地、近震反应谱提高 1 度的地震作用进行抗震验算,以保证输入地震作用具有足够的保守性。

参考文献:

- [1] JAMES J J, ALEJANDORO P A. Soil-structure interaction (SSI): Observations, data, and correlative analysis[C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993: 219-258.
- [2] US NRC. Regulatory guide 1.60: Design response spectra for seismic design of nuclear power plant, Revision 1[S]. US: Atomic Energy Commission, 1973.
- [3] IAEA. Consideration of external events in the design of nuclear facilities other than nuclear power plants, with emphasis on earthquakes, TECDOC 1347[S]. Vienna: IAEA, 2003.
- [4] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.