

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.001

# 美国核电厂抗震主系统分析要求的近期变化 ——SRP 3.7.2 1989 版、2007 版及 2013 版主要对比

夏祖讽

(上海核工程研究设计院, 上海 200233)

**摘要:** 近期美国核管会 NRC 颁布的标准审查大纲《Standard Review Plan》Rev. 3(2007)版已通过我国核安全审评中心翻译出版, 表明我国核安全局将按最严的国际标准执行核工程的安全审查。通过对比美国核管会标准审查大纲 SRP 3.7.2 节 1989 版、2007 版以及最新 2013 版的抗震主系统主要内容, 结合以往核电工程抗震分析的实践经验, 按其所列验收准则各条分别作出专业性的讲解与点评。研究表明: SRP 2013 版在概念上更清晰, 并在可操作性上更加完善, 研究成果对理解核电厂抗震主系统分析要求具有很好的参考价值。

**关键词:** 核电厂; 抗震主系统; 抗震分析方法; 土体-结构相互作用; 审计导则

中图分类号: TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0001-07

## Recent Changes of Seismic System Analysis SRP 3.7.2 in 1989, 2007 and 2013 Versions for NPPs in U. S. A.

XIA Zufeng

(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Recently, the third revision of Standard Review Plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants (SRP Rev. 3) issued by U. S. A NRC in 2007 has been translated and published by Beijing Review Center of Nuclear Safety, which states clearly National Nuclear Security Administration will carry out the most rigorous international standards in safety review of nuclear projects. In this investigation we studied the different versions of Seismic System Analysis SRP 3.7.2 in 1989, 2007 and 2013, combined with the past practical experiences of nuclear seismic analysis, then concluded the technical explanation and reviews according to the acceptance criteria of each standard clause. The results shown that the 2013 version of SRP was clearer in concept and more perfect in operation. This work provides good guidance for seismic system analysis of NPPs.

**Key words:** NPP; seismic system; seismic analysis method; SSI; audit guidelines

近期, 随着我国核安全审评中心出面翻译出版了美国核管会 NRC 的标准审查大纲《Standard Review Plan》(简称 SRP) Rev. 3 2007 版<sup>[1]</sup>, 我国的核安全当局将按最严的国际标准执行核工程的安全审查。但迄今 SRP 已经推出更新版本 Rev. 4 2013—2014 版<sup>[2]</sup>, 不过站在核工程土建专业角度看, SRP

的 Rev. 3 2007 版与其相应老版 SRP Rev. 2 1989 版<sup>[3]</sup>相比, 体现了针对现代(三代)核电标准与二代核电标准审查的重大改变; 而其最新版 SRP Rev. 4 2013—2014 版与较新的 SRP Rev. 3 2007 版相比, 则只是对三代核电标准审查中在某些方面作出更明确的要求, 故最近这两版的更多差别只是在细节操作上的补充与完善。鉴于我国的国情, 全面推出 SRP Rev. 3 2007 版并作认真的核安全审查已实属不易, 笔者估计核安全局先按 SRP Rev. 3 2007 版执行或许会持续一段时期。因为只有经过审查方和业主方(设计方)的审评实践活动, 才会找到适合我国

收稿日期: 2016-10-20

作者简介: 夏祖讽(1941), 男, 浙江镇海人, 勘察设计大师, 研究员级高级工程师, 主要从事核工业土建结构设计和研究工作(email) xiazf@snerdi.com.cn。

国情的最佳审查标准。

笔者近期重读了 SRP 3.7.2 节 Rev. 3 2007 版<sup>[1]</sup>及 Rev. 4 2013 版<sup>[2]</sup>，研究了该节核电厂抗震主系统分析要求的近期变化，并作了专业性的解读和点评，以便核工程设计人员更好地适应下阶段核工程设计分析的改善并参与核安全的审评活动。本文涉及的所谓核电厂抗震主系统 (Seismic System) 根据 SRP 中的命名，指的是在核电厂中和基础相连的抗震 I 类构筑物及其支承介质组成的结构主系统。而在核电设施中其他不称作抗震主系统的 I 类构筑物、系统和部件均应看作为抗震子系统 (Seismic Subsystem)，对它们的抗震分析要求的审查则规定在 SRP 3.7.3 节中。

为了正确理解按 SRP Rev. 3 2007 版要求在设计上的可操作性，笔者主要是利用其最新版 SRP Rev. 4 2013 版倒过来解读 2007 版，这样做或许对 2007 版的理解会更清楚些。也就是说作为核电的设计方，如果我们对核电厂抗震主系统分析中能直接按 SRP Rev. 4 2013 版 3.7.2 节要求去执行设计分析操作的话，肯定能更全面满足 SRP Rev. 3 (2007) 版 3.7.2 节的所有审查要求，这样一来核电设计院在应对今后的核安全审评活动时也会更主动。下面将按 SRP 3.7.2 中各相应 SRP 验收准则的条目分别作对比评述。

## 1 2007 版抗震主系统分析的验收准则要求的可操作性及 2013 版的完善之处

### 1.1 验收准则 1“抗震分析方法”

站在核电工程设计所采用的主系统抗震分析方法的理论概念上，对三代核电及二代核电其实并没有本质上的改变。因此针对三代核电的 SRP Rev. 3 2007 版 3.7.2 节，相对二代核电的 1989 版的文字内容也几乎看不出有什么变化，均分成动态分析法及等效静荷载法两种。只是要清楚在动态反应的模态组合中，由于在 SRP Rev. 3 2007 版 3.7.2 节中其所引的导则 RG1.92<sup>[4]</sup>已变成相应的 RG1.92 Rev. 2 2006 版<sup>[5]</sup>，它在单向模态组合方法中已出现较大的改变，其主要目的是消除以往老版组合方法中的过份保守部分。该新版组合导则 RG1.92 Rev. 2 在单向模态组合中是按反应谱频段的相位特征分成三类分别处理：即根据低频段是以不同相位反应为主，中频段是以从不同相位反应至同相位反应的过

渡，高频段是以同相位的拟静态反应的这三种情况分别采用更合理的分段组合后再作综合组合处理。RG1.92 Rev. 2 对核电结构的高频反应组合给出简单实用的总质量乘 ZPA 的静态法，确保消除了以往对残留刚性反应丢失质量的疑虑。上海核工程研究设计院已在 2008 年专门对 RG1.92 Rev. 2<sup>[5]</sup>作过详细的培训，今后实用中宜再次参阅 RG1.92 Rev. 2 原文忠实执行之。

SRP Rev. 4 2013 版 3.7.2 节<sup>[2]</sup>在其验收准则 1 这节中由于仅涉及抗震方法的理论概念，故章节的文字内容几乎原封不动地照抄 2007 版的要求，因此对 2013 版的验收准则 1 不需再作解读。

### 1.2 验收准则 2“自振频率和反应”

SRP 3.7.2 该节中的验收准则 2 要求需提供一套按传统格式的资料清单，故从更老版 1989 版到 2007 版直至最新的 2013 版在验收准则 2 中的文字内容均没变，设计的可操作性很简单。

### 1.3 验收准则 3“用于分析模型的步骤”

SRP 3.7.2 节中的验收准则 3，其中 A 款“主系统和子系统的命名”及 B 款“子系统的去耦准则”，由于内容十分成熟，自 SRP 1989 版(甚至前版)、2007 版至 2013 版在文字上均无改变无需再解读。

只是其中 C 款“结构建模”中的 (iii) 段，自 SRP 1989 版、2007 版至 2013 版均比初版在文字上更强调要考虑个别楼板和墙体在地震作用下会产生局部振动。为确保结构内在反应谱(楼面反应谱)包含额外的放大，在动态反应模型中要充分考虑这些局部振动的影响。而且 C 款中 (iii) 段的这些文字强调处，在上海核工程研究设计院引进的 AP1000 设计中也已经完全都做到了。

在验收准则 3 中，自 SRP 2013 版的 C 款中比以往版本特别增设 (iv) 段内容如下：

1) 对核岛常规采用的钢筋砼结构，强调开裂能导致结构刚度的减少，该段特别提到如按 ASCE 43-05 标准 2005 版<sup>[6]</sup>所规定刚度折减系数的作法是能被 NRC 所接受的，例如该标准表 3-1 中，列出开裂的砼墙体的抗弯刚度和抗剪刚度的折减系数均可取 0.5。

2) 指出在两步法分析中，不论在第一步 SSI 分析还是第二步的详细分析中均应同时考虑砼的开裂对刚度的影响。对砼结构开裂的更详细可接受的方法则会在 SRP Rev. 4 2013 版的 3.8.1、3.8.3 ~

3.8.5 节中提到,但实际上却仍未见到。

3)明确针对标准设计而按持证设计反应谱 CS-DRS 的设计中,可选用 RG1.61 Rev.1(2007)<sup>[7]</sup>表1的 SSE 阻尼值来表征砼结构开裂特征,但 SRP 要求 CSDRS 对考虑校核某单一厂址条件(如硬岩高频厂址)设计中,在产生楼面谱 ISRS 时,砼结构应考虑不开裂的特征,从而此时在产生楼面谱分析中需引用 RG1.61 Rev.1 2007 版表2中针对 OBE 场合的阻尼值。

SRP Rev.4 2013 版 3.7.2 节 C 款(iv)段的最后部分文字指出,针对已存厂址结构或对厂址特定设计校核中,NRC 强调核电厂钢筋砼构件刚度模型应按最佳估算值 BE 处理,其可接受的实用操作步骤为:

1)初始的整体数学模型应该先考虑砼不开裂,阻尼采用4%。

2)核算具体构件应力时如发现有广泛的开裂,则该构件的刚度应予折减。

3)在数学模型中,对砼开裂区采用7%阻尼,未开裂区仍用4%阻尼作重新分析。

4)如在原先未开裂区又有新的开裂,那未按上述修改后再作分析。

5)如果证明任何已开裂构件不再继续开裂,那么也不用对已开裂构件回复到不开裂的状态中去。

注意 SRP Rev.4 2013 版 3.7.2 节在验收准则3的 C 款增设的(iv)段中所明确提到的上述可接受的砼构件建模作法,对砼的开裂只是刚度打折并伴随阻尼比的提高,但仍可按通用的线弹性分析程序执行操作,因此才需作反复的迭代分析,只不过这种分析操作还是很方便的。看来 NRC 在 SRP 2013 版中已比其 2007 版更进一步理解了 ASCE 43-05 标准中针对砼结构工程分析的操作手段。

验收准则3中的 D 款“在动态模型中的楼面荷载、活荷载和主要设备荷载”这一段,在 SRP 2007 版及 SRP 2013 版中均对模型的质量取值比过去版本作出更为详细的规定,即除结构本身自重外,还包括:

1)240 kg/m<sup>2</sup>的楼层质量以体现电厂中的一些小设备、管道及其他杂项设施的自重。

2)相当于楼层设计荷载的25%和屋顶设计雪载的75%(视情况而定)。

3)主要设备的质量可均布在楼面或采用集中质

量方式来考虑。

上海核工程研究设计院在以往二代核电工程中往往忽略其中的第(1)项,但对第(2)项活载却往往取用50%,因此在实际操作中可能会使结果会存在较小差别。

至于在验收准则3中 E 款“结构动态建模的特别考虑因素”,它仅涉及简单模型及详细模型的转化过程中,这与上海核工程研究设计院的设计操作无关,且在 2007 版及 2013 版中的文字表述均未改变。

#### 1.4 验收准则4“土体-结构的相互作用 SSI”

本节一直是 SRP 3.7.2 中自 1989 版至 2007 版直到 2013 版中文字内容上改变最多的章节。验收准则4的文字内容表述显得较为繁杂。为此本文打算按第一部分前言、第二部分正文、第三部分具体指南作为划分的格式,先后分段详述 SRP 新版 2013 与 SRP 2007 版之间的变化。

##### 1.4.1 SSI 验收准则前言

验收准则4的前言的前半部分,SRP 2007 版文字表达中首先提到 SSI 分析方法需要满足的条件为:

1)A 款,对结构和土体作正确的模拟,以保证能体现地面运动的空间变化、辐射阻尼和土体分层三维效应及场地介质反应的非线性效应。

2)B 款,SSI 输入应与 SRP 3.7.1 节抗震设计参数<sup>[8-9]</sup>中所定义的设计反应谱规定相一致。

本小节前言中在相应 SRP 2013 版中对 SSI 分析要满足的条件则表述变为:

1)A 款,即为原 SRP 2007 版中的 A 款+B 款。

2)B 款,新增,主要强调 SSI 输入位置明确为位于基础面标高处的露出面运动 FIRS。

3)C 款,新增,主要强调要进行足够的土柱参数研究。

本小节前言中的后半部分的 SSI 执行内容所提到的 A、B、C(前半部)三款常规文字内容,其实 SRP 2007 版与 SRP 2013 版均未差别,但在 SRP 2013 版中对涉及考虑参数变化的 C 款之后半部分却增设了不少补充操作内容,归纳起来大致包括以下4点:

1)新增 SSI 分析中要评定接地比(ground contact ratio)在分析中的有效性。

2)新增要考虑非对称结构的基础脱离抬升

(foundation uplift)的相应影响,此处考虑不同相位影响主要是通过采用加及减一倍震级的输入时程作出比较。

3)新增对接地比的 NRC 可接受标准为:凡大于 80% 的,以线性 SSI 分析结果即能被接受;对小于 80% 的应作非线性 SSI 分析才能被接受。

4)新增在 SSI 分析中,凡基础脱离抬升造成的影响明显的场合(指能增加反应大于 10% 者),应把它计入到抗震设计分析中去。

显然 SRP 2013 版中后半部分的 C 款中新增的上述补充说明,能使其 SSI 分析设计的可操作得到更好的改善。

#### 1.4.2 SSI 验收准则的正文

本小节对 SSI 验收准则的正文部分主要概括为下列三款内容:

- 1) A 款为“结构建模”。
- 2) B 款为“支承土体介质建模”。
- 3) C 款为“输入地震动”。

对比最新版 SRP 2013 版与 SRP 2007 版,上述三款正文中,SRP 2013 版在文字内容上均已作了较大的改变如下:

1)在 A 款中,最新版主要是新增应考虑砼结构的开裂影响。

2)在 B 款中,最新版主要是新增对土体单元网络尺寸应考虑地震波长及在底板结构内力分析中的需求。其实这些对土体单元网络划分要求在相应 ASCE4—98<sup>[10]</sup>中早已明确,SRP 3.7.2 节只是提醒审查人员应予以关注。

3)在 C 款的输入地震动中 SRP 2007 版只是比 SRP 1989 版更明确 SSI 分析的地震运动输入位置应位于基础(底)面标高的露头面上,但此说只是简单文字带过无详述,此外对输入地震动的控制也提出过一些简单要求。

SRP 2013 版在 C 款的(i)小节中对输入地震位置的表述更为详细,明确对埋置结构,SSI 分析的地震输入起始点则规定是在基础面标高处的露头运动 FIRS。

SRP 2013 版在 C 款的(ii)小节中全面更改了 SRP 2007 版的表述,并明确在土柱分析中是执行三种土柱剖面即最佳估算 BE,下限 LB 及上限 UB 这三种。它们是用至少 60 组以上(SRP 2007 版为 30 组以上)随机土柱剖面,以概率地震风险分析

PSHA 的反应评估中所采用的相同(输入地震波),按考虑波速及阻尼的反复分析中得出反应的均值及正负偏差  $\sigma$ 。且明确其上限较硬剖面中每层土层用下限的阻尼特性,而下限较软剖面中,每层土体应采用上限的阻尼特性。

SRP 2013 版在 C 款的(iii)小节中与 SRP 2007 版的控制要求完全不同,提醒由每种确定的土体剖面中,以(平均)基础面输入反应谱 FIRS 作为土柱输入分析后所得的地面反应谱应在所有感兴趣的频率点上都能等于或超过基于功能方法所产生的地面自由场平均反应谱 PBSRS(厂址特定设计谱)。

#### 1.4.3 SSI 分析的具体指南

SRP 所列本小节只是为方便审查并提醒审评人员(对设计人员也同样适用)注意在 SSI 分析中某些重要方面列具出来。

SRP 2007 版在本小节的具体指南写得比 SRP 1989 版要详细,不过这些具体的要点都是以往核结构抗震分析标准 ASCE4—98 中有关 SSI 分析的一些基本规定,在此不准备重复,但对设计方值得提醒之处为:

1)SRP 2007 版中首次明确场地土柱剖面反应分析应采用 30~60 组(取均值)。

2)对采用宽频地面设计反应谱作 SSI 分析的,明确土体剪切模量上限值要取最佳估算值的 2 倍,下限值为最佳值的 1/2。这表明 NRC 对以宽频谱作标准设计的场合,其变异系数为  $COV = 1.0$ (只有在厂址场地作特定分析中,允许取  $COV = 0.5$ )。

3)对深土地场的土体模型下边界,明确一般情形下至少应取基础基底尺寸的两倍,这一说法与 ASCE4—98 略有不同。

4)SRP 2007 版中也首次肯定,采用地震输入波多点非一致性运动 incoherency 分析能减少厂址高频地面运动输入的潜在影响。

本小节中,SRP 2013 版则是基本肯定了原 SRP 2007 版中已明确的上述指南且进一步指出:

1)软土地基 SSI 分析的输入应直接按 DC/COL-ISG-017<sup>[11]</sup>执行,土柱的随机剖面组数已扩大至 60 组或以上。

2)在 DC 申请中特征设计谱 CSDRS 的幅值放大部分频率域应与厂址土柱剖面分析中的频率段相容(按笔者体会此时势必用相匹配的人工时程)。

3)增加了一些直接法及子结构法的概念解释,

并肯定了对埋置结构的 SSI 分析应采用直接法为妥,否则有可能不保守。

4)明确了对高频运动采用 incoherency 分析时,谱幅折减的允许值为:(1)0~10 Hz,不折减;(2)30 Hz 以上,30%;(3)10~30 Hz,可按0%~30%中插值;(4)对结构荷载由地震输入控制的场合,10 Hz 处的最大允许折减可用10%。

可见由于有上述这些附加规定,使 SRP 2013 版在 SSI 分析的操作中比 SRP 2007 版更为完善。

### 1.5 验收准则 5“结构内在反应谱(楼面谱)的生成”

本节验收准则的关键是强调按 RG1.122 楼面谱产生导则 Rev.1(1978)<sup>[12]</sup> 执行,而该导则迄今未见有新版出现,故本节文字内容自 SRP 1989 版、SRP 2007 版至 SRP 2013 版均无需改变。不过如按 SRP 2013 版执行的话,由于产生楼面谱时结构的阻尼值其实与以往版本已有所不同,只不过有关阻尼要求的改变不在本节验收准则中提及。而目前的阻尼值选取变化可见本文 1.3 及 1.4 节相关的表述。

### 1.6 验收准则 6“地震动的三分量”

当核电工程抗震分析采用一组三条人工时程作正交三个地震分量同时输入分析时,对三分量间的组合,本节验收准则强调按 RG1.92 导则执行。目前适用的该导则版本虽为 RG1.92 Rev.2(2006),但其对三分量的组合原则及方法在文字内容上与其初版长期没有改变。本验收准则对三条人工时程的统计独立性要求,光从文字上看,自 SRP 1989 版、SRP 2007 版至 SRP 2013 版也一直没有变。但如若关注对应的 SRP 3.7.1 抗震设计参数的 Rev.3(2007)版<sup>[8]</sup>及 Rev.4(2014)版<sup>[9]</sup>,这三分量间统计独立的最小相关系数已从 SRP 1989 老版的 0.30 下降至 0.16,因此对验收准则 6 而言,在 SRP 2007 版及 SRP 2013 版对三分量间的统计独立性要求其实更严了。

### 1.7 验收准则 7“模态反应的组合”

本节模态反应组合,NRC 一直沿用 RG1.92 导则,故本节从文字表述看自 SRP 1989 版、SRP 2007 版至 SRP 2013 版对验收准则 7 中看似不变。但由于 RG1.92 在 2006 年已出修改版 Rev.2<sup>[5]</sup>,它在单向模态组合的方法中已有很大的不同(参见本文 1.1 节),故本节验收准则自 SRP 2007 版至 SRP 2013 版在内涵上与 SRP 1989 版有较大区别。

### 1.8 验收准则 8“非抗震 I 类结构与抗震 I 类构筑物、系统和部件间的相互作用”

本节验收准则要求审查所有非抗震 I 类结构在 SSE 条件下的破坏是否会影响抗震 I 类构筑物、系统和部件的完整性或导致控制室内人员受伤。NRC 在本节中自 SRP 1989 版及 SRP 2007 版中均给出可取下列三种处置方式来作选择:

1)A 款,非抗震 I 类物项的倒塌并不撞击抗震 I 类物项。

2)B 款,非抗震 I 类物项的倒塌既不削弱抗震 I 类物项的结构完整性,也不造成主控室人员丧失工作能力。

3)C 款,将非抗震 I 类物项按 SSE 条件下阻止其破坏的条件执行分析和设计,使其安全裕度相当于抗震 I 类物项。

上述三款要求在执行中分歧最大的正是 C 款中这最后半句话“使其安全裕度相当于抗震 I 类物项”。如果安全裕度完全相当,那岂不是要求非抗震 I 类物项也得按抗震 I 类物项设计了。好在本节验收准则在 SRP 2013 版的上述 C 款中干脆直接取消了这最后半句话,不再需安全裕度相当,这就直接排除了需对非抗震 I 类物项按抗震 I 类设计的最大误解。在 SRP 2013 版对其 C 款解释成要求贴邻的非抗震 I 类物项不发生与抗震 I 类物项的实体接触(physical interaction),即要保持他们两者间的最大可能位移要比设计缝隙为大。要做到这一点可采用二种办法计算:一种是对非抗震 I 类物项按非线性分析,另一种也可使非抗震 I 类物项采用有限的非弹性反应分析,并在保证其结构完整性的前提下证实与贴邻的抗震 I 类物项不发生倒塌攻击或实体接触。NRC 在验收准则 8 中的这些 2013 版②的提示,从实用角度看,其实就是允许核结构设计方可依据 ASCE43—05 标准中那样按弹性分析程序,采用非弹性能量吸收系数  $F_u$  的办法来折减其构件的地震内力并扩大其计算位移来解决工程设计问题,也就是笔者以往几年在上海核工程研究设计院的结构专业培训中建议大家以 ASCE43—05 标准按只保持结构完整性要求的新抗震 II 类作分析校核的办法。

### 1.9 验收准则 9“参数变化对楼面反应谱的影响”

本节验收准则相比过去的 SRP 1989 版,在 SRP 2007 版中首次提出在楼面反应谱产生时,对抗

震主系统的砼结构,应考虑砼开裂的影响,但具体怎么做没有解释。SRP 2013 版在本节中就明确指出砼的开裂对刚度的影响可按 SRP 3.7.2 II 3C(iv) 执行,也即按本文的 1.3 节对验收准则 3 的 C 款的后半部(iv)段的说明要求执行。

### 1.10 验收准则 10~14

SRP 3.7.2 的验收准则 10~14 节,相对前面的 9 节而言并不算是重点。且有关这几节的验收准则要求的文字表述,自 SRP 1989 版至 SRP 2007 版直到 SRP 2013 版几乎均看不出有什么变动。而对第 10 节“等效竖向静力系统的应用”,上海核工程研究设计院从没有采用过。对第 11 节“扭转效应计算方法”,在以往二代堆项目中倒因采用简化悬臂梁模型为主需要注意,目前三代核电的动态分析均采用三维空间板单元的整体有限元模型,这一节也无实用意义。对第 12 节“时程及谱分析反应结果的对比”上海核工程研究设计院一直在如实实施。第 13 节“阻尼分析方法”,指的是不同结构材料间的复合模态阻尼处置,更多涉及及所用分析软件的功能是否满足验收准则第 13 节的要求,上海核工程研究设计院所用 ANSYS 程序已可实现这些要求。第 14 节“确定抗震 I 类结构的地震倾覆力矩和滑动力”,对这 14 节要求上海核工程研究设计院一直在执行。只不过在软地基场合,它与基础底板脱离抬升有相互交集,好在 SRP 2013 版在验收准则 4 中比过去版本已有新的要求,故可直接参见本文 1.4 节的相应部分说明。

## 2 SRP 3.7.2 的附录 A“抗震设计审查中的审计准则”及其应用

SRP 3.7.2 抗震主系统分析这一节自 SRP 2007 版以来相比 SRP 1989 版的另一个明显改变是首次增设了附录 A“抗震设计审查中的审计(Audit)准则”,而 SRP 3.7.2 Rev. 4 2013 版的附录 A 与 SRP 2007 版在文字表述中也未见差别。笔者估计可能是直到 2013 年 9 月 SRP 3.7.2 Rev. 4 公布前,NRC 在美国实际上尚未在具体项目中实施过抗震设计的审计工作,故没有经验反馈。不过从 SRP 的 Rev. 3 2007 版中我们发现,所有与土建结构相关的审计工作,NRC 只安排抗震设计及安全壳设计两项,可见 NRC 对核电厂的抗震设计审查活动的重视。

NRC 把审计(Audit)流程定义为审评人员所开

展审查(Review)活动中的重要组成部分,它提供了审查许可证申请或认证申请中未包含的相关技术信息的机会。还可作为与申请人就未解决的技术问题进行充分面对面交流的平台。审计结果可作为审评人员做出最终安全判断的技术依据的组成部分。

作为核电设计方,核电设计院可以先主动按附录 A 对由该审计准则的第 6 小节“审计实施”中所提出的 NRC 感兴趣的特殊课题先作些重点的准备,即:

- 1) 地面运动产生的时程与地面反应谱的匹配程度。
- 2) 土体参数的模型。
- 3) 结构模型的模态,确认相对于设计基准地面反应谱频率含量的适当细化关系。
- 4) 实施抗震分析所采用的计算机程序、计算模型包括 SSI 效应。
- 5) 结构内在反应谱(楼面反应谱)。

显然,只要设计方能事先细心准备上述这 5 个特殊课题,仔细研读 SRP 3.7.1~3.7.3 的最新版 SRP Rev. 4 2013—2014 版的要求,这比直接按 SRP Rev. 3 2007 版执行要更容易得多。

## 3 结论

本文介绍了 NRC 的标准审查大纲 SRP 3.7.2 的核电厂抗震主系统分析要求的近期变化,主要目的是协助设计人员在核电工程的抗震设计分析中了解该怎么正确操作才符合 NRC 的审查要求。因为 NRC 公开颁布其标准审查大纲 SRP 有两个主要目的:一方面是正确指导其内部的核安全审评员工,只要按 SRP 章节的具体要求执行,就能规范化其安全审评活动并对业主的执照申请作出正确的安全评估;另一方面也是告诉业主包括为业主服务的核电工程设计方,如果核电设计能按 NRC 的 SRP 各章节的验收准则要求执行,那么业主所提供的设计申请就能顺利地被接受,否则得提供严格的等效性论证才能说服 NRC。因此作为核电工程的设计方,学习 NRC 的标准审查大纲 SRP 其实是明白在核工程项目中执行 NRC 所认可的正确设计分析方法,这才是我们核工程设计实践中事半功倍的捷径。

对 SRP Rev. 3 2007 版,估计我国的核安全局会正式先实施一段时期。本文是结合笔者过去核电工程抗震分析的实践经验,重点按 SRP 3.7.2 抗震

主系统分析要求的各条验收准则, 分别作些专业性讲解与点评。本文也利用其最新版 SRP Rev. 4 2013 版所作的详细解读, 反过来再回看其 SRP Rev. 3 2007 版, 则能使大家更正确地理解其 SRP Rev. 3 2007 版中的某些细节要求上的不足。所以笔者建议核电设计院工程师在今后的 CAP 系列工程自主设计中, 应在详细研读 SRP Rev. 3 及 Rev. 4 的基础上, 凡目前有条件按其最新版能做到的不如干脆直接用最新版照做<sup>[13]</sup>。即使安全当局仍按 SRP Rev. 3 版执行审查, 也应该能被顺利通过。笔者认为按最新版执行核电厂抗震主系统分析的最大好处还是核电设计院能轻松应对今后 CAP 项目抗震设计的审计活动。

#### 参考文献:

- [1] Office of Nuclear Regulatory Research. 3.7.2 Seismic system analysis (Revision 3) [S/OL]//Office of Nuclear Regulatory Research. Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants (LWR edition); NUREG-0800. Washington: U. S Nuclear Regulatory Commission, 2007. <http://www.nrc.gov/docs/ML0706/ML070640311.pdf>.
- [2] Office of Nuclear Regulatory Research. 3.7.2 Seismic system analysis (Revision 4) [S/OL]//Office of Nuclear Regulatory Research. Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants (LWR edition); NUREG-0800. Washington: U. S Nuclear Regulatory Commission, 2013. <http://www.nrc.gov/docs/ML1319/ML13198A223.pdf>.
- [3] Office of Nuclear Regulatory Research. 3.7.2 Seismic system analysis (Revision 2) [S/OL]//Office of Nuclear Regulatory Research. Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants. Washington: U. S Nuclear Regulatory Commission, 1989. <http://www.nrc.gov/docs/ML0523/ML05234056.pdf>.
- [4] Office of Nuclear Regulatory Research. Combining modal responses and spatial components in seismic response analysis; Regulatory Guide (RG) 1.92 (Revision 1) [S]. Washington: U. S Nuclear Regulatory Commission, 1976.
- [5] Office of Nuclear Regulatory Research. Combining modal responses and spatial components in seismic response analysis; Regulatory Guide (RG) 1.92 (Revision 2) [S/OL]. Washington: U. S Nuclear Regulatory Commission, 2006. <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0532/ML053250475.pdf>.
- [6] American Society of Civil Engineers. Seismic design criteria for structures, system, and components in nuclear facilities; ASCE/SEI 43-05 [S/OL]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2005. <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784407622.fm>.
- [7] Office of Nuclear Regulatory Research. Damping values for seismic design of nuclear power plants; Regulatory Guide (RG) 1.61 (Revision 1) [S/OL]. Washington: U. S Nuclear Regulatory Commission, 2007. <http://www.nrc.gov/docs/ML0702/ML070260029.pdf>.
- [8] Office of Nuclear Regulatory Research. 3.7.1 Seismic design parameters (Revision 3) [S/OL]//Office of Nuclear Regulatory Research. Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants (LWR edition); NUREG-0800. Washington: U. S Nuclear Regulatory Commission, 2007. <http://www.nrc.gov/docs/ML0706/ML070640306.pdf>.
- [9] Office of Nuclear Regulatory Research. 3.7.1 Seismic design parameters (Revision 4) [S/OL]//Office of Nuclear Regulatory Research. Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants (LWR edition); NUREG-0800. Washington: U. S Nuclear Regulatory Commission, 2014. <http://www.nrc.gov/docs/ML1419/ML14198A460.pdf>.
- [10] American Society of Civil Engineers. Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary; ASCE 4-98 [S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2000. <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784404331.fm>.
- [11] Office of New Reactors. Interim staff guidance on ensuring hazard-consistent seismic input for site response and soil structure interaction analyses; DC/COL-ISG-017 [S/OL]. Washington: U. S Nuclear Regulatory Commission, 2010. <http://www.nrc.gov/docs/ML1005/ML100570203.pdf>.
- [12] Office of Standards Development. Development of floor design response spectra for seismic design of floor-supported equipment components; Regulatory Guide (RG) 1.122 (Revision 1) [S/OL]. Washington: U. S Nuclear Regulatory Commission, 1978. <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1335/ML13350A275.pdf>.
- [13] U. S Nuclear Regulatory Commission. Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants (LWR edition); NUREG-0800, Chapter 3 [S/OL]. Washington: U. S Nuclear Regulatory Commission, 2016. <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr0800/ch3/>.

(责任编辑 郑文棠)

