

关于海洋平台抗震设防水准的考虑¹

吕悦军 彭艳菊 唐荣余

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要 我国尚未制定海洋平台的抗震设计规范, 本文首先将美国 API-RP2A(2002)和 GB17503-1998 规范作分析对比, 并结合美国南加利福尼亚地区和我国渤海海域地震活动性的情况, 认为 GB17503-1998 规范的抗震设防概率水准似乎过于保守。根据我国海域地震活动特征、海洋平台的设计基准期和设防目标等因素, 参照相关行业工程抗震设防标准的经验, 提出海洋平台用于强度设计的正常极限地震重现期取 200 年、用于延性设计的变形极限地震重现期取 3000 年, 并与相关行业工程抗震设防标准进行了比较分析。

关键词: 海洋平台 抗震设防 概率水准 重现期

引言

随着经济建设的快速发展, 近 20 年来我国海洋石油开发得到很大发展, 而海洋石油工程属于可能产生严重次生灾害的工程, 同时我国近海海域的地震活动性较高, 因此, 海洋工程的抗震问题受到广泛关注。

我国对海上平台的抗震安全问题非常重视, 上世纪 80 年代起, 每个拟建平台都进行过场地地震安全性评价工作, 提出了相应的设防标准。但我国尚没有专业的海洋平台抗震技术规范, 目前仅在国家标准 GB17503-1998《海上平台场址工程地质勘察规范》(国家质量技术监督局, 1998)中, 对海洋平台的强度设计和变形设计的抗震设防概率水准作了规定。世界海洋油气行业的抗震规范主要是美国石油协会(American Petroleum Institute)制订的 RP2A-WSD 规范, 该规范依据美国近海岸的地震危险性区划结果, 规定海洋石油平台结构在使用期限内满足指定的强度和变形要求, 考虑两级地震动水平。因 GB17503-1998 规范没有相应的条文说明内容, 只能粗略地比较其与 RP2A-WSD 规范的显著差异。

海洋平台的抗震设防水准应考虑以下几个因素:(1)平台的服役期。海洋平台的服务期限为 30 年左右, 多数小于 30 年, 过高估计了地震因素, 结构分析中会相对降低风、浪、水流、潮汐等作用力的影响, 这不利于平台的结构形状设计和材料选择;(2)平台的重要性和设计准则。海洋平台属于易发生次生灾害的结构, 一旦发生破坏, 将会造成严重的环境污染,

1 中国地震局“十五”重大科研课题“地震安全性评价与结构抗震”之子课题“海洋石油平台的抗震设防标准研究”
[收稿日期] 2005-12-15

[作者简介] 吕悦军, 男, 生于 1966 年。研究员, 现为博士研究生。主要从事地震安全性评价、设计地震动参数区划等方面的研究。E-mail: luyj1@263.net

应根据其破坏效应的特殊性确定设计原则。按国际惯例,要做到结构与基础在罕遇地震作用下确保安全,不发生生命损失和严重的次生灾害,容许有一些损坏,但不能倒塌;(3)地震活动环境,海域内的地震环境与陆地不同,地震危险性特征也不同。对我国邻海内的海洋平台,不但要考虑近场地震的影响,还需要考虑来自大陆或岛弧海沟地区中远场大地震的影响,如日本岛弧、琉球-台湾-菲律宾岛弧地带强震活动的影响。

本文首先将美国 API-RP2A(2002)和 GB17503-1998 规范作分析对比,并结合美国南加利福尼亚地区和我国渤海海域地震活动性的情况,认为 GB17503-1998 规范的抗震设防概率水准似乎过于保守。我国属于发展中国家,国家的财力物力有限,海洋平台的抗震设防概率水准不宜过高,没有必要高于美国等发达国家的标准。其次参照 API-RP2A(2002)的有关规定,根据我国海域地震活动特征、海洋平台的设计基准期和设防目标等因素,提出了我国海洋平台用于强度设计的正常极限地震重现期宜取 200 年,用于延性设计的变形极限地震重现期宜取 3000 年。最后通过与相关行业工程抗震设防标准的比较,分析论证了我国海上平台抗震设防概率水准的合理性。

1 美国 RP2A-WSD 规范与我国有关抗震规范

美国石油协会 RP2A-WSD 规范是基于美国近海岸、特别是南加利福尼亚地区的地震活动强度和地震区划的研究结果制定的,最新版本为 2002 年版。该规范对海洋平台的抗震设防标准及相应概率水准的规定是:海洋石油平台结构在使用期限内满足指定的强度和变形要求,考虑两级地震动水平:(1)设计地震,满足强度要求,结构与基础在经受此地震动时无显著破坏,考虑到地震动估计的不确定性以及波浪和地震设计要求的差异,设计地震的重现期比波浪重现期要长,对南加利福尼亚地区永久性结构的设计地震重现期建议取 200 年(相当于 50 年超越概率 22%);(2)罕遇地震,满足变形设计要求,结构与基础在此地震动下无生命损失和严重污染,容许结构与基础有一些损坏,但不倒塌,重现期建议取几百年到几千年。第一级水准为结构弹性设计提供地震动输入,第二级水准确定结构分析是否要考虑罕遇强震,如果考虑,则作为其地震动输入。

RP2A-WSD 规范中的确定设计地震动参数的技术途径与我国《工程场地地震安全性评价技术规范(GB17741-1999)》(国家质量技术监督局,1999)是一致的。

但我国至今没有专业的海洋平台抗震技术规范,仅在国家标准 GB17503-1998《海上平台场址工程地质勘察规范》中,对海洋平台的强度设计和变形设计的抗震设防概率水准作了一些规定,规定取 50 年超越概率 10%和 0.5%分别作为海洋平台的强度设计和变形设计的概率水准。50 年超越概率 10%和 0.5%分别相当于重现期 500 年和 10000 年。但 GB17503-1998 规范没有相应的条文说明。

通过渤海海域内石油平台的分析计算得到(彭艳菊等,2004a),设计地震水平(强度设计)下,GB17503-1998 规范规定的地震动值是 RP2A-WSD 规范的 1.35—1.46 倍;稀有地震水平(变形设计)下,GB17503-1998 规范的值是 RP2A-WSD 规范的 1.58—1.60 倍。

根据现代地震活动资料,确定了美国南加利福尼亚地区和我国渤海海域的研究范围,综合对比了它们的地震活动的差异(彭艳菊等,2004b)。分析资料的统计时段为两个地区的 5 级地震记录完整的起始时间至今,渤海地区统计时段是南加州的 3.3 倍,南加州的研究区面积是渤海地区的 1.5 倍。统计表明,南加州 M_s 5.0—6.9 地震 192 次远远大于渤海地区的 61 次、

M_s 7.0—7.9 地震均为 7 次、南加州还发生过 1 次 $8\frac{1}{4}$ 级地震。由此可见，南加州的地震频度大于渤海地区。

石油平台的使用期限一般为 30 年左右，由此可见，国家标准 GB17503-1998《海上平台场址工程地质勘察规范》建议的强度设计水准取 50 年超越概率 10%（重现期约 500 年），高于美国 RP2A-WSD 规范对加利福尼亚地区的要求，这种规定应该是保守的。而将变形设计概率水准取 50 年超越概率 0.5%（重现期 10000 年），似乎太高了。GB17503-1998 规范的抗震设防概率水准似乎过于保守。

2 海洋平台抗震设防水准的确定原则

海洋平台结构的特点是柔性和延性性质突出，在地震作用下的非线性反应强烈。在抗震设计分析和确定相应的设防水准时，应当充分考虑这一结构特点。目前我国海洋平台的设计是根据《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法——工作应力设计法》¹的要求进行。对于海洋平台，地震对结构的影响主要是由其基础处地基（场地）的运动所引起。其结构抗震设计所要求的地震输入是结构基础处单点的地震动，目前采用的地震动确定方法是借助于概率分析方法，这一方法能综合反映地震环境、强地震发生的偶然性及地壳介质与震源情况的复杂性等因素的影响。概率分析方法确定海洋平台结构分析的地震动输入的工程地震问题，包括设防地震动水准、设定地震、地震动长周期特征等（吕悦军等，2003）。因此，海洋平台的工程地震问题可以同陆地上的一些特殊工程相类比，如电视发射塔、特大型桥梁、大型大坝工程等。参照相关行业工程的抗震设防标准，确定海洋平台抗震设防水准的原则主要考虑下列几个方面：

（1）科学性方面，既要反映当前科学技术的发展水平，还要顾及同国内、国际通用标准的接轨问题。

目前，我国的抗震设计理念正由安全系数法向可靠度设计法过渡，以适应国际抗震技术发展的基本趋势。需建立有概率意义的海洋平台抗震设防水准，以满足可靠度设计方法的需要。

（2）适用性方面，应考虑分级设防和多次设计的需求。

我国的《建筑抗震设计规范》GB50011-2001 和《构筑物抗震设计规范》GB50191-93 均采用了三级设防的设计要求。按该规范设计的建筑，当遭受低于本地区设防烈度的多遇地震影响时，一般不受损坏或不需修理仍可继续使用；当遭受高于本地区设防烈度的预估的罕遇地震影响时，不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。

可靠度设计是通过对主要条件的控制，使结构符合特定功能极限状态要求。根据我国各工程结构设计的实际情况，其极限状态可划分为“正常使用极限”、“承载能力极限”和“变形极限”。对于三种作用状况，工程结构均应按承载能力极限状态设计。根据结构不同极限设计状态给出相应的抗震设防标准。

（3）政策性方面，要保持国家抗震设防政策的连续性。

制定结构物的抗震设防水准，不但要考虑区域地震活动特征、结构物的特征与服役期，还要考虑社会经济承受能力及与现行标准的连贯性。我国还属于发展中国家，财力和物力有

1 中华人民共和国海洋石油天然气行业标准 SY/T10030-2000，2000。国家石油和化学工业局发布。

限,设防标准与投入费用直接相关,既要保证结构抗震安全,又要适度投入抗震设防的费用,使经济投入获得最大效益。因此,国家总的抗震设防政策决定了各行业的设防标准不宜过高。目前正在使用的 GB5001-2001《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫局,2001)、GB50191-93《构筑物抗震设计规范》(中华人民共和国建设部,1993)和 DL5073-1997《水工建筑物抗震设计规范》等来看,所采用的地震作用参数(加速度峰值、动力放大系数最大值 β_m 和反应谱特征周期 T_g)都略小于观测平均值。所以,海洋平台的抗震设防标准也不宜过于保守,更没有必要高于美国等发达国家同类工程的设防标准。

(4) 充分借鉴已有工程的抗震设防经验

已有的海洋平台抗震设防经验,包括设防标准的选择,都是合理建立我国海洋平台抗震设防水准的宝贵依据之一。另一方面,我国陆地上的一些特殊工程,如电视发射塔、特大型桥梁、大型大坝工程,已有明确概率含义的抗震设防水准。这类相关行业工程的设防标准,也是论证和评定我国海上平台抗震设防标准的重要依据之一。

3 确定海洋平台抗震设防水准

广义的抗震设防标准,包括设防类别、设计基准期、设防目标、设防地震概率水平和抗震措施设计依据等5个方面。但海上平台为石油化工工程中的一类,不再细分。现将海洋平台的抗震设防水准的确定依据概述如下。

(1) 设计基准期

海洋平台的设计基准期决定于结构的使用期。而平台的使用期又取决于油(气)田的开采期限。由于油(气)田的开采期限一般为30年左右,所以,海洋平台的设计基准期宜为30年。

(2) 设防目标

根据海上平台结构的柔性和延续性特点,及现有的海洋平台设计准则,其设防目标宜按正常使用极限地震和变形极限地震两级考虑:正常使用极限地震满足强度设计要求,结构和基础在经受此地震作用后,设计用于耗能的部件只产生次要破坏,能维持正常工作或经一般修理就可以继续使用;变形极限地震即是罕遇地震,满足变形极限状态设计要求,在此地震作用下允许结构和基础有一些损坏,次要部件遭到破坏,但仍能保持平台结构的整体稳定性,不至于倒塌,无生命损失和严重的环境污染。

(3) 正常使用极限地震的概率水平

正常使用极限地震是正常使用极限设计状况所考虑的地震作用。对于一般建、构筑物(丙类),设计基准期为50年,常遇地震作用也是按50年内超越概率63%(即50年一遇)采用的。对于海上平台这类特别重要的工程结构,抗震设防的标准理应高于一般建构筑物。参照 RP2A-WSD 规范对南加利福尼亚地区的建议,常遇地震的重现期宜取200年,相当于30年设计基准期内超越概率为14%的地震。一般建、构筑物常遇地震作用的强度约为中等(500年一遇)地震的1/3。根据对全国范围128项工程场地地震安全性评价结果的统计分析,重现期200年的地震作用强度约为500年重现期地震作用强度的2/3。因此,海上平台常遇地震的重现期取200年,相当于强度设计的地震作用强度是一般建、构筑物的2倍,以便同甲类建构筑物取值持平。

(4) 变形极限地震的概率水平

变形极限地震是变形极限设计状况所考虑的地震作用。变形极限设计状况是指结构设计

基准期内遭受偶然作用时和作用后，结构达到允许的最大变形，但仍能保持必要的整体稳定性，不至于倒塌。一般（丙类）建、构筑物的罕遇地震概率水平为 50 年内 2—3%，相当于重现期 2000 年。甲类建构筑物罕遇地震的概率水平宜取 100 年内 2—3%，相当于重现期 3000—5000 年。海上平台变形极限地震的概率水平宜取 30 年内 1%，相当于重现期 3000 年，以便同甲类建、构筑物持平。

4 与有关行业标准的比较分析

(1) 同已有标准的比较

在国家标准 GB17503-1998《海上平台场址工程地质勘察规范》和美国石油协会 RP2A-WSD 规范中，分别给出了海洋平台强度验算和变形验算的设防地震概率水平或重现期。将其参数与本文的推荐结果并列于表 1 中。

表 1 海上平台设防标准的比较

Table 1 Comparison of seismic design level of offshore platform

标准依据	正常使用极限地震重现期（年）	变形极限地震重现期（年）
GB17503-1998	500	10000
API RP2A(2002)	200	几百年到几千年
本报告推荐值	200	3000

表 1 所列的数据说明，GB17503-1998 规定的设防标准似乎过于保守，本文的推荐值同 RP2A-WSD 规范的值较为接近。在 RP2A-WSD 规范中，用于强度（正常使用极限状态）设计的地震重现期，是基于南加利福尼亚地区的地震环境推荐的。据前面分析，我国海洋平台正常使用极限地震的重现期取为 200 年，是偏于安全的。

本文推荐的变形极限地震重现期取 3000 年，虽然小于 GB17503-1998 规范的规定，但已经接近于 RP2A-WSD 规范的上限值。我国是发展中国家，财力物力有限，其抗震设防标准不宜高于美国那样的发达国家的标准。

(2) 同石油、天然气及化工工程的设防标准比较

石油、天然气及化工工程是较为庞杂的工程系列。它包括了采油（气）中的联合站和输油（气）管道、储油（气）设施、化工工程等。这些工程的共同特点是一旦遭受地震破坏，可能造成较大的经济损失和较严重的污染等次生灾害。因此，有关部门高度重视对其采取工程防御措施。相关的研究结果中，将石油、天然气及化工工程根据结构特征及其重要性程度，分为甲、乙、丙三个类别，各类别的防震标准按表 2 确定。

由表 2 所列内容说明，海上平台在石油、天然气及化工工程的抗震设防重要性分类中，属于最重要的甲类，正常使用极限地震和变形极限地震的重现期相对较长，抗震措施的要求较严格，所冒的地震风险较小。

(3) 同相关行业抗震设防标准的比较

鉴于各行业工程的抗震设计理念不同，全面比较其间的设防标准差异是较为困难的。因此，只能选择理念相同、设防目标相似或相近的工程进行比较。这里着重比较罕遇地震之间的差异。对水工建筑和公路工程等结构的抗震设防，只在承载能力极限状态设计时考虑罕遇地震作用；对于建、构筑物和海上平台等工程结构，则是在变形极限状态设计时考虑罕遇地

震作用。另一方面,由于设防标准中包含了设计基准期和设防地震的重现期两个主要因素,虽然设防目标相似或接近,还是难以直接比较。因为,当设防地震的重现期相同时,但工程设计基准期不同,设防标准的含义也不同,基准期短的工程设防标准要高于基准期长的设防标准。同理,当设计基准期相同时,设防地震重现期长的工程要比设防地震重现期短的设防标准高。为了合理地反映不同设计基准期及不同设防地震重现期工程之间的设防标准差异,本文将设防地震重现期换算为设计基准期内的超越概率(P_T)来表述。 P_T 可以反映出工程结构在设计基准期内所冒地震风险的相对大小。表3列出了由罕遇地震表述的设防标准。

表2 石油、天然气及化工工程的设防类别和防震标准

Table 2 Seismic fortification classification and design level of oil, gas and chemical structures

类别	工程结构和重要性	设计基准期 (年)	正常使用极限 地震重现期(年)	变形极限地震 重现期(年)	抗震措施依据(度)
甲	海上平台	30	200	3000	当 I_0 为 VI—VIII 度时,按 I_0+1 度;当 I_0 为 IX 度时,专门研究
乙	大型联合站、输油(气)管道的重要区段,大型储油(气)设施,重要化工工程	50	100	3000	当 I_0 为 VI—VIII 度时,按 I_0+1 度;当 I_0 为 IX 度时,适当加强抗震措施
		30	50	2500	
丙	除甲、乙类以外的石油、天然气及化工工程	50	50	2500	I_0
		30	30	1500	

注:表中 I_0 为场地地震基本烈度

表3 不同工程的设防标准

Table 3 Seismic design level of different structures

工程名称	基准期(年)	罕遇地震	
		重现期(年)	P_T
海上平台	30	3000	0.01
核电厂	40	10000	0.004
长江三峡大坝	100	10000	0.01
水工甲类雍水建筑	100	5000	0.02
甲类建、构筑物	100	3000—5000	0.02—0.03
特大型桥梁	100	3300	0.03
甲类电视塔	100	2000	0.05
乙类建、构筑物	50	2500	0.02
丙类建、构筑物	50	约 2000	0.02—0.03
水工甲类非雍水建筑	50	1000	0.05

表3所列数据说明,海上平台的设计基准期相对较短,罕遇地震在设计基准期内的超越概率为0.01;海上平台罕遇地震的风险水平仅次于核电站,同三峡大坝持平。可以认为,海上平台的罕遇地震重现期取3000年是安全的。

5 结论与建议

关于我国海洋石油平台的抗震问题,急需相关规范的出台,但由于海洋环境的特殊性,人类对其认识尚不深入。本文首先将美国 API-RP2A(2002)和 GB17503-1998 规范作分析对比。

根据我国海域地震活动特征、海洋平台的设计基准期和设防目标等因素，参照相关行业工程抗震设防标准的经验，提出确定我国海洋平台抗震设防水准的原则。本文得到下列认识：

(1) 海洋平台工程的抗震设防标准与国家的科学技术水平、经济发展水平和抗震设防政策密切相关。我国属于发展中国家，国家的财力物力有限，抗震设防标准不宜过高，也没有必要高于美国等发达国家的标准。

(2) 海洋平台工程抗震设防标准的确定，既要反映当前抗震设计理念的发展水平，还要顾及同国内、国际通用标准的接轨问题，拟以分级设防、二次设计为指导思想，在强度设计的基础上考虑延性设计的需求。

(3) 通过对已有设防经验的总结和相关工程设防标准的比较分析，提出了我国海上平台用于强度设计的正常极限地震重现期宜取 200 年，用于延性设计的变形极限地震重现期宜取 3000 年。

本文提出的海上平台用于强度设计的正常极限地震重现期宜取 200 年、用于延性设计的变形极限地震重现期宜取 3000 年的结论，仅与有关行业工程抗震设防标准进行了比较分析，未能应用到海洋平台抗震结构分析的实例中，还没有开展针对不同类型的海洋平台结构进行地震动力作用下的可靠性分析。尚不具备向行业部门提出海洋石油平台的抗震设防标准建议的条件。

参考文献

- 国家质量技术监督局，1998. 中华人民共和国国家标准《海上平台场址工程地质勘察规范(GB17503-1998)》. 北京：中国标准出版社.
- 国家质量技术监督局，1999. 中华人民共和国国家标准《工程场地地震安全性评价技术规范 (GB17741-1999)》. 北京：中国标准出版社.
- 国家质量技术监督局，中华人民共和国建设部，1993.《构筑物抗震设计规范 (50191-93)》. 北京：中国计划出版社.
- 吕悦军，唐荣余，彭艳菊等，2003. 渤南油田工程地震研究. 北京：地震出版社.
- 吕悦军，彭艳菊，唐荣余，2003. 海洋石油平台的工程地震问题. 地球物理学进展，**18**(4): 662 - 665.
- 彭艳菊，唐荣余，吕悦军，张晓波，2004a. 不同抗震标准下的海洋石油平台设计地震动参数研究. 世界地震工程，**20**(4): 119 - 126.
- 彭艳菊，吕悦军，唐荣余，2004b. 美国 API RP2A-WSD 规范对我国海洋石油平台抗震设防的启示. 地球物理学进展，**19**(3): 635 - 640.
- 中华人民共和国建设部，国家质量监督检验检疫局，2001.《建筑抗震设计规范 (GB 50011-2001)》. 北京：中国建筑工业出版社.
- 中华人民共和国水利部，1998. 中华人民共和国行业标准《水工建筑物抗震设计规范(SL203-97)》. 北京：中国水利水电出版社.
- American Petroleum Institute, 2002. RP2A-WSD: Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. Houston: American Petroleum Institute.

Determination of Seismic Design Level of Offshore Platform in China

Lu Yuejun, Peng Yanju and Tang Rongyu

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing, 100085, China)

Abstract There is no seismic design code of offshore platform in China at present. Based on the comparison between American Petroleum Institute RP2A-WSD and GB17503-1998, with the consideration of the seismicity of southern California and Bohai sea, we found that GB17503-1998 is too conservative. According to the seismic characteristic, design reference period of offshore platform, seismic design goal and the seismic design experiences in relative areas, we recommend that the return periods for strength design and deform design for offshore platforms take 200 years and 3000 years respectively.

Key words: Offshore platform; Seismic design; Probability level; Return period