

渤海海域海洋平台抗震设防标准研究¹

刘育丰¹⁾ 彭艳菊²⁾ 王俊勤³⁾ 沙海军²⁾ 吕悦军²⁾

1) 中海油能源发展股份有限公司北京分公司, 北京 100027

2) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

3) 中海油研究总院, 北京 100027

摘要 本文首先基于渤海海域的地震环境及地震危险性特征, 根据46个海洋平台的设计地震动参数, 分析了不同设防水准的设计地震动参数之间的关系; 然后, 采用与其他工程类比的方法, 确定了海洋平台抗震设防的两级目标; 通过与国内其他规范的类比, 确定了海洋平台强度设计地震的概率水准取重现期200年, 变形设计地震的概率水准取重现期1000—2500年, 并深入分析论证了其合理性; 最后, 根据渤海地区的地震危险性分区和地震动参数区划给出了相应的设防参数。本文是对渤海地区多年来海洋平台抗震设防经验的总结, 是对我国海洋平台抗震设防标准的探索性研究。

关键词: 渤海 海洋平台 抗震设防水准

前言

渤海蕴藏着丰富的海洋资源, 是我国海洋石油的主要开发场所。同时, 渤海海域地震活动也是我国海域内最高的地区, 其活动强度和频度远高于其它海域。为确保地震中海洋平台的结构安全, 自上世纪80年代以来, 我国对拟建的每座海洋平台均进行了地震安全性评价工作, 为其抗震设计提供地震动参数。与水电、交通、核电等工程均有国家或行业标准的抗震设计规范不同, 受海域研究程度的制约, 我国海洋平台的抗震设防尚未制定专业的抗震规范。迄今为止, 海洋平台的抗震设防主要参考相关规范确定设防参数, 如《工程场地地震安全性评价(GB 17741-2005)》(中华人民共和国国家标准, 2005)、《建筑抗震设计规范(GB 50011-2010)》(中华人民共和国国家标准, 2010)和《海上平台场址工程地质勘察规范(GB 17503-1998)》(中华人民共和国国家标准, 1998)等。但这些规范的适用性越来越受到海洋石油设计部门的质疑, 需对其科学性、安全性、经济性进行深入研究。

渤海是我国海域中海洋勘探和海域地震研究较深入的地区, 众多学者在地震构造环境、地震活动特征方面开展了研究(陈国光等, 2003; 2004; 吕悦军等, 2003; 2008; 彭艳菊,

1 基金项目 财政部2007年公益性行业科研专项200708055

[收稿日期] 2012-03-26

[作者简介] 刘育丰, 男, 生于1955年。高级工程师。1982年毕业于中国海洋大学物理海洋专业, 理科学士。现任中海油能源发展股份有限公司北京分公司资深技术专家, 总工。长期从事物理海洋、海洋工程环境等方面的研究和应用工作。E-mail: Liuyf@cnooc.com.cn

通讯作者 吕悦军, E-mail: Luyj1@263.net

2008; 王华林等, 2000; 王健, 2007; 徐杰等, 2008), 同时, 在实际工作中对海洋平台的抗震设计地震动参数也积累了一定的经验, 为研究海洋平台抗震设防标准奠定了一定的基础(吕悦军等, 2006; 彭艳菊等, 2004a; 2004b; 2007)。抗震设防标准是指根据客观的地震设防环境和已定的设防目标, 并考虑社会经济条件等因素确定采用多大的设防参数进行抗震设防(谢礼立等, 1996; 欧进萍等, 2008), 从技术上讲, 包括设防目标、设防水准、设防参数等内容, 其核心问题是设防水准。本文首先分析了渤海海域地震环境, 然后研究了地震危险性特征, 分析了不同概率水准的地震动参数之间的关系。在总结已有工程抗震设防经验的基础上, 对比分析了确定海洋平台的抗震设防目标。采用与甲类建筑物类比的原则, 确定了海洋平台的抗震设防水准, 并与相关行业规范进行了对比, 论证其合理性和安全性。最后, 根据渤海海域的地震危险性分区和地震动参数区划给出了相应的设防参数。

1 渤海海域地震活动特征

渤海海域地震活动的特点是强度大、频度高, 特别是 7 级以上大地震发生率在华北地震区内是最高的, 平均 120 年发生 1 次。但是, 渤海海域内历史地震记载缺失较多。

图 1 是渤海及周边地区历史强震震中分布图。由图 1 可知, 渤海海域内强震在空间分布上很不均匀, 1548 年、1597 年、1888 年和 1969 年发生的 4 次 7 级以上地震都分布在渤海的中部, 主要集中在北纬 38°—39°、东经 119°—121°之间, 形成了华北地震区 7 级以上大震最集中的地区。而在北部的辽东湾一带却没有记录到大于 5 级的地震, 南部的莱州湾也仅有 5 级左右的中等地震发生。这种分布特征受地震构造控制, 在地震构造上, 渤海海域处于郯庐断裂带和张渤断裂带的交汇部位, 北北东向郯庐断裂在渤海内部被一系列大致平行的北西西向断裂左旋错断成多段, 渤海内部的构造格架由这两组构造所组成, 它们控制着渤海的现代构造运动及地震活动(刁守中等, 1990; 邓起东等, 2001; 陈国光, 2003)。

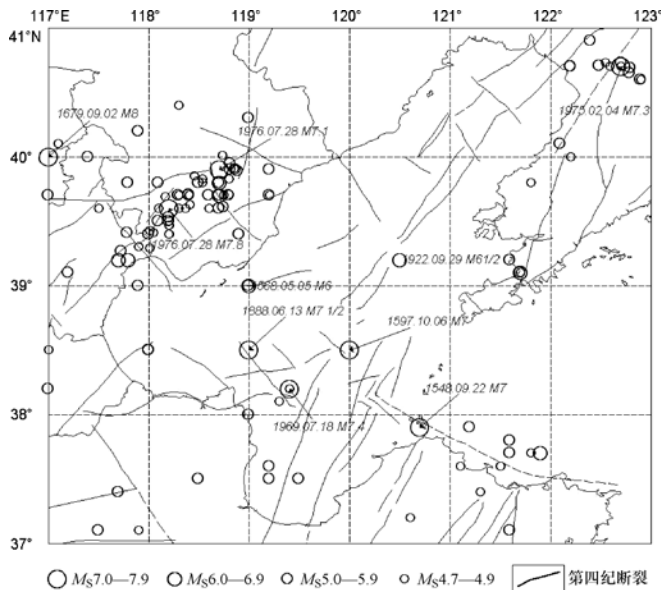


图 1 渤海海域及邻区历史地震震中及主要断裂分布图

Fig. 1 Map of historical earthquake epicenters and faults in Bohai and adjacent region

渤海内部活动断裂各段的现代活动性是不均匀的。郟庐断裂在渤海内部被北西西向断裂大致分割成活动程度不同的三段（魏光兴等，1993）：北段活动性相对较弱，只记载到 5.0—5.5 级地震，近期微震活动也较少；南段只记录到 6 级左右的地震，沿断裂带附近现今有微震活动，地震活动性较北段高；中段由于受到一系列北西西向断裂的切割，断裂结构十分复杂，渤海内部有 3 次 7.0—7.5 级地震和若干次 5 级左右地震都发生在中段，是渤海内部地震活动性最高的地区。

图 2 是渤海海域内强震的 $M-T$ 图，该图显示渤海内强震的时间分布也是不均匀的，具有周期性。自 1548 年以来，强震都集中分布在 2 个时段（表 1）：1548—1624 年为显著活跃阶段，在 76 年时间内发生了 7 级以上地震 2 次、5.0—6.9 级地震 3 次；1625—1887 年为平静阶段，在 262 年时间内没有记录到 $M_S 5.0$ 以上地震；1888 年至今为又一次显著活跃阶段，已发生 7.0 级以上地震 2 次、5.0—6.9 级地震 2 次。

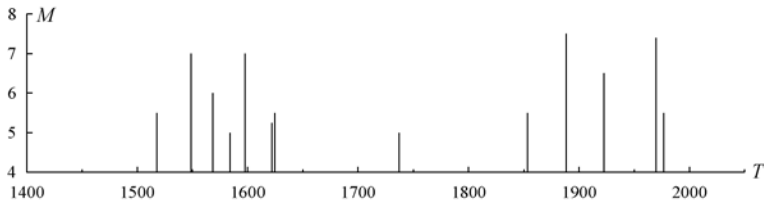
图 2 渤海海域内历史地震 $M-T$ 图Fig. 2 $M-T$ plot of historical earthquakes in Bohai Sea region

表 1 渤海地震活动期统计表

Table 1 Statistics of seismicity in Bohai sea region

活动时段	期限/年	活动期划分	各震级档地震次数	
			≥ 7.0	5.0~6.9
1548—1624 年	76	活跃阶段	2	3
1625—1887 年	262	平静阶段	0	0
1888 年—?	>100	活跃阶段	2	2

2 渤海海域地震危险性特征及工程抗震设防经验

2.1 渤海海域地震危险性特征

极值理论是常用的估计地震强度的方法之一，在地震危险性分析、地震预报、地震烈度区划和重要工程地震安全性评价等方面得到了广泛的应用（高孟潭等，1988；章淮鲁，1991）。李亚琦（1999）利用极值 III 型分布拟合地震危险性曲线，引入形状参数 K 表达地震危险性特征，以 1990 年地震烈度区划结果为基础，将中国的地震危险性分为 3 个区， K 值越小，地震危险性曲线越平缓，不同概率水准的地震强度相差越大。地震危险性曲线表达式为：

$$\lg(-\ln(1-P)) - \lg(-\ln(1-0.1)) = K \lg\left(\frac{1.5 - \lg A_{\max}}{1.5 - \lg A_{\max}^{10}}\right) \quad (1)$$

式中, P 为对应的超越概率值; K 为形状参数; A_{\max} 为超越概率为 P 的地震地面峰值加速度; A_{\max}^{10} 为相应于 50 年超越概率 10% 的地震地面峰值加速度。

近 10 余年来, 吕悦军等 (2003; 2008)、徐杰等 (2008)、陈国光等 (2003; 2004) 对渤海的地震构造、地震危险性进行了深入的研究。吕悦军等 (2008) 初步编制了渤海海域的地震动峰值加速度区划图, 将研究区划分为 0.10g、0.15g 和 0.20g 三个分区。本文以吕悦军等 (2008) 给出的 50 年超越概率 63%、10% 和 2% 的地震动峰值加速度数据为基础, 采用式 (1) 计算了渤海海域 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的网格结点的 K 值, K 值集中分布在 7—16 之间, 并将其划分为 7—10、10—13、13—16 三档, 对研究区进行危险性分区, 共分为 I 区、II 区、III 区 3 个区, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 大部分地区属于 II 区和 III 区, 地震危险程度中等; 渤中地区危险性较高, K 值较低, 属于 I 区。同时, 图 3 还显示出地震危险性分区与地震动峰值加速度分区存在一定的差异, I 区包含了地震动峰值加速度为 0.20g、0.15g 的分区; II 区跨越了 0.15g 和 0.10g 区; III 区跨越了 0.10g 和 0.05g 区。

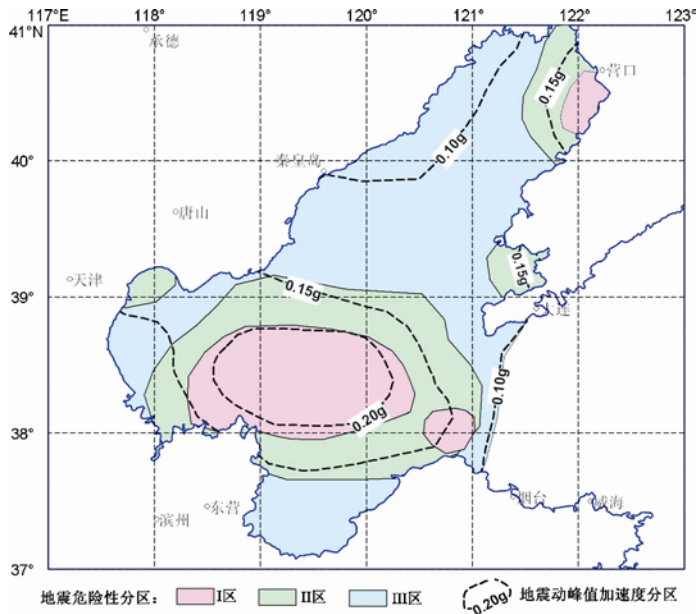


图 3 渤海海域地震危险分布

Fig. 3 Seismic risk map of Bohai Sea

2.2 已有工程抗震设防经验

本文收集整理了渤海地区 2000 年以来海洋平台设计地震动参数研究报告, 从中统计出可用的 46 个平台的海底泥面峰值加速度, 分别为重现期 200 年、1000 年, 50 年超越概率 63%、10% 和 2% (分别相当于重现期 50 年、500 年和 2500 年)。这些海洋平台分别分布在辽东湾、渤海湾、中央盆地以及莱州湾地区, 其设计参数可以代表渤海海域的地震活动环境。对这 46 组数据有针对性地计算了不同概率水准的地震动峰值加速度之间的比值, 统计分析了其分布规律。图 4 (a—d) 分别为重现期 200 年与 50 年超越概率 63%、50 年超越概率 10% 与重现期 200 年、重现期 1000 年与重现期 200 年、50 年超越概率 2% 与重现期 200 年地震动峰值加速度比值 R 与频次 N 分布图, 表 2 为其分布范围、均值分布统计结果。

从图 4 可以看出, 4 组数据的优势分布范围明显, 基本符合正态分布特征。第一组和第四组数据存在偏差, 主要是受 50 年超越概率 63% 和 2% 的数据的可靠度影响, 原因来自于小震和大震资料缺失, 由于小震的影响程度和范围较小, 历史记载缺失较多, 大震则是因为其复发周期长, 大于历史记载时段, 所用资料不能充分反映大震的活动特征。

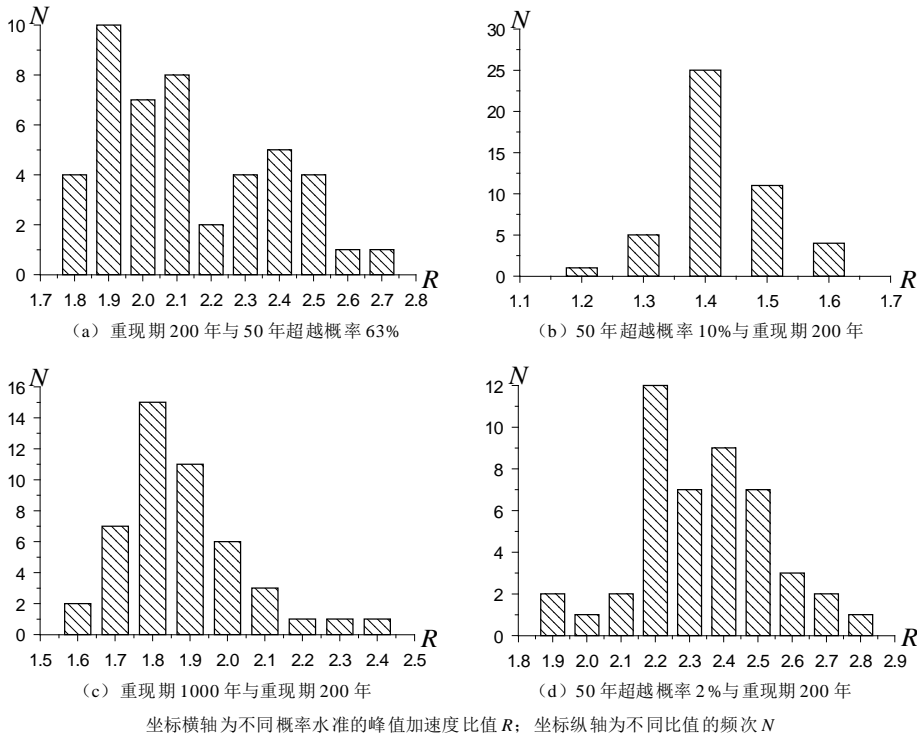


图 4 渤海海洋平台不同概率水准下设计地震动参数比值与频次分布

Fig. 4 Frequency distribution and ratio of seismic parameters at different probability levels for offshore platforms in Bohai Sea

表 2 不同概率水准的地震动参数之间的关系

Table 2 Ratios of peak accelerations at different probability levels

类别	$A_{200a}/A_{50a63\%}$	$A_{50a10\%}/A_{200a}$	A_{1000a}/A_{200a}	$A_{50a2\%}/A_{200a}$
范围	1.8—2.7	1.2—1.6	1.6—2.4	1.9—2.8
均值	2.1	1.4	1.9	2.4
中位值	2.1	1.4	1.8	2.3

3 抗震设防目标的确定

设防目标是指工程结构通过抗震设计所要达到的宏观防震目标。设防目标与设计方法有关。已颁布的各行业抗震规范中均制定了明确的设防目标, 比如: 建构筑物为三级设防, 其目标可概括为“小震不坏、中震可修、大震不倒”; 而水运、水工、公路等工程为一级设防, 目标为在设防地震作用下, 如发生局部损坏, 经一般处理后仍可正常使用。海洋平台目前采

用极限状态设计方法,即按照海洋平台结构的承载力极限状态和使用极限状态进行设计(王忠畅,2005),由此可确定相应的两级设防目标。巍巍(2004)采用时变分析方法模拟了导管架平台的地震破坏过程,将其分为3个阶段:定常反应阶段;塑变反应阶段;破坏阶段。由于导管架平台的空间刚架结构具有很高的冗余度,结构在变形超过塑变状态极限或有构件屈服后,仍具有继续承载的能力,因此,塑变状态可称为承载力极限状态;破坏状态对应使用极限状态。综合上述分析,本文定义两级设防目标,分别为强度水平地震和韧性水平地震(或称为常遇地震和罕遇地震)。

第一级设防目标定义为:经历强度水平地震时,结构处于定常反应阶段或塑变反应阶段,构件不发生破坏。我国建筑设防中的“小震不坏”要求结构处于线弹性阶段,不出现破坏;“中震可修”要求结构可发生非弹性变形,允许出现可修复的破坏。但海洋平台结构特殊,所用的钢材具有很大的塑性变形能力,在往复加卸载过程中结构的塑性变形能够很大程度地提高结构吸收和耗散地震能量的能力,仅将线弹性阶段作为正常工作阶段过于保守,因此将正常使用极限定位为塑性变形阶段。这一目标的受损指标可与“小震不坏”相对应,工作状态可进入塑变阶段,与“中震可修”的状态相对应。

第二级设防目标定义为:经历韧性水平地震时,允许结构和基础有一些损坏,次要部件遭到破坏,海洋平台已不能继续工作,但要求海洋平台的结构和基础系统仍保持整体稳定性,不至于倒塌,不发生生命损失和严重的环境污染。这一目标相当于我国建筑抗震规范的“大震不倒”。

4 抗震设防水准及设防参数的标定

本节采用类比法,确定与上述两级设防目标相对应的设防水准,然后根据渤海海域的地震危险性分区和地震动参数区划,给出不同分区相应设防水准的设防参数。

4.1 强度水平地震概率水准的标定

强度水平地震可类比建筑工程抗震目标“小震不坏”,所以正常使用极限地震可以简称为小震或常遇地震。对于一般建(构)筑物(丙类),常遇地震概率水准取50年超越概率63%。对于海洋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,本文采用与甲类建(构)筑物抗震设防水准持平的原则确定强度水平地震的概率水准。

《建筑抗震设计规范(GB 50011-2010)》(中华人民共和国国家标准,2010)未明确甲类建筑设防地震的概率水准,但规定地震作用应按高于本地区设防烈度计算,其值取地震安全性评价结果,当抗震设防烈度为6—8度时,按提高1度采取抗震措施,为9度时应符合比9度抗震设防更高的要求。鄢家全等(2000)的研究表明,地震烈度提高1度,峰值加速度增加1倍。马玉宏等(2002)利用设计基准期标定建筑的重要性类别,建议甲类建筑物常遇地震的概率水准取50年超越概率22%(相当于重现期200年),但未给出实际的工程资料进行检验。鄢家全等(2000)根据对全国128项工程场地设计地震参数的统计分析发现,重现期200年的地震动峰值加速度约为50年超越概率10%的2/3。高孟潭等(1998)发现50年超越概率63%的地震动峰值加速度为50年超越概率10%的1/3。因此,可以认为重现期200年的地震作用强度约为50年超越概率63%的2倍,也就是说重现期200年的地震作用强度满足了地震烈度提高1度的要求。

同时表2也表明,重现期200年与50年63%的峰值加速度比值在1.8—2.7之间,均值

为 2.1；50 年超越概率 10% 与重现期 200 年的峰值加速度比值在 1.2—1.6 之间，均值为 1.4，即重现期 200 年与 50 年超越概率 10% 的峰值加速度比值为 1/1.4（约为 0.7），略高于鄱家全等（2000）所得的 2/3。另外，海洋平台设计地震动参数的统计结果也表明，在渤海海域内海洋平台正常使用极限地震的重现期取 200 年达到了地震烈度提高 1 度的要求。

由上可见，强度水平地震的概率水准取重现期 200 年，同甲类建（构）筑物取值持平。另外，美国 API RP 2A-WSD 规范（API，2000）建议，南加利福尼亚海域的永久性结构的正常使用极限地震的重现期取 200 年。而彭艳菊等（2006）的研究表明，渤海地区的地震作用弱于南加州地区。因此，渤海海洋平台强度水平地震的概率水准取 200 年是安全的。

4.2 韧性水平地震概率水准的标定

韧性水平地震就是通常所称的罕遇地震。从根本上说，韧性水平地震作用下的抗震验算应该是弹塑性变形能力极限状态的验算。当前在我国海洋平台抗震设计中，韧性水平地震采用 API 规范中 8 腿平台的韧性设计方法，地震作用取强度水平地震设计值的 2 倍（API，2000；王忠畅，2005）。

同时表 2 中的数据也表明，重现期 1000 年与重现期 200 年的峰值加速度比值频次统计在 1.6—2.4 之间，平均为 1.9，大致上能满足强度水平地震作用 2 倍的要求；50 年超越概率 2% 与重现期 200 年的峰值加速度比值为 1.9—2.8，均值为 2.4，大于重现期 200 年地震作用的 2 倍。因此可以判断，渤海海域内重现期 1000—2500 年峰值加速度应该不小于重现期 200 年的 2 倍。也就是说，重现期 1000—2500 年的地震作用应该是强度水平地震的 2 倍及以上。据此，建议韧性水平地震的概率水准取重现期 1000—2500 年。

本文从地震危险性特征方面对韧性水平地震水准取值的合理性进行了论证，将上述渤海 46 个海洋平台强度水平地震作用取重现期 200 年的峰值加速度，韧性地震作用取强度水平地震作用的 2 倍，根据式（1）来计算强度水平地震的重现期，所得重现期分布在 773—1407 年，统计结果列于表 3。重现期主要集中在 1000—1400 年，共 28 个海洋平台，占样本的 61%；小于 1000 年的有 14 个海洋平台；大于 1400 年的有 4 个海洋平台。从海洋平台的分布位置看，韧性水平地震重现期长的位于辽东湾等地震危险性低、地震活动性弱的地区；韧性水平地震重现期短的集中在地震危险性高、活动性强的渤中地区，此结果符合实际规律。

由此可见，从地震环境角度看，渤海海域的韧性水平地震重现期取 1000—2500 年是安全、合理的。

表 3 不同重现期分档的海洋平台个数统计

Table 3 Platform number in different intervals of return period

重现期分档（年）	<800	800—1000	1000—1200	1200—1400	>1400
海洋平台数（个）	7	7	14	14	4

4.3 基于渤海地震环境的设防参数

根据渤海地震危险性分区和地震动参数分区，利用式（1）计算得到了不同地震危险性分区、不同地震动分区内，重现期 200 年、1000—2500 年的地震设防参数，结果如表 4 所示。表 4 中的数据表明，在同一危险性特征分区内，韧性水平地震的设防参数较大，重现期 1000 年的参数一般大于重现期 200 年参数的 2 倍；另外，即使在同一地震动参数分区内，地震危险性特征不同，强度水平地震和韧性水平地震的参数存在一定的差异， K 值小的分区内的强

度水平地震设防参数小于 K 值大的分区内的参数, 而韧性水平地震的情况则相反, 即在 K 值相对低的地区, 相同重现期的韧性水平地震的强度要大, 这也说明了划分地震危险性分区的必要性。

表 4 地震危险性分区内不同概率水准下的抗震设防参数 (单位: g)

Table 4 Seismic fortification parameters on different probability levels in various seismic risk zones (unit: g)

地震危险性分区	地震动参数分区 (50 年超越概率 10%)	强度水平地震 (重现期 200 年)	韧性水平地震 (重现期 1000—2500 年)
I 区 ($K=8$)	0.20	0.14	0.31—0.57
	0.15	0.11	0.24—0.45
II 区 ($K=11$)	0.15	0.12	0.21—0.34
	0.10	0.07	0.15—0.24
III 区 ($K=14$)	0.10	0.08	0.14—0.21
	0.05	0.04	0.07—0.11

5 结论

本文综合分析了渤海海域的地震环境, 研究了其地震危险性特征, 分析了该区海洋平台不同设防水准的设计地震动参数之间的关系, 为确定海洋平台抗震设防水准奠定了资料基础; 针对海洋平台两阶段设计的方法, 并与其他工程进行对比, 确定了两级设防目标; 采用与甲类建筑类比的方法, 以 46 个海洋平台设计地震动参数之间的关系为基础, 确定了强度水平地震的概率水准, 然后根据设计中韧性水平地震与强度水平地震的关系, 确定了韧性水平地震的概率水准, 并深入分析论证了其合理性; 最后根据渤海海域的地震动参数区划和地震危险性分区, 给出了不同地震危险性分区内的设防参数。

本文以渤海的地震环境为基础, 根据该地区海洋平台的地震动参数研究成果, 进行了海洋平台抗震设防水准和设防参数的初步研究。该研究是对渤海地区海洋平台多年的抗震设防经验的总结, 适用于渤海地区的地震环境。

参考文献

- 陈国光, 徐杰, 高战武, 2003. 渤海湾盆地大震的构造特征. 华北地震科学, **21** (2): 7—15.
- 陈国光, 徐杰, 马宗晋等, 2004. 渤海盆地现代构造应力场与地震活动. 地震学报, **25** (4): 396—403.
- 邓起东, 闵伟, 晁洪太等, 2001. 渤海地区新生代构造与地震活动. 见: 卢滨涛等主编, 新构造与气候环境变化. 北京: 地震出版社, 218—233.
- 刁守中, 蒋海昆, 1990. 渤海及邻区地震活动特征和构造涵义. 地震学刊, **3**: 7—17.
- 高孟潭, 贾素娟, 1988. 极值理论在工程地震中的应用. 地震学报, **10** (3): 317—326.
- 高孟潭, 张晓梅, 胥广银, 1998. 关于地震动参数区划图几个重要参数的讨论. 见: 中国地震局科技发展司主编, 中国地震区划学术讨论会文集. 北京: 地震出版社.
- 李亚琦, 1999. 中国地震危险性特征区划 [硕士学位论文]. 中国地震局工程力学研究所.
- 吕悦军, 彭艳菊, 唐荣余, 2006. 关于海洋平台抗震设防水准的考虑. 震灾防御技术, **1** (1): 39—46.

- 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, 2008. 渤海海域地震区划研究 [博士学位论文]. 中国地质大学(北京).
- 马玉宏, 谢礼立, 2002. 不同重要性结构的抗震设防水准. 哈尔滨建筑大学学报, **35** (5): 1—4.
- 欧进萍, 李惠, 吴斌等, 2008. 地震工程灾害与防御(II)——建筑抗震设计规范分析与比较. 见: 汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 彭艳菊, 吕悦军, 唐荣余, 2004a. 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.
- 彭艳菊, 唐荣余, 吕悦军等, 2004b. 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, 唐荣余等, 2007. 渤海某油田设计地震动参数及抗震设防标准研究. 地震工程与工程振动, **27** (4): 8—14.
- 彭艳菊, 吕悦军等, 2006. 探讨渤海及周边地区海洋平台抗震设防水准. 地震学报, **27** (6): 647—655.
- 彭艳菊, 2008. 基于渤海地震环境的海洋平台抗震设防标准研究 [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王华林, 王永光, 刘希强等, 2000. 渤海及周围地区断裂构造与强震活动研究. 地震研究, **23** (1): 35—43.
- 王健, 2007. 渤海海域历史地震和海啸. 地震学报, **29** (5): 549—557.
- 王忠畅, 2005. 固定式平台抗震分析若干问题探讨. 中国海上油气, **17** (6): 421—423.
- 魏光兴, 刁守中, 周翠英等, 1993. 郟庐带地震活动性研究. 北京: 地震出版社.
- 魏巍, 2004. 导管架式海洋平台地震破坏状态分析研究 [学位论文]. 中国海洋大学.
- 谢礼立, 张晓志, 周雍年, 1996. 论工程抗震设防标准. 地震工程与工程振动, **16** (1): 1—18.
- 徐杰, 吕悦军, 周本刚等, 2008. 营口-潍坊断裂带的新构造和新构造活动. 国际地震动态, (11): 43—46.
- 鄢家全, 陈家庚, 高孟潭等, 2000. 抗震设防地震的概率标定. 国际地震动态, (9): 1—7.
- 章准鲁, 1991. 工程地震中有关地震活动性研究的数理统计方法. 见: 国家地震局震害防御司编, 工程地震研究. 北京: 地震出版社, 12—27.
- 中华人民共和国国家标准, 1998. 海上平台场址工程地质勘察规范 (GB 17503-1998). 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2005. 工程场地地震安全性评价 (GB 17741-2005). 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2010. 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2010). 北京: 中国建筑工业出版社.
- API RP 2A, 2000. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design. 21th Edition.

Study on Seismic Fortification Criteria of Offshore Platforms in Bohai Sea

Liu Yufeng¹⁾, Peng Yanju²⁾, Wang Junqin³⁾, Sha Haijun²⁾ and Lu Yuejun²⁾

1) CNOOC Energy Technology & Services Limited Beijing Branch, Beijing 100027, China

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

3) CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China

Abstract Based on the seismo-tectonic background and the seismic risk characters of Bohai Sea region, we analyzed the design seismic parameters of 46 platforms in Bohai Sea, as well as the ratios of the peak accelerations for different probability levels. In accordance with the two-stage design method, a scheme of two design seismic levels is proposed, and two fortification goals are established respectively for the strength level earthquake and ductility level earthquake. By comparison to the Chinese seismic code for buildings it is determined that the probability level for the strength and ductility level earthquake takes respectively return period of 200 and 1000—2500 years, and further expounded on its rationality. Finally, the fortification parameters in sub-regions of Bohai area are given in the light of seismic risk zonation and ground motion division. This article is a summary of experience from many years work of offshore platform seismic fortification, and an exploratory study on the seismic fortification standard of offshore platforms in China, which may serve as reference for the standard establishment.

Key words: Bohai sea; Offshore platform; Seismic fortification level