

海域工程场地地震安全性评价的特殊问题

李小军

(中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080)

摘 要 本文探讨了海域工程场地地震安全性评价涉及的几个特殊问题, 如考虑中深源地震影响的地震危险性分析、海底软弱土层场地地震反应分析等方面的问题。借鉴春晓气田群开发建设项目地震安全性评价和其它工作的实践经验, 分析了对这些问题处理的对策, 给出了一些建议。

关键词: 海洋工程场地 地震安全性评价 中深源地震 软弱土层

引 言

20世纪末, 海洋石油、天然气开发的海洋平台和管道工程以及跨海隧道和桥梁工程的建设不断发展, 并且已具有了一定的规模。21世纪, 海洋资源的开发与利用将成为我国经济发展所要重点考虑的问题。我国海域辽阔, 海洋面积有四百多万平方公里, 近海海洋可开发资源丰富, 随着海洋资源的开发, 近海工程建设会大量增加, 海洋工程地震安全问题也将日益突出。为此, 针对我国海域及邻近区域地震和地质环境, 探讨海洋工程场地地震安全性评价的相关技术和方法成为当今和未来地震学和工程地震应用研究应给予重视的课题。

我国的地震安全性评价工作始于20世纪50年代, 现已形成较为完整的安评技术与方法体系, 相关的管理制度与技术法规也被推出(李小军, 2006)。国家标准《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)和《工程场地地震安全性评价》(GB1774-2005)的编制使得与地震安全性评价相关的技术、方法和法规体系更为完善和规范化。但是这些相关的技术、方法主要是针对陆域工程场地而发展起来的, 而针对海域工程场地的的工作, 特别是技术与方法方面的研究工作则很少。海域地震和地质研究工作的基础和研究水平较低, 远比陆域的程度差。另一方面, 中国海域及邻近区域的地震地质环境和工程场地方面还存在其特殊性, 包括在地震震源深度分布和场地条件等方面与陆域存在巨大差别, 这使得海域的工作更为困难。然而, 即使如此, 海域工程场地地震安全性评价仍在不断地开展并呈现增长趋势, 海域工程场地地震安全性评价工作每年开展几项甚至十几项。这促使我们加强相应的研究工作, 以逐步形成合理的评价技术和方法体系。

本文结合近年来完成的海域工程场地地震安全性评价项目工作, 如春晓气田群开发建设

【收稿日期】2006-04-18

【作者简介】李小军, 男, 生于1965年。博士, 研究员, 博士生导师。主要研究领域: 结构工程、地震工程、防灾减灾工程。

E-mail: beerli@vip.sina.com

项目地震安全性评价工作¹,分析和探讨海域工程场地地震安全性评价涉及的一些特殊技术和方法问题,包括地震危险性分析计算中的中深源地震活动性分析、潜在震源划分、地震动衰减处理,场地地震反应分析计算中海底淤泥与砂土层影响等方面的问题。

1 地震危险性分析计算

地震危险性分析计算是在工程场地区域地震区带和潜在震源区划分及地震活动参数确定后,利用适合的地震动衰减关系,以概率分析方法计算确定工程场地相应的基岩地震动参数的过程(胡聿贤,1999)。而地震区带和潜在震源区划分及地震活动参数确定,甚至地震动衰减特性确定的基础均是工程场地区域及近场区地震活动性、地震构造背景研究与分析的结果。因此工程场地所在区域的地震和地质背景分析是地震危险性分析计算的关键。

中国海的大地构造演化与欧亚板块、太平洋板块和印度洋板块之间的相互作用紧密相关。晚渐新世以来,菲律宾海板块在欧亚板块边缘的俯冲与中国东部的沉降,形成了中国海的现代形态(刘光鼎,1990)。太平洋板块和印度洋板块向欧亚大陆挤压,形成了中国及其周围邻四大中深源地震区,即吉林-日本深震区、台湾中深震区、中印缅交界区和新疆-兴都库什中深震区,他们位于各板块的交界带上(方炜,2003)。吉林-日本深震区、台湾中深震区是欧亚大陆板块受到太平洋板块的推挤俯冲造成的,这两个中深震区控制着我国大陆东海域及邻近区域的中深源地震区。为此,对我国海域工程场地地震动将受陆地和近海的板内地震活动及日本岛弧或琉球-台湾-菲律宾岛弧地带强震活动共同影响。春晓气田群开发建设项目工程场地区域涉及到的琉球俯冲带上的浅源和中源地震震源带及广泛分布在冲绳海槽一带的浅源地震带位于台湾中深震区²。一般认为,浅源地震的深度为0—69km,中源地震为70—300km,深度大于300km的地震为深源地震(方炜,2003)。

对于区域和邻近区域涉及中深源地震区的我国海域工程场地,地震危险性分析计算必须考虑中深源地震区潜在震源区划分的特殊问题,同时利用与之相适应的地震动参数衰减关系,以合理地估计场地基岩的地震动参数。下文将以春晓气田群开发建设项目工程场地地震安全性评价(春晓气田安评)的实际工作为例,分析对相关问题的处理思路和方法。

1.1 潜在震源划分的原则及方案

春晓气田安评中,考虑到该项目工程区域范围涉及陆域和海域,也包括远海海域中深源地震区,潜在震源划分则采用了浅源潜在震源区和中深源潜在震源区综合划分的思路,以形成空间不同深度多层次性的潜在震源划分方案。特别是考虑了菲律宾海板块西侧的琉球俯冲带上地震和地震活动性的空间分布特征。

在我国历次地震区划图的编制工作中,都没有直接研究和确定过我国远海海域及毗邻区域的潜在震源区划分方案。春晓气田安评项目根据琉球一带的地震构造特征,首次给出了该区域的潜在震源区划分方案。琉球岛弧地区毗邻我国的东海陆架盆地,是西太平洋岛弧地震系的一部分。这里的地震活动可分为两部分,即菲律宾海板块西侧的琉球俯冲带上的浅源-中源地震震源带和广泛分布在冲绳海槽一带的浅源地震活动。琉球俯冲带是一条现代强烈活动的板块俯冲带,它是西太平洋菲律宾海板块俯冲带的一部分。该俯冲带呈北东走向,全长

1,2 陆鸣,环文林,李小军,2002.春晓气田群开发建设项目地震安全性评价工作报告.中国地震局工程地震研究中心工程项目报告.

约 1000km。俯冲带上地震强烈活动, 发生地震的最大震级为 8.2 级。

(1) 琉球海沟板块俯冲带上的中源地震

琉球地区的地震分布具有明显的自琉球海沟一带的浅源地震向西逐渐加深为中源地震的变化趋势。从琉球俯冲带上的震源深度剖面图(图 1)上可以看出, 自琉球海沟向西有一个明显的倾斜震源带, 深入地幔的深度达 300km, 倾角上部约 20—30°, 中段 45°, 下段达 50—60°, 倾向西北。带内的地震最大强度达 8 级以上。

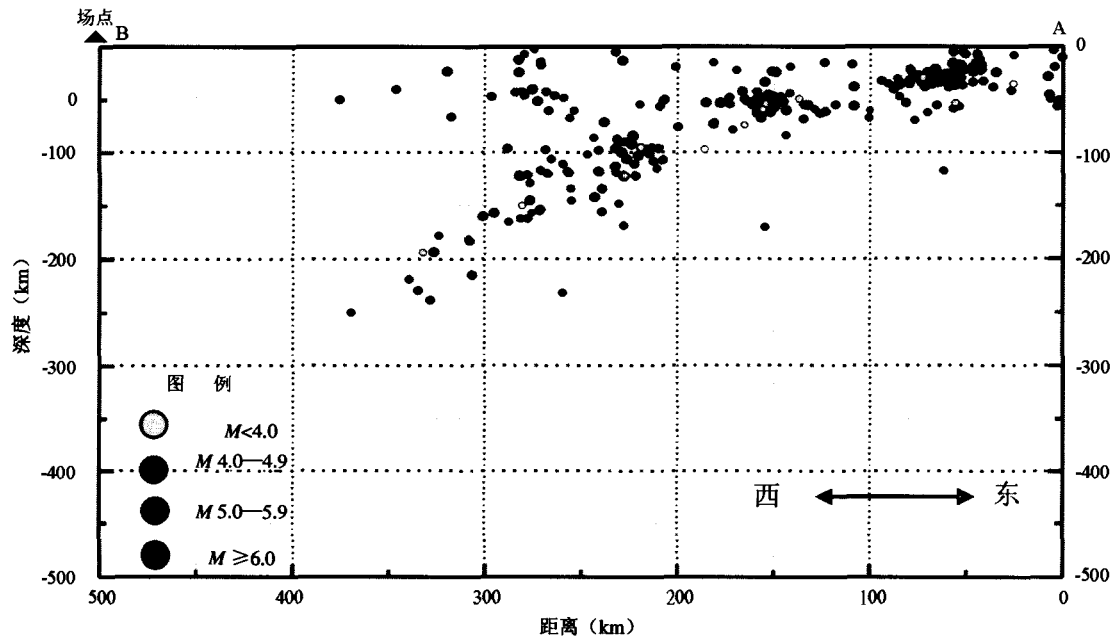


图 1 琉球俯冲带上的震源深度分布剖面图

Fig. 1 Section view of distribution of earthquake source depth in Ryukyu trench-arc-trough zone

(2) 琉球岛弧和冲绳海槽一带的浅源地震

琉球地区除中源地震外, 还广泛分布着强烈活动的浅源地震。这些浅源地震主要分布在琉球群岛和冲绳海槽内。其中, 琉球群岛一带的浅源地震为琉球海沟俯冲带上段的浅源地震。冲绳海槽的浅源地震主要分布在冲绳海槽的中央断裂和海槽东界断裂上。从震源深度剖面图(图 1)可以看出, 两断裂带上发生地震的震源带深达 60km。

(3) 琉球海沟板块俯冲带的潜在震源区

考虑到俯冲带上地震的强度和频度的分布在不同深度有一定差异, 该项目在此区域划分了 3 个不同深度的震源区, 分别位于俯冲带的上、中、下 3 个部分。俯冲带上段浅源地震上限 8.5 级潜在震源区, 震源深度 0—70km, 为俯冲带的上段, 地震频度高强度大, 1900 年以来已记录到 7 级以上地震 10 余次, 最大震级为 8 级; 俯冲带中段中源地震上限为 8.5 级潜在震源区, 震源深度 75—175km, 位于俯冲带的中段, 深入到地幔内部达 175km, 地震频度低于上区, 但强度仍很高, 1911 年 6 月 15 日 8.1 级地震就位于该区之内; 俯冲带下段中源地震上限为 7.5 级潜在震源区, 震源深度 175—300km, 位于俯冲带的下段, 深入到地幔内部达 300km, 地震频度和强度都低于上面两区, 发生地震的最大震级为 7.2 级。

(4) 冲绳海槽浅源地震的潜在震源区

冲绳海槽位于琉球岛弧的西侧,走向北北东,全长 800km 以上,是新生代早期的弧后裂陷槽地。断裂和地震活动强烈,火山活动频繁,海槽内年轻断层十分发育。主要有冲绳海槽东界断裂、冲绳海槽中央断裂、冲绳海槽西界断裂,3 条断裂的走向都为北北东向,为控制该裂陷槽地的主控断裂。地震的震源深度剖面图显示冲绳海槽东界断裂、冲绳海槽中央断裂为直立深达 60km 的岩石圈断裂带。冲绳海槽西界断裂活动性较前两条断裂弱,沿断裂没有发生过中强以上地震。根据地质构造和地震活动的差异,将冲绳海槽地区划分为 3 个震级上限 8 级的潜在震源区:冲绳海槽中部潜在震源区;冲绳海槽南部潜在震源区;冲绳海槽北部潜在震源区。

潜在震源区划分的基本原则为历史地震重演和构造类比原则。这两条基本原则是在板内地震构造和地震活动研究及调查工作的基础上发展起来的,因此存在如何在岛弧地带强震活动区应用或其是否适用的问题,对这一问题目前尚没有开展过深入的研究工作,更没有提出其它可以使用和借鉴的原则。在春晓气田安评中,主要依据的是历史地震重演原则。琉球沟弧槽地区由于构造运动和地震活动十分强烈,近百年来发生了十多次 7 级以上地震也包括 8 级以上的地震,这是项目中确定潜在震源震级上限的依据。当然,由于此区域的地震记录历史较短,会影响所确定结果的可靠性。另外,考虑到其构造较为复杂、宽度较大,记录到的地震震中定位精度较差,各潜在震源区的宽度也划得相对较大。

1.2 多种地震动衰减关系的应用

考虑到项目涉及的区域范围及毗邻区域划分了不同特征的潜在震源区,在进行概率地震危险性分析计算中,必须考虑不同特征的潜在震源区内地震对工程场地地震动影响的差别,这是地震动衰减关系所要考虑的问题。项目中对于陆地和近海潜在震源区及东大陆架和琉球群岛一带的浅源潜在震源区采用了适用于浅源地震的地震动衰减关系,对东大陆架和琉球群岛一带的中深源潜在震源区采用了适用于中深源地震的地震动衰减关系。

琉球群岛地区属于典型的消减带地区,地震活动强烈,既有浅源地震,也有中深源地震,其地震动衰减特征与中国东部相比有很大不同。因此,对于琉球群岛地区的潜在震源区,采用了消减带地区的地震动衰减关系。实际地震危险性分析计算中衰减关系的采用原则是:对于平台场点西部的潜在震源区,使用中国东部的地震动衰减关系,而对于平台场点东部的潜在震源区,则使用消减带地区的地震动衰减关系。具体使用的消减带地区的地震动衰减关系为 Youngs R. R. 等人(1997)得到的消减带地区衰减关系。这一衰减关系所使用的强震资料为环太平洋周边的俯冲带地区的地震记录,包括很多日本地震。此衰减关系适用于 5 级以上地震、10—500km 内的距离。

图 2 所示为基岩地震动峰值加速度衰减关系曲线。从图中可以看到,消减带地区衰减关系计算地震动峰值加速度的衰减速度明显低于我国东部地区的衰减关系,且随着震源深度的增加衰减速度明显减缓;在震中距 100km 范围内东部地区衰减关系的计算值大大高于消减带地区衰减关系的值,但当震中距更大时,消减带地区衰减关系的值逐渐接近甚至超过东部地区衰减关系的值。这些说明板块边缘俯冲带中深源大地震对远场场地地震动有着十分显著的影响,甚至是控制性的作用,即使在几百公里外仍有显著的影响。这是在地震安全性评价工作中容易被忽视的问题,因为板内浅源地震一般不存在这一现象。春晓气田安评项目的结果也展示了远场中深源大地震的影响作用。这提醒我们,在开展我国海洋建设工程场地地震安

全性评价工作时, 不应只考虑一般性的场地区域 (150km) 范围内的地震影响, 还应关注甚至是几百公里范围外的板块边缘俯冲带上的中深源大地震的影响问题。

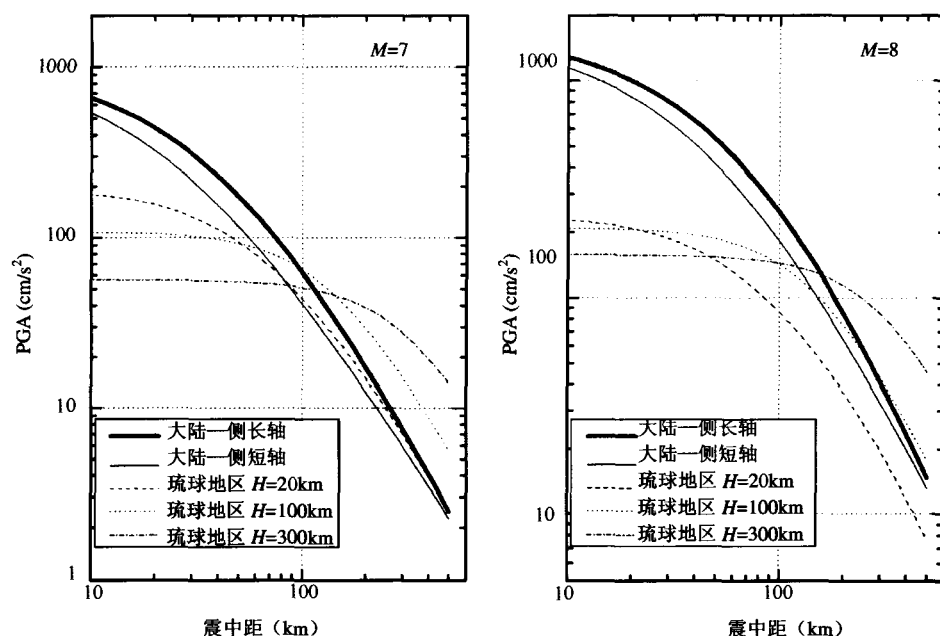


图2 工程区域基岩地震动峰值加速度衰减关系曲线

Fig. 2 Peak acceleration attenuation curve of earthquake ground motion on bedrock of engineering site region

为了同时合理考虑板内浅源地震和消减带地区地震对地震危险性分析结果的影响, 作者结合春晓气田安评项目工作, 建议采用给每一潜在震源区赋予一个特征参数, 以表明其属于板内浅源地震潜源还是消减带地区地震潜源, 而后在地震危险性概率分析计算中计算不同潜在震源区内地震的贡献时采用其相对应的衰减关系。并且, 作者在已有地震危险性概率分析计算程序的基础上编制出了同时使用多种衰减关系的计算程序。

2 场地地震反应分析计算

场地土层地震反应分析计算是安评工作的主要环节。虽然局部工程场地条件十分复杂, 但地震安评工作中常用的还是基于一维场地模型的地表土层地震反应分析方法, 这一简化在一定的情况下能控制或反映局部工程场地条件对场地地震动的影响 (李小军, 1992a)。如何考虑土体的非线性效应是土层地震反应分析中的难点问题, 等效线性化波动分析方法 (Idriss I. M., 1968; 廖振鹏, 1989) 是最早提出和应用的考虑土体非线性特性的土层地震反应分析方法, 这一方法也是目前工程场地地震安全性评价工作中仍在普遍采用的方法。随后也发展了一些能反映土体的非线性物理过程、具有清晰物理意义的非线性积分方法 (Pyke R., 1979; 李小军, 1992b)。

以上所提到方法的一个共同点是其单相各向同性介质的假定, 理论上讲它不适用于具有含水土层特别是含水饱和砂土和软土层的场地。目前工程场地地震安全性评价工作中基本上没有考虑这一问题, 原因之一是我们面临的大多数工程场地并不存在饱和砂土和软土层, 另一个原因是还没有一个较为公认的考虑饱和砂土和软土层对场地地震动影响分析的计算便于

工程应用的方法。对于海洋工程场地这类必然存在饱和砂土和软土层的场地,工程实践中也基本上没考虑其对场地地震动的影响。如何考虑饱和砂土和软土层中水的影响作用也一直是人们关注的研究课题,一般情况下人们利用基于有效应力原理的方法来处理该问题(朱镜清等,1999;孙锐等,2004),但在实际工程中如何确定计算所需参数仍是一个困难的问题,这也影响着这些方法在工程场地地震安全性评价实际工作中的应用。这一现状值得我们注意,需要发展实用的分析计算方法并加以推广应用。

对于海洋工程场地地震安全性评价工作,不但存在是否需要在土层地震反应分析计算中考虑饱和砂土和软土层中水对场地地震动的影响问题,而且还存在如何合理地对待饱和砂土和软土层影响作用的更进一步的问题。海洋工程场地中海床表层土往往是较厚的淤泥质土层和松散砂土层,其剪切波速值十分之低,如小于150m/s。在这种情况下,土层地震反应分析计算得到的海床地表地震动反应往往较为偏异,也就是地震动峰值加速度较小而反应谱的拐点周期值很大(如大于1.0s)。这些结果的出现从理论分析的角度不难理解,海床地表十分软弱的土层对地震动高频成分的强抑制和对低频成分的强放大作用。作者在这里要指出的不只是这些计算结果的合理性问题,还有如何对待这些计算结果和在确定场地计算模型中如何处理这些十分软弱土层的问题。海洋工程结构基础往往采用深埋基础和桩基础,海床地表十分软弱的土层对海洋结构反应的影响则十分之有限。因此,海床地表地震动反应并不能有效地体现海洋工程结构地震反应分析计算的地震动输入。

鉴于以上分析,作者认为海床地表地震动参数的确定不能作为海洋工程场地地震安全性评价工作的主要工作目标,而应根据工程基础设计的具体情况提供工程基础位置或场地不同深度位置的地震动参数。另一方面,一些抗震设计规范中给出了基于场地地表地震动参数采用折减系数(如随深度线性减小)确定不同深度位置地震动参数的简单处理方法,而这些简单处理方法是基于土层变化较均匀(剪切波速随深度较为均匀地增长)场地情况的计算结果分析获得的;但海洋工程场地条件下的场地地震动显然不符合这一规律。在没有明确确定场地不同深度处设计地震动参数的情况下,工程场地地震安全性评价工作所提供的地表地震动参数就决定了工程结构抗震设计的地震动输入,这对于海洋工程结构将会导致十分不合理的地震动输入,以至引起错误的抗震设计结果。为了避免这些问题的出现,同时考虑到海洋工程场地海床地表软弱土层对结构反应的实际影响作用较小的现实,作者建议在工程场地地震安全性评价工作中可以采用忽略这些地表十分软弱土层的处理方法,即土层地震反应分析计算中可以删除这些土层。

海域工程场地地震反应分析计算中人们还需要考虑另一个问题,那就是因为海床地表与陆地场地地表不同,其上存在一定深度的海水,海水对场地地震动的影响。一些研究人员对该问题开展了研究工作(郑天愉等,1985;朱镜清,1988;李金成等,2001)。这些研究工作表明,对于海床一维水平土层场地,海水对水平向地震动的影响可以忽略不计,对竖向地震动的影响可以采用视海水为不可压缩(刚性)层的方法考虑;对于海床表面起伏(存在地形)的情况,海水对无论是水平向还是竖向地震动均有一定的影响。对于以上结果我们不难理解,由于海水属于一种抗剪能力很弱(可视为不抗剪)而抗压缩能力很强(可视为刚性)的流体介质,其不能传播剪切波而只能传播压缩波。因此,作者认为,当基于一维水平土层模型计算海床场地地震反应时,不需要考虑海水对水平向地震动的影响,其场地土层模型和计算方法与陆地上的完全相同,但需要考虑海水对竖向地震动的影响,将海水视为一刚性土层后其

场地土层计算模型和计算方法也将与陆地上的完全相同; 对于海床表面起伏(存在地形)的场地, 需要建立将海水与海床场地土层一并考虑的二维或三维场地模型进行场地影响的分析计算。

3 结 语

本文分析了海洋工程场地地震安全性评价工作中地震危险性分析、场地土层地震反应分析涉及的几个特殊技术问题, 介绍和分析了已有工程实践中对这些问题所采取的处理方法, 指出了对这些特殊问题考虑的必要性 and 这些问题的影响作用, 对问题的处理提出了一些建议。作者希望本文能对更合理地开展海洋工程场地地震安全性评价及相关研究工作有参考价值。

致谢: 本文引用了春晓气田群开发建设项目工程场地地震安全性评价项目工作所得到的资料和结论, 为此作者向参加该项目工作的所有技术人员表示感谢, 如有引用不当之处还请谅解。

参考文献

- 方炜, 吴富春, 张春生, 刘春, 邵辉成, 2003. 中国及其周邻地区中深源地震的活动特征分析. 地震地质研究, 26 (4): 308—314.
- 胡聿贤, 1999. 地震安全性评价技术教程. 北京: 地震出版社.
- 李金成, 朱达力, 朱镜清, 2001. 二维不规则海底地形对海底地震动的影响. 自然灾害学报, 10 (4): 142—147.
- 李小军, 1992a. 场地土层对地震地面运动影响的分析方法. 世界地震工程, 第 2 期: 49—60.
- 李小军, 1992b. 非线性土层地震反应分析的一种方法. 华南地震, 12 (4): 1—8.
- 李小军, 2006. 工程场地地震安全性评价工作及 related 技术问题. 震灾防御技术, 1 (1): 15—24.
- 廖振鹏, 李小军, 1989. 地表土层地震反应的线性化解法. 见: 廖振鹏主编. 地震小区划——理论与实践. 北京: 地震出版社, 141—153.
- 刘光鼎, 1990. 中国海大地构造演化. 石油与天然气地质, 11 (1): 23—29.
- 孙锐, 袁晓铭, 2004. 液化土层对地表加速度反应谱的影响. 世界地震工程, 20 (3): 33—38.
- 郑天愉, 姚振兴, 谢礼立, 1985. 海底强地面运动计算. 地震工程与工程振动, 5 (3): 13—22.
- 中华人民共和国国家标准, 2001. 中国地震动参数区划图 (GB18306-2001). 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2004. GB 17741-2004 《工程场地地震安全性评价》. 北京: 中国标准出版社.
- 朱镜清, 1988. 地震作用下海水与海床土的耦合运动. 地震工程与工程振动, 8 (2): 37—43.
- 朱镜清, 周建, 朱达力, 1999. 海底淤泥层对海洋工程地震作用环境的影响问题. 地震工程与工程振动, 19 (3): 1—6.
- Idriss I.M. and Seed H.B., 1968. Seismic response of horizontal soil layers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 94 (SM4): 1003.
- Pyke R., 1979. Nonlinear soil models for irregular cyclic loadings. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 105 (GT6): 6-715.
- Youngs R.R., Chiou S.J., Silva W.J. and Humphrey J.R., 1997. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone. Seismological Research Letter, 68 (1): 58—73.

Special Problems on Evaluation of Seismic Safety for Offshore Engineering Site

Li Xiaojun

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080)

Abstract Some special problems in evaluation of seismic safety for offshore engineering site are discussed in this paper, such as the seismic hazard analysis considering the influence of moderate-deep focal earthquake, and the earthquake response analysis of soft soil layers on seabed. Based on experiences in the practical projects, for example, the project of Chunxiao Gas Field Complex and others, and some solutions are proposed and discussed in this paper.

Key words: Offshore engineering site; Evaluation of seismic safety; Moderate-deep focal earthquake; Soft soil layer

首届西南地区地震安全性评价工作 研讨会在成都成功举行

2006年4月17日—22日,首届西南地区地震安全性评价工作研讨会在成都成功举行。研讨会由四川省地震局工程地震研究院发起和承办,会议的主题:促进西南地区地震安全性评价工作开展,更好地服务社会;促进西南地区各省、市从业单位的相互学习、相互交流,共同提高地震安全性评价工作的质量;加深对 GB17741-2005《工程场地地震安全性评价》的理解,把握地震安全性评价工作的关键技术环节和要点。

本次会议的举行得到了中国地震局震害防御司的肯定和支持,也得到了西南地区地震安全性评价持证单位的热烈响应,出席本次会议的单位有:云南工程地震研究院、重庆市地震局工程地震研究所、西藏自治区地震局工程地震研究所、成都市地震局工程地震研究所、四川省地震局工程地震研究院。会议还邀请到中国地震安全性评定委员会高孟潭副主任委员、陈国星副主任委员、张裕明顾问委员到会进行专题学术讲座,讲座的题目有:“地震安全性评价报告评审工作的探讨与思考”、“对重大工程地震安全性评价技术负责人的基本要求”、“地震构造评价重点内容与要求的阐释”、“当前地震安全性评价报告中存在的几个技术问题”。四川省地震安全性评定委员会的部分委员列席了本次会议。

本次会议取得了圆满成功,达到了各项预期目标。通过专家讲授以及参会单位和相关人员热烈研讨,各单位进一步加深了对 GB17741-2005《工程场地地震安全性评价》的理解,更加明确了地震安全性评价工作的关键技术环节和要点,大家一致表示,要将本次会议的成果用于各地地震安全性评价工作的具体实践中,提高社会责任意识,紧密结合不同工程的抗震设防特点,把握关键技术环节,注重实际资料,提高工作质量,有针对性地进行地震安全性评价,为社会提供科学、安全、经济的抗震设防要求,共同推进西南地区防震减灾事业的发展。

各参会单位还对本次会议的组织、形式和成果给予了高度评价。大家商定将定期举行西南地区地震安全性评价工作研讨会,加强交流,共同提高,同时希望继续得到中国地震局震害防御司、中国地震安全性评定委员会以及有关专家的指导和帮助。

雷建成 供稿