

工程场地地震安全性评价工作 及相关技术问题

李小军

(中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080)

摘要 本文简单回顾了工程场地地震安全性评价工作的变迁与发展过程,探讨了几个关键的技术问题,分析了相关技术方法的发展与更新趋势。文中重点讨论了不同的地震影响量之间概率水平的一致性问题,同时对在设防水准的选取、地震危险性分析中的不确定性考虑、地震动衰减关系的获取、地震动时程合成中的参数匹配、场地地震反应分析中的非线性处理、设计地震动确定等方面遇到的一些技术问题进行了分析,并且给出了对这些问题处理的一些看法和建议。

关键词: 工程场地 地震安全性评价 设防水准 地震影响 衰减关系

引言

工程场地地震安全性评价工作(以下简称“安评”)的目标是估计未来一定时段内(工程)场地或区域与城市遭受地震威胁的可能性及相应的程度及特性,包括地震动及地面破坏两方面的内容,为工程建设抗震设防及已有工程的抗震可靠性分析、建设规划和其它有关问题(如投资决策、地震保险)提供依据。这里的‘工程场地’为广义概念的场地,它应被理解为新建、扩建和改建的单体或单项工程建设场地,它包括城市 and 小区、企业、厂矿新建、扩建和改建中的规划和建设场地,以及已有工程所在的场地,也包括已有的城市 and 小区、企业、厂矿所在的场地。而这里的‘工程’不但包括人工建设工程,也应包括与人类生产及生活相关联而被人类所利用和改造的自然体,如山坡、溶洞、河道等。

工程场地地震安全性评价工作是在地震学、地质学和地震工程学研究的基础上,考虑到工程结构抗震设防技术与方法发展及抗震设防要求的提高,形成的科技应用工作。安评工作范围与深度的扩展和工作的规范化,相关方法与技术也需不断地发展与完善。其发展经历了从简单到复杂,从经验分析到经验与理论计算分析的结合,从应用探索与个别实践到行业规范化与普遍应用等阶段。本文将对安评工作的历史、现状与特点作简要介绍,对近些年来这一工作中所遇到的一些技术问题进行探讨。

[收稿日期] 2006-01-05

[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

1 安评工作的发展

工程场地地震安全性评价中的‘地震安全性评价’一词的正式与广泛使用应该是在国家地震行业规范《工程场地地震安全性评价工作规范》(DB001-94)及以后。在此之前,相关的工作及项目报告中出现较多的是‘地震烈度鉴定’、‘地震区划’、‘地震危险性分析’、‘地震小区划’和‘地震烈度复核’等。现在的安评工作应该说是这些工作的完善、发展和规范化的结果。我国安评工作的历史可追溯到第一个5年国民经济计划前与初期。那时候全国各地工程建设项目迅速增多,大量重要工程建设都需要有当地的地震烈度作为抗震设计的依据。为此,我国地震工作者开展了鉴定地震烈度的工作。

早期开展的地震烈度鉴定工作依据的是确定性方法,而现在安评工作主要依据的是概率方法。地震危险性评定的概率方法最早是由日本地震学家河角广在20世纪50年代初提出的,但目前我们广泛使用的地震危险性分析的概率方法,其基本思想是源自1968年美国学者Cornell提出的地震危险性分析方法(Cornell, 1968)。该方法在20世纪70年代末才引入我国并得以应用,较早采用概率地震危险性分析方法的项目有渤海海洋石油平台、四川二滩水电站等工程场地的地震危险性分析及安阳市、北京市、大连市等城市地震小区划。20世纪80年代,概率方法在我国重要和重大工程安评及城市地震小区划工作中得到了全面推广应用,与此同时安评技术与方法体系被建立。该方法体系中,不但包括与概率地震危险性分析方法直接相关的地震区与带划分、潜在震源区划分、地震活动性参数确定、地震动参数(包括烈度)衰减关系确定、地震烈度和基岩地震动参数的概率方法计算等,还包括场地土层条件对地震动参数影响分析的方法、场地设计地震动参数的确定以及地震地质灾害分析方法。第三代中国地震烈度区划图(1990)的编制采用了概率地震危险性分析方法的思路(国家地震局, 1996)。这一阶段建立起来的方法体系在安评工作中沿用至今。1986年廖振鹏负责完成了大连市地震小区划工作,该项目对城市和小区域地震小区划工作的思路、技术和方法作了系统性的探讨和应用。这一工作代表着我国地震小区划工作的一个里程碑。随后出版的由廖振鹏主编的《地震小区划——理论与实践》(廖振鹏, 1989)、行业标准《工程场地地震安全性评价工作规范》(DB001-94)、《地震安全性工作规范培训教材》(初稿)¹、国家标准《工程场地地震安全性评价技术规范》(GB1774-1999)等为地震小区划工作及工程场地地震安全性评价工作提供了系统性的思路、技术和方法。

在我国地震安全性评价的理论方法和技术发展以及实际应用工作不断开展的同时,相关的管理制度与技术法规也被推出与完善。国家地震局于1983年成立了地震烈度评定委员会,1990年成立了国家地震烈度评定委员会,即现在的国家地震安全性评定委员会。各省、市、自治区也相继成立了地方的地震安全性评定委员会(原为地震烈度评定委员会)。这些委员会负责地震安全性评价结果的审定工作。20世纪90年代初,由国家地震局组织、胡聿贤负责开始编写地震安全性评价工作的技术规范,1994年编制出了《工程场地地震安全性评价工作规范》(DB001-94),该规范作为国家地震行业标准于1994年由国家地震局颁布实施。这一规范的编制,充分吸收了几十年来,特别是20世纪80年代以来的研究与应用工作成果与经验,从思路、技术和方法上规范了地震安全性评价工作。该行业标准颁布实施使我国的安评

1 胡聿贤等, 1994. 地震安全性评价工作规范培训教材(初稿). 国家地震局工程地震研究中心.

工作得到了迅速发展，安评工作的科研和技术专业队伍不断壮大。在行业标准的基础上，结合规范实施后积累的经验和发现的问题，编制了国家标准《工程场地地震安全性评价技术规范》(GB1774-1999)，该规范于1999年由国家质量技术监督局批准实施。国家标准的实施，使得我国的安评工作更加规范化。与此同时，国家地震局作为国务院地震工作主管部门制定了地震安全性评价工作上岗管理制度，以规范地震行业技术应用工作。为配合行业规范和国家标准的实施及地震安全性评价工作的上岗培训，国家地震局震害防御司委托国家地震局工程地震研究中心组织有关专家编写了《地震安全性评价工作规范培训教材》(初稿)(1994)，该内部教材被作为此后地震安全性评价工作上岗培训和业务培训的教材。5年后，该教材被修订并改名为《地震安全性评价技术教程》，并由地震出版社于1999年正式出版。1997年全国人民代表大会常务委员会通过的《中华人民共和国防震减灾法》及2001年中华人民共和国国务院公布的《地震安全性评价管理条例》，从法律和行政管理上为我国地震安全性评价工作提供了保障。

国家标准《工程场地地震安全性评价技术规范》(GB1774-1999)实施的5年期间正是我国“十五计划”实施的5年，国家重大工程如青藏铁路工程、西气东输工程、南水北调工程、海洋油气开发工程、跨海湾与连岛大型桥梁、大型水电工程及核电站工程等的建设，对安评工作提出了更严格和新的要求，促使了安评方法和技术的完善与更新。在经历几年的安评方法和技术发展与应用经验的积累，特别是《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)编制和颁布实施后，安评技术规范的修订成为必要，为此，修订的国家标准《工程场地地震安全性评价》(GB1774-2005)完成并于2005年10月颁布实施。修订的国家标准除完善条文、修订了部分内容的技术要求外，还在以下两方面做了大的改变：(1)根据安评工作的技术和内容按由强到弱的顺次，重新划分了安评的工作分级，即Ⅰ级工作的内容不变、Ⅱ级工作为原规范中的Ⅲ级工作、Ⅲ级工作为原规范中的Ⅳ级工作、Ⅳ级工作的内容由原规范中的地震烈度复核改变为地震动峰值加速度的复核；(2)增加了Ⅰ级工作相应的内容、技术要求和结果表述的章节。

地震安全性评价工作的第一个突破性的发展是由确定性方法向概率性方法的转变，即在地震危险性分析中引入了概率分析与计算方法。第二个突破性的发展应该是在场地条件对地震动的影响考虑方面引入了直接的场地土层地震反应分析与计算方法，以取代场地分类与经验(或规范)地震动参数调整的方法，这一发展应该说是受益于胡聿贤先生的思想。胡聿贤在20世纪70年代初期就建议设计地震动的估计可以分两步：先确定基岩地震动，然后再考虑地表土层的影响。这一思路的真正实现是在20世纪80年代初美国学者Idriss和Seed(1968)提出的场地土层地震反应分析的等效线性化方法被引入我国之后(谢君斐等,1981)。地震安全性评价工作的第三个突破性的发展是在分析与估计工程场地设计地震动参数(包括地震烈度)的同时，还要分析工程场地遭受地震地质灾害的可能性和程度。

工程场地地震安全性评价技术规范明确了安评工作的总体目标是给出工程场地的工程抗震设防要求水准的地震动参数值及地震地质灾害的可能性与程度。设防地震动参数包括地震烈度及地震动峰值加速度、峰值速度、峰值位移、加速度反应谱(不同阻尼比的)地震动时程和地震动场等；地震地质灾害包括地震作用引起的场地地表破裂、断层错动、砂土液化、软土震陷、岩土崩塌与滑坡及湖涌与海啸等灾害。对于不同的工程场地，需要根据工程抗震设防的要求及工程场地地震、地质环境确定不同的工作内容和深度，提供不同的设防地

震动参数及不同种类地震地质灾害的评价结果。对Ⅰ级安评工作,在确定设防地震动参数时需要综合考虑确定性方法和概率方法的分析和计算结果,需要提供工程场地不同阻尼比值的设计地震动反应谱;需要在场区范围内进行能动断层调查和鉴定,详细评价场区断层地表或近地表破裂影响。对Ⅱ、Ⅲ级安评工作,在确定设防地震动参数时只需考虑概率方法的分析和计算结果,提供的是工程场地某一固定阻尼比值的设计地震动反应谱;对Ⅳ级安评工作,还需要以分区图的形式表述场地设防地震动参数及地震地质灾害。

2 地震影响量之间概率水平的一致性

工程场地设计地震动参数值及地震地质灾害影响范围和程度的确定是地震安全性评价工作的目标。设计地震动参数的确定往往基于概率方法得到,参数值带有一定的概率水平含义。对于核电等重要性和影响极大的工程,安评工作中同时还采用了确定性方法,但在确定设计地震动参数时,将确定性方法的计算结果与概率方法的某些特定概率水平的结果一并综合考虑。这意味着隐含地将确定性方法的结果赋予了一定的概率水平。如核电工程安评中,这一概率水平值为年超越概率 10^{-4} 。地震地质灾害的评价中,由于灾害类型较多,不同类型的灾害评价方法也各不同。一些是基于具有概率意义的设防地震烈度或地震动参数,得到的是概率性结果,如砂土液化、软土震陷等;另一些则在地震地质调查资料及分析结果的基础上,考虑最不利条件得到的(可能性极小的)确定性结果,如断层活动地表错动影响等。

断层活动地表错动影响评价是安评中地震地质灾害评价的主要内容。安评技术规范规定“根据断层活动性调查结果,评价断层的地表错动特征。”这里强调了对断层活动地表错动影响结果的评价,而没有要求考虑其发生的可能性或概率。考虑到断层活动地表错动会导致跨断层结构的破坏,建筑抗震设计规范就发震断裂错动对地面建筑影响的考虑作了明确规定。对需要考虑断裂错动影响的场地规定了采取一定距离避让的原则,这也就是将其作为工程选址的一个否决因素。无论是安评技术规范还是建筑抗震设计规范,在考虑断层活动地表错动影响时均是从确定性角度来考虑的。对于核电等重要性和影响极大的工程,这种确定性考虑问题的思路可以接受,因为这些工程要考虑对极小可能性地震事件的设防。而工程结构也包括核电站等极为重要的工程结构,其抗震设计均基于一定设防水准的设计地震动参数,即其抗震设防采取了接受一定风险的思想,所能接受的风险水平高低与工程的重要性有关。如对于建筑工程,抗震设计规范规定了“大震不倒”的设防原则,这意味着其接受了倒塌概率高达50年2%的风险。

实际上,基于设计地震动参数的抗震设防(这里简称“抗震”)和考虑断层活动地表错动影响的抗震设防(这里简称“抗断”)是工程抗震设防的两大方面。上面的分析表明,现今的抗震设防原则中“抗震”和“抗断”的思路并不一致,“抗震”是概率性的,而“抗断”却是确定性的。另外,地震地质灾害评价和影响分析中,除了断层活动地表错动灾害外其它类型灾害一般也考虑了设防概率水平,如砂土液化、软土震陷、岩土滑坡等均基于一定的设防烈度或设计地震动参数值。既然人们认可了“抗震”的概率性思想,似乎“抗断”也应采用这一思想,即可以接受断层活动地表错动引起工程结构破坏的一定的风险水平。换言之,如果对活动断层发震并引起地表错动的发生概率作出了估计,若其估计的概率值小于工程防倒塌风险水平的概率值,则可不考虑“抗断”问题,否则,必须考虑“抗断”问题。当然,这里指的所能接受的风险水平应与“抗震”的风险水平综合考虑。如果采用上面建议的“抗断”

思想,则给安评工作提出了一个新的问题,即评估活动断层发震并引起地表错动的概率问题。

以上分析表明,工程抗震设防中,不同的地震影响量(如地震动参数与地震地质灾害影响)之间实现概率水平的一致性是一个值得研究的问题。达到概率水平的一致性既能确保工程抗震设防的安全性,又能实现抗震设防的经济性和土地的有效利用。

3 安评技术问题探讨

我国的安评工作从 20 世纪 50 年代开始发展到今天,无论是在技术与方法、行政管理与法规制定方面,还是在行业技术队伍建设和应用市场拓展方面,均已较为成熟。但多年的工程应用实践和相关的理论与应用研究都给安评工作提出了新的问题和要求。这就是下面所要讨论的内容,这里提到的也只是其中的一部分,而且涉及到的只是工程地震学科方面的问题。

3.1 设防水准

安评技术规范和安评工作的其它相关法规对安评工作的对象、目的和目标作了明确的规定,但并没有明确提到工作所涉及的设防水准的选取和确定问题。国家或行业抗震设计标准与规范中,设计地震动参数(包括烈度)均取《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)所确定的地震动参数值,或对应的地震烈度值,这意味着设防水准取为 50 年超越概率 10%。确定这一基本设防水准后,不同的工程结构抗震设计再基于其设防原则间接地确定其它设防水准。但应该了解的是,此设防水准及确定的地震动参数值是针对非重要和重大工程而言的。

《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)规定的抗震设防原则为“小震不坏、中震可修、大震不倒”,且规定“中震”为 50 年超越概率 10%的地震影响,并间接确定了“小震”和“大震”为 50 年超越概率约 63%和约 2—3%的地震影响。对于重要或重大建筑,规范中对设防地震动参数值的确定还另有规定,如“甲类建筑,地震作用应高于本地区抗震设防烈度的要求,其值应按批准的地震安全性评价结果确定;……”。这说明对于重要和重大建筑,其设防水准应高于一般性建筑,并应开展安评工作给出“较高设防水准”下的设计地震动参数值。有些标准或规范对此“较高设防水准”的选取有明确规定,如《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97)中规定运行安全地震动年超越概率水平为 2×10^{-3} ,极限安全地震动年超越概率水平为 0.1×10^{-3} ;《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004-89)条文说明中规定,重大工程建设场地的地震危险性分析应给出满足年超越概率为 2×10^{-3} 、 1×10^{-3} 、 2×10^{-4} 的基本峰值加速度、反应谱、持续时间的加速度时程。而大多数抗震设计规范,也包括建筑抗震设计规范对此“较高设防水准”未明确规定。因此,在开展安评工作时,设防水准的选取和确定上往往会遇到困难。很多安评工作中则将建筑抗震设防原则下的 50 年超越概率 63%、10%、2% (或 3%) 作为设防水准。这种简单的设防水准选取对一般工程是合适的,而对具体安评工作涉及的特定工程的抗震设防不一定合适。

设防水准的确定不只是安评的技术问题,同时还是工程设计与行政决策问题。但无论如何安评工作开始之前要解决这一问题,否则,安评所确定的地震动参数值将没有工程应用价值。但这一设防水准的确定不属于安评技术规范所规定和要求的内容。原则上讲,设防水准的确定应考虑工程的特点和重要性,依据工程抗震设防的相关标准或规范的规定,或地震主管部门的规定和审批结果,或地震主管部门与建设工程主管部门共同协商的结果。

3.2 不确定性

不确定性涉及到安评工作的每一个环节,包括地震带和潜在震源区划分、地震活动性参

数以及地震动参数衰减关系等方面的不确定性,也包括场地土层地震反应分析中的土层分层、波速、土体非线性特性的不确定性。各环节的不确定性最终将归结为所确定的场地地震动参数值和地震地质灾害程度的不确定性。目前,安评工作中对地震动参数衰减关系的不确定性均作了考虑,但一般只限于考虑衰减关系统计方差反映的不确定性。实际工作结果表明,安评工作各个环节中的不确定性对确定场地地震动参数有很明显的影响。近些年来,从理论研究和工程应用的角度,一些学者对安评涉及的不确定性进行了探讨,如潜在震源区划分及地震活动性参数不确定性的考虑和影响分析^{1、2}(胡聿贤等,1999);地震动参数衰减关系的不确定性考虑和影响分析(胡聿贤等,1999);土层地震反应分析中波速及土体非线性的不确定性考虑和影响分析³。最近,作者开展了土体非线性参数的不确定性对土层地震反应影响的研究工作⁴。在江苏省连云港核电厂厂址相关地震问题研究报告⁵中,潜在震源区划分、地震活动性参数和地震动参数衰减关系的不确定性三者在同一项目工作中得到了综合处理。这一工作利用了美国原子能机构制定的法规 RG1.165(1997)中推荐的逻辑树思想,即利用多套潜在震源区划分与地震活动性参数方案和多种地震动参数衰减关系式进行组合计算分析,综合确定地震危险性分析结果,即场地基岩地震动参数。

虽然安评技术规范中并没有明确规定必须考虑这些不确定性,但已有的研究和项目工作结果均已表明不确定性的影响作用和程度。因此,在安评工作中应注意这些不确定性的影响,尤其是对于特别重要工程的安评,如一级安评工作。但在进行不确定性处理,如利用多方案考虑时,应对每一方案的合理性和可靠性进行评估,对每一个方案可以等权处理,但在可能的情况下应尽量进行非等权处理。

3.3 地震动衰减关系

地震动衰减关系选取是安评中至关重要的问题。工程上所指的地震动衰减关系并不是理论上的“衰减”关系,它在表述地震波在地球介质中传播的衰减特性的同时也描述了地震震源特性对地震动的影响。地震动衰减关系确定的直接方法是基于大量强震记录资料进行统计分析。对于缺乏足够强震记录资料的地区,则采用类比及近似转换方法。地震的震源特性和波传播的衰减特性都与区域地震与地质构造环境等有密切关系,地震动衰减关系具有明显的区域性。为此,地震动衰减关系的选取应考虑区域适用性问题。衰减关系统计确定中,所考虑的区域范围大小和强震资料多少是控制地震动衰减关系合理性和适用性的两个矛盾性因素。区域范围大则可用强震资料多,但地区特征难以反映;区域范围小可较好地反映地区特征,但可用强震资料少,导致统计结果的合理性和可靠性减小。

我国是一个缺乏足够强震记录资料的地区,需要采用非直接统计的方法来获取地震动衰减关系。目前安评工作中普遍采用的方法是基于研究地区的地震烈度衰减关系,借助于参考

- 1 潘华,2000. 概率地震危险性分析中参数不确定性研究. 见:中国地震局地球物理研究所博士学位论文(导师:胡聿贤、金严). 中国地震局地球物理研究所.
- 2 米素婷,2002. 地震危险性分析计算和不确定性分析研究——以北京地区为研究区域. 见:中国地震局分析预报中心硕士学位论文(导师:陈国星). 中国地震局分析预报中心.
- 3 赵松戈,1999. 一维场地地震反应分析中的不确定性研究. 见:中国地震局地球物理研究所博士学位论文(导师:胡聿贤、赵凤新). 中国地震局地球物理研究所.
- 4 张倩,2003. 场地土层地震反应特征研究. 见:中国地震局地球物理研究所硕士学位论文(导师:李小军). 中国地震局地球物理研究所.
- 5 胡聿贤,时振梁,1999. 江苏省连云港核电厂厂址相关地震问题研究报告. 中国地震局地球物理研究所.

地区的地震动衰减关系和地震烈度衰减关系，采用转换方法获得用于研究地区的地震动衰减关系（胡聿贤等，1996）。地震烈度可理解为地震动的综合表述量，地震烈度的衰减特征也综合表述了地震动的衰减特征。因此，这一转换方法有其理论依据。然而，地震动的频谱是地震动的主要特征量，而综合表述地震动强度的地震烈度难以表述地震动的频谱分布特征，这使得转换方法不够圆满。能否利用更多的信息来进行地震动衰减关系的转换将是值得研究的问题。

地震动衰减关系选取中，另一个应考虑的问题是震中大震与小震的适用性。因大多数衰减关系（直接统计的）所依据的记录资料中 6 至 7 级地震的占绝大多数，而 5.5 级以下或 7.5 级以上的没有或只占少部分，且震中（或断层）距小于 20km 的近断层地震资料也很少。因此，大多数衰减关系在以上所述范围内的值均为外推值，这些外推值的合理性和可靠性值得考虑。而外推值决定于衰减关系公式的形式，如是否考虑近场大震级饱和的关系式。因此，地震动衰减关系选取中还应考虑所关心的地震（潜源）震级（上限）的情况。考虑到不同地区和不同工程的需要，震级分档衰减关系的研究与利用是值得关注的问题。最近几年，小震衰减关系的研究工作取得了一些进展（赵凤新等，1999；李小军等，2005）。

3.4 地震动时程

地震动时程的合成是基于地震动的峰值（加速度）、（反应谱）谱和包线参数，模拟出地震动时间过程。峰值（加速度）的精确满足和（反应谱）谱拟合程度安评技术规范有明确规定，但包线参数的确定和拟合均难以有具体的规定。这导致安评中给出不合理的地震动时程问题时有发生。如加速度时程包线迹象过于明显或单个峰值过于突出。前一现象的出现是包线的平稳段过小和下降段下降过快所致；后者则相反，即包线的平稳段过大和下降段下降过慢所致。当然，目标反应谱与峰值加速度的不匹配也会导致这一问题的产生。

考虑到包线参数的不确定性十分之大，且地震动峰值和谱与包线之间存在匹配关系，建议在地震动合成中出现不合理现象时适当地调整包线参数。对于需要考虑地震动峰值速度和峰值位移作为工程抗震设防参数的安评工作，地震动合成时应考虑峰值速度和峰值位移的拟合。这一思路，作者已在多个安评项目工作中应用，如西气东输管道沿线地震区划与重要场点场地地震安全性评价项目。对于特别重要工程的安评，如 Ⅰ级安评工作，应注意多阻尼目标反应谱的拟合和不同分量地震动时程之间的独立性控制。

3.5 场地土层地震反应分析

场地土层地震反应分析是安评工作的主要环节。场地土层条件对地震动有十分显著的影响，这也是在地震动参数区划，甚至是在地震动小区划工作的基础上还要开展安评工作的主要原因。安评技术规范中规定“对于地面、土层界面及基岩面较平坦的场地，可用一维分析模型；若土层界面、基岩面或地表起伏较大，用二维或三维分析模型”，并规定“对于一维模型可用等效线性化波动迭代求解”。

由于规范规定用词的模糊性，导致实际工作中大多数情况下均按较低要求工作，即采用一维土层模型和等效线性化波动迭代求解。实际上很多工程项目中，场地远不能视为地面、土层界面及基岩面较平坦的场地。理论上，这些情况应采用二维或三维场地模型。但二维或三维场地模型的采用需要配套性的场地工程地质条件的勘测，这需要足够的经费支持，这也是很多项目采用简单的一维场地模型的出发点。但不管怎么样，对于十分重要的工程，如核工程、水坝工程必须考虑采用适合实际场地条件的模型，即一维、二维或三维场地模型。

土层地震反应研究结果表明,土体非线性特性考虑的等效线性化处理方法,理论上只适用于小的非线性情况。但对于处于地震活动强烈地区或者说中国地震动参数区划图中峰值加速度较大的地区(如 0.2g, 0.3g 和 0.4g 的区域),在 50 年超越概率 10% 或更小值(如 2%)水准下,场地土层地震反应计算中土体往往要进入等效应变 0.001 附近或更大的值域,这种情况无论如何也不能再视为小的非线性情况。因此,在这种情况下应采用直接的非线性场地土层地震反应计算方法。近二十多年来,许多学者对直接的非线性计算方法进行了研究,作者在此方面也开展了一些有意义的工作¹(李小军, 1992)。因此,在以后的安评工作中应积极推广应用直接的非线性计算方法,以取代等效线性化波动迭代求解,使得场地土层条件对地震动影响的考虑更为合理。另外,在土体非线性特性参数确定方面,还应注意大应变值范围内(0.001—0.01)土体剪切模量比值过小的问题。实际上无论是利用动三轴试验还是共振柱试验,均难以得到此大应变值范围内的实际值,所给值只是一些外推结果。然而,当采用土体非线性特性考虑的等效线性化处理方法时,这一范围的值往往对土层地震反应的计算结果产生很大的影响。因此,实际工作中应特别注意其值的合理性与可靠性,以及其对土层地震反应的影响问题,并开展此范围内的土体非线性值对土层地震反应影响的敏感性分析。

在场地土层地震反应分析中场地模型的建立和计算方法的选取合适与否十分重要,然而,其中的土层波速、土体非线性特性参数的影响问题更不可忽视。土层波速的问题主要涉及覆盖土层厚度大于 100m,而剪切波速未测至 500m/s 的场地。因安评技术规范在工程场地勘测条文中规定“级工作和地震小区划,控制孔应达到基岩或剪切波速不小于 500m/s 处,若控制孔深度超过 100m 时,剪切波速仍小于 500m/s,可终孔,应进行专门研究。”在土层模型输入界面确定条文中规定在“钻探深度超过 100m”的情况下,输入界面为“钻探深度超过 100m,且剪切波速有明显跃升的分界面或由其他方法确定的界面”。所以,深度 100m 以下的土层波速的确定是安评工作面临的问题。规范的宣贯教材对此问题的解决推荐了方法,但所确定的深度 100m 以下的土层波速值均只是推测值。因此,在实际工作中应考虑对这种推测值的不确定性以及对土层地震反应影响的敏感性,并综合考虑影响结果。这里建议采用多种推测土层波速变化的方案。

场地土层中的软、硬夹层对地震反应有明显的影响²,因此,在安评工作中必须综合考虑场地范围内的多个钻孔所揭示的土层变化情况,以确认场地范围内存在分布的软、硬夹层还是局部的土层不均匀性。对于局部的土层不均匀性,确定场地模型时可不考虑其影响。

3.6 设计地震动参数

设计地震动参数问题包括设计地震动参数的选取及基于计算分析结果确定设计地震动参数值两个方面。地震动峰值加速度、加速度反应谱是最常用的地震动参数,安评中人们很自然地选用它们作为设计地震动参数。但我们应注意到这一参数的选择方案对于地震影响主要为惯性力作用的地面结构工程合适,但对地震影响主要为非惯性力作用的地下结构工程,如埋地管线工程并不合适。因此,安评工作中,必须结合工程结构的特点及地震影响模式选择设计地震动参数。如对于地面建筑,应选用地震动峰值加速度、加速度反应谱;对于埋地

1 李小军, 1993. 非线性场地地震反应分析方法研究. 见: 国家地震局工程力学研究所博士学位论文(导师: 廖振鹏、张克绪). 国家地震局工程力学研究所.

2 同 20 页页下注 4.

管线之类的工程，应选用地震动峰值速度、位移等；而对于大跨度和分布式结构工程，如大跨度桥梁、坝体工程和管网系统等还应考虑地震动的空间相关性描述。在设计地震动参数值确定方面，应以实际的地震危险性或场地土层地震反应计算结果为依据。应充分理解每一个特定工程场地的地震、地质环境和场地条件的不同导致的场地地震动之间的差异，甚至是巨大的差异，特别是地震动反应谱的平台高度和特征周期值。不要一味地受中国地震动参数区划图、建筑抗震设计规范及其他规范标准反应谱的影响，毕竟标准谱只是简单场地分类下的场地平均结果，甚至还考虑了社会与经济决策的结果。

4 结 语

本文基于作者近些年来直接参与工程场地地震安全性评价项目工作、安评技术规范和技术教程的编写及技术培训工作的经验和体会，介绍和分析了我国工程场地地震安全性评价工作的现状及特色，对该项工作在技术和方法上的一些问题进行了讨论，并就这些问题的处理及工程场地地震安全性评价的技术和方法的更新与发展趋势给出了一些看法和建议。

参考文献

- 地震安全性评价管理条例，2001. 北京：中国法制出版社.
- 国家地震局，1981. 中国地震烈度区划工作报告. 北京：地震出版社.
- 国家地震局，1996. 中国地震烈度区划图（1990）概论. 北京：地震出版社.
- 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（GB1774-1999）. 北京：中国标准出版社.
- 国家技术监督局、中华人民共和国建设部，1997. 中华人民共和国国家标准. 核电厂抗震设计规范（GB 50267-97）. 北京：中国计划出版社.
- 胡聿贤主编，2001. GB18306-2001《中国地震动参数区划图》宣贯教材. 北京：中国标准出版社.
- 胡聿贤，周克森，阎秀杰，1996. 缺乏地震动加速度记录地区地震动估计的映射法. 地震工程与工程振动，16（3）：1—10.
- 胡聿贤主编，1999. 地震安全性评价技术教程. 北京：地震出版社.
- 李善邦，1957. 中国地震区域划分图及其说明. 地球物理学报，6（2）：127—158.
- 李小军，1992. 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，2000. 区域及城市工程中的工程地震问题研究思考. 见：《面向 21 世纪的地震科学技术——青年科学论坛》. 北京：地震出版社. 118-123.
- 李小军，2001. 对近年大地震震害现象与工程地震问题研究的思考. 国际地震动态，8 期：26—31.
- 李小军，阎秀杰，潘华，2005. 中小震近场地震动估计中地震动衰减关系的适用性分析. 地震工程与工程振动，25（1）：1—7.
- 廖振鹏主编，1989. 地震小区划——理论与实践. 北京：地震出版社.
- 卢寿德主编，1999. GB1774-1999《工程场地地震安全性评价技术规范》和 GB/T17742-1999《中国地震烈度表》宣贯教材. 北京：中国标准出版社.
- 谢君斐，石兆吉，1981. 地面运动的反演及其在震害分析中的应用. 地震工程与工程振动，1（2）：9—24.
- 赵凤新，阎秀杰，李小军，2000. 用于核电厂弥散地震峰值加速度估计的衰减关系研究. 见：第八届台湾地

- 区地球物理研讨会暨八十九年度中国地球物理学会年会论文集. 165—172.
- 中华人民共和国防震减灾法, 1998. 北京: 地震出版社.
- 中国地震局, 1994. 中华人民共和国地震行业标准. 工程场地地震安全性评价工作规范 (DB 001-94). 北京: 地震出版社.
- 中华人民共和国建设部, 2001. 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范 (GB50011-2001). 北京: 中国建筑工业出版社.
- Cornell C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis. BSSA, **58** (5): 1583-1606.
- Idriss I.M. and Seed H.B., 1968. Seismic response of horizontal soil layers. ASCE, **94** (SM.4).
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1997. Determination of Controlling Earthquakes and Development of Seismic Hazard Information Base, Regulatory Guide 1. 165.

Evaluation of Seismic Safety for Engineering Sites and Relevant Technical Problems

Li Xiaojun

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

Abstract The author of this paper briefly reviewed the history of evaluation of seismic safety for engineering sites, some important technical issues, the tendencies of development, and renewal of the relevant techniques and methods. The consistency of probability levels for different earthquake effects is discussed in this paper. At the same time, other technical problems related to evaluation of seismic safety are analyzed, which includes the selection of seismic probability level, consideration of uncertainty for seismic hazard analysis, modeling of ground motion attenuation laws, parameter matching of synthetic acceleration time history, earthquake response analysis of soil layers, determination of design ground motions. Some ideas and suggestions are proposed for solving these problems.

Key words: Engineering site; Evaluation of seismic safety; Seismic probability level; Earthquake effect; Attenuation law