

美国地震风险评估中灾害模型的探讨*

吴 凡¹, 汪 明^{2,3}, 刘 宁¹

(1. 上海交通大学 船建学院安全与防灾工程研究所, 上海 200240; 2. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3 北京师范大学 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘 要: 介绍了以美国地震灾害模型为例的地震风险评估在金融保险业和土木工程两大领域的应用, 回顾了地震灾害风险评估发展的历史背景, 其中, 金融保险业的模型更侧重于对历史理赔数据的分析, 土木工程业的模型则注重于对工程结构的分析。着重探讨了评估模型中地震灾害部分的建立, 其中包括致灾因子模块及孕灾环境模块。针对建模中致灾因子、孕灾环境等的关键要素, 如地震源及震级、地震衰减方式、场地土壤土质条件、地震复发率等, 作了分析及归纳总结, 并系统地介绍了所涉及要素的数据信息获取过程及对应的建模方法, 进一步探讨了相应的风险量化的步骤和方法。

关键词: 地震; 风险评估; 地震灾害模型; 致灾因子; 孕灾环境; 地震复发率; 美国

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2012)02-0109-05

0 引言

近年中国经济高速发展, 人民生活得到了极大的提高。但自 2000 年后印度洋及澳大利亚板块活动频繁, 引发了亚太地区一系列的强震。如 2011 年的日本 9 级大地震和中国近年一系列的地震, 以及由此引发的一系列次生灾害如滑坡、海啸等。如何对自然灾害进行风险评估, 制定相应的防灾减灾应对措施, 或在灾害发生时迅速评估破坏程度以减轻各方损失和影响, 已成为政府有关部门和保险行业的重要议题。美国在这方面经过多年的发展, 已研发了有关的模型, 并积累了相当的实践经验, 或可为中国借鉴。

美国的地震灾害风险评估模型始于美国西海岸地区。美国西海岸属于地震频繁地带, 如旧金山地区和洛杉矶地区, 这些地区人口众多, 经济发达。美国政府和机构投入了大量的人力财力, 用于地震预测、风险评估及灾害防御, 并由此衍生了一系列对地震等自然灾害进行损失和风险评估的模型和商业产品。这些模型及商业产品根据其用途通常可分为两大类, 一类是为政府机构用于防灾减灾规划, 为工程项目提供建筑物的地震评估和结构加固, 另一类是为保险公司估算保险损失和费率厘定提供科学依据。

这些模型建立在有关地震的研究成果之上,

如对地震震源及地震动衰减方式的研究、对土壤土质在地震条件下的性能研究、对各种结构物在地震灾害下的破坏反应等。这些成果结合了地震动力学、结构(动)力学、土动力学和地理学等多方面的专业知识。模型将这些成果有机地组织在一起, 并进行量化, 从而评估出建筑物在不同地震场景中可能产生的损失。由于用途不同, 模型的侧重点也不同, 如用于工程评估的模型侧重于结构工程的分析, 而用于保险的模型则有很多对历史数据的统计概率的运用。通常地震灾害风险评估模型会包含下列几个关键的模块: 致灾因子模块, 用于分析潜在地震的地理地质数据, 包括震源相关属性; 孕灾环境模块, 包括不同区域的地震衰减关系、地震波途径的土壤地质及建筑物所在地的土壤地质等; 承灾体模块, 用于管理风险评估的对象及其属性, 如建筑物结构类型、空间分布、价值等; 易损性模块, 用于计算在给定致灾因子强度下的承灾体的破坏, 包括建筑结构、生命线结构、财产、商业中断等的损失和破坏; 金融模块, 用于将承灾体损失转化为金融保险行业的损失, 通常为保险损失, 即(再)保险公司需承担的金额, 一般只存在金融保险的模型中。图 1 是美国地震灾害风险评估模型的流程示意图, 其中, 致灾因子模块及孕灾环境模块构成地震风险评估模型中的灾害模型。通过这一流程, 并考虑所有可能出现的地震事件, 最终可评估出承灾体以及

* 收稿日期: 2011-10-08

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2010DFB20880); 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室重点项目; 上海市科委上海浦江人才计划项目(11PJ1405500)

作者简介: 吴凡(1963-), 女, 汉族, 上海人, 博士, 副教授, 主要从事建筑结构灾害风险评估与管理、结构健康监测的研究。

E-mail: fanwu@sjtu.edu.cn

保险行业所面临的地震损失风险。对于工程的评估模型通常只评估到承灾体的损失,而不再运用金融模块对保险行业的损失作进一步评估。本文根据美国现有的评估模型,介绍其历史发展和各类模型的特点,重点介绍地震灾害模型即致灾因子和孕灾环境模块的建模方法。

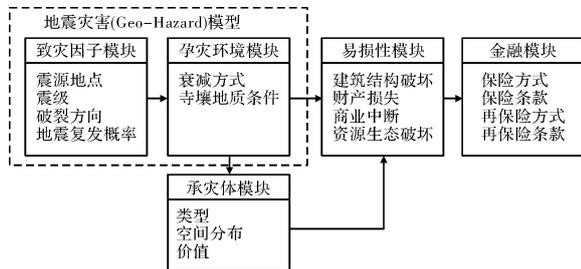


图1 美国地震灾害风险评估模型示意图

1 地震风险评估模型的发展过程

最初的地震风险评估模型,由创立于 Stanford 大学的 RMS Inc. 在 1985 推出,是名为 IRAS 的商业化专家模型,至今,各类模型在美国已经发展了 20 多年。较早开发的商业模型一般用于保险业,如 RMS Inc, AirWorld 和 EQECat 推出的商业软件。1995 年,美国联邦紧急事务管理局(FEMA)研发了非营利性的地震风险评估模型软件 HAZUS,主要用于建筑结构的地震工程评估及加固,类似的软件还有由建筑公司研发的工程用商业软件,如 Risk Engineering Inc., URS 公司等。由于服务对象不同,这两类模型的研发方式存在很大不同,除了图 1 中所述的流程上的差异,其易损性模型的构建也有很大的不同。

用于保险行业的地震风险评估模型,其建筑物的易损性模型大多基于美国政府研究机构发表的地震损失报告 ATC-13^[1]。它概括了当时科学家在地震领域较详细的研究成果,包括有关地震灾害的详尽数据、不同建筑结构的地震易损性数据以及商业中断等的地震损害数据等。尽管此报告只有很多分类的统计数据,却是土木行业的第一份针对建筑结构地震损失评估的系统性分析及总结的报告,提供了地震评估的指南及标准,也是近年科学家致力推广的功能性地震工程方法的雏形。

商业公司如 RMS Inc 等的地震风评模型大多依据 ATC-13 提供的建筑结构的地震损失数据,并结合保险公司大量的历史赔偿数据,运用统计数值回归的方法,研发了一系列易损性函数(曲线),这些模型一直沿用至今。

1995 年 FEMA 推出了 HAZUS 之后,近年更新使用的地震模型中,其易损性模型部分运用了更为科学的方法,结合了很多的工程原理和经验。

它的易损性模型采用了 ATC-40^[2] 或 FEMA^[3] 推荐的方法。在 ATC-40 中,对建筑物的地震评估方式的流程为:先定义建筑物的损失状态,采用静态的非线性分析技术,以得到建筑物的能力曲线;然后构造与结构非线性有关的需求响应频谱曲线,运用能力频谱法,得到建筑物在此损失状态的极限响应值,以及对应的均值偏差,并由此得到各个损失状态下的脆弱性曲线(fragility curve),再由脆弱性曲线组合得到对应的易损性曲线(vulnerability curve)。相比 ATC-13 中对建筑物的 13 种分类,ATC-40 将建筑物拓展为结构性的 36 类和非结构性的 24 类,并且详细定义了每类的各种损失状态。ATC-40 总结规范了建筑行业对地震多年的探索、研究和实践,为建筑物地震损失、评估及加固提出了一个统一的标准。

2 地震风险模型中的灾害及其数据

在美国的地震风险模型中,地震致灾因子及其数据通常包含的信息有地震源数据、地震能量的衰减、当地土质条件的影响和地震事件的重现率等。这些数据随着时间需不断更新,现时美国商业及非商业的模型大多使用美国国家地矿局(USGS)2002 年的最新数据^[4]。

2.1 地震源及震级

地震源数据主要包括地震的地点和最大震级。这些数据通常是记录了地理地质上的地震活动,可以从 USGS 的公共网页上发布的公开信息中获取。例如,美国加州地震源的断层位置以及其最大的震级,就可从 USGS 以及地矿局加州分部取得。

地震源依其形态可分为线源和面源。线源通常包含一个或多个地理分段,例如加州的圣安德烈亚斯断层、海沃德断层等,其涵盖了整个或大部分的加州地区;面源通常覆盖一个较大的地理区域,并假定区域内不同地点有相同的发生地震的概率。在评估模型中,面源亦可简化成若干个线源的组合;除此之外,还有综合考虑震源深度的浸渍面源(Dipping Plane)等。

震级是一个地震事件中的主要参数,它关联着其地震源的参数,如地表破裂面积、破裂开度、平均滑移量。

2.2 衰减关系

衰减关系用于计算地表振动的程度及从地震中心随着距离而递减的关系。由于地表运动的模型随着各个地区特有的断层特征以及地震波在各类地质表面传播特性而不同,相同震级的地震在各个区域产生不同的影响,因此每个地理区域都有其对应的详细的衰减模型^[4];并且,对于同一

区域中不同的断层体系也有不同的结构衰减模型, 例如, 用于表面断层及深层诱发的地震的衰减模型等^[5-6]。

美国国家地矿局(USGS)在2002年更新了国家地震灾害地图的报告^[4], 提供了较为详尽的美国东西部的地震衰减公式。表1中列举了一些模型中常用的由作者命名的地震衰减公式。此份报告也提供了组合应用这些地震衰减公式的方法。这些标准衰减公式及其组合的联合应用, 可涵盖几乎全美国的地震活动区域。现行的美国商业及非营利性地震风险模型都运用了这些最新的衰减公式。在具体应用时, 这些公式被选择性地使用, 即使用特殊的衰减部分以达到特定的效果。例如, 图2所示为描述震级为7级的走滑型地震事件的一组地动加速度峰值线, 从图中可注意到在距地震源40 km内产生较高震动的衰减公式, 在距地震源40 km以外却产生较低的震动。因此, 在评估模型中, 可在某段距离内选择一个特定的衰减公式, 用于模型调整, 以达到不同的评估要求^[7]。

表1 常用的美国地震衰减公式(USGS2002)

美国西部地震衰减公式
Abrahamson and Silva (1997)
Boore, Joyner and Fumal (1997)
Campbell and Bozorgnia (2003)
Sadigh, Chang, Egan, Makdisi, and Yong (1997)
Spudich, Joyner, Lindh, Boore, Margaris and Fletcher (1999)
Munson and Thurber (1997)
Youngs, Shiow, Silva and Humphrey (1997)
Atkinson and Boore (2002)
美国中东部地震衰减公式
Atkinson and Boore (1995)
Toro, Abrahamson and Schneider (1997)
Frankel, Mueller, Barnhard, Perkins, Leyendecker, Dickman, Hopper (1996)
Campbell (2002)
Sommerville, Collins, Abrahamson, Braves, and Saikia (2002)

2.3 场地地质条件

场地地质条件的作用表现为放大或过滤地震的地表运动, 它们对地表运动的传播会有很大的影响。例如, 对于相同的地震, 建于基岩上的建筑物承受的损失通常会小于建在含水较高的冲积层或人工填土上的建筑物。场地地质条件包括地质类型、土壤液化和滑坡等。

2.3.1 地质类型

根据对地表运动的放大作用, 考虑基岩的深度、横波传递速度、表层土的类型和年龄等, 地质类型可分为如下种类:

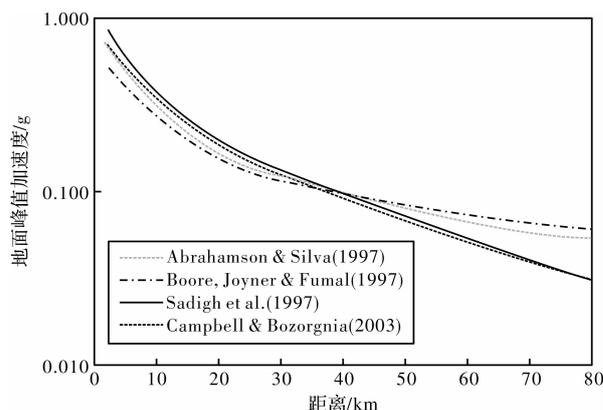


图2 震级7级的走滑型地震事件的衰减曲线(USGS2002)

- (1) 基岩;
- (2) 较弱的岩石/硬土, 或浅层沉积层;
- (3) 硬质软土和砂质土, 或深层沉积层;
- (4) 海湾泥土/人工填土, 软土和非工程性的人工填土。

此类划分运用了1997年NEHRP^[7]条例中的建议。NEHRP条例对土质进行了标准化地质分类, 并为大多数的土质类型提供了相关的土壤放大系数, 其分类数据依据场地土壤地质层面30 m的剪力速度平均值确定。

有关土质土壤的数据库可根据以上的分类、相关地质图并结合NEHRP条例而建立。有些区域可根据研究的结果得到很详细的土质条件数据, 例如对美国加州地区大量的研究, 产生了详尽到地图级或经纬度级的数据; 但对于其它大多数的区域, 可获得的数据就远非如此丰富, 有关的数据由USGS和当地政府根据发表的研究而生成, 其精度大多在邮政编码级或县级的范围^[8]。

2.3.2 土壤液化

决定土壤液化的主要因素有: 地面晃动的时间和程度、浅层水床、沙质材料。土壤液化方面的数据是在对各个地质地理区域进行大量研究的基础上, 根据实测和实验数据逐渐建立, 它包含了地震震级和地下水深度等一系列结果及图表, 罗列了土质类型液化的敏感性、液化的概率、及液化后地层的周边位移和地面沉降的程度^[7]。在地震频发的地区, 如美国加州, 各种土壤液化的数据更是详尽到经纬度及邮编的程度^[9]。

2.3.3 滑坡

滑坡是地震后常见的次生灾害。几个关键的因素对潜在的滑坡起到了决定作用: 坡度、地表地质、沉积层几何形状、土壤含水量, 以及其中已含有的滑坡沉积。

大量研究获得了很多地震引发滑坡的数据^[10-11], 相关研究包括基于地质类型及坡度的滑

坡敏感度，基于土质类型的引发滑坡的临界加速度，基于滑坡敏感度而得到的土壤滑坡的概率和永久性地面位移。这些研究结果用于建立不同地理地质区域的滑坡数据库。

根据地震活动频繁程度的地域差异，相关数据库的详尽也不同。在美国，一些地区如加州旧金山湾区有详尽的细化到经纬度及邮编的数据^[12]，而大多地区没有如此详细的数据。USGS 提供的地理信息如地表坡度可用于建立有关的数据库。

在建立以上各项的土壤状况的数据库后，土壤的因素可作为放大因子，加入到地震衰减公式以反映出对地震效果的增强作用。

2.4 PGA, MMI 和 SA

地面峰值加速度 (PGA) 被用于测量地震动衰减的指标，但在某些地区，PGA 的数据很有限或不存在，因此使用 Mercalli 修正强度或地震裂度 (MMI)，可划分为 I 到 XII 度。MMI 可直接由地震动传播公式导出，或由 PGA 值转化而来，并可加入地质土壤因子的影响。

地震响应频谱作为简单直观且较为精确的方式，在对地震的结构损失分析中使用广泛。运用标准响应频谱形状 (图 3) 更简化了损失和损害评估值的计算。

响应频谱的标准形状是含有 5% 衰减的弹性响应频谱，在实际中响应频谱的形状会根据区域、震级、震中距而变化。图 3 中显示的是一个美国西部标准响应频谱示意图。研究显示，标准响应频谱和实际响应频谱的形状只是在小于 0.3 s 及大于 T_{VD} (即频谱位移为常量) 的周期范围有较大的不同，而这些范围不会对损害和损失的估算产生很大影响^[7]。

不同的响应频谱可根据需要在标准频谱上构造，例如加入土壤放大因子。图 4 所示的响应频谱图中包含了岩石、硬土、软土的频谱曲线，其中，F 代表对应的土壤放大因子。图 4 中也显示了土壤类型对地域响应频谱的重要性，例如，土壤中剪力波速度的减小会增加地域响应的响应值^[7]。

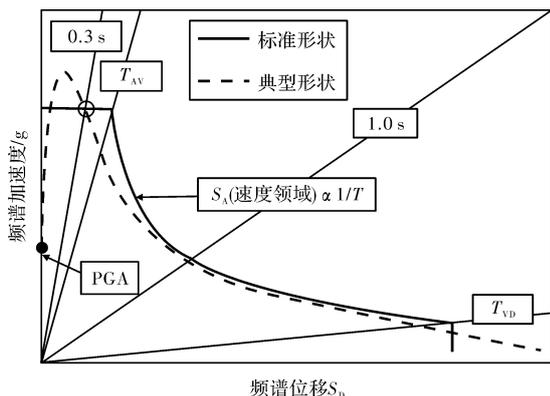


图 3 标准响应频谱示意图 (美国西部)

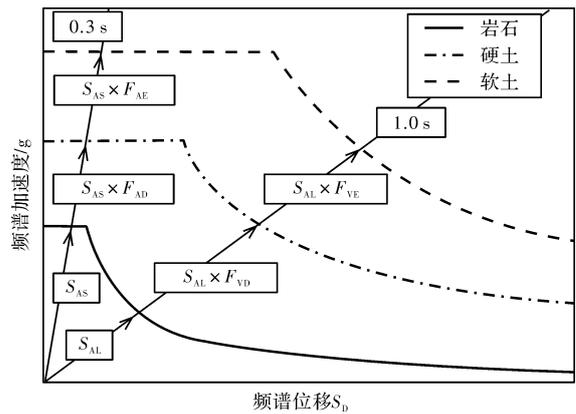


图 4 场地土壤类型对地域响应频谱的影响

响应频谱加速度 SA 与 PGA 可相互转换^[4]，可根据区域 (如美国西部及中东部)、震级、震中距建立转换对照的数据表格。

由此可见，从上述的各类方法和数据最终可得到一个量化的由地震震级和距离、场地地质条件决定的地震灾害数值，以 MMI 或 SA 表示。

2.5 地震重现率

美国的风险评估模型有针对单一地震事件的评估，如 HAZUS，也有对多地震事件的评估，如 RMSInc 的 RiskLink。考虑多事件的评估需用概率的方法，地震重现率是其中关键的参数^[13]。最常用的地震活动概率模型运用泊松分布模型，其分布的基本假设是各个地震事件的发生在时间、震级及地点上是相互独立的，这种假设被证实对于中、小型的地震事件是可靠的。泊松分布的地震活动模型可运用的 Gutenberg-Richter 关系描述^[14]。

$$\log N(M) = a - bM, \quad (1)$$

式中： N 是地震大于震级 M 的累计数；系数 a 通常和某一特定区域的地震活动有关，系数 b 是指数的比例调节参数，这两个参数都可通过回归分析而确定。

对于大震级的地震，时间预测模型有时会更精确地预测地震重现率，但这种方法需储存大量的地理数据，通常较难实现，因此只有著名的地震断层有这样的数据，例如美国加州的圣安德烈亚斯断层、海沃德断层。时间推测的方法通常需要包含以下的数据信息：

- (1) 上次主要事件发生的时间；
- (2) 与上次主要事件相关的震级和滑动；
- (3) 与这一断层相关的平均滑动率。

与此同时，这些信息也可用于估算下次主要事件发生的年概率，例如，根据历史数据，美国加州有 99% 的可能在 30 年内发生震级大于 6.7 级的地震^[15]。此类历史数据均可在美国政府研究机构如 USGS 获得。

3 结语

美国的地震风险评估模型主要由致灾因子、孕灾环境、承灾体、易损性、金融分析等五大模块组成, 其中由致灾因子、孕灾环境模块组成地震灾害模型, 其关键要素包括地震源及震级、地震衰减公式、场地土壤土质条件、地震复发率等。各类要素经过大量分析及实验得到了对应的实验公式及数据信息库, 通过综合运用这些数据, 并在基本假设的前提下, 可对地震灾害的风险进行量化。

在分析美国地震灾害数据及建立模型的同时, 除了考虑地震动本身作为破坏因素, 以及场地土壤条件, 也考虑了由地震诱发的土壤液化、地表塌陷、崩滑等次生灾害。此外, 城市地震往往引发火灾, 火灾的评估比较复杂, 往往需建立单独的火灾风险评估模型。在具体应用中, 地震风险评估模型可与火灾风险评估模型结合使用, 以期获得更精确的评估结果。

参考文献:

- [1] Applied Technology Council (ATC). ATC-13 Earthquake damage evaluation data for California[S]. Redwood City: Applied Technology Council, 1985.
- [2] Applied Technology Council (ATC). ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings[S]. Redwood City: Applied Technology Council, 1996.
- [3] Federal Emergency Management Agency (FEMA). NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings[S]. Washington, D. C. : FEMA, 1996.
- [4] Frankel A D, Peterson M D, Mueller C C, et al. Documentation for the 2002 update of the national seismic hazard maps[R]. USGS; 110.
- [5] Campbell K W. Prediction of strong ground using the hybrid empirical method: Example application to Eastern North America[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(3): 1012 - 1033.
- [6] Atkinson G M, Boore D M. Earthquake ground-motion prediction equations for Eastern North America[J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 2006, 96(6): 2181 - 2205.
- [7] Federal Emergency Management Agency. 1997 NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings[S]. Washington, D. C: FEMA, 1997.
- [8] National Research Council. Liquefaction of soils during earthquakes[S]. Washington, DC: Committee on Earthquake Engineering, Commission on Engineering and Technical Systems, National Academy Press, 1985.
- [9] Youd T L, Perkins D M. Mapping of liquefaction induced ground failure potential[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 1978, 104(4): 433 - 446.
- [10] Seed H B, Tokimatsu K, Harder L F, et al. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, 1985, 111(12): 1425 - 1445.
- [11] Rodriguez-Marek A, Bray J D, Abrahamson N. An empirical geotechnical seismic site response procedure [J]. Earthquake Spectra, 2001, 17(1): 68 - 88.
- [12] Wieczorek G F, Wilson R C, Harp E L. Map of Slope Stability during Earthquakes in San Mateo County, California[R]. Reston: USGS, 1985: 500.
- [13] Aslani H, Miranda E. Probability-based seismic response analysis[J]. Engineering Structures, 2005, 27(8): 1151 - 1163.
- [14] Gutenberg B, Richter C F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena[M]. 2nd ed. Princeton, N. J. : Princeton University Press, 1954: 17 - 19.
- [15] U. S. Geological Survey. California has more than 99% chance of a big earthquake within 30 years, report shows [N]. Science Daily, 2008 -04 - 14.

Discussion of the Geo-Hazard Model in US Earthquake Risk Assessment

Wu Fan¹, Wang Ming^{2,3} and Liu Nin¹

1. Institute of Safety and Hazard Prevention Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240 China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs and Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The paper introduced the models of risk assessment for earthquake hazard, based on US earthquake hazard assessment model, in the field of insurance and civil engineering. It briefly reviews the modeling history and development background of the models, which could be found that the model for insurance industry was built with historical client claimed data in early years, and the model for civil engineering was based more on the building structural analysis in recent years, with the needs of better accurate assessment of buildings and the fast development of computational mechanics. The paper mainly focuses on the discussion of two modules that consist of the part of geological hazard of the model, the hazard factors, and hazard environments. It details the key components in these modules, such as earthquake sources, magnitude, attenuation equations, local soil conditions, and the earthquake recurrence rate, etc. It lists the updated attenuation formulas that are commonly used in US earthquake modeling. It analyzes the procedure of establishing the key hazard components with standard response spectrum and modified response spectrum, by considering local soil types, liquefaction, and landslides. It provides the information of how to obtain the related exposure data and databases from guidelines and resources. It further discusses the approaches of quantifying the hazard risk factors.

Key words: earthquake; risk assessment; geo-hazard modeling; hazard factors; hazard environment; earthquake return period; US.