

雷建成, 高孟潭, 吕红山, 兖川川, 陈鲲. 2010. 四川及邻区不同风险水平下地震动峰值加速度的比值特征. 地震学报, 32(5): 588-600.

Lei Jiancheng, Gao Mengtan, Lü Hongshan, Kang Chuanchuan, Chen Kun. 2010. Ratios between peak ground accelerations under different hazard levels in Sichuan and adjacent region. *Acta Seismologica Sinica*, 32(5): 588-600.

# 四川及邻区不同风险水平下地震动 峰值加速度的比值特征<sup>\*</sup>

雷建成<sup>1,2),\*</sup> 高孟潭<sup>1)</sup> 吕红山<sup>1)</sup> 兖川川<sup>2)</sup> 陈 鲲<sup>1)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国成都 610041 四川省地震局

**摘要** 基于四川及邻区 8181 个控制点的地震危险性分析结果, 统计得出了不同风险水平下中硬场地地震动峰值加速度的比值特征。文中重点分析了大震与中震地震作用的比值( $K_2$ 值)的统计特征和空间分布特征, 初步分析了影响  $K_2$  值的因素。本文研究结果不仅可为抗倒塌地震区划图编图原则和编图方法的确定提供重要依据, 还可为不同行业、不同工程的抗震设计和验算提供参考。

**关键词**  $K_2$  值 峰值加速度 风险水平 抗倒塌地震区划图

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2010.05.008 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

## Ratios between peak ground accelerations under different hazard levels in Sichuan and adjacent region

Lei Jiancheng<sup>1,2),\*</sup> Gao Mengtan<sup>1)</sup> Lü Hongshan<sup>1)</sup>  
Kang Chuanchuan<sup>2)</sup> Chen Kun<sup>1)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

**Abstract:** Based on probabilistic seismic risk analysis result of 8181 grids in Sichuan and adjacent region, we summed up the features of ratios between peak ground accelerations of different risk levels. We focused our research on the statistical and spatial distribution characteristics of the ratio ( $K_2$ -value) between rare and medium seismic action and made a preliminary analysis on the factors affect  $K_2$ -value. The result could provide not only a significant basement for determining criteria and methodology for compiling seismic zonation maps against collapse of structures, but also a reference to aseismic design and checking computation for different industries and engineering.

\* 基金项目 国家科技支撑计划(2006BAC13B01-0604)和中国地震局重点项目《中国地震区划图编制——川西重大工程集中区地震区划图预编》联合资助。中国地震局地球物理研究所著 10AC1031。

收稿日期 2009-11-01 收到初稿, 2010-03-19 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: jclei@126.com

**Key words:**  $K_2$ -value; peak ground acceleration; hazard level; seismic zonation maps against collapse of structures

## 引言

我国 1989 年发布的《建筑抗震设计规范 GBJ11-89》(中华人民共和国建设部, 1989; 中国建筑科学院, 1990)确立了“三水准设防目标, 两阶段设计步骤”的抗震设计思想, 得到了现行《建筑抗震设计规范 GB50011-2001》(中华人民共和国建设部、国家质量技术检验检疫总局, 2001)(以下简称《建规》)的继续采用。建筑物的“三水准设防目标”简称为“小震(50 年超越概率 63%)不坏、中震(50 年超越概率 10%)可修、大震(50 年超越概率 2%—3%)不倒”; “两阶段设计步骤”是指验算小震作用下结构的承载力和弹性变形、大震作用下结构的弹塑性变形两个阶段设计。抗震设计中的中震地震作用一般取中国地震动参数区划图规定的地震基本烈度或地震动参数, 而大震地震作用则是用中震地震作用乘以一定的系数外推得到。但是, 除了部分重要和有特殊要求的建筑需要进行弹塑性变形验算外, 对于大多数建筑, 《建规》规定可不进行第二阶段设计, 仅以概念设计和抗震构造措施来满足第三水准的设计要求。

科学编制地震区划图是提高建设工程的抗震能力和减轻地震灾害的关键手段之一。到目前为止, 我国已经编制完成了 4 代地震区划图(李善邦, 1957; 国家地震局, 1981; 国家地震局, 1996; 胡聿贤等, 2001; 高孟潭, 2003)。从设防水准上看, 第二代—第四代区划图仅考虑地震基本烈度或 50 年超越概率 10% 的地震烈度或地震动参数, 即只反映中震地震作用在全国的分布。一些先进国家已经充分认识到提高建筑物的抗倒塌能力是减轻地震造成人员伤亡、避免严重的次生灾害和减少经济损失的关键, 1996 年美国编制完成了新的地震区划图(Frankel *et al.*, 1996), 给出了 50 年超越概率 10% 和 2% 的水平峰值加速度等值线, 以及阻尼比 0.05 的 0.2 s 和 1.0 s 的加速度反应谱等值线, 随后完成的 2002 年、2008 年美国地震区划图(Frankel *et al.*, 2002; Petersen *et al.*, 2008)仍然采用相同的编图方法。但是, 1996 年及其以后的概率地震区划图并没有被抗震设计规范直接采用。美国建筑抗震安全理事会(Building Seismic Safety Council)以 1996 年版 50 年超越概率 2% 的概率地震区划图为基础, 对部分特定地区采用特征地震模型用确定性方法进行调整, 得出了全美具有一致的抗倒塌地震裕度(seismic margin)的最大考虑地震(maximum considered earthquake)区划图, 并规定取最大考虑地震的 2/3 作为设计地震(design earthquake), 以保证全美建筑抗震设计具有一致的抗倒塌水平(Building Seismic Safety Council, 1998, 2001, 2004; Leyendecker *et al.*, 2000)。目前, 我国正在编制以抗倒塌为设防目标的第五代地震区划图(高孟潭, 卢寿德, 2006), 深入研究并充分体现大震地震作用, 是确定抗倒塌区划图编图原则和编图方法的重要基础。

对于大震与中震地震作用之间的关系, 高孟潭和韩炜(1992)使用第三代区划图基础数据, 对全国 7000 多个场点地震烈度的统计分析表明, 大震、中震之间地震烈度的差值具有显著的区域性特点。雷建成(2002)对四川攀西地区的基岩地震动峰值加速度的研究发现, 该地区基岩大震与中震的比值的平均值为 1.76。沈建文和石树中(2004)分析了上海地区基岩大震与中震的比值关系, 发现该比值在不同潜在震源区中差异较大, 并随着潜在震源区震级上限的提高而增大。唐丽华等(2007)对新疆地区 79 个城市基岩大震与中震的比值研

究发现, 其平均值为 1.78。此外, 雷建成(2002)和唐丽华等(2007)均发现, 大震与中震的比值与潜在震源区的相关性明显。对于其它不同风险水平下基岩地震动峰值加速度的比值特征, 鄢家全等(2000)使用全国范围内 128 项工程场地地震安全性评价结果进行了分析, 李金臣等(2007)还分析了全国范围内 90 项核电、大型水电和特大桥梁的地震安全性评价结果, 给出了相应的统计关系。

到目前为止, 关于大震与中震的比值研究, 或者以地震烈度、基岩地震动峰值加速度为对象, 或者局限于特殊的地区、个别的地点, 其研究结果的适用性和代表性受到了限制。在四川及邻区的抗倒塌地震区划图示范编制研究中, 通过对  $101^{\circ}\text{E}-106^{\circ}\text{E}$ 、 $29^{\circ}\text{N}-33^{\circ}\text{N}$ (面积  $212\,000 \text{ km}^2$ )范围内(以下简称为编图区)、分布于全部 7 个加速度分区( $<0.05g$ ,  $0.05g$ ,  $0.10g$ ,  $0.15g$ ,  $0.20g$ ,  $0.30g$  和  $\geq 0.40g$ )( $g$  为重力加速度,  $1g=10 \text{ m/s}^2$ )的 8181 个控制点的地震危险性计算分析, 采用与区划图相同的场地条件, 我们对该地区中硬场地条件下的大震与中震的比值进行了深入研究, 同时还对其它风险水平下的地震峰值加速度与中震的比值进行了分析研究, 以供不同行业、不同工程的抗震设计和验算参考。

## 1 不同风险水平下地震动峰值加速度及其比值的计算

本研究中, 我们充分收集近年来地震安全性评价工作中取得的资料和成果, 广泛、深入地吸收汶川 8.0 级地震后取得的新资料、新认识, 对四川及邻区的地震地质环境和地震活动特征进行了深入研究, 详细划分出了甘南川北地震带、川滇块体地震带、四川盆地地震带等 3 个地震带、共计 120 个不同震级上限的潜在震源区, 统计确定了相应的地震活动性参数(雷建成等, 2010)。以  $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$  为经度、纬度步长, 在编图区内确定了 8181 个控制点, 采用雷建成等(2007)统计、转换得到了西南地区的地震动衰减关系, 逐点进行了地震危险性概率计算, 得到了各控制点不同风险水平下的基岩水平地震动峰值加速度。

我国第二代—第四代区划图中给出的地震烈度或地震动峰值加速度都是基于中硬场地(相当于Ⅱ类场地)条件的。为得到不同场地类型上的地震动参数, 主要有 3 种途径: 一种是根据已有的不同场地类别的地震动衰减关系, 由地震危险性分析直接得出。这种方法需要依赖于不同场地类型上取得大量的实际地震动纪录资料, 在广泛缺乏实际地震动纪录的今天, 尤其在中国大陆, 其可行性受到了限制。另一种途径是先由基岩地震动衰减关系计算得出基岩地震动参数, 再进行土层地震反应计算, 得出特定场地条件下的地震动参数。这种方法广泛应用于对重大工程场地的地震安全性评价中, 但它要求有详细的场地勘察资料及土力学参数, 且工作量巨大。对于量大面广的地震区划工作, 较为可行的办法是第三种途径, 即对不同场地典型钻孔剖面进行土层反应计算, 统计得出在不同基岩输入地震动情况下不同场地的影响, 对基岩地震动参数进行场地影响调整得到。李小军和彭青(2001)发现随着基岩输入地震动峰值加速度的增大, Ⅱ类场地地表地震动峰值加速度表现出由放大向缩小的线性变化趋势, 并给出了相应的统计关系式。根据一些主要国家和地区的抗震设计规范的规定, 李小军等(2001)还提出了地震区划中不同加速度分区场地地震动参数调整的建议取值。在第五代地震区划图的编制研究中, 李小军等<sup>①</sup>统计计算了 201 个Ⅱ类场

<sup>①</sup> 李小军, 吕悦军, 唐晖等. 2009. “十一五”国家科技支撑计划专题验收自评价报告: 场地条件影响评价技术(2006BAC13B01-05).

地典型剖面, 得到了相似的场地影响规律, 重新给出了统计关系式。在国家标准《工程场地地震安全性评价(GB17741-2005)》中, 也给出了中硬场地地震动峰值加速度与基岩场地地震动峰值加速度的转换关系(卢寿德等, 2006)。其公式为

$$a_{hs} = k_s a_r \quad (1)$$

$$k_s = \begin{cases} 1.25 & a_r \leqslant 62.5 \\ \frac{1.25 - (a_r - 62.5)}{1250} & 62.5 < a_r \leqslant 375 \\ 1 & a_r > 375 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $a_{hs}$  为中硬场地地震动峰值加速度(单位为  $\text{cm}/\text{s}^2$ ),  $a_r$  为基岩地震动峰值加速度(单位为  $\text{cm}/\text{s}^2$ ),  $k_s$  为转换系数。比较式(2)与李小军等<sup>①</sup>的研究成果, 其转换系数很接近。同时考虑到与现行国标的衔接和区划图的延续性, 本研究中采用了式(2)的转换关系, 将地震危险性分析得到的不同风险水平的基岩地震动峰值加速度, 全部转换为相应的中硬场地地震动峰值加速度。在本文以下的论述中, 除特别指明外, 地震动峰值加速度均为中硬场地地震动峰值加速度。

以 50 年超越概率 10% 的峰值加速度值为依据, 基本采用《中国地震动峰值加速度区划图(GB18306-2001)》的分区方法, 为略为扩大  $\geqslant 0.40g$  设防的区域范围以提高该地区的抗震安全性, 仅对  $0.30g$  和  $\geqslant 0.40g$  的分区参数值范围略有调整。我们对四川及邻区进行了

加速度分区, 加速度分区方法如表 1 所示。

为便于表述, 我们统一以中硬场地地震动峰值加速度为研究对象, 以未来 50 年超越概率 63%, 5%, 3%, 2%, 1% 和 0.5% (对应的地震重现期分别为 50, 1000, 1667, 2500, 5000 年和 10000 年) 来表示不同的风险水平, 将上述不同风险水平下的地震动峰值加速度与中震(50 年超越概率 10% 或地震重现期 500 年)地震动峰值加速度的比值分别称为  $K_{63}$ ,  $K_5$ ,  $K_3$ ,  $K_2$ ,  $K_1$  和  $K_{0.5}$ , 并将它们统称为  $K$  值。

采用上述方法, 我们得出了四川及邻区 8081 个计算控制点不同风险水平的  $K$  值。由于大震地震作用控制了建筑物的抗倒塌特性, 是编制抗倒塌地震区划图的一个重要因素, 本文将以  $K_2$  值为研究重点, 讨论四川及邻区的  $K$  值特征及影响因素。

## 2 $K_2$ 值的统计特征

### 2.1 $K_2$ 值的统计特征

我们采用两种方式分别进行统计: ① 不分区进行整体统计, 即对编图区范围内的所有  $K_2$  值进行全部统计; ② 分区统计, 即按照表 1 的分区方法, 对各加速度分区内的  $K_2$  值分别进行统计。

<sup>①</sup> 李小军, 吕悦军, 唐晖等. 2009. “十一五”国家科技支撑计划专题验收自评价报告: 场地条件影响评价技术(2006BAC13B01-05).

编图区  $K_2$  值的统计特征如表 2 及图 1 所示, 从中可见:

1)  $K_2$  值平均值。在全部编图区范围内,  $K_2$  值的平均值为 1.736。由于土层地震反应对不同基岩峰值加速度输入的不均匀放大作用(式(1)、式(2)), 导致绝大多数中硬场地  $K_2$  值低于其基岩  $K_2$  值, 并且基岩峰值加速度越小的地点, 相应中硬场地  $K_2$  值的降低越大。事实上, 对全部编图区范围内的基岩  $K_2$  值的统计表明, 基岩  $K_2$  值的平均值为 1.850,

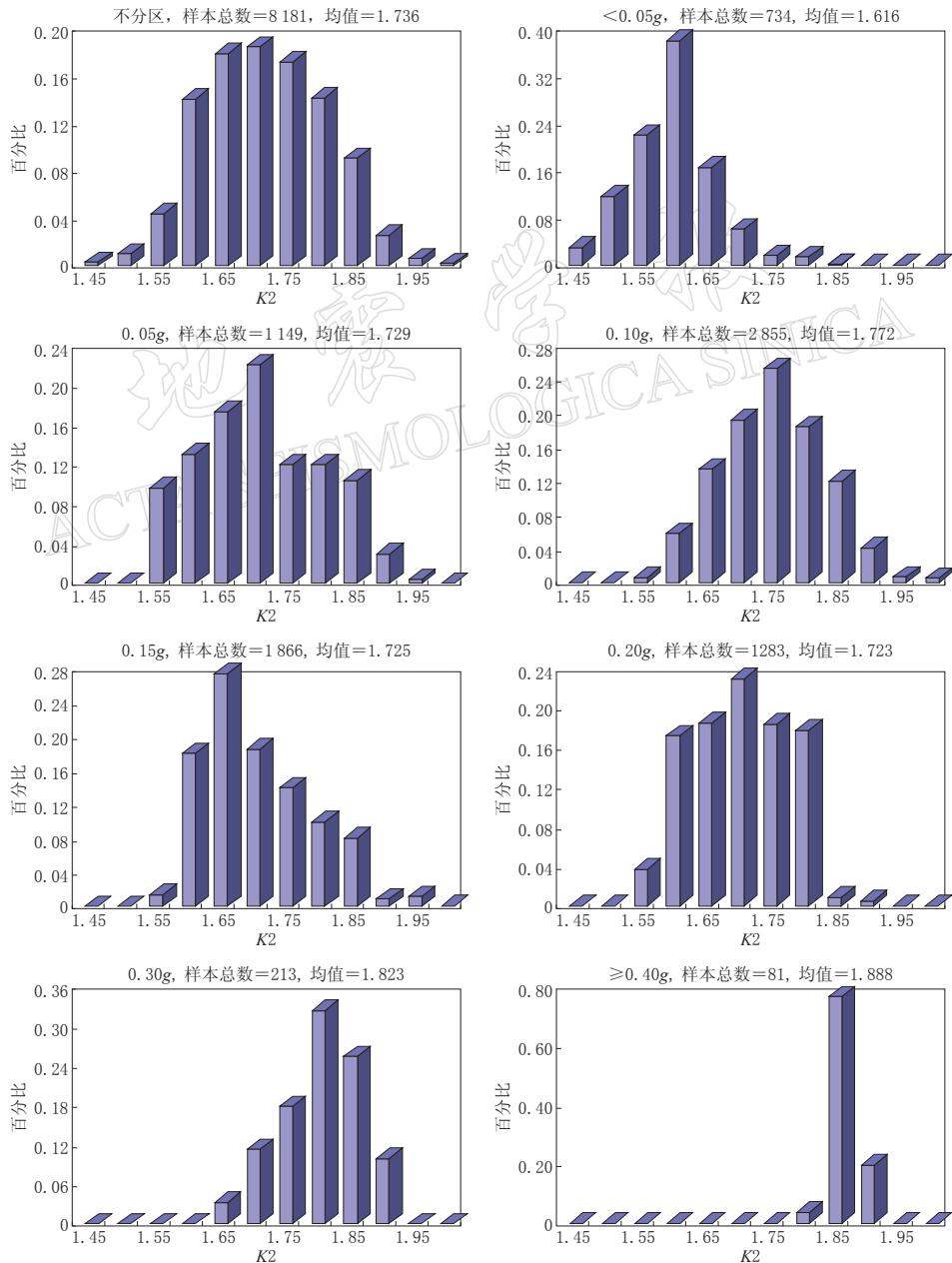


图 1  $K_2$  值的主要分布区间

Fig. 1 Dominant intervals of  $K_2$ -value

表 2  $K_2$  值的统计特征  
Table 2 Statistical features of  $K_2$ -value

| 统计方式   | 平均值   | 标准离差  | 最大值   | 最小值   | 主要分布区间    | 样本数  |
|--------|-------|-------|-------|-------|-----------|------|
| 不分区    | 1.736 | 0.093 | 2.054 | 1.476 | 1.65—1.80 | 8181 |
| <0.05g | 1.616 | 0.063 | 1.852 | 1.476 | 1.55—1.65 | 734  |
| 0.05g  | 1.729 | 0.096 | 1.965 | 1.556 | 1.65—1.75 | 1149 |
| 0.10g  | 1.772 | 0.080 | 2.054 | 1.583 | 1.70—1.85 | 2855 |
| 0.15g  | 1.725 | 0.083 | 2.012 | 1.577 | 1.60—1.75 | 1866 |
| 0.20g  | 1.723 | 0.074 | 1.928 | 1.554 | 1.60—1.85 | 1283 |
| 0.30g  | 1.823 | 0.060 | 1.941 | 1.678 | 1.80—1.90 | 213  |
| ≥0.40g | 1.888 | 0.016 | 1.909 | 1.825 | 1.85—1.90 | 81   |

略高于雷建成(2002)、唐丽华等(2007)的研究结果, 总体上较为接近.

对不同加速度分区内的  $K_2$  值平均值的统计表明, 不同地区的  $K_2$  值差别很大. <0.05g 区的  $K_2$  值平均值明显小于其它加速度分区; 在 0.05g—0.20g 区,  $K_2$  值平均值较为接近, 约在 1.737 附近, 与不分区的统计结果几乎一致; 在 0.30g 和 ≥0.40g 区,  $K_2$  值平均值明显高于其它加速度分区, 并有随着加速度值增大而增大的趋势.

2)  $K_2$  值的主要分布区间. 从全部编图区看,  $K_2$  值主要分布于 1.65—1.80 区间. 在不同的加速度分区,  $K_2$  值主要分布区间不尽相同. 总体上, 随着加速度值的增高, 多数控制点的  $K_2$  值相应增高(表 2、图 1).

3)  $K_2$  值的累积分布. 图 2 是  $K_2$  值的累积分布图. 从中可见, 在全部编图区, 几乎 100% 控制点的  $K_2 \geq 1.5$ . 除了 <0.05g 区, 其它所有加速度分区的全部控制点的  $K_2 \geq 1.5$ . 除 <0.05g 区中仅有 8.4% 的控制点  $K_2 \geq 1.7$  外, 有 61% 编图区, 包括编图区中几乎所有的 0.30g 和 ≥0.40g 区, 其  $K_2$  值超过 1.7. 而对于 0.05g, 0.10g, 0.15g 和 0.20g 区, 有 52%—79% 的控制点  $K_2 \geq 1.7$ . 考虑到与历代区划图的继承性和延续性以及与我国现行抗震设计规范的衔接, 正在编制的抗倒塌地震区划图仍将用 50 年超越概率 10% 的风险水平进行表述, 但其中的地震动参数需充分体现大震地震作用. 具体处理中将会把某些地区的大震地震作

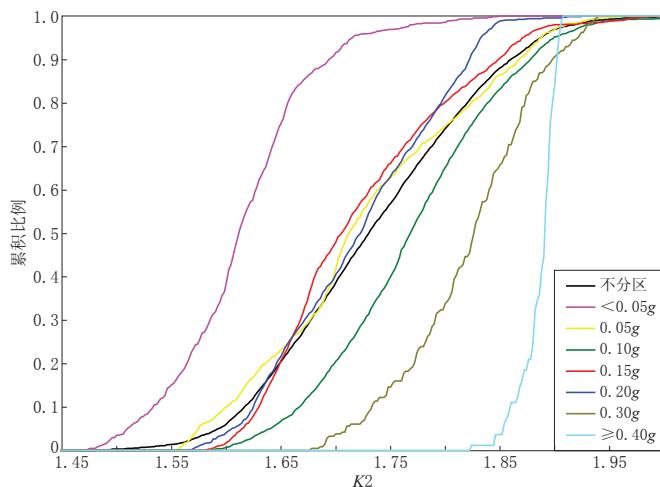


图 2  $K_2$  值累积分布图  
Fig. 2 Accumulative distribution of  $K_2$ -value

用除以一个适当的折算系数,转换成中震地震作用来进行区划图编制(详细做法笔者将另文论述).因此,把编图区的大震地震作用的折减系数取为1.7,大体代表了编图区K2值的平均面貌,并且基本体现了大震地震作用的水平.

## 2.2 K2值与建筑抗震设计规范规定值的比较

在《建规》中,大震、中震和小震地震作用的规定值及相应比值如表3所示.

表3 《建规》规定的地震作用及其比值

Table 3 Seismic actions and their ratios in code for seismic design of buildings (GB50011-2001)

| 加速度分区                  | 0.10g | 0.15g | 0.20g | 0.30g | $\geq 0.40g$ |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 设防烈度                   | VII   |       | VIII  |       | IX           |
| 小震作用(g)                | 0.035 | 0.055 | 0.070 | 0.110 | 0.140        |
| 中震作用(g)                | 0.100 | 0.150 | 0.200 | 0.300 | 0.400        |
| 大震作用(g)                | 0.220 | 0.310 | 0.400 | 0.510 | 0.620        |
| 大震作用/中震作用(K2值)         | 2.20  | 2.07  | 2.00  | 1.70  | 1.55         |
| 大震作用/小震作用              | 6.29  | 5.64  | 5.71  | 4.64  | 4.43         |
| 编图区统计结果<br>(大震作用/小震作用) | 5.87  | 5.97  | 6.33  | 6.68  | 6.51         |

按《建规》规定,随着加速度分区值的提高,大震作用与中震作用的比值(K2值)相应降低,正好与本文的统计结果(表2、表3)相反.需要指出的是,在抗震设计中,地震影响系数最大值是地震基本加速度与加速度放大系数谱最大值的乘积.对于加速度放大系数谱最大值,《建规》中取2.25,而《中国地震动峰值加速度区划图(GB18306-2001)》中规定为2.50,二者相差10%.因此,对比分析图1、图2、表3,从大震作用与中震作用的比值(K2值)看,虽然编图区中的0.10g,0.15g和0.20g区,《建规》规定的大震地震影响系数有一定的安全保障,但0.30g和 $\geq 0.40g$ 区的大震地震影响系数却被大大低估,存在严重的安全隐患.更为重要的是,对于大多数建筑,《建规》规定一般只进行小震作用下结构的承载力和弹性变形验算,可不进行大震作用下的第二阶段设计.但从大震作用与小震作用的比值看(表3),在0.15g,0.20g,0.30g和 $\geq 0.40g$ 的广大地区,《建规》规定的大震作用与小震作用的比值均低于该地区的实际统计值,并且越是高烈度地区,其降低幅度越大.在川西强震活动区,6级以上地震震中区的地震烈度常常达到Ⅷ度以上,地震加速度为0.30g和 $\geq 0.40g$ 地区出现的可能性也很大.在汶川8.0级地震中,仅地震烈度Ⅸ度区(相当于 $\geq 0.40g$ 区)的长轴就长达318 km(中国地震局汶川地震现场指挥部,2009),汶川8.0级地震的人员伤亡和财产损失也主要集中于这些区域.由此可见,按照现行《建规》进行抗震设计的0.20g,0.30g, $\geq 0.40g$ 地区建筑物的抗倒塌能力亟待提高.

## 2.3 K2值与重大工程地震安全性评价结果的比较

在编图区范围内,我们收集到了有代表性的62项重大工程建设项目的地震安全性评价结果.这些结果主要在2001—2009年完成,使用了不同的地震区带、潜在震源区划分方案和不同的地震活动性参数、地震动衰减关系.每个项目工程场地均为中硬场地(即Ⅱ类场地),均根据实际土动力学参数和场地工程地质条件进行了场地土层反应计算,并同时给出了中震(50年超越概率10%)和大震(50年超越概率2%)的地震动参数,相应的K2值统计结果见表4.从中可见:

编图区范围内的 $<0.05g$  和  $0.30g$  区暂无重大工程地震安全性的评价结果的有关资料。编图区内全部重大工程的  $K_2$  值平均值为 1.811, 高于前面研究得出的  $K_2$  值平均值 1.736。按照加速度分区分别进行统计, 重大工程的  $K_2$  值平均值也高于前面得出的相应结果, 反映出重大工程地震安全性评价结果所确定的大震作用高于普通地震区划给出的大震作用, 符合我国关于重大工程地震安全性评价的有关规定。从表 4 还可以发现, 随着分区加速度值的增高, 相应的  $K_2$  值平均值也同步提高, 与前面的研究结论一致。

表 4 地震安全性评价项目  $K_2$  值的统计特征Table 4 Statistical features of  $K_2$ -values from seismic safety evaluation for key engineering sites

| 统计方式         | 平均值   | 标准离差  | 最大值   | 最小值   | 样本数 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 不分区          | 1.811 | 0.093 | 2.012 | 1.467 | 62  |
| $<0.5g$      |       |       |       |       | 0   |
| 0.05g        | 1.786 | 0.117 | 1.984 | 1.689 | 4   |
| 0.10g        | 1.784 | 0.088 | 1.982 | 1.467 | 36  |
| 0.15g        | 1.836 | 0.047 | 1.897 | 1.759 | 12  |
| 0.20g        | 1.888 | 0.096 | 2.012 | 1.658 | 8   |
| 0.30g        | 1.889 | 0.038 | 1.927 | 1.851 | 0   |
| $\geq 0.40g$ |       |       |       |       | 2   |

### 3 $K_2$ 值的空间分布特征

图 3 是编图区  $K_2$  值的空间分布图, 从中可见:

- 1) 编图区内  $K_2$  值空间分布不均匀, 编图区内绝大多数地区  $K_2 \geq 1.6$ 。
- 2) 在四川盆地内部的安岳—遂宁一线、川西地区的金川—丹巴间,  $K_2$  值为全区最低。
- 3) 编图区内的最大  $K_2$  值( $K_2 \geq 2.0$ )分布在峨边附近。
- 4) 在几乎所有的强烈地震活动区, 如整个鲜水河断裂带(道孚—康定—石棉), 龙门山断裂带的北川、都江堰—宝兴, 以及岷江断裂带的松潘—茂县, 甘肃文县等地,  $K_2$  值较高( $K_2 = 1.8—2.0$ )。
- 5) 在部分中等强度地震活动区(如乐山—峨边)和部分弱地震活动区(如中江—简阳、大足), 也有较高  $K_2$  值( $K_2 = 1.8—2.0$ )出现。

总体而言, 四川西部地区的  $K_2$  值高于四川东部地区, 高  $K_2$  值呈带状、团状分布, 大多集中于地震活动较为强烈的地区。

### 4 影响 $K_2$ 值的原因初步分析

总体上,  $K_2$  值的空间分布格局与潜在震源区的分布有着良好的一致性(图 3), 而潜在震源区的边界划分、震级上限的确定主要是建立在发震构造环境、历史地震活动特征等基础上的。所以, 从根本上讲,  $K_2$  值的大小和空间分布特征受到了地震环境的影响和制约。

在本研究中, 我们还选用了 3 组地震动峰值加速度衰减关系来分析其对  $K_2$  值的影响。地震动峰值加速度( $a_{pg}$ )衰减关系的模型如式(3)所示, 相应的参数见表 5。

$$\lg a_{pg} = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \lg [R + c_5 \exp(c_6 M)] \pm \epsilon \quad (3)$$

采用相同的地震带、潜在震源区划分、地震活动性参数, 使用 3 组不同的地震动衰减关系进行编图区各控制点地震危险性计算, 分别计算得出了相应的  $K_2$  值。沿着剖面 I 、

剖面Ⅱ(剖面位置见图3), 我们对各方案得出的K2值与潜在震源区的对应关系进行了比较(图4、图5)。

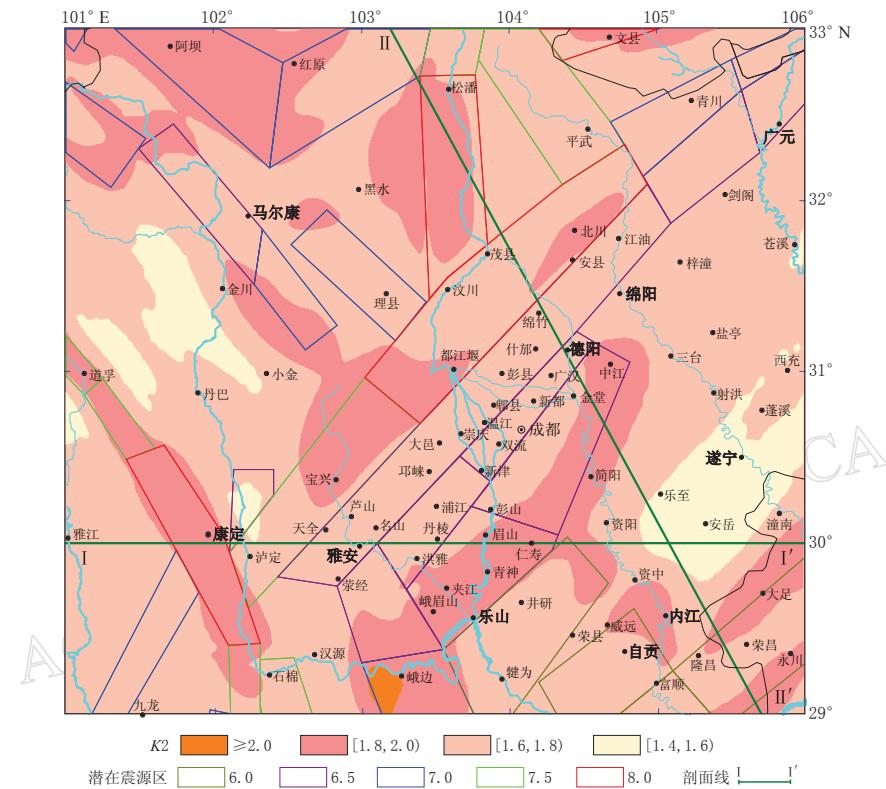


图3 K2值及潜在震源区分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of  $K_2$ -values and potential seismic zones

表5 基岩水平地震动峰值加速度衰减关系方案系数表  
Table 5 Attenuation relation coefficients for different cases

| 方案                  | 震级                | 轴向 | $c_1$   | $c_2$  | $c_3$   | $c_4$   | $c_5$  | $c_6$  |
|---------------------|-------------------|----|---------|--------|---------|---------|--------|--------|
| 方案1<br>(雷建成等, 2007) | 所有                | 长轴 | -0.3349 | 1.3807 | -0.0665 | -2.192  | 2.5292 | 0.3334 |
|                     |                   | 短轴 | -1.5206 | 1.4539 | -0.0715 | -1.8499 | 1.0617 | 0.3854 |
| 方案2<br>(汪素云等, 2000) | 所有                | 长轴 | 2.492   | 0.786  | 0       | -2.787  | 3.269  | 0.451  |
|                     |                   | 短轴 | 1.093   | 0.591  | 0       | -1.794  | 1.046  | 0.451  |
| 方案3<br>(俞言祥等①)      | $M \leqslant 6.5$ | 长轴 | 2.722   | 0.564  | 0       | -2.423  | 2.647  | 0.366  |
|                     |                   | 短轴 | 1.435   | 0.529  | 0       | -1.840  | 0.827  | 0.417  |
|                     | $M > 6.5$         | 长轴 | 3.842   | 0.392  | 0       | -2.423  | 2.647  | 0.366  |
|                     |                   | 短轴 | 2.658   | 0.341  | 0       | -1.840  | 0.827  | 0.417  |

对比分析图3—图5可以发现, 在强烈地震活动区, 如道孚—康定—石棉、北川、都江堰—宝兴、松潘—茂县、文县等地, 高  $K_2$  值 ( $K_2 \geqslant 1.8$ ) 常常分布于高震级潜在震源区内; 而在中等和低地震活动区, 如中江—简阳—乐山、大足、永川等地, 高  $K_2$  值 ( $K_2 \geqslant 1.8$ )

① 俞言祥, 李山友, 姜惠等. 2009. “十一五”国家科技支撑计划专题验收自评价报告: 近场地震动衰减关系确定技术(2006BAC13B01-04).

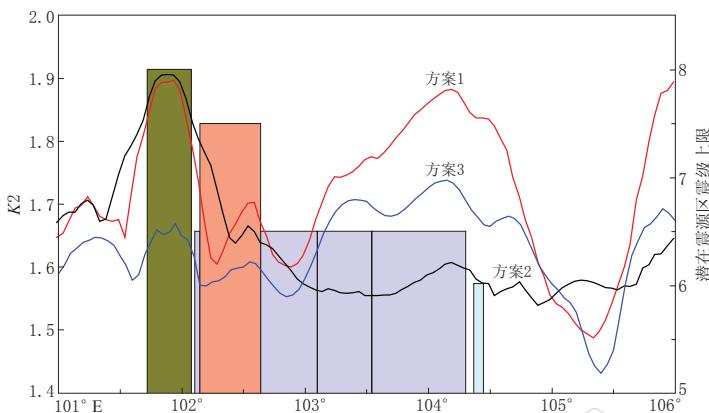


图 4 不同计算方案  $K_2$  值与潜在震源区的对应关系比较(剖面 I)

Fig. 4 Relation between  $K_2$ -value and potential seismic zones for different attenuation cases (section I)

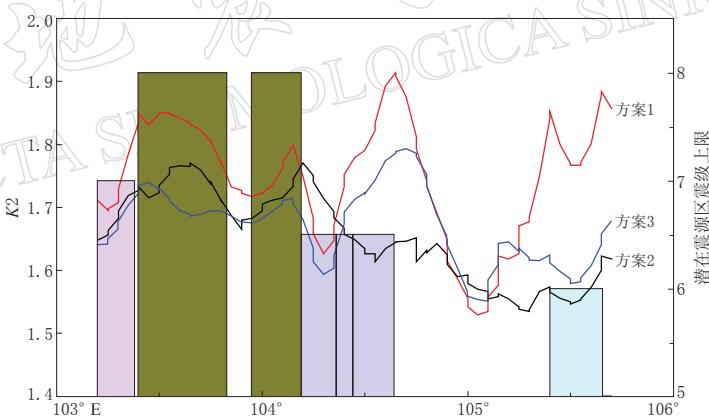


图 5 不同计算方案  $K_2$  值与潜在震源区的对应关系比较(剖面 II)

Fig. 5 Relation between  $K_2$ -value and potential seismic zones for different attenuation cases (section II)

常常分布于低震级潜在震源区边缘。从  $K_2$  值定义可知,  $K_2$  值大小受到大震地震作用和中震地震作用的共同控制。根据地震危险性分析技术原理, 一般来讲, 中震地震作用主要受到中等强度地震的控制和影响, 而大震地震作用主要受到复发间隔很长的大地震的控制和影响。在高震级上限潜在震源区(如 8.0 级、7.5 级潜在震源区)内部的场点, 其中震、大震地震作用均来自场点本地或较近的周围, 并且大震作用相对显著; 在较低震级上限潜在震源区(如 6.5 级、6.0 级潜在震源区), 其中震地震作用来自场点本地或较近的周围, 向潜在震源区边缘和外侧迅速衰减降低, 而其大震地震作用往往来自场点外围的远场大地震的控制和影响, 其衰减往往较慢, 影响范围较大。这就是出现上述高  $K_2$  值分布特征的主要原因。

从图 3、图 4 还可发现, 不同计算方案得出的  $K_2$  值不仅具有相同的变化形态和趋势, 而且与潜在震源区的位置和震级上限有较为明显的相关性。虽然在低震级潜在震源区内部或附近也有较高  $K_2$  值出现, 但在高震级潜在震源区内部, 一般都对应着较高  $K_2$  值。上述

现象再次说明, 地震环境控制了  $K_2$  值的大小和空间分布特征, 地震动衰减关系对  $K_2$  值大小也有一定影响.

## 5 不同风险水平下地震动峰值加速度的比值

在建筑工程(中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检疫检验总局, 2001)、水工建筑(中华人民共和国国家经济贸易委员会, 2001)、铁路工程(中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检疫检验总局, 2006)、核电厂(国家技术监督局, 中华人民共和国建设部, 1998)等不同行业、不同工程的抗震设计和验算过程中, 除了要使用地震重现期为 500 年和 2500 年的地震动参数外, 还会涉及到地震重现期为 50, 1000, 1667, 5000 年和 10000 年的地震动参数. 在本研究中, 采用与  $K_2$  相同的定义和计算方法, 我们同时计算了编图区内 8181 个控制点的  $K_{63}$ ,  $K_5$ ,  $K_3$ ,  $K_1$  和  $K_{0.5}$ , 相应的统计结果见表 6. 这些  $K$  值具有与  $K_2$  值相似的统计特征, 可供不同行业、不同工程的抗震设计和验算参考. 为便于比较和使用, 表 7 还同时给出了上述风险水平下基岩地震动峰值加速度的比值.

表 6 不同风险水平下  $K$  值(中硬场地)

Table 6  $K$ -value on moderate stiff soil sites under different hazard levels

| 统计方式         | $K_{63}$ |       | $K_5$ |       | $K_3$ |       | $K_1$ |       | $K_{0.5}$ |       |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|
|              | 平均值      | 标准离差  | 平均值   | 标准离差  | 平均值   | 标准离差  | 平均值   | 标准离差  | 平均值       | 标准离差  |
| 不分区          | 0.307    | 0.042 | 1.297 | 0.034 | 1.536 | 0.064 | 2.105 | 0.150 | 2.507     | 0.221 |
| $<0.05g$     | 0.399    | 0.027 | 1.245 | 0.022 | 1.445 | 0.043 | 1.927 | 0.104 | 2.265     | 0.148 |
| 0.05g        | 0.338    | 0.023 | 1.292 | 0.032 | 1.528 | 0.063 | 2.098 | 0.160 | 2.490     | 0.231 |
| 0.10g        | 0.302    | 0.019 | 1.310 | 0.028 | 1.563 | 0.056 | 2.137 | 0.126 | 2.523     | 0.181 |
| 0.15g        | 0.289    | 0.026 | 1.304 | 0.031 | 1.534 | 0.057 | 2.071 | 0.132 | 2.465     | 0.221 |
| 0.20g        | 0.272    | 0.021 | 1.292 | 0.026 | 1.526 | 0.049 | 2.144 | 0.139 | 2.628     | 0.198 |
| 0.30g        | 0.273    | 0.030 | 1.298 | 0.031 | 1.579 | 0.045 | 2.288 | 0.098 | 2.764     | 0.118 |
| $\geq 0.40g$ | 0.290    | 0.032 | 1.350 | 0.005 | 1.630 | 0.010 | 2.350 | 0.031 | 2.780     | 0.038 |

表 7 不同风险水平下  $K$  值(基岩场地)

Table 7  $K$ -value on bed rock sites under different hazard levels

| 统计方式         | $K_{63}$ |       | $K_5$ |       | $K_3$ |       | $K_1$ |       | $K_{0.5}$ |       |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|
|              | 平均值      | 标准离差  | 平均值   | 标准离差  | 平均值   | 标准离差  | 平均值   | 标准离差  | 平均值       | 标准离差  |
| 不分区          | 0.297    | 0.048 | 1.330 | 0.046 | 1.609 | 0.090 | 2.303 | 0.220 | 2.809     | 0.322 |
| $<0.05g$     | 0.399    | 0.027 | 1.245 | 0.022 | 1.445 | 0.043 | 1.927 | 0.104 | 2.268     | 0.153 |
| 0.05g        | 0.337    | 0.024 | 1.302 | 0.035 | 1.553 | 0.071 | 2.183 | 0.187 | 2.637     | 0.280 |
| 0.10g        | 0.296    | 0.020 | 1.338 | 0.032 | 1.627 | 0.067 | 2.332 | 0.163 | 2.858     | 0.256 |
| 0.15g        | 0.276    | 0.026 | 1.346 | 0.037 | 1.628 | 0.072 | 2.363 | 0.197 | 2.902     | 0.287 |
| 0.20g        | 0.249    | 0.020 | 1.357 | 0.035 | 1.676 | 0.067 | 2.458 | 0.160 | 3.014     | 0.228 |
| 0.30g        | 0.232    | 0.026 | 1.363 | 0.017 | 1.662 | 0.036 | 2.409 | 0.090 | 2.911     | 0.127 |
| $\geq 0.40g$ | 0.238    | 0.027 | 1.360 | 0.007 | 1.642 | 0.011 | 2.367 | 0.037 | 2.801     | 0.046 |

## 6 讨论与结论

综合上述研究、分析, 得到如下几点认识:

1) 编图区范围内,  $K_2$  值平均值为 1.736. 编图区内不同加速度分区内的  $K_2$  值差别很

大， $<0.05g$  区的  $K_2$  值平均值明显小于其它加速度分区，随着加速度值的增大， $K_2$  值平均值一般也随着增大。 $K_2$  值累积分布的统计分析表明，把编图区的大震地震作用的折减系数取为 1.7，大体代表了编图区  $K_2$  值的平均面貌，并且基本体现了大震地震作用的水平。

2) 对比分析《建规》中大震、中震、小震地震作用规定值的比值与四川及邻区相应的实际统计值发现，在  $0.20g$ ,  $0.30g$ ,  $\geq 0.40g$  地区，按照现行《建规》进行抗震设计的建筑物的抗倒塌能力亟待提高。

3) 与重大工程地震安全性评价结果相比，重大工程地震安全性评价结果所确定的大震作用高于普通地震区划给出的大震作用，符合我国关于重大工程地震安全性评价的有关规定。随着分区加速度值的增高，重大工程地震安全性评价的  $K_2$  值平均值也同步提高，本文与这一结果一致。

4) 四川西部地区的  $K_2$  值高于东部地区，高  $K_2$  值呈带状、团状分布，大多集中于地震活动较为强烈的地区。虽然在低震级潜在震源区内部或附近也有较高  $K_2$  值出现，但在高震级潜在震源区内部，一般都对应着较高  $K_2$  值。

5) 地震环境控制了  $K_2$  值的大小和空间分布特征，地震动衰减关系对  $K_2$  值大小也有一定影响。

6) 本研究得出的  $K_{63}$ ,  $K_5$ ,  $K_3$ ,  $K_1$  和  $K_{0.5}$ ，可供不同行业、不同工程的抗震设计和验算参考。

本文的研究区域既包含了地震活动极为强烈的龙门山断裂带、鲜水河断裂带，又包含了地震活动微弱的四川盆地中心，跨越了现行地震动参数区划图中从  $<0.05g$  到  $\geq 0.40g$  的全部 7 档加速度分区，其研究结果具有较为广泛的代表性和适用性。针对  $K_2$  值进行的重点研究，将为确定四川及邻区的抗倒塌地震区划图编图原则和编图方法提供重要依据。

本文中引用了国家科技支撑计划(2006BAC13B01)的部分研究成果，谨向相关研究者致以衷心的感谢！作者还要感谢审稿专家对本文初稿提出的宝贵意见和建议。

## 参 考 文 献

- 高孟潭, 韩炜. 1992. 抗震设计中的大、中、小地震的确定[M]//地震工程研究文集. 北京: 地震出版社: 28-37.
- 高孟潭. 2003. 新的中国地震区划图[J]. 地震学报, 25(6): 630-636.
- 高孟潭, 卢寿德. 2006. 关于下一代地震区划图编图原则与关键技术的初步探讨[J]. 震灾防御技术, 1(1): 1-6.
- 国家地震局. 1981. 中国地震烈度区划工作报告[M]. 北京: 地震出版社: 5-6.
- 国家地震局. 1996. 中国地震烈度图(1990)概论[M]. 北京: 地震出版社: 11-16, 145-155.
- 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部. 1998. 核电厂抗震设计规范(GB50267-97)[S]. 北京: 中国计划出版社: 3.
- 胡聿贤, 高孟潭, 杜玮, 金严, 赵凤新, 邹其嘉, 陶裕录, 周本刚. 2001. GB18306-2001《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社: 1-15, 84-98.
- 雷建成, 高孟潭, 俞言祥. 2007. 四川及邻区地震动衰减关系[J]. 地震学报, 29(5): 500-511.
- 雷建成. 2002. 攀西地区不同风险水平下基岩地震动参数之间的关系[J]. 中国地震, 18(2): 193-202.
- 雷建成, 高孟潭, 吕红山, 亢川川, 陈鲲. 2010. 地震带划分方案对地震活动性参数的影响[J]. 地震学报, 32(4): 457-465.
- 李金臣, 潘华, 吴健, 郭家全. 2007. 不同超越概率水平 PGA 关系研究[J]. 震灾防御技术, 2(2): 207-211.
- 李小军, 彭青. 2001. 不同类别场地地震动参数的计算分析[J]. 地震工程与工程振动, 21(1): 29-36.

- 李小军, 彭青, 刘文忠. 2001. 设计地震动参数确定中的场地影响考虑[J]. 世界地震工程, 17(4): 34-41.
- 李善邦. 1957. 中国地震烈度区域划分图说明[J]. 地球物理学报, 6(2): 127-158.
- 卢寿德, 高孟潭, 陈国星, 李小军, 赵凤新, 周本刚, 俞言祥, 吕悦军, 潘华, 陶裕录、韦开波. 2006. GB17741-2005《工程场地地震安全性评价》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社: 118.
- 沈建文, 石树中. 2004. 大中小震与抗震设防标准[J]. 地震学报, 26(5): 533-538.
- 唐丽华, 高孟潭, 姜慧. 2007. 新疆地区不同设防水准下设计地震动关系的研究[J]. 中国地震, 23(1): 10-16.
- 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 阎秀杰. 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震, 16(2): 99-106.
- 鄢家全, 陈家庚, 高孟潭, 郝玉芹. 2000. 抗震设防地震的概率标定[J]. 国际地震动态, (9): 1-7.
- 中国地震局汶川地震现场指挥部. 2009. 汶川 8.0 级地震图集[M]. 北京: 地震出版社: 6.
- 中国建筑科学院(主编). 1990. 建筑抗震设计规范(GBJ11-89)条文说明[S]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社: 1-2.
- 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 2001. 水工建筑建筑物抗震设计规范(DL5073-2000)[S]. 北京: 中国电力出版社: 2.
- 中华人民共和国建设部. 1989. 建筑抗震设计规范(GBJ11-89)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 1.
- 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2006. 铁路工程抗震设计规范(GB50111-2006)[S]. 北京: 中国计划出版社: 1-2.
- 中华人民共和国建设部, 国家质量技术检验检疫总局. 2001. 建筑抗震设计规范(GB50011-2001)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 1, 27, 38-39, 195-196.
- Building Seismic Safety Council. 1998. 1997 Edition NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1(Provisions) and Part 2(Commentary), FEMA 302/303[S]. Washington D C: Building Seismic Safety Council; Part 1, 32-40; Part 2, 37-38.
- Building Seismic Safety Council. 2001. 2000 Edition NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1(Provisions) and Part 2(Commentary), FEMA 368/369[S]. Washington D C: Building Seismic Safety Council; Part 1, 39-48; Part 2, 45-46.
- Building Seismic Safety Council. 2004. 2003 Edition NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1(Provisions) and Part 2(Commentary), FEMA 450[S]. Washington D C: Building Seismic Safety Council: 317-329.
- Frankel A, Mueller C, Barnhard T, Perkins D, Leyendecker E V, Dickman N, Hanson S, Hopper M. 1996. National Seismic-Hazard Maps: Documentation June 1996[R]. U S Department of the Interior and U S Geol Surv Open-File Report 96-532: 1-2.
- Frankel A D, Petersen M D, Mueller C S, Haller K M, Harmsen S C, Haller K M, Wheeler R L, Leyendecker E V, Wesson R L, Hanson S C, Cramer C H, Perkins D M, Rukstales K S. 2002. Documentation for the 2002 Update of the National Seismic Hazard Maps[R]. U S Department of the Interior and U S Geol Surv Open-File Report 02-420: 2-3.
- Leyendecker E V, Hunt R J, Frankel A D, Rukstales K S. 2000. Developement of maximum considered earthquake ground motion maps[J]. Earthquake Spectra, 16(1): 21-40.
- Petersen M D, Frankel A D, Harmsen S C, Mueller C S, Haller K M, Wheeler R L, Wesson R L, Zeng Y H, Boyd O S, Perkins D M, Luco N, Field E H, Wills C J, Rukstales K S. 2008. Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps[R]. U S Department of the Interior and U S Geol Surv Open-File Report 2008-1128: 1-4.