

地震危险性分析模型对于我国西部地区 的适用性探讨

刘 平¹, 罗奇峰²

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 同济大学上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘要: 地震危险性分析是地震动估计的一种重要方法, 其准确性对抗震设计至关重要, 因此, 该方法是一项极为重要的实际工程问题。我国东、西部地区大震等震线存在明显的不同, 主要表现为: 西部大震的最内层等震线为沿断层延伸的条带型区域, 东部大震的等震线却完全不同, 用椭圆形来描述更为合适。椭圆模型是我国地震危险性分析中应用最广泛的模型。由于东、西部大震等震线的差异, 假设龙门山断裂发生一次与汶川地震同等级的地震, 分析成都某场地峰值加速度的超越概率。结果表明: 椭圆模型对我国西部地区的危险性分析并不完全适用; 对于本地区的危险性分析, 用断层破裂模型或反映断层破裂长度的椭圆模型更为理想。

关键词: 地震危险性分析; 西部地区; 椭圆模型; 龙门山断裂; 断层破裂模型

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)06-0863-05

Discussion of applicability of seismic risk analysis model for China's western regions

LIU Ping¹, LUO Qifeng²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Seismic hazard analysis is a main method of ground motion estimation, whose accuracy is essential for seismic design, so it is a important practical problem in engineering. There exist obvious differences of the big earthquake isoseismals between Eastern and Western regions in China, the innermost one of the western earthquake isoseismals is a strip-type region extending along the fault, and the eastern earthquakes are completely different, ellipse described more appropriately. The Ellipse model is a most widely used model of the seismic hazard analysis in China. Due to differences between big earthquake of East and West, we assume one earthquake would occur with equal magnitude of Wenchuan great earthquake in the Longmenshan fault zone, and analyze exceedance probability of PGA for a site in Chengdu. The results show that the ellipse model for risk analysis of China's western region is not fully applicable, and fault rupture model or ellipse model which takes into account the length of the fault rupture is more ideal.

Key words: Seismic hazard analysis; western regions in China; ellipse model; Longmenshan fault; fault-rupture model

进行抗震设计前, 工程师需要了解工程使用年限内场地可能遭受地震动的强弱, 以便进行合理地设计。地震的发生和地震动特性不可能精确地预测, 这就必须在概率含义上推测工程可能遭受地震的危险性, 也就是地震危险性分析。地震危险性分析已广泛应用于地震区划和场地地震动的估计工作中。其中, 前者服务于一般结构的抗震设计, 后者服务于特殊或重大的工程建设项目。过高估计地震危险性, 会造成资金的浪费; 而过低估计地震危险性, 则可能带来生命和财产的严重损失。因此, 地震危险性分析是一个极为重要的实际工程问题^[1]。

地震危险性分析的核心为地震动衰减关系的确定, 分析模型就是以衰减关系为基础。1968 年, Coenell^[2]在点源衰减关系基础上最早系统研究了地震危险性分析模型。这种模型忽略了地震引发断层破裂对地震动的影响, 特别是对于大震近场地震动的估计偏差较大。大震近场是震灾最为严重的区域, 近场地震动的预测是地震动预测的关键。1977 年, Kiureghian 和 Ang^[3]考虑了断层对地震动的影响, 提出断层破裂的地震危险性分析模型。目前, 在国外尤其是美国, 该模型是最为主流的模型。近些年, 由太平洋地震研究中心主导的 NGA^[4] (the Next Generation Attenuation Models, 下一代地震动

收稿日期: 2015-07-13 修改稿日期: 2015-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51028273)

作者简介: 刘平 (1984-), 讲师, 主要研究方向为地震动输入及城市综合防灾减灾。E-mail:lxnp0404@163.com

衰减模型)项目就是以断层破裂衰减关系为框架开发.

我国是一个地震频发的国家,由于台网建设缓慢,地震记录较为稀少.1984年,胡聿贤^[5]提出了一种缺乏地震记录地区的地震动参数的估计方法,目前,在我国地震危险性分析工作中广泛应用的椭圆模型^[6]就建立在此理论上.

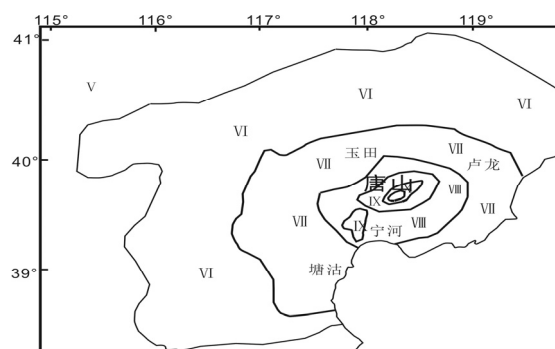
1 危险性分析模型存在的问题

断层破裂模型提出地震的极震区(最内层等震线)是断层在地表的出露(或断层面顶端在地面的投影)区域.沈建文^[7]分析了唐山地震的等震线,认为断层破裂模型在拟合唐山地震近场地震动时存在一定的偏差.唐山地震的断层破裂长度为84 km,观察图1(a)可见,最内层的等震线并不是沿着断层的一个细长的延伸区域,用椭圆模型来模拟等震线的空间分布更为合适.

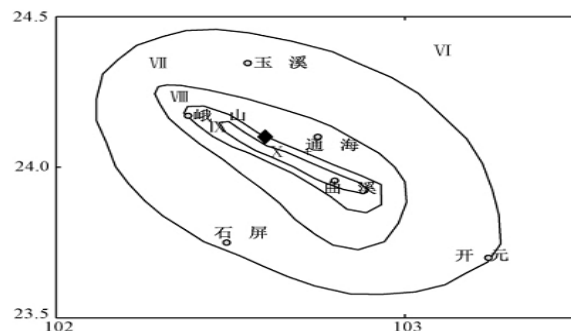
椭圆模型是我国地震危险性分析中应用最广泛的模型.模型提出后,各个地区都相继回归出了本地的衰减关系.观察我国一些大震地震线形状可以发现,东、西部的大震有着显著的差别.如图1所示,云南通海地震(M_s 7.7)和四川汶川地震(M_s 8.0)都发生在西部地区,它们极震区均为断层破裂带形成的狭长区域.云南^[11]和四川^[12]都提出了各自地区的椭圆衰减关系,但是椭圆模型对于这类大震是否适用,还未曾有人专门研究.建立于的2007年底中国数字强震台网在汶川地震中获得了大量高质量的数字强震记录.本文将依据此次地震所在的龙门山断裂为对象,结合近些年汶川地震动的部分研究,来探讨地震危险性分析模型在我国西部地区的适用性.

2 不同模型超越概论的计算

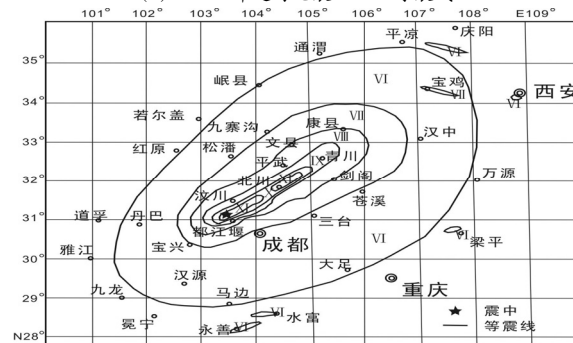
地震危险性分析最主要的过程是计算潜在震源区发生地震时,场地地震动大于某指定值 a 的概率 $P[A \geq a|E_i]$,即,超越概论.求该值所需的条件:区域的地震动衰减关系、震源区的情况(主要为震源区的位置及形状分布、震源区内地震发生的震级分布情况(地震活动强弱规律)等).本节将结合一实际算例讨论不同地震危险性分析模型的差别.由于数据的限制,只分析某震源区发生特定震级的地震时,场地地震动的超越概率.汶



(a) 1976年唐山地震 M_s 7.8 等震线^[8]



(b) 1970年通海地震 M_s 7.7 等震线^[9]



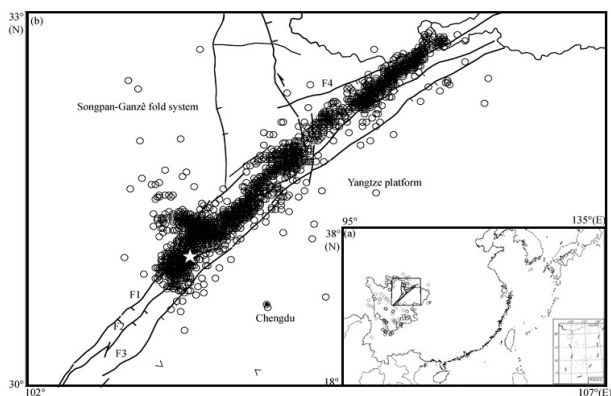
(c) 2008年汶川地震 M_s 8.0 等震线^[10]

图1 典型地震等震线

Fig.1 Isoseismal map of some typical earthquakes

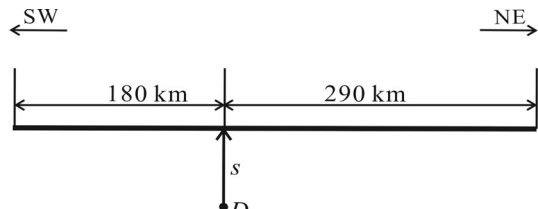
川地震,成都市区附近台站的峰值加速度都接近或大于了100 gal^[10].以四川龙门山断裂为例,分析发生一次和汶川同等级的地震,成都某场地峰值加速度大于等于100 gal的概率(图2).

假设该地区 M_s 8.0 地震的衰减关系已知(点源模型、断层破裂衰减关系参考刘平^[13]对汶川地震衰减关系分析,椭圆衰减模型采用雷建成^[12]提出的地震动衰减关系).如图2,龙门山断裂潜在震源带假设为一线性震源区.据杨智娴^[14]及陈运泰^[15]的分析,震源区长约470 km,场地、震源区的空间关系简化如图3.根据陈达生^[16]的经验关系计算 M_s 8.0 地震的断层破裂长度为80.4 km,与汶川地震断层长度差别过大.为避免过大的计算误差,假设 M_s 8.0 的地震的断层破裂长度的计算值为300 km.



注: 龙门山断裂带在震源带长约 470 km. 白色五角代表汶川地震主震震中; 圆型代表的余震的震中分布. 汶川地震是一次发生在龙门山断裂带 350 km 地段上的地震. 龙门山断裂的南西段是汶川地震并未延伸到的区域, 属于地震矩的亏空区. 陈运泰^[15]表示在汶川地震后预测该段有发生地震的可能性, 而 2013 年发生了芦山地震. 陈运泰又从地震距、断层破裂长度及余震与主震震级的统计关系等多方面分析表明: 芦山地震并未彻底解除龙门山断裂带西南段发生一次较大余震的可能性

图2 龙门山断裂带^[14]
Fig.2 Longmenshan fault zone



注: 粗实线代表潜在震源区; D 为场地, 场地到断层的最短距离 s 为 78 km; 场地到断层的潜在震源区的垂线将潜在震源区分为两部分: 南西段 180 km, 北东段 290 km.

图3 场地与震源区位置关系图
Fig.3 Distribution of site and focal region

2.1 点源模型

汶川地震点源峰值加速度衰减关系^[13]为

$$\ln A = 12.060 - 1.436 \ln(r + 57)$$

场地产生 100 gal 加速度的震中距为

$$r = \exp(12.060 - \ln 100) / 1.436 - 57 = 122.7 \text{ km}$$

地震只要发生在以场地为圆心, r 为半径的圆内, 场地的地震动就可能大于等于 100 gal. 对于该潜在震源带, 只要地震发生在 l_0 内, 场地 D 的地震动就有可能大于等于 100 gal (图 4).

$$l_0 = 2\sqrt{r^2 - s^2} = 2\sqrt{122.7^2 - 78^2} = 189.4 \text{ km}$$

则, 超越概率:

$$P_{\text{点源}}[A \geq 100 \text{ gal} | E_{\text{龙门山}, M_{S8.0}}] = l_0 / L = 189.4 / 470 = 0.403$$

2.2 断层破裂模型

汶川地震断层破裂衰减关系^[13]为

$$\ln A = 11.832 - 1.489 \ln(r_{\text{rup}} + 18)$$

场地产生 100 gal 峰值加速度的断层距:

$$r_{\text{rup}} = \exp(11.831 - \ln 100) / 1.489 - 18 = 110 \text{ km}$$

只要断层延伸到以场地为圆心, r_{rup} 为半径的

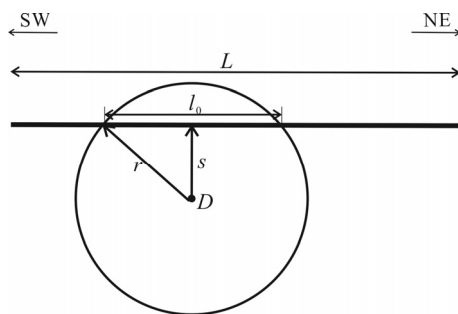


图4 点源模型
Fig.4 Point-Source model

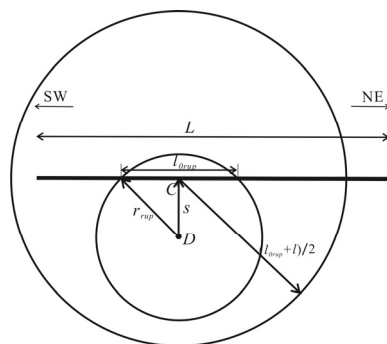


图5 断层破裂模型
Fig.5 Fault-rupture model

圆内 (断层延伸到在 $l_{0\text{rup}}$ 内); 或震中位于以 C 为圆心, $(l_{0\text{rup}} + l)/2$ 为半径的圆内, 场地 D 的地震动就有可能大于等于 100 gal (图 5).

$$l_{0\text{rup}} = 2\sqrt{r_{\text{rup}}^2 - s^2} = 2\sqrt{110^2 - 78^2} = 155.1 \text{ km}$$

$$(l_{0\text{rup}} + l)/2 = (122.1 + 300)/2 = 227.55 \text{ km}$$

由于潜在震源区南西段长 180 km, 北东段长 290 km, 则场地超越概率为

$$P_{\text{断层破裂}}[A \geq 100 \text{ gal} | E_{\text{龙门山}, M_{S8.0}}] = (180 + 227.55) / L = 407.55 / 470 = 0.867$$

2.3 椭圆模型

雷建成^[12]给出四川及临近地区的地震动衰减关系, 其中四川盆地的椭圆衰减关系为

$$\lg A = \begin{cases} -1.824 + 1.541M - 0.085M^2 - 1.639 \lg(r_A + 0.869 \exp(0.384M)) & \text{长轴} \\ -2.138 + 1.486M - 0.081M^2 - 1.385 \lg(r_B + 0.402 \exp(0.446M)) & \text{短轴} \end{cases} \quad (1)$$

由上式计算的 100 gal 的 $M_{S8.0}$ 地震的椭圆长轴 r_A 为 58.4 km, 短轴 r_B 为 35.22 km, 只要震中发生在以场地为圆心, 长半轴 58.4 km, 短半轴为 35.2 km, 且长轴方向与潜在震源区走向一致的椭圆内时, 场地地震动就可能大于等于 100 gal (图 6). 由于该椭圆的短轴比场地到潜在震源区的距离短, 所以:

$$P_{\text{椭圆}}[A \geq 100 \text{ gal} | E_{\text{龙门山}, M_{S8.0}}] = 0$$

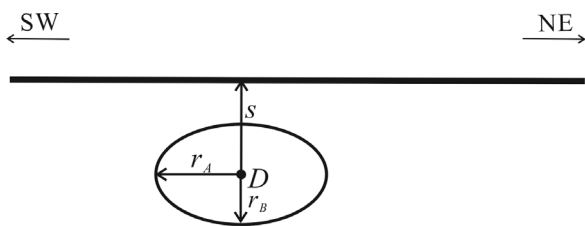


图6 椭圆模型
Fig.6 Ellipse model

3 讨论分析

假设龙门山断裂带发生一次 Ms 8.0 地震, 求成都某场地峰值加速度大于等于 100 gal 的概率. 相比点源模型, 断层破裂模型考虑了断层的影响, 潜在震源区内更大的区域发生地震, 场地的峰值加速度都可能大于等于 100 gal. 所以, 断层破裂模型的超越概率大于点源模型的超越概率. 椭圆模型虽未直接考虑断层的影响, 但是区分了长、短轴方向地震动衰减的不同. 从理论来说, 椭圆模型对于大震来说应比点源模型更理想, 但其超越概率值却为 0, 比点源模型预测的可能性还小. 造成该结果主要有以下两个原因:

(1) 雷建成^[12]在其衰减关系分析中引用了汪素云^[17]提出的烈度衰减关系, 由此得到的 Ms 8.0 的地震等震线的长、短轴的计算值比相同烈度的汶川地震的长度小. 而借用法的地震动参考区为美国西部, 王栋^[18]及喻焯^[19]的分析都表明: 对于高频地震动, 在相同距离下, 汶川地震大于同等级的美西部地震.

(2) 点源及断层破裂的衰减关系均用汶川地震峰值加速度直接拟合得到.

观察式(1)发现椭圆模型的另一个问题: 对于西部的大震, 在极震区, 当短半轴等于 0, 而长半轴小于二分之一断层破裂长度时, 由该关系计算的地震动就会过大. 地震动在该区域已饱和, 用断层破裂模型就能更好地解决这个问题.

汶川地震后杨帆和罗奇峰^[20]考虑了断层破裂及其方向性、上盘效应对地震动的影响, 提出了 6 区域的椭圆模型. 由于成都位于断层下班, 用该模型中 I1, I2, I4, I3 轴分别作为破裂方向长半轴, 破裂方向下盘短半轴, 破裂后方长半轴, 破裂后方下盘短半轴来分析地震危险性:

$$\lg A = \begin{cases} 20.22 - 2.66 \lg(r_{A1} + 145) & \text{长轴前} \\ 14.96 - 1.95 \lg(r_{B1} + 59) & \text{下盘短轴前} \\ 12.98 - 1.68 \lg(r_{A2} + 35) & \text{长轴后} \\ 14.01 - 1.83 \lg(r_{B2} + 46) & \text{下盘短轴后} \end{cases}$$

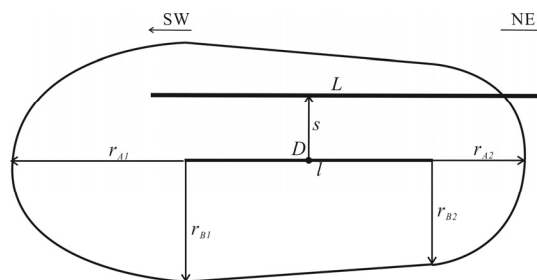


图7 六区域椭圆模型
Fig.7 The ellipse model of six areas

由上式计算的 100 gal 的椭圆的破裂方向长半轴 r_{A1} 为 209.3 km, 破裂方向下盘短半轴 r_{B1} 为 143.4 km, 破裂后方长半轴 r_{A2} 为 111.2 km, 破裂后方下盘短半轴 r_{B2} 为 124.5 km. 只要地震发生在以场地为圆心, r_{A1} , r_{A2} , r_{B1} , r_{B2} 分别为长、短轴, 且长轴方向与潜在震源区走向一致, 并且考虑了断层长度的椭圆内时, 场地的地震动就可能大于等于 100 gal (图 7). 这样的椭圆模型的超越概率与断层破裂模型超越概率结果相近.

对于我国西部的地震, 各种模型(衰减关系)的优劣势分析如下:

点源(圆)模型: 模型的形式简单, 应用简便. 对于断层破裂规模较小的中小地震, 能够较好地反映地震动的空间分布, 较为准确的估计场地的地震危险性. 当地震伴随着较大规模断层破裂时, 点源衰减关系往往低估破裂方向, 而高估与破裂垂直方向的地震动强度. 在场地危险性分析过程中, 会低估场地遭受地震的危险性.

断层破裂模型: 该模型很好地反映了断层破裂对地震动的影响. 由于我国的东、西部大震的等震线的空间分布不同, 断层破裂模型在估计东部地区地震动时会存在一定的偏差. 而对于西部的大震更为合适.

椭圆模型: 对于西部大震来说其预测的危险性偏低, 建议在模型分析中加入断层破裂长度的影响. 由于该模型是建立在烈度基础上, 要直接利用地震动记录来回归衰减关系要同时给出每个场地长、短轴的距离参数, 这是个很复杂的过程.

综合以上的分析, 虽然, 目前我国地震危险性分析中应用最多的为椭圆模型, 但是该模型对于我国西部地区的危险性分析并不完全适用. 对于本地地区的危险性分析, 用断层破裂模型或考虑了断层破裂长度的椭圆模型更加理想.

4 结论

(1) 观测我国典型大震的等震线发现: 我国

东、西部的大震等震线形状有很大区别。

(2) 假设龙门山断裂发生一次与汶川地震同等级的地震,分析成都一场地的峰值加速度的超越概率表明:椭圆模型对我国西部地区的危险性分析并不完全适用。对于本地区的危险性分析,用断层破裂模型或反映断层破裂长度的椭圆模型更加理想。

参考文献 References

- [1] 胡聿贤. 地震工程学 [M](第二版). 北京: 地质出版社, 2006.
HU Yuxian. Earthquake engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Earthquake Press, 2006.
- [2] CORNELL C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5):1583-1606.
- [3] DER K A, ANG A H-S. A fault-rupture model for seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1977, 67(4): 1137-1184.
- [4] POWERM, CHIOU B, ABRAHAMSON N, et al. An overview of the NGA project[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 3-21.
- [5] 胡聿贤, 周克森. 缺乏地震动加速度记录地区地震动估计的映射法[J]. 地震工程与工程振动, 1996, 16(3): 1-10.
HU Yuxian, ZHOU Keseng, YAN Xiujie. A method for evaluation of ground motion in regions with few acceleration observation data[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(3): 1-10.
- [6] 沈建文, 华宜平, 邱瑛, 等. 地震危险性分析的经验点椭圆模型[J]. 地震学报, 1989, 11(3): 259-267.
SHENG Jianwen, HUA Yiping, QIU Ying, et al. Empirical point-ellipse model for seismic hazard analysis[J]. Acta Seismologica Sinica, 1989, 11(1): 259-267.
- [7] 沈建文, 华宜平. 关于地震烈度衰减模型的系统偏差[J]. 地震学报, 1989, 11(1): 38-45.
SHENG Jianwen, HUA Yiping. On the systematic deviation of seismic intensity attenuation models [J]. Acta Seismologica Sinica, 1989, 11(3): 38-45.
- [8] 杜晨晓. 1976年 M_s 7.8唐山地震断层动态破裂及近断层强地震动研究[D]. 北京: 中国地震局地壳应力研究所, 2009.
DU Xiaochen. 3D modeling of dynamic fault rupture and strong ground motion of the 1976 M_s 7.8 Tangshan earthquake[D]. Beijing: Institute of China Seismological Bureau crustal stresss, 2009.
- [9] 谭黎中, 孟令媛, 史保平. 1970年 M_s 7.7云南通海大地震强地面运动模拟[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(4): 476-484.
TAN Lizhong, MENG Linyuan, SHI Baoping. Strong ground motion simulation of the 1970 M_s 7.7 Tonghai earthquake, Yunnan, China[J]. Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012, 29(4): 476-484.
- [10] 地震工程与工程振动编辑委员会. 汶川8.0级地震工程震害概览[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration. General introduction of engineering damage of Wenchuan M_s 8.0 earthquake[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [11] 李世成, 崔建文, 韩新民. 云南地区地震烈度衰减特征研究[J]. 中国地震, 2003, 19(3): 287-294.
LI Shicheng, CUI Jianwen, HAN Xinmin. Study on attenuation features of earthquake intensity in the Yunnan region[J]. Earthquake Research in China, 2003, 19(3): 287-294.
- [12] 雷建成, 高孟潭, 俞言祥. 四川及邻区地震动衰减关系[J]. 地震学报, 2007, 29(5): 500-511.
LEI Jianchen, GAO Mengtan, YU Yanxiang. Seismic motion attenuation relations in Sichuan and adjacent areas[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(5): 500-511.
- [13] 刘平, 罗奇峰. 基于“映射圆”模型的汶川8.0级地震峰值加速度衰减关系[J]. 振动与冲击, 2013, 32(3): 75-78.
LIU Ping, LUO Qifeng. Wenchuan 8.0 magnitude earthquake peak acceleration attenuation relationship based on a model of mapping circle[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(3): 75-78.
- [14] YANG Z X, WALDHAUSER F, CHEN Y T, et al. Double-difference relocation of earthquakes in central-western China, 1992-1999[J]. Journal Seismology, 2005, 9(2): 241-264.
- [15] 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 等. 从汶川地震到芦山地震[J]. 中国科学:地球科学, 2013, 43(6): 1064-1072.
CHEN Yuntai, YANG Zhixian, ZHANG Yong, et al. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake[J]. Scientia Sinica Terrae, 2013, 43(6): 1064-1072.
- [16] 陈达生. 地震引起的地表破裂长度与震级之间的经验关系[J]. 华北地震科学, 1984, 2(2): 26-32.
CHEN Dasheng. Empirical relationship between Surface rupture length caused by earthquake and magnitude[J]. North China Earthquake Sciences, 1984, 2(2): 26-32.
- [17] 汪素云, 俞言祥, 高阿甲等. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震, 2000, 16(2): 99-106.
WANG Suyun, YU Yanxiang, GAO Ajia, et al. Development of attenuation relations for ground motion in China[J]. Earthquake Research in China, 2000, 16(2): 99-106.
- [18] WANG D, XIE L L, ABRAHAMSON N, et al. Comparison of strong ground motion from the Wenchuan, China, earthquake of 12 May 2008 with the next generation attenuation(NGA) ground-motion models. Bull. Seismol[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(5B): 2381-2395.
- [19] 喻焜, 李小军. 基于 NGA 模型的汶川地震区地震动衰减关系. 岩土工程学报, 2012, 32(3): 552-558.
YU Tian, LI Xiaojun. Attenuation relationship of ground motion for Wenchuan earthquake region based on NGA model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 32(3): 552-558.
- [20] 杨帆, 罗奇峰. 汶川地震的 6 区域模型加速度峰值衰减关系[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(5): 29-34.
YANG Fan, LUO Qifeng. Fitting of acceleration peak attenuation with six-area model for Wenchuan 8.0 magnitude earthquake[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(5): 29-34.

(编辑 沈波)