

地震安全性评价中地震动衰减关系的类型及其选取^①

文 雯^{1,2}, 陈宇军², 王 珏², 邓晓华³, 杨雅琼⁴

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224;

3. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450023; 4. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要:通过阐述地震安全性评价工作中地震动衰减关系的演变介绍了衰减关系的三种类型, 其差别在于是否含有高频地震动震级饱和因子 C_3M^2 项和加速度近场饱和因子 $C_5e^{C_6M}$ 项; 分析了这两个因子的由来和作用, 并举实例说明, 当场地所处的地震环境受高频地震动影响较小时, 可忽略 C_3M^2 项的影响; 而加速度近场饱和因子因包含了震源体尺度的影响, 并与实际观测记录相符, 是衰减关系必须包含的内容。

关键词: 衰减关系; 高频地震动; 震级饱和因子; 加速度近场饱和因子

中图分类号: P315.912

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)03-0709-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0709

Type and Selection of the Ground Motion Attenuation Relations during Seismic Safety Evaluation

WEN Wen^{1,2}, CHEN Yu-jun², WANG Jue², DENG Xiao-hua^{1,3}, YANG Ya-qiong⁴

(1. University of Science and Technology of China, Hefei Fujian 230026, China;

2. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming Yunnan 650024, China;

3. Geophysical Exploration Center, CEA, Zhengzhou Henan 450023, China;

4. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang Hebei 050021, China)

Abstract: Through the description of the evolution of attenuation relation, three types of attenuation relations are introduced (type I, type II, type III), with the differences among them including whether they contain the high-frequency ground motion magnitude saturation factor C_3M^2 (a non-linear attenuation factor of magnitude M) and the acceleration near-field saturation factor $C_5e^{C_6M}$ (a distance factor). The origins and functions of two such factors are analyzed in this study. The ground motion increases with the increasing of M, but the amplitude of it rapidly decreases with the increasing of M. $C_5e^{C_6M}$ plays a role in the seismic source body's range scale, in which the ground motion varies not along with the distances' change in the epicentral area. The combined effects of C_3M^2 and $C_5e^{C_6M}$ strongly inhibit the false information that the near-field ground motion is too large in the case of high-magnitude, so as to reach a level consistent with the actual situation. The acceleration near-field saturation factor $C_5e^{C_6M}$ is the content that the attenuation relation must contain, because it contains the influences of the seismic source size and correlates with the actual observation data.

In the seismic safety evaluation, C_3M^2 item can be chosen according to the local seismic environment. Examples are presented to explain that the influences of C_3M^2 can be neglected and the attenuation relation without C_3M^2 can be selected during the seismic safety evaluation when the

① 收稿日期: 2013-05-06

作者简介: 文 雯, 女, 学士, 工程师, 主要从事与工程场地地震安全性评价有关的地震活动性分析、地震危险性分析、场地地震反应分析等方面的工作。

local seismic environment suffers from fewer influences due to the high-frequency ground motion; if the local environment has more influences, an attenuation relation with $C_3 M^2$ should be selected. This essay chooses of a set of type II and then a set of type III to make a comparative analysis of the attenuation relation. In general, type III decays faster than type II. As the distance increases, the peak accelerations with the use of type III are smaller than that with the use of type II. In addition, type III matches well with the actual records in the case of high-magnitude and short distance earthquakes, because it contains $C_3 M^2$. Therefore, in the evaluation of seismic safety, from a conservative perspective, the attenuation relation of type III should be used to evaluate the impact of potential seismic source zone at a short distance, and the attenuation relation of type II should be used to evaluate the impact of the potential seismic source zone at a long distance. This study uses the engineering sites of Kunming and Guiyang and the aforementioned type II and type III attenuation relations to make calculations of a probabilistic seismic hazard analysis, with results that are consistent with the conclusions of the above analysis.

Key words: attenuation relation; high-frequency ground motion; magnitude saturation factor; the acceleration near-field saturation factor

0 引言

目前的地震安全性评价工作仍然是以地震危险性概率分析方法(CPSHA)为主,在这一方法中基岩地震动衰减关系的选取是一个重要的环节,其适宜性直接关系到地震安全性评价结果的可靠性。实际工作中,通常主要考虑评价区域的地震强度、震源深度、衰减特性等等是否与用来拟合衰减关系的地震资料特性相一致,常常忽视了衰减关系的类型也应是影响衰减关系适宜性的重要因素。

随着强震记录的不断增加以及有关震源物理方面的深入研究,众多学者建立了大量的基岩地震动衰减关系^[1-4]。这些衰减关系呈现出不同的类型。本文首先回顾衰减关系的演变过程,进而分析不同类型衰减关系的特点,然后以两个工程实例介绍不同类型衰减关系的应用。

1 地震动衰减关系的演变

早期的衰减关系简单的表达为震级和距离的函数,地震动的对数满足随震级增大而线性增大,随距离的对数增大而减小的衰减规律。几个有代表性的早期的衰减关系如下:

麦圭尔

$$\ln \alpha_{\max} = 3.4 + 0.89M - 1.17 \ln R^{[5]} \quad (1)$$

巴蒂斯

$$\ln \alpha_{\max} = 5.832 + 1.212 m_b - 2.076 \ln (\Delta + 25)^{[6]} \quad (2)$$

胡聿贤

$$\lg \alpha_{\max} = 1.71 + 0.657M - 2.18 \lg (R + 30)^{[7]} \quad (3)$$

上述麦圭尔的衰减关系是最简单最直观的,也符合中、小地震记录不十分充足情况下实际数据的分布情况,写成一般的形式为

$$\ln Y = C_1 + C_2 M + C_4 \ln R \quad (4)$$

人们很快发现在震中区 $R=0$ 处式(4)在数学上不能成立,为了满足数学上的合理性,将(4)式改写成

$$\ln Y = C_1 + C_2 M + C_4 \ln (R + R_0) \quad (5)$$

胡、巴蒂斯的衰减关系即为此种形式, R_0 的数值一般在 10~30 之间,这里胡假定 $R_0=30$,巴蒂斯假定 $R_0=25$,可能是出于对震源深度的考虑。

随后获得的地震记录,特别是大震的记录,用上述简单、直观的衰减形式无法解释。如地震动并不随震级增大而显著增加,在震中区亦并不随距离减小而显著增大的情况,更有学者认为震中区的地震动与震级无关。将式(5)改写成更一般的形式为

$$\ln Y = C_1 + C_2 M + C_4 \ln (R + C_5 e^{C_6 M}) \quad (6)$$

设 $R=0$, 则 $\ln Y = C_1 + C_2 M + C_4 \ln C_5 + C_4 C_6 M$ 。由此式可以看出,地震动的对数随震级增大而线性增大。令 $C_2 = -C_4 C_6$, 则

$$\ln Y = C_1 + C_4 \ln C_5 \quad (7)$$

即震中区的地震动与震级无关。

又

$$\ln Y = 1.30 + 0.41M - \lg (D + 0.032 \times 10^{0.41M}) - 0.0034 D^{[8]} \quad (8)$$

D 为断层距,在震中区 $D=0$ 处 Y 是常量,与震级无关。

在震中区地震动与震级无关的观点令人难以接

受,但震中区地震动不随震级加大的结论也得到了部分强震记录的印证。从式(5)看出,在相同的距离上即 R 相同时地震动参数的对数值随震级线性增大,且不同震级的地震动衰减曲线互相平行。而世界各地的强震记录表明,地震动并不随震级线性增加,特别是控制加速度的高频地震动在大震级情况下趋于饱和,震源物理理论结合实际发生的强震记录给出了理论上的解释,也得到了广泛的认同。新的地震动衰减关系形式为

$$\ln Y = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 + C_4 \ln(R + R_0) \\ R_0 = C_5 e^{C_6 M} \quad (9)$$

式(9)中的第三项 $C_3 M^2$ 是震级 M 的非线性衰减因素。地震动随 M 增加的同时,其增加的幅值随 M 的增大而迅速减少,不同震级的衰减曲线彼此靠近,这与实际强震记录的衰减曲线形状相符,故一般称 $C_3 M^2$ 项为高频地震动的震级饱和因子。式(9)中的 $R_0 = C_5 e^{C_6 M}$ 。根据对潜在震源的理解,潜源范围内都是各级地震的震中区,其规模相当于各震级震源体尺度,震源体各部具有震级、频度相同的发震条件,所以与震源体尺度相当的震中区内地震动基本相同。这样, R_0 便与震级 M 相连,即与震源体尺度大小相连,是个距离因子,它起到在震源体尺度范围内,即在震中区内地震动不因地点不同而不同。这也与实际记录相符,故称 R_0 为加速度近场饱和因子。 $C_3 M^2$ 和 $C_5 e^{C_6 M}$ 联合作用有力抑制了高震级情况下近场地震动过大的虚假信息,达到与实际情况相符的水平。

2 地震动衰减关系类型的选取

纵观地震动衰减研究的演进过程,目前有三种类型:

$$\text{I 型} \quad \ln Y = C_1 + C_2 M + C_4 \ln(R + C)$$

C 为不同的常数

$$\text{II 型} \quad \ln Y = C_1 + C_2 M + C_4 \ln(R + R_0)$$

$$R_0 = C_5 e^{C_6 M}$$

$$\text{III 型} \quad \ln Y = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 + C_4 \ln(R + R_0)$$

$$R_0 = C_5 e^{C_6 M}$$

对工程场地进行地震安全性评价工作时,衰减关系的适宜与否与建立衰减关系的数据集有关,也与其类型有关。因此在评价衰减关系的适宜性时也应对应衰减关系的类型加以考虑。应根据场地所处的地震环境与主要潜源的相对位置选择地震动衰减关系的类型。

如上一节所述, I 型衰减是衰减关系较为早期

的形式,在震源体尺度的考虑上较 II 型、III 型差,与目前实际记录到的强震记录较为不合,因而通常不予选用。下面主要对 II 型、III 型衰减关系做一分析比较。

选取俞言祥研究员的西部地区水平向基岩加速度峰值衰减关系^[3]和西南地区水平向基岩加速度峰值衰减关系^①(表 1)分别代表 II、III 型衰减加以对比分析,并以实际工作中的两个例子进行说明。

表 1 地震动峰值加速度衰减关系

Table 1 Attenuation relations of peak acceleration

衰减 关系	方向	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	σ
II 型	长轴	2.206	0.532	0	-1.954	2.018	0.406	0.240
	短轴	1.010	0.501	0	-1.441	0.340	0.521	0.240
III 型	长轴	0.537	1.167	-0.051	-2.17	2.17	0.383	0.232
	短轴	-0.76	1.068	-0.046	-1.49	0.264	0.53	0.232

这两套衰减关系基于的数据集和转换方法具有一定的共同性,两衰减关系的短周期部分都是采用我国地震动参数区划图编制工作时使用的美国西部地区强震资料建立,而长周期部分亦同是采用美国南加州地区数字宽频带记录建立。综合得到的参考区水平向基岩加速度反应谱衰减关系,使用的强震数据均包括了如 1989 年 Loma Prieta 地震、1992 年 Landers 地震、1994 年 Northridge 地震、1999 年 Hector Mine 地震等大震中获得的较多强震记录。参考地区的烈度衰减关系则采用了 Chandra 的结果^[10]。采用胡聿贤等^[11]提出的转换方法得到的反应谱衰减关系。因此,两套衰减关系在类型上具有一定的可比性。

图 1(a) 和(b)分别为上述两种衰减关系长轴方向和短轴方向一定震级的衰减曲线对比图。当 $M=8$ 时, II 型衰减与 III 型衰减随距离变化的曲线形态相似,但 II 型衰减曲线位于 III 型衰减曲线的上方,即同距离处 II 型对应的峰值加速度较 III 型的大。当 $M=7$ 时,在近距离处 II 型曲线与 III 型曲线几近重合, $R=1$ 时 II 型衰减对应的峰值加速度约为 791 gal, III 型衰减对应的峰值加速度约为 834 gal,数值上 III 型略大些;长轴方向在 $R>15$ km 后,短轴方向在 $R>5$ km 后,同距离处 III 型对应的峰值加速度较 II 型小,可看出 III 型较 II 型衰减的快。当 $M=6$ 时,长轴方向在 $R<15$ km 时,同距离处 III 型对应的峰值加速度较 II 型大,在 $R>15$ km 后,同距离处 III 型

① 俞言祥. 昆明市呈贡新区地震小区划(二期)报告. 中国地震局地球物理研究所, 2008.

对应的峰值加速度较Ⅱ型小;短轴方向与 $M=7$ 情况类似,在近距离处两种曲线几近重合,数值上Ⅲ型略大些,在距离大于某一数值后Ⅲ型对应的峰值加速度较Ⅱ型小。总的看来,Ⅲ型较Ⅱ型衰减的快,随着距离的增大均出现Ⅲ型对应的峰值加速度较Ⅱ型小的状态。在地震安全性评价中,如偏于保守的角度考虑,评价近距离处潜源的影响应选用Ⅲ型衰减关系,而评价远距离处潜源的影响则应选用Ⅱ型衰减关系。

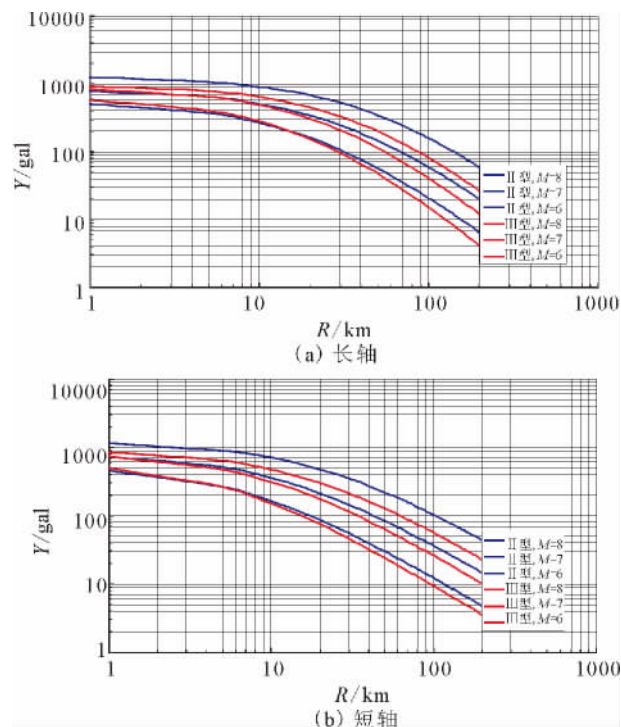


图1 两种衰减关系的对比

Fig.1 Comparison of attenuation relation between two types

在近距离处,如距离为 1 km 时,Ⅲ型由于考虑了高频地震动震级饱和因子 $C_3 M^2$ 项,各震级对应的峰值之差Ⅲ型较Ⅱ型的小,Ⅲ型衰减与实际强震记录近距离处地震动并不随震级增大而显著增加的情况是相符的。以 $M=8.0, R=1.1$ km 为例,取长轴方向,Ⅱ型衰减关系得到震中处的地震动值为 1 236 gal,而Ⅲ型的结果为 933 gal,二者的比值高达 1.3 倍。2008 年汶川 8.0 级地震,距发震断层南端 1.1 km 处的四川卧龙台的记录,最大水平加速度为 957 gal,显然Ⅲ型的更为接近。因此在地震安全性评价中,从接近实际强震记录的角度考虑,工程场地与主要影响潜源距离较近的情况下,应选用Ⅲ型衰减关系。

上述分析表明,无论是从保守角度,还是从接近

实际强震记录的角度考虑,近距离情况下都应选用Ⅲ型衰减关系;而远距离情况下则可保守考虑采用Ⅱ型衰减。

3 工程实例

3.1 贵阳市某工程场地地震安全性评价

贵阳市某工程场地地理位置为 $106.71^\circ, 26.58^\circ$ 。图 2 为场地附近 150 km 范围内潜在震源区划分图。从图上看,距工程场地最近的潜源为 7 号源,震级上限 6.0 级,最近距离约 20 km;其他潜源均距场地较远,震级上限不超过 6.5 级。震级上限最大的潜源为 6 号源,与场地的最近距离 140 多公里。

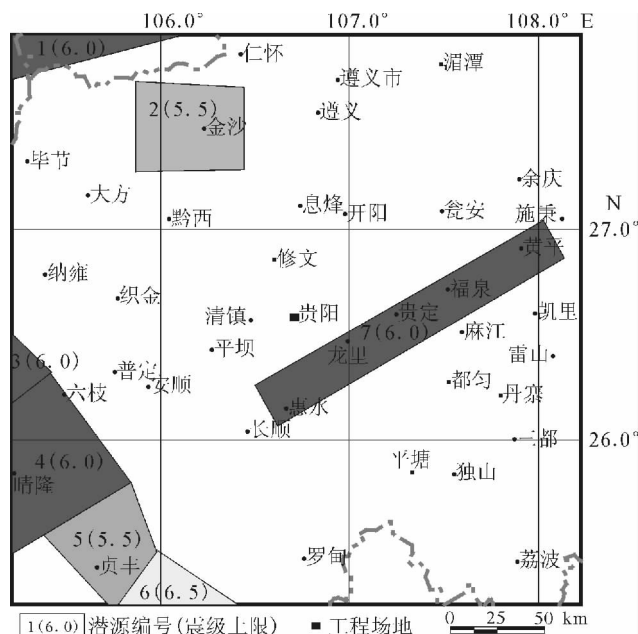


图2 贵阳市某工程场地潜在震源区划分图

Fig.2 Zoning of potential seismic source zones for an engineering site of Guiyang city

将工程场地所在位置输入危险性分析程序,仅改变衰减关系,其他参数不变,Ⅱ型衰减得到的工程场地 50 年超越概率 10% 的峰值加速度约为 51 gal,Ⅲ型衰减得到的工程场地 50 年超越概率 10% 的峰值加速度约为 37 gal。从偏于安全性的角度考虑,应选择Ⅱ型衰减可得到符合工程场地的基岩峰值加速度。如选择Ⅲ型衰减,则会使基岩加速度过小。

3.2 昆明市某工程场地地震安全性评价

昆明市某工程场地地理位置为 $102.72^\circ, 26.05^\circ$ 。图 3 为场地附近 150 km 范围内潜在震源区划分图。由图看出工程场地完全处于震级上限为 7.0 级潜源内,东距 14 号 8.0 级潜源约 18 km,北距

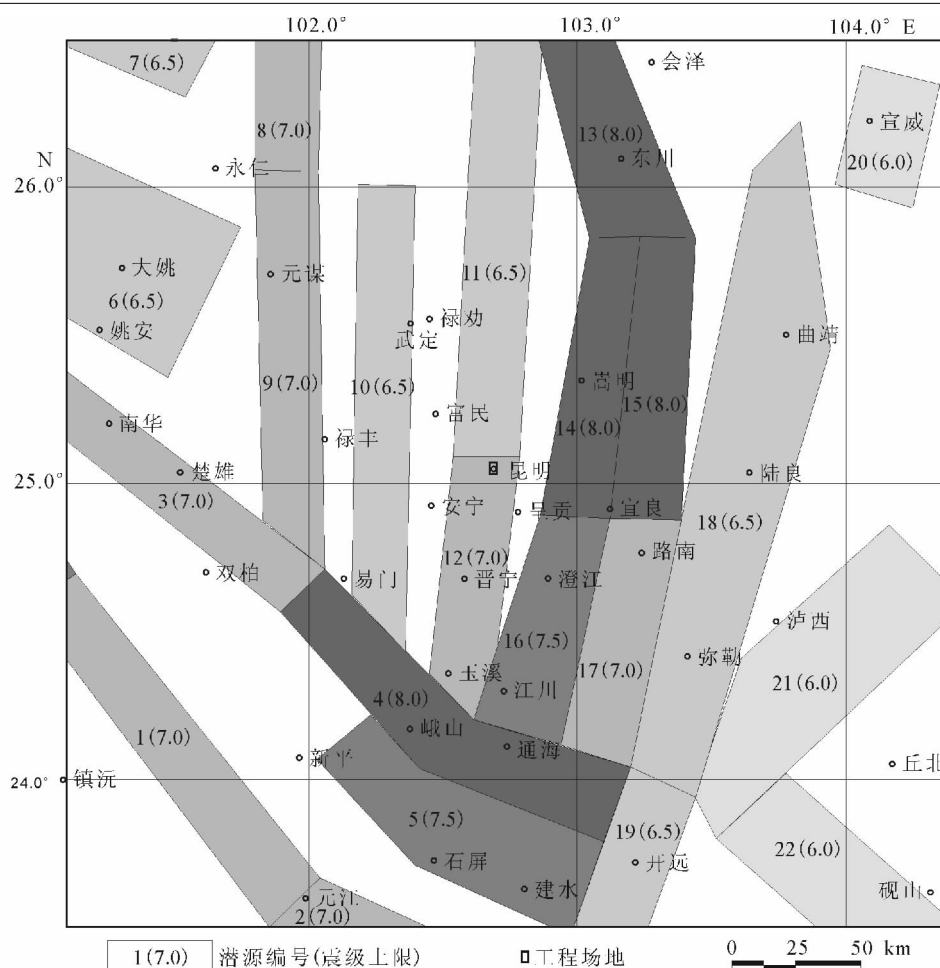


图 3 昆明市某工程场地潜在震源区划分图

Fig. 3 Zoning of potential seismic source zones for an engineering site in Kunming city

11 号 6.5 级潜源约 4 km。场地处于近距离大震的环境中,须考虑高频地震动震级饱和因子 $C_3 M^2$ 项。

将工程场地所在位置输入危险性分析程序,仅改变衰减关系,其他参数不变,Ⅱ型衰减得到的工程场地 50 年超越概率 10% 的峰值加速度约为 255 gal,Ⅲ型衰减得到的工程场地 50 年超越概率 10% 的峰值加速度约为 189 gal。综合场地所处的位置与紧邻 8.0 级潜源的地震环境,应选取Ⅲ型衰减。

4 结束语

本文通过对衰减关系发展的不同类型的叙述、分析,说明了衰减关系中高频地震动的震级饱和因子和加速度近场饱和因子的由来和作用,这两个因子联合作用有力抑制了高震级情况下近场地震动过大的虚假信息,达到与实际相符的水平。并以实例说明在地震安全性评价工作中,在考虑建立衰减关系的数据集与被评价场地的适宜性之外,应根据不同的地震环境,选择不同的衰减关系类型。

当然,地震动衰减关系式建立在强震记录资料的基础之上,衰减关系的类型和建立衰减关系的数据集常常是综合在一起,难以分离开来看的。上述的分析并不能完全排除数据集的影响,但是类型对衰减关系的影响仍是明显的。

每当获得一批有价值的强震记录,就会推动研究的进一步发展。地震动衰减关系的类型也将随着地震观测资料的日益丰富逐渐演变,期待更新更好的衰减关系类型的出现。

参考文献 (References)

- [1] 霍俊荣,胡聿贤.地震动峰值参数衰减规律的研究[J].地震工程与工程振动,1992,12(2):1-11.
HUO Jun-rong, HU Yu-xian. Study on Attenuation Laws of Ground Motion parameters[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1992, 12(2): 1-11. (in Chinese)
- [2] 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 Su-yun, YU Yan-xiang, GAO A-jia, et al. Development of Attenuation Relations for Ground Motion in China[J].

- Earthquake Research in China, 2000, 16(2):99-106. (in Chinese)
- [3] 俞言祥, 汪素云. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系[J]. 震灾防御技术, 2006, 1(3):206-216.
YU Yan-xiang, WANG Su-yun. Attenuation Relations for Horizontal Peak Ground Acceleration and Response Spectrum in Eastern and Western China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(3):206-216. (in Chinese)
- [4] 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 Jian-cheng, GAO Meng-tan, YU Yan-xiang. Seismic Motion Attenuation Relations In Sichuan and Adjacent Areas[J]. ACTA Seismologica Sinica, 2007, 29(5):500-511. (in Chinese)
- [5] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社, 1988:200-201.
HU Yu-xian. Earthquake Engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 1988:200-201. (in Chinese)
- [6] Battis J. Regional Modifications of Acceleration Attenuation Functions[J]. BSSA., 1981, 71(4):1309-1321.
- [7] 胡聿贤, 张继栋, 邹夕林. 基岩地震动参数与震级和距离的关系[J]. 地震学报, 1982, 4(2):199-207.
HU Yu-xian, ZHANG Ji-dong, ZHOU Xi-lin. Functional Relations of Bedrock Motion Parameters with Earthquake Magnitude and Distance[J]. ACTA Seismologica Sinica, 1982, 4(2):199-207. (in Chinese)
- [8] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京:地震出版社, 1999.
HU Yu-xian. Tutorial of Seismic Safety Evaluation[M]. Beijing: Seismological Press, 1999.
- [9] 卢寿德. 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, 2006. (in Chinese)
LU Shou-de. Teaching Material of Evaluation of Seismic Safety for Engineering Sites (GB17741—2005) [M]. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese)
- [10] Chandra U. Attenuation of Intensities in the United States [J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1979, 69(6):2002-2024.
- [11] 胡聿贤, 张敏政. 缺乏强震观测资料地区地震动参数的估算方法[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(1):1-11.
HU Yu-xian, ZHANG Min-zheng. A Method of Predicting Groundmotion on Parameters for Regions with Poor Groundmotion Data[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984, 4(1):1-11. (in Chinese)
- [12] 乔震元, 刘本玉, 张远富. 汶川 8.0 级地震峰值地震动特性研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1):92-95.
QIAO Zhen-yuan, LIU Ben-yu, ZHANG Yuan-fu. Research on the Peak Ground Motion Characteristics of Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1):92-95. (in Chinese)
- [13] 姚凯, 孙崇绍, 朱珊珊, 等. 2008 年汶川地震后的三次强余震地表峰值加速度衰减场研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1):99-104.
YAO Ka, SUN Chong-shao, ZHU Shan-shan, et al. Study on PGA Attenuation of Three Strong Aftershocks of 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1):99-104. (in Chinese)