

我国部分地区基本烈度的概率标定

鲍霭斌 李中锡 高小旺 周锡元

(中国建筑科学研究院工程抗震研究所)

摘要

文中根据对我国华北、西北和西南地区 45 个城镇的地震危险性分析结果, 对中国烈度区划图上预报的基本烈度进行了初步的概率标定。结果发现区划图上所提供的基本烈度大致相应于 50 年内超越概率为 0.14 的烈度水平。

文中的计算是按照地震危险性分析的一般步骤进行的。以下是在实际应用中考虑的几个主要问题: 1) 根据地震地质条件和历史地震震中分布合理地划分潜在震源的位置和大小; 2) 确定与当前地震活动相一致的震级—频度关系; 3) 选用能够反映不同区域地质构造的烈度衰减规律。

本文结合图表对地震危险性分析的结果进行了分析和讨论。

一、前言

地震危险性分析是用概率统计方法评价在未来一定期限内某工程场地遭受不同程度地震作用的可能性。这是 1968 年以来受到各国普遍重视而形成的新的学科分支。由于地震的发生在时间、空间和震级大小等方面都有很大的不确定性, 需要用概率来反映地震危险性。

为了用决策分析方法找出抗震设计或加固的最佳设防标准以求得安全且经济的抗震效果; 为了用概率法进行结构可靠度分析, 把抗震设计规范建立在概率论基础上; 为了进行震害预测并制定减轻灾害的措施等, 都需要以地震危险性分析的结果作输入信息。我国迄今以地震烈度区划图作为抗震设防的主要依据, 并将图中提供的基本烈度定义为某地区今后 100 年内在一般场地条件下可能达到的最高烈度。在编制区划图过程中虽考虑了地震发生的不确定性, 但并没有定量地用概率表达出不同烈度地震发生的危险性。我国最近颁布的《建筑结构设计统一标准》(草案)要求常规的结构设计建立在概率基础上, 考虑各种荷载及抗力的概率分布后要求结构在设计基准期 50 年内的失效概率不超过规定值。为此需要对全国进行地震危险性分析。目前我国已有许多单位在进行这一工作, 但在今后一段时间内的抗震工作仍需使用基本烈度。因此, 抗震设计和研究人员不免要问: 目前的基本烈度大体相当于设计基准期 50 年内多大的超越概率? 在尚未对全国仔

本文 1984 年 1 月 17 日收到, 1984 年 7 月 6 日收到修改稿。

细地进行地震危险性分析之前,我们粗略地根据 45 个城镇的分析结果对基本烈度的概率水准作初步估计。新疆、西藏、东北、华南及台湾省因情况特殊或资料较少,不在本文讨论的范围内。

二、震源划分

这次进行地震危险性分析的 45 个城镇分别位于本文所划的华北、西北和西南三个大区(图1)。各大区内的震源都按面源考虑,面源的划分主要根据地质构造条件和历史地震的震中分布。散布在面源外的零散地震都当作均匀分布,以各场地为中心 150 公里为半径的范围作为又一个面源,由于其地震活动性一般都很低,常称为背景地震。

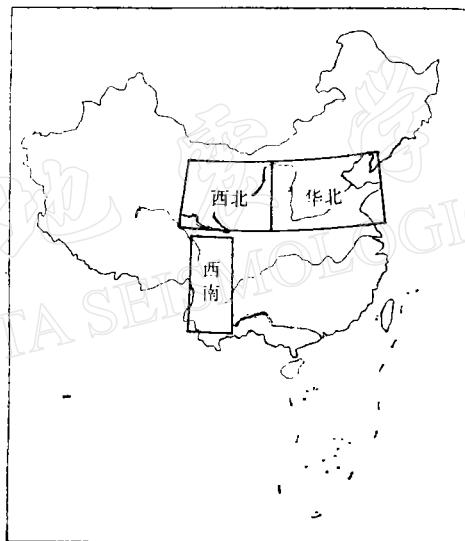


图 1 华北、西北、西南地区范围

Fig. 1 Limits of the North China, north-west and south-west regions

1. 华北地区的范围为东经 108° 至 123° , 北纬 34° 至 42° , 在大地构造上位于西太平洋地震构造带的西面,基本上为我国十大地震区之一的华北地震区。震源分布如图 2。

震源 1 北起延庆—怀来盆地,向南经太原、临汾至西安,由一系列断陷盆地组成。各盆地的长轴呈北东走向,在区域性右旋剪应力作用下,在总体上雁列成“S”形地震带。盆地边缘的断裂均作右旋剪切错动。

震源 2 由南、北两部分组成,约在北纬 39.5° 分界。南部由一系列北北东走向的隆起和拗陷相间排列组成。地震活动主要受这些断裂活动控制,在北东向区域性挤压应力作用下各断裂作右旋剪切错动。这些断裂向北断续地延伸至本震源北部,并受东西向构造的干扰。北部的地震活动除受北北东向断裂活动的控制外,还受东西向及北西向断裂活动控制。

震源 3 主要由郯庐断裂带构成,包括一系列互相平行的北北东向断裂,是穿切地壳、

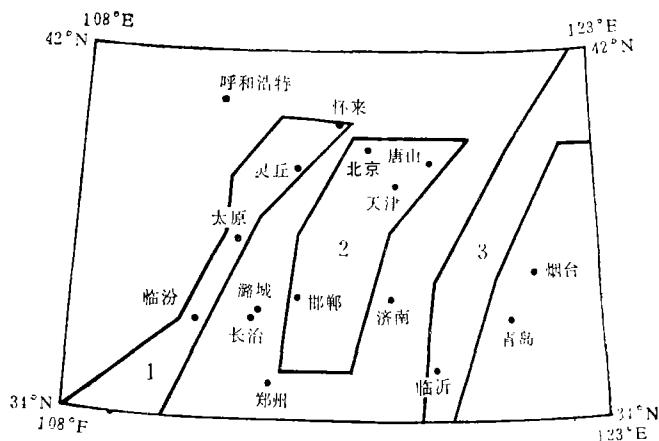


图 2 华北地区各震源位置

Fig. 2 Seismic sources in North China

到达上地幔的深大断裂。断裂带上地震活动的强度较大。在渤海一带，郯庐断裂带受北西向构造影响，地震活动较频繁。

2. 西北地区的范围为东经 96° 至 108° ，北纬 34° 至 42° ，大体包括我国青藏高原北部地震区的宁夏—龙门山地震亚区和祁连山地震亚区。本地区断裂构造发育，断裂的新活动较明显，震源划分如图 3。

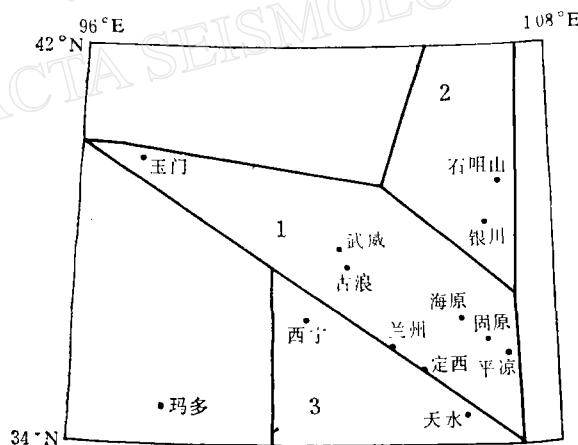


图 3 西北地区各震源位置

Fig. 3 Seismic sources in the north-west region

震源 1 以北西向大型褶皱和断裂为主体，被河西构造体系穿插而分割为不连续的三段。武威、兰州以东为东段，主要由华家岭—宝鸡大背斜及一系列断裂组成，其构造线走向为北西—北西西。武威以西至青海湖以东为中段，由背斜型褶皱及较多平行的大断裂组成，皆为北西走向。青海湖以西至玉门为西段，主要由几个重接的大背斜和断裂带构成。

震源 2 由贺兰山褶皱带组成。它是由一系列走向南北、中部向西微凸的挤压性断裂

带和褶皱等组成的一个复式褶皱带。

震源 3 主要由一个山字形构造带组成，其前弧位于武都一带，脊柱在礼县、武山一带。

3. 西南地区的范围为东经 98° 至 105° ，北纬 23.5° 至 33° ，大致为青藏高原中部地震区的川滇地震分区的范围。这地区新构造运动十分强烈，沿深大断裂带形成一系列断陷盆地和谷地。新地层中断裂广泛分布。区内断裂以南北走向为主，兼有北东及北西向的断裂。本区的断裂和地震活动与欧亚板块、印度洋板块和太平洋板块的相互挤压密切相关，地震的震中明显地沿断裂带成带状分布。各震源划分如图 4。

震源 1 为北西向鲜水河断裂带所纵贯，在北东向挤压应力作用下断裂带呈左旋平移错动，挤压破碎带出露 50 余米，水平错距达 15—20 公里。此面源相当于文献[1]所称炉霍—康定地震带。

震源 2 为龙门山断裂带所纵贯，断裂带由三条北东向大断裂组成，均作右旋平移错动。

鲜水河断裂带、龙门山断裂带和南北走向的安宁河断裂带一起构成“丫”字形。由于安宁河断裂带上的地震频度很低，故作为背景地震来考虑。

震源 3 内分布有数条南北向断裂，各次地震的震中亦大体呈南北向排列。此面源相当于文献[1]所称马边—昭通地震带。

震源 4 北起中甸，南至下关，主要由北西向断裂组成，它们属于元江断裂的北段，地震震中沿断裂呈带状分布。

震源 5 主要有三条南北向活动断裂，断裂向北逐渐转为北北西向，而向南则呈帚状撒开。这里地震和岩浆活动均较剧烈。

震源 6 为南北走向的小江断裂所纵贯，基本上是文献[1]所称东川—嵩明地震带，其断层破碎带十分发育，宽达 3—5 公里。断裂带两侧地层亦强烈褶皱，在北西向压应力作用下作左旋平移错动。

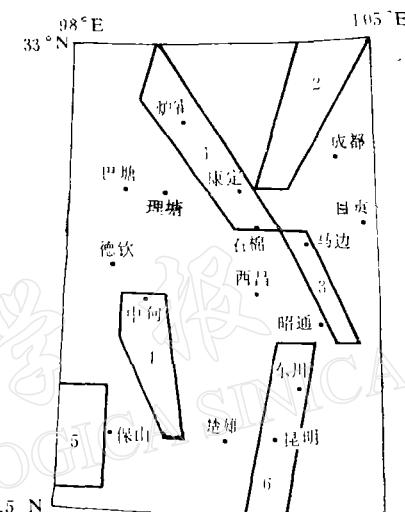


图 4 西南地区各震源位置

Fig. 4 Seismic sources in the south-west region

三、地震活动性

根据文献[1]这三大区地震活动的周期如表 1 所示。显然，如果不区别对待平静期与活跃期而用整个周期内地震发生的数据来计算地震活动性参数，必然会低估活跃期的活动性而高估平静期的活动性。如果把若干百年的地震记录混合统计，则除上述缺点外，还有一个缺点，即年代越老的记录对较小地震遗漏得越多。因此，宜根据该地区自古至今全部地震记录来识别该地区地震活动的周期性，从而判断所要预测地震危险性的年限（比如说，未来 50 年）到底属于平静期还是活跃期；活动的趋势将加强还是趋于平静；可能发生的最大震级是多大等等。然后用最近的相应时期（假定未来 50 年属活跃期就用最近的活跃期）的地震记录来统计。这样求地震活动性参数就可在一定程度上避免上述两种缺点。

表 1 地震活动的周期^[1]
Table 1 Periods of seismic activity

地 震 区	活 动 期	经 历 年 份	阶 段 划 分
华 北	第一	1069—1368 (300 年)	平静期 1069—1208 活跃期 1209—1368
	第二	1369—1730 (362 年)	平静期 1369—1483 活跃期 1484—1730
	第三	1731—今 (已过 252 年)	平静期 1731—1814 活跃期 1815—今
青藏高原北部	第一	1353—1739 (387 年)	平静期 1353—1560 活跃期 1561—1739
	第二	1740—今 (已过 243 年)	平静期 1740—1878 活跃期 1879—今
青藏高原中部	第一	1689—1786 (98 年)	平静期 1689—1732 活跃期 1733—1786
	第二	1787—1893 (107 年)	平静期 1787—1832 活跃期 1833—1893
	第三	1894—今 (已过 89 年)	平静期 1894—1922 活跃期 1923—今

对未来 50 年内各震源可能达到的最大震级(或最大震中烈度)的估计,不能简单地由数据统计年限内的最大地震决定,而要根据该震源历史上发生过的最大地震;根据地震地质条件判断可能发生的最大地震;根据本周期能量释放的程度估计未来 50 年地震活动的趋势等,考虑多种因素综合评定。这就不致于因近期未发生大震而低估震级上限,也不致于因近期发生过大震而高估震级上限。

从表 1 可见,华北地区地震活动性的周期约为 300 年。从应变释放情况看,第二活动期共释放应变 548.9×10^{10} 尔格 $^{\frac{1}{2}}$,第三活动期至今已释放应变 325.4×10^{10} 尔格 $^{\frac{1}{2}}$ ^[1]。从各方面考虑,未来 50 年仍属活跃期。最近一个活跃期虽从 1815 年起,但考虑到 1900 年后有仪器记录,地震数据的完整性和准确性大为提高,因此采用 1901 年初至 1981 年底这 81 年的记录进行统计,数据如表 2。未来 50 年内震中烈度上限取值: 第 1 震源 10.5 度,其余 9.5 度。

文献[1]认为西北地区最近的两个地震活动期的长短差异较大(参看本文表 1 的青藏高原北部地震区),第二活动期的活动高潮可能已经过去,今后一段时间将继续处于大地震后的余震活动阶段,以后就逐渐转入下一活动期的平静阶段。为使计算的地震活动性参数较接近未来 50 年的实际,本文采用 1931—1981 这 50 年的记录如表 2 进行统计。震中烈度上限取值: 第 1 及第 3 震源为 9.5 度,其余为 10.5 度。

西南地区(川滇地震亚区)的地震活动周期大致为 100 年(见表 1 的青藏高原中部地震区),采用 1931—1981 年间的数据如表 2。震中烈度上限均为 9.5 度。

进行地震危险性分析时,对各震源地震活动性的计算不用传统的震级频度关系,而用

表 2 各震源地震次数

Table 2 Number of events for each seismic source

震源号	震中烈度						总次数	统计年数
	5.5—6.4	6.5—7.4	7.5—8.4	8.5—9.4	9.5—10.4	10.5—11		
华北1	5	4	1	0	0	0	10	81
华北2	37	7	5	4	1	1	55	81
华北3	6	5	1	0	2	0	14	81
华北背景	15	5	5	1	0	0	26	81
西北1	17	5	1	1	1	1	26	50
西北2	6	4	1	0	0	0	11	50
西北3	7	4	1	1	0	0	13	50
西北背景	20	11	4	1	1	0	37	50
西南1	11	9	5	3	1	0	29	50
西南2	19	7	5	2	3	0	36	50
西南3	32	14	5	3	0	0	54	50
西南4	11	3	3	2	0	0	19	50
西南5	11	9	8	1	2	0	31	50
西南6	15	10	3	1	1	0	30	50
西南背景	68	40	3	5	2	0	118	50

表 3 各震源的地震活动性参数

Table 3 Parameters of seismic activity for each seismic source

震源号	平均震中烈度	λ_1	年平均发生率
华北1	6.6000	0.8533	0.1234568
华北2	6.6364	0.7340	0.6790124
华北3	6.9286	0.4510	0.1728395
华北背景	6.6923	0.6753	0.0027545
西北1	6.6154	0.7593	0.5200000
西北2	6.5455	0.9088	0.2200000
西北3	6.6923	0.6753	0.2600000
西北背景	6.7027	0.7572	0.0079357
西南1	7.0690	0.3327	0.5800000
西南2	6.8889	0.4861	0.7200000
西南3	6.6111	0.7636	1.0800000
西南4	6.7895	0.5780	0.3800000
西南5	7.0968	0.3092	0.6200000
西南6	6.7333	0.6330	0.6000000
西南背景	6.5678	0.8142	0.0326980

注: 年平均发生率的计算以震源为单位, 但背景地震以 1 万平方公里为单位。

最大熵原理由震级(或震中烈度)均值与拉格朗日乘子 λ_1 决定震级(或震中烈度)的概率分布, 其理论依据见文献[2], 计算程序的编制及此法与传统方法的比较见文献[3]。因此表征地震活动性的参数除震级(或震中烈度)上限及发生率外, 就是均值及 λ_1 (表 3), 而不是 α 及 β 。

四、衰减规律

为便于与历史上发生过的最大烈度及区划图的基本烈度相比较,本文以烈度表达地震危险性。因而衰减规律可表达为

$$I = C_1 + C_2 I_e - C_3 \ln(R + C_4)$$

式中 I 为场地烈度, I_e 为震中烈度, R 为震中距, C_1 至 C_4 为回归常数, 随各地区的地质构造、断层类型、地貌和场地土质条件等而异。显然, 华北、西北、西南的回归常数各不相同。我们根据文献[1]对各地震影响场统计的 a 、 b 值, 采用震中距 $R = \sqrt{a \cdot b}$, 对这三个大区分别求 C_i 值, 相关系数均在 0.94 以上, 变异系数为 0.16, 可见上述表达式能较好地反映衰减规律。因篇幅所限,另文专论各地震区的衰减规律。

五、基本烈度的概率水准

通过对 45 个城镇进行地震危险性分析, 得到每个城镇 50 年内相应于 21 个不同概率水准的地震烈度, 与基本烈度作了比较, 分别按不同超越概率计算 45 个城镇的计算烈度与基本烈度之比值对 1 的平均标准差(图 5(a)), 可见以 45 个城镇平均来讲, 基本烈度与 50 年内超越概率为 0.14 的烈度偏差最小。当超越概率在 0.17—0.12 间变化, 由地震危险性分析得到的烈度值与基本烈度的偏差变化不大。

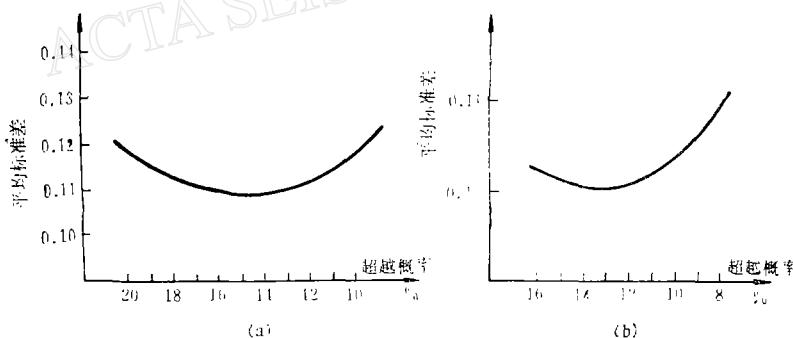


图 5 平均标准差与超越概率的关系

(a) 按 45 个城镇统计 (b) 按 41 个城镇统计

Fig. 5 Average standard deviation Vs. exceeding probability
(a) Based on 45 cities (b) Based on 41 cities

当然, 每个具体地点基本烈度的概率水准有高有低。表 4 列出国家地震局 1978 年编的中国地震烈度分布图、国家地震局 1976 年 9 月编的中国地震烈度区划图与本文计算结果的比较。考虑到目前国外大都以 50 年内超越概率 0.10 的地震强烈程度作一般工业与民用建筑的设防标准, 我国亦已规定以 50 年为设计基准期, 若以 50 年内超越概率为 0.10 的危险性分析结果与基本烈度相比, 则这 45 个城镇的统计结果为: 基本一致(± 0.49 度)者 19 个, 占 42.2%; 比基本烈度高 0.5 度—1.49 度者 12 个, 占 26.7%; 比基本烈度低 0.5

表4 烈度值的比较

Table 4 Comparison of seismic Intensities

序号	城镇	历史地震烈度	基本烈度	50年超越概率0.1的烈度
1	北京	8	8	7.82
2	天津	7	8	7.90
3	唐山	≥10	8	7.80
4	呼和浩特	6—7	8	6.54
5	太原	7—8	8	7.14
6	济南	7	6	7.37
7	邯郸	8	7	7.80
8	长治	7	7	7.12
9	青岛	7	6	6.87
10	临沂	10	9	7.46
11	临汾	≥10	9	7.23
12	郑州	6	6	6.99
13	怀来	9	8	7.31
14	灵丘	9	7	7.34
15	潞城	7	7	7.15
16	烟台	6	7	6.92
17	银川	9—10	8	7.40
18	固原	9	7	7.39
19	海原	10	7	7.46
20	武威	8	6	7.46
21	玉门	7	6—7	7.09
22	兰州	8—9	8	7.51
23	石咀山	8	8	7.36
24	平凉	8	6—7	7.34
25	玛多	7	6—7	6.89
26	定西	8	6	7.49
27	古浪	10	7	7.47
28	西宁	6	7	7.51
29	天水	8—9	8	7.44
30	自贡	7	7	7.70
31	炉霍	8—10	9	8.92
32	昆明	8	7	8.69
33	成都	6	7	7.92
34	巴塘	10	9	8.05
35	理塘	9—10	9	8.18
36	康定	10	≥10	9.13
37	德钦	7	7	7.74
38	马边	8	9	8.76
39	中甸	8	8	8.55
40	西昌	10	9	8.49
41	东川	10	9	8.69
42	保山	7	7	8.62
43	楚雄	8—9	8	7.87
44	石棉	7	8	8.66
45	昭通	7	7	8.70

度—1.49 度者 10 个, 占 22.2%; 以上共 41 个, 占 91.1%; 比基本烈度高 1.6 度—1.7 度者 3 个, 占 6.7%; 比基本烈度低 1.77 度者 1 个, 占 2.2%.

笔者认为, 这四个城镇差异较大的情况是: 昆明的基本烈度是 7 度, 但 50 年内超越概率 0.1 相应于 8.69 度, 7 度则相当于平均约 50 年一遇的地震烈度. 从地质构造和震中分布来看, 昆明周围受强震影响的可能性还是较大的, 例如, 1833 年 9 月 6 日就在昆明附近发生过 8 级地震. 云南省保山和昭通基本烈度均为 7 度, 但 50 年超越概率 0.1 分别对应于 8.6 度和 8.7 度, 7 度则相当于平均三十多年一遇的烈度. 从地质构造和震中分布看, 保山的地震危险性是比较大的, 但昭通则不那么大. 山东省临沂的基本烈度为 9 度, 但 50 年超越概率 0.1 对应于 7.23 度. 临沂位于郯庐断裂与活动性很强的北西向断裂的交汇处, 构造运动很强烈, 基本烈度定得较高看来主要是出于地震地质方面的考虑. 我们这次进行的地震危险性分析对局部地质构造的影响考虑得不够, 所以对临沂的地震危险性可能是低估了一些. 假如不计上述 4 个差异较大的城镇而按 41 个城镇平均计算, 基本烈度的概率水准为 50 年内超越概率 0.13, 当超越概率在 0.17—0.10 范围内变化时, 由危险性分析得到的烈度与基本烈度的偏差变化不大(图 5(b)).

六、讨 论

本文通过对我国华北、西北和西南部分地区 45 个城镇进行的地震危险性分析对基本烈度的出现概率作了粗略估计, 初步获得了与基本烈度相适应的平均超越概率水平. 但是, 应该指出, 当某地的基本烈度与平均超越概率相应的烈度相差较大时并不一定表明基本烈度定得不准, 只有通过具体分析才能对两种方法的可靠度作出进一步的评价, 因为两种方法的基础是不同的. 就目前来讲, 地震危险性分析方法更偏重于历史地震资料的统计分析, 而基本烈度的提供则包含有更多的经验判断. 从发展的角度来看, 地震危险性分析方法具有以下明显的优点: 1. 可以给某地的烈度和烈度区划以明确和统一的概率定义, 而目前地震部门所提供的基本烈度在概率意义上是含糊的. 另外, 由于各地在评定烈度时标准掌握得并不完全一致, 各地区之间基本烈度可能存在系统差别. 2. 通过运用最大熵原理^[2]、贝叶斯定理^[4]等方法, 地震危险性分析同样可以把来自地质、地球物理、考古和专家经验等方面的信息综合在一起进行评价. 3. 地震危险性分析不仅适用于烈度, 也适用于地震动参数如地面运动强度、谱和持时等, 因此更能适应工程抗震的定量需要.

参 考 文 献

- [1] 国家地震局, 中国地震烈度区划工作报告, 地震出版社, 1981.
- [2] 董伟民、H. C. Shah, 鲍震斌, 最大熵原理在地震重现关系上的应用, 地震工程与工程振动, 3, 4, 1—14, 1983.
- [3] 鲍震斌、董伟民, 用于地震危险性分析的 MEP 程序, 全国地震工程会议论文选集, 1, A—3—1 至 A—3—5, 1984.
- [4] H. C. Shah、董伟民、鲍震斌, 地震危险性分析中贝叶斯模型的意义及应用, 地震工程与工程振动, 2, 4, 1—16, 1982.

PROBABILISTIC CALIBRATION OF BASIC INTENSUTY FOR PARTS OF CHINA

BAO AIBIN LI ZHONGXI GAO XIAOWANG ZHOU XIYUAN

(*China Academy of Building Research*)

Abstract

Based on the results of seismic hazard analyses for 45 cities and towns in the Northern, North-western and South-western Regions of China, preliminary probabilistic calibration of Basic Intensity, as predicted by the Chinese Intensity Zoning Map, has been carried out. It is discovered that the Basic Intensity offered by the Zoning Map is roughly equivalent to an average intensity level with exceeding probability of 0.14 in 50 years.

The calculation in this paper have been done in accordance with the common procedures of hazard analysis. Some main points that should be considered in practical application are as follows: 1) Reasonable estimation of the location and extent of potential seismic sources by both geotectonic structure and distribution of historical epicenters; 2) Estimation of the magnitude-recurrence relationships consistent with current level of seismicity; 3) Choice and use of the proper intensity attenuation laws, which reflect specific geotectonic structures of different regions.

The results obtained from hazard analysis are discussed graphically and tabularly.