两类地震风险评估模型的对比与讨论*

杨文涛[1,2,3] 汪 明[1,2]† 史培军[1,2]

(1)北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,100875,北京;
2)民政部-教育部减灾与应急管理研究院,100875,北京;3)兰州大学资源环境学院,730000,兰州)

摘要 回顾了传统的地震危险性评估的方法,介绍了基于离散事件仿真的地震风险评估方法,并以云南省永胜县为例,运用2类不同的方法对永胜县面临的地震风险进行了计算,得到了永胜县的地震烈度超越概率曲线.结果显示2类不同评估方法的结果有着很高的吻合度;结合保险行业地震风险管理的实际需求进一步讨论了基于离散事件的地震模型的优点及其合理性.

关键词 地震风险模型;概率分析方法;离散事件仿真

地震风险评估是评价研究区面临地震威胁(可能的损失及其发生的概率)的重要步骤[1].现存在2类地震风险评价方法:概率性的地震风险评价模型和确定性地震风险评价模型.一些大尺度区域的地震风险评价研究表明,概率性地震风险评价模型在结构工程应用上存在一定的缺陷,主要是不能产生比较符合实际的结果[2].这一缺陷主要由2方面的原因造成,一是概率模型的随机性,二是概率模型参数的不完整性[3].

由于目前还不能完全从机制上对地震进行模拟,因此地震风险模型具有很多的不确定性.概率性地震风险模型也分为解析型模型和计算机仿真模型.地震风险解析模型的定量化研究始于20世纪60年代,首先由Cornell[4]引入概率模型,并使这种不确定的地震灾害风险定量化,以各种地震参数的重现周期展现出了地震灾害风险的大小.在此基础上,Algermissen等[5]1982年进行了改进,之后在1997年SSHAC[6]又进一步完善了这一经典解析型概率分析模型.经过几十年的发展、完善,地震概率模型已经发展成为一个利用地震发生率、震动辐射和震动反应来评估灾害的重要工具.这些改进都使模型趋于更加复杂,或是增加了对模型中不确定性因素的处理.从某种程度上讲,所有的地震风险模型都混合了概率性模型和确定性模型的思想,只是程度上有所不同而已[2].基于事件的确定性地震风险模型较多地应用于关键性基础设施建设的抗震评估,如核电站、大坝等;基于概率的地震风险模型主要应用于保险业承保对象的地震风险分析.

本文引用Cornell的概率解析型地震模型[5],得到了研究区的地震烈度超越概率曲线;然后引入胡聿贤[6]介绍的模型,得到第2个研究区的地震烈度超越概率曲线;最后提出了基于事件仿真的模型作为第3种计算方法,并将这3种模型的结果进行了比较.

1 数据

中国是地震多发区,因地震而造成的经济损失和人员伤亡居诸灾之首[7].地震是云南省最主要的自然灾害之一,云南省除曲靖、文山东部地区和沿红河断裂带中段的滇中狭长地震带较少地震发生外,其他地区几乎都受到地震灾害的影响.与其他地震灾害高发的省份如新疆、甘肃、青海、四川、西藏等相比,云南单位面积上地震活动频率最高[8].云南省永胜县位于滇西北、青藏高原东缘,这里地质构造环境复杂,构造地震活动强烈多发.历史上曾发生多次较大的地震,如1515年永胜县发生大于7.5级地震[9]、1652年弥渡7级地震、1925年大理7级地震、1996年丽江7级地震,而5~6级中强地震也时有发生[10].

地震带是指同一地震区里地震活动性和地震构造条件密切关联的地带,带内地震活动在时间、空间、强度上的联系更加密切.或者说地震震中在地震带内呈带状密集分布,组成地震带.地震带是评价地震活动的基本单元.位于地震带内的潜在发生破坏性地震的源区称为潜在震源区,亦称"地震危险区"、"地震发生带"等.也就是说地震在地震带中不是随机发生的,而是有一定的发生范围,即地震只可能发生在这些潜在震源区内[6].地震带上包含很多的潜在震源区,本文的研究对象是永胜县附近的20个潜在震源区,这些潜在震源区属于可可西里-金沙江地震带.文章采用永胜县附近

* 科技部国际科技合作项目资助(2010DFB);地标过程与资源生态国家重点实验室团队重点资助项目
† 通信作者
收稿日期:2010-12-31

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

200 km 内的 20 个潜源区大于 4 级地震的年均发生率作为输入数据.

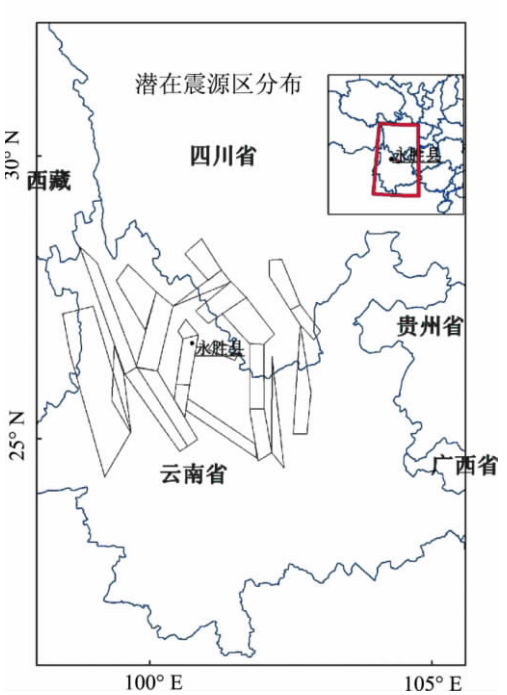

图 1　潜在震源区分布

2　方法

本文重点介绍基于概率的解析型地震风险模型和基于事件仿真的地震风险评价模型.

2.1　概率解析型分析方法

2.1.1　一维解析型地震风险评价概率模型　一维线性模型是对 Cornell[5] 提出的概率模型的应用，即把每个潜源区简化成“潜源线”. 所有可能发生地震的点位，都按照一定的规律分布在这些“潜源线”上.

模型假设：1）由于一般的地震潜在震源区呈现为长条带状，因此在研究中将每个潜在震源区等价为“潜源线”. 方法是：对四边形的带状潜在震源区，选取相对的 2 条短边上的中点相连接，构建与四边形长边近似平行的潜在“震源线”；对三角形潜在震源区，潜在震源区等价为与最长边走向一致的潜在“震源线”（方法见图 2）. 2）如果潜在震源区发生地震，假设它们等概率的发生在“潜源线”上. 3）假设发生在地震带内的震级大于 5.5 级的地震符合泊松分布.

当某个潜源区上发生 $M(M\geqslant 5.5)$ 级地震时，造成大于 i 级烈度影响的条件概率是 $P[I\geqslant i|R=r]$.

引入中国西部地震烈度衰减关系式，

$$I=c_1+c_2M-c_3\ln(r+u),$$

以及地震震级频率的古登堡-里克特关系式（Gutenberg-Richter law），可以得到地震带内某“潜源线”上发生 M 级地震后，对永胜县造成烈度大于 i 级烈度影响的可能性为：

$$P[I\geqslant i\mid R=r]=\exp[-\beta(\frac{i+c_3\ln(r+16)-c_1}{c_2}-m_0)].$$

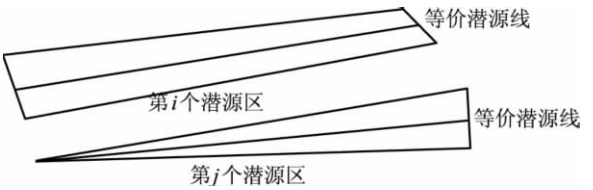

图 2　潜源区等价为“潜源线”

以上 2 式中，c_1、c_2、c_3 和 u 都是半经验常数，它们的值[11]分别是 4.524、1.443、1.844 和 16，m_0 是起算震级，在这里取值 5.5，为常量.

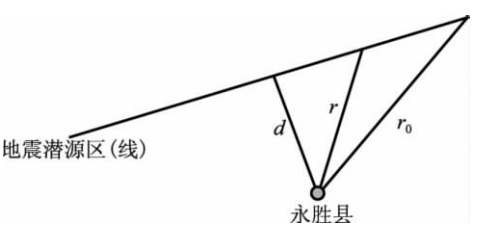

图 3　震源线距离分析示意

把这种地震发生的条件概率事件按长度比例分配到每个潜源区上. 然后再把这种烈度的概率均匀分配到每个“潜源线”上的每个潜在震源点. 最后使用线性积分，得到发生地震后每个“潜源线”对永胜县烈度影响的条件概率：

$$P_l(I\geqslant i)=\frac{1}{L_{all}}C\cdot G\exp[-\frac{\beta}{c_2}i],$$

$$C=\exp[\beta(m_0+\frac{c_1}{c_2})],$$

$$G=\int_d^{r_0}\frac{2}{r^{\beta\frac{c_3}{c_2}-1}\sqrt{r^2-d^2}}\mathrm{d}r.$$

最后得到这 20 个潜在震源区（线）发生至少 1 次感兴趣震级地震的概率，$P_{all}(I\geqslant i)$：

$$P_{all}(I\geqslant i)=1-\prod_{i=1}^{22}(1-P_l).$$

2.1.2　二维解析型地震风险评价概率模型　由于模型 1 把每个潜在震源区“简化”成为潜在“潜源线”. 这样的处理，可能会损失一定的空间分布信息，进而可能造成地震风险评价结果的不准确. 该模型把每个潜在震源区作为面状潜源区，进而把每个地震发生的概率分配到潜源区内的每个点上. 这样，每个点相对于研究区永胜县而言是有具体距离的. 就可以依据每个点发生地震大小的概率来推测该地震潜源点对永胜县造成的地震烈度大小的概率值. 再利用二维积分把所有地

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

震潜在震源点的影响概率扩展得到整个潜在震源区，最后得到所有 20 个潜在震源区对永胜县烈度影响的概率.

与第一种模型相同，首先需要设定模型成立的前提条件：1)如果发生地震，假设地震等概率地发生在地震带潜源区内的所有点上. 2)假设感兴趣震级(大于 5.5 级)的地震在该地震带(可可西里-金沙江地震带)内的发生频数符合泊松分布.

选取一个特定的潜在震源区，假设有一场地震发生，那么它对永胜县造成超过烈度为 i 的条件概率(条件是有 5.5 级的地震发生)是

$$P_l[I \geqslant i \mid R = r] = \exp[-\beta(\frac{i + c_3\ln(r+16) - c_1}{c_2} - m_0)].$$

把这个条件概率从 20 个潜源区分配到每个潜在震源区. 作为第一种模型的改进，这里使用面积权重，即每个潜源区面积占所有 20 个潜在震源区的总面积比例把这一条件概率分配到每个潜源区里. 在这个基础上，再把每个潜在震源区的概率分配到每个潜源区的潜源点上. 使得距离成为常量. 从而计算出每个潜在震源区上潜源点发生感兴趣震级后对永胜县造成大于某 i 烈度的条件概率，最后采用二次积分的办法得到整个潜源区的烈度超越概率(条件概率).

$$P_l(I \geqslant i \mid R = r) = \iint_{s_l} \frac{s_l}{S_{\text{all}}} \times \frac{1}{s_l} \times P[I \geqslant i \mid R = r]\mathrm{d}x\mathrm{d}y.$$

由于地震带内潜在震源区感兴趣震级的地震发生符合泊松分布，

$$p_{l\widetilde{N}}(n) = P_l[\widetilde{N} = n] = \frac{\mathrm{e}^{-\nu_l}(\nu_l)^n}{n!}.$$

据此计算不发生的概率，进而得到所有 20 个潜在震源区的烈度超越概率 $P_{\text{all}}(I \geqslant i) = 1 - \prod_{l=1}^{22}(1 - P_l)$.

2.2 离散事件仿真概率分析方法 基于事件仿真的地震风险评价模型，评价地震危险性的另一种重要概率方法. 与解析型概率的地震危险性评价模型相比，基于事件仿真的地震危险性评价模型更适合用于单一设施的风险评估.

本文中的仿真模型，以 1 万 a 为时间间隔产生 1 万 a 间的所有事件. 即，在这 1 万 a 间所有 20 个潜在震源区发生大于 5.5 级地震次数为所有仿真事件的总个数 N_{all}. 这里 N_{all} 是 1 万倍的 20 个所有潜源区的年均发生率. 得到震源区大于 5.5 级地震的事件次数 N_{all} 后，利用每个潜源区面积占所有 20 个潜在震源区总面积和的比例作为权重，把这些事件分配到了每个潜在震源区，即第 1 个潜在震源区发生事件数为 $N_l = S_l/S_{\text{all}}$(这些事件的震级均在 5.5 级以上).

所有这些 20 个潜源区发生的大于 5.5 级的地震服从地震指数分布，即，震级大小与发生的相对可能性成指数衰减关系. 利用这种指数分布求得每级地震相对所有震级地震的发生概率. 均匀选取概率从 0 到 1 的 N_{all} 个事件，然后再求出每个均匀概率事件对应的震级.

在每个潜源区内生成对应事件的随机点. 即每个潜源区在 1 万 a 内发生的地震点位是均匀、随机分布的. 这样，结合上面生成的震级以及在每个潜源区的随机点位，就组合成了 N_{all} 个完全仿真的地震事件. 事件随机组合，即具有相同概率的震级与具有相同概率的潜源点随机组合，就得到了 N_{all} 个基本事件. 这些事件虽然在点位上整体是随机的，但相对永胜县却有明的地理位置(图 4). 这样就可以应用中国西部的地震震级-烈度衰减关系[11]计算每个事件对永胜县的烈度.

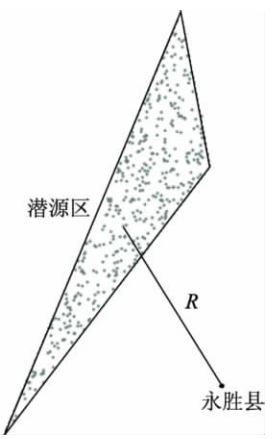

图 4 其中一个潜源区形状以及随机事件分布

由于所研究的 20 个潜在震源区发生的地震次数符合泊松分布，

$$p_{\text{all}}(n) = P_{\text{all}}[\widetilde{N} = n] = \frac{\mathrm{e}^{-\nu_{\text{all}}}(\nu_{\text{all}})^n}{n!}.$$

那么，发生 0 次感兴趣震级(≥5.5 级)的地震概率是

$$p_{\text{all}}(0) = P_{\text{all}}[\widetilde{N} = 0] = \frac{\mathrm{e}^{-\nu_{\text{all}}}(\nu_{\text{all}})^0}{0!} = \mathrm{e}^{-\nu_{\text{all}}},$$

研究区所有潜源区地震研究点发生地震的概率为

$$p_j = \frac{1 - \mathrm{e}^{-v_{\text{all}}}}{N_{\text{all}}},$$

p_j 是单个事件在单个潜源点发生的概率，v_{all} 是 20 个潜源区年均地震次数.

最后把这些烈度中大于Ⅳ度的按照累计概率的定义加起来，就得到了所有 22 个潜在震源区的地震烈度超越概率，和每个地震烈度值的相应回归周期.

3 结果

数据的处理过程涉及到较多的计算，主要过程利用 MATLAB 程序实现. 图 5 是使用 MATLAB 模拟生成的永胜县地震烈度重现周期.

图 5 是 3 个模型生成的 50 a 尺度的烈度重现周期图，可以看到模型 3 与模型 1、2 具有很高的相似度.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在总体趋势上，地震烈度越大对应的重现期越长. 由于烈度在Ⅳ度以下的地震发生对承载体影响很小，所以没有列入统计的范围之内. Ⅳ度地震的重现周期比较短，Ⅶ度地震的重现期在 450 a 左右. 如果观察Ⅳ度到Ⅶ度的地震，可以看到Ⅴ度地震的重现周期大约 50 a 左右；Ⅵ度地震发生重现周期大约在 150 a 左右.

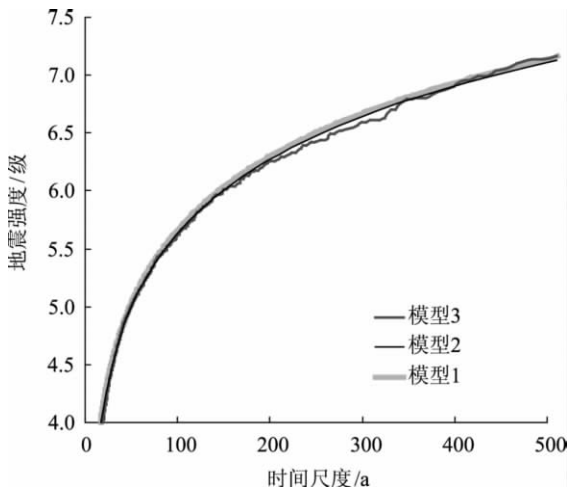

图 5　时间尺度为 500 a 的地震烈度重现周期

图 6 是2 000 a 时间尺度的地震风险模型结果. 从总体上看，2 类模型规律一致. 但是在较长的时间尺度上，模型 3 与前 2 种有较大的不同：仿真模型生成的各烈度波动性较大. 这一特征主要因素是地震的不确定性引起的. 因为小烈度事件很多，个别异常事件的影响很有限；而大烈度的事件太少，个别异常事件的影响会非常大，并影响整个曲线的特征. 从这个意义上讲，模型 3 产生的结果能把极端事件描述出来.

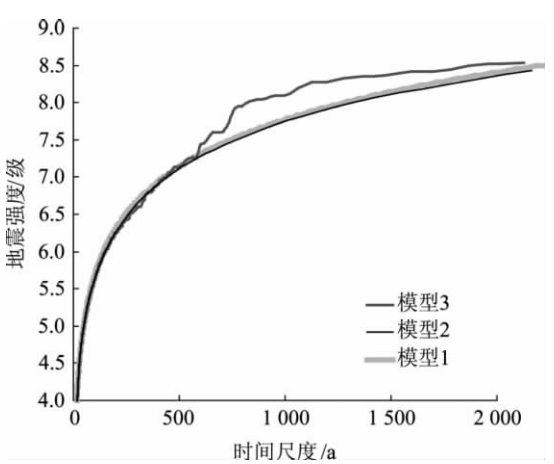

图 6　时间尺度为2 000 a 的地震烈度重现周期图

4　讨论

基于概率的地震危险性评价模型 1 和 2 具有基本相同的曲线走向，二者拟合效果非常理想. 因为前 2 个模型具有相同的理论基础，即把地震带（可可西里-金沙江地震带）内研究的 20 个潜源区发生某一级地震占所有震级地震的条件概率分配到每个潜源区，再把潜源区的这个条件概率按照面积或是长度均匀地分配到所有潜源区的每一个潜源点上. 这样就确定了震中与研究区之间的距离，再利用上面介绍的方法评价每个潜源区实际发生感兴趣震级地震的概率，进而能够得到每个潜源区对永胜县的烈度影响，最后得到这 20 个潜在震源区对永胜县地震烈度的总体评价.

模型 3 是基于事件的仿真地震模拟，先产生一定数量的场景地震，逐个计算这些场景地震对永胜县的烈度影响. 在这个基础上计算每个事件实际发生概率，最后按照所有事件产生的烈度概率累计得到 20 个潜在震源区对永胜县地震烈度的超越概率.

结果显示，这 3 种模型结果非常吻合. 与模型 1 相比，模型 2 在潜源区形状上做了更加精确的描述，但这两种模型的效果高度拟合. 这一点说明可能当潜源区为长条、长带状时，在地震危险性评价中，将其“简化”成线状潜源，结果可能变化不大. 由此得出，今后发展的模型可能不必在潜源区几何形状上做过分精确的描述，进而使得模型计算在一定程度上得到简化，以提高评价效率.

在烈度小于Ⅶ度的情况下，或是考虑的时间尺度较小的情况下，模型 3 能够得到很好的模拟效果. 在烈度增大的情况下，模型 3 得到的结果出现了较大的变动，这一点表现出了现实中地震事件的不确定性. 因而模型 3 在描述现实情况下极端地震事件及小概率事件上比前两种方法更具优势. 这一特点可以被保险行业采用，以考虑概率性模型不能产生的极端小概率事件.

由于数据限制，我们只能得到永胜县附近 200 km 以内的 20 个潜在震源区，以及震级大于 5.5 级的地震，这些都在很大程度上限制了烈度上限值. 因为距离永胜县大于 200 km 的潜在震源区发生震级相对较大的地震，或在距离永胜县较近的位置发生了略小于 5.5 级震级的地震，仍会对永胜县造成较大的烈度影响，从而增加永胜县地震的危险性，使之符合现实情况事件的决策服务.

综上分析，基于事件仿真的模型更适用于保险行业处理单个地震事件，据此可以得到投保单元受到的地震烈度影响，进而算出保险公司的经济损失. 这样可以更好地为保险公司的决策服务. 另外，基于事件的仿真模型有利于保险公司在有具体保险条款（免赔额、赔付上限等）时计算每个随机事件的保险损失，从而统计出各保单、各帐户的风险大小；同时，也有利于再保险分摊时计算各风险分摊者的风险大小.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5 结论

模型1与模型2在结果上的一致性说明,对于长条、长带状的地震潜在震源区,从模型方法上可把震源区简化成"震源线".这样可能会使以后对地震危险性模型的计算变得比较简单.

3种模型都能很好地模拟出永胜县各种地震烈度的重现周期.第3种模型作为基于仿真事件的地震风险评价方法,也能产生很好的模拟效果.这也说明基于事件仿真的模型和解析型概率性模型都能在短时间尺度上得到很好的评估效果.

在较长的时间尺度上,模型3能够将现实中小概率的极端情况表现出来.这也证明了基于事件的地震风险模型比解析型概率地震模型更合适应用于核电站、大坝等关键性基础设施的地震风险评估上.

由于本文在数据上的不够完整,只能在方法上做出对模型的讨论.但在地震危险性评价的研究中,完整的潜在震源区以及完备的震级数据资料对生成精确的烈度重现周期是非常重要的.

6 参考文献

[1] Patricia G, Paul K, Howard K. The impact of uncertainty in managing seismic risk: the case study of earthquake frequency and structural vulnerability [EB/OL]. [2010-12-25]. http://fic.wharton.upenn.edu/fic/papers/99/9923.pdf

[2] Jens U K. Seismic hazard analysis-quo vadis?[J]. Earth-Science Review, 2008(88):1

[3] Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC). Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts[R]. Washington: US Nuclear Regulatory Commission, 1997

[4] Allin Cornell C. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583

[5] Edward H F, Thomas H J. OpenSHA: a developing community-modeling environment for seismic-hazard analysis[J]. Seism Res Lett, 2003,74:406

[6] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京:地震出版社, 1999

[7] 王瑛,王阳. 城乡承载体差异对地震灾情的影响:以包头地震和姚安地震为例[J]. 灾害学,2009,24(1):122

[8] 王瑛,史培军,王敬爱. 云南省农村乡镇地震灾害房屋损失评估[J]. 地震学报, 2005,27(5):551

[9] 虢顺民,向宏发,张靖,等. 1515年云南永胜县地震形变带和震级讨论[J]. 地震研究,1988,11(2):153

[10] 周庆,虢顺民,向宏发. 滇西北地区潜在震源区的划分原则和方法[J]. 地震地质, 2004,26(4):761

[11] 汪素云,俞言祥,高阿甲,等. 中国分区地震衰减关系的确定[J]. 中国地震,2000,16(2):99

COMPARISON OF TWO MODELS FOR SEISMIC RISK ASSESSMENT

YANG Wentao[1,2,3] WANG Ming[1,2] SHI Peijun[1,2]

(1)State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;
2) Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;
3) College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, 730000, Lanzhou, China)

Abstract This paper reviewed traditional method of seismic risk analysis, then introduced a discrete event-based simulation method. Yongsheng County in Yunnan Province was chosen as a case for study. These two methods were tested by calculating seismic hazard risks in Yongsheng and a comparison was made of the results in the form of exceeding probability (EP) curves. Data showed that these two methods generated relatively consistent EP curves. The paper considered the practical needs of insurance industry, then discussed advantages and rationality of event-based simulation method.

Key words seismic risk analysis; probability based; discrete event-based simulation

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net