

概率地震海啸危险性分析中地震样本容量的确定: 考虑震级分布完备性

徐朝阳,任叶飞,温瑞智,刘也

(中国地震局工程力学研究所,中国地震局地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江哈尔滨150080)

摘要:近年来随着世界各国对海啸防灾减灾的重视,国内外都开展了大量 PTHA 工作,然而其中有关地震样本容量的确定都较为随意,也没有相关研究给出合理的方法。本文考虑地震样本的震级分布完备性,采用蒙特卡洛随机采样技术,通过试算法确定 PTHA 工作中潜源的最佳地震样本容量。通过敏感性分析发现潜源的震级上下限之差 ΔM 对确定最佳地震样本容量影响显著。通过数据拟合建立了最佳地震样本容量与震级差 ΔM 的经验模型;最后,将模型应用于我国东南沿海的 PTHA 工作中,给出了各潜在海啸源的最佳地震样本容量建议值。

关键词:地震样本容量; PTHA; 震级分布; 完备性; 敏感性分析

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

Earthquake sample capacity in probabilistic tsunami hazard analysis: considering the completeness of magnitude distribution

XU Zhaoyang, REN Yefei, WEN Ruizhi, LIU Ye

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Harbin 150080, China)

Abstract: With much attention to tsunami mitigation worldwide in recent years, a large amount of PTHA work has been carried out both at home and abroad. However, the determination of the capacity of earthquake samples is relatively arbitrary, and there is no relevant study to develop an available method. In this paper, considering the completeness of magnitude distribution of earthquake samples, the Monte Carlo random sampling technique was used to determine optimum earthquake sample capacity of potential sources in PTHA work by trial algorithm. Through the sensitivity analysis, it has been observed that the difference between the upper and lower magnitudes (ΔM) of the potential source has significant influence on determining the optimum earthquake sample capacity. The empirical model of the earthquake sample capacity and ΔM was established by data fitting; finally, this model was applied to the PTHA work in the coastal areas of South China Sea, and the optimal seismic sample capacity for each potential tsunami source was recommended.

Key words: earthquake sample capacity; PTHA; magnitude distribution; completeness; sensitivity analysis

收稿日期:2018-03-04; 修订日期:2018-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51278473); 环保部公益性行业科研专项(201209040); 东北亚地震海啸和火山合作研究计划项目(ZRH2014-11)

Supported by: National Natural Science Foundation of China(51278473); Ministry of Environmental Protection's Public Welfare Industry Research Project(201209040); Northeast Asia Cooperation Research Project on Earthquake, Tsunami and Volcanism(ZRH2014-11)

作者简介:徐朝阳(1991-),男,博士研究生,主要从事海啸防灾减灾研究。E-mail:xuzhaoyangiem@163.com

通讯作者:温瑞智(1968-),男,博士,研究员,主要从事强震地震学及海啸防灾减灾研究。E-mail:ruizhi@iem.ac.cn

引言

2004年的苏门答腊地震海啸和2011年的日本东北地震海啸,不仅造成了巨大的人员伤亡,也对经济的发展和环境的保护造成了一定的阻碍。许多沿海国家近年来都加大投入通过各种手段和方法以减轻海啸的灾害风险,其中概率地震海啸危险性分析(PTHA)是常用且有效的手段之一,已在全球很多国家和地区推广实施,并且也是海啸防灾减灾领域未来一个重要的研究方向^[1]。国外比较经典的研究案例有很多,例如,Geist和Parsons^[2-3]将PTHA的原理和方法进行了系统的总结和改进,并基于历史数据和数值模拟技术评估了墨西哥阿卡普尔科和美国太平洋西北沿岸卡斯卡底古陆地区的海啸危险性;Leonard等^[4]对加拿大东海岸结合潜在海啸源进行了海啸危险性分析;Annaka等^[5]结合环绕日本的断裂带以及可能影响产生越洋海啸的断裂,对日本采用地震海啸概率危险性分析方法进行评估。我国近几年在PTHA方面也开展了较多工作,例如,Ren等^[6-7]划分了影响我国沿海地区的15个局地海啸潜源和2个区域海啸潜源,对我国东南沿海典型场点开展了PTHA工作,给出了不同海啸波高的年发生概率和历史重现期;Hou等^[8]同样对中国东南沿海五省进行了海啸危险性评估,利用COMCOT模型给出了各地的海啸波高;张鹏等^[9]提出了一套适用于我国的地震海啸概率危险性评价方法和流程,并对大亚湾核电站沿海场点评估海啸危险性。

针对一定数量的地震样本进行海啸生成、传播过程的数值模拟是PTHA中重要的环节之一。随着计算机能力的快速提升,地震样本的容量也在不断提升。Geist和Parsons^[2]对印度洋进行PTHA分析时,采用蒙特卡洛方法随机生成了200次地震;Tadashi等^[10]用逻辑树的方法对日本进行PTHA分析时,模拟了615次地震海啸;Strunz等^[11]开展印度尼西亚海啸危险性分析研究时,采用了震级区间为7.5到9.0的2000次模拟地震海啸源;Li等^[12]在马尼拉断层上采用震级区间为7.0到9.0的30000次模拟地震海啸源,对我国南海进行了海啸危险性分析。与地震危险性分析(PSHA)采用地震动衰减关系估计地震动不同,PTHA估计海啸波高通常采用数值模拟技术,地震样本容量的增加固然可以提高PTHA结果的可靠性,但太大的计算工作量如果耗时很长显然会降低其实用性。因此,有必要科学合理的确立最佳的样本容量以节约时间和成本,提高工作效率。基于这一目的,本论文在考虑震级分布完备性的基础上,通过蒙特卡洛随机采样技术拟合求解PTHA中地震采样样本容量的最佳模型,最后将模型应用于我国东南沿海的PTHA工作中。

1 PTHA 计算过程

概率海啸危险性分析方法(PTHA)源于1968年Cornell^[13]提出的地震危险性分析方法(PSHA),结合我国新一代地震动参数区划图使用的PSHA方法,Ren等^[6,14-15]设计了适合我国使用的PTHA流程,如下:

第1步,确定可能产生海啸的潜在海啸源,根据近海(板内)及外海(板间)断层构造,确定潜在海啸源,即在地震带中可能引发海啸的地震断裂带位置及参数,包括震中纬度、经度、震源深度、断裂面长度、宽度、滑移量、破裂走向角等。

第2步,确定潜在海啸源地震活动性特征,根据经典的G-R分布,利用历史地震记录分布,潜在海啸源区内的地震活动性为:

$$\log \lambda_M = a - bM \quad (1)$$

其中, λ_M 为震级超越 M 的地震发生频率, a 和 b 是由历史地震统计分析的常数系数, M 为震级。根据Cornell^[13]提出的PSHA方法,一定区域内,发生任何一次地震的震级 M 的累积分布函数、概率密度函数分别为:

$$F(M) = \frac{1 - \exp[-\beta(M - M_{\min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]}, M_{\min} < M < M_{\max} \quad (2)$$

$$f(M) = \frac{\beta \exp[-\beta(M - M_{\min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]}, M_{\min} < M < M_{\max} \quad (3)$$

其中, $\beta = b \times \ln 10$, M_{\max} 和 M_{\min} 分别为该区域内发生地震的震级上下限,当震级小于震级下限或大于震级上限时,概率密度值为0。

第3步,通过蒙特卡洛技术随机生成地震样本,样本容量记为 N ,空间上潜在海啸源区内震中位置随机分布,震级上服从式(2)或式(3),其他震源参数亦服从各自经验分布,一般为正态分布或对数正态分布。

第4步,对地震样本中每个地震产生的海啸波传播进行数值模拟计算得到近海沿岸测点 N 个海啸波高值。

第5步,拟合 N 个海啸波高值的对数正态分布,并计算 T 年内总超越概率。

第6步,计算 N_s 个潜在地震海啸源区海啸影响的年平均发生率和重现期。

2 地震样本随机生成

上述 PTHA 流程中,第3步产生的地震样本至关重要,本文从地震样本符合式(2)或式(3)的程度来考虑样本容量的大小,采用平均相对误差的概念来衡量该符合程度,最佳样本容量确定方法计算如式(4)所示:

$$E_r = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|x_{ti} - x_{si}|}{x_{ti}} \right)}{n} \times 100\% \quad (4)$$

其中, n 表示震级分档数量, x_{ti} 、 x_{si} 分别表示第 i 个震级档采样的理论频数和实际频数。式(4)衡量的是随机采样在某一采样次数时,得到在不同震级的地震是否符合潜在海啸源区内的地震活动性规律,即衡量震级分布的完备性。例如,若式(3)中取 $M_{\max} = 7.0$, $M_{\min} = 6.5$, $b = 1.0$, 即 $\beta = 1.0 \times \ln 10 = 2.3$, 进行 100 次随机采样,各震级档的频数分布如图 1 所示,该算例的结果 E_r 为 15.049%。

接下来,本文采用试算法确定最佳样本容量,步骤如下:

(1) 针对特定案例,给定 M_{\max} 、 M_{\min} 、 b 三个参数值,设定采样次数初始值,根据公式(2)或(3)进行震级分布的蒙特卡洛随机采样;

(2) 为减小随机采样产生的离散性,重复 10 次蒙特卡洛随机采样过程,求得 10 个采样结果的 E_r 值的平均值(式(4))。

(3) 逐渐增大采样次数,针对每个采样次数重复步骤(1)和步骤(2),当 E_r 值稳定地低于期望值时,停止试算。

图 2 表示, $M_{\max} = 7.0$, $M_{\min} = 6.5$, $b = 1.0$ 情况下,不同采样次数的 E_r 值的平均值和标准差。若取理论频数与实际采样频数的相对误差期望指标 E 为 5%、10%、15%,图 2 案例中当采样次数达到 1050 次、350 次、100 次时停止试算,由此可确定这些值为最佳采样容量。

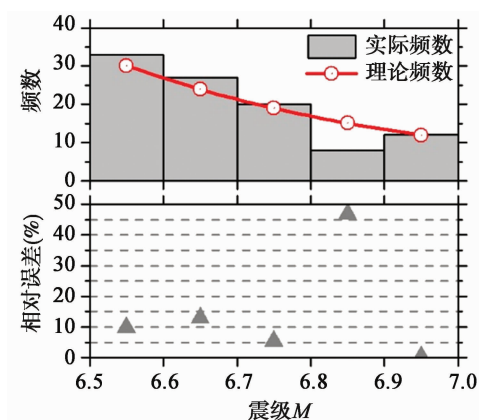


图 1 震级 6.5 ~ 7.0 范围随机取样 100 次的各震级分档频数分布及相对误差

Fig. 1 Frequency distribution and relative error of each magnitude bin while 100 earthquakes are randomly produced in the magnitude range from 6.5 to 7.0

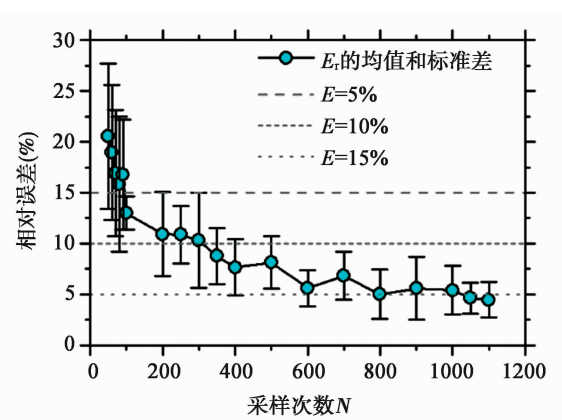


图 2 $b = 1.0$ 震级 6.5 ~ 7.0 不同采样次数的平均相对误差

Fig. 2 The average relative error of different sampling times with the magnitude range from 6.5 to 7.0 while $b = 1.0$

3 参数敏感性分析

在上述随机采样过程中,震级分布是按照式(3)产生的,其中 M_{\max} 、 M_{\min} 、 b 是三个变量,接下来进一步讨

论 b 、 M_{\min} (或 M_{\max})、 ΔM (即 $M_{\max} - M_{\min}$) 对随机采样结果的敏感性。

3.1 b 值影响

对于 b 值敏感性分析,分别保持震级下限 M_{\min} 和震级差 ΔM 不变,改变 b 值,观察最佳采样次数曲线变化趋势,取 $E = 5\%、10\%、15\%$ 作为最佳采样次数的误差期望指标。

当震级下限 $M_{\min} = 6.5$ 保持不变,震级差 ΔM 分别为 $0.5、1.0、1.5$ 时,不同误差期望指标 E 的最佳采样次数与 b 值相关性如图 3 所示。

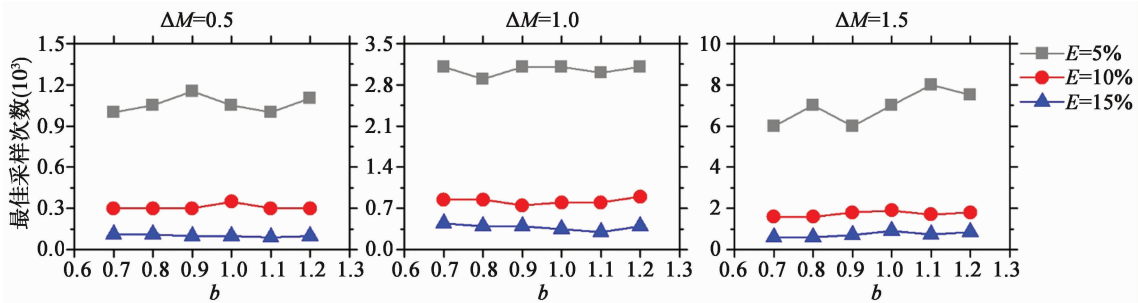


图3 不同震级差 ΔM 、不同 b 值时最佳采样次数的变化趋势

Fig. 3 The tendency of the optimum sampling times correlating with different magnitude differences ΔM and b values

震级差 $\Delta M = 0.5$ 保持不变,震级下限 M_{\min} 分别为 $7.0、7.5、8.0、8.5$ 时,不同误差期望指标 E 的最佳采样次数与 b 值相关性如图 4 所示。

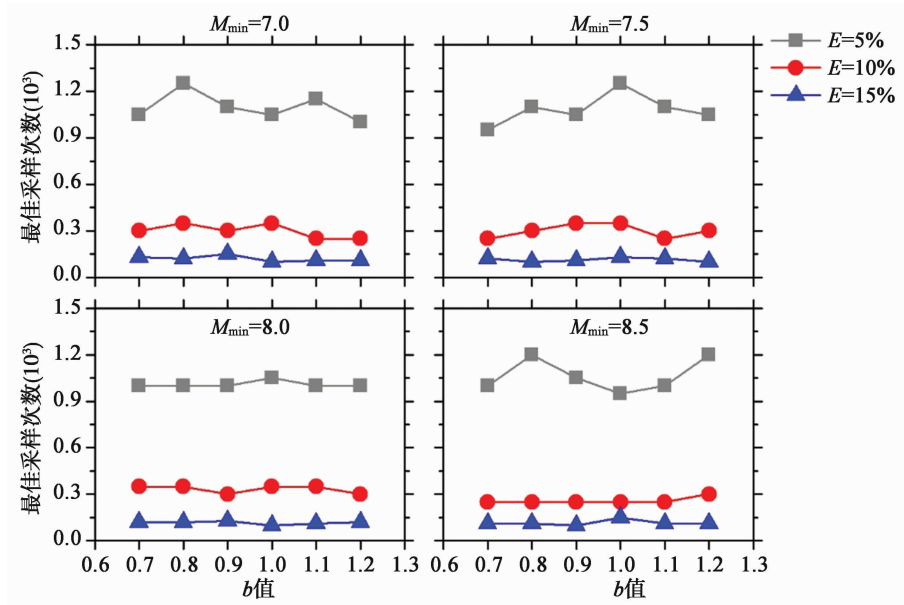


图4 不同震级下限 M_{\min} 、不同 b 值时最佳采样次数的变化趋势

Fig. 4 The tendency of the optimum sampling times correlating with different M_{\min} and b values

不难发现,所有曲线基本没有太大起伏变化,最佳采样次数与 b 值无明显相关性,由此可见 b 值对确定最佳采样次数几乎无影响。

3.2 震级下限 M_{\min} (或震级上限 M_{\max}) 影响

对于震级下限 M_{\min} (或震级上限 M_{\max}) 的敏感性分析,同理,分别保持 b 值和震级差 ΔM 不变,改变震级下限 M_{\min} (或震级上限 M_{\max}),观察最佳采样次数曲线的变化趋势,取 $E = 5\%、10\%、15\%$ 作为最佳采样次数的控制指标。

当 $b = 1.0$,震级差 $\Delta M = 0.5、1.0、1.5$ 时,不同控制指标 E 的采样次数曲线如图 5。

改变 b 值,即 $b = 1.2、1.1、0.9、0.8、0.7$ 时,不同震级差 $\Delta M = 0.5、1.0、1.5$ 情况下,采样次数曲线的变

化趋势图不一一列举,其结果与 $b = 1.0$ 时采样次数变化趋势大致相同,即最佳采样次数与 M_{\min} 没有相关性,因此,震级下限 M_{\min} (或震级上限 M_{\max}) 对确定最佳采样次数几乎无影响。

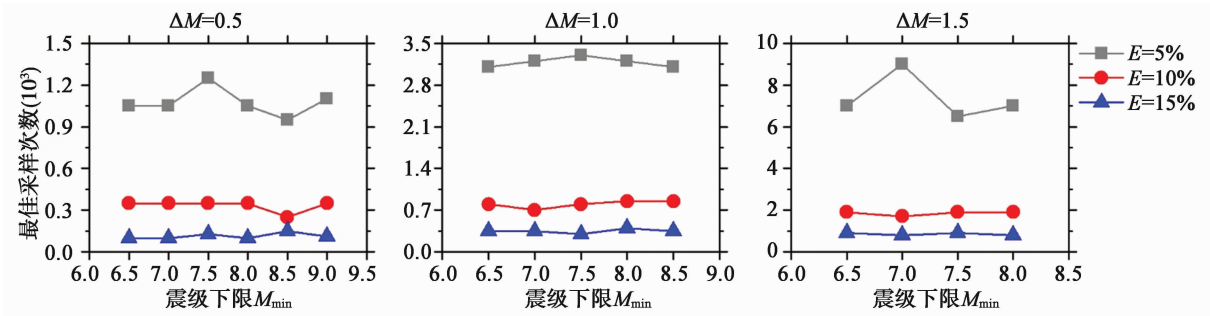


图 5 $b = 1.0$ 不同震级差 ΔM 、不同震级下限 M_{\min} 最佳采样次数变化趋势

Fig. 5 The tendency of the optimum sampling times correlating with different ΔM and M_{\min} values

3.3 震级差 ΔM 影响

最后考虑震级差 ΔM 对确定最佳采样次数的敏感性影响,由图 3 和图 5 可判断,当 b 值、 M_{\min} 值固定时,震级差 ΔM 越大,采样次数越多。

4 最佳样本容量经验估计

由上述讨论可知, b 值与震级下限 M_{\min} (或震级上限 M_{\max}) 对结果的影响很微弱,故在此忽略 b 值与震级下限 M_{\min} (或震级上限 M_{\max}) 的影响,不妨取 $b = 1.0$ 、 $M_{\min} = 7.0$,调整 ΔM 值,按照前述确定最佳采样样本容量的步骤分别确定不同误差期望指标 E 的 PTHA 计算最佳地震样本容量,结果如表 1。

表 1 $b = 1.0$ 、 $M_{\min} = 7.0$ 不同震级差的采样次数结果

Table 1 Sampling results regarding different magnitude differences while $b = 1.0$ and $M_{\min} = 7.0$

震 级		误差期望指标 E		
震级下限	震级上限	5%	10%	15%
7.0	7.2	105	50	20
7.0	7.4	505	160	95
7.0	7.6	1 450	350	170
7.0	7.8	2 100	500	240
7.0	8.0	2 900	810	350
7.0	8.2	4 600	1 000	490
7.0	8.4	6 000	1 400	660
7.0	8.6	7 150	2 150	1 000
7.0	8.8	11 500	3 050	1 300
7.0	9.0	14 000	4 050	1 900

经观察比较,采用式(5)的指数模型对表 1 数值进行经验拟合,

$$N = y_0 + A_1 \times e^{\frac{\Delta M - x_0}{t_1}} \quad (5)$$

其中, N 为最佳采样次数, ΔM 为震级差, y_0 、 A_1 、 x_0 、 t_1 为常数系数。拟合结果如图 6 所示,拟合参数如表 2 所示。

从拟合结果中可以看出,误差期望指标 E 为 5%、10%、15% 时, R^2 分别为 0.988、0.997、0.997,均接近于 1,可见拟合效果较好。

通过上述分析,我们确定 PTHA 样本容量的大小取决于潜在海啸源区内震级上下限之差 ΔM ,未来针对某一地区进行 PTHA 计算时,可通过式(5)来确定最佳样本容量,控制指标 E 的大小取决于用户对 PTHA 结果的精确度需求,可考虑取 10%,既经济又实用。

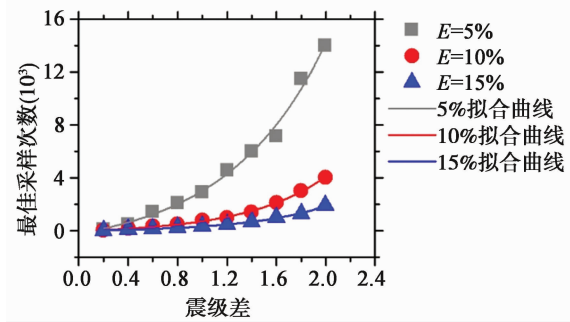


图6 震级下限 $M_{min} = 7.0$ 时最佳采样

次数 N 与震级差 ΔM 的拟合公式

Fig.6 Fitting formula between the optimum sampling times N and magnitude difference ΔM while $M_{min} = 7.0$

表2 拟合公式中的相关参数

Table 2 Related parameters in the fitting formula

参数	误差期望指标 E		
	5%	10%	15%
γ_0	-1 509.231	-192.496	-57.507
A_1	1 401.442	280.808	90.369
x_0	0.055	0.226	0.077
t_1	0.805	0.651	0.628
R^2	0.988	0.997	0.997

5 实例应用

本节旨在将前文得到的 PTHA 最佳地震样本容量模型应用于我国东南沿海的潜在海啸源,为我国日后开展沿海 PTHA 精细化工作提供科学考虑。

Ren 等划分了我国东南沿海潜在海啸源,如图 7 所示,并确定了可引起破坏性海啸的震级下限为 7.0^[6-7]。这里根据不同潜在海啸源的震级上限,结合上文拟合的经验公式,计算得到开展 PTHA 时各潜在海啸源的最佳地震样本容量,结果如表 3 所示。

表3 东南沿海开展 PTHA 时各潜在海啸源的最佳地震样本容量

Table 3 Optimum earthquake sample capacity of each potential source in South China Sea when PTHA is implemented

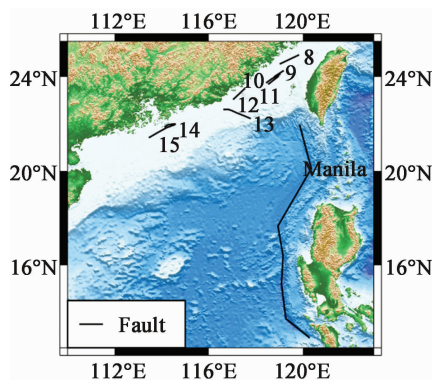


图7 东南沿海潜在海啸源

Fig.7 Potential tsunami sources in South China Sea

编号	名称	震级上限	误差期望指标 E		
			5%	10%	15%
8	泉州海外断裂	8.0	6 867	1 892	843
9	厦门海外断裂1	8.0	6 867	1 892	843
10	厦门海外断裂2	8.0	6 867	1 892	843
11	厦门海外断裂3	8.0	6 867	1 892	843
12	滨海断裂南澳段	7.5	2 642	793	368
13	台湾浅滩西南断裂	7.5	2 642	793	368
14	珠一坳中部断裂	7.5	2 642	793	368
15	担杆列岛海外段	7.5	2 642	793	368
#	马尼拉断裂	9.0	14 192	4 092	1 874

6 结论

概率地震海啸危险性分析中地震样本容量的确定较为重要,国内外已开展的 PTHA 工作中样本容量的确定都较为随意。然而,如果地震样本过少,将导致震级分布的局限性和片面性,得到不可靠的 PTHA 计算结果;地震样本过多,造成大量的计算成本和研究精力的浪费。本文围绕如何确定合理的地震样本容量展开研究,通过试算法建立了最佳地震样本容量的经验模型,主要工作和结论如下:

本文依据由较为成熟的 PSHA 方法衍生而来的 PTHA 方法,结合蒙特卡洛随机采样技术,从震级分布完备性确定合理的地震样本容量。通过定义实际采样频数与理论频数的相对误差来衡量采样结果的震级分布

完备性,以此确定在满足一定误差控制指标条件时的最佳地震样本容量。通过改变 b 值、震级下限 M_{\min} (或震级上限 M_{\max})、震级差 ΔM (即 $M_{\max}-M_{\min}$),分析这些参数对确定最佳地震样本容量的敏感性,结果发现, b 值和震级下限 M_{\min} (或震级上限 M_{\max})对最佳地震样本容量的影响不大,可以忽略不考虑,而震级差 ΔM 对最佳地震样本容量的影响较为显著。通过数据拟合建立了最佳地震样本容量与震级差 ΔM 的经验模型;最后,将此模型应用于我国东南沿海的 PTHA 工作中,给出了各潜在海啸源的最佳地震样本容量建议值。

参考文献:

- [1] 任叶飞,张鹏,温瑞智,等. 通过 WCEE 跟踪国际海啸研究动态及我国海啸防灾减灾工作的思考[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(3): 182-198.
REN Yefei, ZHANG Peng, WEN Ruizhi, et al. Investigating the international trends on tsunami research and thinking the issues of tsunami mitigation in China through the advances in WCEE[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(3): 182-198.
- [2] Geist E L, Parsons T. Probabilistic analysis of tsunami hazard[J]. Natural Hazards, 2006, 37(3): 277-314.
- [3] Geist E L, Parsons T. Assessment of source probabilities for potential tsunami affecting the US Atlantic coast [J]. Marine Geology, 2009, 264(1): 98-108.
- [4] Leonard L J, Rogers G C, Mazzotti S. Tsunami hazard assessment of Canada [J]. Natural hazards, 2014, 70(1): 237-274.
- [5] Annaka T, Satake K, Sakakiyama T, et al. Logic-tree approach for probabilistic tsunami hazard analysis and its applications to the Japanese coasts [M]//Tsunami and Its Hazards in the Indian and Pacific Oceans. Birkh user Basel, 2007: 577-592.
- [6] Ren Y F, Wen R Z, Song Y Y. Recent progress of tsunami hazard mitigation in China [J]. Episodes, 2014, 37(4): 277-283.
- [7] Ren Y F, Wen R Z, Zhang P, et al. Implications of local sources to probabilistic tsunami hazard analysis in south Chinese coastal area [J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2017, 11(1): 1-26.
- [8] Hou J M, Li X J, Yuan Y, et al. Tsunami hazard assessment along the Chinese mainland coast from earthquake in the Taiwan region [J]. Nat Hazard, 2016, 81: 1269-1281.
- [9] 张鹏,任叶飞,温瑞智,等. 广东大亚湾的地震海啸概率危险性评价[J]//第一届中国国际核电厂构筑物可靠性与抗震性能评价技术交流论坛论文集, 2016: 68-73.
ZHANG Peng, REN Yefei, WEN Ruizhi, et al. Probabilistic tsunami hazard analysis for a site at DayaBay [C]//1st China International Forum on Reliability and Seismic Performance Evaluation Techniques of NPP Civil Structures, 2016:68-73.
- [10] Tadashi A, Kenji S, Tsutomu S, et al. Logic-tree approach for probabilistic tsunami hazard analysis and its applications to the Japanese coasts [J]. Pure and Applied Geophysics, 2007, 164: 577-592.
- [11] Strunz G, Post J, Zosseder K, et al. Tsunami risk assessment in Indonesia [J]. Natural Hazard and Earth System Sciences, 2011, 11, 67-82.
- [12] Li L L, Switzer A D, Chan C H, et al. How heterogeneous coseismic slip affects regional probabilistic tsunami hazard assessment: A case study in the South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121.
- [13] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583-1606.
- [14] 宋昱莹,温瑞智,任叶飞,等. 地震海啸危险性概率分析的数值模型可靠性 [J]. 防灾科技学院学报, 2013, 15(4): 7-18.
SONG YuYing, WEN Ruizhi, REN Yefei, et al. Numerical simulation in probabilistic tsunami hazard analysis[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2013, 15(4): 7-18.
- [15] 宋昱莹,温瑞智,任叶飞,等. 沿海场地地震海啸危险性概率分析 [C]. 第九届全国地震工程学术会议, 哈尔滨, 中国, 2014.
SONG Yuying, WEN Ruizhi, REN Yefei, et al. Probabilistic tsunami hazard analysis of Chinese coastal site[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34:1060-1064.