

我国地震海啸危险性概率分析方法

温瑞智¹, 任叶飞¹, 李小军², 潘蓉³

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100020; 3. 环保部核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要: 日本、美国等国家在海啸危险性分析方面做了较多的研究, 有相关的分析方法提出。我国地震海啸研究尚属于起步阶段, 还没有形成公认的地震海啸危险性概率分析的思路和方法。简要综述了我国地震海啸的研究进展, 借鉴我国已成熟的地震危险性分析方法, 给出了地震海啸危险性概率分析的思路与方法, 并对其关键技术问题进行了分析, 为我国全面开展地震海啸减灾工作提供依据。

关键词: 地震海啸; 概率危险性分析; 海啸数值模拟

中图分类号: P315.44 文献标识码: A 文章编号: 1001-8662 (2011) 04-0001-12

引言

随着中国能源需求的持续快速增长, 国内核电装机比例将从目前的 1.6% 上升到 4% 左右, 相当于至少还要建设 24 座百万千瓦级核电机组, 这些拟建核电站场址大部分位于沿海海岸区, 而且我国目前正在运行的大亚湾、岭澳等核电站也位于沿海地区。在我国《工程场地地震安全性评价技术规范》中仅涉及到“对可能遭受海啸与湖涌影响的场地, 收集历史海啸与湖涌对场地及附近地区的影响”, 从 2011 年 3 月 11 日日本地震海啸的经验来看, 这远远不能满足我国核设施的安全要求, 同时我国为滨海大国, 大陆与岛屿的海岸线为 18 000 km 与 14 000 km, 海岸带和海滩面积各约 35 000 km² 和 21 700 m², 见图 1, 应加紧对我国沿海城市的地震海啸危险性工作, 给出未来若干年内一定海啸波高值的超越概率和历史重现期, 为沿海城市的规划与改造、重大工程设施的布局与建设、海洋资源的合理应用与开发提供技术参考。

近几十年随着地震危险性分析方法的成熟, 海啸危险性评价工作也开始逐渐转为基于概率方法的危险性分析 (Probabilistic tsunami hazard analysis, PTHA), 该方法与现有的地震危险性分析方法 (Probabilistic seismic hazard analysis, PSHA) 相似, 其优点在于考虑了海啸的时间不确定性以及可能性。1977 年美国的 Houston 等将概率方法与简单的地震发生

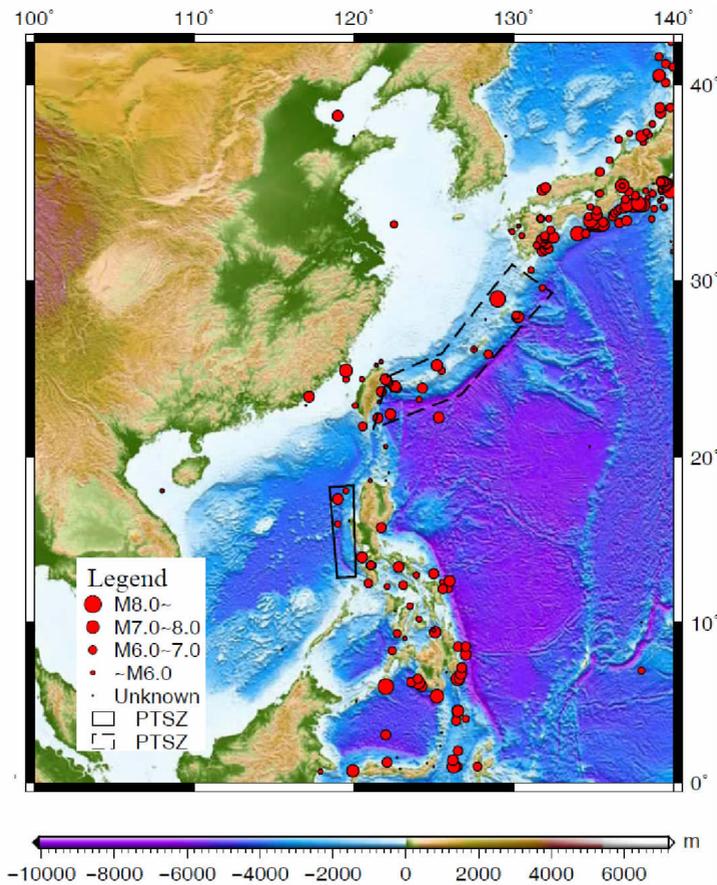
收稿日期: 2011-10-08

基金项目: 环保公益性行业科研专项 (201209040)

作者简介: 温瑞智, 男, 1968 年生, 研究员. 主要从事工程地震与强震动观测技术研究.

E-mail: ruizhiwen@hotmail.com.

模型结合计算了夏威夷群岛浪高的发生频率^[1]。俄罗斯的勘察加半岛附近的海啸记录可以追溯到 3000 年左右，其统计的海啸回归频率为 100 年左右^[2]。日本的一些研究者将逻辑树的方法引入，考虑海啸危险性中的不确定性^[3]。意大利利用历史地震目录，统计了地中海的海啸地震与海啸大小之间的关系^[4]。新西兰实施的海啸危险性分析项目采用与地震危险性分析几乎一样的方法，完成了海啸源的划分^[5]。本文分析了近年来典型的地震海啸对我国沿海的影响，总结了我国地震海啸研究的进展，基于我国成熟的地震危险分析方法，提出了用于我国的地震海啸危险性分析的步骤，并对关键技术问题进行分析。



(数据来源: SRTM30 PLUS^[42] 和 NOAA^[43])

图 1 我国东部及近海邻国引发海啸的强震分布图

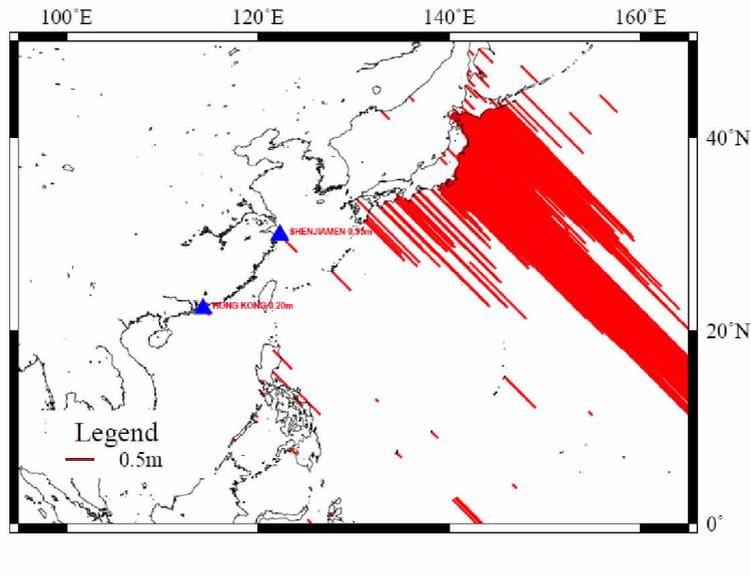
Fig.1 Earthquake-induced tsunami around China and its adjacent countries

1 地震海啸实例

环太平洋地震带是全球地震最活跃的地带，全球 80% 的浅源地震，90% 的中源地震和几乎所有的深源地震都集中于此。该地震带主要是板块俯冲，在板块的接触带上产生过许多逆冲倾滑型的大地震，引起深海沟地形快速变化，导致海啸产生。据统计太平洋沿岸海

啸灾害的多发区为：夏威夷、新西兰、澳大利亚、印度尼西亚、菲律宾群岛、日本、阿拉斯加、堪察加-千岛群岛、新几内亚-所罗门群岛、美国西海岸、中美洲地区以及哥伦比亚与智利地区。近年发生的大地震海啸对我国的影响简述如下。

北京时间 2011 年 3 月 11 日 13 时 46 分日本东北部海域发生 9.0 级地震，海啸于震后 15 min 抵达日本沿岸，数小时内袭击其它海岸区。中国国家海洋预报台在大地震发生 3 h 后发布 级蓝色海啸预警，预测震后 3.5 h 海啸波传播至我国台湾；约 6.5 h 至福建、浙江沿海，最大波峰约 70 cm；10 h 后至我国上海，最大波峰约 50 cm。在 NOAA 的数据库中我国香港观测到最大波高 20 cm，舟山群岛附近的沈家门观测到 55 cm 的最大浪高。温瑞智等在地震后给出了近似的浪高与走时的数值模拟结果^[6]。从图 2 中可以看出这次日本海啸对我国浙江台湾一带应有小于 1 m 浪高的影响，此次海啸未对我国沿海造成显著影响，主要原因是海啸波绕射方式传向我国海域，受到日本本岛及琉球群岛的阻隔及我国宽阔大陆架的摩擦耗能作用，而减少了破坏作用。



(数据来源:NOAA^[43])

图 2 2011 年 3 月 11 日日本地震海啸最大浪高

Fig.2 Maximum wave height of Tohoku earthquake on March 11, 2011

北京时间 2010 年 2 月 27 日 14 时 34 分智利中部近岸发生 8.8 级强烈地震，环太平洋的数十个国家和地区陆续监测到了强震引发的越洋海啸。本文第一作者在 2010 年智利地震发生后，参与了海啸的现场考察工作，智利的托梅小城 (Tome) 紧邻海岸线，距震中 55 km，位于 (36.617, -72.95) 点记录到 8.6 m 的浪高。图 3 为托梅海边 50 m 受到冲洗的一栋建筑以及远离海边约 500 m 观测到的爬高的迹线，图 3 (a) 和图 3 (b)，与 2011 年日本地震海啸相比此次地震海啸破坏较小，但对我国来说却是一次典型的越洋海啸。海啸发生的地理位置与我国台湾省东岸、浙江、福建等相对，于福江等根据中国海洋监测网实时记录，采取功率谱分析和连续小波变换分析了此次越洋海啸实时检测数据，数据分析表明我国长江口



(a) 海岸线 50m 一建筑物



(b) 海岸线 500m 海啸爬高迹线

图 3 2010 年 2 月 27 日智利托梅海滨受海啸破坏

Fig.3 Destruction resulted from Tsunami on February 27, 2010 around Tome, Chile

以北岸段、福建省中南部岸段以及珠江口以西岸段无影响，长江口以南和杭州湾中线以北岸段、粤东岸段波动大约在 7~15 cm 之间，台湾省东岸、浙江省及福建北部岸段有较大影响，最大波高达到 20~32 cm，由于该岸段外围的大陆架宽度相对较窄，且岸线与海啸波近似垂直，受海啸威胁较大^[7]。

2 我国地震海啸研究进展

中国地震与海洋学者开始研究中国的地震海啸问题始于 1976 年唐山大地震之后，1982 年国家海洋局情报所的李成发表了“地震海啸的研究”一文，指出我国海区不易发生海啸，当时的国家地震局也采纳了这个结论^[8]。1986 年周庆海等从历史海啸地震与我国主要地震带的地质、地球物理学特征角度，研究分析了我国海区不易发生海啸，但存在发生海啸的可能性^[9]。1992 年，郭增建等在《未来灾害学》一书中对中国的近海地震海啸作了研究，提出近海岸如发生强震后就易于发生近海海啸，而近海海啸作为一种新的致灾海啸类型应予以关注^[10]。1988 年周庆海等通过历史海啸数据，结合我国海区大陆架的地质、地震特征，给出了我国沿海地区海啸危险性的相对比，台湾东部、大陆架沿岸、渤海沿岸的相对比为 16:4:1^[11]。20 世纪 90 年代后期，国家海洋局组织开发了太平洋海啸资料数据库、太平洋海啸传播数值预报模式和越洋局部地震海啸数值预报模式，并在广东大亚湾、浙江秦山和三门、江苏连云港、福建惠安 5 个核电站的环境评价中得到了应用^[12]。此后这方面的研究一直处于停滞状态，直到 2004 年苏门答腊海啸之后受到关注，近年来有关研究集中在以下几方面：

(1) 历史海啸与海啸成灾的可能性分析。主要限于采用历史数据或大陆架的地质、地球物理学特征给出我国沿海地区遭遇海啸灾害的可能性程度。王锋等通过经中国古籍考证和查对中外大海啸对我国的影响后，发现有十余例的海啸，并对历史数据分析得出我国渤海及黄海北部地震海啸规模小，概率低，相对较为安全；黄海南部及东海北部沿岸有为数甚少的海啸影响，可适当关注；闽南、粤东沿海及台湾周围海岸一带，可考虑地震海啸影

响^[13]。段家芬等通过山东日照地区沿海海啸探析，认为山东日照地区沿海既不具备形成地震海啸的条件，也不可能受非本地地震海啸的影响，日照沿海遭受的海洋灾害主要是风暴潮^[14]。魏柏林等分析的结论认为日本四国东南海域、台湾岛东侧海域、菲律宾群岛西侧海域和苏拉威西和加里曼丹北部海域发生大震可能引发海啸对我国沿海构成威胁，并通过进一步对我国南海海底地形地貌、断裂规模及活动性、地震分布、震源机制解的分析，认为南海北、西、南以及中部都不具备引发地震海啸的条件，只有台南至菲律宾地震带东西两侧才有可能引发海啸^[15]。郭彩玲等对历史时期中国海域发生海啸的频次和空间分布进行分析，结果表明，渤海是海啸低发区域^[16]。在未来，东海、南海，特别是台湾岛附近海域具备产生海啸的条件，陈颢等统计得到在中国沿海地区海拔 5 m 内有全国近 25% 的 GDP，可能影响中国东南沿海的海啸发源地主要有菲律宾西侧的地震、巽他海峡的火山和南海的滑波^[17]。

综上所述，我国渤海和黄海发生近场海啸的可能性很小，但东海和南海却具备海啸产生的条件，历史上这两个海域也产生过海啸。在东海海域，日本琉球群岛是海啸爆发的危险区域，该地区处于菲律宾板块与欧亚板块交汇处，发生海底地震的可能性很大，因此发生地震海啸的可能性也就很大。在我国历次地震区划图的编制工作中，都没有直接研究和确定过我国远海海域及毗邻区域的潜在震源区划分方案。在春晓气阳安评项目中，李小军等首次给出了该区域的潜在震源区划分方案，据地质构造和地震活动的差异，将冲绳海槽地区划分为 3 个震级上限 8 级的潜在震源区：冲绳海槽中部潜在震源区；冲绳海槽南部潜在震源区；冲绳海槽北部潜在震源区^[18]。

(2) 海啸的数值模拟。在地震海啸数值模拟中经常用到基于浅水长波方程的海啸模型、基于 Boussinesq 方程模型、完全非线性势流理论等，通过有限差分等数值计算方法实现了海啸数值研究^[19,20]。目前随着计算机技术的发展，海啸数值模拟的方法也越来越普及，通过海啸数值模拟来进行海啸预警走时也成为近期发展的新方向。美国国家海洋和大气管理局目前主要使用南加利福尼亚大学研制的 MOST (Method of splitting tsunami) 来计算海啸，分析了海啸对阿拉斯加、加利福尼亚、夏威夷、俄勒冈和华盛顿州产生的影响。COMCOT (Cornell multi-grid coupled tsunami model) 是康奈尔大学研制的海啸数值模拟软件。TUNAMI 是日本东北大学研制的模型，其基本原理是基于非线性浅水方程，采用有限差分法。考虑更高阶的 Boussinesq 类型方程来模拟海啸的非线性和散频的德康奈尔大学的 CULWAVE (Cornell University long and intermediate wave modeling package) 和德拉瓦大学的 FUNWAVE 已经被用来进行一些历史海啸的数值模拟。通过与实际发生的一些海啸观测数据相比较，以及配合相应的一些水动力学实验，表明在给定震源发生条件下以上数值的方法可以很好地模拟海啸的传播，并能较精确地模拟海啸的走时和海啸波及地区爬高大小。通用的商业软件，例如 ANSYS、FLUENT、ADINA、FEPG 等也可应用开展海啸的数值模拟，但缺乏一定的灵活性。以上部分程序也被应用到我国的海啸数字模拟的研究，来验证历史海啸与海啸成灾的可能性。

在东海海域，温燕林等用 COMCOT 分析东海冲绳海槽地区的地震地质背景，设定冲绳海槽 8.5 级地震，断层错距达 15 m，分析结果表明 4 h 左右传至浙江沿岸，近岸波高为 1~2 m^[21]。在南海海域，菲律宾群岛附近的马尼拉海沟是地震频发地带，海底地形满足海啸产

生条件, 所以这一区域极易产生海啸。潘文亮等用 COMCOT 海啸模式对马尼拉海沟处设想的可能地震进行了相应海啸发生模拟, 当震级为 8.0 级时, 将在华南沿海 20 m 水深处产生 30~50 cm 的海啸增水, 当震级为 9.0 级时, 最大增水将达到 300 cm^[22]。任叶飞等在我国沿海从黄海海岸线到海南岛设计了 47 个点源进行计算, 分析结果表明长江入海口、钱塘江入海口、珠江入海口附近海岸相对其他地方的海啸危险性最高^[23]。刘迎春等提出了一种概率性的海啸危险性分析方法, 给出了未来 100 年内珠江三角洲地区重要城市遭受 1~2 m、2 m 以上海啸波袭击的概率, 其中香港和澳门遭受 2 m 以上海啸波袭击的概率都在 10% 左右, 说明了珠江三角洲地区海啸危险性程度较高^[24]。

(3) 海啸预警相关技术, 主要为关注国外地震海啸监测预警的历史、现状与当前的发展方向^[25]。温瑞智等基于强震动监测台网和海啸数值走时数据库, 提出了建设基于数值模拟的新一代海啸预警系统的设想^[26]。另外我国沿海地区也对海啸预警建设给与了关注, 海南省建立了南海地震监测和海啸预警系统、香港特区建立了香港海啸监测及警报系统等^[27,28]。

3 概率性海啸危险性分析定义

地震危险性分析方法目前在世界范围内已经广泛使用, 主要思路是基于 Cornell 在 1968 年提出的方法^[29], 我国现有地震危险性分析方法也是源于此法但略有改进^[30]。虽然该方法思路明确, 但由于海啸与地震灾害的本质不同, 海啸历史资料不完善等原因, 其具体实施步骤也不相同。由于概率海啸危险性分析方法思路来源于地震危险性分析方法^[31], 所以借鉴地震危险性分析方法的定义, 将基于概率分析的海啸危险性分析方法定义为: 对于某一给定海滨地区, 要求给出将来若干年内一定海啸波高值的超越概率:

$$P(H \geq h) = \sum_i P(H \geq h | E_i) \cdot P(E_i) \quad (1)$$

其中, h 为给定的海啸波高值, i 为第 i 个潜在海啸源区, E_i 为第 i 个潜在海啸源区内发生海啸地震。 $P(E_i)$ 可通过对历史海啸地震统计得到, $\sum P(E_i) = 1$; $P(H \geq h | E_i)$ 的求解广义上可从下述步骤得到:

第一步, 对震源参数积分。假定 ψ_0 、 ψ_u 分别为参数空间 ψ 的上下限, ψ_0 不同于地震危险性分析中震级—频度关系中的震级下限, 地震危险性分析中通常取 4.0, 而海啸危险性分析中可取 7.0。对震源参数积分得到:

$$N(r) = \int_{\psi_0}^{\psi_u} n(r, \psi) d\psi \quad (2)$$

其中 $n(r, \psi)$ 为年度震级概率密度分布, r 表示与分析场点的距离, $N(r)$ 为相应的年度累积概率。

第二步, 对震源位置积分。在地震危险性分析中将根据地震动衰减关系对给定场地与震源之间的距离进行积分, 而海啸危险性分析中因为给定海滨地区的海啸波高值与震源参数没有特定的关系, 所以采用数值模拟的方式进行。广义上描述海啸浪高的年度超越概率可以表示为:

$$N(H \geq h, r=R) = \int_0^R N(r) dr \quad (3)$$

第三步，计算超越概率。按照泊松概率分布形式，对上述积分得到的频率计算成 T 年内的超越概率：

$$P(H \geq h | E_i) = 1 - e^{-N(H \geq h, r=R) \cdot T} \quad (4)$$

则所有震源在某一地点的超越概率为：

$$P(H \geq h) = 1 - \prod_i (1 - P(H \geq h | E_i)) \quad (5)$$

上述步骤都是从广义上描述的，具体的实施有多种方法：逻辑树法、蒙特卡罗法、经验数据分析法、特征地震模型法等。

4 概率性海啸危险性分析方法

4.1 基于历史数据

如果某一场地有足够的历史海啸观测记录，则可以十分方便地统计出该场地的历史海啸浪高年超越概率，基本的实施过程如下：

第一步，统计给定场地的历史浪高数据。假定统计到 T_u 时间段内共有 m 个浪高记录；

第二步，计算每个浪高值的年累积频率。假设超过某一浪高值 H_u 的个数有 n 个，则该浪高值的年累积频率为：

$$N(H \geq H_u) = \frac{n}{m} \cdot \frac{m}{T_u} = \frac{n}{T_u} \quad (6)$$

第三步，以浪高值为横坐标，年累积频率为纵坐标，将各离散点用图形表示出来，采用经验公式拟合这些点，得到浪高值的年累积频率曲线。经验公式最早由 Soloviev 提出^[32]：

$$N(i) = a_1 10^{-\beta_1 i} \quad (7)$$

其中， a_1 、 β_1 为常数， i 为海啸烈度。另外还有 Houston 在预测加利福尼亚海啸时采用的指数分布形式^[33]：

$$N(i) = a_3 e^{-\beta_3 i} \quad (8)$$

Burroughs 和 Tebbens 建议采用类似于古登堡—里克特的震级—频度关系的能量法则^[34]：

$$N(h) = Ch^{-a_4} \quad (9)$$

其中， C 和 a_4 为统计常数， h 为记录到的最大海啸浪高。同时他们指出在有些地方适于采用上限能量法则^[35]：

$$N(h) = C(h^{-a_4} - h_u^{-a_4}) \quad (10)$$

其中， h_u 为浪高发生率为零值的高度。

第四步，按照泊松分布，计算得到每个浪高 T 年内的超越概率为：

$$P(H \geq H_u) = 1 - e^{-N(H \geq H_u) \cdot T} \quad (11)$$

作出给定场地的 T 年内的超越概率曲线并计算指定浪高的重现期 T_r 为：

$$T_r(H=H_u) = \frac{1}{\ln(1-P(H \geq H_u))} \quad (12)$$

4.2 基于数值模拟

对于那些没有足够历史海啸观测记录的地区，只能采用基于数值模拟的分析方法来评价该地区的海啸危险性。大多数地区的震级—频度关系满足古登堡—里克特模型，但少数地区是满足特征地震模型的，所以同时考虑这两方面因素给出进行地震海啸危险性分析的基本步骤：

(1) 划分潜在海啸源区。根据板块构造、海底地质情况、古地震遗迹、历史地震记录、历史海啸记录、海水深度等划分潜在海啸源区。与地震危险性分析中划分的潜在震源区不同的是，潜在海啸源区内的地震都是能产生海啸的地震，并且具有一定规模，一般都在 6.5 级以上；还有潜在海啸源区必须在海水较深海域，一般在 200 m 以上，以满足海啸产生的条件。

(2) 统计相关地震参数。

① 震级—频度关系满足古登堡—里克特模型的潜源区

根据历史海啸地震记录，统计出每个潜在海啸源区的古登堡—里克特震级—频度关系，并修正该公式，得到第 j 个潜在海啸源区的震级累积频率分布^[36]：

$$F_j(M) = \left(\frac{M_l}{M}\right)^\beta \cdot e^{-\frac{M-M_l}{M_c}} \quad (13)$$

其中， M_l 、 M_c 分别为震级上下限， β 为与古登堡—里克特模型 b 值相关的常数。

② 震级—频度关系满足特征地震模型的潜源区

特征地震具有准周期性，地震发生的事件间隔大致是相同的^[37]。考虑此潜源区内上次特征地震发生的时间，估算出未来大致 T_c 年后将重复发生等强度的特征地震。

(3) 产生地震随机样本。

① 震级—频度关系满足古登堡—里克特模型的潜源区

按照公式 (12) 的震级累积频率分布，运用蒙特卡罗方法在每个潜在海啸源区内，空间上均匀的产生随机地震，震级范围在 M_l 与 M_c 之间。第 j 个潜在海啸源区样本空间计为 N 。

② 震级—频度关系满足特征地震模型的潜源区

特征地震具有原地重发的特点，并且强度基本相同，在整个潜源区内运用随机震源模型^[38,39] 产生 N 个随机滑移分布。

(4) 数值模拟计算沿岸波高。

① 震级—频度关系满足古登堡—里克特模型的潜源区

在第 j 个潜在海啸源区内，针对每个地震事件，由 Wells 和 Coppersmith 提出的经验公式^[40]，计算断层长度、宽、滑移量。其它对计算结果影响较小的断层参数如走向角、断层倾角、滑移角等按照震源处的地质构造情况获得。有了这些参数后，基于数值模拟技术，计算沿岸波高值。于是对于某一指定场地，将获得 N 个沿岸波高值。

② 震级—频度关系满足特征地震模型的潜源区

将 N 个随机滑移分布运用数值模拟的方法计算海啸的初始位移波高值，模拟传播过程

并计算沿岸波高值。同样对于某一指定场地，将获得 N 个沿岸波高值。

(5) 计算单个潜在海啸源区贡献的年累积频率。

① 震级—频度关系满足古登堡—里克特模型的潜源区

以波高值 H_u 为例，针对第 j 个潜在海啸源区内 N 个地震事件进行数值模拟的结果，统计超过 H_u 的波高个数，计为 m ，每个波高对应一个地震事件，那么该场地波高 H_u 的年累积频率为：

$$N(H \geq H_u, zone=j) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{N} (F_j(M_i)) \quad (14)$$

② 震级—频度关系满足特征地震模型的潜源区

仍以 H_u 为例，针对此潜源区内 N 个随机滑移分布进行海啸数值模拟的结果，统计超过 H_u 的波高个数，计为 n ，那么该场地波高 H_u 的年累积频率为：

$$N(H \geq H_u, zone=j) = \frac{n}{T_c} \quad (15)$$

(6) 计算总的累积频率和超越概率。按以上步骤计算出所有潜在海啸源区指定场地波高的年累积频率，集中起来得到多个震源对指定场地 T 年内波高 H_u 的超越概率以及 H_u 波高的重现期，计算公式与公式 (5)、公式 (11)、和公式 (12) 形式一致。

(7) 不确定性分析。采用逻辑树的方法对整个过程中进行不确定性分析。不确定性的主要方面有：确定潜在海啸源区的位置及地震类型产生的不确定性、震级—频度关系中参数确定产生的不确定性、确定断层参数时采用经验公式产生的不确定性、对断层破裂进行假设产生的不确定性、数值模拟中采用的海水深度有误差产生的不确定性、数值模式中对传播原理进行假设产生的不确定性等。

5 地震海啸危险分析的关键

应该编制统一的地震海啸目录。与地震目录类似，地震海啸目录是指按时间顺序，对地震以及地震引起的海啸的主要参数进行收录，编辑成目录资料，要给出地震三要素，整理相应观测点的海浪高度等资料。我国虽然有悠久的文字历史，但和地质历史相比十分短暂，对于古海啸可以通过地质沉积记录来研究。海啸发生后，沉积物经过搅动、搬运、沉积而成为古地震海啸的有利证据，可以分别对各个时期地质的沉积特征分析，寻找古海啸发生的规模、机制，建立起合理的地震海啸目录。

依古登堡—里克特的震级—频度关系模型，其完整性中的 b 值随研究区域的不同而发生变化，海啸地震资料也表现在在低震级端和高震级端偏离线性，在高震级端的偏离是由于大震事件稀少，在小震级段相对大的缺失意味着在高震级上的大偏差，以致造成在地震海啸危险性分析中往往就会过高估计地震的危险性。从图 2 中可以看出，日本 2011 年 3 月 11 日地震海啸在浙江、台湾一带应有小于 1 m 浪高，如果我国沿海有更多的验潮仪来记录海啸的浪高，则会使当地海啸浪高的记载更加完整。

同时作为海啸的浪高在文献中^[42] 给出了明确的定义，最大浪高 (max water level) 是指高于平均海平面 (datum) 的高度，而常说的爬高 (runup height) 是指水平淹没区界限处的

浪高值。对于近些年观测技术的发展,仪器记录的最大浪高被广泛使用,如常见的验潮仪最大浪高、深海浪高(其值通常为沿海海啸最大浪高的一半),因此在进行浪高资料历史记录整理过程中一定要注意数据来源的统一。

明确地震海啸潜源划分方法。为了延续我国现有的地震危险性分析方法,实现与地震危险性分析成果的衔接,地震潜在震源区划分也要遵循历史地震重演和构造类比原则。考虑到我国周边其构造较为复杂,记录到的地震震中定位精度较差,潜在震源区可能划得相对较大,但这对于海啸地震来说仅仅是从震级上保证了海啸发生的条件,需要对潜源的参数进行细化,重点分析与海啸发生机理相关的参数,走滑断层往往不被认为产生海啸。我国目前初步的工作可以得出我国东海和南海应该具备地震海啸发生的条件,可以划出引发海啸的地震潜源,重点应该关注图 1 中马尼拉海沟和日本冲绳海沟的区域,即图 1 中勾勒的 2 个潜在海啸地震区(PTSZ)。

适当考虑我国远海海啸影响。虽然近几年破坏性巨大的几次海啸对我国影响不大,但地震海啸危险性分析方法与地震危险性分析方法的一个显著不同在于地震海啸危险性分析不仅应该包含对局部地震海啸危险性的分析,更应充分考虑越洋海啸的影响。远洋海啸通常是指 1 000 km 范围外或需要 3 h 以上海啸才可以抵达的区域。如 2004 年印尼海啸穿越印度洋对非洲造成了巨大损失。鉴于增加了越洋海啸的因素,我国地震海啸危险性分析在考虑该项因素时,可以采用文献对历史地震海啸数据的分析直接统计地震海啸发生的积累函数。

合理采用海啸数值模拟方法。海啸数值模拟主要分为三个步骤,即发生,传播和爬高过程。在目前通用程序中对于海啸的产生通常忽略地震破裂的时间过程,通常假设海水上升与下降的速度明显快于海啸的传播速度,海水的抬升与下降时间可以忽略,可以认为海床的变形即位海水表面位移的变化相一致。但对于大的地震,破裂过程复杂,可以考虑采用地震动模拟方法来实现地震的破裂过程以及海水表面的变化过程作为海啸模型的初始条件。我国学者进行的数值模拟工作主要集中在海啸传播这一过程,其原因是海啸的传播模型比较容易建立,同时较粗的海深网格数据通常可以满足这样的要求,可以免费下载,如图 1 采用的是美国 30 s 弧度的数据(SRTM30 PLUS),虽然可以用来划分地震构造特征和潜源,但其精度约为 1 km。对于近海关键的爬高模拟阶段,除了要考虑传播的非线性,海底摩擦等因素,高精度的海深数据往往成为进行数值分析的首要难题,STRM1 的数据精度约为 30 m,但仅限于美国范围。如果工作空间网格较大,在浅水区分辨率不够,对海啸进入近海后的波高变化就无从实现。目前我国在近海的海啸的爬高模拟研究工作有待加强。数值模拟的收敛性通常要满足库仑条件(Courant condition),高精度的网格也是保证模拟步长更精细的保障,即满足以下条件

$$\Delta t < \frac{\Delta X}{\sqrt{gh_{\max}}} \quad (16)$$

其中 g 为重力加速度; h_{\max} 为分析区域最大水深, ΔX 为离散网格大小, Δt 为时间步长。在地震海啸研究中,另外一种常见的数值模拟方法为 Monte Carlo 法,可以应用来模拟地震海啸发生的不确定性。如在潜在震源区内,可以用来控制生成相应地震数目来计算积累分布函数。

6 结语

本文总结了我国地震海啸目前的研究现状, 基于成熟的地震危险性分析方法, 给出了概率性海啸危险性分析的定义和进行概率性海啸危险性分析的思路和方法, 并分析了一些技术关键细节。

近年来, 世界上发生了几次破坏性海啸, 虽然对我国没有造成灾情, 但已经为我国沿海的海啸防御提出了要求, 目前我国核安全法规对核电站地震危险性有明确要求, 但在防范海啸方面还没有明确, 2011 年日本福岛海啸引起核泄漏事件, 恰恰是因为在设计时缺乏对海啸的足够预防造成的, 低估了对于未来可能遭受到的最大海啸波高, 以福岛核电站为例, 海啸风险评估的最大高度为 5 m, 而实际上却达到了 12 m, 造成备用发电设备浸水而无法正常工作, 引起了核危机。建设地震海啸危险性分析方法, 可以给出未来一定时期内, 不同地点的地震海啸危险性程度, 完善工程海啸设防标准。地震海啸危险性分析工作的开展将为实现我国沿海地区防灾减灾目标, 对海啸可能成灾的危险海岸的城市规划和改造, 保障沿海经济持续发展, 具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] Houston, J. R., Carver R. D., Markle, D. G.. Tsunami-wave elevation frequency of occurrence for the Hawaiian Islands. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station Technical Report H-77-16 [R]. 1977.
- [2] Kurkin, A. A., Pelinovskii, E. N., Choi, B. H., et. al. A comparative estimation of the tsunami hazard for the Russian coast of the Sea of Japan based on numerical simulation [J]. *Oceanology*, 2004, 44 (2): 163-172.
- [3] Annaka, T., satake,k.,sakakt yama, T., et. al. Logic-tree approach for probabilistic tsunami hazard analysis and its applications to the Japanese coasts[J]. *Pure Applied Geophysics*, 2007, 164: 577-592.
- [4] Salamon, A., Rockwell, T., Ward, S.N., et.al. Tsunami hazard evaluation of the eastern Mediterranean—Historical analysis and selected modeling [J]. *Bulletin Seismological. Society of America*, 2007, 97 (3): 705-724.
- [5] Kelvin, B.. Review of tsunami hazard and risk in New Zealand [R]. Institute of Geological & Nuclear Sciences client report 2005/104, 2005.
- [6] 温瑞智, 任叶飞. 日本 M_w 9.0 地震海啸数值模拟与启示[J]. *国际地震动态*, 2011, 388: 23-28.
- [7] 于福江, 原野, 赵联大, 等. 2010 年 2 月 27 日智利 8.8 级地震海啸对我国影响分析 [J]. *科学通讯*, 2011, 56 (3) :239-246.
- [8] 李成. 地震海啸的研究[J].*海洋通报*, 1982, 1 (2): 16-23.
- [9] Zhou, Q., Adams, W.M.. Tsunamigenic Earthquakes in China, 1831 BC to 1980 AD [J]. *Science of Tsunami Hazards*, 1986, 4 (3) : 131-148.
- [10] 郭增建, 秦保燕, 李革平. 未来灾害学[M]. 北京:地震出版社, 1992.
- [11] Zhou, Q., Adams, W M.. Tsunami Risk Analysis for China[J]. *Natural Hazards*, 1988, 1 (2): 181-195.
- [12] 李起彤. 我国海洋工程场地安全性评价的回顾与展望[J].*国际地震动态*, 2001, (5): 22-26.
- [13] 王锋, 刘昌森, 章振铨. 中国古籍中的地震海啸记录[J].*中国地震*, 2005, 21 (3): 437-443.
- [14] 段家芬, 尹茂仲, 魏汝庆. 山东日照地区沿海海啸探析[J].*华南地震*, 2005, 26 (2): 1-7.
- [15] 魏柏林, 康英, 陈玉桃, 等. 海地震与海啸[J].*华南地震*, 2006, 26 (1): 47-60.
- [16] 郭彩玲, 王晓峰. 中国东部海域发生海啸的可能性分析[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16 (1): 7-11.

- [17] 陈颢, 陈棋福, 张尉. 中国的海啸灾害[J]. 自然灾害学报, 2006, 16 (2): 1-6.
- [18] 李小军. 海域工程场地地震安全性评价的特殊问题[J]. 震灾防御技术, 2006, 1 (2): 97-104.
- [19] 祝会兵, 于颖, 戴世强. 海啸数值计算研究进展[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 21 (6): 714-723.
- [20] 姚远, 蔡树群, 王盛安. 海啸波数值模拟的研究现状[J]. 海洋科学进展, 2007, 25 (4): 487-494.
- [21] 温燕林, 朱元清, 宋治平, 等. 东海海域潜在地震海啸的数值模拟初步研究 [J]. 地震学报, 2008, 30 (5): 456-463.
- [22] 潘文亮, 王盛安, 蔡树群. 南海潜在海啸灾害的模拟[J]. 热带海洋学报, 2009, 28 (6): 7-14.
- [23] Ren, Y. F., Wen, R. Z., Zhou, B. F., et. al. Deterministic analysis of the tsunami hazard in China[J]. Science of Tsunami Hazards, 2010, 29 (1): 32-41.
- [24] Liu, Y., Santos, A., Wang, S.M., et. al. Tsunami hazards along Chinese coast from potential earthquakes in South China Sea [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2007, 163 (4): 233-244.
- [25] 杨马陵. 地震海啸监测预警现状与进展[J]. 华南地震, 2005, 25 (2): 22-29.
- [26] 温瑞智, 周正华, 谢礼立. 基于强震台网的我国沿海海啸走时预警[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26 (2): 20-24.
- [27] 陈运平, 沈繁奎, 陈定. 海南省南海地震监测和海啸预警服务[J]. 华南地震, 2005, 26 (1): 61-65.
- [28] 黄永德, 李健威. 香港海啸监测及警报系统的发展[J]. 华南地震, 2005, 28 (2): 118-124.
- [29] Cornell, C.A.. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58 (5) :1583-1606.
- [30] 胡聿贤主编. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [31] Geist, E.L., Parsons, T.. Probabilistic Analysis of Tsunami Hazards [J]. Natural Hazards, 2006, 37 (3): 277-314.
- [32] Soloviev, S. L.. Recurrence of tsunamis in the Pacific[R]. East-West Center Press, 1969.
- [33] Houston, J. R.. Type 19 Flood Insurance Study, Tsunami Predictions for Southern California [R]. Technical Report HL-80-18, 1980.
- [34] Burroughs, S. M., Tebbens, S. F.. Power law scaling and probabilistic forecasting of tsunami runup heights [J]. Pure Applied Geophysics., 2005, 162: 331-342.
- [35] Burroughs, S.M., Tebbens, S.F.. Upper-truncated power laws in natural systems [J]. Pure Applied Geophysics., 2001, 158: 741-757.
- [36] Kagan, Y. Y., Jackson, D. D.. Probabilistic forecasting of earthquakes [J]. Geophysical Journal International, 2000, 143:438-453.
- [37] Schwartz, D. P., Coppersmith, K. J.. Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas fault zones[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89 (B7): 5681-5698.
- [38] Andrews, D.J.. A stochastic fault model 1. Static case [J]. Journal of Geophysical Research, 1980, 85 (B7): 3867-3877.
- [39] Andrews, D.J.. A stochastic fault model 2. Time-dependent case [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86 (B11): 10821-10834.
- [40] Wells, D., Coppersmith, K.. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement [J]. Bulletin Seismological. Society of America. 1994, 84 (4): 974-1002.
- [41] Becker, J. J., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., et. al, Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS[J]. Marine Geodesy, 2009, 32 (4): 355-371.

Probability Analysis Method of Earthquake-induced Tsunami Risk in China

WEN Ruizhi¹, REN Yefei¹, LI Xiaojun², PAN Rong³

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100022, China;

3. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection of PRC, Beijing 100082, China)

Abstract: Tsunami hazard analysis has been undergone many years in Japan, America and other countries. Some methods had been applied in the resistance of tsunami hazard. In China, the studies on tsunami hazard are just realized by the public. However, the definition and method of probability analysis of earthquake-induced tsunami hazard has not been proposed. In this paper, following the regular seismic hazard analysis methods, Chinese probability analysis of tsunami hazard is given.

Keywords: Earthquake-induced tsunami; Probability analysis of hazard; Numerical simulation of tsunami