

文章编号: 1007-6069 (2007) 01-0006-06

我国地震海啸危险性分析方法研究

温瑞智^{1,2} 任叶飞¹

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022)

摘要: 美国、日本等国家已经建立了完善的海啸防灾减灾机制, 对海啸危险性分析方法的研究也做了很多的工作, 而我国目前在这方面尚属空白。本文首次对我国的海啸危险性分析方法进行了研究, 提出了我国地震海啸危险性分析的基本原则, 在此基础上, 借鉴我国成熟的地震危险性分析方法, 建立了我国地震海啸危险性分析方法的主要步骤。在根据我国一些历史地震海啸资料的基础上, 通过统计的方法对我国珠江三角洲的海啸危险性进行了研究。

关键词: 地震海啸; 海啸地震; 危险性分析; 方法

中图分类号: P315 **文献标识码:** A

Preliminary study on tsunami hazard analysis in China

WEN Rui-zhi^{1,2} REN Ye-fei¹

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The tsunami disaster mitigation systems have been established in many countries, such as in USA and Japan, and lots of works have been done in the tsunami hazard analysis. In China, tsunami hazard analysis is still an undeveloped research field. In this paper, the tsunami hazard analysis of China is discussed and the basic analysis rules are also given. Based on the seismic hazard analysis method, the main procedure for the tsunami hazard analysis of China is summarized. At the end, the historical tsunami data are collected in the Pearl River Delta of China and the tsunami hazard analysis has been preliminarily given.

Key words: Earthquake tsunami; tsunamigenic earthquake; hazard analysis; methodology

1 引言

2004年12月26日印度洋的苏门答腊地震海啸不仅造成了重大人员伤亡和经济损失,而且也促使人们对海啸危险性的重新认识^[1,2]。我国的海啸危险性是否也有必要重新认识呢? 1976年之前,人们普遍认为唐山及其周围的地震危险性很低,但唐山地震的发生改变了这种认识;人们普遍认为印度洋的海啸危险性要比太平洋低,苏门答腊海啸改变了人们对印度洋海啸危险性的认识。我国位于太平洋西岸,世界上近80%的海啸发生在太平洋沿岸地区,尽管我国海区外围有成串的岛屿、暗礁环绕,形成了一道抵抗远海海啸的天然屏障,但我国也可能是地震海啸袭击的地区^[3],尤其是东南沿海是我国发展最快的地区,一旦发生海啸,对国民经济会有较大影响。目前不采取任何措施维持现状是一种消极的等待,应该重视并研究我国海啸危险性,加强相关的研究,开展必要的海啸地震区带划分,建立我国地震海啸危险性分析方法的框架。

收稿日期: 2006-10-13; 修订日期: 2006-12-17

基金项目: 地震科学联合基金 (A07080)

作者简介: 温瑞智 (1968-), 男, 研究员, 主要从事地震工程研究。

2 地震海啸危险性分析研究现状

海啸危险性分析 (Tsunami Hazard Analysis) 是对海啸发生源进行合理简化,采用确定性或概率性方法计算确定地点的某一海啸物理参数的危险性。我国目前对海啸灾害的预防尚处于起步阶段,没有成熟的分析方法,更没有相关的规范考虑海啸灾害,相关的科研资料也寥寥无几,因此,有必要全方位的开展海啸危险性分析工作。

我国早在公元前 47 年就记载了一次发生在山东莱州湾的近海海啸,目前历史上记载的近海海啸地震近二十次,其中大部分可以定位。1969 年渤海湾 7.4 级大震未引起巨大海啸,除海深浅外,震源主要为走滑断层也是原因之一。1994 年 9 月 16 日台湾海峡发生了 7.3 级大震,震源错动是正断层为主,也是因为浅海海域而未形成近距较强的海啸。对于远海海啸,我国台湾东部面临浩瀚的太平洋深水海域,是易遭到海啸袭击的地区。台湾南部到菲律宾群岛之间的巴士海峡宽度较小,对太平洋海啸传播的抑制作用较好,一定程度保护了我国的广州、香港等地区;而我国的东海海域比较宽阔,虽然外部有日本的琉球群岛弧状分布,但岛屿比较小,对海啸的阻挡作用不大,因此海啸就会直接影响到我国长江三角洲地区。我国东海和黄海水深较浅,太平洋海啸会在到达长江三角洲地区之后继续北上,因朝鲜海域水较深,海啸在我国一侧传播速度相对朝鲜海岸线速度要慢一些。

1982 年国家海洋局研究成果认为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。1983 年我国加入国际海啸警报系统中心,主要根据太平洋海啸警报中心发布的有关远洋地震海啸信息,发布我国沿海的海啸信息。1986 年国家地震局组织编写的《地震对策》一书,全面论述了地震海啸的危害、成因机制、产生的条件及中国地震海啸的可能性,并讨论了地震海啸的对策^[4]。鉴于海啸发生危险区划图的重要性,1987 年中国地震局编制了中国海域和邻区海域地震烈度区划图,研究成果表明菲律宾西边海域,主要是马尼拉海沟、巴士海峡海域、台湾岛南边海域和东边海域是发生 Ⅷ 度和 Ⅸ 度以上地震的海域,即有发生 7 级以上地震可能性的海域,是今后可能发生海啸的海域。南海大部分地域为大陆型地壳,其中过渡型地壳和海洋型地壳也相对稳定,不致发生很大地震,因此不是地震海啸发生高风险区。1992 年在海南省地震局成立了海洋地震研究所,地震海啸是其研究方向之一。2005 年中国地震局工程力学研究所也开始对海啸灾害进行研究,已经取得了初步成果^[5,6]。

近几十年随着地震危险性方法的成熟,海啸危险性评价工作也开始逐渐转为基于概率方法的海啸危险性分析 (Probability tsunami hazard analysis, PTHA),该方法与现有的地震危险性分析方法 (Probability 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。地震危险性分析方法目前在世界范围已经广泛使用,主要思路是基于 Comell 在 1968 年提出的方法^[7],我国现有地震危险性分析方法也是源于此法但略有改进^[8]。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。1977 年美国的 Houston 等将概率方法与简单的地震发生模型结合计算了夏威夷群岛浪高的发生频率^[9]。美国 FEMA 目前采用地理信息系统技术结合洪水分析模型进行海啸危险性分析。美国俄勒冈州通过对近 2 千年的历史海啸沉积物的资料分析来研究概率危险分析中的涌浪。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。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。意大利利用历史地震目录,统计了地中海的海啸地震与观测点海啸浪高的关系。加勒比海的海啸危险性分析主要考虑了加勒比海海盆的潜在地震源和潜在的海底滑坡这两项主要诱发因素。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方法几乎一样的方法,目前该项目完成了海啸源的划分。近期的一些研究工作也开始涉及陨石和火山等引起的海啸研究^[10]。

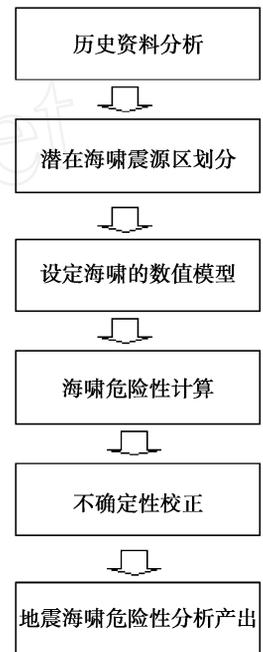


图 1 海啸危险性分析流程

3 我国地震海啸危险性分析方法的初步研究

3.1 我国地震海啸危险性分析评估原则

本文主要探讨地震引发的海啸,并建立一套适合我国国情的地震海啸危险性概率分析方法,实现我国沿海地震海啸危险性分析,并能够与地理信息系统技术集成,绘制地震海啸危险区划图,为进一步全面考虑海底火山、海底滑坡等全方位的海啸危险性分析方法提供技术支持。因此借鉴我国地震危险性分析方法建立我国海啸危险性分析评估的基本原则^[8]:

(1)我国沿海地震海啸危险性分析的概率方法。海啸危险性分析实际上是海啸长期预报问题,是要回答我国沿海地区一段时间内海啸发生的强度,以及对场地的影响情况。我国目前几乎没有关于海啸危险性分析的工作,国外的地震海啸危险性分析方法也不尽相同,但都比较趋向于概率方法,采用概率方法符合当前海啸减灾发展的潮流。采用概率方法评定我国地震海啸危险性也是与当前我国地震科学发展水平和海啸科学发展水平相适应,给出概率含义的地震海啸危险性分析结果可以为沿海城市规划在经济投入和风险水平之间选择合理优化提供参考依据。

(2)基于海啸数值模拟的危险性分析。丰富的历史海啸地震资料可以为海啸灾害的研究提供最可靠的依据,但我国可以用来进行分析的海啸资料很少,因此采用可靠的海啸数值模拟方法模拟潜在海啸的传播过程,尤其是计算海啸的涌浪高度等一系列数据,可以弥补历史资料的不足。在地震危险性分析中是通过历史地震来统计地震的年发生概率,而对于我国海啸的发生概率仅仅通过历史资料远远不能满足此要求,必须结合数值模拟的方法来弥补资料的不足^[11]。

海啸发生机理的研究可以揭示海啸发生的特点,尤其可以确定合理的数值模型的初始条件。目前海啸数值模拟的初始条件常常采用地震发生的线弹性位错机理来描述,主要考虑断裂破裂的几何参数和强度,其它一些复杂的模型可以模拟海底断裂的运动,如从几何形状上考虑断裂的复杂性、滑移的多向性、破裂层厚度可变性等各种因素。

在海啸传播过程中,海洋水域的水平尺寸远远大于垂直尺度,垂直方向流速大小变化可以用沿水深方向的平均值来表达,垂直方向的加速度远远小于重力加速度,可以忽略不计,因而可以简化为二维长波方程。海啸波常常会传播几千公里,地球本身的形状以及自转必须考虑,所以球坐标系下描述海啸的传播更为适合。

(3)反映我国地震海啸活动的不均匀性。我国位于太平洋板块边缘,是地震的多发区,也是诱发地震海啸的多发区,但地震发生的空间分布具有不均匀性,有必要通过划分潜在海啸震源区,反映这一特点。潜在海啸震源区是应该建立在地震区划分的基础上,依据地质构造、地球物理、地壳变形以及地震活动性等信息来判别,划分的潜在震源区可以作为地震海啸危险性分析的基础数据资料。

(4)充分借鉴地震危险性的分析方法和思路。地震海啸危险性分析需要建立在对我国沿海地区地震活动规律认识的基础之上的,需要对地震活动特点和地震发生区域的地质条件有充分的认识。我国的地震危险性分析工作经过几十年的发展已经积累了丰富的研究成果,形成了一套比较完整、科学的评价方法,充分借鉴这些成果,会使地震海啸评价结果更合理可靠。

3.2 我国地震海啸危险性分析技术途径

本文结合我国成熟的地震危险性分析方法,提出基于数值模拟的我国地震海啸危险性分析方法,见图1,其主要步骤为:

(1)历史资料收集整理。收集太平洋历史地震、地震海啸和断层活动段与地震有关的深部构造和地球物理场地特征资料,并建立地理信息系统数据库,重点突出我国历史地震海啸资料。本文根据美国 National Geophysical Data Center的海啸数据库资料绘制的海啸地震以及陆地记录到的海啸浪高(run-ups)分布,见图2和图3。

(2)潜在海啸震源区划分。根据我国近海的特征,通过对海洋板块运动特征分析,并结合海洋深度的条件,划分潜在海啸震源区,分析震源几何空间位置和发震方式对我国沿海的影响。划分地震海啸危险区是地震海啸危险性分析的基础工作,地质活动与海啸地震的运动密切相关,表现地震活动的一致性和相关性。由于影响我国的海啸地震主要发生在太平洋,因此潜在海啸震源区的划分应针对太平洋海域。

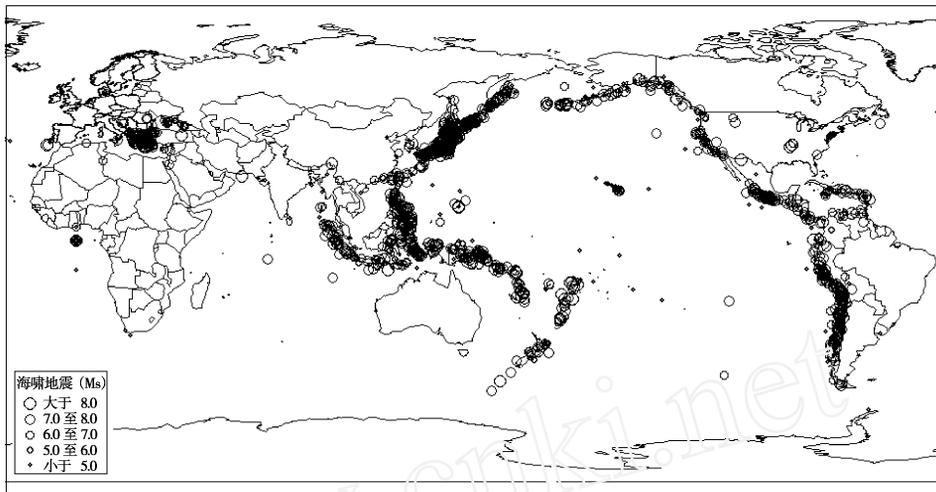


图 2 地震海啸分布图 (BC2000 - 2005)

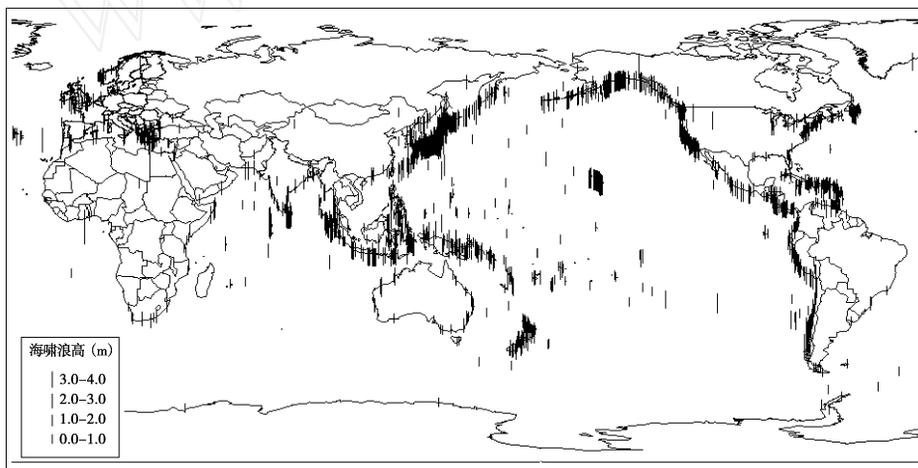


图 3 地震海啸浪高图 (BC2000 - 2005)

(3)近海海啸与远海海啸区分。分析我国海啸地震发生机理特征,通过历史海啸数据库和我国近海地质资料,结合地震海啸震源区的结果,划分我国近海与远海海啸。近海海啸与远海海啸的数值模拟方法不同,我国近海和远海海啸源的合理区分,将有利于正确建立海啸数值模拟模型。

(4)设定海啸的数值模型。近海海域采用直角坐标系,而远海海域采用球坐标系,通过建立线性长波方程模拟海啸传播过程,并对远洋海啸考虑科里奥利力。海啸涌浪高度是地震海啸危险性分析中的重要物理参数,是海啸危险性分析结果最直接的表达形式。通过合理的数学方法,如常用的有限差分法,离散海啸的物理方程,求解海啸的传播方程,就能够得到海啸的涌浪高度,并通过一些历史海啸记录验证分析方法的可靠性;海啸流体动力学方程初始条件可以通过定义我国近海与远海海啸源以及潜在震源区的基本参数获得。

(5)海啸危险性计算。依据地震危险区内的地震活动性,采用 Monte Carlo数值模拟方法,以海啸数值模型为基础设定海啸地震时我国沿海涌浪高度及淹没范围,然后,假设海啸的发生也与地震发生类似,符合泊松分布和全概率定理,这样就可以计算海啸沿海区域在某一涌浪高度水准下的未来时间的超越概率。被广泛采用接受的地震海啸分析方法,如 Poisson模型,可以在给定的海岸线地点在给定时间区间内计算发生可接受灾害指标的超越概率。

(6)不确定性校正。以上通过历史地震海啸资料来分析我国的地震海啸危险性显然有着很多的局限性和不确定性。由于地震海啸资料的缺失,人们对地震海啸发生规律认识的匮乏,在地震海啸危险性分析中的每个步骤都存在着不确定性,可采用地震危险性分析方法中的逻辑树方法分析。

(7)系统集成。将分析模型嵌入地理信息系统中,计算、编制我国沿海地震海啸区划图。海啸危险性分

析的研究成果,如海浪高度,海啸走时(Tsunami Travel Time),可以为我国建设新一代基于数值模拟的海啸预警系统提供必要的理论和技术支持,为合理优化出我国未来海啸观测系统(Tsunami buoy system)的位置提供依据以及为沿海地区的长期规划提供防灾减灾的设防依据。

4 我国历史地震海啸危险性分析

如果某一场点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点的历史涌浪高度年超越概率,但实际上许多地区很难获得翔实的历史资料,虽然我国有着丰富的历史地震记录,但关于海啸地震的记录却不是很多,也不完善。墨西哥的Acapulco地区从1732年到1985年记录到海啸事件共29次,其中7次为历史记录,其余为仪器记录,采用统计的方法建立了涌浪高度的年超越概率经验公式^[12]:

$$n_r = C(h^a - h_0^a) \quad (1)$$

式中: n_r 为年超越概率; C 和 a 为统计常数; h_0 为涌浪发生率为零值的涌浪高度, h 为观测点涌浪最大高度。

本文通过美国National Geophysical Data Center搜集了我国珠江三角洲的海啸浪高数据,见表1,其中1767年和1917年的地震海啸涌浪高度为作者推测值。基于此数据,计算了海啸浪高的年超越概率,其离散点分布见图4。采用与公式(1)相似的经验公式,采用类比的方法,重新计算了公式(1)中相应的参数,拟合出我国珠江三角洲的海啸年发生概率曲线,其相应参数见表2。

从图4中可以看出,对于较低水准的浪高,拟合的曲线偏高,这可能是由于我国缺少有效的监测手段而漏掉了海啸浪高较小的事件;而对于中等水准的浪高,即一米左右的浪高,能够反映浪高的变化;对于较高水准下的浪高,曲线下降趋势较快。总体定性来说,我国珠江三角洲地震海啸的危险性要小于墨西哥的Acapulco地区。

表1 NOAA中我国珠江三角洲海啸浪高记录

年	月	日	地点	纬度	经度	浪高(米)
1765	5		CANTON	23.13	113.33	9
1767	11	22	MACAU	22.17	113.55	大于2
1917	1	25	AMOY, TUNGAN	24.47	118.08	大于1
1952	11	4	HONG KONG	22.25	114.17	0.1
1960	5	22	HONG KONG	22.25	114.17	0.5
1960	5	22	HONG KONG	22.25	114.17	0.6
1985	3	3	HONG KONG	22.25	114.17	0.1
1988	6	24	HONG KONG	22.29	114.22	0.65
1988	6	24	HONG KONG	22.4	114.18	1.03
1992	1	5	SANYA, HANAN	18.23	109.51	0.8

表2 统计参数

地点	C	a	h_0
墨西哥的Acapulco	0.056	0.52	20
珠江三角洲	0.033	0.49	15

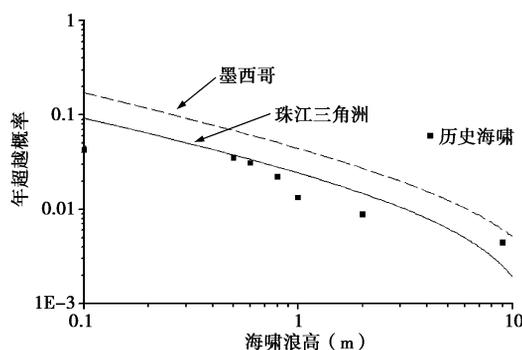


图4 珠江三角洲地震海啸的危险性

5 结语

本文通过历史海啸数据对我国珠江三角洲地震海啸的危险性进行了分析,但由于海啸事件的稀少和历史数据海啸数据的匮乏,在我国通过历史事件统计的方法进行海啸地震危险性分析具有很大的局限性。本文借鉴我国成熟的地震危险性分析方法,对我国地震海啸危险性方法进行了研究,给出了我国地震海啸危险性分析的基本原则,在此基础上,建立了我国地震海啸危险性分析方法技术步骤,总体论述了我国地震海啸危险性的技术思路。

地震海啸危险性分析可以为建立地震海啸预报、报警系统提供技术支持,地震海啸区划图还可以与工程海啸设防结合,提出未来一定时期内,不同地点的地震海啸危险性程度,给出工程海啸设防标准,同时也为海

洋资源合理利用与开发、环境保护与治理、重大工程设施的布局与发展规划、国家建设提供依据。总之,地震海啸危险性分析将为实现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] 王绍玉. 印度洋地震和海啸灾害引发的若干思考 [J]. 国际地震动态, 2005, 313(1): 1 - 8
- [2] 林均歧. 2004年 12月 26日印度尼西亚地震海啸灾害考察 [J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(2): 30 - 33
- [3] 包澄澜. 海啸灾害及其预警系统 [J]. 国际地震动态, 2005, 313(1): 14 - 18.
- [4] 郭增建, 陈鑫连主编. 地震对策 [M]. 北京: 地震出版社, 1986
- [5] 温瑞智, 公茂盛, 谢礼立. 海啸预警系统及我国海啸减灾任务 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(3): 1 - 6
- [6] 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]. 地震工程与工程震动, 2006, 26(2): 20 - 24
- [7] Comell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583 - 1606
- [8] 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.
- [9] Houston J R, Carver R D, Markle D G. Tsunami - wave elevation frequency of occurrence for the Hawaiian Islands[R]. U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station Technical Report H - 77 - 16, 1977.
- [10] Priest G R, Myers E, Baptista A M, Fleuck P, Wang K, Kamphaus R A, Peterson C D. Cascadia subduction zone tsunamis: hazard mapping at Yaquina Bay, Oregon[R]. Oregon Department of Geology and Mineral Industries, Open - File Report O - 97 - 34, 1997.
- [11] Titov V V, Gonzalez F I. Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model[R]. NOAA Technical Memorandum ERL PMEL - 112, 1997.
- [12] Geist E L, Tom Parsons. Probabilistic Analysis of Tsunami Hazards[J]. Natural Hazards 2006, 37(3): 277 - 314.