

日本 $M_w 9.0$ 级地震海啸数值模拟与启示^{*}

温瑞智¹⁾ 任叶飞¹⁾ 李小军²⁾

1) 中国地震局工程力学研究所强震动台网中心, 哈尔滨 150080

2) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 2011年3月11日13时46分日本东北部海域发生 $M_w 9.0$ 级特大地震, 地震诱发了海啸。本文依据 USGS 的震源机制解, 进行了地震海啸的数值模拟, 并与美国国家海洋与大气管理局布设的海底压力计记录的水深数据对比分析, 结果表明数值模拟结果可信。同时, 进一步分析了海啸造成巨大损失的原因, 并对未来我国海啸防灾减灾工作给出了几点建议。

关键词 日本 $M_w 9.0$ 级地震海啸; 数值模拟; 海啸防灾减灾

中图分类号: P315.9; **文献标识码:** A; **doi:** 10.3969/j.issn.0235-4975.2011.04.006

引言

北京时间2011年3月11日13时46分, 日本东北部海域发生 $M_w 9.0$ 级特大地震。地震引发的巨大海啸袭击了环太平洋沿海大部分国家和地区, 造成巨大人员伤亡和财产损失。海啸波于震后15分钟抵达日本沿岸, 并在随后数小时内袭击海岸区。据日本警察厅统计, 截止2011年4月6日, 地震和海啸共造成日本12554人死亡、15077人失踪以及2866人不同程度受伤, 接近20万栋建筑物受损, 其中绝大部分由海啸造成。另外, 由海啸间接引起的福岛第一核电站核泄漏事故对于环境的破坏无法估计。

海啸数值模拟是开展海啸减灾工作的关键环节, 作者于地震发生后数小时内对此次海啸进行了数值模拟, 本文介绍了数值模拟结果, 分析此次海啸造成巨大破坏的原因,

并针对我国海啸防灾减灾工作给出建议。

1 海啸数值模拟

在进行地震海啸的数值模拟过程中, 通常假设初始海啸波由断层的突然竖向错动引起, 不考虑断层破裂过程, 假设海水表面的向上运动和海底位移一致, 可由各向同性的弹性半空间中的断层位错公式确定^[1]。根据日本气象厅的经验公式, 快速估计断层长度 $L=400$ km、宽度 $W=150$ km^[2]; 震源机制解参考 USGS 于震后快速发布的 W_{phase} 矩张量解, 包括断层倾角 δ 、走向 θ 、滑动角 λ 、以及地震矩 $M_0=3.9 \times 10^{22}$ N·m^[3]; 海底面距此次断层顶部高度 H 假设为10 km; 断层平均滑移量 \bar{D} 通过经验公式 $M_0 = \mu \bar{D} L W$ 确定^[4]。

各断层参数值见表1, 按照这些参数计算得到了断层位错分布, 如图1所示。其中, 图(a)给出了此次海啸源的位置及海底地形情况; 图(b)给出了地震引起的地壳抬升及沉降等值线, 实线表示抬升, 虚线表示沉降, 间隔分别为1 m和0.5 m; 图(c)分别表示 $A-A'$ 断面和 $B-B'$ 断面的位错分布,

^{*} 收稿日期: 2011-04-08; 修回日期: 2011-04-13。

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAK55B05)、公益性行业科研专项(201108003)、中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2010C01)资助。

表 1 2011 年日本东北地震估算断层参数

参数名称	符号	参数
断层长度	L	400 km
断层宽度	W	150 km
平均滑移量	\bar{D}	20.0 m
倾角	δ	14°
滑移角	λ	81°
断层走向	θ	$N193^\circ E$
海底面距断层面顶部高度	H	10 km

最大值和最小值分别为 8.71 m 和 -3.64 m。

将上述初始海底位错作为海啸波初始值输入越洋海啸数值传播计算模型^[5-6]，计算区域取： $S80^\circ \sim N80^\circ$ ， $E90^\circ \sim W65^\circ$ ，空间步

长取 $5'$ ，时间步长取 10 s，栅格数量总计为 2461×1921 。计算总持时约 2 个小时 (CPU: P4 3.2GHz, 512M 内存)。计算结果包括海啸传播走时图、各时刻的波高分布、能量分布图及沿海波高分布，限于篇幅原因这里仅给出了传播走时图，如图 2 所示，详细结果可参阅 www.chinatsunami.org。模拟结果显示，震后 3.5 小时海啸波传播至我国台湾；约 6.5 小时至福建、浙江沿海，最大波峰约 70 cm；约 10 小时后至我国上海，最大波峰约 50 cm。此次海啸未对我国沿海造成显著影响，主要原因是海啸波通过绕射向我国海域传播，并受日本本岛及琉球群岛

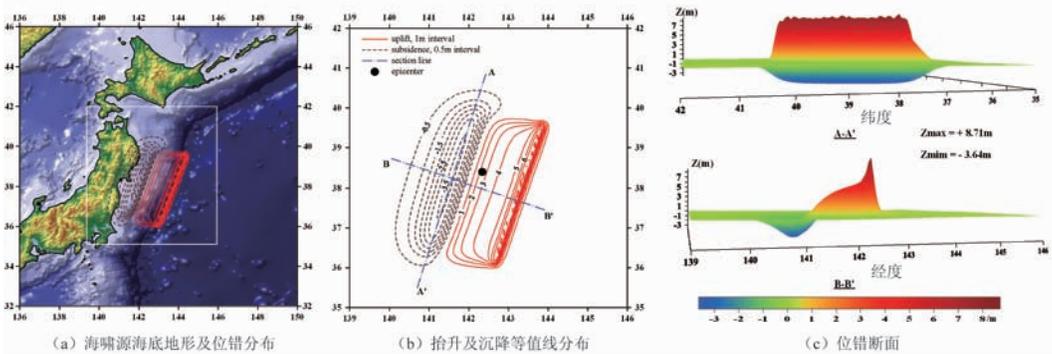


图 1 2011 年日本东北地震海底位错分布

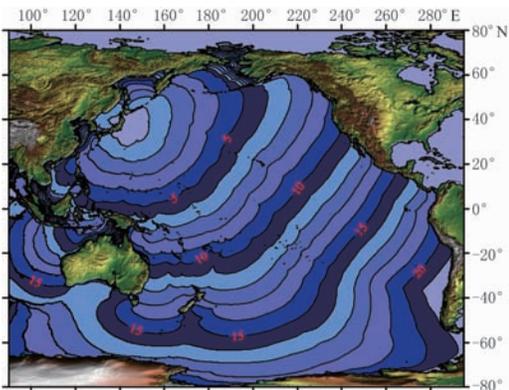


图 2 2011 年日本东北海啸传播走时图 (间隔 1 h)

的阻隔及我国宽阔大陆架的摩擦耗能作用。

美国国家海洋与大气管理局 (NOAA)

于本世纪初实施了 DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) 项目，用于实时监测海啸波，已组建有 39 个观测站，每个观测站配备精密的海底压力计，通过卫星准实时传输水深数据^[7]。本文从中选取 6 个观测站，将其观测值与本文计算值进行对比，以验证模拟结果的可靠性，结果如图 4 所示。从图中可以发现各观测站首波无论是达到时间还是幅值大小计算值与观测值基本上一致，首波过后两者波形显著差异但幅值保持一致，说明本文模拟结果具有一定的可靠度，尤其是作为海啸警报发布前需预估的两个重要指标——首波达到时间及最大波高，模拟结果与观测值之间一致性较高。

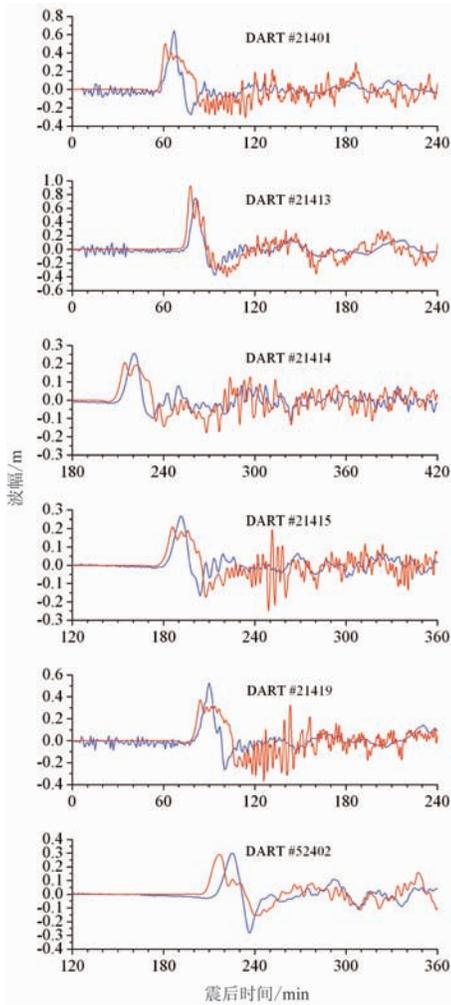


图3 2011年日本东北海啸模拟计算值与观测值比较(分别用红线和蓝线表示)

2 海啸造成巨大破坏的原因

日本自1933年三陆地震海啸造成3000多人死亡后逐步开展海啸防灾减灾研究,至1999年完成了基于数值预报技术的新一代海啸预警系统,能在大震后3分钟之内发出可靠的预警信息^[8]。对于此次海啸预警,日本气象厅(JMA)于地震发生后3分钟,对岩手县、宫城县、福岛县发布大海啸警报($>3\text{ m}$),并不断更新警报信息,于震后45分,扩大至10个区域发布大海啸警报^[9]。可以说日本在海啸研究领域一直处于世界领先

地位,另外政府花费了大量人力、财力修筑了绵延数千公里的海堤和防波堤,为何对于这个已从事了近80年海啸防灾减灾研究工作的国家,还未能避免此次巨大的海啸灾难,值得深思与借鉴,为此我们分析了以下几点原因:

(1) 地震释放能量巨大。此次地震震级最后修订为9.0级,是有记录以来世界第五大地震,形成海底约 $500\text{ km}\times 200\text{ km}$ 区域的破裂带。本文尽管没有对余震海啸展开数值模拟,但据JMA统计,主震发生22分、29分、39分钟过后,破裂区内连续发生了 $M7.4$ 、 $M7.7$ 、 $M7.5$ 三次较强余震^[9]。主震产生的海啸波还未消退,余震的海啸波接踵而至,相互叠加,一浪胜过一浪,持续数小时。

(2) 地形放大效应。里亚斯型海岸的特殊地形有利于海啸波汇聚与爬坡,具有一定的放大效应^[10]。本次海啸受灾较为严重的岩手县和宫城县恰恰具有典型的里亚斯型海岸。图4给出了此次海啸调查的实际波高分布,包括爬坡高度,数据下载源于美国地球物理数据中心(NGDC)的全球历史海啸数据库^[11]。从图中清晰可见,岩手县和宫城县多处海啸波高在 10 m 以上,尤以大船渡市 24 m 最高。图中同时给出了其局部地形,典型的“喇叭口型”海湾,海啸波侵入海湾,经过汇聚与反射叠加,涌浪高度显著增加。

(3) 边缘波效应。在流体动力学中,当表面重力波沿刚壁边界传播时,受其反射作用,边界处以正弦波方式传播,幅值显著增加^[12]。该效应将会使海啸能量盘踞在沿岸或岛屿周围。若周围的海底地形是属于平坦的斜坡,那么边缘波效应将被完美地发挥出来。从图1(a)可以清晰发现日本东北海域正好如上所述,具有“漂亮”的斜坡地形,因而海啸波高增加、持续时间增长。

(4) 民众防范意识麻痹。实际上,JMA在震后3分钟即发布了海啸警报,而第一波

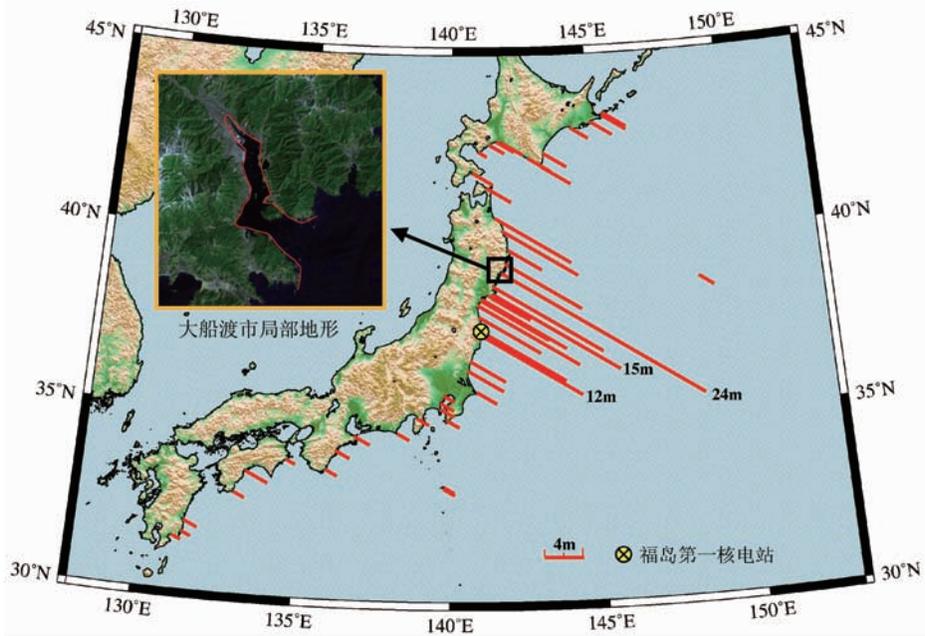


图4 2011年日本东北海啸波高调查值分布(截止2011年4月5日结果)

海啸波在15分钟后才登陆海岸，公众有充足的时间进行逃生与开展防护措施。然而事实并非如此，最典型的例子是仙台机场，约震后1小时才遭受高达12 m的海啸波袭击，由于未采取应急措施而造成严重的破坏。自1960年智利 $M_w 9.5$ 级地震在日本产生6~8 m的海啸波以来，至今未有如此高的海啸波侵袭日本沿岸；另外对于修筑在沿海的海堤与防波堤过度地信任与依赖。大部分民众对于海啸灾害未有清醒的忧患意识，在警报响起后并没有选择逃生。

(5) 政府低估了海啸强度。首先，对于地震震级的低估，从最初的7.9级经过多次修正才确定为9.0级，直接导致对于海啸波高的低估；其次，在沿海经济规划与重大工程海啸评估过程中，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，如图4所示，造成了意想不到的备用发电设备浸水而无法正常工作，引起了核危机。

3 我国海啸防灾减灾工作的启示

2004年印度尼西亚海啸之后，海啸防灾减灾成为一项研究的热点，2010年智利地震也引发了较大海啸，造成了一定损失。尽管日本沿海筑有绵延的海堤和防波堤，但此次海啸仍对这个有着丰富海啸防灾减灾研究工作的国家造成了巨大的灾难。针对此次地震，结合我国现有海啸研究工作^[13-17]，获得以下几点启示：

3.1 完善我国海啸防灾体系

从国家法律政策层面看，我国防灾减灾体系仍旧不完善，多是以单一灾种的管理模式呈现。目前地震防震减灾监测预报、震害防御、应急救援构成的三大体系建设已十分完善，但与其它灾种的衔接和关系尚不明朗。这需要中国地震局与海洋局共同携手，成立“复合型灾变”部门，各负其责，加快建设多部门联动的灾害应急协调机制。

3.2 开展沿海海啸危险性评估

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,需要对地震活动特点和地震发生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,充分借鉴地震危险性的分析方法和思路,会使地震海啸评价结果更合理可靠。

3.3 沿海工程海啸防御

近来我国沿海地区经济飞速发展,但在沿海的经济社会发展规划布局、围填海、重大基础设施的建设过程中,缺乏海洋工程防御内容。必须全面研究具体工程的预防海啸的措施,制定海啸防御建造和基本设施的相关标准,确保沿海工程具有初步防御海啸袭击的能力。

3.4 已有沿海核设施地震与海啸灾害应重新评估

必须启动对我国沿海已有核设施地震、海啸灾害防御安全性重新评估工作。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”,从本次日本海啸的经验来看,这远远

不能满足核设施的安全要求。

3.5 完善海啸监测、警报服务系统

我国在1983年加入国际海啸警报系统中心,国家海洋局目前负责我国的海啸预警预报业务。我国“十二五”期间正在规划建设地震预警系统,应该加强地震预警系统和海啸预警系统技术的统一管理,结合地震科学技术,实现我国沿海重要区域的监视观测。日本大地震发生后3分钟,日本气象厅随即发布了海啸警报,在一定程度上减少了损失,值得借鉴。

3.6 加强民众海啸知识宣传

必须大力普及海啸防灾减灾知识,提高民众的海啸防灾避灾意识和能力。

4 结语

本文介绍了日本 $M_w 9.0$ 级地震海啸数值模拟结果,分析了此次海啸造成巨大破坏的原因,并结合我国防震减灾体系,对我国海啸防灾减灾工作给出了若干建议。

(作者电子信箱,温瑞智: ruizhi@iem.net.cn)

参考文献

- [1] Mansinha L, Smylie D. The displacement field of inclined faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1971, 61(5): 1433-1440
- [2] Furumoto A S, Tatehata H, Morioka C. Japanese Tsunami Warning System. *Science of Tsunami Hazards*, 1999, 17(2): 85-106
- [3] http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/neic_c0001xgp_wmt.php
- [4] Somerville P, Irikura K, et al. Characterizing crustal earthquake slip models for prediction of strong ground motion. *Seismological Research Letters*, 1999, 70(1): 59-80
- [5] 任叶飞. 基于数值模拟的我国地震海啸危险性分析. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所硕士学位论文, 2008
- [6] 温瑞智, 任叶飞, 周正华, 等. 越洋海啸的数值模拟. *地震工程与工程振动*, 2008, 28(4): 28-34
- [7] <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>
- [8] 于福江, 吴玮, 赵联大. 基于数值预报技术的日本新一代海啸预警系统. *国际地震动态*, 2005, 313(1): 19-22
- [9] http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake.html
- [10] Yoshito Tsuchiya, Nobuo Shuto. *Tsunami: Progress in Prediction, Disaster Prevention and Warning*.

Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1995, pp339

[11] http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml

[12] Lamb H. Hydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 1932, pp446

[13] 温瑞智, 公茂盛, 谢礼立. 海啸预警系统及我国海啸减灾任务. 自然灾害学报, 2006, 15(3): 1-7

[14] 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. 地震工程与工程振动, 2006, 26(2): 20-24

[15] 温瑞智, 任叶飞. 我国地震海啸危险性分析方法研究. 世界地震工程, 2007, 23(1): 6-11

[16] 温瑞智, 任叶飞, 周正华. 近场海啸数值模拟初步研究. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(Sup.): 416-420

[17] Ren Y F, Wen R Z, Zhou B F, et al. Deterministic analysis of the tsunami hazard in China. Science of Tsunami Hazards, 2010, 29(1): 32-42

The tsunami simulation for off the Pacific coast of Tohoku earthquake and disaster mitigation in China

Wen Ruizhi¹⁾, Ren Yefei¹⁾, Li Xiaojun²⁾

1) Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China

2) Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China

Abstract The numerical simulation of the tsunami is described for the 9.0-magnitude earthquake off the coast of Japan, which triggered destructive tsunami waves. This is based on USGS focal mechanism information and the output data are compared with NOAA real-time tsunami monitoring systems, the results support the numerical model well. The causes for the great damage by the tsunami are analyzed and some suggestions for tsunami disaster mitigation in China are given.

Key words tsunami; numerical simulation; tsunami disaster mitigation