地震海啸在东海大陆架上传播过程的数值模拟研究。

董非非1,温燕林2,邓 辉1,朱元清2,李 正1

(1. 江西省地震局,江西南昌 330039; 2. 上海市地震局,上海 200062))

摘 要:在东海潜在震源区冲绳海槽假定了五个震源点,根据 Steven 地震海啸地震参数经验值作为 初始条件,分别考虑 6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0 级地震条件下的 30 个震例,采用数值模拟的方 法,对海啸在东海传播过程进行情境分析,特别是对上海沿岸地区可能会遭受的海啸灾害做了较为 精细的研究。结果发现:小于 8.0 级的震例对上海地区几乎不会造成影响;8.0 级震例只有最北端 震源点震例会对上海地区有明显影响;8.5 级以及 9.0 级震级基本上均会对上海沿岸地区造成较 大的影响。特别是冲绳海槽北段 9.0 级震例可能会对上海沿岸局部地区造成危害,最大波高可达 3.9 m。

关键词:地震海啸;数值模拟;东海大陆架;上海地区;冲绳海槽震源区

中图分类号: P315.941 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2013)01-0154-06 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0154

Numerical Simulation of Seismic Tsunami Dissemination at the Continental Shelf of the East China Sea

DONG Fei-fei¹, WEN Yan-lin², DENG Hui¹, ZHU Yuan-qing², LI Zheng¹

Earthquake Administration of Jiangxi Province, Nanchang, Jiangxi 330039, China;
 Earthquake Administration of Shanghai, Shanghai 200062, China)

Abstract: The seismogenic tsunami is a type of sea wave directly caused by uplifting and subsiding of the ocean floor. It generally has substantial destructive power and can create severe damages to lives. Tsunami studies are important in the field of disaster prevention, particularly in tsunami discrimination and sea-quake disaster evaluation.

Chinese scholars conducted studies in this field mainly after the 2004 Indonesia tsunami. In the South China Sea, the huge possibility of seismic tsunami occurrence has become a significant issue. The coastal area of East China Sea is the most economically developed and densely populated region of the country; a tsunami occurrence in this area would be catastrophic. No numerical simulation for tsunamis has been conducted for the East China Sea; therefore, research on the characteristics of potential tsunamis in this area is crucial for tsunami identification and disaster assessment.

Such tsunami research for the East China Sea region is the focus of this paper. The geological background of seismic activity history, spatial—temporal tsunami distribution characteristics, potential source area of Okinawa Trough, and occurrence possibility of earthquakes and tsunamis in the East China Sea formed the basis for discussion, in addition to identification and scope of po-

① 收稿日期:2012-03-20

基金项目:上海市地震局科技专项(2012 专 10)

tential tsunamis.

By using numerical simulation methods, we assumed five focal points in the Okinawa Trough, and we set six seismic tsunami experience parameters for 6.0-9.0 magnitude as the initial conditions. We thoroughly examined 30 earthquake examples that could generate tsunamis, analyzed the tsunami dissemination process in the East China Sea, and discussed the possibility of a tsunami disaster in the coastal areas of Shanghai in detail.

The results show that at different source points with the same magnitude, the initial tsunami wave height is same; thus, the earthquakes with magnitudes less than 8.0 had a negligible effect on Shanghai. For those with magnitude 8.0, only the source point at the northernmost region of Okinawa Trough had an obviously impact. Almost all of the earthquakes with magnitudes of 8.5 and 9.0 had a significant influence on the coastal areas of Shanghai, with the largest potential wave height reaching 3.9 m.

The analysis results were and combined with water level changes recorded by a tsunami instrument to estimate the tsunami disaster occurrence potential. Because tide is a major factor in daily water level changes, we predicted the tide at the monitoring points with the numerical simulation methods. The results strongly correlated with the observation data. We considered the water level changes at the monitoring points caused by the Okinawa Trough magnitude 8.5 earthquake occurring at the northernmost point and the tidal prediction results of the entire day to determine the post—shock theoretical value of the water level at various times.

The results show that the East China Sea is highly susceptible to a seismic tsunami, the Okinawa Trough is a potential risk source area for Shanghai, and the influence from northern section of the trough is greater than that from the southern section.

Key words: Seismic tsunami; Numerical simulation; The continental shelf

0 引言

人们从远古时代就开始观察和记录海啸现象, 特别是在日本及地中海地区。最早的海啸记录发生 在公元前 2000 年西南亚的叙利亚共和国的近岸地 区^[1]。2004 年 12 月 26 日在苏门答腊岛发生了大 地震,并引起了巨大的海啸,造成了印度洋沿岸十几 个国家遇难人员近 30 万,仅印尼的经济损失估算就 有 45 亿美元,并造成了十万人以上的死亡^[2]。这次 事件引起了全世界政府以及社会公众的广泛关注, 如何预防地震海啸灾害,建立有效的海啸预警系统 成为社会各界关注的焦点。

对于我国尽管海区外围有成串的岛屿、暗礁环绕,形成了一道抵抗海啸的天然屏障,几乎不受远洋海啸的影响^[3],海啸发生概率也比较低,但是我国的 南海,东海部分海域极有符合发生海啸的条件,我国 历史上也有关于海啸的记载^[4]。特别是 2004 年印 尼海啸后,中国加强开展了海啸方面的工作,研究表 明中国海域南海和东海符合海啸灾害发生条件,其 中南海区域发生海啸的可能性更大,潜在海啸灾害 影响也可能比较大,因此大部分学者的研究重点放 在南海区域,而针对东海区域海啸的研究比较少,缺 乏精细系统的工作。但是东海沿海地区是我国经济 最发达人口最稠密的区域,特别是上海地区,一旦遭 遇海啸袭击后果不堪设想。本文以发生在东海冲绳 海槽的强震为背景,以数值模拟方法研究海啸在东 海大陆传播过程,并探讨在上海地区可能造成的灾 害。该研究对推动我国的防震减灾将起到积极的作 用。

1 理论及研究方法

根据前人研究^[5]以及历史地震分布表明,冲绳 海槽为东海潜在震源区。冲绳海槽产生的原生海啸 在到达东海海岸线之前还要传播 500 km 左右的距 离。从海面直至海底的海水质点,同步地沿水平方 向往复运动,携带着大量的能量袭向海岸。

在这样长的距离上建立海啸传播模型,应当考虑地球的曲率以及地球自转时的科氏力作用,在传播过程中非线性对流项以及底部摩擦项相对是小量,可以忽略,但是对于波长较短的波,频散现象比较显著。因此,对于这个过程的研究可以采用线性

Boussinesq 方程^[5-8]。

当海啸波传到近海岸大约 100 km 区域时,由 于宽广的大陆坡作用,水深也只有数十米。这时摩 擦力作用显著,对海啸能量的传播衰减作用增强;科 氏力作用减小,可以忽略。应考虑在传播过程中非 线性对流项以及底部摩擦项。因此对于这个过程的 研究可以采用包含底部摩擦项的非线性浅水波方 程^[5]。

根据海啸速度公式推算,海啸波在传播过程中 随水深变小,速度越来越小,从震源附近的 200 m/s 左右减小至近海内的不到 20 m/s,所经过区域决大 部分为东海大陆架,传播速度较慢,从源区到达东海 沿岸地区大慨需要几个小时。

本文采用 COMCOT 数值模型,在潜在震源区 假设 5 个震源点,分别发生 6.5~9.0 级地震,介绍 数值模拟的方法原理以及计算结果。文中所介绍海 啸理论方程也主要是参照 Philip liu 等人编写的程 序说明^[5]。COMCOT 全称为 Cornell Multigrid Coupled Tsunami model,采用交错网格蛙跳差分 方法,求解球坐标系以及直接坐标系下线性或者非 线性的浅水波方程。该程序已成功地用于很多历史 海啸事件的模拟,如 1960 年智利海啸,2003 年阿尔 及利亚海啸以及 2004 年印度洋海啸等。

2 计算示例与分析

2.1 参数设置

本文采用双层嵌套网格对东海区域进行潜在地 震海啸的研究。双层嵌套网格是指在研究区域(粗 网格,第一层网格)中,对重点关心的局部区域加密 网格(细网格,第二层网格)做精细研究。第一层网 格(layer01)范围为 E118.0°~130.0°, N22.0°~ 34.0°,网格数 721×721 采用球坐标系下的线性方 程进行研究,空间步长1 min,时间步长1 s。计算区 域水深及陆地高程数据来源于美国国家地球物理数 据中心(NGDC)的 ETOPO1 数据库。(http://ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/gd_designagrid.html)。

第二层网格(layer21)范围是 E121. 2°~122. 2°,N30.75°~31.75°之间,网格数是1220×1220,采 用笛卡尔坐标系下的非线性方程,空间步长3 s,时 间步长0.5 s。计算区域陆地高程数据是由美国国 家航空航天局(NASA)和美国国家图像与测绘局 (NIMA)联合测量的 SRTM 数据,水深数据主要是 由数字化海图以及插值得到(http://srtm.csi. cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp)。 在最有可能对上海地区造成海啸灾害的潜在震 源区——绳海槽,布设五个震源点,分别命名为: dot1,dot2,dot3,dot4,do5。对每一个震源点,根据 表1Steven的地震海啸地震参数经验值,按6种震 级分别计算,共30个算例。震源深度统一设置为 10 km,走向角23°,倾角30°,滑动角90°,第二层区 域摩擦力参数曼宁粗糙系数 n 假定为 0.013。各震 源点位置如图1及表2所示。

表1 地震海啸地震参数经验值^[9]

 Table1
 Experience of earthquake and seismic

 tsunami parameters
 1

矩震级	地震矩	面积A	长度	宽度	平均错	
$/M_{ m W}$	M_0/Nm	$/km^2$	L/km	W/km	距 u/m	
6.5	6.3×1018	224	28	8	0.56	
7.0	3.5 \times 1019	708	50	14	1.00	
7.5	2.0 \times 1020	2 239	89	25	1.78	
8.0	1.1×1021	7 079	158	45	3.17	
8.5	6.3×1021	22 387	282	79	5.66	
9.0	3.5×1022	70 794	501	141	10.00	



图 1 中小平台全称活节桩小型平台,是上海地 震局在东海设立的海啸监测点,位于离开海岸线约 60 km 处。该区域海水深 20 m 左右,海底为泥质粉 砂或粉砂质砂。5 个假设震源点的经纬度如表 2 所 示。

表 2 假设震源点坐标

Table2 The coordinates of the suppose focal points

dot	经度 E/°	纬度 N/°
1	123.0	24.8
2	124.5	25.2
3	126.0	26.0
4	127.0	27.2
5	128.5	29.2

第35卷第1期

将连接假设震源点和监测点(小平台)的线段, 分别命名为路径1,路径2,路径3,路径4,路径5。

2.2 实例分析

东海大陆架宽达 600 多公里,平均水深仅几十 米。沿五种路径的传播距离、水深、以及传播速度均 有不同,海啸波到达小平台处的时间和波幅存在差 异,对上海沿岸造成的影响也不同。海啸波从震源 点传播到小平台处大约需要 5 个小时左右;小平台 到第二层网格区域的海岸线大约 60 km,速度不到 20 m/s,需要一个小时左右。小平台的布设为尽量 降低海啸灾害赢得了时间。

下面以 dot3 震源点,假设 9.0 级地震为例的模 拟结果进行阐述。dot3 距离小平台约 715 km,平均 波速 41.0 m/s,水深最大值为 47.3 m,最小为 -2 101.6 m,平均为-3 10.6 m。如图 2 所示,初 始波高最小值-0.799 m,最大值 5.313 m。小平台 处记录的波高最大 1.133 m,最小-1.354 m,相应 到达时间为 21 000 s和 25 800 s。海啸波在 4 个小 时后传播到浙江地区,最大灾害方向在浙江地区,对 浙江地区沿岸造成危害的可能性最大。





从图 2(c)中可以看出海啸波每小时的传播情况以及海啸能量的散布。图中较明亮的颜色区域呈现较为对称的弧形。从震源点往监测点方向数,可以看到有十条这样的条状区域,分别代表第 1 小时,第 2 小时,……,第 10 小时海啸波在网格区域传播位置以及造成影响。海啸波在 4 个小时后传播到福建以及浙江沿岸,能量也大部分集中于此,对这些地区影响较大。在地震发生后 6 至 7 个小时传播到上

海沿岸,突出的三角地形以及横沙,崇明岛的触角受 到的灾害较大。对于重点关心范围第二层网格区 域,需要做更细致的研究。每十分钟记录一次各个 网格点处波高,取各个网格点处最大值,可以得到第 二层网格区域的海啸波传播最大波高图(图 2(d))。 从中可以具体地看出海啸波的能量分布,对重点研 究区域易受海啸灾害地区有了更细致的了解。(注 意:图 2(d)中内陆区域存在计算错误,这可能与程 序本身有关,考虑到内陆部分不是本文章的研究重 点,故忽略影响。)

2.3 讨论结果

5个震源点的30个震例总结见表3、表4。

表3 不同路径参数取值

Table3	The	parameters	of	the	different	paths
		per mine eet o	~			

Dot	販賣/lem	亚树水溶/m	亚坎波迪/「m • n=1]
	PEPH/KIII	一千玛小休/Ш	十均 仅 迷/[III•5]
1	745	-269.5	37.7
2	740	-266.9	38.0
3	715	-310.6	41.0
4	665	-286.5	40.9
5	645	-226.0	38.1

注意海啸波传播的起始位置并非是在震源点。 以假定的 9.0 级地震为例,破裂面长度为 501 km, 宽度为 141 km,而上述的传播距离则是从震源点测 量的。实际传播距离是和断层破裂面有关的。也就 是说和海啸波的初始形态有关。即使是相同震源 点,不同震级海啸波传播的初始位置不同;而不同的 震源点,也会由于断层破裂面的位置,导致传播距离 的远近次序发生变化。因此不能仅仅根据表中标示 的距离与速度臆断海啸波到达小平台的时间。如 Dot1,8.5 级震例,首波传播到小平台大约需要 6 个小时,而 9.0 级震例,首波传播到小平台大约需要 不到 6 个小时。另外四个震源点的较大震级震例, 大多数都是首波在 5 个多小时后传播到小平台处, 在 6 个小时左右波峰到达。

dot1 处发生 8.5 级地震,对上海地区海岸沿线 北约纬 31.1 度处造成海啸波高最大约为 0.93 m, 当 1 点位置发生 9.0 级地震时,则是北纬约 31.1°至 31.17°度处的海啸波高最大约为 1.5 m。

dot2 处发生 9.0 级地震,北纬约 31.16°处的海 啸波高最大约为 1.6 m。

dot3 处发生 9.0 级地震,北纬约 31.18°处的海 啸波高最大约为 1.86m。dot4 处发生 8.5 级地震, 北纬约 31.1°处的海啸波高最大约为 1.55 m。4 点 位置发生 9.0 级地震时,海啸波高最大处与 8.5 级 地震海啸波高最大处相同,即北纬约 31.1°处,波高 约为 3.4 m。

dot5 处发生 8.0 级地震,北纬约 30.96°处的海 啸波高最大约为 0.82 m。5 点位置发生 8.5 级地震 时,依旧是即北纬约 31.1°处波高最大约为 1.97 m。 同一震源发生 9.0 级地震时,同位置处波高最大约 为 3.9 m。

表 4 30 个震例初始波高及小平台处波高最值总结

Table4 The initial height waves and the highest wave at the small platform's value summed of the thirty earthquake cases

震级 -	初始波高/m		Jat	小平台处波高值/m		
	Min	Max	· aot -	最大值	最小值	
			1	0.001	-0.006	
			2	0.001	-0.006	
6.5	-0.017	0.106	3	0.001	-0.006	
			4	0.003	-0.009	
			5	0.002	-0.009	
			1	0.006	-0.009	
			2	0.005	-0.011	
7.0	-0.051	0.292	3	0,007	-0.009	
			4	0.011	-0.018	
			5	0.015	-0.023	
			1	0.030	-0.024	
			2	0.025	-0.032	
7.5	-0.119	0.694	3	0.025	-0.037	
			4	0.038	-0.057	
			5	0.071	-0.070	
			1	0.088	-0.104	
			2	0.101	-0.107	
8.0	-0.239	1.466	3	0.096	-0.068	
			4	0.186	-0.098	
			5	0.338	-0.444	
	-0.447	2.858	1	0,427	-0.378	
			2	0.343	-0.226	
8.5			3	0.259	-0.249	
			4	0.583	-0.283	
			5	1.260	-1.529	
	-0.799	5.313	1	0.694	-1.534	
			2	0.632	-0.604	
9.0			3	1.133	-1.354	
			4	1.883	-1.963	
			5	3,416	-3.106	

3 结论

在冲绳海槽假设5个震源点,结合 Steven 地震 海啸地震参数经验值所列出的6个震级地震参数, 共计算了30个震例,对每个震例的初始波高以及传 播到监测点(小平台处)各时刻波高值都做了计算分 析,对在小平台处波高接近或超过半米的较大地震 海啸分别给出了大小区域网格点各点的最大波高, 特别是上海沿岸各处最大波高值。计算结果显示, 海洋深度变化不影响海啸初始时刻的峰值,也就是 说,改变海洋深度值,初始时刻的海啸峰值不变。

综上算例,冲绳海槽北段发生地震海啸对上海 沿岸地区影响最大,南段影响较小。30个震例中, 6.5级、7.0级以及7.5级的所有震源点的15个算 例对上海地区几乎不会造成影响。8.0级时,仅是

第35卷第1期

dot5 震例小平台处记录的波高绝对值接近半米,上 海沿岸最大波高仅有个别地方接近 0.9 m,该级震 例仍然对上海沿岸地区无大影响。8.5级时,有三 个震例小平台处记录到较大波高,即 dot1, dot 4, dot5。dot1 处震例在上海沿岸最大波高不到1 m, 影响较小; dot4 在小平台处记录波峰超过半米, 造 成上海沿岸部分区域最大波高在 1.5 m 左右; dot5 小平台处记录波峰超过1m,造成上海沿岸较大部 分区域波高最大值超过1m,个别地方接近2m。 9.0级时,5个震源点的震例都会对上海地区造成影 响:影响最大的是 dot5 处,小平台处波高超过了 3 m,造成上海沿岸较大部分区域波高最大值接近 4 m,对上海沿岸地区将可能会造成比较大的灾害; dot4 在 小平台处记录波峰接近 2 m,是 30 个震例 中的第二大灾害震例,上海沿岸最大波高部分区域 达到 3 m,个别地方接近 3.5 m;dot3 在上海沿岸最 大波高个别地方接近 2 m; dot2 为该级五个震例中 小平台记录波高幅值最小的一个,上海沿岸最大波 高大部分区域不到 1.2 m; dot1 是最特殊的震例,小 平台处记录的海啸波最大值出现时间落后于最小值 时间,最大峰值波并非首波。虽然该震例显示上海 沿岸大部分地区最大波高不到 0.7 m,但是小平台 记录的波谷振幅是波峰振幅的两倍多,当初始地震 参数改变时,有可能会对上海沿岸地区造成较大的 危害。海啸波高最大值大多均发生在 31.1°至 31. 2°之间,而其中的最大值是在 dot5 点位置发生 9.0 级地震时对北纬约 31.1°处造成约 3.9 m 的海啸波 高。

[参考文献]

- Lander J F, Lockridge P A. Untited States Tsunamis[M]. U. S. ,Department of Commerce, 1989;265.
- [2] 陈运泰,杨智娴,许力生.海啸、地震海啸与海啸地震[J].物理, 2005,34(12):-.
 CHEN Yun-tai, YANG Zhi-xian, XU Li-sheng. Tsunamis, earthquake-generated tsunamis and tsunamigenic earthquakes
 [J]. Physics,2005,34(12).
- [3] 高继宗.中国地震海啸灾害[J].防灾博览,2005,11(1);
 GAO Ji-zong. The disaster of seismic tsunami in China[J]. Overview of Disaster Prevention, 2005,11(1).
- [4] 李善邦.中国地震:中国历史海啸记载一览表[M].北京:地震 出版社,1981.

LI Shan-bang. China Earthquake: List of the historic seismic tsunami in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1981.

- [5] 温燕林.东海海域潜在地震海啸的数值模拟及分析[D].中国 地震局地球物理研究所,2008.
 WEN Yan-lin. Preliminary Numerical Simulation of Potential Earthquake-inducing Tsunami in East China Sea[D]. Institute of Geophysic, China Earthquake Administration,2008.
- [6] Liu P L F, Woo S B, Cho Y. Computer programs for tsunami propagation and inundation[M]. Cornell University, 1998.
- [7] Imamura F, Shuto N, GotoC. Numerical simulation of the transoceanic propagation of tsunami[A]//Proc. 6th Congress Asian and Paciric Regional Division, IAHR[C]. Japan, 1988: 256-272.
- [8] Cho Y S. Numerical Simulation of Tsunami Propagation and Run-up[D]. Cornell University, 1995.
- [9] Steven N Ward. Tsunamis[A]// For lication in Encyclopedia of Physical Science and Technology[G]. Academic Press.
- [10] 刘双庆,聂永安,高武平,等. Matlab 在天津市强震动台网 烈度速报中的应用[J].西北地震学报,2012,34(4):405-412. LIU Shuang-qing, NIE Yong-an, GAO Wu-ping, et al. Application of Matlab Software on Intensity Rapid Report of Tianjin Strong Motion Network[J]. Northwestern Seismological Journa,2012,34(4):405-412.