

苏禄海海啸风险的数值模拟研究

赵广生, 牛小静

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京, 100084, Email: nxj@tsinghua.edu.cn)

摘要: 苏禄海位于环太平洋地震带上, 地震与地震引发的海啸是该区域常见的自然灾害。苏禄海沟、内格罗斯海沟等被认为是潜在的海啸源。在苏禄海东侧的班乃岛、吉马拉斯岛和内格罗斯岛处拟建的跨海大桥项目, 有可能受到来自这些地震源区的海啸威胁。因此, 研究该区域的海啸风险, 对于跨海大桥的设计和建设具有重要的意义。本研究结合三维海洋动力模型 FVCOM 和经典地壳位移模型, 建立了海啸生成和传播的数值模型。对来自 GCMT 等地震目录的区域和历史地震数据进行了统计分析, 并结合前人对菲律宾周围俯冲带震源参数的研究, 构建了苏禄海潜在海啸风险的情景集, 分析了目标海域的海啸波到达时间、第一个大波波高与峰值等特征参数。结果表明, 内格罗斯海沟产生的极端海啸可能对目标区域造成较大威胁, 其首波波高可达 2 m, 而苏禄海沟的极端海啸影响较小。

关键词: 苏禄海; 地震海啸; FVCOM; 数值模型; 风险评估

1 引言

菲律宾位于欧亚板块、菲律宾板块、印度洋板块及太平洋板块的交界处, 构造运动复杂, 地震活动频繁。在菲律宾中部的班乃岛、吉马拉斯岛和内格罗斯岛处拟建一个跨海大桥项目, 该项目直接面临着来自苏禄海的海啸风险。Azis^[1]的研究表明苏禄海沟和内格罗斯海沟是苏禄海地震海啸的潜在来源, 可能对该海域周边造成较大威胁。因此, 研究该跨海大桥面临的海啸风险, 对其设计和建设具有重要的意义。

目前关于区域海啸风险的研究有很多, 例如 Mohammad 等^[2]评估了印度洋西北部的海啸风险, Xing 等^[3]模拟了澳大利亚东海岸的潜在海啸灾害, Okumura 等^[4]提出了一种海啸风险评估方法并应用于日本。但对于苏禄海海域的海啸风险分析还比较少, 该海域周边岛屿众多, 地形复杂, 只有 Mardi 等^[5]学者做了一些工作。

海啸模拟分析已经有许多成熟的软件, 例如 Tohoku 大学的 TUNAMI 模型^[6]、NOAA

基金项目: 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主科研课题 (2018-KY-01)

的 MOST 模型^[7]、Cornell 大学的 COMCOT 模型^[8]和 Kirby 人开发的 FUNWAVE 模型^[9]。本研究采用 FVCOM，该模型使用有限体积法计算，可以采用不规则三角形网格离散，能很好地适用于多岛屿的复杂地形环境。

本研究收集整理了苏禄海海域的历史地震资料，对震源参数进行了统计分析，构建了最不利条件下的海啸风险情景集。基于构建的海啸波生成演进模型，开展了多组典型情景模拟，并与已有的研究进行了对比，重点关注第一个大波的到时的和波高等特征参数，对目标区域的海啸风险进行了评估。

2 苏禄海海域的历史地震

本研究的震源数据来源于全球质心矩张量项目（GCMT）和菲律宾火山与地震学研究所（PHIVOLCS）的历史地震目录。其中，PHIVOLCS 地震目录具有较长的时间序列，但缺少部分震源参数的记录。且 PHIVOLCS 提供的数据主要集中在苏禄海东部，内格罗斯海沟附近，缺少苏禄海沟附近的记录。GCMT 目录有较详细的震源参数资料，但时间序列较短，仅有 1976 年以后的地震记录。因此，本研究结合两个地震目录，对苏禄海海域地震的各震源参数进行了统计分析。图 1 为苏禄海海域地震记录的分布示意图。统计分析的结果将作为参考用于构建海啸风险情景集。

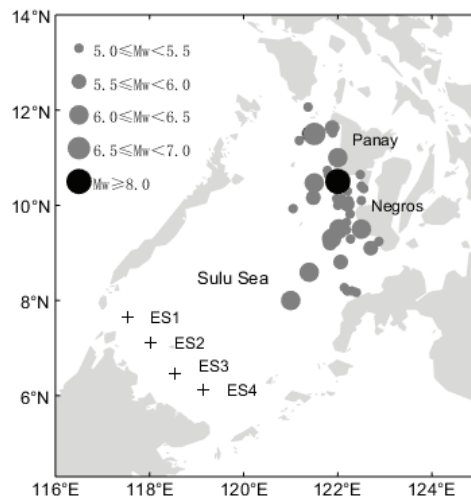


图 1 苏禄海海域历史地震分布

3 海啸生成演进模型的构建和验证

本研究采用 FVCOM 模型计算苏禄海海啸波的传播过程。FVCOM 是 Chen 等人开发的采用非结构化三角网格和有限体积法的三维海洋数值模型。FVCOM 的原始方程包括水体连续性方程和动量方程、温度、盐度、密度控制方程^[10]。

FVCOM 模拟海啸波的传播需要初始水位条件。由于较大震级的地震发生时，地壳变形速度较快。假设地震引起的海床表面抬升是瞬间完成的，水体来不及变形，海面的水位变化等于海床表面的竖向位移，此时可利用 Okada (1985) 的理论方程^[11]计算海底的变形，从而获得初始水位条件。根据 Okada 地壳位移模型，计算海床表面的竖向位移需要的参数有震源深度、地震断层的走向角、倾角和滑移角、断层滑块的长度、宽度和滑移量。震级、震源深度、断层走向角、倾角和滑移角可以通过 GCMT 的历史地震数据获得，滑块长度、宽度、滑移量可根据 Geller^[12]的计算模型，由震级估算获得。

在本研究中，以苏禄海为中心选择了 4.0° — 20.0° N, 115.0° — 125.0° E 范围内的海域作为研究区域。模拟中使用的水深数据为 NOAA 提供的 ETOPO1 地形水深数据，精度为 $1'$ ，岸线采用 GSHHG 的岸线数据，精度为 $1'$ 。

由于 FVCOM 并不是目前主流的用于模拟海啸的主要数值模型，因此本次研究参考 Mardi 等^[5]在苏禄海使用 TUNA-M2 模型进行的海啸模拟研究，使用 FVCOM 对其中的算例进行了模拟并比较两种模型的模拟结果。Mardi 等^[5]认为苏禄海沟为可能的震源，断层面沿苏禄海沟走向分为两段，断层参数如表 1 和表 2 所示。随后，用经验公式计算了苏禄海沟断层面的宽度，取平均值 79.00km 作为全断层面的宽度。

表 1 沿苏禄海沟的断层面参数 (Mardi 2017)

分段	经度 ($^{\circ}$)	纬度 ($^{\circ}$)	长度 (km)	走向角 ($^{\circ}$)	倾角 ($^{\circ}$)	滑移角 ($^{\circ}$)
S1	120.63	6.58	230	45	45	90
S2	121.72	7.95	167	30	45	90

表 2 苏禄海沟断层滑移量 (Mardi 2017)

滑移量 (m)	Mw: 7.0	Mw: 7.5	Mw: 8.0	Mw: 8.5
S1	0.065	0.366	2.058	11.575
S2	0.090	0.504	2.835	15.942

Mardi 等^[5]的研究重点关注马来西亚东海岸的海啸风险，选择的观测点位置在图 1 中用十字符号标出，关注的参数为海啸波的到时和第一个大波的波高。表 3 和表 4 为使用本模型计算结果与文献中模拟结果的对比。可以看出，两模型模拟得到的海啸波到达时间基本一致，第一个大波的波高整体偏大，除了第二个观测点差异较大外，其余观测点文献结果与计算值大体吻合。计算值的这种差异可能与苏禄海沿岸的特殊地形有关，也可能与网格

划分方式和初始水位条件有关。总体来说，本研究使用的模型具有良好的可靠性。

表 3 海啸波到时

观测点	文献模拟结果	计算结果
ES1	1.33	1.35
ES2	1.11	1.12
ES3	0.55	0.55
ES4	0.35	0.32

表 4 海啸波第一个大波波高

震级	ES1		ES2		ES3		ES4	
	文献	计算值	文献	计算值	文献	计算值	文献	计算值
7.0	0.013	0.016	0.009	0.194	0.010	0.015	0.007	0.009
7.5	0.072	0.080	0.051	0.090	0.059	0.068	0.038	0.045
8.0	0.407	0.450	0.287	0.490	0.322	0.390	0.212	0.255
8.5	2.287	2.640	1.611	2.730	1.870	2.250	1.194	1.370

4 目标区域的海啸风险分析

本研究模拟海啸需要的初始参数有震源点位置、震级 M_w 、震源深度 D 、走向角 ϕ 、倾角 δ 、滑移角 λ 。综合了对历史地震数据的统计分析和 Cruz^[13]关于菲律宾地区最大可信地震的研究，并且考虑最不利条件下的海啸风险，对每种震源参数取值。最终，将各地震参数组合形成了苏禄海海啸风险的情景集，如表 5 所示。

由于工程所在位置海底地形复杂，水深变化较大，对沿岸区域准确的模拟需要更细致的建模和更准确的水深数据。因此，本研究中没有考虑海啸波的淹没阶段，选择了工程位置附近水深较深的地方作为观测点：观测点 1 (10.60° N, 122.46° E)、观测点 2 (10.33° N, 122.70° E)。

表 5 苏禄海潜在海啸风险的情景集

	经度 (°)	纬度 (°)	震级 M_w	震源深度 D (km)	走向角 ϕ (°)	倾角 δ (°)	滑移角 λ (°)
NT1	121.82	9.87	8.2	10	20	32	100
NT2	122.16	8.69	8.1	10	310	32	90
ST1	121.72	7.95	8.0	10	30	45	129
ST2	120.63	6.58	8.3	10	45	45	90

选择每个观测点处的开始波动时刻、第一个大波的波峰到时和波峰水位、第一个大波

的波高作为评估海啸风险的参数。开始波动时刻是指水位开始超过波动过程水位最大值的 1/100，且相较于前一时刻，水位增长超过水位最大值的 1/200 的时刻。第一个大波的判定除了正向水位要超过整个波动过程水位最大绝对值的 1/2 外，还需要跨过零点，具有一定的负向水位。表 6 为每种情景下两个观测点处的海啸特征参数，图 2 为第一种情景下的海啸传播过程图，图 3 为第一种情景下观测点 1 处的水位波动过程。

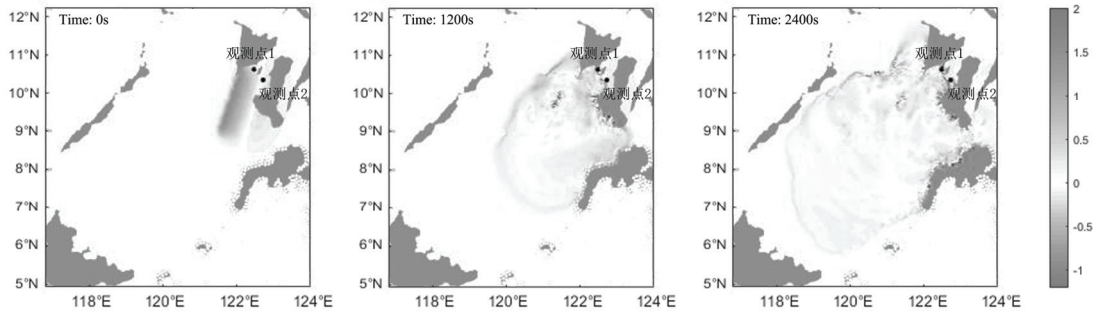


图 2 海啸传播过程

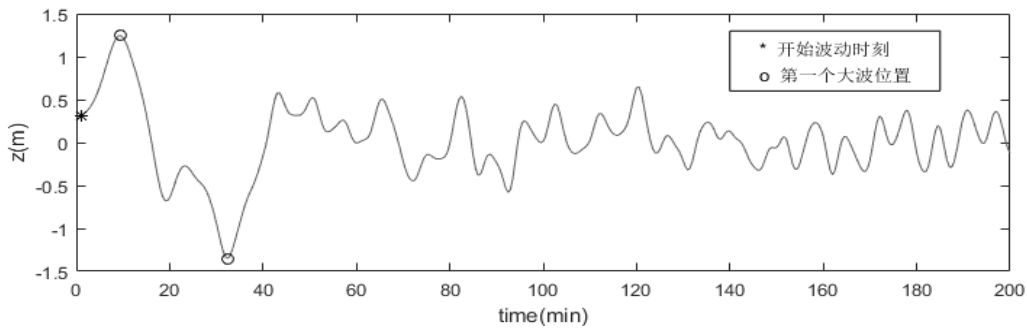


图 3 观测点 1 处水位波动过程

表 6 模拟结果：不同情境下的海啸特征参数

震源位置	NT1		NT2		ST1		ST2	
观测点	1	2	1	2	1	2	1	2
开始波动时 (min)	1.0	13.0	8.5	26.5	22.0	37.5	36.5	48.0
波峰到时 (min)	9.5	26.5	24.5	40.0	36.5	51.5	47.5	63.0
波峰水位 (m)	1.245	0.852	0.494	0.314	0.325	0.202	0.395	0.268
波高 (m)	2.594	1.420	0.831	0.465	0.466	0.246	0.474	0.416

模拟结果表明，观测点 1 处的海啸峰值和波高要大于观测点 2 处，且海啸波会更早到达观测点 1 处。这是因为观测点 2 处水深比 1 处浅，影响了海啸波的传播速度。在四种情景中，内格罗斯海沟产生的海啸比苏禄海沟产生的海啸对目标区域的威胁更大，内格罗斯

海沟的海啸会更快到达工程区域，且会产生更大的波高。最不利的情况是在内格罗斯海沟的北段产生的海啸，会在 10min 内抵达工程所在位置，且会产生超过 2m 的波高。

5 总结

本研究基于三维海洋动力模型 FVCOM，模拟苏禄海区域的地震海啸的生成和传播，通过极端情景分析评估班乃岛、吉马拉斯岛和内格罗斯岛跨海大桥所在区域的海啸风险。根据对历史地震数据的统计分析和其他学者对菲律宾地区地震特性的研究，建立了最不利条件下的潜在海啸风险情景集，并进行了模拟计算。通过对海啸波的开始波动时刻、第一个大波的峰值到时、峰值水位和波高等特征参数的分析发现，内格罗斯海沟产生的极端海啸可能对目标区域造成较大威胁，而苏禄海沟的极端海啸影响较小。苏禄海沟海啸在工程区域产生的波高小于 0.5m，且到达时间在 30min 以上。而内格罗斯海沟北段产生的极端海啸将在 10min 内到达目标区域，且波高超过 2m。此外，班乃岛和吉马拉斯岛之间伊洛伊洛海峡面临的海啸风险高于吉马拉斯岛和内格罗斯岛之间的吉马拉斯海峡。本研究只给出了目标区域深水的海啸特征参数，研究结果可作为参考用于进一步研究海啸在工程位置的沿岸爬高和淹没问题。

参 考 文 献

- 1 Azis M. Tsunami numerical simulation around Sulu Sea and Celebes Sea. *J. Bull. Int. Inst. Seismol. Earthq. Eng.*, 2012, 46: 109–114.
- 2 Mohammad H, Pirooz M D, Zaker N H, Synolakis C E. Evaluating tsunami hazard in the northwestern Indian Ocean. *J. Pure and Applied Geophysics*, 2008, 165: 2045–2058.
- 3 Xing H L, Ding R W, Yuen D A. Tsunami hazards along the eastern Australian coast from potential earthquakes: results from numerical simulations. *J. Pure and Applied Geophysics*, 2015, 172: 2087–2115.
- 4 Okumura N, Jonkman S N, Esteban M, Hofland B, Shibayama T. A method for tsunami risk assessment: a case study for Kamakura, Japan. *J. Natural Hazards*, 2017, 88(3): 1451–1472.
- 5 Mardi N H, Malek M A, Liew M S. Tsunami simulation due to seaquake at Manila Trench and Sulu Trench. *J. Nat. Hazards*, 2017, 85: 1723-1741.
- 6 Imamura F, Yalciner A C, Ozyurt G. Tsunami modelling manual (TUNAMI model). 2006.
- 7 Titov V, Gonzalez F I. Implementation and testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) Model. NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112. 1997.
- 8 Liu P L F, Woo S B, Cho Y S. Computer programs for tsunami propagation and inundation. Cornell University, 1998.

- 9 Kirby J T, Wei G, Chen Q, et al. FUNWAVE 1.0, fully nonlinear Boussinesq wave model documentation and user's manual. University of Delaware, 1998.
- 10 Chen C, Beardsley R C, Cowles G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM user manual. SMAST/UMASSD, 2013, 10–13.
- 11 Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. J. Bulletin of the seismological society of America, 1985, 75(4): 1135–1154.
- 12 Geller R J. Scaling relation for earthquake source parameters and magnitudes. J. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, 66(5): 1501–1523.
- 13 Cruz S J. Earthquake source parameters for subduction zone events causing tsunamis in and around the Philippines. J. Bull. Int. Inst. Seismol. Earthq. Eng., 2011, 45: 49–54.

Numerical simulation of tsunami risk in Sulu Sea

ZHAO Guang-sheng, NIU Xiao-jing

(State key laboratory of hydroscience and engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084.

Email: nxj@tsinghua.edu.cn)

Abstract: Sulu Sea is located on the Pacific Rim seismic belt. Earthquakes and seismic tsunamis are common natural disasters in this region. Sulu Trench and Negros Trench are considered as potential sources of seismic tsunami. The proposed sea-crossing bridges connecting Panay Island, Guimaras Island and Negros Island are likely to be threatened by tsunamis from these trenches. Therefore, a study on tsunami risk in this region is of great significance for the design and construction of the sea-crossing bridges. A numerical model of tsunami generation and propagation is established by combining the 3D hydrodynamic model FVCOM and Okada's model on surface deformation due to shear and tensile faults. A set of potential tsunami scenarios in Sulu Sea is constructed based on the statistical analysis of the regional historical seismic data from the Global Centroid Moment Tensor Project and previous studies on the focal parameters of the subduction zone around the Philippines. The arrival time of tsunami wave, the wave height and peak value of the first large wave are provided. It is found that the extreme tsunami generated from the Negros Trench pose a greater threat to the area of concern, which can cause 2m tsunami in the west mouth of Iloilo Strait, and the risk from the Sulu Trench is much lower.

Key words: Seismic tsunami; Sulu Sea; FVCOM; Numerical model; Risk assessment.