

工业建筑

ISSN 1000-8993
CN 11-2068/TU
CODEN GJIAE5



Industrial Construction

中文核心期刊 主办：中冶建筑研究总院有限公司



中冶建筑研究总院有限公司

CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF BUILDING AND CONSTRUCTION CO.,LTD.MCC GROUP

2016. 增刊

46 卷 | 增刊

目 录

1. EPR 安全壳 C 类密封性试验方案优化策略.....郭峰 戴晓凯 郑斌贤 陈超峰 张鹏 (1)
2. 美国核燃料循环设施抗震设计要求和研究方法.....赵雷 (6)
3. 燃料厂房内部水池流固耦合计算.....于晖 于跃 沈亮 (12)
4. 近地表处置设施混凝土结构耐久性设计研究.....史明霞 左凤琴 (18)
5. 屋顶加层对核电站厂房楼层反应谱的影响评估.....冯芝茂 于晖 (23)
6. 基于数字图像相关技术的钢板 - 混凝土界面监测....覃锋 凡红 严佳川 Y. L. Mo (29)
7. 某核设施结构抗震复核.....李月 尹晓展 刘敏 杨建华 (38)
8. 核岛厂房内部水池 CEL 算法优化.....沈亮 王冬梅 于晖 (42)
9. 带桩基冷却塔边界条件对环基受力性能的影响.....赵常鑫 刘焰 刘敏 杨建华 (47)
10. 核电厂构筑物的地震 PSA 分析.....王冬梅 张莉 (52)
11. 核电站燃料厂房 130t 吊车梁设计方案研究.....李杰 (56)
12. K2/K3 核电重要厂用水进水廊道 (GA 沟) 抗震安全评价.....徐浩明 隋春光 靳金平 (59)
13. 回填材料特性对地下沟道横向抗震性能的敏感性分析.....靳金平 隋春光 (63)
14. 广东大亚湾的地震海啸概率危险性评价.....
.....张鹏 任叶飞 温瑞智 潘蓉 杨智博 李小军 (68)
15. 核电厂安全壳抗震性能的有限元分析.....田智超 周耀 郭全全 (74)
16. 关于我国某核设施砂土液化判别的讨论.....胡勐乾 (76)
17. 关于核电厂抗震 I 类建构筑物基本风压荷载取值的探讨.....王璐 朱好 潘蓉 杨宇 (79)
18. 1969 年渤海地震 (Ms7.4) 引起的灾害成因初探.....路雨 (82)
19. 核电工程用水泥中美标准代换原则初探.....杨宇 潘蓉 孙锋 侯春林 朱秀云 (86)
20. 关于核电厂抗震设计规范中地震检测与报警章节的意见与建议.....李亮 (91)
21. 厂房门式刚架结构受爆炸冲击力后结构安全检测鉴定分析.....孟灵勇 王新泉 (95)
22. 浅议核电厂核岛区域雨排水设计计算方法.....纪忠华 王璐 路雨 何汉源 (98)
23. 某煤矿煤仓输煤栈桥火灾后过火区域结构安全性鉴定.....孟灵勇 王新泉 (103)
24. 基于 LabVIEW 的核电厂安全壳密封性试验检测系统的设计与实现.....贾煜 (108)

广东大亚湾的地震海啸概率危险性评价

张鹏¹, 任叶飞^{1*}, 温瑞智¹, 潘蓉², 杨智博², 李小军³

(1. 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

(2. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082)

(3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100020)

摘要: 2011年3月11日, 日本东北地区海域发生里氏9.0级地震, 地震引发巨大海啸, 波及整个沿太平洋地区, 造成巨大人员伤亡和财产损失。另外, 海啸造成福岛核电站核泄漏事故, 对整个福岛地区的生态造成了重大的破坏, 至今难以恢复。此事件引起世界各国对于地震海啸危险性的重视。我国东南沿海经济发达, 沿海重要基础设施林立, 新的核电站不断涌现。已有研究表明, 南海具有引发海啸的地震构造背景, 菲律宾马尼拉海沟也能产生巨大海啸影响我国沿海地区。因此, 对东南沿海开展海啸危险性评价工作至关重要。本文提出并总结一套适用于我国的地震海啸概率危险性评价方法和流程, 以广东大亚湾为例, 介绍方法的适用性。

关键词: 大亚湾; 地震海啸概率危险性评价; 区划图; 蒙特卡洛; 潜在海啸源

1 引言

我国古代文献中对于海水的异常涨落记载通常采用“海溢”、“潮涌”等词汇表述, 界定比较模糊, 因此从中甄别出的海啸事件并不多 (Chau, 2008; Lau et al., 2010; Mak and Chan, 2007; Ren et al., 2014)。加之近现代我国沿海也没有遭受过破坏性海啸事件, 公众对于海啸危险性缺乏足够的重视。日本311地震引发的海啸对沿海基础设施造成了巨大破坏, 并造成福岛核电站泄漏事故。这一灾难警示我们, 对于位于沿海地区的核电站, 海啸带来的威胁不能忽视, 在其设计及运营阶段, 都需要重点考虑其所面临的海啸威胁。对于我国而言, 大部分核电站建设在沿海地区, 分析研究所在地区的海啸危险性十分有意义。

已有研究表明, 我国南海近海海域具有发生破坏性海啸的地震地质构造条件 (杨马陵和魏柏林, 2005; 张虎男, 1995), 菲律宾马尼拉海沟也能产生巨大海啸影响我国。广东大亚湾直面南海, 其海啸危险性不容忽视。本文首先提出并总结一套适用于我国的地震海啸概率危险性评价方法和流程, 其次分析对大亚湾地区产生影响的潜在海啸源, 计算其沿岸的波高年发生率以及百年超越概率和重现期。研究思路可为我国沿岸其他地区的海啸危险性

评价提供一个范例。

2 PTHA 方法

概率海啸危险性分析方法 (PTHA) 源于 1968 年 Cornell 提出的地震危险性分析方法 (PSHA) (Cornell, 1968), 结合我国新一代地震动参数区划图使用的 PSHA 方法, 我们设计了适合我国使用的 PTHA 过程如下:

根据 Cornell (1968) 提出的 PSHA 方法, 一定区域内, 发生任何一次地震的震级 M 的累积分布函数、概率密度函数分别为:

$$F(M) = \frac{1 - \exp[-\beta(M - M_{\min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]}, \quad M_{\min} < M < M_{\max} \quad (1)$$

$$f(M) = \frac{\beta \exp[-\beta(M - M_{\min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]}, \quad M_{\min} < M < M_{\max} \quad (2)$$

其中, M_{\max} 和 M_{\min} 分别为该区域内发生地震的震级上下限, $\beta = b \times \ln 10$, b 为统计常数, 是该区域内统计的 Gutenberg-Richter (G-R) 关系式中的斜率值。

我们假设第 i 个潜在海啸源随机发生 N_i 次地震, 其空间位置和震级分布都采样 Monte Carlo 技术进行随机采样, 震级分布满足式(2)的概率密度函数, 这里 M_{\max}^i 取各潜在海啸源的震级上限 M_{ui} , 考虑发生 7.0 级以下地震时, 海啸波较小, 产生较小影响, M_{\min}^i 取 7.0。

*基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2014B06); 环保部公益性行业科研专项(201209040); 国家自然科学基金(51278473)

通讯作者简介: 任叶飞(1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事强震地震学及海啸防灾减灾研究. E-mail: renyefei@iem.net.cn

对这 N_i 次地震形成的海啸进行数值模拟, 对于目标场地可获得 N_i 个海啸波高最大值。对于局地海啸源, 数值模拟输入的断层的长度 L 、宽度 W 根据 Wells and Coppersmith (1994) 的经验公式确定。由于其关于震级 M 与平均滑移量 D (average displacement) 的经验相关性系数只有 0.1, 因此对于平均滑移量的估计, 采用下式确定 (Aki, 1966):

$$M_0 = \mu LWD \quad (3)$$

其中 μ 为地壳介质剪切刚度, 取 35Gpa; L 、 W 、 D 分别为断层破裂长度、宽度和平均滑移量。对于区域海啸源, 如马尼拉海沟, 发生俯冲型地震, 这些参数可根据 Papazachos et al. (2004) 给出的经验公式确定。

经统计, 海啸波高满足对数正态分布 (Chio et al., 2002; 2012), 其概率密度函数表示如下:

$$f_i(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h\sigma} \exp\left(-\frac{[\ln(h) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中, h 表示海啸波高, μ 和 σ 分别为 $\ln(h)$ 的均值和标准差, 可根据这 N_i 个海啸波高值统计得到。这样, 海啸波高超越 H 的概率为:

$$F_i(h \geq H) = \int_H^{\infty} f_i(h) dh = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_H^{\infty} \exp\left(-\frac{[\ln(h) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right) \frac{dh}{h} \quad (5)$$

如果我们知道该潜源内震级在 M_{\min}^i 和 M_{\max}^i 之间的地震年发生率 $v_i(M_{\min}^i \leq M \leq M_{\max}^i)$, 即可求得目标场地由第 i 个潜在海啸源引起海啸波高超越 H 的年发生率:

$$v_i(h \geq H) = F_i(h \geq H) \cdot v_i(M_{\min}^i \leq M \leq M_{\max}^i) \quad (6)$$

关于 $v_i(M_{\min}^i \leq M \leq M_{\max}^i)$ 的值如何求解后文将详细叙述。

如果目标场地受 N_T 个潜在海啸源形成的海啸波影响, 则该场地海啸波高超越 H 的总年发生率为:

$$v(h \geq H) = 1 - \prod_{i=1}^{N_T} [1 - v_i(h \geq H)] \quad (7)$$

重现期为:

$$R(h \geq H) = \frac{1}{v(h \geq H)} \quad (8)$$

由于地震在时间序列上服从泊松分布, 那么在时间 T 年内目标场地至少发生一次海啸波高超越 H 的概率为

$$P(h \geq H, t = T) = 1 - \exp(-v(h \geq H) \cdot T) \quad (9)$$

3 潜在海啸源分析

2015 年 5 月, 国家地震局发布了《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015), 这已是我国的第五代地震区划图。新一代区划图根据近几年地震资料的更新, 在我国及邻区划分了 1206 个潜在震源区。相比第四代区划图, 新一代区划图中位于我国东部潜源数量明显增加。根据其震级上限、地质构造背景以及历史地震活动性, 从渤海、黄海、东海至南海划分了 15 个局地潜在海啸源 (陈国星和周本刚, 2011; Ren et al., 2014), 其中 8 个分布于南海区域, 见图 1。根据大亚湾所处位置判断, 对其能够形成影响的局地潜在海啸源有 3 个, 分别为图 1 中 13、14、15 号, 震源相关参数见表 1。

同时还需要考虑区域潜在海啸源的影响——马尼拉海沟, 相关震源参数 Ren et al. (2014) 已给出。对于越远海啸源, 由于外太平洋一系列的岛弧和东南亚岛屿的屏蔽效应, 加之我国开阔平坦大陆架的摩擦作用, 来自太平洋和印度洋的越洋海啸的影响很小。历史上, 1960 年智利海啸和 2004 年印度洋海啸虽然规模巨大, 但都没有在我国沿岸产生有效影响, 因此, 本文不考虑越洋海啸的作用。

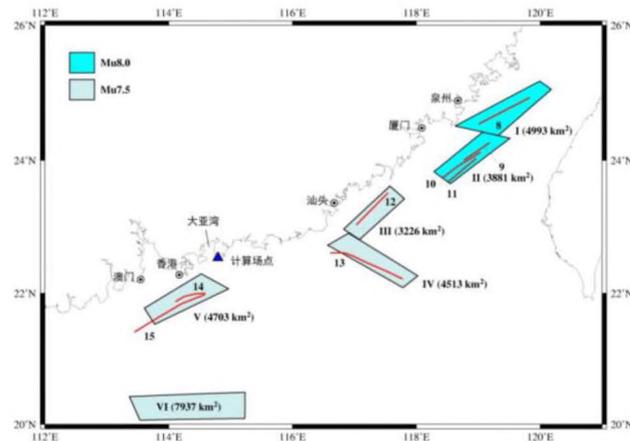


图 1 东南沿海局地潜在海啸源分布

新颁布的区划图给出了各潜在震源区的震级上限, 潜在海啸源的 M_{ui} 可取对应的潜在震源区的震级上限值, 结果见表 1。由于潜在震源区的面积较小, 区域内历史地震数据较少不足以进行地震活动性分析, 因而区划图划分了全国 29 个地震带, 并给出了各自的 b_{belt} 值和 $v_{\text{belt}}(M \geq 4.0)$ (地震带内发

生 4.0 级以上地震的年发生率)。这里 8 个潜在海啸源都位于东南沿海地震带内, $b_{belt}=0.87$, $v_{belt}(M \geq 4.0)=5.6$ (高孟潭, 2015)。

各潜在海啸源的 b_i 值可采用其所属地震带的 b_{belt} 值 (本文情况也就是 0.87)。潜在海啸源的地震年发生率可取对应的潜在震源区的地震年发生率。第 i 个潜在震源区不同震级档的地震年发生率可由下式计算得到:

$$v_i(M_j) = v_{belt}(M_j) \cdot \gamma_i(M_j) \quad (10)$$

式中, M_j 表示第 j 个震级档, 并且 $M_0 + (j-1) \cdot \Delta M \leq M_j \leq M_0 + j \cdot \Delta M$, $M_0=4.0$ 是地震带 (或潜在震源区) 的震级下限, j 为大于等于 1 的整数 (这里用罗马数字表示), 且 $j \leq (M_{ui} - M_0) / \Delta M$, ΔM 为分档间隔, 小震取 0.5、中强震取 0.3 或 0.2; $\gamma_i(M_j)$ 表示第 i 个潜在震源区关于第 j 个震级档的地震年发生率占整个地震带的权重 (称之为空间分布函数), 因此其满足以下等式:

$$\sum_{i=1}^{N_{Sj}} \gamma_i(M_j) = 1 \quad (11)$$

式中 N_{Sj} 表示地震带内能够发生震级 M_j 的潜在震源区的数量。 $\gamma_i(M_j)$ 通过 8 个因子共同作用求得, 过程较为复杂, 有主观因子, 也有客观因子。其中潜在震源区的面积是较为重要的一个因子, 这里将用来求解 $\gamma_i(M_j)$:

$$\gamma_i(M_j) = \frac{A_i(M_j)}{\sum_{i=1}^{N_{Sj}} A_i(M_j)} \quad (12)$$

其中, $A_i(M_j)$ 表示第 i 个能够发生震级 M_j 的潜在震源区的面积, 图 1 中已分别给出。我们取 $\Delta M=0.5$, 因为潜在震源区的震级上限 M_{ui} 以 0.5 分档区分 (见图 1)。由于 $M_{min}^i=7.0$; $M_{max}^i = M_{ui}=7.5$ (见表 1), 这里震级档仅有一档, 通过式(12)求得各潜源空间分布函数, 并通过式(10)求得 13、14、15 号潜在海啸源在震级 $M_{min}^i \sim M_{max}^i$ 的地震年发生率 $v_i(7.0 \leq M \leq 7.5)$ 的值, 结果见表 1。

表 1 局地潜在海啸源的震源及地震活动性参数

编号	走向角(°)	长度(km)	宽度(km)	平均深度(km)	倾角(°)	b_i	M_{ui}	$v_i(7.0 \leq M \leq 7.5) \times 10^{-3}$
13	118	130	50	20	60	0.87	7.5	1.342
14	74	52	50	20	60	0.87	7.5	1.399
15	63	135	50	20	60	0.87	7.5	1.399

对于区域海啸源马尼拉断裂带的相关震源参数本文取 Ren et al. (2014) 给出的结果。考虑危险性评估的安全裕度, 对震级上限 M_{max} 作较高估计, 取 9.0; M_{min} 取值与局地海啸源相同, 取为 7.0。对于其地震活动性参数, Yuan et al. (2015) 整理了 1973-2015 年 $M \geq 5$ 的历史地震目录, 进行了地震发生频度—震级相关性统计, 结果显示 G-R 关系中的 b 值为 1.24, $M \geq 5$ 地震年发生率为 2.8。根据式(1), 我们可求出 $P(7.0 \leq M \leq 9.0 | M \geq 5.0)$, 再利用贝叶斯公式, 即可得 $7.0 \leq M \leq 9.0$ 地震年发生率为 0.0382。

4 PTHA 示例计算

以广东大亚湾作为示例, 分析其海啸危险性。计算场点如图 1 所示, 这里仅取湾口作为目标场点,

水深为 10 米。湾内由于波浪受折射、反射作用, 传播过程较为复杂, 数值模拟需要高精度的海洋测深数据。由于这方面数据获取较为困难, 因而这里仅对湾口进行分析研究。下文对海啸传播进行数值模拟时, 采用 0.5' 的大网格数据。

分别对计算场点 3 个局地潜在海啸源按照各自的震级概率密度函数, 也就是式(2)随机产生 50 次地震, 震中位置在整个断层上随机分布。随机过程采用 Monte Carlo 技术。对于马尼拉区域海啸源, 随机产生 600 次地震。图 2 为 15 号潜源随机产生的 50 次地震的震中位置、震级累积分布函数。图中震中位置分布较为均匀, 震级分布与式(1)计算的理论结果较符合, 说明采样过程科学合理。

针对各局地潜在海啸源, 将随机产生的 50 个

地震进行海啸生成和传播数值模拟，这里采用 COMCOT 开源程序。对马尼拉区域海啸源，模拟 600 个随机产生的海啸。根据式(4)将模拟得到的计算场地的最大海啸波高值进行回归分析，得到波高概率密度函数，见图 3。图中给出了拟合得到的 μ 和 σ 值，得到的概率密度曲线与通过 μ 和 σ 计算的离散值较吻合，一定程度上验证了海啸波高值是符合对数正态分布的。

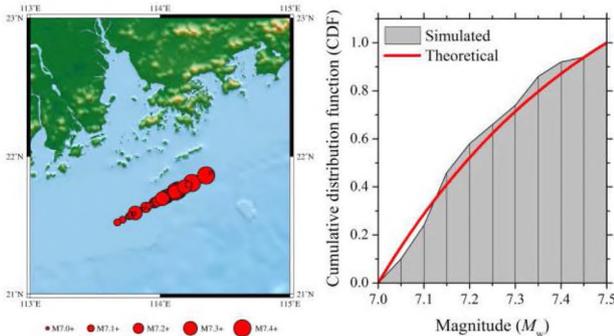


图 2 对 15 号局地潜在海啸源随机采样 50 次地震的震中分布及震级累积概率分布

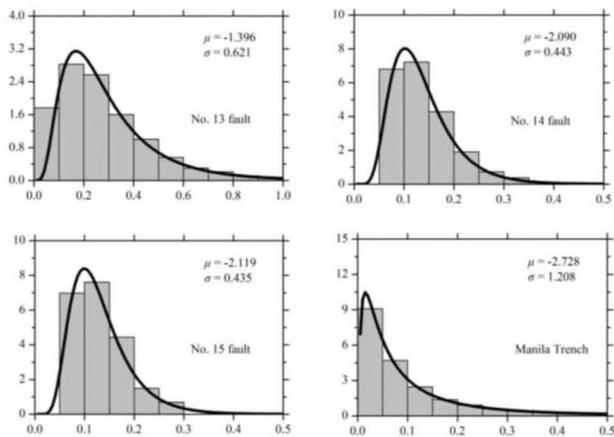


图 3 各个潜源产生的海啸在计算场点引起最大波高的概率密度拟合

从图 3 对比各个潜源引发的海啸在计算场点的最大波高，可以发现 13 号潜源的产生的波高值相对较大，主要分布于 0.1-0.4m 之间，高于 14 号和 15 号潜源的计算结果，其主要分布于 0.05-0.2m 之间。14、15 号潜源的结果相近，主要是因为两者地理位置相近（图 1）并且地震震源参数和地震活动性参数又一致。从图 1 可见，14、15 号潜源断层走向平行于海岸线，断层位置又离海岸较近，海啸波能量主要集中于面向断层的沿岸区域，在计算场点形成的是反射波，波高值较小；而 13 号潜源断层走

向斜交于海岸线，利于其海啸波能量大范围扩散，在计算场点形成的是直达波，波高值相对较高。相比于三个局地潜源，区域潜源（马尼拉断裂带）引发的海啸波高更小，主要分布于 0.0-0.1m 之间。虽然其震级上限远高于局地潜源，但根据震级采样结果判断，大部分地震震级分布于 7.0-7.5 之间，这是局地潜源的震级采样区间。考虑到马尼拉海沟距离大亚湾较远，产生的海啸波能量在传播过程中扩散衰减，因而抵达计算场点时波高相对较小。

接下来根据式(5)可求得各潜源在计算场点引起海啸波高的累积分布函数，通过式(6)即可求得各个潜源在计算场点引起的海啸波高的年发生率和综合所有潜源得出的总年发生率，如图 4 所示。

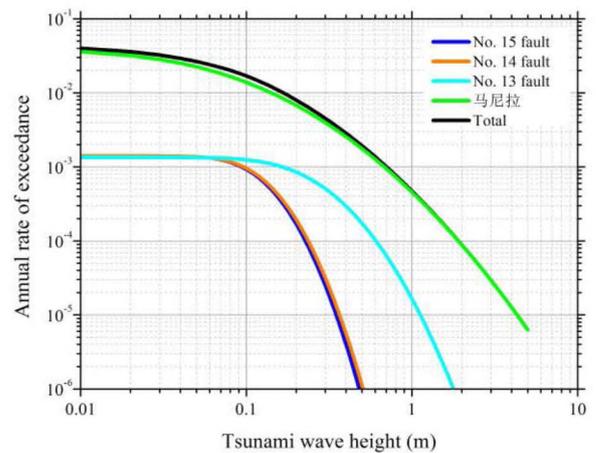


图 4 计算场点不同海啸波高的年发生率

可以看出计算场点的海啸危险性主要受马尼拉潜源的影响，由其产生的地震海啸在计算场点的波高的年发生率要远高于三个局地潜源的结果。尽管前文得到马尼拉潜源在计算场点引起的海啸波高整体上要小于三个局地潜源的结果，但由于其地震年发生率要远高于三个局地潜源，计算得到相对高的海啸波高年发生率。另外，从图 4 还可见，13 号潜源引发的海啸年发生率远大于 14 号和 15 号潜源，这与图 3 的海啸波高概率密度拟合结果相吻合。

最后利用式(8)和式(9)计算得到了不同波高的重现期和 100 年内至少发生一次事件的超越概率，如图 5 所示。可见，该计算场点百年内遭遇波高大于 2m 的概率为 1%，重现期为 10000 年；大于 1m 的概率为 4%，重现期为 2000 年；波高大于 0.5m 的

概率为 20%，重现期为 500 年。如果考虑到海啸波高在近岸的爬高作用以及海湾内波浪的汇聚效应，湾内波高值将是计算场点所在湾口的数倍，其不同波高的超越概率还将大大提高，同时重现期将大大缩短。如果以 Iida et al. (1976) 定义的海啸等级表中能产生破坏的最低级别(波高 1.0m)作为考虑依据，我们建议应该对大亚湾地区采取一定的防灾减灾措施，建立海啸应急预案，防患于未然。

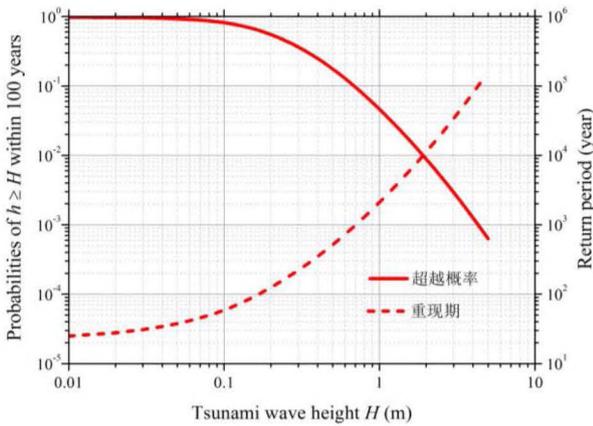


图 5 计算场点不同海啸波高的重现期及 100 年内至少发生一次事件的超越概率

5 结论

考虑中国东南沿海地区存在海啸袭击的潜在风险，本文提出并总结一套适用于我国的地震海啸概率危险性评价方法和流程，以广东大亚湾地区为示例，说明方法的适用性并讨论该地区的海啸危险性程度，具体结论如下：

(1) 通过潜在海啸源分析，发现对大亚湾地区产生的影响的局地潜源有 3 个，区域潜源有 1 个，即马尼拉断裂带。对不同潜源位置上随机生成的设定地震海啸进行传播数值模拟，拟合计算场点海啸波高的概率密度函数。结果发现马尼拉潜源引起的海啸在计算场地的波高值整体上小于 3 个近海局地潜源引起的波高值。主要原因是相比于局地潜源，马尼拉海沟距离大亚湾较远，产生的海啸波能量在传播过程中扩散衰减，抵达计算场点时波高变得较小。

(2) 得到了大亚湾湾口不同海啸波高的年发生率，显示马尼拉区域海啸源对其贡献远大于局地海啸源，尽管前文所述其在计算场点引起的海啸波

高整体上是小于近海局地潜源的，究其原因是马尼拉海沟较近海局地潜源具有更高的地震年发生率。

(3) 最终给出了大亚湾湾口不同海啸波高值的重现期，以及未来 100 年内针对不同波高值至少发生一次事件的超越概率。显示大亚湾湾口百年内发生波高大于 0.5m 的海啸事件的概率为 20%，波高大于 0.5m 的重现期为 500 年。如果在湾内进一步考虑波浪汇聚效应和爬高作用，其海啸危险性将大幅提升。

本文的研究结果显示，我国东南沿海地区的海啸危险性不容忽视，未来应加强该地区的海啸防灾减灾措施，做好合理规划，有效减轻海啸危害。本文提出的思路和方法可被借鉴用于我国沿海其他地区的地震海啸概率危险性评价工作中，以及未来沿海地区海啸区划图的编制工作中。

参考文献

- [1] Aki, K.. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 14, 1964. Part 2, Estimation of earthquake moment, released energy and stress-strain drop from G wave spectrum [J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 1966, 44: 73-88.
- [2] Chau, K.T., Tsunami hazard along coasts of China: a re-examination of historical data. The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [3] Cornell C A.. Engineering seismic risk analysis [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583-1606.
- [4] Choi B H, Pelinovsky E, Ryabov I, et al.. Distribution functions of tsunami wave heights [J]. Natural Hazards, 2002, 25(1): 1-21.
- [5] Choi BH, Min BI, Pelinovsky E, Tsuji Y, Kim KO.. Comparable analysis of the distribution functions of runup heights of the 1896, 1933 and 2011 Japanese Tsunamis in the Sanriku area [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2012, 12(5): 1463-1467.
- [6] Iida K, Cox D and Pararas-Carayannis G. Preliminary catalog of tsunamis occurring in the Pacific Ocean. Data Report No.5, Hawaii Institute of Geophysics, 1972, HIG-67-10. Honolulu: University of Hawaii, re-issued 1972.
- [7] Lau, A.Y.A., Switzer, A.D., Dominey-Howes, D., Aitchison I, J.C., and Zong, Y. . Written records of historical tsunamis in the northeastern South China Sea - challenges associated with developing a new integrated database [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2010, 10(9): 1793-1806.
- [8] Mak, S., and Chan, L.S.. Historical tsunamis in South China [J]. Nature Hazards, 2007, 43(1): 147-164.
- [9] Papazachos B C, Scordilis E M, Panagiotopoulos D G, et al. Global Relations between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquakes [J]. Bulletin of the Geological Society of Greece, 2004, 36: 1482-1489.
- [10] Ren Yefei, Wen Ruizhi and Song Yuying. Recent progress of tsunami hazard mitigation in China [J]. Episodes, 2014, 37(4): 277-283.
- [11] Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [J]. Bulletin of the

- Seismological Society of America, 1994, 84(4): 974-1002.
- [12] Y. Yuan, Hongwei Li, Zongchen Wang, Zhiguo Xu. Probabilistic Tsunami Hazard Assessment in the South China Sea Region and Its Uncertainty on Magnitude Upper-limit. Presentation in the Scientific meeting of experts for coordinated scenario analysis of future tsunami events and hazard mitigation schemes for the South China, Xiamen, 2015, China.
- [13] 陈国星, 周本刚等. 中国及邻区地震区带和潜在震源区划分[R]. 中国地震动参数区划图技术报告. 2011.
- [14] 高孟潭. 《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [15] 杨马陵, 魏柏林. 南海海域地震海啸潜在危险的探析[J]. 灾害学, 2005, 20(3): 41-47.
- [16] 张虎男. 南海及其周缘的地震活动与区域稳定性评价[J]. 海洋学报, 1995, 17(6): 81-89.