

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.019

我国滨海核电厂海啸防护探讨

李顺财¹, 李江峰², 刘鑫², 张洪波²

(1. 中广核陆丰核电有限公司, 陆丰 516600; 2. 深圳中广核工程设计有限公司, 深圳 518124)

摘要: [目的]我国在建及在运核电厂多为滨海厂址, 根据以往观测数据及分析, 防洪设计多以风暴潮作为控制性条件, 海啸相关研究成果较少, 构筑物对海啸的防护方法方面缺少工程经验。福岛核事故后, 海啸对核电厂安全的影响受到了核安全监管、核电从业者及公众的广泛关注, 国内也开展了对在运核电厂海啸防护水平的复核。[方法]结合海啸的特点, 针对我国滨海核电厂并以某一核电厂为例, 通过海啸波物理模型试验研究工作, 以此开展对核电厂海啸防护的复核工作。[结果]模型试验研究表明, 在海啸波作用下, 我国已建滨海核电厂厂坪标高的设置对于近地海啸防护裕度较为充裕。[结论]结合现有海域防洪措施, 针对后续新建的滨海核电厂设计中需结合厂址条件进一步考虑对于马尼拉、琉球海沟可能产生地震海啸的防护, 以增大安全裕度。

关键词: 核电厂; 海啸; 防护; 厂坪标高

中图分类号: TL4; TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)04-0118-05

Discussion on Tsunami Protection of Coastal Nuclear Power Plant in China

LI Shuncai¹, LI Jiangfeng², LIU Xin², ZHANG Hongbo²

(1. CGN Lufeng Nuclear Power Co., Ltd., Lufeng 516600, China;

2. China Nuclear Power Design Co., Ltd(Shenzhen), Shenzhen 518172, China)

Abstract: [Introduction] Most of the nuclear power plants under construction and operation in China are coastal sites. According to the previous observation data and analysis, storm surge is the dominant condition in flood control design. There are few research results on tsunami, and there is a lack of engineering experience in the protection methods of structures against tsunami. After the Fukushima nuclear accident, the impact of the tsunami on the safety of nuclear power plants has been widely concerned by nuclear safety supervision, nuclear power practitioners and the public. In China, the tsunami protection level of nuclear power plants in operation has also been reviewed. [Method] Based on the characteristics of tsunami and taking a nuclear power plant in coastal China as an example, this paper carried out the tsunami protection review of nuclear power plant through the physical model test research of tsunami wave. [Result] The model test results show that under the action of tsunami wave, the level elevation of coastal nuclear power plants built in China is adequate for offshore tsunami protection. [Conclusion] Combining with the existing flood control measures in the sea area, further consideration should be given to the protection against possible earthquake and tsunami in Manila and Ryukyu trenches in order to increase the safety margin in the design of the subsequent newly built coastal nuclear power plant in the light of site conditions.

Key words: nuclear power plant; tsunami; protect; factory level elevation

2011年3月11日, 日本福岛第一核电站以东140 km 海域发生9.0级大地震, 并由此引发了海啸, 导致该核电站放射性物质泄漏事故, 造成了大

量放射性物质向环境释放, 对公众安全产生极大的危害, 并引发了巨大的环境与生态灾难。福岛核事故对全球核电业界产生了强烈影响, 并引发了核电业者与公众对滨海核电厂海啸防护及海啸对核安全的普遍关注。我国滨海核电厂的海啸防护及海啸对核安全的影响, 也受到了核电从业者及公众的广泛关注。

收稿日期: 2019-01-29 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 中广核集团2014年尖峰项目“抗震裕度评价及海啸防护研究”(CGNPC-T-2011-YY)

但是在我国,因第一岛链和第二岛链的地理位置影响,滨海核电厂防洪设计时主要考虑的是风暴潮防护,海啸对构筑物破坏和防护方面工程经验较少^[1]。本文结合海啸的特点,通过物理模型试验等方式对海啸对核电厂的破坏形式开展了研究,并针对当前我国滨海核电厂应对海啸的主要措施进行了分析评价,最后给出了滨海核电厂应对海啸的几点建议。

1 海啸的破坏作用

1.1 海啸波特点

海啸是一种具有强破坏力的海浪,在许多西方语言中称为“tsunami”,在1963年的国际科学会议上正式列入国际术语。目前人类对地震、火山、海啸等突如其来的灾变,只能通过观察、预测来预防或减少它们所造成的损失,但无法阻止它们的发生。

理论上讲,我国的《海港工程设计手册》和美国《海岸工程手册》以及欧洲的《岩石手册·水力工程用》等资料中,均将海啸定义为一种长周期波浪,但其在产生、传播和与构筑物作用及破坏方面有很大不同。

海啸在短时间内形成的是一种高出静水面的水体,高度一般用波幅表示。由于海啸波周期非常长,所以其形成的增、减水更类似于海洋潮汐,其产生的最高波幅和其退潮减水之间差值对核电厂防洪设计参考作用很小。所以在本文中海啸与波浪对比时,使用的是海啸波幅与波浪的波高(波峰到波谷之间的垂直距离)进行对比,这样更符合国际和国内构筑物设计时的习惯。海啸与常规波浪参数如图1所示^[2]。

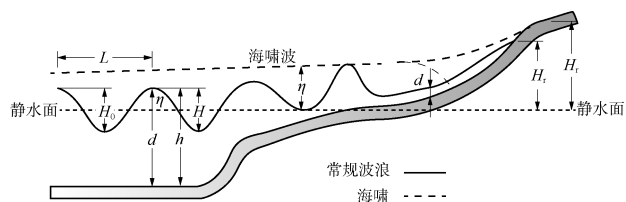


图1 海啸与常规波浪参数

Fig. 1 Tsunami and normal wave parameters

相同波高情况下海啸比常规波浪冲击力更大,且海啸波作用的持续性强,海工构筑物(尤其是挡浪墙)在海啸作用下更容易发生倾覆、滑移等形式

的破坏。而常规波浪周期较短,波峰时间较小,实际波压力一般要小于理论计算值。

海啸与常规波浪差别如图2所示。

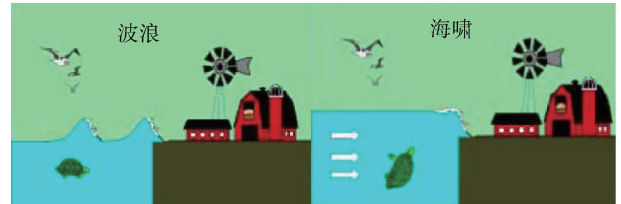


图2 海啸与常规波浪差别示意图

Fig. 2 Illustration of difference between tsunami and normal wave

1.2 海啸对构筑物的破坏

核电厂防波堤和护岸的破坏类型非常多,但一般在单个风暴潮或海啸周期内产生冲击而导致的破坏,且易发生后方水淹的情况通常有以下几种:

1)波浪或海啸沿构筑物爬高或直接越过顶部,对后方道路、地基以及建筑物冲击,导致后方建、构筑物和道路等损坏。

2)波浪或海啸冲击,导致构筑物护面块体失稳滚落、堤体冲毁和结构破损。

3)波浪或海啸作用于挡浪墙或直立堤,导致的倾覆或滑移,而如果挡浪墙倾覆失效,可能会伴随大量的越浪水体越过构筑物,导致后方的厂区发生水淹。

2 针对滨海核电厂的海啸物理模型试验研究

在日本福岛事故后,为快速复核在建、在役核电厂海工构筑物在海啸灾害下的安全性问题,广核集团组织开展了系列海啸物理模型试验工作。本文以广东某滨海核电厂为例,对复核过程和结果加以介绍。

本案例海啸波幅使用马尼拉海沟的一个海啸源,将假想发生地震海啸情况下传播至厂址附近的可能最大波幅2.12 m作为输入,进行断面物理模型试验,对该核电厂海啸灾害下防波堤安全性进行验证。

2.1 试验设备

模型试验在无反射造波机试验断面水槽中进行,水槽的长、宽、高分别为68.0 m、1.0 m、1.6 m。造波机系统由造波板、伺服电机、造波机控制器、计算机控制系统和数据采集、分析系统组成。该系

统可以在 0.5 ~ 4.5 s 的周期范围内模拟不同谱型的不规则波和特定形式的非线性波, 本试验是在水槽中生成孤立波以模拟海啸, 试验设备如图 3 所示。



图3 无反射不规则波造波机试验水槽

Fig. 3 Non-reflection irregular wave examination basin

该设备模拟海啸波的波形方程如下:

$$\xi(X) = a \operatorname{sech}^2 ax - \frac{3}{4} \frac{a^2}{h} \operatorname{sech}^2 ax (1 - \operatorname{sech}^2 ax) \quad (1)$$

$$ax = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{a}{h}} \left(1 - \frac{5}{8} \frac{a}{h}\right) \frac{X}{h} \quad (2)$$

$$X = CT \quad (3)$$

式中: h 为水深; a 为波高; X 为传播距离; T 为周期; C 为波速。

2.2 试验工况

试验先采用了厂址的最高天文潮、设计高水位和极端高水位与海啸源传播至厂址附近 2.12 m 的波幅进行了组合。但由于波幅较小, 冲击作用不明显, 爬高也仅至 8.5 m 处, 为更好的观察海啸波与构筑物作用现象和研究防波堤抵抗海啸能力, 所以又假想了 2 个更大的海啸波幅与极端高水位进行组合, 整个试验共 5 个工况^[1], 组合方式如表 1 所示。

表1 试验水位与波高组合工况

Tab. 1 Tested water level and wave amplitude combinations

工况	组合水位/m	海啸波幅/m
1	最高天文潮 1.71	可能最大海啸波幅 2.12
2	设计高水位 3.40	可能最大海啸波幅 2.12
3	极端高水位 4.34	可能最大海啸波幅 2.12
4	极端高水位 4.34	1.5 倍可能最大海啸波幅 3.18
5	极端高水位 4.34	2 倍可能最大海啸波幅 4.24

2.3 模型设计与制作

1) 模型设计

模型按重力相似律及《波浪模型试验规程》的有关规定进行模拟。综合考虑水深、波浪要素, 根据试验水槽的尺度和造波机性能指标, 本次模型试验

中防波堤断面选用的几何比尺为 1:36, 其它物理量相应的模型比尺为^[2]:

重量比尺 $\lambda_w = \lambda^3$; 时间比尺 $\lambda_t = \lambda^{0.5}$; 总力比尺 $\lambda_w = \lambda^3$ 。

压强比尺 $\lambda_w = \lambda$; 流速比尺 $\lambda_t = \lambda^{0.5}$; 越浪量比尺 $\lambda_q = \lambda^{1.5}$ 。

2) 模型制作

模型中的护面块体采用水泥、砂子、铁粉浇制而成, 防浪胸墙采用水泥和砂石浇注预制。根据《波浪模型试验规程》的要求, 护面块体、防浪胸墙的模型几何尺寸允许偏差控制在 ± 1.0 mm 以内, 重量允许偏差小于 $\pm 3\%$ 。

试验所采用的护底块石和垫层块石均经过人工挑选, 其重量允许偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内。为了便于观测, 试验断面所使用各种块石均涂以不同的颜色。物理模型如图 4 所示。

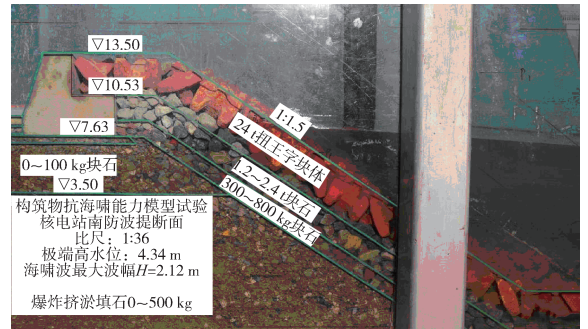


图4 防波堤物理模型

Fig. 4 Flood bank examination model

2.4 试验方法

1) 通过现场目测和钢尺量测的方法观测结构物稳定情况, 包括堤身整体稳定性和挡浪墙与护面块体局部稳定性等。

2) 通过现场目测和钢尺量测的方法观测波爬高和堤顶越浪水舌厚度。

3) 采用压力传感器测量结构物表面波压力, 试验时静水面位置进行传感器定零, 因此所测量的数据均为海啸波通过压力传感器所产生的波压变化, 即包含了波形通过所改变的静水压及流体所施加的动压力, 测点位置如图 5 所示。

2.5 试验结果

1) 断面稳定性

在各水位与海啸波幅组合情况下均未发生整体垮塌和局部护面块滚落、挡浪墙滑移等现象, 防波

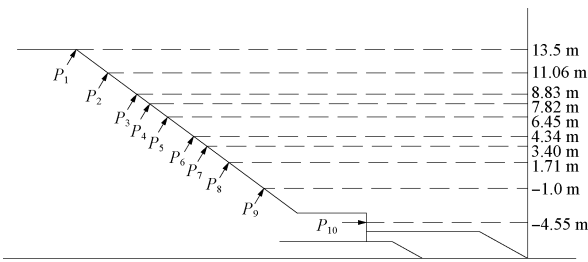


图 5 压力传感器布置图

Fig. 5 Configuration of pressure sensors

堤断面整体和局部都保持稳定。

2) 波爬高

2. 12 m 海啸波组合最高天文潮水位 1.71 m 水位下, 波浪爬坡至 6.45 m 高程处, 上朔水体随后回落; 组合设计高水位 3.40 m 水位下, 波浪爬至 7.82 m; 组合极端高水位 4.34 m, 波浪继续爬坡至 8.83 m, 均未越至护坡肩台上。

3. 18 m 海啸波与极端高水位 4.34 m 组合作用时, 波浪依然未爬至前坡肩台处, 水体最高达到 11.06 m 高程处。

4. 24 m 海啸波与极端高水位 4.34 m 组合作用时, 波浪经过斜坡水体上朔最高爬至肩角处, 并有少量水体溅落在肩台上, 但并未到达挡浪墙处, 未发生越浪。

3 我国滨海核电站的海啸防护

海啸、风暴潮、假潮等洪水是影响滨海核电站布置的重要因素, 核安全导则中《滨海核电站厂址设计基准洪水的确定》专门对核电站防洪提出了具体要求。根据海啸波的特点, 其与常规的潮汐和波浪在传播时类似, 通过合理的防洪构筑物布置可以有效避免或减轻海啸对核电站的危害, 保证核电站的安全营运。

3.1 2011 年前建设核电站防洪标准

核电站防洪高程^[3]计算如图 6 所示。

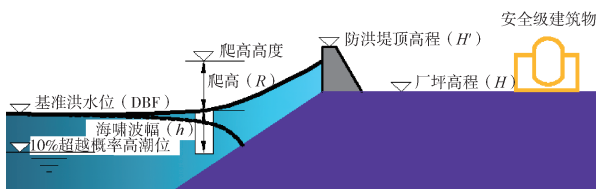


图 6 厂坪高程计算示意

Fig. 6 Illustration of calculation of nuclear power plant ground level

我国部分核电站的防洪情况如表 2 所示:

表 2 我国核电站厂坪和防洪数据

Tab. 2 Chinese nuclear power plants ground level and flood protection design basis m

核电站名称	设计基准洪水 (DBF)	厂坪标高
山东某核电站	7.96 (波浪)	8.40
福建某核电站(1)	8.85	9.50
福建某核电站(2)	8.58	11.00
广东某核电站(1)	7.58	8.50
广东某核电站(2)	6.87	8.50

注: 设计基准洪水水位 = 10% 超越概率天文高潮位 + 核电站预寿期内平均海面异常值 + 可能最大风暴增水, 并考虑相应波浪的影响。

2011 年以前核电站在设计过程中多对近地海啸进行了分析, 波幅都比较小, 因此未作为控制工况。

3.2 海啸波对核电站防洪的影响分析

经过 2011 年日本福岛事故后, 通过开展模型试验, 假设马尼拉、琉球海沟可能产生的地震海啸对滨海核电站进行了防洪符合验证, 相关数据如表 3 所示^[4]。

表 3 我国核电站海啸与风暴潮情况

Tab. 3 Historic data of Chinese sites tsunami and storm tide level m

厂址名称	可能最大风暴潮	2011 年以前考虑可能最大海啸	2011 年后马尼拉、琉球海沟可能最大海啸复核
山东某核电站	3.96	0.23	0.09
福建某核电站(1)	4.37	<0.50	0.42
福建某核电站(2)	5.12	<0.50	0.49
广东某核电站(1)	5.23	2.41	1.53
广东某核电站(2)	5.19	1.16	2.12

从上面数据看, 我国大部分滨海核电站在厂坪设计中对近地海啸引起的洪水是有裕度的。对于马尼拉、琉球海沟可能产生地震海啸的防护, 部分厂址裕度小, 需要进一步考虑设置防洪措施以增大防洪裕度。需要说明的是, 由于试验精度问题, 该结果与实际情况有一定的不确定性。

3.3 核电站防洪布置

我国核电站除了在厂坪标高选取中留有裕度外, 还会通过设置防洪的护岸及防波堤进行防护^[5-6]。下面是几种常见的海工构筑物布置方式如图 7 所示。

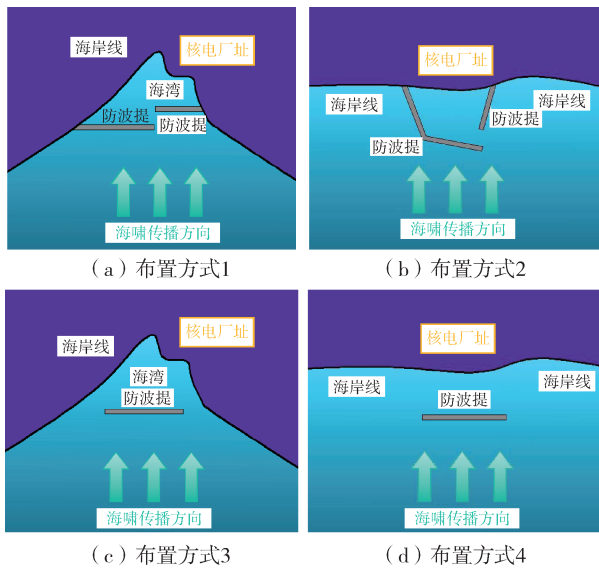


图7 几种常见的防波堤布置方式

Fig. 7 Common configuration of flood bank

由于本文中所述试验均是不考虑在场外设置防波堤的情况开展,因此通过上述各种防洪布置增加了核电厂的防洪安全裕度。

4 结论

结合海啸破坏的特点,结合模型试验对我国滨海典型核电厂的研究,对我国滨海核电厂海啸防护开展分析,结论如下:

1) 因为我国沿海大陆架较浅,且外部有岛链防护,因此对我国滨海形成影响的海啸主要为近地海啸。

2) 我国已建滨海核电厂厂址标高的设置对于近地海啸防护裕度较为充裕。对于马尼拉、琉球海沟可能产生的地震海啸,部分厂址裕度略小,需要进一步考虑设置防洪措施以增大对越洋海啸的防护裕度。

3) 后续新建的滨海核电厂设计中需在厂址标高的选取中依据厂址条件进一步考虑对于马尼拉、琉球海沟可能产生地震海啸的防护,以增大安全裕度。

参考文献:

[1] 姚远,蔡树群,王盛安. 海啸波数值模拟的研究现状[J]. 海洋科学进展, 2007(4): 487-494.
YAO Y, CAI S Q, WANG S A. Present status of study on numerical simulation of tsunami wave [J]. Advances in Marine Science, 2007(4): 487-494.

[2] 温燕玲,朱元清. 海啸传播模型与数值模拟研究进展[J]. 地震地磁观测与研究, 2007(5): 143-149.
WEN Y L, ZHU Y Q. The research progress of tsunami propagation models and numerical simulation [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2007(5): 143-149.

[3] 张超凡,石耀霖. 海啸灾害的数值模拟研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2008(3): 289-296.
ZHANG C F, SHI Y L. Numerical simulation research on tsunami hazards [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008(3): 289-296.

[4] 郭耀武,刘鑫,温洪涌. 海啸对我国滨海核电厂厂址标高的影响[J]. 科技创新导报, 2015, 23(1): 97-98.
GUO Y W, LIU X, WEN H Y. The impact of tsunami on the elevation of coastal nuclear power plant in China [J]. Technological Innovation, 2015, 23(1): 97-98.

[5] 中广核工程有限公司. 核电厂海啸防护工程设计与措施研究报告[R]. 深圳: 深圳中广核工程设计有限公司, 2014: 58.
CGN Engineering Co., Ltd. The research report on the engineering design and measures of the tsunami protection in the nuclear power plants [R]. Shenzhen: China Nuclear Power Design Co., Ltd (Shenzhen), 2014: 58.

[6] 常向东,周本刚. 我国沿海核电厂地震海啸影响分析[J]. 核安全, 2011, 4(4): 45-51.
CHANG X D, ZHOU B G. Analysis about tsunami effect on nuclear power plant in coast of China [J]. Nuclear Safety, 2011, 4(4): 45-49.

作者简介:



LI S C

李顺财(通信作者)

1965-, 男, 广东汕头人, 中广核陆丰核电有限公司, 工程师, 西安交通大学核反应堆工程与反应堆安全硕士, 主要从事核电厂前期工程建设工作 (e-mail) lishuncai@cg npc. com. cn.

李江峰

1981-, 男, 广东深圳人, 深圳中广核工程设计有限公司, 高级工程师, 武汉大学水利水电工程专业毕业, 主要从事核电厂及新能源水工(海工)结构设计 (e-mail) lijia ngfeng@cg npc. com. cn.

刘鑫

1980-, 男, 广东深圳人, 深圳中广核工程设计有限公司, 高级工程师, 大连理工大学防灾减灾工程及防护工程硕士, 主要从事核电厂海工结构设计和科研工作 (e-mail) liu xin@cg npc. com. cn.

(责任编辑 郑文棠)