岛屿地形下的核电厂护岸防洪设计研究

张 俊[1],夏悟民[1],白 帆[1],吕志锋[2],吕迎雪[3]
(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司,广东 广州 510230;
2. 中国核电工程有限公司,北京 100840;3. 中交天津港湾工程研究院有限公司,天津 300222)

摘 要:对国内第一个岛屿地形下核电厂的护岸防洪设计进行了研究,提出直立式护岸结构方案以满足核电厂防洪和避让毗邻海岛的要求。在波浪数值模拟计算结果基础上,开展了波浪整体物理模型试验、波浪局部整体物理模型试验和波浪断面物理模型试验,对护岸的越浪量和结构稳定性进行了优化验证。研究结果表明,岛屿地形下,波浪破碎和波能集中导致护岸堤身坡脚处波高增大,须加高挡浪墙和优化挡浪墙结构型式;在相同的越浪量标准下,采用直立堤结构相对斜坡堤结构对应的护岸挡浪墙的高程须明显加高;利用部分海岛地形斜坡高地作为厂区护岸一部分时,原状海岛地形斜坡高地处的波浪爬高效应明显,须加高邻近护岸挡浪墙的高程。

关键词:岛屿地形;核电厂;护岸;防洪设计;越浪量;结构稳定性
中图分类号:P732.22;TL48 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-3682(2019)02-0085-11
doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.02.001
引用格式: ZHANG J, XIA W M, BAI F, et al. Research on the design of flood control for the revetment of nuclear power plant in the case of island topography[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(2): 85-95. 张俊, 夏悟民, 白帆, 等. 岛屿地形下的核电厂护岸防洪设计研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(2): 85-95.

近年来条件优良的近岸核电厂址逐渐开发殆尽,逐渐转向离岸海岛厂址,对应水深和波浪条件差,且岛屿地形变化大,波浪折射绕射后的形态复杂。依据以往的设计实践,核电厂防洪护岸通常选用消浪效果良好和稳定性好的斜坡堤结构。岛屿地形下还会遇到避让、保护毗邻岛屿的需求,水运工程中成熟的直立堤结构自然被选为替代方案。由于复杂岛屿地形的影响,护岸直立墙前可能出现近破波,且基床上水深小于 0.6 倍的进行波波高,港口与航道水文规范中没有适用的波浪力理论计算公式,另外,港口与航道水文规范和防波堤设计与施工规范中没有计算直墙式建筑物越浪量的理论公式,故须通过波浪物理模型试验验证直立式护岸结构稳定性和越浪量是否满足防洪标准要求。

在国内第一个核电厂海岛厂址的护岸防洪设计实践中,从防洪标准、地形分析与护岸结构选型、波浪理论计算、波浪物理模型试验验证以及护岸结构优化等方面对岛屿地形下的核电厂护岸防洪设计进行研究,进而选定合理的防洪标准并确定了护岸结构设计方案,满足了岛屿地形下的防洪要求,可供类似岛屿地形下的护岸工程设计参考。

1 防洪标准

核电厂位于福建福宁湾的某个离岸岛屿东半岛,规划布置 2 台快堆机组,东护岸承担核岛防洪功能。核电厂区边界依据核岛和常规岛布置确定,东护岸的轴线尽量利用主岛边界,并控制护岸坡脚避让前方毗邻 2 个子岛(图 1)。

核电厂相关的设计规范均明确核岛区承担防洪功能的护岸顶高程应根据越浪量的模型试验确定,并考

收稿日期:2019-02-01
作者简介:张 俊(1984-),男,高级工程师,硕士,主要从事港口和航道工程总平面方面研究. E-mail: 287184620@qq.com

(王 燕 编辑)

虑设计基准洪水位、最大台风浪及相应的 10 min 平均风速的组合工况[1-2]。关于越浪量控制标准，设计规范未提供一致的要求，各核电厂址在防洪设计时选用的越浪量标准也不完全一致。如：《核电厂海工构筑物设计规范》[1]中明确“核岛区对越浪的安全防护应以越浪水体不淹没核岛区相关安全物项为标准，一次风浪过程中，越过护岸挡浪墙的允许海水总量，应根据墙后排水、存水条件确定”；而《核电厂水工设计规范》[2]中明确“核岛区防洪护岸允许越浪，越浪量应根据堤后排水条件确定，不宜大于 0.02 $m^3/(m \cdot s)$，并应有防止越浪水破坏作用的措施”。已有的核电厂防洪设计案例中，越浪量标准最大选取 0.05 $m^3/(m \cdot s)$[3]。设计中考虑到本工程东护岸后方紧邻的厂区生产设施安全性要求高，越浪量标准选定为 0.02 $m^3/(m \cdot s)$。

图 1 核电厂总平面布置图

Fig.1 General plan layout of the nuclear power plant

2 拟定护岸方案

2.1 设计条件

2.1.1 设计水位

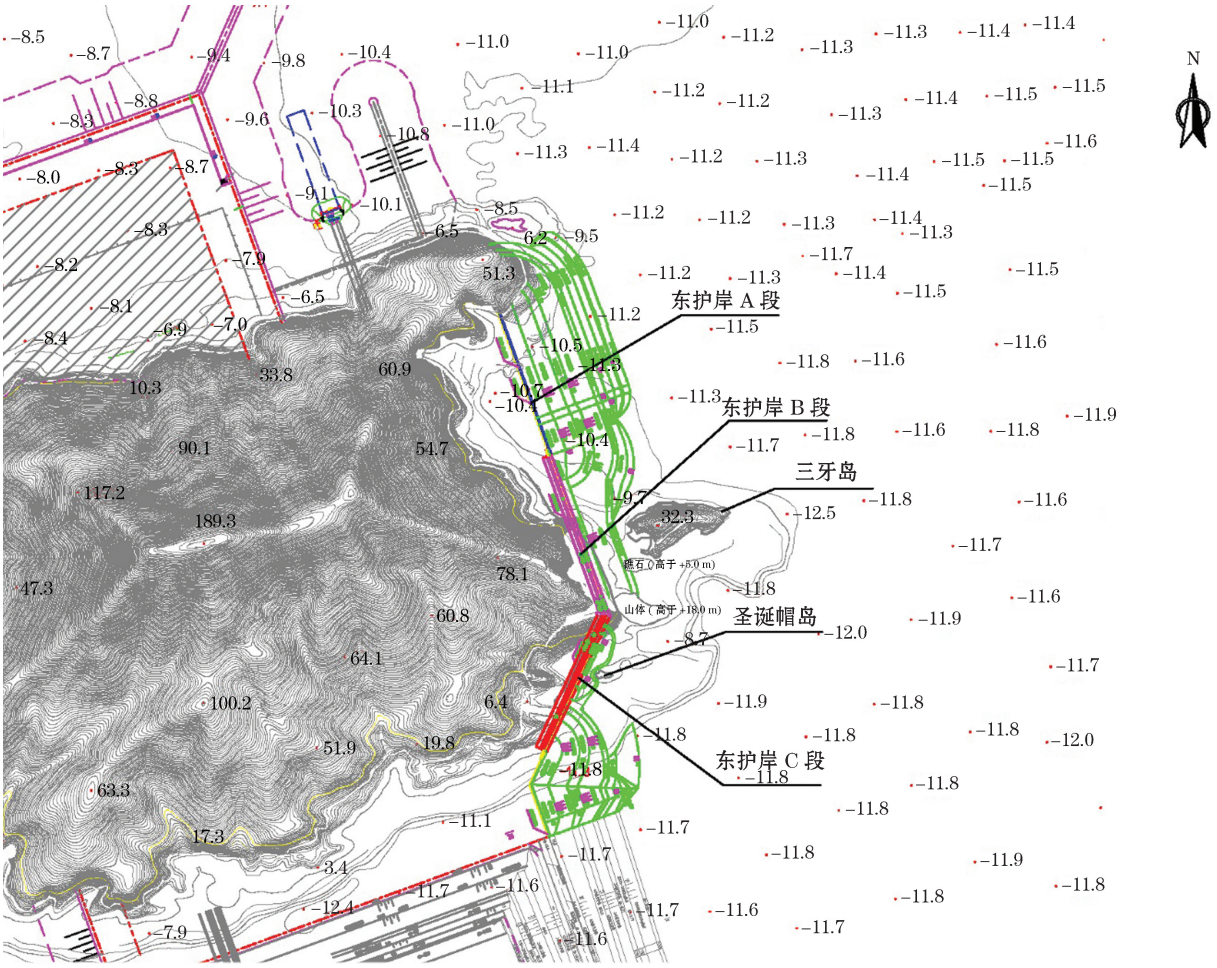
厂址处 1985 国家高程基准(理论最低潮面以上 3.19 m)下的设计水位：设计基准洪水位(DBF)8.84 m；100 a 一遇高潮位 4.69 m；100 a 一遇低潮位 −3.86 m。

2.1.2 波浪

外海 20 m 等深线处深水波浪设计波要素：风速为 53.88 m/s；风向为 76.57°；最大可能台风浪 $H_{1/100}=16.02$ m；累计频率为 1%的 $H_{1\%}=14.56$ m，累计频率为 13%的 $H_{13\%}=10.93$ m，平均周期 $T=12.9$ s。

2.2 地形分析与结构选型

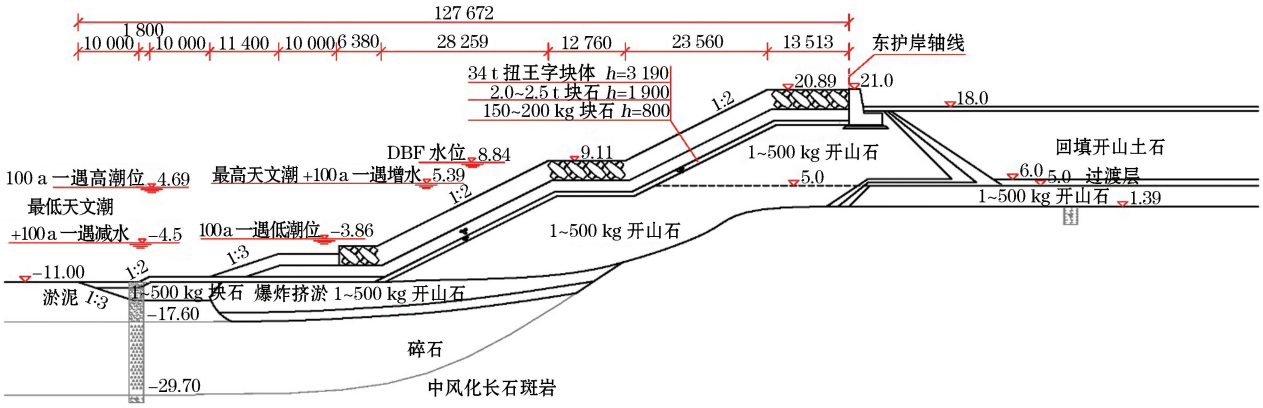
从北至南，东护岸依据地形可以划分为 3 个典型段：A 段(缓慢变化地形)，B 段(海岛地形)和 C 段(海岛地形)，须避让前方毗邻的三牙岛和圣诞帽岛(图 2)。结合消浪、海岛保护要求和地形条件，A 段采用斜坡堤结构；B 段和 C 段分别采用混合堤和直立堤结构。依据设计经验，拟定初始设计断面见图 3、图 4 和图 5。



注：数据为 1985 国家高程基准下高程数据，单位为 m

图 2　东护岸平面布置图

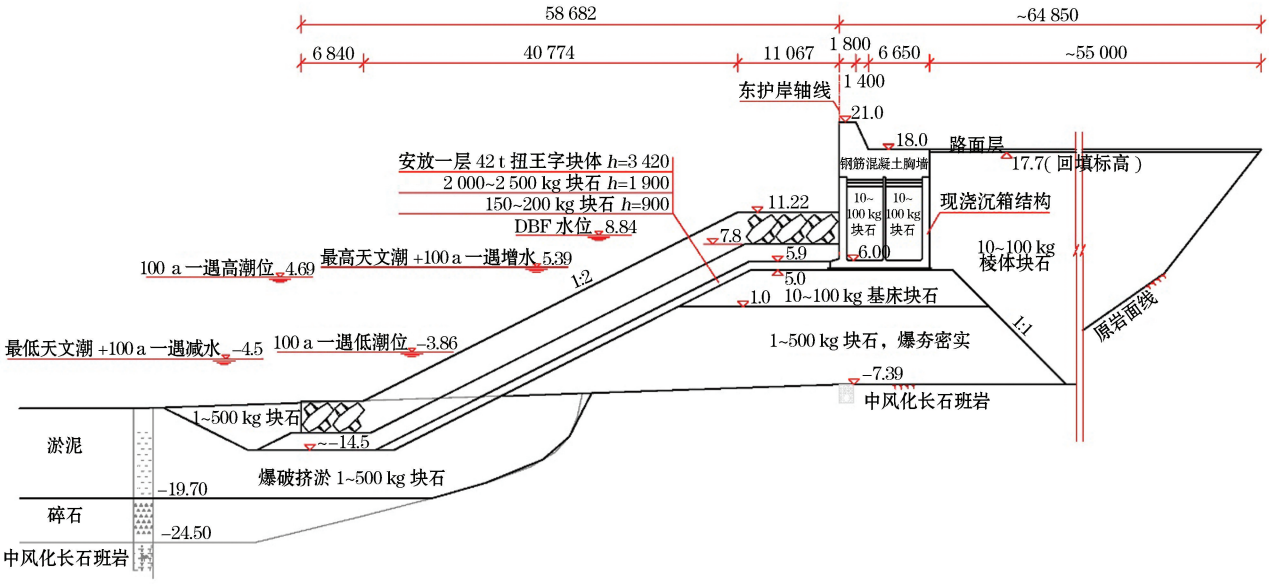
Fig.2　General plan layout of the eastern revetment



注：长度数据单位为 mm；高程数据和各种水位数据单位为 m

图 3　东护岸 A 段地形和拟定断面图

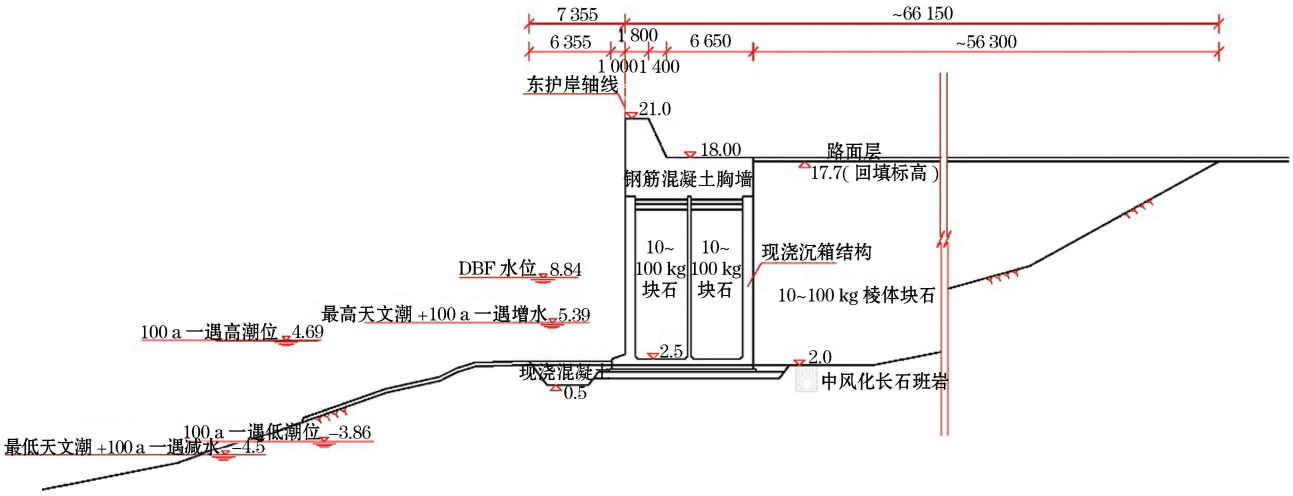
Fig.3　Topography and proposed section diagram of segment A of the eastern revetment



注：长度数据单位为 mm；高程数据和各种水位数据单位为 m

图 4 东护岸 B 段地形和拟定断面图

Fig.4 Topography and proposed section diagram of segment B of the eastern revetment



注：长度数据单位为 mm；高程数据和各种水位数据单位为 m

图 5 东护岸 C 段地形和拟定断面图

Fig.5 Topography and proposed section diagram of segment C of the eastern revetment

3 波浪理论计算

采用丹麦水利研究所(Danish Hydraulic Institute，DHI)开发的 Mike 21 数值计算软件包中的 SW (spectral waves)模型开展波浪整体数学模型试验，测定东护岸处设计波要素。其模型范围约为 74.5 km×52.7 km(长度×宽度)，见图 6。东护岸前沿共布置 6 个测点 H_1～H_6(图 7)，其中 H_1，H_2 和 H_3 在东护岸 A

段、B 段和 C 段前－11 m 水深附近，对应的进行波设计波浪要素见表 1[4]；H_4，H_5 和 H_6 在东护岸 A 段、B 段和 C 段堤脚位置处。

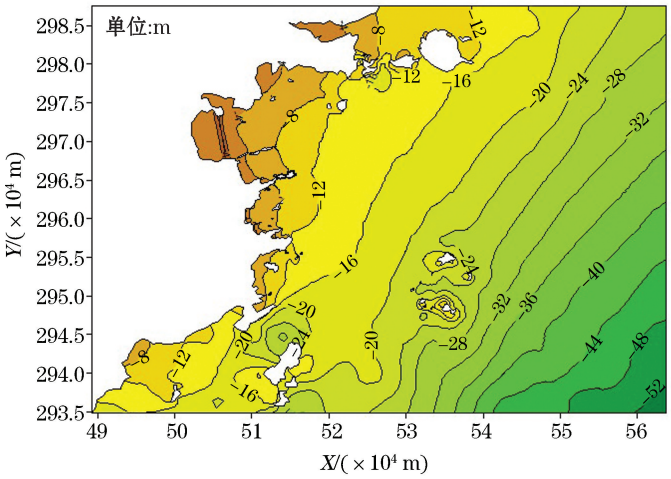


图 6　波浪数学模型试验范围

Fig.6　The range of wave mathematical model test

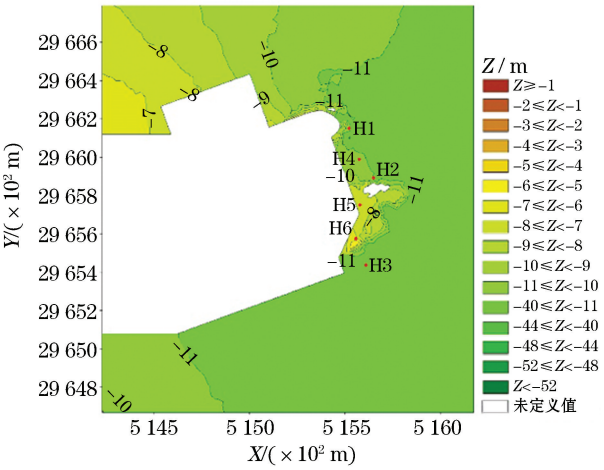


图 7　东护岸前设计波浪要素测点位置示意图

Fig.7　Location of the stations for measuring the designed wave elements in the front of the eastern revetment

表 1　设计基准洪水位和最大台风浪共同作用下 H_1，H_2 和 H_3 测点设计波浪要素

Table 1　The designed wave parameters at measuring stations H_1, H_2 and H_3 under the combined actions of the designed reference flood water level and the maximum typhoon wave

波浪要素	H_1	H_2	H_3
测点水深(1985 国家高程基准)/m	10.75	10.94	10.94
测点水深(DBF 水位基准)/m	19.59	19.78	20.46
$H_{1\%}$/m	13.32 *	11.61	13.65
$H_{5\%}$/m	11.96	10.00	11.90
$H_{13\%}$/m	10.63	8.75	10.54
L/m	164.54	165.19	167.51

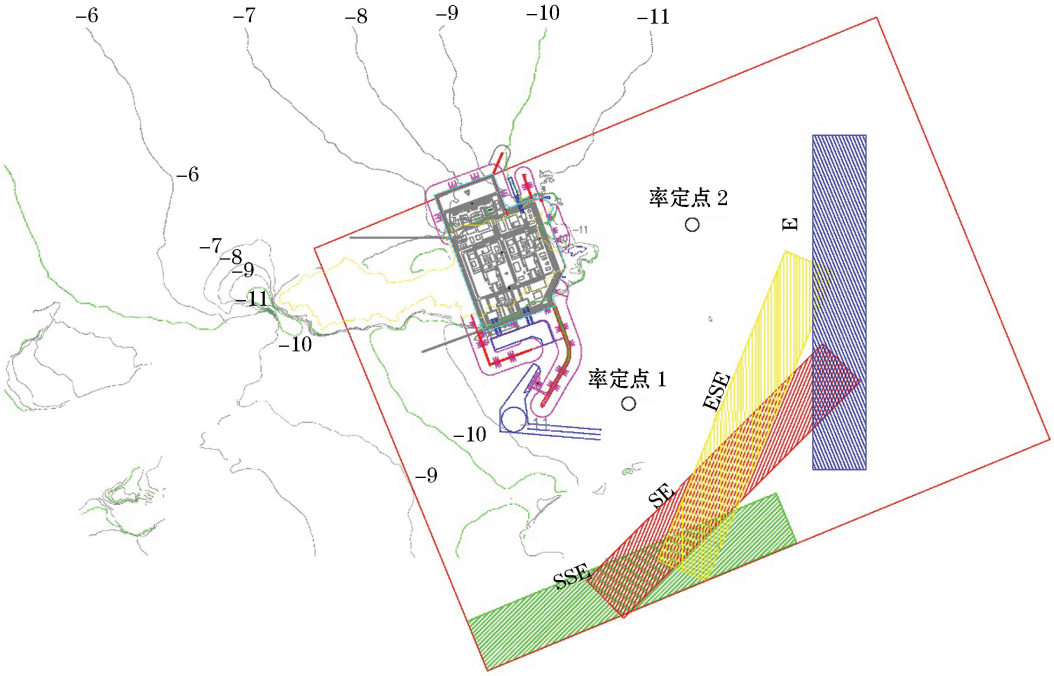
注：$H_{1\%}$，$H_{5\%}$ 和 $H_{13\%}$ 表示波高，L 表示波长，* 表示该水位下极限波高

基于该设计波要素，依据《港口与航道水文规范》[5] 对直墙式建筑物前的波态进行判断并选用适用的波浪力理论计算公式，结果显示：1)东护岸 B 段为高基床结构型式，波态判断为近破波，但基床上水深过小，不满足 $d_1 \geqslant 0.6H$($d_1=3.84$；$H=11.61$；其中 d_1 为基床上水深，单位为 m；H 为建筑物所在处进行波波高，单位为 m)要求；2)东护岸 C 段断面属于暗基床，$d<2H$($d=6.34$；$H=13.65$；其中 d 为建筑物前水深，单位为 m；H 为建筑物所在处进行波波高，单位为 m)，且 $i>1/10$($i=2.8$，i 为建筑物前水底坡度)，并非立波或远破波，应为近破波，但基床上水深过小，同样不满足 $d_1 \geqslant 0.6H$($d_1=6.84$，$H=13.65$)，规范中没有适用的波浪力理论计算公式，故须通过模型试验确定波态和波浪力进而验证护岸稳定性。另外，《港口与航道水文规范》[5] 和《防波堤设计与施工规范》[6] 中没有计算直墙式建筑物越浪量的理论公式，故须通过模型试验测定越浪量并验证是否满足越浪量控制要求。为解决该问题，先后启动了波浪整体物理模型试验、局部整体物理模型试验和断面物理模型试验。

4 波浪模型试验验证优化

4.1 波浪整体物理模型试验

选定厂址东侧和南侧为试验区，模型原型尺度为 4.8 km×3.6 km(长度×宽度)，模型试验的几何比尺为 1∶120，模型布置范围如图 8 所示。研究设计基准洪水位和最大可能台风浪共同作用时(不考虑风的作用)的越浪量和护面块体稳定[7]。结果表明：东护岸 A 段和 C 段中间位置处的单宽越浪量分别为 0.014 和 0.035 $m^3/(m \cdot s)$；大浪在东护岸 B 段和 C 段附近以近破波型式破碎，破碎后的波浪对两侧块体产生冲击并导致块体掉落(图 9)。



注：水深数据为 1985 国家高程基准下高程数据，单位为 m

图 8 波浪整体物理模型试验范围

Fig.8 The range of wave global physical model test

(a)东护岸 B 段处波浪破碎情况 (b)东护岸 C 段处波浪破碎情况 (c)东护岸 C 段处扭王字块滚落情况

图 9 护岸处波浪破碎和扭王子块稳定性情况

Fig.9 Status of wave breakage and accropodes stability at the revetment

受试验模型比尺限制，波浪整体物理模型试验不适合研究块体稳定，且该试验不考虑风的作用，故补充了波浪断面和局部整体物理模型试验进行验证优化[8]。

4.2　波浪断面物理模型试验

波浪断面物理模型试验比尺为 1∶40，控制设计基准洪水水位时，最大台风浪和 100 a 一遇风组合工况下东护岸处断面的越浪量≤0.02 $m^3/(m \cdot s)$。

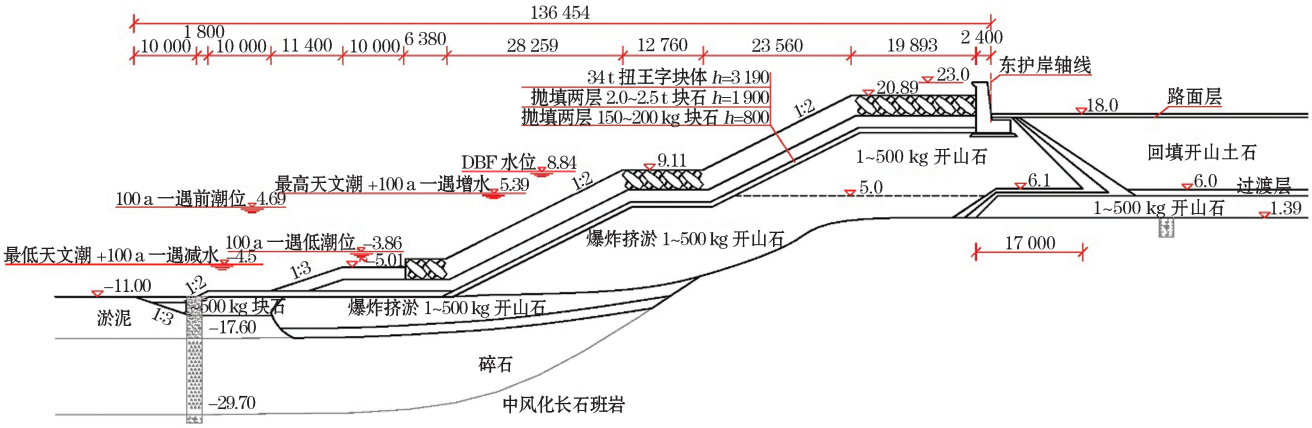
经优化验证，东护岸 A 段挡浪墙加高 2 m 至 23 m；东护岸 B 段由直立式挡浪墙调整为圆弧式挡浪墙加鹰嘴，挡浪墙高程加高 2 m 至 23 m；东护岸 C 段直立式挡浪墙调整为圆弧式挡浪墙加鹰嘴，挡浪墙高程加高 4 m 至 25 m，且在挡墙墙顶加设 1.5 m 子墙。具体试验结果见表 2[9]，最终确定东护岸各段设计断面见图 10，图 11 和图 12。

表 2　东护岸断面物理模型试验结果

Table 2　Results of section physical model test of the eastern revetment

项　目		A　段	B　段	C　段
试验工况	水位/m	8.84	8.84	8.84
	波要素	不规则波 $H_{13\%}=10.63$ m $T=12.9$ s	不规则波 $H_{13\%}=10.54$ m $T=12.9$ s	不规则波 $H_{13\%}=10.54$ m $T=12.9$ s
	风速/$(m \cdot s^{-1})$	53	53	53
挡浪墙形式		直立式挡浪墙加鹰嘴	圆弧式挡浪墙加鹰嘴	圆弧式挡浪墙加鹰嘴＋子墙
挡浪墙顶高程/m		23	23	25＋1.5
越浪量/$(m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$		0.019 8	0.017 0	0.019 0
越浪范围		护岸轴线以后约 26 m	—	护岸轴线以后约 43 m
护面块体和护底块石的稳定性		稳定	稳定	稳定

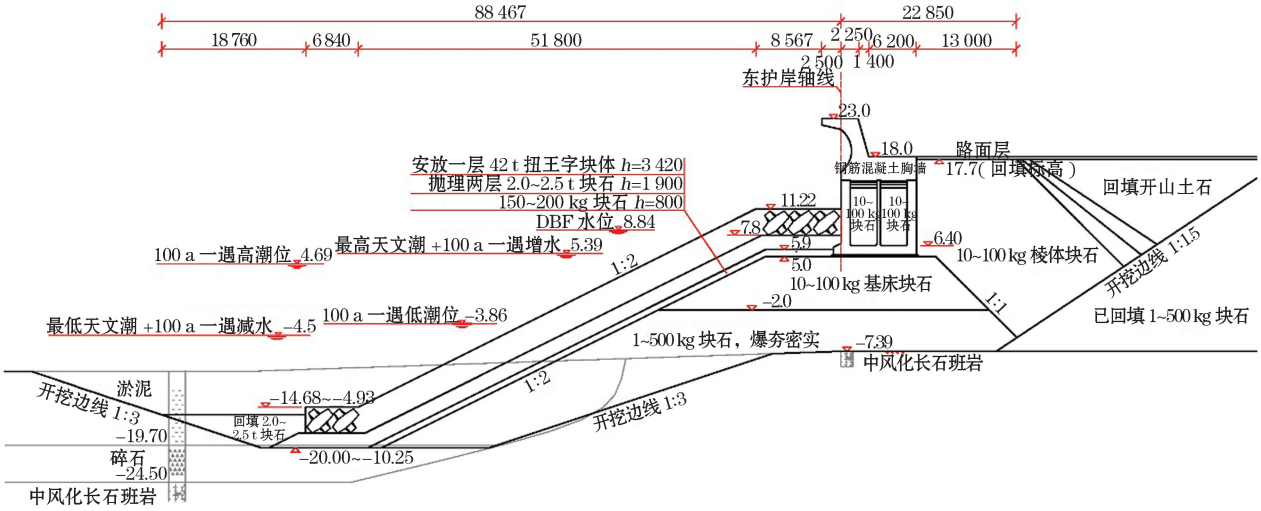
注：C 段挡浪墙顶高程中 25＋1.5 表示圆弧式挡浪墙高 25 m，子墙高 1.5 m；B 段挡浪墙越浪范围中“—”表示试验中未测该数据



注：长度数据单位为 mm；高程数据和各种水位数据单位为 m

图 10　东护岸 A 段优化断面图

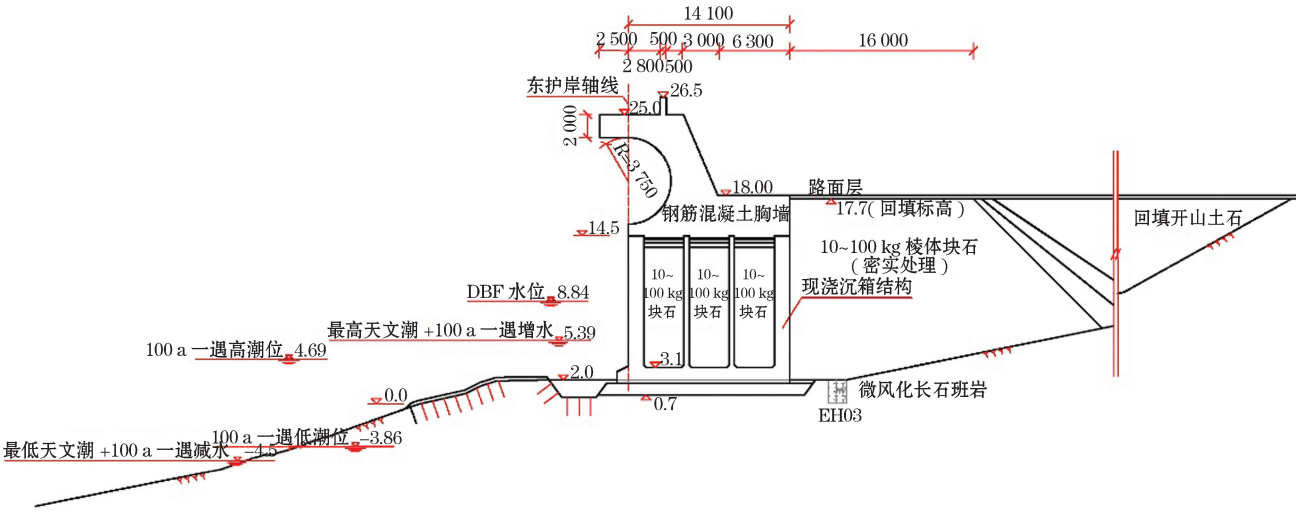
Fig.10　The optimized sectional drawing of segment A of the eastern revetment



注：长度数据单位为 mm；高程数据和各种水位数据单位为 m

图 11 东护岸 B 段优化断面图

Fig.11 The optimized sectional drawing of segment B of the eastern revetment



注：长度数据单位为 mm；高程数据和各种水位数据单位为 m

图 12 东护岸 C 段优化断面图

Fig.12 The optimized sectional drawing of segment C of the eastern revetment

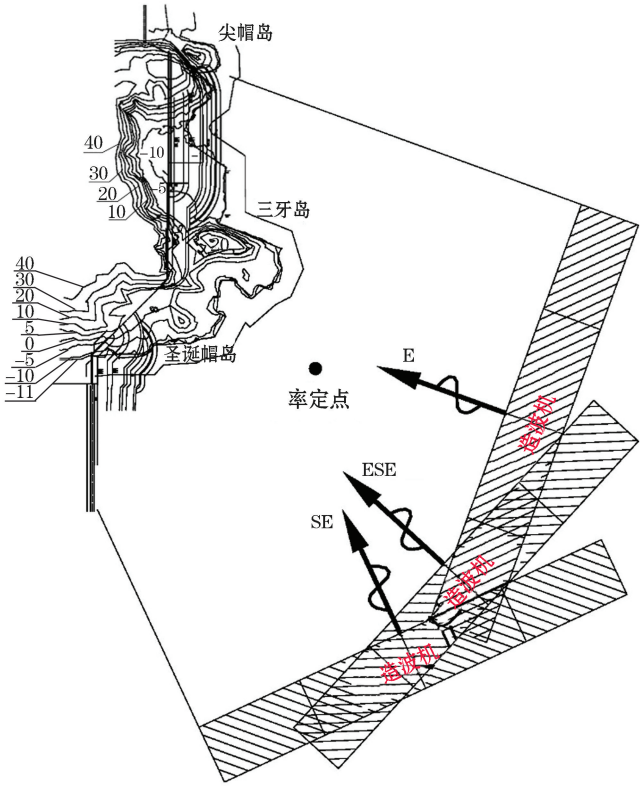
4.3 波浪局部整体物理模型试验

鉴于在波浪整体物理模型试验中东护岸局部出现了波能集中和块体失稳等现象，故在波浪断面物理模型试验确定的优化设计断面基础上，补充开展了模型比尺 1∶50 的波浪局部整体物理模型试验，模型原型范围为 2.0 km×1.5 km(长度×宽度)，模型试验布置见图 13。

试验测定东护岸前沿的设计波浪要素、东护岸的越浪情况，验证东护岸沉箱、挡浪墙、护面块体和护底块石等结构的稳定性[10]，得到结果：

1)设计波要素。试验测定了设计基准洪水位加最大可能台风浪组合作用时东护岸处的设计波浪要素和工程建设后的波要素，并与数学模型试验得到的设计波浪要素结果进行比较(表 3)，结果显示：(1) H_4 测点

处与数学模型试验结果较为接近，H_5 和 H_6 测点处波高大于数学模型试验，原因是 H_5 和 H_6 测点处水深较浅且海岛地形变化复杂，波浪在该位置发生波能聚集，且破碎非常剧烈，实际测得的波高水深比远大于数学模型试验中设定的极限波高与水深的比值 0.68[11]；H_5 测点位于东护岸 B 段堤脚前，其破碎的波高水深比达到了 1.0，东护岸 C 段堤脚前的测点 H_6 的破碎波高水深比也达到了 0.84。(2)东护岸建成后，波浪在海岛地形和护岸处发生反射、绕射，测点波高变化规律并不十分明显，H_4 和 H_5 测点略有减小，H_6 测点波高增大。



注：等深线数字单位为 m

图 13　波浪局部整体物理模型试验范围

Fig.13　The range of local wave global physical model test

表 3　东护岸处最大可能台风浪设计波浪要素($H_{1/3}$)

Table 3　The wave parameters designed for the maximum possible typhoon wave at the eastern revetments ($H_{1/3}$)

测点指标	H_4	H_5	H_6
测点水深(1985 国家高程基准)/m	10.81	1.21	3.62
测点水深(含水位)/m	19.65	10.05	12.46
波浪整体数模设计波要素/m	10.36 *	6.83 *	8.47 *
波浪局部整体物模设计波要素/m	10.42	10.11	10.45
波浪局部整体物模波要素(工程建设后)/m	10.30	9.73	10.74

注：设计基准洪水位＋最大可能台风浪工况下，$H_{13\%}=10.93$ m，$T=12.9$ s；* 数据为破碎波高

2)稳定性。护岸各段胸墙、护面块体、护底块石稳定良好，其中挡浪墙高度达 26.5 m(25 m＋1.5 m)的东护岸 C 段南端护面块体稳定情况见图 14。

3)越浪量。设计基准洪水位和最大台风浪共同作用时，厂区东护岸仅在个别大浪情况下偶有越浪，越浪量远小于 0.02 $m^3/(m \cdot s)$。需要说明的是，由于波浪局部整体物理模型试验中未考虑风的作用，因此该结果仅供参考。

图 14 东护岸 C 段南端护面块体和护底块石稳定性情况

Fig.14 Stability status of armor block and bottom protection stone at the southern end of segment C of the eastern revetment

5 结 论

通过波浪整体数学模型试验、整体物理模型试验、局部整体物理模型试验和断面物理模型试验研究验证优化了岛屿地形下核电厂直立式结构和斜坡式结构的防洪护岸设计方案，研究结论显示：

1)基于安全和消浪考虑，传统的核电厂防洪护岸基本上全部采用斜坡堤结构，在本厂址的海岛地形下，为避让毗邻海岛，水运工程中成熟的直立堤结构在核电厂防洪护岸中首次被应用。

2)岛屿地形作用引起直立堤前出现近破波，且基床上水深小于 0.6 倍的进行波波高，不能通过现行设计规范的理论公式计算护岸直立堤体的波浪力和稳定性，须通过波浪整体和断面物理模型试验进行验证。

3)岛屿地形下波浪破碎和波能集中导致护岸堤身坡脚处波高增大，须加高挡浪墙和优化挡浪墙结构型式以控制越浪量，当波浪整体物理模型试验的模型比尺受限或出现块体失稳时，须补充波浪局部整体物理模型试验进行验证。

4)相对斜坡堤结构，在相同的越浪量标准下，采用直立堤结构时，护岸挡浪墙的高程须明显加高。

5)利用部分海岛地形斜坡高地作为厂区护岸一部分时，因无人工块体的消浪作用，原状海岛地形斜坡高地处的波浪爬高效应明显，需相应加大该段附近护岸挡浪墙的高程。

参考文献(References)：

[1] National Energy Administration. Code for design of maritime structures of nuclear power plants: NB/T 25002—2011[S]. Beijing: Peking University Press, 2010. 国家能源局. 核电厂海工构筑物设计规范：NB/T 25002—2011[S]. 北京：北京大学出版社，2010.

[2] China Electric Power Planning & Engineering Institute. Code for hydraulic design of nuclear power plants: NB/T 25046—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. 电力规划设计总院. 核电厂水工设计规范：NB/T 25046—2015[S]. 北京：中国计划出版社，2015.

[3] ZhANG J, LI X Y, YANG Y L, et al. Key points of general layout for nuclear power plant' marine engineering[J]. Port & Waterway Engineering, 2014, 488(2): 135-140. 张俊，李秀英，杨云兰，等. 滨海核电厂海域工程总平面布置设计要点[J]. 水运工程，2014，488(2)：135-140.

[4] Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd.. Research report on wave numerical simulation for China Fast Reactor 600[R]. Tianjin: Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd.. 2017. 中交天津港湾工程研究院有限公司. 600MW 示范快堆工程波浪数值模拟研究报告[R]. 天津：中交天津港湾工程研究院有限公司，2017.

[5] CCCC First Harbor Consultants CO., Ltd.. Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2016. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范：JTS 145—2015[S]. 北京：人民交通出版社，2016.

[6] CCCC First Harbor Consultants CO., Ltd.. Code of design and construction of breakwaters: JTS 154-1—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤设计与施工规范：JTS 154-1—2011[S]. 北京：人民交通出版社，2011.

[7] Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd.. 3D physical wave disturbance study on the overall plan layout for China Fast Reactor 600[R]. Tianjin: Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd.. 2017. 中交天津港湾工程研究院有限公司. 600MW 示范快堆工程波浪整体物理模型试验研究报告[R]. 天津：中交天津港湾工程研究院有限公司，2017.

[8] Nanjing Hydraulic Research Institute. Wave Model Test Regulation: JTJ/T 234—2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001. 南京水利科学研究院. 波浪模型试验规程：JTJ/T 234—2001[S]. 北京：人民交通出版社，2001.

[9] Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd.. 2D physical wave model study on revetments & breakwaters for China Fast Reactor 600[R]. Tianjin: Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd.. 2017. 中交天津港湾工程研究院有限公司. 600MW 示范快堆工程波浪断面体物理模型试验研究报告[R]. 天津：中交天津港湾工程研究院有限公司，2017.

[10] Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd.. 3D physical wave disturbance study on the eastern revetments of China Fast Reactor 600[R]. Tianjin: Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd.. 2017. 中交天津港湾工程研究院有限公司. 600MW 示范快堆工程波浪局部整体物理模型试验研究报告[R]. 天津：中交天津港湾工程研究院有限公司，2017.

[11] LI Y C, TENG B. Wave action on maritime structures[M]. 2nd Ed. Beijing: Ocean Press, 2002: 162-213. 李玉成，滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 第二版. 北京：海洋出版社，2002：162-213.

Research on the Design of Flood Control for the Revetment of Nuclear Power Plant in the Case of Island Topography

ZHANG Jun[1], XIA Wu-min[1], BAI Fan[1], LÜ Zhi-feng[2], LÜ Ying-xue[3]

(1. *CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd.*, Guangzhou 510230, China;
2. *China Nuclear Power Engineering Co., Ltd.*, Beijing 100840, China;
3. *Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd.*, Tianjin 300222, China)

Abstract: The design of flood control for revetment of the first nuclear power plant built on an island in China is studied and a scheme of vertical revetment structure is proposed in order for the plant to meet the requirements of flood control and to separate from the adjacent islands. A series of wave physical model tests are carried out based on the results of wave numerical simulation, and the wave overtopping and structural stability of the revetment are verified and optimized. The results show that in the case of island topography, the wave wall should be raised and its structural type should be optimized because the wave height at the slope foot of the revetment rises due to wave breakage and wave energy concentration. Under the same standard of wave overtopping, the elevation of the wave wall of the vertical revetment structure should be increased obviously compared with that of the slope dike structure. When using some island terrain slope highlands as parts of the revetment in the plant area, the elevation of the wave walls of the adjacent revetments must be increased because the wave climbing effect is obvious at the slope highlands of undisturbed island terrain.

Key words: island topography; nuclear power plant; revetment; design of flood control; wave overtopping; structural stability

Received: February 1, 2019