



长周期涌浪作用下斜坡式防波堤结构优化设计

张先武, 张华平

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 近年来海外工程中常遇主向浪为周期为 15~18 s、波长为 130~220 m 的涌浪建港海域。针对该类海域波浪周期长、波能大的特点, 从施工可行性、经济性以及结构安全性等多方面进行全面分析, 综合多个同类波况条件下的防波堤结构设计经验, 并通过物理模型试验进行验证优化, 总结了该类波浪作用下的斜坡式防波堤结构设计特点。

关键词: 长周期波; 涌浪; 斜坡堤; 物模试验

中图分类号: U 656.1⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0058-05

Structure optimization design of mound breakwater under action by long period swell

ZHANG Xian-wu, ZHANG Hua-ping

(CCCC Second Harbor Construction Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: In recent years, there are a lot of overseas projects in the sea area where there is a main direction swell with a period of 15~18 s and a wave length of 130~220 m. The comprehensive analysis including construction feasibility, project cost, structural safety and so on is made against those wave with long period and strong wave energy. Meanwhile, based on the design experience of several other projects with the same kind of wave conditions and as per physical model tests, the design main points of mound breakwater under the action of long-period swell are summarized.

Keywords: long-period wave; swell; mound breakwater; physical model test

近年来, 随着港口工程海外市场逐年扩大, 在多个码头工程的防波堤建设过程中, 经常遇到周期长、波能大的恶劣建港条件, 例如印尼印度洋海域已建的 ADIPALA 燃煤电站码头工程、PACITAN 电站码头工程、芝拉扎电站防波堤修复工程、在建的印尼 KARANG TARAJE 码头工程以及西非大西洋海域尚处于基础资料研究阶段塞拉利昂矿石码头工程, 该类海域主向浪均为周期 15~18 s, 波长 130~220 m, 同时伴随巨大波能的涌浪。笔者在综合多个印尼印度洋海域防波堤工程设计经验的基础上, 以印尼 KARANG TARAJE 码头工程为例, 综合考虑施工可行性、经济性以

及结构安全性, 进行了防波堤断面结构设计和优化, 并通过物理模型试验进行验证, 总结了该类波浪作用下防波堤结构设计特点。

1 工程概况

1.1 工程简介及布置

印尼 KARANGTARAJE 码头工程位于印尼万丹省 Bayah 区, 项目业主为印尼 GAMA 集团, 码头设施为业主投资建设水泥厂的配套工程。根据业主建厂和后续生产需求, 需相应建设进出口码头工程。一期规划的主要建筑物包括: 550 m 防波堤、1 个重件泊位, 1 个 3 万吨级的泊位, 2 个

1万吨级的泊位及公用配套设施; 二期规划的主要建筑物包括: 300 m 加长防波堤及一个7万吨级码头泊位。防波堤沿西北方向进行布置。防波堤设计要求采用美国陆军工程兵团海岸工程设计标准, 同时可参考中国规范。码头总平面布置见图1。

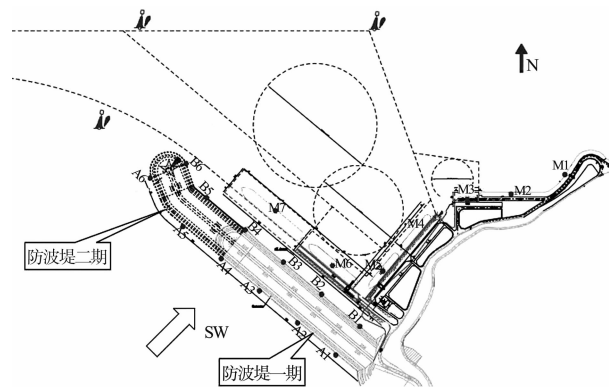


图1 码头总平面布置

1.2 设计水位

极端高水位: 2.36 m; 设计高水位: 1.85 m; 设计低水位: 0.15 m。

1.3 水深

根据工程区域地形, 防波堤从堤根至 100 m 处, 水深变化较为剧烈, 海床高程为 0 ~ -14.5 m, 堤身至堤头段水深变化很小, 海床高程为 -14.5 ~ -15.5 m。

1.4 波浪

根据现场观测及波浪数模研究结果, 建港海域主向浪为 SSW-WSW 向涌浪, 由于从堤身 100 m 处至堤头段水深变化较小, 波浪要素较为接近, 因此本文着重以堤身断面结构设计为例。表1中仅列出了 A3 点处防波堤海侧重现期为 50 a 的设计波浪要素。

表1 A3 点处防波堤设计波浪要素 (重现期 50 a)

浪向	水位	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$	\bar{H}/m	\bar{T}/s	L/m
SSW	极端高水位	7.97	6.92	6.75	5.82	3.89	17.77	225.09
	设计高水位	7.90	6.87	6.69	5.78	3.87	17.77	222.07
	设计低水位	7.77	6.79	6.63	5.75	3.90	17.77	211.57
SW	极端高水位	6.97	6.02	5.86	5.02	3.31	16.19	203.43
	设计高水位	6.89	5.95	5.79	4.97	3.28	16.19	200.75
	设计低水位	6.70	5.81	5.66	4.87	3.24	16.19	191.41

1.5 初始设计方案

1.5.1 护面块体的选取

国内外常用的护面块体有扭工字块、扭王字块、四角空心方块、A-JACK 等。四角空心方块不适用于波高较大的海域, 同时根据印度洋海域其他防波堤工程的建设经验, 扭工字块及 A-JACK 的支腿均有较为细长的特点, 在使用过程中, 对垫层块石理坡要求很高, 若理坡达不到施工质量要求, 遇到大浪时则容易出现断肢的现象, 因此同样不宜采用。考虑到扭王字块在国外的专利使用权已过期, 总包商最终选定了中交一航院发明的双联块体, 其稳定系数与扭王字块接近, 同时其支腿断面也较为粗短, 适用于长周期波的海域。

1.5.2 堤身宽度

国内规范^[1]中关于斜坡堤堤顶宽度取值要求为 1.10 ~ 1.25 倍设计波高值, 同时要求至少能并

列随机安放 3 块人工块体, 对于陆上推进的斜坡堤, 需考虑施工机械要求。由于印度洋海域波高大, 设计采用护面块体质量也较大, 因此施工时需采用起吊能力强的大型吊机。该类吊机履带宽度通常在 7 ~ 8 m, 考虑到施工时还有钩机、石料运输设备等, 堤身设计时应宽大为宜。尽管宽堤身会增加堤心石工程量, 然而其具备以下优点: 1) 为施工带来很大的便利, 大幅缩短工期。以印尼某燃煤电站码头工程为例, 原防波堤设计时堤心石顶宽为 7 m, 然而施工推填时考虑到进度要求, 实际采用了 14 m, 待外坡护面安装完成后回挖堤心石; 2) 由于长周期波的穿透性^[2]很强, 宽堤身有利于减弱透浪; 3) 宽堤身可有效减少越浪量。综合考虑各种因素, 宽堤身的设计对于长周期波海域更为适合, 本工程考虑履带吊宽度 7 m, 同时考虑旋转作业时能通过运输汽车, 宽度应大于 12 m。

1.5.3 堤身结构断面

根据业主标书功能要求，在设计高水位及50 a一遇的波浪条件下，防波堤越浪量要求较高，需小于 $50 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ，因此防波堤设计类型为基本不越浪防波堤，堤身采用 $1 \sim 800 \text{ kg}$ 块石推填而成，根据美标^[3]波浪爬高及越浪量的计算，堤顶高程为 9.70 m ，堤顶设混凝土挡浪墙。防波堤海侧护面块体采用 18.0 t 双联块体，护面块体下设置

$1\ 600 \text{ mm}$ 厚的 $900 \sim 1\ 800 \text{ kg}$ 块石垫层，坡底设 2 层 12 t 双联块体压脚。为方便防波堤的维护并考虑二期防波堤的施工，港池侧预留一条行车通道，行车通道根据二期施工吊机履带宽度定为 7 m ，港池护面采用 $900 \sim 1\ 800 \text{ kg}$ 块石，护面块石下设置 800 mm 厚的 $100 \sim 200 \text{ kg}$ 块石垫层。护底设 600 mm 二片石垫层及 $1\ 000 \text{ mm}$ $400 \sim 500 \text{ kg}$ 护底块石。结构断面见图 2。

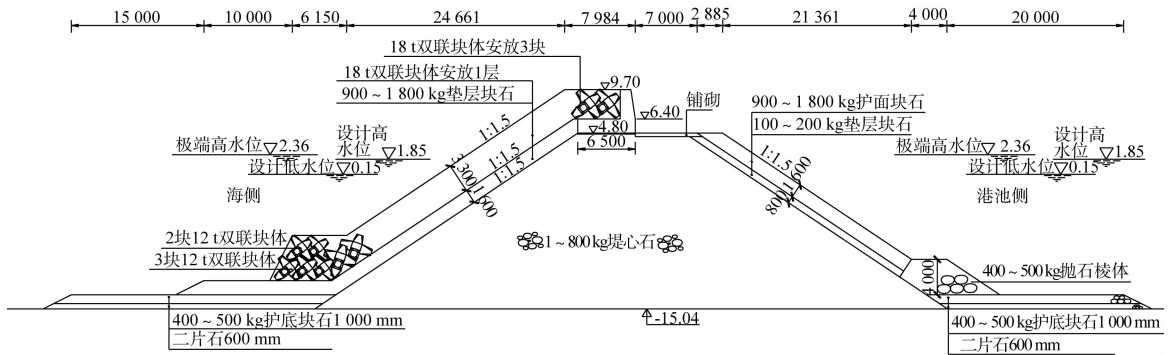


图 2 初始设计断面

1.6 首次优化断面

由于该区域设计波高大，周期长，导致挡浪墙断面较大，每延米混凝土用量为 15.2 m^3 ，每延米质量为 35 t ，施工时若采用预制吊装，则对施工设备的起吊能力要求很高，从而使施工成本费用上升。另一方面，由于本工程工期紧，若采用现浇挡浪墙，施工时需选择浪小的施工条件，工期无法保证。与此同时，根据总包方反映，现场石料非常充足且价格低廉，因此，经设计组研究，决定采用护面块体替代挡浪墙作为内坡防护。用护面块体代替挡浪墙具有如下优点：1) 护面块体可直接预制，

同时相比较预制挡浪墙，安装时无需更大型的起吊设备；2) 节约挡浪墙的模板，而护面块体模板可直接重复利用外坡块体模板；3) 节约挡浪墙的构造钢筋；4) 若防波堤遭遇罕见大浪导致破坏，挡浪墙结构容易出现整体破坏，不易维修，而全护面块体的结构更加易以维护；5) 虽然断面加大，石头量有所增加，然而护面块体的混凝土用量较挡浪墙更小，每延米混凝土用量为 11.6 m^3 ，综合施工费、材料费及工期，总体测算造价更低；6) 断面增大可减少长周期波的透浪，对港池泊稳更加有利。首次优化后防波堤设计断面见图 3。

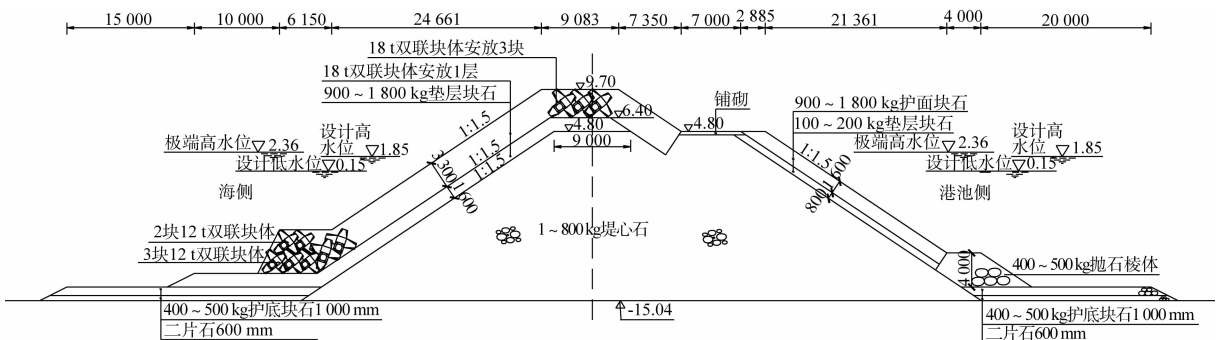


图 3 首次优化设计断面

2 模型试验

2.1 试验简介^[4]

试验在波浪水槽中进行, 试验模型按重力相似准则设计, 结构断面尺寸满足几何相似, 根据试验场地、现有块体质量及试验要求, 模型选用几何比尺为 34, 单宽流量比尺为 198.25, 时间比尺为 5.83, 力比尺为 39 304。试验采用不规则波, 波谱为 JONSWAP 谱。试验模型见图 4。

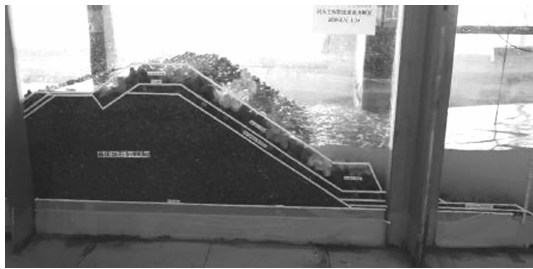


图4 堤身断面模型

2.2 试验结果及分析

设计低水位时, 在重现期 50 a 波浪作用下, 对于 18 t 双联块体, 在波浪连续作用 6 h 后, 未发现位移, 判定稳定。对于海侧坡脚双层摆放的 12 t 双联块体, 虽然其顶高程已经位于规范中规定设计低水位 1 倍波高以下, 然而在波谷作用下, 位于表层块体, 尤其最外侧 1 排块体, 被波浪吸至海侧, 统计其失稳率为 6.25% (12 t 双联块体失稳数与其表层块体总数的比值), 通过试验发现块体滚落区域在 900 ~ 1 800 kg 垫护底块石范围, 判定失稳; 对于 400 ~ 500 kg 护底块石, 同样在波谷作用下, 个别块石有滚落至海侧, 但块石表面整体未发生明显变形, 判定稳定。对于港内侧块体、块石, 由于波浪爬高至堤顶, 未形成越浪, 因此未对其稳定性产生影响, 各部分均保持稳定。

设计高水位时, 在重现期 50 a 波浪作用下, 对于 18 t 双联块体, 在波浪连续作用 6 h 后, 未发现位移, 判定稳定。对于海侧坡脚双层摆放的 12 t 双联块体, 在波谷作用下, 表层仍被波浪吸至海侧, 累积统计其失稳率为 10%, 块体滚落区域仍在其前的 900 ~ 1 800 kg 护底块石范围内, 判定失稳。对于 400 ~ 500 kg 护底块石, 波浪连续作用后, 稳定。随着堤前水深和入射波高增加, 堤

顶产生越浪, 最大越浪量为 47.58 L/(m·s), 越浪量可满足标书要求, 然而越浪形成的越堤流在经过道路路面后直接冲击后方 900 ~ 1 800 kg 护面块石, 波浪连续作用后, 块石被破坏, 堤心石暴露, 同时 4.8 m 高程的道路也因下方块石冲刷而发生破坏, 因此判断断面整体失稳。另外通过试验发现, 由于堤顶至港池侧护面 18 t 双联块体直接安放在堤心石表面, 在波浪越堤时, 堤心石被冲堆积在道路位置, 从而使上方块体高程降低, 有失稳的风险。试验过程中各试验场景如图 5 ~ 8 所示。

考虑到设计高水位时试验断面已失稳, 因此, 未进行极端高水位的断面试验。



图5 压脚块体失稳 (设计低水位)

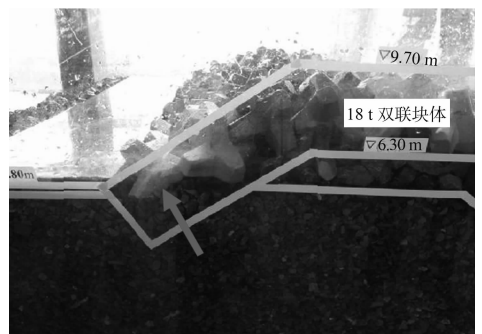


图6 内坡块体塌陷 (设计高水位)

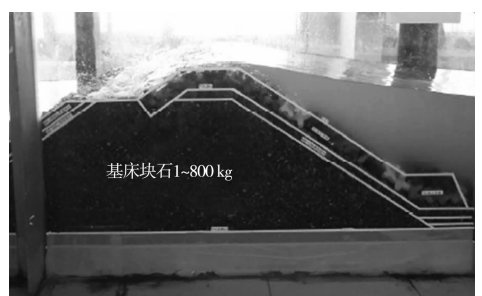


图7 堤顶越浪 (设计高水位)



图8 路肩失稳

3 断面调整

针对断面试验结果，对设计断面进行了以下调整：1) 将海侧2层压脚块体变为1层，并将压脚块体质量增加至与外坡护面质量相同即18 t；

2) 将外坡护面块体垫层延伸至内坡；3) 将施工预留通道内坡护面块石质量增加至2 000~2 500 kg。通过试验再次进行验证发现，海侧压脚块体最外侧一排块体存在少数晃动情况，但判断稳定，内坡护面块体稳定，同时施工预留通道路肩处在极端高水位情况下仍出现破坏情况。针对以上试验结果，对设计断面再次进行了调整：1) 考虑到坡脚稳定对整个防波堤的稳定至关重要，因此在压脚护面块体处设置了6 m宽抛石棱体；2) 预留通道坡肩至设计高水位之间设置0.9 m厚灌砌块石。重新进行物模试验，结构断面各部分均稳定。最终断面如图9所示。

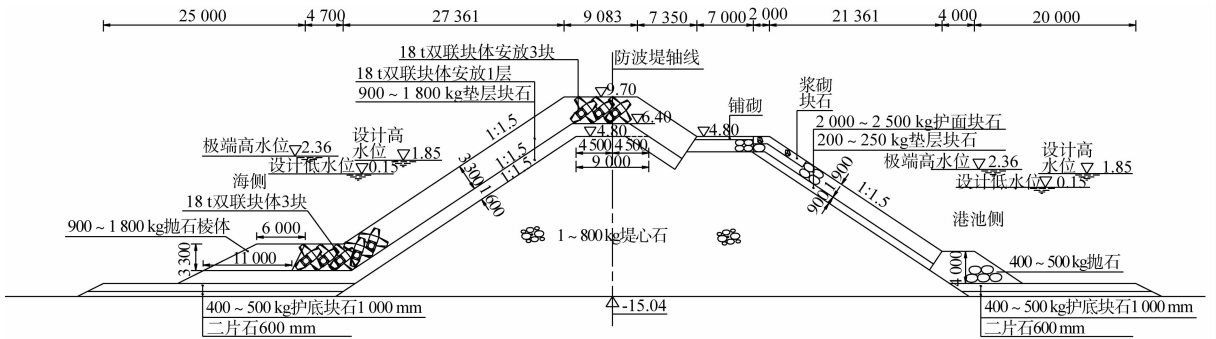


图9 最终结构断面

4 结论

- 1) 长周期涌浪海域，波高大，波能也大，防波堤护面不宜选用支腿断面细长的护面块体；
- 2) 对于石料丰富的区域，综合考虑施工费、材料费、工期、长周期波越浪以及透浪等，宜选用宽堤身的设计断面；
- 3) 内侧用护面块体代替挡浪墙更有利于施工、可减少施工费用、缩短工期，且方便防波堤的维护；
- 4) 仅从试验结果可看出，长周期波作用下，即使护面块体位于设计低水位以下1.0倍设计波高，且块体质量大于规范^[1]0.5倍斜坡块体的要求，仍然出现了失稳现象，因此设计时压脚块体质量宜与斜坡块体一致；

- 5) 对于基本不越浪的防波堤，在遇到大浪的情况下，由于越浪冲刷作用，施工预留通道的路肩为结构的薄弱部位，设计时应重视。

参考文献：

- [1] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [2] 杨宪章. 长周期波的特性及对系泊船舶动态特性的影响[J]. 中国港湾建设, 1989(6): 37-43.
- [3] EM 1110-2-1100: Part VI Fundamentals of Design[S].
- [4] 天津水运工程科学研究院. 印尼 KARANG TARAJE PORT 工程防波堤断面波浪物理模型试验研究[R]. 天津: 天津水运工程科学研究院, 2014.

(本文编辑 郭雪珍)