

涌浪对防波堤稳定性影响的试验研究

杨会利¹, 许磊磊², 陈汉宝¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 中交第二航务工程局, 湖北 武汉 430040)

摘要: 海外工程施工中常遇主浪向周期 10 s 以上的涌浪施工环境。以色列 Ashdod 港防波堤工程直面地中海开敞海域长周期涌浪作用, 通过物理模型试验研究, 结合长周期、大波高浪及水流作用下防波堤断面中堤心石、1~3 t 及 3~6 t 护面块石的流失率, 分析涌浪在施工过程中对防波堤稳定性的影响, 并通过物理模型试验深入研究了堤心石、1~3 t 及 3~6 t 护面块石临界失稳波高以寻求最佳的施工时机, 为同类工程施工提供依据。

关键词: 涌浪; 防波堤; 稳定性; 流失率

中图分类号: U 656.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0078-05

Experimental research on influence of swell on stability of breakwater

YANG Hui-li¹, XU Lei-lei², CHEN Han-bao¹

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China;

2. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: Overseas projects in the sea area often face a main direction swell with a period of over 10 s. The Ashdod breakwater in Israel faces the open Mediteranean sea and is affected by long period swell. Based on studies on the physical model tests of breakwaters, we analyze the influence of swell on the stability of breakwater combining with the drain rate of the core rock, 1~3 t and 3~6 t armor rock of breakwater under the action of impacts and erosions of waves with long periods and big heights during the construction of the breakwater. We also get the critical instability wave hight of the core rock, 1~3 t and 3~6 t armor rock to find out the best installation opportunity. The result may serve as reference for similar projects.

Keywords: surge; breakwater; stability; drain rate

随着国际化步伐的加快, 我国港口工程海外市场逐年扩大。在防波堤建设过程中, 经常遇到周期长、波能大的恶劣建港条件。国内防波堤施工海域波浪周期通常在 10 s 以下, 而印度洋及地中海等海域常年遭受 10~20 s 涌浪作用^[1], 且波能大, 对防波堤破坏性极大。法国中央水力实验室的迈松-阿尔福^[2]研究表明周期为 10~12 s “倒塌”型破碎波波能最集中, 破坏力最大; 柳玉良等^[3]研究揭示了波周期对斜坡防波堤护面块体的影响规律, 波高相同的条

件下, 波陡为 1/25 时波浪对护面块体的稳定最不利。目前针对施工过程中涌浪对防波堤的破坏影响研究还较少, 关于此方面的试验数据也很少。本文结合以色列 Ashdod 项目针对涌浪对防波堤施工过程中稳定性的影响进行了专项的研究。

1 工程概况

1.1 工程简介^[6]

以色列 Ashdod 港位于首都特拉维夫以南约

收稿日期: 2015-11-10

作者简介: 杨会利 (1983—), 女, 硕士, 助理工程师, 从事港口海岸及近海工程研究。

50 km, 地处地中海东南岸, 为满足日益增长的货运要求, Ashdod 港进行扩建, 主防波堤进行延长 600 m 并新建码头和护岸 (图 1)。由于工程所在地主波向浪多半为谱峰周期 10 ~ 13 s, 具有巨大波能的涌浪, 为保证以色列 Ashdod 港防波堤工程顺利安全的实施, 进行了防波堤施工过程中护面块体稳定的物理模型试验, 以指导分阶段的工程施工。防波堤主断面如图 2 所示, 防波堤堤心石为 0 ~ 1 t 块石, 其上为 1 ~ 3 t 和 3 ~ 6 t 块石垫层,

最上层为不同尺寸的预制 Antifer 块, 堤顶为现浇混凝土胸墙。

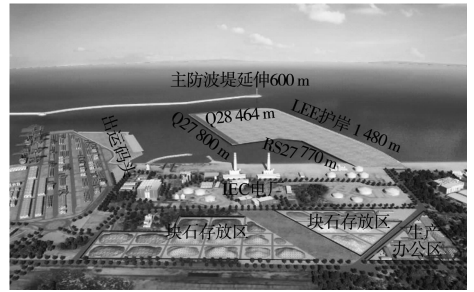


图 1 工程平面图

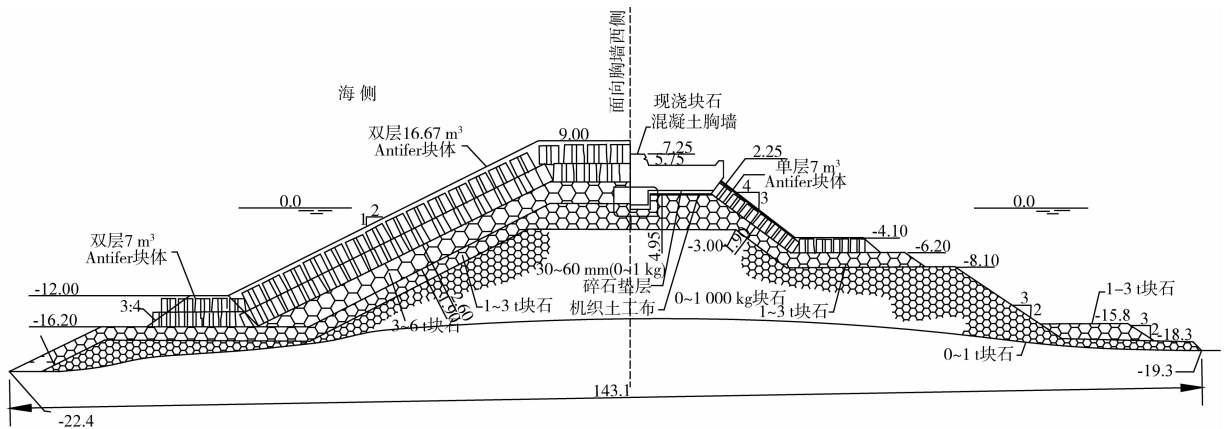


图 2 防波堤断面 (高程: m)

1.2 试验条件

1) 试验水位。

平均海平面: 0.08 m; 大潮低潮位: -0.22 m。

2) 海流流速为。

施工期流速: 0.38 m/s; 季风期最大流速:

1.0 m/s, 流向为正北向。

3) 试验波要素。

为寻求合适的施工时机, 在稳定性试验中模拟了重现期 1 a 和 10 a 的波浪, 主浪向为 270°、295°和 330°, 波要素见表 1。从表中可见 295°方向的波高最大, 1 a 一遇的有效波高为 5.0 m, 10 a 一遇的有效波高为 6.2 m。

表 1 主浪向波要素

方向/(°)	重现期/a	H_s/m	T_p/s
270	1	4.9	11.1
	10	6.1	12.3
295	1	5.0	11.2
	10	6.2	12.4
330	1	3.8	9.7
	10	4.8	11.0

2 模型试验

2.1 试验简介

模型按照重力相似准则进行设计, 根据试验内容、试验场地、造波机造波能力、仪器精度等确定采用正态三维物理模型进行试验, 确定模型比尺为 1:50。试验采用不规则波, 波谱为 JONSWAP 谱, 谱高因子 $\gamma = 7$, 水流均采用季风期最大流速 1.0 m/s, 流向为正北方向, 流速模拟采用潜水泵, 在防波堤周围布置 3 台潜水泵, 通过流量控制, 实现试验区域的流速相似, 模型布置如图 3 所示。

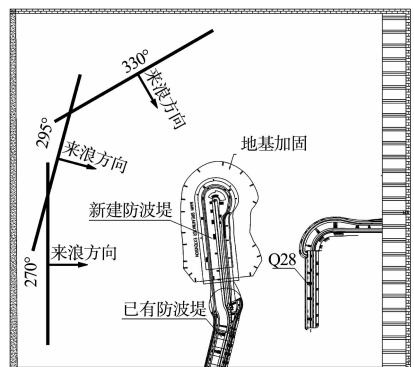


图 3 模型布置

2.2 试验结果及分析

2.2.1 稳定性试验

根据物理模型试验，堤心石、1~3 t 及 3~6 t 护面块石在波浪作用下趋于稳定后的流失率如表 2 所示，试验中堤心石稳定性试验水位考虑大潮低潮位 -0.22 m，第一、二层护面块石稳定性试验水位考虑平均海平面 0.08 m，在试验中为保持入射波浪的平稳性，避免反射波及二次反射波对稳定性试验结果的影响，采取每次造波个数为 110 个，待水面平稳后进行下一次造波，直至防波堤断面趋于稳定。

表 2 堤心石及护面块石流失率统计

块石类型	重现期/a	浪向/(°)	水流流速/(m/s)	水流流向	波浪作用时间/h	流失率/%
堤心石 0~1 t	1	295	1.0	正北	21	3.9
第 1 层护面块石 1~3 t	1	270	1.0	正北	15	1.2
	1	295	1.0	正北	15	1.3
	1	330	1.0	正北	15	0.8
第 2 层护面块石 3~6 t	10	270	1.0	正北	15	5.0
	10	295	1.0	正北	15	5.3
	10	330	1.0	正北	15	1.3

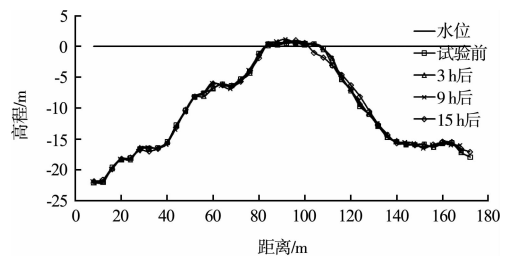
堤心石设计顶高程为 -3 m，堤心石所受波浪作用与潜堤所受波浪作用相似。堤心石在重现期 1 a 的 295° 向波浪持续作用下，防波堤断面形状发生变化，开始阶段的变形较大、速度较快，随着断面形状与动力条件的相互适应，防波堤断面形状趋于稳定。断面形状发生变化的主要位置是迎浪面的坡肩处，波浪作用下的前 3 h(原体值,下文中除特别注明外均为原体值)，坡肩处的大量堤心石被波浪推至背浪侧的坡面上，随着波浪作用时间的增加，更多的堤心石在波浪作用下堆积在背浪侧的坡面上，至第 21 h 防波堤断面趋于稳定，迎浪面堤心石高程从 -3.0 m 延伸至 -8.0 m。波浪持续作用下防波堤断面形状变化过程及试验现象如图 4 所示。



b) 试验现象

图 4 295° 向波浪连续作用下堤心石断面变化

从表 2 可以看出，295° 向波浪作用下护面块石流失率最大，1~3 t 护面块石顶高程为 0.5 m，块石堤顶高程与水面基本持平。在波浪作用下，首先出现移动的部位是在迎浪侧的坡肩处，随着护面块石的运动，一部分护面块石被波浪推至坡顶然后推到背浪侧，另外一部分护面块石被波浪从坡肩处淘刷下来，滚落到坡面上，最终形成与动力条件相适应的更缓的前坡。295° 向波浪持续作用下防波堤断面形状变化过程及试验现象如图 5 所示。



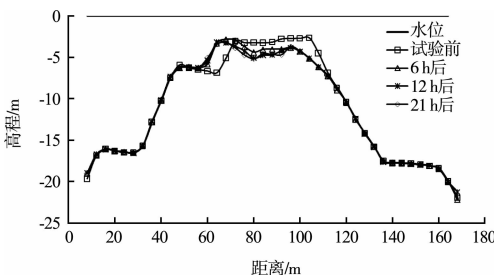
a) 断面变化



b) 试验现象

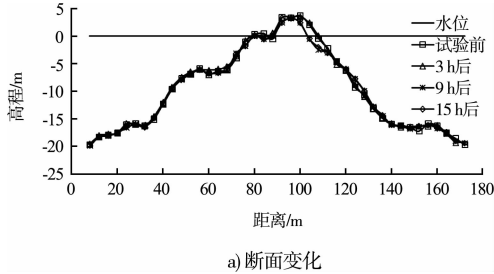
图 5 295° 向波浪连续作用下第一层护面块石断面变化

3~6 t 护面块石的顶高程为 3.4 m，处于波浪力作用最强的范围内，295° 向试验现象与 1~3 t 护面块体类似，即首先出现移动的部位是在迎浪侧的坡肩处，试验开始阶段断面形状变化较



a) 断面变化

快, 随着时间的推移速率变慢, 最终形成与动力条件相适应的更缓的前坡。295°向波浪持续作用下防波堤断面形状变化过程及试验现象如图6所示。



a) 断面变化



b) 试验现象

图6 295°向波浪连续作用下第二层护面块石断面变化

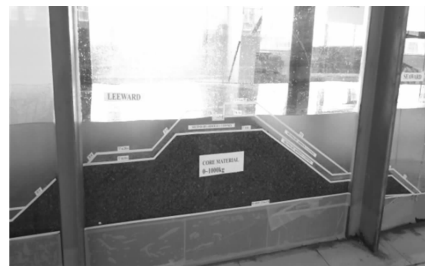
当入射波浪从295°方向由外海传播至主防波堤延长段时, 波浪入射方向与防波堤轴线存在一定夹角, 防波堤外侧上浪, 因此堤心石和块体破坏形式类似, 迎浪侧坡肩处首先出现破坏移动, 波浪强度大时, 块石被波浪推至坡顶然后推到背浪侧, 反而护面块石被波浪从坡肩处淘刷下来, 滚落到坡面。从试验结果看, 施工期堤心石及1~3t护面块石在重现期1a的波浪连续作用下3h内就发生破坏以致失稳, 3~6t护面块石在重现期10a的波浪连续作用下3h内也发生失稳和破坏, 可见防波堤施工期采用块石堆填时, 涌浪对其稳定性影响很大, 破坏速度很快, 因此施工期 Antifer 块体防护需及时跟上, 缩短堤心石、垫层块石施工与块体施工之间的间隔, 以在大浪来临之前及时做好防护。

为保证施工的顺利进行, 对堤心石、1~3t护面块石和3~6t护面块石稳定极限波高进行了试验研究, 以寻求最佳的施工时机。

2.2.2 极限波高试验

在防波堤稳定性整体物理模型试验中观测上述块石整个稳定的过程存在较大难度, 因此对该项内容选择在波浪水槽中进行, 通过水槽中玻璃窗观测堤心石和护面块石的稳定情况, 从而得出堤心石、1~3t护面块石和3~6t护面块石稳定的极限波高, 试验水位考虑平均海平面0.08m。

根据现场提供资料进行极限波高试验时, 取有效周期 $T_s = 7.9$ s, 根据 JTS 145—2013 《海港水文规范》^[10], 谱峰周期与有效周期的换算参数取1.05。试验时根据断面结构形式和防波堤断面块石的施工顺序, 分别得出堤心石、1~3t和3~6t护面块石稳定极限波高, 即临界失稳波高, 试验采用由小波高逐级加大方式进行, 有效周期 $T_s = 7.9$ s保持不变, 有效波高从 $H_s = 0.5$ m 开始逐级增大, 每级增大0.5m, 直至护面表面大量块石滚动, 且块石表面整体形状有变形, 判定其达到临界失稳, 试验结果如表3所示, 堤心石及各块体试验现象如图7~9所示。通过临界失稳波高试验的研究可以为现场施工提供一定的科学依据, 以指导现场施工时寻求最佳时机, 加快施工进度, 减少施工中的防护次数及防护成本。

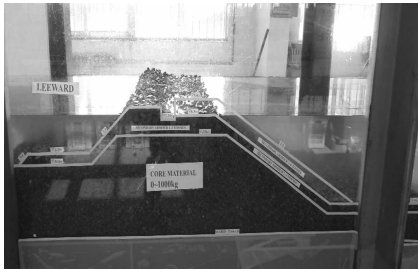


a) 模型摆放

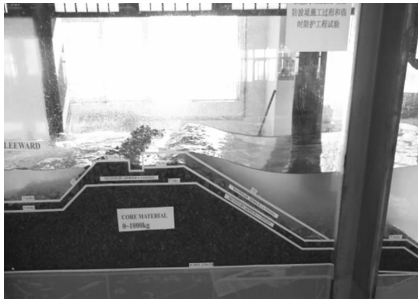


b) 波浪冲击

图7 堤心石断面模型摆放及波浪在0~1t堤心石顶发生破碎



a) 模型摆放



b) 波浪冲击

图8 1~3 t 护面块体模型摆放及波浪冲击拐角位置护面块石



a) 模型摆放



b) 波浪冲击

图9 3~6 t 护面块体模型摆放及波浪冲击拐角位置护面块石

表3 极限波高试验结果

块石质量/t	有效周期 T_s /s	临界失稳波高 H_s /m
堤心石 0~1	7.9	2.0
第1层护面块体 1~3	7.9	3.0
第2层护面块体 3~6	7.9	4.5

3 结语

长周期涌浪海域波高大，波能也大，对防波堤稳定性的影响大且复杂，因此在防波堤施工过程中，

掌握长周期波对防波堤施工期的破坏形态非常重要。通过物理模型试验可以获得涌浪作用下防波堤稳定性能的直观参数，从而对防波堤施工过程中可能出现的问题提前做好准备，选择适宜的施工作业模式，把握好施工时机，通过缩短分项间隔确保施工及时快速推进，减少施工过程中的防护次数与防护成本，为施工顺利完成提供可靠的依据。

本文通过三维物理模型试验模拟了在涌浪和水流共同作用下，防波堤堤心石及护面块石的流失率及断面失稳过程曲线，通过二维物理模型试验模拟得出了防波堤断面各层块石的临界失稳极限波高，为工程的顺利施工提供依据。

本文在稳定性模型试验中，考虑了波流共同作用下的块石稳定性，未进行对波浪单独作用下的块石稳定性试验对比；临界失稳极限波高试验中未考虑水流的作用，且波浪为正向作用，其结果与带角度波浪作用会有一些差别。

参考文献:

- [1] 周加杰, 罗春艳, 靳克, 等. 长周期波作用下斜坡式防波堤稳定性及施工分析[J]. 中国港湾建设, 2013, 5(10): 21-24.
- [2] Carp L, 王美荣. 波浪周期对斜坡式防波堤稳定性的影响[J]. 港工技术, 1989(3): 44-48.
- [3] 柳玉良, 王海峰, 卢燕. 波浪周期对防波堤护面块体稳定性影响的试验分析[J]. 海岸工程, 2012, 31(3): 9-14.
- [4] JTS 154—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [5] 周加杰, 高峰, 张华平. 长周期涌浪作用下防波堤设计关键技术[J]. 中国港湾建设, 2014, 12(12): 25-29.
- [6] 天津水运工程科学研究院. 以色列 Ashdod 项目防波堤施工过程和临时防护物理模型试验研究[R]. 天津: 天津水运工程科学研究院, 2015.
- [7] 曹兵, 靳克, 周加杰. 印尼 Adipala 防波堤施工期波浪与堤头防护分析[J]. 水运工程, 2014(1): 183-186.
- [8] 周加杰, 罗春艳, 钟少杰, 等. 印尼爪哇岛面临印度洋海域波浪特性及防波堤施工技术分析[J]. 中国港湾建设, 2014(4): 17-20.
- [9] 张先武, 张华平. 长周期涌浪作用下斜坡式防波堤结构优化设计[J]. 水运工程, 2015(1): 58-62.
- [10] JTS 145—2013 海港水文规范[S].