



# 有斜坡棱体掩护的防波堤直立墙 波浪力试验研究

黄旺祥, 陈 成

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 抛石防波堤内部存在透浪和透流的现象, 有斜坡棱体掩护的防波堤直立墙受到外海波浪力作用, 但波浪力大小尚无成熟的计算方法。通过防波堤断面物理模型试验, 研究斜坡棱体掩护对直立墙波浪力的影响规律, 分析试验结果得出结论: 直立墙在斜坡棱体掩护下受到的波浪力作用明显减小。斜坡结构顶宽加大, 直立墙波浪力减小, 折减系数减小, 但宽度超过一定值后, 波浪力减小的幅度变缓, 建议设计阶段结合模型试验论证最经济方案。合田公式波浪力折减系数偏大, 在前期方案研究阶段, 不具备开展模型试验条件时, 建议有掩护直立墙折减系数取0.5。

**关键词:** 防波堤; 斜坡棱体掩护; 直立墙; 波浪力

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0028-05

## Experimental study on wave force of vertical breakwater wall shield by sloping prism

HUNAG Wangxiang, CHEN Cheng

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** There are wave and current penetrating phenomena in riprap breakwater, the vertical wall of breakwater with slope prism shield is subjected to the wave force in the open sea, but there is no mature calculation method for the magnitude of wave force. This paper studies the influence law of slope prism shield on the wave force of vertical wall through the physical model test of the breakwater section. The following conclusions are drawn by analyzing the experimental results. The wave force of the vertical wall with sloping prism is obviously reduced. With the increase of the top width of the slope structure, the wave force of the vertical wall decreases and the reduction coefficient decreases. However, when the width exceeds a certain value, the amplitude of the wave force reduction slows down. It is suggested that the most economical scheme should be demonstrated in combination with the model test in the design stage. The reduction coefficient of wave force in Goda formula is too large. In the preliminary scheme research stage, when the conditions for model test are not available, it is recommended to take 0.5 as the reduction coefficient of shielded vertical wall.

**Keywords:** breakwater; slope prism shield; vertical wall; wave force

防波堤通常采用抛石斜坡堤和直立堤沉箱结构, 在波况恶劣的海域, 直立堤造价较高, 一般采取相对经济的抛石斜坡堤结构。近年来, 随着海洋生态环境的管理日趋严格, 集约化用海是项目方案的审查重点。半直立半斜坡混合式防波堤<sup>[1]</sup>外侧为斜坡抛石堤结构, 用于削减外海波浪,

内侧为沉箱结构, 可用于停靠船舶。此类结构可根据需要建成具有旅游、观光和商业功能的景观防波堤<sup>[2]</sup>。

对于作用在直立墙波浪力, 有一种观点认为, 直立墙受外侧抛石斜坡堤掩护, 直立墙波浪力可忽略不计。根据任增金<sup>[3]</sup>、徐佳玲等<sup>[4-5]</sup>、丁坤

收稿日期: 2024-01-29

作者简介: 黄旺祥 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

等<sup>[6]</sup>、潘天娇等<sup>[7]</sup>研究, 由于抛石防波堤内部的孔隙, 在抛石防波堤内部存在透浪和透流的现象, 港外的波浪能通过抛石防波堤内部的流场作用在直立墙上。许凡等<sup>[8]</sup>通过断面模型试验对设置斜坡掩护块石棱体的双排钢管板桩直立式结构波浪力进行试验, 但并未对斜坡掩护的影响效果进行对比试验分析。对于有斜坡棱体掩护的防波堤直立墙波浪力计算, 目前尚未有成熟的计算公式。JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》<sup>[9]</sup>中, 斜坡堤顶部胸墙前有块体或块石掩护, 且掩护的宽度至少为两排, 高度形成全掩护时, 作用在胸墙上的水平波浪力可乘以折减系数 0.6~0.7。《海港工程设计手册》<sup>[10]</sup>中, 对于在直立墙前有斜坡掩护棱体的混合式防波堤作用在墙身上的波浪力, 原则上可用合田公式按下式计算:

$$P_s = (\alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2) \lambda_1 \gamma h \quad (1)$$

$$P_b = \alpha_3 P_s \quad (2)$$

$$P_u = \lambda_3 \alpha_1 \alpha_3 \gamma h \quad (3)$$

式中:  $P_s$  为静水面处波压;  $P_b$  为墙底处波压;  $P_u$  为墙后趾(外海测)波压;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  为波压力

系数;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  为折减系数;  $h$  为波高;  $\gamma = \rho g$ , 其中  $\rho$  为水密度,  $g$  为重力加速度。

对于无掩护直立墙:  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1.0$ ; 当直立墙被消浪块体充分地掩护时:  $\lambda_1 = \lambda_3 = 0.8$ ,  $\lambda_2 = 0$ ; 对于低基床  $\alpha_1/\alpha_2$  一般大于 10.0, 可以看出, 采用合田公示计算有消浪块体充分掩护直立墙波浪力折减系数约为 0.8。

上述两种参考计算方案折减系数与波浪要素、外侧斜坡堤宽度无关, 显然与实际情况不符。本文通过断面模型试验, 进一步研究有斜坡掩护棱体的混合式防波堤直立墙波浪力的影响规律。

## 1 工程概况

某旅游客运码头建设 4 个 500 GT 泊位, 港区采用 U 形布置方案, 东侧客运码头泊位岸线基本与现状岸线平行, 客运码头与西、南防波堤形成三面围合的港池水域, 满足船舶泊稳要求。为集约用海, 西防波堤内侧需满足工作船靠泊要求。码头平面布置方案见图 1。

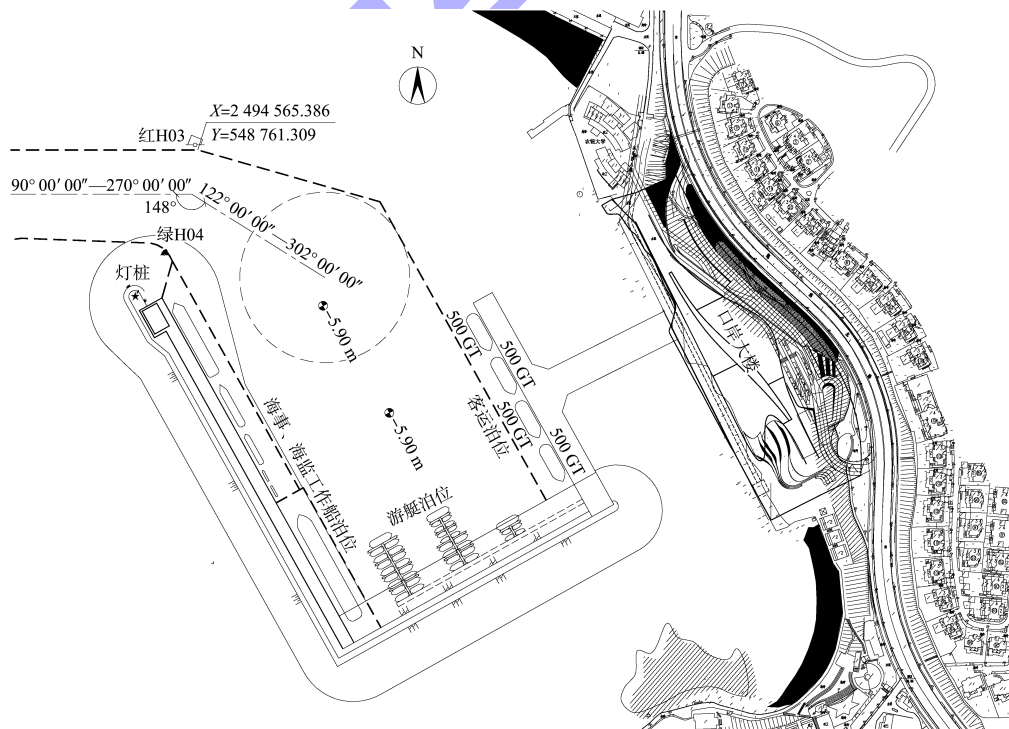


图 1 码头平面布置

### 2 试验设备与方法

试验在河海大学风浪流水槽中进行，见图 2，水槽长 80 m、宽 1.0 m、高 1.5 m，可同时模拟风、浪、流，水槽一端安装不规则造波机，设置二次反射吸收装置，另一端设置消波系统，水槽纵向分为两部分，一部分铺设试验断面，另一部分用以消除波浪的二次反射。波压力采用北科院生产的 DJ800 型波浪采集系统测量，按照正态重力相似准则设计模型。模型长度比尺为  $\lambda' = 30$ 。试验采用 JOWNSWAP 不规则波谱，不规则波数不小于 120 个，每组试验重复 3 次，取平均值作为试验值。



图 2 风浪流水槽

### 3 试验概况

#### 3.1 试验断面

试验断面为断面 1 和 2，根据西防波堤功能需求，试验断面 1 采用无掩护的直立式沉箱防波堤结构，原泥面高程为 -8.0 m，沉箱底高程 -8.0 m，底宽 16.39 m。沉箱顶部为防浪墙，迎浪面墙顶高程 7.00 m，内侧兼做码头，堤顶高程 3.65 m。断面 1 见图 3a)。

断面 2 采用半直立半斜坡式防波堤结构，内侧泊位顶高程为 3.65 m，沉箱底高程 -7.00 m，沉箱底宽 11.5 m。迎浪面采用 1:1.5 斜坡，斜坡上采用 9 t 扭王字块护面，斜坡脚平铺两排扭王字块体；堤顶设置反 L 形挡浪墙，墙顶高程为 6.00 m，挡墙前平铺两排扭王字块体掩护，扭王字块体顶高程和墙顶高程一致。斜坡顶部外边界距离沉箱后壁宽度为  $B$ ，为了研究斜坡顶宽与直立墙波浪力的变化关系，分别对  $B$  为 16.1、21.6、26.6 m 的方案进行试验，断面 2 见图 3b)。

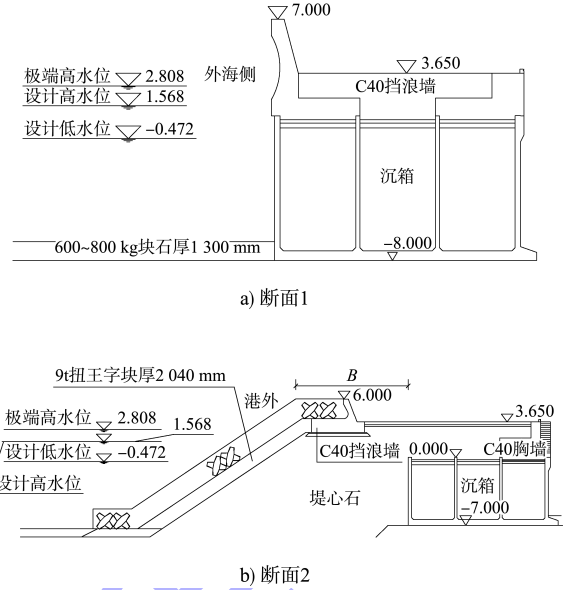


图 3 试验断面 (单位: m)

试验测量防波堤直立墙迎浪面各部位波浪压强，断面 1 共布置 10 个测点。为测量沉箱后壁处直立墙波压力，断面 2 在沉箱上部设置挡板，挡板顶高程与内侧码头面一致，断面 2 共计 6 个测点。各断面测点布置见图 4。

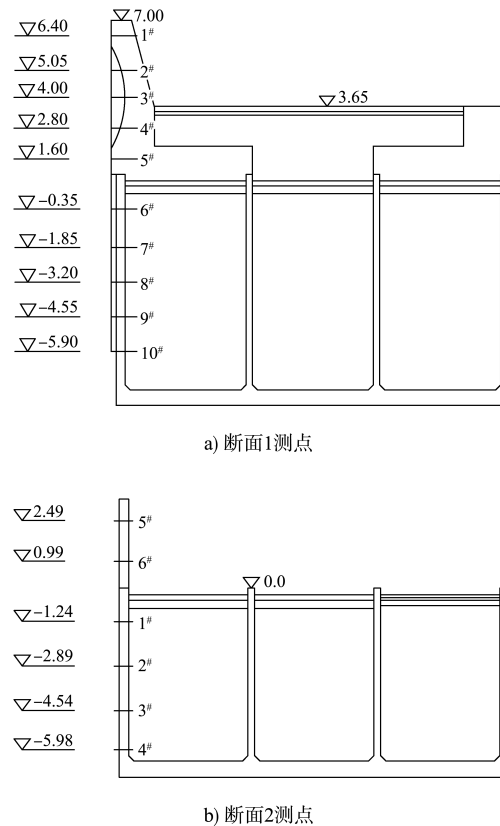


图 4 试验断面测点 (单位: m)

### 3.2 试验波浪要素

根据波浪数学模型计算分析成果, 选取 50 a 一遇潮位对应的波浪要素作为试验依据。试验波浪要素见表 1。试验值与要求值的误差符合交通部《水运工程模拟试验技术规范》的要求, 谱密度分布的偏差小于  $\pm 15\%$ , 波谱总能量的偏差小于  $\pm 10\%$ , 有效波高、有效波周期的偏差小于  $\pm 5\%$ 。

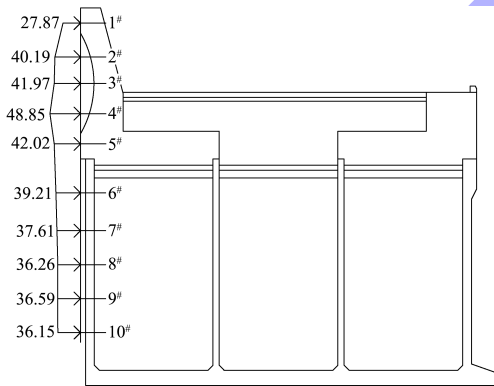
表 1 试验采用波浪要素

潮位/m	波高/m	周期/s	波长/m
2.808	4.26	12.9	131.6
1.568	4.11	12.9	124.8
-0.472	3.89	12.9	112.5

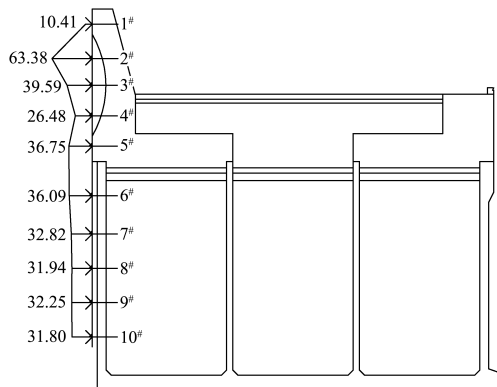
### 3.3 试验成果及分析

#### 3.3.1 试验断面 1(无掩护)

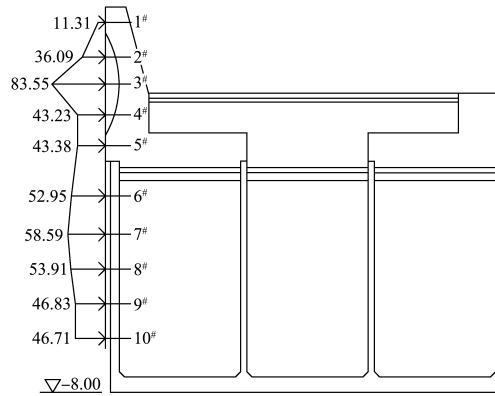
各潮位对应的波浪要素下, 无掩护直立墙  $H_{13\%}$  波压沿高度 (-8.0~7.0 m) 分布情况见图 5, 每延米直立墙所受到的水平波浪力分别为 444.2、313.4、394.3 kN。极端高水位和设计高水位工况, 因堤顶越浪量较大, 导致直立墙范围波浪力偏小。



a) 极端高水位波压分布



b) 设计高水位波压分布



c) 设计低水位波压分布

图 5 波压沿高度分布(无掩护)(单位:kPa)

#### 3.3.2 试验断面 2(有掩护)

不同斜坡顶宽方案和各特征水位工况下, 有掩护直立墙在试验不规则波浪作用下收集一段时间内的波压力数据, 并进行处理, 将经过筛选的数据按大小顺序重新排列。考虑极端值受数据记录错误、环境干扰、越浪等因素影响较大, 且试验数据量有限, 为更好分析规律, 本文提取峰值排序中前 13% 位置的数据作为研究对象, 其波压沿高度 (-7.00~3.65 m) 分布情况见图 6~8。由图可知, 与无掩护情况相比, 有掩护直立墙波压较小, 且随着斜坡顶宽加大, 直立墙波压减小。

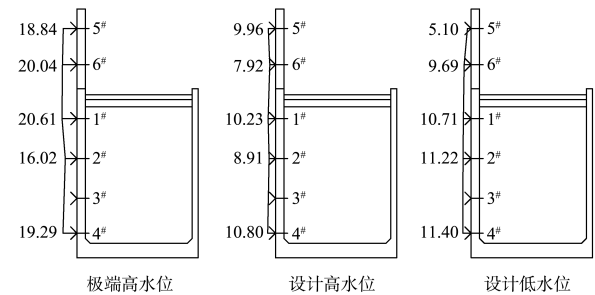


图 6 斜坡顶宽 16.1 m 方案波压分布(单位:kPa)

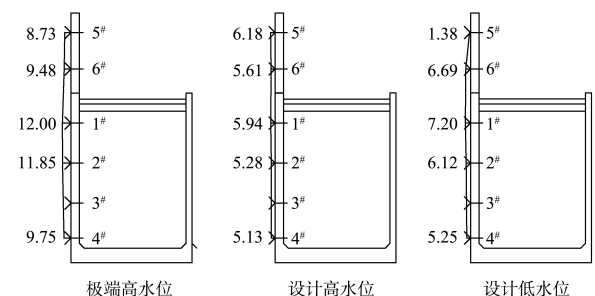


图 7 斜坡顶宽 21.6 m 方案波压分布(单位:kPa)



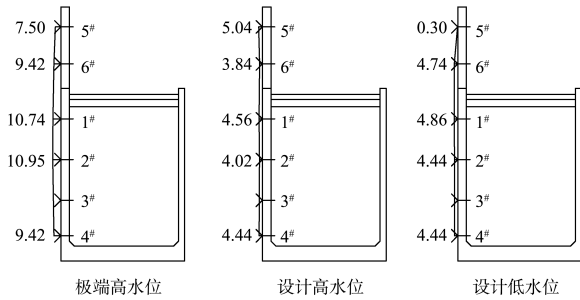


图8 斜坡顶宽 26.6 m 方案波压分布 (单位: kPa)

### 3.3.3 有斜坡棱体掩护直立墙波压折减系数

为方便对比分析,截取试验断面1高程范围-7.00~3.65 m直立墙波浪力,并与试验断面2同样高程范围波浪力进行对比。不同方案直立墙波浪力见图9,折减系数见图10,其中顶宽0 m为无掩护直立墙结构方案。

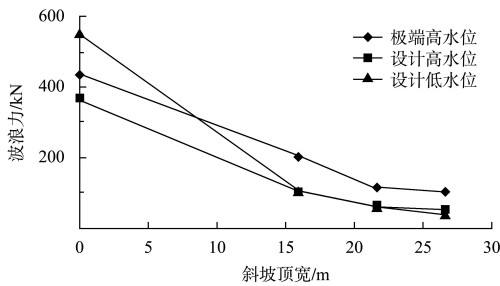


图9 直立墙波浪力与斜坡顶宽关系

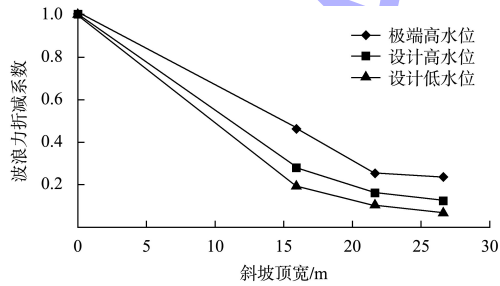


图10 直立墙波浪力折减系数与斜坡顶宽关系

根据上述分析得出: 1) 与无掩护情况相比,有斜坡棱体掩护直立墙波浪力明显减小; 2) 随着斜坡结构顶宽加大,直立墙波浪力减小,折减系数减小,但宽度超过一定值后,波浪力减小的幅度变缓; 3) 相同结构方案,极端高水位折减系数大于低水位; 4) 极端高水位工况下,不同斜坡顶宽方案对应的折减系数为0.46、0.25、0.24。

## 4 结论

1) 外海传递的波浪力能够作用在有斜坡棱体掩护的直立墙上,不考虑此作用会导致结构存在安全隐患。

2) 随着斜坡结构顶宽加大,直立墙波浪力减小,折减系数减小,但宽度超过一定值后,波浪力减小的幅度变缓,建议设计阶段结合模型试验论证最经济方案。

3) 考虑工程一般最不利工况为极端高水位,在前期方案研究阶段,不具备开展模型试验条件时,建议有掩护直立墙折减系数取0.5。

## 参考文献:

- [1] 谢世楞. 深水防波堤技术的最新进展: 94 深水防波堤国际会议报导[J]. 港工技术, 1994(2): 1-10.
- [2] 杨海宁, 张飞, 范江山. 水平混合式直立堤结构在景观防波堤中的应用[J]. 水运工程, 2022(S1): 21-24, 41.
- [3] 任增金. 抛石防波堤内波浪运动的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [4] 徐佳玲. 波浪在斜坡式防波堤中透射的数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [5] 徐佳玲, 赵刘群, 马玉祥, 等. 非均匀堤心石斜坡式防波堤透浪系数模拟研究[J]. 港工技术, 2022, 59(4): 10-17.
- [6] 丁坤, 冯曦, 马钢峰, 等. 波浪非线性对斜坡堤透浪特性影响研究[J]. 水运工程, 2020(4): 1-8.
- [7] 潘天娇, 冯曦, 倪兴也, 等. 可透浪斜坡式防波堤透浪系数对入射波要素的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 45-53.
- [8] 许凡, 许云飞, 常军, 等. 水平式混合直立护岸波浪力试验研究[J]. 水道港口, 2019, 40(2): 144-149, 193.
- [9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018 [S]. 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [10] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港工程设计手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 赵娟)