

· 围垦工程 ·



# 宽平台生态景观海堤结构稳定性试验验证

刘 阳<sup>1</sup>, 项存平<sup>2</sup>

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

2. 舟山绿色石化基地管理委员会, 浙江 舟山 316021)

**摘要:** 针对宽平台生态景观海堤结构稳定计算突破规范适用范围的问题, 开展了物理模型试验验证。首先根据使用需求确定海堤设计的主要功能; 其次通过理论计算挡浪墙、护面块体稳定及波压力值, 初步确定海堤设计断面; 最后根据波浪模型试验验证设计断面, 对比分析理论计算与试验数据。试验结果表明: 宽平台生态景观海堤堤顶挡浪墙与堤脚距离宜大于1.5倍波长, 堤顶越浪量较小, 背海面可种植绿化, 挡墙稳定验算基本可忽略波浪力作用。距离堤脚1倍波长位置, 护面块体应选择稳定可靠的形式, 消浪作用显著。研究成果为宽平台生态海堤设计提供试验验证及合理建议。

**关键词:** 宽平台; 稳定性; 波浪模型试验; 越浪量

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)05-0001-05

## Experimental verification of structural stability for ecological landscape embankment with wide platform

LIU Yang<sup>1</sup>, XIANG Cun-ping<sup>2</sup>

(1.CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2.Zhoushan Green Petrochemical Base Management Committee, Zhoushan 316021, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the structural stability calculation for ecological landscape embankment with a wide platform breaks through the applicable scope of the codes, the physical model test is carried out. Firstly, we determine the main functions of embankment design according to the use requirements; secondly, we preliminarily determine the design section of embankment through the theoretical calculation of the stability and wave pressure of wave wall and armor block; finally, we verify the design section based on the wave model, compare and analyze the theoretical calculation and test data. The results show that: the distance between the seawall and the toe of the embankment with a wide platform should be greater than 1.5 times of the wavelength. Under this condition, the wave overtopping is small, and the greening can be planted back to the sea, so the effect of wave force can be ignored in the stability verification for the seawall. At the position 1 times the wavelength from the embankment toe, the stable and reliable type of armor block should be selected, and the wave dissipation effect is obvious. The research results provide experimental verification and reasonable suggestions for the design of ecological embankment with a wide platform.

**Keywords:** wide platform; stability; wave model test; wave crossing

大型石化基地对边界海堤的要求高, 海堤设计标准为百年一遇的潮位与波浪组合, 海堤结构等级为I级。结构安全等级为一、二级的防波堤和结构安全等级为一级的护岸结构应进行波浪模型试验验证。海堤结构波浪模型试验验证内容一

般包括验证海堤结构各部位的稳定性、量测挡浪墙的波压力分布、量测堤顶越浪情况。海堤各部位结构、挡浪墙波压力分布、越浪量与海堤平台宽度、坡比、潮位、堤前波要素等均有较大关系, 理论计算公式有一定的适用范围, 当海堤断面特

收稿日期: 2020-12-01

作者简介: 刘阳(1985—), 女, 博士, 高级工程师, 从事港口工程设计。

性突破适用范围时，波浪模型试验显得尤为重要，验证结构稳定性的同时还可以优化结构方案。

舟山绿色石化基地东侧宽平台生态景观海堤，具有 20~50 m 的宽平台特征，外海侧堤身局部放坡 1:10，结构稳定计算突破了理论公式的适用范围，宽平台生态景观海堤目前应用较少，海堤结构稳定亟需波浪模型试验验证。本文首先介绍宽平台海堤的工程背景，根据理论计算公式初步确定海堤结构，再通过波浪模型试验验证结构的稳定性，进行对比分析，利用试验结果指导理论分析，提出合理建议。

1 工程概况

舟山绿色石化基地选址于岱山县大、小鱼山海域，通过围填海为石化基地提供建设用地，规划大鱼山东区北侧为高端服务区，其边界海堤拟建设成为生态景观海堤，外海侧设置观海宽平台，规划的海堤效果见图 1。生态景观海堤全长 3 168 m，挡浪墙顶高程 9.1 m(85 高程,下同)，临海侧 4.0 m

高程设置 20 m 宽平台，局部宽平台增加至 50 m，用于展现鱼山文化及鱼山精神，宽平台边界挡浪墙顶高程 5.0 m，其外侧通过设置人工块体消浪。



图 1 规划宽平台生态景观海堤效果

2 结构稳定计算

2.1 作用于海堤的波要素

鱼山海域 200 a 一遇高潮位 3.81 m，100 a 一遇高潮位 3.67 m，设计高潮位 2.34 m，设计低潮位 -1.66 m，100 a 一遇低潮位 -2.62 m。宽平台生态景观海堤前沿重现期为 100 a 的设计波要素见表 1，海堤结构主要受偏北向波浪影响。

表 1 各潮位与 100 a 一遇波浪组合对应的波要素

水位	$H_0$ /m	$H_{1\%}$ /m	$H_{4\%}$ /m	$H_{5\%}$ /m	$H_{13\%}$ /m	$T$ /s	$L$ /m	$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$d$ /m
200 a 一遇高水位	3.48	6.82	5.99	5.84	5.09	8.5	82.7	9.7	12.31
100 a 一遇高水位	3.46	6.77	5.96	5.80	5.06	8.5	82.3	9.7	12.17
设计高水位	3.30	6.36	5.61	5.47	4.79	8.5	78.8	9.3	10.84
设计低水位	2.37	4.41	3.92	3.83	3.38	8.5	65.2	7.7	6.84
100 a 一遇低水位	2.14	3.92	3.50	3.42	3.03	8.5	61.0	7.2	5.88

注： $H_0$ 为平均波高， $H_{1\%}$ 、 $H_{4\%}$ 、 $H_{5\%}$ 、 $H_{13\%}$ 为波高累计频率分别取 1%、4%、5%、13%时对应的波高值， $T$ 为波周期， $L$ 为波长， $C$ 为波速， $d$ 为水深。

2.2 海堤各部位稳定性计算

2.2.1 挡浪墙稳定性计算

按 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》<sup>[1]</sup>，挡浪墙沿墙底抗滑稳定性的承载能力极限状态按式(1)计算：

$$\gamma_0\gamma_pP\leq(\gamma_GG-\gamma_uP_u+\gamma_EE_b)$$
 (1)

式中： $\gamma_0$ 为结构重要性系数，结构等级一级取 1.1，二级取 1.0，三级取 0.9； $\gamma_p$ 为水平波浪力分项系数，持久组合取 1.3，短暂组合取 1.2； $P$ 为作用在胸墙海侧面上的水平波浪力标准值(kN)； $\gamma_G$ 为自重力分项系数，取 1.0； $G$ 为胸墙

自重力标准值(kN)； $\gamma_u$ 为波浪浮托力分项系数，持久组合取 1.1，短暂组合取 1.0； $P_u$ 为作用在胸墙底面上的波浪浮托力标准值(kN)； $f$ 为胸墙底面摩擦系数； $\gamma_E$ 为土压力分项系数，取 1.0； $E_b$ 为胸墙底面埋深大于等于 1 m 时，内侧面填石的被动土压力(kN)，可乘以折减系数 0.3 作为标准值。

挡浪墙沿墙底抗倾稳定性的承载能力极限状态按式(2)计算：

$$\gamma_0(\gamma_pM_p+\gamma_uM_u)\leq\frac{1}{\gamma_d}(\gamma_GM_G+\gamma_EM_E)$$
 (2)

式中： $M_p$  为水平波浪力的标准值对胸墙后趾的倾覆力矩(kN·m)； $M_u$ 为波浪浮托力的标准值对胸墙后趾的倾覆力矩(kN·m)； $\gamma_d$ 为结构系数，取 1.25； $M_G$ 为胸墙自重标准值对胸墙后趾的稳定力矩(kN·m)； $M_E$ 为土压力标准值对胸墙后趾的稳定力矩(kN·m)。

根据 GB/T 51015—2014《海堤工程设计规范》<sup>[12]</sup>规定，一级海堤挡浪墙抗滑稳定安全系数不应小于 1.35，抗倾稳定安全系数不应小于 1.60。由于海堤越浪量控制标准为不大于 0.01 m<sup>3</sup>/(m·s)，波浪对堤顶挡浪墙的水平作用力较小，挡墙向背海侧滑动、倾覆的可能性较小，堤顶挡浪墙稳定性计算应以抵抗墙后填土为主要控制因素。堤顶道路与宽平台之间通过景观砌石挡墙(混凝土灌砌)，高度由 8.3 m 降低至 4.0 m，填土荷载较大，砌石挡墙稳定性计算也应以抵抗墙后填土为主要控制因素。而波浪经护面块体消能后，传递至挡墙面的波压力大大削弱，挡墙向背海侧滑动、倾覆的可能性较小。

宽平台挡浪墙位于波浪影响范围，受力条件复杂。按 JTS 145-2—2013《海港水文规范》<sup>[13]</sup>有关波浪力计算公式及图表，宽平台挡墙所受平均水平波压强为 85 kPa，若仅考虑结构自重提供的抗力及墙后填土压力，挡浪墙向背海侧将发生滑动和倾覆破坏。由于宽平台路面考虑混凝土大板结构，混凝土大板对挡浪墙有一定的水平抗力，当考虑水平抗力为 200 kN 时，挡浪墙抗滑稳定安全系数可满足要求，抗倾覆稳定安全系数比规范略低。需波浪模型试验进一步验证。

2.2.2 护面块体稳定性计算

按《防波堤与护岸设计规范》，在波浪正向作用之下，斜坡堤在计算水位上、下 1 倍计算波高之间的护面块体中，单个块体的稳定质量按下式进行计算：

$$W=\frac{\rho_b H^3}{K_D(S_b-1)^3 \cot \alpha} \tag{3}$$

式中： $W$ 为单个块体的稳定质量(t)； $\rho_b$ 为块体材

料的密度(kg/m<sup>3</sup>)； $H$ 为设计波高(m)； $K_D$ 为块体稳定系数； $\alpha$ 为斜坡与水平面的夹角(°)； $S_b=\frac{\rho_b}{\rho}$ ； $\rho$ 为水的密度(kg/m<sup>3</sup>)。

当护面块体坡比为 1:2 时，坡面可采用 10 t 扭王字块体防护；当护面块体坡比为 1:10 时，坡面可采用 2.5 t 四脚空心块体防护。

2.2.3 堤顶越浪量计算

按《海堤工程设计规范》附录 F，斜坡堤堤顶有胸墙时的越浪量按式(4)计算：

$$Q=0.07^{\frac{H_c}{H_{1/3}}} \exp\left(0.5-\frac{b_1}{2H_{1/3}}\right)BK_A\frac{H_{1/3}^2}{T_p}\left[\frac{0.3}{\sqrt{m}}+\operatorname{th}\left(\frac{d}{H_{1/3}}-2.8\right)\right]\ln\sqrt{\frac{gT_p^2m}{2\pi H_{1/3}}} \tag{4}$$

式中： $Q$ 为单位时间、单位堤宽上的越浪量(m<sup>3</sup>·m<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>)； $H_c$ 为堤顶在静水位以上的高度(m)； $H_{1/3}$ 为有效波高(m)； $b_1$ 为胸墙前沿平台宽度(m)； $B$ 为经验系数； $K_A$ 为护面结构影响系数； $T_p$ 为谱峰周期， $T_p=1.33T$ ； $m$ 为综合坡率； $d$ 为堤前水深(m)。

宽平台生态景观海堤临海侧综合坡率  $m$  不能满足 1.5≤ $m$ ≤3.0 的要求，海堤断面结构尺寸优先考虑整体稳定，再通过波浪模型试验验证。

2.3 海堤设计断面

生态景观海堤采用抛石斜坡堤，堤顶挡浪墙顶高程 9.1 m，宽平台挡浪墙顶高程 5.0 m，均采用钢筋混凝土结构。堤顶挡浪墙内侧堤顶高程 8.3 m、堤顶宽 6.0 m；宽平台挡浪墙内侧亲水宽平台高程 4.0 m、宽度 20.0 m，均采用混凝土大板结构。堤顶挡浪墙外海侧设置 4:1 陡坡的景观砌石挡墙(混凝土灌砌)至 4.0 m 高程；宽平台挡浪墙外侧 3.0 m 高程规则摆放 2.5 t 四脚空心块，四脚空心块 1:10 放坡至 1.5 m 高程用于消浪，其外侧通过 10 t 扭王字块体护坡，-2.0 m 平台设置大块石镇压棱体，结合整体稳定镇压平台宽度 30~40 m，见图 2。

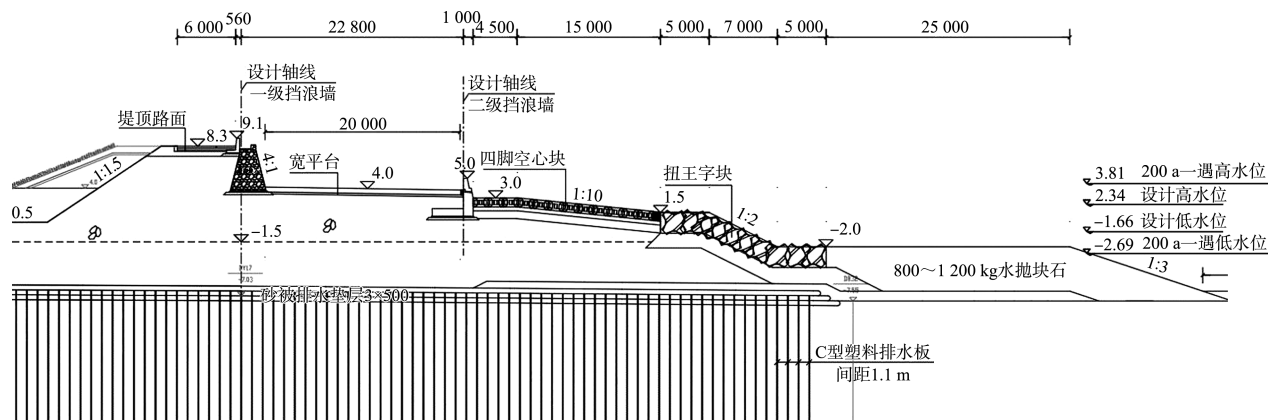


图2 生态景观海堤临海侧堤身设计断面(高程:m;尺寸:mm)

### 3 波浪模型试验

#### 3.1 试验设备及方法

波浪模型试验在河海大学航道实验室 80 m 长的不规则波浪水槽中进行<sup>[4]</sup>。水槽宽 0.8 m、高 1.6 m、有效试验断面宽 0.5 m。试验模型断面距生波板 45 m。模型按重力相似原则设计,模型比尺为 1:36。模型的人工块体采用水泥、黄砂、铁砂浇制而成,密度为 $\rho_b = 2\,300\text{ kg/m}^3$ ,质量误差控制在 $\pm 3\%$ 以内,几何尺度误差小于 1%。镇压的抛石棱体单个质量控制在要求的范围内。试验分别采用规则波和不规则波进行,每组试验重复 3~5 次。不规则波试验采用 JONSWAP 谱,本次试验中波谱的峰度系数  $r$  取 3.3,试验水槽见图 3。

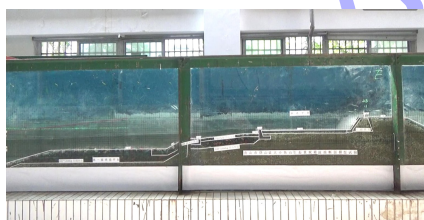


图3 波浪模型试验水槽

#### 3.2 海堤各部位稳定性验证

##### 3.2.1 挡浪墙及护面块体稳定性验证

###### 3.2.1.1 设计断面验证

经过 200 a 一遇高潮位遭遇 100 a 一遇不规则波浪( $H_{13\%}$ )作用一个风暴过程后(现场原型 3 h,模型试验中 30 min),堤顶路面、挡浪墙及宽平台路面、挡浪墙均保持稳定。临海侧 2.5 t 四脚空心块、10 t 扭王字块体及大块石镇压棱体均保持稳定。波浪在 2.5 t 四脚空心块体处发生破碎,但宽平台被淹没,波浪仍可爬升至堤顶挡浪墙。

经过设计高潮位遭遇 100 a 一遇不规则波浪作用一个风暴过程后,堤顶路面、挡浪墙及宽平台路面、挡浪墙均保持稳定。临海侧 2.5 t 四脚空心块、10 t 扭王字块体及大块石镇压棱体均保持稳定。波浪在随机排布的 10 t 扭王字块体处发生破碎,但宽平台被淹没,波浪可爬升至堤顶挡浪墙。

经过设计低潮位遭遇 100 a 一遇不规则波浪作用一个风暴过程后,堤顶路面、挡浪墙及宽平台路面、挡浪墙均保持稳定。大块石镇压棱体变坡拐点处被冲缓,形成动态平衡,总体稳定。堤顶路面、挡浪墙及宽平台路面、挡浪墙均保持稳定。临海侧 2.5 t 四脚空心块、10 t 扭王字块体及大块石镇压棱体均保持稳定。

在 200 a 一遇高潮位及设计高水位条件下,用  $H_{1\%}$  及  $H_{13\%}$  规则波复核堤顶挡浪墙及宽平台挡浪墙的稳定性。试验结果表明,  $H_{1\%}$  及  $H_{13\%}$  规则波均破碎于 10 t 扭王字块体处,消耗了大量的能量,挡浪墙及护面块体在  $H_{1\%}$  及  $H_{13\%}$  规则波的作用下均稳定。

###### 3.2.1.2 护面块体优化的可能性分析

将临海侧 2.5 t 四脚空心块调整为大块石棱体。在 200 a 一遇高潮位、设计高水位遭遇 100 a 一遇不规则波浪的作用下,大量块石出现较大的晃动现象。200 a 一遇高潮位、设计高水位遭遇 100 a 一遇不规则波浪分别作用一个风暴过程后,有部分块石越过宽平台挡浪墙落在宽平台上。由此可见,临海侧 1:10 的坡面块体不可优化调整。

#### 3.2.2 越浪量试验

##### 3.2.2.1 设计断面验证

设计断面 4.0 m 高程的宽平台 20 m,宽平台挡



浪墙顶高程 5.0 m, -2.0 m 高程的镇压平台 30 m。在 200 a 一遇高水位组合 100 a 一遇不规则波浪 ( $H_{13\%}$ ) 的作用下, 观察到堤顶挡浪墙后发生越浪, 经测量, 越浪量范围为  $0.007 \sim 0.008 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ , 可满足  $0.01 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$  的要求。在其余各个水位遭遇 100 a 一遇波浪的作用下, 均未发生越浪现象。

3.2.2.2 断面方案比较

不同断面方案在 200 a 一遇潮位与 100 a 一遇不规则波浪组合作用下越浪量结果见表 2。由表 2 可知, 宽平台挡浪墙顶高程抬高及各平台宽度加宽, 均能有效减少堤顶越浪量, 宽平台挡浪墙顶高程抬高的效果更为显著。因此, 综合考虑使用功能需求及工程投资, 4.0 m 高程平台宽度 20 m、宽平台挡浪墙顶高程 5.0 m、-2.0 m 高程的镇压平台 30 m 为结构断面的最优组合。镇压平台宽度结合稳定计算可适当增加, 对减少越浪量有利。

表 2 不同断面方案在 200 a 一遇潮位与 100 a 一遇不规则波浪组合作用下越浪量

方案序号	4.0 m 高程 平台宽度/m	宽平台挡浪 墙顶高程/m	-2.0 m 高程 平台宽度/m	堤顶越浪量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1 (设计断面)	20	5.0	30	0.007~0.008
2	20	5.0	40	0.005~0.006
3	20	4.5	30	0.017~0.019
4	30	5.0	40	0.002~0.003
5	30	4.5	40	0.012~0.015

3.2.3 波压力试验

对堤顶与宽平台之间的砌石挡墙进行波浪压力测试, 迎浪面共布置了 7 个波压力测点, 在 200 a 一遇高水位组合 100 a 一遇波浪作用下各测点的波压力见表 3。

表 3 在 200 a 一遇潮位与 100 a 一遇不规则波浪组合作用下砌石挡墙波压力

测点编号	测点高程/m	不规则波 ( $H_{13\%}$ )		规则波 ( $H_{1\%}$ )
		$P_{\max}/\text{kPa}$	$P_{13\%}/\text{kPa}$	$P_{\max}/\text{kPa}$
1 <sup>#</sup>	8.30	9.16	2.00	2.98
2 <sup>#</sup>	7.63	9.69	9.69	6.67
3 <sup>#</sup>	6.96	23.31	17.62	9.99
4 <sup>#</sup>	6.28	38.29	16.35	18.49
5 <sup>#</sup>	5.61	51.18	33.33	24.99
6 <sup>#</sup>	4.94	59.69	41.98	27.45
7 <sup>#</sup>	4.00	37.12	23.26	25.37
平均值		32.63	20.60	16.56

由表 3 可知, 波浪在临海侧人工护面块体处破碎后, 经宽平台挡浪墙后, 波能大大削减。不

规则波作用下, 平均波浪力为 21~33 kPa; 规则波作用下, 平均波浪力为 17 kPa。

3.3 对比分析

挡浪墙及护面块体稳定性理论计算及试验验证结果表明, 波浪破碎主要发生在堤脚起 1 倍波长的位置, 1 倍波长位置的护面块体应具有较好的消浪能力和稳定性能。当堤顶挡浪墙至坡脚距离达 1.5 倍波长时, 堤顶越浪量较小, 挡墙受水平波浪力较小, 挡墙稳定性计算以墙后填土荷载为主要因素。宽平台挡浪墙受波浪力作用较为复杂, 墙后道路硬化对挡浪墙抵抗波浪力有很大贡献, 理论计算时应考虑硬化路面结构的水平抗力。

越浪量及波压力试验结果表明, 宽平台挡浪墙顶高程取高值对越浪量及后方挡墙波压力削减有明显改善作用。波压力值由理论计算的 85 kPa 降低至 17 kPa, 降低了 80%。

4 结论

- 1) 宽平台生态景观海堤堤顶挡浪墙与堤脚距离宜大于 1.5 倍波长, 堤顶越浪量较小, 背海面可种植绿化, 挡墙稳定验算基本可忽略波浪力作用。
- 2) 距离堤脚 1 倍波长位置, 护面块体应选择稳定可靠的形式, 消浪作用显著。
- 3) 宽平台高程选择于极端高水位以上, 宽平台挡浪墙顶高程取高值对越浪量及后方挡墙波压力削减均有明显的改善作用。

参考文献:

[1] 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]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[2] 水利部水利水电规划设计总院. 海堤工程设计规范: GBT 51015—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

[3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港水文规范: JTS 145-2—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

[4] 河海大学. 大小鱼山生态景观堤波浪断面模型试验报告[R]. 南京: 河海大学, 2017.