

半直立半斜坡式防波堤结构设计

蒋美娇, 蒋国栋

(中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 半直立半斜坡式防波堤凭借“一堤多用”的结构优势广泛应用于防波堤工程中。外侧斜坡式结构对风浪适应性强, 对波浪有一定的遮挡效应; 内侧直立式结构可兼做码头, 实现系靠泊及平台作业功能。目前规范关于半直立半斜坡式防波堤的研究较少, 斜坡堤的消浪效果及波浪力折减系数缺乏理论支撑。结合工程实例, 通过物理模型试验进行验证, 将实测波浪数据分别与规范中直墙式建筑物墙前波浪力计算值、斜坡式建筑物顶部挡浪墙波浪力计算值进行对比, 分析两种计算方法得出的结论与模型试验结论之间的差异并提出不同部位波浪力折减系数取值, 通过波浪力试验实测值进行结构稳定性复核算并给出相关建议。研究成果可为类似项目提供参考。

关键词: 防波堤; 直立式; 波浪力; 折减系数

中图分类号: U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0061-06

Structural design of semi-vertical and semi-sloping breakwater

JIANG Meijiao, JIANG Guodong

(Engineering Design Institute Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The semi-vertical and semi-sloping breakwater is widely used in breakwater project because of its advantages of “multi-purpose of one breakwater”. The outer sloping structure has strong adaptability to wind and waves, and has certain shielding effect on waves. The inside vertical structure can be used as wharf to realize mooring and platform operation functions. At present, there are few researches on semi-vertical and semi-sloping breakwaters in the code, and the wave dissipation effect and wave force reduction coefficient of sloping breakwaters are lack of theoretical support. In this paper, combined with engineering examples, a physical model test is carried out to verify, the measured wave data are compared with the calculated values of the wave forces in front of the vertical wall and on the top of the sloping wall in the code, the difference between the conclusions of the two methods and the results of model test is analyzed, and the values of wave force reduction coefficients at different locations are proposed, the structural stability is checked by the measured values of wave force test and some suggestions are given. The research results can provide reference for similar projects.

Keywords: breakwater; vertical; wave force; reduction coefficient

港口工程中最常用的防波堤结构形式为直立式和斜坡式^[1], 针对防波堤功能多元化需求, 传统的结构形式已无法满足防波堤某些特定的使用要求^[2]。半直立半斜坡式防波堤作为一种混合式防波堤结构, 具有斜坡堤与直立堤的优点。通常港外侧采用斜坡式结构, 主要由堤心石和护面块体等材料构成^[3], 可更好地抵抗风浪侵袭; 港内侧采用直立式结构, 实现码头功能且减少结

构用海, 增加港内可利用水域, 整体效益显著。

目前国内外学者针对波浪力计算的研究成果较多, 集中于采用物理模型试验研究波浪力影响因素、波浪力分布以及模型试验结果与经验公式对比等^[4]。JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[5]对斜坡式、直立式防波堤设计有详细的条文规定; JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[6]介绍了波浪对直墙式、斜坡式建筑物的作用以及不

收稿日期: 2024-04-02

作者简介: 蒋美娇 (1987—), 女, 高级工程师, 从事水运工程咨询、设计工作。

同波态下的波浪力计算方法。但以上规范对于半直立半斜坡式防波堤结构描述甚少，特别是对护面块体及块石的消浪效果及波浪力折减系数，仅在 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》4.3.25.1 条提出：“当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和波浪浮托力可乘以折减系数 0.6~0.7。”条文说明中该折减系数为试验成果的大致范围，没有详细论述折减系数的适用条件及保证率。除此之外，水运行业规范尚无其他关于斜坡堤对波浪力遮挡效果、波浪力折减系数的相关论述。对于半直立半斜坡式防波堤而言，其内侧直立式结构所受波浪力的情况与上述条文情况类似，却又有不同，不能直接参考使用。根据相关研究^[7]，当直立式防波堤结构外增加较宽的块石回填时，对堤前波浪形态造成影响，从而影响波浪力的变化。

某渔港防波堤工程按 100 a 一遇高水位+100 a 一遇设计波浪要素基本不越浪标准设计，采用半直立半斜坡式防波堤结构，港内直立式结构兼靠渔船。本文结合工程实例，通过物理模型试验进行验证^[8]，将实测波浪数据分别与规范中直墙式建筑物墙前波浪力计算值、斜坡式建筑物顶部挡浪墙波浪力计算值进行对比，分析两种计算方法得出的结论与模型试验结论之间的差异，针对实际遮挡效果提出结构设计相关建议，旨在为类似项目提供参考。

1 工程概况

1.1 设计波浪要素

工程海区波浪以风浪为主，主要受来自 SSE—S—SW 向外海波浪作用和 W 向风浪的影响，设计水文波浪资料见表 1^[9]。

表 1 防波堤设计波浪要素

Tab. 1 Designed wave parameters of breakwater

重现期/a	设计水位/m	$H_{1\%}$ /m	$H_{4\%}$ /m	$H_{5\%}$ /m	$H_{13\%}$ /m	波长 L/m	周期 T/s
100	3.76	8.63	7.63	7.44	6.51	128.5	11.6

1.2 防波堤结构方案

防波堤采用半直立半斜坡式结构，港外侧为斜坡式，港内侧为重力式方块。外侧护面结构均采用 15 t 扭王字块，护脚采用 1 000~1 500 kg 块

石，护底采用 100~200 kg 块石；港内侧为 4 层实心方块结构，方块顶部设现浇钢筋混凝土挡浪墙。防波堤结构断面见图 1。

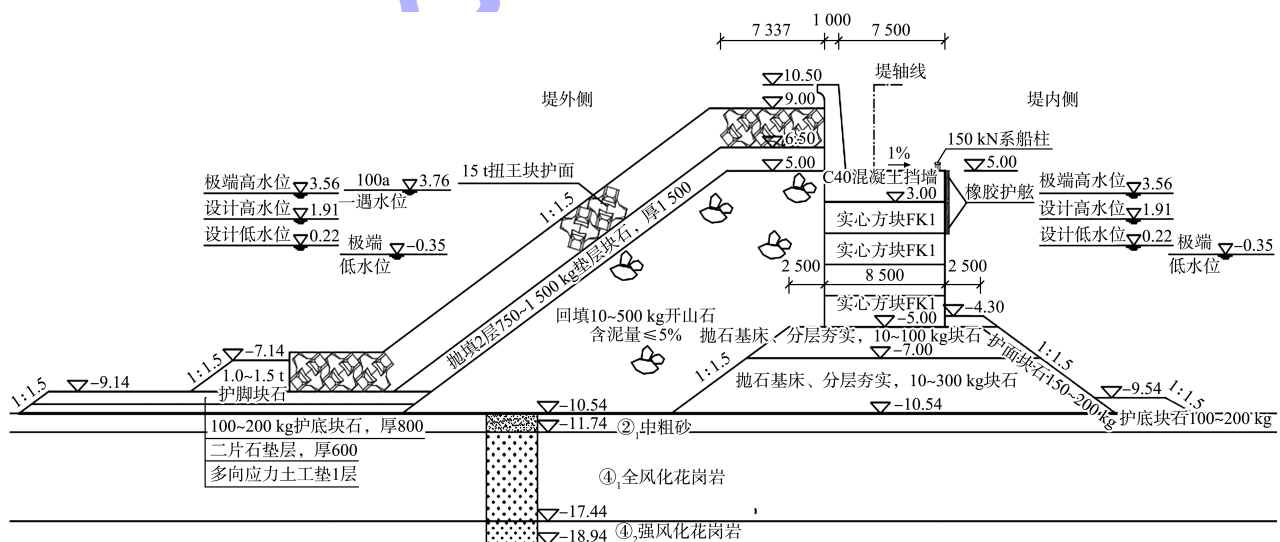


图 1 防波堤结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig. 1 Section of breakwater (elevation: m; size: mm)

1.3 物理模型试验

初始试验时, 将挡浪墙单独制模, 按单独受力考虑, 试验中挡浪墙被波浪掀翻, 挡浪墙发生倾覆后, 各级方块随即发生滑动, 各级方块错位逐渐拉大, 外坡扭王护面块及护脚块石、内坡护面块石及护底块石失去支撑, 随之发生位移, 随着波浪持续作用, 防波堤整体失稳。

再次试验时对试验模型进行改进, 将挡浪墙与各层预制方块按整体受力考虑, 整体制模。

1.3.1 内侧直立式结构

在 100 a 一遇高水位+100 a 一遇波浪作用下, 挡浪墙及连接体出现较明显震动, 当波浪累计作用时间相当于原型 3 h 后, 未发生明显位移, 判断为临界稳定。

1.3.2 外侧斜坡式结构

在 100 a 一遇高水位+100 a 一遇波浪作用下, 护面结构 15 t 扭王块未发生大于半块块体尺寸的位移; 外坡护脚块石个别发生位移, 剖面形状无明显变化, 对上部的扭王块体护面仍能起到较好的支撑作用; 外坡护底块石部分发生位移, 整体坡面形状未发生明显改变, 判断为稳定。

1.3.3 波压强实测数据

试验测量了内侧直立堤断面波压强分布情况, 挡浪墙迎浪侧共布置 11 个波压强测点(图 2), 波压强试验结果见图 3。由图可知, 波压力由 1[#]~11[#]逐渐减小, 1[#]测点波压力最大, 2[#]次之, 主要是由于反弧位置波能集中引起, 而 3[#]~11[#]测点受护面块及块石掩护较好, 受到的波压力也相应减小。

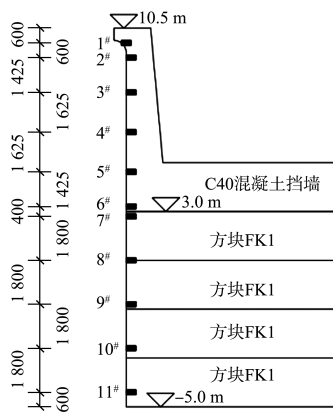


图 2 波压强监测点布置 (单位: mm)

Fig. 2 Layout of wave pressure monitoring points (unit: mm)

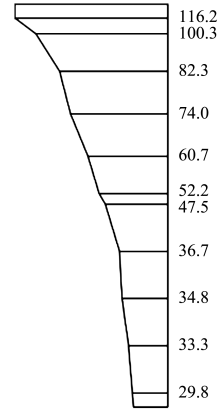


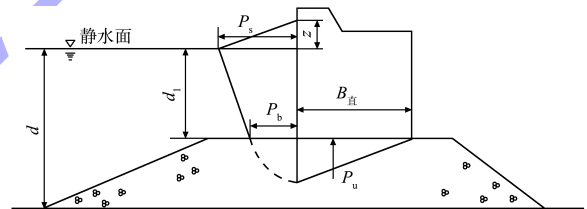
图 3 波压强试验结果 (单位: kPa)

Fig. 3 Test results of wave pressure (unit: kPa)

2 斜坡堤对波浪力的遮蔽效应

2.1 斜坡堤对直立式结构整体的掩护效果

根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》10.1.1 条对防波堤断面中直立式结构前的波态进行判别, 为近破波, 直墙式建筑物上近破波的波浪力确定: 当 $d_1 \geq 0.6H$ 时, 近破波的波压力分布见图 4。



注: d_1 为基床上水深, m; d 为建筑物前水深, m; z 为静水面以上波压强为 0 处的高度, m; p_s 为静水面处波压强, kPa; p_b 为墙底处波压强, kPa; p_u 为墙底面上的波浪浮托力, kN/m; $B_{直}$ 为直墙底宽, m, 有趾时包括趾宽。

图 4 近破波的波压力分布

Fig. 4 Wave pressure distribution of near breaking wave

正向波波峰作用下近破波的波浪力可按以下规定计算。

1) 静水面以上高度 z 处的波压强为 0, 其中:

$$z = \left(0.27 + 0.53 \frac{d_1}{H} \right) H \quad (1)$$

2) 静水面处的波浪压强为:

$$p_s = 1.25\gamma H \left(1.8 \frac{H}{d_1} - 0.16 \right) \left(1 - 0.13 \frac{H}{d_1} \right) \quad (2)$$

$$\left(\frac{1}{3} < \frac{d_1}{d} \leq \frac{2}{3} \right)$$

3) 墙底处的波浪压强为:

$$p_b = 0.6p_s \quad (3)$$

4) 单位长度墙身上的总波浪力为:

$$P = 1.25\gamma Hd_1 \left(1.9 \frac{H}{d_1} - 0.17 \right) \left(\frac{1}{3} < \frac{d_1}{d} \leq \frac{2}{3} \right) \quad (4)$$

5) 底面上的波浪浮托力为:

$$P_u = \mu \frac{B_{直} p_b}{2} \quad (5)$$

式中: H 为建筑物所在处进行波波高, m; γ 为水的重度, kN/m^3 ; P 为单位长度墙身上的总波浪力, kN/m ; μ 为波浪浮托力的折减系数, 取 0.7。

根据以上公式计算: $z = 6.97 \text{ m}$, $p_s = 155.54 \text{ kPa}$, $p_b = 93.32 \text{ kPa}$, $P = 1\ 648.38 \text{ kN/m}$, $P_u = 277.64 \text{ kN/m}$, 与物理模型试验实测值的对比见表 2 和图 4。

表 2 直墙式结构波压强计算值与实测值对比

Tab. 2 Comparison between calculated and measured values of wave pressure of vertical wall structures

监测点 编号	波压强/kPa	
	计算值	实测值
1#	15.55	116.2
2#	28.89	100.3
3#	60.55	82.3
4#	96.66	74.0
5#	132.76	60.7
6#	164.43	52.2
7#	153.98	47.5
8#	139.99	36.7
9#	125.99	34.8
10#	111.99	33.3
11#	97.99	29.8

表 3 直墙式结构总波浪力计算值与实测值对比

Tab. 3 Comparison between calculated and measured values of total wave force of vertical wall structures

设计水位以上墙前波浪力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)		折减 系数	设计水位以下墙前波浪力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)		折减 系数	$P/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$		折减 系数
计算值	实测值		计算值	实测值		计算值	实测值	
558.38	471.71	0.84	1\ 090.00	318.29	0.29	1\ 648.38	790.08	0.48

注: 1. 计算值 P 根据 p_s 和 p_b 对应比例关系换算得出; 2. 实测值 P 根据各测点实测波压力强度连线围合面积叠加得出。

由表 2 波压强分布情况可以看出, 直墙式结构墙前波压强计算值在设计水位处达到最大, 继而向两侧减小, 堤顶处波压强很小, 几乎接近 0 (少许越浪); 而实测值中直墙式结构的掩护效果随着墙前掩护宽度的增加而逐渐减小, 最大值出现在挡浪墙顶部反弧处, 主要原因在于反弧处波能集中, 且该位置未受护面块体掩护, 多重因素导致实际受力情况较为复杂。在设计水位以下, 计算值与实测值随水深的变化率较为接近, 波压强实测值与规范计算值的比值主要分布在 0.27~0.32。

由表 3 可以看出, 直墙式结构墙前总波浪力的计算值大于实测值。本项目中, 由于直墙式结构前有块体和块石掩护, 掩护宽度为 3 排以上, 高度几乎形成全掩护, 仅挡浪墙顶部留有 1.5 m 高的未掩护区, 直墙式结构整体掩护效果良好, 墙前总波浪力的折减系数约为 0.48。以设计水位为分界, 设计水位以上墙前波浪力的计算值与实测值

较为接近, 波浪力消减不大, 折减系数约为 0.84; 设计水位以下墙前波浪力的计算值远大于实测值, 波浪力消减大, 折减系数约为 0.29。

2.2 斜坡堤对挡浪墙的掩护效果

根据试验断面中护面块体的掩护情况, 以高程 5.0 m 为分界, 5.0 m 以上按挡浪墙考虑。根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》10.2.11, 无因次参数 $\xi \leq \xi_b$ 时, 作用于斜坡式建筑物顶部胸墙上的波浪力可按以下规定确定。

1) 如图 5 所示, 波峰作用时胸墙上的平均压强为:

$$\bar{p} = 0.24\gamma HK_p \quad (8)$$

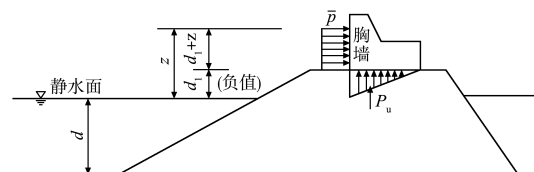


图 5 胸墙波压力

Fig. 5 Wave pressure distribution of breastwork

2) 无因次参数为:

$$\xi = \left(\frac{d_1}{d}\right) \left(\frac{d}{H}\right)^{2\pi H/L} \quad (9)$$

$$\xi_b = 3.29 \left(\frac{H}{L} + 0.043\right) \quad (10)$$

$\xi = \xi_b$ 时, 平均波浪压强 \bar{p} 达到最大值。

3) 胸墙上的波压力分布高度:

$$d_1 + z = H \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) K_z \quad (11)$$

4) 单位长度胸墙上的总波浪力:

$$P = \bar{p}(d_1 + z) \quad (12)$$

5) 胸墙底面上的波浪浮托力:

$$P_u = \mu \frac{B_{\text{胸}} \bar{p}}{2} \quad (13)$$

式中: \bar{p} 为平均压强, kPa; K_p 为平均压强系数; $d_{\text{胸}}$ 为胸墙前水深, m, 当静水面在墙底面以下时为负值; L 为波长, m; z 为胸墙上波浪压强分布图形的顶部距静水面的高度, m; K_z 为波压力作用高度系数; $P_{\text{胸}}$ 为单位长度胸墙上的总波浪力, kN/m; P_u 为单位长度胸墙底面上的波浪浮托力, kN/m; $B_{\text{胸}}$ 为胸墙底宽, m。

根据以上公式计算: $d_1 + z = 2.647$ m; $\bar{p} = 70.06$ kPa; $P = 185.46$ kN/m (未考虑消浪折减系数); $P_u = 36.78$ kN/m。斜坡式建筑物顶部挡浪墙

上波浪力的计算值(185.46 kN/m)远小于物理模型实测值(431.49 kN/m), 扩大系数为 2.33。这是由于当胸墙顶设有反弧时, 越浪较少或无越浪, 波浪在胸墙前的反射较大、波高相对较大, 且可能存在波列中的大波在斜坡或坎肩上发生破碎, 对胸墙产生较大的破波冲击力^[10]。因此, 挡浪墙上波浪力不但不能折减, 还需考虑一定的扩大系数。规范中关于斜坡式建筑物顶部挡浪墙上波浪力的计算方法采用平均波压强乘以波压强分布高度的方法, 在本项目计算值较小、未考虑折减系数的情况下, 其波浪力计算值仍小于实测值, 说明该计算方法不适用于本项目, 也说明规范中关于折减系数的说法具有一定的适用范围。

挡浪墙的波压强的计算值与实测值对比见图 6。由图可知, 规范计算值中波压强及波压强分布高度均小于试验实测值, 特别是波压强分布高度, 计算值仅为 2.647 m, 而在模型试验中, 整个挡浪墙均受波压力作用, 且挡浪墙上部受波浪爬高及反弧处波能集中等多重因素影响, 实际受力情况更为复杂。这也印证了初始试验中挡浪墙被打翻的实际情况, 说明在结构设计时将挡浪墙与下部结构整体连接以提高其抗浪性是非常必要的。

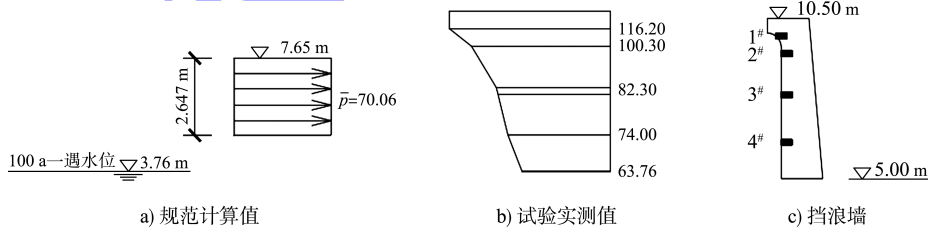


图 6 挡浪墙波压强计算值与实测值对比 (单位: kPa)

Fig. 6 Comparison between calculated and measured values of retaining wall wave pressure (unit: kPa)

3 抗倾、抗滑稳定性验算

通过物理模型试验验证可知, 设计方案稳定性满足要求, 但对于内侧直立式结构而言, 属于临界稳定状态。为确保直立堤结构整体安全稳定, 选取短暂组合情况下的分项系数, 采用波浪力实测值通过规范计算公式进行稳定性复核计算, 计算结果见表 4、5。

根据计算结果可知, 分项系数法计算时, 如采用波浪力实测值和短暂组合分项系数, 得出的

稳定性不满足规范要求, 而用标准值计算稳定性的抗作比为 1, 属于临界稳定状态, 与物理模型试验中的临界稳定状态相吻合。为进一步提高防波堤结构的整体安全性, 须留有一定的结构富余度以应对试验难以覆盖到的极端情况, 适当提高结构安全系数。因此, 拟对临界稳定状态的设计断面进行局部改进, 将直立式结构宽度由 8.5 m 增加至 9.5 m, 并在底层方块后延增加后趾。改进后的防波堤断面经物理模型试验验证, 整体安全稳定。

表4 实测波浪力作用下直墙式结构抗倾稳定性
Tab.4 Overturning stability of vertical wall structural under measured wave force

短暂组合			标准值验算		
$\gamma_0(\gamma_p M_p + \gamma_u M_u)$	$\frac{1}{\gamma_d} \gamma_G M_G$	倾覆抗 作比	$M_p + M_u$	M_G	倾覆抗 作比
9 496.69	6 520.68	0.69	7 913.91	8 150.85	1.03

注： γ_0 为结构重要性系数； γ_p 为水平波浪力的分项系数； γ_u 为浮托力的分项系数； γ_G 为自重力分项系数； γ_d 为结构系数； G 为胸墙自重力标准值，kN； M_p 为胸墙水平波浪力标准值对胸墙后趾的倾覆力矩，kN·m； M_u 为胸墙波浪浮托力标准值对胸墙后趾的倾覆力矩，kN·m； M_G 为胸墙自重力标准值对胸墙后趾的稳定力矩，kN·m。

表5 实测波浪力作用下直墙式结构抗滑稳定性
Tab.5 Sliding resistance stability of vertical wall structural under measured wave force

短暂组合			标准值验算		
$\gamma_0 \gamma_p P_N$	$(\gamma_G G - \gamma_u P_{u,N}) f$	滑动抗 作比	P_N	$(G - P_{u,N}) f$	滑动抗 作比
948.10	809.41	0.85	790.08	792.02	1.00

注： P_N 为计算面以上的水平波浪力标准值，kN； $P_{u,N}$ 为波浪浮托力标准值，kN； f 为沿计算面的摩擦系数设计值。

4 结语

1) 半直立半斜坡式防波堤结构的内侧直立结构稳定性计算时应考虑墙前块体及块石的遮挡效应，对波浪力适当折减，折减系数的取值与波浪参数、墙前块体块石规格与掩护宽度有关。本项目直立结构墙前总波浪力折减系数约为0.48，设计水位以下的墙前波浪力折减系数约0.29，设计水位以上的墙前波浪力折减较少，且实测挡浪墙局部波浪集中，从上部结构安全稳定角度，建议设计水位以上的墙前波浪力不考虑折减系数。

2) 斜坡式建筑物顶部挡浪墙上波浪力计算方法的计算值远小于物理模型试验实测值，说明规范条文有一定的适用条件。本项目的波压力及其分布高度的规范计算值均小于模型实测值，特别是波压力分布高度相差较大，挡浪墙上部受波浪爬高及反弧处波能集中等多重因素影响，实际受力情况更为复杂。建议在类似工程设计中，将挡浪墙与下部结构整体连接以提高其抗浪性。

3) 由于建设情况的多样性、复杂性，混合式防波堤结构形式越来越多，在规范计算方法难以覆盖时，应通过科学的模型试验充分论证方案的合理性、安全性、经济性。在保证安全经济的同时，结构设计应留有适当的富余度以应对不可预计的极端情况，建议采用实测值进行稳定性复核验算，在条件允许的情况下，尽可能保证一定的安全系数。

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] 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: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [3] 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院. 汕尾市遮浪现代渔港(二级)二期工程防波堤工程物理模型试验[R]. 南京: 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 2022.
- [4] 中海(广州)工程勘察设计院有限公司. 广东省汕尾市遮浪现代渔港二期建设工程波浪数值计算报告[R]. 广州: 中海(广州)工程勘察设计院有限公司, 2021.
- [5] 李少斌, 丁建军, 余神光, 等. 国内外斜坡堤挡浪墙水平波浪力计算研究[J]. 港工技术, 2023, 60(1): 20-24.
- [6] 高凌霄, 马志强. 埋入式直立防波堤堤前波浪作用影响分析[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(3): 58-62.
- [7] 唐云, 刘堃. 低桩承台直立结构波浪作用力研究[J]. 水运工程, 2020(1): 11-16.
- [8] 沈雨生, 孙忠滨, 周益人. 斜向波浪对斜坡堤胸墙作用力的试验研究[J]. 水运工程, 2018(1): 35-40.
- [9] 葛晓丹, 柳淑学, 李金宣. 斜坡堤透浪系数计算公式的对比分析[J]. 中国水运(下半月), 2014, 14(5): 100-101, 104.
- [10] 李景辉, 张文忠, 杨宪章, 等. 削角直立堤断面稳定性及波浪力分析试验研究[J]. 中国港湾建设, 2012(2): 31-34.