May 2025



复杂海床地形条件下的斜坡堤设计方案

蒋美娇1,2、吴曼涓1,2

- (1. 中交四航局港湾工程设计院有限公司、广东 广州 510290:
- 2. 广东省海岸与岛礁工程技术研究中心, 广东 珠海 519080)

摘要:针对斜坡式防波堤的断面与结构设计,现行行业规范推荐的计算公式与方法主要来源于实际工程调查与统计资 料、相关模型试验资料、国外有关研究成果等,具有普遍性与指导性,但对斜坡堤前海底坡度、水深突变等相关内容没有 详细条文说明,而近岸波浪要素受地形与水深影响大,特别是礁盘这类复杂海床地形下,波浪运动形态复杂,常规的设计 方法并不适用。结合工程实例,通过物理模型试验,对不同海床地形下的斜坡堤设计断面进行验证,从护面结构、护脚棱 体、越浪量及胸墙稳定性等方面对比分析规范设计与模型试验结果的差异并给出相关建议,可为类似项目提供参考。

关键词: 防波堤; 结构设计; 稳定性; 对比分析

中图分类号: U656.2+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)05-0141-08

Design scheme of sloping breakwater in complex seabed terrain

JIANG Meijiao^{1,2}, WU Manjuan^{1,2}

(1. CCCC FHEC Harbor Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

2. Guangdong Provincial Engineering Research Center of Coasts, Islands and Reefs, Zhuhai 519080, China)

Abstract: For the design of the section and structure of the sloping breakwater, the calculation formulas and methods recommended by the current industry code mainly come from the actual project investigation and statistical data, the related model test data, and the foreign related research results, etc., which are universal and instructive. However, there are no detailed provisions on the relevant contents such as sea-floor gradient and sudden change of water depth in front of the sloping breakwater, and the offshore wave elements are greatly affected by terrain and water depth, especially in the complex seabed terrain such as reef-plate, because of the complexity of wave motion, the conventional design method is not applicable. In this paper, the design cross sections of sloping levees in different seabed topography are verified by physical model tests, the differences between the design code and the model test results are compared and analyzed from the aspects of the structure of the protective face, the prisms of the protective feet, the overtopping volume and the stability of the breast wall, and relevant suggestions are given, which can provide references for similar projects.

Keywords: breakwater; structural design; stability; comparative analysis

斜坡式防波堤作为一种常见的防波堤结构, 具有结构简单、施工方便、对风浪适应性强等特 点。JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》[1] 对 斜坡式防波堤的断面形式及主要尺度、结构稳定 性、构件强度等有较详细的条文规定与要求,推 荐的计算公式与方法主要依据实际工程调查与统 计资料、相关模型试验资料、国外有关研究成果 等,通过分析拟定得出,具有普遍性与指导性, 但对于斜坡堤前海底坡度、水深突变等相关内容、 没有具体条文规定。JTS 145—2015《港口与航道水

收稿日期: 2024-07-08

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。

文规范》(2022版)^[2]对于近岸波浪要素计算没有考虑地形与水深的影响,在水底坡度不大于 1/10时,破碎波高可查图取值,但对于礁盘这类水深变化大的海底地形并不适用。波浪沿礁盘上爬过程中受浅水变形影响,波高增大,波峰尖陡,易在堤脚位置发生强破碎,破碎水体冲击通常是导致外坡护脚块石和护底块石破坏的主要原因。

本文结合工程实例,通过物理模型试验^[3],对不同海床地形下的斜坡堤设计断面进行验证,从护面结构、护脚棱体、越浪量及胸墙稳定性等方面对比分析规范设计与模型试验结果,通过总结给出相关建议,旨在为类似项目提供参考。

1 工程概况

1.1 项目背景

某渔港防波堤工程港内有防台避险等功能需求,根据地方建设标准,防波堤设计波浪、潮位宜采用 100 a 重现期标准。但由于项目资金受限,必须严格控制工程总投资,如完全采用"双 100a"标准建设,将突破投资限额。结合项目周边其他现状渔港防波堤堤顶高程及使用效果,本渔港防波堤按照设计高水位+100 a 一遇设计波浪要素下基本不越浪标准进行设计,并按照 100 a 一遇高水位+100 a 一遇设计波浪要素下越浪量不大于 0.050 m³/(m·s)的要求进行复核。防波堤设计波浪要素见表 1^[4]。

表 1 防波堤设计波浪要素 Tab. 1 Design wave elements of breakwater

水位与波浪	设计水位/m	波高 H _{1%} /m	波高 H _{5%} /m	波高 <i>H</i> _{13%} /m	波长 <i>L</i> /m	周期 T/s
100 a 一遇高水位+100 a 一遇波浪	3. 76	8. 25	7. 10	6. 20	127. 4	11.6
极端高水位+100 a 一遇波浪	3. 56	7. 60	6. 54	5. 71	119. 6	11.0
设计高水位+100 a 一遇波浪	1. 91	7, 40	6. 37	5. 66	117. 3	11.0

1.2 设计方案

防波堤采用斜坡式结构,外侧护面采用 25 t 扭王字块,护脚采用 600~800 kg 块石,护底采用 100~200 kg 块石;港内侧护面采用 1 250~2 500 kg

块石顺延至护脚,护底采用 100~200 kg 块石;防 波堤所在海床地形较为复杂,局部存在礁盘,见 图 1,设计断面见图 2。

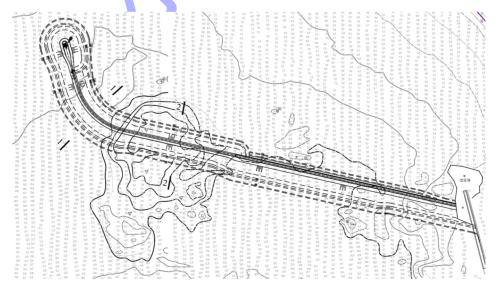


图 1 防波堤平面

Fig. 1 Plan of breakwater

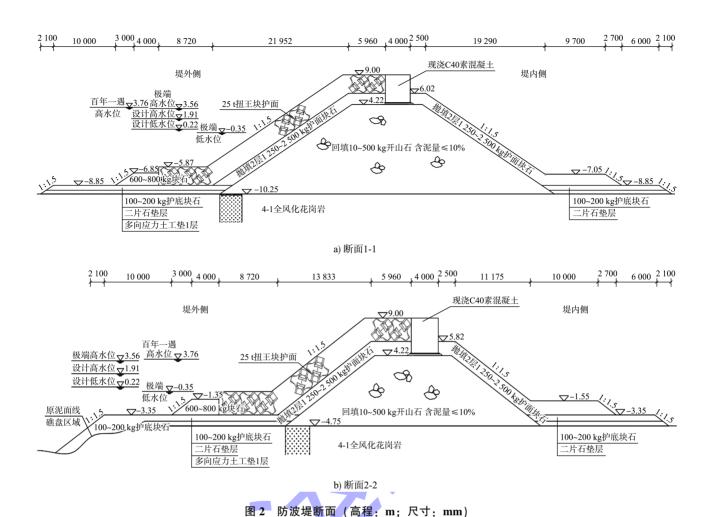


Fig. 2 Cross sections of breakwater (elevation; m; dimension; mm)

2 物理模型试验

2.1 试验方案

试验断面分别为断面 1-1(断面 1)和断面 2-2 (断面 2)。断面 1 位于防波堤堤身深水段,相应泥面高程为-11.00~-10.25 m(堤前海底坡度平缓);断面 2 防波堤堤身段礁盘区域,相应泥面高程为-11.00~-2.25 m(堤前 0.5 倍波长范围内水深地形变化大,海底坡度 1/10~1/3)。

试验水位与波浪:在极端高水位+100 a 一遇 波浪、设计高水位+100 a 一遇波浪、以及设计低 水位、极端低水位对应的极限波要素条件下,对 防波堤断面的稳定性进行验证。

复核水位与波浪:采用 100 a 一遇高水位+100 a 一遇波浪对防波堤断面的稳定性和越浪量进行复核。

2.2 试验断面1

2.2.1 试验情况

在极端高水位+100 a 一遇波浪、设计高水位+

100 a 一遇波浪作用下,胸墙、外坡 25 t 扭王块护面、内外坡 100~200 kg 护底块石稍有晃动及位移,但均在规范允许变形范围内,稳定性满足要求(图 3);外坡 600~800 kg 护脚块石、内坡 1 250~2 500 kg 护面块石的稳定性不满足要求。



图 3 断面 1 内坡护面块石失稳 Fig. 3 Instability of inner slope protection rocks of Section 1

2.2.2 改进思路与验证

- 1) 外坡 600~800 kg 护脚块石。护脚块石失稳主要是由于不规则波列中的大波作用,导致波浪在坡脚位置发生破碎,破碎波的能量大,块石规格不足,故出现晃动及位移。因此,考虑加大护脚棱体规格。
- 2) 内坡 1 250~2 500 kg 护面块石。堤顶越浪量大导致越浪水体在越过堤顶扭王块及胸墙后回落并作用于内坡护面块石,护面块石重力难以承受高速运动的越浪水体冲击,导致静水位以上护

面块石大量滚动,破坏严重。因此,考虑采用逐级增加块体规格的方式,直至稳定。

3) 改进方案验证。将外坡护脚块石规格由 600~800 kg 加大至1000~1500 kg, 内坡护面规格由 1250~2500 kg 块石调整为10 t 扭王字块(逐级增加),经试验验证,断面稳定性满足要求。

断面 1 改进方案见图 4,采用 100 a 一遇高水位+100 a 一遇波浪对防波堤断面的稳定性进行复核.仍满足要求。

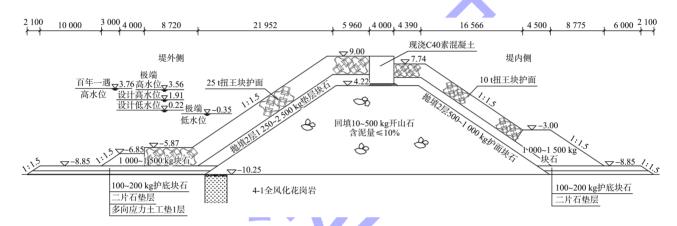


图 4 断面 1 改进方案 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig. 4 Improvement scheme of Section 1 (elevation: m; dimension: mm)

2.3 试验断面 2

2.3.1 试验情况

参考试验断面 1 的试验情况,对试验断面 2 进行优化,将外坡护脚块石质量加大至 1 000~1 500 kg,内坡 1 250~2 500 kg 护面块石调整为 10 t 扭王块护面。

在极端高水位+100 a 一遇波浪、设计高水位+100 a 一遇波浪作用下,胸墙、外坡 25 t 扭王块护面、内坡 10 t 扭王块护面、内坡 1 250~2 500 kg 棱体块石、内坡 100~200 kg 护底块石虽然稍有晃动及位移,均在规范允许变形范围内,稳定性满足要求;外坡 1 000~1 500 kg 护脚块石、外坡 100~200 kg 护底块石的稳定性不满足要求(图 5)。



图 5 断面 2 外坡护脚块石、护底块石失稳 Fig. 5 Instability of outer slope toe and apron protection rocks of Section 2

2.3.2 改进思路

试验断面 2 位于礁盘上部,堤前 0.5 倍波长范围内水深地形变化大,海底坡度 1/10~1/3,波浪沿礁盘上爬过程中受浅水变形影响波高增大,

至堤脚位置时发生破碎,导致外坡护脚块石和护底块石发生较大位移,断面严重变形。因此,针对礁盘位置水深地形变化大且为非均匀变化的情况,从降低水深变化幅度入手^[5]。

2.3.3 改进方案与验证

改进方案见图 6。改进方案 1: 对堤脚处礁盘 开挖后,回填 1 250~2 500 kg 护脚块石至原海床面 高程,并将外坡底部 25 t 扭王块由 3 排增加至 4 排。 经试验,下沉后的护脚块石及护底块石稳定,但 由于外坡底部 25 t 扭王块护面失去棱体块石的支撑,直接承受破碎波的冲击,导致底部最外侧扭 王块局部失稳。改进方案 2:考虑加强扭王块外侧 的掩护与支撑,将扭王块整体下沉 1/3 块体高度, 嵌入护脚块石中,以减少破碎波的冲击影响。经 试验,防波堤断面的稳定性满足要求。

断面 2 改进方案见图 6,采用 100 a 一遇高水位+100 a 一遇波浪对防波堤断面的稳定性进行复核,仍满足要求。

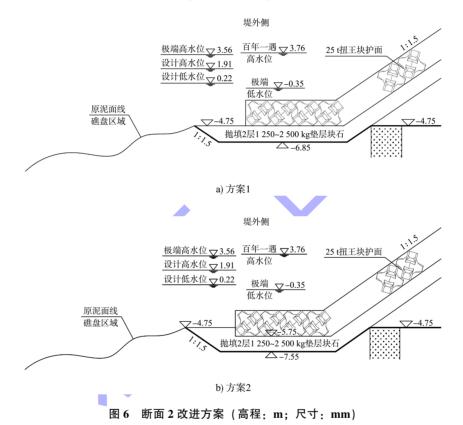


Fig. 6 Improvement scheme of Section 2 (elevation: m; dimension: mm)

3 越浪量

按照 100 a 一遇高水位+100 a 一遇波浪进行越浪量复核,根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》第 10.2.4.3条,斜坡堤顶有胸墙时,堤顶越浪量可按下式计算:

$$Q = 0.07^{\frac{H_{e}/H_{1/3}}{H_{1/3}}} \exp\left(0.5 - \frac{b_1}{2H_{1/3}}\right) BK_A \frac{H_{1/3}^2}{T_P} \cdot \left[\frac{0.3}{\sqrt{m}} + \text{th}\left(\frac{d}{H_{1/3}} - 2.8\right)^2\right] \ln \sqrt{\frac{gT_P^2 m}{2\pi H_{1/3}}}$$
(1)

式中:Q为单位时间单位堤宽的越浪量, $m^3/(m \cdot s)$;

 H'_{c} 为胸墙墙顶在静水面以上的高度,m; $H_{1/3}$ 为有效波波高,m; b_{1} 为胸墙前肩宽,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,s; m 为斜坡坡度系数, 斜坡坡度为 1:m; d 为建筑物前水深,m; g 为重力加速度, m/s^{2} 。

斜坡堤断面 1 堤顶越浪量计算值见表 2。经过多次试验实测,越浪量最大值均不超过 0.05 m³/(m·s),综合考虑越浪水体对港内波高的影响范围及港内渔船的适应性,从节约投资角度,确定堤顶高程维持 9.0 m 不变。

表 2 越浪量理论计算值与实测值对比

Tab. 2 Comparison between theoretical and measured values of wave overtopping

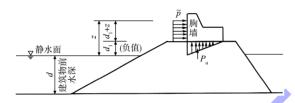
<i>H</i> _c '/m	H _{1/3} /m	h /m	В	K_{A}	T_P/s	m	d/m	g/(m·s ⁻²) -	$Q/(\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{m}^{-1} \cdot \mathrm{s}^{-1})$	
11 _e / III	11 1/3 / 111	<i>b</i> ₁ /m							理论值	实测值
5. 24	6. 20	5. 96	0.6	0. 4	14. 04	1.5	14. 01	9. 81	0. 074	0.050

4 胸墙稳定性

复核 100 a 一遇高水位+100 a 一遇波浪作用下胸墙的稳定性,根据 JTS 145—2015 《港口与航道水文规范》第 10. 2. 11 条,作用于斜坡式建筑物顶部胸墙上的波浪力,无因次参数 $\xi \leqslant \xi_b$ 时,可按以下公式确定。

1) 如图 7 所示,波峰作用时胸墙上的平均压力强度 \bar{p} :

$$\overline{p} = 0.24\gamma H K_p \tag{2}$$



注: d₁ 为胸墙前水深, 当静水面在墙底面以下时为负值; d 为建筑物 前水深; z 为胸墙上波浪压强分布图形的顶部距静水面的高度; P_u 为单位长度胸墙底面上的波浪浮托力; d₁+z 为胸墙上的波压力分布高度。

图 7 胸墙波压力分布

Fig. 7 Wave pressure distribution of breastwork

2) 无因次参数 ξ:

$$\xi = \left(\frac{d_1}{d}\right) \left(\frac{d}{H}\right)^{2\pi H/L} \tag{3}$$

3) 无因次参数 ξ_{k} :

$$\xi_b = 3.29 \left(\frac{H}{L} + 0.043 \right)$$
 (4)

- 4) $\xi = \xi_h$ 时, \bar{p} 达到最大值;
- 5) 胸墙上的波压力分布高度 d_1+z_2

$$d_1 + z = H \operatorname{th} \left(\frac{2\pi d}{L} \right) K_z \tag{5}$$

6) 单位长度胸墙上的总波浪力:

$$P = \overline{p}(d_1 + z) \tag{6}$$

7) 胸墙底面上的波浪浮托力:

$$P_{\rm u} = \mu \frac{b\overline{p}}{2} \tag{7}$$

式中: γ 为水的重力密度, kN/m^3 ; H为建筑物所

在处进行波波高,m; K_P 为平均压强系数; L 为波长, m; K_Z 为波压力作用高度系数; P 为单位长度胸墙上的总波浪力,kN/m; μ 为波浪浮托力的折减系数; b 为胸墙底宽,m。

经计算得: $d_1+z=2.468$ m, $\bar{p}=73.06$ kPa, P=126.24 kN/m(全掩护考虑折减系数 0.7), $P_u=102.29$ kN/m。胸墙稳定性验算见表 3。由表可知,在 100 a 一遇高水位+100 a 一遇波浪工况下,采用短暂组合分项系数($\gamma_u=1.0,\gamma_p=1.2$), 不考虑墙后内坡护面块支撑作用时,胸墙抗滑稳定性满足规范要求,抗倾稳定性不满足规范要求。而在物理模型试验中胸墙抗滑、抗倾稳定性均满足要求,通过试验验证,避免了由于设计依据不充分导致保守设计的问题。

表 3 断面 1 胸墙稳定性计算结果

Tab. 3 Stability calculation results of breastwall of Section 1

抗	滑稳定性	滑动抗 抗倾稳定性			倾覆抗
$\gamma_0 \gamma_p P$	$(\gamma_G G - \gamma_{\mathrm{u}} P_{\mathrm{u}}) f$	作比	$\gamma_0(\gamma_p M_p + \gamma_u M_u)$	$\gamma_G M_G/\gamma_d$	作比
151. 48	188. 13	1. 24	732. 4	665. 34	0. 91

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_a 为自重力分项系数; γ_d 为结构系数;f 为沿计算面的摩擦系数设计值;P 为计算面以上的水平波浪力标准值,kN;G 为胸墙自重力标准值,kN; P_u 为波浪浮托力标准值,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。

5 思考与建议

5.1 内坡护面

JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》第4.3.16.2条规定,当堤顶高程按照基本不越浪标准进行设计时,内坡护面块体宜采用与外坡护面垫层相同质量的块石,且应按照堤内侧波浪进行复核。根据第4.2.2.3条,基本不越浪的高程取值宜定在设计高水位以上大于1.0倍设计波高值处。

本项目堤顶高程取 9.0 m,设计高水位以上 1 倍波高处高程为 7.57 m,满足基本不越浪的高程设计要求,且有一定富余,原设计断面内坡采用与外坡护面垫层相同质量的 1 250~2 500 kg 块石,满足规范要求,但模型试验的设计高水位+100 a 一遇波浪及相应波浪作用下,内坡受堤顶越浪水体冲击较严重,导致内坡护面失稳。

JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》基本不越浪的高程取值只设定较低的下限值,无越浪量和越浪波高控制要求,"基本不越浪"的设计标准相对于"允许越浪"和"按照波浪爬高计算并控制越浪量"的设计标准,自由度过大,易造成理解的偏差。在实际工程中,当采用"基本不越浪"标准的下限值进行堤顶高程设计时,内坡破坏的案例较多,应适当提高内坡护面块体质量。鉴于内坡结构的重要性,建议规范修编时进一步明确"基本不越浪"的设计标准及相关要求,提供更明确的设计依据。

5.2 护脚棱体

JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》对斜坡堤护脚棱体的顶面高程和棱体块石质量有相关要求,主要意图在于避开波浪作用最激烈的区域,尽可能不受破碎波的影响,要求护脚棱体顶高程位于设计低水位波高以下,对应的棱体块石质量按照计算的护面块石质量的 0.3~0.4。规范对护脚棱体顶高程要求比较宽泛,而对棱体块石质量要求相对较高。而在具体项目中,当护脚棱体顶高程低于设计低水位 1.5 倍波高及以下时,护脚棱体受破碎波影响明显减小,对应的块石质量如果仍按照护面块石质量的 0.3~0.4 取值,可能会造成一定的浪费。因此,建议规范修编时细化对不同高程下护脚棱体规格的要求。

5.3 礁盘地形

JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》对斜坡堤前海底坡度、水深突变等相关内容没有具体条文规定,JTS 145—2015《港口与航道水文规范》

(2022版)关于近岸波浪要素计算时,有考虑地形与水深的影响,破碎波高的取值与水底坡度有关,在水底坡度不大于 1/10 时,可查图取值,但对于礁盘这类复杂地形并不适用,本项目堤前 0.5 倍波长范围内海底坡度为 1/3~1/10,且为非均匀变化,波浪沿礁盘上爬过程中受浅水变形影响波高增大,至堤脚位置时发生强破碎,导致外坡护脚块石失稳。

礁盘地形下波浪变形复杂的情况已得到各类试验研究^[6-10]的佐证,建议规范修编时增加海底坡度大于1/10条件下的破碎波高取值依据。

5.4 胸墙稳定性

斜坡堤胸墙后方往往有内坡护面结构的支撑,由于内坡块体的特点与常规回填料不同,这种支撑不能简单等化为被动土压力或摩阻力,纳入稳定计算缺乏理论依据,因此,经常将其作为结构富余而不予考虑。在胸墙稳定性不满足设计要求时,加大胸墙尺寸的做法不利于节约投资。鉴于全包裹式内坡结构对胸墙稳定性验算具有重要意义,建议规范增加相关计算内容与方法。

6 结语

- 1) JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》中的"基本不越浪"设计标准自由度过大,当采用其下限值进行设计时,不宜直接作为内坡结构设计的依据,建议结合越浪量计算情况,适当提高内坡护面块石或块体质量,越浪量超过 0.05 m³/(m·s)时,应提高至外坡护面块体质量的 1/3~1/2 以上。建议规范修编时,进一步明确"基本不越浪"的设计标准及相关越浪量、越浪波高控制要求,提供更明确的设计依据。
- 2) JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》 对斜坡堤护脚棱体顶面高程的取值要求意图在于 避开波浪作用最激烈的区域,不受破碎波的影响, 规范对护脚棱体顶高程要求比较宽松,而对棱体

块石质量要求相对严格,建议规范修编时细化对 不同高程下护脚棱体规格的要求。

3) 现行规范中关于防波堤护脚结构的设计方法适用于海底坡度平缓的情况,对于防波堤堤前水深地形变化大的情况并不适用。建议规范修编时,适当考虑纳入海底坡度 1/10 以上情况下破碎波高的取值依据。礁盘地形上的波浪运动形态复杂,建议结合整体物理模型试验,对堤脚进行优化设计。

参考文献:

- [1] 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.

 Code of design for breakwaters andrevetments: JTS 154—2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [2] 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 2022 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.

 Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145—2015[S]. 2022 ed. Beijing: China Communication Press Co., Ltd., 2022.
- [3] 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: 南京水利科学研究院, 2022.

 Nanjing Hydraulic Research Institute. Physical model test of breakwater engineering for Shanwei Zhelang modern fishing port (level 2) phase II project [R]. Nanjing:

Nanjing Hydraulic Research Institute, 2022.

[4] 中海(广州)工程勘察设计有限公司.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)工程勘察设计有限公司, 2021.
Zhonghai (Guangzhou) Engineering Survey and Design Co.,
Ltd. Wave Numerical Calculation Report for Shanwei Zhelang
modern fishing port phase II construction project [R].

- Zhonghai (Guangzhou) Engineering Survey and Design Co., Ltd, 2021.
- [5] 黄哲, 徐孟飘, 王登婷, 等. 复杂礁盘地形对防波堤堤脚稳定性影响试验研究[J]. 水运工程, 2019(8): 70-73. HUANG Z, XU M P, WANG D T, et al. Experimental research on toe rock stability of breakwater under complex reef terrain condition [J]. Port & waterway engineering, 2019(8): 70-73.
- [6] 卢生军, 丁建军, 李少斌. 深水斜坡堤堤脚块石稳定性分析[J]. 水运工程, 2018(12): 73-77.

 LU S J, DING J J, LI S B. Toe rock stability analysis of rubble mound breakwaters in deep water [J]. Port & waterway engineering, 2018(12): 73-77.
- [7] 刘清君,孙天霆,王登婷. 岛礁陡坡地形上波浪破碎试验研究[J]. 水运工程, 2018(12): 42-45.

 LIU Q J, SUN T T, WANG D T. Experimental research on wave breaking on steep reef terrain[J]. Port & waterway engineering, 2018(12): 42-45.
- [8] 刘诚睿, 琚烈红, 周雅. 长周期波浪在礁盘陡变地形上的变形研究[J]. 水运工程, 2017(5): 31-35.

 LIU C R, JU L H, ZHOU Y. Wave shoaling of long wave on steep reef terrain [J]. Port & waterway engineering, 2017(5): 31-35.
- [9] 丁军, 田超, 王志东, 等. 近岛礁波浪传播变形模型试验研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2015, 30(2): 194-200.
 - DING J, TIAN C, WANG Z D, et al. Experimental research on wave deformation near the typical island[J]. Chinese journal of hydrodynamics, 2015, 30(2): 194-200.
- [10] 陈衍顺. 复杂礁盘地形下防波堤护面稳定性试验分析[J]. 港口科技, 2018(3): 16-26, 38.
 - CHEN Y S. Test analysis on stability of breakwater armor under complex reef terrain condition [J]. Science & technology of ports, 2018(3): 16-26, 38.

(本文编辑 王传瑜)