

· 港口 ·



涌浪及复杂地形条件下斜坡堤 堤脚人工块体方案试验研究*

张海荣¹, 沈雨生², 李社生¹, 蔡东胜¹

(1. 中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510290;

2. 南京水利科学研究院 河流海岸研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 堤脚结构是斜坡式防波堤的重要组成部分, 通常采用天然块石。对于缺乏天然块石的港口工程建设区域, 需要采用混凝土人工块体代替天然块石作为斜坡堤的堤脚。以某海外港口防波堤工程为例, 通过防波堤波浪整体物理模型试验, 研究涌浪及复杂地形条件下斜坡式防波堤堤脚人工块体方案的稳定性, 并对斜坡堤堤脚进行优化, 重点分析和研究涌浪及复杂地形条件下波浪对防波堤各部位的作用特征及斜坡堤堤脚稳定性的提升方法。研究表明, 涌浪及复杂地形条件下, 波浪产生的破波水流对斜坡堤堤头圆弧段内侧及堤根段作用强烈, 原方案堤脚 8 m³ 带槽方块在设计波浪作用下失稳; 通过礁盘开槽、堤脚人工块体安放在礁盘开槽内可提升堤根段堤脚人工块体的稳定性; 将堤身段和堤头段堤脚带槽方块加大至 12 m³, 但是由于带槽方块之间缺少咬合、对破波水流冲击作用的抵抗能力弱, 堤身段和堤头段背浪侧(135°~180°)堤脚块体在设计波浪作用下仍失稳; 优化方案的堤身和堤头段堤脚采用具有勾联性的人工块体, 且其下方块石垫层可增强堤脚人工块体的稳定性, 堤身段的 12 m³ Xbloc 块体和堤头段背浪侧(135°~180°)堤脚的 16 m³ Xbloc 块体在设计波浪作用下稳定。

关键词: 涌浪; 复杂地形; 堤脚; 人工块体; 稳定性; 整体模型试验

中图分类号: U656.2+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0029-10

Experimental study on artificial block toe of sloping breakwater under swell and complex bathymetry conditions

ZHANG Hairong¹, SHEN Yusheng², LI Shesheng¹, CAI Dongsheng¹

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

2. River and Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The toe structure is an important part of the sloping breakwater, and natural rocks are usually used. For port construction areas that lack natural rocks, concrete artificial blocks are needed to replace natural rocks as the toe of the sloping breakwater. Taking a certain overseas port breakwater project as an example, this paper studies the stability of the artificial block toe of the sloping breakwater under the conditions of swell and complex bathymetry through the 3D physical model tests, and optimizes the breakwater toe. The characteristics of the wave action on various parts of the breakwater under the conditions of swell and complex bathymetry and the plans to improve the stability of the breakwater toe are analyzed and studied. The research results show that the wave-breaking water flows generated by waves under swell and complex bathymetry conditions have a strong effect on the inner side of the circular arc section of the breakwater roundhead and the breakwater root, and the 8 m³ Antifer of the original toe plan is unstable under design wave action. The stability of the artificial block toe of the breakwater root can be improved by opening a groove on the reef plate and placing the artificial blocks of the toe in the groove

收稿日期: 2025-02-13

*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y221007)

作者简介: 张海荣(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港航工程结构设计工作。

of the reef plate. The Antifer size of the breakwater trunk and roundhead is increased to 12 m^3 , however, due to the lack of interlocking between the Antifers and their weak resistance to the breaking wave impact, the Antifer at the breakwater trunk and the leeward side ($135^\circ\text{--}180^\circ$) of the breakwater roundhead toe are still unstable under design wave action. For the optimization schemes, the breakwater trunk and roundhead toes use artificial blocks with interlocking properties, and the rocks applied in underlayer of the artificial blocks can enhance the stability of the artificial blocks at the toe. The 12 m^3 Xbloc at the breakwater trunk toe and the 16 m^3 Xbloc at the leeward side ($135^\circ\text{--}180^\circ$) of the breakwater roundhead toe are stable under design wave action.

Keywords: swells; complex bathymetry; toe; artificial block; stability; overall model test

斜坡式防波堤是港口海岸工程中防波堤最常采用的结构形式。斜坡式防波堤通常由堤心、垫层、护面和堤脚等部位组成,其中堤心、垫层和堤脚一般采用开山石和块石,护面一般采用块石或者人工块体。堤脚是斜坡堤的重要组成部分,具有支撑上部护面结构以及保护下方垫层、护底块石和海床的作用。

斜坡堤堤脚一般采用块石材料。对于斜坡堤堤脚的设计,我国 JTS-154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[1]中给出,当外坡水下抛石棱体的顶高程在设计低水位以下 1.0 倍设计波高值时,棱体的块石质量可取 Hudson 公式计算的块石质量的 0.3~0.4。国外学者对斜坡堤堤脚稳定性的研究成果相比国内较早,并提出了多种斜坡堤堤脚块石稳定质量的计算公式,斜坡堤堤脚块石稳定质量计算公式最早由 Gerding^[2]于 1993 年基于物理模型试验结果提出,考虑了设计波高、堤脚块石顶面处的水深、块石相对密度和破坏数等参数,但是未考虑堤前水深的影响。随后 van der Meer^[3]于 1995 年提出另一种计算公式,考虑了堤前水深的影响。在分析已有数据的基础上,Muttray^[4]以堤脚块石淹没水深与入射波高的比值作为控制参数,提出一种斜坡堤堤脚块石稳定质量的计算方法。van Gent^[5]基于二维水槽断面试验对斜坡堤堤脚块石的稳定性进行研究,研究结果表明堤脚块石的稳定性与相对水深、波陡、堤脚的宽度和厚度等有关,并提出一种斜坡堤堤脚块石稳定质量的计算方法。目前欧洲标准 *Rock manual*^[6]和美国标准

Coastal engineering manual^[7]中,同时采用 Gerding 公式和 van der Meer 公式计算斜坡堤堤脚块石的稳定质量。国内也有学者对斜坡堤堤脚的稳定性进行研究,吴中等^[8]对斜坡堤天然块石护脚进行试验研究,指出在中低水位, Gerding 公式计算的护脚棱体稳定质量有可能偏小,并给出了不同类型护面下护脚棱体稳定计算的修正系数。黄哲等^[9]通过波浪整体物理模型试验对礁盘地形附近某工程防波堤堤脚的稳定性进行研究,试验结果表明礁盘地形上堤脚块石稳定重力若按规范计算则偏危险。卢生军等^[10]针对深水斜坡堤堤脚块石的稳定性问题,通过二维物理模型试验进行研究将 van der Meer 公式做了局部修正。钟杰等^[11]通过波浪断面和局部整体物理模型试验,重点分析了斜向波浪作用下斜坡堤堤头圆弧段堤脚块石发生破坏的原因及其随入射波浪周期和水位的变化关系。可见,国内外对斜坡堤堤脚稳定性的研究均主要针对堤脚块石。我国承建的海外港口工程中存在缺乏天然块石、堤脚棱体需要采用人工块体的情况,且海外港口工程大部分位于以涌浪为主的海域,而对于涌浪作用下斜坡堤堤脚人工块体方案的稳定性研究还很少,亟需开展该方面的研究。

本文以某海外港口防波堤工程为例,对其防波堤进行波浪整体物理模型试验,研究涌浪及复杂地形条件下斜坡式防波堤堤脚人工块体方案的稳定性,并对原方案斜坡堤堤脚进行优化,以期类似工程设计提供参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

某港口工程位于太平洋南部的萨摩亚, 项目海域波浪波高较大, 当地石场难以满足防波堤结构设计所需大块石的开采和供应, 需要通过人工块体代替垫层和堤脚大块石的设计方案来解决缺乏天然大块石的难题。

该工程防波堤长 160 m, 防波堤纵轴线为东西走向, 堤头处海床底高程为 $-15 \sim -14$ m、地形坡度约 1:50, 堤根处为岛礁礁缘陡变地形、 $-15.0 \sim -8.0$ m 地形坡度约 1:7、 $-8.0 \sim 0.0$ m 地形坡度约 1:2.5。工程防波堤为抛石斜坡堤结构, 防波堤总平面布置见图 1。

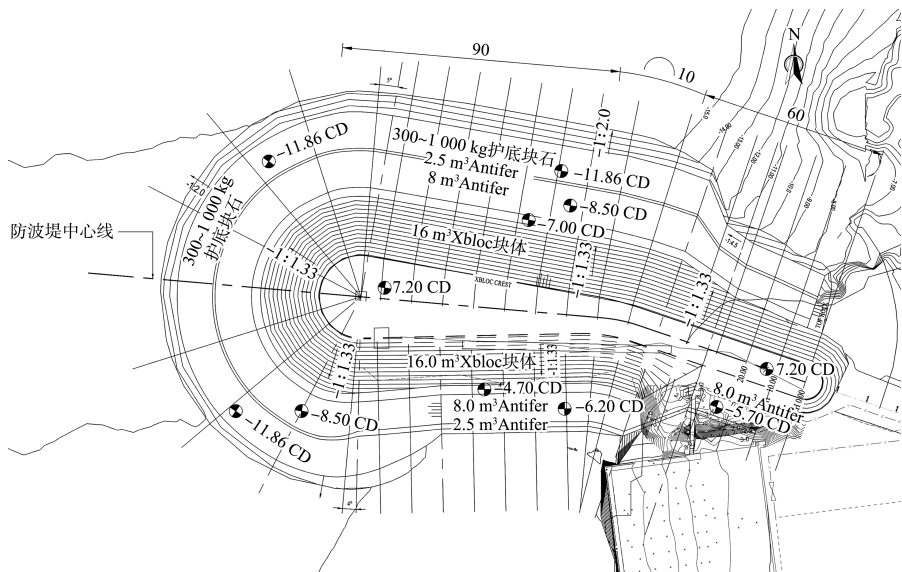


图 1 防波堤总平面布置 (单位: m)
Fig. 1 General layout of the breakwater (unit: m)

1.2 水深及波浪条件

该工程防波堤的极端高水位为 2.04 m, 极端低水位为 0.00 m。

工程海域波浪以涌浪为主, 根据工程波浪数值模拟结果^[12], 外海波浪传至防波堤处的主浪向和强浪向为 $N+8^\circ$ 。防波堤(堤头处)100 a 一遇设计波浪要素见表 1, 可见防波堤的设计波浪波高较大、波浪周期较长。

1.3 防波堤原设计方案

防波堤堤顶高程为 7.2 m, 斜坡坡度为 3:4。防波堤划分为堤根段、堤身段和堤头段, 各段的典型断面见图 2。由于工程区缺乏天然大块石, 斜坡堤的垫层及堤脚均采用混凝土人工块体。垫层(包括护面块体和堤脚块体垫层)采用 2.5 m^3 带槽方块, 按照菱形交错网格规则安放, 孔隙率为 30%; 护面结构采用 16.0 m^3 Xbloc 块体, 由荷兰 DMC(Delta Marine Consultants)公司研发, 结构见图 3, 为单层随机安放的勾联块体。堤脚原方案采用 8.0 m^3 带槽方块。考虑到与岛礁礁盘的衔接, 堤根根部(0~10 m)范围内原设计方案未设置堤脚棱体, 16.0 m^3 Xbloc 护面块体直接安放在岛礁礁盘上, 见图 2a)。防波堤典型断面的各部位组成见表 2。

表 1 防波堤 100 a 一遇设计波浪要素
Tab. 1 100-year return period design wave data of the breakwater

波向	水位	波浪要素	
		波高 H_s/m	周期 T_p/s
$N+8^\circ$	极端高水位 2.04 m	8.78	14.2
	极端低水位 0.00 m	8.78	14.2

表 2 防波堤典型断面各部位组成
Tab. 2 Composition parts of the typical cross-section of the breakwater

堤顶高程/m	斜坡坡度	垫层块体	护面块体	堤脚块体	护底块石
7.2	3:4	2.5 m ³ 带槽方块	16 m ³ Xbloc	8 m ³ 带槽方块	300~1 000 kg 块石

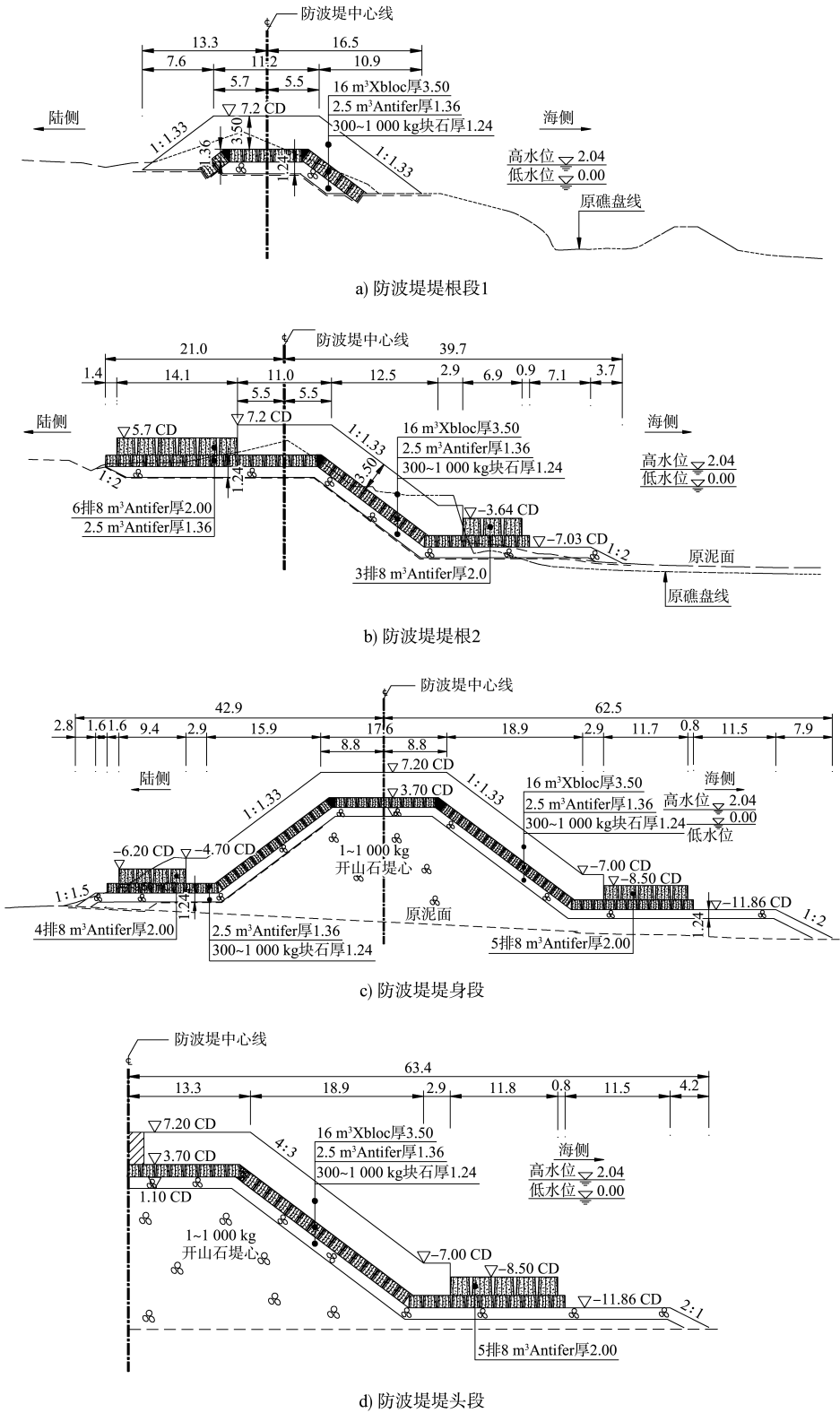
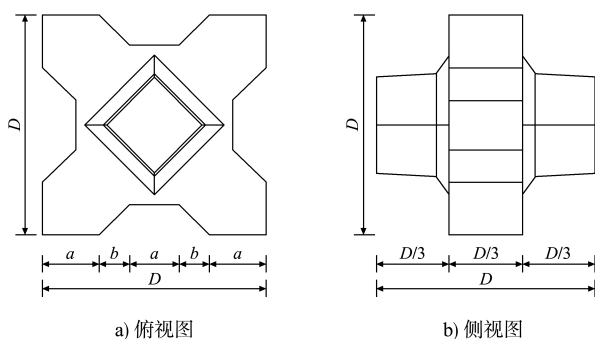


图 2 防波堤各段典型断面 (单位: m)
Fig. 2 Typical sections of each section of the breakwater (unit: m)



注: D 为 Xbloc 块体的特征高度, $D = \sqrt[3]{3V}$, V 为 Xbloc 块体体积;
 $a = D/3 \times \sqrt{2}$; $b = (D - 3a) / 2$ 。

图 3 Xbloc 块体结构

Fig. 3 Xbloc structure

2 物理模型试验方法

2.1 试验仪器设备

防波堤波浪整体物理模型试验在南京水利科学研究院波浪水池中进行, 波浪水池长 50 m、宽 45 m、深 1.2 m, 港池的一端配有消浪缓坡, 另一端配有多向不规则波造波机, 由计算机造波系统控制产生所要求模拟的波浪要素。

2.2 模型设计

防波堤波浪整体物理模型试验均采用正态模型, 根据 Froude 数相似律设计。考虑到防波堤尺度、试验模型范围、水深、波浪条件以及试验场地设备等, 波浪整体物理模型试验的模型几何长度比尺 λ_l 为 1:68。

根据 Froude 数相似定律, 其他各相关物理量的模型比尺为: 水深比尺 $\lambda_h = \lambda_l$, 时间比尺 $\lambda_T = \lambda_l^{1/2}$, 质量比尺 $\lambda_w = \lambda_l^3$ 。

2.3 试验方法

防波堤波浪整体物理模型试验的模型布置见图 4, 模型范围包含本文工程全部防波堤。为准确模拟波浪对防波堤的作用, 对模型范围内的地形进行模拟与制作。试验波浪方向为 $N+8^\circ$ 。

模型中防波堤结构与原型保持几何相似。护面、垫层和堤脚人工块体等除与原型保持几何相似外, 还与原型保持质量相似。护底块石经严格挑选与原型保证质量相似。

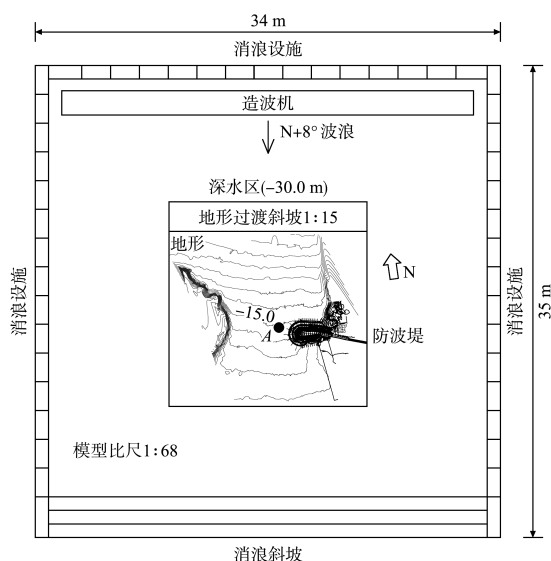


图 4 整体试验模型布置

Fig. 4 layout of overall test model

对于防波堤堤脚块体, 其波浪作用下的破坏结果以失稳率 N_d 表示, 可由下式计算:

$$N_d = \frac{N_{\text{displaced}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $N_{\text{displaced}}$ 为每段失稳块体数; N_{total} 为相应段的块体总数。

为了分析斜坡堤堤脚结构的失稳率, 将斜坡堤堤脚沿程分为堤根段 (0~50 m)、堤身段 (50~146 m)、堤头段迎浪侧 ($0^\circ \sim 135^\circ$) 和堤头段背浪侧 ($135^\circ \sim 180^\circ$) 4 段, 分别统计分析这 4 段堤脚结构的失稳率, 见图 5。斜坡堤模型照片见图 6。

根据欧洲标准 *Rock Manual*, 斜坡堤堤脚结构破坏等级可按失稳率划分, 见表 3。

试验中采用造波机模拟不规则波, 并采用 Jonswap 波谱 (谱峰因子 γ 取平均值 3.3)。对于每组稳定性试验, 波浪的连续作用时间为原型 6 h。试验波浪测量结果见表 4, 试验中在地形模拟完成后、防波堤模型建造前, 在防波堤前布置波高仪 (图 4 中 A 点) 率定试验入射波浪要素。

试验波浪对斜坡堤作用状况见图 7。

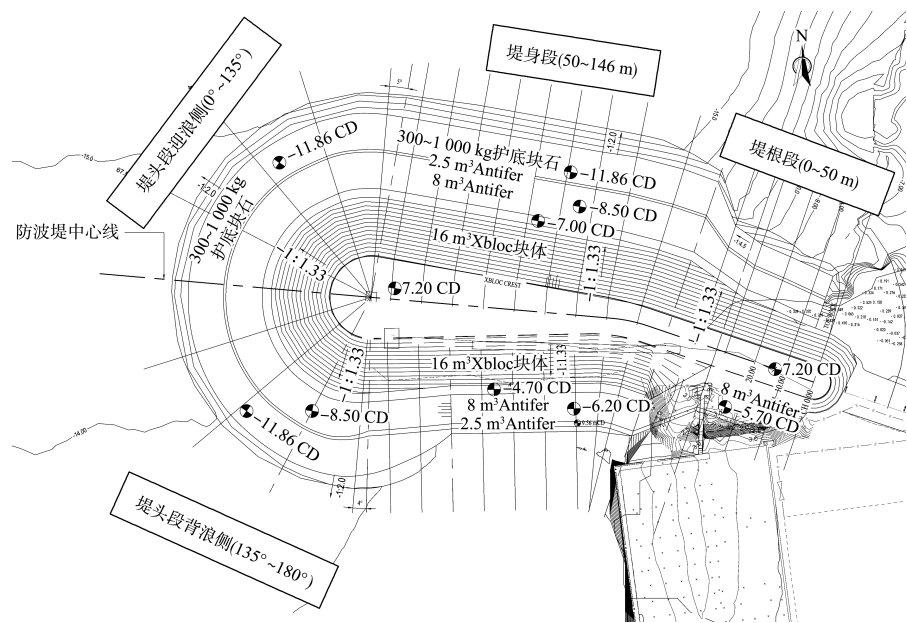


图 5 斜坡堤堤脚分区
Fig. 5 Toe zoning of sloping breakwater



图 6 斜坡堤整体物理模型(原方案)
Fig. 6 Overall physics models of sloping breakwater (original scheme)

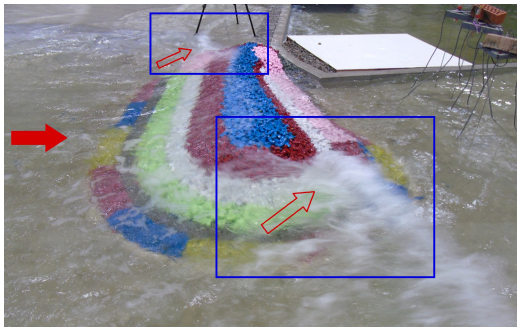


图 7 试验波浪对斜坡堤作用状况
Fig. 7 Effect of test wave on sloping breakwater

3 原方案稳定性结果

由设计波浪(极端高水位及极端低水位叠加 100 a 一遇波浪要素)对斜坡堤的作用状况可见,在涌浪作用下,波浪在斜坡堤堤头处向堤头内侧折射显著,不规则波波列中的大浪在堤头圆弧段背浪侧(135°~180°)范围内发生破碎,该范围内破波水流对堤头圆弧段背浪侧(135°~180°)堤脚具有强烈的冲击作用;在涌浪及岛礁礁缘陡变地形作用下,堤根处波浪发生剧烈破碎,破波水流对堤根段的淘刷作用也十分强烈。设计波浪(极端高水位及极端低水位叠加 100 a 一遇波浪要素)作用后,斜坡堤原方案破坏状况见图 8,堤脚各区段 8 m³ 带槽方块失稳率试验结果见表 5。

表 3 斜坡堤堤脚结构破坏等级划分
Tab. 3 Classification of damage grades for the toe of sloping breakwater

破坏等级	描述
$N_d = 0\% \sim 3\%$	没有或者极个别的移动
$N_d = 3\% \sim 10\%$	堤脚局部区域被波浪打击而变平缓,但整体功能仍然完整,其破坏程度尚可接受
$N_d > 20\%$	堤脚完全丧失其功能,其破坏程度不能接受

表 4 试验波浪测量结果
Tab. 4 Measurement results of test wave

波向	水位/m	设计波浪要素 (目标值)		试验波浪测量结果 (试验率定值)	
		H_s/m	T_p/s	H_s/m	T_p/s
N+8°	极端高水位 2.04	8.78	14.2	8.91	14.13
	极端低水位 0.00	8.78	14.2	8.84	14.13



a) 视角1



b) 视角2

图 8 波浪作用后原方案堤脚损坏状况

Fig. 8 Damage condition of the breakwater toe after wave action for original scheme

表 5 原方案堤脚各区段的失稳率试验结果

Tab. 5 Experimental results of instability rates of breakwater toe for original scheme

堤脚区段	N_{total}	$N_{\text{displaced}}$	$N_d / \%$
堤根段	66	14	21.2
堤身段	218	64	29.4
堤头段迎浪侧($0^\circ \sim 135^\circ$)	207	21	10.1
堤头段背浪侧($135^\circ \sim 180^\circ$)	93	28	30.1

由图 8 和表 5 可见:

1) 在设计波浪(极端高水位及极端低水位叠加 100 a 一遇波浪)作用下, 由于堤根段根部($0 \sim 10$ m)堤脚处的 16 m^3 Xbloc 护面块体直接安放在岛礁礁盘上、堤脚 16 m^3 Xbloc 块体无支撑, 在堤根段破波水流的冲击下, 堤根段根部的堤脚及护面 16 m^3 Xbloc 块体发生大量滚落, 严重失稳。堤根段($10 \sim 50$ m)的 8 m^3 带槽方块堤脚块体有较多发生滚动和位移, 失稳率为 21.2%。

2) 在设计波浪作用下, 堤身段($50 \sim 146$ m)

的堤脚 8 m^3 带槽方块也有较多发生滚动和位移, 失稳率为 29.4%。这是由于堤身段堤前波浪包括入射波浪与堤身反射波浪的叠加, 导致堤身段堤前波浪底流速相比较, 所以堤身段堤脚块体的失稳率相比较。

3) 在设计波浪作用下, 堤头段迎浪侧($0^\circ \sim 135^\circ$)的堤脚 8 m^3 带槽方块失稳率为 10.1%; 堤头段背浪侧($135^\circ \sim 180^\circ$)的堤脚 8 m^3 带槽方块失稳率为 30.1%。可见, 堤头段背浪侧($135^\circ \sim 180^\circ$)堤脚块体失稳率明显大于堤头段迎浪侧($0^\circ \sim 135^\circ$)堤脚块体失稳率, 这是由于堤头段迎浪侧($0^\circ \sim 135^\circ$)范围内的堤前波浪主要为入射波浪、该段内堤头圆弧段的反射波浪不显著, 而堤头段背浪侧($135^\circ \sim 180^\circ$)由于波列中的大浪在堤头该范围内发生破碎, 破波水流冲击对该范围内堤脚作用强烈。

4 优化方案稳定性分析

4.1 优化方案 1

鉴于斜坡堤原设计方案在设计波浪作用下堤根段、堤身段和堤头段均失稳, 提出优化方案 1。对于优化方案 1 堤根段, 将堤根段($0 \sim 50$ m)岛礁礁盘沿着堤脚开槽, 堤根段($0 \sim 10$ m)范围内将护面堤脚处 16 m^3 Xbloc 安放在礁盘开槽内, 堤根段($10 \sim 50$ m)范围内取消原堤脚棱体 8 m^3 带槽方块, 改为采用 12 m^3 Xbloc 块体, 堤脚处 12 m^3 Xbloc 块体安放在礁盘开槽内, 优化方案 1 堤根段典型断面见图 9。对于优化方案 1 堤身段及堤头段, 将原堤脚棱体(8 m^3 带槽方块)改为 12 m^3 带槽方块。

设计波浪(极端高水位及极端低水位叠加 100 a 一遇波浪要素)作用后, 斜坡堤优化方案 1 堤脚状况见图 10, 堤脚各区段的失稳率试验结果见表 6, 堤脚优化方案 1 与原方案的失稳率结果对比见图 11。

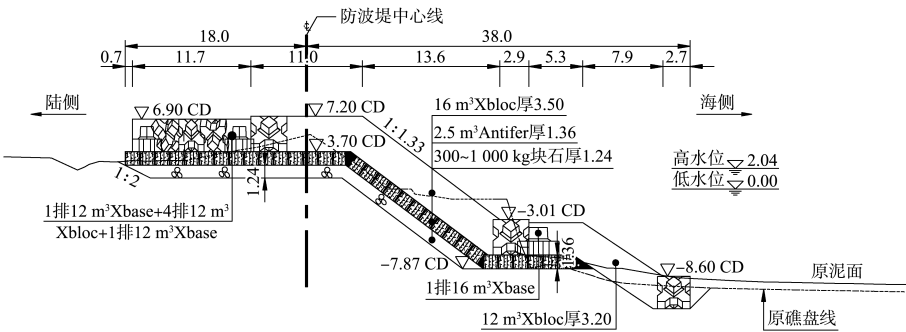
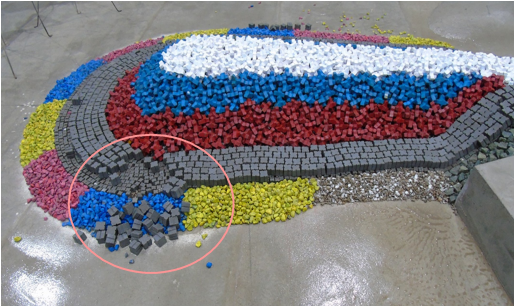


图 9 优化方案 1 堤根段典型断面 (单位: m)

Fig. 9 Typical section of the breakwater root for optimized scheme 1 (unit: m)



a) 视角1



b) 视角2

图 10 波浪作用后优化方案 1 堤脚损坏状况
Fig. 10 Damage condition of the breakwater toe after wave action for optimized scheme 1

表 6 优化方案 1 堤脚各区段的失稳率试验结果
Tab. 6 Experimental results of instability rates of the breakwater toe for optimized scheme 1

堤脚区段	N_{total}	$N_{displaced}$	$N_d / \%$
堤根段	62	0	0
堤身段	196	15	7.7
堤头段迎浪侧(0~135°)	184	4	2.2
堤头段背浪侧(135~180°)	83	29	34.9

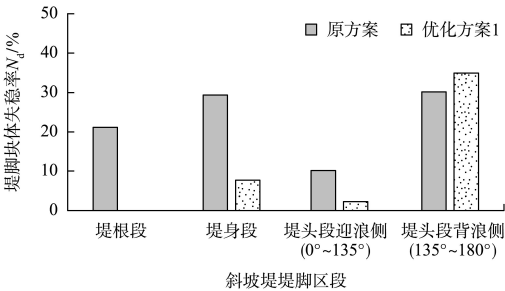


图 11 优化方案 1 与原方案的堤脚失稳率结果对比
Fig. 11 Comparison of instability rate results of the breakwater toe between optimized scheme 1 and original scheme

由图 10、表 5 和图 11 可见:

1) 对于优化方案 1, 由于堤脚处 Xbloc 块体受到礁盘开槽的良好支撑, 在设计波浪作用下, 在堤根段破波水流的冲击下, 堤根段堤脚 Xbloc 块体未发生明显位移或滚动, 满足稳定性要求。

2) 在设计波浪作用下, 优化方案 1 堤身段堤脚 12 m³ 带槽方块失稳率为 7.7%, 与原方案(堤脚 8 m³ 带槽方块)相比, 优化方案 1 堤身段堤脚块体失稳率减小。

3) 在设计波浪作用下, 优化方案 1 堤头段迎浪侧(0°~135°)的 12 m³ 带槽方块失稳率为 2.2%, 与原方案相比, 优化方案 1 堤头段迎浪侧(0°~135°)堤脚块体失稳率减小。在设计波浪作用下, 优化方案 1 堤头段背浪侧(135°~180°)的堤脚 12 m³ 带槽方块仍有较多发生滚动和位移、失稳率为 34.9%, 与原方案相比, 虽然优化方案 1 加大了堤头段背浪

侧($135^{\circ} \sim 180^{\circ}$)堤脚块体质量, 但是其稳定性未得到提高。究其原因, 这是由于在设计波浪作用下, 堤头处破波水流对堤头段背浪侧($135^{\circ} \sim 180^{\circ}$)堤脚的冲击作用十分强烈, 而堤脚带槽方块块体之间缺少咬合, 对破波水流冲击作用的抵抗能力弱。

4.2 优化方案 2

优化方案 2 在优化方案 1 的基础上, 将斜坡堤堤身段和堤头段的堤脚 12 m^3 带槽方块改为 12 m^3 Xbloc 块体, 堤根段保持优化方案 1 不变。

设计波浪作用后, 斜坡堤优化方案 2 堤脚状况见图 12。在设计波浪作用下, 斜坡堤的堤根段、堤身段和堤头段迎浪侧($0^{\circ} \sim 135^{\circ}$)堤脚 12 m^3 Xbloc 块体均未发生明显位移或滚动, 满足稳定性要求。在设计波浪作用下, 优化方案二堤头段背浪侧($135^{\circ} \sim 180^{\circ}$)的堤脚 12 m^3 Xbloc 块体有多个发生滚动和位移、失稳率为 16.7%。可见, 对于堤头段背浪侧($135^{\circ} \sim 180^{\circ}$), 虽然优化方案 2(堤脚 12 m^3 Xbloc 块体)堤脚块体的质量与优化方案 1(堤脚 12 m^3 带槽方块)相同, 但由于优化方案 2 堤脚 12 m^3 Xbloc 块体之间具有一定的勾联性, 其失稳率与优化方案 1 相比明显减小。

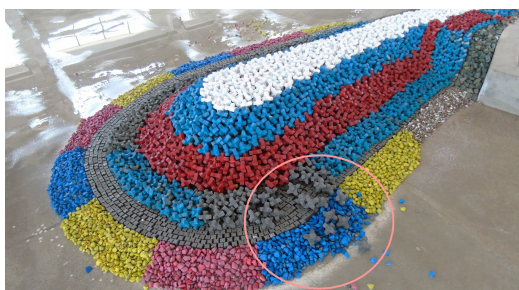


图 12 波浪作用后优化方案 2 堤脚损坏状况
Fig. 12 Damage condition of the breakwater toe after wave action for optimized scheme 2

4.3 优化方案 3

优化方案 3 在优化方案 2 的基础上, 将斜坡堤堤头段背浪侧($135^{\circ} \sim 180^{\circ}$)的堤脚 12 m^3 Xbloc 块体改为 16 m^3 Xbloc 块体, 其余段堤脚保持优化方案 2 不变。

设计波浪作用后, 斜坡堤优化方案 3 堤脚状况见图 13。在设计波浪作用下, 优化方案 3 堤头段背浪侧($135^{\circ} \sim 180^{\circ}$)的堤脚 16 m^3 Xbloc 块体仍

有发生滚动和位移、失稳率为 11.9%, 与优化方案 2(堤脚 12 m^3 Xbloc 块体)相比, 该区域堤脚块体的失稳率有所减小。

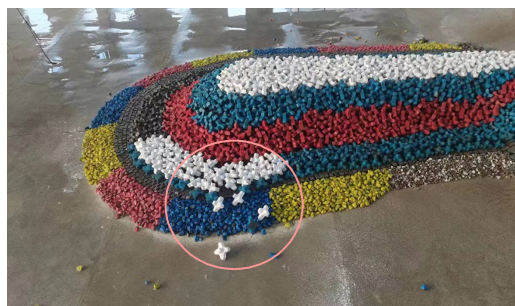


图 13 波浪作用后优化方案 3 堤脚损坏状况
Fig. 13 Damage condition of the breakwater toe after wave action for optimized scheme 3

4.4 优化方案 4

优化方案 4 在优化方案 3 的基础上, 将斜坡堤堤头段背浪侧($135^{\circ} \sim 180^{\circ}$)范围内的堤脚 16 m^3 Xbloc 块体下方的垫层由 2.5 m^3 带槽方块改为 $1\ 250 \sim 3\ 200 \text{ kg}$ 块石, 其余段堤脚保持优化方案 3 不变。

设计波浪作用后, 斜坡堤优化方案四堤脚状况见图 14。在设计波浪作用下, 堤头段背浪侧($135^{\circ} \sim 180^{\circ}$)的堤脚 16 m^3 Xbloc 块体未发生明显位移或滚动, 满足稳定性要求。这是由于该范围内的堤脚 16 m^3 Xbloc 块体下方的垫层由 2.5 m^3 带槽方块改为 $1\ 250 \sim 3\ 200 \text{ kg}$ 块石后, 一方面 Xbloc 块体与垫层之间的摩擦有所增强, 另一方面堤脚块体下方的块石垫层增加了破波水流作用下的渗透性, 一定程度上减小了破波水流对堤脚块体的作用。



图 14 波浪作用后优化方案 4 堤脚损坏状况
Fig. 14 Damage condition of the breakwater toe after wave action for optimized scheme 4

5 结语

1) 本文工程区主浪向和强浪向波浪为涌浪,且防波堤根部处于岛礁礁缘陡变地形区。设计波浪对斜坡堤的作用状况表明,在涌浪作用下,堤头处波浪产生的破波水流对堤头圆弧段背浪侧($135^{\circ}\sim 180^{\circ}$)堤脚具有强烈的冲击作用;在涌浪及岛礁礁缘陡变地形作用下,堤根处波浪发生剧烈破碎,破波水流对堤根段的淘刷作用也十分强烈。

2) 对于斜坡堤原设计方案,堤根段根部护面块体严重失稳,堤脚 8 m^3 带槽方块失稳率较大,最大失稳率发生在堤头段背浪侧($135^{\circ}\sim 180^{\circ}$)堤脚处,最大失稳率为 30.1%。优化方案 1 将堤根段 Xbloc 块体安放在礁盘开槽内,设计波浪作用下稳定;堤身段和堤头段堤脚采用 12 m^3 带槽方块,在设计波浪作用下,堤身段和堤头段迎浪侧($0^{\circ}\sim 135^{\circ}$)堤脚 12 m^3 带槽方块的失稳率与原方案相比减小,但是由于带槽方块之间缺少咬合、对破波水流冲击作用的抵抗能力弱,优化方案 1 堤头段背浪侧($135^{\circ}\sim 180^{\circ}$)堤脚块体的稳定性未得到提高。

3) 优化方案 2~4 堤脚采用具有勾联性的 Xbloc 块体。最终方案堤身段和堤头段迎浪侧($0^{\circ}\sim 135^{\circ}$)的堤脚采用 12 m^3 Xbloc 块体,堤头段背浪侧($135^{\circ}\sim 180^{\circ}$)的堤脚采用 16 m^3 Xbloc 块体(块体下方垫层由带槽方块改为块石垫层),设计波浪作用下该方案堤脚块体稳定。研究结果表明,堤身和堤头段堤脚采用具有勾联性的人工块体,且人工块体下方采用块石垫层可增强堤脚人工块体的稳定性。

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 and revetments: JTS 154-2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [2] GERDING E. Toe structure stability of rubble mound breakwaters[D]. Delft: Delft University of Technology, 1993.
- [3] VAN DER MEER J, D'ANGREMOND K, GERDING E. Toe structure stability of rubble mound breakwaters[M]. [S.l.]: [s.n.], 1996.
- [4] MUTTRAY M. A pragmatic approach to rock toe stability[J]. Coastal engineering, 2013, 82: 56-63.
- [5] VAN GENT M R A, VAN DER WERF I M. Rock toe stability of rubble mound breakwaters[J]. Coastal engineering, 2014, 83(1): 166-176.
- [6] The rock manual: the use of rock in hydraulic engineering: C683[S]. London: CIRIA, 2007.
- [7] Coastal engineering manual: EM 1110-2-1100[S]. Washington: CERC Dept. of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, 2006.
- [8] 吴中, 林民标, 杨越. 斜坡堤天然块石护脚的稳定性计算[J]. 海洋工程, 2002, 20(2): 19-23.
WU Z, LIN M B, YANG Y. Stability calculation of rubble mound toe berm in the front of the sloping breakwater[J]. The ocean engineering, 2002, 20(2): 19-23.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 钟杰, 汤子扬, 沈雨生. 涌浪条件下斜坡式防波堤堤脚块石稳定性[J]. 水运工程, 2020(8): 64-71.
ZHONG J, TANG Z Y, SHEN Y S. Stability of the toe rocks of the rubble-mound breakwater under swell action[J]. Port & waterway engineering, 2020(8): 64-71.
- [12] Beca International Consultants Ltd. Climate risk vulnerability assessment and disaster risk management addendum report [R]. New Zealand: Beca International Consultants Ltd., 2019.

(本文编辑 王传瑜)