



萨摩亚阿皮亚港防波堤结构创新设计

张海荣, 李冠星, 刘扬勇, 蔡东胜, 丁 龙

(中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 针对萨摩亚阿皮亚港防波堤工程石料缺乏、大块石施工困难、开山采石环保要求高、堤根礁盘陡变处护面结构易失稳以及项目进度失控等问题, 对典型斜坡式防波堤进行创新设计, 提出混凝土人工块体替代传统块石的新型斜坡堤结构, 并通过三维整体物理模型试验验证防波堤结构的稳定性。试验结果表明, 斜坡堤采用人工块体替代块石作为垫层、护底和压脚结构具有一定的可行性, 并结合试验现象和结果提出礁盘陡变地形防波堤堤脚开槽的优化方案, 可为类似斜坡堤设计提供参考。

关键词: 斜坡堤; 人工块体; 垫层及压脚设计; 稳定性; 模型试验

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0048-07

Innovative design of Samoa Apia Port breakwater structure

ZHANG Hairong, LI Guanxing, LIU Yangyong, CAI Dongsheng, DING Long

(CCCC-FHEC Harbor Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: In consideration of the shortage of rock materials, difficult construction of large stones, high quarrying environmental protection requirements, the instability tendency of the armour structure at the steep reef of the breakwater root, and out-of-control project progress in Samoa Apia Port breakwater project, an innovative design is carried out for the typical sloping breakwater. A new type of sloping breakwater structure using concrete artificial blocks instead of traditional rocks is proposed, and the stability of the breakwater structure is verified through three-dimensional overall physical model test. The test results show that it is feasible that using artificial blocks instead of rocks as the underlayer, apron and toe structure in the sloping breakwater. Furthermore, based on the test phenomena and results, an optimized design of the breakwater toe grooving on the steep reef terrain is adopted, which can provide reference for the design of similar sloping breakwaters.

Keywords: sloping breakwater; artificial block; underlayer and toe design; stability; model test

阿皮亚港位于太平洋岛国萨摩亚, 是连接亚洲和大洋洲的重要航运枢纽, 区位优势明显, 自然条件独特。萨摩亚阿皮亚港防波堤工程是提升阿皮亚港区基础设施安全和运营能力的一项重要工程, 项目拟建一个长 160 m 的斜坡式接岸防波堤。在阿皮亚港防波堤原设计中, 采用大块石作为斜坡堤的垫层、护底和压脚结构, 其中垫层、护底块石为 2 200~5 000 kg 块石, 压脚块石为 10 400~16 900 kg 块石。但是, 当地群岛石场缺

乏足够的大块石, 开采效率低下, 难以满足原设计所需的石料供应量; 大块石抛填理坡施工难度也较大, 导致防波堤结构可能无法在预定工期内按时完工。同时, 大量的开山采石对当地的自然环境损害较大, 加之防波堤根部位于礁盘陡变地形处, 护面结构存在易失稳风险, 这些无疑给项目的进度带来了巨大的不确定性。因此, 大块石在本防波堤结构中的应用受到限制, 探索采用人工块体替代传统垫层和压脚块石的可行性显得尤为重要。

收稿日期: 2025-01-23

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。

现行的 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[1]未对垫层和压脚块石的可替代性进行明确说明。尽管国内外学者在护面块体的稳定性方面进行了大量物理模型试验研究^[2]，但对于人工块体作为垫层、护底和压脚结构的研究和应用相对较少。鉴于此，本文创新性采用混凝土人工块体替代传统的垫层、护底和压脚块石的斜坡堤结构，提出礁盘陡变地形条件下防波堤堤脚开槽的优化方案，并通过 3D 物理模型试验验证优化方案的技术可行性，旨在为类似斜坡堤设计提供参考和借鉴。

1 防波堤设计概况

阿皮亚港防波堤为深水斜坡式防波堤结构,长 160 m,轴线为东偏北 5° ,防波堤由东侧礁盘区延伸至 -16 m 水深处,礁盘周围的地形呈现出复杂的形态,坡度较陡,防波堤平面布置见图 1。

防波堤堤顶高程为 7.2 m, 堤心采用 1~1 000 kg 开山石, 内外坡均采用 16 m³ Xbloc 护面, 坡比为 1:1.33, 垫层为单层 2.5 m³ 人工槽型块体 Antifer+300~1 000 kg 块石。海侧压脚采用 1 排 16 m³ Xbase+3 排 12 m³ Xbloc+1 排 12 m³ Xbase 块体, 其中堤头圆弧 135°~180°, 压脚采用 1 排 16 m³ Xbase+3 排 16 m³ Xbloc+1 排 16 m³ Xbase, 块体顶

高程为-8.66 m; 陆侧坡脚采用 1 排 12 m³ Xbase+2 排 12 m³ Xbloc+1 排 12 m³ Xbase 块体, 高程定为-5.0 m。前坡护底结构采用 2.5 m³ Antifer 块体并以 1 250~3 200 kg 块石进行端部防护, 后坡护底则采用 2.5 m³ Antifer+300~1 000 kg 块石。防波堤设计典型断面见图 2。防波堤工程所在区域为南太平洋中部, 属典型的热带海洋性气候, 海域的风浪条件复杂且恶劣, 设计主浪向为北偏东 8°, 波浪设计标准采用 100 a 一遇, 相应的有效波高 H_s 为 8.78 m, 谱峰周期 T_p 为 14.2 s。

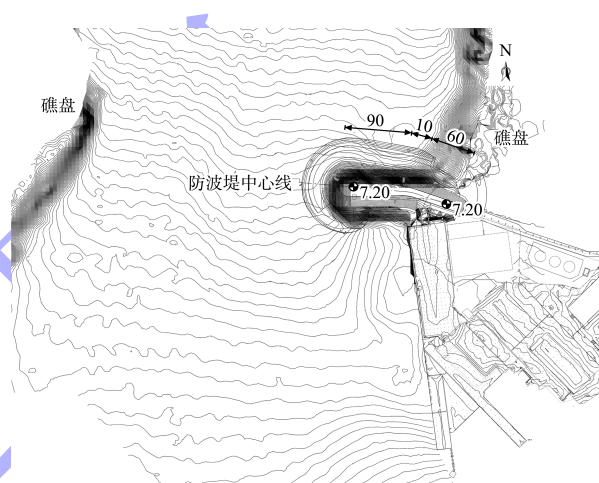


图 1 防波堤平面布置 (单位: m)

Fig. 1 Plane layout of breakwater (unit: m)

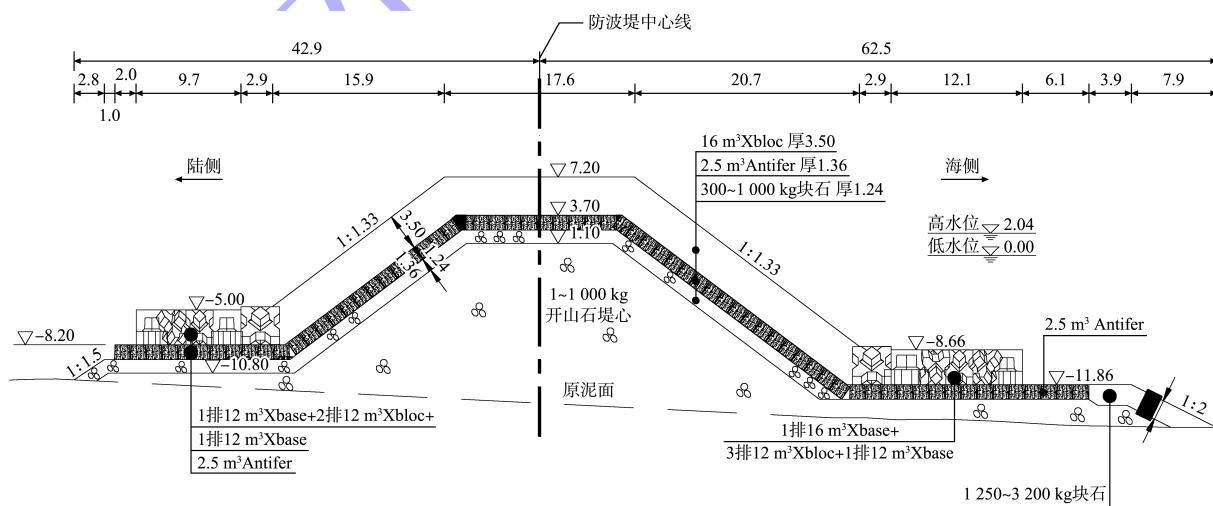


图 2 斜坡堤典型设计断面 (单位: m)

Fig. 2 Typical design cross-section of sloping breakwater (unit: m)

2 防波堤结构设计创新

2.1 混凝土槽型块体替代垫层、护底块石结构

2.1.1 垫层和护底块体选型

垫层和护底人工块体的选型主要从强健性、稳定性、经济性和修复性等方面确定。

1) 强健性。在防波堤的全生命周期中,人工块体的强健性不仅直接影响防波堤结构的使用寿命长短,还与块体在安装环节的破损率密切相关。项目海域波浪波高大、周期长,护面块体自重重大,采用带有细长结构单元的钩连类块体(如扭王字块、Accropode、Core-loc、Xbloc 等)作为垫层和护底块体易造成“断肢”破坏,而方块体类块体通常具有较为规则、对称的几何形状,结构强健性好,耐波浪冲击和防断裂能力强。

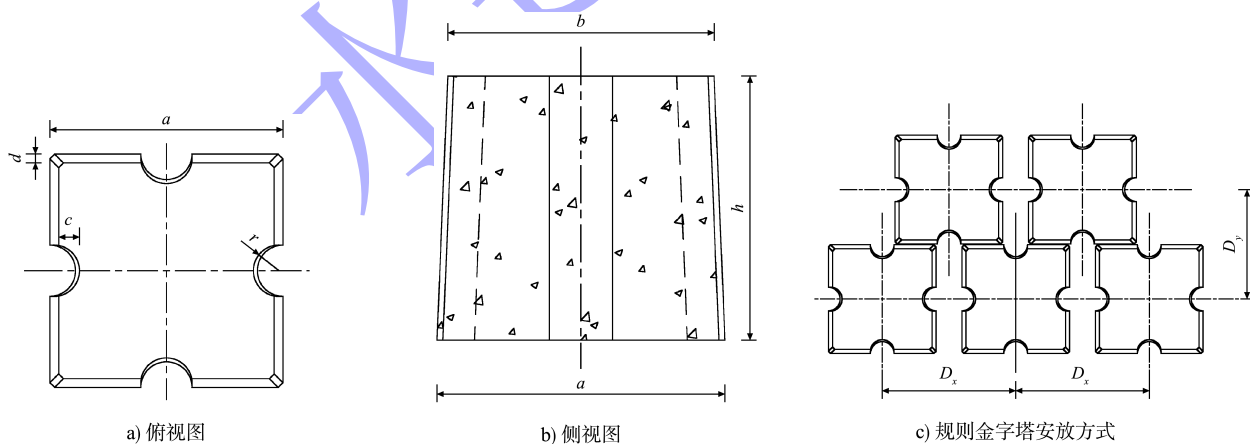
2) 稳定性。方块体类块体与自然石特性相似,主要依靠自身重力来稳定,块体间摩擦对稳定也有一定贡献。此外,通过调整安装方式和空隙率(尤其是带槽方块)可实现与垫层、护底块石的等效功能(如渗透性、波能耗散、减少反射等),防止块体在波浪作用下发生滑移、滚动或上举脱出等失稳情况,达到块体稳定性的要求。

3) 经济性。在施工工艺和成本方面,优先选

用易于预制、储存、转运和安装的块体,单层安放比双层安放的经济性更优^[3]。虽然方块体类块体的单体成本可能相对较高,但相比钩连类块体作为垫层结构,方块体类块体更加容易满足护面块体下垫层允许安放偏差的要求,并且拥有施工速度快、安装破损率低、维护成本低、使用寿命长等优点,从整个工程的全生命周期来看,其经济性较好,选用单层方块体类块体能够为工程带来长期的经济效益,降低工程的总体造价。

4) 修复性。在海洋环境中,防波堤结构频繁遭受台风或长期季风的影响。此外,由于施工过程中的各种因素,如机械故障、人为失误、环境条件等,可能导致个别块体出现滚滑或破损现象,必须尽快对损坏、滑移滚落的块体进行修复或二次安装。采用单层安装的方块体类块体,每个块体相对独立,损坏时可以迅速定位并单独更换,不需要对整个面层进行大规模修复,降低了修复的复杂性和劳动强度,修复工作也更加便捷。

根据现有的混凝土人工块体形式及上述选型因素分析,确定采用混凝土槽型块体 Antifer 作为垫层和护底结构,其块体尺寸规定见图 3^[4]。



注: a 为块体底宽, $a=1.076\sqrt[3]{V}$, V 为块体体积; b 为块体顶宽, $b=0.925\ 4a$; c 为槽深, $c=0.087\ 7a$; d 为棱角宽度, $d=0.022a$; h 为块体高度, $h=0.921a$; r 为槽半径, $r=0.111\ 5a$; D_x 为块体纵向安装间距; D_y 为块体横向安装间距。

图 3 Antifer 块体几何特征与安放方式

Fig. 3 Geometric characteristics and placement method of Antifer-block

2.1.2 垫层和护底块体稳定质量设计

垫层结构作为护面块体 Xbloc 的支撑结构,发挥着 3 项关键的作用: 1) 充当护面层和堤心之间的倒滤结构,有效防止垫层下方石料及堤心石料

遭受波浪淘蚀; 2) 为护面层提供支撑,确保其稳固性; 3) 提供良好的透水性,从而保证护面结构的稳定性。

为了避免在波浪作用下垫层块石从护面块缝隙

中被吸出, 根据 Xbloc 专利方 DMC (Delta Marine Consultants) 的设计手册, 其垫层块体的设计需满足以下要求^[5]:

$$M_{50,u} = (1/6 \sim 1/15) M_{50,a} \quad (1)$$

式中: $M_{50,u}$ 为垫层块体的中值质量; $M_{50,a}$ 为护面块体的中值质量。

根据 CIRIA C 683 *The Rock Manual* 的规定, 单层方块体类块体的空隙率建议取 25%~31%, 以满足倒滤和透水性的要求, 进而保证护面层的稳定。

对于护底块体, 至今尚无相关规范对其稳定质量提供计算依据, 而若按护底块石考虑, 根据 CIRIA C 683 *The Rock Manual* 第 5.2.1.3 节所述的临界床面切应力公式, 考虑波浪和水流作用, 计算得护底块石所需质量为 1 850 kg, 实际设计中为了不增加块体预制模板种类、简化施工工艺, 护底块体采用与垫层 Antifer 槽型块体同等的质量和空隙率, 并建议采用物模试验对护底块体进行稳定性验证。

项目防波堤护面块体采用 16 m^3 Xbloc, 根据上述计算原则, 垫层和护底 Antifer 槽型块体采用规则金字塔安放方式, 空隙率为 30%, 稳定质量为 6 t, 即体积为 2.5 m^3 。

2.2 组合式混凝土钩连块体压脚结构

2.2.1 压脚块体选型

斜坡堤常在海侧主护面结构底端近海床面处设压脚结构, 其既可作为支撑结构抵抗主护面结构自重水平分力, 还可使下方较小尺寸的垫层块石在压脚结构的掩护下免遭波浪淘刷^[6]。因此, 压脚块体的选择主要遵循以下原则: 与护面块体咬合支撑稳定良好、具有出色的抵抗波浪冲击和消浪能力、易于施工、整体性强、经济效益高且主要性能指标不低于块石等。结合本项目拟采用的人工块体类型, 初步遴选出方块体类槽型块体 Antifer、钩连类块体 Xbloc 作为压脚块体进行比选。

对于采用水平布置的钩连类块体 Xbloc 作为压脚结构, 不同于斜坡上 Xbloc 块体可依靠自重实现钩连效果, 如何控制 Xbloc 块体的安装质量且保证

水平钩连块体的充分接触, 成为本方案面临的难点问题, 其解决思路如下:

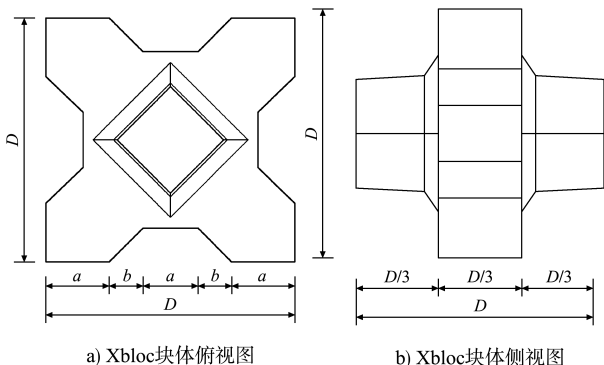
1) 基于国内外相关研究成果, 确定水平段 Xbloc 块体安装原则, 并结合 Xbloc 专利方 DMC 的建议, 满足以下要求: ①压脚处水平 Xbloc 块体应三点着地; ②水平 Xbloc 块体间应相互接触; ③先安装水平第 1 排及相邻斜坡上的 Xbloc 块体, 再安装水平段剩余 Xbloc 块体^[7]。

2) 开展试验室干地摆放模型试验, 确定水平 Xbloc 块体组合和安装纵横向间距, 并验证施工工序的合理性。试验过程中发现, 根据 DMC 的要求, 水平第 1 排 Xbloc 应规则定点安放见图 4, 块体的凸出部分(“鼻子”)着地, 若第 2 排块体采用 Xbloc 块体, 试验中难以充分接触, 由此将第 2 排 Xbloc 块体改为 Xbase 块体(通过切割 Xbloc 块体的“鼻子”而得到)。2 种块体的尺寸规定见图 5。随后依此采用 Xbloc 块体, 最后以 Xbase 块体作为端部支撑结构, 形成 Xbloc+Xbase 组合式混凝土钩连块体压脚结构。干地摆放模型试验见图 6。



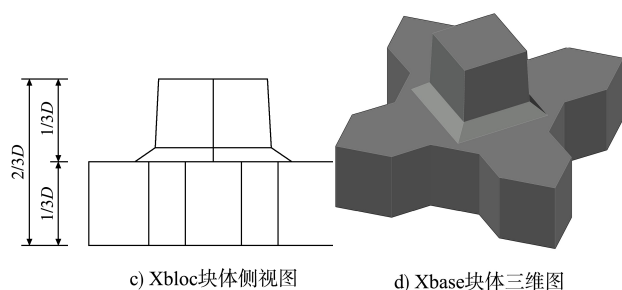
图 4 水平第 1 排 Xbloc 块体规则安放

Fig. 4 Regular placement of Xbloc units in first row



a) Xbloc块体俯视图

b) Xbloc块体侧视图



注: D 为 Xbloc 块体的特征高度, $D = \sqrt[3]{3V}$;

$$a = D/3 \times \sqrt{2}; b = (D - 3a)/2。$$

图 5 Xbloc 和 Xbase 块体几何特征

Fig. 5 Geometric characteristics of Xbloc and Xbase block



图 6 干地摆放模型试验

Fig. 6 Model placement test on dry surface

3) 在满足上述块体安装原则及间距的条件下, 开展物理模型试验, 以验证方案的合理可行性。

2.2.2 压脚块体稳定质量设计

目前国内外关于斜坡式防波堤压脚块体的稳定质量研究甚少, 尚无明确的计算方法可循。国内外学者对压脚结构稳定质量的研究主要针对压脚块石, 如 Gerding (1993)^[8]、van der Meer (1995)^[9]、Burcharth (1995)^[10]、吴中 (2002)^[11] 等对压脚块石的稳定性进行过系统的试验研究, 其中 Gerding、van der Meer 提出的 2 个公式被现行 CIRIA C 683 *The Rock Manual* 收录, 在斜坡式防波堤压脚块石的稳定性计算中被广泛应用。根据该稳定质量计算公式, 本项目防波堤压脚块石稳定质量分别为 13.98 和 12.80 t。依此按 19.2 t (8 m³) Antifer 块体、28.8 t (12 m³) Antifer 块体、28.8 t (12 m³)

Xbloc 块体作为压脚结构, 逐步开展防波堤物模试验来验证压脚方案的可行性, 其中 Antifer 块体和 Xbloc 块体分别采用规则金字塔和随机定点的安放方式, 空隙率均为 58.7%, 与 16 m³ Xbloc 护面块体的空隙率保持一致。

2.3 礁盘陡变地形堤脚开槽处理方案

本文项目防波堤堤根位于东侧礁盘区, 礁盘周围的地形变化复杂, 等深线较密, 坡度较陡, 原设计中将护面块体 Xbloc 直接放置在礁盘处。然而, 在岛礁陡坡地形条件下, 块体所承受的摩擦阻力相较于平底或缓坡地形而言较小, 且波生水流的的存在导致斜坡面上的堤脚受到拖曳力的影响, 因此礁盘附近的防波堤堤脚结构在遭受波浪作用时, 其稳定性更容易受到破坏, 进而发生失稳现象^[12]。为了解决失稳隐患, 对堤根段防波堤进行优化设计, 从防波堤堤脚位置进行开挖, 然后将 1 排 Xbloc 块体置于挖槽内, 块体突出泥面不大于 1/3 块体高度, 优化前后的堤根断面见图 7。

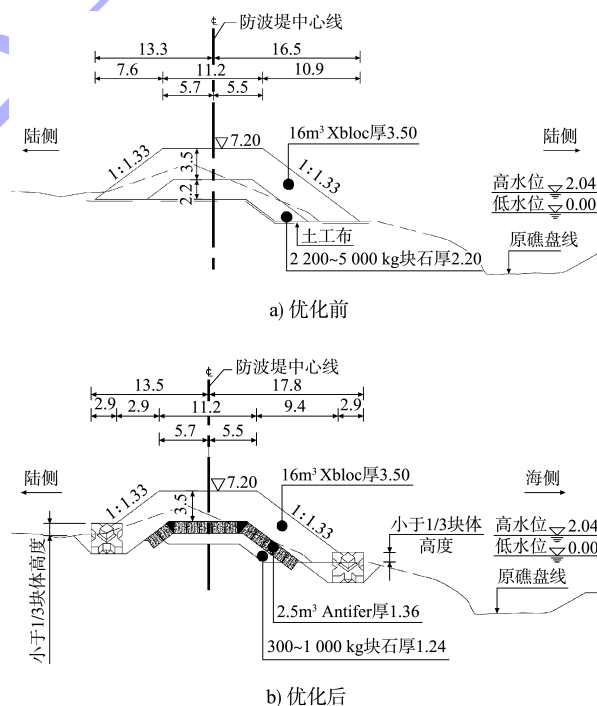


图 7 防波堤堤根断面 (单位: m)

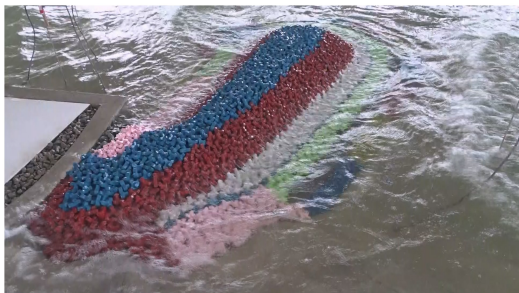
Fig. 7 Typical section of breakwater root (unit: m)

3 物理模型试验

3.1 试验水位及波浪要素

本文的 3D 整体物理模型试验在南京水利科学

研究院波浪港池中完成, 见图 8, 以验证设计方案的合理可行性。试验水位共 2 个, 分别为高水位 2.04 和低水位 0.00 m。试验采用的北偏东 8° 波浪要素见表 1。



a) 堤根视角



b) 正上方视角

图 8 3D 整体物理模型试验

Fig. 8 3D Physical model test of breakwater

表 1 3D 物理模型试验波浪数据

Tab. 1 3D physical model test wave data

水位/m	-30 m 水深处		堤头处		备注
	H_s/m	T_p/s	H_s/m	T_p/s	
高水位 2.04	13.20	14.2	8.78	14.2	100 a 一遇
低水位 0.00					
高水位 2.04	15.84	14.2	10.54	14.2	100 a 一遇, 波浪放大 20%
低水位 0.00					

3.2 模型设计

防波堤 3D 物理模型采用正态模型, 依据弗劳德相似准则进行设计, 综合考虑设计水位、设备制造能力、场地条件及相关规范要求等因素, 试验几何比尺取 1/68。

3.3 试验结果

3.3.1 垫层和护底块体稳定性验证

在防波堤 3D 整体物理模型试验中, 垫层及护底结构采用 6 t Antifer 块体。在试验波浪作用下, 设计所采用的垫层和护底块体是稳定的, 整体防波堤结构也满足稳定性要求。

3.3.2 压脚块体稳定性验证

3D 物理模型试验选用多种压脚方案进行稳定性验证试验, 以充分论证人工块体用于斜坡堤压脚结构的合理可行性, 试验结果见表 2。

表 2 3D 物理模型压脚块体稳定性试验结果

Tab. 2 Stability test results for the toe block of 3D physical model test

方案	压脚块体类型			试验结果		
	海侧	堤头	陆侧	海侧	堤头	陆侧
1	8 m ³ Antifer	8 m ³ Antifer	8 m ³ Antifer	不稳定	不稳定	不稳定
2	12 m ³ Antifer	12 m ³ Antifer	12 m ³ Antifer	不稳定	不稳定	稳定
3	12 m ³ Xbloc+Xbase	12 m ³ Xbloc+Xbase	12 m ³ Xbloc+Xbase	稳定	圆弧 135°~180°: 不稳定; 其他: 稳定	稳定
4	12 m ³ Xbloc+Xbase	圆弧 135°~180°: 16 m ³ Xbloc+Xbase 其他: 12 m ³ Xbloc+Xbase	12 m ³ Xbloc+Xbase	稳定	稳定	稳定

通过对 3D 物理模型试验现象的观察, 并查阅类似项目稳定试验研究的相关文献^[12-13]发现, 造成方案 2、3 压脚块体失稳的主要原因有:

1) Xbloc 块体通过钩连作用来维持自身的稳定, 消浪能力也优于 Antifer 块体, 当波浪爬升后回落时, 负向淘刷力会作用于压脚块体, 导致块体稳定力较小, 也就是方案 2 中同等质量的

Antifer 压脚块体相比 Xbloc 块体在回落过程中受到的波浪力较大, 进而出现块体跳脱失稳的情况。

2) 压脚块体除了依靠自身重力抵御波浪作用外, 块体端部的支撑和摩擦作用同样重要。方案 2 压脚端部缺乏支撑结构 Xbase 块体, Antifer 压脚块体与垫层块体的摩擦作用相对较小, 从而降低了块体的稳定性。

3) 当波浪传播至堤头位置时,会产生绕射现象。这些绕射波浪与入射波浪在堤头的拐角处相互叠加,从而引发局部波能的集中,导致堤头背浪侧拐角处相邻块体之间的支撑咬合力减弱,并且使得护底结构受到较大的底部切应力,造成方案3堤头圆弧 $135^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 段压脚块体失稳。

根据物理模型试验结果,工程最终采用方案4的压脚块体方案。

3.3.3 堤脚开槽方案验证

从3D物模试验现象观察可知,当波浪传播至堤根礁盘区域,因水深变浅,波浪会发生破碎现象。在波浪的峰值接触到堤体迎浪面的瞬间,会产生一种持续时间极为短暂的冲击压力。此外,在波浪回落的过程中,还会在护面结构处产生一种拖曳力,对其稳定性产生重要影响。在礁盘陡变地形对堤脚处进行开槽处理后,经物模验证得出,堤根处护面块体满足波浪作用下的稳定性要求,见图9。



图9 防波堤堤根段稳定情况
Fig.9 Stability of breakwater root

4 结论

1) 对于人工块体作为垫层、护底和压脚结构,至今尚无相关规范可为计算其稳定质量提供依据,建议通过物理模型试验确定。本文工程3D整体物理模型试验表明,人工块体替代块石作为垫层、护底和压脚结构具有可行性,在实际工程中替换时应合理选用块体形式。

2) 经模型验证,组合式混凝土钩连块体压脚结构满足稳定要求,也为如何控制水平段钩连类块体安装质量及块体间的充分接触的问题提供一种有效的解决方案,可供斜坡堤压脚方案设计时参考使用。

3) 对于礁盘陡变地形的防波堤堤根设计,可采用堤脚开槽处理方案。

4) 本文工程所采用的混凝土人工垫层、护底块体和组合式钩连块体压脚结构的斜坡堤结构形式,适用于石料缺乏、大块石施工困难和环保要求高的地区,对防波堤结构的设计创新具有参考借鉴作用。同时,本文研究积累了一定的模型试验和技术难点解决经验,相关应用可以推广到其他类似工程。

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] The rock manual: the use of rock in hydraulic engineering: C 683[S], 2nd edition. London: CIRIA, 2007.
- [3] 薛瑞龙, 王福强, 王玉平. 海外常用护面块体选型及设计[J]. 中国港湾建设, 2014(12): 42-46.
XUE R L, WANG F Q, WANG Y P. Selection and design of overseas popular armor blocks [J]. Chinaharbour engineering, 2014(12): 42-46.
- [4] FRENS A B. The impact of placement method on Antifer-block stability[M]. Delft: Delft University of Technology, 2007.
- [5] Xbloc & Xblocplus Design Guidelines [S]. Netherlands: Delta Marine Consultant, 2023.
- [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] Apia Port Xbloc breakwater-specifications for application of Xbloc[S]. Netherland: Delta Marine Consultant, 2021.
- [8] GERDING E. Toe structure stability of rubble mound breakwaters[D]. Delft: Delft University of Technology, 1993.
- [9] PILARCZYK K W. Dikes and revetments-design, maintenance and safety assessment [M]. Rotterdam: Hydraulic Engineering Division of the Rijkswaterstaat, 1998.

(下转第131页)