DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241450

涌潮作用下多孔介质护坡稳定阈值及破坏机制

蒋 涛[1,2],曾 剑[2],陈 刚[2],周 曾[1]

(1. 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 浙江省水利河口研究院浙江省河口海岸重点实验室,浙江 杭州 310020)

摘要:涌潮水流特性复杂,对海塘有较强的破坏力。研究涌潮作用下多孔介质护坡稳定性对海塘保护有积极作用。为此,选取块石、螺母块体和空心方块3种护坡块体,通过物理模型试验,探究了涌潮作用下涌潮动力条件、涌潮方向、斜坡坡度、块体重量对多孔介质护坡稳定性的影响。结果表明,块石护坡在涌潮作用下易破坏,破坏范围与涌潮高度和潮前水深比值呈正相关。螺母块护坡和空心方块护坡整体表现较稳定,螺母块护坡在强涌潮作用下的稳定性大于波状涌潮,空心方块护坡相反。当涌潮高度与潮前水深的比值在0.50~0.65之间,且潮前水深较大时,两种护坡表现出临界稳定或失稳状态,此时弗劳德数约为1.4。此外,涌潮方向、斜坡坡度、块体重量对多孔介质护坡稳定性均有影响。研究结果为涌潮作用下多孔介质护坡的实际工程应用提供设计指导、施工建议和维护方法。

关键词:涌潮;护坡块体;稳定性;物理模型试验;水压力

中图分类号:TV139.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)07-0073-05

1 引言

涌潮破坏力强,对海塘护坡稳定性产生显著影响。若护坡的设计和材料不足以抵御涌潮的冲击,潮水会冲刷和侵蚀护坡表面,则导致护坡材料损坏。国内护坡材料通常采用工程材料如钢筋混凝土等,因其具备较高的强度和耐久性。然而,硬质护坡材料对生物多样性产生消极影响。国外的护坡方式倾向于采用植物等原生材料,但其强度和耐久性较硬质海岸差。且在涌潮作用下,植被护坡较易受到破坏。多孔介质护坡在保护海塘的前提下,其空隙和多孔结构为微生物和小型无脊椎动物提供了理想的栖息地,可显著改善生态环境。目前,关于多孔介质护坡的稳定性已有较多研究,如韩意等[1]设计了一种四脚空心方块护面块体,通过物理模型试验和数值模拟分析其稳定性;张娜等[2]在波浪水槽中建立蜂巢护岸断面模型,研究其在不同规则波作用下的护岸稳定性状况;陈振华等[3]通过分析护面块体在波浪作用下的受力特点、破坏机理,提出一种低成本的海堤护面结构改造方法。但上述对于多孔介质护坡的研究多集中在波浪作用下,而关于涌潮作用下多孔介质护坡稳定性的研究较少。涌潮的水流特性和波浪存在较大差异。涌潮到达时刻潮位暴涨,最大可达2~3 m,最大实测流速甚至可达12 m/s,压力高达70 kPa。波浪的压力仅有20~30 kPa,河流中波浪速度通常在0.3~1.5 m/s之间。目前关于涌潮的研究主要集中在对桥梁等构筑物的作用,如ZHANG Z Y等[4]在对涌潮溢流引起的丁坝后局部冲刷进行了试验研究,分析了丁坝稳定溢流水深、单位溢流流量和冲刷坑特性;潘虹[5]对曹娥江大闸进行研究,分析了其变形破坏原因;黄君宝等[6]采用物理模型试验研究了涌潮引发桥墩局部冲刷的机理及局部冲刷坑形态变化。多孔介质是指一种包含大量孔隙的材料,这些孔隙在材料内部相互连接或孤立。为此,本文选取块石、螺母块体和空心方块3种护坡块体,通过物理模型试验,探究了涌潮水动力条件、涌潮方向、斜坡坡度和护面块体重量等因子对多孔介质护坡稳定

收稿日期:2024-07-31,**修回日期**:2024-09-27

基金项目:浙江水利科技计划项目(RA2203);浙江省水利河口研究院院长基金项目(ZIHE21Z001)

作者简介:蒋涛(2000-),男,硕士研究生,研究方向为海岸生态修复,E-mail:jiangtaoo0928@163.com

通讯作者:曾剑(1974-),男,博士、正高级工程师,研究方向为河口海岸水沙动力学,E-mail:zengjian@zjwater.gov.cn

中国知网 https://www.cnki.net

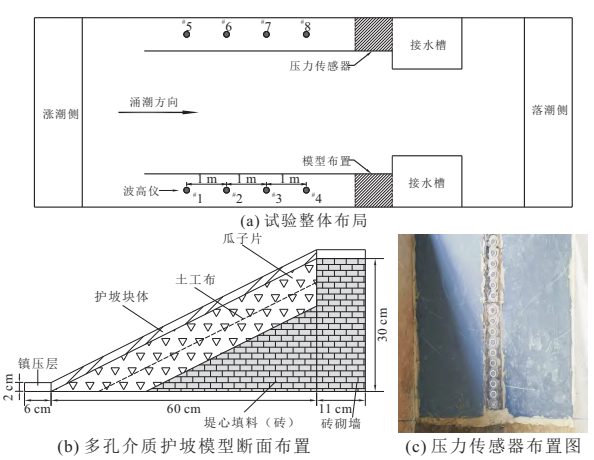
性的影响，其研究结果可为实际工程提供参考。

2 研究方法

2.1 试验设置

试验在浙江省水利河口研究院涌潮水槽中进行，水槽长 42 m、宽 4.3 m、高 1 m。通过调节上、下游变频水泵的频率来生成涌潮并调节涌潮高度，使用旋桨式流速仪来测定流速，并采用水位仪动态监测水位。在涌潮水槽两侧护坡迎流方向各布置 4 台电容式波高仪测量涌潮高度，其精度为 0.01 mm，时间间隔为 0.02 s。配套采用 DJ800 型多功能采集仪进行数据采集。因无法在护坡表面直接安装压力传感器，因此在水槽的另一侧斜坡中间安装 16 个量程为 1～10 kPa 的压力传感器，精度达 1/1 000，从堤角到堤顶依次编号为$^{\#}1$～$^{\#}16$。试验中确保两侧斜坡坡度与表面平整度一致，最大程度模拟护坡块体的实际受力情况。

为确保涌潮能够充分发育并生成潮头，同时避免下游反射的影响，模型布置在水槽的中段位置。在高度为 30 cm 的斜坡上放置不同类型的护面块体，在后方堆放砖块，堤心填料为黄色瓜子片。为防止坡面渗水，在堤心填料中放置一层土工布，堤脚放置镇压层以确保护坡的稳定性。模型布置见图 1。



(a) 试验整体布局　(b) 多孔介质护坡模型断面布置　(c) 压力传感器布置图

图 1 物理模型试验布置

Fig. 1 Physical model test layout

试验模型采用弗劳德相似准则，几何比尺为 1∶30，对应于钱塘江潮前水深 h_u 为 1.8～4.2 m，涌潮高度 H 为 1.2～2.7 m 的波状涌潮、弱漩滚涌潮和强涌潮。

2.2 工况设计

试验采用的 3 种护坡块体见图 2。设置了 3 个坡比和 5 个潮前水深。当坡比为 1∶0.5 时，块石无法铺设，故未进行试验。逐级增加水泵频率直至坡面失稳，试验工况组合见表 1。本文试验模拟 3～4 d，每天 2 次大潮的实际情况，每组试验进行了 6 次，以观测护坡稳定性情况。



(a) 块石　(b) 螺母块　(c) 空心方块

图 2 试验用护坡块体现场照片

Fig. 2 Experimental slope protection block field photos

表 1 试验工况组合

Tab. 1 Experimental working condition combinations

护面块体	坡比			h_u/cm
	1∶0.5	1∶1.5	1∶2.0	
块石		√	√	6、8、10、12、14
螺母块	√	√	√	6、8、10、12、14
空心方块		√	√	6、8、10、12、14

块体下方瓜子片发生沉降，导致块体坍塌；块体翻滚脱落或随涌潮向上滚动，累计位移超过单个块体的几何尺寸。出现上述现象，则认为坡面失稳。失稳率按下式进行计算：

$$n=(n_d/N_1)\times 100\% \tag{1}$$

式中，n 为失稳率；n_d 为静水位上、下各 1 倍试验涌潮高度范围内块体的失稳数；N_1 为静水位上、下各 1 倍试验涌潮高度范围内块体的总数。

当块体轻微错位、晃动，若未发生脱落或坍毁时，则视为处于临界稳定状态。若护坡块体在涌潮作用下未发生错位或移动等现象时，则视其为稳定状态。

2.3 涌潮的特性和验证

涌潮在生成、发展和衰竭的过程中，存在多种形态。根据已有研究，涌潮的潮头局部形态取决于弗劳德数 Fr。当 $Fr<1.4\sim1.5$ 时，潮头不破碎，波峰自由表面光滑，为波状涌潮；当 $1.5<Fr<1.7$ 时，第一波波峰破碎，并对后续波状涌潮产生影响，为弱漩滚涌潮；当 $Fr>1.7$ 时，潮头破碎，涌潮推涌向前，为强涌潮。图 3 为 3 种涌潮形态的 H 随时间变化的曲线。

根据一维连续性方程和动量方程[7]，推算涌潮传播速度为：

$$c=u_u+\sqrt{gh_d(h_d+h_u)/(2h_u)} \tag{2}$$

其中

$$h_d=h_u+H \tag{3}$$

式中，c 为涌潮传播速度；u_u 为潮前流速；h_u、h_d 分别为潮前、潮后水深；H 为涌潮高度。

通过对本次试验涌潮水槽进行验证，模拟结

中国知网 https://www.cnki.net

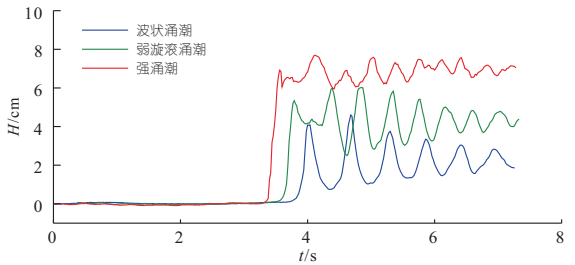


图 3　3 种涌潮形态涌潮高度随时间变化

Fig. 3　The variation of tidal height over time for three types of tidal bore forms

果见表 2。由表 2 可知,涌潮局部形态和 Fr 的关系与现有成果基本一致,涌潮传播速度与理论公式较为吻合,可见涌潮模拟结果精确。

表 2　涌潮局部形态和传播速度验证

Tab. 2　Verification of local morphology and propagation speed of tidal bore

试验组次	H /cm	h_u /cm	Fr	涌潮形态	计算速度 c/(m·s^{-1})	实际速度 c'/(m·s^{-1})	误差 /%
1	3.93	10	1.29	波状涌潮	1.78	1.70	4.49
2	5.12	10	1.38	波状涌潮	1.86	1.80	3.23
3	6.43	10	1.47	弱漩滚涌潮	1.96	1.92	2.04
4	5.12	8	1.47	弱漩滚涌潮	1.80	1.92	6.67
5	6.79	8	1.62	强涌潮	1.94	2.05	5.67
7	6.35	6	1.77	强涌潮	1.36	1.31	3.68

3　结果分析与讨论

3.1　涌潮动力对多孔介质护坡稳定性影响

3.1.1　块石护坡

试验结果表明,块石护坡在涌潮作用下较易被破坏。当涌潮为波状涌潮时,块石会掉落至堤角,而当涌潮为强涌潮时,块石会被涌潮冲向堤顶。这是因为块石均匀铺设在斜坡表面,块石之间的摩擦较小。由于波状涌潮周期性的震荡,水波在波峰与波谷之间运动,块石在这种作用下较易被破坏。现有研究表明,H 越大,涌潮释放的能量越大,导致更强烈的局部侵蚀。而本文试验发现,块石破坏范围随 H 与 h_u 的比值增大而增大,将 H/h_u 与破坏范围进行线性拟合,发现两者相关性较好,见图 4。

3.1.2　螺母块护坡

以 h_u=12.00 cm、H=6.86 cm 为例,图 5 为螺母块护坡重复试验破坏情况。由图 5 可看出,在涌潮第 2 次作用后,斜坡中部一个螺母块体掉落,同时上部螺母块体轻微凸起;在第 4 次涌潮作用后中部又一个螺母块体凸起,上部螺母块体凸起严重;在第 6 次涌潮作用后,斜坡上部破坏情况愈发严重。与此同时,# 12 压力传感器检测

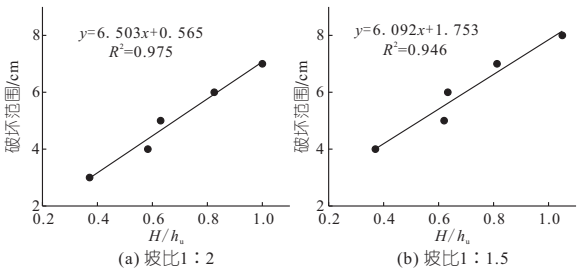


图 4　块石护坡 H/h_u 与破坏范围关系

Fig. 4　The relationship between the slope protection with block stones (H/h_u) and the extent of damage

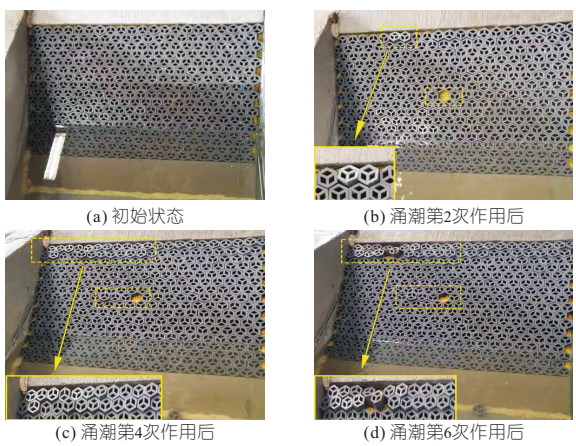


图 5　螺母块护坡重复试验破坏情况

Fig. 5　The repetitive testing results of the nut block slope protection

到−0.182 kPa 的负压,且产生负压位置与护坡破坏位置接近。

试验研究表明,涌潮作用下螺母块护坡的稳定性明显高于块石护坡。这是因为螺母块体之间相互嵌套,形成类似榫卯的结构,提高了整体的稳定性。图 6 为 H/h_u 与螺母块体破坏数量的关系及斜坡表面负压的最大值。由图 6 可看出,当 H/h_u 位于 0.50～0.65 之间,且 h_u 较大时,螺母块护坡容易破坏,此时,Fr 约为 1.4。当 H/h_u 小于 0.50 或大于 0.65 时,螺母块护坡不易破坏。这是因为强涌潮速度快,而螺母块护坡表面平整且光滑,水流在撞击斜坡后沿着护坡表面爬高,从

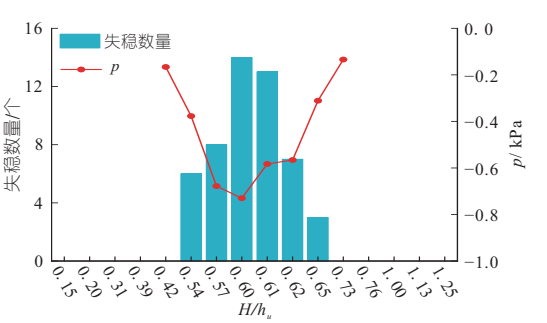


图 6　H/h_u 与螺母块体失稳数量的关系及负压最大值

Fig. 6　Relationship between H/h_u and the number of unstable nut blocks and maximum negative pressure

中国知网　https://www.cnki.net

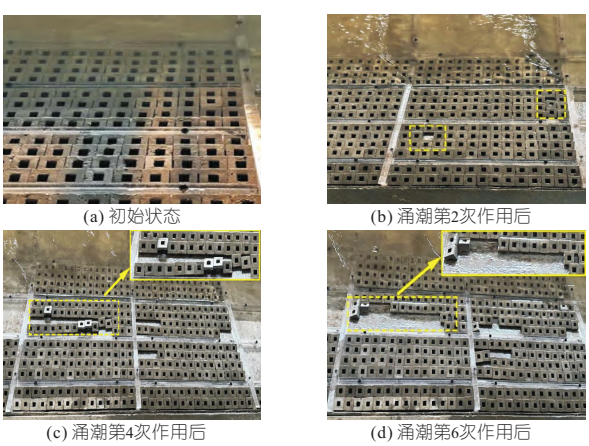
而导致涌潮的冲击力分散。此外，强涌潮在冲击护坡的瞬间水位壅高，一部分水流发生反射。而波状涌潮速度较慢，产生周期性的震荡水流作用于斜坡，波峰与波谷之间的动能转换导致了负压的生成，这种负压会对螺母块体产生吸引作用，造成护坡失稳。

3.1.3 空心方块护坡

试验结果表明，与螺母块相反，空心方块护坡在波状涌潮作用下不易破坏，而在强涌潮作用下易发生错位和移动。这是因为空心方块铺设成阶梯状，强涌潮作用时的水流流动方式更加复杂，在阶梯之间形成局部水流涡旋，从而影响结构的稳定性。此外，空心结构可在波状涌潮作用下形成局部的压力平衡，降低波浪在表面产生的负压效应，提高结构的稳定性。

3.2 涌潮方向对多孔介质护坡稳定性影响

目前空心方块护坡已在钱塘江两岸试点铺设。根据试点处涌潮特性，试验设置了斜坡方向与涌潮方向垂直的组次，坡比为 1∶2。结果表明，在同等条件下，正向作用的空心方块护坡未发生失稳，而空心方块护坡失稳严重，见图 7。



(a) 初始状态 (b) 涌潮第2次作用后 (c) 涌潮第4次作用后 (d) 涌潮第6次作用后

图 7 涌潮垂直作用时空心方块护坡失稳情况

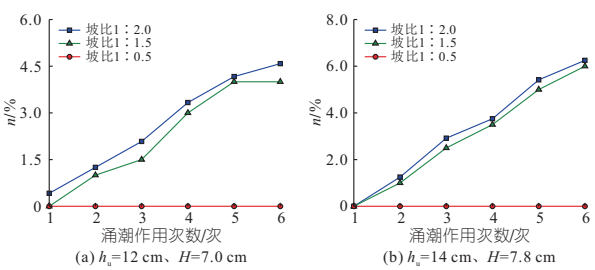
Fig. 7 The instability of the central block slope protection under the vertical action of tidal bore

这是由于垂直入射的涌潮引发更大的横向作用力，更容易导致块体的旋转、倾斜或侧滑。相比之下，正向冲击的涌潮方向更接近护坡块体的朝向，冲击力均匀地作用于块体的迎水面上，可有效减少局部应力集中，避免块体的局部破坏。其次，正向冲击时，块体受到的力主要垂直于护坡表面，增加了块体与坡面之间的法向压力，从而提高了摩擦力和嵌入力。此外，涌潮正向作用下，块体充当了阻挡物，块体的孔隙也减小了涌潮的能量传递，使涌潮的能量更难以集中到斜坡的局部区域。

在特定方向因不同河段有不同的宽度和形状，涌潮在形成并发育的过程中，其传播方向也有所不同。河口两岸的地形高度和河道曲率也会影响涌潮的方向。

3.3 斜坡坡度对多孔介质护坡稳定性影响

在相同的涌潮动力条件下，设置不同的坡度，螺母块护坡稳定情况见图 8。研究表明，坡度越陡，护坡的稳定性越差。而本文试验表明，坡度越陡，护坡块体的稳定性越好，且当坡比为 1∶0.5 时，护坡未发生临界失稳或失稳现象。这是因为坡度越陡，陡坡上的螺母块体之间产生更大的摩擦力和嵌入作用。螺母块体的自重在陡坡上更直接地转化为法向压力，增加了螺母块体之间的摩擦力。陡坡上的水流由于冲击坡面的角度较大，在冲击坡面后发生较大的反射，水流能量在短时间内被耗散掉，减少了对螺母块体的冲击力。因此，由于水流压力分布、摩擦力和嵌入作用等因素的综合作用，出现了坡度越陡，稳定性越好的现象。在进行工程实际应用时，需充分考虑具体的水动力条件和护坡材料特性，并进行相应的试验验证。



(a) h_u=12 cm、H=7.0 cm (b) h_u=14 cm、H=7.8 cm

图 8 不同坡度护坡块体失稳情况

Fig. 8 The instability conditions of slope protection blocks at different slopes

3.4 块体重量对多孔介质护坡稳定性影响

《防波堤设计与施工规范》[8] 指出，在波浪正向作用下且堤前波浪不破碎，斜坡堤堤身在计算水位上下 1 倍设计波高之间的护面块体中单个块体的稳定重量可按下式计算：

$$W = 0.1\frac{\gamma_b H_1^3}{K_D(\gamma_b/\gamma - 1)\mathrm{ctg}\alpha} \tag{4}$$

式中，W 为单个块体的稳定重量；γ_b 为块体材料的重度；H_1 为设计波高；K_D 为块体稳定系数；γ 为水的重度；α 为斜坡与水平面的夹角。

本文试验所用的块石、螺母块体、空心方块平均重量分别为 5.5、8.7、8.3 g。在相同的涌潮动力条件和坡度下，重量为 11.5 g 的螺母块体未发生失稳。因本文试验与式(4)前提条件一致，故采用式(4)计算涌潮作用下护坡块体的稳定系数 K_D。经计算，新的护坡块体稳定系数见表 3。空心方块护坡在涌潮作用下较为稳定，故无法计算稳定系数。

中国知网 https://www.cnki.net

表 3　涌潮作用下护坡块体的稳定系数

Tab. 3　The stability coefficient of slope protection blocks under the action of tidal bore

护面块体	构造型式	H_1/cm	K_D
块石	安放一层	3.90	11.90
螺母块体	安放一层	6.52	26.12

由表 3 可看出,护坡块体的重量可增加整个护坡结构的自重,从而提高护坡的整体稳定性。此外,通过增加块体的自重,可增加护坡块体与坡面之间的摩擦力,从而减少失稳现象的发生。然而,过重的块体可能导致基底土壤压实过度,反而降低稳定性。在实际护坡工程中,应综合考虑块体重量、材料性质和地质条件,避免单纯追求块体重量增加而忽视其他稳定性因素。

4　结论

a. 室内物理模型试验表明,涌潮作用下多孔介质护坡的稳定阈值不仅仅取决于涌潮高度,也取决于潮前水深和涌潮高度比值,即与涌潮局部形态和弗劳德数密切相关。

b. 护坡块体的稳定性由涌潮动力条件、涌潮方向、斜坡坡度、块体重量等多种因子决定。在实际工程应用中,应根据其破坏机制提出相应的铺设和改造方法。

参考文献:

[1] 韩意, 张磊, 吴伟东, 等. 改进型四脚空心方块海尔港防波堤的稳定性分析[J]. 海洋湖沼通报, 2020,42(5): 32-39.

[2] 张娜, 张金凤, 张庆河, 等. 规则波作用下柔性植物蜂巢护岸水动力特性试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(5): 441-449.

[3] 陈振华, 臧振涛, 许沿. 低成本的海堤迎潮面护面结构生态化改造方法探讨[J]. 浙江水利科技, 2020, 48(4): 80-85.

[4] ZHANG Z Y, PAN C H, ZENG J, et al. Hydrodynamics of tidal bore overflow on the spur dike and its influence on the local scour[J]. Ocean engineering, 2022, 266: 113140.

[5] 潘虹. 曹娥江大闸闸下护坡变形原因分析及对策探讨[J]. 浙江水利科技, 2015, 43(4): 69-70, 77.

[6] 黄君宝, 肖厅厅, 孙志林, 等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 441-446.

[7] 潘存鸿,鲁海燕,曾剑.钱塘江涌潮特性及其数值模拟[J].水利水运工程学报,2008(2):1-9.

[8] 中华人民共和国交通部.防波堤设计与施工规范(JTJ298-98)[S].北京:人民交通出版社,1998.

Stability Threshold and Failure Mechanism of Porous Media Slope Protection Under Tidal Bore

JIANG Tao[1,2], ZENG Jian[2], CHEN Gang[2], ZHOU Zeng[1]

(1. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Estuary and Coast of Zhejiang Province, Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The flow characteristics of tidal bores are complex and can exert significant destructive forces on seawalls. Investigating the stability of porous media slope protection under tidal bore action holds positive implications for seawall conservation. This study selected three types of slope protection blocks (riprap, nut blocks, and hollow cube blocks) to explore the impacts of tidal bore dynamics, the direction of surging tide, slope gradient, and block weight on slope stability through physical model experiments. The results demonstrate that the riprap slope protection is prone to failure under action of the surging tide, with the damage extent showing positive correlation with the ratio of bore height to pre-bore water depth. Both nut blocks and hollow cube blocks exhibited relatively stable performance overall. Nut blocks demonstrated superior stability under strong tidal bores compared to undular bores, while the opposite trend was observed for hollow cube blocks. When the bore height to pre-bore water depth ratio ranged between 0.50-0.65 with relatively large pre-bore water depths, both protection types displayed critical stability or incipient failure states, corresponding to a Froude number of approximately 1.4. Additional findings revealed significant impacts of bore direction, slope gradient, and block weight on the stability of porous media slope protection. The research results provide practical guidance for engineering design, construction practices, and maintenance strategies regarding porous media slope protection systems under tidal bore conditions.

Key words: tidal bore; slope protection block; stability; physical model test; water pressure

中国知网　https://www.cnki.net