



空心方块斜坡堤块体稳定质量计算方法^{*}

胡乾明¹, 黄哲^{2,3}, 王震¹, 徐华^{2,3}, 王登婷^{2,3}

- (1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;
2. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024;
3. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 空心方块斜坡堤与传统斜坡堤在断面和块体形状上具有较大差异, 使用规范中公式难以进行块体稳定质量计算。针对这一问题, 通过物理模型试验研究了规则波和不规则波作用下, 空心六面块体在不同水位、不同波高、不同波周期条件下的稳定情况。试验结果表明, 无量纲稳定质量 W_s 随着 Irribarren 数增大呈现出线性增大的趋势。最后结合研究结果拟合了规则和不规则波作用下, 综合考虑波陡影响的块体稳定质量计算公式, 并建议稳定系数取为 9.1, 为空心方块斜坡堤结构设计提供参考。

关键词: 空心方块; 斜坡堤; 块体稳定质量

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0080-04

Stable mass calculation method of hollow-block mound breakwater blocks

HU Qian-ming¹, HUANG Zhe^{2,3}, WANG Zhen¹, XU Hua^{2,3}, WANG Deng-ting^{2,3}

- (1.College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2.Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;
3.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: The hollow block mound breakwater is quite different from the traditional slope dike in section and block shape. It is difficult to calculate the stable mass of the block using the formula in the specification. To solve this problem, the stability of the hollow block under the conditions of different water levels, different wave heights, and different wave periods under the action of regular waves and irregular waves has been studied through physical models. The test results show that dimensionless stable mass W_s shows a linear increasing trend with the increase of the Irribarren number. Finally, combined with the research results, a calculation formula for the stable mass of the block considering the influence of wave steepness under the action of regular and irregular waves is fitted. The recommended stability factor is 9.1, and the formula provides a reference for the structural design of the hollow block mound breakwater.

Keywords: hollow block; mound breakwater; stable mass of blocks

斜坡式防波堤是港口工程中常用的防波堤形式, 通常自质量较大, 对地基承载力要求较高。为了适应承载力较低的淤泥或软土地基, 一种新型空心块体斜坡堤被提出^[1-3], 并在长江口取得了

收稿日期: 2020-10-13

***基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFC0407503); 国家自然科学基金项目(51779149); 引江济淮工程科研项目(YJJH-YJJC-ZX-20191106220); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y220002、Y219012、Y220013); 江苏省水利科技项目(2019009)

作者简介: 胡乾明(1993—), 男, 硕士研究生, 从事波浪及其与建筑物相互作用方面研究。

通讯作者: 王登婷(1976—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为波浪及其与建筑物相互作用。

E-mail: dtwang@nhri.cn。

良好的整治效果^[4-5]。这种防波堤能够利用块体中空的特性, 显著减小自身质量。

目前针对空心块体结构已有一些研究, 付东伟等^[6]通过水槽试验采用粒子图像测速技术研究了不同开口比方形块体对周围流场的影响; 王登婷等^[7]通过粒子图像测速技术和水水力试验, 测量了不同开口比空心块体周围流场和所受水水力; 郅禄文等^[8]采用有限元法对空心立方体结构进行应力分析, 对构件设计进行了合理检验。

相对于块体自身结构的属性和对周围流体影响, 块体稳定质量是保证防波堤安全的重要因素, 国内外已经有众多针对护面块体稳定质量的计算公式和模型试验研究。van der Meer^[9]在 1987 年提出了护面块体稳定计算公式, 该公式中影响因素考虑较为全面; Hudson^[10]在 1959 年提出了稳定质量计算公式, 该公式目前应用较广泛; 潘宝雄^[11]对波浪作用下护面块体稳定质量计算公式进行了讨论, 指出了其中的不足并提出了修正系数; 朴正等^[12]对多种块体稳定质量公式进行比较, 分析不同计算公式的优缺点; 俞聿修等^[13]对块体在斜向和多向不规则波作用下稳定性进行了模型试验, 并给出稳定质量计算公式; 柳玉良等^[14]对大水深斜坡堤护面块体进行断面物模试验, 提出应适当降低稳定系数取值; 钟华雄等^[15]研究了不规则波作用下, 摆放密度和坡度对扭王块体稳定性的影响, 给出了稳定系数的取值范围。

目前我国主要根据《防波堤设计与施工规范》^[16]对斜坡堤上异形护面块体稳定质量进行计算, 空心方块斜坡堤与传统斜坡堤在断面和块体形状上均具有较大差异, 使用规范公式难以进行块体稳定质量计算。因此本文采用物理模型试验的方法对空心方块斜坡堤进行研究, 分析块体稳定质量随 Iribarren 数变化特征并给出了考虑波陡影响的空心块体稳定质量计算公式。

1 物理模型试验

1.1 试验设备与仪器

试验在南京水利科学研究院风、浪、流长波

浪水槽进行, 该波浪水槽长 175 m、宽 1.2 m、高 1.8 m。水槽一端配有消浪缓坡, 另一端配有南京水利科学研究院研发的推板式造波机, 可根据需求产生规则波和不同谱型的不规则波。

1.2 模型设计

模型试验选取两种规格空心六面块体进行稳定性试验研究, 单个块体在 6 个面均开有圆柱孔, 圆柱孔在六面体内部连通。块体开孔率参考空心块体流场和水水力试验^[7]确定为 12.5% 较为合适。块体 1 尺寸为 5 cm×5 cm×5 cm, 每个面开直径为 2 cm 的圆柱孔; 块体 2 尺寸为 2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm, 每个面开直径为 1 cm 的圆柱孔。块体 1 和块体 2 开孔率均为 12.5%, 模型块体均采用水泥砂浆制成, 块体模型见图 1。

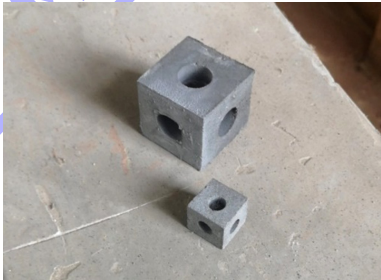


图 1 空心块体模型

空心方块斜坡堤模型按图 2 所示的断面结构形式进行摆放, 其中第 1 层预制块体为规则摆放, 2 层及以上部分随机摆放, 根据实际空隙调整块体的摆放位置, 使块体之间搭接, 基本保持稳定。块体 1 沿水深方向共抛放 3 层, 块体 2 的边长为块体 1 边长的一半, 因此块体 2 沿水深方向共抛放 6 层, 内外坡坡比均为 1:1.5 左右。

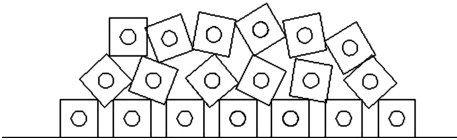


图 2 空心方块斜坡堤断面

1.3 模型试验组次及方法

试验中使用不同堤顶水深和波浪要素对块体稳定性进行研究。堤顶水深根据 R_c 控制, 当水面高于堤顶为正, 低于堤顶为负, R_c 分别取 0.14、0.07、0、-0.035 m。试验波浪包括规则波与不规

则波，波周期取值分别为 1.0、1.2、1.5、2.0、2.5 s，不规则波的周期按平均周期控制。

在进行空心六面体稳定质量试验时，针对每组工况(同一水深、同一周期)，通过计算机由小到大输入入射波高，每次输入的波高增幅为 5% 左右，观察块体稳定性情况。试验中通过观察块体发生的位移距离及晃动幅度判定块体是否稳定，块体无明显晃动及位移为稳定；若块体出现明显晃动或位移距离小于块体尺寸的 1/2 为临界稳定；当发生的位移距离超过块体尺寸的 1/2 则认为块体失稳，记录块体失稳现象和此时的输入波高。每组工况重复 3 次，每次试验后重新堆放断面，取 3 次平均值作为试验结果，若 3 次重复试验的结果差别较大时，则增加重复次数，然后再取平均值。模型试验结束后，通过反率定得出块体失稳的入射波高。即通过在空水槽中进行造波，测量失稳波高对应的实际波高。

2 试验结果与分析

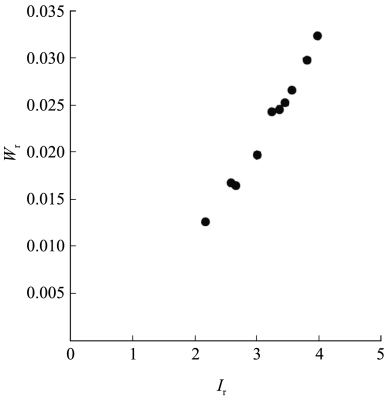
2.1 Irribarren 对稳定质量影响分析

图 3 分别给出了规则波、不规则波作用下块体 1、块体 2 的无量纲稳定质量 W_r 随 Irribarren 数 I_r 变化情况，其中：

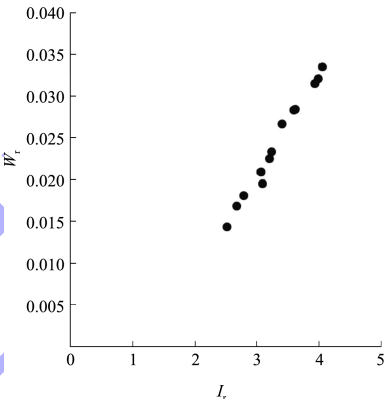
$$W_r = \frac{W}{\rho_b H^3} \tag{1}$$

$$I_r = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{H/L}} \tag{2}$$

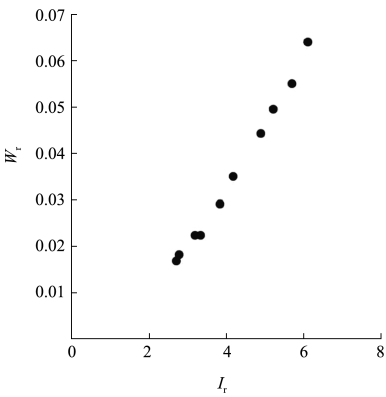
式中： W 为空心六面体稳定质量(kg)； ρ_b 为空心六面块体的密度(kg/m³)； H 为入射波高(m)，不规则波作用时取 $H_{5\%}$ 波高； α 为斜坡与水平面的夹角(°)； L 为平均波长(m)。从图 3 可以看出，随着 I_r 的增大， W_r 基本呈线性增大的趋势。当入射波浪的波高及周期一定时，水深越大，即波长越长， I_r 越大，满足该条件下的块体稳定质量也就越大；当波高和水深一定时，随着入射波浪周期的增大，相应的波长越长， I_r 越大，满足稳定性要求的稳定质量也就越大；当水深和入射波浪周期一定时，随着入射波高的增大， I_r 越大，满足块体稳定性要求的稳定质量也就相应增大。



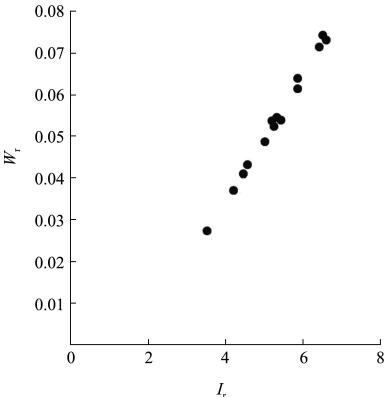
a) 块体1规则波



b) 块体1不规则波



c) 块体2规则波



d) 块体2不规则波

图 3 W_r 随 I_r 变化情况

2.2 空心六面体稳定质量计算公式

结合块体 1、2 在规则波和不规则波作用下稳定质量的试验结果, 考虑入射波浪要素及坡度等因素影响, 分别拟合了规则波与不规则波作用下的块体稳定质量计算公式。

$$\frac{W_r}{\rho_b H^3} = 0.1 \cdot \frac{I_r^{1.5}}{K'_D (S_b - 1)^3}$$

(3)

$$S_b = \frac{\rho_b}{\rho}$$

(4)

式中: K'_D 为空心六面体稳定系数, 规则波时取 9.5, 不规则波时取 9.1。

通过式(2)~(4)计算得到规则波、不规则波作用下空心六面体的稳定质量计算值与实际发生失稳的块体质量对比, 见图 4。从图 4 可以看出, 实测值与计算值较为接近, 且计算所得到的稳定质量比实测值略大, 因此可以认为使用该公式作为块体稳定性的计算公式是合适且安全的。对比规则波与不规则波计算结果可知, 规则波作用下的稳定质量略小于不规则波作用下的稳定质量, 两者误差约为 5%, 综合规则波、不规则波的试验结果, 建议空心六面体的稳定系数取为 9.1。

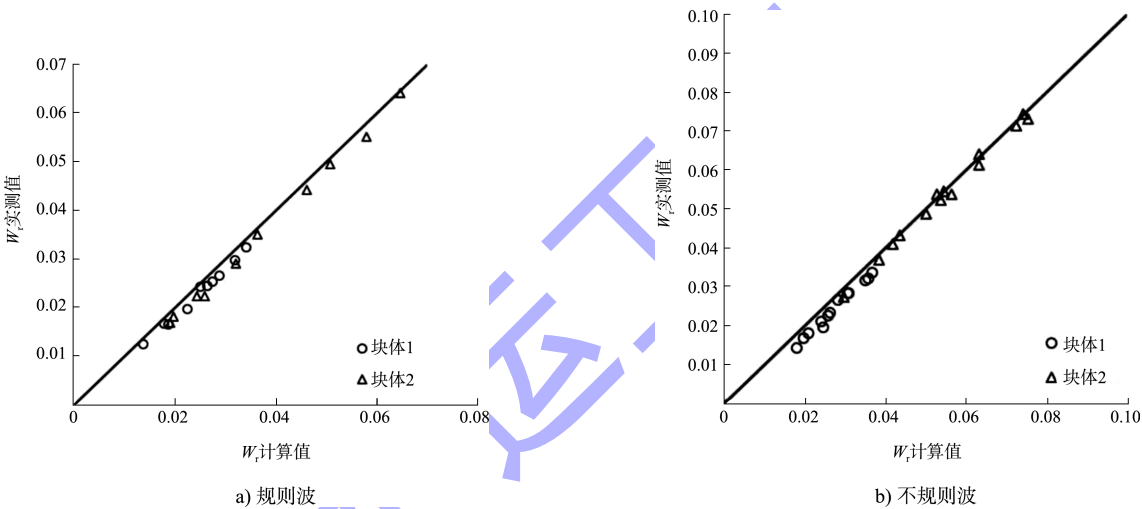


图 4 稳定质量计算值与实际失稳块体质量对比

3 结语

- 1) 无量纲稳定质量 W_r 随着 Irribarren 数的增大呈现出线性增大的趋势。
- 2) 根据规则波和不规则波试验结果, 拟合了考虑入射波浪要素及坡度等因素影响的块体稳定质量计算公式, 并建议稳定系数取为 9.1。

参考文献:

[1] 谢世楞, 谢善文, 吴进, 等. 软基上的空心方块斜坡堤[J]. 海洋工程, 2004(4): 1-6.

[2] 郑荣平, 李建军. 空心方块斜坡堤施工技术[J]. 水运工程, 2006(S2): 89-94, 102.

[3] 曲淑媛, 郭科, 佟德胜. 空心方块斜坡堤块体安放方法的试验研究[J]. 水运工程, 2005(2): 1-6.

[4] 高敏, 范期锦. 新型空心方块斜坡堤结构在长江口深水航道治理工程中的应用[J]. 中国港湾建设, 2006(2):

47-52.

[5] 谢世楞, 谢善文. 新型空心方块斜坡堤结构在长江口深水航道治理工程中的应用[J]. 水运工程, 2006(S2): 42-47.

[6] 付东伟, 陈勇, 陈衍顺, 等. 方形人工鱼礁单体流场效应的 PIV 试验研究[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(1): 82-85.

[7] 王登婷, 黄哲, 赵涵. 正方体人工鱼礁流场效应及水动力试验研究[C]//中国海洋工程学会. 第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 北京: 中国海洋工程学会, 2019.

[8] 郗禄文, 谢世楞. 斜坡堤空心方块的内力分析[J]. 中国港湾建设, 2004(2): 9-12.

[9] VAN DER MEER J W. Stability of breakwater armour layers—design formulae [J]. Coastal engineering, 1987, 11(3): 219-239.

(下转第 129 页)