



波浪作用下开孔混凝土护面板稳定性研究

张庆丰¹, 陈国平²

(1. 海军工程设计研究院, 北京 100070;

2. 河海大学港口、海岸与近海工程学院海岸灾害与防护教育部重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 在混凝土护面板上开孔, 一方面可增大与坡面的摩阻力, 提高抗滑性能; 另一方面增大了护面层的渗透系数, 增强了面板的整体稳定性。通过不规则波系列试验, 对不同开孔率混凝土护面板稳定性的影响因素进行了研究, 提出了稳定厚度计算公式, 并与现行规范的混凝土板和栅栏板稳定厚度公式进行了对比。该公式具有较好精度, 可为工程设计提供参考依据。

关键词: 开孔率; 混凝土护面板; 不规则波; 稳定

中图分类号: U 656.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0028-04

On stability of armor concrete slab with different porosity

ZHANG Qing-feng¹, CHEN Guo-ping²

(1. Navy Engineering Research Design Institute, Beijing 100070, China; 2. College of Harbor Coastal and Nearshore Engineering,

Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Perforating on armor concrete slabs can increase the permeating coefficient of the armor layer, reduce the uplift forces and enhance the overall stability. A series of experimental tests on irregular waves are carried out to analyze the influential factors on the value of the relative net uplift forces of the armor concrete slabs with different porosities. The calculation formula of the maximum relative net uplift forces is deduced, which is then compared with the previous formula.

Keywords: porosity; armor concrete slab; irregular wave; stability

近年来, 混凝土板护面结构在波浪作用不是很强烈的海岸、内河或水库的堤防设施中得到广泛应用。在混凝土护面板上开孔, 一方面可增大与坡面的摩阻力, 提高抗滑性能; 另一方面增大了护面层的渗透系数, 使得堤内渗流可以更快流出, 减小了浮托力, 增强了面板的整体稳定性^[1]。目前, 对于不同开孔率混凝土护面板稳定性的相关研究较少, 堤防设计规范或手册中还未给出详细的设计方法, 因此, 通过系列物理模型试验, 对其稳定特性进行研究具有重要实用价值。

1 试验设备及方法

试验在波浪水槽中进行, 水槽长 80 m, 宽

0.8 m, 高 1.2 m, 一端安装平板推板式不规则波造波机, 在计算机控制下可产生试验所需要的不规则波, 另一端设有消浪设施。为减小波浪二次反射对试验数据的影响, 在水槽中纵向增设了一道玻璃隔板, 将水槽分为宽度为 0.3 m 和 0.5 m 的两个部分, 本试验断面置于宽度为 0.5 m 的区段 (图 1)。

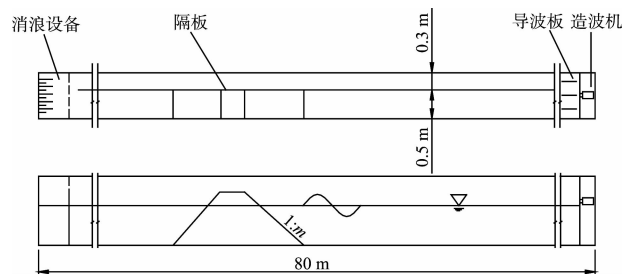


图 1 波浪水槽平、立面示意图

收稿日期: 2014-03-06

作者简介: 张庆丰 (1976—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程设计工作。

试验采用正态模型, 按照 Froude 数相似律设计。试验断面的结构形式为单一斜坡堤, 垫层和堤心均为单块平均质量为 3 ~ 7 g 的碎石, 垫层碎石相对堤心石偏大, 满足垫层块石基本不能从护面板空隙中漏出的要求。试验断面设置 3 个坡度, 分别为 1:1.5、1:2 和 1:3; 试验用的混凝土护面板有 4 种, 开孔率分别为 $P=0$ 、 $P=15\%$ 、 $P=25\%$ 和 $P=35\%$, 平面尺寸为 86 mm × 70 mm, 板中厚度为 10 mm, 按 2.4 t/m³ 干密度制作, 单块质量分别为: 187、143、119、102 g (图 2); 水深为 0.7 m; 波浪平均周期 1.4 和 1.2 s。试验采用不规则波, 波谱为 JONSWAP 谱。

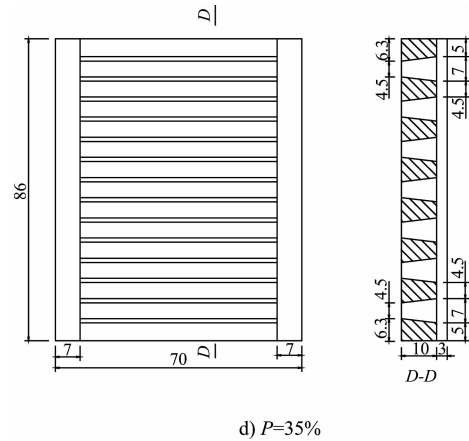


图 2 4 种开孔率混凝土护面板模型平面尺寸 (单位: mm)

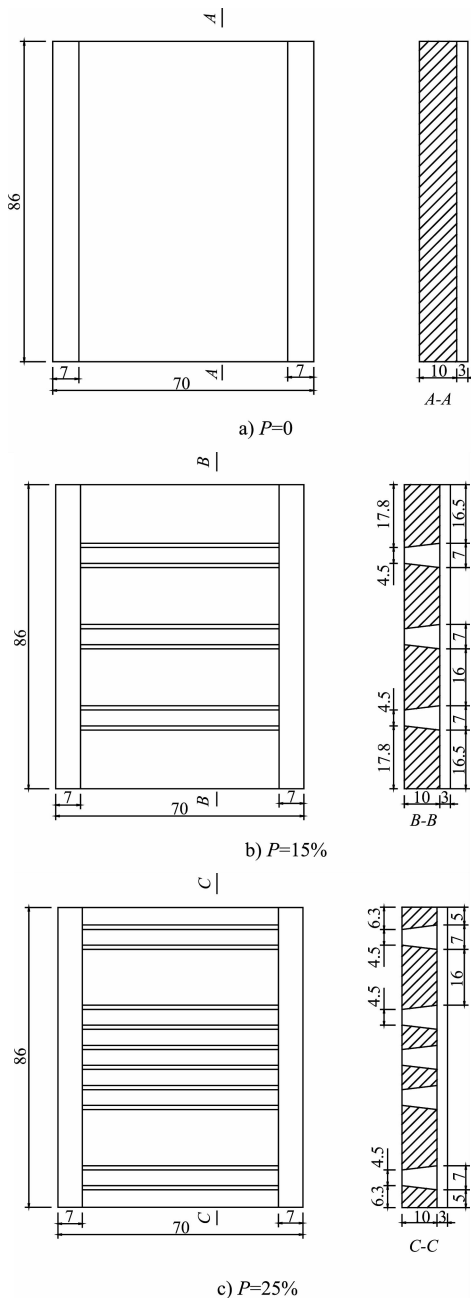
试验采用间隙式生波方式, 以消除波浪反射影响, 每次造波约 250 s。由造波机率定出平均周期 $\bar{T} = 1.4$ s 和 $\bar{T} = 1.2$ s 的不同波高的不规则波, 试验中按照波高从小到大的顺序依次用事先率定的波浪作用坡面, 当波高达到护面接近临界稳定状态时, 重复波浪作用, 观察面板翘起高度和试验断面形变有无继续增大, 连续做 7 组次 (总时间模拟原型 3 h 风暴潮作用时间), 若断面形变没有增大, 则该波高为临界稳定波高, 每次断面失稳后, 均重新铺设断面。试验中将面板翘起高度超过其板厚的一半 (即 5 mm) 和堤面沿法向累积变形超过板厚的一半视为护面板临界失稳的判别依据^[2-4]。

2 试验成果分析

2.1 影响护面板稳定的因素分析

1) 开孔率对护面板临界稳定波高的影响。

随着开孔率的增大, 护面板受波浪作用的面积减小, 临界稳定波高随之增大, 即护面板的稳定性变好 (图 2)。在不同坡度下, 临界稳定波高随开孔率的变化规律并不一致, $m = 1.5$ 时临界稳定波高与开孔率成线性递增关系; $m = 2$ 时增幅变大; 而在 $m = 3$ 时增幅最大, 但此时波浪打击力取代浮托力成为护面板失稳的决定因素, 因而临界稳定波高在开孔率从 25% 增大至 35% 时增幅变小。本文所得试验数据见表 1。



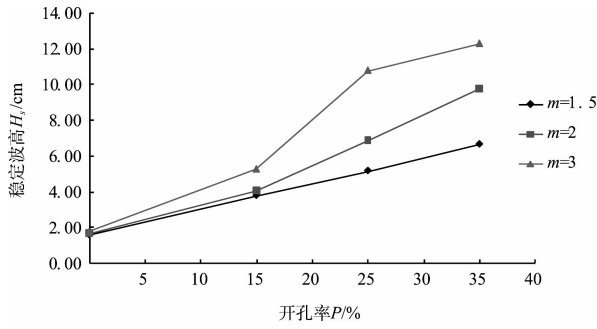


图2 不同坡度下护面板临界稳定波高随开孔率的变化关系

表1 护面板临界稳定波高试验数据

| 坡度 | 平均周期 T/s | 开孔率 P | 临界稳定波高 Hs/cm | 面板厚度 D/cm | Hs/ΔD |
|------|-------------|----------|-----------------|--------------|-------|
| 1.50 | 1.40 | 0.00 | 1.62 | 1.00 | 1.16 |
| 1.50 | 1.40 | 0.15 | 3.82 | 1.00 | 2.73 |
| 1.50 | 1.40 | 0.25 | 5.20 | 1.00 | 3.71 |
| 1.50 | 1.40 | 0.35 | 6.68 | 1.00 | 4.77 |
| 2.00 | 1.40 | 0.00 | 1.71 | 1.00 | 1.22 |
| 2.00 | 1.40 | 0.15 | 4.10 | 1.00 | 2.93 |
| 2.00 | 1.40 | 0.25 | 6.88 | 1.00 | 4.91 |
| 2.00 | 1.40 | 0.35 | 9.77 | 1.00 | 6.98 |
| 3.00 | 1.40 | 0.00 | 1.81 | 1.00 | 1.30 |
| 3.00 | 1.40 | 0.15 | 5.32 | 1.00 | 3.80 |
| 3.00 | 1.40 | 0.25 | 10.80 | 1.00 | 7.72 |
| 3.00 | 1.40 | 0.35 | 12.30 | 1.00 | 8.79 |
| 1.50 | 1.20 | 0.00 | 1.72 | 1.00 | 1.23 |
| 1.50 | 1.20 | 0.15 | 4.33 | 1.00 | 3.09 |
| 1.50 | 1.20 | 0.25 | 5.30 | 1.00 | 3.78 |
| 1.50 | 1.20 | 0.35 | 6.50 | 1.00 | 4.64 |

2) 坡度对护面板临界稳定波高的影响。

护面板不开孔时，稳定波高随坡度 m 的增大基本保持不变。当面板开孔后，稳定波高随着坡度 m 值的增大而增大，但随着面板开孔率的增大，稳定波高增大的幅度更加显著（图3）。

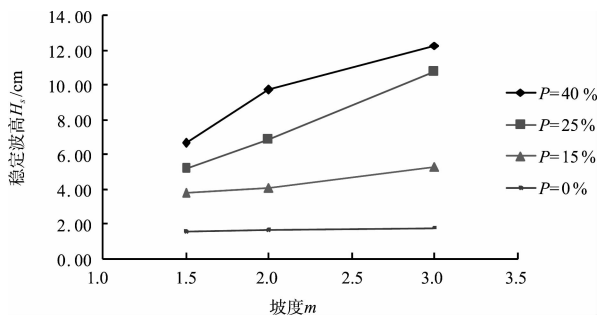


图3 不同开孔率护面板临界稳定波高随斜坡坡度变化关系

3) 波浪周期对护面板临界稳定波高的影响。

对坡度 $m = 1.5$ 的断面进行稳定试验，发现当入射波浪的周期从 1.2 s 增大到 1.4 s 时，各种开孔率护面板的临界稳定波高变化不明显（图4）。一方面由于试验采用的两个波周期相近，差别不显著；另一方面周期增大或者相对很大时，波浪水质点运动速度减小，动量减小，水流有充足的时间进出斜坡堤，反而会使临界稳定波高相对增大。

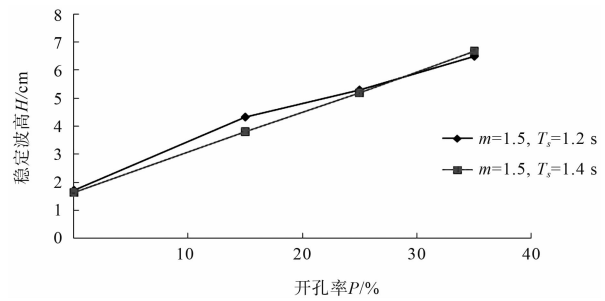


图4 不同开孔率护面板临界稳定波高随入射波周期变化关系

4) 破波参数对护面板临界稳定波高的影响。

综合前文的分析，护面板的临界稳定波高与波浪在斜坡上的破碎形态有着紧密的联系，其临界稳定波高随着 ξ 的增大而减小（图5）。

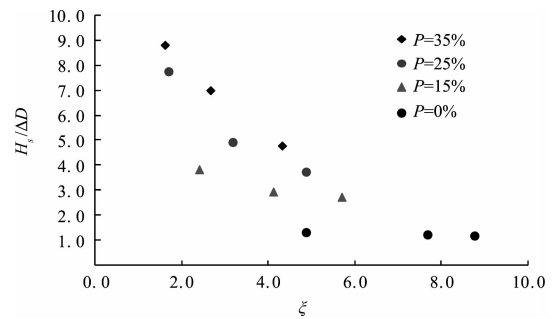


图5 不同开孔率护面板临界相对稳定波高随 ξ 的变化

2.2 不同开孔率混凝土护面板稳定厚度计算方法

总结前人关于护面板体稳定厚度的计算公式，本文认为 $\frac{H_s}{\Delta D} = F\xi^k$ 公式结构较为合理，利用平均周期 $T = 1.2$ s 和 1.4 s 的波要素试验得出的不同开孔率护面板临界相对稳定波高随 ξ 的变化关系（图5），在 K 值取 -0.62 时用公式 $y = Fx^{-0.62}$ 进行拟合，关系良好，并由图6可知，系数 F 值与开孔率 P 存在较好的线性关系。不同开孔率混凝土

护面板稳定厚度可用公式 $\frac{H_s}{\Delta D} = F\xi^{-0.62}$ 计算, 其中 $F = 24.69P + 3.5$ 。公式适用条件: 1) $0 < P < 0.35$; 2) $m = 1.5 \sim 3$; 3) 护面板下垫层和堤心材料有较好透水性, 且堤脚处应采取防止护面板下滑的措施。公式与试验数据拟合关系见图7。

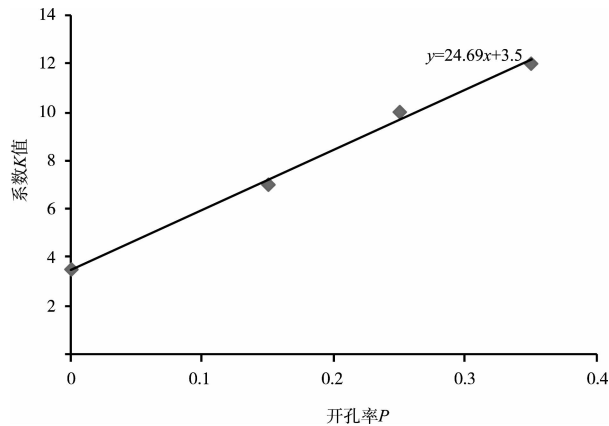


图6 公式系数 F 随开孔率的变化关系

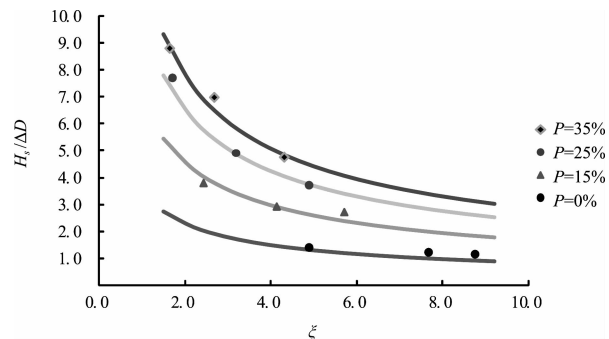
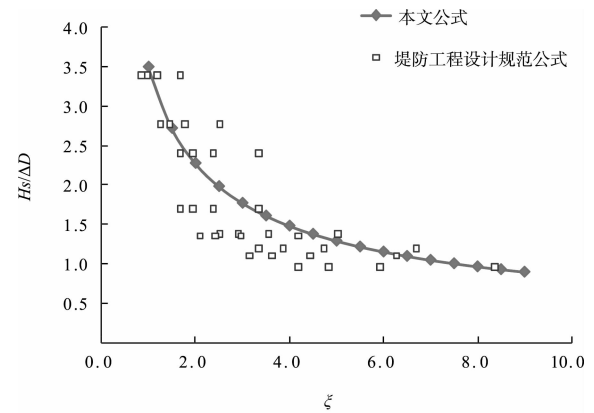


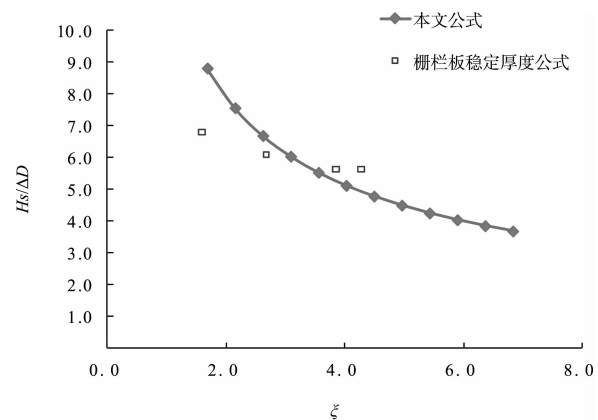
图7 不同开孔率护面板相对稳定厚度随 ξ 的变化拟合曲线

为了验证以上公式的适用性, 将其与前人相关公式计算值进行对比。当混凝土护面板开孔率 $P = 0$ 时, 本文公式计算值基本介于《堤防工程设计规范》混凝土板厚度公式计算值之间 (图8a))。由于堤防工程规范公式没有水深因子, 所以计算中按无限水深考虑; 选用的有效波高分别为1、2、3、4 m, 平均周期分别为4、8、10 s, 共12种波要素; 选用的坡度分别为1.5、2、3。当混凝土护面板开孔率 $P = 0.35$ 时, 本文公式计算值介于《防波堤设计与施工规范》栅栏板厚度公式计算值之间 (图8b))。当 $\xi < 3$ 时, 本文公式计算厚度值偏小; 当 $\xi > 3$ 时, 本文公式计算厚度值偏大。计算中水深按2倍有效波高考虑; 选用的波要素为本文试验中开孔率 $P =$

0.35 护面板临界失稳波要素。



a) 开孔率 $P=0$



b) 开孔率 $P=0.35$

图8 防波堤设计与施工规范公式和本文公式计算值比较

3 结论

护面板临界稳定波高随开孔率和坡度 m 的增大而增大; 入射波浪的周期从1.2 s增大到1.4 s时, 各种开孔率护面板的临界稳定波高变化不明显; 护面板临界稳定波高随着 ξ 的增大而减小。不同开孔率混凝土护面板稳定厚度可用公式 $\frac{H_s}{\Delta D} = F\xi^{-0.62}$ 计算。

参考文献:

- [1] 严恺, 梁其荀. 海岸工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [2] 韩丽华. 港口海岸工程水利模型试验教程[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2007.
- [3] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
- [4] JTS 145-2—2013 海港水文规范[S].

(本文编辑 武亚庆)