



一种新型生态护坡结构及其设计方法^{*}

黄哲, 徐华, 王登婷

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210024)

摘要: 传统堤防工程在发挥社会经济效益的同时, 对原有生态系统也产生了一定程度的影响。随着社会与经济的发展, 堤防工程建设过程中逐步加强了对生态环境的保护意识。镂空驼峰型生态护坡是一种响应生态堤防建设需要而提出的新型护面结构, 具有良好的消浪性能及生态效应。通过波浪断面物理模型试验, 针对镂空驼峰型生态护坡设计方法开展了研究, 得到结论: 1) 规则波与不规则波作用下护坡满足自身稳定所需的厚度 D 均与入射波浪的破碎参数 ξ_p 有关。2) D/H 的值随 $\xi_p^{0.5}$ 的增大基本呈线性增大趋势, 根据这一特点提出了镂空驼峰型生态护坡稳定厚度计算公式。该结构已在引江济淮工程巢湖口门航道整治工程中得到应用。

关键词: 波浪; 镂空驼峰型生态护坡; 稳定厚度; 模型试验

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0111-06

A new ecological slope protection structure and its design method

HUANG Zhe, XU Hua, WANG Deng-ting

(Nanjing Hydraulic Research Institute,

State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210024, China)

Abstract: While traditional dike projects exert social and economic benefits, they also have some impact on the original ecological system. With the development of society and economy, the awareness of ecological environment protection has been gradually strengthened during the construction of dike projects. Hollow hump ecological slope protection is a new type of slope protection structure proposed for the needs of ecological dike construction and has good wave-eliminating performance and ecological effects. This paper uses wave section physical model tests to research the design method of hollow hump ecological slope protection. The research result shows that: 1) Under the action of regular waves or irregular waves, the thickness D required for the slope protection to meet its stability is related to the breaking parameter ξ_p of the incident wave. 2) The value of D/H increases linearly with the increase of $\xi_p^{0.5}$, and calculation formula of the stable thickness of the hollow hump ecological slope protection is proposed. This structure has been applied in the channel regulation project in Chaohu Lake of the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion.

Keywords: wave; hollow hump ecological slope protection; stable thickness; physical model test

堤防工程主要应用于水陆岸线的交界位置, 用
来抵御台风风暴潮、保护陆域。从堤防工程生态建设

角度, 除部分对景观生态要求较高的水域外, 大部
分工程建设主要考虑安全可靠和经济合理, 已有规

收稿日期: 2020-10-20

*基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0407505); 引江济淮工程科研项目(YJJH-YJJC-ZX-20191106220);
安徽省交通科技进步计划(2016-32)

作者简介: 黄哲(1993—), 男, 助理工程师, 从事波浪与建筑物相互作用研究。

通讯作者: 王登婷(1976—), 男, 教授级高级工程师, 从事波浪与建筑物相互作用研究。E-mail: dtwang@nhri.cn。

程规范中也缺少对堤防工程生态建设的相关指导和要求。堤防工程在发挥社会效益的同时，对生态系统也产生了一定程度的影响。开展堤防工程的生态建设，研究生态堤防建设技术和方法，是现代水利工程建设的重要任务和必然趋势。

荷兰、美国、德国、澳大利亚等发达国家对生态堤防、生态河道、生态海岸的问题重视较早^[1]。1999年荷兰发布的海堤和湖堤导则包括了景观、自然、文化、历史价值等方面的内容，要求新建堤防工程或已建工程的加固和维护必须考虑对周边环境的影响；2003年美国陆军工程师团发布的海岸工程手册中，规划、设计、工程建设及管理等章节均包括了环境保护和修复的相关内容；在德国，优先采用保留天然水动力的堤防策略，选用亲和性的防护形式；英国、法国和荷兰于2007年联合颁布了新的石材手册，增加了环境保护和可持续利用方面的指导。

我国的堤防建设发展过程中也逐步加强了对生态环境的保护意识，将“注重生态，落实绿色发展理念”作为基本原则之一，要求妥善处理堤防建设与生态环境保护的关系^[2]。2018年10月中央财经委员会第三次会议上提出推动重点生态工程区生态修复工程，恢复河湖、湿地、海洋等生态系统功能，实施海岸带保护修复工程，建设生态海堤。各地也正在逐步转变堤防工程建设理念，在充分考虑自然条件和防潮安全基础上，以植物护岸等替换传统的刚性结构，形成以消浪、导流为主，兼顾绿化、湿地及生物多样性等多目标的生态堤防模式^[3-4]。

相对于传统堤防工程的建设，生态堤防更尊重生态自然规律，将工程和生态系统相融合，充分发挥堤防工程在维持生态平衡中的作用，生态性可主要在总平面布局、断面结构、工程材料、护坡结构等方面体现^[5]。

为响应生态堤防工程建设的需求，以护坡结构生态化为出发点，提出了一种新型的生态护坡结构——镂空驼峰型生态护坡^[6]。为保证工程安全，本文针对镂空驼峰型生态护坡的设计方法开

展研究，为结构设计提供科学依据。目前该结构已于引江济淮巢湖白石天河口门航道整治工程导堤堤根段中得到应用。

1 堤防工程护坡结构

常见的堤防工程结构包括斜坡式和直立式，此外部分地区还建有一些斜坡和直立式相结合的复合式堤坝。护坡结构是斜坡堤防工程的重要组成部分，用于减小波浪爬高，同时保护堤身安全，该部位直接受到水体作用，因此对其自身稳定性的要求也较高。

1.1 常见护坡结构

常见的护坡结构有块石护坡、人工块体护坡等。块石护坡^[7]是最早应用也是最常见的护坡结构，其形式主要包括散抛、插砌、灌砌等，块石间结构孔隙较大，具有良好的消浪效果，并且易维护、环境亲和力好。但随着水深和波浪动力的增大，满足自身稳定所需的块石质量大幅增加，往往需采用人工块体护坡，人工块体护坡^[8-9]包括栅栏板、四角空心方块、扭工字块和扭王字块等，相较于抛石护坡，这些人工块体护坡结构对大波浪的适用性总体上是有所增强的，但混凝土用量较大，工程造价较高。随着钢筋材料及防腐工艺的进步，近些年钢筋石笼护坡^[10]应用也逐渐增多，这种护坡解决了单个块石稳定性差的缺点，提高了块石护坡整体稳定性，但护面结构的耐久性受钢筋笼制约，一旦破坏，则导致整个钢筋笼失稳。

1.2 镂空驼峰型生态护坡

镂空驼峰型生态护坡是受人工鱼礁流场效应启发而发明的一种新型护面结构，具有美观、生态、亲水等优点及良好的消浪性能，结构由两侧驼峰部分及中间的平面部分构成，见图1。

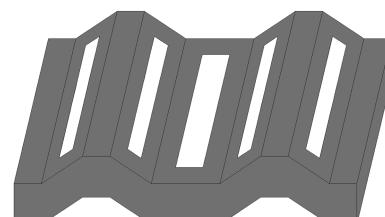


图1 镂空驼峰型生态护坡结构

每个驼峰两侧各开 1 个矩形孔, 每两个驼峰之间的平面部分开 1 个矩形孔, 每个块体共开 5 孔, 水体可通过开孔向垫层和堤心渗透, 实现与垫层石和堤心的水体交换, 因为这种内外透水的护面保留了垫层碎石的多孔渗水结构, 因此其消减波浪冲击力的能力与传统板式护面相比得到了大幅度的提升, 可作为河道、湖区或近海工程的护坡结构, 具有良好的消能效果, 有助于减小波浪对整治建筑物结构稳定性的影响, 控制陆域上水及越浪。

护面自身也具有良好的稳定性能。由于结构具有较高的透水率, 在波谷作用时受到的负压较小, 同时由于采用驼峰式构造, 波浪作用于护面上部存在相位差, 结构所受到的波浪冲击力也相对较小。因此, 在相同动力条件下, 满足波浪作用下自身稳定所需的稳定厚度相对较小。

同时镂空驼峰型生态护坡具有良好的生态效应。与人工鱼礁相似, 当波浪和水流作用于这种镂空驼峰结构时会产生上升水流, 将沉积在坡面上部的营养物质带到表层, 吸引鱼群^[11], 且由于护坡表层透空率大(30%左右), 护坡自身和护坡之间的缝隙有助于底栖动、植物生长, 带来景观效应同时起到稳固边坡的作用。

1.3 波浪与护坡相互作用

当破波参数较小时, 波浪会在护坡斜坡面上发生破碎。破碎波浪在护坡上的运动过程可分为 4 个阶段: 破碎、冲击、上爬和回落。在这 4 个阶段中, 波浪的冲击和下落对护坡稳定产生重要影响。当波浪对坡面冲击时, 护坡所承受的正压力较大。这种较大的正压强对护坡结构自身的强度影响较大, 引起结构损坏。相对于护坡自身稳定性, 波浪下落过程是最危险的, 在波浪上爬至最高点时, 堤心内部也有水渗入, 水位与爬高点相

当, 当波浪沿斜坡表面回落时, 表面水体下落很快, 一旦护坡层透水性弱, 影响护面底部孔隙水的排出, 护面层内外将产生一个水头差, 形成对护面向外顶托力, 一旦超出护面的水下质量, 会导致护面上托失稳(图 2)。

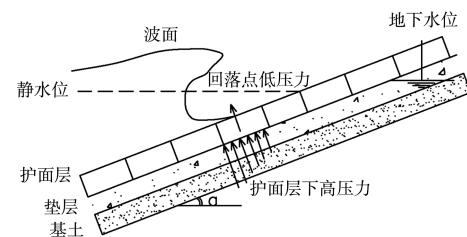


图 2 波浪下落过程中护坡结构受力

由此可见波浪与护坡结构相互作用是一个复杂的过程, 需要通过物理模型试验分析镂空驼峰型生态护坡结构与波浪相互作用时的自身稳定性, 为这种结构的设计与应用提供参考。

2 稳定厚度试验计算方法研究

2.1 试验仪器设备

在南京水利科学研究院风、浪、流长波浪水槽中开展稳定厚度计算方法研究, 试验水槽长 175 m、宽 1.2 m、高 1.8 m。水槽两端均配有消浪缓坡, 在一端配有一端配南京水利科学研究院研发的推板式不规则波造波机。该造波系统可根据需求产生规则波和不同谱型的不规则波, 试验水槽见图 3、4。



图 3 波浪水槽照片

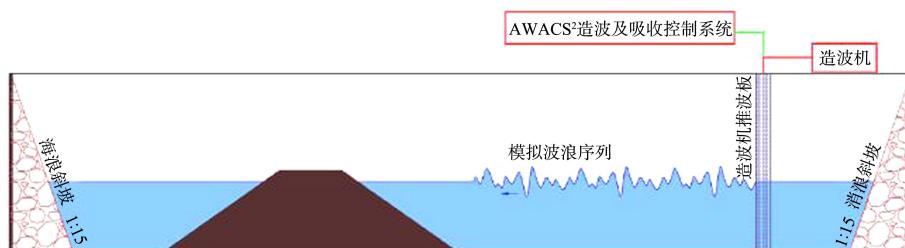


图 4 波浪水槽示意

试验中波高的测量采用 LG1 型电容式波高仪(图 5)，其稳定性好，受水温变化的影响小。敏感丝芯采用铜合金，以金属铜为主，加入少量弹性较好的金属以增加弹性，充分降低了温度对电容的影响，因而不必采用温度传感器进行温度校正；电容介质采用聚四氟乙烯，其对水的附着力小，当水位波动较快时，不会产生附着水从而影响波高的测量精度。采用 DS30 型 64 通道浪高水位仪系统进行数据采集(图 6)，由计算机控制并进行数据处理，其最小采样时间间隔为 0.002 5 s(400 Hz)，量程为 60 cm，分辨率为 0.03 cm。

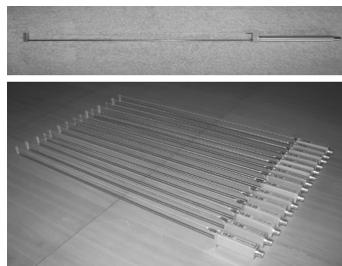


图 5 LG1 型浪高传感器



图 6 波高采集系统

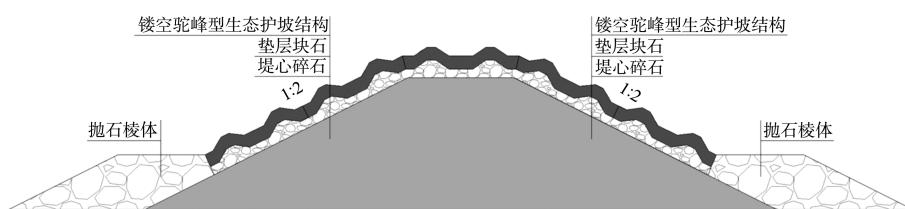


图 9 断面结构

2.3 试验组次

试验选用不同的堤顶水深 R_c ，高于堤顶为正，低于堤顶为负， R_c 取值为 0.14、0.07、0、-0.035 m。

试验波浪包括规则波与不规则波，其中规则波与不规则波的周期均按平均周期控制，不规则

2.2 试验模型

稳定厚度试验采用的镂空驼峰型生态护坡结构尺寸见图 7，剖面见图 8，块体尺寸为 12.5 cm×10 cm，厚度为 1.25 cm，该厚度不包括驼峰凸起高度，驼峰凸起高度为 1 cm。模型采用水泥砂浆制成，并使用铁粉进行配重，整体平均密度为 2.35 g/cm^3 ，与实际工程中的混凝土块体密度相同。每个块体尺寸误差不超过 1 mm。模型按照图 9 所示的断面结构进行布置，内、外坡坡比均为 1:2，下部采用块石垫层。

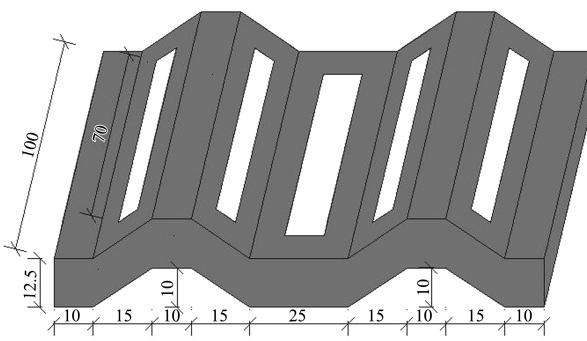


图 7 镂空驼峰型生态护坡结构尺寸 (单位: mm)

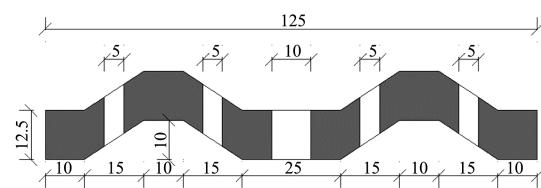


图 8 镂空驼峰型生态护坡结构剖面 (单位: mm)

波波谱采用 JONSWAP 谱。入射波浪平均周期包括 1.2、1.5、1.8、2.0、2.5 s，试验波高逐步加大，直至护坡结构发生失稳或达到极限波高。

2.4 试验方法

进行镂空驼峰型生态护坡结构稳定厚度计算

方法研究时, 针对每一水位、波周期, 通过计算机由小到大输入波高参数, 观察波浪作用下镂空驼峰型生态护坡结构的稳定性情况, 若护坡结构出现轻微晃动、明显晃动、位移等现象则记录下当时的输入波高, 并在拆除模型后通过反向率定分别得到各工况下发生轻微晃动、明显晃动、位移时相对应的实际入射波高。

正式试验前, 先使用小波连续作用一段时间, 使得堤身密实。

稳定厚度试验每组工况(同一水深、同一周期)重复3次, 每次试验后重新堆放断面, 取3次平均波高作为试验结果, 当3次重复试验结果差别较大时, 则增加重复次数。

2.5 试验结果

2.5.1 破波参数 ξ_p 对稳定厚度影响分析

规则波、不规则波作用下, 相对稳定厚度 $\frac{D}{H}$ 随 $\xi_p^{0.5}$ 的变化情况见图10。 D 为镂空驼峰型生态护坡结构的稳定厚度(m), 纵坐标 $\frac{D}{H}$ 为镂空驼峰型生态护坡结构的相对稳定厚度, 横坐标为无因次影响因子破波参数 ξ_p 的算数平方根, 其值为 $\frac{\tan\alpha}{\sqrt{H/L}}$, 不规则波作用时取 $H_{5\%}$ 波高。

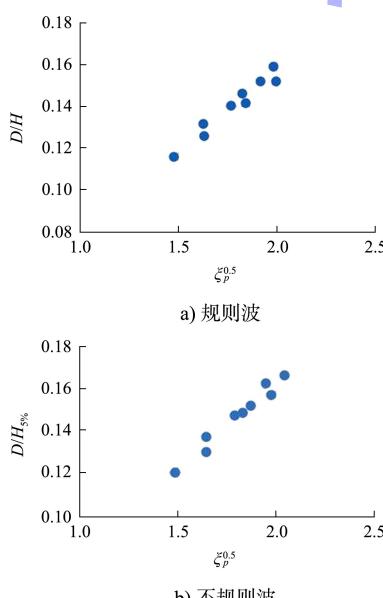


图 10 $\frac{D}{H}$ 随 $\xi_p^{0.5}$ 变化趋势

由图10可见, 在规则波及不规则波作用下, $\frac{D}{H}$ 的值均随着 $\xi_p^{0.5}$ 的增大, 基本呈现出线性增大的趋势。

同时结合试验结果得到: 当入射波浪的波高及周期一定时, 水深越大, 即波长越长, 相应的 $\xi_p^{0.5}$ 越大, $\frac{D}{H}$ 就越大, 即满足该条件下块体稳定所需的自身厚度越大; 当水深和入射波高一定时, 波浪周期越大, 波长越长, 相应的 $\xi_p^{0.5}$ 越大, $\frac{D}{H}$ 也越大, 满足该条件下块体稳定所需的自身厚度就越大; 当水深和入射波浪周期一定时, 波高越大波浪动力越强, 满足该条件下块体所需的稳定厚度也就越大。

2.5.2 镂空驼峰型生态护坡结构稳定厚度计算公式

结合试验结果, 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厚度计算公式, 规则波和不规则波作用下的稳定厚度计算公式见式(1)~(3)。

$$\frac{D}{H} = R \cdot \frac{\xi_p^{0.5}}{S_b - 1} \quad (1)$$

$$S_b = \frac{\rho_b}{\rho} \quad (2)$$

$$\xi_p = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{H/L}} \quad (3)$$

式中: D 为镂空驼峰型生态护坡结构的稳定厚度(m); ρ_b 为镂空驼峰型生态护坡结构的密度(kg/m^3); H 为设计波高(m), 不规则波采用 $H_{5\%}$; R 为稳定系数, 规则波取 0.112, 不规则波取 0.115; α 为斜坡与水平面的夹角($^\circ$); ρ 为水的密度(kg/m^3)。

通过式(1)~(3)计算得到规则波、不规则波作用下镂空驼峰型生态护坡结构的稳定厚度计算值与实际发生失稳的块体厚度对比, 见图11, 其中规则波作用时 R 取0.112, 不规则波作用时取0.115。由图11可见, 实测值与计算值较为接近, 且计算值稍大, 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。

同时对比规则波与采用 $H_{5\%}$ 不规则波稳定厚度计算结果得出两者相近，且偏工程安全考虑，建议该系数取大值 0.115。

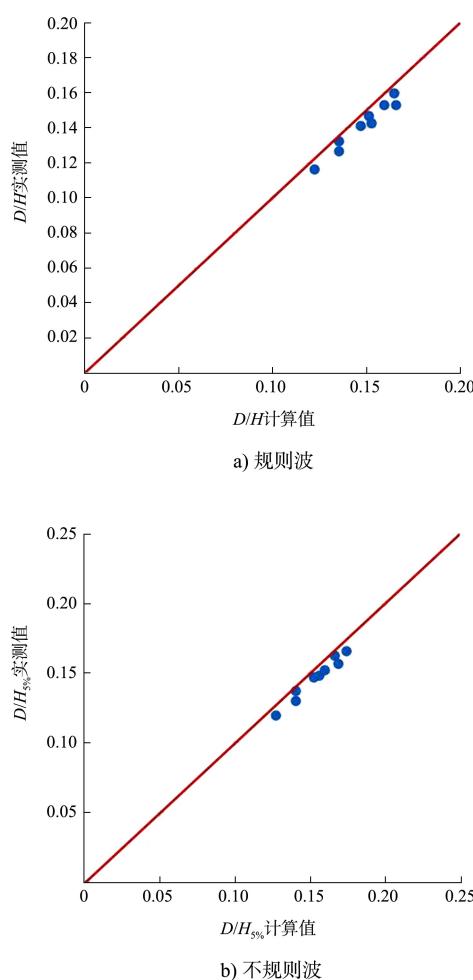


图 11 计算值与实测值对比

3 结论

1) 针对生态堤防建设需求，提出了一种新型护面结构——镂空驼峰型生态护坡。

2) 镂空驼峰型生态护坡自身稳定性好、消浪性能好、流场效应佳，且具有良好的生态效应。

3) 波浪作用下镂空驼峰型生态护坡满足自身稳定所需要的厚度 D 与入射波浪的破碎参数 ξ_p 有关， D/H 的值随 $\xi_p^{0.5}$ 的增大基本呈线性增大趋势。

4) 提出了波浪作用下镂空驼峰型生态护面结构的稳定厚度计算公式。

5) 下阶段将针对镂空驼峰型生态护面结构的平面尺度及驼峰尺寸设计作进一步研究。

参考文献：

- [1] 孙东亚, 黄世昌.国外海堤规划设计方面的一些进展[C]//2008年风暴潮灾害防治及海堤工程技术研讨会.北京:水利水电出版社, 2008.
- [2] 国家发展改革委, 水利部.全国海堤建设方案[R].北京:国家发展改革委, 2017.
- [3] 田鹏, 隋伟涛, 孙鹏, 等.生态海堤在杭州湾海岸防护中的应用[J].中国港湾建设, 2020, 40(10): 40-44.
- [4] 李丽凤, 刘文爱, 蔡双娇, 等.广西北海滨海国家湿地公园生态海堤建设模式研究[J].湿地科学, 2019, 17(3): 277-285.
- [5] 黄莹娜.海堤生态化建设路径浅析[J].珠江水运, 2020(12): 37-38.
- [6] 王登婷, 宋有权, 杨昌道, 等.镂空驼峰型生态护坡结构: CN2020302426.3[P].2021-02-09.
- [7] 程铁军, 张俊, 李善奇, 等.生态护岸在航道整治工程中的应用[J].水运工程, 2012(10): 128-131.
- [8] 赵涵, 王震, 王登婷, 等.不同护面形式对潜堤透射系数的影响[J].水运工程, 2018(10): 58-62.
- [9] 孙天霆, 王登婷.不同形式护面块对斜坡式防波堤波浪爬高的影响[J].水运工程, 2015(7): 56-61.
- [10] 许尚杰, 程素珍, 周国栋.水工石笼的特点及其质量控制措施分析[J].山东水利, 2019(12): 7-8.
- [11] CHEN Q, CHEN P. Short-term effects of artificial reef construction on surface sediment and seawater properties in daya bay, China[J]. Journal of coastal research, 2020, 36(2): 319-326.
- [12] 潘军宁, 王登婷, 吴美安, 等.波浪作用下混凝土砌块护坡稳定性试验研究[J].河海大学学报(自然科学版), 2005(4): 476-481.

(本文编辑 武亚庆)