

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.02.007

内河生态航道孔洞型消波结构的消波特性试验

侯利军^{1,2}, 蔡源达^{1,2}, 王辉³, 石泓逸^{1,2}, 宋少红³, 陈达^{1,2}

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏南京 210098;

2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098; 3. 上海城投航道建设有限公司, 上海 201913)

摘要: 为降低船行波对内河生态航道护岸的影响, 提出一种兼顾消减波浪和连通水体的孔洞型消波结构, 并通过波浪水槽物理模型试验研究了其消波特性, 分析了孔洞、波高和水位对波浪透射、反射、波浪力的影响规律。结果表明: 波浪与孔洞型消波结构相互作用, 表现出显著的波浪透射、反射和孔洞造成的流体紊动现象, 极大改变了波浪传播特征; 透射波浪的波高在消波结构附近相对较大, 距离消波结构较远时波高显著减小并趋于稳定; 波浪透射系数随孔径减小和波高增大而逐渐减小; 波浪反射系数随孔径减小基本不变, 随波高增大而逐渐增大; 透射和反射系数随水位的变化关系与水位-孔洞的相对位置及透波程度相关; 随着波高增大, 波压力和波吸力呈先快速增大后基本不变的趋势; 随着孔径增大, 波压力逐渐减小, 而波吸力相近, 且开孔率对波压力降幅的影响较波吸力更大。

关键词: 生态航道; 船行波; 孔洞型消波结构; 波浪透射; 波浪力

中图分类号: TV139.26

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)02-0054-09

Experimental study on the wave dissipation characteristics of hole-type wave dissipation structures in inland water ecological channels

HOU Lijun^{1,2}, CAI Yuanda^{1,2}, WANG Hui³, SHI Hongyi^{1,2}, SONG Shaohong³, CHEN Da^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Changjiang Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Shanghai Chengtong Channel Construction Co., Ltd., Shanghai 201913, China)

Abstract: One type of hole-type wave dissipation structure, capable of reducing wave impact while maintaining water flow connections, is proposed in this study to reduce the impact of ship wave on the revetments of inland water ecological channels. The wave dissipation behavior of this type of breakwater is investigated through physical model tests in wave flumes. Also, the effects of holes, wave height and water depth on the wave transmission, reflection, and wave forces are analyzed. The experimental results indicated that the interaction between waves and the hole-type wave dissipation structures results in significant wave transmission, reflection, and turbulence induced by the holes, leading to substantial alterations in the characteristics of wave propagation. The wave height of transmissive waves is large in the vicinity of the dissipation structures and decreases apparently and stabilizes when away from the structures. The wave transmission coefficient gradually decreases with a reduction in hole diameter and an increase in wave height. The wave reflection coefficient remains almost unchanged with a decrease in hole diameter and increases gradually with an increase in wave height. Transmission/reflection coefficients as a function of water depth are in relation to water level-relative position of the holes and degree of wave transmission. Both wave pressure and suction increase rapidly with an increase in wave height and then remain stable. As the hole diameter increases, the wave pressure gradually decreases, while the wave suction remains similar. And the porosity has a greater effect on the reduction in wave pressure than in wave suction.

Key words: ecological channels; ship wave; hole-type wave dissipation structure; wave transmission; wave forces

基金项目: 江苏省交通运输科技项目(2024Y09); 上海市科技计划项目(21DZ1202700); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(202103320)

作者简介: 侯利军(1981—), 男, 研究员, 博士, 主要从事港口与航道工程研究。E-mail: hlj2932@hhu.edu.cn

通信作者: 陈达(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事港口与航道工程研究。E-mail: chenda@hhu.edu.cn

引用本文: 侯利军, 蔡源达, 王辉, 等. 内河生态航道孔洞型消波结构的消波特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 54-62.

HOU Lijun, CAI Yuanda, WANG Hui, et al. Experimental study on the wave dissipation characteristics of hole-type wave dissipation structures in inland water ecological channels[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(2): 54-62.

我国内河航道总长约 12.8 万 km,随着内河运输需求不断扩大,航道建设采用的传统工程措施与水生态系统之间的矛盾逐渐显露^[1]。根据交通运输部《关于新时代加强沿海和内河港口航道规划建设的意见》中推动一体化高质量发展,建设绿色航道,加强生态保护和可持续发展的战略要求,为维护航道稳定性,保证通航需要,应重视河道护坡的工程性能和生态效益。

传统护岸工程侧重于护岸结构及其防洪功能^[2],设计理念注重结构安全稳定,多采用硬质材料实施航道护岸治理^[3]。这种硬质护岸忽视了生态效应,阻断了护岸岸坡的物质交换^[4],隔绝了水域与陆域生态系统联系^[5]。近年来,生态护岸快速发展,主要以绿色植被覆盖河道岸坡^[6],并辅以网绳、椰纤维织物、土工格栅等土体加筋材料或透空块体^[7],对岸坡进行侵蚀防护,避免岸坡由于水土流失而失稳^[8]。生态护岸在结构安全和防洪的基础上改善了河岸护坡的生态条件^[9],有助于维持河道岸坡连通,促进河道生物多样性。

当前,生态护岸在内河生态航道工程已大量应用,并成为今后的重要发展趋势,但仍存在以下问题:①护岸岸坡植被长期遭受船行波的侵蚀作用,植被生长受到严重影响和威胁^[10],经历一定年限后甚至发生植被死亡等现象,严重影响航道护岸生态功能,打破了航道生态系统平衡;②船行波的冲刷作用导致护坡土体的松动、剥落和塌陷,严重时可能影响护岸结构稳定性^[11-12];③部分护岸采用了直立实体墙消波结构,但消波结构前后水体连通较差^[13],河道水质和生态景观受到较大影响。

透空式消波结构具有良好的波浪消减和水体连通优势,在港口与海岸工程中得到了广泛应用。格栅板式消波结构^[14]主要通过格栅板间反射和内部涡流削减波浪。直立式透浪沉箱结构^[15]在传统沉箱结构上增加透浪通道,使波浪经过多次绕射和反射传播到堤后,从而减少波浪透射。开孔挡板式消波结构^[16]利用开孔挡板对波浪进行反射和紊动消能。反弧倾斜板透空消波结构^[17]利用消浪箱上的开孔反弧板和倾斜板进行反射和紊动消浪。但是,这些消波结构的横断面尺度较大,应用于河道护岸时会占用过多河道宽度,适用性较低。本文在上述消波结构的基础上,进一步优化结构布置形式,提出适用于内河航道生态护岸的孔洞型消波结构,并通过物理模型试验,探究该消波结构的消波特性和机理,分析孔径、波高和水位等因素对波浪消减的影响效应,以期为该消波结构的工程应用提供支撑。

1 物理模型设计和试验方法

1.1 试验平台和仪器

物理模型试验依托河海大学风浪流水槽(长 60 m、宽 1.0 m)试验平台进行。水槽配有造波机,通过电机伺服系统及相应软件远程控制造波机的运动,水槽前后均设有消波装置。试验共布置 7 根浪高仪(WG1~WG7),如图 1 所示,其中 3 根放置于结构迎浪侧用于测量反射波高,4 根放置于结构背浪侧用于测量透射波高。在消波结构迎浪面布置 5 只波压力计、底面布置 3 只波压力计,以测量消波结构竖向墙体和水平底板受到的波压力、波吸力和浮托力,布置方式如图 2 所示。

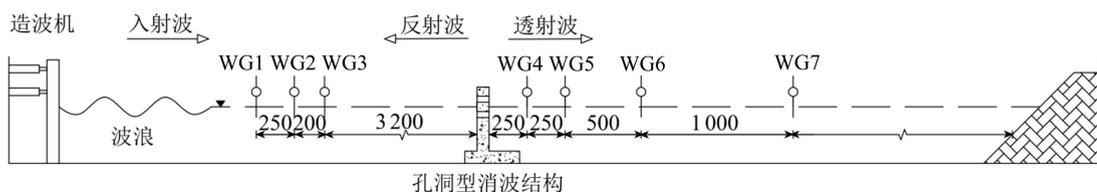


图 1 试验平台和浪高仪布置(单位:mm)

Fig. 1 Layout of test platform and wave gauge (unit: mm)

1.2 船行波与模拟波浪要素

长江下游内河航道等级主要以二级以下航道为主,为了提高消波结构的使用范围,拟以二级航道为依托,进行消波结构消浪特性研究。根据 GB 50139—2014《内河通航标准》,二级航道水位不低于 2.6~3.0 m,其中限制性航道水位不低于 4.0 m,代表性船型为 2000 t 级以下散货船、杂货船。此外,船速为影响船行波的重要因素,调研相关资料表明内河航道船速一般不高于 15 km/h。

船行波一般为斜向传播作用于消波结构,但水槽仅适用于断面试验,通常仅能模拟垂直入射,斜向入射会产生很大的边壁反射效应,导致结果失真。试验采用垂直入射规则波模拟船行波,这种简化较实际情况更保守,结果更偏安全。依据 JTS 181—2016《航道工程设计规范》的相关规定,可通过式(1)~(3)计算船行波

波浪要素。

$$H_c = \alpha h_c (S/h_c)^{-0.33} (v/\sqrt{gh_c})^{2.67} \quad (1)$$

$$L_c = 0.43v^2 \quad (2)$$

$$T_c = \sqrt{\frac{2\pi L_c}{\text{th}(2\pi h_c/L_c)g}} \quad (3)$$

式中: H_c 为岸坡坡脚处的船行波波高; L_c 为船行波波长; T_c 为船行波周期; α 为与船型有关的系数; S 为岸坡坡脚与船舷的距离; h_c 为航道水深; v 为船舶航速; g 为重力加速度。

对于二级航道,20~30 m 岸边距、15 km/h 航速时,船行波波高在 0.29~0.33 m 之间。规则波采用间断造波法,每组波要素一次造波 50 个,每次待水面平静后重新造波,重复 3 次取其平均值为最终结果。根据 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》,结合表 1 中的船行波波要素和试验水槽尺度,模型比尺设计为 $\lambda = 5 : 1$ 。试验参数包括孔径、水位位置与规则波波要素,具体试验工况见表 2。

1.3 模型设计

消波结构拟设计为重力式 T 型混凝土结构,包括水平底板和竖向开孔墙体。竖向开孔墙体是削减波浪的主要结构部件,根据河道水位变化特征,可在墙体上开设多排孔洞,以达到消波结构前后水体连通、船行波波浪削减的目的。

根据 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》,消波结构模型采用有机玻璃制作,模型厚度、高度比尺均为 5 : 1,断面长度为 1.0 m,立墙和底板壁厚均为 80 mm。如图 2 所示,根据原型设计和模型比尺,模型孔径为 30、40、50 mm,间距为 100 ~ 125 mm。其中,40 mm 和 50 mm 孔按 2 排 8 列布置,30 mm 孔按 2 排 10 列布置。

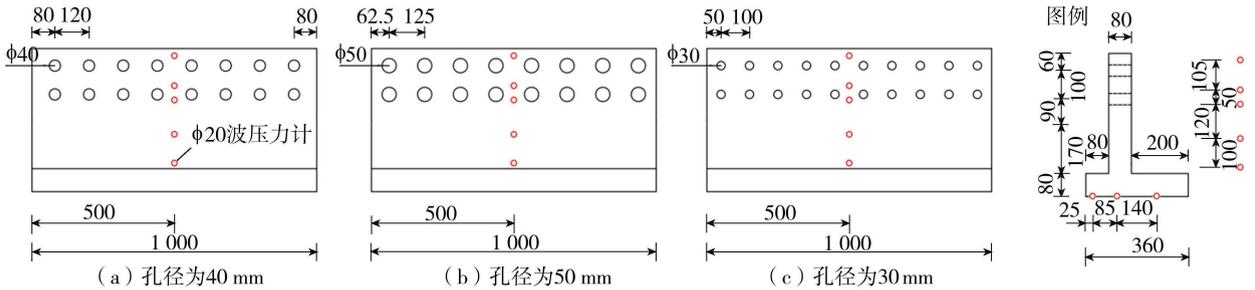


图 2 孔洞型消波结构试验模型简图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of test models of hole-type wave dissipation structures(unit: mm)

试验采用三点法^[18]测量消波结构前方的波浪反射,输入沿波浪传播方向不同间距的 3 个波高测点数据,得到入反射波的频域分离结果。反射系数和透射系数分别为

$$K_R = H_R/H \quad (4)$$

$$K_T = H_T/H \quad (5)$$

式中: K_R 为反射系数; H_R 为反射波高; K_T 为透射系数; H_T 为透射波高。

2 试验结果与分析

2.1 波浪流场

2.1.1 波浪与结构相互作用

从流场来看,不同工况下波浪通过消波结构的流场特征基本相近。以工况 5 为例,通过分析一个完整周

表 1 船行波波要素

Table 1 Ship traveling wave and wave elements

a	h_c/m	S/m	$v/(km/h)$	H_c/m	L_c/m	T_c/s
0.42	4	20	15	0.33	7.47	2.19
0.42	4	30	15	0.29	7.47	2.20

表 2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况	d/mm	水位位置	h/mm	t/s	H/mm
1	30	下孔中心	320	0.98	60
2	40	下孔切边	300	0.98	60
3/4/5/6/7	40	下孔中心	320	0.98	20/40/60/80/100
8	40	上下孔中心	370	0.98	60
9	40	上孔中心	440	0.98	60
10	50	下孔中心	320	0.98	60

注: d 为孔径, h 为水位, t 、 H 分别为规则波(入射波)的周期和波高。

期内不同时刻的流场情况,阐明孔洞型消波结构的消波特性及其与波浪的相互作用情况。

如图3所示, $t=0.980\text{ s}$ 为一个周期的开始,上一个人射波刚结束,下一个人射波已传播至消波结构前面,结构迎浪侧的反射波带动水流回流,流速分布不均,层流转变为湍流。当 $t=1.225\text{ s}$ 时,入射波波峰到达孔洞型消波结构的迎浪侧,由于结构大部分为实体结构,水流从孔洞通过,流线出现收缩,流速变快且方向发生改变,孔洞周围出现局部流体扰动,导致背浪侧形成湍流。当 $t=1.470\text{ s}$ 时,可以观察到入射波的爬高已经下降,迎浪侧的水流流向与波浪的前进方向相反,水体发生紊动。当 $t=1.715\text{ s}$ 时,入射波波谷到达结构迎浪侧,此时大部分波浪都被反射,消波结构两侧出现水面高差,结构背浪侧水体回流,水面持续上升,对消波结构的孔洞产生冲刷。



图3 一个波周期内不同时刻消波结构与波浪的相互作用(迎浪侧)

Fig. 3 Interaction between wave dissipation structures and waves at different times within a wave cycle (wave-approaching side)

可见,孔洞型消波结构主要是依靠其对波浪的反射和孔洞透射引起的水体紊动减小波浪透射,从而对消波结构后方水体形成掩护。此外,消波结构迎浪侧水体震荡和紊动强烈,可能引起消波结构底部岸坡泥沙起动流失,因此在实际工程中应做好冲刷防护处理,保证结构安全。

2.1.2 透射波与反射波传播特性

对于透射波和反射波,不同工况下的传播特性也基本相近,入射波处在波峰、波谷时最明显,以工况5为例,阐述入射波波峰和波谷时的透射和反射波浪传播情况。

由图4可见,孔洞型消波结构对波浪传播影响显著。在消波结构后方,透射波浪在紧靠消波结构后方紊动较强,在距消波结构1 m后波浪逐渐平稳,而后呈规则的波浪传播方式。在波要素方面,由于消波结构对波浪的反射以及波浪穿过孔洞的能量耗散等^[19],波浪在结构附近经历衰减,波高显著减小。这种波浪消减效应可有效减小航道船行波的能量传播,极大减小波浪对航道岸坡和水生植物的冲刷和影响。



图4 一个波周期内不同时刻透射波传播形态(背浪侧)

Fig. 4 Transmission modes of transmitted waves at different times within a wave cycle (wave-receding side)

与透射波浪不同,迎浪侧波浪呈现出更加剧烈的情况(图3)。这是由于孔洞型消波结构对波浪有较强的反射作用,使得部分波浪能量被反射回波浪传播方向^[20],导致入射波与反射波的相互作用和叠加,进而增强了消波结构前方波浪的振幅和波高。因此,若航道与消波结构距离较近时,通行船舶可能会受波浪反射的影响,遭受更大的横浪作用,影响船舶航行稳性。

2.2 波浪透射与反射分析

2.2.1 孔径的影响

图5为不同孔径的消波结构对波浪透射系数的影响。以工况1、5和10为例,透射系数随孔径的增大明显增大,孔径30 mm和40 mm时的透射系数相差较小,而孔径50 mm时的透射系数约为孔径40 mm时的

1.5 倍。这主要归因于消波结构的透空率的差异,其与孔径及布置方式密切相关。30 mm 孔径的消波结构单排布置 10 个孔,40 mm 和 50 mm 孔径结构单排布置 8 个孔。尽管孔径逐级相差 10 mm,但孔径 30 mm 和 40 mm 的消波结构的透空率相差较小,在 23.6%~26.2% 范围内,而 50 mm 孔消波结构的透空率较高,达 31.4%。此外,透射系数随着远离消波结构而逐渐减小,并在距离 1 m 后逐渐趋于平稳。在波浪透射通过消波结构后,后方水体产生较大紊动及震荡耗能,波能随远离消波结构而逐渐减小,透射波高在水体紊动区外逐渐趋于平稳。综合考虑水体交换效率和透射系数,建议消波结构的孔径尺寸可选为 40 mm,即结构原型孔洞大小为 200 mm。

由图 6 可知,相比于透射系数,反射系数随孔径和透空率的变化相对较小,30 mm 和 40 mm 孔径下的反射系数基本相当,50 mm 时略微减小。这可能由于孔径 50 mm 时,波浪经过孔洞时的摩擦耗能减小,导致波能耗散减小,从而反射波高降幅减小。

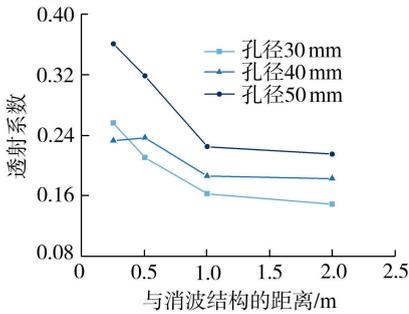


图 5 孔径对透射系数的影响

Fig. 5 Effect of pore sizes on the transmission coefficient

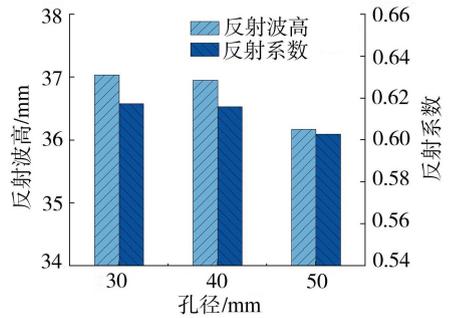


图 6 孔径对反射波的影响

Fig. 6 Effect of the pore size on the reflection wave

2.2.2 波高的影响

图 7 为不同入射波高时消波结构对波浪透射系数影响。以工况 3~7 为例,透射系数随入射波高的增大而减小,入射波高为 20 mm 和 40 mm 时透射系数峰值约为 0.29,而在入射波高 60~100 mm 时,透射系数降至 0.15~0.23。这是由于试验水位处在下孔中心,20 mm 和 40 mm 波高基本在孔径范围内,而 60 mm 以上波高均显著超出孔洞边界。图 8 为不同波高下波浪与消波结构相互作用形态。20~40 mm 波高时,尽管大部分波浪仍被孔洞间的实体墙阻挡反射,但穿过孔洞的波浪水体基本相同;在入射波高为 60~100 mm 时,入射波浪的波峰和波谷位置均显著高于孔洞上下边缘,透过孔洞的波浪逐渐减小,特别是入

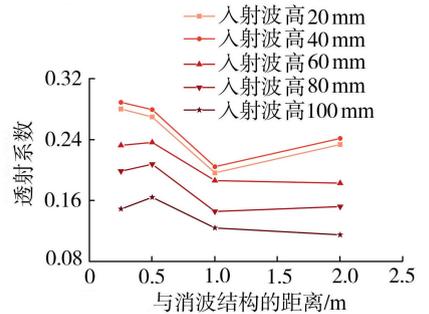


图 7 入射波高对透射系数的影响

Fig. 7 Effect of incident wave heights on the transmission coefficient

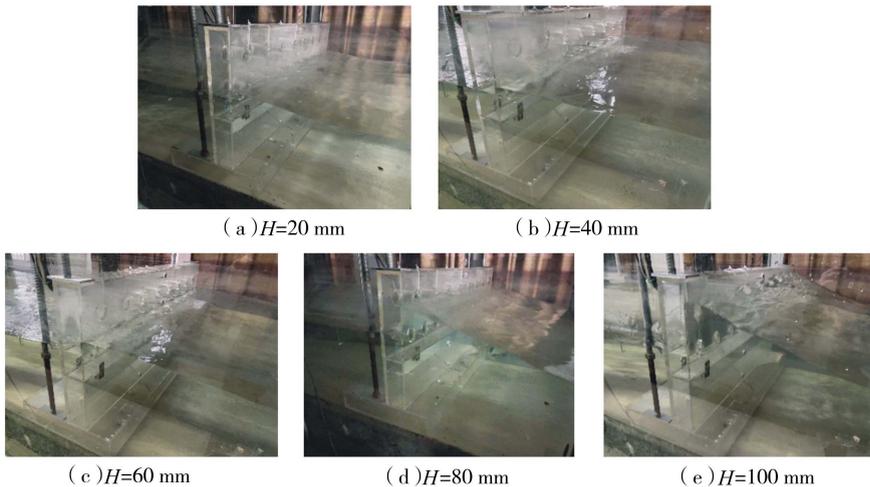


图 8 不同入射波高下波峰的消波形态 (迎浪侧)

Fig. 8 Wave elimination appearance at different incident wave heights (wave-approaching side)

射波高 100 mm 时,波幅及爬高范围远大于孔径,透射系数减小尤为显著。

由图 7 可知,透射系数在距离消波结构 0.5 m 范围内变化较小,而在 0.5~1.0 m 范围内急剧下降,1 m 后逐渐趋于稳定。入射波高 20 mm 和 40 mm 时,在距离消波结构 0.25 m 处,透射系数出现最大值。这是由于波浪刚好能完全通过孔洞,消波结构的消浪效果最弱。在入射波高为 60、80、100 mm 时,由于波浪被消波结构的实体部分所阻挡,在距离消波结构较近时,水流的严重紊动导致透射波还没有完全形成,所以在距离消波结构 0.5 m 处才达到最大值,进而随远离消波结构逐渐平稳。此外,尽管不同波高下的透射系数差异较大,但透射波高值均低于 18 mm,即实际透射波高小于 90 mm,远小于正常航速 15 km/h 时的 330 mm 船行波波高,可有效减小波浪对水生植物和岸坡的冲刷。

由图 9 可知,反射系数随着入射波高的增大而逐渐增大,波高每增加 20 mm 时,反射系数增大 1.75% 左右。入射波高的增加导致波浪与消波结构的实体部分接触面积增大,消波结构实体部分对波浪阻挡加大,波浪反射表现更强烈。

2.2.3 水位的影响

以工况 2、5、8 和 9 为例,由图 10 可知,在较低水位(300 mm 和 320 mm)时,透射系数呈现逐渐减小至平稳的趋势,而在较高水位(370 mm 和 440 mm)时,透射系数呈现先减小后增大至平稳的趋势。这可能是因

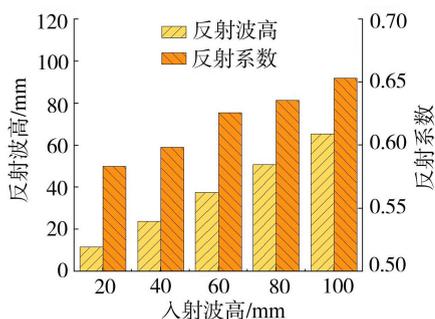


图 9 入射波高对反射波的影响

Fig. 9 Effect of incident wave heights on the reflection wave

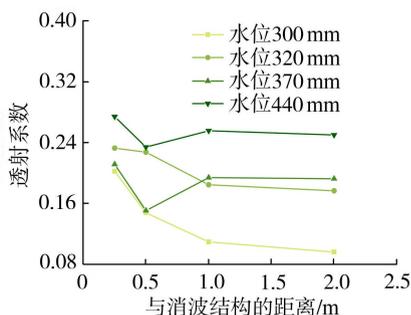


图 10 水位对透射系数的影响

Fig. 10 Effect of water level on the transmission coefficient

为:①波浪爬高从上孔透射或顶部越浪,导致消波结构后方水体紊动特征发生变化;②在较高水位条件下,下孔始终透水,在波浪力和消波结构前后水头差作用下,水体往复通过下孔,进一步影响背浪侧的水体紊动。

对于波浪透射,不同水位下的透射系数依次为 $K_{T,440\text{mm}} > K_{T,320\text{mm}} > K_{T,370\text{mm}} > K_{T,300\text{mm}}$ 。在理想状态下,入射波浪穿过孔洞的形态特征如图 11 所示。随着水位从 300 mm 依次增至 320、370、440 mm,在孔洞范围内理想透射系数依次为 0.5、0.67、0 和 0.67。但是波浪遭遇消波结构立墙后,波浪发生反射且与后续入射波叠加形成波高更大的墙前波浪,从而影响波浪透射系数。在 370 mm 水位时,下孔始终透水,且在波峰时上孔也可透浪,两者叠加则使其透射系数超过水位 300 mm 工况(仅能透射半个周期波浪),甚至在传播平稳后的透射

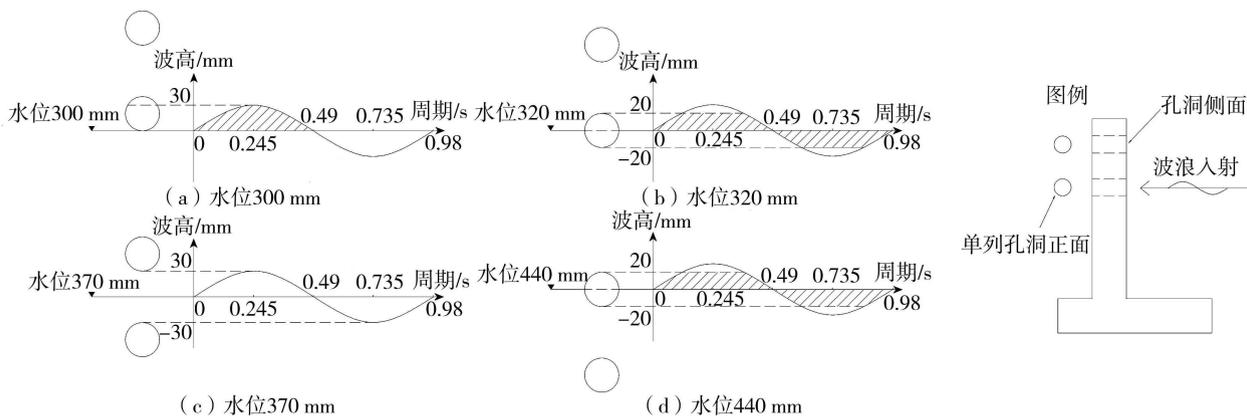


图 11 不同水位下孔洞周围理想的波浪透射形态

Fig. 11 Ideal wave transmission patterns around a hole at varying water levels

波高与水位 320 mm 时相当。此外,在水位 440 mm 时,尽管理论透射系数与水位 320 mm 相同,但下孔透水、顶部越浪,同时越高水位受底部摩擦影响越小,透射系数较水位 320 mm 工况时显著增大。

由图 12 可知,反射系数变化规律为 $K_{R_{320\text{mm}}} < K_{R_{440\text{mm}}} < K_{R_{370\text{mm}}} < K_{R_{300\text{mm}}}$ 。孔洞型消波结构随水位的变化比较复杂,涉及了波浪通过程度以及波浪浅水变形性质^[21]。由于消波结构实体部分的作用,墙前反射强烈,有助于对入射波浪的消减;但在反射系数过大的情况下,会增强墙前波浪,使透射系数变大。

2.3 波浪力分析

2.3.1 孔径的影响

波浪力随水位的变化规律与直立墙前波浪力一致,波压力峰值约在水面附近,波吸力峰值在水面下一定深度。

由图 13(a)可知,波压力随孔径的增大而减小,孔径 30 mm 消波结构的最大波压力约为 40 mm 和 50 mm 孔径下的 1.5 倍。

这主要是由于孔径较小时,波峰作用下波浪透射较小,结构受入射波作用面积大,从而导致波压力较高。此外,与实体墙波压力理论计算值相比,开孔消波结构波压力峰值显著较小,特别是 40 mm 和 50 mm 孔径时降幅达 50%。波压力峰值一般发生于波峰作用时,该状态下的孔洞透水会有效削弱波压力作用,孔径 30 mm 时透空率为 23.6%,低于 40 mm 和 50 mm 孔径下的 26.2% 和 31.4%,透空率越大则波压力削减越显著。

由图 13(b)可知,不同孔径下消波结构所受的波吸力相近,约比理论计算值低 0.1 kPa,降幅约为 18%,显著低于波峰作用下的波压力降幅。波吸力峰值一般发生于波谷作用时,该状态下水面低于孔洞下边缘,全部作用于实体墙体部分,类似于未开孔直立墙体,但由于波谷水面低于消波结构后方水面,水体从孔洞反向流入消波结构前方,从而可能部分抵消波吸力作用。

由图 13(c)可知,不同孔径消波结构底板的浮托力随距底板迎浪边的距离增大而线性下降,这与实体底板的浮托力分布规律相同。

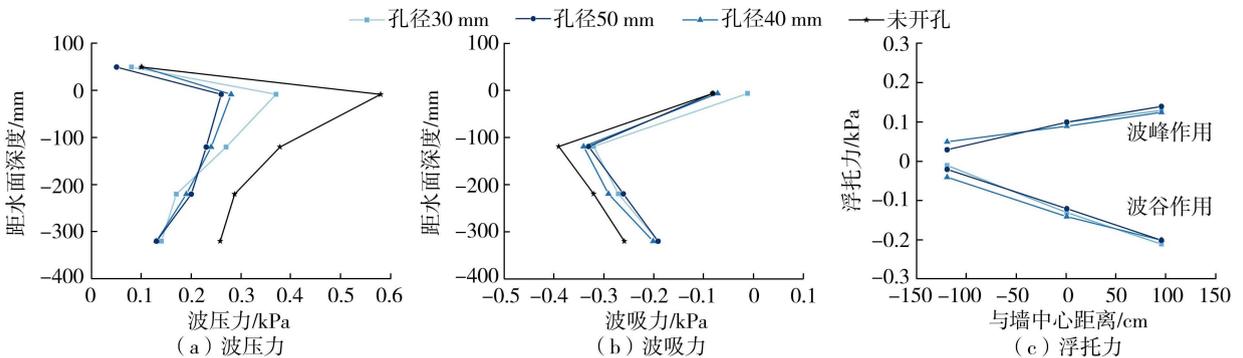


图 13 不同孔径对波浪力分布的影响

Fig. 13 Effect of different pore sizes on the wave force distribution

2.3.2 波高的影响

由图 14(a)可知,随着入射波高增大,波压力峰值先快速增大而后基本不变。波压力由波浪动能转化而来^[22],波浪动能和波高的平方成正比,故波高越大时波浪压力也越大。但在 80 mm 以上波高时,波峰作用引起水面爬高,导致部分波浪从消波结构上排孔透过(图 8),故波压力增幅减小;而在波高 100 mm 时,上排孔波浪透射进一步增加,还伴随有一定程度的顶部越浪,导致该波高下的波压力与 80 mm 波高时基本相当。

由图 14(b)可知,波吸力峰值随波高增加也呈先快速增大后基本不变的变化规律。波高 20 mm 时,部分波浪仍可穿过孔洞,波吸力峰值最下;波高在 20~80 mm 时,波谷时波浪都作用于实体墙壁,波吸力逐级增大;波高 100 mm 时,波峰时的上排孔透波和顶部越浪加剧背浪侧水体紊动,导致波谷时背浪侧水体通过孔洞的回流速度增大,波吸力抵消增大,从而该波高下的波吸力与 80 mm 波高时相近。

由图 14(c)可知,与波压力和波吸力类似,浮托力随波高增大基本呈相同的变化规律。此外,相比于孔径影响,波高对浮托力的影响更大。

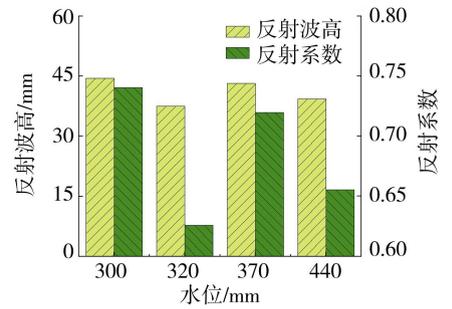


图 12 水位对反射波的影响

Fig. 12 Effect of water level on the reflection wave

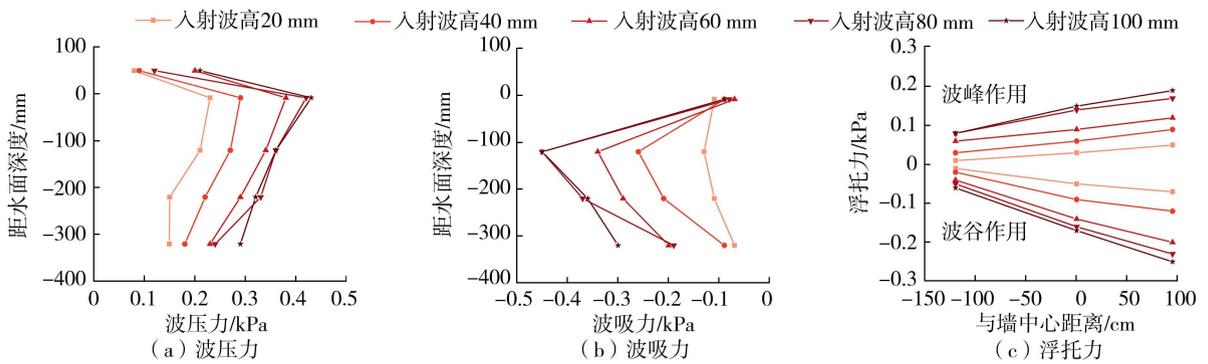


图14 入射波高对波浪力分布的影响

Fig. 14 Effect of incident wave height on the wave force distribution

3 结论

a. 孔洞型消波结构主要通过孔洞内反复双向水流造成的局部流体扰动,使背浪侧形成湍流,并利用结构对波浪的反射和迎浪侧的紊动削减船行波。

b. 透射波高在距消波结构 0.5 m 范围内相对较大,在距 1 m 后波高大幅减小并逐渐平稳。透射系数随孔径减小和波高增大而逐渐减小,波高从 20 mm 增至 100 mm,透射系数降幅达 50%。考虑水体交换和消波效率,孔径 40 mm、孔距 120 mm 下消波结构的消浪效果较佳。

c. 波浪反射系数随孔径增大而基本不变,约为 0.60~0.62,同时随波高增大而小幅增大,从 20 mm 波高下的 0.58 增至 100 mm 波高下的 0.65。

d. 水位对波浪透射、反射的影响与水位与孔洞相对位置、孔洞透空率及波高与孔径之比相关,透波孔洞应布置于设计高低水位之间。

e. 波压力随着孔径增大逐渐减小,而不同孔径下的波吸力基本相近。相比于未开孔直立墙,开孔率 23.6%~31.4%可使消波结构的波压力峰值减小 35%~50%,波吸力峰值下降约 18%。波压力和波吸力随波高增大逐渐增大,但增幅逐渐越小,波高在 80~100 mm 时几乎不变。

参考文献:

- [1] 姚仕明,胡呈维,渠庚. 三峡水库下游河道演变与生态治理研究进展[J]. 长江科学院院报,2021,38(10):16-26. (YAO Shiming, HU Chengwei, QU Geng. Research advances in river evolution and ecological regulation in the downstream of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(10): 16-26. (in Chinese))
- [2] 邹红梅,杨成刚,袁晶,等. 近 10 年长江中游重点险工段近岸河床冲淤演变特点分析[J]. 长江科学院院报,2024,41(6): 187-192. (ZOU Hongmei, YANG Chenggang, YUAN Jing, et al. Evolution characteristics of near-bank riverbed erosion and deposition in vulnerable sections of middle Yangtze River over the past decade[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(6): 187-192. (in Chinese))
- [3] 李凌云,野博超,刘心愿. 河道生态护坡技术研究现状[J]. 水运工程,2022(7):205-210. (LI Lingyun, YE Bochao, LIU Xinyuan. Research status of river ecological slope protection technology[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(7): 205-210. (in Chinese))
- [4] 潘保柱,刘心愿. 长江流域水生态问题与修复述评[J]. 长江科学院院报,2021,38(3):1-8. (PAN Baozhu, LIU Xinyuan. A review of water ecology problems and restoration in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(3): 1-8. (in Chinese))
- [5] 韩伟,王致维,胡淼,等. 安庆长江江豚保护区江段河漫滩生境演变[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(增刊1):79-84. (HAN Yi, WANG Zhiwei, HU Miao, et al. Floodplain changes in the river section of the Anqing Yangtze finless porpoise provincial nature reserve[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(Sup1): 79-84. (in Chinese))
- [6] EVETTE A, LABONNE S, REY F, et al. History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in Western Europe[J]. Environmental Management, 2009, 43(6): 972-984.
- [7] 刘泽,陈丽,何矾,等. 边坡筋锚三维网柔性防护结构的稳定性分析[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):65-70. (LIU Ze, CHEN Li, HE Fan, et al. Stability analysis of flexible protection structure for slope reinforced anchor 3D-geomat[J]. Advances

- in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 65-70. (in Chinese))
- [8] 戴永琪,李宏恩,刘晓青. 里运河堤防险工险段典型失效模式分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(2): 104-110. (DAI Yongqi, LI Hongen, LIU Xiaoqing. Analysis of failure modes for typical dangerous sections of Li Canal levee[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(2): 104-110. (in Chinese))
- [9] 谢亚军,顾浩,苏宇宸,等. 考虑植被力学-水力作用的洪泽湖堤防加固效果分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 61-68. (XIE Yajun, GU Hao, SU Yuchen, et al. Reinforcement effects of Hongze Lake embankment considering hydro-mechanical effects of vegetation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 61-68. (in Chinese))
- [10] THUNNISSEN N W, COLLAS F P L, HENDRIKS A J, et al. Effect of shipping induced changes in flow velocity on aquatic macrophytes in intensively navigated rivers[J]. Aquatic Botany, 2019, 159: 103145.
- [11] 李果. 长江人工水道与万吨级船舶相关性试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [12] DE ROO S, TROCH P. Field monitoring of ship wave action on environmentally friendly bank protection in a confined waterway [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2013, 139(6): 527-534.
- [13] 潘天娇,冯曦,倪兴也,等. 可透浪斜坡式防波堤透浪系数对入射波要素的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 45-53. (PAN Tianjiao, FENG Xi, NI Xingye, et al. Study on the response of wave transmission coefficient to various incident wave elements of a permeable sloping breakwater[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 45-53. (in Chinese))
- [14] 程永舟,杨小桦,黄筱云,等. 新型透空格栅板式防波堤消浪性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 30-34. (CHENG Yongzhou, YANG Xiaohua, HUANG Xiaoyun, et al. Experimental study on wave-dissipating performance of a new grille plate-type open breakwater[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 30-34. (in Chinese))
- [15] 杜沛霖,孙昭晨,梁书秀. 新型直立透空堤消浪性能数值研究[J]. 海洋工程, 2021, 39(1): 12-20. (DU Peilin, SUN Zhaochen, LIANG Shuxiu. Numerical study on wave dissipation performance of new type vertical permeable breakwater[J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(1): 12-20. (in Chinese))
- [16] 桂劲松,张可新,夏曦. 透空式开孔防波堤水动力特性的数值研究[J]. 水动力学研究与进展, 2020, 35(5): 584-591. (GUI Jinsong, ZHANG Kexin, XIA Xi. Numerical study on hydrodynamic characteristics of perforated Pile-supported vertical wall breakwater[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2020, 35(5): 584-591. (in Chinese))
- [17] 于定勇,高志洋,窦志豪,等. 一种反弧倾斜板透空防波堤结构消浪性能试验研究[J]. 海岸工程, 2023, 42(2): 111-120. (YU Dingyong, GAO Zhiyang, DOU Zhihao, et al. Experimental study on the wave dissipation performance of a permeable breakwater structure with reverse-arc inclined plate[J]. Coastal Engineering, 2023, 42(2): 111-120. (in Chinese))
- [18] MANSARD E P D, FUNKE E R. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method [C]// Proceedings of the Conference Information 17th International Conference on Coastal Engineering. Sydney: ASCE, 1980: 154-172.
- [19] ELSHEIKH A K, MOSTAFA Y E, MOHAMED M M. A comparative study between some different types of permeable breakwaters according to wave energy dissipation[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13(4): 101646.
- [20] ZHU Shutang, CHWANG A T. Analytical study of porous wave absorber[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(4): 326-332.
- [21] 张继生,钱方舒,童林龙,等. 细砾质斜坡海床上波浪的传播特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 150-157. (ZHANG Jisheng, QIAN Fangshu, TONG Linlong, et al. Experimental study on wave propagation over fine gravel slope seabed[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 150-157. (in Chinese))
- [22] GHASEMI A, AMIRABADI R, KAMALIAN U R, et al. Numerical modeling investigation of perforated geometry of caisson breakwater under irregular waves by considering porous media[J]. Ocean Engineering, 2023, 269: 113558.

(收稿日期: 2024-07-07 编辑: 刘晓艳)