

文章编号:1672-9331(2021)03-0024-08

# 波浪作用下空心块体堤身结构稳定性和 消浪特性试验研究

常留红<sup>1,2</sup>, 汤 薇<sup>1,2</sup>, 肖 政<sup>1,2</sup>, 王瀚锐<sup>1,2</sup>, 孙文硕<sup>1,2</sup>, 覃瓶山<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治  
湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为了研究波浪作用对空心块体稳定性与消浪效果的影响, 依托长江口南槽航道治理一期工程, 开展了系列水槽试验, 分析了不同波浪要素(波高、周期)、水深和结构组合方式对空心块体堤身结构的稳定性、波浪力及结构前后波高的影响。结果表明: 在淹没状态下, 空心块体主要受动水压力的作用, 且试验水深越浅, 空心块体所受到的最大波浪力越大, 消浪效果越好。结构组合方式对空心块体的稳定性和消浪效果的影响不明显。不同位置的空心块体所受到的波浪力的大小不同, 迎浪侧方块所受到的波浪力最大, 背浪侧方块次之, 中部方块最小。但空心块体总体受力较小, 这有利于堤身结构的局部稳定。

**关键词:** 空心块体; 长江口; 水槽试验; 消浪效果; 波浪力

**中图分类号:** TV139.2

**文献标志码:** A

## Experimental study on structural stability and wave suppression characteristics of hollow block dike under wave action

CHANG Liu-hong<sup>1,2</sup>, TANG Wei<sup>1,2</sup>, XIAO Zheng<sup>1,2</sup>,  
WANG Han-rui<sup>1,2</sup>, SUN Wen-shuo<sup>1,2</sup>, QIN Ping-shan<sup>1,2</sup>

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences & Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to study the influence of wave action on the stability and wave suppression effect of hollow block dike, a series of flume experiments were carried out on the basis of the first phase project of channel regulation in the south channel of the Yangtze River estuary. The effects of different wave elements (wave height, period), water depths and structure combination modes on the structure stability, wave force and wave height before and after the structure of the hollow block dike were analyzed. The results show that in the submerged state, the hollow block dike is mainly affected by the hydrodynamic pressure, and the shallower the test water depth, the greater the maximum wave force on the hollow block, and the better the wave suppression effect. The structure combination mode has little effect on the stability and wave suppression effect of the hollow block dike. The

收稿日期: 2021-03-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402100); 长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2019SS16)

通讯作者: 常留红(1979—), 女, 副教授, 主要从事水工结构及其水动力特性方面的研究。E-mail: claire886@163.com

hollow blocks at different locations are subjected to different wave forces. The blocks on the side facing the wave receive the greatest wave force, the blocks on the back side of the wave receive medium wave force, and the blocks in the middle receive the least wave force. However, the wave force acting on the hollow blocks is small generally, which is beneficial to the local stability of the dike structure.

**Key words:** hollow block dike; the Yangtze River estuary; flume experiment; wave suppression effect; wave force

长江口是连接河流与海洋的河口,并呈“一主两辅一支”的布局。两辅之一的南槽位于九段沙以南,是船舶进出长江口的重要航道,同时靠近九段沙生物多样性维护红线<sup>[1]</sup>。南槽受潮流、波浪、来沙等众多因素共同影响,河势极不稳定。近年来,为稳定南槽入口段的河势、遏制江亚南沙甬沟的发展,有关部门兴建了大量航道治理工程<sup>[2]</sup>。但传统整治工程的堤身多为不透水结构,对水流的横向发展产生了阻碍,同时引起河流侧向非连续化,这在一定程度上对生态环境造成了影响<sup>[3]</sup>。为降低整治工程对九段沙生物多样性的影响,结合生态块体与鱼礁理念提出了空心块体堤身结构。空心块体为四周开孔、两侧贯通的堤身结构。通过不同组合方式将空心块体组合在一起,形成连通空间,可为水生生物提供生存环境,减少整治工程带来的不利影响。

近年来,国内外学者对不同形式的透水堤身结构开展了大量研究。DUAN<sup>[4]</sup>通过水槽试验研究了透水丁坝周围的三维紊流结构。蔡喆伟等<sup>[5]</sup>基于 Fluent 数值模拟对不同流速、水深下的新型结构齿形丁坝的水流力进行了研究,发现水流力随流速的增大而增大,随水深的增大而减小。常留红等<sup>[6]</sup>对不同孔隙率的空心梯形块透水丁坝进行水槽试验,研究了孔隙率、水深与流速对其透水特性的影响。张凯等<sup>[7]</sup>对水力插板透水丁坝群进行了动床模型试验,发现透水丁坝防护堤岸和减缓流速的效果十分显著,且坝头局部冲刷较小。蒋傲等<sup>[8]</sup>通过波浪水槽试验研究了不同波浪要素下植物防护带对边界层流速的影响。王小明等<sup>[9]</sup>基于 Open FOAM 开源程序包,研究了透空率对丁坝周围水流特性的影响规律。王文森等<sup>[10]</sup>基于模型试验与数值模拟,对梯形透水潜坝附近的水面线与透水率开展了研究,发现在透水潜坝后方

水面出现逆坡现象,壅水与跌水高度随透水率的增大而减小。周银军等<sup>[11]</sup>通过试验探讨了桩式透水丁坝附近的水动力特性,并提出了坝后回流区长度经验公式。马爱兴等<sup>[12]</sup>对不同透水框架的水动力特性开展了试验,研究了透水框架的防冲机理及周围流场结构的变化。常留红等<sup>[13]</sup>对一种新型岸滩防护结构四棱台透水框架进行了水槽试验,发现透水框架能显著降低框架周围的水流流速,且近底水流流速与紊动强度随透水框架架空率的增大而减小。况宏伟等<sup>[14]</sup>通过水槽试验与数值模拟对鱼嘴 U 型坝周围的水动力进行了研究,发现鱼嘴 U 型坝能有效改善坝体周围水流流速的多样性,从而能间接改善河流的物种多样性,因此具有一定的生态效益。上述研究探讨了水流与堤身结构相互作用下的水动力特性,而对于实体堤身结构主要研究了波浪作用下结构的稳定性与消浪效果。黄海龙等<sup>[15]</sup>基于模型试验,对长周期波浪作用下不同顶宽的抛砂潜堤的稳定性进行了研究。邹红霞等<sup>[16]</sup>通过水槽试验研究了潜堤对不规则波波高的影响,发现波高随堤顶相对水深与潜堤相对宽度的增大而减小。潘冬冬等<sup>[17]</sup>通过数值模拟,研究了波浪作用下各因素对潜堤透浪系数的影响,并得出了透浪系数的经验公式。这些工作为长江口区域受风浪与潮流共同作用下的堤身结构的研究提供了借鉴方法,但目前对透水堤身结构的消浪效果与波浪力的研究还不多。

本研究分析了在不同波浪作用下空心块体的消浪效果与不同位置空心块体波浪力的分布规律。研究目的是确保空心块体结构发挥整治功能,并形成连通空间为河段内生物提供栖息场所,减少整治工程对局部水生生境的影响。本研究对实现航道治理目标具有重要的工程价值和生态效益。

## 1 模型试验设计

### 1.1 结构原型

空心块体结构是在长江口南槽航道治理一期工程中从生境需求等方面考虑,结合国内外人工

鱼礁等生态块体结构的相关实践,提出的一种新型聚氨酯碎石空心块体结构,如图1所示。结构尺寸为 $1.6\text{ m}\times 1.6\text{ m}\times 1.6\text{ m}$ ,重约 $3.7\text{ t}$ 。正面开设2孔,孔的直径为 $0.35\text{ m}$ ,侧面开设1孔,孔的直径为 $0.5\text{ m}$ 。空心块体的正视图见图2。

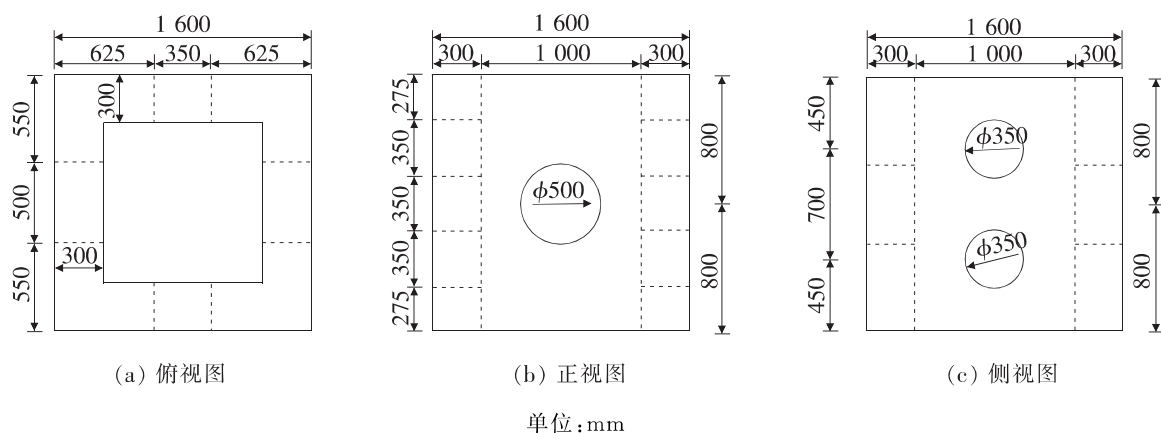


图1 空心块体结构三视图

Fig. 1 Three views of hollow block dike



图2 空心块体正视图

Fig. 2 Elevation view of hollow block dike

### 1.2 模型设计

试验采用局部正态模型设计方法,在此基础上开展模型设计和构件制作。模型试验按照几何相似、重力相似准则设计,模型几何比尺为 $1:20$ ,波高、波长、水深比尺为 $1:20$ 。比尺的确定如下式所示:

$$\begin{cases} \lambda_l = \frac{l_m}{l_p} = 20 \\ \lambda_t = \lambda^{\frac{1}{2}} = 4.5 \\ \lambda_u = \lambda^{\frac{1}{2}} = 4.5 \\ \lambda_F = \lambda^3 = 8\,000 \\ \lambda_G = \lambda_F = 8\,000 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\lambda_l$ 为模型长度比尺; $l_m$ 为模型长度; $l_p$ 为原型长度; $\lambda_t$ 为时间比尺; $\lambda_u$ 为速度比尺; $\lambda_F$ 为力比尺; $\lambda_G$ 为重力比尺,与力比尺的数值相同。根据几何相似准则,空心块体模型的尺寸为 $80\text{ mm}\times$

$80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ ,材料为 $10\text{ mm}$ 硬质塑料板与 $5\text{ mm}$ 有机玻璃板做成的复合板材,其综合密度为 $1.61\text{ g/cm}^3$ ,重约 $467.13\text{ g}$ 。模型结构如图3所示。

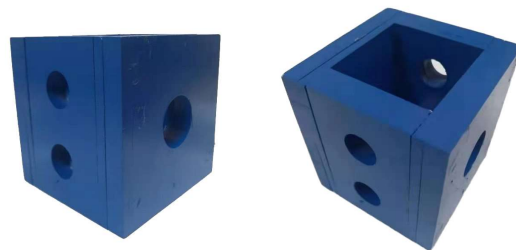


图3 模型结构图

Fig. 3 Model structure diagram

### 1.3 试验设备及布置

在长沙理工大学水利实验中心的波流水槽中进行水槽模型试验。水槽尺寸为 $50\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。在此水槽中采用推板式造波机可产生最大波高 $0.5\text{ m}$ 、周期 $0.5\sim 5.0\text{ s}$ 的单向规则波和不规则波。造波机的主控系统是由大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室研发的wave make系统。在水槽后端设孔隙消浪装置以消减波浪反射。

试验布置如图4所示,为防止模型受二次反射波浪的影响,将模型放置在水槽中后部。试验共设置5支波高仪,测量波高的沿程变化。其中,在模型前 $3\text{ m}$ 处布设1支,在 $3.3\text{ m}$ 处布设1支,在模型上方布设2支,在模型后方 $1\text{ m}$ 处布设1

支。同时,采用扬州科动 KD460100 测力天平对作用在堤身结构上的压力进行测量。

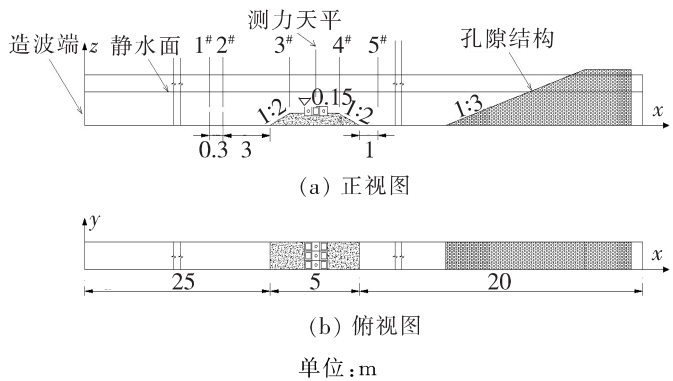


图 4 试验布置图  
Fig. 4 Experiment layout

空心块体四周开孔、两侧贯通的结构形式,具有施工方便、经济实用等优点,同时可通过不同组合方式形成不同连通空间。堤身布置方式如图 5 所示,块体下方的护脚块石高 10 cm,堤顶高 15 cm。在组合方式一中,两侧块体竖放(上下贯通),中间平放,这样沿堤轴线方向就形成了相对独立的空

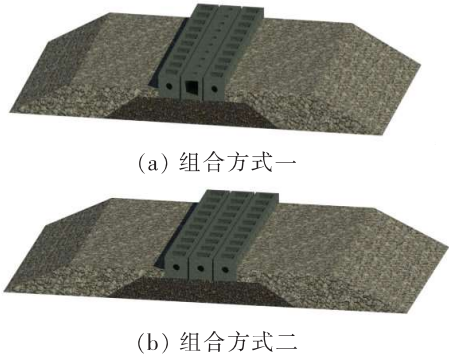


图 5 堤身布置方式  
Fig. 5 Dike body layout

间,可为水生生物提供庇护场所;在组合方式二中,块体均竖放,有利于泥沙沉淀,可为水生生物提供有机质。

1.4 试验方法

本次试验是为了研究不同动力条件下空心块体的稳定性与消浪效果,并主要考虑破坏性波浪与水位的组合。水位条件包括极端高水位与设计高水位,波浪重现期为 50 年一遇。波浪作用下的试验波要素如表 1 所示,试验工况如表 2 所示。

表 1 试验波要素  
Table 1 Test wave elements

| 工况           | 原型    |                 |      |       | 模型   |                 |      |      |
|--------------|-------|-----------------|------|-------|------|-----------------|------|------|
|              | 水深/m  | 波高 $H_{4\%}$ /m | 周期/s | 波长/m  | 水深/m | 波高 $H_{4\%}$ /m | 周期/s | 波长/m |
| 50 年一遇+极端高水位 | 12.00 | 2.38            | 7.86 | 74.00 | 0.60 | 0.12            | 1.76 | 3.70 |
| 50 年一遇+设计高水位 | 10.40 | 2.00            | 7.65 | 67.90 | 0.50 | 0.10            | 1.71 | 3.40 |

表 2 试验工况  
Table 2 Test conditions

| 组次             | 水深/<br>m | 波高<br>$H_{4\%}$ /m | 周期/<br>s | 波长/<br>m | 块体组合<br>方式 |
|----------------|----------|--------------------|----------|----------|------------|
| B <sub>1</sub> | 0.60     | 0.12               | 1.76     | 3.70     | 一          |
| B <sub>2</sub> | 0.50     | 0.10               | 1.71     | 3.40     | 一          |
| B <sub>3</sub> | 0.60     | 0.12               | 1.76     | 3.70     | 二          |
| B <sub>4</sub> | 0.50     | 0.10               | 1.71     | 3.40     | 二          |

为探讨块体组合方式和水深对空心块体结构的稳定性和消浪效果的影响,分别考虑两种水位和两种组合方式。试验时先放置物理模型,随后对造波机预热,数据的采样间隔为 0.02 s。在正式试验前先进行多次预备试验,并将实测波浪的波高、周期与理论值之间的相对误差控制在±5%以内。图 6 所示的水面线验证结果均符合试验要求。

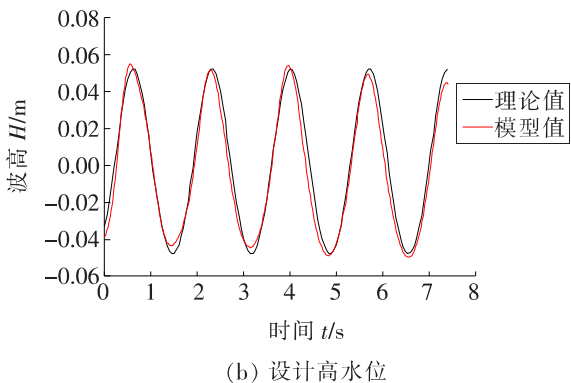
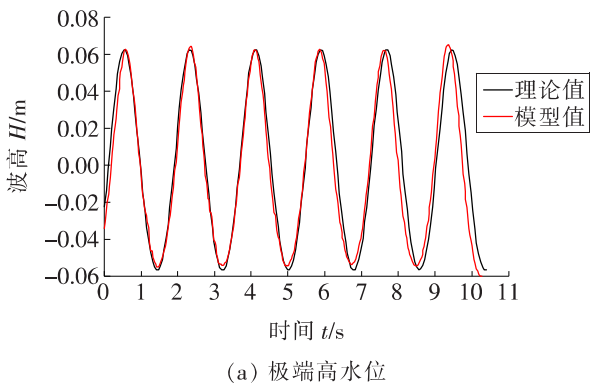


图 6 水面线验证  
Fig. 6 Verification of water surface line

稳定性试验需要观察空心块是否发生滑移与倾斜。在结构稳定的基础上,进行波浪力试验。采用测力天平测量作用在空心块体不同位置上的波浪力。消浪试验需要观察不同工况下模型前后水头和波高的变化。

## 2 稳定性与消浪效果分析

### 2.1 稳定性分析

在极端高水位和设计高水位两种工况下,空心块体均保持稳定,护脚块石均未发生移动。图7给出了两种组合方式下迎浪侧方块、中部方块与

背浪侧方块所受到的水平波浪力随时间的变化过程(图中的水平波浪力为换算后的原型值)。由图7可知,在组次  $B_1$  中,结构所受到的最大水平波浪力为 4.64 kN,最大浮托力为 0.31 kN,约为水平波浪力的 1/15。由此可见,波浪力主要体现在水平方向,而浮托力几乎可以忽略不计。空心块体所受到的波浪力在试验开始 15 s 后基本稳定,并呈周期性变化,其周期与波浪周期大体一致。波浪在传播过程中与不同位置的空心块体发生相互作用,迎浪侧方块与背浪侧方块所受到的水平波浪力变化幅度较大,而中部方块所受到的变化幅度较小。

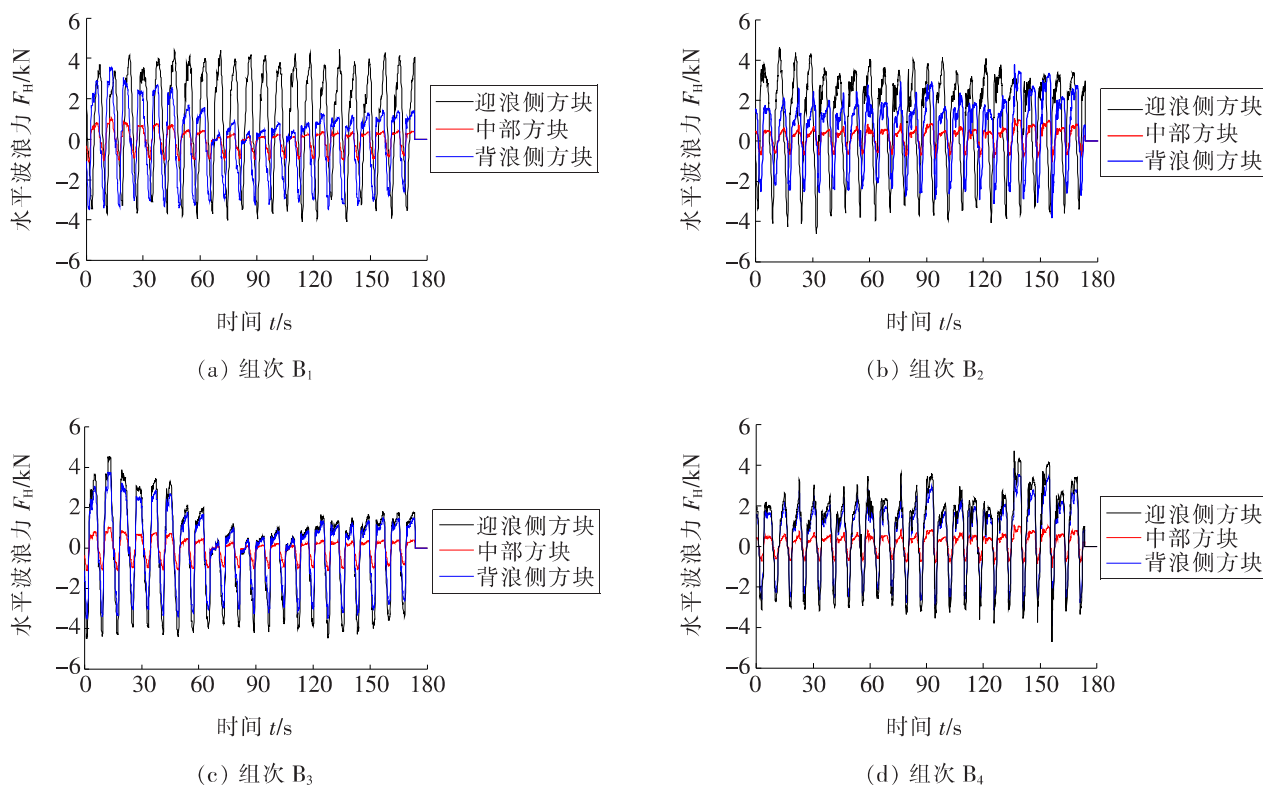


图7 水平波浪力随时间的变化过程

Fig. 7 Process of horizontal wave force changing with time

图8为不同组次下空心块体所受到的最大波浪力的试验结果(图中的水平波浪力为换算后的原型值)。由图8可知,在不同组次下,不同位置的空心块体所受到的波浪力大小不同,迎浪侧方块所受到的最大,背浪侧方块次之,中部方块最小。波浪作用在结构上的冲击力主要发生在迎浪侧,中部方块受到两侧方块的遮挡,波浪力传递给了两侧方块,因此所受到的波浪力最小。组次  $B_1$  与  $B_2$  具有相同的组合方式,其极端高水位的最大波浪力均小于设计高水位的波浪力,说明在水深

较大时,波浪对空心块体的作用较小。当水深不变时,组次  $B_3$  迎浪侧方块所受到的最大波浪力比组次  $B_1$  的大 4%,背浪侧方块所受到的最大波浪力比组次  $B_1$  的大 5.9%。组次  $B_4$  迎浪侧方块所受到的最大波浪力比组次  $B_2$  的大 2%,背浪侧方块所受到的最大波浪力比组次  $B_2$  的大 2.5%。由此可见,组合方式对空心块体所受到的波浪力的大小影响不明显,不同位置空心块体的总波浪力均较小,这有利于堤身结构的总体稳定与局部稳定。

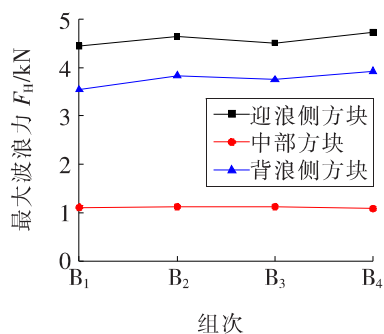


图 8 最大波浪力的试验结果

Fig. 8 Test results of maximal wave force

## 2.2 消浪效果分析

图 9 为不同工况下模型前后的波高历时曲线

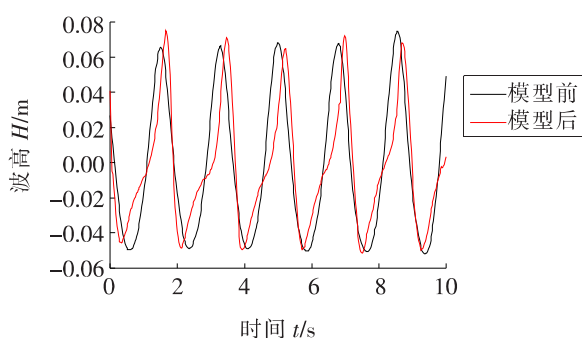
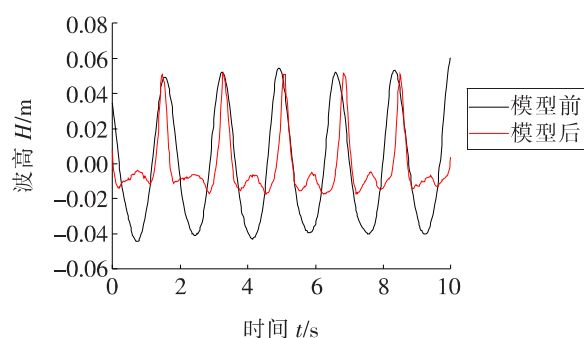
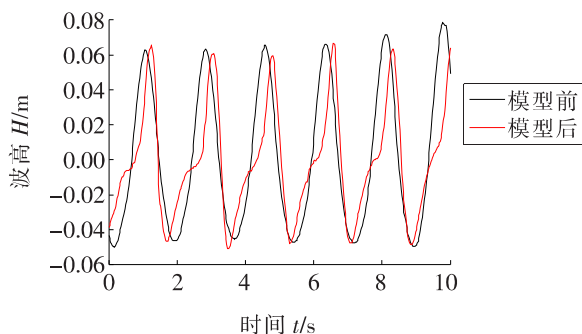
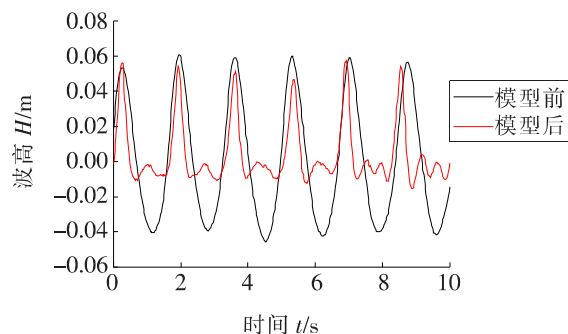
(a) 极端高水位下组合方式一(组次 B<sub>1</sub>)(b) 设计高水位下组合方式一(组次 B<sub>2</sub>)(c) 极端高水位下组合方式二(组次 B<sub>3</sub>)(d) 设计高水位下组合方式二(组次 B<sub>4</sub>)

图 9 波高历时曲线

Fig. 9 Wave height duration curve

为了更好地体现空心块体的消浪效果,通常用模型后波高  $H_1$  与试验入射波高  $H_0$  之比来定义透射系数  $K_t$ 。透射系数越小,表示结构的消浪效果越好。采用入射波高  $H$  与堤顶水深  $d$  的比值表示相对淹没深度( $H/d$ )。表 3 显示了空心块体波浪透射系数的计算结果(表中的数据均为模型值)。分析表 3 可知,组次 B<sub>1</sub> 与 B<sub>3</sub> 具有相同的相对淹没深度,但块体组合方式有所不同,波高的透射系数分别为 0.91 与 0.90,说明在相对淹没深度较小时波浪对空心块体的作用较小;组次 B<sub>2</sub> 与 B<sub>4</sub> 的波浪透射系数分别为 0.42 与 0.40,可知在淹

(图中的波高为模型值)。由图 9 可知,波浪通过空心块体后,波能发生损耗,波高略微减小。由组次 B<sub>1</sub> 和 B<sub>3</sub> 可知,在极端高水位下,模型后的波形不对称,但模型前后波高的变化较小,说明空心块体的消浪效果不明显。由组次 B<sub>2</sub> 和 B<sub>4</sub> 可知,在设计高水位时,波浪与空心块体相互作用强烈,模型前后波形变化明显,模型后波峰更加尖锐,波谷逐渐平坦,说明空心块体的消浪效果明显。同时,可以看出随着水深逐渐变浅,空心块体使波浪发生变形,波峰逐渐变尖,波谷明显变平坦,波形表现出不对称性,且波浪在模型后发生破碎。

表 3 空心块体波浪透射系数计算结果

Table 3 Calculation results of wave transmission coefficient of hollow block

| 组次             | 试验水深/<br>m | 堤顶水深/<br>$d/m$ | 入射波高/<br>$H_0/m$ | 相对淹没深度<br>$H_0/d$ | 模型后波高/<br>$H_1/m$ | 透射系数<br>$K_t$ |
|----------------|------------|----------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| B <sub>1</sub> | 0.6        | 0.45           | 0.12             | 0.26              | 0.11              | 0.91          |
| B <sub>2</sub> | 0.5        | 0.35           | 0.10             | 0.29              | 0.04              | 0.42          |
| B <sub>3</sub> | 0.6        | 0.45           | 0.12             | 0.26              | 0.11              | 0.90          |
| B <sub>4</sub> | 0.5        | 0.35           | 0.10             | 0.29              | 0.04              | 0.40          |

没状态下,相对淹没深度越大,结构对波浪的破碎作用越大,空心块体的消浪效果越好,说明空心块体的组合方式对消浪效果的影响较小。

### 3 结论

通过水槽试验对空心块体的稳定性、消浪效果及波浪力进行分析,得出以下结论:

1) 空心块体在破坏性波浪与水位组合作用下均保持稳定,未产生滑移,其所受到的波浪力呈周期性变化,周期与波浪周期大体一致。

2) 不同位置的空心块体所受到的波浪力大小不同,迎浪侧方块所受到的波浪力最大,背浪侧方块次之,中部方块最小。且随着试验水深的减小,空心块体所受到的最大波浪力逐渐增大。空心块体总体受力较小,这有利于堤身结构的局部稳定。

3) 相对淹没深度对波浪传播的影响较大,组合方式对波浪传播的影响较小。相对淹没深度越大,空心块体的消浪效果越好,组合方式对空心块体所受到的波浪力与消浪效果的影响较小。

4) 空心块体削弱了波浪对堤岸的侵蚀作用,这有利于维护长江河口的河势稳定,同时可为小型鱼类提供栖息场所。

### 〔参考文献〕

- [1] 韩玉芳,窦希萍. 长江口综合治理历程及思考[J]. 海洋工程, 2020, 38(4): 11-18.  
HAN Yu-fang, DOU Xi-ping. The history and thinking of the comprehensive treatment of the Yangtze River estuary[J]. Ocean Engineering, 2020, 38(4): 11-18.
- [2] 谢华亮,戴志军,左书华,等. 1959—2013年长江河口南槽动力地貌演变过程[J]. 海洋工程, 2015, 33(5): 51-59.  
XIE Hua-liang, DAI Zhi-jun, ZUO Shu-hua, et al. Evolution of the dynamic geomorphology of the south passage of the Yangtze River estuary from 1959 to 2013[J]. Ocean Engineering, 2015, 33(5): 51-59.
- [3] 刘均卫. 长江生态航道发展探析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(S1): 9-14.  
LIU Jun-wei. Analysis on the development of the Yangtze River ecological channel[J]. Resources and

- Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(S1): 9-14.
- [4] DUAN J G. Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(10): 803-811.
- [5] 蔡喆伟,夏云峰,徐华,等. 深水航道整治中新型结构淹没丁坝水流特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 16-23.  
CAI Zhe-wei, XIA Yun-feng, XU Hua, et al. Flow force characteristics of new-type structure submerged spur dike during deep waterway regulation[J]. Journal of Hydraulic and Waterway Engineering, 2018(3): 16-23.
- [6] 常留红,徐斌,肖政,等. 空心梯形块丁坝结构透水特性试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2019, 34(1): 99-105.  
CHANG Liu-hong, XU Bin, XIAO Zheng, et al. Experimental study on permeability characteristics of hollow trapezoidal block groin structure[J]. Research and Progress in Hydrodynamics: Series A, 2019, 34(1): 99-105.
- [7] 张凯,侍克斌,李玉建,等. 水力插板透水丁坝坝头冲刷坑深度模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(6): 90-94.  
ZHANG Kai, SHI Ke-bin, LI Yu-jian, et al. Experiment on local scour effect reduced by group cumulative role of hydraulic flashboard permeable spur dike[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources and Hydropower, 2016, 36(6): 90-94.
- [8] 蒋傲,宋静贤,胡旭跃,等. 波浪条件下植物对边界层内流速的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(2): 55-60.  
JIANG Ao, SONG Jing-xian, HU Xu-yue, et al. Effects of plants on flow velocity in boundary layer under wave condition[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2017, 14(2): 55-60.
- [9] 王小明,程永舟,常留红,等. 梯形透水潜坝三维水流特性的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 51-56.  
WANG Xiao-ming, CHENG Yong-zhou, CHANG Liu-hong, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow characteristics of trapezoidal permeable submersible dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources and Hydropower, 2017, 37(5): 51-56.

- [10] 王文森,程永舟,王小明,等. 梯形透水潜坝附近水面线及透水率[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2):66-71.  
WANG Wen-sen, CHENG Yong-zhou, WANG Xiao-ming, et al. Water surface line and water permeability near trapezoidal permeable submersible dam[J]. Progress in Water Resources and Hydropower Science and Technology, 2019, 39(2): 66-71.
- [11] 周银军,刘焕芳,何春光,等. 桩柱透水丁坝水流特性试验研究[J]. 泥沙研究, 2009(5):58-62.  
ZHOU Yin-jun, LIU Huan-fang, HE Chun-guang, et al. Experimental study on flow characteristics of pile permeable spur dike[J]. Sediment Research, 2009(5):58-62.
- [12] 马爱兴,曹民雄,谭伦武,等. 扭双工字型透水框架防冲机理试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(1):8-16.  
MA Ai-xing, CAO Min-xiong, TAN Lun-wu, et al. Experimental study on anti-scouring mechanism of twisted I-shaped permeable frame[J]. Journal of Water Resources and Water Transportation Engineering, 2014(1): 8-16.
- [13] 常留红,杨思宇,徐斌,等. 四棱台透水框架水动力特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5):482-486.  
CHANG Liu-hong, YANG Si-yu, XU Bin, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of pervious frame of four-lens platform[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2019, 47(5): 482-486.
- [14] 况宏伟,蒋波,刘奇,等. 鱼嘴 U 型坝水沙输移规律及生态效应研究[J]. 中国水运: 航道科技, 2020(2):1-12.  
KUANG Hong-wei, JIANG Bo, LIU Qi, et al. Study on the law of water and sediment transport and ecological effect of U-shaped fishmouth dam[J]. China Water Transport: Waterway Science and Technology, 2020(2):1-12.
- [15] 黄海龙,周益人,王驰,等. 长周期波浪作用下顶宽对抛砂潜堤稳定性的影响研究[J]. 水运工程, 2014(5):69-72, 89.  
HUANG Hai-long, ZHOU Yi-ren, WANG Chi, et al. Research on the influence of top width on the stability of dumped sand submerged dike under long-period waves[J]. Water Transport Engineering, 2014(5): 69-72, 89.
- [16] 邹红霞,陈国平. 不规则波作用下潜堤透射系数的计算方法及统计分布[J]. 水运工程, 2010(3):11-16.  
ZOU Hong-xia, CHEN Guo-ping. Calculation method and statistical distribution of submerged dike transmission coefficient under the action of irregular waves[J]. Water Transport Engineering, 2010(3): 11-16.
- [17] 潘冬冬,郝嘉凌,王红川. 规则波作用下潜堤透浪系数数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2017(1):95-102.  
PAN Dong-dong, HAO Jia-ling, WANG Hong-chuan. Numerical simulation of wave transmission coefficient of submerged dike under regular wave action[J]. Journal of Water Resources and Water Transportation Engineering, 2017(1): 95-102.