

DOI:10.12170/20190416001

张志涛, 拾兵, 王俊杰. 单排三角锥透空圆孔礁坝保滩促淤的试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2020(3): 61-67. (ZHANG Zhitao, SHI Bing, WANG Junjie. Experimental study on the silting and shoal protection of single row triangular cone perforated circular-hole reef dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(3): 61-67. (in Chinese))

# 单排三角锥透空圆孔礁坝保滩促淤的试验研究

张志涛, 拾兵, 王俊杰

(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 借助波浪水槽断面模型试验, 开展了不同设计水位下的单排三角锥透空圆孔礁坝对波浪的消减作用及对砂质岸滩地形演变和底层水质点运动轨迹影响的研究。由试验资料分析可知: 人工礁坝对波高消减、波面形态及波浪爬高有较大影响; 人工礁坝会削弱掩护区的水动力强度, 减弱波浪挟沙能力, 促使超饱和悬沙在礁后落淤, 且通过对水质点水平运动离岸流速的阻减, 防止底层泥沙产生离岸亏损。本试验研究在一定程度上揭示了人工礁坝的消浪阻流特征及砂质岸滩地形的响应规律, 可为人工礁坝在砂质海滩防护中的应用提供依据。

**关键词:** 锥体透空礁坝; 透射系数; 砂质岸滩演变; 保滩促淤; 波浪试验

中图分类号: P753

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)03-0061-07

人工鱼礁技术作为一种改善海洋环境、丰富海洋生物多样性的新型防护手段, 近年来受到一些学者的关注。鱼礁对水流的阻滞作用, 可减弱水流挟沙能力, 为悬移质及推移质泥沙于礁后沉积提供了有利环境。人工鱼礁组成的礁坝淹没放置于近岸海床, 不仅可作为海洋生物的庇护所、栖息地、食物源及繁殖区, 又能以其独特的流场效应, 较好地削弱掩护区的水动力强度, 减弱波浪挟沙能力, 促使超饱和悬沙落淤。从经济角度来讲, 镂空式的礁坝还可以节省大量的原材料。多孔人工鱼礁用作多功能近岸工程措施, 已在加勒比海岸等地有了工程应用, 并取得了较好的防护效果<sup>[1-2]</sup>。Atilla 等<sup>[3]</sup>通过模拟海浪, 分析了水深对人工鱼礁周围水动力的影响, 结果显示: 当水深变浅时, 水动力长期赋值增加。王磊等<sup>[4]</sup>通过对比不同结构混凝土鱼礁的相对表面积和相对空方体积, 得出不同结构混凝土鱼礁的阻流特点, 其中箱型礁、三角锥型礁和梯形礁的稳固性较好, 可作为建设海洋牧场的首选礁型。吴建和拾兵等<sup>[5]</sup>利用 1:20 正态波浪模型, 对北戴河海滩横断面有无喂养沙坝、人工礁坝等工况进行了 3 种水位的极限波高试验, 测取了一种正方体多孔礁坝内外波高过程线及稳定后的断面形态, 试验资料分析显示: 水下正方体多孔礁坝对波能有较大的削弱, 从而使水体挟带泥沙于掩护区域落淤, 在一定程度上阻止了海滩泥沙的离岸亏损。

本文通过对一种单排三角锥透空圆孔礁坝的断面试验研究, 旨在揭示三角锥透空圆孔礁坝的保滩促淤效果以及消浪阻流规律, 可为海洋牧场的海滩养护提供科学依据。

## 1 理论分析

海岸地区的水动力主要是波浪和潮流, 近岸泥沙在波流共同作用下产生搬运现象, 波浪离岸流动和向岸流动的强弱决定海岸侵蚀和淤积的程度。当向岸流速大于离岸流速时, 近岸泥沙沉积物被向岸搬运, 进而形成淤积现象; 当向岸流速小于离岸流速时, 近岸泥沙沉积物被离岸搬运, 进而形成侵蚀现象。多数保滩促淤工程通过削减离岸流的挟沙能力, 从而达到养护海滩、防止冲刷的目的。

收稿日期: 2019-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51279189); 联合基金资助项目 (U1906234)

作者简介: 张志涛(1994—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事岸滩防护研究。E-mail: 13243171183@163.com  
通信作者: 拾兵(E-mail: sediment@ouc.edu.cn)

潮流和波浪共同作用下的携沙能力公式为<sup>[6]</sup>:

$$S^* = \alpha(\gamma\gamma_s)/(\gamma_s - \gamma) \left( \frac{v^3}{c^2 D \omega} + \beta \frac{H^2}{DT\omega} \right) \quad (1)$$

式中:  $\alpha, \beta$  为系数;  $\gamma$  和  $\gamma_s$  分别为水、泥沙的重度;  $\omega$  为沉速;  $H, T$  为波高和周期;  $c$  为谢才系数;  $D$  为水深;  $v$  为流速。

由式(1)可知, 波浪和潮流的挟沙能力与速度的3次方以及波高的平方成正比, 通过一定的工程手段, 削弱离岸流速和波高可以有效降低水体携沙能力, 防止岸滩冲刷, 可达到保滩促淤的目的。

## 2 物理模型试验设计

试验以烟台市某砂质海岸实测数据为依据, 开展3种潮位(极端高水位: 2.14 m; 设计高水位: 0.81 m; 设计低水位: -0.81 m)、2种重现期(25和50年)对应波高的断面模型试验, 验证单排三角锥透空圆孔礁坝保滩促淤效果。正态模型比尺  $\lambda=28$ , 岸滩泥沙中值粒径  $d_{50}=0.3$  mm。模型满足重力相似准则。

试验在长 30.0 m、宽 0.60 m、深 0.80 m 的不规则波水槽中进行。水槽一端为低惯量直流式电机不规则造波机, 另一端为消能设施。试验布置情况及单个礁体尺寸(原型)如图 1 所示。波高测量采用电阻式浪高仪, 流速测量采用声学多普勒流速仪(设于 3 号波高仪断面处), 地形测量用全站型电子测距仪。

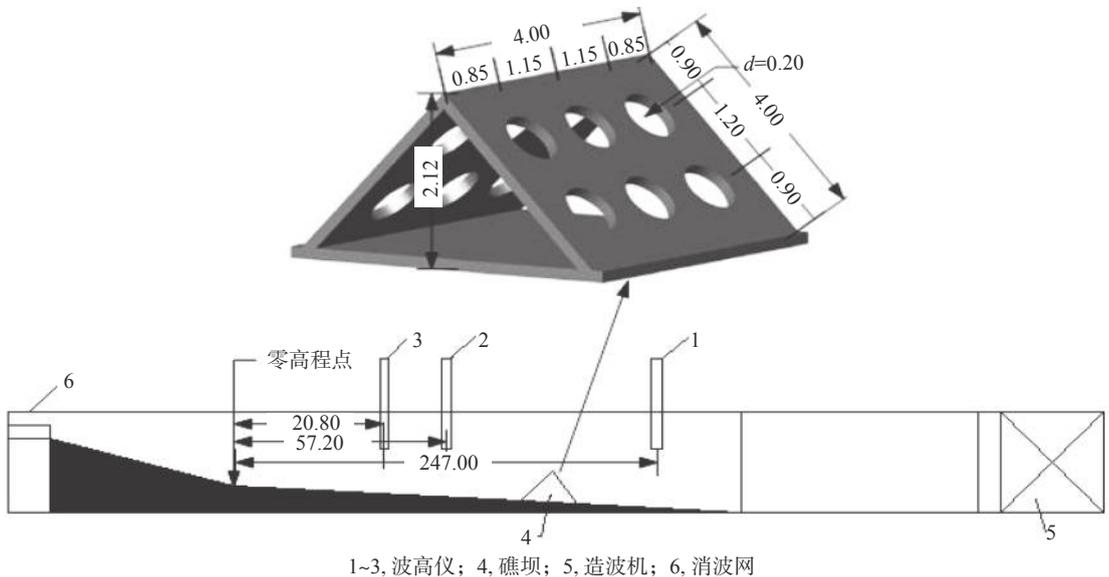


图 1 礁坝断面试验布置及鱼礁大样图(单位: m)

Fig. 1 Experimental arrangement of reef dam section and large sample of reef (unit: m)

为防止鱼礁冲刷沉陷, 在工程实践中需在礁体底部安装防护垫, 并安装固定栓防止滑移<sup>[5]</sup>。试验开始之前需在现状海底地形状况下进行波要素率定, 按照实测波要素, 以 JONSWAP 风浪谱为靶谱模拟造波, 用浪高仪采集记录波浪数据, 进行谱分析, 与靶谱对照, 调整造波机推程和运动频率, 直至试验波要素满足靶谱要求。原型波入射要素如表 1 所列。试验过程中, 由于不规则波的不稳定性, 每组工况测试波波数约 700 个, 重复进行 3 次取其平均值作为

表 1 原型波入射要素  
Tab. 1 Incident elements of prototype waves

水位情况	重现期/a	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$T/s$
极端高水位	50	4.35	3.99	3.92	3.57	8.3
	25	4.00	3.65	3.55	3.20	7.9
设计高水位	50	3.58	3.26	3.17	2.86	8.3
	25	3.52	3.21	3.12	2.81	7.9
设计低水位	50	2.57	2.25	2.21	1.92	8.3
	25	2.52	2.20	2.16	1.88	7.9

实测数据, 出现异常数据时检查仪器, 并重新进行试验, 以确保试验数据真实可靠。

### 3 试验结果分析

人工礁坝的透射系数( $k$ )定义为波浪通过礁坝后的波高( $H'$ )与通过礁坝前的波高( $H$ )之比。其大小与很多因素有关, 包括水深  $D$ , 堤顶水深  $R$ , 堤顶宽度  $B$ , 礁坝空方体积  $V$ , 相对表面积  $S$ , 礁坝离岸距离  $x$ , 以及入射波高  $H$  和周期  $T$  等<sup>[6-12]</sup>。即:

$$k = H' / H = g(D, R, B, V, S, x, H, T) \tag{2}$$

本试验在保证礁坝形状不变的情况下, 通过模拟实际海域的入射波高、水深、控制礁坝离岸距离得出不规则波作用下人工礁坝的透射系数、地形的响应及近岸底层水质点的流速变化规律, 进而为人工礁坝在岸滩防护领域的发展提供实际依据。

#### 3.1 礁坝相对距离对透射系数的影响

试验通过改变三角锥透空圆孔礁坝距离参考点的位置, 测得礁坝在不规则波作用下的波高数据, 进而求得相应的透射系数。由于不规则波的不稳定性, 每组工况进行 3 次造波试验, 取 3 次数据的平均值计算礁坝的透射系数。相对位置用礁坝到参考点(零高程点)的距离和入射波长的比值表示, 得到如图 2(a) 和 (b) 所示的有效波高透射系数与相对位置的关系。从图 2(a) 和 (b) 中可以看出, 礁坝在 3 种不同水深情况下, 25 年重现期和 50 年重现期的有效波高透射系数与相对位置的关系均为明显的漏斗型曲线, 在礁坝距参考点  $0.75L$  ( $L$  为入射波长) 处有效波高透射系数最小, 消波效果比较理想。礁坝摆放位置大于  $1.5H$  ( $H$  为入射波高) 时, 会出现有效波高透射系数大于有效波高自然衰减系数(即无礁坝时的衰减系数)的情况, 说明此时礁坝的布置位置会使波能汇聚进而加速岸滩的冲刷, 在实际工程中应避免此类情况出现。

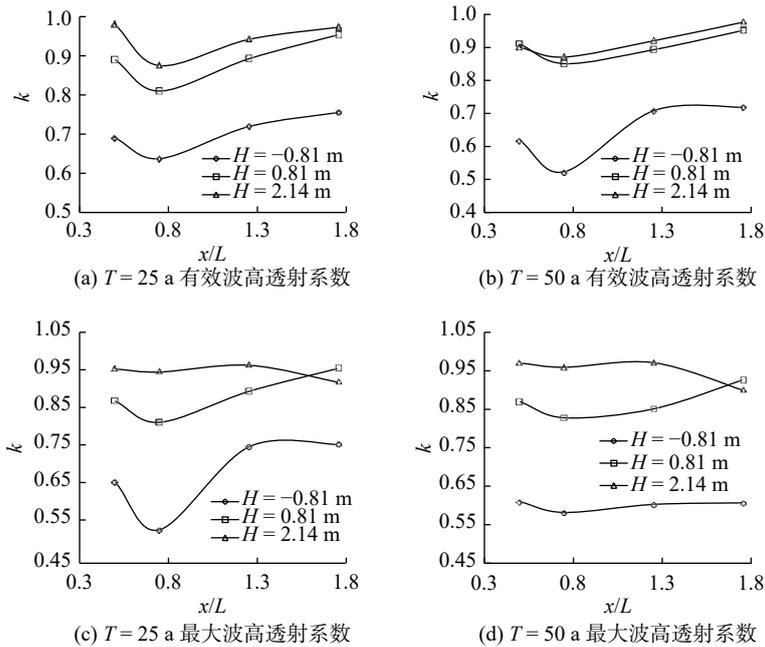


图 2 礁坝相对距离对透射系数的影响

Fig. 2 Effect of relative distance of reef dam on transmission coefficient

最大波高透射系数与相对位置的关系如图 2(c) 和 (d)。可见, 25 年和 50 年重现期设计低水位及设计高水位时, 最大波高透射系数在礁坝距参考点  $0.75L$  ( $L$  为入射波长) 时达到最小值, 但在极端水位时, 透射系数

的变化趋于水平直线且接近 1, 此时礁坝的防护作用相对较弱; 2 种重现期、3 种水位的最大波高和有效波高透射系数规律保持一致, 礁坝距参考点  $0.75L$  时, 其消波效果最好, 距参考点  $(1.50 \sim 2.00)L$  的位置是非线性部分驻波的波腹位置, 礁坝位于此处防护效果最差。

综上所述, 礁坝的存在可以有效削减波能, 降低有效波高和最大波高, 进而降低水体携沙能力, 达到保滩促淤的目的。

### 3.2 礁坝相对距离对波浪爬高的影响

定义有礁坝防护时的波浪爬高与无礁坝防护时的波浪爬高的比值为波浪爬高衰减系数( $K^*$ )。在滩肩断面处架设摄像机, 通过观测 3 种水位不同放置位置时的波浪爬高, 以及无礁坝防护时的波浪爬高, 分别计算其爬高衰减系数(图 3)。可见, 25 年及 50 年重现期, 均在礁坝距参考点  $0.80L$  ( $L$  为入射波长) 附近出现波谷, 说明礁坝位于此处防护效果最佳, 但波浪爬高衰减系数均在  $0.89 \sim 1.02$  波动, 说明透空礁坝对波浪爬高的抑制作用不明显, 甚至在极端高水位下, 礁坝距参考点  $(1.50 \sim 2.00)L$  的位置时, 出现有波浪爬高衰减系数大于 1 的情况, 说明礁坝在此位置不仅不能削弱波能, 相反会汇聚波能, 抬高波高, 加速岸滩冲刷。

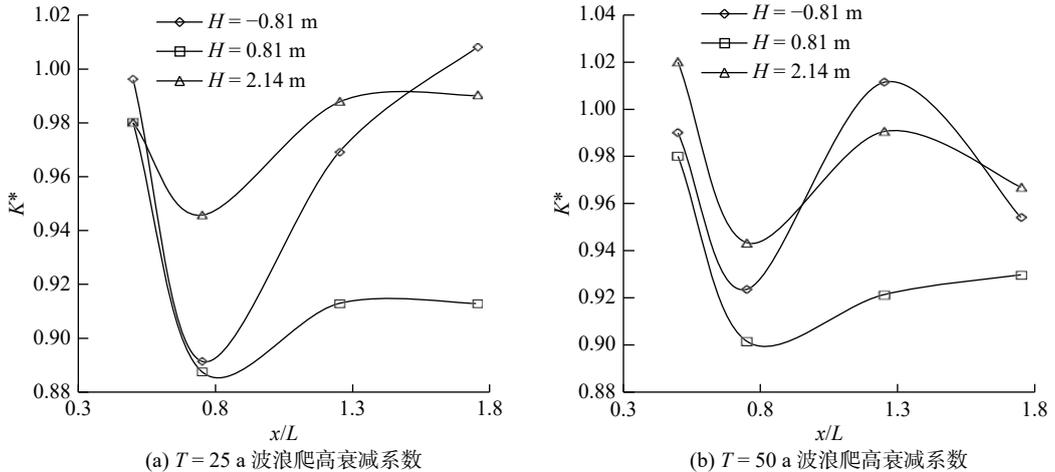


图 3 礁坝防护下的波浪爬高衰减系数

Fig. 3 Attenuation coefficient of wave climbing under reef dam protection

### 3.3 礁坝相对距离对岸滩冲淤变化的影响

地形冲淤变化是本次试验需要精确测量的部分, 为保证排水不会对地形造成影响, 待水面完全平静后再缓慢进行排水, 当全部排完后, 在水槽中间架设全站仪开始测量地形。试验过程中发现地形沿水槽宽度方向略有变化, 但变化较小, 因此在本次试验中选取  $y=0.1, 0.3$  和  $0.5$  m 共 3 条地形剖面线进行记录, 并取 3 条地形剖面线的平均值作为这一组工况的最终地形数据。如图 4(a) 和 (d) 所示, 试验通过收集原始地形在不同水位下的冲淤变化数据以及有礁坝防护下的地形冲淤变化数据, 对比发现: 在设计低水位无礁坝防护时, 潮位较低, 波浪对岸滩的冲刷作用不明显, 零高程点之后向岸部分的岸滩变化很小, 离岸部分则出现轻微的冲刷现象, 在距离零高程点  $4.5 \sim 6.0$  倍礁长(礁长用  $l$  表示)之间, 有很浅的沙沟出现, 在距零高程  $6 \sim 33$  倍礁长之间地形有轻微的起伏, 但未观测到沙波现象; 有礁坝防护时, 地形明显被坦化, 但仍有沙沟现象出现, 并且沙沟出现的位置均有轻微后移, 其中以礁坝布置在  $0.50L$  处的后移最为明显; 礁坝前后出现少量的泥沙淤积, 其中以礁坝布置在  $0.75L$  的淤积最为明显,  $0.50L$  处淤积效果最差。说明礁坝布置在  $0.50L$  处时波能被汇聚, 加速岸滩侵蚀。如图 4(b) 和 (e) 所示, 在设计高水位时, 原地形距零高程点  $-3.5 \sim 3.5$  倍礁长的岸滩坡面是主要冲刷区, 淤积区主要出现在距零高程点  $5.5 \sim 10.0$  倍礁长,  $110.0$  倍礁长之间出现大量的沙波; 有礁坝防护时, 沙沟宽度变窄, 出现位置均有轻微后移, 距零高程点  $5.5 \sim 10.0$  倍礁长之间的沙波消失, 并出现明显淤积隆起现象, 其中以礁坝布置在  $0.75L$  处的淤积最为明显, 岸滩坡面变形最小,

礁坝布置在  $0.50L$  处岸滩坡度增加, 冲刷加剧。如布置在  $0.50L$  处岸滩坡度增加, 冲刷加剧。如图 4(c) 和 (f) 在极端高水位时, 岸滩冲刷现象最为明显, 平整的地形冲刷形成大斜面, 滩肩明显后移, 在距零高程点  $5.5\sim 23.0$  倍礁长之间出现大量沙波, 地形变化复杂; 有礁坝防护时, 岸滩坡度冲刷仍然非常严重, 滩肩明显后移, 但是在距零高程点  $5.5\sim 23.0$  倍礁长之间沙波数量减少, 且出现一定程度的淤积。其中以礁坝布置在  $0.75L$  处的淤积最为明显。

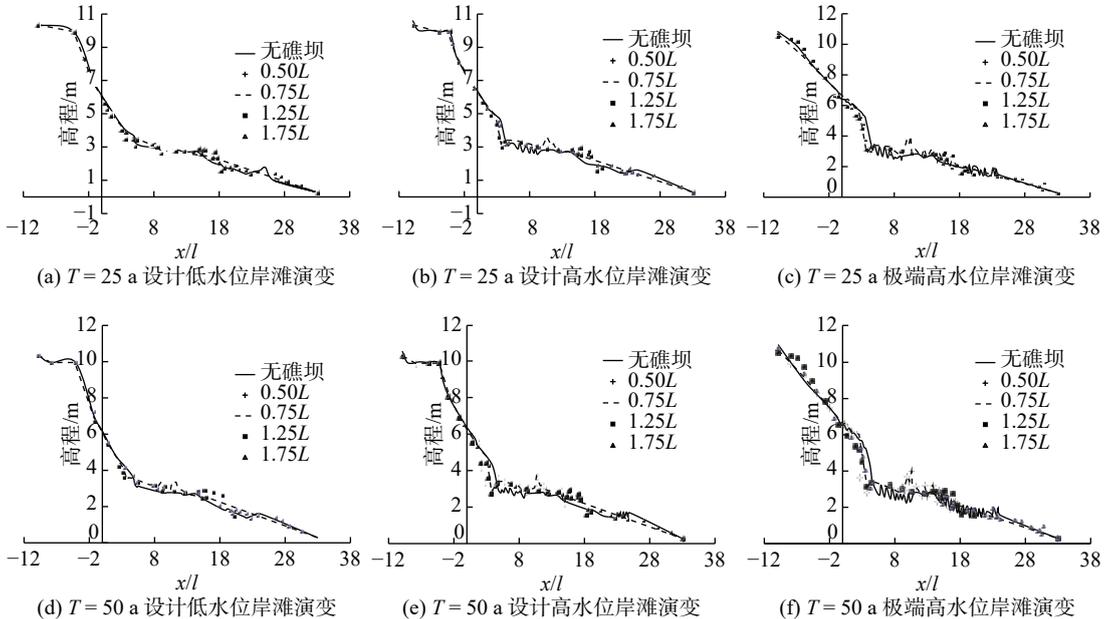


图 4 礁坝位置对岸滩地形的影响

Fig. 4 Effect of reef dam location on beach topography

由上述分析可见, 礁坝布置在  $0.75L$  处, 防护效果最佳, 但在极端高水位情况下, 鱼礁防护作用很小, 这与礁体的空方体积及堆砌高度有关, 后续可以通过不同的堆砌方式改变礁坝高程及坝顶宽度进而优化礁坝在极端波浪作用下保滩促淤能力。

### 3.4 礁坝相对距离对礁后底层流速的影响

波浪水质点运动轨迹不封闭, 将会产生净输移水流, 从而造成泥沙的净输移。当底沙净向岸输移时, 海滩就会发育; 当底沙净离岸输移时, 海滩就会被侵蚀<sup>[5, 13]</sup>。试验通过使用声学多普勒流速仪测量 25 年重现期不规则波作用下的距离零高程点  $0.90\text{ m}$  处的底层水质点水平速度分布规律。试验在水槽造波 20 min 后开始收集流速数据, 此时岸滩地形达到最稳定状态, 更能确保试验的准确性, 设置采样间隔为  $0.005\text{ s}$ , 收集样本流速点 20 万个, 统计向岸平均流速、离岸平均流速以及向岸流动和离岸流动历时。礁坝相对距离对礁后底层流速的影响见图 5。

通过数据分析可以看出, 在无礁坝防护时向岸流历时和离岸流历时比例为  $4 : 6$ , 有礁坝防护时其比例关系为  $4.5 : 5.5$ , 离岸流历时有所缩减, 这也为底层泥沙在礁后落淤提供了良好条件。图 5(a) 为礁后波浪底层水质点平均水平流速分布, 可以看出在礁坝的防护下, 底层水质点向、离岸流速都有所减小, 设计低水位时尤为明显, 礁坝的摆放位置对底层水质点流速的影响呈明显的线性关系, 摆放位置距参考点越近阻流效果越好。礁坝修建前后, 向岸和离岸流态均为未发现明显变化。定义向岸和离岸平均速度之差为潮流的闭合度, 通过图 5(b) 可以看出, 在设计低水位和设计高水位, 有礁坝防护时底层水质点均出现向岸的净输移水流, 有利于底沙在礁后落淤, 其中礁坝处于  $0.75L$  处, 向岸净输移水流流速最大; 在极端高水位波浪作用下, 底层水质点均出现离岸的净输移水流, 此时滩面被冲刷, 礁坝超过防护极限。

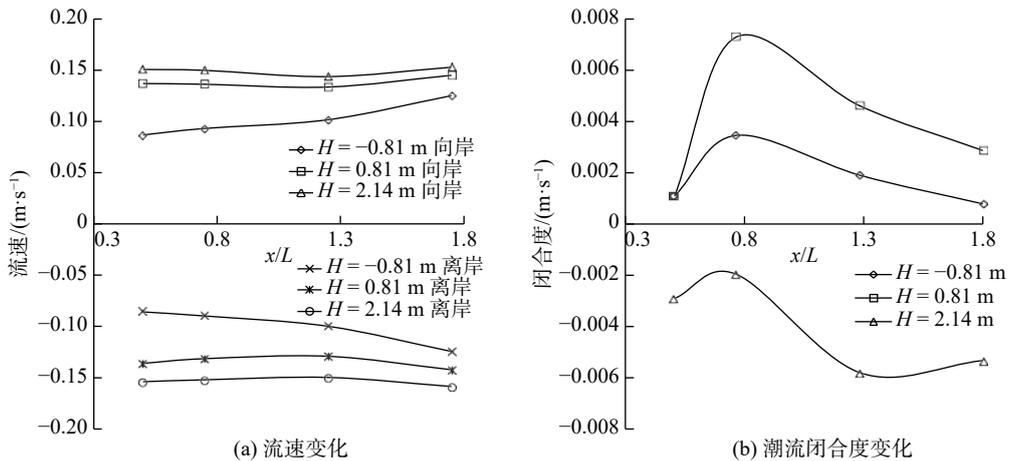


图 5 礁后底层水质点平均水平流速及潮流闭合度

Fig. 5 Average horizontal flow velocity and tidal closure of the bottom water particles behind the reef

## 4 结 语

通过开展不规则波作用下的波浪断面模型试验,对一种新型锥体透空礁坝的消浪能力和保滩促淤特性进行了研究,得出相关结论如下:

(1) 三角锥透空圆孔礁坝对岸滩的防护效果随堤顶水深的减小而线性递增,低水位时透射系数接近 0.6,防护效果最好,在极端水位下的防护效果则相对较弱;礁坝位于距参考点  $0.75L$  ( $L$  为入射波长) 的位置时,透射系数相对较小,消浪效果最佳。礁坝可有效削减波能,降低有效波高和最大波高,进而降低水体携沙能力,达到保滩促淤的目的。

(2) 三角锥透空圆孔礁坝位于距参考点  $0.80L$  的位置时,对波浪爬高的抑制效果相对较好,但波浪爬高衰减系数均在  $0.89 \sim 1.02$  波动,说明透空礁坝对波浪爬高的抑制作用不明显。

(3) 三角锥透空圆孔礁坝布置于距离参考点  $0.75L$  时,波浪透射系数及对岸滩的掩护效果最佳,而处于距参考点  $1.50L$  的距离,是非线性部分驻波的波腹位置,会造成岸滩前方波能集中,冲击力增加,加重了岸滩侵蚀,实际工程中应避开此位置。

(4) 三角锥透空圆孔礁坝布置于近海,通过阻减波浪底层水质点运动速度,增强水质点运动轨迹的不对称性,为礁后一定范围内的底层泥沙在近岸落淤创造良好条件,防止岸滩泥沙离岸亏损。

(5) 人工礁坝用于岸滩防护时,应确保其稳定性,特别是在砂质海岸和淤泥质海岸,需要安装防护垫或其他防护装置,防止礁坝因冲刷沉陷或倾覆而导致其防护效果降低。

## 参 考 文 献:

- [1] ARMONO H D. Artificial reefs as shoreline protection structures[R]. Surabaya: Seminar Teori dan Aplikasi Teknologi Kelautan IV, 2004.
- [2] HARRIS L E. Artificial reefs for ecosystem restoration and coastal erosion protection with aquaculture and recreational amenities[C]//Proceedings of the 5th International Surfing Reef Conference. 2006.
- [3] ATILLA N, WETZEL M A, FLEEGER J W. Abundance and colonization potential of artificial hard substrate-associated meiofauna[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003, 287(2): 273-287.
- [4] 王磊,唐衍力,黄洪亮,等. 混凝土人工鱼礁选型的初步分析[J]. *海洋渔业*, 2009, 31(3): 308-315. (WANG Lei, TANG Yanli, HUANG Hongliang, et al. Primary analysis of model selection for artificial reefs[J]. *Marine Fisheries*, 2009, 31(3): 308-315. (in Chinese))

- [5] 吴建, 拾兵, 范菲菲, 等. 单排方形多孔鱼礁保滩促淤的试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2011(3): 42-47. (WU Jian, SHI Bing, FAN Feifei, et al. Experimental study on single-row artificial reefs for beach protection and siltation promotion[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2011(3): 42-47. (in Chinese))
- [6] 窦国仁, 董风舞, DOU Xibing. 潮流和波浪的挟沙能力[J]. *科学通报*, 1995, 40(13): 1096-1101. (DOU Guoren, DONG Fengwu, DOU Xibing. Sediment transport capacity of tidal currents and waves[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(13): 1096-1101. (in Chinese))
- [7] 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. (ZHAO Han, WANG Zhen, WANG Dengting, et al. Influence of different types of surfacing on transmittance coefficient[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2018(10): 58-62. (in Chinese))
- [8] 王俊. 波浪在潜堤上传播变形的试验与数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. (WANG Jun. Experimental and numerical studies on the transformation of wave propagation over submerged breakwater[D]. Qingdao: China Ocean University, 2014. (in Chinese))
- [9] 杨正己, 贺辉华, 潘少华. 波浪作用下抛石堤的稳定性及消浪特性[J]. *水利水运科学研究*, 1981(3): 34-45. (YANG Zhengji, HE Huihua, PAN Shaohua. Stability and wave dissipation characteristics of rubble-mound breakwater under wave action[J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1981(3): 34-45. (in Chinese))
- [10] 陈兆林. 不同结构离岸式潜堤消浪效果试验研究[J]. *海岸工程*, 2005, 24(2): 1-6. (CHEN Zhaolin. Experimental study of wave dissipating effect of offshore submerged dikes with different structures[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 24(2): 1-6. (in Chinese))
- [11] 冯卫兵, 王明明, 崔川川. 潜堤透浪系数的试验研究[J]. *水运工程*, 2012(9): 1-6. (FENG Weibing, WANG Mingming, CUI Chuanchuan. Experimental study of wave transmission coefficient over a submerged breakwater[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2012(9): 1-6. (in Chinese))
- [12] 陈杰, 蒋昌波, 邓斌, 等. 波浪通过斜坡上潜堤的波能演化实验研究[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2009, 24(4): 417-424. (CHEN Jie, JIANG Changbo, DENG Bin, et al. Energy evolution generated by waves propagate over submerged breakwater on a sloping bed[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics(SerA)*, 2009, 24(4): 417-424. (in Chinese))
- [13] 吴建, 拾兵, 杨立鹏, 等. 多孔方形鱼礁对水动力环境影响的试验研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2011(2): 147-152. (WU Jian, SHI Bing, YANG Lipeng, et al. Experimental study of the hydrodynamics of modeled reefs located within a current[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011(2): 147-152. (in Chinese))

## Experimental study on the silting and shoal protection of single row triangular cone perforated circular-hole reef dam

ZHANG Zhitao, SHI Bing, WANG Junjie

(College of Civil Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** Based on the model test of wave flume section, the effects of single row triangular cone permeable circular-hole reef dams at different design water levels on wave attenuation, topographic evolution of sandy beaches and movement track of bottom water particles were studied. From the analysis of test data, it can be seen that artificial reef dams have great influence on wave height reduction, wave surface shape and wave climbing; artificial reef dams weaken the hydrodynamic strength of the shelter area, weaken the wave sediment carrying capacity, promote the deposition of supersaturated suspended sediment behind the reef, and prevent the offshore loss of bottom sediment by resisting the offshore velocity of horizontal movement of water particles. To a certain extent, the experimental study reveals the characteristics of wave dissipation and current blocking of artificial reef dams and the response law of sandy beach topography, which can provide a scientific basis for the application of artificial reef dams in sandy beach protection.

**Key words:** conical permeable reef dam; transmission coefficient; evolution of sandy beach; beach protection and siltation promotion; wave test