

砾石堤坝和多孔方型鱼礁 消浪护滩的试验研究

——以北戴河西海滩为例

杨立鹏¹, 杨少鹏^{2*}, 张芝永³, 朱金龙⁴, 拾兵⁵

(1. 青岛市运输事业发展中心, 山东 青岛 266061;

2. 山东科技大学海洋科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

3. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020;

4. 山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006;

5. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 本文通过物理模型试验, 研究了砾石堤坝、多孔方型鱼礁、堤坝+鱼礁等不同防护措施对岸滩的保护作用。通过测量不同防护措施的波浪透射系数、输沙率、水下坡度角及床面地形变化, 并与无防护措施工况进行对比, 结果发现: 不同试验条件下堤坝+鱼礁工况的透射系数仅为 0.21~0.36, 对波浪具有显著的消减作用; 同一水位不同防护措施下的输沙率由大变小依次为: 堤坝、堤坝+鱼礁、无工程、鱼礁; 堤坝迎浪面的水下坡度角随极限波高呈现先增大、后减小的趋势, 堤坝工况的水下坡度角约是堤坝+鱼礁工况的 2~4 倍; 对于近岸的地形恢复, 堤坝+鱼礁工况的效果比较明显, 且对岸滩附近的侵蚀较少。堤坝+鱼礁的防护措施可明显减小波浪的透射系数, 增加向岸输沙率, 对恢复近岸地形、保护岸滩有显著作用。

关键词: 砾石堤坝; 多孔方型鱼礁; 波浪消减; 岸滩养护

中图分类号: P75

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)03-0223-10

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220314001

引用格式: 杨立鹏, 杨少鹏, 张芝永, 等. 砾石堤坝和多孔方型鱼礁消浪护滩的试验研究——以北戴河西海滩为例[J]. 海岸工程, 2022, 41(3): 223-232. YANG L P, YANG S P, ZHANG Z Y, et al. Experimental study on wave dissipation and beach protection by gravel dam and porous square reef: taking Beidaihe West Beach as the example[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(3): 223-232.

海滩是海洋与陆地的衔接区域, 是海陆相互作用的缓冲区, 是沿海区域重要的旅游资源, 在滨海生产生活中发挥着重要作用。近年来, 受台风频发、港口开发、河口整治、近海工程建设等因素的影响, 海滩侵蚀越来越严重, 已经成为各个沿海国家面临的普遍问题^[1-3]。环渤海区域砂质岸线平均侵蚀速度约为 1~2 m/a, 局部甚至高达 5~8 m^[4]。众多滨海旅游胜地, 如山东青岛、福建厦门、广西北部湾、海南三亚等海滩侵蚀都比较严重^[5-7]。

由此, 众多学者对海滩保护进行了大量研究。冯金良^[8]、刘会欣等^[9]、杨燕雄等^[10]利用物理模型试验与数值模拟相结合的方式, 对北戴河海滩侵蚀原因及人工沙坝防护效果进行了研究。吴建^[11]、赵多仓等^[12]、马悦^[13]运用数值模拟、物理模型试验的方法研究了近海人工鱼礁、人工沙坝等生态构筑物对波浪消减和海滩养护的效果。徐杨杨等^[14]以山东长岛为例探讨了砾石养滩的防护方法, 对砾石填充厚度、粒径及滩肩扩宽等参数进行了具体研究。王立杨等^[15]、黄祖明等^[6]通过对海滩断面高程观测, 从风浪叠加作用、海滩粒径变

收稿日期: 2022-03-14

作者简介: 杨立鹏(1982—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事港口、航道、海洋工程等方面研究. E-mail: djkyip@163.com

* 通信作者: 杨少鹏(1990—), 男, 博士, 主要从事海底管线冲刷与防护, 岸滩演变等方面研究. E-mail: yangshaopeng612@163.com

(陈 靖 编辑)

化、不同岸段变化等角度研究了台风对威海楮岛、北海银滩等海滩的影响。何岩雨等^[16]采用 GENESIS 岸线演变模型,研究了海口人工岛作用下的海滩变化,提出了人工补沙和循环养护的生态修复措施。戚洪帅等^[3]归纳总结了护滩技术的发展历程、世界各国采用的实践方法及未来养护的发展趋势。匡翠萍等^[17]、赵友鹏^[18]、黎树式等^[1]提出通过滩肩补沙、实体工程、离岸潜堤、退塘还滩等途径以促淤保滩的方式对侵蚀海滩进行养护。虽然海滩保护方法研究已开展较多,但对砾石堤坝与多孔方型鱼礁共同作用下的消浪效果及岸滩防护的研究相对较少。因此,本文在前人研究的基础上,以北戴河西海滩为例,通过物理模型试验,探讨了砾石堤坝、多孔方型鱼礁等不同防护措施对近岸海滩的保护作用。

1 研究区域

北戴河西海滩位于北戴河老虎石公园至戴河口区域(图1),是北戴河开发历史最长的海滩,为基岩岬湾海岸向沙丘海岸的过渡区,海岸为人工护堤,后方为丘陵,海滩长约3.57 km,宽约20 m,向海侧400 m水深2 m左右,潮差较小,是优良的天然浴场。海滩沉积物主要为细沙和中粗沙,平均粒径在1.26~2.76 mm。

西海滩自建国初期至80年代岸滩侵蚀速率为2.31 m/a,80年代至2000年侵蚀速率为3.07 m/a,2002年至2007年侵蚀速率为3.28 m/a。60年代北戴河西海滩宽度均匀,平均宽度约110 m;80年代海滩最宽约76 m;2000年最宽处约为58 m;到2007年,只能靠填沙维持,西海滩平均宽度变为17 m。



图1 研究区位置及方案示意图

Fig. 1 Location and schematic diagram of the study area

2 物理模型试验

2.1 物理模型试验布置

本试验在波流循环水槽中进行,水槽尺寸为30 m×0.6 m×0.8 m,最大试验水深为0.5 m,水槽一端为推板式造波机,另一端为消能设施,如图2所示。为便于测量且充分研究不同防护措施对波浪的消减作用,本试验主要开展规则波作用下的岸滩演变研究,试验前先对波高仪进行标定,以消除系统误差。

综合考虑试验条件、仪器测量精度等因素,确定试验采用正态模型,根据重力相似准则设计,其长度

比尺为: $\lambda_L = \lambda_h = 20$, 泥沙粒径比尺为: $\lambda_D = \lambda_L = 20$, 泥沙沉速比尺为: $\lambda_w = \lambda_h \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_L} \right)^{1/2} = 20$ 。

2.2 试验参数和工况

防护措施主要是在近海区域水面以下修建砾石堤坝或人工鱼礁,对入射波浪产生消减作用,减弱近岸泥沙运动,减少波浪对岸滩的侵蚀,本试验中的防护措施分3种工况,分别是堤坝防护、鱼礁防护、堤坝+鱼礁共同防护。砾石堤坝采用粗砾堆积形成,其中70%粒径为5~7 mm,30%粒径小于5 mm,原型宽度约100 m,高1 m,距离基点(岸边起始点0 m处)约170~270 m;试验采用中值粒径为0.3 mm的天然沙作为模型沙。鱼

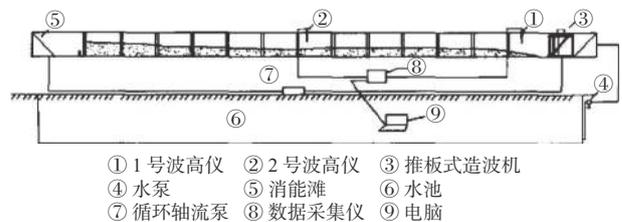


图2 波流水槽试验立面图

Fig. 2 Wave-flow flume experiment (side view)

礁采用多孔方型透空结构, 原型顶高程-1.8 m, 宽 10 m, 位置距离基点约 450 m。鱼礁工况试验采用一体式, 其结果布置如图 3 所示, 堤坝+鱼礁工况断面布置如图 4 所示。工程海域横断面地形如图 4b 所示。

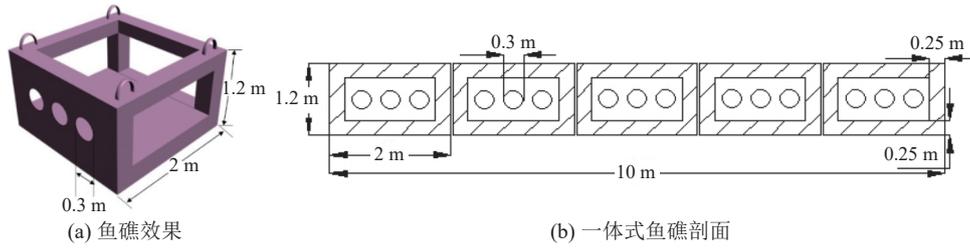


图 3 多孔方型鱼礁结构布置
Fig. 3 Arrangement of the porous square reef

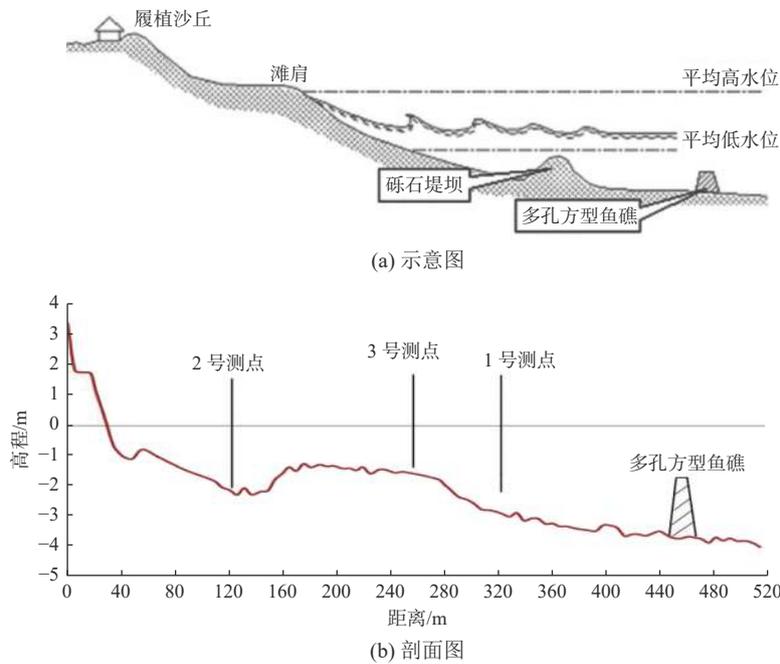


图 4 堤坝+鱼礁工况断面布置
Fig. 4 Section layout for the case of gravel dam + reef

通过对秦皇岛海洋站潮位资料进行统计分析, 研究区海域主要潮位特征值为: 极端高水位 2.66 m、设计高水位 1.35 m。故本试验选用 2.66、1.35 和 0 m 三种试验水位, 并通过试验获得各水位对应的极限波高(即运用波流水槽模拟海洋环境, 试验时保持水位恒定, 逐渐增加波高, 直至得到该水位波浪破碎前的最大波高), 以此作为外海入射波高。试验水位及入射波高参数如表 1 所示。各防护措施如表 2 所示。

表 1 试验水位及入射波高
Table 1 Parameters for the experiment

水位/m	入射波高 H_0 /m	周期/s
2.66(极端高水位)	4.51	7.51
1.35(设计高水位)	3.76	7.51
0	2.07	7.51

表 2 试验工况

Table 2 Cases for the experiment

序号	防护措施	水位/m	波高/m
1		0	2.07
2	无防护	1.35	3.76
3		2.66	4.51
4		0	2.07
5	堤坝	1.35	3.76
6		2.66	4.51
7		0	2.07
8	鱼礁	1.35	3.76
9		2.66	4.51
10		0	2.07
11	堤坝+鱼礁	1.35	3.76
12		2.66	4.51

3 试验结果分析

3.1 波浪消减

为便于分析,设 1 号波高测点位于堤坝与鱼礁之间,距基点 328 m 处(堤坝向海方向约 60 m);2 号波高测点位于堤坝后,距基点 122 m 处(堤坝向岸方向约 50 m)。本试验选用透射系数作为衡量各防护措施消浪效果的参数;2 号测点位于所有防护措施的后方,波高受堤坝、鱼礁作用后明显减少,因此将 2 号测点波高与入射波高的比值作为波浪透射系数。不同水位及防护措施下的波高如表 3 所列。同一水位下,各防护措施的透射系数变化规律为:鱼礁>堤坝>堤坝+鱼礁;同一防护措施下,堤坝、堤坝+鱼礁工况下透射系数随水位及波高的增加略有增加,其中堤坝+鱼礁工况的消浪效果最明显,对应透射系数分别为 0.21、0.27、0.36;其次为堤坝工况,分别为 0.24、0.29、0.37;鱼礁的透射系数最高,说明单排鱼礁对近岸波浪的消减作用不明显且有可能引起近岸波浪的汇聚^[1],但其对深水区的波浪具有一定的消减作用。

表 3 不同水位及防护措施下的波高

Table 3 Wave heights under different cases and water levels

水位/m	防护措施	入射波高 H_0 /m	1 号测点波高 H_1 /m	2 号测点波高 H_2 /m	波浪透射系数 K
0	无防护	2.07	2.07	1.11	0.54
	堤坝		2.07	0.50	0.24
	鱼礁		1.40	1.31	0.63
	堤坝+鱼礁		1.36	0.43	0.21
1.35	无防护	3.76	3.76	1.63	0.43
	堤坝		3.76	1.09	0.29
	鱼礁		2.64	2.04	0.54
	堤坝+鱼礁		2.61	1.03	0.27
2.66	无防护	4.51	4.51	2.29	0.51
	堤坝		4.51	1.65	0.37
	鱼礁		3.73	2.63	0.58
	堤坝+鱼礁		3.69	1.61	0.36

注:波浪透射系数 $K=H_2/H_0$ 。

3.2 输沙率

因堤坝迎浪面顶端位置波能耗散较大, 泥沙运动剧烈, 故本试验选取距基点 258 m 处(堤坝向海方向的顶端位置)作为 3 号测点测量输沙率。不同水位及防护措施下的单宽输沙率如表 4 所示。同一水位不同防护措施下的单宽输沙率变化由大到小为: 堤坝、堤坝+鱼礁、无防护、鱼礁; 同一防护措施不同水位的单宽输沙率由大到小为: 2.66 m、0 m、1.35 m; 单宽输沙率最大值出现在 2.66 m 水位下的堤坝工况, 其值为 54.4 kg/(m·s)。这说明堤坝工况下, 泥沙向岸输移量较大, 有利于岸滩防护, 但堤坝迎浪面的泥沙运动比较剧烈。堤坝+鱼礁工况的单宽输沙率为 33.6 kg/(m·s), 是堤坝工况的 0.62 倍, 说明该防护措施既能增加向岸输沙率又能减弱堤坝迎浪面的泥沙运动。

表 4 不同水位及防护措施下的单宽输沙率
Table 4 Sediment discharge rates under different cases and water levels

水位/m	防护措施	向岸单宽输沙率/(kg·(m·s) ⁻¹)	向海单宽输沙率/(kg·(m·s) ⁻¹)	合成单宽输沙率/(kg·(m·s) ⁻¹)
0	无防护	40.8	9.6	31.2
	堤坝	62.4	13.6	48.8
	鱼礁	36.0	8.0	28.0
	堤坝+鱼礁	55.2	12.8	42.4
1.35	无防护	23.2	5.6	17.6
	堤坝	41.6	9.6	32.0
	鱼礁	20.0	4.0	16.0
	堤坝+鱼礁	37.6	8.8	28.8
2.66	无防护	51.2	12.0	39.2
	堤坝	69.6	15.2	54.4
	鱼礁	43.2	10.4	32.8
	堤坝+鱼礁	44.8	11.2	33.6

3.3 水下坡度角

根据试验测量资料, 对堤坝、堤坝+鱼礁两种防护措施下堤坝迎浪面的水下坡度角进行了分析, 结果如图 5 所示。水下坡度角随极限波高的增大呈现先增大、后减小的趋势。堤坝工况下, 坡度角在 0 m 水位时最小(约 3.5°), 1.35 m 水位时最大(约 5.0°); 堤坝+鱼礁工况下, 坡度角在 2.66 m 水位时最小(约 1.2°), 1.35 m 水位时最大(约 1.7°); 堤坝工况的坡度角约是堤坝+鱼礁工况的 2~4 倍。这说明, 堤坝单独防护时, 其迎浪面区域泥沙运动剧烈, 引起前坡变陡; 而堤坝+鱼礁共同防护时, 鱼礁的存在消减了深水波浪, 减弱了泥沙运动, 堤坝整体变形程度较小^[13]。

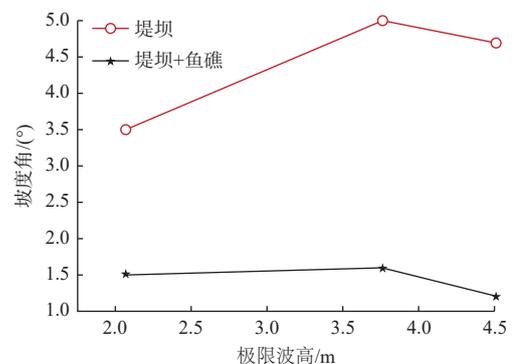


图 5 水下坡度角随极限波高的变化

Fig. 5 Variation of the slope angle with the extreme wave height

3.4 地形变化

3.4.1 地形冲淤

为便于测量,本试验将原型中0 m处1.8~3.0 m高程段的水平距离扩展为-28~0 m,高程扩展为2.0~3.0 m,其中2.0 m高程段长8 m,2.0~3.0 m高程段长20 m。

0 m水位时以极限波高(2.07 m)冲刷7.5 h后,各防护措施下的海床面地形变化如图6所示。对于堤坝及堤坝前的外海区域:无防护时,泥沙在260~320 m范围内淤积;堤坝工况下,泥沙在280~310 m范围内淤积,且在290 m处形成一个高度约0.9 m的沙垄;鱼礁工况下,地形无较大变化;堤坝+鱼礁工况下,泥沙主要在堤坝顶端170~250 m范围内淤积,且在堤坝迎浪面顶端形成一个高度约0.5 m的沙垄,对堤顶保护效果明显。

对于堤坝后的近岸区域:各防护措施的主要作用范围为40~135 m。无防护和鱼礁工况下,泥沙在40~110 m范围内淤积,淤积高度略高于原始地形,在110~135 m范围内发生冲刷;堤坝及堤坝+鱼礁工况下,地形无明显变化,对近岸区域防护较好。

1.35 m水位时各防护措施加波7.5 h后近岸地形变化如图7a所示。各防护措施主要作用区域由0 m水位的40~135 m变为-2~40 m范围,其中-2~16 m区域淤积,16~40 m区域冲刷。无防护时泥沙在-2~14 m范围内淤积,最大淤积高度约为1 m;在14~40 m区域发生冲刷,最大深度约为1.3 m;说明岸滩侵蚀较严重,且易在近岸区域形成海沟。堤坝工况下,淤积范围由无防护时的-2~14 m变为2~14 m;鱼礁工况下,淤积范围与堤坝工况近似,淤积高度仅为堤坝的0.5倍,且在24 m处冲刷较严重,最大深度约为1 m;堤坝+鱼礁工况下,淤积范围由无防护时的-2~14 m延伸至6~18 m,且18~40 m区域冲刷较浅。

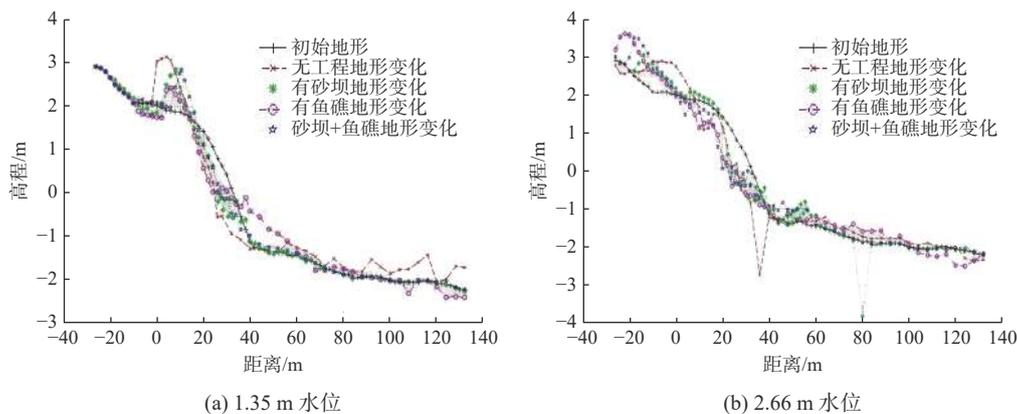


图7 不同水位下各防护措施近岸地形变化

Fig. 7 Variations of nearshore topography under different cases and water levels

2.66 m水位时各防护措施的地形变化规律(图7b)与1.35 m水位时类似,近岸淤积范围由1.35 m水位的-2~16 m变为-24~0 m,范围拓宽了33%;在20~40 m区域内冲刷更为严重。其中,无防护时在30~40 m处冲刷形成深度约为2 m的海沟;堤坝工况下该范围变为75~85 m,向海方向推移了2.5倍距离,也形成深度约2 m的海沟;其他工况下未出现类似海沟。

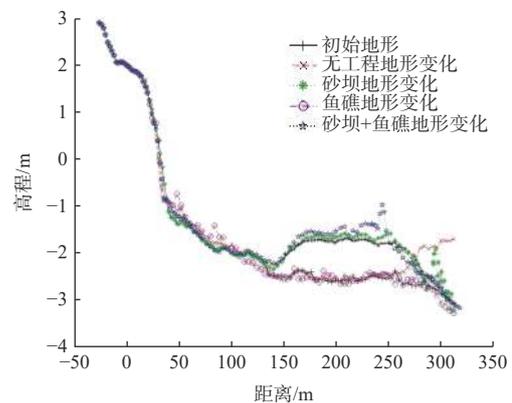


图6 0 m水位不同防护措施下地形变化

Fig. 6 Variation of topography for different conditions under the same water level

3.4.2 地形恢复

为研究同一防护措施在不同水位经历大浪作用后的地形变化, 本试验先将各防护措施水位调至极端高水位(2.66 m), 在该水位以对应的极限波高(4.51 m)冲刷 1.5 h 后测量地形变化; 然后将水位降至设计高水位(1.35 m), 以该水位对应的极限波高(3.76 m)冲刷 4.5 h 后测量地形变化; 最后将水位降至 0 m, 以该水位对应的极限波高(2.07 m)冲刷 9 h 后测量地形变化。各工况下海床面地形变化情况如图 8 所示。

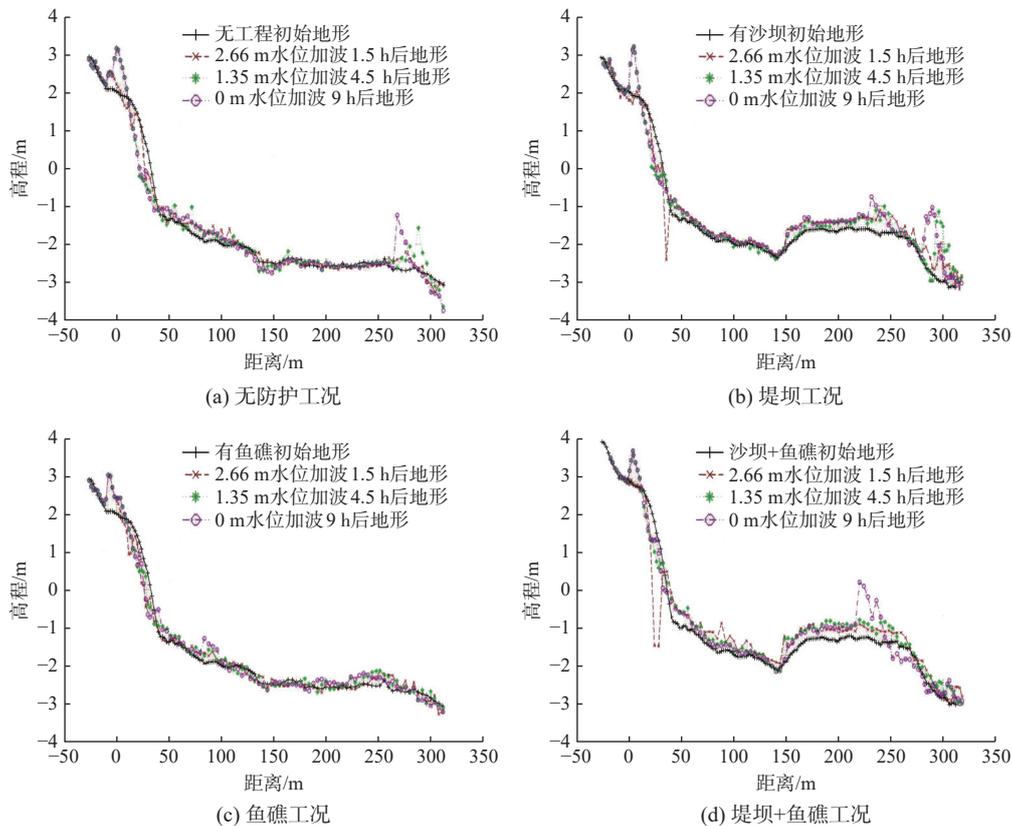


图 8 不同防护措施下的地形变化

Fig. 8 Variations of topography under different cases

无防护时(图 8a), 极端高水位(2.66 m)波浪作用后, 近岸泥沙在 $-10\sim 5$ m 区域内淤积, 最大淤积高度约 0.5 m; 低水位(0 m)波浪作用后, 泥沙在 $-10\sim 10$ m 区域内淤积, 最大淤积高度约 1.1 m, 岸滩地形防护边界向海方向拓展至约 10 m 处。

堤坝工况下(图 8b), 低水位波浪作用后, 近岸泥沙在 $-4\sim 14$ m 区域内淤积, 最大淤积高度约 1.3 m, 岸滩地形防护边界向海方向拓展至约 14 m 处, 与无防护工况相比, 海域范围拓展了 40%, 大浪形成的海沟可完全恢复至初始地形, 堤顶泥沙淤积明显且在 230 m 处形成高度约为 0.5 m 的沙垄。

鱼礁工况下(图 8c), 低水位波浪作用后, 近岸泥沙在 $-10\sim 12$ m 区域内淤积, 最大淤积高度约 1.1 m, 岸滩地形防护边界向海方向拓展至约 12 m 处, 与无防护工况相比, 海域范围拓展了 20%, 其他区域地形变化不明显。

鱼礁+堤坝工况下(图 8d), 低水位波浪作用后, 近岸泥沙在 $-4\sim 16$ m 区域内淤积, 最大淤积高度约 0.8 m, 岸滩地形防护边界向海方向拓展至约 16 m 处, 与无防护工况相比, 海域范围拓展了 60%, 大浪形成的海沟可完全恢复至初始地形, $40\sim 140$ m 区域及堤顶范围内泥沙淤积明显, 且在 220 m 处形成高度约为 1 m 的沙垄, 地形恢复效果优于堤坝工况。

4 结论及建议

本文对砾石堤坝、多孔方型鱼礁等不同防护措施下的波浪消减、泥沙输移、海床地形变化等进行了研究,所得研究海域岸滩防护结论如下。

1)波浪消减:堤坝、鱼礁的存在可导致深水区的波浪提前破碎,减小了波浪传播至近岸的能量,起到消浪作用,其中堤坝+鱼礁工况的效果比较明显。

2)输沙率:同一条件下,堤坝工况的输沙率明显大于堤坝+鱼礁工况;其迎浪面的水下坡度角约是堤坝+鱼礁工况的2~4倍,说明堤坝工况的迎浪面泥沙运动比较剧烈。

3)地形变化:堤坝+鱼礁工况对高水位极限波高作用后的岸滩地形恢复效果较好,可以达到护滩促淤的目的。

综上,堤坝+鱼礁工况对岸滩防护效果明显,是较好的方案,其次为堤坝工况。根据不同防护措施的试验结果,建议北戴河西海岸岸滩防护采取相关工程措施如下。

1)采用堤坝单独防护,需进一步粗化堤坝迎浪面的泥沙粒径,以保持其稳定。

2)采用鱼礁防护时,鱼礁周围泥沙运动剧烈,床面侵蚀明显,建议在鱼礁的迎浪面放置粒径较粗的砾石,减少泥沙起动,保护床面稳定。

3)可采用仿生态原理确定鱼礁的形状及材质,在不影响生态的前提下,达到工程防护的目的。

参考文献 (References):

- [1] 黎树式, 林俊良, 黄鹄, 等. 广西海滩侵蚀原因与修复[J]. 北部湾大学学报, 2019, 34(12): 30-37. LI S S, LIN J L, HUANG H, et al. Causes of beach erosion and its restoration in Guangxi[J]. Journal of BeiBu Gulf University, 2019, 34(12): 30-37.
- [2] 吴建, 拾兵. 近岸补沙养护海滩研究综述[J]. 海洋科学, 2011, 35(8): 108-112. WU J, SHI B. A review of the shore-face nourishment for beach protection[J]. Marine Sciences, 2011, 35(8): 108-112.
- [3] 戚洪帅, 刘根, 蔡锋, 等. 海滩修复养护技术发展趋势与前景[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 111-125. QI H S, LIU G, CAI F, et al. Development trend and prospect of beach nourishment technology[J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(1): 111-125.
- [4] 庄振业, 杨燕雄, 刘会欣. 环渤海砂质岸侵蚀和海滩养护[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(2): 1-9. ZHUANG Z Y, YANG Y X, LIU H X. Sandy beach erosion and beach nourishment in circum-bohai bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(2): 1-9.
- [5] 李春柱, 徐宏明, 侯国本. 青岛汇泉湾浴场部分海滩侵蚀及治理的初步探讨[J]. 海岸工程, 1992, 11(1): 26-31. LI C Z, XU H M, HOU G B. A preliminary investigation of the beach erosion of the huiquan cove Qingdao[J]. Coastal Engineering, 1992, 11(1): 26-31.
- [6] 黄祖明, 戴志军, 黎树式, 等. 中强潮海滩剖面冲淤过程研究——以北海银滩为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(4): 36-47. HUANG Z M, DAI Z J, LI S S, et al. Erosion and accretion of a meso-macro-tidal beach profile: a case from the Yintan Beach of Beihai[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(4): 36-47.
- [7] 刘针, 程永舟, 戈龙仔, 等. 三亚新机场工程海岸侵蚀补沙措施效果研究[J]. 海岸工程, 2021, 40(2): 121-130. LIU Z, CHENG Y Z, GE L Z, et al. Study on the effect of sand compensation measures for coastal erosion of Sanya new airport project[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(2): 121-130.
- [8] 冯金良. 人类工程活动对秦皇岛海滩侵蚀及淤积的影响[J]. 海岸工程, 1997, 16(3): 41-46. FENG J L. The effect of man's engineering activities on beach erosion and sediment at Qinhuangdao coast[J]. Coastal Engineering, 1997, 16(3): 41-46.
- [9] 刘会欣, 杨燕雄, 张甲波, 等. 北戴河海滩养护侵蚀热点[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(2): 45-52. LIU H X, YANG Y X, ZHANG J B, et al. Erosional hotspots Beidaihe beach after nourishment[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(2): 45-52.
- [10] 杨燕雄, 杨雯, 邱若峰, 等. 人工近岸沙坝在海滩养护中的应用——以北海银滩工程为例[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(2): 23-30. YANG Y X, YANG W, QIU R F, et al. Application of artificial submerged sandbars to beach nourishment: a case from Beidaihe beach[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(2): 23-30.
- [11] 吴建. 近海人工凸体保滩促淤的试验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010. WU J. Experimental study on the artificial convex structure for beach protection and siltation promotion [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [12] 赵多苍, 白玉川, 拾兵. 人工沙坝消波和养护海滩性能研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020(2): 100-105. ZHAO D C, BAI Y C, SHI B. Study on the properties of weakening wave and beach nourishment by artificial sand bar[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(2): 100-

- 105.
- [13] 马悦. 人工鱼礁和沙坝养护下砂质海滩剖面动力地貌演变的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2020. MA Y. Experimental investigation on beach profile evolution process with offshore interventions of artificial reef and submerged sand bar[D]. Shanghai: Tongji University, 2020.
- [14] 徐杨杨, 庄振业, 赵东波, 等. 山东长岛砾石海滩侵蚀及修复[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(5): 22-28. XU Y Y, ZHUANG Z Y, ZHAO D B, et al. Erosion and restoration of gravel beach in Changdao Shandong province[J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(5): 22-28.
- [15] 王立杨, 付玉成, 杨丽中, 等. 台风“利奇马”对威海楮岛海滩演化过程的影响[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(4): 608-617. WANG L Y, FU Y C, YANG L Z, et al. Effects of typhoon Lekima on the evolution of Chudao beach in Weihai[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(4): 608-617.
- [16] 何岩雨, 朱君, 戚洪帅, 等. 人工岛影响下的海滩修复对策研究——以海口西海岸为例[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 2-11. HE Y Y, ZHU J, QI H S, et al. Beach restoration strategy influenced by artificial island: a case study on the west coast of Haikou[J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(1): 2-11.
- [17] 匡翠萍, 单云驰, 顾杰, 等. 海坛湾龙凤头海滩养护工程方案[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 714-721. KUANG C P, SHAN Y C, GU J, et al. Beach nourishment in Longfengtou beach of Haitan Bay[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(5): 714-721.
- [18] 赵友鹏, 山海关旅游海滩岸线侵蚀和养护之探讨[J]. 河北地质, 2020(3): 8-13. ZHAO Y P. Discussion on shoreline erosion and conservation of tourist beach in Shanhaiguan[J]. Hebei Geology, 2020(3): 8-13.

Experimental Study on Wave Dissipation and Beach Protection by Gravel Dam and Porous Square Reef: Taking Beidaihe West Beach as the Example

YANG Li-peng¹, YANG Shao-peng², ZHANG Zhi-yong³, ZHU Jin-long⁴, SHI Bing⁵

(1. *Qingdao Municipal Transport Development Centre, Qingdao 266061, China;*

2. *College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;*

3. *Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China;*

4. *Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology, Yantai 264006, China;*

5. *College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract: The wave transmission coefficient, sediment discharge rate, underwater slope angle and seabed topography under the cases of different protective measures are measured by using physical model and compared with those under the cases of no protective measures. It is revealed that under different experimental conditions the transmission coefficient in the case of gravel dam and reef is only 0.21—0.36, indicating that the combination of gravel dam with reef has a significant dissipation effect on the waves. The change law of sediment discharge rate under the same water level but different working conditions is gravel dam>gravel dam+reef>no project>reef. The underwater slope angle of the wave-ward surface of the dam tends to increase first and then reduce with the increase in extreme wave height. The underwater slope angle under the case of gravel dam is about 2—4 times that under the case of gravel dam+reef. For the recovery of nearshore terrain, the case of gravel dam+reef has obvious effect and can also reduce the erosion of coastal beach. Therefore, it is concluded that the protection measure of the combination of gravel dam with reef can significantly reduce the wave transmission coefficient and increase the sediment discharge rate landward, and can also play a significant role in restoring the nearshore topography and protecting the coastal beach.

Key words: gravel dam; artificial porous square reef; wave dissipation; beach protection

Received: March 14, 2022